ROBERT H. BISHOP

THE MECHATRONICS HANDBOOK

CƠ ĐIỆN TỬ

Tập 1

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

Biên dịch: Phạm Anh Tuấn

ĐHQG HÀ NỘI
NHÀ XUẤT BẢN ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

CƠ ĐIỆN TỬ

Người dịch:

Vũ Lê Bình	Nguyễn Cao Mệnh
Phùng Văn Hiệp	Phạm Văn Bạch Ngọc
Vũ Việt Hùng	Đỗ Thị Ngọc Oanh
Đinh Công Huân	Phan Mạnh Quân
Lê Xuân Huy	Nguyễn Trường Thanh
Vũ Minh Hùng	Đỗ Trần Thắng
Vương Thị Diệu Hương	Nguyễn Huy Thụy
Tạ Hồng Kỳ	Phạm Anh Tuấn

Robert H. Bishop

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

CƠ ĐIỆN TỬ

(Gồm hai tập)

Tập 1

Biên dịch: **Phạm Anh Tuấn**

ĐHQG HÀ NỘI

Nhà xuất bản Đại học Quốc gia

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

Lời giới thiệu

Cơ điện tử là một lĩnh vực khoa học công nghệ liên ngành, tích hợp trong mỗi sản phẩm của nó các thành tựu mới nhất của cơ khí chính xác, điện tử, điều khiển, công nghệ thông tin và các vật liệu mới. Với đặc điểm nổi bật này, vai trò của Cơ điện tử trở nên rất quan trọng và không thể thiếu trong sự phát triển của khoa học kỹ thuật hiện đại. Tạp chí "Technology Review" của MIT tháng 02/2003 đã đánh giá Mechatronics (Cơ điện tử) là một trong 10 công nghệ có triển vọng làm thay đổi thế giới trong thế kỷ 21.

Cơ điện tử đã được quan tâm phát triển và có những bước tiến nhất định ở Việt Nam. Ngày 31/12/2003, Thủ tướng Chính phủ đã ký quyết định phê duyệt "Chiến lược phát triển Khoa học và Công nghệ Việt Nam đến 2010" trong đó Cơ điện tử là một trong những hướng công nghệ trọng điểm phục vụ phát triển kinh tế xã hội.

Trong những năm qua, với tiềm lực của một trung tâm nghiên cứu KHCN liên ngành mạnh, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã đạt được các thành tích đáng kể về trong lĩnh vực Cơ điện tử. Quan hệ hợp tác nghiên cứu và triển khai của Viện trong lĩnh vực Cơ điện tử cũng không ngừng được tăng cường. Giáo sư Robert H. Bishop, một chuyên gia hàng đầu trong lĩnh vực Cơ điện tử, là người có nhiều đóng góp tích cực trong việc thúc đẩy mối quan hệ hợp tác nghiên cứu và đào tạo giữa Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam và Trường Đại học Texas tại Austin (Mỹ). Ông đã giành được nhiều giải thưởng khoa học danh giá, đồng thời là chủ biên, tác giả của nhiều cuốn sách chuyên ngành có uy tín.

Cuốn *The Mechatronics Handbook* do Giáo sư Robert H. Bishop chủ biên, được biên soạn bởi tập thể 88 nhà khoa học xuất sắc đến từ 13 nước trên thế giới - không chỉ giới thiệu một cách toàn diện những kiến thức từ tổng hợp đến chuyên sâu về Cơ điện tử mà còn là một tài liệu hữu ích khi cần tra cứu các khái niệm kỹ thuật chuyên ngành hoặc sử dụng các kiến thức này vào các mục đích nghiên cứu hoặc triển khai ứng dụng.

Với mục đích giúp các nhà nghiên cứu, các kỹ sư, các sinh viên đại học và sau đại học trong nước có điều kiện tiếp cận với những kiến thức Cơ điện tử mới nhất trên thế giới một cách thuận lợi và hiệu quả, tập thể cán bộ phòng Cơ điện tử, Viện Cơ học, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam dưới sự hỗ trợ chuyên môn của nhiều nhà khoa học, nhà giáo có uy tín, đã biên dịch toàn bộ nội dung cuốn *The Mechatronics Handbook* thành cuốn sách *Cơ điện tử* tiếng Việt. Cuốn sách được chia thành hai tập có nội dung sắp xếp khoa học theo chủ đề với 50 chương. Chủ tịch Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã dành sự quan tâm và hỗ trợ tài chính quý báu cho công việc rất có ý nghĩa này.

Tôi tin tưởng rằng cuốn *Cơ điện tử* sẽ là một tài liệu tham khảo thật sự bổ ích với các bạn đọc Việt Nam.

GS. TSKH. Nguyễn Khoa Sơn

Phó Chủ tịch Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

AEROSPACE ENGINEERING & ENGINEERING MECHANICS
THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN

210 E. 24th Street, WRW · Tel: 512-471-7593 · Fax 512-471-3788
1 University Station C0600 · Austin, Texas 78712-0235

To my friends in Vietnam –

The Mechatronic Handbook represents the best efforts of researchers world-wide to describe the state-of-the-art in mechatronic design. I hope that students and faculty with a thirst for knowledge and a desire to expand their horizons will find this text valuable.

I wish to extend my congratulations to Dr. Pham Anh Tuan and his colleagues for succesfully completing this Vietnamese translation of the Mechatronics Handbook. I am thrilled that students in Vietnam will have access to this book in their native language.

My best wishes to all readers!

With warm regards,
Robert H. Bishop
August 28, 2006

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

Thư gửi độc giả Việt Nam

Các bạn Việt Nam thân mến!

Cuốn *The Mechatronics Handbook* là kết quả những nỗ lực làm việc hết mình của các nhà nghiên cứu trên thế giới nhằm mang đến cho người đọc những kiến thức mới nhất trong thiết kế các hệ cơ điện tử hiện đại. Tôi hy vọng rằng các sinh viên và cán bộ giảng dạy với khao khát tri thức và mong muốn mở rộng tầm nhìn sẽ tìm thấy giá trị của cuốn sách.

Tôi muốn gửi lời chúc mừng đến Tiến sĩ Phạm Anh Tuấn và các đồng nghiệp đã hoàn thành bản dịch tiếng Việt cuốn *The Mechatronics Handbook*. Tôi thật sự xúc động khi sinh viên tại Việt nam sẽ được tiếp cận với cuốn sách bằng chính ngôn ngữ của mình.

Xin gửi lời chúc tốt đẹp nhất đến tất cả các bạn đọc cuốn sách này!

Thân ái,

Robert H. Bishop

21 - 08 - 2006

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

Lời cảm ơn

Cuốn sách *Cơ điện tử* được biên dịch từ nguyên bản *The Mechatronics Handbook* bởi tập thể cán bộ phòng Cơ điện tử, Viện Cơ học, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam và sự hỗ trợ chuyên môn của nhiều Nhà khoa học, Nhà giáo có uy tín từ Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà nội, Đại học Bách khoa Hà Nội và Trung tâm Khoa học kỹ thuật và Công nghệ quân sự.

Cuốn *Cơ điện tử* này chứa đựng một khối lượng lớn kiến thức về Cơ điện tử và liên quan đến nhiều chuyên ngành khác nhau. Do vậy để thuận tiện cho việc tham khảo của bạn đọc, chúng tôi chia cuốn sách thành hai tập, với các nội dung chính sau:

Tập một: Phần I: Tổng quan về cơ điện tử
Phần II: Mô hình hóa hệ vật lý
Phần III: Cảm biến và cơ cấu chấp hành

Tập hai: Phần IV: Hệ thống và điều khiển
Phần V: Máy tính và hệ thống logic
Phần VI: Phần mềm và thu thập dữ liệu

Chúng tôi xin gửi lời cảm ơn đặc biệt tới GS.VS. Đặng Vũ Minh, Chủ tịch Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam vì sự quan tâm và hỗ trợ tài chính quý báu; GS. Robert H. Bishop, Chủ biên cuốn *The Mechatronics Handbook* vì sự giúp đỡ quý giá để cuốn *Cơ điện tử* được ra mắt.

Xin cảm ơn Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Viện Cơ học, Nhà xuất bản CRC Press (Mỹ), Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội đã tạo điều kiện giúp chúng tôi sớm đưa cuốn sách đến tay bạn đọc.

Chúng tôi chân thành cảm ơn các nhà khoa học, các nhà giáo trong và ngoài nước, bạn bè đồng nghiệp và người thân đã dành cho chúng tôi những lời đóng góp chân tình thẳng thắn về chuyên môn, sự quan tâm, động viên khích lệ tinh thần trong suốt quá trình biên dịch, hoàn thiện và xuất bản cuốn sách này.

Cuối cùng, chúng tôi xin chân thành cảm ơn toàn bộ thành viên phòng Cơ điện tử đặc biệt là: Đỗ Thị Ngọc Oanh, Nguyễn Trường Thanh, Nguyễn Huy Thụy, Phùng Văn Hiệp... vì tinh thần làm việc nghiêm túc và tâm huyết trong quá trình biên dịch cuốn sách này.

Mặc dù đã rất cố gắng nhưng do khối lượng kiến thức chuyên sâu khá lớn, trong đó một số thuật ngữ kỹ thuật mới còn chưa được thống nhất về mặt dịch thuật ở Việt Nam, cuốn sách không thể tránh khỏi những sai sót. Chúng tôi rất mong nhận được sự phản hồi góp ý của bạn đọc.

Phạm Anh Tuấn
Phòng Cơ điện tử, Viện Cơ học
Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam
264 Đội Cấn, Ba Đình, Hà Nội, Việt Nam
Email: patuan@mechatronics.org.vn
Tel.: (+84-4) 7627205

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

Ban tư vấn khoa học

(Tập 1)

1) GS. TSKH. Nguyễn Đức Cương

Trung tâm Khoa học kỹ thuật và Công nghệ Quân sự

2) GS. TSKH. Nguyễn Cao Mệnh

Viện Cơ học, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

3) GS. TSKH. Đỗ Sanh

Đại học Bách khoa Hà Nội

4) GS. TSKH. Nguyễn Khoa Sơn

Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

5) GS. TS. Ngô Diên Tập

Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

6) GS. TSKH. Nguyễn Phú Thuỳ

Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

7) GS.TS. Trần Mạnh Tuấn

Trung tâm Điều hành Ứng dụng Công nghệ Vũ trụ,
Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

8) TS. Trần Quang Vinh

Đại Học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

9) PGS. TS. Vương Dạo Vy

Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

THE MECHATRONICS HANDBOOK

Editor-in-Chief
Robert H. Bishop
The University of Texas at Austin
Austin, Texas

ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society

CRC PRESS

Boca Raton London New York Washington, D.C.

Lời nói đầu

Theo định nghĩa đầu tiên về cơ điện tử của Công ty Yasakawa Electric và những định nghĩa sau đó, nhiều sản phẩm công nghệ được thiết kế và sản xuất trong 25 năm gần đây tích hợp các hệ thống cơ khí và điện tử có thể coi là các *hệ cơ điện tử*. Tuy nhiên, nhiều kỹ sư và nhà nghiên cứu liên quan đến các sản phẩm này lại chưa từng được đào tạo chính thức về cơ điện tử. Cuốn *Cơ điện tử* là một tài liệu tham khảo cho các nhà thiết kế nhằm liên hệ những kinh nghiệm thực tế của họ với các lĩnh vực của cơ điện tử. Ngoài ra, cuốn sách này còn là tài liệu dùng trong các phòng nghiên cứu và phát triển của các đơn vị nghiên cứu, cơ quan quản lý, trong công nghiệp hay trong thư viện trong các trường đại học. Nó cũng được dùng cho những học giả có nhu cầu hiểu và giải thích quá trình thiết kế kỹ thuật. Khi mà sự phân chia truyền thống giữa các chuyên ngành khác nhau của kỹ thuật và khoa học máy tính trở nên khó xác định thì có thể thấy ngành cơ điện tử cung cấp một "định hướng" mới cho sinh viên kỹ thuật hiện đang được đào tạo theo các chương trình học truyền thống ở hầu hết các trường đại học. Các phòng thí nghiệm và các khóa học cơ điện tử ngày càng phát triển trong các trường đại học trên toàn thế giới. Thực tế đó được phản ánh qua danh sách các tác giả - 88 nhà khoa học và kỹ sư đến từ 13 nước - đã tham gia biên tập cuốn sách này. Hy vọng cuốn *Cơ điện tử* có thể được dùng như một tài liệu tham khảo chuẩn trong lĩnh vực cơ điện tử cho bạn đọc trên toàn thế giới.

Nội dung cuốn sách

Cuốn *Cơ điện tử* bao gồm 50 chương và bao quát các nội dung về các thành phần chính của cơ điện tử:

- Mô hình hóa hệ vật lý
- Cảm biến và cơ cấu chấp hành
- Tín hiệu và hệ thống
- Máy tính và hệ thống logic
- Phần mềm và thu thập dữ liệu

Phần I: Tổng quan về cơ điện tử

Phần mở đầu sẽ là phần định nghĩa và phân loại đối tượng chung của cơ điện tử. Nội dung của các chương nhằm đưa ra tổng quan và giới thiệu chung các thành phần chính của cơ điện tử. Với bạn đọc quan tâm tới vấn đề đào tạo liên quan đến cơ điện tử, phần này cũng đưa ra một thảo luận về định hướng mới trong chương trình giảng dạy về cơ điện tử. Các chương trong phần này bao gồm:

1. Cơ điện tử là gì?
2. Phương pháp thiết kế cơ điện tử
3. Giao diện, thiết bị đo và hệ thống điều khiển
4. Vi điện tử và các bộ điều khiển dựa trên vi xử lý

5. Giới thiệu về công nghệ micro và nano
6. Những hướng mới trong thiết kế các hệ cơ điện tử mini, micro, và nano và xây dựng chương trình đào tạo

Phần II: Mô hình hóa hệ vật lý

Các mô hình toán học, điện và cơ học cơ bản trong hầu hết các hệ cơ điện tử được trình bày trong phần này. Các thảo luận này nhằm mô tả chi tiết quá trình mô hình hệ vật lý, với các nội dung chính về cấu trúc và vật liệu, các hệ lưu chất, các hệ điện, các hệ nhiệt động lực học, các hệ tịnh tiến và quay, vấn đề mô hình liên quan đến MEMS và cơ sở vật lý của sự tương tự trong mô hình hệ thống. Các chương được liệt kê dưới đây:

7. Mô hình các hệ cơ điện
8. Cấu trúc và vật liệu
9. Mô hình hóa các hệ cơ học trong các ứng dụng cơ điện tử
10. Các hệ thống thủy lực
11. Kỹ thuật điện
12. Nhiệt động lực học
13. Mô hình hóa và mô phỏng hệ cơ điện tử micro (MEMS)
14. Tổng hợp, chế tạo, phân tích và tối ưu MEMS
15. Cơ sở vật lý của sự tương tự trong các mô hình hệ thống vật lý

Phần III: Cảm biến và cơ cấu chấp hành

Cơ sở của cảm biến và cơ cấu chấp hành được giới thiệu trong phần này. Nội dung của các chương đầu là các vấn đề cơ sở của thời gian, tần số, đặc tính của các cảm biến và cơ cấu chấp hành. Phần còn lại nói về hai nội dung chính đó là: cảm biến và cơ cấu chấp hành. Các chương này bao gồm các mối quan hệ vật lý cơ bản và các mô hình toán học liên quan đến các công nghệ cảm biến và cơ cấu chấp hành. Các chương của phần này được liệt kê dưới đây:

16. Giới thiệu về cảm biến và cơ cấu chấp hành
17. Cơ sở thời gian và tần số
18. Đặc tính của cảm biến và cơ cấu chấp hành
19. Cảm biến
    - 19.1. Cảm biến dịch chuyển thẳng và quay
    - 19.2. Cảm biến gia tốc
    - 19.3. Đo lực
    - 19.4. Đo mômen và công suất
    - 19.5. Đo lưu lượng
    - 19.6. Đo nhiệt độ
    - 19.7. Đo khoảng cách và cảm biến tiệm cận
    - 19.8. Hệ thống nhận biết ánh sáng, hình ảnh và nhận dạng
    - 19.9. Cảm biến micro tích hợp
20. Cơ cấu chấp hành
    - 20.1. Cơ cấu chấp hành cơ điện
    - 20.2. Máy điện
    - 20.3. Cơ cấu chấp hành áp-điện
    - 20.4. Hệ thống chấp hành thuỷ lực và khí nén

20.5. MEMS: Phân tích, thiết kế và chế tạo các bộ chuyển đổi micro

Phần IV: Hệ thống và điều khiển

Phần này sẽ trình bày tổng quan về tín hiệu và hệ thống. Do đã có đầy đủ tài liệu cần thiết cho người đọc về các vấn đề chung của tín hiệu và hệ thống, ở đây sẽ không trình bày lặp lại. Mục đích của phần này là trình bày các vấn đề liên quan đến tín hiệu và điều khiển đặc biệt quan trọng đối với các nghiên cứu về cơ điện tử. Phần đầu tiên sẽ là các chương về vai trò của điều khiển trong cơ điện tử và vai trò của mô hình trong thiết kế cơ điện tử. Những chương này mở đầu cho các thảo luận cơ bản hơn về tín hiệu và hệ thống chiếm phần lớn trong phần này. Các vấn đề hiện đại của thiết kế điều khiển dùng các công nghệ tối ưu hóa từ lý thuyết H^2, điều khiển phi tuyến và thích nghi, mạng nơron và hệ thống mờ được trình bày với vai trò quan trọng trong thiết kế hệ thống kỹ thuật hiện đại. Phần IV cũng gồm một chương về tối ưu hóa thiết kế cho các hệ cơ điện tử. Phần này bao gồm các chương sau:

21. Vai trò của điều khiển trong cơ điện tử
22. Vai trò của mô hình hoá trong thiết kế cơ điện tử
23. Tín hiệu và hệ thống
    - 23.1. Tín hiệu thời gian liên tục và rời rạc
    - 23.2. Hệ thống số và biến đổi z
    - 23.3. Mô hình không gian trạng thái thời gian liên tục và rời rạc
    - 23.4. Hàm truyền và các biến đổi Laplace
24. Phân tích không gian trạng thái và các thuộc tính hệ thống
25. Đáp ứng của các hệ động
26. Phương pháp quỹ đạo nghiệm
27. Phương pháp đáp ứng tần số
28. Bộ lọc Kalman trong vai trò bộ quan sát trạng thái
29. Xử lý tín hiệu số trong các ứng dụng cơ điện tử
30. Thiết kế hệ điều khiển bằng phương pháp tối ưu H^2
31. Thiết kế điều khiển phi tuyến và thích nghi
32. Mạng nơron và hệ mờ
33. Điều khiển hiện đại một trục thuỷ lực-điện
34. Thiết kế tối ưu hệ cơ điện tử

Phần V: Máy tính và hệ thống logic

Sự phát triển của máy tính, sau đó là máy vi tính, các máy tính nhúng, và công nghệ thông tin liên quan, đã tác động sâu sắc đến thế giới. Nó càng đúng cho cơ điện tử, nơi tích hợp máy tính với các hệ cơ-điện dẫn đến việc sáng tạo ra các sản phẩm thông minh. Trong tương lai, các sản phẩm tốt hơn và thông minh hơn là kết quả của sự phát triển liên tục công nghệ máy tính và kỹ thuật phần mềm. Hai phần cuối cùng của cuốn *Cơ điện tử* dành cho máy tính và phần mềm. Phần V này sẽ tập trung vào phần cứng máy tính và các vấn đề liên quan tới logic, truyền thông, mạng, kiến trúc, phân tích lỗi, các máy tính nhúng và các bộ điều khiển khả trình. Phần này bao gồm các chương:

35. Giới thiệu về máy tính và hệ logic
36. Các khái niệm logic và thiết kế logic
37. Giao diện hệ thống
38. Truyền thông và mạng máy tính

39. Phân tích lỗi trong các hệ cơ điện tử
40. Thiết kế hệ logic
41. Các hệ thống dãy đồng bộ và không đồng bộ
42. Kiến trúc
43. Điều khiển với máy tính nhúng và bộ điều khiển logic khả trình

Phần VI: Phần mềm và thu thập dữ liệu

Do máy tính đóng vai trò trung tâm trong các sản phẩm cơ điện tử hiện đại, việc hiểu phương thức thu thập, xử lý và ghi dữ liệu của máy tính là khá quan trọng. Phần cuối của cuốn *Cơ điện tử* trình bày các vấn đề về phần mềm máy tính và thu thập dữ liệu. Các chương trong phần này là:

44. Giới thiệu về việc thu thập dữ liệu
45. Các kỹ thuật đo: cảm biến và bộ chuyển đổi
46. Biến đổi A/D và D/A
47. Chuẩn hóa tín hiệu
48. Các hệ thống thiết bị đo dựa trên máy tính
49. Thiết kế và phát triển phần mềm
50. Ghi dữ liệu

Lời cảm ơn

Tôi muốn gửi lời cảm ơn chân thành nhất của mình đến toàn bộ tập thể các tác giả của cuốn sách này. Những người đã dành những khoảng thời gian ít ỏi trong lịch làm việc dày đặc của mình để viết những bài viết hoàn hảo trong cuốn *Cơ điện tử* thật đáng được trân trọng. Tôi cũng muốn dành lời cảm ơn của mình đến toàn thể hội đồng tư vấn vì những giúp đỡ đáng quý trong giai đoạn ban đầu của các vấn đề được trình bày trong cuốn sách.

Cuốn sách là kết quả của sự cộng tác làm việc hiệu quả và chuyên nghiệp dưới sự điều hành của nhà xuất bản CRC. Tôi xin được cảm ơn tập thể biên tập và sản xuất cuốn sách:

Nora Konopka, biên tập viên

Michael Buso, biên tập viên

Susan Fox, tổng biên tập

Xin được cảm ơn những người bạn của tôi và đồng nghiệp Giáo sư Richard C. Dorf vì những giúp đỡ và chỉ dẫn nhiệt tình. Cuối cùng, tôi xin dành lời cảm ơn đặc biệt của mình đến Lynda Bishop, người đã quản lý những bản thảo trong thời gian đầu viết cuốn sách này. Sự giúp đỡ của bà trong việc hoàn thành và xuất bản cuốn sách là những đóng góp vô giá.

Chủ biên

Robert H. Bishop

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

Chủ biên

Robert H.Bishop là giáo sư tại khoa Công nghệ Vũ trụ và Cơ học kỹ thuật Trường đại học Tổng hợp Texas tại Austin (Mỹ), ông đã giành được vị trí giáo sư Joe J. King ngành kỹ thuật. Ông tốt nghiệp đại học và cao học tại khoa Công nghệ Vũ trụ, Trường đại học tổng hợp Texas A&M, ông hoàn thành luận án tiến sĩ tại Khoa Điện và Kỹ thuật Máy tính, Trường Đại học tổng hợp Rice. Trước khi giảng dạy ở Trường Đại học Tổng hợp Texas tại Austin, Ông là thành viên của Hội đồng kỹ thuật tại Phòng thí nghiệm MIT Charles Stark Draper. Tiến sĩ Bishop là chuyên gia trong lĩnh vực Công nghệ vũ trụ, các nghiên cứu tập trung chủ yếu về dẫn đường theo quỹ đạo và điều khiển tàu vũ trụ. Ông cùng hợp tác với Trung tâm Vũ trụ Johnson của NASA và Phòng thí nghiệm Động cơ phản lực nghiên cứu về kỹ thuật xác định độ chính xác khi hạ cánh trên Sao Hỏa. Ông là nhà nghiên cứu năng động, đồng tác giả của hơn 50 bài báo trên các tạp chí và báo cáo tại các Hội nghị khoa học. Ông đã hai lần được lựa chọn là thành viên Ban điều hành tại Phòng thí nghiệm Động cơ phản lực của NASA và thành viên Hiệp hội Welliver của Tập đoàn Boeing. Tiến sĩ Bishop là đồng tác giả cuốn *Modern Control Systems* với giáo sư R. C. Dorf, và là tác giả của hai cuốn *Learning with LabView* và *Design and Analysis Using Matlab và Simulink*. Ông mới nhận được huy chương John Leland Atwood của Hiệp hội các giảng viên kỹ thuật Mỹ và Học viện Hàng không vũ trụ Mỹ dành cho "Nhà lãnh đạo có những đóng góp quan trọng và bền vững trong đào tạo Công nghệ Vũ trụ".

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

Các tác giả

Maruthi R. Akella
University of Texas at Austin
Austin, Texas
Sami A. Al-Arian
University of South Florida
Tampa, Florida
M. Anjanappa
University of Maryland
Baltimore, Maryland
Dragos Arotaritei
Aalborg University Esbjerg
Esbjerg, Denmark
Ramutis Bansevicius
Kaunas University of
Technolo
Kaunas, Lithuania
Eric J. Barth
Vanderbilt University
Nashville, Tennessee
Peter Breedveld
University of Twente
Enschede, The Netherlands
Tomas Brezina
Technical University of Brno
Brno, Czech Republic
George T.-C. Chiu
Purdue University
West Lafayette, Indiana
George I. Cohn
California State University
Fullerton, California
Daniel A. Connors
University of Colorado
Boulder, Colorado
Neville Hogan
Massachusetts Institute of
Technology, Massachusetts
Rick Homkes
Purdue University
Kokomo, Indiana
Bouvard Hosticka
University of Virginia
Charlottesville, Virginia
Wen-Mei W. Hwu
Kevin C. Craig
Rennselaer Polytechnic
Institute
Troy, New York
Timothy P. Crain II
NASA Johnson Space Center
Houston, Texas
Jace Curtis
National Instruments, Inc.
Austin, Texas
K. Datta
University of Maryland
Baltimore, Maryland
Raymond de Callafon
University of California
La Jolla, California
Santosh Devasia
University of Washington
Seattle, Washington
Ivan Dolezal
Technical University of
Liberec
Liberec, Czech Republic
C. Nelson Dorny
University of Pennsylvania
Philadelphia, Pennsylvania
Stephen A. Dyer
Kansas State University
Manhattan, Kansas
M.A. Elbestawi
McMaster University
Hamilton, Ontario, Canada
Eniko T. Enikov
University of Arizona
Tuscon, Arizona
Thomas R. Kurfess
Georgia Institute of
Technology
Atlanta, Georgia
Kam Leang
University of Washington
Seattle, Washington
Chang Liu
University of Illinois
Halit Eren
Curtin University of
Technology
Bentley, Australia
H. R. (Bart) Everett
Space and Naval Warfare
Systems Center
San Diego, California
Jorge Fernando Figueroa
NASA Stennis Space Center
New Orleans, Louisiana
C. J. Fraser
University of Abertay Dundee
Dundee, Scotland
Kris Fuller
National Instruments, Inc.
Austin, Texas
Ivan J. Garshelis
Magnova, Inc.
Pittsfield, Massachusetts
Carroll E. Goering
University of Illinois
Urbana, Illinois
Michael Goldfarb
Vanderbilt University
Nashville, Tennessee
Margaret H. Hamilton
Hamilton Technologies, Inc.
Cambridge, Massachusetts
Cecil Harrison
University of Southern
Mississippi
Hattiesburg, Mississippi
Bonnie S. Heck
Georgia Institute of
Technology
Atlanta, Georgia
Ondrej Novak
Technical University of
Liberec
Liberec, Czech Republic
Cestmir Ondrusek
Technical University of Brno
Brno, Czech Republic

University of Illinois
Urbana, Illinois
Mohammad Ilyas
Florida Atlantic University
Boca Raton, Florida
Florin Ionescu
University of Applied Sciences
Konstanz, Germany
Stanley S. Ipson
University of Bradford
Bradford, West Yorkshire, England
Rolf Isermann
Darmstadt University of Technology
Darmstadt, Germany
Hugh Jack
Grand Valley State University
Grand Rapids, Michigan
Jeffrey A. Jalkio
Univeristy of St. Thomas
St. Paul, Minnesota
Rolf Johansson
Lund Institute of Technology
Lund, Sweden
J. Katupitiya
The University of New South Wales
Sydney, Australia
Ctirad Kratochvil
Technical University of Brno
Brno, Czech Republic
T. Song
University of Maryland
Baltimore, Maryland
Massimo Sorli
Politecnico di Torino
Torino, Italy
Andrew Sterian
Grand Valley State University
Grand Rapids, Michigan
Alvin Strauss
Vanderbilt University
Nashville, Tennessee
Fred Stolfi
Rennselaer Polytechnic Institute
Troy, New York
Job van Amerongen
University of Twente
Urbana, Illinois
Michael A. Lombardi
National Institute of Standards and Technology
Boulder, Colorado
Raul G. Longoria
University of Texas at Austin
Austin, Texas
Kevin M. Lynch
Northwestern University
Evanston, Illinois
Sergey Edward Lyshevski
Indiana University-Purdue University Indianapolis
Indianapolis, Indiana gy
Tom Magruder
National Instruments, Inc.
Austin, Texas
Francis C. Moon
Cornell University
Ithaca, New York
Thomas N. Moore
Queen's University
Kingston, Ontario, Canada
Michael J. Moran
The Ohio State University
Columbus, Ohio, es
Pamela M. Norris
University of Virginia
Charlottesville, Virginia
Leila Notash
Queen's University
Kingston, Ontario, Canada
Richard Thorn
University of Derby
Derby, England
Rymantas Tadas Tolocka
Kaunas University of Technology
Kaunas, Lithuania
M. J. Tordon
The University of New South Wales
Sydney, Australia
Mike Tyler
National Instruments, Inc.
Austin, Texas
Crina Vlad
Politehnica University of Bucharest
Bucharest, Romania
Hitay Özbay
The Ohio State University
Columbus, Ohio
Joey Parker
University of Alabama
Tuscaloosa, Alabama
Stefano Pastorelli
Politecnico di Torino
Torino, Italy
Michael A. Peshkin
Northwestern University
Evanston, Illinois
Carla Purdy
University of Cincinnati
Cincinnati, Ohio
M. K. Ramasubramanian
North Carolina State University
Raleigh, North Carolina
Giorgio Rizzoni
The Ohio State University
Columbus, Ohio
Armando A. Rodriguez
Arizona State University
Tempe, Arizona
Momoh-Jimoh Eyiomika Salami
International Islamic University of Malaysia
Kuala Lumpur, Malaysia
Mario E. Salgado
Universidad Tecnica Federico Santa Maria
Valparaiso, Chile
Jyh-Jong Sheen
National Taiwan Ocean University
Keelung, Taiwan
Bogdan M. Wilamowski
University of Wyoming
Laramie, Wyoming
Juan I. Yuz
Universidad Tecnica Federico Santa Maria, Chile
Qin Zhang
University of Illinois
Urbana, Illinois
Qingze Zou
University of Washington
Seattle, Washington
Enschede, The Netherlands

Mục lục

PHẦN I: TỔNG QUAN VỀ CƠ ĐIỆN TỬ

1 Cơ điện tử là gì? *Robert H. Bishop và M. K. Ramasubramanian* 1-1

2 Phương pháp thiết kế cơ điện tử *Rolf Isermann* 2-1

3 Giao diện, thiết bị đo và hệ thống điều khiển *Rick Homkes* 3-1

4 Vi điện tử và các bộ điều khiển dựa trên vi xử lý *Ondrej Novak và Ivan Dolezal* 4-1

5 Giới thiệu về công nghệ micro và nano *Michael Goldfard, Alvin Strauss và Eric J. Barth* 5-1

6 Những hướng mới trong thiết kế các hệ cơ điện tử mini, micro và nano, và xây dựng chương trình đào tạo *Sergey Lyshevski* 6-1

PHẦN II: MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG VẬT LÝ

7 Mô hình hoá các hệ cơ điện *Francis C. Moon* 7-1

8 Cấu trúc và vật liệu *Eniko T. Enikov* 8-1

9 Mô hình hóa các hệ cơ học trong các ứng dụng cơ điện tử *Raul G. Longoria* 9-1

10 Các hệ thống thủy lực *Qin Zhang và Carroll E. Goering* 10-1

11 Kỹ thuật điện *Giorgio Rizzoni* 11-1

12 Nhiệt động lực học *Michael J. Moran* 12-1

13 Mô hình hóa và mô phỏng hệ cơ điện tử micro (MEMS) *Carla Purdy* 13-1

14 Tổng hợp, chế tạo, phân tích và tối ưu MEMS *Sergey Lyshevski* 14-1

15 Cơ sở vật lý của sự tương tự trong các mô hình hệ thống vật lý *Neville Hogan và Peter C. Breedveld* 15-1

PHẦN III: CẢM BIẾN VÀ CƠ CẤU CHẤP HÀNH

16 Giới thiệu về cảm biến và cơ cấu chấp hành
M. Anjanappa, K. Datta và T. Song 16-1

17 Cơ sở thời gian và tần số *Michael A. Lombardi* 17-1

18 Đặc tính của cảm biến và cơ cấu chấp hành *Joey Parker* 18-1

19 Cảm biến 19-1

19.1 Cảm biến dịch chuyển thẳng và quay *Kevin M. Lynch và Micheal A. Peshkin* 19-1

19.2 Cảm biến gia tốc *Halit Eren* 19-12

19.3 Đo lực *M. A. Elbestawi* 19-34

19.4 Đo mômen và công suất *Ivan J. Garshelis* 19-47

19.5 Đo lưu lượng *Richard Thorn* 19-61

19.6 Đo nhiệt độ *Pamela M. Norris và Bouvard Hosticka* 19-73

19.7 Đo khoảng cách và cảm biến tiệm cận *J. Fernando Figueroa và H. R. (Bart) Everett* 19-87

19.8 Hệ thống nhận biết ánh sáng, hình ảnh và nhận dạng *Stanley S. Ipson* 19-118

19.9 Cảm biến micro tích hợp *Chang Liu* 19-135

20 Cơ cấu chấp hành 20-1

20.1 Cơ cấu chấp hành cơ điện *George T.-C. Chiu* 20-1

20.2 Máy điện *Charles Fraser* 20-32

20.3 Cơ cấu chấp hành áp-điện *Ramutis Bansevicius và Rymanta Tadas Tolocka* 20-49

20.4 Hệ thống chấp hành thuỷ lực và khí nén *Massimo Sorli và Stefano Pastorelli* 20-60

20.5 MEMS: Phân tích, thiết kế và chế tạo các bộ chuyển đổi micro *Sergey Lyshevski* 20-92

I

Tổng quan về cơ điện tử

1 **Cơ điện tử là gì?** *Robert H. Bishop và M. K. Ramasubramanian* 1-1

Các khái niệm cơ bản • Các thành phần chủ yếu của cơ điện tử • Lịch sử phát triển • Sự phát triển của ô tô là một ví dụ điển hình cho cơ điện tử • Cơ điện tử là gì? và tương lai của cơ điện tử?

2 **Phương pháp thiết kế cơ điện tử** *Rolf Isermann* 2-1

Lịch sử phát triển và định nghĩa hệ cơ điện tử • Chức năng của các hệ cơ điện tử • Các phương pháp tích hợp • Các hệ thống xử lý thông tin • Quy trình thiết kế đồng thời cho các hệ cơ điện tử

3 **Giao diện, thiết bị đo và hệ thống điều khiển** *Rick Homkes* 3-1

Mở đầu • Các tín hiệu đầu vào của hệ cơ điện tử • Các tín hiệu đầu ra của hệ cơ điện tử • Xử lý tín hiệu • Điều khiển dùng vi xử lý • Điều khiển số dùng vi xử lý • Điều khiển vào-ra của bộ vi xử lý • Điều khiển bằng phần mềm • Thiết bị đo và kiểm thử • Kết luận

4 **Các bộ điều khiển dựa trên vi xử lý và vi điện tử** *Ondrej Novak và Ivan Dolezal* 4-1

Giới thiệu vi điện tử • Lôgic số • Tổng quan về các máy tính điều khiển • Các bộ vi xử lý và vi điều khiển • Các bộ điều khiển lôgic khả trình • Truyền thông số

5 **Giới thiệu về công nghệ micro và nano** *Michael Goldfard, Alvin Strauss và Eric J. Barth* 5-1

Mở đầu • Cơ cấu chấp hành micro • Cảm biến micro • Thiết bị nano

6 **Những hướng mới trong thiết kế các hệ cơ điện tử mini, micro và nano, và xây dựng chương trình giảng dạy** *Sergey Lyshevski* 6-1

Mở đầu • Hệ cơ điện tử mini, micro và nano, và chương trình giảng dạy • Cơ điện tử và kỹ thuật hiện đại • Thiết kế hệ cơ điện tử • Các thành phần của hệ cơ điện tử • Tổng hợp hệ thống, phần mềm cơ điện tử và mô phỏng • Chương trình giảng dạy cơ điện tử • Giới thiệu chương trình đào tạo cơ điện tử • Sách về cơ điện tử • Xây dựng chương trình giảng dạy cơ điện tử • Kết luận: Triển vọng cơ điện tử

1

Cơ điện tử là gì?

1.1 Các khái niệm cơ bản 1-1
1.2 Các thành phần chủ yếu của cơ điện tử 1-2
1.3 Lịch sử phát triển 1-2
1.4 Sự phát triển của ô tô là một ví dụ điển hình cho cơ điện tử 1-6
1.5 Cơ điện tử là gì? và tương lai của cơ điện tử? 1-9

Robert H. Bishop
The University of Texas at Austin

M. K. Ramasubramanian
North Carolina State University

Cơ điện tử là một giai đoạn tự nhiên trong quá trình phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật thiết kế hiện đại. Sự phát triển của máy tính, tiếp theo là máy vi tính, máy tính nhúng, cùng với sự phát triển của công nghệ thông tin và công nghệ phần mềm đã khiến cho cơ điện tử trở thành một yêu cầu cấp thiết trong nửa cuối thế kỷ 20. Sang thế kỷ 21, với những tiến bộ đã được dự báo trong các hệ cơ-điện-sinh học, máy tính lượng tử, hệ pico và nano cùng những phát triển khác, tương lai của cơ điện tử sẽ đầy tiềm năng và triển vọng.

1.1 Các khái niệm cơ bản

Khái niệm cơ điện tử được mở ra từ định nghĩa ban đầu của công ty Yasakawa Electric. Trong các tài liệu xin bảo hộ thương hiệu của mình, Yasakawa định nghĩa Cơ điện tử như sau [1, 2]:

> "Thuật ngữ mechatronics (cơ điện tử) được tạo thành bởi "mecha" trong mechanism (cơ cấu) và "tronics" trong electronics (điện tử). Nói cách khác, các công nghệ và sản phẩm được phát triển sẽ ngày càng được kết hợp chặt chẽ và hữu cơ thành phần điện tử vào trong các cơ cấu và rất khó có thể chỉ ra ranh giới giữa chúng."

Khái niệm cơ điện tử tiếp tục phát triển sau khi Yasakawa đưa ra định nghĩa đầu tiên. Một định nghĩa khác về cơ điện tử thường hay được nói tới do Harashima, Tomizuka và Fukuda đưa ra năm 1996 [3]. Theo họ:

> "Cơ điện tử là sự tích hợp chặt chẽ của kỹ thuật cơ khí với điện tử và điều khiển máy tính thông minh trong thiết kế và chế tạo các sản phẩm và quy trình công nghiệp."

Cùng năm đó, Auslander và Kempf cũng đưa ra một định nghĩa khác như sau [4]:

> "Cơ điện tử là sự áp dụng tổng hợp các quyết định tạo nên hoạt động của các hệ vật lý."

Năm 1997, Shetty và Kolk lại quan niệm [5]:

> "Cơ điện tử là một phương pháp luận được dùng để thiết kế tối ưu các sản phẩm cơ điện."

Và gần đây, Bolton đề xuất định nghĩa [6]:

> "Một hệ cơ điện tử không chỉ là sự kết hợp chặt chẽ các hệ cơ khí, điện và nó cũng không chỉ đơn thuần là một hệ điều khiển; nó là sự tích hợp đầy đủ của tất cả những hệ trên."

Tất cả những định nghĩa và phát biểu trên về cơ điện tử đều xác đáng và giàu thông tin, tuy nhiên bản thân chúng, nếu đứng riêng lẻ lại không định nghĩa được đầy đủ thuật ngữ cơ điện tử.

Mặc dù đã có những nỗ lực trong việc tiếp tục định nghĩa thuật ngữ cơ điện tử, phân loại các sản phẩm cơ điện tử và đã xây dựng một chương trình giảng dạy cơ điện tử chuẩn, nhưng cho đến nay vẫn chưa có một quan điểm thống nhất trong việc định nghĩa một cách toàn diện "thế nào là cơ điện tử". Tuy nhiên, sự thiếu nhất trí này lại là một tín hiệu đáng mừng. Nó cho thấy rằng đây là một lĩnh vực sinh động và là một chủ đề còn khá mới mẻ. Thậm chí khi không có định nghĩa thống nhất về cơ điện tử, các kỹ sư cũng hiểu được bản chất *triết học* của cơ điện tử từ những định nghĩa trên và từ bản thân kinh nghiệm sống của họ.

Đối với các kỹ sư có nhiều kinh nghiệm trong thiết kế thì cơ điện tử không còn xa lạ. Tuy nhiên, nhiều sản phẩm kỹ thuật được tạo ra trong vòng 25 năm qua bằng sự kết hợp các hệ cơ khí, điện tử và máy tính lại được thiết kế bởi những kỹ sư chưa từng được đào tạo chính quy về thiết kế cơ điện tử. Kỹ thuật thiết kế hiện đại, hiện được xem là một bộ phận của ngành cơ điện tử, là những quy trình thiết kế mang tính tự nhiên. Rõ ràng việc nghiên cứu cơ điện tử cung cấp cho các học giả quan tâm tìm hiểu và lý giải quy trình thiết kế một kỹ năng để định rõ, phân loại, sắp xếp và tổng hợp nhiều khía cạnh của công việc thiết kế sản phẩm thành một khối gắn kết. Khi những phân chia mang tính lịch sử giữa kỹ thuật cơ khí, điện, hàng không, hóa học, xây dựng và vi tính ngày càng ít rõ ràng hơn, chúng ta nên bằng lòng với sự tồn tại của cơ điện tử như một lĩnh vực nghiên cứu hàn lâm. Ngành cơ điện tử cung cấp một phương pháp đào tạo đóng vai trò định hướng cho các sinh viên kỹ thuật đang học tập và nghiên cứu theo mô hình đào tạo truyền thống ở hầu hết các trường kỹ thuật. Nhìn chung, cơ điện tử được toàn thế giới công nhận là một lĩnh vực nghiên cứu khá thú vị. Các chương trình đào tạo đại học và sau đại học về cơ điện tử được giảng dạy ở rất nhiều trường đại học. Các tạp chí ngành cơ điện tử đang được xuất bản, các cuộc hội thảo về cơ điện tử cũng đã và đang được tổ chức với số lượng người tham dự rất đông.

Cần hiểu rằng, cơ điện tử không chỉ là một cấu trúc thuận tiện cho nghiên cứu khảo sát của các nhà khoa học mà còn là một phương thức hoạt động trong thực tiễn kỹ thuật hiện đại. Sự ra đời của vi xử lý vào đầu thập niên 80 cùng với sự gia tăng khả năng thực hiện để giảm giá thành sản phẩm đã tạo ra cuộc cách mạng trong thiết kế kỹ thuật. Số lượng sản phẩm mới được phát triển dựa trên sự giao thoa giữa các ngành truyền thống của khoa học kỹ thuật, khoa học máy tính và khoa học tự nhiên đang không ngừng tăng lên. Những tiến bộ mới trong các ngành truyền thống này đã được áp dụng ngày càng nhiều trong các thiết kế cơ điện tử. Sự phát triển không ngừng của cuộc cách mạng công nghệ thông tin, những tiến bộ trong truyền thông không dây và thiết kế cảm biến thông minh (được phát triển dựa trên công nghệ MEMS) đã đảm bảo cho sự phát triển của mô hình thiết kế kỹ thuật trong những năm đầu thế kỷ 21.

1.2 Các thành phần chủ yếu của cơ điện tử

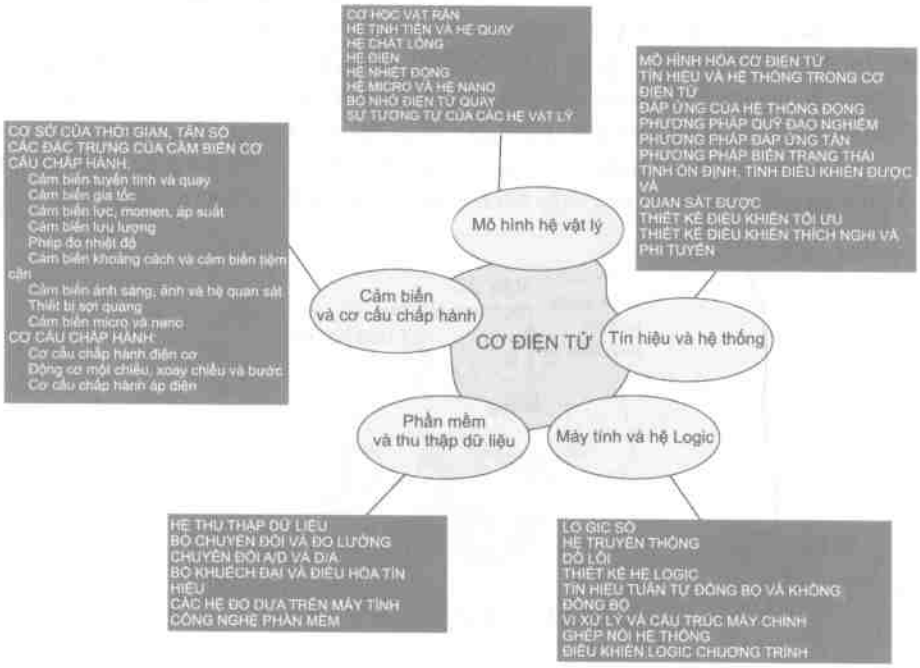
Hệ cơ điện tử có thể được phân chia thành những lĩnh vực nghiên cứu sau:

1. Mô hình hóa hệ vật lý
2. Cảm biến và cơ cấu chấp hành
3. Tín hiệu và hệ thống
4. Máy tính và hệ lôgic
5. Phần mềm và thu thập dữ liệu

Các thành phần chủ yếu của cơ điện tử được minh họa trong hình 1.1. Khi lĩnh vực cơ điện tử tiếp tục phát triển, danh sách những vấn đề liên quan đến nó chắc chắn sẽ được mở rộng và phát triển.

1.3 Lịch sử phát triển

Những nỗ lực nhằm xây dựng các hệ cơ khí tự động có một lịch sử thú vị. Trên thực tế, thuật ngữ "tự động hóa" không được phổ biến cho tới thập niên 1940, khi công ty Ford Motor sử dụng



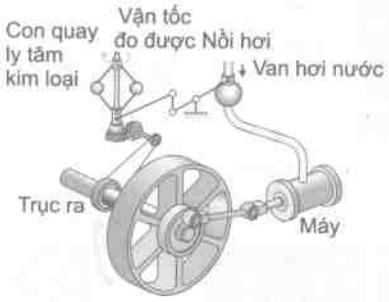
HÌNH 1.1 Các thành phần chính của cơ điện tử

thuật ngữ này để biểu thị một quá trình trong đó, một cỗ máy chuyển một cụm lắp ráp từ vị trí này sang vị trí khác, sau đó định vị chúng một cách chính xác cho các hoạt động lắp ráp phụ. Tuy nhiên, sự phát triển thành công các hệ cơ khí tự động lại xuất hiện từ trước đó rất lâu. Ví dụ những ứng dụng ban đầu của hệ điều khiển tự động xuất hiện ở Hy Lạp từ khoảng năm 300 đến năm thứ nhất trước Công nguyên với sự phát triển của cơ cấu điều chỉnh bằng phao [7]. Điển hình là phát minh đồng hồ nước sử dụng phao điều chỉnh của Ktesibios và phát minh đèn dầu sử dụng phao điều chỉnh của Philon để duy trì lượng dầu liên tục có trong đèn. Sau đó, vào thế kỷ thứ nhất sau công nguyên dưới triều đại Alexandria, Heron đã xuất bản một cuốn sách mang tựa đề *Pneumatica* trong đó miêu tả những cách thức khác nhau trong việc sử dụng phao để điều chỉnh mực nước.

Vào khoảng giữa thế kỷ 17 và 19, ở châu Âu và Nga có rất nhiều phát minh quan trọng đóng góp cho sự phát triển của cơ điện tử. Ở Hà Lan, Cornelis Drebbel (1572 - 1633) đã phát minh ra máy điều chỉnh nhiệt độ được xem là một trong những hệ thống có phản hồi đầu tiên. Sau đó, Dennis Papin (1647 - 1712) sáng chế ra thiết bị điều chỉnh áp suất an toàn cho nồi hơi vào năm 1681. Thiết bị điều chỉnh áp suất của Papin cũng tương tự như van nồi áp suất hiện nay. Vào năm 1642, Pascal phát minh ra máy tính cơ khí đầu tiên [8]. Năm 1765, Polzunov người Nga xây dựng hệ thống có phản hồi đầu tiên trong lịch sử [9]. Thiết bị điều chỉnh mực nước của Polzunov (hình 1.2) sử dụng một chiếc phao nâng lên hạ xuống tùy theo mực nước, nhờ đó điều chỉnh van khóa nước bên trong nồi hơi.

HÌNH 1.2 Thiết bị điều chỉnh mực nước [10]

Những tiến bộ trong lý thuyết điều khiển đã thúc đẩy hơn nữa sự phát triển của tự động hóa. Khởi đầu là máy điều tốc ly tâm của Watt vào năm 1769. Máy điều tốc ly tâm (hình 1.3) được sử dụng để điều chỉnh tốc độ của động cơ hơi nước [10]. Dùng phép đo tốc độ trục đầu ra và sử dụng chuyển động của quả văng để điều chỉnh van và lượng hơi nước vào động cơ. Khi tốc độ của động cơ tăng lên, các quả văng của bộ điều tốc được nâng lên và khoảng cách của chúng so với trục giữa được mở rộng, nhờ đó van được đóng lại. Đây là một ví dụ về hệ điều khiển có phản hồi, trong đó tín hiệu phản hồi và cơ cấu chấp hành là hai thành phần không thể tách rời trong phần cơ khí.



HINH 1.3 Máy điều tốc ly tâm [10]

Trực giác, những kỹ năng thực hành và lòng kiên nhẫn đã mang lại những thành công ban đầu trong lĩnh vực tự động hóa. Bước phát triển tiếp theo trong lĩnh vực tự động hóa đòi hỏi sự ra đời của một *lý thuyết* về điều khiển tự động. Tiền thân của máy điều khiển số NC (Numerically Controlled) dùng trong sản xuất tự động (ra đời vào thập niên 50 và 60 ở MIT) xuất hiện vào đầu những năm 1800 là bộ điều khiển truyền thẳng (feed-forward control) cho khung máy dệt của Joseph Jacquard người Pháp. Vào cuối những năm 1800, J. C. Maxwell là người khởi xướng phát triển lý thuyết điều khiển thông qua việc phân tích một loạt các phương trình vi phân để mô tả máy điều tốc ly tâm [11]. Maxwell đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số khác nhau tới hoạt động của hệ thống. Cùng thời gian đó, Vyshnegradskii đã đưa ra một lý thuyết toán học mới về điều khiển [12]. Vào những năm 1830, Michael Faraday đã mô tả định luật cảm ứng là cơ sở cho động cơ điện và máy phát điện. Sau đó, vào cuối thập niên 80 của thế kỷ 19, Nikola Tesla đã phát minh ra động cơ điện xoay chiều. Ý tưởng cơ bản của việc điều khiển tự động hệ cơ khí được xác lập vững chắc vào cuối thế kỷ 19. Sự phát triển của tự động hóa đã thực sự bùng nổ vào thế kỷ 20.

Vào những năm 1930, các bộ điều khiển khí nén đã được phát triển và được ứng dụng trong công nghiệp. Tuy nhiên, trước năm 1940, việc thiết kế các hệ thống điều khiển vẫn theo phương pháp thử và kiểm tra lỗi. Trong suốt những năm 1940, những tiến bộ không ngừng trong phương pháp giải tích và toán học đã giúp củng cố thêm các quan niệm về kỹ thuật điều khiển như một môn kỹ thuật độc lập. Ở Hoa Kỳ, sự phát triển của mạng điện thoại và máy khuếch đại điện tử có phản hồi đã khuyến khích Bode, Nyquist và Black ứng dụng các bộ phận có phản hồi trong phòng thí nghiệm về điện thoại Bell [13-17]. Hoạt động của bộ khuếch đại có phản hồi được mô tả trong miền tần số, việc thiết kế và phân tích đang được xem là "điều khiển cổ điển". Cùng thời gian đó, lý thuyết điều khiển cũng được phát triển ở Nga và Đông Âu. Các nhà toán học và các nhà cơ học ứng dụng của Liên bang Xô Viết cũ là những người đi đầu trong lĩnh vực điều khiển. Họ đã tập trung nghiên cứu để đưa ra các mô tả trong miền thời gian và các mô hình phương trình vi phân của hệ thống. Vào những năm 1960 xuất hiện những tiến bộ hơn nữa trong việc mô tả trong miền thời gian bằng cách sử dụng hệ các biến trạng thái. Những tiến bộ này đã dẫn đến những thiết kế và phân tích được gọi là "điều khiển hiện đại".

Thế chiến thứ hai đã mang đến những bước tiến xa hơn nữa trong lý thuyết và thực tiễn của điều khiển tự động thể hiện ở việc thiết kế và xây dựng các thiết bị tự động điều khiển máy bay, hệ thống định vị bắn súng, hệ thống điều khiển anten rađa và các hệ thống quân sự khác. Hoạt động phức tạp của các hệ thống quân sự này đòi hỏi sự phát triển của công nghệ điều khiển và chúng đã thu hút sự quan tâm của giới khoa học đến hệ điều khiển và việc phát triển những phương pháp điều khiển mới. Sau Thế chiến thứ hai, phương pháp miền tần số vẫn tiếp tục đóng vai trò chủ đạo trong lĩnh vực điều khiển với việc tăng cường ứng dụng biến đổi Laplace và phương pháp mặt phẳng *s*, điển hình là việc thiết kế hệ thống điều khiển sử dụng quỹ đạo nghiệm.

Xét về mặt kinh tế, do sức ép của việc giảm chi phí thông qua sản xuất hàng loạt, ứng dụng tự động hóa quá trình sản xuất đã được ưu tiên hàng đầu kể từ những năm 1940. Trong thập niên 50, việc phát minh ra cam, thanh liên kết và dây đai trở thành những công nghệ chính để tạo ra các sản phẩm mới và việc sản xuất, lắp ráp chính xác, tốc độ cao. Điển hình là sự ra đời của máy dệt, máy in và máy khâu. Việc sản xuất với độ chính xác cao đã trở thành hiện thực trong giai đoạn này. Máy sản xuất thùng các tông tự động áp dụng quy trình cấp (sheet-fed), trong đó bìa các tông được cắt thành hình cánh quạt để tạo ra mặt xung quanh của thùng và được quấn quanh một trục. Các vết cắt sau đó được gắn liền lại bằng nhiệt. Một tấm các tông khác được cắt thành từng tấm nhỏ để tạo thành mặt đáy của thùng các tông. Tấm bìa các tông này được tạo thành hình đĩa bằng các thao tác rạch khía và gấp nếp trong một cái khuôn dập. Sau đó, các tấm bìa các tông được ghép thành vỏ thùng có hình chén. Các gờ của vỏ thùng được uốn vào bên trong lên trên gờ mặt đáy của thùng và sau đó được gắn lại ở nhiệt độ cao để chống rò rỉ và tạo độ phẳng cho gờ để thùng có thể đứng được. Miệng thùng được làm thành hình tròn để tạo độ cứng cần thiết. Tất các các thao tác này được thực hiện khi sản phẩm được chuyển từ giá đỡ này sang giá đỡ khác và sau đó được đưa ra ngoài. Một chiếc máy trung bình sản xuất được hơn 200 thùng mỗi phút. Việc sản xuất thùng các tông tự động không đòi hỏi bất kỳ một hệ phi cơ khí nào, ngoại trừ một động cơ điện dùng để điều khiển một trục thẳng. Các máy điển hình này cho thấy rằng hệ thống tự động hóa thực sự phức tạp hơn các loại hệ thống tiền thân của nó.

Sự phát triển của vi xử lý trong những năm cuối thập niên 1960 đã dẫn đến sự ra đời phương thức điều khiển bằng máy tính để xử lý và thiết kế sản phẩm. Ví dụ như máy điều khiển số NC và các hệ thống điều khiển máy bay. Tuy nhiên, các quy trình sản xuất về bản chất vẫn hoàn toàn là cơ khí. Các hệ thống tự động và điều khiển chỉ được áp dụng ở công đoạn sau cùng. Việc phóng tàu Sputnik và sự mở ra của thời đại vũ trụ đã tạo thêm một động lực mới cho sự phát triển không ngừng của hệ cơ khí tự động. Sự ra đời của tên lửa, tàu thăm dò vũ trụ đòi hỏi phải phát triển các hệ điều khiển phức tạp, có độ chính xác cao. Hơn nữa, do cần tối thiểu hóa khối lượng vệ tinh (cụ thể là việc tối thiểu hóa lượng nhiên liệu cần thiết cho một hành trình) trong khi vẫn phải đảm bảo quy trình điều khiển một cách chính xác nên đã thúc đẩy sự phát triển của điều khiển tối ưu. Các phương pháp miền thời gian của Liapunov, Minorsky và những người khác, cũng như lý thuyết điều khiển tối ưu của L. S. Pontryagin ở Liên bang Xô Viết cũ và R. Bellman ở Hoa Kỳ rất phù hợp với sự phát triển không ngừng của máy tính tốc độ cao và các ngôn ngữ lập trình mới dùng trong khoa học.

Những thành tựu trong sản xuất bán dẫn và mạch tích hợp dẫn đến sự phát triển của một loạt các sản phẩm mới có sự kết hợp chặt chẽ giữa cơ khí và điện tử trong cùng một hệ thống và cùng thực hiện chức năng của mình. Thuật ngữ cơ điện tử do Yasakawa Electric đưa ra vào năm 1969 để mô tả những hệ thống như thế. Yasakawa đăng ký độc quyền thuật ngữ này vào năm 1972, nhưng sau đó khi thuật ngữ này được sử dụng rộng rãi trên thế giới, Yasakawa đã từ bỏ bản quyền của mình vào năm 1982 [1 - 3]. Ban đầu, cơ điện tử dùng để chỉ các hệ thống chỉ có các thành phần cơ khí và điện tử - không yêu cầu sự tính toán. Ví dụ như cửa trượt tự động, máy bán hàng tự động, hệ thống mở cửa gara.

Vào những năm cuối thập niên 70, Hiệp hội Xúc tiến ngành Công nghiệp chế tạo máy của Nhật Bản JSPMI (the Japan Society for the Promotion of Machine Industry) đã chia sản phẩm cơ điện tử thành bốn lớp [1] như sau:

1. *Lớp I*: Các sản phẩm cơ khí là chính với sự kết hợp của điện tử để nâng cao tính năng. Ví dụ như các máy công cụ điều khiển số và bộ điều tốc trong máy sản xuất.
2. *Lớp II*: Các hệ cơ khí truyền thống với sự hiện đại hóa đáng kể các thiết bị bên trong bằng việc kết hợp với các thiết bị điện tử. Giao diện người dùng bên ngoài không đổi. Ví dụ như máy khâu hiện đại và các hệ thống sản xuất tự động.
3. *Lớp III*: Các hệ thống giữ lại chức năng của hệ cơ khí truyền thống nhưng máy móc bên trong được thay thế bằng các thiết bị điện tử. Ví dụ như đồng hồ số.
4. *Lớp IV*: Các sản phẩm được thiết kế nhờ công nghệ cơ khí và điện tử tích hợp hỗ trợ nhau. Ví dụ như máy photocopy, máy làm khô và máy giặt thông minh, nồi cơm điện và lò nướng tự động.

Các công nghệ được ứng dụng trong mỗi lớp sản phẩm cơ điện tử đã cho thấy sự tiến bộ của các sản phẩm cơ điện cùng với sự phát triển của lý thuyết điều khiển, các công nghệ tính toán và các bộ vi xử lý. Các sản phẩm lớp I ứng dụng công nghệ servo, điện tử công suất, lý thuyết điều khiển. Các sản phẩm lớp II ứng dụng khả năng của các thiết bị nhớ và tính toán, khả năng thiết kế mạch theo đơn đặt hàng. Các sản phẩm lớp III dựa vào bộ vi xử lý và các mạch tích hợp để thay thế cho các hệ cơ khí. Cuối cùng, các sản phẩm lớp IV đánh dấu sự khởi đầu thực sự của hệ cơ điện tử, thông qua việc tích hợp các hệ cơ khí và điện tử. Đến tận thập niên 70, sự phát triển bộ vi xử lý của tập đoàn Intel đã khiến cho việc kết hợp hệ máy tính với hệ cơ khí trở nên khả thi.

Sang thập niên 80, với sự ra đời của lý thuyết "điều khiển bền vững", ranh giới phân chia giữa lý thuyết điều khiển cổ điển và hiện đại không còn nữa. Ngày nay, nhìn chung người ta đều thừa nhận rằng kỹ thuật điều khiển phải có sự kết hợp đồng bộ giữa miền thời gian và miền tần số trong phân tích và thiết kế hệ điều khiển. Cũng trong thập niên 80, việc ứng dụng máy tính số, một bộ phận không thể thiếu của hệ điều khiển đã trở nên khá phổ biến. Ngày nay, trên toàn thế giới đã có hàng trăm nghìn máy tính số điều khiển quá trình [18, 19]. Bất kể người ta công nhận định nghĩa cơ điện tử nào đi chăng nữa, thì có một điều rõ ràng là cơ điện tử hiện đại luôn coi tính toán là nhân tố trung tâm. Trên thực tế, bản chất của cơ điện tử hiện đại và các sản phẩm thông minh chính là việc ứng dụng vi xử lý nhằm điều chỉnh chính xác cơ năng và để thích nghi với những thay đổi của môi trường.

1.4 Sự phát triển của ô tô là một ví dụ điển hình cho cơ điện tử

Sự phát triển của cơ điện tử hiện đại có thể được minh họa bằng sự phát triển của ô tô. Đến tận thập niên 60, chỉ có radiô là thiết bị điện tử đáng kể duy nhất trong ô tô. Tất cả các chức năng khác thuần túy mang tính cơ khí hoặc điện, ví dụ như động cơ khởi động và hệ thống nạp ắc quy. Trong ô tô không hề có một "hệ thống an toàn thông minh" nào, ngoại trừ việc tăng kích cỡ đệm giảm chấn và các phần tử kết cấu để bảo vệ hành khách trong trường hợp xảy ra tai nạn. Vào đầu thập niên 60, dây an toàn ra đời nhằm tăng độ an toàn cho người sử dụng và được vận hành hoàn toàn cơ khí. Tất cả hệ thống động cơ được điều khiển bởi người lái và/hoặc các hệ điều khiển cơ khí. Chẳng hạn, trước khi có sự xuất hiện các cảm biến và vi điều khiển, bộ phân phối cơ khí được dùng để chọn bují đánh lửa khi hỗn hợp nhiên liệu - không khí được nén lại. Thời gian ấn định cho việc đốt cháy nhiên liệu chính là biến điều khiển. Quá trình đốt cháy được điều khiển cơ khí không phải là tối ưu nếu đứng trên phương diện tiết kiệm nhiên liệu. Việc mô hình hóa quá trình đốt cháy nhiên liệu chỉ ra rằng, để tăng hiệu quả nhiên liệu, tồn tại một thời điểm tối ưu để đốt nhiên liệu. Thời điểm này phụ thuộc vào tải, tốc độ và các đại lượng có thể đo khác. Hệ thống đánh lửa điện tử là một trong những hệ cơ điện tử đầu tiên được ứng dụng trong ngành công nghiệp ô tô vào cuối thập niên 70. Hệ thống đánh lửa điện tử bao gồm bộ cảm biến vị trí trục khuỷu, bộ cảm biến vị trí trục cam, tốc độ luồng khí, vị trí van tiết lưu, tốc độ thay đổi vị trí van tiết lưu của bộ cảm biến, bộ vi điều khiển quyết định thời điểm bují đánh lửa. Những ứng dụng ban đầu chỉ gồm một cảm biến hiệu ứng Hall nhằm xác định một cách chính xác vị trí của rôto trong bộ phân phối. Những ứng dụng sau này đã loại bỏ hoàn toàn bộ phân phối và dùng trực tiếp bộ vi xử lý để điều khiển quá trình đốt cháy.

Vào cuối thập niên 70, hệ thống chống bó phanh ABS (Antilock Brake System) được ứng dụng trong ô tô [20]. Hệ thống ABS hoạt động thông qua việc phát hiện ra hiện tượng bó cứng của bất kỳ bánh xe nào, sau đó điều chỉnh áp suất thủy lực cần thiết để giảm thiểu hoặc loại bỏ sự trượt. Hệ thống điều khiển khả năng bám đường TCS (Traction Control System) được ứng dụng trong ô tô vào cuối thập niên 90. Hệ thống TCS hoạt động thông qua việc phát hiện ra sự trượt trong quá trình tăng tốc và sau đó điều chỉnh công suất truyền cho bánh xe đang trượt. Quá trình này đảm bảo cho xe có thể tăng tốc với vận tốc lớn nhất có thể với điều kiện về đường và xe cho trước. Hệ thống điều khiển động lực ô tô VDC (Vehicle Dynamics Control) được ứng dụng trong ô tô vào những năm cuối của thập niên 90. VDC hoạt động tương tự TCS với việc thêm một cảm biến tốc độ lệch và cảm biến gia tốc ngang. Vị trí của bánh xe phát động được xác định bởi vị trí bánh lái và tiếp theo được so sánh với hướng thực của chuyển động. Sau đó, hệ thống TCS được kích hoạt để điều khiển công suất truyền cho bánh xe và điều khiển vận tốc ô tô, cũng như giảm thiểu sự khác nhau giữa hướng bánh lái và hướng chuyển động của ô tô [20, 21]. Trong một số trường hợp, ABS được dùng để giảm tốc độ của ô tô để thực hiện việc điều khiển như mong muốn. Trong các ô tô hiện nay, các CPU 8, 16, hay 32 bit được dùng để vận hành các hệ điều khiển khác nhau. Bộ vi điều khiển này có bộ nhớ (EEPROM/EPROM), các đầu ra số và tương tự, các bộ biến đổi A/D, bộ điều chế độ rộng xung (PWM), các chức năng thời gian, ví dụ dùng để đếm sự kiện và đo độ rộng xung, các đầu ra ưu tiên và trong một số trường hợp xử lý tín hiệu số. Bộ xử lý 32 bit được dùng để quản lý động cơ, điều khiển truyền động và các túi khí; bộ xử lý 16 bit dùng cho ABS, TCS, VDC, cụm thiết bị và các hệ thống điều hòa không khí; bộ xử lý 8 bit dùng cho điều khiển ghế, gương và các hệ thống nâng hạ cửa. Ngày nay, có khoảng 30 - 60 bộ vi điều khiển trong một chiếc ô tô. Điều này sẽ càng tăng lên nhờ việc môđun hóa các hệ cơ điện tử con trong tương lai.

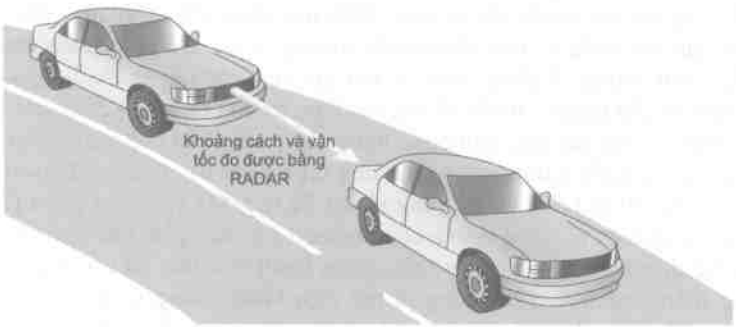
Cơ điện tử đã trở thành yếu tố để phân biệt giữa các ô tô. Kể từ khi khái niệm cơ bản về động cơ đốt trong được đưa ra cách đây gần một thế kỷ, các điểm khác nhau trong thiết kế động cơ cho xe hơi không còn là dấu hiệu để phân biệt các loại ô tô khác nhau. Trong những năm 1970, các nhà chế tạo Nhật Bản đã thành công trong việc tạo dựng một chỗ đứng vững chắc trên thị trường xe hơi Mỹ bằng việc chào bán các xe hơi nhỏ tiết kiệm năng lượng với chất lượng không thua kém các loại xe khác. Trong suốt thập niên 1980, chất lượng của xe là dấu hiệu phân biệt các sản phẩm. Trong những năm 1990, chất lượng và độ tin cậy của ô tô là những gì mà người tiêu dùng mong đợi từ phía các nhà sản xuất. Ngày nay, *các đặc tính cơ điện tử* trở thành dấu hiệu phân biệt sản phẩm trong những hệ cơ khí truyền thống này. Điều này được thúc đẩy hơn nữa bởi tỷ lệ giá trị thực hiện cao hơn của các thiết bị, nhu cầu của thị trường về các sản phẩm sáng tạo với những đặc tính thông minh và bởi những cố gắng giảm chi phí sản xuất các sản phẩm thông qua việc tái thiết kế các phần cơ điện tử cấu thành. Do tốc độ dự báo tăng trưởng thấp (2 - 3%), các hãng chế tạo xe hơi đang ra sức nghiên cứu các đặc tính công nghệ cao giúp phân biệt sản phẩm của họ với sản phẩm của các hãng khác [22]. Lượng giao dịch trên thị trường các thiết bị điện tử ô tô ở Bắc Mỹ hiện đạt giá trị khoảng 20 tỷ USD và hy vọng sẽ đạt 28 tỷ USD vào năm 2004 [22]. Những ứng dụng mới của các hệ cơ điện tử trong ngành công nghiệp ô tô bao gồm các ô tô bán tự động đến tự động hoàn toàn, hệ thống nâng cao độ an toàn, giảm thiểu tiêu hao và các đặc tính khác như hệ thống dẫn đường thông minh, các hệ thống phanh điện không dùng thủy lực [23]. Một lĩnh vực tăng trưởng có ý nghĩa khác do tiếp cận thiết kế cơ điện tử mang lại là hệ thống mạng không dây liên lạc tới các trạm mặt đất và giữa các xe hơi với nhau. Công nghệ viễn thông là sự kết hợp của hệ thống âm thanh, điện thoại di động, hệ thống điều hướng, khả năng kết nối internet, e-mail và nhận dạng tiếng nói, có thể được coi là lĩnh vực có tiềm năng lớn nhất trong ngành công nghiệp ô tô. Trên thực tế, việc ứng dụng điện tử trong sản xuất ô tô dự kiến sẽ tăng trung bình mỗi năm khoảng 6% trong vòng năm năm tới và cũng trong khoảng thời gian đó, các tính năng điện tử trong ô tô cũng sẽ tăng gấp đôi [24].

Hệ cơ điện tử micro MEMS (Micro Electromechanical System), cũng được gọi là hệ vi cơ điện tử, là một công nghệ cho phép phát triển các bộ cảm biến và cơ cấu chấp hành có hiệu quả kinh tế cho các ứng dụng cơ điện tử. Thực tế, đã có một vài thiết bị MEMS được ứng dụng trong ô tô, ví dụ như cảm biến và cơ cấu chấp hành của túi khí, cảm biến áp suất dùng cho việc đo áp suất trong

ống phân phối. Việc tích hợp các thiết bị MEMS với các mạch trạng thái tín hiệu CMOS trên cùng một chip bán dẫn là một ví dụ khác về sự phát triển của các công nghệ cho phép cải tiến các sản phẩm cơ điện tử, chẳng hạn như ô tô.

Công nghệ rađa với sóng milimét gần đây cũng đã được ứng dụng trong ô tô. Rađa với sóng milimét cho phép phát hiện vị trí của các đối tượng (các ô tô khác) và xác định khoảng cách tới chướng ngại vật cũng như tốc độ theo thời gian thực. Một mô tả khá chi tiết về cách thức vận hành của một hệ thống như thế đã được Suzuki và các cộng sự đưa ra [25]. Hình 1.4 minh họa khả năng nhận biết của ô tô nhờ sự trợ giúp của rađa sóng milimét. Công nghệ này cho phép điều chỉnh khoảng cách giữa ô tô và chướng ngại vật (hoặc ô tô khác) bằng việc kết hợp cảm biến với hệ thống dẫn hướng và ABS. Người lái có thể đặt vận tốc và khoảng cách mong muốn tới những chiếc xe ở phía trước. Hệ thống ABS và hệ thống dẫn hướng được ghép với nhau để đảm bảo thực hiện được những chức năng nói trên một cách an toàn. Khả năng tránh chướng ngại vật còn được mở bổ sung thêm một chức năng khá hợp lý nữa là lái bán tự động ở tốc độ chậm nhằm duy trì khoảng cách với xe ở phía trước khi xảy ra tắc đường. Trong điều kiện phát triển của cơ điện tử như ngày nay, những chiếc xe hơi hoàn toàn tự động chắc chắn sẽ ra đời trong vòng 20 năm tới. Các nghiên cứu về ô tô bán tự động dùng mô hình giao thông liên tục dựa trên hệ thống GPS và quá trình tự động hóa việc dừng và đi nhằm xác lập các hướng đi đang diễn ra ở khắp các trung tâm nghiên cứu. Hệ thống nhận biết và điều khiển được đề xuất cho loại xe như vậy (hình 1.5), có sự tham gia của hệ thống định vị toàn cầu sai phân DGPS (Differential Global Positioning Systems), xử lý ảnh theo thời gian thực và xác lập hướng đi linh hoạt [26].

(a)

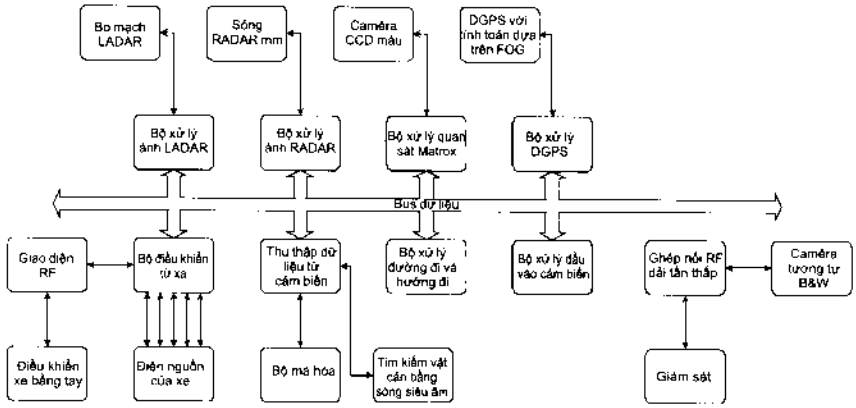


(b)

HÌNH 1.4 Sử dụng rađa đo khoảng cách và vận tốc để tự động điều chỉnh khoảng cách giữa các xe ô tô [10]

Các hệ cơ điện tử tương lai trong ô tô có thể bao gồm kính chắn gió không mờ dựa trên hệ thống nhận biết độ ẩm, nhiệt độ và điều hòa không khí, khả năng tự đỗ xe song song, thiết bị trợ giúp đỗ xe phía sau, hỗ trợ thay đổi làn xe, phanh điện tử và việc thay thế các hệ thống thủy lực bằng các hệ cơ điện servo. Khi lượng ô tô trên thế giới tăng lên, các tiêu chuẩn nghiêm ngặt hơn về khí thải sẽ ra đời. Các sản phẩm cơ điện tử sẽ có khả năng đáp ứng được những thách thức đặt ra đối với việc điều chỉnh lượng khí thải và hiệu suất động cơ bằng việc giảm đáng kể lượng khí thải

CO, NO và HC và tăng hiệu quả của xe [23]. Rõ ràng là không thể coi một chiếc ô tô với 30 đến 60 bộ vi điều khiển, 100 động cơ điện, hệ thống dây điện nặng 200 pound, vô số các cảm biến và hàng nghìn dòng mã lệnh là một hệ cơ khí thuần túy. Ô tô đang được chuyển hóa thành một hệ cơ điện tử hoàn toàn.



HÌNH 1.5 Thiết kế hệ thống ô tô tự hành với các cảm biến và cơ cấu chấp hành

1.5 Cơ điện tử là gì? và tương lai của cơ điện tử?

Thuật ngữ cơ điện tử ra đời ở Nhật Bản vào những năm 1970 và đã trải qua một quá trình phát triển trong suốt 25 năm qua với sự ra đời của hàng loạt các sản phẩm thông minh. Vậy cơ điện tử là gì? Nó là một giai đoạn tự nhiên trong quá trình phát triển của kỹ thuật hiện đại. Đối với một số kỹ sư, cơ điện tử không còn mấy xa lạ và đối với những người khác nó lại là một phương thức tiếp cận mang tính triết học nhằm phục vụ cho hoạt động của họ. Tất nhiên, cơ điện tử là một quá trình phát triển chứ không phải là một cuộc cách mạng. Rõ ràng là không thể có được một định nghĩa toàn diện về cơ điện tử, nhưng trên thực tế lại rất cần có một định nghĩa như vậy. Tuy nhiên, có thể hiểu rằng cơ điện tử là sự tích hợp các hệ cơ khí, điện và máy tính. Cần thấy rằng cơ điện tử liên quan đến rất nhiều ngành bằng việc mô tả các phần cấu thành cơ điện tử, bao gồm (i) mô hình hệ vật lý, (ii) cảm biến và cơ cấu chấp hành, (iii) tín hiệu và hệ thống, (iv) máy tính và hệ lôgic, (v) phần mềm và thu thập dữ liệu. Các nhà khoa học và các kỹ sư từ tất cả các tầng lớp xã hội và các lĩnh vực nghiên cứu khác nhau đều có thể góp sức mình cho sự phát triển của cơ điện tử. Khi ranh giới giữa kỹ thuật và khoa học trở nên ít rõ ràng hơn, rất nhiều sinh viên muốn tìm kiếm một chương trình học mang tính đa ngành. Vì vậy, giới hàn lâm cần hướng tới việc đưa ra một môn học có liên quan đến các hệ cơ điện tử.

Trong tương lai, sự phát triển của hệ cơ điện tử sẽ được thúc đẩy bởi sự phát triển của các lĩnh vực có liên quan. Những tiến bộ trong lĩnh vực truyền thống cũng sẽ tạo động lực cho sự phát triển của hệ cơ điện tử thông qua việc cung cấp những "công nghệ khả thi". Chẳng hạn, việc phát minh ra bộ vi xử lý đã có ảnh hưởng sâu rộng đến quá trình tái thiết kế hệ cơ khí và quá trình thiết kế mới hệ cơ điện tử. Chúng ta nên hy vọng vào những tiến bộ không ngừng của bộ vi xử lý và bộ vi điều khiển, sự phát triển của bộ cảm biến và cơ cấu chấp hành dựa trên việc ứng dụng những tiến bộ của hệ MEMS, các phương pháp điều khiển thích nghi và phương pháp lập trình tốc độ xử lý của máy tính, công nghệ mạng và công nghệ không dây, kỹ thuật được trợ giúp bởi máy tính CAE (Computer Aided Engineering) dùng cho việc lập mô hình hệ thống tiên tiến, tạo mẫu ảo và thử nghiệm. Sự phát triển nhanh chóng trong những ngành này sẽ giúp tăng tốc độ phát triển các sản phẩm thông minh. Mạng Internet là một công nghệ khi được ứng dụng kết hợp với công nghệ không dây cũng sẽ tạo ra những sản phẩm cơ điện tử mới. Khi những phát triển trong thiết bị tự động đã cung cấp cho chúng ta ví dụ sinh động về sự phát triển của Cơ điện tử, thì có hàng loạt các ví dụ về các hệ thống thông minh trong tất cả các lĩnh vực của đời sống xã hội, bao gồm thiết bị gia dụng thông minh như máy giặt, máy hút bụi, lò vi sóng và các thiết bị ứng dụng mạng không

dây. Trong lĩnh vực "thiết bị thân thiện với con người" (thuật ngữ do H.Kobayashi [27] đưa ra), chúng ta có thể hy vọng vào những tiến bộ trong phẫu thuật có sự trợ giúp của người máy và bộ cảm biến, cơ cấu chấp hành có thể cấy ghép được. Những tiến bộ trong lĩnh vực Cơ điện tử có thể đem lại lợi ích cho những lĩnh vực khác như rôbôt, chế tạo máy, vũ trụ, công nghệ và vận tải. Tương lai của Cơ điện tử đang rộng mở.

Tài liệu tham khảo

[1] Kyura, N. and Oho, H., "Mechatronics - an industrial perspective", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, 1996, pp. 10-15.

[2] Mori, T., "Mechatronics", Yasakawa Internal Trademark Application Memo 21.131.01, July 12, 1969.

[3] Harshama, F., Tomizuka, M., and Fukuda, T., "Mechatronics - What is it, why, and how? - an editorial", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, 1996, pp. 1-4.

[4] Auslander, D. M. and Kempf, C. J., *Mechatronics: Mechanical System Interfacing*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.

[5] Shetty, D. and Kolk, R. A., *Mechatronic System Design*, PWS Publishing Company, Boston, MA, 1997.

[6] Bolton, W., *Mechatronics: Electrical Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, 2nd Ed., Addison-Wesley Longman, Harlow, England, 1999.

[7] Mayr, I. O., *The Origins of Feedback Control*, MIT Press, Cambridge, MA, 1970.

[8] Tomkinson, D. and Horne, J., *Mechatronics Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1996.

[9] Popov, E. P., *The Dynamics of Automatic Control Systems*; Gostekhizdat, Moscow, 1956; Addison-Wesley, Reading, MA, 1962.

[10] Dorf, R. C. and Bishop, R. H., *Modern Control Systems*, 9th Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.

[11] Maxwell, J. C., "On governors", *Proc. Royal Soc. London*, 16, 1868; in *Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory*, Dover, New York, 1964, pp. 270-283.

[12] Vyshnegradskii, I. A., "On controllers of direct action", *Izv. SPB Tekhnotog. Inst.*, 1877.

[13] Bode, H. W., "Feedback - the history of an idea", in *Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory*, Dover, New York, 1964, pp. 106-123.

[14] Black, H. S., "Inventing the Negative Feedback Amplifier", *IEEE Spectrum*, December 1977, pp. 55-60.

[15] Brittain, J. E., *Turning Points in American Electrical History*, IEEE Press, New York, 1977.

[16] Fagen, M. D., A *History of Engineering and Science on the Bell Systems*, Bell Telephone Laboratories, 1978.

[17] Newton, G., Gould, L., and Kaiser, J., *Analytical Design of Linear Feedback Control*, John Wiley & Sons, New York, 1957.

[18] Dorf, R. C. and Kusiak, A., *Handbook of Automation and Manufacturing*, John Wiley & Sons, New York, 1994.

[19] Dorf, R. C., *The Encyclopedia of Robotics*, John Wiley & Sons, New York, 1988.

[20] Asami, K., Nomura, Y., and Naganawa, T., "Traction Control (TRC) System for 1987 Toyota Crown, 1989", ABS-TCS-VDC *Where Will the Technology Lead Us*? J. Mack, ed., Society of Automotive Engineers, Warrendale PA, 1996.

[21] Pastor, S. et al., "Brake Control System", United States Patent # 5,720,533, Feb. 24, 1998 (see http://www.uspto.gov/ for more information).

[22] Jorgensen, B., "Shifting gears", Auto Electronics, *Electronic Business*, Feb. 2001.

[23] Barron, M. B. and Powers, W. F., "The role of electronic controls for future automotive mechatronic systems", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, 1996, pp. 80–88.

[24] Kobe, G., "Electronics: What's driving the growth?" *Automotive Industries*, August 2000.

[25] Suzuki, H., Hiroshi, M. Shono, and Isaji, O., "Radar Apparatus for Detecting a Distance/Velocity", United States Patent # 5,677,695, Oct 14, 1997 (see http://www.uspto.gov/ for more information).

[26] Ramasubramanian, M. K., "Mechatronics - the future of mechanical engineering-past, present, and a vision for the future", (Invited paper), Proc. SPIE, Vol. 4334-34, March 2001.

[27] Kobayashi, H. (Guest Editorial), *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 2, No. 4, 1997, p. 217.

2

Phương pháp thiết kế cơ điện tử

2.1 Lịch sử phát triển và định nghĩa hệ cơ điện tử 2-1
2.2 Chức năng của các hệ cơ điện tử 2-3
2.3 Các phương pháp tích hợp 2-5
2.4 Các hệ thống xử lý thông tin 2-6
2.5 Quy trình thiết kế đồng thời cho các hệ cơ điện tử ... 2-10

Rolf Isermann
Darmstadt University of Technology

2.1 Lịch sử phát triển và định nghĩa hệ cơ điện tử

Trong một số lĩnh vực kỹ thuật đã có sự kết hợp các sản phẩm hoặc các quy trình sản xuất với điện tử, đặc biệt với các hệ cơ khí được phát triển từ năm 1980. Những hệ thống này đã chuyển từ hệ cơ-điện với các phần điện và cơ khí riêng rẽ sang hệ cơ-điện tích hợp với các bộ cảm biến, các cơ cấu chấp hành, các mạch điện tử số micro. Những hệ thống tích hợp này, như thấy trên bảng 2.1, được gọi là các *hệ cơ điện tử* (mechatronic systems), với sự kết hợp giữa từ CƠ HỌC (MECHAnics) và từ ĐIỆN TỬ (elecTRONICS).

Thuật ngữ "Cơ điện tử" lần đầu tiên được đưa ra bởi một kỹ sư người Nhật vào năm 1969 [1], với những định nghĩa ban đầu được đưa ra trong [2] và [3]. Trong [4], người ta đã đưa ra một định nghĩa tổng quát như sau: "Cơ điện tử là sự tích hợp chặt chẽ của kỹ thuật cơ khí với điện tử và điều khiển thông minh bằng máy tính trong thiết kế và chế tạo các sản phẩm và quy trình công nghiệp"[5].

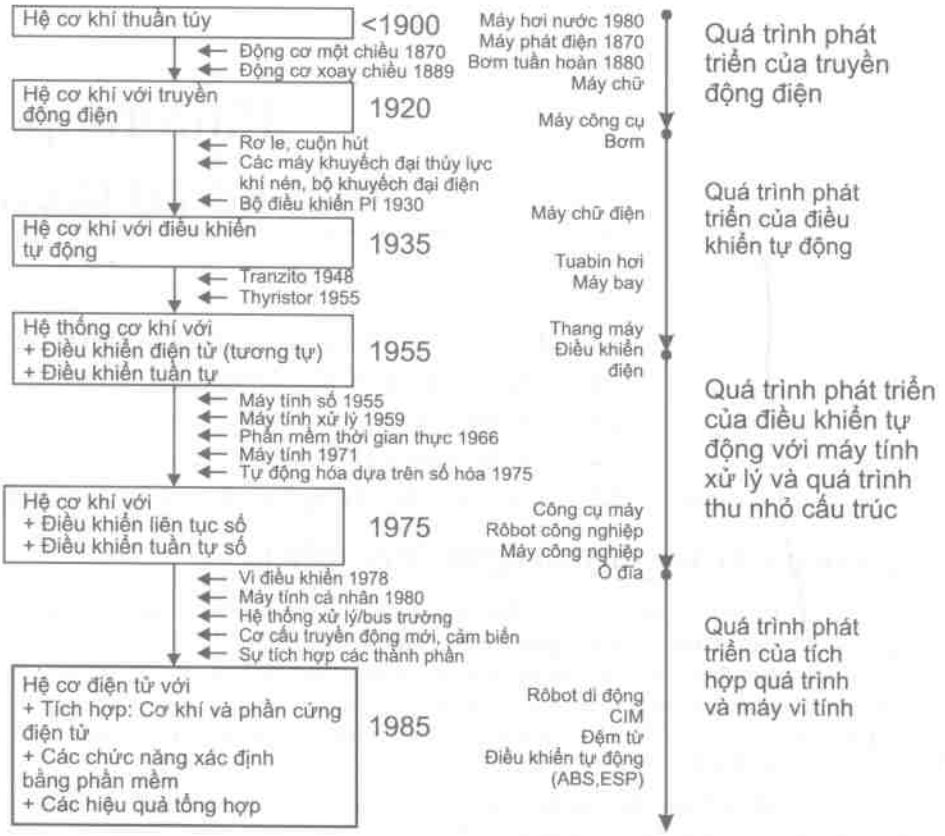
Tất cả những định nghĩa này đều có điểm chung là coi cơ điện tử như một *lĩnh vực liên ngành*, trong đó những ngành dưới đây hoạt động cùng nhau (hình 2.1):

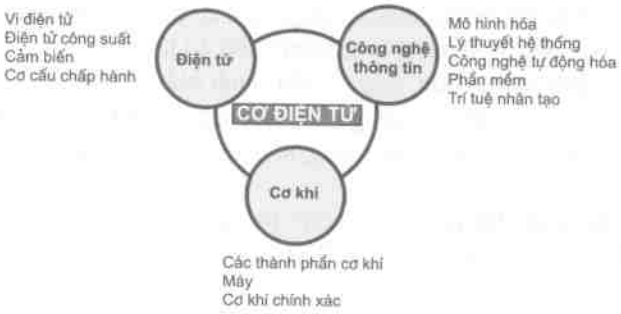
- *Cơ khí* (các thành phần cơ khí, máy, cơ khí chính xác);
- *Điện tử* (điện tử micro, điện tử công suất, công nghệ cảm biến và cơ cấu chấp hành);
- *Công nghệ thông tin* (lý thuyết hệ thống, tự động hóa, công nghệ phần mềm, trí tuệ nhân tạo).

Một số bài báo đã mô tả sự phát triển của cơ điện tử; xem [5-8]. Nội dung chi tiết về những vấn đề chung nhất được đưa ra trong các tạp chí [4, 9, 10]; các tuyển tập của hội nghị đầu tiên [11-15] và các ấn phẩm [16-19].

Hình 2.2 đưa ra sơ đồ tổng quát của một quá trình cơ khí hiện đại giống như một máy tiêu thụ hoặc phát điện. *Dòng năng lượng* sơ cấp đi vào trong máy, sau đó được dùng trực tiếp cho bộ phận tiêu thụ năng lượng như trường hợp của bộ biến đổi năng lượng hoặc được chuyển thành dạng năng lượng khác như trường hợp của bộ chuyển đổi năng lượng. Dạng năng lượng có thể là điện năng, cơ năng (thế năng hoặc động năng, thủy lực, khí nén), hóa năng hay nhiệt năng. Các máy hầu hết được đặc trưng bởi dòng năng lượng liên tục hoặc tuần hoàn. Đối với các quá trình cơ học khác, như các thành phần cơ học hoặc các thiết bị cơ khí chính xác, các dòng năng lượng rời rạc hoặc không liên tục là điển hình.

BẢNG 2.1 Lịch sử phát triển của các hệ cơ học, điện và điện tử





HÌNH 2.1 Cơ điện tử: sự tích hợp hữu cơ của nhiều ngành khác nhau

Nhìn chung, dòng năng lượng là tích của dòng suy rộng và thế (effort). Thông tin về trạng thái của quá trình cơ có thể nhận được bằng các dòng suy rộng đo được (dòng tốc độ, khối lượng, thể tích) hoặc dòng điện hoặc thế (lực, áp suất, nhiệt độ, điện áp). Cùng với những biến tham chiếu, các biến đo là đầu vào của *dòng thông tin* chạy qua các thiết bị điện tử số tạo ra các biến điều khiển cho cơ cấu chấp hành hoặc các biến giám sát trên màn hình.

HÌNH 2.2 Quá trình cơ khí và việc xử lý thông tin phát triển hướng tới các hệ cơ điện tử

Việc thêm và tích hợp dòng thông tin phản hồi với dòng năng lượng truyền thẳng trong hệ cơ khí cơ bản là một đặc trưng của nhiều hệ cơ điện tử. Sự phát triển này đã tác động ngay đến quá trình thiết kế các hệ cơ khí. Các hệ cơ điện tử có thể được chia nhỏ thành:

- Hệ cơ điện tử
- Thiết bị cơ điện tử
- Phương tiện di động cơ điện tử
- Cơ điện tử chính xác
- Vi cơ điện tử

Điều này cho thấy sự tích hợp với điện tử diễn ra ở nhiều lớp. Trong một vài trường hợp, thành phần cơ khí của quá trình được ghép đôi với một phần điện, nhiệt, nhiệt động, hóa hay xử lý thông tin. Điều này đặc biệt đúng với các bộ chuyển đổi năng lượng mà ở đó, ngoài dạng năng lượng cơ khí, còn có các dạng năng lượng khác. Như vậy, *các hệ cơ điện tử theo nghĩa rộng* bao gồm cả quá trình cơ khí và phi cơ khí. Tuy nhiên, các thành phần cơ khí thông thường nắm vai trò chủ đạo trong hệ thống.

Do một năng lượng phụ trợ được yêu cầu để thay đổi các thuộc tính cố định của các hệ cơ khí thụ động trước kia thông qua điều khiển phản hồi hay điều khiển truyền thẳng, nên những hệ thống này đôi khi còn được gọi là *hệ cơ khí chủ động*.

2.2 Chức năng của các hệ cơ điện tử

Hệ cơ điện tử cho phép nâng cấp nhiều chức năng cũ và tạo ra các chức năng mới. Vấn đề này sẽ được bàn tới bằng việc xem xét một số ví dụ.

Sự phân chia chức năng giữa cơ khí và điện tử

Trong thiết kế hệ cơ điện tử, sự tác động qua lại của các phần cơ khí và điện tử nhằm thực hiện các chức năng là điều rất quan trọng. So với việc thực hiện các chức năng cơ khí đơn thuần, việc

sử dụng các bộ khuếch đại và cơ cấu chấp hành với năng lượng điện phụ trợ đã mang đến sự đơn giản hóa đáng kể cho các thiết bị như đồng hồ đeo tay, máy chữ và camera. *Một sự đơn giản hóa trong cơ khí* bắt nguồn từ việc đưa máy tính kết nối với các thiết bị điện phân tán, như có thể thấy ở máy chữ điện tử, máy khâu, hệ điều khiển đa trục và bộ hộp số tự động.

Việc thiết kế các cấu trúc gọn nhẹ dẫn đến các hệ đàn hồi có độ giảm chấn yếu do vật liệu. *Giảm chấn điện tử* với các cảm biến vị trí, tốc độ hoặc dao động và phản hồi điện tử có thể được thực hiện với lợi thế của một thiết bị giảm chấn có khả năng điều chỉnh thông qua các thuật toán. Ví dụ như bộ xích truyền động đàn hồi của ô tô với các thuật toán giảm chấn trong động cơ điện tử, rôbôt đàn hồi, hệ thống thủy lực, cần cẩu và các cấu trúc không gian (bánh đà).

Việc thêm vào các vòng điều khiển kín đối với vị trí, tốc độ hoặc lực không chỉ dẫn đến sự bám chính xác các biến tham chiếu mà còn dẫn đến một ứng xử xấp xỉ tuyến tính, thậm chí ngay cả khi hệ cơ khí có ứng xử phi tuyến. Bằng việc *loại bỏ ràng buộc của sự tuyến tính hóa* về mặt cơ khí, việc thiết kế và gia công có thể được giảm nhẹ. Ví dụ như các cơ cấu chấp hành cơ điện và khí nén cơ học đơn giản cùng các van lưu lượng với điều khiển điện tử.

Với *việc tạo ra các biến tham chiếu khả trình mềm dẻo*, khả năng thích nghi của hệ cơ phi tuyến có thể được cải thiện. Điều này đã được dùng cho việc điều khiển các đặc tính bàn đạp trong phần điện tử của động cơ ô tô, điều khiển từ xa của ô tô và máy bay trong việc phát triển máy xúc chấp hành thủy lực và việc điều khiển công suất điện.

Với sự gia tăng về số lượng của các bộ cảm biến, cơ cấu chấp hành, khoá chuyển mạch và các thiết bị điều khiển, các kết nối dây và điện sẽ tăng. Điều đó ảnh hưởng đến độ tin cậy, chi phí, trọng lượng và kích thước. Vì vậy, sự phát triển các hệ thống bus, hệ thống giắc cắm hợp lý, hệ thống điện tử tái cấu hình và dự phòng là những thách thức đặt ra cho các nhà thiết kế.

Cải thiện các đặc tính hoạt động

Bằng việc ứng dụng điều khiển phản hồi chủ động, độ chính xác đạt được không chỉ thông qua độ chính xác cơ khí cao của một thành phần cơ khí được điều khiển truyền thẳng một cách thụ động mà còn thông qua việc so sánh một biến tham chiếu được lập trình với một biến điều khiển đo được. Vì vậy, độ chính xác cơ khí trong thiết kế và gia công có thể giảm một phần và người ta có thể sử dụng các kết cấu đơn giản hơn cho ổ trục hoặc khe trượt. Một khía cạnh quan trọng là việc bù ma sát biến thiên theo thời gian và ma sát lớn hơn gọi là *bù ma sát thích nghi* [13, 20]. Ngoài ra, ma sát lớn hơn của khe hở có thể được chấp nhận vì bù ma sát thường dễ hơn bù khe hở.

Điều khiển theo mô hình và thích nghi cho phép mở rộng phạm vi hoạt động hơn so với điều khiển cố định với những thực hiện không mong muốn (nguy hiểm do không ổn định hoặc ứng xử không nhanh nhạy). Sự kết hợp giữa điều khiển thích nghi và bền vững cho phép mở rộng phạm vi hoạt động cho điều khiển dòng, lực, tốc độ và cho các quá trình như động cơ, phương tiện di động, máy bay. Khả năng thực hiện tốt hơn của hệ điều khiển cho phép các biến tham chiếu tiến gần hơn tới những ràng buộc (ví dụ như nhiệt độ và áp suất cao hơn để đốt cháy động cơ và tua bin, máy nén với những giới hạn dừng, áp suất và tốc độ cao hơn đối với máy sản xuất giấy và xưởng luyện thép) làm tăng hiệu suất làm việc và tăng lợi nhuận.

Bổ sung những chức năng mới

Hệ cơ điện tử cho phép thực hiện những chức năng mà khó có thể thực hiện được nếu không có điện tử số. Trước hết, *những đại lượng không đo được* có thể được tính trên cơ sở các tín hiệu đo được và bị chi phối bởi điều khiển truyền thẳng và điều khiển phản hồi, chẳng hạn như các biến phụ thuộc vào thời gian như độ trượt của lốp, ứng suất bên trong, nhiệt độ, góc trượt và tốc độ cho điều khiển dẫn hướng của phương tiện di động hoặc các thông số như hệ số tắt dần, độ cứng và lực cản. *Sự thích nghi của các thông số* như hệ số tắt dần và độ cứng của hệ dao động (dựa trên các phép đo dịch chuyển hoặc gia tốc) lại là một ví dụ khác. *Tích hợp giám sát và chẩn đoán lỗi* trở nên quan trọng hơn với việc gia tăng các tính năng tự động, gia tăng độ phức tạp và nhu cầu ngày càng cao về độ ổn định và an toàn. Khi đó, việc khởi động các bộ phận dự phòng, sự tái cấu hình

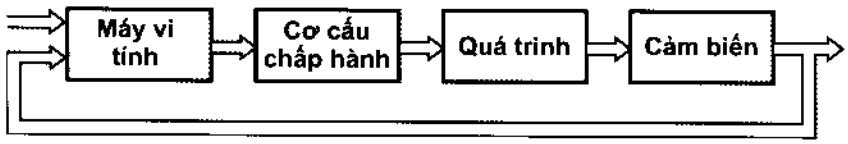
hệ thống, bảo dưỡng theo yêu cầu và bất kỳ một loại *dịch vụ từ xa* nào đã làm cho hệ thống trở nên "thông minh" hơn. Bảng 2.2 tóm tắt một số đặc tính của hệ cơ điện tử so với hệ cơ điện truyền thống.

Bảng 2.2 Các thuộc tính của các thiết kế truyền thống và thiết kế cơ điện tử

Thiết kế truyền thống	Thiết kế cơ điện tử
Các thành phần phải thêm vào	**Tích hợp các thành phần (phần cứng)**
1. To lớn	Nhỏ gọn
2. Kết cấu phức tạp	Kết cấu đơn giản
3. Vấn đề về dây dẫn	Truyền thông khôngdây hoặc bus
4. Các thành phần kết nối	Các thiết bị tự trị
Điều khiển đơn giản	**Tích hợp bởi xử lý thông tin (phần mềm)**
5. Cấu trúc cứng nhắc	Câu trúc mềm dẻo với phản hồi điện tử
6. Điều khiển truyền thẳng, điều khiển tuyến tính	Điều khiển số phản hồi khả lập trình (phi tuyến)
7. Độ chính xác nhờ dung sai hẹp	Độ chính xác nhờ đo lường và điều khiển phản hồi
8. Các đại lượng không đo được thay đổi tùy tiện	Điều khiển các đại lượng không do được mà ước lượng được
9. Theo dõi đơn giản	Giám sát với chẩn lỗi
10. Khả năng cố định	Khả năng tự học

2.3 Các phương pháp tích hợp

Hình 2.3 chỉ ra sơ đồ tổng quát của một hệ cơ-điện truyền thống. Những hệ này ra đời dựa trên việc thêm các cảm biến, cơ cấu chấp hành và các bộ điều khiển tương tự hoặc số vào các thành phần cơ khí. Hạn chế của phương pháp này là thiếu các cảm biến và cơ cấu chấp hành thích hợp, tuổi thọ không như mong muốn trong điều kiện làm việc khắc nghiệt (gia tốc, nhiệt độ, ô nhiễm), yêu cầu không gian lớn, yêu cầu dây nối, xử lý dữ liệu tương đối chậm. Nhờ những cải tiến liên tục trong việc thu nhỏ kích thước, tăng độ cứng và khả năng tính toán của các thành phần vi điện tử, người ta có thể chú trọng hơn đến điện tử trong thiết kế hệ cơ điện tử. Có thể hình dung ra nhiều hệ thống tự vận hành như các thiết bị được bọc kín với việc truyền tín hiệu không tiếp xúc hoặc kết nối bus và vi điện tử bền vững.



HÌNH 2.3 Sơ đồ tổng quát của một hệ cơ-điện truyền thống

Việc tích hợp hệ cơ điện tử có thể được tiến hành thông qua việc tích hợp các thành phần và tích hợp xử lý thông tin.

Tích hợp các thành phần (phần cứng)

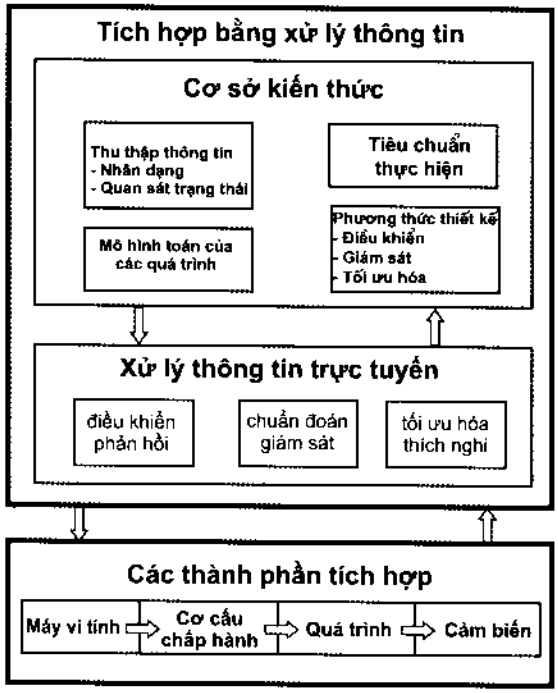
Việc tích hợp các thành phần (tích hợp phần cứng) bắt nguồn từ việc thiết kế hệ cơ điện tử như một hệ tổng thể có gắn các cảm biến, cơ cấu chấp hành và máy tính vào quá trình cơ khí, như thấy ở hình 2.4. Việc tích hợp về mặt không gian này có thể sẽ giới hạn ở sự tích hợp quá trình cơ khí với bộ cảm biến hoặc quá trình cơ khí với cơ cấu chấp hành. Máy tính có thể được tích hợp với cơ

cấu chấp hành, quá trình cơ khí hay bộ cảm biến, hoặc có thể được sắp xếp ở một vài vị trí khác nhau.

Việc tích hợp bộ cảm biến với máy vi tính sẽ tạo nên *bộ cảm biến thông minh* và tích hợp cơ cấu chấp hành với máy vi tính cũng sẽ tạo nên *cơ cấu chấp hành thông minh*. Đối với những hệ thống lớn hơn, kết nối bus sẽ thay thế dây. Do vậy, có một số khả năng xây dựng hệ thống tích hợp toàn diện bằng việc tích hợp các phần cứng một cách hợp lý.

Tích hợp xử lý thông tin (Phần mềm)

Việc tích hợp xử lý thông tin (tích hợp phần mềm) phần lớn dựa trên các chức năng điều khiển hiện đại. Bên cạnh điều khiển truyền thẳng và điều khiển phản hồi cơ bản, một tác động nữa được tính đến là nhờ sự hiểu biết về quá trình và việc xử lý thông tin trực tuyến tương ứng, như thấy ở hình 2.4. Điều này đồng nghĩa với việc xử lý các tín hiệu hiện có ở các mức độ cao hơn, bao gồm các giải pháp như giám sát có chẩn đoán lỗi, tối ưu và quản lý tổng thể quá trình. Các giải pháp tương ứng sẽ cho kết quả là các thuật toán thời gian thực phù hợp với các thuộc tính gia công cơ khí được thể hiện bằng các mô hình toán học dưới dạng đặc tính tĩnh hoặc các phương trình vi phân. Vì vậy cần có cơ sở tri thức về các phương pháp thiết kế, thu thập thông tin, các mô hình quá trình và các tiêu chuẩn thực hiện. Theo cách này, các thành phần cơ khí được vận hành theo nhiều cách khác nhau thông qua việc xử lý thông tin ở cấp cao hơn với các thuộc tính thông minh có thể bao gồm cả việc học, vì vậy hình thành việc tích hợp bằng phần mềm thích ứng với quá trình.



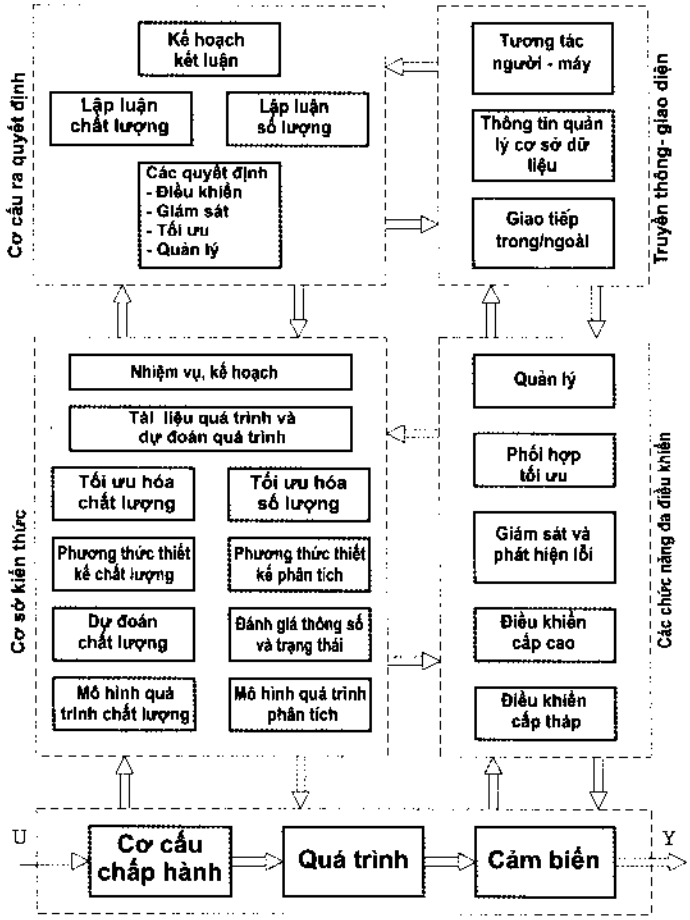
HÌNH 2.4 Các cách tích hợp trong hệ cơ điện tử

2.4 Các hệ thống xử lý thông tin

Việc điều khiển các hệ cơ khí thường được thực hiện thông qua cơ cấu chấp hành nhằm thay đổi vị trí, tốc độ, dòng, lực, mômen và điện áp. Các đại lượng đầu ra có thể đo được trực tiếp thường là vị trí, tốc độ, gia tốc, lực và dòng điện.

Kiến trúc điều khiển đa cấp

Việc xử lý thông tin của các *tín hiệu đầu vào, đầu ra đo được trực tiếp* có thể được tổ chức ở một vài mức như hình 2.5.



HÌNH 2.5 Hệ thống tự động thông minh hiện đại với nhiều cấp điều khiển, cơ sở tri thức, cơ chế suy luận và các giao diện

Cấp 1: Điều khiển ở cấp thấp (truyền thẳng, phản hồi để tắt dần, ổn định và tuyến tính hóa)

Cấp 2: Điều khiển ở mức cao (các chiến lược điều khiển phản hồi hiện đại)

Cấp 3: Giám sát bao gồm cả chẩn đoán lỗi

Cấp 4: Tối ưu hóa, phối hợp (các quá trình)

Cấp 5: Quản lý tổng thể quá trình

Các phương pháp xây dựng hệ cơ điện tử gần đây sử dụng việc xử lý tín hiệu ở mức thấp, như phản hồi để tắt dần, điều khiển chuyển động hoặc giám sát ở mức giản đơn. Tuy nhiên, việc xử lý thông tin số cho phép giải quyết nhiều nhiệm vụ như điều khiển thích nghi, điều khiển tự học, giám sát với chẩn đoán lỗi, quyết định về vấn đề bảo dưỡng hoặc thậm chí về các hoạt động dự phòng, tối ưu hóa về mặt kinh tế và phối hợp các nhiệm vụ. Các nhiệm vụ ở cấp cao hơn đôi khi được gọi tắt là "quản lý quá trình".

Xử lý tín hiệu đặc biệt

Các phương pháp được mô tả có thể áp dụng một phần cho *các đại lượng không đo được* mà có thể được khôi phục từ các mô hình toán học của quá trình. Theo cách này, có thể điều khiển các hệ số tắt dần, ứng suất nhiệt và vật liệu, và trượt hoặc để giám sát các đại lượng như điện trở, điện dung, nhiệt độ của các thành phần hay các tham số hao mòn và ô nhiễm. Việc xử lý tín hiệu có thể đòi hỏi *các bộ lọc đặc biệt* để xác định biên độ hoặc tần số dao động, để xác định tích phân hoặc đạo hàm, hoặc *các bộ quan sát trạng thái*.

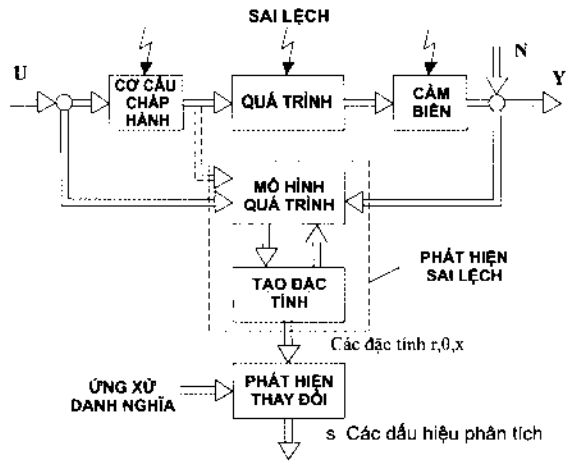
Các hệ điều khiển thích nghi và dựa trên mô hình

Ít nhất ở các mức thấp hơn, việc xử lý thông tin được thực hiện thông qua các thuật toán hoặc các môđun phần mềm đơn giản trong các điều kiện thời gian thực. Những thuật toán này bao gồm các thông số có khả năng điều chỉnh tự do, chúng phải được thích ứng với ứng xử tĩnh và động của quá trình. Đối lập với việc điều chỉnh bằng tay thông qua phương pháp thử và kiểm tra lỗi, việc sử dụng các mô hình toán học cho phép khả năng thích nghi tự động nhanh và chính xác.

Các mô hình toán học có thể nhận được bằng việc nhận dạng và đánh giá tham số dùng các tín hiệu đầu vào, đầu ra được đo và lấy mẫu. Những phương pháp này không chỉ giới hạn cho các mô hình tuyến tính, mà còn cho phép áp dụng đối với một số lớp của hệ phi tuyến. Nếu các phương pháp đánh giá thông số được kết hợp với các phương pháp thiết kế theo thuật toán điều khiển thích hợp thì sẽ có các hệ điều khiển thích nghi. Chúng có thể được dùng cho việc điều chỉnh bộ điều khiển chính xác hoặc chỉ cho các mục đích đặc biệt [20].

Giám sát và phát hiện lỗi

Với việc tăng số lượng các chức năng tự động (độc lập), bao gồm các thành phần điện tử, các cảm biến và cơ cấu chấp hành, tăng độ phức tạp và tăng các yêu cầu về độ tin cậy và an toàn, một bộ giám sát được tích hợp với chẩn đoán lỗi càng trở nên quan trọng hơn. Đây là một đặc tính tự nhiên quan trọng của hệ cơ điện tử thông minh. Hình 2.6 cho thấy một quá trình bị tác động bởi lỗi. Các lỗi này chỉ ra độ lệch không cho phép từ các trạng thái thông thường và có thể được sinh ra từ bên ngoài hoặc bên trong. Các lỗi bên ngoài có thể do nguồn cung cấp năng lượng, do ô nhiễm hoặc va chạm, trong khi các lỗi bên trong có thể do sự hao mòn, thiếu bôi trơn, hoặc các lỗi cơ cấu chấp hành hoặc cảm biến. Phương pháp phát hiện lỗi truyền thống là kiểm tra giá trị giới hạn của một vài biến có thể đo được. Tuy nhiên, các lỗi sơ khai và không liên tục thường không thể phát hiện ra và việc chẩn đoán lỗi bên trong không thể thực hiện được bằng phương pháp đơn giản này.



HÌNH 2.6 Sơ đồ phát hiện lỗi dựa trên mô hình

Các phương pháp phát hiện và chẩn đoán lỗi dựa trên mô hình được phát triển trong những năm gần đây cho phép sớm phát hiện ra những lỗi nhỏ thông qua các tín hiệu đo được thông thường [21]. Dựa trên các tín hiệu đầu vào đo được, U(t), các tín hiệu đầu ra Y(t) và mô hình quá trình, các đặc tính được xác định bằng việc đánh giá các thông số, các quan sát trạng thái và đầu ra, cũng như các phương trình cân bằng, như thấy ở hình 2.6.

Sau đó, những số dư này được đem so sánh với những số dư của ứng xử thông thường và với các phương pháp phát hiện thay đổi sẽ nhận được các dấu hiệu giải tích. Khi đó, việc chẩn đoán lỗi sẽ được thực hiện bằng các phương pháp phân loại và lập luận. Chi tiết hơn xem trong [22, 23].

Một ưu điểm đáng kể ở đây là cùng một mô hình xử lý có thể được sử dụng cho cả việc *thiết kế bộ điều khiển (thích nghi) và phát hiện lỗi*. Nói chung, các mô hình liên tục theo thời gian được ưa dùng hơn nếu việc phát hiện lỗi dựa trên việc đánh giá các thông số hoặc các phương trình cân bằng. Để phát hiện lỗi bằng việc đánh giá trạng thái hoặc phương trình cân bằng, có thể sử dụng mô hình rời rạc theo thời gian.

Giám sát và chẩn đoán lỗi hiện đại là một cơ sở để cải thiện độ tin cậy và an toàn, việc bảo dưỡng theo trạng thái, khởi động các dự phòng và việc tái cấu hình.

Các hệ thông minh (các nhiệm vụ cơ bản)

Xử lý thông tin trong hệ cơ điện tử có thể đi từ các chức năng điều khiển đơn giản đến điều khiển thông minh. Đã có rất nhiều định nghĩa khác nhau về hệ điều khiển thông minh, xem [24-30]. Một hệ điều khiển thông minh có thể được tổ chức giống như *hệ chuyên gia trực tuyến* (hình 2.5) và bao gồm:

- Các chức năng đa điều khiển (các chức năng quản lý),
- Cơ sở kiến thức,
- Cơ chế suy luận,
- Giao diện truyền thông.

Các chức năng điều khiển trực tuyến thường được tổ chức ở dạng đa cấp, như đã mô tả ở trên. *Cơ sở kiến thức* bao gồm kiến thức định tính và định lượng. Phần định tính có tác dụng với các mô hình giải tích (toán học) của quá trình, các phương pháp đánh giá trạng thái và tham số, phương pháp thiết kế bằng giải tích (ví dụ đối với điều khiển và phát hiện lỗi) và các phương pháp tối ưu một cách định tính. Tương tự, các môđun chứa đựng các kiến thức định lượng (ví dụ, các qui tắc cho tính toán phần mềm và mờ). Thêm nữa là kiến thức về các sự kiện quá khứ trong bộ nhớ và khả năng đoán trước ứng xử. Cuối cùng có thể bao gồm cả các nhiệm vụ hoặc thời gian biểu.

Cơ chế suy luận đưa ra kết luận hoặc bằng lập luận định lượng (ví dụ như các phương pháp Bool) hoặc bằng lập luận định tính (ví dụ như các phương pháp dự đoán) và đưa ra các quyết định cho các chức năng quản lý.

Truyền thông giữa các môđun khác nhau, cơ sở dữ liệu quản trị thông tin và sự tương tác người - máy cần được thiết lập.

Dựa trên những chức năng này của hệ chuyên gia trực tuyến, một hệ thông minh có thể được xây dựng với khả năng "lập mô hình, lập luận và học quá trình cũng như các chức năng tự động hóa của nó trong một khuôn khổ định sẵn và khả năng tự điều khiển để hướng tới mục tiêu nhất định". Vì vậy, hệ cơ điện tử thông minh có thể được xây dựng từ "những hệ thông minh bậc thấp" [13] như cơ cấu chấp hành thông minh đến "những hệ tương đối thông minh" như phương tiện di động.

Một hệ cơ điện tử thông minh sẽ tự điều chỉnh bộ điều khiển cho hợp với ứng xử gần như phi tuyến và lưu giữ các thông số điều khiển của nó theo vị trí và tải (tự học), giám sát tất cả các thành phần liên quan và chẩn đoán lỗi (giám sát) để bảo dưỡng theo yêu cầu hoặc nếu có sự cố xảy ra thì yêu cầu hoạt động an toàn (các quyết định dựa trên các hoạt động). Trong trường hợp đa thành phần, việc giám sát có thể giúp loại bỏ những thành phần bị lỗi và thực hiện tái cấu hình quá trình được điều khiển.

2.5 Quy trình thiết kế đồng thời cho các hệ cơ điện tử

Việc thiết kế các hệ cơ điện tử đòi hỏi có sự phát triển mang tính hệ thống và sử dụng các công cụ thiết kế hiện đại.

Các bước thiết kế

Bảng 2.3 chỉ ra 5 bước phát triển quan trọng đối với các hệ cơ điện tử, bắt đầu từ một hệ cơ khí thuần tuý đến một hệ cơ điện tử tích hợp toàn diện. Phụ thuộc vào loại hình hệ thống cơ khí, mức độ của các bước phát triển đơn lẻ là khác nhau. Với các thiết bị cơ khí chính xác, người ta có thể cho ra đời một hệ cơ điện tử tương đối tích hợp. Ảnh hưởng của điện tử đến *các bộ phận cơ khí* có thể được như mong muốn, như bộ giảm chấn thích nghi, hệ thống phanh chống bó và các hộp số tự động. Tuy nhiên, để hoàn chỉnh các *máy* và *phương tiện di động*, trước hết phải chỉ ra các thiết kế cơ điện tử của các bộ phận cấu thành và sau đó từng bước tái thiết kế các phần trong cấu trúc tổng thể như có thể thấy khi phát triển các máy công cụ, rôbôt và các phương tiện di động.

BẢNG 2.3 Các bước thiết kế hệ cơ điện tử

TABLE 2.3

	Cơ khí chính xác	Các thành phần cơ khí	Máy
Hệ cơ khí đơn thuần	●	●	●
1. Thêm cảm biến, cơ cấu chấp hành, vi điện tử, các chức năng điều khiển	○	○	○
2. Tích hợp các thành phần (tích hợp phần cứng)	○	○	◔
3. Tích hợp bằng xử lý thông tin (tích hợp phần mềm)	○	○	◔
4. Thiết kế lại các hệ thống cơ khí	○	○	◔
5. Tạo ra các hiệu ứng hỗ trợ	○	◔	◔
Hệ thống cơ điện tử được tích hợp toàn diện	●	◔	◔
Ví dụ	Cảm biến Cơ cấu chấp hành Đĩa cứng Camera	Giảm xóc Giảm chấn Khớp ly hợp Phanh hãm	Truyền động điện Máy hơi đốt Rôbôt

Kích thước của hình tròn chỉ ra mật độ phát triển hiện tại của bước phát triển cơ điện tử tương ứng: ● lớn, ◔ trung bình, ○ nhỏ.

Các công cụ CAD/CAE cần thiết

Việc phát triển các hệ cơ điện tử có sự trợ giúp của máy tính bao gồm:

1. Mô tả cấu trúc trong giai đoạn phát triển kỹ thuật bằng cách dùng các công cụ CAD và CAE,
2. Xây dựng mô hình nhằm nhận được các mô hình tĩnh và động của quá trình,

3. Chuyển thành mã máy tính để mô phỏng hệ thống,
4. Lập trình và thực hiện phần mềm.

Một số công cụ phần mềm được mô tả trong [31]. Có một loạt các công cụ CAD/CAE dùng cho thiết kế cơ khí 2D và 3D, như Auto CAD với kết nối trực tiếp tới CAM (Computer-Aided Manufacturing) và PADS, dùng cho thiết kế bo mạch in đa lớp. Tuy nhiên, việc mô hình hóa có trợ giúp của máy tính là chưa hoàn hảo. Các ngôn ngữ hướng đối tượng như DYMOLA và MOBILE dùng cho việc mô hình hóa các hệ thống phức tạp được mô tả trong [31-33]. Những ngôn ngữ này dựa trên các phương trình vi phân thường, các phương trình đại số và các hàm rời rạc đặc trưng. Một mô tả gần đây về việc thiết kế hệ điều khiển với sự trợ giúp của máy tính có thể tìm thấy trong [34]. Để mô phỏng hệ thống (và thiết kế bộ điều khiển), có nhiều chương trình khác nhau như ACSL, SIMPACK, MATLAB/SIMULINK và MATRIX-X. Các kỹ thuật mô phỏng này là các công cụ hữu ích cho thiết kế, ví dụ như chúng cho phép nhà thiết kế nghiên cứu sự tương tác của các thành phần với những thay đổi của các thông số thiết kế trước khi đưa vào sản xuất. Nói chung, chúng không thích hợp cho mô phỏng thời gian thực.

Qui trình mô hình hóa

Các mô hình toán học của quá trình ứng xử tĩnh và động là yêu cầu cho các bước khác nhau khi thiết kế hệ cơ điện tử như mô phỏng, thiết kế điều khiển và khôi phục các biến. Hai cách để có được các mô hình này là *mô hình hóa theo lý thuyết* dựa trên những nguyên tắc (vật lý) cơ bản và *mô hình hóa theo thực nghiệm* (*nhận dạng*) với các biến số đầu vào và đầu ra đo được. Một vấn đề cơ bản trong mô hình lý thuyết của các hệ cơ điện tử là các thành phần bắt nguồn từ nhiều lĩnh vực khác nhau. Ở đó tồn tại một kiến thức riêng cho việc mô hình hóa các mạch điện, các hệ nhiều vật, hoặc các hệ thủy lực và các phần mềm tương ứng. Tuy nhiên, hiện vẫn chưa có được một phương pháp luận chung với sự trợ giúp của máy tính cho việc mô hình hóa và mô phỏng các thành phần của các lĩnh vực khác nhau [35].

Các nguyên tắc cơ bản của việc mô hình hóa theo lý thuyết cho hệ thống có dòng năng lượng đã được biết đến và có thể được thống nhất cho các thành phần của nhiều lĩnh vực khác nhau như điện, cơ khí và nhiệt (xem [36-41]). Phương pháp luận của việc mô hình hóa trở nên phức tạp hơn đối với dòng chất lỏng, nhiệt động lực và các quá trình hóa học.

Một qui trình chung cho mô hình lý thuyết của các quá trình tham số tập trung có thể được tóm tắt như sau:

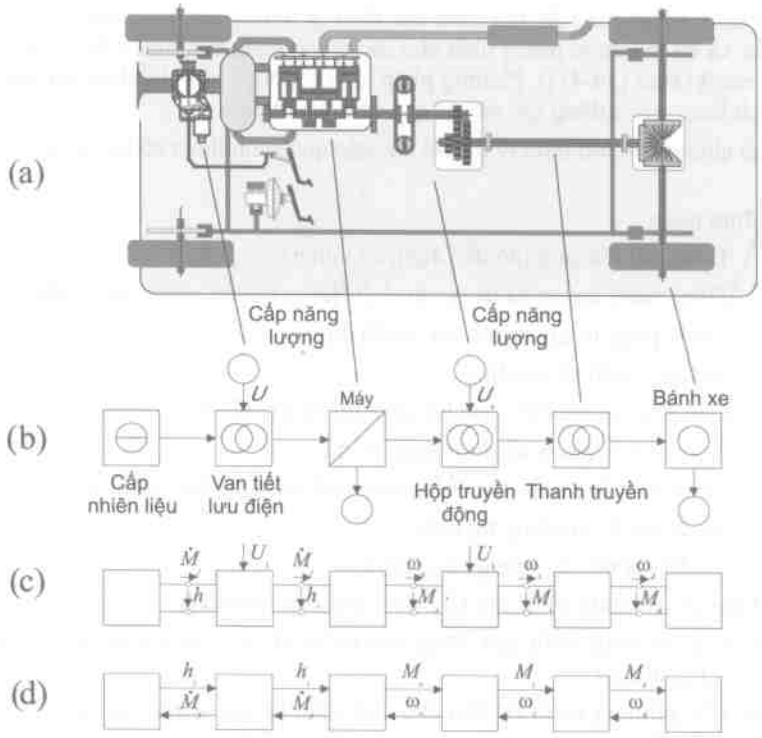
1. Xác định dòng
   - Dòng năng lượng (độ dẫn điện, cơ, nhiệt)
   - Dòng năng lượng và dòng vật chất (lỏng, truyền nhiệt, nhiệt động lực, hóa học)
2. Xác định các phần tử quá trình: các sơ đồ dòng
   - Nguồn, phần tử tiêu thụ .
   - Các phần tử tích lũy, các bộ biến đổi và các bộ chuyển đổi
3. Biểu diễn mô hình quá trình dưới dạng sơ đồ
   - Sơ đồ đa cổng (các đầu cuối, dòng, thế, hay các biến chéo và biến xuyên qua)
   - Sơ đồ khối cho dòng tín hiệu
   - Sơ đồ kết nối cho dòng năng lượng
4. Thiết lập các phương trình cho tất cả các phần tử quá trình
   (i) Các phương trình cân bằng cho phần tử tích lũy (khối lượng, năng lượng và động lượng)
   (ii) Các phương trình cơ bản cho các phần tử quá trình (nguồn, bộ chuyển đổi, bộ biến đổi)
   (iii) Các định luật của các hiện tượng trong các quá trình không thuận nghịch (các hệ tiêu hao: phần tử tiêu thụ)

5. Các phương trình liên kết cho các yếu tố quá trình
   - Phương trình liên tục cho các liên kết song song (định luật nút)
   - Phương trình tương thích cho liên kết chuỗi (định luật mạch kín)
6. Tính toán mô hình tổng thể của quá trình
   - Thiết lập các biến đầu ra và đầu vào
   - Mô tả không gian trạng thái
   - Mô hình đầu ra/đầu vào (các phương trình vi phân, các hàm truyền)

Một ví dụ với các bước 1 - 3 cho một ô tô điều khiển bằng điện được đưa ra trên hình 2.7. Một phương pháp thống nhất cho các quá trình có dòng năng lượng đã được áp dụng đối với quy trình điện, cơ khí và thủy lực có chất lỏng không thể nén được. Bảng 2.4 chỉ ra các biến chéo và biến xuyên qua tổng quát.

BẢNG 2.4 Các biến chéo và biến xuyên qua tổng quát cho các quá trình có dòng năng lượng

Hệ thống	Các biến chéo		Các biến xuyên qua	
Điện	Dòng điện	I	Điện thế	U
Từ	Dòng điện từ	F	Lực điện từ	Q
Cơ khí				
* Tịnh tiến	Lực	F	Vận tốc	w
* Quay	Mômen	M	Vận tốc góc	ω
Thủy lực	Dòng khối	$\dot{V}$	Áp suất	p
Nhiệt động	Dòng Entropi		Nhiệt độ	T



HÌNH 2.7 Các sơ đồ khác nhau của một ô tô: (a) Sơ đồ các thành phần (sơ đồ cấu trúc), (b) Sơ đồ dòng năng lượng (được đơn giản hóa), (c) Sơ đồ đa cổng với các dòng và thế, (d) Sơ đồ tín hiệu dòng cho các cổng

Trong những trường hợp này, giá trị của biến chéo và biến xuyên qua là năng lượng. Sự thống nhất này cho phép mô tả *mô hình sơ đồ kết nối* chuẩn [39]. Tương tự, đối với các quá trình thủy lực có chất lỏng nén được và quá trình nhiệt, những biến này được xác định cho việc tạo ra năng lượng, như thấy ở bảng 2.4. Tuy nhiên, trong thực tiễn kỹ thuật, người ta không sử dụng dòng khối lượng và dòng nhiệt. Nếu các biến này được sử dụng sẽ dẫn ra những sơ đồ kết nối giả với những định luật đặc biệt, bỏ qua tính đơn giản của các sơ đồ kết nối chuẩn. Sơ đồ kết nối dẫn tới sự trừu tượng hóa ở mức cao, ít tính linh hoạt và cần rất nhiều công sức nữa để tạo ra các thuật toán mô phỏng. Vì vậy, chúng không phải là công cụ lý tưởng cho các hệ cơ điện tử [35]. Tương tự, thiết lập *sơ đồ khối* với những định nghĩa trước về các khối đầu ra/đầu vào là không phù hợp.

Sự phát triển theo mô hình hướng đối tượng là cách mà ở đó các đối tượng với các thiết bị đầu cuối được định nghĩa không cùng quan hệ nhân quả của trạng thái cơ bản này. Sau đó, các sơ đồ đối tượng được mô tả một cách trực quan, cùng với việc giữ lại cách hiểu mang tính trực giác về thành phần vật lý cơ bản [43, 44]. Vì vậy, việc lập mô hình lý thuyết cho hệ cơ điện tử với một quy trình đồng nhất, rõ ràng và linh hoạt (từ các thành phần cơ bản thuộc các lĩnh vực khác nhau đến việc mô phỏng) là một thách thức cho sự phát triển xa hơn. Nhiều thành phần chỉ ra ứng xử phi tuyến và các tính chất phi tuyến (ma sát và khe hở). Đối với những phần phức tạp hơn của quá trình, các ánh xạ đa chiều (ví dụ như ứng xử của động cơ đốt trong, ứng xử của lốp xe) cần được tích hợp.

Để thẩm định mô hình lý thuyết, có thể sử dụng một số phương pháp nhận dạng nổi tiếng như phân tích tương quan và đo đáp ứng tần số, hoặc phân tích Fourier và phân tích phổ. Do có một số thông số chưa biết hoặc thay đổi theo thời gian, phương pháp đánh giá thông số có thể được áp dụng cho cả mô hình thời gian liên tục và mô hình với thời gian rời rạc (đặc biệt với các mô hình tuyến tính theo các thông số) [42, 45, 46]. Để nhận dạng và xấp xỉ các đại lượng phi tuyến, đa chiều, các mạng trí tuệ nhân tạo có thể được triển khai cho các quá trình động phi tuyến [47].

Mô phỏng thời gian thực

Mô phỏng thời gian thực được áp dụng ngày càng nhiều trong thiết kế hệ cơ điện tử. Điều này đặc biệt đúng nếu quá trình, phần cứng, phần mềm được phát triển đồng thời nhằm tối thiểu hóa các chu trình phát triển lặp cũng như rút ngắn khoảng thời gian đưa sản phẩm ra thị trường. Dựa trên tốc độ yêu cầu của *các phương pháp mô phỏng* tính toán, có thể chia nhỏ thành:

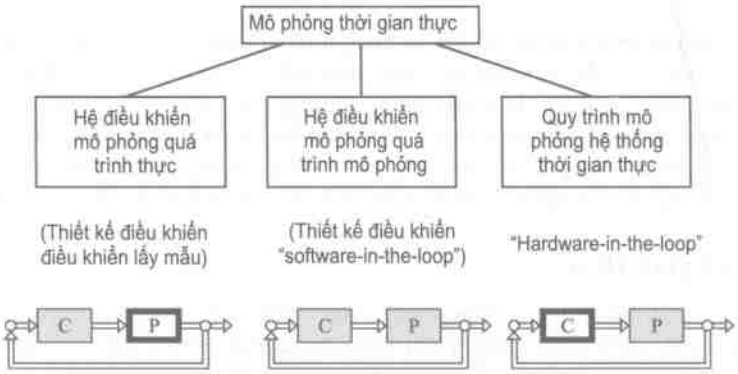
1. Mô phỏng không giới hạn thời gian (cứng),
2. Mô phỏng thời gian thực,
3. Mô phỏng nhanh hơn thời gian thực.

Một số ví dụ áp dụng có thể thấy trên hình 2.8. Ở đây, *mô phỏng thời gian thực* có nghĩa là việc mô phỏng một thành phần được thực hiện sao cho các tín hiệu đầu ra và đầu vào chỉ ra các giá trị phụ thuộc vào cùng thời gian như thành phần đang vận hành thực trong trạng thái động. Điều này sẽ trở thành vấn đề đối với các quá trình động nhanh hơn so với các thuật toán và tốc độ tính toán được yêu cầu.

Hình 2.9 thể hiện các loại phương pháp mô phỏng thời gian thực khác nhau. Lý do yêu cầu thời gian thực chủ yếu là do một phần của hệ thống được nghiên cứu không phải là mô phỏng mà là thực. Những trường hợp như vậy có thể được phân biệt như sau:

1. *Quá trình thực* được vận hành cùng với *điều khiển mô phỏng* thông qua việc sử dụng phần cứng khác thay vì phần cứng cuối cùng. Quá trình này còn được gọi là "tạo mẫu điều khiển".
2. *Quá trình mô phỏng* được vận hành kết hợp với *phần cứng điều khiển* thực hay còn gọi là "mô phỏng hardware-in-the-loop".
3. *Quy trình mô phỏng* được vận hành với *điều khiển mô phỏng* theo thời gian thực. Điều này có thể được yêu cầu nếu phần cứng cuối cùng là không có sẵn hoặc nếu bước thiết kế trước khi tiến hành mô phỏng hardware-in-the-loop được xem xét.

HÌNH 2.8 Phân loại của các phương pháp mô phỏng theo tốc độ và các ví dụ ứng dụng



HÌNH 2.9 Phân loại mô phỏng thời gian thực

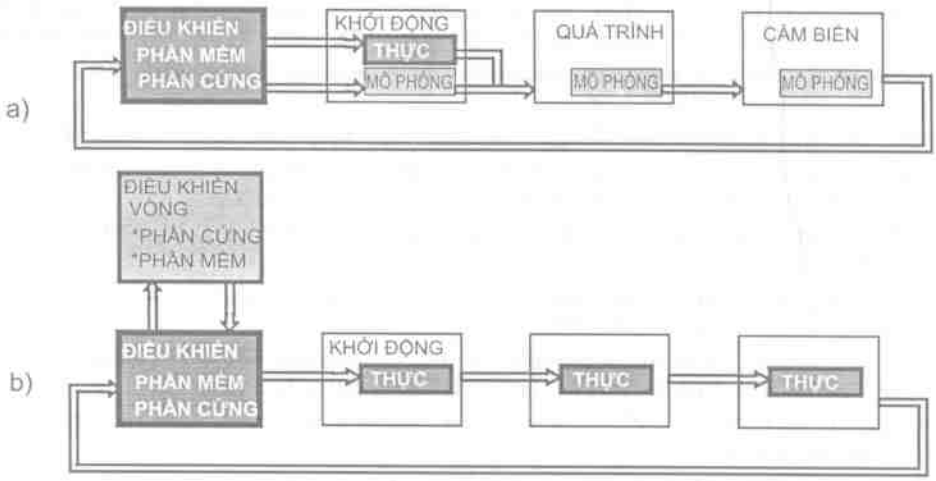
Mô phỏng Hardware-in-the-Loop

Mô phỏng *Hardware-in-the-loop* (HIL) được đặc trưng bởi việc vận hành các thành phần thực kết hợp với các thành phần mô phỏng theo thời gian thực. Thường thường, phần cứng và phần mềm của hệ điều khiển là hệ thống thực như được dùng trong dây chuyền sản xuất. Quá trình được điều khiển (bao gồm các cơ cấu chấp hành, các quá trình vật lý và các cảm biến) có thể bao gồm cả các thành phần được mô phỏng hoặc các thành phần thực, như thấy ở hình 2.10(a). Nói chung, thường kết hợp thực hiện các trường hợp nêu trên. Thông thường, một số cơ cấu chấp hành là thực, còn quá trình và các bộ cảm biến chỉ là mô phỏng. Lý do là cơ cấu chấp hành và phần cứng điều khiển thường là một hệ thống tích hợp con hoặc do cơ cấu chấp hành rất khó được mô hình hóa chính xác và mô phỏng trong khoảng thời gian thực. (Kết hợp sử dụng các cảm biến thực cùng với quá trình mô phỏng đòi hỏi phải cố gắng thực sự bởi đầu vào cảm biến vật lý không tồn tại mà phải được tạo ra một cách nhân tạo). Để thay đổi hoặc tái thiết kế một số chức năng của phần cứng hoặc phần mềm điều khiển, thiết bị phần dòng có thể được nối với phần cứng điều khiển cơ bản. Do vậy, các bộ mô phỏng hardware-in-the-loop cũng bao gồm các chức năng điều khiển được mô phỏng riêng.

Nói chung, những ưu điểm của mô phỏng hardware-in-the-loop là:

- Thiết kế và thử nghiệm phần cứng, phần mềm điều khiển mà không cần vận hành một quá trình thực nào ("đưa các quá trình vào phòng thí nghiệm");

- Thử nghiệm phần cứng và phần mềm điều khiển ở điều kiện môi trường tới hạn trong phòng thí nghiệm (ví dụ, nhiệt độ cao/thấp, gia tốc lớn và các va chạm cơ học, thiết bị kích thích, tính tương thích điện từ);
- Thử nghiệm các tác động của lỗi và tình trạng không mong đợi của cơ cấu chấp hành, cảm biến và máy tính trên toàn bộ hệ thống;
- Vận hành và thử nghiệm các điều kiện vận hành tới hạn và nguy hiểm;
- Các thử nghiệm tái sinh, có thể lặp lại thường xuyên;
- Vận hành dễ dàng với các giao diện người-máy khác nhau (bộ điều khiển cho buồng tập lái máy bay);
- Tiết kiệm chi phí và thời gian phát triển.



HÌNH 2.10 Mô phỏng thời gian thực: Cấu trúc lại. (a) Mô phỏng Hardware-in-the-loop; (b) Tạo mẫu điều khiển

Tạo mẫu điều khiển

Để thiết kế và thử nghiệm các hệ cơ điện tử phức tạp cũng như các thuật toán của chúng dưới sức ép thời gian thực, việc mô phỏng các bộ điều khiển theo thời gian thực kết hợp với phần cứng (ví dụ như các bộ xử lý tín hiệu có sẵn) thay vì với phần cứng thật (ví dụ như ASICS) có thể được thực hiện. Sau đó, quá trình, cơ cấu chấp hành và cảm biến có thể là thực. Đây được gọi là tạo mẫu điều khiển (hình 2.10(b)). Tuy nhiên, các thành phần của quá trình, hoặc cơ cấu chấp hành có thể được mô phỏng, dẫn đến sự kết hợp giữa mô phỏng HIL và việc tạo mẫu điều khiển. Ưu điểm của sự kết hợp này là:

- Những phát triển ban đầu của phương pháp xử lý tín hiệu, các mô hình quá trình và cấu trúc hệ điều khiển bao gồm các thuật toán có phần mềm cao cấp và phần cứng với tính năng cao sẵn có;
- Thử nghiệm quy trình xử lý tín hiệu và hệ điều khiển kết hợp với các thiết kế cơ cấu chấp hành, các thành phần của quá trình và cảm biến để tạo ra tác dụng hỗ trợ lẫn nhau;
- Giảm các mô hình và thuật toán nhằm giảm giá thành sản phẩm;
- Xác định các thông số kỹ thuật cho phần mềm và phần cứng cuối cùng.

Một số ưu điểm của mô phỏng HIL cũng có giá trị cho việc tạo mẫu điều khiển. Một số tham khảo về mô phỏng thời gian thực được đề cập trong [48, 49].

Tài liệu tham khảo

[1] Kyura, N. and Oho, H., Mechatronics - an industrial perspective. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(1):10-15.

[2] Schweitzer, G., Mechatronik-Aufgaben und Lösungen. VDI-Berichte Nr. 787. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.

[3] Ovaska, S. J., Electronics and information technology in high range elevator systems. *Mechatronics*, 2(1): 89-99, 1992.

[4] *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1996.

[5] Harashima, F., Tomizuka, M., and Fukuda, T., Mechatronics - "What is it, why and how?" An editorial. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(1):1-4, 1996.

[6] Schweitzer, G., Mechatronics - a concept with examples in active magnetic bearings. *Mechatronics*, 2(1): 65-74, 1992.

[7] Gausemeier, J., Brexel, D., Frank, Th., and Humpert, A., Integrated product development. In *Third Conf. Mechatronics and Robotics*, Paderborn, Germany, Okt. 4-6, 1995. Teubner, Stuttgart, 1995.

[8] Isermann, R., Modeling and design methodology for mechatronic systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(1):16-28, 1996.

[9] *Mechatronics: An International Journal*. Aims and Scope. Pergamon Press, Oxford, 1991.

[10] *Mechatronics Systems Engineering: International Journal on Design and Application of Integrated* Electromechanical Systems. Kluwer Academic Publishers, Nethol, 1993.

[11] IEE, Mechatronics: Designing intelligent machines. In Proc. IEE-Int. Conf. 12-13 Sep., Univ. of Cambridge, 1990.

[12] Hiller, M. (ed.), *Second Conf. Mechatronics and Robotics*. September 27-29, Duisburg/Moers, Germany, 1993. Moers, IMECH, 1993.

[13] Isermann, R. (ed.), Integrierte mechanisch elektroni-sche Systeme. March 2-3, Darmstadt, Germany, 1993. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 179. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.

[14] Lückel, J. (ed.), *Third Conf. Mechatronics and Robotics*, Paderborn, Germany, Oct. 4-6, 1995. Teubner, Stuttgart, 1995.

[15] Kaynak, O., Özkan, M., Bekiroglu, N., and Tunay, I. (eds.), Recent advances in mechatronics. In *Proc. Int. Conf. Recent Advances in Mechatronics*, August 14-16, 1995,

[16] Istanbul, Turkey. Kitaura, K., Industrial mechatronics. New East Business Ltd., in Japanese, 1991.

[17] Bradley, D. A., Dawson, D., Burd, D., and Loader, A. J., *Mechatronics-Electronics in Products and Processes*. Chapman and Hall, London, 1991.

[18] McConaill, P. A., Drews, P., and Robrock, K. H., *Mechatronics and Robotics I*. IOS-Press, Amsterdam, 1991.

[19] Isermann, R., *Mechatronische Systeme*. Springer, Berlin, 1999.

[20] Isermann, R., Lachmann, K. H., and Matko, D., *Adaptive Control Systems*, Prentice-Hall, London, 1992.

[21] Isermann, R., Supervision, fault detection and fault diagnosis methods - advanced methods and applications. In *Proc. XIV IMEKO World Congress*, Vol. 1, pp. 1-28, Tampere, Finland, 1997.

[22] Isermann, R., Supervision, fault detection and fault diagnosis methods - an introduction, special section on supervision, fault detection and diagnosis. *Control Engineering Practice*, 5(5):639-652, 1997.

[23] Isermann, R. (ed.), Special section on supervision, fault detection and diagnosis. *Control Engineering Practice*, 5(5):1997. ©2002 CRC Press LLC

[24] Saridis, G. N., *Self Organizing Control of Stochastic Systems*. Marcel Dekker, New York, 1977.

[25] Saridis, G. N. and Valavanis, K. P., Analytical design of intelligent machines. *Automatica*, 24:123-133, 1988.

[26] Åström, K. J., Intelligent control. In *Proc. European Control Conf.*, Grenoble, 1991.

[27] White, D. A. and Sofge, D. A. (eds.), *Handbook of Intelligent Control*. Van Norstrad, Reinhold, New York, 1992.

[28] Antaklis, P., Defining intelligent control. *IEEE Control Systems*, Vol. June: 4-66, 1994.

[29] Gupta, M. M. and Sinha, N. K., *Intelligent Control Systems. IEEE-Press*, New York, 1996.

[30] Harris, C. J. (ed.), *Advances in Intelligent Control*. Taylor & Francis, London, 1994.

[31] Otter, M. and Gruebel, G., Direct physical modeling and automatic code generation for mechatronics simulation. In *Proc. 2nd Conf. Mechatronics and Robotics*, Duisburg, Sep. 27–29, IMECH, Moers, 1993.

[32] Elmquist, H., Object-oriented modeling and automatic formula manipulation in Dymola, Scandin. Simul. Society SIMS, June, Kongsberg, 1993.

[33] Hiller, M., Modelling, simulation and control design for large and heavy manipulators. In *Proc. Int. Conf. Recent Advances in Mechatronics*. 1:78-85, Istanbul, Turkey, 1995.

[34] James, J., Cellier, F., Pang, G., Gray, J., and Mattson, S. E., The state of computer-aided control system design (CACSD). *IEEE Transactions on Control Systems*, Special Issue, April 6-7 (1995).

[35] Otter, M. and Elmqvist, H., Energy flow modeling of mechatronic systems via object diagrams. In Proc. 2nd MATHMOD, Vienna, 705-710, 1997.

[36] Paynter, H. M., *Analysis and Design of Engineering Systems*. MIT Press, Cambridge, 1961.

[37] MacFarlane, A. G. J., *Engineering Systems Analysis*. G. G. Harrop, Cambridge, 1964.

[38] Wellstead, P. E., *Introduction to Physical System Modelling*. Academic Press, London, 1979.

[39] Karnopp, D. C., Margolis, D. L., and Rosenberg, R. C., *System Dynamics*. A Unified Approach. J. Wiley, New York, 1990.

[40] Cellier, F. E., *Continuous System Modelling*. Springer, Berlin, 1991.Gawtrop, F. E. and Smith, L., *Metamodelling: Bond Graphs and Dynamic Systems*. Prentice-Hall, London, 1996.

[41] *Eykhoff, P., System* Identification. John Wiley & Sons, London, 1974.

[42] Elmqvist, H., *A structured model language for large continuous systems*. Ph.D. Dissertation, Report CODEN: LUTFD2/(TFRT-1015) Dept. of Aut. Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 1978.

[43] Elmqvist, H. and Mattson, S. E., *Simulator for dynamical systems using graphics and equations for modeling*. IEEE Control Systems Magazine, 9(1):53-58, 1989.

[44] *Isermann, R., Identifikation* dynamischer Systeme. 2nd Ed., Vol. 1 and 2. Springer, Berlin, 1992.

[45] Ljung, L., *System Identification: Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.

[46] Isermann, R., Ernst, S., and Nelles, O., Identification with dynamic neural networks - architectures, comparisons, applications - Plenary. In Proc. IFAC Symp. System Identification (SYSID'97), Vol. 3, pp. 997-1022, Fukuoka, Japan, 1997.

[47] Hanselmann, H., Hardware-in-the-loop simulation as a standard approach for development, customization, and production test, SAE 930207, 1993.

[48] Isermann, R., Schaffnit, J., and Sinsel, S., Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine control systems. Control Engineering Practice, 7(7):643-653, 1999.

3

Giao diện, thiết bị đo và hệ thống điều khiển

3.1 Mở đầu 3-1
3.2 Các tín hiệu đầu vào của hệ cơ điện tử 3-3
3.3 Các tín hiệu đầu ra của hệ cơ điện tử 3-5
3.4 Xử lý tín hiệu 3-6
3.5 Điều khiển dùng vi xử lý 3-8
3.6 Điều khiển số dùng vi xử lý 3-9
3.7 Điều khiển vào-ra của bộ vi xử lý 3-10
3.8 Điều khiển bằng phần mềm 3-11
3.9 Thiết bị đo và kiểm thử 3-13
3.10 Kết luận 3-14

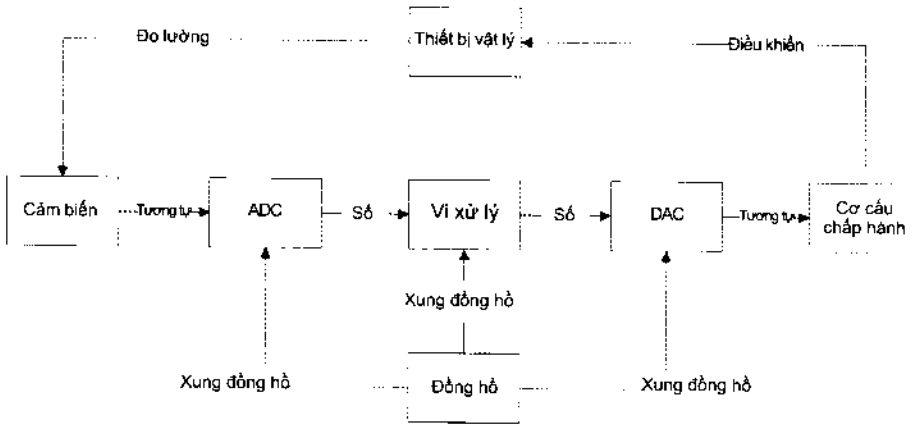
Rick Homkes
Purdue University

3.1 Mở đầu

Mục đích của chương này là nhằm giới thiệu một số vấn đề liên quan đến một hệ cơ điện tử. Đầu tiên là giới thiệu tổng quan về các hệ cơ điện tử và các tín hiệu đầu vào và đầu ra của một hệ cơ điện tử. Tiếp theo sẽ giới thiệu về các đặc trưng đầu vào và ra của bộ vi xử lý. Phần mềm, thường ít được chú ý tới trong hệ cơ điện tử, sẽ được trình bày ngắn gọn bằng việc nhấn mạnh các khái niệm của kỹ thuật phần mềm. Chương này kết thúc với một trình bày về thiết bị đo và kiểm thử.

Hệ cơ điện tử

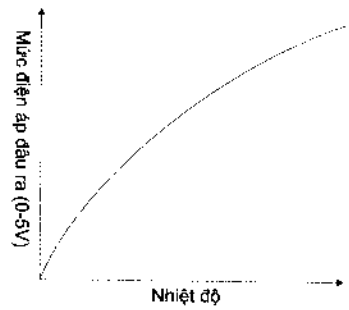
Hình 3.1 chỉ ra một hệ cơ điện tử điển hình với các thành phần cơ khí, điện và máy tính. Quá trình thu thập dữ liệu bắt đầu với việc đo một đại lượng vật lý bằng một cảm biến. Cảm biến có khả năng tạo ra một số dạng tín hiệu, thường là một tín hiệu tương tự dưới dạng mức điện áp hoặc dạng sóng. Tín hiệu tương tự này được truyền đến bộ biến đổi tương tự - số (ADC). Thông thường, bằng việc sử dụng xấp xỉ liên tiếp, ADC sẽ chuyển đổi tín hiệu vào tương tự sang tín hiệu ra số. Giá trị số này bao gồm một tập các giá trị nhị phân gọi là bit (thường được biểu diễn bằng các số 0 và 1). Bộ vi điều khiển có thể sử dụng tập các bit biểu diễn số thập phân hoặc cơ số 16. Bộ vi điều khiển bao gồm một bộ vi xử lý cùng với bộ nhớ và các thiết bị phụ trợ khác. Chương trình trong bộ vi xử lý sử dụng giá trị số này cùng với các đầu vào khác và giá trị được đặt trước được gọi là giá trị chuẩn để xác định các lệnh đầu ra. Giống như đầu vào của bộ vi xử lý, những đầu ra này có dạng số và có thể được biểu diễn bằng một tập các bit. Sau đó, bộ biến đổi số - tương tự (DAC) thường được sử dụng để chuyển đổi giá trị số thành một tín hiệu tương tự. Tín hiệu tương tự dùng cho một cơ cấu chấp hành để điều khiển một thiết bị vật lý hoặc tác động lên môi trường vật lý. Sau đó, bộ cảm biến sẽ thực hiện các phép đo mới và quy trình được lặp lại, như vậy một vòng lặp điều khiển phản hồi được hoàn thành. Toàn bộ quá trình hoạt động này được đồng bộ hóa bằng xung đồng hồ.



HÌNH 3.1 Hệ thống điều khiển dựa trên vi xử lý

Ví dụ về thiết bị dân dụng/văn phòng

Một ví dụ về hệ cơ điện tử là hệ thống sưởi ấm hoặc làm lạnh thông thường ở các gia đình hoặc công sở. Những hệ thống đơn giản sử dụng một bộ điều chỉnh nhiệt lưỡng kim với các tiếp điểm điều khiển một chuyển mạch thủy ngân dùng để bật, tắt lò sưởi hoặc máy điều hòa. Hệ thống điều hòa hiện đại cũng sử dụng những thành phần cơ bản này cùng với các thành phần khác và điều khiển bằng chương trình máy tính. Bộ cảm biến nhiệt độ sẽ theo dõi môi trường vật lý và đưa ra mức điện áp như thể hiện ở hình 3.2 (chung trên thực tế nó không chỉ là một thiết bị đơn giản như vậy). Sau khi ADC thực hiện bước biến đổi, bộ vi điều khiển dùng các dữ liệu nhiệt độ được số hóa cùng với một bộ tạo xung đồng hồ 24 giờ và mức nhiệt độ người sử dụng yêu cầu để phát ra các tín hiệu điều khiển số. Tín hiệu này sẽ điều khiển cơ cấu chấp hành, thường là một chuyển mạch đơn giản như trong ví dụ này. Tiếp theo, chuyển mạch sẽ điều khiển động cơ để bật tắt thiết bị sưởi ấm hoặc làm lạnh, thực hiện các phép đo mới và chu trình được lặp lại. Mặc dù không phải là một sản phẩm cơ điện tử tầm cỡ như một máy ghi hình, nhưng nó là một hệ cơ điện tử bởi nó có sự kết hợp giữa các thành phần cơ khí, điện và máy tính. Hệ thống này cũng có thể kết hợp thêm một số đặc tính. Nếu nhiệt độ đo được rất cao, ví dụ 80°C, thì hỏa hoạn rất có thể xảy ra. Vì vậy thay vì bật quạt (làm tăng lượng ôxy), hệ thống cần đặt chuông báo động hoặc sử dụng thiết bị truyền dữ liệu để cảnh báo hỏa hoạn. Nhờ có điều khiển bằng máy tính này mà hệ thống được coi là "thông minh", ít nhất là so với những hệ thống được điều khiển dựa trên bộ ngắt mạch bằng thủy ngân kiểu cũ.



HÌNH 3.2 Mức điện áp

Ví dụ về ô tô

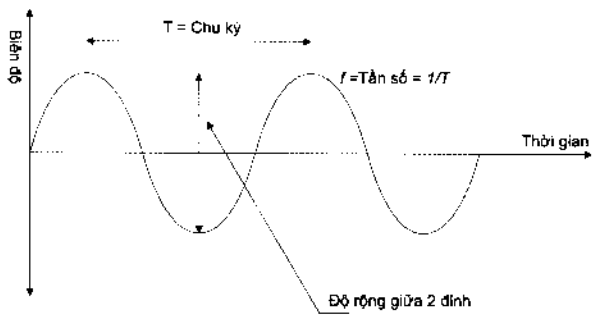
Ví dụ thứ hai là hệ thống phanh chống bó (ABS) ở nhiều phương tiện di động. Mục đích của loại hệ thống này là nhằm ngăn chặn việc bó cứng một bánh xe và như vậy sẽ tránh cho lái xe mất khả năng điều khiển hướng lái do bị trượt. Trong trường hợp này, các cảm biến được gắn với mỗi bánh xe để xác định vận tốc góc của các bánh. Các dữ liệu này, có thể là dạng sóng hoặc điện áp biến đổi theo thời gian, được truyền tới bộ vi điều khiển cùng với dữ liệu từ các cảm biến báo cáo về các đầu vào như vị trí phanh bàn đạp, tốc độ xe và độ lệch hướng. Sau quá trình biến đổi của ADC hoặc chương trình lưu giữ đầu vào thành một giá trị số, chương trình của bộ vi xử lý sẽ xác định hành động cần thiết. Đây chính là điểm khiến cho hướng phát triển giao diện người - máy tính HCI (Human Computer Interface) hoặc giao diện người - máy HMI (Human Machine Interface) trở thành hiện thực bằng việc tính đến "cảm nhận" của hệ thống đối với người sử dụng. Việc hiệu chuẩn hệ thống có thể điều chỉnh những phản ứng của người lái trong khi cho xe dừng lại bằng cách điều khiển phanh thông qua cơ cấu chấp hành. Có hai điều quan trọng cần lưu ý trong ví dụ này. Thứ nhất, cuối cùng xe cũng sẽ bị dừng lại do thủy lực tác động lên má phanh để giữ trống tang và rôto - một chức năng hoàn toàn cơ học. Thứ hai, mặc dù ABS là một "sản phẩm thông minh" nhưng không phải là một thiết bị độc lập. Nó là một phần của hệ thống lớn hơn với nhiều bộ vi điều khiển hoạt động cùng nhau thông qua mạng dữ liệu.

3.2 Các tín hiệu đầu vào của hệ cơ điện tử

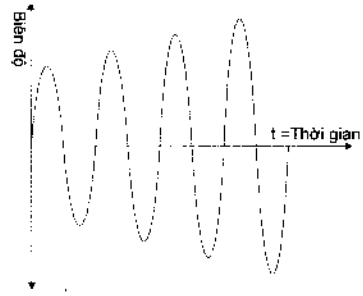
Đầu vào bộ chuyển đổi/cảm biến

Tất cả các đầu vào của hệ cơ điện tử đều bắt nguồn từ một vài dạng cảm biến hoặc từ các hệ thống khác. Các cảm biến đã được giới thiệu ở phần trước và sẽ được trình bày chi tiết hơn ở chương 19. Bộ chuyển đổi là những thiết bị biến đổi năng lượng từ dạng này sang dạng khác, thường được đồng nhất với các cảm biến. Các bộ chuyển đổi và các tính chất của chúng sẽ được mô tả đầy đủ ở chương 45. Cảm biến có thể được phân thành hai nhóm tổng quát: chủ động và thụ động. Cảm biến chủ động phát ra tín hiệu để ước tính thuộc tính của môi trường và thiết bị được đo, còn cảm biến thụ động thì không. Một ví dụ về vũ khí trong quân sự cho thấy sự khác biệt này là máy bay chiến đấu "vẽ" mục tiêu hoặc bằng rađa laze chủ động (LADAR) hoặc bằng cảm biến hồng ngoại FLIR (Passive Forward Looking InfRared).

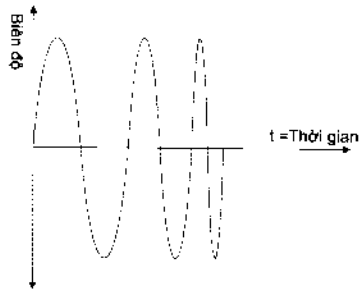
Như đã nêu ở phần giới thiệu, đầu vào của bộ cảm biến thường là một tín hiệu tương tự. Dạng đơn giản nhất của tín hiệu tương tự là mức điện áp (không nhất thiết tuyến tính) có mối liên hệ trực tiếp với điều kiện đầu vào. Dạng thứ hai là tín hiệu điều chế độ rộng xung PWM (Pulse Width Modulation), sẽ được giải thích cụ thể hơn ở phần sau của chương này khi bàn về đầu ra của bộ vi điều khiển. Dạng thứ ba là sóng như thấy ở hình 3.3. Dạng tín hiệu này được điều chế về mặt biên độ (hình 3.4) hoặc tần số (hình 3.5) hoặc trong một số trường hợp cả biên độ lẫn tần số. Những thay đổi này phản ánh sự biến đổi của trạng thái được theo dõi.



HÌNH 3.3 Sóng hình sin

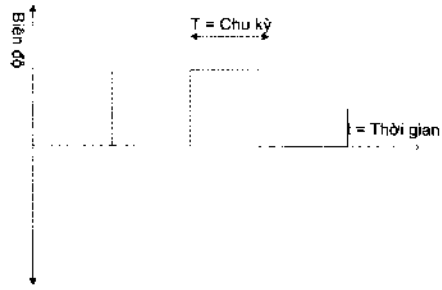


HÌNH 3.4 Điều chế biên độ



HÌNH 3.5 Điều chế tần số

Có những cảm biến không phát ra tín hiệu tương tự. Một số cảm biến thuộc loại này phát ra sóng hình vuông như thấy ở hình 3.6. Loại sóng này được đưa vào bộ vi điều khiển thông qua tiêu chuẩn truyền thông EIA 232. Sóng hình vuông thể hiện giá trị nhị phân của 0 và 1. Trong trường hợp này, ADC có lẽ được gắn liền bộ cảm biến, làm tăng giá trị cho bộ cảm biến. Một số bộ cảm biến/máy ghi âm thậm chí có thể tạo luôn ra thư điện tử hoặc gói TCP/IP. Ví dụ về loại thiết bị này là MobileCorder MV của tập đoàn Yokogawa của Mỹ.



HÌNH 3.6 Sóng vuông

Bộ biến đổi tương tự - số

Các bộ biến đổi tương tự - số ADC (Analog-to-Digital Converter) cơ bản có thể được phân loại theo hai thông số: dải tín hiệu đầu vào tương tự và dải tín hiệu đầu ra số. Chẳng hạn, xét ADC biến đổi mức điện áp trong khoảng từ 0 - 12 V thành một byte đơn 8 bit. Trong ví dụ này, mỗi số gia nhị phân phản ánh một lượng tăng điện áp tương tự bằng 1/256 của điện áp lớn nhất là 12 V. Tuy nhiên, có một sự chênh bất thường trong biến đổi này. Do giá trị 0 tương ứng với 0 V, giá trị 128

tương ứng với một nửa giá trị lớn nhất, trong ví dụ này là 6 V, nên giá trị thập phân lớn nhất 255 chỉ tương ứng với 255/256 giá trị điện áp tối đa hoặc 11.953125 V. Xem bảng các giá trị tương ứng dưới đây:

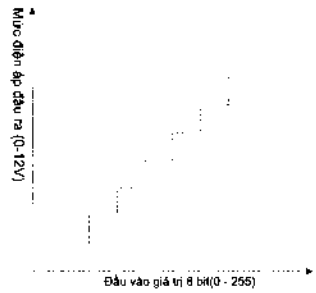
Nhị phân	Thập phân	Điện áp
0000 0000	0	0.0
0000 0001	1	0.00390625
1000 0000	128	6.0
1111 1111	255	11.953125

ADC được dùng trong bộ vi điều khiển Motorola HC12 với 10 bit. Mặc dù không hoàn toàn tương thích với một byte dữ liệu, nhưng ADC 10 bit này đã góp phần làm tăng độ phân giải. Với đầu vào từ 0 đến 5 V, độ phân giải thập phân trên mỗi bit với trọng số thấp nhất là 4.88 mV. Nếu ADC có đầu vào 8 bit, thì độ phân giải trên mỗi bit này là 19.5 mV, gấp tới bốn lần. Điện áp lớn hơn, chẳng hạn từ 0 đến 12 V, có thể được cân chỉnh bằng một bộ chia điện áp sao cho phù hợp với dải từ 0 đến 5 V. Điện áp nhỏ hơn có thể được khuếch đại sao cho phù hợp với toàn bộ biên độ. Một quy trình được gọi là xấp xỉ liên tiếp (sử dụng bộ ghi xấp xỉ liên tiếp SAR (Succesive Approximation Register) trong con chíp Motorola) được dùng để xác định giá trị số chính xác.

3.3 Các tín hiệu đầu ra của hệ cơ điện tử

Bộ biến đổi số - tương tự

Lệnh đầu ra của bộ vi điều khiển là một giá trị nhị phân dưới dạng bit, byte (8 bit) hoặc từ (16 bit). Tín hiệu số được biến đổi thành tín hiệu tương tự bằng cách dùng bộ biến đổi số - tương tự DAC (Digital-to-Analog Converter). Chúng ta hãy xem xét việc biến đổi một giá trị 8 bit thành mức điện áp trong khoảng từ 0 đến 12 V. Bit có trọng số cao nhất của giá trị nhị phân được biến đổi (số thập phân 128) sẽ tạo ra giá trị tương tự bằng một nửa giá trị đầu vào lớn nhất là 6 V. Số tiếp theo sinh ra thêm 1/4, tương đương với 3 V, kế đó là thêm 1/8... Tổng tất cả các giá trị đầu ra đã được cân chỉnh này tương ứng với điện áp tương tự thích hợp. Như đã nêu ở phần trước, giá trị điện áp tối đa của dải là không thể đạt được bởi vì giá trị lớn nhất được sinh ra là 255/256 của 12V tương đương với 11.953125 V. Độ mịn của tín hiệu phụ thuộc vào số lượng bit DAC chấp nhận và dải đầu ra yêu cầu. Hình 3.7 minh họa hàm bậc thang đã được đơn giản hóa bằng cách dùng đầu vào nhị phân một byte và đầu ra tương tự 12 V.



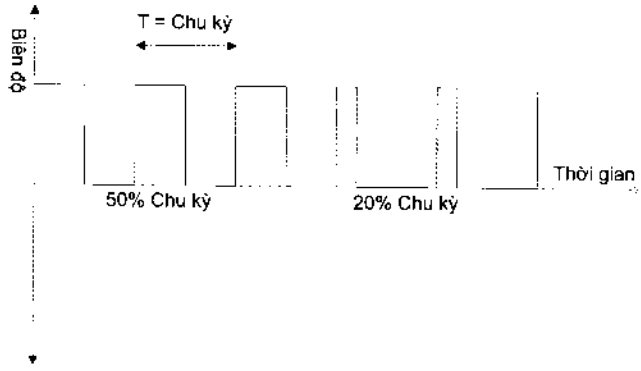
HÌNH 3.7 Đầu ra bước của DAC

Đầu ra cơ cấu chấp hành

Giống như bộ cảm biến, cơ cấu chấp hành đã được giới thiệu ở phần trước và sẽ được mô tả chi tiết trong chương tiếp theo của cuốn sách này. Ba cơ cấu chấp hành thông thường được xem xét ở phần này là chuyển mạch, solenoid và động cơ. Chuyển mạch là thiết bị trạng thái đơn giản

để điều khiển một hoạt động nào đó như bật, tắt lò sưởi. Các loại chuyển mạch bao gồm các rơle và các thiết bị liền khối như điôt, thyristor, tranzito lưỡng cực, tranzito trường (FET và MOSFET). Chuyển mạch có thể được kết hợp với cảm biến, giúp bật, tắt toàn bộ hoặc một chức năng của cảm biến.

Solenoid là thiết bị bao gồm lõi sắt chuyển động được. Lõi sắt này được kích hoạt bởi một dòng điện. Sự chuyển động của nó giúp điều khiển dòng thủy lực hoặc khí nén. Thiết bị này được ứng dụng rất nhiều trong các hệ thống phanh và trong công nghiệp chất lỏng. Chương sau sẽ giới thiệu cụ thể hơn về cơ cấu chấp hành loại solenoid. Động cơ là loại cơ cấu chấp hành cuối cùng sẽ được giới thiệu ở phần này. Cơ cấu chấp hành này có ba loại chính: động cơ điện một chiều (DC) xoay chiều (AC) và động cơ bước. Động cơ DC có thể được điều khiển bởi điện áp DC cố định hoặc bởi tín hiệu điều chế độ rộng xung. Trong tín hiệu điều chế độ rộng xung như thấy ở hình 3.8, điện áp lần lượt được bật, tắt khi thay đổi độ rộng của tín hiệu bật hoặc độ rộng xung. Nhìn chung động cơ AC rẻ hơn động cơ DC nhưng đòi hỏi điều khiển tần số để điều khiển tốc độ quay. Động cơ bước quay một góc nhất định ứng với mỗi xung đầu vào.



HÌNH 3.8 Điều biến độ rộng xung

3.4 Xử lý tín hiệu

Xử lý tín hiệu là việc thay đổi một tín hiệu để nó có ích hơn đối với một hệ thống. Tất nhiên, hai dạng sửa đổi tín hiệu quan trọng là sự biến đổi giữa tín hiệu tương tự và số, như mô tả ở hai phần trước. Các dạng sửa đổi tín hiệu khác được nêu ngắn gọn dưới đây và sẽ được giới thiệu cụ thể hơn ở các chương 46 và 47.

Tốc độ lấy mẫu

Tốc độ lấy mẫu dữ liệu là tốc độ mà hệ cơ điện tử có thể phát hiện ra sự thay đổi trạng thái. Tuy nhiên, có một vài vấn đề cần lưu ý. Ví dụ như đáp ứng của bộ cảm biến có thể bị hạn chế về mặt thời gian hoặc dải đo. Ngoài ra cũng phải có thời gian cần thiết để chuyển đổi tín hiệu thành dạng mà bộ vi xử lý có thể dùng được, gọi là thời gian chuyển đổi từ A sang D. Một vấn đề đáng lưu ý nữa là tần số của tín hiệu được lấy mẫu. Đối với việc số hóa tiếng nói, tốc độ lấy mẫu thường dùng là 8000 mẫu/giây. Đây là kết quả của định lý Nyquist. Định lý này cho rằng muốn chính xác thì tốc độ lấy mẫu ít nhất phải gấp hai lần tần số lớn nhất được đo. Vì vậy, tốc độ 8000 mẫu/giây sẽ là tốt nhất để biến đổi giọng nói người trên hệ thống điện thoại tương tự có tần số cao nhất xấp xỉ 3400 Hz. Một điều cuối cùng nữa là tốc độ xung đồng hồ của bộ vi xử lý cũng phải được cân nhắc đến. Nếu ADC và DAC cùng nằm trên một bo mạch như bộ vi xử lý thì chúng thường dùng chung một bộ phát xung đồng hồ. Tuy nhiên, đồng hồ của bộ vi xử lý có thể lại quá nhanh đối với ADC và DAC. Trong trường hợp này, bộ cân chỉnh được dùng để chia tần số đồng hồ thành mức có thể sử dụng được cho ADC và DAC.

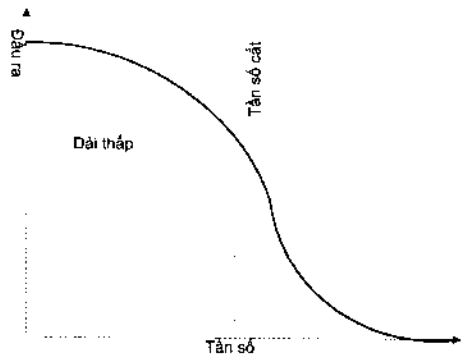
Lọc

Lọc là làm suy giảm (giảm bớt) tần số nào đó của tín hiệu. Quá trình này có thể loại bỏ nhiễu khỏi tín hiệu và xử lý đường truyền để giúp chuyển tải dữ liệu tốt hơn. Bộ lọc có thể được phân chia thành bộ lọc tương tự và số. Bộ lọc tương tự lại được chia nhỏ thành dạng chủ động và dạng thụ động. Trong khi bộ lọc tương tự thụ động sử dụng điện trở, tụ điện và điện cảm thì bộ lọc tương tự chủ động dùng bộ khuếch đại thuật toán với phần điện cảm và tụ điện. Bộ lọc số có thể được thực hiện bằng phần cứng và/hoặc phần mềm. Phần mềm sẽ tạo cho các bộ lọc số có tính năng dễ dàng thay đổi hơn. Chương 29 sẽ giải thích đầy đủ hơn về bộ lọc số.

Các bộ lọc cũng có thể được phân biệt dựa trên các loại tần số bị ảnh hưởng:

1. Bộ lọc thông thấp cho phép tập hợp các tần số thấp hơn đi qua, còn những tần số cao sẽ bị làm suy giảm. Xem ví dụ đơn giản về bộ lọc này ở hình 3.9.
2. Ngược lại với bộ lọc thông thấp là bộ lọc thông cao lọc dải tần số thấp hơn, trong khi cho phép tần số cao hơn đi qua.
3. Bộ lọc thông dải cho phép một dải tần số nhất định đi qua, còn tất cả những dải khác sẽ bị làm suy giảm.
4. Bộ lọc ngăn dải chỉ chặn một dải tần số nhất định, trong khi vẫn cho phép tất cả các dải tần số khác đi qua.

Bộ lọc có rất nhiều loại và được ứng dụng trong nhiều trường hợp khác nhau. Ví dụ trong cuốn *Understanding Automotive Electronics* (Newnes 1998), William Ribbens đã mô tả bộ lọc thông thấp dùng phần mềm (đôi khi còn gọi là bộ lọc trễ) để lấy trung bình 60 mẫu mức dầu cuối cùng trong thùng trong khoảng 1 giây. Các dữ liệu được lọc sau đó được hiển thị trên đồng hồ đo trên xe. Dạng lọc này làm giảm những dao động lớn và nhanh trong đồng hồ đo lượng nhiên liệu do sự dập dềnh của bề mặt nhiên liệu và vì vậy sẽ cho giá trị chính xác hơn.



HÌNH 3.9 Bộ lọc thông thấp

Bo mạch thu thập dữ liệu

Có một kiểu bo mạch đặc biệt cắm vào máy tính cá nhân để bàn có thể sử dụng cho nhiều nhiệm vụ kể trên. Nó được gọi là bo mạch thu thập dữ liệu DAQ (Data Acquisition Board). Kiểu bo mạch này có thể tạo ra các tín hiệu đầu vào tương tự và đa thành phần đa đầu vào trên một bus đơn để truyền đến máy tính. Nó cũng có thể được dùng kèm với phần cứng/phần mềm xử lý tín hiệu và ADC. Một số thiết bị có thể truy cập trực tiếp bộ nhớ DMA (Direct Memory Access), cho phép thiết bị ghi dữ liệu trực tiếp vào bộ nhớ máy tính mà không cần dùng đến bộ vi xử lý. Trong khi máy tính cá nhân để bàn không được coi là một bộ phận của hệ cơ điện tử thì bo mạch DAQ lại rất hữu ích cho việc đo đạc.

3.5 Điều khiển dùng vi xử lý

Điều khiển PID

Hệ thống điều khiển vòng kín là hệ thống sẽ xác định sai khác giữa trạng thái mong muốn và trạng thái thực (sai lệch) và tạo ra lệnh điều khiển để loại bỏ sai lệch. Điều khiển PID thực hiện ba cách phát hiện và hiệu chỉnh sai lệch này. Cách thứ nhất là P (Proprotional - tỷ lệ) trong PID. Thuật ngữ này cho biết hoạt động điều khiển của bộ vi điều khiển tỷ lệ với sai lệch. Nói cách khác, sai lệch càng lớn thì sự hiệu chỉnh sai số càng cao. Cách thứ hai là I (Integral - tích phân) trong PID, để tích phân lỗi theo thời gian, có nghĩa là hiệu chỉnh sai lệch có tính đến thời gian xảy ra sai lệch. Nói cách khác, sai lệch xảy ra trong thời gian càng dài thì sự hiệu chỉnh lỗi càng cao. Cuối cùng là D (Derivative - đạo hàm) trong PID, có nghĩa là việc hiệu chỉnh sai lệch có liên quan đến đạo hàm hoặc thay đổi sai lệch đối với thời gian. Nói cách khác, sai lệch thay đổi càng nhanh thì hiệu chỉnh sai lệch càng lớn. Hệ thống điều khiển có thể sử dụng P, PI, PD hoặc PID để hiệu chỉnh sai lệch. Nhìn chung, vấn đề ở đây là "hiệu chỉnh" hệ thống bằng cách lựa chọn những giá trị thích hợp trong ba cách nêu trên. Xem chương 31 để biết thêm thông tin về thiết kế bộ điều khiển.

Bộ điều khiển lôgic khả trình

Bất kỳ một bàn luận nào về các hệ thống điều khiển và điều khiển dùng vi xử lý cũng đều bắt đầu từ dạng điều khiển "cơ điện tử" đầu tiên là bộ điều khiển lôgic khả trình (PLC – Programmable Logic Controllers). PLC là một bộ điều khiển đơn giản nhưng linh hoạt hơn, được thiết kế dùng trong các môi trường như nhà máy, xí nghiệp. Đầu vào thường từ các chuyển mạch như các nút ấn được điều khiển bởi người vận hành máy hoặc các bộ cảm biến vị trí. Các bộ định thời cũng có thể được lập trình trong PLC để vận hành một quy trình nhất định trong các khoảng thời gian định trước. Các đầu ra bao gồm đèn, van solenoit và động cơ với các giao diện vào-ra được thực hiện bên trong bộ điều khiển. Một ngôn ngữ lập trình đơn giản được sử dụng với PLC được gọi là lôgic hình thang hoặc ngôn ngữ lập trình hình thang. Lôgic hình thang là ngôn ngữ trực quan cho biết lôgic là sự liên kết các khối nối tiếp (AND) và song song (OR). Để biết thêm thông tin xem chương 43 và cuốn sách *Programmable Logic Controllers* của W. Bolton (Newnes 1996).

Bộ vi xử lý

Giải thích đầy đủ về bộ vi xử lý có thể tìm thấy ở mục 5.8. Ở mục này, chúng ta chỉ giới thiệu một chút về các bộ phận cấu thành trong cấu trúc máy tính. Bộ nhớ truy cập ngẫu nhiên RAM (Random Access Memory) là tập hợp các đơn vị bộ nhớ mà máy tính sử dụng để lưu dữ liệu tạm thời một cách tức thì. Các kênh phát thanh định sẵn do lái xe (hoặc hành khách) lựa chọn trong radiô của xe ô tô được lưu ở RAM. Một dòng điện nhỏ duy trì những tần số phát sóng được lưu lại này, nên nếu radiô hết pin thì các dữ liệu sẽ bị mất. Bộ nhớ chỉ đọc ROM (Read Only Memory) là bộ nhớ tĩnh chứa chương trình để chạy bộ vi điều khiển. Do đó, chương trình lưu trong radiô sẽ không bị mất đi khi hết pin. Một số loại ROM bao gồm bộ nhớ ROM xoá và lập trình được - EPROM (Erasable Programmable ROM), bộ nhớ ROM xoá và lập trình được bằng điện - EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM) và bộ nhớ flash (một dạng mới hơn cả EEPROM). Tất cả những bộ nhớ này sẽ được trình bày ở phần sau của cuốn sách. Ngoài ra còn có một số nơi lưu trữ dữ liệu đặc biệt trong bộ vi xử lý gọi là thanh ghi. Các thanh ghi là nơi lưu dữ liệu nhanh. Chúng sẽ tạm thời lưu địa chỉ lệnh chương trình đang hoạt động, các giá trị tức thời cần thiết để hoàn thành việc tính toán, các dữ liệu cần cho việc so sánh và các dữ liệu đầu ra, đầu vào. Địa chỉ và các dữ liệu được chuyển từ vị trí này sang vị trí khác trong RAM, ROM, các thanh ghi bằng cách sử dụng bus, tức là một tập hợp các đường truyền đồng thời nhiều bit dữ liệu.

3.6 Điều khiển số dùng vi xử lý

Toán học dấu phẩy tĩnh

Nhìn chung, các bộ vi xử lý trong một bộ điều khiển nhúng thường rất nhỏ so với một máy tính cá nhân hoặc một máy tính trạm. Việc thêm vào chức năng xử lý dưới dạng bộ xử lý dấu phẩy động và RAM hoặc ROM bổ sung không phải lúc nào cũng là sự lựa chọn đúng đắn. Điều này có nghĩa là đôi khi các chức năng toán học phức tạp cần thiết cho hệ điều khiển không phải lúc nào cũng sẵn có. Tuy nhiên, các giá trị sẽ được đo và được tính, mặc dù là các số thực, đôi khi cũng thuộc một miền giá trị hợp lôgic. Vì vậy, tồn tại một dạng số học đặc biệt, nhờ đó bộ vi điều khiển có thể sử dụng các số nguyên thay thế cho số dấu phẩy động để tính toán các giá trị giả thực (psuedo real).

Hiện có một vài dạng phép toán dấu phẩy tĩnh đang được sử dụng. Dạng đơn giản nhất dựa trên lũy thừa của 2, giống như các số nguyên thông thường trong hệ nhị phân. Tuy nhiên, một dấu phẩy nhị phân ảo được chèn vào số nguyên cho phép xấp xỉ của các giá trị thực lưu trữ như số nguyên. Một số nguyên không âm 8 bit chuẩn được trình bày dưới đây cùng với các giá trị thập phân tương đương:

$$0001 \quad 0100 = (1*2^4)+(1*2^2) = (1*16)+(1*4) = 20$$

Giả sử có một dấu phẩy nhị phân ảo được chèn vào giữa hai phần của một byte. Lúc này sẽ có 4 bit nằm ở phía bên tay trái của dấu phẩy nhị phân tương ứng với các số mũ dương chuẩn của 2 và 4 bit bên tay phải dấu phẩy nhị phân tương ứng với số mũ âm của 2. Con số tương tự lúc này sẽ đại diện cho một số thực trong hệ thập phân:

$$0001 \quad 0100 = (1*2^0)+(1*2^{-2}) = (1*1)+(1*0.25) = 1.25$$

Rõ ràng là phương pháp này đã bộc lộ những nhược điểm nhất định. Độ phân giải của bất kỳ số dấu phẩy tĩnh nào cũng đều bị giới hạn ở lũy thừa của 2 gắn với bit có trọng số thấp nhất ở bên tay phải, trong trường hợp này là 2^{-4} hoặc 1/16 hoặc 0.0625. Đôi khi làm tròn là cần thiết. Do vị trí của dấu phẩy nhị phân ảo này phải được thường xuyên duy trì khi thực hiện tính toán, nên có một sự cân bằng để làm giảm tính phức tạp. Tuy nhiên, để tiết kiệm bộ nhớ và thời gian xử lý, toán học dấu phẩy tĩnh lại trở nên rất hữu ích.

Hiệu chuẩn

Phạm vi hiệu chuẩn một hệ thống đôi khi là vấn đề rất quan trọng, không thấy rõ trước được khi thiết kế một hệ cơ điện tử. Việc sử dụng các giá trị hiệu chuẩn là các giá trị số và logic lưu trong EEPROM hoặc ROM, sẽ tạo tính linh hoạt khi hiệu chỉnh và vận hành hệ thống. Ví dụ, nếu các tốc độ thạch anh của các bộ vi xử lý khác nhau được dùng trong một hệ cơ điện tử và các giá trị thời gian thực là cần thiết, thì một hệ số hiệu chỉnh của số chu kỳ xung đồng hồ trên mili giây được lưu giữ sẽ cho phép thực hiện việc tính toán này. Vì vậy, các giá trị hiệu chuẩn thường được dùng như một hệ số khuếch đại, nó được nhân với một số đầu vào nào đó để sinh ra đầu ra được cân chỉnh.

Như đã trình bày ở trên, việc hiệu chuẩn thường được dùng khi kiểm tra hệ cơ điện tử để thay đổi "cảm nhận" của sản phẩm. Một bộ điều khiển có thể dùng một tập các giá trị hiệu chuẩn cho RPM của động cơ, tải trọng động cơ và tốc độ xe để quyết định khi nào dịch chuyển các bánh răng. Điều này thường được thực hiện với các hiện tượng trễ vì các điểm xê dịch chuyển từ bánh răng thứ hai sang bánh răng thứ ba cũng như từ bánh răng thứ ba sang bánh răng thứ hai có thể khác nhau.

3.7 Điều khiển vào-ra của bộ vi xử lý

Hỏi vòng và ngắt

Có hai phương pháp cơ bản để bộ vi xử lý điều khiển vào/ra là hỏi vòng và ngắt. Hỏi vòng có nghĩa là bộ vi xử lý sẽ kiểm tra định kỳ các thiết bị ngoại vi khác nhau để xác định đầu vào hoặc đầu ra nào đang chờ. Nếu một thiết bị ngoại vi có một vài đầu vào hoặc đầu ra nào đó cần được xử lý thì cờ sẽ được thiết lập. Vấn đề là ở chỗ rất nhiều thời gian xử lý đã bị lãng phí cho việc kiểm tra các đầu vào trong khi chúng không có gì thay đổi.

Phục vụ ngắt là một phương pháp khác để điều khiển các đầu vào và các đầu ra. Theo phương pháp này, thanh ghi trong bộ vi xử lý phải thiết lập một bit có khả năng cho phép ngắt IE (Interrupt Enable) cho một thiết bị ngoại vi nhất định. Khi một thiết bị ngoại vi khởi tạo ngắt, một cờ sẽ được thiết lập cho bộ vi xử lý. Đường yêu cầu ngắt IRQ (Interrupt Request Line) sẽ được kích hoạt và bộ vi xử lý sẽ phục vụ ngắt. Phục vụ ngắt có nghĩa là quá trình xử lý thông thường của bộ vi xử lý sẽ bị dừng lại (ngắt) để trao đổi dữ liệu với thiết bị ngoại vi. Để tiếp tục được lại quá trình xử lý thông thường, bộ vi xử lý cần lưu dữ liệu của các thanh ghi trước khi thực hiện ngắt. Quá trình này bao gồm việc lưu tất cả các dữ liệu hiện thời của thanh ghi vào một ngăn xếp, một phần của RAM dành riêng cho mục đích này, trong một quy trình gọi là đẩy (push). Sau quy trình đẩy, bộ vi xử lý có thể tải địa chỉ của chương trình phục vụ ngắt và thực hiện việc trao đổi dữ liệu theo yêu cầu. Khi việc phân chia mã đó được hoàn thành, các dữ liệu trong ngăn xếp lại được tải về thanh ghi trong một chu trình gọi là bật (pop) hoặc kéo (pull) và tiếp tục quá trình xử lý thông thường.

Truyền dữ liệu vào-ra

Khi đầu vào hoặc đầu ra sẵn sàng cho việc truyền dữ liệu, chúng ta có thể sử dụng một vài phương thức truyền. Thứ nhất, dữ liệu có thể được truyền theo phương thức song song hoặc nối tiếp. Phương thức song song có nghĩa là nhiều bit (16 bit chẳng hạn) di chuyển song song xuống đa đường dẫn hoặc bus đa nhánh từ nguồn tới đích. Phương thức nối tiếp có nghĩa là bit di chuyển riêng biệt, nối tiếp nhau xuống một đường dẫn đơn lẻ. Truyền theo phương thức song song nhanh hơn do nhiều bit cùng nhau di chuyển, nhưng số lượng đường dẫn lại là một nhược điểm. Vì lý do này, phương thức song song thường được sử dụng cho các thành phần gần nhau, còn phương thức nối tiếp được sử dụng khi các thành phần xa nhau.

Việc truyền nối tiếp có thể được phân biệt dựa trên tính đồng bộ và không đồng bộ. Với phương thức truyền dữ liệu không đồng bộ, bên gửi và bên nhận dữ liệu sử dụng các đồng hồ riêng. Do những đồng hồ này không đồng bộ nên cần có các bit thêm vào được gọi là bit start và stop để định rõ ranh giới các byte đang được truyền. Phương thức truyền dữ liệu đồng bộ sử dụng nguồn thời gian chung hoặc đồng bộ. Do vậy, các bit start, bit stop không cần nữa và lượng thông tin truyền sẽ tăng lên.

Cách thứ ba để phân loại việc truyền dữ liệu là dựa vào hướng. Đường truyền đơn công là đường dẫn một hướng. Dữ liệu đi từ bộ cảm biến đến bộ vi điều khiển có thể được truyền theo phương thức truyền đơn công. Phương thức truyền bán song công cho phép truyền dữ liệu theo hai chiều, nhưng chỉ thực hiện truyền theo từng chiều một. Phương thức này đòi hỏi cần có cơ chế điều khiển luồng để tránh lỗi xảy ra khi truyền dữ liệu. Phương thức truyền song công toàn phần cho phép truyền dữ liệu theo hai chiều một cách đồng thời.

Sự thoả thuận giữa các thiết bị gửi và nhận tin có tính đến các tham số truyền dữ liệu (như tốc độ truyền) được gọi là phương thức bắt tay (handshaking).

Các hệ vào-ra con của bộ vi điều khiển HC12

Có bốn hệ thống con vào-ra của bộ vi điều khiển Motorola HC12, có thể được dùng làm ví dụ cho phần truyền dữ liệu trình bày ở trên.

Giao diện truyền thông nối tiếp SCI (Serial Communications Interface) là một thiết bị nối tiếp không đồng bộ trong HC12. Nó có thể được điều khiển theo phương pháp hỏi vòng hoặc ngắt và được dùng để truyền thông giữa các thiết bị điều khiển từ xa. Liên quan tới SCI là giao diện ngoại vi nối tiếp SPI (Serial Peripheral Interface). SPI là một giao diện nối tiếp đồng bộ. Nó được dùng để truyền thông giữa các các thiết bị hỗ trợ SPI như một mạng nhiều bộ vi điều khiển. Do nhu cầu đồng bộ hóa về mặt thời gian nên SIP phải dùng đến hệ thống các mối quan hệ chủ/tớ giữa các bộ vi điều khiển.

Hệ con điều chế độ rộng xung PWM thường được dùng trong điều khiển động cơ và cuộn cảm. Việc sử dụng thanh ghi được thiết kế để dùng cho cả thiết bị PWM và bộ vi xử lý, đầu ra của PWM có thể được điều khiển bằng cách đặt các giá trị cho từng chu kỳ và chu trình làm việc trong các thanh ghi thích hợp. Điều này sẽ tạo ra một lệnh bật và tắt điện áp riêng.

Cuối cùng là bộ gỡ lỗi tuần tự SDI (Serial in-Circuit Debugger) cho phép bộ vi điều khiển được nối với PC để kiểm tra và điều chỉnh phần mềm nhúng.

Hệ thống mạng của bộ vi điều khiển

Đây là nội dung cuối cùng về các thiết bị vào/ra cần được trình bày trong phần này. Hệ cơ điện tử thường vận hành đồng thời với các hệ thống khác trong cùng một mạng. Do đó, dữ liệu và các lệnh sẽ được chuyển tải từ hệ thống này sang hệ thống khác. Trong khi có rất nhiều giao thức khác nhau, cả loại mở và không mở được nói đến trong hệ thống mạng này, thì chỉ có hai loại phục vụ cho mục đích nghiên cứu của chúng ta. Loại thứ nhất là giao thức MAP (Manufacturing Automation Protocol) dùng trong tự động hóa sản xuất của tập đoàn General Motors. Hệ thống này được xây dựng dựa trên mô hình liên kết hệ thống mở OSI (Open Systems Interconnection) đã được quy định trong ISO, được thiết kế đặc biệt cho hệ sản xuất tích hợp và các PLC. Loại thứ hai là mạng điều khiển diện rộng CAN (Controller Area Network). Loại mạch tiêu chuẩn này được phát triển bởi công ty Robert Bosh GmbH cho truyền thông nối tiếp, chúng được dùng trong hầu hết các hệ nhúng ở ôtô.

3.8 Điều khiển bằng phần mềm

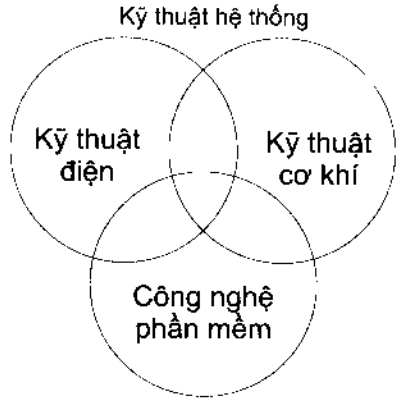
Kỹ thuật hệ thống

Kỹ thuật hệ thống là cách tiếp cận hệ thống trong việc thiết kế và phát triển các sản phẩm cũng như các hệ thống. Hình 3.10 chỉ ra mối quan hệ của các kỹ thuật hệ thống chính liên quan tới cơ điện tử. Các khả năng kỹ thuật hệ thống bao gồm các khả năng về cơ khí, điện và phần mềm. Có một vài nhiệm vụ quan trọng mà các kỹ sư hệ thống cần thực hiện, bắt đầu bằng việc thu thập các yêu cầu, tiếp đến là thông qua việc kiểm tra, xác nhận hệ thống và sản phẩm hoàn chỉnh. Sau khi thu thập và phân tích các yêu cầu, các kỹ sư hệ thống cần phân chia chức năng của các yêu cầu giữa các thành phần cơ khí, điện và phần mềm dựa trên ba khả năng liên quan. Đây là một phần trong việc thực hiện các kỹ thuật hệ thống một cách đồng thời. Như đã chỉ ra trong hình, phần mềm cũng có vai trò tương đương trong việc phát triển hệ cơ điện tử. Trước kia, đôi khi người ta cho rằng phần mềm không phải là một trong những bộ phận cấu thành nên hệ cơ điện tử. Mặc dù cụm từ "Phần cứng làm tăng chi phí, phần mềm tạo thêm giá trị" không hoàn toàn đúng, nhưng đôi khi các kỹ sư phần mềm vẫn cảm thấy rằng khả năng của họ không được đánh giá ngang bằng với các ngành kỹ thuật truyền thống. Một điều cuối cùng nữa là rất nhiều hệ cơ điện tử là các hệ thống an toàn như hệ thống túi khí trong ô tô. Vì vậy, việc chịu được lỗi trong phần mềm cũng là vấn đề quan trọng như trong phần cứng.

Công nghệ phần mềm

Công nghệ phần mềm liên quan đến cả quy trình phát triển cơ điện tử và "sản phẩm" cơ điện tử hoàn chỉnh. Có hai phương pháp cơ bản với những biến thể khác nhau được dùng trong quá trình. Phương pháp thứ nhất được gọi là phương pháp "thác nước" (waterfall), ở đó quá trình sẽ tiến triển

từ giai đoạn này sang giai đoạn khác (ví dụ như từ phân tích đến thiết kế) với các điểm kiểm tra được đánh dấu dọc theo quá trình. Phương pháp thứ hai với tên gọi phương pháp "xoắn ốc" (spiral) được áp dụng khi các yêu cầu là không cố định.



HÌNH 3.10 Nguyên lý công nghệ cơ điện tử

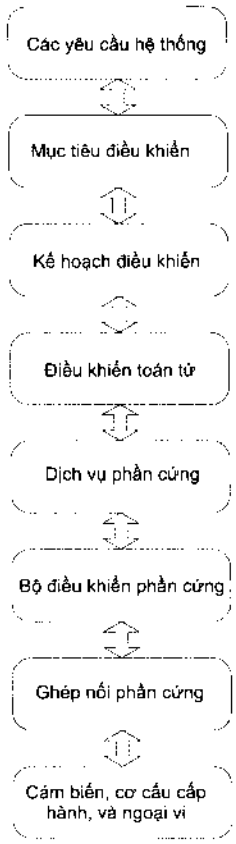
Trong phương pháp này có việc tạo mẫu để khách hàng và/hoặc các kỹ sư hệ thống có thể cải tiến các yêu cầu khi biết thêm các thông tin về hệ thống. Trong cả hai phương pháp, khi các yêu cầu về việc chia nhỏ phần mềm của hệ cơ điện tử được thể hiện, các kỹ sư phần mềm nên chia nhỏ chức năng thành các phần nhỏ hơn của thiết kế phần mềm. Các chỉ tiêu như thời gian phát triển, chi phí phát triển, bộ nhớ cần thiết và lượng thông tin được truyền cũng cần được lên kế hoạch và lưu lại. Người ta có thể sử dụng các cấp khác nhau của mô hình SEI CMM (Software Engineering Institute's Capability Maturity Model) để thực hiện các thao tác trên. Rõ ràng việc phát triển phần mềm không phải là một công việc dễ dàng như người ta vẫn nghĩ và một hệ thống chỉ có thể duy trì ở mức "90 % hoàn thiện" trong suốt quá trình phát triển. Giải pháp đầu tiên cho vấn đề này thường là phân công thêm nhiều kỹ sư phần mềm hơn cho dự án. Tuy nhiên, không phải giải pháp này lúc nào cũng thực hiện được bởi có sự khác nhau về kiến thức của những người mới như Frederick Brooks đã chỉ ra trong cuốn sách quan trọng của mình mang tựa đề The Mythical Man Month (Addison-Wesley 1995).

Thiết kế phần mềm

Có thể thấy phần quan trọng nhất trong thiết kế phần mềm cho hệ cơ điện tử từ cấu trúc phân lớp ở hình 3.11. Bắt đầu từ các yêu cầu đến phần cứng, sự phân lớp này nhằm phục vụ một số mục đích khác nhau. Mục đích quan trọng nhất là nó tách các chức năng cơ điện tử khỏi quá trình vận hành. Hiểu một cách đơn giản là lớp ở trên không can hệ tới cách thực hiện nhiệm vụ của lớp dưới. Thay vào đó, mỗi lớp được chỉ thị bởi lớp ở trên nó và nhận dịch vụ hoặc trạng thái từ lớp bên dưới nó. Việc vượt qua ranh giới của hơn một lớp là một kỹ thuật không được khuyến khích và sau này có thể gây rắc rối cho quy trình thiết kế. Nên nhớ rằng việc trừu tượng hóa quy trình là rất hữu ích vì một hệ cơ điện tử có các thành phần cơ khí, điện và phần mềm được phát triển đồng thời. Một thay đổi trong giao diện bộ cảm biến hoặc cơ cấu chấp hành chỉ đòi hỏi sự thay đổi ở lớp ngay trên nó là lớp điều khiển. Trong điều kiện kinh doanh hiện nay, rất khó cho những người làm việc ở các lớp khác nhau hợp tác với nhau. Hơn nữa, việc thiết kế phần mềm diễn ra ở nhiều nơi, nhiều quốc gia lại không mấy phổ biến. Nếu không có sự phân chia rõ ràng giữa những lớp này thì rất dễ xảy ra xung đột.

Để biết thêm thông tin chi tiết về chủ đề này và những chủ đề khác trong kỹ thuật phần mềm như sự hợp lại, sự cố kết và tái sử dụng phần mềm, hãy xem chương 49 trong cuốn sách này hoặc

xem cuốn "*Software Engineering: A practitioner's Approach* của Roger Pressman (McGraw Hill 2000) và cuốn "*Code Complete*" của Steve McConnel (Microsoft Press 1993).



HÌNH 3.11 Phân lớp phần mềm cơ điện tử

3.9 Thiết bị đo và kiểm thử

Kiểm tra và xác nhận

Kiểm tra và xác nhận là những nhiệm vụ có liên quan đến nhau cần được thực hiện trong suốt thời gian sống của sản phẩm hoặc hệ cơ điện tử. Trong cuốn "Software Engineering Economics" (Prentice-Hall 1988), Boehm đã miêu tả việc kiểm tra giống như việc "xây dựng đúng sản phẩm - Building the product right" trong khi xác nhận lại giống việc "xây dựng sản phẩm đúng - Building the right product". Nói cách khác, kiểm tra là việc thử phần mềm và sản phẩm để chắc chắn rằng nó được xây dựng theo đúng thiết kế. Mặt khác, xác nhận là nhằm đảm bảo phần mềm được xây dựng theo đúng yêu cầu của khách hàng. Như đã trình bày ở trên, kiểm tra và xác nhận là những nhiệm vụ phải thực hiện trong vòng thời gian sống của sản phẩm, chứ không phải nhiệm vụ được hoàn thành trước khi hệ thống được đưa vào sản xuất. Một trong những kỹ thuật đơn giản và hữu ích nhất là việc duyệt lại quá trình kiểm tra và xác nhận phần cứng, phần mềm. Các kỹ sư hệ thống, những người có am hiểu sâu sắc nhất về những nhu cầu của khách hàng cần được tham gia vào việc duyệt lại quá trình xác nhận phần cứng, phần mềm.Việc duyệt lại quá trình xác nhận thiết kế phần cứng, mã phần mềm là một biện pháp tuyệt vời nhằm tìm kiếm lỗi ngay trong giai đoạn đầu của quá trình phát triển hệ thống. Các nhà quản lý có thể sẽ phải quyết định tập trung tìm lỗi ngay trong giai đoạn đầu khi lỗi được sửa dễ dàng hơn, hay trong giai đoạn cuối khi lỗi trở nên rõ

ràng hơn. Hãy xem xét sự khác nhau giữa việc duyệt lại mã để phát hiện lỗi và yêu cầu nhà sản xuất thay đổi hoặc sửa chữa lại với việc tìm ra lỗi sau khi sản phẩm đã được bán, khi đó một sản phẩm đắt tiền có thể bị yêu cầu hủy bỏ.

Bộ gỡ lỗi

Edsgar Dijkstra, người đi tiên phong trong việc phát triển lập trình thành một môn học, không khuyến khích dùng thuật ngữ "bug" và "debug" vì ông cho rằng những thuật ngữ này không có lợi cho kỹ thuật phần mềm. Tuy nhiên, chúng lại thường xuyên được sử dụng trong lĩnh vực này. Bộ gỡ lỗi là một chương trình phần mềm cho phép xem xét vấn đề gì đang xảy ra đối với mã và dữ liệu chương trình khi đang chạy chương trình. Nhìn chung, thiết bị này vận hành trên một máy tính cá nhân được nối với một dạng đặc biệt của bộ vi điều khiển cao cấp gọi là bộ mô phỏng. Mặc dù thiết bị gỡ lỗi có thể rất hữu ích trong việc tìm và sửa lỗi dưới dạng mã, nhưng chúng lại không ở thời gian thực và do đó có thể tạo ra những lỗi vận hành nhưng lại hợp lệ với máy tính COP (Computer Operating Properly Errors). Tuy nhiên, nếu chế độ gỡ lỗi cơ sở BMD (Background Debug Mode) được ứng dụng trong bộ vi xử lý thì thiết bị gỡ lỗi có thể được dùng thành từng bước thông qua thuật toán của chương trình nhằm đảm bảo rằng mã vẫn đang vận hành như mong muốn. Có thể kiểm tra được các giá trị biến đổi tức thời và cuối cùng, đặc biệt là những giá trị có liên quan đến một giá trị đầu vào hoặc đầu ra. Hầu hết các bộ gỡ lỗi đều cho phép mở đồng thời nhiều cửa sổ, đặt các điểm ngắt chương trình đang chạy bằng mã và thậm chí đôi khi cả việc làm hiện lại chương trình trong bộ mô phỏng vi xử lý. Điển hình là thiết bị gỡ lỗi Noral trong Motorola HC12.

Phần mềm trong bộ vi điều khiển có thể kiểm tra phần cứng và tự kiểm tra chính nó. Bằng việc lập trình kiểm tra tổng của các phần được xác định của ROM và/hoặc EFROM, phần mềm có thể kiểm tra để đảm bảo rằng chương trình và dữ liệu vẫn đúng. Thông qua việc ghi và đọc có chọn lọc 0x55 và 0xAA vào RAM (the "checkboard test"), chương trình có thể kiểm tra RAM và bus vẫn đang vận hành tốt. Những thao tác khởi động này nên được thực hiện với mỗi vòng hoạt động của sản phẩm.

Bộ phân tích Logic

Bộ phân tích logic là thiết bị được dùng để giám sát và kiểm tra nhưng không can thiệp vào bộ vi điều khiển. Thiết bị này thường được nối với bộ vi điều khiển và bộ mô phỏng. Trong khi bộ vi điều khiển chạy chương trình và xử lý dữ liệu thì bộ mô phỏng mô phỏng đầu vào và hiển thị đầu ra của hệ thống. "Trigger word" có thể được đưa vào bộ phân tích logic. Nó được thể hiện dưới dạng bit nằm trên hệ thống bus do bộ phân tích logic giám sát. Với "Trigger word" này, truyền thông bus xung quanh điểm quan tâm có thể được giữ và lưu trong bộ nhớ bộ phân tích logic. Một chương trình dịch ngược trong bộ phân tích cho phép mã máy trên bus có thể được nhận biết và phân tích dưới dạng lệnh hợp ngữ của chương trình. Bộ phân tích cũng có thể lưu giữ các đầu vào số của bộ vi điều khiển nhằm xác minh rằng vòng nhiệm vụ PWM chính xác đang được thực thi. Bộ mô phỏng có thể đưa shorts hoặc opens vào hệ thống, sau đó bộ phân tích sẽ được dùng để xem xét liệu phần mềm có phản hồi chính xác với lỗi không. Bộ phân tích logic cũng có thể giám sát vòng lặp chính của hệ thống, đảm bảo rằng hệ thống hoàn thành tất cả các nhiệm vụ trong thời gian đặt ra, chẳng hạn như 15ms. Một ví dụ về bộ phân tích logic là Hewlett Packard HP54620.

3.10 Kết luận

Chương này giới thiệu một loạt các chủ đề liên quan đến một hệ cơ điện tử. Những chủ đề này không chỉ bao gồm các đầu vào, đầu ra và quá trình xử lý mà còn bao gồm cả thiết kế, phát triển và thử nghiệm. Các chương sau sẽ trình bày chi tiết hơn về các vấn đề này.

4

Các bộ điều khiển dựa trên vi xử lý và vi điện tử

Ondrej Novak
Technical University Liberec

Ivan Dolezal
Technical University Liberec

4.1 Giới thiệu vi điện tử 4-1
4.2 Lôgic số 4-2
4.3 Tổng quan về máy tính điều khiển 4-2
4.4 Các bộ vi xử lý và vi điều khiển 4-4
4.5 Các bộ điều khiển lôgic khả trình 4-5
4.6 Truyền thông số 4-6

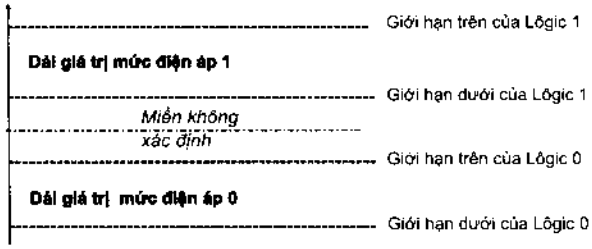
4.1 Giới thiệu vi điện tử

Lĩnh vực vi điện tử đã thay đổi mạnh mẽ trong hai thập kỷ gần đây và công nghệ số đã thống trị trong phần lớn các lĩnh vực ứng dụng của điện tử. Việc thiết kế các hệ thống số được thực hiện trên hàng ngàn IC khác nhau của nhiều nhà sản xuất trên khắp thế giới. Nó làm cho việc thiết kế và chế tạo các sản phẩm điện tử trở nên dễ dàng với giá thành rẻ hơn. Sự phát triển liên tục của tốc độ IC, tỷ lệ tích hợp và việc giảm giá thành đã làm cho các mạch số đang dần thay thế cho các giải pháp tương tự cổ điển trong các bộ điều khiển, bộ lọc và bộ điều chế.

Sự lớn mạnh của khả năng tính toán được minh họa bằng ví dụ dưới đây. Một vi điều khiển đơn chip có khả năng tính toán bằng một máy tính xách tay tiêu biểu của năm 1992. Vi điều khiển đơn chip này có khả năng tính toán bằng bốn máy tính cá nhân IBM tiêu biểu của năm 1981 hoặc bằng hai máy tính lớn IBM 370 của năm 1972.

Các IC số được thiết kế cho nhiều mục đích và được sản xuất với số lượng lớn. Các IC hiện đại có nhiều tính năng cải tiến từ các thiết kế gần đây, cho phép truy cập và điều khiển "thân thiện hơn". Do các tham số của IC tác động không chỉ với các IC riêng biệt mà còn với tất cả các mạch liên quan tới nó, định hướng cho sự phát triển trong tương lai của công nghệ IC phải được cập nhật hàng năm. Từ định hướng này, chúng ta có thể ước lượng được các tham số sau này của các IC và làm cho các thiết kế phù hợp với những yêu cầu của tương lai. Sự phát triển tương đối của số lượng các tranzito tích hợp trên một chíp là khá ổn định. Với các phần tử nhớ, nó xấp xỉ bằng 1.5 lần số lượng hiện thời. Đối với các IC số khác, nó xấp xỉ 1.35 lần số lượng hiện thời.

Trong điện tử số, chúng ta dùng các đại lượng được gọi các giá trị lôgic thay vì các đại lượng tương tự của điện thế và dòng điện. Các giá trị lôgic thường liên quan đến điện thế của tín hiệu, nhưng chúng chỉ có hai giá trị: 1 hoặc 0. Khi một mạch số xử lý một giá trị lôgic, một giá trị đúng là xác định vì giữa các giá trị điện thế lôgic có một khoảng cách (hình 4.1). Chúng ta có thể cải thiện tùy ý độ phân giải của tín hiệu bằng cách đơn giản là dùng thêm nhiều bit.

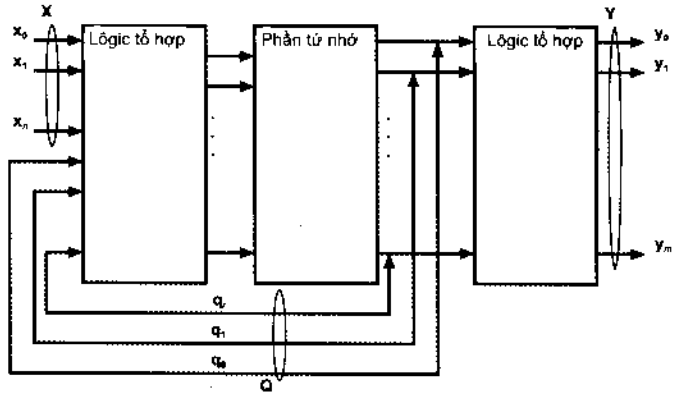


HÌNH 4.1 Các mức điện áp và các giá trị lôgic tương ứng

4.2 Lôgic số

Các mạch số như các mạch điện tử cơ bản gồm các cổng lôgic chỉ hoạt động với hai trạng thái. Các cổng này hoạt động theo cách mà các giá trị lôgic nhận được tương ứng với giá trị nhận được của các mệnh đề đại số Bool. Điều này có nghĩa là với sự trợ giúp của các cổng, chúng ta có thể thực hiện tất cả các phép toán số học và lôgic. Những phép toán này được thực hiện trong các mạch tổ hợp cho giá trị kết quả chỉ phụ thuộc vào trạng thái hiện thời của các giá trị đầu vào. Dĩ nhiên, các cổng lôgic không thể đủ cho các cấu trúc tự động. Để tạo ra một cấu trúc tự động, chúng ta cũng cần một số phần tử nhớ để lưu giữ các đáp ứng của các khối lôgic và số học.

Một sơ đồ điển hình của thiết bị tự động số có trạng thái hữu hạn được thấy trên hình 4.2. Các thiết bị tự động có thể được xây dựng từ các IC chuẩn bao gồm các cổng lôgic, các khối lôgic tổ hợp phức tạp hơn, các thanh ghi, các bộ đếm, các bộ nhớ và các IC tuần tự chuẩn khác được cấy trên một bo mạch in. Một khả năng khác là việc dùng các IC riêng cho ứng dụng (ASIC), hoặc có khả năng lập trình, hoặc hoàn toàn tùy biến, với một thiết kế tiên tiến hơn. Cách tiếp cận này thích hợp cho các thiết kế mà ở đó các giải pháp phần cứng nhanh được ưu tiên. Một khả năng nữa là dùng các bộ vi điều khiển được thiết kế để hoạt động như một thiết bị tự động đa năng mà chức năng của nó có thể được chỉ ra bằng việc lập trình bộ nhớ.



HÌNH 4.2 Thiết bị tự động trạng thái hữu hạn: X - vectơ nhị phân đầu vào, Y - vectơ nhị phân đầu ra, Q - vectơ trạng thái trong

4.3 Tổng quan về máy tính điều khiển

Các máy tính lớn, đồ sộ, phức tạp và tốn năng lượng và sau này là các máy tính nhỏ phần lớn đã từng được dùng cho các tính toán khoa học và kỹ thuật (FORTRAN, ALGOL) và cho các ứng dụng cơ sở dữ liệu (COBOL). Việc phát minh vào năm 1971 của một đơn vị xử lý trung tâm (CPU) chung trong một bộ vi xử lý đơn chíp đã dẫn đến một cuộc cách mạng trong công nghệ máy tính. Bắt đầu từ năm 1981, các vi máy tính như máy tính để bàn và máy tính xách tay đã trở thành

một công cụ cá nhân trong đời sống hàng ngày dùng cho xử lý văn bản, tính toán dữ liệu công tác, chơi trò chơi, vẽ, xử lý đa phương tiện và trình bày báo cáo. Khi được kết nối trong một mạng cục bộ LAN (Local Area Network) hay Internet, các "máy tính cá nhân (PC)" này có khả năng trao đổi dữ liệu và truy cập vào mạng diện rộng toàn cầu WWW (World Wide Web).

Bên cạnh những máy tính "hữu hình" này, nhiều vi máy tính nhúng được ẩn trong các sản phẩm như máy móc, phương tiện giao thông, thiết bị đo lường, thiết bị viễn thông, dụng cụ gia đình, sản phẩm điện tử dân dụng (máy ảnh, hệ thống âm thanh nổi, vô tuyến truyền hình, máy quay phim, điện thoại di động, nhạc cụ, đồ chơi, điều hòa nhiệt độ). Chúng được kết nối với các cảm biến, các giao diện người dùng (các nút bấm và màn hình hiển thị) và các cơ cấu chấp hành. Khả năng lập trình của các bộ điều khiển này mang lại sự linh hoạt cho các thiết bị (chọn chức năng bằng chương trình), một số có tính thông minh (lôgic mờ) và hoạt động thân thiện với người dùng. Nó bảo đảm độ tin cậy cao hơn và sự bảo trì, sửa chữa, hiệu chuẩn (tự động), chẩn đoán (tự động) một cách dễ dàng hơn và đưa ra khả năng tương hỗ - truyền thông qua lại hoặc điều khiển phân cấp trong toàn nhà máy hay trong một ngôi nhà thông minh. Một thiết bị điện tử được đưa ra trên hình 4.3.

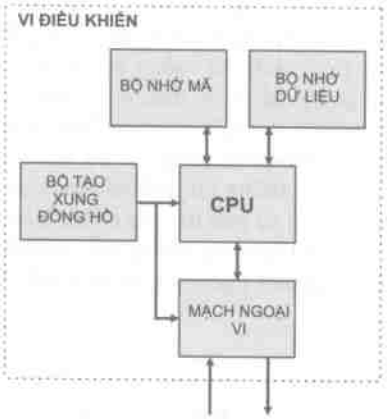
HÌNH 4.3 Ví dụ về một hệ cơ điện tử nhỏ: Thiết bị ALAMBETA dùng cho đo lường tính chất nhiệt của tấm thủy tinh và vải (được sản xuất bởi SENSORA, Cộng hòa Séc). Nó thực hiện một phương pháp đo lường duy nhất dùng cảm biến luồng nhiệt mỏng mở rộng, đo độ dày mẫu kết hợp trong truyền động đinh, điều khiển vi xử lý và kết nối với một máy tính cá nhân.

Các máy tính nhúng dựa trên kiến trúc Harvard mà các bộ nhớ dữ liệu và mã lệnh được tách riêng. Chương trình nền (firmware) được dịch chéo trong một hệ thống phát triển và sau đó được tập trung vào một bộ nhớ không thay đổi. Theo cách này, chương trình chính đơn có thể chạy ngay lập tức sau khi nguồn được bật. Các thiết bị nhớ cơ học nhạy với sốc và tương đối đắt (các ổ cứng) và các màn hình ống chân không được thay thế bằng các thẻ nhớ hoặc các đĩa bán dẫn (nếu một bộ nhớ lưu trữ là cần thiết) và các thiết bị hiển thị thanh LED hay các LCD. Một bàn phím máy tính có thể được thay thế bởi một thiết bị/bộ các phím được gán chức năng riêng biệt và/hoặc các phím thường dùng (các phím mũi tên, Enter, Escape) được thực hiện bằng các phím số, nếu cần thiết. Những bộ phím, công tắc hỗ trợ, nút bấm lớn, công tắc chính và màn hình hiển thị này có thể được đặt trong các bảng điều khiển chịu được nước và bụi.

Sự tiến bộ trong việc tích hợp mạch dẫn tới sự phát triển nhanh chóng của các bộ vi điều khiển trong 2 thập kỷ gần đây. Bộ nhớ mã, bộ nhớ dữ liệu, bộ tạo xung nhịp và tập hợp các mạch ngoại vi khác nhau được tích hợp với CPU (hình 4.4) để chèn các vi máy tính đơn chíp hoàn toàn này vào trong một PCB ứng dụng riêng.

Bộ vi xử lý tín hiệu (DSP) là bộ vi xử lý nhúng đặc biệt với một vài thiết bị ngoại vi trên chíp nhưng với ADC/DAC bên ngoài đại diện cho kênh vào/ra quan trọng nhất. Các DSP có một kiến trúc tính toán song song và một tập lệnh xử lý dấu phảy tĩnh và động được tối ưu cho các thao tác xử lý tín hiệu điển hình như phép biến đổi rời rạc, lọc, tích chập và mã hóa. Chúng ta có thể tìm

thấy các DSP trong các ứng dụng như tạo/xử lý âm thanh, phân tích tín hiệu cảm biến (như dao động), truyền thông qua đường điện thoại (ví dụ như bộ lọc dải và bộ điều chế/giải điều chế số trong điện thoại di động, bộ thu phát cho truyền thông, các môđem) và điều khiển vectơ của động cơ AC.



HÌNH 4.4 Sơ đồ khối của một vi điều khiển

Sản xuất hàng loạt (tức là giá thành hạ), khả năng hoạt động mạnh, sự truy cập toàn diện tới các công cụ gỡ lỗi và phát triển phần mềm và hàng triệu dòng lệnh sẵn có làm cho các PC trở nên hữu ích cho các ứng dụng điều khiển và đo lường cần tập trung tính toán, mặc dù kiến trúc và hệ điều hành của chúng không hẳn thích hợp cho mục đích này.

Với sự phát triển mạnh của máy tính, có rất nhiều công cụ siêu máy tính, các PC đầu cuối và các hệ thống VXI (64/32 bit, trên 1000 MFLOPS/MIPS, 1000 MB bộ nhớ, công suất đầu vào 100 W, giá khoảng 10 000 USD), đến các môđun/thẻ máy tính PC (32 bit, 100 - 300 MFLOPS/MIPS, 10 - 100 MB, giá thấp hơn 1000 USD). Các môđun/thẻ vi xử lý (16/8 bit, 10-30 MIPS, 1 MB, giá khoảng 100 USD) và các bộ vi điều khiển 8 chân đơn giản (8 bit, 1 - 5 MIPS, 1 KB, 10 mW, giá khoảng 1 USD) cũng có sẵn với giá thành rất rẻ.

4.4 Các bộ vi xử lý và vi điều khiển

Không có một ranh giới rõ ràng giữa các bộ vi xử lý và các bộ vi điều khiển vì các chíp này đều có thể truy cập đến bộ nhớ dữ liệu hoặc/và mã ngoài và được trang bị các thành phần ngoại vi riêng biệt.

Một số vi điều khiển có một bộ tạo dao động RC bên trong và không cần có một bộ bên ngoài. Tuy nhiên, một bộ cộng hưởng thạch anh hay gốm ngoài hoặc mạng RC được nối thường xuyên với các phần tử tích cực, bên trong bộ phát xung nhịp. Tần số nhịp thay đổi từ 32 kHz (công suất thấp) tới 75 MHz. Một mạch phụ khác tạo tín hiệu xác lập lại cho một chu kỳ thích hợp sau khi nguồn được bật. Các mạch Watchdog khởi động lại chíp khi nó không nhận được tín tín hiệu kích do lỗi chương trình. Có một số chế độ hoạt động tiết kiệm năng lượng được kích hoạt bởi các lệnh chương trình.

Sự phức tạp và cấu trúc của hệ thống ngắt (tổng số nguồn ngắt và sự lựa chọn cấp độ ưu tiên của chúng), xác lập về độ nhạy mức thế/sườn xung của các nguồn ngắt ngoài và các sự kiện của các nguồn ngắt bên trong (như thiết bị ngoại vi) và sự bố trí các sự kiện ngắt đồng thời được coi là những tiêu chuẩn phân loại vi điều khiển quan trọng nhất.

Mặc dù các bộ vi điều khiển 16 và 32 bit được thực hiện trong các ứng dụng đặc biệt, yêu cầu cao (điều khiển các hệ servo), nhưng hầu hết ứng dụng đều dùng các chíp 8 bit. Một số bộ vi điều khiển có thể hoạt động bên trong với dữ liệu 16 bit hoặc thậm chí 32 bit chỉ trong phạm vi dấu

phẩy tĩnh - các bộ vi điều khiển không được cung cấp bộ dấu phẩy động (FPU). Các họ vi điều khiển mới được xây dựng trên tập lệnh rút gọn RISC (Reduced Instruction Set) thực hiện một lệnh trên một vài chu kỳ xung nhịp hay thậm chí trên một chu kì.

Có thể tìm thấy sự khác nhau trong các chế độ địa chỉ, số lượng các thanh ghi truy cập trực tiếp và loại bộ nhớ chương trình (từ 1 đến 128 KB). Chúng là những thành phần quan trọng cho việc phát triển chương trình nền. Bộ nhớ flash cho phép truy cập nhanh và lập trình ngay trong hệ thống ISP (In-System Programming) sử dụng 3 - 5 dây dẫn, ngược lại các EPROM truyền thống đắt hơn do việc đóng gói cửa sổ IC. Một số bộ vi điều khiển có sẵn khả năng gỡ lỗi và khởi động nhằm tải mã từ một PC vào trong bộ nhớ flash dùng bộ thu/phát không đồng bộ đa năng UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) và đường truyền thông nối tiếp RS-232C. Bộ nhớ lập trình một lần OTP (One Time Programmable) EPROM hay ROM hiệu quả trong một số lượng lớn sản phẩm. EEPROM lưu dữ liệu (từ 64 B đến 4 KB) dùng để lưu các hằng số, các bảng tham số, lưu trữ trạng thái và các mật khẩu có thể được viết bởi các chương trình nền cùng với SRAM chuẩn (từ 32 B đến 4 KB).

Phạm vi của các thiết bị ngoại vi là rất rộng lớn. Mọi chip đều có các chân vào/ra I/O hai hướng kết hợp trong các cổng 8 bit, nhưng chúng thường có chức năng luân phiên. Một vài chip có thể đặt một mức đầu vào (TTL, MOS, hay trigger Schmitt) và các nguồn dòng kéo lên (pull-up) hoặc kéo xuống (pull-down). Các đầu ra thay đổi theo collector hở mạch, hoặc đầu ra ba trạng thái và các dòng lớn nhất.

Ít nhất một bộ định thời/bộ đếm 8 bit (thường được cung cấp một số đặt trước) sẽ đếm các sự kiện bên ngoài (các xung từ một cảm biến vị trí) hoặc từ các xung đồng hồ bên trong, để đo các khoảng thời gian và tạo một ngắt định kỳ hoặc tốc độ baud thay đổi cho truyền thông nối tiếp. Các bộ đếm 16 bit và các thanh ghi thích hợp thông thường hình thành các bộ capture để lưu trữ thời gian của các đột biến đầu vào hoặc so sánh các bộ phát tạo các đột biến đầu ra như là trạng thái điều khiển động cơ bước hay tín hiệu PWM. Một bộ đếm thời gian thực RTC (real-time counter) là một loại bộ đếm đặc biệt có thể chạy thậm chí trong chế độ ngủ. Một hay hai giao diện truyền thông UART/USART với một máy tính chủ, trong khi các giao diện nối tiếp khác như SPI, CAN và I^2C điều khiển các chip chuyên dụng khác được dùng trong thiết bị hay hệ thống.

Hầu hết các họ vi điều khiển có những loại được xây dựng với một bộ chuyển đổi A/D và một bộ dồn kênh các đầu vào. Dải đầu vào thường là đơn cực và bằng với điện áp nguồn hay ít khi bằng điện áp tham chiếu trên chip. Thời gian chuyển đổi được tính bằng nguyên lý xấp xỉ liên tiếp của ADC và số bit hiệu dụng ENOB (Effective Number of Bits) thường không đạt tới độ phân giải danh nghĩa 8, 10 hay 12 bit.

Có các mạch giao diện đặc biệt khác, như mảng cổng khả trình FPGA (Field Programmable Gate Array), có thể được cấu hình như một mạch số tùy ý.

Chương trình nền của bộ vi điều khiển thường được lập trình bằng hợp ngữ hoặc bằng ngôn ngữ C. Nhiều công cụ phần mềm, bao gồm cả các bộ mô phỏng chip, có sẵn miễn phí trên trang web của các nhà sản xuất chip hay các công ty hỗ trợ thứ ba. Một môi trường phát triển tích hợp chuyên nghiệp và phần cứng gỡ rối (bộ mô phỏng bằng mạch) là rất đắt (cỡ hàng nghìn USD). Tuy nhiên, việc dùng linh hoạt một bộ mô phỏng ROM rẻ trong một hệ thống vi xử lý hay một vòng phát triển từng bước dùng một bộ nạp chương trình ISP cho bộ nhớ Flash của bộ vi xử lý có thể phát triển khá tốt các ứng dụng phức tạp.

4.5 Các bộ điều khiển lôgic khả trình

Một bộ điều khiển lôgic khả trình PLC (Programmable Logic Controller) là một thiết bị điều khiển dựa trên vi xử lý được thiết kế cho các ứng dụng công nghiệp (vỏ bọc, thiết bị đầu cuối, chịu ảnh hưởng môi trường, có khả năng chịu được lỗi) trong một chuyển mạch công suất để điều khiển máy móc hay một quá trình công nghiệp. Nó bao gồm một CPU với các bộ nhớ và một giao diện I/O đặt trong hộp hoặc trong các môđun được gài trên một giá đỡ và được nối với bus riêng. Hộp này ban đầu có khoảng 16 đường I/O, trong khi thiết kế môđun có thể có hàng ngàn đường I/O.

Các đầu vào độc lập thường chấp nhận mức lôgic công nghiệp, điện áp 24 V DC hay điện lưới AC, trong khi các đầu ra thường được cung cấp hoặc với các công tắc trạng thái hoàn toàn độc lập (24 V cho các van hoặc công tắc solenoid) hoặc với các rơle. Các bảng đầu vít tiện lợi trong các PLC cho phép nối ghép dễ dàng với các hệ thống cần điều khiển. Các mức lôgic I/O có thể hiển thị với đèn LED gần thiết bị đầu cuối.

Các PLC thường được dùng để thay thế các rơle, chúng thực hiện các phép toán logic Bool và các chức năng định thời/đếm. Các I/O tương tự, số nguyên hoặc số dấu phẩy động, các đầu ra PWM và RTC được bổ sung trong các PLC hiện đại. Một PLC hoạt động nhờ một chương trình được quét liên tục và được giám sát bởi một bộ vi xử lý nhúng (CPU). Thời gian quét là thời gian để kiểm tra trạng thái đầu vào, để thực hiện tất cả các nhánh lệnh (các nấc thang riêng biệt của một biểu đồ bậc thang) của một chương trình bằng cách dùng các biến số bit bên trong (biến trạng thái) và để cập nhật các trạng thái đầu ra. Thời gian quét là độc lập với độ phức tạp của chương trình (cỡ hàng mili giây hoặc hàng chục mili giây). Thao tác quét tiếp theo liền ngay thao tác trước (chạy tự do) hoặc bắt đầu một cách định kỳ.

Ngôn ngữ lập trình cho các PLC được miêu tả trong chuẩn IEC-1131-3:

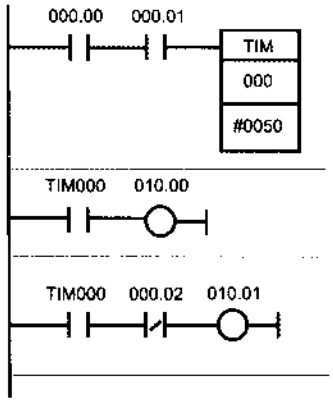
LD - biểu đồ hình thang (hình 4.5)

IL - tập lệnh (một chương trình hợp ngữ)

SFC - biểu đồ chức năng tuần tự (GRAFCET)

ST - văn bản có cấu trúc (tương tự một ngôn ngữ bậc cao)

FBD - sơ đồ khối chức năng



HÌNH 4.5 Ví dụ về biểu đồ hình thang PLC: 000.xx/010.xx - nhóm địa chỉ của đầu vào/đầu ra, TIM000 - bộ định thời trễ 5 s, 000.00 – đầu vào thường mở, 000.02 - đầu vào thường đóng

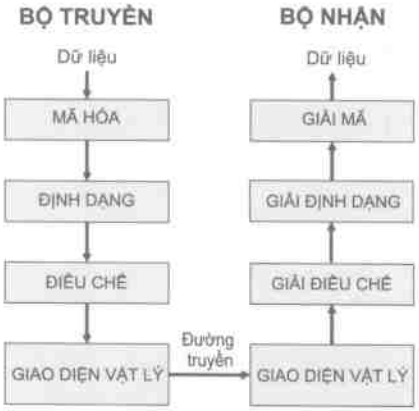
Các PLC được lập trình dùng các công cụ biên dịch chéo và gỡ lỗi chạy trên một PC hay với các thiết bị lập trình (thường dùng với IL), cả hai được nối bằng một đường nối tiếp. Các bảng điều khiển từ xa có thể được dùng như một giao diện người - máy. Một khái niệm thay thế mới (được gọi là SoftPLC) bao gồm các môđun I/O giống như PLC được điều khiển bởi một máy tính PC công nghiệp, có sẵn một bảng điều khiển cảm ứng.

4.6 Truyền thông số

Truyền thông giữa các hệ cơ điện tử đóng một vai trò quan trọng khi thực hiện các ứng dụng, cho cả các cấu hình cố định và linh hoạt (một ô tô, một hệ thống âm thanh nổi, một dây chuyền sản xuất cố định và một thiết bị linh hoạt, một mạng pico không dây của các thiết bị máy tính ngoại vi). Rõ ràng rằng truyền thông số phụ thuộc vào mục đích của các nhà thiết kế với số lượng dữ liệu cần truyền, khoảng cách giữa các hệ thống và các yêu cầu về độ tin cậy và an toàn của dữ liệu.

Tín hiệu được biểu diễn bằng sự thay đổi của biên độ, tần số, hay pha. Nó được thực hiện bởi sự thay đổi điện áp/dòng điện trong các dây kim loại hoặc bởi các sóng điện từ, cả trong truyền vô tuyến và truyền tia hồng ngoại (hoặc "không dây" cho các khoảng cách ngắn, hoặc cáp quang cho các khoảng cách khá dài). Tốc độ dữ liệu và độ rộng dải thay đổi từ 300 b/s (máy telex), 3.4 kHz (điện thoại), 144 kb/s (ISDN) đến hàng chục Mb/s (ADSL) trên một dây kim loại (đường thuê bao), lên tới 100 Mb/s trên cáp xoắn (LAN), khoảng 30 - 100 MHz trên một kênh vi sóng, 1 GHz trên 1 cáp đồng trục (mạng cáp liên tỉnh, cáp TV) và lên tới hàng chục Gb/s cho một cáp quang (mạng xương sống).

Việc truyền dữ liệu sử dụng các phương pháp phức tạp như điều chế số, nén dữ liệu và bảo vệ dữ liệu, chống lại mất mát do nhiễu, méo tín hiệu và đứt mạch. Các giao thức chuẩn đa lớp (mô hình tham chiếu 7 lớp ISO/OSI hay nhóm các giao thức 4 lớp dùng cho Internet bao gồm cả giao thức TCP/IP nổi tiếng), "phần cứng đến đâu, phần mềm thực hiện đến đó", thuận tiện cho việc giao tiếp giữa các hệ thống truyền thông. Chúng không chỉ đặt kết nối trên một tốc độ chấp nhận được, kiểm tra việc truyền dữ liệu, định dạng và nén dữ liệu, mà còn có thể tạo sự trong suốt truyền thông cho một ứng dụng. Ví dụ không thấy được sự khác nhau giữa các nguồn dữ liệu từ xa và địa phương. Một ví dụ về khái niệm truyền thông đa lớp được minh họa trên hình 4.6.



HÌNH 4.6 Ví dụ về truyền thông đa lớp

Phụ thuộc vào số lượng người dùng, truyền thông được thực hiện theo kiểu điểm tới điểm (RS-232C từ cổng COM của PC tới một thiết bị), điểm tới nhiều điểm (các kênh, các mạng), hoặc thậm chí như một đài phát (radio). Dữ liệu được truyền bằng cách dùng kết nối kiểu chuyển mạch (mạng điện thoại) hoặc chuyển mạch dạng gói (mạng máy tính, ATM). Truyền hai chiều có thể là song công hoàn toàn (điện thoại, RS-232C) hoặc bán song công (hầu hết các mạng số). Liên quan tới kiểu kết nối, một kết nối hình sao hay một kết nối hình cây dùng một thiết bị ("chủ") quản lý truyền thông tại nút chính. Một kết nối vòng thường yêu cầu phương pháp truyền thẻ bài (Token Passing) và một truyền thông bus được điều khiển bởi các phương pháp khác nhau như phương pháp Master - Slave, có hoặc không có Token Passing, hoặc dùng một phương pháp truy cập ngẫu nhiên (CSMA/CD trong Ethernet).

Một cổng LPT của PC, SCSI cho các thiết bị ngoại vi của máy tính và GPIB (IEEE-488) cho các thiết bị chủ là những ví dụ kết nối song song (thường là 8 bit) cho các khoảng cách ngắn (cỡ mét). RS-232C, RS-485, I^2C, SPI, USB và Fireware (IEEE-1394) là ví dụ về truyền thông nối tiếp, một vài thiết bị trong số đó có thể dùng cho khoảng cách dài (tới 1 km). Truyền thông nối tiếp có thể thực hiện không đồng bộ bằng cách dùng các bit bắt đầu và kết thúc trong khung truyền hoặc đồng bộ bằng cách dùng bit đồng bộ kèm theo, nếu cần thiết. Cả mức điện áp đơn cực và lưỡng cực đều được dùng để điều khiển cả các đường không cân bằng (LPT, GPIB đối với RS-232C) hoặc các đường cáp đôi dây xoắn cân bằng (CAN đối với RS-422, RS-485).

5

Giới thiệu về công nghệ micro và nano

Michael Goldfard
Vanderbilt University

Alvin Strauss
Vanderbilt University

Eric J. Barth
Vanderbilt University

5.1 Mở đầu 5-1
5.2 Cơ cấu chấp hành micro 5-3
5.3 Cảm biến micro 5-7
5.4 Thiết bị nano 5-10

5.1 Mở đầu

Xuất phát từ quá trình phát triển của công nghệ chế tạo vi điện tử, các thiết bị micro thường được phân loại không chỉ theo kích thước của chúng mà còn theo cấu tạo và cách sản xuất. Nói chung công nghệ nano được xem là có phạm vi từ những thiết bị cỡ micro nhỏ nhất xuống đến các thiết bị cỡ phân tử là tổ hợp của các phân tử đơn lẻ. Hai lĩnh vực riêng biệt nhưng lại chồng chéo lên nhau này của các hệ cơ điện tử micro (MEMS) và các hệ nano hay công nghệ nano cùng chia sẻ một tập hợp các nghiên cứu thiết kế kỹ thuật chung, khác biệt so với các hệ thống kỹ thuật thông thường khác. Có hai nhân tố chính để phân biệt sự tồn tại, tính hiệu quả và sự phát triển của các bộ chuyển đổi cỡ micro và nano với các bộ biến đổi bình thường. Thứ nhất là tính chất vật lý theo kích thước và thứ hai là tính thích hợp của các qui trình và công nghệ sản xuất. Nhân tố thứ nhất bị chi phối bởi các định luật vật lý và như vậy nó là nhân tố cơ bản trong khi nhân tố thứ hai liên quan tới sự phát triển công nghệ sản xuất, là một nhân tố quan trọng, mặc dầu không phải là chủ yếu. Nhờ sự kết hợp các nhân tố này, các bộ chuyển đổi hiệu quả với kích thước micro thường không thể chế tạo bằng cách giảm kích thước hình học các bộ chuyển đổi thông thường.

Tính chất vật lý theo kích thước

Các lực tác động lên các thiết bị cỡ micro có ảnh hưởng khác so với lực tác động lên các thiết bị tương tự cỡ thông thường. Đó là vì kích thước một hệ vật lý ảnh hưởng đáng kể tới các hiện tượng vật lý quyết định ứng xử động lực học của hệ thống này. Ví dụ, các hệ thống kích thước lớn bị ảnh hưởng nhiều hơn bởi các hiệu ứng quán tính so với các hệ thống kích thước nhỏ, trong khi các hệ thống nhỏ lại bị tác động nhiều hơn bởi các hiệu ứng bề mặt. Hiện tượng các con côn trùng nhỏ có thể đứng trên bề mặt nước phẳng nhờ sức căng bề mặt là một ví dụ. Sức căng bề mặt đó cũng xuất hiện khi con người tiếp xúc với nước nhưng với kích thước của con người, các lực tác động thường không đáng kể. Thế giới mà con người đang sống bị chi phối bởi các lực giống với thế giới mà các con côn trùng đang sống, nhưng các lực này tồn tại theo các tỷ lệ rất khác nhau. Vì trong thực tế, nói chung các lực quán tính thường tỷ lệ với thể tích và các lực bề mặt thường tỷ lệ với diện tích bề mặt. Do thể tích thay đổi với lũy thừa bậc ba của độ dài và diện tích với lũy thừa bậc hai nên với cùng hình dáng thì các vật nhỏ hơn có tỉ lệ diện tích bề mặt lớn hơn các vật lớn.

Các quan hệ tỉ lệ chính xác của các loại lực khác nhau có thể nhận được bằng việc kết hợp chặt chẽ các kỹ thuật phân tích thứ nguyên [1-5]. Ví dụ, các lực quán tính có thể được biểu diễn theo thứ nguyên là $F_i = rL^3\ddot{x}$, trong đó F_i là lực quán tính tổng quát, ρ là tỷ trọng của một vật, L là độ dài tổng quát và x là dịch chuyển. Mối quan hệ này hình thành một nhóm không thứ nguyên đơn, được cho bởi:

$$\Pi = \frac{F_i}{\rho L^3 \ddot{x}}$$

Quan hệ tỷ lệ với sự đồng dạng về mặt hình học và động học có thể được biểu diễn như sau:

$$\frac{L_s}{L_0} = \frac{x_s}{x_0} = N, \qquad \frac{t_s}{t_0} = 1$$

trong đó L là thang độ dài, x là thang động học, t là thang thời gian, chỉ số 0 là chỉ hệ ban đầu và chỉ số s chỉ hệ tỷ lệ. Do sự đồng dạng vật lý yêu cầu nhóm không thứ nguyên (P) không thay đổi giữa các kích thước, nên mối liên hệ lực được cho bởi $F_s/F_0 = N^4$, với giả thiết rằng đặc tính mật độ (tỷ trọng) không đổi (tức là, $\rho_s = \rho_0$). Lực quán tính vì thế tỷ lệ theo hệ số N^4, trong đó N là hệ số tỷ lệ hình học. Nói cách khác, với một hệ quán tính có kích thước nhỏ hơn N lần, lực cần thiết để tạo ra một gia tốc tương đương là nhỏ hơn N^4 lần. Một phân tích tương tự chỉ ra rằng các lực nhớt biểu diễn một cách không thứ nguyên bởi $F_v = \mu L\dot{x}$ chuyển đổi với hệ số N^2 (với độ nhớt μ không đổi) và các lực đàn hồi biểu diễn một cách không thứ nguyên bởi $F_e = ELx$ chuyển đổi với hệ số N^2 (với suất đàn hồi E không đổi). Do đó, với cùng hình dáng hình học thì lực quán tính của hệ có kích thước nhỏ hơn sẽ có vai trò không đáng kể so với lực nhớt và lực đàn hồi.

Cơ chế chung của sự chuyển đổi điện-cơ

Cơ chế chủ yếu cho cảm biến và chấp hành là sự chuyển đổi năng lượng. Các dạng cơ bản của sự chuyển đổi điện cơ vật lý có thể được nhóm thành hai loại. Loại thứ nhất là chuyển đổi đa thành phần, hoạt động dựa trên sự tương tác không tiếp xúc giữa các vật. Loại thứ hai là các chuyển đổi hoạt động dựa trên sự biến dạng hay còn gọi là chuyển đổi chất rắn, loại chuyển đổi này sử dụng các đặc tính cơ học của vật liệu ví dụ như những sự chuyển pha tinh thể hoặc sự sắp xếp lưỡng cực phân tử. Loại thứ nhất gồm có chuyển đổi điện từ dựa trên phương trình Lorentz và định luật Faraday và tương tác tĩnh điện dựa trên định luật Culông. Loại thứ hai gồm có các hiệu ứng áp điện, hợp kim nhớ hình và các vật liệu từ giảo, điện giảo và quang giảo. Mặc dù các vật liệu với những đặc tính như trên đã bắt đầu được nhìn nhận trong một số ít các ứng dụng nghiên cứu, sự phát triển của các hệ thống micro hiện nay chủ yếu là sự ứng dụng các tương tác tĩnh điện và điện từ. Với tầm quan trọng của chúng, chuyển đổi tĩnh điện và điện từ sẽ được giới thiệu trong các phần tiếp theo.

Các đặc tính chuyển đổi của cảm biến và cơ cấu chấp hành

Các đặc tính liên quan cho cả công nghệ cảm biến micro và cơ cấu chấp hành micro là khả năng lặp lại, khả năng chế tạo ở kích thước nhỏ, sự loại trừ các ảnh hưởng bên ngoài, dải thông thích hợp và nếu có thể là cả tính tuyến tính. Các đặc tính riêng liên quan tới cơ cấu chấp hành micro là lực có thể đạt được, dịch chuyển, công suất, dải thông (hay tốc độ đáp ứng) và hiệu suất. Các đặc tính riêng liên quan tới cảm biến micro là độ phân giải cao và khả năng loại bỏ hiện tượng trễ và trôi.

5.2 Cơ cấu chấp hành micro

Chấp hành tĩnh điện

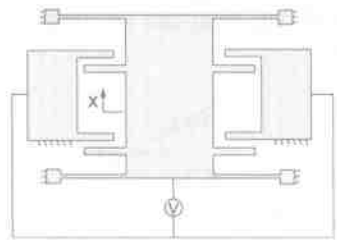
Các cơ cấu chấp hành đa thành phần được dùng rộng rãi nhất là những cơ cấu dựa trên chuyển đổi tĩnh điện. Những cơ cấu chấp hành này cũng có thể được coi như một loại điện dung thay đổi, bởi chúng hoạt động giống như các cơ cấu chấp hành điện từ dạng từ trở biến thiên (ví dụ các động cơ bước từ trở biến thiên). Các cơ cấu chấp hành tĩnh điện được phát triển cả dưới dạng chuyển động thẳng và dạng quay. Hai cấu hình phổ biến nhất của cơ cấu chấp hành tĩnh điện chuyển động thẳng là loại truyền động vuông góc và loại tiếp tuyến hay còn gọi là loại truyền động dạng lược, được minh họa trên hình 5.1 và 5.2. Chú ý rằng cả hai loại cơ cấu chấp hành đều được treo bởi cơ cấu uốn và như vậy lực đầu ra bằng lực chấp hành tĩnh điện trừ đi lực đàn hồi dùng để bù việc bị uốn. Loại truyền động vuông góc của cơ cấu chấp hành micro tĩnh điện hoạt động giống như một cái micro dạng tụ. Với cấu hình truyền động này, lực chấp hành được cho bởi:

$$F_x = \frac{\varepsilon A v^2}{2x^2}$$

trong đó A là tổng diện tích của các bản mặt song song, ε là hằng số điện môi của không khí, v là điện áp giữa các bản và x là khoảng cách giữa các bản. Lực chấp hành của truyền động dạng lược được cho bởi:

$$F_x = \frac{\varepsilon w v^2}{2d}$$

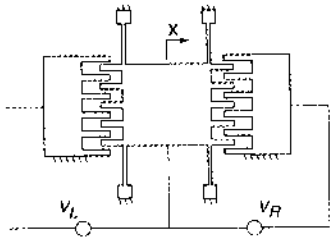
trong đó w là độ rộng của các bản, ε là hằng số điện môi của không khí, v là điện áp giữa các bề mặt và d là khoảng cách giữa các bản. Việc xét đến thứ nguyên của hai biểu thức này chỉ ra rằng lực là độc lập với hệ số tỉ lệ giữa kích thước hình học và động học, tức là với một cơ cấu chấp hành tĩnh điện được làm giảm về hình học và động học bởi hệ số N thì lực sinh ra bởi cơ cấu chấp hành này trước và sau khi giảm là như nhau. Vì các lực liên quan đến hầu hết các hiện tượng vật lý khác đều giảm đáng kể ở kích thước nhỏ, nên các lực tĩnh điện ở cỡ micro trở nên đáng kể so với các lực khác. Hiện tượng này được minh họa bởi thực tế là tất cả các lực liên kết phân tử có bản chất là lực tĩnh điện và như vậy sức bền của tất cả vật liệu là kết quả của các lực tĩnh điện [6].



HÌNH 5.1 Sơ đồ cơ cấu chấp hành tĩnh điện truyền động vuông góc

Lực đạt được lớn nhất của các cơ cấu chấp hành tĩnh điện đa thành phần bị giới hạn bởi sự đánh thủng điện môi của không khí, hiện tượng này xảy ra trong không khí khô tại giá trị 0.8×10^6 V/m. Fearing [7] xác định rằng giới hạn trên của lực được tạo ra bởi chấp hành tĩnh điện là xấp xỉ 10 N/cm^2. Do các truyền động tĩnh điện không có bất kỳ sự tác động động lực đáng kể nào và do quán tính của phần tử chuyển động thường nhỏ, nên dải thông của cơ cấu chấp hành thường khá rộng, cỡ 1 kHz.

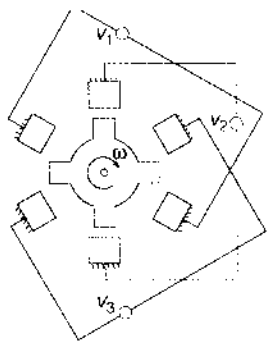
Hành trình chuyển động đạt được lớn nhất của các cơ cấu chấp hành dạng vuông góc bị giới hạn bởi vùng đàn hồi của cơ cấu treo bị uốn và ngoài ra còn bởi sự phụ thuộc của lực chấp hành vào khoảng cách giữa các bề mặt, như đã trình bày trong các phương trình ở trên. Theo Fearing, một hành trình tiêu biểu cho một cơ cấu chấp hành dạng vuông góc được gia công micro bề mặt vào khoảng vài micrômet. Có thể tăng độ dịch chuyển bằng cách dùng một dãy các cơ cấp chấp hành tĩnh điện dạng vuông góc, như đề xuất của Bobbio [8,9].



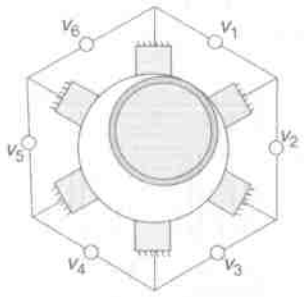
HÌNH 5.2 Cơ cấu chấp hành truyền động dạng lược. Khi được nạp năng lượng điện cực sẽ chuyển động về phía trước

Hành trình chuyển động tiêu biểu của một cơ cấu chấp hành dạng lược được gia công micro bề mặt là khoảng một vài micro mét, thậm chí có thể ít hơn. Hành trình đạt được lớn nhất trong một truyền động dạng lược bị giới hạn chủ yếu bởi tính cơ học của hệ thống treo bị uốn. Hệ thống treo nên có chiều trùng với chiều tác động để làm tăng khả năng dịch chuyển, nhưng độ cứng theo phương vuông góc với hướng này phải đủ lớn nhằm tránh các bản mặt song song chạm vào nhau do sự không thẳng hàng. Tuy nhiên, khi sự đồng nhất giữa chiều của hệ thống treo và chiều chuyển động tăng lên thì độ cứng theo chiều trực giao sẽ bị giảm. Ngoài ra, để tăng độ dịch chuyển thì phải tăng khoảng cách giữa các bề mặt, tuy nhiên điều này sẽ làm giảm tổng lực.

Loại phổ biến nhất của các cơ cấu chấp hành tĩnh điện quay là động cơ điện dung biến đổi và động cơ truyền động điều hòa (hay còn gọi là động cơ truyền động rung), được minh họa lần lượt trên hình 5.3 và 5.4. Hai động cơ này hoạt động theo nguyên tắc giống như cơ cấu chấp hành tuyến tính truyền động dạng lược. Động cơ điện dung biến đổi được đặc trưng bởi khả năng hoạt động tốc độ cao, mômen thấp. Để có được mức mômen thích hợp cho hầu hết các ứng dụng thì cần phải có một số dạng truyền động cơ khí micro đặc biệt, tuy nhiên hiện nay vẫn chưa có những loại truyền động này. Rôto của động cơ rung hoạt động bằng cách quay quanh stato, tạo ra một truyền động tự điều hòa và do đó tạo ra một tỷ số truyền lớn (khoảng vài trăm lần). Chú ý rằng rôto phải được cách ly tốt để quay quanh stato mà không có tiếp xúc điện. Nhược điểm của loại cơ cấu chấp hành này là chuyển động của rôto không đồng tâm với stato, điều này làm cho việc ghép tải vào một trục micro trở nên khó khăn hơn.



HÌNH 5.3 Động cơ tĩnh điện dạng điện dung thay đổi. Các cặp điện cực đối diện được lần lượt nạp năng lượng để làm quay rôto



HÌNH 5.4 Động cơ tĩnh điện dạng truyền động điều hòa. Các điện cực kề liền được lần lượt nạp năng lượng làm quay rôto (được cách ly) quanh stato

Các ví dụ về các cơ cấu chấp hành tĩnh điện tuyến tính dạng vuông góc được đưa ra ở [8-10]. Các ví dụ về cơ cấu chấp hành tĩnh điện truyền động dạng lược được đưa ra ở[11, 12], những cơ cấu chấp hành loại này nhưng có kích thước lớn hơn được giới thiệu trong [13]. Các ví dụ về động cơ tĩnh điện quay điện dung biến thiên được đưa ra ở [14-16]. Các ví dụ về động cơ truyền động điều hòa được đưa ra ở [17-22]. Các cơ cấu chấp hành micro tĩnh điện vẫn còn là một chủ đề trong nghiên cứu và phát triển do vậy hiện nay chưa có mặt trên thị trường.

Cơ cấu chấp hành điện từ

Cơ cấu chấp hành điện từ micro không phổ biến như ở kích thước thông thường. Có thể một phần do sự hoài nghi trước đây về kích thước của các lực từ và một phần do những khó khăn trong việc chế tạo theo bản sao của các thiết kế kích thước thường. Hầu hết các chuyển đổi điện từ dựa trên một dây dẫn mang điện trong một từ trường, được mô tả bằng phương trình Lorentz:

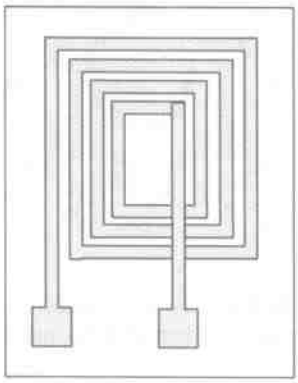
$$dF = Idl \times \mathbf{B}$$

trong đó F là lực trên dây dẫn, I là dòng điện trong dây dẫn, l là chiều dài dây dẫn và B là mật độ từ thông. Trong quan hệ này, mật độ từ thông là một biến nhạy và như vậy với vật liệu đã cho nó không đổi theo kích thước. Tuy nhiên, xác định dòng điện cũng không đơn giản. Điện trở của dây được cho bởi:

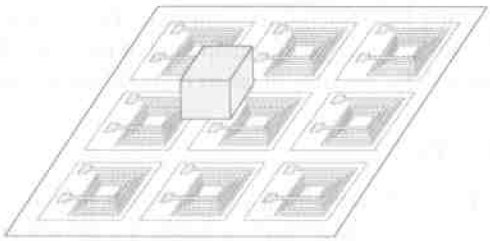
$$R = \frac{\rho l}{A}$$

trong đó ρ là suất điện trở của dây (một biến nhạy), l là chiều dài và A là diện tích tiết diện ngang. Nếu một dây có kích thước hình học giảm dần với hệ số N, điện trở sẽ tăng dần với hệ số N. Do công suất tiêu hao trên dây là I^2R, giả thiết dòng điện không đổi, suy ra công suất tiêu hao trên dây hình dáng nhỏ hơn sẽ tăng dần với hệ số N. Giả sử tiêu hao công suất lớn nhất với một dây đã cho được xác định bởi diện tích bề mặt của dây, một dây nhỏ hơn với hệ số N sẽ có thể làm tiêu hao công suất với hệ số N^2. Do đó giả thiết về dòng điện không đổi là một giả thiết không thực tế. Một giả thiết tốt hơn là dòng điện lớn nhất bị giới hạn bởi tiêu hao công suất lớn nhất, nó phụ thuộc vào diện tích bề mặt của dây. Nếu một dây dẫn nhỏ đi với hệ số N thì tiêu hao công suất sẽ giảm đi với hệ số N^2, do đó dòng điện trong dây dẫn sẽ giảm với hệ số $N^{3/2}$. Đưa kết luận này vào phương trình Lorentz ta sẽ thấy rằng nếu một cơ cấu chấp hành điện từ nhỏ hơn về hình học bởi hệ số N thì lực tác động sẽ nhỏ hơn với hệ số $N^{5/2}$. Trimmer và Jebens đã đưa ra một phân tích tương tự và chứng minh rằng các lực điện từ biến đổi với hệ số N^2 khi giả thiết nhiệt độ tăng với tốc độ không đổi trong dây, $N^{5/2}$ khi giả thiết dòng (được miêu tả ở trên) nhiệt (công suất) không đổi và N^3 khi giả thiết mật độ dòng điện không đổi [23, 24]. Trong bất kỳ trường hợp nào, tỷ lệ của các lực điện từ

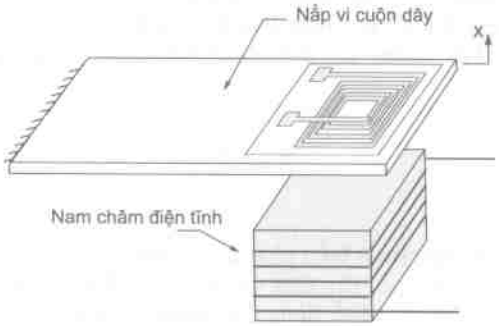
đều không lợi bằng tỷ lệ của các lực tĩnh điện. Mặc dù vậy, chấp hành điện từ vẫn được sử dụng trong các chấp hành micro và rất có thể là tỷ lệ kích thước có lợi hơn tỷ lệ của các lực quán tính hay trọng lực.



HÌNH 5.5 Sơ đồ cuộn dây micro được gia công micro bề mặt dùng cho cơ cấu chấp hành điện từ



HÌNH 5.6 Mảng cuộn dây micro để định vị trên mặt phẳng một nam châm micro vĩnh cửu [25]. Mỗi cuộn dây sinh ra một từ trường hút hoặc đẩy nam châm vĩnh cửu tuỳ thuộc vào hướng của dòng điện. Nam châm không bay mà trượt trên bề mặt cách ly



HÌNH 5.7 Nắp gập có chứa cuộn dây micro [26]. Tương tác giữa cuộn dây được nạp năng lượng và nam châm điện cố định làm cong nắp gập lệch lên trên hoặc xuống dưới, phụ thuộc vào hướng của dòng điện chạy trong cuộn dây micro

Phương pháp của Lorentz với chấp hành micro sử dụng các cuộn dây micro được gia công micro bề mặt, như thấy trên hình 5.5. Một cấu hình của phương pháp này được thấy trong cơ cấu chấp hành của Inoue [25], sử dụng việc điều khiển dòng điện trong một mảng các cuộn dây micro nhằm định vị một nam châm micro vĩnh cửu trên một bản mặt, như minh họa trên hình 5.6. Một phương pháp kiểu Lorentz khác được minh họa ở [26], sử dụng điều khiển dòng điện của một nắp gập có chứa cuộn dây micro trong một từ trường ngoài không đổi để thay đổi độ lệch của nắp gập,

như thấy trên hình 5.7. Theo Liu thì độ lệch có thể lên tới 500 μm và một dải thông xấp xỉ 1000 Hz [26]. Các ví dụ khác của các cơ cấu chấp hành không quay dạng Lorentz được giới thiệu trong [27-30]. Judy đã giới thiệu một phương pháp từ thuần túy, thực chất là tác động vào một nam châm vĩnh cửu micro treo bị uốn bằng cách điều khiển từ trường bên ngoài [30].

Ahn và Guckel đều đã đưa ra các động cơ micro điện từ loại từ trở biến thiên quay trong mặt phẳng [31, 32]. Phương pháp từ trở biến thiên có nhiều ưu điểm hơn vì rôto không yêu cầu đảo mạch và không cần phải là nam châm. Động cơ của Ahn kết hợp một stato 12 cực và một rôto 10 cực, trong khi động cơ của Guckel sử dụng một stato 6 cực và một rôto 4 cực. Cả 2 rôto kết hợp đều có đường kính xấp xỉ 500 μm. Guckel báo cáo rằng tốc độ động cơ trên 30000 vòng/phút và Ahn xác định mômen xoắn hãm lớn nhất là 1.2 μNm. Cũng giống như các cơ cấu chấp hành micro tĩnh điện, các cơ cấu chấp hành điện từ chế tạo micro cũng đang được nghiên cứu và phát triển, do đó hiện nay chưa có mặt trên thị trường.

5.3 Cảm biến micro

Do các cảm biến micro không truyền công suất, nên tỷ lệ các lực là không quan trọng. Cũng như với cảm biến kích thước thông thường, các chỉ số chất lượng cần quan tâm là độ phân giải cao, không có trôi và trễ, đạt được một độ rộng dải hiệu quả và giảm thiểu các ảnh hưởng bên ngoài đến quá trình đo.

Các cảm biến micro thường dựa vào đo lường biến dạng cơ học, đo lường dịch chuyển cơ học hoặc đo lường tần số cộng hưởng cấu trúc. Hai dạng đầu có bản chất là đo lường tương tự, trong khi dạng sau có bản chất là đo lường dạng nhị phân, bởi đại lượng cần đo thường là tần số dao động. Do các cảm biến loại cộng hưởng đo lường tần số thay vì biên độ, nên chúng ít bị ảnh hưởng của nhiễu và như vậy độ phân giải của phép đo thường lớn hơn. Theo Guckel, cảm biến cộng hưởng có độ phân giải gấp một trăm lần cảm biến tương tự [33]. Tuy nhiên, chúng cũng phức tạp hơn và thường khó chế tạo hơn.

Dạng cơ sở của đo lường dựa trên biến dạng là áp trở, trong khi phương pháp cơ bản để đo độ dịch chuyển là điện dung. Các cảm biến cộng hưởng yêu cầu phải có phương pháp kích thích cấu trúc và phương pháp phát hiện tần số cộng hưởng. Nhiều phương pháp chuyển đổi đã được sử dụng kết hợp cho các mục đích này, bao gồm kích thích tĩnh điện, dò điện dung, kích thích và dò từ tính, kích thích nhiệt và dò quang học.

Biến dạng

Nhiều cảm biến micro dựa trên đo biến dạng. Một phương thức cơ bản của đo biến dạng là thông qua biến dạng kế áp trở, đây là một dạng đo tương tự. Các biến dạng kế áp trở, hay còn gọi là thiết bị đo bán dẫn, thay đổi điện trở tương ứng với một biến dạng cơ học. Chú ý rằng các vật liệu áp điện cũng có thể được sử dụng để đo biến dạng. Nhớ rằng biến dạng cơ học sẽ gây ra sự tích điện trong một vật liệu áp điện. Vấn đề cơ bản của việc dùng vật liệu áp điện là mạch đo bị giới hạn trở kháng, nên điện tích được tạo ra từ biến dạng cơ học sẽ dần dần bị rò rỉ thông qua trở kháng đo. Ngược lại, sự thay đổi điện trở của một vật liệu áp trở là ổn định và có thể đo được dễ dàng với các tín hiệu ra ổn định. Tuy nhiên, một vấn đề với các vật liệu áp trở là độ biến dạng của chúng phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ và do đó thường phải bù nhiệt.

Một dạng khác của bộ áp trở bán dẫn là bộ biến dạng cộng hưởng của Ikeda [34], nó cung cấp một dạng đo lường dựa trên tần số mà ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu [34]. Biến dạng kế cộng hưởng là một dầm được treo nhẹ trên một bộ phận biến dạng và dính với nó tại hai đầu. Dầm biến dạng được kích thích từ tính bằng các xung và tần số dao động được xác định bởi một mạch dò từ tính. Khi dầm bị kéo dãn bởi lực biến dạng cơ học, tần số dao động sẽ tăng. Các cảm biến này có độ phân giải cao hơn các bộ điện áp thông thường và có hệ số nhiệt độ thấp hơn. Tuy nhiên, các cảm biến cộng hưởng yêu cầu công nghệ chế tạo ba chiều phức tạp, không giống như các áp trở thông thường chỉ yêu cầu công nghệ trên mặt phẳng.

Áp suất

Một trong những công nghệ cảm biến micro thành công về mặt thương mại nhất là cảm biến áp suất. Các cảm biến áp suất từ silic có mặt trên thị trường có thể đo áp suất từ một đến một vài nghìn kPa, với độ phân giải cỡ 1/10.000. Các cảm biến loại này có một màng làm bằng silic được gia công micro dưới sự tác động của chất lưu (tức là chất lỏng hoặc chất khí) màng sẽ giãn nở. Dạng đơn giản nhất của những cảm biến áp suất sử dụng các bộ áp trở nằm ở phần sau của màng để đo sự biến dạng do áp suất gây ra. Các ví dụ về thiết bị này được đưa ra bởi [35, 36]. Một biến thể của dạng này là thiết bị của Ikeda [34]. Thay vì một bộ áp trở để đo biến dạng, Ikeda sử dụng một bộ biến dạng kế cộng hưởng đo và điều khiển bằng điện từ, như đã miêu tả ở phần trước [37]. Đo lường điện dung cũng là một phương pháp hay được sử dụng, phương pháp này đo điện dung giữa màng và một điện cực được gắn cứng và song song với màng. Một minh họa cho phương pháp này được đưa ra ở [38]. Một phương pháp phức tạp hơn để đo lường áp suất là loại của Stemme và Stemme, dùng cộng hưởng của màng để xác định áp suất [39]. Trong thiết bị này, màng được kích thích điện dung và được xác định bằng quang học. Áp suất tác động tải cơ học lên màng, làm tăng độ cứng và tần số cộng hưởng.

Gia tốc

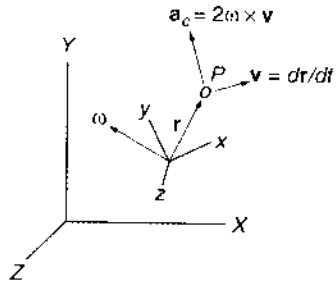
Một loại cảm biến micro khác cũng thành công về mặt thương mại là gia tốc kế gia công micro từ silic với nhiều dạng khác nhau có thể đo các khoảng gia tốc từ dưới 1 đến 1000 m/s^2 (nghĩa là tới vài trăm *g*), với độ phân giải cỡ $1/10^4$. Các cảm biến này sử dụng một khối lượng được gia công micro có khả năng chịu uốn. Lực quán tính gây ra bởi gia tốc sẽ làm chỗ treo bị uốn. Một phương pháp đo độ uốn là dùng các biến dạng kế áp trở gắn trên các chỗ bị uốn. Nhược điểm cơ bản của phương pháp này là độ nhạy nhiệt của bộ đo áp trở. Một cách khác để đo độ uốn là sử dụng phương pháp đo điện dung. Trong các thiết bị này, điện dung được đo giữa khối lượng treo bị uốn và một điện cực được gắn cứng và song song với nó. Các ví dụ của phương pháp này được đưa ra bởi [40-42]. Còn một cách khác nữa để đo lực quán tính trên khối lượng treo bị uốn là đo tần số cộng hưởng ở các chỗ uốn đỡ. Lực quán tính do gia tốc sẽ tác động lên chỗ uốn gây ra biến thiên tần số cộng hưởng của nó. Vì thế, từ tần số dao động có thể đo được gia tốc. Các loại thiết bị này sử dụng một số dạng chuyển đổi để kích thích cộng hưởng cấu trúc của các chỗ uốn đỡ và sau đó sử dụng các kỹ thuật đo lường khác để tìm ra tần số dao động. Các ví dụ về loại thiết bị này được đưa ra bởi [43], sử dụng kích thích tĩnh điện và đo điện dung và đưa ra bởi [44], sử dụng kích thích nhiệt và đo áp trở. Các loại gia tốc kế này rất phức tạp, tuy nhiên độ phân giải được cải thiện đáng kể. Một biến thể khác của gia tốc kế micro là dạng cân bằng lực. Dạng thiết bị này đo vị trí của khối được treo bị uốn (thường bằng các phương pháp điện dung), sử dụng một vòng phản hồi và chấp hành tĩnh điện hoặc điện từ để duy trì độ lệch không của khối. Gia tốc khi đó là hàm của lực chấp hành. Thiết bị này có dải thông rộng và độ nhạy cao, nhưng thường phức tạp hơn và đắt hơn các loại khác. Các ví dụ về thiết bị cân bằng lực được đưa ra bởi [45, 46], cả hai đều sử dụng cảm biến điện dung và chấp hành tĩnh điện.

Lực

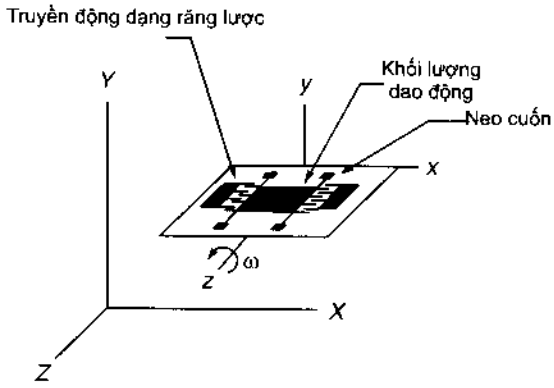
Cảm biến lực gia công micro silic sử dụng các phương pháp đo giống như kiểu cảm biến áp suất và gia tốc kế gia công micro. Những dạng khác nhau của loại cảm biến lực này có thể đo lực trong khoảng từ vài mN đến N, với độ phân giải $1/10^4$. Cảm biến cơ học thường sử dụng dầm hoặc gối đỡ linh hoạt bị uốn đàn hồi dưới tác động của lực, do đó có thể đo lực thông qua đo độ biến dạng hoặc dịch chuyển (có thể thực hiện bằng các phương pháp áp trở hoặc điện dung). Một ví dụ về dạng thiết bị này là thiết bị của Despont sử dụng phép đo điện dung [47]. Các thiết bị có độ phân giải cao hơn thường là kiểu dầm cộng hưởng, mà ở đó lực tác dụng tạo tải lên một dầm cộng hưởng dưới dạng sức căng. Sức căng càng tăng thì tần số cộng hưởng càng tăng. Một ví dụ về dạng thiết bị này là thiết bị của Blom [48].

Cảm biến đo vận tốc góc (Con quay hồi chuyển)

Con quay hồi chuyển kích thước thông thường sử dụng sự liên kết không gian của hiệu ứng hồi chuyển dựa trên động lượng góc để đo vận tốc góc. Trong các thiết bị này, một đĩa được quay ở vận tốc cao không đổi quanh trục chính của nó, sao cho khi đĩa quay quanh một trục không thẳng hàng với trục chính (hoặc trục quay) thì mômen xoắn xuất hiện theo phương vuông góc và tỷ lệ với vận tốc góc. Các thiết bị này thường được đặt trong khớp các đăng với ổ bi ma sát thấp, kết hợp với động cơ để duy trì vận tốc quay và sử dụng bộ đo ứng suất để đo mômen xoắn hồi chuyển (và do đó tính được vận tốc góc). Một thiết kế như vậy có thể không thích hợp cho cảm biến micro do một vài lý do, một số trong đó bao gồm hiệu ứng suy giảm quán tính (và do đó động lượng) ở kích thước nhỏ, thiếu ổ bi tương xứng, thiếu động cơ micro thích hợp và thiếu quá trình gia công micro ba chiều phù hợp. Thay vào đó, các cảm biến micro vận tốc góc có dạng dao động mà nó tích hợp các hiệu ứng kiểu Coriolis hơn là cơ cấu hồi chuyển dựa trên động lượng góc của thiết bị kích thước thông thường. Gia tốc Coriolis được tạo ra do dịch chuyển tuyến tính trong hệ toạ độ đang quay đối với hệ qui chiếu quán tính. Cụ thể, nếu phần tử trên hình 5.8 đang chuyển động với vận tốc v trong hệ xyz và nếu hệ xyz quay với vận tốc góc ω đối với hệ qui chiếu quán tính XYZ, thì gia tốc Coriolis sẽ có kết quả bằng $\mathbf{a}_c = 2\omega \times v$. Nếu vật có khối lượng m, lực quán tính Coriolis sẽ có kết quả bằng $F_c = -2\omega \times v$ (dấu trừ bởi vì hướng ngược với $\mathbf{a}_c$). Một con quay hồi chuyển dao động sử dụng hiệu ứng này được minh họa trên hình 5.9.



HÌNH 5.8 Minh họa gia tốc Coriolis do dịch chuyển trong hệ qui chiếu quay đối với hệ qui chiếu quán tính



HÌNH 5.9 Sơ đồ con quay hồi chuyển dao động

Một khối lượng quán tính treo động được dao động theo chiều x, thường với truyền động dạng răng lược tĩnh điện. Vận tốc góc quanh trục z sẽ tạo ra gia tốc Coriolis và do đó tạo ra lực theo chiều y. Nếu vận tốc góc "bên ngoài" không đổi và vận tốc theo chiều x là hình sin, thì lực Coriolis sinh ra sẽ có dạng hình sin và khối lượng quán tính treo sẽ dao động theo chiều y với biên độ tỷ lệ theo vận tốc góc. Chuyển động theo chiều y, thường được đo bằng điện dung, vận tốc góc. Các ví

dụ về kiểu thiết bị này là các thiết bị của [49, 50]. Chú ý rằng mặc dù dao động là thành phần chủ yếu của các thiết bị này, nhưng về mặt kỹ thuật chúng không phải là cảm biến cộng hưởng, do chúng đo biên độ của dao động hơn là đo tần số.

5.4 Thiết bị nano

Thiết bị nano là thiết bị có dải từ kích thước nhỏ nhất của các thiết bị MEMS tới thiết bị được lắp ráp từ những phân tử đơn lẻ [51]. Phần này giới thiệu ngắn gọn các nguồn năng lượng, phân cấp cấu trúc và tương lai của việc chế tạo thiết bị nano. Được xây dựng từ những thành phần cỡ phân tử thực hiện chức năng cơ học riêng biệt, các dạng thích hợp của nguồn năng lượng để khởi động thiết bị nano chỉ có thể là những dạng năng lượng hoạt động ở mức phân tử. Xét về mặt sản xuất, việc lắp ráp các thiết bị nano thực chất là việc lắp ráp từng phân tử. Mặc dù kỹ thuật hiển vi đã được sử dụng cho việc lắp ráp các cấu trúc nano, nhưng việc tự lắp ráp được xem như là phương pháp có thể thực hiện được trong sản xuất loại lớn.

Trong một thiết bị cỡ phân tử, rất nhiều thành phần phân tử được kết hợp với nhau để tạo thành một cấu trúc siêu phân tử, ở đó mỗi thành phần phân tử rời rạc thực hiện một chức năng riêng lẻ. Việc kết hợp những phân tử riêng lẻ này tạo thành thiết bị có khả năng hoạt động và thực thi những chức năng khác nhau. Các thiết bị phân tử cần một nguồn năng lượng để hoạt động. Năng lượng này cơ bản được dùng để kích thích các phân tử thành phần trong thiết bị và do đó năng lượng phải có bản chất hóa học. Năng lượng hoá học có thể nhận được bằng cách thêm các ion hydro, chất oxy hoá, v.v.., bằng cách gây phản ứng hoá học dưới tác động của ánh sáng, hoặc bằng các tác động của dòng điện. Hai phương pháp sử dụng nguồn năng lượng quang hoá và điện hoá được ưa chuộng do chúng không chỉ cung cấp năng lượng cho hoạt động của thiết bị, mà chúng có thể được sử dụng để định vị hoặc điều khiển thiết bị. Ngoài ra, có thể dùng việc biến đổi năng lượng để truyền dữ liệu nhằm thông báo việc thực thi và trạng thái của thiết bị. Một lý do khác cho sự ưu tiên đối với thiết bị phân tử dựa trên quang hóa và điện hoá là khi các thiết bị này cần hoạt động theo chu kỳ thì phản ứng hoá học điều khiển hệ thống phải có tính thuận nghịch. Do các quá trình quang hoá và điện hoá không dẫn tới việc tích trữ sản phẩm phản ứng, nên chúng được ứng dụng trong thiết bị nano.

Thiết bị phân tử được thiết kế hiện nay có khả năng chuyển động và điều khiển bằng phương pháp quang hoá. Một thiết bị là hệ thống khe và chốt cỡ phân tử và một cái khác là hệ thống piston-xilanh [51]. Việc xây dựng các thiết bị siêu phân tử như thế thuộc về lĩnh vực của những nhà hoá học, những người giỏi về điều khiển phân tử.

Như một sự tiến bộ tiếp theo về kích thước của thiết bị nano, chúng ta đã đạt tới những thiết bị được sản xuất từ các ống nano carbon đơn vách SWNT (Single-Walled Carbon NanoTubes) và/hoặc ống nano carbon đa vách MWNT (Multi-walled Carbon NanoTubes) với đường kính vài nano mét. Chúng ta sẽ chỉ thảo luận về ống nano carbon CNT (Carbon NanoTubes), mặc dù có rất nhiều ống nano được tạo ra từ các vật liệu khác, đặc biệt là bitmut. Độ bền và tính đa dụng của CNT làm cho chúng trở thành một công cụ tốt cho kỹ sư thiết kế máy micro. Chúng có độ dẫn điện cao với khả năng mang dòng điện hàng tỷ ampe trên một centimét vuông. Chúng là bộ cực phát trường tuyệt vời ở điện áp hoạt động thấp. Hơn nữa, CNT phát ra ánh sáng kết hợp và điều này tạo ra một lĩnh vực hoàn toàn mới của các ứng dụng toàn ảnh (holographic). Suất đàn hồi của CNT là cao nhất của tất cả các vật liệu được biết hiện nay[52]. Các tính chất điện và độ bền cơ học rất cao này làm MWNT trở thành đầu dò kính hiển vi lực nguyên tử. CNT có khả năng được sử dụng như các thiết bị lắp ráp phân tử để chế tạo các máy chế tạo nano mỗi lần một nguyên tử.

Hai ứng dụng công nghệ nano rõ ràng của CNT là ổ bi nano và lò xo nano. Zettl và Cumings [53] đã tạo ra ổ bi tuyến tính và lò xo nano lực không đổi dựa trên MWNT. CNT có thể tạo ra tập hợp cơ bản các khối xây dựng cỡ nano mét, từ đó các máy nano với nhiều loại khác nhau có thể được chế tạo. Những máy nano này có thể được sử dụng trong một tập hợp các máy nano mà sau đó được dùng để thiết kế máy với các kiểu và kích thước khác nhau. Những máy này có thể cạnh tranh, thậm chí vượt trội so với tất cả thiết bị hiện có.

SWNT cũng có thể được sử dụng như một cơ cấu chấp hành cơ điện. Baughman [54] đã chứng minh rằng các tấm SWNT sinh ra lực lớn hơn cơ bắp tự nhiên và độ biến dạng lớn hơn các chất sắt điện có suất áp điện cao. Người ta dự đoán rằng cơ cấu chấp hành dùng các tấm SWNT có thể cung cấp mật độ công việc trên một chu kỳ cao hơn các cơ cấu chấp hành đã biết. Kim và Lieber [55] đã xây dựng những cái kẹp nano SWNT và MWNT. Những thiết bị cơ điện cỡ nano này được dùng để thao tác và kiểm tra cấu trúc nano. CNT dẫn điện được gắn vào các điện cực trên ống nghiệm micro thuỷ tinh dạng kéo. Điện áp đặt vào điện cực mở và đóng đầu tự do của CNT. Kim và Lieber đã chứng minh khả năng của kẹp nano bằng cách tìm và gắp những vật siêu nhỏ và dây cỡ nano. Thiết bị này có thể được dùng để điều khiển tế bào sinh học và thậm chí thao tác với các cơ quan và các cụm tế bào người. Có lẽ, quan trọng hơn, những cái kẹp này có khả năng được sử dụng để lắp ráp những máy nano khác.

Các dạng tay máy cỡ nano khác nhau được giới thiệu bởi [56] bao gồm tay máy khí nén có thể được định hình để tạo nên các thiết bị dạng xúc tu, con rắn, hoặc nhiều khoang. Drexler đã đề xướng các tay máy nano có khả năng lồng vào nhau cho các công việc định vị và lắp ráp phân tử chính xác. Tay máy này có dạng hình trụ với đường kính 35 nm và chiều dài có khả năng mở rộng tới 100 nm. Một số cơ cấu Stewart sáu bậc tự do được giới thiệu trong [56], trong đó có cơ cấu cho phép chiều dài các chân đỡ thay đổi trong phạm vi 100 nm với bước thay đổi là 0.1 nm. Một số các thiết bị nano khác bao gồm gia tốc kế lò xo hộp, gia tốc kế dịch chuyển, gia tốc kế hồi chuyển trục đứng và con quay hồi chuyển nano khớp các-đăng cũng đã được giới thiệu và thiết kế [56].

Hiện nay, người ta đang tập trung suy nghĩ về các thiết bị lắp ráp và tự nhân bản cỡ phân tử (robot nano tự nhân bản). Tự lắp ráp là cách duy nhất cho công nghệ nano phát triển theo hướng kỹ thuật và công nghệ. Việc lắp ráp hàng tỷ hoặc hàng nghìn tỷ nguyên tử một lần một có thể là một công việc lớn. Nó cần một sự đầu tư khổng lồ về thiết bị, phòng thí nghiệm và thời gian. Freitas [56] đã mô tả hạ tầng cơ sở cần thiết để chế tạo một rôbôt nano y tế đơn giản: một tế bào hô hấp hình cầu 1μm bao gồm 18 tỷ nguyên tử. Ông tính toán rằng để chế tạo được hai rôbôt nano trong vòng 10 năm thì cần phải có một dây chuyền sản xuất để triển khai một hệ thống gồm 100 bộ lắp ráp của kính hiển đầu dò quét kích thước micro (SPM), trong đó mỗi bộ lắp ráp có khả năng đặt một nguyên tử trong một giây lên cùng một vùng lắp ráp. Nếu như tốc độ chế tạo của các bộ lắp ráp thậm chí được tăng cường đến mức chế tạo được một rôbôt nano trong mỗi phút có tăng lên nhiều lần, thì vẫn phải mất hai triệu năm để xây dựng một cm^3 đầu tiên của các rôbôt nano y học. Bởi vậy, rõ ràng là tương lai của công nghệ nano y học và kỹ thuật nano phải theo hướng tự lắp ráp và tự nhân bản.

Tài liệu tham khảo

[1] Bridgman, P. W., *Dimensional Analysis*, 2nd Ed., Yale University Press, 1931.

[2] Buckingham, E., "On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations", *Physical Review*, 4(4):345–376, 1914.

[3] Huntley, H. E., *Dimensional Analysis*. Dover Publications, 1967.

[4] Langhaar, H. L., *Dimensional Analysis and Theory of Models*, John Wiley and Sons, 1951.

[5] Taylor, E. S., *Dimensional Analysis for Engineers*, Oxford University Press, 1974.

[6] Israelachvili, J. N., *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, 1985, pp. 9–10.

[7] Fearing, R. S., "Microactuators for microrobots: electric and magnetic", *Workshop on Micromechatronics, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997.

[8] Bobbio, S. M., Keelam, M. D., Dudley, B. W., Goodwin-Hohansson, S., Jones, S. K., Jacobson, J. D., Tranjan, F. M., Dubois, T. D., "Integrated force arrays", *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, 149–154, 1993.

[9] Jacobson, J. D., Goodwin-Johansson, S. H., Bobbio, S. M., Bartlett, C. A., Yadon, L. N., "Integrated force arrays: theory and modeling of static operation", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 4(3):139–150, 1995.

[10] Yamaguchi, M., Kawamura, S., Minami, K., Esashi, M., "Distributed electrostatic micro actuators", *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, 18–23, 1993.

[11] Kim, C. J., Pisano, A. P., Muller, R. S., "Silicon-processed overhanging microgripper", *Journal of Microelectromechanical Systems,* 1(1):31–36, 1992.

[12] Matsubara, T., Yamaguchi, M., Minami, K., Esashi, M., "Stepping electrostatic microactuator", *International Conference on Solid-State Sensor and Actuators,* 50–53, 1991.

[13] Niino, T., Egawa, S., Kimura, H., Higuchi, T., "Electrostatic artificial muscle: compact, high-power linear actuators with multiple-layer structures", *Proceedings of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 130–135, 1994.

[14] Huang, J. B., Mao, P. S., Tong, Q. Y., Zhang, R. Q., "Study on silicon electrostatic and electroquasistatic micromotors", *Sensors and Actuators,* 35:171–174, 1993.

[15] Mehragany, M., Bart, S. F., Tavrow, L. S., Lang, J. H., Senturia, S. D., Schlecht, M. F., "A study of three microfabricated variable-capacitance motors", *Sensors and Actuators,* 173–179, 1990.

[16] Trimmer, W., Gabriel, K., "Design considerations for a practical electrostatic micromotor", *Sensors and Actuators,* 11:189–206, 1987.

[17] Mehregany, M., Nagarkar, P., Senturia, S. D., Lang, J. H., "Operation of microfabricated harmonic and ordinary side-drive motors", *Proceeding of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 1–8, 1990.

[18] Dhuler, V. R., Mehregany, M., Phillips, S. M., "A comparative study of bearing designs and operational environments for harmonic side-drive micromotors", *IEEE Transactions on Electron Devices,* 40(11):1985–1989, 1993.

[19] Price, R. H., Wood, J. E., Jacobsen, S. C., "Modeling considerations for electrostatic forces in electrostatic microactuators", *Sensors and Actuators,* 20:107–114, 1989.

[20] Trimmer, W., Jebens, R., "An operational harmonic electrostatic motor", *Proceeding of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 13–16, 1989.

[21] Trimmer, W., Jebens, R., "Harmonic electrostatic motors", *Sensors and Actuators,* 20:17 -24, 1989.

[22] Furuhata, T., Hirano, T., Lane, L. H., Fontanta, R. E., Fan, L. S., Fujita, H., "Outer rotor surface micromachined wobble micromotor", *Proceeding of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 161–166, 1993.

[23] Trimmer, W., Jebens, R., "Actuators for microrobots", *IEEE Conference on Robotics and Automation,* 1547–1552, 1989.

[24] Trimmer, W., "Microrobots and micromechanical systems", *Sensors and Actuators,* 19:267–287, 1989.

[25] Inoue, T., Hamasaki, Y., Shimoyama, I., Miura, H., "Micromanipulation using a microcoil array", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation,* 2208–2213, 1996.

[26] Liu, C., Tsao, T., Tai, Y., Ho, C., "Surface micromachined magnetic actuators", *Proceedings of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 57–62, 1994.

[27] Shinozawa, Y., Abe, T., Kondo, T., "A proportional microvalve using a bi-stable magnetic actuator", *Proceedings of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 233–237, 1997.

[28] Wagner, B., Benecke, W., "Microfabricated actuator with moving permanent magnet", *Proceedings of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 27-32, 1991.

[29] Yanagisawa, K., Tago, A., Ohkubo, T., Kuwano, H., "Magnetic microactuator", *Proceedings of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 120–124, 1991.

[30] Judy, J., Muller, R. S., Zappe, H. H., "Magnetic microactuation of polysilicon flexure structures", *Journal of Microelectromechanical Systems,* 4(4):162–169, 1995.

[31] Ahn, C. H., Kim, Y. J., Allen, M. G., "A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stator and wrapped coils", *Proceedings of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 1–6, 1993.

[32] Guckel, H., Christenson, T. R., Skrobis, K. J., Jung, T. S., Klein, J., Hartojo, K. V., Widjaja, I., "A first functional current excited planar rotational magnetic micromotor", *Proceedings of the IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems,* 7–11, 1993.

[33] Guckel, H., Sneigowski, J. J., Christenson, T. R., Raissi, F., "The application of fine grained, tensile polysilicon to mechanically resonant transducers", *Sensor and Actuators.* A21–A23:346–351, 1990.

[34] Ikeda, K., Kuwayama, H., Kobayashi, T., Watanabe, T., Nishikawa, T., Yoshida, T., Harada, K., "Silicon pressure sensor integrates resonant strain gauge on diaphragm", *Sensors and Actuators*, A21–A23:146–150, 1990.

[35] Fujii, T., Gotoh, Y., Kuroyanagi, S., "Fabrication of microdiaphragm pressure sensor utilizing micromachining", *Sensors and Actuators*, A34:217–224, 1992.

[36] Mallon, J., Pourahmadi, F., Petersen, K., Barth, P., Vermeulen, T., Bryzek, J., "Low-pressure sensors employing bossed diaphragms and precision etch-stopping", *Sensors and Actuators*, A21–23:89–95, 1990.

[37] Ikeda, K., Kuwayama, H., Kobayashi, T., Watanabe, T., Nishikawa, T., Yoshida, T., Harada, K., "Three-dimensional micromachining of silicon pressure sensor integrating resonant strain gauge on diaphragm", *Sensors and Actuators*, A21–A23:1007–1009, 1990.

[38] Nagata, T., Terabe, H., Kuwahara, S., Sakurai, S., Tabata, O., Sugiyama, S., Esashi, M., "Digital compensated capacitive pressure sensor using cmos technology for low-pressure measurements", *Sensors and Actuators*, A34:173–177, 1992.

[39] Stemme, E., Stemme, G., "A balanced resonant pressure sensor", *Sensors and Actuators*, A21–A23: 336–341, 1990.

[40] Boxenhorn, B., Greiff, P., "Monolithic silicon accelerometer", *Sensors and Actuators*, A21–A23:273–277, 1990.

[41] Leuthold, H., Rudolf, F., "An ASIC for high-resolution capacitive microaccelerometers", *Sensors and Actuators*, A21–A23:278–281, 1990

[42] Seidel, H., Riedel, H., Kolbeck, R., Muck, G., Kupke, W., Koniger, M., "Capacitive silicon accelerometer with highly symmetrical design", *Sensors and Actuators*, A21–A23:312–315, 1990.

[43] Chang, S. C., Putty, M. W., Hicks, D. B., Li, C. H., Howe, R. T., "Resonant-bridge two-axis microaccelerometer", *Sensors and Actuators*, A21–A23:342–345, 1990.

[44] Satchell, D. W., Greenwood, J. C., "A thermally-excited silicon accelerometer," *Sensors and Actuators*, A17:241–245, 1989.

[45] Chau, K. H. L., Lewis, S. R., Zhao, Y., Howe, R. T., Bart, S. F., Marchesilli, R. G., "An integrated force-balanced capacitive accelerometer for low-*g* applications", *Sensors and Actuators*, A54:472–476, 1996.

[46] Kuehnel, W., Sherman, S., "A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry", *Sensors and Actuators*, A45:7–16, 1994.

[47] Despont, Racine, G. A., Renaud, P., de Rooij, N. F., "New design of micromachined capacitive force sensor", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 3:239–242, 1993.

[48] Blom, F. R., Bouwstra, S., Fluitman, J. H. J., Elwenspoek, M., "Resonating silicon beam force sensor", *Sensors and Actuators*, 17:513–519, 1989.

[49] Bernstein, J., Cho, S., King, A. T., Kourepenis, A., Maciel, P., Weinberg, M., "A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope", *IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 143–148, 1993.

[50] Oh, Y., Lee, B., Back, S., Kim, H., Kim, J., Kang, S., Song, C., "A surface-micromachined tunable vibratory gyroscope", *IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 272–277, 1997.

[51] Venturi, M., Credi, A., Balzani, V., "Devices and machines at the molecular level", *Electronic Properties of Novel Materials, AIP Conf. Proc.*, 544:489–494, 2000.

[52] Ajayan, P. M., Charlier, J. C., Rinzler, A. G., "PNAS", 96:14199–14200, 1999.

[53] Zettl, A., Cumings, J., "Sharpened nanotubes, nanobearings and nanosprings", *Electronic Properties of Novel Materials, AIP Conf. Proc.*, 544:526–531, 2000.

[54] Baughman, R. H., et al., "Carbon nanotube actuators", *Science*, 284:1340–1344, 1999.

[55] Kim, P., Lieber, C. M., "Nanotube nanotweezers", *Science*, 286:2148–2150, 1999.

[56] Freitas, R. A., "Nanomedicine", Vol. I, *Landes Bioscience*, Austin, 1999.

6

Những hướng mới trong thiết kế các hệ cơ điện tử mini, micro và nano, và xây dựng chương trình giảng dạy

6.1 Mở đầu 6-1
6.2 Hệ cơ điện tử mini, micro và nano, và chương trình giảng dạy 6-3
6.3 Cơ điện tử và kỹ thuật hiện đại 6-3
6.4 Thiết kế hệ cơ điện tử 6-4
6.5 Các thành phần của hệ cơ điện tử 6-6
6.6 Tổng hợp hệ thống, phần mềm cơ điện tử và mô phỏng 6-6
6.7 Chương trình giảng dạy cơ điện tử 6-7
6.8 Giới thiệu chương trình đào tạo cơ điện tử 6-8
6.9 Sách về cơ điện tử 6-9
6.10 Xây dựng chương trình giảng dạy cơ điện tử 6-10
6.11 Kết luận: Triển vọng cơ điện tử 6-11

Sergey Edward Lyshevski
Purdue University Indianapolis

6.1 Mở đầu

Kỹ thuật hiện đại bao gồm nhiều lĩnh vực kiến thức đa dạng. Bởi vậy, một yêu cầu cấp thiết là phải xác định các hướng mới trong nghiên cứu và đào tạo kỹ thuật để hướng tới, theo đuổi và thực hiện các sáng kiến nghiên cứu tiên phong có ý nghĩa và xây dựng chương trình đào tạo phù hợp. Cơ điện tử là sự tích hợp nhiều chuyên ngành và các công cụ khác nhau nên nó có khả năng phối hợp đa ngành và hỗ trợ những thay đổi hiện nay trong nghiên cứu và công nghiệp. Cần thiết phải có một nghiên cứu tiên tiến cho cơ điện tử và một sự cải tổ chương trình đào tạo đại học và sau đại học. Ngày nay, các kết quả nghiên cứu và sự tiến bộ mạnh mẽ của công nghệ trong các thiết bị chuyển động cơ điện, điện tử công suất, thiết bị ở trạng thái rắn, điện tử micro, hệ cơ điện tử micro và nano (MEMS, NEMS), vật liệu và đóng gói, máy tính, thông tin, hệ thống thông minh, vi xử lý và DSP, xử lý tín hiệu và quang học, các công cụ thiết kế có sự trợ giúp của máy tính và các môi trường mô phỏng đã đặt ra những thách thức mới cho nghiên cứu. Vì vậy, nhiều nhà khoa học đã quan tâm đến lĩnh vực cơ điện tử và các trường kỹ thuật đã thay đổi chương trình đào tạo để đưa ra những khoá học thích hợp cho cơ điện tử.

Hệ cơ điện tử được phân loại như sau:

1. Hệ cơ điện tử truyền thống
2. Hệ cơ điện tử micro (MEMS)
3. Hệ cơ điện tử nano (NEMS)

Nguyên tắc hoạt động và nền tảng cơ bản của hệ cơ điện tử truyền thống và MEMS là giống nhau, trong khi NEMS có thể được nghiên cứu bằng những khái niệm và lý thuyết khác. Trong thực tế, các nhà thiết kế áp dụng cơ học cổ điển và điện từ để nghiên cứu hệ cơ điện tử truyền thống và MEMS. Lý thuyết lượng tử và cơ điện tử nano được áp dụng cho NEMS, xem hình 6.1.

HÌNH 6.1 Phân loại và các lý thuyết cơ sở được áp dụng trong hệ thống cơ điện tử

Điểm yếu của các chương trình đào tạo kỹ thuật máy tính, điện và cơ khí là không có đủ những kiến thức cơ sở và sự hiểu biết sâu rộng về các hệ cơ điện tử tích hợp để giải quyết nhiều vấn đề kỹ thuật đa ngành phức tạp. Cơ điện tử đưa ra chủ đề, các lĩnh vực đa ngành và các môn học (chẳng hạn kỹ thuật điện, cơ học và máy tính) từ cái nhìn tổng thể thông qua các cơ sở lý thuyết cơ điện và chuỗi các khóa học cơ điện tử trong một hướng đi hoặc chương trình (như chương trình giảng dạy) của hệ cơ điện (như cơ điện tử). Chuỗi khoá học này được xây dựng dựa trên các mục tiêu và cường độ của chương trình. Đối với các chương trình kỹ thuật khác (ví dụ: điện, cơ học, máy tính, hàng không, vật liệu) thì số lượng các môn học cơ điện tử, nội dung và lượng kiến thức cũng khác nhau, do các môn học cơ điện tử bổ sung cho chương trình học cơ bản. Tuy nhiên, mục đích cuối cùng là giống nhau: giáo dục và chuẩn bị một thế hệ sinh viên và kỹ sư mới nhằm giải quyết một loạt các vấn đề kỹ thuật.

Cơ điện tử là một phần quan trọng của kỹ thuật tổng hợp hiện đại do các đặc tính tích hợp, tương tác, tương thích và hệ thống hoá. Các phương pháp đầy đủ và hiệu quả để đánh giá xu hướng hiện nay trong kỹ thuật hiện đại với phân tích đánh giá và dự báo đầu ra có thể được tiếp cận nhờ mô hình cơ điện tử. Các hoạt động nghiên cứu và đào tạo cơ điện tử đa ngành, kết hợp với cách dạy tổng hợp và học chủ động sẽ có hiệu quả lớn hơn việc cải tiến các chương trình đào tạo kỹ thuật điện, máy tính và cơ học truyền thống. Mô hình cơ điện tử đa ngành đáp ứng những mục đích rất quan trọng do nó mang đến chiều sâu mới cho các lĩnh vực kỹ thuật, cung cấp nền tảng và kiến thức cho sinh viên, cung cấp cho sinh viên những kỹ năng cơ bản cần thiết để giải quyết các vấn đề của các hệ cơ điện tử cao cấp được điều khiển bằng bộ vi xử lý hoặc DSP, hướng tới các phần cứng tiên tiến, làm nổi bật và ứng dụng các môi trường phần mềm hiện đại. Thông qua chương trình học cơ điện tử để đạt được các mục đích và mục tiêu quan trọng. Sự tích hợp các môn học cơ điện tử vào chương trình giảng dạy kỹ thuật sẽ được trình bày trong chương này. Mục đích cơ bản của chúng ta là xác định vai trò, kiểm tra các môn học sẵn có, cải tiến và nâng cao chương trình giảng dạy cơ điện tử nhằm cải tiến cấu trúc và nội dung các chương trình kỹ thuật, tuyển chọn và thúc đẩy sinh viên, tăng cường hiệu quả giảng dạy và cải thiện việc phân phát tư liệu, cũng như ước lượng và đánh giá đầu ra của chương trình kỹ thuật cần đạt. Tầm quan trọng chính được đặt vào việc nâng cao và cải thiện trong kiến thức, cách học, cách suy nghĩ, chiều sâu, chiều rộng của sinh viên mang lại sự hiểu biết, kiến thức tích hợp và ứng dụng, động cơ, sự tận tâm, tính sáng tạo, nhiệt tình và sự tin tưởng. Có thể đạt được điều này thông qua sự phát triển và thực thi chương trình giảng dạy cơ điện tử. Chương này trình bày việc xây dựng chương trình giảng dạy cơ điện tử. Vai trò của cơ điện tử trong kỹ thuật hiện đại sẽ được thảo luận và trình bày.

6.2 Hệ cơ điện tử mini, micro và nano, và chương trình giảng dạy

Các hệ cơ điện tử truyền thống, mini và micro được nghiên cứu từ một quan điểm thống nhất do các đặc điểm hoạt động, hiện tượng cơ bản và hiệu ứng chi phối được dựa trên điện từ học và cơ học cổ điển (cơ điện). Hệ cơ điện tử tích hợp các hệ thống con và thành phần. Cho dù các hệ thống con hoặc các thành phần (động cơ điện, cảm biến, bộ khuyếch đại công suất hoặc DSP) hoạt động tốt, nhưng hoạt động toàn bộ có thể bị suy giảm nếu nhà thiết kế thất bại trong việc tích hợp và tối ưu hệ cơ điện tử. Trong khi máy điện, cảm biến, điện tử công suất, bộ điều khiển micro và DSP có thể được quan tâm, phân tích, thiết kế và tối ưu thì tâm điểm chính vẫn tập trung vào các vấn đề tích hợp. Các nhà thiết kế đôi khi không nắm bắt và hiểu rõ một cách tổng thể về hệ thống, nguyên nhân là do không có đủ kinh nghiệm, kiến thức và khả năng phân tích đánh giá chi tiết với dự báo kết quả và đánh giá hoạt động của toàn bộ hệ thống. Trong khi phương pháp *phân chia và giải quyết* dựa trên các thành phần được sử dụng trong giai đoạn thiết kế ban đầu thì việc thiết kế và phân tích các hệ cơ điện tích hợp được thực hiện trong bối cảnh tối ưu hoá toàn bộ hệ thống với các mục tiêu phù hợp với đặc tính kỹ thuật, yêu cầu và giới hạn đặt ra. Các công nghệ VLSI và cơ điện mới, phần mềm thiết kế có sự trợ giúp của máy tính, các công cụ thiết kế phối hợp phần cứng phần mềm, các môi trường phần mềm hiệu suất cao và các giải thuật tính toán mạnh cần được áp dụng để thiết kế các hệ cơ điện. Đối tượng chính của việc phát triển chương trình giảng dạy cơ điện tử là nhằm thoả mãn các yêu cầu nghiên cứu - công nghiệp - chính phủ cũng như giúp đỡ sinh viên phát triển các kỹ năng cơ bản, khả năng phân tích và thực nghiệm chuyên sâu trong phân tích, thiết kế, tối ưu, điều khiển và thực thi các hệ cơ điện tích hợp tiên tiến. Không thể giới thiệu toàn bộ các vấn đề cơ điện tử bằng một khóa học đơn lẻ, do vậy, cần phải phát triển chương trình giảng dạy cơ điện tử với giả thiết rằng sinh viên đã có những kiến thức cơ bản về toán học, vật lý, mạch điện tử, thiết bị cơ điện, cảm biến và điều khiển.

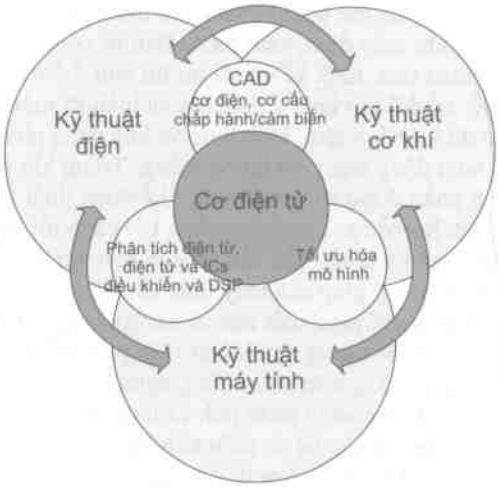
Chương trình giảng dạy kỹ thuật thường tích hợp các môn học giáo dục, khoa học, kỹ thuật đại cương. Sự hợp nhất các môn học thiết kế kỹ thuật và khoa học kỹ thuật đa ngành chính là biểu hiện của sự rời xa khỏi chương trình giảng dạy truyền thống. Thông thường, các sinh viên kỹ thuật điện cũng có hiểu biết hạn chế về điện tử hiện đại, máy điện, điện tử công suất, IC, bộ vi điều khiển và DSP do một số trong các môn học này là môn tự chọn. Các sinh viên kỹ thuật cơ khí hiểu biết hơn các sinh viện kỹ thuật điện về cơ học và nhiệt động học nhưng lại hạn chế về điện tử, máy điện, điện tử công suất, vi điện tử và DSP. Ngoài ra, những sinh viên kỹ thuật cơ khí và điện cũng đều ít hiểu biết về khoa học máy tính và toán kỹ thuật do các môn học này thường chỉ bắt buộc đối với những sinh viên kỹ thuật máy tính. Sự cần thiết của toán kỹ thuật, điện tử, điện tử công suất và các thiết bị chuyển động cơ điện (máy điện, cơ cấu chấp hành và cảm biến) không hề giảm, thậm chí còn tăng lên. Mặt khác, các phần cứng cao cấp được phát triển để chế tạo các cảm biến, cơ cấu chấp hành, IC và anten cỡ micro và nano. Vấn đề phần mềm hiệu quả cũng được đặt ra. Để vượt qua khó khăn gặp phải, những khoá học cơ điện tử bao trùm các lĩnh vực đa ngành cần được giới thiệu cho chương trình giảng dạy kỹ thuật. Cơ điện tử đã được khảo sát và hỗ trợ đầy nhiệt tình bởi chương trình đại học và sau đại học, các trường đại học theo định hướng nghiên cứu và đào tạo, công nghiệp công nghệ cao và các phòng thí nghiệm của nhà nước. Tuy nhiên, cần phát triển chiến lược dài hạn trong nghiên cứu và đào tạo cơ điện tử, xác định vai trò cũng như thực thi, thương mại hoá và thị trường hóa các chương trình cơ điện và cơ điện tử.

6.3 Cơ điện tử và kỹ thuật hiện đại

Nhiều vấn đề kỹ thuật có thể được thiết lập, xem xét và giải quyết bằng cách dùng mô hình cơ điện tử. Cơ điện tử giải quyết các vấn đề cơ bản và mới trong kỹ thuật khoa học và công nghệ tích hợp, điện-cơ-máy tính. Nhiều vấn đề đã không được bắt đầu và giải quyết và đôi khi các giải pháp đã có không thể coi là giải pháp tối ưu. Điều này phản ánh một cách rõ ràng các xu hướng trong nghiên cứu cơ bản, ứng dụng và thực nghiệm cũng như những thay đổi chương trình giảng dạy đáp ứng với các vấn đề chưa được giải quyết lâu dài, các hoạt động kinh doanh kỹ thuật và công nghệ và những yêu cầu có tính cách mạng.

Cơ điện tử là sự thiết kế tích hợp, phân tích, tối ưu hóa và tạo mẫu ảo cho các hệ cơ điện hiệu suất cao và thông minh, tính thông minh hệ thống, khả năng học, sự thích ứng, ra quyết định và điều khiển thông qua việc sử dụng phần cứng cao cấp (cơ cấu chấp hành, cảm biến, vi xử lý, DSP, điện tử công suất và IC) và phần mềm tiên tiến.

Các đặc trưng đa ngành tích hợp tiếp cận với nhau một cách nhanh chóng, như thấy trên hình 6.2. Mô hình cơ điện tử, là sự tích hợp kỹ thuật điện-cơ-máy tính.



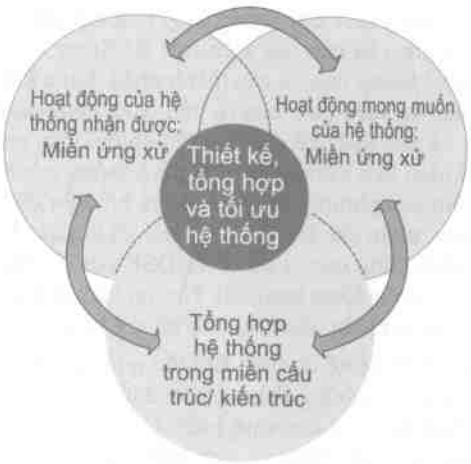
HÌNH 6.2 Cơ điện tử tích hợp kỹ thuật cơ khí, điện và máy tính

Tính phức tạp về cấu trúc của các hệ cơ điện tử tăng lên nhiều do sự tiến bộ của phần cứng và phần mềm, cũng như các yêu cầu hoạt động *có thể thực hiện* nghiêm ngặt. Mô hình cơ điện tử được đưa ra để thỏa mãn các yêu cầu về nâng cao độ phức tạp của hệ cơ điện, đặc tính hoạt động và sự thông minh. Ngoài sự lựa chọn thích hợp các thành phần và hệ thống con của hệ cơ điện, còn có các vấn đề khác cần được chú ý đến từ góc độ bản chất tiến hoá không ngừng của lý thuyết hệ cơ điện (chẳng hạn phân tích, thiết kế, mô hình, tối ưu hoá, tính phức tạp, độ thông minh, ra quyết định, chẩn đoán, đóng gói). Các hệ cơ điện *hoạt động tối ưu* có sức cạnh tranh cần phải được thiết kế với các khái niệm phần cứng và phần mềm cao cấp.

6.4 Thiết kế hệ cơ điện tử

Một trong những vấn đề thách thức nhất trong thiết kế hệ cơ điện tử là tổng hợp kiến trúc hệ thống, tích hợp hệ thống, tối ưu hóa cũng như lựa chọn phần cứng (cơ cấu chấp hành, cảm biến, điện tử công suất, IC, bộ vi điều khiển và DSP) và phần mềm (môi trường, công cụ, thuật toán điều khiển, cảm nhận, thực hiện, bắt chước, dòng thông tin, thu thập dữ liệu, mô phỏng, minh họa trực quan, tạo mẫu ảo và đánh giá). Các nỗ lực nhằm thiết kế các hệ cơ điện tử hiệu suất cao và nhằm đảm bảo sự thiết kế tích hợp được theo đuổi thông qua việc phân tích các mẫu và mô hình phức tạp của hệ sinh học phát triển tiến hoá. Xu hướng hiện nay trong kỹ thuật là tập trung vào phân tích tích hợp, thiết kế và điều khiển các hệ cơ điện tử tiên tiến. Phạm vi của hệ cơ điện tử tiếp tục được mở rộng và ngoài cơ cấu chấp hành, cảm biến, điện tử công suất, IC, bộ thu phát, bộ vi xử lý cũng như thiết bị vào/ra, nhiều hệ thống con khác cũng cần được tích hợp. Quá trình thiết kế là sự tiến hoá tự nhiên. Nó bắt đầu với một tập các yêu cầu và đặc tính kỹ thuật cho trước. Thiết kế chức năng cấp cao được thực hiện trước nhằm tạo ra thiết kế cụ thể ở mức hệ thống con và thành phần. Bằng cách dùng các hệ thống con và thành phần cao cấp, có thể thực hiện thiết kế ban đầu, kiểm tra khả năng hoạt động của hệ cơ điện vòng kín theo các yêu cầu đặt ra. Nếu các yêu cầu và đặc tính kỹ thuật không thỏa mãn, nhà thiết kế phải sửa lại hoặc cải tiến kiến trúc hệ thống và tìm ra các giải pháp khác. Ở mỗi mức phân cấp thiết kế, khả năng hoạt động của hệ thống trong miền hoạt động được dùng để đánh giá và cải tiến quá trình thiết kế và giải pháp được đưa ra. Mỗi phân

cấp thiết kế tương ứng với một mức trừu tượng xác định và có một tập ứng xử riêng và các công cụ thiết kế hỗ trợ cho việc thiết kế ở mức này. Ví dụ, người ta dùng các tiêu chuẩn khác nhau để thiết kế cơ cấu chấp hành và IC phụ thuộc vào ứng xử, tính chất vật lý, nguyên lý hoạt động và tiêu chuẩn hoạt động khác nhau được áp đặt cho các thành phần này. Cần nhấn mạnh rằng phải xác định mức phân cấp, tức là, không cần nghiên cứu ứng xử của hàng triệu tranzito trên mỗi chip IC do các hệ cơ điện tử tích hợp hàng trăm IC và thường đánh giá ứng xử cuối cùng của IC (IC được giả thiết là tối ưu và các IC này được sử dụng như các thành phần có sẵn). Dòng thiết kế này được minh họa trên hình 6.3.



HÌNH 6.3 Dòng thiết kế khi tổng hợp hệ cơ điện tử

Tổng hợp tự động có thể được sử dụng để thực hiện dòng thiết kế này. Thiết kế hệ cơ điện tử là một quá trình bắt đầu từ việc định rõ các yêu cầu và từng bước đi đến thực hiện một thiết kế và tối ưu hóa chức năng được cải tiến dần dần thông qua một loạt các bước. Các đặc tính kỹ thuật thông thường bao gồm các yêu cầu hoạt động thu được từ chức năng hệ thống, gói hoạt động, khả năng cung cấp và những yêu cầu khác. Cả hai phương pháp *từ trên xuống dưới* (bottom-up) và *từ dưới lên trên* (top-down) nên được phối hợp để thiết kế các hệ cơ điện tử hiệu suất cao để làm tăng độ phân cấp, tích hợp, tính cân đối, tính môđun, khả năng thực hiện đúng và sự hoàn thiện trong quá trình tổng hợp. Cho dù các nền tảng cơ bản đã được phát triển, thì một số lĩnh vực cấp bách vẫn bị đánh giá thấp, ít được quan tâm và nghiên cứu. Sự tổng hợp các hệ cơ điện tử như trên bảo đảm sự liên ứng thực sự giữa các miền cấu trúc và hành vi, cũng như đảm bảo các đặc tính mô tả và tích hợp trong thiết kế. Chúng được hoàn thành bằng cách áp dụng mô hình cơ điện tử cho phép mở rộng và làm tăng các kết quả của cơ học cổ điển, điện từ, máy điện, điện tử công suất, vi điện tử, tin học và lý thuyết điều khiển, cũng như ứng dụng phần cứng và phần mềm tích hợp hiện đại.

Để thu được và mở rộng hạt nhân kỹ thuật, cần tăng cường các lĩnh vực đa ngành cũng như liên kết và thực hiện việc tích hợp theo xu hướng đa ngành các cơ cấu chấp hành-cảm biến-điện tử công suất-IC-DSP nhằm đạt được việc chấp hành, đo, điều khiển, ra quyết định, thông minh, xử lý tín hiệu và thu thập dữ liệu. Sự phát triển mới là cần thiết. Lý thuyết và thực hành kỹ thuật của các hệ cơ điện hiệu suất cao có thể được xem là nền tảng thống nhất của chương trình giảng dạy kỹ thuật thông qua cơ điện tử. Sự phân tích thống nhất của cơ cấu chấp hành và cảm biến (tức là các thiết bị chuyển động cơ điện), điện tử công suất và IC, bộ vi xử lý và DSP, cùng phần cứng và phần mềm cao cấp, được giới thiệu một cách nghèo nàn trong chương trình giảng dạy kỹ thuật. Cơ điện tử, như một khái niệm đột phá trong thiết kế và phân tích các hệ cơ điện truyền thống, mini, micro và nano, đã được giới thiệu để xem xét, tích hợp và giải quyết một loạt các vấn đề mới phát sinh.

6.5 Các thành phần của hệ cơ điện tử

Cơ điện tử tích hợp thiết kế, mô hình hóa, mô phỏng, phân tích, phát triển và đồng thiết kế phần cứng-phần mềm, tính thông minh, ra quyết định, điều khiển hiện đại (bao gồm điều khiển thích nghi, bền vững và điều khiển chuyển động thông minh), xử lý tín hiệu/hình ảnh và tạo mẫu ảo hệ cơ điện. Mô hình cơ điện tử sử dụng các cơ sở kỹ thuật điện, cơ và máy tính với đối tượng cơ bản nhằm đảm bảo sự kết hợp hữu cơ của kỹ thuật chính xác, điều khiển điện tử và sự thông minh trong thiết kế, phân tích và tối ưu các hệ cơ điện. Các hệ cơ điện (rôbôt, truyền động điện, cơ cấu servo, hệ thống lắp rắp) là những hệ phi tuyến mạnh và việc chấp hành, đo và điều khiển chính xác của chúng là những vấn đề rất phức tạp. Cơ cấu chấp hành và cảm biến cần được thiết kế và tích hợp với các hệ thống điện tử công suất con tương ứng. Các nguyên lý của sự phù hợp và tuân theo là các nguyên lý thiết kế chung yêu cầu các kiến trúc hệ thống cơ điện phải được tổng hợp bằng cách tích hợp hữu cơ tất cả hệ thống con và các thành phần. Điều kiện phù hợp phải được xác định và đảm bảo và phải thỏa mãn sự tuân theo của cơ cấu chấp hành-cảm biến-điện tử công suất. Cần phải điều khiển hệ cơ điện và nên thiết kế các bộ điều khiển. Cần phải thiết kế, kiểm tra, xác minh và thực thi các luật điều khiển bền vững, thích nghi và thông minh. Nghiên cứu điều khiển của hệ cơ điện nhằm mục đích tìm các phương pháp để tạo ra bộ điều khiển chuyển động và thông minh, tổng hợp kiến trúc hệ thống, nhận các ánh xạ phản hồi và thu các hệ số khuếch đại. Để thực thi các bộ điều khiển này, cần phải dùng các vi xử lý và DSP với IC (thiết bị vào-ra, bộ biến đổi A/D và D/A, cặp quang ngẫu, bộ truyền động tranzito). Những vấn đề khác là nhằm thiết kế, tối ưu và kiểm tra phần mềm phân tích, điều khiển, thực thi, mô phỏng và đánh giá.

Chúng ta đã nhấn mạnh rằng thiết kế hệ cơ điện tử hiệu quả cao thực chất là xây dựng các hệ thống con và các thành phần. Một trong những thành phần chính của hệ cơ điện tử là các máy điện được dùng như là các cơ cấu chấp hành và các cảm biến. Các vấn đề sau đây thường được nhấn mạnh: đặc tính của máy điện, cơ cấu chấp hành và cảm biến tùy theo các ứng dụng của chúng và các yêu cầu của toàn bộ hệ thống bằng các phần mềm thiết kế có sự trợ giúp của máy tính; thiết kế các máy điện, cơ cấu chấp hành và cảm biến hiệu suất cao cho các ứng dụng riêng; tích hợp động cơ điện và cơ cấu chấp hành với cảm biến, điện tử công suất và IC; điều khiển và chẩn đoán máy điện, cơ cấu chấp hành và cảm biến bằng cách dùng các bộ vi xử lý và DSP.

6.6 Tổng hợp hệ thống, phần mềm cơ điện tử và mô phỏng

Mô hình hóa, mô phỏng và tổng hợp là các hoạt động bổ sung cho nhau được thực hiện trong thiết kế hệ cơ điện tử. Mô phỏng bắt đầu với sự phát triển mô hình, trong khi tổng hợp bắt đầu với đặc tính kỹ thuật được gắn với ứng xử và phân tích khả năng hoạt động hệ thống thông qua phân tích sử dụng mô hình, mô phỏng và kết quả thực nghiệm. Người thiết kế bắt chước, nghiên cứu, phân tích và đánh giá ứng xử của hệ cơ điện tử bằng cách dùng trạng thái, khả năng hoạt động, điều khiển, sự kiện, nhiễu và các biến khác. Quá trình tổng hợp đã được mô tả trong phần 6.4. Mô hình, mô phỏng, phân tích, tạo mẫu ảo và minh họa trực quan là những khía cạnh then chốt và đặc biệt quan trọng cho việc phát triển và tạo mẫu của hệ cơ điện tử hiện đại. Là một môi trường thiết kế và mô hình hiệu suất cao linh hoạt, MATLAB đã trở thành một công cụ chuẩn, hiệu quả kinh tế. Sự cạnh tranh đã thúc đẩy việc giảm giá thành và chu kỳ sản xuất. Môi trường MATLAB® được sử dụng để tăng tốc độ phân tích và thiết kế với phân tích đánh giá, tạo điều kiện thuận lợi nâng cao hiệu quả và tính sáng tạo, tích hợp điều khiển và xử lý tín hiệu bằng cách dùng bộ vi xử lý và DSP, tăng các đặc trưng mẫu, tạo mã C thời gian thực và minh họa trực quan, thực hiện thu thập dữ liệu và phân tích tập trung dữ liệu. MATLAB cung cấp các công cụ ứng dụng sau đây: SIMULINK®, Real-Time Workshop™, Hệ điều khiển (Control System), Thiết kế điều khiển phi tuyến (Nonlinear Control Design), Tối ưu hoá (Optimization), Điều khiển bền vững (Robust Control), Xử lý tín hiệu (Signal Processing), Công cụ toán học (Symbolic Math), Nhận dạng hệ thống (System Identification), Phương trình đạo hàm riêng (Partial Differential Equations), Mạng Nơron (Neural Networks), cũng như những công cụ ứng dụng riêng khác (xem demo MATLAB, bằng cách đánh demo trong cửa sổ lệnh). Các khả năng của MATLAB có thể được minh họa bằng

cách bắt đầu từ những ví dụ thực hành quan trọng để tăng hiệu quả và sự sáng tạo của sinh viên qua cách trình bày việc sử dụng phần mềm cao cấp trong ứng dụng hệ cơ điện tử. Môi trường MATLAB đưa ra một tập lớn các khả năng để giải quyết hiệu quả một loạt các vấn đề phân tích, mô hình, mô phỏng, điều khiển và tối ưu phức tạp bắt gặp trong các môn học cơ điện tử của đại học và sau đại học. Có thể mô hình, mô phỏng, phân tích và tối ưu rất nhiều hệ cơ điện tử. Các ví dụ hệ cơ điện tử, được tích hợp trong các môn học cơ điện tử, sẽ cung cấp cho các sinh viên khả năng thực hành và sự hiểu biết sâu rộng.

6.7 Chương trình giảng dạy cơ điện tử

Mục tiêu cuối cùng của chương trình giảng dạy cơ điện tử là nhằm đào tạo thế hệ sinh viên và kỹ sư mới cũng như trợ giúp công nghiệp và chính phủ trong việc phát triển hệ cơ điện hiệu suất cao bằng cách tăng cường chương trình giảng dạy kỹ thuật truyền thống với nòng cốt cơ điện tử đang ngày càng mở rộng. Nên tập trung sự chú ý vào việc tiên tiến hoá toàn bộ nhiệm vụ của chương trình giảng dạy kỹ thuật, bởi vì thông qua cơ điện tử có thể xác định, cải tiến và mở rộng hơn nữa các mục tiêu vào ba lĩnh vực cơ bản: nghiên cứu, giáo dục và dịch vụ. Dùng mô hình cơ điện tử, các nhà khoa học sẽ thực hiện nghiên cứu cơ bản và ứng dụng cấp cao bằng cách:

- Tích hợp điện tử, cơ điện, điện tử công suất, IC và điều khiển;
- Đưa ra các công cụ và khả năng mô phỏng và giải tích thiết kế, phân tích và tối ưu hóa tiên tiến thông qua việc phát triển phần mềm thiết kế chuyên dụng có sự trợ giúp của máy tính;
- Phát triển phần cứng chấp hành - cảm biến - điều khiển;
- Đưa ra các mô hình, khái niệm và công nghệ tiên tiến;
- Hỗ trợ nghiên cứu, thực tập và chương trình giáo dục hợp tác đa ngành cho đại học và sau đại học;
- Hỗ trợ, duy trì và trợ giúp cán bộ giảng dạy trong các lĩnh vực mới.

Thiết kế chương trình giảng dạy cơ điện tử bao gồm việc phát triển mục đích và đối tượng, chương trình học và hướng dẫn chương trình giảng dạy, các môn học, phòng thí nghiệm, các giáo trình, tài liệu hướng dẫn, thực nghiệm, kỹ thuật giảng dạy, kỹ thuật phân phối tài liệu, cách minh hoạ và trình bày bằng hình ảnh và các tài liệu tham khảo khác để thực hiện một dải rộng các mục đích nghiên cứu và giáo dục. Có thể thấy ngày càng nhiều các sinh viên có kỹ năng lập trình và nền tảng lý thuyết tốt nhưng hoàn toàn bất lực trong việc giải quyết những vấn đề kỹ thuật đơn giản. Mục tiêu cơ bản của các khoá học cơ điện tử là nhằm trình bày áp dụng của các kết quả lý thuyết, ứng dụng và thực nghiệm trong phân tích, thiết kế và phát triển các hệ cơ điện tử tổng hợp (bao gồm MEMS và NEMS), bao gồm phần cứng và phần mềm, giới thiệu và truyền đạt lý thuyết cơ điện, giúp đỡ sinh viên phát triển kỹ năng giải quyết vấn đề, cũng như cung cấp sự kỹ thuật thực hành cần thiết. Các khoá học cơ điện tử được đưa ra để phát triển một hiểu biết thấu đáo về các quan điểm tích hợp trong phân tích, mô hình hóa, mô phỏng, tối ưu hoá, thiết kế và cài đặt các hệ cơ điện phức tạp. Bằng thực hành với các ví dụ, sinh viên sẽ được chuẩn bị và đào tạo để sử dụng kết quả trong thực hành, nghiên cứu và phát triển kỹ thuật. Phần cứng và phần mềm hiện đại có tầm quan trọng về kỹ thuật (thiết bị chuyển động cơ điện, cơ cấu chấp hành, cảm biến, thiết bị bán dẫn, điện tử công suất, IC, bộ vi xử lý và DSP) cần được xem xét chi tiết theo quan điểm tích hợp đa ngành.

Tại khoa kỹ thuật điện và máy tính, đại học Purdue Indianapolis các môn học đại học sau đây được yêu cầu trong chương trình học Kỹ thuật điện: *Phân tích mạch tuyến tính I và II, Tín hiệu và hệ thống, Thiết bị bán dẫn, Điện trường và từ trường, Hệ vi xử lý và Giao diện, và Phân tích và Thiết kế hệ thống phản hồi*. Các môn học đại học lựa chọn sau đây hỗ trợ cho lĩnh vực cơ điện tử: *Thiết bị chuyển động cơ điện, Cấu trúc máy tính, Xử lý tín hiệu số và Hệ thống đa phương tiện*. Ngoài các môn học nòng cốt này cho Kỹ thuật điện và máy tính, cần thiết phải dạy các môn học về Cơ điện tử.

Chương trình giảng dạy cơ điện tử nên nhấn mạnh về các chủ đề kỹ thuật truyền thống, các công nghệ và sự phát triển khả thi mới nhất nhằm tích hợp và khuyến khích những tiến bộ mới trong phân tích và thiết kế hệ cơ điện tử tiên tiến. Ví dụ, các môn học sau đây nên được xây dựng và yêu cầu: *Hệ cơ điện tử, Cấu trúc thông minh, Hệ cơ điện tử micro* (*MEMS*) *và Hệ cơ điện tử nano* (*NEMS*).

Mục đích chính là nhằm đảm bảo sự hiểu sâu nền móng kỹ thuật, tích hợp kỹ thuật-khoa học-công nghệ và phát triển bức tranh hiện đại của kỹ thuật cơ điện bằng cách sử dụng cơ sở nền tảng của cơ điện tử. Các nhà khoa học, công nghiệp và chính phủ đã nhận ra rằng rằng lĩnh vực cấp thiết nhất của Cơ điện tử hiện đại là MEMS và NEMS. Vì vậy, sự phát triển hiện nay nên tập trung vào nghiên cứu cơ bản, ứng dụng và thực nghiệm trong các lĩnh vực nổi bật này.

6.8 Giới thiệu chương trình đào tạo cơ điện tử

Tại đại học Purdue - Indianapolis, trong các Khoa Kỹ thuật Điện và Máy tính và Khoa Kỹ thuật cơ khí, người ta đã phát triển và đưa ra một chương trình đào tạo Cơ điện tử cho các sinh viên đại học năm cuối và sau đại học ngành Kỹ thuật Điện/Cơ khí. Các chủ đề được cho trong bảng 6.1.

Chương trình này được phát triển nhằm làm cầu nối khoảng trống kỹ thuật-khoa học-công nghệ bằng việc liên kết những sự phát triển đa ngành mới, tập trung vào phần cứng tiên tiến và trọng tâm là phần mềm hiệu suất cao. Khóa học đã giúp các sinh viên thiết lập các kỹ năng cơ bản cho khả năng làm việc với công nghệ cao với thời gian ngắn hơn. Mục tiêu của khoá này gồm hai phần nhằm mang tới những phát triển gần đây của cơ điện hiện đại và tích hợp một phương pháp giảng dạy dựa trên tương tác. Trong thập niên gần đây, đã có sự chuyển dịch trong giáo dục kỹ thuật từ môi trường giảng dạy lấy trọng tâm là giáo viên sang môi trường học tập lấy sinh viên là trọng tâm. Chúng tôi đã phát triển một phòng học hiện đại cơ điện tử kết hợp các bài giảng, bài tập mô phỏng và thực nghiệm trong một lớp học duy nhất nhằm thực hiện các phương pháp giảng dạy và truyền đạt mới thông qua một môi trường tích cực, các chiến lược dựa trên hoạt động, đa phương tiện tương tác, học tập dựa trên máy tính được nối mạng, phân phối đa đồng bộ các tài liệu hỗ trợ và trình bày hiệu quả. Các bài tập lớn dựa trên mô phỏng có thể được dùng để minh họa các vấn đề không thể nghiên cứu và đánh giá dễ dàng bằng các giải pháp phân tích trên giấy cổ điển. Mặc dù các bài tập lớn dựa trên mô phỏng cung cấp sự hiểu biết về các vấn đề thực hành, nhưng chúng cũng không thể thay thế được thực nghiệm. Cơ điện tử được giới thiệu thông qua sự tổng hợp của thiết kế hệ thống toàn diện, mô hình có độ chính xác cao, mô phỏng, mô tả phần cứng và nghiên cứu tình huống.

BẢNG 6.1 Nội dung chương trình đào tạo cơ điện tử

STT	Chủ đề	Lớp
1	Giới thiệu các hệ cơ điện và cơ điện tử	1
2	Hệ điện tử và cơ học trong hệ cơ điện tử: Cơ học Newton, các phương trình chuyển động Lagrange và các định luật Kirchhoff	2
3	Bảo toàn năng lượng và tương tự cơ điện	2
4	Động lực học của hệ cơ điện tử	2
5	Môi trường MATLAB trong phân tích phi tuyến và mô hình hóa hệ cơ điện tử	2
6	Động cơ servo đồng bộ và động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu	4
7	Bộ chuyển đổi và cấu trúc thông minh: cơ cấu chấp hành và cảm biến	2
8	Điện tử công suất, mạch truyền động, bộ biến đổi và khuếch đại công suất	4
9	Điều khiển chuyển động hệ cơ điện và cấu trúc thông minh	3
10	Bộ vi xử lý và DSP trong điều khiển và thu thập dữ liệu hệ cơ điện tử	2
11	Hệ cơ điện tử: nghiên cứu chuyên ngành, mô hình hoá, phân tích, điều khiển và thực nghiệm	3
12	Đồ án	1

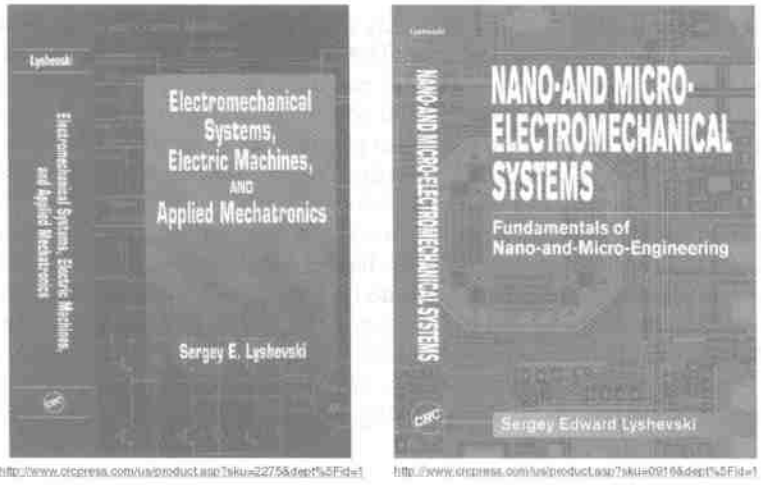
Các đánh giá đã chứng minh rằng khoá học này đảm bảo bao trùm cân bằng và toàn diện, thoả mãn các mục đích và hoàn thành các mục tiêu. Trong khi sinh viên chỉ biết rõ một số chủ đề kỹ thuật và khoa học cao cấp (tính toán và vật lý), rõ ràng rằng họ không có nền tảng đầy đủ về động lực học phi tuyến và điều khiển, máy điện, điện tử công suất, thiết bị bán dẫn, IC, vi xử lý và DSP. Bởi vậy, cần đưa ra tài liệu chi tiết đầy đủ và bao phủ toàn bộ lý thuyết cơ bản cần thiết để hiểu, đánh giá và áp dụng cơ điện tử một cách hoàn toàn. Trong khoá học này, người ta đưa ra và giải thích các phương pháp phân tích, mô hình, mô phỏng và tổng hợp có hiệu quả và trung thực nhất với các đối tượng cơ bản để định rõ và giải quyết các vấn đề phân tích, thiết kế, điều khiển, tối ưu và tạo mẫu ảo. Một dải rộng các ví dụ được trình bày và các minh họa định tính được nghiên cứu sâu làm cầu nối qua khoảng trống giữa các vấn đề lý thuyết, thực hành và thực tế kỹ thuật. Từng bước, khoá học cơ điện tử sẽ hướng dẫn sinh viên từ cơ sở lý thuyết chặt chẽ tới ứng dụng cao cấp và sự thực thi đầy đủ. Ngoài việc đạt được cân bằng tốt giữa lý thuyết và ứng dụng, phần cứng và phần mềm tiên tiến được nhấn mạnh và trình bày. Trong khoá học này, các hệ cơ điện tử được bao phủ xuyên suốt và sinh viên có thể áp dụng dễ dàng các kết quả để bắt tay vào các vấn đề kỹ thuật thực tế.

6.9 Sách về cơ điện tử

Yêu cầu sách giáo dục về Cơ điện tử vượt xa những gì các nhà khoa học và công nghiệp đã lường trước đây. Những cuốn sách hay về máy điện [1-8], điện tử công suất [9-11], vi điện tử và IC [12] và cảm biến [13, 14] đã được xuất bản. Những ví dụ mang tính giáo dục trong phân tích và thiết kế hệ cơ điện tuyến tính được giới thiệu trong những cuốn sách điều khiển [15-21]. *Control Systems Theory With Engineering Applications* [18], (hình 6.4), có các ví dụ minh họa về mô hình, mô phỏng và điều khiển hệ cơ điện phi tuyến phức tạp. Cụ thể, nó bao hàm hoàn toàn sự phân tích và điều khiển bộ chuyển đổi phi tuyến, động cơ đồng bộ, động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu, động cơ cảm ứng lồng sóc, cơ cấu servo và bộ biến đổi năng lượng.

HÌNH 6.4 Sách điều khiển về phân tích và điều khiển hệ cơ điện [18]

Việc nghiên cứu toàn diện hệ cơ điện phi tuyến dùng mô hình cơ điện tử là rất cần thiết. Những quyển sách hay về thiết bị chuyển động cơ điện truyền thống [3, 4, 22] và giáo trình về cơ điện tử cho sinh viên chế tạo máy [23, 27] đã được sử dụng tương ứng trong bộ môn Kỹ thuật điện và Chế tạo máy. Tuy nhiên, rất cần thiết phải có các cuốn sách hiện đại về Cơ điện tử bao hàm toàn bộ các hướng cho các bộ môn kỹ thuật. Cuốn sách *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics* [28] là sự tổng hợp các ưu điểm của chương trình giảng dạy kỹ thuật hiện đại (hình 6.5). Cuốn sách giới thiệu một cách đầy đủ về lý thuyết cơ bản cơ điện, các công nghệ khả thi mới, các nguyên lý kỹ thuật cơ bản, tích hợp hệ thống, mô hình hóa, phân tích, mô phỏng, điều khiển cũng như một loạt những vấn đề kỹ thuật hiện đại. Những ai quan tâm đến NEMS và MEMS có thể tham khảo cuốn sách *Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Micro-Engineering* [29]. Cuốn sách này giới thiệu nhiều minh hoạ và ví dụ về các hệ cơ điện.



HÌNH 6. 5 Sách về hệ cơ điện và hệ cơ điện tử

6.10 Xây dựng chương trình giảng dạy cơ điện tử

Chương trình giảng dạy cơ điện tử hiện nay vẫn chưa hoàn chỉnh. Các nhà khoa học có thể điều chỉnh và mở rộng chiến lược sau đây để tích hợp các khoá học cơ điện tử vào chương trình giảng dạy đại học và sau đại học:

- Thương mại hoá và đưa ra thị trường chương trình cơ điện tử;
- Mở rộng phạm vi cơ điện tử tới những hệ cơ điện tử truyền thống và các hệ cơ điện tử cỡ mini cũng như MEMS và NEMS đang là các lĩnh vực nổi bật trong kỹ thuật;
- Xem xét lại chương trình giảng dạy kỹ thuật. Đặc biệt, nên đề nghị các môn học Điện tử, Thiết bị chuyển động cơ điện, Điện tử công suất, Điều khiển, Vi điện tử và DSP như là các môn học chính bắt buộc và là điều kiện tiên quyết cho các khoá học cơ điện tử nâng cao;
- Nhấn mạnh cơ điện tử như một trọng tâm của chương trình giảng dạy kỹ thuật cơ điện bậc đại học và sau đại học hơn là bên lề của chương trình;
- Đưa các hệ cơ điện và các nghiên cứu chuyên ngành không quá phức tạp vào trong khoá học cơ điện tử bậc đại học và xây dựng lại các chủ đề chuyên sâu cho các chương trình sau đại học;
- Phát triển một chương trình giảng dạy cơ điện tử được cân đối tốt, tiến bộ, yêu cầu trí tuệ kèm theo các phòng thí nghiệm;
- Tích hợp đầy đủ các công cụ thiết kế có sự trợ giúp của máy tính và phần mềm mô phỏng hiệu quả cao;
- Mở rộng cơ điện tử cho các đồ án thiết kế của sinh viên đại học năm cuối;
- Viết và xuất bản sách, giáo trình và sổ tay toàn diện về cơ điện tử;
- Phổ biến rộng rãi và đúng lúc các kết quả.

Có thể đạt được sự kết hợp hiệu quả giữa các môn học và các bộ môn kỹ thuật với chương trình cơ điện tử. Có thể áp dụng các môn học cơ bản dưới đây:

- Thiết bị chuyển động cơ điện,
- Điện tử công suất và vi điện tử,
- Vi xử lý và giao diện,
- Xử lý tín hiệu số,

- Hệ cơ điện,
- Giới thiệu về cơ điện tử,
- Lý thuyết điều khiển và điều khiển hệ cơ điện tử,
- Hệ cơ điện tử và cấu trúc thông minh,
- MEMS,
- NEMS,

Do sự khác nhau của các chương trình học kỹ thuật điện, máy tính, cơ học và hàng không vũ trụ, cũng như số lượng hạn chế các môn học kỹ thuật lựa chọn của mỗi ngành học, nên các môn học cơ điện tử có thể khác nhau. Ví dụ đối với sinh viên kỹ thuật điện, chương trình học có thể được thiết kế bằng cách dùng kỹ thuật điện cơ bản và kỹ thuật cơ khí ứng dụng; đối với sinh viên kỹ thuật cơ khí, có thể nhấn mạnh kỹ thuật cơ khí cơ bản và kỹ thuật điện ứng dụng. Sinh viên sẽ có cơ sở trong một lĩnh vực chính trong khi vẫn nhận được kiến thức ứng dụng về lĩnh vực khác.

6.11 Kết luận: Triển vọng cơ điện tử

Sự tiến bộ cơ sở và công nghệ có ảnh hưởng sâu rộng trong thiết bị chuyển động cơ điện (cơ cấu chấp hành và cảm biến), điện tử công suất, thiết bị bán dẫn, IC, MEMS và NEMS, vật liệu và đóng gói, máy tính và tin học, vi xử lý và DSP, xử lý tín hiệu số và quang, cũng như các công cụ thiết kế có sự trợ giúp của máy tính và phần mềm mô phỏng, đã mang lại những thách thức mới cho khoa học, công nghiệp và chính phủ. Vì thế, nhiều trường kỹ thuật đã thay đổi chương trình giảng dạy của họ nhằm đưa ra những khoá học liên ngành thích hợp như Hệ cơ điện và Cơ điện tử. Cơ sở của cơ điện tử là lý thuyết cơ bản và thực hành kỹ thuật. Những nỗ lực giới thiệu cơ điện tử mới chỉ thành công một phần do thiếu một chiến lược dài hạn. Vì vậy, cần tìm những nỗ lực hợp tác. Hầu hết các chương trình giảng dạy kỹ thuật cung cấp một khoá học lựa chọn đơn lẻ để giới thiệu cơ điện tử cho các sinh viên kỹ thuật điện, máy tính, cơ học và hàng không vũ trụ. Do thiếu thời gian, không thể bao hàm hoàn toàn tài liệu và nhấn mạnh kỹ lưỡng bản chất đa ngành của cơ điện tử trong một khoá học giới thiệu. Vì vậy, khoá học bậc đại học không thể đáp ứng hết yêu cầu và mục tiêu chuyên nghiệp của sinh viên và không thoả mãn các yêu cầu phát triển của khoa học, công nghiệp và chính phủ. Nên tích hợp các môn học cơ điện tử chính trong chương trình giảng dạy kỹ thuật và nên phát triển các khóa học định hướng thí nghiệm và dự án để giảng dạy và minh họa các phần cứng và phần mềm tiên tiến ứng dụng vào hệ cơ điện phức tạp. Sự thích hợp của những lý thuyết cơ bản, kết quả ứng dụng và thực nghiệm là rất quan trọng và cần được nhấn mạnh. Sức mạnh và tính đa dụng của cơ điện tử, không đề cập tầm quan trọng chủ yếu của các kết quả mà nó tiếp cận trong tất cả các lĩnh vực kỹ thuật, làm cho nó trở nên quan trọng với tất cả kỹ sư được làm quen với lý thuyết cơ bản và thực tế kỹ thuật. Đó không phải là ứng dụng cuối cùng của cơ điện tử và còn có nhiều đóng góp hơn cho khái niệm liên ngành này. Chúng ta vừa lướt qua các ứng dụng của cơ điện tử trong các hệ cơ điện hiện đại. Những hướng mới sẽ được nghiên cứu và ứng dụng trong một tương lai gần bởi vì cơ điện tử là một mũi nhọn của kỹ thuật - khoa học - công nghệ. Ví dụ có thể phát minh, nghiên cứu, phân tích và xác minh các hiện tượng mới và nguyên lý hoạt động mới trong NEMS và MEMS bằng cách dùng cơ điện tử nano.

Tài liệu tham khảo

[1] Chapman, S. J., *Electric Machinery Fundamentals,* McGraw-Hill, New York, 1999.

[2] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., and Umans, S. D., *Electric Machinery,* McGraw-Hill, New York, 1990.

[3] Krause, P. C., and Wasynczuk, O., *Electromechanical Motion Devices,* McGraw-Hill, New York, 1989.

[4] Krause, P. C., Wasynczuk, O., and Sudhoff, S. D., *Analysis of Electric Machinery,* IEEE Press, New York, 1995.

[5] Leonhard, W.,*Control of Electrical Drives,* Springer, Berlin, 1996.

[6] Ong, C. M., *Dynamic Simulation of Electric Machines,* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998.

[7] Novotny, D. W., and Lipo, T. A., *Vector Control and Dynamics of AC Drives,* Clarendon Press, Oxford, 1996.

[8] Slemon, G. R., *Electric Machines and Drives,* Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1992.

[9] Hart, D. W., *Introduction to Power Electronics,* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.

[10] Kassakian, J. G., Schlecht, M. F., and Verghese, G. C., *Principles of Power Electronics,* Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1991.

[11] Mohan, N. T., Undeland, M., and Robbins, W. P., *Power Electronics: Converters, Applications, and Design,* John Wiley and Sons, New York, 1995.

[12] Sedra, A. S., and Smith, K. C., *Microelectronic Circuits,* Oxford University Press, New York, 1997.

[13] Fraden, J., *Handbook of Modern Sensors: Physics, Design, and Applications,* AIP Press, Woodbury, NY, 1997.

[14] Kovacs, G. T. A., *Micromachined Transducers Sourcebook,* McGraw-Hill, New York, 1998.

[15] Dorf, R. C., and Bishop, R. H., *Modern Control Systems,* Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1995.

[16] Franklin, J. F., Powell, J. D., and Emami-Naeini, A., *Feedback Control of Dynamic Systems,* Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1994.

[17] Kuo, B. C., *Automatic Control Systems,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.

[18] Lyshevski, S. E., *Control Systems Theory With Engineering Applications,* Birkhäuser, Boston, MA, 2001. http://www.birkhauser.com/cgi-win/ISBN/0-8176-4203-X

[19] Ogata, K., *Discrete-Time Control Systems,* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.

[20] Ogata, K., *Modern Control Engineering,* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.

[21] Phillips, C. L., and Harbor, R. D., *Feedback Control Systems,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.

[22] White, D. C., and Woodson, H. H., *Electromechanical Energy Conversion,* Wiley, New York, 1959.

[23] Auslander, D. M., and Kempf, C. J., *Mechatronics: Mechanical System Interfacing,* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.

[24] Bolton, W., *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical Engineering,* Addison-Wesley Logman Publishing, New York, 1999.

[25] Bradley, D. A., Dawson, D., Burd, N. C., and Loader, A. J., *Mechatronics,* Chapman and Hall, New York, 1996.

[26] Fraser, C., and Milne, J., *Electro-Mechanical Engineering,* IEEE Press, New York, 1994.

[27] Shetty, D., and Kolk, R. A., *Mechatronics System Design,* PWS Publishing Company, New York, 1997.

[28] Lyshevski, S. E., *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics,* CRC Press, Boca Raton, FL, 1999. http://www.crcpress.com/us/product.asp?sku=2275&dept%5Fid=1

[29] Lyshevski, S. E., *Nano- and Microelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering,* CRC Press, Boca Raton, FL, 2000. http://www.crcpress.com/us/product.asp?sku=0916&dept%5Fid=1

II

Mô hình hóa hệ thống vật lý

7 **Mô hình hoá các hệ cơ điện** *Francis C. Moon* 7-1

Mở đầu • Mô hình của các hệ cơ điện • Các mô hình vật rắn • Các phương trình cơ bản của động lực học vật rắn • Các mô hình động lực học đơn giản • Mô hình hoá hệ đàn hồi Lực điện từ • Các nguyên lý động lực của các mạch điện và từ • Định lý Earnshaw và ổn định cơ điện

8 **Cấu trúc và vật liệu** *Eniko T. Enikov* 8-1

Các định luật cơ bản của cơ học • Cấu trúc phổ biến trong các hệ cơ điện tử • Phân tích dao động và dạng riêng • Phân tích mất ổn định cong • Các bộ chuyển đổi • Xu hướng phát triển

9 **Mô hình hóa các hệ cơ học trong các ứng dụng cơ điện tử** *Raul G. Longoria* 9-1

Mở đầu • Mô hình hóa hệ cơ học trong các hệ cơ điện tử • Mô tả các thành phần mô hình cơ học cơ bản • Các định luật vật lý cho việc xây dựng mô hình • Phương pháp năng lượng để mô hình hoá hệ cơ học • Động lực học vật rắn đa chiều • Phương trình Lagrange

10 **Các hệ thống thủy lực** *Qin Zhang và Carroll E. Goering* 10-1

Mở đầu • Chất lỏng thuỷ lực • Van điều khiển thuỷ lực • Các bơm thuỷ lực • Xi lanh thuỷ lực • Điều khiển các hệ thống thủy lực • Các van điện - thuỷ lực khả trình

11 **Kỹ thuật điện** *Giorgio Rizzoni* 11-1

Mở đầu • Cơ sở của mạch điện • Phân tích mạch điện trở • Phân tích mạch AC

12 **Nhiệt động lực học** *Michael J. Moran* 12-1

Các nguyên lý cơ bản • Cân bằng thuộc tính mở rộng • Các quan hệ thuộc tính và dữ liệu • Các chu trình công suất của chất khí và hơi

13 **Mô hình hóa và mô phỏng hệ cơ điện tử micro (MEMS)** *Carla Purdy* 13-1

Mở đầu • Qui trình phát triển mạch điện tử số: Mô hình hóa và mô phỏng các hệ micro (hoặc nano) • Phát triển mạch tín hiệu tương tự và hỗn hợp: mô hình hóa và mô phỏng hệ micro (hoặc nano); đầu vào, đầu ra và các

tín hiệu hỗn hợp số và tương tự • Các kỹ thuật cơ bản và các công cụ sẵn có cho mô hình hóa và mô phỏng MEMS • Mô hình hóa và mô phỏng MEMS (hoặc NEMS); đầu vào, đầu ra và tín hiệu hỗn hợp tương tự và số; các hiện tượng hai và ba thứ nguyên; sự kết hợp và tương tác của các miền và các công nghệ • Một "công thức" mô phỏng MEMS thành công • Kết luận: Sự phát triển tiếp của mô hình hóa và mô phỏng MEMS

14 Tổng hợp, chế tạo, phân tích và tối ưu MEMS *Sergey Lyshevski* 14-1

Mở đầu • Phân loại và tổng hợp cấu trúc các thiết bị MEMS chuyển động • Chế tạo MEMS • Cơ sở điện từ và mô hình hóa MEMS • Mô hình toán học của MEMS • Điều khiển MEMS • Kết luận

15 Cơ sở vật lý của sự tương tự trong các mô hình hệ thống vật lý *Neville Hogan và Peter C. Breedveld* 15-1

Mở đầu • Lịch sử • Tương tự lực - dòng điện: các biến chéo và biến xuyên qua • Sự tương tự lực - điện áp của Maxwell: các biến lực và lưu lượng • Cơ sở nhiệt động lực cho các tương tự • Các sơ đồ kết nối • Một số nhận xét kết luận

7

Mô hình hoá các hệ cơ điện

7.1 Mở đầu 7-1
7.2 Mô hình của các hệ cơ điện 7-2
7.3 Các mô hình vật rắn 7-2
7.4 Các phương trình cơ bản của động lực học vật rắn 7-4
7.5 Các mô hình động lực học đơn giản 7-6
7.6 Mô hình hoá hệ đàn hồi 7-8
7.7 Lực điện từ 7-10
7.8 Các nguyên lý động lực của các mạch điện và từ 7-13
7.9 Định lý Earnshaw và ổn định cơ điện 7-16

Francis C. Moon
Cornell University

7.1 Mở đầu

Cơ điện tử là sự tích hợp của các yếu tố cơ khí, điện tử và máy tính để sản xuất các thiết bị và các hệ thống giám sát và điều khiển các hệ máy và kết cấu. Một số sản phẩm cơ điện tử quen thuộc là thiết bị ghi hình VCR, camera tự động, các túi đệm khí của ô tô, các thiết bị điều khiển tàu biển. Đặc điểm để phân biệt các thiết bị cơ điện tử hiện đại với các thiết bị điều khiển trước đây là sự thu nhỏ kích thước của thiết bị điện tử. Máy tính, các cảm biến điện tử và cơ cấu chấp hành được nhúng nhiều hơn trong các cấu trúc và máy. Vì vậy cần thiết phải tích hợp thiết kế cơ khí và điện. Điều này không chỉ đúng đối với cảm biến và xử lý tín hiệu mà còn đối với thiết kế cơ cấu chấp hành. Trong các thiết bị cỡ lớn, các vật liệu từ, các chất siêu dẫn mạnh hơn đã đưa đến việc thay thế các cơ cấu chấp hành thủy lực và khí nén bằng động cơ servo, động cơ tuyến tính và các cơ cấu chấp hành điện từ khác. Trong các hệ cơ điện tử micro (MEMS), các cơ cấu chấp hành lực điện tích, gồm điện và sắt điện đã đạt được kết quả đáng kể về mặt kích thước.

Trong khi các vật liệu dùng trong thiết kế cơ điện thường đổi mới liên tục thì các nguyên lý động lực học cơ bản của Newton và Maxwell vẫn còn được sử dụng. Trong các hệ không gian mở rộng, người ta phải giải các bài toán môi trường liên tục khi dùng lý thuyết đàn hồi và các phương trình vi phân đạo hàm riêng của lý thuyết trường điện từ. Tuy nhiên, đối với nhiều ứng dụng chỉ cần dùng mô hình tham số tập trung dựa trên i) động lực học vật rắn đối với các thành phần quán tính, ii) các định luật mạch Kirchhoff đối với các thành phần dòng - điện,tích iii) các định luật mạch từ đối với các thiết bị từ.

Trong chương này sẽ xem xét cẩn thận các giả thiết cơ bản về quán tính, các mạch điện và từ là các dạng điển hình của các hệ cơ điện tử và sẽ tóm tắt các nguyên lý động lực học và các tương tác giữa các biến trạng thái của chuyển động cơ học, mạch điện và từ. Ở đây cũng minh họa các nguyên lý này bằng một số ví dụ và giới thiệu một số bài báo, sách chuyên ngành là các tài liệu tham khảo nâng cao về cơ điện.

7.2 Mô hình của các hệ cơ điện

Các phương trình chuyển động cơ bản của môi trường vật lý liên tục là các phương trình đạo hàm riêng (PDE), mô tả ứng xử động lực học theo cả thời gian và không gian. Chẳng hạn, chuyển động của dây đàn, dầm và bản đàn hồi, dòng chất lỏng bao quanh và chảy qua các vật thể, cũng như các trường điện và từ đòi hỏi các thông tin cả về không gian và thời gian. Các phương trình này gồm các phương trình đàn hồi, động lực học đàn hồi, các phương trình Navier - Stokes trong cơ học chất lỏng, các phương trình Maxwell - Faraday của điện từ. Các vấn đề trường điện từ có thể tìm thấy trong [3]. Các vấn đề về trường kép trong các trường điện và chất lỏng có thể tìm trong [5]. Các vấn đề trong trường từ và kết cấu đàn hồi có thể tìm trong sách chuyên khảo [7]. Bài ngắn này chỉ đề cập đến các hệ vật rắn.

Nhiều thiết bị cơ điện thực tế có thể được mô hình hóa bởi các yếu tố vật lý tập trung như khối lượng hoặc bộ tự cảm. Khi đó, các phương trình chuyển động là các dạng tích phân của PDE cơ bản và kết quả là cùng dẫn đến các phương trình vi phân thường (ODE). Phương pháp luận này sẽ được xem xét trong chương này. Khi các bài toán vật lý có phân bố theo không gian, người ta có thể tách bài toán thành phần không gian và phần thời gian gọi là *tách biến*. Mô tả không gian được biểu diễn bởi một số hữu hạn các dạng riêng hoặc dạng không gian, mỗi dạng có biên độ dạng. Phương pháp này cũng đưa đến một tập ODE. Thông thường, các phương trình liên kết này có thể được hiểu trong phạm vi của các khối lượng cơ học tập trung đơn giản và các mạch điện và từ.

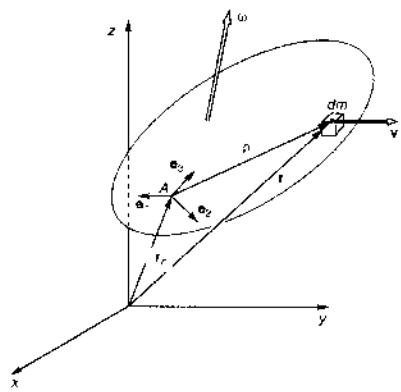
7.3 Các mô hình vật rắn

Động học vật rắn

Động học là sự mô tả chuyển động thông qua các vectơ định vị **r**, vận tốc **v**, gia tốc **a**, vectơ vận tốc góc ω và các tọa độ suy rộng $\{q_k(t)\}$ như các vị trí góc tương đối của bộ phận này đối với bộ phận khác của máy (hình 7.1). Trong vật rắn nói chung, người ta chỉ rõ vectơ vị trí của một điểm như khối tâm $\mathbf{r}_c$ và vận tốc của điểm này $\mathbf{v}_c$. Vị trí góc của vật rắn được xác định bởi một bộ các góc gọi là các góc Euler. Ví dụ trong phương tiện là các góc gật (pitch), lắc ngang (roll) và góc xoay (yaw) [9]. Vectơ vận tốc góc của vật rắn được ký hiệu là ω. Vận tốc của một điểm trong vật rắn khác với khối tâm, $\mathbf{r}_p = \mathbf{r}_c + \rho$, được cho bởi:

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_c + \omega \times \rho \tag{7.1}$$

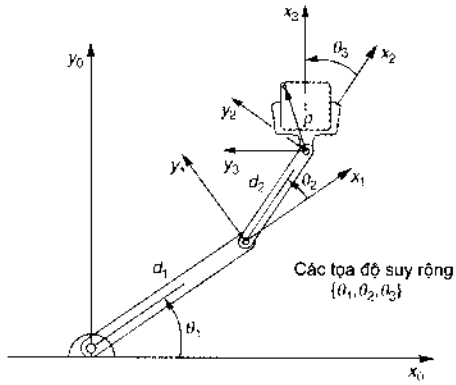
trong đó thành phần thứ hai là tích vectơ. Vectơ vận tốc góc ω là một đặc tính của toàn bộ các vật rắn. Nói chung, một vật rắn, ví dụ như một vệ tinh có sáu bậc tự do. Nhưng khi các chi tiết máy được mô phỏng như một vật rắn, các liên kết động học sẽ giới hạn làm giảm số bậc tự do.



HÌNH 7.1 Phác họa vật rắn với vectơ định vị, vectơ vận tốc và vận tốc góc

Các liên kết và tọa độ suy rộng

Các máy thường là một tập hợp các vật rắn, trong đó mỗi bộ phận bị liên kết để có được một bậc tự do đối với bộ phận bên cạnh nó. Ví dụ trong một tay máy rôbôt nhiều khâu cho trên hình 7.2, mỗi khâu cứng có một bậc quay tự do. Các bậc tự do của mỗi khâu cứng bị liên kết bởi các ổ trục, thanh dẫn và bánh răng để có một loại chuyển động tương đối. Như vậy, để thuận tiện cho việc mô tả động lực học ta dùng các tọa độ suy rộng $\{q_k: k=1,\ldots, K\}$.



HÌNH 7.2 Tay máy rôbôt nhiều khâu

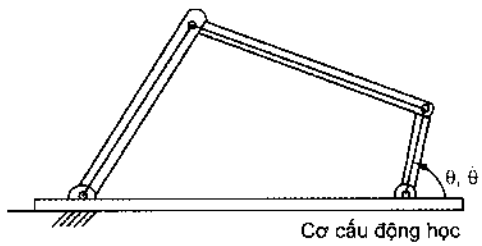
Đôi khi, để thuận tiện, sẽ sử dụng vectơ hoặc ma trận *Jacobian* $\mathbf{J}(q_k)$, để tính vận tốc các điểm vật lý trong máy theo các vận tốc suy rộng $\{\dot{q}_k\}$. Nếu vectơ định vị đối với một điểm thuộc tay máy là $\mathbf{r}_p(q_k)$ và được xác định là hàm của các $\{q_k(t)\}$ nhờ các liên kết hình học, thì vận tốc điểm này được tính theo biểu thức:

$$\mathbf{v}_p = \sum \frac{\partial \mathbf{r}_p}{\partial q_r} \dot{q}_r = \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{q}} \tag{7.2}$$

trong đó tổng lấy theo số bậc tự do K. Ma trận $\mathbf{J}$ bậc $3\times K$ được gọi là *Jacobian* và $\dot{\mathbf{q}}$ là vectơ $K\times 1$ của tọa độ suy rộng. Biểu thức này có thể được dùng để tính động năng của các bộ phận cấu thành máy và dùng các phương trình Lagrange, sẽ được đề cập sau đây, để rút ra phương trình chuyển động [9].

Các vấn đề động học và động lực học

Một số máy được cấu tạo dưới dạng chuỗi động học kín sao cho chuyển động của một khâu xác định chuyển động các khâu còn lại của các vật rắn trong chuỗi, như cơ cấu bốn khâu trên hình 7.3. Trong những bài toán này, người thiết kế không cần phải giải các phương trình vi phân chuyển động. Định luật Newton được dùng để xác định các lực trong máy, nhưng chuyển động là *động học* được xác định từ các liên kết hình học.



HÌNH 7.3 Một ví dụ về động học cơ cấu

Trong những bài toán chuỗi hở, như rôbôt (hình 7.2), chuyển động của một khâu không xác định được *động lực học* của các khâu còn lại. Chuyển động của thiết bị này về bản chất là *động lực học*. Người kỹ sư phải dùng cả liên kết động học (7.2) cũng như phương trình vi phân chuyển động Newton - Euler hoặc các dạng tương đương như phương trình Lagrange được đề cập đến sau đây.

7.4 Các phương trình cơ bản của động lực học vật rắn

Trong mục này chúng ta hệ thống lại các phương trình chuyển động cho các máy cơ khí trong hệ cơ điện tử. Các máy này có thể là hệ các vật rắn như trong tay máy rôbôt chuỗi (hình 7.2) hoặc tàu chạy trên đệm từ (hình 7.4), hoặc kết cấu mềm trong gia tốc kế MEMS. Động lực học của hệ đàn hồi được mô tả bởi các phương trình chuyển động PDE. Phương trình đối với các vật rắn là phương trình chuyển động của khối tâm và mở rộng của Euler từ các định luật Newton đối với mômen động lượng của vật rắn cho khối tâm. Các phương trình này có thể phát biểu theo nhiều cách [9]:

1. Phương trình Newton - Euler (phương pháp vectơ)
2. Phương trình Lagrange (phương pháp năng lượng vô hướng)
3. Nguyên lý D'Alambert (phương pháp công ảo)
4. Nguyên lý công khả dĩ (phương trình Kane hoặc nguyên lý Jourdan)

HÌNH 7.4 Vật rắn trên đệm từ (HSST MagLev prototype vehicle, 1998, Nagoya, Japan)

Phương trình Newton - Euler

Khảo sát vật rắn trong hình 7.1, khối tâm của nó được cho bởi vectơ $\mathbf{r}_c$ trong hệ tọa độ cố định nào đó. Vận tốc và gia tốc khối tâm được cho bởi:

$$\dot{\mathbf{r}}_c = \mathbf{v}_c, \quad \dot{\mathbf{v}}_c = \mathbf{a}_c \tag{7.3}$$

Dấu chấm chỉ đạo hàm toàn phần theo thời gian. Ký hiệu tổng toàn phần các vectơ lực trên vật có nguồn gốc cơ học và điện tử là **F**.

Định luật Newton đối với chuyển động của khối tâm của vật có khối lượng m được cho bởi:

$$m\dot{\mathbf{v}}_c = \mathbf{F} \tag{7.4}$$

Nếu **r** là vectơ định vị của một điểm nào đó trong vật rắn, vectơ định vị địa phương ρ được xác định bởi $\mathbf{r}_p = \mathbf{r}_c + \rho$. Nếu một lực $\mathbf{F}_i$ tác động tại điểm của vật rắn có vectơ định vị $\mathbf{r}_i$ thì mômen **M** của lực đó đối với gốc cố định được xác định bởi:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i \tag{7.5}$$

Mômen tổng bằng tổng tất cả các mômen do các lực tác dụng lên vật gây ra:

$$\mathbf{M} = \sum \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i = \mathbf{r}_c \times \mathbf{F} + \mathbf{M}_c \text{ trong đó } \mathbf{M}_c = \sum \rho_i \times \mathbf{F}_i \tag{7.6}$$

Mômen động lượng của vật rắn cũng được xác định qua tích của ma trận đối xứng của các mômen bậc hai của khối lượng gọi là *ma trận quán tính* $\mathbf{I}_c$. Vectơ mômen động lượng đối với khối tâm được xác định bởi:

$$\mathbf{H}_c = \mathbf{I}_c.\omega \tag{7.7}$$

Vì $\mathbf{I}_c$ là ma trận đối xứng, nó có thể được chéo hóa với các mômen quán tính chính (hoặc giá trị riêng) $\{\mathbf{I}_{ik}\}$ đối với các phương chính (vectơ riêng) $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$. Trong hệ tọa độ này, gắn với vật thể, mômen động lượng đối với khối tâm sẽ trở thành:

$$\mathbf{H}_c = I_{1c}\omega_1\mathbf{e}_1 + I_{2c}\omega_2\mathbf{e}_2 + I_{3c}\omega_3\mathbf{e}_3 \tag{7.8}$$

trong đó vectơ vận tốc góc được viết thông qua các vectơ riêng chính $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$, gắn với vật rắn.

Theo mở rộng của Euler từ định luật Newton cho vật rắn, ta có:

$$\dot{\mathbf{H}}_c = \mathbf{M}_c \tag{7.9}$$

Phương trình này chỉ ra rằng, sự thay đổi mômen động lượng đối với khối tâm bằng tổng mômen của tất cả các lực đối với khối tâm. Phương trình này cũng có thể áp dụng đối với vật quay quanh một điểm cố định, không nhất thiết là khối tâm như trong ví dụ con lắc kép được cho dưới đây.

Các phương trình (7.4) và (7.9) được biết như là các phương trình chuyển động Newton - Euler. Khi không có các liên kết, chúng biểu diễn sáu phương trình vi phân bậc 2 đối với vị trí của khối tâm và các góc định hướng của vật rắn.

Động lực học hệ nhiều vật

Trong một chuỗi các khâu của cánh tay rôbôt, như cho trên hình 7.2, chúng ta có một tập hợp các vật rắn liên kết. Mỗi khâu chịu tác động của cả hai loại mômen ngoài tác dụng lên vật và lực liên kết. Các phương trình động lực học của chuyển động gắn với nghiệm của các phương trình Newton - Euler đối với mỗi khâu rắn chịu liên kết hình học và động học giữa các vật thể như trong (7.2). Các lực tác dụng lên mỗi vật thể được ký hiệu bởi $\mathbf{F}^a$, đến từ các cơ cấu chấp hành hoặc bắt nguồn từ tác động bên ngoài và lực liên kết bên trong $\mathbf{F}^c$. Khi ma sát không tồn tại, công được thực hiện bởi các lực liên kết bằng 0. Tính chất này có thể được dùng để viết các phương trình chuyển động qua các hàm năng lượng vô hướng, được biết như các phương trình Lagrange (xem dưới đây).

Dù dùng phương pháp nào để đưa ra phương trình chuyển động, thì các phương trình chuyển động động lực học đối với hệ nhiều vật được biểu diễn với các tọa độ suy rộng $\{q_k(t)\}$ đều có dạng:

$$\sum m_{ij}\ddot{q}_j + \sum\sum \mu_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k = \mathrm{Q}_i \tag{7.10}$$

Thành phần thứ nhất ở vế trái chứa ma trận khối lượng suy rộng đối xứng $m_{ij} = m_{ji}$. Thành phần thứ hai bao gồm gia tốc Coriolis và gia tốc hướng tâm. Vế phải chứa tất cả các lực và các thành phần điều khiển. Phương trình này chứa các số hạng phi tuyến bậc hai đối với vận tốc suy rộng. Các số hạng bậc hai này thường được bỏ đi đối với các bài toán vật rắn với trục quay đơn. Tuy nhiên, các thành phần quán tính phi tuyến nói chung xuất hiện trong các bài toán với sự quay đồng thời quanh hai hoặc ba trục như trong tay máy rôbôt nhiều khâu (7.2), các bài toán con quay hồi chuyển và các bánh xe động lượng quay trong vệ tinh.

Trong phần mềm mô phỏng động lực học hiện đại, các phương trình trên được lập một cách tự động và được giải mỗi khi người sử dụng xác định các quan hệ hình học, lực và điều khiển. Trong số các chương trình này có ADAMS, DADS, Working Model và NEWEUL. Tuy nhiên, người thiết kế phải lưu ý vì các chương trình này đôi khi thiếu mô hình ma sát và va đập giữa các vật.

7.5 Các mô hình động lực học đơn giản

Hai ví dụ ứng dụng đơn giản của định luật mômen động lượng được cho sau đây. Đầu tiên là sự quay của vật rắn quanh một trục và ví dụ thứ hai có hai trục quay.

Con lắc kép

Khi một vật chịu liên kết chỉ có 1 bậc tự do quay và chịu tác dụng của lực trọng trường như trên hình 7.5, với θ là góc hợp với trục thẳng đứng, phương trình chuyển động có dạng:

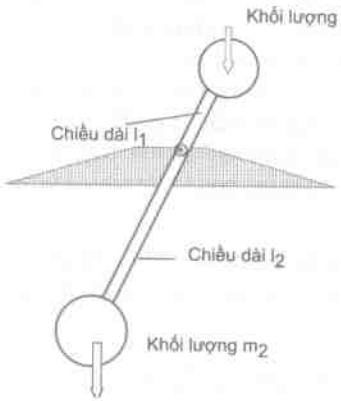
$$I\ddot{\vartheta} - (m_1 L_1 - m_2 L_2) g \sin\theta = T(t) \tag{7.11}$$

trong đó $T(t)$ là mômen tác dụng, $I = m_1 L_1^2 + m_2 L_2^2$ là mômen quán tính (còn được gọi mômen bậc hai của khối lượng). Phương trình trên là phi tuyến theo hàm sin của góc. Trong trường hợp chuyển động với góc quay bé thì $\theta = 0$, phương trình trở thành phương trình vi phân tuyến tính và có thể tìm nghiệm dưới dạng $\theta = A\cos(\omega t)$, khi $T(t) = 0$. Đối với trường hợp này, chuyển động của con lắc có dạng hình sin với tần số riêng:

$$\omega = \left[g(m_2 L_2 - m_1 L_1)/I \right]^{1/2} \tag{7.12}$$

Đối với con lắc đơn $m_1 = 0$ và sẽ có quan hệ con lắc cổ điển trong đó tần số riêng tỉ lệ nghịch với căn bậc hai của độ dài:

$$\omega = (g/L_2)^{1/2} \tag{7.13}$$

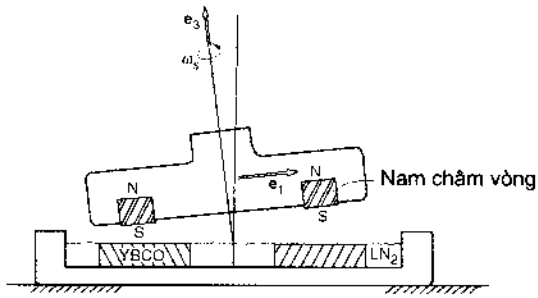


HÌNH 7.5 Con lắc kép chịu tác dụng của mômen của lực trọng trường

Các chuyển động Gyroscop

Thiết bị quay như các động cơ tốc độ cao trong tay máy rôbôt hoặc tua bin trong động cơ máy bay hay bánh xe của tầu đệm từ (hình 7.6) có mômen động lượng, ký hiệu bởi vectơ **H**. Mở rộng của Euler từ định luật Newton nói rằng, sự biến thiên mômen động lượng phải phù hợp với mômen lực **M**:

$$\mathbf{M} = \dot{\mathbf{H}} \tag{7.14}$$



HÌNH 7.6 Bánh xe tàu đệm từ trên các ổ đỡ siêu dẫn nhiệt độ cao

Trong các bài toán ba chiều, người ta thường có các thành phần mômen động lượng quanh hai trục khác nhau. Điều đó dẫn đến gia tốc Coriolis sinh ra mômen gyroscop ngay cả khi 2 chuyển động quay là dừng. Xét động cơ quay góc ϕ quanh một trục với vectơ đơn vị $\mathbf{e}_1$ và hãy tưởng tượng một chuyển động quay của trục $\mathbf{e}_1$, góc ψ đối với trục trực giao $\mathbf{e}_2$ được gọi là trục tiến động theo cách nói trong lý thuyết gyroscop. Khi đó, người ta có thể chỉ ra rằng mômen động lượng sẽ được tính theo công thức:

$$\mathbf{H} = I_1\phi\mathbf{e}_1 + I_2\psi\mathbf{e}_2 \tag{7.15}$$

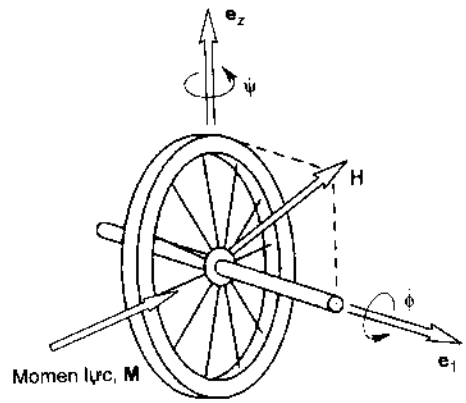
và tốc độ biến thiên của mômen động lượng đối với chuyển động quay không đổi và tốc độ tiến động được cho bởi:

$$\dot{\mathbf{H}} = \psi e_2 \times \mathbf{H} \tag{7.16}$$

Khi đó sẽ tồn tại mômen gyroscope thường được sinh ra bởi các lực trên các ổ đỡ của trục 1 (hình 7.7). Mômen này vuông góc với mặt phẳng tạo bởi $\mathbf{e}_1$ và $\mathbf{e}_2$ và tỉ lệ với tích của các tốc độ quay:

$$\mathbf{M} = I_1\phi\psi\mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_1 \tag{7.17}$$

Phương trình này có cùng dạng như phương trình (7.10), khi lực suy rộng Q được đồng nhất với mômen $\mathbf{M}$, tức là mômen là tích của các vận tốc suy rộng khi các số hạng gia tốc ứng với đạo hàm bậc hai bằng không.



HÌNH 7.7 Mômen gyroscope trên vật rắn quay và tiến động

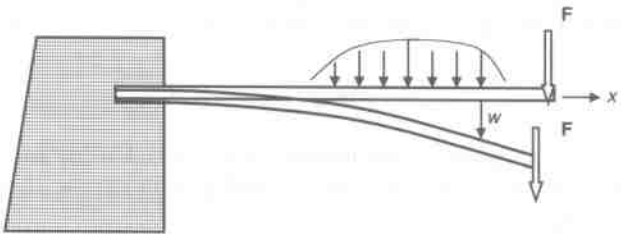
7.6 Mô hình hoá hệ đàn hồi

Các kết cấu đàn hồi có dạng cáp, dầm, bản, vỏ và khung. Đối với những bài toán tuyến tính có thể dùng phương pháp dạng riêng để biểu diễn động lực học với một tập hữu hạn các biên độ dãn đối với bậc tự do suy rộng. Các dạng riêng này tìm được là nghiệm của các phương trình đạo hàm riêng (PDE) của kết cấu đàn hồi [10].

Kết cấu đàn hồi đơn giản nhất sau dây cáp là dầm một chiều (hình 7.8). Đối với những chuyển động nhỏ, giả thiết rằng chỉ có dịch chuyển ngang $w(x,t)$, trong đó x là tọa độ không gian dọc theo dầm. Người ta thường giả thiết rằng ứng suất trên tiết diện ngang của dầm được tổng hợp để nhận được vectơ tổng ứng suất trượt V, mômen uốn M và lực dọc trục T. Dầm này có thể chịu tải với lực tập trung, các lực và mômen tại đầu hoặc các lực phân bố như trong trường hợp lực trọng trường, lực chất lỏng, lực điện từ. Đối với tải trọng phân bố ngang $f(x,t)$, phương trình chuyển động có dạng:

$$D\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - T\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \rho A\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(x,t) \tag{7.18}$$

trong đó D là độ cứng chống uốn, A là diện tích tiết diện ngang của dầm và ρ là mật độ khối lượng. Đối với dầm có môđun Young Y, tiết diện ngang chữ nhật với chiều rộng b, chiều cao h: ta có $D = Ybh^3/12$. Khi $D = 0$ ta có dây cáp hoặc dây đàn chịu sức căng T và phương trình có dạng phương trình sóng thông thường. Khi một dầm chịu lực kéo T thì các tần số riêng tăng lên do thêm vào số hạng thứ hai trong phương trình này. Khi $T = -P$ tức là có lực nén ở đầu của dầm thì số hạng độ cong dẫn đến làm giảm tần số riêng khi tăng lực nén P. Nếu tần số riêng thấp nhất tiến tới không khi tăng P thì cấu hình thẳng của dầm trở nên mất ổn định hoặc chịu mất ổn định cong. Việc dùng T hoặc $(-P)$ tăng hoặc giảm độ cứng của kết cấu dầm có thể dùng trong thiết kế cảm biến để tạo nên một cảm biến với sự cộng hưởng biến thiên. Ý tưởng này đã được dùng trong việc thiết kế gia tốc kế MEMS (phần sau).



HÌNH 7.8 Phác họa dầm đàn hồi bị ngàm

Đặc điểm khác biệt của động lực học kết cấu dầm với dây đàn và dây cáp là các tần số riêng không phải là tương xứng do sự có mặt của số hạng chứa đạo hàm bậc bốn trong phương trình. Trong các bài toán sóng, đó là sự *phân tán sóng*. Điều đó có nghĩa là, các sóng có bước sóng khác nhau chuyển động với vận tốc khác nhau sao cho dạng xung của sóng biến đổi như sóng chuyển động theo kết cấu.

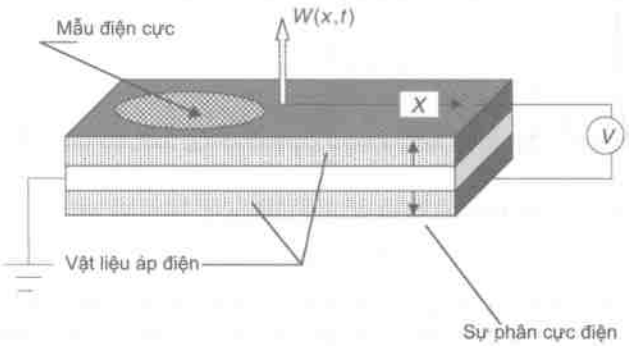
Để giải các bài toán động lực học trong kết cấu dầm độ dài hữu hạn, cần xác định các điều kiện biên ở các đầu. Các ví dụ về điều kiện biên như sau:

Đầu ngàm cứng	$w = 0,\ \frac{\partial w}{\partial x} = 0$		
Đầu lăn trượt	$w = 0,\ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$	(mômen bằng 0)	(7.19)
Đầu trượt tự do	$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0,\quad \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0$	(xoắn bằng không)	

Dầm áp-đàn hồi

Các vật liệu áp-đàn hồi (piezoelastic) có đặc tính quan hệ giữa sự biến dạng và sự phân cực điện hoặc điện áp. Vì vậy, các vật liệu này có thể dùng làm cảm biến hoặc cơ cấu chấp hành. Chúng được sử dụng để giảm dao động trong cấu trúc đàn hồi. Nhiều vật liệu tự nhiên có tính piezoelastic như quartz, cũng như các vật liệu được chế tạo như barium, titan đưa đến zirconate titan (PZT) và polyvinylidene flouride (PVDF). Không giống như lực của điện tích và dòng (xem ở dưới), hiệu ứng điện xảy ra theo sự biến dạng của vật liệu. Mô hình của thiết bị này có thể được thực hiện bằng cách biến đổi các phương trình đối với cấu trúc đàn hồi.

Công trình sau đây về dầm uốn piezo dựa trên công trình của Lee và Moon [4] được tóm tắt trong [6]. Một trong những cấu hình phổ biến của cảm biến - cơ cấu chấp hành piezo là dầm uốn piezo (hình 7.9). Dầm đàn hồi tiết diện chữ nhật này là một phần tử piezo. Phần tử piezo này có thể được gắn vào một hoặc hai mặt, trên toàn bộ hay chỉ trên một phần bề mặt kết cấu không có tính piezo của dầm.



HÌNH 7.9 Dầm đàn hồi với hai lớp áp điện (Lee and Moon, 1989)

Nói chung, sự phân cực cục bộ phụ thuộc vào sáu thành phần biến dạng độc lập sinh ra bởi các ứng suất tiếp và pháp. Tuy nhiên, sẽ giả thiết rằng điện áp hoặc sự phân cực theo chiều ngang phụ thộc vào sự biến dạng trục trong các lớp áp điện dạng tấm. Các quan hệ giữa ứng suất trục và biến dạng T, S, điện trường và dịch chuyển điện E_3, D_3 (không được nhầm với độ cứng chống uốn D) được cho bởi:

$$T_1 = c_{11}S_1 - e_{31}E_3, \quad D_3 = e_{31}S_1 + \varepsilon_3 E_3 \tag{7.20}$$

Các hằng số c_{11}, e_{31}, ε_3 tương ứng là các môđun độ cứng đàn hồi, hằng số áp điện và hằng số điện môi.

Nếu các lớp piezo được đặt theo các hướng ngược nhau như trên hình 7.9, khi đặt một điện thế lên đó sẽ sinh ra biến dạng kéo trong lớp này và biến dạng nén trong lớp kia và cũng gây nên mômen tác dụng lên dầm. Điện áp đặt vào lớp trên và lớp dưới cũng có thể được điều chỉnh để có một gradient của điện áp trung bình theo chiều rộng dầm. Đối với trường hợp này, các phương trình chuyển động của dầm composite có thể viết dưới dạng:

$$D\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -2e_{31}z_0\frac{\partial^2 V_3}{\partial x^2} \tag{7.21}$$

trong đó $z_0 = \left(h_s + h_p\right)/2$.

Số hạng z_0 là trung bình cộng của độ dày tấm piezo và kết cấu. Khi điện áp đều thì số hạng ở vế phải là kết quả của mômen đặt tại đầu của dầm, tỉ lệ với điện áp ngang.

7.7 Lực điện từ

Một trong những chìa khóa để mô hình hóa hệ cơ điện tử là xác định các lực điện và từ. Các lực điện tác dụng trên điện tích và phần cực điện (lưỡng cực điện). Các lực từ tác dụng trên dòng điện và phần cực từ. Điện tích và dòng điện có thể sinh ra một lực trong trường từ hoặc trường điện đều; tuy nhiên lưỡng cực điện và từ chỉ sinh ra một lực trong gradient trường từ hoặc lực.

Các lực điện và từ cũng có thể tính được khi dùng trực tiếp cả phương pháp vectơ cũng như nguyên lý năng lượng. Một trong các phương pháp phổ biến hơn cả là *phương trình Lagrange* với các hệ cơ điện được mô tả dưới đây.

Các hệ điện từ có thể được mô phỏng như các đại lượng trường phân bố như trường điện **E**, hoặc mật độ thông lượng từ **B**, hoặc như các dòng từ và điện của phần tử tập trung. Lực này trên điện tích điểm Q được cho bởi phương trình vectơ (hình 7.10):

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{E} \tag{7.22}$$

Khi **E** được sinh ra bởi điện tích đơn, lực giữa điện tích Q_1 và Q_2 được tính theo:

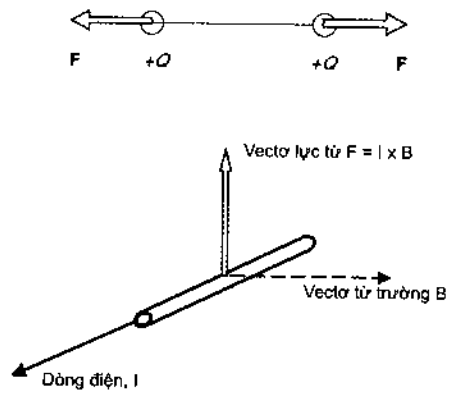
$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \tag{7.23}$$

và hướng dọc theo đường nối hai điện tích. Các điện tích cùng dấu thì đẩy nhau và các điện tích trái dấu hút nhau.

Các lực từ trên một đơn vị dài trên phần tử dòng **I** được cho bởi tích vectơ:

$$\mathbf{F} = I \times \mathbf{B} \tag{7.24}$$

trong đó lực từ vuông góc với mặt phẳng của phần tử dòng và vectơ trường từ. Lực tổng hợp trên mạch kín trong trường đều sẽ bằng không. Các lực lưới trên mạch kín được sinh ra bởi gradient trường do các mạch dòng khác hoặc trường nguồn.



HÌNH 7.10 Các lực tĩnh điện trên hai điện tích và lực điện từ tác động lên một đoạn dây có dòng điện chạy qua

Các lực sinh ra bởi phân bố trường bao quanh một điện tích chứa trong một thể tích hoặc dòng có thể tính được khi sử dụng các đại lượng trường của **E** và **B** trực tiếp dùng khái niệm ứng suất từ và điện được phát triển bởi Faraday và Maxwell. Các ứng suất điện và từ này phải được tích phân trên diện tích bao quanh điện tích hoặc phân bố dòng. Ví dụ một vật rắn chứa một phân bố dòng có thể sinh ra *áp lực từ* $P = B_t^2 / 2\mu_0$, trên yếu tố bề mặt và *sức căng từ* $t_n = B_n^2 / 2\mu_0$, trong đó các

thành phần trường từ được biểu diễn qua các đại lượng tiếp tuyến và pháp tuyến với bề mặt. Như vậy, trường từ 1 tesla phía ngoài của vật rắn sẽ sinh ra áp suất 40 N/cm^2 nếu trường này tiếp tuyến với bề mặt.

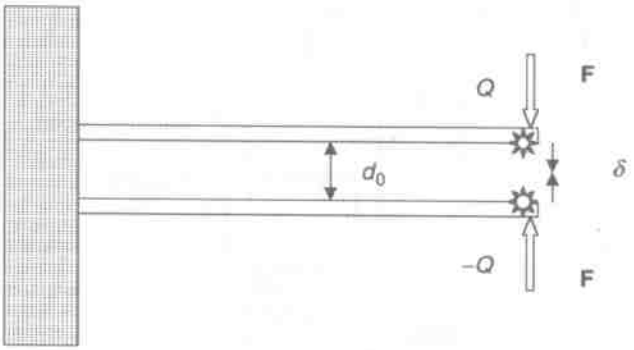
Nhìn chung, có 4 phương pháp chính để tính các lực điện và từ:

- Các vectơ lực trực tiếp và các mômen giữa các điện tích, các dòng và các lưỡng cực;
- Các vectơ lực điện của trường điện tích và lực từ của trường dòng;
- Tenxơ điện từ, tích phân của sức điện động, áp suất từ trên bề mặt của vật thể;
- Các phương pháp năng lượng dựa trên gradient của năng lượng điện và từ.

Các ví dụ về phương pháp trực tiếp và phương pháp tenxơ ứng suất được cho dưới đây. Phương pháp năng lượng được mô tả trong mục phương trình Lagrange.

Ví dụ 1: Lực điện giữa các điện tích

Giả sử hai dầm đàn hồi trong một thiết bị MEMS có các điện tích Q_1, Q_2 Culông, mỗi một điện tích tập trung ở điểm đầu của nó (hình 7.11).



HÌNH 7.11 Hai dầm đàn hồi với các điện tích ở đầu

Lực điện giữa các điện tích được cho bởi vectơ:

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 Q_2 \mathbf{r}}{4\pi\varepsilon_0 r^3} \quad \text{(Newton)} \tag{7.25}$$

trong đó $1/4\pi\varepsilon_0 = 8.99\text{x}10^9$ Nm^2/C^2.

Nếu khoảng cách ban đầu giữa các dầm là d_0, cần phải tìm khoảng cách mới dưới tác dụng của lực điện. Để đơn giản, ta lấy $Q_1 = -Q_2 = Q$, trong đó điện tích trái dấu tạo nên lực hút giữa các đầu của dầm. Độ dịch chuyển của các dầm này sẽ bằng:

$$\delta = \frac{FL^3}{3YI} = \frac{1}{k}F \tag{7.26}$$

trong đó L là độ dài, Y là môđun Young, I là mômen bậc hai của diện tích và k là hằng số đàn hồi hiệu dụng. Do lực điện, khoảng cách mới là $d = d_0 - 2\delta$:

$$k\delta = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{(d_0 - 2\delta)^2} \tag{7.27}$$

Đối với $\delta << d_0$ khi chỉ giữ lại đến bậc nhất, ta có:

$$\delta = \frac{Q^2 / 4\pi\varepsilon_0 d_0^2 k}{1 - (1/d_0^3)(Q^2 / k\pi\varepsilon_0)} \tag{7.28}$$

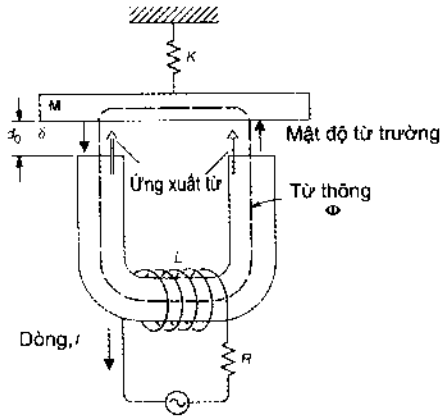
Bài toán này chỉ ra thế năng đối với sự mất ổn định khi uốn dọc trong trường điện vì khi các đầu dầm chuyển động gần nhau hơn thì lực hút giữa chúng tăng lên. Biểu thức không thứ nguyên trong mẫu số:

$$\frac{Q^2}{\pi\varepsilon_0 d_0^3}\frac{1}{k} \tag{7.29}$$

là tỉ số độ cứng điện âm đối với độ cứng đàn hồi k của các dầm.

Ví dụ 2: Lực từ trên nam châm điện

Hãy tưởng tượng một khung sắt từ được giữ bằng lò xo có độ cứng đàn hồi k (hình 7.12). Dưới khung nam châm từ mềm, đặt một nam châm điện được sinh ra từ N vòng của dòng điện I bao quanh lõi sắt từ mềm. Dòng điện được sinh ra bởi điện thế trong mạch với điện trở R.



HÌNH 7.12 Lực trên thanh sắt từ gần một nam châm điện

Sẽ tính được lực từ khi dùng *tenxơ ứng suất từ* được phát triển bởi Maxwell và Faraday (xem Moon 1984, 1994). Bên ngoài một vật sắt từ, *tenxơ ứng suất* được cho bởi **t**, còn vectơ ứng suất trên bề mặt xác định bởi pháp tuyến **n** được cho bởi $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{t} \cdot \mathbf{n}$:

$$\tau = \frac{1}{\mu_0}\left(\frac{1}{2}\left[B_n^2 - B_t^2\right], B_n B_t\right) = (\tau_n, \tau_t) \tag{7.30}$$

Đối với độ từ thẩm cao như trong vật sắt từ, thành phần tiếp tuyến của trường từ ngoài bề mặt gần bằng không. Như vậy, lực gần vuông góc với bề mặt và tìm được từ tích phân của sức căng từ trên toàn bề mặt:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2\mu_0}\int B_n^2 \mathbf{n}\, dA \tag{7.31}$$

và $B_n^2 / 2\mu_0$ biểu diễn ứng suất căng từ. Như vậy, nếu diện tích của các cực là A (bỏ qua phần lề của trường) thì lực là:

$$F = B_g^2 A / \mu_0 \tag{7.32}$$

trong đó B_g là trường có khe hở. Trường khe hở này được xác định từ định luật Ampe:

$$NI = \tilde{R}\Phi, \quad \Phi = B_g A \tag{7.33}$$

trong đó *từ trở* được cho với xấp xỉ:

$$\tilde{R} = \frac{2(d_0 - \delta)}{\mu_0 A} \tag{7.34}$$

Khi đó việc cân bằng lực từ và lực đàn hồi được cho bởi:

$$F = \frac{1}{\mu_0 A}\Phi^2 = \frac{1}{\mu_0 A}\left(\frac{NI}{\tilde{R}}\right)^2 = k\delta \tag{7.35}$$

hay:

$$\frac{(NI)^2}{4(d_0 - \delta)^2}\mu_0 A = k\delta, \quad \frac{\mu_0 N^2 I^2 A}{4(d_0 - \delta)^2} = k\delta$$

(chú ý rằng biểu thức $\mu_0 N^2 I^2$ có đơn vị là lực). Một lần nữa khi dòng điện tăng, thì độ cứng đàn hồi và độ cứng điện tiến tới không và sẽ có thể nảy mất ổn định uốn dọc.

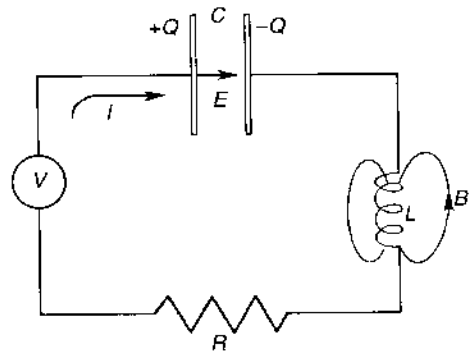
7.8 Các nguyên lý động lực của các mạch điện và từ

Các phương trình cơ bản của điện từ xuất phát từ các công trình của các nhà khoa học thế kỷ 19 như Faraday, Henry và Maxwell. Đó là các phương trình dạo hàm riêng theo điện trường **E** và mật độ dòng từ **B** và đòi hỏi các phép đo mật độ điện tích và mật độ dòng **J**, [3]. Tuy nhiên, hầu hết các thiết bị thực tế có thể mô hình hóa bởi mạch từ và mạch điện tập trung. Điện trở, điện dung và mạch tự cảm tiêu chuẩn chỉ ra trên hình 7.13 dùng các dòng điện I (ampe), điện tích Q (culông), từ thông Φ (weber) và điện thế V (volt) như là các biến động lực. Điện thế là tích phân của điện trường dọc theo một đường:

$$V_{21} = \int_1^2 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \tag{7.36}$$

Điện tích Q là tích phân của mật độ điện tích q trên toàn bộ thể tích và dòng điện I là tích phân của thành phần pháp tuyến của **J** trên toàn bộ tiết diện. Từ thông Φ được coi như là tích phân mặt của dòng từ:

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \tag{7.37}$$



HÌNH 7.13 Mạch điện với điện dung tự cảm và điện trở tập trung

Khi không có các thành phần cơ trong hệ các phương trình động lực của dạng bảo toàn điện tích và định luật Faraday - Henry về biến đổi dòng:

$$\frac{dQ}{dt} = I \tag{7.38}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = V \tag{7.39}$$

trong đó $\phi = N\Phi$ được gọi là số liên kết dòng và N là số nguyên. Trong mạch điện từ, tương tự với các đại lượng cơ bản của cơ học là độ tự cảm L và điện dung C. Chẳng hạn từ thông trong bộ tự cảm thường phụ thuộc vào dòng I:

$$\phi = f(I) \tag{7.40}$$

Đối với bộ tự cảm tuyến tính người ta có định nghĩa về độ tự cảm L tức là $\phi = LI$. Nếu hệ có biến trạng thái cơ học như chuyển vị x, khi trong cơ cấu chấp hành nhiễm từ, thì L có thể có chức năng của x.

Trong các phần tử mạch tích lũy điện tích, điện dung C được định nghĩa là:

$$Q = CV \tag{7.41}$$

Trong các thiết bị MEMS và microphone, điện dung cũng có thể có chức năng của biến dịch chuyển cơ học tổng quát nào đó.

Các điện thế ngang qua các phần tử mạch khác nhau có thể là chủ động hoặc bị động. Một nguồn điện thế thuần túy có thể duy trì một điện thế đã cho nhưng dòng phụ thuộc vào điện thế bị động ngang qua phần tử mạch khác nhau và được tóm tắt trong định luật mạch của Kirchoff:

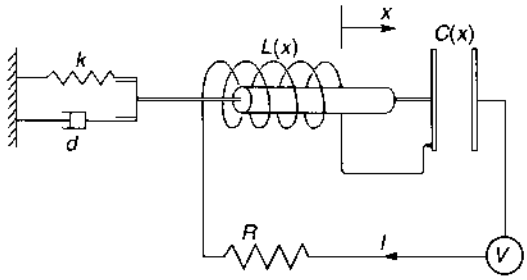
$$\frac{d}{dt}L(x)I + \frac{Q}{C(x)} + RI = V(t) \tag{7.42}$$

Các phương trình chuyển động Lagrange đối với các hệ cơ điện

Rõ ràng là các phương trình chuyển động Newton - Euler đối với các hệ cơ học có thể rút ra khi dùng nguyên lý năng lượng được gọi là phương trình Lagrange. Trong phương pháp này, người ta đồng nhất các tọa độ suy rộng $\{q_k\}$, không nhầm lẫn với điện tích và viết động năng của hệ T theo các vận tốc và tọa độ suy rộng $T(\dot{q}_k, q_k)$. Tiếp theo, các lực cơ học được tách ra thành lực bảo toàn và có thể rút ra từ hàm thế năng $W(q_k)$ và phần còn lại của các lực được biểu diễn bởi lực suy rộng Q_k tương ứng với công sinh ra bởi tọa độ suy rộng thứ k. Các phương trình Lagrange trong các hệ cơ học khi đó có dạng:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T(\dot{q}_k, q_k)}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial W(q_k)}{\partial q_k} = Q_k \tag{7.43}$$

Ví dụ trong hệ giảm chấn - khối lượng - lò xo tuyến tính với khối lượng m, hằng số đàn hồi k, hằng số giảm chấn nhớt c và một tọa độ suy rộng $q_1=x$, phương trình chuyển động có thể rút ra khi sử dụng $T = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$, $W = \frac{1}{2}kx^2$, $Q_1 = -c\dot{x}$, trong phương trình Lagrange ở trên. Có thể nhận xét về các công thức này là nó có thể mở rộng cho cả mạch điện từ và các bài toán cơ điện kết hợp. Ví dụ về ứng dụng phương trình Lagrange cho bài toán cơ điện kết hợp, xét một thiết bị cơ một chiều (hình 7.14), với cơ cấu chấp hành từ và điện dung được điều khiển bởi mạch điện thế tác dụng $V(t)$. Có thể mở rộng phương trình Lagrange cho các mạch nhờ xác định điện tích trên điện dung Q là tọa độ suy rộng khác cùng với x, tức là trong phương trình Lagrange: $q_1 = x_1$, $q_2 = Q$.



HÌNH 7.14 Hệ cơ điện liên kết tham số tập trung với chuyển động cơ học một bậc tự do x(t)

Khi đó, thêm một hàm năng lượng từ $W_m(\dot{Q},x)$ vào hàm động năng và thêm hàm năng lượng điện trường $W_e(Q.x)$ vào thế năng. Các phương trình của cả khối lượng và mạch có thể suy ra từ:

$$\frac{d\partial}{dt}\frac{[T+W_m]}{\partial\dot{q}_k}-\frac{\partial[T+W_m]}{\partial q_k}+\frac{\partial[W+W_e]}{\partial q_k}=Q_k \tag{7.44}$$

Lực suy rộng phải được thay đổi để phù hợp với hao tán năng lượng trong bộ điện trở và năng lượng đầu vào của điện thế tác dụng $V(t)$, tức là $Q_1=-c\dot{x}$, $Q_2=-R\dot{Q}+V(t)$. Trong ví dụ này, năng lượng từ tỉ lệ với độ tự cảm $R(x)$ và hàm năng lượng điện tỉ lệ nghịch với điện dung $C(x)$. Áp dụng các phương trình Lagrange sẽ thu được các biểu thức đối với các lực điện và từ như là các đạo hàm của các hàm năng lượng điện và từ tương ứng, tức là:

$$W_m=\frac{1}{2}L(x)\dot{Q}^2=\frac{1}{2}LI^2,\quad W_e=\frac{1}{2C(x)}Q^2 \tag{7.45}$$

$$F_m=\frac{\partial W_m(x,\dot{Q})}{\partial x}=\frac{1}{2}I^2\frac{dL(x)}{dx},\quad F_e=-\frac{\partial W_e(x,Q)}{\partial x}=-\frac{1}{2}Q^2\frac{d}{dx}\left[\frac{1}{C(x)}\right] \tag{7.46}$$

Các công thức đáng chú ý này rất có lợi vì có thể tính toán các lực điện từ khi biết sự phụ thuộc của độ tự cảm và điện dung vào dịch chuyển x. Các hàm này thường có thể tìm được từ các phép đo L và C.

Ví dụ: Lực điện trên cơ cấu chấp hành MEMS truyền động răng lược

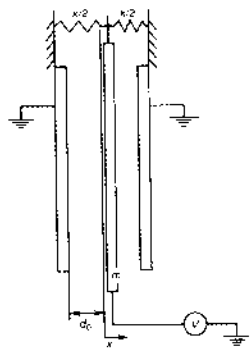
Hãy xét chuyển động của tấm liên kết đàn hồi giữa hai tấm nền cố định như trong cơ cấu chấp hành truyền động răng lược MEMS trên hình 7.15. Khi tấm có thể chuyển động có điện thế V tác dụng, tích lũy năng lượng điện trường trong hai khe hở được cho bởi:

$$W_e^*(V,x)=\frac{1}{2}\varepsilon_0V^2A\frac{d_0}{d_0^2-x^2} \tag{7.47}$$

Trong biểu thức này, hàm năng lượng điện được viết thông qua điện thế V thay cho điện tích trên các tấm Q như trong các phương trình 7.45 và 7.46. Khe hở ban đầu là d_0 và diện tích của tấm là A.

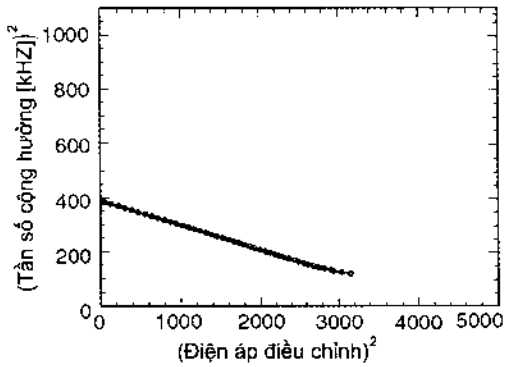
Khi dùng các biểu thức về lực suy ra từ các phương trình Lagrange 7.44, lực điện tích trên tấm được cho bởi:

$$F_e=\frac{\partial}{\partial x}W_e^*(V,x)=\frac{\varepsilon_0V^2A}{d_0}\frac{x}{(1-x^2/d^2)^2} \tag{7.48}$$



HÌNH 7.15 Ví dụ về lực điện trên các phần tử cơ cấu chấp hành truyền động răng lược

Biểu thức này chỉ ra rằng, F_x là âm với x nhỏ, điều đó có nghĩa là điện thế sẽ làm giảm tần số riêng của tấm. Ý tưởng này đã được Adams ứng dụng vào cơ cấu chấp hành truyền động răng lược MEMS, trong đó điện thế được dùng để điều chỉnh tần số riêng của gia tốc kế MEMS như chỉ ra trên hình 7.16 [1].



HÌNH 7.16 Sự suy giảm tần số riêng của thiết bị MEMS với điện thế tác dụng như là một ví dụ về độ cứng điện âm [1]

7.9 Định lý Earnshaw và ổn định cơ điện

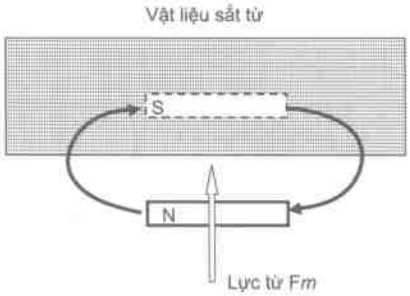
Người ta vẫn chưa biết rằng các lực điện và từ trong các hệ cơ học có thể sinh ra mất ổn định tĩnh như người ta đã biết về *mất ổn định dọc đàn hồi*. Đó là hệ quả của tính chất bình phương ngược của các lực điện và từ. Ta biết rằng, thế năng điện từ trường Φ thỏa mãn phương trình Laplace $\nabla^2\Phi = 0$. Có một định lý cơ bản trong lý thuyết thế năng về sự không thể có các giá trị cực tiểu hay cực đại tương đối của thế năng $\Phi(\mathbf{r})$ đối với các nghiệm của phương trình Laplace trừ trên biên. Điều đó được phát biểu trong định lý Earnshaw (1829) rằng đối với một hệ tĩnh các điện tích, các lưỡng cực điện từ, các dòng không đổi không thể có trạng thái ổn định của trạng thái cân bằng mà không có các lực động, các lực cơ học và các lực phản hồi [7, 8].

Một ví dụ của định lý Earnshaw là sự không ổn định của lưỡng cực từ (từ tính không đổi) gần bề mặt sắt từ (hình 7.17). Chẳng hạn, các ổ đỡ từ dựa trên các lực sắt từ cần có điều khiển phản hồi. Định lý Earnshaw cũng cho biết nếu có một bậc tự do của lực đàn hồi ổn định thì phải có một bậc tự do nữa không ổn định. Như vậy, các vị trí cân bằng đối với hệ điện từ thuần túy của điện tích và lưỡng cực phải là những điểm lõm xuống. Sự liên quan của các thế năng lực là ở chỗ ma

trận đạo hàm bậc hai là không xác định dương. Chẳng hạn, giả sử có ba tọa độ vị trí suy rộng $\{s_u\}$ đối với tập các điện tích. Khi đó nếu lực suy rộng tỉ lệ với gradient thế năng $\nabla\Phi$ thì ma trận độ cứng điện suy rộng $\mathbf{K}_{ij}$ cho bởi:

$$\mathbf{K}_{ij} = \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial s_i \partial s_j} \right]$$

sẽ không xác định dương. Có nghĩa là ít nhất một giá trị riêng sẽ có độ cứng âm.



HÌNH 7.17 Lực từ trên một nam châm lưỡng cực đặt gần vật liệu sắt từ

Ví dụ khác về mất ổn định dọc điện tích là một dầm trong trường điện tích với điện tích sinh ra bởi trường điện tích trên hai tấm cố định gần nhau như trên hình 7.15. Điện tích trên dầm sẽ bị hút vào hai tấm nhưng bị cản lại bởi độ cứng đàn hồi của dầm. Khi điện thế tăng, độ cứng đàn hồi và điện tố hợp sẽ giảm cho đến khi dầm bị mất ổn định dọc về phía này hoặc phía kia. Tuy nhiên trước khi mất ổn định dọc, tần số riêng của dầm đã tích điện sẽ giảm (hình 7.16). Tính chất này đã được quan sát bằng thực nghiệm trong một thiết bị MEMS. Mất ổn định đàn hồi từ tương tự được quan sát đối với dầm đàn hồi sắt từ mỏng trong trường từ tĩnh [7]. Cả hai mất ổn định đàn hồi điện và từ được suy ra từ cùng nguyên lý của định lý Earnshaw.

Có những sự ngoại lệ khá ấn tượng đối với định lý ổn định Earnshaw. Hiển nhiên, một trong số đó là sự nâng lên của phương tiện vận tải 50 tấn trong trường từ, đã được biết theo MagLev, hoặc sự treo của các động cơ trong đường ống khí khi dùng các hệ đỡ từ điều khiển phản hồi (Moon 1994). Ở đây, hoặc là thiết bị dùng lực phản hồi tức là các trường không phải là tĩnh, hoặc là nguồn của một trong các trường từ là siêu dẫn. Các lực nghịch từ là ngoại lệ đối với định lý Earnshaw và các vật liệu siêu dẫn có các tính chất giống như các vật liệu nghịch từ. Các vật liệu mới có tính chất siêu dẫn nhiệt độ cao, như $YBaCuO$, có các lực quay từ thông, do đó có thể được dùng để nâng cao ổn định trong hệ đỡ từ mà không cần phản hồi [8].

Tài liệu tham khảo

[1] Adams, S. G. (1996), *Design of Electrostatic Actuators to Tune the Effective Stiffness of Micro-Mechanical Systems*, Ph.D. Dissertation, Cornell Unversity, Ithaca, New York.

[2] Goldstein, H. (1980), *Classical Mechanics*, Addison-Wesley, Reading, MA.

[3] Jackson, J. D. (1968), *Classical Electrodynamics*, J. Wiley & Sons, New York.

[4] Lee, C. K. and Moon, F. C. (1989), "Laminated piezopolymer plates for bending sensors and actuators," *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(6), June 1989.

[5] Melcher, J. R. (1981), *Continuum Electrodynamics*, MIT Press, Cambridge, MA.

[6] Miu, D. K. (1993), *Mechatronics*, Springer-Verlag, New York.

[7] Moon, F. C. (1984), *Magneto-Solid Mechanics*, J. Wiley & Sons, New York.

[8] Moon, F. C. (1994), *Superconducting Levitation*, J. Wiley & Sons, New York.

[9] Moon, F. C. (1999), *Applied Dynamics*, J. Wiley & Sons, New York.

[10] Yu, Y. Y. (1996), *Vibrations of Elastic Plates*, Springer-Verlag, New York.

8

Cấu trúc và vật liệu

8.1 Các định luật cơ bản của cơ học 8-1
8.2 Cấu trúc phổ biến trong các hệ cơ điện tử 8-6
8.3 Phân tích dao động và dạng riêng 8-8
8.4 Phân tích mất ổn định cong 8-10
8.5 Các bộ chuyển đổi 8-11
8.6 Xu hướng phát triển 8-15

Eniko T. Enikov
University of Arizona

Thuật ngữ "cơ điện tử" (mechatronics) lần đầu tiên được các kỹ sư Nhật Bản dùng để chỉ các hệ cơ có nhúng điện tử có khả năng tạo ra các chức năng điều khiển và thông minh. Quá trình tích hợp tiếp theo đã dẫn đến sự phát triển của các hệ cơ điện tử micro (MEMS), trong đó, kết cấu cơ lại là một phần của hệ thống điện. Để phát triển và thiết kế các hệ cơ điện tử đòi hỏi kiến thức liên ngành trong nhiều lĩnh vực: điện tử, cơ học, vật liệu và hóa học. Chương này giới thiệu tổng quan về các kết cấu cơ học chính, các vật liệu tạo ra chúng và các định luật mô tả tương tác giữa các quá trình cơ và điện. Những kiến thức này được dùng trong giai đoạn đầu của thiết kế, khi cần các ước lượng nhanh để chấp nhận hoặc từ chối một khái niệm. Các cơ cấu chấp hành polyme tác dụng điện - những vật liệu thông minh mới xuất hiện cũng giành được sự chú ý đặc biệt. Ở đây cung cấp một số bảng hằng số vật liệu để tham khảo.

8.1 Các định luật cơ bản của cơ học

Tĩnh học và động học của các hệ cơ điện tử

Các định luật cơ bản của cơ học là cân bằng của mômen động lượng và động lượng. Đối với các hệ lý tưởng gồm chỉ một chất điểm có khối lượng m chuyển động với vận tốc $\mathbf{v}$, động lượng được xác định là tích của khối lượng và vận tốc:

$$\mathbf{L} = m\mathbf{v} \tag{8.1}$$

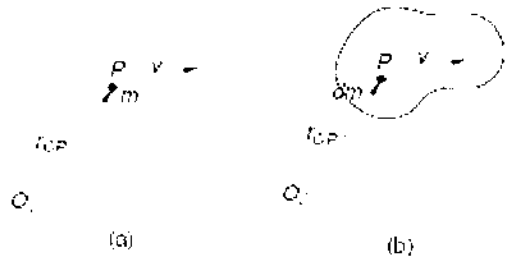
Tính bảo toàn của động lượng đối với một chất điểm độc lập đòi hỏi: tốc độ biến thiên của động lượng bằng tổng tất cả các lực tác dụng lên chất điểm đó:

$$\dot{\mathbf{L}} = m\dot{\mathbf{v}} = \sum \mathbf{F}_i \tag{8.2}$$

trong đó ta đã giả thiết rằng khối lượng không thay đổi theo thời gian.

Mômen động lượng của chất điểm đối với điểm O bất kỳ của hệ quy chiếu (điểm tham chiếu) được xác định như sau:

$$\mathbf{H}_O = \mathbf{r}_{OP} \times (m\mathbf{v}) \tag{8.3}$$



HÌNH 8.1 Định nghĩa các vectơ vận tốc và định vị của chất điểm (a) và của vật rắn (b)

trong đó $\mathbf{r}_{OP}$ là vectơ định vị của điểm P so với điểm O (hình 8.1(a)). Sự cân bằng mômen động lượng đối với phần tử chất điểm tự thỏa mãn như một hệ quả của (8.1). Trong trường hợp nhiều phần tử (một vật rắn chứa vô số các phần tử), động lượng và mômen động lượng được xác định là tổng (tích phân) của các động lượng và các mômen động lượng của các phần tử (hình 8.1(b)):

$$\mathbf{L} = \int_V \mathbf{v} dm \quad \text{và} \quad \mathbf{H}_O = \int_V \mathbf{r}_{OP} \times \mathbf{v} dm \tag{8.4}$$

Từ định luật thứ hai của cơ học cổ điển ta có: tốc độ biến thiên theo thời gian của mômen động lượng của vật rắn đối với một điểm cố định bằng tổng các mômen của các lực ngoài tác dụng lên vật thể đối với cùng điểm đó:

$$\dot{\mathbf{H}}_O = \sum_i \mathbf{M}_i + \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i \tag{8.5}$$

Trong đó $\mathbf{M}_i$ là các ngẫu lực ngoài tác dụng cùng với các lực $\mathbf{F}_i$. Nếu điểm tham chiếu O được chọn là khối tâm của vật thể G thì định luật cân bằng động lượng và mômen động lượng có công thức đơn giản hơn:

$$m\dot{\mathbf{v}}_G = \sum_i \mathbf{F}_i \tag{8.6}$$

$$I_G \dot{\boldsymbol{\omega}} = \sum_i \mathbf{M}_i + \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i \tag{8.7}$$

trong đó $\boldsymbol{\omega}$ là vectơ vận tốc góc tức thời và I_G là mômen quán tính đối với khối tâm. Các phương trình (8.6) và (8.7) được gọi là các phương trình chuyển động và đóng vai trò trung tâm trong động lực học của vật rắn. Nếu không có chuyển động (vận tốc góc và vận tốc dài bằng không), ta sẽ gặp *bài toán tĩnh*. Ngược lại, khi các gia tốc lớn ta cần phải giải hệ đầy đủ các phương trình (8.6) và (8.7) chứa các thành phần quán tính. Trong các hệ cơ điện tử nói chung đáp ứng cơ học chậm hơn đáp ứng điện và do đó nó xác định đáp ứng tổng thể. Nếu thời gian đáp ứng là tới hạn thì khi áp dụng cần phải xét các thành phần quán tính trong các phương trình (8.6) và (8.7).

Phương trình chuyển động của vật thể biến dạng

Các vật rắn không thay đổi hình dạng và kích thước khi chuyển động, tức là, khoảng cách giữa các phần tử là không đổi. Trong thực tế, tất cả các vật đều biến dạng ở mức độ nào đó khi chịu tác dụng của ngoại lực. Một vật được coi là rắn hoặc biến dạng phụ thuộc vào đặc thù của từng ứng dụng cụ thể. Trong mục này, chúng ta sẽ xem xét lại các phương trình cơ bản mô tả chuyển động của vật thể biến dạng. Các phương trình này cũng được rút ra từ sự cân bằng của động lượng và mômen động lượng của phần tử có thể tích vô cùng bé dV của vật liệu. Mỗi phần tử thể tích dV không chỉ chịu tác dụng của ngoại lực $\mathbf{f}$ lên thể tích, mà còn chịu các nội lực bắt nguồn từ trạng thái tĩnh của vật thể. Các nội lực này được mô tả bởi tenxơ bậc hai $\mathbf{T}$ gọi là tenxơ ứng suất. Khi đó cân bằng động lượng được thiết lập dưới dạng tích phân đối với một phần tùy ý của vật thể có thể tích V như sau:

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho \mathbf{v}\, dv = \int_{\partial V} \mathbf{T}\cdot\mathbf{n}\, dA + \int_V \mathbf{f}\, dv \tag{8.8}$$

trong đó ρ là khối lượng riêng, $\mathbf{v}$ vận tốc của thành phần dV, $\mathbf{f}$ là ngoại lực tác dụng lên thể tích dV. Quy luật cân bằng ở trên nói lên rằng, tốc độ biến thiên của động lượng bằng tổng của thông lượng nội lực tác động trên biên của V và ngoại lực được phân bố bên trong V. Biến đổi (8.8) theo định luật bảo toàn khối lượng ta có:

$$\int_V \rho \dot{\mathbf{v}}\, dv = \int_V \nabla\cdot\mathbf{T}\, dv + \int_V \mathbf{f}\, dv \tag{8.9}$$

Vì (8.9) đúng cho một thể tích bất kỳ nên suy ra rằng, các biểu thức dưới dấu tích phân cũng bằng nhau. Như vậy dạng vi phân của cân bằng động lượng là:

$$\rho\dot{\mathbf{v}} = \nabla\cdot\mathbf{T} + \mathbf{f} \quad \text{hoặc với ký hiệu chỉ số} \quad \rho\dot{v}_i = T_{ij,j} + f_i \tag{8.10}$$

Bằng cách tương tự, việc cân bằng mômen động lượng sẽ đưa đến điều kiện đối xứng đơn giản của tenxơ ứng suất:

$$T_{ij} = T_{ji} \tag{8.11}$$

điều đó đúng cho các vật liệu không có ngẫu lực thể tích ngoài. Cần chú ý rằng, trong các vật liệu dị hướng nào đó các vectơ phân cực hoặc vectơ từ trường có thể làm tăng ngẫu lực thể tích, ví dụ khi $\mathbf{E}\times\mathbf{P} \neq \mathbf{0}$. Trong những trường hợp này tenxơ ứng suất là không đối xứng và bất biến vectơ của nó bằng ngẫu lực thể tích. Phương trình (8.10) thường được viết ứng với một trong ba hệ tọa độ thông dụng. Chẳng hạn dùng tọa độ vuông góc ta có:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} + f_x = \rho a_x, \quad T_{xy} = T_{yx}\\
&\frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} + f_y = \rho a_y, \quad T_{yz} = T_{zy}\\
&\frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + f_z = \rho a_z, \quad T_{xz} = T_{zx}
\end{aligned} \tag{8.12}$$

và trong tọa độ trụ:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{T_{rr} - T_{\theta\theta}}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_{r\theta}}{\partial\theta} + \frac{\partial T_{rz}}{\partial z} + f_r = \rho a_r \qquad T_{r\theta} = T_{\theta r}\\
&\frac{\partial T_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2}{r}T_{r\theta} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_{\theta\theta}}{\partial\theta} + \frac{\partial T_{\theta z}}{\partial z} + f_\theta = \rho a_\theta \qquad T_{\theta z} = T_{z\theta}\\
&\frac{\partial T_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r}T_{rz} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_{\theta z}}{\partial\theta} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + f_z = \rho a_z \qquad T_{rz} = T_{zr}
\end{aligned} \tag{8.13}$$

trong đó (x, y, z) và (r, θ, z) là ba tọa độ, f_s là mật độ lực thể tích tương ứng và a_s là các gia tốc. Bổ sung vào các phương trình (8.12) và (8.13) là mối liên hệ giữa ứng suất và chuyển vị, là cần thiết để xác định biến dạng. Vì sự dịch chuyển và quay của vật rắn không gây ra biến dạng của vật thể, nên chúng cũng không ảnh hưởng đến trường ứng suất bên trong. Thực ra, trường ứng suất là hàm của gradien chuyển vị, gọi là gradien biến dạng. Khi gradien này nhỏ, có thể sử dụng mối quan hệ tuyến tính giữa chuyển vị và biến dạng:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x},\ \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y},\ \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z},\ \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x},\ \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x},\ \varepsilon_{zy} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \tag{8.14}$$

Sự bảo toàn mômen động lượng và các quan hệ động học không chứa bất kỳ thông tin nào về vật liệu. Các định luật cơ bản sẽ cung cấp thêm các thông tin này. Định luật chung nhất mô tả vật liệu đàn hồi tuyến tính và có thể biểu diễn thuận lợi khi dùng ma trận đối xứng c_{ij}, gọi là ma trận độ cứng:

$$\begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{zz} \\ T_{yz} \\ T_{zx} \\ T_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & \text{đối xứng} & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{Vmatrix} \tag{8.15}$$

Trong trường hợp tổng quát nhất, ma trận c_{ij} có 21 phần tử độc lập. Khi vật liệu có đối xứng tinh thể, thì số hằng số độc lập sẽ giảm đi. Ví dụ, tinh thể đơn Si là vật liệu kết cấu thông dụng trong MEMS với tính đối xứng lập phương. Trong trường hợp này, chỉ có ba hằng số độc lập:

$$\begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{zz} \\ T_{yz} \\ T_{zx} \\ T_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & \text{đối xứng} & & & c_{44} & 0 \\ & & & & & c_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{Vmatrix} \tag{8.16}$$

Nếu vật liệu là đẳng hướng (không định hình hoặc đa tinh thể), thì số các hằng số đàn hồi độc lập được giảm xuống còn hai bởi quan hệ $c_{44} = (c_{11}-c_{12})/2$. Các hằng số đàn hồi của nhiều vật liệu thông dụng nhất được liệt kê trong bảng 8.1 [13]. Thông tin bổ sung trên các lớp đối xứng khác có thể tìm trong [18].

BẢNG 8.1 Hệ số đàn hồi của tinh thể lập phương thông thường

Tinh thể	Hằng số co dãn tại nhiệt độ phòng, 10^{11}N/m^2		
	C_{11}	C_{12}	C_{44}
W	5.233	2.045	1.607
Ta	2.609	1.574	0.818
Cu	1.684	1.214	0.754
Ag	1.249	0.937	0.416
Au	1.923	1.631	0.420
Al	1.608	0.607	0.282
K	0.0370	0.0314	0.0188
Pb	0.495	0.423	0.149
Ni	2.508	1.500	1.235
Pd	2.271	1.761	0.17
Si	1.66	0.639	0.796

Các hiện tượng điện

Trong mục trước đã nêu tóm tắt các định luật về chuyển động của các vật rắn và biến dạng. Các lực tham gia vào các phương trình này thường có nguồn gốc điện từ: như vậy cần phải biết sự

phân bố của các trường điện và từ. Trường điện từ được chi phối bởi hệ bốn phương trình liên kết với nhau như các phương trình Maxwell. Tương tự đối với các phương trình động lượng, chúng cũng có thể biểu diễn dưới dạng tích phân:

$$\begin{aligned} &\dot{\mathbf{B}} + \nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \\ &\nabla \cdot \mathbf{D} = q^f \\ &\nabla \times \mathbf{H} - \dot{\mathbf{D}} = \mathbf{i} \\ &\nabla \cdot \mathbf{B} = \mathbf{0} \end{aligned} \tag{8.17}$$

trong đó **E** là điện trường, **D** là dịch chuyển điện, **B** là cảm ứng từ, **H** là cường độ từ trường, **i** là mật độ dòng điện và q^f mật độ điện tích tự do. Các phương trình (8.17) cần đến các định luật cơ bản xác định mật độ dòng, dịch chuyển điện, và trường từ qua trường điện và các vectơ tơ cảm ứng từ. Dạng tuyến tính của các định luật này cho bởi:

$$\mathbf{i} = \frac{\mathbf{E}}{\rho_e}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \tag{8.18}$$

trong đó ρ_e là điện trở. Sự liên kết giữa các trường cơ và điện có thể là tuyến tính hoặc phi tuyến. Ví dụ, áp-điện là hiện tượng tuyến tính mô tả sự sinh ra của trường điện như là kết quả áp đặt các ứng suất cơ học. Mặt khác các điện tích gần nhau là hiệu ứng bậc hai, sinh ra biến dạng cơ học tỷ lệ với bình phương điện trường. Các hiệu ứng khác chứa áp-trở, tức là, sự biến đổi của điện trở do ứng suất cơ học. Thêm vào các tính chất vật liệu này, sự liên kết cơ điện có thể đạt được qua việc sử dụng trực tiếp các lực điện từ (lực Lorentz) như thường được tiến hành trong các máy điện thông dụng. Lực Lorentz trên một đơn vị thể tích được cho bởi:

$$\mathbf{f}^L = q^f (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \tag{8.19}$$

trong đó q^f là mật độ tích điện. Phương trình (8.19) tính đến các lực tác dụng chỉ trên điện tích tự do. Nếu các trường có gradien mạnh, biểu thức trên phải được biến đổi để chứa các thành phần phân cực và nhiễm từ [16]:

$$\mathbf{f}^{EM} = q^f \mathbf{E} + \left(\mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \right) \times \mathbf{B} + \mathbf{P} \cdot \nabla \mathbf{E} + \nabla \mathbf{B} \cdot \mathbf{M} \tag{8.20}$$

Có thể dùng các kết quả nhận được cho phương trình động lượng (8.10) ở đó lực thể tích **f** được thay bằng (8.19) hoặc (8.20).

Như đã đề cập trước đây, áp-điện và áp-trở là các hiệu ứng được dùng thông dụng trong các hệ cơ điện. Hiệu ứng áp-điện chỉ xảy ra trong các vật liệu với cấu trúc tinh thể nào đó. Các ví dụ thông dụng chứa $BaTiO_3$ và titan zirconia dẫn suất (PZT). Trong xấp xỉ giả tĩnh điện (khi hiệu ứng từ được bỏ qua) có bốn biến mô tả trạng thái cơ điện của vật: điện trường **E**, dịch chuyển **D**, ứng suất cơ học **T** và biến dạng cơ học **ε**. Các định luật cơ bản của áp-điện được cho bởi hệ hai phương trình ma trận giữa bốn biến trường xác lập sự liên hệ một biến cơ, một biến điện với hai biến khác từ các hệ thức:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl} T_{kl} + d_{ijk} E_k, \quad D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_0 \Xi_{ij} E_j \tag{8.21}$$

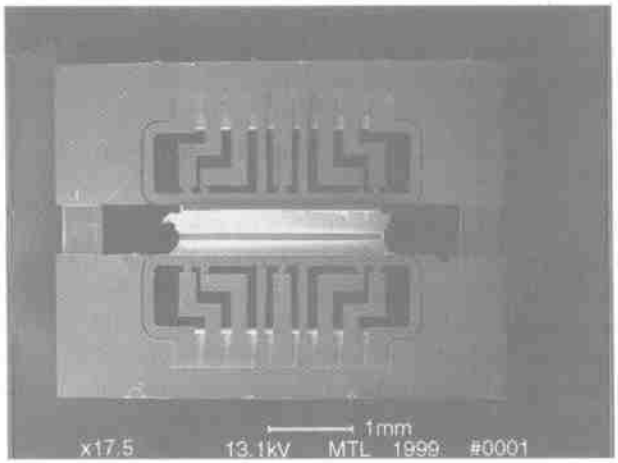
trong đó s_{ijkl} là tenxơ hiệp biến đàn hồi, d_{ijk} là tenxơ áp-đàn hồi, Ξ_{ij} là tenxơ điện môi. Nếu điện trường và vectơ phân cực là cùng tuyến tính, thì tenxơ ứng suất và biến dạng là đối xứng và số các hệ số độc lập trong s_{ijkl} được rút lại từ 81 xuống 21 và đối với tenxơ áp-đàn hồi d_{ijk} từ 27 xuống 18. Hơn nữa, nếu điện áp phân cực chỉ theo một hướng (ví dụ chỉ số 3) các phần tử khác không sẽ là:

$$d_{113}, \quad d_{223}, \quad d_{333}, \quad d_{232} = d_{322}, \quad d_{131} = d_{313}, \quad d_{123} = d_{213}.$$

Giá trị của các hệ số trong (8.21) đối với nhiều tinh thể $BaTiO_3$ có thể tìm trong [22].

8.2 Cấu trúc phổ biến trong các hệ cơ điện tử

Các hệ cơ điện tử micro (MEMS) thường dùng công nghệ chế tạo mạch tích hợp truyền thống. Các kết cấu cơ học được sử dụng thường là các thiết bị hai chiều như lò xo, cuộn dây, cầu hoặc dầm công xôn chịu uốn và xoắn phẳng hoặc không phẳng. Sử dụng công nghệ khắc ion với tỉ lệ tương quan cao kết hợp với liên kết chảy dẻo của silic, cũng có thể tạo thành kết cấu ba chiều. Ví dụ hình 8.2 chỉ ra mạch micro SEM của cảm biến lực điện dung được thiết kế để gắn các sợi thủy tinh vào rãnh chữ v đã được khắc. Mục này sẽ xem lại các quan hệ cơ bản dùng trong thiết kế ban đầu của các hệ cơ điện tử như vậy.



HÌNH 8.2 Cảm biến lực điện dung được gia công micro 3D

Dầm

Dầm công xôn micro được dùng trong các chuyển mạch tĩnh điện có bề mặt được gia công micro cho kính hiển vi SPM (Scanning Probe Microscope) và rất nhiều cảm biến dựa trên các công xôn dao động. Các dầm được gia công micro bề mặt thường là dầm công xôn và cầu. Hình 8.3(a) minh họa dầm công xôn hai lớp và hình 8.3(b) minh họa dầm cầu. Lực đàn hồi cần thiết để tạo ra chuyển dịch d ở đầu dầm công xôn hoặc ở tâm của cầu, được cho bởi:

$$F^{\text{elast}} = K_{\text{eff}} d \tag{8.22}$$

trong đó:

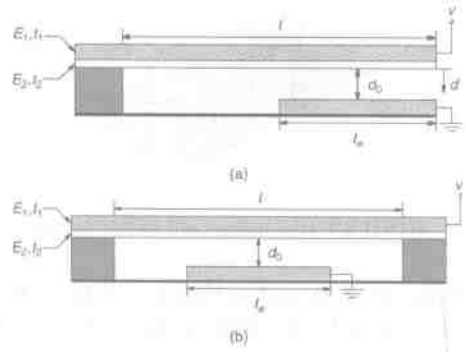
$$K_{\text{eff}} = \frac{24(EI)_{\text{eff}}}{(6l_e^3/5) + 6(l-l_e)l_e^2 + 12(l-l_e)^2 l_e + 8(l-l_e)^3} \text{ và } K_{\text{eff}} = \frac{360(EI)_{\text{eff}}}{30l^3 - 45ll_e^2 - 5(l_e^4/l) + 3l_e^3} \tag{8.23}$$

là hằng số đàn hồi hiệu dụng của các dầm tổng hợp đối với các dầm công xôn và dầm cầu tương ứng.

Độ cứng hiệu dụng của dầm trong cả hai trường hợp có thể tính theo:

$$(EI)_{\text{eff}} = \frac{E_1 w t_1^3}{12} + \frac{E_2 w t_2^3}{12} + \frac{E_1 E_2 t_1 t_2 w (t_1 + t_2)^2}{4(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \tag{8.24}$$

Trong đó w là chiều rộng của dầm, t_1 là độ dày của đỉnh dầm, t_2 là độ dày của lớp cách điện (oxit silic hoặc silic nitrit), l là chiều dài của dầm, l_e là chiều dài của điện cực cố định, E_1 là môđun Young của lớp trên, E_2 là môđun Young của lớp cách điện.



HÌNH 8.3 Dầm gia công micro bề mặt (a) Dầm composite hai lớp với nguyên lý tĩnh điện, (b) Dầm cầu composite hai lớp với nguyên lý tĩnh điện

Lò xo xoắn

Sự xoắn của dầm ban đầu được sử dụng trong các kết cấu quay như các gương micro trong máy quét quang học hoặc trong các máy chiếu. Dãy gương vi mô của hãng Taxas Instruments dùng các dầm silic đa tinh thể như các khớp bản lề tấm gương.

Các bài toán xoắn có thể giải ở dạng kín cho các dầm với các thiết diện ngang tam giác hoặc elip [17]. Trong trường hợp thiết diện ngang elip, mômen để tạo ra độ xoắn góc α [rad/m] (góc xoắn trên một đơn vị dài của dầm) bằng:

$$M = \frac{\pi a^3 b^3}{a^2 + b^2} G\alpha \tag{8.25}$$

trong đó G là môđun trượt đàn hồi, a và b là độ dài của hai bán trục elip. Trong trường hợp này ứng suất trượt cực đại là:

$$\tau^{\max} = \frac{2G\alpha a^2 b}{a^2 + b^2}, \quad a > b \tag{8.26}$$

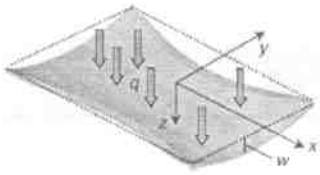
Độ cứng chống xoắn của dầm thiết diện chữ nhật có thể được biểu diễn ở dạng chuỗi lũy thừa vô hạn [11]. Nếu thiết diện ngang có kích thước $a \times b$, $a < b$, ba số hạng đầu của chuỗi này cho trong phương trình tương tự như (8.25):

$$M = 2KG\alpha \text{ trong đó } K = ab^3\left[\frac{1}{3} - 0.21\frac{b}{a}\left(1 - \frac{b^4}{12a^4}\right)\right] \tag{8.27}$$

Tấm mỏng

Cảm biến áp lực là một trong các bộ chuyển đổi cơ điện phổ thông nhất. Kết cấu cơ bản là một tấm mỏng chịu áp lực vi phân dùng để chuyển đổi áp lực cơ học thành tín hiệu điện. Các lá áp-trở được dùng để chuyển đổi biến dạng của màng thành sự thay đổi điện trở và sẽ được đọc ra bằng mạch cầu điện trở thông dụng. Các cảm biến áp lực ban đầu được chế tạo bằng công nghệ ăn mòn dị hướng silic, điều đó thu được trong giản đồ vuông góc. Hình 8.4 là tấm mỏng chịu áp lực vuông góc q, dẫn đến dịch chuyển không phẳng $w(x,y)$. Điều kiện cân bằng đối với $w(x,y)$ được cho bởi lý thuyết tấm mỏng [22]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D}, \tag{8.28}$$



HÌNH 8.4 Tấm mỏng chịu áp lực dương q

trong đó $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ là độ rắn, E là môđun Young, ν là hệ số Poisson và h là độ dày của tấm. Các mômen biên (mômen trên đơn vị dài trên biên) và các biến dạng nhỏ là:

$$M_x(x,y) = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \mathbf{v}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right), \quad \varepsilon_{xx}(x,y,z) = -z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$
$$M_y(x,y) = -D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \mathbf{v}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right), \quad \varepsilon_{yy}(x,y,z) = -z\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \tag{8.29}$$
$$M_{xy}(x,y) = D(1-\mathbf{v})\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \qquad \varepsilon_{xy}(x,y,z) = -z\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

Dùng (8.29) người ta có thể tính được biến dạng cực đại xảy ra ở đỉnh và đáy của tấm qua các mômen biên:

$$\varepsilon_{xx}^{\max}(x,y,z) = \frac{12z}{Eh^3}(M_x - \mathbf{v}M_y)\Big|_{z=h} = \frac{12}{Eh^2}(M_x - \mathbf{v}M_y)$$
$$\varepsilon_{yy}^{\max}(x,y,z) = \frac{12z}{Eh^3}(M_y - \mathbf{v}M_x)\Big|_{z=h} = \frac{12}{Eh^2}(M_y - \mathbf{v}M_x) \tag{8.30}$$

Trong trường hợp của cảm biến áp lực với màng chịu áp lực đều, các điều kiện biên được xây dựng trên các cạnh: $w = 0$, $\partial w/\partial x = 0$ tại $x = \pm a/2$ và $w = 0$, $\partial w/\partial y = 0$ tại $y = \pm b/2$, trong đó màng có kích thước phẳng là $a \times b$. Nghiệm của bài toán này chỉ ra rằng các biến dạng cực đại tại điểm giữa các cạnh [3]. Các giá trị của mômen biên và dịch chuyển tại tâm của tấm được liệt kê trong bảng 8.2.

BẢNG 8.2 Chuyển vị và mômen uốn của tấm ngàm dưới tải đều q [3]

b/a	$W(x=0,y=0)$	$M_x(x=a/2,y=0)$	$M_y(x=0,y=b/2)$	$M_x(x=0,y=0)$	$M_y(x=0,y=0)$
1	$0.00126qa^4/d$	$-0{,}0513qa^2$	$-0{,}0513qa^2$	$0{,}0231qa^2$	$0{,}0231qa^2$
1.5	$0.00220qa^4/d$	$-0{,}0757qa^2$	$-0{,}0570qa^2$	$0{,}0368qa^2$	$0{,}0203qa^2$
2	$0.00254qa^4/d$	$-0{,}0829qa^2$	$-0{,}0571qa^2$	$0{,}0412qa^2$	$0{,}0158qa^2$
∞	$0.00260qa^4/d$	$-0{,}0833qa^2$	$-0{,}0571qa^2$	$0{,}0417qa^2$	$0{,}0125qa^2$

8.3 Phân tích dao động và dạng riêng

Như đã chú ý trước đây, đáp ứng theo thời gian của kết cấu môi trường liên tục đòi hỏi nghiệm phương trình (8.10) chứa các số hạng gia tốc. Đối với những hệ tuyến tính, nghiệm của phương trình này có thể biểu diễn bằng cách sử dụng nguyên lý xếp chồng vô hạn các hàm đặc trưng (hàm dạng). Phù hợp với mỗi dạng là số đặc trưng (giá trị riêng) xác định đáp ứng thời gian của dạng riêng. Việc phân tích các dạng riêng này được gọi là phân tích dạng riêng và có vai trò trung tâm trong thiết kế cảm biến công xôn cộng hưởng, làm cánh lái cho tàu trên đệm khí micro MAV

(Micro-Air-Vehicle) và gương micro dùng trong máy quét laze và máy chiếu. Trong trường hợp dầm công xôn, các dịch chuyển mềm được mô tả bởi phương trình vi phân bậc bốn:

$$\frac{IE}{\rho A}\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4}+\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2}=0 \tag{8.31}$$

trong đó I là mômen quán tính, E là môđun Young, ρ là khối lượng riêng và A là diện tích thiết diện ngang. Khi độ dày của dầm công xôn nhỏ hơn nhiều so với chiều rộng, E được thay thế bởi môđun Young thu gọn $E_1 = E/(1-\nu^2)$. Đối với thiết diện ngang chữ nhật, (8.31) ta có:

$$\frac{Eh^2}{12\rho}\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4}+\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2}=0 \tag{8.32}$$

trong đó h là độ dày của dầm. Nghiệm của (8.32) có thể viết ở dạng chuỗi vô hạn các hàm đặc trưng biểu diễn các dạng dao động riêng:

$$w=\sum_{i=1}^{\infty}\Phi_i(x)\sin(\omega_i t+\delta_i) \tag{8.33}$$

trong đó các hàm đặc trưng $\mathbf{\Phi}_i$ được biểu diễn với bốn hàm Rayleigh S, T, U và V:

$$\begin{aligned}
&\Phi_i = a_i S(\lambda_i x)+b_i T(\lambda_i x)+c_i U(\lambda_i x)+d_i V(\lambda_i x)\\
&S(x)=\frac{1}{2}(\cosh x+\cos x),\quad T(x)=\frac{1}{2}(\sinh x+\sin x)\\
&U(x)=\frac{1}{2}(\cosh x-\cos x),\quad V(x)=\frac{1}{2}(\sinh x-\sin x),\quad \lambda_i^4=\omega_i^2\frac{\rho A}{IE}
\end{aligned} \tag{8.34}$$

Các hệ số a_i, b_i c_i d_i, ω_i, δ_i được xác định từ các điều kiện biên và điều kiện đầu của (8.34). Đối với dầm công xôn với mút cố định tại $x = 0$ và một mút tự do tại $x = L$, các điều kiện biên là:

$$\begin{aligned}
&w(0,t)=0, \qquad \frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial x^2}=0\\
&\frac{\partial w(0,t)}{\partial x}=0, \qquad \frac{\partial^3 w(L,t)}{\partial x^3}=0
\end{aligned} \tag{8.35}$$

Vì (8.35) được thỏa mãn bởi mọi hàm $\mathbf{\Phi}_i$ nên suy ra $a_i = 0$, $b_i = 0$ và:

$$\cosh(\lambda_i L)\cos(\lambda_i L)=-1 \tag{8.36}$$

Từ phương trình siêu việt, các λ_i và các tần số vòng ω_i được xác định [1]:

$$\lambda_i L \approx \frac{(2i-1)\pi}{2}, \qquad \omega_i=\frac{(2i-1)^2\pi^2}{4L^2}\sqrt{\frac{IE}{\rho A}}=\frac{(2i-1)^2\pi^2}{4L^2}\sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho}} \tag{8.37}$$

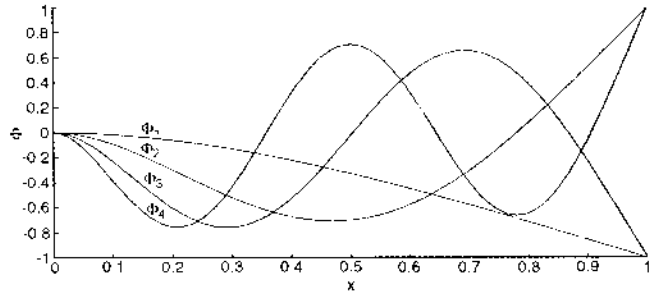
Hình 8.5 đưa ra bốn dạng dao động riêng của dầm công xôn. Một kết quả quan trọng của phân tích dạng riêng là tính biên độ dao động nhiệt của công xôn. Khi kích thước của công xôn thu về cỡ nano mét, năng lượng kích động nhiệt ngẫu nhiên có thể so sánh được với năng lượng của các dạng dao động riêng. Hiệu ứng này dẫn đến nhiễu nhiệt trong các dầm công xôn nano. Dùng định lý phân phối đều [1] đã chỉ ra rằng căn của bình phương trung bình của biên độ đỉnh công xôn này là:

$$\sqrt{\hat{z}^2}=\sqrt{\frac{kT}{K}}=\frac{0.64\text{Å}}{\sqrt{K}}, \qquad K=\frac{Ewh^3}{4L^3} \tag{8.38}$$

Phân tích tương tự có thể được thực hiện đối với dao động của tấm mỏng như các gương micro. Dao động phăng tự do của tấm này được mô tả bởi:

$$\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial y^4} = -\frac{\rho h}{D}\frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial t^2} \tag{8.39}$$

Độc giả quan tâm có thể xem [22] để biết chi tiết hơn về dao động của tấm.



HÌNH 8.5 Bốn dạng dao động đầu tiên của dầm công xôn

8.4 Phân tích mất ổn định cong

Mất ổn định kết cấu có thể xảy ra do vật liệu bị hỏng như bị hóa dẻo hoặc bị phá hủy hoặc cũng có thể xảy ra do biến đổi lớn về hình học của kết cấu (ví dụ: mất ổn định uốn, xoắn, gẫy). Đó chính là nội dung của mục này. Khi những cột ngắn chịu tải nén, ứng suất trong các thiết diện ngang được coi là đều. Như vậy đối với cột ngắn, hư hỏng xảy ra khi vật liệu đạt đến ứng suất dẻo. Trong trường hợp dầm dài và mảnh chịu nén, do sự không hoàn hảo trong chế tạo, tải tác dụng hoặc cột sẽ có sự lệch tâm.

Kết quả là lực này gây ra mômen uốn tỷ lệ với độ lệch tâm, tạo ra sự uốn phăng bổ sung. Trong khi đối với các tải nhỏ dịch chuyển phăng sẽ đạt đến cân bằng thì với tải trọng tới hạn nào đó, dầm không thể chịu được mômen uốn và sẽ gẫy. Xét dầm trên hình 8.5, chịu lực F với lệch tâm e, sẽ sinh ra dịch chuyển phăng tại đỉnh δ. Theo phương trình uốn của dầm:

$$EI\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = M = F(\delta + e + w) \tag{8.40}$$

trong đó điều kiện biên là $w(0) = 0$, $\partial w/\partial x\big|_{x\,0} = 0$. Nghiệm tương ứng là:

$$w = (e+\delta)[1 - \cos(\sqrt{IE/Fx})] \tag{8.41}$$

Từ $w(L) = \delta$ có $\delta = e(1/\cos kL\text{-}1)$, trong đó $k = \sqrt{IE/F}$. Nghiệm này mất ổn định khi δ vượt ra ngoài biên khi $\cos kL = 0$ hoặc $kL = (2n+1)\pi/2$. Từ điều kiện này tải trọng tới hạn nhỏ nhất là:

$$F^{cr} = \pi^2 IE/4L^2 \tag{8.42}$$

Phân tích trên và phương trình (8.42) được phát triển bởi Euler. Các điều kiện tương tự có thể rút ra đối với các dạng gối đỡ khác của dầm. Công thức chung đối với tải trọng tới hạn được viết như sau:

$$F^{cr} = K\pi^2 IE/L^2 \tag{8.43}$$

trong đó nhiều giá trị của hệ số K được cho trong bảng 8.3.

BẢNG 8.3 Các hệ số tải trọng tới hạn

	Các điều kiện biên		
	Một đầu ngàm một đầu khác tự do	Cả hai đầu ngàm	Cả hai đầu tựa
Hệ số K	1/4	4	1

8.5 Các bộ chuyển đổi

Các bộ chuyển đổi là các thiết bị có thể biến đổi năng lượng từ dạng này sang dạng khác. Nếu năng lượng ra là công cơ học thì bộ chuyển đổi được gọi là cơ cấu chấp hành. Các bộ chuyển đổi khác gọi là cảm biến, mặc dù trong nhiều trường hợp, bộ chuyển đổi cơ học cũng gọi là cảm biến và ngược lại. Ví dụ bộ chuyển đổi điện dung có thể dùng như là cơ cấu chấp hành hoặc cảm biến vị trí. Trong mục này sẽ hệ thống lại các cơ cấu chấp hành thường được dùng trong MEMS.

Bộ chuyển đổi tĩnh điện

Bộ chuyển đổi tĩnh điện được chia làm hai loại chính: loại điện cực tấm song song, loại các điện cực răng lược đan nhau. Trong ứng dụng ở đâu cần sự biến đổi điện dung hoặc lực tương đối lớn thì cấu hình tấm song song được ưa chuộng. Trái lại, những dịch chuyển lớn với các đặc trưng lực/dịch chuyển tuyến tính có thể dùng loại răng lược để bù cho giảm lực. Các cơ cấu chấp hành tấm song song dùng trong công tắc tĩnh điện micro được minh họa trong hình 8.1. Trong trường hợp này các điện cực tạo thành điện dung tấm song song và lực được mô tả bởi:

$$F_{\text{elec}} = \frac{A\varepsilon_0\varepsilon_r^2 V^2}{2[t_2 + \varepsilon_r(d_0 - d)]^2} \tag{8.44}$$

trong đó A là phần diện tích giao nhau của hai điện cực; t_2 là độ dày của lớp cách điện (đioxit silic hoặc nitrua silic); l_e là độ dài của điện cực cố định, ε_0 là hằng số điện môi tương đối của lớp cách điện, V là điện thế tác dụng; d_0 là khoảng cách ban đầu giữa các tấm điện dung; và d là độ võng của dầm.

Điện thế cực tiểu đòi hỏi đóng lại khe hở của cơ cấu chấp hành công xôn được hiểu như điện thế ngưỡng [20] và được xấp xỉ:

$$V^{th} \approx \sqrt{\frac{18(IE)_{\text{eff}} d_0^3}{5\varepsilon_0 L^4 w}} \tag{8.45}$$

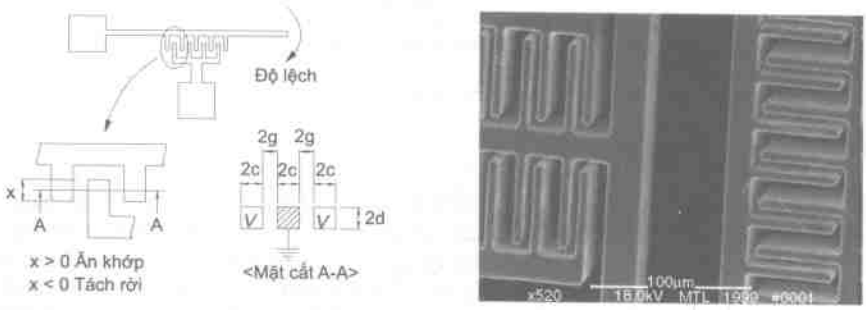
trong đó $(IE)_{\text{eff}}$ được cho bởi (8.24).

Các bộ chuyển đổi răng lược cũng được phân thành hai loại: đối xứng và không đối xứng. Loại đối xứng cho trên hình 8.6(a). Trong cấu hình này các khe hở giữa các răng riêng biệt bằng nhau. Hình 8.6(b) đưa ra một cặp các điện dung răng lược đối xứng, dùng cảm biến lực được cho trong hình 8.2 [4]. Trong trường hợp nào đó, lực sinh ra giữa các răng bằng đạo hàm đối với dịch chuyển của năng lượng tĩnh điện toàn phần:

$$F^{\text{el}} = \frac{n}{2}\frac{\partial C}{\partial x}V^2 \tag{8.46}$$

trong đó n là số răng. Một số tác giả đã cho các biểu thức xấp xỉ đối với (8.46). Một trong các tính toán lực chính xác nhất giữa những cặp răng được chỉ ra trong hình 8.6(a) [10] nhờ dùng các phép biến đổi Schwartz:

$$F^{\text{el}} = \begin{cases} \dfrac{\varepsilon_0 V^2}{\pi}\left\{\ln\left[\left(\left(\dfrac{c}{g}+1\right)^2 - 1\right)\left(1+\dfrac{2g}{c}\right)^{1+c/g}\right] + \dfrac{\pi d}{g} - \dfrac{c+g}{x}\right\}, & x > \Delta_- \\ -\dfrac{\varepsilon_0 V^2}{\pi}\left\{\dfrac{2(c+g)}{x}\right\}, & x < -\Delta_- \end{cases} \tag{8.47}$$



(a) (b)

HÌNH 8.6 Các bộ chuyển đổi răng lược phẳng (a) các mặt cắt (b) hai răng lược Si trực giao

Trong vùng biến đổi $x \in [-\Delta_-; \Delta_+], \Delta_{+,-} \approx 2g$, lực có thể được xấp xỉ với đường tiếp tuyến giữa hai nhánh mô tả bởi (8.47).

Các bộ chuyển đổi điện từ

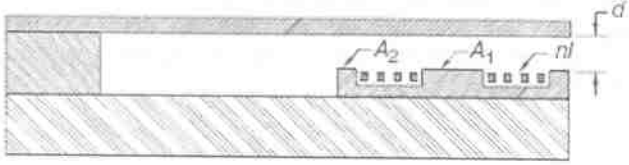
Lực điện từ cũng được sử dụng phổ biến. Nó có thể được sinh ra từ cuộn dây phẳng như minh họa trên hình 8.7. Dầm công xôn và các cuộn dây thường làm bằng vật liệu sắt từ mềm. Khi dùng mô hình mạch từ tương đương, lực từ tác dụng tại đỉnh dầm công xôn có thể được ước tính như sau:

$$F_{mag} = \frac{2n^2 I^2 (2A_2 + A_1)}{\mu_0 A_1 A_2 (2R_1 + R_2)^2} \tag{8.48}$$

trong đó:

$$R_1 = \frac{d}{\mu_0 A_1} + \frac{h_1}{\mu_0 \mu_r A_1}, \qquad R_2 = \frac{d}{\mu_0 A_2} + \frac{h_1}{\mu_0 \mu_r A_2} + \frac{h_2}{\mu_0 \mu_r A_b} \tag{8.49}$$

là các từ trở; h_1 và h_2 là các độ dài dòng từ thông bên trong các lớp hợp kim pecmansi ở đáy và đỉnh.



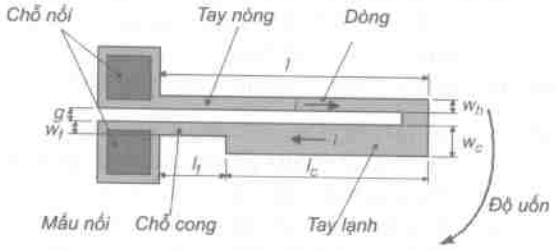
HÌNH 8.7 Bộ chuyển đổi điện từ

Cơ cấu chấp hành nhiệt

Các cơ cấu chấp hành nhiệt đã được nghiên cứu để định vị các gương micro [15] và các chuyển mạch micro [23]. Cơ cấu chấp hành này bao gồm hai cánh tay với các thiết diện ngang khác nhau (hình 8.8). Khi dòng điện đi qua hai cánh tay, thì ở dầm có thiết diện ngang nhỏ hơn sẽ có mật độ dòng cao hơn vì vậy ở đó sẽ sinh ra nhiều nhiệt hơn trên một đơn vị thể tích. Sự chênh lệch nhiệt độ này tạo ra một dịch chuyển. Mô hình xấp xỉ của độ lệch của đỉnh δ của cơ cấu chấp hành chỉ ra trên hình 8.8 có thể được xây dựng bằng cách dùng lý thuyết đẳng nhiệt [7]:

$$\delta \approx \frac{3l^2(T^{\text{nóng}}\alpha(T^{\text{nóng}}) - T^{\text{lạnh}}\alpha(T^{\text{lạnh}}))}{4(w_h + w_f)} \tag{8.50}$$

trong đó $T^{\text{nóng}}$ và $T^{\text{lạnh}}$ là nhiệt độ trung bình của tay nóng và tay lạnh và $\alpha(T)$ là nhiệt độ phụ thuộc hệ số truyền nhiệt. Phân tích chi tiết hơn về sự phân bố nhiệt độ trong các cánh tay có thể tìm trong [12].



HÌNH 8.8 Cơ cấu chấp hành nhiệt

Cơ cấu chấp hành polyme kích hoạt bằng điện

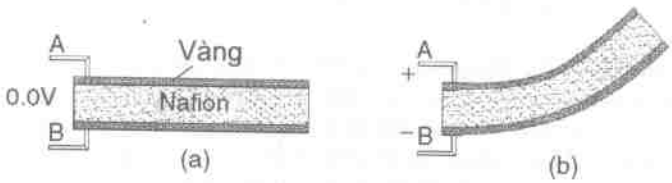
Vật liệu tổ hợp polyme-kim loại được kích hoạt bằng điện (EAP) là vật liệu đa chức năng đầy hứa hẹn với các tính chất vật lý vô cùng mạnh. Sự quan tâm hiện nay đối với vật liệu này là do chúng có thể vượt qua biến dạng lớn dưới điện áp điều khiển rất thấp cũng như chúng có khối lượng nhỏ, độ bền cao. Để so sánh, bảng 8.4 liệt kê nhiều tính chất đặc trưng của EAP và các gốm áp-điện khác.

BẢNG 8.4 So sánh các tính chất của EAP, Hợp kim nhớ mẫu và gốm áp-điện

Tính chất đặc trưng	EAP	Hợp kim nhớ mẫu	Gốm áp-điện
Biến dạng đạt được	hơn 10%	dưới 8%	dưới 0.3%
Môđun Young (GPa)	0.114 (wet)	75	89
Độ bền chịu kéo (MPa)	34 (wet)	850	76
Thời gian đáp ứng	msec-min	sec-min	μsec-sec
Mật độ khối lượng (g/cm3)	2.0	6.5	7.5
Điện thế khởi động	1-10 V	N/A	50-1000 V

EAP đang được thử nghiệm để dùng trong cánh lái cho tàu trên đệm khí micro [21], các rôbôt lặn dưới nước [14] và các ứng dụng y sinh [19]. Một cơ cấu chấp hành EAP bao gồm màng trao đổi ion phủ bởi lớp dẫn điện như minh họa trên hình 8.9(a).

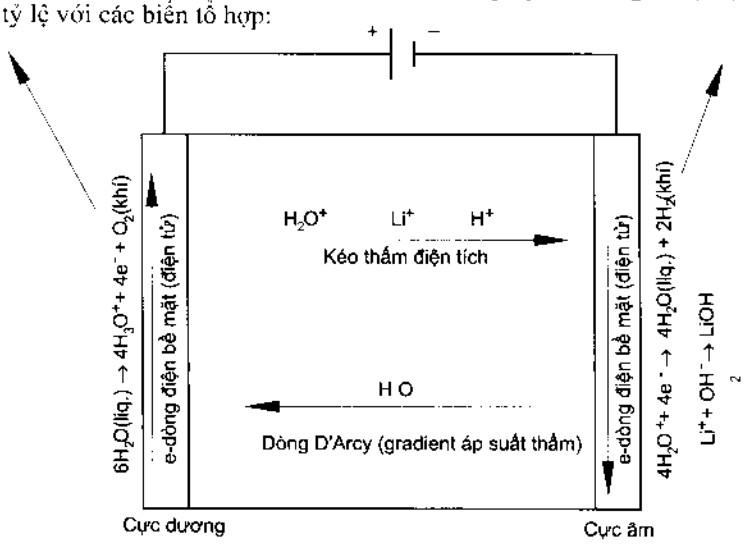
Do sự khác nhau về điện thế tại các điểm A và B, composite bị cong về phía anot như chỉ ra trên hình 8.9(b). Trong phần lớn polyme trao đổi ion, axit perfluorinate sulfonic (Nafion Du Pont, USA) và axit perfluorinate carboxylic (Flemion, Asahi, Japan) được dùng nhiều nhất trong các ứng dụng cơ cấu chấp hành. Công thức hóa học của chuỗi đơn vị của Nafion là:



HÌNH 8.9 Cơ cấu chấp hành composite kim loại polyme

$$[(CF_2 - CF_2)_n - CF - CF_2 -]_m \qquad (8.51)$$
$$\quad\quad\quad

hạng biến dạng bổ sung (biến dạng riêng) trong biểu thức biến dạng tổng thể. Như vậy biến dạng tổng thể có hai phần cộng lại: biến dạng đàn hồi của lưới polyme do ngoại lực (cơ, điện) và biến dạng hóa học tỷ lệ với các biến tổ hợp:



HÌNH 8.12 Vận chuyển ion trong nafion

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{elast} + \rho_0 \sum_s \frac{\overline{\mathbf{V}}^s}{3\mathbf{M}^s}(c^s - c_0^s)\boldsymbol{\delta}_{ij} \tag{8.52}$$

trong đó c^s là những phần khối lượng, $\overline{\mathbf{V}}^s$ là thể tích riêng của phân tử gam, $\mathbf{M}^s$ là khối lượng phân tử gam và chỉ số 0 là giá trị ban đầu của biến. Để mô tả toán học đầy đủ cơ cấu chấp hành polyme cần phải giải phương trình chuyển khối (khuếch tán), cân bằng mômen động lượng và phương trình Poisson cho phân bố thế năng, việc thảo luận vấn đề này nằm ngoài phạm vi của cuốn sách. Một hệ quả lý thú của việc bổ sung biến dạng hóa học trong (8.46) là sự xuất hiện của số hạng áp lực trong thế năng điện hóa chi phối khuếch tán. Dòng khuếch tán khối lượng tổng thể sẽ có một thành phần tỷ lệ với gradien âm của áp lực, do đó đối với trường hợp nước, sẽ sinh ra hiện tượng phục hồi quan sát được bằng thực nghiệm. Khi đó dòng tổng thể của thành phần s được cho bởi:

$$\mathbf{J}^s = -\frac{\rho c^s W^s}{\mathbf{M}^s}\nabla(\mu^{os}(T) + p\overline{\mathbf{V}}^s + RT\ln(fc^s) + z^s\boldsymbol{\Phi}) \tag{8.53}$$

trong đó $\mathbf{W}^s$ là độ linh hoạt của thành phần s, z^s là hóa trị của thành phần s, p là áp lực, f^s là hệ số hoạt động và Φ là điện thế. Chúng ta đã bỏ qua các số hạng liên quan chéo mà có thể xuất hiện trong công thức loại Onsager liên kết đầy đủ. Các độc giả cần quan tâm có thể xem [5] và các tài liệu tham khảo để biết chi tiết.

8.6 Xu hướng phát triển

MEMS tương lai có lẽ sẽ có nhiều sự không đồng nhất về vật liệu và kết cấu. Chẳng hạn, MEMS sinh học đòi hỏi dùng các vật liệu không bị ăn mòn và không độc, mà các chuẩn IC lại không đòi hỏi khắt khe. Khởi đầu là MEMS dựa trên silic truyền thống đã được thấy trong lĩnh vực MEMS quang học dùng các vật liệu có khe hở dải rộng, các polyme quang điện phi tuyến và gốm. Như đã lưu ý trước đây, các cảm biến dựa trên dầm công xôn cỡ gần micro sinh ra vấn đề nhiễu nhiệt trong kết cấu cơ học. Hơn nữa việc giảm kích thước đòi hỏi mô tả thống kê phân tử của các lực tương tác. Ví dụ, ống cacbon nano đặt trên than chì nhiệt phân định hướng cao HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) cho thấy các lực kết dính tăng khi được sắp hàng với lưới than chì bên dưới [6]. Các hệ cơ điện tử tương lai có lẽ sẽ trở thành giao diện giữa các lĩnh vực nano và macro.

Tài liệu tham khảo

[1] Butt, H., Jaschke, M., "Calculation of thermal noise in atomic force microscopy", *Nanotechnology*, **6**, pp. 1–7, 1995.

[2] Eikerling, M., Kharkats, Y.I., Kornyshev, A.A., Volfkovich, Y.M., "Phenomenological theory of electroosmotic effect and water management in polymer proton-conducting membranes", *Journal of the Electrochemical Society*, **145**(8), pp. 2684–2698, 1998.

[3] Evans, T.H., *Journal of Applied Mechanics*, **6**, p. A-7, 1939.

[4] Enikov, E.T., Nelson, B., "Three dimensional microfabrication for multi-degree of freedom capacitive force sensor using fiber chip coupling", *J. Micromech. Microeng.*, **10**, pp. 492–497, 2000.

[5] Enikov, E.T., Nelson, B.J., "Electrotransport and deformation model of ion exhcange membrane based actuators", in *Smart Structures and Materials 2000*, Newport Beach, CA, SPIE vol. 3987, March, 2000.

[6] Falvo, M.R., Steele, J., Taylor, R.M., Superfine, R., "Gearlike rolling motion mediated by commensurate contact: carbon nanotubes on HOPG", *Physical Review B*, **62**(6), pp. 665–667, 2000.

[7] Faupel, J.H., Fisher, F.E., *Engineering Design: A Synthesis of Stress Analysis and Materials Engineering*, 2nd Ed., Wiley & Sons, New York, 1981.

[8] Liu, R., Her, W.H., Fedkiw, P.S., "*In situ* electrode formation on a nafion membrane by chemical platinization", *Journal of the Electrochemical Society*, **139**(1), pp. 15–23, 1990.

[9] Gierke, T.D., Hsu, W.S., "The cluster-network model of ion clusturing in perfluorosulfonated membranes", in *Perfluorinated Ionomer Membranes*, A. Eisenberg and H.L. Yeager, Eds., vol. 180, American Chemical Society, 1982.

[10] Johnson et al., "Electrophysics of micromechanical comb actuators", *Journal of Microelectromechanical Systems*, **4**(1), pp. 49–59, 1995.

[11] Hopkins, *Design Analysis of Shafts and Beams*, 2nd Ed., Malabar, FL: RE Kreiger, 1987.

[12] Huang, Q.A., Lee, N.K.S., "Analysis and design of polysilcon thermal flexture actuator", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **9**, pp. 64–70, 1999.

[13] Kittel, Ch., *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.

[14] Laurent, G., Piat, E., "High efficiency swimming microrobot using ionic polymer metal composite actuators", to appear in 2001.

[15] Liew, L. et al., "Modeling of thermal actuator in a bulk micromachined CMOS micromirror", *Microelectronics Journal*, **31**(9–10), pp. 791–790, 2000.

[16] Maugin, G., *Continuum Mechanics of Electromagnetic Solids*, Elsevier, The Netherlands, 1988.

[17] Mendelson, *Plasticity: Theory and Application*, Macmillan, New York, 1968.

[18] Nye, J.F., *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, London, 1960.

[19] Onishi, K., Sewa, Sh., Asaka, K., Fujiwara, N., Oguro, K., "Bending response of polymer electrolyte actuator", in *Smart Structures and Materials 2000*, Newport Beach, CA, SPIE vol. 3987, 2000.

[20] Peterson, "Dynamic micromechanics on silicon: techniques and devices", *IEEE*, 1978.

[21] Rohani, M.R., Hicks, G.R., "Multidisciplinary design and prototype of a micro air vehicle", *Journal of Aircraft*, **36**(1), p. 237, 1999.

[22] Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S., *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, 1959.

[23] Wood, R. et al., "MEMS microrelays", *Mechatronics*, **8**, pp. 535–547, 1998.

[24] Xue, T., Trent, Y.S., Osseo-Asare, K., "Characterization of nafion membranes by transmision electron microscopy", *Journal of Membrane Science*, **45**, p. 261, 1989.

[25] Zgonik et al., "Dielectric, elastic, piezoelectric, electro-optic and elasto-optic tensors of BaTiO3 crystals", *Physical Review B*, **50**(9), p. 5841, 1994.

9

Mô hình hóa các hệ cơ học trong các ứng dụng cơ điện tử

9.1 Mở đầu 9-1
9.2 Mô hình hóa hệ cơ học trong các hệ cơ điện tử 9-1
9.3 Mô tả các thành phần mô hình cơ học cơ bản 9-7
9.4 Các định luật vật lý cho việc xây dựng mô hình 9-20
9.5 Phương pháp năng lượng để mô hình hoá hệ cơ học 9-28
9.6 Động lực học vật rắn đa chiều 9-31
9.7 Phương trình Lagrange 9-47

Raul G. Longoria
The University of Texas at Austin

9.1 Mở đầu

Các ứng dụng cơ điện tử được phân biệt bởi chuyển động được điều khiển của hệ cơ học, kết hợp với cơ cấu chấp hành và cảm biến. Mô hình hóa đóng vai trò quan trọng trong việc tìm hiểu các thuộc tính và khả năng của các thành phần cơ, và ảnh hưởng của chúng đến toàn bộ thiết kế hệ thống. Chương này điểm lại các phương pháp mô hình hóa hệ thống có các thành phần cơ học được kết nối. Trước tiên là giới hạn ứng dụng cho các phần tử cơ bản quay và tịnh tiến, chúng đặc trưng cho một lớp khá rộng các ứng dụng cơ điện tử. Các cơ sở động học được xem như đã biết và không nhắc lại, các vấn đề về động lực học sẽ được xem xét ở đây. Những ứng dụng nâng cao của các chuyển động hai, ba chiều được trình bày trong mục 9.6.

Các hệ cơ học có thể bao gồm các vật rắn hoặc vật đàn hồi có khả năng chuyển động tương đối với nhau, phụ thuộc vào kết nối của các thành phần trong hệ như: khớp nối, giảm chấn và các phần thụ động khác. Chương này tập trung vào những hệ có thể mô tả ở dạng mô hình tham số tập trung, ở đó các vật thể được xem là vật rắn và không cần quan tâm đến sự phụ thuộc vào hiệu ứng đàn hồi. Nói chung, việc mô hình hóa các hệ cơ học đã khá thuần thục, dựa trên các phương pháp kinh điển bắt nguồn từ các định luật chuyển động của Newton. Điều này có được là nhờ nền tảng kiến thức khá đầy đủ và rộng lớn đã được phát triển cho từ các hệ khối lượng-lò xo cơ bản đến các hệ nhiều vật phức tạp. Trong khi các vấn đề về vật lý cơ bản đã được hiểu khá rõ ràng, thì lại có nhiều phương pháp và các cách khác nhau để đưa đến kết quả cuối cùng. Điều đó đặc biệt đúng khi nhu cầu mô hình hóa hệ nhiều vật tăng lên, đòi hỏi phải đầu tư đáng kể vào phương pháp lập và giải các phương trình chuyển động. Các ứng dụng ấy không nằm trong khuôn khổ của chương này mà trọng tâm chính là mô hình hóa các hệ cơ bản và tương đối phức tạp, đó là mối quan tâm chính của các nhà thiết kế/ phân tích hệ cơ điện tử.

9.2 Mô hình hóa hệ cơ học trong các hệ cơ điện tử

Các bước đầu tiên trong mô hình hóa một hệ vật lý bất kỳ là xác định ranh giới của hệ và xác định các bộ phận nào nên được tách ra và sau đó kết hợp lại. Trong các hệ cơ học, việc phân tích

này thường được thực hiện dễ dàng nhờ xác định các điểm có vận tốc khác biệt. Để phục vụ mục đích này, các lực và mômen lực sẽ đặt tại các điểm thể hiện tương tác năng lượng ở ranh giới của hệ. Các lực và các mômen lực này thường do cơ cấu chấp hành hoặc các tải trọng ngoài tác dụng lên.

Một thành phần cơ học được mô hình hóa như một khối lượng điểm hoặc một vật rắn, được xác định dễ dàng nhờ vận tốc của nó và sự phụ thuộc vào số lượng các vật và tính phức tạp của chuyển động nên cần phải đưa vào một hệ tọa độ để mô tả động học [12, 15]. Bằng việc phân tích động học, các vận tốc tương đối có thể được xác định, nó chỉ ra sự liên kết và chuyển động của các thành phần cơ học phụ như các lò xo, giảm chấn và/hoặc cơ cấu chấp hành. Nói chung, sự liên kết của các thành phần cơ học phụ thuộc vào dạng hình học. Sự phụ thuộc này trong nhiều trường hợp làm phức tạp việc phân tích vì vậy cần phải có sự xem xét đặc biệt với các hệ phức tạp.

Mô tả sơ bộ của một hệ cơ học cần thể hiện được mọi liên kết đối với các trạng thái chuyển động, chúng có thể là hàm thời gian hoặc hàm của trạng thái. Trong nhiều trường hợp thực tế, động lực học của các hệ cơ học phụ thuộc vào các liên kết. Định lượng và tính toán các liên kết là quan trọng nhất, đặc biệt trong động lực học hệ nhiều vật. Để xây dựng mô hình này có nhiều trường phái khác nhau. Quyết định dùng phương pháp nào tùy thuộc vào mục tiêu ứng dụng và ưu thế của mỗi người.

Do đó đa số các hệ có thể được hiểu và được mô hình hoá, trước tiên bằng việc nắm vững chuyển động tịnh tiến một thứ nguyên và chuyển động quay quanh trục cố định. Các hệ này cũng có thể được mô hình hoá khi sử dụng các phương pháp phù hợp với các phương pháp đã được dùng để nghiên cứu các hệ khác, như các hệ thuỷ lực và hệ điện. Ngoài ra việc xây dựng các mô hình hệ cơ điện tử kết nối sẽ thuận lợi và dễ dàng hơn cho người phân tích hệ thống để hiểu và phân tích các hệ này.

Tóm lại một khi đã hiểu được (a) các thành phần của hệ và sự kết nối của chúng (gồm cả sự phụ thuộc vào hình dạng), (b) các lực và các mômen lực và (c) vai trò của các ràng buộc thì có thể thiết lập được các phương trình động lực học dựa trên các định luật Newton. Phần còn lại của mục này sẽ giới thiệu cách lựa chọn các biến vật lý phù hợp với dòng công suất và phương pháp dựa vào năng lượng để mô hình hoá các hệ cơ học cơ bản quay và tịnh tiến. Phương pháp sơ đồ kết nối [28, 3, 17] được giới thiệu để xây dựng mô hình cho các hệ cơ học. Đó là cơ sở để đưa ra khái niệm nhân quả mô tả quan hệ vào-ra giữa các biến truyền công suất trong một hệ. Phương pháp sơ đồ kết nối đưa ra một cách để hiểu và lập mô hình toán học các hệ cơ học cơ bản cũng như những hệ cơ học phức tạp sao cho phù hợp với các miền năng lượng khác nhau (điện, cơ điện, nhiệt, chất lỏng, hoá học…).

Các biến vật lý và các kết nối công suất

Cơ sở năng lượng và công suất

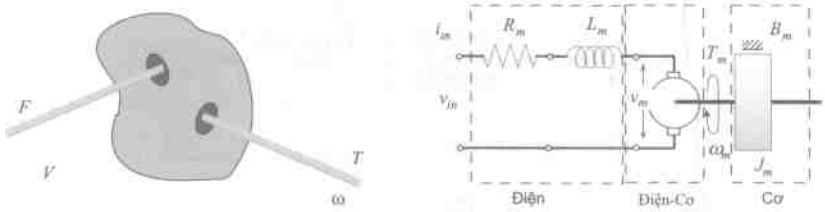
Một phương pháp để tách ra và kết nối hợp lý các mô hình hệ con là dùng các biến công suất và năng lượng để định lượng tương tác của hệ, như đã được minh hoạ đối với hệ cơ học trong hình 9.1(a). Trong hình này, một **cổng** ở đó dòng công suất là tích của lực và vận tốc ($F \cdot V$) và cổng khác cho công suất là tích của mômen lực và vận tốc góc ($T \cdot \omega$). Các biến liên hợp công suất này (tức là tích của chúng sinh công suất) có thể dùng cho miền năng lượng thuỷ lực và điện được tóm tắt trong bảng 9.1. Tương tự các biến thế (e) và dòng (f) có thể được nhận dạng đối với các miền năng lượng được quan tâm khác (nhiệt, từ, hoá…). Cơ sở này đảm bảo cho các mô hình được chính xác về năng lượng và cung cấp phương pháp phù hợp để kết nối các thành phần của hệ.

Trong việc mô hình hoá các hệ năng lượng, tính liên tục về năng lượng được dùng làm cơ sở để phân loại và định lượng các hệ. Paynter [28] chỉ ra phương trình liên tục của năng lượng cùng với khái niệm **cổng** là cơ sở cho việc mô hình hoá, dẫn đến phương pháp sơ đồ kết nối. Phương trình lưới Paynter về tính liên tục của năng lượng:

$$-\sum_{i=1}^{l} P_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{dE_j}{dt} + \sum_{k=1}^{n} (P_d)_k \tag{9.1}$$

BẢNG 9.1 Các biến công suất và năng lượng cho các hệ cơ học

Miền năng lượng	Thế, e	Dòng, f	Công suất, P
Tổng quát	e	f	$e \cdot f$ [W]
Tịnh tiến	Lực, F [N]	Vận tốc, V [m/sec]	$F \cdot V$ [Nm/sec, W]
Quay	Mômen, T hoặc τ [Nm]	Vận tốc góc, ω [rad/sec]	$T \cdot \omega$ [Nm/sec, W]
Điện	Điện thế, v [V]	Cường độ dòng, i [A]	$v \cdot i$ [W]
Thủy lực	Áp suất, P [Pa]	Tốc độ dòng, Q [m^3/sec]	$P \cdot Q$ [W]



(a) (b)

HÌNH 9.1 Kết nối cơ bản của các hệ khi dùng các biến công suất

chỉ ra có l dòng công suất P_j riêng biệt, m năng lượng tích trữ E_j riêng biệt và n năng lượng tiêu hao P_d riêng biệt. Việc mô hình hóa nhằm hoàn thiện các mô tả bằng quan điểm này. Ví dụ trong hệ khối lượng-lò xo-giảm chấn đơn giản, khối lượng và lò xo tích trữ năng lượng, giảm chấn tiêu tán năng lượng và sự liên kết của các phần tử này có thể mô tả các dòng công suất giữa chúng. Một vài chi tiết để hoàn thiện các bước mô hình hóa này được trình bày trong phần sau.

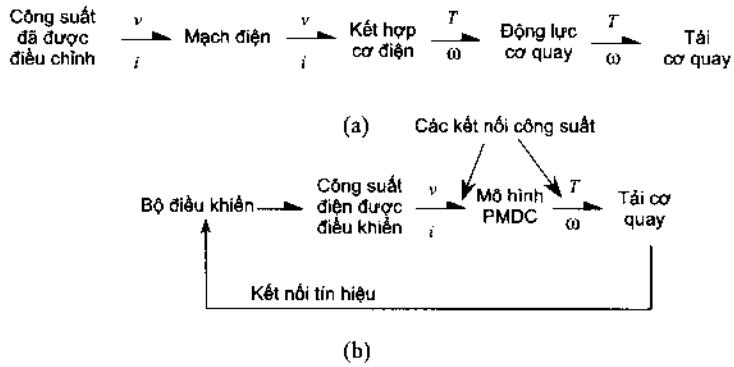
Một phương pháp thực hiện là xác định và phân loại các thành phần của hệ dựa trên phương trình năng lượng liên tục (9.1). Ví dụ, xét một hệ chỉ bao gồm các vật rắn tích trữ năng lượng (cụ thể là động năng), khi đó $P_d = 0$ (ta có thể thêm vào sau), nói chung, có l cổng có thể mang năng lượng vào hệ tích năng lượng (động năng) thuần túy này, hệ này có m đường riêng biệt để đưa năng lượng vào các vật rắn. Đó là một khái niệm rất tổng quát, phù hợp với nhiều cách khác để lập mô hình các hệ vật lý. Tuy nhiên, đó là cơ sở cung cấp cách tổng quát để lập mô hình và tích phân các dạng khác nhau của các hệ năng lượng.

Sơ đồ của động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu (PMDC) cho trên hình 9.1(b) minh họa các biến công suất được dùng như thế nào để nhận dạng các điểm kết nối. Ví dụ này cũng dùng để xác định những thứ cần thiết cho mô hình hóa các cơ cấu, như tương tác cơ điện (EM), để có thể biểu diễn qua sự trao đổi năng lượng giữa hai phần của một hệ thống. Mô hình này biểu diễn mối quan hệ được đơn giản hóa giữa dòng công suất điện ($v \cdot i$) và dòng công suất cơ ($T \cdot \omega$), là cơ sở cho một mô hình động cơ. Hơn nữa, đó là mối quan hệ bảo toàn công suất lý tưởng, chỉ chứa các dòng công suất trong phương trình năng lượng liên tục, không có tích trữ hoặc hao tán. Các hiệu ứng vật lý phụ nên được bổ sung vào sau.

Dòng công suất và tín hiệu

Trong sơ đồ kết nối của động cơ điện một chiều nam châm vĩnh cửu PMDC, một **kết nối công suất** được dùng để xác định dòng công suất. Các kết nối công suất xác định dòng công suất qua một cặp thế-dòng như trên hình 9.2(a) (quy ước ghi thế ở trên các định hướng kết nối). Đây là một mô hình **sơ đồ kết nối bằng chữ**, được dùng để xác định các thành phần chính trong mô hình hệ phức tạp. Ở loại mô hình này, chỉ có những tương tác của các hệ đa cổng được thể hiện. Các nửa

mũi tên trong sơ đồ kết nối chỉ ra hướng của dòng công suất giữa hai hệ. **Các kết nối tín hiệu** được dùng trong sơ đồ điều khiển, có các mũi tên đầy đủ và được dùng trong các mô hình sơ đồ kết nối để chỉ đường truyền thông tin (công suất có thể bỏ qua) giữa các đa cổng. Ví dụ, sơ đồ kết nối bằng chữ trên hình 9.2(b) chỉ ra một tín hiệu từ khối cơ thể hiện phép đo lý tưởng được truyền đến một bộ điều khiển như một tín hiệu thuần túy. Bộ điều khiển này có cả tín hiệu và các dòng công suất đóng kín mạch về phương diện điện của mô hình. Các giản đồ khái quát này tiện cho việc hiểu và truyền đạt các mối quan hệ của hệ, nhưng không đầy đủ để định lượng hoạt động của hệ.



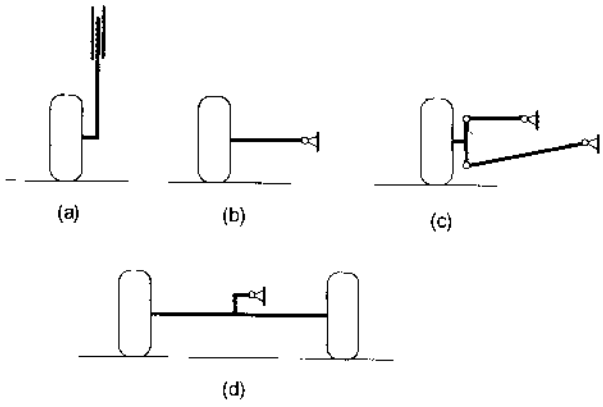
HÌNH 9.2 Các mô hình sơ đồ kết nối theo công suất: (a) Sơ đồ kết nối bằng chữ cho động cơ PMDC, (b) Sơ đồ kết nối bằng chữ cho động cơ PMDC với bộ điều khiển

Trong khi dùng công suất và năng lượng để thiết lập mô hình cho các hệ cơ học là thuận lợi, thì cơ sở **chuyển động** để xác định kết nối khi thiết lập các mô hình toán học lại bị hạn chế. Đối với nhiều hệ cơ, quay và tịnh tiến, sẽ là hiệu quả khi dựa vào các khái niệm chuyển động cơ bản một thứ nguyên và chuyển động tương đối để chỉ ra tương tác giữa nhiều kiểu thành phần thực tế. Việc xác định cấu trúc kiểu mạng trong các hệ này có thể làm cơ sở cho việc xây dựng các tương tự điện. Các phương pháp này, cũng như phương pháp phân tích dòng tín hiệu, không được trình bày ở đây nhưng chúng là một trong các phương pháp để phân tích động lực học hệ thống. Các mô hình sơ đồ kết nối đã được trình bày và sự nhất quán của chúng với các mô tả động lực học ba chiều của các hệ cơ học phức tạp cũng như với việc dùng các mô hình Lagrange sẽ được chỉ ra ở các phần sau.

Sự cần thiết của cơ sở chuyển động

Khi mô hình hóa các hệ cơ học tịnh tiến và quay, việc quan trọng là nhận ra cấu hình thay đổi thế nào và một hệ tọa độ phải được xác định và các hiệu ứng thay đổi hình học phải được xét đến. Giả thiết rằng, độc giả đã quen với các khái niệm cơ bản này [12]. Thông thường một cấu hình gốc được xác định, từ đó xác định được các tọa độ. Đó là việc chính ngay cả đối với chuyển động tịnh tiến một thứ nguyên đơn giản hay chuyển động quay quanh trục cố định. Số tọa độ hình học độc lập tối thiểu cần thiết để mô tả cấu trúc của hệ được định nghĩa là số **bậc tự do.** Các liên kết cần được xác định và có thể được dùng để chọn một tập các tọa độ thuận lợi nhất để mô tả hệ. Chúng ta phân biệt giữa bậc tự do và số tối thiểu **biến trạng thái động lực** là các biến cần thiết để mô tả hệ. Chúng có thể liên hệ với nhau, nhưng không nhất thiết trùng nhau hoặc giống nhau về số lượng (ví dụ, một hệ bậc hai có hai biến trạng thái, nhưng chỉ quy về một bậc tự do).

Một minh họa về bậc tự do, liên kết và vai trò của những khái niệm này trong mô hình hóa và thực hiện một hệ thực đã được chỉ ra trên hình 9.3. Đó là bốn phương pháp khác nhau để mô tả hệ thống treo của bánh xe ô tô [22]. Trường hợp (a), là một cơ sở cho mô hình ¼ - xe ô tô rõ ràng chỉ có một bậc tự do. Cũng đúng như vậy cho các trường hợp (b) và (c) mặc dù ở đây có những điều kiện giảm bớt số tọa độ xuống còn một cho mỗi trường hợp. Cuối cùng trục xe dạng dầm cứng phải có hai bậc tự do trong chuyển động đứng và quay của dầm để đạt được ít nhất mỗi bậc tự do ở một bánh.



HÌNH 9.3 Các hệ thống treo bánh xe: (a) Chỉ chuyển động đứng, một bậc tự do; (b) Trục xe đảo với các chuyển vị đứng và ngang, một bậc tự do; (c) Thiết kế nối bốn thanh, chuyển động liên kết, một bậc tự do; (d) Trục xe dạng dầm cứng, hai bánh chuyển động đứng và quay, hai bậc tự do

Sự kết nối các thành phần

Trong chương này chúng ta sẽ dùng các sơ đồ kết nối để mô hình hóa các hệ cơ học. Giống như các sơ đồ khác được dùng khi phân tích động lực học hệ thống [33] và phân tích hệ nhiều vật [30, 39], các sơ đồ kết nối đòi hỏi sự am hiểu về các phần tử mô hình cơ bản dùng để biểu diễn một hệ. Tuy nhiên các phương pháp sơ đồ là một phương pháp có hệ thống để mô tả sự kết nối các phần các phần tử của hệ đa năng lượng. Ngoài ra, các sơ đồ kết nối là duy nhất trong đó chúng không là những dạng sơ đồ tuyến tính: các kết nối công suất thay thế các nhánh, các cổng thay thế các nút [28]. Hơn nữa, chúng bao gồm cách tiếp cận hệ thống đối với nhân quả tính toán.

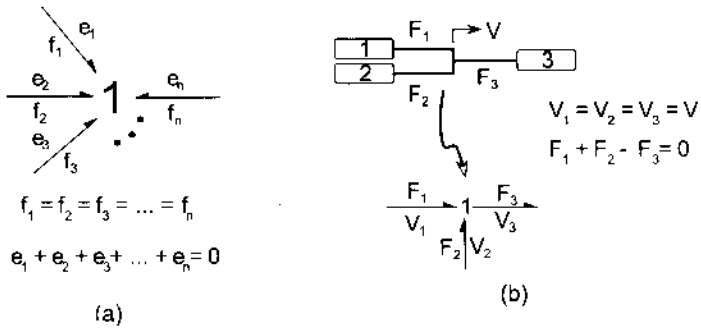
Lưu ý rằng một đường đơn giản biểu diễn dòng công suất và một nửa mũi tên được sử dụng để biểu diễn hướng dương của dòng công suất. Các nút trong sơ đồ tuyến tính biểu diễn các biến chéo (ví dụ vận tốc, điện thế, tốc độ dòng); Tuy nhiên đa cổng trong sơ đồ kết nối biểu diễn một phần tử của hệ có chức năng vật lý được xác định trên cơ sở năng lượng. Các phần tử mô hình của hệ biểu diễn các khối lượng, các lò xo và các thành phần khác sẽ được thảo luận trong mục sau. Hai phần tử mô hình đóng vai trò cốt yếu khi mô tả các phần tử mô hình được kết nối như thế nào là mối nối 1 và mối nối 0. Đó là các phần tử đa cổng lý tưởng (bảo toàn công suất), có thể biểu diễn các quan hệ vật lý đặc biệt trong một hệ, thường dùng khi kết nối các phần tử mô hình khác.

Một điểm trong hệ cơ học có vận tốc phân biệt được biểu diễn bởi mối nối 1. Khi một hoặc nhiều phần tử mô hình (như một khối lượng) có cùng vận tốc như mối nối 1 đã cho, điều đó đã được chỉ ra bởi sự kết nối chúng ở mối nối 1 bằng một kết nối công suất. Vì mối nối 1 được liên kết để bảo toàn công suất nên có thể chỉ ra rằng thế (lực, mômen) trên tất cả các kết nối phải có tổng bằng 0, tức là $\Sigma e_i = 0$. Điều đó được minh họa trên hình 9.4(a). Mối nối 1 tạo ra sự phù hợp động học và đưa ra một cách biểu diễn bằng sơ đồ tổng các lực! Ví dụ trên hình 9.4(b) chỉ ra ba hệ (các khối được đánh dấu 1, 2, 3) nối vào một điểm của vận tốc chung. Trong sơ đồ kết nối, ba hệ phải được liên kết bởi mối nối 1.

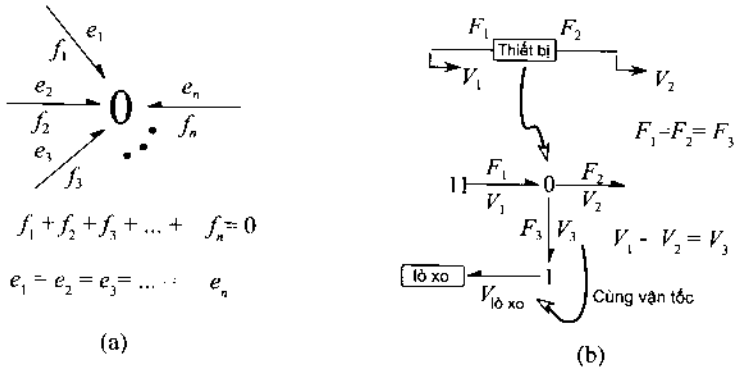
Tương tự, với các hệ điện, mối nối 1 có thể được coi như một chuỗi các liên kết điện. Bằng cách ấy các phần tử được kết nối vào mối nối 1 để có cùng dòng điện (biến dòng) và suy ra tổng thế của mối nối 1 tuân theo định luật điện áp Kirchhoff. Trong các hệ cơ học các mối nối 1 có thể biểu diễn các điểm trong một hệ, thể hiện vận tốc của một khối lượng và tổng thế là một phát biểu của định luật Newton (dạng D'Alembert) $\Sigma F - \dot{p} = 0$.

Hình 9.4 minh họa các thành phần có vận tốc chung được kết nối như thế nào. Nhiều thành phần vật lý có thể được kết nối bởi một thế chung (lực, mômen) hoặc mối nối 0. Ví dụ hai lò xo kết nối biến dạng liên tiếp và các đầu của chúng có các vận tốc kéo, nén khác nhau; tuy nhiên chúng có cùng lực tác động tại các đầu (các lò xo lý tưởng không khối lượng). Các thành phần của

hệ, có kiểu quan hệ này, được biểu diễn bằng mối nối 0. Định nghĩa mối nối 0 cơ bản được chỉ ra trong hình 9.5(a). Các mối nối 0 đặc biệt tiện lợi khi mô hình hóa hệ cơ học vì chúng cũng có thể được dùng để mô phỏng sự kết nối của các thành phần có chuyển động tương đối. Ví dụ vật trong hình 9.5(b), giống như một lò xo có các đầu chuyển động tương đối với nhau nhưng lực trên mỗi một đầu là như nhau (chú ý giả thiết bỏ qua khối lượng). Định nghĩa của mối nối 0 chỉ ra rằng tất cả kết nối có các vận tốc khác nhau, nên sự khác biệt dòng có thể được tạo ra để tạo nên một vận tốc tương đối V_3. Tất cả các kết nối này có cùng lực, tuy nhiên lực này phải được tác dụng ở các mối nối 1, để nhận dạng ba vận tốc khác nhau trong ví dụ này. Chẳng hạn, một lò xo phải được kết nối trên một kết nối với mối nối V_3, như chỉ ra trên hình 9.5(b) và lò xo $V_{\text{lò xo}} = V_3$.



HÌNH 9.4 Mối nối 1 cơ học: (a) Định nghĩa cơ bản, (b) Ví dụ sử dụng mối nối không khối lượng

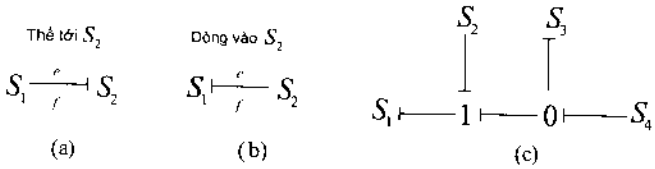


HÌNH 9.5 Mối nối 0 cơ học: (a) Định nghĩa cơ bản, (b) Ví dụ sử dụng mối nối không khối lượng

Các phần tử của mối nối 0 và mối nối 1 biểu diễn cấu trúc đại số trong một mô hình, với các thuộc tính vật lý riêng từ sự tương thích của các đặc trưng động học (mối nối 1) và lực hoặc mômen (mối nối 0). Sơ đồ này có thể phản ánh những hiểu biết về sự tương quan của các thiết bị vật lý với sơ đồ kết nối. Việc thiết lập sơ đồ kết nối cho nhiều lợi thế, vì khi đó có thể dùng tính nhân quả để xây dựng các mô hình toán học [17]. Một quan hệ với các biến xuyên qua và biến chéo được dùng trong các phương pháp sơ đồ tuyến tính [33].

Nhân quả

Mô hình hóa bằng sơ đồ kết nối đã diễn đạt được phương pháp luận về thuật toán và sự gắn bó đối với nhận định nhân quả [28]. Trong phạm vi mô hình hóa sơ đồ kết nối, nhân quả đưa đến mối quan hệ vào-ra giữa các biến trên kết nối công suất và phụ thuộc vào các hệ được nối với mỗi đầu của một kết nối. Paynter đã nhận ra sự cần thiết của khái niệm này khi bị lôi cuốn mạnh mẽ vào tính toán tương tự, trong đó lời giải dựa trên những quan hệ đã được xác định rõ giữa các tín hiệu. Ví dụ, nếu hệ S_1 trong hình 9.6(a) là một nguồn thế đã biết, thì khi kết nối với hệ S_2, nó phải xác định thế vào S_2 và đến lượt mình S_2 phải trở lại biến dòng f trên sơ đồ kết nối hai hệ. Trong sơ đồ kết nối, quan hệ nhân quả này được thể hiện bởi nét vẽ trên sơ đồ, như chỉ ra trong hình 9.6(a). Nét vẽ đứng ở một đầu của một kết nối chỉ ra rằng thế được xác định vào phần tử đa cổng được nối ở đầu này. Trong hình 9.6(b), tính nhân quả được đảo lại từ những điều thể hiện trong (a). Ví dụ trong hình 9.6(c) minh họa, tính nhân quả truyền như thế nào qua sơ đồ kết nối của các kết nối và các hệ. Chú ý rằng một mối nối 1 với các đa cổng chỉ có thể có một kết nối xác định dòng ở mối nối này, nên những kết nối khác xác định thế trong mối nối 1. Một mối nối 0 đòi hỏi một kết nối để xác định thế, trong khi đó tất cả các kết nối khác xác định dòng. Cũng lưu ý rằng, một hướng đối với dòng công suất dương đã không được phân định trên sơ đồ kết nối này. Ở đây muốn nhấn mạnh một thực tế rằng công suất và xác định nhân quả trên một kết nối là **độc lập** với nhau.



HÌNH 9.6 (a) Thế từ S_1 vào S_2, (b) dòng đặc biệt từ S_1 vào S_2, (c) một ví dụ được sắp xếp chỉ ra liên kết trên cơ sở nhân quả đặt ra trong các định nghĩa vật lý của mối nối 0 và mối nối 1

Xác định nhân quả trong các mô hình hệ sẽ được áp dụng trong các ví dụ sau đây. Một tranh luận sôi nổi về quy trình xác định nhân quả kế tiếp (xem SCAP) có thể tìm trong [17, 32]. Bằng cách dùng các thành phần sơ đồ kết nối xác định, việc phân định nhân quả được làm một cách hệ thống. Qui trình này đã được lập trình trong nhiều chương trình phần mềm thương mại dùng sơ đồ kết nối như mô tả chính thức của các mô hình hệ vật lý.

Vì có thể phát hiện quan hệ vào-ra của các biến trên tất cả các sơ đồ kết nối trong mô hình hệ thống, nên tính nhân quả có thể đoán nhận khả năng giải bằng máy tính của mô hình sơ đồ kết nối. Các kết quả được dùng để chỉ ra số trạng thái động lực đã được yêu cầu trong một hệ và sơ đồ nhân quả rất tiện lợi trong việc đưa ra chính xác mô hình toán học. Ngay cả nếu không rút ra được các phương trình, tính nhân quả cũng có thể dùng để rõ hơn về mặt vật lý để xem hệ thống làm việc thế nào.

9.3 Mô tả các thành phần mô hình cơ học cơ bản

Các thành phần cơ học trong các hệ cơ điện tử thể hiện sự hiện diện của chúng thông qua đáp ứng chuyển động và bởi phản ứng lực và mômen đáng kể trên kết cấu đỡ, các cơ cấu chấp hành và các cảm biến. Khi hiểu và đoán nhận các thuộc tính đáp ứng này, nó tạo ra do kết hợp với các hiệu ứng ma sát, đàn hồi và quán tính, có thể thu nhận được bản chất tích lũy năng lượng và hao tán bằng nhận dạng. Sự nhấn mạnh này đến sự hao tán và tích lũy năng lượng dẫn đến một định nghĩa hệ thống của các quan hệ được thiết lập đối với các thành phần mô hình hóa hệ cơ học cơ bản. Các thành phần mô hình này tạo cơ sở cho việc xây dựng các mô hình hệ phi tuyến phức tạp và cho việc xác định các quan hệ trở kháng tiện lợi trong việc tạo lập hàm truyền. Tiếp theo đó, giả thiết rằng các thành phần của hệ có thể mô tả với công thức thông số tổng thể.

Người ta coi quyết định mô hình hóa được thực hiện sao cho các thành phần hao tán và tích lũy năng lượng (động và thế năng) có thể được nhận dạng để biểu diễn trung thực một hệ cần quan tâm. Hình mắt lưới là một phần cơ bản của quá trình mô hình hóa, nhưng đôi khi việc định nghĩa và liên kết các thành phần không phải dễ dàng hoặc trực giác. Trong mục này, đầu tiên là xem lại các thành phần mô hình vào và ra của hệ cơ học và sau đó xem xét các thành phần tiêu tán thụ động và các thành phần tích lũy năng lượng. Mục này cũng bàn về các thành phần kết nối dùng cho mô hình hóa các bánh răng, đòn bẩy và các loại thành phần truyền năng lượng khác. Chương này kết thúc bằng việc đưa vào các quan hệ trở kháng cho tất cả các thành phần này.

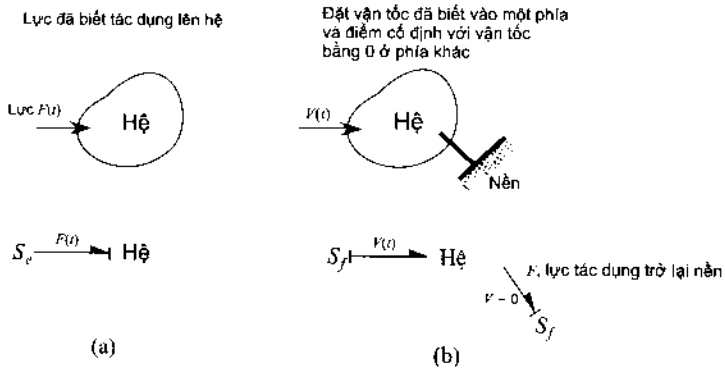
Định nghĩa các phần tử mô hình cơ học đầu vào và đầu ra

Trong mô hình hóa hệ động lực, yêu cầu trước tiên là xác định **biên của hệ**, một khái niệm được mượn từ nhiệt động học cơ bản. Trong những hệ cơ học cô lập, biên của hệ đồng nhất với các cổng, ở đó tín hiệu và công suất có thể đi qua. Mỗi cổng được mô tả bằng cặp liên hợp công suất giữa lực-vận tốc hoặc mômen lực-vận tốc góc. Điều này là thuận lợi, khi tập trung vào mô hình hóa hệ cơ học, để làm cơ sở cho tính nhân quả ở mỗi cổng. Ví dụ, nếu một động cơ gắn với một cổng thì có thể xác định được mômen như biến đầu vào và vận tốc góc như đầu ra (sau động cơ).

Điều quan trọng để nhận dạng đó là những giả thiết mô hình. Ta xác định các thành phần đặc biệt như **nguồn** của thế hoặc dòng có thể gắn vào biên của hệ được quan tâm. Các đầu vào này phải được biết và hoặc lý tưởng hóa, hoặc chúng có thể là "người giữ chỗ" mà sau này ở đó ta sẽ gắn cho mô hình một cơ cấu chấp hành hoặc cảm biến. Trong trường hợp này tính nhân quả xác định tại cổng được cố định sao cho mô hình hệ (bên trong) sẽ không thay đổi. Nếu tính nhân quả thay đổi thì cần thiết phải tạo lập lại mô hình mới.

Trong thuật ngữ sơ đồ kết nối, **nguồn thế** được sử dụng để định nghĩa một phần tử để chỉ ra một thế như lực hoặc mômen. Ký hiệu S_e hoặc E có thể được dùng để thể hiện một nguồn thế trên sơ đồ kết nối.

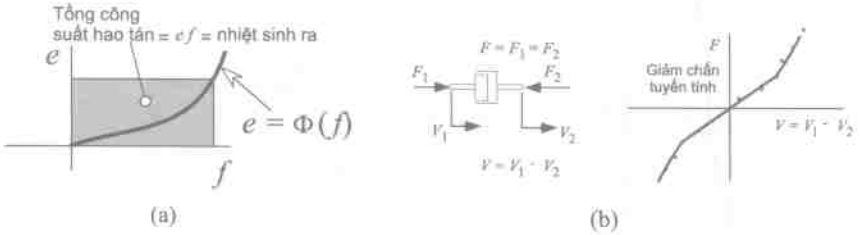
Một **nguồn dòng** là một phần tử định rõ một dòng trên một kết nối, như vận tốc tịnh tiến, vận tốc quay hoặc vận tốc góc. Ký hiệu trên sơ đồ kết nối là S_f hoặc F. Hai ví dụ về các nguồn cơ bản được chỉ ra trên hình 9.7. Chú ý rằng mỗi sơ đồ có thể hoặc dòng xác định, phụ thuộc vào loại nguồn. Tính nhân quả trên các thành phần mô hình này luôn luôn được biết, như đã chỉ ra. Hơn nữa, mỗi sơ đồ mang cả hai đoạn thông tin: (1) thế hoặc biến dòng định rõ bởi nguồn và (2) *phản ứng ngược* được chỉ ra bởi tính nhân quả. Ví dụ, tại chỗ kết nối với nền trong hình 9.7(b) nguồn định rõ liên kết vận tốc 0 trong hệ và hệ này, đến lượt nó, lại xác định thế *phản hồi* tới nền. Sự trình bày mang tính chất biểu trưng này nhấn mạnh bản chất nhân quả của các mô hình sơ đồ kết nối và nhấn mạnh các biến nào có giá trị cho việc kiểm tra. Trong trường hợp này lực tác dụng lại nền phải là biến đầu ra tới hạn.



HÌNH 9.7 Hai trường hợp nguồn thế và nguồn dòng được chỉ ra trong sơ đồ kết nối chữ

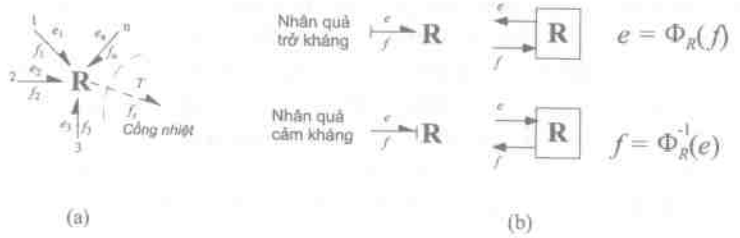
Hiệu ứng hao tán trong các hệ cơ học

Các hệ cơ học sẽ hao tán năng lượng do ma sát khi tiếp xúc trượt, các bộ giảm chấn (thụ động hay tích cực) và thông qua tương tác với các miền năng lượng khác nhau (như tải thủy lực, cản dòng xoáy). Các hiệu ứng không thuận nghịch này được mô hình hóa bởi các hàm cơ bản giữa lực và vận tốc hoặc mômen và vận tốc góc. Trong mỗi trường hợp tích của các biến lực-dòng biểu diễn công suất bị hao tán $P_d = e \cdot f$ và năng lượng tổng thể bị hao tán là $E_d = \int P_d dt = \int (e \cdot f) dt$. Năng lượng này có thể xác định được khi cho hàm cơ bản $e = \Phi(f)$, được chỉ ra bằng biểu đồ trên hình 9.8(a). Chúng ta coi nó như là quan hệ thiết lập *trở kháng* cơ bản, chứa đựng những hạn chế quy định bởi định luật thứ hai của động lực học nhiệt; chính là $e \cdot f \geq 0$. Một giảm chấn cơ học điển hình mô tả mô hình loại trở kháng, được tóm tắt trong hình 9.8(b).



HÌNH 9.8 (a) Quan hệ ràng buộc điện trở (b) Ví dụ mô hình điện trở giảm chấn

Trong mô hình sơ đồ kết nối, các thành phần trở kháng được ký hiệu bởi thành phần **R** và một mô hình thành phần **R** đa cổng, tổng quát hóa được chỉ ra trên hình 9.9(a). Chú ý rằng thành phần **R** được phân biệt bởi khả năng biểu diễn tích entropi trong một hệ. Trên thành phần **R**, *cổng nhiệt* và kết nối được chỉ ra và hướng công suất đi *ra* từ **R** luôn luôn dương. Trong các hệ nhiệt, nhiệt độ T là biến thế và tốc độ dòng entropi f_s là biến dòng. Để tính toán nhiệt sinh ra bởi thành phần **R**, hãy kết hợp tính toán khi $Q = T \cdot f_s = \Sigma_i e_i \cdot f_i$ (tính theo Wat) trên n cổng.



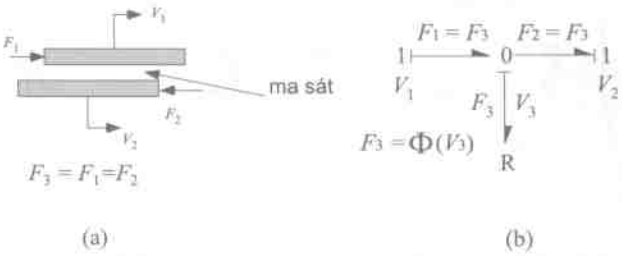
HÌNH 9.9 (a) Thành phần sơ đồ kết nối trở kháng (b) Tính nhân quả trở kháng và dẫn suất

Hệ được gắn với thành phần trở kháng qua kết nối công suất nói chung sẽ xác định nhân quả trên kết nối này, vì các thành phần trở kháng nói chung không có dạng nhân quả gốc. [1]Hai trường hợp có thể trên thành phần cổng **R** đã cho được chỉ ra trên hình 9.9(b). Sơ đồ khối nhấn mạnh phương diện tính toán của tính nhân quả. Ví dụ, trong trường hợp trở kháng, dòng (hoặc vận tốc)

[1] Điều này đúng với hầu hết các trường hợp. Các thành phần tích lũy năng lượng sẽ chỉ ra ở sau, có dạng nhân quả để dễ dàng mô tả bằng công thức.

là đầu vào đã biết, nên công suất bị hao tán là $P_d = e \cdot f = \Phi(f) \cdot f$. Đối với cản tuyến tính, $F = b \cdot V$, nên $P_d = F \cdot V = b \cdot V^2 (W)$.

Trong các hệ cơ học, nhiều hiệu ứng ma sát được rút ra bởi chuyển động tương đối. Do đó, việc nhận dạng hiệu ứng hao tán được mô tả như thế nào trong một hệ cơ học đòi hỏi xác định các biến chuyển động tới hạn. Hãy xét ví dụ về hai mặt phẳng trượt lên nhau với các vận tốc khác nhau được nhận dạng bởi mối nối 1, như chỉ ra trên hình 9.10(a). Khi xác định một mặt với vận tốc V_1 và mặt kia với vận tốc V_2 cấu trúc đơn giản trên hình 9.10(b) chỉ ra một thành phần **R** có thể được kết nối ở vận tốc *tương đối* V_3. Điều đó ghi nhận tính hợp lý của thuyết nhân quả. Hai vận tốc kết nối tại mối nối 0 tạo thành vận tốc tương đối, đó là đầu vào cho **R.** Còn đầu ra là lực F_3, tính được từ quan hệ cơ bản $F = \Phi(V_3)$. Mối nối 1 được tạo lập để biểu diễn V_3 có thể bị loại ra khi chỉ có thành phần đơn được gắn vào như đã chỉ ra. Trong trường hợp này, **R** có thể thay thế mối nối 1.

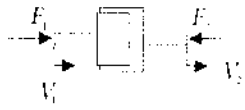
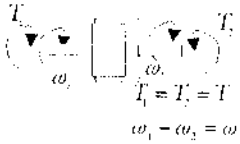


Hình 9.10 (a) Hai mặt tiếp xúc trượt (b) Mô hình sơ đồ kết nối với nhân quả suy ra các vận tốc như đầu vào đã biết

Khi mối quan hệ dòng-lực là tuyến tính, hằng số tỷ lệ là **trở kháng**, trong các hệ cơ học các đại lượng này thường là **các hằng số cản** (giảm chấn). Cản tuyến tính có thể xuất hiện trong các trường hợp khi hai mặt phân cách bởi chất lỏng trượt tương đối với nhau và sinh ra dòng nhớt thành lớp. Trong trường hợp này có thể chỉ ra rằng lực và vận tốc tương đối có quan hệ tuyến tính và tính chất hình học và vật liệu của bài toán sẽ định lượng hằng số cản tuyến tính. Bảng 9.2 tổng kết các thành phần cản quay và tịnh tiến, bao gồm cả các trường hợp tuyến tính. Các thành phần này được chuyển cho các bộ giảm chấn và loại giảm chấn được mô tả ở đây dẫn đến ma sát nhớt trong các ứng dụng cơ học, thuận lợi trong nhiều ứng dụng có chứa các mặt bôi trơn. Nếu vận tốc tương đối khá cao, dòng có thể trở thành dòng xoáy và dẫn đến đặc tính của bộ giảm chấn phi tuyến. Khi đó quan hệ cơ bản này là hàm phi tuyến, nhưng **cấu trúc** hoặc sự kết nối của mô hình này trong hệ không thay đổi. Ví dụ các bộ giảm chấn cũng được cấu tạo dùng thiết kế piston/chất lỏng và chẳng hạn, chung cho các bộ hấp thụ va chạm. Trong những trường hợp này, các đặc trưng vận tốc-lực thường phù hợp với tính phi tuyến.

Mô hình nhớt sẽ không hiệu quả để mô tả ma sát giữa các vật rắn khô, ma sát loại này là quá trình phức tạp hơn nhiều và dẫn đến thể hiện các giới hạn đặc biệt ở các tốc độ tương đối thấp hơn. Một cách thể hiện loại ma sát này là mô hình Culông kinh điển, phụ thuộc vào tải trọng pháp tuyến giữa các mặt và vào hệ số ma sát, thường ký hiệu bởi μ (bảng 9.3). Mô hình Culông định lượng lực ma sát là $F = \mu N$, trong đó N là lực pháp tuyến. Hàm này được vẽ trên hình 9.11(a) để minh họa lực ma sát luôn luôn ngược chiều với chuyển động như thế nào. Mô hình này đủ khả năng như một hàm trở kháng cơ bản liên hệ với lực ma sát và vận tốc tương đối của các mặt. Tuy nhiên, trong trường hợp này, vận tốc chỉ có tác dụng xác định dấu của lực, tức là, $F = \mu N \, \text{sgn}(V)$, trong đó sgn là hàm signum (lấy giá trị 1 khi $V > 0$, lấy giá trị -1 khi $V < 0$).

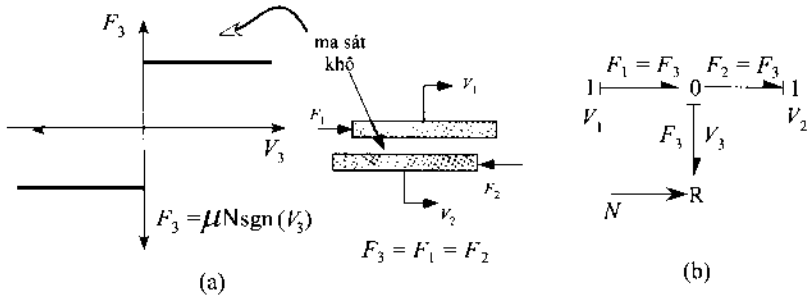
BẢNG 9.2 Các phần cơ hao tán năng lượng

Hệ vật lý	Các quan hệ cơ bản	Sơ đồ kết nối
Phần tử hao tán tổng quát – phần tử trở kháng – **Điện trở** R	Sự hao tán: $\mathbf{e}\cdot\mathbf{f}=\sum_i e_i f_i = T\cdot f_s$ Luật trở kháng: $e=\Phi_R(f)$ Luật điện dẫn: $f=\Phi_R^{-1}(e)$ Công suất: $P_f=\int e\cdot df$ Đồng công suất: $P_e=\int f\cdot de$	 **Thành phần đa cổng R tổng quát**
Tịnh tiến cơ học  $F_1=F_2=F$ $V_1-V_2=V$ – Giảm chấn – **Hệ số giảm chấn** b	Cơ bản: $F=\Phi(V)$ Công suất: $P_1=\int F\cdot dV$ Đồng năng lượng: $P_F=\int V\cdot dF$ Sự hao tán: $P_d=P_1+P_F$	$\xrightarrow[i]{F}\mathbf{R}:b$ Tuyến tính: $F=b\cdot V$ Hao tán: $P_d=bV^2$
Quay cơ học  $T_1=T_2=T$ $\omega_1-\omega_2=\omega$ – Giảm chấn xoắn – **Hệ số giảm chấn** B	Cơ bản: $T=\Phi(\omega)$ Công suất: $P_\omega=\int T\cdot d\omega$ Đồng năng lượng: $P_T=\int\omega\cdot dT$ Hao tán: $P_d=P_\omega+P_T$	$\xrightarrow[i]{F}\mathbf{R}:B$ Tuyến tính: $T=B\cdot\omega$ Hao tán: $P_d=B\omega^2$

BẢNG 9.3 Các hệ số ma sát điển hình

Chú ý: các giá trị này thay đổi phụ thuộc nhiều vào các điều kiện

Các mặt tiếp xúc	Tĩnh, μ_s	Trượt hoặc động, μ_k
Thép trên thép (khô)	0. 6	0. 4
Thép trên thép (nhờn)	0. 1	0. 05
Teflon trên thép	0. 04	0. 04
Teflon trên teflon	0. 04	-
Đồng trên thép (khô)	0. 5	0. 4
Lót phanh trên sắt đúc	0. 4	0. 3
Cao su trên nhựa đường	-	0. 5
Cao su trên bê tông	-	0. 6
Lốp cao su trên đường lát nhẵn (khô)	0. 9	0. 8
Cáp kim loại trên puly sắt (khô)	0. 2	0. 15
Dây gai trên kim loại	0. 3	0. 2
Kim loại trên băng	-	0. 02



HÌNH 9.11 (a) Ma sát Culông kinh điển cho các mặt trượt. (b) Sơ đồ kết nối chỉ ra tác dụng của lực pháp tuyến như sự điều biến của luật thành phần –**R**

Mô hình này đòi hỏi điều kiện đặc biệt khi $V \rightarrow 0$. Ma sát khô có thể dẫn đến hiện tượng trượt-dính, đặc biệt phổ biến khi vận tốc tương đối giữa các mặt tiếp xúc tiến đến giá trị thấp. Hiện tượng trượt-dính được phân biệt theo cách chúng thay đổi như kết quả các biến khác, như lực pháp tuyến hoặc tải trọng tác dụng khác. Trượt-dính là một loại phản ứng của hệ xảy ra do hiệu ứng ma sát. Trên sơ đồ kết nối, một kết nối tín hiệu có thể được dùng để chỉ rằng lực pháp tuyến được xác định bởi yếu tố bên ngoài (chẳng hạn, trọng lượng, tải trọng tác dụng,…). Điều đó được minh họa trên hình 9.11(b). Khi các tính chất cơ bản của thành phần vật lý bị thay đổi bởi các kết nối tín hiệu trong cách này, chúng được coi là **bị điều biến**. Đó là một phương pháp mô hình hóa rất tiện dụng, nhưng cần lưu ý, không áp dụng được khi vi phạm nguyên lý năng lượng cơ bản.

Khó khăn nữa với mô hình ma sát khô tiêu chuẩn là nó có tính nhân quả ưu tiên. Nói cách khác, nếu đầu vào là vận tốc thì quan hệ cấu thành này tính ra lực. Tuy nhiên, nếu đầu vào là lực thì không có đầu ra vận tốc duy nhất. Hàm này là đa trị. Những khó khăn loại này thường chứng tỏ rằng các hiệu ứng vật lý chưa được kể hết khi mô hình hóa. Trong khi quan hệ cấu thành dòng thế được dùng, thì dạng của quan hệ cấu thành này cần thiết cho tham số hóa bởi các biến tới hạn khác (nhiệt độ, độ ẩm...). Các mô hình chi tiết hơn nằm ngoài phạm vi của chương này, độc giả có thể tham khảo Rabinowicz (1995) và Armstrong - Helouvry (1991), các tác giả này đã trình bày kỹ trong mô hình hóa ma sát và tác dụng của chúng. Ma sát thường là nguồn bất định trội trong nhiều thế mô hình hóa dự đoán (đó là thực tế trong nhiều miền năng lượng).

Các phần tử tích lũy thế năng

Một phần năng lượng làm biến dạng thành phần cơ học nào đó có thể tham gia vào việc dự trữ thế năng thuần túy. Thông thường, quyết định mô hình hóa một thành phần cơ học theo cách này được nhận dạng thông qua mối liên hệ ràng buộc cấu thành giữa biến thế e (lực, mômen) và biến dịch chuyển q (dịch chuyển tịnh tiến, dịch chuyển góc). Mối quan hệ này có thể rút ra từ cơ học cơ bản [29] hoặc qua đo đạc trực tiếp. Một ví dụ là lò xo tịnh tiến, trong đó dịch chuyển của các điểm mút x liên hệ với lực tác dụng F như sau: $F = F(x)$.

Trong mô hình tham số tập trung dựa vào năng lượng, biến dịch chuyển suy rộng q được dùng để xác định hàm thế năng trạng thái nhất định:

$$E = E(q) = U_q$$

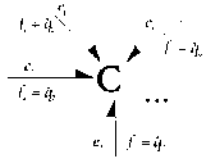
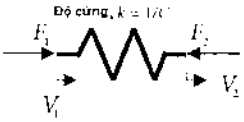
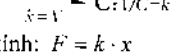
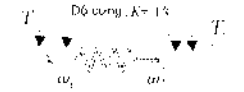
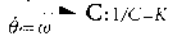
Năng lượng này gắn với quan hệ cấu tạo $e = \Phi(q)$ bởi:

$$U(q) = U_q = \int e dq = \int \Phi(q) dq$$

Điều này có ích khi phương pháp này là thuận lợi và xác định rằng các thiết bị thực tế cần quan tâm có ít nhất một chỗ kết nối (cổng) trong đó công suất có thể tích lũy thế năng. Tại cổng này

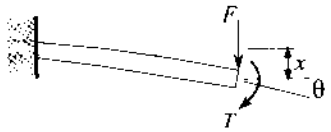
biến dịch chuyển được quan tâm là dịch chuyển tịnh tiến x hoặc dịch chuyển góc θ và các vận tốc phù hợp là $V = \dot{x}$ và $\omega = \dot{\theta}$. Thành phần tích lũy thế năng mở rộng được tóm tắt trong bảng 9.4, trong đó các ví dụ được cho đối với một cổng tịnh tiến hoặc quay.

BẢNG 9.4 Các phần tử cơ tích lũy thế năng (dạng tích phân)

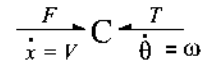
Hệ vật lý	Các quan hệ cơ bản	Sơ đồ kết nối
Phần tử tích lũy năng lượng - Phần tử điện dung - Điện dung C	Trạng thái: **q** = dịch chuyển Tốc độ: $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}$ Cấu thành: $\mathbf{e} = \mathbf{\Phi}(\mathbf{q})$ Năng lượng: $U_q = \int \mathbf{e}.d\mathbf{q}$ Đồng năng lượng: $U_e = \int \mathbf{q} \cdot d\mathbf{e}$	 Phần tử đa cổng C tổng quát
Tịnh tiến cơ học  - Lò xo dài - Độ cứng K, độ mềm C	Trạng thái: x = dịch chuyển Tốc độ: $\dot{x} = V$ Cấu thành: $F = F(x)$ Năng lượng: $U_x = \int F.dx$ Đồng năng lượng: $U_F = \int x \cdot dF$	 Tuyến tính: $F = k \cdot x$ Năng lượng: $U_x = \frac{1}{2}kx^2$ Đồng năng lượng: $U_F = \frac{F^2}{2k}$
Quay cơ học  $T_1 = T_2 = T \quad \omega_1 - \omega_2 = \omega$ - Lò xo xoắn - Độ cứng K, độ mềm C	Trạng thái: θ = góc Tốc độ: $\dot{\theta} = \omega$ Cấu thành: $T = T(\theta)$ Năng lượng: $U_\theta = \int T \cdot d\theta$ Đồng năng lượng: $U_T = \int \theta \cdot dT$	 Tuyến tính: $T = K \cdot \theta$ Năng lượng: $U_\theta = \frac{1}{2}k\theta^2$ Đồng năng lượng: $U_T = \frac{T^2}{2K}$

Lò xo dài tuyến tính là một phần tử có $F = F(x) = kx = (1/C)x$, với k là độ cứng và $C \equiv 1/k$ là *độ mềm* của lò xo. Như chỉ ra trong bảng 9.4 thế năng được tích lũy trong lò xo tuyến tính là $U_x = \int F dx = \int kx\,dx = \frac{1}{2}kx^2$ và đồng năng lượng là $U_F = \int F dx = \int (F/k)\,dF = F^2/2k$. Vì lò xo là tuyến tính, có thể chỉ ra rằng $U_x = U_F$. Nếu lò xo là phi tuyến do biến dạng dẻo hoặc cứng hóa công thì điều đó không đúng.

Thế năng đàn hồi có thể được tích lũy trong một thiết bị qua các cổng và qua các miền năng lượng khác nhau. Một ví dụ thú vị về loại này là dầm công xôn có cả hai đầu vào là lực và mômen tại mút. Dầm này có thể tích lũy năng lượng bởi cả dịch chuyển tịnh tiến và dịch chuyển quay tại mút. Quan hệ cơ bản cho thành phần C hai cổng liên hệ lực và mômen với dịch chuyển thẳng và dịch chuyển quay, như chỉ ra trên hình 9.12. Ma trận độ cứng (hoặc độ mềm) đối với độ lệch nhỏ được rút ra bởi sự siêu vị trí tuyến tính.



(a)



$$\begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ q \end{bmatrix}$$

(b)

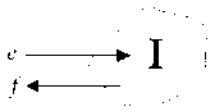
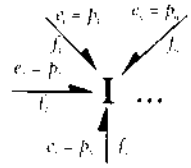
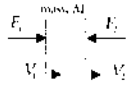
HÌNH 9.12 Ví dụ phần tử tích lũy năng lượng hai cổng: (a) Dầm công xôn với các kết nối mút quay và tịnh tiến, (b) Thành phần **C** và mô hình hai cổng

Tích lũy động năng

Tất cả các thành phần cấu tạo nên các hệ cơ học đều có khối lượng, nhưng trong một phân tích hệ, trong đó sự liên quan là thể hiện động lực học, thì chỉ cần tập trung vào các thành phần có thể tích lũy lượng động năng thích hợp thông qua chuyển động của chúng. Điều đó dự đoán rằng một cơ sở năng lượng được dùng cho mô hình hóa và theo dõi động năng sẽ cung cấp cái nhìn bên trong động lực học hệ. Đó là tâm điểm của thảo luận, liên quan đến khoảnh khắc chuyển động tịnh tiến một thứ nguyên và chuyển động quay quanh một trục cố định. Sau đó sẽ được chỉ ra cách diễn đạt được trình bày ở đây có lợi như thế nào để hiểu các hệ phức tạp hơn.

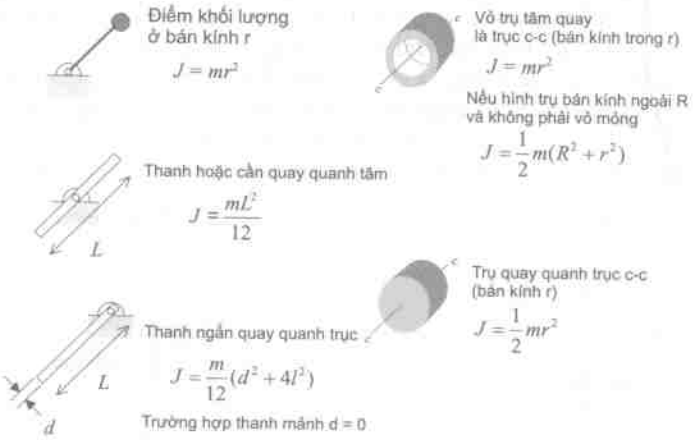
Khái niệm về khối lượng và việc dùng nó như phần tử mô hình sẽ thuận lợi bởi quan hệ Newton giữa tốc độ thay đổi của động lượng của khối lượng đối với các lực thực đặt lên nó, $F = \dot{p}$, trong đó p là động lượng. Năng lượng tích lũy trong hệ do chuyển động tịnh tiến với vận tốc V là động năng. Khi dùng quan hệ từ định luật Newton, $dp = Fdt$, năng lượng này là $E(p) = T(p) = T_p = \int Pdt = \int FV\ dt = \int V\ dp$. Nếu vận tốc được biểu diễn chỉ như hàm động lượng p, thì hệ này là khối lượng tịnh tiến thuần túy, $V = \Phi(p)$. Nếu vận tốc tỷ lệ thuận với động lượng thì $V = p/m$, trong đó m là khối lượng. Các định nghĩa cơ bản tương tự được dùng cho vật thể quay quanh một trục cố định và các thành phần này được tóm tắt trong bảng 9.5.

BẢNG 9.5 Các phần tử cơ học tích lũy động năng

Hệ vật lý	Các quan hệ cơ bản	Sơ đồ kết nối
Phần tử tích trữ động năng tổng quát  Phần tử quán tính Quán tính I	Trạng thái: $\mathbf{p}$ = động lượng Tốc độ: $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{e}$ Cơ sở: $\mathbf{f} = \Phi(\mathbf{p})$ Năng lượng: $T_p = \int \mathbf{f} \cdot d\mathbf{p}$ Đồng năng lượng: $T_f = \int \mathbf{p} \cdot d\mathbf{f}$	 Phần tử đa cổng I tổng quát
Chuyển động tịnh tiến cơ học  $F_1 - F_2 = F$ $V_1 - V_2 = V$ Khối lượng Khối lượng m	Trạng thái: p = động lượng Tốc độ: $\dot{p} = F$ Cơ sở: $V = V(p)$ Năng lượng: $T_p = \int f.dp$ Đồng năng lượng: $T_V = \int p \cdot dV$	$\frac{\dot{p} = F}{V}$ **I:M** Tuyến tính: $V=P/M$ Năng lượng: $T_p=p^2/2M$ Đồng năng lượng: $T_V=1/2MV_2$
Chuyển động quay cơ học $T_1 - T_2 = T$ $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ – Quán tính quay – **Mômen quán tính** J	Trạng thái: h = mômen động lượng Tốc độ: $\dot{h} = T$ Cơ sở: $\omega = \omega(h)$ Năng lượng: $T_h = \int \omega \cdot dh$ Đồng năng lượng: $T_\omega = \int h \cdot d\omega$	$\frac{\dot{h} = T}{\omega}$ **I:J** Tuyến tính: $\omega = h/J$ Năng lượng: $T_h = h^2/2J$ Đồng năng lượng: $T_\omega = \frac{1}{2} J\omega^2$

Đối với nhiều ứng dụng thực tiễn trong kỹ thuật, quan hệ vận tốc-động lượng, $V = V(p)$ (quan hệ cấu thành) là tuyến tính. Chỉ trong trường hợp tương đối có thể có quan hệ phi tuyến trong luật cơ bản đối với khối lượng. Tuy nhiên, điều đó chỉ ra rằng, trong trường hợp tích lũy động năng tổng quát, quan hệ cấu thành được thiết lập giữa biến dòng và biến động lượng, $f = f(p)$. Điều đó giúp đánh giá sự tương tự cho miền năng lượng khác, đặc biệt trong các hệ điện trong đó các bộ cảm ứng (tương tự như khối lượng) có thể có quan hệ phi tuyến giữa luồng (dòng) và sự kết nối luồng (động lượng).

Chuyển động quay của vật rắn được xét ở đây bị hạn chế cho trường hợp đơn giản quay phẳng quanh trục cố định. Mômen quán tính của khối lượng của một vật đối với một trục được xác định như là tổng của các tích các thành phần khối lượng và bình phương khoảng cách của chúng tính đến trục này. Đối với trường hợp rời rạc $I = \Sigma r^2 \Delta m$ còn đối với trường hợp liên tục trở thành $I = \int r^2 dm$ (đơn vị kg m^2). Một số dạng thông dụng và mômen quán tính khối lượng của chúng được cho trên hình 9.13. Các vật rắn tổng quát được giới thiệu trong mục "các tính chất quán tính".



HÌNH 9.13 Các mômen quán tính khối lượng đối với một số vật thông dụng

Có nhiều khái niệm và định lý thuận lợi liên quan đến các tính chất của vật rắn sẽ hữu ích trong mục này. Đầu tiên, nếu mômen quán tính khối lượng được biết đối với một trục đi qua tâm khối (I_G), thì định lý Steiner (định lý trục song song) liên hệ mômen quán tính này với mômen quán tính đối với trục khác ở khoảng cách d cho bởi $I = I_G + md^2$, trong đó m là khối lượng của vật. Cũng có thể thiết lập mômen quán tính của các vật tổ hợp, khi đó bỏ qua chuyển động riêng của mỗi vật. Một khái niệm tiện dụng là bán kính quán tính, k, là bán kính của một xi lanh tưởng tượng có độ dày thành mỏng vô cùng bé, có khối lượng m và có cùng mômen quán tính I như vật thể khảo sát, thì $k = \sqrt{I/m}$. Bán kính quán tính có thể dùng để tìm khối lượng tương đương đối với vật lăn, dùng $m_{tq} = I/k^2$.

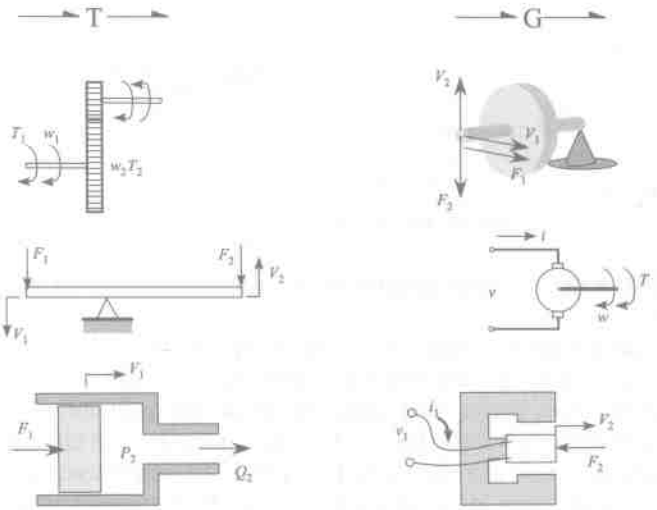
Các cơ cấu nối

Nhiều loại thiết bị dùng như các bộ nối ghép hoặc các cơ cấu truyền năng lượng, thông dụng nhất là đòn bẩy, truyền động bánh răng, pu li, ròng rọc, tời và cần cẩu. Một cách lý tưởng, các thiết bị này và dạng tương tự của chúng trong miền năng lượng khác là bảo toàn công suất và biểu diễn chúng một cách thuận lợi khi sử dụng mô hình hai cổng. Trong thành phần mô hình này, công suất vào bằng công suất ra, hoặc qua cặp dòng-thế, $s_1 f_1 = e_2 f_2$. Suy ra rằng có hai loại thiết bị cơ bản được mô tả theo cách này dựa trên mối quan hệ giữa các biến công suất trên hai cổng. Đối với cả hai loại mối quan hệ giữa hai biến thường có thể được nhận dạng từ hình học hoặc tính chất vật lý

cơ bản của thiết bị. Bởi việc đưa vào hạn chế là có sự truyền bảo toàn công suất vốn có trong thiết bị, một quan hệ thứ hai được rút ra. Một khi mối quan hệ được thiết lập thì thiết bị thường có thể được phân loại như **bộ chuyển đổi** hoặc **hồi chuyển**. Cần nhấn mạnh rằng, các thành phần của mô hình này được dùng để biểu diễn các phương diện bảo toàn công suất lý tưởng của thiết bị. Những tổn thất hoặc hiệu ứng động lực học được thêm vào các thiết bị thực được mô hình.

Một thiết bị có thể được mô hình như **bộ chuyển đổi khi** $e_1 = me_2$ và $mf_1 = f_2$. Trong quan hệ này, m là **môđun** của bộ chuyển đổi được xác định bởi tính chất vật lý của thiết bị sẽ là hằng số hoặc trong một số trường hợp là một hàm của trạng thái của hệ. Ví dụ, trong truyền động bánh răng đơn giản, vận tốc góc có thể tìm được nhờ quan hệ lý tưởng của tỷ số các bán kính cơ sở của các bánh răng và đối với cơ cấu tay quay con trượt có thể tạo lập được mối quan hệ giữa chuyển động của con trượt và góc tay quay. Do đó, hai mômen liên hệ với nhau và truyền động bánh răng là một bộ chuyển đổi. Một thiết bị có thể được mô hình hóa như **bộ hồi chuyển** nếu $e_1 = rf_2$ và $rf_1 = e_2$, trong đó r là môđun bộ hồi chuyển. Chú ý rằng, mô hình này có thể biểu diễn sự chuyển đổi bảo toàn công suất trong các thiết bị đối với chúng mối quan hệ chéo giữa các biến công suất (tức là thế liên hệ với dòng) được nhận dạng[2].

Các ví dụ về bộ chuyển đổi và bộ hồi chuyển được chỉ ra trên hình 9.14. Trong mô hình sơ đồ kết nối, bộ chuyển đổi có thể được biểu diễn bởi **TF** hoặc **T**, trong khi đó bộ hồi chuyển được biểu diễn bởi **GY** hoặc **G** (chú ý, ký hiệu hai chữ cái là thông dụng). Các ví dụ trên hình 9.14 chỉ ra môđun m hoặc r, nó có thể là hoặc không là giá trị hằng. Nhiều thiết bị có thể tham gia vào sự bảo toàn công suất, tuy nhiên, mối quan hệ giữa các biến thế-dòng có thể không là hằng, nên mối quan hệ này được coi là *điều biến* khi môđun là hàm của biến động lực (đúng hơn là một trạng thái của hệ). Trên sơ đồ kết nối, điều đó được chỉ ra khi dùng kết nối tín hiệu hướng vào môđun **T** hoặc **G**.

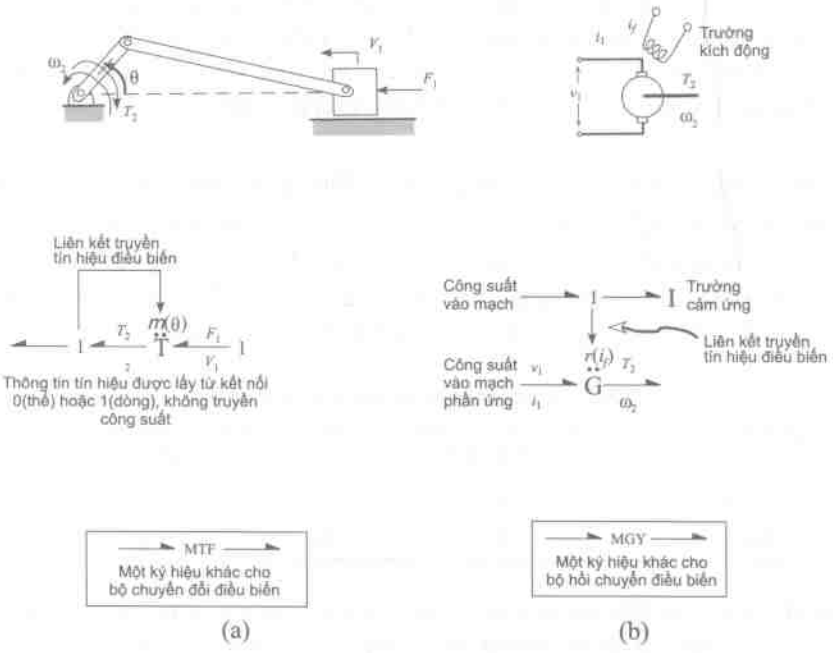


HÌNH 9.14 Các thiết bị thông thường có thể được mô hình hoá như các bộ chuyển đổi hoặc bộ hồi chuyển trong hệ cơ học

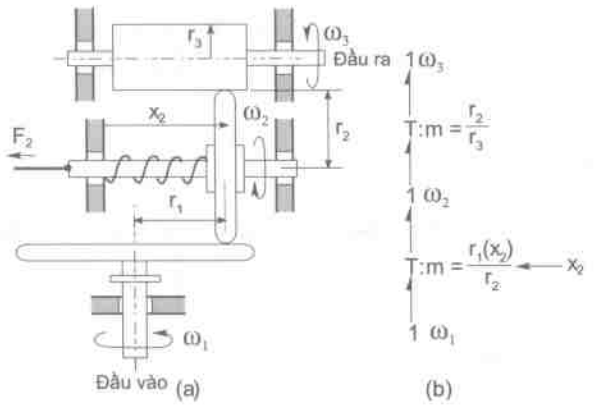
Các ví dụ về bộ chuyển đổi hoặc bộ hồi chuyển điều biến được cho trên hình 9.15. Các ví dụ này làm nổi bật các phương pháp tiện dụng trong mô hình hóa các thiết bị thực tế. Trong hệ tay quay con trượt, chú ý rằng sự điều biến là do sự thay đổi vị trí góc của tay quay. Thông tin này nhận được từ một kết nối ngay sát bộ chuyển đổi trong bài toán; tức là, nếu chúng ta tích hợp vận tốc góc tìm được trên kết nối kế bên, như chỉ ra trên hình 9.15(a). Đối với trường kích động bởi

[2] Suy ra rằng thành phần mô hình hồi chuyển là chính trong tất cả các loại hệ. Sự cần thiết đối với một thành phần như vậy để biểu diễn hiệu ứng con quay hồi chuyển (gyroscop) trong các hệ cơ học được ghi nhận đầu tiên bởi Thomson và Tait vào cuối thế kỷ 19. Tuy nhiên, G. D. Birkhoff (1927) và B. D. H. Tellegen (1948) đã độc lập tìm ra sự cần thiết của thành phần này trong phân tích và tổng hợp các hệ.

động cơ một chiều như trên hình 9.15(b), quan hệ mômen-dòng trong động cơ phụ thuộc vào luồng sinh ra bởi trường này; do đó trường này bị kích động bởi một mạch, được cấp nguồn *độc lập* với mạch phần ứng. Thông tin tín hiệu đối với sự điều biến không đến từ kết nối kế bên, như trong trường hợp tay quay con trượt. Hai ví dụ này minh họa hai cách mà các liên kết đặt vào các cơ cấu nối. Sự điều biến trong tay quay con trượt có thể biểu diễn liên kết holonomic và theo chính các mạch này kích động trường trong động cơ phải chịu liên kết không holonomic. Chúng ta không thể liên hệ dòng và mômen trong trường hợp sau mà không giải bài toán động lực học của một hệ độc lập - mạch trường (field circuit). Trong hệ tay quay con trượt vị trí góc điều biến cần thiết có thể nhận được một cách đơn giản bởi tích phân vận tốc, vì $\dot{q} = \omega$. Việc thảo luận thêm về các liên kết có thể tìm trong mục 9.7.



HÌNH 9.15 Khái niệm về điều biến trong các bộ chuyển đổi và các bộ hồi chuyển



HÌNH 9.16 Liên kết không holonomic trong mô hình bộ chuyển đổi

Hệ cho trên hình 9.16(a) là bộ phận của truyền động thuần túy cơ học với vận tốc hằng. Một lực phản hồi cơ học F_2 sẽ điều chỉnh vị trí rôto giữa x_2. Hiệu ứng này được nhìn thấy trong mô hình sơ đồ kết nối hình 9.16(b), có hai bộ chuyển đổi để biểu diễn tỷ số vận tốc giữa đầu vào (bàn quay) 1 và rôto giữa 2 và tỷ số tốc độ giữa rôto giữa và con lăn đầu ra 3. Bộ chuyển đổi thứ nhất là một phiên bản cơ học của phép biến đổi không holonomic. Đặc biệt, ta cần giải đối với động lực học của vị trí rôto (x_2) để truyền công suất giữa các thành phần đầu vào và đầu ra của thiết bị này.

Các quan hệ trở kháng

Những mô tả thành phần cơ bản đã được trình bày là cơ sở cho việc xây dựng các mô hình cơ bản và một phương pháp rất hiệu quả dựa trên các cách thiết lập trở kháng. Một hàm trở kháng Z là tỷ số của biến thế đối với biến dòng tại một cổng của hệ đã cho của một thiết bị vật lý và việc ứng dụng phổ biến nhất là đối với các hệ tuyến tính $Z = Z(s)$, trong đó s là biến tần số phức (đôi khi gọi là toán tử Laplace). Độ dẫn là nghịch đảo của trở kháng, hay $Y = 1/Z$. Đối với mỗi thành phần cơ bản xác định, quan hệ trở kháng tuyến tính có thể được rút ra để phát triển mô hình. Đầu tiên, nhớ lại rằng toán tử đạo hàm có thể biểu diễn bởi toán tử s, nên dx/dt trong miền s đơn giản là sx và $\int x dt$ là x/s...

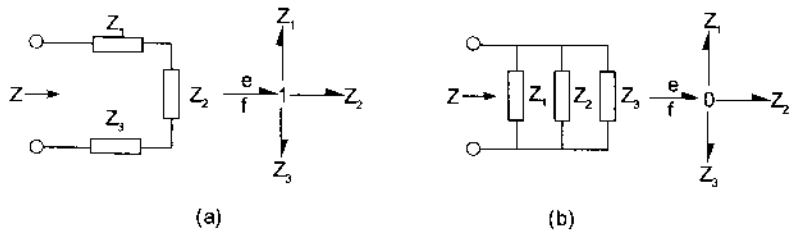
Đối với thành phần quán tính cơ bản trong chuyển động quay, chẳng hạn, quy luật của chuyển động quay cơ bản (xem bảng 9.5) là $\dot{h} = T$. Trong miền s, ta có thể biểu diễn $sh = T$. Khi sử dụng quan hệ cấu thành tuyến tính, ta có $h = J\omega$, $sJ\omega = T$. Chúng ta có thể quan sát thấy trở kháng quán tính quay được xác định bằng cách lấy tỷ số của thế và dòng, hoặc $T/\omega \equiv ZI = sJ$. Có thể được thực hiện một bài tập tương tự đối với mỗi thành phần cơ bản để thiết lập bảng 9.6.

BẢNG 9.6 Các phần tử trở kháng cơ học cơ bản

Hệ	Trở kháng Z_R	Dung lượng Z_C	Quán tính Z_I
Tịnh tiến	b	k/s	$m \cdot s$
Quay	B	K/s	$J \cdot s$

Khi dùng khái niệm cơ bản của mối nối 0 và mối nối 1, tương tự như các bộ nối mạch song song và nối tiếp, việc tạo lập các trở kháng tương ứng có thể rút ra đối với các sơ đồ kết nối theo cách tương tự như đã làm đối với các mạch. Đặc biệt, khi các trở kháng được kết nối nối tiếp thì trở kháng tổng là tổng các trở kháng, trong khi đó nếu các trở kháng nối song song thì độ dẫn tổng là tổng các độ dẫn. Các quan hệ cơ bản này được minh họa trên hình 9.17, đối với chúng:

$$Z = \underbrace{Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_n}_{n \text{ trở kháng nối tiếp}}, \qquad Y = \underbrace{Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_n}_{n \text{ điện dẫn song song}} \tag{9.2}$$

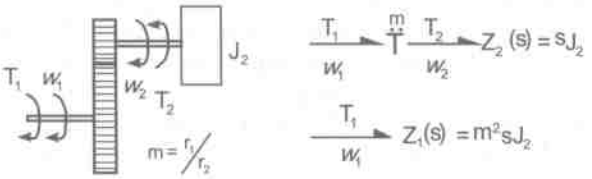


HÌNH 9.17 (a) Trở kháng của bộ nối nối tiếp (b) Độ dẫn cho tổ hợp song song

Các quan hệ trở kháng có lợi khi xây dựng hàm truyền của một hệ, vì chúng có thể được gây dựng trực tiếp từ một mạch tương tự hoặc sơ đồ kết nối. Các thành phần bộ chuyển đổi hoặc hồi chuyển cũng có thể được đưa vào trong các mô hình này. Một thiết bị có thể được mô hình hóa với bộ chuyển đổi và bộ hồi chuyển sẽ biểu diễn khả năng dùng tỷ lệ trở kháng, với những môđun dùng làm cơ sở trong điều chỉnh trở kháng gắn vào một "phía" của thiết bị xuất hiện như thế nào khi "được quan sát" từ phía kia. Ví dụ, đối với thiết bị có trở kháng Z_2 được gắn trên cổng 2, thì trở kháng khi được quan sát từ cổng 1 được tính như sau:

$$Z_1 = \frac{e_1}{f_1} = \left[\frac{e_1}{e_2}\right]\left[\frac{e_2}{f_2}\right]\left[\frac{f_2}{f_1}\right] = [m][Z_2(s)][m] = m^2 Z_2(s) \tag{9.3}$$

Khái niệm này được minh họa bởi hệ truyền động bánh răng trong hình 9.18. Quán tính quay được gắn vào trục đầu ra của cặp bánh răng, được mô hình hóa như một bộ chuyển đổi (sự tổn thất và các yếu tố khác sẽ bỏ qua ở đây).

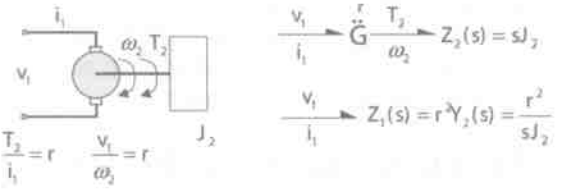


HÌNH 9.18 Quán tính quay gắn vào truyền động bánh răng và mô hình tương ứng trong dạng trở kháng. Ví dụ này minh họa bộ chuyển đổi có thể dùng trở kháng như thế nào

Trở kháng của quán tính là $Z_2 = sJ_2$, trong đó J_2 là mômen quán tính khối lượng. Truyền động bánh răng có khả năng dùng tỷ lệ trở kháng, được thiết kế qua việc chọn tỷ số truyền động m. Trở kháng có thể thay đổi với bộ chuyển đổi theo mục đích khuếch đại. Bộ hồi chuyển có thể ảnh hưởng có lợi và hơn nữa có thể thay đổi trở kháng vào trong độ dẫn. Nhớ lại quan hệ hồi chuyển cơ bản, $e_1 = rf_2$ và $e_2 = rf_1$, thì đối với trường hợp tương tự trước đây:

$$\frac{i_1}{v_1} = \left[\frac{e_1}{f_2}\right]\left[\frac{f_2}{e_2}\right]\left[\frac{e_2}{f_1}\right] = [r][Y_2(s)][r] = r^2 Y_2(s) \tag{9.4}$$

Khả năng phiếm hàm này của các bộ hồi chuyển giúp nhận dạng thiết kế động cơ-máy phát cơ bản khi các bộ phận tích hợp của hệ ắc quy bánh đà. Một minh chứng rất đơn giản xem trên hình 9.19, trong đó một bánh đà (quán tính quay) được gắn vào cổng cơ học của bộ hồi chuyển cơ điện cơ bản. Khi được quan sát từ cổng điện, bạn có thể thấy rằng bộ hồi chuyển làm cho quán tính giống như thiết bị tích trữ thế năng, vì trở kháng hoạt động như $1/(sC)$, giống như thành phần điện dung, mặc dầu ở đây C là quán tính cơ học.



HÌNH 9.19 Quán tính quay gắn vào máy quay cơ bản được mô hình hóa như một bộ hồi chuyển đơn giản. Ví dụ này minh họa, bộ hồi chuyển có thể dùng vào mục đích này như thế nào nhưng cũng biến đổi trở kháng thành dạng độ dẫn

9.4 Các định luật vật lý cho việc xây dựng mô hình

Mục này sẽ minh họa việc lập phương trình cơ bản cho các hệ được sắp xếp theo tính phức tạp từ những mô hình khối lượng-lò xo-giảm chấn đến các mô hình phức tạp hơn, chỉ ra giao diện với mô hình không cơ học như thế nào.

Các mục trước của chương này cung cấp cách mô tả các thành phần cơ bản tiện dụng trong mô hình hóa các hệ cơ học, nhấn mạnh đến cách tiếp cận hệ động lực. Cơ sở công suất và năng lượng của phương pháp sơ đồ kết nối làm cho việc xây dựng này nhất quán đối với các mô hình của các hệ từ các miền năng lượng khác. Một lợi ích nữa của việc dùng phương pháp sơ đồ kết nối là ở chỗ, một phương pháp hệ thống đối với chức năng nhân quả sẽ có giá trị. Cùng với các định luật vật lý, chức năng nhân quả cung cấp cái nhìn để xem phát triển mô hình tính toán như thế nào. Thậm chí không có việc tạo lập các phương trình, tính nhân quả cũng trở thành công cụ hữu hiệu.

Các định luật động học và động lực học

Việc sử dụng các phương trình cơ bản của động học và động lực học đặt một cấu trúc lên các mô hình chúng ta xây dựng biểu diễn chuyển động quay và chuyển động tịnh tiến cơ học. Các phương trình động lực học được rút ra từ các định luật Newton và ta lập biểu đồ vật tự do để biết các lực nào đặt vào các hệ cơ học. Hơn nữa, ta phải sử dụng các cấu hình của hệ để tìm ra các phương trình động học, dựa trên các hệ tọa độ đã được xác định. Nếu mục đích là phân tích một hệ cơ học riêng rẽ, thì để tìm lời giải cho bài toán đặt ra điển hình là áp dụng sự bảo toàn động lượng và mômen động lượng hoặc các phương pháp năng lượng và (hoặc) sử dụng phân tích động học. Trong hệ cơ điện tử, một hệ cơ học liên kết với các loại hệ khác (thủy lực, thiết bị cơ điện,...). Do đó ở đây ta tập trung vào việc xây dựng các mô hình như thế nào để dễ dàng tích hợp được chúng vào trong các mô hình toàn hệ. Các thảo luận kinh điển chi tiết về động học và động lực học từ cách nhìn cơ bản có thể tìm được trong nhiều sách nhập môn của Meriam và Kraige [23], Bedford và Fowler [5], hoặc trong nhiều nghiên cứu nâng cao của Goldstein [11] và Greenwood [12].

Khi mô hình hóa các hệ tịnh tiến đơn giản hoặc các hệ quay quanh trục cố định, một số định luật cơ bản chính được tóm tắt dưới đây là đủ để xây dựng các mô hình toán học cần thiết.

Các định luật động học và động lực học cơ bản

Hệ	Động lực học	Động học
Tịnh tiến	$\sum_i^N F_i = 0$	$\sum_i^N V_i = 0$
Quay	$\sum_i^N T_i = 0$	$\sum_i^N W_i = 0 \Sigma \, W_i = 0$
Loại mối nối	Mối nối 1	Mối nối 0

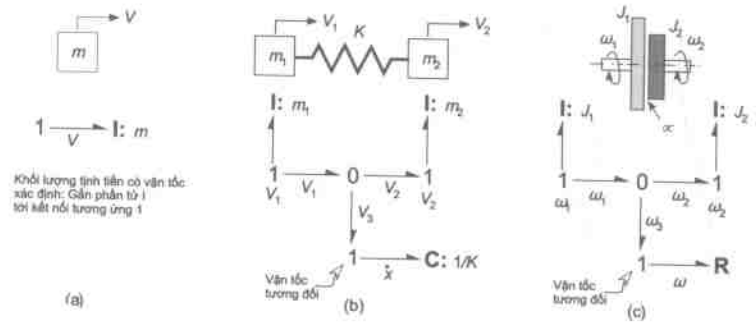
Có một lớp khá lớn các hệ cơ học có thể biểu diễn được khi dùng các phương trình cơ bản này và trong dạng này có thể thấy (a) Các thành phần mối nối của sơ đồ kết nối có thể được dùng để cấu tạo các mô hình này như thế nào, (b) Các phương trình này hỗ trợ cho các phương trình mạch tương tự như thế nào, vì chúng rất giống các định luật mạch Kirchhoff đối với điện áp và dòng điện. Ở đây ta trình bày phương pháp sơ đồ kết nối, phương pháp này truyền đạt bằng biểu đồ các định luật vật lý thông qua các thành phần mối nối 0 và mối nối 1.

Nhận dạng và biểu diễn chuyển động trong sơ đồ kết nối

Việc tập trung xác định những điểm của hệ có các vận tốc riêng (V hoặc ω) sẽ tạo thuận lợi khi nghiên cứu một hệ cơ học. Người ta có thể kết hợp một cách đơn giản mối nối 1 với các điểm này. Một khi đã làm được điều đó thì dễ dàng nhận dạng các điểm nối đối với các thành phần cơ học khác (khối lượng, lò xo, giảm chấn,...) cũng như các điểm để gắn cơ cấu chấp hành hoặc cảm

biến. Hơn nữa, đó cũng là then chốt để xác định các vận tốc bổ sung liên kết với chuyển động tương đối. Ở đây có thể không có những điểm rõ ràng nhận dạng được về phương diện vật lý trong một hệ, nhưng cần thiết khoanh vùng những điểm này để gắn các thành phần dựa trên chuyển động tương đối để mô tả sự làm việc của chúng (như các hệ thống treo).

Hình 9.20 chỉ ra việc nhận dạng vận tốc cần quan tâm có thể trợ giúp như thế nào cho việc nhận dạng các mối nối 1 ở đó các thành phần cơ học có thể được gắn kết. Đối với thành phần khối lượng cơ bản trong phần (a), giả thuyết cơ bản là một thành phần của hệ đưa vào nghiên cứu được lý tưởng hóa như khối lượng tịnh tiến thuần túy đối với nó động lượng và vận tốc được liên quan qua mối quan hệ liên kết. Suy ra là vận tốc của khối lượng như nhau trên toàn thành phần, nên mối nối 1 được dùng để nhận dạng chuyển động chính này. Một kết nối gắn vào mối nối 1 biểu diễn một công suất bất kỳ đi vào mối nối này như thế nào để có thể đi vào thành phần tích lũy động năng **I**, nó biểu diễn khối lượng m. Chú ý rằng lực trên kết nối bằng tốc độ biến đổi của động lượng $\dot{p}$, trong đó $p = mV$.



HÌNH 9.20 Nhận dạng các vận tốc trong một hệ cơ học có thể giúp cho nhận dạng sự nối kết chính xác của các thành phần và thiết bị (a) Khối lượng tịnh tiến cơ bản, (b) Hệ cơ bản hai bậc tự do, (c) Nối ghép ma sát quay giữa hai quán tính quay

Hai ví dụ trên hình 9.20(b) và 9.20(c) minh họa vận tốc tương đối có thể tạo ra như thế nào. Hai khối lượng đồng nhất với hai điểm vận tốc riêng trong các hệ này. Dùng mối nối 0 cho phép xây dựng *sự khác nhau về vận tốc* và trong mỗi trường hợp nó tạo ra vận tốc tương đối. Trong mỗi trường hợp vận tốc tương đối được biểu diễn bởi mối nối 1 và đó là then chốt để nhận dạng được rằng mối nối 1 chính là một điểm kết nối cho thành phần mô hình hóa cơ học cơ bản.

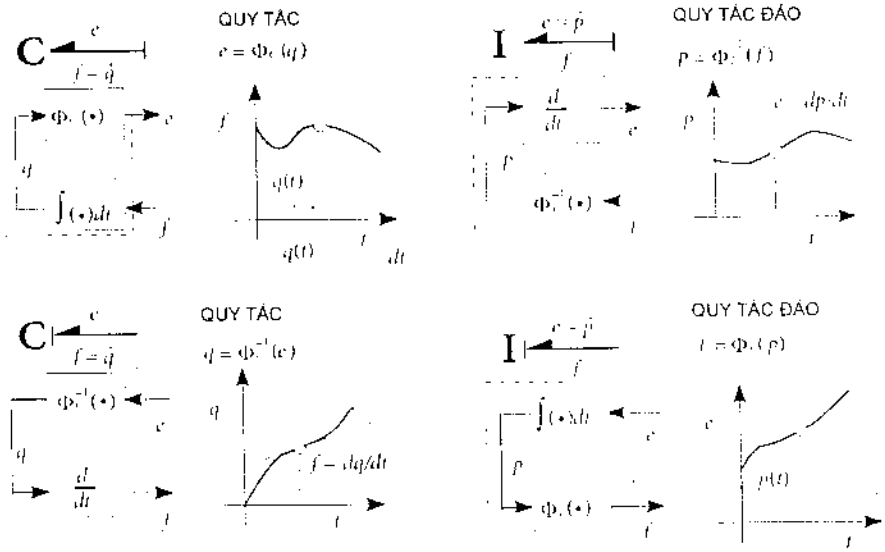
Sự ấn định và sử dụng tính nhân quả

Các sơ đồ kết nối mô tả các quyết định mô hình hóa đã được thực hiện như thế nào và các thành phần mô hình (**R**, **C**,...) được kết nối như thế nào. Một kết nối công suất biểu diễn dòng công suất và ấn định quy ước công suất dùng nửa mũi tên là phần chính tạo lập sơ đồ tiện dụng cho mô hình hóa. Quy ước dấu để biểu diễn tổng đại số của các biến thế và dòng tại các mối nối 0 và 1. Công suất nói chung được ghi dấu dương khi đi vào các thành phần bị động (điện trở, điện dung, quán tính) và nó thường an toàn và luôn luôn phù hợp với quy ước này. Quy ước dấu đòi hỏi nhất quán và xem xét thận trọng các điều kiện tham chiếu mà đôi khi có một số ý kiến có tính chất chủ quan không giống như định nghĩa của các hướng tham chiếu trong sơ đồ vật thể tự do.

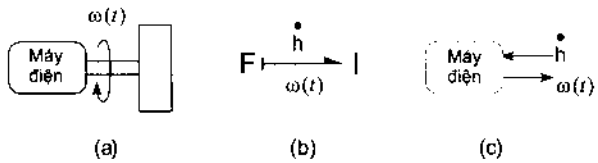
Tính nhân quả bao gồm sự mở rộng sơ đồ kết nối, nhưng độc lập thực sự với quy ước dòng công suất. Như đã thảo luận trước đây, một sự ấn định được làm trên mỗi kết nối chỉ ra mối quan hệ đầu vào đầu ra của các biến thế-dòng. Sự ấn định của nhân quả theo một tập hợp các quy luật rất chặt chẽ. Một mô hình hệ đã được ấn định thành công nhân quả trên tất cả các kết nối sẽ thông tin đầy đủ khả năng giải được của các phương trình toán học cơ bản. Để hiểu điều đó đến từ đâu,

ta có thể bắt đầu bằng việc kiểm tra các nội dung của bảng 9.4 và 9.5. Các bảng này chỉ dẫn dạng tích phân của các thành phần tích lũy năng lượng. Một thành phần tích lũy năng lượng ở trong dạng tích phân nếu nó được ấn định nhân quả tích phân. Nhân quả tích phân suy ra rằng biến đầu vào nhân quả (thế hoặc dòng) dẫn đến điều kiện trong đó trạng thái của năng lượng được tích lũy trong phần tử ấy có thể được xác định chỉ bằng cách lấy tích phân luật tốc độ cơ bản. Như chỉ ra trong bảng 9.7, nhân quả tích phân đối với thành phần **I** suy ra thế là đầu vào, trong khi đó nhân quả tích phân đối với thành phần **C** suy ra dòng là đầu vào.

BẢNG 9.7 Bảng tổng hợp nhân quả đối với các thành phần tích lũy năng lượng



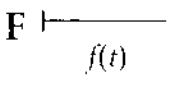
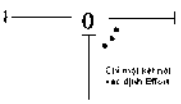
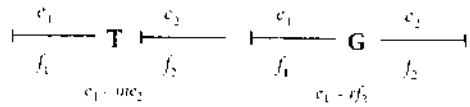
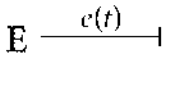
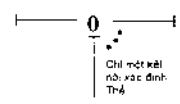
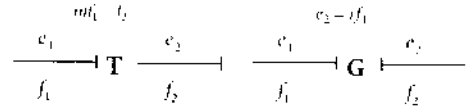
Như chỉ ra trong bảng này, tính nhân quả khác cho mỗi thành phần dẫn đến *nhân quả đạo hàm*, một điều kiện trong đó là trạng thái của thành phần tích lũy năng lượng được biết tức thời và như vậy có thể nói được là *phụ thuộc* vào biến đầu vào và ở trong trạng thái nhân quả phụ thuộc. Suy ra rằng các thành phần tích lũy năng lượng trong nhân quả tích phân đòi hỏi một phương trình vi phân (luật vận tốc) được giải ra để xác định giá trị của *biến trạng thái* (p hoặc q). Các thành phần tích lũy năng lượng trong nhân quả đạo hàm không đòi hỏi phương trình vi phân; tuy nhiên, chúng vẫn thể hiện sự hiện diện của mình qua phản ứng ngược. Ví dụ, nếu máy điện cho trên hình 9.21(a) giả thiết được dẫn động quán tính quay với vận tốc đã biết, ω, thì quán tính ở trong nhân quả đạo hàm. Cũng sẽ có sự thất thoát, nhưng bài toán này được đơn giản hóa để minh chứng cho các ứng dụng nhân quả. Năng lượng luôn luôn được biết vì $h = J\omega$ nên $T_h = h^2/2J$. Tuy nhiên, máy sẽ cảm nhận một mômen quán tính ngược $\dot{h}$, chừng nào có sự biến đổi đối với ω. Hiệu ứng này không thể bỏ qua được.



HÌNH 9.21 (a) Quán tính quay với một nguồn vận tốc; (b) Sơ đồ kết nối đơn giản với tính nhân quả; (c) Giải thích hiệu ứng ngược

Việc ấn định nhân quả trên một số thành phần mô hình hóa khác là rất riêng biệt, như chỉ ra trong bảng 9.8. Ví dụ, đối với các nguồn thế và dòng, đã hàm ý tính nhân quả. Trên bộ chuyển đổi và bộ hồi chuyển hai cổng, có hai sự sắp đặt nhân quả có thể cho mỗi bộ. Cuối cùng, đối với các mối nối 0 và 1, tính nhân quả cũng rất riêng biệt vì trong mỗi trường hợp chỉ một kết nối có thể định rõ thế và dòng.

BẢNG 9.8 Bảng hướng dẫn ấn định nhân quả

Nguồn	Kết nối	Phần tử kết hợp lý tưởng
		
		

Như những hướng dẫn, quy trình ấn định nhân quả cơ bản có thể kéo theo việc bảo đảm tất cả các kết nối là nhân quả đã ấn định [17, 32].

1. Đối với một hệ cho trước, Cần ấn định nhân quả cho mọi nguồn thế và dòng đối với mỗi nguồn cần ấn định nhân quả qua các mối nối 0 và 1 và các thành phần chuyển đổi hoặc hồi chuyển. Tính nhân quả cần được mở rộng qua mô hình đến một điểm ở đó không có hàm ý ấn định. Lặp lại quy trình này đến khi tất cả các nguồn đã được ấn định nhân quả.
2. Ấn định nhân quả cho thành phần **C** hoặc **I** nào đó, cần cố gắng ấn định nhân quả tích phân nếu có thể. Đối với mỗi việc ấn định, cần truyền nhân quả qua hệ như được yêu cầu. Lặp lại quy trình này đến khi tất cả các thành phần tích lũy được ấn định nhân quả.
3. Thực hiện bất kỳ những ấn định nhân quả cuối cùng trên các thành phần **R** mà chưa được ấn định nhân quả qua các bước 1 và 2 và lại truyền nhân quả như được yêu cầu. Sự ấn định bất kỳ nào trên thành phần **R** sẽ chỉ rõ sự cần thiết giải một phương trình đại số.
4. Cần ấn định các kết nối còn lại một cách tùy ý, mở rộng mỗi trường hợp khi cần thiết.

Tính nhân quả có thể cung cấp thông tin về sự vận hành của hệ. Theo nghĩa này, sơ đồ kết nối cung cấp một hình ảnh như thế nào các đầu vào của một hệ dẫn đến các đầu ra nào đó. Việc dùng tính nhân quả với một sơ đồ kết nối thay thế cho việc ấn định chuyển động nhân quả trong một hệ. Loại thông tin này cũng hữu ích để hiểu một hệ có thể tách ra thành các môđun để mô phỏng như thế nào hoặc nó có thể khẳng định các giới hạn vật lý thực của các thành phần. Việc hoàn thành ấn định nhân quả trên một sơ đồ kết nối cũng sẽ phát hiện thông tin về khả năng giải được của mô hình hệ. Dưới đây là các kết quả mấu chốt từ việc ấn định nhân quả:

- Ấn định nhân quả sẽ phát hiện bậc của hệ, nó bằng số thành phần tích lũy năng lượng độc lập (tức là số thành phần với nhân quả tích phân). Biến trạng thái (p hoặc q) đối với thành phần bất kỳ như vậy sẽ là một trạng thái của hệ và một phương trình vi phân bậc nhất sẽ cần thiết để mô tả trạng thái này phát triển theo thời gian như thế nào.
- Việc ấn định nhân quả bất kỳ nào đó trên thành phần **R** chỉ rõ tồn tại một vòng đại số. Số các ấn định tùy ý có thể liên quan đến số các phương trình đại số cần thiết trong mô hình.

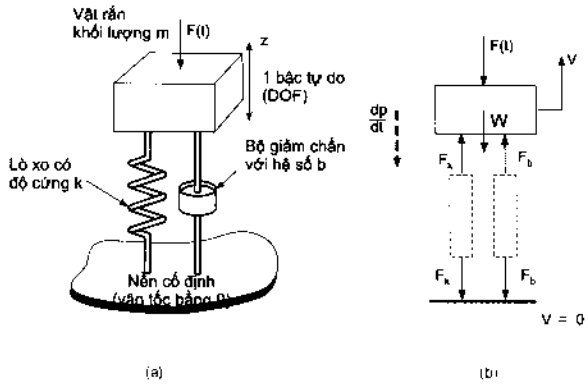
Phát triển mô hình toán học

Các mô hình toán học đối với các hệ cơ học tham số tập trung sẽ nhận dạng các phương trình vi phân thường liên kết hoặc, đối với hệ tuyến tính hay tuyến tính hóa, các hàm truyền giữa các biến quan tâm và các đầu vào của hệ. Dạng mô hình toán học này hợp với ứng dụng và người ta

sẵn sàng chuyển đổi giữa các dạng khác nhau. Một phương pháp truyền thống phát triển mô hình toán học này sẽ bao gồm việc áp dụng định luật thứ hai của Newton trực tiếp cho mỗi vật thể dưới tác dụng của các lực và các mômen lực. Nói chung, kết quả nhận được là một phương trình vi phân thường bậc hai cho mỗi vật trong một hệ. Phương pháp khác là dùng các phương trình Lagrange, đối với động lực học nhiều chiều, trong đó các vật có thể có dạng tổ hợp các chuyển động tĩnh tiến và chuyển động quay, các khảo sát bổ sung như sẽ được thảo luận trong mục 9.6. Ở mục này hãy xét các hệ trong đó vật thể vừa chuyển động tịnh tiến vừa chuyển động quay.

Khối lượng-lò xo-giảm chấn: Phương pháp truyền thống

Hệ cơ học cơ bản bao gồm một vật rắn có thể chuyển động tịnh tiến theo hướng z được chỉ ra trên hình 9.22(a). Hệ này được mô hình hóa bằng cách dùng một khối lượng, một lò xo và một giảm chấn, còn một lực $F(t)$ tác dụng trực tiếp vào khối lượng.



HÌNH 9.22 Hệ khối lượng-lò xo-giảm chấn cơ bản: (a) Sơ đồ (b) Giản đồ vật tự do

Một giản đồ vật thể tự do trong phần (b) chỉ ra các lực tác dụng lên hệ. Lò xo và giảm chấn sinh ra lực F_k và F_b tác dụng vào khối lượng và chính các lực này cũng tác dụng lên nền cố định vì lò xo và giảm chấn được giả thiết không có khối lượng. Một thành phần của trọng lượng W, được thêm vào dọc theo trục của chuyển động. Khi đó tổng các lực tác dụng là $\Sigma F = F(t) + W - F_k - F_b$. Mũi tên nét cách kí hiệu "lực quán tính" bằng tốc độ biến thiên của động lượng theo hướng z, p_z hoặc $dp_z / dt = \dot{p}_z = m\dot{V}_z$. Thành phần này nói chung được dùng trong công thức D'Alembert, người ta có thể coi lực này như lực chống lại tác dụng của các lực đặt vào để tăng tốc vật thể. Nói chung có thể coi lực quán tính như một "lực tác dụng", đặc biệt khi tiến hành phân tích cơ bản (xem chương 3 hoặc chương 6 của [23]).

Định luật thứ hai của Newton liên hệ tốc độ biến đổi của động lượng với lực tác dụng $\dot{p} = \Sigma F$, nên $\dot{p}_z = F(t) + W - F_k - F_b$. Để rút ra mô hình toán học, lập một hệ tọa độ cơ bản với hướng dương của trục z hướng lên trên. Nhớ lại các quan hệ cấu thành đối với mỗi một thành phần mô hình hóa, ở đây được giả thiết là tuyến tính, $p_z = mV_z$, $F_k = kz_k$ và $F_b = bV_b$. Trong mỗi thành phần này, vận tốc tương ứng V hoặc dịch chuyển z phải được xác định. Khối lượng có vận tốc $V_z = \dot{z}$, liên quan tới tọa độ tham chiếu quán tính. Lò xo và giảm chấn có cùng vận tốc tương đối vì một mút của mỗi thành phần này gắn với khối lượng còn mút kia gắn với nền. Sự thay đổi độ dài lò xo là z, còn vận tốc là $\dot{z} - V_{\text{nền}}$. Tuy nhiên $V_{\text{nền}} = 0$ vì nền cố định, vì vậy, đặt các kết quả đó cùng với định luật hai của Newton ta có $m\ddot{z} = F(t) + W - kz - b\dot{z}$. Một phương trình vi phân thường bậc hai (ODE) đối với hệ một bậc tự do là:

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = F(t) + W$$

Trong ví dụ riêng biệt này, nếu W được bỏ qua thì z là dao động quanh vị trí cân bằng tĩnh, $z_{tĩnh} = W/k$.

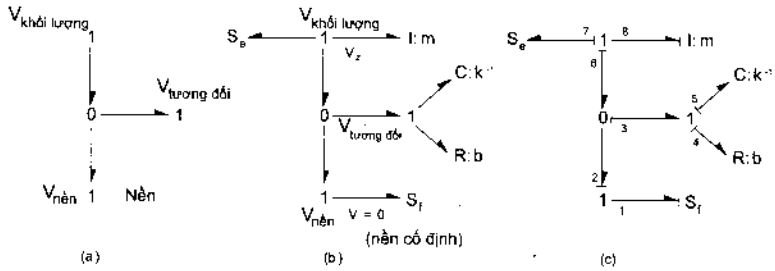
Nếu cần có hàm truyền thì phép biến đổi Laplace đơn giản dẫn đến (giả thiết các điều kiện đầu bằng không đối với chuyển động quanh $z_{tĩnh}$):

$$\frac{Z(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k}$$

Ví dụ hệ khối lượng-lò xo-giảm chấn đơn giản minh họa rằng các mô hình có thể được đưa ra cho các hệ cơ học bằng cách ứng dụng trực tiếp các kiến thức của động học và các định luật Newton. Khi các hệ có dạng phức tạp hơn do số vật thể hoặc do tương tác của nhiều loại hệ (thủy lực, cơ điện,...), thì nên dùng các công cụ đã được phát triển để dùng cho phát triển mô hình. Trong mục sau, các bài toán hệ nhiều vật và các phương pháp phân tích sẽ được thảo luận một cách ngắn gọn. Vấn đề thường được bàn cãi là lợi ích của sơ đồ kết nối, nó chỉ có thể thấy được khi hệ đa năng lượng và rất phức tạp được phân tích. Điều đó không nhất thiết vì người phân tích hệ cơ điện tử có thể thấy rằng việc mô tả nhất quán và lợi ích nhân quả rất thuận tiện trong việc phân tích nhiều loại hệ vật lý khác nhau. Hãy ghi nhớ điều đó vì các phương pháp sơ đồ kết nối cơ bản này được dùng để kiểm tra lại hệ khối lượng-lò xo-giảm chấn đơn giản.

Khối lượng-lò xo-giảm chấn: Phương pháp sơ đồ kết nối

Hình 9.23 minh họa sự phát triển của mô hình sơ đồ kết nối đối với hệ khối lượng-lò xo- giảm chấn. Trong phần (a), các điểm vận tốc khác nhau được nhận dạng và khớp 1 được dùng để biểu diễn chúng trên sơ đồ kết nối. Ngay cả khi nền có vận tốc bằng không và không có dòng công suất đi vào và đi ra khỏi điểm này thì cũng thuận lợi để nhận dạng nó tại điểm này. Vận tốc tương đối được tạo lập khi dùng mối nối 0 và chú ý rằng tất cả các kết nối đã được áp dụng quy ước đánh dấu, nên tại mối nối 0, $V_{khối\ lượng} - V_{tương\ đối} - V_{nền} = 0$, cho ta $V_{tương\ đối} = V_{khối\ lượng} - V_{nền}$ như thường thấy.



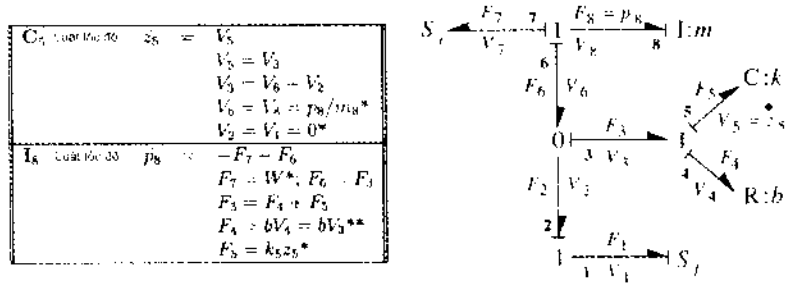
HÌNH 9.23 Hệ khối lượng-lò xo-giảm chấn cơ bản: (a) Nhận dạng các mối nối 1 vận tốc, (b) Gắn các thành phần mô hình, (c) Ấn định tính nhân quả

Các thành phần của mô hình cần thiết để biểu diễn hệ được nối vào mối nối 1, như chỉ ra trên hình 9.23(b). Hai nguồn được yêu cầu, một là biểu diễn lực tác dụng (thế S_e) do trọng lượng và nguồn thứ hai biểu diễn vận tốc cơ sở cố định (nguồn dòng S_f). Nguồn dòng được gắn trực tiếp vào mối nối 1 (kết nối thêm có thể không kể đến). Thành phần **I** biểu diễn khối lượng, thành phần **C** biểu diễn lò xo, còn thành phần **R** biểu diễn sự tiêu hao trong bộ giảm chấn. Chú ý rằng khối lượng và nguồn thế được nối vào mối nối 1 như thế nào khi biểu diễn vận tốc khối lượng (trọng lượng luôn chịu tác dụng ở vận tốc này). Lò xo và giảm chấn được nối qua kết nối công suất đến vận tốc tương đối giữa khối lượng và nền.

Cuối cùng trên hình 9.23(c) tám kết nối được ghi nhãn và tính nhân quả được ấn định. Đầu tiên, nguồn cơ bản cố định ấn định nhân quả trên mối nối 1, định rõ vận tốc tại mối nối 1 và như vậy hạn chế nhân quả của mối nối 2 để có thế trong mối nối 1. Vì mối nối 2 không định rõ thế trong mối nối 0 nên việc ấn định nhân quả cần thực hiện nguồn khác và nguồn thế ấn định nhân quả trên kết nối 7. Kết nối này không định rõ dòng ở mối nối 1 liền kề, nên tại điểm này ta cần tìm

các nguồn xác định khác. Vì không có nên ta ấn định nhân quả cho các thành phần tích lũy năng lượng nào đó có tính nhân quả tích phân phù hợp. Kết nối 8 được ấn định để cho nhân quả tích phân thành phần **I** (xem bảng 9.7), nên định rõ vận tốc ở mối nối 1 và như vậy hạn chế kết nối 6. Tại điểm này các kết nối 6 và 2 định rõ dòng trong mối nối 0, vì vậy kết nối 3 còn lại phải định rõ thế. Điều đó thực hiện tốt vì bây giờ kết nối 3 định rõ dòng trong mối nối 1 còn lại (vận tốc tương đối), cái đó xác định vận tốc trong các thành phần **C** và **R.** Đối với thành phần **C** điều đó cho tính nhân quả tích phân.

Tóm lại, tính nhân quả được ấn định, không có mâu thuẫn nhân quả (tức là hai kết nối cố gắng định rõ vận tốc trong mối nối 1). Cả hai thành phần tích lũy năng lượng đều có nhân quả tích phân. Điều đó chỉ ra rằng các trạng thái đối với **I** (khối lượng) và **C** (lò xo) sẽ tham gia đóng góp vào các biến trạng thái của hệ. Quy trình này đảm bảo vectơ trạng thái cỡ tối thiểu, trong trường hợp này nó có bậc hai (hệ bậc hai). Hình 9.24 chỉ ra sơ đồ kết nối được chú thích đầy đủ, với các biến lực-vận tốc đánh dấu mỗi kết nối. Trạng thái cho thành phần **I** là mômen động lượng, trong trường hợp này động lượng tịnh tiến của khối lượng p_8. Đối với thành phần **C** biến dịch chuyển là trạng thái z_5, ở đây biểu diễn thay đổi chiều dài của lò xo. Vectơ trạng thái là $\mathbf{x}^T = [p_8, z_5]$.



HÌNH 9.24 Rút ra phương trình cho khối lượng-lò xo-giảm chấn. Dấu '*' chỉ rằng các quan hệ này được rút gọn về các hàm trạng thái hoặc đầu vào. A'**' chỉ ra biến trung gian có thể rút gọn về '*' ở nơi nào đó

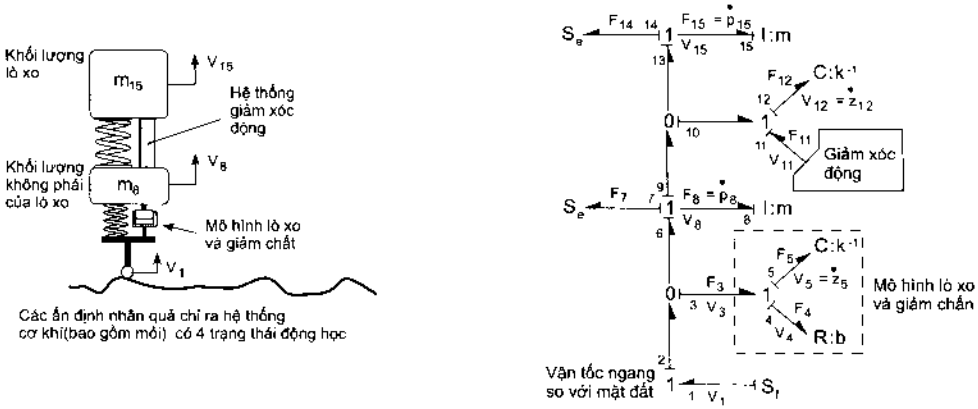
Mô hình toán học có thể đưa ra bằng cách sử dụng sơ đồ kết nối này, tập trung vào các thành phần tích lũy năng lượng độc lập. **Định luật tốc độ** (xem bảng 9.4 và 9.5) đối với mỗi thành phần tích lũy năng lượng trong nhân quả tích phân tạo thành một **phương trình trạng thái** vi phân thường bậc một đối với hệ này. Để thiết lập các phương trình này, vế phải của mỗi luật vận tốc phải chỉ là một hàm của trạng thái hoặc các đầu vào cho hệ. Quá trình này được tóm tắt trong bảng trên hình 9.24. Chú ý rằng ví dụ này giả thiết các mối quan hệ tạo thành tuyến tính đối với các thành phần này, nhưng rõ ràng rằng trong quá trình này điều đó không nhất thiết. Tất nhiên, trong một số trường hợp tính phi tuyến làm phức tạp sự phân tích cũng như quá trình mô hình hóa trong cách khác.

Hệ giảm xóc chủ động của một phần tư (¼) xe ô tô: Phương pháp sơ đồ kết nối

Hệ khối lượng-lò xo-giảm chấn đơn giản tạo nên một cơ sở cho xây dựng mô hình phức tạp hơn. Một mô hình đối với dao động đứng của một hệ giảm xóc của một phần tư (¼) xe ô tô được chỉ ra trên hình 9.25. Mô hình sơ đồ kết nối minh họa việc sử dụng mô hình khối lượng-lò xo-giảm chấn, mặc dầu có một số sự thay đổi cần thiết. Trong trường hợp này, nền chuyển động với vận tốc bằng vận tốc thẳng đứng của mặt phân cách giữa đường và lốp xe (cái đó đòi hỏi hiểu biết về độ cao địa hình tại khoảng cách di chuyển và tốc độ dọc theo đường của xe). Hướng công suất đã thay đổi trên nhiều kết nối với nhiều công suất dương hướng từ đường đến hệ giảm xóc.

Hệ giảm xóc chủ động được tách ra để minh họa tốt hơn xem mô hình hóa sơ đồ kết nối giúp cho phương pháp môđun để nghiên cứu các hệ phức tạp như thế nào. Điểm đạt nhất là mô hình đồng nhất quan hệ nhân quả đòi hỏi tại giao diện với sự treo chủ động, định rõ rằng vận tốc tương đối là một đầu vào nhân quả và lực là đầu ra nhân quả của hệ giảm xóc chủ động. Lực chủ động được dùng để cấu thành lực bằng và ngược chiều trên các thành phần treo và không treo.

Sự ấn định nhân quả nhận dạng bốn trạng thái (hai trạng thái động lượng và hai trạng thái dịch chuyển của lò xo). Bốn phương trình trạng thái bậc nhất có thể được đưa ra khi dùng các luật vận tốc của mỗi một thành phần tích lũy năng lượng độc lập ($\mathbf{C}_5$, $\mathbf{I}_8$, $\mathbf{C}_{12}$, $\mathbf{I}_{15}$). Tại điểm này, phụ thuộc vào các mục tiêu phân tích, hoặc là các phương trình phi tuyến được rút ra (nó có thể chứa lực giảm xóc chủ động phụ thuộc vào vận tốc đầu vào), hoặc là phương trình tuyến tính hóa có thể được phát triển và các phương pháp trở kháng được ứng dụng để trực tiếp rút ra hàm truyền.



HÌNH 9.25 Ví dụ mô hình dao động đứng trong mô hình treo một góc xe ô tô với thành phần treo chủ động. Ví dụ này xây dựng trên mô hình khối lượng-lò xo-giảm chấn đơn giản và chỉ ra tích hợp cơ cấu chấp hành trong cấu trúc mô hình sơ đồ kết nối

Lưu ý về một số khó khăn trong những phương trình dẫn xuất

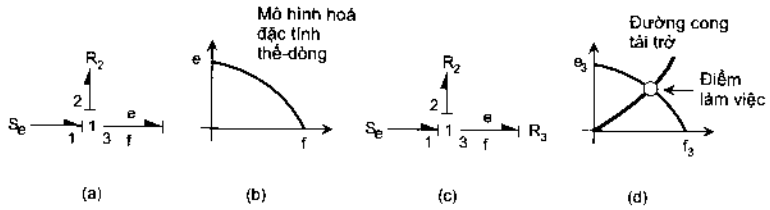
Hai tình huống thường gặp dẫn đến những khó khăn trong việc phát triển mô hình toán học. Những vấn đề phát sinh đối với bất kỳ phương pháp nào và không rõ ràng trong các sơ đồ kết nối. Cả hai điều này dẫn đến một tình huống là cần có phương trình đại số bổ sung vào phương trình dẫn xuất và nó có thể không dễ dàng đạt được dạng đóng. Có vài cách thay đổi mô hình để loại bỏ những vấn đề này, nhưng nó có thể đưa thêm vào những bài toán phụ. Hai bài toán là (1) nhân quả phát sinh, và (2) những vòng lặp đại số. Cả hai vấn đề đều có thể tìm thấy trong ấn định nhân quả để một vấn đề có thể tìm ra trước khi tiêu tốn quá nhiều thời gian.

Việc xuất hiện nhân quả phát sinh có thể sử dụng bảng 9.7 để mô tả trong sơ đồ kết nối. Vấn đề là, trạng thái của một thành phần lưu trữ năng lượng (**I** hoặc **C**) phụ thuộc vào hệ chứa gắn với nó. Điều này ngụ ý rằng không cần giải phương trình vi phân để tìm trạng thái. Cần thấy rằng vẫn cần tính toán hiệu ứng phản hồi mà hệ thống bắt thành phần đưa vào trạng thái đã cho. Ví dụ, một khối lượng chuyển động với vận tốc V, rõ ràng chúng ta biết trạng thái năng lượng của nó là $p = mV$. Tuy nhiên, lực quán tính được tính là, $\dot{p} = m\dot{V} = ma$. Nhiều khi, có thể giải bài toán này bằng phương pháp đại số có tính đến hiệu ứng của thành phần này (mức độ khó phụ thuộc vào độ phức tạp của hệ). Đôi khi, các trạng thái phụ thuộc phát sinh do hệ không được mô hình hóa chi tiết và đầy đủ. Ví dụ, chèn vào giữa hai bánh răng một vật bổ sung sự phụ thuộc bị loại bỏ. Điều này có thể giải quyết vấn đề; mà giá duy nhất phải trả là đưa vào thêm một trạng thái bổ sung. Một trở ngại nghiêm trọng của cách tiếp cận này sẽ xuất hiện nếu vật bổ sung nhỏ, do đó dẫn đến những vấn đề số do độ cứng (sử dụng phương pháp giải số hiện đại, thậm chí bài toán này có thể bỏ qua). Có một cách khác để giải bài toán nhân quả phát sinh trong hệ cơ học là dùng cách tiếp cận Lagrange cho các mô hình hệ cơ học. Điều này sẽ được nói đến trong phần 9.7.

Một khó khăn khác có thể phát sinh khi phát triển hệ phương trình có thể giải được là sự xuất hiện của một vòng lặp đại số. Những vòng lặp đại số tương đối dễ phát sinh ra, đặc biệt trong các sơ đồ khối dùng mô hình môi trường. Thật vậy, những vòng lặp đại số thường xuyên phát sinh do những quyết định trong lập mô hình và với cách này, một nguyên nhân của sơ đồ kết nối cung cấp

sự phản hồi nhanh cảnh báo khả năng giải quyết của hệ thống. Vòng lặp đại số ngụ ý rằng có một cách tùy ý để tính toán trong mô hình và cách này tự khám phá khi một quyết định tùy ý được đưa ra trong sự gán nguyên nhân cho một thành phần **R**.

Ví dụ, xem xét mô hình cơ bản trong tài liệu Thevenin ở hình 9.26(a), mô hình này sử dụng một nguồn thế và một thành phần kháng để mô hình một dòng thế (trạng thái dừng) đường cong đặc trưng, như đường cong mômen lực-tốc độ của một động cơ hay môtơ hoặc đường cong lực-vận tốc của một cơ cấu chấp hành tuyến tính. Một đặc tính điển hình trình bày trong hình 9.26(b). Khi một kháng tải đặt lên điểm này như hình 9.26(c), mô hình là đại số thuần túy. Khi nguyên nhân được gán vào, lưu ý rằng sau khi áp dụng hiệu ứng nguyên nhân lên liên kết 1, có hai thành phần kháng tồn tại. Việc gán nguyên nhân là tùy ý. Lời giải đòi hỏi phân tích những quan hệ đại số với điểm hoạt động bằng cách áp dụng biểu đồ như hình 9.26(d).



HÌNH 9.26 Đường đại số trong một mô hình tải đơn giản

Đây là một ví dụ đơn giản để chỉ ra cách dùng sơ đồ kết nối tìm những vòng lặp đại số và giải pháp yêu cầu giải những mối quan hệ đại số như thế nào. Trong những hệ phức tạp có thể khó sử dụng cách này. Một số trường hợp có thể thêm vào hay loại trừ những thành phần "ký sinh", có nghĩa là những thành phần có thể bỏ qua do ảnh hưởng quá nhỏ. Dầu sao, những thành phần này có thể làm giảm đi những nguyên nhân ràng buộc. Trong khi điều này có thể quyết định bài toán, như trong trường hợp nhân quả phát sinh, có những trường hợp như phần giới thiệu về bài toán độ cứng số. Trong một số trường hợp, lời giải có thể tìm được bằng phương pháp năng lượng như trong mục tiếp theo.

9.5 Phương pháp năng lượng để mô hình hoá hệ cơ học

Phần này miêu tả các phương pháp sử dụng các hàm năng lượng để mô tả những thành phần mang năng lượng cơ bản trong những hệ cơ học cũng như một cách mô tả sự thu thập trong các phần tử lưu trữ năng lượng trong trường đa cổng. Các phương pháp năng lượng có thể làm đơn giản hoá việc phát triển mô hình, cung cấp các phương tiện đạt được những mối liên hệ cơ bản và cũng là cơ sở cho việc loại bỏ những vật chứa năng lượng phụ thuộc (xem phần sau). Việc giới thiệu những phương pháp này đặt nền tảng cho hệ phương trình Lagrange trong phần 9.7 như một cách tiếp cận chủ yếu cho hệ phương trình rút ra hoặc trong tổ hợp các dạng sơ đồ kết nối.

Các mô hình đa cổng

Những mô hình mang năng lượng và trở kháng được giới thiệu trong phần 9.3 đã được tổng kết trong bảng 9.2, 9.4 và 9.5 như những thành phần đa cổng. Trong phần này, chúng ta xem xét việc sử dụng các thành phần đa cổng trong mô hình các hệ cơ học và các phương pháp chung để đưa ra các mối tương quan cấu thành. Các phương pháp này áp dụng rất tốt cho những thành phần đơn cổng.

Một ví dụ về thành phần **C** với hai cổng như hình 9.12 được mô hình như một dầm công xôn có thể có cả biến dạng quay và tịnh tiến tại một đầu. Một thành phần hai cổng được dùng trong mô hình này bởi vì có hai cách độc lập để chứa thế năng trong dầm. Một điểm đặc trưng trong ví dụ này là mô hình dựa trên mối liên hệ giữa thế và các biến chuyển vị (trong trường hợp của thành phần dung kháng). Mô hình các thành phần đa cổng phát triển bằng cách này được phân loại như

các trường để phân biệt với các trường ẩn [17]. Các trường ẩn được định dạng bằng cách tập hợp các thành phần một cổng lưu trữ năng lượng với cấu trúc mối nối (ví dụ, 1, 0 và thành phần TF) để nhận dạng thành phần đa cổng.

Các trường hiện thông thường tìm được trực tiếp khi sử dụng các định luật vật lý, dựa vào những hiểu biết về các tính chất vật liệu và hình học ảnh hưởng đến quan hệ cấu thành cơ bản giữa các biến vật lý. Trong một vài trường hợp, các tính chất này có thể là hàm trạng thái, thật vậy, những trường hợp này đòi hỏi sự mô tả đa cổng, nó được sử dụng rộng rãi trong nhiều thiết bị trong thực tế, đặc biệt là các cảm biến và các cơ cấu đọc ghi. Mô hình đa cổng nên theo một cơ sở năng lượng chặt chẽ như được mô tả dưới đây.

Các hạn chế trên những quan hệ cấu thành

Các thành phần đa cổng lưu trữ năng lượng phải tuân theo hai hạn chế cơ bản nó cũng hữu dụng trong việc đưa ra những quan hệ năng lượng cơ bản. Những mô tả về lưu trữ năng lượng được tổng kết trong bảng 9.4 và 9.5 chỉ ra rằng tồn tại một hàm trạng thái năng lượng, $E = E(\mathbf{x})$, với **x** hoặc là chuyển vị suy rộng **q** cho phần tử dung kháng **C** hoặc là động năng suy rộng **p** cho phần tử quán tính (**I**). Với thành phần lưu trữ năng lượng đa cổng, đặc điểm kỹ thuật yêu cầu những đặc điểm sau [2, 3].

1. Tồn tại một quy luật vận tốc, $\dot{x} = u_i$, ở đây u_i xác định là nhân quả tích phân đưa vào cổng i.
2. Năng lượng lưu trữ trong một thành phần đa cổng xác định như sau:

$$E(x) = \int \sum_{i=1}^{n} y_i dx_i \tag{9.5}$$

3. Một sự hạn chế đầu tiên với quan hệ cấu thành đa cổng đòi hỏi đầu ra nhân quả ở bất kỳ cổng nào được đưa ra là:

$$y_i = \Phi_{si}(\mathrm{x}) = \frac{\partial E(\mathrm{x})}{\partial x_i} \tag{9.6}$$

với $F_{si}()$ là hàm đơn trị.

4. Hạn chế thứ hai với quan hệ cấu thành đa cổng là đòi hỏi các mối quan hệ cấu thành tuân theo tính đảo Maxwell hoặc:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 E(\mathrm{x})}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \tag{9.7}$$

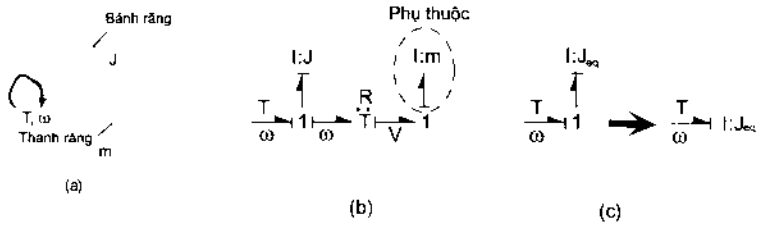
Dẫn xuất các quan hệ cấu thành

Hạn chế đầu tiên với các quan hệ cấu thành, phương trình (9.6), là việc lập các quan hệ cơ bản như thế nào để có thể đưa ra cho một thành phần đa cổng nếu một hàm năng lượng có thể được lập nên. Hạn chế này định hình căn bản cho một phương pháp được sử dụng nhiều trong những ứng dụng thực tế để tìm những mối quan hệ cấu thành từ các hàm năng lượng (ví dụ năng lượng biến dạng, cơ điện,...). Những phương pháp này giả thiết rằng ít nhất một trong những quan hệ cấu thành cho một thành phần đa cổng chứa năng lượng được đưa ra. Do đó hàm năng lượng được thiết lập bằng phương trình (9.5), sau khi hoán vị các phép tính tích phân và tổng:

$$(\mathrm{x}) = \sum_{i=1}^{n} \int y_i dx_i = \int y_1 dx_1 + {}^{\circ} + \int y_n d \tag{9.8}$$

Giả thiết y_1 là các hàm trạng thái đã biết, $y_i = \Phi_{si}(\mathrm{x})$. Do thành phần là bảo toàn, bất kỳ trạng thái năng lượng nào cũng có thể đạt tới bằng một cách thuận tiện khi $dx_i = 0$ với mọi $i \neq 1$. Điều này cho phép xác định $E(\mathrm{x})$.

Để minh họa, hãy nghiên cứu cơ cấu bánh răng, thanh răng đơn giản như hình 9.27. Bánh răng có quán tính quay J quanh trục quay và thanh răng có khối lượng m. Dễ dàng tính được động năng trong trường hợp này. Bánh răng có vận tốc góc ω và thanh răng có vận tốc V liên hệ với nhau bằng biểu thức $V = R\omega$ với R là bán kính cơ sở của bánh răng. Nếu hệ con này được mô hình hóa trực tiếp, ta sẽ thấy một trong hai quán tính thành phần (bánh răng, thanh răng) sẽ là nhân quả dẫn xuất. Có thể nói đó là mong muốn để nối hệ này xuyên qua cổng quay T - ω. Để định dạng một thành phần đơn cổng **I** chứa thanh răng, đồng năng lượng-động năng $T = T(\omega, V) = J\omega^2/2 + mV^2/2$, hãy sử dụng quan hệ ràng buộc để viết, $T = T(\omega) = (J + mR^2)\omega^2/2$. Để tìm mối quan hệ cấu thành cho thành phần quay một cổng ta lấy đạo hàm $h = \partial T(\omega)/\partial\omega = (J + mR^2)\omega$, ở đây chúng ta có thể xác định mômen quán tính tương đương $J_{eq} = J + mR^2$.



HÌNH 9.27 (a) Hệ thanh răng và bánh răng với mômen quay đầu vào. (b) Mô hình một chiều, chỉ ra khối lượng phụ thuộc. (c) Mô hình tương đương, bắt nguồn từ việc sử dụng nguyên lý năng lượng

Ví dụ hệ bánh răng và thanh răng minh họa một phương pháp cơ bản để làm giảm nhân quả dẫn xuất, nó có thể được dùng để xây dựng các mô hình thành phần cơ bản lưu trữ năng lượng. Một vài bài toán có thể nảy sinh khi động năng phụ thuộc vào cấu hình của hệ. Trong trường hợp này, một phương pháp hệ thống sử dụng hệ phương trình Lagrange thích hợp hơn (xem phần 9.7).

Cách tiếp cận được trình bày ở đây nhằm tìm ra những mối quan hệ cấu thành cũng giống như định lý Castigliano [6, 9]. Định lý Castigliano dựa trên các hàm năng lượng biến dạng với các biến là lực hoặc mômen cũng như dùng các hàm đồng thế năng. Đặc biệt là tìm các kết quả chuyển vị (tịnh tiến, quay) và các hàm thế (lực, mômen). Trong những trường hợp trên, các hàm này được tính bằng cách lấy đạo hàm riêng của các hàm đồng năng lượng theo lực và mômen. Định lý Castigliano rất thích hợp trong việc tìm các hàm lực-chuyển vị cho các cấu trúc dầm có góc cạnh [6].

Thiết lập công thức sử dụng các hàm năng lượng để tìm những mối quan hệ cấu thành được dùng trong nhiều lĩnh vực khác, một vài tham khảo như [21] cho cơ điện và [17] ứng dụng trong mô hình sơ đồ kết nối.

Kiểm tra các quan hệ cấu thành

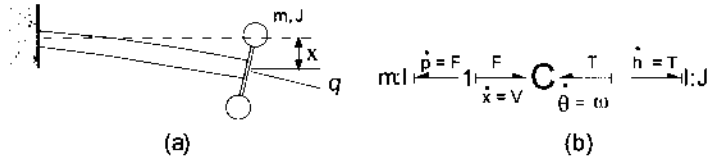
Sự hạn chế thứ hai của các quan hệ cấu thành, phương trình (9.7) cung cấp một cơ sở để thử nghiệm hay kiểm tra nếu các mối liên hệ là đúng. Đây là một điều kiện đảo, nó kiểm tra năng lượng bảo toàn trong mô hình thành phần lưu trữ năng lượng và kiểm tra nhanh hệ cơ học tuyến tính để tìm ra hoặc ma trận quán tính hoặc ma trận độ cứng phải đối xứng.

Xem lại ví dụ dầm công xôn hai cổng trong hình 9.12 với chuyển vị nhỏ. Đối với chuyển vị nhỏ tại đầu dầm và góc dịch chuyển dưới tác dụng của lực và mômen xoắn có thể đưa vào (sử dụng các hệ số ảnh hưởng dẻo), nó có thể biểu diễn dưới dạng ma trận:

$$\begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} = \frac{1}{EI}\begin{bmatrix} \frac{1}{3}l^3 & \frac{1}{2}l^2 \\ \frac{1}{2}l^2 & l \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} = \mathrm{C}\begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} = \mathrm{K}^{-1}\begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix}$$

Trong đó, **C** và **K** là các ma trận độ mềm và ma trận độ cứng. Mối quan hệ cấu thành này thỏa mãn tính đảo Maxell khi $\partial x/\partial T = \partial\theta/\partial F$. Thành phần hai cổng C được dùng để mô hình hóa hệ được trình bày trong hình 9.28(a) bao gồm một thanh chuông gắn cứng vào đầu dầm. Dưới tác dụng của biến dạng nhỏ, một sơ đồ kết nối trình bày trong hình 9.28(b) được dựng lên. Hệ quả được áp dụng cho hệ này chỉ ra mỗi cổng của thành phần hai cổng **C** có hệ quả tích hợp. Trong thành phần lưu trữ năng lượng đa cổng, mỗi cổng độc lập với hệ quả được gán giống như các quy tắc với thành phần một cổng. Nếu một thành phần đa cổng được gắn nguyên nhân, một phần của hệ phương trình trạng thái bị nghịch đảo. Sự khó khăn đại số có thể tránh tốt nhất là bằng cách thử gán các nguyên nhân tích hợp lên tất cả các thành phần đa cổng trong mô hình nếu có thể.

Trong ví dụ này, khởi gán nguyên nhân lên thành phần **I** cũng là tích phân. Tổng kết có bốn thành phần lưu trữ năng lượng độc lập và ở đây có bốn biến trạng thái $x = [x, \theta, p, h]^T$. Bốn phương trình trạng thái rút ra bằng các luật vận tốc như trong hình 9.28.



HÌNH 9.28 Mô hình dầm đỡ cứng một thanh hay khối tạ: (a) sơ đồ, (b) mô hình sơ đồ kết nối dùng một **C** hai cổng để biểu diễn dầm. Quả tạ được biểu diễn bằng khối lượng tịnh tiến *m* và một quán tính quay *J*

9.6 Động lực học vật rắn đa chiều

Mô phỏng các vật thể trong các hệ cơ học với giả thiết một vật rắn có thể quay và chuyển động tịnh tiến. Và trong trường hợp này những tính chất động lực học phức tạp hơn nhiều so với chất điểm. Trong những phần trước, một vật rắn đơn giản đã được trình bày và nó đặc biệt hữu dụng cho loại bài toán quay quanh một trục cố định.

Trong vật rắn, khoảng cách giữa hai thành phần khối lượng bất kỳ trên một vật rắn là không đổi. Trong một số trường hợp, nó thuận lợi để xét sự phân bố liên tục của khối lượng trong khi ở một hệ các phần tử rắn riêng biệt khác được cố định với nhau nhằm hỗ trợ khái quát vấn đề. Trong phần sau, các tính chất của vật rắn có thể tìm được bằng sự tổng hợp tất cả các thành phần rời rạc, trong khi các công thức tích phân được dùng trong khái niệm khối lượng liên tục. Bất kỳ cách nào những khái niệm cơ bản và các quan hệ dẫn đến phân tích động lực học vật rắn cũng được dùng. Cuối cùng mô hình hóa trong hầu hết các hệ cơ khí được giới hạn trong cơ học Newton, ở đó hệ thức tuyến tính vận tốc-động lượng được tuân thủ (năng lượng và đồng năng lượng bằng nhau).

Động học của vật rắn

Phần này trình bày ngắn gọn những tính toán chuyển động ba chiều của vật rắn. Mục tiêu là đưa ra những phương pháp phân tích chuyển động quay của vật rắn quanh một trục cố định và những phương pháp phân tích chuyển động tương đối của vật rắn sử dụng các trục quay và tịnh tiến. Những khái niệm này trình bày cơ sở để tìm hiểu những công thức phức tạp hơn. Trong khi mô tả vectơ (ký hiệu bằng một mũi tên bên trên một ký tự $\vec{a}$) là rất hữu dụng trong nghiên cứu các vấn đề cơ bản, thì dạng ma trận là thích hợp hơn với những hệ vật rắn phức tạp. Những trình bày ngắn gọn ở đây và các ví dụ có thể tìm ở những sách trình bày về động lực học (ví dụ [23]), ở đó có sự thảo luận riêng cho trường hợp đặc biệt của chuyển động phẳng.

Chuyển động quay của một vật rắn quanh một điểm cố định

Những khái niệm cơ bản trình bày ở đây liên quan đến chuyển động của một vật rắn quanh một điểm cố định. Chuyển động cơ bản này chỉ ra rằng mọi điểm thuộc vật đều nằm trên mặt một hình cầu có bán kính là khoảng cách từ điểm đó đến điểm cố định. Có thể nói vật rắn có chuyển động cầu.

Định lý Euler: Định lý Euler phát biểu rằng mọi di chuyển của vật có chuyển động dạng cầu đều có thể biểu diễn như một sự quay quanh một trục đi qua tâm của chuyển động cầu. Trục này có thể gọi là trục định hướng của phép quay [26]. Ví dụ, hai chuyển động quay quanh hai trục khác nhau đi qua một điểm cố định thì tương đương với một chuyển động quay quanh một trục đi qua điểm cố định đó.

Phép quay hữu hạn: Nếu các phép quay sử dụng định lý Euler là hữu hạn, thứ tự áp dụng là quan trọng bởi vì các phép quay hữu hạn không tuân theo định luật cộng vectơ.

Phép quay vô hạn: Những phép quay vô cùng bé có thể cộng vectơ theo thứ tự bất kỳ và điều này được xem là tổng quát khi xác định chuyển động vật rắn.

Vận tốc góc: Một vật quay góc $d\vec{\theta}$ quanh một điểm cố định sẽ có vận tốc góc $\vec{\omega}$ được xác định bằng đạo hàm theo thời gian $d\vec{\theta}/dt$ có cùng phương với $d\vec{\theta}$. Nếu vật thể gồm hai chuyển động quay thành phần với vận tốc góc $\vec{\omega}_1$ và $\vec{\omega}_2$, thì vật có vận tốc góc tổng hợp là: $\vec{\omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2$.

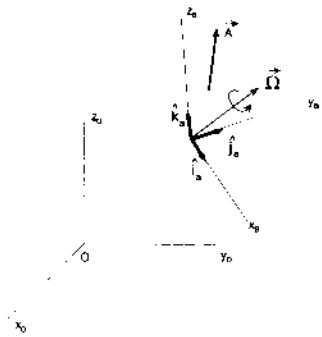
Gia tốc góc: Gia tốc góc của một vật được định nghĩa là đạo hàm theo thời gian của vận tốc góc, $\vec{\alpha} = d\vec{\omega}/dt$. Tổng quát, gia tốc không đồng phương với vận tốc.

Chuyển động của điểm trong vật: Cho biết $\vec{\omega}$, vận tốc của một điểm trên vật là $\vec{v} = \vec{\omega} x \vec{r}$, với $\vec{r}$ là vectơ định vị của điểm đó đối với điểm cố định mà vật quay quanh. Gia tốc của điểm được tính, $\vec{\alpha} = \vec{\alpha} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$.

Đạo hàm theo thời gian của vectơ tương đối trong các hệ toạ độ

Trường hợp thông thường là chúng ta cần xác định tốc độ biến đổi theo thời gian của vectơ như vectơ $\vec{A}$ trong hình 9.29 liên quan tới các hệ toạ độ khác. Có thể xác định dễ dàng vectơ $\vec{A}$ với các toạ độ x_a, y_a, z_a nhưng chúng ta cần tìm các giá trị của nó trong tọa độ x_0, y_0, z_0. Vectơ $\vec{A}$ được biểu diễn trên các trục x_a, y_a, z_a với các vectơ đơn vị như sau:

$$\vec{A} = A_x\hat{i}_a + A_y\hat{j}_a + A_z\hat{k}_a$$



HÌNH 9.29 Đạo hàm theo thời gian của $\vec{A}$ liên quan đến các trục x_0, y_0, z_0, giá trị của nó được cho trong hệ tịnh tiến-quay x_a, y_a, z_a

Để tìm tốc độ thay đổi theo thời gian, ta biết rằng trong hệ tọa độ quy chiếu chuyển động, đạo hàm theo thời gian của $\vec{A}$ là:

$$\left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_a = \frac{dA_x}{dt}\hat{i}_a + \frac{dA_y}{dt}\hat{j}_a + \frac{dA_z}{dt}\hat{k}_a$$

Đối với các trục x_0, y_0, z_0 hướng của các vectơ đơn vị $\hat{i}_a$, $\hat{j}_a$, $\hat{k}_a$ thay đổi do phép quay Ω nên:

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right) + A_x\frac{d\hat{i}_a}{dt} + A_y\frac{d\hat{j}_a}{dt} + A_z\frac{d\hat{k}_a}{dt}$$

$$\frac{d\hat{i}_a}{dt} = \vec{\Omega}\times\hat{i}_a, \quad \frac{d\hat{j}_a}{dt} = \vec{\Omega}\times\hat{j}_a, \quad \frac{d\hat{k}_a}{dt} = \vec{\Omega}\times\hat{k}_a$$

Vậy:

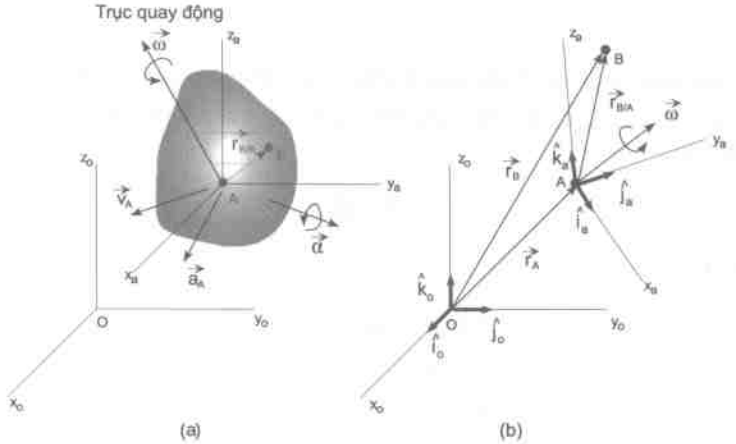
$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_a + \vec{\Omega}\times\vec{A} \tag{9.9}$$

Mối liên hệ này không chỉ có ích cho việc tính toán các đạo hàm mà còn cho cả việc mô tả các sơ đồ kết nối cơ sở. Điều này được trình bày trong phần "Động lực học vật rắn".

Chuyển động của vật so với một hệ tọa độ

Các trục toạ độ tịnh tiến

Gốc của các trục toạ độ x_a, y_a, z_a cố định trên vật tại A như hình 9.30(a) và tịnh tiến không quay đến các trục x_0, y_0, z_0 với vận tốc và gia tốc đã biết. Vật rắn chuyển động với vận tốc góc $\vec{\omega}$ và gia tốc góc $\vec{\alpha}$ trong không gian ba chiều.



HÌNH 9.30 Chuyển động tổng quát của một vật rắn (a) vật rắn với hệ toạ độ tịnh tiến (b) vật rắn với hệ toạ độ tịnh tiến và quay

Chuyển động của điểm *B* đối với *A*: Chuyển động của điểm B so với A là chuyển động quanh một điểm cố định. Nên $\vec{v}_{B/A} = \vec{\omega}\times\vec{v}_{B/A}$ và $\vec{a}_{B/A} = \vec{\alpha}\times\vec{r}_{B/A} + \vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r}_{B/A})$.

Chuyển động của điểm *B* với *O*: Với các trục chuyển động tịnh tiến, không quay, vận tốc và gia tốc của điểm B so với gốc O rất đơn giản, $\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A}$ và $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A}$:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega}\times\vec{r}_{B/A} \tag{9.10}$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{\alpha}\times\vec{r}_{B/A} + \vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r}_{B/A}) \tag{9.11}$$

Các trục tọa độ tịnh tiến và quay

Một cách tổng quát để mô tả chuyển động trong không gian ba chiều của vật rắn bằng việc sử dụng hệ tọa độ quay và tịnh tiến so với hệ trục thứ hai, như hình 9.30 (b). Các vectơ vị trí xác định điểm A và B trong vật tương quan với x_0, y_0, z_0 và các trục x_a, y_a, z_a có vận tốc góc $\vec{\Omega}$ và gia tốc góc $\dot{\vec{\Omega}}$. Vị trí của điểm B được tính như sau:

$$\vec{r}_B = \vec{r}_A + \vec{r}_{B/A} \tag{9.12}$$

Vận tốc và gia tốc được tính theo đạo hàm trực tiếp:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\Omega} \times \vec{r}_{B/A} + (\vec{v}_{B/A})_a \tag{9.13}$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}_{B/A} + \Omega \times (\Omega \times \vec{r}_{B/A}) + 2\Omega \times (\vec{v}_{B/A})_a + (\vec{a}_{B/A}) \tag{9.14}$$

Với $(\vec{v}_{B/A})_a$ và $(\vec{a}_{B/A})_a$ là vận tốc và gia tốc của điểm B so với A trong hệ trục x_a, y_a, z_a.

Những phương trình trên được áp dụng trong chuyển động phẳng của của vật rắn với $\vec{\Omega}$ và $\dot{\vec{\Omega}}$ có hướng không đổi. Trong không gian ba chiều, $\dot{\vec{\Omega}}$ phải được tính theo phương trình (9.9).

Dạng ma trận và các phương pháp chuyển hệ tọa độ

Một vectơ trong không gian ba chiều được biểu thị trên hệ tọa độ thuận phải x_a, y_a, z_a $\vec{A} = A_x\hat{i}_a + A_y\hat{j}_a + A_z\hat{k}_a$, có thể trình bày như sau:

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}_a = \begin{bmatrix} A_x & A_y & A_z \end{bmatrix}_a^{\mathrm{T}}$$

ở đây, các thành phần của vectơ cột biểu diễn hướng của vectơ trên các trục tọa độ. Ký hiệu $\underline{A}_a$ là vectơ cột tương quan với x_a, y_a, z_a. Có thể biểu diễn vectơ $\vec{A}$ trong hệ tọa độ quy chiếu khác x_b, y_b, z_b bằng ma trận chuyển:

$$\underline{A}_b = \underline{\overline{C}}_{ab}\underline{A}_a \tag{9.15}$$

với $\underline{\overline{C}}_{ab}$ là ma trận 3x3:

$$\underline{\overline{C}}_{ab} = \begin{bmatrix} cx_a x_b & cx_a y_b & cx_a z_b \\ cy_a x_b & cy_a y_b & cy_a z_b \\ cz_a x_b & cz_a y_b & cz_a z_b \end{bmatrix} \tag{9.16}$$

Các thành phần của ma trận này là các cosin của góc giữa các trục tọa độ tương ứng. Ví dụ, $cz_a y_b$ là cosin của góc giữa z_a và y_b. Đây là ma trận chuyển quay và trực giao:

$$C_{ab}^{-1} = C_{ab}^{\mathrm{T}} = C_{ba}$$

và với hệ tọa độ thuận phải, $C_{ab} = +1$.

Các biểu diễn góc của phép quay

Sáu bậc tự do cần thiết để mô tả chuyển động tổng quát của vật rắn được đặc trưng bằng ba bậc tự do tịnh tiến và ba tự do bậc quay. Mục đích ở đây là các phương pháp mô tả phép quay.

Định lý Euler (11) chứng minh rằng chỉ cần ba thông số xác định phép quay. Hai thông số định nghĩa trục quay và một thông số xác định góc quay quanh trục đó. Ba thông số này xác định ba bậc tự do của vật rắn. Ba thông số quay này giúp xây dựng ma trận quay $\overline{\underline{C}}$. Sau đây ta thảo luận về việc xây dựng ma trận quay hay ma trận cosin chỉ hướng.

Phép quay tổng quát: Các vectơ đơn vị của hệ trục a, $\hat{u}_a$ có thể chuyển sang hệ trục b, với $\hat{u}_b = \overline{\underline{C}}_{ba}\hat{u}_a$. Có thể chỉ ra rằng ma trận cosin chỉ hướng có thể xây dựng theo công thức [30]:

$$\overline{\underline{C}} = \underline{\lambda}\underline{\lambda}^{\mathrm{T}} + (\overline{\underline{E}} - \underline{\lambda}\underline{\lambda}^{\mathrm{T}})\cos\psi - \overline{\underline{S}}(\underline{\lambda})\sin\psi \tag{9.17}$$

với $\overline{\underline{E}}$ là ma trận đồng nhất, $\underline{\lambda}$ là vectơ đơn vị, $\underline{\lambda} = [\lambda_1, \quad \lambda_2, \quad \lambda_3]^{\mathrm{T}}$ song song với trục quay, ψ là góc quay quanh trục đó [30]. Trong mối tương quan này, $\overline{\underline{S}}(\underline{\lambda})$ là ma trận phản đối xứng được định nghĩa như sau:

$$\overline{\underline{S}}(\underline{\lambda}) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix}$$

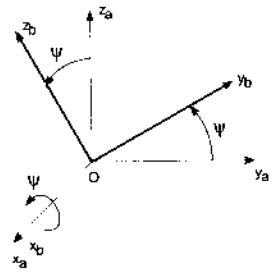
Các thành phần của $\overline{\underline{C}}$ có thể tìm bằng cách khai triển công thức trên, sử dụng $\overline{\underline{S}}(\underline{\lambda})$ ta được:

$$\overline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} (1-\cos\psi)\lambda_1^2 + \cos\psi & (1-\cos\psi)\lambda_1\lambda_2 + \lambda_3\sin\psi & (1-\cos\psi)\lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\sin\psi \\ (1-\cos\psi)\lambda_2\lambda_1 + \lambda_3\sin\psi & (1-\cos\psi)\lambda_2^2 + \cos\psi & (1-\cos\psi)\lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\sin\psi \\ (1-\cos\psi)\lambda_3\lambda_1 + \lambda_2\sin\psi & (1-\cos\psi)\lambda_3\lambda_2 + \lambda_1\sin\psi & (1-\cos\psi)\lambda_3^2 + \cos\psi \end{bmatrix} \tag{9.18}$$

Giá trị của công thức này là chứng tỏ rằng có những trục chính đặc trưng bởi $\underline{\lambda}$ và các góc quay ψ xác định hướng của vật. Những phép quay này mô tả các biến góc cổ điển bằng các phép quay cơ bản và có thể đưa ra hai trường hợp đặc trưng và thiết thực, được tạo thành từ hai trục quay riêng biệt liên tiếp.

Các phép quay cơ bản: Ba phép quay cơ bản được tạo thành khi trục quay (định nghĩa bằng vectơ riêng) trùng với một trong ba vectơ cơ sở xác định hệ tọa độ. Ví dụ, $\underline{\lambda} = [1, 0, 0]^{\mathrm{T}}$ xác định trục quay x, như hình 9.31, một phép quay cơ bản ϕ có ma trận quay:

$$\overline{\underline{C}}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$



HÌNH 9.31 Một phép quay cơ bản với góc ϕ quanh trục x

Hai phép quay cơ bản quanh các trục y và z như sau:

$$\underline{\overline{C}}_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \underline{\overline{C}}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ba ma trận quay cơ bản này có thể dùng liên tiếp để định nghĩa ma trận cosin chỉ hướng, ví dụ:

$$\underline{\overline{C}} = \underline{\overline{C}}_{z,\psi}\,\underline{\overline{C}}_{y,\theta}\,\underline{\overline{C}}_{x,\phi}$$

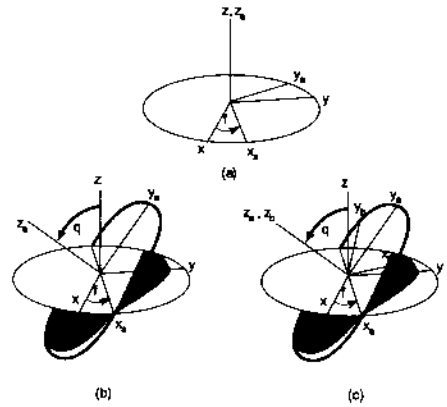
và các ma trận quay cơ bản và ma trận cosin chỉ hướng là trực giao:

$$\underline{\overline{C}} = \underline{\overline{C}}^{\mathrm{T}} = \underline{\overline{C}}^{\mathrm{T}}\,\underline{\overline{C}} = \underline{\overline{E}}$$

ở đây, $\underline{\overline{E}}$ là ma trận đơn vị. Do đó, nghịch đảo của ma trận quay hay ma trận tịnh tiến có thể tìm bằng nghịch đảo của $\underline{\overline{C}}^{-1} = \underline{\overline{C}}^{\mathrm{T}}$.

Có thể chỉ ra có hai mô tả độc lập chuyển động quay (Tait-Bryan và Cardan), chúng cùng với mô tả chuyển động quay của Euler tạo thành các mô tả chuyển động quay nổi tiếng.

Các góc Euler: Các góc quay Euler được định nghĩa bằng một chuỗi phép quay riêng biệt. Xét một hệ tọa độ thuận định nghĩa bằng các vectơ cơ sở x, y, z như hình 9.32(a). Chuỗi quay liên tiếp bao gồm các phép quay quanh các trục theo trình tự sau: (1) ϕ quanh trục z, (2) θ quanh x_a, (3) ψ quanh z_b. Tập hợp các phép quay theo trình tự này được mô tả bằng các ma trận quay cơ bản sau:



HÌNH 9.32 Định nghĩa góc Euler (Theo Goklstein[11])

$$\underline{\overline{C}}_{z,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{\overline{C}}_{x_a,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad \underline{\overline{C}}_{z_b,\psi} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

các ma trận $\underline{\overline{C}}$ thể hiện các trục và các phép quay. Sử dụng các phép biến đổi này liên hệ với đại lượng $\underline{A}$ trong x, y, z với $\underline{A}_b$ trong x_b, y_b, z_b:

$$\underline{A}_b = \underline{\overline{C}}_{Euler}\,\underline{A} = \underline{\overline{C}}_{z_b,\psi}\,\underline{\overline{C}}_{x_a,\theta}\,\underline{\overline{C}}_{z,\phi}\,\underline{A}$$

ở đây $\underline{\overline{C}}_{Euler}$ như sau:

$$\underline{\underline{C}}_{Euler} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\phi - \sin\psi\cos\theta\sin\phi & \cos\psi\sin\phi + \sin\psi\cos\theta\cos\phi & \sin\psi\sin\theta \\ -\sin\psi\cos\phi - \cos\psi\cos\theta\sin\phi & -\sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\theta\cos\phi & \cos\psi\sin\theta \\ \sin\theta\sin\phi & -\sin\theta\cos\phi & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9.19)$$

Vì $\underline{\underline{C}}_{Euler}$ trực giao, chuyển đổi giữa hai hệ trục toạ độ là đơn giản khi ma trận đảo được tính đơn giản với chuyển vị của phương trình (9.19).

Trong một vài ứng dụng, điều mong muốn là lấy được các góc đưa ra ma trận cosin chỉ phương. Do đó, nếu biết được phần tử (3,3) của $\underline{\underline{C}}_{Euler}$, dễ dàng tìm được θ. Nhưng sẽ khó khi nghiên cứu các góc quay nhỏ. Nếu θ tiến tới không, có sự suy biến trong khi tìm giải ϕ và ψ, do đó xác định hướng của vật trở nên khó khăn. Bài toán cũng trở thành khó hiểu khi chuyển các vận tốc góc giữa các hệ toạ độ. Nếu bài toán tránh được trường hợp này (ví dụ θ không tiến tới không) thì các góc Euler có thể dùng để giải. Trong nhiều ứng dụng không thể chấp nhận vấn đề này có thể sử dụng những phương pháp khác, như phương pháp các thông số Euler sẽ được bàn tới.

Trong động lực học vật rắn cổ điển, ϕ được gọi là góc *tiến động*, θ là góc *chương động* và ψ là *góc quay*. Mối liên hệ giữa đạo hàm theo thời gian của các góc Euler, $\dot{\varphi} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T$ và vận tốc góc của vật thể $\underline{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x, & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}$ được tính bằng [11]:

$$\underline{\omega}_b = \underline{\underline{T}}(\underline{\varphi})\dot{\varphi} \quad (9.20)$$

ma trận chuyển, $\underline{\underline{T}}(\underline{\varphi})$ được tính như sau:

$$\underline{\underline{T}}(\underline{\varphi}) = \begin{bmatrix} \sin\theta\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ \sin\theta\cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \cos\theta & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nhắc lại là $\underline{\underline{T}}(\varphi)$ bị suy biến tại điểm $\theta = \pm\pi/2$.

Các góc Tail-Bryan hoặc Cardan: Các góc Tail-Bryan hoặc Cardan được thiết lập khi ba phép quay liên tiếp trên ba trục khác nhau. Ở đây trình bày các phép quay liên tiếp dùng trong động lực học máy bay và ô tô. Những góc này được thiết lập theo trình tự sau: (1) ϕ quanh trục z (sự lệch hướng), (2) θ quanh y_a (sự nhấp nhô), (3) ψ quanh trục đích x_b (sự lộn nhào), a và b ký hiệu cho bước thứ hai và ba trong một chuỗi liên tiếp ba bước hoặc ba trục (như đã sử dụng trong sự mô tả các góc Euler). Những phép quay này hình thành ma trận chuyển như sau:

$$\underline{A}_b = \underline{\underline{C}}\,\underline{A} = \underline{\underline{C}}_{x_b,\psi}\,\underline{\underline{C}}_{y_a,\theta}\,\underline{\underline{C}}_{z,\phi}\,\underline{A}$$

với:

$$\underline{\underline{C}}_{z,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{C}}_{y_a,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{C}}_{x_b,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & \sin\psi \\ 0 & -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}$$

và ma trận cuối cùng chuyển hệ tọa độ với các góc Tait-Bryan là:

$$\underline{\underline{C}}_{Tait-Bryan} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta \\ \sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi & \sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & \cos\theta\sin\psi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi & \cos\theta\cos\psi \end{bmatrix} \quad (9.21)$$

Một dạng tuyến tính hóa của $\underline{\underline{C}}_{Tait-Bryan}$ rút ra từ các góc Euler, nó rất hữu dụng trong vài bài toán phân tích và điều khiển. Ở đây tồn tại bài toán suy biến trong trường hợp θ tiến đến $\pm\pi/2$.

Với các góc Tait-Bryan, ma trận chuyển giữa $\dot{\varphi}$ và $\underline{\omega}_b$ được tính như sau:

$$\underline{\underline{T}}(\underline{\varphi}) = \begin{bmatrix} -\sin\theta & 0 & 1 \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ \cos\theta\cos\psi & -\sin\psi & 0 \end{bmatrix}$$

ma trận này sẽ suy biến tại $\theta = 0, \pi$.

Các thông số Euler và Quaternion

Các điều kiện suy biến trong các chuyển đổi hệ tọa độ với các góc Euler và Tait-Bryan có thể tránh được bằng cách sử dụng nhiều hơn một tập hợp tối thiểu các biến được tham số hóa (trừ ba góc). Tập hợp đáng chú ý nhất là các thông số Euler, hay là các đơn vị Quaternion. Có rất nhiều các khả năng, nhưng phương pháp bốn thông số này được áp dụng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm động lực học tàu vũ trụ/máy bay, rôbôt và động học và động lực học tính toán. Thuật ngữ "quaternion" được Hamilton nói đến khoảng năm 1840, nhưng Euler phát minh và sử dụng các thông số Euler từ 70 năm trước đó. Các Quaternion được Goldstein [11] nói đến và dùng trong động lực học vật rắn và điều khiển cho đến cuối những năm năm mươi, đầu sáu mươi [13, 14]. Ứng dụng của Quaternion được tìm thấy rộng rãi trong điều khiển không gian [38] cũng như tàu biển. Gần đây (hơn 20 năm về trước), những phương pháp này đã tìm được vị trí của nó trong mô tả chuyển động và điều khiển rôbôt [34] và động học và động lực học tính toán [14, 25, 26]. Tổng quan về quaternion và các thông số Euler được Wehage trình bày trong [37]. Quaternion và sự quay tuần tự và vai trò của nó ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, bao gồm cả cảm nhận và biểu đồ, là chủ đề trong cuốn sách của Kuipers [19]. Nội dung được trình bày có thể dẫn người đọc tới một lĩnh vực áp dụng lý thú mà ở đó có thể tìm thấy được các vấn đề nghiên cứu liên quan. Sau đây tổng quan ngắn được nêu như sau:

Quaternion: Quaternion được định nghĩa là tổng của một vô hướng, q_0 và một vectơ $\dot{q}$, hoặc:

$$q = q_0 + \dot{q} = q_0 + q_1\hat{i} + q_2\hat{j} + q_3\hat{k}$$

Có một môn đại số và giải tích đặc biệt để giải những đối tượng toán học dạng này [7, 19, 37]. Đại lượng liên hợp được định nghĩa như sau $q = q_0 - \dot{q}$.

Các thông số Euler: Các thông số Euler là các quaternion tiêu chuẩn hóa, do đó có cùng tính chất, đại số và giải tích. Một vectơ riêng chính của phép quay có một trị riêng bằng 1 và xác định trục quay Euler (xem định lý Euler và [11]), với góc quay α. Vectơ riêng $\underline{e} = [e_1, \quad e_2, \quad e_3]^T$, từ phương trình (9.17), ma trận cosin chỉ phương được tính như sau:

$$\underline{\underline{C}} = \underline{e}\underline{e}^T + (I - \underline{e}\underline{e}^T)\cos\alpha - \underline{\underline{S}}(\underline{e})\sin\alpha$$

với $\underline{\underline{S}}(\underline{e})$ là ma trận phản đối xứng. Các thông số Euler được định nghĩa như sau:

$$\underline{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha/2) \\ e_1\sin(\alpha/2) \\ e_2\sin(\alpha/2) \\ e_3\sin(\alpha/2) \end{bmatrix}$$

với:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

Tương quan các Quaternion và Ma trận chuyển hệ tọa độ: Ma trận cosin chỉ phương với các thông số Euler được xác định như sau:

$$\underline{\underline{C}}_q = (q_0^2 - \underline{q}^T\underline{q})\underline{\underline{E}} + 2\underline{q}\underline{q}^T - 2q_0\underline{\underline{S}}(q)$$

ở đây $\underline{q} = [q_1, \quad q_2, \quad q_3]^T$ và $\underline{\underline{E}}$ là ma trận đồng nhất. Ma trận cosin chỉ phương với các quaternion:

$$\underline{\overline{C}}_q = \begin{bmatrix} q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2 & 2(q_1q_2+q_3q_0) & 2(q_1q_3-q_2q_4) \\ 2(q_1q_2-q_3q_0) & q_0^2-q_1^2+q_2^2-q_3^2 & 2(q_2q_3+q_1q_4) \\ 2(q_1q_3+q_2q_0) & 2(q_1q_2+q_3q_0) & q_0^2-q_1^2-q_2^2+q_3^2 \end{bmatrix}$$

Ta dễ dàng tìm được các quaternion và các thành phần của ma trận cosin chỉ phương một cách độc lập bằng cách tích phân các vận tốc góc quanh các trục chính của vật thể. Có được các thành phần của ma trận cosin chỉ phương, ta có thể tìm được các quaternion và ngược lại. Quan tâm hơn về lý thuyết và ứng dụng, bạn đọc có thể đọc thêm tài liệu tham khảo.

Các tính chất động lực học của vật rắn

Các tính chất quán tính

Các mômen và tích của quán tính mô tả sự phân bố khối lượng trong vật thể tương quan với hệ tọa độ cho trước. Mô tả này dựa vào một hướng và hệ tọa độ quy chiếu xác định. Giả thiết rằng người đọc quen thuộc với các tính chất cơ bản như trọng tâm và mục tiêu ở đây là những tính chất cần thiết để hiểu được chuyển động tổng quát của vật rắn và động lực học vật quay nói riêng.

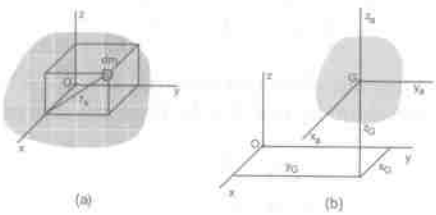
Mômen quán tính: Vật rắn như trong hình 9.33 (a), mômen quán tính của một thành phần, dm đối với bất kỳ trục tọa độ nào được định nghĩa bằng tích của khối lượng thành phần và bình phương khoảng cách từ thành phần đến trục đó. Như theo hình vẽ, $r_x = \sqrt{y^2 + z^2}$, sự phân bố mômen quán tính với trục x, I_{xx} của khối lượng dm như sau:

$$dI_{xx} = r_x^2 dm = (y^2 + z^2)dm$$

Tổng mômen quán tính I_{xx}, I_{yy} và I_{zz} được tính bằng tích phân biểu thức trên toàn bộ khối lượng m của vật thể. Tổng lại ba mômen quán tính với ba trục x, y, z được tính như sau:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \int_m r_x^2 dm = \int_m (y^2 + z^2)dm \\ I_{yy} &= \int_m r_y^2 dm = \int_m (x^2 + z^2)dm \\ I_{zz} &= \int_m r_z^2 dm = \int_m (x^2 + y^2)dm \end{aligned} \qquad (9.22)$$

Ghi nhớ rằng các mômen quán tính được định nghĩa bằng bình phương khoảng cách và các thành phần có khối lượng hữu hạn luôn là các đại lượng dương.



HÌNH 9.33 Các tính chất vật rắn được xác định qua cách phân bố như thế nào của khối lượng của vật đối với một hệ toạ độ xác định. (a) vật rắn dùng để mô tả tính chất mômen và tích quán tính. (b) vật rắn và các trục dùng để mô tả định lý trục song song và mặt phẳng song song

Tích quán tính: Tích quán tính của một thành phần vi phân dm được định nghĩa tương ứng với một tập hợp hai mặt phẳng trực giao như là tích của khối lượng thành phần và khoảng cách ngắn nhất giữa thành phần và các mặt phẳng. Ví dụ, ứng với mặt phẳng y-z và x-z (z là trục chung của những mặt phẳng này), sự phân bố của thành phần vi phân đến I_{xy} là dI_{xy} và bằng $dI_{xy} = xydm$.

Tương tự mômen quán tính, bằng cách tích phân toàn bộ khối lượng vật thể cho mỗi cặp mặt phẳng, tích quán tính như sau:

$$I_{xy} = I_{yx} = \int_m xy\,dm$$
$$I_{yz} = I_{zy} = \int_m yz\,dm \qquad (9.23)$$
$$I_{xz} = I_{zx} = \int_m xz\,dm$$

Tích quán tính có thể dương, âm hoặc bằng không, phụ thuộc vào dấu của các tọa độ xác định nghĩa các đại lượng. Nếu một hoặc cả hai cặp mặt phẳng vuông góc là mặt phẳng đối xứng với vật thể, tích quán tính sẽ bằng không. Về căn bản, các thành phần có khối lượng xuất hiện đối một ở hai phía của mặt phẳng đối xứng đối với mặt phẳng này.

Các định lý về trục song song và mặt phẳng song song: Định lý trục song song có thể dùng để chuyển mômen quán tính của vật thể từ một trục đi qua khối tâm về một trục song song đi qua một điểm khác (xem thêm phần "Tích động năng"). Thông thường, các mômen quán tính được biết với các trục cố định thuộc vật thể, như hình 9.33(b). Nếu trọng tâm được xác định với các tọa độ (x_G, y_G, z_G) theo các trục x, y, z, định lý trục song song có thể được dùng để tính mômen quán tính đối với các trục x, y, z như sau:

$$I_{xx} = (I_{xx})_a + m(y_G^2 + z_G^2)$$
$$I_{yy} = (I_{yy})_a + m(x_G^2 + z_G^2)$$
$$I_{zz} = (I_{zz})_a + m(x_G^2 + y_G^2)$$

ở đây, ví dụ, $(I_{xx})_a$ là mômen quán tính với trục x_a đi qua trọng tâm. Chuyển các tích quán tính yêu cầu dùng định lý mặt phẳng song song:

$$I_{xy} = (I_{xy})_a + mx_G y_G$$
$$I_{yz} = (I_{yz})_a + my_G z_G$$
$$I_{zx} = (I_{zx})_a + mz_G x_G$$

Tenxơ quán tính: Động lực học của vật quay dựa vào kiến thức về tính chất quán tính, nó hoàn toàn được xác định bằng chín thành phần trong tenxơ quán tính, trong đó sáu thành là phần độc lập. Tenxơ quán tính như sau:

$$\underline{\underline{I}} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & -I_{zz} \end{bmatrix}$$

và nó tương ứng với vị trí và hướng xác định của các trục tọa độ. Với một vật rắn, một gốc và hướng của các trục tọa độ có thể tìm được hệ trục toạ độ khác sao cho tenxơ quán tính là chéo hóa:

$$\underline{\underline{I}} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}$$

Hướng của các trục tọa độ này là các trục chính của mômen quán tính và các mômen quán tính chính $I_x = I_{xx}$, $I_y = I_{yy}$, $I_z = I_{zz}$ (một cái sẽ là cực đại còn cái thứ 3 là cực tiểu). Trong một vài trường hợp, hướng này có thể được xác định bằng cách kiểm tra. Ví dụ, nếu hai trong ba mặt phẳng trực giao là mặt phẳng đối xứng, thì các tích quán tính bằng không, như vậy điều này sẽ xác định các trục quán tính chính.

Hướng của các trục chính có thể hiểu như một bài toán trị riêng và điều này cho phép ta tìm được các hướng chính, như đã định nghĩa tenxơ quán tính theo hướng bất kỳ. Để biết chi tiết hơn về phương pháp này, xin xem thêm Crandall [8].

Mômen động lượng

Vật rắn trong hình 9.34, được xem là tập hợp các thành phần *i*, có khối lượng *m*. Mômen động lượng đối với điểm *A* được định nghĩa như sau:

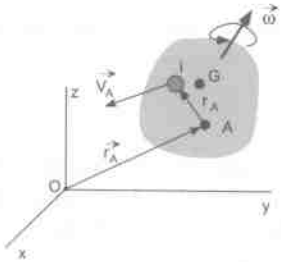
$$(\vec{h}_A)_i = \vec{\rho}_A \times m_i \vec{V}_i$$

với $\vec{V}_i$ là vận tốc đo được tương quan với quán tính khung. Do $\vec{V}_i = \vec{V}_A + \vec{\omega} \times \vec{\rho}_A$, nên:

$$(\vec{h}_A)_i = \vec{\rho}_A \times m_i \vec{V}_i = m_i \vec{\rho}_A \times \vec{V}_A + m_i \vec{\rho}_A \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho}_A)$$

Tích phân trên toàn bộ khối lượng vật thể, tổng mômen động lượng của vật là:

$$\vec{h}_A = (\int_m \vec{\rho}_A dm) \times \vec{V}_A + \int_m \vec{\rho}_A \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho}_A) dm \tag{9.24}$$



HÌNH 9.34 Vật rắn chuyển động tương đối đối với một hệ qui chiếu quán tính, *x, y, z*

Phương trình này có thể sử dụng để tìm mômen động lượng đối với một điểm bằng cách đặt điểm *A*: (1) cố định, (2) tại trọng tâm, (3) tùy ý trong vật thể. Dạng tổng quát trong trường hợp 1 và 2:

$$\vec{h} = \int_m \vec{\rho} \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho}) dm$$

Khi mở rộng dạng này theo ba thành phần *x, y, z* thì:

$$\vec{h} = h_x \hat{i} + h_y \hat{j} + h_z \hat{k} = \int_m (x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}) \times \left[(\omega_x \hat{i} + \omega_y \hat{j} + \omega_z \hat{k}) \times (x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}) \right] dm$$

cũng có thể mở rộng như sau:

$$\begin{aligned} h_x \hat{i} + h_y \hat{j} + h_z \hat{k} &= \left[\omega_x \int_m (y^2 + z^2) dm - \omega_y \int_m xy\, dm - \omega_z \int_m xz\, dm \right] \hat{i} \\ &= \left[-\omega_x \int_m xy\, dm + \omega_y \int_m (x^2 + z^2) dm - \omega_z \int_m yz\, dm \right] \hat{j} \\ &= \left[-\omega_x \int_m xy\, dm - \omega_y \int_m zy\, dm - \omega_z \int_m (x^2 + y^2) dm \right] \hat{k} \end{aligned}$$

Biểu thức mômen và tích quán tính có thể định nghĩa ở đây và biểu thức này dẫn đến ba thành phần mômen động lượng được viết dưới dạng ma trận:

$$\underline{h} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \underline{I}\,\underline{\omega} \tag{9.25}$$

Lưu ý trong trường hợp các trục là trục chính ta có biểu thức đơn giản hơn:

$$\vec{h} = I_{xx}\omega_x\hat{i} + I_{yy}\omega_y\hat{j} + I_{zz}\omega_z\hat{k}$$

Điều này chứng tỏ rằng khi vật quay quanh một trục song song với trục chính, vectơ mômen động lượng $\vec{h}$ song song với vectơ vận tốc góc. Trong trường hợp tổng quát thì điều này là không đúng (đã nói ở cuối phần "Các tính chất quán tính").

Mômen động lượng đối với điểm bất kỳ, trường hợp 3 là kết quả của mômen động lượng đối với khối tâm (một vectơ tự do) và mômen tịnh tiến với khối tâm:

$$\vec{p} = mV_x\hat{i} + mV_y\hat{j} + mV_z\hat{k} = m\vec{V}$$

hoặc:

$$\vec{h} = \vec{h}_G + \vec{r} \times \vec{p}$$

với $\vec{r}$ là vectơ định vị từ điểm tùy ý đến khối tâm *G*. Dạng này có thể mở rộng với các thành phần như phương tình (9.25).

Động năng của một vật rắn

Phần này trình bày một dạng động năng của vật rắn, từ quan điểm mô phỏng sơ đồ kết nối, động năng lưu trữ được mô tả bằng một thành phần **I**, phương trình (9.25) chứng minh rằng vật rắn có ít nhất ba cổng để lưu trữ năng lượng quay. Thêm vào ba bậc tự do tịnh tiến, một vật rắn có thể có đến sáu "cổng" độc lập lưu trữ năng lượng.

Một thành phần 3-cổng **I** có thể thay thế động năng quay trong trường hợp quay xung quanh một điểm cố định (không tịnh tiến). Mối tương quan chủ yếu là phương trình đơn giản (9.25). Động năng như sau:

$$T = \frac{1}{2}\vec{\omega} \cdot \vec{h}$$

với $\vec{h}$ là mômen động lượng với một tenxơ quán tính xác định quanh một điểm cố định. Nếu các trục là các trục chính, thì:

$$T = \frac{1}{2}I_x\omega_x^2 + \frac{1}{2}I_y\omega_y^2 + \frac{1}{2}I_z\omega_z^2$$

Tổng động năng của một vật rắn vừa quay vừa tịnh tiến với mômen động lượng đối với trọng tâm như sau:

$$T = \frac{1}{2}mV_G^2 + \frac{1}{2}\vec{\omega} \cdot \vec{h}_G$$

trong đó $V_G^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$.

Động lực học vật rắn

Khi cho biết những tính chất quán tính, động lượng, mômen động lượng và động năng của một vật rắn có thể mô tả động lực học vật rắn bằng việc sử dụng các phương trình chuyển động dựa trên định luật Newton. Các phương trình Euler cổ điển được giới thiệu ở đây và được dùng để chứng tỏ rằng việc mô tả sơ đồ kết nối có thể dùng để tích hợp các thành phần của vật rắn vào mô hình sơ đồ kết nối.

Những phương trình chuyển động cơ bản

Động lượng của vật rắn trong hình 9.30 $\underline{p} = m\underline{V}$, m là khối lượng, $\underline{V}$ là vận tốc khối tâm với ba thành phần liên quan đến hệ trục x_0, y_0, z_0. Trong chuyển động ba chiều, tổng lực (vectơ tổng các lực) trên vật quan hệ với tốc độ biến đổi động lượng theo định luật Newton:

$$\underline{F} = \frac{d}{dt}\underline{p}$$

Sử dụng phương trình 9.9, Có thể viết như sau:

$$\underline{F} = \frac{\partial \underline{p}}{\partial t}\Big|_{rel} + \underline{\Omega} \times \underline{p}$$

với $\underline{p}$ liên quan đến hệ trục chuyển động x_a, y_a, z_a và $\underline{\Omega}$ là vận tốc góc tuyệt đối của các trục quay.

Một biểu thức tương tự cũng có thể viết cho tốc độ biến đổi mômen động lượng, nó liên quan đến mômen lực $\underline{T}$:

$$\underline{T} = \frac{\partial \underline{h}}{\partial t}\Big|_{rel} + \underline{\Omega} \times \underline{h}$$

với $\underline{h}$ được xác định đối với hệ toạ độ chuyển động x_a, y_a, z_a.

Để sử dụng những mối quan hệ này một cách hiệu quả, chuyển động của các trục x_a, y_a, z_a phải chọn sao cho phù hợp với bài toán. Sự lựa chọn này thường dẫn đến ba trường hợp $\underline{\Omega}$ liên quan đến vận tốc góc $\underline{\omega}$ của vật.

1. $\underline{\Omega} = 0$. Nếu vật chuyển động tổng quát và các trục được chọn chuyển động tịnh tiến đối với khối tâm, trường hợp này sẽ dẫn đến một tập hợp các phương trình được đơn giản với $\underline{\Omega} = 0$, dù phải mô tả các thuộc tính quán tính của vật dưới dạng hàm của thời gian.
2. $\underline{\Omega} \neq 0 \neq \underline{\omega}$. Trong trường hợp này, các trục có vận tốc góc khác với vận tốc góc của vật, một dạng tiện lợi là khi các vật là đối xứng đối với các trục quay. Mômen quán tính và các tích quán tính sẽ là hằng số đối với các trục quay. Các phương trình trở thành:

$$\begin{aligned}
F_x &= m\dot{V}_x - mV_y\Omega_z + mV_z\Omega_y \\
F_y &= m\dot{V}_y - mV_z\Omega_x + mV_x\Omega_z \\
F_z &= m\dot{V}_z - mV_x\Omega_y + mV_y\Omega_x \\
T_x &= I_x\dot{\omega}_x - I_y\omega_y\Omega_z + I_z\Omega_y\omega_z \\
T_y &= I_y\dot{\omega}_y - I_z\omega_z\Omega_x + I_x\Omega_z\omega_x \\
T_z &= I_z\dot{\omega}_z - I_x\omega_x\Omega_y + I_y\Omega_x\omega_y
\end{aligned} \tag{9.26}$$

3. $\underline{\Omega} = \underline{\omega}$. Ở đây, các trục chuyển động cùng với vận tốc góc của vật. Mômen và các tích quán tính liên quan đến các trục chuyển động là hằng số. Một trường hợp đặc biệt tiện lợi nếu các trục được chọn là các trục quán tính chính (xem phần "Các thuộc tính quán tính"), nó đưa đến *hệ phương trình Euler*[3]:

$$\begin{aligned}
F_x &= m\dot{V}_x - mV_y\omega_z + mV_z\omega_y \\
F_y &= m\dot{V}_y - mV_z\omega_x + mV_x\omega_z \\
F_z &= m\dot{V}_z - mV_x\omega_y + mV_y\omega_x \\
T_x &= I_x\dot{\omega}_x - (I_y - I_z)\omega_y\omega_z \\
T_y &= I_y\dot{\omega}_y - (I_z - I_x)\omega_z\omega_x \\
T_z &= I_z\dot{\omega}_z - (I_x - I_y)\omega_x\omega_y
\end{aligned} \tag{9.27}$$

[3] Lần đầu tiên được phát triển bởi nhà toán học Euler người Thuỵ Sĩ.

Hệ phương trình chuyển động này có thể dùng để xác định lực và mômen lực gây ra chuyển động của vật. Các sách động lực học [12, 23] cung cấp nhiều ví dụ để phân tích trường hợp này. Một lựa chọn khác là những điều này có thể xem như sáu phương trình vi phân thường phi tuyến liên kết (ODEs). Trường hợp 3 (các phương trình Euler) có thể giải trong trường hợp viết lại như sáu phương trình ODEs bậc nhất. Một lời giải số có thể được áp dụng. Các chương trình phần mềm tính toán hiện đại đều giải được hệ phương trình này. Trường hợp 2 đòi hỏi phải có kiến thức về vận tốc góc của các trục quay $\underline{\Omega}$.

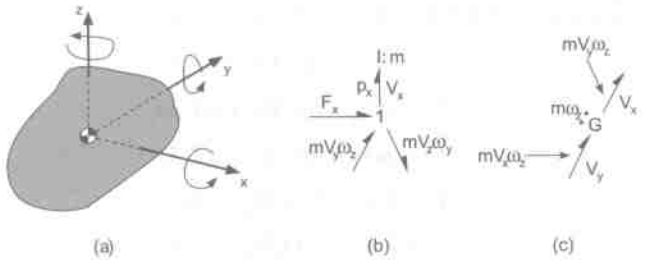
Nếu chuyển động quay cùng với chuyển động tịnh tiến do các lực và các mômen xoắn phải có mô hình động lực học. Một vài trường hợp cần phải sử dụng dạng sơ đồ kết nối, đặc biệt nếu có các thiết bị ghi đo và các cảm biến và các hệ đa năng lượng kết hợp.

Mô tả sơ đồ kết nối vật rắn

Phụ thuộc vào việc quay của vật, có hai cặp vốn có của chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay có thể tổng quát hoá dưới dạng sơ đồ kết nối. Xét trường hợp hệ phương trình Euler dạng (9.27). Động lực học tịnh tiến theo phương x:

$$F_x = \dot{p}_x - mV_y\omega_z + mV_z\omega_y$$

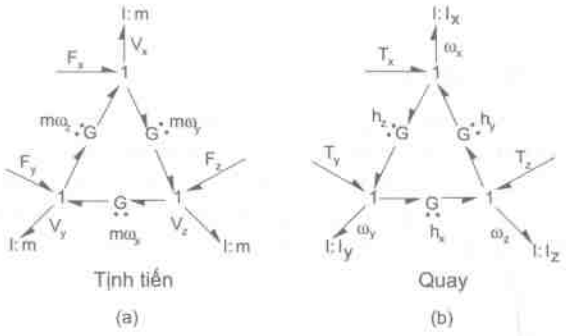
với $p_x = mV_x$ và F_x là tổng các lực ngoài tác động theo phương x. Phương trình này, tổng các lực (các thế) được trình bày trong sơ đồ kết nối, hình 9.35(b). Tất cả các lực này tác động với cùng vận tốc, V_x, đặc trưng bằng mối nối 1. Thành phần I biểu diễn sự lưu trữ động năng của vật thể theo phương x. Thành phần lực $mV_y\omega_z$ trong hình 9.35(b) gây ra do thành phần vận tốc theo hướng y, V_y và thành phần vận tốc góc ω_z. Hiệu ứng vật lý này là hồi chuyển tự nhiên và có thể nắm bắt bằng vật xoay như hình 9.35(c). Lưu ý rằng đây là con quay điều chỉnh (có thể xem như **MGY**) với một môđun hồi chuyển $r = m\omega_z$ (xác minh rằng các đơn vị này là lực).



HÌNH 9.35 (a) Vận tốc góc của vật rắn tương ứng với các trục x, y, z. (b) Mẫu sơ đồ kết nối của chuyển động theo hướng x. (c) Sự thực hiện hồi chuyển của ngẫu lực

Sáu phương trình chuyển động (9.27) có thể trình bày lại dưới dạng sơ đồ kết nối như hình 9.36. Lưu ý rằng hai sơ đồ kết nối này có dạng vòng. Lần đầu được Karnopp và Rosenberg đưa ra [18], nhận được hệ phương trình Euler một cách đầy đủ và đưa ra dạng biểu đồ để giúp nhớ các chuyển động vật rắn. Hệ phương trình Euler có thể mô tả đơn giản theo các bước sau: (1) đặt ba mối nối 1 thay cho các vận tốc góc quanh x, y, z (đánh dấu theo chiều kim đồng hồ) với các thành phần **I**, (2) giữa các mối nối 1 đặt một con quay được hiệu chỉnh bởi mômen quanh các trục được thay thế trực tiếp bằng mối nối 1 đối diện trong tam giác, (3) vẽ các mũi tên lực theo chiều kim đồng hồ. Bản phác thảo này sẽ đưa ra hệ phương trình Euler thông thường. Hệ phương trình tịnh tiến cũng mô tả được dễ dàng.

Những mô hình sơ đồ kết nối này minh họa cặp gắn kết thông qua điều chỉnh con quay. Ở đây có sáu thành phần **I** và mỗi thành phần đặc trưng cho một trạng thái năng lượng độc lập dưới dạng mômen $[p_x, p_y, p_z, h_x, h_y, h_z]$ hoặc như một sự lựa chọn, sự phân tích có thể nhằm vào các vận tốc liên hợp $[v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]$.

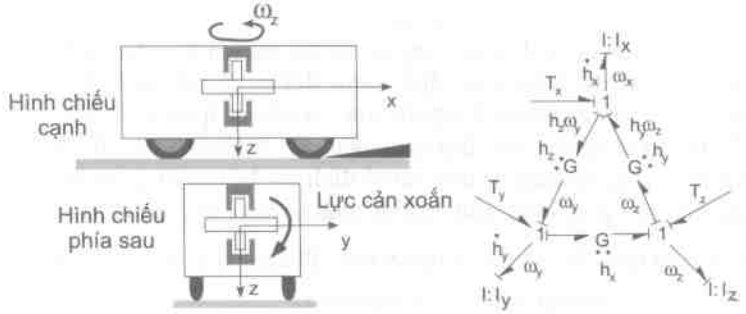


HÌNH 9.36 (a) Sơ đồ kết nối cho vật rắn tịnh tiến (b) Sơ đồ kết nối cho vật rắn quay

Nếu các lực, mômen lực được xem như các đầu vào, thông qua sơ đồ kết nối trình bày các F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z, từ đó ta có thể thấy tất cả các thành phần **I** đều được tích hợp nguyên nhân và vật sẽ có sáu trạng thái độc lập mô tả bằng sáu phương trình vi phân bậc một.

Ví dụ: toa xe - bánh đà

Một ví dụ để trình bày phương pháp sơ đồ kết nối của vật rắn miêu tả cơ học cơ bản được rút ra từ phương trình (9.27) và cách mô hình hình học trực quan như trong hình 9.37. Bánh đà được gắn trong toa xe và quay theo hướng như trong hình. Các trục cố định của vật thể được gắn trên xe với quy ước hướng dương của trục z chỉ xuống đất (thường dùng trong động lực học xe). Toa xe tiến lên dốc và câu hỏi ở đây là những lực nào tác dụng lên và những khả năng nào sẽ xuất hiện và những thông số, những biến nào là phụ thuộc.



HÌNH 9.37 Xe hai bánh với một bánh đà chứa quán tính và cứng tiếp cận một đoạn dốc

Sơ đồ kết nối cho chuyển động quay của bánh đà (giả thiết nó trội hơn hẳn trong bài toán này) được trình bày trong hình 9.37. Giả thiết mômen của bánh đà rất lớn, do đó chúng ta chỉ chú ý tới ảnh hưởng của nó. Tại mối nối 1 cho ω_x, cho $T_x = 0$ và ω_z quay theo hướng âm, bạn có thể thấy mômen xoắn $h_z\omega_y$ đặt lên hướng âm của trục x. Nó sẽ có khuynh hướng đẩy xe lăn về phía bên phải và các bánh xe sẽ tăng thêm lực pháp tuyến. Với mô hình đã trình bày, không khó khăn gì để thành lập một tập hợp đầy đủ hệ phương trình vi phân.

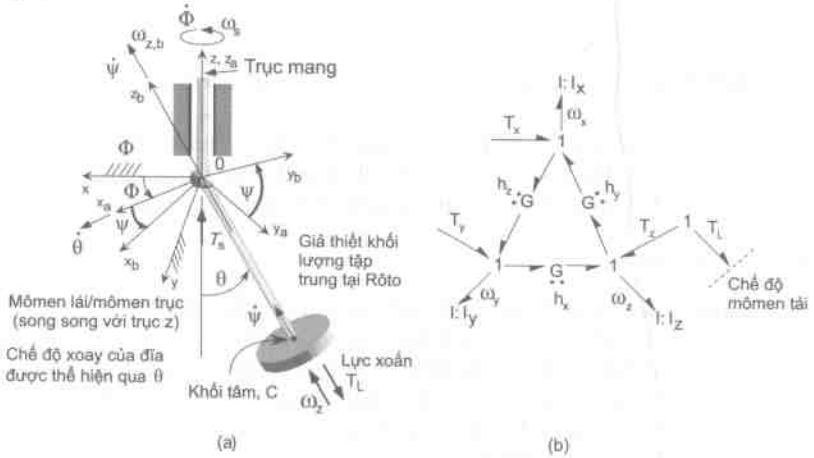
Sự cần thiết của các chuyển đổi hệ tọa độ

Trong ví dụ trên, giả thiết rằng các bánh trước của toa xe đặt lên dốc, bánh đà sẽ tác động trở lại do chuyển động tại gối đỡ. Quả thật, bánh đà gây ra mômen được truyền trực tiếp cho toa xe. Hệ phương trình và các sơ đồ kết nối cơ bản được phát triển thuận lợi nếu các lực, mômen lực tác dụng lên vật rắn đang quay quanh các trục (giả thiết cố định với vật). Hướng thay đổi, ý nói rằng cần thiết phải liên kết các hệ trục cố định trên vật hoặc các trục với hệ trục quán tính. Điều này được thực hiện với phép biến đổi toạ độ, nó gắn việc định hướng vật với hệ trục tọa độ mà nhờ đó

dễ dàng biết được chuyển động, lực tác dụng, hiểu và ứng dụng đo đạc được và áp dụng điều khiển có phản hồi.

Ví dụ: Động lực học mômen quay

Hình 9.38(a) minh họa một rôto công xôn có thể xoay tròn. Đây là một ví dụ tốt để mô tả sự cần thiết sử dụng các chuyển đổi hệ tọa độ biến đổi và sử dụng các góc Euler trong quá trình mô hình hóa. Vật quay theo hình nón và được mô tả bằng góc θ. Vectơ mômen lực T_s đồng phương với trục đỡ z còn x, y, z là hệ trục tọa độ quán tính. Sơ đồ kết nối trong hình 9.38(b) thể hiện chuyển động của rôto, được biểu diễn trong các hệ trục gắn cố định với vật x_b, y_b, z_b là hệ trục quán tính chính của rôto.



HÌNH 9.38 (a) Rôto công xôn với mối nối linh hoạt và trục rắn [36]. (b) Sơ đồ kết nối biểu diễn quay vật rắn của rôto

Vấn đề đầu tiên ở đây được nhận thấy là trong lúc sơ đồ kết nối đưa đến thiết lập mô hình rất thuận lợi thì T_s, mômen lực tác dụng được xác định tương đối so với hệ toạ độ quán tính x, y, z. Do đó cần phải biết mối quan hệ giữa chuyển động của rôto và hệ trục quán tính. Một vài vấn đề xuất hiện, trong đó có vấn đề độ cứng của rôto liên quan đến góc θ. Những vấn đề này là lý do để sử dụng các góc Euler liên hệ chuyển động hệ trục vật cố định với hệ tọa độ quán tính và đưa thêm ra ba phương trình trạng thái cho ϕ, θ, ψ (nó cần thiết để định hướng chuyển động).

Trong ví dụ này, thứ tự quay là (1) x, y, z (quán tính) đến x_a, y_a z_a với ϕ quanh trục z, $\dot{\phi} = \omega_s$, (2) x_a, y_a, z_a sang x_b, y_b, z_b với θ quanh trục x_a, (3) ψ quanh z_b.

Điều quan tâm chính của chúng ta là việc chuyển đổi từ x, y, z (quán tính) sang x_b, y_b, z_b (cố định trên vật). Theo cách này, chúng ta biểu diễn vận tốc góc trong hệ qui chiếu quán tính sử dụng phương trình (9.20) như sau:

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_b = \begin{bmatrix} \dot{\phi}\sin\theta\sin\psi + \dot{\theta}\cos\psi \\ \dot{\phi}\sin\theta\cos\psi - \dot{\theta}\sin\psi \\ \dot{\theta}\cos\theta + \dot{\psi} \end{bmatrix}$$

ở đây,chữ b nhỏ ở bên trái phương trình là ký hiệu các vận tốc góc tương đối với các trục x_b, y_b, z_b. Một sơ đồ kết nối đầy đủ và hoàn chỉnh cần bao gồm cả việc trình bày các phép biến đổi này (ví dụ, xem Karnoop, Margolis và Rosenberg [17]). Những mối nối 1 ở dạng hiện có thể dùng để nhận dạng các mối nối vận tốc tại điểm có lực và mômen lực tác dụng. Ví dụ, tại một mối nối 1 cho $\dot{\phi} = \omega_z$, T_s được đặt vào. Một sơ đồ kết nối được hoàn thành, đưa vào nguyên nhân sẽ dẫn đến các nhân quả tích hợp cho tất cả các thành phần **I** chịu lực và mômen lực như là các nguyên nhân đầu vào, một vấn đề này sinh với các góc Euler là xuất hiện sự suy biến (ví dụ tại điểm $\theta = \pi/2$).

Một cách phân tích khác là sử dụng các phương trình Lagrange trong phần 9.7 và trình bày ở [36] (xem trang 292). Với những hệ nhiều vật, việc tạo nên nhiều nối kết có thể có hiệu quả hơn và rõ ràng hơn cho những bài toán phức tạp [4, 35].

9.7 Phương trình Lagrange

Việc thảo luận về những phương pháp năng lượng tập trung vào việc tìm ra những quan hệ cấu thành cho các thành phần đa cổng lưu trữ năng lượng và điều này sẽ rất hữu dụng trong vài bài tập mô hình hóa. Trong những trường hợp mà điều kiện biên giữa các thành phần là holonomic và scleronomic (không chứa biến thời gian), các trường đa cổng ẩn có thể được lập (xem chương 7 [17]). Điều quan tâm chính xuất hiện là do sự tích năng lượng phụ thuộc và những phương pháp được trình bày có thể có được lời giải trong vài trường hợp thực tế. Nhưng có rất nhiều hệ cơ học có cấu hình hình học phức tạp. Phần này trình bày phương trình Lagrange sẽ áp dụng dễ dàng cho những cơ hệ này.

Có vài cách để giới thiệu, nhận được và sử dụng các phương pháp và khái niệm của phương trình Lagrange. Phần tổng kết được trình bày dưới đây giới thiệu những khái niệm cơ sở, sự tìm thấy đầy đủ có thể xem trong [11, 20]. Việc nhận được phương trình này bằng cách sử dụng phương pháp năng lượng và công suất được trình bày ở [3].

Phương trình Lagrange cũng rất quan trọng vì nó cung cấp một phương pháp thống nhất để mô hình hóa hệ từ những miền năng lượng khác nhau, giống như cách ứng dụng sơ đồ kết nối. Sử dụng các hàm năng lượng vô hướng và cấu hình hình học tối thiểu là lý do được nhiều người sử dụng. Phần trình bày dưới đây nói về những lợi ích chính thu được theo cách tiếp cận Lagrange trong mô hình hóa các hệ cơ học đặc biệt với cách tiếp cận sơ đồ kết nối. Một cách tiếp cận kết hợp những điểm mạnh của cả hai phương pháp và đưa ra phương pháp luận cho những hệ cơ học phức tạp trong dạng tổng hợp.

Cách tiếp cận cổ điển

Một phương pháp cổ điển để rút ra được phương trình Lagrange đòi hỏi khái niệm về chuyển vị ảo và công ảo để phân tích các hệ tĩnh [11]. Để bắt đầu, hệ phương trình Lagrange có thể dùng cho hệ động bằng cách sử dụng các nguyên lý Hamilton hay D'Alembert.

Ví dụ, một hệ gồm các chất điểm, định luật thứ hai của Newton cho khối lượng thứ i, $\mathbf{F}_i = \mathbf{p}_i$ được viết lại, $\mathbf{F}_i - \mathbf{p}_i = 0$. Lực được chia làm hai thành phần, lực tác dụng và lực liên kết, $\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^{(a)} + \mathbf{f}_i$. Nguyên tắc công ảo được ứng dụng lên toàn hệ, lưu ý lực liên kết $\mathbf{f}_i$ không sinh công nên bị loại bỏ dẫn đến nguyên lý D'Alembert [11]:

$$\sum_i (F_i^{(a)} - \dot{p}_i) \cdot \delta r_i = 0 \tag{9.28}$$

Điểm chính trong việc biểu diễn mối quan hệ này chỉ ra rằng: (a) lực liên kết không xuất hiện trong các phương trình (b) cần có những mối quan hệ chuyển đổi, trong trường hợp này, N tọa độ của các chất điểm, $\mathbf{r}_i$ và một tập hợp n **tọa độ suy rộng**, $\mathbf{q}_i$ độc lập với nhau (với các điều kiện holonomic):

$$\mathrm{r}_i = \mathrm{r}_i(q_1, q_2, \ldots q_n, t) \tag{9.29}$$

Chuyển về hệ tọa độ suy rộng, nguyên lý D'Alembert's trở thành [11]:

$$\sum_j \left[\left\{ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} \right\} - \mathrm{Q}_j \right] \delta q_j = 0 \tag{9.30}$$

T là động năng của hệ, $\mathbf{Q}_j$ là các lực thành phần.

Nếu quan hệ chuyển dời bị giới hạn là holonomic, các điều kiện liên kết là không xuất hiện trong các hệ thức chuyển đổi và các tọa độ độc lập là đảm bảo. Do đó, tất cả các thành phần chứa các di chuyển ảo độc lập, δq_j trong phương trình (9.30) cần phải triệt tiêu. Từ đây ta nhận được:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j \tag{9.31}$$

Những phương trình này trở thành hệ phương trình Lagrange theo cách phát triển sau. Hạn chế tất cả các lực tác dụng Q_j được tìm từ một hàm vô hướng $U = U(q_i, \dot{q}_i)$ và:

$$Q_j = -\frac{\partial U}{\partial q_j} + \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}\right)$$

Hàm Lagrange được định nghĩa như sau: $L = T - U$ và thay phương trình (9.31) sẽ tìm được n phương trình Lagrange:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = \mathrm{Q}_j \tag{9.32}$$

Bằng cách này nhận được n phương trình ODEs bậc hai với các biến q_i.

Ứng xử với các hiệu ứng không bảo toàn

Việc rút ra hệ phương trình Lagrange giả thiết trong phạm vi nào đó là hệ bảo toàn, nghĩa là tổng động năng và thế năng bằng hằng số. Đây không phải là một giả thiết giới hạn bởi vì quá trình xây dựng sơ đồ sẽ cung cấp phương pháp lấy ra các hiệu ứng không bảo toàn (các đầu vào, sự phát tán), sau đó để lắp ráp toàn hệ. Điều này là cần thiết để nhận thức rằng các hiệu ứng không bảo toàn có thể tích hợp được vào mô hình dựa trên phương trình Lagrange khi sử dụng Q_j. Kết hợp những lực này với tọa độ suy rộng bao hàm công đã được thực hiện và điều này phù hợp với nguyên lý bảo toàn năng lượng (chúng ta tính công toàn bộ thực hiện trên hệ). Các lực suy rộng ứng với một tọa độ q_i và do lực ngoài được tính từ công thức $Q_i = \delta W / \delta q_i$, W_i là công của các ngoại lực gây nên chuyển vị δq_i.

Sự mở rộng cho cơ hệ phi holonomic

Trong trường hợp các liên kết phi holonomic, các tọa độ q_i là phụ thuộc. Giả thiết có m ràng buộc phi holonomic $m \le n$. Nếu hệ phương trình có thể viết dưới dạng:

$$\sum_k \frac{\partial a_l}{\partial q_k} dq_k + \frac{\partial a_l}{\partial t} dt = \sum_k a_{lk} dq_k + a_{lt} dt = 0 \tag{9.33}$$

Ở đó l = 1,2,...,m, trong đó m là số phương t rình liên kết. Các phương trình Lagrange được thiết lập với nhân tử chưa xác định Lagrange λ_l. Ta có n tọa độ q_k nhưng n phương trình Lagrange viết dưới dạng [11]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = \sum_l \lambda_l a_{lk}, \quad k = 1, 2, ..., n \tag{9.34}$$

Bây giờ có thêm nhân tử Lagrange chưa xác định λ_l, nếu cần phải giải thêm m phương trình:

$$\sum_k a_{lk} \dot{q}_k + a_{lt} = 0 \tag{9.35}$$

Thành phần $\sum_i \lambda_i a_{ik}$ có thể hiểu là các lực suy rộng của các liên kết. Chúng là các liên kết không tiêu hao công. Các phương trình Lagrange chịu các liên kết phi holonomic có thể dùng để nghiên cứu các hệ holonomic và bằng cách này sẽ tính được các lực liên kết thông qua đánh giá các nhân tử Lagrange. Sử dụng phương trình Lagrange với các nhân tử Lagrange cho các mô hình phức tạp, các hệ nhiều vật được Haug trình bày trong [14].

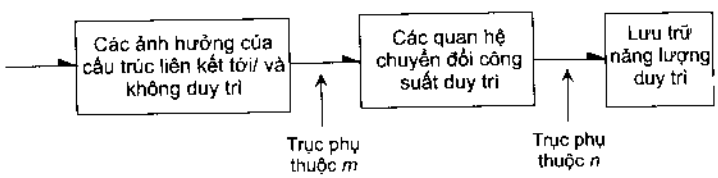
Sử dụng phương pháp Lagrange cho các cơ hệ con

Phần trước đã tổng kết việc lập và áp dụng phương trình Lagrange. Khi thiết lập các mô hình cho các hệ cơ học, những phương pháp này là rất hiệu quả. Phương trình Lagrange được nhìn nhận là cách tiếp cận hữu hiệu để giải các hệ cơ học phức tạp, bao gồm cả hệ với các liên kết. Phần năng lượng cơ sở cũng làm cho phương pháp hấp dẫn trên quan điểm xây dựng các mô hình năng lượng. Phương trình Lagrange cũng được dùng rộng rãi trong mô hình cơ điện. Ví dụ, với hệ bảo toàn, dễ dàng có được lời giải mà không cần quan tâm đến lực đặc biệt. Các hiệu ứng không bảo toàn có thể xử lý "bên ngoài" sự bảo toàn động lực học. Phát triển hệ phương trình chuyển giữa các hệ tọa độ x, dùng để mô tả hệ và các biến độc lập q, giúp có một công thức tối thiểu. Dù sao, trong một số trường hợp, nó làm mất nguyên nhân và kết quả bên trong của hệ mà đối với các phương pháp điều này được nhận thấy rõ ràng hơn. Cũng như gánh nặng đại số có thể trở thành quá mức. Dầu sao, đây cũng là cơ sở giải tích của phương pháp làm cho phương pháp trở nên khá hấp dẫn. Cùng với sự trợ giúp của các kỹ thuật xử lý ký hiệu, những khó khăn về đại số không còn là gánh nặng.

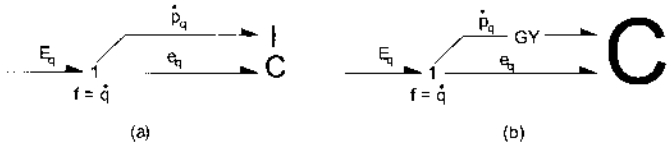
Trong phần này, những thuận lợi của cách tiếp cận Lagrange được dùng cùng với sơ đồ kết nối. Khái niệm và các công thức là cổ điển, tuy nhiên, sự diễn giải bằng biểu đồ đã được đưa bổ sung vào bên trong. Do đó, việc sử dụng các sơ đồ kết nối đảm bảo một công thức chắc chắn với nhân quả làm sao bảo toàn động năng bằng các hàm năng lượng phụ thuộc vào các đầu vào, kiểu thường phát sinh từ động lực học không bảo toàn. Phần sau là sự ứng xử hiệu quả với việc sử dụng phương pháp sơ đồ kết nối và cách tiếp cận tổ hợp là có tính hệ thống và đạt được hệ phương trình vi phân bậc nhất hơn là các phương trình ODEs bậc hai trong cách cách tiếp cận cổ điển. Trong một vài trường hợp, cách tiếp cận tổ hợp mà thực hiện nó sẽ mô hình tương đối dễ dàng một số hệ nào đó trong khi tiếp cận trực tiếp phương pháp khác một cách độc lập sẽ mắc phải sai lầm.

Một mô hình con áp dụng sơ đồ kết nối Lagrange minh họa các thành phần được tổng kết bằng sơ đồ kết nối chữ trong hình 9.39. Những thành phần chủ yếu được nhận dạng như sau: (a) tích năng lượng bảo toàn từ các hàm động năng và thế năng (b) các mối quan hệ chuyển đổi năng lượng bảo toàn (c) kết nối các thành phần phi Lagrange và không bảo toàn. Lưu ý rằng trong khía cạnh không bảo toàn của mối quan hệ chuyển, có m tọa độ trong mô hình nhưng chúng không độc lập với nhau. Các mối quan hệ chuyển đổi bảo toàn giảm các hệ tọa độ này còn một tập hợp n tọa độ độc lập q_i kết hợp với mỗi tọa độ độc lập hay vận tốc $\dot{q}$. Có một sự tích lũy liên kết của động năng và thế năng có thể trình bày bằng cặp **IC** trong hình 9.40(a) [16]. Một sự lựa chọn là thành phần đơn **C** dùng để biểu diễn tất cả sự tích lũy cặp năng lượng [3], khi con quay có môđun bằng 1. Trong cả hai trường hợp, cấu trúc này chứng tỏ rằng có một mối nối chung liên kết với mỗi tọa độ độc lập. Nhắc lại tổng các thế tại mối nối -1 và tại mối nối thứ i:

$$E_{q_i} = \dot{\tilde{p}}_i + e_{q_i} \tag{9.36}$$



HÌNH 9.39 Sơ đồ khối minh họa mô hình hệ con Lagrange



HÌNH 9.40 Sự hình thành cơ bản của liên kết dòng trong mô hình hệ con Lagrange. Các thế tại mối nối 1 với biến dòng độc lập thứ i, $\dot{q}_i$, biểu diễn các phương trình Lagrange

ở đây E_{q_i} là thế tổng không bảo toàn tại $\dot{q}_i, e_{q_i}$ là thế bảo toàn tổng quát, nó sẽ được xác định nhờ hệ Lagrange và thế $\tilde{p}$ là tốc độ thay đổi của mômen tổng quát thứ i. Những thuật ngữ này sẽ được trình bày ở phần sau. Tuy nhiên cần lưu ý rằng tổng các thế này là các định luật Newton đơn giản được tìm từ biểu thức Lagrange. Thực ra, phương trình này là lặp lại đơn giản phương trình Lagrange thứ i, như sẽ chỉ ra sau này. Các phương trình của tổng thế này cho n phương trình ODEs bậc nhất đối với $\dot{p}_i$, còn n phương trình khác cho các biến chuyển vị q_i. Các phương pháp dưới đây được trình bày ở [3].

Phương pháp luận để xây dựng mô hình hệ con

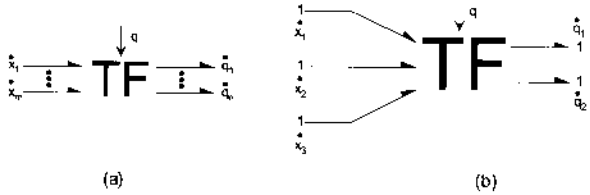
Kiểm soát mô hình hoá ban đầu: Cô lập các phần bảo toàn của hệ thống và đảm bảo rằng các liên kết là holonomic. Cấu trúc đan xen này sẽ xác định các cổng cho hệ cần nghiên cứu, bao gồm các điểm trong hệ (các vận tốc đặc trưng) khi các lực và/hoặc các mômen lực cần quan tâm tác động lên (ví dụ, tại các mối nối luồng). Các lực và mômen này đều không bảo toàn, hoặc chúng được xác định bằng các hệ ngoài tới hệ con Lagrange. Đây là một quyết định mô hình hoá. Ví dụ, lực trọng trường có thể đưa vào trong hệ con Lagrange hoặc nó có thể được thấy một mối nối vận tốc tương ứng với chuyển động đã được mô hình bên ngoài hệ con Lagrange. Điều này sẽ được minh họa trong một ví dụ sau.

Xác định các biến chuyển vị mở rộng: Cách tiếp cận Lagrange, cần thiết phải xác định các biến xác định cấu hình của hệ. Trong hệ cơ học, gồm có nhiều chuyển động tịnh tiến và quay. Do đó, các biến này là đặc trưng liên kết các chuyển động hoặc là các chuyển động tương đối của vật. Để đơn giản hóa một một mô hình với một tập hợp hệ tọa độ độc lập và tối thiểu, phát triển các mối quan hệ biến đổi giữa m vận tốc hoặc tổng quát hơn, các dòng $\dot{x}$ và n dòng độc lập $\dot{q}$. Dạng [3]:

$$\dot{x} = T(q)\dot{q} \tag{9.37}$$

chỉ rõ ràng rằng ma trận $\mathbf{T(q)}$ có thể phụ thuộc vào $\mathbf{q}$. Điều này có thể hiểu như sau, trong mô hình sơ đồ kết nối, như một chuyển đổi biến đổi được điều chỉnh, $\mathbf{q}$ chứa các biến điều chỉnh. Các chuyển vị mở rộng độc lập suy rộng $\mathbf{q}$ sẽ tạo thành các biến trạng thái của hệ con Lagrange.

Các mối quan hệ chuyển đổi thường được rút ra từ các liên kết holonomic và từ sự quan tâm đến hình học và động học cơ bản. Ma trận $\mathbf{T}$ cỡ $m \times n$ và có thể không nghịch đảo được. Sơ đồ kết nối được trình bày trong hình 9.41.



HÌNH 9.41 (a) Biểu diễn quan hệ chuyển dịch bằng sơ đồ kết nối, (b) ví dụ trường hợp $m = 3$ và $n = 2$

Thiết lập công thức hàm động năng: Đưa ra những mối quan hệ chuyển đổi, có thể biểu diễn tổng động năng của hệ con Lagrange bằng cách sử dụng các luồng biến độc lập $\dot{q}$. Đầu tiên, động năng có thể được viết bằng cách sử dụng $\dot{x}$ (thường đơn giản hơn) hoặc $T = T_{\dot{x}}(\dot{x})$. Sau đó các mối liên hệ trong phương trình (9.37) được dùng để chuyển các hàm động năng sao cho có thể biểu diễn như hàm của các biến q và $\dot{q}$, $T_{\dot{x}}(\dot{x}) \to T_{\dot{q}q}(\dot{q},q)$. Ngắn gọn, điều này có thể chỉ ra trong ký hiệu, hoặc chỉ viết $T_{\dot{q}q}$. Ví dụ, một hàm động năng phụ thuộc vào x, θ, $\dot{\theta}$ được viết bằng $T_{\dot{\theta}\theta x}$ (nếu số lượng biến lớn, chắc chắn quy ước này không được dùng).

Xác định các biến mômen mở rộng: Với hàm động năng với các biến độc lập $\dot{q}$, các mômen mở rộng có thể xác định như sau [3, 20]:

$$\tilde{p} = \frac{\partial T_{\dot{q}q}}{\partial \dot{q}} \tag{9.38}$$

dấu ngã $(\tilde{p})$ được dùng để phân biệt những biến mômen này với các biến mômen được xác định chặt chẽ bằng các nguyên tắc tổng kết trong bảng 9.5. Ghi nhớ rằng những biến mômen mở rộng này có thể là hàm của các chuyển vị (ví dụ, chúng có thể phụ thuộc vào cấu hình).

Lập công thức hàm thế năng: Tổng quát, một hệ được nghiên cứu bằng phương pháp Lagrange sẽ chứa thế năng, động năng và hàm thế năng U có thể biểu diễn là hàm của các biến phụ thuộc x. Sử dụng các mối quan hệ chuyển đổi trong phương trình (9.37), biểu thức sẽ là hàm của q hay $U = U(q) = U_q$. Trong các hệ cơ học, hàm này thường được lập bằng việc tính đến năng lượng lưu trữ trong những thành viên theo, hoặc năng lượng của trọng trường. Trong những trường hợp này, rất dễ dàng biểu diễn hàm thế năng theo các biến chuyển vị q.

Rút ra những thế bảo toàn tổng quát: Một thế bảo toàn có thể tìm từ biểu thức:

$$\tilde{e}_q = -\frac{\partial T_{\dot{q}q}}{\partial \mathrm{q}} + \frac{\partial U_q}{\partial \mathrm{q}} \tag{9.39}$$

với chỉ số q được dùng để chỉ các thế bảo toàn. Số hạng đầu tiên bên phải biểu diễn thế do sự phụ thuộc của động năng vào chuyển vị, số hạng thứ hai được công nhận là thế của thế năng.

Nhận dạng và biểu diễn dòng năng lượng tổng trong hệ con Lagrange: Tại đầu vào của hệ con Lagrange trong vế không bảo toàn, năng lượng đầu vào có thể biểu diễn theo tích của thế và dòng. Vì các quan hệ chuyển đổi là bảo toàn công suất nên dòng công suất này phải bằng dòng công suất ở vế "bảo toàn". Điều này được biểu diễn như sau:

$$P_x = \underbrace{\mathrm{e}_x}_{1\times m}\ \underbrace{\dot{\mathrm{x}}}_{m\times 1} = \underbrace{\mathrm{e}_x}_{1\times m}\ \underbrace{\mathrm{T(q)}}_{m\times n}\ \underbrace{\dot{\mathrm{q}}}_{n\times 1} = \underbrace{\mathrm{E}_q}_{1\times n}\ \underbrace{\dot{\mathrm{q}}}_{n\times 1} \tag{9.40}$$

ở đây, thành phần $\mathrm{E_q}$ là thế không bảo toàn được chuyển vào các tọa độ q. Thành phần này được tính như sau:

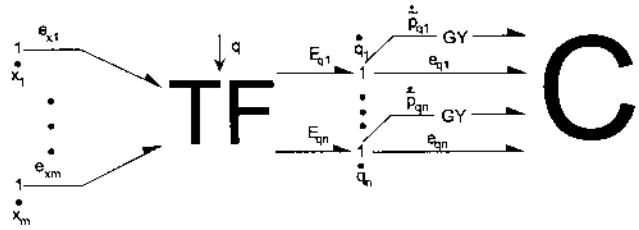
$$\mathrm{E_q} = \mathrm{e_x T(q)} \tag{9.41}$$

Tổng kết phương pháp: Tất cả các thành phần của hệ con Lagrange có thể rút ra một cách hệ thống. Có một vài khó khăn có thể nảy sinh. Để bắt đầu, bước đầu tiên có thể yêu cầu một vài lập luận hình học, trong một vài trường hợp nó là một vấn đề mặc dù không phải là không vượt qua được. n phương trình mômen trạng thái cho hệ con Lagrange sẽ là:

$$\dot{\tilde{p}} = -e_i + E_i \tag{9.42}$$

và hệ phương trình trạng thái cho q_i phải tìm bằng cách đảo hệ phương trình mômen mở rộng (9.38). Trong vài trường hợp, n phương trình này là liên quan với nhau và phải giải đồng thời.

Cuối cùng, có 2*n* phương trình trạng thái bậc nhất. Ngoài ra, các phần tử của sơ đồ kết nối mục tiêu như trong hình 9.42 có thể kết hợp với những hệ khác để xây dựng một mô hình hệ phức tạp.



HÌNH 9.42 Mô hình hệ con Lagrange

Lưu ý rằng để có được *2n* phương trình trong nhân quả tích phân, các thế (lực và mômen lực) phải được xác định như là đầu vào nhân quả tới các quan hệ chuyển đổi. Hơn nữa, mô hình hệ con này giả thiết chỉ có những liên kết holonomic. Điều này có thể xem như bị hạn chế, nó chỉ ra rằng, trong nhiều trường hợp thực tế, các ảnh hưởng vật lý dẫn đến những ràng buộc phi holonomic và như thế có thể xử lý "bên ngoài" mô hình Lagrange những hiệu ứng tiêu tán, các cơ cấu chấp hành và hơn nữa.

Tài liệu tham khảo

[1] Arczewski, K. and Pietrucha, J., *Mathematical Modelling of Complex Mechanical Systems*, Ellis Horwood, New York, 1993.

[2] Beaman, J. J. and Rosenberg, R. C., "Constitutive and modulation structure", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control (ASME)*, Vol. 110, No. 4, pp. 395–402, 1988.

[3] Beaman, J. J., Paynter, H. M., and Longoria, R. G., *Modeling of Physical Systems*, Cambridge University Press, in progress.

[4] Breedveld, P. C., "Multibond graph elements in physical systems theory", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 319, No. 1–2, pp. 1–36, 1985.

[5] Bedford, A. and Fowler, W., *Engineering Mechanics. Dynamics*, 2nd edition, Addison Wesley Longman, Menlo Park, CA, 1999.

[6] Burr, A. H., *Mechanical Analysis and Design*, Elsevier Science Publishing, Co., New York, 1981.

[7] Chou, J. C. K, "Quaternion kinematic and dynamic differential equations", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 1, February, 1992.

[8] Crandall, S., Karnopp, D. C., Kurtz, E. F., and Pridmore-Brown, D. C., *Dynamics of Mechanical and Electromechanical Systems*, McGraw-Hill, New York, 1968 (Reprinted by Krieger Publishing Co., Malabar, FL, 1982).

[9] Den Hartog, J. P., *Advanced Strength of Materials*, McGraw-Hill, New York, 1952.

[10] Fjellstad, O. and Fossen, T. I., "Position and attitude tracking of AUVs: a quaternion feedback approach", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 512–518, 1994.

[11] Goldstein, D., *Classical Mechanics*, 2nd edition, Addison-Wesley, Reading, MA, 1980.

[12] Greenwood, D. T., *Principles of Dynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1965.

[13] Harding, C. F., "Solution to Euler's gyrodynamics-I", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 31, pp. 325–328, 1964.

[14] Haug, E. J., *Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems*, Allyn and Bacon, Needham, MA, 1989.

[15] Kane, T. R. and Levinson, D. A., *Dynamics: Theory and Applications*, McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1985.

[16] Karnopp, D., "An approach to derivative causality in bond graph models of mechanical systems", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 329, No. 1, pp. 65–75, 1992.

[17] Karnopp, D. C., Margolis, D., and Rosenberg, R. C., *System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, Wiley, New York, 2000, 3rd edition, or *System Dynamics: A Unified Approach*, 1990, 2nd edition.

[18] Karnopp, D. and Rosenberg, R. C., *Analysis and Simulation of Multiport Systems. The Bond Graph Approach to Physical System Dynamics*, MIT Press, Cambridge, MA, 1968.

[19] Kuipers, J. B., *Quaternions and Rotation Sequences*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1998.

[20] Lanczos, C., *The Variational Principles of Mechanics*, 4th edition, University of Toronto Press, Toronto, 1970. Also published by Dover, New York, 1986.

[21] Lyshevski, S. E., *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.

[22] Matschinsky, W., *Road Vehicle Suspensions*, Professional Engineering Publishing Ltd., Suffolk, UK, 1999.

[23] Meriam, J. L. and Kraige, L. G., *Engineering Mechanics. Dynamics*, 4th edition, John Wiley and Sons, New York, 1997.

[24] Mortensen, R. E., "A globally stable linear regulator", *International Journal of Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 297–302, 1968.

[25] Nikravesh, P. E. and Chung, I. S., "Application of Euler parameters to the dynamic analysis of threedimensional constrained mechanical systems", *Journal of Mechanical Design (ASME)*, Vol. 104, pp. 785–791, 1982.

[26] Nikravesh, P. E., Wehage, R. A., and Kwon, O. K., "Euler parameters in computational kinematics and dynamics, Parts 1 and 2", *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design (ASME)*, Vol. 107, pp. 358–369, 1985.

[27] Nososelov, V. S., "An example of a nonholonomic, nonlinear system not of the Chetaev type", *Vestnik Leningradskogo Universiteta*, No. 19, 1957.

[28] Paynter, H., *Analysis and Design of Engineering Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 1961.

[29] Roark, R. J. and Young, W. C., *Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill, New York, 1975.

[30] Roberson, R. E. and Schwertassek, *Dynamics of Multibody Systems*, Springer-Verlag, Berlin, 1988.

[31] Rosenberg, R. M., *Analytical Dynamics of Discrete Systems*, Plenum Press, New York, 1977.

[32] Rosenberg, R. and Karnopp, D., *Introduction to Physical System Dynamics*, McGraw-Hill, New York, 1983.

[33] Rowell, D. and Wormley, D. N., *System Dynamics*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.

[34] Siciliano, B. and Villani, L., *Robot Force Control*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1999.

[35] Tiernego, M. J. L. and Bos, A. M., "Modelling the dynamics and kinematics of mechanical systems with multibond graphs", *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 319, No. 1–2, pp. 37–50, 1985.

[36] Vance, J. M., *Rotordynamics of Turbomachinery*, John Wiley and Sons, New York, 1988.

[37] Wehage, R. A., "Quaternions and Euler parameters-a brief exposition", in *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Computer Aided Analysis and Optimization of Mechanical System Dynamics*, E. J. Haug (ed.), Iowa City, IA, August 1–12, 1983, pp. 147–182.

[38] Wie, B. and Barba, P. M., "Quaternion feedback for spacecraft large angle maneuvers", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, pp. 360–365, May–June 1985.

[39] Wittenburg, J., *Dynamics of Systems of Rigid Bodies*, B. G. Teubner, Studttgart, 1977.

10

Các hệ thống thủy lực

10.1 Mở đầu 10-1
10.2 Chất lỏng thuỷ lực 10-2
10.3 Van điều khiển thuỷ lực 10-3
10.4 Các bơm thuỷ lực 10-5
10.5 Xi lanh thuỷ lực 10-6
10.6 Điều khiển các hệ thống thủy lực 10-7
10.7 Các van điện - thuỷ lực khả trình 10-12

Carroll E. Goering
University of Illinois

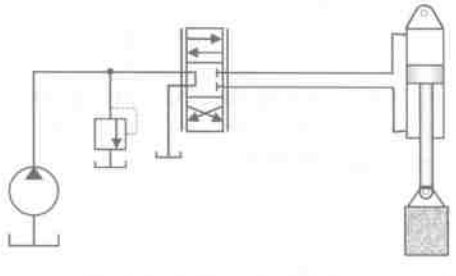
Qin Zhang
University of Illinois

10.1 Mở đầu

Các hệ thống thủy lực

Hệ thống thủy khí sử dụng chất lỏng hoặc chất khí để thực hiện các nhiệm vụ đặt ra. Hoạt động của các hệ thuỷ lực và các hệ khí nén là dựa trên cùng một nguyên tắc. Vì vậy chúng ta sẽ chỉ tập trung vào các hệ thống thuỷ lực.

Một hệ thống thuỷ lực điển hình bao gồm một bơm thuỷ lực, một van hạn chế áp suất, một van điều khiển hướng tỷ lệ và một cơ cấu chấp hành (hình 10.1). Các hệ thuỷ lực được sử dụng rộng rãi trong hàng không vũ trụ, trong công nghiệp và trong các thiết bị di động bởi các ưu điểm nổi bật của chúng so với các hệ thống điều khiển khác. Các ưu điểm chính của hệ thống này là tỷ lệ công suất trên trọng lượng cao, khả năng hãm, đổi chiều hoặc hoạt động không liên tục, khả năng tăng tốc và đáp ứng nhanh, vận hành tin cậy và tuổi thọ cao.



HÌNH 10.1 Sơ đồ của một hệ thống thuỷ lực

Do các nhiệm vụ và môi trường làm việc khác nhau, các đặc tính của hệ thống thuỷ lực là khác nhau cho tuỳ từng ứng dụng cụ thể trong công nghiệp và trong các thiết bị di động [4]. Trong các ứng dụng công nghiệp, mức ồn thấp là vấn đề quan tâm chính. Thông thường, mức độ ồn mong muốn đạt được là dưới 70 dB và trên 80 dB là quá mức cho phép. Các hệ thống công nghiệp thường vận hành trong dải áp suất thấp (dưới 7 MPa hoặc 1000 psi) đến dải áp suất trung bình

(dưới 21 MPa hoặc 3000 psi). Trong các ứng dụng di động, kích cỡ của thiết bị cần được quan tâm trước tiên. Do đó, các hệ thống thủy lực di động thường hoạt động ở dải áp suất từ 14 và 35 MPa (2000 - 5000 psi). Cũng vì vậy mà dải nhiệt độ hoạt động cho phép của các thiết bị di động này thường cao hơn so với các ứng dụng công nghiệp.

Các hệ thống điều khiển điện - thuỷ lực

Các ứng dụng sử dụng các mạch điện tử để điều khiển hệ thống thuỷ lực gọi là hệ thống điều khiển điện - thuỷ lực. Hệ thống điều khiển điện - thuỷ lực đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống thuỷ lực hàng không vũ trụ, công nghiệp và trong các hệ thống di động. Điều khiển điện - thuỷ lực có một số ưu điểm đặc biệt so với các loại điều khiển khác. Thứ nhất là một hệ thống điện - thuỷ lực có thể hoạt động trong một dải tốc độ rộng và tốc độ có thể được điều khiển vô cấp. Hơn nữa, một hệ thống điện - thuỷ lực có thể dừng đột ngột hoặc hoạt động dưới gia tốc rất lớn mà không bị hỏng các thành phần của hệ. Cơ cấu chấp hành thuỷ lực có thể được sử dụng trong trường điện từ mạnh mà không bị ảnh hưởng bất lợi của điện tử lên hoạt động điều khiển. Thêm vào đó, dòng chất lỏng thuỷ lực có thể tản nhiệt cho các bộ phận của hệ thống và bôi trơn tất cả các chi tiết chuyển động một cách liên tục.

10.2 Chất lỏng thuỷ lực

Có nhiều loại chất lỏng như dầu mỏ, dầu thực vật, nước được dùng trong các hệ thống thuỷ lực tuỳ thuộc vào nhiệm vụ và môi trường làm việc. Một cách lý tưởng, chất lỏng phải không độc, không đắt, không ăn mòn, không bắt lửa, phải có độ bôi trơn tốt và các thuộc tính của chúng phải ổn định. Các thuộc tính kỹ thuật quan trọng của chất lỏng thuỷ lực bao gồm khối lượng riêng, độ nhớt và môđun nén.

Khối lượng riêng

Khối lượng riêng ρ của một chất lỏng là khối lượng một đơn vị thể tích của nó [15]:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{10.1}$$

Khối lượng riêng có thể xấp xỉ bằng một hàm tuyến tính của áp suất (P) và nhiệt độ (T) [1]:

$$\rho = \rho_0(1 + aP - bT) \tag{10.2}$$

Trong thực tế, các hãng sản xuất chất lỏng thuỷ lực thường cung cấp tỷ khối (hay tỷ trọng) thay cho khối lượng riêng thực. Tỷ khối của một chất lỏng là tỷ số của khối lượng riêng thực của nó với khối lượng riêng của nước ở cùng một nhiệt độ.

Độ nhớt

Độ nhớt của một chất lỏng là số đo độ cản của nó đối với tốc độ biến dạng do lực trượt gây ra [15]. Các nhà sản xuất thường cung cấp hai giá trị về độ nhớt, đó là độ nhớt động lực học (μ) và độ nhớt động học (ν). Độ nhớt động lực học còn có tên gọi khác là độ nhớt tuyệt đối và được xác định bằng phương trình ứng suất trượt của Newton:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \tag{10.3}$$

trong đó dv là vận tốc tương đối giữa hai lớp song song trong một phân tố dy và τ là ứng suất trượt.

Độ nhớt động học là tỷ số của độ nhớt động lực học trên khối lượng riêng của chất lỏng và được tính bằng công thức sau:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{10.4}$$

Trong hệ SI, đơn vị của độ nhớt động lực học là Pascal-giây (Pa s) và đơn vị của độ nhớt động học là m^2/s. Cả độ nhớt động lực học và độ nhớt động học đều thay đổi rất lớn theo nhiệt độ.

Môđun nén

Môđun nén là số đo độ chịu nén hay độ cứng của chất lỏng. Môđun nén của chất lỏng là sự giảm thể tích của chất lỏng khi tăng một đơn vị áp suất, môđun nén được tính theo công thức [8]:

$$\beta = -V\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right) \tag{10.5}$$

Có thể định nghĩa môđun nén là môđun nén tiếp tuyến đường đẳng nhiệt đo được khi nén trong điều kiện nhiệt độ không đổi hoặc là môđun nén tiếp tuyến đẳng entropi trong trường hợp độ nén đo được trong điều kiện entropi không đổi.

Khi phân tích ứng xử động lực học của một hệ thống thuỷ lực, độ cứng của khoang chứa thuỷ lực đóng vai trò rất quan trọng. Môđun nén hiệu dụng β_e thường được sử dụng để xem xét cả độ nén của chất lỏng β_f và độ cứng của khoang chứa chất lỏng β_c ở cùng một thời điểm [14]:

$$\frac{1}{\beta_e} = \frac{1}{\beta_f} + \frac{1}{\beta_c} \tag{10.6}$$

10.3 Van điều khiển thuỷ lực

Nguyên lý điều khiển của van

Trong một hệ thống thuỷ lực, người ta sử dụng các van điều khiển thuỷ lực để điều khiển áp suất, lưu lượng dòng chảy và hướng dòng chảy. Có nhiều cách định nghĩa một van thuỷ lực, phụ thuộc vào từng ứng dụng khác nhau mà các van thuỷ lực được gọi tên khác nhau. Thường thì van thuỷ lực được phân loại theo các chức năng riêng của chúng, như là van điều khiển áp suất, lưu lượng, hướng hoặc dựa trên cơ chế điều khiển của chúng, như là bật-tắt, servo và các van điện-thuỷ lực hoặc dựa vào cấu trúc của chúng, như là van con trượt (spool), supáp, van kim.

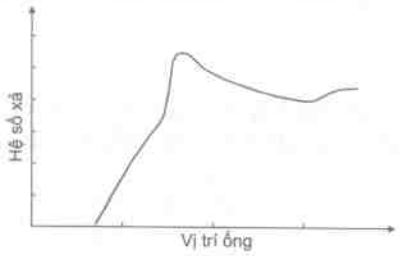
Một van thuỷ lực điều khiển một hệ thống thủy lực bằng cách mở và đóng van để điều khiển tiết diện dòng chất lỏng chảy qua. Trong thực tế kỹ thuật, việc điều chỉnh diện tích tiết diện chất lỏng đi qua được mô tả bằng cách dùng thông số diện tích cửa van A_0. Về mặt vật lý, cửa van là một trở kháng thuỷ lực R_h có thể điều khiển được. Ở trạng thái dừng, có thể định nghĩa trở kháng thuỷ lực là tỷ số giữa chênh áp Δp qua van với lưu lượng dòng chảy q đi qua van:

$$R_h = \frac{d(\Delta p)}{dq} \tag{10.7}$$

Các van điều khiển được chế tạo với nhiều cấu hình cửa khác nhau để có thể thực hiện các đặc tính trở kháng thuỷ lực khác nhau cho các ứng dụng khác nhau. Do đó, cần phải xác định được mối quan hệ giữa chênh áp với lưu lượng qua cửa van. Phương trình cửa van thường được sử dụng để mô tả mối quan hệ này [8]:

$$q = C_d A_o \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta P} \tag{10.8}$$

Độ chênh áp qua cửa van là sự tụt áp suất trong một hệ thống thủy lực. Ở phương trình trên, hệ số cửa van C_d đóng một vai trò quan trọng và được xác định từ thực nghiệm. Các nghiên cứu cho thấy rằng hệ số cửa van thay đổi rất lớn theo vị trí con trượt, nhưng lại ít thay đổi so với chênh áp qua cửa van trong van con trượt (hình 10.2) [13]. Dựa vào các kết quả giải tích nhận được từ mô phỏng động lực học chất lỏng bằng máy tính, thấy rằng hình dạng của con trượt và vỏ van ảnh hưởng ít đến hệ số cửa van với các dịch chuyển lớn của con trượt [3].

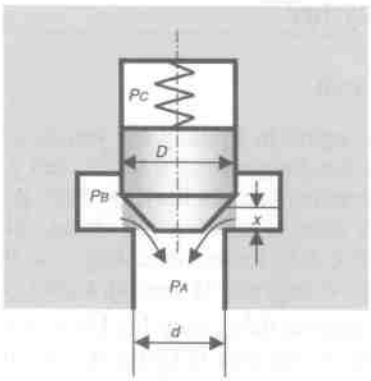


HÌNH 10.2 Hệ số xả theo vị trí của con trượt trong van con trượt

Các van điều khiển thuỷ lực

Có nhiều cách phân loại các van điều khiển thuỷ lực. Ví dụ theo các cấu hình cấu trúc của van, các van điều khiển thuỷ lực có thể chia thành hai nhóm: các van dạng cửa và van con trượt. Phần này sẽ cung cấp mô hình toán học của các loại van điều khiển thuỷ lực dựa trên cấu hình cấu trúc.

Một van dạng cửa (cartridge) điển hình có một supáp hoặc một bi tròn để điều khiển lưu lượng đi qua. Để biểu diễn các đặc tính điều khiển của một van dạng cửa mà không mất đi tính tổng quát, ta sẽ phân tích một van cửa kiểu supáp (hình 10.3).



HÌNH 10.3 Nguyên lý vận hành van cửa kiểu supáp

Có thể diễn tả các đặc tính điều khiển của van cửa kiểu supáp bằng một phương trình cửa van và một phương trình cân bằng lực. Ở hình 10.3, van mở bằng cách nâng supáp. Vì supáp có cấu trúc hình nón, ta có thể xác định được diện tích dòng chảy đi qua bằng phương trình sau:

$$A_x = \pi dx \sin\alpha \tag{10.9}$$

Do vậy, có thể tính lưu lượng dòng chảy chuyển qua bằng phương trình cửa van. Đối với van kiểu supáp, người ta khuyên nên sử dụng hệ số cửa tương đối cao $c_d = 0.77 \sim 0.82$ [5]:

$$q = c_d A_x \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_B - P_A)} \tag{10.10}$$

Các lực tác dụng lên supáp bao gồm lực áp suất, lực lò xo và lực thuỷ lực. Có thể xác định áp lực dựa theo các áp suất trước van, sau van và áp suất khoang lò xo:

$$F_p = P_A \frac{\pi d^2}{4} + P_B \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} - P_C \frac{\pi D^2}{4} \tag{10.11}$$

Lực lò xo đẩy supáp về xu thế đóng. Khi đã ở vị trí đóng, lúc đó lực lò xo đạt giá trị nhỏ nhất của nó. Lực lò xo tăng theo chiều nâng supáp để mở rộng diện tích cho dòng chảy qua:

$$F_S = k(x_0 + x) \tag{10.12}$$

Lực dòng chảy ở trạng thái ổn lập có xu thế mở supáp trong kiểu van này. Lực dòng chảy là hàm của lưu lượng và vận tốc chất lỏng chuyển qua cửa van:

$$F_F = \rho q v \cos\alpha \tag{10.13}$$

Các đặc tính điều khiển dòng chảy của van con trượt tương tự như với kiểu van cửa và có thể sử dụng một phương trình cửa van để mô tả. Sự khác nhau ở đây chỉ là diện tích tiết diện dòng chất lỏng chảy qua van con trượt được xác định bằng chu vi thấm ướt w và dịch chuyển x của con trượt:

$$q = c_d w x \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta P} \tag{10.14}$$

Khi cửa van được tạo ra bởi cạnh của con trượt và thân van, chu vi thấm ướt là $w = \pi.d$. Khi cửa van được tạo ra bởi n khe trên con trượt và chu vi mỗi khe là n, chu vi thấm ướt tương ứng là $w = n.b$. Với van con trượt, hệ số cửa thường sử dụng là $c_d = 0.60 \sim 0.65$.

Các lực tác dụng lên con trượt cũng bao gồm lực áp suất, lực lò xo và lực dòng chảy [7]. Áp lực cũng có thể được cân bằng trên con trượt bởi vì cấu trúc đối xứng của chúng trong van được dẫn động trực tiếp, được dẫn động trực tiếp bằng cơ cấu điện từ (solenoid), hoặc áp lực sẽ gây ra sự di chuyển của con trượt trong van được dẫn động bằng một van khác nhỏ hơn. Lực lò xo này có xu thế giữ con trượt ở vị trí trung lập (vị trí không) và có thể được biểu diễn bằng phương trình (10.12). Có thể tính lực dòng chảy tác dụng lên con trượt bằng phương trình (10.14). Góc α của vận tốc dòng chảy thường là 69°.

10.4 Các bơm thuỷ lực

Nguyên lý hoạt động của bơm

Bơm là một bộ phận quan trọng bậc nhất trong các hệ thống thuỷ lực bởi vì chúng cung cấp dòng thuỷ lực vào hệ thống. Được dẫn động bởi động cơ, bơm thuỷ lực đưa chất lỏng ở trạng thái áp suất không khí vào đầy không gian bên trong bơm qua một đường vào và đưa chất lỏng vẫn được giữ ở áp suất không khí tới đường ra nhờ sự giảm thể tích bên trong gần cửa ra. Lưu lượng của bơm được xác định bởi lượng đẩy của bơm (D) và tần số quay (n). Lượng đẩy của bơm là thể tích chất lỏng theo lý thuyết có thể được đẩy đi trong một vòng quay của trục của bơm:

$$Q = Dn \tag{10.15}$$

Áp suất ở đường ra của bơm được xác định bởi tải của hệ thống, tải này được hợp bởi trở kháng đối với dòng chất lỏng trong đường ống dẫn và trở kháng đối với di chuyển của tải ngoài. Dòng chảy của bơm cần được giải toả ra hoặc bởi việc di chuyển tải hoặc bằng cách chảy qua van xả ngược lại thùng chứa, nếu không áp suất sẽ tăng vọt có thể dẫn đến hỏng hóc trầm trọng cho bơm hoặc các đường ống nối [11].

Dựa vào khả năng thay đổi lượng đẩy của bơm thuỷ lực, có thể phân chúng thành hai loại: bơm lưu lượng cố định và bơm lưu lượng thay đổi. Dựa vào thiết kế của bơm thuỷ lực có thể phân loại

chúng thành các bơm bánh răng, bơm cánh gạt và các bơm piston. Thường thì các bơm bánh răng là các bơm lưu lượng cố định, còn các bơm cánh gạt và bơm piston có thể là các bơm lưu lượng cố định hoặc các bơm lưu lượng thay đổi.

Việc chọn thiết kế bơm phụ thuộc vào việc nó sẽ được dùng trong ngành công nghiệp nào. Ví dụ trong công nghiệp chế tạo máy công cụ thường chọn sử dụng các bơm cánh gạt vì tiếng ồn của chúng thấp và khả năng cung cấp lưu lượng thay đổi tại một áp suất không đổi. Ngành chế tạo các thiết bị di động thường sử dụng các bơm piston vì chúng có tỷ số công suất trên trọng lượng cao. Một vài ngành sản xuất các thiết bị nông nghiệp sử dụng các bơm bánh răng để giảm chi phí và tăng độ tin cậy [11], các bơm piston cũng được sử dụng rộng rãi.

Điều khiển bơm và các hệ thống

Bơm là thiết bị biến đổi năng lượng từ năng lượng cơ học trở thành thế năng dòng chảy để truyền động cho các cơ cấu chấp hành thuỷ lực hoạt động. Để đáp ứng được các yêu cầu của các ứng dụng khác nhau, có rất nhiều kiểu điều khiển hệ thống thuỷ lực để chọn lựa. Thiết kế của van điều khiển hướng cần phải tương thích với thiết kế của bơm. Thông thường, van điều khiển kiểu mở ở vị trí trung lập (gọi tắt là kiểu trung lập-mở) được sử dụng trong bơm có lượng đẩy cố định và bơm có lượng đẩy thay đổi thường trang bị van điều khiển kiểu trung lập-đóng (tức là đóng khi ở vị trí trung lập).

Một hệ thống thuỷ lực bao gồm một bơm lượng đẩy cố định và một van điều khiển hướng kiểu trung lập-mở (hình 10.1) là một hệ thống trung lập-mở vòng-hở. Hệ thống này cũng được gọi là hệ thống nhạy cảm-tải bởi vì bơm sẽ chỉ cung cấp áp suất được yêu cầu để di chuyển tải, cộng với chênh áp để thắng sức cản của đường ống. Hệ thống trung lập-mở vòng-hở phù hợp với các kiểu điều khiển "tắt-mở" đơn giản. Khi hoạt động như vậy, cơ cấu chấp hành thủy lực sẽ di chuyển tải tại vận tốc lớn nhất hoặc ở trạng thái dừng khi bơm không tải. Nếu một van tỷ lệ được dùng, thì hệ thống trung lập-mở vòng-hở cũng có thể điều khiển được vận tốc của cơ cấu chấp hành. Tuy nhiên, điều khiển như vậy sẽ làm tăng áp suất dòng ngoài để xả nó ngược lại thùng chứa. Điều khiển như vậy sẽ làm hao tán đáng kể năng lượng, làm giảm hiệu suất của hệ thống và sinh nhiều nhiệt.

Để giải quyết các vấn đề nêu trên, một mạch trung lập-đóng vòng-mở được xây dựng bằng cách sử dụng một bơm có lượng đẩy thay đổi và một van điều khiển hướng kiểu trung lập-đóng. Bởi vì bơm có lượng đẩy thay đổi thường được trang bị với bộ điều khiển áp suất giới hạn hoặc "bộ bù áp suất" nên lượng đẩy của bơm sẽ tự động tăng hoặc giảm theo sự tăng giảm của áp suất hệ thống. Khi sử dụng vị trí của van điều khiển hướng để điều khiển vận tốc của cơ cấu chấp hành, có thể đạt được vận tốc không đổi nếu tải không đổi. Tuy nhiên khi tải thay đổi, hệ thống bù áp suất này sẽ không có khả năng giữ vận tốc cố định nữa nếu không hiệu chỉnh vị trí của van điều khiển. Để giải quyết vấn đề này, nên sử dụng một bơm nhạy cảm-tải để giữ vận tốc không đổi khi tải thay đổi. Một bơm nhạy cảm-tải có thể duy trì vận tốc không đổi cho vị trí bất kỳ của van là vì bơm duy trì một độ chênh áp không đổi qua cửa van của van điều khiển hướng và sau đó tự động hiệu chỉnh áp suất đường ra của bơm để bù cho sự thay đổi áp suất do tải ngoài. Độ chênh áp không đổi qua van sẽ duy trì lưu lượng không đổi và do đó vận tốc tải sẽ không thay đổi.

10.5 Xi lanh thuỷ lực

Một xi lanh thuỷ lực có nhiệm vụ biến đổi thế năng của chất lỏng có áp suất thành cơ năng để truyền động cho các thiết bị vận hành thực hiện các chuyển động thẳng, xi lanh là cơ cấu chấp hành hay được sử dụng nhất trong các hệ thống thuỷ lực. Một xi lanh thuỷ lực bao gồm thân xi lanh, piston, thanh truyền và các chi tiết bịt kín. Dựa vào cấu trúc của xi lanh, xi lanh thuỷ lực có thể được phân loại thành xi lanh một hướng (cấp lực chỉ theo một hướng), xi lanh hai hướng (lực cấp theo hai hướng), xi lanh một thanh truyền (không có thanh truyền ở nắp đáy) và xi lanh hai thanh truyền (có thanh truyền ở cả hai bên piston).

Các tham số xi lanh

Một xi lanh thuỷ lực truyền năng lượng bằng cách biến đổi lưu lượng và áp suất thành lực và vận tốc. Có thể xác định được lực và vận tốc của xi lanh kiểu hai thanh truyền, hai hướng bằng các công thức sau:

$$v = \frac{4q}{\pi(D^2 - d^2)} \tag{10.16}$$

$$F = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)(P_1 - P_2) \tag{10.17}$$

Vận tốc và lực của xi lanh kiểu một thanh truyền hai hướng, cần xác định bằng cách khác nhau cho các chuyển động co và giãn. Trong trường hợp co, vận tốc được xác định bằng phương trình (10.16) và lực có thể xác định bằng phương trình sau:

$$F = P_1\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} - P_2\frac{\pi D^2}{4} \tag{10.18}$$

Trong trường hợp giãn, sử dụng các công thức sau để xác định vận tốc và lực:

$$v = \frac{4q}{\pi D^2} \tag{10.19}$$

$$F = (P_1 - P_2)\frac{\pi D^2}{4} + P_2\frac{\pi d^2}{4} \tag{10.20}$$

Độ cứng thuỷ lực k_h, của xi lanh đóng một vai trò quan trọng trong quá trình động lực học của hệ thống thủy lực. Đây là một hàm của môđun nén β của chất lỏng, các diện tích của piston (A_1, A_2), thể tích các buồng chứa của xi lanh (V_1, V_2) và thể tích của các ống thuỷ lực nối với các buồng chứa của xi lanh (V_{L1}, V_{L2}). Đối với xi lanh đơn thanh hai hướng, độ cứng theo cả hai bên của piston đóng vai trò như nhau [12]. Độ cứng tổng của xi lanh được tính theo công thức sau:

$$k_h = \beta\left(\frac{A_1^2}{V_{L1} + V_1} + \frac{A_1^2}{V_{L2} + V_2}\right) \tag{10.21}$$

Tần số dao động riêng ω_n của một hệ thống thuỷ lực được xác định bởi khối lượng tổng cộng m của xi lanh (phần chuyển động) và tải theo công thức sau:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_h}{m}} \tag{10.22}$$

10.6 Điều khiển các hệ thống thủy lực

Các đặc tính trạng thái ổn định của hệ thống

Các đặc tính trạng thái ổn định của hệ thống thuỷ lực xác định khả năng mang tải, khả năng điều khiển tốc độ và hiệu suất của hệ thống. Sẽ không mất tính tổng quát khi ta mô hình hoá một hệ thống thuỷ lực bao gồm van điều khiển hướng bốn đường kiểu trung lập-mở và xi lanh hai hướng đơn thanh, mô hình này được sử dụng để phân tích các đặc tính trạng thái ổn định của hệ thống (hình 10.1). Trong hệ thống này, diện tích cửa xi lanh-thùng chứa (C-T) trong van điều khiển luôn luôn lớn hơn diện tích cửa bơm-xi lanh (P-C). Do đó, có thể giả thiết rằng cửa P-C điều khiển tốc độ của xi lanh trong lúc giãn ra [13].

Theo định luật Newton, lực cân bằng trên piston được xác định bởi áp suất buồng chứa phía dưới P_1, diện tích đầu dưới piston A_1, áp suất buồng chứa thanh dưới P_2, diện tích thanh dưới của piston A_2 và tải trọng ngoài F, nếu bỏ qua ma sát và lượng rò rỉ, ta có công thức sau:

$$P_1A_1 - P_2A_2 = F \tag{10.23}$$

Khi bỏ qua các tổn thất trên đường đi từ cơ cấu chấp hành đến thùng chứa, áp suất phần dưới của thanh bằng không. Sau đó, xác định áp suất phần dưới bằng tải ngoài tác động vào hệ thống:

$$P_1 = \frac{F}{A_1} \tag{10.24}$$

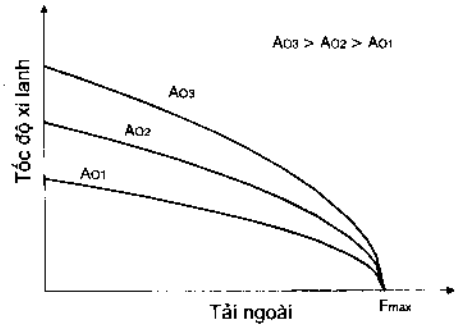
Để đẩy chất lỏng qua van điều khiển và đi vào phần đầu dưới của xi lanh, áp suất xả P_p của bơm thuỷ lực phải cao hơn áp suất buồng chứa của xi lanh. Sự khác nhau giữa áp suất xả của bơm và áp suất buồng chứa của xi lanh được xác định bởi trở kháng thuỷ lực qua van điều khiển. Dựa vào phương trình cửa van, lưu lượng đi vào buồng chứa phía đầu dưới của xi lanh là:

$$q = C_d A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_p - P_1)} \tag{10.25}$$

Có thể mô tả được tốc độ của xi lanh theo phương trình dưới đây bằng việc sử dụng một hệ số điều khiển K thay thế cho C_d, ρ:

$$v = \frac{KA_0}{A_1}\sqrt{P_p - \frac{F}{A_1}} \tag{10.26}$$

Phương trình (10.13) biểu diễn mối quan hệ tốc độ-tải của một xi lanh thuỷ lực theo diện tích tiết diện chất lỏng chuyển qua (diện tích cửa) của van điều khiển. Trong hình 10.4, tốc độ của xi lanh giảm khi tải ngoài được đặt tới xi lanh tăng. Trong trường hợp không có tải ngoài, tốc độ của xi lanh đạt tới giá trị lớn nhất. Ngược lại, khi tải ngoài cấp tới van có giá trị là $F = P_pA_1$, sau đó xi lanh sẽ dừng. Tải dừng xi lanh không phụ thuộc vào kích thước của diện tích chất lỏng chuyển qua trong van. Các đặc tính này của hệ thống thuỷ lực loại trừ khả năng quá tải, điều này làm cho phương thức truyền động này an toàn hơn.



HÌNH 10.4 Mối quan hệ tải trọng-tốc độ của xi lanh thuỷ lực dưới cùng một áp suất hệ thống

Khi phân tích hệ thống, k_v thường được sử dụng để diễn tả mức độ ít phụ thuộc của tốc độ xi lanh theo sự thay đổi của tải [5].

$$k_v = \frac{1}{\frac{\partial v}{\partial F}} = \frac{2(P_pA_1 - F)}{v} \tag{10.27}$$

Phương trình (10.27) chỉ ra rằng có thể tăng k_v bằng cách tăng áp suất của hệ thống hoặc kích thước của xi lanh hoặc bằng cách giảm tốc độ.

Các đặc tính động lực học của hệ thống

Để phân tích các đặc tính động lực học của hệ thống chấp hành xi lanh thuỷ lực, ta có thể sử dụng các phương trình liên tục của dòng chảy và lực quán tính của hệ thống để mô hình hoá chuyển động của hệ xi lanh. Bỏ qua khe hở hệ thống, ma sát và tổn thất đường truyền, ta có các phương trình chuyển động của hệ thống thuỷ lực như sau:

$$q = kx\sqrt{P_p - P_1} = A_1\frac{dy}{dt} + \frac{V_1}{\beta}\frac{dP_1}{dt} \tag{10.28}$$

$$P_1 A_1 = m\frac{d^2y}{dt^2} + F \tag{10.29}$$

Để phân tích động lực học trên hệ thống thuỷ lực có phương trình chuyển động trên cần thiết phải tìm được các hàm truyền dựa vào các phương trình phi tuyến ở trên, có thể nhận được các hàm truyền bằng cách thực hiện biến đổi Laplace đối với các dạng đã được tuyến tính hoá của các phương trình trên [14]:

$$\delta v(s) = \frac{\dfrac{k_1 K_i}{A_1}\delta i(s) - \left(\dfrac{V_1}{A_1^2\beta}s + \dfrac{1}{A_1^2 k_3 R_o}\right)\delta F(s)}{\dfrac{V_1}{A_1^2\beta}ms + \dfrac{1}{A_1^2 k_2 R_o}ms + 1} \tag{10.30}$$

Đặt:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{A_1^2\beta}{V_1 m}}, \qquad \zeta = \frac{1}{2k_2 R_o}\sqrt{\frac{m\beta}{V_1 A_1^2}}, \qquad K_s = \frac{k_1 K_i}{A_1}$$

Có thể biểu diễn phương trình (10.30) như sau:

$$\delta v(s) = \frac{K_s\delta i(s)}{\dfrac{1}{\omega_n^2}s^2 + \dfrac{2\zeta}{\omega_n}s + 1} - \frac{\dfrac{1}{A_1^2}\left(\dfrac{V_1}{\beta}s + \dfrac{1}{k_3 R_o}\right)\delta F(s)}{\dfrac{1}{\omega_n^2}s^2 + \dfrac{2\zeta}{\omega_n}s + 1} \tag{10.31}$$

Dựa vào tiêu chuẩn ổn định cho hệ bậc hai, cần thoả mãn:

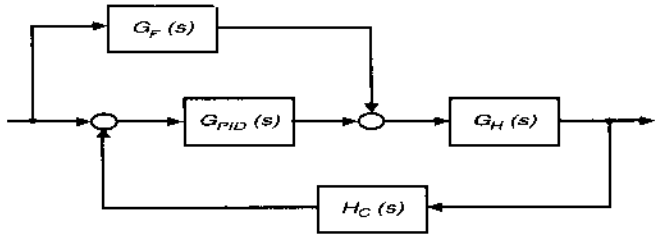
$$\frac{1}{\omega_n^2}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1 = 0 \tag{10.32}$$

Hệ số điều khiển tốc độ K_s là hệ số giữa dòng tín hiệu điều khiển và tốc độ xi lanh. Khi hệ số này cao có thể làm tăng độ nhạy của hệ thống khi điều khiển tốc độ.

Điều khiển kiểu kết hợp truyền thẳng và PID cho hệ thống điện thủy lực

Phương trình (10.31) chỉ ra rằng hệ điều khiển tốc độ một xi lanh thuỷ lực là một hệ bậc 3. Ứng xử động của nó chịu ảnh hưởng của các đặc tính của van con trượt, áp suất hệ thống và kích thước xi lanh. Do đó, rất khó có thể thực hiện được một điều khiển tốc độ vô cấp và chính xác cho xi lanh thuỷ lực. Một bộ điều khiển PID kết hợp với truyền thẳng (FPID) đã chứng tỏ được khả năng điều khiển tốc độ cao cho một xi lanh thuỷ lực [16].

Một bộ điều khiển FPID bao gồm một vòng truyền thẳng và một vòng PID (hình 10.5). Vòng truyền thẳng được thiết kế để bù cho các đặc tính phi tuyến của hệ thống thủy lực, gồm có vùng không nhạy của hệ thống và đặc tính lưu lượng phi tuyến qua van điều khiển. Vòng truyền thẳng sử dụng thuật toán bù đón trước để xác định tín hiệu điều khiển cơ bản dựa trên tốc độ yêu cầu. $G_F(s)$ được xác định dựa trên biến đổi ngược đặc tính của van điện - thủy lực để có các đặc tính điều khiển trạng thái ổn định cho van theo tốc độ của xi lanh và dòng điều khiển của bộ điều khiển PWM của van.



HÌNH 10.5 Sơ đồ khối cấu trúc của bộ điều khiển PID kết hợp với truyền thẳng. $G_F(s)$ là hàm truyền của bộ điều khiển truyền thẳng, $G_{PID}(s)$ là hàm truyền của bộ điều khiển PID, $G_H(s)$ là hàm truyền của hệ thống thuỷ lực và $H_C(s)$ là hàm truyền của cảm biến

Vòng PID bổ sung cho điều khiển truyền thẳng qua bộ bù sai lệch bám tốc độ. Bộ điều khiển PID được phát triển dựa theo hàm truyền của hệ thống điều khiển tốc độ xi lanh thuỷ lực đã được tuyến tính hoá:

$$G(s) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) \tag{10.33}$$

Độ bền vững của điều khiển FPID được đánh giá dựa vào tính năng và độ ổn định của chúng. Độ bền vững về tính năng sẽ giảm thiểu ảnh hưởng của các nhiễu ngoài không mong đợi và độ bền vững về tính ổn định sẽ giảm thiểu ảnh hưởng của các thay đổi cấu trúc bên trong hoặc các thay đổi tham số trong hệ thống. Thiết kế của bộ điều khiển FPID này dựa trên một tình huống xấu nhất trong các điều kiện vận hành hệ thống đối với cả hệ số khuyếch đại của PID và thuật toán bù đón trước.

Điều khiển mờ tổng quát cho hệ điện - thủy lực

Điều khiển mờ là một công nghệ điều khiển tiên tiến có thể sử dụng để thay thế con người điều khiển các hệ thống phức tạp và có thể áp dụng với các hệ thống phi tuyến và hệ thống biến đổi không đoán trước được [10]. Đặc điểm chung của các bộ điều khiển mờ là tất cả chúng được thiết kế dựa trên các luật điều khiển ngôn ngữ tự nhiên. Đặc điểm này có thể giúp thiết kế một bộ điều khiển tổng quát cho các đối tượng khác nhau khi mà các đối tượng này được điều khiển bởi cùng luật điều khiển ngôn ngữ tự nhiên [11].

Điều khiển tốc độ của một xi lanh thuỷ lực trong thực tế được thực hiện bằng cách điều khiển lưu lượng cấp tới xi lanh. Ở các hệ thống thuỷ lực khác nhau, kích thước của xi lanh và khả năng của hệ thống thuỷ lực thường khác nhau, tuy nhiên các nguyên tắc điều khiển lại rất đơn giản. Biểu diễn hoạt động điều khiển tốc độ xi lanh, không mất tính tổng quát khi sử dụng ngôn ngữ tự nhiên, luật điều khiển là như nhau với tất cả các hệ thống:

Để có được một dịch chuyển nhanh, mở hết van.

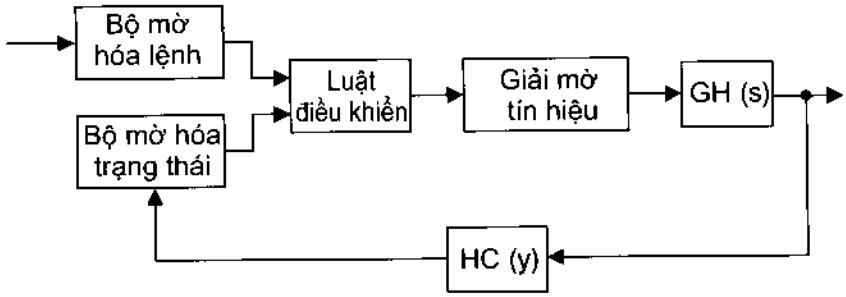
Để tạo một dịch chuyển chậm, giữ van mở một chút.

Để giữ xi lanh tại vị trí hiện thời của nó, xoay van về tâm.

Để đổi chiều chuyển động, vận hành van theo hướng khác.

Mô hình ngôn ngữ tự nhiên thể hiện các vai trò chung trong việc điều khiển tốc độ xi lanh qua van điều khiển E/H trên tất cả các hệ thống thuỷ lực. Sự khác nhau ở các tham số hệ thống trong các hệ thống khác nhau có thể được giải quyết bằng cách định nghĩa lại miền của biến mờ, như là toàn bộ (fully), nhiều (a_lot) và một chút (a_little), sử dụng các hàm liên thuộc [9]. Mô hình này sẽ đưa ra cơ sở cho việc thiết kế một bộ điều khiển mờ tổng quát cho các hệ điện - thuỷ lực. Việc sử dụng bộ điều khiển tổng quát này trong các hệ thống khác nhau có thể được thực hiện dễ dàng giống như định nghĩa lại hàm liên thuộc dựa vào các tham số hệ thống của nó.

Hình 10.6 thể hiện sơ đồ khối của một bộ điều khiển mờ tổng quát gồm có hai bộ mờ hoá biến đầu vào, một cơ sở nguyên tắc điều khiển, một bộ giải mờ lệnh điều khiển. Hai bộ mờ hoá đầu vào được sử dụng để chuyển đổi các biến đầu vào giá trị thực sang các biến giá trị ngôn ngữ phù hợp với các hàm liên thuộc. Mỗi một bộ mờ hoá bao gồm một bộ các hàm liên thuộc định nghĩa miền cho mỗi biến đầu vào ngôn ngữ. Một biến đầu vào giá trị thực thường được chuyển thành hai giá trị ngôn ngữ thích hợp với các hàm liên thuộc tương ứng. Các định nghĩa về các giá trị kiểu mờ này đóng một vai trò quan trọng trong việc thiết kế các bộ điều khiển mờ tổng quát và thường được định nghĩa dựa vào các tham số hệ thống thuỷ lực. Bộ điều khiển mờ sử dụng các luật điều khiển mờ nhằm xác định các hoạt động điều khiển theo như sự ứng xử điển hình trong điều khiển tốc độ của các xi lanh thuỷ lực. Các giá trị đầu ra của bộ điều khiển cũng là các giá trị ngôn ngữ và có quan hệ với các hàm liên thuộc. Ví dụ khi tốc độ yêu cầu là negative_small (NS) và sai lệch trong tốc độ là positive_small (PS), hoạt động điều khiển thích hợp của van sẽ là positive_small (PS).



HÌNH 10.6 Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển điện - thủy lực mờ. Bộ điều khiển mờ chứa bộ mờ hoá biến đầu vào, các quy tắc điều khiển và một bộ giải mờ

Các hoạt động điều khiển thích hợp này được xác định dựa theo các luật điều khiển đã được định nghĩa trước. Do mỗi biến giá trị thực thường ánh xạ tới hai giá trị mờ, cơ chế để sử dụng mờ cần ít nhất hai luật điều khiển chứa đựng các giá trị mờ này để xác định hoạt động điều khiển thích hợp. Do đó, ít nhất sẽ có hai hoạt động điều khiển thích hợp giá trị mờ được chọn. Tuy nhiên, bộ điều khiển điện - thủy lực có thể chỉ thực hiện một lệnh điều khiển giá trị thực cụ thể tại một thời điểm đưa ra. Vì vậy cần thiết phải chuyển đổi các lệnh điều khiển đa giá trị mờ trở thành một tín hiệu điều khiển giá trị thực trong bộ điều khiển mờ này.

Quá trình giải mờ chuyển đổi hai hoặc nhiều đầu ra có giá trị mờ thành một đầu ra giá trị thực. Có nhiều phương pháp giải mờ, ví như phương pháp trọng tâm (COG) và tâm diện tích (COA), sử dụng được ngay cho nhiều ứng dụng khác nhau [9]. Khi sử dụng phương pháp COA, tín hiệu điều khiển giá trị thực u được xác định bởi trong miền giá trị của nó và các giá trị thành viên trong bộ lệnh điều khiển mờ được chọn $\mu(u_i)$ theo công thức sau:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i \mu(u_i) du}{\sum_{i=1}^{n} \mu(u_i) du} \tag{10.34}$$

Phương pháp COA thường trung bình hóa các tập hợp các lệnh điều khiển mờ được chọn và do đó giảm độ nhạy cảm của hệ thống với nhiễu. Sử dụng phương pháp COA làm tăng độ bền vững và sự chính xác trong điều khiển.

Hoạt động của bộ điều khiển mờ phụ thuộc vào sự thích hợp của các định nghĩa miền cho cả các biến đầu vào và đầu ra mờ. Khi định nghĩa hợp lý các biến mờ cho một hệ thống điện - thủy lực cụ thể sẽ nâng cao độ ổn định, độ chính xác và sự bù sai lệch phi tuyến của bộ điều khiển mờ. Thường thì, một hàm liên thuộc tam giác μ_{FV} được định nghĩa bởi miền giá trị của a_i, a_j và a_k cho mỗi giá trị mờ (FV) trong bộ điều khiển mờ:

$$\mu_A = \begin{bmatrix} \mu_{NL} \\ \mu_{NM} \\ \mu_{NS} \\ \mu_{ZE} \\ \mu_{PS} \\ \mu_{PM} \\ \mu_{PL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_1 & a_2 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ a_2 & a_3 & a_4 \\ a_3 & a_4 & a_5 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_5 & a_6 & a_7 \\ a_6 & a_7 & a_7 \end{bmatrix} \tag{10.35}$$

trong đó đây μ_A là một tập hợp các hàm liên thuộc cho mỗi biến đầu vào và đầu ra mờ; a_i, a_k là các giá trị biên; và a_j là điểm thành viên đầy đủ của giá trị mờ.

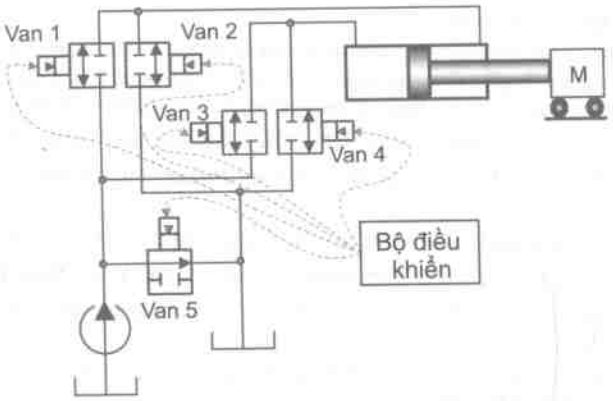
Phương trình (10.35) sử dụng một tập hợp miền giá trị để định nghĩa bảy giá trị mờ trong vùng làm việc sử dụng giá trị thực. Bộ điều khiển mờ sẽ xác định các giá trị miền cho mỗi bộ giá trị mờ. Các vectơ sau biểu diễn các miền của bộ hàm liên thuộc cho một biến cụ thể:

$$A = \{a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6 \quad a_7\} \tag{10.36}$$

10.7 Các van điện - thuỷ lực khả trình

Các van thuỷ lực điều khiển hướng và tỷ lệ là những công cụ thường dùng nhất để điều khiển chuyển động của các động cơ thuỷ lực hoặc các xi lanh thuỷ lực trong các hệ thống thuỷ lực [8]. Thường thì, một van điều khiển hướng tỷ lệ sử dụng một ống trượt để điều khiển hướng và lượng chất lỏng chuyển qua van. Với các ứng dụng khác nhau, các ống này thường được thiết kế đặc biệt để cung cấp các đặc tính điều khiển mong muốn. Vì vậy, cần sử dụng các van đúng chức năng và không thể thay đổi các van với nhau thậm chí kể cả khi chúng có kích cỡ giống nhau hoàn toàn. Việc chế tạo, phân phối và bảo dưỡng một số lượng lớn chủng loại các van chuyên dụng rất không thuận tiện và tốn kém. Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu tại trường Đại học Illinois ở Urbana-Champaign [2, 6] đã chế tạo một bộ van điều khiển thuỷ lực đa dụng khả trình. Bộ van đa dụng khả trình là một bộ các van điện - thủy lực được điều khiển riêng biệt có thể thực hiện các yêu cầu điều khiển áp suất. Một bộ các van đa dụng như trên có thể thay thế một van điều khiển hướng, tỷ lệ và các van phụ khác, ví dụ như các van xả trong hệ thống.

Một van điện - thủy lực đa dụng khả trình thường bao gồm năm van điều khiển dòng chảy tỷ lệ hai hướng, ba cảm biến áp suất và một bộ điều khiển điện tử. Hình 10.7 đưa ra sơ đồ của hệ thống van đa dụng. Van số 1 và số 2 nối với bơm và với phần trên hoặc phần dưới của buồng chứa của xi lanh và sẽ đảm bảo các cổng cân bằng P-A và P-B giống như trong van điều khiển hướng truyền thống. Trong khi đó các van số 3 và số 4 nối buồng chứa A và B của xi lanh với thùng chứa và đảm bảo các cổng cân bằng A-T và B-T như ở van điều khiển hướng truyền thống. Van số 5 nối trực tiếp với bơm và thùng chứa với mục đích cung cấp cho một van điều khiển hướng 2 chức năng đồng thời vừa là cổng xả vừa là cổng cân bằng theo hướng P-T. Có thể dễ dàng thấy được các chức năng cơ bản của van đa dụng bằng cách vận hành các quá trình mở và đóng chúng. Trong khi vận hành, các tín hiệu điều khiển đầu ra của bộ điều khiển cho mỗi van trên sẽ căn cứ trên luật lôgic điều khiển tiền định.



HÌNH 10.7 Sơ đồ hệ thống của một hệ thống thủy lực sử dụng các van điện - thủy lực đa dụng khả trình

Các luật lôgic thích hợp cho điều khiển đóng-mở cả năm van trên, sẽ cung cấp cho van đa dụng khả trình các chức năng cơ bản như: chức năng trung lập-mở, trung lập-đóng, trung lập-động và xả áp suất. Ứng dụng điều khiển môđun hoá, van đa dụng có thể có chức năng tỷ lệ như meter-in/meter-out, nhạy với tải, tự dẫn động và chống xâm thực (cavitation). Ví dụ ở các van điều khiển hướng kiểu trung lập-đóng hoặc trung lập nối tiếp truyền thống, các cổng A và B thường được đóng để giữ áp suất trong các buồng chứa của xi lanh, trong lúc đó các cổng P và T thường mở hoặc là đóng. Để thực hiện đầy đủ chức năng này, van đa dụng sẽ giữ các van số 1 đến 4 đóng nhằm bảo tồn áp suất buồng chứa của xi lanh và mở hết van số 5 để đẩy dòng chất lỏng trở lại thùng chứa hoặc ở tại giá trị áp suất thấp (chức năng trung lập nối tiếp), hoặc khi áp suất hệ thống vượt quá một mức độ đã được đặt trước (chức năng trung lập-đóng). Với các van điều khiển hướng trung lập-mở truyền thống, thường tất cả các cổng được nối với nhau. Để sử dụng hết được chức năng này, van đa dụng sẽ giữ tất cả các van mở. Cũng tương tự, để cung cấp chức năng trung lập-động, van đa dụng này cần để mở các van số 3 và 4 để xả áp suất ở cả hai buồng chứa phía đầu trên và đầu dưới thanh của xi lanh. Trong cả hai trường hợp, chỉ mở van số 5 khi áp suất hệ thống vượt qua mức đã được đặt trước.

Trong hầu hết các trường hợp rất khó đạt được chức năng tự dẫn động từ một van điều khiển hướng. Để đạt được chức năng này, một van đa dụng cần mở van 1 và van 2 để dẫn dòng chảy quay về của buồng chứa đầu thanh trở lại buồng chứa đầu trên để cung cấp thêm dòng chảy để tăng tốc độ piston khi có tải tương ứng. Chức năng bổ sung trong một hệ thống thuỷ lực truyền thống được cung cấp bởi một van bổ sung riêng biệt nhằm cung cấp chất lỏng trực tiếp từ thùng chứa trong trường hợp có hiện tượng xâm thực. Van đa dụng này cũng có thể cung cấp chức năng này bằng cách thực hiện mở các van tương ứng nối từ xi lanh tới thùng chứa khi áp suất hệ thống dưới một mức độ cho phép.

Tài liệu tham khảo

[1] Anderson, W.R., *Controlling Electrohydraulic Systems*, Marcel Dekker, New York, NY, 1988.

[2] Book, R. and Goering, C.E., Programmable electrohydraulic valve, *SAE 1999 Transactions, Journal of Commercial Vehicles* (1997), Section 2, 108:346–352.

[3] Borghi, M.G., Cantore, G., Milani, M., and Paoluzzi, R., Analysis of hydraulic components using computational fluid dynamics models, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal C* (1998), 212:619–629.

[4] Lambeck, R.P., *Hydraulic Pumps and Motors: Selection and Application for Hydraulic Power Control Systems*, Marcel Dekker, New York, NY, 1983.

[5] Li, Z., Ge, Y., and Chen, Y., *Hydraulic Components and Systems* (in Chinese), Mechanical Industry Publishing, Beijing, China, 2000.

[6] Hu, H., Zhang, Q., and Alleyne, A., Multi-function realization of a generic programmable E/H valve using flexible control logic, *Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Power Transmission and Control* (2001), International Academic Publishers, Beijing, China, pp. 107–110.

[7] Merritt, H.E., *Hydraulic Control Systems*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1967.

[8] McCloy, D. and Martin, H.R., *The Control of Fluid Power*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1973.

[9] Passino, K.M. and Yurkovich, S., *Fuzzy Control*, Addition-Wesley, Menlo Park, CA, 1998.

[10] 10. Pedrycz, W., *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, 2nd edition, Wiley, New York, NY, 1993.

[11] Reed, E.W. and Larman, I.S., *Fluid Power with Microprocessor Control: An Introduction*, Prentice-Hall, New York, NY, 1985.

[12] Skinner, S.C. and Long, R.J., *Closed Loop Electrohydraulic Systems Manual*, 2nd edition, Vickers,Rochester Hills, MI, 1998.

[13] Viall, E.N. and Zhang, Q., Determining the discharge coefficient of a spool valve, *Proceedings of the American Control Conference* (2000), Chicago, IL, pp. 3600–3604.

[14] Watton, J., *Fluid Power Systems, Modeling, Simulation, Analog and Microcomputer Control*, Prentice-Hall, New York, NY, 1989.

[15] Welty, J.R., Wicks, C.E., and Wilson, R.E., *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 1984.

[16] Zhang, Q., Hydraulic linear actuator velocity control using a feedforward-plus-PID control, *International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing* (1999), 7:275–290.

[17] Zhang, Q., Design of a generic fuzzy controller for electrohydraulic steering, *Proceedings of theAmerican Control Conference* (2001), (in press).

11

Kỹ thuật điện

11.1 Mở đầu 11-1
11.2 Cơ sở của mạch điện 11-1
11.3 Phân tích mạch điện trở 11-15
11.4 Phân tích mạch AC 11-21

Giorgio Rizzoni
The Ohio State University

11.1 Mở đầu

Vai trò của kỹ thuật điện và điện tử trong các hệ cơ khí đã tăng lên rất nhanh trong hai thập kỷ qua nhờ những tiến bộ trong các lĩnh vực vật liệu và mạch tích hợp cho phép tích hợp các công nghệ đo, tính toán và cơ cấu chấp hành vào các hệ thống công nghiệp và các sản phẩm dân dụng. Các ví dụ của cuộc cách mạng tích hợp này liên quan tới một lĩnh vực mới gọi là *Cơ điện tử*, có thể tìm thấy trong lĩnh vực điện tử dân dụng (camera tự động chỉnh tiêu cự, máy in, các thiết bị dân dụng điều khiển bằng vi xử lý), trong tự động hoá công nghiệp và giao thông vận tải, đáng kể nhất là trong các phương tiện giao thông. Mục đích của chương này là xem xét và tổng kết lại những kiến thức cơ sở của nó làm tài liệu tham khảo nhanh và hữu ích tới các lĩnh vực khác nhau của kỹ thuật điện cho các kỹ sư thực hành cơ khí. Có sự nhấn mạnh đặc biệt đối với các chủ đề có khả năng liên quan đến việc thiết kế sản phẩm.

11.2 Cơ sở của mạch điện

Phần này trình bày các định luật cơ bản là cơ sở phục vụ việc phân tích và nghiên cứu mạch điện. Các khái niệm cơ bản được giới thiệu trong những trang đầu tiên này sẽ được sử dụng cho toàn bộ chương.

Đại lượng điện cơ bản là **điện tích** và lượng điện tích nhỏ nhất là điện tích của một điện tử có giá trị là:

$$q_e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ culông} \tag{11.1}$$

Với đơn vị C (culông) này thì lượng điện tích của một điện tử là khá nhỏ. Tuy nhiên, nó lại thích hợp khi ta cần định nghĩa dòng điện vì dòng điện là một dòng của một số lượng rất lớn các hạt điện tích. Các hạt mang điện tích khác trong nguyên tử là proton. Diện tích của proton có dấu dương và cùng độ lớn với điện tích của điện tử:

$$q_p = +1.602 \times 10^{-19} \text{ culông} \tag{11.2}$$

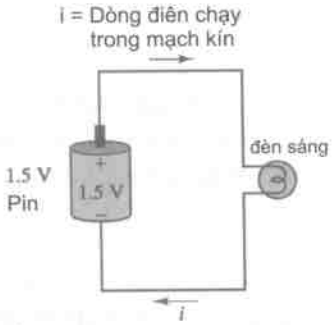
Các hạt electron và proton thường được gọi là các **điện tích nguyên tố**.

Dòng điện là tốc độ thay đổi theo thời gian của điện tích khi chuyển qua một tiết diện được xác định trước. Khi chúng ta xem tác động của một số lượng lớn các điện tích nguyên tố như tạo thành dòng chạy thực, chúng ta có thể viết mối quan hệ này ở dạng khác:

$$i = \frac{dq}{dt} (C/s) \tag{11.3}$$

Đơn vị của dòng điện là **ampe** (A), trong đó 1 A = 1 C/s. Trong kỹ thuật điện, người ta quy ước rằng chiều dương của dòng điện là chiều chuyển động của các điện tích dương. Tuy nhiên, trong các kim loại vật dẫn, dòng điện lại tạo thành từ các hạt điện tích âm; những điện tích này là các điện tử tự do trong lớp dẫn điện, chúng chỉ bị cấu trúc nguyên tử trong kim loại hút một cách yếu ớt nên dễ bị dời chỗ khi có các điện trường ngoài xuất hiện.

Để tồn tại dòng điện cần phải có một mạch kín. Hình 11.1 vẽ một mạch điện đơn giản, gồm có một nguồn (ví dụ pin khô hoặc pin kiềm 1.5V) và một bóng đèn sợi đốt.



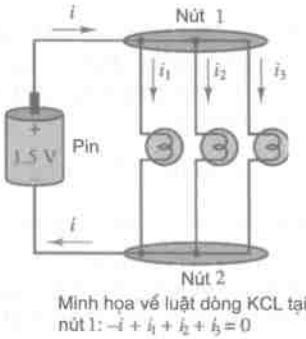
HÌNH 11.1 Một mạch điện đơn giản

Chú ý rằng trong mạch điện trên hình 11.1, dòng điện i chạy từ nguồn tới điện trở bằng dòng điện chạy từ bóng đèn tới nguồn điện. Nói một cách khác, dòng điện (và vì vậy điện tích) không bị "mất" trong mạch điện kín. Nguyên tắc này đã được quan sát bởi nhà khoa học Đức G. R. Kirchhoff và được gọi là là định luật dòng Kirchhoff (**Kirchhoff Current Law** - gọi tắt là KCL), KLC phát biểu rằng: vì điện tích phải được bảo toàn nên *tổng các dòng điện tại một nút phải bằng không*. Nút là một điểm giao nhau giữa hai hoặc nhiều vật dẫn. Công thức toán biểu diễn định luật này như sau:

$$\sum_{n=1}^{N} i_n = 0 \quad \text{(Định luật dòng Kirchhoff)} \tag{11.4}$$

Hình 11.2 minh hoạ cho định luật Kirchhoff, ở đây mạch điện đơn giản trên hình 11.2 đã được tăng thêm 2 bóng đèn (chú ý tới hai nút trên mạch điện đã được tô màu). Khi áp dụng KCL, thường định nghĩa dòng điện đi vào một nút là dấu âm và ra khỏi nút là mang dấu dương. Vì vậy phương trình biểu diễn mạch điện hình 11.2 là:

$$i + i_1 + i_2 + i_3 = 0$$



HÌNH 11.2 Minh hoạ cho định luật dòng Kirchhoff

Như đã nêu trên, điện tích di chuyển trong một mạch điện tạo ra một dòng điện. Hiển nhiên cần phải có một công hay năng lượng để làm cho điện tích di chuyển giữa hai điểm trong mạch điện,

ví dụ từ điểm *a* tới điểm *b*. *Công tổng cộng trên một đơn vị điện tích* liên quan tới chuyển động của điện tích giữa hai điểm được gọi là **điện áp**. Do đó, đơn vị điện áp là năng lượng trên một đơn vị điện tích:

$$1 \text{ vôn} = \frac{1 \, Jun}{\text{culông}} \tag{11.5}$$

Điện áp hay là **sự chênh điện thế** giữa hai điểm trong một mạch điện thể hiện năng lượng cần thiết để di chuyển điện tích từ một điểm này tới điểm khác. Như sẽ chỉ ra ngay sau đây, hướng hoặc chiều phân cực của điện áp có mối quan hệ chặt chẽ với điều kiện năng lượng đang bị hao tán hay đang được phát sinh trong quá trình. Khái niệm có vẻ trừu tượng của công ở trên có thể được sử dụng trực tiếp để phân tích các mạch điện; lại xét mạch điện đơn giản bao gồm một nguồn và một đèn sợi đốt. Vẽ lại mạch như hình 11.3. Để tiện cho việc phân tích, kí hiệu các nút bằng các chữ *a* và *b*. Quan sát kĩ điện thế trong một mạch điện Kirchhoff để xây dựng công thức cho định luật thứ hai của Kirchhoff, **định luật điện thế Kirchhoff** (Kirchhoff's Voltage Law - gọi tắt là KVL). Nguyên tắc cơ bản của KVL là không có năng lượng nào bị mất đi hoặc sinh ra trong một mạch điện; Trong mọi mạch điện, tổng tất cả các điện thế của các nguồn phải bằng tổng các điện thế trên tải, do đó *điện thế trong một mạch kín là bằng* 0. Nếu không thoả mãn điều kiện này, chúng ta cần tìm một sự giải thích có tính vật lý cho sự thừa hoặc thiếu năng lượng. KVL có thể được phát biểu theo cách tương đương đã dùng cho KCL như sau:

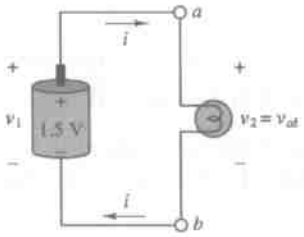
$$\sum_{n=1}^{N} v_n = 0 \quad \text{(Định luật điện áp Kirchhoff)} \tag{11.6}$$

trong đó v_n là các điện thế riêng phần trong mạch kín. Xem hình 11.3, chúng ta có thể thấy rằng theo KVL, công sinh ra bởi nguồn cân bằng với năng lượng bị tiêu thụ trên bóng đèn sợi đốt để duy trì dòng điện và chuyển năng lượng điện thành nhiệt và ánh sáng:

$$v_{ab} = -v_{ba}$$

hoặc:

$$v_1 = v_2$$



Minh họa luật áp Kirchhoffs:

$$v_1 - v_2 = 0$$

HÌNH 11.3 Điện áp trên một mạch điện

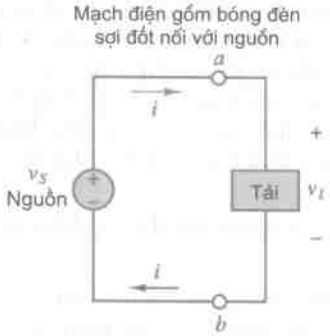
Có thể coi công để di chuyển một điện tích từ điểm *a* tới điểm *b* và công để điện tích này di chuyển ngược lại từ *b* về *a chính là điện áp trên từng phần tử mạch*. Gọi Q là tổng điện tích di chuyển trong mạch trong một đơn vị thời gian, sinh ra dòng điện *i*. Khi đó công sinh ra để di chuyển Q từ *b* đến *a* (đi qua nguồn) là:

$$W_{ba} = \text{Q} \times 1.5V \tag{11.7}$$

Tương tự, công sinh ra để di chuyển Q từ *a* đến *b* đi qua bóng đèn. Chú ý rằng khái niệm *điện thế* đồng nghĩa với khái niệm điện áp, trong đó điện áp biểu diễn thế năng giữa hai điểm trong mạch điện: khi tháo bóng đèn khỏi mạch điện (không nối với nguồn), vẫn tồn tại một điện áp giữa hai đầu *b* và *a*.

Cần phải xác định dấu của đại lượng này. Xét lại trường hợp nguồn pin khô hoặc pin kiềm, phản ứng điện hoá sinh ra sự chênh điện thế là 1.5 V. Điện thế mà nguồn tạo ra có thể được dùng để di chuyển điện tích trong mạch điện. Một khi một mạch điện kín được thiết lập (tức là dòng điện được sinh ra khi nối mạch với nguồn) thì tốc độ di chuyển điện tích sẽ phụ thuộc vào phần tử mạch mà ta chọn để nối vào nguồn. Do đó, điện áp nguồn thể hiện điện thế để *cấp năng lượng* cho mạch điện, còn điện áp trên bóng đèn là công *tiêu thụ năng lượng*. Ở trường hợp đầu tiên, năng lượng được sinh ra, ở trường hợp thứ hai, là năng lượng bị tiêu thụ (chú ý rằng năng lượng cũng có thể được tích trữ bằng các phần tử mạch thích hợp sẽ được giới thiệu sau). Sự khác biệt cơ bản này đòi hỏi phải chú ý khi xác định chiều phân cực của điện áp.

Một cách tổng quát, chúng ta sẽ coi các phần tử cung cấp năng lượng là **nguồn** và các phần tử tiêu thụ năng lượng là **tải**. Các ký hiệu chuẩn cho một mạch điện với nguồn và tải được đưa ra trên hình 11.4. Các định nghĩa thường dùng sẽ tiếp tục được nêu ở phần sau.



HÌNH 11.4 Nguồn và tải trong một mạch điện

Quy ước về dấu và công suất

Định nghĩa điện áp là công trên một đơn vị điện tích phù hợp định nghĩa công suất. Nhớ rằng công suất được định nghĩa là công thực hiện trong một đơn vị thời gian. Do đó, công suất P hoặc là được sinh ra hoặc là bị tiêu thụ bởi các phần tử trên một mạch điện được biểu diễn bằng mối quan hệ sau đây:

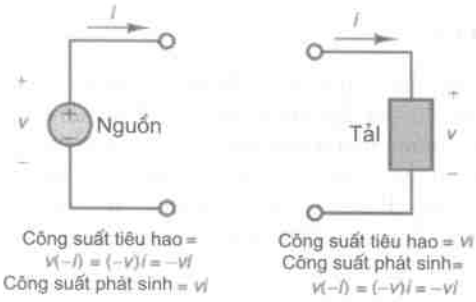
$$\text{Công suất} = \frac{\text{công}}{\text{thời gian}} = \frac{\text{công}}{\text{đơn vị điện tích}} \times \frac{\text{điện tích}}{\text{thời gian}} = \text{điện áp} \times \text{dòng điện} \qquad (11.8)$$

Do đó, năng lượng điện (được tạo ra bởi một phần tử tích cực hoặc bị tiêu thụ hoặc được lưu giữ bởi một phần tử thụ động), sẽ bằng tích của điện áp trên phần tử và dòng điện chạy qua nó như sau:

$$P = VI \qquad (11.9)$$

Dễ dàng thấy rằng các đơn vị điện áp (jun/culông) nhân với đơn vị của dòng điện (culông/giây) chính là đơn vị của năng lượng (jun/giây hay còn gọi là oát (W)).

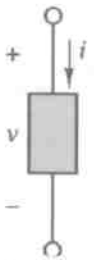
Cần chú ý rằng, cũng giống như điện áp, công suất là một đại lượng có dấu và cần phải phân biệt giữa *công suất dương* và *công suất âm*. Để hiểu được sự phân biệt này tham khảo hình 11.5, trên đó thể hiện một nguồn và một tải tách thành hai hình đặt cạnh nhau. Cực tính của điện áp nguồn và chiều dòng điện chỉ ra rằng *nguồn điện áp đang sinh công di chuyển điện tích từ điểm có điện thế thấp hơn đến điểm có điện thế cao hơn*. Ngược lại, tải đang tiêu thụ năng lượng, bởi vì chiều của dòng điện chỉ ra rằng *điện tích đang được chuyển dời từ điểm có điện thế cao hơn tới điểm có điện thế thấp hơn*. Để tránh nhầm lẫn chiều của công suất, trong kỹ thuật điện, người ta đưa ra **quy ước chung về dấu thụ động**. Quy ước này quy định *công suất tiêu thụ trên một tải là một đại lượng dương* (hoặc, ngược lại công suất được sinh ra bởi một nguồn là một đại lượng dương). Có thể phát biểu theo cách khác như sau: khi dòng điện chạy từ một nơi có điện thế cao đến một nơi có điện thế thấp (+ tới -), công suất tiêu thụ sẽ là một đại lượng dương.



HÌNH 11.5 Quy ước về dấu

Các phần tử của mạch và các đặc tuyến *i-v* của chúng

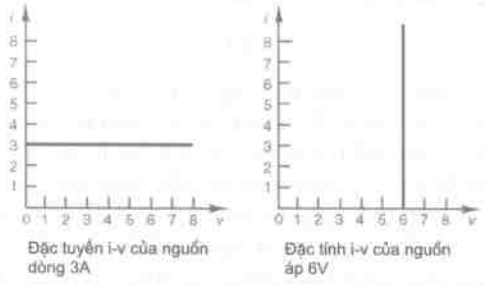
Mối quan hệ giữa dòng điện và điện áp trên các đầu của một phần tử mạch điện xác định cách hoạt động của phần tử này trong mạch điện. Phần này sẽ giới thiệu các phương tiện đồ thị để biểu diễn các đặc tính của các phần tử mạch điện. Hình 11.6 là một phần tử mạch tổng quát được sử dụng trong suốt chương này: biến *i* biểu diễn dòng điện đi qua phần tử, biến *v* là chênh lệch điện thế hay điện áp trên phần tử.



HÌNH 11.6 Biểu diễn chung của các phần tử mạch điện

Giả sử đặt một điện áp đã biết lên một phần tử mạch. Điện áp này và điện áp của bản thân phần tử sẽ tạo ra một dòng điện. Nếu điện áp cấp biến đổi thì dòng điện cũng thay đổi theo. Quan hệ giữa điện áp và dòng điện được gọi là **đặc tuyến *i-v* (đặc tuyến vôn-ampe)**. Quan hệ này sẽ xác định phần tử mạch. Sử dụng đặc tuyến *i-v* của một phần tử chúng ta có thể tính trực tiếp được dòng điện (hoặc điện thế) tương ứng với một điện thế (hoặc dòng điện) đã biết trước đi qua phần tử. Từ đặc tuyến *i-v* ta cũng xác định được năng lượng bị tiêu thụ hoặc được phát ra bởi phần tử.

Đặc tuyến *i-v* của các nguồn điện áp và nguồn dòng điện lý tưởng cũng có thể hữu ích trong việc biểu diễn trực quan cách thức hoạt động của chúng. Một nguồn áp lý tưởng sẽ tạo ra một điện áp quy định không phụ thuộc vào dòng điện chạy qua tải; do đó, đặc tuyến *i-v* của nó là đường thẳng đứng cắt trục điện áp tại vị trí tương ứng với giá trị điện áp của nguồn. Tương tự, đặc tuyến *i-v* của một nguồn dòng lý tưởng là một đường nằm ngang cắt trục dòng điện tại vị trí tương ứng với giá trị nguồn dòng. Hình 11.7 mô tả các đặc tuyến trên.



HÌNH 11.7 Đặc tuyến *i-v* của các nguồn lý tưởng

Điện trở và định luật Ôm

Khi dòng điện chạy qua một dây dẫn kim loại hoặc các phần tử mạch điện khác, nó sẽ gặp phải một lượng **điện trở** nào đó có độ lớn phụ thuộc vào các thuộc tính điện của vật liệu. Điện trở đối với dòng điện có thể là không mong muốn như trong trường hợp của dây dẫn và cáp nối, nhưng có thể được khai thác một cách có ích. Tuy nhiên, trong thực tế tất cả các phần tử mạch điện đều có một điện trở nào đó, vì vậy dòng điện chạy qua một phần tử sẽ sinh ra năng lượng được hao tán dưới dạng nhiệt. Theo định luật Ôm, một **điện trở** lý tưởng là một thiết bị có các đặc tính điện trở tuyến tính, phát biểu như sau:

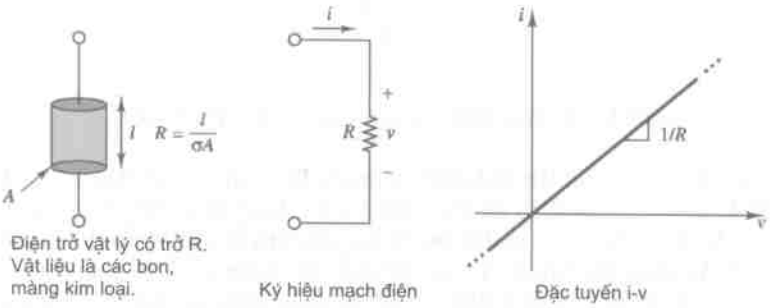
$$V = IR \tag{11.10}$$

Điều đó có nghĩa là điện áp trên một phần tử tỷ lệ thuận với dòng điện đi qua nó. R là giá trị của điện trở với đơn vị là Ω (Ôm), ở đây:

$$1\Omega = 1\,V/A \tag{11.11}$$

Điện trở của vật liệu phụ thuộc vào một thuộc tính được gọi là **điện trở suất**, ký hiệu là ρ; nghịch đảo của điện trở suất là **điện dẫn**, ký hiệu là σ. Đối với một phần tử điện trở dạng hình trụ (hình 11.8), điện trở tỷ lệ với chiều dài l của nó và tỷ lệ nghịch với thiết diện ngang A và điện dẫn của nó:

$$v = \frac{l}{\sigma A} i \tag{11.12}$$



HÌNH 11.8 Phần tử điện trở

Thường người ta định nghĩa **điện dẫn** của một phần tử là nghịch đảo với điện trở của nó. G được dùng để ký hiệu điện dẫn của một phần tử:

$$G = \frac{1}{R} \text{siemens } (S), \quad \text{trong đó } 1\ S = 1\ A/V \tag{11.13}$$

Do đó, có thể phát biểu định luật Ôm theo độ dẫn như sau:

$$I = GV \tag{11.14}$$

Định luật Ôm là một phát biểu dựa vào kinh nghiệm, được ứng dụng rộng rãi trong kỹ thuật điện bởi tính đơn giản của nó. Tuy nhiên, định luật này chỉ gần đúng về mặt vật lý đối với các vật liệu dẫn điện. Thường thì mối quan hệ tuyến tính giữa điện áp và dòng điện trong các chất dẫn điện không áp dụng được khi điện áp và dòng điện rất lớn. Hơn nữa, thực tế không phải tất cả các chất dẫn điện đều có quan hệ tuyến tính ngay cả trường hợp điện áp và dòng điện nhỏ. Tuy nhiên, hầu hết các phần tử mạch điện có *đặc tuyến i-v* là tuyến tính trong một số dải điện áp và dòng điện.

Hình 11.8 thể hiện cấu trúc điển hình và ký hiệu của điện trở. Điện trở được làm từ các miếng carbon hình trụ (với điện trở suất $\rho = 3.5 \times 10^{-5}$ Ωm) rất phổ biến và có sẵn trên thị trường với một

dải giá trị rộng ứng với một số dải công suất (sẽ được giải thích sau). Một kỹ thuật thường dùng nữa là dùng màng mỏng kim loại. Dải công suất thông dụng cho các điện trở thường được sử dụng trong các mạch điện tử (ví dụ trong hầu hết các ứng dụng điện tử gia dụng như radiô, máy thu hình) là ¼ W. Bảng 11.1 liệt kê các giá trị tiêu chuẩn thường dùng của các điện trở và mã màu liên quan tới các giá trị này (có nghĩa là các tổ hợp các con số $b_1b_2b_3$ như được định nghĩa trên hình 11.9). Thí dụ, khi ba vòng màu đầu tiên trên một điện trở là các màu đỏ ($b_1 = 2$), màu tím ($b_2 = 7$) và màu vàng ($b_3 = 4$), thì giá trị điện trở là như sau:

$$R = 27 \times 10^4 = 270,000\,\Omega = 270\,k\Omega$$

BẢNG 11.1 Một số giá trị điện trở thông dụng (Trong dải 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2 W)

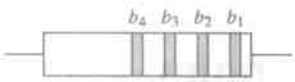
Ω	Mã màu	Ω	Hệ số nhân	kΩ	Hệ số nhân	kΩ	Hệ số nhân	kΩ	Hệ số nhân
10	Nâu-đen-đen	100	Nâu	1.0	Vàng	10	Da cam	100	Vàng
12	Nâu-đỏ-đen	120	Nâu	1.2	Vàng	12	Da cam	120	Vàng
15	Nâu-xanh lá cây-đen	150	Nâu	1.5	Vàng	15	Da cam	150	Vàng
18	Nâu-xám-đen	180	Nâu	1.8	Vàng	18	Da cam	180	Vàng
22	Đỏ-đỏ-đen	220	Nâu	2.2	Vàng	22	Da cam	220	Vàng
27	Đỏ-tím-đen	270	Nâu	2.7	Vàng	27	Da cam	270	Vàng
33	Da cam-da cam-đen	330	Nâu	3.3	Vàng	33	Da cam	330	Vàng
39	Da cam-trắng-đen	390	Nâu	3.9	Vàng	39	Da cam	390	Vàng
47	Vàng-tím-đen	470	Nâu	4.7	Vàng	47	Da cam	470	Vàng
56	Xanh lá cây-xanh lục-đen	560	Nâu	5.6	Vàng	56	Da cam	560	Vàng
68	Xanh lục-xám-đen	680	Nâu	6.8	Vàng	68	Da cam	680	Vàng
82	Xám-đỏ-đen	820	Nâu	8.2	Vàng	82	Da cam	820	Vàng

Ở bảng 11.1, cột màu thứ nhất biểu diễn mã màu đầy đủ; các cột màu (nhân bội) tiếp theo chỉ biểu diễn màu thứ ba, do đó chỉ có màu thứ ba thay đổi. Ví dụ điện trở 10 Ω có mã nâu-đen-*đen*, trong khi điện trở 100 Ω là nâu-đen-*nâu*.

Ngoài điện trở tính theo Ω, công suất tiêu thụ tối đa cho phép (hay **công suất định mức**) cũng được ghi rõ trên các điện trở trên thị trường. Nếu vượt quá công suất định mức sẽ dẫn tới hiện tượng quá nhiệt và có thể là nguyên nhân gây cháy điện trở. Với một điện trở R, công suất tiêu thụ sẽ là:

$$P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R} \tag{11.15}$$

Ở đây, công suất tiêu thụ trên một điện trở tỷ lệ với bình phương dòng điện đi qua nó và cũng tỷ lệ với bình phương điện áp đi qua nó. Ví dụ sau sẽ minh hoạ một ứng dụng kỹ thuật thông thường của các phần tử điện trở: đo biến dạng bằng điện trở.



đen	0	xanh da trời	6
nâu	1	tím	7
đỏ	2	xám	8
cam	3	trắng	9
vàng	4	bạc	10%
xanh lá cây	5	vàng	5%

giá trị điện trở $= (b_1\,b_2) \times 10^{b_3}$;
b_4 = dung sai về độ chính xác thật.

HÌNH 11.9 Mã màu của điện trở

Ví dụ 11.1 Đo biến dạng bằng điện trở

Một ứng dụng phổ biến của điện trở trong kỹ thuật đo lường là để đo **biến dạng**. Các đầu đo biến dạng là thiết bị được gắn chặt vào bề mặt của một đối tượng và điện trở của nó sẽ thay đổi như là một hàm của biến dạng bề mặt của đối tượng. Các đầu đo biến dạng có thể được sử dụng để đo biến dạng, sức căng, lực, mômen xoắn và áp suất. Nhớ rằng điện trở của một vật dẫn điện hình trụ có thiết diện A, chiều dài L và độ dẫn suất σ được tính bởi biểu thức:

$$R = \frac{L}{\sigma A}$$

Khi vật dẫn bị nén hoặc bị kéo giãn bởi tác dụng của một ngoại lực, các kích thước của nó sẽ thay đổi và do đó điện trở của chúng cũng thay đổi theo. Đặc biệt, khi vật dẫn bị kéo giãn, diện tích thiết diện của nó sẽ giảm và do đó điện trở sẽ tăng. Khi vật dẫn bị nén, điện trở của nó sẽ giảm, do chiều dài L giảm. Mối quan hệ giữa sự thay đổi điện trở và sự thay đổi chiều dài được thể hiện bởi hệ số điện dẫn G như sau:

$$G = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}$$

Và vì biến dạng ε được định nghĩa là tỷ số của gia số độ dài trên độ dài:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Nên sự thay đổi của điện trở theo biến dạng ε được biểu diễn như sau:

$$\Delta R = R_0 G \varepsilon$$

trong đó R_0 là điện trở của đầu đo khi không có biến dạng và được gọi là điện trở khi biến dạng bằng không. Giá trị G của các đầu đo biến dạng kiểu lá kim loại thường khoảng bằng 2.

Hình 11.10 vẽ một đầu đo đo biến dạng điển hình. Biến dạng lớn nhất có thể đo bằng một đầu đo loại này khoảng 0.4 – 0.5% tức là $\Delta L/L$= 0.004 đến 0.005. Đối với đầu đo 120 Ω, giá trị này tương ứng với sự thay đổi điện trở từ 0.96 – 1.2 Ω. Mặc dù sự thay đổi điện trở này rất bé, nhưng nó vẫn có thể được phát hiện bằng mạch điện thích hợp. Các đầu đo điện trở theo nguyên lý biến dạng thường được nối trong một mạch điện gọi là mạch cầu Wheatstone sẽ được phân tích kỹ hơn ở phần tiếp theo.

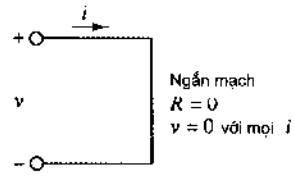
Ký hiệu mạch điện cho là điện trở đo biến dạng

Đầu đo sức căng là lá kim loại được tạo bởi quá trình khắc laze và có độ dày nhỏ hơn 0.00002 inch. Giá trị điện trở thường là 120,350 và 1000 ôm.

HÌNH 11.10 Đầu đo biến dạng

Ngắn mạch và hở mạch

Hai trường hợp lý tưởng hoá của phần tử điện trở là những trường hợp giới hạn của định luật Ôm khi trở kháng tiến dần đến không hoặc vô cùng. Một phần tử mạch điện có điện trở tiến tới 0 thì gọi là phần tử **ngắn mạch**. Dễ thấy, phần tử ngắn mạch không có tác dụng cản dòng điện chạy qua. Trong thực tế, các chất dẫn điện kim loại (ví dụ các dây dẫn ngắn có đường kính lớn) có đặc tính gần giống với của phần tử ngắn mạch. Phần tử ngắn mạch được định nghĩa là một phần tử mạch điện mà điện áp trên nó bằng không, ở đây không chú ý đến dòng điện qua nó. Hình 11.11 thể hiện ký hiệu mạch cho phần tử ngắn mạch lý tưởng.



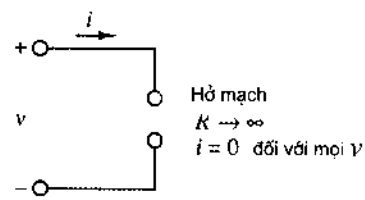
HÌNH 11.11 Phần tử ngắn mạch

Thông thường, bất kỳ dây dẫn kim loại nào đều có điện trở, dù là nhỏ. Tuy nhiên, dưới các điều kiện nhất định, trong các ứng dụng thực tế, với độ chính xác cao nhiều phần tử được coi là phần tử ngắt mạch. Ví dụ một ống dẫn bằng đồng đường kính lớn thực tế sẽ là phần tử ngắn mạch với một nguồn cấp điện, trong khi đó trong một mạch vi điện tử công suất thấp (ví dụ đài FM) một đoạn dây dẫn ngắn cỡ 24 (tham khảo bảng 11.2 về điện trở của dây dẫn cỡ 24) sẽ là một phần tử ngắn mạch thích hợp hơn.

Một phần tử mạch điện có điện trở tiến tới vô cùng được gọi là một phần tử **hở mạch**. Có thể thấy ngay rằng, sẽ không có dòng điện đi qua một phần tử hở mạch, vì điện trở của nó là vô cùng với mọi loại dòng điện. Trong một phần tử hở mạch, dòng điện luôn bằng không với mọi điện thế bên ngoài cấp lên mạch. Hình 11.12 minh họa khái niệm này.

BẢNG 11.2 Điện trở của dây dẫn đồng

Cỡ AWG	Số sợi dây	Đường kính dây	Điện trở trên mỗi 1000 feet dây (Ω)
24	đặc	0.0201	28.4
24	7	0.0080	28.4
22	đặc	0.0254	18.0
22	7	0.0100	19.0
20	đặc	0.0320	11.3
20	7	0.0126	11.9
18	đặc	0.0403	7.2
18	7	0.0159	7.5
16	đặc	0.0508	4.5
16	19	0.0113	4.7



HÌNH 11.12 Phần tử hở mạch

Trong thực tế, tạo một phần tử hở mạch là không khó chỉ cần ngắt đường dẫn. Tuy nhiên, mạch hở mạch lý tưởng như trên hình 11.12 không đáp ứng với các điện áp rất cao. Vật liệu cách điện giữa hai cực sẽ bị đánh thủng ở điện áp đủ lớn. Khi chất cách điện là không khí, các phần tử trong vùng lân cận giữa hai phần tử dẫn điện có thể bị ion hoá, có thể dẫn tới hiện tượng phóng điện; nói cách khác, một xung dòng có thể được tạo ra tức thời ở khe giữa hai phần tử dẫn điện (nhờ nguyên lý này, chúng ta có thể đốt hỗn hợp khí-nhiên liệu trong một động cơ đốt trong kiểu đánh lửa bằng công tắc đánh lửa). Hở mạch và ngắn mạch lý tưởng là những khái niệm hữu ích và chúng được ứng dụng rất nhiều trong việc phân tích mạch điện.

Các điện trở mắc nối tiếp và luật phân áp

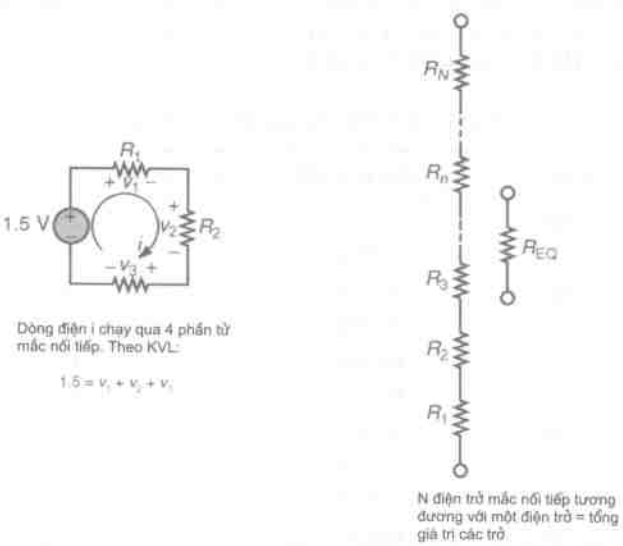
Mặc dù các mạch điện có thể rất phức tạp, nhưng vẫn có thể được đơn giản hóa thành các tổ hợp *song song* và *nối tiếp* của các phần tử mạch. Do đó, việc quan trọng đầu tiên là làm quen các mạch song song và nối tiếp đơn giản trước khi tiếp cận việc phân tích mạng điện. Các mạch song song và nối tiếp có mối quan hệ mật thiết với định luật của Kirchoff. Mục đích của phần này và phần tiếp theo là minh hoạ hai mạch hay gặp đó là các bộ phân dòng và phân áp dựa trên các tổ hợp điện trở song song và nối tiếp. Các dạng mạch này là cơ sở để phân tích mạng điện; do đó việc hiểu rõ các vấn đề này rất quan trọng.

Một ví dụ về mạch điện nối tiếp được chỉ ra ở hình 11.13, ở đây có một nguồn điện nối với các điện trở R_1, R_2 và R_3. Áp dụng định nghĩa sau:

"Hai hoặc nhiều phần tử được gọi là **nối tiếp** khi có cùng một dòng điện chạy qua mỗi phần tử"

Vì vậy ba điện trở mắc nối tiếp có thể thay bằng một điện trở có giá trị R_{EQ} mà không làm thay đổi dòng điện qua chúng. Từ kết quả này chúng ta có thể suy rộng cho trường hợp tổng quát hơn với N điện trở mắc nối tiếp:

$$R_{EQ} = \sum_{n=1}^{N} R_n \tag{11.16}$$



HÌNH 11.13 Nguyên tắc của bộ phân áp

Điều này cũng được minh hoạ trên hình 11.13. Một khái niệm gắn liền với trường hợp điện trở mắc nối tiếp là **bộ phân áp**.

Dạng tổng quát của luật phân áp cho mạch điện có N điện trở mắc nối tiếp với một nguồn áp là:

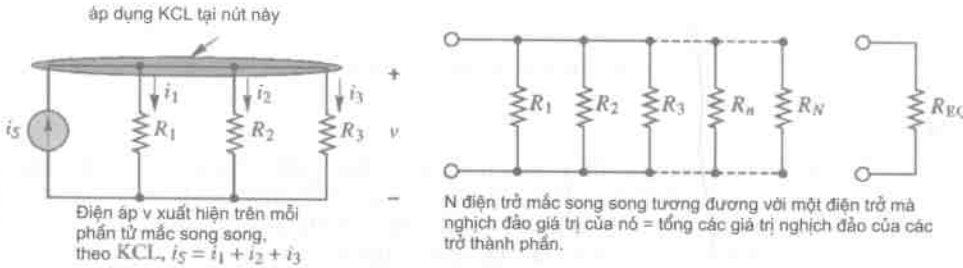
$$v_n = \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \ldots + R_n + \ldots + R_N} v_s \tag{11.17}$$

Các điện trở mắc song song và luật phân dòng

Bằng cách áp dụng định luật về dòng điện của Kirchhoff, có thể phát triển một khái niệm tương tự cho mạch điện chỉ có các điện trở mắc song song.

Định nghĩa

Hai hoặc nhiều phần tử mạch điện được gọi là **song song** với nhau khi có cùng một điện áp trên mỗi phần tử (hình 11.14).



HÌNH 11.14 Các mạch song song

N điện trở mắc song song có thể được thay thế bằng một điện trở tương đương R_{EQ} có công thức như sau:

$$\frac{1}{R_{EQ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_N} \tag{11.18}$$

hoặc:

$$R_{EQ} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + \ldots + 1/R_N} \tag{11.19}$$

Trong quyển sách này cần rất chú ý rằng chúng ta ký hiệu về một bộ (hai hoặc nhiều) các điện trở mắc song song như sau:

$$R_1 \| R_2 \| \ldots$$

trong đó ký hiệu || có nghĩa là "song song với".

Công thức tổng quát cho luật phân dòng trên một mạch điện có N điện trở mắc song song là:

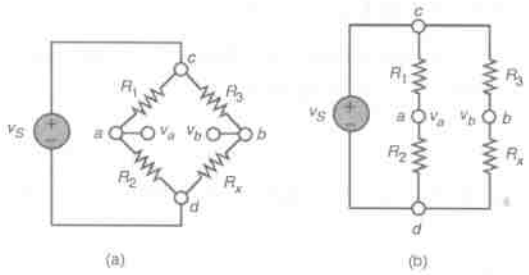
$$i_n = \frac{1/R_n}{1/R_1 + 1/R_2 + \ldots + 1/R_n + \ldots + 1/R_N} i_s \tag{11.20}$$

Ví dụ 11.2 Cầu Wheatstone

Cầu Wheatstone là một mạch các điện tử thường được sử dụng trong rất nhiều mạch đo. Dạng tổng quát của cầu được thể hiện trên hình 11.15(a), ở đây R_1, R_2 và R_3 đã biết, R_x là điện trở chưa biết và cần phải xác định. Cũng có thể biểu diễn mạch cầu theo như trên hình 11.15(b), mạch điện này sẽ được sử dụng để minh hoạ cho việc sử dụng bộ phân áp trong một mạch hỗn hợp song song-nối tiếp.

Mục đích chính là xác định điện trở chưa biết R_x.

1. Tìm giá trị điện áp $v_{ad} = v_{ad} - v_{bd}$ theo bốn điện trở biết trước và điện áp của nguồn v_s. Chú ý rằng do điểm quy chiếu d là như nhau cho hai cả hai điện áp, chúng ta có thể viết $v_{ab} = v_a - v_b$.
2. Nếu $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ kΩ, $v_s = 12$ V và $v_{ab} = 12$ mV thì giá trị R_x là bao nhiêu?



HÌNH 11.15 Các mạch cầu Wheatstone

Lời giải

1. Đầu tiên, chúng ta quan sát thấy rằng mạch điện bao gồm ba mạch phụ nhỏ mắc song song với nhau: nguồn điện áp, mạch hai điện trở R_1 và R_2 mắc nối tiếp và mạch hai điện trở R_3 và R_x mắc nối tiếp. Do ba mạch nhánh này mắc song song với nhau, qua chúng sẽ xuất hiện cùng một điện áp, chính là điện áp của nguồn v_s.

   Vì vậy, điện áp của nguồn trên mỗi cặp điện trở R_1-R_2 và R_3-R_x, được xác định theo luật phân áp là: v_a là một phần của nguồn điện áp đặt trên R_2 và v_b là phần còn lại trên R_x:

$$v_a = v_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{và} \quad v_b = v_s \frac{R_x}{R_3 + R_x}$$

   Cuối cùng, có thể tính được hiệu điện thế giữa hai điểm a và b như sau:

$$v_{ab} = v_a - v_b = v_S \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_3 + R_x} \right)$$

   Đây là một kết quả tổng quát và rất hữu dụng, kết quả này được ứng dụng rất nhiều trong các mạch điện thực tế.

2. Để có thể tìm được điện trở chưa biết, chúng ta thay các giá trị số vào phương trình đã nêu ở trên:

$$0.012 = 12 \left(\frac{1000}{2000} - \frac{R_x}{1000 + R_x} \right)$$

   Từ đó có thể tìm được R_x:

$$R_x = 966\,\Omega$$

Các nguồn áp và nguồn dòng trong thực tế

Các mô hình lý tưởng hoá của nguồn áp và nguồn dòng sẽ không hợp lý khi xem xét bản chất của các nguồn dòng và áp trong thực tế với mức năng lượng giới hạn. Mục đích của phần này là mở rộng mô hình lý tưởng để có thể mô tả được các giới hạn vật lý của các nguồn dòng và áp sử dụng trong thực tế. Thí dụ, xét một mô hình của nguồn áp lý tưởng. Khi điện trở tải (R) giảm, dòng điện của nguồn cung cấp tăng để duy trì mức điện áp $v_s(t)$ qua các cực của nó không đổi:

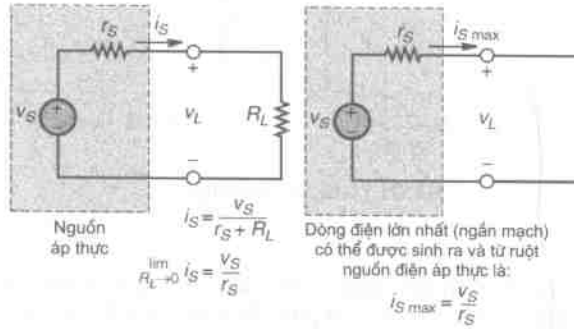
$$i(t) = \frac{v_S(t)}{R} \tag{11.21}$$

Mạch này được giải thích rằng nguồn áp lý tưởng cung cấp một dòng lớn vô cùng trên tải khi điện trở tải tiến tới không.

Hình 11.16 vẽ mô hình nguồn áp thực tế; bao gồm một nguồn áp lý tưởng v_s mắc nối tiếp với điện trở r_s. Có thể tính được giá trị giới hạn lớn nhất của dòng điện như sau:

$$i_{S\,max} = \frac{v_S}{r_S} \tag{11.22}$$

Dễ thấy rằng, tính chất mong muốn của một nguồn áp lý tưởng là có điện trở trong rất bé để thỏa mãn yêu cầu về dòng điện cấp cho một tải bất kỳ.

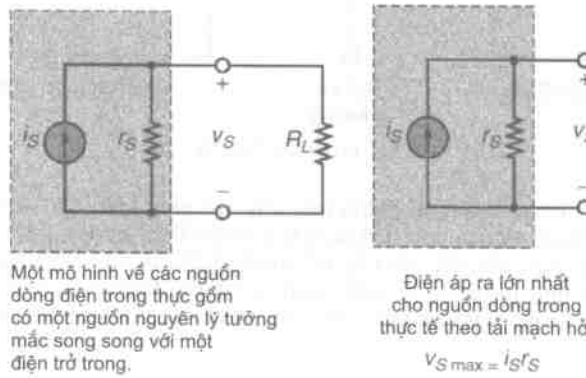


HÌNH 11.16 Nguồn áp thực tế

Để mô tả cách thức hoạt động của một nguồn dòng thực tế người ta cũng dùng mô hình nguồn dòng lý tưởng được sửa đổi tương tự như trên. Mạch điện hình 11.17 mô tả một nguồn dòng thực tế đơn giản, bao gồm một nguồn lý tưởng ghép song song với một điện trở. Chú ý rằng, khi điện trở tải tiến tới vô cùng (có nghĩa là mạch hở), điện áp ra của nguồn dòng sẽ tiến tới giới hạn của nó:

$$v_{S\,max} = i_S r_S \tag{11.23}$$

Một nguồn dòng tốt phải có khả năng hoạt động gần giống một nguồn dòng lý tưởng. Vì vậy điện trở trong của một nguồn dòng càng lớn càng tốt.



HÌNH 11.17 Nguồn dòng thực tế

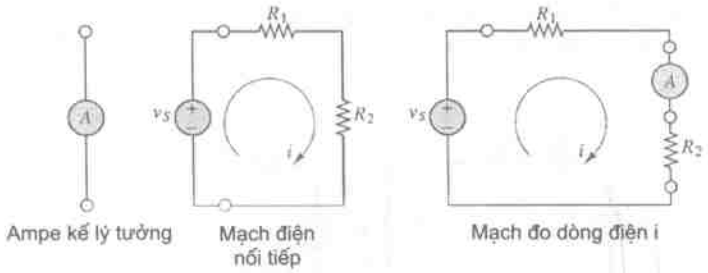
Các thiết bị đo

Ampe kế

Ampe kế là một thiết bị mà khi được nối nối tiếp với một phần tử mạch điện, nó có thể đo được dòng điện chạy qua phần tử đó. Hình 11.18 minh hoạ một ampe kế. Từ hình 11.18, ta thấy cần phải đảm bảo được hai yêu cầu để có thể đo dòng điện chính xác:

1. Phải mắc nối tiếp ampe kế với phần tử muốn đo dòng điện qua nó (ví dụ điện trở R_2).

2. Ampe kế không cản dòng điện trên mạch (tức là không tạo nên một sụt thế trên nó), nếu không nó sẽ không cho được giá trị chính xác của dòng điện trong mạch. *Một ampe kế lý tưởng phải có điện trở trong bằng không.*



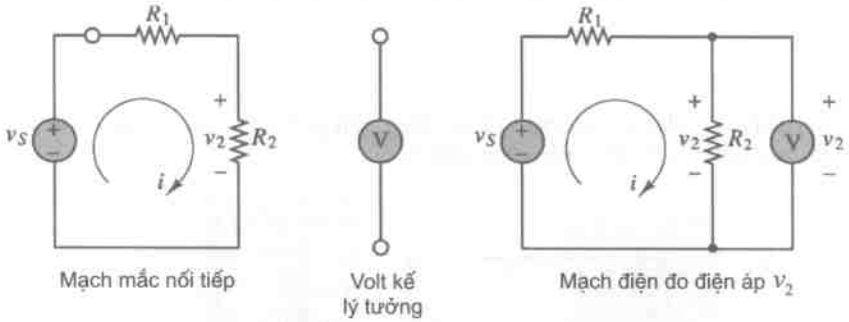
HÌNH 11.18 Đo dòng điện

Vôn kế

Vôn kế là một thiết bị đo điện áp trên phần tử mạch điện. Đo điện áp là hiệu điện thế giữa hai điểm khác nhau trên một mạch điện, vôn kế cần phải được nối với đúng phần tử mạch cần đo điện áp. Một vôn kế cần phải thoả mãn đầy đủ hai yêu cầu sau:

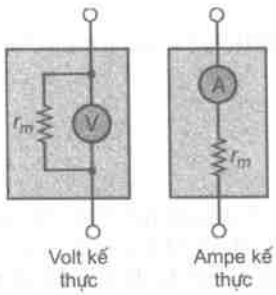
1. Vôn kế cần phải được nối song song với phần tử cần đo điện áp.
2. Vôn kế phải không được rẽ nhánh dòng điện chạy qua phần tử cần đó, nếu không điện áp qua phần tử đo được sẽ không chính xác. Do đó, *một vôn kế lý tưởng phải có điện trở trong là vô cùng.*

Hình 11.19 minh hoạ hai yêu cầu này.



HÌNH 11.19 Đo điện áp

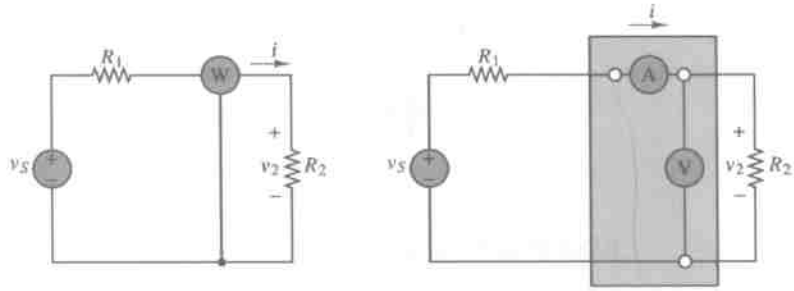
Nhắc lại một lần nữa rằng, các định nghĩa trên đây chỉ phát biểu cho Ampe kế và Vôn kế lý tưởng, làm cơ sở để đánh giá về các giới hạn thực tế của các thiết bị này. Một Ampe kế trong thực tế sẽ có trong nó một vài điện trở mắc nối tiếp với mạch điện mà nó sẽ đo dòng điện; một Vôn kế thực tế không hoàn toàn như lý tưởng là một mạch hở nhưng luôn theo nguyên tắc ít ảnh hưởng nhất tới giá trị dòng điện trong mạch cần đo. Hình 11.20 vẽ các mô hình mạch điện của Vôn kế và Ampe kế trong thực tế.



HÌNH 11.20 Các mô hình vôn kế và ampe kế trong thực tế

Những gì đã giới thiệu về các Ampe kế và Vôn kế trong thực tế có thể được ứng dụng cho hoạt động của một **Watt kế** - một dụng cụ dùng để đo công suất tiêu thụ trên một phần tử mạch điện, vì Watt kế là sự kết hợp Vôn kế và Ampe kế.

Hình 11.21 vẽ sơ đồ ghép nối điển hình của một Watt kế trong cùng một mạch điện nối tiếp đã trình bày ở phần trước. Theo đó, Watt kế đo đồng thời dòng điện và điện áp qua tải, sau đó nhân hai giá trị đó sẽ thu được giá trị công suất tiêu thụ trên tải.



HÌNH 11.21 Đo công suất

11.3 Phân tích mạch điện trở

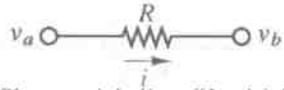
Phần này sẽ giới thiệu các phương pháp phân tích mạch điện cơ bản. Các phương pháp được giới thiệu là dựa trên định luật Ôm và Kirchhoff. Các phương pháp phân tích mạch điện này sẽ được sử dụng trong suốt cuốn sách này.

Phương pháp điện áp nút

Phương pháp phân tích điện áp nút là phương pháp phân tích mạch điện tổng quát nhất. Trong phần này, sẽ minh hoạ ứng dụng của phương pháp điện áp nút để phân tích các mạch điện trở tuyến tính. **Phương pháp điện áp nút** dựa trên định nghĩa điện áp tại mỗi nút là một biến độc lập. Một trong số các nút sẽ được chọn làm **gốc** (thường là đất nhưng không bắt buộc) và điện áp của các nút khác sẽ được tham chiếu so với nút này. Khi đã xác định được điện áp trên mỗi nút, định luật Ôm có thể được áp dụng giữa hai nút kế tiếp để xác định được dòng điện chạy trong mỗi nhánh. Với phương pháp điện áp nút, *mỗi dòng điện nhánh được biểu diễn theo một hoặc nhiều điện áp nút*; do đó, các dòng điện không thể hiện tường minh trong các phương trình. Hình 11.22 minh hoạ cách xác định các dòng điện nhánh theo phương pháp này.

Với phương pháp điện áp nút, gọi các điện áp nút là v_a và v_b : dòng điện nhánh chạy từ a đến b sẽ được biểu diễn theo các điện áp nút.

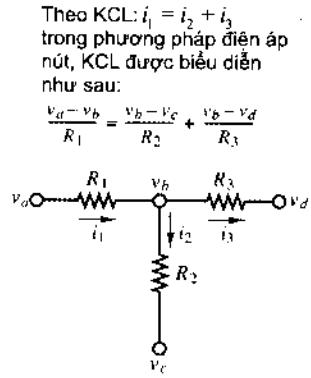
$$i = \frac{v_a - v_b}{R}$$



HÌNH 11.22 Phương trình dòng điện nhánh khi phân tích nút

Khi mỗi dòng điện nhánh được xác định theo các điện áp nút, có thể áp dụng định luật dòng Kirchhoff tại mỗi nút. Theo KCL, tại mỗi nút, tổng các dòng điện đi vào bằng tổng các dòng điện đi ra khỏi nút:

$$\sum i_{\text{vào}} = \sum i_{\text{ra}} \qquad (11.24)$$



HÌNH 11.23 Sử dụng KCL khi phân tích nút

Việc áp dụng có hệ thống phương pháp này cho một mạch điện *n* nút có thể viết được *n* phương trình tuyến tính. Tuy nhiên, một trong các điện áp nút là điện áp quy chiếu và thường được giả thiết bằng không. Do đó, chúng ta có thể viết *n* - 1 *phương trình độc lập tuyến tính* theo *n* - 1 biến độc lập (các điện áp nút). Phương pháp phân tích nút sẽ đưa ra tối thiểu phương trình cần thiết để giải mạch điện, do có thể xác định được điện áp hoặc dòng điện của nhánh bất kỳ từ các điện áp nút đã biết.

Phương pháp phân tích điện áp nút

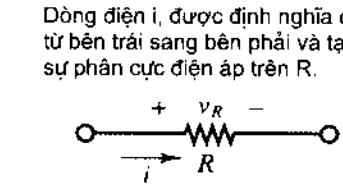
Có thể được định nghĩa gồm các bước sau:

1. Chọn một nút quy chiếu (thường là đất). Tất cả các điện áp nút khác sẽ được tham chiếu tới nút này.
2. Đặt *n* - 1 điện áp nút còn lại như là các biến độc lập.
3. Áp dụng KCL tại mỗi nút, biểu diễn các dòng điện nhánh theo các điện áp nút liền kề nhau.
4. Giải hệ *n* - 1 phương trình tuyến tính với *n* - 1 biến.

Với một mạch điện có *n* nút, chúng ta có thể viết được nhiều nhất *n* - 1 phương trình độc lập.

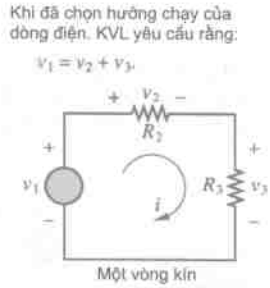
Phương pháp dòng điện mạch vòng

Trong phương pháp dòng điện mạch vòng, chúng ta thấy rằng một dòng điện chạy qua một điện trở theo một hướng xác định sẽ tạo ra sự phân áp trên điện trở đó, như được minh hoạ trên hình 11.24. Theo KVL tổng điện áp trên một mạch điện vòng kín phải bằng không. Khi đã quy ước chiều dòng điện chạy trong vòng, KVL sẽ cho phép xây dựng phương trình mong muốn. Hình 11.25 minh hoạ cách xác định này.



HÌNH 11.24 Nguyên lý cơ bản của phương pháp phân tích mạch vòng

Số phương trình xây dựng được theo phương pháp này bằng với số mạch vòng trong mạch điện. Từ đó có thể có được tất cả điện áp và dòng điện của các vòng. Do có thể dễ dàng chỉ ra các vòng trong một mạch điện, nên phương pháp này rất hiệu quả cho việc phân tích các mạch điện. Phần tiếp theo trình bày các bước phân tích mạch tuyến tính dùng phương pháp dòng mạch vòng.



HÌNH 11.25 Sử dụng KVL trong phân tích mạch vòng

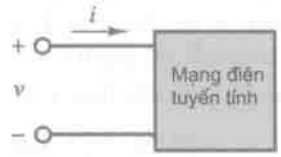
Phương pháp phân tích dòng điện mạch vòng

1. Xác định từng dòng điện mạch vòng một cách thích hợp. Để thuận tiện, quy ước chiều dòng điện mạch vòng là chiều kim đồng hồ.
2. Áp dụng KVL trong từng mạch vòng, biểu diễn từng điện áp theo một hoặc nhiều dòng điện mạch vòng.
3. Giải hệ phương trình tuyến tính thu được với các dòng điện mạch vòng là các biến độc lập.

Khi phân tích một mạch vòng, việc chọn chiều dòng điện một cách thích hợp là rất quan trọng. Để tránh nhầm lẫn trong khi viết các phương trình mạch điện, nên định nghĩa dòng điện mạch nhánh theo chiều kim đồng hồ khi định sử dụng phương pháp này.

Các mạng một cửa và mạch tương đương

Hình 11.26 biểu diễn một mạch điện tổng quát. Cấu trúc này được gọi là **mạng một cửa** và đặc biệt thường được sử dụng để biểu diễn các mạch điện tương đương. Chú ý rằng mạng trên hình 11.26 được diễn tả hoàn toàn bằng đặc tuyến *i-v* của nó.



HÌNH 11.26 Mạng một cửa

Các mạch Norton và Thévenin tương đương

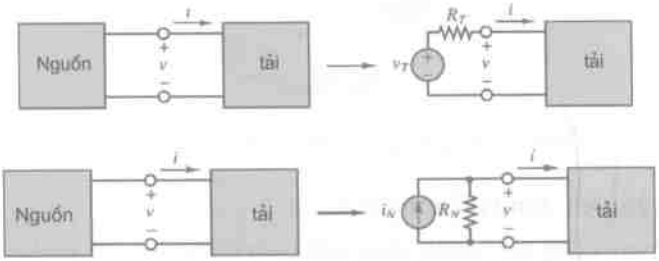
Phần này giới thiệu một trong số các vấn đề quan trọng nhất trong phân tích mạch điện: khái niệm **mạch tương đương**. Có thể chỉ ra rằng một mạch điện phức tạp luôn có thể biểu diễn thành nhiều mạch nguồn và tải *tương đương* đơn giản hơn và các phép biến đổi ra các mạch tương đương dễ thực hiện với một chút kinh nghiệm thực tế. Khi phân tích phương pháp điện áp nút và phương pháp dòng vòng, chúng ta thấy rằng có một sự tương ứng (được gọi là **đối ngẫu**) nào đó, một mặt là giữa các nguồn dòng và các nguồn áp và mặt khác là các mạch điện nối tiếp song song. Tính đối ngẫu này được thể hiện rất rõ khi phân tích các mạch điện tương đương. Nói tóm lại là các mạch điện tương đương sẽ là một trong hai loại: nguồn áp hoặc nguồn dòng (tương ứng) và các điện trở nối nối tiếp hoặc song song, cùng nguyên lý đối ngẫu này. Việc trình bày các mạch tương đương sẽ bắt đầu với hai định lý rất quan trọng, minh hoạ trên hình 11.27 và 11.28.

Định lý Thévenin

Với một tải nối đủ xa, một mạng bất kỳ gồm các nguồn áp, các nguồn dòng lý tưởng và các điện trở tuyến tính, có thể được biểu diễn bởi một mạch điện tương đương bao gồm một nguồn áp lý tưởng v_T mắc nối tiếp với một điện trở tương đương R_T.

Định lý Norton

Với một tải nối đủ xa, một mạng điện gồm các nguồn áp lý tưởng, các nguồn dòng lý tưởng và các điện trở tuyến tính, có thể được biểu diễn bởi một mạch điện tương đương bao gồm một nguồn dòng lý tưởng i_N mắc song song với một điện trở tương đương R_N.



HÌNH 11.28 Minh họa định lý Norton

Xác định điện trở tương đương Norton hoặc Thévenin

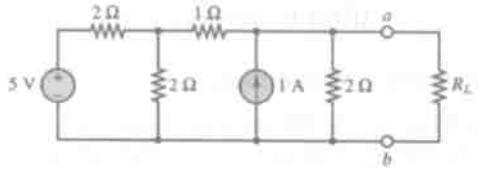
Để tính một mạch Thévenin hoặc Norton tương đương, đầu tiên phải tính điện trở tương đương tại các cực của nó. Việc này được thực hiện bằng cách đặt tất cả các nguồn trong mạch điện bằng 0 và tính điện trở hiệu dụng giữa các cực. Các nguồn áp và dòng hiện có trong mạch được đặt tới 0 như sau: thay thế các nguồn áp bằng các ngắn mạch, các nguồn dòng bằng các hở mạch. Chúng ta có thể đưa ra một tập hợp các luật đơn giản như là một sự trợ giúp để tính điện trở tương đương Thévenin (hoặc Norton) cho một mạch điện trở tuyến tính.

Tính điện trở tương đương của một mạng một cửa như sau:

1. Bỏ tải.
2. Đặt tất cả các nguồn áp và nguồn dòng về giá trị 0.
3. Tính điện trở tổng giữa 2 đầu tải, *khi đã bỏ tải*. Điện trở này sẽ tương đương với điện trở được tạo ra bởi một nguồn dòng nối với mạch ở vị trí của tải.

Ví dụ điện trở tương đương của mạch điện trên hình 11.29 khi nhìn từ phía tải là:

$$R_{eq} = ((2 \| 2) + 1) \| 2 = 1\,\Omega$$



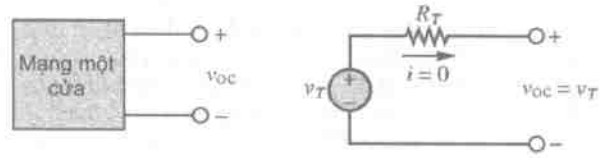
HÌNH 11.29 Tính điện trở Thévenin

Tính điện áp Thévenin

Điện áp tương đương Thévenin được định nghĩa như sau: Điện áp nguồn tương đương (Thévenin) bằng với **điện áp hở mạch** giữa 2 đầu của tải khi bỏ tải.

Trong trường hợp này để tính toán v_T, chỉ cần bỏ tải và tính điện áp hở mạch tại các cực của một cửa. Hình 11.30 minh hoạ điện áp hở mạch v_{OC} và điện áp Thévenin v_T, chúng phải như nhau nếu tuân theo định lý Thévenin. Điều này là đúng bởi vì trong mạch điện có v_T và R_T, điện thế v_{OC} phải bằng v_T, vì không có dòng điện chạy qua R_T và do đó điện áp trên R_T bằng 0. Định luật điện áp của Kirchhoff xác nhận điều này:

$$v_T = R_T(0) + v_{OC} = v_{OC} \tag{11.25}$$



HÌNH 11.30 Tương đương của điện áp hở mạch và điện áp Thévenin

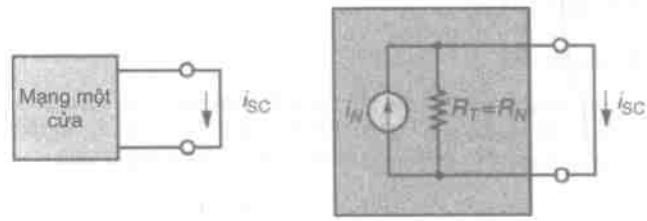
Tính dòng điện Norton

Tính dòng tương đương Norton cũng tương tự như việc tính điện áp Thévenin.

Định nghĩa

Dòng điện tương đương Norton bằng **dòng điện ngắn mạch** khi thay thế tải bằng một phần tử ngắn mạch.

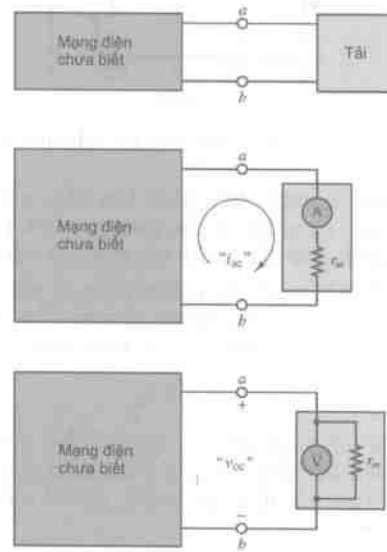
Hình 11.31 minh hoạ cho định nghĩa dòng Norton bằng cách xét một mạng một cửa bất kỳ, ở đây đưa ra cả mạng một cửa cùng với mạch tương đương Norton của nó.



HÌNH 11.31 Minh hoạ mạch tương đương Norton

Cần nhớ rằng dòng điện i_{SC} chạy qua phần tử ngắn mạch thay cho tải chính là dòng Norton i_N, do tất cả các dòng điện nguồn của mạch điện ở hình 11.31 phải chạy qua phần tử ngắn mạch này.

Xác định bằng thực nghiệm các đại lượng Norton và Thévenin tương đương



HÌNH 11.32 Đo điện áp mạch hở và dòng điện ngắn mạch

Hình 11.32 minh hoạ phép đo điện áp hở mạch và dòng điện ngắn mạch của một mạng bất kỳ được nối với tải bất kỳ và cũng chỉ ra rằng phương pháp này yêu cầu một số chú ý riêng, bởi vì bản chất không lý tưởng của các dụng cụ đo thực tế. Hình cũng minh họa sự tồn tại của điện trở hữu hạn r_m của thiết bị đo nên cần phải đưa đại lượng này vào quá trình tính toán dòng điện ngắn mạch và điện áp hở mạch; v_{OC} và i_{SC} được đặt trong dấu ngoặc kép để chỉ ra rằng, trong thực tế "điện áp hở mạch" và "dòng điện ngắn mạch" đo được bị ảnh hưởng bởi điện trở trong của thiết bị đo và đây không phải là các giá trị thực đúng.

Dưới đây là các công thức chính xác cho dòng điện ngắn mạch và điện áp hở mạch.

$$\begin{aligned} i_N &= i_{SC}\left(1+\frac{r_m}{R_T}\right) \\ v_T &= v_{OC}\left(1+\frac{R_T}{r_m}\right) \end{aligned} \tag{11.26}$$

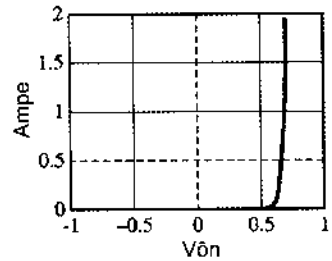
trong đó i_N là dòng điện Norton lý tưởng, v_T là điện áp Thévenin lý tưởng và R_T là điện trở Thévenin thực.

Các phần tử mạch phi tuyến

Mô tả các phần tử phi tuyến

Có một số trường hợp hữu ích trong đó tồn tại một mối quan hệ hàm đơn giản giữa điện áp và dòng điện trong một phần tử mạch phi tuyến. Ví dụ hình 11.33 miêu tả một phần tử với đường cong đặc tuyến *i-v* có dạng hàm mũ, được mô tả bởi các phương trình sau:

$$\begin{aligned} i &= I_0 e^{\alpha v}, \quad v > 0 \\ i &= -I_0, \quad v \le 0 \end{aligned} \tag{11.27}$$



HÌNH 11.33 Đặc tính *i-v* của điện trở tuân theo hàm mũ

Trong thực tế, tồn tại một phần tử mạch điện (điôt bán dẫn) gần như thoả mãn hoàn toàn mối quan hệ đơn giản này. Cái khó trong quan hệ *i-v* của phương trình (11.27) là nói chung không thể, nhận được nghiệm giải tích một cách chặt chẽ, thậm chí ngay cả với một mạch điện rất đơn giản.

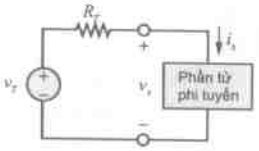
Một cách tiếp cận để phân tích một mạch điện chứa phần tử phi tuyến là có thể coi phần tử phi tuyến như là một tải và sau đó tính toán lượng tương đương Thévenin của mạch còn lại, như thể hiện trên hình 11.34. Áp dụng KVL, nhận được phương trình sau:

$$v_T = R_T i_x + v_x \tag{11.28}$$

Để tìm được phương trình thứ hai phục vụ cho việc giải bài toán với 2 ẩn số là điện thế v_x và dòng điện i_x, chúng ta cần xét đến đặc tính *i-v* của phần tử mạch điện phi tuyến, phương trình (11.27). Nếu tại một thời điểm chỉ xét các điện áp dương, có thể biểu diễn toàn bộ mạch điện dưới dạng hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} i_x &= I_0 e^{\alpha v_x}, \quad v > 0 \\ v_T &= R_T i_x + v_x \end{aligned} \tag{11.29}$$

Hệ phương trình (11-29) gồm hai phương trình với hai ẩn số. Có thể lựa chọn bất kỳ một phương pháp giải số nào để giải hệ phương trình đó.



HÌNH 11.34 Biểu diễn một phần tử phi tuyến trong mạch điện tuyến tính

11.4 Phân tích mạch AC

Phần này sẽ giới thiệu các phần tử tích lũy năng lượng, các mạch động và phân tích các mạch được kích thích bởi các điện áp và dòng điện hình sin. Các tín hiệu hình sin (hoặc AC) là lớp tín hiệu quan trọng nhất khi phân tích các mạch điện. Đơn giản vì thực chất tất cả các nguồn năng lượng điện sử dụng trong sinh hoạt và trong công nghiệp đều xuất phát từ dạng điện áp và dòng điện hình sin.

Các phần tử tích lũy năng lượng (động)

Điện trở lý tưởng đã được giới thiệu qua định luật Ôm ở phần 11.2 là một sự lý tưởng hoá nhiều thiết bị điện thực tế. Tuy nhiên, ngoài đặc tính cản dòng điện chạy trong mạch còn gọi là hiện tượng tiêu thụ (mất năng lượng), các thiết bị điện cũng có thể tích lũy năng lượng, hiện tượng này giống như một lò xo hoặc một bánh đà có thể tích lũy năng lượng cơ học. Có hai cơ chế tích lũy năng lượng khác biệt trong mạch điện là: **điện dung** và **điện cảm**, cả hai đều lưu giữ năng lượng trong một trường điện từ.

Tụ điện lý tưởng

Tụ điện vật lý là một thiết bị mà có thể tích năng lượng theo dạng phân cách điện tích khi được phân cực bởi một điện trường thích hợp (một điện áp). Cấu trúc của một tụ điện đơn giản nhất bao gồm hai tấm dẫn song song có thiết diện là A, được cách ly bởi không khí (hoặc một chất **điện môi**[1] khác, ví như mica hoặc Teflon). Hình 11.35 chỉ ra một cấu trúc điển hình và ký hiệu của một tụ điện.

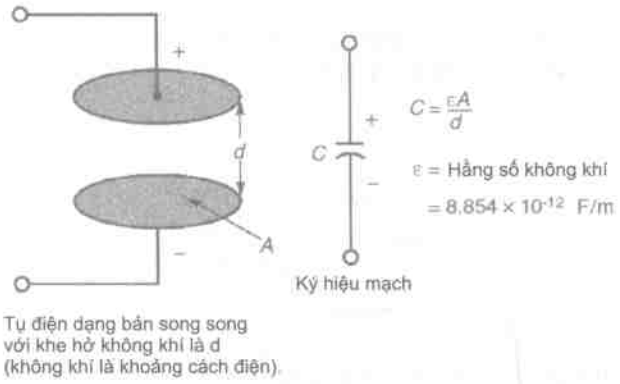
Chất cách điện đặt giữa hai tấm dẫn điện sẽ không cho phép dòng điện DC chạy qua, do vậy, *tác động của một tụ điện giống như một phần tử hở mạch trong sự hiện diện của các dòng điện DC*. Tuy nhiên, điện áp trên các cực tụ điện biến đổi theo thời gian, thì điện tích được tích tụ trên hai bản sẽ thay đổi, vì độ phân cực là hàm phụ thuộc điện trường cung cấp mà điện trường này lại biến đổi theo thời gian. Trong một tụ điện, sự phân cách điện tích do sự phân cực của chất điện môi tỷ lệ với điện thế ngoài, tức điện trường cấp:

$$Q = CV \tag{11.30}$$

ở đây tham số C được gọi là *điện dung* của phần tử và là số đo khả năng nạp hoặc tích lũy điện tích của thiết bị. Đơn vị của điện dung là culông/vôn và được gọi là **fara** (F). Fara là một đơn vị rất lớn không thực tế, do vậy thường sử dụng microfara ($1\mu F = 10^{-6}F$) hoặc picofara ($1pF = 10^{-12}F$). Từ phương trình (11.30) dễ dàng thấy rằng khi điện áp ngoài cấp lên các bản tụ điện thay đổi theo thời gian, sẽ làm thay đổi điện tích bên trong của tụ điện:

$$q(t) = Cv(t) \tag{11.31}$$

[1] Vật liệu điện môi chứa một số lượng lớn các lưỡng cực điện sẽ bị phân cực trong một điện trường



HÌNH 11.35 Cấu trúc của tụ điện dạng bản song song

Vì vậy, mặc dù không có dòng điện nào chạy qua tụ điện khi điện áp trên tụ không đổi, nhưng khi điện áp thay đổi theo thời gian thì điện tích cũng thay đổi theo thời gian. Sự tích điện của tụ thay đổi theo thời gian giống như một dòng điện. Mối quan hệ giữa dòng điện và điện áp trên một tụ điện được biểu diễn như sau:

$$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt} \tag{11.32}$$

Khi tích phân các phương trình vi phân ở trên, chúng ta có thể tìm được mối quan hệ điện áp trên một tụ điện như sau:

$$v_C(t) = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t_0} i_C dt \tag{11.33}$$

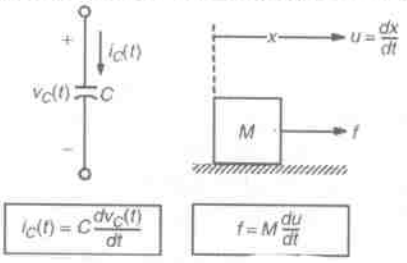
Phương trình (11.33) chỉ ra rằng điện áp trên tụ điện phụ thuộc vào dòng điện đã đi qua tụ điện từ trước đó đến thời điểm đang xét *t*. Tất nhiên, thường không có các thông tin chính xác về dòng điện qua tụ điện trong toàn bộ khoảng thời gian trước đó vì vậy cần phải xác định điện áp ban đầu (hoặc *điện kiện đầu*) của tụ điện như sau:

$$V_0 = v_C(t = t_0) = \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t_0} i_C dt \tag{11.34}$$

Trong đó t_0 là một thời điểm ban đầu bất kỳ. Và điện thế của tụ điện là:

$$v_C(t) = \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} i_C dt + V_0 \qquad t \geq t_0 \tag{11.35}$$

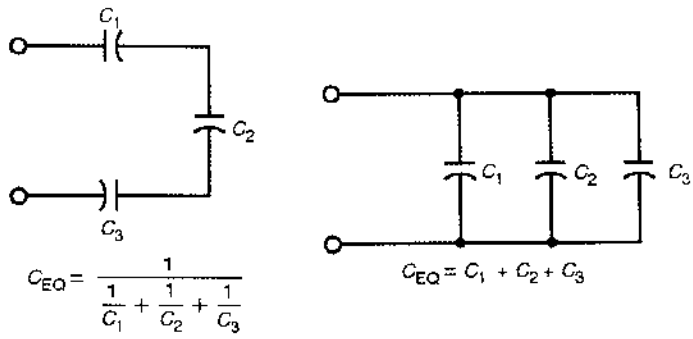
Ý nghĩa của điện áp ban đầu V_0 đơn giản là tại một thời điểm t_0 lượng điện tích được lưu giữ trong tụ điện sẽ tạo ra một điện thế $v_C(t_0)$, theo quan hệ $Q = CV$. Biết được điều kiện đầu đủ để tính toán bộ quá trình biến đổi đã qua trước đó của dòng điện trên tụ. (hình 11.36).



HÌNH 11.36 Phương trình của một tụ điện lý tưởng và hệ lực-khối lượng tương đương

Từ quan điểm phân tích mạch điện, điều quan trọng chỉ ra rằng các tụ điện được mắc song song và nối tiếp có thể kết hợp thành một điện dung tương đương. Quy tắc được minh họa trên

hình 11.37 như sau; các tụ điện mắc song song được cộng với nhau, các tụ điện mắc nối tiếp được thực hiện giống như quy tắc sử dụng cho các điện trở mắc song song với nhau.



HÌNH 11.37 Gộp các tụ điện trong một mạch điện

Các tụ điện vật lý ít khi có cấu trúc dạng hai bản song song được cách ly bởi không khí vì có giá trị điện dung rất thấp, trừ trường hợp diện tích của hai bản tụ này rất lớn. Để tăng điện dung (hay khả năng tích luỹ năng lượng), người ta thường làm các tụ điện vật lý bằng cách cuộn chặt các các tấm màng kim loại, cùng với một chất điện môi (giấy hoặc Mylar) ở giữa. Bảng 11.3 đưa ra các giá trị điển hình, vật liệu, điện áp định mức tối đa và các dải tần số có ích cho các loại tụ điện. Điện áp định mức đặc biệt quan trọng, vì các chất cách điện sẽ bị đánh thủng khi có một điện áp đủ cao đặt vào nó. Năng lượng tích trong một tụ điện được tính như sau:

$$W_C(t) = \frac{1}{2} C v_C^2(t) \ \text{(J)}$$

BẢNG 11.3 Các tụ điện

Vật liệu	Dải điện dung	Điện thế lớn nhất (V)	Dải tần số (Hz)
Mica	1 pF đến 0.1 μF	100-600	10^3-10^{10}
Gốm	10 pF đến 0.1 μF	50-1000	10^3-10^{10}
Mylar	0.001 đến 10 μF	50-500	10^2-10^8
Giấy	1000 pF đến 50 μF	100-105	10^2-10^8
Điện phân	0.1 μF đến 0.2 F	3-600	10-10^4

Ví dụ 11.3 Đầu đo dịch chuyển kiểu điện dung và microphone

Như trên hình 11.26, điện dung của một tụ điện dạng bản song song được biểu diễn như sau:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

trong đó ε là **hằng số điện môi** của chất điện môi, A là diện tích mỗi bản tụ và d là khoảng cách. Xét một tụ điện với hằng số điện môi của không khí là $\varepsilon_0 = 8.854\times10^{-12} F/m$, diện tích của hai bản tụ song song là 1 m^2, khoảng cách giữa hai bản tụ là 1 mm, điện dung của tụ là $8.854\times10^{-3}\mu F$, đây là một giá trị rất bé so với diện tích rất lớn của bản tụ. Sự không hiệu quả này làm cho các tụ điện dạng bản song song không mang tính thực tế khi sử dụng trong các mạch điện. Tuy nhiên, các tụ điện kiểu này lại được ứng dụng trong các *đầu đo chuyển động*, đó là các thiết bị có thể đo chuyển động hoặc sự dịch chuyển của một đối tượng. Trong một đầu đo chuyển động kiểu điện dung, khe không khí giữa các bản tụ được thiết kế để có thể thay đổi, thường bằng cách cố định một bản và

nối bản còn lại với một đối tượng chuyển động. Giá trị điện dung của một tụ điện dạng bản song song, có thể biểu diễn bởi phương trình:

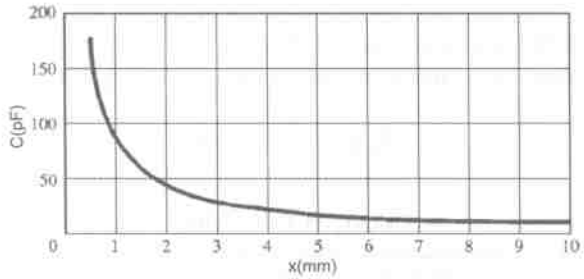
$$C = \frac{8.854 \times 10^{-3} A}{x}$$

trong đó C là điện dung cỡ picofara, A là diện tích các bản tụ tính theo millimét vuông và x là khoảng cách (có thể thay đổi) tính theo millimét. Một điều quan trọng chúng ta cần thấy là sự thay đổi điện dung do sự dịch chuyển của một trong hai bản tụ là phi tuyến, vì điện dung biến thiên tỷ lệ nghịch với dịch chuyển. Tuy nhiên, đối với các dịch chuyển nhỏ, điện dung biến đổi gần như tuyến tính.

Độ nhạy S, của đầu đo chuyển động này được định nghĩa là độ dốc của sự thay đổi điện dung trên sự thay đổi dịch chuyển x theo quan hệ:

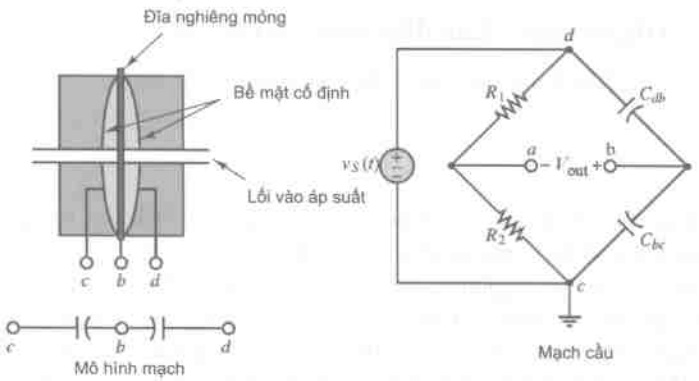
$$S = \frac{dC}{dx} = -\frac{8.854 \times 10^{-3} A}{2x^2} (pF / mm)$$

Do vậy, độ nhạy sẽ tăng đối với các dịch chuyển nhỏ. Đặc tính này có thể được xác định bằng cách vẽ điện dung như là hàm của x và chú ý rằng khi x tiến tới 0, độ dốc của đường cong phi tuyến $C(x)$ trở nên dốc hơn (độ nhạy lớn hơn). Hình 11.38 thể hiện đặc tính này của một đầu đo chuyển động có diện tích là 10 mm^2.



HÌNH 11.38 Đáp ứng của một đầu đo sự dịch chuyển kiểu điện dung

Trong thực tế đầu đo dịch chuyển kiểu điện dung đơn giản này được ứng dụng phổ biến trong *microphone* kiểu điện dung (tụ điện), ở đây áp suất sóng âm thanh sẽ tạo ra dịch chuyển của một bản tụ. Sự thay đổi điện dung sau đó sẽ được chuyển thành sự thay đổi điện áp hoặc dòng điện bởi một mạch thích hợp. Một ứng dụng nữa là đo độ chênh áp suất được thể hiện như trên hình 11.39.



HÌNH 11.39 Đầu đo áp suất kiểu điện dung và mạch cầu tương ứng

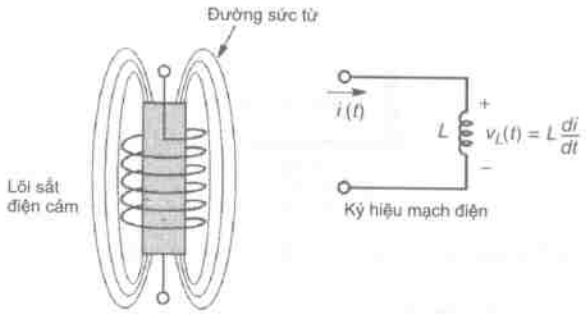
Trong hình vẽ một tụ điện ba cực được làm từ hai bản mặt cố định (điển hình là mạch kiểu cầu nối đất với các đĩa kính và được bao phủ bởi một vật liệu dẫn điện) và một tấm lệch tâm (thường được làm từ thép) giữa các đĩa kính. Các cửa vào sẽ được cung cấp áp suất, để cho tấm lệch tâm có thể di chuyển tiếp xúc với dòng chất lỏng mà chúng ta cần đo áp suất. Khi áp suất trên cả hai mặt của tấm lệch tâm bằng nhau, điện dung giữa hai cực b và d là C_{bd}, sẽ bằng với điện dung C_{bc} giữa hai cực b và c. Khi tồn tại bất kỳ độ chênh áp suất nào, hai điện dung này sẽ thay đổi, với việc tăng ở một phía nơi mà tấm lệch tâm tiến gần tới bề mặt cố định và sự giảm tương ứng ở phía còn lại.

Cách thức hoạt động này phù hợp lý tưởng cho ứng dụng mạch cầu, tương tự như mạch cầu Wheatstone được minh họa trong ví dụ 11.2 và cũng được thể hiện trên hình 11.39. Trong mạch cầu, điện áp đầu ra v_{ra} được cân bằng một cách chính xác khi độ chênh áp suất trên đầu đo bằng 0, nhưng nó sẽ lệch khỏi 0 khi hai điện dung không bằng nhau do có độ chênh áp suất trên đầu đo. Chúng ta sẽ phân tích mạch cầu trong ví dụ 11.4.

Cuộn cảm lý tưởng

Cuộn cảm lý tưởng là một phần tử có khả năng tích luỹ năng lượng trong một từ trường. Các cuộn cảm điển hình là cuộn dây quấn quanh một lõi, lõi có thể làm bằng vật liệu cách điện hoặc sắt từ, được minh hoạ trên hình 11.40. Khi có dòng điện chạy qua cuộn dây, sẽ tạo ra một từ trường, bạn có thể xem lại các thí nghiệm vật lý về điện từ. Trong cuộn cảm lý tưởng, điện trở của dây dẫn bằng không, do đó khi dòng điện không đổi chạy qua cuộn cảm sẽ không gây ra tổn hao điện áp. Nói một cách khác, *tác động của cuộn cảm lý tưởng giống như một phần tử ngắn mạch trong đối với của các dòng điện DC*. Nếu một điện áp thay đổi theo thời gian được đặt trên cuộn cảm trong đó sẽ xuất hiện một dòng điện tương ứng theo mối quan hệ sau:

$$v_L(t) = L\frac{di_L}{dt} \tag{11.36}$$



HÌNH 11.40 Cuộn cảm lõi sắt

trong đó L là *điện cảm* của cuộn dây và có đơn vị là henri (H):

$$1\text{ H} = 1\text{ V sec/ A} \tag{11.37}$$

Henri, millihenri (mH) và microhenri (μH) là các đơn vị của cuộn cảm thường được sử dụng trong thực tế.

Dòng điện qua cuộn cảm tìm được bằng cách tích phân điện áp trên cuộn cảm:

$$i_L(t) = \frac{1}{L}\int_{-\infty} v_L dt \tag{11.38}$$

Nếu dòng điện chạy qua cuộn cảm tại thời điểm $t = t_0$ là I_0 với:

$$I_0 = i_L(t = t_0) = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t_0} v_L dt \tag{11.39}$$

thì có thể tìm được dòng điện qua cuộn cảm theo phương trình sau:

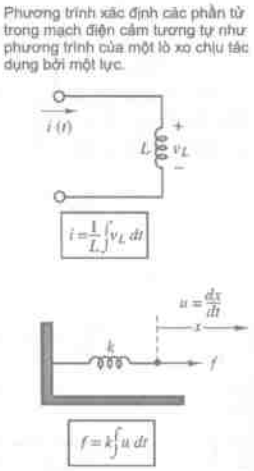
$$i_L(t) = \frac{1}{L}\int_{t_0} v_L dt + I_0 \qquad t \geq t_0 \tag{11.40}$$

Cuộn cảm tương đương của tổ hợp các cuộn cảm mắc nối tiếp bằng tổng các cuộn cảm. Cuộn cảm tương đương của tổ hợp các cuộn cảm mắc song song được xác định theo cùng nguyên tắc xác định điện trở tương đương của tổ hợp các điện trở nối song song. Xem hình 11.41-11.43.

Bảng 11.4 và các hình 11.36, 11.41 và 11.43 mô tả sự tương tự giữa các phần tử cơ khí với các phần tử điện lý tưởng.

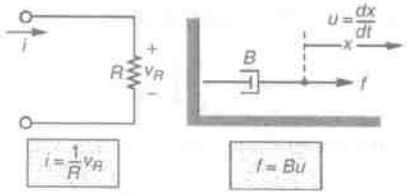
Bảng 11.4 Sự tương tự giữa các biến cơ và biến điện

Hệ cơ	Hệ điện
Lực f (N)	Dòng điện i (A)
Vận tốc μ (m/s)	Điện thế v (V)
Độ giảm chấn B (N s/m)	Điện dẫn $1/R$ (S)
Độ mềm dẻo $1/k$ (m/N)	Điện cảm L (H)
Khối lượng M (kg)	Điện dung C (F)



HÌNH 11.41 Phương trình mô tả cuộn cảm lý tưởng tương tự với hệ lực - lò xo

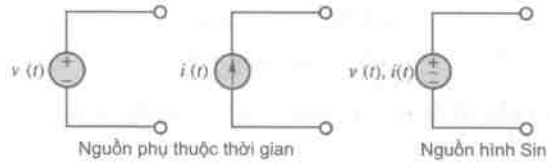
HÌNH 11.42 Cuộn cảm trong một mạch điện



HÌNH 11.43 Sự tương tự giữa các phần tử cơ khí và các phần tử điện

Các nguồn tín hiệu phụ thuộc thời gian

Hình 11.44 đưa ra ký hiệu của các nguồn tín hiệu phụ thuộc thời gian.

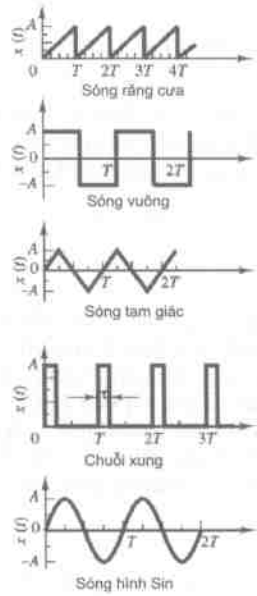


HÌNH 11.44 Các nguồn tín hiệu phụ thuộc thời gian

Một trong các lớp tín hiệu phụ thuộc thời gian quan trọng nhất là các **tín hiệu tuần hoàn**. Các tín hiệu này thường xuất hiện trong các ứng dụng thực tế và là các tín hiệu có ích gần giống với các tín hiệu của nhiều hiện tượng vật lý. Một tín hiệu tuần hoàn $x(t)$ là tín hiệu thoả mãn phương trình sau:

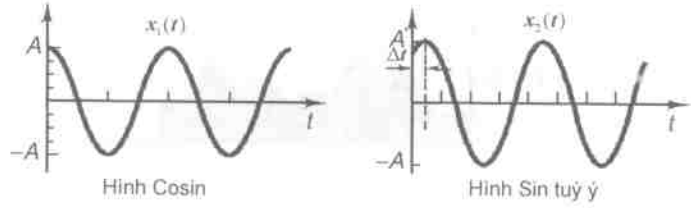
$$x(t) = x(t + nT) \qquad n = 1, 2, 3... \tag{11.41}$$

ở đây T là **chu kỳ** của $x(t)$. Hình 11.45 minh hoạ một số dạng sóng tuần hoàn thường được sử dụng khi nghiên cứu mạch điện. Các dạng sóng như sin, tam giác, vuông, xung và răng cưa được cung cấp dưới dạng điện áp (hoặc đôi khi là dòng điện) bằng cách sử dụng **các máy phát tín hiệu** (hoặc máy phát **sóng**) có sẵn trên thị trường. Các thiết bị như vậy cho phép chọn biên độ đỉnh sóng và chu kỳ của nó.



HÌNH 11.45 Các dạng sóng của tín hiệu tuần hoàn

Như đã nêu trong phần giới thiệu, các sóng hình sin là lớp tín hiệu phụ thuộc thời gian quan trọng nhất. Hình 11.46 thể hiện các tham số của một sóng hình sin.



HÌNH 11.46 Các dạng sóng hình sin

Một sóng hình sin tổng quát được định nghĩa như sau:

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi) \tag{11.42}$$

trong đó A là **biên độ**, ω là **tần số** đo theo radian và ϕ là **góc pha**. Hình 11.46 tổng hợp lại các định nghĩa về A, ω và ϕ cho các dạng sóng:

$$x_1(t) = A\cos(\omega t) \qquad x_2(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

trong đó:

$$f = \text{tần số riêng} = \frac{1}{T}(\text{chu kỳ/s hoặc Hz})$$

$$\omega = \text{ tần số radian} = 2\pi f\,(\text{rad/s})$$

$$\phi = 2\pi\frac{\Delta T}{T}(\text{rad}) = 360\frac{\Delta T}{T}(\text{độ}) \tag{11.43}$$

Độ lệch pha ϕ cho phép biểu diễn một tín hiệu hình sin bất kỳ. Như vậy, việc chọn hàm cosin chuẩn biểu diễn các tín hiệu hình sin không hạn chế khả năng biểu diễn cho tất cả các sóng sin bằng các tín hiệu hình sin bất kỳ. Ví dụ có thể biểu diễn một sóng sin dưới dạng sóng cosin một sóng bằng cách đưa vào một góc lệch pha $\pi/2$ radian:

$$A\sin(\omega t) = A\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{11.44}$$

Điều quan trọng phải chú ý rằng, mặc dù chúng ta luôn sử dụng biến ω (được tính theo rad/s) để ký hiệu tần số sin, nhưng nó lại thường liên quan tới tần số tự nhiên f được tính theo số chu kỳ trong một giây hoặc hertz (Hz). Mối quan hệ giữa hai đại lượng trên là:

$$\omega = 2\pi f \tag{11.45}$$

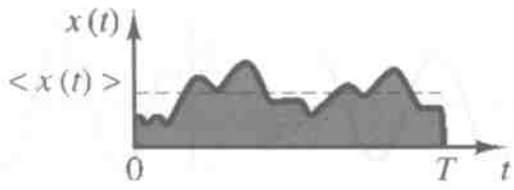
Giá trị trung bình và RMS

Ở trên đã định nghĩa một số dạng sóng khác nhau, cần định nghĩa các đại lượng đo tương ứng để xác định độ lớn của một tín hiệu biến đổi theo thời gian. Các kiểu đại lượng đo thường gặp nhất là **giá trị trung bình** (hoặc **DC**) của sóng tín hiệu, tương ứng với việc đo điện áp hoặc dòng điện trung bình trong một chu kỳ thời gian và **giá trị căn trung bình bình phương**, là giá trị được sử dụng để đánh giá sự dao động của tín hiệu quanh giá trị trung bình của nó. Về nguyên tắc, việc tính toán giá trị trung bình của một tín hiệu chính là tích phân sóng tín hiệu trong một vài chu kỳ thời gian (được lựa chọn cho phù hợp). Chúng ta định nghĩa giá trị trung bình theo thời gian của một tín hiệu $x(t)$ như sau:

$$\langle x(t)\rangle = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)dt \tag{11.46}$$

trong đó T là chu kỳ tích phân. Hình 11.47 minh hoạ cho quá trình tính toán, trong thực tế, chính là việc tính biên độ trung bình của $x(t)$ trong một chu kỳ T giây.

$$\langle A\cos(\omega t + \phi)\rangle = 0$$



HÌNH 11.47 Trung bình của một tín hiệu

Mạch có các thành phần tích trữ năng lượng được mô tả bằng phương trình vi phân. Phương trình vi phân mô tả mạch RC nối tiếp là:

$$\frac{di_C}{dt} + \frac{1}{RC} i_C = \frac{dv_S}{dt}$$

Một số đo điện áp quan trọng của một sóng AC là giá trị rms của tín hiệu $x(t)$ được định nghĩa như sau:

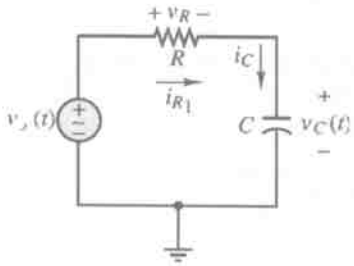
$$x_{rms} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \tag{11.47}$$

Cần chú ý rằng, khi $x(t)$ là một điện áp thì x_{rms} tương ứng cũng có đơn vị là vôn. Nếu phân tích phương trình (11.47), có thể thấy rằng, thực chất, giá trị rms là căn bậc hai của giá trị trung bình bình phương của tín hiệu. Do đó, thuật ngữ *rms* chỉ ra chính xác các phép toán được thực hiện với $x(t)$ để tính được giá trị rms của nó.

Giải các mạch điện chứa các phần tử động

Điểm khác nhau chính giữa việc phân tích các mạch thuần trở với các mạch có chứa tụ điện và cuộn cảm là các phương trình được dẫn ra từ việc áp dụng định luật Kirchhoff là các phương trình vi phân chứ không phải là các phương trình đại số nhận được khi giải các mạch thuần điện trở. Xét ví dụ mạch điện trên hình 11.48 là mạch bao gồm một nguồn áp mắc nối tiếp với một điện trở và một tụ điện. Áp dụng KVL cho mạch vòng này, chúng ta có thể suy ra được phương trình sau:

$$v_S(t) = v_R(t) + v_C(t) \tag{11.48}$$



Một mạch có những phần tử tích trữ năng lượng được mô tả bằng một phương trình vi phân. Phương trình vi phân biểu diễn mạch RC nối tiếp như sau:

$$\frac{di_C}{dt} + \frac{1}{RC} i_C = \frac{dv_S}{dt}$$

HÌNH 11.48 Mạch điện chứa phần tử tích lũy năng lượng

Thấy rằng $i_R = i_C$, kết hợp phương trình 11.48 với phương trình biểu diễn tụ điện (phương trình 4.6.6), ta có:

$$v_S(t) = Ri_C(t) + \frac{1}{C} \int_{-\infty} i_C dt \tag{11.49}$$

Phương trình (11.49) là một phương trình tích phân, có thể chuyển nó về một phương trình vi phân quen thuộc hơn bằng cách lấy vi phân cả hai vế của phương trình và sử dụng:

$$\frac{d}{dt}\left(\int_{-\infty} i_C dt \right) = i_C(t) \tag{11.50}$$

ta có được phương trình vi phân sau:

$$\frac{di_C}{dt} + \frac{1}{RC} i_C = \frac{1}{R} \frac{dv_S}{dt} \tag{11.51}$$

trong đó đã khử được đối số t.

Từ phương trình (11.51) có thể thấy rằng, biến độc lập là dòng điện chạy trong mạch và đó cũng không phải là phương trình duy nhất mô tả mạch điện *RC* nối tiếp. Nếu trong ví dụ này, áp dụng KCL tại nút nối điện trở với tụ điện, chúng ta sẽ có mối quan hệ sau:

$$i_R = \frac{v_S - v_C}{R} = i_C = C\frac{dv_C}{dt} \tag{11.52}$$

hoặc:

$$\frac{dv_C}{dt} + \frac{1}{RC}v_C = \frac{1}{RC}v_S \tag{11.53}$$

Chú ý tới sự giống nhau giữa các phương trình (11.51) và (11.53). Vế trái của cả hai phương trình là đồng nhất, ngoại trừ các biến phụ thuộc, trong khi đó vế phải thì khác nhau một chút. Tuy nhiên, giải phương trình trên là đủ để xác định được tất cả các điện thế và dòng điện trong mạch.

Có thể tổng quát hóa các kết quả trên bằng cách nhận xét rằng bất kỳ một mạch điện nào chứa một phần tử tích lũy năng lượng đều có thể mô tả bởi phương trình vi phân có dạng:

$$a_1\frac{dy(t)}{dt} + a_0(t) = F(t) \tag{11.54}$$

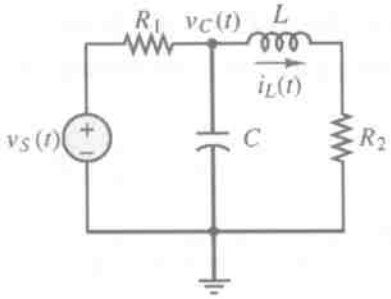
trong đó $y(t)$ biểu diễn điện áp của tụ điện trong mạch trên hình 11.48 và các hằng số a_0 và a_1 là tổ hợp các tham số của các phần tử mạch điện. Phương trình (11.54) là một **phương trình vi phân thuần nhất** với các hệ số hằng.

Tiếp theo xét một mạch điện chứa hai phần tử tích lũy năng lượng trên hình 11.49. Áp dụng KVL, ta có phương trình sau:

$$Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int_{-\infty} i(t)dt = v_S(t) \tag{11.55}$$

Phương trình (11.55) được gọi là phương trình vi-tích phân (integro-differential) vì nó có cả phép toán vi phân và tích phân trong đó. Phương trình này có thể được biến đổi thành một phương trình vi phân bằng cách lấy vi phân cả hai vế để nhận được:

$$R\frac{di(t)}{dt} + L\frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{1}{C}i(t) = \frac{dv_S(t)}{dt} \tag{11.56}$$



HÌNH 11.49 Mạch điện bậc hai

hoặc tương tự, ta thấy rằng dòng điện chạy trong mạch điện nối tiếp liên quan tới điện áp của tụ điện như sau: $i(t) = Cdv_C/dt$ và phương trình (11.55) có thể được viết lại như sau:

$$RC\frac{dv_C}{dt} + LC\frac{d^2v_C(t)}{dt^2} + v_C(t) = v_S(t) \tag{11.57}$$

Chú ý rằng, mặc dù có các biến khác nhau xuất hiện trong các phương trình vi phân trước, nhưng cả phương trình (11.55) và (11.57) đều có thể được tổ chức lại để có cùng một dạng tổng quát như sau:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = F(t) \tag{11.58}$$

trong đó biến tổng quát $y(t)$ biểu diễn hoặc là dòng điện của mạch nối tiếp trên hình 11.49 hoặc là điện áp tụ điện. Tương tự như vậy với phương trình (11.54), chúng ta gọi phương trình (11.58) là **phương trình vi phân thường bậc hai** với các hệ số hằng. Do đó, nếu tăng số các phần tử tích lũy năng lượng trong mạch điện, có thể bậc của các phương trình vi phân còn cao hơn.

Pha và trở kháng

Phần này sẽ giới thiệu kí hiệu dùng để biểu diễn các tín hiệu hình sin dưới dạng các *số phức* và rút ra các yếu tố cần thiết giải các phương trình vi phân.

Pha

Xin nhắc lại rằng có thể biểu diễn một tín hiệu hình sin tổng quát dưới dạng phần thực của một véc tơ phức với **góc** là $(\omega t + \phi)$ và **độ lớn** của nó bằng biên độ đỉnh hình sin. **Pha phức** của một tín hiệu $A\cos(\omega t + \phi)$ được định nghĩa là số phức $Ae^{j\phi}$:

$$Ae^{j\phi} = \text{ký hiệu pha phức của } A\cos(\omega t + \phi) \tag{11.59}$$

1. Một tín hiệu hình sin bất kỳ có thể được biểu diễn toán học bằng một trong hai cách sau: **dạng miền thời gian**:

   $$v(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

   và **dạng miền tần số (pha)**:

   $$\mathbf{V}(j\omega) = Ae^{j\phi}$$

2. Pha là một số phức, được biểu diễn ở dạng cực, có *độ lớn* bằng với biên độ đỉnh của tín hiệu hình sin và *góc pha* bằng với độ dịch pha của tín hiệu sin *đối với gốc*.
3. Khi sử dụng ký hiệu pha, cần chú ý chú thích cho tần số riêng ω của tín hiệu sin, vì nó sẽ không xuất hiện một cách tường minh trong biểu diễn pha.

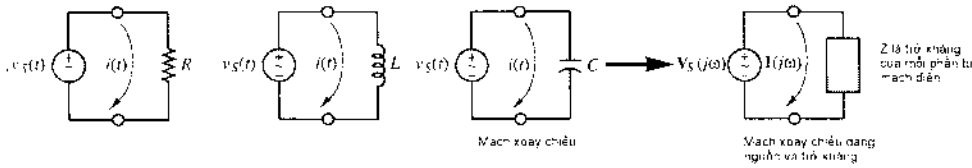
Trở kháng

Bây giờ chúng ta sẽ phân tích mối quan hệ *i-v* của ba phần tử mạch điện lý tưởng bằng cách sử dụng kí hiệu pha. Kết quả sẽ là một công thức mới với các điện trở, tụ điện và cuộn cảm sẽ được mô tả theo cùng một ký hiệu. Điều này sẽ mở rộng các định lý mạch điện ở phần 11.3 cho các mạch điện AC. Trong khi nguyên cứu về các mạch điện AC, bất cứ phần tử nào trong ba phần tử mạch điện lý tưởng đã được định nghĩa ở các phần trước cũng sẽ được miêu tả bởi một tham số gọi là **trở kháng** và có thể thấy như một *trở kháng phức*. Khái niệm điện trở tương đương với việc coi tụ điện và cuộn cảm là các *điện trở phụ thuộc tần số*, tức là điện trở của chúng là một hàm của tần số kích tín hiệu sin. Hình 11.50 vẽ cùng một mạch điện được biểu diễn ở dạng thông thường (trên) và ở dạng điện trở-pha (dưới); cách biểu diễn sau thể hiện tường minh điện áp pha và dòng điện theo pha và coi các phần tử mạch điện là một điện trở suy rộng. Điều này thể hiện rằng mỗi phần tử trong ba phần tử mạch điện lý tưởng đều có thể được biểu diễn bằng một phần tử điện trở như vậy.

Không mất tính tổng quát, định nghĩa nguồn áp trong mạch điện hình 11.50 như sau:

$$v_S(t) = A\cos\omega t \quad \text{và} \quad \mathbf{V}_S(j\omega) = Ae^{j0} \tag{11.60}$$

Khi đó dòng điện $i(t)$ được định nghĩa bằng mối quan hệ *i-v* cho mỗi phần tử mạch điện. Chúng ta sẽ cùng nghiên cứu các đặc tính phụ thuộc tần số của điện trở, cuộn cảm và tụ điện.



HÌNH 11.50 Phần tử trở kháng

Trở kháng của điện trở được định nghĩa là tỷ số của điện áp pha trên điện trở với dòng điện pha chạy qua nó và ký hiệu Z_R được dùng để ký hiệu nó:

$$Z_R(j\omega) = \frac{\mathbf{V}_S(j\omega)}{\mathbf{I}(j\omega)} = R \tag{11.61}$$

Trở kháng của cuộn cảm được định nghĩa như sau:

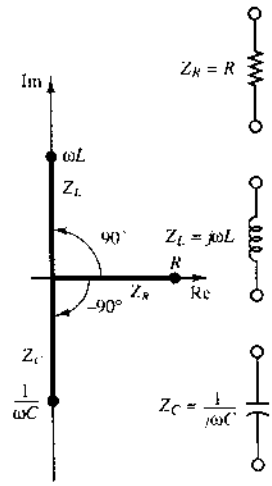
$$Z_L(j\omega) = \frac{\mathbf{V}_S(j\omega)}{\mathbf{I}(j\omega)} = \omega L e^{j90} = j\omega L \tag{11.62}$$

Chú ý rằng, lúc này cuộn cảm sẽ giống như một *điện trở phức phụ thuộc tần số* và độ lớn ωL của điện trở phức này tỷ lệ với tần số góc ω của tín hiệu. Do đó, cuộn cảm sẽ cản dòng điện tỷ lệ với tần số của tín hiệu nguồn. Điều này có nghĩa rằng tại các tần số tín hiệu thấp, một cuộn cảm có tác dụng như phần tử ngắn mạch, trong khi tại các tần số cao nó có xu thế giống phần tử hở mạch hơn. Một điểm quan trọng nữa là *biên độ trở kháng của một cuộn cảm luôn luôn dương*, bởi vì cả L và ω đều là các số dương. Đơn vị của đại lượng này cũng là ôm.

Trở kháng của tụ điện lý tưởng $Z_C(j\omega)$ được định nghĩa như sau:

$$Z_C(j\omega) = \frac{\mathbf{V}_S(j\omega)}{\mathbf{I}(j\omega)} = \frac{1}{\omega C} e^{-j90} = \frac{-j}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C} \tag{11.63}$$

trong đó chúng ta đã sử dụng $1/j = e^{-j90°} = -j$. Vì thế, trở kháng của một tụ điện cũng là một đại lượng phức phụ thuộc tần số và trở kháng của tụ điện là hàm nghịch đảo của tần số, do vậy tụ điện tác động như phần tử ngắn mạch ở tần số cao, khi ở tần số thấp chúng giống một phần tử hở mạch nhiều hơn. Một điểm quan trọng khác là *trở kháng của một tụ điện luôn luôn âm*, do cả C và ω đều là các số dương. Cũng nên nhớ rằng đơn vị điện trở của một tụ điện là Ôm. Hình 11.51 vẽ $Z_C(j\omega)$, $Z_R(j\omega)$ và $Z_L(j\omega)$ trong mặt phẳng phức.



HÌNH 11.51 Trở kháng của R, L và C trong mặt phẳng phức

Các tham số trở kháng định nghĩa trong phần này rất hữu ích khi phân tích mạch điện AC, bởi vì nhờ chúng mà hầu hết các định lý được phát biểu cho mạch điện DC được dùng trong mạch AC bằng cách thay thế điện trở bởi các điện trở phức. Dạng tổng quát nhất, điện trở của một phần tử mạch điện được định nghĩa là tổng của một phần thực và một phần ảo:

$$Z(j\omega) = R(j\omega) + jX(j\omega) \tag{11.64}$$

trong đó R được gọi là **điện trở AC** và X được gọi là **điện kháng**. Sự phụ thuộc vào tần số của R và X đã được chỉ ra rất rõ ràng. Các ví dụ sau sẽ minh họa cách tính trở kháng gồm cả phần thực và phần ảo trong một mạch điện.

Ví dụ 11.4 Đầu đo dịch chuyển kiểu điện dung

Trong ví dụ 11.3, ta đã xét một đầu đo dịch chuyển kiểu điện dung được cấu tạo bởi một tụ điện có 2 bản song song trong đó có một bản cố định và một bản chuyển động. Điện dung của tụ điện biến đổi này là một hàm *phi tuyến* theo vị trí x của bản chuyển động (hình 11.39). Trong ví dụ này muốn chỉ ra rằng trong các điều kiện nào đó, trở kháng của tụ điện sẽ thay đổi như một hàm *tuyến tính* của độ dịch chuyển, tức là tụ điện có bản di động có thể dùng như đầu đo dịch chuyển tuyến tính.

Nhắc lại công thức trong ví dụ 11.3:

$$C = \frac{8.854 \times 10^{-3} A}{x}$$

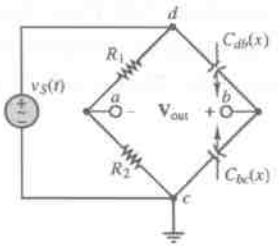
trong đó C là điện dung có đơn vị picofara, A là diện tích các bản tụ đơn vị mét vuông và x là khoảng dịch chuyển (thay đổi) đơn vị milimét. Khi tụ điện nối vào một mạch điện AC, trở kháng của nó sẽ được xác định bằng công thức sau:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

vì vậy:

$$Z_C = \frac{x}{8.854 j\omega A}$$

Do vậy, tại một tần số không đổi ω, điện trở của tụ điện sẽ thay đổi tuyến tính theo dịch chuyển. Có thể thấy được đặc tính này qua các mạch cầu ở ví dụ 11.3, trong ví dụ này trình bày một đầu đo độ chênh áp suất được làm từ hai tụ điện có bản tụ có thể chuyển động, thấy rằng nếu điện trở của một tụ điện tăng do có sự chênh áp suất đi qua đầu đo, điện trở của tụ còn lại phải giảm đi một lượng tương ứng (nhất là đối với trường hợp các dịch chuyển nhỏ). Mạch điện trên hình 11.52 gồm có hai điện trở và hai tụ điện có thể thay đổi (được biểu diễn là $C(x)$) nối thành mạch cầu. Mạch cầu này được kích bởi một tín hiệu hình sin.



Hình 11.52 Mạch cầu cho đầu đo dịch chuyển theo kiểu điện dung

Sử dụng ký hiệu pha, chúng ta có thể biểu diễn điện áp đầu ra như sau:

$$\mathbf{V}_{ra}(j\omega) = \mathbf{V}_S(j\omega)\left(\frac{Z_{C_{bc}}(x)}{Z_{C_{db}}(x) + Z_{C_{bc}}(x)} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

Điện dung danh nghĩa của mỗi tụ điện với màn ngăn ở vị trí chính giữa là:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

trong đó d là sự phân cách danh định (không dịch chuyển) giữa màn ngăn và mặt cố định của tụ điện (mm), điện dung của các tụ điện sẽ thay đổi theo luật sau:

$$C_{db} = \frac{\varepsilon A}{d - x} \text{ và } C_{bc} = \frac{\varepsilon A}{d + x}$$

Khi xuất hiện sự chênh áp suất trên đầu đo, điện trở của các tụ điện thay đổi theo độ dịch chuyển:

$$Z_{C_{db}} = \frac{d - x}{8.854 j\omega A} \text{ và } Z_{C_{bc}} = \frac{d + x}{8.854 j\omega A}$$

Và chúng ta có được công thức tính điện áp đầu ra dạng pha như sau, nếu chọn $R_1 = R_2$.

$$\mathbf{V}_{ra}(j\omega) = \mathbf{V}_S(j\omega)\left(\frac{\frac{d + x}{8.854 j\omega A}}{\frac{d - x}{8.854 j\omega A} + \frac{d + x}{8.854 j\omega A}} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

$$= \mathbf{V}_S(j\omega)\left(\frac{1}{2} + \frac{x}{2d} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

$$= \mathbf{V}_S(j\omega)\frac{x}{2d}$$

Vì vậy, điện áp đầu ra sẽ biến đổi tương ứng với điện áp đầu vào và tỷ lệ với độ dịch chuyển.

Tài liệu tham khảo

[1] Irwin, J.D., 1989. *Basic Engineering Circuit Analysis,* 3rd ed., Macmillan, New York.

[2] Nilsson, J.W., 1989. *Electric Circuits,* 3rd ed., Addison-Wesley, Reading, MA.

[3] Rizzoni, G., 2000. *Principles and Applications of Electrical Engineering,* 3rd ed., McGraw-Hill, Burr Ridge, IL.

[4] Smith, R.J. and Dorf, R.C., 1992. *Circuits, Devices and Systems,* 5th ed., John Wiley & Sons, New York.

[5] 1993. *The Electrical Engineering Handbook,* CRC Press, Boca Raton, FL.

[6] Budak, A., *Passive and Active Network Analysis and Synthesis,* Houghton Mifflin, Boston.

[7] Van Valkenburg, M.E., 1982, *Analog Filter Design,* Holt, Rinehart & Winston, New York.

12

Nhiệt động lực học

12.1 Nguyên lý cơ bản 12-1
12.2 Cân bằng thuộc tính mở rộng 12-4
12.3 Các quan hệ thuộc tính và dữ liệu 12-12
12.4 Các chu trình công suất của chất khí và hơi 12-24

Michael J. Moran
The Ohio State University

Mặc dù rất nhiều vấn đề về Nhiệt động lực học (Nhiệt động) đã được chú ý từ lâu nhưng việc nghiên cứu có cơ sở khoa học và lý luận về các vấn đề năng lượng vận động của nhiệt như các vật nóng có khả năng tạo ra công mới chỉ được bắt đầu trong nửa đầu thế kỷ mười chín. Ngày nay, những vấn đề này đã được nghiên cứu ở phạm vi lớn hơn, được giải quyết một cách tổng quát hơn theo năng lượng và entropi, và theo các mối quan hệ giữa các thông số trạng thái của vật chất. Hơn thế nữa, trong 25 năm qua Nhiệt động kỹ thuật đã trải qua một cuộc cách mạng, cả về việc diễn giải các cơ sở lý thuyết lẫn các phương pháp ứng dụng. Đặc biệt, định luật thứ hai của nhiệt động đã trở thành một công cụ hiệu quả phục vụ cho công việc thiết kế và phân tích kỹ thuật.

12.1 Nguyên lý cơ bản

Nhiệt động cổ điển có liên quan mật thiết tới cấu trúc vĩ mô của vật chất. Lĩnh vực này tập trung vào các đặc tính tổng quát của tổ hợp lượng lớn các phân tử chứ không phải từng phân tử. Cấu trúc vi mô của vật chất được nghiên cứu trong lý thuyết động học và cơ học thống kê (bao gồm cả nhiệt động lượng tử). Trong chương này sẽ trình bày phương pháp tiếp cận cổ điển tới nhiệt động.

Các định nghĩa và các khái niệm cơ bản

Nhiệt động vừa là một nhánh của ngành vật lý vừa là một ngành khoa học kỹ thuật. Các nhà khoa học luôn mong muốn có được một hiểu biết cơ bản về tính chất hoá học và vật lý của các đại lượng vật chất cố định, bất biến và sử dụng các nguyên lý của nhiệt động để mô tả các thông số của vật chất. Các kỹ sư thường quan tâm tới việc nghiên cứu các hệ nhiệt động và sự trao đổi của chúng với môi trường. Để thuận tiện cho việc nghiên cứu, các kỹ sư đã mở rộng đối tượng của nhiệt động tới việc nghiên cứu cả hệ có dòng vật chất chảy qua.

Hệ nhiệt động

Hệ nhiệt động là một vật hoặc nhiều vật được tách riêng ra khỏi các vật khác để nghiên cứu những tính chất nhiệt động của chúng. Tất cả các vật ngoài hệ gọi là môi trường. Bề mặt ngăn cách hệ với môi trường gọi là bề mặt ranh giới. Hệ nhiệt động có trọng tâm không chuyển động gọi là hệ kín. Hệ kín có khối lượng không đổi. Hệ nhiệt động có trọng tâm chuyển động, khối lượng thay đổi, mội chất đi qua bề mặt ranh giới gọi là hệ hở. Hệ cô lập là hệ không trao đổi với môi trường dưới bất kỳ hình thức nào.

Trạng thái, thông số trạng thái

Các đặc điểm của một hệ tại một thời điểm nào đó được gọi là *trạng thái* của nó. Để mô tả trạng thái của hệ ở một thời điểm bất kỳ, ta sử dụng các thông số trạng thái của hệ. Một *thông số trạng thái* là đại lượng nào đó mà giá trị của nó phụ thuộc vào trạng thái, chứ không phụ thuộc vào quá trình biến đổi của hệ. Giá trị của một thông số được xác định chủ yếu bằng vận hành hoặc thử nghiệm vật lý.

Các thông số mở rộng phụ thuộc vào kích cỡ hoặc sự mở rộng của hệ thống. Thể tích, khối lượng, năng lượng, entropi và exergy là các ví dụ về các thông số tổng hợp. Một thông số tổng hợp có tính cộng được theo nghĩa các giá trị của toàn bộ hệ bằng tổng các giá trị thành phần. Các thông số *cục bộ* của hệ có tính chất độc lập với kích cỡ hoặc sự mở rộng của hệ thống. Áp suất và nhiệt độ là các ví dụ về loại thông số cục bộ.

Quá trình nhiệt động, chu trình nhiệt động

Hai trạng thái được gọi là đồng nhất khi và chỉ khi các thông số của hai trạng thái này là đồng nhất. Khi có bất kỳ một thông số nào của một hệ thay đổi về giá trị sẽ làm trạng thái này thay đổi và hệ lúc này trải qua một *quá trình nhiệt động*. Khi một hệ có một trạng thái ban đầu sau đó thực hiện qua một chuỗi các quá trình và cuối cùng trở lại trạng thái ban đầu của nó, tức là hệ này đã thực hiện một *chu trình nhiệt động*.

Pha và chất tinh khiết

Khái niệm *pha* được coi là một đại lượng của vật chất mà cả thành phần hoá học và cấu trúc vật lý của nó đều đồng nhất. Sự đồng nhất trong cấu trúc vật lý có nghĩa là vật chất hoàn toàn ở *thể rắn*, hoặc hoàn toàn ở *thể lỏng*, hoặc hoàn toàn ở *thể hơi* (cũng gọi là *thể khí*). Một hệ có thể chứa đựng một hoặc nhiều pha. Ví dụ một hệ gồm nước lỏng và hơi nước có hai pha. Một *chất tinh khiết* là một lượng của vật chất mà thành phần hoá học của nó là đồng nhất và không biến đổi. Một chất tinh khiết có thể tồn tại nhiều hơn một pha, tuy nhiên thành phần hoá học của nó phải luôn không đổi ở mỗi pha. Ví dụ khi nước lỏng và hơi nước hợp thành một hệ hai pha, hệ này được coi là một chất tinh khiết bởi vì mỗi pha có cùng một thành phần hoá học. Định luật pha [21, 22] chỉ ra bản chất của các pha là luôn cùng tồn tại cân bằng tại một vị trí gọi là *vị trí cân bằng*.

Trạng thái cân bằng

Trạng thái cân bằng có nghĩa là một điều kiện cân bằng. Trong nhiệt động, khái niệm này không chỉ phản ánh sự cân bằng của các lực, mà còn thể hiện sự cân bằng của các tác động khác. Mỗi một loại tác động đó liên quan tới một khía cạnh đặc biệt của trạng thái cân bằng nhiệt động. Trạng thái cân bằng *nhiệt* liên quan tới nhiệt độ, trạng thái cân bằng *cơ học* liên quan tới áp suất và trạng thái cân bằng *pha* liên quan tới các năng lượng hoá học [21, 22]. Trạng thái cân bằng *hoá học* cũng được xây dựng theo hoá năng. Để có được trạng thái cân bằng hoàn toàn thì một vài trạng thái cân bằng cần phải tồn tại riêng rẽ.

Nhiệt độ

Một thang nhiệt độ độc lập với các chất đo nhiệt độ được gọi là *thang nhiệt độ nhiệt động*. Thang nhiệt độ Kelvin (thang nhiệt độ tuyệt đối), là một thang nhiệt động, có thể được suy ra từ định luật thứ hai của nhiệt động. Các định nghĩa của nhiệt độ từ định luật hai này được sử dụng cho toàn bộ miền nhiệt độ và đưa ra một mối quan hệ gắn kết về bản chất giữa một vài *hệ* đo lường nhiệt độ bằng *thực nghiệm*. Đặc biệt, các nhiệt độ đã được đo khi sử dụng một *nhiệt kế khí thể tích hằng đồng nhất* với các nhiệt độ trong thang đo nhiệt độ Kelvin trong miền nhiệt độ mà ở đó nhiệt biểu học khí có thể được sử dụng. Trong thang đo nhiệt theo Kelvin đơn vị là kelvin (K).

Thang đo nhiệt độ theo Celsius (thang nhiệt độ bách phân) sử dụng độ C, có cùng độ lớn như kelvin. Do đó, sự chênh lệch nhiệt độ là đồng nhất ở cả hai thang đo. Tuy nhiên, điểm 0 trên thang

C lệch với thang K là 273.15, *điểm ba thể* của nước (hình 12.1b), được thể hiện bằng mối quan hệ sau theo nhiệt độ Celsius và nhiệt độ Kelvin:

$$T(°C) = T(K) - 273.15 \tag{12.1}$$

Có hai thang nhiệt độ khác cũng thường được sử dụng trong kỹ thuật ở Mỹ. *Thang Rankine*, đơn vị của nó là độ rankine (°R), tỷ lệ với nhiệt độ Kelvin theo công thức sau:

$$T(°R) = 1,8T(K) \tag{12.2}$$

Thang đo theo Rankine cũng một thang đo tuyệt đối trong Nhiệt động với một giá trị không tuyệt đối trùng khớp với giá trị không tuyệt đối của thang đo Kelvin. Trong các mối quan hệ Nhiệt động, nhiệt độ luôn luôn được tính theo thang đo Kelvin hoặc Rankine trừ trường hợp đặc biệt nào đó.

Một độ khác có cùng kích cỡ như ở thang Rankine là *thang đo nhiệt độ Fahrenheit*, tuy nhiên điểm 0 của nó có chênh lệch thể hiện theo quan hệ sau:

$$T(°F) = T(°R) - 459.67 \tag{12.3}$$

Thay thế phương trình (12.1) và (12.2) vào phương trình (12.3) ta thu được:

$$T(°F) = 1.8T(°C) + 32 \tag{12.4}$$

Phương trình này thể hiện rằng nhiệt độ Fahrenheit của *điểm đóng băng* (0°C) là 32°F và của *điểm bay hơi* (100°C) là 212°F. 100 độ Celsius hoặc Kelvin giữa điểm đóng băng và điểm bay hơi tương ứng với 180 độ Fahrenheit hoặc Rankine.

Để đưa ra một tiêu chuẩn đo lường nhiệt độ dùng cho cả lý thuyết và thực tế, thang đo nhiệt độ quốc tế năm 1990 (ITS-90) được định nghĩa theo cách mà nhiệt độ đo đạc trên nó phù hợp với nhiệt độ nhiệt động, đơn vị của nó là kelvin và nằm trong các giới hạn của độ chính xác đo đạc có thể đạt được. Có thể xem thêm các nghiên cứu về ITS-90 trong [24].

Quá trình không thuận nghịch

Một quá trình được gọi là *thuận nghịch* khi ta có thể loại bỏ được những ảnh hưởng của nó và sau đó bằng cách nào đó khôi phục lại một cách chính xác các trạng thái ban đầu tương ứng của hệ và cả môi trường nó. Một quá trình gọi là *không thuận nghịch* khi không thể khôi phục được các trạng thái ban đầu của hệ và cả môi trường nó. Có nhiều hiệu ứng trong suốt một quá trình có tính chất không thuận nghịch. Ví dụ: truyền nhiệt qua qua một miền có chênh lệch nhiệt độ hữu hạn; quá trình giãn nở không hạn chế của một chất khí hoặc lỏng làm giảm áp suất; phản ứng hoá học tự phát; hỗn hợp vật chất với các hợp chất khác nhau hoặc ở các trạng thái khác nhau; ma sát (ma sát trượt cũng như ma sát trong dòng chảy của lưu chất); dòng điện chạy qua một điện trở; sự trễ từ hoá và trễ phân cực; và biến dạng không đàn hồi... Thuật ngữ *tính không thuận nghịch* được sử dụng với mục đích nhận biết các hiệu ứng như trên.

Có thể chia quá trình không thuận nghịch thành hai lớp: *trong* và *ngoài*. Quá trình thuận nghịch trong xảy ra bên trong hệ thống, trong khi đó quá trình thuận nghịch ngoài xảy ra ở môi trường của hệ thống, thường thì là môi trường ngoài kề sát. Theo cách phân loại này, phụ thuộc vào các loại bề mặt ranh giới, sẽ tồn tại một số tuỳ chọn khi phân loại (như khi chọn các bề mặt ranh giới bao quanh cả môi trường kề sát, các tính không thuận nghịch đều là trong). Tuy nhiên, kết quả sẽ là cụ thể khi biết được sự phân biệt này giữa các quá trình không thuận nghịch. Khi không tồn tại một quá trình không thuận nghịch trong trong một quá trình, quá trình này sẽ được gọi là có tính chất *thuận nghịch trong*. Tại mọi trạng thái trung gian của một quá trình có tính thuận nghịch trong của một hệ kín, tất cả các thông số cục bộ đều đồng nhất trong toàn bộ pha hiện hữu: nhiệt độ, áp suất, thể tích riêng và các thông số cục bộ khác sẽ không thay đổi theo vị trí.

Các định luật của nhiệt động

Các bước đầu tiên trong việc phân tích nhiệt động là định nghĩa các hệ và định nghĩa những mối quan hệ trao đổi với môi trường. Sau đó tập trung tới các định luật vật lý liên quan trực tiếp tới chúng và các mối quan hệ cho phép diễn tả sự biến đổi của hệ bằng một mô hình kỹ thuật, mô hình này biểu diễn biến đổi của hệ theo một cách đơn giản đủ để phục vụ cho mục đích phân tích, thậm chí, bỏ qua các đặc điểm thực của các hệ trong thực tế.

Thường sẽ sử dụng một trong ba định luật cơ bản hoặc nhiều hơn để phân tích một cách trực tiếp hoặc gián tiếp nhiệt động của các thể tích không đổi và các hệ kín. Các định luật này sẽ độc lập với các chất hoặc hợp chất cụ thể tuỳ thuộc vào vấn đề cần xem xét như sau

- Định luật bảo toàn khối lượng,
- Định luật bảo toàn năng lượng,
- Định luật thứ hai của nhiệt động.

Có thể diễn đạt định luật hai này theo exergy hoặc entropi.

Các định luật nhiệt động cần phải được bổ sung thêm các dữ liệu thông số nhiệt động thích hợp. Đối với một số ứng dụng cần sử dụng thêm một phương trình động lượng biểu diễn định luật Newton thứ hai về chuyển động. Dữ liệu cho các thông số truyền dẫn, các hệ số truyền nhiệt và các hệ số ma sát thường rất cần thiết cho quá trình phân tích toàn diện trong kỹ thuật. Các nguyên lý của kinh tế kỹ thuật và dữ liệu kinh tế thích hợp cũng có thể đóng vai trò thích đáng.

12.2 Cân bằng thuộc tính mở rộng

Các định luật nhiệt động có thể được thể hiện qua sự *cân bằng các thông số tổng hợp* cho khối lượng, năng lượng, entropi và exergy. Các ứng dụng kỹ thuật nói chung thường được phân tích trên cơ sở một thể tích không đổi. Chính vì vậy, ở đây sẽ trình bày các công thức thể tích không đổi của sự cân bằng khối lượng, năng lượng, entropi và exergy. Chúng sẽ được thể hiện ở dạng cân bằng tổng thể với giả thiết dòng chảy là một chiều. Các phương trình thay đổi về khối lượng, năng lượng và entropi ở dạng các phương trình vi phân có thể tìm thấy trong tài liệu [4].

Cân bằng khối lượng

Đối với các ứng dụng xuất hiện các dòng chảy bên trong và dòng chảy bên ngoài đi qua một hoặc nhiều cổng, cân bằng thông số tổng hợp mô tả nguyên lý bảo toàn khối lượng có dạng:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e \tag{12.5}$$

ở đây dm/dt biểu diễn tốc độ thay đổi khối lượng được chứa đựng trong thể tích không đổi theo thời gian, $\dot{m}_i$ thể hiện lưu lượng khối lượng[1] tại một cổng vào và $\dot{m}_e$ là lưu lượng khối lượng tại một cổng ra.

Một dòng chảy chuyển động qua một phần của bề mặt không đổi có diện tích là dA sẽ được tính là tích của thành phần vận tốc vuông góc với diện tích đó v_n với vi phân diện tích dA: $v_n dA$. Lưu lượng khối lượng đi qua dA là $\rho(v_n dA)$, ở đây ρ là khối lượng riêng. Từ đây ta có thể tính được lưu lượng khối lượng đi qua một cổng có diện tích A bằng cách tích phân trên toàn bộ diện tích như sau:

$$\dot{m} = \int_A \rho v_n dA$$

[1] Lưu lượng khối lượng được tính bằng kg/s, khác với lưu lượng thể tích được tính bằng m^3/s.

Đối với dòng chảy một chiều các thông số cục bộ là đồng nhất theo vị trí trên toàn bộ diện tích A và ta sẽ thu được phương trình cuối cùng là:

$$\dot{m} = \rho v A = \frac{vA}{v} \tag{12.6}$$

với v là một thể tích riêng (nghịch đảo của khối lượng riêng) và bỏ qua chỉ số n đặt dưới vận tốc để làm đơn giản hơn.

Cân bằng năng lượng

Năng lượng là một khái niệm cơ bản của nhiệt động và cũng là khía cạnh quan trọng nhất khi phân tích kỹ thuật. Năng lượng có thể được lưu trữ ở rất nhiều dạng vĩ mô khác nhau: động năng, thế năng trọng trường và nội năng. Năng lượng cũng có thể được chuyển đổi từ dạng này sang dạng khác và giữa các hệ thống. Năng lượng có thể được truyền bằng công, bằng sự truyền nhiệt và bằng dòng lưu chất. Tổng năng lượng trong các quá trình chuyển đổi và truyền sẽ được bảo toàn. Cân bằng các thông số tổng hợp biểu diễn nguyên lý bảo toàn năng lượng có dạng như sau:

$$\frac{d(U + \mathrm{KE} + \mathrm{PE})}{dt} = \dot{\mathrm{Q}} - \dot{\mathrm{W}} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{\mathrm{v}_i^2}{2} + g z_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\mathrm{v}_e^2}{2} + g z_e \right) \tag{12.7a}$$

với U, KE và PE tương ứng biểu diễn nội năng, động năng và thế năng trọng trường của toàn bộ thể tích không đổi.

Vế phải của phương trình (12.7a) tính đến lượng năng lượng truyền qua bề mặt ranh giới của thể tích không đổi. Năng lượng có thể truyền vào hoặc thoát ra các thể tích không đổi dưới dạng công. Bởi vì công được thực hiện trên (hoặc do) một thể tích không đổi khi dòng lưu chất đi qua biên, nên phân chia tốc độ sinh công (công suất) thành hai loại để thuận tiện cho các mục đích sau này. Một phần là tốc độ công sinh ra bởi áp lực do khối lượng được dẫn đến tại đường vào và bị loại bỏ ở đường ra. Các thành phần này thường được coi là *công dòng chảy*, được định lượng thông qua các đại lượng lần lượt là $\dot{m}_i (p_i v_i)$ và $\dot{m}_e (p_e v_e)$, ở đây p là áp suất và v là thể tích riêng. Một thành phần nữa, có ký hiệu là $\dot{\mathrm{W}}$ trong phương trình (12.7a), bao gồm tất cả các hiệu ứng công khác có liên quan tới các trục quay, dịch chuyển của bề mặt ranh giới và các hiệu suất điện. $\dot{\mathrm{W}}$ có giá trị *dương* trong quá trình truyền năng lượng *từ* thể tích không đổi.

Năng lượng cũng có thể đi vào và thoát ra các thể tích không đổi cùng với các dòng chảy của lưu chất. Đối với dòng chảy một chiều, năng lượng đi vào cùng với lưu chất ở đầu vào i là $\dot{m}_i \left(u_i + \mathrm{v}_i^2/2 + g z_i \right)$, ở đây ba số hạng trong ngoặc đơn lần lượt là nội năng riêng, động năng riêng và thế năng riêng của lực trọng trường của vật chất chảy qua cổng i. Trong phương trình (12.7a), tổng của nội năng riêng và công dòng chảy riêng tại mỗi đường vào và đường ra được thể hiện theo entanpi riêng $h(= u + pv)$. Cuối cùng, $\dot{\mathrm{Q}}$ là tốc độ truyền nhiệt năng và có giá trị *dương* trong quá trình truyền năng lượng tới thể tích không đổi.

Bằng cách bỏ qua các số hạng của phương trình (12.7a) liên quan tới lưu lượng khối lượng, ta có thể thu được một cân bằng năng lượng cho các hệ kín. Về nguyên tắc, có thể tích phân cân bằng năng lượng hệ kín trong một quá trình giữa hai trạng thái để thu được cân bằng năng lượng hệ kín:

$$(U_2 - U_1) + (\mathrm{KE}_2 - \mathrm{KE}_1) + (\mathrm{PE}_2 - \mathrm{PE}_1) = \mathrm{Q} - W \tag{12.7b}$$

ở đây 1 và 2 thể hiện các trạng thái bắt đầu và kết thúc. Q và W lần lượt là các *lượng* nhiệt năng được truyền và công thực hiện trong suốt quá trình.

Cân bằng Entropi

Các ứng dụng hiện đại của nhiệt động kỹ thuật thể hiện định luật thứ hai như một lựa chọn là một cân bằng entropi hoặc một cân bằng exergy. Ở đây xem xét tới cân bằng entropi.

Như khối lượng và năng lượng, entropi có thể được lưu trữ và truyền tải qua bề mặt ranh giới của các hệ thống. Tuy nhiên, sự khác nhau so với khối lượng và năng lượng là, entropi không được bảo toàn, nhưng có thể được tạo ra từ các quá trình *không thuận nghịch* trong các hệ thống. Cân bằng thông số tổng hợp cho entropi đối với một thể tích không đổi là:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen} \tag{12.8}$$

Trong đó:

$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e$ là tốc độ truyền entropi

$\dot{S}_{gen}$ là tốc độ tạo ra entropi

ở đây *dS/dt* biểu diễn tốc độ biến đổi của entropi theo thời gian trong thể tích không đổi. Các số hạng $\dot{m}_i s_i$ và $\dot{m}_e s_e$ tương ứng sẽ là các tốc độ của entropi truyền tới và truyền ra khỏi thể tích không đổi tương ứng với lưu lượng khối lượng. $\dot{Q}_j$ biểu diễn tốc độ truyền nhiệt theo thời gian tại một vùng trên bề mặt ranh giới mà ở đây nhiệt độ tức thời là T_j và $\dot{Q}_j / T_j$ thể hiện tốc độ tương ứng của sự truyền entropi. $\dot{S}_{gen}$ là tốc độ tạo ra entropi theo thời gian do các quá trình không thuận nghịch trong thể tích không đổi. Biểu thức cân bằng tốc độ entropi cho các hệ kín có thể thu được bằng cách bỏ các số hạng trong phương trình (12.8) liên quan tới lưu lượng khối lượng $\dot{m}_i$ và $\dot{m}_e$.

Khi áp dụng cân bằng entropi ở bất kể một dạng nào của nó, thì mục đích sẽ thường là tính giá trị của số hạng phát sinh ra entropi. Tuy nhiên, bản thân giá trị đặc trưng cho việc tạo ra entropi ở một quá trình cho trước của một hệ thường không đủ ý nghĩa. Ý nghĩa này thường được xác định thông qua việc so sánh: sự tạo ra entropi bên trong một thành phần được đưa ra trước sẽ được so sánh với các giá trị của sự tạo ra entropi của các thành phần khác trong toàn bộ một hệ được tạo ra từ các thành phần này. Điều này cho phép chỉ ra một cách chính xác những bộ phận chính gây ra các quá trình không thuận nghịch trong toàn bộ hệ thống.

Các thể tích không đổi trong trạng thái ổn lập

Các hệ trong thực tế thường được lý tưởng hoá ở tại *trạng thái ổn lập*, có nghĩa là tất cả các thông số của chúng không thay đổi theo thời gian. Đối với một thể tích không đổi ở tại trạng thái ổn lập, tính đồng nhất của vật chất bên trong thể tích không đổi thay đổi một cách liên tục, nhưng tổng khối lượng không thay đổi. Tại trạng thái ổn lập, phương trình cân bằng biến đổi khối lượng (12.5) trở thành:

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e \tag{12.9a}$$

Tại trạng thái ổn lập, phương trình cân bằng biến đổi năng lượng (12.7a) trở thành:

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + g z_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + g z_e \right) \tag{12.9b}$$

Tại trạng thái ổn lập, phương trình cân bằng biến đổi entropi (12.8) sẽ là:

$$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen} \tag{12.9c}$$

Khối lượng và năng lượng là những đại lượng bảo toàn, tuy nhiên entropi nói chung là không được bảo toàn. Phương trình (12.9a) chỉ ra rằng lưu lượng khối lượng đi vào thể tích không đổi

bằng với tốc độ tổng cộng của lưu lượng đi ra khỏi thể tích không đổi này. Tương tự, phương trình (12.9b) phát biểu rằng tổng cộng tốc độ của năng lượng truyền tới thể tích không đổi bằng với tổng cộng tốc độ của năng lượng truyền ra khỏi thể tích không đổi này. Tuy nhiên, phương trình (12.9c) cho thấy rằng tốc độ mà tại đó entropi được truyền ra ngoài vượt quá tốc độ mà tại đó entropi đi vào, sự chênh lệch đó chính là tốc độ tạo ra entropi bên trong thể tích không đổi vì các quá trình không thuận nghịch.

Nhiều ứng dụng có liên quan tới các thể tích không đổi mà có một đường vào đơn và một đường ra đơn. Với những trường hợp này, cân bằng sự thay đổi khối lượng, phương trình (12.9a), trở thành $\dot{m}_i = \dot{m}_e$. Biểu diễn lưu lượng có khối lượng chung bằng $\dot{m}$, phương trình (12.9b) và (12.9c) tương ứng sẽ là:

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}\left[(h_i - h_e) + \left(\frac{v_i^2 - v_e^2}{2}\right) + g(z_i - z_e)\right] \tag{12.10a}$$

$$0 = \frac{\dot{Q}}{T_b} + \dot{m}(s_i - s_e) + \dot{S}_{\text{gen}} \tag{12.11a}$$

trong đó để cho đơn giản T_b biểu thị nhiệt độ hoặc một nhiệt độ trung bình phù hợp, trên bề mặt ranh giới nơi mà quá trình truyền nhiệt xảy ra.

Khi cân bằng sự thay đổi năng lượng và entropi được ứng dụng trong các trường hợp cụ thể người ta thường làm đơn giản thêm. Tốc độ truyền nhiệt $\dot{Q}$ được bỏ qua khi nó không đáng kể so với sự truyền các năng lượng khác qua biên. Điều này có thể là kết quả của một hoặc nhiều trường hợp sau: (1) bề mặt bên ngoài của thể tích không đổi được cô lập; (2) diện tích bề mặt ngoài quá nhỏ để có thể có quá trình truyền nhiệt đáng kể ở đó; (3) sự chênh lệch nhiệt độ giữa thể tích không đổi và môi trường của nó đủ nhỏ để có thể bỏ qua sự truyền nhiệt; (4) chất khí hoặc chất lỏng đi qua thể tích không đổi quá nhanh dẫn tới không đủ thời gian cho quá trình truyền nhiệt xảy ra một cách đáng kể. Công $\dot{W}$ sẽ không còn trong phương trình cân bằng sự biến đổi năng lượng khi không có các trục quay, các dịch chuyển của biên, hiệu ứng điện hoặc các cơ chế công khác liên quan tới thể tích không đổi đang được xem xét. Các hiệu ứng của động năng và thế năng thường được bỏ qua so với các số hạng khác của cân bằng sự thay đổi năng lượng.

Các dạng đặc biệt của phương trình (12.10a) và (12.11a) được liệt kê trong bảng 12.1 có thể đạt được như sau: Khi không có quá trình truyền nhiệt, phương trình (12.11a) đưa ra như sau:

$$s_e - s_i = \frac{\dot{S}_{\text{gen}}}{\dot{m}} \geq 0 \tag{12.11b}$$

Do vậy, khi có quá trình không thuận nghịch trong một thể tích không đổi, entropi riêng sẽ tăng theo dòng có khối lượng từ đường vào tới đường ra. Trong trường hợp *lý tưởng* mà ở đó không có các quá trình không thuận nghịch trong, dòng lưu chất đi qua thể tích không đổi sẽ không thay đổi về entropi của nó - tức là quá trình *đẳng entropi*.

Khi không có quá trình truyền nhiệt, phương trình (12.10a) sẽ là:

$$\dot{W} = \dot{m}\left[(h_i - h_e) + \left(\frac{v_i^2 - v_e^2}{2}\right) + g(z_i - z_e)\right] \tag{12.10b}$$

BẢNG 12.1 Các phương trình cân bằng năng lượng và entropi cho các thể tích không đổi một đường vào, một đường ra tại trạng thái ổn lập và không có sự truyền nhiệt

Phương trình cân bằng năng lượng:

$$\dot{W} = \dot{m}\left[(h_i - h_e) + \left(\frac{v_i^2 - v_e^2}{2}\right) + g(z_i - z_e)\right] \qquad (12.10b)$$

Các máy nén, bơm nhiệt và tua bin[a]:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_i - h_e) \qquad (12.10c)$$

Các loại van điều chỉnh:

$$h_e \cong h_i \qquad (12.10d)$$

Các loại thiết bị hãm dòng và thiết bị phun[b]:

$$v_e = \sqrt{v_i^2 + 2(h_i - h_e)} \qquad (12.10e)$$

Phương trình cân bằng entropi:

$$s_e - s_i = \frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}} \geq 0 \qquad (12.11b)$$

[a] Đối với một chất khí lý tưởng với hằng số c_p, phương trình (1') của bảng 12.4 cho phép phương trình (12.10c) trở thành:

$$\dot{W} = \dot{m}c_p(T_i - T_e) \qquad (12.10c')$$

Công suất tạo ra trong *quá trình đẳng entropi* có thể đạt được từ phương trình (5') của bảng 12.4 như sau:

$$\dot{W} = \dot{m}c_p T_i\left[1 - (p_e / p_i)^{(k-1)/k}\right] \quad (s = c) \qquad (12.10c'')$$

ở đây $c_p = kR/(k-1)$.

[b] Đối với một chất khí lý tưởng với hằng số c_p, phương trình (1') của bảng 12.4 cho phép phương trình (12.10e) được viết lại như sau:

$$v_e = \sqrt{v_i^2 + 2c_p(T_i - T_e)} \qquad (12.10e')$$

Có thể tính được vận tốc đầu ra trong một *quá trình đẳng entropi* bằng cách sử dụng phương trình (5') của bảng 12.4 như sau:

$$v_e = \sqrt{v_i^2 + 2c_p T_i\left[1 - (p_e / p_i)^{(k-1)/k}\right]} \quad (s = c) \qquad (12.10e'')$$

ở đây $c_p = kR/(k-1)$.

Một dạng đặc biệt có thể áp dụng được, ít nhất một cách gần đúng, với các bơm nhiệt, máy nén và các tua bin bằng cách bỏ qua các số hạng thế năng và động năng trong phương trình:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_i - h_e) \qquad (12.10c)$$

Trong *các thiết bị van điều chỉnh*, có thể giảm áp suất một cách đáng kể bằng cách tạo ra một cản trở trong một đường dẫn mà chất khí hoặc chất lỏng chảy qua nó. Đối với các thiết bị này $\dot{W} = 0$ và phương trình (12.10c) sẽ đơn giản hơn nhiều:

$$h_i \cong h_e \qquad (12.10d)$$

Điều này có nghĩa là đối với dòng lưu chất trước và sau van điều chỉnh, entropi riêng không đổi.

Một *thiết bị phun* là một đường chảy có diện tích mặt cắt ngang biến đổi mà ở đó vận tốc của chất khí hoặc chất lỏng tăng theo hướng dòng chảy. Ở *thiết bị hãm dòng*, chất khí hoặc chất lỏng sẽ giảm tốc theo hướng dòng chảy. Đối với những thiết bị này, $\dot{W} = 0$. Nói chung là có thể bỏ qua sự thay đổi thế năng và quá trình truyền nhiệt. Lúc này phương trình (12.10b) có dạng đơn giản hơn như sau:

$$0 = h_i - h_e + \frac{v_i^2 - v_e^2}{2}$$

Ta được vận tốc thoát ra:

$$v_e = \sqrt{v_i^2 + 2(h_i - h_e)} \qquad (12.10e)$$

Các dạng trạng thái ổn lập của các phương trình cân bằng sự biến đổi khối lượng, năng lượng và entropi có thể được ứng dụng cho các thể tích không đổi có nhiều đường vào và/hoặc đường ra, ví dụ các trường hợp liên quan tới các máy phát hơi nóng phục hồi, thiết bị cấp nước nóng và thiết bị trao đổi nhiệt chạy ngược và chạy chéo. Việc phân tích các quá trình quá độ (không ổn lập) có thể được tiến hành bằng các phương trình (12.5), (12.7a) và (12.8). Minh hoạ của các ứng dụng này được đưa ra ở [21, 22].

Cân bằng exergy

Exergy cung cấp một sự lựa chọn sử dụng entropi cho việc ứng dụng định luật thứ hai. Khi các khái niệm exergy được sử dụng cùng với các nguyên lý của kinh tế kỹ thuật, các kết quả thu được sẽ thuộc lĩnh vực *nhiệt kinh tế học*. Nhiệt kinh tế học cho phép xác định được các nguồn chi phí thực tế: các chi phí đầu tư vốn, chi phí bảo quản và vận hành, và các chi phí liên quan tới việc phá huỷ và hao phí exergy. Sự tối ưu các hệ có thể đạt được bằng việc đánh giá cẩn thận các nguồn chi phí này. Mục đích của nhiệt kinh tế học là mong muốn *giảm thiểu nhất chi phí nhờ sự trợ giúp của exergy*. Các phân tích về exergy và nhiệt kinh tế học được đưa ra ở [3, 18-22]. Ở phần này sẽ trình bày các khía cạnh nổi bật nhất về Exergy.

Định nghĩa exergy

Công có thể được thực hiện khi nào hai hệ ở tại các trạng thái khác nhau có mối quan hệ với nhau, bởi vì về nguyên tắc, công có thể được sinh ra từ hai hệ và có thể tiến tới cân bằng. Khi một trong hai hệ là một hệ được lý tưởng hoá phù hợp để là một *môi trường* và hệ còn lại là một hệ cần xem xét, exergy là công hữu ích theo lý thuyết lớn nhất (công trục quay hoặc công điện) có thể đạt được do hệ đang xét và môi trường trao đổi với nhau tiến tới cân bằng, giả thiết là quá trình truyền nhiệt chỉ xảy ra với môi trường này (nói một cách khác, exergy là công hữu dụng lý thuyết bé nhất được yêu cầu để định dạng một lượng vật chất từ các chất có mặt trong môi trường và đưa lượng vật chất đó tới một trạng thái nhất định). Exergy là một đại lượng để đo *sự bắt đầu* một trạng thái của hệ từ môi trường, do vậy nó là thông số của sự trao đổi giữa hệ và môi trường với nhau. Khi đã xác định được môi trường, exergy có thể được gán cho một giá trị theo các giá trị của các thông số chỉ cho hệ thống, do vậy exergy có thể được coi như là một thông số tổng hợp của hệ thống. Có thể phá huỷ exergy, nói chung là exergy không được bảo toàn như là entropi.

Các mô hình có nhiều mức độ khác nhau được ứng dụng trong việc diễn tả môi trường được sử dụng để đánh giá exergy. Các mô hình của môi trường thường là một bộ phận của không gian xung quanh hệ thống, các thông số cục bộ của mỗi pha mà luôn đồng nhất và không bị thay đổi đáng kể do tác động của một quá trình nào đó đang được xem xét. Môi trường được coi là hợp bởi các chất thường gặp tồn tại nhiều trong áp suất khí quyển, các đại dương và vỏ trái đất. Các chất ở các dạng ổn lập của chúng như là chúng tồn tại trong tự nhiên và không thể sinh công từ các trao đổi - vật lý hoặc hoá học - giữa các phần của môi trường. Mặc dù các thông số cục bộ của môi trường này được giả thiết là không thay đổi, các thông số tổng hợp của môi trường vẫn có thể thay

đổi do nguyên nhân của sự trao đổi với các hệ khác. Thế năng và động năng được xác định tương đối so với các toạ độ trong môi trường, tất cả các phần của môi trường được coi như đứng yên. Dễ dàng thấy, nhiệt độ T_0 và áp suất p_0 của môi trường thường là các giá trị bên ngoài, ví dụ là 1 atm và 25°C (77°F). Tuy nhiên, các thông số này có thể được xác định khác đi, phụ thuộc vào ứng dụng.

Khi một hệ là cân bằng với môi trường, trạng thái của hệ lúc đó được gọi là *trạng thái chết*. Tại trạng thái chết này, các điều kiện về cân bằng cơ học, nhiệt và hoá học giữa hệ với môi trường được thoả mãn như sau: áp suất, nhiệt độ và các thế năng hoá học của hệ tương ứng sẽ giống như của môi trường. Thêm vào đó, hệ không chuyển động hoặc chênh lệch so với các toạ độ trong môi trường. Theo các điều kiện này sẽ không thể có một sự thay đổi tự phát nào bên trong hệ hoặc trong môi trường hoặc là không có một sự trao đổi nào giữa chúng. Giá trị của exergy bằng không. Có thể định nghĩa một loại cân bằng khác giữa hệ và môi trường. Đây là một dạng cân bằng được hạn chế mà ở đây chỉ có các điều kiện cân bằng cơ học và nhiệt học phải được thoả mãn. Trạng thái này của hệ được gọi là *trạng thái chết có giới hạn* (restricted dead state). Ở trạng thái này, lượng vật chất cố định cần xem xét được coi là đóng kín trong một bề mặt ranh giới không cho phép lưu lượng đi qua, tại vận tốc và độ cao bằng không so với các toạ độ của môi trường và tại nhiệt độ T_0 và áp suất p_0.

Truyền Exergy và phá huỷ Exergy

Exergy có thể được truyền theo ba cách: exergy truyền cùng với công, exergy truyền cùng với quá trình truyền nhiệt và exergy truyền liên quan tới quá trình đi vào và đi ra của vật chất qua một thể tích không đổi.Tất cả các quá trình truyền exergy này được tính toán so với môi trường mà dùng để xác định exergy. Exergy cũng bị phá huỷ bởi các quá trình không thuận nghịch trong hệ hoặc thể tích không đổi. Các phương trình cân bằng exergy có thể được viết ở rất nhiều dạng, phụ thuộc vào hệ là kín hay là thể tích không đổi cần xem xét và việc quan tâm tới trạng thái ổn lập của nó hay là sự hoạt động trong giai đoạn quá độ. Do vai trò quan trọng của chúng trong nhiều ứng dụng, cân bằng tốc độ exergy cho các thể tích không đổi tại trạng thái ổn lập được biểu diễn theo một trong hai phương trình sau, phương trình (12.12a) và (12.12b):

$$0 = \sum_j \dot{E}_{q,j} - \dot{W} + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e - \dot{E}_D \qquad (12.12a)$$

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)\dot{Q}_j - \dot{W} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{E}_D \qquad (12.12b)$$

Trong đó:

$\sum_j \dot{E}_{q,j} - \dot{W} + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e$ là tốc độ truyền entropi

$\dot{E}_D$ là tốc độ phá hủy exergy

$\dot{W}$ có cùng ý nghĩa như trong phương trình (12.7a): tốc độ sinh công loại trừ công dòng chảy. $\dot{Q}_j$ là tốc độ theo thời gian của sự truyền nhiệt trên bề mặt ranh giới của thể tích không đổi nơi mà nhiệt độ tức thời là T_j. Tốc độ truyền exergy là:

$$\dot{E}_{q,j} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right)\dot{Q}_j \qquad (12.13)$$

Với các phương trình cân bằng đối với thể tích không đổi khác, chỉ số dưới i và e tương ứng với các đường vào và đường ra. Các tốc độ truyền exergy tại thể tích không đổi ở đường vào và

đường ra lần lượt là $\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i$ và $\dot{E}_e = \dot{m}_e e_e$. Cuối cùng, $\dot{E}_D$ tính toán cho tốc độ theo thời gian của quá trình phá huỷ exergy do các quá trình không thuận nghịch trong thể tích không đổi. Tốc độ của quá trình phá huỷ exergy có liên quan tới tốc độ phát sinh entropi như sau:

$$\dot{E}_D = T_0 \dot{S}_{\text{gen}} \tag{12.14}$$

Các số hạng truyền exergy riêng e_i, e_e có thể được thể hiện theo bốn thành phần: exergy vật lý e^{PH}, động năng e^{KN}, thế năng e^{PT} và exergy hoá học e^{CH}:

$$e = e^{\text{PH}} + e^{\text{KN}} + e^{\text{PT}} + e^{\text{CH}} \tag{12.15a}$$

Ba thành phần đầu tiên được tính toán như sau:

$$e^{\text{PH}} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \tag{12.15b}$$

$$e^{\text{KN}} = \frac{1}{2}\text{v}^2 \tag{12.15c}$$

$$e^{\text{PT}} = gz \tag{12.15d}$$

Ở phương trình (12.15b), h_0 và s_0 lần lượt là entanpi riêng và entropi riêng tại trạng thái chết hạn chế. Ở phương trình (12.15c) và (12.15d), v và z tương ứng là vận tốc và độ cao so với các toạ độ trong môi trường.

Để đánh giá exergy hoá học (các thành phần exergy liên quan tới sự tham gia các thành phần hoá học của một hệ trong môi trường). Các mô hình khác của môi trường có thể được dùng tùy theo các ứng dụng [15, 18]. Phân tích exergy có thể thực hiện được dễ dàng bằng cách ứng dụng một *môi trường chuẩn* và sử dụng một bảng *các exergy hoá học chuẩn* tương ứng. Các exergy hoá học tiêu chuẩn được xây dựng dựa trên các giá trị tiêu chuẩn, ví dụ của nhiệt độ tiêu chuẩn T_0 và áp suất tiêu chuẩn p_0 của môi trường, 298.15 K (25°C) và 1 atm. Các môi trường tiêu chuẩn cũng bao gồm một tập hợp các chất tham gia với các tiêu chuẩn phản ánh càng gần càng tốt về các thông số hoá học của môi trường tự nhiên. Dữ liệu exergy hoá học tiêu chuẩn được cung cấp trong [3, 20, 21, 29].

Các nguyên tắc để nâng cao hiệu suất nhiệt động

Để nâng cao hiệu suất nhiệt động, chúng ta cần phải khắc phục ngay lập tức sự thiếu hiệu quả liên quan tới sự phá huỷ exergy và sự hao tán exergy. Các nguyên nhân chính gây ra sự phá huỷ exergy là phản ứng hoá học, sự truyền nhiệt, sự pha trộn và ma sát, bao gồm cả sự dãn nở tự do của các chất khí và chất lỏng. Để giải quyết các vấn đề này một cách hiệu quả, ta không chỉ cần hiểu rõ các nguyên nhân chính gây ra sự không hiệu quả, mà còn cần định lượng của chúng, ít nhất cũng phải xác định được giá trị gần đúng. Thay đổi thiết kế để nâng cao hiệu suất cần phải được thực hiện một cách sáng suốt, tuy nhiên, vấn đề sẽ có thể khác đi khi ta tính toán chi phí có liên quan tới các nguồn khác nhau gây ra sự không hiệu quả. Thí dụ chi phí trên 1 đơn vị của công suất điện hoặc công suất cơ học được yêu cầu để cung cấp cho việc tự phá huỷ exergy do bị giảm áp suất nói chung sẽ cao hơn chi phí cho 1 đơn vị nhiên liệu được yêu cầu cung cấp cho phá huỷ exergy bởi vì bị tổn hao trong quá trình cháy hoặc quá trình truyền nhiệt.

Phản ứng hoá học là một nguyên nhân nổi bật gây ra sự không hiệu quả của nhiệt động. Do đó, nói chung trong thực tế người ta thường làm giảm tối thiểu quá trình cháy. Tuy nhiên, trong nhiều ứng dụng thường không thể tránh khỏi việc sử dụng các thiết bị đốt cháy như các nồi đun. Lúc này không thể hy vọng làm giảm đáng kể ảnh hưởng trong quá trình cháy không thuận nghịch bằng các phương pháp truyền thống đơn giản được, đối với phần chính của sự phá huỷ exergy được tạo ra bởi sự cháy là hậu quả tất yếu cố hữu của các thiết bị đó. Mặc dù vậy, có thể giảm sự phá huỷ exergy trong các hệ cháy thực tế bằng cách giảm thiểu việc sử dụng quá nhiều không khí và bằng việc làm nóng trước các chất phản ứng. Trong hầu hết các trường hợp chỉ một phần nhỏ của sự phá

huỷ exergy trong một buồng đốt là có thể được khắc phục bằng các phương pháp này. Điều này dẫn tới, sau khi xem xét các lựa chọn trên để làm giảm sự phá huỷ exergy liên quan tới sự cháy, để nâng cao hiệu suất nhiệt động nên tập trung vào các thành phần của toàn bộ hệ mà dễ dàng hơn cho việc tính toán tới chi phí. Nói cách khác là một số hiện tượng phá huỷ exergy và hao tán năng lượng có thể tránh được, còn những trường hợp khác không làm được như vậy. Nên tập trung cố gắng vào các hiện tượng ta có thể tránh.

Sự truyền nhiệt thường đóng vai trò trong việc làm giảm hiệu suất. Do vậy, phải tránh sử dụng quá trình truyền nhiệt khi không cần thiết hoặc khi quá tốn kém. Một số hướng dẫn như sau:

- Khi nhiệt độ càng cao hơn nhiệt độ T mà tại đó một quá trình truyền nhiệt xảy ra, ($T > T_0$, ở đây T_0 là nhiệt độ của môi trường), thì quá trình truyền nhiệt càng mạnh hơn, do đó càng cần tránh truyền nhiệt ra xung quanh, truyền tới nước mát hoặc tới các dòng làm lạnh. Nên tránh quá trình truyền nhiệt qua T_0.
- Khi nhiệt độ càng thấp hơn nhiệt độ T mà tại đó một quá trình truyền nhiệt xảy ra ($T < T_0$), thì quá trình truyền nhiệt có càng mạnh hơn, do đó càng cần tránh truyền nhiệt trực tiếp với môi trường hoặc với một dòng khí nóng.
- Do sự phá huỷ exergy liên quan tới sự truyền nhiệt giữa các dòng nhiệt thay đổi ngược với nhiệt độ, cho nên khi nhiệt độ càng thấp lại càng cần giảm thiểu sự chênh lệch nhiệt độ từ dòng này đến dòng kia.

Mặc dù các quá trình không thuận nghịch liên quan tới ma sát, sự giãn nở tự do và sự trộn hỗn hợp thường ít ảnh hưởng hơn sự cháy và truyền nhiệt, chúng ta không nên bỏ qua chúng, nên ứng dụng các hướng dẫn sau:

- Nên tập trung hơn vào việc thiết kế các cấp có nhiệt độ thấp hơn của các tua bin và các máy nén (các cấp cuối cùng của các tua bin và các cấp đầu tiên của các máy nén) so với các cấp còn lại của các thiết bị này. Đối với các tua bin, các máy nén và các động cơ, xem xét các các lựa chọn hiệu quả nhất về mặt nhiệt động.
- Giảm thiểu việc sử dụng các van điều chỉnh, kiểm tra xem các thiết bị hỗ trợ khôi phục công suất có phải là một chọn lựa có hiệu quả kinh tế thay cho việc giảm áp suất hay không.
- Tránh các quá trình sử dụng các lực nhiệt động quá lớn (sự khác nhau về nhiệt độ, áp suất và thành phần hoá học). Đặc biệt, giảm thiểu việc trộn hỗn hợp các dòng với nhau quá khác nhau về nhiệt độ, áp suất hoặc các thành phần hoá học.
- Lưu lượng khối lượng càng lớn, thì cần thiết phải sử dụng exergy của dòng càng phải hiệu quả.

Các phương pháp nâng cao hiệu suất nhiệt động cũng có thể thấy trong các tài liệu [3, 22].

12.3 Các quan hệ thuộc tính và dữ liệu

Nhiệt động kỹ thuật sử dụng rất nhiều các thông số nhiệt động và mối quan hệ giữa các thông số này. Bảng 12.2 liệt kê một vài thông số thường được sử dụng. Trong thực nghiệm luôn có thể xác định được các thông số: Áp suất, nhiệt độ và thể tích riêng. Nội năng riêng, entropi riêng và entanpi riêng là các thông số mà không dễ dàng có thể xác định được trong phòng thí nghiệm. Các giá trị của các thông số trên có thể được tính toán từ các dữ liệu thí nghiệm của các thông số khác dễ đo đạc hơn, từ đây cũng có thể suy ra được các quan hệ thông số thích hợp bằng việc sử dụng các nguyên lý nhiệt động.

BẢNG 12.2 Các ký hiệu và định nghĩa cho các thông số được chọn

Thông số	Ký hiệu	Định nghĩa	Thông số	Ký hiệu	Định nghĩa
Áp suất	p		Nhiệt dung riêng, thể tích hằng	c_v	$(\partial u/\partial T)_v$
Nhiệt độ	T		Nhiệt dung riêng, áp suất hằng	c_p	$(\partial h/\partial T)_p$
Thể tích riêng	v		Độ giãn nở của thể tích	β	$\frac{1}{v}(\partial v/\partial T)_p$
Nội năng riêng	u		Độ nén đẳng nhiệt	κ	$-\frac{1}{v}(\partial v/\partial p)_T$
Entropi riêng	s		Độ nén đẳng entropi	α	$-\frac{1}{v}(\partial v/\partial p)_s$
Entanpi riêng	h	$u + pv$	Mô đun nén đẳng nhiệt	B	$-v(\partial p/\partial v)_T$
Hàm Helmholtz riêng	ψ	$u - Ts$	Mô đun nén đẳng entropi	B_s	$-v(\partial p/\partial v)_s$
Hàm Gibbs riêng	g	$h - Ts$	Hệ số Joule-Thomson	μ_J	$(\partial T/\partial p)_h$
Hệ số nén	Z	pv/RT	Hệ số Joule	η	$(\partial T/\partial v)_u$
Tỷ số nhiệt dung	k	c_p/c_v	Vận tốc âm thanh	c	$\sqrt{-v^2(\partial p/\partial v)_s}$

Dữ liệu thông số được công bố trong các tài liệu của Viện Quốc gia về tiêu chuẩn và công nghệ (trước đây là Cục tiêu chuẩn của Mỹ) hoặc của các nhóm chuyên gia như là Hội cơ khí Mỹ (ASME), Hội kỹ thuật nhiệt lạnh và điều hoà không khí của Mỹ (ASHRAE) và hội hoá học Mỹ, và của các tập đoàn như Dupont and Dow Chemical. Các sổ tay và các tuyển tập tham khảo về thông số đã được liệt kê trong chương này để có thể dễ dàng truy cập vào dữ liệu gốc. Cũng có thể lấy được các dữ liệu thông số từ rất nhiều các cơ sở dữ liệu trực tuyến thương mại. Phần mềm máy tính ngày càng dễ dàng sử dụng các cơ sở dữ liệu này.

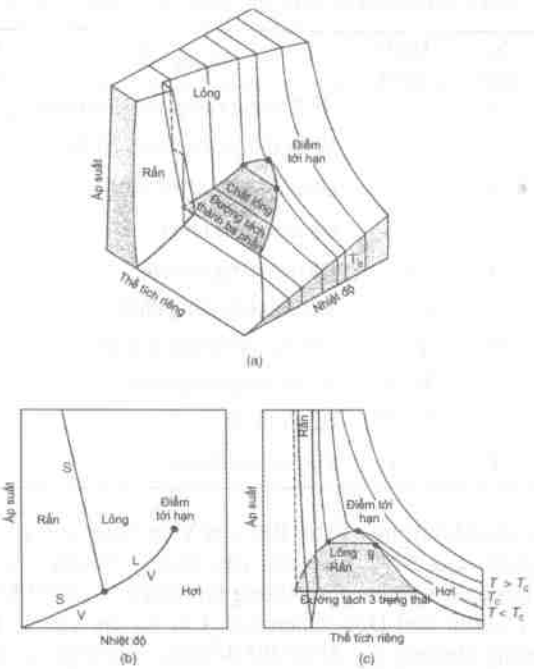
Bề mặt *p-v-T*

Một lượng lớn dữ liệu về áp suất, thể tích riêng và nhiệt độ được tích luỹ đối với các chất khí và chất lỏng quan trọng trong công nghiệp. Các dữ liệu này có thể được biểu diễn ở dạng $p = f(v,T)$, được gọi là một *phương trình trạng thái*. Có thể biểu diễn các phương trình trạng thái ở dạng đồ thị, bảng và dạng giải tích. Hình 12.1(a) thể hiện mối quan hệ *bề mặt p-v-T* của nước. Hình 12.1(b) thể hiện hình chiếu của bề mặt *p-v-T* lên mặt phẳng áp suất-nhiệt độ, được gọi là *biểu đồ pha*. Hình chiếu lên trên mặt phẳng *p-v* được thể hiện ở hình 12.1(c).

Hình 12.1(a) có 3 vùng được đánh dấu là đặc, lỏng và khí mà ở đây hợp chất chỉ tồn tại ở một pha. Giữa các vùng một pha riêng có các *vùng hai pha*, mà ở đây hai pha sẽ cùng tồn tại ở trạng thái cân bằng. Đường thẳng chia các vùng đơn pha cách ra khỏi các vùng hai pha là các *đường bão hoà*. Một trạng thái bất kỳ được biểu diễn bằng một điểm trên một đường bão hoà là một *trạng thái bão hoà*.

Đường chia cách pha lỏng với vùng hai pha lỏng-khí là đường lỏng bão hòa. Trạng thái này được biểu diễn là f là một trạng thái lỏng bão hòa. Đường hơi bão hòa chia cách vùng hơi với vùng hai pha khí-lỏng. Trạng thái này được ký hiệu là g - một trạng thái hơi bão hòa. Đường lỏng bão hòa và đường hơi bão hòa gặp nhau tại một *điểm tới hạn*. Tại điểm tới hạn này, áp suất là *áp suất tới hạn* P_c và nhiệt độ là *nhiệt độ tới hạn* T_c, ba pha có thể cùng tồn tại ở trạng thái cân bằng trên đường đánh dấu là đường ba thể. Đường ba thể này chiếu xuống biểu đồ pha thành một điểm: điểm ba thể.

Khi một pha thay đổi trong quá trình làm nóng và làm mát đẳng áp thì nhiệt độ vẫn không đổi khi vẫn còn cả hai pha. Do đó, trong vùng hai pha lỏng-khí, đường đẳng áp cũng là đường đẳng nhiệt. Đối với một áp suất đã được xác định trước, nhiệt độ tương ứng với nó được gọi là *nhiệt độ bão hoà*. Đối với một nhiệt độ xác định, áp suất tương ứng với nó được gọi là *áp suất bão hoà*. Vùng phía bên phải của đường hơi bão hòa được gọi là *vùng hơi quá nhiệt* vì hơi tồn tại ở tại một nhiệt độ lớn hơn nhiệt độ bão hoà cho áp suất của nó. Vùng bên trái của đường lỏng bão hòa là *vùng lỏng bị nén* vì chất lỏng ở tại một áp suất cao hơn áp suất bão hoà cho nhiệt độ của nó.



HÌNH 12.1 Bề mặt thể tích-nhiệt độ áp suất riêng và các hình chiếu của nước (không co giãn về tỷ lệ)

Khi pha lỏng và pha khí cùng tồn tại ở trạng thái cân bằng, thì cả hai pha (pha lỏng và pha khí) đều ở trạng thái bão hoà. Thể tích tổng cộng của sự trộn pha này là $V = V_f + V_g$ hoặc có thể viết khác là $mv = m_f v_f + m_g v_g$, ở đây m và v lần lượt là khối lượng và thể tích riêng. Chia tất cả cho khối lượng tổng cộng của hai pha m ta có *thành phần khối lượng* của pha khí trong hai pha, m_g/m, được ký hiệu là x, gọi là độ khô, thể tích riêng v xuất hiện trong lưỡng pha này là:

$$v = (1-x)v_f + xv_g = v_f + xv_{fg} \tag{12.16a}$$

ở đây $v_{fg} = v_g - v_f$. Tương tự ta có thể biểu diễn cho nội năng, entanpi và entropi:

$$u = (1-x)u_f + xu_g = u_f + xu_{fg} \tag{12.16b}$$

$$h = (1-x)h_f + xh_g = h_f + xh_{fg} \tag{12.16c}$$

$$s = (1-x)s_f + xs_g = s_f + xs_{fg} \tag{12.16d}$$

Tra cứu các dữ liệu nhiệt động

Sự biểu diễn ở dạng bảng của áp suất, thể tích riêng và nhiệt độ đã có sẵn cho các chất khí và chất lỏng quan trọng trong thực tế. Các bảng này thường liệt kê các thông số hữu dụng cho mục đích phân tích nhiệt động, như là nội năng, entanpi và entropi. Hàng loạt các *bảng về hơi nước* đã được đưa vào trong phần tham khảo của chương này. Phần mềm máy tính cũng là một công cụ có sẵn phục vụ việc tra cứu các thông số cho một dải lớn các loại chất hoá học, ví dụ các bảng về hơi nước [2, 6]. Ngày càng nhiều các tài liệu cùng với đĩa máy tính cung cấp dữ liệu về các thông số nhiệt động của nước, các chất làm lạnh và một vài chất khí được mô hình lý tưởng hoá [20, 21].

Ở bảng 12.3 trình bày một ví dụ về *dữ liệu dạng bảng về hơi nước* thường gặp trong thực tế. Dạng của các bảng này và sử dụng chúng như thế nào được thể hiện rất đơn giản với người sử dụng. Ở đây, mặc nhiên coi rằng người sử dụng đã biết cách *nội suy tuyến tính*.

BẢNG 12.3 Dữ liệu hơi nước

(a) Thông số của hơi nước bão hòa: Bảng nhiệt độ

		Thể tích riêng (m^3/kg)		Nhiệt dung (kJ/kg)		Entanpi (kJ/kg)			Entropi (kJ/kg · K)	
Nhiệt độ (°C)	Áp suất (bar)	Chất lỏng bão hòa ($v_f \times 10^3$)	Hơi nước bão hòa (v_g)	Chất lỏng bão hòa (u_f)	Hơi nước bão hòa (u_g)	Chất lỏng bão hòa (h_f)	Evap. (h_k)	Hơi nước bão hòa (h_g)	Chất lỏng bão hòa (s_f)	Hơi nước bão hòa (s_g)
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0716	9.0257
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.4	0.1212	8.9501

(b) Thông số của hơi nước bão hòa: Bảng áp suất

		Thể tích riêng (m^3/kg)		Nhiệt dung (kJ/kg)		Entanpi (kJ/kg)			Entropi (kJ/kg · K)	
Áp suất (bar)	Nhiệt độ (°C)	Chất lỏng bão hòa ($v_f \times 10^3$)	Hơi nước bão hòa (v_g)	Chất lỏng bão hòa (u_f)	Hơi nước bão hòa (u_g)	Chất lỏng bão hòa (h_f)	Evap. (h_k)	Hơi nước bão hòa (h_g)	Chất lỏng bão hòa (s_f)	Hơi nước bão hòa (s_g)
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.85	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085

(c) Thông số của hơi nước quá nhiệt								
T(°C)	vx10^3(m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg · K)
p = 0.06 bar = 0.006 Mpa (T_{sat} 36.16C)					p = 0.35 bar = 0.035 Mpa (T_{sat} 72.69°C)			
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	4.526	2473.0	2631.4	7.7158
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	4.625	2483.7	2645.6	7.7564
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	5.163	2542.4	2723.1	7.9644
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	5.696	2601.2	2800.6	8.1519
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	6.228	2660.4	2878.4	8.3237
(d) Các thông số của nước lỏng nén								
T(°C)	vx10^3(m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg · K)
p = 25 bar = 2.5 Mpa (T_{sat} 223.99°C)					p = 50 bar = 5.0 Mpa (T_{sat} 263.99°C)			
20	1.0006	83.80	86.30	0.2961	0.9995	83.65	88.65	0.2956
80	1.0280	334.29	336.86	1.0737	1.0268	333.72	338.85	1.0720
140	1.0784	587.82	590.52	1.7369	1.0768	586.76	592.15	1.7343
200	1.1555	849.9	852.8	2.3294	1.1530	848.1	853.9	2.3255
Sat.	1.1973	959.1	962.1	2.5546	1.2859	1147.8	1154.2	2.9202

Các dữ liệu về nội năng riêng, entanpi riêng và entropi riêng được xác định so với điểm gốc tùy chọn các dữ liệu và điểm gốc này thay đổi đối với các chất khác nhau. Tham khảo bảng 12.3a, có thể thấy điểm gốc để tính các dữ liệu nội năng riêng, entanpi riêng và entropi riêng của nước tương ứng với nước lỏng bão hòa tại nhiệt độ 0.01°C (32.02°F). Giá trị của mỗi thông số được đặt bằng không tại trạng thái này. Khi chỉ tính toán đến *sự khác nhau* của một thông số riêng cụ thể thì việc chọn điểm gốc không có ý nghĩa. Khi thay đổi thành phần hoá học trong quá trình, cần đưa ra lưu ý đặc biệt. Lúc này sự tiếp cận vấn đề khi thành phần hoá học thay đổi do phản ứng hoá học [20, 21].

Dữ liệu nước lỏng (xem bảng 12.3d) cho thấy rằng tại một nhiệt độ cố định sự thay đổi thể tích riêng, nội năng riêng và entropi riêng theo áp suất không lớn. Sự thay đổi của entanpi riêng theo áp suất tại nhiệt độ cho trước lớn hơn một chút vì áp suất xuất hiện tường minh trong định nghĩa về entanpi. Sự biến thiên v, u, s và h được thể hiện một cách tổng quát bằng các dữ liệu lỏng và là cơ sở cho việc thiết lập các phương trình đánh giá thông số dữ liệu ở trạng thái lỏng từ dữ liệu lỏng bão hòa:

$$v(T,p) \approx v_f(T) \tag{12.17a}$$

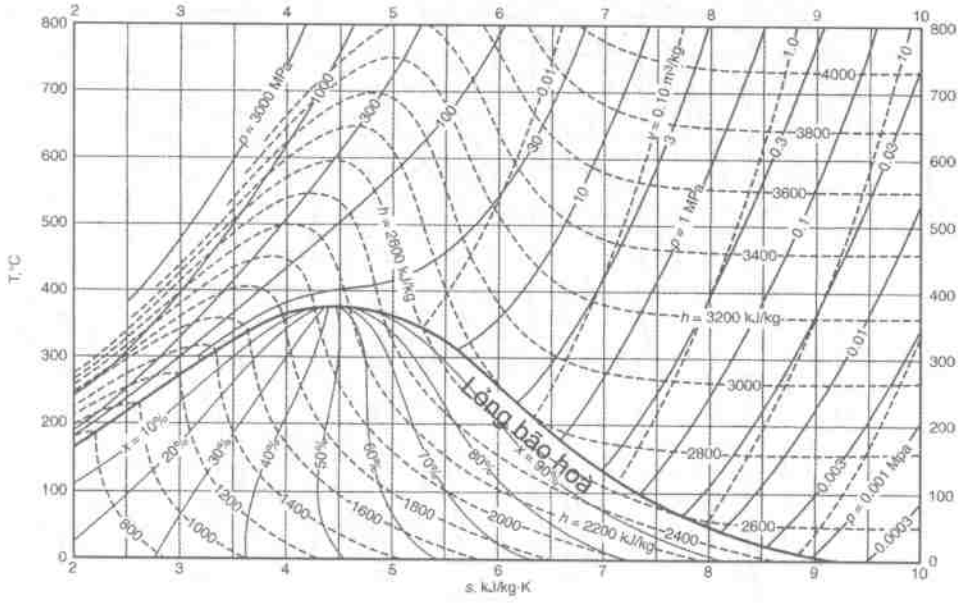
$$u(T,p) \approx u_f(T) \tag{12.17b}$$

$$h(T,p) \approx h_f(T) + v_f\underline{\left[p - p_{sat}(T)\right]} \tag{12.17c}$$

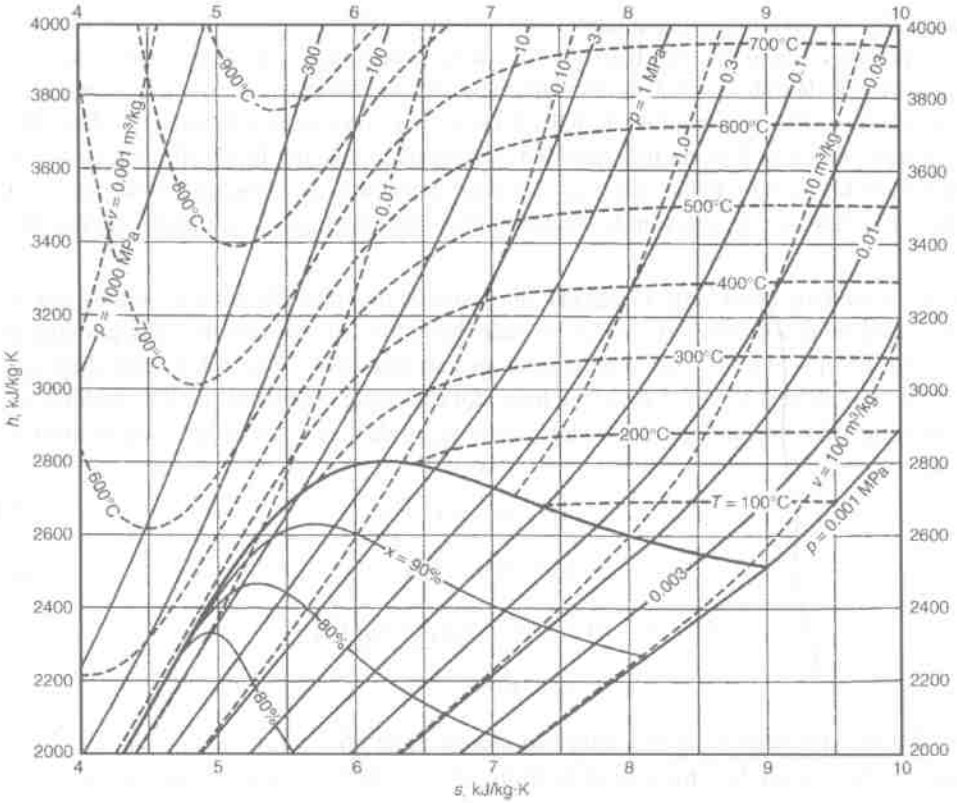
$$s(T,p) \approx s_f(T) \tag{12.17d}$$

Chỉ số dưới f thể hiện trạng thái lỏng bão hòa tại nhiệt độ T và p_{sat} là áp suất bão hoà tương ứng. Số hạng được gạch dưới trong phương trình (12.17c) thường có thể bỏ qua, do đó $h(T,p) \approx h_f(T)$.

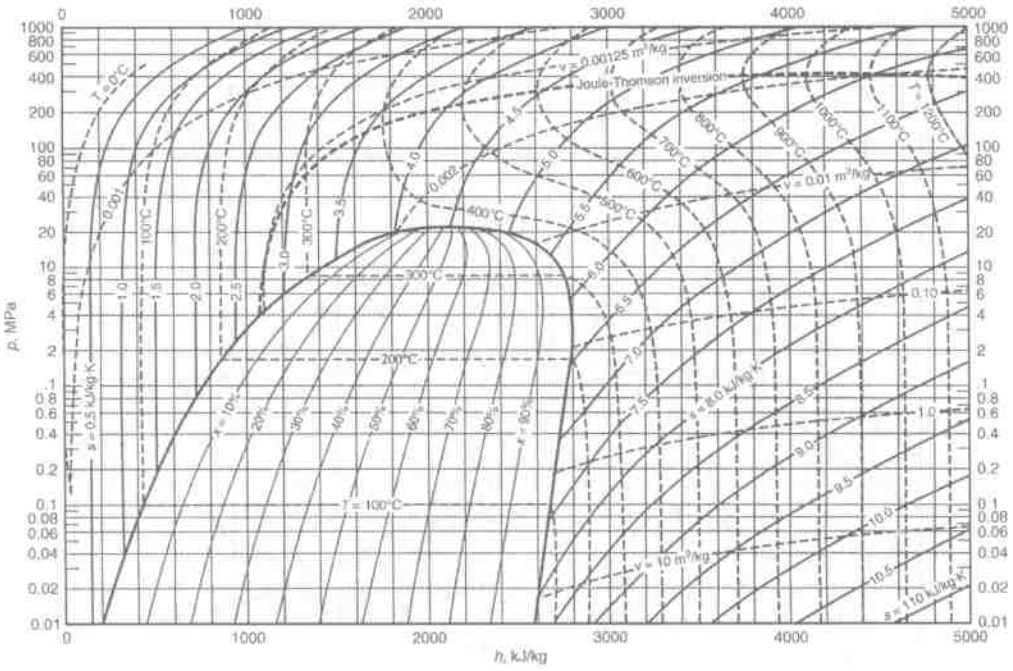
Các biểu diễn ở dạng đồ thị của các dữ liệu thông số cũng thường được sử dụng. Chúng bao gồm các biểu đồ về p-T và p-v trên hình 12.1, biểu đồ T-s của hình 12.2, biểu đồ h-s (Mollier) của 12.3 và biểu đồ p-h của hình 12.4. Các đồ thị về *độ nén* xem xét tiếp theo sử dụng *độ nén* là một tọa độ trong một vectơ.



HÌNH 12.2 Biểu đồ nhiệt độ-entropi của nước [11, 8]



HÌNH 12.3 Biểu đồ Entanpi-entropi (Mollier) của nước [11, 8]



HÌNH 12.4 Biểu đồ áp suất-entanpi của nước [11, 8]

Đồ thị độ nén

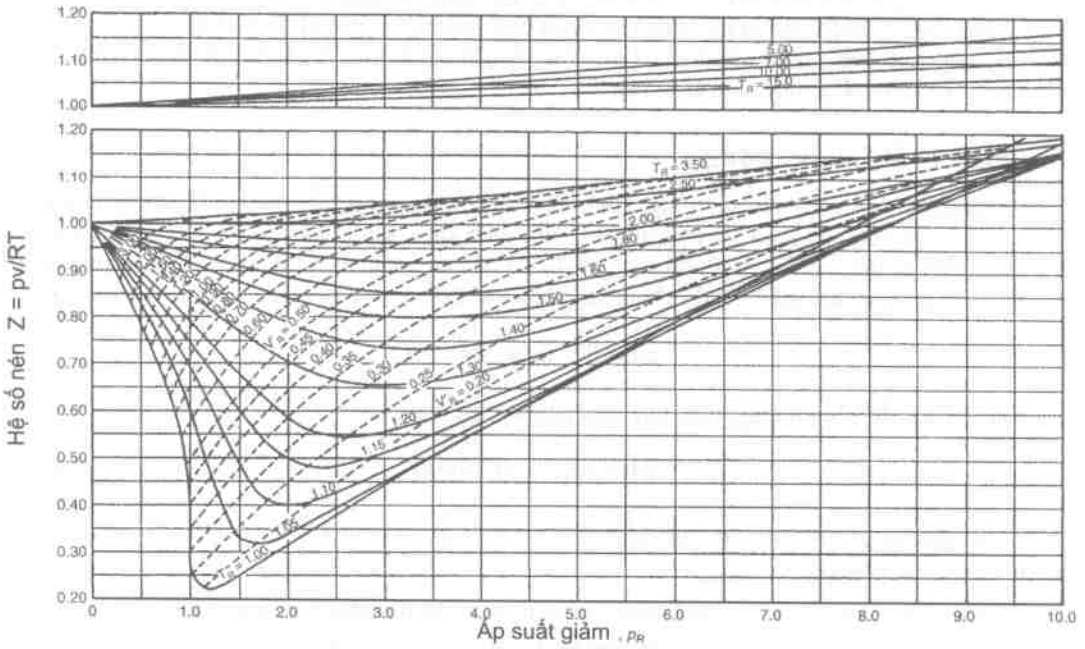
Hình 12.5 minh hoạ đồ thị về độ nén suy rộng của mối quan hệ *p-v-T* sử dụng cho một loạt các chất khí thường gặp. Ở đồ thị này, độ nén ký hiệu là *Z*, được vẽ theo áp suất *quy đổi* p_R, nhiệt độ *quy đổi* T_R và thể tích riêng *quy đổi* v_R', ở đây:

$$Z = \frac{p\overline{v}}{\overline{R}T} \tag{12.18}$$

Trong công thức này $\overline{v}$ là thể tích riêng trong một phân tử gam (ví dụ m^3/kmol) và $\overline{R}$ là *hằng số phổ biến của chất khí* (ví dụ 8314 N.m/kmol.K). Các thông số *quy đổi* được định nghĩa như sau:

$$p_R = \frac{p}{p_c}, \qquad T_R = \frac{T}{T_c}, \qquad v'_R = \frac{\overline{v}}{(\overline{R}T_c / p_c)} \tag{12.19}$$

ở đây p_c và T_c lần lượt là áp suất và nhiệt độ tới hạn. Các giá trị của p_c và T_c có thể được tìm thấy trong các tài liệu chuyên ngành [20, 21]. Đồ thị đẳng nhiệt quy đổi trên hình 12.5 biểu diễn các đường cong thể hiện gần đúng nhất về các dữ liệu của một vài chất khí. Với 30 chất khí được dùng để xây dựng đồ thị này, sự sai lệch của giá trị quan sát được so với các giá trị trên đồ thị này nhiều nhất là 5% và đối với các trường hợp hầu hết thì sai lệch này nhỏ hơn.



HÌNH 12.5 Đồ thị độ nén suy rộng ($T_R = T/T_c, p_R = p/p_c, v'_R = \overline{v}p_c/\overline{R}T_c$) đối với $p_R \le 10$ [23]

Các phương trình giải tích của trạng thái

Xem xét đồ thị đẳng nhiệt ở trên hình 12.5, thấy rằng sự thay đổi của độ nén có thể được thể hiện ở dạng một phương trình tin cậy được, ít nhất cho các khoảng xác định của *p* và *T*. Có thể viết hai biểu diễn này theo một biểu diễn lý thuyết cơ bản. Độ nén có thể biểu diễn theo một khai triển dạng chuỗi vô hạn của áp suất:

$$Z = 1 + \hat{B}(T)p + \hat{C}(T)p^2 + \hat{D}(T)p^3 + \ldots \tag{12.20a}$$

và dạng khác là một chuỗi theo $1/\overline{v}$:

$$Z = 1 + \frac{B(T)}{\overline{v}} + \frac{C(T)}{\overline{v}^2} + \frac{D(T)}{\overline{v}^3} + \ldots \qquad (12.20b)$$

Các phương trình trạng thái trên được biết đến như là các *khai triển virial* và các hệ số $\hat{B}, \hat{C}, \hat{D}\ldots$ và *B, C, D*... được gọi là các *hệ số virial*. Về nguyên tắc, có thể tính toán các hệ số virial bằng cách sử dụng các công thức của cơ học thống kê được suy ra từ việc xem xét các trường lực xung quanh các phân tử. Từ đây các hệ số đầu tiên được tính toán cho các chất khí bao gồm các phân tử tương đối đơn giản. Về nguyên tắc cũng có thể tìm được các hệ số này bằng cách điều chỉnh dữ liệu *p-v-T* khớp bên trong một phạm vi cụ thể được quan tâm đặc biệt. Chỉ có các hệ số đầu tiên là có thể được tìm thấy một cách chính xác bằng cách này, tuy nhiên kết quả sẽ là một phương trình *được xấp xỉ* chỉ phù hợp tại các trạng thái nhất định.

Hơn 100 phương trình trạng thái đã được xây dựng và phát triển nhằm miêu tả một cách chính xác ứng xử *p-v-T* của các chất và để tránh tính phức tạp có sẵn trong nó ở một dạng chuỗi virial đầy đủ. Nói chung, các phương trình này ít thể hiện các tính chất mang ý nghĩa vật lý cơ bản và thể hiện các tính chất thiên về tính thực nghiệm nhiều hơn. Hầu hết chúng được phát triển cho các chất khí, nhưng cũng có một số diễn tả về các ứng xử *p-v-T* của pha lỏng, ít nhất là về mặt định định tính.

Mỗi phương trình trạng thái chỉ được sử dụng cho một số trạng thái cụ thể. Phạm vi ứng dụng của chúng thường được chỉ ra một khoảng quyết định bởi gia số của áp suất hoặc khối lượng riêng mà phương trình thể hiện được ứng xử *p-v-T* một cách chính xác. Để có được thêm thông tin về phương trình trạng thái, hãy xem [25, 26].

Mô hình chất khí lý tưởng

Xem xét kỹ đồ thị độ nén suy rộng, Hình 12.5, thấy rằng khi p_R nhỏ và với nhiều trạng thái mà khi đó T_R là lớn, độ nén Z có giá trị gần tới 1. Nói cách khác, khi các áp suất thấp hơn so với p_c và đối với nhiều trường hợp có nhiệt độ cao hơn T_c, độ nén có giá trị tiến tới 1. Bên trong khoảng giới hạn chỉ ra ở trên, có thể giả thiết độ chính xác chấp nhận được là $Z = 1$-*i.e*:

$$p\overline{v} = \overline{R}T \quad \text{hoặc} \quad pv = RT \qquad (12.21a)$$

Các dạng khác của phương trình này thường được sử dụng là:

$$pV = n\overline{R}T\,, \quad pV = mRT \qquad (12.21b)$$

Ở các phương trình trên, $n = m/M, \overline{v} = Mv$ và *hằng số chất khí* là $R = \overline{R}/M$, ở đây M là trọng lượng của phân tử.

Có thể thấy rằng $(\partial u/\partial v)_T$ triệt tiêu với một chất khí mà phương trình trạng thái của nó có dạng chính xác là phương trình (12.21) và do đó nội năng riêng chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ. Kết luận này đã được củng cố thêm bằng các quan sát thực nghiệm bắt đầu từ công trình của Joule, người đã chỉ ra rằng nội năng của chất khí ở tỷ trọng thấp phụ thuộc chính vào nhiệt độ.

Các vấn đề xem xét trên cho phép mô hình hoá một chất khí thực nào đó với một *mô hình lý tưởng* của nó: (1) Phương trình trạng thái được thể hiện bởi phương trình (12.21) và (2) nội năng, entanpi và nhiệt dung riêng (bảng 12.2) là các hàm chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ. Chất khí thực tiếp cận tới các mô hình này với một giới hạn là áp suất nhỏ so với áp suất tới hạn. Tại các trạng thái khác, sự ứng xử thực của chất khí có thể về căn bản không giống với những gì được dự đoán. Do vậy, nên thận trọng khi làm việc với mô hình chất khí lý tưởng.

Dữ liệu nhiệt dung riêng cho các chất khí có thể thu được bằng việc đo trực tiếp. Khi ngoại suy tới áp suất không, sẽ tìm được nhiệt dung riêng của chất khí lý tưởng. Cũng có thể tính toán được nhiệt dụng riêng của chất khí lý tưởng bằng việc sử dụng các mô hình phân tử của vật chất cùng

với các dữ liệu từ đo đạc quang phổ. Mối quan hệ giữa các dạng nhiệt dung riêng của chất khí lý tưởng thường hữu dụng và có dạng như sau:

$$c_p(T) = c_v(T) + R \tag{12.22a}$$

$$c_p = \frac{kR}{k-1}, \qquad c_v = \frac{R}{k-1} \tag{12.22b}$$

ở đây $k = c_p/c_v$.

Đối với các quá trình của một chất khí lý tưởng giữa trạng thái 1 và 2, Bảng 12.4 đưa ra các biểu thức để tính toán sự thay đổi về entanpi riêng Δh, entropi riêng Δs và nội năng riêng Δu. Cũng có thể cung cấp các mối quan hệ này cho các quá trình của một chất khí lý tưởng giữa các trạng thái mà có cùng một entropi riêng: $s_2 = s_1$. Mối quan hệ của thông số và dữ liệu sử dụng trong các biểu thức của bảng 12.4: h, u, c_p, c_v, p_r, v_r và s° tính được từ các tài liệu chuyên ngành [20, 21].

BẢNG 12.4 Các công thức về khí lý tưởng cho $\Delta h, \Delta u$ và Δs

Nhiệt dung riêng thay đổi		Nhiệt dung riêng hằng[b]	
$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)dT$	(1)	$h(T_2) - h(T_1) = c_p(T_2 - T_1)$	(1')
$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p(T)}{T}dT - R\ln\frac{p_2}{p_1}$	(2)[a]	$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$	(2')
$u(T_2) - u(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)dT$	(3)	$u(T_2) - u(T_1) = c_v(T_2 - T_1)$	(3')
$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v(T)}{T}dT + R\ln\frac{v_2}{v_1}$	(4)	$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = c_v \ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{v_2}{v_1}$	(4')
$s_2 = s_1$		$s_2 = s_1$	
$\frac{p_r(T_2)}{p_r(T_1)} = \frac{p_2}{p_1}$	(5)	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}$	(5')
$\frac{v_r(T_2)}{v_r(T_1)} = \frac{v_2}{v_1}$	(6)	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{(k-1)}$	(6')

[a] Có thể sử dụng, $s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R\ln\frac{p_2}{p_1}$.

[b] c_p và c_v là các giá trị trung bình trên khoảng nhiệt độ từ T_1 đến T_2.

12.4 Các chu trình công suất của chất khí và hơi

Các hệ năng lượng khí và hơi tạo ra các năng lượng cơ học và năng lượng điện từ các nguồn năng lượng gốc là: hoá học, mặt trời hoặc hạt nhân. Ở các hệ năng lượng *hơi, chất lỏng công tác*, thường là nước, sẽ trải qua một giai đoạn thay đổi pha từ lỏng sang hơi và ngược lại. Trong các hệ năng lượng khí, chất lỏng công tác luôn luôn là một chất khí đi qua, mặc dù thành phần hoá học thường thay đổi do việc tạo ra quá trình cháy nhiên liệu.

Các quá trình diễn ra trong các hệ công suất thường phức tạp, do vậy thường phát triển các mô hình nhiệt động lý tưởng hoá để dễ xử lý phân tích. Sự phân tích chuẩn thường dùng đối với không khí của các hệ năng lượng khí được xem xét trong phần này là một ví dụ đáng chú ý. Phụ thuộc vào cấp độ của sự lý tưởng hoá, các mô hình lý tưởng này có thể chỉ cung cấp các thông tin định tính về sự hoạt động của các hệ thực tương ứng. Các thông tin này thường có ích trong việc ước tính các thay đổi của các tham số vận hành chính có thể ảnh hưởng tới các tính năng thực tế. Các mô hình nhiệt động cơ sở cũng có thể cung cấp các phương pháp đánh giá gần đúng ưu nhược điểm của các biện pháp được sử dụng để nâng cao hiệu suất nhiệt động.

Công và truyền nhiệt trong các quá trình thuận nghịch trong

Các biểu thức biểu diễn công và sự truyền nhiệt bên trong các quá trình thuận nghịch rất có ích cho việc diễn tả sự hoạt động nhiệt động của các chu trình khí và hơi. Các trường hợp riêng quan trọng sẽ được xem xét như sau. Đối với một chất khí là một hệ thống, công giãn nở sinh ra từ các lực mà hệ tác dụng để di chuyển bề mặt ranh giới của nó chống lại cản trở của môi trường:

$$W = \int_1^2 F\,dx = \int_1^2 pA\,dx$$

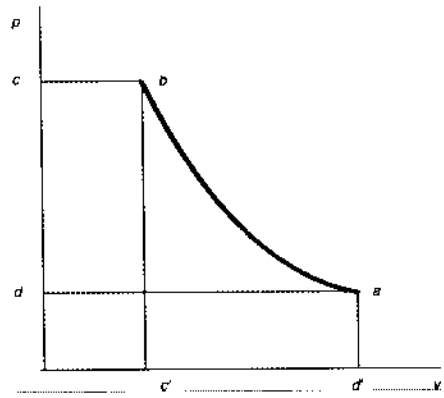
trong đó lực bằng tích của diện tích di chuyển và áp suất tác dụng bởi hệ ở đây. Chú ý rằng Adx là sự thay đổi của tổng thể tích hệ thống:

$$W = \int_1^2 p\,dV$$

Biểu thức này biểu diễn công áp dụng cho cả hai quá trình nội giãn nở và quá trình giãn nở phát động. Tuy nhiên, đối với một quá trình thuận nghịch trong thì p không chỉ là áp suất tại bề mặt ranh giới di động mà còn là áp suất trong cả hệ thống. Hơn thế nữa, đối với một quá trình ngược bên trong, thể tích bằng mv, ở đây thể tích riêng v có một giá trị duy nhất trong cả hệ tại một thời điểm được đưa ra. Do vậy, công của quá trình giãn nở bên trong (hoặc nén) trên một đơn vị khối lượng hệ là:

$$\left(\frac{W}{m}\right)_{\substack{\text{int}\\ \text{rev}}} = \int_1^2 p\,dv \qquad (12.23)$$

Khi biểu diễn một quá trình của một hệ kín bằng một đường cong liên tục trên đồ thị áp suất theo thể tích riêng, diện tích bên dưới đường cong chính là độ lớn của công cho một đơn vị khối lượng hệ thống: diện tích a-b-c'-d' của hình 12.6.



HÌNH 12.6 Quá trình thuận nghịch trong trên mặt phẳng p-v

Đối với các thể tích không đổi có một đường vào, một đường ra nếu không có các quá trình không thuận nghịch trong, các biểu thức sau sẽ đưa ra công được tạo ra cho một đơn vị lưu lượng khối lượng:

$$\left(\frac{\dot{W}}{\dot{m}}\right)_{\substack{\text{int}\\ \text{rev}}} = -\int_i^e v dp + \frac{v_i^2 - v_e^2}{2} + g(z_i - z_e) \tag{12.24a}$$

ở đây tích phân được tính từ đường vào đến đường ra [20, 21]. Nếu không có một thay đổi đáng kể nào của động năng và thế năng từ đường vào tới đường ra, phương trình (12.24a) sẽ là:

$$\left(\frac{\dot{W}}{\dot{m}}\right)_{\substack{\text{int}\\ \text{rev}}} = -\int_i^e v dp \qquad (\Delta ke = \Delta pe = 0) \tag{12.24b}$$

Thể tích riêng gần như không đổi trong nhiều ứng dụng cho chất lỏng. Lúc này phương trình (12.24b) sẽ trở thành:

$$\left(\frac{\dot{W}}{\dot{m}}\right)_{\substack{\text{int}\\ \text{rev}}} = -v(p_e - p_i) \qquad (v = \text{hằng số}) \tag{12.24c}$$

Khi xem xét các trạng thái đối với một đơn vị lưu lượng khối lượng không có các quá trình không thuận nghịch từ đường vào tới đường ra và diễn tả chúng bằng một đường cong liên tục biểu diễn qua đồ thị áp suất với thể tích riêng, như được thể hiện trên hình 12.6, độ lớn của tích phân $\int v dp$ trong phương trình (12.24a) và (12.24b) được biểu diễn bởi diện tích a-b-c-d *bên trái* đường cong.

Đối với một quá trình thuận nghịch trong của một hệ kín giữa trạng thái 1 và trạng thái 2, sự truyền nhiệt cho một đơn vị lưu lượng khối lượng hệ là:

$$\left(\frac{Q}{m}\right)_{\substack{\text{int}\\ \text{rev}}} = \int_1^2 T ds \tag{12.25}$$

Đối với thể tích không đổi có một đường vào, một đường ra, nếu không có các quá trình không thuận nghịch trong, biểu thức sau đây chỉ ra truyền nhiệt cho mỗi đơn vị lưu lượng khối lượng từ đường vào *i* đến đường ra *e*:

$$\left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}\right)_{\substack{\text{int}\\ \text{rev}}} = \int_i^e T\, ds \tag{12.26}$$

Khi một quá trình nào như vậy được biểu diễn bởi một đường cong liên tục qua đồ thị của nhiệt độ với entropi riêng, diện tích *dưới* đường cong chính là độ lớn của nhiệt truyền cho một đơn vị khối lượng.

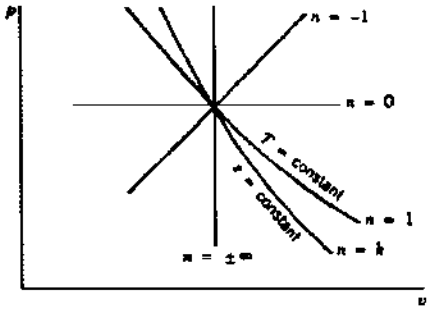
Các quá trình đa biến

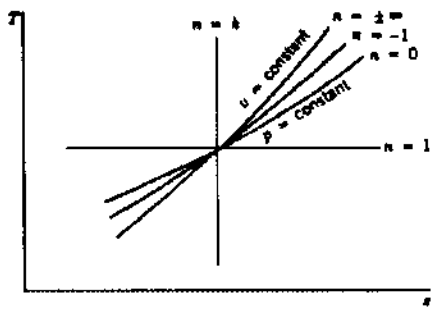
Một quá trình thuận nghịch trong được diễn tả bởi biểu thức pv^n = hằng sẽ được gọi là một *quá trình đa biến* và *n* là *chỉ số đa biến*. Trong các ứng dụng nhất định *n* có thể tính được bằng cách làm thích hợp các dữ liệu áp suất thể tích riêng. Mặc dù có thể áp dụng biểu thức này khi xem xét một chất khí thực, nói chung trong thực tế vẫn thường sử dụng biểu thức này cho mô hình chất khí lý tưởng. Bảng 12.5 cung cấp một vài biểu thức có thể áp dụng cho các quá trình đa biến và các dạng riêng của chúng khi giả thiết chất khí là lý tưởng. Các biểu thức cho $\int p dv$ và $\int v dp$ lần lượt áp dụng để tính toán các phương trình (12.23) và (12.24).

BẢNG 12.5 Quá trình đa hướng: pv^n = Constant[a]

Tổng quát		Khí lý tưởng[b]	
$\frac{p_2}{p_1}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n$	(1)	$\frac{p_2}{p_1}=\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n=\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{n/(n-1)}$	(1')
$n = 0$: áp suất hằng		$n = 0$: áp suất hằng	
$n = \pm\infty$: thể tích riêng hằng		$n = \pm\infty$: thể tích riêng hằng	
		$n = 1$: nhiệt độ hằng	
		$n = k$: entropi hằng khi k bằng hằng	
$n = 1$		$n = 1$	
$\int_1^2 pdv = p_1v_1 \ln\frac{v_2}{v_1}$	(2)	$\int_1^2 pdv = RT \ln\frac{v_2}{v_1}$	(2')
$-\int_1^2 vdp = -p_1v_1 \ln\frac{p_2}{p_1}$	(3)	$-\int_1^2 vdp = -RT \ln\frac{p_2}{p_1}$	(3')
$n \neq 1$		$n \neq 1$	
$\int_1^2 pdv = \frac{p_2v_2 - p_1v_1}{1-n} = \frac{p_1v_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}\right]$	(4)	$\int_1^2 pdv = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} = \frac{RT_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}\right]$	(4')
$-\int_1^2 vdp = \frac{n}{1-n}(p_2v_2 - p_1v_1) = \frac{np_1v_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}\right]$	(5)	$-\int_1^2 vdp = \frac{nR}{1-n}(T_2 - T_1) = \frac{nRT_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n}\right]$	(5')

[a] Đối với các quá trình đa biến của các hệ kín mà thể tích thay đổi chỉ trong chế độ công, phương trình (2), (4) và (2'), (4') có thể ứng dụng với phương trình (12.23) để tính toán công. Khi mỗi đơn vị khối lượng đi qua một thể tích không đổi một đường vào, một đường ra tại trạng thái ổn lập sẽ thực hiện một quá trình đa hướng, phương trình (3), (5) và (3'), (5') có thể ứng dụng với phương trình (12.24a) và (12.24b) để tính toán công suất. Cũng nên chú ý rằng, nói chung $-\int_1^2 vdp = n\int_1^2 pdv$.





Chu trình Rankine và Brayton

Với các mô hình đơn giản nhất về các máy công suất tua bin khí và công suất hơi thường được biểu diễn lần lượt theo bốn thành phần ở dạng nối tiếp tạo thành *chu trình Rankine* và *chu trình Brayton* được thể hiện dưới dạng biểu đồ trong bảng 12.6. Các mô hình lý tưởng nhiệt động của các chu trình này được tạo thành từ bốn quá trình thuận nghịch bên trong: hai quá trình đẳng entropi được kế tiếp luân phiên với hai quá trình đẳng áp. Bảng 12.6 cung cấp các biểu đồ thông số của các chu trình thật và các chu trình lý tưởng tương ứng của chúng. Mỗi một chu trình thật được đánh dấu là 1-2-3-4-1; chu trình lý tưởng của nó là 1-2s-3-4s-1. Để đơn giản, không thể hiện áp suất thay đổi trên các thiết bị đun nhiệt, các nồi ngưng và các thiết bị trao đổi nhiệt. Liên quan tới phương trình (12.26) đối với các chu trình lý tưởng, nhiệt được thêm vào một đơn vị lưu lượng khối lượng chảy được thể hiện bởi diện tích *dưới* đường đẳng áp từ trạng thái 2s tới trạng thái 3: diện tích a-2s-3-b-a. Nhiệt đi ra là diện tích *dưới* đường đẳng áp từ trạng thái 4s đến trạng thái 1: diện tích a-1-4s-b-a. diện tích khép kín 1-2s-3-4s-1 biểu diễn nhiệt hiệu dụng được thêm vào mỗi đơn vị khối lượng dòng chảy. Đối với một chu trình công suất nào đó, nhiệt hiệu dụng thêm vào bằng với công hiệu dụng được thực hiện.

Các biểu thức cho các quá trình truyền năng lượng chính được thể hiện trên các biểu đồ trong bảng 12.6 và được thể hiện từ các phương trình (1) đến phương trình (4) của bảng. Có thể đạt được chúng bằng việc đơn giản phương trình (12.10a) với các giả thiết bỏ qua sự hao tán nhiệt và bỏ qua sự thay đổi về động năng và thế năng từ đường vào đến đường ra của từng thành phần. Tất cả các đại lượng đều là dương theo các hướng mũi tên trên hình.

Hiệu suất nhiệt của một chu trình công suất được định nghĩa là tỷ số của công có ích với năng lượng tổng cộng được thêm vào bởi quá trình truyền nhiệt. Sử dụng các biểu thức (1)-(3) của bảng 12.6, hiệu suất nhiệt sẽ là:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \\ &= 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}\end{aligned} \tag{12.27}$$

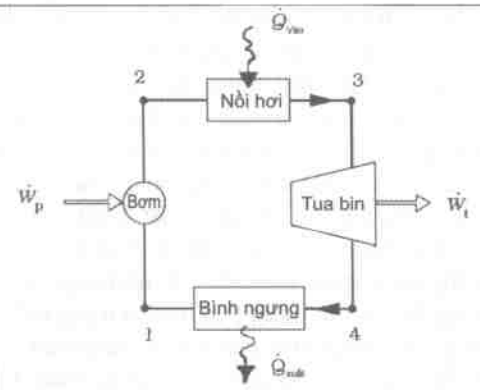
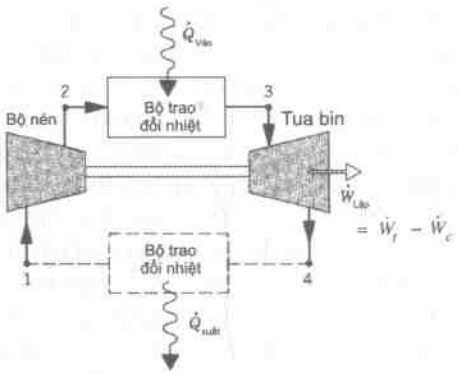
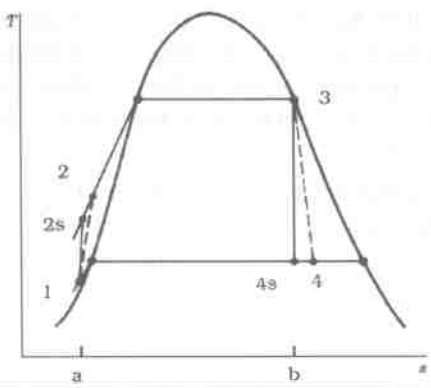
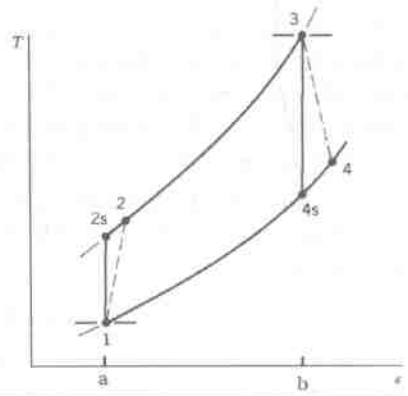
Để đạt được hiệu suất nhiệt của một chu trình lý tưởng, h_{2s} thay thế bằng h_2 và h_{4s} thay thế bằng h_4 trong phương trình (12.27).

Thường thì các đánh giá về chu trình theo các điều kiện vận hành cho thấy rằng hiệu suất nhiệt có xu thế tăng khi nhiệt độ trung bình của nhiệt thêm vào tăng và/hoặc nhiệt độ của nhiệt đi ra giảm. Trong chu trình Rankine, nhiệt thêm vào có thể đạt được một nhiệt độ cao bằng cách cấp quá nhiệt cho chất khí trước khi đi vào tua bin và/hoặc vận hành tại một áp suất hơi phát cao. Trong chu trình Brayton việc tăng tỷ số áp suất nén p_2/p_1 sẽ làm tăng nhiệt độ trung bình của nhiệt đi vào. Do các vật liệu có các giới hạn về nhiệt độ và áp suất, trạng thái của chất lỏng công tác tại đường vào của tua bin phải kiểm tra các giới hạn thực tế. Nhiệt độ đường vào của tua bin trong chu trình, ví dụ được không đổi bằng việc cung cấp một lượng khí vượt mức yêu cầu cho buồng đốt. Trong một chu trình Rankine có sử dụng nước làm chất lỏng công tác, thường đạt được một nhiệt độ thấp của nhiệt đi ra bằng cách vận hành thiết bị ngưng tại một áp suất thấp dưới 1 atm. Để giảm sự xói mòn và tránh các giọt nước rơi trên các cánh của tua bin hơi chu trình Rankine, cần phải duy trì ít nhất 90% lượng hơi ở đường ra của tua bin: $x_4 > 0.9$.

Tỷ số công trở lại bwr, là tỷ số của công được yêu cầu bởi bơm nhiệt hoặc máy nén với công phát sinh bởi tua bin:

$$\text{bwr} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} \tag{12.28}$$

BẢNG 12.6 Các chu trình Rankine và Brayton

Chu trình Rankine	Chu trình Brayton
	
	

$$\left.\begin{matrix}\dot{W}_P \\ \dot{W}_C\end{matrix}\right\} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (>0) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{vào} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (>0) \quad (2)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (>0) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{ra} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (>0) \quad (4)$$

Vì một chất khí có thể tích riêng lớn giãn nở trong một tua bin sử dụng chu trình Rankine và một chất lỏng có thể tích riêng thấp hơn nhiều được bơm nhiệt, tỷ số công trở lại thường rất thấp trong các máy công suất hơi-trong nhiều trường hợp nó ở cỡ từ 1-2%. Tuy nhiên, trong chu trình Brayton, cả tua bin và máy nén chứa một chất khí có thể tích riêng cao và tỷ số công trở lại sẽ lớn hơn nhiều, thường thì 40% hoặc hơn.

Ảnh hưởng của ma sát và các quá trình không thuận nghịch khác đối với các dòng chảy đi qua tua bin, các máy nén và bơm nhiệt thường được đánh giá qua một *hiệu suất đẳng entropi* thích hợp. Tham khảo thêm bảng 12.6 về khía cạnh này, hiệu suất tua bin đẳng entropi là:

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \tag{12.29a}$$

Hiệu suất của máy nén đẳng entropi là:

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \tag{12.29b}$$

Với hiệu suất bơm nhiệt đẳng entropi, mà có cùng một dạng như phương trình (12.29b), tử số của nó thường được xấp xỉ bằng phương trình (12.24c) là $h_{2s} - h_1 \approx v_1 \Delta p$, ở đây Δp là mức tăng áp suất qua bơm nhiệt.

Các máy công suất tua bin khí đơn giản khác với mô hình chu trình Brayton ở nhiều khía cạnh quan trọng. Khi vận hành thực, thường cấp vào thiết bị nén thừa khí, ở đây chúng sẽ được nén với một áp suất cao hơn, sau đó nhiên liệu sẽ được cấp và quá trình cháy xảy ra; cuối cùng sự cháy của hỗn hợp trộn xảy ra và chất khí giãn nở trong tua bin, sau đó chúng được xả ra môi trường. Do vậy, bộ trao đổi nhiệt ở nhiệt độ thấp được thể hiện bởi một đường đứt quãng trên biểu đồ chu trình Brayton ở bảng 12.6 không phải là một thành phần trong thực tế, tuy nhiên nó được dùng chỉ để tính đến quá trình làm mát trong môi trường của khí nóng được xả ra từ tua bin.

Một lý tưởng hoá khác thường được ứng dụng của các máy công suất tua bin khí là phương pháp phân tích chuẩn đối với không khí. Phương pháp phân tích tiêu chuẩn đối với không khí liên quan tới hai giả thiết quan trọng: (1) Quá trình cháy sẽ phát sinh ra nhiệt độ gây ra ảnh hưởng cho hệ thay vào việc truyền nhiệt từ một nguồn bên ngoài, như được thể hiện bởi biểu đồ chu trình Brayton của bảng 12.6. (2) Chất lỏng công tác trong toàn bộ chu trình là chất khí và là một chất khí lý tưởng. Trong phân tích khí tiêu chuẩn lạnh, tỷ số nhiệt riêng k cho khí được coi là hằng. Phương trình (1) đến (6) của bảng 12.4 thường áp dụng để phân tích chuẩn đối với không khí. Phương trình (1') tới (6') của bảng 12.4 áp dụng để phân tích chuẩn đối với không khí *nguội*, từ đây có thể có được biểu thức sau tính toán công suất của tua bin từ bảng 12.1 (Phương trình (10c")):

$$\dot{W}_t = \dot{m}\frac{kRT_3}{k-1}\left[1-(p_4/p_3)^{(k-1)/k}\right] \tag{12.30}$$

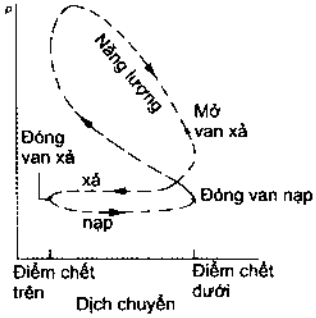
Có thể viết một biểu thức công suất có dạng tương tự cho một máy nén.

Các chu trình Otto, Điêzen và chu trình kép

Mặc dù hầu hết các tua bin khí cũng là các động cơ đốt trong, tuy nhiên tên gọi động cơ đốt trong thường dùng để chỉ các động cơ đốt trong *khứ hồi* là loại được sử dụng nhiều trong ô tô, xe tải và xe khách. Có hai nguyên lý cơ bản của các động cơ đốt trong khứ hồi là động cơ đánh lửa bằng tia lửa điện và động cơ đánh lửa bằng quá trình nén. Ở *động cơ đánh lửa bằng tia lửa điện*, một hỗn hợp của nhiên liệu và khí sẽ được đánh lửa bằng một nến điện. Ở một động cơ *đánh lửa bằng quá trình nén*, khí sẽ được nén tới một áp suất và nhiệt độ đủ cao và quá trình cháy tự xảy ra một cách tự phát khi nhiên liệu được dẫn vào.

Ở một động cơ đốt trong *bốn kỳ*, piston của nó thực hiện bốn kỳ phân biệt bên trong một xi lanh cho hai vòng quay của trục khuỷu. Hình 12.7 vẽ một biểu đồ áp suất-dịch chuyển. Với van vào mở, piston sẽ thực hiện một *kỳ nạp* để kéo khí nạp sạch vào trong xi lanh. Tiếp theo, lúc này cả hai van đều đóng, piston sẽ trải qua *kỳ nén* và sẽ gia tăng nhiệt độ và áp suất của khí nạp. Sau đó quá trình cháy sẽ bắt đầu, kết quả sẽ tạo ra một hỗn hợp khí có áp suất cao, nhiệt độ cao. Tiếp theo kỳ nén là *kỳ nổ*, ở kỳ này hỗn hợp khí giãn nở và sinh công lên piston. Tiếp theo piston sẽ thực hiện một *kỳ xả* mà ở đây sẽ thải sạch các khí bị cháy ra ngoài xi lanh qua van xả mở. Các động cơ nhỏ hơn vận hành trong hai chu kỳ. Ở các động cơ *hai kỳ*, các quá trình hút-nén-nổ-xả và thải được thực hiện cho một vòng quay của tay quay. Mặc dù các động cơ đốt trong thực hiện các chu trình *cơ học*, thể tích trong xi lanh không thực hiện một chu trình *nhiệt động* nào cả, vì vật chất được tạo ra thành một hợp chất và sau đó lại được chuyển sang thành một hợp chất khác.

Một thông số được sử dụng để diễn tả hoạt động của các động cơ đốt trong khứ hồi là *áp suất hiệu dụng trung bình* hoặc mep.



HÌNH 12.7 Biểu đồ áp suất-dịch chuyển cho một động cơ đốt trong khứ hồi

Áp suất hiệu dụng trung bình là một áp suất hằng số theo lý thuyết mà khi nó tác dụng lên piston trong thời gian kỳ công suất, sẽ tạo ra cùng một công hữu ích giống như trong một chu trình, tức là:

$$\text{mep} = \frac{\text{công hữu ích trong một chu kỳ}}{\text{thể tích dịch chuyển}} \tag{12.31}$$

ở đây thể tích dịch chuyển là thể tích mà piston sẽ đẩy ra ngoài khi di chuyển từ điểm chết dưới đến tâm điểm chết trên. Đối với hai động cơ có cùng thể tích dịch chuyển như nhau, động cơ nào có áp suất hiệu dụng trung bình cao hơn sẽ tạo ra được nhiều công hữu ích hơn và khi chạy ở cùng một tốc độ, nó sẽ có công suất lớn hơn.

Các nghiên cứu chi tiết về tính năng của các động cơ đốt trong khứ hồi có thể cần phải xem xét và đánh giá được nhiều đặc điểm, bao gồm quá trình cháy xảy ra trong xi lanh và các ảnh hưởng của các quá trình không thuận nghịch liên quan tới ma sát và gradien áp suất và nhiệt độ. Nhiệt truyền giữa các chất khí trong xi lanh ra thành xi lanh và công cần thiết để nạp và xả các sản phẩm của quá trình cháy cũng có thể được xem xét đến. Do tồn tại những vấn đề phức tạp này, việc mô hình hóa tỉ mỉ các động cơ đốt trong khứ hồi thường được mô phỏng trên máy tính.

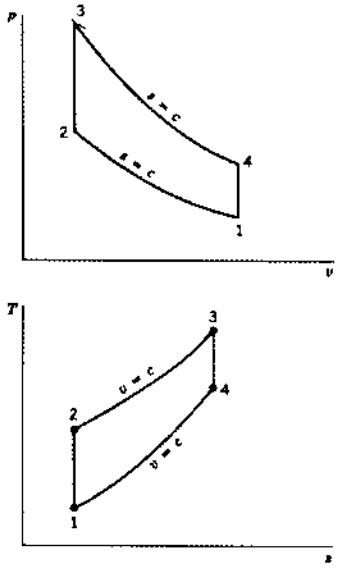
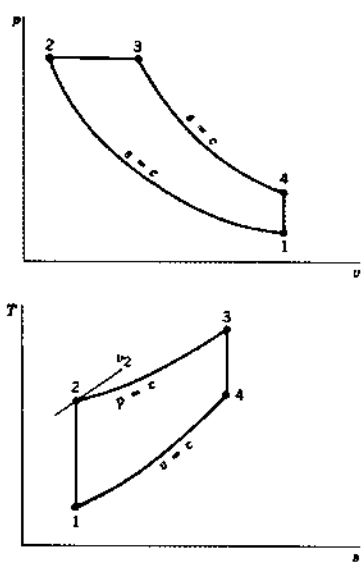
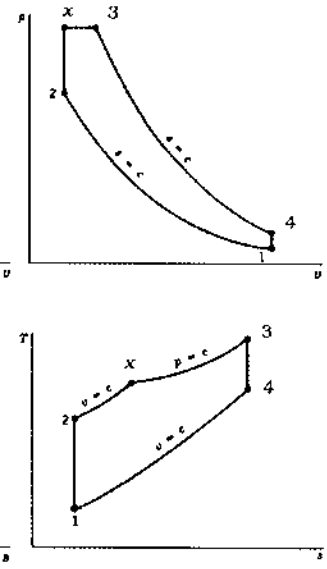
Để tiến hành phân tích nhiệt động *cơ sở* của các động cơ đốt trong, cần có quá trình đơn giản hoá. Một thủ tục mà cho phép các động cơ được nghiên cứu một cách *định tính* để áp dụng cho việc *phân tích chuẩn đối với không khí* có các thành phần sau đây: (1) một lượng không đổi không khí được mô hình hóa thành một khí lý tưởng của hệ thống; (2) quá trình cháy được thay thế bằng một quá trình truyền nhiệt từ một nguồn bên ngoài và được biểu diễn bằng các quá trình nhiệt động cơ bản; (3) Sẽ không có các quá trình xả và dẫn vào như là trong một động cơ thật: chu trình này được hoàn thành bằng một quá trình tỏa nhiệt với thể tích hằng; (4) Tất cả các quá trình đều có tính thuận nghịch bên trong.

Các quá trình được ứng dụng trong các phân tích chuẩn đối với không khí của các động cơ đốt trong được chọn để biểu diễn các sự kiện xảy ra bên trong động cơ một cách đơn giản và thể hiện giống với các đặc trưng của các biểu đồ áp suất-dịch chuyển quan sát được. Thêm vào quá trình tỏa nhiệt thể tích hằng nói trên, kỳ nén và ít nhất một phần của kỳ nổ thường được coi là đẳng entropi. Sự thêm nhiệt thường được xem xét khi xảy ra trong một thể tích hằng tại một áp suất hằng hoặc tại một thể tích hằng tiếp theo là quá trình áp suất hằng, từ đó có các chu trình tương ứng là chu trình Otto, chu trình Điêzen và chu trình kép được thể hiện trong bảng 12.7.

Từ sự cân bằng năng lượng của hệ kín, phương trình 12.7b, có thể đưa ra các biểu thức tính công và nhiệt được cấp trong mỗi trường hợp như trong bảng 12.7:

$$\frac{W_{12}}{m} = u_1 - u_2, \qquad \frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4, \qquad \frac{Q_{41}}{m} = u_1 - u_4 \tag{12.32}$$

BẢNG 12.7 Các chu trình Otto, Điêzen và Dual

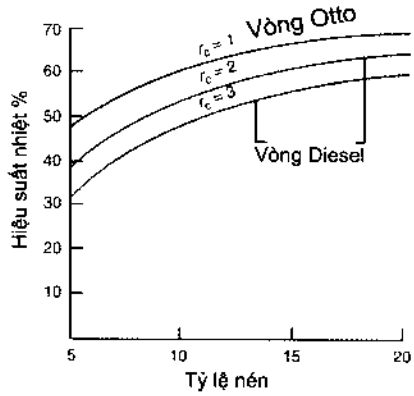
(a) Chu trình Otto	(b) Chu trình Điêzen	(c) Chu trình Dual
		
$\frac{W_{23}}{m} = 0$	$\frac{W_{23}}{m} = p_2(v_3 - v_2)$	$\frac{W_{2x}}{m} = 0, \quad \frac{Q_{2x}}{m} = u_x - u_2$
$\frac{Q_{23}}{m} = u_3 - u_2$	$\frac{Q_{23}}{m} = h_3 - h_2$	$\frac{W_{x3}}{m} = p_3(v_3 - v_2), \quad \frac{Q_{x3}}{m} = h_3 - h_x$
$\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2}$	$\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2}$	$\eta = 1 - \frac{u_4 - u_1}{(u_x - u_2) + (h_3 - h_x)}$

Bảng 12.7 cung cấp thêm các biểu thức cho công, truyền nhiệt và hiệu suất nhiệt xác định cho từng trường hợp riêng. Tất cả các biểu thức tính công và nhiệt gắn với các ký hiệu thường dùng của phương trình (12.7b). Phương trình (1) đến (6) của bảng 12.4 thường áp dụng cho phân tích chuẩn đối với không khí. Trong phân tích chuẩn đối với không khí *nguội*, tỷ số nhiệt dung riêng k cho chất khí thường được coi là hằng số. Phương trình (1') đến (6') của bảng 12.4 áp dụng cho phân tích chuẩn đối với không khí nguội, như là phương trình (4') của bảng 12.5, với $n = k$ cho các quá trình đẳng entropi của các chu trình này.

Trên bảng 12.7, tỷ số của các thể tích riêng v_1/v_2 là *tỷ số nén r*. Đối với chu trình Điêzen, tỷ số v_3/v_2 là tỷ số giới hạn r_c. Hình 12.8 thể hiện sự thay đổi của hiệu suất nhiệt theo tỷ số nén cho một chu trình Otto và các chu trình Điêzen có tỷ số giới hạn của 2 và 3. Các đường cong này được xác định trên một cơ sở về chuẩn đối với không khí nguội với $k = 1.4$ có sử dụng biểu thức sau:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}\left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)}\right] \qquad \text{(hằng số)} \tag{12.33}$$

ở đây chu trình Otto tương ứng với $r_c = 1$.



HÌNH 12.8 Hiệu suất nhiệt của các chu trình Otto và Điêzen, không khí *nguội* chuẩn, $k = 1.4$

Với tất cả các quá trình thuận nghịch bên trong, các diện tích trên các biểu đồ *p-v* và *T-s* của bảng 12.7 tương ứng có thể được giải thích như là công và truyền nhiệt. Liên quan tới phương trình (12.23) và tham khảo các biểu đồ *p-v*, các diện tích dưới quá trình 3-4 của chu trình Otto, quá trình 2-3-4 của chu trình Điêzen và quá trình *x*-3-4 của chu trình kép biểu diễn công thực hiện bởi chất khí trong giai đoạn của kỳ nổ, cho một đơn vị khối lượng. Đối với mỗi chu trình, diện tích phía dưới quá trình đẳng entropi 1-2 biểu diễn công thực hiện trên chất khí trong giai đoạn kỳ nén, cho một đơn vị khối lượng. Diện tích đóng kín của mỗi chu trình biểu diễn công hữu ích thực hiện cho một đơn vị khối lượng. Cùng với phương trình (12.25) và tham khảo các biểu đồ *T-s*, các diện tích dưới quá trình 2-3 của các chu trình Otto và Điêzen và dưới quá trình 2-*x*-3 của chu trình Dual biểu diễn nhiệt được thêm vào một đơn vị khối lượng. Diện tích dưới quá trình 4-1 thể hiện lượng nhiệt tỏa ra tính cho một đơn vị khối lượng. Diện tích đóng kín của mỗi chu trình biểu diễn nhiệt lưới được thêm vào, nó bằng với công lưới thực hiện cho từng đơn vị khối lượng.

Tài liệu tham khảo

[1] *ASHRAE Handbook 1993 Fundamentals*. 1993. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta.

[2] *ASME Steam Tables*, 6th ed., 1993. ASME Press, Fairfield, NJ.

[3] Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M. 1996. *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, New York.

[4] Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot, E.N. 1960. *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York.

[5] Bolz, R.E. and Tuve, G.L. (Eds.). 1973. *Handbook of Tables for Applied Engineering Science*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL.

[6] Bornakke, C. and Sonntag, R.E. 1996. *Tables of Thermodynamic and Transport Properties*, John Wiley & Sons, New York.

[7] Gray, D.E. (Ed.). 1972. *American Institute of Physics Handbook*, McGraw-Hill, New York.

[8] Haar, L., Gallagher, J.S., and Kell, G.S. 1984. *NBS/NRC Steam Tables*, Hemisphere, New York.

[9] *Handbook of Chemistry and Physics*, annual editions, CRC Press, Boca Raton, FL.

[10] *JANAF Thermochemical Tables*, 3rd ed., 1986. American Chemical Society and the American Institute of Physics for the National Bureau of Standards.

[11] Jones, J.B. and Dugan, R.E. 1996. *Engineering Thermodynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[12] Keenan, J.H., Keyes, F.G., Hill, P.G., and Moore, J.G. 1969 and 1978. *Steam Tables*, John Wiley & Sons, New York (1969, English Units; 1978, SI Units).

[13] Keenan, J.H., Chao, J., and Kaye, J. 1980 and 1983. *Gas Tables-International Version*, 2nd ed., John Wiley& Sons, New York (1980, English Units; 1983, SI Units).

[14] Knacke, O., Kubaschewski, O., and Hesselmann, K. 1991. *Thermochemical Properties of Inorganic Sub stances*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin.

[15] Kotas, T.J. 1995. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger, Melbourne, FL.

[16] Liley, P.E. 1987. *Thermodynamic Properties of Substances*, In *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, E.A. Avallone and T. Baumeister (Eds.), 9th ed., McGraw-Hill, New York, Sec. 4.2.

[17] Liley, P.E., Reid, R.C., and Buck, E. 1984. Physical and chemical data. In *Perrys' Chemical Engineers. Handbook*, R.H. Perry and D.W. Green (Eds.), 6th ed., McGraw-Hill, New York, Sec.3.

[18] Moran, M.J. 1989. *Availability Analysis-A Guide to Efficient Energy Use*, ASME Press, New York.

[19] Moran, M.J. 1998. Engineering Thermodynamics. In *The CRC Handbook of Mechanical Engineering*, F. Kreith (Ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, Chap. 2.

[20] Moran, M.J. and Shapiro, H.N. 2000. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York.

[21] Moran, M.J. and Shapiro, H.N. 2000. *IT: Interactive Thermodynamics*, Computer Software to Accompany Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 4th ed., Intellipro, John Wiley & Sons, New York.

[22] Moran, M.J. and Tsatsaronis, G. 2000. Engineering Thermodynamics. In *The CRC Handbook of Thermal Engineering*, F. Kreith (Ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, Chap. 1.

[23] Obert, E.F. 1960. *Concepts of Thermodynamics*, McGraw-Hill, New York.

[24] Preston-Thomas, H. 1990. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia*. 27: 3-10.

[25] Reid, R.C. and Sherwood, T.K. 1966. *The Properties of Gases and Liquids*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

[26] Reid, R.C., Prausnitz, J.M., and Poling, B.E. 1987. *The Properties of Gases and Liquids*, 4th ed., McGraw Hill, New York.

[27] Reynolds, W.C. 1979. *Thermodynamic Properties in SI—Graphs, Tables and Computational Equations for 40 Substances*. Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Palo Alto, CA.

[28] Stephan, K. 1994. Tables. In *Dubbel Handbook of Mechanical Engineering*, W. Beitz and K. H. Kuttner (Eds.), Springer-Verlag, London, Sec. C11.

[29] Szargut, J., Morris, D.R., and Steward, F.R. 1988. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, Hemisphere, New York.

[30] Van Wylen, G.J., Sonntag, R.E., and Bornakke, C. 1994. *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York.

[31] Zemansky, M.W. 1972. *Thermodynamic Symbols, Definitions, and Equations*. In American Institute ofPhysics Handbook, D.E. Gray (Ed.), McGraw-Hill, New York, Sec. 4b.

13

Mô hình hóa và mô phỏng hệ cơ điện tử micro (MEMS)

13.1 Mở đầu 13-1

13.2 Qui trình phát triển mạch điện tử số: Mô hình hóa và mô phỏng các hệ micro (hoặc nano)..... 13-2

13.3 Phát triển mạch tín hiệu tương tự và hỗn hợp: mô hình hóa và mô phỏng hệ micro (hoặc nano); đầu vào, đầu ra và các tín hiệu hỗn hợp số và tương tự .. 13-7

13.4 Các kỹ thuật cơ bản và các công cụ sẵn có cho mô hình hóa và mô phỏng MEMS..... 13-8

13.5 Mô hình hóa và mô phỏng MEMS (hoặc NEMS); đầu vào, đầu ra và tín hiệu hỗn hợp tương tự và số; các hiện tượng hai và ba thứ nguyên; sự kết hợp và tương tác của các miền và các công nghệ... 13-13

13.6 Một "công thức" mô phỏng MEMS thành công..... 13-15

13.7 Kết luận: Sự phát triển tiếp của mô hình hóa và mô phỏng MEMS 13-15

Carla Purdy
University of Cincinnati

13.1 Mở đầu

Mô hình hóa chính xác và mô phỏng hiệu quả nhằm giảm đáng kể thời gian phát triển và chi phí, là các kỹ thuật đã được thiết lập tốt trong thế giới thu nhỏ của các mạch tích hợp (IC). Việc mô phỏng thường đạt được độ chính xác 5% hoặc thấp hơn đối với các tham số quan tâm [1], tuy nhiên nhiều mô phỏng kém chính xác hơn (chẳng hạn, 25-30%) vẫn có thể được dùng để nhận được thông tin có giá trị [2]. Trong thế giới IC, mô phỏng được dùng để dự báo tính năng của một thiết kế, phân tích một thành phần có sẵn, hoặc hỗ trợ tổng hợp tự động một thiết kế. Tóm lại, các môi trường mô phỏng MEMS cũng cần có ba khả năng này. Tất nhiên, các nhà phát triển MEMS quan tâm nhất đến việc tiếp cận nhanh tới các kỹ thuật và công cụ riêng biệt nhằm hỗ trợ việc phát triển hệ thống hiện thời. Tuy nhiên, về lâu dài, việc đạt được hoàn toàn các mô phỏng MEMS với độ chính xác chấp nhận được sẽ không chỉ phụ thuộc vào khả năng của môi trường thiết kế có sự trợ giúp của máy tính CAD (Computer-Aided Design) nhằm phát triển các công cụ mạnh, hiệu quả, thân thiện cho cả các nhà nghiên cứu và kỹ sư sản xuất, mà còn phụ thuộc vào sự tồn tại của các quá trình chuẩn hóa có sẵn có thể chấp nhận. Trong chương này, chúng ta sẽ tập trung xem xét các phương pháp cơ bản để việc mô phỏng MEMS trở nên dễ dàng. Chúng ta cũng xem xét các công cụ có sẵn mà một nhà phát triển MEMS có thể dùng để đạt được các kết quả mô phỏng tốt. Nhiều công cụ trong số này tạo nên các hệ thống phát triển MEMS trên nền tảng sẵn có của các công nghệ khác, do đó thúc đẩy những nguồn lực rộng lớn đã được phát triển sâu rộng trước đó và tránh việc "sáng tạo lặp lại".

Để có thể bàn về việc mô hình hóa và mô phỏng, cần biết các đặc tính nổi bật của MEMS là:

1. Bao gồm nhiều lĩnh vực và công nghệ và sự tương tác của chúng
2. Có cả các ứng xử hai thứ nguyên và ba thứ nguyên
3. Đầu vào, đầu ra và các tín hiệu là hỗn hợp cả tương tự (liên tục) và số (rời rạc)
4. Các kích thước đặc trưng của thang micro (hoặc nano)

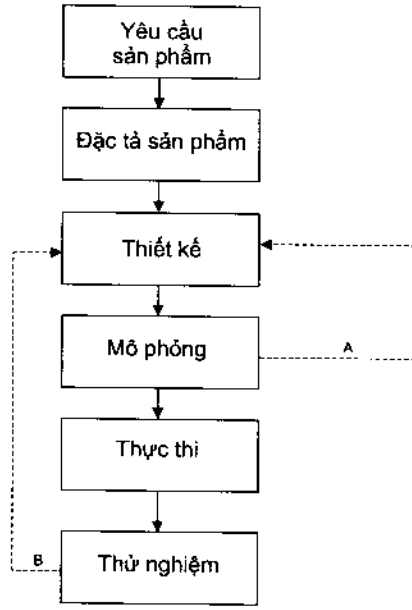
Các công nghệ chế tạo hệ thống (hai thứ nguyên) tin cậy với kích thước đặc trưng của thang micro hoặc nano (đặc tính 4) đã rất hoàn thiện trong lĩnh vực vi điện tử và sẽ là hợp lý nếu đem triển khai công nghệ này cho MEMS, kết hợp với những thay đổi cần thiết nhằm giải quyết các đặc tính 1, 2, 3. Ở đây, ta tóm tắt một số nguyên lý chính đã làm cho vi điện tử trở thành một lĩnh vực phát triển nhanh và ta xem xét các công cụ vi điện tử có thể được dùng hoặc được sửa lại cho phù hợp để cho phép áp dụng những nguyên lý này cho MEMS. Ta cũng thảo luận xem tại sao việc áp dụng các chiến lược này cho MEMS không phải lúc nào cũng khả thi.

13.2 Qui trình phát triển mạch điện tử số: Mô hình hóa và mô phỏng các hệ micro (hoặc nano)

Lưu đồ qui trình phát triển hệ thống hoặc mạch điện tử số mật độ tích hợp cao VLSI (Very Large-Scale Intergration) điển hình được thấy trên hình 13.1, ở đây các đường chấm chấm là đường tối ưu mà nhà phát triển cần phải quay trở lại nếu phát hiện thấy lỗi. Tuỳ chọn A, cho công nghệ "hoàn thiện", được hỗ trợ bởi các bộ mô phỏng chính xác và hiệu quả, do đó thậm chí việc chế thử cũng có thể được chấp nhận. Mục tiêu của qui trình hoàn thiện là có được kết quả mô phỏng tốt hơn nữa, để giảm hơn nữa các sai sót vận hành nghiêm trọng sau khi chế tạo. Để hỗ trợ cho mục tiêu này, việc phát triển các mô hình và các bộ mô phỏng là nhiệm vụ chính. Tuỳ chọn B (công nghệ chưa hoàn thiện), tại điểm cuối cùng của quy trình, có thể trình diễn một công nghệ thực nghiệm mà nó không đủ dữ liệu hỗ trợ cho ngay cả các mô phỏng không mạnh lắm. Trong các hệ thống phát triển phần cứng và phần mềm hiện đại, quan trọng là các công cụ đưa thêm các hỗ trợ tốt cho giai đoạn đầu của quy trình này. Do đó tăng khả năng nhận dạng lỗi ý tưởng và lỗi thiết kế và việc sửa đổi sẽ được thực hiện ngay khi có thể, như vậy sẽ giảm được cả thời gian phát triển lẫn giá thành sản phẩm.

Ở mức micro, chu trình phát triển ứng với tuỳ chọn A thường được thực hiện cho nhiều mạch điện tử số. Trên thực tế, quy trình đầy đủ có thể được tự động hóa cao trong một số trường hợp, do đó có "các bộ biên dịch silicon" hay "các máy tính thiết kế máy tính". Vì vậy, không chỉ phân tích thiết kế, mà thậm chí tổng hợp thiết kế cũng có thể thực hiện được. Ví dụ trường hợp công nghệ CMOS dựa trên silic được thiết lập tốt. Có nhiều đặc tính của các hệ thống số tạo nên tính khả thi này. Đó là:

- Sự tồn tại của một tập nhỏ các phần tử mạch số cơ bản. Tất cả các hàm Bool có thể được thực hiện bằng việc tổ hợp các hàm logic AND, OR, NOT. Trên thực tế, tất cả các hàm Bool có thể được thực hiện bằng việc tổ hợp chỉ một cổng NAND (NOT-AND). Vì thế nếu một "thư viện mô hình" các cổng cơ bản (và một vài phần hữu ích khác, như các chân vào/ra, các bộ dồn kênh và các flip-flop) được phát triển, thì các hệ thống có thể được thực hiện chỉ bằng việc tổ hợp các phần tử thích hợp trong thư viện.
- Một tập nhỏ các công nghệ đã được chuẩn hóa và dễ hiểu, với các quy trình chế tạo đã được miêu tả kỹ sẵn có khắp nơi. Ví dụ ở Mỹ, dịch vụ MOSIS [3] hỗ trợ khả năng tiếp cận tới các công nghệ này. Các dịch vụ tương tự như vậy bao gồm CMP ở Pháp [4], Europractice ở Châu Âu [5], VDEC ở Nhật [6] và CMC ở Canada [7].
- Một cơ sở hạ tầng giáo dục đã được phát triển tốt và các phương tiện tạo nguyên mẫu. Tất cả đều được hỗ trợ bởi các dịch vụ trên. Các dạng hỗ trợ giáo dục và tổ chức này có nguồn gốc trong tác phẩm của Mead và Conway [8] và tiếp tục đào tạo thêm các kỹ sư VLSI ngày càng tinh xảo. Một khía cạnh quan trọng của cơ sở hạ tầng này là nó cũng hỗ trợ, với giá tương đối thấp, khả năng tiếp cận việc tạo mẫu các thiết bị và hệ thống đã được chế tạo với các quy trình ổn định mà ứng xử của chúng có thể được kiểm tra và được so sánh với kết quả mô phỏng, từ đó cho phép cải tiến các kỹ thuật mô phỏng này.



HÌNH 13.1 Quy trình thiết kế sản phẩm (A: công nghệ hoàn thiện, B: công nghệ chưa hoàn thiện)

- "Mức và khía cạnh" (trừu tượng hóa và đóng gói hoặc "che dấu thông tin") (xem [9]). Khái niệm này được minh họa trên hình 13-2(a). Với lĩnh vực VLSI, chúng ta có thể nhận thấy ít nhất năm mức trừu tượng hóa, từ mức thấp nhất (sơ đồ bố trí) đến mức cao nhất (đặc tả hệ thống). Ta cũng có thể "quan sát" một hệ thống theo khía cạnh ứng xử, cấu trúc, hoặc vật lý. Theo *khía cạnh ứng xử* ta mô tả chức năng của mạch điện tử mà không chỉ ra cách thực hiện chức năng ấy. Nó cho phép ta hình dung rõ ràng: hệ thống cần phải làm gì, các đầu vào đòi hỏi gì và các đầu ra sẽ đưa ra cái gì. Vì thế, ta có thể quan sát mỗi thành phần như là một "hộp đen" để định rõ được đáp ứng cho các đầu vào. Ví dụ dòng điện qua một tranzito hiệu ứng trường MOS (MOSFET), là một hàm của điện áp cổng, là một miêu tả ứng xử (mức thấp). Nhìn từ *khía cạnh vật lý* ta định rõ các phần vật lý thực sự của mạch điện tử. Tại các mức thấp nhất của miền này, ta phải chọn vật liệu cho từng bộ phận của mạch điện tử (ví dụ các đoạn dây sẽ nằm trong lớp kim loại thường được đưa ra trong một mạch CMOS) và chính xác nơi nào mà từng bộ phận sẽ được đặt trong sơ đồ vật lý thực tế. Miêu tả vật lý sẽ được chuyển trực tiếp thành các sơ đồ mặt nạ cho mạch điện tử. *Cấu trúc* nằm giữa vật lý và ứng xử. Nó cung cấp một giao diện giữa các chức năng đã được định rõ trong miền ứng xử mà không quan tâm đến tính chất hình học và các tính chất hình học được định rõ trong miền vật lý mà không quan tâm đến chức năng. Ví dụ trong miền trung gian này, chúng ta có thể thực hiện việc tối ưu hóa hợp lý và tối thiểu hóa trạng thái. Sơ đồ là một ví dụ miêu tả cấu trúc. Dĩ nhiên, không phải tất cả các đặc tính của mạch điện tử có thể được gói gọn hoàn toàn chỉ trong một trong những khía cạnh này. Ví dụ nếu ta thay đổi kích thước vật lý của một sợi dây, ta sẽ tác động đến thời gian là một thuộc tính ứng xử. Nguyên tắc đóng gói dẫn đến việc phát triển của IP (Intellectual Property), tức là các thư viện của các linh kiện ngày càng phức tạp hơn để có thể được các nhà phát triển hệ thống dùng như là "các hộp đen".

(a)

Mức	Các khía cạnh		
	Ứng xử	Cấu trúc	Vật lý
4	Đặc tính hoạt động	CPU, bộ nhớ, chuyển mạch, bộ điều khiển, Bus	Phân chia vật lý
3	Thuật toán	Môđun, cấu trúc dữ liệu	Cluster
2	Truyền thanh ghi	ALU, MUX, Thanh ghi	Floorplan
1	Phương trình Bool, FSM	Cổng, Flip-flop	Tế bào, môđun
0	Hàm truyền, Định thời	Tranzito, dây dẫn, công tắc	Sơ đồ bố trí

(b)

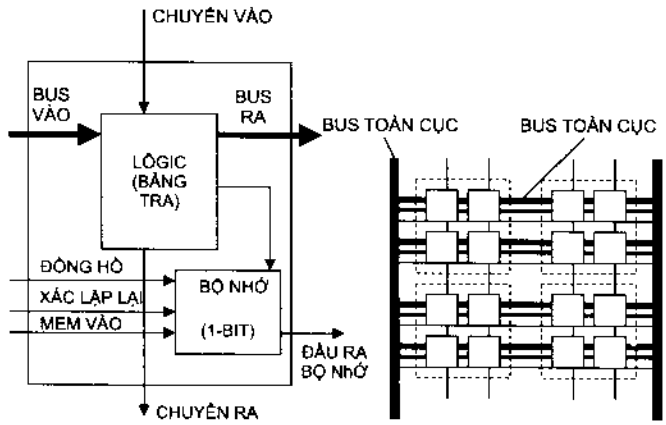
Mức	Các khía cạnh		
	Ứng xử	Cấu trúc	Vật lý
4	Đặc tính hoạt động	Cảm biến Cơ cấu chấp hành Hệ thống	Phân chia vật lý
3		Các thành phần Miền Đa năng lượng	Cluster
2		Miền – miền Các thành phần	Floorplan
1		Các thành phần Miền Đơn năng lượng	Tế bào, môđun
0	Hàm truyền, Định thời	Dầm, màng che, lỗ, rãnh, khớp	Sơ đồ bố trí

HÌNH 13.2 Phân loại sự phát triển thành phần ("các mức và khía cạnh"): (a) phân loại VLSI chuẩn, (b) phân loại từng phần cho các thành phần MEMS

- Các mô hình được phát triển tốt cho những phần tử cơ bản mô tả rõ ràng các ảnh hưởng do những thay đổi trong thiết kế, quá trình sản xuất hay môi trường. Ví dụ, trong [10], các thừa số trong các phương trình cơ bản bậc nhất cho I_{ds}, dòng điện máng - nguồn (drain - source) trong một tranzito NMOS, có thể được chia rõ ràng thành các phần dưới sự điều khiển của nhà thiết kế (W/L, tỷ lệ chiều rộng/chiều dài cho kênh tranzito), phụ thuộc quá trình chế tạo (ε là hằng số điện môi của chất cách điện cổng và t_{ox} là độ dày của chất cách điện cổng), phụ thuộc vào các hệ số môi trường (V_{ds} và V_{gs}, tương ứng là điện áp máng - nguồn và điện áp cổng - nguồn và đó là một hàm của cả quá trình chế tạo và môi trường (μ là độ linh động bề mặt hiệu dụng của các hạt tải trong kênh và V_t là điện áp ngưỡng). Thông tin chi tiết hơn về việc mô hình hóa MOSFET có thể được tìm thấy trong [11]. Việc nhận dạng các tham số cơ bản trong một giai đoạn của quy trình phát triển có thể có giá trị lớn trong các giai đoạn khác. Ví dụ kích thước đặc trưng nhỏ nhất λ của một công nghệ cho trước có thể được dùng để phát triển một tập các "qui tắc thiết kế" biểu diễn những chồng chéo và khoảng cách bắt buộc đối với các vật liệu khác nhau. Sau đó, một công cụ thiết kế được phát triển để "bắt tuân theo" các qui tắc này và các kết quả có thể được dùng để đơn giản hóa tới một mức độ nào đó, các giai đoạn mô hình hóa và mô phỏng. Tham số λ cũng có thể được dùng để biểu diễn các hiệu ứng gây bởi việc thay đổi thang khi việc này có hiệu lực.

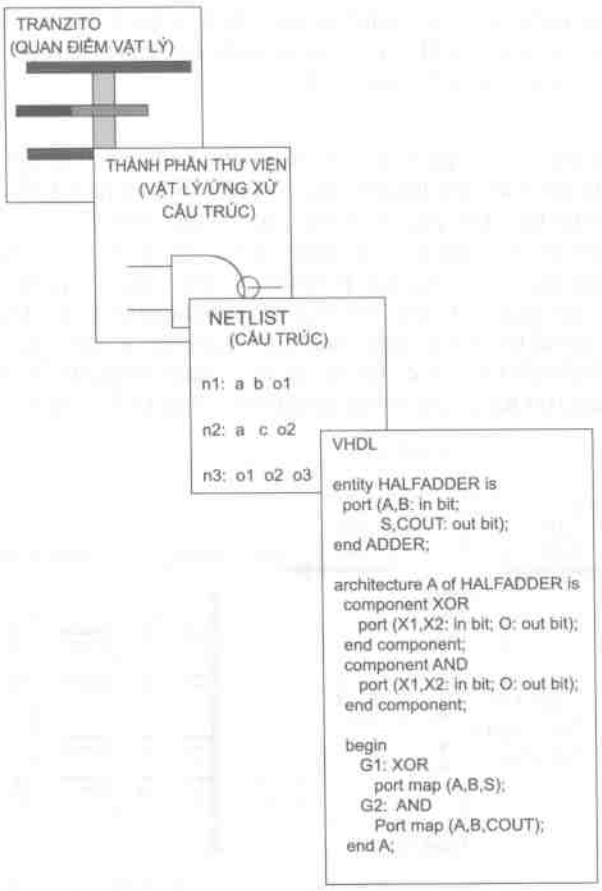
- Các công cụ hoàn thiện cho thiết kế và mô phỏng đã tiến triển qua rất nhiều thế hệ và với nhiều phiên bản có giá thành vừa phải đang sẵn có từ nhiều nguồn khác nhau. Ví dụ, nhiều công cụ hiện nay kết hợp các phiên bản của công cụ thiết kế MAGIC [12] và bộ mô phỏng SPICE (Simulation Program with Integarated Circuit Emphasis - Chương trình mô phỏng tập trung vào mạch tích hợp), cả hai đều được bắt đầu phát triển ở Trường đại học California, Berkeley. Các phiên bản của bộ mô phỏng SPICE hỗ trợ một vài mô hình thiết bị (ví dụ hiện nay có hơn sáu mô hình MOS khác nhau và năm mô hình đường truyền khác nhau), vì thế một nhà phát triển có thể chọn mức độ chi tiết của thiết bị thích hợp với nhiệm vụ sắp tới. Các phiên bản giá thấp hoặc miễn phí của cả MAGIC và SPICE, cũng như các phiên bản mở rộng của cả hai công cụ này, luôn sẵn có khắp nơi. Nhiều kỹ thuật khác nhau, như đóng gói mô hình (các mô hình tối ưu cho các phạm vi cụ thể của tham số mô hình) và việc bao gồm cả thông tin quy trình dạng độc quyền sở hữu và sử dụng, được sử dụng để tạo ra các mô hình và kết quả mô phỏng tốt hơn, đặc biệt trong phiên bản HSPICE của SPICE và trong các phiên bản cuối cùng của các công cụ này [11].
- Các hệ thống phát triển tích hợp sẵn có và cung cấp hỗ trợ cho một loạt các mức và khía cạnh, các thư viện thành phần mở rộng, các giao diện thân thiện với người dùng và trợ giúp trực tuyến cũng như sự chuyển đổi tự động giữa các miền, cùng với việc kiểm tra lỗi và các ràng buộc. Trong một hệ thống phát triển VLSI, các mô hình, các bộ mô phỏng và các bộ dịch phức tạp giữ đường đi thông tin mạch điện tử cho nhiều mức và khía cạnh, trong khi cho phép nhà phát triển tập trung vào một mức hay quan sát tại một thời điểm. Nhiều hệ thống phát triển ngày nay cũng hỗ trợ, ở các mức trừu tượng hóa cao hơn, các ngôn ngữ "lập trình" có cấu trúc như ngôn ngữ mô tả phần cứng mạch tích hợp mật độ rất lớn VHDL (Very large scale integrated circuit Hardware Description Language) [14, 15] hoặc Verilog [16].

Một nhà phát triển mạch số có rất nhiều lựa chọn, phụ thuộc vào các ràng buộc về hiệu suất, số lượng các đơn vị được sản xuất, giá thành mong muốn, thời gian phát triển... Theo quan điểm của mình, nhà thiết kế có thể lựa chọn phát triển một mạch "theo đơn đặt hàng", tạo các sơ đồ bố trí, sắp xếp các bộ dịch đơn lẻ, mô hình hóa các hiệu ứng RC trong các dây riêng biệt và duyệt các lựa chọn thiết kế thông qua các mô phỏng dựa trên SPICE mức thấp mở rộng. Theo quan điểm khác, các nhà phát triển có thể chọn sản xuất một PLD (Programmable Logic Device - Linh kiện logic khả trình) với một sơ đồ bố trí cơ bản được định trước gồm các tế bào logic khả trình và tế bào lưu trữ (hình 13.3) có thể kết nối khi cần để tạo ra các chức năng mong muốn. Một PLD cuối cùng có thể chứa tới 100 nghìn (100 K) tế bào tương tự như trên hình 13.3 và một 100 K byte bổ sung của



HÌNH 13.3 Kiến trúc thiết bị logic khả trình điển hình

bộ nhớ RAM. Trong một hệ thống phát triển tích hợp, như được đưa ra ở [17, 18], nhà phát triển thiết kế dạng biểu đồ hoặc ngôn ngữ cấp cao và sau đó thiết kế được "biên dịch" tự động và ánh xạ tới PLD và các chạy các bộ mô phỏng định thời và chức năng. Nếu kết quả mô phỏng có khả năng chấp nhận được, một PLD thực sự sau đó có thể được lập trình trực tiếp, như một bước xa hơn trong quy trình phát triển và thậm chí được kiểm tra, trong mức độ nào đó, với một tập dữ liệu mẫu giống như dữ liệu được dùng trong bước mô phỏng. Việc "tạo mẫu nhanh" này [19] khi sản xuất một "chip" có thể không khác mấy so với việc sản xuất một chương trình phần mềm đang hoạt động (và PLD có thể được lập trình lại nếu chức năng khác được yêu cầu sau đó). Dĩ nhiên, một hệ thống đặt nhiều ràng buộc trên các thiết kế có thể thực hiện được. Thêm vào đó, các bước tự động chủ yếu dựa vào kinh nghiệm để tìm được các lời giải có thể chấp nhận được cho nhiều vấn đề đòi hỏi tính toán phức tạp, để nhận được sự dễ dàng hơn trong phát triển. Vì vậy một thiết bị được thiết kế trong một hệ thống như vậy sẽ không bao giờ đạt được hiệu quả tốt nhất. Tuy nhiên, một sự thỏa hiệp tốt giữa sự dễ dàng trong sử dụng, thời gian phát triển ngắn hơn và sự quản lý nhiều phần tử mạch điện tử đơn lẻ hơn là có thể nếu mỗi phần tử đơn lẻ được dùng với khả năng tối ưu của nó. Thêm vào đó, nếu một ngôn ngữ bậc cao được dùng cho đầu vào, một thiết kế chấp nhận được có thể được chuyển, với một vài thay đổi, thành một hệ thống thiết kế mạnh hơn cho phép thực thi trong nhiều công nghệ linh hoạt và sự điều chỉnh mịn bổ sung cho khả năng của mạch điện tử. Trong hình 13.4 chúng ta thấy một số mức trừu tượng hóa hiện diện như là một qui trình phát triển, với mức thấp nhất mô tả các mô hình tranzito và mức cao nhất là một mô tả VHDL của một bộ cộng bán phần.



HÌNH 13.4 Các mức trừu tượng - bộ cộng bán phần

13.3 Phát triển mạch tín hiệu tương tự và hỗn hợp: mô hình hóa và mô phỏng hệ micro (hoặc nano); đầu vào, đầu ra và các tín hiệu hỗn hợp số và tương tự

Tại mức thấp nhất, các mạch số thực tế là các các thiết bị tương tự. Ví dụ, một bộ biến đổi CMOS không "chuyển" ngay lập tức từ một mức điện áp biểu diễn số nhị phân 0 sang mức điện áp biểu diễn số nhị phân 1. Tuy nhiên, bằng việc thiết kế kỹ lưỡng các cấu trúc vật lý của bộ biến đổi, có thể tạo ra thời gian chuyển từ dải điện áp ra được coi là "0" tới dải được coi là "1" ngắn tới mức chấp nhận được. Ví dụ, trong các MOSFET, hai tín hiệu rời rạc cần quan tâm có thể nhận biết được bằng tranzito, được mô hình như một công tắc "đóng" hoặc "mở" và "sự chuyển mạch" từ trạng thái này sang trạng thái khác có thể bỏ qua trừ ở mức trừu tượng hóa thấp nhất. Vì thế khi mô phỏng và thiết kế, khía cạnh tương tự trong ứng xử của mạch số cũng có thể được bỏ qua. Chỉ ở các mức trừu tượng hóa thấp hơn, các thuộc tính tương tự của các thiết bị VLSI hay các hiệu ứng lượng tử diễn ra chẳng hạn trong MOSFET mới cần được tính toán một cách rõ ràng và lý tưởng bằng các công cụ phát triển tự động mạnh với các mô hình chi tiết. Ở các mức cao hơn, ứng xử này có thể được gói gọn và biểu diễn theo thời gian chuyển lớn nhất và nhỏ nhất đối với tải điện dung và các mức điện áp đã cho. Tuy nhiên, khi các hệ thống số micron trở nên phổ biến hơn, cần quan tâm hơn đến các hiệu ứng tương tự. Ví dụ, với các kích thước đặc trưng nhỏ, trễ đường dây do các hiệu ứng RC và sự xuyên âm gần đường dây trở thành các yếu tố đáng kể hơn vì vậy cần phải tính đến khi mô phỏng [20]. Để kiểm tra xem mô phỏng hỗ trợ các hệ thống số khi tính đến các yếu tố này như thế nào.

Nói chung, các thiết bị tương tự có vẻ thích hợp để "làm thủ công" hơn là các thiết bị số. Các bộ mô phỏng SPICE và giống SPICE thường được dùng để đánh giá việc thực hiện ở mức tranzito, điện trở, tụ điện và cuộn cảm. Ví dụ, do tầm quan trọng ngày càng lớn của tính toán di động và không dây, một phần khá lớn trong việc thiết kế tương tự đang tập trung vào vấn đề làm thế nào để tạo ra các mạch điện tử (số, tương tự và hỗn hợp) có "công suất thấp" và các mô phỏng cho các thiết bị được dùng trong các mạch này sẽ được tiến hành ở mức SPICE chừng nào chưa có các loại công nghệ vật lý mới, các mô phỏng hầu hết sẽ dựa vào những mô hình chung sẵn có cho tranzito, đường truyền,... như vậy gói gọn chúng ở các ứng xử mức thấp nhất.

Chúng ta cùng kiểm tra các yếu tố được đề cập ở trên cho sự thành công của việc mô phỏng và phát triển hệ thống số để nhìn ra cách so sánh với miền tương tự. Giả thiết một chu trình phát triển tương tự như hình 13.1.

- Có một tập các phần tử mạch cơ bản không? Trong miền tương tự, có thể nhận thấy các tập thành phần, như các gương điện, khuyếch đại thuật toán... Tuy nhiên, không có một cổng "đa năng" hay một tập các cổng mà từ đó tất cả các linh kiện khác có thể được tạo ra, như thấy trong miền số. Một yếu tố phức tạp khác là các phần tử mạch tương tự cơ bản thường được xác định trong các giới hạn của khả năng vật lý. Không có khái niệm rõ ràng của ứng xử 0/1. Do các tín hiệu tương tự là liên tục nên khó khăn để gỡ rối các ứng xử mạch phức tạp và thực hiện các mô phỏng có ý nghĩa mà ở đó sự phân chia các tham số tách bạch sẽ cho các kết quả rõ ràng. Khi một thiết kế mạch hoặc thiết bị tương tự cơ bản được phát triển, qui trình dùng cho các mô phỏng nhằm chọn các giá trị tham số chính xác sẽ được biết đến như là "khám phá không gian thiết kế". Qui trình này đòi hỏi mức độ tính toán phức tạp. Các phương pháp khám phá phổ biến như simulated annealing, mạng nơron hoặc một thuật toán di truyền có thể được dùng để thực hiện một cách hiệu quả sự tìm kiếm cần thiết [21].
- Có một tập các công nghệ dễ hiểu hay không? Ở góc độ này, miền tín hiệu hỗn hợp và tương tự là giống với miền số. Nhiều hoạt động phát triển tương tự tập trung vào một vài công nghệ chuẩn và dễ tham số hóa. Nói chung, các thiết bị tương tự nhạy với các thay đổi của các tham số quá trình hơn và cái đó phải được tính đến trong mô phỏng tương tự. Các công nghệ thống kê để mô hình hóa sự thay đổi quá trình cần được tính đến, ví dụ APLAC [22] đã cung cấp các thiết kế và mô phỏng hướng đối tượng cho các

mạch tương tự. Các phương pháp mô phỏng và mô hình hóa, kết hợp với các mô hình xác suất, sẽ dần trở nên quan trọng khi các thiết bị nano trở nên phổ biến và khi các công nghệ mới phụ thuộc vào các hiệu ứng lượng tử và các tính toán dựa trên sinh học được phát triển. Ví dụ, hiện nay người ta đã cố gắng tập trung phát triển một bộ mô phỏng "BIOSPICE", có thể kết hợp nhiều ứng xử của hệ thống ngẫu nhiên hơn[23].

- Có hay không một cơ sở hạ tầng giáo dục tiên tiến và các tiện ích tạo mẫu? Tất cả các tổ chức hỗ trợ đào tạo và tạo mẫu trong miền số [3-7] cũng hỗ trợ để thiết kế tín hiệu hỗn hợp và tương tự.
- Có phải sự đóng gói và trừu tượng hóa được sử dụng rộng rãi? Trong những năm gần đây, nhiều phát triển đã được tạo ra từ sự kết hợp các khái niệm vào các hệ thống thiết kế tín hiệu hỗn hợp và tương tự. Nhiều máy tính mạnh có thể thực hiện các nhiệm vụ thiết kế và mô phỏng cần thiết trong khoảng thời gian hợp lý giúp cho các phát triển này trở nên khả thi. Ví dụ trong [24], các phương pháp điều chỉnh ràng buộc, từ trên xuống (top - down) được mô tả và trong [25], một phương pháp tạo mẫu nhanh cho việc tổng hợp các hệ thống hỗn hợp và tương tự, dựa trên phần mềm VASE (VHDL-AMS), được giải thích. Các phương pháp này dựa vào sự phân loại giống như các phân loại đã đưa ra cho hệ thống số trên hình 13.2(a).
- Có hay không các mô hình dễ phát triển, các công cụ thuần thục và các hệ thống phát triển tích hợp sẵn có? Theo khía cạnh này, trong miền tương tự, vẫn còn nhiều việc để làm hơn là trong miền số, nhưng các mẫu đã tồn tại. Cụ thể, các ngôn ngữ VHDL và Verilog được mở rộng nhằm tính đến các thành phần hỗn hợp và tương tự. Sự mở rộng của VHDL, ví dụ VDHL-AMS [14], sẽ cho phép bổ sung bất cứ phương trình vi phân đại số hay thông thường trong một mô phỏng. Tuy nhiên, không tồn tại một bộ mô phỏng VHDL-AMS dạng hàm số hoàn toàn, mặc dù đã có một phiên bản dạng mở, bao gồm rất nhiều tính năng hữu ích, có trong [26] và nhiều phiên bản thương mại cũng đang được phát triển (thí dụ [27]). Do đó, hiện nay các phiên bản mở rộng của MAGIC và SPICE vẫn là các công cụ mô phỏng và thiết kế được dùng rộng rãi nhất. Trong khi có một số nỗ lực nhằm phát triển các hệ thống thiết kế với các thiết bị có thể định cấu hình tương tự như các thiết bị số được thấy trên hình 13.3, chúng vẫn có những thành công đáng kể. Hiện nay, người ta tập trung nhiều hơn vào sự phát triển dựa trên thành phần với việc dùng lại thiết kế cho SOC (Systems on Chip) thông qua những sáng kiến như [28].

13.4 Các kỹ thuật cơ bản và các công cụ sẵn có cho mô hình hóa và mô phỏng MEMS

Trước khi cố gắng trả lời câu hỏi trên đối với MEMS, chúng ta cần có một cái nhìn cụ thể về các công cụ và kỹ thuật mà nhà thiết kế MEMS đã có sẵn cho nhiệm vụ mô hình hóa và mô phỏng. Như đã chỉ ra trong [29, 30], dòng cuối cùng là trong bất cứ một bộ mô phỏng nào, tất cả các mô hình không được tạo ra như nhau. Nhà phát triển phải rất rõ ràng về những tham số cần quan tâm nhất và sau đó phải chọn các mô hình và kỹ thuật mô phỏng (bao gồm cả sự thực thi trong một hoặc một số công cụ) mang lại các giá trị chính xác nhất cho những tham số này với tổng thời gian mô phỏng nhỏ nhất. Ví dụ, mô hình được dùng để xác định ứng xử tĩnh có thể khác với mô hình được dùng cho việc xác định đầy đủ ứng xử động. Do đó, cần thiết phải có một loạt các mô hình và kỹ thuật sẵn có.

Các kỹ thuật mô hình hóa và mô phỏng cơ bản

Ta cần theo các lựa chọn dưới đây:

- Dạng ứng xử mà ta quan tâm là gì? Ví dụ, các bộ mô phỏng IC thường hỗ trợ phân tích hoạt động DC, phân tích quét DC (các giá trị nguồn điện áp hay dòng điện bậc thang) và

phân tích quét tức thời (các giá trị thời gian bậc thang), cùng với một vài dạng phân tích tức thời khác [30].

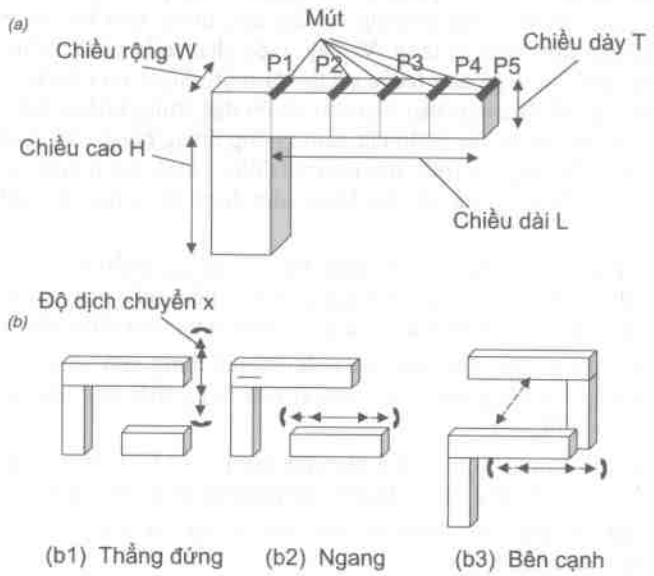
- Quá trình tính toán sẽ theo dạng biểu trưng hay dạng số?
- Dùng phương trình chính xác, phân tích nút hay phân tích phần tử hữu hạn là thích hợp nhất? Hiện tại, chúng là những kỹ thuật được hầu hết các nhà phát triển MEMS ưa chuộng.

Để thấy được yêu cầu của các lựa chọn trên, chúng ta hãy xem một ví dụ đơn giản bao gồm các phần cơ khí và điện. Dầm công xôn trên hình 13.5(a), được chế tạo bằng kim loại, chất dẻo silicon hoặc một hợp chất, có thể kết hợp với một tấm cách điện để hình thành một bản tụ song song. Nếu một lực cơ học hay một điện áp thay đổi được tác động lên dầm (hình 13.5(b1)), một gia tốc kế hoặc một công tắc có thể được sử dụng [31]. Nếu thay vì bản mặt có thể được di chuyển về sau hay trước, một thiết kế của gia tốc kế thích hợp hơn được đưa ra (hình 13.5(b2)); đây là một thiết kế cơ bản của các thiết bị tương tự "gia tốc kế", là thiết bị MEMS thương mại thành công thực sự đầu tiên [32, 33]. Nếu một vài dầm được tổ hợp trong hai "lược", một cảm biến hay cơ cấu chấp hành truyền động dạng lược được đưa ra, như trên hình 13.5(b3) [34]. Ta thử xem xét trường hợp đơn giản nhất, như thấy trên hình 13.5(b1).

Nếu ta giả thiết lực trên dầm tập trung tại điểm cuối của nó, thì ta có thể áp dụng phương pháp trong [35] để tính điện áp "kéo về", tức là điện áp mà tại đó các bản mặt được gom lại, hay để một bộ dừng giữ 2 bản mặt chạm vào nhau. Chúng ta mô hình dầm như là một hệ lò xo-khối lượng-giảm chấn và tìm lực F khi chuyển sang điện áp sẽ cho giá trị chính xác x với dầm được "kéo về".

$$F = mx'' + Bx' + kx$$

Ở đây khối lượng $m = \rho WTL$, trong đó ρ là tỷ trọng của vật liệu dầm, $I = WT^3/12$ là mômen quán tính, $k = 3EI/L^3$, E là môđun đàn hồi Young của vật liệu dầm và $B = (K/EI)^{1/4}$. Phương trình sai phân tuyến tính bậc hai có thể giải bằng phương pháp số để thu được điện áp kéo về. Trong trường hợp này, khi một biểu thức dạng kín có thể nhận được với x, tính toán dạng biểu trưng có thể là một lựa chọn. Trong [36], có thể thấy rằng với bài toán đơn giản này, một vài phương pháp và công cụ thường dùng sẽ cho kết quả giống nhau.

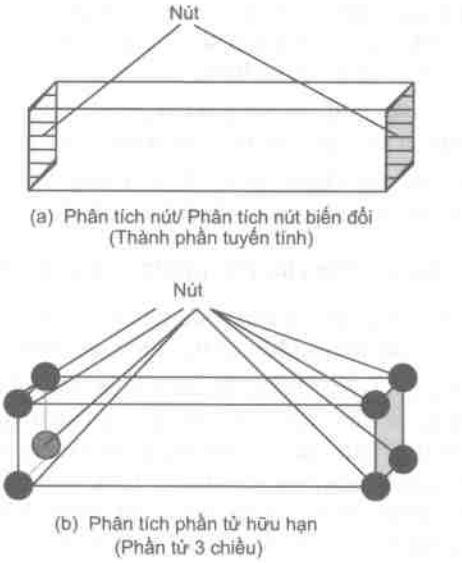


HÌNH 13.5 Các lựa chọn của dầm công xôn và tụ điện dạng thanh: (a) kích thước dầm công xôn, (b) các thiết kế tụ điện dạng thanh cơ bản

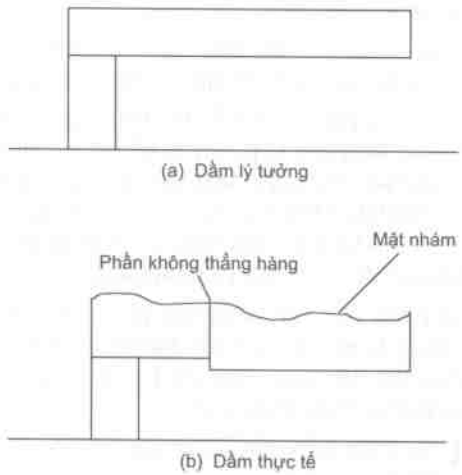
Để thu được một mô hình dầm chính xác hơn, ta có thể sử dụng phương pháp phân tích nút, coi dầm như là một mô hình gồm tập hợp các phần tử được liên kết với nhau tại các "nút". Phương pháp nút giả thiết rằng tại vị trí cân bằng, tổng của tất cả các giá trị (lực và mômen) trong một vòng kín (các đại lượng "chéo") sẽ bằng không và tổng của tất cả các giá trị ra hoặc vào một nút cho trước (các đại lượng "xuyên qua") cũng bằng không. Như vậy, tổng của tất cả các lực và mômen trên mỗi nút phải bằng không và tổng tất cả dòng điện ra và vào một nút cho trước cũng bằng không. Dạng mô hình này đôi khi được biết đến như là một "tham số gộp" từ các lượng như điện trở và điện dung, trong thực tế phân bố dọc theo các cạnh của mô hình, được mô hình thành các thành phần rời rạc. Trong lĩnh vực điện, các định luật Kirchhoff là một ví dụ cụ thể cho các qui tắc này. Phương pháp thường được áp dụng cho các phần tử điện trong các khóa học phân tích mạch điện cơ bản này có thể được áp dụng dễ dàng vào các miền năng lượng khác bằng cách dùng các đương lượng chính xác (xem [38]). Một thảo luận toàn diện về lý thuyết phân tích nút có thể được tìm thấy trong [39]. Trong hình 13.5(a), dầm công xôn được chia thành 4 "phần tử", các dầm con giữa các nút i và $i+1$, $i = 1, 2, 3, 4$, trong đó các vị trí của nút được biểu diễn bằng (x_i, y_i, θ_i) và $(x_{i+1}, y_{i+1}, \theta_{i+1})$ là các tọa độ và độ dốc của P_i và P_{i+1}. Dầm được giả thiết rằng có bề rộng không đổi W và độ dày T, mỗi dầm con được coi như một cấu trúc hai chiều tự do chuyển động trong không gian ba chiều. Trong [40], một phiên bản phân tích nút sửa đổi được dùng để phát triển các thủ tục số nhằm mô phỏng một số ứng xử MEMS, bao gồm cả ứng xử tĩnh và tức thời của một cơ cấu chấp hành dạng dầm điện dung. Phương pháp này cũng thêm vào các tọa độ vị trí z_i và z_{i+1} và thay thế độ dốc θ_i tại mỗi nút bằng một vectơ của các độ dốc, θ_{ix}, θ_{iy} và θ_{iz} cho mỗi nút sáu bậc tự do.

Do phân tích nút dựa trên các phần tử tuyến tính được biểu diễn thành cạnh trong đồ thị cơ bản nên nó không thể dùng để mô hình nhiều hiện tượng và cấu trúc phức tạp như dòng chất lỏng và hiện tượng áp điện. Thậm chí với dầm công xôn, nếu dầm bao gồm các lớp của hai vật liệu khác nhau (ví dụ silic đa tinh thể và kim loại), nó cũng không thể mô hình một cách đầy đủ bằng phân tích nút. Kỹ thuật phân tích phần tử hữu hạn (FEA - Finite Element Analysis) phải được dùng để thay thế. Ví dụ, trong một số công việc tiếp theo được thấy trong [36], phân tích nút và tính toán biểu trưng cho các kết quả về cơ bản giống nhau, trong khi các kết quả FEA là khá khác nhau. Phân tích phần tử hữu hạn với dầm bắt đầu bằng việc nhận dạng các phần tử con, như trên hình 13.5(a), tuy nhiên mỗi phần tử được coi là một đối tượng ba chiều thực sự. Các phần tử không cần giống nhau về hình dạng, ví dụ, các phần tử "dạng gạch" lập phương và tứ diện có thể trộn lẫn với nhau. Trong FEA, một phần tử lập phương có tám nút, nhiều hơn hai nút so với trước kia (hình 13.6), nên độ phức tạp tính toán sẽ tăng. Vì vậy, việc phát triển phần mềm máy tính hiệu quả để thực hiện FEA với một cấu trúc cho trước có thể là một nhiệm vụ khó khăn. Tuy nhiên, phương pháp tổng quát này có thể đưa vào bản báo cáo nhiều đặc trưng không thể lấy ra một cách tương xứng bằng phân tích nút, ví dụ các phần cắt dầm không thẳng hàng và kết cấu bề mặt (hình 13.7). FEA có thể phối hợp các ứng xử tĩnh, tức thời và động và có thể nghiên cứu dòng nhiệt và chất lỏng, cũng như các lực điện, cơ và các lực khác, như được trình bày chi tiết trong [41]. Qui trình cơ bản như sau:

- Rời rạc hóa cấu trúc hoặc miền quan tâm thành các phần tử hữu hạn. Chúng không cần đồng đều cả về kích cỡ lẫn hình dạng. Tuy nhiên, mỗi phần tử nên được chọn sao cho có thay đổi rõ rệt về hình học và ứng xử diễn ra tại một điểm bên trong.
- Với mỗi phần tử, xác định các đặc tính phần tử dùng một hệ tọa độ "địa phương". Đó sẽ là trạng thái cân bằng (hay một xấp xỉ nếu trạng thái này không được tính toán chính xác) của phần tử.
- Biến đổi các hệ trục tọa độ địa phương thành một hệ trục tọa độ toàn cục và "tập hợp lại" các phương trình phần tử thành một phương trình ma trận.
- Áp đặt bất cứ ràng buộc được dẫn đến bởi các bậc tự do hạn chế (ví dụ, một nút cố định trong một bài toán cơ học).
- Giải (thường bằng số) các biến số nút.
- Từ lời giải toàn cục, tính các hợp lực phần tử.



HÌNH 13.6 Phân tích nút và phân tích phần tử hữu hạn



HÌNH 13.7 Dầm công xôn lý tưởng và thực tế (hình chiếu cạnh)

Danh mục các công cụ cho mô hình hóa và mô phỏng MEMS

Để có thể hiểu về việc mô phỏng MEMS, ở đây sẽ liệt kê trước một vài công cụ và sản phẩm sẵn có. Danh sách này không có nghĩa là toàn bộ, tuy nhiên nó sẽ cung cấp cho ta một phạm vi các phương pháp để so sánh. Lưu ý là danh sách này chỉ chính xác đến tháng 7/2001, trong khi cộng đồng phát triển MEMS đang phát triển trong cả các công ty thương mại lẫn các địa chỉ nghiên cứu đại học thường xuyên đảm nhận các yêu cầu từ đối tác và mở rộng dịch vụ cung cấp.

A. Các công cụ sẵn có rộng rãi cho tính toán biểu trưng và số

Các công cụ này tương đối dễ dàng để học cách sử dụng. Hầu hết các sinh viên kỹ thuật sẽ làm chủ ít nhất một công cụ trước khi tốt nghiệp. Chúng có thể được dùng để mô hình một thiết bị "từ vạch xuất phát" và để thực thi các mô phỏng đơn giản. Với nhiều mô phỏng phức tạp, chúng có

thể không thích hợp vì hai nguyên nhân. Thứ nhất, không một công cụ nào tối ưu để chạy các tính toán dài và phức tạp một cách hiệu quả. Thứ hai, việc phát triển các thủ tục cần thiết để thực hiện một nút phức tạp hoặc phân tích phần tử hữu hạn sẽ là một nhiệm vụ tốn nhiều thời gian và trong hầu hết trường hợp chỉ tái tạo chức năng sẵn có trong các công cụ khác được liệt kê dưới đây:

- Mathematica [42]. Trong [36] các kết quả mô phỏng Mathematica cho một hệ dầm điện dung công xôn được so sánh với các kết quả từ một vài công cụ khác.
- Matlab (được tích hợp với Maple) [43]. Ví dụ trong [44], các mô phỏng Matlab được đưa ra cho thấy các xấp xỉ tốt với nhiều loại tham số cho các thành phần hệ vi chất lỏng.

B. Các công cụ mới được phát triển cho các phạm vi năng lượng đặc biệt

Các phiên bản giá thấp, dễ sử dụng của các công cụ này (như SPICE, ANSYS) luôn sẵn có. Các hiện tượng từ các phạm vi năng lượng khác có thể được mô hình bằng cách biến đổi phạm vi.

- SPICE (mạch tương tự) [13]. SPICE là chuẩn trên thực tế cho các bộ mô phỏng mạch tương tự. Nó cũng được dùng để hỗ trợ mô phỏng các tranzito và các thành phần khác của hệ thống số. SPICE thực thi các phương pháp số cho phân tích nút. Một số tác giả đã dùng SPICE để mô phỏng ứng xử MEMS trong các miền năng lượng khác. Ví dụ, trong [35], phương trình chuyển động của lò xo giảm chấn dùng để tính toán điện áp kéo được biến đổi thành miền điện và thu được độ chính xác mô phỏng hợp lý. Trong [45], ứng xử nhiệt ở trạng thái ổn định với các cảm biến tốc độ luồng được mô phỏng bằng cách chia thiết bị được mô hình thành "các viên gạch" ba chiều, mô hình mỗi viên gạch thành một tập các điện trở nhiệt và biến đổi cấu trúc thu được và các phương trình đối lưu thành các đương lượng điện.
- APLAC [22]. Bộ mô phỏng tín hiệu hỗn hợp và tín hiệu tương tự hướng đối tượng này kết hợp các chương trình cho phép mô hình thống kê sự thay đổi quá trình.
- VHDL-AMS [14, 26, 27]. Ngôn ngữ VHDL-AMS được thiết kế để hỗ trợ mô phỏng tín hiệu số, tương tự và tín hiệu hỗn hợp thực tế hỗ trợ mô phỏng bằng các phương trình vi phân toàn phần và đại số tổng quát. Như vậy, mô phỏng miền năng lượng trộn lẫn có thể được thực hiện. VHDL-AMS thường được xây dựng trên lõi SPICE dùng kỹ thuật phân tích nút. Một số mô hình MEMS VHDL-AMS đã được phát triển (xem ví dụ [46, 47]). Thông tin thêm về VHDL-AMS có trong [48].
- ANSYS [49]. Phiên bản cho sinh viên của phần mềm ANSYS cơ bản luôn sẵn có. ANSYS hiện nay đang là một đối tác của MemsPro (xem bên dưới). ANSYS mô hình cả hiện tượng cơ học lẫn chất lỏng dùng các kỹ thuật FEA. Một tổng quan về sáng kiến ANSYS MEMS có thể tìm thấy trong [50].
- Phần mềm CFD [51]. Phần mềm này, cũng dùng FEA, đã được phát triển để mô hình dòng chất lỏng và hiện tượng nhiệt.

C. Các công cụ phát triển riêng cho MEMS

Các công cụ trong mục này dùng các kỹ thuật đơn giản khác nhau để cung cấp các mô phỏng MEMS chính xác hợp lý không dùng tất cả các tính toán trên của FEA.

- SUGAR [40, 52]. Chương trình miễn phí này được xây dựng trên nền Matlab. Nó dùng phân tích nút và phân tích nút sửa đổi để mô hình các phần tử cơ và điện. Các phần tử cơ phải được xây dựng từ một tập các thành phần cố định bao gồm các dầm và khe hở.
- NODAS phiên bản 1.4 [53]. Công cụ có thể tải được này cung cấp một thư viện các thành phần được tham số hóa (dầm, khối bản, mấu neo, truyền động dạng lược tĩnh điện ngang và dọc và khe hở tĩnh điện ngang) có thể kết nối với nhau để hình thành các hệ thống MEMS. Công cụ này tạo ra các tham số có thể được dùng để thực thi các mô phỏng điện-cơ với bộ mô phỏng Saber [27]. Một ví dụ được thấy trong [54] và mô tả về hoạt động của công cụ (cho phiên bản 1.3) trong [53]. Thông tin thêm xem trong [70].

D. "Siêu công cụ" cố gắng tích hợp hai hoặc nhiều công cụ riêng cho từng miền vào trong một chương trình

- MEMCAD, hiện đang được hỗ trợ bởi hãng Coventor [56]. Sản phẩm này trước đó được hỗ trợ bởi tập đoàn Microcosm. Nó cung cấp khả năng mô phỏng cấp thấp bằng cách tích hợp các công cụ FEA riêng cho từng miền trong một chương trình để hỗ trợ các mô phỏng ở miền năng lượng kép.
- MemsPro [58], hiện đang liên kết với ANSYS. MemsPro là một sản phẩm của công ty Tanner Tool [59], ban đầu được biết đến như là một phiên bản của MAGIC [12], có thể chạy trên các máy PC. Hệ thống MemsPro cung cấp các khả năng thiết kế và mô phỏng tích hợp. Qui trình "các quy tắc thiết kế" có thể được người dùng định nghĩa. Khả năng mô phỏng của SPICE được tích hợp trong bộ công cụ và file dữ liệu dùng với ANSYS cũng có thể được tạo ra. MemsPro không thực sự đúng với việc ghép miền năng lượng tại thời điểm này. Một số thành phần thư viện cũng sẵn có.

E. Các tài nguyên hữu ích khác

- Trang web MEMS Clearinghouse [60]. Trang web này chứa các đường dẫn về các sản phẩm, nhóm nghiên cứu và thông tin hội nghị. Một đường dẫn hữu ích khác là dữ liệu Material Properties, gồm các kết quả từ một số lượng lớn thực nghiệm của nhiều nhóm nghiên cứu khác nhau. Thông tin về bộ cơ sở dữ liệu này có thể được dùng cho các tính toán "phía sau vỏ bọc" ban đầu cho tính khả thi cấu thành.
- Trang web Cronos [62]. Công ty này cung cấp nguyên mẫu và cách chế tạo ở mức sản xuất cho tất cả 3 phương pháp xử lý (gia công micro bề mặt, gia công micro khối và gia công micro tỷ lệ tương quan cao). Nó cũng đang dùng thử để xây dựng một thư viện các thành phần MEMS cho cả gia công micro bề mặt (MUMPS, hoặc Multi-User MEMS Process [63]) và gia công micro khối.

13.5 Mô hình hóa và mô phỏng MEMS (hoặc NEMS); đầu vào, đầu ra và tín hiệu hỗn hợp tương tự và số; các hiện tượng hai và ba thứ nguyên; sự kết hợp và tương tác của các miền và các công nghệ

Trong phần trước, chúng ta đã mô tả ngắn gọn về toàn cảnh hiện nay trong mô hình và mô phỏng trong cả miền số và tương tự. Khi các công cụ số được phát triển nhiều hơn thì trong cả miền số và tương tự, tồn tại các kỹ thuật chuẩn và tốt, các công cụ chuẩn sẵn có và các chương trình đào tạo và chế thử ổn định. Trong lĩnh vực MEMS nhiều phức tạp, điều đó không được đáp ứng. Chúng ta cùng so sánh từng điểm giữa MEMS và các mạch số và tương tự.

- Tồn tại hay không một tập các thành phần cơ bản? Câu trả lời cho câu hỏi này rõ ràng là không. Các nỗ lực khác nhau đã được các nhà nghiên cứu tạo ra để phát triển các tập các khối xây dựng cơ bản, bắt đầu với sự nhận dạng của Petersen về một tập các thành phần cơ bản bao gồm dầm, màng, lỗ, rãnh và khớp nối [64]. Hầu hết các nỗ lực này tập trung vào việc thêm các phần tử cơ học hoặc cơ-điện. Ví dụ trong hệ thống SUGAR, các phần tử cơ bản là dầm và khe hở tĩnh điện. Trong công cụ Carnegie Mellon MEMSYN [65], được hỗ trợ bởi bộ mô phỏng NODAS, các phần tử cơ bản gồm dầm và khe hở, cũng như các khối tấm phẳng, mấu và truyền động dạng lược tĩnh điện (ngang và dọc). Với qui trình MUMPS, đó là Thư viện phần tử cơ điện tử thống nhất (CaMEL) bao gồm cả cơ sở dữ liệu phần tử phi tham số và một thư viện các phần tử tham số (có thể được truy cập thông qua một "bộ tạo" thành phần nhưng không được truy cập trực tiếp bởi người dùng). CaMEL hỗ trợ việc tạo một tập giới hạn các thành phần, gồm các động cơ và bộ cộng hưởng, trong một công nghệ gia công bề mặt cố định. Nhưng điều cốt yếu với MEMS là không một tập hợp các khối xây dựng cơ bản được xác định có thể hỗ trợ tất cả các thiết kế, trong nhiều miền năng lượng và kỹ thuật

khác nhau được các nhà nghiên cứu dùng để xây dựng. Hơn nữa, không có sự nhất trí về cách giới hạn hiệu quả các lựa chọn thiết kế sao cho một tập cơ bản có thể được xác định. Thêm vào đó, bản chất liên tục của hầu hết các ứng xử MEMS biểu thị các loại trở ngại giống nhau như các phần tử tương tự. Tuy nhiên, sự phát triển của các thư viện thành phần cấp cao hơn là một lĩnh vực khá tích cực với ANSYS, CFD, MEMCAD, Carnegie Mellon và MemsPro, tất cả đều cung cấp các thư viện thành phần được thiết kế và thử nghiệm trước cho các hệ thống mà người thiết kế có thể dùng. Hầu hết các thành phần này nằm trong miền cơ-điện. Như đã đề cập ở trên, một vài mô hình VHDL-AMS cũng sẵn có, nhưng chúng sẽ không có giá trị thực tế đến khi các bộ mô phỏng VHDL-AMS đầy đủ và bền vững được phát triển và nhiều kết quả thực nghiệm có thể thu được thông qua các mô hình này.

- Có hay không một tập nhỏ các công nghệ dễ hiểu? Một lần nữa câu trả lời là không. Hầu như tất cả các mạch số và tương tự có bản chất hai chiều, nhưng trong trường hợp của MEMS, nhiều thiết kế có thể phát triển hoặc trong công nghệ "2.5 chiều" có tên là gia công micro hoặc trong công nghệ ba chiều thực sự có tên là gia công micro khối. Vì vậy, trước khi thực hiện bất kì một mô hình hay mô phỏng nào, nhà thiết kế MEMS trước tiên phải chọn không chỉ trong các công nghệ chế tạo rất khác nhau mà trong các qui trình thực tế. Ví dụ, cả hai công cụ Carnegie Mellon và Cronos đều được dựa trên các qui trình được phát triển song song giữa các công cụ. MOSIS cho phép đạt được công nghệ có thể làm được tất cả trừ bước cuối cùng của gia công micro bề mặt, nhưng không một xử lý chính có sẵn đối với cộng đồng các nhà nghiên cứu MEMS nói chung. Với gia công micro bề mặt, thực tế là bước xử lý cuối cùng được thực hiện trong các phòng thí nghiệm nghiên cứu độc lập là một vấn đề đối với việc đưa ra các kết quả thực nghiệm lặp lại. Với các ví dụ gia công micro khối, chế tạo trong các phòng thí nghiệm nghiên cứu nhỏ được ưa chuộng hơn trong môi trường sản xuất do yêu cầu về tiêu chuẩn và sự chuẩn hóa các qui trình sản xuất khối rất khó thực hiện. Thêm vào đó, do phần lớn các công việc MEMS có khối lượng khá nhỏ nên hầu hết các qui trình không đủ khả năng mô tả mô hình cấp thấp một cách hiệu quả. Trong hoàn cảnh như vậy, khó có thể có các mô tả qui trình hợp lý để xây dựng các mô hình bền vững.
- Có hay không một cơ sở hạ tầng đào tạo phát triển và các điều kiện chế thử thuận lợi? Một lần nữa câu trả lời là không. Đặc biệt, các khóa học mở đầu về MEMS thường thích nhấn mạch các kỹ thuật chế tạo hơn mô hình hóa và mô phỏng. [66] có mô tả một bộ các môđun giảng dạy cho một khóa MEMS nhấn mạnh thiết kế và mô phỏng tích hợp. Tuy nhiên, khóa học này yêu cầu sử dụng các thiết bị được chế tạo trước cho các kết quả thiết kế và mô phỏng hợp lý, hơn là đòi hỏi các sinh viên hoàn thành chuỗi thiết kế - mô phỏng - thử nghiệm - chế tạo hoàn toàn trong ba tháng hoặc một học kỳ. Thêm vào đó, việc cần các khóa thực tập sản xuất tốt làm nó khó có thể cung cấp sự hỗ trợ cần thiết cho đào tạo đa ngành mà MEMS yêu cầu.
- Sự tóm lược và trừu tượng hóa có được sử dụng rộng rãi? Trong những năm 1980, nhiều nhà nghiên cứu tin rằng đa cấp trừu tượng không hữu ích cho các thiết bị MEMS. Tuy nhiên hiện nay, khái niệm "các mô hình macro" cấp trung gian đã nhận được nhiều sự hỗ trợ [57, 70] và việc nhấn mạnh một cách tăng dần đang được áp dụng trên các mô hình macro phát triển cho các thành phần MEMS sẽ là một phần của hệ thống lớn hơn. Thêm vào đó, có một số hệ thống đang phát triển dựa trên các tập thành phần cơ bản. Tuy nhiên, phương pháp phát triển này không được coi là tiêu chuẩn trong hệ lớn hơn bởi vì các tập khả năng cố hữu bên trong MEMS nói chung. Trong hình 13.2(b), chúng ta được thấy một sự phân loại từng phần của MEMS tương ứng với sự phân loại các thiết bị số trong hình 13.2(a). Tại điểm này, có thể thấy rõ về số lượng tối ưu các cấp trừu tượng cho MEMS. Trong hình 13.8, chúng ta đã thử phân loại một số công cụ từ phần 13.4 về mặt khả năng hỗ trợ của chúng cho những cấp khác nhau (do chúng là các bộ mô phỏng nên tất cả đều được hỗ trợ cách nhìn "ứng xử"). MEMCAD cho phép mô phỏng quá trình gia công được hỗ trợ bởi cách nhìn "Vật lý" Chú ý rằng, VHDL-AMS là công cụ duy nhất, bên cạnh Mathematica và Matlab với mục đích thông thường, cung cấp một cái nhìn cấp cao về MEMS.

Công cụ mô phỏng	Các mức hỗ trợ
Mathematica, Matlab	Tất cả
MEMCAD	Thấp
SPICE	Thấp đến trung bình
APLAC	Thấp đến trung bình
ANSYS, CFD	Thấp đến trung bình
SUGAR, NODAS	Thấp đến trung bình
MemsPro	Thấp đến trung bình
VHDL-AMS	Trung bình đến cao

*Do MEMCAD kết hợp các mô phỏng quá trình nên nó hỗ trợ cả quan sát vật lý lẫn quan sát ứng xử. Tất cả các công cụ khác chỉ hỗ trợ quan sát ứng xử

HÌNH 13.8 Các công cụ mô phỏng MEMS sẵn có hiện nay

- Có sẵn hay không các mô hình được phát triển tốt, các công cụ thuần thục và các hệ thống phát triển tích hợp? Trong khi các hệ thống như thế này hiện nay không tồn tại, có thể dự đoán rằng một số ví dụ có thể sẽ có trong vòng mười năm tới [57].

13.6 Một "công thức" mô phỏng MEMS thành công

Một công thức hữu ích mang tính định hướng cho các mô phỏng tương tự có thể tìm thấy trong [67]. Từ đó, chúng ta có thể xây dựng một tập các chỉ dẫn cho mô phỏng MEMS.

1. Hãy chắc chắn rằng bạn có sự truy cập tới các kiến thức chuyên sâu trong phạm vi cần thiết cho tất cả các miền năng lượng quan tâm trước khi nhận dự án.
2. Không bao giờ dùng một bộ mô phỏng trừ khi ta biết trước phạm vi kết quả.
3. Không bao giờ mô phỏng nhiều về hệ thống hơn những gì cần thiết.
4. Luôn dùng các mô hình đơn giản nhất cho công việc của mình.
5. Dùng bộ mô phỏng chính xác như ta có thể làm trong thực nghiệm.
6. Dùng thủ tục riêng cho việc thăm dò không gian thiết kế. Trong hầu hết trường hợp, điều đó có nghĩa là bạn chỉ nên thay đổi một tham số trong một thời điểm.
7. Hiểu bộ mô phỏng mà bạn đang dùng và tất cả các lựa chọn có sẵn.
8. Dùng các bộ nhân đúng cho tất cả các đại lượng.
9. Dùng nghĩa thông thường.
10. So sánh các kết quả của bạn với thực nghiệm và làm cho chúng trở nên sẵn có trong cộng đồng MEMS.
11. Cẩn nhạy với khả năng của các hiệu ứng micro làm cho kết quả không có giá trị.

Điểm cuối cùng là đặc biệt quan trọng. Nhiều hiệu ứng không có tại các kích thước đặc trưng lớn hơn sẽ cần phải được xem xét tại cấp độ micro. Ví dụ ở thang micro, luồng chất lỏng có thể chạy theo nhiều cách đột ngột khác nhau [44]. Rất nhiều hiệu ứng khác khi kích thước đặc trưng giảm xuống cấp độ micro, bao gồm một phân tích tại sao các cơ cấu chấp hành dầm công xôn ngang lại tốt hơn các cơ cấu chấp hành dầm công xôn đứng, được miêu tả trong chương 9 của [68]. Chương 4 và 5 của [68] cũng cung cấp thông tin quan trọng cho mô hình và mô phỏng cấp thấp.

13.7 Kết luận: Sự phát triển tiếp của mô hình hóa và mô phỏng MEMS

Trong 15 năm trước đây, nhiều quá trình phát triển được hình thành nhằm cung cấp cho những nhà thiết kế MEMS các bộ mô phỏng và các công cụ khác nhằm giúp họ có khả năng tạo MEMS một cách hữu ích và rộng khắp như mong đợi trong [64]. Trong khi còn nhiều việc cần phải làm,

tương lai này vẫn sáng sủa cho công nghệ linh hoạt và mạnh mẽ này. Một trong những thách thức chính còn lại trong mô hình hóa và mô phỏng là nhằm hoàn thành sự thiết kế và phát triển của một ngôn ngữ mô tả MEMS cấp cao, song song với việc hỗ trợ các mô hình và bộ mô phỏng nhằm tăng tốc chế thử và nhằm cung cấp một ngôn ngữ thân thiện phổ biến cho các nhà thiết kế. Một trong những ngôn ngữ như thế là VHDL-AMS. Trong [69], người ta đã mô tả điểm mạnh và điểm yếu của VHDL-AMS với tư cách là một công cụ cho phát triển MEMS. Điểm mạnh bao gồm khả năng nắm bắt của ứng xử rời rạc lẫn liên tục, chuyển tiếp uyển chuyển giữa các mức trừu tượng hóa, khả năng vận dụng đồng thời cả các hệ bảo toàn lẫn không bảo toàn và khả năng nạp mã từ các ngôn ngữ khác. Nhược điểm chính bao gồm sự bất lực trong việc thực hiện tính toán biểu trưng, sự giới hạn với các phương trình vi phân thường, ít sự hỗ trợ cho các mô phỏng miền tần số và sự bất lực trong việc chuyển đổi đơn vị tự động. Vẫn còn phải đợi xem liệu VHDL-AMS cuối cùng có được mở rộng để trở nên thích hợp hơn cho việc hỗ trợ lĩnh vực MEMS hay không. Tuy nhiên, gần như VHDL-AMS hay một số ngôn ngữ tương tự sẽ được dùng rộng rãi và sẽ được đánh giá cao trong cộng đồng MEMS.

Tài liệu tham khảo

[1] Kielkowski, R.M., *SPICE: Practical Device Modeling,* McGraw-Hill, 1995.

[2] Leong, S.K., Extracting MOSFET RF SPICE models, http://www.polyfet.com/MIT98.pdf (accessed July 20, 2001).

[3] http://www.mosis.edu (accessed July 20, 2001).

[4] http://cmp.imag.fr (accessed July 20, 2001).

[5] http://www.imec.be/europractice/europractice.html (accessed July 20, 2001).

[6] http://www.vdec.u-tokyo.ac.jp/English (accessed July 20, 2001).

[7] http://www.cmc.ca (accessed July 20, 2001).

[8] Mead, C. and Conway, L., *Introduction to VLSI Systems,* Addison-Wesley, 1980.

[9] Gajski, D. and Thomas, D., Introduction to silicon compilation, in *Silicon Compilation,* D. Gajski, Ed., Addison-Wesley, 1988, 1–48.

[10] Weste, N. and Esraghian, K., *Principles of CMOS VLSI Design: A Systems Perspective,* 2nd ed., Addison-Wesley, 1993.

[11] Foty, D., *MOSFET Modeling with SPICE,* Prentice Hall, 1997.

[12] http://www.research.compaq.com/wrl/projects/magic/magic.html (accessed July 20, 2001).

[13] http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE (accessed July 20, 2001).

[14] Design Automation Standards Committee, IEEE Computer Society, *IEEE VHDL Standard Language Reference Manual (Integrated with VHDL-AMS Changes),* Standard 1076.1, IEEE, 1997.

[15] Ashenden, P., *The Designer's Guide to VHDL, 2nd ed.,* Morgan Kauffman, 2001.

[16] Bhasker, J., *A Verilog HDL Primer,* 2nd ed., Star Galaxy Pub., 1999.

[17] http://www.altera.com (accessed July 20, 2001).

[18] http://www.xilinx.com (accessed July 20, 2001).

[19] Hamblen, J.O. and Furman, M.D., *Rapid Prototyping of Digital Systems, A Tutorial Approach,* Kluwer, 1999.

[20] Uyemura, J.P., *Introduction to VLSI Circuits and Systems,* John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[21] Sobecks, B., Performance Modeling of Analog Circuits via Neural Networks: The Design Process View, Ph.D. Dissertation, University of Cincinnati, 1998.

[22] http://www.aplac.hut.fi (accessed July 20, 2001).

[23] Weiss, R., Homsy, G., and Knight, T., Toward *in vivo* digital circuits, http://www.swiss.ai.mit.edu/~rweiss/bio-programming/dimacs99-evocomp-talk/ (accessed July 20, 2001).

[24] Chang, H., Charbon, E., Choudhury, U., Demir, A., Liu, Felt E., Malavasi, E., Sangiovanni-Vincentelli, A., Charbon, E., and Vassiliou, I., *A Top-down, Constraint-Driven Design Methodology for Analog Integrated Circuits,* Kluwer Academic Publishers, 1996.

[25] Ganesan, S., Synthesis and Rapid Prototyping of Analog and Mixed Signal Systems, Ph.D. Dissertation, University of Cincinnati, 2001.

[26] SEAMS simulator project, University of Cincinnati ECECS Department, Distributed Processing Laboratory, http://www.ececs.uc.edu/~hcarter (accessed July 20, 2001).

[27] http://www.analogy.com/products/Simulation/simulation.htm#Saber (accessed July 20, 2001).

[28] www.design-reuse.com (accessed July 20, 2001).

[29] S. M. Sandler and Analytical Engineering Inc., *The SPICE Handbook of 50 Basic Circuits,* http://dacafe.ibsystems.com/DACafe/EDATools/EDAbooks/SpiceHandBook (accessed July 20, 2001).

[30] Kielkowski, R.M., *Inside Spice,* 2nd ed., McGraw Hill, 1998.

[31] Gibson, D., Hare, A., Beyette, F., Jr., and Purdy, C., Design automation of MEMS systems using behavioral modeling, *Proc. Ninth Great Lakes Symposium on VLSI,* Ann Arbor Mich. (Eds. R.J. Lomax and P. Mazumder), March 1999, pp. 266–269.

[32] http://www.analog.com/industry/iMEMS (accessed July 20, 2001).

[33] http://www-cerma.stanford.edu/CCRMA/Courses/252/sensors/node6.html (accessed July 20, 2001).

[34] Tang, W., Electrostatic Comb Drive for Resonant Sensor and Actuator Applications, Ph.D. Dissertation, UC Berkeley, 1990.

[35] Lo, N.R., Berg, E.C., Quakkelaar, S.R., Simon, J.N., Tachiki, M., Lee, H.-J., and Pister, S.J., Parameterized layout synthesis, extraction, and SPICE simulation for MEMS, *ISCAS 96,* May 1996, pp. 481–484.

[36] Gibson, D., and Purdy, C.N., Extracting behavioral data from physical descriptions of MEMS for simulation, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing 20,* 1999, pp. 227–238.

[37] Hayt, W.H., Jr. and Kemmerly, J.E., *Engineering Circuit Analysis,* 5th ed., McGraw-Hill, 1993, pp. 88–95.

[38] Dewey, A., Hanna, J., Hillman, B., Dussault, H., Fedder, G., Christen, E., Bakalar, K., Carter, H., and Romanowica, B., VHDL-AMS Modeling Considerations and Styles for Composite Systems, Version 2.0, http://www.ee.duke.edu/research/IMPACT/documents/model_g.pdf (accessed July 20, 2001).

[39] McCalla, W.J., *Fundamentals of Computer-Aided Circuit Simulation,* Kluwer Academic, 1988.

[40] Clark, J.V., Zhou, N., and Pister, K.S.J., Modified nodal analysis for MEMS with multi-energy domains, *International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators,* San Diego, CA, March 27–29, 2000, pp. 31–34.

[41] Stasa, F.L., *Applied Finite Element Analysis for Engineers,* Holt, Rinehart and Winston, 1985.

[42] http://www.wolfram.com/products/mathematica (accessed July 20, 2001).

[43] http://www.mathworks.com/products/matlab (accessed July 20, 2001).

[44] Mehta, A., Design and Control Oriented Approach to the Modeling of Microfluidic System Components, M.S. Thesis, University of Cincinnati, 1999.

[45] Swart, N., Nathan, A., Shams, M., and Parameswaran, M., Numerical optimisation of flow-rate microsensors using circuit simulation tools, *Transducers '91,* 1991, pp. 26–29.

[46] http://www.ee.duke.edu/research/IMPACT/vhdl-ams/index.html (accessed July 20, 2001).

[47] Gibson, D., Carter, H., and Purdy, C., The use of hardware description languages in the development of microelectromechanical systems, *International Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing,* 28(2), August 2001, pp. 173–180.

[48] http://www.vhdl-ams.com/ (accessed July 20, 2001).

[49] http://www.ansys.com/action/MEMSinitiative/index.htm (accessed July 20, 2001).

[50] http://www.ansys.com/action/pdf/MEMS_WP.pdf (accessed July 20, 2001).

[51] http://www.cfdrc.com (accessed July 20, 2001).

[52] Pister, K., SUGAR V2.0, http://www-bsac.EECS.Berkeley.edu/~cfm/mainpage.html (accessed July 20, 2001).

[53] http://www.ece.cmu.edu/~mems/projects/memsyn/nodasv1_4/index.shtml (accessed July 20, 2001).

[54] http://www2.ece.cmu.edu/~mems/projects/memsyn/nodasv1_4/tutorial.html (accessed July 20, 2001).

[55] Jing, Q. and Fedder, G.K., NODAS 1.3-nodal design of actuators and sensors, *IEEE/VIUF International Workshop on Bahavioral Modeling and Simulation,* Orlando, Fla., October 27–28, 1998.

[56] http://www.coventor.com/software/coventorware/index.html (accessed July 20, 2001).

[57] Senturia, S.D., Simulation and design of microsystems: a 10-year perspective, *Sensors and Actuators A,* 67, 1998, pp. 1–7.

[58] www.memscap.com/index2.html (accessed July 20, 2001).

[59] http://www.tanner.com/ (accessed July 20, 2001).

[60] http://mems.isi.edu (accessed July 20, 2001).

[61] http://mems.isi.edu/mems/materials/index.html (accessed July 20, 2001).

[62] http://www.memsrus.com (accessed July 20, 2001).

[63] http://www.memsrus.com/cronos/svcsmumps.html (accessed July 20, 2001).

[64] Petersen, K., Silicon as a mechanical material, *IEEE Proceedings,* 70(5), May 1982, pp. 420–457.

[65] http://www.ece.cmu.edu/~mems/projects/memsyn/index.shtml (accessed July 20, 2001).

[66] Beyette, F., Jr. and C.N. Purdy, Teaching modules for a class in mechatronics, *European Workshop on Microelectronics Education (EWME2000),* May 2000.

[67] Allen, P.E. and Holberg, D.R., *CMOS Analog Circuit Design,* Oxford University Press, 1987, pp. 142–144.

[68] Madou, M., *Fundamentals of Microfabrication,* CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.

[69] Gibson, D. and Purdy, C., The strengths and weaknesses of VHDL-AMS as a tool for MEMS development, white paper, 2000, http://www.eecs.uc.edu/~cpurdy/csl.html/pub.html/weakvhdl.pdf (accessed July 20, 2001).

[70] Mukherjee, T. and Fedder, G.K., Hierarchical mixed-domain circuit simulation, synthesis and extraction methodology for MEMS, *Journal of VLSI Signal Processing,* 21, 1999, pp. 233–249.

14

Tổng hợp, chế tạo, phân tích và tối ưu MEMS

14.1 Mở đầu 14-1
14.2 Phân loại và tổng hợp cấu trúc các thiết bị MEMS chuyển động 14-2
14.3 Chế tạo MEMS 14-5
14.4 Cơ sở điện từ và mô hình hóa MEMS 14-7
14.5 Mô hình toán học của MEMS 14-10
14.6 Điều khiển MEMS 14-21
14.7 Kết luận 14-32

Sergey Edward Lyshevski
Purdue University Indianapolis

14.1 Mở đầu

MEMS dựa trên hệ điện từ được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng đo lường và chấp hành. Các thiết bị micro chuyển động tịnh tiến và quay là cần thiết để đưa ra ý tưởng, thiết kế và điều khiển MEMS này. Phần này sẽ giới thiệu một sơ đồ phân loại các hệ điện từ micro dựa trên các đặc tính điện từ để phục vụ cho việc tổng hợp MEMS. Để có được ý tưởng thiết kế tốt lưu ý các vấn đề sau: mô hình hóa, phân tích, mô phỏng, điều khiển, tối ưu và chọn ý tưởng hợp lý. Các sáng kiến được nghiên cứu sẽ sử dụng các khái niệm về phân loại, tổng hợp cấu trúc, thiết kế, phân tích và tối ưu đã được phát triển. Cần phải có các phương pháp tích hợp mới để phân tích, mô hình hóa và thiết kế MEMS. Chương này đưa ra một phương pháp tổng hợp cấu trúc, mô hình hóa, phân tích, tối ưu và điều khiển MEMS.

Các MEMS tích hợp các cấu trúc chuyển động micro và các linh kiện như IC trên một chip đơn hay trên một chip lai. Để chế tạo MEMS, người ta đã thay đổi các công nghệ, kỹ thuật, qui trình và vật liệu chế tạo vi điện tử. Do sử dụng công nghệ CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) để chế tạo các cấu trúc, thiết bị micro và các IC, MEMS đã thúc đẩy ngành vi điện tử.

Một định nghĩa về MEMS [1]:

"MEMS là các thiết bị micro được chế tạo theo khối (như các IC và các cấu trúc micro chuyển động), biến đổi các thông số vật lý thành các tín hiệu điện và ngược lại, ngoài ra các đặc trưng micro của các thành phần, các kiến trúc, các cấu trúc và các tham số cơ và điện là những yếu tố quan trọng đối với thiết kế và hoạt động của chúng."

Phạm vi của MEMS ngày nay đã mở rộng tới các ý tưởng về các mẫu mo hình mới, mô hình hóa toàn bộ hệ thống với độ chính xác cao, phân tích sâu dữ liệu, điều khiển, tối ưu, chế tạo và thực thi. Như vậy, chúng ta định nghĩa MEMS như sau:

MEMS là các hệ thống micro được chế tạo theo khối (như các thiết bị/cấu trúc micro phân tán năng lượng và chuyển động - các mạch dẫn động/đo - các IC điều khiển/xử lý) có khả năng:

1. Biến đổi các kích thích, sự kiện và các tham số vật lý thành các tín hiệu điện và cơ, và ngược lại
2. Đo và chấp hành
3. Điều khiển (thông minh, ra quyết định, tiến hóa, thích nghi, tự tổ chức...), chẩn đoán, xử lý tín hiệu và thu thập dữ liệu

và các đặc tính micro của các thành phần (các cấu trúc, các thiết bị và các hệ thống con) cơ điện tử, điện tử, quang học và sinh học; kiến trúc và nguyên lý hoạt động là cơ sở hoạt động, thiết kế, phân tích và chế tạo chúng.

Việc thiết kế tích hợp, phân tích, tối ưu và tạo mẫu ảo các khả năng thông minh, tự học, thích nghi, ra quyết định và tự tổ chức của hệ thống và MEMS thông minh và hiệu suất cao có thể được chỉ ra, nghiên cứu và giải quyết bằng các lý thuyết cơ điện cao cấp, phần cứng hiện đại, các công nghệ mới lạ và phần mềm chuyên sâu. Nhiều vấn đề trong MEMS có thể được mô tả và giải quyết bằng các kỹ thuật cơ điện tử micro. Cụ thể, cơ điện tử micro giải quyết các vấn đề thông thường và các vấn đề mới nảy sinh trong khoa học, kỹ thuật và công nghệ tích hợp điện-cơ-máy tính. Các đặc tính tích hợp đa ngành được tiếp cận một cách nhanh chóng và cơ điện tử micro diễn ra.

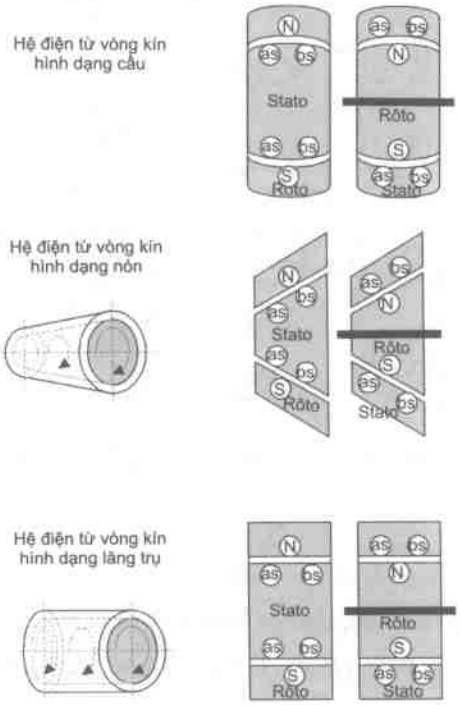
Các công cụ thiết kế có trợ giúp của máy tính được sử dụng để hỗ trợ phân tích, mô phỏng, thiết kế, tối ưu hóa và chế tạo MEMS. Nhiều nỗ lực đã được triển khai nhằm đạt được đặc trưng động và trạng thái ổn định riêng của MEMS để đáp ứng các yêu cầu và tiêu chuẩn đặt ra. Hiện nay, MEMS được thiết kế, tối ưu và phân tích bằng các phần mềm sẵn có dựa trên phân tích trạng thái ổn định và tuyến tính. Tuy nhiên, việc mô hình hóa một cách chi tiết các hệ điện tử và các hệ cơ phi tuyến cần được thực hiện để thiết kế các MEMS hiệu quả cao. Do vậy các nghiên cứu cần được tập trung vào mô hình toán học có độ chính xác cao, phân tích sâu dữ liệu và mô phỏng phi tuyến, cũng như điều khiển (thiết kế các thuật toán điều khiển để đạt được khả năng mong muốn). Các khái niệm, các công cụ và các biểu đồ của việc tổng hợp, mô hình hóa, phân tích, mô phỏng, tối ưu được được ghi lại để đảm bảo một giải pháp hiệu quả về giá thành và có thể được dùng để tạo mẫu nhanh cho MEMS mới, hiệu quả cao. Việc giải quyết phần lớn các vấn đề phân tích và thiết kế phi tuyến cho các thiết bị chuyển động micro dùng các phương pháp truyền thống là rất khó và gần như là không khả thi. Cần phải có các khái niệm, phương pháp và công cụ mới hỗ trợ đầy đủ việc phân tích, mô hình hóa, mô phỏng, điều khiển, thiết kế và tối ưu hóa. Các công nghệ chế tạo được dùng trong MEMS đã được phát triển [2,3] và các công nghệ gia công micro được miêu tả trong chương này. Chương này cũng giải quyết một số vấn đề tồn tại của MEMS dựa trên hệ điện từ.

14.2 Phân loại và tổng hợp cấu trúc các thiết bị MEMS chuyển động

Để thiết kế MEMS, nhà thiết kế phải đưa ra các thiết bị micro chuyển động, các thiết bị micro phân tán năng lượng, các IC micro dẫn động/đo và điều khiển/xử lý. Một quy trình thiết kế các thiết bị micro chuyển động là:

- Xác định nghĩa ứng dụng và các yêu cầu của môi trường
- Xác định các thông số kỹ thuật,
- Đưa ra các thiết bị và cấu trúc micro chuyển động và phân tán năng lượng, các IC micro dẫn động/đo và điều khiển/xử lý,
- Xây dựng qui trình chế tạo dùng các công nghệ gia công micro và CMOS,
- Ước lượng: điện từ, chuyển đổi năng lượng, cơ học và cỡ/kích thước,
- Thực hiện thiết kế điện từ, cơ học, âm học và nhiệt động lực học với việc phân tích khả năng và dự đoán kết quả,
- Kiểm tra, hiệu chỉnh và cải tiến thiết kế với các mục tiêu và đối tượng cơ bản nhằm tối ưu hoạt động

Phần này sẽ trình bày việc thiết kế và tối ưu các thiết bị micro chuyển động. Quy trình trên được minh họa bằng việc xét các máy dạng không khe đồng bộ vĩnh cửu hai pha như thấy trên hình 14.1. Hệ thống điện từ này là *kín* (endless) và các hình dạng khác nhau có thể được dùng như thấy trên hình 14.1. Ngược lại, các máy micro đồng bộ tịnh tiến (tuyến tính) là hệ thống điện từ *hở* (open-ended). Các tài liệu [1, 4, 5] đã đưa ra cách phân loại các MEMS chuyển động; tuy nhiên, việc phân tích toàn diện về cả số lượng và chất lượng vẫn cần phải được nghiên cứu.



HÌNH 14.1 Máy đồng bộ nam châm vĩnh cửu với các hình dạng khác nhau

Các hệ thống điện từ chuyển động với kiểu và hình dạng khác nhau phải được tích hợp khi tổng hợp, phân tích, thiết kế và tối ưu hóa. Các cấu trúc micro có thể có hình tấm, cầu, xuyến, nón, trụ hoặc không đối xứng. Có thể phân loại được MEMS dựa vào kiểu hệ thống điện từ và hình dạng khác nhau này. Cách này rất tiện lợi trong việc nghiên cứu sự tồn tại của MEMS cũng như khi tổng hợp một số lượng vô hạn thiết bị micro chuyển động mới. Cụ thể, có thể tổng hợp MEMS hiệu quả cao bằng cách sử dụng kiểu (*kín*, *hở* và *tích hợp*) và hình dạng có thể.

Các máy (thiết bị) điện từ micro cơ bản được xem xét dưới khía cạnh dòng điện một chiều và xoay chiều, không đồng bộ và đồng bộ, quay và tịnh tiến (tuyến tính). Phân loại các thiết bị micro dùng một tập phân loại cơ bản:

$$Y = \{y : y \in Y\}$$

Các thiết bị micro chuyển động được phân loại theo hình dạng (tấm P, cầu S, xuyến T, nón N, trụ C, hay không đối xứng A) và theo kiểu hệ thống điện từ (*kín* E, *hở* O, hay *tích hợp* I). Phân loại thiết bị micro trên bảng 14.1 được chia thành ba hàng và sáu cột và gồm 18 loại, mỗi loại được nhận dạng bởi cặp chữ cái như (E, P) hay (O, C).

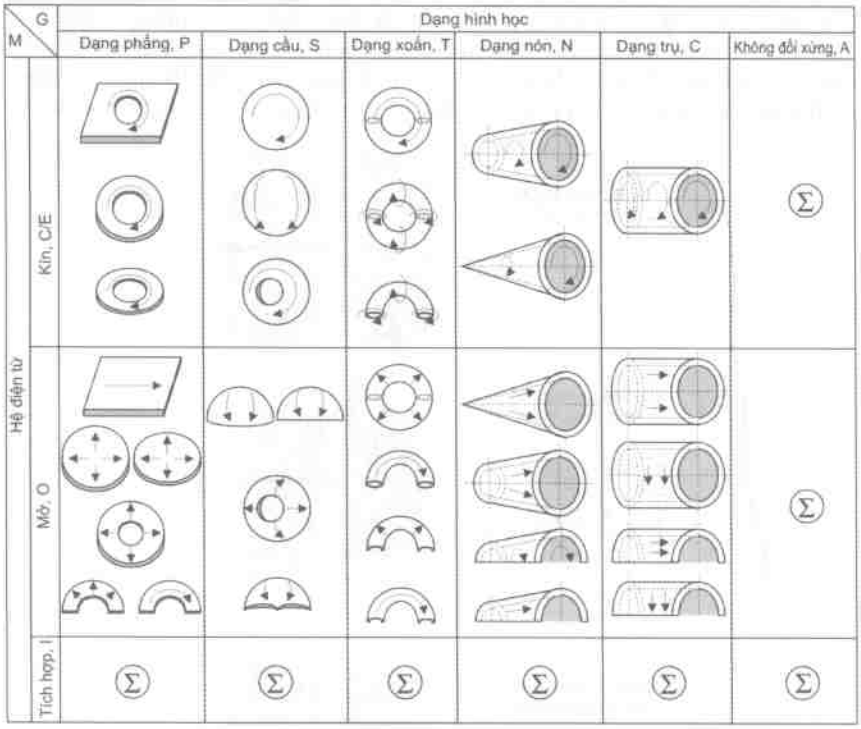
Trong mỗi cặp chữ cái, chữ cái thứ nhất được chọn từ tập các chữ cái chỉ kiểu hệ điện từ:

$$M = \{E, O, I\}$$

Chữ cái thứ hai là chữ cái được chọn từ tập các chữ chỉ hình dạng:

$$G = \{P, S, T, N, C, A\}$$

BẢNG 14.1 Phân loại các thiết bị điện tử micro sử dụng phân loại kiểu hệ điện tử - hình dạng



Tức là, với các thiết bị điện tử micro, tập hợp kiểu-hình dạng của hệ thống điện tử là:

$$M \times G = \{(E,F),(E,S),(E,T),....,(I,N),(I,C),(I,A)\}$$

Do vậy có:

$$M \times G = \{(m,g) : m \in M \text{ và } g \in G\}$$

Có thể áp dụng cách phân loại khác. Ví dụ, phân loại các thiết bị một pha, hai pha, ba pha và nhiều pha theo một tập phân loại pha:

$$H = \{h : h \in H\}$$

Như vậy, $Y \times M \times G \times H = \{(y,m,g,h) : y \in Y, m \in M, g \in G \text{ và } h \in H\}$

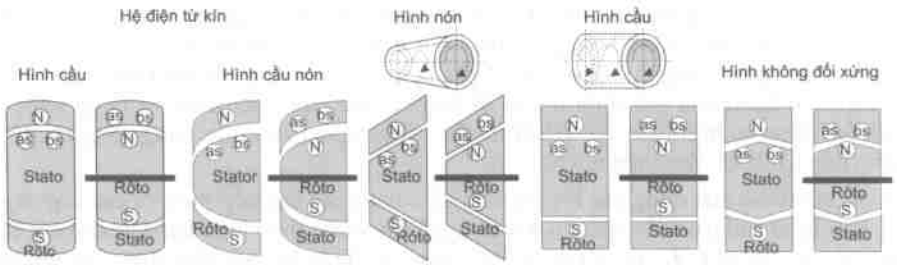
Có thể phân loại dễ dàng theo hình học topo (xuyên tâm hoặc trục), hình dạng của các cực nam châm vĩnh cửu (dải, cung, đĩa, chữ nhật, tam giác, hay các hình dạng khác), các đặc tính nam châm vĩnh cửu (đường cong khử từ *BH*, tích số năng lượng, vòng trễ), sự đảo mạch, phân bố *sức điện động emf*, làm mát, công suất, mômen, cỡ, đặc tính mômen-tốc độ, cũng như các đặc tính khác của thiết bị micro.

Tức là, có thể phân loại các thiết bị điện tử micro mới bằng một tập *N*-đặc tính:

{loại thiết bị micro, hệ thống điện tử, hình dạng, tôpô, pha, độ vênh, liên kết, làm mát}.

Dùng tập phân loại như trên bảng 14.1 có thể phân loại các thiết bị micro chuyển động hiện nay cũng như tổng hợp các thiết bị micro mới và hiệu quả cao. Ví dụ, hình 14.2 minh họa các dạng hình cầu, hình nón và hình trụ của một thiết bị micro đồng bộ nam châm vĩnh cửu 2 pha.

Phần này cho thấy các kết quả mới trong tổng hợp cấu trúc có thể được dùng để tối ưu hóa khả năng thực hiện của thiết bị micro. Hình 14.2 mô tả các hình dạng thiết bị micro dạng nón (hiện nay) và nón-cầu (sắp tới). Dùng hình nón-cầu mới khác rất nhiều so với hình dạng nón hiện nay, nó làm tăng chiều dài hoạt động L và đường kính trung bình D_r.



HÌNH 14.2 Hình dạng thiết bị micro đồng bộ nam châm vĩnh cửu hai pha

Với các thiết bị micro dòng xuyên tâm, mômen điện từ T_e tỷ lệ với đường kính rotor bình phương và chiều dài trục. Cụ thể là $T_e = k_T D_r^2 L_r$, trong đó k_T là hằng số. Từ mối liên hệ trên, hiển nhiên các động cơ nón-cầu micro có mômen điện từ cao hơn so với thiết kế truyền thống. Thêm vào đó, việc cải tiến hệ thống làm mát, giảm các thành phần mômen không mong muốn, cũng như việc tăng khả năng chịu đựng và bền vững góp phần tăng tính khả thi của giải pháp. Như vậy, dùng mô hình phân loại trên, người ta có thể tạo ra các thiết bị micro mới với khả năng tốt hơn.

14.3 Chế tạo MEMS

MEMS tích hợp cơ học và vi điện tử đòi hỏi các công nghệ chế tạo hiệu quả cao, chi phí thấp, cho phép gia công các thiết bị và cấu trúc micro 3D. Gia công micro là một công nghệ chế tạo chủ yếu cho các cấu trúc, thiết bị micro và MEMS. Có thể chia các công nghệ chế tạo MEMS từ thành ba loại: gia công khối, gia công bề mặt và kỹ thuật LIGA (gần LIGA) [1-3].

Gia công khối

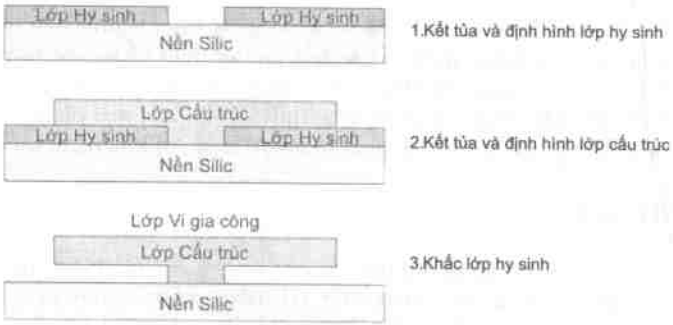
Gia công micro khối và bề mặt đều dựa trên công nghệ CMOS cải tiến và đặc biệt là quy trình gia công micro. Gia công micro khối silic dùng kỹ thuật khắc khắc ăn mòn ướt và khô với các mặt nạ và các lớp dừng khắc khắc ăn mòn để tạo các cấu trúc micro từ nền silic. Các cấu trúc micro được xử lý bằng cách khắc khắc ăn mòn các vùng của nền silic nhằm tạo ra các cấu trúc micro 3D mong muốn. Trong gia công khối micro, người ta thường sử dụng rộng rãi các quá trình khắc khắc ăn mòn ướt *đẳng hướng* và *dị hướng* cũng như các kỹ thuật khắc khắc ăn mòn tập trung. Các cấu trúc micro được hình thành bằng cách khắc khắc ăn mòn tấm (wafer) silic nhằm tạo ra cấu trúc 3D mong muốn. Gia công khối với cấu trúc tinh thể và các quá trình khắc khắc ăn mòn phụ thuộc vào chất kích thích, khi được tổ hợp bằng liên kết tấm với tấm, tạo ra các cấu trúc micro 3D phức tạp với hình dạng mong muốn. Thông qua gia công khối micro, có thể chế tạo các cấu trúc micro bằng cách khắc ăn mòn sâu vào trong tấm silic. Có một số cách để khắc ăn mòn tấm silic. Khắc ăn mòn *dị hướng* là khắc ăn mòn các hướng cấu trúc tinh thể với tốc độ khác nhau. Thông qua khắc ăn mòn *dị hướng*, người ta chế tạo các cấu trúc 3D (nón, chóp, lập phương và các kênh vào tấm silic). Ngược lại, khắc ăn mòn *đẳng hướng* khắc ăn mòn tất cả các hướng trong tấm silic với tốc độ giống nhau (hoặc gần giống nhau) và như vậy, có thể tạo ra các cấu trúc bán cầu và trụ. Khắc ăn mòn ion phản ứng sâu dùng plasma để khắc ăn mòn các cấu trúc vách phẳng (lập phương, chữ nhật, tam giác, v.v...).

Gia công micro bề mặt

Gia công micro bề mặt đã trở thành công nghệ chế tạo chính trong những năm gần đây do có thể chế tạo được các cấu trúc và thiết bị micro 3D phức tạp. Gia công micro bề mặt với silic đơn tinh thể, đa tinh thể, silic nitrit, silic oxit và silic đioxit (là các vật liệu cấu trúc và hy sinh được kết tủa hoặc khắc ăn mòn) được sử dụng rộng rãi để chế tạo các cấu trúc và thiết bị micro trên bề mặt tấm silic. Công nghệ với năng suất cao, chi phí thấp này được tích hợp với các quá trình chế tạo IC đảm bảo tính tương thích cần thiết giữa cấu trúc - IC. Các công nghệ kết tủa và tạo cấu trúc màng mỏng được dùng để sản xuất các cấu trúc và thiết bị micro phức tạp trên bề mặt tấm silic (gia công

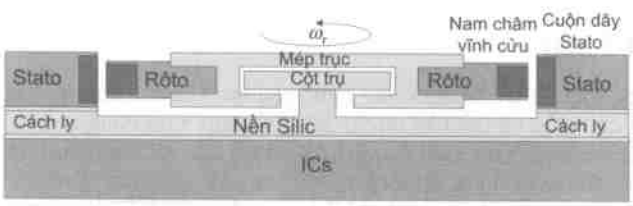
micro bề mặt silic) hoặc trên bề mặt các nền khác. Công nghệ gia công micro bề mặt cho phép tạo các cấu trúc như là các lớp màng mỏng. Công nghệ này đảm bảo chế tạo thiết bị micro 3D với độ chính xác cao và gia công micro bề mặt có thể được gọi là qui trình màng mỏng. Mỗi màng mỏng thường được giới hạn độ dày tới 5μm có thể gia công các cấu trúc và thiết bị micro dạng phẳng hiệu quả cao. Ưu điểm của gia công micro bề mặt là việc dùng qui trình và công nghệ gia công CMOS chuẩn và sự tương thích với IC. Bởi vậy, công nghệ này được dùng rộng rãi để sản xuất các cơ cấu chấp hành và cảm biến micro.

Gia công micro bề mặt dùng các lớp hy sinh để duy trì các lớp tiếp theo và các lớp này sẽ được xóa bỏ để làm lộ ra cấu trúc cần chế tạo. Công nghệ này được thực hiện lần đầu cho các IC và ứng dụng cho chế tạo các cấu trúc micro trong thập niên 80. Trên bề mặt tấm silic, các lớp mỏng của vật liệu cấu trúc và hy sinh được kết tủa để tạo cấu trúc. Sau đó, vật liệu hy sinh được loại bỏ và tạo ra một cấu trúc hay thiết bị micro cơ học. Hình 14.3 minh họa qui trình cơ bản của công nghệ chế tạo gia công micro bề mặt.



HÌNH 14.3 Gia công micro bề mặt

Thông thường, lớp hy sinh là silic đioxit (SiO_2), silic đioxit được kích thích bằng photpho, hoặc silic nitorit (Si_3N_4). Các lớp cấu trúc sau đó được hình thành với silic đa tinh thể và loại bỏ lớp hy sinh. Cụ thể, sau quá trình gia công cấu trúc và thiết bị bề mặt, tấm silic có thể là khối được khắc ăn mòn ướt để hình thành các lỗ phía dưới tạo bề mặt với dải chuyển động rộng hơn cho thiết bị. Có thể khắc ăn mòn ướt bằng cách dùng axit flohyđric và flohyđric đệm, kali hiđroxit, etilen-điamin-pyrocatecol, têtrametylam-monium hiđroxit, hoặc natri hiđroxit. Công nghệ gia công micro bề mặt đã được dùng để chế tạo các máy micro dạng quay [6]. Ví dụ, có thể dùng silic đa tinh thể được kích thích mạnh bằng photpho để chế tạo các roto và stato, và dùng nitorit silic như là vật liệu cấu trúc để cách điện. Tiết diện ngang của động cơ micro được gia công trên nền silic với stato silic đa tinh thể với cuộn dây kết tủa, rôto silic đa tinh thể với nam châm được kết tủa và ổ trục được minh họa trên hình 14.4. Động cơ micro được điều khiển bằng cách dùng các IC dẫn động/đo và điều khiển/xử lý tín hiệu. Để chế tạo động cơ micro và IC trên một chip, một mặt hoặc hai mặt (có hiệu quả hơn hẳn), người ta dùng các công nghệ và qui trình chế tạo tương tự và các vấn đề về tính tương thích sẽ được xác định và giải quyết. Các qui trình gia công bề mặt được tích hợp với công nghệ CMOS (chẳng hạn, các vật liệu tương tự, quang khắc, khắc ăn mòn và các kỹ thuật khác). Để chế tạo MEMS tích hợp, có thể áp dụng các kỹ thuật CMOS và kỹ thuật gia công micro [1-3].



HÌNH 14.4 Sơ đồ mặt cắt của động cơ micro nam châm vĩnh cửu không chổi quét trên IC

Các công nghệ LIGA và giống LIGA

Cần phát triển các kỹ thuật chế tạo cho phép tạo các cấu trúc micro có tỷ lệ tương quan cao. Qui trình LIGA (Lithography-Galvanoforming-Molding) thích hợp cho việc tạo các cấu trúc micro 3D với chiều cao cỡ centimét có tỷ lệ tương quan (chiều sâu đối với kích thước bên) lớn hơn 100 [2, 7, 8]. Công nghệ LIGA dựa trên quang khắc dùng tia X đảm bảo bước sóng ngắn hơn (nhỏ hơn 10 A do đó các hiệu ứng nhiễu xạ là không đáng kể) và đạt độ sâu tập trung lớn hơn so với quang khắc thông thường. Khả năng chế tạo các cấu trúc và thiết bị micro cỡ centimét là đặc biệt quan trọng đối với các ứng dụng của cơ cấu chấp hành và truyền động vì các đặc tính kỹ thuật liên quan đến lực và mômen được tạo ra bởi các thiết bị này, và do mật độ lực và mômen bị giới hạn nên nhà thiết kế phải đối mặt với nhu cầu tăng kích thước cơ cấu chấp hành.

14.4 Cơ sở điện từ và mô hình hóa MEMS

Phân loại, tổng hợp cấu trúc và tối ưu MEMS đã được trình bày trong phần 14.2. Phân loại và tối ưu dựa trên xem xét và tổng hợp hệ thống điện từ, phân tích lực *từ động* (magnetomotive), thiết kế hình học và tôpô của MEMS và tối ưu các đại lượng khác. Người ta phân loại các thiết bị micro dạng chuyển động tịnh tiến và quay (hướng tâm hoặc quanh trục) bằng cách dùng các hệ thống *kín*, *hở* và *tích hợp*.

Mục tiêu của chúng ta là tiếp cận và giải quyết ở phạm vi rộng các vấn đề thực tế trong thiết kế phi tuyến, mô hình hóa, phân tích, điều khiển và tối ưu các cấu trúc và thiết bị micro chuyển động với mạch dẫn động/đo được điều khiển bởi các IC để MEMS đạt hiệu quả cao. Khi nghiên cứu MEMS, tầm quan trọng được đặt vào:

- Thiết kế MEMS hiệu quả cao bằng việc sáng chế thiết bị micro chuyển động mới và các thiết bị micro năng lượng phát xạ, mạch dẫn động/đo micro và các IC điều khiển/xử lý tín hiệu,
- Tối ưu và phân tích các thiết bị micro chuyển động quay và tịnh tiến,
- Phát triển các IC xử lý tín hiệu và điều khiển hiệu quả cao cho các thiết bị micro,
- Xây dựng mô hình toán học ở mức độ đơn giản và những giả định trong miền thời gian,
- Thiết kế các thuật toán điều khiển bền vững tối ưu,
- Thiết kế các hệ thông minh thông qua sự tự thích nghi, tự tổ chức, học tiến hóa, ra quyết định và trí thông minh,
- Phát triển phần mềm và phần cứng tiên tiến để đạt được cấp độ thông minh, tích hợp, hiệu quả cao nhất.

Trong phần này, mục tiêu của chúng ta là mô hình hóa, phân tích và mô phỏng phi tuyến. Để đạt được mục tiêu này, chúng ta áp dụng mô hình tổng hợp MEMS, phát triển các mô hình toán học phi tuyến để mô hình hóa động lực học cơ điện từ phức tạp, thực hiện tối ưu hóa, thiết kế các hệ điều khiển vòng kín và tiến hành phân tích dữ liệu tập trung trong miền thời gian.

Để mô hình hóa các thiết bị micro chuyển động điện từ, người ta thường dùng thế năng vectơ từ $\vec{A}$ và thế năng vô hướng điện V để giải các phương trình vi phân đạo hàm riêng:

$$-\nabla^2 \vec{A} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\sigma \nabla V$$

dùng phân tích phần tử hữu hạn. Ở đây, μ, σ và ε lần lượt là độ từ thẩm, độ dẫn và hằng số điện môi.

Tuy nhiên, để thiết kế MEMS điện từ cũng như để thực hiện phân tích và tối ưu hóa cơ điện từ, cần giải các phương trình vi phân trong miền thời gian. Thực tế, các hiện tượng cơ bản không thể mô hình, phân tích và đánh giá một cách đầy đủ bằng cách dùng phân tích phần tử hữu hạn cho các mô hình và lời giải ở trạng thái ổn định. Do vậy cần phát triển các công cụ mô hình hóa cho phép

tăng thêm tính điện từ và cơ học phi tuyến trong một lõi mô hình cơ điện tử đơn để đạt được phân tích có độ trung thực cao với đánh giá khả năng và dự báo kết quả.

Hoạt động của MEMS dựa trên các nguyên lý điện từ. Một mô hình điện từ đầy đủ gồm năm vectơ điện từ trường. Cụ thể là ba vectơ điện trường và hai vectơ từ trường. Các vectơ điện trường là cường độ điện trường $\vec{E}$, cảm ứng điện $\vec{D}$ và mật độ dòng điện $\vec{J}$. Các vectơ từ trường là cường độ từ trường $\vec{H}$ và mật độ từ trường $\vec{B}$. Các phương trình sai phân cho thiết bị micro chuyển động cơ điện được lấy từ các phương trình Maxwell, phương trình cơ bản và cơ học cổ điển.

Các phương trình vi phân đạo hàm riêng Maxwell trong miền $\vec{E}$ và $\vec{H}$ ở dạng điểm là:

$$\nabla \times \vec{E}(x,y,z,t) = -\mu \frac{\partial \vec{H}(x,y,z,t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H}(x,y,z,t) = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}(x,y,z,t)}{\partial t} + \vec{J}(x,y,z,t) = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}(x,y,z,t)}{\partial t} + \sigma \vec{E}(x,y,z,t)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(x,y,z,t) = \frac{\rho_v(x,y,z,t)}{\varepsilon}$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(x,y,z,t) = 0$$

trong đó ε là hằng số điện môi, μ là độ từ thẩm, σ là độ dẫn và ρ_v là mật độ điện tích khối.

Các phương trình cơ bản thu được từ hằng số điện môi ε, tenxơ từ thẩm μ và độ dẫn σ. Cụ thể:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \text{ hoặc } \vec{D} = \varepsilon \vec{E} + \vec{P}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \text{ hoặc } \vec{B} = \mu(\vec{H} + \vec{M})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ hoặc } \vec{J} = \rho_v \vec{v}$$

Phương trình Maxwell có thể giải được bằng cách dùng các điều kiện ràng buộc trên các vectơ trường. Trong môi trường hai vùng, chúng ta có:

$$\vec{a}_N \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0, \quad \vec{a}_N \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s, \quad \vec{a}_N \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s, \quad \vec{a}_N \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0$$

trong đó, $\vec{J}_s$ là vectơ mật độ dòng điện bề mặt, $\vec{a}_N$ là vectơ chuẩn pháp của bề mặt tại ranh giới từ vùng 2 vào trong vùng 1 và ρ_s là mật độ điện tích bề mặt.

Các quan hệ cơ bản mô tả phương tiện có thể được tích hợp với các phương trình Maxwell liên quan với các trường nhằm tìm ra hai phương trình vi phân đạo hàm riêng. Dùng mật độ điện trường $\vec{E}$ và từ trường $\vec{H}$ để mô hình các trường điện từ trong MEMS, ta có:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{H}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

Cặp phương trình sóng đồng nhất và không đồng nhất dưới đây:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \nabla\left(\frac{\rho_v}{\varepsilon}\right)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

tương đương với bốn phương trình Maxwell và quan hệ cơ bản. Với một số trường hợp, hai phương trình này có thể giải độc lập. Cần phải nhấn mạnh rằng không thể dùng các điều kiện ràng buộc chỉ cho $\vec{E}$ và $\vec{H}$ và như vậy, vấn đề này luôn không đơn giản với hai vectơ điện từ trường. Bởi thế, cần dùng thế năng vô hướng điện và vectơ từ. Gọi thế năng vectơ từ là $\vec{A}$ và thế năng vô hướng điện là V, ta có:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{và} \quad \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V$$

Diện từ trường là vi phân của thế năng. Dùng phương trình Lorentz:

$$\nabla \cdot \vec{A} = -\frac{\partial V}{\partial t}$$

phương trình sóng thế năng vectơ không đồng nhất cần được giải là:

$$-\nabla^2 \vec{A} + \mu\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\sigma \nabla V$$

Để mô hình các thiết bị micro chuyển động các phương trình cơ học và định luật thứ hai của Newton thường được áp dụng để thu được phương trình chuyển động.

Dùng mật độ điện tích khối ρ_v, tìm được lực Lorentz liên hệ các hiện tượng điện từ và cơ học:

$$\vec{F} = \rho_v(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = \rho_v \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B}$$

Có thể tìm lực điện từ bằng cách dùng phương pháp tenxơ ứng suất Maxwell. Khái niệm này dùng một tích phân khối để thu được năng lượng tích trữ và xác định ứng suất tại tất cả các điểm của một bề mặt ranh giới. Tổng các ứng suất cục bộ sẽ cho tổng lực. Cụ thể, ứng suất điện từ là:

$$\vec{F} = \int_v (\rho_v \vec{E} + \vec{J} \times \vec{B}) dv = \frac{1}{\mu} \oint_s \vec{T}_{\alpha\beta} \cdot \vec{ds}$$

Tenxơ năng lượng ứng suất điện từ (tenxơ ứng suất Maxwell thứ 2) là:

$$\vec{T}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 0 & \vec{E}_x & \vec{E}_y & \vec{E}_z \\ -\vec{E}_x & 0 & \vec{B}_z & -\vec{B}_y \\ -\vec{E}_y & -\vec{B}_z & 0 & \vec{B}_x \\ -\vec{E}_z & \vec{B}_y & -\vec{B}_x & 0 \end{bmatrix}$$

Nói chung, mômen điện từ trong cấu trúc micro chuyển động tìm được bằng cách dùng điện từ trường. Cụ thể, tenxơ ứng suất điện từ được cho như sau:

$$T_s = T_s^E + T_s^M$$

$$= \begin{bmatrix} E_1 D_1 - \frac{1}{2} E_j D_j & E_1 D_2 & E_1 D_3 \\ E_2 D_1 & E_2 D_2 - \frac{1}{2} E_j D_j & E_2 D_3 \\ E_3 D_1 & E_3 D_2 & E_3 D_3 - \frac{1}{2} E_j D_j \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} B_1 H_1 - \frac{1}{2} B_j H_j & B_1 H_2 & B_1 H_3 \\ B_2 H_1 & B_2 H_2 - \frac{1}{2} B_j H_j & B_2 H_3 \\ B_3 H_1 & B_3 H_2 & B_3 H_3 - \frac{1}{2} B_j H_j \end{bmatrix}$$

Với các hệ tọa độ Đề các, trụ và cầu dùng để phát triển mô hình toán học, chúng ta có:

$$E_x = E_1, E_y = E_2, E_z = E_3, \quad D_x = D_1, D_y = D_2, D_z = D_3,$$
$$H_x = H_1, H_y = H_2, H_z = H_3, \quad B_x = B_1, B_y = H_2, B_z = B_3$$
$$E_r = E_1, E_\theta = E_2, E_z = E_3, \quad D_r = D_1, \quad D_\theta = D_2, \quad D_z = D_3,$$
$$H_r = H_1, H_\theta = H_2, H_z = H_3, \quad B_r = B_1, \quad B_\theta = B_2, B_z = B_3$$
$$E_\rho = E_1, \quad E_\theta = E_2, \quad E_\theta = E_3, \quad D_\rho = D_1, D_\theta = D_2, D_\phi = D_3,$$
$$H_\rho = H_1, \quad H_\theta = H_2, \quad H_\phi = H_3, \quad B_\rho = B_1, \quad B_\theta = B_2, \quad B_\phi = B_3$$

Có thể dùng môi trường Matlab để giải các phương trình Maxwell.

Trong các thiết bị micro chuyển động, nhà thiết kế phân tích các cơ cấu sinh ra mômen và lực.

Định luật 2 Newton với các chuyển động quay và tịnh tiến là:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}\sum \vec{T}_\Sigma, \qquad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$
$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}\sum \vec{F}_\Sigma, \qquad \frac{dx}{dt} = v$$

trong đó ω_r và θ_r lần lượt là vận tốc và dịch chuyển góc, v và x lần lượt là vận tốc và dịch chuyển dài, $\sum \vec{T}_\Sigma$ là mômen tổng, $\sum \vec{F}_\Sigma$ là tổng lực, J là mômen quán tính tương đương và m là khối lượng.

14.5 Mô hình toán học của MEMS

Vấn đề mô hình và điều khiển MEMS rất quan trọng trong nhiều ứng dụng. Một mô hình toán học là một mô tả toán học (dạng hàm số hoặc phương trình) của MEMS tích hợp các thiết bị micro chuyển động (các cơ cấu chấp hành và cảm biến micro), thiết bị micro phân tán năng lượng, mạch dẫn động/đo micro, các IC điều khiển/xử lý tín hiệu. Mục đích của việc xây dựng mô hình là để hiểu và lĩnh hội về hiện tượng cũng như để phân tích hành vi gần nhau.

Để mô hình MEMS, các phương pháp phân tích hiện đại được dùng để giải chính xác các hiện tượng, hiệu ứng và quá trình vật lý có độ phức tạp cao. Sự cần thiết của phân tích chính xác cao, thuật toán có hiệu năng tính toán và việc giảm thời gian mô phỏng đã tăng lên đáng kể với các thiết bị micro phức tạp, khó khăn trong việc ứng dụng các phương trình Maxwell để giải quyết vấn đề. Như đã minh họa trong phần trước, các hiện tượng điện từ và biến đổi năng lượng phi tuyến được mô tả bởi các phương trình vi phân đạo hàm riêng. Việc dùng các phương trình Maxwell đáp ứng nhu cầu cho khả năng phân tích dữ liệu tập trung với sự dự báo kết quả trong toàn bộ miền mô phỏng cũng như đặc biệt cần thiết cho mô phỏng và phân tích MEMS hiệu quả cao. Ngoài ra, người ta còn sử dụng các phương pháp mô phỏng và phân tích khác. Có thể dùng mô hình toán học rút gọn được mô tả bằng các phương trình vi phân thường. Qui trình mô hình hóa toán học và xây dựng mô hình như sau.

Bước đầu tiên là xây dựng công thức cho vấn đề cần mô hình:

- Khảo sát và phân tích MEM nhờ khái niệm đa cấp, phát triển các cặp hệ con vào-ra nhiều biến, chẳng hạn, các cấu trúc micro chuyển động (cơ cấu chấp hành và cảm biến micro), các thiết bị micro phân tán năng lượng, vi mạch, các IC, bộ điều khiển, các thiết bị vào/ra;
- Hiểu và nhận thức cấu trúc MEMS và cấu hình hệ thống;
- Thu thập dữ liệu và thông tin;

- Thiết lập các cặp biến vào-ra, nhận dạng điều khiển, nhiễu, đầu ra, tham chiếu (lệnh), trạng thái độc lập và phụ thuộc và các biến hoạt động cũng như các sự kiện;
- Tạo các giải thiết chính xác, đơn giản vấn đề để làm cho MEMS cần nghiên cứu trở nên dễ kiểm soát về mặt toán học (là sự lý tưởng hóa hiện tượng vật lý, các mô hình toán học không bao giờ chính xác tuyệt đối và việc các mô hình toán học đơn giản hóa thực tế cho phép nhà thiết kế thực hiện một sự phân tích triệt để và tạo ra các dự đoán chính xác cho hoạt động của hệ thống)

Bước thứ 2 là đưa ra các phương trình liên hệ các biến và sự kiện:

- Định nghĩa và chỉ ra các định luật cơ bản (Kirchhoff, Lagrange, Maxwell, Newton và các định luật khác) được dùng để xây dựng các phương trình chuyển động. Các mô hình toán học của các hệ con micro điện từ, điện và cơ học có thể tìm được và gia cố để tạo ra các mô hình toán học của MEMS thông qua các biến và sự kiện đã định nghĩa.
- Đưa ra các mô hình toán học

Bước thứ 3 là mô phỏng, phân tích và phê chuẩn:

- Nhận dạng các phương pháp giải tích và số được dùng để phân tích và mô phỏng;
- Giải bằng phương pháp giải tích và/hoặc số các phương trình toán học (ví dụ, các phương trình vi phân hoặc sai phân, các phương trình phi tuyến,...)
- Dùng các biến (đo được hoặc quan sát được) và sự kiện thông tin, tổng hợp các hàm tương hợp và không tương hợp;
- Kiểm tra các kết quả thông qua việc so sánh toàn diện giữa lời giải (các tập ánh xạ đầu vào trạng thái đầu ra sự kiện của mô hình) với các dữ liệu thực nghiệm (các tập ánh xạ đầu vào trạng thái đầu ra sự kiện thực nghiệm);
- Tính toán các hàm tương hợp và không tương hợp;
- Nghiên cứu dữ liệu giải tích và số dựa vào dữ liệu và dấu hiệu thực nghiệm mới.

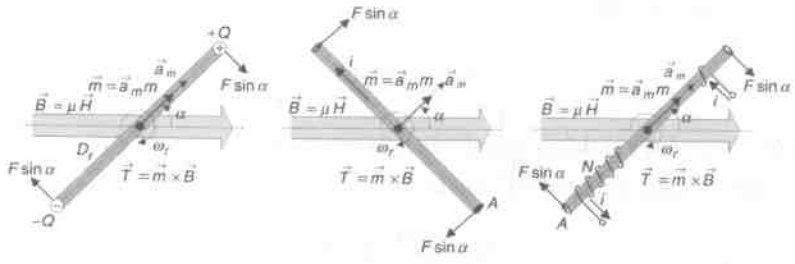
Nếu không đảm bảo sự tương hợp với độ chính xác cho trước, cần phải cải tiến mô hình toán học của MEMS và nhà thiết kế phải bắt đầu lại chu trình.

Lý thuyết điện từ và cơ học cổ điển hình thành cơ sở cho sự phát triển mô hình toán học cho MEMS. Người ta đã chỉ ra rằng MEMS có thể được mô hình bằng các phương trình Maxwell và các phương trình chuyển động *cơ học xoắn*. Tuy nhiên, từ mô hình, phân tích, thiết kế, điều khiển và mô phỏng, có thể hình thành và sử dụng các mô hình toán học được cho bởi các phương trình vi phân thường.

Xem xét cấu trúc micro dạng quay (nam châm thỏi, cuộn dòng và solenoid micro) trong một từ trường không đổi, xem hình 14.5. Cấu trúc micro sẽ quay nếu có mômen điện từ. Cần nghiên cứu điện từ trường để tìm mômen điện từ.

Mômen hướng thẳng mômen từ $\vec{m}$ với $\vec{B}$ và:

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B}$$



HÌNH 14.5 Quay theo chiều kim đồng hồ của cấu trúc micro chuyển động

Cho một cấu trúc micro có đường kính ngoài D_r, cường độ từ Q. Khi đó, mômen từ là $m = QD_r$ và lực được tính là $F = QB$.

Mômen điện từ là:

$$T = 2F\frac{1}{2}D_r \sin\alpha = QD_rB\sin\alpha = mB\sin\alpha$$

Dùng vectơ đơn vị theo hướng mômen từ $\vec{a}_m$, ta thu được:

$$\vec{T} = \vec{m}\times\vec{B} = \vec{a}_m m\times\vec{B} = QD_r\vec{a}_m\times\vec{B}$$

Với một cuộn dòng có diện tích A, ta tính được mômen:

$$\vec{T} = \vec{m}\times\vec{B} = \vec{a}_m m\times\vec{B} = iA\vec{a}_m\times\vec{B}$$

Với một solenoid có N vòng, ta thu được:

$$\vec{T} = \vec{m}\times\vec{B} = \vec{a}_m m\times\vec{B} = iAN\vec{a}_m\times\vec{B}$$

Từ mômen điện từ tìm được, dùng định luật thứ hai của Newton, ta có:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}\sum\vec{T}_\Sigma = \frac{1}{J}(\vec{T}-\vec{T}_L),\quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

trong đó $\vec{T}_L$ là mômen tải.

Có thể dùng các lực *điện động* (emf) và *từ động* (mmf) khi xây dựng mô hình.

Ta có:

$$\text{emf} = \oint_l \vec{E}\cdot d\vec{l} = \oint_l (\vec{v}\times\vec{B})\cdot d\vec{l} - \int_s \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}d\vec{s}$$

và:

$$\text{mmf} = \int_l \vec{H}\cdot d\vec{l} = \oint_s \vec{J}\cdot d\vec{s} + \oint_s \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}d\vec{s}$$

Với thiết kế sơ bộ, khi cần độ chính xác vừa đủ, có thể dùng các định luật Faraday hoặc Lenz cho lực điện động dưới dạng thay đổi từ trường theo thời gian. Cụ thể:

$$\text{emf} = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial t} - \frac{\partial\psi}{\partial\theta_r}\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{\partial\psi}{\partial t} - \frac{\partial\psi}{\partial\theta_r}\omega_r$$

trong đó $\frac{\partial\psi}{\partial t}$ là số hạng biến đổi.

Liên hệ thông lượng tổng là:

$$\psi = \frac{1}{4}\pi N_s\Phi_p$$

trong đó N_S là số vòng và Φ_P là thông lượng trên một cực.

Với các máy micro dạng tôpô hướng tâm, ta có:

$$\Phi_p = \frac{\mu i N_s}{P^2 g_e}R_{\text{inst}}L$$

trong đó i là dòng điện trên cuộn dây micro pha (cung cấp bởi IC), R_{inst} là bán kính stato bên trong, L là độ tự cảm, P là số cực và g_e là khe hở tương đương bao gồm khe hở không khí và độ dày hướng tâm của nam châm vĩnh cửu.

Gọi số vòng trên một pha là N_S, lực điện động là:

$$\text{mmf} = \frac{iN_S}{P}\cos P\theta_r$$

Biểu thức đơn giản hóa cho lực điện động của máy micro không chổi than dạng tôpô hướng tâm là:

$$T = \frac{1}{2}PB_{ag}i_sN_SL_rD_r$$

trong đó B_{ag} là mật độ thông lượng khe hở không khí, $B_{ag} = (\mu iN_S/2Pg_e)\cos P\theta_r$, i_s là dòng điện tổng, L_r là chiều dài hoạt động (chiều dài trục roto) và D_r là đường kính roto phía ngoài.

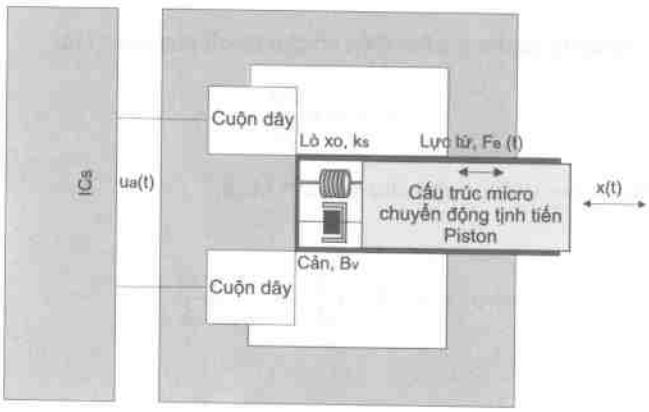
Các máy micro không chổi quét dạng tôpô hướng trục có thể được thiết kế và chế tạo. Mômen điện từ được cho như sau:

$$T = k_{ax}B_{ag}i_sN_sD_a^2$$

trong đó k_{ax} là hệ số phi tuyến tìm được theo chiều dài dây dẫn hoạt động và nam châm vĩnh cửu màng mỏng và D_a là đường kính tương đương là một hàm số của cuộn dây và tôpô nam châm vĩnh cửu.

Ví dụ 14.5.1: Mô hình toán học của bộ chuyển đổi micro tịnh tiến

Hình 14.6 minh họa một cấu trúc micro dịch chuyển đơn giản với một bộ phận đứng yên và một cấu trúc micro có khả năng chuyển động tịnh tiến (piston) được gia công bằng qui trình xử lý mẻ liên tục. Cuộn dây được "in" bằng công nghệ gia công micro/CMOS.



HÌNH 14.6 Sơ đồ chuyển đổi micro với cấu trúc micro chuyển động tịnh tiến

Áp dụng định luật hai Newton để nghiên cứu động lực học. Định luật Newton phát biểu rằng gia tốc của một vật tỷ lệ với tổng lực. Vectơ tổng của tất cả các lực được tìm như sau:

$$F(t) = m\frac{d^2x}{dt^2} + B_v\frac{dx}{dt} + (k_{s1}x + k_{s2}x^2) + F_e(t)$$

trong đó x là dịch chuyển của cấu trúc micro tịnh tiến (piston), m là khối lượng của piston dịch chuyển, B_v là hệ số ma sát nhớt, k_{s1} và k_{s2} là độ cứng (lò xo có thể làm từ silic đa tinh thể) và $F_e(t)$ là lực từ được tìm từ đồng năng lượng W_c, $F_e(i,x) = \dfrac{\partial W_c(i,x)}{\partial x}$

Các lực căng và phục hồi không tỷ lệ trực tiếp với dịch chuyển và các lực này khác nhau ở cả hai phía của vị trí cân bằng. Lực căng/phục hồi của lò xo silic đa tinh thể được biểu diễn như sau $(k_{s1}x + k_{s2}x^2)$.

Giả sử rằng hệ từ là tuyến tính, đồng năng lượng được biểu diễn như sau:

$$W_c(i,x) = \frac{1}{2}L(x)i^2$$

Tiếp theo:

$$F_e(i,x) = \frac{1}{2}i^2\frac{dL(x)}{dx}$$

Độ tự cảm tìm được như sau:

$$L(x) = \frac{N^2}{\Re_f + \Re_g} = \frac{N^2\mu_f\mu_0 A_f A_g}{A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)}$$

trong đó $\Re_f$ và $\Re_g$ lần lượt là từ trở của vật liệu sắt từ và khe hở không khí, A_f và A_g là các tiết diện ngang liên kết và l_f và $(x + 2d)$ lần lượt là các chiều dài của vật liệu từ và khe hở không khí.

Như vậy:

$$\frac{dL}{dx} = -\frac{2N^2\mu_f^2\mu_0 A_f^2 A_g}{[A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)]^2}$$

Dùng định luật Kirchhoff, phương trình điện áp cho mạch pha micro là:

$$u_a = ri + \frac{d\psi}{dt}$$

trong đó liên kết thông lượng ψ được cho như sau $\psi = L(x)i$.

Ta thu được:

$$u_a = ri + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$$

và như vậy:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{r}{L(x)}i + \frac{2N^2\mu_f^2\mu_0 A_f^2 A_g}{L(x)[A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)]^2}iv + \frac{1}{L(x)}u_a$$

Thêm phương trình sau vào phương trình vi phân:

$$F(t) = m\frac{d^2x}{dt^2} + B_v\frac{dx}{dt} + (k_{s1}x + k_{s2}x^2) + F_e(t)$$

tìm được ba phương trình vi phân phi tuyến cho thiết bị micro chuyển động tịnh tiến:

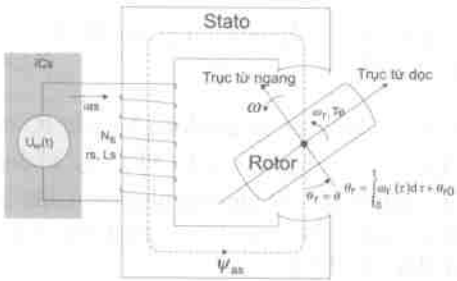
$$\frac{di}{dt} = -\frac{r[A_g l_f + 2A_f \mu_f (x+2d)]}{N^2 \mu_f \mu_0 A_f A_g} i + \frac{2\mu_f A_f}{A_g l_f + 2A_f \mu_f (x+2d)} iv + \frac{A_g l_f + 2A_f \mu_f (x+2d)}{N^2 \mu_f \mu_0 A_f A_g} u_a$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{N^2 \mu_f^2 \mu_0 A_f^2 A_g}{m[A_g l_f + 2A_f \mu_f (x+2d)]^2} i^2 - \frac{1}{m}(k_{s1} x + k_{s2} x^2) - \frac{B_v}{m} v$$

Ví dụ 14.5.2: Mô hình toán học của động cơ micro từ trở đồng bộ sơ cấp

Xem xét một động cơ micro từ trở một pha được gia công trực tiếp bằng các công nghệ CMOS, LIGA, giống như LIGA truyền thống. Vật liệu sắt từ được dùng để gia công các stato và roto cỡ micro và có thể kết tủa cuộn dây trên stato, xem hình 14.7.



HÌNH 14.7 Động cơ từ trở đơn pha có cấu trúc micro (động cơ micro) chuyển động quay

Các trục từ *ngang* và *dọc* được cố định với động cơ micro khi nó quay với vận tốc góc ω_r. Các trục từ này quay với vận tốc góc ω. Giả sử điều kiện đầu bằng không. Như vậy, dịch chuyển góc của roto θ_r và dịch chuyển góc của trục từ *vuông góc* θ bằng nhau và:

$$\theta_r = \theta = \int_0^t \omega_r(\tau) d\tau = \int_0^t \omega(\tau) d\tau$$

Từ trở do từ hóa $\Re_m$ là một hàm của dịch chuyển góc roto θ_r. Với số vòng dây N_S, từ trở do từ hóa là:

$$L_m(\theta_r) = \frac{N_S^2}{\Re_m(\theta_r)}$$

Từ trở do từ hóa thay đổi hai lần mỗi vòng quay roto, có giá trị nhỏ nhất và lớn nhất, và:

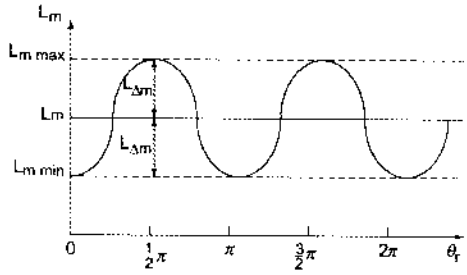
$$L_{m\min} = \frac{N_S^2}{\Re_{m\max}(\theta_r)}\bigg|_{\theta_r = 0, \pi, 2\pi \ldots}, \quad L_{m\max} = \frac{N_S^2}{\Re_{m\min}(\theta_r)}\bigg|_{\theta_r = \frac{1}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi \ldots}$$

Giả sử sự thay đổi này là một hàm hình sin của dịch chuyển góc roto. Khi đó:

$$L_m(\theta_r) = \overline{L}_m - L_{am} \cos 2\theta_r$$

trong đó $\overline{L}_m$ là giá trị trung bình của từ trở từ hóa và là một nửa biên độ biến thiên hình sin của từ trở từ hóa.

Đồ thị của $L_m(\theta_r)$ như trên hình 14.8.



HÌNH 14.8 Từ trở do từ hóa $L_m(\theta_r)$

Mômen điện từ trong các động cơ từ trở một pha được tính nhờ biểu thức của đồng năng lượng $W_c(i_{as}, \theta_r)$. Từ $W_c(i_{as},\theta_r) = \frac{1}{2}\left(L_{ls} + \overline{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2\theta_r\right)i_{as}^2$, ta tìm được:

$$T_c = \frac{\partial W_c(i_{as},\theta_r)}{\partial \theta_r} = \frac{\partial[\frac{1}{2} i_{as}^2 (L_{ls} + \overline{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2\theta_r)]}{\partial \theta_r} = L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r$$

Mômen điện từ không có ở các động cơ từ trở đồng bộ nếu IC nuôi dòng hoặc điện áp một chiều trong cuộn dây của động cơ vì $T_e = L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r$. Như vậy, không thể áp dụng các thuật toán điều khiển truyền thống và cần nghiên cứu các phương pháp mới dựa trên các đặc tính điện từ. Giá trị trung bình của T_e không bằng không nếu dòng điện là hàm của θ_r. Để minh họa, chúng ta giả sử dòng điện dưới đây trong cuộn dây của động cơ:

$$i_{as} = i_M \,\mathrm{Re}(\sqrt{\sin 2\theta_r})$$

Khi đó, mômen điện từ là:

$$T_e = L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r = L_{\Delta m} i_M^2 (\mathrm{Re}\sqrt{\sin 2\theta_r})^2 \sin 2\theta_r \neq 0$$

và:

$$T_{eav} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r d\theta_r = \frac{1}{4} L_{\Delta m} i_M^2$$

Có thể tìm mô hình toán học của động cơ từ trở một pha cỡ micro bằng cách dùng định luật Kirchhoff và định luật thứ hai của Newton:

$$u_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \quad \text{(phương trình mạch)}$$

$$T_e - B_m\omega_r - T_L = J\frac{d^2\theta_r}{dt^2} \quad \text{(phương trình } \textit{cơ học xoắn}\text{)}$$

Từ $\psi_{as} = \left(L_{ls} + \overline{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2\theta_r\right)i_{as}$, ta thu được ba phương trình vi phân phi tuyến bậc nhất. Cụ thể như sau:

$$\frac{di_{as}}{dt} = \frac{r_s}{L_{ls} + \overline{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2\theta_r} i_{as} - \frac{2L_{\Delta m}}{L_{ls} + \overline{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2\theta_r} i_{as}\omega_r \sin 2\theta_r + \frac{1}{L_{ls} + \overline{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2\theta_r} u_{as}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r - B_m\omega_r - T_L)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

Ví dụ 14.5.3: Mô hình toán học của các động cơ micro bước nam châm vĩnh cửu hai pha

Với các động cơ micro bước nam châm vĩnh cửu hai pha, ta có:

$$u_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt}$$

$$u_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\psi_{bs}}{dt}$$

trong đó các liên kết từ thông là $\psi_{as} = L_{asas} i_{as} + L_{asbs} i_{bs} + \psi_{asm}$ và $\psi_{bs} = L_{bsas} i_{as} + L_{bsbs} i_{bs} + \psi_{bsm}$.

Ở đây, u_{as} và u_{bs} là các điện áp pha trong các cuộn dây stato *as* và *bs*; i_{as} và i_{bs} là các các dòng điện trong các cuộn dây stato; ψ_{as} và ψ_{bs} là các liên kết từ thông stato, r_s là điện trở của cuộn dây stato; L_{asas}, L_{asbs}, L_{bsas}, L_{bsbs} là các từ trở chung.

Có thể tìm vận tốc và dịch chuyển góc điện bằng cách dùng số răng roto *RT*:

$$\omega_r = RT\omega_{rm}$$

$$\theta_r = RT\theta_{rm}$$

trong đó ω_r và ω_{rm} lần lượt là các vận tốc góc điện và roto, và θ_r và θ_{rm} lần lượt là các dịch chuyển góc điện và roto.

Các liên kết thông lượng là các hàm của số răng roto *RT* và biên độ của các liên kết thông lượng sinh ra bởi nam châm vĩnh cửu ψ_m. Cụ thể:

$$\psi_{asm} = \psi_m \cos(RT\theta_{rm}) \text{ và } \psi_{bsm} = \psi_m \sin(RT\theta_{rm})$$

Độ tự cảm của cuộn dây stato là:

$$L_{ss} = L_{asas} = L_{bsbs} = L_{ls} + \overline{L}_m$$

Các cuộn dây stato dịch chuyển một góc 90 độ điện. Như vậy, các từ trở chung giữa các cuộn dây stato bằng không, $L_{asbs} = L_{bsas} = 0$.

Khi đó, ta có:

$$\psi_{as} = L_{ss} i_{as} + \psi_m \cos(RT\theta_{rm}) \text{ và } \psi_{bs} = L_{ss} i_{bs} + \psi_m \sin(RT\theta_{rm})$$

Lưu ý đến các phương trình mạch, ta có:

$$u_{as} = r_s i_{as} + \frac{d[L_{ss} i_{as} + \psi_m \cos(RT\theta_{rm})}{dt} = r_s i_{as} + L_{ss}\frac{di_{as}}{dt} - RT\psi_m \omega_{rm} \sin(RT\theta_{rm})$$

$$u_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\left[L_{ss} i_{bs} + \psi_m \sin(RT\theta_{rm})\right]}{dt} = r_s i_{bs} + L_{ss}\frac{di_{bs}}{dt} + RT\psi_m \omega_{rm} \cos(RT\theta_{rm})$$

Do đó, thu được:

$$\frac{di_{as}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}} i_{as} + \frac{RT\psi_m}{L_{ss}} \omega_{rm} \sin(RT\theta_{rm}) + \frac{1}{L_{ss}} u_{as}$$

$$\frac{di_{bs}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}} i_{bs} - \frac{RT\psi_m}{L_{ss}} \omega_{rm} \cos(RT\theta_{rm}) + \frac{1}{L_{ss}} u_{bs}$$

Dùng định luật hai Newton, ta có:

$$\frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B_m\omega_{rm} - T_L)$$
$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_{rm}$$

Có thể tìm được biểu thức cho mômen điện từ cho các động cơ micro bước nam châm vĩnh cửu. Lưu ý mối liên hệ đồng năng lượng:

$$W_c = \frac{1}{2}(L_{ss}i_{as}^2 + L_{ss}i_{bs}^2) + \psi_m i_{as}\cos(RT\theta_{rm}) + \psi_m i_{bs}\sin(RT\theta_{rm}) + W_{PM}$$

ta tìm được mômen điện từ:

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta_{rm}} = -RT\psi_m[i_{as}\sin(RT\theta_{rm}) - i_{bs}\cos(RT\theta_{rm})]$$

Do đó, sự phát triển tức thời của các dòng điện pha i_{as} và i_{bs}, vận tốc góc roto ω_{rm} và dịch chuyển góc roto θ_{rm} được lấy từ các phương trình vi phân dưới đây:

$$\frac{di_{as}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}}i_{as} + \frac{RT\psi_m}{L_{ss}}\omega_{rm}\sin(RT\theta_{rm}) + \frac{1}{L_{ss}}u_{as}$$
$$\frac{di_{bs}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}}i_{bs} - \frac{RT\psi_m}{L_{ss}}\omega_{rm}\cos(RT\theta_{rm}) + \frac{1}{L_{ss}}u_{bs}$$
$$\frac{d\omega_{rm}}{dt} = -\frac{RT\psi_m}{J}[i_{as}\sin(RT\theta_{rm}) - i_{bs}\cos(RT\theta_{rm})] - \frac{B_m}{J}\omega_{rm} - \frac{1}{J}T_L$$
$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_{rm}$$

Bốn phương trình vi phân phi tuyến này được viết lại dưới dạng không gian trạng thái như sau:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{as}}{dt} \\ \frac{di_{bs}}{dt} \\ \frac{d\omega_{rm}}{dt} \\ \frac{d\theta_{rm}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_{ss}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_s}{L_{ss}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{B_m}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ \omega_{rm} \\ \theta_{rm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{RT\psi_m}{L_{ss}}\omega_{rm}\sin(RT\theta_{rm}) \\ -\frac{RT\psi_m}{L_{ss}}\omega_{rm}\cos(RT\theta_{rm}) \\ -\frac{RT\psi_m}{J}[i_{as}\sin(RT\theta_{rm}) - i_{bs}\cos(RT\theta_{rm})] \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ss}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{ss}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_L$$

Việc phân tích phương trình mômen:

$$T_e = -RT\psi_m[i_{as}\sin(RT\theta_{rm}) - i_{bs}\cos(RT\theta_{rm})]$$

dẫn đến kết luận biểu thức cho một tập hình sin dòng điện hai pha cân bằng là:

$$i_{as} = -\sqrt{2} i_M \sin(RT\theta_{rm}) \text{ và } i_{bs} = \sqrt{2} i_M \cos(RT\theta_{rm})$$

Nếu những dòng điện pha này được nuôi, mômen điện từ là một hàm của biên độ dòng điện i_M và:

$$T_e = \sqrt{2} RT \psi_m i_M$$

Các dòng điện pha cần được nuôi là các hàm của dịch chuyển góc roto. Giả sử rằng các từ trở là nhỏ không đáng kể, ta có các điện áp pha dưới đây:

$$u_{as} = -\sqrt{2} u_M \sin(RT\theta_{rm}) \text{ và } u_{bs} = \sqrt{2} u_M \cos(RT\theta_{rm})$$

Ví dụ 14.5.4: Mô hình toán học của động cơ micro đồng bộ nam châm vĩnh cửu hai pha

Xét động cơ micro đồng bộ nam châm vĩnh cửu hai pha. Dùng định luật điện áp Kirchhoff, ta có:

$$u_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt}$$

$$u_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\psi_{bs}}{dt}$$

trong đó các liên kết thông lượng là: $\psi_{as} = L_{asas} i_{as} + L_{asbs} i_{bs} + \psi_{asm}$ và $\psi_{bs} = L_{bsas} i_{as} + L_{bsbs} i_{bs} + \psi_{bsm}$.

Các liên kết thông lượng là các hàm tuần hoàn của dịch chuyển góc (vị trí roto), và đặt:

$$\psi_{asm} = \psi_m \sin\theta_{rm} \text{ và } \psi_{bsm} = -\psi_m \cos\theta_{rm}$$

Độ tự cảm của các vòng dây stato được tính như sau:

$$L_{ss} = L_{asas} = L_{bsbs} = L_{ls} + \overline{L}_m$$

Các cuộn dây stato dịch chuyển 90 độ điện và do đó, các từ trở chung giữa các cuộn dây stato là $L_{asbs} = L_{bsas} = 0$. Như vậy, ta có:

$$\psi_{as} = L_{ss} i_{as} + \psi_m \sin\theta_{rm} \text{ và } \psi_{bs} = L_{ss} i_{bs} - \psi_m \cos\theta_{rm}$$

Do đó, ta tìm được:

$$u_{as} = r_s i_{as} + \frac{d(L_{ss} i_{as} + \psi_m \sin\theta_{rm})}{dt} = r_s i_{as} + L_{ss} \frac{di_{as}}{dt} + \psi_m \omega_{rm} \cos\theta_{rm}$$

$$u_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d(L_{ss} i_{bs} - \psi_m \cos\theta_{rm})}{dt} = r_s i_{bs} + L_{ss} \frac{di_{bs}}{dt} - \psi_m \omega_{rm} \sin\theta_{rm}$$

Dùng định luật hai Newton:

$$T_e - B_m \omega_{rm} - T_L = J \frac{d^2\theta_{rm}}{dt^2}$$

ta có:

$$\frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B_m \omega_{rm} - T_L)$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_{rm}$$

Chúng ta có thể thu được biểu thức mômen điện từ cho động cơ nam châm vĩnh cửu bằng cách dùng đồng năng lượng:

$$W_c = \frac{1}{2}(L_{ss} i_{as}^2 + L_{ss} i_{bs}^2) + \psi_m i_{as} \sin\theta_{rm} - \psi_m i_{bs} \cos\theta_{rm} + W_{PM}$$

Khi đó, ta có:

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta_{rm}} = \frac{P\psi_{rm}}{2}(i_{as} \cos\theta_{rm} + i_{bs} \sin\theta_{rm})$$

Thêm các quá trình chuyển tiếp mạch vào động lực học *cơ học xoắn*, ta tìm được mô hình toán học của động cơ micro nam châm vĩnh cửu hai pha ở dạng sau:

$$\frac{di_{as}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}} i_{as} - \frac{\psi_m}{L_{ss}} \omega_{rm} \cos\theta_{rm} + \frac{1}{L_{ss}} u_{as}$$

$$\frac{di_{bs}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}} i_{bs} + \frac{\psi_m}{L_{ss}} \omega_{rm} \sin\theta_{rm} + \frac{1}{L_{ss}} u_{bs}$$

$$\frac{d\omega_{rm}}{dt} = \frac{P\psi_m}{2J}(i_{as} \cos\theta_{rm} + i_{bs} \sin\theta_{rm}) - \frac{B_m}{J}\omega_{rm} - \frac{1}{J}T_L$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_{rm}$$

Với các động cơ hai pha (giả sử các phân bố cuộn dây hình sin và các dạng sóng mmf hình sin), mômen điện từ được biểu diễn như sau:

$$T_e = \frac{P\psi_m}{2}(i_{as} \cos\theta_{rm} + i_{bs} \sin\theta_{rm})$$

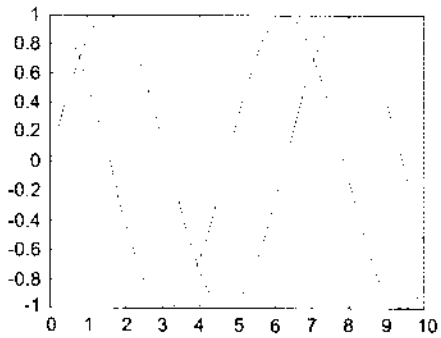
Như vậy, để đảm bảo trạng thái cân bằng, cần:

$$i_{as} = \sqrt{2} i_M \cos\theta_{rm} \text{ và } i_{bs} = \sqrt{2} i_M \sin\theta_{rm}$$

để cực đại mômen điện từ. Tóm lại, ta thu được:

$$T_e = \frac{P\psi_m}{2}(i_{as} \cos\theta_{rm} + i_{bs} \sin\theta_{rm}) = \frac{P\psi_m}{2}\sqrt{2} i_M (\cos^2\theta_{rm} + \sin^2\theta_{rm}) = \frac{P\psi_m}{2} i_M$$

Hình 14.9 mô tả các dạng sóng của mmf khe hở không khí và dòng điện pha.



HÌNH 14.9 Dạng sóng của mmf khe hở không khí và dòng điện pha

14.6 Điều khiển MEMS

Mô hình toán học của MEMS có thể được xây dựng ở các mức độ phức tạp khác nhau. Cần nhấn mạnh là ngoài các mô hình thiết bị micro chuyển động, phải xác định đáp ứng nhanh của IC. Do độ phức tạp của các mô hình IC đầy đủ và sự không thực tế của các phương trình đã xây dựng nên có thể mô hình hóa động học IC bằng phương trình vi phân rút gọn hoặc động học không mô hình. MEMS được mô hình hóa bằng cách dùng các phương trình vi phân tuyến tính và phi tuyến:

$$\dot{x}(t) = Ax + Bu, \quad u_{\min} \le u \le u_{\max}, \quad y = Hx$$
$$\dot{x}(t) = F_z(t, x, r, z) + B_p(t, x, p)u, \quad u_{\min} \le u \le u_{\max} \quad y = H(x)$$

có thể thiết kế các thuật toán khác nhau.

Ở đây, các vectơ trạng thái, điều khiển, đầu ra và tham chiếu (lệnh) được định nghĩa là x, u, y và r; các trạng thái tham số bất định (như các hệ số biến đổi theo thời gian, động học không mô hình, những thay đổi không xác định,...) dùng các vectơ z và p để mô hình hóa.

Các ma trận hệ số là A, B và H. Các trường ánh xạ làm mịn mô hình tuyến tính được định nghĩa là $F_z(\cdot)$, $B_p(\cdot)$ và $H(\cdot)$.

Cần nhấn mạnh rằng tín hiệu điều khiển bị giới hạn. Ví dụ, dùng hệ số sử dụng d_D làm tín hiệu điều khiển, ta có $0 \le d_D \le 1$ hoặc $-1 \le d_D \le 1$. Dùng các IC bốn góc ¼ do khả năng tốt hơn và $0 \le d_D \le 1$. Như vậy, ta có $0 \le u \le 1$. Tuy nhiên, nói chung, $u_{min} \le d_D \le u_{max}$.

Điều khiển tỷ lệ - tích phân - vi phân

Nhiều MEMS có thể được điều khiển bởi các bộ điều khiển tỷ lệ - tích phân - vi phân (PID) cùng với các giới hạn điều khiển, như đã thấy trong [9]:

$$u(t) = \mathbf{sat}_{u_{\min}}^{u_{\max}}\left(e, \int e\,dt, \frac{de}{dt}\right)$$
$$= \mathbf{sat}_{u_{\min}}^{u_{\max}}\left(\sum_{j=0}^{\varsigma} k_{pj} e^{\frac{2j+1}{2\beta+1}} + \sum_{j=0}^{\sigma} k_{ij} \int e^{\frac{2j+1}{2\mu+1}} dt + \sum_{j=0}^{\alpha} k_{dj} \dot{e}^{\frac{2j+1}{2\gamma+1}}\right), \quad u_{\min} \le u \le u_{\max}$$

trong đó k_{pj}, k_{ij} và k_{dj} là các ma trận hệ số khuếch đại phản hồi tỷ lệ, tích phân và vi phân; ς, β, σ, μ, α và γ là các số nguyên không âm.

Trong các bộ điều khiển PID phi tuyến, người ta dùng sai lệch bám. Cụ thể:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Các bộ điều khiển giới hạn tuyến tính có thể được thiết kế trực tiếp. Ví dụ, đặt $\varsigma = \beta = \sigma = \mu = 0$, ta có luật điều khiển PI phi tuyến như sau:

$$u(t) = \mathbf{sat}_{u_{\min}}^{u_{\max}}\left(k_{p0} e(t) + k_{i0} \int e t\,dt\right)$$

Các bộ điều khiển PID có mở rộng phản hồi trạng thái được tổng hợp:

$$u(t) = \mathbf{sat}_{u_{\min}}^{u_{\max}}(e, x)$$
$$= \mathbf{sat}_{u_{\min}}^{u_{\max}}\left(\sum_{j=0}^{\varsigma} k_{pj} e^{\frac{2j+1}{2\beta+1}} + \sum_{j=0}^{\sigma} k_{ij} \int e^{\frac{2j+1}{2\mu+1}} dt + \sum_{j=0}^{\alpha} k_{dj} \dot{e}^{\frac{2j+1}{2\gamma+1}} + G(t) B \frac{\partial V(e,x)}{\partial \begin{bmatrix} e \\ x \end{bmatrix}}\right), \quad u_{\min} \le u \le u_{\max}$$

trong đó $V(e, x)$ là hàm số thỏa mãn các yêu cầu chung cho cặp Lyapunov [9], ví dụ, dùng các điều kiện đủ cho ổn định.

Rõ ràng các kết quả ánh xạ phản hồi phi tuyến và hàm không toàn phương $V(e, x)$ có thể được tổng hợp và sử dụng để nhận được thuật toán điều khiển và các hệ số phản hồi.

Điều khiển bám

Điều khiển bám được thiết kế cho các hệ thống được mô hình hóa bằng các biến trạng thái và động học tham chiếu. Cụ thể, từ:

$$\dot{x}(t) = Ax + Bu, \quad \dot{x}^{ref}(t) = r(t) - y(t) = r(t) - Hx(t)$$

ta tìm được:

$$\dot{x}_\Sigma(t) = A_\Sigma x_\Sigma + B_\Sigma u + N_\Sigma r,\ y = Hx,\ x_\Sigma = \begin{bmatrix} x \\ x^{\text{ref}} \end{bmatrix},\ A_\Sigma = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -H & 0 \end{bmatrix},\ B_\Sigma = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix},\ N_\Sigma = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Từ giá trị nhỏ nhất của phiếm hàm đặc trưng toàn phương:

$$J = \frac{1}{2}\int_0^t (x_\Sigma^{\mathrm{T}} Q x_\Sigma + u^{\mathrm{T}} G u)dt$$

ta tìm được luật điều khiển dựa trên điều kiện cần bậc nhất cho sự tối ưu. Cụ thể, ta có:

$$u = -G^{-1}B_\Sigma^T \frac{\partial V}{\partial x_\Sigma} = -G^{-1}\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}^T \frac{\partial V}{\partial x_\Sigma}$$

Ở đây, Q là ma trận hệ số cố định bán xác định dương, G là ma trận trọng số cố định dương.

Nghiệm của phương trình Hamilton-Jacobi:

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{2}x_\Sigma^T Q x_\Sigma + \left(\frac{\partial V}{\partial x_\Sigma}\right)^T A x_\Sigma - \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V}{\partial x_\Sigma}\right)^T B_\Sigma G^{-1} B_\Sigma^T \frac{\partial V}{\partial x_\Sigma}$$

thỏa mãn bởi hàm hồi tiếp toàn phương $V = \frac{1}{2}x_\Sigma^T K x_\Sigma$. Ở đây, K là ma trận đối xứng, tìm được được tìm bằng cách giải phương trình vi phân phi tuyến:

$$-\dot{K} = Q + A_\Sigma^T K + K^T A_\Sigma - K^T B_\Sigma G^{-1} B_\Sigma^T K, \qquad K(t_f) = K_f$$

Bộ điều khiển được cho như sau:

$$u = -G^{-1}B_\Sigma^T K x_\Sigma = -G^{-1}\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}^T K x_\Sigma$$

Từ $\dot{x}_{ref}(t) = e(t)$, ta có:

$$x_{\text{ref}}(t) = \int e(t)dt$$

Do đó, ta thu được luật điều khiển tích phân:

$$u(t) = -G^{-1}\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}^T K \begin{bmatrix} x(t) \\ \int e(t)dt \end{bmatrix}$$

Trong thuật toán điều khiển này, vectơ sai lệch được bổ sung trong phản hồi trạng thái.

Như đã minh họa, các giới hạn được áp cho điều khiển và $u_{min} \le u \le u_{max}$. Như vậy, phải thiết kế các bộ điều khiển có giới hạn. Dùng phiếm hàm đặc trưng toàn phương [9]:

$$J = \int_0^t \left(x_\Sigma^T Q x_\Sigma + G \int \tan^{-1} u \, du \right) dt$$

với ma trận hệ số cố định bán xác định dương Q và ma trận xác định dương G, ta tìm được:

$$u(t) = -\tanh\left(G^{-1} \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}^T K \begin{bmatrix} x(t) \\ \int e(t) dt \end{bmatrix} \right) \approx -\text{sat}_{-1}^{+1}\left(G^{-1} \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}^T K \begin{bmatrix} x(t) \\ \int e(t) dt \end{bmatrix} \right), \quad -1 \le u \le 1$$

Bộ điều khiển này thu được với giả thiết rằng nghiệm của phương trình vi phân đạo hàm riêng có thể xấp xỉ bằng hàm hồi tiếp toàn phương:

$$V = \frac{1}{2} x_\Sigma^T K x_\Sigma$$

trong đó K là ma trận đối xứng.

Điều khiển tối ưu tác động nhanh

Một bộ điều khiển tối ưu tác động nhanh có thể được thiết kế bằng cách dùng phiếm hàm:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t (x_\Sigma^T Q x_\Sigma) dt$$

Ta có phương trình Hamilton-Jacobi:

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \min_{-1 \le u \le 1} \left[\frac{1}{2} x_\Sigma^T Q x_\Sigma + \left(\frac{\partial V}{\partial x_\Sigma} \right)^T (A x_\Sigma + B_\Sigma u) \right]$$

bộ điều khiển dạng rơle được tìm như sau:

$$u = -\text{sgn}\left(B_\Sigma^T \frac{\partial V}{\partial x_\Sigma} \right), \quad -1 \le u \le 1$$

Thuật toán điều khiển "tối ưu" không thể thực hiện trong thực tế do hiện tượng rung. Do đó, thường dùng các luật điều khiển dạng rơle với vùng chết:

$$u = -\text{sgn}\left(B_\Sigma^T \frac{\partial V}{\partial x_\Sigma} \right)_{\text{miền chết}}, \quad -1 \le u \le 1$$

Điều khiển trượt

Luật điều khiển trượt chuyển mềm được thấy trong [9]. Thuật toán chuyển mềm dạng trượt cung cấp đặc trưng tốt hơn và loại bỏ được hiệu ứng rung.

Để thiết kế các bộ điều khiển, chúng ta mô hình động học trạng thái và sai lệch như sau:

$$\dot{x}(t) = Ax + Bu, \quad -1 \le u \le 1$$
$$\dot{e}(t) = N\dot{r}(t) - HAx - HBu$$

Bản sao trượt mịn là:

$$M = \{(t,x,e) \in R_{\geq 0} \times X \times E \,|\, \upsilon(t,x,e) = 0\}$$
$$= \bigcap_{j=1}^{m} \{(t,x,e) \in R_{\geq 0} \times X \times E \,|\, \upsilon_j(t,x,e)\} = 0$$

Bề mặt chuyển phi tuyến thay đổi theo thời gian là $\upsilon(t, x, e) = K_{tore}(t, x, e)$. Luật điều khiển chuyển mềm được cho như sau:

$$u(t,x,e) = -G\phi(\upsilon), \quad -1 \leq u \leq 1, \quad G \geq 0$$

trong đó $\phi(\cdot)$ là hàm giải tích thực liên tục của lớp C^{ϵ} ($\epsilon \geq 1$), ví dụ, `tanh` và `erf`.

Điều khiển có ràng buộc của MEMS phi tuyến: phương pháp Hamilton-Jacobi

Tối ưu hóa có ràng buộc của MEMS là một chủ đề thực tế đang rất được quan tâm. Dùng lý thuyết Hamilton-Jacobi, có thể tổng hợp các bộ điều khiển có giới hạn cho hệ thống liên tục được mô hình như sau:

$$\dot{x}^{\text{MEMS}}(t) = F_s(x^{\text{MEMS}}) + B_s(x^{\text{MEMS}})u^{2w+1}, \quad y = Hx^{\text{MEMS}}$$
$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad x^{\text{MEMS}}(t_0) = x_0^{\text{MEMS}}.$$

Ở đây, $x^{\text{MEMS}} \in X_s$ là vectơ trạng thái; $u \in U$ là vectơ các đầu vào điều khiển; $y \in Y$ là đầu ra đo được; $F_s(\cdot)$, $B_s(\cdot)$ và $H(\cdot)$ là các ánh xạ mịn; $F_s(0) = 0$, $B_s(0) = 0$ và $H(0) = 0$; và w là số nguyên không âm.

Để thiết kế bộ điều khiển bám, ta bổ sung động học MEMS:

$$\dot{x}^{\text{MEMS}}(t) = F_s(x^{\text{MEMS}}) + B_s(x^{\text{MEMS}})u^{2w+1}, \quad y = H\left(x^{\text{MEMS}}\right)$$
$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad x^{\text{MEMS}}(t_0) = x_0^{\text{MEMS}}$$

với động học *ngoại sinh* $\dot{x}^{ref}(t) = Nr - y = Nr - H\left(x^{\text{MEMS}}\right)$.

Dùng vectơ trạng thái bổ sung:

$$x = \begin{bmatrix} x^{\text{MEMS}} \\ x^{\text{ref}} \end{bmatrix} \in X$$

ta thu được:

$$\dot{x}(t) = F(x,r) + B(x)u^{2w+1}, \; u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad x(t_0) = x_0, \quad x = \begin{bmatrix} x^{\text{MEMS}} \\ x^{\text{ref}} \end{bmatrix}$$
$$F(x,r) = \begin{bmatrix} F_s(x^{\text{MEMS}}) \\ -H(x^{\text{MEMS}}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ N \end{bmatrix} r, \qquad B(x) = \begin{bmatrix} B_s(x^{\text{MEMS}}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Tập điều khiển có thể chấp nhận U gồm hàm đo được Lebesgue $u(\cdot)$ và một bộ điều khiển giới hạn có thể được thiết kế với các tập điều khiển ràng buộc:

$$U = \{u \in \mathbb{R}^m \,|\, u_{i\min} \leq u_i \leq u_{i\max}, \quad i = 1, \ldots, m\}$$

Chúng ta ánh xạ các giới hạn điều khiển vào một hàm liên tục giá trị vectơ, Lipschitz hoàn toàn, đơn ánh, khả tích và bị giới hạn $\Phi \in C^{\epsilon}$ ($\epsilon \geq 1$). Mục tiêu của chúng ta là thiết kế bằng giải tích bộ điều khiển phản hồi trạng thái giới hạn chấp nhận được ở dạng đóng như $u = \Phi(x)$. Hầu hết Φ thông thường là các hàm đơn ánh, khả tích, khả vi liên tục đại số và siêu việt (mũ, hyperbolic,

logarit, lượng giác). Ví dụ, hàm khả tích đơn ánh lẻ tanh với miền $(-\infty, +\infty)$ ánh xạ sang các giới hạn điều khiển. Hàm này có hàm nghịch đảo tương ứng là $\tanh^{-1}$.

Hàm tổn thất cần cực tiểu hóa được cho như sau:

$$J = \int_{t_0}^{\infty} [W_x(x) + W_u(u)]dt = \int_{t_0}^{\infty} [W_x(x) + (2w+1)\int (\Phi^{-1}(u))^T G^{-1} \mathrm{diag}(u^{2w})du]dt$$

trong đó $G^{-1} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ là ma trận đường chéo xác định dương.

Hàm khả tích đặc trưng $W_x(\cdot)$ và $W_u(\cdot)$ là các hàm giá trị thực, xác định dương và khả tích khả vì liên tục. Dùng các tính chất của hàm Φ, ta chứng minh được hàm nghịch đảo Φ^{-1} là khả tích. Vì vậy, tồn tại tích phân:

$$\int (\Phi^{-1}(u))^T G^{-1} \mathrm{diag}(u^{2w})du$$

Ví dụ

Xem xét một hệ động học phi tuyến:

$$\frac{dx}{dt} = ax + bu^3, \quad u_{\min} \le u \le u_{\max}$$

Với:

$$W_u(u) = (2w+1)\int (\Phi^{-1}(u))^T G^{-1} \mathrm{diag}(u^{2w})du$$

ta có hàm khả tích xác định dương:

$$W_u(u) = 3\int \tanh^{-1} u G^{-1} u^2 du = \frac{1}{3}u^3 \tanh^{-1} u + \frac{1}{6}\ln(1-u^2), \quad G^{-1} = \frac{1}{3}$$

Nói chung, nếu dùng một hàm tang hyperbol để ánh xạ hiệu ứng bão hòa, cho trường hợp một đầu vào, ta có:

$$W_u(u) = (2w+1)\int u^{2w} \tanh^{-1} \frac{u}{k} du = u^{2w+1} \tanh^{-1} \frac{u}{k} - k\int \frac{u^{2w+1}}{k^2 - u^2} du$$

Các điều kiện cần thiết để hàm điều khiển $u(\cdot)$ đảm bảo cực tiểu tới hàm Hamilton:

$$H = W_x(x) + (2w+1)\int (\Phi^{-1}(u))^T G^{-1} \mathrm{diag}(u^{2w})du + \frac{\partial V(x)^T}{\partial x}[F(x,r) + B(x)u^{2w+1}]$$

là: điều kiện cần bậc nhất $n1$:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

và điều kiện cần bậc hai $n2$:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial u \times \partial u^T} > 0$$

Hàm hồi tiếp xác định dương $V(\cdot)$, $V \in C^{\kappa}$, $\kappa \ge 1$, là:

$$V(x_0) = \inf_{u \in U} J(x_0, u) = \inf J(x_0, \Phi(\cdot)) \ge 0$$

Phương trình Hamilton-Jacobi-Bellman được cho như sau:

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \min_{u \in U}\left\{W_x(x) + (2w+1)\int(\Phi^{-1}(u))^T G^{-1}\mathrm{diag}(u^{2w})du + \frac{\partial V(x)^T}{\partial x}[F(x,r) + B(x)u^{2w+1}]\right\}$$

Có thể xây dựng bộ điều khiển bằng cách tìm giá trị điều khiển từ việc cực tiểu tới hàm không toàn phương. Điều kiện cần bậc nhất ($n1$) dẫn chúng ta tới một luật điều khiển giới hạn có thể chấp nhận được. Cụ thể:

$$u = -\Phi\left(GB(x)^T \frac{\partial V(x)}{\partial x}\right), \quad u \in U$$

Điều kiện cần bậc hai cho tối ưu ($n2$) được đáp ứng do ma trận G^{-1} xác định dương. Như vậy, thiết kế được một hàm điều khiển liên tục, giải tích thực, giới hạn và duy nhất.

Nếu tồn tại một hàm thích hợp $V(x)$ thỏa mãn phương trình Hamilton-Jacobi, hệ thống đóng thu được là ổn định thô trong các tập trạng thái danh nghĩa X và điều khiển U và bám bền vững được đảm bảo trong tập lồi và compact $XY(X_0, U, R, E_0)$. Tức là, tồn tại một miền ổn định bất biến:

$$S = \{x \in \mathbb{R}, e \in \mathbb{R}^* : \|x(t)\| \le \varrho_x(\|x_0\|, t) + \varrho_u(\|u\|), \|e(t)\| \le \varrho_e(\|e_0\|, t) + \varrho_r(\|r\|) + \varrho_y(\|y\|),$$
$$\forall x \in X(X_0, U), \forall t \in [t_0, \infty), \forall e \in E(E_0, R, Y)\} \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^*$$

và điều khiển $u(\cdot)$, $u \in U$ dẫn sai lệch bám đến tập:

$$S_E(\delta) = \{e \in \mathbb{R}^* : e_0 \in E_0, x \in X(X_0 U), r \in R, y \in Y, t \in [t_0, \infty)$$
$$\|e(t)\| \le \varrho_e(\|e_0\|, t) + \delta, \delta \ge 0, \forall e \in E(E_0, R, Y), \forall t \in [t_0, \infty\} \subset \mathbb{R}^*$$

Ở đây ϱ_x và ϱ_e là các hàm KL; và ϱ_u, ϱ_r và ϱ_y là các hàm K.

Có thể tìm lời giải phương trình hàm bằng cách dùng các hàm hồi tiếp không toàn phương. Để thu được $V(\cdot)$, hàm tổn thất được ước lượng tại các giá trị trạng thái và điều khiển cho phép. Các phiếm hàm phi tuyến và tuyến tính nhận các giá trị cuối cùng và giá trị tổn thất toàn phương nhỏ nhất được cho bởi các dạng chuỗi lũy thừa [9]. Tức là:

$$J_{\min} = \sum_{i=0}^{\eta} v(x_0)^{\frac{2(i+\gamma+1)}{2\gamma+1}}, \qquad \eta = 0,1,2,\ldots, \gamma = 0,1,2,\ldots$$

Nghiệm của phương trình vi phân đạo hàm riêng được thỏa mãn bằng một hàm hồi tiếp xác định dương khả vi liên tục:

$$V(x) = \sum_{i=0}^{\eta} \frac{2\gamma+1}{2(i+\gamma+1)}\left(x^{\frac{i+\gamma+1}{2\gamma+1}}\right)^T K_i x^{\frac{i+\gamma+1}{2\gamma+1}}$$

trong đó ma trận K_i được tính bằng cách giải phương trình Hamilton-Jacobi.

Hàm hồi tiếp toàn phương trong $V(x) = \frac{1}{2}x^T K_0 x$ được tính bằng cách đặt $\eta = \gamma = 0$. Có thể dùng hàm này chỉ khi nhà thiết kế có thể bỏ qua các thành phần bậc cao trong khai triển chuỗi Taylor. Dùng $\eta = 1$ và $\gamma = 1$, ta thu được:

$$V(x) = \frac{1}{2}x^T K_0 x + \frac{1}{4}(x^2)^T K_1 x^2$$

trong khi với $\eta = 4$ và $\gamma = 1$, ta có hàm sau:

$$V(x) = \frac{3}{4}(x^{2/3})^T K_0 x^{2/3} + \frac{1}{2}x^T K_1 x + \frac{3}{8}(x^{4/3})^T K_2 x^{4/3} + \frac{3}{10}(x^{5/3})^T K_3 x^{5/3} + \frac{1}{4}(x^2)^T K_4 x^2$$

Bộ điều khiển giới hạn phi tuyến được cho như sau:

$$u = -\Phi\left(GB(x)^T \sum_{i=0}^{\eta} \mathrm{diag}\left[x(t)^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} \right] K_i(t) x(t)^{\frac{i+\gamma+1}{2\gamma+1}} \right),$$

$$\mathrm{diag}\left[x(t)^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} \right] = \begin{bmatrix} x_1^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & x_2^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x_{c-1}^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & x_c^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} \end{bmatrix}$$

Nếu các ma trận K_i là ma trận đường chéo, chúng ta có thuật toán điều khiển như sau:

$$u = -\Phi\left(GB(x)^T \sum_{i=0}^{\eta} K_i x^{\frac{2i+1}{2\gamma+1}} \right)$$

Điều khiển ràng buộc của MEMS không xác định phi tuyến: phương pháp Lyapunov

Trong tập $[t_0, \infty)$, ta coi động học của MEMS được mô hình như sau:

$$\dot{x}(t) = F_z(t, x, r, z) + B_p(t, x, p)u, \qquad y = H(x), \qquad u_{\min} \le u \le u_{\max}, \quad x(t_0) = x_0$$

trong đó $t \in \mathbb{R}_{\ge 0}$ là thời gian; $x \in X$ là vectơ không gian trạng thái; $u \in U$ là vectơ đầu vào điều khiển giới hạn; $r \in R$ và $y \in Y$ là các vectơ tham chiếu và đầu ra đo được; $z \in Z$ và $p \in P$ là các phần có thể tham số, các hàm $z(\cdot)$ và $p(\cdot)$ là Lebesgue đo được và đã biết trong giới hạn; Z và P là các tập compact không rỗng đã biết; và $F_z(\cdot)$, $B_p(\cdot)$ và $H(\cdot)$ là các trường ánh xạ làm mịn.

Chúng ta sẽ lập công thức và giải bài toán điều khiển chuyển động bằng cách tổng hợp các bộ điều khiển bền vững đảm bảo tính bám ổn định và bền vững. Mục tiêu là nhằm thiết kế các luật điều khiển làm ổn định bền vững các hệ phi tuyến với các tham số không xác định và điều khiển sai lệch bám $e(t) = r(t) - y(t)$, $e \in E$ tới đến tập compact một cách bền vững. Với MEMS được mô hình bởi các phương trình vi phân phi tuyến với tham số biến thiên, sự tự điều chỉnh bền vững của vectơ đầu ra đo được $y \in Y$ cần được hoàn thành đối với vectơ đầu vào tham chiếu giới hạn đồng dạng đo được $r \in R$.

Động học không xác định và *danh nghĩa* được ánh xạ bởi $F(\cdot)$, $B(\cdot)$ và $\Xi(\cdot)$. Như vậy, tiến trình hệ thống được mô tả như sau:.

$$\dot{x}(t) = F_z(t, x, r) + B(t, x)u + \Xi(t, x, u, z, p), \quad y = H(x) \qquad u_{\min} \le u \le u_{\max}, \quad x(t_0) = x_0$$

Tồn tại một qui tắc là $\Xi(t, x, u, z, p)$ và $\|\Xi(t, x, u, z, p)\| \le \rho(t, x)$, trong đó $\rho(\cdot)$ là hàm đo được Lebesgue liên tục. Mục tiêu của chúng ta là giải quyết bài toán điều khiển chuyển động và cần tổng hợp các bộ điều khiển bám dùng vectơ sai lệch bám và các biến trạng thái. Hơn nữa, để đảm bảo tính bền vững và để mở rộng biên độ ổn định, tăng khả năng động học và nhằm thỏa mãn các

yêu cầu khác, các hàm Lyapunov không toàn phương $V(t, e, x)$ sẽ được dùng trong phân tích và thiết kế ổn định của các luật điều khiển bám bền vững.

Giả sử rằng một tập điều khiển chấp nhận được U bao gồm cả hàm đo được Lebesgue $u(\cdot)$. Có thể dùng lý thuyết Hamilton-Jacobi để tìm các luật điều khiển và việc tối thiểu hóa các phiếm hàm đặc trưng không toàn phương dẫn đến bộ điều khiển giới hạn.

Đặt $u = \Phi(t, e, x)$, ta thu được một tập các bộ điều khiển chấp nhận được. Áp dụng phản hồi sai lệch và trạng thái, ta xác định một họ bộ điều khiển bám như sau:

$$u = \Omega(x)\Phi(t,e,x) = -\Omega(x)\Phi\left(G_E(t)B_E(t,x)^T \frac{1}{s}\frac{\partial V(t,e,x)}{\partial e} + G_X(t)B(t,x)^T \frac{\partial V(t,e,x)}{\partial x} \right), \quad s = \frac{d}{dt}$$

trong đó $\Omega(\cdot)$ là hàm phi tuyến; $G_E(\cdot)$ và $G_X(\cdot)$ là các hàm ma trận đường chéo xác định trên $[t_o, \infty)$; $B_E(\cdot)$ là hàm ma trận; và $V(\cdot)$ là hàm liên tục, khả vi và giải tích thực.

Vấn đề thiết kế hàm Lyapunov là một vấn đề tới hạn và chứa đựng nhiều khó khăn. Có thể dùng các hàm Lyapunov. Tuy nhiên, với các hệ phi tuyến không xác định, các hàm không toàn phương $V(t, e, x)$ cho phép thực hiện khả năng đầy đủ của lý thuyết dựa trên Lyapunov và đưa tới các ánh xạ phản hồi phi tuyến cần để thu được các đối tượng thiết kế đối lập. Ta có họ các hàm Lyapunov dưới đây:

$$V(t,e,x) = \sum_{i=0}^{\zeta} \frac{2\beta+1}{2(i+\beta+1)} = \left(e^{\frac{i+\beta+1}{2\beta+1}} \right)^T K_{Ei}(t) e^{\frac{i+\beta+1}{2\beta+1}} + \sum_{i=0}^{\eta} \frac{2\gamma+1}{2(i+\gamma+1)} \left(x^{\frac{i+\gamma+1}{2\gamma+1}} \right)^T K_{Xi}(t) x^{\frac{i+\gamma+1}{2\gamma+1}}$$

trong đó $K_{Ei}(\cdot)$ và $K_{Xi}(\cdot)$ là các ma trận đối xứng; ζ, β, η và γ là các số nguyên không âm; $\zeta = 0,1,2,\ldots$, $\beta = 0,1,2,\ldots$, $\eta = 0,1,2,\ldots$ và $\gamma = 0,1,2,\ldots$

Dạng toàn phương nổi tiếng của $V(t, e, x)$ được tìm bằng cách đặt $\zeta = \beta = \eta = \gamma = 0$ và ta có:

$$V(t,e,x) = \frac{1}{2}e^T K_{E0}(t)e + \frac{1}{2}x^T K_{X0}(t)x$$

Bằng cách dùng $\zeta = 1$, $\beta = 1$, $\eta = 1$ và $\gamma = 1$, ta thu được một hàm không toàn phương:

$$V(t,e,x) = \frac{1}{2}e^T K_{E0}(t)e + \frac{1}{4}e^{2^T} K_{E1}(t)e^2 + \frac{1}{2}x^T K_{X0}(t)x + \frac{1}{4}e^{2^T} K_{X1}(t)x^2$$

Ta thu được luật điều khiển bám sau:

$$u = -\Omega(x)\Phi\left(G_E(t)B_E(t,x)^T \sum_{i=0}^{\zeta} \mathrm{diag}\left[e(t)^{\frac{i-\beta}{2\beta+1}} \right] K_{Ei}(t) \frac{1}{s} e(t)^{\frac{i+\beta}{2\beta+1}} \right.$$

$$\left. + G_X(t)B(t,x)^T \sum_{i=0}^{\zeta} \mathrm{diag}\left[x(t)^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} \right] K_{Xi}(t) x(t)^{\frac{i+\gamma+1}{2\gamma+1}} \right)$$

$$\mathrm{diag}\left[e(t)^{\frac{i-\beta}{2\beta+1}} \right] = \begin{bmatrix} e_1^{\frac{i-\beta}{2\beta+1}} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & e_2^{\frac{i-\beta}{2\beta+1}} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e_{b-1}^{\frac{i-\beta}{2\beta+1}} & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & e_b^{\frac{i-\beta}{2\beta+1}} \end{bmatrix}$$

và:

$$\operatorname{diag}\left[x(t)^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}}\right]=\begin{bmatrix} x_1^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & x_2^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x_{n-1}^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 & x_n^{\frac{i-\gamma}{2\gamma+1}} \end{bmatrix}$$

Nếu các ma trận K_{Ei} và K_{Xi} là ma trận đường chéo, ta có:

$$u=-\Omega(x)\Phi\left(G_E(t)B_E(t,x)^T\sum_{i=0}^{s}K_{Ei}(t)\frac{1}{s}e(t)^{\frac{2i+1}{2\beta+1}}+G_X(t)B(t,x)^T\sum_{i=0}^{n}K_{Xi}(t)x(t)^{\frac{2i+1}{2\gamma+1}}\right)$$

Một hệ thống không xác định đóng là ổn định thô trong $X(X_o, U, Z, P)$ và việc đảm bảo bám bền vững trong tập lồi và compact $E(E_o, Y, R)$ nền với các đầu vào tham chiếu $r \in R$ và các tham số không xác định trong Z và P tồn tại một hàm dạng $C^{\kappa}(\kappa \geq 1)$: V(·) cũng như các hàm dạng K_∞: $\rho_{X1}(\cdot)$, $\rho_{X2}(\cdot)$, $\rho_{E1}(\cdot)$, $\rho_{E2}(\cdot)$ và các hàm dạng K: $\rho_{X3}(\cdot)$, $\rho_{E3}(\cdot)$, như các điều kiện đủ dưới đây:

$$\rho_{X1}(\|x\|)+\rho_{E1}(\|e\| \leq V(t,e,x) \leq \rho_{X2}(\|x\|)+\rho_{E2}(\|e\|)$$

$$\frac{dV(t,e,x)}{dt} \leq -\rho_{X3}(\|x\|)-\rho_{E3}(\|e\|)$$

được đảm bảo trong miền ổn định bất biến S và $XE(X_o, E_o, U, R, Z, P) \subseteq S$.

Các điều kiện đủ cho việc giải bài toán điều khiển bền vững đã được cho. Qua việc tính đạo hàm của $V(t, e, x)$, có thể tìm được các hệ số chưa biết của $V(t, e, x)$. Tức là, thu được các ma trận $K_{Ei}(\cdot)$ và $K_{Xi}(\cdot)$. Bài toán này được giải bằng cách dùng khái niệm bất đẳng thức phi tuyến [9].

Ví dụ 14.6.1: Điều khiển động cơ micro bước nam châm vĩnh cửu 2 pha

MEMS hiệu quả cao với các động cơ micro bước nam châm vĩnh cửu đã được thiết kế và chế tạo. Các bộ điều khiển cần thiết được thiết kế để điều khiển động cơ micro bước nam châm vĩnh cửu và điều chỉnh vận tốc và dịch chuyển góc quay bằng cách thay đổi biên độ điện áp hoặc dòng điện trong cuộn dây stato (xem ví dụ 14.5.3). Dịch chuyển roto được đo hoặc quan sát để áp các điện áp vào các cuộn pha. Để giải quyết vấn đề điều khiển chuyển động, cần thiết kế bộ điều khiển. Có thể thấy rằng cần triển khai các thuật toán điều khiển mới để cực đại mômen. Trên thực tế, không thể dùng các bộ điều khiển truyền thống:

$$u=-G^{-1}B^T\frac{\partial V}{\partial x} \text{ và } u=-\Phi\left(G^{-1}B^T\frac{\partial V}{\partial x}\right)$$

Dùng khái niệm đồng năng lượng, ta tìm được biểu thức cho mômen điện từ:

$$T_e=-RT\psi_m[i_{as}\sin(RT\theta_{rm})-i_{bs}\cos(RT\theta_{rm})]$$

và như vậy, phải nuôi dòng điện pha dưới dạng hàm sin hoặc cosin của dịch chuyển roto.

Mô hình toán học của động cơ micro bước nam châm vĩnh cửu tìm được trong ví dụ 14.5.3:

$$\frac{di_{as}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}} i_{as} + \frac{RT\psi_m}{L_{ss}} \omega_{rm} \sin(RT\theta_{rm}) + \frac{1}{L_{ss}} u_{as}$$

$$\frac{di_{bs}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ss}} i_{bs} - \frac{RT\psi_m}{L_{ss}} \omega_{rm} \cos(RT\theta_{rm}) + \frac{1}{L_{ss}} u_{bs}$$

$$\frac{d\omega_{rm}}{dt} = -\frac{RT\psi_m}{J} [i_{as} \sin(RT\theta_{rm}) - i_{bs} \cos(RT\theta_{rm})] - \frac{B_m}{J} \omega_{rm} - \frac{1}{J} T_L$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_{rm}$$

Điện trở roto là một hàm của nhiệt độ do suất điện trở là $\rho_T = \rho_0[1 + \alpha_\rho(T^0 - 20^0)]$. Như vậy, $r_s(\cdot) \in [r_{smin}\ r_{smax}]$. Độ nhạy của các nam châm vĩnh cửu (các màng mỏng) tăng theo chiều tăng của nhiệt độ. Các tham số của hệ thống servo khác cũng thay đổi; cụ thể là $L_{ss}(\cdot) \in [L_{ssmin}\ L_{ssmax}]$ và $B_{ss}(\cdot) \in [B_{ssmin}\ B_{ssmax}]$.

Phương trình chuyển động tìm được dưới dạng vectơ như sau:

$$\dot{x}(t) = F_z(t, x, r, d, z) + B_p(p)u, \qquad u_{\min} \le u \le u_{\max}$$

$$x(t_0) = x_0, \qquad x = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ \omega_{rm} \\ \theta_{rm} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \end{bmatrix}, \qquad y = \theta_{rm}$$

Ở đây, $x \in X$ và $u \in U$ lần lượt là các vectơ trạng thái và điều khiển, $r \in R$ và $y \in Y$ lần lượt là tham chiếu và đầu ra đo được, $d \in D$ là nhiễu, $d = T_L$ và $z \in Z$ cùng $p \in P$ là phần không xác định tham số chưa biết và giới hạn.

Mục tiêu của chúng ta là thiết kế điều khiển giới hạn $u(\cdot)$ trong tập ràng buộc:

$$U = \{u \in \mathbb{R}^2 : u_{\min} \le u \le u_{\max}, u_{\min} < 0, u_{\max} > 0\} \subset \mathbb{R}^2$$

Một luật điều khiển có thể chấp nhận đảm bảo một điện áp hai pha cân bằng cho các cuộn *ab* và đảm bảo sản phẩm có mômen điện từ lớn nhất được tổng hợp như sau:

$$u = \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(RT\theta_{rm}) & 0 \\ 0 & \cos(RT\theta_{rm}) \end{bmatrix} \times \Phi\left(G_x(t) B^T \frac{\partial V(t,x,e)}{\partial x} + G_e(t) B_e^T \frac{\partial V(t,x,e)}{\partial e} + G_i(t) B_e^T \frac{1}{s} \frac{\partial V(t,x,e)}{\partial e} \right)$$

trong đó $e \in E$ là sai lệch bám đo được, $e(t) = r(t) - y(t)$; $\Phi(\cdot)$ là hàm giới hạn (erf, sat, tanh) và $\Phi \in U, |\Phi(\cdot)| \le V_{\max}$, $V_{\max}$ là điện áp tỷ lệ; $G_x(\cdot)$, $G_e(\cdot)$ và $G_i(\cdot)$ được giới hạn và đối xứng, $G_x > 0$, $G_e > 0$ và $G_i > 0$; và $V(\cdot)$ là hàm giải tích thực, khả vi liên tục trên $C^\kappa(\kappa \ge 1)$.

Với $X_0 \subseteq X$, $u \in U$, $r \in R$, $d \in D$, $z \in Z$ và $p \in P$, ta thu được tập hợp ước lượng trình trạng thái X. Tập trạng thái đầu ra là:

$$XY = (X_0, U, R, D, X, P)$$
$$= \{(x, y) \in X \times Y : x_0 \in X_0, u \in U, r \in R, d \in D, z \in Z, p \in P, t \in [t_0, \infty)\}$$

và có thể tìm một ánh xạ *đầu vào-tham chiếu*. Mục tiêu của ta là tìm bộ điều khiển giới hạn như sai lệch bám $e(\cdot) : [t_o, \infty) \to E$ với $E_o \subseteq E$ lấy trong tập đóng danh nghĩa:

$$S_e(\delta) = \{e \in \mathbb{R} : e_0 \in E_0, x \in X(X_0, U, R, D, X, P), t \in [t_0, \infty)\Big|$$
$$\|e(t)\| \le \rho_e(t, \|e_0\|) + \rho_r \|r\| + \rho_d \|d\| + \rho_y \|y\| + \delta, \delta \ge 0, \forall e \in E(E_0, R, D, Y), \forall t \in [t_0 \infty)\}$$

Ở đây, $\rho_x(\cdot)$ là hàm KL; $\rho_r(\cdot)$, $\rho_d(\cdot)$ và $\rho_y(\cdot)$ là các hàm K.

Một miền ổn định bất biến dương tìm được cho hệ thống vòng kín với $x_0 \in X_0$, $e_0 \in E_0$, $u \in U$, $r \in R$, $d \in D$ và $p \in P$. Cụ thể:

$$S_s = \{x \in \mathbb{R}^n, e \in \mathbb{R}^l : \|x(t)\| \le \rho_x(t, \|x_0\|) + \rho_r \|r\| + \rho_d \|d\| + \delta,$$
$$\forall x \in X(X_0, U, R, D, Z, P), \forall t \in [t_0, \infty), \|e(t)\| \le \rho_e(t, \|e_0\|) + \rho_r \|r\|$$
$$+ \rho_d \|d\| + + \rho_y \|y\| + \delta, \forall e \in E(E_0, R, D, Y), \forall t \in [t_0, \infty)\},$$

trong đó $\rho_x(\cdot)$ là hàm KL.

Để nghiên cứu tính bền vững, bám và loại bỏ nhiễu, ta xem xét một tập lỗi trạng thái:

$$XE(X_0, E_0, U, R, D, Z, P) = \{(x, e) \in X \times E : x_0 \in X_0, e_0 \in E_0, u \in U,$$
$$r \in R, d \in D, z \in Z, p \in P, t \in [t_0, \infty)\}$$

Sự bám bền vững, tính ổn định và loại bỏ nhiễu được đảm bảo nếu $XE \subseteq S_s$. Tập *chấp nhận được* S_s tìm được bằng cách dùng lý thuyết ổn định Lyapunov [9] và:

$$S_s = \left\{x \in \mathbb{R}^n, e \in \mathbb{R}^l : x_0 \in X_0, e_0 \in E_0, u \in U, r \in R, d \in D, z \in Z, p \in P\right|$$
$$\rho_1 \|x\| + \rho_2 \|e\| \le V(t, x, e) \le \rho_3 \|x\| + \rho_4 \|e\|, \frac{dV(t, x, e)}{dt} \le -\rho_5 \|x\| - \rho_6 \|e\|,$$
$$\forall x \in X(X_0, U, R, P, Z, P), \forall e \in E(E_0, R, D, Y), \forall t \in [t_0, \infty)\}$$

trong đó $\rho_1(\cdot)$, $\rho_2(\cdot)$, $\rho_3(\cdot)$ và $\rho_4(\cdot)$ là các hàm K_∞; và $\rho_5(\cdot)$ và $\rho_6(\cdot)$ là các hàm K.

Nếu trong XE tồn tại một hàm Lyaponov dạng C^κ : $V(t, x, e)$ sao cho với mọi $x_0 \in X_0$, $e_0 \in E_0$, $u \in U$, $r \in R$, $d \in D$ và $p \in P$ trên $[t_0, \infty)$ điều kiện đủ cho tính ổn định ($s1$):

$$\rho_1 \|x\| + \rho_2 \|e\| \le V(t, x, e) \le \rho_3 \|x\| + \rho_4 \|e\|$$

và bất đẳng thức:

$$\frac{dV(t, x, e)}{dt} \le -\rho_5 \|x\| - \rho_6 \|e\|$$

là điều kiện đủ cho ổn định $s2$, thì

1. Nghiệm $x(\cdot) : [t_o, \infty) \to X$ cho hệ vòng đóng là giới hạn và ổn định thô,
2. sự hội tụ của vectơ sai lệch $e(\cdot) : [t_o, \infty) \to E$ tới S_e được thỏa mãn trong XE,
3. XE lồi và compact và $XE \subseteq S_s$.

Tức là, nếu đảm bảo tiêu chuẩn ($s1$) và ($s2$), ta có $XE \subseteq S_s$.

Chọn hàm Lyapunov không toàn phương như sau:

$$V(t, x, e) = \sum_{i=0}^{\eta} \frac{2\gamma + 1}{2(j + \gamma + 1)} \left(x^{\frac{j+\gamma+1}{2\gamma+1}} \right)^T K_{xj}(t) x^{\frac{j+\gamma+1}{2\gamma+1}} + \sum_{j=0}^{\xi} \frac{2\beta + 1}{2(j + \beta + 1)} \left(e^{\frac{j+\beta+1}{2\beta+1}} \right)^T K_{ej}(t) e^{\frac{j+\beta+1}{2\beta+1}}$$
$$+ \sum_{i=0}^{\sigma} \frac{2\mu + 1}{2(j + \mu + 1)} \left(e^{\frac{j+\mu+1}{2\mu+1}} \right)^T K_{ij}(t) e^{\frac{j+\mu+1}{2\mu+1}}$$

ta thu được bộ điều khiển giới hạn như sau:

$$u = \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(RT\theta_{rm}) & 0 \\ 0 & -\cos(RT\theta_{rm}) \end{bmatrix} \Phi\left(G_x(t) B^T \sum_{j=0}^{\eta} diag\left[x^{\frac{j-\gamma}{2\gamma+1}} \right] \right) K_{xj}(t) x^{\frac{j-\gamma+1}{2\gamma+1}}$$

$$+ G_e(t) B_e^T \sum_{j=0}^{\zeta} K_{ej}(t) e^{\frac{2j+1}{2\beta+1}} + G_i(t) B_e^T \sum_{j=0}^{\sigma} K_{ij}(t) \frac{1}{s} e^{\frac{2j+1}{2\mu+1}}$$

Ở đây, $K_{xj}(\cdot)$ là các hàm ma trận chưa biết và $K_{ej}(\cdot)$ và $K_{ij}(\cdot)$ là các hệ số chưa biết; $\eta = 0,1,2,\ldots$, $\gamma = 0,1,2,\ldots$, $\zeta = 0,1,2,\ldots$, $\beta = 0,1,2,\ldots$, $\sigma = 0,1,2,\ldots$ và $\mu = 0,1,2,\ldots$

Nếu giả thiết rằng X_m, E_a, R, D, Z và P có thể chấp nhận được, bài toán bám bền vững có thể giải được trong *XE*. Tức là, điều khiển giải tích thực giới hạn $u(\cdot)$ đảm bảo tính ổn định bền vững và dẫn sai lệch bám tới S_e. Hơn nữa, tính ổn định được đảm bảo, việc loại bỏ nhiễu được thực hiện, khả năng bám đầu vào-đầu ra danh nghĩa có thể đạt được.

Áp dụng bộ điều khiển được thiết kế, ta cực đại hóa mômen điện từ trong động cơ bước vĩnh cửu micro. Điều này có thể thấy dễ dàng bằng cách dùng biểu thức cho mômen điện từ, tập điện áp hình sin 2 pha cân bằng (áp dụng cho các điện áp u_{as} và u_{bs}), cũng như đồng nhất thức lượng giác $\sin^2 a + \cos^2 a = 1$.

Có thể thiết kế bộ điều khiển dùng sai lệch bám. Cụ thể, ta có:

$$u = \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin(RT\theta_{rm}) & 0 \\ 0 & -\cos(RT\theta_{rm}) \end{bmatrix} \Phi\left(G_e(t) B_e^T \sum_{j=0}^{\zeta} K_{ej}(t) e^{\frac{2j+1}{2\beta+1}} + G_i(t) B_e^T \sum_{j=0}^{\sigma} K_{ij}(t) \frac{1}{s} e^{\frac{2j+1}{2\mu+1}} \right)$$

Phần thiết kế, cài đặt và kiểm tra thực nghiệm bộ điều khiển được trình bày trong [9].

14.7 Kết luận

Chương này đã trình bày thực trạng hiện nay, công bố các kết quả mới nhất, nghiên cứu các mô hình mới trong tổng hợp, mô hình hóa, phân tích, mô phỏng, điều khiển và tối ưu MEMS hiệu quả cao. Các kết quả thu được này ứng dụng các phương pháp mô hình hóa, phân tích, tổng hợp, điều khiển và tối ưu phi tuyến, cho phép đánh giá khả năng và dự báo kết quả. Các MEMS mới đã được tạo ra. Ứng dụng của động cơ có dạng tấm, cầu, xuyến, nón, trụ và không đối xứng, cũng như các hệ thống điện từ *kin, hở* và *tích hợp*, cho phép ta phân loại MEMS. Ý tưởng này đặc biệt hữu ích trong việc nghiên cứu MEMS đã có cũng như trong việc tổng hợp MEMS mới, hiệu quả cao. Ví dụ, có thể áp dụng hệ thống điện từ *tích hợp* và hình dạng không đối xứng (không thông thường). Tối ưu hóa có thể được thực hiện và mô hình phân loại như là điểm bắt đầu từ các cấu hình tiên tiến có thể được tổng hợp và thể hiện trực tiếp. Dạng hình học các thiết bị chuyển động và các hệ điện từ (đóng vai trò trung tâm) liên quan với nhau. Sự tổng hợp cấu trúc và tối ưu hóa MEMS được hình thành và thể hiện bằng cách dùng các ý tưởng mới. Mô hình phân loại MEMS dẫn đến phân tích định lượng. Trên thực tế, dùng các định luật cơ bản của điện từ và cơ học (như các phương trình Maxwell, Kirchhoff và Newton), có thể bắt nguồn và ứng dụng các phương trình vi phân để mô hình các hiện tượng và hiệu ứng điện từ và cơ học nhằm thu được phân tích khả năng với việc dự báo kết quả. Các mô hình toán học cho MEMS đã được tìm ra. Việc dùng các mô hình toán học này cho phân tích và tối ưu hóa đã được thực hiện và các thuật toán điều khiển phi tuyến đã được thiết kế. Các đặc trưng và hiện tượng điện từ được tích hợp trong phân tích, mô hình hóa, tổng hợp và tối ưu. Có thể thấy, để đạt được cấp độ hoạt động danh nghĩa, MEMS mới, hiệu quả cao cần được tổng hợp và các mô phỏng phi tuyến động học mô tả cao phải được thực hiện. Các kết quả đã báo cáo có ứng dụng trực tiếp tới việc phân tích và thiết kế MEMS hiệu quả cao. Có thể phát minh, tổng hợp, định nghĩa và thiết kế các MEMS khác nhau và nghiên cứu một số các vấn đề

tồn tại liên quan tới điện từ và tính thay đổi hình học. Các kết quả chuẩn này cho phép lập lại công thức và cải tiến các vấn đề đặc biệt quan trọng trong lý thuyết MEMS và giải quyết một số vấn đề rất phức tạp trong thiết kế và tối ưu với mục tiêu cuối cùng để tổng hợp MEMS mới, hiệu quả cao, mômen lớn và tỉ lệ tương quan cao.

Tài liệu tham khảo

[1] Lyshevski, S. E., *Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Micro-Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.

[2] Madou, M., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.

[3] Campbell, S. A., *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University Press, New York, 2001.

[4] Lyshevski, S. E., *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1999.

[5] Lyshevski, S. E. and Lyshevski, M. A., "Analysis, dynamics, and control of micro-electromechanical systems", *Proc. American Control Conference*, Chicago, IL, pp. 3091–3095, 2000.

[6] Mehregany, M. and Tai, Y. C., "Surface micromachined mechanisms and micro-motors", *J. Micromechanics and Microengineering*, vol. 1, pp. 73–85, 1992.

[7] Becker, E. W., Ehrfeld, W., Hagmann, P., Maner, A., and Munchmeyer, D., "Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanoformung, and plastic molding (LIGA process)", *Microelectronic Engineering*, vol. 4, pp. 35–56, 1986.

[8] Guckel, H., Christenson, T. R., Skrobis, K. J., Klein, J., and Karnowsky, M., "Design and testing of planar magnetic micromotors fabricated by deep X-ray lithography and electroplating", *Technical Digest of International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers 93*, Yokohama, Japan, pp. 60–64, 1993.

[9] Lyshevski, S. E., *Control Systems Theory with Engineering Applications*, Birkhäuser, Boston, MA, 2001.

15

Cơ sở vật lý của sự tương tự trong các mô hình hệ thống vật lý

15.1 Mở đầu 15-1
15.2 Lịch sử 15-1
15.3 Tương tự lực - dòng điện: các biến chéo và biến xuyên qua 15-2
15.4 Sự tương tự lực - điện áp của Maxwell: các biến lực và lưu lượng 15-3
15.5 Cơ sở nhiệt động lực cho các tương tự 15-5
15.6 Các sơ đồ kết nối 15-8
15.7 Một số nhận xét kết luận 15-9

Neville Hogan
Massachusetts Institute of Technology

Peter C. Breedveld
University of Twente

15.1 Mở đầu

Một trong những điểm hấp dẫn của các hệ cơ điện tử là chức năng của hệ phụ thuộc vào tương tác giữa các hoạt động điện và cơ cũng như các hiệu ứng khác như từ học, lưu chất, hóa học... Đồng thời đây cũng là một thách thức vì các hiện tượng này thường liên quan đến nhiều lĩnh vực kỹ thuật và vật lý khác nhau. Một cách tiếp cận hiệu quả tới vấn đề liên ngành này là thiết lập sự tương tự trong cách hoạt động của các lĩnh vực khác nhau - ví dụ cộng hưởng do tương tác giữa quán tính và độ đàn hồi trong hệ cơ tương tự với cộng hưởng do tương tác giữa điện dung và điện cảm trong một mạch điện. Các sự tương tự có thể cung cấp sự hiểu biết tốt về hoạt động của thiết kế, tìm ra các phương pháp tương đương để nhận được một chức năng cụ thể và thuận tiện khi phân tích định lượng chi tiết. Cách tiếp cận này đặc biệt hữu ích khi nghiên cứu hoạt động động lực thường sinh ra do tương tác giữa các lĩnh vực; ví dụ một khối lượng chuyển động trong từ trường có thể có dao động cộng hưởng ngay cả khi không có các hiệu ứng đàn hồi. Tuy nhiên, có rất nhiều cách thiết lập các sự tương tự nhưng sự tương tự thích hợp nhất giữa các mạch điện, các hệ cơ học và lưu chất vẫn còn là vấn đề chưa giải quyết được như lực giống dòng điện hoặc lực giống điện áp hơn? Trong phần này, chúng ta xem xét cơ sở vật lý của phương pháp tương tự thường dùng và cách mở rộng chúng ra ngoài các hệ điện và cơ.

15.2 Lịch sử

Một trong những ứng dụng sớm nhất của phương pháp tương tự giữa các hệ điện và cơ là việc xác định các hệ cơ với ứng xử động tương đương để chứng minh và nghiên cứu các trạng thái biến đổi quá nhanh trong các mạch điện, mà bằng các dụng cụ đo ngày ấy không thể quan sát được chúng; đó là chủ đề của hàng loạt bài báo "Các mô hình và sự tương tự khi chứng minh các nguyên lý điện" [1]. Các phương pháp tiên tiến có khả năng quan sát trực tiếp các trạng thái điện biến đổi nhanh (đặc biệt máy dao động tia catôt vẫn còn dùng đến ngày nay) đã làm cho phương

pháp tương tự trên trở nên lỗi thời nhưng nó vẫn cho phép nghiên cứu định lượng các hệ phi điện thông qua các mạch điện tương tự [10]. Mặc dù phương pháp này có tầm quan trọng đáng kể tại thời điểm đó hơn hiện nay (ngày nay chúng ta có nhiều công cụ mạnh để tính toán số các đáp ứng của hệ cơ điện tử), trong cuối những năm 1920 đầu những năm 1930, một chuỗi các bài báo [3] đã đưa ra phương pháp hợp lý để dùng các mạch điện như là những khuôn mẫu để thiết lập sự tương tự giữa các hệ vật lý.

15.3 Tương tự lực - dòng điện: các biến chéo và biến xuyên qua

Firestone đã chỉ ra hai loại biến trong mỗi lĩnh vực vật lý – biến "chéo" và "xuyên qua" có thể phân biệt với nhau dựa trên cách đo chúng. Biến "chéo" có thể đo như là sự sai khác giữa các giá trị tại hai điểm trong không gian (dựa trên khái niệm *chéo* qua hai điểm); biến "xuyên qua" có thể được đo bằng một cảm biến trên đường truyền năng lượng giữa hai điểm trong không gian (dựa trên khái niệm truyền *xuyên qua* cảm biến). Bằng cách phân loại này, điện áp sẽ tương tự với vận tốc cơ học và dòng điện tương tự với lực cơ học. Dĩ nhiên, cách phân loại biến này đưa đến một cách phân loại phần tử mạch: một khối lượng tương tự với một tụ điện, một lò xo tương tự một điện cảm...

Sự tương tự "lực - dòng điện" hay "khối lượng - tụ điện" là có cơ sở toán học. Định luật nút Kirchhoff hay định luật dòng điện, giới thiệu năm 1847 (tổng các dòng điện trong một nút mạch bằng không) có thể được xem như là sự tương tự hình thức với nguyên lý D'Alembert giới thiệu năm 1742 (tổng các lực trên một vật bằng không, bao gồm cả "lực quán tính" bằng khối lượng âm của vật nhân với gia tốc của nó). Đó là sự tương tự được dùng trong các biểu diễn đồ thị tuyến tính của hệ tham số thu gọn [13]. Các đồ thị tuyến tính cho các kết quả giá trị từ lý thuyết đồ thị toán học liên quan tới việc phân tích các hệ tham số thu gọn. Ví dụ có một qui trình có hệ thống dựa trên sự phân chia một sơ đồ thành *cây* và *các liên kết* để chọn các tập tham số độc lập mô tả hệ thống. Các phương pháp lý thuyết sơ đồ liên quan mật thiết với các phương pháp ma trận sẽ thuận lợi cho việc tính toán trên máy tính. Các đồ thị tuyến tính đưa ra cách biểu diễn thống nhất cho ứng xử động tham số thu gọn trong một vài lĩnh vực đã được trình bày chi tiết trong các giáo trình nổi tiếng [12].

Tương tự khối lượng - tụ điện cũng có thể đáp ứng một số vấn đề thực tế. Nói chung, dễ xác định các điểm của vận tốc thông thường trong một hệ cơ học hơn là xác định lực trong các phần tử; và tương ứng, dễ xác định các nút trong một mạch điện hơn tất cả các vòng của nó. Như vậy, với sự tương tự này, không khó để xác định một mạch điện tương đương với một hệ cơ học, ít nhất trong trường hợp một thứ nguyên.

Hạn chế của sự phân loại chéo - xuyên qua

Mặc dù việc thiết lập những sự tương tự dựa trên các quy trình đo lường thực tế là cần thiết, nhưng tương tự lực - dòng điện còn có một số hạn chế sau: (i) khi kiểm tra gần, sự phân loại dựa trên đo lường thường mập mờ; (ii) sự mở rộng của nó cho các hệ thống có thứ nguyên lớn hơn một là một vấn đề; và (iii) quan trọng nhất là nó dẫn đến các sự tương tự (đặc biệt giữa các hệ cơ học và lưu chất) không tuân theo những hiểu biết vật lý thông thường.

Đo lường là cơ sở của những sự tương tự

Thậm chí một sự xem xét nhanh các công nghệ đo lường tiên tiến cho thấy cách phân loại chéo - xuyên qua có thể là lỗi thời hoặc là một sự đơn giản hóa. Vận tốc (một biến "chéo") có thể được đo bằng một gia tốc kế tích hợp được gắn lên điểm cần đo vận tốc - đó là cách tai trong của con người đo vận tốc đầu. Trong khi vận tốc được đo tương ứng với một hệ qui chiếu quán tính, mà không có sự kết nối hữu hình với hệ qui chiếu này. Ví dụ có thể đo dòng điện trong một dây dẫn (một biến "xuyên qua") nhờ các cảm biến đo dòng điện bằng cảm ứng từ trường quanh dây dẫn mà không cần gắn Ampe kế lên dây dẫn (được ưa dùng trong một số ứng dụng). Ngoài ra, trong một số trường hợp, có thể áp dụng các phương pháp tương tự để đo cả biến "chéo" lẫn biến "xuyên

qua". Ví dụ tốc độ dòng lưu chất được coi là biến xuyên qua; có lẽ do liên quan đến cách đo nó bằng một đồng hồ dịch chuyển dương trong ống dẫn; là một loại đo dòng chất lỏng thường dùng trong đồng hồ nước gia đình. Tuy nhiên, các phương pháp quang học dùng để đo vận tốc của một vật rắn (được phân loại là một biến chéo) thường được dùng để đo tốc độ thể tích dòng chảy của một chất lỏng (máy đo vận tốc doppler laze là một ví dụ đáng lưu ý). Và hình như cùng một công nghệ đo cơ bản có thể liên kết với một biến chéo trong một miền và một biến xuyên qua trong một miền khác. Như vậy, khi tiến hành kiểm tra gần, việc xác định biến chéo và xuyên qua dựa trên các quy trình đo lường là mơ hồ.

Các hệ cơ học có nhiều hơn một thứ nguyên

Sự tiện lợi hiển nhiên của việc tương đương hoá các vận tốc trong một hệ cơ học với các điện áp trong các nút mạch bị giảm nhanh khi chúng ta đề cập đến các chuyển động có thứ nguyên lớn hơn chuyển động tịnh tiến hoặc quay quanh một trục cố định với một thứ nguyên. Một vật tịnh tiến có thể có hai hoặc ba vận tốc độc lập (tương ứng trong chuyển động phẳng hoặc không gian). Mỗi vận tốc độc lập sẽ cần một nút mạch độc lập riêng, nhưng động năng liên quan tới dịch chuyển có thể bị phân bố lại với hai hoặc ba bậc tự do (chẳng hạn, khi chuyển động trên một vòng tròn với vận tốc hằng, tổng động năng không đổi trong khi động năng tương ứng với mỗi bậc tự do thay đổi). Nó yêu cầu một số dạng kết nối giữa các nút mạch tương ứng trong mạng điện tương đương, nhưng kết nối này có thể là không rõ ràng.

Vấn đề này càng khó khăn hơn khi ta xem xét chuyển động quay. Thậm chí trường hợp đơn giản nhất trong chuyển động phẳng (ví dụ một vật có thể vừa quay vừa tịnh tiến) cũng cần ba vận tốc độc lập, do đó là ba nút độc lập trong một mạch điện tương đương. Chúng ta thấy rằng ba nút này phải được kết nối nhưng theo một kiểu khác với kết nối giữa ba nút tương ứng với chuyển động không gian. Hơn nữa, kết nối này là không rõ ràng, mà vừa tịnh tiến vừa quay luôn có trong các hệ cơ học - như bánh xe chẳng hạn.

Việc nghiên cứu chuyển động quay không gian đầy đủ vẫn còn nhiều thách thức. Trong trường hợp này, tương tác giữa các bậc tự do độc lập đặc biệt quan trọng khi nó làm tăng các hiệu ứng hồi chuyển, bao gồm tiến động và lắc. Các hiện tượng này là các vấn đề thực tế quan trọng trong cơ điện tử hiện đại, khi chỉ do vấn đề phức tạp của cơ học cổ điển; ví dụ chúng là vấn đề vật lý cơ bản trong một số thiết kế cho một con quay hồi chuyển tốc độ dao động loại cơ điện tử micro (MEMS) [15].

Trực giác vật lý

Theo chúng tôi, hạn chế lớn nhất của phân loại chéo và xuyên qua là nó xác định lực tương tự với tốc độ dòng chất lỏng cũng như với dòng điện (vận tốc tương tự với áp suất chất lỏng cũng như với điện áp). Nó thực sự ngược lại với trực giác và tương đối khó hiểu. Bằng sự tương tự này, áp suất chất lỏng không tương tự với lực mặc dù trong thực tế áp suất thường được định nghĩa bằng lực chia cho đơn vị diện tích. Hơn nữa, động năng tích trữ do chuyển động của chất lỏng không tương tự với động năng do chuyển động của vật rắn. Dựa vào sự giống nhau rõ rệt của các quá trình vật lý cho hai dạng tính năng này, khó có thể hiểu rằng tại sao chúng không tương tự.

Sự hiểu biết là mục tiêu cuối cùng của mô hình hóa. Nó là nhân tố chủ yếu trong việc cho ra đời các thiết kế mới và hiệu quả đồng thời quyết định sự phát triển và duy trì một "trực giác vật lý" về cách ứng xử của các thiết bị. Quan trọng là các sự tương tự giữa các hiệu ứng vật lý trong các lĩnh vực khác nhau có thể phù hợp với trực giác vật lý và bất cứ phương pháp nào cần một sự tương tự ngược với trực giác là đáng ngờ; cần phải xem xét cẩn thận.

15.4 Sự tương tự lực - điện áp của Maxwell: các biến lực và lưu lượng

Một sự tương tự sẽ phân loại các biến trong mỗi miền vật lý để miêu tả chuyển động hoặc nguyên nhân của nó. Như vậy, tốc độ dòng chất lỏng, dòng điện và vận tốc được coi là tương tự

(đôi khi được miêu tả như là các biến "dòng"). Ngược lại, áp suất chất lỏng, điện áp và lực được coi là tương tự (đôi khi được miêu tả như là các biến "thế").

"Lực - điện áp" là sự tương tự đầu tiên giữa các hệ cơ và điện. Nó được Maxwell (1873) đề xuất lần đầu trong luận án của ông về điện học và từ học khi ông quan sát thấy sự tương tự giữa các phương trình Lagrange của cơ học và cơ điện cổ điện. Đó là lý do tại sao Firestone (1933) đưa ra quan điểm lực giống dòng điện như là "một sự tương tự *mới* giữa các hệ cơ và điện" (nhấn mạnh thêm). Có thể, sự tương tự lực - điện áp đã bị ghi sâu trong ngôn ngữ của chúng ta. Thực tế, điện áp vẫn được gọi là "lực điện động" trong một số trường hợp. Các từ như "trở" hoặc "kháng" cũng có ý nghĩa này: một điện trở hay một trở kháng hàm ý một lực suy rộng cho một chuyển động cho trước hoặc một điện áp suy rộng cho một dòng điện cho trước.

Trong thực tế, việc xem vận tốc tương tự với dòng điện và lực tương tự với điện áp của Maxwell là sự công nhận nhiều hơn là sự tương tự về mặt toán học của các phương trình cơ học và cơ điện; có thể dẫn tới sự tương tự của các quá trình vật lý cơ bản.

Hệ các phần tử

Các mô hình thường mô tả các hệ phần tử phân bố trong không gian. Các phần tử có thể có các thuộc tính như khối lượng, điện tích... chúng ta sẽ cân nhắc chọn để bỏ qua phần lớn các thuộc tính này sao cho có thể tập trung vào một hiện tượng vật lý đơn lẻ cần quan tâm. Như vậy, để mô tả điện dung, chúng ta chỉ xem xét điện tích, trong khi để miêu tả quán tính chuyển động, ta chỉ xem xét khối lượng...

Cho rằng mô hình khái niệm chung này được dùng trong các lĩnh vực khác nhau, có thể dùng nó để đưa ra các sự tương tự giữa các biến trong các lĩnh vực vật lý khác nhau. Từ triển vọng này, các đại lượng liên quan tới chuyển động của các phần tử có thể được coi là tương tự với cái khác; như vậy vận tốc cơ học, dòng điện và tốc độ dòng chất lỏng là tương tự. Theo đó, dịch chuyển cơ học, thể tích dòng dịch chuyển và điện tích thay thế là tương tự; và như thế lực, áp suất chất lỏng và điện áp là tương tự. Sự phân loại các biến này hàm ý một sự phân loại các phần tử mạng: một lò xo gắn với dịch chuyển cơ học và lực; một điện dung gắn với điện tích thay thế và điện áp. Do đó, lò xo tương tự với điện dung, khối lượng tương tự với điện cảm và với nguyên do đó, sự tương tự này thỉnh thoảng còn được gọi là sự tương tự "khối lượng-điện cảm".

Trực giác vật lý

Các mô hình "hệ phần tử" thường dẫn đến sự tương tự "trực giác" giữa áp suất, lực và điện áp. Tuy nhiên, với một khái niệm được định nghĩa mập mờ như "trực giác vật lý", đâu là sự xem xét thích hợp trong việc đưa ra sự tương tự giữa các hệ vật lý? Sau cùng, trực giác vật lý có thể là một tập tục và sự hiểu biết, dựa trên cơ sở văn hóa và giáo dục ban đầu.

Chúng ta không nghĩ về vấn đề ấy, thay vào đó chúng ta nghiên cứu trực giác vật lý có thể liên quan tới sự phù hợp với một mô hình trí tuệ trong thế giới vật lý. Mô hình trí tuệ này quan trọng cho việc nghiên cứu về các hệ vật lý và cho việc truyền thông với chúng (nếu được chia sẻ). Do mô hình "hệ phần tử" được giả thiết (đôi khi là rõ ràng, đôi khi lại không) nhiều trong các giáo trình và sổ tay của khoa học và kỹ thuật cơ bản nên chúng ta nhận thấy mô hình này có thể giải thích nguyên nhân tại sao trực giác vật lý được hầu hết các kỹ sư chia sẻ. Như vậy, sau đó việc tuân theo mô hình trí tuệ "hệ phần tử" chung này là quan trọng nhằm tạo điều kiện cho thiết kế, nghiên cứu và giao tiếp với các hệ cơ điện tử. Sự tương tự lực-điện áp cũng như thế; còn sự tương tự lực-dòng điện thì không.

Sự phụ thuộc vào các hệ qui chiếu

Mô hình "hệ phần tử" cũng dẫn đến lý do các cân nhắc vật lý quan trọng khác trong sự lựa chọn tương tự giữa các biến: cách chúng phụ thuộc vào các hệ qui chiếu. Dịch chuyển cơ học xác định chéo đàn hồi tích trữ trong một lò xo và điện tích thay thế xác định thế năng tĩnh điện tích trữ trong một điện dung có thể được định nghĩa với *bất kỳ* hệ qui chiếu này (dù thay đổi theo thời gian

hay đứng yên). Ngược lại, chuyển động cần cho việc tích trữ động năng trong một vật rắn hay chất lỏng có thể được xác định đối với một hệ *quán tính*. Mặc dù nó có thể thường bị bỏ qua, chuyển động của điện tích cần cho việc tích trữ từ trường cũng phải được xác định đối với một hệ quán tính [4].

Để chính xác hơn, các phương trình cơ bản của sự tích luỹ năng lượng dựa trên chuyển động (chẳng hạn, trong một khối lượng hay một cuộn cảm) cần một hệ qui chiếu quán tính (hoặc phải được xác định trong một hệ qui chiếu phi quán tính). Ngược lại, các phương trình cơ bản của việc tích luỹ năng lượng từ dựa trên sự dịch chuyển (chẳng hạn trong một lò xo hay một điện dung) thì không như thế. Vì vậy, sự tương tự khối lượng-cuộn dây (lực-điện áp) thích hợp với vật lý cơ bản hơn sự tương tự khối lượng-điện dung (lực-dòng điện).

Sự thay đổi của các phương trình cơ bản cho việc tích luỹ năng lượng từ trong một hệ qui chiếu phi quán tính liên quan tới việc truyền bức xạ điện từ. Tuy nhiên, các định luật Kirchhoff (đúng hơn là "các xấp xỉ Kirchhoff") tạo nên lý thuyết mạch điện là tương đương với giả thiết rằng bức xạ điện từ không có hoặc không đáng kể. Vì vậy, có thể thấy rằng sự phụ thuộc tích luỹ năng lượng từ vào một hệ qui chiếu quán tính là không đáng kể đối với mạch điện và như thế không liên quan tới bất kỳ sự tranh luận về cơ sở vật lý của các tương tự giữa các mạch điện và các mô hình hệ động lực tham số thu gọn. Đó là một sự thật không thể phủ nhận và có thể được dùng để biện minh cho sự tương tự lực-dòng điện. Tuy nhiên, do sự nhầm lẫn có thể xảy ra, giá trị của một sự tương tự mâu thuẫn cơ bản với vật lý cơ bản của các mô hình tham số rút gọn là đáng ngờ.

15.5 Cơ sở nhiệt động lực cho các tương tự

Thường trong thiết kế và phân tích các hệ cơ điện tử, cần thiết phải xem xét một bộ hiện tượng rộng là so với cơ học và cơ điện. Chẳng hạn như, có thể cần xem xét độ dẫn nhiệt, sự đối lưu hoặc thậm chí các phản ứng hóa học nhiều hơn nữa. Để đưa ra các tương tự giữa các biến trong miền này, cần nghiên cứu các vấn đề vật lý cơ bản. Ứng xử động tương tự trong các miền vật lý khác nhau (dao động cộng hưởng, sự hồi phục tới trạng thái cân bằng...) không chỉ đơn thuần là một sự tương tự của các dạng *toán học*. Ứng xử động này có một cơ sở *vật lý* chung nằm trong sự tích trữ, truyền và tiêu hao không thuận nghịch của năng lượng. Việc xem xét năng lượng dẫn chúng ta đến nhiệt động lực học; chúng ta sẽ thấy rằng nhiệt động lực cung cấp một cơ sở rộng hơn cho việc đưa ra các tương tự và mang lại một số hiểu biết sâu hơn.

Tất cả các dịch chuyển liên quan tới sự tương tự ở trên (như dịch chuyển cơ học, thể tích chất lỏng thay thế và điện tích thay thế) có thể liên hệ với một hàm tích luỹ năng lượng cần trạng thái cân bằng theo định nghĩa của nó, dịch chuyển là đối số của hàm năng lượng này. Nói chung, các hàm này có thể gọi là các hàm thế năng. Để chi tiết hơn, việc lưu trữ năng lượng đàn hồi cần biến dạng liên tục nhưng có thể phục hồi của một vật liệu (chẳng hạn như một lò xo); lực cần thiết để duy trì biến dạng này được xác định tại trạng thái cân bằng, được tính khi thay đổi tỷ lệ dịch chuyển tương đối theo thời gian của các phần tử vật liệu đều bằng không (tức là tất cả các phần tử đứng yên tương đối so với mỗi phần tử khác). Việc lưu trữ năng lượng đàn hồi cần sự cách ly liên tục các điện tích hoạt động mang dấu dương (chẳng hạn như trong một điện dung); điện áp cần thiết được xác định tại trạng thái cân bằng, được tính khi tốc độ thay đổi theo thời gian của chuyển động điện tích bằng không (tức là, tất cả các điện tích là đứng yên tương đối so với mỗi phần tử khác).

Các biến tập trung và mở rộng

Trong sự hình thành nhiệt động lực, tổng năng lượng tích trữ và dịch chuyển xác định nó là các biến *mở rộng*. Tức là chúng thay đổi với phạm vi không gian (chẳng hạn kích thước hoặc thể tích) của một đối tượng tích năng lượng. Năng lượng đàn hồi tổng cộng tích trữ trong một thanh đồng dạng với tiết diện cố định trong một trạng thái ứng suất không đổi lý tưởng tỷ lệ với chiều dài (và sau đó là thể tích) của thanh; do vậy là tổng dịch chuyển tương đối của các phần đầu; đều là các biến mở rộng. Năng lượng đàn hồi tổng cộng tích trữ trong một điện dung bản mặt song song lý

tưởng (chẳng hạn điện dung không có trường biên) tỷ lệ với diện tích của bản mặt (và sau đó là thể tích bao quanh, với khe hở cố định); do vậy là điện tích riêng tổng cộng trên các bản mặt; đều là các biến mở rộng [2].

Trạng thái cân bằng của các phần tử tích trữ này được thiết lập bởi một biến *tập trung* không thay đổi theo kích cỡ của đối tượng. Biến này là gradien (đạo hàm khối) của năng lượng tích trữ đối với dịch chuyển tương ứng. Như vậy, tại trạng thái cân bằng, lực trên tiết diện của thanh là không liên quan đến chiều dài hay thể tích của thanh; lực là một biến tập trung. Nếu tổng điện tích riêng trên một điện dung tỷ lệ với diện tích, điện áp giữa các bản mặt không phụ thuộc vào diện tích; điện áp là biến tập trung.

Động lực học không chỉ do sự tích năng lượng mà còn do việc truyền và tạo công suất. Công suất tức thời trong một phần tử tích trữ tại trạng thái cân bằng là sản phẩm cả biến (tập trung) gradien (lực, điện áp) với tốc độ biến đổi theo thời gian của biến (mở rộng) dịch chuyển (vận tốc, dòng điện). Dùng cách tiếp cận dựa trên nhiệt động lực này, tất cả các biến tập trung sẽ được coi là tương tự, cũng như tất cả các biến mở rộng và tốc độ thay đổi theo thời gian của chúng...

Việc đưa các tương tự từ sự phân loại nhiệt động lực vào trong các biến mở rộng và tập trung có thể dễ dàng được áp dụng cho các hệ chất lỏng. Xem xét thế năng tích trữ trong một vật chứa chất lỏng không nén mở: áp suất tại bất kỳ độ sâu nào không phụ thuộc vào diện tích tại độ sâu này và thể tích của khối chất lỏng bên trên nó; áp suất là một biến tập trung tương tự với lực và điện áp, như trực giác vật lý chung của chúng ta đang nghĩ. Ngược lại, năng lượng tích trong khối chất lỏng phía trên mà độ sâu xác định bởi thể tích chất lỏng; năng lượng và thể tích là các biến mở rộng, thể tích đóng vai trò của dịch chuyển tương tự với điện tích và dịch chuyển cơ học. Áp suất là đạo hàm khối của năng lượng tích trữ đối với thể tích và công suất tức thời tích trữ là sản phẩm của áp suất với tốc độ dòng thể tích, tốc độ thay đổi theo thời gian của khối chảy qua độ sâu danh nghĩa.

Ưu điểm quan trọng nhất của việc đưa ra các tương tự từ một sự phân loại với các biến mở rộng và tập trung là nó có thể được tổng quát hóa cho các lĩnh vực mà khái niệm "hệ phần tử" có thể ít có khả năng áp dụng. Ví dụ hầu hết các thiết kế cơ điện tử yêu cầu sự xem xét kỹ lưỡng vấn đề làm nóng và làm lạnh nhưng không có một dòng phần tử rõ ràng liên quan tới thông lượng nhiệt. Tuy nhiên, các biến mở rộng và tập trung liên quan tới việc tích trữ nhiệt năng ở trạng thái cân bằng có thể dễ dàng nhận dạng. Từ nhiệt động lực học cổ điển, có thể thấy rằng entropy (tổng) là một biến mở rộng và đóng vai trò là một dịch chuyển. Gradien năng lượng đối với nhiệt năng (một biến tập trung) có thể được xem là tương tự với lực, điện áp và áp suất. Đẳng thức nhiệt thiết lập cân bằng nhiệt giữa hai vật chứa nhiệt (năng lượng) và truyền nhiệt tới vật khác.

Dùng từ thận trọng ở đây là hợp lý khi sự phân loại thành các biến mở rộng và tập trung áp dụng chính xác chỉ cho các đại lượng vô hướng như áp suất, thể tích... Như phác họa ở trên, sự phân loại này có thể được tổng quát hóa theo một cách nghiêm ngặt cho các đại lượng có hướng, nhưng cần phải cẩn trọng [2].

Trạng thái cân bằng và dừng

Trong một số lĩnh vực (không phải là tất cả), việc tích năng lượng cũng có thể dựa trên chuyển động. Sự tích lũy động năng có thể liên quan tới chuyển động vật rắn hoặc chuyển động chất lỏng; việc tích năng lượng từ cần chuyển động của các điện tích. Sự phân loại dựa trên nhiệt động lực học tạo ra các kiểu tích năng lượng khác nhau này như là sự tương tự với một loại khác và nói chung chúng có thể được gọi là các phần tử tích trữ *động* năng. Tất cả các biến chuyển động được coi tương tự nhau (chẳng hạn vận tốc, tốc độ dòng chảy, dòng điện) có thể liên hệ với một hàm tích năng lượng được xác định bằng *trạng thái dừng* (đúng hơn là trạng thái cân bằng). Với một vật rắn, chuyển động dừng cần tổng lực bằng không và sau đó là mômen và động năng không đổi. Với từ trường tích năng lượng trong một cuộn dây, dòng điện dừng cần điện áp bằng không và sau đó là từ thông và năng lượng từ không đổi.

Chúng ta có thể tranh luận rằng sự khác biệt nào đó giữa trạng thái cân bằng và dừng đơn thuần là vấn đề viễn cảnh hay thông thường, hơn là một đặc tính cơ bản của thế giới vật lý. Ví dụ với

hay đứng yên). Ngược lại, chuyển động cần cho việc tích trữ động năng trong một vật rắn hay chất lỏng có thể được xác định đối với một hệ *quán tính*. Mặc dù nó có thể thường bị bỏ qua, chuyển động của điện tích cần cho việc tích trữ từ trường cũng phải được xác định đối với một hệ quán tính [4].

Để chính xác hơn, các phương trình cơ bản của sự tích luỹ năng lượng dựa trên chuyển động (chẳng hạn, trong một khối lượng hay một cuộn cảm) cần một hệ qui chiếu quán tính (hoặc phải được xác định trong một hệ qui chiếu phi quán tính). Ngược lại, các phương trình cơ bản của việc tích luỹ năng lượng từ dựa trên sự dịch chuyển (chẳng hạn trong một lò xo hay một điện dung) thì không như thế. Vì vậy, sự tương tự khối lượng-cuộn dây (lực-điện áp) thích hợp với vật lý cơ bản hơn sự tương tự khối lượng-điện dung (lực-dòng điện).

Sự thay đổi của các phương trình cơ bản cho việc tích luỹ năng lượng từ trong một hệ qui chiếu phi quán tính liên quan tới việc truyền bức xạ điện từ. Tuy nhiên, các định luật Kirchhoff (đúng hơn là "các xấp xỉ Kirchhoff") tạo nên lý thuyết mạch điện là tương đương với giả thiết rằng bức xạ điện từ không có hoặc không đáng kể. Vì vậy, có thể thấy rằng sự phụ thuộc tích luỹ năng lượng từ vào một hệ qui chiếu quán tính là không đáng kể đối với mạch điện và như thế không liên quan tới bất kỳ sự tranh luận về cơ sở vật lý của các tương tự giữa các mạch điện và các mô hình hệ động lực tham số thu gọn. Đó là một sự thật không thể phủ nhận và có thể được dùng để biện minh cho sự tương tự lực-dòng điện. Tuy nhiên, do sự nhầm lẫn có thể xảy ra, giá trị của một sự tương tự mâu thuẫn cơ bản với vật lý cơ bản của các mô hình tham số rút gọn là đáng ngờ.

15.5 Cơ sở nhiệt động lực cho các tương tự

Thường trong thiết kế và phân tích các hệ cơ điện tử, cần thiết phải xem xét một bộ hiện tượng rộng là so với cơ học và cơ điện. Chẳng hạn như, có thể cần xem xét độ dẫn nhiệt, sự đối lưu hoặc thậm chí các phản ứng hóa học nhiều hơn nữa. Để đưa ra các tương tự giữa các biến trong miền này, cần nghiên cứu các vấn đề vật lý cơ bản. Ứng xử động tương tự trong các miền vật lý khác nhau (dao động cộng hưởng, sự hồi phục tới trạng thái cân bằng...) không chỉ đơn thuần là một sự tương tự của các dạng *toán học*. Ứng xử động này có một cơ sở *vật lý* chung nằm trong sự tích trữ, truyền và tiêu hao không thuận nghịch của năng lượng. Việc xem xét năng lượng dẫn chúng ta đến nhiệt động lực học; chúng ta sẽ thấy rằng nhiệt động lực cung cấp một cơ sở rộng hơn cho việc đưa ra các tương tự và mang lại một số hiểu biết sâu hơn.

Tất cả các dịch chuyển liên quan tới sự tương tự ở trên (như dịch chuyển cơ học, thể tích chất lỏng thay thế và điện tích thay thế) có thể liên hệ với một hàm tích luỹ năng lượng cần trạng thái cân bằng theo định nghĩa của nó, dịch chuyển là đối số của hàm năng lượng này. Nói chung, các hàm này có thể gọi là các hàm thế năng. Để chi tiết hơn, việc lưu trữ năng lượng đàn hồi cần biến dạng liên tục nhưng có thể phục hồi của một vật liệu (chẳng hạn như một lò xo); lực cần thiết để duy trì biến dạng này được xác định tại trạng thái cân bằng, được tính khi thay đổi tỷ lệ dịch chuyển tương đối theo thời gian của các phần tử vật liệu đều bằng không (tức là tất cả các phần tử đứng yên tương đối so với mỗi phần tử khác). Việc lưu trữ năng lượng đàn hồi cần sự cách ly liên tục các điện tích hoạt động mang dấu dương (chẳng hạn như trong một điện dung); điện áp cần thiết được xác định tại trạng thái cân bằng, được tính khi tốc độ thay đổi theo thời gian của chuyển động điện tích bằng không (tức là, tất cả các điện tích là đứng yên tương đối so với mỗi phần tử khác).

Các biến tập trung và mở rộng

Trong sự hình thành nhiệt động lực, tổng năng lượng tích trữ và dịch chuyển xác định nó là các biến *mở rộng*. Tức là chúng thay đổi với phạm vi không gian (chẳng hạn kích thước hoặc thể tích) của một đối tượng tích năng lượng. Năng lượng đàn hồi tổng cộng tích trữ trong một thanh đồng dạng với tiết diện cố định trong một trạng thái ứng suất không đổi lý tưởng tỷ lệ với chiều dài (và sau đó là thể tích) của thanh; do vậy là tổng dịch chuyển tương đối của các phần đầu; đều là các biến mở rộng. Năng lượng đàn hồi tổng cộng tích trữ trong một điện dung bản mặt song song lý

tường (chẳng hạn điện dung không có trường biên) tỷ lệ với diện tích của bản mặt (và sau đó là thể tích bao quanh, với khe hở cố định); do vậy là điện tích riêng tổng cộng trên các bản mặt; đều là các biến mở rộng [2].

Trạng thái cân bằng của các phần tử tích trữ này được thiết lập bởi một biến *tập trung* không thay đổi theo kích cỡ của đối tượng. Biến này là gradien (đạo hàm khối) của năng lượng tích trữ đối với dịch chuyển tương ứng. Như vậy, tại trạng thái cân bằng, lực trên tiết diện của thanh là không liên quan đến chiều dài hay thể tích của thanh; lực là một biến tập trung. Nếu tổng điện tích riêng trên một điện dung tỷ lệ với diện tích, điện áp giữa các bản mặt không phụ thuộc vào diện tích; điện áp là biến tập trung.

Động lực học không chỉ do sự tích năng lượng mà còn do việc truyền và tạo công suất. Công suất tức thời trong một phần tử tích trữ tại trạng thái cân bằng là sản phẩm cả biến (tập trung) gradien (lực, điện áp) với tốc độ biến đổi theo thời gian của biến (mở rộng) dịch chuyển (vận tốc, dòng điện). Dùng cách tiếp cận dựa trên nhiệt động lực này, tất cả các biến tập trung sẽ được coi là tương tự, cũng như tất cả các biến mở rộng và tốc độ thay đổi theo thời gian của chúng...

Việc đưa các tương tự từ sự phân loại nhiệt động lực vào trong các biến mở rộng và tập trung có thể dễ dàng được áp dụng cho các hệ chất lỏng. Xem xét thế năng tích trữ trong một vật chứa chất lỏng không nén mở: áp suất tại bất kỳ độ sâu nào không phụ thuộc vào diện tích tại độ sâu này và thể tích của khối chất lỏng bên trên nó; áp suất là một biến tập trung tương tự với lực và điện áp, như trực giác vật lý chung của chúng ta đang nghĩ. Ngược lại, năng lượng tích trong khối chất lỏng phía trên mà độ sâu xác định bởi thể tích chất lỏng; năng lượng và thể tích là các biến mở rộng, thể tích đóng vai trò của dịch chuyển tương tự với điện tích và dịch chuyển cơ học. Áp suất là đạo hàm khối của năng lượng tích trữ đối với thể tích và công suất tức thời tích trữ là sản phẩm của áp suất với tốc độ dòng thể tích, tốc độ thay đổi theo thời gian của khối chảy qua độ sâu danh nghĩa.

Ưu điểm quan trọng nhất của việc đưa ra các tương tự từ một sự phân loại với các biến mở rộng và tập trung là nó có thể được tổng quát hóa cho các lĩnh vực mà khái niệm "hệ phần tử" có thể ít có khả năng áp dụng. Ví dụ hầu hết các thiết kế cơ điện tử yêu cầu sự xem xét kỹ lưỡng vấn đề làm nóng và làm lạnh nhưng không có một dòng phần tử rõ ràng liên quan tới thông lượng nhiệt. Tuy nhiên, các biến mở rộng và tập trung liên quan tới việc tích trữ nhiệt năng ở trạng thái cân bằng có thể dễ dàng nhận dạng. Từ nhiệt động lực học cổ điển, có thể thấy rằng entropy (tổng) là một biến mở rộng và đóng vai trò là một dịch chuyển. Gradien năng lượng đối với nhiệt năng (một biến tập trung) có thể được xem là tương tự với lực, điện áp và áp suất. Đẳng thức nhiệt thiết lập cân bằng nhiệt giữa hai vật chứa nhiệt (năng lượng) và truyền nhiệt tới vật khác.

Dùng từ thận trọng ở đây là hợp lý khi sự phân loại thành các biến mở rộng và tập trung áp dụng chính xác chỉ cho các đại lượng vô hướng như áp suất, thể tích... Như phác họa ở trên, sự phân loại này có thể được tổng quát hóa theo một cách nghiêm ngặt cho các đại lượng có hướng, nhưng cần phải cẩn trọng [2].

Trạng thái cân bằng và dừng

Trong một số lĩnh vực (không phải là tất cả), việc tích năng lượng cũng có thể dựa trên chuyển động. Sự tích lũy động năng có thể liên quan tới chuyển động vật rắn hoặc chuyển động chất lỏng; việc tích năng lượng từ cần chuyển động của các điện tích. Sự phân loại dựa trên nhiệt động lực học tạo ra các kiểu tích năng lượng khác nhau này như là sự tương tự với một loại khác và nói chung chúng có thể được gọi là các phần tử tích trữ *động* năng. Tất cả các biến chuyển động được coi tương tự nhau (chẳng hạn vận tốc, tốc độ dòng chảy, dòng điện) có thể liên hệ với một hàm tích năng lượng được xác định bằng *trạng thái dừng* (đúng hơn là trạng thái cân bằng). Với một vật rắn, chuyển động dừng cần tổng lực bằng không và sau đó là mômen và động năng không đổi. Với từ trường tích năng lượng trong một cuộn dây, dòng điện dừng cần điện áp bằng không và sau đó là từ thông và năng lượng từ không đổi.

Chúng ta có thể tranh luận rằng sự khác biệt nào đó giữa trạng thái cân bằng và dừng đơn thuần là vấn đề viễn cảnh hay thông thường, hơn là một đặc tính cơ bản của thế giới vật lý. Ví dụ với

một sự lựa chọn thay thế các hệ qui chiếu, "chuyển động liên tục" có thể định nghĩa lại như là "trạng thái dừng" hoặc "trạng thái cân bằng". Từ cách nhìn này, một "trạng thái cân bằng" vận tốc tương đối bằng không giữa hai vật rắn (hoặc giữa một vật rắn và một hệ qui chiếu) có thể định nghĩa bởi lực bằng không. Theo cách lập luận này, bất cứ sự khác biệt giữa sự tương tự khối lượng-cuộn dây và khối lượng-điện dung có thể trở thành một vấn đề của lựa chọn cá nhân. Tuy nhiên, trong khi sự tương đương rõ ràng giữa "trạng thái cân bằng" và "trạng thái dừng" có thể hợp lý trong cảm nhận toán học bề ngoài của tỷ lệ thay đổi của một biến bằng không, trong một hệ cơ học, dịch chuyển (hay vị trí) và vận tốc (hay mômen) là khác nhau một cách cơ bản. Ví dụ trong khi vận tốc, lực và mômen có thể biến đổi giữa các hệ qui chiếu như các tenxơ hạng một, thì vị trí (hay dịch chuyển) không thể biến đổi như là một tenxơ của bất cứ loại nào. Như vậy, một sự khác biệt giữa trạng thái cân bằng và trạng thái dừng phản ánh một phần quan trọng của cấu trúc các mô hình hệ vật lý.

Sự tương tự, không đồng nhất

Cần phải nhớ rằng bất kỳ sự phân loại nào dùng để thiết lập các tương tự đều là sự trừu tượng hóa. Hầu hết hoạt động động lực trong các miền khác nhau có thể tương tự nhưng không đồng nhất. Chúng ta đã chỉ ra ở trên rằng nếu dùng vận tốc hay dòng điện như là đối số của hàm tích năng lượng, phải cần sự thận trọng để nhận dạng hệ qui chiếu quán tính thích hợp và/hoặc để hiểu các hệ quả của việc dùng một hệ qui chiếu phi quán tính. Tuy nhiên, một đặc tính quan trọng khác của các biến này là chúng về cơ bản là các vectơ (chẳng hạn chúng có một hướng xác định trong không gian). Một hệ quả là việc định nghĩa nhiệt động lực học của các biến mở rộng và tập trung phải được hình thành trước khi có thể dùng nó để phân loại các biến này [2] Ngược lại, một đại lượng như nhiệt độ hay áp suất về cơ bản là một đại lượng vô hướng. Hơn nữa, cả hai đại lượng này thực chất là các đại lượng vô hướng "dương", chúng đã hoàn toàn xác định, duy nhất và có các giá trị không có ý nghĩa vật lý (nhiệt độ không tuyệt đối, áp suất chân không hoàn toàn). Bên cạnh bất cứ sự phụ thuộc nào vào các hệ qui chiếu quán tính, sự tương tự chéo-xuyên qua giữa vận tốc (một vectơ không có giá trị không duy nhất) và áp suất (một đại lượng vô hướng có một điểm không quan trọng về mặt vật lý) sẽ gây nên lỗi và nhầm lẫn nếu được sử dụng không cẩn thận.

Lý do này trở nên đặc biệt quan trọng khi tổ hợp các phần tử tương tự nhau của một mô hình (ví dụ một số vật chuyển động với vận tốc giống nhau được coi như là một vật rắn đơn nhất) để đơn giản hóa biểu thức của phương trình động lực học hay cải thiện khả năng tính toán. Việc dùng các biến kỹ thuật để mô tả việc tích năng lượng có thể được phân thành hai nhóm: (i) các biến vô hướng giá trị dương và (ii) các biến có hướng. Các biến vô hướng dương chỉ ra một giá trị vật lý tuyệt đối hoặc không; ví dụ thể tích dòng tích trữ, số mol của một loại chất, entropy... Các biến có hướng có hướng xác định trong không gian. Thậm chí trong trường hợp một thứ nguyên, chúng có thể dương hoặc âm, dấu xác định hướng phụ thuộc vào hệ quy chiếu; các ví dụ bao gồm dịch chuyển, mômen... Nói chung, các biến này không chỉ ra giá trị vật lý tuyệt đối hoặc không, mặc dù một số trong chúng cần phải được xác định đối với một hệ quán tính.

Các phần tử của một mô hình mô tả việc tích năng lượng dựa trên các biến vô hướng có thể được tổ hợp theo chỉ một cách: Các phần tử phải trong trạng thái cân bằng của nhau; thêm các biến mở rộng của chúng, trong khi các biến tập trung tương ứng bằng nhau, tính độc lập của hướng và xác định điều kiện cân bằng. Với các phần tử mô hình miêu tả việc tích năng lượng dựa trên các biến không vô hướng, thường có hai lựa chọn. Ví dụ có thể tổ hợp các điện dung thành song song hoặc nối tiếp và dễ dàng xác định điện dung tương đương thu được. Trong một mạch song song, trạng thái cân bằng được xác định bởi điện áp (biến tập trung) và các điện tích (biến mở rộng) được cộng vào trước đó. Tuy nhiên, một mạch nối tiếp là "sự ghép đôi" theo nghĩa thay đổi vai trò của điện tích và điện áp: đẳng thức của các điện tích xác định trạng thái cân bằng và điện áp được cộng lại. Các lò xo cũng có thể tổ hợp bằng hai cách. Tuy nhiên, không chỉ cho trường hợp khối lượng tịnh tiến và mômen quay, chỉ có thể tổ hợp chúng trong một vật rắn tương đương đơn nhất nếu các vận tốc của chúng bằng nhau và trong trường hợp này mômen được cộng lại với nhau.

Sự tồn tại của hai cách "ghép đôi" để tổ hợp một số phần tử tích năng lượng dựa trên các đại lượng không vô hướng phần nào hơi khó hiểu. Nó có thể đã góp phần vào cuộc tranh luận dài (nếu

chúng ta tính từ thời đại của Maxwell, cách đây hơn 1 thế kỷ) về sự tương tự tốt nhất giữa các hệ cơ học và điện từ. Tuy nhiên, điểm quan trọng là các mạch nối tiếp và song song có thể không được phổ biến theo một cách dễ hiểu cho tất cả các miền.

Tính nút

Tính chất này được hiểu như là mục tiêu đầu tiên của mô hình hóa, các tương tự có thể được chọn để nâng cao sự hiểu biết. Do có thể có những sự khác nhau cơ bản giữa tất cả các lĩnh vực, nên thận trọng trong việc đưa ra sự tương tự để đảm bảo các tính chất riêng biệt của một lĩnh vực có thể không được áp dụng thích hợp cho các lĩnh vực khác. Dẫn đến đối số mạnh nhất dựa vào sự phân loại chéo-xuyên qua. Lịch sử đã chứng minh rằng tính chất này bắt đầu với việc dùng các biểu diễn mạch điện tương đương của các hệ thống phi điện. Không may, các mạch điện cung cấp một cơ sở không thích hợp cho việc phát triển một sự biểu diễn chung cho động lực học hệ vật lý. Đó là bởi vì các mạch điện có được tính chất riêng biệt, *tính nút*, khá hiếm trong các miền hệ vật lý (trừ trường hợp xấp xỉ).

Tính nút nói đến thực tế là bất kỳ mạch con của một mạch điện được coi như một nút theo nghĩa có thể viết một phương trình cân bằng dòng điện Kirchhoff cho mạch con hoàn toàn. Như là một kết quả của tính nút, có thể thiết lập các phần tử mạch điện trong hình học tôpô bất kỳ và vẫn còn mô tả một mạch điện có thể thực hiện về mặt vật lý. Tính chất "khả năng kết nối tùy ý" này không phải là một tính chất chung của các mô hình hệ vật lý tham số thu gọn. Đáng lưu ý, không thể kết nối các phần tử khối lượng một cách tùy ý; chúng phải luôn được tham chiếu tới một hệ quán tính. Với lý do này, các mạch điện có thể dẫn đến sai lầm khi dùng chúng như là một cơ sở cho việc biểu diễn chung cho động lực học hệ vật lý. Đó không đơn thuần chỉ là sự chính xác toán học; một số hậu quả của hoạt động không nút để phân tích hệ thống điều khiển đã được phát hiện gần đây [14].

Với sự mở rộng, do mỗi lĩnh vực vật lý có các đặc tính riêng, bất cứ sự cố gắng để lập công thức cho sự tương tự bằng cách lấy một lĩnh vực (điện, cơ học...) như là một điểm bắt đầu gần có những hạn chế. Một cách tiếp cận hữu ích hơn là bắt đầu với các đặc tính này của các biến vật lý chung cho tất cả các lĩnh vực và đó là nguyên nhân để hướng đến nhiệt động lực học. Nói cách khác, cách tốt nhất để xác định sự tương tự *giữa* các lĩnh vực có thể là để "bước ra ngoài" *tất cả* chúng. Bằng cách thiết kế, các tính chất chung của tất cả lĩnh vực như là một bản chất mở rộng của năng lượng tích trữ, bản chất tập trung của các biến định nghĩa trạng thái cân bằng, hơn nữa, không là đối tượng để các giới hạn của bất kỳ tính chất nào (chẳng hạn như tính nút). Đó là ưu điểm chính của việc đưa ra sự tương tự dựa trên các khái niệm nhiệt động lực học như là sự khác biệt giữa các biến mở rộng và tập trung.

15.6 Các sơ đồ kết nối

Sự tương tự thường liên quan đến các biểu diễn sơ đồ trừu tượng của các mô hình hệ vật lý đa lĩnh vực. Sự tương tự lực-dòng điện thường liên quan tới biểu diễn đồ thị tuyến tính của các mạch [13]; sự tương tự lực-điện áp liên quan tới biểu diễn sơ đồ kết nối được Paynter giới thiệu năm 1960. Sơ đồ kết nối phân loại các biến thành các lực (nói chung là lực, điện áp, áp suất...) và các dòng (nói chung là vận tốc, dòng điện, tốc độ dòng chảy...). Các sơ đồ liên kết mở rộng tất cả các lợi ích thực tế của sự tương tự lực-dòng điện (chéo-xuyên qua) tới sự tương tự lực-điện áp (lực-dòng): chúng cung cấp một biểu diễn thống nhất cho ứng xử động lực học tham số rút gọn trong một số lĩnh vực đã được giảng giải trong một số giáo trình nổi tiếng [7, 8], có các phương pháp có hệ thống cho việc lựa chọn các tập các biến độc lập để mô tả một hệ thống, các cách để tận dụng ưu thế dễ dàng trong nhận biết vận tốc và điện áp và các phương pháp ma trận để thuận tiện cho phân tích trên máy tính. Thực tế, hiện tại đã có một vài mô hình hỗ trợ bởi máy tính cung cấp các gói sử dụng ngôn ngữ sơ đồ liên kết. Hơn nữa, các sơ đồ kết nối đã được áp dụng thành công để mô tả động lực học của các cơ cấu không gian (gồm cả các hiệu ứng hồi chuyển) trong khi các đồ thị tuyến tính không làm được.

Mặc dù, sự tương tự lực-điện áp thường được dùng nhiều nhất với sơ đồ kết nối, có thể dùng tương tự lực-dòng điện dễ dàng: hình thức toán học cơ bản là không khác so với việc chọn các biến tương tự. Thực tế, khi theo đuổi dòng suy nghĩ này, sự lựa chọn là không cần thiết và có thể tránh; tạo một cách để lọc sự khác biệt tiềm tàng về vai trò của các biến tập trung và các dạng kết nối ghép đôi sẵn có cho một số phần tử trong một số lĩnh vực.

Trong phương pháp Sơ đồ kết nối suy rộng GBG (Generalized Bond Graph) [2], tất cả sự tích năng lượng trở nên tương tự và chỉ nhận dạng một loại phần tử tích trữ. Dịch chuyển của nó là một biến mở rộng; gradien của hàm tích năng lượng đối với dịch chuyển này là một biến tập trung. Trong một số lĩnh vực (nhưng không phải tất cả), một kiểu ghép đôi riêng biệt được gọi là *hồi chuyển* được tìm để tăng *sự xuất hiện* của một dạng tích năng lượng kép, một quán tính (suy rộng) cũng như khả năng của các cách ghép đôi để kết nối các phần tử. Biểu diễn GBG nhấn mạnh rằng sự hiện diện của các dạng tích năng lượng kép và các dạng kết nối kép là một tích chất riêng (dẫu quan trọng) của một số lĩnh vực giới hạn. Nói chung, có thể bắt nguồn từ sự tương tự "khối lượng-điện dung" hoặc từ sự tương tự "khối lượng-cuộn dây" từ một biểu diễn GBG bằng cách chọn để kết hợp cặp hồi chuyển với các phần tử tích năng lượng "trạng thái cân bằng" hoặc "trạng thái dừng".

Điểm quan trọng thu được ở đây là cơ sở của sự tương tự giữa các miền không phụ thuộc vào việc dùng một biểu diễn sơ đồ trừu tượng riêng. Giá trị thực tế của việc thiết lập tương tự giữa các lĩnh vực và những phẩm chất của một cách tiếp cận không phụ thuộc vào lĩnh vực dựa trên các biến tập trung và mở rộng vẫn không được chú ý trong các công cụ lý thuyết sơ đồ được dùng để phân tích.

15.7 Một số nhận xét kết luận

Trong phần trước, chúng ta đã đưa ra một số lưu ý quan trọng trong việc lựa chọn sự tương tự giữa các biến trong các lĩnh vực vật lý khác nhau. Từ quan điểm toán học chặt chẽ, có rất ít sự lựa chọn, các sự tương tự có thể được dùng như là cơ sở cho mô tả hệ vật lý tự phù hợp, khắc khe. Nhân tố độc lập và quan trọng nảy ra từ một quan điểm vật lý - coi ứng xử vật lý theo cách cấu trúc được mô tả trong các lĩnh vực khác nhau. Kết luận:

- Mô hình "hệ phần tử" được thừa nhận rộng rãi trong khoa học cơ bản và kỹ thuật dẫn đến sự tương tự trực giác giữa lực và điện áp, vận tốc và dòng điện, khối lượng và cuộn cảm...
- Phương pháp đo lường dùng để thúc đẩy sự khác biệt giữa các biến chéo và xuyên qua tốt nhất cho sự phân loại không rõ ràng.
- Tính nút (thuộc tích của "khả năng liên kết tùy ý") không phải là một thuộc tính chung của các mô hình hệ vật lý tham số rút gọn. Như vậy, các mạch điện có thể dẫn đến nhầm lẫn khi dùng là một cơ sở cho mô tả chung của động lực học hệ vật lý.
- Sự tương tự trực giác giữa vận tốc và dòng điện phù hợp với sự phân loại nhiệt động lực học thành các biến mở rộng và tập trung. Với kết quả đó, sự tương tự có thể được suy ra từ ứng xử động lực học trong các lĩnh vực mà khái niệm "hệ phần tử" ít có khả năng áp dụng.
- Sự tương tự lực-điện áp hay khối lượng-cuộn cảm phản ánh sự khác biệt quan trọng giữa hiện tượng tích năng lượng cân bằng và hiện tượng tích năng lượng ở trạng thái dừng: các phương trình cơ bản của hiện tượng tích năng lượng ở trạng thái dừng cần hệ qui chiếu quán tính (hoặc phải được thay đổi trong một hệ qui chiếu phi quán tính) trong khi các phương trình cơ bản của hiện tượng tích năng lượng cân bằng không có.

Lập luận của chúng ta dựa trên sự giả thiết rằng các mô hình động lực học hệ vật lý có thể phản ánh đúng đắn cách các mô tả hiện tượng vật lý phụ thuộc vào các hệ qui chiếu và tương thích với nhiệt động lực học. Sự phân loại chéo-xuyên qua của các biến không gặp phải các yêu cầu này. Ngược lại, sự phân loại các biến dựa trên quan điểm hệ phần tử dẫn đến sự tương tự giữa lực, áp

suất, và điện áp ở một bên và vận tốc, dòng chất lỏng và dòng diện ở một bên không chỉ thỏa mãn các tiêu chuẩn này mà còn có vẻ phù hợp với cảm nhận chung. Chúng ta tin vào sự giao tiếp thuận tiện và hiểu biết sâu sắc này là những lợi ích lớn của việc dùng các sự tương tự.

Lời cảm ơn

Neville Hogan đã được hỗ trợ một phần bởi nguồn tài chính số AR40029 từ Viện Y tế quốc gia.

Tài liệu tham khảo

[1] (1926). Models and analogies for demonstrating electrical principles, parts I-XIX. *The Engineer*, 142.

[2] Breedveld, P.C. (1984). *Physical Systems Theory in Terms of Bond Graphs,* University of Twente, Enschede, Netherlands, ISBN 90-9000599-4 (distr. by author).

[3] Darrieus, M. (1929). Les modeles mecaniques en electrotechnique. Leur application aux problemes de stabilite., *Bull. Soc. Franc. Electric.*, 36:729–809.

[4] Feynman, R.P., Leighton, R.B., and Sands, M. (1963). *The Feynman Lectures on Physics, Volume II: Mainly Electromagnetism and Matter*, Addison-Wesley Publishing Company.

[5] Firestone, F.A. (1933). A new analogy between mechanical and electrical system elements. *Journal of the Acoustic Society of America*, 3:249–267.

[6] Hähnle, W. (1932). Die darstellung elektromechanischer gebilde durch rein elektrsiche schaltbilder. *Wissenschaftliche Veroffentl. Siemens Konzern*, 11:1–23.

[7] Karnopp, D.C. and Rosenberg, R.C. (1975). *System Dynamics: A Unified Approach*, John Wiley.

[8] Karnopp, D.C., Margolis, D.L., and Rosenberg, R.C. (1999). *System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, 3rd edition, John Wiley.

[9] Maxwell, J.C. (1873). *Treatise on Electricity and Magnetism.*

[10] Nickle, C.A. (1925). Oscillographic solutions of electro-mechanical systems. *Trans. A.I.E.E.*, 44:844–856.

[11] Rowell, D. and Wormley, D.N. (1997). *System Dynamics: An Introduction*, Prentice-Hall, NJ.

[12] Shearer, J.L., Murphy, A.T., and Richardson, H.H. (1967). *Introduction to System Dynamics*, Addison-Wesley Publishing Company.

[13] Trent, H.M. (1955). Isomorphisms between oriented linear graphs and lumped physical systems. *Journal of the Acoustic Society of America*, 27:500–527.

[14] Won, J. and Hogan, N. (1998). Coupled stability of non-nodic physical systems. *IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems Design.*

[15] Yazdi, N., Ayazi, F., and Najafi, K. (1998). Micromachined inertial sensors. *Proc. IEEE*, 86(8), 1640–1659.

III

Cảm biến và cơ cấu chấp hành

16 Giới thiệu về cảm biến và cơ cấu chấp hành *M. Anjanappa, K. Datta và T. Song* .. 16-1

Cảm biến • Cơ cấu chấp hành

17 Cơ sở thời gian và tần số *Michael A. Lombardi* 17-1

Mở đầu • Đo thời gian và tần số • Các chuẩn thời gian và tần số • Truyền thời gian và tần số • Kết luận

18 Đặc tính của cảm biến và cơ cấu chấp hành *Joey Parker*..... 18-1

Dải đo • Độ phân giải • Độ nhạy • Sai số • Khả năng lặp lại • Độ tuyến tính và độ chính xác • Trở kháng • Tính phi tuyến • Ma sát tĩnh và ma sát Culông • Độ lệch tâm • Khe hở • Trạng thái bão hòa • Vùng chết • Đáp ứng hệ thống • Đáp ứng hệ bậc nhất • Đáp ứng hệ bậc hai có cản • Đáp ứng tần số

19 Cảm biến *Kevin M. Lynch, Micheal A. Peshkin, Halit Eren, M. A. Elbestawi, Ivan J. Garshelis, Richard Thorn, Pamela M. Norris, Bouvard Hosticka, J. Fernando Figueroa, H. R. (Bart) Everett, Stanley S. Ipson, và ChangLiu.* 19.1

Cảm biến dịch chuyển thẳng và quay • Cảm biến gia tốc • Đo lực • Đo mômen và công suất • Đo lưu lượng • Đo nhiệt độ • Cảm biến đo khoảng cách và cảm biến tiệm cận • Các hệ thống nhận biết ánh sáng, hình ảnh và nhận dạng • Các cảm biến micro tích hợp

***20* Cơ cấu chấp hành** *George T.-C. Chiu, Charles Fraser, Ramutis Bansevicius, Rymanta Tadas Tolocka, Massimo Sorli, Stefano Pastorelli, và Sergey Lyshevski* 20.1

Cơ cấu chấp hành cơ điện • Máy điện • Cơ cấu chấp hành áp điện • Hệ thống chấp hành thuỷ lực và khí nén • MEMS: Phân tích, thiết kế và chế tạo các bộ chuyển đổi micro

16

Giới thiệu về cảm biến và cơ cấu chấp hành

M. Anjanappa
University of Maryland Baltimore
Country

K. Datta
University of Maryland Baltimore
Country

T. Song
University of Maryland Baltimore
Country

16.1 Cảm biến 16-1
16.2 Cơ cấu chấp hành 16-8

Cảm biến và cơ cấu chấp hành là hai thành phần cơ bản của mọi hệ điều khiển vòng kín. Hệ thống như thế cũng có thể gọi là *hệ cơ điện tử*. Một hệ cơ điện tử điển hình như trên hình 16.1 bao gồm một khối cảm biến, một khối điều khiển và một khối cơ cấu chấp hành. Khối cảm biến có thể đơn giản là một cảm biến đơn lẻ hoặc có thể gồm các thành phần bổ sung như bộ lọc, bộ khuyếch đại, bộ điều chế và các bộ biến đổi tín hiệu khác. Khối điều khiển nhận thông tin từ khối cảm biến, đưa ra quyết định dựa trên thuật toán điều khiển và các lệnh tới khối cơ cấu chấp hành. Khối cơ cấu chấp hành bao gồm một cơ cấu chấp hành có thể thêm một bộ nguồn và một cơ cấu ghép nối.

16.1 Cảm biến

Cảm biến là một thiết bị mà khi có một hiện tượng vật lý tác động vào (nhiệt độ, dịch chuyển, lực...) sẽ tạo ra tín hiệu đầu ra (điện, cơ học, từ,...) tỷ lệ. Thuật ngữ bộ chuyển đổi thường được dùng đồng nghĩa với cảm biến. Tuy nhiên, về ý tưởng, một cảm biến là một thiết bị đáp ứng lại sự thay đổi của hiện tượng vật lý. Trong khi bộ chuyển đổi là thiết bị biến đổi một dạng năng lượng này thành một dạng năng lượng khác. Cảm biến là các bộ chuyển đổi khi chúng tiếp nhận một dạng năng lượng ở đầu vào và đưa ra đầu ra một dạng năng lượng khác. Ví dụ một cặp nhiệt đáp ứng với sự thay đổi nhiệt độ (nhiệt năng) và đưa ra sự thay đổi tỷ lệ dưới dạng sức điện động (điện năng). Như vậy, có thể gọi một cặp nhiệt là một cảm biến hoặc một bộ chuyển đổi.

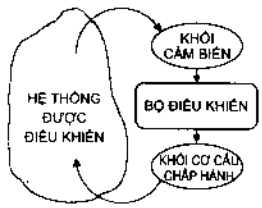
Phân loại

Bảng 16.1 liệt kê các dạng khác nhau của cảm biến được phân loại theo các đối tượng đo của chúng. Mặc dù bảng liệt kê này chưa phải là toàn bộ nhưng nó đã bao gồm tất cả các dạng cơ bản kể cả những cảm biến thế hệ mới như cảm biến dùng vật liệu thông minh, cảm biến micro và cảm biến nano.

BẢNG 16.1 Các dạng cảm biến dùng cho các đối tượng đo khác nhau

Cảm biến	Đặc tính
	Cảm biến thẳng/quay
Bộ chuyển đổi sai phân thẳng/quay	Độ phân giải cao với dải đo rộng Rất ổn định trong các ứng dụng tĩnh và giả tĩnh
Bộ mã hoá quang	Giải pháp đơn giản, tin cậy và giá thành thấp Tốt cho cả đo lường tuyệt đối lẫn tương đối
Đầu đo tốc độ dạng điện	Độ phân giải phụ thuộc vào kiểu như máy phát hoặc cảm biến từ
Cảm biến theo hiệu ứng Hall	Độ chính xác cao đối với dải đo nhỏ đến trung bình
Đầu đo kiểu điện dung	Độ phân giải rất cao với độ nhạy cao Tiêu thụ năng lượng thấp Tốt cho các đo lường động lực tần số cao
Các đầu đo biến dạng	Độ chính xác rất cao trong dải đo nhỏ Độ phân giải cao tại các mức nhiễu thấp
Cảm biến kiểu giao thoa	Hệ thống laze có độ phân giải rất cao trong các dải đo rộng Rất tin cậy và đắt
Cảm biến từ tính	Đầu ra là tín hiệu sin
Con quay hồi chuyển	Độ phân giải rất cao trong dải đo nhỏ
Cảm biến gia tốc	
Đầu đo gia tốc chấn động	Tốt cho đo lường các tần số lên tới 40% tần số tự nhiên của nó
Đầu đo gia tốc kiểu áp điện	Độ nhạy cao, gọn và bền Tần số tự nhiên rất cao (thường 100 kHz)
	Cảm biến lực, mômen và áp suất
Đầu đo biến dạng	Tốt cho cả đo lường tĩnh và động
Lực kế/các đầu đo lực	Chúng cũng sẵn có như các cảm biến micro và cảm biến nano
Đầu đo lực kiểu áp điện	Tốt cho các đo lường lực động với độ chính xác cao
Cảm biến xúc giác	Gọn, có dải động lực rộng và cao
Cảm biến ứng suất siêu âm	Tốt cho các phép đo lực nhỏ
	Cảm biến dòng
Ống Pitot	Được sử dụng rộng rãi như là cảm biến tốc độ luồng để xác định vận tốc các vật bay
Tấm phun	Ít tốn kém với dải đo giới hạn
Ống venturi, vòi phun	Chính xác với dải đo rộng Phức tạp và đắt hơn
Lưu lượng kế	Tốt cho đo lường luồng ngược dòng Được dùng kết hợp với cảm biến điện dung
Kiểu siêu âm	Tốt khi tốc độ dòng rất cao Có thể dùng cho cả đo lường ngược dòng lẫn xuôi dòng
Bộ đo dòng dạng ống	Không thích hợp cho chất lỏng chứa các phần tử mài mòn Quan hệ giữa tốc độ dòng và vận tốc góc là tuyến tính
Bộ đo dòng dạng điện từ	Ít xâm nhập do là dạng không tiếp xúc Có thể dùng với chất lỏng ăn mòn, nhiễm bẩn... Chất lỏng phải dẫn điện
	Cảm biến nhiệt
Cặp nhiệt	Là cảm biến rẻ nhất và đa năng nhất Có thể dùng trong khoảng nhiệt độ rộng (thường từ -200°C đến 1200°C)
Nhiệt điện trở	Độ nhạy rất cao trong dải đo trung bình (thường lên tới 100°C) Gọn nhưng bản chất không tuyến tính
Điôt nhiệt, tranzito nhiệt	Thích hợp về mặt lý tưởng cho các đo lường nhiệt độ chip Được tối thiểu hóa việc tự làm nóng
RTD - bộ dò nhiệt điện trở	Ổn định hơn trong dải thời gian dài so với cặp nhiệt Tuyến tính trên dải đo rộng

Cảm biến	Đặc tính
Dạng hồng ngoại	Cảm biến dạng điểm không tiếp xúc với độ phân giải giới hạn bởi bước sóng
Bộ ghi nhiệt hồng ngoại	Đo phân bố toàn bộ trường nhiệt
Cảm biến tiếp cận	
Điện cảm, dòng điện xoáy, hiệu ứng Hall, quang điện, điện dung…	Thao tác ngắt không tiếp xúc bền vững Đầu ra dạng số thường được dẫn trực tiếp đến bộ điều khiển số
Cảm biến quang	
Quang trở, điôt quang, tranzito quang, chất dẫn quang,…	Đo cường độ sáng với độ nhạy cao Cảm biến giá rẻ, tin cậy và không tiếp xúc
Điôt ghép nối điện tích	Bắt ảnh số trong trường quan sát
	Cảm biến vật liệu thông minh
Sợi quang	Thay thế đầu đo biến dạng với độ chính xác và dải thông rất cao
Cảm biến biến dạng	Nhạy với phản xạ hướng và tình trạng bề mặt
Cảm biến mức	Độ phân giải cao trong dải đo rộng
Cảm biến lực	Độ phân giải và dải đo cao (lên tới 2000°C)
Cảm biến nhiệt	
Áp điện	Đo phân bố với độ phân giải và dải thông cao
Cảm biến biến dạng	Thích hợp nhất cho các ứng dụng động lực
Cảm biến lực	Ít trễ và độ chính xác điểm đặt tốt
Đầu đo gia tốc kế	
Từ giảo	Cảm biến lực gọn nhẹ với độ phân giải và dải thông cao
Cảm biến lực	Tốt cho các ứng dụng đo phân tán và không tiếp xúc
Cảm biến mômen	Chính xác, dải thông cao và không tiếp xúc
	Cảm biến microionvà cảm biến nano
Vi cảm biến hình ảnh CCD	Kích thước nhỏ
Sợi quang	Tầm nhìn nhỏ (đường kính 0.2 mm) dùng cơ cấu chấp hành cuộn SMA
Vi cảm biến siêu âm	Phát hiện lỗi trong đường ống nhỏ
Vi cảm biến xúc giác	Phát hiện độ tiếp cận giữa đầu ống thông nước tiểu và mạch máu



HÌNH 16.1 Hệ cơ điện tử thường gặp

Các cảm biến cũng được phân loại thành *bị động* và *chủ động*. Trong các cảm biến bị động, năng lượng cần để cung cấp cho đầu ra được sinh ra từ chính hiện tượng vật lý được cảm nhận (chẳng hạn như nhiệt kế) trong khi các cảm biến chủ động cần nguồn năng lượng bên ngoài (chẳng hạn như đầu đo biến dạng).

Ngoài ra, cảm biến cũng được phân loại thành hai dạng *tương tự* hoặc *số* dựa trên dạng tín hiệu đầu ra. Cảm biến tương tự cung cấp tín hiệu liên tục tỷ lệ với tham số cần đo và cần sự biến đổi tương tự thành số trước khi chuyển cho bộ điều khiển số. Trong khi đó, cảm biến số cung cấp đầu ra số có thể trực tiếp ghép nối với bộ điều khiển số. Thông thường, các đầu ra số được cung cấp bằng cách thêm bộ biến đổi tương tự thành số vào thiết bị cảm biến. Trong trường hợp cần quá nhiều cảm biến, sẽ kinh tế hơn nếu chọn các cảm biến tương tự đơn giản và giao tiếp với bộ điều khiển số qua bộ biến đổi tương tự - số đa kênh.

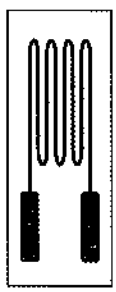
Nguyên lý hoạt động

Cảm biến tuyến tính và quay

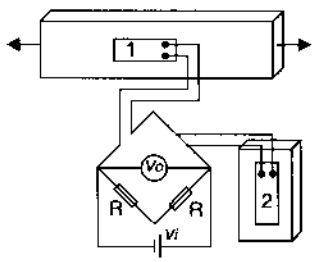
Các cảm biến vị trí tịnh tiến và quay là hai trong số các cảm biến đo lường cơ bản nhất được dùng trong một hệ cơ điện tử điển hình. Các loại cảm biến vị trí phổ biến nhất được liệt kê trong bảng 16.1. Thông thường, các cảm biến vị trí đưa ra tín hiệu điện tỷ lệ với độ dịch chuyển cần đo. Có các loại cảm biến tiếp xúc như đầu đo biến dạng, LVDT, RVDT, đầu đo tốc độ... Các dạng không tiếp xúc gồm có bộ mã hoá (encoder), cảm biến dựa trên hiệu ứng Hall, cảm biến điện dung, điện cảm và giao thoa kế. Cũng có thể phân loại chúng dựa trên dải đo. Dạng cảm biến có độ phân giải cao như *hiệu ứng Hall, điện cảm sợi quang, điện dung* và *đầu đo biến dạng* chỉ thích hợp cho những dải đo rất nhỏ (thường từ 0.1 mm đến 5 mm). Nói cách khác, bộ *biến đổi vi sai* có dải đo lớn hơn với độ phân giải tốt. Các cảm biến kiểu *giao thoa* cung cấp độ phân giải rất cao (cỡ micro) và dải đo lớn (thường lên tới 1 m). Tuy nhiên, cảm biến kiểu giao thoa có kích thước lớn, đắt tiền và cần nhiều thời gian cài đặt.

Trong nhiều cảm biến dịch chuyển tuyến tính, đầu đo biến dạng có độ phân giải cao với mức nhiễu thấp và giá thành không cao. Một đầu đo biến dạng kiểu điện trở điển hình là lá điện trở được sắp xếp như trên hình 16.2. Đo biến dạng pháp tuyến của một phần tử bị kéo được thực hiện như trên hình 16.3. Đầu đo biến dạng 1 được liên kết với phần tử chịu tải trong khi đầu đo biến dạng 2 được liên kết với phần tử thứ hai được làm bằng vật liệu tương tự nhưng không chịu tải. Sự bố trí này sẽ bù được các hiệu ứng nhiệt. Khi phần tử bị chịu tải, đầu đo biến dạng 1 sẽ bị kéo dài làm thay đổi điện trở của đầu đo biến dạng. Sự thay đổi điện trở được chuyển đổi thành thay đổi điện áp bằng mạch cầu wheatstone cảm ứng điện áp. Giả thiết rằng, điện trở của cả bốn nhánh ban đầu bằng nhau, sự thay đổi trong điện áp đầu ra (Δv_0) do sự thay đổi điện trở (ΔR_1) của đầu đo 1 là:

$$\frac{\Delta v_0}{v_i} = \frac{\Delta R_1 / R}{4 + 2(\Delta R_1 / R)}$$



HÌNH 16.2 Đầu đo biến dạng



HÌNH 16.3 Đo biến dạng pháp tuyến dùng đầu đo biến dạng

Cảm biến gia tốc

Với các hệ thống liên quan đến va chạm và dao động, đo lường gia tốc là quan trọng. Mặc dù gia tốc có thể nhận được bằng cách lấy đạo hàm dữ liệu quá trình theo thời gian nhận được từ cảm biến tuyến tính hoặc quay, nhưng người ta vẫn ưa dùng đầu đo gia tốc để đo trực tiếp gia tốc. Hai dạng thông thường là đầu đo gia tốc kiểu *khối lượng địa chấn* và đầu đo gia tốc kiểu *áp điện*. Gia tốc kế kiểu khối lượng địa chấn dựa trên chuyển động tương đối giữa một khối lượng và một cấu trúc hỗ trợ. Tần số riêng của khối lượng địa chấn hạn chế ứng dụng của nó cho các tần số thấp và trung bình. Tuy nhiên, gia tốc kế áp điện ổn định và thích hợp hơn cho các ứng dụng tần số cao.

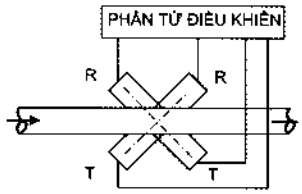
Cảm biến lực, mômen và áp suất

Trong nhiều loại cảm biến lực/mômen, kiểu *đầu đo biến dạng* và *áp điện* là phổ biến nhất. Cả hai đều có thể đo lực và/hoặc mômen theo một trục hoặc nhiều trục. Đầu đo biến dạng dùng cho các phần tử cơ học có đàn hồi khi chịu tải. Các loại cảm biến này bị giới hạn bởi tần số riêng của chúng. Ngược lại, các cảm biến áp điện thường thích hợp cho tải động với một dải tần số rộng. Chúng có độ ổn định lớn, độ phân giải cao trên một dải đo rộng và phức tạp.

Cảm biến lưu lượng

Đo lưu lượng là một nhiệm vụ khó khăn. Môi trường lưu chất có thể là chất lỏng, chất khí hoặc hỗn hợp của cả hai. Hơn nữa, dòng có thể theo lớp hoặc hỗn loạn và có thể là hiện tượng thay đổi theo thời gian. *Ống Venturi* và *màng chắn* hạn chế dòng chảy và dùng sự sai khác áp suất để xác định lưu lượng. Bộ đo áp suất dạng *ống Pitot* là một phương pháp thông dụng khác dùng để đo lưu lượng. Khi được đặt vào dòng chảy, nó sẽ đo áp suất tĩnh và áp suất toàn phần. Nhờ đó có thể xác định được lưu tốc và sau đó là lưu lượng. *Lưu lượng kế kiểu phao* và *bộ đo dạng ống*, khi được đặt vào dòng chảy, sẽ quay với tốc độ tỷ lệ với lưu lượng. *Lưu lượng kế điện từ* sử dụng phương pháp không tiếp xúc. Từ trường được tác động theo hướng ngang của dòng chảy và lưu chất hoạt động như là một chất dẫn sinh ra điện áp tỷ lệ với lưu lượng.

Lưu lượng kế siêu âm đo lưu tốc bằng cách phát âm thanh tần số cao vào lưu chất. Một sơ đồ của lưu lượng kế siêu âm được mô tả trên hình 16.4. Bộ phát (T) cung cấp nguồn tín hiệu âm. Khi sóng âm đi chuyển đến bộ thu nhận (R), vận tốc của nó bị ảnh hưởng bởi vận tốc dòng lưu chất do hiệu ứng Doppler. Mạch điều khiển so sánh thời gian để tính ra lưu lượng. Nó có thể dùng cho lưu lượng rất lớn và cũng có thể dùng cho cả dòng xuôi và ngược. Một ưu điểm khác là lưu lượng kế này có thể dùng trong lưu chất ăn mòn, lưu chất với các phần tử mài mòn, như một cảm biến không tiếp xúc.



HÌNH 16.4 Bố trí cảm biến lưu lượng dùng siêu âm

Cảm biến nhiệt độ

Có nhiều loại thiết bị sử dụng để đo nhiệt độ, các dạng thông dụng nhất là cặp nhiệt, nhiệt điện trở, bộ dò nhiệt độ điện trở (Resistance Temperature Detectors - RTD) và dạng hồng ngoại.

Cặp nhiệt là loại linh hoạt, rẻ nhất và có dải đo rộng (lên tới 1200°C). Một cặp nhiệt đơn giản gồm hai dây kim loại không giống nhau được nối tại điểm cuối để tạo mối nối đo. Khi được dùng kết hợp với một mối nối chuẩn, sự sai khác nhiệt độ giữa mối nối chuẩn và nhiệt độ thực tế tạo ra một điện thế. Chúng thích hợp cho các đo lường có độ nhạy cao trong một dải giới hạn tới 100°C.

Mối quan hệ giữa nhiệt độ và điện trở là phi tuyến. *RTD* ứng dụng hiện tượng điện trở của kim loại thay đổi theo nhiệt độ. Tuy nhiên, chúng tuyến tính trên một dải rộng và rất ổn định.

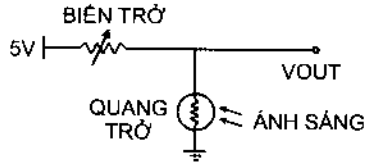
Các cảm biến *dạng hồng ngoại* dùng nhiệt bức xạ để cảm nhận nhiệt độ từ xa. Các cảm biến không tiếp xúc này cũng có thể được dùng để tạo ra bản đồ nhiệt của một bề mặt.

Cảm biến tiệm cận

Được dùng để cảm nhận độ tiếp cận của một vật thể so với vật thể khác. Chúng thường cho tín hiệu on hoặc off nhằm biểu diễn sự có mặt hay không có mặt của một vật thể. Các cảm biến tiệm cận thường là các dạng *cảm ứng, điện dung, quang điện* và *hiệu ứng Hall*. Cảm biến tiệm cận dạng cảm ứng gồm một cuộn dây quấn quanh một lõi sắt mềm. Độ tự cảm của cảm biến thay đổi khi một vật có từ tính ở gần nó. Sự thay đổi này được chuyển thành chuyển mạch trigger điện áp. Các dạng điện dung tương tự dạng cảm ứng trừ sự tiếp cận của một vật thể thay đổi khoảng cách và tác động đến điện dung. Cảm biến dạng quang điện thường nối thẳng với một nguồn sáng hồng ngoại. Sự tiếp cận của một vật chuyển động sẽ ngắt tia sáng gây nên sự thay đổi cấp độ điện áp. Điện áp hiệu ứng Hall sinh ra khi dây dẫn mang dòng điện được đặt trong một từ trường ngang. Điện áp tỷ lệ với dịch chuyển ngang giữa cảm biến hiệu ứng Hall và vật tiếp cận nó.

Cảm biến quang

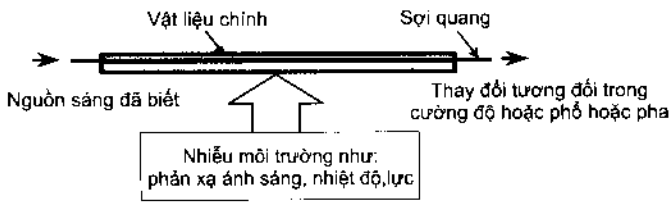
Cường độ ánh sáng và tầm nhìn là hai dạng đo lường quan trọng trong rất nhiều ứng dụng điều khiển. *Tranzito quang, quang trở* và *điôt quang* là những dạng thường thấy của các cảm biến cường độ ánh sáng. Một quang trở thông thường được làm từ catmi sunfua có điện trở lớn nhất khi ở trong bóng tối. Khi quang trở được chiếu sáng, điện trở của nó giảm tỷ lệ với cường độ ánh sáng. Khi kết hợp với một mạch như trên hình 16.5 và được cân bằng, sự thay đổi cường độ ánh sáng sẽ được chuyển thành sự thay đổi điện áp. Các cảm biến này đơn giản, tin cậy và rẻ được dùng rộng rãi trong các phép đo cường độ ánh sáng.



HÌNH 16.5 Đo ánh sáng với quang trở

Cảm biến vật liệu thông minh

Có khá nhiều vật liệu thông minh được ứng dụng cho cảm biến. Trong số đó, vật liệu *sợi quang, áp điện* và *từ giảo* thường hay được sử dụng, đặc biệt là sợi quang.



HÌNH 16.6 Nguyên lý hoạt động của đo lường bằng sợi quang

Sợi quang được dùng để cảm nhận sức căng, độ lòng, lực và nhiệt độ với độ phân giải rất cao. Do tính kinh tế chúng thích hợp cho việc sử dụng cảm biến *phân tán* trên diện tích rộng, có thể thấy chúng trong rất nhiều ứng dụng trong các cấu trúc thông minh như cảm biến hông hóc, cảm

biến dao động và cảm biến giám sát sửa chữa. Các cảm biến này sử dụng thuộc tính vật liệu (thủy tinh và thạch anh) sẵn có của sợi quang để cảm nhận môi trường. Hình 16.6 cho thấy nguyên lý hoạt động cơ bản của một sợi quang nhúng dùng để đo dịch chuyển, lực hoặc nhiệt độ. Sự thay đổi tương đối trong cường độ hoặc phổ truyền tỷ lệ với sự thay đổi tham số cần đo.

Cảm biến micro và cảm biến nano

Cảm biến micro (đôi khi cũng được gọi là MEMS) là một phiên bản nhỏ hóa của các cảm biến thông thường được tăng khả năng và giảm chi phí. Công nghệ vi gia công bán dẫn đã mang lại sự phát triển của nhiều cảm biến micro và tiếp tục là một trong những hướng nghiên cứu tích cực và phát triển nhất trong lĩnh vực này.

Cảm biến micro hình ảnh đã có ứng dụng trong công nghệ y học. Một *sợi quang* có đường kính khoảng 0.2 mm được dùng để phát hiện các vết nứt bên trong đường ống. Một ví dụ khác là *cảm biến micro xúc giác* dùng ánh sáng laze để kiểm tra sự tiếp xúc giữa ống thông nước tiểu và vách trong mạch máu, với độ nhạy trong dải khoảng 1 mN. Tương tự, sự phát triển trong công nghệ nano cũng tác động đến sự phát triển của cảm biến nano. Chúng là những cảm biến tương đối mới với một bước tiến xa hơn trong việc nhỏ hóa và được mong đợi sẽ mở ra các hướng mới trong các ứng dụng đo lường.

Tiêu chuẩn lựa chọn

Một số các hệ số tĩnh và động cần phải được xem xét khi lựa chọn cảm biến phù hợp với việc đo lường một tham số vật lý cần quan tâm. Dưới đây là danh sách các hệ số cơ bản:

Dải đo: Chênh lệch giữa giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của tham số cần đo

Độ phân giải: Thay đổi nhỏ nhất mà cảm biến có thể phân biệt

Độ chính xác: Sai khác giữa giá trị đo được và giá trị thực

Tính chính xác: Khả năng lặp lại kết quả đo với độ chính xác cho trước

Độ nhạy: Tỷ số của thay đổi đầu ra trên một đơn vị thay đổi của đầu vào

Dịch không: Giá trị đầu ra khác không khi không có đầu vào

Độ tuyến tính: Tỷ lệ phần trăm độ lệch so với đường cong chuẩn tuyến tính tốt nhất

Thời gian đáp ứng: Độ trễ giữa đầu vào và đầu ra

Dải thông: Tần số mà tại đó độ lớn đầu ra bằng 3 dB

Cộng hưởng: Tần số tại đó độ lớn đầu ra đạt giá trị đỉnh

Nhiệt độ hoạt động: Khoảng nhiệt độ tại đó cảm biến hoạt động danh nghĩa

Dải chết: Dải đầu vào mà trong dải đó sẽ không có đầu ra

Tỷ lệ tín hiệu - nhiễu: Tỷ số giữa biên độ tín hiệu và biên độ nhiễu tại đầu ra

Việc chọn cảm biến thỏa mãn tất cả các đặc tính kỹ thuật trên là không thực tế. Ví dụ việc tìm một cảm biến vị trí với độ phân giải μm trong khoảng một mét gần như là không đáp ứng được với hầu hết các loại cảm biến. Nhiều khi, việc thiếu cảm biến thích hợp kéo theo việc phải thiết kế lại hệ cơ điện tử. Do vậy, nên theo cách tiếp cận ở cấp độ hệ thống khi lựa chọn cảm biến và tránh chọn cảm biến một cách riêng lẻ.

Khi các hệ số chức năng trên được thỏa mãn, người ta có thể đưa ra một danh sách cảm biến. Sự lựa chọn cuối cùng sẽ phụ thuộc vào kích cỡ, phạm vi chuẩn hóa tín hiệu, độ tin cậy, độ bền vững, khả năng bảo dưỡng và giá thành.

Chuẩn hóa tín hiệu

Thông thường, tín hiệu từ đầu ra một cảm biến cần được xử lý trước khi đưa tới bộ điều khiển. Đầu ra cảm biến có thể phải điều chế lại, khuếch đại, lọc, tuyến tính hóa, lượng tử hóa và rời rạc

hóa sao cho có thể đưa tín hiệu vào một bộ chuyển đổi tương tự - số thông thường của bộ điều khiển. Một số cảm biến tích hợp sẵn bộ chuẩn dạng tín hiệu, như các cảm biến micro. Toàn bộ phần điện tử được tích hợp vào một vi mạch và có thể giao tiếp trực tiếp với các bộ điều khiển.

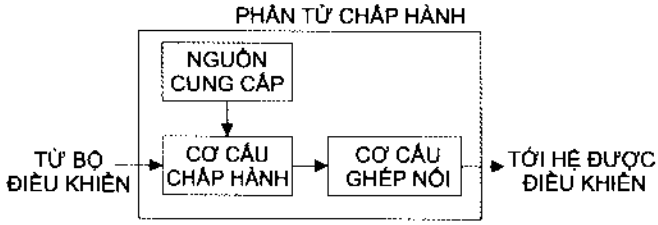
Hiệu chuẩn

Các nhà sản xuất cảm biến thường cung cấp các đường cong hiệu chuẩn. Nếu các cảm biến ổn định và không trôi thì không cần phải hiệu chuẩn lại. Tuy nhiên, thường các cảm biến cần được hiệu chỉnh lại sau khi tích hợp chúng với một hệ thống chuẩn hóa tín hiệu. Cảm biến cần một tín hiệu đầu vào đã biết và ghi lại đầu ra của cảm biến nhằm thiết lập một thước đo đầu ra chính xác. Quá trình này chứng tỏ khả năng đo chính xác và nâng cao độ tin cậy.

Nếu cảm biến được dùng để đo đầu vào biến đổi theo thời gian, cần phải hiệu chuẩn động. Việc dùng các đầu vào hình sin là một cách hiệu chuẩn động tin cậy và đơn giản nhất. Tuy nhiên, nếu việc tạo đầu vào hình sin trở lên không khả thi (ví dụ tín hiệu nhiệt) thì có thể thay thế bằng một đầu vào dạng xung. Đáp ứng tức thời của xung chứa đầy đủ thông tin về đáp ứng động của cảm biến.

16.2 Cơ cấu chấp hành

Về cơ bản, các cơ cấu chấp hành là phần cơ phía sau một hệ cơ điện tử, nhận lệnh điều khiển (hầu hết là dạng tín hiệu điện) và gây ra một sự thay đổi trong hệ vật lý bằng cách tạo lực, chuyển động, nhiệt, dòng chảy... Thông thường, các cơ cấu chấp hành được sử dụng kết hợp với nguồn nuôi và một cơ cấu ghép nối như trên hình 16.7. Phần nguồn nuôi AC hoặc DC với điện áp hay dòng điện định mức. Cơ cấu ly hợp là phần trung gian giữa cơ cấu chấp hành và hệ vật lý. Các cơ cấu thông thường là thanh răng-bánh răng, truyền động bánh răng, truyền động đai, vítme-đai ốc, piston và các thanh nối.



HÌNH 16.7 Thiết bị chấp hành thông thường

Phân loại

Cơ cấu chấp hành có thể phân loại dựa trên dạng năng lượng như liệt kê trong bảng 16.2. Bảng này liệt kê tất cả các dạng cơ bản nhất. Về cơ bản có các dạng điện, điện cơ, điện từ, thủy lực và khí nén. Các dạng cơ cấu chấp hành thế hệ mới bao gồm cơ cấu chấp hành vật liệu thông minh, cơ cấu chấp hành micro và cơ cấu chấp hành nano.

Cơ cấu chấp hành cũng có thể phân loại thành dạng *nhị phân* và *liên tục* dựa trên số lượng đầu ra trạng thái ổn định. Một rơle với hai trạng thái ổn định là một ví dụ điển hình của cơ cấu chấp hành dạng nhị phân. Tương tự, một động cơ bước là một ví dụ điển hình cho cơ cấu chấp hành dạng liên tục. Khi được dùng cho điều khiển vị trí, động cơ bước có thể cung cấp các đầu ra ổn định với số gia dịch chuyển rất nhỏ.

BẢNG 16. 2 Các dạng cơ cấu chấp hành và đặc tính của chúng

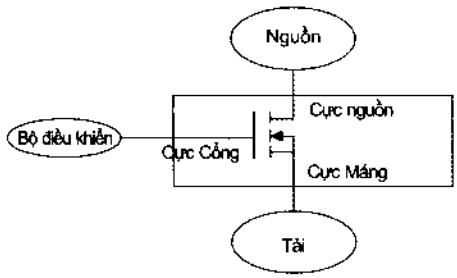
Cấu chấp hành			Đặc tính
			Điện
Điôt, thyristor, tranzito lưỡng cực, triac, diac, MOSFET công suất, rơle bán dẫn...			Dạng điện tử Đáp ứng tần số rất cao Tiêu thụ năng lượng thấp
			Điện cơ
Động cơ một chiều	Trường kích	Kích thích độc lập	Tốc độ có thể điều khiển hoặc bằng điện áp chạy trong cuộn dây phần ứng hoặc bằng cách thay đổi dòng điện trường
		Mạch mắc rẽ	Ứng dụng tốc độ không đổi
		Tổ hợp	Mômen khởi động cao, mômen gia tốc cao, tốc độ cao với tải nhẹ Không ổn định khi tải nặng
	Nam châm vĩnh cửu	Động cơ nam châm vĩnh cửu truyền thống	Hiệu suất cao, công suất đỉnh cao và đáp ứng nhanh
		Động cơ nam châm vĩnh cửu cuộn dây chuyển động	Hiệu suất cao hơn và độ cảm thấp hơn động cơ một chiều truyền thống
		Động cơ mômen	Được thiết kế để chạy thời gian dài trong điều kiện chết máy hoặc vòng quay thấp
	Truyền thông điện tử (động cơ không chổi quét)		Đáp ứng nhanh Hiệu suất cao, thường hơn 75% Tuổi thọ dài, độ tin cậy cao, không cần bảo dưỡng Sinh nhiễu tần số sóng thấp
Động cơ xoay chiều	Động cơ cảm ứng xoay chiều		Là động cơ được dùng nhiều nhất trong công nghiệp Đơn giản, khỏe và rẻ
	Động cơ đồng bộ xoay chiều		Rôto quay với tốc độ đồng bộ Hiệu suất rất cao trên dải vận tốc và tải rộng Cần hệ thống trợ giúp để khởi động Tuổi thọ tương đối ngắn
Động cơ bước	Lai ghép		Thay đổi xung điện trong chuyển động cơ học đưa ra vị trí chính xác không cần phản hồi
	Từ trở biến thiên		Bảo dưỡng ít
			Điện từ
Thiết bị dạng solenoid			Lực lớn, khoảng thời gian ngắn
Nam châm điện từ, rơle			Điều khiển đóng/mở
			Thủy lực và khí nén
Xi lanh			Thích hợp với chuyển động thẳng
Động cơ thủy lực	Dạng bánh răng		Dải tốc độ rộng
	Dạng van		Đầu ra mã lực lớn
	Dạng piston		Độ tin cậy cao
Động cơ khí	Dạng quay		Không có rủi ro sốc điện
	Dạng truyền động qua lại		Bảo dưỡng ít
Van	Van điều hướng		
	Van điều khiển áp suất		
	Van điều khiển quá trình		

Cấu chấp hành	Đặc tính
Cơ cấu chấp hành vật liệu thông minh	
Áp điện và điện giảo	Tần số cao với chuyển động nhỏ Điện áp thấp với kích thích dòng điện thấp Độ phân giải cao
Từ giảo	Tần số cao với chuyển động nhỏ Điện áp thấp với kích từ dòng điện cao
Hợp kim nhớ hình thù	Điện áp thấp với kích từ dòng điện cao Tần số thấp với chuyển động lớn
Dòng lưu biến điện	Kích từ điện áp rất cao Chịu đựng tốt với sốc và dao động cơ học Tần số thấp với lực lớn
Cơ cấu chấp hành micro và cơ cấu chấp hành nano	
Động cơ micro	Thích hợp với các hệ cơ micro
Van micro	Có thể dùng công nghệ xử lý silic sẵn có, như động cơ tĩnh điện
Bơm micro	Có thể dùng bất cứ vật liệu thông minh nào

Nguyên lý hoạt động

Cơ cấu chấp hành điện

Các bộ chuyển mạch điện là sự lựa chọn của các cơ cấu chấp hành dùng cho hầu hết các hoạt động điều khiển đóng-mở. Các thiết bị chuyển mạch như *điôt, tranzito, triac, MOSFET* và *rơle* nhận một tín hiệu ra lệnh ở cấp năng lượng thấp từ bộ điều khiển và tác động đóng hay mở các thiết bị điện như động cơ, van và các bộ phận nung. Ví dụ một bộ chuyển MOSFET được thấy trên hình 16.8. Cực cổng nhận tín hiệu điều khiển mức năng lượng thấp từ bộ điều khiển để đóng hoặc ngắt kết nối giữa nguồn cung cấp và tải cơ cấu chấp hành. Khi sử dụng các chuyển mạch, nhà thiết kế phải khẳng định là loại bỏ được vấn đề *nhảy trạng thái* bằng phần cứng hoặc bằng phần mềm.



HÌNH 16.8 MOSFET công suất kênh n

Cơ cấu chấp hành cơ điện

Cơ cấu chấp hành cơ điện thông dụng nhất là động cơ biến đổi năng lượng điện thành chuyển động cơ học. Các động cơ là thiết bị chủ yếu dùng cho việc biến đổi năng lượng điện thành năng lượng cơ học trong công nghiệp. Nói chung, động cơ có thể được phân thành *động cơ một chiều, động cơ xoay chiều* và *động cơ bước*. Động cơ một chiều hoạt động nhờ điện áp một chiều và việc thay đổi điện áp có thể dễ dàng điều khiển tốc độ của chúng. Động cơ được dùng rộng rãi trong dải các ứng dụng, từ các động cơ hàng nghìn mã lực dùng trong cán cuộn tới các động cơ mã lực nhỏ dùng trong ô tô (động cơ khởi động, động cơ quạt, động cơ gạt nước,...).

Tuy nhiên, loại động cơ này có giá thành cao do cần nguồn một chiều và yêu cầu bảo dưỡng nhiều hơn so với động cơ xoay chiều.

Phương trình chuyển động cơ bản của động cơ một chiều như sau:

$$T = J\frac{d\omega}{dt} + T_L + T_{\text{tổn hao}}$$

ở đây, T là mômen, J là mômen quán tính tổng, ω là vận tốc góc của động cơ, T_L là mômen quay của động cơ, $T_{\text{tổn hao}}$ là tổn hao cơ bên trong như ma sát.

Động cơ xoay chiều (AC) phổ biến nhất là do chúng dùng nguồn xoay chiều chuẩn, không cần chổi than và vành chuyển mạch, và do đó rẻ hơn. Động cơ AC có thể phân loại theo cấu trúc vật lý của chúng thành *động cơ cảm ứng, động cơ đồng bộ* và *động cơ vạn năng*. Động cơ cảm ứng đơn giản, khỏe và dễ bảo dưỡng. Chúng có sẵn với nhiều kích thước và hình dạng dựa trên số pha cần dùng. Ví dụ động cơ cảm ứng ba pha được dùng trong các ứng dụng công suất lớn, như truyền động bơm, cán thép, thang máy hoặc xe cộ. Động cơ servo hai pha được dùng rộng rãi trong các hệ điều khiển vị trí. Động cơ cảm ứng một pha được dùng nhiều trong các thiết bị gia dụng. Động cơ đồng bộ là một trong những động cơ điện có hiệu suất cao nhất trong công nghiệp, nên nó được dùng để giảm chi phí năng lượng điện. Thêm vào đó, động cơ đồng bộ nên chúng cũng được dùng trong các ứng dụng cần hoạt động đồng bộ. Động cơ vạn năng hoạt động với nguồn xoay chiều hoặc một chiều. Chúng thường được dùng trong các ứng dụng công suất nhỏ. Động cơ vạn năng một chiều có tỷ số công suất/khối lượng cao nhất, nhưng có thời gian hoạt động tương đối ngắn.

Động cơ bước là loại động cơ định vị rời rạc (tương đối), tại thời điểm ứng với mỗi xung điều khiển đầu vào, động cơ dịch chuyển một bước. Do chúng nhận lệnh số trực tiếp và sinh ra chuyển động cơ học, các động cơ bước được dùng rộng rãi trong các ứng dụng điều khiển công nghiệp. Phần lớn, chúng được dùng trong các ứng dụng công suất nhỏ. Cùng với sự phát triển nhanh chóng của các bộ truyền động bán dẫn tần số cao và sự giảm giá thành, chúng ngày càng được ứng dụng nhiều.

Hình 16.9 cho thấy một động cơ bước đơn cực đơn giản. Cuộn dây 1 nằm giữa cực stato trên và dưới, cuộn dây 2 nằm giữa các cực trái và phải của động cơ. Rôto là một nam châm vĩnh cửu với sáu cực có góc bước đơn 30°. Với việc kích thích cuộn 1 thích hợp, cực stato trên trở thành cực bắc và cực stato dưới trở thành cực nam. Tác động của nó sẽ hút rôto ở vị trí như trên hình vẽ. Bây giờ nếu cuộn 1 được nạp điện lại và cuộn 2 được nạp điện, rôto sẽ quay góc 30°. Bằng việc chọn dòng điện thích hợp qua cuộn dây 2, rôto có thể quay theo chiều kim đồng hồ hoặc ngược chiều kim đồng hồ. Bằng việc kích thích theo thứ tự hai cuộn dây, động cơ có thể quay với tốc độ mong muốn một cách liên tục.

HÌNH 16.9 Động cơ bước đơn cực

Cơ cấu chấp hành điện từ

Solenoid là cơ cấu chấp hành điện từ thông dụng nhất. Một solenoid một chiều bao gồm một lõi sắt từ nằm trong một cuộn dây mang điện. Khi cuộn dây có dòng điện, từ trường sinh ra lực đẩy hoặc kéo lõi sắt. Các cuộn kim loại xoay chiều cũng có thể xem như rơle kích thích xoay chiều.

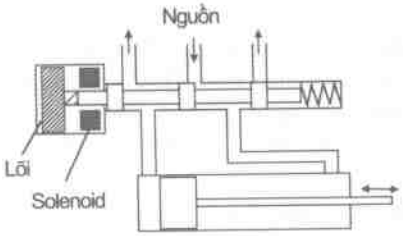
Một solenoid điều khiển một van định hướng được đưa ra trên hình 16.10. Thông thường, do lực lò xo, lõi sắt mềm được đẩy sang vị trí tận cùng bên trái. Khi solenoid được kích thích, lõi sắt từ sẽ chuyển sang vị trí tận cùng bên phải nhờ đó sinh ra sự khởi động điện từ.

Một dạng quan trọng khác là *nam châm điện*. Các nam châm điện được dùng rộng rãi trong các ứng dụng cần lực lớn.

Cơ cấu chấp hành thủy lực và khí nén

Các cơ cấu chấp hành thủy lực và khí nén thường là *động cơ quay* hoặc *piston/xi lanh* hay *van điều khiển*. Chúng phù hợp cho các ứng dụng cần lực và dịch chuyển lớn. Cơ cấu chấp hành khí nén dùng khí nén, thích hợp cho các ứng dụng lực thấp và trung bình, hành trình ngắn và tốc độ cao. Các cơ cấu chấp hành dùng dầu áp lực không được nén. Chúng có thể sinh ra lực rất lớn cùng với dịch chuyển lớn một cách hiệu quả. Nhược điểm của các cơ cấu chấp hành này là phức tạp và phải bảo dưỡng nhiều.

Các động cơ quay thường được dùng trong các ứng dụng vận tốc nhỏ và mômen lớn. Các cơ cấu chấp hành xi lanh/piston thích hợp cho ứng dụng chuyển động tịnh tiến như điều khiển cánh máy bay. Van điều khiển ở dạng van điều khiển định hướng được dùng kết hợp với động cơ quay và xi lanh để điều khiển hướng dòng chất lỏng như hình 16.10. Trong các van điều khiển định hướng điều khiển bởi solenoid, vị trí van quyết định hướng dịch chuyển của xi lanh/piston.



HÌNH 16.10 Van điều hướng được hoạt động solenoid

Các cơ cấu chấp hành vật liệu thông minh

Không giống như các cơ cấu chấp hành truyền thống, các cơ cấu chấp hành vật liệu thông minh thường trở thành một phần của cấu trúc mang tải. Chúng được nhúng trong các cơ cấu chấp hành theo cách phân tán và tích hợp trong một cấu trúc mang tải có thể được dùng để khử dao động, loại bỏ nhiễu và thay đổi hình dạng. Trong số rất nhiều loại cơ cấu chấp hành vật liệu thông minh thì *hợp kim tạo hình, áp điện (PZT), từ giảo, dòng lưu biến điện* và *hợp chất cao phân tử trao đổi ion* là thông dụng nhất.

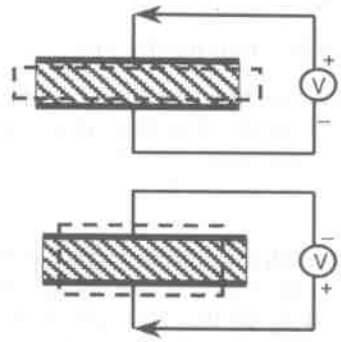
Hợp kim tạo hình (SMA) là hợp kim của niken và titan chịu chuyển pha khi đặt trong trường nhiệt. Các SMA cũng được biết đến là NITINOL ở Phòng thí nghiệm hậu cần hải quân về Niken và Titan của Mỹ. Khi được làm lạnh dưới nhiệt độ tới hạn, cấu trúc tinh thể của chúng sẽ vào pha mactensit như thấy trên hình 16.11. Trong trạng thái này, hợp kim là chất dẻo và có thể tạo hình dễ dàng. Khi hợp kim được nung trên nhiệt độ tới hạn (trong khoảng 50-80°C), nó sẽ chuyển thành pha austenit. Ở đây, hợp kim phục hồi hình dạng mà nó có ở nhiệt độ cao hơn. Ví dụ một dây dẫn thẳng tại nhiệt độ phòng có thể được làm thành hình dạng bán nguyệt định trước, khi nung nóng, được thấy trong các ứng dụng trong nha khoa và các thiết bị áp lực khác. Các dây này thông thường được nung nóng bằng cách cho dòng điện chạy qua (lên tới cỡ vài ampe), giá trị 0 tại điện áp rất thấp (thông thường 2-10 V).

HÌNH 16.11 Thay đổi pha của hợp kim nhớ hình

Cơ cấu chấp hành PZT chủ yếu là các tinh thể áp điện với các tấm dẫn trên và dưới được thấy trên hình 16.12. Khi đặt một điện áp dọc hai tấm dẫn, tinh thể mở rộng theo chiều ngang được biểu diễn bằng nét chấm. Khi đảo cực điện áp, tinh thể co lại nhờ đó sinh ra dịch chuyển hai chiều. Mối quan hệ giữa điện và cơ của vật liệu áp điện có thể biểu diễn như sau:

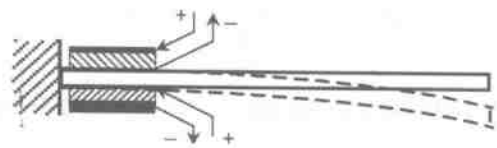
$$T = c^E S - eE$$

trong đó T là ứng suất, c^E là hệ số đàn hồi tại điện trường không đổi, S là biến dạng, e là điện dung của điện môi, còn E là điện trường.



HÌNH 16.12 Cơ cấu chấp hành áp điện

Một ứng dụng của các cơ cấu chấp hành này được đưa ra trên hình 16.13. Hai miếng áp điện được kích thích ở cực dương để tạo dao động ngang ở dầm công xôn. Các cơ cấu chấp hành này có dải tần rộng (thông thường 0-10 kHz) với dịch chuyển nhỏ. Do không có các bộ phận chuyển động trong cơ cấu chấp hành nên chúng gọn và thích hợp cho các chấp hành micro và nano. Không giống hoạt động hai chiều của cơ cấu chấp hành áp điện, hiệu ứng *điện giảo* là hiệu ứng bậc hai, nghĩa là nó phản ứng lại một điện trường với việc mở rộng vô hướng.



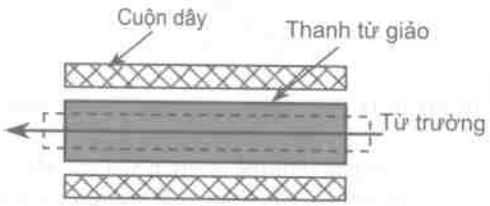
HÌNH 16.13 Dao động của dầm sử dụng cơ cấu chấp hành áp điện

Vật liệu *từ giảo* là một hợp kim của tecbi, điprozi và sắt tạo các biến dạng cơ học lên tới 2000 vi biến dạng hưởng ứng từ trường. Chúng có sẵn dưới dạng thanh, tấm, vòng đệm và bột. Hình 16.14 cho thấy một cơ cấu chấp hành dạng thanh từ giảo thông thường được đặt trong một cuộn từ

tính. Khi cuộn dây được kích thích, thanh dài ra theo tỷ lệ với mật độ từ trường sinh ra. Quan hệ điện từ được cho như sau:

$$\varepsilon = S^H \sigma + dH$$

ở đây, ε là biến dạng, S^H là độ thuận tại từ trường không đổi, σ là ứng suất, d là hằng số từ giảo và H là mật độ từ trường.



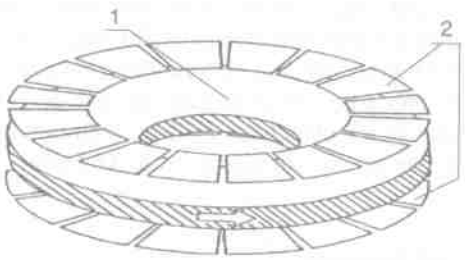
HÌNH 16.14 Cơ cấu chấp hành từ giảo dạng thanh

Hợp chất cao phân tử trao đổi ion lợi dụng hiện tượng thẩm điện của các chất dẻo ion hóa tự nhiên dùng cho mục đích chấp hành. Khi cấp một điện thế vào mạng điện phân liên kết ngang, các cụm có khả năng ion tạo thành một mạng điện tích sinh ra biến dạng cơ học. Các dạng cơ cấu chấp hành này đã được dùng để phát triển cơ nhân tạo và chi nhân tạo. Ưu điểm cơ bản là khả năng tạo ra biến dạng lớn với kích thích điện áp tương đối thấp.

Cơ cấu chấp hành micro và cơ cấu chấp hành nano

Các cơ cấu chấp hành micro hoặc còn được gọi là các thiết bị micro, hệ vi cơ điện tử (MEMS) và vi hệ thống là các thiết bị di động cỡ nhỏ đang được phát triển nhờ qui trình vi điện tử chuẩn với sự tích hợp các bán dẫn và các thành phần vi cơ. Một định nghĩa khác phát biểu rằng bất kỳ thiết bị nào được sản xuất bằng cách lắp ráp các bộ phận chức năng cực nhỏ trong khoảng 1 - 15 mm được gọi là thiết bị micro.

Trong các *động cơ tĩnh điện*, lực tĩnh điện chiếm ưu thế, không giống như trong các động cơ truyền thống dựa trên các lực từ. Với hệ vi cơ nhỏ hơn, lực tĩnh điện đóng vai trò là lực tác động. Hình 16.15 cho thấy một dạng của động cơ tĩnh điện. Động cơ này là một đĩa hình khuyên với hằng số dẫn suất và điện môi đồng nhất. Khi hoạt động, điện áp đặt vào hai mặt dẫn song song ngăn bởi một lớp cách ly. Động cơ quay với vận tốc không đổi giữa hai lớp đồng tâm, đồng phẳng của các điện cực tĩnh.



HÌNH 16.15 Động cơ tĩnh điện: 1 - rôto, 2 - các điện cực stato

Tiêu chuẩn lựa chọn

Việc chọn lựa cơ cấu chấp hành thích hợp còn khó hơn việc chọn cảm biến, cơ bản do ảnh hưởng của chúng đến động lực học của toàn bộ hệ thống. Hơn nữa, việc chọn cơ cấu chấp hành chi phối bởi công suất và cơ cấu ghép nối của hệ thống. Cơ cấu ghép nối đôi khi không cần nếu đầu ra

của cơ cấu chấp hành có thể giao tiếp trực tiếp với hệ vật lý. Ví dụ việc chọn động cơ tuyến tính thay cho động cơ quay có thể loại trừ việc cần thiết phải có cơ cấu ghép nối để biến đổi chuyển động quay thành chuyển động tịnh tiến.

Nói chung, các thông số dưới đây cần xem xét trước khi lựa chọn cơ cấu chấp hành:

Công suất đầu ra liên tục: Lực/mômen lớn nhất có thể đạt được một cách liên tục không vượt quá giới hạn nhiệt độ

Khoảng dịch chuyển: Khoảng dịch chuyển tịnh tiến/quay

Độ phân giải: Số gia lực/mômen nhỏ nhất có thể đạt được

Độ chính xác: Độ tuyến tính hóa của mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra

Lực/mômen đình: Lực/mômen lúc cơ cấu chấp hành dừng

Tổn hao nhiệt: Lượng điện năng lớn nhất tổn hao do nhiệt khi hoạt động liên tục

Đặc tính tốc độ: Quan hệ lực/mômen và tốc độ

Tốc độ không tải: Tốc độ/vận tốc hoạt động bình thường khi không có tải

Đáp ứng tần số: Dải tần số mà đầu ra đáp ứng chính xác với đầu vào, áp dụng cho các cơ cấu chấp hành tuyến tính

Yêu cầu về công suất: Dạng năng lượng (AC hoặc DC), số pha, cấp điện áp và công suất dòng điện.

Ngoài các tiêu chuẩn kể trên, còn nhiều thông số khác cũng quan trọng tuỳ theo yêu cầu dạng năng lượng và cơ cấu ghép nối. Ví dụ nếu chọn cơ cấu ghép nối thanh răng/bánh răng, khe hở và ma sát sẽ ảnh hưởng đến độ phân giải của phần chấp hành.

17

Cơ sở thời gian và tần số

17.1 Mở đầu 17-1
17.2 Đo thời gian và tần số 17-2
17.3 Các chuẩn thời gian và tần số 17-9
17.4 Truyền thời gian và tần số 17-13
17.5 Kết luận 17-17

Michael A. Lombardi

National Institute of Standards and Technology

17.1 Mở đầu

Các chuẩn thời gian và tần số cung cấp ba dạng thông tin cơ bản: *thời gian, khoảng thời gian,* và *tần số*. Thông tin thời gian được chia thành giờ, phút, giây, nhưng cũng thường bao gồm cả ngày tháng và năm. Một thiết bị hiển thị hoặc ghi thông tin thời gian được gọi là *đồng hồ*. Nếu dùng một đồng hồ để đánh dấu thời điểm diễn ra *sự kiện* thì thời điểm đó đôi khi được gọi là *nhãn thời gian* hoặc *tem thời gian*. Có thể dùng ngày tháng và thời gian để đảm bảo là các sự kiện được *đồng bộ*, hoặc xảy ra tại một thời điểm.

Khoảng thời gian là một quãng thời gian trôi giữa hai sự kiện. Đơn vị chuẩn của khoảng thời gian là giây (s). Tuy nhiên, nhiều ứng dụng kỹ thuật cần đo khoảng thời gian ngắn hơn, như mili giây (1 ms $=10^{-3}$ s), micro giây (1μs$=10^{-6}$ s), nano giây (1 ns$=10^{-9}$ s) và pico giây (1 ps$=10^{-12}$ s). Thời gian là một trong bảy đại lượng vật lý cơ bản, và giây là một trong bảy đơn vị cơ bản được định nghĩa trong Hệ đơn vị quốc tế (SI). Định nghĩa về các đại lượng vật lý khác dựa trên định nghĩa về giây. Giây đã từng được định nghĩa dựa trên tốc độ quay của trái đất hoặc theo năm mặt trời. Sau đó thay đổi vào năm 1967 khi kỷ nguyên nguyên tử chính thức bắt đầu. Định nghĩa hiện nay của giây theo hệ đơn vị quốc tế SI là:

> Khoảng thời gian của 9.192.631.770 chu kỳ phát xạ tương ứng với dịch chuyển giữa hai cấp trạng thái cơ bản của nguyên tử xesi 133.

Tần số là tốc độ lặp lại của một sự kiện. Nếu T là chu kỳ lặp lại của một sự kiện, thì tần số f là $1/T$. Ngược lại, chu kỳ là nghịch đảo của tần số, $T = 1/f$. Do chu kỳ là một khoảng thời gian biểu diễn bằng giây (s), có thể dễ dàng thấy một quan hệ chặt chẽ giữa khoảng thời gian và tần số. Đơn vị chuẩn cho tần số là Héc (Hz), được định nghĩa là số sự kiện hay chu trình trong 1 giây. Tần số của tín hiệu điện đo được thường nhiều héc, bao gồm kilô héc (kHz), mega héc (MHz), hoặc giga héc (GHz), ở đây 1 kHz bằng một nghìn (10^3) sự kiện trên một giây, 1 MHz bằng một triệu (10^6) sự kiện trên một giây và 1 GHz bằng một tỷ (10^9) sự kiện trên một giây. Thiết bị tạo tần số gọi là *máy tạo dao động (oscillator)*. Quá trình thiết lập các máy tạo dao động về cùng một tần số gọi là *sự điều hưởng*.

Như vậy, ba dạng thông tin: thời gian, khoảng thời gian và tần số liên quan mật thiết với nhau. Như đã đề cập, đơn vị chuẩn của khoảng thời gian là giây. Bằng cách tính giây, chúng ta có thể xác định được ngày tháng và thời gian trong ngày. Bằng cách tính số sự kiện hay chu trình trong một giây, chúng ta có thể tính được tần số.

Hiện nay, khoảng thời gian và tần số có thể đo với sai số nhỏ và có độ phân giải cao hơn bất kỳ một đại lượng vật lý nào khác. Chuẩn thời gian và tần số tốt nhất thu được trong giây SI có sai số cỡ 1×10^{-15}. Việc đo lường vật lý các đơn vị SI cơ bản khác có sai số lớn hơn khá nhiều, xem bảng 17.1 [1-5].

BẢNG 17.1 Các sai số thực hiện vật lý của các đơn vị SI cơ bản

Đơn vị cơ bản SI	Đại lượng vật lý	Sai số
Candela	Cường độ sáng	1×10^{-4}
Kenvin	Nhiệt độ	3×10^{-7}
Mol	Tổng số phân tử	8×10^{-8}
Ampe	Dòng điện	4×10^{-8}
Kilôgam	Khối lượng	1×10^{-8}
Mét	Độ dài	1×10^{-12}
Giây	Khoảng thời gian	1×10^{-15}

Thời gian quốc tế được tọa độ hóa UTC (Coordinated Universal Time)

Các phòng thí nghiệm đo lường chính trên thế giới đều đặn đo các chuẩn thời gian và tần số của họ và gửi dữ liệu đo tới BIPM (Bureau International des Poids et Measures) tại Sevres, Pháp. BIPM lấy trung bình dữ liệu thu được từ hơn 200 chuẩn tần số và thời gian nguyên tử đặt tại hơn 40 phòng thí nghiệm, bao gồm cả Viện tiêu chuẩn và công nghệ quốc gia Mỹ (NIST). Với kết quả của việc lấy trung bình này, BIPM tạo ra hai thước đo thời gian, thời gian nguyên tử quốc tế TAI (International Atomic Time) và thời gian quốc tế được tọa độ hóa UTC (Coordinated Universal Time). Các thước đo thời gian này càng gần giây SI càng tốt.

UTC có tần số giống TAI. Tuy nhiên, UTC khác TAI ở số giây tích phân. Sự khác nhau này tăng khi xuất hiện các *giây nhuận*. Khi cần thiết, các giây nhuận được cộng vào UTC trong ngày 30 tháng 6 hoặc 31 tháng 12. Mục đích của việc thêm các giây nhuận là để giữ thời gian nguyên tử (UTC) trong khoảng ±0.9 s của một thước đo thời gian cũ hơn gọi là UT1 dựa trên tốc độ quay của trái đất. Các giây nhuận đã được thêm vào UTC với tỷ lệ nhỏ hơn một lần trong năm, bắt đầu từ năm 1972 [3,5].

Nhớ rằng BIPM giữ TAI và UTC như là các thước đo thời gian "giấy tờ". Các phòng thí nghiệm đo lường chính dùng các dữ liệu công khai từ BIPM để thay đổi đồng hồ và bộ tạo dao động của họ và tạo ra các phiên bản thời gian thực của UTC. Rất nhiều phòng thí nghiệm này phân phát các phiên bản UTC của họ qua tín hiệu radiô, sẽ được mô tả trong phần 17.4.

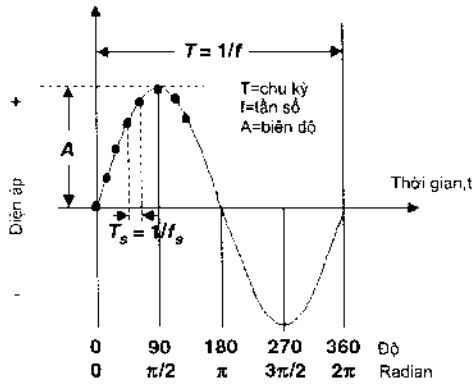
Bạn có thể coi UTC là chuẩn cơ bản cho thời gian, khoảng thời gian và tần số. Các đồng hồ được đồng bộ với UTC cho giờ, phút và giây giống nhau trên toàn thế giới (và giữ trong vòng 1 giây của UT1). Các bộ tạo dao động được điều hưởng với UTC tạo các tín hiệu dùng như các chuẩn tham chiếu cho khoảng thời gian và tần số.

17.2 Đo thời gian và tần số

Các phép đo thời gian và tần số tuân theo các quy ước của các lĩnh vực đo lường khác nhau. Chuẩn tần số hoặc đồng hồ đang dùng được gọi là *thiết bị cần kiểm tra* DUT (device under test). Phép đo sẽ so sánh DUT với một *chuẩn* hoặc *một tham chiếu*. Chuẩn có thể làm tốt hơn DUT bằng một tỷ số riêng, gọi là *tỷ số sai số kiểm tra* (TUR). Lý tưởng, TUR có thể là 10:1 hoặc cao hơn. Tỷ số càng cao, càng cần ít phép đo trung bình để có được các kết quả đo có giá trị.

Tín hiệu kiểm tra cho các phép đo thời gian thường là một xung xuất hiện một lần trong một giây (1 xung/giây). Độ rộng và cực xung thay đổi theo thiết bị, nhưng thường cùng các mức TTL.

Tín hiệu kiểm tra các phép đo tần số thường là tần số 1 MHz hoặc cao hơn, thông thường là 5 hoặc 10 MHz. Các tín hiệu tần số thường là các sóng hình sin, nhưng cũng có thể là các xung hoặc sóng vuông. Nếu tín hiệu tần số là một tín hiệu sin thì nó có thể giống như trên hình 17.1. Tín hiệu này sinh ra một vòng (360^0 hoặc 2π radian) trong một chu kỳ. Biên độ tín hiệu được biểu diễn là Vôn và phải tương thích với thiết bị đo. Nếu biên độ quá nhỏ, thiết bị đo có thể không đo được, nếu biên độ quá lớn, tín hiệu phải được ngắt để tránh quá tải cho thiết bị đo.



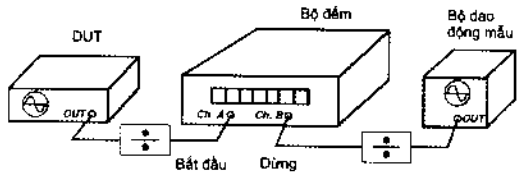
HÌNH 17.1 Một sóng dao động hình sin

Phần này sẽ xem xét hai đặc tính chính của các phép đo thời gian và tần số là *độ chính xác* và *tính ổn định*. Ngoài ra còn đưa ra một số thiết bị đo thời gian và tần số.

Độ chính xác

Độ chính xác là mức độ đúng của một giá trị đo hoặc được tính so với định nghĩa của nó. Độ chính xác liên quan với giá trị bù so với giá trị lý tưởng. Ví dụ, *thời gian bù* là sai khác giữa xung thời gian đúng đo được và xung thời gian đúng lý tưởng trùng chính xácvới UTC. *Tần số bù* là sai khác giữa tần số đo được và tần số lý tưởng với sai số bằng không. Tần số lý tưởng này được gọi là *tần số danh nghĩa.*

Thời gian bù thường được đo bằng một *bộ đếm khoảng thời gian* TIC (time interval counter), như đã chỉ ra trên hình 17.2. Một TIC có các đầu vào cho hai tín hiệu. Một tín hiệu khởi động bộ đếm và một tín hiệu dừng bộ đếm. Khoảng thời gian giữa tín hiệu khởi động và kết thúc được đo bằng cách đếm các chu trình từ bộ tạo dao động thời gian cơ bản. Độ phân giải của TIC giá thấp hạn chế bởi chu kỳ thời gian cơ bản của nó. Ví dụ, một TIC với bộ tạo dao động thời gian cơ bản 10 MHz sẽ có độ phân giải 100 ns. Các TIC chính xác hơn dùng các bộ nội suy để phát hiện các phần của chu trình thời gian cơ bản và cho độ phân giải cao hơn, bình thường là 1ns và có thể đến 20 ps.

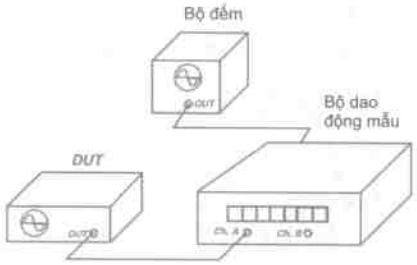


HÌNH 17.2 Đo lường sử dụng bộ đếm khoảng thời gian

Có thể đo tần số bù trong *miền tần số* hoặc *miền thời gian*. Một phép đo trong miền tần số đơn giản gồm việc tính toán và hiển thị trực tiếp đầu ra tần số của DUT với một *bộ đếm tần số*. Tham chiếu cho phép đo này là bộ tạo dao động thời gian cơ bản bên trong hoặc bên ngoài bộ đếm (hình 17.3). Độ phân giải của bộ đếm, hoặc số chữ số nó có thể hiển thị, giới hạn khả năng đo tần số bù của nó. Ví dụ, một bộ đếm tần số chín chữ số có thể phát hiện một tần số bù không nhỏ hơn 0.1 Hz tại 10 MHz (1×10^{-8}). Tần số bù được xác định như sau:

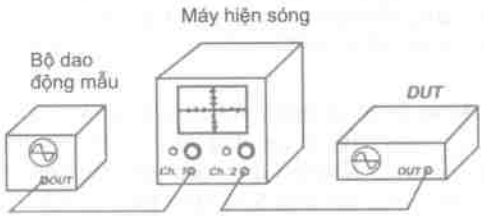
$$f_{bù} = \frac{f_{đo} - f_{danh\ nghĩa}}{f_{danhnghĩa}}$$

ở đây $f_{đo}$ là tần số đọc được từ bộ đếm tần số, và $f_{danh\ nghĩa}$ là tần số ghi trên nhãn của bộ tạo dao động, hay gọi là tần số riêng của đầu ra.

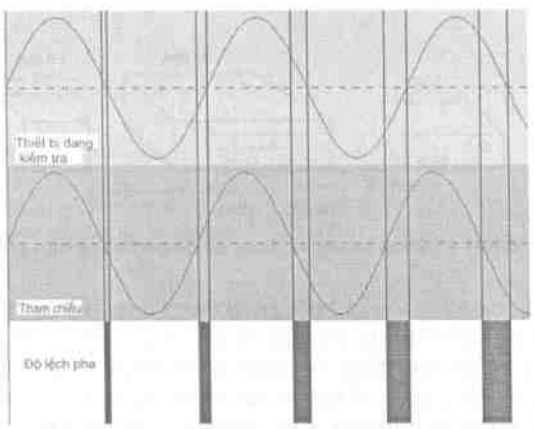


HÌNH 17.3 Đo lường sử dụng bộ đếm tần số

Các phép đo tần số bù trong miền thời gian đòi hỏi phải *so pha* giữa DUT và tín hiệu tham chiếu. Việc so pha đơn giản có thể được thực hiện bởi một máy hiện sóng (hình 17.4). Máy hiện sóng sẽ hiển thị hai sóng hình sin (hình 17.5). Sóng hình sin bên trên biểu diễn tín hiệu từ DUT, và sóng hình sin bên dưới biểu diễn tín hiệu tham chiếu. Nếu hai tần số này giống hệt nhau, mối quan hệ pha của chúng sẽ không thay đổi và cả hai sẽ xuất hiện ổn định trên màn hình hiện sóng. Khi hai tần số không thật sự bằng nhau, tín hiệu tham chiếu sẽ xuất hiện ổn định và tín hiệu DUT dịch chuyển. Bằng cách đo tốc độ dịch chuyển của tín hiệu DUT, ta có thể xác định tần số bù của nó. Các đường thẳng đứng được vẽ từ các điểm tại đó mỗi sóng hình sin chuyển qua điểm không. Phần dưới của hình vẽ cho thấy các thanh với độ rộng của nó biểu diễn độ lệch pha giữa các tín hiệu. Trong trường hợp này, độ lệch pha sẽ tăng, cho thấy là DUT có tần số thấp hơn tham chiếu.



HÌNH 17.4 So sánh pha sử dụng máy hiện sóng



HÌNH 17.5 Hai sóng hình sin với mối quan hệ pha thay đổi

Việc đo các tín hiệu có độ chính xác cao bằng máy hiện sóng là không thực tế do mối quan hệ về pha giữa các tín hiệu thay đổi rất chậm và độ phân giải của máy hiện sóng bị giới hạn. Các so sánh pha chính xác hơn có thể được tạo với một TIC, dùng một bộ tương tự như hình 17.2. Nếu hai tín hiệu đầu vào có tần số giống nhau, khoảng thời gian sẽ không thay đổi. Nếu hai tín hiệu có tần số khác nhau, khoảng thời gian sẽ thay đổi và tốc độ thay đổi là tần số bù. Độ phân giải của một TIC xác định thay đổi tần số nhỏ nhất mà nó có thể phát hiện khi không lấy trung bình. Ví dụ, một TIC giá rẻ với độ phân giải 100 ns có thể phát hiện được sự thay đổi tần số là 1×10^{-7} trong 1 giây. Giới hạn hiện nay cho độ phân giải TIC là 20 ps, có nghĩa là có thể được phát hiện được 2×10^{-11} lần thay đổi tần số trong 1 giây. Việc lấy trung bình các khoảng dài hơn có thể cải thiện độ phân giải đến nhỏ hơn 1 ps trong một số đơn vị [6].

Do các tần số chuẩn như 5 hoặc 10 MHz không khả thi để đo với một TIC, các *bộ chia tần số* (thấy trên hình 17.2) hoặc *bộ trộn tần số* được dùng để biến đổi tần số kiểm tra thành tần số thấp hơn. Các hệ thống chia đơn giản hơn và linh hoạt hơn, do chúng có thể dễ dàng được xây dựng hoặc lập trình để đưa ra các tần số khác nhau. Các hệ thống trộn tần số có giá thành cao hơn, cần nhiều phần cứng với một bộ tạo dao động tham chiếu bổ sung và thường chỉ đo được một tần số đầu vào (ví dụ 10 MHz), nhưng chúng có tỷ số tín hiệu-nhiễu lớn hơn các hệ thống chia.

Nếu dùng các bộ chia, các phép đo được thực hiện từ TIC, nhưng thay vì dùng trực tiếp các phép đo này, ta xác định tỷ lệ thay đổi từ lần đọc này sang lần đọc khác. Tỷ lệ thay đổi này được gọi là *độ lệch pha*. Chúng ta có thể xác định tần số bù như sau:

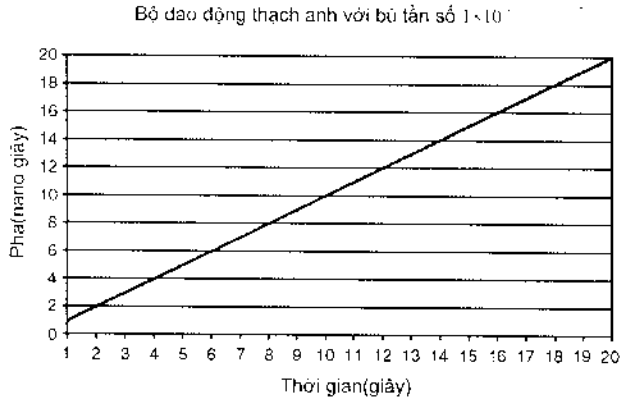
$$f_{bù} = \frac{-\Delta t}{T}$$

ở đây Δt là tổng độ lệch pha và T là chu kỳ đo.

Để thấy rõ, hãy xét một phép đo lệch pha $+1\,\mu s$ trong một khoảng thời gian đo là 24 giờ. Đơn vị dùng cho khoảng thời gian đo (h) phải được chuyển đổi sang đơn vị dùng cho độ lệch pha (μs). Phương trình trở thành:

$$f_{bù} = \frac{-\Delta t}{T} = \frac{-1\,\mu s}{86,400,000,000\,\mu s} = -1.16\times10^{-11}$$

Như đã thấy, một thiết bị có độ lệch pha tích lũy 1 μs/ngày có tần số bù là -1.16×10^{-11} đối với tham chiếu. Với thiết bị này, chỉ cần đọc hai giá trị và khoảng thời gian Δt là hiệu của hai giá trị. Thông thường, ta lấy nhiều lần đọc và tần số bù được ước lượng bằng cách dùng hồi quy tuyến tính bình phương nhỏ nhất trên tập dữ liệu và Δt thu được từ độ dốc của đường bình phương bé nhất. Thông tin này được biểu diễn dưới dạng đồ thị pha, như thấy trên hình 17.6. Thiết bị cần kiểm tra tần số cao chính xác cỡ 1×10^{-9}, có độ lệch pha 1 ns/s [2, 7, 8].



HÌNH 17.6 Đồ thị pha mẫu

Các giá trị tần số bù không thứ nguyên có thể được chuyển sang đơn vị tần số (Hz) nếu biết tần số danh nghĩa. Để minh họa cho việc này, hãy xét một bộ tạo dao động với tần số danh nghĩa 5 MHz và tần số bù -1.16×10^{-11}. Để tìm tần số bù đo bằng Hz, ta nhân tần số danh nghĩa với tần số bù:

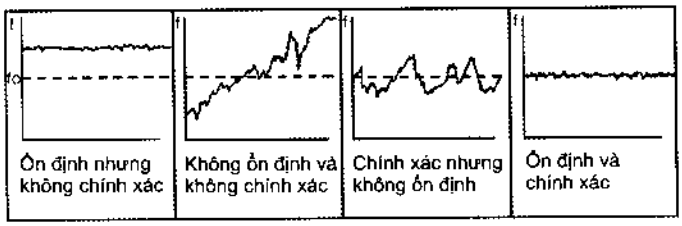
$$\left(5\times10^{6}\right)\left(+1.16\times10^{-11}\right) = 5.80\times10^{-5} = +0.0000580 \text{ Hz}$$

Sau đó, cộng với tần số danh nghĩa để được tần số thực:

$$5,000,000Hz + 0.0000580Hz = 5,000,000.0000580Hz$$

Tính ổn định

Tính ổn định biểu thị khả năng một bộ tạo dao động có thể sinh ra tần số hoặc thời gian bù giống nhau trên một khoảng thời gian cho trước. Không thể nói rằng thời gian hoặc tần số là "đúng" hay "sai", mà chỉ có thể nói nó *cho kết quả giống nhau*. Ngược lại, độ chính xác biểu thị mức độ bộ tạo dao động đặt đúng thời gian hay đúng tần số. Để hiểu sự khác nhau này, hãy xét một bộ tạo dao động ổn định cần điều chỉnh để có thể sinh ra một tần số bù lớn. Hoặc, một bộ tạo dao động không ổn định vừa được điều chỉnh tạm thời để có thể sinh ra một tần số gần giá trị danh nghĩa của nó. Hình 17.7 cho thấy mối quan hệ giữa độ chính xác và tính ổn định.



HÌNH 17.7 Mối quan hệ giữa độ chính xác và độ ổn định

Tính ổn định được định nghĩa là ước lượng thống kê dao động thời gian hoặc tần số của một tín hiệu trên một khoảng thời gian cho trước. Những dao động này được đo kết hợp với thời gian bù hoặc tần số trung bình. Tính ổn định *ngắn hạn* thường chỉ các dao động trong các khoảng nhỏ hơn 100 giây. Tính ổn định *dài hạn* có thể chỉ các khoảng đo lường lớn hơn 100 giây, nhưng thường chỉ các chu kỳ dài hơn 1 ngày.

Các ước lượng tính ổn định có thể được tính trong miền tần số hoặc trong miền thời gian và có thể được tính từ một tập tần số bù hoặc các phép đo khoảng thời gian. Trong một số lĩnh vực đo lường, tính ổn định được xác định bằng cách lấy độ lệch chuẩn của tập dữ liệu. Tuy nhiên, độ lệch chuẩn chỉ thực hiện với dữ liệu ổn định mà ở đó các kết quả độc lập về thời gian và nhiễu là *ồn trắng*, có nghĩa là nó phân bố đều dọc theo dải tần số đo. Dữ liệu bộ tạo dao động thường không ổn định, do nó chứa nhiễu phụ thuộc về thời gian do dịch tần số. Với dữ liệu ổn định, độ lệch chuẩn và trung bình sẽ hội tụ đến các giá trị riêng khi thực hiện nhiều phép đo hơn. Với dữ liệu không ổn định, độ lệch chuẩn và trung bình không bao giờ hội tụ đến bất cứ giá trị riêng nào. Thay vào đó, có một trung bình động thay đổi mỗi lần ta thêm vào một phép đo.

Với những nguyên nhân này, phép thống kê không truyền thống thường được dùng để ước lượng tính ổn định trong miền thời gian. Thống kê này đôi khi được gọi là *phương sai Allan*, nhưng do nó là căn bậc hai của phương sai, nên tên thích hợp của thống kê này là *độ lệch Allan*. Phương trình cho độ lệch Allan ($\sigma_y(\tau)$) là:

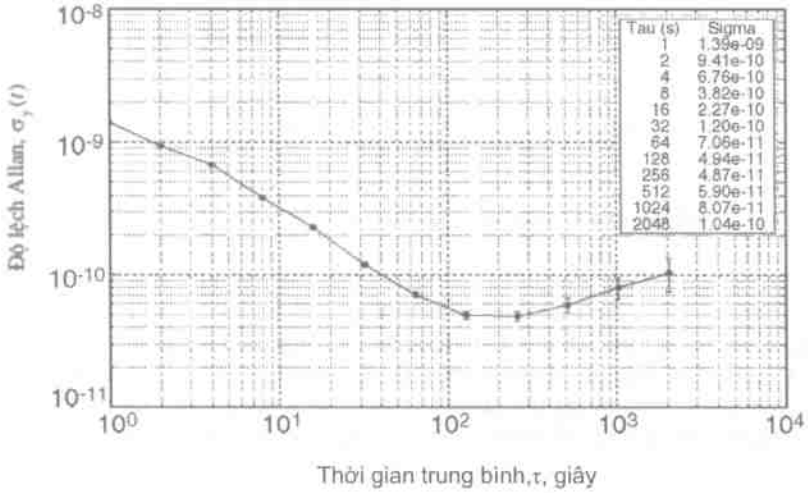
$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)}\sum_{i=1}^{M-1}\left(y_{i+1}-y_i\right)^2}$$

ở đây y_i là tập các kết quả tần số bù đo được bao gồm $y_1, y_2, y_3, \ldots, M$ là số giá trị trong chuỗi y_i, và dữ liệu được đặt đều trong các đoạn τ giây. Hoặc

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(N-2)\tau^2}\sum_{i=1}^{N-2}\left(x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i\right)^2}$$

ở đây x_i là tập các kết quả pha trong đơn vị thời gian đo được bao gồm $x_1, x_2, x_3, \ldots, N$ là số giá trị của chuỗi x_i, và dữ liệu là các khoảng τ giây đều nhau tương ứng. Chú ý rằng, trong khi độ lệch chuẩn trừ đi trung bình từ mỗi phép đo trước khi bình phương tổng của chúng thì độ lệch Allan trừ đi điểm dữ liệu trước. Sự sai khác giữa các điểm dữ liệu liên tục loại bỏ nhiễu phụ thuộc thời gian gây ra bởi tần số bù.

Một đồ thị độ lệch Allan được chỉ ra trên hình 17.8, cho thấy tính ổn định của thiết bị tăng lên khi chu kỳ trung bình (τ) tăng, do một số dạng nhiễu có thể loại bỏ bằng cách lấy trung bình. Tuy nhiên, tại một số điểm, việc lấy trung bình của nhiều số liệu hơn không cải thiện được kết quả. Điểm này gọi là *sàn nhiễu*, hay điểm mà ở đó nhiễu còn lại chứa các quá trình không ổn định như nhiễu rung hoặc bước ngẫu nhiên. Thiết bị đo trên hình 17.8 có sàn nhiễu ~5×10^{-11} tại $\tau = 100$ s.



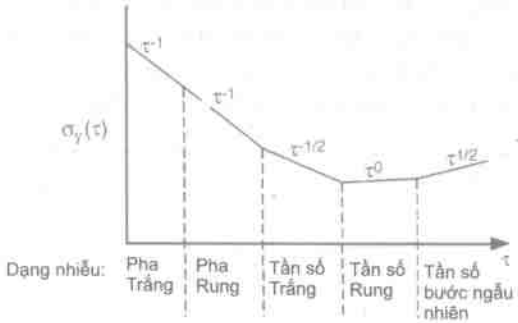
HÌNH 17.8 Đồ thị ổn định tần số

Thực tế, một đồ thị ổn định tần số cũng cho ta biết thời gian cần để lấy trung bình nhằm loại bỏ nhiễu do hệ thống tham chiếu và đo. Sàn nhiễu cũng cung cấp một số dấu hiệu tổng trung bình cần để thu được một TUR đủ lớn và giúp ta có được tần số bù thực của DUT. Nếu DUT là một bộ tạo dao động nguyên tử (phần 17.4) và tham chiếu là một sóng vô tuyến được điều khiển bởi chuẩn truyền (phần 17.5) ta phải lấy trung bình trong 24 giờ hoặc lâu hơn để có kết quả đo tin cậy.

Năm dạng nhiễu thường được nói đến trong các tài liệu tần số và thời gian là: *nhiễu pha trắng, pha rung, tần số trắng, tần số rung* và *tần số bước ngẫu nhiên*. Độ dốc của đường độ lệch Allan có thể giúp việc xác định tổng trung bình cần để loại bỏ các nhiễu này (hình 17.9). Loại nhiễu thứ nhất cần loại bỏ bằng cách lấy trung bình là nhiễu pha, hoặc dao động ngẫu nhiên, nhanh trong pha tín hiệu. Lý tưởng, chỉ thiết bị cần kiểm tra mới gây nhiễu pha vào kết quả đo, nhưng thực tế, còn có nhiễu pha từ hệ thống đo và tham chiếu, và cần được loại bỏ thông qua việc lấy trung bình. Chú ý rằng độ lệch Allan không phân biệt nhiễu pha trắng và nhiễu pha rung. Bảng 17.2 cho thấy một số thống kê khác dùng để ước lượng tính ổn định và xác định các loại nhiễu cho các ứng dụng khác nhau.

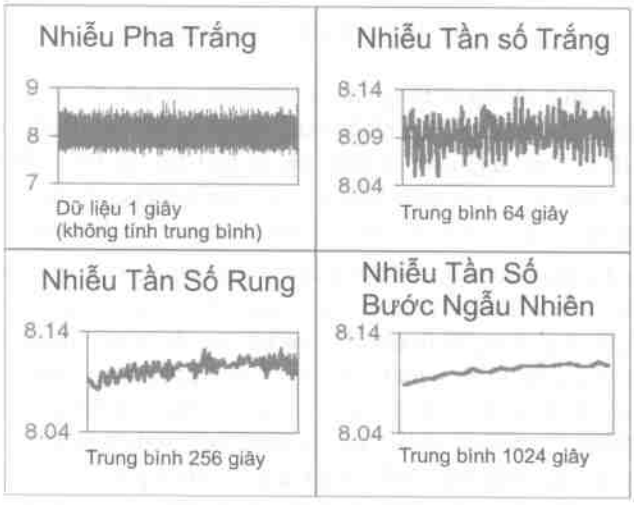
BẢNG 17.2 Thống kê dùng để ước lượng độ ổn định thời gian và tần số, và các dạng nhiễu

Tên	Ký hiệu toán học	Mô tả
Độ lệch Allan	$\sigma_y(\tau)$	Ước lượng độ ổn định tần số. Đặc biệt thích hợp cho các phép đo từ trung bình đến dài hạn.
Độ lệch Allan sửa đổi	MOD $\sigma_y(\tau)$	Ước lượng độ ổn định tần số. Không giống như độ lệch Allan thông thường, nó có thể khác nhau giữa nhiễu pha trắng và nhấp nháy, làm cho nó thích hợp hơn khi ước lượng tính ổn định ngắn hạn.
Độ lệch thời gian	$\sigma_x(\tau)$	Được dùng để đo tính ổn định thời gian. Nhận dạng rõ ràng cả ổn pha trắng và nhấp nháy, các dạng nhiễu cần quan tâm nhất khi đo thời gian hoặc pha.
Độ lệch tổng	$\sigma_{y,\ TỔNG}(\tau)$	Ước lượng tính ổn định tần số. Đặc biệt thích hợp khi ước lượng dài hạn khi τ vượt quá 10% mẫu dữ liệu tổng cộng.



HÌNH 17.9 Sử dụng đồ thị ổn định tần số để nhận dạng nhiễu

Việc xác định và loại trừ nguồn nhiễu của bộ tạo dao động là một vấn đề phức tạp, nhưng việc vẽ các sai phân bậc nhất của tập các số đo miền thời gian có thể tạo cơ sở của phương pháp loại bỏ nhiễu bằng cách lấy trung bình. Hình 17.10 được tạo ra bằng cách dùng một đoạn dữ liệu từ đồ thị ổn định trong hình 17.8. Nó cho thấy đồ thị pha chi phối bởi nhiễu pha trắng (1 s trung bình), nhiễu tần số trắng (64 s trung bình), nhiễu tần số rung (256 s trung bình) và tần số bước ngẫu nhiên (1024 s trung bình). Chú ý rằng đồ thị nhiễu pha trắng có tỷ lệ 2 ns và các đồ thị khác dùng tỷ lệ 100 ps [8-12].



HÌNH 17.10 Các đồ thị pha của bốn dạng nhiễu

17.3 Các chuẩn thời gian và tần số

Tất cả các chuẩn thời gian và tần số đều dựa trên một *sự kiện tuần hoàn* lặp lại với một tốc độ không đổi. Thiết bị sinh ra sự kiện này được gọi là *bộ cộng hưởng*. Trong trường hợp đơn giản là đồng hồ quả lắc thì quả lắc là bộ cộng hưởng. Dĩ nhiên, một bộ cộng hưởng cần một nguồn năng lượng trước khi nó có thể chuyển động qua lại. Nguồn năng lượng và bộ cộng hưởng tạo thành một *bộ tạo dao động*. Bộ tạo dao động chạy với một tốc độ được gọi là *tần số cộng hưởng*. Ví dụ, quả lắc đồng hồ có thể được đặt quay đi quay lại với tốc độ một lần trong một giây. Việc đếm số lần quả lắc dao động hoàn toàn sinh ra khoảng thời gian 1 s. Việc đếm tổng số lần dao động tạo ra một *thước đo thời gian* trong các khoảng thời gian dài hơn, như phút, giờ và ngày. Thiết bị thực hiện việc tính và hiển thị hoặc ghi lại các kết quả được gọi là *đồng hồ*. Bảng 17.3 cho thấy sai số tần số của bộ cộng hưởng đồng hồ tương ứng với sai số thời gian của đồng hồ.

BẢNG 17.3 Mối quan hệ của sai số tần số và sai số thời gian

Sai số tần số	Khoảng do	Sai số tần số
$\pm 1.00\times10^{-3}$	1 s	$\pm 1\,ms$
$\pm 1.00\times10^{-6}$	1 s	$\pm 1\,\mu s$
$\pm 1.00\times10^{-9}$	1 s	$\pm 1\,ns$
$\pm 2.78\times10^{-7}$	1 giờ	$\pm 1\,ms$
$\pm 2.78\times10^{-10}$	1 giờ	$\pm 1\,\mu s$
$\pm 2.78\times10^{-13}$	1 giờ	$\pm 1\,ns$
$\pm 1.16\times10^{-8}$	1 ngày	$\pm 1\,ms$
$\pm 1.16\times10^{-11}$	1 ngày	$\pm 1\,\mu s$
$\pm 1.16\times10^{-14}$	1 ngày	$\pm 1\,ns$

Trong lịch sử, các nhà thiết kế đồng hồ đã tìm ra nhiều bộ cộng hưởng ổn định hơn, và sự thay đổi của các chuẩn thời gian và tần số được tổng hợp trong bảng 17.4. Các sai số được liệt kê theo các chuẩn mới nhất đại diện cho các thiết bị hiện nay (năm 2001), và không giống các nguyên mẫu ban đầu. Chú ý rằng các chuẩn thời gian và tần số đã cải thiện 13 bậc biên độ so với 700 năm về trước và khoảng 9 bậc biên độ so với 100 năm về trước.

BẢNG 17.4 Sự tiến hóa của các chuẩn thời gian và tần số

Chuẩn	Bộ cộng hưởng	Thời điểm	Sai số thời gian (24 h)	Sai số tần số (24 h)
Đồng hồ mặt trời	Chuyển động hiển nhiên của mặt trời	3500 trước CN	Không biết	Không biết
Con ngựa dạng thanh	Cơ cấu dạng thanh và folict	Thế kỷ 14	15 phút	1×10^{-2}
Quả lắc	Quả lắc	1656	10 s	1×10^{-4}
Đồng hồ bấm giờ Harrison	Lò xo và bánh xe cân bằng	1759	350 ms	4×10^{-6}
Quả lắc Shortt	Hai lò xo, tớ và chủ	1921	10 ms	1×10^{-7}
Tinh thể thạch anh	Tinh thể thạch anh	1927	10 μs	1×10^{-10}
Tế bào khí Rubiđi	Cộng hưởng ^{87}Rb (6834682608 Hz)	1958	100 ns	1×10^{-12}
Tín hiệu Xesi	Cộng hưởng ^{133}Cs (9192631770 Hz)	1952	1 ns	1×10^{-14}
Maze Hyđro	Cộng hưởng Hyđro (1420405752 Hz)	1960	1 ns	1×10^{-14}
Nguồn Xesi	Cộng hưởng ^{133}Cs (9192631770 Hz)	1991	100 ps	1×10^{-15}

Tính ổn định của các chuẩn thời gian và tần số liên quan mật thiết với hệ số chất lượng của chúng Q của một bộ tạo dao động là tần số cộng hưởng của nó chia cho độ rộng dải cộng hưởng. Tần số cộng hưởng là tần số riêng của bộ tạo dao động. Độ rộng dải cộng hưởng là khoảng tần số có thể mà ở đó bộ tạo dao động thực hiện dao động. Một bộ cộng hưởng có Q cao sẽ không dao động, trừ khi gần tần số cộng hưởng của nó. Hiển nhiên, một tần số cộng hưởng cao và dải độ rộng cộng hưởng hẹp đều là lợi thế khi tìm một Q cao. Nói chung, Q càng cao, bộ tạo dao động càng ổn định, vì một Q cao có nghĩa là bộ tạo dao động sẽ nằm ở gần tần số cộng hưởng riêng của nó.

Phần này sẽ bắt đầu từ bộ tạo dao động thạch anh, thiết bị thu được Q cao nhất trong tất cả các thiết bị cơ khí. Sau đó sẽ thảo luận về các bộ tạo dao động có hệ số Q cao hơn, dựa trên sự cộng hưởng của nguyên tử rubiđi và xesi. Các bộ tạo dao động nguyên tử dùng các mức năng lượng lượng tử hóa trong nguyên tử và phân tử làm nguồn cộng hưởng của chúng. Các định luật của cơ học lượng tử phát biểu rằng năng lượng của một hệ kín, như một nguyên tử, có các giá trị rời rạc nhất định nào đó. Một trường điện từ tại một tần số riêng có thể đẩy một nguyên tử từ một mức năng lượng này lên một mức cao hơn. Hoặc, một nguyên tử ở mức năng lượng cao có thể chuyển xuống mực năng lượng thấp hơn bằng cách giải phóng năng lượng. Tần số cộng hưởng (f) của một bộ tạo dao động nguyên tử là hiệu giữa hai mức năng lượng chia cho hằng số Planck (h):

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Nguyên lý cơ bản của bộ tạo dao động nguyên tử là khi tất cả nguyên tử của một chất nào đó đồng nhất, có thể sinh ra chính xác một tần số giống nhau khi chúng hấp thụ hoặc giải phóng năng lượng. Về lý thuyết, nguyên tử là một "con lắc" hoàn hảo mà việc đếm các dao động của nó dùng để đo khoảng thời gian. Việc thảo luận các bộ tạo dao động nguyên tử chỉ giới hạn ở các thiết bị có sẵn trên thị trường, loại trừ các chuẩn sơ cấp và chuẩn thực nghiệm được tìm trong các phòng thí nghiệm như NIST. Bảng 17.5 sẽ đưa ra một bản tổng kết [1, 4, 8].

BẢNG 17.5 Tổng kết các dạng bộ dao động

Dạng bộ dao động	Thạch anh (TCXO)	Thạch anh (OCXO)	Rubiđi	Tia Xesi thương mại	Maze Hydro
Q	10^4 đến 10^6	3.2×10^6 (5 MHz)	10^7	10^8	10^9
Tần số cộng hưởng	Khác nhau	Khác nhau	6,834682608 GHz	9,192631770 GHz	1,420405752 GHz
Nguyên nhân chính gây hỏng	Không	Không	Đèn rubiđi (Thời gian mong đợi >15 năm)	Ống tia Xesi (Thời gian mong đợi 3 đến 25 năm)	Xả hết hyđro (Thời gian mong đợi >7 năm)
Độ ổn định $\sigma_y(\tau)$ $\tau = 1$s	1×10^{-8} đến 1×10^{-9}	1×10^{-12}	1×10^{-11} đến 5×10^{-12}	5×10^{-11} đến 5×10^{-12}	1×10^{-12}
Sàn nhiễu $\sigma_y(\tau)$	1×10^{-9} ($\tau = 1$ đến 10^2 s)	1×10^{-12} ($\tau = 1$ đến 10^2 s)	1×10^{-12} ($\tau = 10^3$ đến 10^5 s)	1×10^{-14} ($\tau = 10^5$ đến 10^7 s)	1×10^{-15} ($\tau = 10^3$ đến 10^5 s)
Sự lão hóa/năm	5×10^{-7}	5×10^{-9}	1×10^{-10}	Không	$\sim1\times10^{-13}$
Dịch tần số sau khi khởi động	1×10^{-6}	1×10^{-8} đến 1×10^{-10}	5×10^{-10} đến 5×10^{-12}	5×10^{-12} đến 5×10^{-14}	1×10^{-12} đến 1×10^{-13}
Chu kỳ khởi động	<10 s đến 1×10^{-6}	<5 phút đến 1×10^{-8}	<5 phút đến 5×10^{-10}	30 phút đến 5×10^{-12}	24 h đến 1×10^{-12}

Các bộ tạo dao động thạch anh

Các bộ tạo dao động tinh thể thạch anh là các chuẩn thời gian và tần số thông dụng nhất. Khoảng hai tỷ (2×10^9) bộ tạo dao động thạch anh được sản xuất hàng năm. Hầu hết là các thiết bị nhỏ dùng cho đồng hồ đeo tay, đồng hồ và các mạch điện tử. Tuy nhiên, chúng cũng có trong các thiết bị đo lường và kiểm tra, như bộ đếm, bộ tạo tín hiệu, máy hiện sóng; và tất nhiên trong tất cả bộ tạo dao động nguyên tử.

Một tinh thể thạch anh trong bộ tạo dao động là bộ cộng hưởng. Nó có thể được làm từ thạch anh tự nhiên hoặc nhân tạo, nhưng tất cả các thiết bị hiện đại đều dùng thạch anh nhân tạo. Tinh thể sẽ biến dạng (giãn hoặc co) khi một điện áp đặt vào. Khi đảo điện áp, tinh biến dạng cũng sẽ đảo ngược. Đây là *hiệu ứng áp điện*. Sự dao động được duy trì bởi việc lấy tín hiệu điện áp từ bộ cộng hưởng, khuếch đại nó và phản hồi trở lại bộ cộng hưởng. Tốc độ giãn hoặc co là tần số cộng hưởng và được xác định bởi nhát cắt và kích cỡ của tinh thể. Tần số đầu ra của một bộ tạo dao động thạch anh là tần số cộng hưởng cơ bản hoặc nhiều tần số cộng hưởng, được gọi là bội *tần số (overtone)*. Hầu hết các bộ ổn định cao dùng bội tần số bậc ba hoặc bậc năm để thu được Q cao. Các bội tần số cao hơn bậc năm ít được dùng do khó dẫn thiết bị đến tần số xác định. Q thông thường cho một bộ tạo dao động thạch anh có khoảng từ 10^4 đến 10^6. Q lớn nhất cho một bộ tạo dao động ổn định cao được ước lượng khoảng $Q = 1.6 \times 10^7/f$, ở đây f là tần số cộng hưởng đo bằng MHz.

Sự thay đổi môi trường do nhiệt độ, độ ẩm, áp suất và rung động có thể làm thay đổi tần số cộng hưởng của tinh thể thạch anh, nhưng có một số thiết kế để giảm các hiệu ứng môi trường này. *Bộ tạo dao động tinh thể dạng lò* (OCXO) chứa các tinh thể trong một buồng được điều khiển nhiệt độ gọi là lò. Khi bật một OCXO, nó sẽ thực hiện một chu kỳ "làm nóng" trong khi nhiệt độ của bộ cộng hưởng tinh thể và lò ổn định. Trong khoảng thời gian này, hoạt động của bộ tạo dao động thay đổi liên tục đến khi nó đạt nhiệt độ hoạt động bình thường. Nhiệt độ này sẽ được giữ không đổi trong lò khi nhiệt độ bên ngoài thay đổi. Một cách khác để giải quyết vấn đề nhiệt độ là *bộ tạo dao động tinh thể bù nhiệt* (TCXO). Trong một TCXO, tín hiệu từ một cảm biến nhiệt được dùng để tạo điện áp chính xác cung cấp cho điện kháng điện áp thay đổi, còn gọi là vectơ. Sau đó, varăctơ sinh ra thay đổi tần số bằng hoặc dương so với thay đổi tần số do nhiệt độ. Kỹ thuật này không hoạt động tốt như điều khiển lò, nhưng chi phí rẻ hơn. Do đó, các TCXO được dùng khi không cần tính ổn định cao trên một khoảng nhiệt độ rộng.

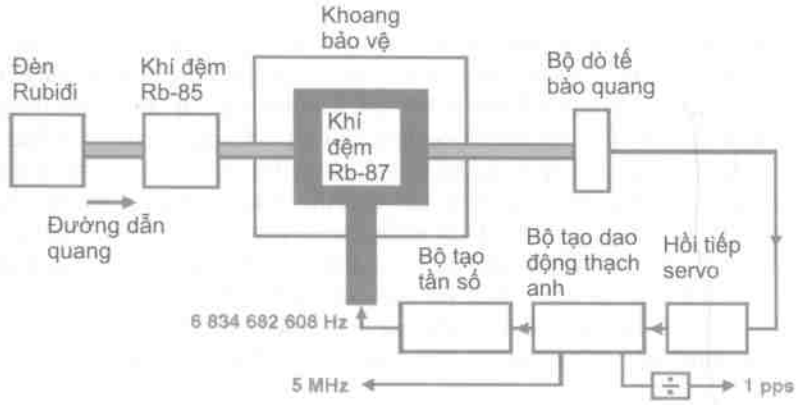
Các bộ tạo dao động thạch anh có tính ổn định ngắn hạn rất tốt. Một OCXO có thể ổn định ($\sigma_y(\tau)$, tại $\tau = 1$s) tới 1×10^{-12}. Các giới hạn trong tính ổn định ngắn hạn phần lớn do các thành phần điện tử trong mạch điện tử của bộ cộng hưởng. Tính ổn định dài hạn bị giới hạn bởi *sự lão hóa*, hay là sự thay đổi trong tần số so với thời gian do những thay đổi bên trong bộ tạo dao động. Sự lão hóa thường thay đổi gần tuyến tính theo tần số cộng hưởng có thể dương hoặc âm, và đôi khi, diễn ra sự đảo ngược hướng lão hóa. Sự lão hóa có rất nhiều nguyên nhân bao gồm sự tích lũy tạp chất trên tinh thể, thay đổi trong mạch điện tử của bộ tạo dao động, hoặc thay đổi chính trong vật liệu thạch anh hoặc cấu trúc tinh thể. Một OCXO chất lượng cao có thể lão hóa với tốc độ $<5\times10^{-9}$ trong một năm, trong khi một TCXO có thể lão hóa nhanh hơn 100 lần.

Do sự lão hóa và các ảnh hưởng môi trường như nhiệt độ và rung động nên khó giữ các bộ dao động thạch anh tốt nhất trong 1×10^{-10} tần số danh nghĩa của chúng khi không có sự điều chỉnh cố định. Với lý do này, cần các bộ tạo dao động nguyên tử dùng cho các ứng dụng cần độ chính xác và tính ổn định dài hạn tốt hơn [4, 13, 14].

Bộ tạo dao động rubiđi

Các bộ tạo dao động rubiđi là bộ có giá thành thấp nhất trong họ các bộ tạo dao động dạng nguyên tử. Chúng hoạt động tại 6.834.682.608 Hz, tần số cộng hưởng của nguyên tử rubiđi (^{87}Rb) và dùng tần số rubiđi để điều khiển tần số của bộ tạo dao động thạch anh. Một tín hiệu vi sóng phát ra từ bộ tạo dao động thạch anh được dùng cho hơi ^{87}Rb trong một ô nhỏ, đưa nguyên tử đến

một trạng thái năng lượng riêng. Sau đó, một tia sáng được bơm vào trong ô nhỏ và được hấp thụ bởi các nguyên tử đưa chúng đến một trạng thái năng lượng riêng. Một bộ tế bào quang tách sóng đo số lượng tia sáng bị hấp thụ, và đầu ra của nó được dùng để điều chỉnh bộ tạo dao động thạch anh tới tần số sao cho tổng số ánh sáng được hấp thụ là lớn nhất. Tiếp theo, bộ tạo dao động thạch anh được hãm tới tần số cộng hưởng của rubiđi, và các tần số chuẩn được nhận từ bộ tạo dao động thạch anh và được cung cấp như là đầu ra (hình 17.11).



HÌNH 17.11 Bộ tạo dao động Rubiđi

Các bộ tạo dao động rubiđi ngày càng nhỏ hơn và rẻ hơn, và có thể có tỷ số giá/khả năng tốt nhất trong các bộ tạo dao động. Tính ổn định dài hạn của chúng tốt hơn nhiều so với bộ tạo dao động thạch anh và chúng cũng nhỏ hơn, tin cậy hơn, rẻ hơn bộ tạo dao động xesi.

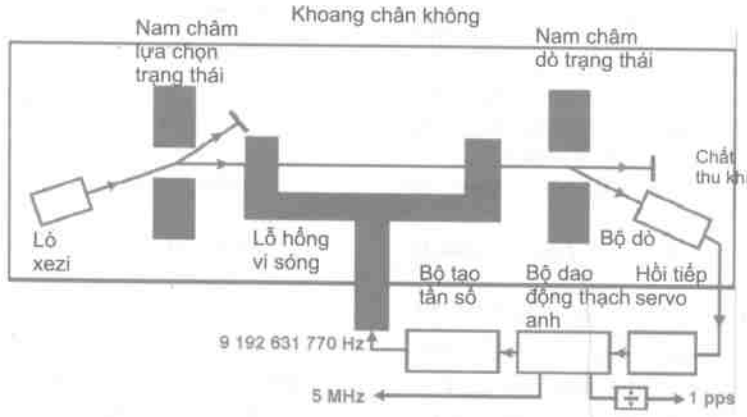
Q của một bộ tạo dao động rubiđi là khoảng 10^7. Các dịch chuyển trong tần số cộng hưởng phần lớn do va chạm của các nguyên tử rubiđi với các phân tử khí khác. Những dịch chuyển này hạn chế tính ổn định dài hạn. Tính ổn định ($\sigma_y(\tau)$, tại $\tau = 1$ s) thường là 1×10^{-11} và khoảng 1×10^{-12} một ngày. Tần số bù của một bộ tạo dao động rubiđi có khoảng từ $5x10^{-10}$ đến 5×10^{-12} sau khi chu kỳ làm nóng là một vài phút hoặc một vài giờ, nên bộ tạo dao động này đáp ứng yêu cầu chính xác của hầu hết các ứng dụng mà không cần hiệu chỉnh.

Bộ tạo dao động xesi

Các *bộ tạo dao động xesi* là các *chuẩn tần số căn bản* từ khi giây SI được định nghĩa từ tần số cộng hưởng của nguyên tử xesi (^{133}Cs), với tần số 9.192.631.770 Hz. Một bộ tạo dao động xesi hoạt động bình thường sẽ gần với tần số danh nghĩa của nó mà không cần điều chỉnh và sẽ không có thay đổi tần số do sự lão hóa.

Các bộ tạo dao động sẵn có trên thị trường dùng công nghệ *tia xesi*. Bên trong bộ tạo dao động xesi, các nguyên tử ^{133}Cs được nung nóng thành khí trong một cái lò. Các nguyên tử khí rời lò trong các tia tốc độ cao chuyển động trong ống chân không tới bộ nam châm. Các nam châm hoạt động như là một cổng chỉ cho phép các nguyên tử của một mực năng lượng riêng đi qua vào trong một lỗ hổng vi sóng, ở đó chúng phát ra một tần số vi sóng thu được từ bộ tạo dao động thạch anh. Nếu tần số vi sóng phù hợp với tần số cộng hưởng của xesi, các nguyên tử xesi sẽ thay đổi trạng thái năng lượng từ của chúng.

Sau đó, tia nguyên tử sẽ đi qua một cổng từ khác gần phía cuối của ống. Những nguyên tử bị thay đổi trạng thái năng lượng này khi đi qua lỗ hổng vi sóng sẽ được phép đi đến một bộ tách sóng ở phía cuối ống. Các nguyên tử không thay đổi trạng thái sẽ bị làm trệch khỏi bộ tách sóng. Bộ tách sóng sinh ra tín hiệu phản hồi phù hợp một cách liên tục với bộ tạo dao động thạch anh theo cách tối đa hóa số lần thay đổi trạng thái sao cho số nguyên tử lớn nhất tới được bộ tách sóng. Các tần số đầu ra chuẩn thu được từ bộ tạo dao động thạch anh bị khóa (hình 17.12).



HÌNH 17.12 Bộ tạo dao động dạng tia Xesi

Q của một chuẩn xesi thương mại là một phần của 10^8. Ống tia thường có chiều dài <0.5 m, và các nguyên tử chuyển động với vận tốc > 100 m/s bên trong ống. Điều này hạn chế thời gian quan sát xuống còn một vài mili giây và độ rộng cộng hưởng xuống còn một vài trăm héc. Tính ổn định ($\sigma_y(\tau)$, tại $\tau = 1$ s) thường cỡ 5×10^{-12} và dẫn tới sàn nhiễu gần 1×10^{-14} trong khoảng 1 ngày, mở rộng đến hàng tuần hoặc tháng. Tần số bù thường gần 5×10^{-12} sau chu kì làm nóng 30 phút.

17.4 Truyền thời gian và tần số

Nhiều ứng dụng cần đồng hồ hoặc bộ tạo dao động ở các vị trí khác nhau được đặt thời gian giống nhau (*đồng bộ hóa*) hoặc tần số giống nhau (*điều hưởng*). Các kỹ thuật *truyền thời gian và tần số* được dùng để so sánh và điều chỉnh các đồng hồ và bộ tạo dao động tại các vị trí khác nhau. Truyền thời gian và tần số có thể đơn giản là đặt đồng hồ đeo tay của bạn theo một tín hiệu thời gian âm thanh, hoặc phức tạp hơn như là điều khiển tần số của bộ tạo dao động trong một mạng tới các phần của 10^{13}.

Truyền thời gian và tần số có thể dùng các tín hiệu quảng bá thông qua nhiều phương tiện khác nhau như cáp đồng trục, cáp quang, tín hiệu sóng vô tuyến (tại nhiều vùng trong phổ sóng vô tuyến), đường điện thoại và Internet. Việc đồng bộ hóa cần cả xung thời gian đúng và mã thời gian. Việc điều hưởng cần chính xác một tần số ổn định từ đài phát. Tần số có thể mang trên chính sóng mang hoặc từ mã thời gian hay thông tin khác điều chế từ sóng mang.

Phần này sẽ thảo luận về các vấn đề cơ bản của cả truyền thời gian và tần số và các tín hiệu sóng vô tuyến được dùng như là tham chiếu chuẩn. Các vấn đề này được tổng kết trong bảng 17.6.

Cơ sở truyền thời gian và tần số

Các tín hiệu dùng cho truyền thời gian và tần số thường được tham chiếu tới các bộ tạo dao động nguyên tử được để điều khiển càng phù hợp với UTC càng tốt. Thông tin được gửi từ một bộ phát (A) tới bộ nhận (B) và trễ τ_{ab}, thường được gọi là *trễ đường dẫn* (hình 17.13).

HÌNH 17.13 Truyền thời gian và tần số một đường

BẢNG 17.6 Tổng kết các tín hiệu và phương pháp truyền thời gian và tần số

Tín hiệu hoặc liên kết	Thiết bị nhận	Sai số thời gian (24 h)	Sai số tần số (24 h)
Dịch vụ thời gian máy tính quay số	Máy tính, phần mềm, môđem và đường điện thoại	< 15 ms	Không dùng cho phép đo tần số
Dịch vụ thời gian Internet	Máy tính, phần mềm và kết nối Internet	< 1 s	Không dùng cho phép đo tần số
Sóng vô tuyến HF (3 đến 30 MHz)	Bộ nhận và ăngten HF	1 đến 20 ms	10^{-6} đến 10^{-9}
Sóng vô tuyến LF (30 đến 300 kHz)	Bộ nhận và ăngten LF	1 đến 100 μs	10^{-10} đến 10^{-12}
Hệ thống định vị toàn cầu (GPS)	Ăngten bộ nhận GPS	< 20 ns	$< 2 \times 10^{-13}$

Để minh họa trễ đường dẫn, hãy xem xét một tín hiệu sóng vô tuyến phát trên một quãng đường 1000 km. Do các tín hiệu sóng vô tuyến truyền với vận tốc ánh sáng (~3.3 μs/km), ta có thể chuẩn đường đi bằng việc đưa một hiệu chỉnh 3,3-ms vào phép đo. Dĩ nhiên, với nhiều ứng dụng có thể loại bỏ trễ đường đi một cách đơn giản. Ví dụ, nếu mục đích của ta đơn giản là đồng bộ hóa đồng hồ máy tính trong 1giây với UTC thì sẽ không cần bận tâm về một trễ đường dẫn 100-ms trong mạng. Và dĩ nhiên, trễ đường dẫn không quan trọng trong hệ thống truyền tần số, do đó không cần xung đúng giờ. Thay vào đó, truyền tần số chỉ cần đường dẫn ổn định trong đó các trễ là không thay đổi.

Các hệ thống truyền phức tạp hơn ước lượng và loại bỏ tất cả hoặc từng phần trễ đường dây. Một trong hai cách thường dùng là ước lượng τ_{ab} và gửi sớm một khoảng thời gian bằng thời gian này. Ví dụ, nếu τ_{ab} ít nhất là 20 ms cho tất cả người dùng, có thể gửi trước 20 ms.

Một kỹ thuật tốt hơn đó là tính toán τ_{ab} và hiệu chỉnh tín hiệu nhận được. Có thể tính được τ_{ab} nếu biết vị trí của cả bộ truyền và nhận. Nếu bộ truyền đứng yên, có thể dùng một hằng số cho vị trí bộ truyền. Nếu bộ truyền di chuyển (ví dụ như một vệ tinh) thì cần phải truyền thêm vị trí của nó vào thời gian truyền. Hệ thống định vị toàn cầu (GPS) cung cấp cả hai phương pháp này – mỗi vệ tinh GPS phát vị trí của nó và bộ nhận có thể dùng các toạ độ của nhiều vệ tinh để tính vị trí của chính nó.

Thông tin được truyền thường bao gồm cả *mã thời gian* sao cho có thể đặt đồng hồ đúng thời gian trong ngày. Hầu hết mã thời gian chứa giờ, phút và giây UTC; ngày, tháng và năm; và cảnh báo trước thời gian tiết kiệm ánh sáng ban ngày và các giây nhảy quãng.

Các tín hiệu truyền thời gian và tần số sóng radio

Có nhiều dạng bộ nhận sóng vô tuyến được thiết kế để nhận các tín hiệu thời gian và tần số. Một số được thiết kế ban đầu để tạo ra thông tin thời gian trong ngày hoặc xung thời gian đúng, một số khác được thiết kế để đưa ra các tần số chuẩn và một số có thể dùng cho cả truyền thời gian và tần số. Phần tiếp theo xem xét ba dạng tín hiệu radio thời gian và tần số được phân loại theo UTC đó là: tần số cao (HF), tần số thấp (LF) và các tín hiệu vệ tinh GPS.

Tín hiệu sóng vô tuyến HF (gồm WWV và WWVH)

Các đài phát sóng vô tuyến tần số cao (HF) chiếm phổ sóng vô tuyến từ 3 đến 30 MHz. Các tín hiệu này thường được dùng cho việc truyền thời gian và tần số tại các cấp hiệu suất vừa phải. Một số đài phát HF sinh ra các thông báo thời gian âm thanh và các mã thời gian số. Các đài phát khác đơn giản chỉ sinh ra các tần số sóng mang để dùng như một tần số tham chiếu.

Các trạm thời gian và tần số HF gồm các trạm sóng vô tuyến NIST của Mỹ là WWV và WWVH. WWV được đặt gần Fort Collins, Colorado và WWVH nằm trên đảo Kauai, Hawaii. Các hai trạm phát các tín hiệu thời gian và tần số 2.5; 5; 10 và 15 MHz, và WWV cũng phát 20 MHz. Tất cả các tần số phát chương trình giống nhau, và ít nhất một tần số sẽ không ổn định trong tất cả các lần. Các trạm này cũng có thể nghe bằng điện thoại, gọi (303) 499-7111 cho WWV hoặc (808) 335-4363 cho WWVH.

Các tín hiệu WWV và WWVH có thể được dùng một trong các dạng sau:

- Phần âm thanh của đài phát gồm các xung có độ dài vài giây hoặc vài khoảng khắc, các tần số âm chuẩn, và các thông báo giọng nói về giờ và phút UTC. WWV dùng giọng nói nam và WWVH dùng giọng nói nữ.
- Bộ mã thời gian nhị phân được gửi trên sóng mang phụ 100 Hz với tốc độ 1 bit/s. Mã thời gian gồm giờ, phút, giây, ngày trong năm, thời gian DST (Daylight Saving Time), cùng một hiệu chỉnh UT1. Mã này có thể được đọc và hiển thị bởi đồng hồ sóng vô tuyến.
- Tần số mang có thể được dùng như là một tham chiếu cho chuẩn của bộ tạo dao động. Nó hầu hết được thực hiện với các tín hiệu sóng mang 5 hoặc 10 MHz, do chúng thích hợp với các tần số đầu ra của các bộ tạo tín hiệu chuẩn.

Việc phát thời gian bằng WWV và WWVH sẽ bị chậm khi nó tới vị trí sử dụng. Thời gian bù phụ thuộc khoảng cách từ bộ truyền đến bộ nhận, nhưng nên nhỏ hơn 15 ms ở Mỹ. Để ước lượng tốt thời gian bù cần dựa trên cơ sở của việc truyền sóng vô tuyến HF. Hầu hết các nơi ứng dụng nhận một tín hiệu đã truyền lên tầng điện ly và sau đó phản hồi lại trái đất. Do độ cao của tầng điện ly thay đổi trong ngày nên trễ đường dẫn cũng thay đổi. Độ trễ đường dẫn thay đổi giới hạn dải tần số nhận trong khoảng 10^9 khi lấy trung bình trong 1 ngày.

Các trạm sóng vô tuyến HF như WWV và WWVH có ích cho các ứng dụng cấp thấp, như sự đồng bộ hóa bằng tay của các đồng hồ tương tự và số, các chuẩn tần số đơn giản và các chuẩn của đồng hồ dừng và bộ định thời. Tuy nhiên, các tín hiệu LF và GPS là các lựa chọn tốt hơn cho các ứng dụng nhiều yêu cầu hơn [2,7,15].

Tín hiệu sóng radio LF (gồm WWVB)

Trước sự xuất hiện của vệ tinh, các tín hiệu tần số thấp (LF) là phương thức được lựa chọn để truyền thời gian và tần số. Trong khi các tín hiệu LF chỉ còn được dùng trong phòng thí nghiệm, chúng vẫn có hai ưu điểm chính là có thể nhận được trong nhà không cần anten ngoài và một vài trạm phát mã thời gian. Do đó các tín hiệu này tỏ ra là lý tưởng để ứng dụng cho các sản phẩm điện tử gia dụng hiển thị thời gian trong ngày.

Nhiều trạm thời gian và tần số hoạt động trong dải LF từ 30 đến 300 kHz (bảng 17.7). Hiệu suất của tín hiệu nhận bị ảnh hưởng bởi chiều dài đường dẫn và độ mạnh tín hiệu. Chiều dài đường dẫn quan trọng bởi vì tín hiệu được chia thành sóng mặt đất và sóng không trung. Tín hiệu sóng mặt đất ổn định hơn. Do nó truyền theo đường đi ngắn nhất giữa bộ truyền và bộ nhận, nó đến trước và trễ đường dẫn của nó dễ ước lượng hơn. Sóng không trung phản hồi từ tầng điện ly và tạo ra các kết quả tương tự với các kết quả nhận được từ việc thu HF. Với khoảng cách ngắn các trạm thu phát có thể bám theo sóng mặt đất một cách liên tục. Các đường dẫn dài hơn trộn hỗn hợp sóng không trung và sóng mặt đất. Với các đường dẫn rất dài, chỉ có thể thu sóng không trung.

BẢNG 17.7 Các trạm truyền phát thời gian và tần số LF

Ký hiệu gọi	Quốc gia	Tần số (kHz)	Luôn luôn bật?
DCF77	Đức	77.5	Có
DGI	Đức	177	Có
HBG	Thụy Sỹ	75	Có
JG2AS	Nhật Bản	40	Có
MSF	Anh	60	Có
RBU	Nga	66.666	Không
RTZ	Nga	50	Có
TDF	Pháp	162	Có
WWVB	Mỹ	60	Có

Độ mạnh tín hiệu cũng quan trọng. Nếu tín hiệu yếu, bộ nhận có thể tìm kiếm chu trình mới của sóng mang để bám. Mỗi thời điểm bộ nhận điều chỉnh điểm bám của nó bằng một vòng quét, nó đưa ra một bước pha bằng chu kỳ của sóng mang. Ví dụ, một vòng trượt với sóng mang 60 kHz đưa ra một bước pha 16.67 μs. Tuy nhiên, với một tín hiệu sóng mặt đất mạnh có thể cho các kết quả rất tốt. Một bộ nhận LF bám liên tục trong cùng một chu trình của một tín hiệu sóng mặt đất có thể truyền tần số trong dải 1×10^{-12} khi lấy trung bình trong 1 ngày.

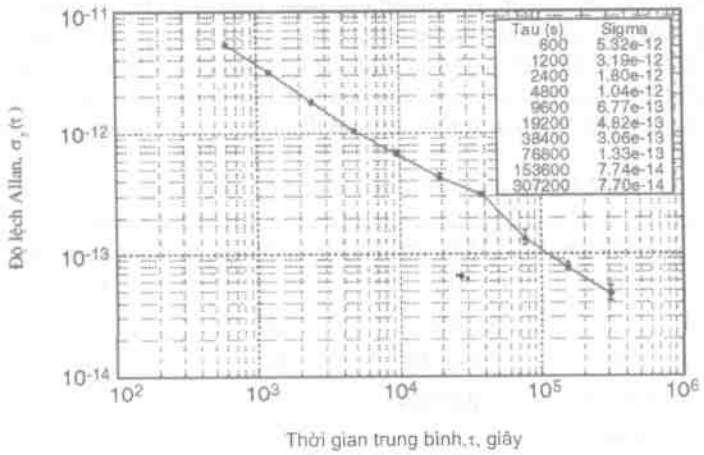
NIST điều hành trạm sóng vô tuyến LF WWVB từ Fort Collins, Colorado với tần số truyền 60 kHz. Trạm hoạt động 24/24 giờ với công suất đầu ra có ích 50 kW. Mã thời gian WWVB đồng bộ với sóng mang 60 kHz và chứa năm, ngày của năm, giờ, phút, giây, và cờ chỉ trạng thái thời gian tiết kiệm ánh sáng ban ngày, năm ngắt quãng và giây ngắt ngãng. Mã thời gian được nhận và hiển thị bằng đồng hồ đeo tay, đồng hồ báo thức, đồng hồ treo tường và các thiết bị điện tử dân dụng khác [2,7,15].

Hệ thống định vị toàn cầu (GPS)

GPS là hệ thống dẫn hướng được phát triển và điều hành bởi Bộ quốc phòng Mỹ (DoD) và được sử dụng hầu khắp trên thế giới. Hệ thống bao gồm ít nhất 24 vệ tinh có quĩ đạo ở độ cao 20,200 km so với mặt đất trong sáu mặt phẳng cố định nghiêng 55^0 so với đường xích đạo. Chu kỳ quĩ đạo là 11 giờ 58 phút, có nghĩa là mỗi vệ tinh băng qua mặt phẳng giống nhau trên trái đất hai lần một ngày. Bằng việc xử lý các tín hiệu nhận từ các vệ tinh, một bộ nhận GPS có thể xác định vị trí của nó với sai số < 10 m.

Các vệ tinh phát trên hai tần số sóng mang, L1 tại 1575.42 MHz và L2 tại 1227.6 MHz. Mỗi vệ tinh phát một dạng sóng phổ rộng, được gọi là một mã *nhiễu giả ngẫu nhiên* (*PRN*) trên L1 và L2, và mỗi vệ tinh được nhận dạng bằng mã PRN mà nó truyền. Có hai dạng mã PRN. Dạng thứ nhất là mã *thu thập thô* (*C/A*) với tốc độ chipping là 1023 chip/ms. Dạng thứ hai là mã *chính xác* (*P*) với tốc độ chipping là 10230 chip/ms. Mã C/A được phát trên L1 và mã P được phát trên cả L1 và L2. Việc thu GPS theo đường ngắm có nghĩa là anten nhận cần phải có tầm nhìn không trung rõ [16].

Mỗi vệ tinh mang các bộ tạo dao động rubiđi hoặc xesi hoặc tổ hợp của cả hai. Các bộ tạo dao động này được điều hành từ các trạm mặt đất của DoD và được tham chiếu tới thước đo thời gian thiên văn hải quân Mỹ, UTC (USNO), luôn giữ trong 100 ns so với UTC (NIST). Các bộ tạo dao động cung cấp tham chiếu cho cả sóng mang và mã phát.



HÌNH 17.14 Độ ổn định tần số của bộ nhận GPS

Ngày nay, các tín hiệu GPS chiếm ưu thế trên thế giới với việc truyền thời gian và tần số hiệu suất cao, do chúng có độ thu tin cậy và các kết quả chấp nhận được với chi phí tối thiểu. Một bộ

nhận GPS có thể tự động tính toán vĩ độ, kinh độ và độ cao của nó từ dữ liệu vị trí nhận từ các vệ tinh. Sau đó, bộ nhận có thể chuẩn lại đường đi sóng vô tuyến và đồng bộ với xung đúng giờ. Ngoài xung đúng giờ, nhiều bộ nhận sinh ra các tần số chuẩn như 5 hoặc 10 MHz bằng cách điều hành một OCXO hoặc bộ tạo dao động rubiđi dùng tín hiệu vệ tinh. Các bộ nhận GPS cũng cung cấp thông tin thời gian trong ngày và ngày tháng.

Một bộ nhận GPS chuẩn cho các trễ thiết bị có sai số thời gian < 20 ns tương đối so với UTC (NIST), và sai số tần số $< 2 \times 10^{-13}$ khi lấy trung bình cho 1 ngày. Hình 17.14 cho thấy một đồ thị độ lệch Allan cho đầu ra của bộ nhận GPS giá thành thấp. Độ ổn định là gần 1×10^{-13} sau khoảng 1 ngày lấy trung bình.

17.5 Kết luận

Như đã lưu ý ở trên, các chuẩn và đo lường thời gian và tần số đã được cải tiến bởi chín bậc biên độ trong 100 năm qua. Sự tiến bộ nhanh chóng này đã tạo ra rất nhiều sản phẩm và công nghệ khả thi mới. Dù không thể đoán trước về tương lai, chúng ta cũng có thể chắc chắn rằng các bộ tạo dao động thạch anh sẽ tiếp tục tăng, các sai số đo lường sẽ tiếp tục giảm và các công nghệ mới sẽ tiếp tục được tìm ra.

Tham khảo

[1] Jespersen, J., and Fitz-Randolph, J., *From Sundials to Atomic Clocks: Understanding Time and Frequency*, 2nd ed., Dover, Mineola, New York, 1999.

[2] Kamas, G., and Lombardi, M. A., *Time and Frequency Users Manual*, NIST Special Publication 559, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1990.

[3] Levine, J., *Introduction to time and frequency metrology*, Rev. Sci. Instrum., 70, 2567, 1999.

[4] Hackman, C., and Sullivan, D. B., Eds., *Time and Frequency Measurement*, American Association of Physics Teachers, College Park, Maryland, 1996.

[5] ITU Radiocommunication Study Group 7, *Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems*, International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland, 1997.

[6] Novick, A. N., Lombardi, M. A., Zhang, V. S., and Carpentier, A., A high performance multi-channel time interval counter with an integrated GPS receiver, in Proc. 31st *Annu. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, Dana Point, California, p. 561, 1999.

[7] Lombardi, M. A., Time measurement and frequency measurement, in *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, Webster, J. G., Eds., CRC Press, Boca Raton, Florida, 1999, chap. 18–19.

[8] Sullivan, D. B., Allan, D. W., Howe, D. A., and Walls, F. L., Eds., *Characterization of Clocks and Oscillators*, NIST Technical Note 1337, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1990.

[9] Jespersen, J., Introduction to the time domain characterization of frequency standards, in *Proc. 23rd Annu. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, Pasadena, California, p. 83, 1991.

[10] IEEE Standards Coordinating Committee 27, *IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1999.

[11] Walls, F. L., and Ferre-Pikal, E. S., Measurement of frequency, phase noise, and amplitude noise, in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John Wiley and Sons, New York, 1999,

[12] Howe, D. A., An extension of the Allan variance with increased confidence at long term, *IEEE Int. Freq. Control Symp.*, 321, 1995.

[13] Vig, J. R., Introduction to quartz frequency standards, *Army Research and Development Technical Report*, SLCET-TR-92-1, October 1992.

[14] Hewlett-Packard Company, *Fundamentals of Quartz Oscillators*, HP Application Note 200-2, 1997.

[15] Carr, J. J., *Elements of Electronic Instrumentation and Measurement*, 3rd ed., Prentice-Hall, NJ, 1996.

[16] Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., *GPS: Theory and Practice, 3rd ed.*, Springer-Verlag, New York, 1994.

18

Đặc tính của cảm biến và cơ cấu chấp hành

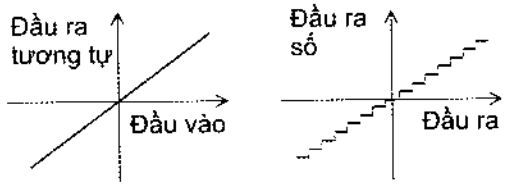
18.1 Dải đo 18-1
18.2 Độ phân giải 18-2
18.3 Độ nhạy 18-2
18.4 Sai số 18-2
18.5 Khả năng lặp lại 18-3
18.6 Độ tuyến tính và độ chính xác 18-3
18.7 Trở kháng 18-4
18.8 Tính phi tuyến 18-5
18.9 Ma sát tĩnh và ma sát Culông 18-5
18.10 Độ lệch tâm 18-5
18.11 Khe hở 18-6
18.12 Trạng thái bão hòa 18-6
18.13 Vùng chết 18-7
18.14 Đáp ứng hệ thống 18-8
18.15 Đáp ứng hệ bậc nhất 18-8
18.16 Đáp ứng hệ bậc hai có cản 18-9
18.17 Đáp ứng tần số 18-12

Joey Parker
University of Alabama

Các hệ cơ điện tử dùng nhiều loại cảm biến và cơ cấu chấp hành để đo và điều khiển các hệ cơ, điện và nhiệt. Cảm biến có nhiều đặc tính ảnh hưởng đến khả năng đo và khả năng ứng dụng. Các cảm biến tương tự có đầu ra liên tục trên một miền đầu vào giới hạn. Các ví dụ về cảm biến tương tự gồm đồng hồ đo điện thế, cảm biến vi phân tuyến tính LVDT (Linear Variable Differential Transformers), cảm biến tải và nhiệt điện trở. Một cảm biến số thông thường hay được sử dụng trong các hệ cơ điện tử là bộ mã hóa tương đối (incremental encoder). Cảm biến tương tự kết hợp với bộ biến đổi tương tự - số (ADC) có các đặc tính đầu ra giống như chỉ ra trên hình 18.1.

18.1 Dải đo

Dải đo của một cảm biến là hiệu giữa đầu vào lớn nhất (dương nhất) với đầu vào nhỏ nhất mà ứng với dải giá trị đầu vào đó có giá trị đầu ra phù hợp. Dải đo thường được quy định bởi nhà sản xuất cảm biến. Ví dụ cặp nhiệt K loại thông thường có dải đo là 800°C (từ -50°C đến 750°C). Một chiết áp 10 vòng có dải đo là 3600 độ.



HÌNH 18. 1 Đầu ra của cảm biến tương tự và số

18.2 Độ phân giải

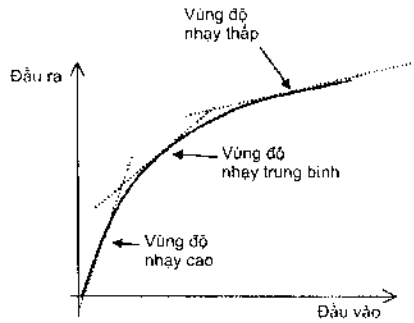
Độ phân giải của một cảm biến là khoảng nhỏ nhất của đầu vào mà cảm biến có thể đo được. Độ phân giải cũng có thể được hiểu là số đếm nhỏ nhất của cảm biến. Độ phân giải của cảm biến số được xác định một cách dễ dàng. Một bộ mã hóa tương đối 1024 ppr (xung/vòng) có độ phân giải là:

$$\frac{1\,\text{độ phân giải}}{1024\,\text{xung}} \times \frac{360\,\text{độ}}{1\,\text{độ phân giải}} = 0.3516 \frac{\text{độ}}{\text{xung}}$$

Độ phân giải của cảm biến tương tự thường chỉ bị giới hạn bởi nhiễu điện mức thấp và thường tốt hơn cảm biến số tương đương.

18.3 Độ nhạy

Độ nhạy của cảm biến được định nghĩa là thay đổi đầu ra trên mỗi thay đổi đầu vào. Độ nhạy của cảm biến số thường liên quan mật thiết đến độ phân giải. Độ nhạy của một cảm biến tương tự là độ dốc của đường biểu thị mối quan hệ giữa đầu ra và đầu vào. Một cảm biến có đặc tính tuyến tính thì có độ nhạy không đổi trên toàn bộ dải đầu vào. Các cảm biến có đặc tính phi tuyến thì có độ nhạy tăng hoặc giảm khi đầu vào thay đổi như hình 18.2.



HÌNH 18. 2 Độ nhạy cảm biến

18.4 Sai số

Sai số là độ sai khác giữa giá trị đo được và giá trị thực của đầu vào. Có hai dạng sai số là sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên. Sai số hệ thống có ở tất cả các phép đo được thực hiện với một cảm biến cho trước và không thể phát hiện hoặc loại bỏ bằng trung bình thống kê. Các sai số hệ thống này được chia thành:

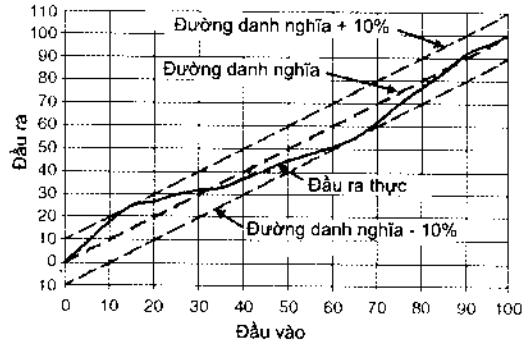
- *Sai số lệch không* là dạng phổ biến của sai số hệ thống khi giá trị đầu ra khác không với đầu vào bằng không,
- *Sai số tải* do thêm cảm biến vào hệ được đo làm thay đổi hệ,
- *Sai số do độ nhạy của cảm biến thay đổi không giống như mong muốn* ví dụ các hiệu ứng nhiệt trên biến dạng kế.

18.5 Khả năng lặp lại

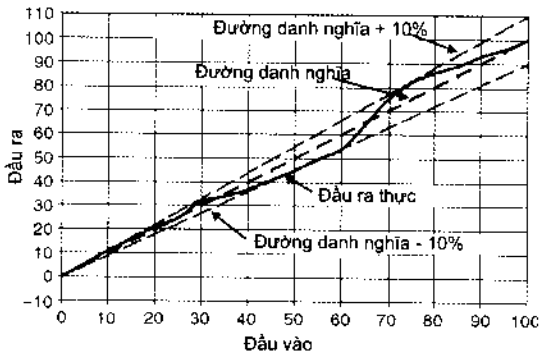
Khả năng lặp lại (phục hồi) là khả năng thu được đầu ra giống nhau với đầu vào giống nhau của một cảm biến. Sai số ngẫu nhiên làm giảm khả năng lặp lại. Rất may là sai số ngẫu nhiên có thể xóa bỏ bằng cách lấy trung bình một số phép đo hoặc sử dụng bộ lọc thông thấp. Nhiễu và trễ điện (sẽ mô tả sau) đều làm giảm khả năng lặp lại.

18.6 Độ tuyến tính và độ chính xác

Độ chính xác của một cảm biến tỷ lệ nghịch với sai số, nghĩa là một cảm biến có độ chính xác cao sẽ có sai số nhỏ. Nhiều nhà sản xuất quy định độ chính xác dưới dạng độ tuyến tính của cảm biến. Đường thẳng bình phương tối thiểu giữa các giá trị đầu ra và đầu vào tương ứng của tất cả các phép đo xác định đầu ra danh nghĩa của cảm biến. Độ tuyến tính (độ chính xác) được xác định theo tỷ lệ phần trăm trên toàn dải đo (giá trị đầu vào lớn nhất), như thấy trên hình 18.3 hoặc là phần trăm của số đọc của cảm biến, như thấy trên hình 18.4. Hình 18.3 và 18.4 đều cho thấy đặc tính của chúng với độ tuyến tính 10%, thường lớn hơn nhiều so với hầu hết các cảm biến trong thực tế.

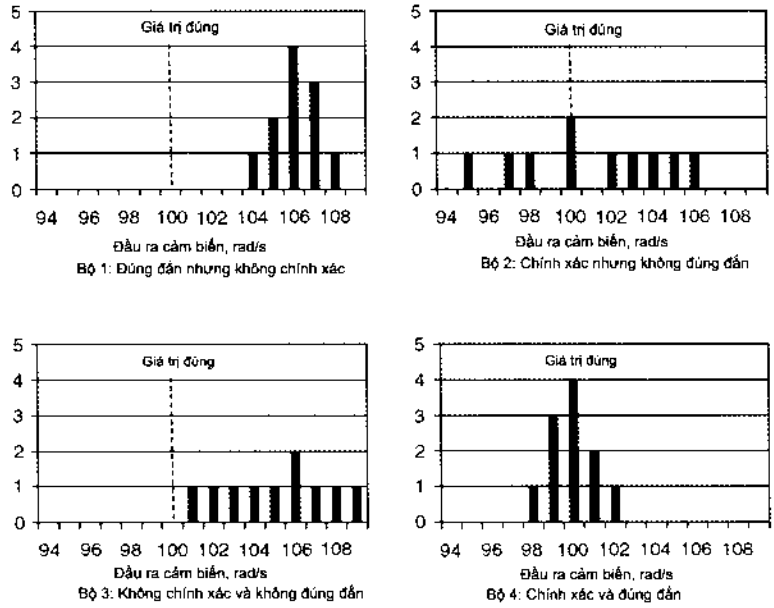


HÌNH 18. 3 Độ tuyến tính được chỉ ra trên toàn thang



HÌNH 18. 4 Độ tuyến tính được chỉ ra ở kết quả

Độ chính xác và tính đúng đắn là hai khái niệm thường gây nhầm lẫn. Hình 18.5 là bốn biểu đồ của 10 phép đo vận tốc góc của một cơ cấu chấp hành với giá trị không đổi 100 rad/s. Bộ dữ liệu đầu tiên cho thấy độ đúng đắn cao (độ lệch chuẩn thấp) và khả năng lặp lại, nhưng độ chính xác trung bình kém. Bộ dữ liệu thứ hai cho thấy độ đúng đắn thấp (độ lệch chuẩn cao) trong khi độ chính xác trung bình cao. Bộ dữ liệu thứ ba cho thấy độ đúng đắn thấp và độ chính xác thấp còn bộ dữ liệu thứ tư cho thấy cả độ đúng đắn, khả năng lặp lại và độ chính xác cao.



HÌNH 18. 5 Các ví dụ về độ chính xác và tính đúng đắn

18.7 Trở kháng

Trở kháng là tỷ số giữa điện áp và dòng điện qua một cảm biến. Với cảm biến có tính thuần trở (biến dạng kế hoặc nhiệt điện trở), trở kháng Z chính là điện trở R có đơn vị là ôm (Ω):

$$Z_R = \frac{V}{I} = R$$

Với các cảm biến phức tạp hơn, trở kháng gồm điện dung C và điện cảm L. Việc thêm các thành phần này làm trở kháng phụ thuộc tần số, nhưng đơn vị vẫn là ôm:

$$Z_C = \frac{V}{I} = \frac{1}{jC\omega} \text{ và } Z_L = \frac{V}{I} = jL\omega$$

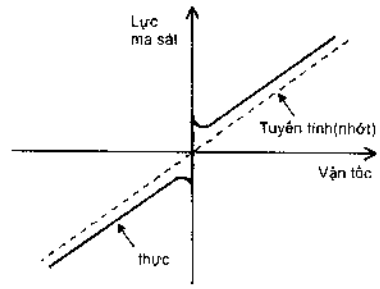
trong đó $j = \sqrt{-1}$ là số ảo còn ω là tần số. Dạng trở kháng đặc biệt tốt cho việc phân tích các mạch đơn giản, các điện cảm song song và nối tiếp có thể coi như các điện trở. Hai dạng trở kháng quan trọng trong các ứng dụng cảm biến: Trở kháng vào và trở kháng ra. Trở kháng vào là một đại lượng đo độ lớn dòng điện được đưa vào cảm biến (hoặc mạch chuẩn hóa tín hiệu). Trở kháng vào thường được mô hình như là một điện trở song song với các cực đầu vào. Cần có trở kháng vào cao do cần dòng điện qua thiết bị nhỏ hơn dòng điện từ nguồn. Máy hiện sóng và thiết bị thu thập dữ liệu thường có trở kháng vào là 1 MΩ hoặc nhiều hơn để tối thiểu hóa dòng điện đưa vào. Trở kháng ra là đại lượng đo dòng điện đến các bộ phận khác của hệ thống phía sau cảm biến (hoặc mạch chuẩn hóa tín hiệu). Trở kháng ra thường được mô hình hóa là điện trở mắc nối tiếp với đầu ra cảm biến. Trở kháng ra thấp là điều mong muốn nhưng thường không sẵn có trực tiếp từ cảm biến. Các cảm biến áp điện có trở kháng ra cao và không thể là nguồn dòng lớn (thường cỡ microampe hoặc nhỏ hơn). Vì thế các mạch khuếch đại thuật toán thường được dùng để làm bộ đệm cho đầu ra cảm biến. Các mạch khuếch đại thuật toán (đặc biệt là bộ dẫn điện áp) là lý tưởng đối với nhiều cảm biến, do chúng có trở kháng vào cao nhưng trở kháng ra về cơ bản là thấp hơn.

18.8 Tính phi tuyến

Các hệ tuyến tính có tính chất xếp chồng. Nếu đáp ứng của hệ thống đối với đầu vào A là đầu ra A và đáp ứng đối với đầu vào B là đầu ra B thì đáp ứng với đầu vào C bằng đầu vào A cộng với đầu vào B sẽ cho đầu ra C bằng đầu ra A cộng với đầu ra B. Nhiều hệ thống thực có đặc tính tuyến tính hoặc gần tuyến tính trên một số dải hoạt động. Phân tích các hệ như vậy theo kiểu hệ tuyến tính là đúng, ít nhất là trên những khoảng chia nhỏ trong toàn dải hoạt động của hệ thống. Tuy nhiên, hầu hết các hệ thống thực có tính phi tuyến làm cho chúng hoạt động ngoài vùng tuyến tính và nhiều tính chất của hệ tuyến tính như tính xếp chồng, không còn áp dụng được. Một số tính phi tuyến trong hệ cơ điện tử như ma sát tĩnh và ma sát điện, độ lệch tâm, khe hở (trễ), trạng thái bão hòa và vùng chết.

18.9 Ma sát tĩnh và ma sát Culông

Khi phân tích hệ tuyến tính truyền thống, các lực ma sát được giả thiết là tỷ lệ với vận tốc, ví dụ như ma sát nhớt. Khi vận tốc cơ cấu chấp hành bằng không thì không có ma sát. Trong thực tế, một lượng nhỏ ma sát tĩnh (không vận tốc) hoặc ma sát Culông hầu như luôn tồn tại, thậm chí trong các ổ trục chống ma sát dạng bi hoặc con lăn. Một đồ thị thông thường biểu thị mối quan hệ giữa lực ma sát và vận tốc được thấy trên hình 18.6. Chú ý rằng lực ma sát tĩnh có thể nhận bất cứ giá trị nào giữa một số giới hạn trên và dưới tại vận tốc bằng không. Ma sát tĩnh có hai tác động cơ bản đến hệ cơ điện tử đó là:

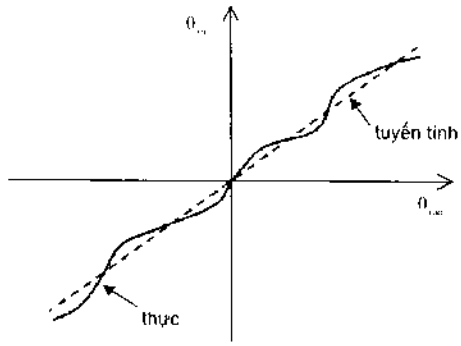


HÌNH 18. 6 Ma sát tĩnh và ma sát Culông

1. Một phần mômen hoặc lực của cơ cấu chấp hành bị mất đi do phải thắng các lực ma sát dẫn đến việc không hiệu quả về mặt năng lượng.
2. Khi cơ cấu chấp hành dịch chuyển hệ thống tới vị trí cuối cùng, vận tốc gần bằng không và mômen/lực của cơ cấu chấp hành sẽ tiệm cận giá trị cân bằng một cách chính xác với các tải trọng lực và ma sát. Do ma sát tĩnh có thể nhận bất cứ giá trị nào tại vận tốc không, cơ cấu chấp hành sẽ có sự khác nhau nhỏ giữa các vị trí nghỉ cuối cùng - phụ thuộc vào giá trị cuối cùng của ma sát tĩnh. Tác động này làm giảm khả năng lặp lại của hệ cơ điện tử.

18.10 Độ lệch tâm

Mối quan hệ lý tưởng giữa bánh răng, con lăn và truyền động xích được giả thiết là điểm tiếp xúc bánh răng giữ khoảng cách cố định với tâm quay của mỗi bánh răng. Trong thực tế, tâm thực sự của vòng tròn bước răng và tâm của chuyển động quay có lượng sai khác nhỏ, được gọi là độ lệch tâm. Các sai lệch tiếp xúc răng - răng cũng có thể gây nên những biến đổi của chính bán kính vòng tròn bước răng. Tổ hợp hai sai lệch này có thể dẫn đến mối quan hệ hình học phi tuyến giữa hai bánh răng như trên hình 18.7, ở đây tính phi tuyến được khuếch đại để thấy rõ hơn. Độ lệch tâm ảnh hưởng đến độ chính xác của các phép đo vị trí thực hiện trên bánh răng vào và bánh răng ra.

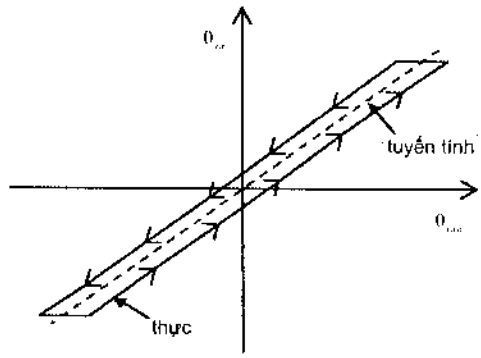


HÌNH 18. 7 Độ lệch tâm bánh răng

18.11 Khe hở

Nếu các bánh răng không ăn khớp hoàn toàn trên đường nối tâm (bằng tổng bán kính bước răng thì sẽ có độ hở nhỏ), hay khe hở giữa các răng. Khi bánh răng vào đổi chiều phải mất một vòng quay nhỏ trước để loại bỏ độ hở này và sau đó bánh răng ra mới bắt đầu dịch chuyển. Khe hở bánh răng chỉ là một trong nhiều hiện tượng trễ, xem hình 18.8. Độ hở giữa trục và ổ trục cũng gây nên hiện tượng trễ. Khe hở dẫn đến các hiệu ứng tương tự như đối với độ lệch tâm, nghĩa là giảm khả năng lặp lại, đặc biệt khi tiếp cận điểm cần đo từ các hướng khác nhau. Vấn đề khe hở bánh răng là phổ biến và tiềm tàng khả năng gây hại đến mức nhiều nhà sản xuất phải vào cuộc để giảm thiểu hoặc giảm tác động này:

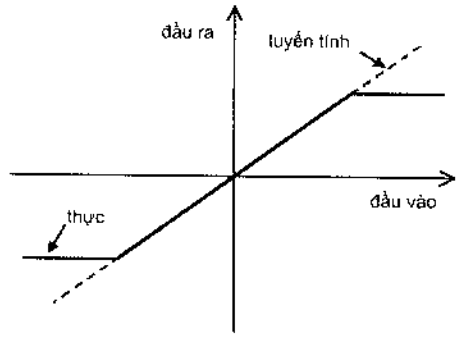
- Các bánh răng ăn khớp gần nhau hơn khoảng cách lý tưởng về mặt lý thuyết,
- Các bánh răng "chống khe hở" dùng tải đàn hồi để tác dụng lên các răng nhằm giữ sự tiếp xúc trong toàn bộ thời gian,
- Các tải đàn hồi ngoài gắn trên một trong nhiều bánh răng để tạo sự tiếp xúc,
- Các bánh răng được thiết kế đặc biệt với tính năng chống khe hở.



HÌNH 18. 8 Khe hở bánh răng

18.12 Trạng thái bão hòa

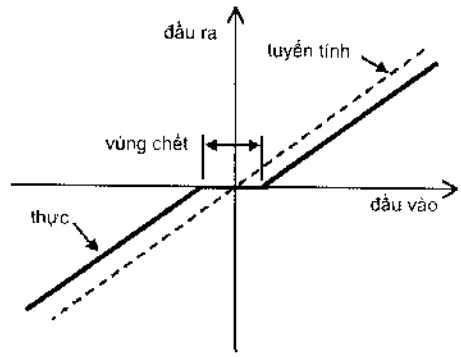
Tất cả các cơ cấu chấp hành thực tế đều có một số đầu ra tối đa, không phụ thuộc vào đầu vào. Điều này vi phạm tính chất tuyến tính, vì tại một số điểm đầu vào tăng nhưng không có sự thay đổi đáng kể ở đầu ra, xem hình 18.9. Dạng phi tuyến này phải được xem xét trong thiết kế hệ điều khiển trong cơ điện tử, do các giới hạn lực/mômen và vận tốc lớn nhất ảnh hưởng đến khả năng của hệ thống. Các hệ điều khiển được mô hình bằng lý thuyết hệ tuyến tính phải được kiểm tra và phân tích cẩn thận để xác định tác động của trạng thái bão hòa đến khả năng hệ thống.



HÌNH 18. 9 Trạng thái bão hòa

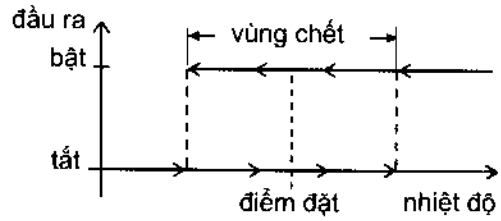
18.13 Vùng chết

Một đặc tính phi tuyến nữa của một số cơ cấu chấp hành và cảm biến là vùng chết. Vùng chết thường là một vùng đầu vào gần điểm không mà đầu ra vẫn giữ giá trị 0. Khi đầu vào dịch ra khỏi vùng chết thì đầu ra sẽ thay đổi theo đầu vào, như thấy trên hình 18.10. Các đầu vào của cần điều khiển tương tự thường dùng một lượng nhỏ thuộc vùng chết để giảm tác động của nhiễu đầu vào do người gây ra. Một dịch chuyển rất nhỏ của cần điều khiển không có đầu ra, cần điều khiển sẽ hoạt động bình thường khi các đầu vào lớn hơn.



IIÌNH 18. 10 Vùng chết

Vùng chết cũng thường được dùng trong bộ ổn nhiệt gia đình và các bộ điều khiển quá trình, như thấy trên hình 18.11. Khi một phòng ấm và nhiệt độ đạt điểm đặt (giá trị mong muốn) trên bộ ổn nhiệt, đầu ra vẫn giữ trạng thái tắt. Ngay khi nhiệt độ phòng tăng đến điểm đặt cộng một nửa vùng chết thì đầu ra hệ thống làm mát sẽ bật hoàn toàn. Khi phòng lạnh đi, đầu ra sẽ giữ trạng thái bật đến khi nhiệt độ đạt điểm đặt trừ đi một nửa vùng chết, đầu ra hệ thống làm lạnh sẽ tắt hoàn toàn.

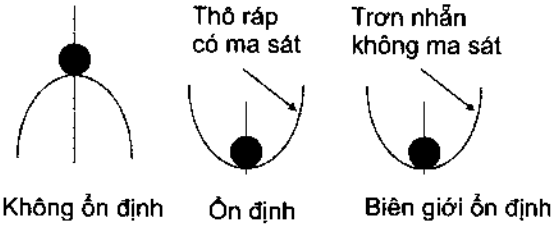


HÌNH 18. 11 Vùng chết của bộ ổn nhiệt

18.14 Đáp ứng hệ thống

Các cảm biến và cơ cấu chấp hành đáp ứng với các đầu vào thay đổi theo thời gian. Bất cứ hệ thống nào thay đổi theo thời gian được coi là hệ thống động. Việc hiểu đáp ứng của hệ thống động với các dạng đầu vào khác nhau là quan trọng trong thiết kế hệ cơ điện tử. Khái niệm quan trọng nhất trong đáp ứng hệ thống là tính ổn định. Thuật ngữ tính ổn định có nhiều định nghĩa và cách dùng khác nhau nhưng định nghĩa phổ biến nhất là định nghĩa có liên quan đến cân bằng. Một hệ cân bằng sẽ giữ được trạng thái không đổi khi không có nhiễu ngoài tác động. Một hệ ổn định sẽ trở lại trạng thái cân bằng nếu có nhiễu "nhỏ" làm dịch chuyển hệ thống khỏi trạng thái ban đầu. Một hệ không ổn định sẽ không trở lại vị trí cân bằng và thường sẽ dịch chuyển "xa" trạng thái ban đầu.

Hình 18.12 cho thấy ba điều kiện ổn định với một hệ đơn giản gồm: quả bóng và đồi. Trong mỗi trường hợp, vị trí cân bằng được xác định dễ dàng - trên đỉnh đồi hoặc dưới đáy thung lũng. Trong trường hợp không ổn định, một dịch chuyển nhỏ của quả bóng ra khỏi vị trí cân bằng sẽ làm cho bóng di chuyển "xa" hơn vị trí cân bằng, như chuyển động xuống đồi. Trong trường hợp ổn định, một chuyển động nhỏ của quả bóng ra khỏi vị trí cân bằng không làm nó rời xa vị trí cân bằng, nó sẽ quay trở về vị trí cân bằng, có thể sau một vài dao động. Trong trường hợp thứ ba, trường hợp không có ma sát làm cho quả bóng đao động liên tục quanh vị trí cân bằng sau khi có một chuyển động nhỏ. Trường hợp đặc biệt này được gọi là biên ổn định do hệ thống không bao giờ thực sự trở lại vị trí cân bằng.



HÌNH 18. 12 Tính ổn định của hệ thống

Hầu hết cảm biến và cơ cấu chấp hành đều vốn đã ổn định. Tuy nhiên, việc thêm các hệ điều khiển chủ động có thể làm hệ các thiết bị ổn định trở thành không ổn định. Cần phân tích và kiểm tra cẩn thận để đảm bảo rằng một hệ cơ điện tử hoạt động trong trạng thái ổn định. Đáp ứng phức tạp của hệ thống động ổn định thường được xấp xỉ hóa bằng các hệ đơn giản hơn. Việc hiểu các đáp ứng hệ bậc nhất và bậc hai đối với các thay đổi tức thì (dạng bước) của đầu vào hoặc đầu vào dạng sin là đủ để đáp ứng hầu hết các trường hợp.

18.15 Đáp ứng hệ bậc nhất

Các hệ bậc nhất gồm hai phần tử cơ bản là phần tử tích trữ năng lượng và phần tử tiêu thụ năng lượng. Các hệ bậc nhất thông thường là các bộ lọc điện trở-điện dung và mạng điện trở-điện cảm (ví dụ cuộn dây của động cơ bước). Cặp nhiệt và nhiệt điện trở cũng thuộc dạng hệ bậc nhất, do điện dung và điện trở nhiệt. Phương trình vi phân mô tả đáp ứng thời gian của hệ bậc nhất là:

$$\frac{dy(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} y(t) = f(t)$$

ở đây $y(t)$ là biến đầu vào phụ thuộc (vận tốc, gia tốc, nhiệt độ, điện áp...), t là biến đầu vào độc lập (thời gian), τ là hằng số thời gian (đơn vị là giây) và $f(t)$ là hàm lực (đầu vào hệ thống).

Giải phương trình này với đầu vào dạng bước hoặc hằng số ta được:

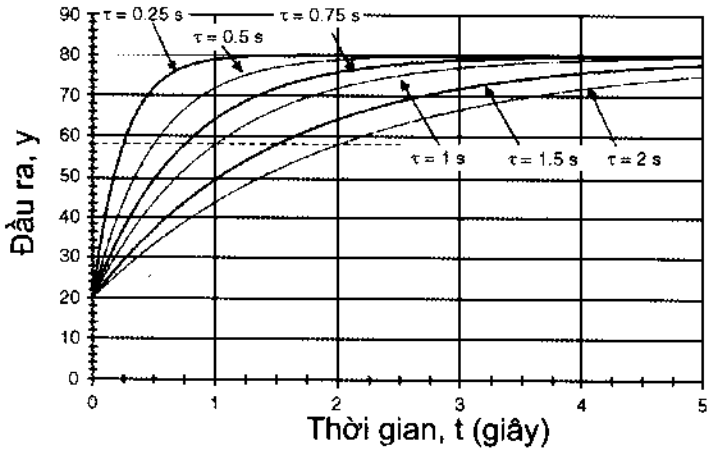
$$y(t) = y_\infty + (y_0 - y_\infty)e^{-t/T}$$

trong đó, y_∞ là giá trị giới hạn hoặc cuối cùng (giá trị ổn định), y_0 là giá trị ban đầu của biến độc lập tại $t = 0$.

Tập các đáp ứng bước hệ bậc nhất thông thường được thấy trên hình 18.13. Giá trị ban đầu được chọn tùy ý là 20 và giá trị cuối cùng là 80. Các hằng số thời gian chạy từ 0.25 đến 2 s. Mỗi đường cong này biểu thị trực tiếp hằng số thời gian tại một điểm nút trên đường cong. Thay $t = \tau$ vào phương trình đáp ứng bậc nhất với $y_0 = 20$ và $y_\infty = 80$ ta được:

$$y(t) = 80 + (20 - 80)e^{-1} = 57.9$$

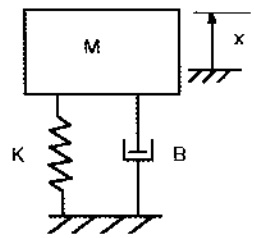
Mỗi đường cong cắt đường $y(\tau) = 57.9$ tại hằng số thời gian τ bằng thời gian t. Khái niệm này thường được dùng để xác định bằng thực nghiệm hằng số thời gian cho các hệ bậc nhất.



HÌNH 18. 13 Đáp ứng bước của hệ bậc nhất

18.16 Đáp ứng hệ bậc hai có cản

Các hệ bậc hai gồm ba phần tử cơ bản: hai phần tử tích trữ năng lượng và một phần tử tiêu thụ năng lượng. Hai phần tử tích trữ năng lượng phải chứa các dạng năng lượng khác nhau. Hệ cơ học bậc hai thông dụng là tổ hợp lò xo - khối lượng - giảm chấn như thấy trên hình 18.14. Lò xo tích trữ thế năng ($PE = \frac{1}{2}kx^2$), trong khi khối lượng tích trữ động năng ($KE = \frac{1}{2}mv^2$), ở đây k là độ cứng lò xo (N/m), x là độ giãn lò xo (m), m là khối lượng (kg) và v là vận tốc tuyệt đối của khối lượng (m/s).



HÌNH 18. 14 Hệ lò xo - khối lượng - giảm chấn

Hệ bậc hai trong điện thường thấy là mạng điện trở - điện cảm - điện dung, ở đây điện dung và điện cảm chứa năng lượng điện ở hai dạng khác nhau. Dạng chung của phương trình động cho hệ bậc hai cản dưới là:

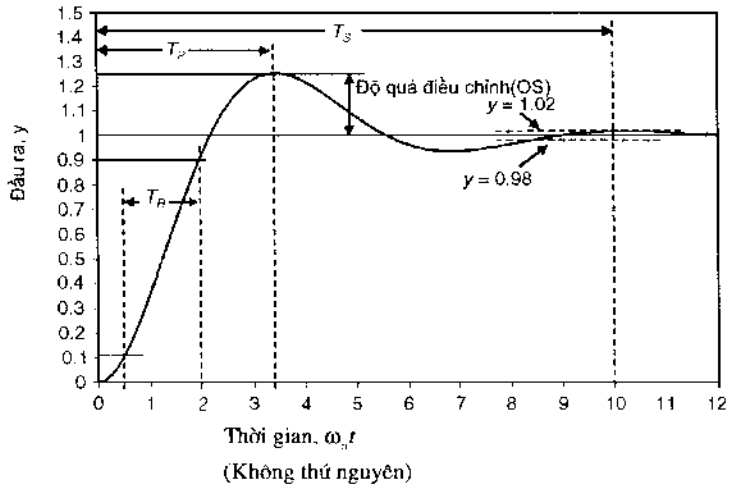
$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = f(t)$$

ở đây $y(t)$ là biến phụ thuộc (vận tốc, gia tốc, nhiệt độ, điện áp...), t là biến độc lập (thời gian), ζ là hệ số cản (đại lượng không thứ nguyên), ω_n là tần số tự nhiên (rad/s) và $f(t)$ là hàm lực (đầu vào).

Đáp ứng của hệ bậc hai cản dưới ($0 \le \zeta < 1$) với đầu vào bước có thể xác định như sau:

$$y(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t}\left(\cos\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\,t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\sin\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\,t\right)$$

Đáp ứng bước hệ bậc hai này thường được mô tả bởi tập các tham số đáp ứng thời gian như trên hình 18.15.



HÌNH 18. 15 Đáp ứng bước của hệ bậc hai

Các tham số đáp ứng thời gian là các hàm của hệ số cản ζ và tần số tự nhiên ω_n:

- Thời gian đỉnh T_P: thời gian cần để đạt tới đỉnh đầu tiên (lớn nhất):

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}$$

- Độ quá điều chỉnh %OS: lượng đáp ứng vượt quá so với giá trị trạng thái ổn định:

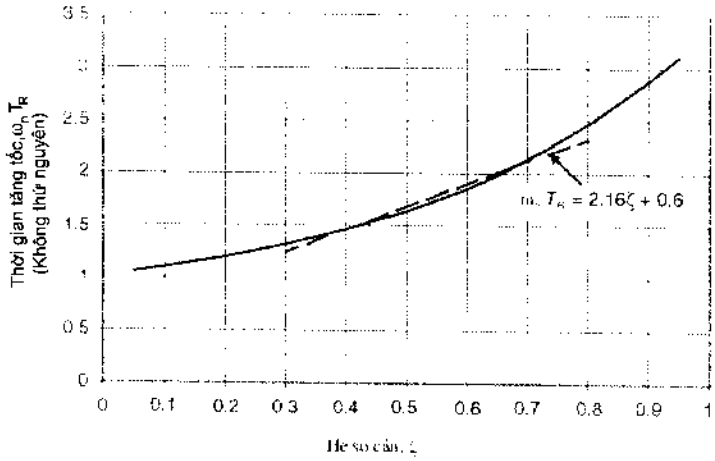
$$\%OS = 100e^{-(\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2})}$$

- Thời gian ổn định T_s: thời gian khi đáp ứng hệ thống giữ trong ±2% so với giá trị ở trạng thái ổn định:

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$$

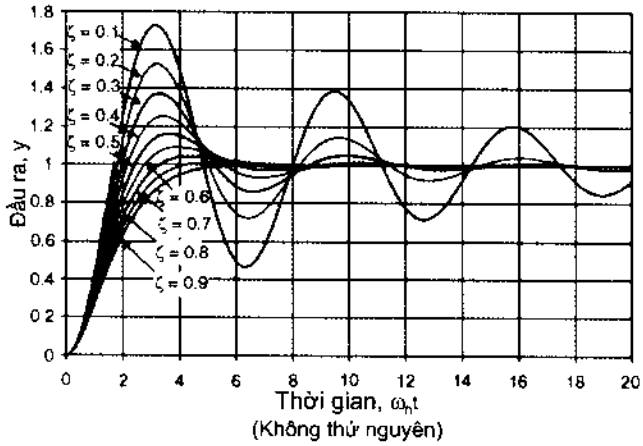
- Thời gian tăng tốc (rise time) T_R: thời gian cần cho đáp ứng đi từ 10% đến 90% giá trị ở trạng thái ổn định. Hình 18.16 cho thấy thời gian tăng không thứ nguyên ($\omega_n T_R$) như là một hàm của hệ số giảm chấn ζ. Một phép làm gần đúng thường được dùng đối với hai tham số này là:

$$\omega_n T_R \approx 2.16\zeta + 0.6 \qquad 0.3 \le \zeta 0.8$$

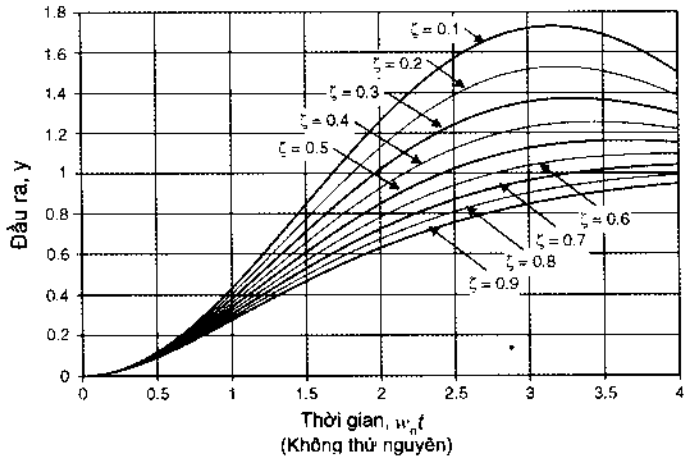


HÌNH 18. 16 Thời gian tăng tốc và hệ số cản ζ

Hình 18.17 và 18.18 cho thấy đáp ứng bước của hệ bậc hai là một hàm của hệ số cản ζ.



HÌNH 18. 17 Đáp ứng bước và hệ số cản ζ của hệ bậc hai



HÌNH 18. 18 Đáp ứng bước và hệ số cản ζ của hệ bậc hai ban đầu

18.17 Đáp ứng tần số

Đáp ứng của bất cứ hệ động nào với một đầu vào hình sin được gọi là đáp ứng tần số. Hệ bậc nhất với đầu vào hình sin biên độ A có phương trình động học là:

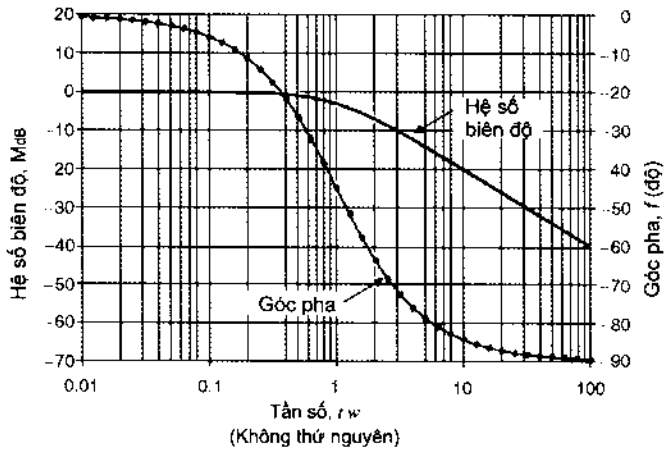
$$\frac{dy(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} y(t) = f(t) = A\sin(\omega t)$$

trong đó ω là tần số của đầu vào hình sin và τ là hằng số thời gian bậc nhất. Nghiệm đối với trạng thái ổn định của phương trình này là:

$$y(t) = AM\sin(\omega t + \Phi)$$

trong đó $M = 1/\sqrt{(\tau\omega)^2 + 1}$ là hệ số biên độ (đại lượng không thứ nguyên) và $\Phi = -\tan^{-1}(\tau\omega)$ là góc pha.

Hình 18.19 là đồ thị của hệ số biên độ M_{dB} và góc pha Φ là một hàm của tần số không thứ nguyên $\tau\omega$. Chú ý rằng biên độ thường được vẽ dưới dạng đêxiben, ở đây $M_{dB} = 20\log_{10}(M)$.



HÌNH 18. 19 Đáp ứng tần số của hệ bậc nhất

Tần số tại đó hệ số biên độ bằng 0.707 (-3 dB) được gọi là giới hạn của dải thông. Với hệ bậc nhất, dải thông tỷ lệ nghịch với hằng số thời gian. Do đó, $\omega = 1/\tau$.

Hệ bậc hai với đầu vào hình sin có biên độ A và tần số ω sẽ có phương trình động học như sau:

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = A\sin(\omega t)$$

Nghiệm ổn định của phương trình này là:

$$y(t) = \frac{AM}{\omega_n^2}\sin(\omega t + \Phi)$$

trong đó:

$$M = \frac{1}{\sqrt{[1-(\omega^2/\omega_n^2)]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}}$$

là hệ số biên độ (đại lượng không thứ nguyên) và:

$$\Phi = -\tan^{-1}\left[\frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1-(\omega^2/\omega_n^2)}\right]$$

là góc pha.

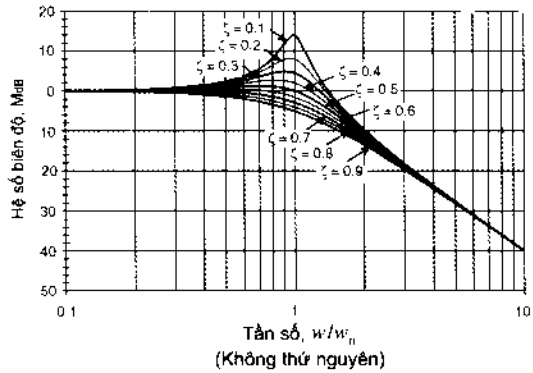
Hình 18.20 và 18.21 vẽ đáp ứng biên độ $M_{dB} = 20\log_{10}(M)$ và góc pha Φ của hệ bậc hai là một hàm của hệ số cản ζ. Giá trị đỉnh trong đáp ứng biên độ M_P có thể tìm được bằng cách lấy đạo hàm M đối với ω và giải phương trình $M = 0$ [1] để tìm M_p:

$$M_P = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}$$

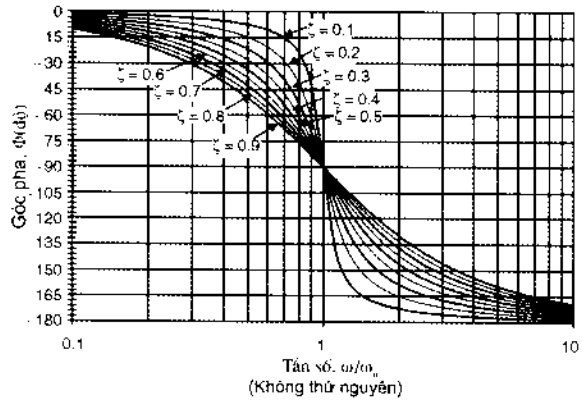
Giá trị đỉnh này đạt được tại tần số ω_P:

$$\omega_P = \omega_n\sqrt{1-2\zeta^2}$$

Giá trị đỉnh trong đáp ứng tần số được xác định bằng thực nghiệm có thể được dùng để ước lượng cả tần số tự nhiên lẫn hệ số cản cho hệ bậc hai. Sau đó có thể dùng các tham số này để ước lượng đáp ứng miền thời gian như thời gian đỉnh và độ quá điều chỉnh.



HÌNH 18. 20 Biên độ đáp ứng tần số của hệ bậc hai



HÌNH 18. 21 Góc pha đáp ứng của hệ bậc hai

Tài liệu tham khảo

[1] Nise, N. S., *Control Systems Engineering*, 2nd ed., Benjamin/Cummings, 1995.

19
Cảm biến

Kevin M. Lynch
Northwestern University

Micheal A. Peshkin
Northwestern University

Halit Eren
Curtin University of Technoloty

M. A. Elbestawi
McMaster University

Ivan J. Garshelis
Magnova, Inc.

Richard Thorn
University of Derby

Pamela M. Norris
University Virginia

Bouvard Hosticka
University Virginia

Jorge Fernando Figueroa
NASA Stennis Space Center

H. R. (Bart) Everett
Space and Naval Warfare Systems Center

Stanley S. Ipson
University of Bradford

19.1 Cảm biến dịch chuyển thẳng và quay 19-1
19.2 Cảm biến gia tốc 19-12
19.3 Đo lực 19-33
19.4 Đo mômen và công suất 19-46
19.5 Đo lưu lượng 19-59
19.6 Đo nhiệt độ 19-71
19.7 Cảm biến đo khoảng cách và cảm biến tiệm cận 19-86
19.8 Các hệ thống nhận biết ánh sáng, hình ảnh và nhận dạng 19-115
19.9 Các cảm biến micro tích hợp 19-132

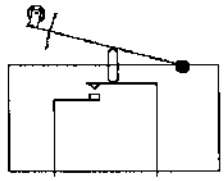
19.1 Cảm biến dịch chuyển thẳng và quay

Kevin M. Lynch và Michael A. Peshkin

Hầu như tất cả các chuyển động phổ biến nhất trong các hệ thống cơ khí là dịch chuyển thẳng dọc theo một trục cố định và quay một góc quanh trục cố định. Những chuyển động p.hức tạp hơn thường được tạo ra bởi việc kết hợp những chuyển động đơn giản đó. Chương này sẽ giới thiệu tóm tắt một số công nghệ sẵn có để đo các chuyển động thẳng và chuyển động quay dọc theo một trục đơn. Các phương thức đo được sắp xếp theo các hiệu ứng vật lý được khai thác để đưa ra các phương pháp đo lường.

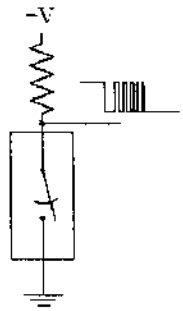
Công tắc

Loại đơn giản nhất của cảm biến dịch chuyển là một công tắc cơ khí, nó gửi trả một bit thông tin: chạm hoặc không chạm. Một *vi công tắc* điển hình bao gồm một đòn bẩy, khi nó được nhấn sẽ tạo ra một tiếp xúc cơ khí bên trong công tắc, từ đó tạo ra một mạch điện kín (hình 19.1). Có thể sử dụng các vi công tắc này như là những cảm biến va chạm dùng cho các rôbôt di động, thường là gắn một vật liệu dễ chế tạo vào một đòn bẩy (như một cái râu) để bảo vệ rôbôt khi va chạm với các vật cản cứng. Một ứng dụng thông dụng khác của vi công tắc trong rôbôt là *công tắc hành trình*, dùng để xác định một khớp đã đạt tới điểm giới hạn trong hành trình cho phép của nó.



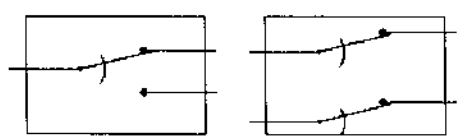
HÌNH 19.1 Một vi công tắc cơ bản

Hình 19.2 mô tả cấu hình cơ bản của một vi công tắc. Điện trở nối lên nguồn giữ tín hiệu ở trạng thái +V tới khi công tắc đóng, đưa tín hiệu xuống đất. Tuy nhiên khi công tắc đóng, một loạt các ảnh hưởng nhỏ có thể dẫn đến tình trạng "nhiễu" của tín hiệu. Một mạch "giảm nhiễu" có thể được sử dụng để làm sạch tín hiệu ra.



HÌNH 19.2 Tín hiệu tạo thành từ một công tắc đóng ngắt

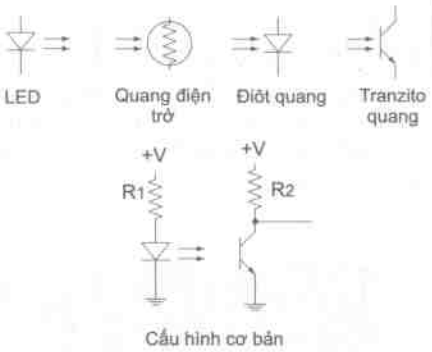
Các công tắc có thể có hai loại: thường mở - NO hoặc thường đóng - NC. Một công tắc có thể có nhiều *cực* (P - poles) và một hoặc hai *tiếp điểm* (T - throw) cho mỗi chuyển mạch. Một chuyển mạch dịch chuyển khi một công tắc được kích hoạt và nối với tiếp điểm. Vì vậy một công tắc SPDT (một chuyển mạch hai tiếp điểm) sẽ chuyển một chuyển mạch từ tiếp xúc với tiếp điểm này sang tiếp sang tiếp xúc với tiếp điểm kia và một công tắc chuyển mạch 2 cực (double pole single throw) chuyển hai chuyển mạch từ mở sang đóng (hình 19.3).



HÌNH 19.3 Cấu tạo của các công tắc SPDT và DPST

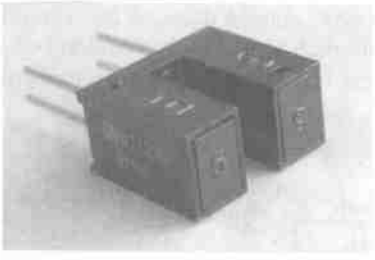
Tia hồng ngoại

Tia hồng ngoại có thể được sử dụng để đo các dịch chuyển thẳng hoặc dịch chuyển quay. Thông thường các điôt phát tia hồng ngoại (LED) hoặc là *đèn phát quang* (photoemitter), được dùng như một nguồn phát sáng và một thiết bị cảm nhận hồng ngoại được dùng để phát hiện tia sáng. Bộ thu có thể là một *quang điện trở* hoặc *tế bào quang điện*, một biến trở có điện trở thay đổi theo cường độ của tia tới (ánh sáng hồng ngoại hoặc ánh sáng nhìn thấy); một *điôt quang*, nó cho phép dòng điện chạy theo một hướng khi có tia hồng ngoại, nếu không nó hoạt động như một mạch hở; hoặc *tranzito quang*. Trong một tranzito quang, tia hồng ngoại tới hoạt động như dòng điện base của tranzito, dòng điện collector tỉ lệ với cường độ của tia hồng ngoại nhận được (cho tới trạng thái bão hoà của tranzito). Các ký hiệu mạch cho các phần tử biến đổi được chỉ ra trong hình 19.4.



HÌNH 19.4 Các ký hiệu mạch quang điện tử và cấu hình một bộ phát/thu điển hình

Nếu thiết bị phát và thiết bị dò đặt đối diện nhau thì chúng có thể được sử dụng như một bộ ngắt tia để phát hiện ra bất kỳ vật gì đi qua chúng. Thiết bị này được gọi là *thiết bị ngắt quang* (hình 19.5). Nếu bộ phận phát và thu di chuyển tự do theo đường thẳng nối chúng, thì cường độ của tín hiệu nhận được có thể được sử dụng để đo khoảng cách giữa chúng. Tuy nhiên, các bộ phát hiện tia hồng ngoại cũng có thể nhạy cảm với cả ánh sáng xung quanh. Để phân biệt tia sáng của bộ phát với ánh sáng nền, có thể điều biến nguồn phát (có nghĩa là đóng hoặc mở ở tần số cao) và các thiết bị thu được thiết kế để chỉ đáp ứng với tia hồng ngoại đã được điều biến.



HÌNH 19.5 Bộ ngắt quang bán dẫn QVA11234

Một bộ phát sáng và bộ dò đặt cùng hướng về một phía có thể đo thô khoảng cách tới một bề mặt gần đó nhờ cường độ của tia phản xạ khi va vào bề mặt. Thiết bị đó gọi là *thiết bị phản xạ quang* (hình 19.6). Một cảm biến như vậy có thể được dùng cho các rôbôt di động để phát hiện các bề mặt hấp thụ hay phản xạ ánh sáng ở một khoảng cách không đổi. Các bộ lọc phân cực tia sáng có thể dùng với bộ dò và phát để bộ dò chỉ phát hiện ra ánh sáng được phản xạ bởi một bề mặt đặc biệt.

HÌNH 19.6 Cảm biến phản xạ quang bán dẫn QRB1114

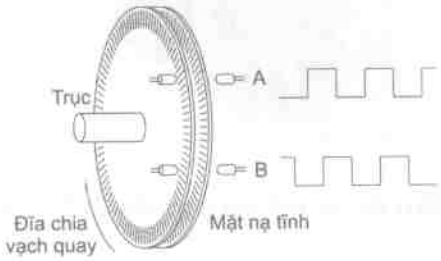
Các thiết bị ngắt quang và các các thiết bị phản xạ quang có thể được đóng gói sẵn hoặc chế tạo riêng biệt từ một LED hồng ngoại và một điôt quang hoặc một tranzito quang, sau khi chắc chắn rằng thiết bị dò nhạy cảm với bước sóng sinh ra bởi LED.

Các khối thiết bị phản xạ quang cũng có sẵn các bộ dò vị trí (PSD) hiện đại hơn, nó sẽ báo vị trí của tia sáng hồng ngoại trên bề mặt đo (hình 19.7). Vị trí cố định của đèn LED có quan hệ với PSD, cũng như vị trí ảnh của tia hồng ngoại trên PSD, cho phép sử dụng phép tam giác hoá để xác định khoảng cách tới đích. Các cảm biến đo khoảng cách như vậy được sản xuất bởi các công ty Sharp và Hamamatsu.

HÌNH 19.7 Bộ dò vị trí PSD (UDT Sensors Inc.)

Các bộ mã hoá quang học

Một bộ mã hoá quang sử dụng một bộ ngắt quang để biến chuyển động thành một chuỗi xung điện. Những chuỗi xung này "mã hoá" chuyển động và các xung được đếm hoặc "được giải mã" bởi một mạch điện để đưa ra số đo dịch chuyển. Chuyển động có thể là thẳng hoặc quay, nhưng chúng ta tập trung nhiều hơn vào các bộ mã hoá quang quay thông thường.



HÌNH 19.8 Bộ mã hoá tương đối

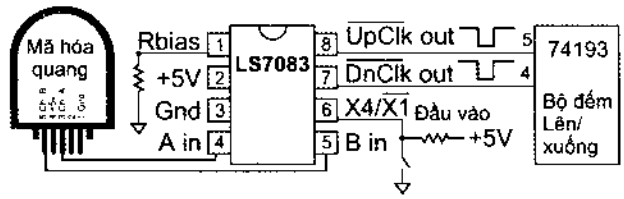
Có hai bộ mã hoá quang quay cơ bản là *bộ mã hoá tương đối* (incremental encoder) và *bộ mã hoá tuyệt đối* (absolute encoder). Trong một bộ mã hoá tương đối, một đĩa (đĩa chia vạch) được gắn vào một trục quay tròn giữa hai bộ ngắt quang học (hình 19.8). Đĩa có thể được làm từ nhựa trong hoặc kính với có đặt các vạch hướng tâm hoặc nhựa mờ với các khe nhỏ, vì vậy khi đĩa quay

thì các vạch này sẽ ngăn hoặc cho qua tia sáng hồng ngoại tới thiết bị dò quang học. (Còn có một mặt nạ đứng yên giống như đĩa chia vạch đặt giữa bộ phát và bộ thu) Các dãy xung thu được từ các bộ dò này có tần số tương ứng với vận tốc góc của đĩa. Những tín hiệu này được ký hiệu là A và B, và chúng lệch pha nhau ¼ chu kỳ. Các tín hiệu có thể đến từ các bộ ngắt quang học thẳng hàng với hai rãnh tách biệt tại các điểm ứng với các góc khác nhau của đĩa hoặc có thể được sinh ra bởi cùng một rãnh, với các bộ ngắt quang học được đặt tương đối với bộ ngắt khác để đưa ra các chuỗi xung pha.

Thông qua việc đếm số lượng các xung và số lượng của các đường xuyên tâm trong đĩa đã biết, ta có thể đo được tốc độ quay của trục. Hướng quay được xác định dựa trên quan hệ pha của các chuỗi xung A và B. Ví dụ A tăng khi B = 1 có thể chỉ ra là chuyển động quay ngược chiều kim đồng hồ, trong khi A tăng khi B = 0 chỉ ra chuyển động quay thuận chiều kim đồng hồ. Hai tín hiệu pha này được biết như là 2 tín hiệu cầu phương (2 tín hiệu vuông góc).

Các bộ mã hoá tương đối thường có một đầu ra tín hiệu thứ ba gọi là tín hiệu chỉ số, kí hiệu là I hoặc Z. Tín hiệu chỉ số được lấy từ một rãnh riêng biệt sinh ra một xung đơn trên một vòng quay của đĩa, để định hướng tuyệt đối. Trong thực tế, có thể thay thế nhiều bộ ngắt quang học bằng một nguồn đơn và một thiết bị dò tín hiệu đơn.

Các chíp giải mã được dùng để giải mã các chuỗi xung. Đầu vào của các chip là các tín hiệu A và B, và đầu ra là một hoặc nhiều chuỗi xung được đưa vào một bộ đếm. Ví dụ như bộ LS7083 số của Mỹ cho ra hai chuỗi xung, một cho chuyển động quay theo chiều kim đồng hồ và một cho chuyển động quay ngược chiều kim đồng hồ, chúng sẽ được gửi tới các đầu vào của bộ đếm 74193 (hình 19.9). Các phương pháp giải mã chuẩn cho đầu vào cầu phương là các phương pháp với độ phân giải 1X, 2X và 4X. Trong phương pháp 1X, giá trị của bộ đếm sẽ tăng lên một đơn vị khi có một sườn lên hoặc xuống của chỉ một chuỗi xung, do đó tổng số đếm của bộ mã hoá cho một vòng quay của đĩa bằng tổng số vạch trên đĩa. Trong phương pháp 4X, giá trị của bộ đếm được tăng lên một đơn vị khi có một sườn lên hoặc xuống của một trong hai dãy xung, vì vậy độ phân giải góc giảm 4 lần. Một bộ mã hoá với 1000 vạch trên đĩa mã giải mã được theo phương pháp 4X với độ phân giải góc là $360^0/(4\times1000) = 0,09^0$.



HÌNH 19.9 Bộ mã hoá quang, chip giải mã cầu phương số LS7083 và bộ đếm (US Digital Inc.)

Trong khi một bộ mã hoá *đầu ra đơn* (single-ended output encoder) chỉ đưa ra tín hiệu A, B và có thể là Z, thì một bộ mã hoá *đầu ra vi phân* (differential output encoder) cung cấp thêm các đầu ra bù A', B' và Z'. Các đầu ra vi phân, khi được dùng với thiết bị thu vi phân, có thể làm tăng tính chống nhiễu điện của bộ mã hoá.

Một hạn chế của bộ mã hoá tương đối đó là không có cách nào để biết được vị trí tuyệt đối của trục khi cấp nguồn mà không quay nó đến khi nhận được xung chỉ số. Giải pháp cho những vấn đề này là bộ mã hoá tuyệt đối. Một bộ mã hoá tuyệt đối dùng k bộ ngắt quang học và k vạch mã để sinh ra một từ nhị phân k bit biểu diễn duy nhất 2^k vị trí khác nhau của đĩa và đưa ra độ phân giải góc là $360^0 / 2^k$ (hình 19.10). Không giống như bộ mã hoá tương đối, một bộ mã hoá tuyệt đối luôn đưa ra được góc chính xác.

Các vạch trên các rãnh được sắp xếp sao cho khi bộ mã hoá quay theo một hướng, một từ nhị phân tăng hoặc giảm tuỳ thuộc vào một mã nhị phân. Mặc dù có thể dùng mã nhị phân tự nhiên tuy nhiên mã Gray là một giải pháp thông dụng hơn. Với mã nhị phân tự nhiên, việc tăng lên 1 bit

có thể thay đổi ở nhiều hoặc tất cả các bit, ví dụ như 7 thành 8 trong hệ thập phân là 0111 thành 1000 trong hệ nhị phân tự nhiên. Với mã Gray, chỉ một bit thay đổi tăng hoặc giảm, ví dụ như 7 thành 8 trong hệ thập phân là 0100 thành 1100 trong mã Gray. Độ chính xác trong suốt quá trình chuyển dịch mã Gray chỉ là một bước đếm hoặc $360^0 / 2^k$. Với mã nhị phân thông thường, một sự sắp xếp sai lệch dù rất nhỏ giữa các đường và các ngắt quang học có thể gây nên việc đọc lỗi từ 0111 (7) thành 1111 (15) trong khi giá trị cần đọc là 1000 (8).

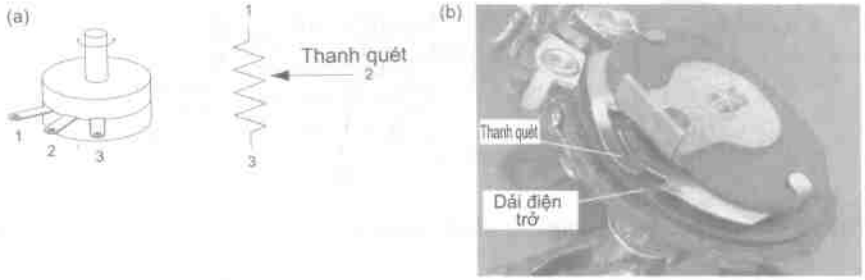
Nhìn chung, bộ mã hoá tương đối cho phép độ phân giải tốt hơn ở mức giá thấp và là sự lựa chọn thông dụng nhất cho nhiều ứng dụng trong công nghiệp và rôbôt.

HÌNH 19.10 Đĩa của bộ mã hoá tuyệt đối theo mã Gray 8 bit, (BEI Technogies Industrial Encoder Division)

Trở kháng

Một trong những cách đơn giản nhất và ít tốn kém nhất để đo các chuyển động quay hoặc chuyển động thẳng là việc sử dụng *biến trở* hay còn gọi là *bộ chia thế*. Chúng ta tập trung vào các phân thế quay, nhưng nguyên lý điều khiển cũng tương tự như trong trường hợp thẳng.

Biến trở quay gồm một cái cốc chứa ba cực (hình 19.11(a, b)). Hai cực cuối, gọi là cực 1 và cực 3, nối với mỗi điểm cuối của phần vật liệu có tính trở kháng, giống như dây dẫn cục bộ bằng nhựa, gồm hoặc một dây dài và mỏng. (Để tăng tính rắn chắc, sợi dây dài được cuộn lại thành nhiều vòng để tạo thành cuộn dây, nên nó được gọi là bộ chia thế *cuộn dây*).

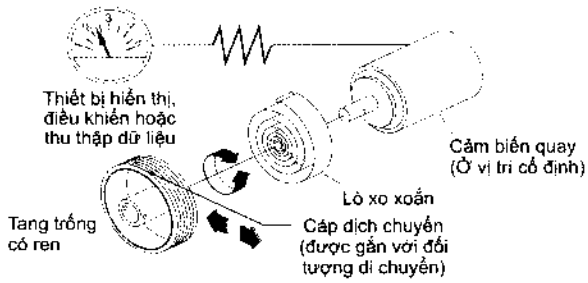


HÌNH 19.11 (a) Khi trục của một bộ phân thế quay, thanh trượt sẽ dịch chuyển từ đầu này tới đầu còn lại của vật liệu điện trở. (b) Bên trong một bộ phân thế, biểu diễn mối liên hệ giữa thanh trượt và dải điện trở

Cực số 2, được nối với một *cần gạt*, trượt qua vật liệu khi trục của cốc quay. Trở kháng toàn phần R_{13} của cốc bằng với tổng trở kháng R_{12} giữa cực 1 và cần gạt và trở kháng R_{23} giữa cần gạt và cực 3. Thông thường, cần gạt có thể quay từ một đầu của vật liệu có trở kháng ($R_{13} = R_{12}$) tới đầu kia ($R_{13} = R_{23}$). Trục của cốc quay một hoặc ít hơn một vòng có thể tạo nên chuyển động đầy đủ của cần gạt, lúc đó cái cốc được gọi là cốc *một vòng quay*. Nếu chuyển động đầy đủ được tạo ra bởi nhiều vòng quay của trục thì gọi là cốc *nhiều vòng quay*.

Để sử dụng biến trở, ta nối cực 1 với một nguồn V, cực 3 nối đất, và sử dụng điện thế để làm một phép đo góc quay. Điện thế được đo tại cần gạt là $V(R_{23}/R_{13})$ và là một hàm tuyến tính theo góc quay của trục.

Một cảm biến tuyệt đối đơn giản dùng cho một dải rộng các khoảng cách là một chuỗi các cốc hoặc cảm biến dây kéo (hình 19.12). Nó bao gồm một sợi dây được quấn trên một ống, với một phần thế để kiểm soát các góc quay của ống. Một lò xo đàn hồi giữ cho dây luôn căng. Bằng việc sử dụng cảm biến kết hợp với nhiều cốc đa vòng có thể đo được độ dài lên tới hàng mét. Với khoảng cách ngắn (vài cm) ta cũng dùng kỹ thuật tương tự sử dụng các cốc 1 vòng và một ống nhỏ. Cả hai trường hợp đều bỏ qua việc không thẳng hàng hoặc sự di động giống một cung tròn. Chuỗi các cốc dễ dàng phá huỷ các dây trong các ứng dụng nêu trên, nhưng phần tử cảm biến là nhỏ và kín. Các nhà sản xuất bao gồm RDP Electronics, SpaceAge Control và UniMeasure.



HÌNH 19.12 Sơ đồ nguyên lý (Space Age Control Inc.)

Một loại khác của cảm biến trở kháng là cảm biến uốn linh động. Một loại mực có tính dẫn điện giữa hai công tắc điện trên một vật liệu có trở kháng thay đổi điện trở khi vật liệu bị bẻ cong hoặc kéo dài. Được sử dụng trong bộ phân điện với một điện trở cố định, điện áp tương tự có thể được sử dụng như một phép đo độ uốn. Giống như việc sử dụng cảm biến để phát hiện mối liên hệ hoặc giống như một phép đo thô độ méo mó của bề mặt mà nó được gắn vào.

Cảm biến đo nghiêng (trọng trường)

Ta có thể dùng một *công tắc thuỷ ngân* để cung cấp một bit thông tin về hướng so với vectơ trọng trường. Một giọt nhỏ thuỷ ngân đặt trong một bóng điện thuỷ tinh mở hoặc đóng điện giữa hai đầu phụ thuộc vào hướng của cảm biến. Có thể sử dụng một vài công tắc thuỷ ngân theo các hướng khác nhau dùng để xác định thô độ nghiêng. Tín hiệu từ một công tắc thuỷ ngân có thể bị "nảy" lên giống như tín hiệu từ một công tắc cơ khí (hình 19.2).

Thiết bị đo độ nghiêng có thể được dùng để đo một góc nghiêng. Ví dụ như *cảm biến góc nghiêng* sử dụng tính điện phân. Các nhà sản xuất gồm có công ty Fredericks và Spectron Glass. Mô hình hai trục có 5 điện cực que song song trong một vỏ bọc được bịt kín và được điền đầy một phần bởi một chất lỏng dẫn điện. Bốn điện cực đặt ở bốn góc một hình vuông và một cái được đặt ở giữa. Độ nghiêng của cảm biến thay đổi sự phân bố của dòng điện thông qua điện cực trung tâm sẽ ưu tiên các điện cực ngâm sâu hơn trong chất lỏng.

Cảm biến nghiêng có thể nhận được với chất lỏng có tính dẻo biến đổi, để tối thiểu hoá tiếng ồn. Vì dòng một chiều khi chạy qua chất lỏng sẽ gây nên hiện tượng điện phân và có thể gây hỏng cảm biến, do vậy phương pháp đo tính dẫn của dòng xoay chiều được sử dụng. Theo đó, các điện tử hỗ trợ là không phải không đáng kể.

Tính dẫn điện của chất lỏng phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ. Các điện tử hỗ trợ cho cảm biến đo nghiêng phải dựa vào tỉ lệ của tính dẫn điện giữa các cặp cực. Mặc dù các cảm biến đo nghiêng điện phân điều chỉnh qua một vùng nhiệt độ rộng, nhưng nó bị nhiễu loạn lớn bởi tính không đều của nhiệt độ qua các tế bào.

Có thể tạo ra một loại khác của thiết bị đo độ nghiêng đơn giản từ một biến trở quay có gắn vào một quả lắc. Có một vấn đề nảy sinh trong giải pháp này là sự sai lệch có thể làm ngừng chuyển động của con lắc khi mà nó không theo phương thẳng đứng. Một ý tưởng liên quan đến việc này là sử dụng một bộ mã hoá quang học tuyệt đối với một con lắc. Các cảm biến hoàn chỉnh điều khiển theo một nguyên tắc có thể được cải tiến với các lựa chọn tốt hơn, như là làm giảm cường độ từ

trường để giảm sự quá độ và sự dao động. Ví dụ như thiết bị đo độ nghiêng tuyệt đối US Digital's 12-bit A2I.

Tất nhiên, tác động của trọng trường lên một thiết bị không khác biệt so với các gia tốc khác. Nếu độ nghiêng của trạng thái dừng của thiết bị là số cần quan tâm thì cần phải dùng phép chuẩn hóa tín hiệu để đảm bảo rằng các kết quả đo là chặc chắn.

Các cảm biến nghiêng tinh vi hơn bao gồm con quay hồi chuyển và các thiết bị cơ điện tử micro (MEMS) không được đề cập ở đây.

Cảm biến điện dung

Có thể sử dụng điện dung để đo các chuyển động tiệm cận hoặc các chuyển động thẳng cỡ mm. Điện dung C của một cặp hai bản cực đặt song song là $C = \varepsilon_r \varepsilon_0 A / d$, trong đó: ε_r là hằng số điện môi tương đối của chất điện môi giữa các bản cực, ε_0 là hằng số điện môi của không khí, A là diện tích bề mặt của hai bản cực và d là khoảng cách giữa hai bản cực. Khi các bản cực dịch chuyển theo một hướng vuông góc với các mặt phẳng chứa chúng, thì C là hàm không tuyến tính với d. Khi một bản cực dịch chuyển tương đối với bản cực kia trong mặt phẳng của chúng, thì C là hàm tuyến tính với diện tích bề mặt A. Sử dụng điều này để tạo nên cảm biến điện dung để phát hiện ra các vật, chất lỏng có tính kim loại hoặc phi kim loại hoặc bất kỳ vật nào có hằng số điện môi lớn hơn không khí.

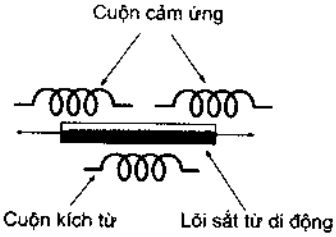
Một mô hình đo thông thường có một bản cực tụ điện trong một thiết bị dò, đặt trong một chất cách điện. Vật quan tâm bên ngoài tạo nên một bản cực khác của tụ điện và nó phải được nối đất qua một cảm biến tiệm cận đã nối đất. Khi cảm biến đạt tới mục tiêu, điện dung của nó tăng, nó thay đổi dao động của mạch máy dò bao gồm cả tụ điện. Sự biến đổi dao động này được sử dụng để xấp xỉ tín hiệu hoặc dùng để đo khoảng cách.

Các nhà sản xuất cảm biến điện dung có Cutler-Hammer và RDP Electronics.

Cảm biến cảm ứng xoay chiều

LVDT

Cảm biến cảm ứng xoay chiều được biết nhiều nhất là *biến thế vi sai biến đổi tuyến tính*, hay LVDT. LVDT là một ống với lõi sắt từ, độ dịch chuyển của lõi là một biến có thể đo được (hình 19.13). Ống được quấn quanh với ít nhất là hai cuộn dây, một cuộn kích thích và một cuộn cảm ứng. Một dòng xoay chiều (khoảng 1kHz) chạy qua cuộn kích thích và một tín hiệu xoay chiều được lấy từ cuộn cảm ứng và được so sánh về cường độ và pha (0° hoặc 180°) với dòng điện kích thích. Các thiết bị điện tử phụ trợ là cần thiết để tránh quá trình điều biến, được gọi là sự nhận dạng đồng bộ lõi mang một thanh kim loại có tính sắt từ, để làm tăng từ tính giữa cuộn kích thích và cuộn cảm ứng. Tuỳ thuộc vào vị trí của thanh sắt từ trong cuộn cảm ứng mà tín hiệu lấy ra có thể bằng không (khi mà thanh sắt từ ở giữa cuộn cảm ứng) hoặc là làm tăng cường độ hoặc pha, tuỳ thuộc vào vị trí thanh sắt từ.



HÌNH 19.13 Nguyên tắc hoạt động của một LVDT

LVDT là một ứng dụng công nghệ cao và rất chính xác, trong một vài trường hợp có thể đạt mức micron (10^{-8}). Chúng có các dải dịch chuyển cỡ mm đến m. Chúng không bỏ qua các sai lệch vị trí và dịch chuyển phi tuyến, giống như dãy các biến trở.

Cảm biến đo góc tuyệt đối

Cảm biến đo góc sẽ đưa ra số đo góc quay của trục, thường với các đầu ra tương tự dạng sin, cosin. Nó sử dụng kỹ thuật từ trường của dòng điện xoay chiều tương tự như LVDT và các thiết bị điện tử phụ trợ tương tự cũng được sử dụng để đưa ra tín hiệu nhận dạng đồng bộ. Cảm biến đo góc rất thô, bởi vậy nó thường được dùng trên các trục động cơ hơn bộ mã hoá quang học, mặc dù chúng không chính xác và chúng yêu cầu nhiều thiết bị điện tử phụ trợ hơn. Một vài cảm biến có thêm các tín hiệu ra giống như là các bộ mã hoá tương đối, dùng để so sánh. Thêm vào đó, các cảm biến loại này còn đưa ra một phép đo tuyệt đối góc quay của trục. Giống như LVDT, các cảm biến đo góc tuyệt đối cũng được thiết kế và chế tạo với công nghệ cao.

Cảm biến từ tính một chiều

Một trường điện từ xuất hiện khi có sự di chuyển của các điện tích (ví dụ như dòng điện trong chất bán dẫn) sinh ra một lực hút các điện tử theo phương ngang và lực này có thể sinh ra một hiệu điện thế vuông góc với hướng dòng điện. Hiệu ứng này là nhỏ, thậm chí cả trong chất bán dẫn, nhưng nó đã trở thành cơ sở cho việc hình thành một lớp các cảm biến thô, rẻ và đa năng.

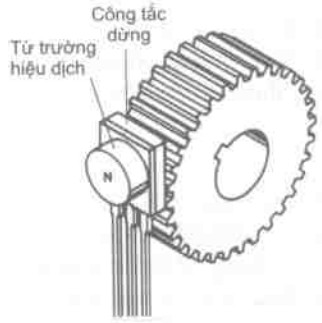
Chuyển mạch dựa trên hiệu ứng Hall

Chuyển mạch dựa trên hiệu ứng Hall là các thiết bị sinh ra tín hiệu nhị phân, phụ thuộc vào việc cường độ từ trường có vượt quá ngưỡng hay không. Trong hình dạng cấu thành của chúng, những chuyển mạch này có thể được kết hợp như là các thiết bị có ba cực với kích cỡ như một thiết bị (TO-92), chỉ có một chân nguồn (3-24V), một dây nối đất và một đầu ra. Bình thường, đầu ra có thể đặt nối đất hoặc không, phụ thuộc vào trạng thái của từ trường. Các loại chuyển mạch dựa trên hiệu ứng Hall này luôn sẵn có ở trên thị trường.

Các khoảng ngưỡng kích thích từ một vài Gauss (từ trường trái đất là 1/2 G) đến hàng trăm Gauss, như trong nam châm vĩnh cửu. Thường thì có một vài cấp độ trong việc dồi đơn vị trong ngưỡng. Các chuyển mạch dựa trên hiệu ứng Hall có độ trễ: ngưỡng "mở" của chúng có thể khác ngưỡng "đóng". Đôi khi hiệu ứng trễ được sử dụng để tạo nên một chuyển mạch chốt, để nó có thể kéo dài trạng thái của nó (đóng hoặc mở) đến tận khi từ trường trong nó bị đảo ngược. Các chuyển mạch không có hiệu ứng chốt có thể là đơn cực (chỉ phản ứng với một hướng của từ trường) hoặc hai cực (phản ứng với cả trường). Thời gian đóng hoặc mở chỉ là vài micro giây.

Các chuyển mạch Hall có dải nhiệt độ hoạt động rộng và thường được sử dụng trong các bộ phận của động cơ ô tô. Chúng có những ưu điểm khác là không nhạy với những sai lệch cơ khí của các chuyển mạch quang học hoặc cơ khí, như là các chất lỏng hoặc bụi bẩn. Trong khi thông thường phần chuyển động được xác định là một nam châm, nó có thể được đặt gần một nam châm cố định, nghiêng và bị kích thích khi chuyển mạch Hall chạm vào phần sắt từ, ví dụ như một răng của bánh răng, theo đó nó cho phép phát hiện đối tượng không nhiễm từ (hình 19.14).

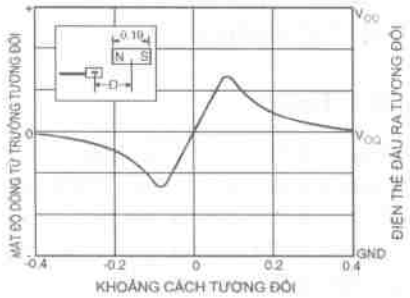
Những ứng dụng cơ bản là để đo một thành phần quay, thay thế một chuyển mạch giới hạn cơ khí. Chuyển mạch Hall không có những phần di động hoặc hở và nó được treo tự do. Một ứng dụng thông thường khác là trong việc lập mối liên hệ giữa các chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay. Chuyển mạch Hall được dùng để phát hiện một vị trí; và xung đầu ra của nó được dùng như là một chỉ dẫn cho một bộ mã hoá tương đối cái mà có thể tính khoảng cách từ điểm chỉ dẫn đó. Các chuyển mạch Hall thường nhỏ và không đắt, do vậy trong khoảng vài mm có thể đặt nhiều cái, tạo nên một bộ mã hoá quay hoặc tịnh tiến với độ phân giải thấp hoặc chuyển mạch đa vị trí. Như thế một bộ mã hoá hay một chuyển mạch có những ưu điểm thô của các chuyển mạch Hall.



HÌNH 19.14 Đo một răng của bánh răng trong một vật liệu từ sử dụng một chuyển mạch Hall và một từ trường nghiêng (Allegro Microsystems Inc.)

Các cảm biến tương tự dựa trên hiệu ứng Hall

Trong một cái hộp có kích thước và giá như hộp chuyển mạch Hall cũng có thể đặt các thiết bị Hall có một đầu ra tương tự tỉ lệ thuận với cường độ từ trường (hình 19.15). Thường chúng có độ nhạy cảm từ trường trong dải 100 G. Chúng không được ứng dụng trong việc đo các từ trường phụ trên trái đất.



HÌNH 19.15 Đầu ra của một cảm biến Hall tương tự và vị trí tương đối với một từ trường. (Allegro Microsystem Inc.)

Các cảm biến Hall đều có tác dụng như các bộ mã hoá tịnh tiến hoặc quay. Có thể đặt hai cảm biến Hall ở hai cạnh góc vuông để tính được sin hoặc cosin của một góc của một nam châm quay, do đó tạo thành một cảm biến quay tuyệt đối. Các thiết bị mang tính thương mại của thuộc tính này gọi là "điện thế Hall" và có các đầu ra biến đổi (ví dụ như sin và cosin hoặc đường dốc tuyến tính lặp lại với mỗi vòng quay). Đối lập với các điện thế là các thanh trượt điện trở và các dải điện trở, các cảm biến Hall cho phép quay 360^0 không ngừng và không bị hao mòn. Tuy nhiên, tất cả các thiết bị dựa theo hiệu ứng Hall đều nhạy cảm với từ trường ngoài.

Các cảm biến Hall cũng là những bộ chuyển đổi tuyệt vời của các chuyển động thẳng nhỏ hoặc chuyển động theo cung tròn. Chuyển động của một thanh nam châm qua một cảm biến Hall tạo ra cho cảm biến một từ trường – nó có thể được sắp xếp để làm biến đổi tuyến tính với các dịch chuyển – qua một dãy từ vài mm tới vài cm. (Thanh nam châm chưa đi hết chiều dài của nó). Sự bổ sung mang tính thương mại là các cảm biến điều khiển vị trí.

Các cảm biến dây

Nhiều loại cảm biến thẳng và cảm biến quay (tương đối và tuyệt đối) tương tự như các bộ mã hoá quang học nhưng chúng sử dụng tính chất từ nhiều hơn quang học. Các ứng dụng thẳng yêu cầu dải hở. Trong các ứng dụng đã nêu, cảm biến từ có ưu điểm trong việc chống lại bụi bẩn, mặc dù các dải từ trường cần được bảo vệ để tránh bị phá hỏng.

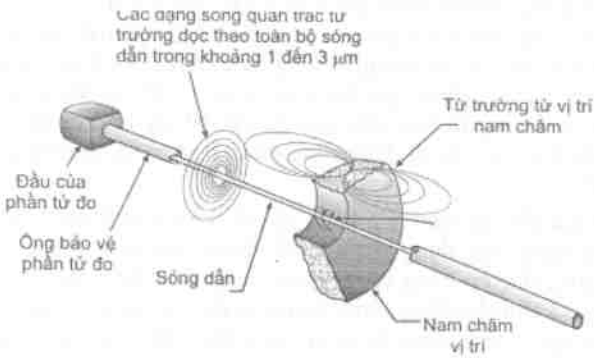
Cảm biến siêu âm

Cảm biến sóng siêu âm (US) đo thời gian truyền của một xung của sóng siêu âm xuyên qua không khí hoặc chất lỏng để xác định khoảng cách. Có các loại cảm biến đo được các dải từ vài cm tới 10 m. Ưu điểm lớn nhất của cảm biến siêu âm là các thiết bị điện và các bộ phận chuyển đổi của nó đều nằm trên cùng một vị trí. Nhưng cũng có nhược điểm tương ứng đó là nó có xu hướng không phân biệt được: chúng có thể phát hiện sai mục tiêu, thậm chí một cái rất nhỏ, đặc biệt khi chúng quá gần bộ chuyển đổi. Có loại cảm biến có các chùm sóng định hướng (giảm xuống 7^0) để tối giản sự phát hiện sai các mục tiêu. Một số thực hiện thêm việc bù cho sự thay đổi của nhiệt độ không khí, vì nó ảnh hưởng tới vận tốc âm thanh. Loại cảm biến này có thể sử dụng trong việc bù các kích thước hình học. Ví dụ như, chúng có thể được dùng để phát hiện mực chất lỏng trong một ống thẳng đứng; sự phản xạ của xung sóng âm từ các thành của ống là nhỏ nhất.

Các cảm biến siêu âm điển hình có một đầu ra tương tự tỉ lệ thuận với khoảng cách tới vật đích. Trong một môi trường thuận lợi, thì mức độ chính xác có thể là 1%.

Thời gian truyền từ giảo

Một kỹ thuật có độ chính xác cao hơn đó là sử dụng thời gian truyền để xác định khoảng cách là bộ chuyển đổi dây từ giảo (MTS). Một nam châm di chuyển tạo nên một "mục tiêu" tương ứng với mục tiêu âm thanh trong các cảm biến siêu âm và không cần chạm vào dây từ giảo, nó chính là trung tâm của thiết bị. Từ trường hoạt động trong dây từ giảo madnetostrictive tạo ra một xung sóng siêu âm trong dây khi một xung điện chạy qua dây. Khoảng thời gian giữa sóng xung điện đến khi phát hiện của xung sóng siêu âm tại điểm cuối của dây dùng để quyết định vị trí của nam châm dọc theo dây (hình 19.16).



HÌNH 19.16 Nguyên tắc hoạt động của một cảm biến vị trí tuyến tính từ giảo (Temposonics Inc.)

Bộ chuyển đổi từ giảo không có tính chắc chắn vốn có và độ thô của sóng siêu âm truyền qua không khí, nhưng nó đạt được phép đo chiều dài có độ lớn tương tự, lên tới vài m. Sự chính xác và sự ổn định là tốt hơn rất nhiều so với các cảm biến sóng siêu âm. Một vài chuyển động không thẳng được bỏ qua, bởi vì nam châm đích không cần đạt tới vị trí xấp xỉ gần với dây từ giảo.

Cảm biến ứng dụng hiện tượng giao thoa của laze

Các giao thoa kế laze có khả năng đo được các chuyển động thẳng tương đối với độ chính xác ở mức nano. Trong một giao thoa kế, các tia sáng laze chuẩn trực truyền qua một bộ tách ánh sáng, đưa năng lượng ánh sáng theo hai đường khác nhau. Một phản xạ trực tiếp vào bộ thu, giống như dãy các cảm biến quang, vẽ ra một đường đi với độ dài cố định. Đường còn lại phản xạ ngược trở lại bộ thu từ một bộ phản xạ ngược (gương) được gắn vào vật cần đo. Hai sóng tăng cường hoặc triệt tiêu lẫn nhau khi giao thoa với nhau tại bộ thu, tạo ra các vân sáng và tối. Các vân giao thoa được phân tích để tìm ra mối quan hệ về pha giữa hai sóng, nó phụ thuộc vào độ dài tương đối của

đường đi, bởi vậy có thể đo được khoảng cách tới vật đang dịch chuyển. Khi vật di chuyển, mẫu ảnh lặp lại khi độ dài của đường đi tia sáng thay đổi bởi độ dài bước sóng tia laze. Vì thế giao thoa kế laze chính là một thiết bị đo tương đối.

Giao thoa kế laze là một thiết bị đắt tiền và đã được thảo luận về nó trong chương này. Chúng cũng là loại có độ phân giải cao nhất. Các giao thoa kế rất nhạy cảm với các sai lệch cơ khí và các rung động.

Các bạn có thể tìm thêm nhiều thông tin về cảm biến ở các tạp chí về các loại cảm biến hoặc trong trang web: http:// www.sensorsmag.com/

Tài liệu tham khảo

[1] Histand, M. B. and Alciatore, D. G., *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, McGraw-Hill, Boston, MA, 1999.

[2] Bolton, W., *Mechatronics*, 2nd edition, Addison Wesley Longman, New York, NY, 1999.

[3] Horowitz, P. and Hill, W., *The Art of Electronics*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.

[4] Auslander, D. M. and Kempf, C. J., *Mechatronics: Mechanical System Interfacing*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.

[5] Jones, J. L., Flynn, A. M., and Seiger, B. A., *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*, 2nd edition, A. K. Peters, Boston, MA, 1999.

19.2 Cảm biến gia tốc

Halit Eren

Gia tốc của chuyển động là một thành phần rất quan trọng của các thông số động học như: vị trí, vận tốc, gia tốc và tốc độ biến thiên gia tốc. Mỗi một thông số trên lại có liên hệ tuyến tính với thông số cạnh nó. Bởi thế, tất cả các thông số động học trên đều có thể được lấy ra từ một thông số. Ví dụ như, gia tốc có thể lấy được qua đạo hàm của vận tốc tương ứng hoặc là tích phân của tốc độ biến thiên gia tốc. Tương tự như thế, vận tốc có thể lấy từ đạo hàm vị trí tương ứng hoặc tích phân gia tốc. Trong thực tế, chỉ sử dụng rộng rãi tích phân vì nó đem đến kết quả tốt hơn khi có nhiễu và có sự tắt dần.

Có hai kỹ thuật đo gia tốc: đo *trực tiếp* bằng gia tốc kế đặc biệt và đo *gián tiếp* bằng cách lấy đạo hàm vận tốc. Khả năng ứng dụng của các kỹ thuật trên phụ thuộc vào dạng chuyển động (chuyển động thẳng, tròn, chuyển động cong) hoặc trạng thái cân bằng ở giữa các dao động. Với các chuyển động thẳng và chuyển động cong, người ta ưu tiên dùng phương pháp đo bằng gia tốc kế trực tiếp. Tuy nhiên, người ta thường đo gia tốc góc bằng các phương pháp đo gián tiếp.

Gia tốc là một thông số quan trọng để đo độ dịch chuyển tuyệt đối, dao động và đo độ va đập. Với những mục đích như vậy, có nhiều loại gia tốc kế với các tính kinh tế và dải đo rộng nhằm đáp ứng các yêu cầu ứng dụng đa dạng, chủ yếu là trong 3 lĩnh vực: (1) *ứng dụng thương mại* - ô tô, tàu, dụng cụ, thể thao; (2) *các ứng dụng công nghiệp* - robôt học, điều khiển máy móc, kiểm tra dao động và đo đạc; và (3) *các ứng dụng có độ tin cậy cao* - quân sự, không gian, hàng không, đo động đất, theo dõi chấn động, dao động và các phép đo va đập.

Gia tốc kế đã được sử dụng từ lâu, những loại đầu tiên là loại cơ khí với các tín hiệu điện tử tương tự. Mặc dù các loại đầu đo gia tốc cũ vẫn còn được dùng trong nhiều ứng dụng gần đây, nhưng các đầu đo gia tốc hiện đại thực chất là các thiết bị bán dẫn với các chip điện tử được tích hợp với các mạch xử lý tín hiệu là rất cần thiết. Các gia tốc kế cơ khí phát hiện ra lực tác dụng lên một khối khi có gia tốc. Một loại gia tốc kế mới, dạng nhiệt, có thể đo vị trí nhờ ứng dụng hiện tượng truyền nhiệt.

Tổng quan về các loại gia tốc kế

Một gia tốc kế cơ bản gồm một khối có thể di chuyển tự do dọc trục đo bên trong một cái vỏ. Công nghệ chế tạo gia tốc kế dựa nhiều vào cơ sở này và có thể phân chia chúng theo nhiều cách,

như là loại cơ khí hay điện, chủ động hay bị động, độ lệch hay vị trí cân bằng không... Loại thường được dùng trong đo dao động hay va đập thường là dạng độ lệch, khi dùng chúng trong các phép đo chuyển động của các phương tiện, máy bay và hơn cả là mục đích định hướng thì ta có thể dùng loại độ lệch hay vị trí cân bằng không.

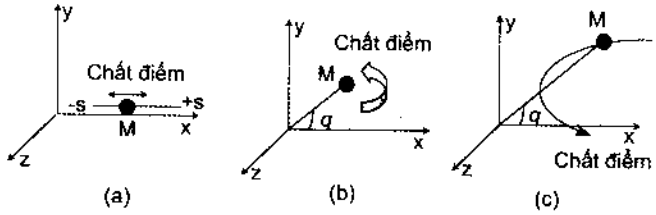
Phần này sẽ tập trung vào các phép đo trực tiếp với các dạng gia tốc kế sau:

- Quán tính và cơ khí
- Điện cơ
- Áp-điện
- Áp-trở
- Đo theo sức căng
- Điện dung và cân bằng lực tĩnh điện
- Gia tốc kế micro và nano

Dựa trên các nguyên tắc hoạt động người ta chia thành các nhóm nhỏ hơn trong mỗi nhóm chính.

Động lực học và các đặc tính của các gia tốc kế

Gia tốc có quan hệ với chuyển động, một vectơ biểu diễn một hướng cũng như độ lớn. Hướng của chuyển động được mô tả theo nghĩa của một số hệ trục toạ độ Đề các và trực giao. Hình 19.17 minh họa lần lượt các chuyển động thẳng, quay và cong.



HÌNH 19.17 Các dạng chuyển động mà gia tốc kế thường ứng dụng

Ta có các phương trình cho mỗi loại chuyển động:

$$\text{Gia tốc thẳng } a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d(ds/dt)}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} \tag{19.1}$$

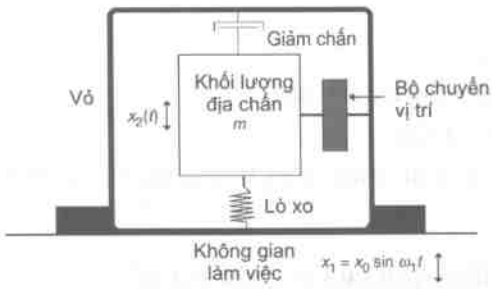
$$\text{Gia tốc góc } \alpha = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(d\theta/dt)}{dt} = \frac{d^2 \theta}{dt^2} \tag{19.2}$$

$$\text{Gia tốc cong } a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} i + \frac{d^2 y}{dt^2} j + \frac{d^2 z}{dt^2} k \tag{19.3}$$

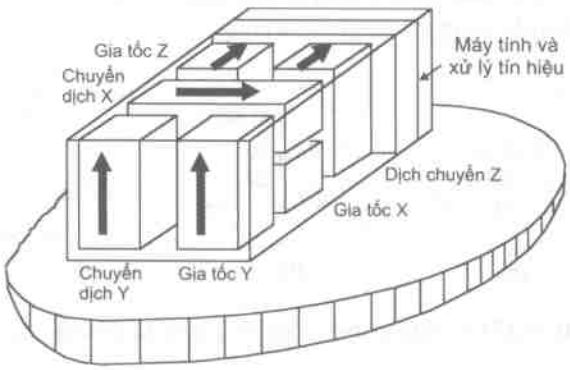
trong đó a và α là các gia tốc; v và ω là tốc độ; s là khoảng cách; θ là góc; i, j và k là các vectơ đơn vị tương ứng theo các hướng x, y và z.

Với ứng dụng cần đo chính xác gia tốc, thì sự hiểu biết đúng đắn về các đặc điểm của chuyển động là rất quan trọng. Các lĩnh vực áp dụng có thể là chuyển động thẳng và các dao động, chuyển động quay, sự kiểm soát độ nghiêng của một đối tượng hoặc sự biến đổi dạng chuyển động của quá trình tổng hợp. Trong mỗi trường hợp, việc chọn lựa đúng đắn các gia tốc kế là cần thiết.

Phần chính của các gia tốc kế cần được xem xét và phân tích giống như một thiết bị đo chấn động một bậc tự do, nó có thể bao gồm một khối lượng, một lò xo, một giảm chấn được bố trí giống như hình 19.18. Trong trường hợp các hệ thống có nhiều bậc tự do, có thể áp dụng các nguyên tắc của dịch chuyển cong như trong phương trình 19.3 và phải sử dụng các bộ chuyển đổi đa năng để tạo ra phương pháp đo với một, hai hoặc ba điểm đo. Một ví dụ điển hình là những thiết bị dẫn hướng và định vị bằng quán tính như minh hoạ trong hình 19.19. Trong các ứng dụng như thế, các cảm biến đóng vai trò quan trọng trong việc định hướng và tìm đường. Thường thường, hệ các cảm biến ba trục thu nhỏ có thể phát hiện ra sự thay đổi trong trục, bước răng và góc phương vị theo các hướng x, y và z.



HÌNH 19.18 Một gia tốc kế đo chấn động điển hình



HÌNH 19.19 Sự sắp xếp của các gia tốc kế trong các hệ thống định vị và chỉ dẫn

Nếu một hệ một bậc tự do tuyến tính trong một khoảng thời gian bất biến, phương trình vi phân bậc hai cơ bản mô tả chuyển động của hệ lực lò xo - khối lượng được viết như sau:

$$f(t) = m\frac{d^2x}{dt^2} + c\frac{dx}{dt} + kx \tag{19.4}$$

trong đó $f(t)$ là lực, m là khối lượng, c là hằng số vận tốc và k là hằng số của lò xo.

Tuy nhiên, cơ sở của các gia tốc kế cũng là chuyển động. Khi đó, lực được truyền qua lò xo tới khối lượng treo, phụ thuộc vào khả năng chuyển đổi của lực tới khối lượng. Phương trình (19.4) được hình thành qua việc đưa ra các ảnh hưởng của chuyển động dựa trên phương trình sau:

$$m\frac{d^2z}{dt^2} + c\frac{dz}{dt} + kz = mg\cos\theta - m\frac{d^2x_1}{dt^2} \tag{19.5}$$

trong đó $z = x_2 - x_1$ là chuyển động tương đối giữa vật và gốc, x_1 là dịch chuyển của gốc, x_2 là dịch chuyển của vật và θ là góc giữa trục cảm biến và trọng trường.

Phương pháp giải hoàn chỉnh cho phương trình 19.5 có thể thu được qua việc áp dụng nguyên tắc xếp chồng. Nguyên tắc xếp chồng phát biểu rằng nếu có đồng thời nhiều hành động cùng tác động vào một vật, thì ảnh hưởng chung của nó là tổng các ảnh hưởng thành phần tác động vào vật. Sử dụng nguyên lý xếp chồng và phép biến đổi Laplace ta có:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2} + cs + k \tag{19.6}$$

hoặc:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K}{s^2/\omega_n^2 + 2\zeta s/\omega_n + 1} \tag{19.7}$$

trong đó s là toán tử Laplace, $K = 1/k$ là độ nhạy tĩnh, $\omega_n = \sqrt{k/m}$ là tần số dao động riêng (rad/s) và $\zeta = (c/2)\sqrt{km}$ là hệ số suy giảm.

Có thể thấy rằng trong hiệu suất của gia tốc kế, các thông số quan trọng là độ nhạy tĩnh, tần số riêng và hệ số giảm chấn, tất cả đều là các hàm của khối lượng, vận tốc và các hệ số lò xo. Các gia tốc kế được thiết kế và chế tạo với những đặc điểm khác nhau theo sự lựa chọn hợp lý của những thông số trên. Danh sách các nhà sản xuất được đưa ra trong bảng 19.1.

Dao động

Phần này đề cập đến các ứng dụng của gia tốc kế để đo các đặc tính vật lý như là gia tốc, dao động hay sự rung và các chuyển động nói chung. Mặc dù có nhiều điểm khác nhau cơ bản trong các dạng chuyển động, nhưng việc hiểu rõ về các nguyên tắc cơ bản của dao động sẽ đưa các ứng dụng của các gia tốc kế vào các tình huống khác nhau bởi phương pháp xấp xỉ gần đúng.

Dao động là một chuyển động qua lại có được từ sự tác dụng của các lực thay đổi vào một cấu trúc. Các dao động có thể là tuần hoàn, ngẫu nhiên tĩnh, ngẫu nhiên động hoặc tức thời.

Các dao động tuần hoàn

Trong các dao động tuần hoàn, vật lặp lại chuyển động của chính nó sau một khoảng thời gian nào đó. Có thể biểu diễn nó theo dạng sóng hình sin:

$$x(t) = X_p \sin(\omega t) \tag{19.8}$$

trong đó $x(t)$ là độ dịch chuyển phụ thuộc thời gian, $\omega = 2\pi ft$ là tần số góc và X_p là biên độ của dao động (độ dịch chuyển lớn nhất tính từ gốc).

Vận tốc của vật cũng là một hàm theo thời gian và được tính như sau:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \omega X_p \cos(\omega t) = V_p \sin(\omega t + \pi/2) \tag{19.9}$$

trong đó $v(t)$ là vận tốc phụ thuộc vào thời gian và $V_p = \omega X_p$ là vận tốc lớn nhất.

Gia tốc của vật là đạo hàm của vận tốc theo thời gian:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 X_p \sin(\omega t) = A_p \sin(\omega t + \pi) \tag{19.10}$$

trong đó $a(t)$ là gia tốc phụ thuộc thời gian và $A_p = \omega^2 X_p = \omega V_p$ là gia tốc lớn nhất.

BẢNG 19.1 Danh sách các nhà sản xuất

Analog Devices, Inc. 1 Technology Way, P.O. Box 9106 Norwood, MA 02062-9106 USA Tel: 781-329-4700 Fax: 781-326-8703	Kistler Instrument Corp. 75 John Glenn Dr. Amherst, NY 14228 2119 USA Tel: 888-KISTLER (547-8537) Fax: 716-691-5226
Aydin Telemetry 47 Friends Lane & Penns Trail Newtown, PA 18940 0328 USA Tel: 215-968-4271 Fax: 215-968-3214	Oceana Sensor Technologies, Inc. 1632-T Corporate Landing Pkwy. Virginia Beach, VA 23454 USA Tel: 757-426-3678 Fax: 757-426-3633
Bruel & Kjaer 2815-A Colonnades Court Norcross, GA 30071 USA Tel: 800-332-2040 Fax: 770-447-8440	PCB Piezotronics, Inc. 3425-T Walden Ave. Depew, NY 14043 2495 USA Tel: 716-684-0001 Fax: 716-684-0987
Dytran Instruments, Inc. 21592 Marilla St. Chatsworth, CA 91311 USA Tel: 800-899-7818 Fax: 800-899-7088	Piezo Systems, Inc. 186 Massachusetts Ave. Cambridge, MA 02139-4229 USA Tel: 617-547-1777 Fax: 617-354-2200
Endevco Corp. 30700 Rancho Viejo Rd. San Juan Capistrano, CA 92675 USA Tel: 800-982-6732 Fax: 949-661-7231	Rieker Instrument Co. P.O. Box 128 Folcroft, PA 19032 0128 USA Tel: 610-534-9000 Fax: 610-534-4670
Entran Devices, Inc. 10-T Washington Ave. Fairfield, NJ 07004 USA Tel: 888-8-ENTRAN (836-8726) Fax: 973-227-6865	Sensotec, Inc. 2080 Arlingate Lane Columbus, OH 43228 USA Tel: 800-858-6184 Fax: 614-850-1111
GS Sensors, Inc. 16 W. Chestnut St. Ephrata, PA 17522 USA Tel: 717-721-9727 Fax: 717-721-9859	Techkor Instrumentation 2001 Fulling Mill Rd. P.O. Box 70 Dept. T-1 New Cumberland, PA 17057-0070 USA Tel: 800-697-4567 Fax: 717-939-7170

Từ các phương trình trên ta có thể thấy rằng các dạng cơ bản và chu kỳ dao động tồn tại trong cùng gia tốc, vận tốc và độ dịch chuyển. Nhưng vận tốc sớm pha hơn so với dịch chuyển một góc 90^0 và gia tốc cũng sớm pha hơn vận tốc một góc 90°.Trong tự nhiên, dao động có thể dự đoán được, nhưng không hẳn đã là hàm sin. Nếu ta biết trước chúng nhưng chúng không ở dạng sin, có thể biểu diễn chúng qua tổng của các hàm sin, theo phân tích Fourier:

$$x(t) = X_0 + X_1 \sin(\omega_1 t + \Phi_1) + X_2 \sin(\omega_2 t + \Phi_2) + ... + X_n \sin(\omega_n t + \Phi_n) \qquad (19.11)$$

trong đó ω_1, ω_2... ω_n là các tần số (rad/s), X_0, X_1, ...,X_n là biên độ tương ứng với các tần số và ϕ_1, ϕ_2... ϕ_n là các góc pha.

Số các số hạng có thể là vô hạn và số các phần tử càng cao thì kết quả xấp xỉ càng chính xác. Những phần tử này tạo thành một chuỗi đủ rộng với các tần số khác nhau. Chúng ta có thể biểu diễn dao động trong miền thời gian hoặc trong miền không gian, trong cả hai miền đều rất hữu ích trong khi phân tích.

Dao động ngẫu nhiên tĩnh

Các dao động ngẫu nhiên thường gặp trong tự nhiên, ở đó chúng tạo thành các chuyển động với chu kỳ bất quy tắc và chúng không bao giờ lặp lại chính chúng một cách chính xác. Về mặt lý thuyết mà nói, ta cần quan sát với thời gian dài vô tận để thu được một quá trình hoàn thiện của những dao động này. Tuy nhiên, có thể sử dụng các phương pháp thống kê hay lý thuyết xác suất để phân tích qua các mẫu đại diện. Các công cụ toán học như các hàm phân bố xác suất, mật độ xác suất, phổ tần xuất, các hàm tương quan chéo, hàm tự tương quan, các chuyển đổi Fourier số (DFT), các chuyển đổi Fourier nhanh (FFT), phân tích phổ tự động, các giá trị căn trung bình bình phương và phép phân tích lọc số là một vài kỹ thuật có thể được áp dụng.

Các đao động ngẫu nhiên biến đổi

Trong trường hợp này, các tính chất thống kê của các dao động biến đổi theo thời gian. Có thể áp dụng các phương pháp như trung bình thời gian hoặc các kỹ thuật thống kê.

Quá độ và va đập

Bình thường ta cần đo đạc các dao động xảy ra đột ngột và trong thời gian ngắn. Có thể mô tả sự va đập (shock) và quá trình quá độ của dao động thông qua các đại lượng như lực, gia tốc, vận tốc, di chuyển. Trong phân tích quá độ và va đập người ta sử dụng các phương pháp thống kê và biến đổi Fourier.

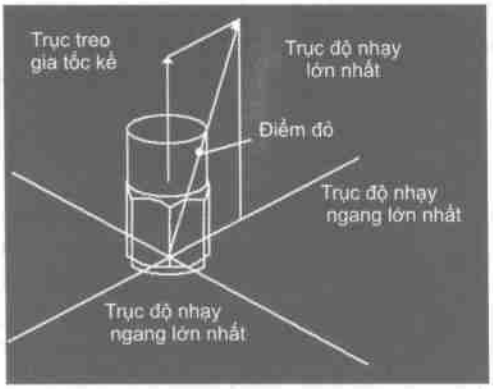
Các sai số điển hình và mô hình hóa sai số

Sai số trong phương pháp đo gia tốc xảy ra do bốn nguyên nhân chính: do cảm biến, sự thu nhận dữ liệu bằng thiết bị điện tử, xử lý tín hiệu và các sai số khác. Trong các phương pháp đo gia tốc trực tiếp, các nguồn gây ra sai số chính là từ các cảm biến và từ sự thu nhận dữ liệu bằng điện tử. Những sai số này sẽ được thảo luận trong phần khác và trong một vài trường hợp, các sai số cảm biến và sai số thu nhận điện tử có thể cao ở mức 5%. Việc lấy mẫu và các chuyển đổi A/D thường đem lại một phần của những sai số này và nó là cố hữu cũng như nó tồn tại trong tất cả các hệ thống thu thập và tính toán dữ liệu. Tuy nhiên có thể giảm thiểu những sai số này qua việc chọn bộ dồn kênh, các mạch giữ và lấy mẫu và các chuyển đổi A/D.

Khi dùng phương pháp đo trực tiếp, phải kiểm tra cẩn thận để lựa chọn đúng gia tốc kế phù hợp với các yêu cầu của một ứng dụng cụ thể. Để giảm thiểu sai số, các đặc trưng của chuyển động cần được nghiên cứu và cần phải xem xét các đặc tính sau của các gia tốc kế: đáp ứng quá độ hoặc độ nhạy chéo trục; dải tần số; độ nhạy, dải động và khối lượng; đáp ứng chéo trục; và các điều kiện môi trường như nhiệt độ, nhiễu đường truyền, độ ổn định của sai lệch, thang chia và sự sai lệch...

Độ nhạy của gia tốc kế

Trong quá trình đo, dịch chuyển ngang của hệ thống ảnh hưởng đến hầu hết các gia tốc kế và độ nhạy của của những chuyển động này đóng vai trò chủ yếu đối với độ chính xác của các phép đo. Độ nhạy theo phương ngang, cũng như chéo, của gia tốc kế là phản ứng của nó với gia tốc trong mặt phẳng thẳng đứng với trục chính của gia tốc kế như trong hình 19.20. Độ nhạy chéo trục thông thường được thể hiện là một phần trăm của độ nhạy trục chính và nên thấp đến mức có thể. Các nhà sản xuất thường cung cấp hướng có độ nhạy tối thiểu.



HÌNH 19.20 Minh hoạ về độ nhạy chéo trục

Việc đo độ nhạy chéo trục lớn nhất là một phần của quá trình hiệu chỉnh từng phần và phải nhỏ hơn 3 hoặc 4%. Nếu dao động ngang quá lớn, nó có thể gây nên sai lệch rất lớn. Trong trường hợp này, ta nên sắp xếp riêng các mức dao động và tần số các nội dung của các chuyển động chéo trục. Độ nhạy chéo trục của các gia tốc kế điển hình được mô tả trong các phần liên quan là khoảng 2-3% đối với các loại áp-điện và 1% đối với hầu hết các loại khác.

Dải tần số

Các phép đo gia tốc bình thường gần giống như việc sử dụng phép chia tuyến tính đường cong độ nhạy của gia tốc kế. Độ nhạy bị giới hạn ở các vùng tần số thấp cũng như các vùng tần số cao quanh tần số cộng hưởng tự nhiên. Có một quy tắc kinh nghiệm, có thể đặt giới hạn tần số cao cho phép đo bằng 1/3 tần số gây cộng hưởng của gia tốc kế như vậy, các dao động được đo trong tuyến tính dưới 1 dB. Ta nên chú ý rằng một dải tần số hữu dụng cho gia tốc kế có thể cao hơn 1/2 hoặc 2/3 tần số cộng hưởng của nó. Tần số đo có thể được đặt cao hơn giá trị trong các ứng dụng mà ở đó độ tuyến tính thấp hơn (ví dụ 3 dB) có thể chấp nhận. Có hai nguyên nhân để quyết định giới hạn tần số đo thấp. Đầu tiên là ngưỡng tần số thấp của các bộ tiền khuếch đại liên đới. Thứ hai là ảnh hưởng của sự thay đổi nhiệt độ xung quanh trong khi gia tốc kế rất nhạy cảm với sự thay đổi này.

Khối lượng của gia tốc kế và dải động lực học

Theo lý thuyết, độ nhạy của bộ chuyển đổi càng cao thì càng tốt. Có thể phải đưa ra những thoả hiệp cho độ nhạy đối với tần số, dãy, quá tải, kích cỡ...

Trong một vài trường hợp, nhiều lỗi gây ra do việc lựa chọn sai cảm biến, không phù hợp với ứng dụng. Ví dụ như khối lượng của gia tốc kế trở nên quan trọng khi sử dụng để kiểm tra các vật nhỏ và nhẹ. Gia tốc kế không nên mang thành phần có cấu trúc, do khối lượng thêm vào có thể dẫn đến sự thay đổi đáng kể tới mức và tần số tại các điểm đo và làm sai lệch các kết quả. Có một quy tắc chung là khối lượng gia tốc kế không nên lớn hơn 1/10 khối lượng hiệu dụng của phần hoặc cấu trúc được gắn lên để đo.

Dải động lực học của gia tốc kế nên làm cho hợp với các mức độ gia tốc cao hay thấp của các đối tượng được đo. Với gia tốc kế dùng cho mục đích chung thì dải nằm trong khoảng tuyến tính từ 5000 g đến 10000 g, đây là dải phù hợp nhất với các thay đổi đột ngột cơ khí. Các gia tốc kế đặc biệt có thể đo trên 100000 g.

Đáp ứng tức thời

"Sốc" là sự thay đổi năng lượng đột ngột dưới dạng các xung ngắn với hình dạng và số lần xuất hiện khác nhau. Chúng có cường độ cao và dải tần rộng. Trong các ứng dụng có cả các phép đo quá độ và sốc, tính chất tuyến tính toàn cục của hệ thống đo có thể bị giới hạn ở các tần số cao

hoặc thấp bởi các hiện tượng gọi là *vòng* (ringing) và *lệch không* (zero shift) tương ứng. *Lệch không* gây nên bởi sự không tuyến tính về pha trong cả các bộ tiền khuếch đại và gia tốc kế không trở về trạng thái ổn định sau khi phải chịu những sốc mạnh. *vòng* gây nên bởi các thành phần có tần số cao của tần số kích thích gần với tần số cộng hưởng, ngăn cản gia tốc kế trở lại trạng thái ổn định của nó. Để tránh sai số phép đo vì những hiệu ứng này, tần số hoạt động của hệ thống đo cần được được giới hạn trong dải tuyến tính.

Dải thang đo và khả năng quá tải

Hầu hết các gia tốc kế đều có khả năng đo theo cả hai chiều: dương và âm. Chúng được thiết kế để có thể sử dụng khi quá tải. Các nhà sản xuất cũng cung cấp thông tin cho cả hai đặc điểm này.

Điều kiện môi trường

Khi chọn lựa và làm việc với các gia tốc kế, cần phải xem xét các điều kiện môi trường như các dải nhiệt độ, sự thay đổi nhiệt độ, các ảnh hưởng của từ trường, độ ẩm và tạp âm. Các nhà sản xuất cũng cung cấp các thông tin về các điều kiện môi trường.

Gia tốc kế quán tính

Các gia tốc kế quán tính là các gia tốc kế cơ khí sử dụng một khối lượng chấn động được treo bởi một lò xo hoặc một đòn bẩy bên trong một khung cứng như trong hình 19.18. Khung mang khối lượng chấn động được nối cứng với nguồn dao động. Sử dụng các tính chất của hệ thống dùng để thực hiện phép đo. Khi hệ dao động, khối lượng có xu hướng trở về vị trí cân bằng của nó để chuyển động có thể được ghi lại giống như một dịch chuyển tương đối giữa khối lượng và khung. Một bộ chuyển đổi xác định dịch chuyển này và đưa ra tín hiệu đến bộ xử lý. Có thể chế tạo các phần tử chuyển đổi bằng các vật liệu có tính điện trở, điện dung, điện cảm, áp-điện, áp-trở và quang học. Trong thực tế, khối lượng chấn động không đem đến một trạng thái ổn định tuyệt đối, nhưng nó có thể đạt được một vị trí gần đó với với các tần số xác định.

Qua việc lựa chọn hợp lý giữa khối lượng, lò xo và giảm chấn, có thể sử dụng thiết bị này cho cả mục đích đo gia tốc và đo sự dịch chuyển. Nói chung, vật có khối lượng lớn cùng với một lò xo mềm thích hợp cho việc đo dao động và chuyển dịch, trong khi đó một khối lượng tương đối nhỏ và lò xo cứng được sử dụng trong các gia tốc kế. Tuy nhiên, thuật ngữ chấn động được sử dụng thường xuyên trong các thiết bị, chúng đo các mức độ dao động rất chậm của nền và của các kết cấu.

Để miêu tả đáp ứng của gia tốc khối lượng chấn động như trong hình 19.18, phương trình chuyển động theo định luật hai Newton có thể được viết như sau:

$$m\frac{d^2x_2}{dt^2} + c\frac{dx_2}{dt} + kx_2 = c\frac{dx_1}{dt} + kx_1 + mg\cos(\theta) \tag{19.12}$$

trong đó x_1 là dịch chuyển của khung dao động, x_2 là dịch chuyển của khối lượng chấn động, c là hằng số vận tốc, θ là góc lệch giữa trục đo và phương trọng lực, và k là độ cứng lò xo.

Trừ cả hai vế phương trình cho md^2x_1/dt^2 và sắp xếp lại ta được:

$$m\frac{d^2z}{dt^2} + c\frac{dz}{dt} + kz = mg\cos(\theta) - m\frac{d^2x_1}{dt^2} \tag{19.13}$$

trong đó $z = x_2 - x_1$ là chuyển động tương đối giữa khối lượng và vật cơ sở.

Trong phương trình (19.12), ta đã giả sử rằng lực của lò xo lên khối lượng chấn động chỉ tỉ lệ thuận với vận tốc. Nếu ta đưa vào thiết bị một dao động điều hoà như sau:

$$x_1(t) = X_0\sin(\omega_1 t) \tag{19.14}$$

trong đó ω_1 là tần số của dao động (rad/s), ta được:

$$-m\frac{d^2x_1}{dt^2} = mX_0 \sin\omega_1 t$$

biến đổi phương trình (19.13) thành:

$$m\frac{d^2z}{dt^2} + c\frac{dz}{dt} + kz = mg\cos(\theta) + ma_1 \sin\omega_1 t \tag{19.15}$$

trong đó $a_1 = mX_0\omega_1^2$.

Phương trình (19.15) có thể suy ra trạng thái quá độ và trạng thái ổn định của hệ thống. Trạng thái ổn định của phương trình vi phân (19.15) có thể được xác định:

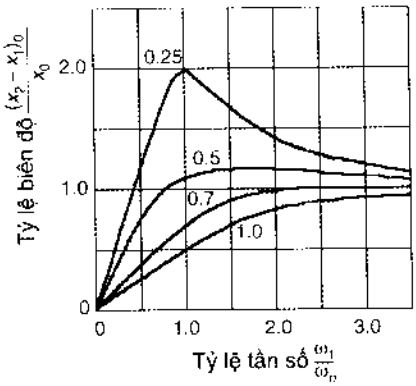
$$z = \frac{mg\cos(\theta)}{k} + \frac{ma_1 \sin\omega_1 t}{(k - m\omega_1^2 + jc\omega_1)} \tag{19.16}$$

Sắp xếp lại phương trình (19.16) ta được:

$$z = \frac{mgc\cos(\theta)}{\omega_n} + \frac{a_1 \sin(\omega_1 t - \Phi)}{\sqrt{\omega_n^2(1-r^2)^2 + (2\varsigma r)^2}} \tag{19.17}$$

Trong đó $\omega_n(=\sqrt{k/m})$ là tần số dao động riêng của khối lượng chấn động, $V(=c/2\sqrt{km})$ là hệ số suy giảm. Có thể viết hệ số suy giảm theo dạng sau $\varsigma = c/c_c$, với $c_c = 2\sqrt{km}$. Trong đó góc pha là $\phi(=\tan^{-1}\left[c\omega_1/(k-m\omega_1^2)\right])$ và $r(=\omega_1/\omega_n)$ là tỷ lệ tần số.

Một đồ thị của phương trình (19.17), $(x_1 - x_2)_0/x_0$ với tỷ lệ tần số ω_1/ω_n, minh hoạ trong hình 19.21. Hình này chỉ ra rằng biên độ đầu ra bằng với biên độ đầu vào khi $c/c_c = 0.7$ và $\omega_1/\omega_n > 2$. Đầu ra gần trở thành một hàm tuyến tính theo đầu vào ở tần số cao. Để thoả mãn hệ thống, các hằng số thiết bị c/c_c và ω_n nên được tính toán kỹ hoặc thu được qua vài lần kiểm tra.



HÌNH 19.21 Tần số với tỷ lệ biên độ của gia tốc kế động

Bằng cách này, độ chính xác được dự đoán của phép đo có thể được đoán trước qua các tần số quan tâm. Một phép so sánh phân tích được thực hiện bởi McConnell [7]; các độc giả quan tâm xem phần này để có được các thông tin cụ thể.

Các thiết bị dao động được xây dựng theo nhiều cách khác nhau. Trong một thiết bị đo điện thế, một bộ phân thế được sử dụng để đo các dịch chuyển tương đối giữa khung và khối lượng chấn động. Trong phần lớn các gia tốc kế đo điện thế, thiết bị được điền đầy một loại chất nhớt, nó liên tục tương tác với khung và khối lượng chấn động để giảm chấn. Những gia tốc kế này có tần

số hoạt động thấp (dưới 100 Hz) và chủ yếu được dành cho các gia tốc có độ thay đổi chậm và tần số dao động thấp. Một họ điển hình của các thiết bị này có các mô hình khác nhau, gồm các khoảng ±1 g tới ±50 g. Các dải tần số tự nhiên từ 12 đến 89 Hz, và hệ số suy giảm ς có thể được giữ trong khoảng từ 0.5 đến 0.8 bằng việc bù nhiệt độ và bù bằng giảm chấn. Điện trở của bộ phân thế có thể được chọn trong dải từ 1000 - 10000 W, với độ phân giải tương ứng 0.45 - 0.25% của toàn dải đo. Độ nhạy ngang trục nhỏ hơn ±1%. Độ chính xác toàn bộ là ±1% của toàn dải đo hoặc thấp hơn nhiệt độ phòng. Kích thước cỡ vào khoảng 500 mm^3 với tổng khối lượng khoảng 1/2 kg.

Các bộ chuyển đổi vi phân tuyến tính có thể thay đổi (LVDTs) sử dụng cách đo khác của dịch chuyển tương đối của khối lượng chấn động và vỏ của gia tốc kế. Các thiết bị này có các tần số tự nhiên cao hơn ở các gia tốc kế, tới khoảng 300 Hz. Do các LVDT có mức độ cản trở chuyển động thấp hơn, nó đạt được độ phân giải tốt hơn. Một họ điển hình của các gia tốc kế chuyển đổi vi phân với chất nhớt thể hiện các đặc tính sau. Một dải đo từ ±2 g tới ±700 g, tần số riêng từ 35 tới 650 Hz, độ không tuyến tính là 1% của mức tối đa. Mức tối đa của đầu ra là khoảng 1V với kích thích LVDT là 10 V tại 2000 Hz, dải hệ số suy giảm từ 0.6 tới 0.7, với điện thế dư tại vị trí không là nhỏ hơn 1% và độ trễ nhỏ hơn 1% mức cực đại. Kích thước vào khoảng 50 mm^3 với khối lượng vào khoảng 120 g.

Bộ đo biến dạng dùng cảm biến ứng suất loại điện trở được sử dụng để đo dịch chuyển của khối lượng chấn động. Trong trường hợp này, khối lượng chấn động được đỡ trên một *dầm công xôn* tốt hơn là dùng lò xo. Cảm biến ứng suất loại điện trở được gắn chặt trên mỗi mặt của đòn cân bằng để đo độ biến dạng trong đòn để xác định dịch chuyển dao động của khối lượng. Một chất lỏng nhớt được đổ đầy để giảm chấn cho hệ thống. Đầu ra của các thiết bị độ biến dạng được nối với một mạch cầu thích hợp. Tần số riêng của hệ thống này vào khoảng 300 Hz. Tần số riêng thấp là do cần một dầm công xôn đủ rộng để phù hợp với việc treo các cảm biến ứng suất loại điện trở.

Một điều trở ngại lớn của các thiết bị dao động là cần thêm các mạch bù để giảm các ảnh hưởng của nhiệt độ. Độ giảm chấn của thiết bị có thể cũng bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi về độ nhớt của chất lỏng theo nhiệt độ. Ví dụ như chúng ta thường dùng dầu silic trong các thiết bị và tính nhớt của nó phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ.

Gia tốc kế khối lượng treo, công xôn và gia tốc kế quán tính dạng quả lắc

Có nhiều kiểu gia tốc kế quán tính khác nhau, chúng hầu hết đều đang trong giai đoạn phát triển hoặc được sử dụng với nhiều trường hợp đặc biệt, ví như quả lắc hồi chuyển, rôto phản ứng, dây dao động và cân bằng lực li tâm.

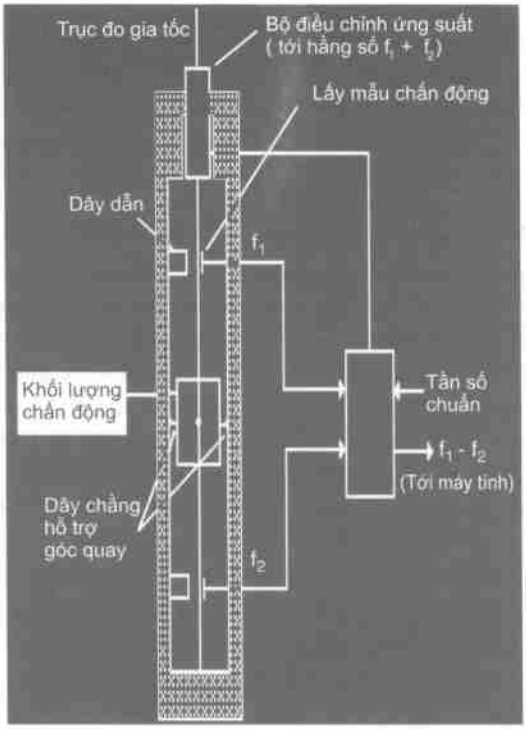
Thiết bị dây dao động hình 19.22 lợi dụng một khối lượng thử được hỗ trợ theo chiều dọc bởi một cặp dây căng, dao động theo chiều ngang với hình dáng tiết diện ngang với độ dài và khối lượng bằng nhau. Tần số dao động của các dây được đặt ở mức vài nghìn vòng trên giây. Khối lượng thử được đỡ qua tâm nên theo đó gia tốc theo phương vuông góc với các sợi dây không ảnh hưởng đến độ biến dạng sợi dây. Với sự hiện diện của gia tốc dọc theo trục đo, tồn tại một độ biến dạng trên hai dây, theo đó làm thay đổi tần số của dao động. Theo định luật thứ hai về chuyển động, các tần số được viết như sau:

$$f_1^2 = \frac{T_1}{4m_s l} \quad \text{và} \quad f_2^2 = \frac{T_2}{4m_s l} \tag{19.18}$$

trong đó T là độ biến dạng, m_s là khối lượng và l là chiều dài các sợi.

Hiệu $T_1 - T_2$ tỉ lệ thuận với ma, trong đó a là gia tốc dọc theo trục của các sợi dây. Một cách biểu diễn sai lệch của bình phương tần số như sau:

$$f_1^2 - f_2^2 = \frac{T_1 - T_2}{4m_s l} = \frac{ma}{4m_s l} \tag{19.19}$$



HÌNH 19.22 Một gia tốc kế dây khối lượng dao động treo điển hình

Từ đó:

$$f_1 - f_2 = \frac{ma}{4m_s l(f_1 + f_2)} \tag{19.20}$$

Tổng của các tần số $(f_1 + f_2)$ có thể được giữ cố định bằng cách liên hệ sức căng của dây so với tần số của một bộ dao động chuẩn. Từ đó, sự sai khác giữa các tần số trở thành tỉ lệ thuận với gia tốc. Trong một số phiên bản, tính chất giống dầm của các phần tử dao động được dùng bằng cách kẹp chặt chúng tại các điểm nút không tương ứng với kiểu cơ bản của dao động của đòn bẩy và tại các tâm tương ứng của sự va chạm của khối lượng thử chung. Tần số ra tỉ lệ với gia tốc còn vận tốc thì tỉ lệ với pha, đây là một ưu điểm quan trọng. Những phiên bản cải tiến mới hơn của các thiết bị này đưa đến các gia tốc kế dạng công xôn và chúng được thảo luận trong phần tới.

Trong một gia tốc kế dạng công xôn, một dầm công xôn nhỏ được gắn trên một khối và được đặt ngược lại với bề mặt dao động và một cơ cấu cơ khí thích hợp được dùng để thay đổi của chiều dài dầm. Chiều dài dầm được ngầm định sao cho tần số tự nhiên của nó cân bằng với tần số của bề mặt dao động và từ đó thu được điều kiện cộng hưởng. Gần đây các thay đổi nhỏ của các sự sắp xếp dầm công xôn đang tìm ra những ứng dụng mới trong các gia tốc kế micro.

Một dạng khác của cấu hình gia tốc kế khối lượng treo, khi một con lắc quay quanh trục thẳng đứng. Hệ thống là điều khiển servo để duy trì nó ở vị trí không. Gia tốc trọng trường được cân bằng bởi gia tốc ly tâm. Tốc độ trục tỉ lệ với bình phương giá trị địa phương của gia tốc.

Gia tốc kế cơ điện

Các gia tốc kế cơ điện có thành phần cơ bản là điều khiển servo và cân bằng ở vị trí không hoạt động dựa trên nguyên lý phản hồi. Trong những thiết bị này, một vật có khối lượng nhạy gia tốc được giữ rất gần với một vị trí trung tâm hoặc điểm không bằng cách xác định độ dịch chuyển và phản hồi các ảnh hưởng của dịch chuyển. Một lực từ trường tương ứng được tạo ra để chống lại chuyển động của khối lượng dịch chuyển từ vị trí không, do đó quá trình trở lại giá trị này giống

như là một lò xo cơ khí trong một gia tốc kế thường vẫn làm. Các ưu điểm của việc tiếp cận này là độ tuyến tính tốt hơn và hạn chế các hiện tượng trễ, giống như các lò xo cơ khí. Cũng như thế, trong một số trường hợp, có thể tạo thêm bộ giảm chấn điện, nó có độ nhạy nhỏ hơn khi thay đổi nhiệt độ.

Một đặc điểm rất quan trọng của các gia tốc kế cơ điện là khả năng kiểm tra về động học và tĩnh học của các thiết bị bằng cách đưa kích thích điện vào các hệ thống. Việc kiểm tra này khá thuận tiện trong các trường hợp phức tạp và tốn kém với yêu cầu chính xác cao. Các thiết bị này cũng hữu ích cho các hệ thống điều khiển gia tốc, vì giá trị gia tốc có thể được đưa ra bởi một dòng điện tương ứng từ một nguồn ngoài. Chúng được sử dụng cho mục đích đo các chuyển động thông thường và điều khiển các dao động tần số thấp.

Có nhiều loại gia tốc kế cơ điện như: Dạng cuộn dây - từ trường, các dạng cảm ứng...

Gia tốc kế cuộn dây - từ trường

Các gia tốc kế này hoạt động dựa trên định luật Ampe: "Một cuộn cảm mang dòng điện đặt trong một từ trường sinh ra một lực tỷ lệ với dòng điện, độ dài cuộn cảm trong từ trường, mật độ từ trường và *sin* của góc lệch giữa cuộn cảm và từ trường". Các cuộn dây trong các gia tốc kế này được đặt trong miền hình ống trụ nằm giữa một nam châm vĩnh cửu và một ống sắt non hình trụ. Chúng được gắn bằng cách một cái cần được đặt trên một ổ bi có ma sát rất nhỏ hoặc chỗ uốn cong để tạo thành một khối lượng chấn động nhạy với gia tốc. Cơ cấu nhổ (pickoff) đo độ dịch chuyển của cuộn dây có gia tốc và khiến cuộn dây được cung cấp bởi một dòng trực tiếp thông qua một bộ điều khiển servo thích hợp để trở lại hoặc duy trì điều kiện không. Các dòng điện trong mạch trở lại tỷ lệ thuận với gia tốc, cung cấp tương tác phần ứng là không đáng kể và bị trung hoà hoàn toàn bởi một cuộn dây bù ở vị trí đối diện cuộn dây chuyển động và hệ số khuếch đại của hệ thống servo là đủ lớn để ngăn chặn sự dịch chuyển của cuộn dây ở nơi mà từ trường không đổi.

Trong những gia tốc kế này, cấu trúc của từ trường phải được che chắn thích đáng để làm cho độ nhạy của hệ thống với các nhiễu loạn hoặc từ trường ngoài là không đáng kể. Cũng như thế, khi xuất hiện gia tốc thì nhiệt độ cũng tăng do sự toả nhiệt theo i^2R. Các ảnh hưởng của sự toả nhiệt trên trong việc biểu diễn được quyết định bởi sự phân bố nhiệt và các tính chất truyền nhiệt của các gia tốc kế.

Gia tốc kế cảm ứng

Mối quan hệ giữa dòng điện, từ trường và lực chính là cơ sở cho các gia tốc kế điện từ trường dạng cảm ứng. Các gia tốc kế này có các máy phát điện nhiều hơn các môtơ. Một dạng của thiết bị này là màn che từ (cup-and-magnet design), bao gồm một phần tử dao động với một *cơ cấu nhổ* và một bộ điều khiển servo dẫn động một kết nối máy đo tốc độ. Một từ trường vĩnh cửu và một vành đưa về thông lượng, phần không gian hẹp tương ứng với một hình trụ dẫn điện, được gắn vào phần tử dao động. Một lực kéo tỉ lệ với tốc độ thu được bởi sự cảm ứng của điện từ trường giữa từ trường và vật dẫn. *Cơ cấu nhổ* đo độ võng của dao động dưới gia tốc và gây cho bộ điều khiển servo quay rôto để kéo phần tử dao động hướng tới vị trí không. Dưới điều kiện ổn định, tốc độ môtơ là một phép đo của gia tốc ảnh tác động lên thiết bị. Hoạt động ổn định của servo được thực hiện bởi sử dụng một mạng tiền định để bù vào thời gian trễ quán tính của môtơ và sự tổng hợp từ trường. Độ chính xác của các gia tốc kế dạng servo là hạn chế cơ bản bởi sự ổn định và chắc chắn của các hệ số tỷ lệ của các thiết bị ghép nối và thiết bị chắn từ cũng như tính chất của thời gian và nhiệt độ.

Một gia tốc kế khác dựa trên thiết kế về cảm ứng sử dụng sự hình thành mômen cảm ứng dòng điện xoáy. Cơ cấu tạo lực của một gia tốc kế cảm ứng bao gồm từ trường không đổi, thường được cung cấp bởi một nam châm vĩnh cửu, xuyên thẳng vào một tấm dẫn điện. Sự dịch chuyển của tấm dẫn trong từ trường thay đổi tạo thành một sức điện động trong mỗi mạch của điện trở. Kết quả này có được là theo định luật Faraday. Trong các gia tốc kế dạng cảm ứng, các dòng điện cảm ứng xoáy tiếp giáp với tấm điện trở, cần thiết tạo cho hệ thống một khớp nối để kéo. Vì tốc độ góc tỷ lệ với gia tốc, vị trí góc đại diện cho sự thay đổi vận tốc. Đây là tính năng đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng dùng để định hướng.

Một thiết bị điển hình cho tính kinh tế dựa trên nguyên tắc gia tốc kế điều khiển servo có thể có một bộ tạo dao động chuẩn thạch anh cực nhỏ, một mang nén không khí cộng với sự bù đầu trợ động cho hệ thống giảm chấn. Một số mô hình biến đổi, ví dụ như một khối nặng 30g có ngưỡng và độ phân giải là 1 μg, một đáp ứng tần số ở 10 Hz là 0.05% và ở 100 Hz là 2%, một tần số tự nhiên là 1500 Hz, hệ số giảm chấn là từ 0.3 - 0.8 và độ nhạy chuyển đổi hoặc ngang trục là 0.1 %. Ví dụ như nếu dòng điện đầu ra là 1.3 mA/g, một điện trở chỉ thị 250 W sẽ có một điện thế cực đại ±10 V cho 30g. Các gia tốc kế này là phù hợp cho công việc yêu cầu độ chính xác và được dùng trong nhiều ứng dụng như là hàng không và các hệ thống điều khiển tên lửa, phép đo các góc nghiêng dùng cho việc định hướng các ứng dụng với các lỗ khoan trong lòng đất và góc lượng trục trong các hệ thống cân bằng và trọng lượng ở máy bay.

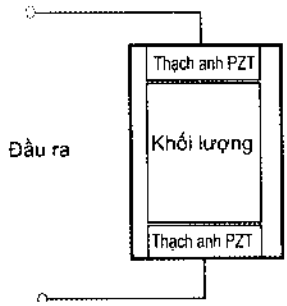
Gia tốc kế áp-điện

Các gia tốc kế áp-điện được sử dụng rộng rãi với mục đích đo gia tốc, độ va đập và dao động. Chúng là các bộ chuyển đổi truyền động cơ bản với các tín hiệu ra lớn và kích thước tương đối nhỏ và chúng là các bộ nguồn tự tạo không cần cấp nguồn từ bên ngoài. Chúng có thể hoạt động ở tần số tự nhiên rất cao và do đó thích hợp cho các ứng dụng tần số cao và các phép đo va đập.

Các thiết bị này sử dụng một khối lượng gắn trực tiếp với thành phần áp-điện hoặc tinh thể như hình 19.23. Khi áp một chuyển động biến đổi vào gia tốc kế, tinh thể chịu một lực kích thích biến đổi ($F = ma$), gây nên một điện tích q tỷ lệ được hình thành ngang qua nó. Nên:

$$q = d_{ij}F = d_{ij}ma \tag{19.21}$$

trong đó q là điện tích hình thành và d_{ij} là hệ số áp-điện của vật liệu.



HÌNH 19.23 Sự bố trí của một gia tốc kế áp-điện dạng nén

Phương trình trên chỉ ra rằng, điện thế đầu ra của vật liệu áp-điện phụ thuộc vào thuộc tính cơ của nó d_{ij}. Hai loại tinh thể áp-điện thường được sử dụng là gồm lead-zirconate titanate (PZT) và tinh thể thạch anh (crystalline quartz). Chúng là các vật liệu tự sinh điện và sản sinh ra điện tích lớn tuỳ theo kích thước của chúng. Hệ số biến dạng áp-điện của PZT gấp khoảng 150 lần so với thạch anh. Theo đó, các PZT là nhạy và nhỏ hơn nhiều so với thạch anh. Các gia tốc kế này được dùng trong các ứng dụng tần số cao. Tần số ban đầu vào khoảng 100 Hz. Các thiết bị này không có đáp ứng 1 chiều. Vì các gia tốc kế áp-điện có cản trở cơ khí tương đối thấp, ảnh hưởng của chúng lên chuyển động của hầu hết các cấu trúc là không đáng kể.

Trên phương diện toán học, hàm truyền của chúng giống một hệ thống bậc 3 được viết như sau:

$$\frac{e_0(s)}{a(s)} = \frac{K_q \tau s}{C\omega_n^2(\tau s+1)(s^2/\omega_n^2 + 2\zeta s/\omega_n + 1)} \tag{19.22}$$

trong đó K_q là hằng số áp-điện liên quan tới điện tích (C cm), τ là hằng số thời gian của thạch anh và s là biến Laplace. Có một điểm cần lưu ý là thạch anh không có hằng số thời gian τ, nhưng

hằng số thời gian được quan sát khi các gia tốc kế được nối với một mạch điện, ví dụ một mạch *RC*.

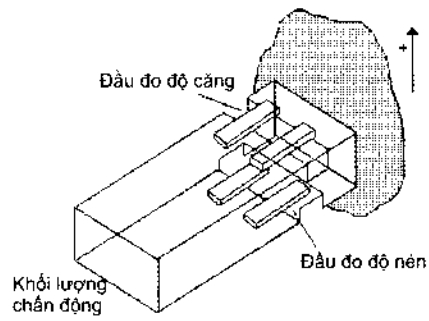
Đáp ứng tần số thấp được giới hạn bởi đặc tính áp-điện $\tau s/(\tau s+1)$, trong khi đáp ứng tần số cao liên quan tới đáp ứng cơ khí. Hệ số giảm chấn ζ là rất nhỏ, thường nhỏ hơn 0.01 hoặc gần 0. Độ chính xác đáp ứng tần số thấp yêu cầu τ rộng, nó thường được thực hiện bởi việc sử dụng biến áp điện trở cao. Ở các tần số rất thấp, các hiệu ứng nhiệt có thể ảnh hưởng thường xuyên lên các đặc tính hoạt động.

Trong các gia tốc kế áp-điện, hai cấu hình thiết kế cơ bản được sử dụng: các dạng ứng suất nén và ứng suất trượt. Trong các gia tốc kế dạng nén, tinh thể được giữ ở dạng nén bởi một phần tử có tải trọng đặt trước; do đó dao động thay đổi ứng suất trong dạng nén. Trong gia tốc dạng ứng suất trượt, dao động đơn giản làm biến dạng tinh thể ở dạng trượt. Các gia tốc kế dạng nén có một khối lượng tương đối tốt cho tỷ lệ độ nhạy và từ đó nó hoạt động tốt hơn. Nhưng, vì vỏ làm việc như là một phần của hệ thống lo xo - khối lượng, nó có thể sinh ra một mặt phân cách giả trong đầu ra của gia tốc kế nếu được kích thích xung quanh tần số tự nhiên của nó.

Các gia tốc kế áp-điện có dải rộng các đặc tính và có nhiều nhà sản xuất. Ví dụ các đặc tính của một gia tốc kế va đập có thể có độ nhạy ở mức 0.004 pC/*g* và một tần số tự nhiên tới 250.000 IIz, trong khi một bộ được thiết kế cho các dao động ở mức thấp có thể có độ nhạy ở mức 1000 pC/*g* và tần số tự nhiên chỉ vào khoảng 7000 Hz. Chúng được sản xuất theo kích cỡ 3 x 3 mm với khối lượng 0.5 g, bao gồm cả các dây nối. Chúng có khoảng nhiệt độ tuyệt vời và một số được thiết kế để thích ứng với môi trường bức xạ của các phản ứng hạt nhân. Tuy nhiên, các gia tốc kế áp-điện theo xu hướng có độ nhạy cảm ngang trục lớn hơn các loại khác, khoảng 2 - 4%. Trong một vài trường hợp, độ nhạy cảm ngang trục lớn có thể được làm tối giản nhờ ta chọn ra hướng đúng của thiết bị trong suốt quá trình thiết lập. Các gia tốc kế này có thể được gắn với nút ren, với xi măng hoặc chất dính hoặc mâm cặp từ trường.

Gia tốc kế áp-trở

Các gia tốc kế áp-trở chủ yếu là các bán dẫn hiệu chuẩn độ biến dạng với các hệ số hiệu chuẩn lớn. Các hệ số hiệu chuẩn lớn từ tính kháng điện của vật liệu là phụ thuộc chủ yếu vào độ biến dạng, không chỉ phụ thuộc vào kích thước. Ảnh hưởng này có thể được làm tăng đáng kể bằng việc cho thêm vào bán dẫn các chất phụ gia ví dụ như silic. Tất cả các gia tốc kế áp-trở đều sử dụng hai hoặc bốn hiệu chuẩn hoạt động được sắp xếp thành một cầu Wheatstone. Sử dụng thêm các điện trở chính xác, như là một phần mạch điện, trong chuỗi với đầu vào để điều khiển độ nhạy, để cân bằng và để hạn chế những ảnh hưởng của nhiệt độ. Độ nhạy của một cảm biến áp-trở có được từ phản ứng mềm dẻo trong cấu trúc của nó và điện trở của vật liệu. Dây và điện trở dày hoặc mỏng có hệ số hiệu chuẩn thấp, như vậy, sự thay đổi điện trở dựa vào độ biến dạng là nhỏ. Hình 19.24 mô tả cấu trúc cơ khí của gia tốc kế áp-trở.



HÌNH 19.24 Gắn các gia tốc kế áp-điện và áp-trở vào các hệ thống quán tính

Các gia tốc kế áp-trở là hữu ích trong việc thu thập thông tin dao động ở các mức tần số thấp, ví dụ như dưới 1 Hz. Trong thực tế, chúng vốn là các cảm biến gia tốc không dao động. Nhìn chung chúng có độ rộng băng thông lớn, độ không tuyến tính nhỏ và độ dịch không và các đặc tính trễ tốt hơn khi so sánh chúng với các đặc điểm của gia tốc kế áp-điện. Chúng thích hợp để đo các biến đổi đột ngột trên 100.000 g.

Các đặc trưng điển hình của các gia tốc kế áp-trở như sau: Độ nhạy 100 mV/*g*, dải tần số từ 0 - 750 Hz, tần số cộng hưởng 2500 Hz, dải biên độ 25 g, tỷ lệ va đập 2000 g, và dải nhiệt độ 0 - 95°C, với tổng khối lượng khoảng 25 g.

Hầu hết các cảm biến áp-trở hiện tại được sản xuất từ một miếng đơn tinh thể silic. Nó mang lại sự ổn định hơn và giảm nhiệt hơn giữa các phần. Trong một phần tử đo dạng khối điển hình có một chip silic 1 mm kết hợp với 1 lò xo, khối lượng và một cầu gồm 4 nhánh. Các phần tử này được tạo thành bởi một đặc điểm của chất phụ gia trong khối silic phẳng nguyên bản. Tiếp sau sự khắc mòn của các kênh giải phóng sự hiệu chuẩn và đồng thời định nghĩa các khối lượng như các phần của silic trên bản gốc.

Gia tốc kế đo ứng suất

Các gia tốc kế đo ứng suất dựa trên các thuộc tính điện trở của các dây dẫn điện. Nếu một dây dẫn được kéo dài hoặc bị nén lại, điện trở của nó vốn phụ thuộc (a) vào chiều dài dây dẫn, và (b) thay đổi theo tính chất cơ bản của vật liệu và được gọi là áp-trở. Điều này chỉ ra rằng điện trở suất ρ của dây dẫn phụ thuộc vào ứng suất cơ khí đặt lên nó. Sự phụ thuộc này được biểu diễn theo hệ số đo:

$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \tag{19.23}$$

trong đó 1 thể hiện điện trở thay đổi theo chiều dài, 2ν chỉ ra điện trở thay đổi theo diện tích và $(d\rho/\rho)/(dL/L)$ nói rằng điện trở thay đổi theo tính chất áp-trở.

Có nhiều dạng đo ứng suất: đo dây kim loại không tiếp xúc, đo dây kim loại liên kết, đo lá kim loại liên kết, đo màng kim loại mỏng đặt trong chân không, đo bán dẫn liên kết và đo bán dẫn khuếch tán. Tuy nhiên, ở đây các đầu đo dây kim loại tiếp xúc hoặc không tiếp xúc thường được sử dụng rộng rãi hơn. Một phần của các gia tốc kế ứng suất được sử dụng, đặc biệt là dạng bán dẫn liên kết, giống như các chuyển đổi áp-trở, nhưng chúng nhạy với nhiệt độ cao, sự không tuyến tính và một số khó khăn khác. Tuy nhiên, cùng với sự phát triển của công nghệ gia công micro gần đây, các cảm biến này đã được cải thiện đáng kể, từ đó ta có thể tìm ra được nhiều ứng dụng mới.

Các gia tốc kế ứng suất không tiếp xúc sử dụng các sợi dây ứng suất giống như các phần tử lò xo và chuyển đổi chuyển động, bố trí tương tự như trong hình 19.25. Chúng hữu ích với các chuyển động thông thường và các phép đo dao động từ các tần số từ thấp đến trung bình. Với nhiều chủng loại có các đặc tính sau: thang đo từ ±5 g tới ±200 g, dải tần tự nhiên từ 17 - 800 Hz, điện thế kích thích 10 V DC hay AC, thang đầu ra ±20 mV tới ±50 mV, độ phân dải nhỏ hơn 0.1%, độ không chính xác thấp hơn 1 % dải đo và độ nhạy chéo trục nhỏ hơn 2%. Tỷ lệ suy giảm (sử dụng dầu nhờn silic) là 0.6 - 0.8 ở nhiệt độ phòng. Các thiết bị này nhỏ, nhẹ, thường dưới 25 g.

Các gia tốc kế ứng suất liên kết thông thường sử dụng một khối lượng được đỡ bởi một dầm uốn cong mỏng. Để đạt được độ nhạy lớn nhất, sự bù nhiệt và độ nhạy cho cả gia tốc chéo trục lẫn gia tốc góc người ta gắn các hiệu chuẩn ứng suất vào dầm này. Chúng có các đặc điểm tương tự với các gia tốc kế ứng suất không tiếp xúc nhưng chúng có kích cỡ và trọng lượng nặng hơn. Và thường sử dụng dầu silic để giảm chấn. Các đầu đo kiểu ứng suất bán dẫn được sử dụng rộng rãi như các cảm biến ứng suất trong các dầm công xôn và các dạng khối lượng của các gia tốc kế. Chúng cho phép các mức đầu ra cao (0.2 - 0.5 V). Thông thường một máy ±25 g có đáp ứng phẳng từ 0 đến 750 Hz, hệ số suy giảm 0.7, khối lượng là 28 g và nhiệt độ hoạt động từ -18°C tới +93°C. Một mô hình ±20000 g ba trục có đáp ứng phẳng từ 0 tới 15 kHz, hệ số suy giảm là 0.01, và dải bù nhiệt độ từ 0 - 45^0 C, và kích cỡ là 13 x 10 x 13 mm^3 và khối lượng là 10 g.

Các gia tốc kế tĩnh điện

Các gia tốc kế tĩnh điện hoạt động dựa trên định luật Cu lông giữa hai vật mang điện; do đó, chúng là ở dạng điện dung. Phụ thuộc vào nguyên tắc hoạt động và các mạch ngoài chúng có thể được phân loại chung thành (a) gia tốc kế phản hồi lực tĩnh điện và (b) các gia tốc kế điện dung vi phân.

Gia tốc kế phản hồi lực tĩnh điện

Một gia tốc kế phản hồi lực tĩnh điện bao gồm 1 điện cực, với khối lượng m và diện tích S, treo trên một cần trục nhẹ có thể di chuyển tương đối so với một vài điện cực cố định. Khoảng trống nhỏ h giữa trục và các điện cực cố định được duy trì bởi một hệ thống servo cân bằng lực, nó có khả năng biến đổi điện thế của các điện cực trong tương ứng tới các tín hiệu từ cơ cấu đo sự thay đổi tương đối trong khoảng trống. Biểu diễn toán học của điện trường giữa các điện cực:

$$E = \frac{\mathrm{Q}}{\varepsilon k S} \tag{19.24}$$

trong đó E là mật độ hoặc gradien điện thế (dV/dx), Q là điện lượng, S là diện tích của vật dẫn và k là hằng số chất điện môi của khoảng trống bề mặt vật dẫn.

Từ công thức này, ta có thể biểu diễn lực trên một đơn vị diện tích điện cực (N/m^2) như sau:

$$\frac{F}{S} = \frac{\mathrm{Q}^2}{2\varepsilon k S^2} = \frac{\varepsilon k E^2}{2} \tag{19.25}$$

Xem một điện cực là cố định và cực kia có thể di chuyển và giả sử rằng điện cực có thể di động có điện thế V_1 và cực kia có điện thế V_2. Cường độ điện trường trong khoảng trống E được tính như sau:

$$E_1 = \frac{V_1 - V_2}{h} \tag{19.26}$$

Từ đó ta tìm ra lực tương tác như sau:

$$F_1 = \frac{\varepsilon k E^2 S}{2h^2} = \frac{\varepsilon k (V_1 - V_2)^2 S}{2h^2} \tag{19.27}$$

Với sự có mặt của gia tốc, nếu V_2 được hiệu chỉnh để ngăn trở cực có thể di động tới vị trí không, biểu thức quan hệ với gia tốc và điện thế được viết như sau:

$$a = \frac{F_1}{m} = \frac{\varepsilon k (V_1 - V_2)^2 S}{2h^2 m} \tag{19.28}$$

Thiết bị này như mô tả chỉ có thể đo gia tốc theo một hướng và đầu ra có đặc tính dạng quán tính bậc hai:

$$(V_1 - V_2) = D\sqrt{a} \tag{19.29}$$

trong đó D là hệ số tỷ lệ.

Có thể tuyến tính hoá đầu ra theo nhiều cách, một trong số đó là phương pháp góc phần tư. Nếu bộ điều khiển servo tạo ra điện thế $-V_2$ so với các điện cực khác, lực tương tác giữa điện cực này và điện cực di chuyển trở thành:

$$a = \frac{F_2}{m} = \frac{\varepsilon k (V_1 + V_2)^2 S}{2h^2 m} \tag{19.30}$$

và phương trình cân bằng lực của điện cực di chuyển khi thiết bị có gia tốc a là:

$$ma = F_2 - F_1 = \frac{\varepsilon kS[(V_1 + V_2)^2 - (V_1 - V_2)^2]}{2h^2}$$

hay:

$$ma = F_2 - F_1 = \frac{2\varepsilon kSV_1V_2}{h^2} \tag{19.31}$$

Từ đó, nếu điện thế V_1 được giữ cố định và hệ số khuếch đại thu được từ vòng lặp điều khiển đủ lớn để các dao động trong khoảng trống là không đáng kể, gia tốc trở thành hàm tuyến tính của điện thế ra V_2 của bộ điều khiển.

Sự khó khăn cơ bản trong việc cơ khí hoá gia tốc kế lực tĩnh điện là cường độ điện trường tương đối cao để thu được một lực duy nhất. Độ suy giảm có thể được đưa ra do điện hoặc bởi tính nhớt của môi trường khí ở trong khoảng không giữa hai điện cực nếu khoảng trống h là đủ nhỏ. Hiện tượng đánh thủng điện thế phi tuyến cho phép gradien lớn hơn trong những khoảng trống rất nhỏ.

Một gia tốc kế tĩnh điện điển hình có những đặc điểm sau: dải ±50 g, độ phân giải 10^{-3} g , độ nhạy 100 mV/*g*, độ phi tuyến <1% toàn thang, độ nhạy chuyển đổi <1% toàn thang, độ nhạy với nhiệt $6x10^{-4}$/K, va đập cơ khí 10.000*g*, nhiệt độ hoạt động -45^0 C đến 90^0C, nguồn nuôi 5 V DC, và trọng lượng 45 g. Ưu điểm chính của gia tốc kế tĩnh điện là kết cấu cơ khí rất đơn giản, yêu cầu nguồn thấp, không có các nguyên nhân dẫn đến hiện tượng trễ, hệ số nhiệt 0 và dễ che chắn tránh các nguồn nhiễu.

Gia tốc kế điện dung vi phân

Nguyên tắc để thiết kế các gia tốc kế này là sự thay đổi điện dung tương ứng với gia tốc tác dụng. Trong dạng này, người ta tạo ra một khối lượng địa chấn của gia tốc kế như phần tử di động của một bộ dao động điện. Khối lượng địa chấn được đỡ bởi một dầm đàn hồi di chuyển song song từ chân đế. Hệ thống này được đặt để có một tần số danh nghĩa xác định cụ thể khi không bị làm nhiễu. Nếu thiết bị là có gia tốc, tần số sẽ biến đổi cao hơn hoặc thấp hơn giá trị tần số danh nghĩa phụ thuộc vào hướng của gia tốc.

Khối lượng địa chấn mang theo một điện cực được đặt đối diện với các điện cực gốc cố định mà nó xác định các tụ điện biến đổi. Các điện cực gốc cố định xác định trước để đảm bảo duy trì dao động trong một khoảng thay đổi của điện dung xác định bởi gia tốc tác động. Giá trị điện dung của tụ C biến thiên được tính theo:

$$C = \frac{\varepsilon kS}{h} \tag{19.32}$$

trong đó k là hằng số của chất điện môi, ε hằng số điện môi của không gian tự do chuyển động của điện cực, S là diện tích điện cực và h là khoảng cách biến thiên.

Gọi độ lớn của khoảng không gian tại gia tốc bằng 0 là h_0, giá trị của h tương ứng với gia tốc a có thể được viết như sau:

$$h = h_0 + \frac{ma}{K} \tag{19.33}$$

trong đó m là khối lượng vật, K là hằng số lò xo, do vậy:

$$C = \frac{\varepsilon kS}{h_0 + (ma/K)} \tag{19.34}$$

Ví dụ như, tần số của dao động của mạch dạng trở kháng được cho bởi biểu thức:

$$f = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC} \tag{19.35}$$

Thay giá trị C ở (19.34) vào (19.35), ta được:

$$f = \frac{\sqrt{6}\left[h_0 + (ma/K)\right]}{2\pi R\varepsilon kS} \tag{19.36}$$

Đặt $B = \sqrt{6}/(2\pi R\varepsilon kS)$ biểu thức được viết lại như sau:

$$f = Bh_0 + \frac{Bma}{K} \tag{19.37}$$

Số hạng đầu tiên của biểu thức bên phải biểu diễn tần số lệch không cố định f_0 và số hạng thứ hai thể hiện sự thay đổi của tần số lấy ra từ gia tốc, do đó biểu thức được viết lại như sau:

$$f = f_0 + f_a \tag{19.38}$$

Nếu so sánh tần số đầu ra với một nguồn độc lập của một tần số không đổi f_0, do đó f_a có thể được tính dễ dàng.

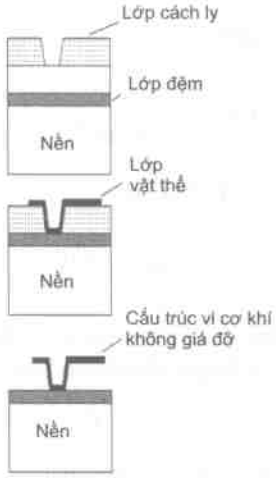
Thông thường kiểu gia tốc kế loại này dựa trên màng chắn mỏng uốn hình xoắn ốc tạo ra lò xo, khối lượng thử và một đĩa di động cần cho tụ điện vi phân. Chuyển động của đĩa giữa các điện cực đẩy không khí song song với bề mặt đĩa và qua các lỗ trong đĩa để tạo màng đàn hồi nén. Do độ nhớt của không khí có độ nhạy thấp hơn của dầu, hằng số suy giảm mong muốn là 0.7 và rất khó thay đổi đến 15%. Các thiết bị này có thể cho phép với dải đo rộng từ ±0.2g (4 Hz) tới 1000 g (3000 Hz), độ nhạy chéo trục < 1% và mức đầu ra tối đa là ±1.5 V. Kích cỡ của một thiết bị thông thường vào khoảng 25 mm^3 với một khối lượng 50 g.

Gia tốc kế micro và nano

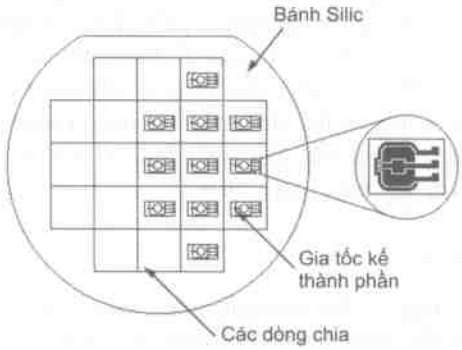
Vào những năm cuối của thập kỷ 70 công nghệ mạch xử lý tích hợp (IC) phẳng được biến đổi quá trình gia công micro để chế tạo các cấu trúc cơ điện từ 3 chiều. Các gia tốc kế và các cảm biến áp suất là các cảm biến IC đầu tiên. Gia tốc kế đầu tiên được phát triển vào năm 1979. Từ đó trở đi công nghệ chế tạo ngày càng phát triển ngày nay rất nhiều loại gia tốc kế khác nhau đã xuất hiện. Hầu hết các cảm biến đều sử dụng gia công khối micro hơn là các kỹ thuật gia công bề mặt micro. Trong gia công khối micro, độ cong, các dầm công xôn và các thành phần cơ bản khác của gia tốc kế được sản xuất từ các khối silic để sử dụng các tính chất cơ khí của các tinh thể silic. Với thiết kế và quy trình phim hợp lý, gia công khối micro đem lại các gia tốc kế hoàn toàn ổn định và bền vững.

Công nghệ khắc có chọn lựa nhiều lớp của các tấm phim mỏng, hay gia công micro bề mặt, cho phép các vi cấu trúc di động để được sản xuất trên các màng silic siêu mỏng. Với bề mặt gia công micro, các lớp của cấu trúc vật liệu được bố trí và lấy làm mẫu như hình 19.25. Các cấu trúc này được tạo thành bởi silic tổng hợp và các vật liệu phù hợp khác như các oxit silic. Các vật liệu hoạt động như một lớp trực tiếp được khắc ăn mòn đi để sinh ra một cấu trúc đứng tự do. Công nghệ gia công bề mặt cũng cho phép các cấu trúc nhỏ hơn và phức tạp hơn được chế tạo theo nhiều lớp trên một nền đơn. Hình 19.26 mô tả một ví dụ cơ bản của gia công micro gia tốc kế hiện đại. Người ta gắn nhiều gia tốc kế lên một chip đơn, đo gia tốc theo các hướng x, y, và z. Cũng chính chip này đưa ra quy định về tín hiệu chính. Lối ra từ chip thường là tín hiệu dưới dạng số.

Tất cả các gia tốc kế dạng micro hoặc nano đều phát hiện gia tốc qua việc đo chuyển động tương đối giữa khối lượng mẫu và nền treo. Khối lượng mẫu được treo trên nền qua một lò xo cơ khí. Khi cảm biến chịu gia tốc, khối lượng mẫu có xu hướng trở về vị trí cân bằng và do đó nó dịch chuyển đối với nền chuyển động. Việc đo các dịch chuyển này nhờ khả năng của các phương pháp áp-trở hoặc áp-điện sử dụng công nghệ CMOS. Mạch điện tử có nhiệm vụ triệt tiêu lệch không, do vậy ổn định lệch không, ổn định hệ số khuếch đại, ổn định lệch không gia tốc, bù nhiệt, tiền lọc, giảm nhiễu đầu ra...



HÌNH 19.25 Các bước gia công micro để sản xuất các gia tốc kế nhỏ và siêu nhỏ



HÌNH 19.26 Nhiều gia tốc kế trên một chip đơn

Nguyên tắc hoạt động của một số gia tốc kế micro tương tự như cân bằng lực điện dung hay gia tốc kế dầm dao động đã được nêu ở phần trước. Kỹ thuật sản xuất có thể thay đổi tuỳ theo các nhà sản xuất khác nhau. Tuy nhiên, gia tốc kế dầm dao động thường được quan tâm hơn vì nó có thuộc tính khe hở không khí tốt hơn và cải thiện tốt hơn đặc tính lệch không.

Các gia tốc kế dầm dao động, còn gọi là các chuyển đổi lực dầm cộng hưởng, sinh ra một gia tốc dọc theo trục dương tín hiệu đầu vào đặt ở phần căng của khung dao động. Do đó, tần số cộng hưởng của dầm dao động tăng hoặc giảm khi có gia tốc.

Trong DETF, một bộ tạo dao động điện kết hợp năng lượng vào trong hai khung dao động để giữ chúng dao động tại tần số cộng hưởng của chúng. Các dầm dao động 180° về pha để huỷ các lực hoạt động tại điểm cuối. Ảnh hưởng huỷ động học của thiết kế DETF ngăn năng lượng bị mất mát qua các điểm cuối của dầm. Từ đó bộ cộng hưởng cân bằng động DETF có một nhân tố Q cao, dẫn đến một mạch dao động ổn định. Các tín hiệu gia tốc được sinh ra từ một bộ tạo dao động như là một sóng vuông được điều biến tần số được sử dụng cho giao diện số.

Tần số cộng hưởng của hệ thống phải lớn hơn nhiều so với bất kỳ một gia tốc đầu vào nào và điều này đã hạn chế dải đo. Trong một gia tốc kế gia công micro, sử dụng trong các ứng dụng quân sự, có các đặc tính sau: phạm vi ±1200 *g*, độ nhạy 1.11 Hz/*g*, băng thông 2500 Hz, tần số DETF không tải 9952 Hz. Tần số tại +1200 *g* là 11.221 Hz, tần số tại -1200 *g* là 8544 Hz và độ nhạy nhiệt độ là 5 mg/°C. Kích thước của gia tốc kế: đường kính 6 mm, chiều dài 4.3 mm, khối lượng khoảng 9 g. Thời gian bật nhỏ hơn 60 s, nguồn nuôi từ +9 đến +16 V DCvà tín hiệu ra trung bình là một xung vuông 9000 Hz.

Bề mặt gia công micro được sử dụng để tạo ra các gia tốc kế dùng cho các ứng dụng đặc biệt, như các ứng dụng về túi khí trong công nghiệp ô tô. Một tụ điện với ba lớp khác nhau được tạo bởi các lớp xen kẽ của silic tổng hợp và thuỷ tinh phosphosilicate (PSG) trên một tấm dài 100mm, dày 0.38mm. Một miếng silic dùng làm nền cho kết cấu cơ khí. Một lớp đệm lò xo ở giữa được treo bởi bốn thanh trợ giúp. Cấu trúc di động này chính là khối lượng chấn động cho gia tốc. Các lớp silic tổng hợp ở trên hoặc dưới là các đĩa cố định cho các tụ điện vi phân. Tấm kính được ăn mòn dùng axit hydrofluoric (HF).

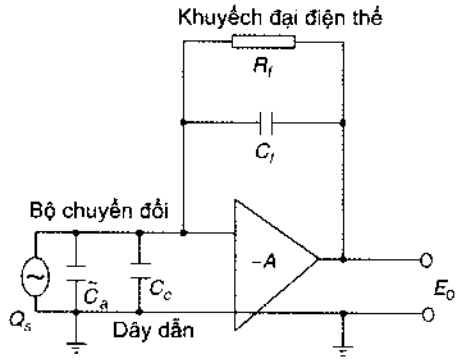
Chuẩn hoá tín hiệu

Các bộ chuẩn hoá tín hiệu thông thường thích hợp cho quá trình giao tiếp từ gia tốc kế tới các máy tính hoặc các thiết bị khác cho quá trình xử lý tiếp theo. Nhìn chung, các tín hiệu thô mới tạo ra được khuếch đại và lọc phù hợp bởi các mạch lọc trong các gia tốc kế. Tuy nhiên, các bộ chuyển đổi áp-trở và áp-điện yêu cầu các bộ chuẩn hoá tín hiệu đặc biệt với các đặc tính cụ thể sẽ được thảo luận sau.

Gia tốc kế áp-điện

Các gia tốc kế áp-điện cung cấp một năng lượng nhỏ tới các bộ biến đổi tín hiệu vì chúng có nguồn trở kháng cao. Có thể xem mạch tương đương của một gia tốc kế áp-điện như một tụ điện hoạt động và tự tích điện cho chính nó khi chịu tải cơ khí. Sự chọn lựa các phần tử của mạch biến đổi tín hiệu ngoài phụ thuộc vào các đặc tính của mạch tương đương. Một cách tiếp cận phổ thông nhất là khuếch đại điện tích vì hệ số khuếch đại của hệ thống và đáp ứng ở tần số thấp của bộ khuếch đại là hoàn toàn xác định. Hoạt động của mạch cũng phụ thuộc vào độ dài dây nối và điện dung của gia tốc kế. Trong nhiều ứng dụng, các dây nối chống nhiễu là cần thiết để tránh các điện tích xuất hiện do các chuyển động của các dây nối.

Khuếch đại điện tích (có trở kháng đầu vào khoảng 1000 MΩ) trước tiên chuyển hoá điện tích đầu vào thành điện áp, sau đó khuếch đại điện áp này. Nó bao gồm một chuyển đổi điện tích có đầu ra điện áp, nó là kết quả của tín hiệu điện tích đầu vào thông qua một tụ điện phản hồi để duy trì điện tích đầu vào ở mức đầu vào gần giá trị không, như trong hình 19.27.



HÌNH 19.27 Mạch khuếch đại điện tích điển hình

Nhờ có loại khuếch đại thuật toán phản hồi, đầu vào bộ khuếch đại được giữ ở mức 0 V; do đó, hiện tượng này giống như khi ngắn mạch ở đầu vào. Do vậy, điện tích đầu vào được lưu trữ ở trong tụ điện phản hồi, sinh ra một điện áp qua nó và điện áp này là bằng với giá trị của điện tích đầu vào được chia bởi điện dung của tụ điện phản hồi. Hàm truyền của mạch mô tả quan hệ giữa điện áp đầu ra và độ lớn gia tốc đầu vào có thể được xác định bởi chuyển đổi phức sau:

$$\frac{E_0}{a_0} = S_a jR_f C_f \omega \left[1 + jR_f C_f \omega \left(1 + C_f + \frac{C_a + C_c}{1+G} \right) \right] \qquad (19.39)$$

trong đó, E_0 là chuyển đổi điện tích đầu ra (V), a_0 là độ lớn gia tốc (m/s^2), S_a là độ nhạy gia tốc kế (mV/g), C_a là điện dung gia tốc kế (F), C_c là điện dung dây dẫn (F), C_f là điện dung phản hồi (F), R_f là điện trở vòng phản hồi và G là hệ số khuếch đại vòng hở của bộ khuếch đại.

Trong hầu hết các ứng dụng, C_f được chọn đủ lớn so với $(C_a + C_c)/(1+G)$ để hệ số khuếch đại độc lập với độ dài của dây dẫn. Trong trường hợp này, người ta đơn giản hoá mẫu số của phương trình để đưa ra một hệ bậc nhất với:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_c C_f} \tag{19.40}$$

với độ dốc là 10 dB/decade. Trong thực tế, đáp ứng ở tần số thấp của hệ là một hàm của các thành phần điện hoàn toàn xác định và không thay đổi theo độ dài của dây dẫn. Đây là một đặc tính quan trọng khi đo các dao động tần số thấp.

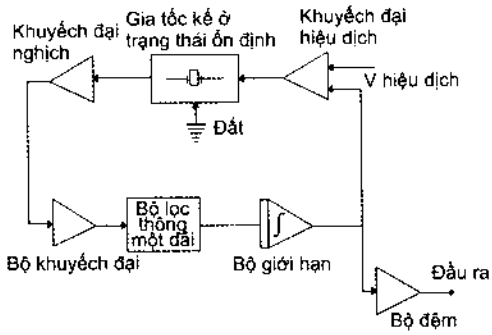
Nhiều gia tốc kế áp-điện được sản xuất với bộ tiền khuếch đại và các mạch chuẩn hoá tín hiệu được đặt trong cùng một vỏ. Một số bộ tiền khuếch đại gia tốc kế bao gồm nhiều bộ tích phân để chuyển đổi các đầu ra tỷ lệ với gia tốc thành tín hiệu vận tốc hoặc dịch chuyển. Để làm tắt dần nhiễu và các tín hiệu dao động nằm ngoài dải tần số quan tâm, người ta sử dụng các bộ tiền khuếch đại và các bộ lọc thông thấp hoặc thông cao. Điều này tránh sự giao thoa của các nhiễu điện với các tín hiệu bên trong dải tần số tuyến tính của gia tốc kế. Tuy nhiên, có thuận lợi là những thiết bị này thường có hai hằng số thời gian, nội và ngoại. Sự lẫn lộn của hai hằng số thời gian này có thể dẫn đến một số vấn đề, đặc biệt ở vùng tần số thấp. Các nhà sản xuất thông qua các thiết kế hoặc kết cấu thường cố định các hằng số thời gian nội. Tuy nhiên, cần phải tính toán cẩn thận các ảnh hưởng của các hằng số thời gian ngoại thông qua điện kháng phù hợp.

Chuyển đổi áp-trở

Các chuyển đổi áp-trở nhìn chung có tín hiệu đầu ra lớn, điện trở đầu ra thấp và các nhiễu nội thấp. Tất cả những thiết bị này được thiết kế cho các điện áp kích thích không đổi. Chúng thường được chuẩn hoá cho các dòng điện kích thích không đổi để tránh các nhiễu bên ngoài. Chúng được ghép với một mạch cầu điện trở. Một số có nhánh trở hoạt động, cùng với hai điện trở chính xác cố định để cho phép chuẩn hoá các nhánh.

Gia tốc kế micro

Trong gia tốc kế micro, các mạch chuẩn hoá tín hiệu được tích hợp trên cùng một chip với cảm biến. Sơ đồ khối trong hình 19.28 đưa ra một ví dụ điển hình của mạch biến đổi tín hiệu. Với gia tốc kế này, hệ thống điện tử được điều khiển bằng một mạch dao động thạch anh và tín hiệu ra của mạch tạo dao động là tín hiệu gia tốc được điều tần. Một số mạch điện cung cấp đầu ra dạng xung vuông có thể làm giao diện số trực tiếp. Trong những trường hợp này không yêu cầu cho bộ chuyển đổi (A/D) do đó hạn chế một trong những nguyên nhân chính gây lỗi. Ở các loại gia tốc kế khác, các mạch biến đổi tín hiệu như các bộ chuyển đổi A/D được tích hợp ngay trên chip.



HÌNH 19.28 Sơ đồ một mạch điều biến tín hiệu điển hình cho các gia tốc kế đơn chip đơn

Gia tốc kế phản hồi lực

Các tín hiệu từ các gia tốc kế phản hồi lực thường được số hoá để dùng trong các hệ thống số. Một giải pháp thông thường là dùng các bộ chuyển đổi điện thế thành tần số hoặc dòng điện thành tần số để chuyển đổi các tín hiệu tương tự thành các chuỗi xung. Các bộ chuyển đổi này rất đắt, thường đắt hơn nhiều so với các gia tốc kế và gây ra thêm sai lệch.

Ở đây, các hệ thống GPS ngày càng trở nên có ý nghĩa trong các cơ cấu đo vị trí. Do các tính chất động, hiệu ứng màn chắn, các hiệu ứng đa đường của anten và để cung cấp thêm cho các hệ thống tới hạn như là máy bay, nhiều trong số những hệ thống này cần sự trợ giúp quán tính, bó hẹp trong các gia tốc kế và các con quay hồi chuyển. Với sự phát triển của công nghệ gia công micro, trong tương lai chúng ta sẽ có các hệ thống trợ giúp quán tính GPS nhỏ và mang lại nhiều thuận lợi. Sự phát triển trên sẽ yêu cầu quá trình xử lý tín hiệu với khối lượng lớn và có độ chính xác cao. Cần phải xử lý các dải động học theo bậc từ 1000,000 tới 1 (ví dụ 30-32 bit). Để đạt được các yêu cầu chính xác, một thách thức lớn đang chờ đợi các nhà làm về xử lý tín hiệu.

Tài liệu tham khảo

[1] Bentley, J. P., *Principles of Measurement Systems*, 2nd ed., Burnt Mill, UK: Longman Scientific and Technical, 1988.

[2] Doebelin, E. O., *Measurement Systems: Application and Design*, 4th ed., Singapore: McGraw-Hill, 1990.

[3] Frank, R., *Understanding Smart Sensors*, Boston: Artech House, 1996.

[4] Harris, C., *Shock and Vibration Handbook*, 4th ed., McGraw-Hill, 1995.

[5] Holman, J. P., *Experimental Methods for Engineers*, 5th ed., Singapore: McGraw-Hill, 1989. FIGURE 19.28 A typical signal conditioning arrangement for single chip microaccelerometers. ©2002 CRC Press LLC

[6] Lawrance, A., *Modern Inertial Technology-Navigation, Guidance, and Control*, Springer-Verlag, New York, 1993.

[7] McConnell, K. G., *Vibration Testing: Theory and Practice*, New York: Wiley, 1995.

[8] *Machine Vibration: Dynamics and Control*, London: Springler, 1992–1996.

[9] *Measuring Vibration*, Bruel & Kjaer, 1982.

[10] Sydenham, P. H., Hancock, N. H., and Thorn, R., *Introduction to Measurement Science and Engineering*, New York: Wiley, 1989.

[11] Tompkins, W. J. and Webster, J. G., *Interfacing Sensors to the IBM PC*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1988.

19.3 Đo lực

M. A. Elbestawi

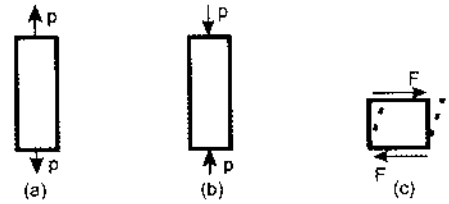
Lực là một đại lượng vectơ, được định nghĩa như là tác nhân gây ra gia tốc hoặc phản ứng cụ thể của một vật. Chương này sẽ giới thiệu về các phương pháp được ứng dụng để xác định độ lớn của những lực này.

Nhận xét chung

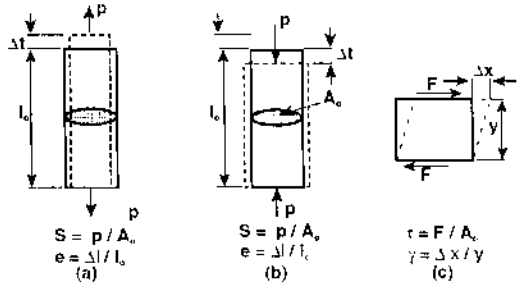
Việc xác định hoặc đo các lực phải theo những nhận xét sau: Nếu các lực tác dụng lên một vật mà không sinh ra gia tốc, chúng phải có dạng một *hệ lực cân bằng*. Hệ này được xem như một hệ cân bằng tĩnh. Các lực tác dụng lên vật có thể được chia thành hai loại: nội lực do các phần tử riêng biệt của vật tác dụng lẫn nhau, và ngoại lực. Nếu một vật được đỡ bởi những vật khác trong khi chịu tác dụng của các lực, thì sự biến dạng và/hoặc dịch chuyển sẽ được sinh ra ở điểm tiếp xúc giữa các vật. Các nội lực sẽ phân bố trên vật cho đến khi trạng thái cân bằng của vật được thiết lập và vật lúc đó được coi như ở trong trạng thái kéo, nén hoặc trượt. Ở mục này, khi xét một vật ta thừa nhận rằng các nội lực tác dụng theo cặp, hai lực có độ lớn bằng nhau và ngược chiều nhau, trong khi các ngoại lực thì tác dụng độc lập.

Định luật Hooke

Đây là cơ sở cho việc tính toán các lực được sinh ra khi một vật bị thay đổi dưới tác dụng của ngoại lực. Do đó, việc tìm hiểu về biến đổi cơ học của các loại vật liệu là rất hữu ích. Khi một tấm kim loại chịu kéo, nén dọc trục hoặc bị biến dạng (hình 19.29), nó sẽ co giãn đàn hồi cho đến khi các ứng suất thẳng (S) và ứng suất biến dạng (τ) đạt đến các giá trị tới hạn và sau đó nó sẽ ở trạng thái biến dạng dẻo [1].



HÌNH 19.29 Khi một tấm kim loại bị kéo dọc trục (a), nén dọc trục (b). hoặc bị biến dạng (c), nó sẽ đàn hồi đến khi ứng suất pháp tuyến hoặc ứng suất biến dạng đạt giá trị tới hạn



HÌNH 19.30 Ứng suất đàn hồi và sức căng cho: (a) kéo dọc trục; (b) nén dọc trục; (c) biến dạng [1]

Trong miền biến dạng đàn hồi, các nguyên tử tạm thời bị dịch chuyển nhưng chúng sẽ trở về trạng thái cân bằng của chúng khi các lực không tác dụng nữa. Ứng suất (S hoặc τ) và sức căng (e hoặc γ) được định nghĩa như trong hình 19.30:

$$\nu = -\frac{e_2}{e_1} \tag{19.41}$$

Hệ số Poisson (ν) là tỷ lệ biến dạng theo phương ngang (e_2) và phương thẳng đứng (e_1) trong trường hợp nén hoặc kéo. Trong miền đàn hồi, đối với kim loại, ν nằm trong khoảng từ 1/4 tới 1/3. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong miền đàn hồi được cho bởi định luật Hooke:

$$S = Ee \text{ (kéo hoặc nén)} \tag{19.42}$$

$$\tau = G\gamma \text{ (biến dạng)} \tag{19.43}$$

trong đó E và G lần lượt là môđun đàn hồi Young và môđun đàn hồi trượt. Một sự thay đổi nhỏ của thể tích ($\Delta V_{ol} / V_{ol}$) cũng có thể gây ra biến dạng đàn hồi, được biểu diễn như sau cho một vật liệu đẳng hướng (có các tính chất giống nhau theo mọi hướng):

$$\frac{\Delta V_{0l}}{V_{0l}} = e_1(1 - 2\nu) \tag{19.44}$$

Môđun khối (K bằng nghịch đảo của hệ số nén) được định nghĩa như sau:

$$K = \Delta p / \left(\frac{\Delta V_{ol}}{V_{ol}} \right) \tag{19.45}$$

trong đó Δp là áp suất tại một điểm cho trước. Đối với một vật rắn đàn hồi chịu nén dọc trục (S) thì K được tính như sau:

$$K = S / (\frac{\Delta Vol}{Vol}) = \frac{S}{e_1(1-2\nu)} = \frac{E}{1-2\nu} \tag{19.46}$$

Do đó, một vật rắn đàn hồi là có thể nén được khi $\nu < \frac{1}{2}$. Hầu hết các kim loại đều thỏa mãn điều kiện này. Phương trình 19.42 đối với trương hợp kéo dọc trục, có thể được tổng quát hoá thành một điều kiện đàn hồi ba chiều.

Lý thuyết đàn hồi đã được xây dựng và sử dụng như là cơ sở cho các kỹ thuật đo lực. Chú ý rằng phương pháp đo lực trong các ứng dụng riêng biệt là các ứng dụng rất đặc biệt và phải xem xét kỹ trong việc chọn lựa các kỹ thuật đo được đề cập sau đây.

Các phương pháp cơ bản của phép đo lực

Lực có thể được đo theo các cách sau:

1. Cân bằng các lực chưa biết với một khối lượng chuẩn thông qua một hệ cân bằng,
2. Đo gia tốc của một khối lượng đã biết,
3. Cân bằng nó với một lực từ trường hình thành bởi sự tương tác của một cuộn dây mang điện và một nam châm,
4. Phân bố các lực trên một diện tích cho trước để tạo nên áp lực và sau đó đo áp lực này,
5. Chuyển lực tác dụng thành sự biến dạng của một phần tử đàn hồi.

Có nhiều loại thiết bị đo lực khác nhau ứng với các phương pháp đo lực kể trên. Khó khăn chính của phép đo lực là việc thiết kế cảm biến. Cơ sở của việc thiết kế cảm biến gồm hai vấn đề sau:

1. Hình dạng ban đầu hoặc các ràng buộc vật lý bị chi phối bởi sử dụng thiết bị đo lực;
2. Các phương pháp chuyển đổi lực thành một dạng tín hiệu dễ xử lý (ví dụ như: tín hiệu điện hoặc các dịch chuyển được chia độ).

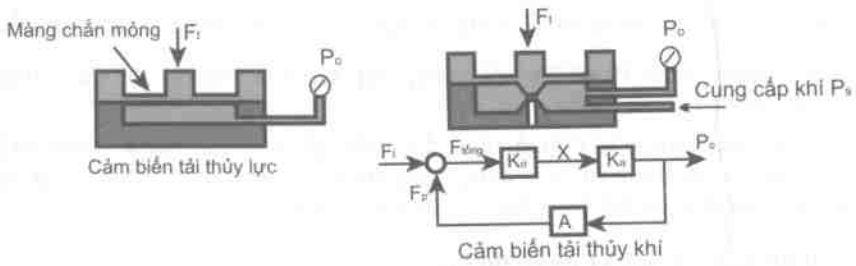
Những phần tiếp theo sẽ giới thiệu về các loại thiết bị dùng để chuyển đổi lực thành tín hiệu, và cuối cùng minh hoạ một vài ví dụ ứng dụng các thiết bị này để đo lực.

Các cảm biến lực

Để hiểu được đáp ứng của hệ thống thì cần phải có các cảm biến lực. Ví dụ các lực cắt tạo bởi một quá trình gia công có thể được kiểm tra để phát hiện dụng cụ hỏng hoặc để chẩn đoán các nguyên nhân gây hỏng trong điều khiển các thông số công nghệ và trong phân tích chất lượng bề mặt gia công. Các cảm biến lực được sử dụng để kiểm tra các lực tác động trong công nghiệp ô tô. Người ta đo các lực ở các điểm cuối của phần tử tác động để điều khiển quá trình và lắp ráp của rôbôt. Phương pháp đo lực trực tiếp thường được sử dụng trong các hệ thống cơ khí.

Một vài dạng cảm biến lực dựa trên phương pháp đo độ lệch gây ra bởi lực. Để đạt được tính khả thi trong kỹ thuật này cần phải có độ lệch tương đối cao (điển hình khoảng vài μm). Nhờ tính chất đàn hồi tuyệt vời của các lò xo xoắn nên có thể dùng chúng trong các cảm biến lực qua sự biến dạng của lò xo khi chịu tải. Mối quan hệ giữa lực và độ lệch trong vùng đàn hồi được chứng minh bằng định luật Hooke. Thông thường các cảm biến lực sử dụng các phần tử bị thay đổi điện trở dưới tác dụng của sức căng hoặc các tinh thể áp điện (thạch anh) có các vi mạch điện tử gắn liền. Các cảm biến này hầu như có thể kiểm soát được các lực biến thiên nhanh cũng như chậm.

Trong các kỹ thuật đo hiện có, một nhóm được gọi là cảm biến tải (hay còn gọi là load cells). Nhìn chung cảm biến tải gồm một khung cứng, một môi trường để đo các lực đặt vào và một đầu đo. Các cảm biến tải được sử dụng để đo các lực lớn, tĩnh hoặc biến thiên chậm với độ lệch rất ít và tương đối chính xác. Các độ chính xác điển hình là bậc của 0.1% của giá trị đo. Có thể áp dụng các phương pháp pháp khác nhau để đo các lực tuỳ thuộc vào thiết kế của cảm biến tải. Ví dụ hình 19.31 minh hoạ các loại cảm biến tải khác nhau có thể được sử dụng để đo các lực tương đối lớn với giá thành tương đối thấp. Cảm biến tải thuỷ lực dùng một khung rất cứng với một khoang trong chứa đầy chất lỏng. Khi có tải, áp lực của dầu tăng, và một đầu đo chính xác sẽ đọc giá trị đó.



HÌNH 19.31 Các kiểu cảm biến tải khác nhau [2]

Có thể sử dụng các kỹ thuật đo khác để đo lực, như là các chuyển đổi áp điện để phản ứng nhanh hơn khi tải thay đổi, phương pháp khí động học, đo độ biến dạng,... Các kỹ thuật đo chuẩn cần sự tính toán đặc biệt dựa trên các điều kiện yêu cầu cho phép đo.

Cảm biến tải đo sức căng

Cảm biến tải đo sức căng bao gồm một cấu trúc biến dạng đàn hồi khi chịu một lực và một mạng đầu đo sức căng sinh ra các tín hiệu điện tỷ lệ với độ biến dạng này. Ví dụ như cảm biến tải dạng dầm và dạng vành.

Thiết bị đo sức căng

Thiết bị đo sức căng sử dụng một sợi dây dài để tạo ra một điện trở mong muốn (thường vào khoảng 120 Ω) theo dạng một cuộn dây phẳng. Cuộn dây này sau đó được gắn và giữa hai tấm cách điện mỏng bằng giấy hoặc bằng nhựa. Một đầu đo như vậy không thể dùng để đo trực tiếp độ lệch được. Trước hết nó phải được cố định một cách phù hợp vào một bộ phận sẽ chịu biến dạng. Sau đó, chúng được đốt nóng ở 195°F (90°C) để loại bỏ hết độ ẩm. Vỏ của thiết bị được bảo vệ bởi sáp ong hoặc là nhựa thông. Điện trở giữa bộ phận sẽ chịu biến dạng và cuộn dây phải lớn hơn 50 MΩ. Tổng diện tích của tất cả các dây dẫn phải đủ nhỏ sao cho chất gắn kết có thể dễ dàng truyền lực cần thiết để làm biến dạng dây dẫn. Khi bộ phận chịu biến dạng bị tác dụng của sức căng, cuộn dây sẽ bị biến dạng và diện tích tiết diện ngang của dây sẽ giảm. Kết quả là điện trở của cuộn dây sẽ tăng và có thể dễ dàng xác định điện trở của cuộn dây. Để đo độ biến dạng rất nhỏ thì cần phải đo sự thay đổi rất nhỏ của điện trở trên một đơn vị điện trở $\Delta R / R$. Sự thay đổi của điện trở của một đầu đo sức căng thường nhỏ hơn 0.5 %. Có rất nhiều loại đầu đo sức căng với hình dáng và kích thước khác nhau, một số ví dụ điển hình được giới thiệu trong hình 19.32.

Việc sử dụng các đầu đo sức căng để đo lực yêu cầu phải tính toán cẩn thận đến các yếu tố về độ cứng và môi trường. Do đặc điểm thiết kế nên các đầu đo có độ dài ngắn hơn sẽ có tần số đáp ứng cao hơn (ví dụ: 660 Hz với đầu đo dài 0.2mm và 20 kHz với đầu đo dài 60 mm). Việc xem xét yếu tố môi trường tập trung chủ yếu vào nhiệt độ của đầu đo. Ta đã biết rằng điện trở là một hàm của nhiệt độ và do đó, các đầu đo sức căng chịu ảnh hưởng của sự thay đổi của nhiệt độ.

Do đó, nếu biết rằng nhiệt độ của đầu đo sẽ biến đổi theo bất kỳ ảnh hưởng nào, thì bù nhiệt độ là cần thiết để đảm bảo rằng kết quả đo lực là chính xác.

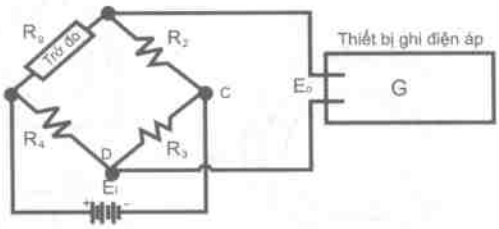
HÌNH 19.32 Hình dạng của các cảm biến sức căng điện trở lá kim loại: (a) một phần tử, (b) hai phần tử và (c) ba phần tử

Một cầu Wheatstone (hình 19.33) thường được sử dụng để đo sự thay đổi nhỏ của cường độ. Trong hình 19.33, không có dòng điện chạy qua điện kế (G) nếu bốn điện trở thoả mãn điều kiện cân bằng. Để hiểu được cách hoạt động của cầu Wheatstone [3], phải xác định điện thế tại các điểm C, D trong hình 19.33. Giả sử rằng R_1 là một đầu đo sức căng và phương trình ban đầu (19.47) được thoả mãn. Nếu bây giờ kéo dài R_1 sao cho điện trở của nó tăng một lượng $(+\Delta R)$, điện áp tại D sẽ tăng từ 0 đến một giá trị điện áp $(+\Delta V)$ và cũng xuất hiện một hiệu điện thế giữa C và D làm tăng dòng điện chạy qua C. Nếu R_4 cũng là một là một đầu đo sức căng và cùng thời gian này R_1 thay đổi một lượng $(+\Delta R)$, R_4 thay đổi một lượng $(-\Delta R)$, điện thế tại D sẽ tăng thành $(+2\Delta V)$. Cũng như thế, tại cùng thời điểm đó, R_2 thay đổi một lượng $-\Delta R$ và R_3 thay đổi $+\Delta R$, do đó điện thế điểm C sẽ giảm $-2\Delta V$ và hiệu điện thế giữa C và D bây giờ tăng lên là $4\Delta V$. Một điều hiển nhiên là độ nhạy sẽ tăng bốn lần nếu ta sử dụng hai đầu đo ở phần kéo và hai đầu đo khác ở phần nén:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \tag{19.47}$$

Người ta dùng quá trình ăn mòn quang để tạo nên cấu hình lưới của các đầu đo sức căng với điện trở là các lá kim loại. Các đầu đo ngắn nhất thường có là 0.20 mm và dài nhất là 102mm. Các điện trở tiêu chuẩn của đầu đo là 120 Ω và 350 Ω. Một đầu đo sức căng biểu diễn sự thay đổi điện trở $\Delta R/R$ sinh ra do sức căng theo hướng của các đường lưới bằng phương trình 19.48 (ở đó S_g là hệ số đầu đo hoặc hằng số căn chỉnh cho đầu đo):

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon \tag{19.48}$$



HÌNH 19.33 Cầu Wheatstone

Cảm biến tải dạng dầm

Các cảm biến tải dạng dầm thường được sử dụng để đo các tải trọng mức thấp [3]. Một dầm đòn bẩy đơn giản (hình 19.34(a)) với bốn đầu đo sức căng, hai ở trên mặt mặt, hai ở dưới đáy (tất cả các hướng dọc theo trục của dầm) được dùng như bộ phận đàn hồi (cảm biến) cho các cảm biến tải. Các đầu đo được quấn dây trong cầu Wheatstone như hình 19.34(b). Tải trọng P sinh ra một mômen $M = Px$ tại vị trí đầu đo (x), tạo ra các sức căng sau:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \frac{6M}{Ebh^2} = \frac{6Px}{Ebh^2} \tag{19.49}$$

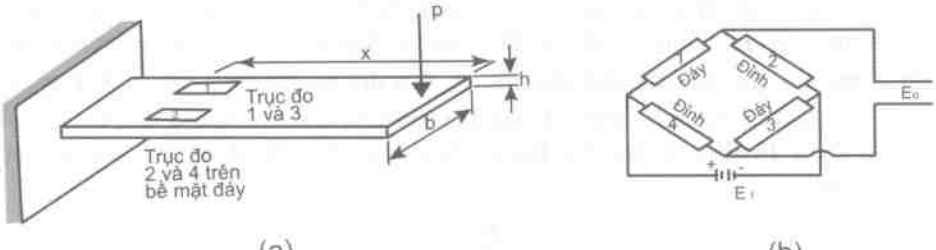
ở đó b và h lần lượt là độ rộng và chiều cao mặt cắt ngang của dầm. Do đó, đáp ứng của các đầu đo sức căng thu được từ phương trình (19.50):

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S_g Px}{Ebh^2} \tag{19.50}$$

Điện áp đầu ra E_0 từ cầu Wheatstone, ứng với tải P, thu được từ phương trình 19.51. Nếu giả sử rằng bốn đầu đo là như nhau, thì điện áp đầu ra sẽ là:

$$E_o = \frac{6S_g PxE_i}{Ebh^2} \tag{19.51}$$

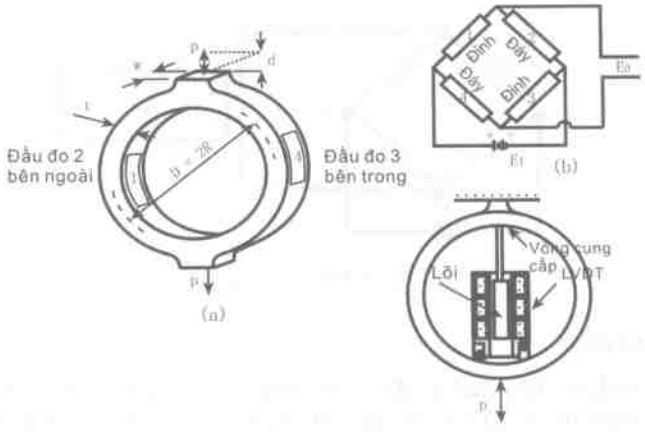
Dải đo và độ nhạy của cảm biến tải dạng dầm phụ thuộc vào hình dáng mặt cắt ngang của dầm, vị trí của điểm đặt lực và độ bền của vật liệu làm dầm.



HÌNH 19.34 Các cảm biến tải dạng dầm: (a) Chọn lựa các cảm biến tải dạng dầm (phần tử đàn hồi với các cảm biến sức căng) và (b) các vị trí cảm biến trong cầu Wheatstone

Cảm biến tải dạng vành

Các cảm biến tải dạng vành sử dụng một vành thử (hình 19.35) là phần tử đàn hồi. Phần tử vành có thể được thiết kế để tạo ra một dải rộng các tải trọng bằng cách thay đổi đường kính D, độ dày t hoặc độ sâu w của vành. Đầu đo sức căng hoặc biến áp vi sai tuyến tính (LVDT) có thể được sử dụng làm cảm biến.



HÌNH 19.35 Các cảm biến tải dạng vành: (a) Phần tử đàn hồi với các cảm biến sức căng; (b) Các vị trí đặt cảm biến sức căng trong cầu Wheatstone; (c) Phần tử đàn hồi với một cảm biến LVDT [3]

Tải trọng P tỷ lệ thuận với điện áp đầu ra E_0. Độ nhạy của thiết bị đo với một cảm biến LVDT phụ thuộc vào hình dáng hình học của vành (R, t và w), vật liệu chế tạo (E) và các đặc tính của LVDT (S và E_i). Dải hoạt động của cảm biến tải dạng vành được điều khiển bởi độ bền của vật liệu sử dụng làm vành.

Các phương pháp áp điện

Một vật liệu áp điện thể hiện một hiện tượng được biết đến là *hiệu ứng áp điện*. Hiệu ứng khẳng định rằng khi các tinh thể đàn hồi, không đối xứng bị biến dạng bởi một lực, một hiệu điện thế sẽ sinh ra bên trong mạng tinh thể bị biến dạng. Hiệu ứng này là thuận nghịch. Đó là, nếu đặt một điện thế vào các bề mặt của tinh thể, kích thước vật lý của tinh thể sẽ thay đổi [4]. Các phần tử biểu hiện tính áp điện đôi khi được biết như là các phần tử giới hạn điện.

Cường độ và độ phân cực của các điện tích bề mặt cảm ứng tỷ lệ với cường độ và hướng của lực tác dụng [4]:

$$Q = dF \tag{19.52}$$

ở đó d là độ nhạy điện tích (là hằng số đối với một tinh thể) của tinh thể trong C/N. Lực F gây nên biến dạng bề dày Δt (m) của tinh thể:

$$F = \frac{aY}{t}\Delta t \tag{19.53}$$

ở đó a là diện tích tinh thể, t là bề dày tinh thể và Y là môđun đàn hồi Young:

$$Y = \frac{\text{ứng suất}}{\text{biến dạng}} = \frac{Ft}{a\Delta t} \tag{19.54}$$

Điện tích của các điện cực tăng tới $E_0 = Q/C$, trong đó C là điện dung (Fara) giữa hai cực và $C = \varepsilon a / t$ với ε là hằng số điện môi tuyệt đối:

$$E_o = \frac{dF}{C} = \frac{d}{\varepsilon}\frac{tF}{a} \tag{19.55}$$

độ nhạy điện thế = $g = d / \varepsilon$ (Vm/N) được tính như sau:

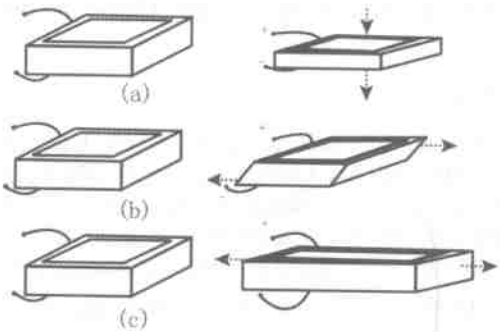
$$E_o = g\frac{t}{a}F = gtP \tag{19.56}$$

Các vật liệu áp điện được sử dụng là thạch anh, tuamalin, photpho đihyđro amoni (ADP), sunfat lithi, titan bari và chì titan zircon (PZT) [4]. Thạch anh và các tinh thể áp điện khoáng chất khác là phân cực tự nhiên. Tuy nhiên, các nguyên tố áp điện tổng hợp, như là gốm titan bari, được làm bởi việc nung các tinh thể nhỏ dưới áp suất và sau đó đặt các nguyên tố tổng hợp vào trong điện trường của dòng điện một chiều mạnh [4]. Sau đó, tinh thể này phân cực, dọc theo trục mà lực tác dụng vào, để thể hiện các tính chất áp điện. Các phần tử áp điện nhân tạo này di chuyển tự do trong cấu trúc tinh thể của chúng và có thể được làm thành khuôn theo bất kỳ kích cỡ hoặc hình dạng nào. Hướng phân cực được thiết kế trong quá trình sản xuất chúng.

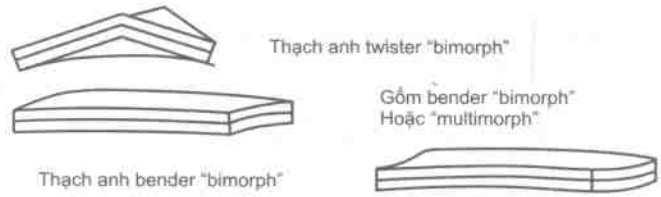
Các phương thức hoạt động khác nhau của một thiết bị áp điện cho một tấm đơn được thể hiện trong hình 19.36 [4]. Bằng cách dính chặt hai tinh tấm tinh thể lại với nhau để các trục điện tích của chúng vuông góc với nhau, đặt các mô men uốn hoặc xoắn lên các chuyển đổi áp điện và từ đó sinh ra một hiệu điện thế ở đầu ra (hình 19.37) [4]. Dải lực có thể đo được nằm trong phạm vi từ 1 đến 200 kN và ở một tỷ số 1 x 10^5.

Cũng có thể dùng các tấm tinh thể áp điện để đo các thay đổi tức thời của lực (các lực động học). Một tấm thạch anh mỏng có thể được dùng như là một bộ tạo dao động điện. Tần số của các dao động này là tần số tự nhiên của đĩa mỏng. Bất kỳ sự bóp méo nào về hình dạng của đĩa gây ra

bởi một ngoại lực, sẽ thay đổi tần số dao động. Do đó, có thể đo một lực động học thông qua sự thay đổi tần số của bộ dao động.



HÌNH 19.36 Các phương thức hoạt động của một đĩa đơn như là một thiết bị áp điện [4]



HÌNH 19.37 Sự uốn cong của các chuyển đổi áp điện "kép" và "uốn" khi điện thế được đặt vào [4]

Phương pháp trở kháng

Phương pháp trở kháng được áp dụng vào trong thực tế khi nhiều vùng tiếp giáp giữa các mảnh nhỏ bán dẫn (thường là cacbon) và khoảng cách giữa chúng thay đổi, tổng trở cũng thay đổi. Việc thiết kế ra những chuyển đổi như thế sinh ra một dịch chuyển rất nhỏ khi có lực tác dụng vào. Một bộ chuyển đổi có thể bao gồm 2-60 đĩa cacbon mỏng được gắn giữa một điện cực cố định và một điện cực di động. Khi có lực tác dụng vào điện cực di động, các đĩa cacbon sẽ di chuyển cùng nhau một đoạn 5-250 μm trên một mặt giao nhau, hàm truyền của các điện trở của chúng chống lại lực tác động là xấp xỉ hàm hypebol, nó là hàm không tuyến tính bậc cao. Thiết bị này có hiện tượng trễ và trôi lớn với một độ nhạy ngang trục cao.

Để giảm hiện tượng trễ và hiện tượng trôi, người ta dùng các vành thay cho các đĩa. Các đĩa phải được gắn vào một lõi cứng đã được cách li và tạo ứng suất trước để chống lại sức đè. Điều này hoàn toàn loại bỏ lỗi nhạy ngang trục. Tần số cộng hưởng của lõi là cao và có thể xảy ra ở giá trị 10 kHz. Phạm vi có thể đo được của bộ chuyển đổi là từ 0.1 đến 10 kg. Độ chính xác và độ nhạy tuyến tính của thiết bị này là rất kém.

Phương pháp cảm ứng

Phương pháp cảm ứng dựa vào hiện tượng: sự thay đổi ứng suất cơ học của một vật liệu sắt từ làm độ từ thẩm của nó thay đổi. Sự thay đổi của thông lượng từ trường được chuyển thành điện áp cảm ứng trong các cuộn dây khi có dịch chuyển xảy ra. Hiện tượng này được gọi là hiện tượng Villari hoặc là hiện tượng từ giảo. Hiện tượng này thường xảy ra trong các hợp kim niken-sắt.

Các chuyển đổi dựa trên hiện tượng từ giảo bao gồm một cuộn dây quấn trên một lõi làm bằng vật liệu từ giảo. Lực cần đo được đặt vào cuộn dây, làm nén cuộn dây và gây ra sự thay đổi về độ từ thẩm cũng như sự cảm ứng. Sự thay đổi này có thể đo được và từ đó tính được lực.

Phạm vi đo của thiết bị này phụ thuộc vào diện tích mặt cắt ngang của lõi. Độ chính xác của thiết bị được quyết định bởi một quá trình hiệu chỉnh. Bộ chuyển đổi này có độ tuyến tính thấp và có hiện tượng trễ. Độ từ thẩm của một vật liệu từ giảo tăng khi khi nó bị xoắn, không quan tâm đến hướng. Một đường đáp ứng tần số phẳng thu được trên một dải rộng từ 150 đến 15,000 Hz.

Phương pháp tranzito áp điện

Các thiết bị sử dụng các hiệu ứng ứng suất không đẳng hướng được mô tả như là các tranzito áp điện (piezotranzitor). Trong hiệu ứng này, nếu mặt trên của một điôt p-n chịu một ứng suất cục bộ, dòng điện chạy qua lớp tiếp xúc sẽ thay đổi thuận nghịch đáng kể. Các tranzito này thường là dạng silic không phẳng, với một lớp tiếp xúc emitter-base. Lớp tiếp xúc này là kết nối cơ học với một màng chắn được đặt trên mặt của một hộp thường có dạng TO [4]. Khi tác dụng một áp suất hoặc một lực vào màng này, một điện thế sẽ sinh ra. Ta nên sử dụng những thiết bị này tại một nhiệt độ không đổi bởi vì các vật liệu bán dẫn sẽ thay đổi các tính chất dẫn điện của chúng khi nhiệt độ thay đổi. Đặc tính nổi bật khác của các tranzito áp điện là chúng có thể chịu đựng được quá tải 500 %.

Các lực kế nhiều thành phần sử dụng các tinh thể thạch anh như là các phần tử đo

Các hiệu ứng áp điện ở thạch anh

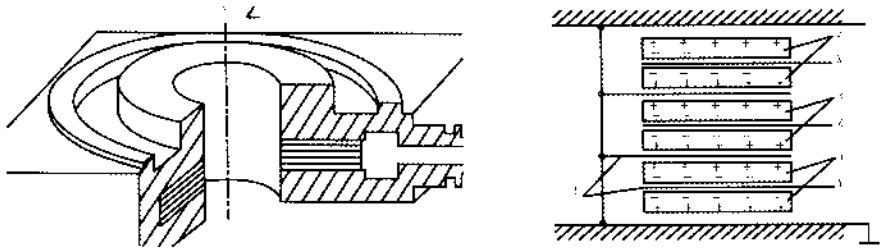
Hiệu ứng áp điện theo phương thường được dùng để đo lực. Hiệu ứng theo chiều dọc đo được các lực nén; hiệu ứng cắt đo được các lực cắt theo một hướng. Ví dụ như nếu một đĩa tinh thể oxit thạch anh (SiO_2) cắt vuông góc với trục tinh thể Y chịu tải trọng bởi một lực nén, nó sẽ tạo ra sự thay đổi điện tích, trung bình khoảng 2.26 pC/N. Nếu đĩa tinh thể thạch anh được cắt theo trục vuông góc với trục tinh thể Y, nó sẽ sinh ra một điện cực 4.52 pC/N nếu nó chịu một lực cắt theo một hướng cụ thể. Lực tác dụng vào các hướng khác sẽ không gây ra bất cứ sự thay đổi nào.

Một bộ khuyếch đại được sử dụng để chuyển đổi điện thế hình thành bởi phần tử tinh thể thạch anh thành một điện thế tỷ lệ. Hệ số biến đổi của bộ khuếch đại được xác định bởi tụ phản hồi. Việc hiệu chỉnh các khối cơ khí có thể được thực hiện bởi các bộ khuyếch đại thuật toán có hệ số khuếch đại biến thiên.

Thiết kế các lực kế nhiều thành phần bằng thạch anh

Phần tử chính cho việc thiết kế lực kế nhiều thành phần là bộ chuyển đổi lực 3 thành phần (hình 19.38). Nó chứa một cặp đĩa thạch anh cắt theo trục X cho thành phần lực trực giao và một cặp cắt theo trục Y (nhạy theo hướng cắt) cho mỗi thành phần lực cắt.

Các lực kế 3 thành phần được sử dụng để đo các lực cắt trong quá trình gia công. Các chuyển đổi lực 4 thành phần kẹp giữa một đĩa đế và một đĩa trên được giới thiệu trong hình 19.38. Bộ chuyển đổi lực chịu một tải trọng đặt trước khi các lực cắt được sinh ra do lực ma sát. Bộ chuyển đổi lực 4 thành phần chịu một sự thay đổi đáng kể ở tải trọng, phụ thuộc vào dạng và vị trí của lực tác dụng. Để làm giảm tải trọng đặt trước thì phải tìm hiểu sâu hơn về các bộ chuyển đổi lực sử dụng lực căng. Khi uốn đĩa trên cùng của lực kế sẽ gây nên các ứng suất uốn và ứng suất cắt. Dải đo của lực kế phụ thuộc không chỉ vào các lực thành phần mà còn các ứng suất uốn thành phần.

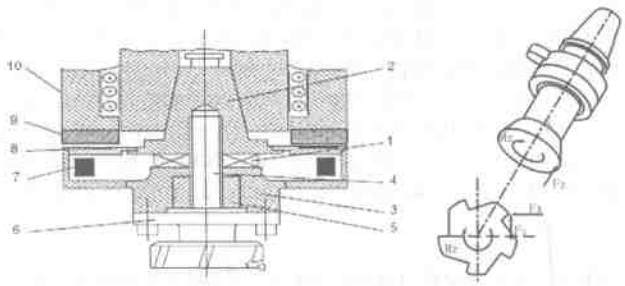


HÌNH 19.38 Bộ chuyển đổi lực ba thành phần

Đo các tín hiệu chuyển đổi bởi phép đo từ xa

Hình 19.39 giới thiệu hệ thống đo lực mới được thiết kế RCD (lực kế lực cắt quay). Một cảm biến dạng đĩa (1) được đặt giữa một lỗ nhọn góc thẳng đứng (2) và một vành đế (3) cho phép đo 3 thành phần lực F_x, F_y và F_z tại cạnh cắt cũng như là mômen M_z. Nguyên tắc hoạt động vật lý của thiết bị đo này dựa trên hiệu ứng áp điện của các đĩa thạch anh. Các đĩa thạch anh sử dụng trong

cảm biến được xếp thẳng hàng sao cho độ nhạy ngang trục lớn nhất giữa các lực thành phần là 1%. Vì các cảm biến được thiết kế cứng nên tần số cộng hưởng của hệ thống đo lực nằm từ 1200 đến 3000 Hz và dải đo có thể đạt tới 10^6 kN [6].



HÌNH 19.39 Hệ thống đo lực để tính ra các lực cắt có liên quan trong mắt phay 5 trục [6]

Các điện tích tỷ lệ với lực sinh ra tại bề mặt của các đĩa thạch anh được chuyển thành điện áp bởi bốn bộ khuếch đại điện tích thu nhỏ (7) trong kết cấu lắp ghép. Các tín hiệu này được lọc bởi một mạch đặc biệt để loại bỏ hiệu ứng răng cưa và số hoá 8 bit với tốc độ lấy mẫu cao (điều biến xung-số). Các tín hiệu số hoá được truyền đi bằng một thiết bị đo từ xa bao gồm một môđun nhận và một môđun phát, một anten đặt tại đỉnh của hệ thống đo lực quay (8), cũng như một anten cố định (9) trên lớp bảo vệ của đầu mũi khoan hai trục (10). Các thành phần điện, bộ khuếch đại điện và môđun phát được gắn vào đường viền của hệ thống đo lực (6).

Các lực cắt và mômen đo được được số hoá với hệ thống đo lực được mô tả như trên. Chúng được điều biến trên sóng mang FM và được truyền bởi một bộ truyền quay tới bộ thu cố định. Các tín hiệu được truyền được đưa tới khối xử lý kết quả bên ngoài.

Đo các lực động học

Có thể giả sử bất kỳ một hệ thống cơ học nào trong gần đúng bậc nhất như là một bộ dao động giảm chấn yếu bao gồm một lò xo và một vật. Nếu một hệ thống cơ khí có nhiều hơn một tần số cộng hưởng thì ta sẽ xem xét tần số thấp nhất. Nếu tần số thử vẫn nhỏ hơn 10% của tần số cộng hưởng của bộ chuyển đổi mẫu (sử dụng cho kiểm tra), thì sự khác biệt giữa độ nhạy động thu được từ việc căn chỉnh tĩnh sẽ nhỏ hơn 1%. Các đánh giá trên dựa vào giả thiết rằng tín hiệu lực là hình sin. Việc căn chỉnh tĩnh bộ chuyển đổi mẫu cũng có giá trị với các mục đích kiểm tra động nếu các tần số thử là nhỏ hơn nhiều lần (ít nhất là 10 lần) so với tần số cộng hưởng của hệ thống.

Các bộ chuyển đổi lực điện dung

Có thể dùng một bộ chuyển đổi sử dụng sự thay đổi của điện dung để đo lực. Lực tác động trực tiếp vào một màng và sự dao động đàn hồi của nó được phát hiện qua sự thay đổi của điện dung. Một bộ chuyển đổi lực có độ nhạy cao có thể được chế tạo vì các chuyển đổi điện dung có thể đo được các dao động rất nhỏ với độ chính xác cao. Một mạch điện chuyển đổi sự thay đổi điện dung thành sự thay đổi điện một chiều [7]. Cảm biến điện dung được tạo thành từ hai tấm kim loại đặt cách nhau một khoảng trống. Điện dung C được xác định như sau:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{h} \tag{19.57}$$

ở đó

C = điện dung (F),

ε_0 = hằng số điện môi của không khí,

ε_r = hằng số điện môi tương đối của chất cách điện,

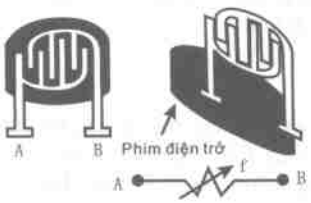
A = diện tích bề mặt đối diện giữa hai tấm cực,

h = khoảng cách hai bản cực.

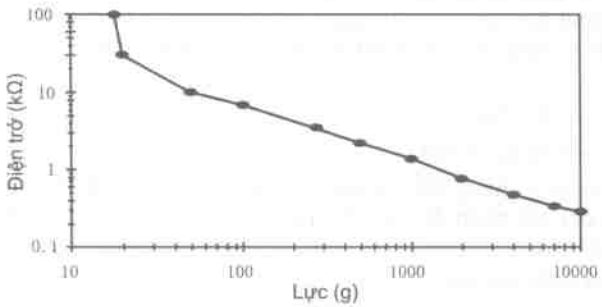
Độ nhạy của cảm biến điện dung là thấp. Trên lý thuyết, khi giảm khoảng cách h thì độ nhạy sẽ tăng; tuy nhiên các điều kiện trên thực tế về điện và cơ khí đã ngăn không cho chúng có độ nhạy cao. Một trong những ưu điểm chính của chuyển đổi điện dung đó là việc chuyển động của một tấm so với tấm kia chỉ cần một lực rất nhỏ. Một ưu điểm khác là tính ổn định và độ nhạy của cảm biến không bị ảnh hưởng bởi áp suất và nhiệt độ của môi trường.

Các điện trở đo lực (các chất dẻo dẫn)

Các điện trở đo lực (FSRs) dựa trên hiện tượng điện trở của các thiết bị màng dầy bằng chất dẻo bị giảm khi lực tác dụng vào tăng. Một điện trở đo lực được làm từ hai phần. Thứ nhất là một vật liệu dẫn điện được gắn vào một màng. Thứ hai là một tập các tiếp xúc hình ngón được đặt vào màng còn lại. Hình 19.40 giới thiệu cấu hình này. Vật liệu dẫn điện khép kín mạch điện giữa hai phần dẫn điện của màng thứ hai. Khi đặt một lực vào cảm biến, sẽ thu được một liên kết tốt hơn giữa các lớp tiếp xúc; từ đó, làm tăng tính dẫn điện. Với một dải lực rộng, tính dẫn điện là một hàm xấp xỉ tuyến tính với lực. Cần lưu ý rằng có ba khu vực mà cảm biến có thể hoạt động. Sự chuyển tiếp đột ngột đầu tiên xảy ra ở quanh vùng lân cận của 10g lực. Trong vùng này, điện trở thay đổi rất nhanh. Điều này có ích khi sử dụng các điện trở đo lực để thiết kế các công tắc.



HÌNH 19.40 Sơ đồ một trở kháng đo lực điển hình (FSR)



HÌNH 19.41 Điện trở là hàm của lực cho một điện trở đo lực điển hình

Không nên dùng FSR cho các phép đo lực cần độ chính xác, bởi vì các bộ phận của cảm biến có thể thay đổi điện trở tới 15-25% giữa các phần với nhau. Tuy nhiên, các FSR có độ trễ thấp và rẻ hơn các loại cảm biến khác. So với các màng áp, thì FSR ít bị ảnh hưởng hơn đối với dao động và nhiệt.

Các cảm biến lực kháng từ trường

Nguyên tắc của các *cảm biến lực kháng từ trường* dựa trên hiện tượng khi làm lạnh kim loại tới nhiệt độ thấp và đặt chúng vào trong từ trường thì điện trở của chúng thay đổi. Chất Bitmut là một ví dụ điển hình cho tính chất này. Trên thực tế, các thiết bị này có những hạn chế lớn do chúng rất nhạy cảm với sự thay đổi của nhiệt độ môi trường xung quanh.

Các cảm biến đo lực từ trường đàn hồi

Các thiết bị *chuyển đổi từ trường đàn hồi* hoạt động dựa trên hiệu ứng Joule, đó là một vật liệu sắt từ có thể thay đổi kích thước khi nó chịu một từ trường. Nguyên tắc hoạt động như sau: Đầu tiên, một xung dòng điện được đưa vào điện trở bên trong một sóng dẫn. Nó tạo ra từ trường bao

quanh trục dây trên độ dài của toàn bộ dây. Một nam châm vĩnh cửu tạo ra từ trường khác ở xung quanh chỗ đặt nam châm. Từ trường này có một thành phần theo chiều dọc. Hai trường này tổng hợp lại dưới dạng vectơ tạo nên một trường xoắn gần nam châm và tác động ngược trở lại sóng dẫn, khiến sóng dẫn chịu một sức căng xoắn nhỏ hoặc chỉ xoắn tại vị trí của nam châm. Hiệu ứng xoắn này được gọi là *hiệu ứng Wiedemann* [8].

Các chuyển đổi lực từ trường đàn hồi có đáp ứng tần số cao (trên mức 20 kHz). Các vật liệu từ trường đàn hồi điển hình là: kim loại Monel, Permalloy, Cekas, Alfer và một lượng lớn các hợp kim niken-sắt. Những nhược điểm của thiết bị này bao gồm: (1) thực tế là ứng suất dư và sự già hoá có thể gây nên các thay đổi vĩnh viễn, (2) độ lệch không và độ nhạy thay đổi theo nhiệt độ và (3) các lỗi do trễ.

Cân bằng xoắn

Các thiết bị cân bằng sử dụng sự đàn hồi của lò xo có thể được sử dụng để đo lực. Các *cân bằng xoắn* là tương đương với các thiết bị đo lực tỷ lệ với cánh tay đòn. Chúng bao gồm một đai thép nằm ngang thay cho các trục đứng và các trụ. Nguyên tắc hoạt động dựa trên hiện tượng khi tác dụng một lực vào cánh tay đòn thì lò xo xoắn sẽ bị biến dạng (trong giới hạn của nó) tỷ lệ với lực tác dụng. Loại thiết bị này là nhạy cảm với các lỗi gây ra do trễ và nhiệt, do đó nó không được dùng cho các ứng dụng cần độ chính xác.

Các cảm biến tiếp xúc

Các *cảm biến tiếp xúc* thường được hiểu như là các kỹ thuật đo tiếp xúc. Không thể xem xét các cảm biến này như là các cảm biến tiếp xúc bình thường dùng để đo một số ít các lực rời rạc. Trong phép đo tiếp xúc, các cảm biến được sắp xếp theo hàng rất gần nhau để đo các lực phân bố.

Phép đo tiếp xúc là quan trọng trong cả các hoạt động cố định và nhận dạng đối tượng. Đối tượng trong gia công cần phải được đặt ổn định để nó không bị trượt hoặc bị phá hỏng khi gia công. Nhận dạng đối tượng bao gồm hình dáng, vị trí và hướng của sản phẩm, cũng như nhận dạng các tính chất hoặc độ biến dạng bề mặt. Trên lý thuyết các nhiệm vụ trên được phân ra thành hai loại [9]:

1. Đo liên tục các lực liên kết,
2. Đo các profile biến dạng bề mặt.

Hai dạng dữ liệu trên nhìn chung liên hệ qua mối quan hệ ứng suất-sức căng của cảm biến tiếp xúc giác. Theo đó, hầu hết các phép đo biến đổi liên tục của các lực tiếp xúc (đo các profile biến dạng tiếp xúc) được thực hiện.

Các yêu cầu đối với cảm biến tiếp xúc

Các ưu điểm nổi bật của phép đo tiếp xúc được dùng trong lĩnh vực rôbôt. Các ứng dụng bao gồm tự động kiểm tra các profile bề mặt, cố định vật liệu hoặc vận chuyển các bộ phận, lắp ghép các bộ phận và nhận dạng các bộ phận và gá đặt trong các ứng dụng gia công và các nhiệm vụ thao tác vận chuyển có độ chính xác cao. Một số ứng dụng này chỉ cần các cảm biến tiếp xúc đơn giản (lực-mômen) nếu các bộ phận cần cố định nằm theo hướng hợp lý và có đầy đủ các thông tin về quy trình.

Lẽ tự nhiên, mục đích thiết kế chính của các cảm biến tiếp xúc là bắt chước các khả năng của các ngón tay con người [9]. Các đặc tính điển hình cho một cảm biến tiếp xúc trong công nghiệp bao gồm:

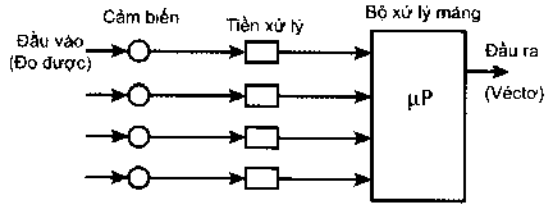
1. Độ phân giải trong không gian vào khoảng 2mm
2. Độ phân giải của lực (độ nhạy) vào khoảng 2g
3. Lực tiếp xúc lớn nhất 1 kg
4. Thời gian đáp ứng thấp 5 ms
5. Hiện tượng trễ thấp
6. Làm việc được trong các điều kiện khó khăn
7. Không nhạy cảm với sự thay đổi của môi trường (nhiệt độ, bụi, độ ẩm, dao động,...)
8. Có khả năng đo trượt

Cảm biến tiếp xúc dạng màng

Các cảm biến màng tiếp xúc (hình 19.42) bao gồm các phần tử đo chuẩn để đo sự phân bố áp suất ngang qua đầu ngón tay của rôbôt. Các ma trận màng 8x8 cách nhau 2 mm theo mỗi hướng tạo ra 64 phần tử đo lực. Bảng 19.2 giới thiệu một vài đặc tính của các cảm biến màng tiếp xúc đầu tiên. Cảm biến này gồm hai lớp mạ đồng chéo nhau được phân cách bởi các lớp cao su silic dẫy. Cảm biến tạo ra một lớp mỏng, thuận tiện có thể dễ dàng gắn vào các đầu ngón tay có hình dạng và kích thước khác nhau. Toàn bộ màng được lấy mẫu bằng máy tính.

BẢNG 19.2 Tổng hợp một vài đặc tính của các cảm biến màng tiếp xúc

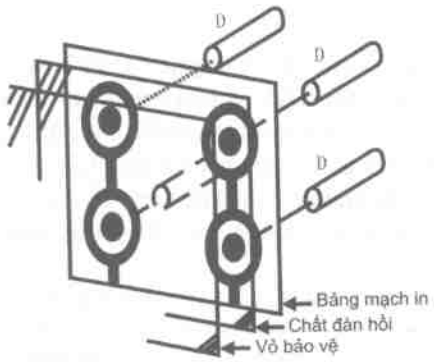
Thông số thiết bị	Kích thước màng		
	(4×4)	(8×8)	(16×16)
Khoảng cách phần tử (mm)	4.00	2.00	1.00
Điện dung ở áp suất 0 (fF)	6.48	1.62	0.40
Lực gián đoạn (N)	18.90	1.88	0.19
Điện dung tuyến tính Max (fF)	4.80	1.20	0.30
Điện áp đầu ra Max (V)	1.20	0.60	0.30
Độ phân giải Max (bit)	9.00	8.00	8.00
Thời gian hiển thị (μs)	—	<20	—



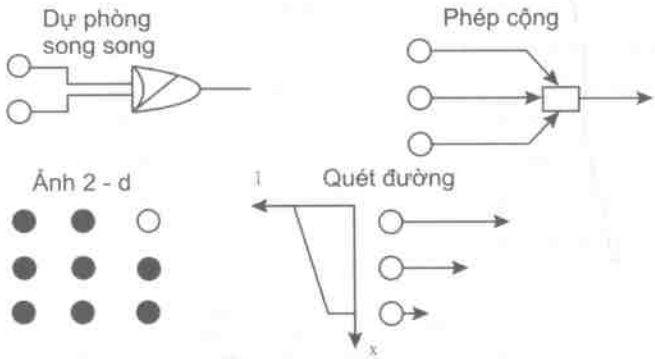
HÌNH 19.42 Cảm biến tiếp xúc dạng màng

Một cảm biến màng tiếp xúc điển hình bao gồm vài phần tử đo. Mỗi một phần tử hoặc taxel (hình 19.43) dùng để đo tác dụng của các lực. Do các cảm biến tiếp xúc được dùng trong các ứng dụng cần có độ nhạy giống như cảm nhận tiếp xúc của con người nên một chất đàn hồi được sử dụng để làm giả da người. Chất đàn hồi thông thường là vật liệu dẫn điện và tính dẫn điện của nó thay đổi cục bộ khi chịu áp lực. Cảm biến bao gồm ba lớp: một lớp vỏ bảo vệ, một màng chất đàn hồi dẫn điện và một bảng mạch in. Bảng mạch in bao gồm hai hàng, mỗi hàng có hai "điểm đen-lỗ tròn", mỗi "điểm đen-lỗ tròn" có 1 vòng dẫn điện bên trong và 1 vòng dẫn điện bên ngoài kết nối các taxel của cảm biến. Các vòng dẫn ngoài được nối với nhau và với một tranzito được chọn theo cột. Các vòng dẫn trong được nối với các điôt (D) trong hình 19.43. Khi một cột trong màng được chọn, dòng điện chạy qua các điôt, qua chất đàn hồi và sau đó là qua transito tới đất. Như vậy không thể kích thích chỉ duy nhất một taxel bởi vì áp lực đặt vào gây ra biến dạng cục bộ cho cả các taxel liền kề. Trường hợp này được gọi là *crosstalk* (sự xuyên âm) và bị khử bởi các điôt [10].

Các tín hiệu của màng cảm biến tiếp xúc được sử dụng để cung cấp các thông tin về các động học liên kết. Một vài thông số đặc tính như là vị trí liên kết, hình dáng đối tượng và sự phân bố áp lực, có thể thu được. Hình 19.44 đưa ra một sơ đồ chung về một hệ thống cảm biến hàng. Một ví dụ của hệ thống này là ngón tay đo lực và tiếp xúc. Ngón tay tiếp xúc này có bốn cảm biến liên kết làm từ các miếng chất dẻo áp điện trên bề mặt của ngón tay cái cung cấp các thông tin liên kết động học. Một cảm biến lực dựa trên thiết bị đo sức căng cung cấp thông tin về lực nén tĩnh.



HÌNH 19.43 Cảm biến taxel dạng màng điển hình



HÌNH 19.44 Sơ đồ chung của một hệ thống cảm biến dạng màng thông minh [9]

Tài liệu tham khảo

[1] Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles,* Oxford: Oxford Science Publications, Clarendon Press, 1989.

[2] Doebelin, E. O., *Measurement Systems, Application and Design,* 4th ed., New York: McGraw-Hill,1990.

[3] Dally, J. W., Riley, W. F., and McConnel, K. G., *Instrumentation for Engineering Measurements,* NewYork: John Wiley & Sons, 1984.

[4] Mansfield, P. H., *Electrical Transducers for Industrial Measurement,* London: The Butterworth Group,1973.

[5] Martini, K. H., Multicomponent dynamometers using quartz crystals as sensing elements, *ISA Trans.*,22 (1), 1983.

[6] Spur, G., Al-Badrawy, S. J., and Stirnimann, J., Measuring the Cutting Force in Five-Axis Milling, Translated paper "Zerpankraftmessung bei der funfachsigen Frasbearbeitung," Zeitschrift fur wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung 9/93 Carl Hanser, Munchen, Kistler Piezo-Instrumentation, 20.162e 9.94.

19.4 Đo mômen và công suất

Ivan J. Garshelis

Mômen, tốc độ và công suất là các biến định nghĩa về mặt cơ khí kết hợp với hoạt động chức năng của các máy quay. Khả năng đo chính xác các thông số này là cần thiết để xác định hiệu suất của máy và thiết lập các chế độ hoạt động an toàn và có lợi cho các dịch vụ bảo dưỡng lâu dài và tin cậy. Các phép đo trực tuyến những thông số này cho phép điều khiển thời gian thực, giúp đảm bảo tính ổn định của chất lượng sản phẩm và có thể sớm cung cấp những dấu hiệu của các vấn đề có thể xảy ra. Các phép đo mômen và công suất được sử dụng trong việc kiểm tra các thiết kế tiên

tiến của các máy mới và trong sự phát triển các bộ phận mới của máy. Các phép đo mômen cũng cung cấp một cơ sở vững chắc cho việc điều khiển và kiểm tra khả năng siết chặt của nhiều dạng ốc vít. Chương này mô tả các khái niệm cơ bản cũng như các phương pháp khác nhau và các thiết bị được sử dụng trong phép đo mômen và công suất; phép đo tốc độ và đo vận tốc góc được giới thiệu trong [1].

Các khái niệm cơ bản

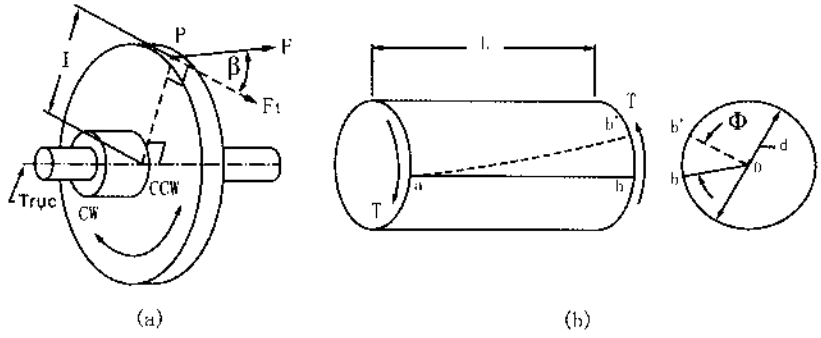
Dịch chuyển góc, vận tốc và gia tốc góc

Khái niệm về *chuyển động quay* dễ dàng được hình thức hoá: Tất cả các điểm trong một vật rắn chuyển động quay trong các mặt phẳng song song hoặc trùng nhau trong khi vẫn duy trì một khoảng cách cố định tới một đường thẳng gọi là trục. Trong một vật rắn tuyệt đối, tất cả các điểm luôn duy trì một khoảng cách tới các điểm khác. Quay được hiểu như là sự thay đổi về vị trí góc của một điểm tham chiếu trên vật thể, ví dụ như sự *dịch chuyển góc* $\Delta\theta$ của nó trong một khoảng thời gian Δt. Chuyển động của điểm này, cũng như toàn bộ vật thể, được đặc trưng bởi *hướng* thuận chiều kim đồng hồ (CW) hay ngược chiều kim đồng hồ (CCW) của nó và *vận tốc góc* của nó, $\omega = \Delta\theta / \Delta t$. Nếu trong khoảng thời gian Δt, vận tốc thay đổi một lượng $\Delta\omega$, thì vật chịu một gia tốc góc $\alpha = \Delta\omega / \Delta t$. Với đơn vị của góc là rad và thời gian là s, thì đơn vị của vận tốc góc là rad/s và của gia tốc góc là rad/s^2. Vận tốc góc chỉ *tốc độ quay* và được đo bởi số vòng quay trong một phút (rpm) hoặc trong một giây (rps).

Lực, mômen và trạng thái cân bằng

Chuyển động quay hoặc chuyển động nói chung, bị điều khiển bởi *lực* theo các định luật của Newton. Bởi vì một lực chỉ tác động trực tiếp vào thành phần chuyển động đó theo phương tác dụng của nó, nên lực hoặc các thành phần của nó tác động trong bất kỳ mặt phẳng nào có chứa trục quay sẽ không sinh ra xu hướng quay quanh trục đó. Chuyển động quay được bắt đầu, được thay đổi vận tốc hoặc kết thúc chỉ bởi *lực tiếp tuyến* F_t tác động vào một điểm cách trục quay một khoảng bằng l. Tích của F_t và l gọi là *mômen* và là đại lượng ảnh hưởng tới chuyển động quay. Một mômen xung quanh trục quay tạo thành mômen *quay*. Hình 19.45(a) mô tả một lực F tác động theo phương lệch một góc β với tiếp tuyến tại điểm P, cách trục quay một đoạn l (cánh tay đòn). Mômen quay T được xác định từ *thành phần tiếp tuyến* của F như sau:

$$T = F_t l = (F\cos\beta)l \tag{19.58}$$



HÌNH 19.45 (a) Lực trực giao F với trục tại P sinh ra một mômen xoắn $T = (F\cos\beta)l$ có xu hướng kéo vật quay theo chiều thuận kim đồng hồ. (b) Mômen truyền T qua độ dài xoắn L của trục với một góc ϕ

Tác động tổng hợp của bất kỳ các mômen quay nào tại các vị trí khác nhau dọc theo vật chính là *tổng* của các tác động thành phần, các mômen quay gây ra xu hướng quay theo chiều kim đồng hồ và ngược chiều kim đồng hồ được gán các dấu ngược nhau. Các lực, do đó các mômen quay, xuất hiện từ một tiếp xúc vật lý với các vật thể rắn khác, sự tương tác chuyển động với các chất

lỏng hoặc thông qua trọng trường (gồm cả lực quán tính), điện hoặc các trường lực từ. *Gốc* của mỗi một mômen như thế chịu một mômen hoạt động bằng nhau nhưng hướng ngược lại. Với đơn vị của lực là N và khoảng cách là m, phương trình 19.58 đưa ra đơn vị của mômen là Nm.

Một mômen quay khác không sẽ gây nên một gia tốc góc tương ứng tuân theo định luật 2 Newton:

$$T_r = I\alpha \tag{19.59}$$

trong đó I có đơn vị là (kg m^2) là mômen quán tính của vật quanh một trục. Phương trình (19.59) có thể áp dụng cho mọi vật với trạng thái chuyển động bất kỳ. Khi $\alpha = 0$, phương trình (19.59) chỉ ra rằng T_r cũng bằng không, vật được xem là *cân bằng*. Để một vật cân bằng thì đồng thời phải có ít nhất hai mômen *tác động* hoặc là không có mômen nào.

Ứng suất, độ cứng và biến dạng

Bất kỳ phần nào của một vật rắn ở trạng thái cân bằng cũng là cân bằng, do đó, điều kiện cân bằng thành phần là bất kỳ mômen nào tác động thêm vào từ *bên ngoài* phải được cân bằng bởi một mômen *bên trong* có cùng độ lớn và ngược chiều từ các phần liền kề của vật. Các mômen bên trong được *truyền* giữa các phần tử liền kề bởi tác động tổng hợp của các *ứng suất* trên các mặt cắt trung gian của chúng. Trong một vật rắn có tiết diện ngang hình tròn (ví dụ như một trục), *ứng suất tiếp* biến đổi tuyến tính từ không tại trục tới giá trị lớn nhất tại bề mặt. *Ứng suất tiếp* τ thay đổi tuyến tính từ không tại trục quay đến giá trị lớn nhất tại bề mặt của vật. Ứng suất tiếp τ_m tại bề mặt của một trục có đường kính d, sinh ra mômen quay T, được xác định như sau:

$$\tau_m = \frac{16T}{\pi d^3} \tag{19.60}$$

Các vật liệu trên thực tế không phải là rắn *hoàn toàn*, nhưng thay vào đó chúng có *độ cứng* G, biểu diễn tỷ số giới hạn giữa τ và *biến dạng góc* γ. biến dạng lớn nhất của một trục tròn cứng tại bề mặt của nó và được xác định như sau:

$$\gamma_m = \frac{\tau_m}{G} = \frac{16T}{\pi d^3 G} \tag{19.61}$$

Hình 19.45(b) mô tả biến dạng góc như là một dịch chuyển góc giữa các tiết diện ngang. Trục tròn cứng có độ dài L được biểu diễn ở trên bị *xoắn* bởi mômen một góc ϕ được xác định như sau:

$$\phi = \frac{32LT}{\pi d^4 G} \tag{19.62}$$

Công, năng lượng và công suất

Nếu trong thời gian chịu tác dụng của một lực T, vật quay một góc θ, thì công cơ học được thực hiện sẽ là:

$$W = T\theta \tag{19.63}$$

Nếu mômen xoắn tác động cùng chiều hoặc ngược chiều với chiều dịch chuyển của vật thì người ta nói rằng công được thực hiện *trên* vật thể, trường hợp ngược lại là công được thực hiện *bởi* vật. Công thực được hiện *trên* vật thể tạo ra gia tốc cho vật, do đó cũng làm tăng *năng lượng động học* ($KE = I\omega^2/2$). Công được thực hiện *bởi* vật làm giảm tốc độ của vật, do đó làm giảm năng lượng động học tương ứng. Nếu vật không gia tốc thì bất kỳ công nào được thực hiện trên vật tại một vị trí phải được sinh ra bởi vật ở một vị trí khác. Công và năng lượng được đo bằng đơn vị Junle (J). Phương trình 19.63 chỉ ra rằng 1 J tương đương với 1 Nm rad, nhưng do rad là một tỷ số phi kích thước nên 1 J tương đương với 1 Nm. Để tránh nhầm lẫn với mômen xoắn, công cơ học thường được đo bằng đơn vị mN hoặc J.

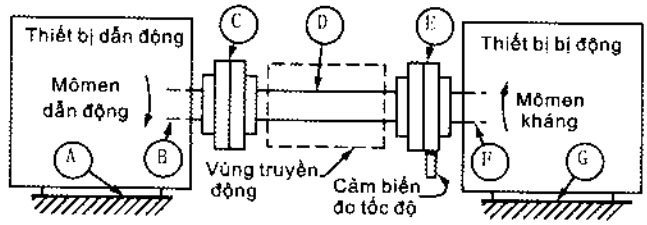
Tốc độ sinh công được gọi là *công suất*, ký hiệu là P. Nếu một mômen xoắn T tác động trong một khoảng thời gian Δt, di chuyển một góc $\Delta\theta$, thì công $T\Delta\theta$ được thực hiện với tốc độ là $T\Delta\theta/\Delta t$. Thay $\Delta\theta/\Delta t$ bằng ω, công suất được xác định như sau:

$$P = T\omega \tag{19.64}$$

Đơn vị của công suất là Watt (W). 1 W = 1 Js^{-1} = 1 mNs^{-1}. Trước kia, công suất cũng được đo bằng mã lực (Hp), ở đó 1 Hp = 746 W. Các vật quay thực sự truyền công suất giữa các vị trí khi có mômen xoắn từ bên ngoài tác dụng vào.

Lắp đặt dụng cụ đo mômen xoắn và công suất

Các phương trình từ (19.58) đến (19.64) biểu diễn các cơ sở vật lý cho phép đo công suất và mômen xoắn. Hình 19.46 minh họa cách bố trí một phép đo tổng quát. Các dụng cụ đo được lựa chọn để thỏa mãn các mục đích đo cụ thể. Nhìn chung, một mômen dẫn động sinh ra trong một thiết bị tại một vị trí (B trong hình 19.46) bị chống lại bởi một mômen ngược chiều sinh ra bởi một thiết bị khác ở vị trí khác (F). Mômen dẫn động (từ động cơ điện, động cơ xăng, tua bin hơi, quay tay, ...) được nối với qua khớp nối C, vùng truyền động D và khớp nối phụ E, tới thiết bị được dẫn động (động cơ điện, bơm, máy công cụ, ...), trong đó mômen cản được đặt tại F. Mômen tại B và F là các đại lượng có thể đo được. Những mômen này có thể được xác định gián tiếp từ một đại lượng vật lý liên quan, ví dụ như một dòng điện hoặc áp suất chất lỏng kết hợp với hoạt động của thiết bị dẫn động hoặc được dẫn động hoặc xác định trực tiếp bằng cách đo các mômen *cản* tại A hoặc G hoặc mômen được *truyền* qua D. Nó tuân theo quan hệ nhân quả giữa mômen và chuyển động quay rằng thành phần quan trọng nhất của mômen được truyền được sẽ gây ra chuyển động quay của vật.



HÌNH 19.46 Giản đồ bố trí các thiết bị được dùng để đo mômen và công suất

Trong một chừng mực nào đó, các khung của thiết bị dẫn động và được dẫn động và các bộ phận nối đất của chúng là cứng *hoàn toàn*, mômen liên kết tại A bằng mômen tại B, cũng như mômen liên kết tại G bằng với mômen tại F. Dưới các điều kiện cân bằng, các trạng thái bằng nhau này không phụ thuộc vào bất kỳ thành phần nào. Cũng dưới các điều kiện cân bằng, ngoại trừ các mômen *ký sinh* đối xứng thông thường (sinh ra do ma sát tiếp xúc, trượt không khí trên các bề mặt chuyển động nhanh), mômen dẫn động tại B sẽ cân bằng với mômen cản tại F.

Các mômen cản tại A và G thường được xác định từ các phương pháp đo lực tác dụng tại một khoảng cách cố định cho trước bởi dụng cụ đo. Mômen truyền được tính từ các phép đo τ_m, γ_m hoặc θ trên một thành phần thích hợp trong vùng D và áp dụng các phương trình (19.60)-(19.62) (hoặc các biểu thức tương tự cho các thành phần không phải là tiết diện tròn cứng [2]). Phép đo ứng suất, sức căng hoặc góc xoắn sinh ra do sự tác động của các mômen *đã biết*, không cần biết chi tiết về các thành phần trong D. Khi $\alpha \neq 0$ và có thể đo được, thì T cũng có thể được xác định từ phương trình (19.59). Chỉ yêu cầu các phương pháp quan sát và không tiếp xúc, nên phương pháp này đặc biệt hữu ích cho việc xác định các mômen tức thời; ví dụ như chúng liên quan tới các kỳ đánh lửa của các động cơ đốt trong nhiều xi lanh [3].

Phương trình (19.63) và (19.64) *chỉ* áp dụng khi có chuyển động quay, vì nếu không có chuyển động thì không sinh công và công suất truyền cũng bằng không. Phương trình (19.63) có thể được sử dụng để tính mômen *trung bình* từ các phép đo nhiệt lượng của lượng nhiệt tạo thành (bằng với

công cơ học) trong một tổng số vòng quay ($\equiv \theta/2\pi$). Phương trình (19.64) được áp dụng trong việc đo công suất, trong đó T được xác định bởi các phương pháp dựa trên các phương trình (19.58), (19.60), (19.61), (19.62) và ω được đo bằng các phương pháp thích hợp bất kỳ [4].

F, T và ϕ thỉnh thoảng được đo bằng các phương pháp cơ học đơn giản. Ví dụ như một "mômen xoắn" thường được sử dụng cho việc siết chặt có điều khiển của các bộ khoá ren. Trong những thiết bị này, mômen được hiển thị bởi vị trí của một kim di chuyển trên một thang chia độ tương ứng với sự biến dạng đàn hồi của lò xo, trong trường hợp đơn giản nhất là sự cong uốn của một tay vặn có ren [5]. Tổng quát hơn, các *cảm biến* hoặc các *bộ chuyển đổi* được sử dụng để biến đổi đại lượng yêu cầu (mômen hoặc tốc độ có liên quan) thành một tín hiệu điện tỷ lệ tuyến tính. Việc tính toán P thường yêu cầu một phép nhân hai tín hiệu từ hai cảm biến riêng biệt của T và ω. Một bộ chuyển đổi có cường độ của một tín hiệu đơn tỷ lệ với công suất truyền dọc theo trục được mô tả trong [6].

Các kỹ thuật chuyển đổi mômen

Rất nhiều tương tác vật lý được sử dụng để chuyển đổi F, τ, γ, ϕ thành các tín hiệu điện tỷ lệ. Chúng yêu cầu một phần của trục phải dành cho chức năng đo mômen. Hình 19.47 mô tả các tính chất điển hình của các vùng đo cho bốn kỹ thuật đo đang được sử dụng.

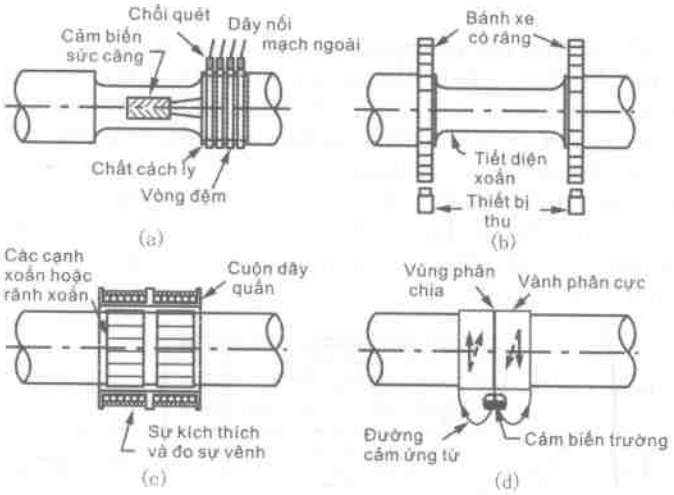
Sức căng bề mặt

Hình 19.47(a) minh hoạ một vùng đo được được định dạng để chuyển đổi sức căng bề mặt (γ_m) thành một tín hiệu điện tỷ lệ với mômen truyền. Sức căng bề mặt trở thành cơ sở chính cho việc đo cả lực và mômen theo sau phát minh về thiết bị đo sức căng dây tích hợp của E.E. Simmons, Jr. và Arthur C. Ruge vào năm 1938 [7]. Một thiết bị đo sức căng hiện đại bao gồm một dây dẫn điện thon dài được định hình uốn khúc trong một lá hoặc một màng kim loại mỏng và được gắn vào giá đỡ cách điện mỏng. giá đỡ được gắn chắc vào bề mặt của thành phần mang tải. Sức căng được đo tương ứng với sự thay đổi điện trở của dây. Nhìn chung sự thay đổi này là rất nhỏ để có thể đo chính xác một cách trực tiếp, nên người ta thường dùng từ hai đến bốn điện trở dây trong một mạch cầu Wheatstone. Để tránh sự phụ thuộc vào trục và tải uốn cũng như sự biến thiên nhiệt độ người ta sử một cầu có bốn điện trở dây gồm hai cặp đối xứng tuyệt đối, mỗi cặp được bố trí theo một hướng căng chính. Trong những trục tròn (và các trục khác được dùng để truyền mômen), các trạng thái căng chính kéo hoặc nén xảy ra tại góc 45° so với trục. Giới hạn của sức căng được tính theo phương trình (19.61) (với τ_m bằng với giới hạn tỷ lệ trượt của vật liệu làm trục), hiếm khi vượt quá một vài phần của 10^3. Các thí nghiệm đặc biệt là để tăng sự đồng thuận của khu vực đo (ví dụ như qua việc giảm đường kính của nó hoặc với các phần rỗng hoặc có hình dạng đặc biệt) để đạt được sức căng tới hạn tại giá trị cao nhất của mômen xoắn cần đo. Điều này sẽ đạt được cực đại hoá độ nhạy của phép đo.

Góc xoắn

Nếu một trục là đủ *thon* (ví dụ $L > 5d$), tại các giá trị tới hạn của τ_m đối với các vật liệu làm trục điển hình, thì ϕ có thể lớn hơn 1°, đủ để đáp ứng độ chính xác cần thiết cho các phép đo mômen xoắn trong thực tế (ϕ tại τ_m có thể được xác định bằng cách giải các phương trình (19.60-19.62)). Hình 19.47(b) biểu diễn một cách bố trí điển hình trong đó mômen xoắn được xác định từ độ sai lệch khe hở răng đồng nhất giữa hai bánh răng giống nhau được gắn ở hai đầu đối diện của một "thanh xoắn". Độ dịch pha của các tín hiệu điện tuần hoàn từ hai đầu dò tỷ lệ với độ dịch chuyển ngoại biên của các điểm nổi bật trên hai bánh răng, do đó tỷ lệ với góc xoắn của thanh xoắn và tỷ lệ với mômen. Những điểm được lựa chọn phải dễ dàng đo được bằng các kỹ thuật từ trường không tiếp xúc, quang học hoặc điện dung.

Với các đầu đo tinh vi hơn, vị trí góc tương đối của hai bánh răng tương đương với biên độ của một tín hiệu điện *đơn*, do đó cho phép đo mômen xoắn thậm chí trên cả trục tĩnh (ví dụ như từ [13-15]). Trong các cấu trúc khác, bộ chuyển đổi dịch chuyển thay đổi hoặc các thiết bị điện liên quan được sử dụng để cung cấp các tín hiệu ra không phụ thuộc vào tốc độ tỷ lệ với ϕ.



HÌNH 19.47 Bốn kỹ thuật được biểu diễn ở trên sử dụng cho việc đo các mômen truyền. (a) Độ căng xoắn trong trục thay đổi điện trở của bốn cảm biến sức căng (hai cái không nhìn thấy) được nối trong một mạch cầu Wheatstone. Trong hình vẽ trên, các kết nối điện được đưa tới cầu thông qua các vành trượt và các răng. (b) Sự xoắn của các tiết diện xoắn gây ra sự thay đổi góc của các tiết diện bề mặt trên các bánh răng lắp ghép. Nó tạo ra sự khác biệt về pha trong các tín hiệu từ hai đầu thu (pickup-sensor). (c) Độ từ thẩm của hai rãnh của trục thay đổi đối nhau với ứng suất xoắn. Nó được đo khi có sự khác nhau giữa điện thế đầu ra của hai hướng vênh. (d) Ứng suất xoắn gây ra sự từ hoá theo chu vi ban đầu của vành (mũi tên nét liền) tới hướng nghiêng (mũi tên nét đứt). Sự từ hoá xoắn ốc gây nên các cực từ trường để xuất hiện một vùng phân chia và các giới hạn vành. Từ trường thu được, được đo bằng các cảm biến từ

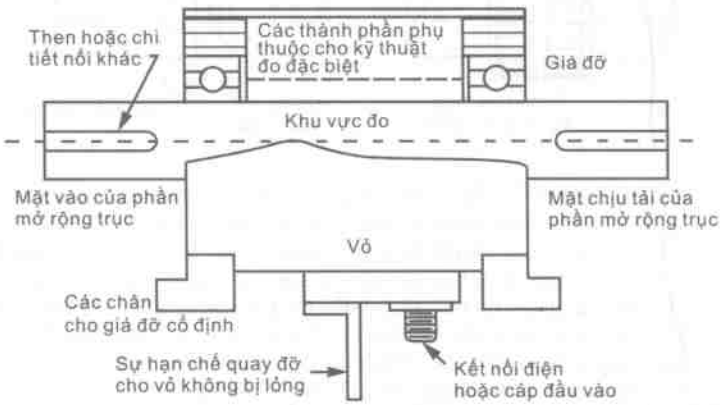
Ứng suất

Cùng với sức căng đàn hồi, các ứng suất được biểu thị bằng sự thay đổi của các tính chất từ trường của các vật liệu sắt từ dùng để làm trục. "Sự tương tác từ dẻo này" cung cấp một cơ sở cho phương pháp đo mômen xoắn không tiếp xúc. Có hai dạng của bộ chuyển đổi từ dẻo-mômen xoắn: Dạng thứ nhất lấy tín hiệu ra dựa trên sự biến thiên độ dẫn của mạch từ; dạng thứ hai tạo ra một từ trường tương ứng với mômen. Các chuyển đổi dạng 1 sử dụng các cấu trúc điển hình như "nhánh," " chéo," hoặc "cuộn từ" [9]. Trong các kiểu dạng nhánh và chéo, mômen được xác định thông qua sự chênh lệch độ từ thẩm dọc theo các đường xoắn ốc cắt nhau với một góc 45° (các hướng ứng suất chính) trên bề mặt của trục hoặc trên bề mặt của một vật liệu đặc biệt được gắn với trục. Trong các cấu trúc cuộn từ, mômen được đo thông qua sự khác biệt độ từ thẩm trục của hai vùng bề mặt gần kề, nối đầu với các trục từ trường đối xứng (cơ bản dọc 45° theo hướng ứng suất chính). Mặc dù các cảm biến dạng nhánh và chéo đã được thu nhỏ, nhưng những thay đổi cục bộ của các đặc tính từ trường của các bề mặt trục cơ bản làm giới hạn độ chính xác của chúng. Các thiết kế kiểu "cuộn từ", minh hoạ trong hình 19.47(c), loại bỏ khó khăn trên bằng cách lấy giá trị trung bình của những thay đổi đó. Các bộ chuyển đổi dạng thứ 2 nhìn chung được thiết kế với một vòng làm bằng vật liệu phóng xạ từ dẻo được gắn cứng vào trục. Vòng này được từ hoá trong suốt quá trình sản xuất bộ chuyển đổi, thường là với mỗi nửa trục được phân cực theo hướng đường tròn ngược chiều như mô tả bởi các mũi tên liền trong hình 19.47(d) [11]. Khi có sự tác dụng của mômen xoắn tác, sự từ hoá nghiêng về các hướng xoắn (mũi tên nét đứt), khiến các cực từ trường hình thành ở thành vùng trung tâm và (của cực ngược dấu) tại các mặt cuối của vòng. Mômen xoắn được tính từ các tín hiệu ra của một hoặc nhiều cảm biến từ trường (ví dụ: hiệu ứng Hall, tính kháng từ hoặc thiết bị định hướng từ trường trái đất) được gắn để đo cường độ và độ phân cực của từ trường phát sinh trong không gian gần vòng.

Cấu trúc của bộ chuyển đổi mômen xoắn, hoạt động và ứng dụng

Mặc dù một vùng đo mômen xoắn có thể được tạo trực tiếp trên trục mong muốn, người ta thường gắn một bộ chuyển đổi mômen xoắn dạng môđun được lắp đặt trước vào trong đường

truyền. Các bộ chuyển đổi dạng này thường có sẵn với phạm vi từ 0.001 đến 200000 Nm. Nguyên tắc hoạt động, lắp đặt chi tiết và hướng dẫn sử dụng được giới thiệu trong các catalog và các tài liệu của nhiều nhà sản xuất khác nhau [12-20]. Các nhãn hiệu thường xác định một dạng chuyển đổi cụ thể; ví dụ như *torquemeters* [13] chỉ họ các thiết bị đo sức căng không tiếp xúc, *Torkducer*® [18] chỉ họ các thiết bị chuyển đổi từ dẻo dạng 1, *Torqstar*™ [12] chỉ một dòng các chuyển đổi từ dẻo dạng 2, *torquetronic* [16] chỉ một họ các bộ chuyển đổi sử dụng các cảm biến góc xoắn quấn quanh và *TorXimitor*™ [20] chỉ các chuyển đổi sức căng, không tiếp xúc, dựa trên quang điện tử. Nhiều thiết bị dạng này có các đặc tính tốt hơn cả công nghệ đo cũng như dải đo của chúng. Hình 19.48 mô tả các đặc tính phổ biến đó.



HÌNH 19.48 Bộ chuyển đổi mômen xoắn điều chỉnh biểu diễn các đặc tính chung và sự lắp ghép khác cho khung cứng hoặc khung tự do. Các ổ đỡ chỉ được sử dụng trong các mô hình quay. Các phần trục mở rộng có then hoặc các đặc điểm khác để làm thuận tiện truyền mômen quay

Các vấn đề cơ khí

Tốc độ hoạt động lớn nhất biến thiên rộng; các giới hạn trên phụ thuộc vào kích cỡ, nguyên tắc hoạt động, dạng của các giá đỡ, sự bôi trơn và sự cân bằng động của các cơ cấu quay. Các vòng bi, thường được bôi trơn bằng mỡ, dầu hoặc phun dầu. Các mômen phụ kết hợp với dầu bôi trơn các giá đỡ và các tấm lót làm giảm độ chính xác của các phép đo mômen nhỏ nhất (Các thiết bị loại nhỏ không có vòng bi [15].). Việc bôi trơn áp lực cho phép hoạt động tới tốc độ 80,000 vòng trên phút [16]. Việc hoạt động ở tốc độ cao yêu cầu sự xem xét cẩn thận các ảnh hưởng của các ứng suất ly tâm tới đại lượng quả đo cũng như các giải tốc độ tới hạn (gây ra dao động). Các dao động xoắn kết hợp với hiện tượng cộng hưởng đàn hồi của trục (mô tả bởi hằng số lò xo của nó) với quán tính quay của cặp khối lượng có thể làm sai lệch phép đo, phá huỷ bộ chuyển đổi bởi sự lệch trục động khi vượt quá mômen tải của nó và thậm chí gây ra *nguy hiểm cho tính mạng con người.*

Các vỏ có thể *đặt* trên các gối trục hoặc được *gắn cứng*. Các vỏ thả tự do bị hạn chế quay bởi các phần tử mềm như cáp, lò xo hoặc là dầm công xôn hoặc đặc trưng lệch tâm ra ngoài đơn giản là giảm sự hoạt động chống lại bề mặt cố định. Trong thiết kế trôi tự do, các đường tâm của các trục dẫn động hoặc bị động phải được đặt thẳng hàng. Các đầu nối cứng xoắn "linh hoạt" tại mỗi điểm đầu của trục được dùng để cung cấp các sự sai lệch về góc nhỏ hoặc/và sự lệch trục (lệch đường tâm). Theo nghĩa khác thì việc sử dụng các đầu nối linh động kép tại một đầu trục sẽ cho phép điều chỉnh đầu nối ở đầu kia của trục. Các vỏ được gắn cứng được lắp với các chân gắn hoặc là các giá đỡ tương tự như trong vỏ của các môtơ điện. Các mô hình thả tự do thỉnh thoảng được gắn cứng sử dụng các đĩa thích hợp gắn chặt với vỏ. Người ta thích dùng cách gắn cứng bởi vì khi việc làm đồng tâm hai trục dẫn động và trục bị động trở nên khó khăn hoặc không khả thi, ví dụ như khi các máy móc chủ động hoặc bị động thay đổi thường xuyên. Việc gắn cứng các vỏ *yêu cầu* sử dụng việc nối ghép linh động kép tại *cả* hai đầu trục.

Các mô đun chuyển đổi được thiết kế cho các ứng dụng giới hạn hoặc không quay không yêu cầu về độ uốn. Để chắc chắn rằng đo được *tất cả* các mômen đặt vào tại các đầu, thì các chuyển

đổi dạng mômen giới hạn việc gắn kết của vỏ với trục chỉ ở một mặt của khu vực đo là khá quan trọng. Nếu trong trạng thái quay hoặc tĩnh, các đầu ngoài của trục nhìn chung bao gồm cả các chi tiết nối mômen như kiểu phẳng, kiểu ổ khoá, kiểu trục, kiểu đai truyền, kiểu vành,...

Các vấn đề điện

Dựa trên những điểm rất tự nhiên của chúng, các bộ chuyển đổi yêu cầu công suất điện đầu vào hoặc sự kích thích. Tín hiệu răng cưa từ những thiết bị đo hiện nay nhìn chung cũng yêu cầu "chuẩn hoá" vào trong một cấp hoặc một dạng thích hợp cho hiển thị trên một đồng hồ số hoặc tương tự hoặc bắt được các yêu cầu đầu vào thiết bị thu dữ liệu. Sự kích thích và chuẩn hoá tín hiệu được cung cấp bởi các mạch điện được thiết kế để phù hợp với các đặc tính của bất kỳ một công nghệ đo đặc biệt nào. Ví dụ các mạch cầu đo độ biến dạng dùng nguồn cơ bản là 10 – 20V (DC hoặc AC) và có các dải tín hiệu ra từ 1.5-3.0 mV trên một Vôn kích thích tại tải trọng ước lượng. Muốn khuếch đại các tín hiệu yếu (mili Vôn) có thể dùng các bộ khuếch đại với tỷ lệ khuếch đại có thể là 100 hoặc lớn hơn. Với kích thích AC, cần thiết phải có các bộ tạo dao động và các bộ giải điều chế (hoặc là các bộ tách sóng, bộ chỉnh lưu). Các phần tử mạch của các dạng này là tiêu chuẩn khi mà các phần tử mạch cảm ứng được sử dụng cho cả phần thiết yếu của cảm biến hoặc đơn giản chỉ để thực hiện các cấu trúc không tiếp xúc.

Các đầu đo ứng suất, các bộ chuyển đổi vi phân và các kỹ thuật đo liên quan yêu cầu các thành phần điện cần được gắn *trên* các phần chịu mômen. Công suất nguồn nuôi và các tín hiệu ra từ các thành phần trên trục quay yêu cầu các phương pháp đo đặc biệt. Phương pháp thông dụng nhất và trực tiếp nhất là sử dụng các phần tử cảm biến ở đó các bánh răng (thông dụng là graphit bạc) chống đỡ lại các vành trượt (bạc). Tuổi thọ của nó được kéo dài qua việc làm cho các bánh răng nhấc khỏi các vành quay khi các phép đo không thực hiện được. Người ta sử dụng một vài phương pháp không tiếp xúc. Ví dụ có thể cung cấp nguồn qua việc nối ghép cảm biến giữa sự vênh của các chuyển đổi tĩnh và quay [12-15], qua độ rọi của các tế bào quang điện được gắn trên trục [20] hoặc thậm chí bởi các pin được đánh đai với trục [21] (được giới hạn bởi lực li tâm với các tốc độ tương đối thấp). Các tín hiệu ra được đưa tới trục thông qua các bộ chuyển đổi quay, bởi các đèn LED (hồng ngoại) bằng điều tần [19, 20] hoặc bởi tần số radiô (FM) từ xa [21]. Ở đó sự quay của trục bị hạn chế không hơn một vài vòng đầy đủ, như là trong bánh răng chủ động, các cơ cấu chấp hành van hoặc là các kết cấu cơ khí dao động, việc thường dùng mạng điện bằng đồng (hard wiring) cho cả mạch công suất và mạch tín hiệu là phù hợp. Việc nối dây linh động đã tối giản hoá các mômen xoắn ngẫu nhiên và tạo cho một nó có tuổi thọ lâu hơn và đáng tin hơn. Ta nên tránh tất cả các đánh giá về mạng như thế này trong các kết cấu và kỹ thuật không tiếp xúc.

Giá thành và chọn lựa

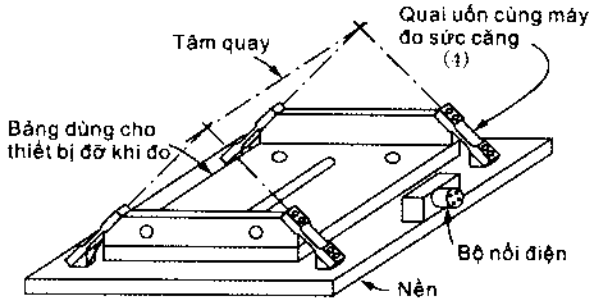
Giá cả cho các bộ chuyển đổi mômen phản ánh dải làm việc sẵn có, các mức độ biểu diễn, các loại, kiểu, các đặc tính lựa chọn và các phụ tùng khác. Nhìn chung, giá của bất kỳ một loại nào là tăng đều phụ thuộc vào khả năng làm việc. Các dạng phản ứng có giá khoảng một nửa các khối quay lấy mẫu tương tự. Một loại chân đính, công suất 565 Nm, các bộ chuyển đổi biến dạng với hoặc vành trượt hoặc các chuyển đổi quay và cảm biến tốc độ trọn vẹn, mỗi cái có độ phi tuyến và độ trễ đặc trưng với ±0.1%, giá khoảng 4000 USD (1997). Thiết bị đo tương thích cung cấp tín hiệu kích thích cho bộ chuyển đổi, sự chuẩn hoá và có đầu ra tương tự với bộ hiển thị số của mômen và tốc độ giá khoảng 2000 USD. Một bộ chuyển đổi làm bằng vật liệu từ đàn hồi có thể so sánh được với độ chính xác ±0.5% giá khoảng 1300 USD. Các bộ chuyển đổi công suất cao cho yêu cầu về tốc độ cực cao với việc lựa chọn bôi trơn thích hợp với giá có thể cao hơn 50,000 USD. Các chuyển đổi từ đàn hồi dạng hai, khối lượng sinh ra cho các ứng dụng điều khiển công suất truyền động, với giá xấp xỉ khoảng 10 USD.

Thiết bị đo công suất

Các máy quay tồn tại ở các dạng xác định mà không có giới hạn và có thể hoạt động tại các cấp độ công suất nhỏ hơn 1W cho tới vài chục MW, một dải rộng hơn 10^8. Các thiết bị đo công suất có

ở dải rộng tương tự với dạng và kích cỡ. Công suất cơ khí chảy từ *nguồn* tới *tải*. Công suất này có thể được quyết định *trực tiếp* theo các kết quả của phương trình (19.64), đơn giản qua việc đo đạc, thêm vào vận tốc góc ω, mômen ra của nguồn hoặc mômen vào tải, bất cứ cái nào cũng là thiết bị cần kiểm tra (DUT). Khi một DUT là một nguồn, việc đo thường yêu cầu qua dải đặc tính tốc độ và mômen. Khi một DUT đơn giản là một cái bơm hoặc một cái quạt hoặc dạng tải khác hoặc một số tải khác mà nó đơn giản chỉ thay đổi tốc độ và mômen (ví dụ như một hộp số), các thiết bị kiểm tra phải bao gồm một *nguồn* có khả năng cung cấp công suất thông qua dải lấy mẫu đầy đủ của mômen và tốc độ của một DUT. Có thể tính được công suất cơ khí *gián tiếp* qua sự bảo toàn năng lượng (ví dụ nhiệt năng hoặc điện năng) và hoặc đo các đại lượng bằng nhiệt lượng hoặc điện liên quan. Trong phạm vi của dải rộng các phương pháp sẵn có ổn định và các thiết bị cho phép đo chính xác cho cả tốc độ và mômen xoắn, phương pháp đo gián tiếp chỉ cần được xem xét khi các yêu cầu đặc biệt bởi phép đo trực tiếp trở nên khó khăn.

Lực kế (dynamometer) là tên gọi đặc biệt đặt cho thiết bị đo công suất, nó bao gồm các chức năng hấp thụ và/hoặc điều khiển và ở một mức nào đó mômen có thể được đo bởi các phản lực trên một phần tĩnh (stato). Một lực kế hiệu quả thuận tiện cho việc lắp các DUT vào theo cách là cho phép nó đo được cả mômen bằng cấu trúc đó. Hình 19.49 biểu diễn một thiết bị được thiết kế để thực hiện những phép đo này. Các mô hình có tính thương mại (Torque Table [12] coi như để hỗ trợ cho các DUT trọng lượng khoảng 222 – 4900 N có thể đo đo mômen ở mức từ 1.3 tới 226 Nm. Sử dụng "Các ống xoắn" [4] hoặc việc lắp đặt các DUT khác. Ngoài việc có khả năng cộng hưởng khi quay hoặc đàn hồi, các hệ thống này còn không có các giới hạn về tốc độ. Thông dụng hơn và đặc biệt cho các máy lớn, các lực kế bao gồm một máy truyền động chuyên dụng hoặc máy hấp thụ. Các gia tốc kế được phân chia dựa theo các chức năng của chúng như khả năng *truyền động* hoặc *hấp thụ* (đôi khi là *theo dõi*). Một *lực kế vạn năng* có thể có chức năng như là một bộ truyền hoặc một bộ hấp thụ.



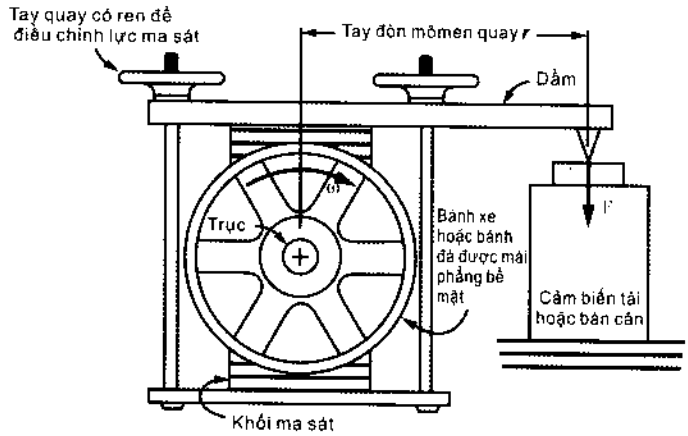
HÌNH 19.49 Hệ thống đo các lực hoạt động của một máy quay. Trục của máy phải được đặt chính xác với trục quay. Các lỗ và các đường tâm trong bảng thuận tiện cho việc gắn máy và sắp thẳng hàng. Các lỗ ở phía trên bên phải dùng để gắn một cánh tay đòn để treo các vật cần đo [4, 11]

Các lực kế hấp thụ

Lực kế hấp thụ, thường được gọi là *phanh hãm* bởi vì việc điều khiển của chúng phụ thuộc vào việc hình thành một mômen *kéo* có thể điều khiển được, chuyển công cơ học thành nhiệt. Một mômen kéo, được phân biệt với một mômen hoạt động, có thể hoạt động chỉ để cản trở và không thiết lập nên một mômen quay. Người ta dùng các thiết bị tản nhiệt khi nhiệt độ gia tăng trong lực kế, thường dùng các dòng chất lỏng chuyển động, bằng không khí hoặc nước. Mômen kéo được tạo ra bởi các quy trình mất mát cố hữu như là: ma sát giữa các bề mặt chuyển động, sự kéo hoặc sự chảy rối của các chất lỏng bôi trơn, sự chảy của dòng điện hoặc hiện tượng từ trễ.

Gaspard Riche de Prony (1755 – 1839), vào năm 1821 đã phát minh ra một dạng rất hữu ích của một bánh răng ma sát thoả mãn các yêu cầu kiểm tra các động cơ hơi nước cái mà sau đó đã trở nên rất thông dụng. Các bánh răng loại này được dùng cho các mục đích hướng dẫn để chúng đưa ra các nguyên tắc chung và xem xét điều khiển chủ yếu cho tất cả các loại lực kế hấp thụ. Hình 19.50 mô tả dạng cơ bản và các đặc điểm cấu trúc của một *phanh hãm prony*. Công suất

trung bình truyền qua trục của động cơ dẫn động tới tải điều khiển (cho các mục đích đo) được chuyển thành nhiệt thông qua công được thực hiện bởi các lực ma sát giữa các khối ma sát và giữa vành bánh xe chuyển động. Việc điều chỉnh độ căng của các bu lông kẹp biến đổi mômen kéo theo yêu cầu. Nhiệt được giải phóng từ bên trong bề mặt của vành bởi việc sắp xếp sử dụng một dòng chảy liên tục hay sự bốc hơi của nước. Không cần biết cường độ của các lực ma sát, thậm chí không biết bán kính của bánh xe bởi vì trong khi mômen kéo có xu hướng làm quay các thiết bị được kẹp, nó được giữ cố định bởi lực hoạt động F_r có cùng độ lớn nhưng ngược chiều. Lực F tại điểm cuối của cánh tay đòn dài r (kích thước cố định của dụng cụ) được đo bởi một cân hoặc một cảm biến tải. Công suất được tính từ phương trình (19.58) và (19.64) là $P = Fr\omega = Fr2\pi N/60$ trong đó N có đơn vị là vòng/phút.



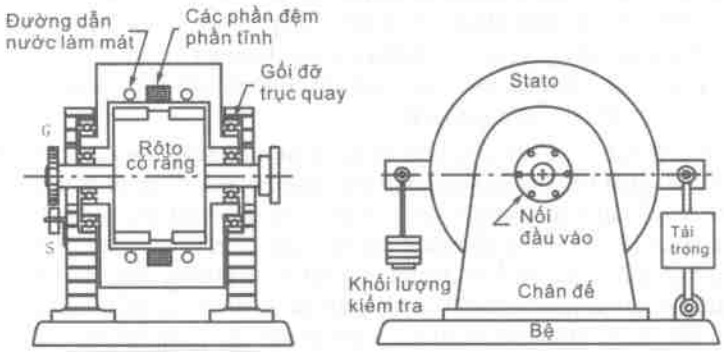
HÌNH 19.50 Một bánh răng prony cổ điển. Bánh răng này bao gồm các đặc tính xác định của tất cả các lực kế thẩm thấu: Chuyển đổi công cơ học sang dạng nhiệt và quyết định công suất từ các giá trị đo được của mômen hoạt động và vận tốc góc

Các lực cản không đều liên quan tới các hệ số dao động của ma sát nhìn chung tạo thành sự cọ sát nhẹ để tạo ra mômen kéo. Tuy nhiên, bởi vì có thể dễ dàng tạo ra chúng, các phương pháp *đặc biệt* dùng bánh răng prony, thường chỉ sử dụng các dây thừng quấn hoặc là các chêm gỗ được nối bằng các dây thừng hoặc dây đai, các phát hiện này được sử dụng trong phòng thí nghiệm hoặc bất kỳ phép đo không theo yêu cầu hoặc phép đo công suất không thường xuyên. Nhiều dạng bánh răng prony được làm tinh vi hơn sử dụng trong các lực kế độc lập với cái bình chứa nước lạnh kích cỡ tới 746 kW (1000 Hp) để điều khiển tới 3600 vòng/phút và mômen là 5400 Nm [23]. Các mô hình tĩnh hoặc động được dùng trong việc kiểm tra các động cơ điện cỡ lớn cũng như các động cơ và truyền động trong các phương tiện nông nghiệp. Các phanh hãm prony hoàn toàn cho phép mômen kéo có thể giảm tốc độ xuống không.

William Froude (1810 – 1879) [24] phát minh ra một *phanh hãm nước* (1877), nó không phụ thuộc vào ma sát. Mômen kéo bên trong một *bánh răng Froude* được hình thành giữa rôto và stato bởi mômen được truyền từ rôto tới bình nước. Rôto quay tác dụng lực vào nước để lan truyền giữa các túi dạng cốc thả vào trong các bề mặt được phủ của cả rôto và stato. Rôto được đỡ phía bên trong stato và giữ cố định bởi các ổ bi. Những cái bịt dạng đường dẫn ngăn không cho nước rò rỉ trong khi hạn chế sự ma sát kéo và tổn hao. Vỏ stato được đỡ trong một khung lực kế dạng cái nôi bởi các gối trục. Có thể đo mômen cản sự quay thông qua các phản lực theo nhiều cách khác nhau với các bánh răng prony. mômen kéo được điều chỉnh bởi một van, điều khiển cả sự giảm áp trong các ống nước nhỏ bên ngoài [25] hoặc các ống bên trong [26] hoặc thỉnh thoảng có hai van điều khiển cả hai [27] (cho phép thay đổi mômen rất nhanh). Trong bất cứ trường hợp nào năng lượng thẩm thấu được đưa đi qua dòng nước chảy tuần hoàn. Các dạng khác của các bánh răng nước gắn nối, trong khi các kết cấu tương tự như bên ngoài, các cấu trúc trong chắc chắn khác và phụ thuộc vào các nguyên tắc khác để hình thành các mômen kéo (ví dụ các rôto nhẵn phát triển sự kéo nhớt bởi sự kéo và sự nhiễu loạn). Do đó, tất cả các *lực kế thuỷ lực* hoạt động theo mục đích như là các

bơm li tâm *không hiệu lực*. Bỏ qua các mẫu bên trong và các cài đặt cho van, mômen kéo lớn nhất là thấp ở tốc độ thấp (bằng không khi dừng lại) nhưng nó có thể tăng tốc rất nhanh, thay đổi theo bình phương vận tốc quay. Việc không làm giảm được sự có mặt của nước, cũng như là độ hở, đánh giá giới hạn thấp hơn phụ thuộc vào tốc độ trên mômen kéo có thể *điều khiển* được. Trong bất cứ một thiết kế nào, sự hao mòn và dao động gây bởi sự tạo ra lỗ trống phía trên sẽ giới hạn tốc độ và cấp công suất. Các lực kế thuỷ lực luôn có nhiều loại với công suất từ 300 tới 25.000 kW, với một vài khối có thể di động được có công suất thấp ở mức 75 kW [26]. Cái lớn nhất mà người ta đã làm được có thể đạt tới khoảng 75.000 kW (100.000 Hp), đã được dùng để kiểm tra các hệ thống đẩy cho các tàu ngầm hạt nhân. Các tốc độ tối đa phù hợp với các tốc độ điều khiển của các bộ phận đẩy chính cái mà được làm để kiểm tra và do đó nhìn chung làm suy giảm việc tăng công suất. Tua bin hơi tốc độ cao và thiết bị kiểm tra động cơ không gian có thể điều khiển ở tốc độ cao khoảng 30.000 vòng trên phút [25].

Năm 1855, Jean B.L Foucault (1819 – 1868) [22] đã giải thích sự chuyển đổi từ công cơ học thành nhiệt bởi việc quay của một đĩa mạ đồng giữa hai cực của một nam châm điện. Điều này đơn giản được giải thích là sự hình thành của các mômen kéo, dựa trên các *dòng điện xoáy*, từ khoảng năm 1935, đã được ứng dụng rộng rãi trong các lực kế. Hình 19.51 chỉ ra các đặc điểm cần thiết của các phanh dạng này. Việc quay của các rôto lồng sóc qua một vùng từ trường, được tạo bởi dòng điện trực tiếp trong các cuộn dây trong stato, phát sinh ra các dòng điện (xoắn) tuần hoàn cục bộ trong các phần (bằng đồng) cảm ứng điện của stato. Các lực nam châm điện giữa rôto, bị từ hoá bởi từ trường đồng dạng, và trường phát sinh từ các dòng điện xoáy, tạo ra mômen kéo. Mômen này và cả công suất đầu vào cơ học, được điều khiển bằng việc điều chỉnh các *dòng điện kích thích* trong các cuộn dây của stato. Công suất điện đầu vào là nhỏ hơn 1% so với công suất cực đại. Lực kế có hiệu ứng như một máy phát điện tròn ngắn bên trong bởi vì công có liên quan tới sự mất mát do việc cản trở các dòng điện xoắn được đã hình thành *bị hao phí* trong máy. Do có sự làm nóng của các dòng điện xoắn này, nên stato phải được làm mát, thỉnh thoảng dùng các quạt gió (trong các máy công suất nhỏ) [23], nhưng người ta thường dùng dòng nước để lấy nhiệt [25, 27, 28]. Trong các *phanh hãm* bằng dòng điện xoáy (hình dáng được mô tả trong hình 19.51), *dòng nước bị giới hạn* không cho chảy qua khe khô trong stato. Các máy có kích thước lớn hơn thường dùng dạng có khe hở cho nước chảy qua, trong đó nước chảy tuần hoàn xung quanh rôto [28]. Nước trong sự liên hệ với chuyển động của rôto hoạt động tương đối như trong một phanh nước, thêm vào một thành phần không có nam châm điện, do đó đặt một giới hạn thấp hơn cho mômen điều khiển. Khe hở giới hạn giá trị tối thiểu của mômen điều khiển trong các dạng dùng khe khô. Khi các mômen kéo được hình thành bởi chuyển động của rôto, nó nhận giá trị bằng không ở trạng thái tĩnh với bất kỳ giá trị nào của dòng điện kích thích.



HÌNH 19.51 mặt cắt ngang (trái) và hình chiếu cạnh (phải) của một lưu kế dòng điện xoắn. G là bánh răng quay và S là cảm biến tốc độ. Các bộ phận chứa nước làm mát và dây dẫn mang điện tới stato không được biểu diễn ở đây

Sự phát sinh mômen khởi động rất nhanh, xấp xỉ tuyến tính, với tốc độ, cuối cùng tiếp cận với giá trị giới hạn dòng điện bão hoà. Như trong các máy Cradle, mômen kéo được yêu cầu để ngăn

cản stato quay được đo bởi các lực hoạt động tác dụng tại một khoảng cách cố định đã biết trước từ trục quay. Mô hình chuẩn của các phanh hãm dòng điện xoáy có công suất từ nhỏ hơn 1 kW [23, 27] tới hơn 2000 kW [27, 28], với tốc độ tối đa từ 12,000 vòng/phút trong các đơn vị công suất nhỏ hơn và tới 3600 v/ph với các đơn vị công suất lớn hơn. Người ra còn thiết lập các khối đặc biệt với công suất là 3000 Hp (2238 kW) tại các tốc độ 25,000 v/ph [28].

Các phanh *ứng dụng hiện tượng trễ* [29] hình thành mômen xoắn thông qua các lực hấp dẫn/đẩy từ giữa các cực nam châm được hình thành trong một stato mắt cáo cấu tạo bởi một dòng điện thông qua cuộn từ và những cái này được tạo ra trong một rôto dạng "cốc kéo" bởi các cường độ từ trường stato. Sự quay của các rôto thép đặc biệt, thông qua không gian từ trường được tạo thành bởi stato, thu được trong cơ cấu đảo chiều tuần hoàn của tính phân cực của những sự từ hoá cục bộ của nó. Năng lượng có liên hệ với cơ cấu đảo chiều này (tỷ lệ với diện tích của vòng từ trễ của vật liệu chế tạo rôto) được chuyển đổi thành nhiệt bên trong các cốc kéo (drag cup). Nhiệt độ gia tăng bị kiểm soát bởi luồng không khí lạnh bị nén từ một quạt hoặc một nguồn không khí nén. Như với phanh hãm dòng điện xoáy, mômen kéo của những thiết bị này bị kiểm soát bởi dòng điện kích thích. Ngược với nó, mômen kéo ước lượng có thể sẵn sàng giảm tốc độ tới không (Các hiệu ứng dòng điện xoáy chỉ tăng thêm 1% cho mômen kéo khi tốc độ tăng lên 1000 v/ph). Theo đó những phần quay bề mặt phẳng của chúng, các phanh hãm trễ biểu diễn các mômen nhỏ và thấp, từ đó chiếm một vùng động rộng có thể tới 200 lần. Các mô hình chuẩn luôn có dải công suất liên tục tới 6 kW (12kW với hai phanh được làm mát trước và sau bởi hai quạt). Công suất không liên tục trên một đơn vị (khoảng 5 phút hoặc ít hơn) là 7 kW. Một vài máy công suất thấp được làm mát đối lưu; cái nhỏ nhất có công suất liên tục chỉ ở mức 7 W (35 W trong 5 phút). Tốc độ tối đa đạt tới 30,000 v/ph các máy bé nhất và 10,000 v/ph cho các máy lớn nhất. mômen đo được bằng cách sử dụng cầu đo sức căng trên một cánh tay đòn đỡ cho stato của máy.

Các lực kế truyền động và đa năng

Các máy phát điện, cả AC và DC, đưa ra một phương pháp khác tạo mômen kéo có thể điều khiển và chúng ổn định thích nghi cho sự giúp ích của lực kế bởi giá dùng để treo các khung stato. Hơn thế nữa, các máy điện năng dạng này cũng có thể hoạt động trong một mô hình quay nhờ nó có thể chuyển mômen *hoạt động* điều khiển được. Khi xây dựng để hoạt động một cách có lựa chọn trong cả các phương thức dẫn động hoặc hấp thụ, máy phát điện làm việc như là một lực kế đa năng. Với máy phát một chiều trong phương thức bị dẫn, công suất phát bị tiêu tán chủ yếu vào trong dãy điện trở làm lạnh đối lưu. Dòng không khí làm mát máy bằng quạt gió thường là đầy đủ, từ đó *tất cả* các công cơ học đầu vào tiêu tan ra ngoài. Tuy nhiên, *tất cả* các công cơ học đầu vào được tính là tích của lực hoạt động và tốc độ quay. Khi theo dõi, mômen và tốc độ được điều khiển bởi việc bổ sung cả hai dòng điện phần cảm và dòng phần ứng. Mô hình các máy xoay chiều tận dụng các bộ chuyển đổi công suất đầu vào tái sinh để cho phép công suất hãm được trả về dòng công suất có ích. Khi theo dõi, tốc độ được kiểm soát bằng công suất cao, trạng thái ổn định, các bộ biến đổi tần số có thể điều chỉnh được. Cấu trúc trong là một môtơ cảm ứng điện pha ba đơn giản, không có cả chổi than, vành trượt hoặc cả các bộ chuyển mạch. Việc không có sự vênh của rôto cho phép nó hoạt động ở tốc độ cao hơn các máy điện DC. Các lực kế vạn năng là các máy "bốn kỳ", một thuật ngữ chỉ khả năng sinh mômen của chúng cùng một hướng hoặc ngược hướng với vận tốc tương đối của chúng. Khả năng duy nhất này cho phép mômen kéo ảnh hưởng có thể giảm tới không ở bất kỳ tốc độ nào. Các lực kế vạn năng này [25, 28] luôn có với dải công suất giới hạn tương đối (56–450 kW), với mômen tương xứng (110–1900 Nm) và các dải tốc độ (4500 13,500 v/ph), phản ánh ứng dụng chính trong sự phát triển động cơ ô tô. Các lực kế đặc biệt dùng cho kiểm tra việc chuyển đổi và các bộ phận bộ truyền động lái của xe khác có thêm DUT giữa một động cơ điêzen hoặc động cơ chính của môtơ điện và các phanh hãm thuỷ lực hoặc dòng điện xoáy [30].

Độ chính xác của phép đo

Độ chính xác của phép đo công suất nhìn chung là bị giới hạn bởi phép đo mômen (±0.25% tới ±1%) vì có thể đo vận tốc góc với bất kỳ độ chính xác mong muốn nào. Độ sai số mômen có thể

tăng từ các ứng dụng mômen bên ngoài và từ các kết nối bằng ống hoặc bằng cáp (không chỉ dẫn ở đây), từ khe hở của các phần bên ngoài và từ sự kiểm định sai của các cảm biến tải. Ma sát không biết trước trong các ổ trục đỡ vỏ của các lực kế có thể tương thích với độ chính xác phép đo mômen. Trên lý thuyết, các ổ trục chống ma sát do được bôi trơn tốt sẽ không có đóng góp đáng kể tới mômen cản. Tuy nhiên, trong thực tế khu vực tiếp xúc không thay đổi của các viên bi hoặc các phần tử lăn trên ổ trục sẽ làm chúng có xu hướng nứt (một dạng của mỏi) do các lực tăng trong quá trình dao động, các khối lượng không được đỡ của các thiết bị gắn vào hoặc thậm chí là sự sai lệch không cố ý trong quá trình lắp máy. Vấn đề này có thể được làm nhẹ bớt bằng cách quay có chu kỳ của các vòng bi (vành ngoài). Trong một vài kết cấu ổ bimang ổ bi, thì các ổ bi trung tâm tiếp tục quay ở tốc độ thấp bởi một môtơ điện trong khi những cái khác vẫn tránh được các vấn đề nhờ stato nâng bi trong dầu thủy tĩnh [28].

Giá thành

Giá thành của các lực kế có thể thay đổi nhiều phụ thuộc vào dải mô men, tốc độ và các mức công suất, cùng với sự thay đổi trong mức độ tinh vi của các thiết bị đo liên quan. Các hệ thống giảm xóc được minh hoạ trong hình 19.49 (dùng cho các máy quay) giá khoảng 4000 – 6000 USD, tuỳ theo công suất. Một phanh hãm nước *di động* 100 Hp (74.6 kW) lắp với một cảm biến sức căng và một thiết bị hiển thị số cho mômen, tốc độ và công suất giá khoảng 4500 USD hoặc 8950 USD với thiết bị có thể thu được nhiều dữ liệu liên quan hơn [26]. Một số lực kế thuỷ lực tĩnh (hoặc di động) giá từ 113 USD/kW ở kích cỡ nhỏ giảm xuống 35 USD/kW cho cái rất lớn [27]. Quá trình vận chuyển, cài đặt và lắp ráp có thể làm tăng đáng kể giá trên. Các lực kế dòng xoáy giá chỉ khoảng 57 USD/kW tới gần 700 USD/kW, phụ thuộc vào công suất tương ứng, loại hệ điều khiển và thiết bị [24, 25, 28]. Các phanh trễ với các cảm biến đo tốc độ giá khoảng 3300 USD tới 14,000 USD phụ thuộc vào công suất. Các bộ điều khiển tương thích, từ bằng tay tới lập trình hoàn toàn cho điều khiển kiểm thử bằng máy tính và sự thu thập dữ liệu thông qua một giao diện IEEE-488, giá trị biến thiên vào khoảng 500 USD tới 4200 USD Sự hiển thị tốt và linh động của các lực kế vạn năng AC được phản ảnh qua giá trị rất cạnh tranh từ 670 USD tới 2200 USD/kW [25, 28].

Tài liệu tham khảo

[1] Pinney, C. P. and Baker, W. E., Velocity Measurement, *The Measurement, Instrumentation and SensorsHandbook,* Webster, J. G., Ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.

[2] Timoshenko, S. *Strength of Materials,* 3rd ed., New York: Robert E. Kreiger, Part I, 281-290; Part II,235-250, 1956.

[3] Citron, S. J., *On-line engine torque and torque fluctuation measurement for engine control utilizing crankshaft speed fluctuations*, U. S. Patent No. 4,697,561, 1987.

[4] Supplement to ASME Performance Test Codes, Measurement of Shaft Power, ANSI/ASME PTC 19.7-1980 (Reaffirmed 1988).

[5] See, for example, the catalog of torque wrench products of Consolidated Devices, Inc., 19220 SanJose Ave., City of Industry, CA 91748.

[6] Garshelis, I. J., Conto, C. R., and Fiegel, W. S., A single transducer for non-contact measurement ofthe power, torque and speed of a rotating shaft, SAE Paper No. 950536, 1995.

[7] Perry, C. C., and Lissner, H. R., *The Strain Gage Primer,* 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1962, 9. (This book covers all phases of strain gage technology)

[8] Cullity, B. D., *Introduction to Magnetic Materials,* Reading, MA: Addison-Wesley, 1972, Section 8.5,266–274.

[9] .Fleming, W. J., Magnetostrictive torque sensors-comparison of branch, cross and solenoidaldesigns, SAE Paper No. 900264, 1990.

[10] Nonomura, Y., Sugiyama, J., Tsukada, K., Takeuchi, M., Itoh, K., and Konomi, T., Measurements of engine torque with the intra-bearing torque sensor, SAE Paper No. 870472, 1987.

[11] Garshelis, I. J., *Circularly magnetized non-contact torque sensor and method for measuring torque using same,* U.S. Patent 5,351,555, 1994 and 5,520,059, 1996.

[12] Lebow® Products, Siebe, plc., 1728 Maplelawn Road, Troy, MI 48099, Transducer Design Fundamentals/Product Listings, Load Cell and Torque Sensor Handbook No. 710, 1997, also: TorqstarTM and TorqueTable®.

[13] S. Himmelstein & Co., 2490 Pembroke, Hoffman Estates, IL 60195, MCRT® Non-Contact StrainGage Torquemeters and Choosing the Right Torque Sensor.

[14] Teledyne Brown Engineering, 513 Mill Street, Marion, MA 02738-0288.

[15] Staiger, Mohilo & Co. GmbH, Baumwasenstrasse 5, D-7060 Schorndorf, Germany (In the U.S.:Schlenker Enterprises, Ltd., 5143 Electric Ave., Hillside, IL 60162), Torque Measurement.

[16] Torquemeters Ltd., Ravensthorpe, Northampton, NN6 8EH, England (In the U.S.: Torquetronics Inc., P.O. Box 100, Allegheny, NY 14707), Power Measurement.

[17] Vibrac Corporation, 16 Columbia Drive, Amherst, NH 03031, Torque Measuring Transducer.

[18] GSE, Inc., 23640 Research Drive, Farmington Hills, MI 48335-2621, Torkducer®.

[19] Sensor Developments, Inc., P.O. Box 290, Lake Orion, MI 48361-0290, 1996 Catalog.

[20] Bently Nevada Corporation, P.O. Box 157, Minden, NV 89423, TorXimitorTM.

[21] Binsfield Engineering, Inc., 4571 W. MacFarlane, Maple City, MI 49664.

[22] Gillispie, C. C. (Ed.), *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. XI, New York: Charles Scribner's Sons,1975.

[23] AW Dynamometer, Inc., P.O. Box 428, Colfax, IL 61728, Traction dynamometers: portable and stationary dynamometers for motors, engines, vehicle power take-offs.

[24] Roy Porter (Ed.), *The Biographical Dictionary of Scientists*, 2nd ed., New York: Oxford University Press, 1994.

[25] Froude-Consine, Inc., 39201 Schoolcraft Rd., Livonia, MI 48150, F Range Hydraulic Dynamometers, AG Range Eddy Current Dynamometers, AC Range Dynamometers.

[26] Go-Power Systems, 1419 Upfield Drive, Carrollton, TX 75006, Portable Dynamometer System, Go-Power Portable Dynamometers.

[27] Zöllner GmbH, Postfach 6540, D-2300 Kiel 14, Germany (In the U.S. and Canada: Roland Marine, Inc., 90 Broad St., New York, NY 10004), Hydraulic Dynamometers Type P, High Dynamic Hydraulic Dynamometers.

[28] Dynamatic Corporation, 3122 14th Ave., Kenosha, WI 53141-1412, Eddy Current Dynamometer—Torque Measuring Equipment, Adjustable Frequency Dynamometer.

[29] Magtrol, Inc., 70 Gardenville Parkway, Buffalo, NY 14224-1322, Hysteresis Absorption Dynamometers... Hicklin Engineering, 3001 NW 104th St., Des Moines, IA 50322, TransdyneTM (transmission test systems, brake and towed chassis dynamometers).

19.5 Đo lưu lượng

Richard Thorn

Giới thiệu

Phép đo lưu lượng đã rất quen thuộc với cuộc sống của chúng ta. Ta có thể thấy chúng hàng ngày như các thiết bị đo nước và khí. Tương tự như thế, các lưu lượng kế cũng được sử dụng trong hầu hết các ngành công nghiệp, từ dầu khí tới sản xuất và chế biến thực phẩm. Do đó không ngạc nhiên rằng ngày nay, tổng giá trị của thị trường lưu lượng kế toàn cầu là hơn 3000 triệu USD và hy vọng sẽ phát triển ổn định trong tương lai.

Mặc dù phép đo lưu lượng có vai trò không thể phủ nhận đối với nền kinh tế, nhưng độ chính xác và công nghệ của các lưu lượng kế đang sử dụng hiện nay lại tương đối lạc hậu so với các thiết bị được sử dụng để đo các đại lượng khác như áp suất hoặc nhiệt độ. Ví dụ như lưu lượng kế đĩa vòi phun, là lưu lượng kế được sử dụng nhiều nhất trong công nghiệp chế biến, chỉ có độ chính xác của giá trị đo là 2% và được sử dụng từ những năm cuối của thế kỷ 18. Sự bảo thủ của công nghiệp đo lưu lượng thể hiện ở chỗ các kỹ thuật cổ điển như là đĩa vòi phun, đồng hồ Venturi và

lưu lượng kế tiết diện thay đổi, hiện vẫn được sử dụng rộng rãi, trong khi các lưu lượng kế siêu âm, được phát triển vào những năm 1950, thì vẫn được coi như là một thiết bị mới với nhiều người dùng. Mục này sẽ giới thiệu những phương pháp đo lưu lượng hiện có trên thị trường.

Thuật ngữ

Thuật ngữ đo lưu lượng là một thuật ngữ chung và trước khi chọn lựa một lưu lượng kế người dùng phải xác định rõ phép đo lưu lượng nào sẽ được sử dụng. Với một dòng chất lỏng chảy qua một ống, việc đo lưu lượng có thể thực hiện theo 1 trong 6 kiểu đo sau.

1. Phép đo vận tốc điểm: vận tốc dòng chảy tại một điểm cố định ngang qua tiết diện ngang của ống (m/s)
2. Phép đo vận tốc dòng chảy trung bình: vận tốc trung bình dòng chảy qua tiết diện ngang của ống (m/s)
3. Phép đo lưu lượng dòng chảy: tốc độ thay đổi của thể tích dòng chảy ngang qua ống trong một đơn vị thời gian (m^3/s)
4. Phép đo thể tích: tổng thể tích dòng chảy qua ống (m^3)
5. Phép đo mức khối lượng: tốc độ thay đổi khối lượng của dòng chảy qua ống trong một đơn vị thời gian
6. Phép đo tổng khối lượng : Tổng khối lượng chảy qua ống (kg/s)

Mặc dù dạng cơ bản nhất của phép đo lưu lượng là đo dòng chất lỏng chảy qua một ống dẫn kín, nhưng các phép đo lưu lượng cho các dòng chảy trong các kênh mở cũng là cần thiết, đặc biệt là các ứng dụng trong xử lý nước và chất thải.

Các đặc tính dòng chảy

Lưu chất được đo thường là chất lỏng hoặc khí, còn gọi là dòng một pha. Tuy nhiên, việc đo tốc độ lưu lượng của các chất lỏng hỗn hợp cũng rất cần thiết (như trong phần "dòng hai pha").

Có rất nhiều nguyên tắc quan trọng liên quan tới các đặc tính dòng chảy trong ống cần được tìm hiểu trước khi chọn lựa lưu lượng kế để đảm bảo sự phù hợp và an toàn, đó là ý nghĩa của hằng số Reynolds (Re) và sự quan trọng của lưu đồ vận tốc dòng chảy.

Hằng số Re là tỷ số của các lực quán tính trong dòng chảy ($\rho \bar{v} D$) với các lực nhớt trong dòng chảy (η) và nó có thể được dùng để xác định một dòng chất lỏng là chảy tầng hoặc chảy rối.

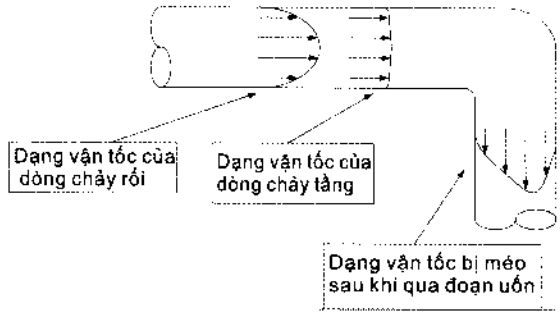
Hằng số Re được tính như sau:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \bar{v} D}{\eta} \tag{19.65}$$

trong đó ρ là tỷ trọng của chất lỏng, $\bar{v}$ là vận tốc trung bình của chất lỏng, D là đường kính của ống và η là độ nhớn động học của chất lỏng. Nếu Re nhỏ hơn 2000, các lực nhớt trong dòng chảy là đủ lớn và dòng chảy trở thành dòng chảy tầng. Nếu Re lớn hơn 4000, các lực quán tính của dòng chảy là đủ lớn và dòng chảy trở thành dòng chảy rối. Nếu Re ở giữa 2000 và 4000 thì dòng chảy là chuyển tiếp, nó có thể là dòng chảy tầng hoặc dòng chảy rối. Người ta tính hằng số Re chủ yếu dựa vào các tính chất của chất lỏng và không đưa vào đó các yếu tố như là độ gồ ghề của ống, các góc lượn và các van, mặc dù chúng cũng ảnh hưởng tới tính chất dòng chảy. Tuy nhiên, hằng số Re là một chỉ dẫn tốt để xác định dạng dòng chảy, đây là một yếu tố quan trọng trong hầu hết các trường hợp.

Vận tốc dòng chảy qua một tiết diện ngang của ống không phải là hằng số và phụ thuộc vào dạng dòng chảy (hình 19.52). Trong dòng chảy tầng, vận tốc ở tâm ống bằng hai lần giá trị vận tốc trung bình chảy qua tiết diện ngang của ống và dạng dòng chảy không bị ảnh hưởng bởi độ gồ ghề của thành ống. Trong dòng chảy rối, các ảnh hưởng của thành ống là nhỏ và dạng tốc độ dòng

chảy là ổn định hơn, với vận tốc ở tâm ống bằng 1,2 lần vận tốc trung bình. Dạng dòng chảy chính xác trong dòng chảy rối phụ thuộc vào độ gồ ghề của thành ống và hằng số Re. Trong các ứng dụng công nghiệp hiếm khi gặp các dòng chảy tầng trừ khi cần đo các chất lưu có độ nhớt lớn. Phải luôn luôn tính hằng số ống Re vì có một vài lưu lượng kế không phù hợp khi sử dụng trong cả điều kiện chảy tầng và chảy rối.



HÌNH 19.52 Các dạng vận tốc dòng chảy rối và chảy tầng

Dạng vận tốc của một dòng chảy sẽ chỉ đối xứng tại điểm cuối của một ống rất dài. Các góc lượn và sự cản trở của các van sẽ làm dạng vận tốc bị méo hoặc không đối xứng. Do việc căn chỉnh các lưu lượng kế là nhạy với dạng của dòng chảy qua thiết bị đo, nên để đảm bảo sự hoạt động tin cậy của lưu lượng kế thì dạng của dòng chảy phải ổn định và được biết trước.

Phân loại các lưu lượng kế

Trên thị trường hiện nay có ít nhất 80 loại lưu lượng kế khác nhau, chúng được phân loại thành 9 nhóm chính. Bảng 19.3 đưa ra những ví dụ về những lưu lượng kế điển hình trong mỗi nhóm.

BẢNG 19.3 Các dạng chính của lưu lượng kế hệ thống dẫn khép kín

Dạng 1: các lưu lượng kế chênh áp
Đĩa vòi phun góc phẳng, đĩa vòi phun dây, đĩa vòi phun lệch tâm, Venturi, vòi, ống Pitot, gấp khúc, hình nêm, nón chữ V, ống Dall, ống dòng Elliot-Nathan, Epiflo
Dạng 2: các lưu lượng kế diện tích thay đổi
Lưu lượng kế dạng phao, chốt dạng thon và có vòi, xi lanh và piston, bia, độ mở thay đổi
Dạng 3: các lưu lượng kế dịch chuyển dương
Van trượt, 3-rôto, 2-rôto, piston, bánh răng ovan, đĩa lắc, CVM, màng ngăn, khí ẩm
Dạng 4: các lưu lượng kế tua bin
Tua bin trục, tua bin trục hai rôto, rôto dạng trụ, bánh công tác, bánh xe Pelton, Hoverflo, chân vịt
Dạng 5: các lưu lượng kế dao động
Rơi xoáy, lưu lượng kế dạng xoáy, lỏng
Dạng 6: các lưu lượng kế điện từ trường
Từ trường xoay chiều, từ trường một chiều dạng xung, dạng ghép
Dạng 7: các lưu lượng kế dạng siêu âm
Doppler, thời gian truyền qua đơn chiều, thời gian truyền qua đa chiều, tương quan chéo, lệch
Dạng 8: các lưu lượng kế khối lượng
Coriolis, nhiệt
Dạng 9: các lưu lượng kế đa năng
Thiết bị đo gió laze, thiết bị đo gió dây nóng, cộng hưởng từ hạt nhân

Các kỹ thuật đo lưu lượng truyền thống hoạt động dựa vào sự chênh lệch áp suất, sự thay đổi diện tích, sự dịch chuyển dương và các loại tua bin. Các kỹ thuật mới hơn sử dụng điện từ, siêu âm, sự dao động và các loại khối lượng. Mặc dù các gia tốc kế hoạt động dựa trên sự chênh lệch áp suất vẫn được dùng trong hầu hết các ứng dụng, đặc biệt trong các lĩnh vực công nghiệp chế biến, nhưng nhìn chung những phương pháp truyền thống dần dần được thay thế bằng các phương pháp mới hơn. Những kỹ thuật trên được ưa thích hơn vì trong hầu hết các trường hợp chúng không cản trở dòng chảy, ngoài ra chúng còn có độ chính xác và độ tin cậy cao.

Những phần tiếp theo sẽ giới thiệu các dạng lưu lượng kế phổ biến nhất của 8 nhóm chính trong bảng trên. Thông tin về các dạng lưu lượng kế khác hoặc nhóm tổng hợp có thể tìm thấy trong các tài liệu khác như [3 - 6].

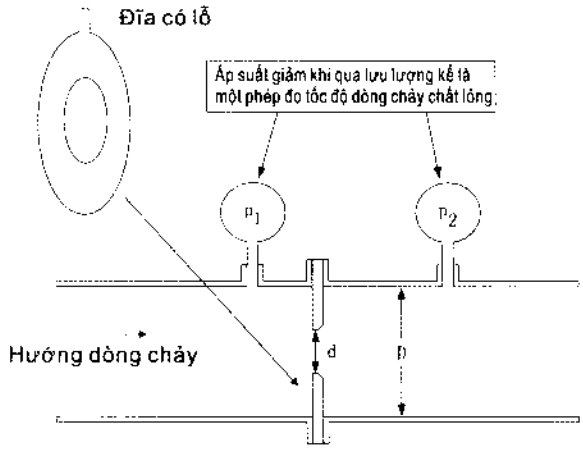
Lưu lượng kế chênh áp

Nguyên tắc cơ bản của các lưu lượng kế chênh áp là nếu đặt một vật cản trong ống thì sự giảm áp qua vật cản này có quan hệ với thể tích lượng chất lỏng chảy qua ống.

Đĩa orifice là dạng đơn giản nhất và rẻ nhất trong số các loại lưu lượng kế chênh áp. Nó đơn giản là một đĩa với một lỗ có kích thước và vị trí xác định. Đĩa orifice có thể được kẹp giữa hai mép bích trong ống (hình 19.53). Lưu lượng của dòng chảy Q trong ống được cho bởi phương trình 19.66:

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \qquad (19.66)$$

trong đó p_1 và p_2 là áp suất ở mỗi mặt của jiclơ đĩa, ρ là tỷ trọng của chất lỏng ở phía đầu nguồn trước jiclơ, d là đường kính lỗ trong đĩa jiclơ và β là hệ số tỷ lệ đường kính d/D, ở đó D là đường kính trong ống ở phía đầu nguồn. Các nhân tố hiệu chỉnh được định theo kinh nghiệm là hệ số phóng điện C và hệ số co giãn ε. C bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi tỷ số đường kính, hằng số Re, độ gồ ghề ống, độ sắc nhọn của cạnh trước của đĩa jiclơ và điểm đặt đĩa jiclơ trong ống. Tuy nhiên, nếu cố định hệ số tỷ lệ đường kính thì C chỉ phụ thuộc vào hệ số Re, do đó có thể xác định hệ số này trong các ứng dụng cụ thể. Hệ số ε được dùng để tính hệ số nén của chất lỏng được đo. Cả hai hệ số ε và C có thể được xác định từ các phương trình và bảng trong các tài liệu đã được công nhận rộng rãi như là các chuẩn.



HÌNH 19.53 Phép đo lưu lượng sử dụng đĩa có lỗ

Các chuẩn này không chỉ mô tả về C và ε, mà còn về hình dáng hình học và các điều kiện thiết lập cho đĩa jiclơ cạnh vuông và hai dạng cơ bản khác của lưu lượng kế chênh áp, ống Venturi

và miệng. Mục đích của các tài liệu hướng dẫn cài đặt là để đảm bảo rằng tồn tại các điều kiện dòng chảy rối trong khu vực đo của lưu lượng kế. Chuẩn thường xuyên được dùng nhất ở Châu âu là ISO 5167-1 [7], trong khi đó ở Mỹ là API 2530 [8]. Do vậy, một trong những nguyên nhân chính cho việc tiếp tục sử dụng lưu lượng kế đĩa giclơ là sai số của phép đo (thường là ±2% của kết quả đo) có thể được dự báo trước mà không cần thiết phải kiểm định, miễn là nó được sản xuất và thiết lập phù hợp với một trong những chuẩn của quốc tế.

Nhược điểm chính của lưu lượng kế đĩa giclơ là sự hạn chế về dải đo và rất nhạy với sự thay đổi của dạng vận tốc dòng chảy. Do tốc độ dòng chảy tỷ lệ với căn bậc hai của độ chênh áp đo được, nên tỷ số của sự kết hợp một đĩa/một bộ phát chênh áp bị giới hạn ở giá trị 3:1. Tỷ số đường kính (hay còn gọi là tỷ số Bêta) của đĩa phụ thuộc vào tốc độ lớn nhất của dòng chảy cần đo và dải của bộ thu áp suất chênh sẵn có.

Phương trình (19.66) giả sử dạng vận tốc của dòng chảy đã hình thành đầy đủ và ổn định, do đó việc lắp đặt thiết bị phải chính xác, đặc biệt là đường ống ở trước và sau lưu lượng kế phải đủ thẳng. Sự mài mòn của cạnh dẫn đĩa giclơ có thể làm thay đổi rất nhiều độ chính xác của phép đo và do đó thiết bị này thường chỉ được sử dụng với các chất lỏng sạch.

Hai lưu lượng kế chênh áp khác theo tiêu chuẩn quốc tế là ống và vòi Venturi. Ống Venturi có áp suất cố định thấp hơn đĩa giclơ và nó ít nhạy cảm hơn đối với sự ăn mòn và sự nhiễu loạn ở đầu nguồn. Hạn chế lớn nhất của nó chính là kích cỡ và giá cả. Việc sản xuất gặp nhiều khó khăn hơn so với giclơ đĩa, do vậy giá thành cao hơn.

Các vòi phun có sự giảm áp giống như đĩa giclơ nhưng do được thiết kế rất phẳng nên chúng giữ được độ chính xác trong một thời gian dài. Giá thành để sản xuất các thiết bị này lớn hơn đĩa giclơ nhưng nhỏ hơn ống Venturi. Hai dạng thiết kế phổ biến nhất của vòi phun tuân theo các tiêu chuẩn quốc tế ISA-1932 được ưa thích ở châu Âu và ASME ở Mỹ.

Có nhiều dạng khác nhau của các lưu lượng kế chênh áp, như là nêm phân đoạn, ống hình nón, ống gấp khúc và ống Dall. Mỗi loại đều có những ưu điểm vượt trội so với đĩa giclơ, ống Venturi và vòi phun trong những ứng dụng cụ thể. Ví dụ có thể sử dụng các nêm phân đoạn với các dòng chảy có hệ số Re thấp và ống Dall có sự giảm áp cố định thấp hơn so với ống Venturi. Tuy nhiên, những thiết bị này chưa được chuẩn hoá theo tiêu chuẩn quốc tế, do đó cần phải kiểm tra độ chính xác của chúng.

Lưu lượng kế tiết diện thay đổi

Các lưu lượng kế tiết diện thay đổi dựa trên nguyên tắc sử dụng một vật cản dòng để tạo ra sự chênh lệch áp suất, ngoại trừ trong trường hợp này độ chênh áp là hằng số và tiết diện vật cản biến thiên khi tốc độ dòng cần đo thay đổi. Có lẽ loại phổ biến nhất của lưu lượng kế tiết diện thay đổi là ống búp măng và kiểu phao nổi (hình 19.54). Loại lưu lượng kế này có một phao hoặc một nút đặt trong một ống thẳng đứng. Chất lỏng cần đo chảy vào trong đáy ống và làm nổi phao lên, do đó làm tăng tiết diện khe hở quanh phao cho chất lỏng chảy vào. Tốc độ dòng chảy càng tăng thì phao càng dịch chuyển lên trên và vị trí của phao trong ống khi đã ổn định là hàm trực tiếp của tốc độ dòng chảy.

Các lưu lượng kế dạng phao rất đơn giản và đáng tin cậy. Chúng có giá trị đầu ra thay đổi tuyến tính với tốc độ dòng chảy (không giống với các lưu lượng kế chênh áp) với tỷ lệ thông thường là 10:1 (so với 3:1 ở lưu lượng kế chênh áp). Độ chính xác thường là 2% của toàn bộ thang đo, nhưng nó phụ thuộc vào dải đo và giá thành của thiết bị. Thêm vào đó, việc căn chỉnh thang đo của lưu lượng kế không bị ảnh hưởng của dạng vận tốc dòng chảy. Do ống được làm bằng kính hoặc nhựa trong suốt, nên có thể đọc được giá trị của tốc độ dòng chảy một cách trực quan và không cần có nguồn cung cấp bên ngoài để thực hiện chức năng này. Vì vậy các lưu lượng kế kiểu này được dùng rộng rãi trong các ứng dụng sản xuất và trong phòng thí nghiệm nơi cần đo chất khí và chất lỏng. Nếu đo các chất lỏng có nhiệt độ cao, áp suất cao và có khả năng ăn mòn thì ống của lưu lượng kế kiểu phao phải được làm bằng kim loại. Trong trường hợp đó, cần phải có một bộ phận để xác định và hiển thị vị trí của phao.

HÌNH 19.54 Lưu lượng kế có ống hình nón và phao nổi thay đổi diện tích

Hạn chế chính của lưu lượng kế kiểu phao là nó thường chỉ được sử dụng theo phương thẳng đứng, do vậy việc lắp đặt sẽ rất khó khăn nếu ống cần đo nằm theo phương ngang. Một số nhà sản xuất đã chế tạo lưu lượng kế dạng phao tải lò xo, được dùng trong mọi vị trí, tuy nhiên, độ chính xác lại thấp hơn loại chuẩn. Một số hạn chế khác là việc căn chỉnh thang đo của lưu lượng kế loại này phụ thuộc vào độ nhớt và tỷ trọng chất lỏng cần đo và việc đưa ra tín hiệu điện tương ứng với giá trị đo làm tăng thêm độ phức tạp của lưu lượng kế. Tuy nhiên, việc sử dụng các công tắc giới hạn quang học hoặc từ trong các lưu lượng kế với chức năng cảnh báo dòng cao hoặc thấp là rất phổ biến.

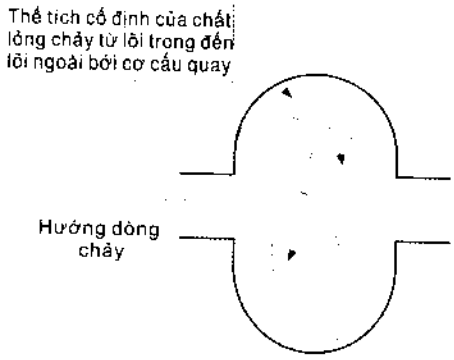
Lưu lượng kế dịch chuyển dương

Các lưu lượng kế dịch chuyển dương dựa theo nguyên tắc đo khá đơn giản. Dòng cần đo được di chuyển từ đầu vào của lưu lượng kế đến đầu ra thông qua hàng loạt các ngăn với thể tích biết trước. Tổng thể tích chảy qua lưu lượng kế được xác định dựa trên số lượng các ngăn và nếu thời gian cũng được đo thì có thể tính được lưu lượng dòng chảy.

Trên thị trường hiện nay có nhiều loại lưu lượng kế dịch chuyển dương khác nhau. Với các chất lỏng thì thông dụng nhất là các dạng lưu lượng kế piston, van trượt, bánh răng ovan, hai rôto, ba rôto và các dạng đĩa. Trong khi các dạng thông dụng đối với khí là piston, ống thổi (màng ngăn) hoặc dạng CVM. Các lưu lượng kế dịch chuyển dương kể trên đều dựa trên cùng một nguyên tắc hoạt động và hầu hết là các thiết bị cơ khí.

Ưu điểm của các lưu lượng kế dạng này là khả năng đo với độ chính xác cao (thông thường là 0.5% của giá trị đo đối với chất lỏng và 1% của giá trị đo đối với khí) với một dải rộng tốc độ. Chúng có thể được sử dụng để đo chất lỏng với độ nhớt và tỷ trọng cao. Thêm vào đó, không giống như hầu hết các lưu lượng kế khác, chúng ít phụ thuộc vào sự thay đổi của dạng vận tốc dòng chảy và do đó ống dẫn trước và sau lưu lượng kế không nhất thiết phải thẳng với độ dài lớn.

Hình 19.55 mô tả nguyên tắc của lưu lượng kế bánh răng ovan và minh hoạ những hạn chế của lưu lượng kế dịch chuyển dương. Chúng là các thiết bị cơ khí tương đối phức tạp, phần di động bị mòn theo thời gian. Độ chính xác của chúng phụ thuộc vào chất lượng sản xuất ban đầu và chế độ bảo trì định kỳ trong quá trình sử dụng. Chất lỏng được đo không nên ở dạng các phần tử đặc để hạn chế sự mài mòn của các miếng đệm chống thấm và giảm yêu cầu bảo trì quá mức cần thiết. Đối với các ống dẫn có kích thước lớn thì các lưu lượng kế dạng này thường rất nặng và giá thành cũng cao hơn và một số dạng thiết kế có thể làm tắc các ống dẫn nếu các lưu lượng kế bị kẹt cứng.



HÌNH 19.55 Gia tốc kế dịch chuyển dương với bánh răng ovan

Lưu lượng kế tua bin

Cũng giống như lưu lượng kế dịch chuyển dương, các lưu lượng kế tua bin là các thiết bị cơ khí có độ chính xác đo cao. Nguyên tắc hoạt động của loại này là một rôto nhiều lá (multi-bladed rotor) được đặt trong dòng chảy và quay khi chất lỏng chảy qua nó. Tốc độ quay của rotor được đo bằng cảm biến (thường dùng loại cảm biến từ hoặc cơ khí) và tỉ lệ với vận tốc dòng chảy qua thiết bị đo. Các lưu lượng kế loại này có thể đo vận tốc trung bình của chất lỏng chảy trong ống và do đã biết đường kính ống nên có thể tính được lưu lượng dòng chảy.

Mặc dù các loại lưu lượng kế tua bin là cũ so với các loại hiện có trên thị trường, nhưng nó vẫn là một trong những lưu lượng kế có độ chính xác cao và ngày nay vẫn được sử dụng. Sai số của phép đo là nhỏ hơn 0.1% khi đo chất lỏng và 0.25% khi đo chất khí. Do vậy chúng là một trong những thiết bị được sử dụng nhiều nhất trong các ứng dụng kiểm tra sự truyền dẫn chất lỏng hoặc khí. Chúng có đầu ra tuyến tính và dải đo ít nhất là 10:1 và có thể tới 100:1 đối với một số ứng dụng.

Hạn chế chính của chúng là các bộ phận cơ khí chính như các ổ đỡ rôto sẽ bị mòn khi sử dụng và làm giảm độ lặp lại của thiết bị và thay đổi thang đo của nó. Do vậy chúng cần được bảo trì và kiểm định thường xuyên. Do những phần tử cứng trong chất lỏng có thể làm tăng tốc độ mài mòn của ổ trục, nên chất lỏng cần đo phải là chất lỏng sạch. Thang đo của lưu lượng kế cũng rất nhạy với sự thay đổi của độ nhớt chất lỏng và dạng vận tốc dòng chảy ở phía trước lưu lượng kế.

Các dạng khác của lưu lượng kế sử dụng nguyên tắc tua bin bao gồm lưu lượng kế bánh Pelton và loại chân vịt, mặc dầu chúng có độ chính xác thấp hơn các loại quay quanh trục.

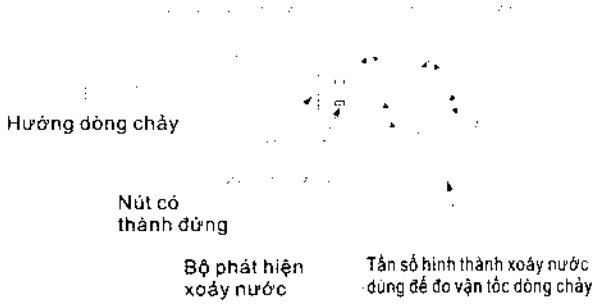
Lưu lượng kế dạng rơi xoáy

Lưu lượng kế dạng rơi xoáy, hay còn gọi là lưu lượng kế dạng xoáy, dựa trên hiện tượng rơi xoáy, được Strouhal nghiên cứu vào năm 1878. Hình 19.56 mô tả nguyên tắc của lưu lượng kế dạng xoáy. Một vật cản có thành thẳng đứng được đặt ở giữa dòng chảy. Khi dòng chảy va phải chướng ngại vật nó phải tách ra để vượt qua, với các lớp chất lỏng ở gần bề mặt của vật cản chuyển động chậm hơn các lớp ở xa. Do vậy, sau khi vượt qua vật cản, các lớp chất lỏng tái kết hợp, hiện tượng xoáy được hình thành và toả ra lần lượt từ các mặt của vật cản. Tần số tạo dòng xoáy liên quan tới vận tốc dòng chảy đầu nguồn và độ rộng của vật cản và được định nghĩa bởi hệ số K của lưu lượng kế. Với một vật cản đã biết trước kích thước thì hệ số K của là tương đối ổn định trong một dải rộng hằng số Re của ống và do đó trong những trường hợp này lưu lượng dòng chảy có quan hệ tuyến tính với tần số tạo dòng xoáy.

Để phát hiện tần số tạo dòng xoáy người ta tích hợp các cảm biến vào trong các vật cản. Các loại cảm biến thường dùng cho mục đích này là cảm biến áp suất, nhiệt, điện dung và siêu âm.

Lưu lượng dạng xoáy có khả năng đo chính xác chất khí và chất lỏng (sai số thường gặp là 1% giá trị đo) trên một dải đo tối thiểu 30:1. Chúng cũng được sử dụng trên một dải rộng nhiệt độ của

chất lỏng và do đó thường được dùng để đo các chất lỏng công nghiệp tại những nơi có nhiệt độ cao, ví dụ như nitơ lỏng hoặc hơi nước. Việc căn chỉnh thang đo của thiết bị không phụ thuộc vào sự thay đổi của tỷ trọng chất lỏng, do đó thang chia độ của một lưu lượng kế có thể được sử dụng cho bất kỳ chất lỏng nào miễn là lưu lượng kế được dùng trong dải hằng số Re mà nhà sản xuất đã ghi rõ. Loại lưu lượng kế này có cấu tạo đơn giản và tin cậy và nên có thể được dùng với các dòng chảy có chứa các phần tử nhỏ, mặc dù các dòng nhiều pha như là hỗ xi măng sẽ làm tăng tốc độ mài mòn của các vật cản và gây ra sai số của phép đo.



HÌNH 19.56 Nguyên tắc của lưu lượng kế dạng rơi xoáy

Hạn chế chính của loại này là nó chỉ có thể được sử dụng trong các điều kiện dòng chảy hỗn loạn. Do đó nó không thích hợp với các ống có đường kính lớn hoặc trong các ứng dụng mà ở đó vận tốc dòng chảy thấp hoặc độ nhớt cao. Các nhà sản xuất thường đặt hằng số Re nhỏ nhất là 10,000, đây là giá trị mà hầu hết các lưu lượng kế có thể làm việc được. Trong khi đó một số lưu lượng kế còn hoạt động ở hằng số Re thấp hơn, dòng xoáy được tạo ra kém ổn định hơn và độ chính xác bị giảm. Khi hằng số Re nhỏ hơn 3000 thì sẽ không có dòng chảy rối, do đó lưu lượng kế sẽ ngừng hoạt động. Lưu lượng kế dạng xoáy rất nhạy cảm với sự thay đổi của dạng vận tốc dòng chảy phía trước lưu lượng kế và các nhiễu dạng xoáy khác do đó khi cài đặt phải chú ý rằng đoạn ống phía trước và phía sau lưu lượng kế phải thẳng với độ dài đủ lớn. Không nên sử dụng lưu lượng kế dạng xoáy tại những nơi mà đường ống bị dao động hoặc nhiễu của các nguồn điện cục bộ cao quá mức cho phép, vì các hiện tượng đó sẽ làm sai lệch tín hiệu xoáy cần đo và có thể đưa ra kết quả sai ngay cả khi không có dòng chảy.

Lưu lượng kế điện từ

Lưu lượng kế điện từ hoạt động dựa trên định luật cảm ứng Faraday (ví dụ: khi một vật dẫn chuyển động vuông góc với một từ trường, thì điện áp cảm ứng trên vật dẫn tỷ lệ với tốc độ chuyển động của nó). Trong trường hợp của lưu lượng kế điện từ, dây dẫn sẽ là chất lỏng cần đo, trong khi điện áp cảm ứng được đo bằng các điện cực trên thành ống. Do trong hầu hết các ứng dụng, thành ống của các lưu lượng kế thường được làm bằng các chất dẫn điện như thép không gỉ, nên cần phải có một lớp cách điện bên trong để cách ly các điện cực và hạn chế sự hao tổn của tín hiệu điện áp vào thành ống. Các cuộn dây ở bên ngoài ống được dùng để tạo ra một từ trường ngang qua chất lỏng, với các kỹ thuật kích thích một chiều dạng xung thay thế cho các phương pháp kích thích cuộn dây xoay chiều bị ảnh hưởng bởi hiện tượng lệch không.

Lưu lượng kế điện từ có nhiều ưu điểm hơn so với các kỹ thuật đo lưu lượng truyền thống và có một số đặc tính của lưu lượng kế lý tưởng. Nó không có phần chuyển động, không làm tắc ống, dải kích thước ống rất rộng và có thể dùng để đo dòng lưỡng hướng. Độ chính xác có thể đạt được là 0.5% trên một dải tối thiểu là 10:1. Độ chính xác cũng không bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi của độ nhớt và tỷ trọng chất lỏng và có thể dùng để đo các chất trộn phức tạp như hỗ xi măng hoặc giấy nhão.

Hạn chế chính của lưu lượng kế điện từ là chỉ có thể được sử dụng với các chất lỏng có suất dẫn lớn hơn $5\mu S/\text{cm}$, mặc dù một số thiết kế đặc biệt có thể sử dụng với các chất lỏng có suất

dẫn thấp ở mức $0,1\mu S/\text{cm}$. Do vậy chúng không thích hợp trong các ứng dụng đo chất khí, hơi nước hoặc các chất lỏng không dẫn điện như dầu. Việc căn chỉnh thang đo nhạy cảm với sự thay đổi của dạng dòng chảy, mặc dù độ dài của đoạn ống thẳng trước thiết bị đo là ngắn hơn so với khi dùng lưu lượng kế giclơ hoặc tua bin. Mặc dù các lưu lượng kế điện từ không yêu cầu bảo dưỡng đặc biệt, nhưng vẫn phải chú ý trong quá trình sử dụng để đảm bảo rằng lớp cách điện bên trong không bị hư hỏng và các chất cặn bẩn không tích tụ trên các điện cực, nếu không chúng sẽ làm thay đổi thang đo hoặc trong một vài trường hợp làm cho lưu lượng kế bị ngừng hoạt động. Ngay cả khi các hiệu ứng đo đã được hạn chế tới mức nhỏ nhất, thì chúng vẫn phải được căn chỉnh lại thang đo theo định kỳ bằng các kỹ thuật truyền thống hoặc bằng các thiết bị căn chỉnh điện tử được các nhà sản xuất cung cấp kèm theo thiết bị đo.

Lưu lượng kế siêu âm

Mong muốn sản xuất ra được một lưu lượng kế không tiếp xúc đa năng đã tác động tới sự hình thành của nhiều loại lưu lượng kế siêu âm khác nhau. Các lưu lượng kế siêu âm hiện có trên thị trường được chia làm hai loại: Doppler và thời gian truyền qua.

Loại Doppler dựa trên nguyên tắc dịch Doppler. Sóng siêu âm ở tần số 1 MIlz được truyền dưới một góc vào dòng chất lỏng cần đo. Một phần năng lượng này sẽ bị phản hồi bởi các điểm gián đoạn âm thanh như các hạt nhỏ, bong bóng hoặc các dòng xoáy hỗn loạn. Sự khác biệt tần số giữa tín hiệu truyền đi và tín hiệu nhận được (độ dịch tần số Doppler) tỷ lệ trực tiếp với vận tốc dòng chảy.

Các bộ chuyển đổi siêu âm, dùng để truyền và nhận sóng siêu âm, thường được đặt trong một hộp bảo vệ cố định bên ngoài đường ống. Do đó, có thể thực hiện được việc chế tạo một lưu lượng kế dạng kẹp, lắp đặt dễ dàng và hoàn toàn không tiếp xúc.

Sóng siêu âm phản hồi không phải là sóng một tần số mà gồm một dải tần số gây ra do sự phản xạ từ các điểm gián đoạn có kích thước khác nhau. Các điểm gián đoạn đó di chuyển với các vận tốc khác nhau trong vùng đo. Với các chất lỏng, tần số của sóng siêu âm được truyền có giá trị từ 500 kHz tới một vài MHz. Tại tần số 500 kHz, các điểm gián đoạn phải có đường kính xấp xỉ $50\mu m$ để phản xạ sóng siêu âm về thiết bị thu. Việc tăng tần số hoạt động sẽ cho phép phát hiện ra các phần tử nhỏ hơn, nhưng sẽ làm giảm khả năng xâm nhập của tín hiệu truyền vào trong chất lỏng. Lưu lượng kế nhạy với những sự thay đổi của dạng vận tốc dòng chảy và phân bố không gian của các điểm gián đoạn trong dòng chảy. Do đó, độ chính xác của các lưu lượng kế Doppler là thấp, sai số thường ở mức 5 % của giá trị cần đo. Tuy nhiên, điều này có thể được cải thiện qua việc căn chỉnh thang đo trực tiếp trong quá trình hoạt động. Do sự lệch âm giữa thép và không khí là rất lớn, nên không nên sử dụng các lưu lượng kế Doppler dạng kẹp để đo các dòng khí hoặc các chất lỏng hoàn toàn sạch do chúng không có đủ các phần tử phản xạ hoặc các bong bóng để sinh ra tín hiệu Doppler tin cậy.

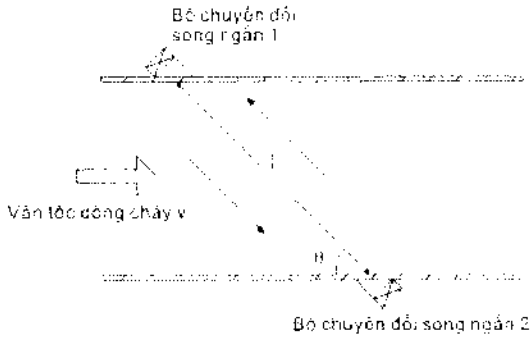
Hình 19.57 mô tả nguyên tắc cơ bản của lưu lượng kế thời gian truyền qua sóng siêu âm. Hai bộ chuyển đổi siêu âm được gắn ở trên hai mặt của ống, do đó sóng siêu âm có thể được truyền ngang qua dòng chảy trong ống. Sai lệch thời gian để một xung siêu âm đi từ bộ chuyển đổi 1 đến bộ chuyển đổi 2 (xuôi dòng) và từ bộ chuyển đổi 2 đến bộ chuyển đổi 1 (ngược dòng) được xác định như sau:

$$\Delta T = \frac{2lv\cos\theta}{c^2 - v^2\cos^2\theta} \tag{19.68}$$

Do vận tốc của âm thanh trong chất lỏng c lớn hơn nhiều so với vận tốc chất lỏng v, nên:

$$\Delta T = \frac{2lv\cos\theta}{c^2} \tag{19.69}$$

Do đó, nếu vận tốc của âm thanh trong chất lỏng là hằng số, thì có một mối quan hệ tuyến tính giữa ΔT và v.



HÌNH 19.57 Nguyên tắc của lưu lượng kế siêu âm thời gian truyền qua

Mặc dù về nguyên tắc phương pháp này là đơn giản và dễ hiểu, nhưng trong thực tế có rất nhiều khó khăn do ΔT quá bé và sự thay đổi của ΔT xảy ra khi vận tốc dòng chảy thay đổi thậm chí còn nhỏ hơn (thường là phần lẻ của micro giây trên mét). Hơn nữa, phương trình (19.68) đã chỉ ra rằng, nếu nhiệt độ của chất lỏng thay đổi thì c sẽ thay đổi. Vì vậy, cần phải đo sự thay đổi của nhiệt độ chất lỏng để hiệu chỉnh. Các lưu lượng kế dạng thời gian truyền yêu cầu phép đo trạng thái tín hiệu và xử lý phức tạp.

Vận tốc dòng chảy v, xác định bởi phương trình (19.68), là vận tốc trung bình dọc theo đường truyền giữa hai bộ chuyển đổi và do vậy việc căn chỉnh thang đo của lưu lượng kế phụ thuộc vào dạng vận tốc dòng chảy. Sự phụ thuộc vào chế độ dòng chảy có thể được giảm đáng kể bằng cách sử dụng cấu hình gồm nhiều chùm sóng siêu âm song song và lấy giá trị trung bình của các vận tốc đo được dọc theo mỗi chùm sóng để tính vận tốc dòng chảy. Điều này tương tự với việc tích hợp các số và rất nhiều cấu hình đa chùm sóng đã được đưa ra, mỗi cấu hình đều có những ưu điểm riêng.

Các lưu lượng kế loại này có độ chính xác khoảng ±2% của giá trị đo trên một dải ít nhất là 100:1. Mặc dù chúng có thể được sử dụng với khí và chất lỏng, nhưng thiết kế dạng treo thì chỉ có thể sử dụng cho chất lỏng. Loại lưu lượng kế đa chùm có độ chính xác được cải thiện đáng kể, nhưng giá thành lại rất cao. Tuy nhiên, có thể sử dụng chúng trong một số ứng dụng có giá trị cao như theo dõi quá trình truyền khí tự nhiên. Không giống như các loại lưu lượng kế khác, giá của lưu lượng kế dạng thời gian truyền qua tăng không đáng kể khi đường kính của ống tăng. Chúng được dự định dùng cho các chất lỏng sạch, tuy nhiên chúng vẫn có thể hoạt động nếu tồn tại một lượng nhỏ các chất bẩn ở trong dòng chảy.

Lưu lượng kế Coriolis

Lưu lượng kế Coriolis có thể được sử dụng để trực tiếp đo khối lượng một dòng chảy. Nguyên tắc hoạt động dựa trên hiệu ứng Coriolis (được Gustave Coriolis tìm ra vào năm 1835). Chất lỏng cần đo chảy qua một ống dao động và khi đó lực Coriolis sẽ tác động lên nó, chất lỏng sẽ được tăng tốc khi nó hướng tới điểm dao động lớn nhất và giảm tốc khi nó đi xa điểm đó. Điều này xảy ra tại điểm uốn của ống, số lượng điểm uốn tỷ lệ trực tiếp với khối lượng dòng chảy của chất lỏng.

Phiên bản đầu tiên của lưu lượng kế Coriolis sử dụng ống hình chữ U, nhưng hiện nay có rất nhiều phiên bản khác nhau, bao gồm các vòng kép và các thiết kế thẳng. Mỗi thiết kế có những ưu điểm riêng, với các nhân tố như độ chính xác, khả năng lặp lại và sự giảm áp thay đổi theo các thiết kế.

Với bất cứ thiết kế nào được sử dụng, chúng đều là các thiết bị có độ chính xác cao, có thể dùng chúng để đo chất lỏng hoặc khí với độ chính xác là ±0.25% của giá trị đo. Dải đo thay đổi theo thiết kế, nhưng tỷ lệ 100:1 là có thể đối với các thiết kế ống hình chữ U và 50:1 với các thiết kế ống thẳng. Do lưu lượng kế Coriolis đo khối lượng một cách trực tiếp, nên sự thay đổi của tỷ trọng, độ nhớt, áp suất và nhiệt độ chất lỏng không ảnh hưởng tới việc căn chỉnh thang đo của lưu

lượng kế. Nó cũng không bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi của dạng vận tốc dòng chảy hoặc các sự nhiễu xoáy khác. Nó không cản trở dòng chảy và có thể sử dụng để đo theo hai hướng. Tuy nhiên, sự giảm áp trong các thiết kế ống hình chữ U có thể là một hạn chế với các chất lỏng nhớt.

Hạn chế lớn nhất của lưu lượng kế Coriolis là giá thành khá cao so với hầu hết các loại lưu lượng kế khác. Do đó nó thường chỉ được sử dụng trong các ứng dụng có giá trị sản phẩm lớn hoặc là các ứng dụng cần đo khối lượng dòng chảy. Giá thành và trọng lượng của nó tăng đáng kể khi đường kính ống tăng và do đó thường chỉ được sử dụng với các đường ống có đường kính dưới 100 mm.

Không giống như hầu hết các loại lưu lượng kế đã giới thiệu, lưu lượng kế Coriolis có thể đo được một số dòng hai pha phức tạp. Ví dụ như các phép đo khối lượng của hỗn hợp khí/chất lỏng là đáng tin cậy nếu thành phần khí là nhỏ và phân bố tốt và do đó chất lỏng nhiều pha hoạt động như là một chất lỏng giả đồng nhất. Tỷ lệ của chất khí mà lưu lượng kế có thể chấp nhận được phụ thuộc vào độ nhớt của thành phần chất lỏng. Chất lỏng có độ nhớt càng thấp thì khả năng chất khí tách rời khỏi chất lỏng là càng nhiều và gây ra nhiều vấn đề. Cũng có thể đo các dòng chất lỏng/rắn hỗn hợp (xi măng nhão), mặc dù người dùng phải dung hòa giữa việc tránh làm thất thoát các thành phần nhỏ ra ngoài và việc loại trừ các vận tốc dòng chảy quá lớn vì ống dẫn sẽ bị mài mòn nhanh hơn.

Dòng hai pha

Có nhiều yêu cầu đo các dòng hai pha xuất phát từ các lĩnh vực dầu khí hay công nghiệp thực phẩm, ví dụ như đo hỗn hợp chất lỏng và khí, hay chất lỏng và rắn. Việc đo các dòng chảy như thế luôn gây ra những khó khăn cho các kỹ sư hệ thống.

Ví dụ một lưu lượng kế lý tưởng có thể đo trực tiếp lưu lượng dòng chảy của một chất lỏng nếu nó hoàn toàn lỏng hoặc có thêm pha khí. Tuy nhiên những lưu lượng kế đã trình bày trong các phần trước chỉ có thể đo các dòng hai pha khi thành phần thứ hai chiếm tỷ lệ nhỏ. Hoạt động của các lưu lượng kế truyền thống khi đo các dòng hai pha có thể tìm thấy trong [10].

Một phương pháp khác để đo dòng trực tiếp là dùng phương pháp suy luận. Một phương pháp suy luận về dòng khí hoặc chất lỏng sẽ cần vận tốc của các pha khí và lỏng (v_g và v_l) và tỷ lệ phần tiết diện ngang của pha khí (α) có thể đo độc lập để xác định lưu lượng của dòng hỗn hợp Q_m:

$$Q_m = v_l A(1-\alpha) + v_g A\alpha \tag{19.69}$$

Sai số của phép đo lưu lượng phụ thuộc vào độ chính xác của các phép đo độc lập. Không thể giả sử rằng vận tốc của các pha lỏng và pha khí là giống nhau và sự phân bố của pha khí trong pha lỏng (chế độ dòng chảy) sẽ thay đổi phụ thuộc vào các nhân tố như thành phần khí, vận tốc các pha riêng biệt và áp suất. Thậm chí trong một trường hợp đơn giản như trường hợp này, rõ ràng là phép đo dòng nhiều pha rất phức tạp. Do vậy những lưu lượng kế nhiều pha trên thị trường có giá khá cao và chỉ hướng tới các ứng dụng đặc biệt.

Các dòng hai pha phổ biến nhất là lỏng-khí (ví dụ như khí trong nước), lỏng-lỏng (nước trong dầu), khí-rắn(chất rắn mang khí) và lỏng-rắn hoặc xi măng nhão (như than trong dầu). Mỗi loại đều có những vấn đề khác nhau và khó có thể giới thiệu hết các phương pháp đo có thể của các loại dòng đó trong quyển sách này. Để có thêm thông tin chi tiết về các kỹ thuật đo dòng hai pha hãy xem trong [11].

Lắp đặt lưu lượng kế

Dù lưu lượng kế có tốt như thế nào đi nữa thì việc lắp đặt nó chuẩn xác là rất cần thiết nếu dùng để đo với một sai số được nhà sản xuất ghi rõ. Việc căn chỉnh thang đo của các lưu lượng kế là nhạy cảm với sự thay đổi của dạng vận tốc dòng chảy và trong những trường hợp này thì chúng

cần phải được lắp đặt để đảm bảo rằng dạng vận tốc dòng chảy hình thành đầy đủ và ổn định tại điểm đo. Các tài liệu kỹ thuật của nhà sản xuất đưa ra hướng dẫn về độ dài cần thiết của đoạn ống thẳng trước và sau lưu lượng kế để đảm bảo sự lắp đặt hợp lý. Có thể dùng các bộ điều tiết dòng chảy (bộ nắn dòng) để hiệu chỉnh các dạng vận tốc bị thay đổi và loại bỏ các nhiễu xoáy trong những ứng dụng mà đoạn ống thẳng không có đủ độ dài cần thiết. Tuy nhiên, hạn chế của tất cả các bộ điều tiết dòng là chúng làm cản trở dòng chảy và sinh ra sự giảm áp không thể bù lại trong đường ống.

Việc lắp đặt phải luôn lưu chất hoàn toàn điền đầy ống tại điểm đo và không có sự tham gia của pha không mong muốn thứ hai. Trong các dòng chất lỏng, khí lẫn vào có thể được sinh ra từ nhiều nguồn khác nhau, ví dụ như các lỗ hổng và các mối rò rỉ. Trong khi với một dòng khí, pha lỏng không mong muốn có thể được sinh ra từ các nguyên nhân như sự ngưng tụ. Trong tất cả các trường hợp, lưu lượng kế có thể đưa ra kết quả sai nếu như tồn tại pha thứ hai trong dòng chảy. Mặc dù có thể loại bỏ pha không mong muốn ra khỏi dòng chảy từ trước điểm đo, nhưng tốt hơn hết hãy thận trọng trong quá trình chế tạo, thiết kế đường ống và lắp đặt lưu lượng kế nhằm đảm bảo rằng tình huống này không xảy ra.

Lựa chọn lưu lượng kế

Không có một lưu lượng kế nào thích hợp với mọi ứng dụng, cùng với rất nhiều lưu lượng kế và các tài liệu kỹ thuật hiện có trên thị trường làm cho việc lựa chọn lưu lượng kế phù hợp đôi khi gặp nhiều khó khăn. Có thể có nhiều lưu lượng kế phù hợp với một ứng dụng đặc biệt, nhưng để chọn cái thích hợp nhất thì không dễ chút nào. Nói chung, cái phù hợp nhất chính là cái đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật cụ thể với giá thấp nhất (bao gồm giá thiết bị và chi phí bảo dưỡng).

Có năm nhân tố nên tham khảo khi chọn lựa lưu lượng. Đó là loại chất lỏng cần đo, điều kiện hoạt động, điều kiện lắp đặt, các tính năng hoạt động cần có và yếu tố kinh tế. Thông tin cần thiết khi xem xét loại chất lỏng được đo bao gồm: nó là dòng một pha hay chứa đựng pha thứ hai như khí hoặc rắn, độ nhớt và tỷ trọng chất lỏng, chất lỏng có phải là chất ăn mòn không và nó là khí khô hay khí ẩm. Các yếu tố cần xem xét khi đánh giá điều kiện hoạt động bao gồm: nhiệt độ của ống và áp suất và các điều kiện xung quanh đường ống. Các điều kiện lắp đặt bao gồm các thông tin như là đường kính ống, hằng số Re của ống, hướng của ống làm việc tại điểm cần đo, độ dài của đoạn ống thẳng, dòng chảy có giãn nở hay không, các yêu cầu cho bất kỳ điều kiện dòng chảy nào, nguồn cung cấp bên ngoài có sẵn không và môi trường thực hiện phép đo có nguy hiểm không. Các tính năng hoạt động yêu cầu của lưu lượng kế bao gồm độ chính xác, khả năng lặp lại, dải đo và đáp ứng tác động yêu cầu. Cuối cùng, các yếu tố kinh tế cần quan tâm bao gồm giá ban đầu của thiết bị, giá lắp đặt, giá bảo dưỡng và hình thức đào tạo.

Các tài liệu giới thiệu về phép đo lưu lượng đều có các bảng lựa chọn lưu lượng kế (ví dụ như [3, 4, 6]) và các chuẩn quốc tế hỗ trợ việc chọn lựa và ứng dụng các lưu lượng kế [12].

Tham khảo

[1] Flow Measurement and Instrumentation, Oxford: Elsevier Science.

[2] Grant, D. M., Open channel flow measurement, in D. W. Spitzer (Ed.), *Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control*, 2nd ed., Research Triangle Park, NC: ISA, 2001.

[3] Miller, R. W., *Flow Measurement Engineering Handbook*, 3rd ed., New York: McGraw Hill, 1996.

[4] Baker, R. C., Flow Measurement Handbook, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[5] Webster, J. G. (Ed.), *Mechanical Variables Measurement: Solid, Fluid, and Thermal*, Boca Raton: CRC Press, 2000.

[6] Spitzer, D. W. (Ed.), *Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control*, 2nd ed., Research Triangle Park, NC: ISA, 2001.

[7] International Organisation for Standardization, ISO5167-1, Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices - Part 1: Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full, Geneva, Switzerland, 1991.

[8] American Petroleum Institute, API 2530, Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 14—Natural Gas Fluids Measurement, Section 3 - Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids, Washington, 1985.

[9] Lynnworth, L. C., *Ultrasonic Measurements for Process Control: Theory, Techniques, Applications*, Boston: Academic Press, 1989.

[10] National Engineering Laboratory, UK, *Effects of Two-Phase Flow on Single-Phase Flowmeters*, Flow Measurement Guidance Note No. 3, 1997.

[11] Rajan, V. S. V, Ridley, R. K., and Rafa, K. G., Multiphase flow measurement techniques—a review, *Journal of Energy Resource Technology*, 115, 151-161, 1993.

[12] British Standards Institution, BS7405, Guide to the Selection and Application of Flowmeters for Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits, London,

[13] Nachtigal, C. L., *Instrumentation and Control, Fundamentals and Applications*. Wiley Series inMechanical Engineering Practice, New York: Wiley Interscience, John Wiley & Sons, 1990.

[14] DeSilva, C. W., *Control sensors and Actuators*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.

[15] Gardner, J. W., *Microsensors Principles and Applications*, New York: John Wiley & Sons, 1995.

[16] Stadler, W., *Analytical Robotics and Mechatronics*, New York: McGraw-Hill, 1995.

Thông tin bổ sung

Wright, C. P., Applied Measurement Engineering, How to Design Effective Mechanical Measurement Systems,Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.

Hereeg, E. E., *Handbook of Measurement and Control*, Pennsauken, NJ: Schavitz Engineering, 1972.

Considine, D. M., *Encyclopedia of Instrumentation and Control*, New York: McGraw-Hill, 1971.

Norton, H. N., *Sensors and Analyzer Handbook*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.

Sze, S. M., *Semiconductor sensors*, New York: John Wiley & Sons, 1994

Lindberg, B., and Lindstrom, B., Measurements of the segmentation frequency in the chip formation process, *Ann. CIRP*, 32 (1), 1983.

Tlusty, J., and Andrews, G. C., A critical review of sensors for unmanned machinning, *Ann. CIRP*, 32(2),1983.

19.6 Đo nhiệt độ

Pamela M. Norris và Bouvard Hosticka

Giới thiệu

Trong khoa học cũng như công nghiệp, nhiệt độ là một trong những thông số rất được coi trọng, tuy nhiên cho đến nay, một định nghĩa chính xác cho nhiệt vẫn còn đang bị bỏ ngỏ. Định nghĩa đơn giản nhất là gắn nhiệt với động năng trung bình của từng phân tử cấu thành hệ thống. Khi nhiệt độ tăng thì hoạt tính của các phần tử tăng do đó động năng trung bình tăng. Đó là một định nghĩa đầy đủ cho các kỹ thuật đo nhiệt được trình bày ở đây. Định nghĩa này giúp chúng ta hiểu được khái niệm về nhiệt độ, tuy nhiên nó lại không giúp ta đưa ra được một giá trị số cho nhiệt độ hay cung cấp cho ta một phương pháp thuận tiện trong việc đo nhiệt. Luật thứ không của nhiệt động học được đưa ra vào năm 1931 sau hơn nửa thế kỷ so với luật thứ nhất và thứ hai đã tạo cơ sở cho việc đo nhiệt độ. Luật này cho rằng nếu hai vật cùng cân bằng nhiệt với vật thứ ba thì chúng cân bằng nhiệt từng đôi một. Bằng việc thay vật thứ ba bằng một cái nhiệt kế, ta có thể chỉ ra hai vật là cân bằng nhiệt khi chúng có cùng nhiệt độ cho dù chúng không tiếp xúc với nhau.

Luật thứ không không có khả năng đưa ra một giá trị số cho nhiệt độ. Do đó, ta phải tham chiếu nhiệt độ theo một thang đo chuẩn. Hai thang đo nhiệt độ tuyệt đối được định nghĩa sao cho nhiệt độ tại điểm 0 tương ứng với một trạng thái giả định mà tại đó không một phân tử nào chuyển động bên trong vật chất. Đây chính là cơ sở của thang đo Kelvin trong hệ chuẩn (SI) và thang đo Rankine trong hệ Anh. Ngoài ra còn có thang đo hai điểm dựa trên việc định ra hai "điểm" nhiệt

độ bất kỳ. Các điểm này thường được chọn bằng với nhiệt độ mà tại đó xuất hiện sự chuyển pha của vật chất ở trạng thái tinh khiết. Quen thuộc nhất chính là điểm đóng băng và sôi của nước ở 0°C và 100°C. Sự chuyển pha xảy ra trong một khoảng rộng, khá nhiều trường hợp có điểm cân bằng, tại đó cả ba pha đều cân bằng, điểm này đã được định nghĩa trong *Thang đo nhiệt độ quốc tế* (International Practical Temperature Scale of 1990 (ITS_{90})) - bảng 19.4. Chúng có thể được sử dụng trực tiếp làm điểm chuẩn để giám sát nhiệt độ với giả thiết chất đó là nguyên chất cùng một số các điều kiện khác như áp suất ổn định tại điểm đặt. Tiêu chuẩn ITS_{90} cũng giới thiệu cả việc nội suy nhiệt độ giữa hai điểm cho trước. Ví dụ điện trở bạch kim được dùng trong giới hạn nhiệt độ từ 13.8 đến 1235 K. Thông qua một đa thức bậc cao đã được đơn giản hóa ta nội suy ra nhiều giá trị nhiệt độ giữa hai mức nhiệt độ định nghĩa từ đó điện trở sẽ có nhiệt độ phù hợp hơn. Sự khác nhau giữa nội suy tuyến tính của điện trở giữa hai điểm định nghĩa và nội suy với đa thức bậc cao là không bao giờ vượt quá 2mK [8].

BẢNG 19.4 Các điểm xác định được xử dụng trong ITS_{90}*

Điểm cân bằng của hyđro	13.8033K
Điểm ba thể của neon	24.5561 K
Điểm ba thể của acgon	54.3584 K
Điểm ba thể của thuỷ ngân	234.3156 K
Điểm ba thể của nước	273.16 K
Điểm tan chảy của gali	302.9146 K
Điểm đóng băng của indi	429.7485 K
Điểm đóng băng của thiếc	505.078 K
Điểm đóng băng của kẽm	692.677 K
Điểm đóng băng của nhôm	933.573 K
Điểm đóng băng của bạc	1234.93 K
Điểm đóng băng của vàng	1337.33 K
Điểm đóng băng của đồng đỏ	1357.77 K

* Magnum (1990) chứa toàn bộ định nghĩa của các điểm này

Một sự phức tạp khác nữa là thực tế thì nhiệt độ thể hiện là một thuộc tính bên trong nhiều hơn bên ngoài. Vì vậy, nhiệt độ không thể cộng, trừ và chia theo cách thông thường như các giá trị chiều dài hoặc điện áp.

Bất kỳ thuộc tính nào thay đổi đáp ứng theo nhiệt độ mà dự báo được đều có thể được sử dụng trong cảm biến nhiệt. Các thiết bị đo nhiệt trong đề cập trong tài liệu này được phân loại theo phương pháp đo. Phương pháp đầu tiên dựa trên sự giãn nở nhiệt khác nhau của các loại vật liệu rắn, lỏng hoặc khí. Nhiệt kế thuỷ ngân thuộc loại nhiệt kế này là một trong những nhiệt kế thông dụng nhất. Tiếp đến phải kể đến các thiết bị dựa trên sự thay đổi pha. Các cảm biến và bộ chuyển đổi nhiệt điện. Bao gồm cặp nhiệt điện, RTD và nhiệt điện trở, cũng như các mạch tích hợp cảm biến nhiệt. Loại cuối cùng của cảm biến nhiệt là cảm biến không tiếp xúc. Một thảo luận riêng về đo lường nhiệt độ với cỡ micro được đưa ra ở phần cuối. Nhiều kỹ thuật được mô tả trong phần này bắt nguồn từ những gì đã được thảo luận ở trước từ thứ yếu đến quan trọng phải được thực hiện để cho phép các đo nhiệt độ kích thước nhỏ và/hoặc đáp ứng nhanh.

Các loại nhiệt kế dựa trên hệ số giãn nở khác nhau

Những nhiệt kế dựa trên hệ số giãn nở khác nhau thông dụng nhất là nhiệt kế đọc nhiệt độ trực tiếp. Những nhiệt kế này có thể phân loại theo trạng thái vật liệu sử dụng. Ta sẽ nghiên cứu chi tiết từng loại một.

Khí - rắn

Nhiệt kế bầu khí dùng để xác định điểm không tuyệt đối bằng cách ngoại suy sự thay đổi áp suất của một đơn chất khí trong khối cầu kim loại khi nhiệt độ thay đổi có thể coi là một ví dụ của loại nhiệt kế khí - rắn. Nếu bầu kim loại có cùng hệ số giãn nở nhiệt với chất khí thì áp suất bên trong sẽ là hằng số và đó không thể là một nhiệt kế. Thay vào đó, chất khí theo định luật khí lý tưởng chỉ ra rằng, tại một thể tích không đổi, áp suất quan hệ tuyến tính với nhiệt độ và bình chứa khí thay đổi tuyến tính với hệ số giãn nở theo thể tích của kim loại làm bầu chứa. Hệ số giãn nở nhiệt của kim loại thường được bỏ qua trừ trong trường hợp có yêu cầu đặc biệt về sự chính xác của điểm không tuyệt đối.

Trong khi một khối cầu kim loại lớn được bơm đầy không khí không phải là một thiết bị thuận tiện nhiều cho đo lường nhiệt, trừ việc dùng như là một dụng cụ nghiên cứu hoặc minh hoạ, thì bầu khí có thể làm tương đối nhỏ và nối với ống mao dẫn nhỏ để điều khiển áp suất bơm vào. Trong dạng cấu hình thu nhỏ, nhiệt kế dạng bầu khí trở thành thiết bị thực tế cho đo lường nhiệt. Chỉ cần các thiết bị làm việc trong vùng khí lý tưởng, từ áp suất bình ta có thể đọc nhiệt độ một cách trực tiếp do áp suất tỷ lệ tuyến tính với nhiệt độ.

Một số hạn chế chính của nhiệt kế bầu khí là thiết bị đo này nên được căn chuẩn riêng cho một cài đặt cụ thể do chiều dài của mao dẫn bị đốt nóng, cũng như áp suất và nhiệt độ xung quanh tại đầu đo áp suất, sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác của thiết bị. Những hạn chế này có thể khắc phục bằng cách sử dụng các phần tử lưỡng kim trong đầu đo áp suất để bù nhiệt tại điểm này hoặc bằng một mao dẫn song song không có bầu khí theo mao dẫn chính lên tới điểm đo và mao dẫn song song này gắn với đầu đo áp suất để loại bỏ các hiệu ứng từ đầu đo chính. Ngoài ra, bất kỳ sự nguy hiểm nào về thể tích của bầu khí, như một vết lõm, sẽ làm xê dịch sự căn chuẩn. Loại dụng cụ này không nên lẫn lộn với nhiệt kế áp suất hơi nước có thể có hình dạng bên ngoài giống như vậy, nhưng thay vì chứa khí lý tưởng, chúng chứa chất lỏng hai pha và đo áp suất bão hòa của chất lỏng đó. Kiểu cảm biến nhiệt độ này sẽ được thảo luận ở phần sau.

Lỏng - rắn

Nhiệt kế thủy ngân và thủy tinh phổ biến là một ví dụ về cảm biến nhiệt độ dạng lỏng – rắn. Hệ số giãn nở nhiệt của chất lỏng, mặc dù không được lớn như khí, nhưng nói chung cũng lớn hơn chất rắn và trong nhiều trường hợp hệ số giãn nở nhiệt của thuỷ tinh có thể bỏ qua. Tuy nhiên, trong các thiết bị đo chính xác, hệ số giãn nở nhiệt của thuỷ tinh được coi là sai số đáng kể. Có hai cách phổ biến liên quan hệ số giãn nở nhiệt của thuỷ tinh. Các nhiệt kế dùng cho đọc nhiệt độ của một bình chất lỏng có thể có một độ sâu phù kín riêng được chỉ rõ bởi một dấu hiệu trên ống. Giả sử phần còn lại của nhiệt kế nằm trong điều kiện chuẩn của phòng thí nghiệm. Tuy nhiên, điều này không phải là một giả thiết tốt và có một cách chính xác hơn để nắm bắt hệ số giãn nở nhiệt của thủy tinh so với hệ số giãn nở của thủy ngân là dùng một cặp ống nhiệt kế. Một dùng để đo nhiệt của chất lỏng trong khi cái còn lại đo nhiệt độ trong vùng lân cận trung gian của ống. Một công thức hiệu chỉnh ống dẫn đơn giản được cung cấp bởi nhà chế tạo nhiệt kế có thể được ứng dụng để xác định nhiệt độ của bình chứa.

Tỉ lệ dung tích bầu với lỗ của ống mao dẫn xác định độ phân giải của nhiệt kế. Tổng lượng chất lỏng ban đầu trong nhiệt kế sẽ xác định giới hạn của nhiệt kế. Độ chính xác của lỗ và vạch chia độ quyết định độ chính xác của nhiệt kế. Nhiệt độ được đọc từ nhiệt kế chất lỏng - thuỷ tinh chỉ có giá trị khi mà chất lỏng trong lỗ của ống mao dẫn là liên tục từ bầu tới điểm đọc. Phần chia cách có thể loại trừ bằng cách làm co toàn bộ chất lỏng về bầu hay trong một số trường hợp bằng cách mở rộng một bầu ở bên trên của nhiệt kế. Thuỷ ngân là rất phù hợp cho nhiệt độ đóng băng khoảng -40°C đến quanh 500°C. Nhiệt độ sôi của thuỷ ngân chỉ là 357°C ở áp suất tiêu chuẩn do vậy nhiệt kế thuỷ ngân thiết kế cho loại nhiệt độ rất cao phải được nén áp bằng một chất khí trước khi hàn kín nhiệt kế. Cồn hay chất lỏng khác có thể được sử dụng thay cho thuỷ ngân, tuy nhiên độ chính xác thông thường là không cao. Khoảng đo nhiệt độ của nhiệt kế dùng cồn là -200°C đến +250°C.

Một phương pháp thay thế dùng sự sai khác trong hệ số giãn nở của chất lỏng và chất rắn để đo nhiệt độ là dùng một hệ thống được điền đầy với một chất lỏng và để đo sự thay đổi dung tích của

chất lỏng bằng vị trí của ống. Nếu dung tích này có hằng số giãn nở cao, phải xét đến tỉ số nén [3]. Sự kết hợp này có hạn chế giống như nhiệt kế bầu khí đã nêu trên, cũng như cùng một cách bù để giảm những hạn chế này.

Khí - lỏng - rắn

Một vài nhiệt kế sử dụng trước đây bao gồm một bầu khí nối với ống dạng chữ U đóng kín chứa thuỷ ngân hoặc một loại chất lỏng khác. Đây là một dạng nhiệt kế áp suất sử dụng áp kế thuỷ ngân để hiển thị áp suất. Để đảm bảo độ chính xác, cần phải xét đến hệ số giãn nở nhiệt khác nhau của cả ba pha khí, lỏng và rắn. Tuy vậy, những thiết bị đo này ít khi được sử dụng khi dụng cụ đo yêu cầu có độ chính xác cao. Nhiệt kế dạng này được sử dụng rộng rãi để đo dải nhiệt độ nhỏ nhất-lớn nhất của môi trường không khí ở đó có một sợi kim loại nhỏ nối với chân của áp kế thuỷ ngân. Sợi kim loại này phải có ma sát đủ lớn bên trong ống và không bị dính thuỷ ngân để nó có thể duy trì trạng thái tự do trong ống thuỷ tinh sau khi mức thuỷ ngân thay đổi. Đồng hồ đo trên cầu kim loại sẽ hiển thị nhiệt độ nhỏ nhất còn đồng hồ lắp trên các chân sẽ hiển thị nhiệt độ lớn nhất khi thuỷ ngân rút xuống. Khi quan sát được nhiệt độ lớn nhất và nhỏ nhất, các sợi kim loại có thể được đặt trên đỉnh của hai cột thuỷ ngân bằng lực li tâm hoặc bằng một nam châm nếu các sợi được làm bằng sắt.

Rắn - rắn

Nhiệt điện kế lưỡng kim bao gồm hai kim loại có hệ số giãn nở nhiệt khác nhau được gắn với nhau. Khi nhiệt độ thay đổi từ nhiệt độ liên kết ban đầu thì các thanh kim loại này sẽ giãn nở khác nhau và gây ra lực trượt giữa hai thanh kim loại. Từ thiết bị đo độ trượt của hai thanh kim loại sẽ cho phép chúng ta xác định được sự thay đổi nhiệt. Cấu trúc của nhiệt kế loại này rất phong phú từ dạng lá đơn giản được cố định một đầu với một kim chỉ trên đầu còn lại đến đường xoắn ốc được cố định trên một đầu và một trục quay tại đầu còn lại được liên kết với kim chỉ, có thể thông qua hệ thống bánh răng. Trục này được giữ trên các ổ trục trơn với kim chỉ như một đồng hồ từ đường xoắn ốc lưỡng kim.

Do những thay đổi nhiệt độ sẽ tạo ra lực, nên luôn có một số lực hồi phục phân cấp tác dụng lên dải lưỡng kim. Ứng dụng phổ biến nhất là dùng ngay dải lưỡng kim như một lò xo hồi phục. Vị trí cuối cùng của dải là điểm cân bằng giữa sự trượt do các hệ số giãn nở vì nhiệt khác nhau và hằng số đàn hồi của dải. Trong một số tình huống, nhiệt kế lưỡng kim được cần để kích hoạt một công tắc. Trong các trường hợp này, lực trượt trên dải phải thắng tải do công tắc và nhà thiết kế phải coi nó là tải trọng ngoài. Dải nhiệt độ của nhiệt kế lưỡng kim bị giới hạn bởi nhiệt độ tôi hoặc nhiệt độ chuyển pha của kim loại. Do đó, các nhiệt kế loại này làm việc tốt với nhiệt độ dưới 700°C và chúng có thể bị phá hủy vĩnh viễn nếu các kim loại thay đổi tính chất hoặc liên kết giữa các kim loại khác nhau bị hỏng. Một cặp kim loại phổ biến là thép niken, như hợp kim inva với hệ số giãn nở vì nhiệt rất thấp, liên kết với hợp kim đồng thau với hệ số giãn nở vì nhiệt cao.

Nhiệt kế hoạt động dựa trên sự thay đổi pha

Sự thay đổi pha của các vật liệu nguyên chất tại các áp suất riêng được sử dụng trong bảng thông số ITS90 để xác định một vài điểm nhiệt độ. Khái niệm thay đổi pha là một hàm của nhiệt độ cũng như áp suất và dạng kim loại này có thể dùng trong một số dạng như một phương tiện để xác định nhiệt độ của một hệ thống bằng cách quan sát chính sự thay đổi pha hoặc các điều kiện tại đó hai pha cân bằng. Một số ứng dụng hữu ích của nó sẽ được thảo luận sau.

Chuyển từ trạng thái lỏng sang khí

Nhiệt kế từ xa thông thường bao gồm một bầu nhiệt kế có chứa chất lưu hai pha lỏng - khí được nối với đầu đo áp suất thông qua ống mao dẫn. Khi xuất hiện cả hai pha, áp suất đọc trên đầu đo cho ta giá trị áp suất bão hoà của lưu chất. Việc khắc phục những khuyết điểm của nhiệt kế dạng này được thực hiện tương tự với nhiệt kế dạng "khí và chất lỏng" ở trên. Bằng cách giám sát áp suất bão hoà, nhiệt độ biểu thị phụ thuộc vào nhiệt độ phần còn lại của hệ thống và không phụ

thuộc vào thể tích thực của bầu nhiệt kế cũng như ống mao dẫn. Chất lỏng thường là dung môi hữu cơ như êtan được chọn cho dải nhiệt độ riêng. Để giữ chất lỏng hai pha hoàn toàn trong bầu nhiệt kế, áp suất được truyền qua ống mao dẫn bằng cách dùng chất lỏng đơn pha như dầu. Một vài loại chất lỏng có đường cong bão hoà tuyến tính. Do vậy, phần lớn các áp kế có tỷ lệ phi tuyến đáng kể khi chúng được phân chia tương ứng với đơn vị nhiệt độ. Để khắc phục được điều này, người ta có thể sử dụng lò xo bù đặc biệt được đặt bên trong áp kế để tạo ra thang đo nhiệt độ tuyến tính. Tuy nhiên, đôi khi việc khắc phục này có thể gây ra những rắc rối không lường trước.

Dải nhiệt độ của chất lỏng tới nhiệt kế khí bị giới hạn bởi 2 pha của lưu chất và chúng thường được sử dụng trong dải nhiệt độ từ -40°C đến 300°C, mặc dù một thiết bị đo đơn lẻ hiếm khi làm việc với dải nhiệt độ vượt quá 150°C. Nếu áp suất bão hoà rất lớn so với 100 kPa, áp suất khí quyển kế được dùng thay cho áp kế. Mặt khác, độ chính xác lớn nhất có thể đạt được khi sử dụng áp kế tuyệt đối. Thể tích của bầu nhiệt kế phải tương đối lớn so với sự thay đổi thể tích của ống mao dẫn trong áp kế để cả hai pha có thể tồn tại bên trong bầu nhiệt kế.

Bộ điều chỉnh nhiệt thay đổi pha nghịch

Bộ điều chỉnh nhiệt điểm cố định có thể được xây dựng dựa trên sự thay đổi pha của các phần tử đo đặc biệt. Một ví dụ trong các điểm đóng băng tham chiếu cơ học, ở đó, sự giãn nở đột ngột của nước khi đóng băng được hiểu là chu kỳ hệ thống làm lạnh duy trì trạng thái hai pha của lưu chất. Sự tan chảy và đông lạnh thực tế của băng duy trì nhiệt độ tham chiếu. Các chất sáp (mềm, dính, dễ chảy) với nhiều điểm tan chảy có thể được sử dụng cho những mục đích tương tự.

Một ví dụ khác là khóa điện từ được giữ bằng một nam châm vĩnh cửu cho đến khi đạt tới nhiệt độ Curie mà tại đó nam châm mất đi tính chất từ hóa của nó, hay thay đổi tính chất từ sắt từ sang thuận từ do đó khóa sẽ mở. Khi vật liệu lạnh đi, nó lấy lại tính chất sắt từ và do vậy đóng khóa nhiệt. Những vật liệu từ tính có nhiệt độ Curie khác nhau sẽ được chọn cho các ứng dụng thích hợp.

Bộ chỉ thị nhiệt độ cố định

Bất kỳ chất nào thay đổi pha tại một nhiệt độ cố định có thể được sử dụng như một bộ chỉ thị nhiệt độ. Ví dụ phấn màu làm bằng sáp với điểm tan chảy xác định. Một dấu hiệu được tạo ra trên vật cần được quan sát nhiệt độ và nếu sáp chảy, thì nhiệt độ của vật lớn hơn nhiệt độ của phấn màu. Các bộ chỉ thị nhiệt độ cố định thường không thuận nghịch và có thể dùng với nhiều chất khác nhau.

Một biến thể có thể là thuận nghịch hay không thuận nghịch là sơn chứa thể rắn lơ lửng của sáp hoặc vật liệu tương tự có nhiệt độ tan chảy xác định. Chỉ cần một lượng nhỏ vật liệu đặc sơn lên vật tạo một lớp mờ đục, khi chúng tan ra và chuyển thành dạng lỏng có chỉ số khúc xạ gần tới chỉ số khúc xạ của vật liệu được sơn, nó sẽ trở nên trong suốt. Chỉ thị này có thể được làm thành chuỗi điểm thay đổi theo nhiệt độ để giúp quan sát nhiệt độ thực tế tốt hơn. Các điểm có thể được làm thuận nghịch để chỉ thị liên tục hay bất thuận nghịch để chỉ thị nhiệt độ cực đại đạt được trong chu kỳ giám sát. Thực tế, chỉ thị bất thuận nghịch thông dụng hơn chỉ thị thuận nghịch.

Mặc dù sáp được sử dụng rộng rãi, bất kỳ vật liệu nào có thay đổi pha riêng tại một nhiệt độ xác định có thể được dùng như một bộ giám sát. Các kỹ thuật hình ảnh cũng có thể được dùng để xác định thay đổi pha. Một ứng dụng như thế là dùng gadoli hoặc các phần tử khác hấp thu dễ dàng nơtron ở dạng thích hợp và quan sát sự tan chảy bên trong bằng các phương tiện soi tia X nơtron.

Cảm biến và bộ chuyển đổi nhiệt điện

Cảm biến trong trường hợp này là một phần tử thay đổi một tham số điện như là một hàm số của nhiệt độ. Sau đó, tham số điện này được biến đổi thành một hàm điện hữu dụng, như điện áp tuyến tính với nhiệt độ, với các thành phần điện tử bổ sung. Cảm biến và các thành phần điện tử bổ sung tạo thành bộ chuyển đổi. Sự biến đổi của đặc tính điện theo nhiệt độ là sự khởi nguồn của các khả năng đo lường cũng như sự sụp đổ của toàn bộ hệ thống đo điện do những thay đổi không

mong muốn của của các yếu tố như hệ số khuếch đại của một bộ khuếch đại dẫn đến những sai số nhiệt. Nỗ lực nhằm loại trừ những biến đổi điện do nhiệt nhiều hơn là khai thác chúng cho việc đo lường nhiệt độ.

Cặp nhiệt điện

Có sự liên hệ giữa nhiệt độ của một vật dẫn và động năng của các điện tử tự do. Vì vậy, khi một kim loại được đặt trong khu vực có nhiệt độ, các điện tử tự do sẽ khuếch tán từ khu vực có nhiệt độ cao (động năng lớn) đến khu vực có nhiệt độ thấp (động năng thấp hơn). Građien tập trung điện tử tạo một građien điện áp do các nguyên tử mắt lưới tạo thành điện tích dương không tự do để di chuyển. Građien điện áp này sẽ chống lại sự khuếch tán sau này của các điện tử trong dây dẫn và thiết lập trạng thái cân bằng ổn định khi không có dòng điện.

"Công suất nhiệt" của vật liệu liên hệ sự cân bằng khuếch tán nhiệt của điện tử với tính dẫn điện của kim loại và là duy nhất cho mọi vật dẫn cũng như thường thay đổi theo nhiệt độ. Tính dẫn điện của vật liệu có ảnh hưởng mạnh đến công suất nhiệt vì nó xác định khả năng của vật liệu chịu đựng građien điện áp. Một vật dẫn đơn lẻ có nhiệt độ khác nhau ở hai đầu sẽ có sự sai khác điện thế giữa hai đầu đó. Bí quyết là khả năng đo điện áp tại cả hai đầu vật dẫn và như vậy xác định sai khác nhiệt độ giữa hai đầu này. Nếu chúng ta sử dụng cùng một kiểu dây nối để đo điện áp ở dây dẫn ban đầu, thì dây dẫn thứ hai sẽ sinh ra chính xác sai lệch điện áp khi các đầu của nó được đặt vào cùng nhiệt độ như dây dẫn ban đầu. Do građien điện áp là một hàm của công suất nhiệt là khác nhau đối với mỗi dạng kim loại, nên có thể dùng dây dẫn thứ hai có dạng dây dẫn khác để đo građien nhiệt độ ban đầu. Chỉ một vật dẫn không có chuyển động điện tử hoặc độ dẫn vô hạn có thể dùng để đo građien điện áp tuyệt đối liên quan đến građien nhiệt độ của vật dẫn ban đầu. Đó không phải một định lý thực tế, nên chỉ sự sai khác trong građien nhiệt-điện tử cảm giữa hai vật dẫn có thể đo. Đó chính là cơ sở của cặp nhiệt.

Trong thực tế, khi có hai kim loại được nối với nhau và mối nối đặt tại nhiệt độ khác với nhiệt độ ở hai đầu tự do của hai dây dẫn, thì hai đầu tự do này sẽ xuất hiện sự sai lệch điện áp, là một hàm của nhiệt độ tuyệt đối tại mối nối và nhiệt độ. Mối liên hệ giữa sai khác điện áp và sai khác nhiệt độ sẽ là đặc tính của cặp dây dẫn được chọn. Trong mạch điện, hai đầu dây tự do của cặp nhiệt điện chính là điểm nối với mạch. Điều này nhắc chúng ta rằng luôn có một mối nối thứ hai cần xem xét nếu hai dây dẫn từ cặp nhiệt nối với một mạch đo. Trong một số vị trí của bộ đo, mạch đóng và mối nối thứ hai hình thành.

Từ các giải thích trên, tất cả các định luật cặp nhiệt cổ điển có thể được xem xét. Các định luật này được tổng kết và tìm kiếm ứng dụng như sau:

Định luật 1. Một kim loại thứ ba được đưa vào mạch với cả hai đầu của nó tại điểm đẳng nhiệt không ảnh hưởng tới điện áp cảm ứng nhiệt của cặp kim loại ban đầu.

Có hai gợi ý quan trọng liên quan tới định luật này. Gợi ý thứ nhất là bản chất tiếp xúc điện giữa các dây dẫn tại mối nối không quan trọng và bản thân cặp nhiệt có thể hình thành từ hai dây được hàn, hàn bằng đồng thau, hàn lại hoặc dập ép với nhau. Trong tất cả các trường hợp, kim loại thứ ba có mặt tại mối nối nên nó là chất độn trong liên kết hàn, hợp kim trung gian được sinh ra bằng việc hàn các kim loại không giống nhau hoặc ép kim loại giữ các đầu dây với nhau. Điều đó không có nghĩa rằng không có sự quan tâm khác với cách hình thành của mối nối. Rõ ràng không thể hàn các dây với nhau và sau đó dùng mối nối trên điểm tan chảy của chất hàn. Hầu hết các cặp nhiệt trên thị trường đều được hàn do nguyên nhân này. Định luật này cho phép đo nhiệt độ của một vật kim loại bằng cách hàn trực tiếp một dây dẫn với nó ở vị trí cần đo nhiệt độ. Cách này tránh thời gian trễ khi truyền nhiệt giữa vật và bộ cặp nhiệt độc lập. Gợi ý thứ hai của định luật này cho phép một mạch đo làm từ các dây dẫn khác so với những thứ được dùng trong cặp nhiệt được chèn vào mạch ngay cả khi các kết nối giữa mạch đo và hai dây cặp nhiệt ở cùng một nhiệt độ.

Định luật 2. Nhiệt độ dọc theo dây dẫn không ảnh hưởng đến đặc tính điện áp cảm nhiệt của nhiệt độ hai mối nối.

Điều đó có nghĩa là các dây dẫn chính của cặp nhiệt có thể được dẫn thuận tiện qua các vùng nhiệt độ khác nhau và chỉ những nhiệt độ tại mối nối và vị trí giám sát mới quan trọng trong việc xác định điện áp.

Định luật 3. Mỗi kim loại có một gradien điện áp tương ứng với mỗi gradien nhiệt độ cho trước độc lập với dây dẫn dùng để giám sát điện áp này.

Điều đó có nghĩa là mỗi dạng kim loại có thể được căn chuẩn theo chuẩn và sự căn chuẩn này có giá trị với từng kiểu cặp nhiệt được làm từ dây dẫn này.

Như vậy, những thảo luận trên được giới hạn cho mạch hở vì điều này tránh những sự phức tạp của năng lượng đang được các điện tử chuyển đi từ mối nối có nhiệt cao hoặc tổn thất I^2R trên dây dẫn sinh ra nhiệt và giảm điện áp được đo. Dùng áp kế khuếch đại trở kháng cao hoặc áp kế vi sai có trở kháng vô hạn khi cân bằng cho phép đo điện áp mạch hở thực tế và loại bỏ các nguồn nhiễu này. Tuy nhiên, do các dây dẫn dùng trong cặp nhiệt thường là kim loại với độ dẫn nhiệt hợp lý, nên có thể loại bỏ năng lượng từ hệ thống được đo bằng việc dẫn nhiệt đơn giản dọc theo dây dẫn.

Để thực sự sử dụng cặp nhiệt, nhiệt độ tại một mối nối phải được xác định và một bảng các giá trị kiểm định hay đa thức đặc tính chuẩn được sử dụng để biến đổi điện áp đo được thành nhiệt độ tại mối nối. Hiện có các bảng và đa thức cho các cặp kim loại thông dụng dùng trong cặp nhiệt tham chiếu tới điểm đóng băng của nước [2]. Chúng dựa trên một hợp kim trung bình trừ khi hợp kim này thực sự có thể lấy chính xác con số trong bảng. Sự thay đổi không tránh khỏi này của hàm lượng hợp kim và ứng dụng của các bảng chuẩn là nguồn sai số chính trong các giá trị của cặp nhiệt. Nhờ sự nỗ lực của các nhà sản xuất, sự thay đổi này có thể chỉ còn 2% sai số trong điện áp đưa ra trong một phép đo nhiệt độ cho trước. Các cuộn dây dẫn đơn lẻ hoặc các cặp nhiệt được tạo ra có thể được căn chuẩn để giảm thiểu nguồn sai số.

Nhiệt độ của mối nối tham chiếu phải được biết để xác định nhiệt độ của mối nối đang đo từ điện áp được đo. Nếu nhiệt độ của một trong những mối nối tham chiếu không giống như nhiệt độ tham chiếu của bảng chuẩn thì điện áp kết hợp với nhiệt độ đã biết của mối nối tham chiếu có thể được thêm một cách đại số vào điện áp đo được để xác định điện áp sẽ được đo nếu mối nối tham chiếu có nhiệt độ xác định trong bảng. Điều này không khó như lần đầu tiên. Nếu mối nối tham chiếu được đặt trong một bình đóng băng thì không cần hiệu chỉnh khi dùng các bảng chuẩn danh nghĩa. Để dễ dàng, có những thiết bị làm lạnh tham chiếu đóng băng được thiết kế riêng để dùng cho đo lường cặp nhiệt. Cũng có những cảm biến điện tử cho đầu ra điện áp hoặc dòng điện tỉ lệ thuận với nhiệt độ tuyệt đối và được gắn với hệ thống đo. Chúng được dùng để đo nhiệt độ của khối cực đẳng nhiệt và sau đó bằng mạch tương tự hoặc phần mềm máy tính, điện áp cặp nhiệt liên hệ với nhiệt độ đó được thêm vào điện áp đo được thích hợp. Sự phối hợp này cho phép việc đọc trực tiếp điện thế liên hệ với nhiệt độ chưa biết. Cũng không cần thiết phải nhấn mạnh yêu cầu cảm biến nhiệt cần phải có nhiệt độ giống với nhiệt độ ở các cực của cặp nhiệt. Một máy quét đa kênh hoặc thiết bị tự ghi dạng biểu đồ có thể có bảng đấu nối kéo dài đến hàng trăm milimét. Nếu nhiệt độ được đo tại một điểm trên chiều dài này và nguồn năng lượng hoặc các nguồn nhiệt khác trong máy quét gây ra gradien nhiệt trên bảng cực thì có thể xảy ra những sai số nghiêm trọng. Phải cẩn thận để đảm bảo rằng khối đẳng nhiệt thực sự là đẳng nhiệt. Trong trường hợp máy quét ở trên, bảng đấu nối và bộ dồn kênh cần phải được tách ra khỏi thiết bị mẹ và được bọc cách điện trước khi đạt được các phép chính xác.

Có rất nhiều loại cặp nhiệt độ thương mại với đủ loại cấu hình và chất liệu phụ thuộc vào các yêu cầu đo lường. Cùng với cặp nhiệt, các ngành công nghiệp cung cấp các đầu đọc, bộ điều khiển, dây dẫn và những thiết bị hữu ích khác. Một đầu đọc cặp nhiệt điển hình sẽ có một nhiệt độ tham chiếu điện tử và các điều chỉnh đối với quan hệ phi tuyến giữa hiệu điện thế và nhiệt độ được xây dựng sao cho việc cắm một loại cặp nhiệt độ thích hợp và đọc nhiệt độ trở nên đơn giản. Dây dẫn cho các loại chuẩn được mã hoá màu sắc với vỏ bọc biểu thị cặp dây dẫn và màu sắc của từng dây biểu thị chiều phân cực.

Thật không may khi hầu như chỉ có một sự không thống nhất về các tiêu chuẩn trên thế giới. Ví dụ như ở Hoa Kỳ (ASNI/MC96-1,1982) một vỏ bọc cặp nhiệt độ màu vàng biểu thị cặp crôm-nhôm với dây dẫn màu đỏ cho biết cực âm khi đọc nhiệt độ nâng lên (Ở Hoa kì, màu đỏ thường là dây âm). Trong khi đó ở Nhật (JIS-C 1610, 1981), vỏ bọc màu vàng biểu thị sắt-constantan với dây dẫn đỏ biểu thị cực dương.

Sự ôxy hoá và nhiễm bẩn do pha trộn không chủ định của dây dẫn ở nhiệt độ cao có thể làm dịch căn chuẩn. Việc căn chuẩn cũng có thể dịch chuyển nếu như hợp kim thay đổi theo độ dài của cặp nhiệt sau khi chịu gradien nhiệt độ nhanh ở nhiệt độ cao cho phép các kim loại trong hợp kim khuếch tán sang một kim loại khác. Tuy nhiên, nếu chỉ sử dụng với các mục đích thông thường, cặp nhiệt khá ổn định, dễ dàng sử dụng và đáng tin cậy với các loại phù hợp khi sử dụng từ gần điểm không tuyệt đối đến 2000°C.

Kích thước vật lí và khối lượng nhiệt của cặp nhiệt xác định độ phân giải không gian và hằng số thời gian, nhưng chúng có thể được chế tạo bằng các dây dẫn hoặc các màng khá tốt nhằm giới hạn kích thước của chúng xuống phạm vi micro cần đầu ra công suất thực và mạnh. Không giống như các cảm biến nhiệt điện khác, cặp nhiệt có thể được đính trên tiếp điểm điện trực tiếp với bề mặt được đo, nhờ đó cải thiện đáp ứng thời gian đo. Khái niệm này có thể được mở rộng khi có một mối nối thực hình thành bởi một kim loại thứ ba được kết tủa dưới dạng hơi để làm cầu cách ly giữa các dây đo. Sau đó, các mối nối chứa màng mỏng kim loại mỏng có thể giảm về mặt lý thuyết hằng số thời gian xuống dưới 1 μs [3]). Những nhược điểm chính của cặp nhiệt là điện áp phi tuyến đối với đáp ứng nhiệt, cần biết nhiệt độ tham chiếu bằng các phương tiện khác hơn là sử dụng một cặp nhiệt và độ chính xác tương đối thấp nếu không được căn chuẩn riêng.

Linh kiện nhiệt điện trở (RTD-Resistance Temperature Device)

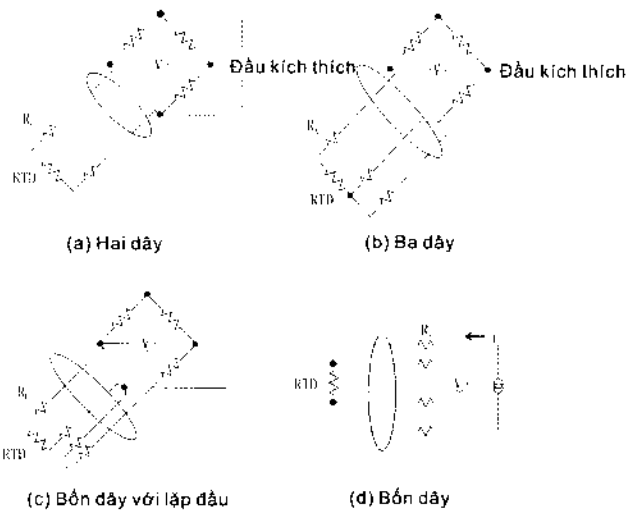
Hầu hết các vật liệu đều có sự biến thiên điện trở theo nhiệt độ. Đối với kim loại, điện trở tăng gần như tuyến tính theo nhiệt độ. Platin là một kim loại được ưa chuộng trong các phép đo nhiệt điện trở thực tiễn và thực sự là biện pháp nội suy riêng giữa rất nhiều các điểm xác định trên thang ITS_{90}. Các kim loại khác ngoài platin có thể được sử dụng cho các ứng dụng cụ thể. Ví dụ như, một cách đo nhiệt độ của cuộn dây trong động cơ hay máy phát là đo điện trở của chúng khi vận hành dưới tải. Các cuộn dây bằng đồng tự nó hoạt động như một thiết bị nhiệt điện trở trong trường hợp này. Các thảo luận dưới đây chủ yếu dành cho các thiết bị nhiệt điện trở platin nhưng các khái niệm có thể áp dụng cho tất cả các kim loại.

Với các đo lường chính xác trên một phạm vi nhiệt độ rộng, cần áp dụng đa thức bậc cao để xác định nhiệt độ từ điện trở. Đối với các đo lường thực tế trong phạm vi hẹp ở hàng trăm mức độ khác nhau, điện trở có thể coi là tuyến tính với nhiệt độ. Các điện trở platin xác định bởi ITS_{90} không giống như các loại thông thường sẵn có. ITS_{90} yêu cầu dây dẫn platin nguyên chất, không căng, tạo nên cảm biến, thường với điện trở 25.5 Ω ở 0°C [9]. Hầu hết các bộ phận của thiết bị nhiệt điện trở đều sử dụng platin nguyên chất trên thị trường với điện trở bằng 100 Ω hoặc 50 Ω ở 0°, mặc dù các giá trị danh nghĩa cao hơn thỉnh thoảng được dùng để giảm thiểu hiệu ứng của điện trở tiếp xúc và dây dẫn trong mạch và các điện trở thấp hơn được sử dụng ở nhiệt độ cao. Có một vài đường cong platin chuẩn khác nhau thể hiện sự thay đổi các hợp kim platin nguyên chất chuẩn. Trong khi tất cả các hợp kim là platin nguyên chất về mặt danh nghĩa, hệ số bậc nhất với nhiệt độ từ 0°C đến 100°C của tiêu chuẩn châu Âu (DIN43 760) là 3.85 mΩ/Ω-K trong khi tiêu chuẩn của Hoa Kỳ là 3.92 mΩ/Ω-K. Bên cạnh hai hệ số phổ biến đó, còn có một vài các hệ số khác đối với platin nguyên chất. Khi mua các linh kiện nhiệt điện trở và đầu đọc thiết bị nhiệt điện trở, người sử dụng nên lưu ý các tiêu chuẩn áp dụng.

Các bộ phận của linh kiện nhiệt điện trở được chế tạo dưới dạng một dây dẫn quấn quanh ống cách điện hoặc các màng kết tủa trên chất nền cách điện. Kích cỡ của cả giá đỡ và dây dẫn, cũng như mọi vỏ bọc cách điện, sẽ xác định thời gian đáp ứng của bộ phận. Các màng thường nhỏ hơn các cảm biến quấn dây và do đó có thời gian đáp ứng nhanh hơn. Tuy nhiên, do yêu cầu cách li thiết bị nhiệt điện trở với bề mặt đo và để tránh làm biến dạng các bộ phận, thậm chí cả những linh kiện nhiệt điện trở màng mỏng nhỏ có các hằng số thời gian được đo bằng 1/10 giây. Trong trường hợp đặc biệt sử dụng dây trần để đo nhiệt độ khí, hằng số thời gian có thể giảm đáng kể tới 1/10 micro giây; tuy nhiên, do việc tự làm nóng được miêu tả dưới đây, phương pháp đo gió địa phương có lợi hơn phương pháp đo nhiệt.

Đo lường nhiệt độ sử dụng một linh kiện nhiệt điện trở chỉ đơn thuần là vấn đề xác định điện trở của nó. Không giống như cặp nhiệt độ, mối quan hệ giữa điện trở và nhiệt độ là tuyệt đối, nên ta không cần thêm nhiệt độ tham chiếu. Tuy nhiên, đo lường điện trở của phần tử này không phải lúc nào cũng đơn giản. Có ba kĩ thuật truyền thống, mỗi loại có những nhược điểm riêng sẽ được đề cập ngắn gọn sau đây.

Phổ biến nhất trong tất cả các kĩ thuật đo cảm biến từ xa là sự phức tạp của điện trở dây dẫn. Như đã đề cập ở trên, tất cả các kim loại đều biến thiên theo nhiệt độ trong điện trở do đó bất kì dây dẫn nào đều đóng vai trò như các linh kiện nhiệt điện trở. Do đó, nếu nhiệt độ dây dẫn giữa các linh kiện nhiệt điện trở và cơ cấu đầu đọc thay đổi, thì sai số sẽ xảy ra trong quá trình đọc nhiệt độ trừ khi được lấy để cung cấp các hiệu ứng nhiệt dẫn. Với lí do đó, các linh kiện nhiệt điện trở trên thị trường thường có hai, ba hoặc bốn dây nối vào các điện cực thực của các điện trở, phụ thuộc vào kĩ thuật sử dụng để điều khiển các hiệu ứng dây dẫn như trong hình 19.58. Sự bố trí như trong hình 19.58 được sử dụng ở những nơi mà độ dài dây dẫn ngắn, điện trở của RTD cao so với điện trở dây dẫn hoặc những nơi không cần độ chính xác cao. Ba dây RTD trong hình 19.58(b) cho phép một chiều dài dây dẫn tương đương được đưa vào mỗi phía của cầu nối sao cho các thay đổi trong điện trở dây dẫn ở hai phía là như nhau và sự cân bằng của cầu không bị ảnh hưởng. Cũng cần phải lưu ý rằng các RTD bốn dây dẫn trong hình 19.58 (d) có thể được sử dụng với các đầu đọc dành cho các loại RTD hai, ba hoặc bốn dây và bỏ qua vấn đề về chi phí và kích cỡ, chúng cần cho phép nâng cấp đầu đọc sau này. Hình 19.58(c) cho thấy một cấu trúc thay thế khá hiếm của một đầu dò RTD bốn dây trong đó hai dây dẫn tạo nên một vòng kín. Các bố trí này thường được cần đến chỉ khi nhiều RTD bên trong cầu và không nên nhầm lẫn với các loại RTD bốn dây khác trong hình 19.58(d) có hai dây dẫn ở mỗi đầu điện trở.



HÌNH 19.58 Một số loại RTD và các mạch ứng dụng

Một vấn đề phổ biến khác đối với tất cả hệ thống đầu đọc đó là việc tự làm nóng của các RTD do dòng điện đang đo chạy qua điện trở. Điều này có thể được giảm thiểu bằng cách sử dụng dòng điện nhỏ, có hệ số truyền nhiệt cao giữa cảm biến và quá trình đo hoặc bằng phương pháp đo xung thời gian công suất thấp. Mặc dù các bước có thể lấy để giảm thiểu nó, nhưng việc tự làm nóng không bao giờ bị loại bỏ hoàn toàn. Một đặc điểm thường thấy ở các RTD là nó có thể được tận dụng như là một phương tiện xác định hệ số truyền nhiệt của một hệ thống, chẳng hạn như khi các điện trở platin được sử dụng như các thiết bị đo gió.

Như đã chỉ ra ở trên, đo nhiệt độ sử dụng một RTD chỉ cần xác định điện trở của nó. Ba kỹ thuật truyền thống sẽ được đề cập ngắn gọn ở đây.

Cầu cân bằng hoàn toàn

Một phương tiện đơn giản nhưng chính xác cao để xác định điện trở của một RTD là sử dụng chúng trong một chân của một cầu wheatstone và có điện trở biến thiên được căn chuẩn ở chân đối diện khi cầu được đưa đến vị trí cân bằng, như được biểu thị bởi dòng điện bằng không trong điện kế, điện trở của RTD giống với điện trở biến thiên được căn chuẩn. Có một vài sự thay đổi trên cách bố trí này để loại bỏ hầu hết các nguồn sai số bằng cách tách thiết bị gây sai lệch giữa các chân của cầu. Ví dụ như, nếu một RTD tách khỏi cầu, một cấu trúc ba dây dẫn có thể được sử dụng để đưa dây dẫn có độ dài như nhau vào hai phía của cầu với "góc" cầu giờ đây được xác định tại vị trí RTD từ xa như trong hình 19.58(b). Cuối cùng, độ chính xác của quá trình đọc bị hạn chế bởi độ chính xác của các điện trở được làm khá chính xác trong cầu. Do điện trở biến thiên phải được điều chỉnh vật lý để làm cân bằng cầu, nên phương pháp này không thích hợp đối với các bộ ghi dữ liệu hay bộ hiển thị nhiệt.

Cầu không cân bằng

Nếu điện trở biến thiên được căn chuẩn trong cách bố trí ở trên được thay thế bằng một điện trở cố định, thì phạm vi không cân bằng của cầu có thể được đo bằng một vôn kế thay cho điện kế có giá trị không. Kỹ thuật này có nhiều sai số do sự không cân bằng của cầu là không tuyến tính với điện trở của RTD và đầu đọc của vôn kế cũng tỉ lệ thuận với dòng điện kích thích. Tuy nhiên, nó có thể là một biện pháp thực tế để đo nhiệt độ trong một phạm vi hẹp nếu như các giá trị điện trở trong các chân ở xa của cầu cao hơn RTD và điện trở chân đối diện gần với chân của RTD. Giống như với các kĩ thuật cầu khác, ba dây dẫn có thể được sắp xếp trong các chân đối diện của cầu cho các cảm biến từ xa để bù vào các thay đổi điện trở dây dẫn. Nếu các chân đối diện của cầu đều có RTD, sự mất cân bằng của cầu tỉ lệ thuận với sự chênh lệch về nhiệt độ của hai RTD và chỉ có một cách duy nhất để giữ độ dài cân bằng trong các chân là sử dụng loại đặc biệt bốn dây dẫn trong như trong hình 19.58(c).

Đo điện áp và dòng điện một chiều

Nếu cho một dòng điện không đổi chạy qua một điện trở, điện áp qua nó sẽ tỉ lệ thuận với điện trở. Đây là một khái niệm đơn giản nhưng phải đợi sự ra đời của các nguồn điện không đổi và bộ khuếch đại điện áp trở kháng cao thì mới trở thành sự thay thế thực tế cho phương pháp cầu. Bằng việc sử dụng bốn dây dẫn như trong hình 19.58(d), mạch dòng điện có thể được chế tạo độc lập với mạch cảm biến điện thế và điện trở dây dẫn không ảnh hưởng đến đầu đọc.

Nhiệt điện trở

Nhiệt điện trở là các chất bán dẫn khối được làm từ oxit của niken, cô ban, măng gan hoặc kim loại khác. Oxit được đặt vào bột mịn và sau đó được nung để tạo vật liệu nhiệt điện trở thực tế để sau đó được kết hợp vào trong cảm biến. Nhiệt điện trở là thiết bị cảm nhận nhiệt độ điện trở với một số phân biệt đáng chú ý so với RTD như hệ số nhiệt âm lớn và đáp ứng cực kỳ phi tuyến. Điện trở của một nhiệt điện trở thường lớn (vài ngàn ôm) đến mức ít quan tâm tới điện trở dây nối. Do vậy chúng chắc chắn là các thiết bị hai dây trừ khi trường hợp nhiều nhiệt điện trở hoặc các thành phần trong đầu đo. Phải có liên kết điện giữa dây dẫn và chất bán dẫn nhiệt điện trở. Liên kết này và vỏ bọc epoxit đặc trưng đặt một giới hạn cho nhiệt độ không ổn định lớn nhất, thậm chí bản thân nhiệt điện trở là một vật liệu chịu nhiệt.

Có một số cách phối hợp để thực hiện với đặc tính phi tuyến của nhiệt điện trở, từ việc bù một đường cong đặc tính dùng máy tính cho đến sử dụng nhiều nhiệt điện trở với các đặc tính khác nhau cùng điện trở phi nhiệt trong một mạch cầu với một đầu đo đơn. Với nhiệt độ vừa phải trong dải 200 K, một mạch cầu ngoài đơn giản có thể được sử dụng để tuyến tính hoá đặc tính của tín hiệu.

Mặc dù thường không được gọi là nhiệt điện trở, Gecmani, Silic và Cacbon là những chất bán dẫn có thể được dùng để đo nhiệt độ bằng cách đo điện trở của chúng. Gecmani được sử dụng cho các ứng dụng yêu cầu độ chính xác rất cao tại nhiệt độ đông lạnh xuống gần 1 K. Sự thay đổi của

điện trở có thể là rất lớn và rất phi tuyến. nhưng khá lặp lại từ 700 Ω ở 2 K đến 6 Ω ở 60 K [3]. Silic có thể được sử dụng ở nhiệt độ phòng, phụ thuộc nhiều vào kích thích, có độ dốc của đường đặc tính lớn. Nó hiếm khi được sử dụng như là một cảm biến nhiệt độ do các phương pháp khác thực hiện tốt hơn trong khoảng làm việc -200^{0}C đến 200^{0}C. Điện trở cacbon không chỉ được dùng phổ biến trong các phòng thí nghiệm mà còn được dùng để đo nhiệt độ trong khoảng từ 1 đến 20 K, nhưng chúng cần được kiểm định riêng rẽ.

Cảm biến nhiệt độ dùng mạch tích hợp (IC)

Sụt điện áp từ cực B (base) đến cực E (emitter) của một tranzito hoạt động với dòng điện không đổi là một hàm đơn giản của nhiệt độ tuyệt đối. Do vậy, bất cứ tranzito nào cũng có thể được sử dụng như là một cảm biến nhiệt độ. Trong thực tế, không chỉ đơn thuần là đo lường, có nhiều vấn đề khi xây dựng các linh kiện điện tử ổn định dành cho việc đo nhiệt độ. Có sẵn những mạch tích hợp (IC) để đo dòng điện cực góp (C), khuếch đại và tuyến tính hoá điện áp từ cực B đến cực E để tạo tín hiệu ra tỉ lệ thuận với nhiệt độ tuyệt đối. Các cảm biến nhiệt độ IC phổ biến với các đầu ra 10 mV/K, hay 1μA/K. Khoảng nhiệt độ có thể sử dụng thường giới hạn trong khoảng -50^{0}C đến 150^{0}C với công nghệ mạch tích hợp. Điều này rất hữu ích trong việc so sánh nhiệt độ tiếp xúc của cặp nhiệt với nhiệt độ của môi trường được đo quanh nó. Mặc dù bản chất không thấm nước nhưng IC thường được đóng vỏ bằng kim loại hoặc bằng nhựa giống như tranzito tín hiệu và có thể để được trong nguồn nước có nhiệt.

Cảm biến IC với đầu ra điện áp thường có thiết bị đầu cuối, với dây dẫn tùy chọn để cắt đáp ứng. Khi cho dòng điện nhỏ khoảng 1mA chạy qua, nó sẽ gây ra một điện áp rơi tỉ lệ thuận với nhiệt độ tuyệt đối (National, 2000). Thậm chí, một bộ chuyển đổi IC đơn giản hơn cũng có sẵn kích thích và dây dẫn tín hiệu riêng biệt. Nó thường được căn chuẩn ở 10 mV/^{0}F hoặc ^{0}C. Chúng có một hạn chế cố hữu là không thể đo được nhiệt độ sát nhiệt độ 0^{0}F hoặc 0^{0}C trừ khi có sẵn cả nguồn cung cấp là dương và âm.

Các IC có đầu ra điện áp rất thuận tiện khi nhiệt độ đang được giám sát tác động tới kết quả đạt được và không quan tâm đến điện áp rơi trên dây dẫn, nhưng với các cảm biến từ xa cần dây dài, các cảm biến dòng điện được ưa chuộng hơn. Cảm biến dòng điện cũng là hai thiết bị đầu cuối chạy các nguồn dòng điện trở kháng cao sao cho bất cứ điện trở dây dẫn làm tăng điện áp như thế nào cũng không ảnh hưởng đến dòng điện qua cảm biến [1]. Cả hai loại này đều có thể được điều chỉnh riêng bằng cách loại bỏ điện trở trên chip bằng laze trong quá trình chế tạo để tạo ra đáp ứng đầu ra nhanh hoặc chúng có thể có một dây dẫn điều chỉnh bên ngoài. Mặc dù đã cắt bỏ và căn chuẩn, nhưng độ chính xác của chúng trong khoảng -50 đến 150^{0}C thường hiếm khi chính xác hơn 2-3^{0}C. Một số IC có thể được kết hợp nhau để cho nhiệt độ nhỏ nhất hoặc trung bình. Các IC điện áp thường mắc song song để đo được nhiệt độ nhỏ nhất, hay mắc nối tiếp để được nhiệt độ trung bình, trong khi các đầu dòng điện được nối nối tiếp trong trường hợp tính giá trị nhỏ nhất và nối song song trong trường hợp tính giá trị trung bình. Ngoài các ứng dụng đơn giản của các nguồn dòng điện và điện áp không đổi dựa trên nhiệt độ, còn có nhiều mạch mới để tạo ra bất cứ chức năng nào trong lĩnh vực đo lường nhiệt độ.

Mặc dù chỉ là một phần nhỏ trên chíp silic của IC cảm nhận nhiệt độ, nhưng sẽ có ích khi quan tâm đến toàn bộ chip, vỏ bọc của nó và dây dẫn của cảm biến. Việc tăng khối lượng nhiệt này làm giảm thời gian đáp ứng của thiết bị xuống vài giây. Hiện tượng tự làm nóng và truyền nhiệt qua dây dẫn cũng cần quan tâm và làm giới hạn tính ứng dụng của các linh kiện này trong đo lường.

Nhiệt kế không tiếp xúc

Tất cả các hệ thống giám sát (cảm biến) nhiệt độ được thảo luận ở phía trước đều ở dạng tiếp xúc vật lý với đối tượng được đo hoặc trong một số trường hợp đặc biệt là đối tượng thực đang được đo. Thông thường, việc thực hiện kết nối vật lý là không thực tế và các thiết bị đo không tiếp xúc đã được phát triển để vượt qua trở ngại này. Hầu như tất cả các kỹ thuật này yêu cầu sự phát tia hồng ngoại từ bề mặt của vật được đo, nhưng trong một số trường hợp đặc biệt, bề mặt có tính chất quang học như phản xạ, có thể được khai thác để xác định nhiệt độ từ xa.

Nhiệt kế phát xạ hồng ngoại

Bất cứ vật nào có nhiệt độ lớn hơn nhiệt độ tuyệt đối đều phát ra các tia điện từ mà phổ của chúng có quan hệ với nhiệt độ bề mặt của vật phát xạ. Sử dụng đặc tính này của phổ, nhiệt độ của đối tượng có thể được xác định trực tiếp và tuyệt đối. Cơ sở vì sóng của vũ trụ ở 3 K và nhiệt độ của ngôi sao phụ thuộc vào màu sắc của nó là những ví dụ điển hình về hiện tượng này. Nhiệt độ cũng có thể được xác định từ bề mặt phát xạ mà không cần sử dụng quang phổ kế. Nếu hai vật được dùng để so sánh với nhau và chúng ở điều kiện cân bằng về nhiệt độ, khi nhiệt độ của một vật được xác định, ta có thể xác định nhiệt độ của vật còn lại. Đây là nguyên tắc cơ bản của tất cả các phương pháp đo nhiệt độ dựa trên truyền nhiệt đã nêu. Điều này cũng được mở rộng cho phương pháp đo nhiệt độ không tiếp xúc bởi vì truyền nhiệt do bức xạ cũng là một biện pháp để hai vật đạt tới cân bằng nhiệt. Nhiều nhiệt kế hồng ngoại được xây dựng dựa trên hiện tượng này.

Dạng đơn giản nhất của nhiệt kế hồng ngoại gồm cảm biến nhiệt để giám sát nhiệt độ của vật được cách ly gọi là đầu dò và đầu dò này chỉ phụ thuộc vào truyền nhiệt do bức xạ với bề mặt nhiệt cần đo. Giả sử là cả hai bề mặt của đầu đo và vật cần đo được xem như là vật đen tuyệt đối, do vậy không có sự mất mát nhiệt từ đầu đo ra môi trường xung quanh và trường quan sát của đầu dò bị giới hạn bởi vật dưới đo lường và ngược lại hoàn toàn không bị cản trở. Mỗi giả thiết cần được xem xét khi thực hiện so với trường hợp lý tưởng của nhiệt kế hồng ngoại.

Khái niệm của vật đen tuyệt đối là một khái niệm lý tưởng, khi nhiệt lượng phát ra bị bề mặt hấp thụ toàn bộ. Do giả thiết này, nhiệt phát ra là một hàm duy nhất của nhiệt độ bề mặt. Chỉ có sự thay đổi nhiệt do hấp thụ bởi bề mặt là bị phản xạ bởi bề mặt hay xuyên qua vật liệu. Độ phát xạ, mô tả khả năng phát xạ của bề mặt một vật đen tuyệt đối, là hiệu giữa phần phản xạ và phần truyền qua. Nếu độ phát xạ nhỏ hơn một nhưng độc lập với bước sóng thì được gọi là vật xám. Một số vật liệu vừa có thể là vật đen, cũng có thể là vật xám do vậy cần thực hiện hiệu chỉnh độ phát xạ và nó là hàm của nhiệt độ cần đo. Nếu một bề mặt giống như vật xám trong một khoảng giới hạn của bước sóng, cường độ tại một vài bước sóng trong khoảng này có thể được xác định để ước lượng cho toàn bộ dải phổ. May mắn là nhiều vật thực tế giống như vật xám trong một khoảng hẹp của bước sóng quanh 750 nm và hình dạng phổ như một hàm của nhiệt độ cho vật xám trong khoảng nhiệt độ từ 500 - 3000^{0}C được xem xét tại các bước sóng này có thể đo dạng phổ và nhiệt độ chỉ với hai điểm. Độ phát xạ của bề mặt có thể được xác định cùng với nhiệt độ bằng cách dùng một chùm laze hồng ngoại chiếu sáng bề mặt và đo tổng số tia laze phát xạ. Số tia chiếu sáng bằng tổng của số tia phản xạ và phần phát ra nhiệt hồng ngoại. Cẩn thận hơn, nếu dùng xung ngắn hay chùm laze công suất thấp sẽ cho phép tránh làm nóng bề mặt được đo và sẽ sinh ra phần phản xạ ở bước sóng của chùm laze và do vậy độ phát xạ của nó (với bề mặt đục) bằng một trừ đi độ phản xạ.

Sự truyền nhiệt tới hoặc từ một đầu dò bằng trao đổi nhiệt phát xạ với bề mặt cần đo yêu cầu nhiệt độ của đầu đo được xem như chỉ mô tả nhiệt độ của mặt được đo hơn là giống hệt nhiệt độ của bề mặt cần đo. Truyền nhiệt từ đầu dò tới thiết bị có thể thông qua dẫn nhiệt hay bức xạ nhiệt và được cung cấp bằng hiệu chỉnh thiết bị đối với một vật đen của một nhiệt độ đã biết. Khi điều này được thực hiện, nhiệt độ của thiết bị được giám sát và xung quanh có thể được thiết lập để có một liên hệ tham chiếu cho đầu dò quan sát nhiệt độ xung quanh thiết bị. Thay đổi luồng photon thực tế có thể được xác định bằng các phương tiện điện tử dùng điôt quang, tế bào quang điện và các phương pháp khác như là cảm biến quang điện cảm nhận tia hồng ngoại. Khi thực hiện điều này, các bộ lọc dải hẹp thường được sử dụng để giới hạn đáp ứng của đầu dò cho một bước sóng của phát xạ hồng ngoại để tránh việc đếm các photon có thể bị phản xạ từ một bề mặt hoặc để giới hạn đáp ứng tới một bước sóng đặc biệt ở đó nhiễu không khí là nhỏ nhất.

Các thành phần quang học thường được dùng để giới hạn trường quan sát của đầu dò, do vậy phần xác định của bề mặt được đo được tập trung trên đầu đo. Miễn là toàn bộ đầu đo nhìn thấy bề mặt cần đo, khoảng cách giữa đầu đo và bề mặt là không quan trọng, ngoại trừ sự liên quan hấp thụ tia hồng ngoại bởi nước (H_2O) hay khí cacbonic (CO_2) hoặc một khí hoạt động đối với tia hồng ngoại.

Một biến thể của kỹ thuật hồng ngoại được thảo luận ở trên là hỏa kế dạng sợi biến mất. Thiết bị này được đặt thêm vào bên ngoài vỏ bóng đèn sợi đốt mà nhiệt độ của sợi đã biết là một hàm

của dòng điện chạy qua nó và quan sát được. Tường của lò nhiệt hoặc một bề mặt nóng phát nhiệt thường được quan sát bằng một thiết bị đo từ xa trong khi hiệu chỉnh dòng điện chạy qua sợi đốt cho đến khi nó vừa biến mất khỏi nền chiếu sáng. Nhiệt độ của sợi đốt sẽ tương ứng với nhiệt độ của của bề mặt vật nóng phát nhiệt và được xác định từ dòng điện chạy qua sợi đốt. Một cách lọc đơn giản là dùng một bộ lọc thông dải hẹp màu đỏ cho thiết bị đo nhiệt độ do vậy màu sắc giống nhau cho cả sợi đốt và đích, nó trở nên một sóng đơn sắc sáng hơn phát xạ. Nếu độ phát xạ của các sợi đốt và bề mặt là đồng nhất, việc xác định này là rất chính xác. Nếu không bằng một, khi một bộ lọc đơn sắc được sử dụng chỉ độ phát xạ ở một bước sóng cần để biết cho việc xác định độ chính xác nhiệt độ.

Đo lường nhiệt độ cỡ micro

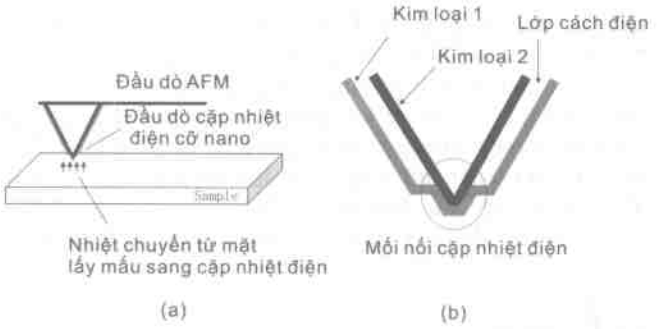
Công nghiệp vi điện tử ngày càng phát triển cho phép các thiết bị hoạt động ở tần số cao, các thiết bị ngày càng trở nên nhỏ gọn hơn, các kỹ thuật đo lường với phạm vi đo lớn và độ phân giải về thời gian cao đã trở nên ngày càng quan trọng. Một số kỹ thuật đã có có thể dùng để đo nhiệt độ với sai lệch nhỏ, như là phân giải lớn về giá trị, cũng như phân giải lớn về thời gian. Tuy nhiên, nhiều kỹ thuật đang được phát triển tập trung vào cảm nhận sự sai khác nhiệt độ ở mức độ sai lệch rất nhỏ. Ví dụ như kỹ thuật phản xạ nhiệt dùng xung laze để làm nóng và đầu dò phản xạ nhiệt của mẫu cho phép quan sát truyền nhiệt trong khoảng thời gian rất nhỏ ở phần nghìn tỉ giây. Kỹ thuật đo liên quan sự thay đổi phản xạ tương ứng với sự thay đổi nhiệt độ sử dụng chỉ số phức hợp của vật liệu của phản xạ [13].

Ba phương pháp phổ biến nhất quan sát hiện tượng nhiệt cỡ micro bao gồm cặp nhiệt màng mỏng, vi cầu màng mỏng và kỹ thuật quang học. Cặp nhiệt ở tỉ lệ nano thông thường được sử dụng kết hợp với một kính hiển vi lực nguyên tử (AFM). Kỹ thuật này không gây phá huỷ do AFM đưa đầu dò tiếp xúc với mẫu rất thận trọng. Vi cầu màng mỏng là những màng mỏng kim loại thường mỏng hơn 100 nano mét và có độ rộng tùy vào các ứng dụng. Kỹ thuật này dựa trên thực tế là điện trở của một vi cầu là một hàm bền vững của nhiệt độ. Vi cầu phải được lắng tụ trên bề mặt mẫu, do vậy kỹ thuật này hoặc là không tiếp xúc hoặc là không phá huỷ. Kỹ thuật quang học thông thường dùng laze như là một nguồn phát nhiệt và hoặc là một đầu dò nhiệt. Ảnh hưởng của nhiệt độ có thể được quan sát theo nhiều cách khác nhau. Kỹ thuật phản xạ nhiệt dựa trên sự phụ thuộc của phần nhiệt phản xạ [11], trong khi kỹ thuật nhiệt quang xem xét sự phản xạ của chùm dò bằng sự giãn nở nhiệt gây ra trên bề mặt [16]. Kỹ thuật "ảo ảnh" dựa trên thực tế là chỉ phần không khí nằm bên trên bề mặt bị làm nóng, nó gây ra sự thay đổi về chỉ số khúc xạ làm cong chùm dò theo sự thay đổi của nhiệt độ [5].

Kỹ thuật soi quét nhiệt (SThM)

SThM là một ví dụ tiêu biểu nhất của phương pháp đo nhiệt độ dựa trên bước sóng ngắn (sub-micron length scales). Cặp nhiệt nano bao gồm phiến kim loại mỏng gắn trực tiếp trên một đầu dò AFM. Majumdar đã đưa ra một tổng kết dễ hiểu về RThM và bao gồm cả những mô tả về một vài phương pháp sản xuất những cặp nhiệt nanô mét này [8]. Hình 19.59(a) chỉ ra sơ đồ của một đầu dò dùng nguyên lý soi quét và trong hình 19.59(b) là sơ đồ nguyên lý của một cặp nhiệt thông thường. Một số yếu tố ảnh hưởng đến độ phân giải của kết quả đo. Các yếu tố này bao gồm kích thước đỉnh đầu cặp nhiệt có giá trị là 20 hoặc 50nm, đường mang năng lượng tự do trung bình của vật liệu được mô tả và cơ chế truyền nhiệt giữa mẫu và cặp nhiệt về cơ bản là một yếu tố giới hạn.

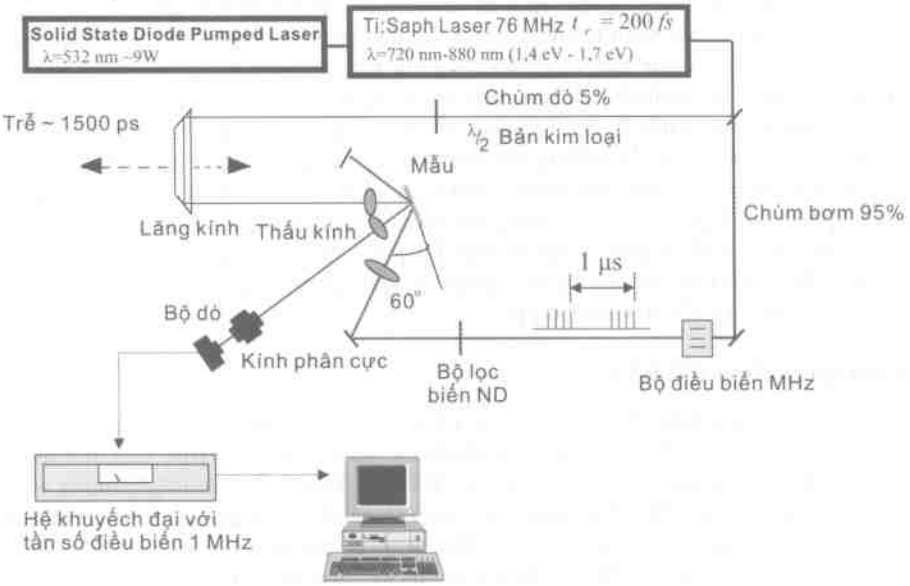
Hoạt động của dầm AFM giống hệt như hoạt động của một đầu dò AFM. Về lý tưởng, cặp nhiệt nhanh chóng đạt tới trạng thái cân bằng khi cặp nhiệt được nối với mẫu và không ảnh hưởng ngược lại đến nhiệt độ của bề mặt. Trong thực tế, có một năng lượng nhiệt xác định truyền giữa mẫu và cặp nhiệt do đó ảnh hưởng đến nhiệt độ vật mẫu và cũng có điện trở nhiệt gây ra hiện tượng trễ của kết quả đo và giới hạn độ phân giải. Khi mẫu và cặp nhiệt được gắn vào nhau, gây ra dẫn nhiệt rắn-rắn từ mẫu sang cặp nhiệt. Cũng có sự dẫn nhiệt qua không khí quanh đầu cặp nhiệt và qua lớp chất lỏng đọng trong khe nhỏ giữa đầu đo và mẫu. Hiện tượng dẫn nhiệt qua lớp chất lỏng này trội hơn hẳn truyền nhiệt dưới điều kiện áp suất thông thường [14].



HÌNH 19.59 (a) Sơ đồ sử dụng đầu dò soi quét nhiệt
(b) Sơ đồ nguyên lý của cặp nhiệt sai lệch nhỏ công xôn AFM

Kỹ thuật phản xạ nhiệt tức thời (TTR)

Kỹ thuật phản xạ nhiệt, phương pháp đo nhiệt độ gián tiếp, là kỹ thuật quang học cho phép đo sự thay đổi nhiệt độ nhanh tính theo đơn vị nhỏ hơn một phần của giây. Kỹ thuật này hoàn toàn dựa trên nguyên tắc không tiếp xúc và độ phản xạ tỉ lệ thuận với nhiệt độ. Thí nghiệm về TTR [4, 11, 6] trên hình 19.60 có thể được dùng để đo đáp ứng của phản xạ nhiệt của một vật kim loại sau khi hấp thụ xung laze siêu ngắn. Xung laze lấy từ nguồn laze hoạt động ở 76 MHz được tách thành hai chùm, chùm có cường độ rất mạnh được dùng để làm nóng tấm phim (chùm bơm); chùm có cường độ yếu hơn (chùm dò) được sử dụng để đo độ phản xạ. Chùm bơm truyền qua một bộ điều biến quang. Kết quả là tại đây, chùm này bị cắt với tần số điều biến 1 MHz.



HÌNH 19.60 Thực nghiệm cài đặt phương pháp đo phản xạ nhiệt

Chùm dò xuyên qua một lăng kính trên một giá động, được sử dụng để làm tăng độ dài quang học của chùm dò và do đó có thời gian trễ giữa bơm và xung chùm dò. Sự phản xạ của chùm dò là trung tâm của khu vực nhiệt độ được đo bởi một điôt quang và gửi đến khoá hệ khuếch đại với tần số điều biến 1MHz. Điều này có lợi cho hồi phục biên dạng tạm thời của mẫu.

Thực hiện phương pháp này, đầu dò nhiệt độ sẽ đo sự thay đổi phản xạ đối với sự thay đổi nhiệt độ dùng chỉ số khúc xạ phức hợp của vật liệu. Ở hầu hết các kim loại và chất điện môi, chỉ số phức hợp của khúc xạ phụ thuộc ít vào nhiệt độ [12]. Ở phạm vi độ dài bước sóng, nếu hệ số phản xạ lớn, hệ số phản xạ có thể được mô tả bằng tổng tuyến tính của phân bố lớn và một phân bố điều biến nhỏ của nhiệt độ. Sự thay đổi tương ứng của hệ số phản xạ xấp xỉ 10^{-5}/K. Việc dò lock-in ở

1MHz cho phép độ phân giải của tín hiệu tức thời nhỏ. Bằng cách so sánh đáp ứng nhiệt độ tức thời của bề mặt với mô hình dẫn nhiệt phù hợp, thuộc tính nhiệt-lý như là sự khuếch tán nhiệt và điện trở biên nhiệt độ có thể được xác định [6, 15].

Kết luận

Các loại cảm biến có mặt trên thị trường dùng để giám sát các thông số liên quan đến nhiệt độ rất đa dạng. Việc chọn lựa một cảm biến thích hợp phụ thuộc rất nhiều vào cấu trúc vật lý thực tế của vật liệu cần đo, cũng như yêu cầu về độ chính xác, hiển thị và xử lý số liệu. Cặp nhiệt có thể là một lựa chọn tốt cho các ứng dụng liên quan đến đo điện của hệ thống xử lý từ xa, nhiệt kế bầu khí phù hợp cho các hệ thống đo từ xa không liên quan đến điện. Các yếu tố địa lý và vật lý thường giới hạn việc sử dụng các loại cảm biến khác nhau. Một số yêu tố quan trọng cần quan tâm tới là độ chính xác, không gian, độ phân giải yêu cầu. Các ý kiến ở đây cung cấp một cái nhìn khái quát về một lĩnh vực rộng lớn là kỹ thuật đo nhiệt độ. Một số tham khảo hữu ích được liệt kê dưới đây sẽ chi tiết hơn về những thông tin này. Đo nhiệt độ giống như một nghệ thuật hơn là một khoa học với nhiều đặc điểm và sáng tạo kỹ thuật mới trong suốt quá trình phát triển. Do xu thế của công nghệ nano, ngày càng có nhiều sự cải tiến trong việc xác định nhiệt độ của từng khu vực nhỏ cần đo. Các phương pháp đo nhiệt độ truyền thống không phù hợp cho những vùng nhiệt độ nhỏ để có thể xác định được chính xác.

Tài liệu tham khảo

[1] Analog Devices Data Sheet for AD590 Temperature Transducer, 1997.

[2] Croarkin, M.C., et al., 1993, "Temperature-electromotive force reference functions and tables for the letter-designated thermocouple types based on the ITS-90", National Institute of Standards and Technology, Monograph 175.

[3] Doebelin, E.O., *Measurement Systems, Application and Design*, McGraw-Hill, New York, 1990.

[4] Elsayed-Ali, H.E., Juhasz, T., Smith, G.O., and Bron, W.E., 1991, "Femtosecond thermoreflectivity and thermotransmissivity of polycrystalline and single-crystalline gold films", Phys. Rev. B, Vol. 43, pp. 4488–4491.

[5] Gonzales, E.J., Bonevich, J.E., Stafford, G.R., White, G., and Josell, D., 2000, "Thermal transport through thin films: mirage technique measurements on aluminum/titanium multilayers", *J. Materials Res.*, Vol. 15, pp. 764–771.

[6] Hostetler, J.L., Smith, A.N., and Norris, P.M., 1998, "Simultaneous measurement of thermophysical and mechanical properties of thin films", *Int. J. Thermophys.*, Vol. 19, pp. 569–577.

[7] Hostetler, J.L., Smith, A.N., and Norris, P.M., 1997, "Thin-film thermal conductivity and thickness measurements using picosecond ultrasonics", *Micro. Thermophys. Eng.*, Vol. 1, pp. 237–244.

[8] Majumdar, A., 1999, "Scanning thermal microscopy", *Ann. Rev. Material Sci.*, Vol. 29, pp. 505–585.

[9] Mangum, B.W. and Furukawa, G.T., 1990, "Guidelines for realizing the international temperature scale of 1990 (ITS-90)", National Institute of Science and Technology, Technical Note 1265.

[10] National Semiconductor Data Sheet for LM135 series Temperature Sensors, DS005698, 2000.

[11] Paddock, C.A. and Eesley, G.L., 1986, "Transient thermoreflectance from thin metal films", *J. Appl. Phys.*, Vol. 60, pp. 285–290.

[12] Price, D.J., 1947, "The temperature variation of the emissivity of metals in the near infrared", *Proc. Phys. Soc.* (London), Vol. 59, pp. 131.

[13] Rosei, R. and Lynch, D.W., 1972, "Thermomodulation spectra of Al, Au, and Cu", *Phys. Rev. B*, Vol. 10, pp. 474–483.

[14] Shi, L., Plyasunov, S., Bachtold, A., McEuen, P.L., and Majumdar, A., 2000, "Scanning thermal microscopy of carbon nanotubes using batch-fabricated probes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, pp. 4295–4297.

[15] Smith, A.N., Hostetler, J.L., and Norris, P.M., 2000, "Thermal boundary resistance measurements using a transient thermoreflectance technique", *Micro. Thermophys. Eng.*, Vol. 4, No. 1, pp. 51–60.

[16] Welsh, E. and Ristau, D., 1995, "Photothermal measurements on optical thin films", *Appl. Opt.*, Vol. 34, pp. 7239–7253.

19.7 Cảm biến đo khoảng cách và cảm biến tiệm cận

Jorge Fernando Figueroa và H. R. (Bart) Everett

Cảm biến đo khoảng cách

Giới thiệu

Các cảm biến này được sử dụng để đo khoảng cách từ một điểm tham chiếu tới một đối tượng. Rất nhiều công nghệ khác nhau đã được ứng dụng để phát triển các loại cảm biến này, tiêu biểu là ánh sáng/quang học, hình ảnh, vi sóng và siêu âm. Cảm biến đo khoảng cách có thể phân thành 2 loại: Tiếp xúc và không tiếp xúc.

Cảm biến đo khoảng cách không tiếp xúc

Cảm biến đo khoảng cách không tiếp xúc là loại cảm biến đo khoảng cách thực từ điểm tham chiếu tới một đối tượng không thông qua tiếp xúc vật lý. Có ít nhất bảy kỹ thuật đo khác nhau được áp dụng trên các cảm biến này [19]:

- Đo tam giác
- Thời gian truyền
- Đo dịch pha
- Điều biến tần số
- Giao thoa
- Hội tụ quét
- Cường độ tín hiệu trả về

Cảm biến đo khoảng cách không tiếp xúc được phân chia thành hai loại: *chủ động* (phát một số dạng năng lượng vào khu vực quan tâm) hoặc *thụ động* (dựa trên năng lượng phát ra từ các đối tượng trong khu vực quan tâm). Các thuật ngữ thường được sử dụng như *rađa* (radio direction and ranging), *sonar* (sound navigation and ranging) và *lidar* (light direction and ranging) tương ứng với các phương pháp *chủ động* dựa trên một số kỹ thuật đo ở trên. Ví dụ, *rađa* sử dụng kỹ thuật thời gian truyền, đo dịch pha hoặc điều biến tần số. *Sonar* thường sử dụng kỹ thuật thời gian truyền do tốc độ âm thanh đủ chậm để đo bằng các thiết bị điện tử có giá thành thấp. *Lidar* thường dựa trên cơ sở kỹ thuật laze sử dụng phép đo thời gian truyền hoặc đo dịch pha.

Với các loại cảm biến tích cực (phản xạ), khoảng cách đo hiệu quả phụ thuộc không chỉ vào mức năng lượng phát ra mà còn phụ thuộc vào các đặc tính sau của đối tượng:

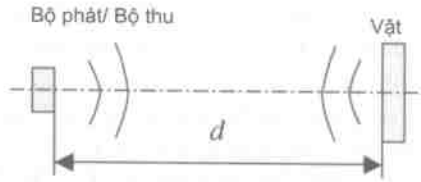
- *Diện tích tiết diện ngang* - xác định lượng năng lượng phát ra tác động vào đối tượng.
- *Hệ số phản xạ* - xác định lượng năng lượng truyền tới được phản xạ so với lượng năng lượng bị hấp thụ hoặc xuyên qua.
- *Độ tập trung* - xác định khả năng phân bố lại của năng lượng phản xạ.

Rất nhiều cảm biến không tiếp xúc hoạt động dựa trên vật lý học truyền sóng. Sóng được phát ra tại một điểm tham chiếu, khoảng cách được xác định bằng cách đo thời gian truyền từ điểm tham chiếu tới vật hoặc độ suy giảm của cường độ khi sóng truyền tới vật và quay trở lại điểm tham chiếu. Thời gian truyền sóng được đo bằng phương pháp thời gian truyền hoặc điều biến tần số.

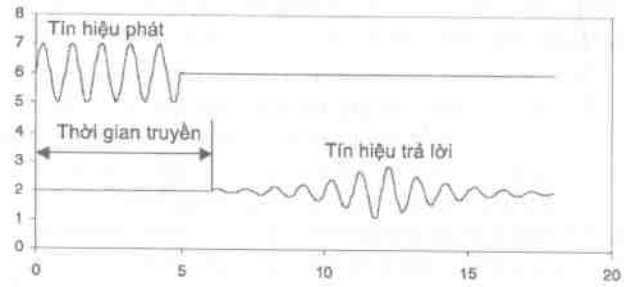
Đo khoảng cách bằng phương pháp thời gian truyền (TOF)

Phương pháp thời gian truyền (time-of-flight) được minh họa trong hình 19.61 và 19.62. Một sóng cửa (chỉ phát ra vài chu kỳ) được phát ra và phản xạ từ vật về bộ thu có vị trí gần bộ phát. Bộ

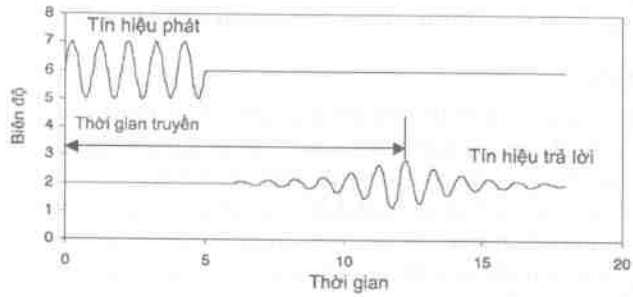
phát và bộ thu có thể được tích hợp trên cùng một cảm biến. Bộ thu cũng có thể được gắn trên vật. TOF là thời gian từ khi bắt đầu phát đến khi có tín hiệu trả về. Khoảng cách được xác định bằng công thức $d = c \cdot \text{TOF}/2$ khi bộ phát và bộ thu ở cùng một vị trí hoặc $d = c \cdot \text{TOF}$ khi bộ thu được gắn trên vật. Độ chính xác thường là 1/4 của bước sóng khi phát hiện tín hiệu trả về, tại thời điểm biên độ của nó tiến tới ngưỡng giới hạn. Hệ số khuếch đại được tự động tăng lên tương ứng với khoảng cách để đảm bảo độ chính xác. Độ chính xác có thể được cải thiện bằng phương pháp dò biên độ cực đại (hình 19.63). Điều này làm cho việc xác định thời gian đến của sóng ít phụ thuộc vào biên độ tín hiệu. Siêu âm, sóng rađiô hoặc các nguồn năng lượng quang học thường được sử dụng; vì vậy các thông số liên quan đến việc tính toán khoảng cách là tốc độ của âm thanh trong không khí (gần 0.305 m/ms) và tốc độ của ánh sáng (0.305 m/ns).



HÌNH 19.61 Sóng được phát và phản xạ lại từ vật. Khoảng cách d được tính theo tốc độ truyền sóng c và thời gian truyền sóng TOF theo công thức $d = (1/2).c.\text{TOF}$



HÌNH 19.62 Định nghĩa thời gian truyền sóng



HÌNH 19.63 TOF tính theo biên độ lớn nhất của tín hiệu phản xạ để tăng độ chính xác

Sai số của phương pháp thời gian truyền có thể do các nguyên nhân sau:

- Sự thay đổi tốc độ truyền sóng, đặc biệt là với các hệ thống âm thanh.
- Không xác định chính xác được thời gian đến của xung phản xạ (Figueroa & Lamancusa, 1992).
- Sai số của mạch định thời sử dụng để đo thời gian truyền.
- Sự tương tác của sóng tới với bề mặt của đối tượng cần đo khoảng cách.

Tốc độ truyền: Trong hầu hết các ứng dụng, sự thay đổi tốc độ truyền của năng lượng điện từ không quan trọng và có thể bỏ qua, ngoại trừ các hệ thống định vị sử dụng vệ tinh. Tuy nhiên, nhận định trên là không đúng đối với các hệ thống sử dụng âm thanh, nguyên nhân là do tốc độ của âm thanh chịu ảnh hưởng rõ rệt của sự thay đổi nhiệt độ và độ ẩm. (Tốc độ của âm thanh tỉ lệ với căn bậc hai của nhiệt độ Rankine; nếu nhiệt độ của môi trường thay đổi 30° thì sai số đo sẽ là 1 ft (0.305 m) ứng với khoảng cách đo là 35 ft (10.668 m)).

Độ bất định: Còn được gọi là các *sai số bước thời gian* gây ra do sự thay đổi cường độ tín hiệu trả về (là kết quả của (1) sự thay đổi độ phản xạ bề mặt của vật và (2) sự suy giảm tín hiệu theo lũy thừa bậc bốn của khoảng cách do sự phân kì hình cầu). Sự khác biệt trong mật độ tín hiệu trả về tác động tới thời gian tăng (là thời gian để tín hiệu tăng từ 10% đến 90% giá trị biên độ cực đại) của xung dò được và trong trường hợp dò có ngưỡng giới hạn cố định thì những vật có độ phản xạ thấp sẽ xuất hiện với khoảng cách xa hơn [39]. Vì lý do này, *các bộ phân tách hằng số thời gian* thường được dùng để thiết lập ngưỡng dò tại một số giá trị xác định, các giá trị này tính theo giá trị đỉnh của xung nhận được [67, 23].

Định thời: Tốc độ của âm thanh trong không khí tương đối thấp. Đây là một đặc điểm khiến TOF trở thành ưu thế trong các hệ thống âm thanh giá thành thấp. Ngược lại, tốc độ truyền dẫn của năng lượng điện từ đặt ra một vài yêu cầu cho các mạch đo lường và điều khiển phối hợp trong các ứng dụng quang học hoặc radiô. Do đó, các cảm biến TOF dựa trên tốc độ của ánh sáng cần mạch định thời ở mức nano giây để đo khoảng cách với độ phân giải khoảng 1 foot [38]. Đặc biệt hơn, để có được độ phân giải 1mm thì độ chính xác của mạch đo thời gian phải là 3 ps [67]. Giải pháp này có giá thành cao hơn một chút và có thể không đạt hiệu quả kinh tế với một số ứng dụng, ngoại trừ trong các ứng dụng có phạm vi nhỏ nhưng yêu cầu độ chính xác cao.

Tương tác bề mặt: Khi ánh sáng, âm thanh hoặc sóng radiô tác động vào đối tượng, tín hiệu phản hồi đo được chỉ thể hiện một phần nhỏ của tín hiệu ban đầu. Năng lượng còn lại phản xạ theo các hướng khác nhau và có thể được hấp thụ hoặc đi xuyên qua đối tượng, phụ thuộc vào đặc tính bề mặt và góc tới của chùm sóng. Ví dụ, có thể không nhận được tín hiệu trả về do sự phản xạ tại bề mặt đối tượng, đặc biệt là trong vùng siêu âm của phổ năng lượng. Nếu góc tiếp cận của nguồn phát tín hiệu bằng hoặc lớn hơn một giá trị ngưỡng nào đó thì năng lượng phản xạ sẽ bị lệch hướng ra ngoài vùng cảm biến của bộ nhận. Tín hiệu rời rạc có thể phản xạ từ những đối tượng thứ cấp (không phải là đối tượng quan tâm), quay trở lại bộ dò tại những thời điểm khác nhau gây ra những tín hiệu sai hay còn gọi là dữ liệu nhiễu. Để bù sai số, người ta thường lấy giá trị trung bình của nhiều phép đo lặp lại sao cho chất lượng tín hiệu (tỉ lệ tín hiệu so với nhiễu) ở mức chấp nhận được. Tuy nhiên, để xác định khoảng giá trị này sẽ mất nhiều thời gian hơn.

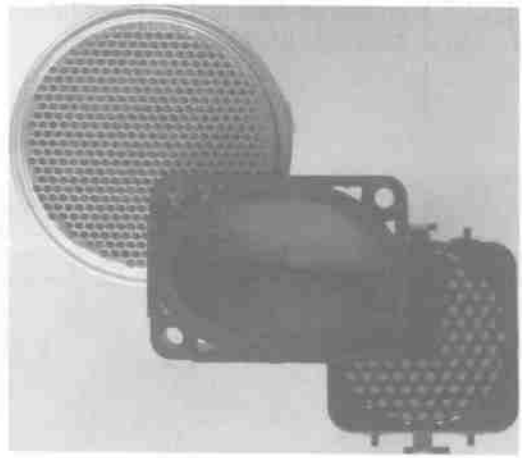
Hệ thống TOF siêu âm

Phương pháp đo khoảng cách TOF siêu âm hiện nay là kỹ thuật đo không tiếp xúc phổ biến nhất, chủ yếu là do các hệ thống giá thành thấp sẵn có và dễ dàng ghép nối. Trong một vài thập kỷ trước, nhiều nghiên cứu đã áp dụng cho rôbôt di động để tránh va chạm, tính toán vị trí và phát hiện chuyển động. Một vài nhà nghiên cứu đã đánh giá sự hiệu quả của cảm biến siêu âm khi hoạt động trong các môi trường bên ngoài [29, 40, 54]. Trong công nghiệp ô tô, BMW kết hợp bốn bộ chuyển đổi áp điện (gắn trên một màng để bảo vệ môi trường) trên cả tấm bảo vệ mặt trước và mặt sau trong hệ thống điều khiển khoảng cách [62].

Mô đun đo khoảng cách Polaroi là một thiết bị TOF loại tích cực, được thiết kế cho bộ phận tự hội tụ của camêra và xác định khoảng cách tới đối tượng bằng cách đo thời gian từ thời điểm truyền đi một sóng siêu âm cho đến khi nhận được tín hiệu phản hồi [8]. Có thể nói rằng sự phát triển mạnh của loại cảm biến này là do những tác động của nó đến cộng đồng nghiên cứu rôbôt và các ứng dụng công nghiệp. Hệ thống này được được giới thiệu nhiều nhất ở các tài liệu sau [38, 49, 18, 37, 3, 10]. Với những đặc tính đặc trưng cho các thiết bị đo khoảng cách, Polaroid trở nên phổ biến nhờ giá thành thấp (cả bộ chuyển đổi và mạch đo khoảng cách Polaroid có giá thấp hơn 50 USD) và được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng truyền thống như cảm biến tiêu cự tự chỉnh camêra (camera auto-focus sensor).

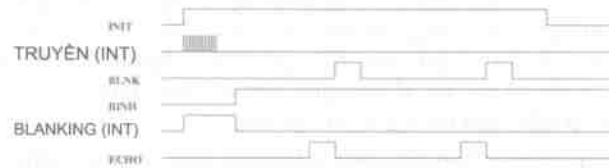
Cấu hình cơ bản nhất bao gồm hai thành phần chính: (1) bộ chuyển đổi siêu âm và (2) mô đun điện tử đo khoảng cách. Hiện nay có rất nhiều loại chuyển đổi để lựa chọn. Ở phiên bản đầu tiên của thiết bị tĩnh điện (hình 19.64), một màng kim loại rất mỏng được gắn trên một tấm che phía sau tạo thành bộ chuyển đổi điện dung [56]. Một bộ chuyển đổi tĩnh điện có đường kính nhỏ hơn (loại 7000) đã được phát triển cho các camêra Polaroid Spectra [58]. Một bộ chuyển đổi áp điện có thiết kế bền vững (loại 9000), dùng cho các ứng dụng trong môi trường nóng, lạnh, dưới trời mưa, sương muối và dao động. Loại chuyển đổi này được dùng trong các xe tải hạng nặng. Dải đo của hệ thống Polaroid là từ 1 ft tới 35 ft, với một góc phân tán của một chùm nửa công suất (-3 dB) là xấp xỉ 12° cho bộ chuyển đổi tĩnh điện của thiết bị gốc. Một chu kỳ hoạt động điển hình như sau:

- Mạch điều khiển kích hoạt bộ chuyển đổi và chờ dấu hiệu báo việc truyền đã bắt đầu.
- Bộ nhận được để trống trong một chu kì ngắn để tránh lỗi do sai do tín hiệu truyền còn dư trong bộ chuyển đổi.
- Khuếch đại tín hiệu thu được với hệ số tăng dần theo thời gian để bù lại sự suy giảm mật độ âm theo khoảng cách.
- Những tín hiệu phản hồi có giá trị lớn hơn một ngưỡng cho trước được ghi lại và khoảng cách liên kết được tính từ khoảng thời gian đã trôi qua.



HÌNH 19.64 Từ trái sang phải: (1) Bộ chuyển đổi tĩnh điện phiên bản đầu tiên, (2) Bộ chuyển đổi môi trường sêri 9000 và (3) Bộ chuyển đổi tĩnh điện sêri 7000 (hãng Polaroid)

Trong chế độ *phản hồi đơn* của mô đun *loại 6500*, đường *blank* (BLNK) và *blank-inhibit* (BINH) được giữ ở mức thấp khi đường *initiate* (INIT) chuyển lên mức cao để kích dãy xung phát ra. Tín hiệu *internal blanking* (BLANKING) tự động chuyển lên mức cao trong 2.38 ms để ngăn ngừa bộ chuyển đổi rung do nhầm thành xung phản hồi. Mỗi khi có tín hiệu trả về hợp lệ, đầu ra phản hồi (ECHO) sẽ giữ ở mức cao cho đến khi được xác lập lại nhờ việc chuyển đầu INIT từ mức cao xuống mức thấp. Đối với quá trình phải xử lý *nhiều phản hồi*, đầu vào *blank* (BLANK) phải được giữ ở mức cao trong ít nhất 0.44 ms sau khi phát hiện tín hiệu trả về đầu tiên để xác lập lại đầu ra *phản hồi* cho lần trả về tiếp theo như biểu diễn trong hình 19.65 [58].



HÌNH 19.65 Giản đồ thời gian cho mô đun đo khoảng cách siêu âm loại 6500 thực hiện vòng lặp chế độ nhiều xung phản hồi với đầu vào blanking (hãng Polaroid)

Hệ thống TOF dùng laze

Hệ thống đo khoảng cách TOF dùng laze, còn được gọi là *rađa laze* hay *lidar*, lần đầu tiên xuất hiện tại phòng thí nghiệm Jet Propulsion, Pasadena, CA, trong những năm 1970 [43]. Năng lượng laze được phát ra dưới dạng những xung ngắn tốc độ cao hướng tới đối tượng cần đo khoảng cách. Thời gian truyền của một xung đã phản xạ từ đối tượng được sử dụng để tính khoảng cách tới đối tượng dựa trên tốc độ ánh sáng. Độ chính xác của những cảm biến thế hệ đầu của loại này có thể đạt tới vài centimet với khoảng cách đo từ 1 đến 5 m [50, 17].

Công ty Schwartz Electro-Optics (bang Orlando, Mỹ) đã sản xuất nhiều hệ thống đo khoảng cách TOF sử dụng laze, các hệ thống này sử dụng một kỹ thuật mới để *biến đổi từ thời gian sang biên độ* nhằm thỏa mãn mức thời gian nano giây yêu cầu bởi tốc độ ánh sáng. Khi laze được phát ra, một tụ màng có độ chính xác cao bắt đầu phóng điện từ một giá trị cho trước với tốc độ cố định. Lượng điện năng phóng ra tỉ lệ với thời gian tính từ khi tín hiệu được phát ra, phản xạ tại vật và quay về bộ thu [26]. Điện áp trên tụ được biến đổi từ dạng tương tự sang dạng số ngay tại thời điểm bộ thu nhận được tín hiệu phản hồi. Sau đó, giá trị điện áp được biến đổi thành khoảng cách và bước thời gian và được hiệu chỉnh bằng cách tra bảng.

Các thiết bị đo khoảng cách *LRF*-X (hình 19.66) có kích cỡ nhỏ gọn, tốc độ xử lý cao và có khả năng đo được khoảng cách lên tới 100 m từ hầu hết các bề mặt (hệ số phản xạ Lambertian nhỏ nhất là 10%). Một hệ thống *LRF*-X cơ bản sử dụng một điôt laze InGaAs dạng xung kết hợp với bộ dò nhiều điôt quang, cung cấp cả đầu ra số (RS-232) và tương tự.

HÌNH 19.66 Thiết bị đo khoảng cách *loại LRF – 200* (Schwartz Electro Optics)

RIEGL Laze Measurement Systems, Horn, Austria, đã đưa ra thị trường rất nhiều sản phẩm sử dụng thiết bị đo khoảng cách laze TOF xung ngắn (như hệ thống quan trắc, cảm biến đo mức). Các ứng dụng điển hình bao gồm: các thiết bị đo độ cao lidar, giám sát tốc độ xe, chống va chạm cho xe và đo mức trong các xilô chứa.

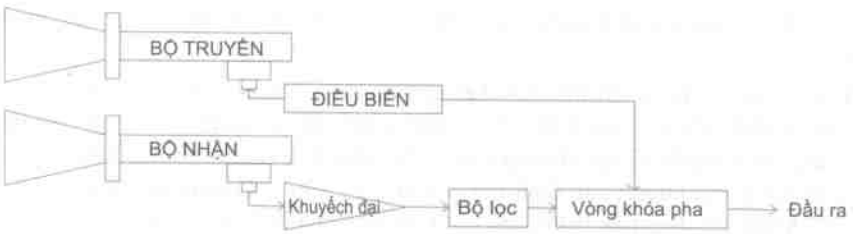
Các thiết bị đo khoảng cách laze họ RIEGL *LD90-3* (hình 19.67) sử dụng nguồn điôt laze gần hồng ngoại và một bộ dò điôt quang để thực hiện kỹ thuật đo khoảng cách TOF tới 500m với các bề mặt khuếch tán và trên 1000 m với trường hợp có nhiều vật. Thời gian truyền tính từ khi tín hiệu được phát ra cho đến khi phản hồi về bộ thu được đo chính xác bởi một đồng hồ thạch anh và được biến đổi thành khoảng cách bởi một bộ vi xử lý ở bên trong, sử dụng một trong hai thuật toán đã có. Thuật toán *triệt tiếng ồn* kết hợp phương pháp lấy trung bình các phép đo và kỹ thuật khử nhiễu để loại bỏ hiện tượng lệch hướng của các hạt trong không gian và vì vậy rất hiệu quả khi hoạt động dưới điều kiện bất lợi về ánh sáng (Riegel, 1994). Ngược lại, *thuật toán đo chuẩn* cho phép đo khoảng cách với tốc độ cao mà không quan tâm đến việc khử nhiễu và do đó có tốc độ cập nhật cao trong những điều kiện môi trường thuận lợi hơn.

Độ chính xác đo trong trường hợp xấu nhất là khoảng cách ±5 cm, thông thường độ chính xác là ±2 cm. Nguồn laze gần hồng ngoại dạng xung là loại an toàn cho mắt, *loại-1*, dưới mọi điều kiện hoạt động.

HÌNH 19.67 Thiết bị đo khoảng cách laze *loại-1 LD90-3* (an toàn cho mắt) là một thiết bị độc lập với nhiều phiên bản khác nhau và có thể đo tới 150-500m dưới điều kiện khí quyển trung bình (RIEGL USA)

Cảm biến khoảng cách vi sóng

Công nghệ vi sóng có thể được sử dụng để đo chuyển động, tốc độ, khoảng cách và hướng chuyển động (hình 19.68). Các cảm biến loại này rất bền do chúng không chứa các bộ phận chuyển động. Chúng có thể hoạt động an toàn trong các môi trường dễ cháy nổ do mức năng lượng sử dụng rất thấp. Cảm biến khoảng cách loại vi sóng hoạt động trong điều kiện nhiệt độ từ -55^0C đến $+125^0$C, môi trường khói, bụi, khí độc và phóng xạ. Các cảm biến vi sóng thông thường được sử dụng để đo khoảng cách từ 25 đến 45 000 mm, nhưng cũng có thể đo xa hơn tùy thuộc vào năng lượng và kích thước đối tượng. Năng lượng phản xạ về bộ thu bị suy giảm theo lũy thừa bậc bốn của khoảng cách tới đối tượng. Bước sóng thông thường là từ 1 đến 1000 mm.

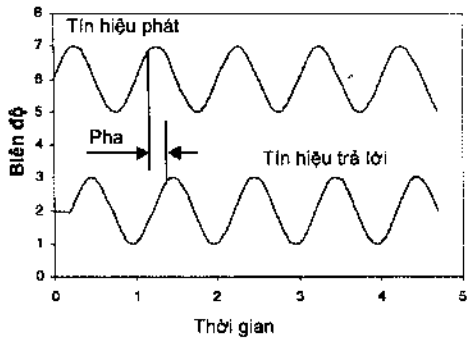


HÌNH 19.68 Cảm biến vi sóng, không giống như các bộ dò chuyển động, cần một bộ phát và một bộ nhận riêng biệt [71]

Thời gian truyền sóng (truyền tới vật và phản xạ về cảm biến) là khoảng 2 ns trên một foot hay 10.56 ms trên một dặm. Khi đo các khoảng cách ngắn có thể gặp phải một vấn đề, đó là với độ phân giải 1 inch thì mạch phải phân giải 167 ps. Một phương pháp khác phù hợp hơn được dùng để đo các khoảng cách ngắn là dựa trên một tần số quét của bộ phát tín hiệu. Trong trường hợp này, tín hiệu trả về vẫn giữ nguyên tần số khởi tạo (thường là 10.525 GHz) và được so sánh với tần số hiện tại bị thay đổi bởi tốc độ quét. Ví dụ, để đo khoảng cách 3ft, có thể quét ở 5 MHz/ ms. Sau 6 ns, tần số thay đổi thành 30 Hz (6 ns × 5 MHz/0.001 s). Trong trường hợp này có thể đo được khoảng cách 0.0256 mm (0.001 inch) một cách dễ dàng. Khi sử dụng phương pháp này, cần có một bộ khuếch đại tín hiệu với hệ số khuếch đại tăng cùng với tần số. Xem phần "điều tần" để hiểu rõ hơn về các phương pháp điều tần.

Đo pha

Thời gian truyền (TOF) được định nghĩa là độ dịch chuyển pha giữa tín hiệu phát và tín hiệu thu khi khoảng cách nhỏ hơn một bước sóng (hình 19.69). Giả sử độ dịch pha là f, khoảng cách sẽ là $d = \phi\lambda/4\pi = \phi c/4\pi f$ nếu bộ phát và bộ thu được đặt ở cùng một vị trí hoặc $d = \phi\lambda/2\pi = \phi c/2\pi f$ nếu bộ thu được gắn vào vật, trong đó c là tốc độ truyền, ϕ là pha đo được và f là tần số điều biến.



HÌNH 19.69 Xác định khoảng cách từ đo pha

Độ dịch pha giữa sóng hình sin phát ra và phản xạ có thể đo được bằng cách nhân hai tín hiệu với nhau trong một bộ trộn điện tử rồi lấy trung bình kết quả sau nhiều vòng điều biến [74]. Quá trình tích hợp này tương đối mất thời gian, làm giảm tốc độ cập nhật. Kết quả có thể được biểu diễn như sau [74]:

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T \sin\left(\frac{2\pi c}{\lambda}t+\frac{4\pi d}{\lambda}\right)\sin\left(\frac{2\pi c}{\lambda}\right)dt \tag{19.70}$$

Rút gọn thành:

$$A\cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \tag{19.71}$$

Trong đó t là thời gian, T là khoảng thời gian trung bình và A là hệ số biên độ của bộ khuếch đại tích hợp.

Từ biểu thức trước của ϕ, có thể thấy kết quả đo được thực tế là cosin của độ dịch pha và không phải là độ dịch pha của chính nó [74]. Trường hợp này được gọi là *khoảng không xác định* khi tổng khoảng cách truyền (2 lần khoảng cách từ bộ phát đến vật) vượt quá bước sóng điều chế λ (ví dụ, đo pha trở thành không xác định khi ϕ vượt quá 360^0). Conrad và Sampson (1990) định nghĩa khoảng không xác định này là khoảng cách lớn nhất mà độ lệch pha là một chu kỳ 360°:

$$R_u = \frac{c}{2f} \tag{19.72}$$

trong đó R_u là khoảng thời gian không xác định.

Xét phương trình (19.73), có thể thấy rằng tổng khoảng cách truyền $2d$ bằng một số nguyên lần của bước sóng $n\lambda$ cộng với một phần bước sóng x tương ứng với dịch pha. Do hàm cosin của ϕ không phải là hàm đơn trị, sẽ có hơn một khoảng cách d tương ứng với phép đo dịch pha bất kỳ (Woodbury, 1993):

$$\cos\phi = \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = \cos\left(\frac{2\pi(x+n\lambda)}{\lambda}\right) \tag{19.73}$$

trong đó

$d = (x + n\lambda)/2$ khoảng cách thực tới đối tượng,

x = khoảng cách tương ứng với độ lệch pha ϕ,

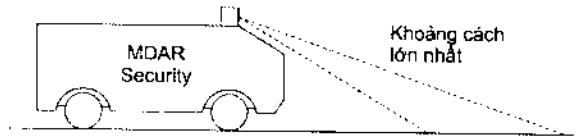
n = số vòng điều biến trọn vẹn.

Xem xét kỹ lại phương trình (19.73), trên thực tế, hàm cosin không đơn trị ngay cả trong một khoảng bước sóng đơn 360^0. Vì vậy, nếu chỉ đo hàm cosin của góc pha, khoảng cách không xác

định phải giảm nhiều hơn đến một nửa bước sóng điều biến hoặc 180^0 [61]. Hơn thế nữa, độ dốc của đường cong là giá trị mà tốc độ thay đổi của hàm cosin phi tuyến, không phải là hằng số trong dải $0 \leq \phi \leq 180^0$ và bằng không ở hai đầu. Do đó, độ chính xác của kỹ thuật đo dịch pha thay đổi như một hàm của khoảng cách tới vật, từ trường hợp tốt nhất thực hiện cho một góc pha 90^0 tới trường hợp xấu nhất tại 0 và 180^0. Vì lý do này, khoảng đo có thể sử dụng thường bị giới hạn dưới 90% của khoảng không xác định 180^0 [15].

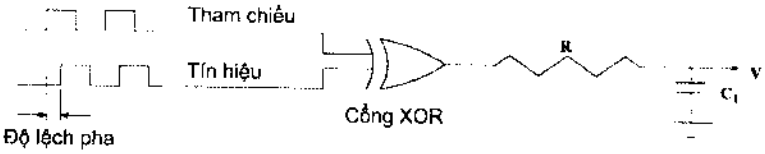
Một giải pháp cho vấn đề này là tiến hành đo lần thứ hai nhưng với độ dịch pha 90° so với dạng sóng ban đầu, sau đó thực hiện phép đo sine của góc pha thay vì cosin của góc pha. Thông tin bổ sung này (nghĩa là thực hiện cả phép đo cosin và sine) có thể sử dụng để mở rộng khoảng không xác định của góc pha tới giới hạn 360° [61]. Hơn thế nữa, độ chính xác của hệ thống cũng cũng được cải thiện, do tại bất cứ vùng nào khi phép đo cosin có độ nhạy thấp nhất thì phép đo sine sẽ có độ nhạy cao nhất [74].

Tuy nhiên, do ảnh hưởng của khoảng không xác định nên không thể tránh khỏi sự sai lệch của hệ số suy giảm trong các phương pháp đo dò pha. Trong một số ứng dụng, vấn đề này được giải quyết bằng cách bố trí đường đi của tín hiệu sao cho khoảng cách lớn nhất có thể luôn nhỏ hơn khoảng không xác định (hình 19.70). Mặt khác, bằng cách thực hiện liên tiếp các phép đo khoảng cách tới cùng một vật với hai tần số điều biến khác nhau, sẽ thu được hai phương trình cho phép xác định giá trị của x và n (trong phương trình 19.73). Một ứng dụng như vậy với hai tần số điều biến là 6 MHz và 32 MHz đã được mô tả trong [35].



HÌNH 19.70 Sai số của phép đo có thể được loại bỏ bằng cách giới hạn khoảng cách đo lớn nhất nhỏ hơn khoảng không xác định R_u

Đối với việc điều chế sóng vuông tại tần số tương đối thấp, thường ứng dụng trong các hệ thống siêu âm (20 - 200 kHz), độ lệch pha giữa dạng sóng vào và ra được đo bằng một mạch tuyến tính đơn giản như trong hình 19.71 [20]. Đầu ra của cổng *XOR* sẽ chuyển lên mức lôgic cao khi 2 tín hiệu đầu vào có mức lôgic ngược nhau, tạo ra một điện áp trên tụ C_1 tỉ lệ với độ lệch pha. Ví dụ, khi hai tín hiệu có cùng pha (ví dụ $\phi = 0$), đầu ra của cổng XOR sẽ ở mức thấp và điện áp V bằng không. Điện áp đầu ra đạt giá trị lớn nhất khi $\phi = 180^o$. Tuy thực hiện dễ dàng nhưng phương pháp trên bị giới hạn ở tần số rất thấp và thường xuyên phải hiệu chỉnh tần số để bù sai lệch do thiết bị đã sử dụng lâu ngày hoặc sự thay đổi của điều kiện xung quanh [22].

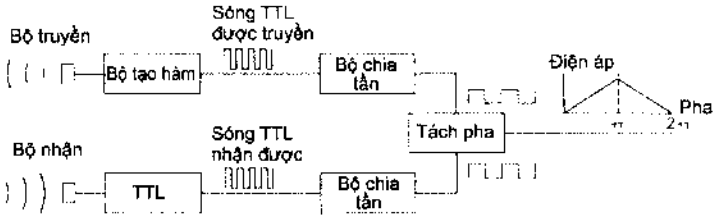


HÌNH 19.71 Tại các tần số thấp của các hệ thống siêu âm, một mạch dò pha đơn giản hoạt động dựa trên cổng XOR sẽ phát ra một điện áp tương tự tỷ lệ với độ lệch pha của các tín hiệu đầu vào [21]

Hệ thống đo pha dải mở rộng

Một phương pháp mở rộng khoảng không xác định trong các hệ thống dò pha siêu âm bằng cách chia tần số của tín hiệu nhận được và tín hiệu mẫu đã được đưa ra ở [21]. Do khoảng so sánh có ý nghĩa bị giới hạn ở một bước sóng λ (trường hợp tốt nhất), nên khi tần số của các tín hiệu đầu của bộ dò pha giảm một hệ số nào đó thì λ sẽ tăng lên một giá trị tương ứng. Nguyên tắc hoạt động phương pháp trên được biểu diễn trong hình 19.72. Do bước sóng của năng lượng siêu âm là rất ngắn nên tổng số khoảng cách đo hiệu quả chỉ là 4 inch sau khi đã chia các tín hiệu đầu vào của bộ

dò cho 16. Vì khoảng cách đo nhỏ nên các hệ thống đo khoảng cách bằng phương pháp dò pha không được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng rôbôt, dù [22] đã đưa ra một phương pháp lai để nâng cao độ chính xác của các hệ thống đo khoảng cách TOF cho việc xác định vị trí trong không gian ba chiều.



HÌNH 19.72 Khi chia các tần số đầu vào của bộ so sánh pha cho một số nguyên thì khoảng không xác định sẽ được mở rộng với cùng hệ số, tuy nhiên độ phân giải sẽ bị giảm [21]

[75] đã giới thiệu một phương pháp hiệu quả để đo khoảng cách dựa trên thông tin về pha. Phương pháp này xác định tổng số khoảng cách đo bằng cách ghép các đoạn pha liên tiếp với nhau, các đoạn pha này trở về trạng thái ban đầu mỗi khi độ lệch pha của tín hiệu đã phát và tín hiệu nhận được là 2π. Đây cũng là một phương pháp khắc phục được những nhược điểm của các hệ thống dựa vào pha để đo các khoảng cách nhỏ hơn một bước sóng âm. Các giá trị gián đoạn tại các điểm có độ lệch pha là 2π được loại bỏ bằng cách lấy đạo hàm của pha, tín hiệu thu được rất mịn với những xung nhọn tại các điểm gián đoạn. Sau đó các xung nhọn được loại bỏ, các tín hiệu được kết hợp lại với nhau và nhân với một hệ số để xác định khoảng cách tổng. Phương pháp trên đã được kiểm tra trong một thí nghiệm sử dụng bộ chuyển đổi 40 kHz. Với khoảng cách từ 40 đến 400 mm thì sai số là từ ±0.1629 đến ±0.4283 mm.

Phương pháp đo khoảng cách bằng sóng laze liên tục đã được phát triển tại viện nghiên cứu Stanford vào những năm 1970 [51]. Phương pháp này có độ chính xác tương đương với phương pháp TOF sử dụng xung laze, nhưng thuận lợi hơn một chút. Tuy tránh được những khó khăn của vấn đề đo thời gian của phương pháp TOF sử dụng xung laze nhưng lại phải sử dụng thiết bị điện tử đo pha tương đối phức tạp [17]. Hơn nữa, những khó khăn của phương pháp đo độ dịch pha thường xảy ra khi năng lượng phát ra được phản xạ đồng thời về bộ thu từ hai bề mặt có khoảng cách đến cảm biến khác nhau.

Các thiết bị điện tử được sử dụng để so sánh pha của một sóng đơn phản xạ về bộ thu với sóng mẫu. Tuy nhiên, chúng sẽ mất tác dụng khi có nhiều sóng phản hồi đồng thời về bộ thu. Một kỹ thuật để phát hiện trường hợp trên với mục đích giảm bớt sai số của phép đo đã được đưa ra ở [1].

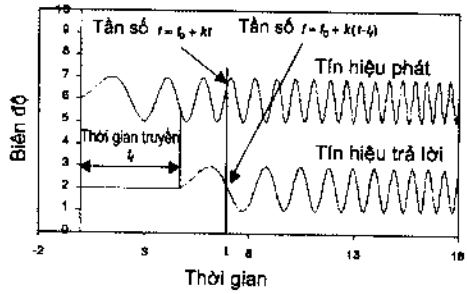
Điều biến tần số

Đây là phương pháp được dùng để nâng cao độ chính xác trong việc xác định thời gian sóng truyền đến bộ thu. Thay vì sử dụng sóng có một tần số duy nhất, một sóng có tần số thay đổi có dạng $f = f_0 + kt$ sẽ được phát đi. Sai lệch giữa tần số đã phát và tần số thu được tại một thời điểm bất kỳ được tính bằng công thức $\Delta f = kt - k(t - t_f) = kt_f$ (hình 19.73). Ưu điểm của phương pháp này là không cần phải xác định chính xác thời điểm sóng truyền đến bộ thu. Tuy nhiên, hệ thống phải sử dụng các thiết bị đo tần số thời gian thực với độ chính xác cao và bộ chuyển đổi phải cho kết quả trong một vòng quét dải tần số. Phương pháp điều biến không tuyến tính cũng có thể được sử dụng để làm giảm ảnh hưởng của nhiễu và nâng cao độ chính xác.

Sóng được phản xạ từ vật đến bộ thu tại thời điểm $t + T$:

$$T = \frac{2d}{c}$$

trong đó T là thời gian sóng đi từ bộ phát tới vật và quay trở lại bộ thu, d là khoảng cách từ bộ phát đến vật và c là tốc độ truyền sóng.

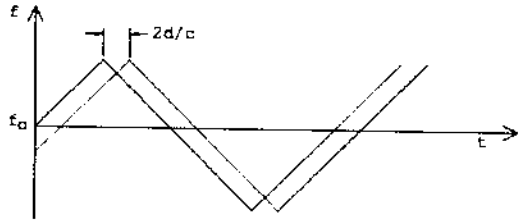


HÌNH 19.73 Sai lệch tần số giữa tín hiệu phát ra và tín hiệu thu tỷ lệ với thời gian truyền tại bất kỳ thời điểm nào

Sóng thu được sẽ được so sánh với một sóng chuẩn lấy từ bộ phát. Đường cong tần số của tín hiệu thu được (hình 19.74) sẽ được hiển thị trên cùng trục thời gian với đường cong tần số của tín hiệu mẫu nhưng cách đường cong tần số của tín hiệu mẫu một khoảng thời gian đúng bằng thời gian sóng được truyền từ bộ phát tới vật và quay trở lại bộ thu. Do ảnh hưởng của hiệu ứng Doppler nên đường cong tần số của sóng thu được cũng có thể bị dịch chuyển dọc theo trục tần số so với sóng mẫu. Bộ trộn tần số kết hợp hai tần số trên để tạo ra tần số đậpF_b:

$$F_b = f(t) - f(T+t) = kT$$

trong đó k là hằng số.



HÌNH 19.74 Đường cong tần số thu được dịch đi một khoảng theo trục thời gian so với tần số chuẩn

Tần số F_b được dùng để xác định khoảng cách tới vật:

$$d = \frac{F_b c}{4F_r F_d}$$

trong đó

d là khoảng cách tới vật,

c là tốc độ truyền sóng,

F_b là tần số đập,

F_r là tần số điều biến,

F_d là tổng sai lệch tần số FM.

Khoảng cách cần đo tỷ lệ thuận với tần số đập, độ chính xác của kết quả phụ thuộc vào độ tuyến tính của sự thay đổi tần số trong khoảng thời gian đo.

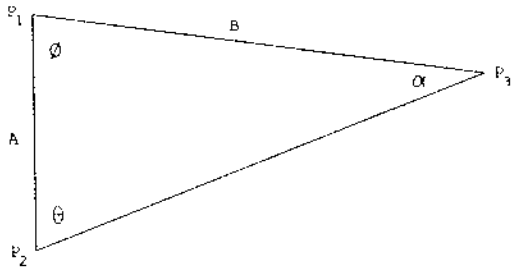
Hiện nay, những ưu điểm trong việc điều chỉnh bước sóng của điôt laze đã cho phép các kỹ thuật đo bằng sóng siêu âm và rađa có thể được dùng với laze. Tần số hoặc bước sóng của điôt laze có thể được thay đổi bằng cách thay đổi nhiệt độ của nó. Xét trường hợp của một điôt laze có bước sóng là 850 nm, nếu thay đổi bước sóng này 0.05 nm trong thời gian 4 μs thì tốc độ thay đổi tần số tương ứng là 5.17 Mhz/ns. Chùm laze này khi phản xạ ra khỏi bề mặt vật 1 m sẽ sinh ra tần số đập 34.5 MHz. Mức độ tuyến tính của độ dịch tần số sẽ quyết định độ chính xác của hệ thống.

Khác với phương pháp đo dịch pha, phương pháp điều biến tần số cho kết quả chỉ sau một lần đo. Tuy nhiên phương pháp này cũng có một số hạn chế, nguyên nhân là do yêu cầu về độ tuyến tính và tính tuần hoàn của độ dốc tần số. Do đó hầu hết các thiết bị đo khoảng cách FMCW hiện có trên thị trường đều sử dụng rađa, trong khi đó các thiết bị laze lại sử dụng phương pháp thời gian truyền hoặc phương pháp dò pha.

Đo khoảng cách bằng phương pháp tam giác

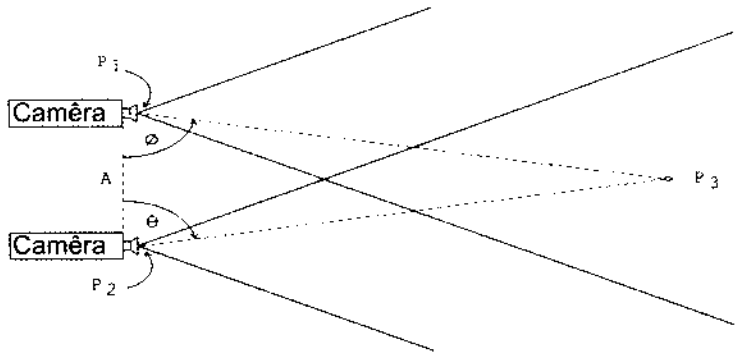
Phương pháp đo tam giác dựa trên một tiền đề quan trọng của lượng giác học. Theo tiền đề này, nếu biết trước độ dài của một cạnh và hai góc của một tam giác thì có thể xác định được độ dài của các cạnh còn lại cũng như độ lớn của góc thứ ba. *Định luật Sin* có thể được sửa lại như sau để biểu diễn độ dài của cạnh B theo độ dài của cạnh A và hai góc θ và ϕ:

Trong các ứng dụng đo khoảng cách, đối với các cảm biến đã biết trước đường cơ sở A, độ dài của cạnh B chính là khoảng cách tới điểm P_3 trên đối tượng (hình 19.75).



HÌNH 19.75 Phương pháp đo khoảng cách tam giác xác định khoảng cách B đến điểm P_3 bằng cách đo các góc ϕ và θ tại các điểm P_1 và P_2

Các hệ thống đo khoảng cách bằng phương pháp tam giác được chia thành hai loại: *thụ động* (chỉ dùng ánh sáng xung quanh đối tượng quan tâm) và *chủ động* (dùng một nguồn năng lượng để chiếu sáng đối tượng quan tâm). Các thiết bị dò hướng (máy quay phim, màng ảnh bán dẫn) của hệ thống thụ động được đặt tại vị trí của điểm P_1 và P_2 (hình 19.76). Hai cảm biến hình ảnh được bố trí để cùng nhìn đến điểm P_3 tạo thành một tam giác ảo. Bằng cách đo hai góc θ và ϕ, kết hợp với hướng và khoảng cách A đã biết của hai cảm biến ảnh, ta có thể xác định được khoảng cách tới đối tượng quan tâm.



HÌNH 19.76 Hệ thống đo khoảng cách ba chiều tích cực

Các hệ thống chủ động đặt một nguồn ánh sáng điều khiển được (ví dụ như laze) tại điểm P_1 hoặc điểm P_2 và hướng về điểm P_3. Một cảm biến ảnh sẽ được đặt tại điểm còn lại và cũng hướng về điểm P_3. Ánh sáng phát ra từ nguồn sáng sẽ được phản xạ tại đối tượng, một phần của ánh sáng phản xạ sẽ truyền đến bộ dò. Vị trí của chùm sáng đó trên bộ dò cho phép xác định góc ϕ, áp dụng *định luật Sin* ta sẽ tìm được khoảng cách tới đối tượng.

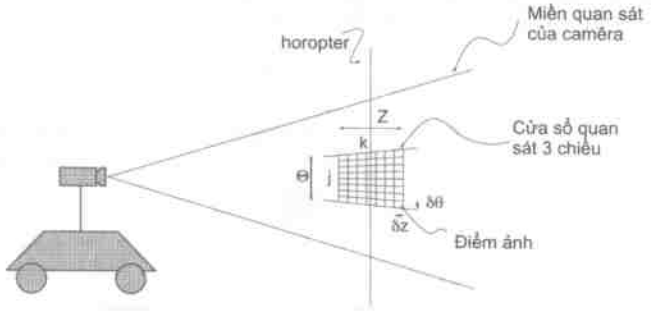
Đặc điểm làm việc của các hệ thống đo tam giác phụ thuộc vào việc hệ thống đó là chủ động hay thụ động. Các hệ thống thụ động sử dụng các camêra thông thường và yêu cầu điều kiện chiếu sáng tốt, trong trường hợp ánh sáng môi trường quá tối thì cần phải dùng thêm ánh sáng nhân tạo. Hơn nữa, các hệ thống này còn gặp khó khăn trong việc khớp các ảnh của một điểm được thu bởi các camêra khác nhau. Ngược lại, các hệ thống chủ động chỉ sử dụng một bộ dò duy nhất và không yêu cầu nguồn chiếu sáng đặc biệt nào cũng như không gặp phải các vấn đề của hệ thống thụ động. Tuy nhiên, một số trường hợp các hệ thống chủ động không hoạt động được, nguyên nhân là do không phản xạ được ánh sáng hoặc do sự hấp thụ ánh sáng của bề mặt đối tượng.

Độ chính xác của các hệ thống đo tam giác sẽ bị giảm khi khoảng cách đến đối tượng tăng. Các hệ thống này cũng có sai số khi đo các góc θ và ϕ. Ngoài ra, chúng cũng gặp khó khăn với hiện tượng "khuất vật". Bản chất của hiện tượng "khuất vật" là một phần của đối tượng chỉ có thể được quan sát từ một điểm đặt camêra duy nhất (P_1 hoặc P_2). Khoảng cách A giữa P_1 và P_2 là nguyên nhân của hiện tượng che khuất này (cùng một điểm trên đối tượng nhưng chỉ một trong hai camêra thu được ảnh của điểm đó). Khi độ lớn của đường cơ bản A tăng thì độ chính xác của phép đo cũng tăng, tuy nhiên khả năng xảy ra hiện tượng khuất vật cũng tăng lên. Do đó, khi thiết kế các hệ thống đo tam giác nên chọn một giải pháp thỏa mãn tương đối các yêu cầu trên.

Stereo Dispairty

Stereo dispairty là phương pháp đo khoảng cách chủ động sử dụng kỹ thuật đo tam giác. Phương pháp này có nguyên tắc hoạt động giống như mắt người. Khi một vật được quan sát từ hai điểm nằm trên mặt phẳng vuông góc với hướng nhìn thì ảnh quan sát được từ hai vị trí đó sẽ lệch nhau một khoảng cách theo phương nằm ngang. Khoảng cách này được gọi là "sai lệch" và tỷ lệ nghịch với khoảng cách từ hệ thống quan sát đến vật.

Hầu hết các ứng dụng kiểu này đều sử dụng hai camêra giống hệt nhau (hoặc là một camêra có thể di chuyển được theo phương ngang) để cung cấp hai ảnh khác nhau của vật cho hệ thống đo. Hai camêra thông thường được hướng đến cùng một điểm, tuy nhiên trục của hai camêra không thể cắt nhau tại điểm quan sát giống như mắt người. Hạn chế này làm cho việc đặt các camêra gặp đôi chút khó khăn, nguyên nhân là do phương pháp đo này chỉ có thể thực hiện được tại những nơi có vùng quan sát trùng nhau. Trong thực tế, việc phân tích được thực hiện trên một dải sai lệch chọn trước dọc theo trục Z về hai phía của mặt phẳng vuông góc, mặt phẳng này có có sai lệch bằng không và được gọi là "*horopter*" (hình 19.77). Sự kết hợp của vùng ảnh chọn trước và dải sai lệch này tạo thành một khối ba chiều gọi là "*cửa sổ quan sát ba chiều*" [13].

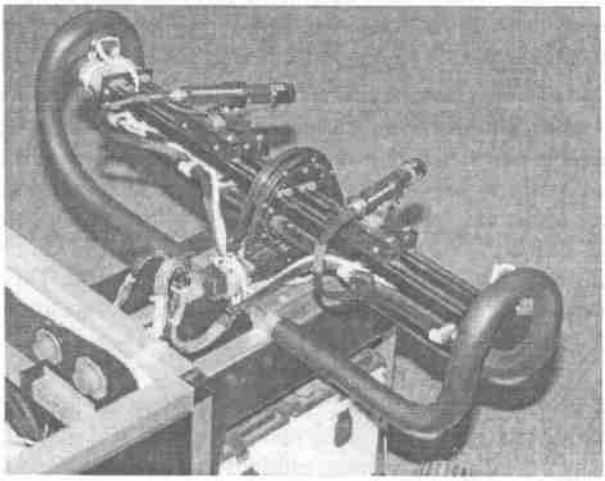


HÌNH 19.77 *Cửa sổ quan sát ba chiều* là thể tích của vùng quan tâm ở một phía của mặt phẳng có sai lệch bằng không - horopter (David Sarnoff Research Center)

Gần đây có rất nhiều công trình nghiên cứu nhằm phát triển các hệ thống có khả năng thay đổi hướng của camêra một cách linh hoạt, các hệ thống này được gọi là quan sát linh hoạt"*active vision*". Việc sử dụng rộng rãi thuật ngữ này đã gây ra một số nhầm lẫn với các hệ thống đo sử dụng nguồn sáng chủ động. Một thuật ngữ khác hợp lý hơn được dùng để chỉ các hệ thống trên là "*verging stereo*". "*Mechanical verging*" là quá trình xoay một hoặc cả hai camêra quanh trục thẳng đứng nhằm đạt được sai lệch không tại điểm trọn trước [55]:

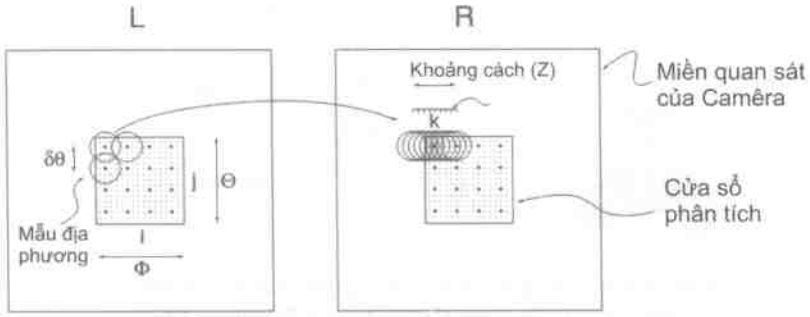
Quá trình căn chỉnh các camêra có bốn bước như sau:

- Xác định một điểm trong ảnh của một camêra (hình 19.79, trái).
- Xác định điểm chọn trước đó trong ảnh của camêra còn lại (hình 19.79, phải).
- Xác định vị trí theo phương nằm ngang của hai ảnh so với một điểm gốc.
- Dải *Z* được xác định dựa vào sai lệch theo phương nằm ngang.



HÌNH 19.78 Hệ thống camêra stereoscopic này sử dụng một đôi trục vít-đai ốc để thay đổi khoảng cách cơ sở và góc nghiêng theo yêu cầu (Robotic System Technology, Inc)

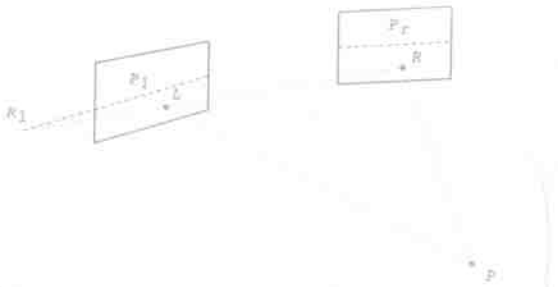
Nhìn qua thì phương pháp này có vẻ đơn giản, tuy nhiên rất khó để xác định ảnh của điểm trọn trước đó trên camêra thứ hai (hình 19.79). Ảnh của một vật hoặc một điểm trên vật thường được đặc trưng bởi các điểm ảnh có cường độ sáng khác nhau, do đó kỹ thuật khớp các điểm ảnh có cường độ sáng lớn thường được sử dụng để giải quyết vấn đề trên (Conrad & Sampson, 1990). Tuy nhiên, rất khó áp dụng kỹ thuật trên tại các vùng ảnh mà các điểm ảnh có cường độ sáng và màu tương đối giống nhau [33]. Các yếu tố khác như một ảnh bị mờ do che khuất hoặc đặc tính của ảnh bị thay đổi khi quan sát ảnh từ các góc nhìn khác nhau cũng gây ra khó khăn khi áp dụng kỹ thuật khớp điểm ảnh nói trên. Quá trình khớp hai ảnh của cùng một điểm được gọi là "*tìm điểm tương ứng*", có rất nhiều phương pháp nhằm giảm bớt quá trình tính toán của kỹ thuật khớp ảnh nói trên đã được đưa ra thảo luận [52, 32, 55, 44, 67, 70].



HÌNH 19.79 Dải Z được xác định từ độ sai lệch giữa hai ảnh của vật trên hai camêra

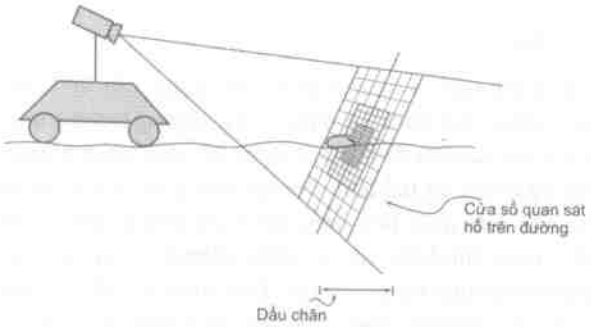
Vấn đề quan trọng nhất trong quá trình khớp ảnh là giới hạn *"epipolar"* (giảm miền tìm kiếm từ hai chiều xuống một chiều). *Mặt phẳng epipolar* là mặt phẳng được tạo bởi điểm *P* trên vật và vị trí của hai thấu kính camêra phải và trái, *R* và *L* (hình 19.80). Giao tuyến của mặt phẳng này và mặt phẳng ảnh bên trái được gọi là *đường epipolar trái*. Do điểm *P* nằm trên *mặt phẳng epipolar* nên ảnh của nó, điểm P_l phải nằm trên *đường thẳng epipolar trái*. Tương tự, điểm P_r cũng nằm

trên *đường thẳng epipolar phải* trong mặt phẳng ảnh phải. Nếu các camêra được bố trí sao cho *đường epopilar* trùng với đường quét chính trong ảnh thì việc tìm điểm tương ứng trong ảnh thứ hai sẽ được giới hạn trên đường quét ngang chứa điểm chọn trước trong ảnh thứ nhất. Phương pháp căn chỉnh camêra cũng cho kết quả tương tự như cách làm trên.



HÌNH 19.80 *Mặt phẳng epipolar* được tạo bởi tâm của hai thấu kính *L*, *R* và điểm *P* trên vật [67]

Để giảm bớt thời gian xử lý ảnh thì hầu hết các phương pháp "*tìm điểm tương ứng*" chỉ sử dụng ảnh có độ phân giải thấp và chỉ kiểm tra chi tiết ở những vùng ảnh chọn trước. Sử dụng "*biểu diễn hổ*" giống như sự phân bố "*độ tập trung*" của mắt người (hình 19.81) sẽ cho phép mở rộng vùng quan sát mà không làm độ phân giải hoặc làm tăng thời gian tính toán [13]. Hố có độ phân giải cao phải được dịch từ khung ảnh này sang khung ảnh khác để kiểm tra các vùng ảnh quan tâm khác nhau một cách độc lập. Độ tập trung là lớn nhất với những sai lệch nhỏ xung quanh mặt phẳng horopter và giảm nhanh khi sai lệch tăng [12].

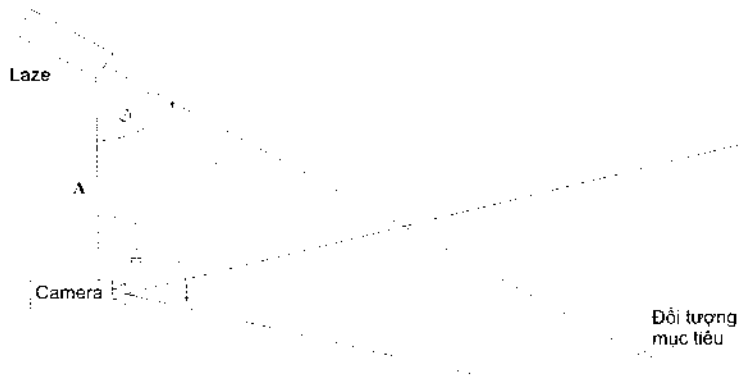


HÌNH 19.81 Biểu diễn *hổ* làm tăng độ tập trung tại tâm của *cửa sổ quan sát* và làm giảm độ phân giải của khu vực xung quanh (David Sarnoff Research Center)

Phương pháp đo tam giác chủ động

Đo tam giác chủ động là dạng khác của phương pháp đo khoảng cách *stereo disparity*. Tuy nhiên, một trong hai camêra được thay thế bởi một nguồn sáng laze (hoặc là đèn LED) chiếu vào bề mặt của đối tượng quan tâm. Camêra còn lại được bố trí cách nguồn sáng một khoảng cách A cho trước và phải đảm bảo rằng các điểm được chiếu sáng nằm trong vùng quan sát của nó (hình 19.82).

Đối với các bộ dò kiểu mảng một chiều hoặc hai chiều thì khoảng cách được xác định từ khoảng cách cơ bản A và vị trí tương đối của điểm sáng trên mặt phẳng ảnh. Đối với các bộ dò đơn, có thể dịch chuyển như điôt quang hoặc tranzito quang thì góc quay của cảm biến và nguồn sáng được xác định tại thời điểm cảm biến quan sát các điểm được chiếu sáng. Mối quan hệ lượng giác giữa các góc này và khoảng cách cơ sở A cho phép xác định khoảng cách đến vật. Để có được thông tin về những vùng ba chiều thì các nguồn phát laze tam giác được quét theo cả phương ngang và phương thẳng đứng. Trong các hệ thống có bộ thu và bộ phát độc lập với nhau thì toàn bộ hệ thống có thể dịch chuyển được. Đối với các hệ thống có bộ phận quang dịch chuyển thì gương và thấu kính được quét đồng thời trong khi nguồn phát laze và bộ dò vẫn đứng yên.



HÌNH 19.82 Hệ thống *đo khoảng cách bằng phương pháp tam giác chủ động* dùng CCD làm bộ dò

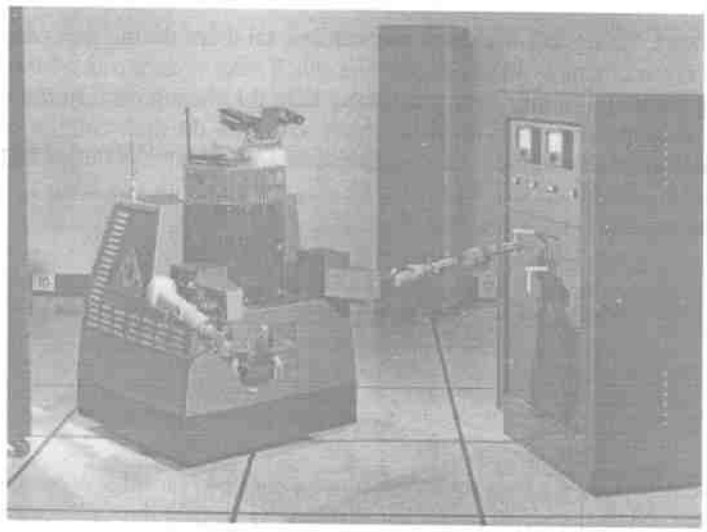
Nhược điểm của phương pháp đo tam giác chủ động là hiện tượng *khuất vật* (tức là camêra không quan sát được các điểm đã chiếu sáng và ngược lại) cũng như hiện tượng hấp thụ ánh sáng của bề mặt vật hoặc là ánh sáng không phản xạ được từ bề mặt vật (xem chương 9). Tuy nhiên phương pháp này không tồn tại vấn đề "*tìm điểm tương ứng*" như phương pháp "*Stereo dispairty*". Phương pháp này cũng không bị phụ thuộc vào độ tương phản của môi trường làm việc cũng như giảm được ảnh hưởng của điều kiện chiếu sáng xung quanh (ánh sáng của môi trường có thể trở thành nhiễu làm giới hạn độ phân giải của khoảng cách đo).

Hệ thống ba chiều chủ động

Do việc tính toán rất phức tạp và những khó khăn trong vấn đề "*tìm điểm tương ứng*" nên phương pháp ba chiều bị động chỉ được sử dụng trong những trường hợp đơn giản. Một nguồn sáng chủ động kết hợp với hai camêra đã được sử dụng để khắc phục những nhược điểm trên. Ánh sáng chủ động trên giúp hệ thống có thể làm việc tại những nơi có độ tương phản thấp. Việc xác định các điểm sáng trở nên đơn giản hơn bằng cách lấy khung ảnh kế tiếp khi nguồn sáng đã không hoạt động trừ đi khung ảnh hiện tại. Áp dụng phương pháp ngưỡng cho ảnh thu được từ phép trừ trên sẽ xác định được vùng sáng tích cực. Quá trình trên được thực hiện liên tiếp trên hai camêra và độ dịch chuyển theo phương ngang của tâm điểm sáng sẽ được xác định.

Nguồn sáng và các camêra không nhất thiết phải thẳng hàng với nhau trong các hệ thống ba chiều chủ động. Trong thực tế, nguồn sáng thậm chí không cần phải gắn trên rôbôt. Kilough và Hamel đã đưa ra hai cấu hình mới sử dụng nguồn sáng ngoài cho rôbôt HERMIES IIB (rôbôt này được chế tạo tại Oak Ridge Nation Laboratory). Hai CCD camêra đen trắng có góc quay rộng được gắn trên cơ cấu đĩa nghiêng tại đỉnh đầu rôbôt (hình 19.83). Tín hiệu ra tương tự của hai camêra được số hóa bởi bộ giữ khung dưới dạng 512x384 điểm ảnh. Độ phân giải được giảm xuống 256x256 nhờ bộ xử lý ảnh *Hypercube*. Hệ thống xử lý ảnh này được sử dụng để điều khiển hai cánh tay của rôbôt HERMIES.

Để thực hiện nhiệm vụ này thì một đèn LED hồng ngoại được gắn vào cuối cánh tay HERO-1 gần tay gắp và được định hướng sao cho nằm trong vùng quan sát của hai camêra. Hai camêra sẽ liên tiếp thu ảnh trong khi đèn LED được chuyển trạng thái từ *bật* sang *tắt* và ngược lại. Ảnh thu được ở trạng thái *tắt* sẽ được trừ bởi ảnh thu được ở trạng thái *bật*, vị trí của điểm sáng trên ảnh thu được sau phép trừ chính là vị trí của đèn LED. Tâm của các điểm sáng được tính toán để xác định chính xác tọa độ của các điểm sáng trong các mảng ảnh trừ. Vectơ khoảng cách tới đèn LED có thể được xác định dễ dàng nhờ độ dịch theo phương ngang của các điểm sáng. Phương pháp này cho phép thiết lập vị trí thực tế của tay gắp trong khung tọa độ tham chiếu của rôbôt. Các kết quả thực nghiệm đã chỉ ra rằng độ chính xác ở khoảng cách 2 ft là 2 inch với sai số 0.2 inch [36].



HÌNH 19.83 HERMIES IIB sử dụng hệ thống đo khoảng cách ba chiều chủ động với một nguồn laze ngoài để xác định rõ các vật đích trong ảnh của camêra

Một nguồn laze bán dẫn hồng ngoại gắn trên một giá đỡ ba chân điều khiển từ xa được sử dụng để tạo ra điểm đích trong ảnh của một trong hai camêra. Phương pháp đã được mô tả ở trên lại được áp dụng và hệ thống chuyển trạng thái của nguồn laze từ bật sang tắt. Quá trình trừ ảnh liên tiếp sẽ cho phép xác định vectơ khoảng cách tới vật trong khung tọa độ tham chiếu của rôbôt. Sai lệch khoảng cách giữa tay gắp và vật được sử dụng để điều khiển cánh tay và chuyển động của rôbôt. Các quá trình xử lý ảnh cho tay gắp và đối tượng đích nên thực hiện luân phiên và sát với thời gian thực, điều này sẽ giúp rôbôt có thể tiếp cận và gắp một vật bất kỳ với vòng điều khiển kín liên tục.

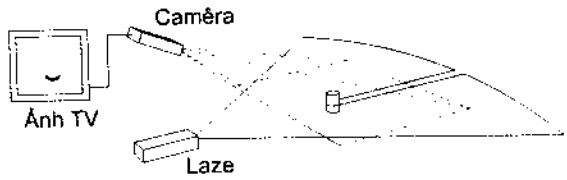
Ánh sáng có cấu trúc

Các hệ thống đo khoảng cách sử dụng *ánh sáng có cấu trúc* là một trường hợp riêng của hệ thống đo tam giác chủ động. Ánh sáng mẫu (có thể là một đường, một chùm điểm sáng hoặc là một lưới ánh sáng) được chiếu lên bề mặt của vật trong khi camêra quan sát ánh sáng mẫu từ một ví trí thuận lợi. Thông tin về khoảng cách có thể được xác định thông qua biến dạng do thay đổi độ sâu ảnh của chùm sáng đã chiếu. Việc sử dụng các hiệu ứng ánh sáng đặc biệt này nhằm mục đích làm giảm các tính toán phức tạp và nâng cao độ tin cậy của việc phân tích các vật thể ba chiều. Kỹ thuật trên thường được áp dụng để xác định nhanh khoảng cách của các vật chuyển động có ít thông tin, do đó hay được dùng trong các ứng dụng tránh va chạm. [7] đã giới thiệu một cách tổng quan về kỹ thuật chiếu *ánh sáng có cấu trúc*, trong khi [68] đã phân loại các ứng dụng đã được công bố theo các đặc điểm sau:

- Số lượng và kiểu cảm biến
- Kiểu quang học (thấu kính hình cầu hay lăng trụ, gương, nhiều ống kính)
- Dạng ánh sáng (điểm, đường)
- Số bậc tự do của cơ cấu quét (0, 1 hoặc 2)
- Vị trí quét đã xác định hay chưa xác định

Hầu hết các phương pháp sử dụng *ánh sáng có cấu trúc* yêu cầu chiếu một đường ánh sáng vào vùng quan tâm. Phương pháp này được giới thiệu đầu tiên bởi P.Will và Pennington của trung tâm IBM Research Division Headquarters, Yorktown Heights, NY. Hệ thống của họ tạo một mặt phẳng ánh sáng bằng cách chiếu một nguồn sáng mạnh trực chuẩn qua một khe hở, do đó tạo ra một đường sáng ngang qua khu vực quan tâm. (Các hệ thống gần đây tạo ra hiệu ứng tương tự bằng cách quét một chùm laze qua một thấu kính lăng trụ hoặc bằng cách quét nhanh một chùm

sáng theo một hướng). Trong ảnh thu được của camêra, tại điểm đường ánh sáng cắt vật, là viền sáng mà sự dịch chuyển của nó tỷ lệ với độ sâu của ảnh. Trong ví dụ mô tả ở hình 19.84, nếu vị trí ảnh các điểm sáng phản xạ thu được trong ảnh càng thấp thì khoảng cách từ điểm tương ứng trên vật đến nguồn laze càng ngắn. Mối quan hệ chính xác giữa độ dịch chuyển của viền sáng và khoảng cách cần đo phụ thuộc vào độ dài của đường cơ sở giữa nguồn sáng và bộ dò. Giống như hệ thống đo tam giác, khi độ lớn của đường cơ sở tăng thì độ chính xác cũng tăng, tuy nhiên khả năng xảy xa hiện tượng *khuất vật* cũng tăng lên.



HÌNH 19.84 Hệ thống sử dụng ánh sáng có cấu trúc (thường dùng trên các rôbôt di động) chiếu một đường ánh sáng nằm ngang vào khu vực quan tâm và ánh sáng phản xạ từ vật sẽ được dò trên ảnh của một CCD camêra được hướng xuống dưới

Thông tin về khoảng cách trong không gian ba chiều cho toàn bộ quang cảnh có thể thu được một cách tương đối nhờ các kỹ thuật viền ánh sáng. Vùng không gian ba chiều trong vùng quan sát của camêra có thể được tạo ra bằng cách ghép nhiều đường viền hai chiều sát nhau. Chiều thứ ba của không gian thường được tạo ra bằng cách quét mặt phẳng laze qua không gian ảnh. So với phương pháp đo tam giác một điểm thì phương pháp viền ánh sáng số hóa mặt phẳng trong thời gian ngắn hơn và có ít phần chuyển động hơn do chỉ phải quét theo một chiều. Nhược điểm của phương pháp này là việc xác định khoảng cách mất nhiều thời gian và khó vì phải nhớ và xử lý nhiều khung ảnh.

Một cách tiếp cận khác của phương pháp *ánh sáng có cấu trúc* cho các ứng dụng không gian ba chiều là chiếu một lưới hình chữ nhật của các điểm hoặc đường ánh sáng có độ tương phản cao lên một mặt phẳng. Sự thay đổi độ sâu của ảnh làm cho lưới ánh sáng bị biến dạng, nhờ đó có thể xác định khoảng cách. Phần mở rộng do biến dạng được xác định bằng cách so sánh lưới ánh sáng đã dịch chuyển với mẫu lưới ánh sáng gốc như sau [41]:

- Xác định các điểm giao cắt của ảnh lưới biến dạng.
- Đánh ký hiệu cho các điểm đó theo hệ tọa độ đã lập cho lưới ánh sáng mẫu đã chiếu.
- Tính toán độ sai lệch giữa các điểm giao cắt và/hoặc giữa các đường của hai lưới.
- Biến đổi sai lệch đó về khoảng cách cần tìm.

Quá trình so sánh yêu cầu sự tương ứng giữa các điểm trên ảnh và các điểm trong lưới ánh sáng mẫu, điều này có thể gây ra khó khăn trong quá trình thực hiện. Thực hiện phép tương quan giữa các điểm trên lưới ảnh và các điểm trên lưới ánh sáng mẫu sẽ làm giảm bớt khó khăn cho vấn đề trên. Thông số thiết kế chủ yếu là độ dày của các đường tạo thành lưới ánh sáng và khoảng cách giữa các đường đó. Các đường đó quá mỏng sẽ làm giãn các không gian ảnh có nhiều vật, điều này gây hiện tượng không liên tục và làm ảnh hưởng đến quá trình đánh ký hiệu cho các điểm giao cắt. Ngược lại, nếu quá dày sẽ gây khó khăn cho việc xác định sự biến dạng của lưới, điều này sẽ làm giảm độ chính xác của phép đo [41]. Miền làm việc dự kiến của cảm biến sẽ xác định mật độ của các điểm cần thiết cho việc biểu diễn đầy đủ cảnh và độ phân giải mong muốn.

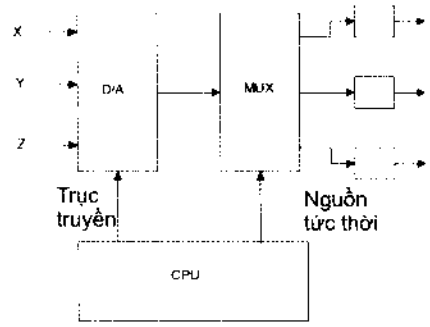
Các hệ thống xác định vị trí từ tính

Phương pháp dò từ sử dụng một nguồn phát từ trường (ba trục) và một cảm biến nhỏ để thông báo vị trí và hướng của nó so với nguồn phát từ trường. Các hệ thống lớn thường dùng rất nhiều nguồn phát từ trường và nhiều cảm biến, các cảm biến này có thể dò rất nhiều điểm với tần số lên tới 100 Hz trong dải khoảng cách từ 3 đến 20 ft (Polhemus incoperared và Ascension Technologies). Các hệ thống này thường chính xác hơn 0.1 inch về khoảng cách và 0.1^{o} về góc

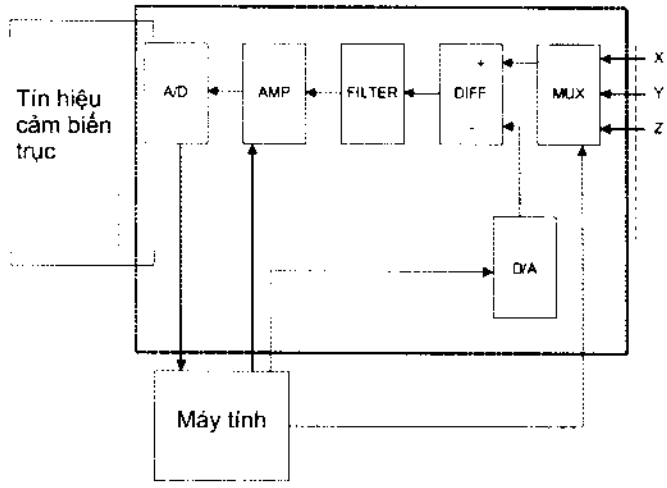
quay. Các hệ thống từ tính không phụ thuộc vào đường đi từ nguồn phát đến vật như các hệ thống quang và các hệ thống âm thanh, tuy nhiên các vật kim loại trong môi trường sẽ gây ảnh hưởng lên từ trường và làm sai kết quả đo. Các hệ thống này cũng cần phải nối dây cáp vào một thiết bị trung tâm (giống như các hệ thống LED và âm thanh). Công nghệ này hiện nay tương đối mạnh và được sử dụng rộng rãi cho các thiết bị dò cầm tay đơn hoặc đôi, các thiết bị đội đầu, phân tích cơ sinh học, đồ họa (số hóa trong 3D), xác định vị trí vật rắn.

Các nguồn từ trường có thể là AC hoặc DC. Các nguồn DC thường phát ra các xung hơn là sự phát xạ liên tục với mục đích làm giảm tối đa sự giao thoa với các nguồn từ khác. Các hệ thống sử dụng xung còn cho phép đo các từ trường tồn tại trong môi trường. Thông tin về các từ trường bên ngoài này cho phép nâng cao độ chính xác và làm giảm độ nhạy đối với các vật kim loại.

Hình 19.85 mô tả một bộ phát điều khiển điện tử điển hình. Thiết bị này cung cấp các xung dòng một chiều tới các ăng ten của nó, tại một thời điểm chỉ gửi tới một ăng ten. Bộ phát này gồm một lõi trên đó có quấn các ăng ten X, Y, Z. Khi một ăng ten nào đó của bộ phát được kích hoạt thì các thông số sẽ được đọc trên ba ăng ten của cảm biến. Tại thời điểm ban đầu bộ phát không được kích hoạt, khi đó cảm biến có thể đo được các thành phần *x, y, z* của từ trường trái đất. Trong lúc hoạt động, máy tính gửi tới bộ biến đổi số-tương tự (D/A) một con số biểu diễn biên độ của xung dòng điện để gửi tới ăng ten chọn trước. Bộ D/A sẽ chuyển đổi biên độ này thành một điện áp điều khiển tương tự. Điện áp điều khiển này được đưa tới bộ đa kênh (MUX), bộ đa kênh này sẽ kết nối điện áp điều khiển với nguồn dòng của bộ phát X, Y, Z.



HÌNH 19.85 Mạch phát của hệ thống xác định vị trí từ tính



HÌNH 19.86 Mạch thu của hệ thống xác định vị trí từ tính

Cảm biến bao gồm ba ăng ten trực giao và rất nhạy với các từ trường một chiều. Rất nhiều kỹ thuật khác nhau có thể được sử dụng để thực hiện các cảm biến một chiều. Flock (Ascension Technologies) sử dụng một từ kế định hướng ba trục. Tín hiệu đầu ra của cảm biến được chuyển tới bộ xử lý tín hiệu. Như mô tả trong hình 19.86, bộ phận xử lý tín hiệu của cảm biến gồm một bộ dồn kênh (MUX) dùng để nhận tín hiệu điều khiển từ máy tính, chuyển các tín hiệu mong muốn X, Y, Z tới bộ khuếch đại vi sai (DIFF). Bộ khuếch đại vi sai này loại bỏ các thành phần của từ trường trái đất (đã đo trước đó) khỏi tín hiệu thu được. Đầu ra của bộ khuếch đại vi sai lúc này chỉ còn tín hiệu thu được tương ứng với từ trường đã phát. Tín hiệu đó được lọc nhiễu và khuếch đại. Bộ chuyển đổi tương tự-số đưa tín hiệu một chiều về dạng tín hiệu số và truyền về máy tính.

Các phương pháp đo khoảng cách khác

Các phương pháp sau đây được sử dụng để đo sự dịch chuyển và do đó có thể được dùng để xác định khoảng cách đã dịch chuyển.

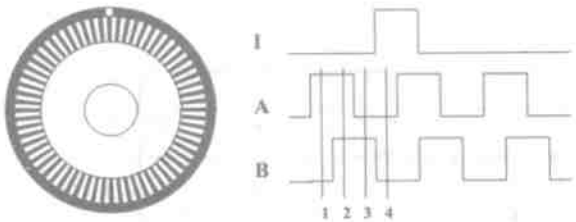
Odometry

Đây là một trong rất nhiều phương pháp xác định vị trí và là phương pháp đo khoảng cách gián tiếp. Khoảng cách được xác định bằng cách đo số vòng quay của bánh xe khi nó dịch chuyển từ vị trí tham chiếu đến vị trí đích. Vòng quay bánh xe được đo bằng các bộ mã hoá góc, bộ mã hoá này có thể là số hoặc tương tự.

Bộ mã hoá quang đo góc

Các thiết bị này gồm một nguồn ánh sáng, hệ thống quang học để định dạng và tạo đường đi cho ánh sáng, một bánh xe mã hóa trên đó có những rãnh trong suốt và một bộ phận thu nhận ánh sáng. Có hai loại bộ mã hoá quang: *tương đối và tuyệt đối*.

***Bộ mã hoá quang đo góc tương đối*:** Sơ đồ nguyên lý được miêu tả như hình 19.87, trên bánh xe có các rãnh trong suốt dọc theo đường tròn. Hai hàng rãnh được đặt lệch pha 90° được dùng để xác định số vòng quay và hướng. Hai dãy xung lệch pha 90° với nhau sẽ được tạo ra khi bánh xe quay (kênh A và kênh B). Khoảng cách được xác định bằng cách đếm số xung tính từ vị trí không bất kỳ ban đầu. Điểm tham chiếu sẽ mất khi hệ thống mất nguồn. Chiều quay của bánh xe được xác định nhờ vào việc kiểm tra dãy xung nào được tạo ra trước.



Trạng thái	Ch A	Ch B
S_1	Cao	Thấp
S_2	Thấp	Cao
S_3	Thấp	Cao
S_4	Thấp	Thấp

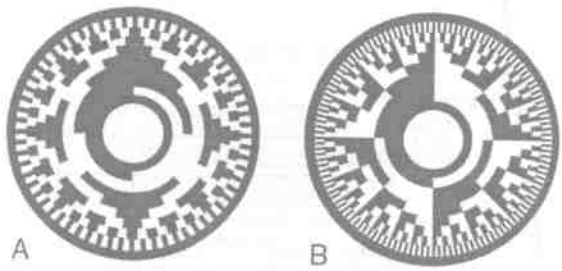
HÌNH 19.87 Bộ mã hoá quang đo góc tương đối

Ngoài hai kênh nói trên đôi khi hệ thống còn có kênh thứ ba (kênh Z), một xung sẽ được tạo ra sau mỗi vòng quay. Độ phân dải phụ thuộc vào số rãnh trên vòng tròn. Những bánh xe lớn có thể đạt độ phân giải lớn hơn. Tổng quãng đường đã dịch chuyển phụ thuộc vào hệ thống được sử dụng để đếm xung. Do việc đếm xung được thực hiện bên ngoài cảm biến nên có thể đo được khoảng cách với đơn vị mét.

Việc giải mã các xung (kênh A, B, Z) để xác định dịch chuyển góc được thực hiện nhờ các chip điện tử đặc biệt (Hewlett Packard đã sản xuất một họ các chip điện tử) hoặc là các mạch điện tử tích hợp hoàn chỉnh. Các mạch thu thập dữ liệu và các bộ đếm được lập trình để xác định khoảng cách từ các cảm biến này.

Các cảm biến hiện trên thị trường có tốc độ hoạt động tối đa là 6000 vòng/phút, số đếm tối đa trên một vòng quay là 360000, độ phân giải tối đa là 0.001°, đáp ứng tần số lên tới 150 kHz.

***Bộ mã hoá quang đo góc tuyệt đối*:** Các bộ mã hoá loại này có một bánh xe được mã hóa sao cho mỗi rãnh trên bánh xe biểu diễn cho một số bit, các rãnh này có thể là *on* (sáng) hoặc *off* (tối) (hình 19.88). Do đó, vị trí góc của bánh xe có giá trị tuyệt đối được xác định bởi giá trị mã hóa của rãnh đang thẳng hàng với bộ phận phát quang. Vị trí của bánh xe vẫn được nhớ ngay cả khi cảm biến bị mất nguồn nuôi. Khi ánh sáng phát ra từ thiết bị phát quang đi ngang qua đường thẳng giữa hai rãnh thì vị trí của bánh xe được tăng lên một đơn vị. Tuy nhiên, vị trí của bánh xe là không xác định khi bánh xe dừng lại tại vị trí mà ánh sáng nằm ở bên phải của đường thẳng giữa hai rãnh. Để giảm bớt sai số thì hệ thống hiển thị được xác định theo mã Grey. Theo phương pháp mã hóa này thì chỉ một bit được thay đổi giữa hai rãnh kế tiếp. Vì vậy sai số giảm xuống chỉ còn 1 đơn vị.



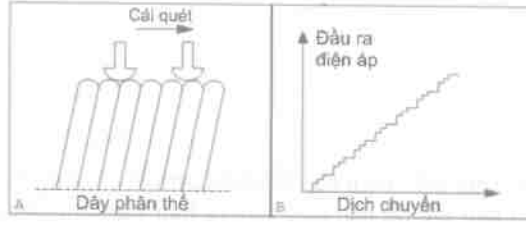
HÌNH 19.88 Bộ mã hoá quang đo góc tuyệt đối

Các cảm biến loại này thích hợp đối với các ứng dụng đo khoảng cách nhỏ cỡ vài trăm mili mét. Các bánh xe lớn có thể chứa nhiều rãnh hơn và một rãnh biểu diễn nhiều bit hơn. Cảm biến hiện có trên thị trường có thể đạt tới 11 bit, với độ phân giải ±1/2 bit hiển thị cuối cùng.

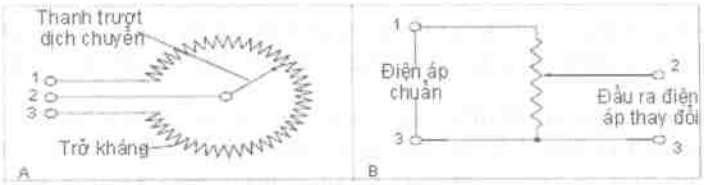
***Bộ mã hoá quang đo chuyển động thẳng*:** Các bộ mã hoá loại này cũng giống như các bộ mã hoá đo góc, nhưng thay vì sử dụng bánh xe mã hóa thì chúng sử dụng một thanh mã hóa và một thanh trượt, trên thanh trượt đó có các thành phần điện tử và quang. Khoảng cách được đo dọc theo thanh. Các bộ mã hoá loại này trên thị trường có thể đo được khoảng cách tối đa là 2150 m, độ phân giải tối đa là 0.08 μm, tốc độ hoạt động tối đa là 508 mm/s.

Chiết áp

Chiết áp là bộ chuyển đổi điện áp-điện trở. Chúng có một cuộn dây và một thanh trượt. Khi thanh trượt chuyển động dọc theo cuộn dây thì điện trở sẽ thay đổi theo mối quan hệ tuyến tính với khoảng cách tính từ một đầu của điện kế tới vị trí hiện tại của thanh trượt (hình 19.89). Biến trở được quấn giống như bộ chia điện áp sao cho điện áp đầu ra tỷ lệ với khoảng cách dịch chuyển của thanh trượt (hình 19.90). Độ phân giải được tính bằng số vòng dây trên một đơn vị khoảng cách và ảnh hưởng do tải của mạch chia điện áp cũng cần được xem xét.



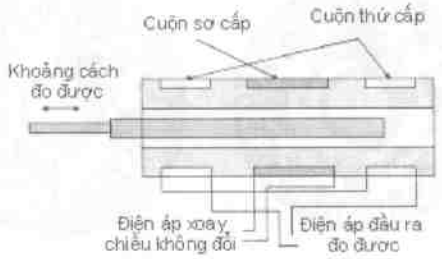
HÌNH 19.89 Nguyên tắc hoạt động của chiết áp



HÌNH 19.90 Mạch tương ứng của chiết áp

Bộ biến đổi vi sai biến thiên tuyến tính

Bộ biến đổi vi sai biến thiên tuyến tính (LVDT) phát ra một tín hiệu xoay chiều, có biên độ tỉ lệ với dịch chuyển của một lõi di động (hình 19.91). Khi lõi này thay đổi vị trí so với các cuộn dây nó sẽ làm thay đổi từ trường, do đó làm thay đổi biên độ điện áp trong cuộn dây thứ cấp.



HÌNH 19.91 Bộ biến đổi vi sai biến thiên tuyến tính

Độ phân giải của LVDT phụ thuộc vào thiết bị dùng để đo điện áp. Độ phân giải lớn nhất có thể đạt được là 25 μm. Các tín hiệu tĩnh (tần số thấp) có thể đo bằng đồng hồ xoay chiều. Đối với các tín hiệu tần số cao thì phải dùng các thiết bị đo đặc biệt để thực hiện việc giải điều biến hoặc là phải sử dụng một hệ thống thu thập dữ liệu để xử lý tín hiệu bằng máy tính.

Một bộ biến đổi vi sai biến thiên quay hoạt động với nguyên tắc cũng giống như LVDT và có thể đo được góc tới ±40°.

Cảm biến tiệm cận

Cảm biến tiệm cận được dùng để phát hiện các vật ở khoảng cách gần. Các cảm biến loại này được phát triển nhằm cải tiến các cảm biến có chức năng tương tự nhưng hoạt động dựa vào phương pháp tiếp xúc trực tiếp. Những ưu điểm hiện nay của công nghệ điện tử đã nâng cao khả năng hoạt động và độ tin cậy của các cảm biến tiệm cận, số lượng các ứng dụng cũng vì thế mà tăng lên. Như một hệ quả tất yếu, các hệ thống đã sử dụng công tắc hành trình cơ khí giờ đây đã chuyển sang sử dụng các công tắc không tiếp xúc để thực hiện chức năng tương tự. Các *cảm biến tiệm cận đường* phân chia thành nhiều loại tùy theo đặc tính cụ thể dùng để tạo ra sự chuyển mạch:

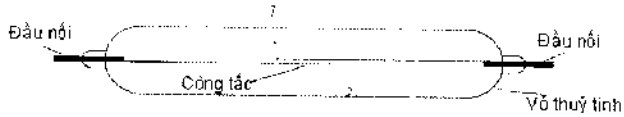
- Từ tính
- Cảm ứng
- Siêu âm
- Vi sóng
- Quang
- Điện dung

Do có đặc tính tin cậy, cảm biến tiệm cận rất phù hợp với các ứng dụng trong môi trường khắc nghiệt trong khi vẫn đảm bảo tốc độ đáp ứng cao và tuổi thọ lớn. Các cảm biến loại này có thể được thiết kế để chống lại những dao động và va đập mạnh, lực tác động có thể lên tới 30000 Gs với áp suất gần 20000 psi [27]. [11] và [53] đã phân tích các ưu điểm cũng như các yếu tố cần xem

xét khác trong việc lựa chọn cảm biến tiệm cận cho các ứng dụng trong các môi trường khắc nghiệt. Hơn nữa, các cảm biến tiệm cận hoạt động rất hiệu quả khi cần phát hiện các vật chuyển động với tốc độ cao (có thể làm hỏng thiết bị nếu dùng cảm biến tiếp xúc vật lý) hoặc là khi cần có sự cách li giữa các bộ phận kim loại và các bộ phận phi kim loại. [5], Johnson (1987) và [72] đã đưa ra các tóm tắt tổng quan về các loại cảm biến tiệm cận khác nhau với hướng dẫn lựa chọn cụ thể cho từng loại cảm biến.

Cảm biến tiệm cận từ

Dạng đơn giản nhất của cảm biến tiệm cận từ là *công tắc từ hình ống*. Hai lá sắt từ có từ trở nhỏ được đặt so le sát nhau từ hai đầu của một ống hàn kín, chúng được bố trí sao cho đầu của chúng chồng nhẹ lên nhau nhưng không tiếp xúc. Hai đầu phía ngoài của hai lá trở thành hai điện cực trái dấu khi được đặt vào một vùng từ thông. Lực hút liên tiếp qua khe hở sẽ kéo hai lá mỏng lại với nhau tạo thành sự tiếp xúc điện [23].



HÌNH 19.92 Công tắc từ hình ống được hàn kín, loại thường mở, được bơm khí trơ, chống bụi và ăn mòn

Các cảm biến này có giá thành thấp và rất bền, do đó được sử dụng làm cảm biến đóng mở cửa ứng dụng trong an ninh. Có hai loại cảm biến từ: thường đóng và thường mở. Cảm biến loại này có một số vấn đề như lỏng tiếp xúc, dao động khung và rỗ bề mặt ống trong trường hợp tải điện cảm hoặc điện dung [11]. Điều này đã khiến cho các nhà thiết kế lựa chọn cảm biến từ có hiệu ứng bán dẫn Hall thay cho cảm biến tiệm cận từ.

Hiệu ứng Hall được đưa ra bởi E.H. Hall vào năm 1897. Hall cho rằng khi đặt một vật dẫn mang dòng điện chạy trong một từ trường thì sẽ sinh ra một điện áp nhỏ đi qua vật dẫn theo hướng nằm ngang (hình 19.93):

$$V_h = \frac{R_h IB}{t}$$

trong đó:

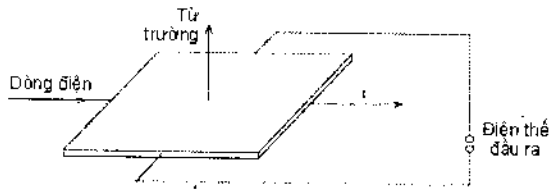
V_h là điện áp Hall,

R_h là hệ số Hall phụ thuộc vào vật liệu,

I là cường độ dòng điện với đơn vị ampe,

B là mật độ từ thông (vuông góc với I) có đơn vị là Gauss,

t là độ dày của vật dẫn có đơn vị là cm.



HÌNH 19.93 Hiệu ứng Hall [42]

Sự ra đời của công nghệ bán dẫn đã thúc đẩy sự phát triển của rất nhiều lĩnh vực khác nhau. Tuy nhiên, việc chế tạo silic trong thời gian đầu vẫn có những khó khăn và chưa được ứng dụng rộng rãi, nguyên nhân là do giá thành cao, nhiệt độ không ổn định, độ tin cậy thấp [46]. Những ưu điểm của công nghệ mạch tích hợp sau đó (thiết kế nguyên khối, vật liệu mới, bù nhiệt độ bên

trong) đã cải thiện đáng kể độ ổn định và độ nhạy. Ví dụ, nếu một dòng điện 100 mA chạy qua vật dẫn InAs đặt trong từ trường có mật độ từ thông 10 kG [31] sẽ sinh ra một điện áp 60 mV. Rất nhiều ứng dụng trong công nghiệp ô tô (ví dụ như bộ tạo thời gian của hệ thống đánh lửa điện tử) đã đưa công nghệ trên lên tầm cao mới vào cuối những năm 70 [69]. Có rất nhiều ứng dụng trong việc chế tạo rôbôt như cảm biến tốc độ và vị trí, đảo chiều động cơ, dẫn đường, la bàn.

Quan hệ tuyến tính giữa điện áp ra và mật độ từ trường ngang là một yếu tố quan trọng quyết định khả năng ứng dụng rộng rãi của các *cảm biến hiệu ứng Hall* hiện đại. Các cảm biến hiệu ứng Hall được tích hợp bộ điều chỉnh điện áp và khuếch đại tín hiệu đầu ra để nâng cao độ ổn định. Điện áp ra V_0 dao động xung quanh vị trí cân bằng "*trường không*" (thông thường là một nửa điện áp cung cấp V_{cc}), với biên độ và hướng dao động phụ thuộc vào sự phân cực và độ lớn của từ trường [69]. (Lưu ý rằng bất cứ sự thay đổi nào của hướng từ trường khỏi phương vuông góc cũng làm thay đổi biên độ điện áp ra). Tần số đáp ứng có thể lớn hơn 100 kHz.

Với sự trợ giúp của bộ dò ngưỡng Schmitt-trigger và một mạch điều khiển đầu ra phù hợp thì cảm biến hiệu ứng Hall tuyến tính sẽ làm việc như một bộ chuyển mạch hiệu ứng Hall số. Hầu hết các thiết bị hiện có trên thị trường đều sử dụng các bộ điều khiển tranzito để cung cấp đầu ra mạch hở khi không có từ trường [73]. Điểm dò ngưỡng thường được đặt ở một giá trị lớn hơn điện áp cân bằng "*trường không*". Khi vượt qua giá trị này bộ điều khiển đầu ra sẽ chuyển về trạng thái on (cực nguồn hoặc cực cửa, tùy thuộc vào loại tranzito PNP hay NPN được sử dụng). Ưu điểm nổi bật của phương pháp thiết kế trên là làm giảm sự ảnh hưởng của phân cực từ trường ngược đối với bộ chuyển mạch hiệu ứng Hall. Điều này cũng giống như việc chỉ có cực nam của nam châm vĩnh cửu mới kích hoạt được bộ chuyển mạch, thậm chí ngay cả khi có sự tiếp xúc trực tiếp của cực bắc cũng không gây ra tác động chuyển mạch bởi vì điện áp đầu ra đã khuếch đại nhỏ hơn điểm dò ngưỡng. Thời gian đáp ứng chuyển mạch rất nhanh, thông thường khoảng 400 ns [73].

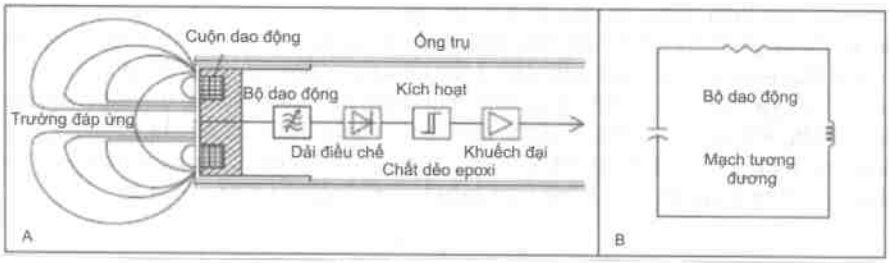
Cảm biến tiệm cận cảm ứng

Các bộ chuyển mạch tiệm cận cảm ứng ngày nay là loại cảm biến công nghiệp được sử dụng nhiều nhất để dò các vật kim loại và phi kim loại trong khoảng cách gần. Các thiết kế hình lăng trụ với đường kính 4 mm đã được sử dụng trong hơn một thập kỷ [63]. Do có khả năng cảm ứng qua những vật phi kim loại nên các cảm biến này có thể được phủ, bọc, thậm chí là hàn, cho phép chúng làm việc trong những khu vực ô nhiễm hoặc ngập trong chất lỏng. Đáp ứng tần số có thể lên tới 10 kHz [14].

Cảm biến tiệm cận cảm ứng sinh ra một từ trường tần số radiô dao động (100 kHz đến 1 MHz) xung quanh một cuộn dây quấn quanh một lõi sắt từ. Khi một vật kim loại đi vào từ trường được phát ra từ bề mặt cảm biến sẽ một dòng điện xoáy được sinh ra trên bề mặt của vật kim loại đó. Dòng điện xoáy này lại sinh ra một từ trường thứ cấp tác động ngược trở lại từ trường của đầu dò, do đó làm đầu dò dao động. Trở kháng hiệu dụng của cuộn dây đầu dò thay đổi kéo theo sự thay đổi của tần số dao động (hoặc thay đổi biên độ), thay đổi này sẽ được biến đổi thành tín hiệu ra tỷ lệ với khe hở cảm ứng giữa đầu dò và vật.

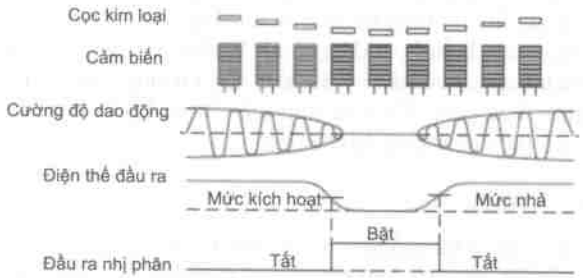
Sơ đồ của một cảm biến tiệm cận cảm ứng điển hình được mô tả như hình 19.94. Bộ dao động gồm một linh kiện tích cực (tranzito hoặc IC) và cuộn dây của cảm biến. Carr (1987) đã đưa ra mạch tương ứng (hình 19.94B) của cấu hình trên, trong đó cuộn dây của cảm biến được mô hình hóa bởi cuộn cảm L_p mắc nối tiếp với điện trở R_p, cáp nối giữa cuộn dây và thiết bị chủ động được biểu diễn bởi điện dung C. Trong trường hợp của bộ dao động Collpitts thì kết nối đầu dò-cáp là một phần của mạch tạo tần số cộng hưởng.

Khi một vật dẫn đi vào từ trường thì các tác động của thành phần trở kháng R_p tăng lên, trở kháng của mạch tạo tần số cộng hưởng giảm đi, do đó làm tăng dao động. Khi khe hở giữa cảm biến và vật giảm dần thì biên độ tín hiệu đầu ra của bộ dao động cũng giảm theo cho đến khi không còn dao động nữa. Cảm biến tiệm cận cảm ứng kiểu này thường được gọi là ECKO (eddy current-killed oscillator). Những khe hở nhỏ hơn ngưỡng nhỏ nhất này sẽ không được dùng để tính toán khoảng cách cần đo và do đó tạo thành một vùng không xác định, khi đó sẽ không có tín hiệu ở đầu ra.



HÌNH 19.94 (A) Sơ đồ khối của cảm biến tiệm cận kiểu ECKO [63] và (B) mạch dao động tương ứng [14]

Giám sát biên độ đầu ra của bộ dao động bằng một bộ dò ngưỡng cho phép tạo ra một bộ cảm biến tiệm cận cảm ứng với đầu ra số *on/off* (hình 19.95). Khi một vật kim loại tiến gần đến bề mặt của cảm biến thì điện áp đầu ra của bộ dao động sẽ giảm xuống, thậm chí thấp hơn mức "*ngưỡng kích hoạt*", sau đó bộ so sánh ngưỡng sẽ chuyển từ trạng thái off sang trạng thái on. Nếu tăng khoảng cách của khe hở thì điện áp sẽ tăng trở lại và đầu ra chuyển về trạng thái off khi vượt qua "*ngưỡng nhả*". Sai lệch nhỏ giữa "*ngưỡng kích hoạt*" và "*ngưỡng nhả*" được gọi là "*khoảng trễ*", có tác dụng giảm sự mất ổn định tại những điểm gần ngưỡng dò. Thông thường "*khoảng trễ*" có giá trị từ 3% đến 20% của khoảng cách hiệu quả lớn nhất [16].



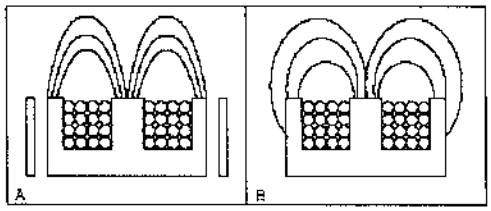
HÌNH 19.95 Sai lệch nhỏ (khoảng trễ) giữa "mức kích hoạt" và "mức nhả" sẽ loại bỏ sự mất ổn định của đầu ra khi vật di chuyển xung quanh ngưỡng đo

Khoảng đo hiệu quả có giá trị xấp xỉ đường kính của cuộn dây đo [38] và chịu ảnh hưởng của vật liệu, kích thước và hình dạng của vật. Đối tượng chuẩn trong công nghiệp (dùng để xác định khoảng cách đo danh nghĩa) là một miếng sắt nhẹ dày 1 mm^2 cùng độ lớn với đường kính của cảm biến hoặc bằng ba lần khoảng cách đo danh nghĩa [24]. Đối với các kim loại sắt thì việc tăng độ dày của vật không có tác dụng đáng kể nào [16]. Nếu vật có càng nhiều thành phần kim loại không chứa sắt thì khoảng cách dò càng giảm (xem bảng 19.5). Đối với những kim loại không phải là sắt thì có thể đo được khoảng cách xa hơn với những vật hình lá mỏng có độ dày nhỏ hơn khoảng suy giảm từ trường bên trong của chúng [63]. Hiện tượng này được gọi là "*hiệu ứng lá mỏng*" gây ra bởi sự xuyên qua của từ trường sóng radiô sinh ra dòng điện xoáy bề mặt trên phía bên kia của vật.

BẢNG 19.5 Khoảng cách đo danh nghĩa đối với các vật liệu không phải là thép mềm phải được thay đổi với các hệ số suy giảm liệt kê trong bảng sau:

Vật liệu	Hệ số suy giảm
Sắt mài	
Thép nhẹ	1.00
Thép không rỉ	0.70 – 0.90
Đồng thau	0.45
Nhôm	0.40
Đồng đỏ	0.35

Có hai loại cảm biến tiệm cận cảm ứng cơ bản là: (1) *có vỏ bảo vệ* (hình 19.96A) và (2) *không có vỏ bảo vệ* (hình 19.96B). Khi một cảm biến loại không có vỏ bảo vệ được đặt trên một bề mặt kim loại, nếu tấm kim loại đó càng gần cảm biến thì càng ngăn cản hoạt động của cảm biến [65]. Cảm biến loại có vỏ bảo vệ với một vòng kim loại đồng trục quấn quanh đã được sử dụng để giải quyết vấn đề trên, khi đó từ trường sẽ được tập trung ở phía trước cảm biến và hạn chế được việc dò theo phương ngang [24]. Tuy nhiên, khoảng cách tối đa mà các cảm biến loại có vỏ bảo vệ có thể dò được chỉ bằng một nửa so với các cảm biến loại không có vỏ bảo vệ [65].



HÌNH 19.96 Cảm biến tiệm cận điện cảm có vỏ bảo vệ (A) có thể được nhúng trong kim loại mà không bị ảnh hưởng đến hoạt động, trong khi loại không có vỏ (B) phải được đặt trên những bề mặt phi kim loại [24]

Hiện tượng giao thoa lẫn nhau giữa các cảm biến tiệm cận cảm ứng có thể xảy ra nếu khoảng cách theo phương ngang giữa chúng nhỏ hơn hai lần đường kính của cảm biến. Biểu hiện của hiện tượng trên là sự mất ổn định của tín hiệu ra hoặc là khoảng cách đo hiệu quả bị giảm. Hiện tượng trên thường xảy ra khi một cảm biến hoạt động bình thường và các cảm biến khác đang ở dải trễ [63]. Đối với các cảm biến loại có vỏ bảo vệ thì một nửa khoảng cách khuyến cáo ở trên cũng đủ để loại bỏ hiện tượng giao thoa [25]. Khi các cảm biến được bố trí đối diện với nhau thì khoảng cách tối thiểu giữa các cảm biến phải tăng lên hai lần.

Cảm biến tiệm cận điện dung

Cảm biến tiệm cận điện dung rất giống với *cảm biến tiệm cận điện cảm*. Cảm biến điện dung không những phát hiện các vật liệu kim loại mà còn có thể phát hiện các vật liệu điện môi. Khoảng cách đo hiệu quả lên tới vài inch. Các cảm biến này hoạt động dựa vào sự thay đổi điện dung giữa đầu dò (hoặc đĩa dò) và môi trường xung quanh. Khi một vật tiến gần đến cảm biến, sự thay đổi của không gian xung quanh và các đặc tính điện môi trong vùng làm việc khiến điện dung tăng lên. Sự thay đổi của điện dung có thể được phát hiện bằng các cách sau đây: (1) dòng điện chạy qua đầu dò tăng lên [27], (2) mạch RC bắt đầu dao động [47], (3) tần số của một dao động đang xảy ra bị giảm [66]. Các ứng dụng điển hình trong công nghiệp của cảm biến điện dung bao gồm: đo mức cho các loại vật liệu khác nhau (dạng chất lỏng, viên, bọt), phát hiện sản phẩm (đặc biệt là qua các bao bì không phải là kim loại).

Cảm biến tiệm cận siêu âm

Các cảm biến đã trình bày ở trên đều hoạt động dựa vào sự hiện diện của vật trong vùng làm việc để làm thay đổi đặc tính điện môi hoặc một tính chất nào đó (điện cảm, điện dung), kết hợp với các mạch cảm ứng đã tích hợp. Cảm biến tiệm cận siêu âm là một dạng cảm biến phản xạ hoạt động dựa trên sự thay đổi năng lượng của tín hiệu đã được phát đi và quay trở lại bộ dò sau khi đã phản xạ tại đối tượng đích. Một cảm biến tiệm cận siêu âm điển hình bao gồm hai bộ biến đổi (một để phát tín hiệu, một để thu tín hiệu), cho dù tốc độ của âm thanh đủ chậm để cảm biến có thể hoạt động với một bộ biến đổi duy nhất. Bộ phát tín hiệu truyền đi một sóng dọc trong dải siêu âm của phổ âm thanh (thường từ 20 đến 200 kHz) và lớn hơn ngưỡng nghe của người.

Các cảm biến tiệm cận siêu âm hoạt động hiệu quả ở khoảng cách lớn, chúng được dùng để phát hiện các hầu hết các vật thể, chất lỏng và chất rắn. Tín hiệu phát ra sẽ được phản hồi về bộ thu khi có một vật đi vào trường âm thanh. Cũng giống như các cảm biến phản xạ khác, khoảng cách lớn nhất có thể phát hiện vật không chỉ phụ thuộc vào mức năng lượng được phát ra mà còn phụ thuộc vào diện tích tiết diện ngang của vật, độ phản xạ của vật và hướng nhạy của cảm biến.

Khi biên độ của tín hiệu nhận được lớn hơn một ngưỡng chọn trước thì đầu ra của cảm biến sẽ thay đổi trạng thái và báo rằng đã phát hiện được vật. Với sự phát triển của các bộ vi điều khiển giá thành thấp, các cảm biến tiệm cận siêu âm đã được thay thế bởi các hệ thống đo khoảng cách siêu âm đa năng với dải khoảng cách phát hiện vật lớn (xem phần các hệ thống TOF siêu âm).

Cảm biến tiệm cận vi sóng

Cảm biến tiệm cận vi sóng hoạt động ở dải khoảng cách 5-150 ft hoặc xa hơn [71]. Loại cảm biến này rất giống với các cảm biến tiệm cận siêu âm đã trình bày ở phần trên, điểm khác biệt giữa chúng là cảm biến tiệm cận vi sóng phát đi năng lượng điện từ trong dải vi sóng của phổ năng lượng tần số radiô. FCC đã dành giải tần số 10.50-10.55 GHz và 24.075-24.175 GHz cho các cảm biến nhiễu trường vi sóng, là một dạng của cảm biến tiệm cận vi sóng. Năng lượng phát ra từ ăng ten của bộ phát được phản xạ tại vật và quay trở lại ăng ten của một bộ thu (xem hình 19.68 của phần "Cảm biến khoảng cách vi sóng"), nếu năng lượng này là đủ lớn (lớn hơn một ngưỡng chọn trước) thì đầu ra của cảm biến sẽ thay đổi trạng thái để báo rằng đã phát hiện được vật trong vùng quan sát. Một dạng khác của cảm biến tiệm cận vi sóng chỉ sử dụng một ăng ten thu/phát duy nhất. Loại cảm biến này giám sát độ dịch Doppler gây ra bởi một vật chuyển động để xác định sự dịch chuyển tương đối của vật so với cảm biến. Kích thước của cảm biến tiệm cận vi sóng thường lớn hơn kích thước của cảm biến tiệm cận điện cảm, cảm biến tiệm cận điện dung và chúng thường được sử dụng để phát hiện các vật có kích thước lớn.

Cảm biến tiệm cận quang

Các cảm biến tiệm cận quang (quang điện) thường dùng trong công nghiệp được chia thành ba nhóm cơ bản: (1) *tương phản*, (2) *phản xạ ngược*, (3) *khuếch tán*. (Nếu xét kỹ về ngữ nghĩa thì tên của hai nhóm đầu không phản ánh chính xác bản chất của cảm biến tiệm cận). Khoảng cách đo hiệu quả là từ vài inch cho đến vài trăm ft. Cảm biến tiệm cận quang được dùng trong một số ứng dụng của trong lĩnh vực rôbôt như: Dò sàn nhà, định vị chuyển động và tránh va chạm. Trong công nghiệp có các ứng dụng sau: phát hiện vật tại khoảng cách lớn nhất cho trước (dùng để đếm hoặc để làm việc trên một phần của vật), phát hiện sự xâm phạm cho các hệ thống an ninh, căn chỉnh thẳng hàng. Năng lượng gần hồng ngoại đã điều biến thường được sử dụng để giảm sự ảnh hưởng của ánh sáng xung quanh, do đó nâng cao chất lượng tín hiệu, đảm bảo sự hoạt động tin cậy của cảm biến. Các sóng dài màu đỏ thường được sử dụng để trợ giúp việc căn chỉnh các thiết bị trong khi cài đặt và chuẩn đoán hệ thống.

Hoạt động thực tế của cảm biến tiệm cận quang phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Khoảng cách đo hiệu quả phụ thuộc vào tính chất vật lý (kích thước, hình dạng, độ phản xạ, chất liệu), tốc độ và hướng dịch chuyển của vật cần phát hiện, cách thiết kế cảm biến, chất lượng cũng như số lượng của năng lượng mà cảm biến phát ra và thu về. Khả năng tuần hoàn phụ thuộc vào kích thước của vật, sự thay đổi của điều kiện xung quanh, sự thay đổi của độ phản xạ hoặc các thuộc tính chất liệu khác của vật và độ ổn định của các mạch điện tử trong cảm biến. Đặc tính hoạt động đặc biệt của từng loại cảm biến sẽ được sử dụng tùy theo yêu cầu cụ thể của từng ứng dụng nhằm mục đích tối ưu khả năng làm việc của cảm biến.

Kiểu tương phản

Loại cảm biến trên còn được gọi là "mắt điện", được dùng trong rất nhiều ứng dụng từ sau năm 1950. Một số ứng dụng tiêu biểu như: đếm vật, mở cửa tự động, bảng tín hiệu điện báo và các hệ thống an ninh. Bộ thu và phát tín hiệu được bố trí cách biệt ở hai phía của khu vực quan tâm. Bộ phát truyền đi một chùm ánh sáng (thường dùng đèn LED) về phía một bộ thu quang điện. Bất cứ vật nào chuyển động ngang qua giữa bộ phát và bộ thu sẽ làm gián đoạn chùm sáng, do đó làm ngắt mạch điện. Dải khoảng cách hiệu quả của loại cảm biến này có thể lên tới hàng trăm feet hoặc xa hơn. Cảm biến kiểu tương phản thường được sử dụng trong lĩnh vực an ninh.

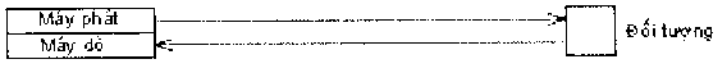
Kiểu phản xạ ngược

Cảm biến tiệm cận quang kiểu phản xạ ngược được phát triển từ loại cảm biến tương phản bằng cách sử dụng gương để phản xạ năng lượng đã phát ra từ bộ phát về bộ thu (bộ thu được bố trí song song với bộ phát). Bộ phản xạ ngược loại ba góc (hình 19.97) thậm chí đã thay thế các tấm gương để giảm bớt những khó khăn trong khi căn chỉnh thiết bị. Loại ba góc lăng kính có ba mặt phẳng phản xạ vuông góc với nhau và một mặt đáy. Ánh sáng đi vào qua mặt đáy được phản xạ bởi các mặt phẳng khác và quay trở lại qua mặt đáy về nguồn phát. Một vật phản xạ ngược tốt sẽ trả về cảm biến một năng lượng gấp 300 lần năng lượng phản xạ từ một tờ giấy [6]. Trong các nhà máy tự động hóa, vật được phát hiện khi nó làm gián đoạn chùm ánh sáng (mặc dù một số trường hợp đòi hỏi phải đặt bộ phản xạ ngược trên vật).

HÌNH 19.97 Bộ phản xạ ngược loại ba góc được sử dụng để làm tăng khoảng cách đo hiệu quả và đơn giản hóa việc căn chỉnh thiết bị

Kiểu khuếch tán

Cảm biến tiệm cận quang kiểu *khuếch tán* hoạt động gần giống với cảm biến tiệm cận quang kiểu *phản xạ ngược*, tuy nhiên năng lượng được phản xạ từ bề mặt của vật cần phát hiện thay vì từ *bộ phản xạ ngược* (hình 19.98). Đặc điểm này cho phép cảm biến phát hiện được một vật bất kỳ trong các môi trường vô định hình.



HÌNH 19.98 Cảm biến tiệm cận kiểu khuếch tán hoạt động dựa trên năng lượng phản xạ từ bề mặt vật

Loại cảm biến này có rất nhiều ưu điểm so với phương pháp đo khoảng cách siêu âm, trong việc phát hiện các vật ở khoảng cách gần. Do năng lượng được truyền đi với tốc độ của ánh sáng nên hầu như không có thời gian trễ, trong khi phải mất gần 1 giây để cập nhật liên tục một mảng 12 cảm biến siêu âm. Thêm vào đó, năng lượng ánh sáng có thể dễ dàng hội tụ do đó tránh được sự ảnh hưởng lẫn nhau giữa các cảm biến gần liền kề, cho phép sử dụng đồng thời nhiều cảm biến. Việc sử dụng tín hiệu có bước sóng ngắn đã làm giảm ảnh hưởng của hiện tượng "*phản xạ bề mặt của vật*", cho phép phát hiện hiệu quả hơn các vật có bề mặt không bình thường. Nhược điểm của loại cảm biến này là không cho phép đo trực tiếp khoảng cách và khi độ phản xạ của bề mặt vật thay đổi thì kết quả sẽ không ổn định.

Kiểu hội tụ

Bộ thu và bộ phát trong các *cảm biến tiệm cận khuếch tán* có thể được sắp xếp, bố trí để đảm bảo độ chính xác của thông tin về vị trí. Trục quang của đèn LED trong bộ phát được đặt lệch một góc so với trục quang của đèn LED trong bộ thu sao cho giao điểm của hai trục đó tạo thành một vùng hẹp như hình mô tả trên hình 19.99, do đó chỉ những vật nằm cách cảm biến một khoảng cách xác định như trên mới có khả năng phản hồi năng lượng về bộ thu. Những vật nằm ngoài vùng trên sẽ không được phát hiện. Đặc điểm trên giúp cảm biến tiệm cận không bị phụ thuộc vào độ phản xạ của bề mặt vật và hoạt động rất hiệu quả trong trường hợp vật cần phát hiện không được phân biệt rõ so với các vật nền.

HÌNH 19.99 Cảm biến tiệm cận khuếch tán hoạt động ở chế độ hội tụ được dùng để xác định gần đúng khoảng cách đến vật

Tài liệu tham khảo

[1] Adams, M.D., "Amplitude modulated optical range data analysis in mobile robotics", *IEEE International Conference on Robotics and Automation,* Atlanta, GA, pp. 8–13, 1993.

[2] Aloimonos, J., Weiss, I., Bandyopadhyay, A., "Active vision", *First International Conference on Computer Vision,* pp. 35–54, 1987.

[3] Arkin, R.C., "Motor-schema-based mobile robot navigation", *International Journal of Robotics Research,* Vol. 8., No. 4, pp. 92–112, Aug., 1989.

[4] Ascension Technologies, P.O. Box 527, Burlington, VT 05402, USA. www.ascension-tech.com.

[5] Ball, D., "Sensor selection guide", *Sensors,* pp. 50–53, April, 1986.

[6] Banner, *Handbook of Photoelectric Sensing,* Banner Engineering Corp., Minneapolis, MN, 1993.

[7] Besl, P.J., "Range imaging sensors", GMR-6090, General Motors Research Laboratory, 1988.

[8] Biber, C., Ellin, S., Shenk, E., "The polaroid ultrasonic ranging system", Audio Engineering Society, 67th Convention, New York, NY, Oct.–Nov., 1980.

[9] Blais, F., Rioux, M., Domey, J., Beraldin, J.A., "A very compact real time 3-D range sensor for mobile robot applications", SPIE Vol. 1007, Mobile Robots III, Cambridge, MA, Nov., 1988.

[10] Borenstein, J., Koren, Y., "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments", *IEEE International Conference on Robotics and Automation,* Vol. CH2876-1, Cincinnati, OH, pp. 572–577, May, 1990.

[11] Burreson, B., "Magnetic proximity switches in severe environments", *Sensors,* pp. 28–36, June, 1989.

[12] Burt, P.J., Anadan, P., Hanna, K., van der Wal, G., "A front end vision processor for unmanned vehicles", *Advanced Image Processing Group,* David Sarnoff Research Center, Princeton, NJ, April, 1992.

[13] Burt, P.J., Anadan, P., Hanna, K., van der Wal, G., Bassman, R., "A front end vision processor for vehicle navigation", *International Conference on Intelligent Systems,* pp. 653–662, Feb., 1993.

[14] Carr, W.W., "Eddy current proximity sensors", *Sensors,* pp. 23–25, Nov., 1987.

[15] Chen, Y.D., Ni, J., Wu, S.M., "Dynamic calibration and compensation of a 3-D lasar radar scanning system", *IEEE International Conference on Robotics and Automation,* Atlanta, GA, Vol. 3, pp. 652–664, May, 1993.

[16] Damuck, N., Perrotti, J., "Getting the most out of your inductive proximity switch", *Sensors,* pp. 25–27, Aug., 1993.

[17] Depkovich, T., Wolfe, W., "Definition of requirements and components for a robotic locating system", Final Report MCR-83-669, Martin Marietta Denver Aerospace, Denver, CO, Feb., 1984.

[18] Everett, H.R., "A multi-element ultrasonic ranging array", *Robotics Age,* pp. 13–20, July, 1985.

[19] Everett, H.R., DeMuth, D.E., Stitz, E.H., "Survey of collision avoidance and ranging sensors for mobile robots", *Technical Report 1194,* Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, San Diego, CA, Dec., 1992.

[20] Figueroa, F., Barbieri, E., "Increased measurement range via frequency division in ultrasonic phase detection methods", *Acustica,* Vol. 73, pp. 47–49, 1991a.

[21] Figueroa, J.F., Barbieri, E., "An ultrasonic ranging system for structural vibration measurements", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* Vol. 40, No. 4, pp. 764–769, Aug., 1991b.

[22] Figueroa, J.F., Lamancusa, J.S., "A method for accurate detection of time of arrival: analysis and design of an ultrasonic ranging system", *Journal of the Acoustical Society of America,* Vol. 91, No. 1, pp. 486–494, Jan., 1992.

[23] Fernando Figueroa and Evangelos Doussis, "A hardware-level method to improve the range and accuracy of an ultrasonic ranging system", *Acustica,* Vol. 78, No. 4, pp. 226–232, May, 1993.

[24] Flueckiger, N., "Inductive proximity sensors: theory and applications", *Sensors,* pp. 11–13, May, 1992.

[25] Gatzios, N.E., Ben-Ari, H., "Proximity control primer", *Sensors,* pp. 47–49, April, 1986.

[26] Gustavson, R.L., Davis, T.E., "Diode-laser radar for low-cost weapon guidance", *SPIE,* Vol. 1633, Laser Radar VII, Los Angeles, CA, pp. 21–32, Jan., 1992.

[27] Hall, D.J., "Robotic sensing devices", Report No. CMU-RI-TR-84-3, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, March, 1984.

[28] Hamlin, "The versatile magnetic proximity sensor", *Sensors,* pp. 16–22, May, 1988.

[29] Hammond, W., "Vehicular use of ultrasonic systems", *Technical Report,* Cybermotion, Salem, VA, May, 1994.

[30] Hebert, M., Krotkov, E., "3-D measurements from imaging laser radars: how good are they?", *International Conference on Intelligent Robots and Systems,* pp. 359–364, 1991.

[31] Hines, R., "Hall effect sensors in Paddlewheel Flowmeters", *Sensors,* pp. 32–33, Jan., 1992.

[32] Jarvis, R.A., "A perspective on range finding techniques for computer vision", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol. PAMI-1, No. 2, pp. 122–139, March, 1983a.

[33] Jarvis, R.A., "A laser time-of-flight range scanner for robotic vision", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol. PAMI-5, No. 5, pp. 505–512, Sep., 1983b.

[34] Kent, E.W., et al., "Real-time cooperative interaction between structured light and reflectance ranging for robot guidance", *Robotica,* Vol. 3, pp. 7–11, Jan.–March, 1985.

[35] Kerr, J.R., "Real time imaging rangefinder for autonomous land vehicles", *SPIE,* Vol. 1007, Mobile Robots III, pp. 349–356, Nov., 1988.

[36] Kilough, S.M., Hamel, W.R., "Sensor capabilities for the HERMIES experimental robot", American Nuclear Society, Third Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Charleston, SC, CONF-890304, Section 4-1, pp. 1–7, March, 1989.

[37] Kim, E.J., "Design of a phased sonar array for a mobile robot", *Bachelor's Thesis,* MIT, Cambridge, MA, May, 1986.

[38] Koenigsburg, W.D., "Noncontact distance sensor technology", GTE Laboratories, 40 Sylvan Rd., Waltham, MA, pp. 519–531, March, 1982.

[39] Lang, S., Korba, L., Wong, A., "Characterizing and modeling a sonar ring", *SPIE Mobile Robots IV,* Philadelphia, PA, pp. 291–304, 1989.

[40] Langer, D., Thorpe, C., "Sonar based outdoor vehicle navigation and collision avoidance", *International Conference on Intelligent Robots and Systems,* IROS'92, Raleigh, NC, July, 1992.

[41] LeMoigue, J., Waxman, A.M., "Projected light grids for short range navigation of autonomous robots", *Proceedings, 7th IEEE Conference on Pattern Recognition,* Montreal, Canada, pp. 203–206, 30 July–2 Aug., 1984.

[42] Lenz, J.E., "A review of magnetic sensors", *Proceedings of the IEEE,* Vol. 78, No. 6, June, 1990.

[43] Lewis, R.A., Johnson, A.R., "A scanning laser rangefinder for a robotic vehicle", *5th International Joint Conference on Artificial Intelligence,* pp. 762–768, 1977.

[44] Loewenstein, D., "Computer vision and ranging systems for a ping pong playing robot", *Robotics Age,* pp. 21–25, Aug., 1984.

[45] Manolis, S., "Resolvers vs. rotary encoders for motor commutation and position feedback", *Sensors,* pp. 29–32, March, 1993.

[46] McDermott, J., "The hall effect: success at 90", *Electronic Design 21,* pp. 38–45, 11 Oct., 1969.

[47] McMahon, V.C., "Solutions from capacitive proximity switches", *Sensors,* pp. 31–33, May, 1987.

[48] Moldoveanu, A., "Inductive proximity sensors: fundamentals and standards", *Sensors,* pp. 11–14, June, 1993.

[49] Moravec, H.P., Elfes, A., "High resolution maps from wide angle sonar", *IEEE International Conference on Robotics and Automation,* St. Louis, MO, pp. 116–121, March, 1985.

[50] NASA, "Fast accurate rangefinder", *NASA Tech Brief,* NPO-13460, Winter, 1977.

[51] Nitzan, D., et al. "The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis", *Proceedings of IEEE,* Vol. 65, No. 2, pp. 206–220, Feb., 1977.

[52] Nitzan, D., "Assessment of robotic sensors", *Proceedings of 1st International Conference on Robotic Vision and Sensory Controls,* pp. 1–11, 1–3 April, 1981.

[53] Peale, S., "Speed/Motion sensing in challenging environments", *Sensors,* pp. 45–46, Jan., 1992.

[54] Pletta, J.B., Amai, W.A., Klarer, P., Frank, D., Carlson, J., Byrne, R., "The remote security station (RSS) final report", Sandia Report SAND92-1947 for DOE under Contract DE-AC04-76DP00789, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Oct., 1992.

[55] Poggio, T., "Vision by man and machine", *Scientific America*, Vol. 250, No. 4, pp. 106–116, April, 1984.

[56] Polaroid, "Polaroid ultrasonic ranging system user's manual", Publication No. P1834B, Polaroid Corporation, Cambridge, MA, Dec., 1981.

[57] Polaroid, "Technical specifications for polaroid electrostatic transducer", 7000-Series Product Specification ITP-64, Polaroid Corporation, Cambridge, MA, June, 1987.

[58] Polaroid, "6500-series sonar ranging module", Product Specifications PID 615077, Polaroid Corporation, Cambridge, MA, 11 Oct., 1990.

[59] Polhemus Incorporated, a Rockwell Collins Company, 40 Hercules Drive, P.O. Box 560, Colchester, VT 05446 (www.polhemus.com).

[60] Schwartz, J.T., "Structured light sensors for 3-D robot vision", Technical Report No. 65, Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University, undated.

[61] Scott, M.W., "Range imaging laser radar", US Patent 4,935,616, June 19, 1990.

[62] Siuru, B., "The smart vehicles are here", *Popular Electronics*, Vol. 11, No. 1, pp. 41–45, Jan., 1994.

[63] Smith, J.W., "Design and application of inductive proximity sensors", *Sensors*, pp. 9–14, Nov., 1985.

[64] Swain, M.J., Stricker, M., eds., *Promising Directions in Active Vision*, Report from the National Science Foundation Active Vision Workshop, University of Chicago, IL, 1991.

[65] Swanson, R., "Proximity switch application guide", *Sensors*, pp. 20–28, Nov., 1985.

[66] Vranish, J.M., McConnel, R.L., Mahalingam, S., "Capaciflector collision avoidance sensors for robots", Product Description, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, Feb., 1991.

[67] Vuylsteke, P., Price, C.B., Oosterlinck, A., "Image sensors for real-time 3-D acquisition, part 1", in *Traditional and Non-Traditional Robotic Sensors*, T.C. Henderson, ed., NATO ASI Series, Vol. F63, Springer-Verlag, pp. 187–210, 1990.

[68] Wavering, A.J., Fiala, J.C., Roberts, K.J., Lumia, R., "TRICLOPS: a high-powered trinocular active vision system", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 410–417, 1993.

[69] White, D., "The hall effect sensor: basic principles of operation and application", *Sensors*, pp. 5–11, May, 1988.

[70] Wildes, R.P., "Direct recovery of 3-D scene geometry from binocular stereo disparity", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 8, pp. 761–774, Aug., 1991.

[71] Williams, H., "Proximity sensing with microwave technology", *Sensors*, pp. 6–15, June, 1989.

[72] Wojcik, S., "Noncontact presence sensors for industrial environments", *Sensors*, pp. 48–54, Feb., 1994.

[73] Wood, T., "The hall effect sensor", *Sensors*, pp. 27–36, March, 1986.

[74] Woodbury, N., Brubacher, M., Woodbury, J.R., "Noninvasive tank gauging with frequency-modulated laser ranging", *Sensors*, pp. 27–31, Sep., 1993.

[75] Young, M.S., Li, Y.C., "A high precision ultrasonic system for vibration measurements", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 63, No.11, pp. 5435–5441, Nov., 1992

19.8 Các hệ thống nhận biết ánh sáng, hình ảnh và nhận dạng

Stanley S. Ipson

Giới thiệu

Các bộ (nhận biết) cảm biến ánh sáng có (dải phổ rộng) rất nhiều loại. Đơn giản nhất là các cảm biến có đầu ra để thể hiện và giao tiếp với các thành phần khác như các bộ vi xử lý. Ngược lại, những cảm biến hình ảnh trong máy video hay máy camêra số có tới hàng triệu cảm biến đưa ra các các tín hiệu đầu ra mà phức tạp trong việc kết nối và đòi hỏi phải có các bộ xử lý mạnh để chuyển đổi. Không xét đến độ phức tạp, mục đích của các đầu đo ánh sáng là để đo ánh sáng. Phần "Cơ bản về đo lường bức xạ" sẽ giới thiệu một số các thuật ngữ về đo lường bức xạ thể hiện đặc tính của ánh sáng, nguồn sáng và các bộ chuyển đổi. Tuy các nhà sản xuất thường ghi rõ các đặc

tính của thiết bị theo hệ đơn vị photometric của phép đo ánh sáng tương ứng với dải ánh sáng nhìn thấy được của thị giác người vì vậy cần nắm được đồng thời hai phép đo ánh sáng radiometric và photometric. Nguồn sáng sẽ được trình bày trong phần "Các nguồn sáng". Nguyên lý hoạt động và đặc tính của một vài loại bộ chuyển đổi ánh sáng thông dụng nhất bao gồm: hỏa điện, quang trở, điôt quang và tranzito quang sẽ được trình bày trong phần "Các bộ chuyển đổi ánh sáng". Các hệ thống quan sát có các thành phần quang học tạo nên hình ảnh và cảm biến hình ảnh để chuyển hình ảnh ánh sáng thu được sang tín hiệu điện. Sự hình thành ảnh được giới thiệu trong phần "Sự hình thành ảnh", trước khi giới thiệu các bộ chuyển đổi ánh sáng được sử dụng rộng rãi nhất dựa trên các công nghệ CCD (thiết bị ghép nối điện tích) và CMOS (chất bán dẫn ôxit kim loại), trong phần "Các cảm biến hình ảnh". Phần cuối cùng sẽ đề cập đến một số phần tử cần thiết khác để tạo thành một hệ thống quan sát hoàn chỉnh.

Cơ bản về đo lường bức xạ

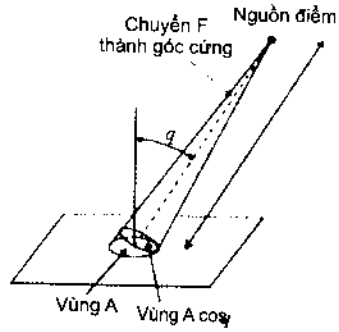
Ánh sáng quan sát được là năng lượng điện từ bức xạ với bước sóng rất ngắn trong dải từ 400 đến 700 nm. Ở những bước sóng nhỏ hơn vào khoảng 30 nm, là những tia cực tím không quan sát được, những bước sóng lớn hơn, cho tới 0.3 mm, là các tia hồng ngoại và cũng không quan sát được. Mặc dù bức xạ điện từ thể hiện bản chất sóng bao gồm các hiện tượng giao thoa và nhiễu xạ, tuy nhiên nó cũng có những thuộc tính của hạt với việc phát ra và hấp thụ một lượng năng lượng gọi là Photon - lượng tử ánh sáng. Năng lượng ε của một photon lượng tử ánh sáng có bước sóng được tính bởi:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} \tag{19.74}$$

trong đó h là hằng số Planck (6.6×10^{-34} Js), c là vận tốc ánh sáng (3×10^{8} ms^{-1}) [1]. Định nghĩa cơ bản nhất trong phép đo ánh sáng chính là năng lượng bức xạ, đôi khi còn gọi là quang thông (F), nó chính là năng lượng (số photon) trên một đơn vị thời gian đi qua một vùng xác định trong không gian, đơn vị đo là oát (W) và có thể áp dụng cho cả bức xạ nhìn thấy và không nhìn thấy. Đơn vị đo ánh sáng tương ứng là lumen (lm), có tính đến sự thay đổi độ nhạy của mắt với các bước sóng khác nhau. Một oát của bức xạ ở bước sóng 555 nm quy ước tương ứng với 683 lm. Ở bước sóng khác số lumen sẽ giảm đi (tới một nửa ở các bước sóng 510 và 610 nm) theo đường cong đáp ứng của mắt có dạng hình chuông theo tiêu chuẩn CIE. Các đại lượng khác như độ rọi, cường độ sáng, độ chói được đo theo độ tập trung của luồng ánh sáng. Độ rọi (E) là tổng năng lượng bức xạ rơi trên một đơn vị diện tích bề mặt, có đơn vị là Wm^{-2}. Tổng ánh sáng đo được tương ứng là độ rọi, đơn vị là lm m^{-2} (lux). Cường độ ánh sáng (I) của một nguồn sáng điểm chiếu sáng một bề mặt tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách d từ điểm đó tới bề mặt. Đơn vị là Wsr^{-1} tương đương với cường độ sáng đo bằng Candêla (lm sr^{-1} hay cd). Độ rọi của một nguồn điểm có cường độ sáng I tới một diện tích bề mặt nhỏ A cách nguồn sáng một khoảng cách d và có pháp tuyến nghiêng một góc θ với nguồn sáng (hình 19.100) được tính theo:

$$E = \frac{F}{A} = \frac{I\cos\theta}{d^2} \tag{19.75}$$

Mặc dù thực tế rất ít nguồn sáng có thể coi xấp xỉ là nguồn điểm (không kể đến các ngôi sao trong bầu trời đêm), nhưng người ta thường dùng phương pháp xấp xỉ để tính độ sáng trên một bề mặt bằng cách giả sử nguồn sáng có cường độ lý tưởng. Sai số do bỏ qua phạm vi không gian của nguồn sáng nhỏ hơn 1% nếu khoảng cách tới nguồn sáng lớn hơn 10 lần so với kích thước lớn nhất của nguồn [2]. Khi khoảng cách này gấp năm (ba) lần kích thước nguồn sáng, sai số vào khoảng 4% (9%). Cường độ bức xạ là đại lượng dễ đo nhất của nguồn sáng và thường được trích dẫn như một tham số thuộc tính của nguồn. Một số nguồn sáng phát xạ đều theo mọi hướng và có cường độ độc lập với phương. Một số nguồn khác lại phát xạ không đều. Một nguồn sáng điểm Lambertian là nguồn sáng trong đó cường độ biến thiên theo phương $I_0\cos(\theta)$, trong đó θ là góc giữa phương đo với phương có cường độ mạnh nhất I_0. Rất nhiều nguồn sáng có cường độ theo góc giảm nhanh hơn so với trường hợp nguồn sáng Lambertian, giảm một nửa khi góc lệch là 60°.



HÌNH 19.100 Một nguồn điểm có cường độ sáng I phát ra năng lượng bức xạ F trong một góc khối đối diện với diện tích A. Độ sáng ở khoảng cách d so với nguồn là I/d^2. Khi kích thước của A nhỏ hơn d, góc khối có thể xấp xỉ bằng $A\cos(\theta)/d^2$

Khi một nguồn sáng có phạm vi không gian đáng kể, độ chói (R) theo một phương đã cho được định nghĩa là cường độ ánh sáng chia cho diện tích của nguồn phát ra theo cùng phương đó và được đo bằng (W sr^{-1} m^{-2}). Ngược lại, cường độ của một nguồn sáng được tính bằng tích của diện tích phát sáng và độ chói. Độ chói rất quan trọng khi đề cập đến các hệ thống quang. Cụ thể, độ chói của hình ảnh tạo bởi thấu kính bằng với độ chói của vật thể, trừ trường hợp bị mất mát trong quá trình thu và phản xạ. Thực tế này được dùng để tính độ rọi của ảnh từ độ chói lý thuyết bằng một thấu kính lý thuyết. Độ chói, đôi khi còn được gọi theo một cách không chặt chẽ là độ sáng và được đo bằng cd/m^2. Ngoại trừ màu sắc, độ sáng chỉ đề cập đến thuộc tính ánh sáng mà ta có thể nhận biết hoặc quan sát được. Do đã được tiêu chuẩn hóa theo kích thước, độ chói của các nguồn sáng với kích thước khác nhau có thể được so sánh. Ví dụ, độ chói của mặt trời vào khoảng 1.3×10^6 W sr^{-1} m^{-2}, độ chói của một bóng đèn thủy ngân 1000W vào khoảng 10^7 W sr^{-1} m^{-2} và độ chói của tia laze He–Ne 1-mW với đường kính chùm 1mm và độ phân kỳ 1 mrad là vào khoảng 1.6×10^9 W sr^{-1} m^{-2}. Độ chói của hầu hết các nguồn sáng tăng dần theo phương quan sát tới phương pháp tuyến của nguồn sáng. Nguồn sáng Lambertian mở rộng là một ngoại lệ, cường độ và diện tích được chiếu biến thiên như nhau so với phương quan sát, do đó độ chói độc lập với phương quan sát.

Việc cần thiết là ước lượng đáp ứng của một bộ nhận biết ánh sáng với các nguồn sáng khác nhau. Rất khó để tính toán chính xác vì ở đây như yêu cầu các thông tin không sẵn có, bởi vậy thường thì người ta ước lượng một cách đơn giản sau đó điều chỉnh thiết bị để tạo ra đáp ứng mong muốn. Nếu bề rộng của nguồn sáng đủ nhỏ so với khoảng cách d tới bộ đo thì độ bức xạ được nhận biết bởi bộ đo có thể được ước lượng bằng cách giả sử nguồn sáng là một nguồn điểm Lambertian có cường độ sáng I bằng tích của độ sáng B và diện tích miền S. Độ sáng được nhận biết bởi bộ đo tính theo [2]:

$$E = \frac{I\cos\phi}{d^2} = \frac{BS\cos\theta\cos\phi}{d^2} \tag{19.76}$$

trong đó ϕ và θ lần lượt là các góc giữa pháp tuyến của nguồn với bộ đo tương ứng với đường thẳng nối nguồn và bộ đo. Nếu nguồn sáng là hình tròn, góc khối là S/d^2 có thể xấp xỉ bằng $\pi\alpha^2$, với điều kiện α - đo bằng radian, được tính bằng tỷ số giữa bán kính của nguồn với khoảng cách từ nguồn tới đầu đo là nhỏ. Các đầu dò ánh sáng có một phương đáp ứng với bức xạ, nó có thể là quá rộng hay quá hẹp cho một ứng dụng. Việc mở rộng góc đáp ứng của đầu đo với ánh sáng có thể giảm bằng cách sử dụng ống chuẩn trực. Nếu đầu đo nằm trên tiêu cự của thấu kính, góc mở có thể giảm hay tăng tùy việc sử dụng thấu kính hội tụ hay phân kỳ. Nếu nguồn là nguồn điểm, tất cả ánh sáng hội tụ bởi thấu kính trên đầu đo, do đó làm tăng thêm độ nhạy bằng chính tỉ lệ giữa diện tích thấu kính và đầu đo.

Các nguồn sáng

Việc lựa chọn đầu đo phải xét đến bản chất tự nhiên của nguồn sáng, nguồn sáng có thể là ánh sáng ban ngày, đèn sợi đốt Vonfram, đèn thạch anh halogen, đèn huỳnh quang, điôt quang... Những thuộc tính riêng biệt của các loại nguồn sáng phát sinh một phần bởi cấu trúc và một phần bởi các quá trình vật lý dẫn đến sự phát ra của ánh sáng [3]. Nhiều nguồn sáng là nguồn nhiệt trong tự nhiên, do đó ánh sáng phát ra nhờ nhiệt độ cao. Một vật bị đốt cho tới khi nóng sáng, như dây tóc trong đèn dây tóc vonfram, phát ra một dải quang phổ liên tục của bức xạ điện từ với cường độ phụ thuộc vào nhiệt độ và bề mặt phát xạ của nó. Ở một nhiệt độ xác định, không bề mặt nào bức xạ nhiều hơn vật đen tuyệt đối, vật có độ phát xạ 1.0 ở mọi bước sóng. Khi thiết kế hệ thu nhận ánh sáng điều quan trọng là phải chú ý đến vùng sáng nhìn thấy từ các đèn (cả đèn huỳnh quang) thường kèm một lượng đáng kể bức xạ không nhìn thấy nhưng vẫn được nhận biết bằng các bộ đo thậm chí mắt cũng không phân biệt được. Rất nhiều nguồn sáng hoạt động ở nhiệt độ gần nhiệt độ phòng và do đó không có sự cân bằng về nhiệt. Sự phát quang là thuật ngữ chung dùng để mô tả việc tạo ra ánh sáng ở tốc độ lớn do nhiệt độ của nó.

Một số ví dụ về những nguồn sáng này là các điôt phát quang, bảng kẽm-sunfua phát quang và các chùm điện tử photpho bị kích thích trong màn hình vi tính hay màn hình ti vi. Những thuộc tính chính của các nguồn sáng bao gồm: tổng độ chói hay năng lượng đầu ra; hiệu suất chuyển đổi từ năng lượng điện sang năng lượng bức xạ; dải quang phổ đầu ra; hướng phát xạ; diện tích bề mặt phát xạ; kích thước đèn và nhiệt độ hoạt động. Bảng 19.6 liệt kê các thuộc tính của một số nguồn sáng thông dụng theo các thông số kỹ thuật của nhà sản xuất đèn.

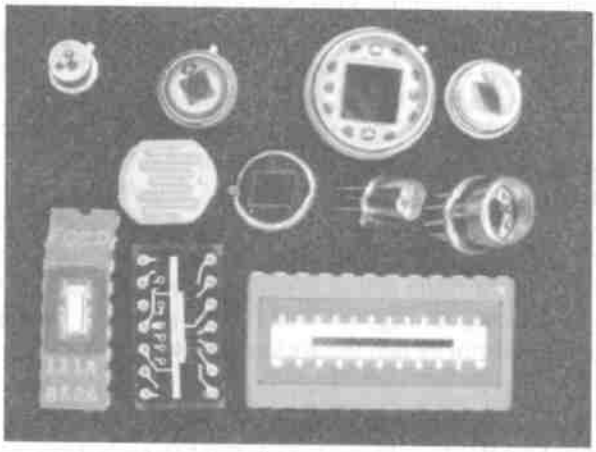
BẢNG 19.6 Các đặc tính của một số dạng nguồn sáng khác nhau

Loại nguồn sáng	Kích thước (đường kính)	Đầu vào điện	Đầu ra quang	Góc nhìn	Kiểu quang phổ
LED vàng cực sáng	10 mm	20 mA,2.1V	14cd	4°	590 nm
LED GaAIAs hồng ngoại	5 mm	0.1A, 1.9V	16mWsr $^{-1}$	80°	880 nm
LED hồng ngoại	5 mm	0.1A, 1.9V	135mWsr $^{-1}$	8°	880 nm
Đèn dây tóc nhỏ	11mm	6V, 0.3A	11 lm	360°	thân đen
Ống huỳnh quang thu nhỏ	300×16 mm	8W	480 lm	360°	Trắng
Ống huỳnh quang chuẩn	1500×26 mm	58W	4800 lm	360°	Trắng
Lưỡng sắc vonfam halogen	51 mm	12V, 20W	3300 cd	12°	3000K
Lưỡng sắc vonfam halogen	51 mm	12V, 20W	460 cd	36°	3000K

Các đầu đo ánh sáng

Các đầu đo ánh sáng sẽ chuyển năng lượng bức xạ mà nó hấp thụ được thành các tham số của thiết bị như điện trở, điện tích bề mặt, dòng điện hay điện áp. Một số đầu đo ánh sáng được giới thiệu trên hình 19.101. Có thể cần thêm các bộ chuẩn hóa tín hiệu để chuyển đổi từ dạng tín hiệu cơ bản của đầu ra của đầu đo thành tín hiệu điện áp phù hợp, ví dụ như việc số hoá bằng cách sử dụng bộ chuyển đổi tương tự - số (ADC). Bộ này có thể được tích hợp bên trong đầu đo hoặc là các thành phần mở rộng bên ngoài. Các đầu đo ánh sáng có thể được chia thành hai loại chính: nhiệt và lượng tử ánh sáng - photon. Trong các đầu đo dạng nhiệt, hiệu ứng nhiệt của bức xạ hấp thụ được tạo ra sự thay đổi của các tham số phụ thuộc nhiệt như điện trở (trong các dụng cụ đo bức xạ) hoặc sức điện động nhiệt điện (trong pin nhiệt điện). Đầu ra của các đầu đo dạng nhiệt này thường tương ứng với năng lượng bức xạ đầu đo hấp thụ được miễn là hiệu suất hấp thụ là như nhau ở mọi bước sóng, đầu ra độc lập với bước sóng. Loại đầu đo dạng nhiệt được sử dụng rộng rãi nhất là đầu đo hoả điện (pyroelectric detector) sẽ được đề cập đến trong mục tiếp theo. Ngược lại với đầu đo dạng nhiệt, các đầu đo dạng photon, phụ thuộc vào sự phát sinh các điện tích tự do do sự hấp thụ các photon riêng lẻ. Các photon này có điện tích, do đó làm thay đổi điện trở thiết bị, như trong trường hợp của quang trở hoặc dòng điện hoặc điện áp đầu ra như trong các điôt quang

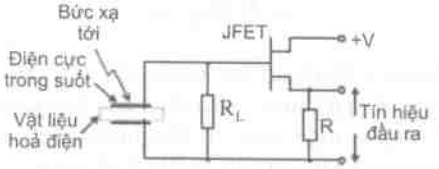
và tranzito. Tất cả các đầu đo dạng photon đều yêu cầu một lượng nhỏ năng lượng photon để tạo ra các điện tử tự do và vì vậy có một bước sóng tối đa, nếu nằm ngoài khoảng đó, chúng sẽ không hoạt động, giá trị này tuỳ theo loại vật liệu của đầu đo. Hay nói cách khác, các đầu đo dạng photon thường đáp ứng nhanh và nhạy hơn với những thay đổi về mức độ phát xạ hơn là các đầu đo dạng nhiệt.



HÌNH 19.101 Một số ví dụ của đầu đo ánh sáng như trên hình. Ở hàng trên cùng từ trái sang phải là bốn điôt quang với diện tích 1, 5, 41.3 và 7.5mm^2. Cuối cùng là bộ lọc màu ánh sáng. Trên hàng giữa từ trái sang phải là quang trở CdS, đầu đo hỏa điện, tranzito quang và điôt quang silic chứa 4 thành phần cảm biến khác nhau. Hàng cuối cùng từ trái sang phải là CCD tuyến tính 256 nguyên tố, mảng CMOS tích hợp chứa 64 nguyên tố và điôt quang silic tuyến tính 16 nguyên tố trong đóng gói 24 chân

Các đầu đo hoả điện

Các đầu đo hoả điện dùng vật liệu là gốm chứa sắt (II), sắt (III) (như chì zirconate hoặc lithium tantalate) vì các phần tử đều có một mômen lưỡng cực điện vĩnh cửu [4]. Khi chưa đến nhiệt độ tới hạn, nhiệt độ Curie, các lưỡng cực một phần được sắp thành hàng và tạo ra hiện tượng phân cực trên toàn bộ tinh thể. Khi vật liệu bị đốt nóng, nhiệt độ của nó tăng lên, làm tăng độ xáo trộn của các phân tử, giảm sự phân cực mạng tới không ở nhiệt độ Curie. Một đầu đo cơ bản, hình 19.102, gồm có một tấm mỏng làm bằng vật liệu sắt từ sao cho sự phân cực trực giao với diện tích bề mặt lớn ở đó các điện cực trong suốt đã được làm khô. Chúng được nối với một điện trở tải (lên tới 10^{11} Ω). Sự tăng độ bức xạ rọi vào đầu đo làm tăng nhiệt độ của nó và là nguyên nhân dẫn tới sự thay đổi điện tích bề mặt tỉ lệ với sự phân cực. Điều này làm sự thay đổi điện tích trên các điện cực và cả dòng điện chạy trong điện trở tải. Do điện trở tải trong các đầu đo hỏa điện có giá trị lớn, một mạch trở kháng phù hợp, như nguồn JFET, thường được dùng trong các đầu đo loại này, xem hình 19.102. Các đầu đo hoả điện chỉ đáp ứng với những thay đổi độ sáng và đặc biệt có thể nhận biết được năng lượng bức xạ đến 10^{-8} W ở 1 Hz. Do đầu đo này phản ứng với nhiệt sinh ra do hấp thụ bức xạ, chúng đáp ứng được với một dải quang phổ rộng. Các đầu đo dạng này thích hợp cho các ứng dụng làm các đầu đo hồng ngoại giá rẻ, các hệ thống báo động, hệ thống báo cháy.



HÌNH 19.102 Các thành phần cơ bản trong đầu đo hỏa điện. Sự tăng góc chiếu vào trên vật liệu hỏa điện làm cho nhiệt độ của nó tăng lên và trở trên bề mặt vật liệu cũng thay đổi. Dòng điện nhỏ chảy qua điện trở R_L có giá trị khoảng 10^{11} Ω. JFET giảm trở kháng đầu ra đến R

Các đầu đo Photon (Photon detector)

Thông thường các đầu đo photon được làm từ vật liệu bán dẫn. Trong chất bán dẫn, các điện tử điền đầy mức năng lượng có thể trong vật liệu tới đỉnh trong vùng hóa trị. Vùng hóa trị được ngăn cách với đỉnh vùng dẫn bằng một vùng cấm (E_g), là một đặc tính của vật liệu. Những vùng năng lượng này hoặc là hoàn toàn đầy hay hoàn toàn rỗng ở nhiệt độ 0 tuyệt đối (0 K). Ở nhiệt độ cao hơn, có sự cân bằng giữa các điện tử được kích thích nhiệt vượt qua qua vùng cấm (tạo ra các điện tử tự do trong vùng dẫn, các lỗ trống tự do mang điện tích dương trong vùng hóa trị) và sự kết hợp từng cặp các điện tử tự do và lỗ trống. Số lượng điện tử tự do và lỗ trống tăng nhanh cùng nhiệt độ (T) theo hệ số Boltzmann: $\exp(-E_g/kT)$, với k là hằng số Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K). Hiện tượng mất cân bằng xảy ra nếu các photon có mức năng lượng cao hơn E_g bị hút bởi các điện tử đã được kích thích vượt qua vùng cấm. Khi nguồn bức xạ mất đi, số điện tử và lỗ trống dư thừa sẽ nhanh chóng giảm về không, thời gian tái hợp này tùy thuộc vào từng loại vật liệu. Khi xuất hiện các điện tích tự do dư thừa, có sự thay đổi đáng kể tính dẫn điện và tính chất này thường dùng trong các đầu đo dạng quang trở (hay còn gọi là quang dẫn). Tương tự, trong các bộ đo tiếp xúc, tốc độ tạo ra quang điện tích được chuyển thành đầu ra là dòng điện hay điện áp. Tất cả các đầu đo photon bán dẫn có dải quang phổ tương đối hẹp, với đỉnh ở bước sóng vào khoảng hc/E_g. Đầu đo quang trở và tiếp xúc sẽ được nghiên cứu kỹ hơn trong các mục dưới đây.

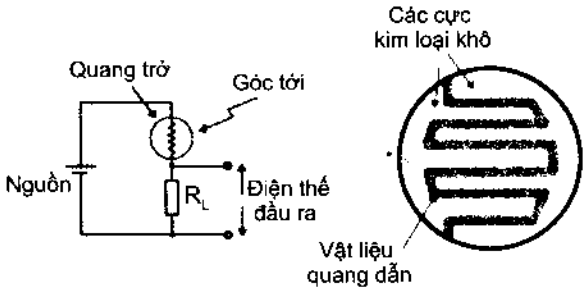
Quang trở

Độ dẫn điện của chất bán dẫn được bằng tổng của 2 thành phần đó là điện tử và lỗ trống [5], cụ thể:

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p \tag{19.77}$$

Trong đó: $n(p)$ là số điện tử (lỗ trống) trên một đơn vị thể tích trong vùng dẫn (vùng hóa trị; μn (μp): Độ linh động của điện tử (lỗ trống); e: giá trị điện tích của điện tử.

Nguyên lý hoạt động của các đầu đo quang trở là khi tăng độ hấp thụ các photon ánh sáng sẽ làm tăng số n và p dẫn tới tăng tính dẫn điện. Đầu đo gồm một tấm bán dẫn đặt trên bề mặt các điện cực cho phép điều chỉnh điện trở như minh họa trong hình 19.103.



HÌNH 19.103 Mạch đo của một bộ nhận biết ánh sáng đơn giản sử dụng quang trở. Khi độ rọi ánh sáng tăng điện trở của quang trở giảm, điện áp đầu ra tăng. Mẫu điện cực hình răng lược thường được dùng trong các quang trở do có diện tích vật liệu quang dẫn tương đối lớn và khoảng cách giữa các điện cực nhỏ, kết quả sẽ có độ nhạy cao

Dòng điện cảm ứng - photon tỉ lệ thuận với chiều dài của các điện cực và tỉ lệ nghịch với khoảng cách giữa chúng, vì vậy thông thường các điện cực của quang trở thường làm theo hình răng lược như trên hình 19.73. Bởi vì điện trở R_C tỉ lệ nghịch với độ dẫn điện, sự biến thiên của R_C gắn liền với công suất P_D theo quan hệ tuyến tính, mô tả dưới dạng:

$$\log_{10} R_C = a - b \log P_D \tag{19.78}$$

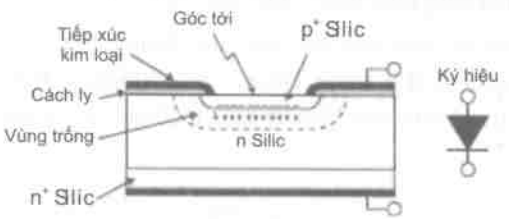
trong đó: a, b là các hằng số.

Sunfua cađimi thường được sử dụng trong các bộ nhận biết các bức xạ nhìn thấy do giá thành thấp và khả năng đáp ứng của nó tương đương với khả năng của mắt người. Các vật liệu quang dẫn khác bao gồm sunfua chì với khoảng 1000 đến 3400 nm, Inđi (indium antimonide) trên 7000 nm, Telurit cađimi thủy ngân có độ nhạy tối đa trong dải 5000 - 14.000 nm. Dải sóng từ 5000-14.000 nm rất quan trọng vì nó là các bức xạ chính phát ra bởi các vật thể có nhiệt độ bằng hoặc cao hơn nhiệt độ môi trường xung quanh, đồng thời dải sóng này cũng là vùng truyền tốt trong môi trường không khí. Các thiết bị quang dẫn khi sử dụng để dò các bước sóng dài (hồng ngoại) phải thường xuyên được làm mát, nếu không sẽ bị nhiễu do sự dao động nhiệt của điện tích. Có thể xấp xỉ thô theo hệ số Boltzmann, một đầu đo với khoảng năng lượng của vùng cấm E_g thì cần làm mát tới nhiệt độ nhỏ hơn $E_g/25k$.

Đầu đo tiếp xúc

Trong quang trở, tốc độ sinh ra các cặp điện tử-lỗ trống phụ thuộc việc hấp thụ bức xạ, sự kết hợp và tái hợp phụ thuộc đặc tính của thiết bị; độ dẫn điện phụ thuộc vào số lượng các điện tích tự do. Tuy nhiên trong đầu đo tiếp xúc [6], quá trình tạo ra các cặp điện tử-lỗ trống xảy ra độc lập và trước quá trình tái hợp để có thể phát hiện được dòng điện cảm ứng, như trong các điôt quang hoặc tranzito quang.

Việc chia các điện tử và lỗ trống trong điện trường kết hợp với lớp tiếp giáp P-N tạo ra vật liệu bán dẫn, thường là silic. Cấu trúc của một điôt quang silic điển hình thể hiện trong hình 19.104. Vật liệu nền là silic loại n, được tạo ra bằng cách trộn một lượng nhỏ chất nhóm V vào silic nguyên chất nhóm IV. Sự kết hợp các điện tử tự do trong vùng dẫn của silic sẽ loại bỏ các iôn nguyên tử mang điện tích dương. Một lớp bán dẫn silic dạng p được hình thành trên bề mặt vật liệu nền do bổ sung một số nguyên tố nhóm III, ví dụ sự khuếch tán hoặc ion hoá. Các nguyên tử nhóm III kết hợp với các lỗ trống tự do trong vùng hoá trị loại bỏ các ion điện tích âm. Lớp tiếp giáp P-N là vùng ranh giới giữa vùng p và vùng n, ở đó lượng các ion trái dấu là bằng nhau. Các điện tử và lỗ trống tự do sẽ di chuyển từ vùng mà nó chiếm đa số sang vùng nó chiếm thiểu số qua lớp tiếp giáp. Khi các điện tử di chuyển như vậy nó làm cho bán dẫn N mất điện tử và tích điện dương, ngược lại bán dẫn P tích điện âm. Vùng trống điện tích không chứa các điện tích tự do. Sự di chuyển của các điện tử tự do tiếp tục cho tới khi lực khuếch tán cân bằng với lực điện trường nội tại trong vùng trống điện tích. Khi trạng thái cân bằng thiết lập, điện áp của điện trường này vào khoảng 0.6 V (đối với vật liệu Silic). Người ta gọi đây là điện trường nội tại hay hàng rào điện thế. Với các điôt quang trong hình 19.104, vùng điện tích này mở rộng về phía n nhiều hơn là phía p do chứa nhiều tạp chất khác nhau. Vùng bán dẫn p được thiết kế rất mỏng, do đó các bức xạ có thể đi qua nó và các tiếp xúc kim loại được làm bằng các vật liệu dạng n hoặc p.



HÌNH 19.104 Đây là cấu trúc cơ bản của một điôt quang silic điển hình. Một vùng trống điện tích tạo ra do sự khuếch tán các điện tích tự do qua bề mặt silic giữa lớp p và lớp n. Nó mở rộng tối đa về phía silic dạng n vì lớp này có ít tạp chất hơn dạng p. Bất kỳ cặp điện tử-lỗ trống nào sinh ra trong vùng này đều bị ngăn tái hợp với nhau do sự tồn tại của một điện trường, do đó chúng góp phần với các photon hình thành nên dòng điện. Vùng bán dẫn loại p được làm mỏng để các photon có thể xuyên qua đó sang vùng rỗng

Khi chiếu ánh sáng có bước sóng nhỏ hơn (hc/E_g) sẽ xuất hiện thêm các cặp điện tử-lỗ trống trong vùng trống điện tích, chúng được tách rời ngay dưới tác dụng của điện trường và có thể được nhận biết theo hai cách. Nếu điôt quang hở mạch bên trái, điện áp V_p trên điôt là hàm lôga của độ sáng P_D:

$$V_p = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{\eta P_D A e \lambda}{hci_0}\right) \tag{19.79}$$

trong đó:

η: hiệu suất hấp thụ photon,

A: diện tích hấp thụ của điôt quang,

i_0: dòng (dark current)sinh ra do nhiệt.

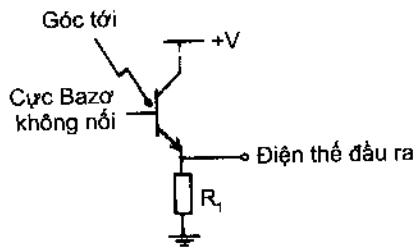
Đây là chế độ quang điện. Nếu đi-ốt phân cực ngược, dòng quang dẫn i_p được tính theo công thức dưới đây:

$$i_p = \frac{\eta P_D A e \lambda}{hc} \tag{19.80}$$

Ở chế độ quang dẫn, dòng điện qua điôt quang quang biến thiên tuyến tính với độ mạnh của ánh sáng. Dòng điện i_0 biến thiên nhanh theo nhiệt độ và giới hạn độ nhạy của thiết bị. Tuy nhiên, chế độ quang dẫn thường có sự đáp ứng nhanh hơn, ổn định hơn và có khoảng làm việc rộng hơn chế độ quang điện nói trên. Độ đáp ứng K_D của một bộ đo được xác định theo $i_p = K_D P_D$, nhỏ hơn *1* AW^{-1} trong điôt silic. Trong trường hợp lý tưởng, K_D biến thiên tuyến tính theo bước sóng theo phương trình 19.80 tới giá trị ngưỡng, xác định bởi khoảng năng lượng vùng cấm. Các điôt quang có nhiều thuộc tính khác nhau như: độ nhạy (diện tích hấp thụ ánh sáng), tốc độ đáp ứng, dải quang phổ hoạt động, góc tới hạn (hướng rọi sáng). Ngoài ra điôt quang có thể sự dụng đơn chiếc hay đa chiếc (mảng vuông, hay đường) đồng bộ trong một nhóm.

Trong nhiều ứng dụng, tín hiệu đầu ra của các điôt quang cần được khuếch đại. Có thể dùng một bộ khuếch đại riêng biệt hay một bộ khuếch đại ngay trong tranzito quang. Nếu thiết kế để bức xạ có thể rơi vào vùng gốc (base region) của tranzito thì sau đó dòng này được chính tranzito khuếch đại. Thông thường không cần thêm các kết nối ngoại vi tới cực gốc việc khuếch đại dòng quang điện được thực hiện bởi một mạch đơn giản như hình 19.105. Thông thường một tranzito quang có độ nhạy gấp hàng trăm lần điôt quang cùng loại tuy nhiên tần số đáp ứng lại khá thấp. Trong các cảm biến trạng thái (hết băng, nhận dạng đồng xu, cảm biến định mức) thường sử dụng các tranzito quang tích hợp với các đèn LED với quang phổ phù hợp. Ta có thể tham khảo đặc tính của một số bộ nhận biết ánh sáng tiêu biểu trong bảng 19.7.

Bằng việc sắp xếp nhiều bộ nhận biết ánh sáng nhỏ thành một mảng ta có thể đo cường độ sáng bao trùm một vùng. Đây chính là ý tưởng của các máy video và máy chụp ảnh. Vấn đề này sẽ được nghiên cứu kỹ hơn trong mục các bộ cảm biến hình ảnh, tuy nhiên tốt hơn hết là ta xem xét cách tạo ảnh của các đầu đo.



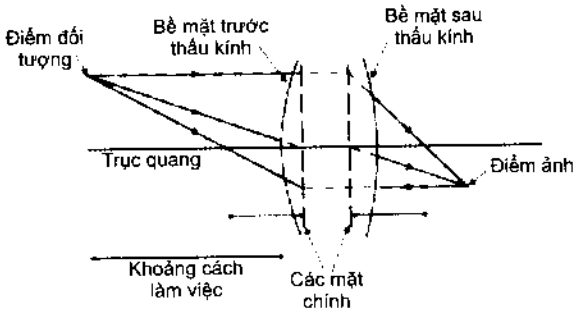
HÌNH 19.105 Một tranzito quang đơn giản. Dòng quang dẫn theo chiều cực gốc-cực phát có thể được khuếch đại hàng trăm lần bởi tranzito. Dòng điện của tranzito quang lớn hơn nhiều so với điôt cùng loạivà thời gian đáp ứng cũng lớn hơn

BẢNG 19.7 Các đặc tính của một số bộ nhận biết ánh sáng

Loại	Vùng hoạt động	Đáp ứng	Đáp ứng phổ	Dòng tối	Thời gian đáp ứng	Góc chấp nhận
Điôt quang Silic miền trung gian	41.3 mm^2	0.5 A W^{-1}	Tối đa 800 nm, dải 350-1100 nm	4 nA	25 ns	NA
Điôt quang silic tốc độ siêu âm	0.5mm^2	0.35 A W^{-1}	Tối đa 800 nm, dải 400-1000 nm	10 nA	1 ns	NA
Điôt quang silic	7.5 mm^2	7 nA lux^{-1}	Tối đa 560 nm, dải 460-750 nm	2 nA	3.5 μS	100°
Màng 16 điôt quang trên bước 1mm	Mỗi điôt 0.66 mm^2	0.6 A W^{-1}	Tối đa 900 nm, dải 400-1100 nm	0.1 nA	4 ns	NA
Tranzito quang silic	0.7 mm^2	9 μA lux^{-1}	Tối đa 880 nm, dải 450-1100 nm	0.3 μA	15 μS	30°
Tranzito quang silic	0.7 mm^2	2 μA lux^{-1}	Tối đa 880 nm, dải 450-1100 nm	0.3 μA	15 μS	80°
Chất dẫn quang CdS	đường kính 6.3 mm	9 $k\Omega$ tại 10 lux, 400 Ω tại 1000 lux	Tối đa 530 nm	NA	100ms	NA

Sự tạo ảnh

Mặc dù, các ảnh được hình thành qua các lỗ nhỏ, các thấu kính là bộ phận cần thiết đối với độ sáng của ảnh. Việc sử dụng thấu kính rất đa dạng, từ các thấu kính đơn thành phần đơn giản dùng để tăng lượng ảnh sáng thu được trong các đầu đo hay camêra giá rẻ tới các ống kính máy ảnh phức tạp có khả năng phóng to thu nhỏ đối tượng thu hình, với cấu hình bao gồm từ 14 đến 20 thành phần, có khả năng thu nhận những hình ảnh chất lượng cao ở nhiều kích thước khác nhau. Hai thông số quan trọng nhất của thấu kính là tiêu cự f - để xác định vị trí ảnh và hệ số hiệu dụng của thấu kính số f ($f_\#$) đặc trưng cho tốc độ hay lượng ánh sáng thu nhận được. Trục quang học của thấu kính là trục đi qua trục tâm thấu kính, nơi mà tia sáng đi qua không bị lệch hướng. Một thấu kính xác định thuộc tính bằng sáu điểm chính, ([2] nằm dọc trên trục quang học– như thấu kính hội tụ trên hình 19.106. Vị trí và độ phóng đại của ảnh của một đối tượng có thể xác định nhờ các điểm chính này, hai điểm tiêu cự, hai điểm nút, hai điểm cơ sở. Khi một tia sáng đi vào thấu kính qua điểm nút thứ nhất thì tia sáng ra khỏi thấu kính ở điểm nút thứ hai theo phương song song và cùng hướng với tia sáng đi vào thấu kính. Một tia sáng song song và đi gần trục quang học khi đi qua thấu kính sẽ hội tụ (thấu kính hội tụ) hay phân kỳ (thấu kính phân kỳ) và cắt trục quang ở tiêu cự của thấu kính. Giao điểm giữa tia sáng đi vào và thoát ra khỏi thấu kính là điểm nằm trên mặt cơ sở. Giao điểm giữa mặt cơ sở với trục quang học là điểm cơ sở. Như vậy sẽ có hai điểm nút, hai tiêu cự và hai mặt cơ sở bởi vì ánh sáng có thể đến thấu kính từ các phía khác nhau. Tiêu cự trước và sau của thấu kính là khoảng cách giữa điểm tiêu cự trước và sau tới các mặt cơ sở tương ứng. Trong điều kiện bình thường, khi thấu kính hoạt động trong môi trường đơn chất, ví dụ không khí, vị trí của các điểm nút và điểm cơ sở ở mặt trước và sau của thấu kính sẽ trùng nhau. Trong trường hợp tổng quát, khi thấu kính không đối xứng, tiêu cự trước và sau của thấu kính là khác nhau. Ở thấu kính mỏng lý tưởng thì các mặt cơ sở sẽ trùng khít với nhau và với tâm thấu kính, nhưng trong hệ đa thấu kính, chúng có thể cách nhau từ +20 đến -10 mm, tuỳ thuộc vào việc thiết kế thấu kính. Tiêu cự của thấu kính f được tính từ khoảng cách tới ảnh u và khoảng cách tới vật v theo công thức:



HÌNH 19.106 Đây là sơ đồ mô tả nguyên lý hoạt động của một thấu kính trong môi trường đơn (thường là không khí). Các điểm cơ sở (principal points) và điểm nút (nodal points) trùng nhau ở N_1 và N_2, chiều dài của các tiêu cự trước và sau đều bằng (f). Các tia sáng từ đối tượng quét qua thấu kính tạo ra các điểm ảnh tương ứng. Với trường hợp hệ số phóng đại bằng 0.5, ảnh được tạo sẽ nằm sau tiêu cự F_2. Với các đối tượng xa, mặt phẳng ảnh trùng với mặt phẳng vuông góc với trục quang học đi qua F_2. Thông thường các thấu kính hoạt động chính xác với một khoảng quang sai khi giả thiết rằng khoảng cách từ thấu kính tới vật lớn hơn khoảng cách tới ảnh. Trong những trường hợp chụp ảnh cận cảnh, tức là khoảng cách từ thấu kính tới ảnh lớn hơn tới vật, người ta đảo ngược thấu kính để tăng chất lượng ảnh

$$\frac{1}{u}+\frac{1}{v}=\frac{1}{f} \tag{19.81}$$

Các khoảng cách đều được đo tới mặt cơ sở. Hệ số phóng đại m, định nghĩa là tỷ lệ giữa kích thước ảnh và vật, bằng với tỉ lệ giữa khoảng cách ảnh vật và liên quan đến tổng khoảng cách ảnh-vật D_T theo công thức:

$$D_T=\frac{f(m+1)^2}{m}+D_N \tag{19.82}$$

Trong đó D_N là khoảng cách giữa hai mặt cơ sở. Thông thường thấu kính có khoảng tập trung từ 5-10% chiều dài tiêu cự, có hệ số phóng đại tối đa từ 0.05 đến 0.1. Kích thước mở rộng yêu cầu với thấu kính hội tụ ở vô cùng, chính là tích số giữa hệ số phóng đại và chiều dài tiêu cự bởi vì khoảng cách tới ảnh là $f(m+1)$. Độ rộng hiệu chỉnh (depth of field hoặc depth of view) F_0 là khoảng giữa điểm gần và xa đối tượng nhất mà trong khoảng đó ảnh rõ nét nhất. Khoảng này phụ thuộc vào hệ số $f_\#$ của thấu kính, hệ số phóng đại và độ mờ chấp nhận được C trong mặt phẳng ảnh [7]. Kích thước điểm ảnh phụ thuộc vào cảm biến ảnh và với phim 35 mm thì C thường có giá trị vào khoảng từ 0.02 đến 0.033 mm, còn với ảnh của mảng cảm biến, C là khoảng cách giữa các phần tử của đầu đo, thường vào khoảng 0.01 mm. Độ rộng hiệu chỉnh giảm khi hệ số phóng đại tăng, với m lớn hơn 0.1 thì F_0 được tính theo công thức:

$$F_0=2f_\#\frac{C(m+1)}{m^2} \tag{19.83}$$

F_i là khoảng dọc trục mà mọi điểm trong đó đều có thể thu được ảnh nét. Khoảng đặt cảm biến là rất giới hạn khi cả số f và hệ số phóng đại đều nhỏ. Khi m nhỏ, F_i giảm xuống $2Cf_\#v/f$ và bằng m^2F_o. Khi m lớn, F_i sẽ ít bị giới hạn hơn.

Cần thiết kết hợp ánh sáng của vật với độ chói của ảnh trên cảm biến. Các tính toán chính xác là khó khăn, Người ta thường đưa ra các xấp xỉ đơn giản và sau đó đưa ra các hiệu chỉnh ánh sáng và độ mở ống kính. Một vật được chụp trong một cảnh không phải là nguồn sáng nhưng vẫn nhìn thấy do vật đó phản chiếu lại ánh sáng. Do đó, độ sáng của vật phải được ước lượng bằng lượng bức xạ rơi trên nó và hệ số phản xạ R_o của bề mặt vật. Ví dụ, nếu vật đó có bề mặt Lambertian, độ rọi L_o thì độ sáng được tính bởi:

$$B=L_o\frac{R_o}{\pi} \tag{19.84}$$

Khi một thấu kính sử dụng để thu ảnh, độ rọi trên trục quang tới mặt thu ảnh là L_S (luxơ) được tính theo độ sáng B (cd m^{-2}) theo công thức:

$$L_s = \frac{TB\pi}{[2f_{\#}(m+1)]^2} \tag{19.85}$$

trong đó, $f_{\#}$ là tỷ lệ giữa chiều dài tiêu cự và đường kính độ mở của thấu kính, tổn hao trên các thấu kính là hệ số truyền T. Do một số nhân tố hình học, độ rọi của ảnh giảm theo góc θ so với trục quang học với giá trị khoảng $\cos^4\theta$. Khi gần trục, độ sáng biến thiên khá chậm nhưng với ở góc 30^0 lượng sáng giảm đi là 44%. Công thức (19.85) là cơ sở để tính tốc độ đóng mở của thấu kính dựa trên $f_{\#}$ của chúng và cũng cho thấy độ rọi tỉ lệ nghịch với số f. Công thức trên đúng khi hệ số phóng đại nhỏ, nhưng với những công việc cận cảnh, khi mà khoảng cách ảnh lớn hơn chiều dài tiêu cự, $f_{\#}$ cần được thay bằng $(m+1)f_{\#}$ khi tính toán độ rọi. Thấu kính được thiết kế sao cho phù hợp với các kích thước ảnh chuẩn như 36 mm × 24 mm trong ảnh 35 mm hay kích thước cảm biến tỉ vi 1″, 2/3″, 1/2″, 1/3″ và 1/4″. Các kích thước được định nghĩa bằng hai lần chiều ngang của ảnh hình chữ nhật có tỷ lệ 4:3. Ví dụ như cảm biến 1″ sẽ có chiều rộng 12.7 mm, chiều cao 9.5 mm và đường chéo là 15.9 mm. Kích thước thấu kính gần như kích thước danh nghĩa để dễ dàng tương thích với các cảm biến. Góc lớn nhất của độ sâu trường của một thấu kính hội tụ ở vô cùng là:

$$F_{ov} = 2\tan^{-1}(\frac{C_F}{2f}) \tag{19.86}$$

trong đó, C_F là đường chéo của cảm biến. Ví dụ như trong thấu kính 35 mm với chiều tiêu cự là 55 mm sẽ có trường quan sát là 43°. Việc méo và nhọn hướng về phía cạnh của độ sâu trường là chấp nhận được nên ta có thể sử dụng thấu kính 2/3″ với cảm biến 1/2″, nhưng không có điều ngược lại. Một thấu kính camêra 35-mm, với chi phí tương đối thấp thông thường được dùng nhiều hơn các thấu kính C-mount tương đương dùng cho các camêra TV, do cần một chuyển đổi C-mount sang các Pentax, Cannon hoặc Nikon mount.

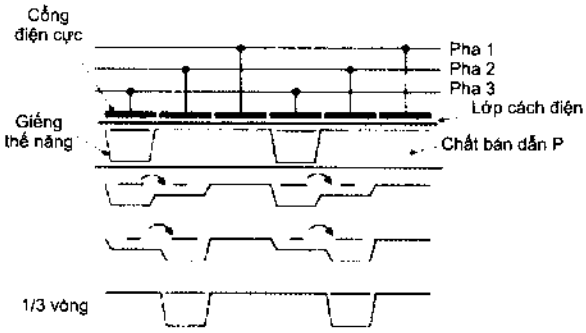
Cảm biến hình ảnh

Việc tạo ra các tín hiệu đầu ra từ một cảm biến hình ảnh tiêu chuẩn bao gồm bốn quá trình sau: Sự quy đổi tương ứng từ phân bố không gian của độ sáng trên mặt phẳng ảnh về sự phân bố không gian điện tích tương ứng; thu thập và lưu trữ lại thông số điện tích gần với điểm mà thông số này được tạo ra; truyền hoặc đọc số liệu về điện tích này; chuyển đổi sang tín hiệu điện áp đầu ra. Mỗi quá trình này đều có thể thực hiện theo nhiều cách. Ví dụ như trong cảm biến đèn chân không, người ta dùng vật liệu đầu đo quang dẫn và quét chùm điện tử để đọc dữ liệu. Trong khi đó, cảm biến CMOS sử dụng đầu đo điôt quang và bus đọc dữ liệu. Các thiết bị bán dẫn được sử dụng rất rộng rãi, tuy nhiên ở đây ta chỉ chú ý đến hai loại đó là CCD và CMOS. Trong các thiết bị này độ sáng của ảnh được đo bởi mảng một hay hai chiều của các vùng lấy mẫu với các vị trí cố định trong quá trình chế tạo. Mỗi mẫu là một phần tử ảnh hay còn gọi là điểm ảnh và càng có nhiều điểm ảnh thì ảnh độ phân giải càng cao được ghi lại. Các cảm biến có số điểm ảnh trong dải từ mười nghìn đến hàng triệu điểm ảnh. Các cảm biến màu sẽ có các bộ lọc màu, kiểu khảm hay sọc, ở từng đầu đo, giá trị màu ở một điểm ảnh được nội suy từ các giá trị lân cận. Trong các thiết bị màu, độ phân giải màu nhỏ hơn độ phân giải sáng, tuy vậy điều này không quan trọng vì chính ở mắt người độ phân giải màu cũng kém hơn so với độ sáng. Trong các camêra đắt tiền sử dụng ba cảm biến được sắp thẳng hàng, mỗi cảm biến sẽ dành riêng cho một màu gốc. Các camêra tích hợp với các cảm biến này thường tạo ra tín hiệu tỉ vi theo các chuẩn khác nhau [8] (RS-170, NTSC cho tivi 525 của Mỹ, CCIR hay PAL cho các tivi chuẩn Châu Âu) hay tín hiệu số ra máy tính (RS 423, USB, IEE 1394, FireWire).

Linh kiện ghép nối điện tích CCD (Charge-Coupled Devices)

Trong linh kiện CCD, một lượng điện tích biệt lập, khoảng 10 đến 10^6 điện tử, chuyển động qua vật liệu bán dẫn, từ vị trí bên trong một ô CCD tới ô liền kề bằng cách cấp một chuỗi xung

điện áp tới các điện cực cổng. Trong các cảm biến ánh sáng dạng CCD, photon tạo ra lượng điện tích tích tụ trong các điểm ảnh, các điểm ảnh này sẽ được thay đổi bởi các tế bào CCD và sau đó được chuyển qua các tế bào CCD khác tới tế bào có gắn bộ khuếch đại đầu ra. Một CCD được chế tạo trên một băng niêm phong tinh thể đơn silic dạng P và bao gồm mảng tế bào một hoặc hai chiều chứa điện tích khoảng 10 μm tính từ tâm. Hoạt động của tế bào CCD ba pha được minh họa trong hình 19.107.



HÌNH 19.107 Minh họa sự di chuyển của các điện tích từ một giếng thế năng tới giếng tiếp theo trong CCD ba pha. Mỗi tế bào CCD có ba điện cực G. Trong sơ đồ thế năng ở trên, một giếng được tạo thành dưới điện cực thứ nhất trong mỗi tế bào CCD nhờ điện áp cấp cho pha 1. Khi điện áp ở pha 1 giảm và điện áp ở pha 2 tăng, các giếng thế năng cũ sẽ bị hủy bỏ và các giếng mới được tạo ra dưới cổng thứ hai trong mỗi tế bào khiến cho các điện tích trong giếng chuyển động về một phía như trên hình vẽ. Để hoàn thành một chuyển động của điện tích tới giếng đầu tiên của tế bào CCD kế tiếp ta cần thêm hai vòng như trên

Mỗi tế bào có ba cổng G gần nhau ở trên được cách ly với silic bằng một lớp mỏng oxit silic (S_iO_2). Một điện thế dương được đưa vào một trong các cổng này sẽ hút và giữ lại tất cả các điện tích tự do tạo ra trong silic do tác động của nhiệt và ánh sáng trong khi các lỗ trống tự do được đẩy và tập hợp lại nhờ các điện cực chất nền. Các điện thế thấp hơn ở các cổng lân cận sẽ cách ly chúng với các tế bào xung quanh, tạo ra một giếng thế năng trong tế bào. Một tế bào có kích thước 8μm × 8μm có thể chứa 200.000 điện tử trước khi bão hòa. Các tế bào được chế tạo có độ nhạy ánh sáng có các điện cực làm từ chất tổng hợp silic nửa trong suốt nên ánh sáng có thể đi vào các vùng lưu giữ trong khi các tế bào chỉ với nhiệm vụ di chuyển các điện tích được bao phủ bởi lớp bề mặt chắn sáng. Trong quá trình hoạt động, điện thế ở các điện cực được giữ không đổi trong một khoảng thời gian (thời gian tích phân) cho phép các hạt tích điện tích tụ trong các điểm ảnh tỉ lệ với bức xạ trong. Tại thời điểm cuối của khoảng thời gian này một chuỗi xung điện áp được đưa vào các điện cực để chuyển các điện tích từ một tế bào lưu giữ đến tế bào tiếp theo cho đến khi chúng đến được bộ khuếch đại cảm biến tạo ra một điện thế khoảng 0.6 μV trên mỗi điện tử. Hiệu suất di chuyển điện tích (CTE) của một thiết bị thực là dưới 100% và từ 99.95% đến 99.999% điện tích lưu trữ được chuyển đến tế bào tiếp theo tùy thuộc vào kết cấu chính xác và tần số đo. Điều này cho phép các thiết bị được sản xuất ra với một dây chuyền gồm hàng trăm hoặc hàng ngàn các tế bào tích trữ cung cấp cho một bộ khuếch đại.

Mặc dù có rất nhiều loại cấu trúc CCD, các đặc tính cơ bản các CCD của các hãng sản xuất khác nhau là tương tự nhau. Ở các cảm biến ánh sáng CCD, sự biến thiên của điện áp đầu ra với bức xạ là tuyến tính, từ mức tối thiểu đặt bởi nhiễu tới mức tối đa sử dụng được đặt bởi sự bão hoà của khuếch đại đầu ra hoặc do dung tích hạn chế của các tế bào tích điện. Phạm vi động của một thiết bị được định nghĩa là tỉ lệ của tín hiệu đầu ra lớn nhất so với đầu ra từ nhiễu. Các nhà sản xuất có thể đưa ra các số liệu về nhiễu dưới dạng các giá trị toàn phần hoặc giá trị toàn phương (thường là nhỏ hơn 5 lần), tuy nhiên giá trị toàn phần phù hợp hơn cho các ứng dụng về hình ảnh. Do các hạn chế về sản xuất, các điểm ảnh không có được độ nhạy và các đặc tính tín hiệu tối đồng đều. Ví dụ như chúng ta có thể dễ dàng đo tính không đồng đều của phản ứng quang (PRNU) bằng cách sử dụng các cảm biến quang cùng dạng và độ không đồng đều này thường vào khoảng 5-

10%. Nếu cần, các ảnh hưởng này có thể loại bỏ bằng cách kiểm tra kích cỡ. Phản ứng quang phổ cơ bản của một cảm biến silic có phạm vi từ 200 đến 1100 nm với độ nhạy tối đa vào khoảng 1 μA điện tích được tạo thành trên mỗi microwatt của bức xạ tới, tuy nhiên điều này có thể thay đổi do cấu trúc của điện tử tạo thành trên bề mặt của silicon. Các photon có bước sóng dài hơn sẽ thâm nhập sâu hơn các photon có bước sóng ngắn hơn và phản ứng bước sóng ngắn thường đạt đến 450nm nhờ việc hấp thụ trên bề mặt các lớp. Các photon hồng ngoại có thể phát ra các điện tử từ một khoảng cách tính từ điểm vào silic và kết quả là điện tích có thể được tích tụ bởi một tế bào khác. Điều này làm giảm độ phân giải của thiết bị và đôi khi dù không cần đến hoạt động hồng ngoại nhưng trong bức xạ đã bao gồm tia hồng ngoại (như bóng đèn Vônfam), do vậy người ta thường dùng một bộ lọc phản chiếu hồng ngoại (bộ lọc hot-mirror). Nếu yêu cầu phản ứng quang phổ rộng nhất có thể, các thiết bị có chất nền được mài mỏng và vận hành với việc chiếu sáng trên bề mặt sau nơi có nhiều điện cực. Các thiết bị được chiếu sáng mặt sau rất dễ vỡ và tốn kém, tuy nhiên chúng được dùng trong các ứng dụng ánh sáng yếu như thiên văn học và sinh học.

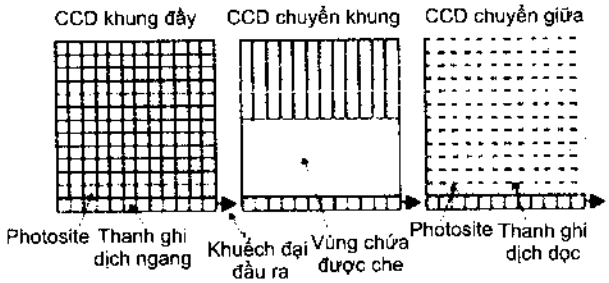
Tất cả các tế bào CCD tích tụ điện tích tuyến tính theo thời gian do các điện tử phát nhiệt trong các tế bào và tại các bề mặt chung điện cực. Giống như phản ứng quang, tín hiệu tối thay đổi khác nhau với các tế bào khác nhau và có thể được bù bằng việc xác định kích thước. Việc góp phần tạo nhiệt là quan trọng nhất đối với các ứng dụng ánh sáng ở mức độ thấp và có thể giảm bớt bằng cách làm mát cảm biến sử dụng máy làm lạnh điện nhiệt (máy làm lạnh Joule Thomson) hoặc nitơ lỏng. Ở khoảng -60°C, tín hiệu tối sẽ giảm 50% mỗi khi giảm nhiệt độ 7°C, do một thiết bị làm lạnh Peltier tạo ra, tín hiệu tối thường được giảm còn một điện tử trên một pixel mỗi giây. Một nhiệt độ quan trọng khác phụ thuộc vào đặc điểm của cảm biến CCD, được tăng theo độ làm mát, là sàn nhiễu của máy khuếch đại đầu ra tỉ lệ thuận với $T^{1/2}$ và thường tương đương với khoảng 300 điện tử ở nhiệt độ phòng. Một CCD sử dụng trong thiên văn học minh họa cho tác dụng của việc làm mát. Hoạt động dưới -110°C, thiết bị này có số liệu nhiễu đọc ra là 10 điện tử, một dòng điện thấp hơn 0.3 điện tử mỗi phút và hiệu suất lượng tử để chuyển các photon nhìn thấy được vào trong các hạt điện tử là từ 70 đến 80%. Ánh sáng có thể được hội tụ trong vài giờ so với thời gian khoảng từ 1/8 đến 1/4 giây của mắt tương thích. So sánh với các fim chụp ảnh trước kia sử dụng cho các hình ảnh mức độ ánh sáng thấp trong thiên văn học, các CCD được làm mát nhạy cảm hơn từ 10 đến 100 lần, đáp ứng tuyến tính hơn là phi tuyến và có dải động học rộng hơn nên cả vật thể mờ nhạt lẫn vật thể sáng đều có thể được ghi lại trong cùng một thời gian phơi sáng.

Sự di chuyển của điện tích từ một tế bào sang một tế bào bên cạnh cũng mất thời gian và CTE sẽ giảm dần khi tăng tốc độ đếm và nhiệt độ làm mát. Điều này hạn chế số lượng tế bào có thể sử dụng để chuyển điện tích từ một điểm ảnh tới bộ phận khuếch đại đầu ra. Nó cũng hạn chế tốc độ dữ liệu có thể chuyển ra khỏi CCD và tốc độ truyền hình ảnh kết quả. Tuy nhiên, công nghệ CCD có nhiều thay đổi nhằm mục đích tăng đặc tính hoạt động. Ví dụ như ở các CCD pha ảo (10), một số điện cực được thay thế bằng các vùng cấy ion phóng xạ và kết quả là tăng phản ứng xanh và cho độ nhạy cao hơn, do việc loại một số cổng bề mặt và đơn giản hóa sơ đồ hoạt động do số cổng trên mỗi tế bào ít hơn. Sự đóng góp lớn nhất cho các tín hiệu tối là loại bỏ trung gian và kỹ thuật ghim (pinning) có thể được sử dụng để loại bỏ các trạng thái trung gian, đưa ra một cách tăng biên độ tín hiệu tối cũng như tăng hiệu suất lượng tử và CTE. Người ta có thể cải thiện nhiễu đầu ra thông qua việc sử dụng một kĩ thuật gọi là lấy mẫu kép tương quan. Kỹ thuật này thực hiện việc lấy đầu ra là hiệu của hai tín hiệu, một đầu là tín hiệu điện tích hiện thời và một đầu không, do vậy các thành phần chính của nhiễu được loại bỏ. Một số cấu trúc CCD đã được thực hiện [11]. Trong số các thiết bị này, bao gồm cả thiết bị đường, thiết bị mặt của toàn khung, chuyển khung, các loại chuyển đổi giữa sẽ được đề cập đến trong các phần tiếp theo.

Thiết bị ghép nối điện tích tuyến tính (Linear CCD)

Một cảm biến CCD tuyến tính bao gồm một đường có thể lên tới hàng ngàn điểm ảnh và một thanh ghi dịch CCD song song gần kề và cuối cùng là một khuếch đại cảm biến. Mỗi điểm ảnh được phân cách với thanh ghi dịch bởi một cổng truyền. Trong quá trình hoạt động, một điện thế được đưa tới mỗi cổng điểm ảnh để tạo ra các giếng lưu trữ trống, những giếng này sau đó tích tụ một lượng điện tích tỉ lệ thuận với cường độ ánh sáng theo thời gian. Một xung truyền ở cuối giai

đoạn hội tụ khiến cho tất cả các gói điện tích tích tụ được truyền qua cổng truyền tới các tế bào thanh ghi dịch. Các điện tích qua thanh ghi dịch tới bộ khuếch đại cảm biến được đếm và tạo ra một chuỗi xung điện áp với biên độ tỉ lệ thuận với ánh sáng hội tụ trên các điểm ảnh. Trên thực tế, các thanh ghi dịch thường được đặt trên cả hai phía của điểm ảnh, các điểm ảnh xen kẽ nhau được nối với cổng truyền bằng các thanh ghi bên phải và bên trái. Những thanh ghi này sẽ chia đều thời gian cần thiết để ghi tất cả dữ liệu. Giới hạn số lượng điện tử lưu trữ được trong một tế bào (thường bằng từ 1000-2000 lần diện tích của điểm ảnh đo bằng μm^2), là điểm mốc trước khi các điện tử đó lan sang các tế bào bên cạnh. Hiện tượng nở (blooming) xảy ra khi một điểm ảnh bị quá sáng. Nó có thể được giảm bớt với hệ số 100 bằng cách thêm các cổng ngăn nở (antiblooming gate) giữa các điểm ảnh lân cận và cổng truyền và các kênh giữa các điểm ảnh lân cận. Điện thế trên cổng ngăn nở được đặt với một giá trị cho phép các điện tích thừa ra ngoài thay vì đi vào trong các cổng truyền và thanh ghi dịch. Bằng cách đo các điện thế này, số lần tích hợp biến thiên sẽ ít hơn xung cấu trúc với thời gian khung phơi sáng có thể đạt đến.



HÌNH 19.108 Minh họa ba cấu trúc cơ bản trong CCD dạng miền. Trong CCD toàn khung (full-frame transfer), hầu hết các miền thiết bị được sử dụng như các điểm ảnh. Các điện tích phát photon được chuyển cùng lúc xuống từng cột của tế bào theo các thanh ghi dịch ngang nơi chúng được chuyển cả xuống thiết bị khuếch đại đầu ra trước khi diễn ra sự di chuyển theo hàng dọc của điện tích. CCD toàn khung sẽ hạn chế sự cần thiết của các lá chắn sáng để ngăn sự chắn điện tích, điều này có thể xảy ra bằng cách cung cấp một vùng lưu trữ mà trong đó tất cả các điện tích phát photon có thể chuyển thành hàng dọc nhanh chóng ở cuối mỗi giai đoạn tích hợp. Các CCD đệm cho phép tất cả các điện tích phát photon được chuyển tới các thanh ghi dịch dọc cùng một lúc, điều này gần như loại bỏ các nguồn chắn điện tích

Thiết bị điện tích miền

Ba cấu trúc cơ bản được sử dụng trong CCD dạng miền được minh họa trong hình 19.108. CCD toàn khung bao gồm một miền ảnh do cổng truyền tách ra từ thanh ghi dịch CCD ngang. Trong miền ảnh mỗi điểm ảnh là một bộ phận của thanh ghi dịch dọc do các trạm dừng kênh và cấu trúc chống bạc màu tách ra từ các thanh ghi dịch lân cận. Trong suốt quá trình tích hợp ánh sáng, các đồng hộ dọc không hoạt động và các điểm ảnh thu thập các điện tử quang. Vào cuối quá trình, các điện tích được ghi lại theo chiều dọc vào một hang và đồng thời trong các thanh ghi dịch ngang. Các điện tích trong thanh ghi ngang sau đó được chuyển nhanh chóng tới thiết bị khuếch đại đầu đọc do ứng dụng của một tính hiệu đồng hồ hàng ngang. Ví dụ như, RA1001J, một CCD nguyên khung kích cỡ 1024×1024 của EG&G Reticon lưu giữ được tỉ lệ đọc 30 khung mỗi giây. Để tránh làm đốm bẩn hình ảnh trong suốt quá trình đọc, một cảm biến nguyên khung phải hoạt động với cửa chắn ngoài hoặc được sử dụng trong các ứng dụng có ánh sáng thấp đòi hỏi thời gian tích hợp dài hơn so với thời gian đọc, như trong thiên văn học.

Các CCD truyền khung làm giảm nhu cầu sử dụng một cửa chắn ngoài bằng cách cung cấp một vùng lưu được chắn ánh sáng bên trong toàn bộ điện tích ảnh được chuyển đổi với một tỉ lệ giới hạn cỏ bản do các yếu tố CTE. Điện tích được đọc từ các vùng lưu trữ sẽ không dính bẩn trong suốt thời gian tích hợp. Trong một vài thiết bị, ví dụ như EG&G Reticon RA1102, vùng lưu trữ tách thành hai phía đối diện trong miền ảnh. Điều này làm tăng hiệu quả hoạt động khi chia số lượng tối đa chuyển đổi cần thiết để tới được vùng lưu trữ gần nhất. Với các cảm biến thiết kế dành cho hoạt động xen kẽ, trái ngược với phương thức đọc quét không kết hợp, việc cắt giảm

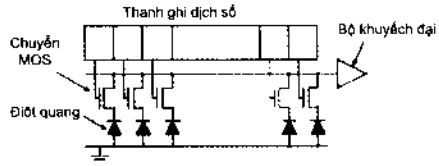
diễn ra tự động. Sau đó mỗi giai đoạn tích hợp tương ứng với một miền video và chỉ cần một nửa số hàng trong khung tại một thời điểm. Ví dụ như, để sản xuất một khung video hỗn hợp gồm 576 đường ảnh (tiêu chuẩn CCIR) cần một cảm biến chuyển đổi khung với 288 hàng lưu trữ. Bằng việc thay đổi các tín hiệu xung, một nửa số hàng lẻ có thể được thay thế bằng hàng chẵn theo chiều dọc. Điều này sẽ đảm bảo rằng các hàng chẵn và lẻ chứa dựng các thông tin khác nhau và giảm canh đồ thị vì bề ngang của các tế bào gấp đôi khoảng phân cách giữa các đường trong khung. Rất nhiều công ty như Cohu, Dalsa, EG&G Reticon, EEV, Kodak, Philips và Thomson-CSF sản xuất cảm biến CCD chuyển khung và camêra.

Rõ ràng là cấu trúc đệm (ILT) đã giúp xóa sạch các vết bẩn trên ảnh khi cung cấp cho mỗi cột điểm ảnh một thanh ghi dịch CCD dọc chắn ánh sáng lân cận trong đó điện tích được chuyển đổi bằng một xung chuyển đổi. Sau đó nội dung của các thanh ghi dịch dọc được chuyển đồng thời một pixel tại một thời điểm tới một thanh ghi dịch ngang nơi mà sau đó chúng nhanh chóng được chuyển tới đầu đọc khuếch đại. Phương pháp này khiến cho việc đạt đến thời điểm tích hợp ngắn và kiểm soát việc phơi sáng với công nghệ quét hiện đại. Nó cũng gia tăng "khoảng chết" giữa các điểm pixel hoạt động làm giảm độ nhạy của vùng cảm biến hình ảnh và làm tăng hiệu ứng đồ thị so với cảm biến chuyển khung. Đối với cảm biến chuyển khung, hệ số làm đầy, là tỉ lệ của miền ảnh nhạy cảm với ánh sáng có thể đạt tới 100% trong khi bình thường chỉ vào khoảng thấp hơn 50% đối với thiết bị chuyển xen kẽ. Các vật thể sáng khu biệt có xu hướng tạo ra các vệt dọc trong một thiết bị ILT do ánh sáng mạnh có thể lọt qua dưới kính chắn sáng hẹp xung quanh các thanh ghi dịch dọc gây ra các vết bẩn trên ảnh giống như trong thiết bị nguyên khung. Đối với các hoạt động xen kẽ, ví dụ như hai điểm lân cận 1 và 2, 3 và 4,... được chuyển tới một tế bào thanh chuyển đơn trong một trường và trong trường sau thì pixel 2 và 3, 4 và 5 được chuyển cùng lúc. Điều này khá giống các hoạt động xem kẽ của một CCD khung chuyển. Các công ty như Hitachi, NEC, Panasonic, Pulnix và Sony sản xuất cảm biến ILT CCD và các máy camêra.

Cảm biến CMOS

Cảm biến hình ảnh CMOS dựa trên công nghệ ra đời trước công nghệ CCD. Tuy nhiên, các cảm biến CCD thường cho hình ảnh đẹp hơn các thiết bị CMOS do đó chúng chiếm lĩnh đa số trên thị trường. Tuy nhiên công nghệ lâu đời ngày nay được quan tâm hơn do chúng có những lợi thế nổi bật hơn so với các CCD. Công nghệ CMOS sử dụng trong cảm biến tương tự như công nghệ sản xuất RAM động và do đó có thể sản xuất với giá thành rẻ, độ phân giải cao, định địa chỉ ngẫu nhiên, sử dụng ít năng lượng. Cũng có thể tích hợp cảm biến hình ảnh, điều khiển, xử lí và ghép nối trong cùng một chip, do đó một máy quay camêra trên chip có thể sử dụng công nghệ CMOS mà không phải công nghệ CCD. Theo kết quả những nghiên cứu và phát triển gần đây, rất nhiều nhà sản xuất tuyên bố đã tạo ra được các cảm biến CMOS cho cùng chất lượng với các cảm biến CCD. Các hãng sản xuất cảm biến CMOS có thể kể đến như Fillfactory, National Semiconductor, Philips, ST Microelectronics và Y Media sản xuất.

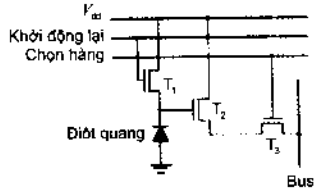
Một cảm biến CMOS bao gồm một mảng các điôt quang được nối với đầu đọc khuếch đại bằng các bus và công tắc MOS. Nguyên tắc của đầu đọc được minh họa trong hình 19.109. Mỗi một pixel được nối với khuếch đại đầu ra bởi một chuyển mạch mà điều khiển bus nối với thanh ghi dịch kĩ thuật số. Dịch một bit qua các thanh ghi nối với các điôt quang tuần tự tới khuếch đại đầu ra. Các đầu đọc ngẫu nhiên của các điôt quang có thể được thực hiện bằng việc thay thế thanh ghi dịch bằng bộ giải mã địa chỉ nối với một bus địa chỉ. Các mảng điôt quang hai chiều có được sắp xếp thành theo cấu hình tương tự với một ma trận chuyển mạch chéo với một công tắc và một điôt ở mỗi giao điểm các thanh ghi dịch dọc và ngang. Để quét mảng này, thanh ghi dọc khởi động các hàng đẩy công tắc và các điôt quang trong hàng đó đưa tín hiệu vào trong các đường dẫn dọc. Chúng lần lượt được kết nối với khuếch đại đầu ra qua các bộ chuyển mạch nối với thanh ghi dịch ngang. Sử dụng hai thanh ghi dịch ngang riêng biệt và tách các chức năng chọn hàng và điều chỉnh hàng cho phép loại cửa chớp điện có màn cuốn hoạt động với một tỉ lệ phơi sáng tương đương với số lượng các hàng.



Hình 19.109

HÌNH 19.109 Minh họa nguyên tắc đầu dọc trong một cảm biến CMOS một kích cỡ. Mỗi một pixel được nối với một khuếch đại đầu ra qua một công tắc MOS mà các dây điều khiển của nó được nối với thanh ghi dịch số. Dịch một bit qua các thanh ghi nối với các điôt quang tuần tự tới khuếch đại đầu ra

Các mảng điôt quang nói chung có ít mở rộng cấu trúc điện cực qua mỗi thành phần cảm biến hơn so với các mảng CCD do đó đáp ứng quang phổ sẽ mịn hơn và lan rộng hơn ở dải xanh cuối cùng của quang phổ, đây là một lợi thế cho các cảm biến màu. Hiệu suất lượng tử lớn nhất cũng cao hơn, từ 60%-80% so với 10%-60% của các cổng quang dẫn đến công suất điện đầu ra tăng gần như gấp đôi so với công suất vào. Trong trường hợp khác, các điôt quang có mức độ nhiễu lớn hơn CCD do dòng điện rò khi phân cực ngược. Điôt quang có thể hoạt động ở chế độ tích hợp hoặc chế độ liên tục. Đối với loại đầu tiên, điện dung điôt quang được điều chỉnh lại theo thế hiệu dịch ngược đặt và sau đó được phép thả nổi. Sau đó, điện tích trên điện dung của điôt quang sẽ được phóng nhờ dòng điện tạo bởi photon và các dòng điện rò. Sau một khoảng thời gian tích hợp nhất định, các điện tích còn lại có thể được đọc và độ lệch so với giá trị đặt sẽ tỉ lệ thuận với độ sáng của điôt nếu các nguồn rò không đáng kể. Cả hai loại thiết bị điểm ảnh chủ động và bị động đều đã được phát triển. Đối với loại thứ hai, điện tích trên điôt quang được đọc thông qua một MOSFET, tranzito này chuyển điện tích thành điện áp và khuếch đại. Hình 19.110 minh họa một CMOS điển hình với ba tranzito điểm ảnh chủ động. tranzito 1 đặt lại điôt quang và sau một khoảng thời gian tích phân thích hợp, các tín hiệu pixel được đọc thông qua bộ phận bị dẫn nguồn tranzito 2 và tranzito chọn lọc 3. Hai điểm bất lợi của phương pháp này đó là hệ số làm đầy thấp do miền pixel do tranzito khuếch đại sử dụng và sự gia tăng không đồng đều các pixel do sự biến đổi các đặc tính của tranzito. Trong phạm vi ibis của các cảm biến CMOS do công ty Fill Factor sản xuất, một điôt quang diện tích nhỏ được sử dụng để làm giảm dòng điện tối và nhiễu kTC đồng thời làm tăng hệ số chuyển đổi điện tích thành điện áp (9 μV trên một điện tử tại đầu ra ibis 1). Cấu trúc pixel đưa ra một hàng rào điện thế, ngăn các photon - điện tử cảm bị hút bởi các cấu trúc trong một pixel hơn là trong các điôt quang. Điều này cho phép các điôt quang thu hút hầu hết các điện tử sinh ra trong chất nền dưới các pixel do đó làm tăng hệ số làm đầy. Trong các thiết bị tích hợp, mẫu nhiễu cố định do sự thay đổi trong các ngưỡng MOSFET có thể giảm bớt bằng việc lấy mẫu đôi tương quan. Pixel được lấy mẫu tại điểm cuối của quá trình tích phân và sau đó được đặt lại và lấy mẫu lần nữa. Sự khác biệt trong hai mẫu chính là phép đo cường độ ánh sáng và sự tự do bù đắp pixel. Để kiểm soát sự không đồng đều trong phản ứng quang không hề đơn giản. Sự không đồng đều này là do sự thay đổi về thể tích thu thập điôt quang, điện dung chuyển tiếp, điện dung cổng của bộ khuếch đại MOSFET.



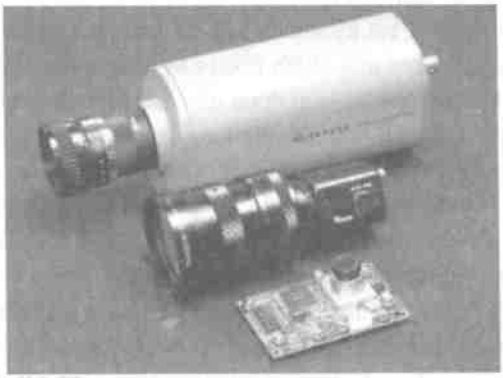
Hình 19.110

HÌNH 19.110 Minh họa một CMOS điển hình với ba tranzito và pixel hoạt động. Tranzito T_1 nối với đường đặt lại (reset) cho phép điện dung của điôt quang được đặt lại khi bắt đầu quá trình tích hợp dòng điện quang. Trong thiết bị phương thức CMOS liên tục, tranzito này được kết nối để hoạt động như một điện trở có giá trị cao. Tranzito T_2 và T_3 cho phép tín hiệu được chuyển từ điôt quang tới bộ khuếch đại dọc thông qua các đường bus dọc

Một cảm biến ánh sáng với đáp ứng pixel liên tục sẽ có lợi thế khiến cho các pixel (điểm ảnh) có thể được truy cập theo trình tự bất kỳ không cần có thời gian tích hợp cho nên một thuật toán xử lí ảnhcó thể quyết định pixel hay một nhóm pixel nào để đọc tiếp theo. Trong một loạt các cảm biến Fuga do Fillfactory thiết kế, chế độ hoạt động liên tục được thực hiện bằng cách cho pho ton-dòng điện phát ra đi qua điện trở nối tiếp. Do photon-dòng điện cảm ứng rất nhỏ nên điện trở nối tiếp phải rất lớn và nó được nhận ra bởi một MOSFET hoạt động với sự đảo ngược không đáng kể. Kết quả của sự chuyển dòng điện thành điện áp là biến đổi loga và các thiết bị có một phạm vi động rất rộng (bậc 6 của độ lớn hay 120 dB) với giới hạn tối là 10^{-4} W m^{-2}. Tín hiệu ra của một pixel đơn lẻ không thể đáp ứng tức thời đối với sự thay đổi của độ rọi do hằng số thời gian RC của điện dung điôt quang và điện trở nối tiếp. Một giá trị điển hình cho hằng số thời gian này là một phần triệu giây. Do sự không đồng đều của các pixel mẫu nhiễu cố định của các thiết bị này rất lớn, từ 50-100%,và không giảm được bằng cách lấy mẫu đôi tương quan do phản ứng liên tục. Tuy nhiên, nhiễu này cố định nên nó có thể giảm bớt nhờ hiệu chỉnh theo bảng giá trị lưu trữ trong PROM do đó các máy quay camêra đơn sắc hay màu được hiệu chỉnh hoàn toàn với 1024×1024 pixel rất phổ biến với các cảm biến Fuga.

Các hệ thống quan sát

Các hệ thống quan sát được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như sản xuất, đo lường trong khoa học kĩ thuật, giám sát từ xa và dẫn đường rôbôt. Trong hệ thống quan sát, các thành phần ảnh cơ bản không chỉ là một chip cảm biến mà là một máy camêra hoàn chỉnh như ta thấy trong hình 19.111, nó bao gồm: một mảng cảm biến, hệ điện tử phụ trợ, định dạng tín hiệu ra và các thấu kính. Tuỳ thuộc vào từng ứng dụng máy quay có thể là đơn sắc RS-170/CCIR, màu NTSC/PAL, phương pháp quét luỹ tiến, quét biến thiên hay quét theo dòng. Miền ảnh, độ phân giải, khoảng làm việc, độ sâu ảnh và tốc độ thu ảnh là năm thông số chính của một hệ máy quay camêra. Màu sắc đôi khi là quan trọng với các ứng dụng tuy nhiên các ảnh trắng đen lại thường được ưa chuộng bởi vì chúng yêu cầu ít bộ nhớ và xử lý nhanh hơn. Như một quy tắc, trong các ứng dụng đo lường kích thước, các cảm biến phải có được độ phân giải ít nhất là gấp hai lần tỉ số giữa chiều lớn nhất và nhỏ nhất của vật quan tâm. Ánh sáng phải đặt sao cho độ sáng (illuminate) trong ảnh thu được của vật ta quan tâm là tốt nhất có thể. Ánh sáng có thể là ánh sáng bao quanh, huỳnh quang tần số cao, đèn LED, nguồn nóng sáng, hay thạch anh halogen. Việc giao tiếp của máy quay với máy tính chủ thường cần trang bị thêm card thu ảnh (card bắt khung hình hoặc card bắt video). Các nhà cung cấp máy quay thường quy định các loại card tương thích với loại máy quay của mình. Các card này sẽ chứa dữ liệu ảnh từ máy quay on-board hay trong bộ nhớ hệ thống, ở đây cần có sự lấy mẫu và số hoá tín hiệu tương tự. Trong một số trường hợp đầu ra của các máy quay đã là tín hiệu số tương thích với các giao thức chuẩn như USB 2.0 hay IEE-1394 Fire Wire bởi vậy không cần sử dụng thêm card thu ảnh nữa. Máy tính phải đủ mạnh để xử lý từng ảnh trong một thời gian ngắn nhất có thể hay là cho phép hoàn thành một chuỗi các xử lý trong một khoảng thời gian cho trước. Các phần mềm trong máy nhận dạng sẽ tạo ra các chương trình xử lý dữ liệu ảnh. Phần mềm này có thể có nhiều dạng, bao gồm các thư viện C điều khiển các chức năng thiết bị, điều khiển Active X và môi trường lập trình trực quan sẽ cho phép người dùng dễ dàng sắp đặt các quá trình xử lý ảnh. Khi một ảnh vừa được phân tích hệ thống phải cho phép kết nối với kết quả để điều khiển quá trình hay thêm thông tin vào cơ sở dữ liệu. Điều này yêu cầu một giao diện vào/ra số hay kết nối mạng. Mắt người và bộ não có thể nhận dạng đối tượng và các cảnh trong một dải các điều kiện đa dạng. Hệ thống máy nhận dạng hiện nay còn kém độ linh hoạt do đó việc tạo ra một hệ thống hoàn thiện yêu cầu một sự lựa chọn tỉ mỉ tất cả các thành phần của hệ thống và cần xác định chính xác mục đích sử dụng sao cho đơn giản hoá tối đa nếu có thể.



Hình 19.111 Ba camêra: Gần nhất là mạch camêra rẻ tiền với cảm biến CMOS và thấu kính 4 mm; Ở giữa là camêra CCD CCIR, được thu nhỏ bởi các thấu kính 9.5 đến 75 mm; Camêra xa nhất là camêra CCD Cohu 4712 chất lượng cao với các thấu kính 16 mm và ống mở rộng 20 mm

Tài liệu tham khảo

[76] Wilson, J. and Hawkes, J. F. B., *Optoelectronics: An Introduction,* Prentice-Hall International, London, 1983.

[77] Jenkins, F. A. and White, H. E., *Fundamentals of Physical Optics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1981.

[78] Hewitt, H. and Vause, A. S., *Lamps and Lighting*, Edward Arnold, London, 1966.

[79] Fraden, J., Pyroelectric thermometers, in *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, Webster, J. G., Ed., CRC Press, 1999, chap. 32.

[80] Schuermeyer, F. and Pickenpaugh, T., Photoconductive sensors, in *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, Webster, J. G., Ed., CRC Press, 1999, chap. 56

[81] Sze, S. M., *Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons, New York, 1985.

[82] Ray, S. F., *Applied Photographic Optics*, 2nd. ed., Focal Press, Oxford, 1994

[83] CCIR, *Characteristics of Monochrome and Colour Television Systems*, Recommendations and Reports of the CCIR, Vol. XI, Part 1: Broadcasting Service (Television), Section IIA, 1982.

[84] Amelio, G. F., Charge coupled devices, *Scientific American*, 176, 1974.

[85] Sheu, L. and Kadekodi, N., Linear CCDs, Advances in linear solid-state sensors, *Electronic Imaging*, August, 72, 1984.

[86] Rutherford, D. A., A new generation of cameras tackles tomorrow's challenges, *Photonics Spectra*, September, 119, 1989.

[87] Asano, A., MOS sensors continue to improve their image, *Advanced Imaging*, 42-44f, 1989.

[88] Dierickx, B., Meynants, G., and Scheffer, D., Near 100% fill factor in CMOS active pixels, in *Proc. IEEE Workshop on Charge-Coupled & Advanced Image Sensors*, Brugge, Belgium, P1, 1997.

[89] Ricquier, N. and Dierickx, B., Pixel structure with logarithmic response for intelligent and flexible imager architectures, *Microelectronics Engineering*, 19, 631, 1992.

19.9 Các cảm biến micro tích hợp

Chang Liu

Giới thiệu

Mục đích của phần này là cung cấp các thông tin về các cảm biến micro tích hợp. Tác giả mong muốn, người đọc quan tâm tới lĩnh vực cảm biến này hiểu được những kỹ thuật chế tạo cơ bản và các nguyên lý cảm biến, cũng như phát triển một nền tảng cơ sở phục vụ cho mục đích

chọn lựa các cảm biến đã được thương mại hoá và phát triển các cảm biến theo yêu cầu trong tương lai.

Nội dung của phần này được tổ chức như sau. Phần đầu tiên trình bày về lịch sử phát triển chung của các cảm biến micro. Tiếp theo sẽ trình bày ngắn gọn về các phương pháp chế tạo các cảm biến micro. Ở phần này cũng nhắc lại các nguyên lý thường được sử dụng cho các cảm biến. Có thể nhận biết, xem xét một tham số vật lý nào đó bằng cách sử dụng các cấu trúc với các nguyên lý cảm biến khác nhau. Các ví dụ minh hoạ về cảm biến, cùng với các cấu trúc và kỹ thuật chế tạo từng cảm biến, được cung cấp tới người đọc một cách dễ hiểu.

Phạm vi nghiên cứu về các cảm biến micro bao trùm nhiều lĩnh vực khác nhau như vật liệu học, gia công micro, điện tử học và cơ học. Tuy nhiên, mục đích của tài liệu không mong muốn bao trùm toàn bộ các kiến thức liên ngành này. Chúng tôi sẽ chỉ tập trung vào một vài nguyên lý cảm biến cơ bản và thường được sử dụng. Người đọc sẽ có điều kiện nắm bắt được một cái nhìn tổng quan về lĩnh vực cảm biến từ các nguyên lý cảm biến và tiềm năng ứng dụng của lĩnh vực này. Các tham khảo chuyên sâu sẽ được cung cấp khi cần thiết.

Định nghĩa cảm biến micro tích hợp

Các cảm biến micro tích hợp chính là các cảm biến hoặc các dãy cảm biến được phát triển nhờ công nghệ gia công micro. Chiều dài của các cảm biến micro trong khoảng từ 1 μm đến 1 mm còn các cảm biến nano trong khoảng từ 1 nm đến 1 mm. Trong tài liệu này, chúng ta tập chung nói về các cảm biến nhận biết các đại lượng biến đổi của vật lý như lực, áp suất, tiếp xúc trực tiếp, gia tốc, góc quay, nhiệt độ và các sóng âm. Các cảm biến hoá học, được sử dụng để nhận biết nồng độ của các chất hoá học hoặc các giá trị pH, sẽ không nằm trong phạm vi tài liệu này.

Ở đây, chúng tôi xin giới thiệu sơ lược về lịch sử phát triển của các cảm biến micro. Các vi cảm được chế tạo bằng cách sử dụng công nghệ chế tạo micro được tích hợp, đầu tiên chúng được phát triển cho mục đích tạo ra các mạch tích hợp. Từ sự xuất hiện tranzito đầu tiên vào năm 1947 và sự thành công của các mạch tích hợp năm 1971, công nghệ và thiết bị cho việc xây dựng và tích hợp các mạch điện thu nhỏ dựa trên nền là các chất bán dẫn (như silic và GaAs) đã phát triển rất nhanh chóng. Sau 12 - 18 tháng, mật độ tích hợp lại được nhân đôi tuân theo định luật thực nghiệm của Moore. Công nghệ mạch tích hợp này đã làm cách mạng hoá xã hội hiện đại bởi vì cho phép tạo ra được các bộ xử lý tín hiệu tương tự, các khối lôgic số, các bộ nhớ máy tính và các camêra CCD với chi phí thấp. Thành tựu này là một dẫn chứng thuyết phục thể hiện sức mạnh của công nghệ tích hợp và công nghệ thu nhỏ.

Các bộ xử lý tín hiệu tiên tiến như là ASIC tương tự (các mạch được tích hợp cho các ứng dụng đặc thù) và CPU (Các khối xử lý trung tâm) chỉ là một phần trong hệ cơ điện tử có độ thông minh cao. Các cảm biến đóng vai trò cực kỳ quan trọng cho các hệ cơ điện tử trong việc tương tác với môi trường vật lý. Ở những năm 1970, một số nhà nghiên cứu đã thí nghiệm sử dụng công nghệ gia công IC để nhận biết được các phần tử truyền tải đặc tính cơ học trên một chíp silicon. H. Nathansan [1] đã phát triển các tranzito cổng thả nổi, các cổng này được làm từ một dầm công xôn treo (suspended cantilever beam) và khoảng cách của nó tới kênh dẫn có thể được hiệu chỉnh bằng các lực tĩnh điện. Một số nhà nghiên cứu tiên phong đã bỏ nhiều công sức và cho ra đời loạt các cảm biến thương mại đầu tiên như cảm biến áp suất [2], các máy đo gia tốc [3], máy đo màu khí tích hợp, máy in phun [4, 5].

Các cảm biến micro tích hợp có một số ưu điểm hơn so với các cảm biến kích thước lớn truyền thống. Việc thu nhỏ kích thước các cảm biến đáng kể làm tăng khả năng ứng dụng do lợi thế về không gian. Trong nhiều trường hợp, làm giảm khối lượng quán tính và khối lượng nhiệt truyền tới tần số cộng hưởng cơ học cao hơn và các hằng số thời gian nhiệt thấp hơn. Do các cảm biến này được chế tạo theo phương pháp in ảnh litô nên có thể giảm được chi phí và nhiều khối giống nhau có thể được làm song song (trong trường hợp khi nhu cầu đủ lớn). Hơn thế nữa, do các đặc điểm hình học của các bộ phận cảm biến được quy định bằng độ chính xác của ảnh in litô, nên tính đồng dạng và lặp lại của các cảm biến này tăng lên rõ rệt so với các cảm biến truyền thống. Khả năng tích hợp các cảm biến một cách nguyên khối sẽ giúp các mạch tích hợp giảm được chiều dài đường dẫn giữa các cảm biến và các mạch đồng thời làm tăng tỷ số tín hiệu trên nhiễu.

Quá trình chế tạo các cảm biến micro tích hợp

Như đã đề cập ở phần trước, công nghệ chế tạo micro các cảm biến micro được phát triển dựa trên nền tảng là những mạch tích hợp. Do đó, silic từ lâu đã là vật liệu chủ yếu và quan trọng sử dụng để chế tạo các cảm biến micro tích hợp. Phần lớn các cảm biến hiện nay thường được làm có sử dụng lớp mỏng silic làm chất nền. Tuy nhiên, những năm gần đây, nhiều vật liệu polyme mới đã được ứng dụng trong công nghệ chế tạo micro. Các vật liệu polyme cho phép giảm chi phí chế tạo hơn so với các lớp silic dạng tinh thể đơn và ở một số trường hợp, khả năng thực hiện đơn giản hơn, so với silic bán dẫn. Hiện nay, chỉ có một số loại cảm biến được chế tạo từ polyme, bởi vì nhiều phần tử cảm biến chính không sẵn có ở các dạng polyme. Tuy nhiên, với sự phát triển của công nghệ chế tạo micro các polyme và các chất bán dẫn hữu cơ, có thể dự báo trong tương lai tất cả các cảm biến polyme sẽ được sử dụng.

Có thể chế tạo được các cảm biến micro và các thành phần cơ khí (các màng ngăn và các dầm) từ các chất nền silic bằng rất nhiều cách khác nhau. Có hai phương thức chế tạo thường được sử dụng là gia công micro cắt gọt khối và gia công cắt gọt bề mặt. Ở phương thức gia công cắt gọt khối, một phần chất nền silic được loại bỏ nhờ sự ăn mòn axit ướt hoặc ăn mòn axit khô có plasma. Các chất nền silic thường được ăn mòn bởi các chất sau: Kali hyđroxit (KOH), pyrocatecol ethylene-diamine (EDP) hoặc hydroxide ammonium tetramethyl (TMAH). Các phương pháp chống ăn mòn khô sử dụng plasma được kích hoạt AC như là một nguồn năng lượng để cắt bỏ một cách chọn lọc và không đẳng hướng các vật liệu nền. Tổng quát các giải pháp chống ăn mòn được sử dụng trong công nghiệp chế tạo micro silic và mức chống ăn mòn tương ứng với các vật liệu khác nhau có thể được tìm thấy trong tài liệu [6].

Ở các phương pháp chế tạo micro bề mặt, lớp cấu trúc tồn tại tự do (freestanding structure) thường tập trung thành một vùng mỏng gần bề mặt chất nền. Quá trình gia công chỉ thực hiện với các lớp trên bề mặt của một chất nền, do đó gọi là gia công micro cắt gọt bề mặt. Quá trình gia công thường là phương pháp ăn mòn axit. Đầu tiên, một lớp chất rắn mỏng gọi là lớp thay thế (sacrificial layer) được đặt trên bề mặt tấm. Điều này được thực hiện bằng sự thay thế một lớp cấu trúc, hình thành cấu trúc cơ học (màng mỏng hoặc công xôn). Để loại bỏ lớp thay thế mà không làm ảnh hưởng đến lớp cấu trúc, người ta thường sử dụng axit có tốc độ ăn mòn lớp thay thế lớn hơn nhiều so với lớp cấu trúc.

Trong phần tiếp theo, quá trình gia công một số dạng cảm biến xác định sẽ được trình bày để minh hoạ cho các phương pháp gia công micro bề mặt và khối. Cả hai kỹ thuật gia công micro khối và bề mặt đều tồn tại những ưu điểm và nhược điểm. Quá trình gia công micro bề mặt thường thích hợp với việc chế tạo các mạch tích hợp bởi vì nó không bao gồm việc ăn mòn chất nền. Phương pháp gia công micro khối có một phần chất nền bị loại bỏ. Tuy nhiên, một quá trình gia công micro cắt gọt silic khối có thể hợp lý với các cấu trúc silic dạng tinh thể đơn do giảm được độ uốn và ứng suất cơ học bên trong. Khi phát triển các cảm biến theo đơn đặt hàng, cần phải chọn một quá trình gia công thật cẩn thận để đạt được các đặc tính của thiết bị như mong muốn, tiện lợi cho gia công và cũng để làm giảm toàn bộ chi phí cho việc gia công cảm biến.

Các nguồn tài liệu về cảm biến

Tổ chức phát triển các phương pháp gia công micro và các cảm biến vi tích hợp thường công bố các kết quả đạt được trong *tạp chí Các hệ thống vi cơ điện tử* (MEMS), *tạp chí Cảm biến và các cơ cấu chấp hành* và *tạp chí Vi cơ học và Vi kỹ thuật*. Có nhiều các hội nghị lớn về lĩnh vực này như: (1) hội thảo IEEE về cảm biến và các cơ cấu chấp hành trạng thái rắn (được tổ chức một năm hai lần tại bán đảo Hilton Head, Nam Carolina); (2) Hội nghị Quốc tế về cảm biến và các cơ cấu chấp hành thể rắn (được tổ chức hai năm một lần tại nhiều nước trên thế giới); (3) Hội nghị Quốc tế về các hệ thống vi điện tử - cơ học (được tổ chức hàng năm trên thế giới).

Độc giả quan tâm có thể tìm thêm các thông tin và kiến thức về cảm biến micro trong một số các sách tham khảo [7, 8] và các trang web [9].

Các ví dụ cảm biến micro và cảm biến nano

Các nguyên lý đo cơ bản

Cảm biến micro được xây dựng dựa trên một số các nguyên lý truyền dẫn, bao gồm tĩnh điện, áp-trở, áp-điện và điện từ (bao gồm cả cảm biến quang học). Nguyên lý cơ bản của các phương pháp cảm biến sẽ được đề cập đến sau đây.

Đo Tĩnh điện

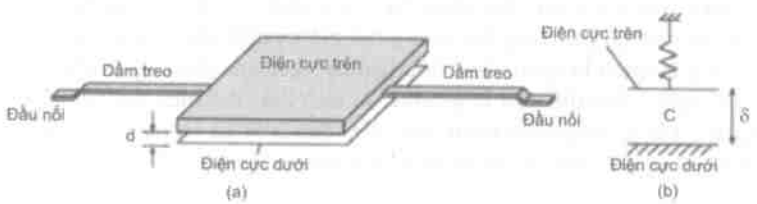
Trong đo tĩnh điện, các biến vật lý cần quan tâm như là lực hoặc dao động, sẽ được truyền dẫn thành các dịch chuyển cơ học của một dầm công xôn hoặc một màng mỏng. Trên hình 19.112 là sơ đồ của một cấu trúc điển hình. Dầm công xôn hoặc màng mỏng di động được gắn với điện cực cố định có dạng như một tụ điện. Đối với cấu trúc được mô tả trong sơ đồ này, dịch chuyển của tấm trên sẽ gây ra sự thay đổi điện dung. Việc đo tĩnh điện này cũng thường được dùng để đo điện dung. Sự thay đổi điện dung là cơ sở thông tin để tính toán các tham số cần quan tâm. Nguyên lý đo tĩnh điện có thể được sử dụng cho gia tốc kế, cảm biến âm thanh, con quay hồi chuyển, cảm biến áp suất, cảm biến tiếp xúc và các cảm biến hồng ngoại. Tương ứng với các mẫu cảm biến này, các tác động bên ngoài tương ứng sẽ gây ra các chuyển động thành phần là lực quán tính, dao động khối lượng không khí, lực Coriolis, áp suất, lực tiếp xúc và sự uốn nhiệt lưỡng tính do sự hấp thụ năng lượng và tăng nhiệt độ.

Mô hình cơ điện của một cảm biến điện dung đơn giản trên hình 19.112 (a) được minh hoạ trong hình 19.112(b). Điện cực bên trên được gá trên hai dầm treo với một hệ số lực tương đương (hệ số lò xo) của k. Giá trị điện dung của một tụ điện phẳng song song là:

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d}$$

trong đó A là diện tích của điện cực, d là khoảng cách giữa hai điện cực, ε_r và ε_0 tương ứng là các hằng số điện môi tương đối của môi trường trung gian và môi trường chân không. Khi khoảng cách giữa hai điện cực thay đổi một lượng Δd, điện dung thay đổi một lượng là:

$$\Delta C = \frac{C}{d}\Delta d$$



HÌNH 19.112 Sơ đồ của một tụ điện phẳng song song: (a) hình linh kiện, (b) mô hình cơ điện

Khi cấp một lực F lên bản trên của tụ phẳng, giá trị điện dung sẽ thay đổi như sau:

$$\Delta C = \frac{C}{d}\frac{F}{k}$$

Đo áp-trở

Ở một cảm biến áp-trở, độ lớn của dịch chuyển cơ học được đo bằng lượng ứng suất phát sinh trong một phần tử cơ học. Một điện trở nhạy cảm với ứng suất (được gọi là một áp-trở) đặt có mục đích trên phần tử cơ học để đo sự thay đổi của điện trở do sự tác dụng của ứng suất. Nhiều vật liệu,

bao gồm các kim loại, các hợp kim, silic lỏng sệt, thể hiện các đặc tính áp-trở. Ứng suất là nguyên nhân gây biến dạng mạng lưới cấu tạo vật liệu, do vậy sẽ dẫn tới sự thay đổi trở kháng cũng như các kích thước của một điện trở. Sự thay đổi trở kháng (ΔR) là hàm của sức căng ε :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = G\varepsilon$$

trong đó R_0 là giá trị của điện trở ở trạng thái không có ứng suất và G là hệ số đo trở kháng áp-điện.

Khi sử dụng silic sệt cho các cảm biến áp-trở, toàn bộ chân của cảm biến có thể được làm rất nhỏ và đạt được một giá trị mong muốn, tức là ví dụ 1 kΩ. Không giống như phương pháp cảm biến điện dung cần có một diện tích tấm phẳng đủ để đạt được giá trị điện dung cần thiết, cảm biến áp-trở yêu cầu nhiều diện tích hơn. Do vậy, cảm biến áp-trở thích hợp hơn cho các cảm biến có chiều dài đặc tính dưới 10 μm. Tuy nhiên, phương pháp đo điện dung nói chung là có khả năng áp dụng nhiều hơn, so với các cảm biến áp-trở tối ưu chứa silic với nồng độ thích hợp.

Đo áp-điện

Mỗi vật liệu áp-điện sinh ra sự phân cực điện (điện trường bên trong) khi có một sức căng cơ học bên ngoài tác động. Vật liệu áp-điện cũng thể hiện tính áp-trở ngược. Cụ thể là, khi có một điện áp (hoặc điện trường) cấp lên vật liệu, sẽ tạo ra sức căng cơ học (hoặc dịch chuyển) trên vật liệu. Tính chất áp-điện ngược thường được sử dụng như một nguyên tắc tạo ra dịch chuyển cơ học hoặc lực.

Một ưu điểm của cảm biến áp-điện so với cảm biến áp-trở trong thực tế là các cảm biến áp-điện tự phát sinh, tức là một hiệu điện thế sẽ được tạo ra không cần phải có nguồn năng lượng cấp bên ngoài nào khác. Tuy nhiên, các lớp vật liệu áp-điện chất lượng cao với các đặc tính thích hợp và đồng đều cần phải có các cơ cấu chuyên dụng và quá trình căn chỉnh. Đó là một hạn chế khiến các lớp vật liệu áp-điện mỏng không được sử dụng rộng rãi như các phần tử áp-trở. Tuy nhiên, các lớp vật liệu áp-điện chất lượng cao đang ngày càng trở thành các vật liệu sẵn có nhờ thương mại hoá. Các vật liệu áp-điện thường được sử dụng trong chế tạo các cảm biến micro gồm oxide zinc sputtered và titanate zirconate lead (PZT).

Đo nhiệt độ

Đo nhiệt độ không chỉ được sử dụng cho mục đích đo đạc nhiệt độ xung quanh, mà còn để truyền nhiệt. Có thể tạo ra các cảm biến nhiệt độ từ các điện trở nhiệt hoặc từ cặp nhiệt. Một điện trở nhiệt là một phần tử điện trở dạng lớp mỏng mà giá trị điện trở của nó là một hàm theo nhiệt độ. Điều này có thể giải thích là do sự thay đổi điện trở theo các phương là như nhau. Các vật liệu bán dẫn (ví dụ silic dạng tinh thể đơn hoặc silic đa tinh thể) thể hiện các hệ số nhiệt độ của các điện trở (TCR, ký hiệu là α) theo thứ tự từ -0.1 %°C đến 5 %°C. Đối với một điện trở nhiệt, quan hệ giữa sự thay đổi giá trị điện trở (R) và sự thay đổi của nhiệt độ là:

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha T$$

Các cặp nhiệt được tạo thành từ hai vật liệu khác nhau với các hệ số Seebeck khác nhau. Điện áp được gây ra do ghép cặp nhiệt đơn tỷ lệ với sự chênh lệnh nhiệt độ tại chỗ ghép và nhiệt độ xung quanh. Để có thêm thông tin về các cặp nhiệt, bạn đọc có thể xem thêm các tài liệu tham khảo.

Đo nhiệt độ cũng thường có thể tạo ra bằng việc sử dụng một dầm lưỡng kim nhiệt. Một dầm composite được làm từ hai vật liệu có các hệ số dãn nở vì nhiệt khác nhau sẽ bị uốn do hai phần dãn nở với tốc độ khác nhau. Độ uốn cơ khí, được đo theo tĩnh điện hoặc các áp-trở, tương ứng với nhiệt độ cung cấp. Nguyên lý này đã và đang được sử dụng cho việc tạo ra các cảm biến hồng ngoại không làm mát.

Các cảm biến áp suất

Các cảm biến áp suất có vai trò quan trọng trong điều khiển công nghiệp và điều khiển hệ tự chuyển động và trong hệ giám sát. Các cảm biến micro áp suất hiện có bao gồm các màng chắn biến dạng theo sự thay đổi chênh lệch áp suất. Sử dụng công nghệ chế tạo micro, có thể tạo ra được các màng chắn rất mỏng, do vậy làm tăng đáng kể độ nhạy của cảm biến so với các cảm biến áp suất truyền thống khác với các màng dày hơn. Công nghệ chế tạo micro tích hợp cũng cho phép các cảm biến có thể ghép được với các mạch xử lý tín hiệu. Do đó khoảng cách giữa màng ngăn cảm biến và các bộ xử lý tín hiệu gần nhau, nhiễu sẽ thấp hơn so với các cảm biến truyền thống.

Màng chắn là một phần tử rất quan trọng trong một cảm biến áp suất. Nó có thể được làm hoặc bằng công nghệ gia công micro cắt gọt bề mặt hoặc công nghệ gia công micro cắt gọt khối. Do vậy, ta sẽ phân loại các cảm biến micro áp suất theo các phương pháp tạo ra màng ngăn. Ở mỗi loại cảm biến áp suất, độ dịch chuyển của màng ngăn có thể được xác định nhờ đo áp-trở hoặc đo điện dung.

Trải qua hơn hai thập niên, nhiều loại cảm biến micro áp suất được phát triển và được thương mại hoá một cách thành công trong các ứng dụng máy móc và tự động hóa. Phần này không có mục đích trình bày tổng kết mang tính đầy đủ về các công việc đã được thực hiện, mà chỉ đề cập một vài thiết bị hiện có với mục đích (1) cung cấp cho người đọc một cách nhìn tổng quan về các công nghệ hiện có và (2) các vấn đề hiện tại về lĩnh vực này.

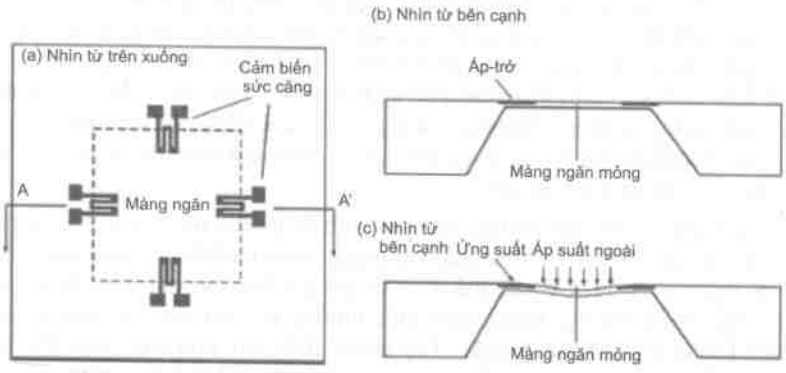
Các cảm biến áp suất được chế tạo khối micro

Sơ đồ của một cảm biến micro áp suất gia công cắt gọt khối được minh hoạ dưới đây. Màng ngăn sẽ cong khi có một áp suất vi phân tác động lên nó. Kỹ thuật thông dụng dùng cho việc đo độ dịch chuyển của màng ngăn là sử dụng các áp-trở nhúng trong các màng ngăn này. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng còn có nhiều nguyên lý đo khác khả thi.

Trong sơ đồ dưới (hình 19.113), bốn áp-trở được nhúng gần cạnh của màng ngăn. Vùng đặt cảm biến được chọn sao cho với một dịch chuyển cho trước tại tâm của màng ngăn, độ lớn của ứng suất là lớn nhất trong toàn vùng cảm biến. Có một số lựa chọn đối với các màng ngăn và các áp-trở. Các loại vật liệu có thể được sử dụng và các đặc điểm của chúng được tổng kết trong bảng 19.8. Ba cấu trúc cảm biến áp suất khác nhau và quá trình chế tạo tương ứng sẽ được trình bày trong các phần sau.

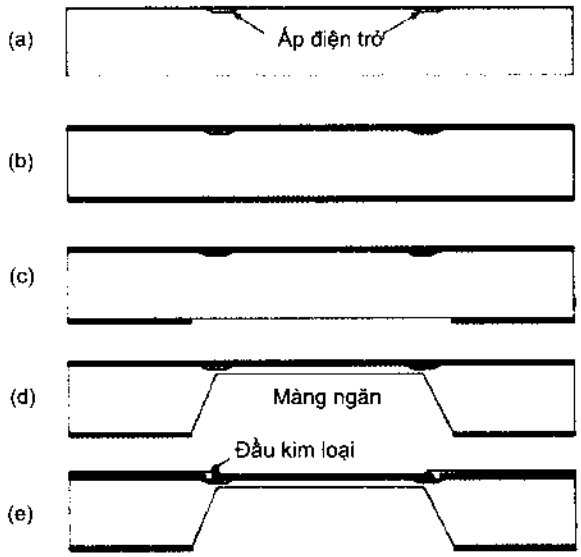
BẢNG 19.8 Danh sách các vật liệu có thể sử dụng cho các cảm biến áp-trở và màng ngăn

Vật liệu màng ngăn	Vật liệu áp-trở	Đặc điểm
Silic dạng tinh thể đơn	Silic tinh thể đơn	Tương đối khó điều khiển độ dày của màng ngăn
Màng mỏng nitrua silic	Silic đa tinh thể	Dễ dàng tạo ra các màng mỏng bao gồm silic đa thể LPCVD.



HÌNH 19.113 Sơ đồ của một cảm biến micro áp suất gia công micro khối

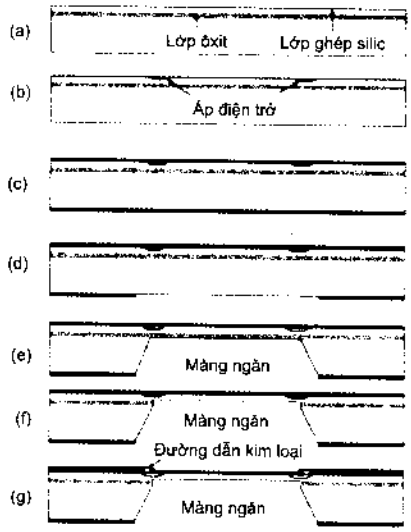
Quá trình chế tạo một cảm biến áp suất sử dụng tấm silic làm chất nền được thể hiện trên hình 19.114. Ở bước đầu tiên, tấm silic được thêm vào các nguyên tử Bo và Phốt pho để tạo ra các áp-trở ở phía trước (a). Các tấm này sau đó được oxy hoá chống rỉ với một màng mỏng đioxit silic (b). Ở bước kế tiếp, lớp đioxit silic trên mặt sau được lấy làm mẫu và ăn mòn axit có chọn lọc để lộ ra lớp silic (c). Phần vật liệu silic này sẽ được ăn mòn khi nhấn chìm vào chất ăn mòn silic không đẳng hướng (d). Để tạo ra được lớp màng ngăn silic với một chiều dày mong muốn, người công nhân cần phải sử dụng đến axit đúng lúc và phải xác định chính xác được chiều dày mong muốn và tốc độ axit hoá. Tuy nhiên, khi thực hiện bước này cần lưu ý là tốc độ axit hoá có thể biến đổi theo thời gian và vị trí trên tấm. Thường thì, độ dày được tạo ra của màng ngăn rộng (30-50 μm) để đảm bảo đủ không gian cho các thiết bị. Ở bước cuối cùng, ôxít trên mặt trước của bánh được lấy làm mẫu để tạo ra tiếp xúc cho các dây dẫn kim loại (e).



HÌNH 19.114 Sơ đồ minh hoạ các bước chính trong quá trình chế tạo micro theo phương pháp gia công khối một cảm biến micro áp suất

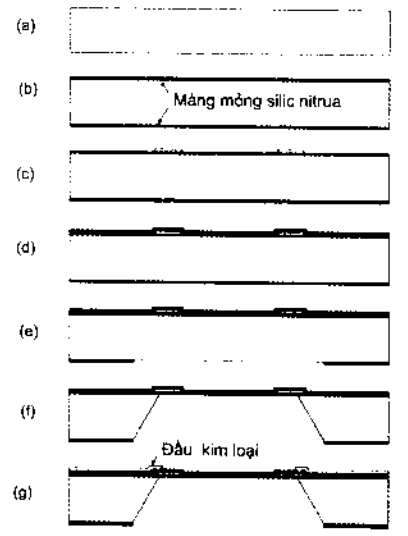
Để tránh sự hay thay đổi trong quá trình đã đề cập trên, các tấm với các lớp ngăn có thể được sử dụng (hình 19.115). Ví dụ có thể sử dụng một tấm silic cách điện với một màng mỏng silic trên phía trên của một lớp đioxit silic. Các lớp silic và lớp ôxít nằm trên đỉnh của khối chất nền silic (a). Các bước tiếp theo tương tự như các bước đã trình bày ở trên, có thể định dạng các áp-trở (b) và chia ra các ô ôxít silic trên mặt sau của tấm (d). Chất ăn mòn không đẳng hướng của silic có tốc độ ăn mòn tối thiểu trên ôxít silic, do vậy việc ăn mòn sẽ tự động dừng lại khi lớp ôxít bị che phủ lộ ra. Điều này cho phép một kỹ sư chuyên ngành thực hiện đầy đủ quá trình ăn mòn với đảm bảo rằng các màng ngăn trên tất cả các thiết bị có cùng chiều dày (e). Phản ứng ăn mòn tự giới hạn này có tác dụng làm giảm độ phức tạp của việc điều khiển và giảm chi phí của quá trình. Lớp ôxít sau đó được loại bỏ một cách có chọn lọc bằng axit hydrofluoric, axit này sẽ không ăn mòn silic. Do đó có thể tạo ra một màng ngăn silic mỏng, với chiều dày xác định bởi lớp silic ghép được tạo ra trong quá trình gia công tấm SOI. Cuối cùng, qua các lỗ được mở trên mặt trước và các đường dẫn kim loại chính được tạo ra và lấy mẫu (g).

Mặc dù quá trình này thuận tiện hơn so với quá trình đã đề cập đến trước đó, nhưng nó có một vài thiếu sót. Ví dụ dù quá trình trên hiệu quả hơn trong việc điều khiển chiều dày của màng ngăn, nhưng các tấm SOI được sử dụng trong quá trình có giá đắt hơn các tấm silic bình thường. Thậm chí với các tấm SOI, chiều dày của màng ngăn silic thường là 2-10 μm. Để tăng thêm độ nhạy về áp suất, nên giảm chiều dày của màng ngăn. Tuy nhiên, điều này khó thực hiện khi vật liệu màng ngăn là silic. Phần tiếp theo sẽ trình bày về một quá trình sử dụng lớp màng mỏng silic nitrua.



HÌNH 19.115 Sơ đồ của một quá trình chế tạo cảm biến micro áp suất theo phương pháp khối

Cấu trúc của một cảm biến thay đổi có sử dụng lớp mỏng silic nitrua làm màng ngăn có bổ sung silic đa tinh thể là cảm biến áp-trở. Quá trình này được mô tả như trong hình 19.116. Bắt đầu từ một tấm silic trần (không cách điện) (a), một lớp màng mỏng silic nitrua được kết tủa theo phương pháp LPCVD (b). Tấm này sau đó sẽ được phủ một lớp silic đa tinh thể với nồng độ chất phụ gia hợp lý (c). Silic đa tinh thể này được lấy mẫu và xác định. Tiếp sau đó là lắng đọng một lớp màng mỏng silic nitrua khác để bảo vệ màng silic đa tinh thể trong quá trình ăn mòn silic (d). Độ dày của hai lớp silic nitrua LPCVD là độ dày của lớp màng ngăn cuối cùng. Một ô được mở trên mặt sau của tấm để lộ ra lớp vật liệu silic. Silic này sẽ bị ăn mòn trong một chất ăn mòn không đẳng hướng, nhưng không phá huỷ lớp màng mỏng silic nitrua. Nói cách khác, khả năng lựa chọn giữa silic và silic nitrua là cao. Tiếp theo sự hình thành màng ngăn, silic nitrua phía trên các điện trở silic đa tinh thể được lấy mẫu có chọn lọc và các đường dẫn điện kim loại được hình thành (g).

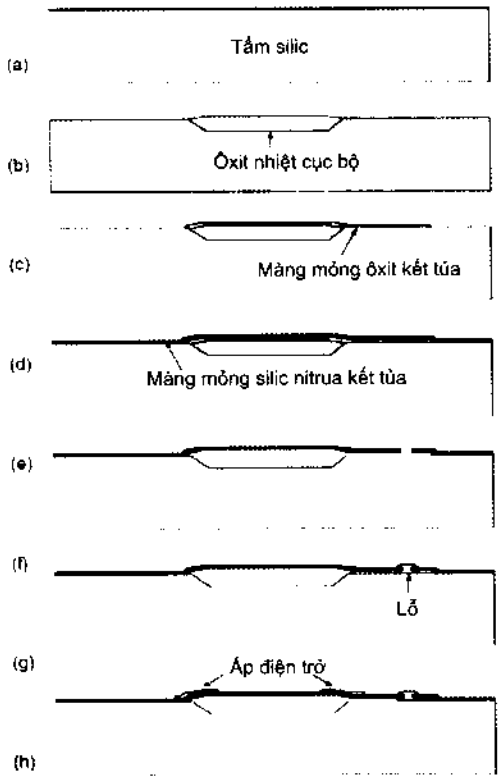


HÌNH 19.116 Sơ đồ các bước gia công chính thực hiện chế tạo micro một cảm biến micro áp suất với màng ngăn silic nitrua

Các cảm biến áp suất chế tạo micro bề mặt

Quá trình chế tạo micro bề mặt không yêu cầu phải loại bỏ chất nền silic, một công việc tiêu phí thời gian và không thật sự thích hợp với các quá trình tích hợp mạch hiện nay do sử dụng các chất ăn mòn silic. Để chế tạo các cảm biến tích hợp hiệu suất, chi phí thấp, cần thiết nên sử dụng phương pháp chế tạo micro bề mặt. Phần sau mô tả một ví dụ về quá trình chế tạo micro bề mặt. Một quá trình chế tạo micro bề mặt minh hoạ sẽ được miêu tả trong đoạn sau.

Quá trình chế tạo một cảm biến áp suất bằng phương pháp chế tạo micro bề mặt được thể hiện trên hình 19.117. Quá trình bắt đầu với một chất nền silic (a) với mặt trước được đánh bóng. Trước tiên, quá trình oxy hoá nhiệt được thực hiện để tạo ra một lớp oxit silic với chiều dày là 1,3 μm. Lớp oxit nhiệt là một phần của lớp sẽ bị lấy đi tại một giai đoạn sau đó. Sử dụng một quá trình làm lắng đọng khí áp suất thấp (LPCVD), một lớp oxit mỏng bám lại trên toàn bộ bề mặt của tấm. Lớp oxit này được làm mẫu sử dụng phương pháp in ảnh litô (c). Toàn bộ tấm này được bao phủ bởi một lớp màng mỏng silic nitrua kết tủa theo kỹ thuật LPCVD. Lớp màng mỏng silic nitrua được lấy mẫu và được ăn mòn để tạo ra các lỗ đường vào trên mặt trên của lớp oxit phía dưới (e). axit hydrofluoric đi qua các lỗ đường vào này sẽ loại bỏ các vật liệu oxy hoá bên trong các hốc. Tốc độ ăn mòn của axit trên silic nitrua là không đáng kể (f). Sau khi các hốc đã được làm sạch và làm khô, lớp silic nitrua LPCVD khác sẽ đông lại để bịt kín lớp silic nitrua ban đầu (g). Tiếp theo, silic đa tinh thể với nồng độ phụ gia thích hợp sẽ bám trên mặt trên của tấm và được làm mẫu để tạo ra các áp-trở (h).



HÌNH 19.117 Sơ đồ các bước chính thực hiện chế tạo micro bề mặt cảm biến áp suất với màng ngăn silic nitrua

Cần chú ý rằng mặc dù đo áp-trở được ưu tiên sử dụng ở các phương pháp trên, nhưng nó không phải chỉ có các phương pháp đo đó. Đo điện dung và đo áp-điện đã được minh hoạ ở phần trước và các phương pháp đó không nằm trong phạm vi đề cập của chương này.

Các cảm biến áp suất được làm từ các vật liệu phi silic

Với các ứng dụng nhất định như theo dõi động cơ đốt trong, các cảm biến áp suất cần phải chịu được nhiệt độ cao khi vận hành. Trong trường hợp này, silic sẽ không còn là vật liệu tối ưu nữa bởi vì nhiệt độ cao sẽ làm hỏng các liên kết silic có phụ gia.

Người ta đã sử dụng các vật liệu polyme cho việc chế tạo các cảm biến áp suất. Mặc dù các thiết bị tương đối ít, chúng vẫn là một xu thế phát triển quan trọng trong tương lai.

Gia tốc kế

Các gia tốc kế chế tạo micro khối

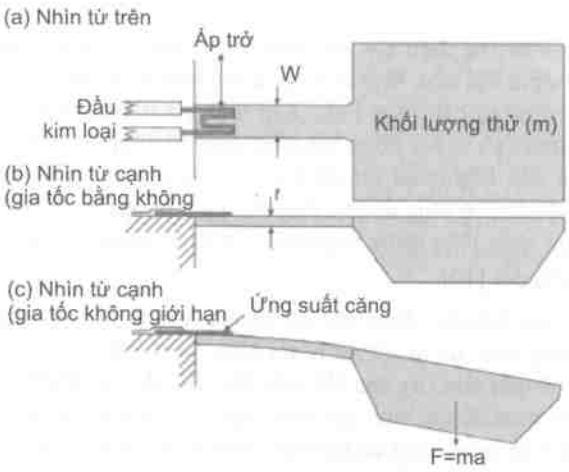
Các cảm biến gia tốc (hoặc còn được gọi là các thiết bị đo quán tính, IMU- inertial measurement units) đóng một vai trò quan trọng trong việc giám sát gia tốc và dao động của một đối tượng, như ô tô, máy móc hoặc một toà nhà. Có thể sử dụng các gia tốc kế rẻ tiền trong các hệ thống túi khí ô tô nhằm giảm chi phí và nâng cao độ an toàn cho người lái. Các cảm biến chế tạo micro có thể được làm nhỏ và chi phí thấp một cách hiệu quả để sử dụng trong các thiết bị phóng thông minh, ví dụ các bom xuyên bê tông. Cũng có thể ứng dụng các gia tốc kế nhỏ, nhiều trục trong các dụng cụ viết (các bút bi thông minh) để nhận dạng chữ viết tay.

Một gia tốc kế chế tạo micro khối được minh hoạ trên hình 19.118. Ảnh qua kính hiển vi SEM của cảm biến mẫu được thể hiện trên hình 19.119. Một khối silic được gắn vào phía cuối của một dầm công xôn. Tại nền của dầm công xôn đặt một phần tử áp-trở. Giả sử khối lượng của khối tâm là m, độ lớn của gia tốc là a, có thể tính toán giá trị đầu ra của cảm biến bằng một vài bước phân tích đơn giản sau đây. Lực tác dụng có điểm đặt tại khối tâm của vật được xác định theo định luật thứ nhất của Newton có độ lớn F = *ma*. Mômen tương đương của lực này đặt trên nền của dầm công xôn có độ lớn là:

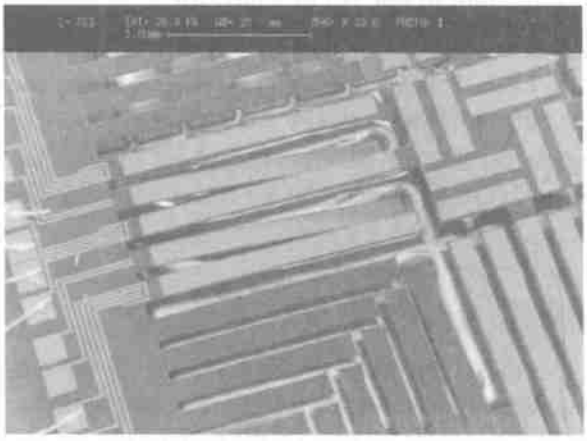
$$M = F\left(l + \frac{L}{2}\right) = ma\left(l + \frac{L}{2}\right)$$

Độ lớn của biến dạng tại bề mặt của dầm công xôn, nơi mà đặt các áp-trở là:

$$\varepsilon = \frac{Mt}{2EI}$$



HÌNH 19.118 Sơ đồ một gia tốc kế chế tạo micro khối



HÌNH 19.119 Hình ảnh qua kính hiển vi của một mẫu cảm biến micro áp suất chế tạo khối micro (Junjun Li)

Trong đó t là chiều dày của dầm, E là môđun đàn hồi của vật liệu làm dầm công xôn và I là mômen quán tính liên quan tới mặt cắt ngang của dầm. Giả sử mặt cắt ngang của dầm là một hình chữ nhật với chiều rộng là w và chiều dầy là t, mômen quán tính sẽ là:

$$I = \frac{wt^3}{12}$$

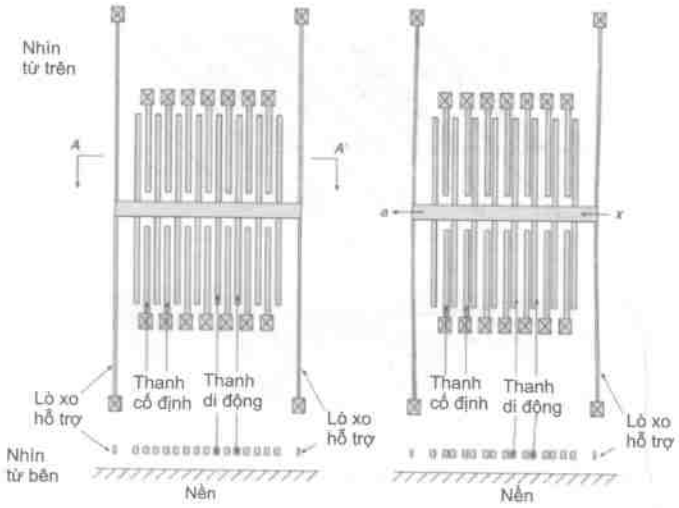
Chú ý rằng mômen quán tính này liên quan chặt chẽ tới chiều dày của dầm. Khi chiều dày của dầm giảm xuống một nửa, độ lớn của I sẽ bị giảm xuống tám lần và độ nhạy của cảm biến sẽ tăng lên tám lần.

Gia tốc kế chế tạo micro bề mặt

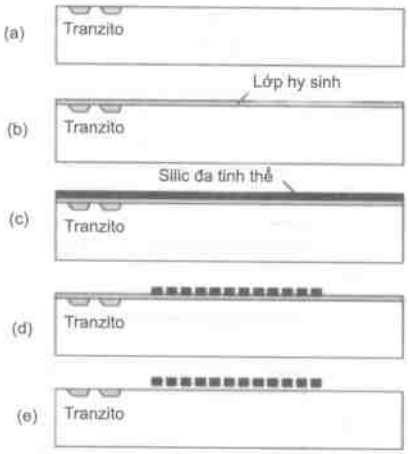
Các gia tốc kế chế tạo micro bề mặt thể hiện các ưu điểm tiềm năng như khả năng sẵn sàng cho tích hợp với các mạch xử lý tín hiệu. Do vậy, hàng loạt các loại cảm biến chế tạo micro bề mặt đã được sản xuất từ thập niên trước. Một loại sản phẩm thương mại thành công, sử dụng các thiết bị dạng tương tự để đo gia tốc sử dụng trong các túi khí ô tô nhằm đảm bảo an toàn trong những trường hợp va chạm. Cấu trúc, nguyên lý hoạt động và quá trình gia công loại cảm biến này sẽ được tóm tắt trong phần này.

Cảm biến này bao gồm hai bộ điện cực có hình răng lược đan vào nhau thể hiện trên hình 19.120. Một bộ tĩnh và cố định với nền. Một bộ khác được treo bằng các lò xo gắn với nền. Các tụ điện sẽ được tạo ra ứng với từng cặp răng lược. Khi một gia tốc ngoài tác động dọc theo chiều ngang của trục, một lực quán tính sẽ tác động lên phần răng di động và làm phần răng này chuyển động. Lượng dịch chuyển này liên quan tới độ lớn của gia tốc và hệ số lực của các lò xo đỡ. Chuyển động tương đối giữa hai bộ răng sẽ làm thay đổi toàn bộ giá trị điện dung giữa hai bộ răng này. Sự thay đổi điện dung từng phút được nhận biết và xử lý bằng một mạch xử lý tín hiệu bao gồm $\sum -\Delta A / D$ tầng chuyển đổi [10].

Quá trình chế tạo một cảm biến này theo mặt cắt ngang A-A được minh hoạ trong hình 19.121. Trước hết, các tranzito dùng cho các mạch xử lý tín hiệu được tạo ra trên một chất nền silic (a). Lớp silic đioxit bám trên bề mặt tấm (b), sau khi một lớp silic đa tinh thể kết tủa (c). Silic đa tinh thể này được lấy mẫu và ăn mòn để tạo hình các răng lược (e). Sau đó, lớp oxit này sẽ được loại bỏ bằng việc sử dụng một chất ăn mòn dạng đa tinh thể (axit hydrofluoric) với tốc độ ăn mòn không đáng kể. Ở khu vực các đa silic lan tới nền, qua lỗ đã lấy mẫu và được ăn mòn ở bước trước (c).



HÌNH 19.120 Sơ đồ minh hoạ nguyên lý hoạt động của một vi gia tốc kế chế tạo bề mặt



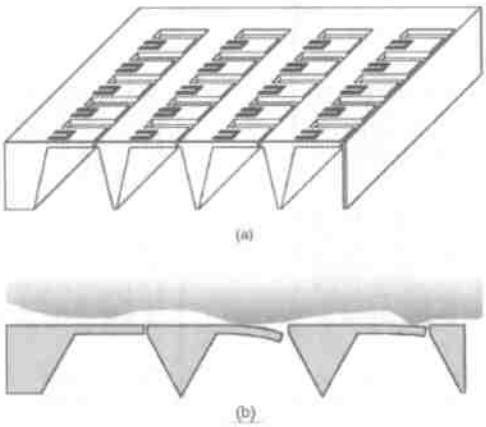
HÌNH 19.121 Sơ đồ quá trình chế tạo micro bề mặt một gia tốc kế đã được giới thiệu ở trên

Cảm biến tiếp xúc

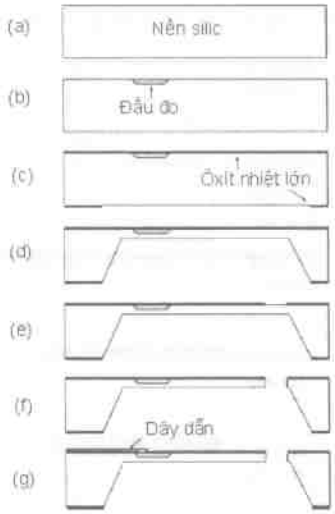
Các cảm biến tiếp xúc được sử dụng rộng rãi nhất trong các ứng dụng rôbôt nhằm nhận dạng khi tiếp xúc đối tượng. Mật độ cảm biến trên đầu ngón tay người là khoảng chừng 100/cm^2. Có thể có được mật độ cảm biến cao nếu ứng dụng công nghệ chế tạo micro.

Một cảm biến tiếp xúc dạng mảng được minh hoạ trong hình 19.122. Một mảng hai chiều các phần tử cảm biến độc lập cung cấp ánh xạ hai chiều của lực tiếp xúc và lực trượt. Sơ đồ mặt cắt ngang của một mảng khi tiếp xúc với một đối tượng bất kỳ được thể hiện trên hình 19.122 (b). Khi một đối tượng tiếp xúc với một cảm biến, lượng dịch chuyển tương ứng với lực tiếp xúc giống như hình học tôpô bề mặt.

Quá trình chế tạo cảm biến tiếp xúc được đề cập sau đây và được minh hoạ trên hình 19.123. Bắt đầu với một tấm silic (a), sự phân cực ion cục bộ tạo thành các áp-trở (b). Lớp màng mỏng oxit nhiệt được phát triển để rửa axit toàn bộ tấm. Lớp oxit ở đáy của tấm sẽ được lấy mẫu và được ăn mòn để lộ ra các chất nền silic (c). Một chất ăn mòn silic không đẳng hướng sẽ loại bỏ silic ở mặt sau của tấm (d). Sau đó, lớp màng mỏng oxit ở mặt trên của tấm được lấy mẫu và được ăn mòn bởi chất ăn mòn không đẳng hướng dạng plasma để tạo ra các dầm công xôn đứng tự do (e và f). Sau đó màng mỏng kim loại được làm khô và lấy mẫu tạo ra các dây dẫn (g).



HÌNH 19.122 Sơ đồ của một cảm biến tiếp xúc dạng màng: (a) hình phối cảnh, (b) hình chiếu mặt cắt ngang



HÌNH 19.123 Sơ đồ quá trình chế tạo micro một cảm biến tiếp xúc

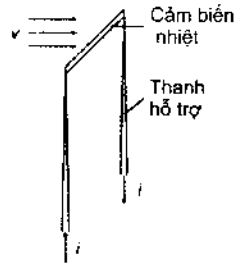
Cảm biến dòng chảy

Các cảm biến sử dụng để giám sát tốc độ dòng chảy của chất lỏng hoặc chất khí và để đo lực kéo tác động lên chuyển động của một đối tượng trong chất lỏng hoặc khí đó, chúng có vai trò quan trọng trong các ứng dụng rôbôt. Các cảm biến về dòng chảy hiện tại dựa trên một số các nguyên lý, đáng chú ý là các nguyên lý truyền nhiệt và truyền động lượng.

Các cảm biến dòng chảy dựa trên nguyên lý truyền nhiệt

Đối với các cảm biến dựa trên nguyên lý truyền nhiệt, một phần tử nhiệt được sử dụng với nhiệt độ lớn hơn nhiệt độ của môi trường chất lỏng hoặc khí xung quanh (hình 19.124). Nói chung nhiệt sinh ra do dòng điện chạy qua một phần tử điện trở. Một phần tử lý tưởng làm phần tử nhiệt là một điện trở đa silic có phụ gia. Suất điện trở nói chung là thấp hơn so với các điện trở kim loại cùng kích thước, do đó giá trị điện trở sẽ lớn hơn nhờ đó có thể thu nhỏ phần tử nhiệt.

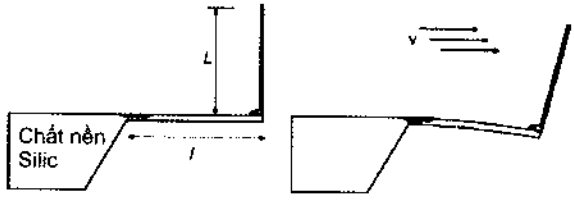
Chuyển động của chất lỏng có vận tốc phụ thuộc vào sự đối lưu nhiệt, sẽ làm giảm nhiệt độ của phần tử nhiệt. Nhiệt độ của phần tử này vì vậy được sử dụng để cung cấp thông tin về tốc độ dòng chảy và hướng của nó. Các cảm biến này thường được sử dụng trong các thiết bị đo gió dây dẫn nhiệt. Chế tạo micro các máy đo gió dây dẫn nhiệt đã được thực hiện bởi một số nhóm [11, 12].



HÌNH 19.124 Sơ đồ minh họa một quá trình truyền nhiệt của một cảm biến dòng chảy cơ bản (thiết bị đo gió)

Các cảm biến dựa trên nguyên lý truyền động lượng

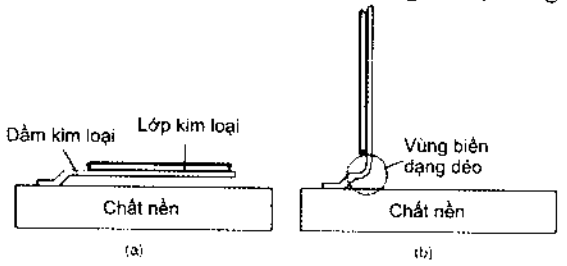
Đối với các cảm biến dựa trên nguyên lý truyền động lượng, các phần tử cơ học sẽ bị uốn do động lượng được truyền bởi một chất lỏng chuyển động (hình 19.125). Độ uốn này được sử dụng để tính độ lớn của dòng chảy. Sơ đồ của một cảm biến dòng chảy được thể hiện như hình dưới đây. Nó bao gồm một trục thẳng đứng nối với điểm cuối của một dầm công xôn (a). Khi có một dòng chảy tác động, sẽ có một lực phân bố lên trên trục thẳng đứng và làm cong dầm công xôn. Mức độ cong sẽ được nhận biết bởi các áp-trở nhúng, tỷ lệ với tốc độ trung bình của dòng chảy.



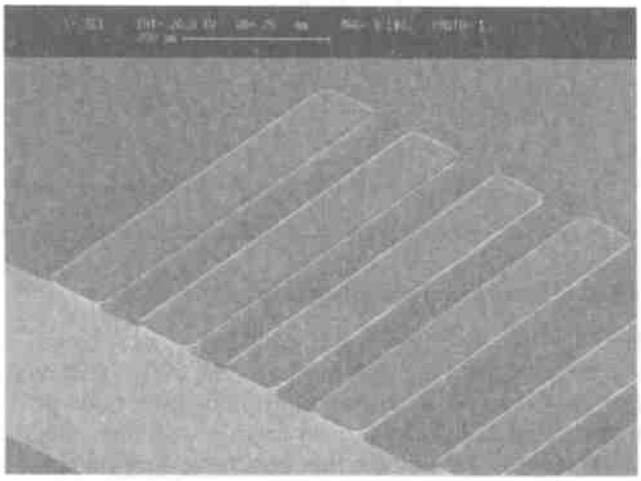
HÌNH 19.125 Sơ đồ minh hoạ nguyên lý hoạt động của cảm biến dòng chảy dựa trên sự truyền động lượng

Quá trình chế tạo chúng tương tự như với cảm biến tiếp xúc chỉ trừ việc ghép thêm trục thẳng đứng. Một số kỹ thuật để tổ hợp các vi cấu trúc 3 chiều ứng dụng hiệu quả các quá trình tích hợp đã được phát triển trong quá khứ. Ví dụ các cấu trúc ba chiều có thể được thực hiện bằng việc ghép nối các vi cấu trúc với nhau và sử dụng các khớp hợp kim hàn hoặc khớp polyme. Hiện nay, một quá trình với tên gọi là tổ hợp từ biến dạng dẻo PDMA (Plastic Deformation Magnetic Assembly process) đã và đang được phát triển. Ở phần tiếp theo, sẽ tóm tắt quá trình PDMA.

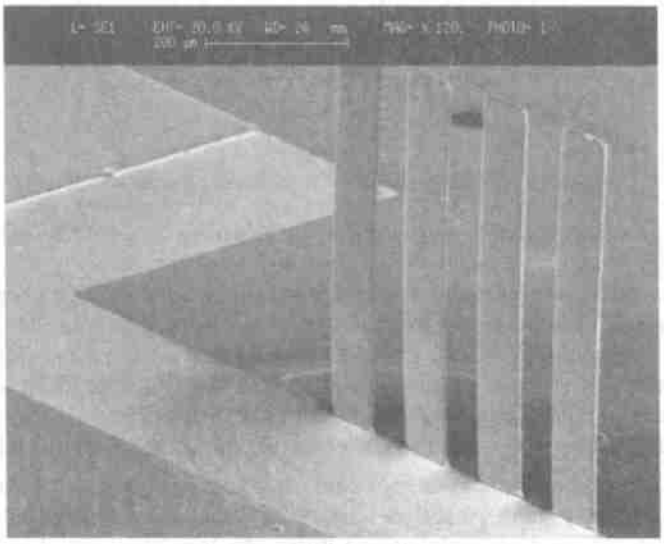
Kỹ thuật PDMA được đề cập qua ví dụ một dầm công xôn chế tạo micro bề mặt. Như đã được thể hiện trong sơ đồ dưới đây (hình 19.126 và hình 19.127), một dầm công xôn kẹp đơn được làm từ một kim loại mềm (ví dụ vàng hoặc nhôm) được gắn trên chất nền. Một miếng hợp kim pecmalci, một hợp kim sắt từ tính được tạo ra nhờ sự kết tủa bằng điện, sẽ được gắn với dầm công xôn. Khi có một từ trường xuất hiện bên dưới tấm, miếng từ tính sẽ bị nhiễm từ và sẽ tạo ra một mômen từ *M*. Mômen từ này sẽ nâng dầm công xôn ra khỏi chất nền. Khi lượng uốn là đáng kể, phần kim loại mềm này sẽ bị thay thế hoàn toàn do biến dạng dẻo tại vùng bản lề.



HÌNH 19.126 Sơ đồ quá trình tổ hợp từ biến dạng dẻo PDMA



(a)



(b)

HÌNH 19.127 Các vi hình ảnh SEM của các dầm công xôn (a) khi còn phẳng và (b) sau khi tổ hợp PDMA

Các xu thế phát triển trong tương lai

Thu nhỏ hoá và việc tích hợp các mạch đã tạo ra một bước nhảy vọt trong xã hội. Điều này góp phần làm giảm chi phí và góp phần quan trọng làm tăng tính năng của các mạch điện. Nếu không có các công nghệ mạch tích hợp này, thời đại thông tin có lẽ sẽ không tồn tại trong xã hội loài người.

Các cảm biến micro tích hợp cũng được dự đoán sẽ tạo ra những ảnh hưởng sâu rộng trong xã hội ngang bằng với các mạch tích hợp. Các cảm biến được ứng dụng trong rôbôt, toà nhà thông minh, đồ chơi thông minh, hệ thống an toàn và điều khiển trong ô tô và điều khiển công nghiệp. Tuy nhiên, để thật sự cảm nhận rõ ràng các ưu điểm của các cảm biến tích hợp, cần phải vượt qua

một số rào cản kỹ thuật. Hai rào cản lớn nhất là (1) chi phí cho nghiên cứu và phát triển các cảm biến tích hợp cao, (2) tính tin cậy và bền vững của các cảm biến.

Sự phát triển của các cảm biến vi tích hợp phụ thuộc nhiều vào chi phí phát triển và thời gian đưa vào thị trường. Các gia tốc kế được chế tạo micro bề mặt được phát triển bởi các thiết bị tương tự có giá thành tới mười triệu đô la và cần mất hơn 5 năm để sản xuất chúng. Một câu hỏi đặt ra là tại sao để chế tạo các cảm biến tích hợp lại cần nhiều chi phí đến vậy? Các cảm biến được phát triển sử dụng phương pháp tiếp cận theo nhóm. Chu trình phát triển một cảm biến bắt đầu từ các nguyên lý vật lý. Chi phí phát triển cảm biến bắt đầu từ giai đoạn chọn lựa vật liệu, thiết kế, quá trình chế tạo mẫu và đặc tính hoá.

Chi phí và thời gian cho một quá trình như vậy khiến các ứng dụng theo đơn đặt hàng một lượng nhỏ các cảm biến không thể thực hiện được. Do vậy, các môđun đo chuẩn, chi phí thấp, quá trình gia công đúc kim loại linh hoạt và các công cụ tạo mẫu và mô phỏng trên máy tính là cần thiết cho sự phát triển tối ưu của các cảm biến vi tích hợp.

Các cảm biến trong tương lai sẽ sử dụng các vật liệu không phải là silic nhiều hơn. Ví dụ các vật liệu polyme có thể được sử dụng để giảm chi phí trong khi các vật liệu chịu được nhiệt độ cao được sử dụng cho các ứng dụng đo nhiệt độ cao (ví dụ theo dõi các trạng thái của động cơ).

Kết luận

Phần trên đây đã trình bày một cách khái quát về sự phát triển công nghệ chế tạo micro và các cảm biến vi tích hợp. Giới thiệu các nguyên tắc đo thông dụng, bao gồm đo cảm biến điện dung, đo cảm biến áp-trở và đo cảm biến áp-điện. Bốn dạng cảm biến quan trọng đã được đề cập đến. Với từng loại cảm biến - cảm biến áp suất, cảm biến gia tốc, cảm biến tiếp xúc và cảm biến dòng chảy - cấu trúc cũng như các quá trình chế tạo chúng đã được nêu lên khái quát. Các bạn đọc quan tâm có thể tìm thêm các thông tin chuyên sâu trong các tài liệu tham khảo ở phần này.

Tài liệu tham khảo

[1] Nathanson, H.C., Newell, W.E., Wickstrom, R.A., and Davis J.R. Jr., "The resonant gate transistor", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-14, No. 3, pp. 117–113, March 1967.

[2] Petersen, K.E., "Silicon as a mechanical material", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 70, No. 5, pp. 420–457, May 1982.

[3] Angell, J.B., Terry, S.C., and Barth, P.W., "Silicon micromechanical devices", *Scientific American*, Vol., 248, pp. 44–55, April 1983.

[4] Siewell, G.L., Boucher, W.R., and McClelland, P.H., "The ThinkJet orifice plate: a part with many functions", *Hewlett-Packard Journal*, May 1985, pp. 33–37.

[5] Allen, R.R., Meyer, J.D., and Knight, W.R., "Thermodynamics and hydrodynamics of thermal ink jets", Hewlett-Packard Journal, May 1985, pp. 21–27.

[6] Williams, K.R., and Muller, R.S., "Etch rates for micromachining processing", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 256–268, December 1996.

[7] Kovacs, G.T.A., Micromachined transducers sourcebook, McGraw-Hill, 1998.

[8] Trimmer, W.S., Micromechanics and MEMS—Classis and seminal papers to 1990, IEEE Press, 1997.

[9] WWW site http://mems.isi.edu.

[10] Yun, W., Howe, R.T., and Gray, P.R., "Surface micromachined, digitally force-balanced accelerometer with integrated CMOS detection circuitry", *Technical Digest, IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 21–25, Hilton Head, SC, June 1992.

[11] Jiang, F., Tai, Y.C., Ho, C.M., Karan, R., and Garstenauer, M., "Theoretical and experimental studies of micromachined hot-wire anemometers", *Technical Digest, International Electron Devices Meeting 1994*, San Francisco, CA, pp. 139–142, December 1994.

[12] Ebefors, T., Kalvesten, E., and Stemme, G., "Three dimensional silicon triple-hot-wire anomometer based on polyimide joints", *Proceedings of the 11th International Workshop on MEMS*, pp. 93–98, January 1998.

20

Cơ cấu chấp hành

George T.-C. Chiu
Purdue University

C. J. Fraser
University of Abertay Dundee

Ramutis Bansevicius
Kaunas University of Technology

Rymanta Tadas Tolocka
Kaunas University of Technology

Massimo Sorli
Politecnico di Torino

Stefano Pastorelli
Politecnico di Torino

Sergey Edward Lyshevski
Purdue University Indianapolis

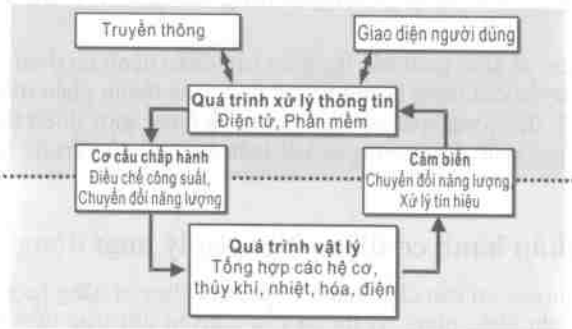
20.1 Cơ cấu chấp hành cơ điện 20-1
20.2 Máy điện 20-31
20.3 Cơ cấu chấp hành áp điện 20-48
20.4 Hệ thống chấp hành thuỷ lực và khí nén 20-59
20.5 MEMS: Phân tích, thiết kế và chế tạo các bộ chuyển đổi micro 20-91

20.1 Cơ cấu chấp hành cơ điện

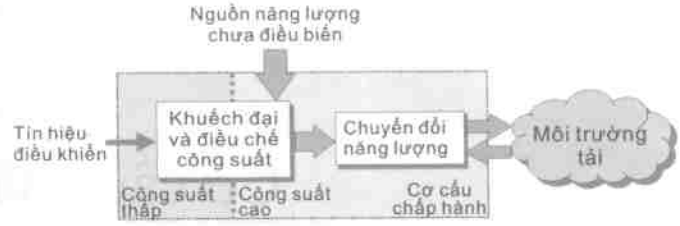
George T.-C. Chiu

Mở đầu

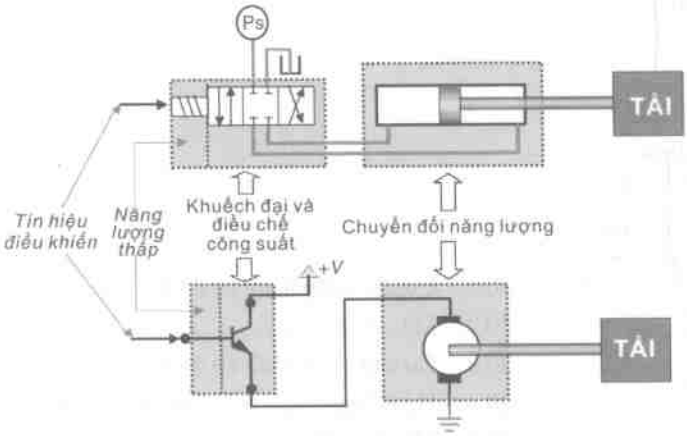
Như đã tóm tắt trong các chương trước, một hệ cơ điện tử có thể được chia thành các khối chức năng như trong hình 20.1. Chương này sẽ tập trung vào phần cơ cấu chấp hành của hệ thống. Đặc biệt, sẽ xem xét về các dạng cơ cấu chấp hành cơ điện tử và những ảnh hưởng của tải trọng hay môi trường vật lý đến chúng. Tiếp theo, sẽ xem xét các thành phần điện tử cơ bản cần thiết cho việc điều biến năng lượng điện.



HÌNH 20.1 Hệ cơ điện tử



HÌNH 20.2 Sơ đồ chức năng của cơ cấu chấp hành



HÌNH 20.3 Cơ cấu chấp hành thuỷ lực và cơ điện

Một hệ cơ điện tử có thể được chia một cách tương đối thành hai phần: phần năng lượng cao hơn tương tác với môi trường vật lý và phần năng lượng thấp hơn để xử lý dữ liệu, hình 20.1. Cảm biến và cơ cấu chấp hành là những thiết bị thực hiện nhiệm vụ điều biến và chuyển hoá năng lượng. Bởi vậy cấu trúc của một cơ cấu chấp hành có thể được mô tả như trong hình 20.2. Thông thường các cơ cấu chấp hành chỉ là các thiết bị chuyển đổi năng lượng. Tuy nhiên, với sự phát triển của điện tử công suất, một cách tổng quan có thể coi cơ cấu chấp hành bao gồm cả phần khuếch đại công suất. Một cơ cấu chấp hành thuỷ lực tuyến tính, hình 20.3, cũng có thể phân loại tương tự, van cuộn (spool valve) là khối khuyếch đại/điều chỉnh công suất với vị trí van là tín hiệu điều khiển và áp suất/lưu lượng chất lỏng là nguồn năng lượng. Xi lanh thuỷ lực hoạt động như một thiết bị chuyển đổi từ thủy năng sang cơ năng. Với một hệ cơ cấu chấp hành cơ điện thông thường như động cơ điện một chiều (hình 20.3), khối khuếch đại công suất là phần truyền động cho động cơ, khuếch đại mức tín hiệu điều khiển (dòng điện/công suất nhỏ) tới tín hiệu công suất cao hơn (dòng điện lớn), được dùng để chuyển năng lượng điện thành năng lượng cơ dựa trên nguyên lý điện từ.

Phần đầu chương này sẽ khái quát các dạng cơ cấu chấp hành cơ điện. Chúng được chia thành các nhóm có cơ cấu chuyển đổi năng lượng tương ứng. Các thành phần điện tử như điôt, thyristor, tranzito dùng để khuếch đại công suất và điều chỉnh sẽ được giới thiệu thông qua việc xây dựng các khối khuếch đại công suất. Cuối cùng là kết luận về một số vấn đề liên quan tới các cơ cấu chấp hành cơ điện.

Các dạng cơ cấu chấp hành cơ điện - Nguyên lý hoạt động

Nguyên lý chung của các cơ cấu chấp hành cơ điện là chuyển năng lượng điện sang năng lượng cơ. Có nhiều dạng cơ cấu khác nhau, ví dụ cơ cấu chuyển đổi trực tiếp như chuyển đổi áp điện hoặc cơ cấu chuyển đổi qua một môi trường trung gian như từ trường. Các cơ cấu chấp hành cơ điện phổ biến sẽ được giới thiệu một cách khái quát sau đó sẽ được đề cập chi tiết hơn trong các mục nhỏ.

Điện từ - Từ trường

Điện từ là phương pháp chuyển đổi năng lượng ứng dụng phổ biến nhất ở các cơ cấu chấp hành cơ điện. Một trong những lý do sử dụng từ trường thay vì điện trường là do mật độ năng lượng trong từ trường cao hơn. Khe không khí phân cách phần tĩnh (stato) và phần chuyển động của một cơ cấu chấp hành cơ điện là nơi diễn ra sự chuyển đổi năng lượng cơ điện. Lượng năng lượng trên một đơn vị thể tích trong khe không khí có từ trường có thể cao hơn năm lần trong khe có điện trường.

Định luật Lorentz về lực điện từ và định luật Faraday về cảm ứng điện từ là hai nguyên tắc cơ bản chi phối các cơ cấu chấp hành điện từ. Trước khi đi vào chi tiết về điện từ, chúng tôi sẽ giới thiệu các khái niệm về từ trường và từ thông.

Từ thông ϕ tồn tại khi có từ trường. Độ lớn của từ trường $\vec{H}$ (A/m) và mật độ từ thông $\vec{B}$ (tesla [T]) liên quan với nhau bởi độ từ thẩm *tương đối* của vật liệu. Trong chân không, mật độ từ thông tỉ lệ với độ lớn từ trường như công thức sau:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \tag{20.1}$$

trong đó $\mu_0 = 4$ [T m/A] là *hằng số độ từ thẩm*. Với các vật liệu từ hoặc sắt từ khác, công thức tính như sau:

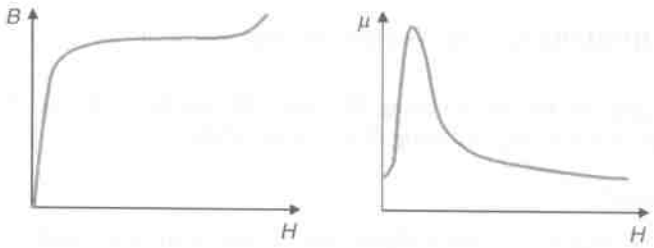
$$\vec{B} = \mu_r(\vec{H}) \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \tag{20.2}$$

trong đó, μ_r ($\vec{H}$) là *độ từ thẩm ứng với* từng loại vật liệu. Hình 20.4 là các đường cong *B-H* và μ-*H* điển hình.

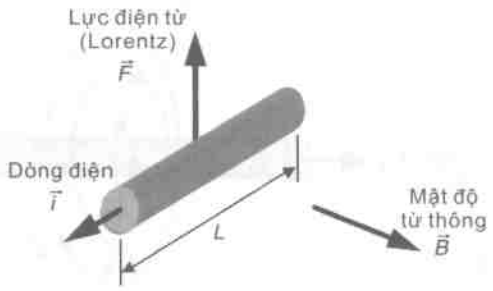
Định luật Lorentz về lực điện từ

Khi một vật dẫn mang dòng điện được đặt trong từ trường, nó sẽ chịu tác động của một lực cảm ứng theo công thức:

$$\vec{F} = \vec{i} \times \vec{B} \tag{20.3}$$



HÌNH 20.4 Biểu đồ μ-*H* và biểu đồ *B-H*



HÌNH 20.5 Lực điện từ Lorentz

Trong đó $\vec{F}$ là vectơ lực, $\vec{i}$ là vectơ dòng điện, $\vec{B}$ là mật độ từ thông. Lực này được gọi là *lực điện từ* hay lực Lorentz. Nếu một vật dẫn có độ dài L mang dòng điện i không đổi đặt trong vùng có từ thông B không đổi, như trong hình 20.5, độ lớn của lực Lorentz được tính theo công thức:

$$F = \left|\vec{F}\right| = BLi \tag{20.4}$$

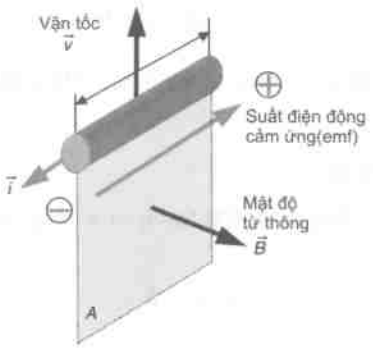
Định luật Faraday về cảm ứng điện từ

Chuyển động của một vật dẫn trong từ trường sẽ sinh ra một suất điện động (emf), hay hiệu điện thế, ở hai đầu vật dẫn:

$$emf = E = -\frac{d\phi}{dt} \tag{20.5}$$

trong đó $\phi = \oint \vec{B}.d\vec{A}$ là từ thông. Với một vật dẫn có độ dài L chuyển động với tốc độ không đổi v trong từ trường không đổi vuông góc với bề mặt A, như hình 20.6, độ lớn của suất điện động cảm ứng (điện thế) là:

$$emf = E = BLv \tag{20.6}$$



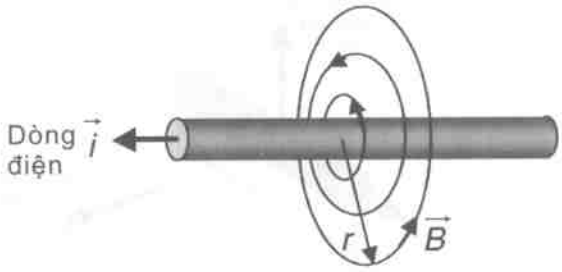
HÌNH 20.6 Suất điện động cảm ứng được sinh ra do chuyển động

Có hai phương pháp để tạo ra từ trường $\vec{H}$, hay một mật độ từ thông $\vec{B}$ mong muốn đó là dùng một nam châm vĩnh cửu hoặc sử dụng định luật Boit-Savart.

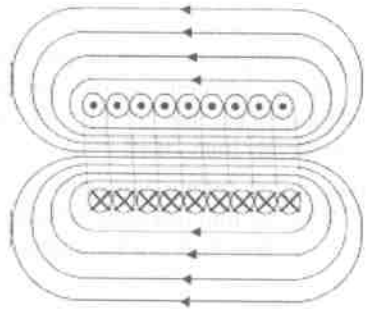
Định luật Boit-Savart

Một vật dẫn mang điện dài (vô hạn), thẳng, sinh ra một từ trường quanh vật dẫn như thấy trên hình 20.7. Mật độ từ thông ở khoảng cách r vuông góc từ vật dẫn tính theo công thức:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi r} \cdot i \tag{20.7}$$



HÌNH 20.7 Từ trường sinh ra bởi vật dẫn mang dòng điện



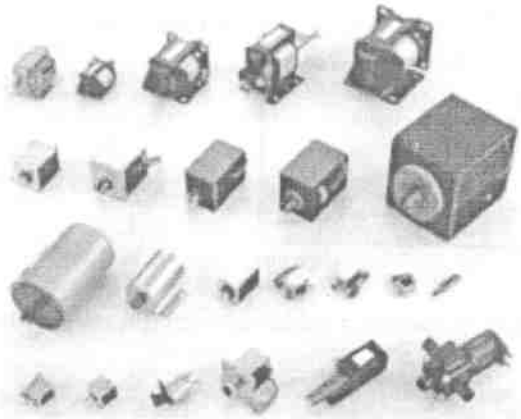
HÌNH 20.8 Từ trường cảm ứng của cuộn dây

Trong đó, i là dòng điện. Nếu ta bẻ cong vật dẫn mang dòng điện thành dạng cuộn cảm xoắn ốc với N vòng (solenoid), nó sẽ sinh ra một từ trường tương ứng như mô tả trong hình 20.8.

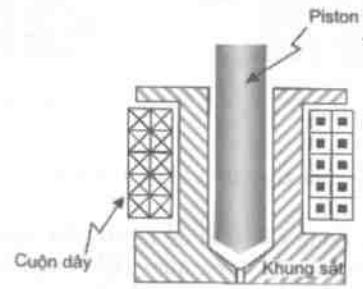
Nếu độ dài cuộn cảm L lớn hơn nhiều đường kính D của nó, mật độ từ thông xác định theo quy tắc bàn tay phải và độ lớn xấp xỉ bằng:

$$B = \mu \frac{N}{L} \cdot i \tag{20.8}$$

trong đó $\mu = \mu_r.\mu_0$ là độ từ thẩm của môi trường vật chất trong cuộn dây và i là dòng điện qua cuộn dây. Đại lượng này có thể được tăng cường bằng cách cài một lõi sắt từ trong cuộn cảm để tăng độ từ thẩm. Cuộn cảm được sử dụng rộng rãi trong các thiết bị điện tử cho việc tạo ra các từ trường điều khiển được và thường liên quan tới nam châm điện.



HÌNH 20.9 Các cơ cấu chấp hành kiểu cuộn cảm (Courtesy of Shih Hsing Industrial Co., Ltd.)



HÌNH 20.10 Một cuộn cảm thông thường

Các thiết bị kiểu solenoid

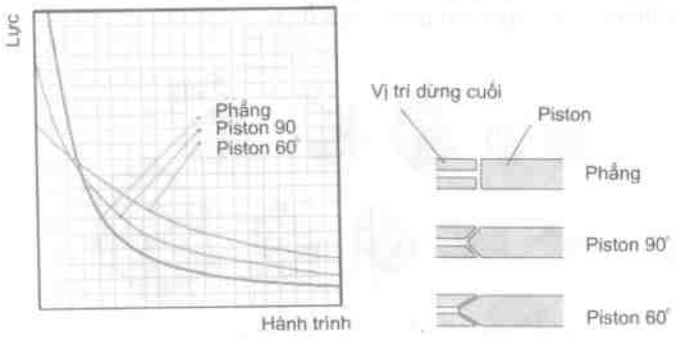
Solenoid, hình 20.9, là dạng cơ cấu chấp hành điện từ đơn giản nhất được dùng ở các bộ phát động dạng thẳng hoặc quay cho các van, khoá chuyển mạch (công tắc) và rơle. Như tên gọi đã chỉ ra, một cuộn solenoid bao gồm một khung sắt từ tĩnh (stato), một cuộn dây điện và một lõi sắt từ có dạng như piston (phần ứng) ở tâm cuộn dây hình 20.10.

Khi cuộn cảm được cấp năng lượng, từ trường được sinh ra trong nó. Piston sẽ di chuyển thu hẹp khe hở không khí giữa nó và khung sắt từ tĩnh làm tăng từ thông móc vòng. Lực từ sinh ra xấp xỉ tỉ lệ với bình phương dòng điện i và tỉ lệ nghịch với bình phương diện tích khe hở không khí δ, được gọi là hành trình của cuộn cảm:

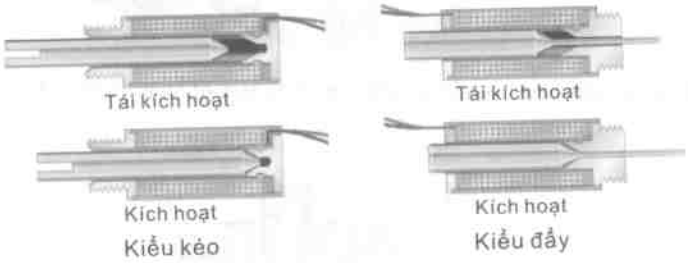
$$F \propto \frac{i^2}{\delta^2} \tag{20.9}$$

Như chỉ ra trong hình 20.11, với các hành trình nhỏ hơn 0.060 inch, piston dạng mặt phẳng cần lực kéo hoặc đẩy lớn hơn các piston 60° từ 3-5 lần. Với các hành trình dài tới 0.750 inch, piston 60° có lợi thế lớn hơn piston thẳng. Khi cuộn cảm không được cấp năng lượng, từ trường giảm và piston sẽ trở về vị trí cũ nhờ tải trọng bản thân hoặc nhờ một lò xo kéo trở lại.

Tất cả các cuộn solenoid thẳng về cơ bản sẽ kéo piston vào trong cuộn dây khi nó được cấp năng lượng. Cuộn solenoid dạng đẩy được thực hiện bằng cách duỗi dài piston qua một lỗ ở vị trí dừng cuối (back-stop), hình 20.12. Do đó khi được cấp năng lượng, piston vẫn được kéo vào trong cuộn dây, nhưng phần kéo dài sinh ra một chuyển động đẩy từ phần cuối của cuộn cảm. Khi cuộn cảm không cấp năng lượng piston tự chuyển động trở về vị trí ban đầu nhờ tải bản thân nó (trọng lượng của tải) hoặc nhờ lực lò xo, nó được cung cấp như một phần không thể thiếu của cuộn cảm.



HÌNH 20.11 Đường cong lực-hành trình của các cuộn cảm (Courtesy of Magnetic Sensor Systems)



HÌNH 20.12 Các dạng cuộn cảm đẩy và kéo (Curtesy of Ledex® & Dormeyer®)

Các cuộn cảm dạng quay sử dụng các ổ bi để di chuyển xuống theo hướng đường vòng ổ bi biến chuyển động tịnh tiến thành chuyển động quay. Khi cuộn cảm được cấp năng lượng, piston được kéo về phía stato và quay một góc xác định bởi đường vòng ổ bi, hình 20.13. Một rơle cơ

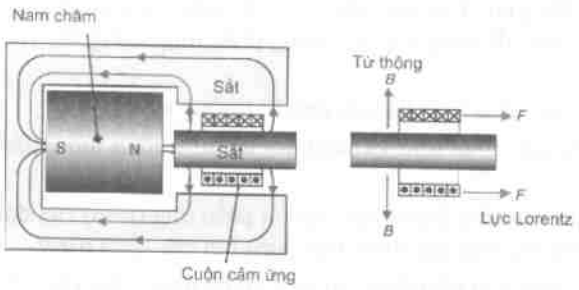
điện (EMR) là một thiết bị sử dụng một cuộn solenoid để đóng hay mở một tiếp điểm cơ khí (công tắc) giữa các đầu dẫn điện công suất lớn. Một rơle thực hiện chức năng tương tự một tranzito công suất là dùng năng lượng điện nhỏ để chuyển mạch dòng điện lớn. Điểm khác nhau là một rơle có khả năng điều khiển mức dòng điện lớn hơn nhiều. Sự khác nhau của cơ cấu này có thể là: một số rơle có nhiều tiếp điểm, một số thì lại bị được bao kín, một số lại có mạch điện bên trong làm trễ sự tiếp xúc khép kín sau khi khởi động và một số khác như trong mạch điện thoại trước đây lại được di chuyển qua một loạt vị trí từng bước mỗi khi chúng được cấp năng lượng và không được cấp năng lượng.

HÌNH 20.13 Các cuộn cảm dạng quay (Courtesy of Ledex® & Dormeyer®)

Xem xét thiết kế/lựa chọn. Lực, hành trình, nhiệt độ và chu trình hoạt động là 4 điểm chính cần cân nhắc khi thiết kế/lựa chọn cuộn solenoid. Một cuộn tuyến tính có thể cấp tối đa 30 lb lực từ một đơn vị ít hơn 2¼ in. độ dài. Một cuộn quay cũng có thể cung cấp một mômen hơn 100 lb từ 1 đơn vị nhỏ hơn 2¼ in. chiều dài. Như trong hình 20.11, quan hệ giữa lực và hành trình có thể sửa bằng cách thay đổi thiết kế của một số bộ phận bên trong. Tăng dòng điện tới cuộn cảm để có thể đạt được lực đầu ra. Tuy nhiên dòng điện lớn lại có xu hướng làm tăng nhiệt độ cuộn dây, điện trở dây dẫn tăng. Điều này dẫn tới giảm lực đầu ra. Các cuộn cảm thường có một dải hoạt động với chu kỳ hoạt động liên tục hoặc không liên tục. Một cuộn solenoid với chu trình hoạt động 100% có thể được cấp một điện thế danh định liên tục vì tổng nhiệt độ cuộn dây sẽ không vượt quá giá trị cực đại cho phép, trong khi một cuộn solenoid khác hoạt động gián đoạn có một thời gian đóng mạch giới hạn cho phép mà khi hoạt động không được vượt quá thời gian đó. Cuộn cảm hoạt động không liên tục cung cấp lực lớn hơn cuộn cảm liên tục. Nhiệt độ hoạt động tối đa của một cuộn cảm quyết định bởi dải nhiệt độ của vật liệu cách điện dùng trong cuộn dây (bảng 20.1).

BẢNG 20.1 Dải nhiệt độ của các vật liệu cách điện

Phân loại		Dải nhiệt độ	
Loại (lớp) A	Loại (lớp) 105	105^0C	221^0F
Loại (lớp) E	Loại (lớp) 120	120^0C	248^0F
Loại (lớp) B	Loại (lớp) 130	130^0C	266^0F
Loại (lớp) F	Loại (lớp) 155	155^0C	311^0F
Loại (lớp) H	Loại (lớp) 180	180^0C	356^0F
Loại (lớp) N	Loại (lớp) 200	200^0C	392^0F



HÌNH 20.14 Động cơ kiểu cuộn dây động

Động cơ kiểu cuộn dây động VCM (Voice-Coil Motor)

Động cơ kiểu cuộn dây động có ứng dụng bắt nguồn từ các loa phát thanh. Hiện nay nó dùng rộng rãi trong các đầu đọc/ghi trong các ổ đĩa cứng. Khi cuộn cảm chuyển động, VCM giống như một cơ cấu chấp hành cuộn dây động. VCM bao gồm một cuộn dây chuyển động (phần ứng) trong một khe không khí và một nam châm vĩnh cửu (stato) tạo ra từ trường trong khe, hình 20.14. Khi dòng điện qua cuộn cảm, cuộn cảm chịu một lực điện từ tác động theo định luật Lorentz bằng:

$$\vec{F} = \vec{i} \times \vec{B}$$

Hầu hết các cuộn cảm động được thiết kế có từ thông vuông góc với chiều dòng điện nên lực Lorentz có thể được tính như sau:

$$F_{VCM} = \gamma BNl \cdot i = K_F \cdot i \Rightarrow F_{VCM} \infty\ i \qquad (20.10)$$

trong đó l là độ dài cuộn cảm/một vòng, B là mật độ từ thông, N là số vòng dây của cuộn cảm và γ là hệ số sử dụng của cuộn cảm. Công thức trên chỉ ra lực tỉ lệ với độ lớn dòng điện cấp và hằng số tỉ lệ K_F thường được gọi là *hằng số lực*.

Cuộn dây thường được treo trong khe nhờ các lò xo và được gắn với tải như màng của loa âm thanh, ống cuộn của van thủy lực hay đầu đọc/ghi của ổ đĩa. Quan hệ tuyến tính giữa lực đầu ra và dòng điện cung cấp, khả năng dịch chuyển được cả hai chiều, vì vậy cuộn dây động thường được dùng hơn so với các cuộn dây solenoid. Tuy nhiên, do đại lượng ra được điều khiển của cuộn dây động là lực yêu cầu một vài loại điều khiển vòng kín hoặc vài loại lò xo giảm chấn.

Xem xét thiết kế/lựa chọn. Từ công thức (20.10) ta thấy rằng hằng số lực phụ thuộc vào mật độ từ thông và số lượng dây dẫn có thể đặt trong khe. Có hai chọn lựa để tăng hằng số lực. Một là tăng mật độ từ thông, điều này có thể đạt được bằng cách dùng vật liệu từ mạnh hơn và tăng các thông số khác như N hoặc l, tức là bó nhiều dây hơn hoặc làm cuộn có đường kính lớn hơn.

Với một khe có thể tích cố định, dùng loại dây dẫn nhỏ hơn là cách duy nhất để tăng số vòng dây. Tuy nhiên, tăng số vòng dây sẽ dẫn tới điện trở cao hơn và nó sẽ làm tăng nhiệt của cuộn dây và hạn chế dòng điện được phép. Thêm vào đó, phần cách ly thêm vào sẽ chiếm nhiều thể tích hơn và có xu hướng giảm hiệu quả của việc tăng số vòng dây N. Tóm lại, để tăng hiệu năng của cuộn cảm động, người thiết kế có thể hoặc là chọn vật liệu từ tốt hơn hoặc tăng kích cỡ động cơ bằng cách tăng độ lớn cuộn cảm (tăng D) hay tăng độ dài cuộn cảm (tăng N).

Động cơ điện

Các động cơ điện được sử dụng rộng rãi nhất trong các cơ cấu chấp hành cơ điện. Nó có thể được phân loại theo chức năng hoặc theo đặc tính điện từ. Sự khác nhau chủ yếu ở các động cơ điện là thiết kế rôto và phương pháp tạo từ trường. Hình 20.15 mô tả các thành phần cấu tạo của một động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu. Một số thuật ngữ chung cho các động cơ điện là:

Stato là phần tĩnh bên trong hoặc bên ngoài của động cơ làm bằng vật liệu tạo từ trường stato thích hợp. Nó có thể được làm bằng nam châm vĩnh cửu hoặc các cuộn dây cảm.

Hệ thống kích từ là một phần của stato, tạo từ thông stato.

Rôto là phần quay của động cơ. Tuỳ theo cấu trúc, nó có thể là nam châm vĩnh cửu hay lõi sắt từ với các cuộn dây (phần ứng) để cung cấp từ trường phần ứng tương tác với từ trường stato tạo mômen quay.

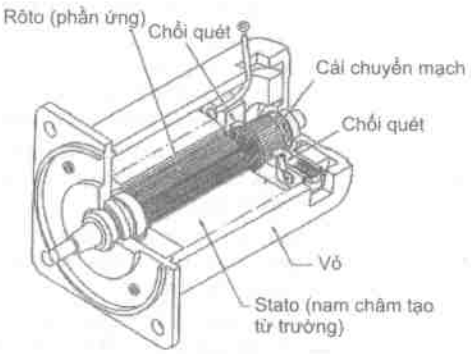
Phần ứng là cuộn dây rôto mang điện và cảm ứng từ trường rôto.

Khe hở không khí là khe nhỏ giữa rôto và stato nơi hai từ trường tương tác và sinh ra mômen quay.

Chổi than là bộ phận qua nó dòng điện được cấp tới phần ứng (rôto) của động cơ một chiều. Ở các động cơ xoay chiều đồng bộ, việc này được thực hiện bởi *các vành trượt*.

Vành đổi chiều là một phần của rôto động cơ một chiều được tiếp xúc với chổi than và dùng cho việc điều khiển chiều dòng điện phần ứng. Vành đổi chiều dùng để điều khiển chiều dòng điện

trong stato và/hoặc cuộn dây phần ứng để duy trì chiều từ thông stato và rôto. Với các động cơ xoay chiều, việc chuyển mạch được thực hiện bởi các dòng điện xoay chiều cung cấp và sơ đồ đấu nối các cuộn dây. Với các động cơ bước và động cơ một chiều không chổi than (BLDC), sự chuyển mạch được thực hiện bởi các mạch điện tử và/hoặc các lệnh tới động cơ.



HÌNH 20.15 Động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu [2]

Mômen sinh ra trong động cơ điện có thể do tương tác giữa dòng điện phần ứng với từ trường stato (định luật Lorentz) hoặc tương tác giữa từ trường stato và từ trường phần ứng. Bảng 20.2 tổng kết cách phân loại chung của động cơ điện. Phần sau sẽ nêu chi tiết hơn về hoạt động của các loại động cơ điện và những đặc điểm cần cân nhắc khi thiết kế.

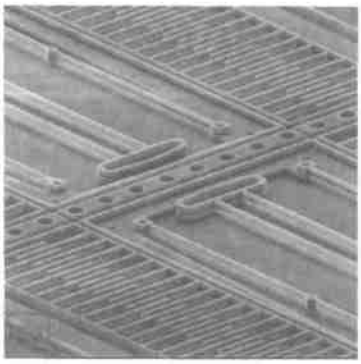
BẢNG 20.2 Phân loại động cơ điện

Phân loại			Mô tả
Loại động cơ	Từ trường		
Động cơ một chiều	Nam châm vĩnh cửu		Nam châm vĩnh cửu sinh từ trường stato, Dòng điện cấp trực tiếp tới cuộn dây phần ứng của rôto qua các chổi than và các chuyển mạch.
	Nam châm điện	Cuộn song song	Cuộn dây stato chính là nam châm điện. Cuộn stato được nối song song với cuộn dây phần ứng.
		Cuộn nối tiếp	Cuộn dây stato chính là nam châm điện. Cuộn dây kích từ được nối nối tiếp với cuộn dây phần ứng.
		Cuộn hỗn hợp	Hai cuộn dây stato chính là nam châm điện. Một cuộn dây kích từ được nối nối tiếp, một nối song song với cuộn dây phần ứng.
		Cuộn độc lập	Cuộn dây stato chính là nam châm điện. Từ trường stato và từ trường phần ứng được cấp điện độc lập.
Động cơ xoay chiều	Một pha	Cảm ứng	Gồm một cuộn dây stato và rôto lồng sóc. Không có sự kết nối bên ngoài với rôto. Mômen sinh ra do sự cảm ứng điện từ giữa stato và rôto. Dòng điện xoay chiều tạo ra sự đổi chiều của các từ trường. Tốc độ rôto chậm hơn một chút so với tốc độ từ trường stato quay (độ trượt).
		Đồng bộ	Rôto nam châm vĩnh cửu hoặc rôto dây quấn cùng các vành đổi chiều. Tốc độ quay đồng bộ với tần số của nguồn điện xoay chiều.
	Nhiều pha	Cảm ứng (không đồng bộ)	Tương tự như động cơ cảm ứng một pha nhưng có nhiều cuộn dây stato. Tự khởi động.
		Đồng bộ	Tương tự động cơ đồng bộ một pha nhưng có nhiều cuộn dây hơn, hoạt động êm hơn.

Phân loại			Mô tả
Loại động cơ	Từ trường		
	Vạn năng		Về bản chất, một động cơ xoay chiều cảm ứng một pha với sơ đồ nối như động cơ một chiều nối tiếp, có thể được điều khiển bởi nguồn xoay chiều hoặc một chiều.
	Nam châm vĩnh cửu		Rôto nam châm vĩnh cửu với dây quấn stato sinh ra một từ trường tương ứng. Khi cung cấp trình tự (cực tính) dòng điện cuộn cảm khác nhau, từ trường nam châm vĩnh cửu rôto sẽ đồng bộ với từ trường cảm ứng stato.
Động cơ bước	Từ trở biến thiên		Rôto bằng sắt từ dạng răng cưa và các cuộn dây stato. Chuyển động của rôto là kết quả sự tối thiểu hóa từ trở giữa các cực rôto và stato.
	Lai		Rôto nhiều răng với cuộn dây stato. Rôto gồm hai phần cảm ứng sắt từ dạng răng cưa giống nhau xếp xen kẽ với một nam châm vĩnh cửu.
Động cơ một chiều không chổi than	Nhiều pha	Đồng bộ	Về cơ bản là một động cơ xoay chiều nhiều pha nhưng dùng chuyển mạch điện tử để phối hợp (đồng bộ) với từ trường rôto và stato. Chuyển mạch điện tử có thể dùng nguồn một chiều để điều khiển động cơ đồng bộ.

Tĩnh điện học - Điện trường

Do điện trường có mật độ năng lượng thấp hơn từ trường, các ứng dụng điển hình của lực điện trường giới hạn trong các thiết bị đo và gia tốc các phần tử tích điện, trong đó mật độ năng lượng yêu cầu nhỏ. Gần đây, với sự phát triển nhanh của công nghệ chế tạo micro, có thể cung cấp lực tĩnh điện nhỏ cho các cơ cấu chấp hành cơ điện micro như cơ cấu chấp hành kiểu răng lược (hình 20.16). Ưu điểm của các bộ phát động dựa trên tĩnh điện học là có tốc độ chuyển mạch cao hơn và tiêu hao năng lượng ít hơn khi so sánh với sự phát động điện từ. Tuy nhiên, cần tính đến giới hạn lực, di chuyển và điện áp làm việc cao. Sự phát động tĩnh điện là cơ chế chính điều khiển chuyển động các hạt mực tích điện trong các xử lý chụp ảnh điện, ví dụ như các máy in laze.

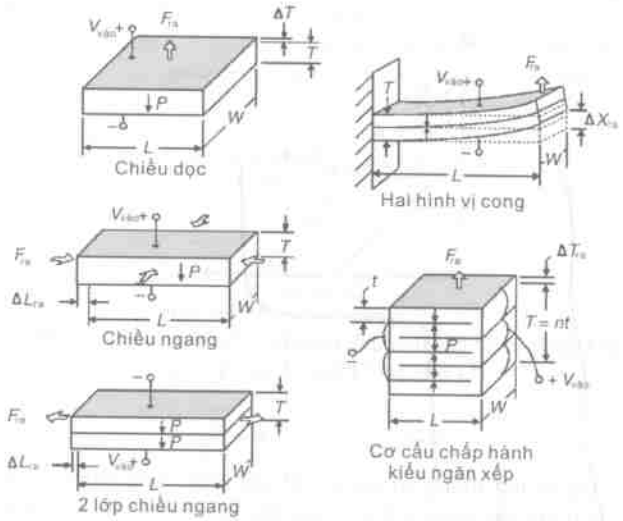


HÌNH 20.16 Cơ cấu truyền động răng lược MEMS sử dụng kích động tĩnh điện (www.mems.sandia.com)

Áp điện

Áp điện là thuộc tính của tinh thể, có thể sinh ra một điện áp khi chịu một biến dạng cơ học hoặc chịu sự biến dạng cơ học khi có một điện áp. Khi một vật liệu áp điện chịu một tác động cơ học, nó có sự dịch chuyển không đối xứng trong cấu trúc tinh thể và trong điện tích trung tâm của các iôn tinh thể bị tác động. Kết quả là có sự phân tách điện tích và sinh ra một điện áp có thể đo được tỉ lệ với biến dạng cơ học. Đó là *hiệu ứng áp điện thuận*. Ngược lại, vật liệu sẽ biến dạng với thể tích không đổi khi đặt một điện áp lên nó. *Hiệu ứng áp điện ngược* này có thể được dùng để tạo ra tác động cơ học. Có 2 loại vật liệu áp điện: gốm nung như là PZT (lead-zirconate-titinate) và

polymers như là PVDF (polyvinylidence fluoride). Gồm áp điện có lực đầu ra lớn hơn và được sử dụng nhiều làm các cơ cấu chấp hành. PVDF có xu hướng tạo độ biến dạng lớn hơn và dùng nhiều trong các ứng dụng cảm biến.



HÌNH 20.17 Các dạng cơ cấu áp điện phổ biến (Courtesy of Piezo Systems, Inc.)

Sự liên hệ giữa đặc tính điện và cơ của vật liệu có thể được mô hình bởi các phương trình tuyến tính cơ bản sau:

$$\begin{cases} S = s^E \cdot T + d \cdot E \\ D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} E = -g \cdot T + (\varepsilon^T)^{-1} \cdot D \\ S = s^D \cdot T + g \cdot D \end{cases} \tag{20.11}$$

trong đó:

E = cường độ điện trường [V/m]

D = mật độ điện tích trên một đơn vị diện tích [C/m^2]

T = ứng suất [N/m^2]

S = sức căng

s = độ mềm

ε = hằng số điện môi *[F/m]*

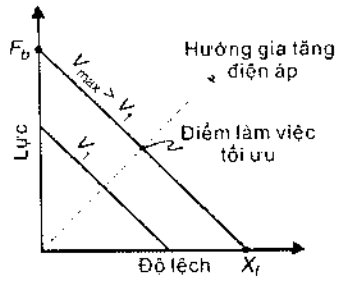
d, g = hệ số liên hệ áp điện

Xem xét việc thiết kế/lựa chọn

Hình 20.17 mô tả những cơ cấu áp điện phổ biến. Thường hệ số giới hạn của các cơ cấu áp điện nhỏ hơn 0.3% tổng độ cong hoặc biến dạng. Cấu trúc phổ biến nhất là dạng ngăn xếp và dạng uốn. Các cơ cấu chấp hành áp điện thích hợp với các ứng dụng yêu cầu dải thông lớn, lực lớn, có tác động và biến dạng nhỏ. Chúng được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực âm thanh, cũng như các ứng dụng quang học, trong đó chuyển động chính xác là quan trọng.

Các cơ cấu áp điện thường được xác định theo độ biến dạng tự do và lực ngưỡng của chúng. Biến dạng tự do (X_f) tương ứng với độ dịch chuyển đạt được mức điện áp tối đa yêu cầu khi cơ cấu hoàn toàn tự do chuyển động mà không cần bất kỳ lực nào khác. Lực ngưỡng (F_b) tương ứng với lực ở mức điện áp tối đa khi cơ cấu không chuyển động. Hình 20.18 chỉ ra các đường cong đặc tính tĩnh của một cơ cấu chấp hành áp điện điển hình (lực đối với độ biến dạng). Thông thường, cơ

cấu áp điện có một độ biến dạng tương ứng với một lực xác định, quyết định bởi điểm hoạt động trên đường đặc tính lực-biến dạng. Một cơ cấu được coi là tối ưu với từng ứng dụng riêng nếu nó đưa ra lực yêu cầu bằng lực ứng với một nửa độ biến dạng tự do của nó. Khi thiết kế cần cân nhắc các yếu tố quan trọng đó là điện áp làm việc cao, hiện tượng trễ, trượt, khả năng chịu hao mòn.



HÌNH 20.18 Đường cong đặc tính tĩnh của một cơ cấu chấp hành áp điện phổ biến (Courtesy of Piezo Systems, Inc.)

Hiệu suất

Hiệu suất là một trong những thông số chính cần cân nhắc lựa chọn của các quá trình chuyển đổi năng lượng. Trong hầu hết các trường hợp, năng lượng tiêu hao đều chuyển thành nhiệt và làm tăng nhiệt độ của thiết bị. Với các cơ cấu chấp hành cơ điện, nhiệt (nhiệt độ) là một trong các hệ số giới hạn nổi bật nhất tương đương với chế độ hỏng hóc. Khi nhiệt độ thiết bị tăng, hiệu suất chuyển đổi năng lượng giảm dẫn đến tăng lượng năng lượng chuyển thành nhiệt và lại làm tăng thêm nhiệt độ thiết bị. Đây là hiện tượng *quá nhiệt*. Do đó, vấn đề quan trọng khi thiết kế các cơ cấu chấp hành cơ điện là ngăn ngừa sự quá nhiệt (thất thoát nhiệt) và bảo đảm dưới điều kiện hoạt động bình thường thì hệ thống cơ cấu chấp hành sẽ cân bằng nhiệt. Cân bằng nhiệt nên được giữ dưới dải nhiệt độ thấp nhất của các thành phần, ví dụ như cách điện cho các cuộn dây. Dải nhiệt độ cho phần cách điện được liệt kê trong bảng 20.1.

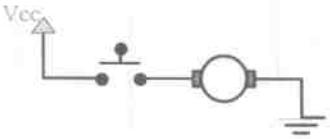
Khuếch đại công suất và điều biến-chuyển mạch điện tử công suất

Như đã trình bày trong phần trước và mô tả trong hình 20.2, có hai phần chính trong định nghĩa mở rộng của một cơ cấu chấp hành cho các hệ cơ điện tử. Chúng tôi đã giới thiệu một số cơ cấu chuyển đổi năng lượng và các cơ cấu chấp hành liên quan. Trong phần hai của chương này, chúng tôi sẽ tập trung vào phần khuếch đại công suất và điều biến của cơ cấu chấp hành. Tên gọi truyền thống của bộ phận này là bộ *khuếch đại công suất* hay bộ *điều khiển công suất* của cơ cấu chấp hành tương ứng. Tuy nhiên khi xu hướng thu nhỏ và tích hợp hệ thống trở nên phổ biến hơn thì điện tử công suất hoặc được nhúng trong bộ điều khiển (đơn vị xử lý thông tin) hoặc trong cơ cấu chấp hành. Phần chức năng/đặc tính thông minh và bổ sung có thể kết hợp với nhau. Với các cơ cấu chấp hành cơ điện, điện là nguồn năng lượng không điều chỉnh. Bộ khuếch đại công suất hoạt động như một bộ đệm giữa phần năng lượng thấp của hệ thống, trong đó các lệnh được đưa ra ở mức tín hiệu điện năng lượng thấp và cần được chuyển đổi thành tín hiệu điện năng lượng cao.

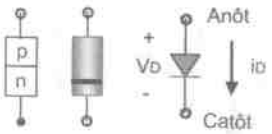
Khuếch đại công suất nhìn chung có thể chia theo hai phương pháp: tuyến tính và chuyển mạch. Ưu điểm chính của khuếch đại công suất tuyến tính là "sự sạch" của tín hiệu so với khuếch đại chuyển mạch. Điểm hạn chế chính là hiệu suất, khuếch đại tuyến tính có xu hướng bị nóng hơn khuếch đại chuyển mạch cùng kích thước. Tuy nhiên bất kỳ một kỹ sư thiết kế nào đều phải nắm chắc quy tắc là cần phân tích ứng dụng và lựa chọn hoặc thiết kế phần điều khiển công suất thích hợp.

Khuếch đại chuyển mạch được chế tạo bằng các linh kiện bán dẫn như các điôt và tranzito. Các thiết bị bán dẫn này hoạt động như một phần tử chuyển mạch, điều khiển dòng điện tới một phần tử chuyển đổi năng lượng như cuộn cảm hoặc hoạt động như một phần tử khuếch đại điều biến

lượng dòng điện chảy trong cuộn cảm. Một ưu điểm khác của khuếch đại công suất dùng chuyển mạch là với các chuyển mạch, tầng khuếch đại có thể điều khiển trực tiếp bởi một tín hiệu số từ một thiết bị xử lý thông tin (hình 20.1) như một bộ vi điều khiển hoặc một bộ vi xử lý. Điều này tránh cho việc phải dùng bộ biến đổi ADC và do đó đã giảm được giá thành và kích thước yêu cầu của mạch điện tử. Điều chế độ rộng xung (PWM) là một ví dụ điển hình dùng tín hiệu nhị phân để điều khiển các cơ cấu chấp hành cơ điện. Hình 20.19 chỉ ra một ví dụ đơn giản dùng một công tắc điều khiển ghép nối với một động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu PMDC. Như đã nêu trong các phần trước, mômen quay được sinh ra khi dòng điện chạy trong cuộn cảm phần ứng của động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu. Để bật hoặc tắt một động cơ, chúng ta có thể mắc động cơ với nguồn một chiều nối tiếp với một khoá chuyển mạch. Khi khoá chuyển mạch được đóng lại, dòng điện chạy qua động cơ và động cơ quay. Nếu khoá mở, dòng điện ngắt, động cơ sẽ dừng lại. Với những mạch phức tạp hơn, cần phải có thiết kế chuyển mạch. Tuy nhiên, ví dụ này minh hoạ nguyên lý cơ bản của chuyển mạch khuếch đại công suất. Phần dưới đây đưa ra các nguyên tắc cơ bản xây dựng các khối của khuếch đại chuyển mạch.



HÌNH 20.19 Động cơ một chiều với công tắc điều khiển DC



HÌNH 20.20 Điôt

Các chất bán dẫn

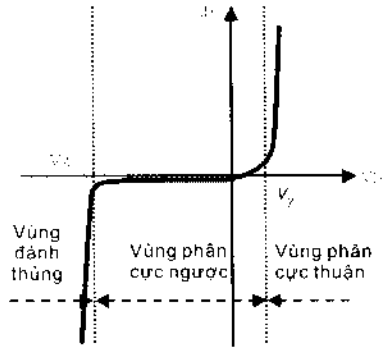
Các chất bán dẫn là các vật liệu cấu thành từ các nguyên tố thuộc nhóm IV trong bảng tuần hoàn hoá học ví dụ: silicon (Si), germanium (Ge) và cadmium sulfide. Khác với chất dẫn điện và cách điện, khả năng mang điện của các chất bán dẫn chịu tác động đáng kể bởi nhiệt độ và khối lượng của các photon tới cũng như loại và lượng các tạp chất trong vật liệu. Khi đưa các nguyên tố nhóm V hoặc nhóm III (*dopants*) vào trong các chất bán dẫn, sẽ dẫn tới tăng hoặc giảm số điện tử hoá trị trong các chất bán dẫn. Tuỳ theo dạng nguyên tố thêm vào, chất bán dẫn có thể chia thành các nhóm:

- *Bán dẫn loại n*: Là chất bán dẫn pha tạp các nguyên tố *cho* (ví dụ arsenic hay phosphor các nguyên tố nhóm V), điều này tạo nên một điện tử được giải phóng (điện tử tự do) khỏi mạng tinh thể và vật dẫn có thêm một vật mang điện tích.
- *Bán dẫn loại p*: Là chất bán dẫn pha tạp các nguyên tố *nhận* (ví dụ boron hoặc gallium các nguyên tố nhóm III), gây thiếu một điện tử trong cấu trúc mạng tinh thể gọi là lỗ trống. Các lỗ trống có thể được xem như là các hạt mang điện dương hay chỗ nhận các điện tử tự do.

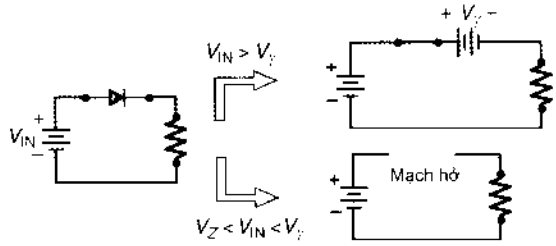
Như đã nói ở trên, cơ sở cho tất cả các thiết bị điện tử bán dẫn là sự kết hợp dưới các dạng khác nhau các chất bán dẫn dạng n và dạng p. Một điểm mạnh của điện tử hiện đại là có thể nhận được nhiều tính năng trong một thiết bị chuyển mạch đơn giản khi đóng hoặc mở kết nối tùy thuộc vào cách thức điều khiển. Chúng ta sẽ xem xét về một vài phần tử điện tử được sử dụng rộng rãi, chủ yếu là các phần tử chuyển mạch có điều khiển, cho việc thiết kế các bộ khuyếch đại công suất/các bộ điều khiển trong các cơ cấu chấp hành điện thuộc lĩnh vực điện tử công suất.

Điôt

Điôt là thiết bị điện tử hai cực được cấu tạo bằng cách ghép một bán dẫn loại p và một bán dẫn loại n với nhau tạo thành một lớp *tiếp giáp pn*. Hình 20.20 là sơ đồ mô tả một điôt thông thường. Cực nối với vật liệu loại p gọi là *anôt* và với loại n là *catôt*. Nếu anôt có mức điện thế lớn hơn (> 0.7 V) so với catôt, điôt được gọi là được phân cực thuận, $V_D > 0.7$ V. Ngược lại, nếu $V_D < 0.7$V là điôt được phân cực ngược.



HÌNH 20.21 Các đặc tính điôt



HÌNH 20.22 Mạch tương đương của một điôt

Như chỉ ra trong hình 20.21, tuỳ thuộc vào điện áp cung cấp, một điôt có thể làm việc trong ba vùng khác nhau:

- *Vùng phân cực thuận*: $V_D > V_\gamma$, trong đó V_γ được gọi là điện áp phân cực thuận và thường ở lân cận mức 0.7 V với silic và 0.3 V với germanium. Điôt hoạt động như một khoá đóng mạch, ngắn mạch anôt và catôt với một điện thế ngược nhỏ bằng V_γ (điện áp thuận rơi trên điôt), hình 20.22.
- *Vùng phân cực ngược*: $V_Z < V_D < V_\gamma$, trong đó V_Z là điện áp ngược, hay điện áp đánh thủng ngược của điôt. Điôt như một khoá mở, mạch hở, hình 20.22.
- *Vùng đánh thủng*: $V_D < V_Z$. Điôt lại hoạt động như một khoá đóng mạch và một dòng điện lớn chạy qua điôt. Dây được gọi là hiệu ứng thác lũ. Nếu độ lớn của dòng điện ngược i_D lớn hơn dòng điện ngược tới hạn, thiết bị sẽ hỏng.

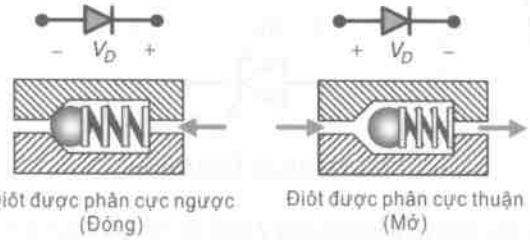
Điôt tương tự một van 1 chiều, cho phép chất lỏng (dòng điện) chảy theo một chiều nếu áp suất thuận đủ lớn để thắng lực lò xo, hình 20.23. Bảng 20.3 tổng kết các đặc tính của một số điôt điển hình.

Dòng điện tối đa cho phép qua một điôt và điện áp đánh thủng ngược là hai thông số chính khi thiết kế lựa chọn điôt. Điện áp ở hai đầu một điôt nhân với dòng điện qua nó là lượng công suất tiêu hao trên một điôt và chuyển hoàn toàn sang nhiệt. Nhiệt độ của một điôt có thể tăng nhanh do

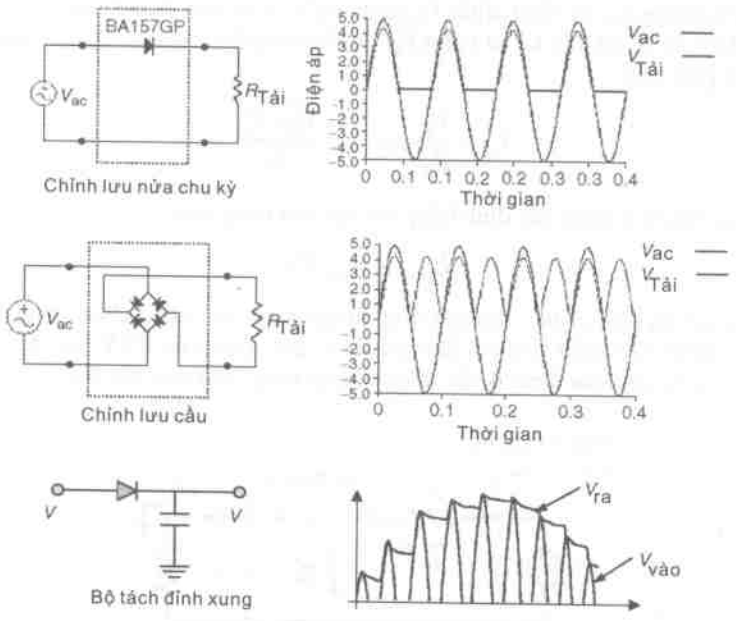
kích cỡ và khối lượng của nó nhỏ. Để hoạt động an toàn, nhiệt độ của lớp tiếp giáp điôt không nên vượt quá 200^0C. Để cải thiện sự truyền nhiệt, các điôt thường đặt trên các tấm kim loại *tản nhiệt*. Các điôt tín hiệu có công suất danh định trong khoảng giữa ½ đến 1W. Điôt công suất có thể có dải cao hơn tới vài trăm kW.

BẢNG 20.3 Các đặc tính thông thường của điôt [1]

Công suất tương đối	Dòng điện thuận trung bình lớn nhất [A]	Điện áp sụt trên điôt khi dòng điện thuận trung bình lớn nhất [V]	Giá trị đỉnh lớn nhất của dòng điện thuận [A]	Điện áp ngược đánh thủng [V]	Nhiệt độ tối đa của lớp tiếp giáp [^{0}C]
Thấp	1	0.8	30	1000	175
Trung bình	12	0.6	240	1000	200
Cao	100	0.6	1600	1000	200
Rất cao	1000	1.1	10,000	2000	200



HÌNH 20.23 Sự tương đương giữa điôt và van một chiều

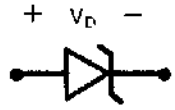


HÌNH 20.24 Các ứng dụng phổ biến của điôt

Với các ứng dụng chuyển mạch, thời gian phục hồi (reverse-recovery time) cũng là một thông số thiết kế quan trọng khác. Thời gian này quy định giới hạn trên cho tần số chuyển mạch mà điôt có thể đóng hoặc mở. Nếu điôt làm việc quá tần số này sẽ làm giảm hiệu suất chuyển mạch và có thể là nguyên nhân gây quá nhiệt. Điôt được sử dụng rộng rãi trong các mạch điện tử công suất. Chúng được dùng nhiều nhất cho việc chỉnh lưu và tách sóng đỉnh. Hình 20.24 minh hoạ một số ứng dụng phổ biến của điôt. Nếu cần sử dụng nhiều điôt thì có thể dùng loại mảng điôt. Thường thuật ngữ mảng điôt chỉ bốn hoặc nhiều điôt được đóng trong một vỏ đơn. Đóng gói điển hình nhất là tám điôt hoặc nhiều hơn trong một vỏ hai hàng chân (DIP). Các loại đóng gói khác là vỏ một hàng chân (SIP), vỏ dẹt và thậm chí là mảng điôt gắn bề mặt. Mặc dù các mảng điôt có thể chứa các điôt khác loại, mảng phổ biến nhất chứa loại điôt tín hiệu nhỏ, tốc độ cao như 1N4148 và các mảng kích dùng loại điôt 100mA chuyển mạch nhanh, có dòng cao hơn.

Điôt Zener

Xét lại đường cong đặc tính điện áp-dòng điện của một điôt trong hình 20.21. Nếu điôt được phân cực ngược tới vùng đánh thủng, một dòng ngược lớn sẽ chảy qua nó. Với hầu hết các điôt, điện áp này thường lớn hơn 50 V và có thể tới kilovolt. Điôt *Zener* (*thác lũ*) là loại điôt có đường cong đánh thủng dốc đứng với một điện áp ngược, đánh thủng hoàn toàn xác định V_Z.



HÌNH 20.25 Điôt Zener

Đặc tính đánh thủng đặc biệt này khiến điôt Zener là sự lựa chọn tốt cho việc xây dựng các bộ ổn áp vì chúng có thể duy trì một *nguồn điện áp* ổn định dù nguồn cung cấp thay đổi cũng như trở kháng tải biến đổi. Hình 20.25 là ký hiệu riêng biểu diễn một điôt Zener.

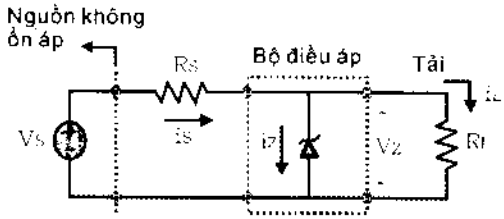
Để dùng điôt Zener như bộ ổn áp, nó cần được phân cực ngược với một điện thế cung cấp cao hơn điện thế đánh thủng ngược danh định V_Z, hình 20.26. Với một điôt Zener lý tưởng, trong hình 20.26, $V_S > V_Z$, điện áp ở hai đầu tải sẽ bằng V_Z, do đó dòng điện qua tải $i_{tải}$ và dòng điện qua điôt Zener có thể tính như sau:

$$i_{tải} = \frac{V_Z}{R_{tải}} \text{ và } i_Z = \frac{V_S - V_Z}{R_S}$$

Các điôt Zener thường được xác định bằng độ tiêu hao công suất:

$$P_{Z\max} = i_{Z\max} . V_Z$$

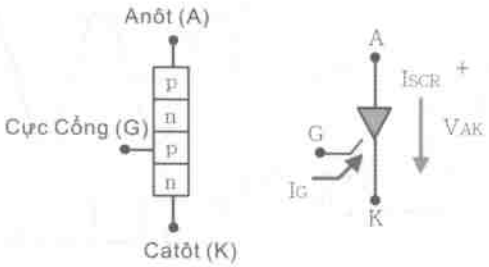
Do đó khi lựa chọn điôt Zener cho các ứng dụng ổn áp, cần chắc chắn rằng $i_{Z\max}$ không vượt quá giới hạn cho phép. Dải điện áp đánh thủng của các điôt Zener từ 3.3 V tới 75 V. Tuy nhiên các điôt với dải điện áp ra này của đều có sẵn. Một số loại công suất của các điôt Zener là ¼, ½, 1, 5, 10 và 50 W.



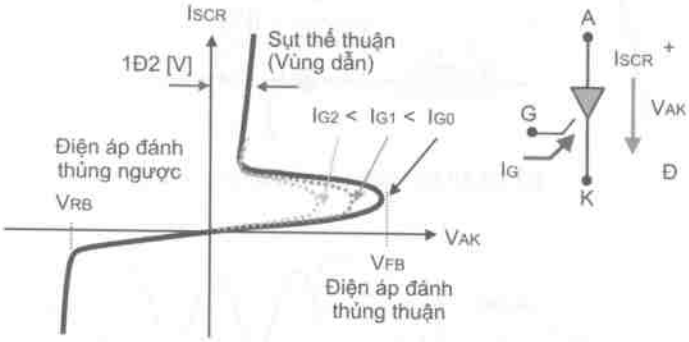
HÌNH 20.26 Dùng điôt zener như bộ ổn áp đơn giản

Thyristor

Một thyristor hoặc một *chỉnh lưu bán dẫn có điều khiển* (SCR), là một chuyển mạch bán dẫn bốn lớp, tương tự như một điôt, nhưng thêm một cực để điều khiển việc dẫn điện. Một thyristor có ba cực: một anôt, một catôt và một cổng, hình 20.27. Có thể coi một thyristor như một điôt có thể điều khiển được, trong đó cực cổng như một bộ phận điều khiển chính xác khi thyristor mở, nói cách khác đó là một khoá điều khiển được.



HÌNH 20.27 Thyristor và kí hiệu của nó



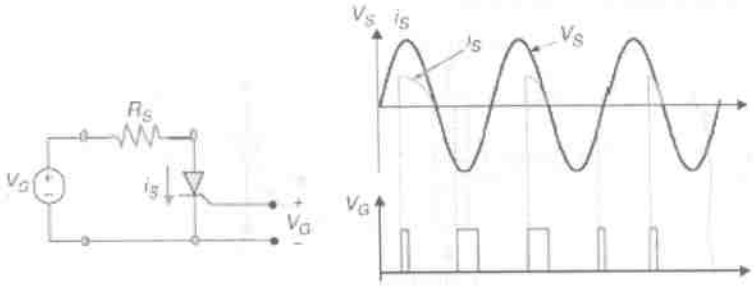
HÌNH 20.28 Các đặc tính thyristor (SCR)

Hình 20.28 biểu diễn đặc tuyến điện áp-dòng điện của một thyristor. Để mở một thyristor (ngắn mạch hay làm nó dẫn điện) hai điều kiện sau phải thoả mãn:

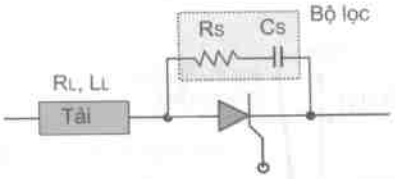
1. Cực anôt (A) và catôt (K) phải được phân cực thuận, tức là điện thế anôt cần cao hơn điện thế catôt.
2. Dòng điện cực cổng I_G phải chảy đủ một khoảng thời gian thông thường là một vài micro giây. Dòng điện cực cổng có thể được tạo ra bởi một xung điện áp dương cấp cho cực cổng (G) và cực catôt (K). Dòng điện cực tối thiểu yêu cầu để mở một thyristor gọi là *dòng điện chốt*.

Khi thyristor mở, giá trị dòng điện qua nó I_{SCR} bị giới hạn bởi phần còn lại của trở kháng mạch điện. Khi thyristor mở, cực cổng mất quyền điều khiển, nghĩa là không thể sử dụng cổng để tắt thiết bị. Thyristor sẽ chỉ ngắt nếu dòng điện anôt I_{SCR} tiến tới không, sau đó cực cổng mới có thể xác lập lại quyền điều khiển. Rõ ràng, thyristor cũng có thể dẫn khi điện áp vượt qua điện áp đánh thủng V_{FB}. Tuy nhiên, thông số này thường là chỉ số giới hạn cần tính toán đến khi thiết kế, còn thông thường việc chuyển mạch thường được điều khiển bởi điện áp cực cổng. Nếu cực cổng (G) ngắn mạch với catôt (K), thyristor không thể mở được, thậm chí cả khi V_{AK} được phân cực thuận. Có thể coi thyristor như một khoá thường mở có hãm. Khi khoá đóng không cần điều khiển thêm. Hình 20.29 mô tả các hoạt động của một thyristor trong một mạch tải thuần trở đơn giản với một nguồn điện áp sin lưỡng cực V_S. Hình 20.31, điện thế cực cổng V_G là đầu vào điều khiển.

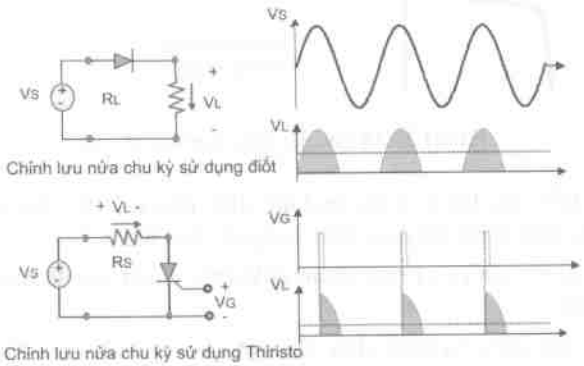
Khi thyristor được phân cực ngược (đang khoá), không nên đặt điện áp thuận lên cực cổng (G) và catôt (K) để ngăn sự đánh thủng của lớp tiếp giáp pn thứ nhất của thyristor, Hình 20.27. Điện áp đánh thủng V_{RB}, dòng điện chốt, dòng điện và công suất danh định và tốc độ tăng điện áp là các thông số quan trọng khi thiết kế lựa chọn một thyristor. Khi đột ngột cung cấp hoặc tăng nhanh điện áp ở hai đầu thyristor, thyristor có thể mở ngay cả khi dòng điện (điện áp) cực cổng bằng không.



HÌNH 20.29 Thyristor với mạch chứa tải thuần trở



HÌNH 20.30 Mạch bảo vệ (Snubber circuit)



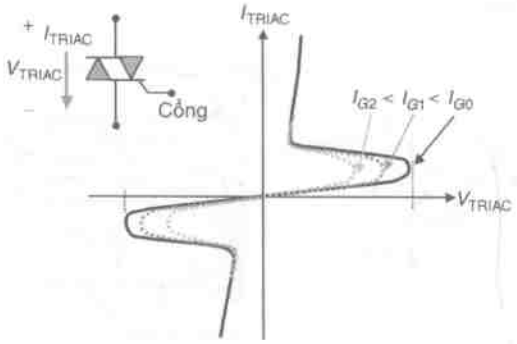
HÌNH 20.31 Chỉnh lưu điều khiển (thyristor) và chỉnh lưu không điều khiển (điôt)

Tốc độ thay đổi điện áp thông thường sẽ kích mở thyristor là khoảng 50 V/μs. Để tránh sự dẫn điện không mong muốn do tần số thay đổi điện áp lớn tần số cao, thường dùng *một mạch bảo* vệ nối song song với thyristor (snubber circuit), hình 20.30, để lọc sự biến thiên điện áp tần số cao. Mạch này về bản chất cơ bản là một bộ lọc thông thấp RC. Việc lựa chọn điện trở R_S và điện dung C_S có thể dùng công thức sau:

$$C_s = \frac{V_{Amax}^2}{L_L (dV/dt)_{max}^2} \qquad R_s = 2\sqrt{\frac{L_L}{C_s}} - R_L \tag{20.12}$$

trong đó R_L và L_L là phần tải cảm và tải trở tương ứng. V_{Amax} là điện áp anôt tối đa và $(dV/dt)_{max}$ là tốc độ tăng điện thế tối đa trên anôt-catôt.

Không giống các điôt dùng trong mạch chỉnh lưu chỉ có thể chỉnh lưu điện áp xoay chiều đầu vào thành điện áp một chiều trung bình, các thyristor có thể dùng để xây dựng các mạch chỉnh lưu có điều khiển có thể chỉnh lưu nguồn xoay chiều và điều biến điện áp đầu ra một chiều trung bình bằng cách điều chỉnh thời gian bắt đầu của điện áp/dòng điện cực cổng, hình 20.31.



HÌNH 20.32 Đặc tính Triac

Triac

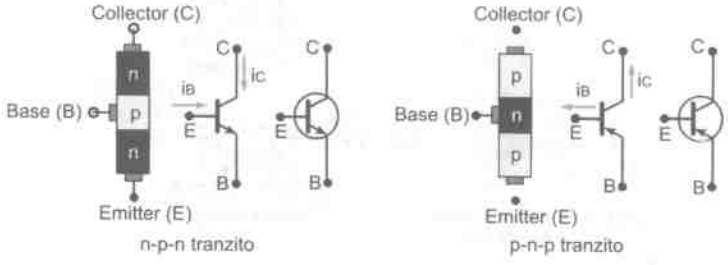
Thyristor chỉ có thể mở theo chiều phân cực thuận. *Triac* là một loại khoá điều khiển tương đương với một cặp thyristor nối song song và ngược nhau, hình 20.32. Như mô tả trong hình 20.32, một triac có thể mở theo cả hai chiều thuận và ngược.

Tranzito

Tranzito là một linh kiện bán dẫn có ba cực hoặc nhiều hơn và có thể ứng dụng trong khuếch đại công suất và chuyển mạch. Như đã nêu trong phần trước, chuyển mạch điện tử có thể dùng điôt hoặc thyristor. Chuyển mạch điôt không điều khiển được, thyristor là thiết bị có ba cực và cực thứ hai (cực cổng) có thể dùng để điều khiển và chuyển mạch tức thời. Tuy nhiên, một hạn chế của chuyển mạch thyristor là chỉ điều khiển được theo một chiều. Tức là cực cổng chỉ có thể dùng để mở thyristor. Chỉ có thể khoá thyristor bởi cách hạ dòng điện anôt tới không.

Tranzito là một dụng cụ bán dẫn đặc biệt có thể được dùng cho khuyếch đại công suất bằng việc điều chỉnh dòng điện hoặc điện áp tương đối lớn trên hai đầu khi dùng một dòng hoặc điện áp điều khiển nhỏ. Tranzito còn có thể làm một chuyển mạch bằng việc đóng mở một cách có hiệu quả giữa hai cực khi dùng một tín hiệu điều khiển đầu cực thứ ba.

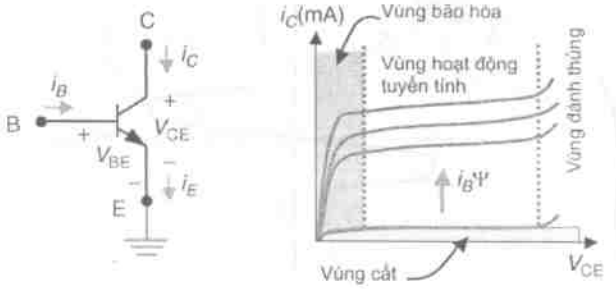
Các tranzito là các phần tử cơ bản của thiết bị điện tử hiện đại và là các khối chủ yếu trong điện tử số, các bộ khuyếch đại thuật toán và điện tử công suất. Có ba loại tranzito phổ biến là tranzito tiếp giáp lưỡng cực pn BJTs (bipolar junction transistors), tranzito hiệu ứng trường metal-oxide MOSFETs (metal-oxide field effect transistors) và tranzito lưỡng cực có cực cổng cách ly IGBTs (insulated gate bipolar transistors).



HÌNH 20.33 Tranzito lưỡng cực tiếp giáp (BJTs)

Các tranzito tiếp giáp lưỡng cực (BJTs)

Một tranzito tiếp giáp lưỡng cực là một dụng cụ có ba lớp kết hợp hai loại bán dẫn p-n-p và n-p-n, hình 20.33. Các BJT có ba cực tương ứng với từng lớp gọi là collector (C), emitter (E), base (B). Hình 20.34 mô tả hoạt động của một BJT loại n-p-n với loại cực emitter chung. Các BJTs có thể hoạt động trong ba vùng:



HÌNH 20.34 Đặc tính của một tranzito n-p-n BJT có emitter chung

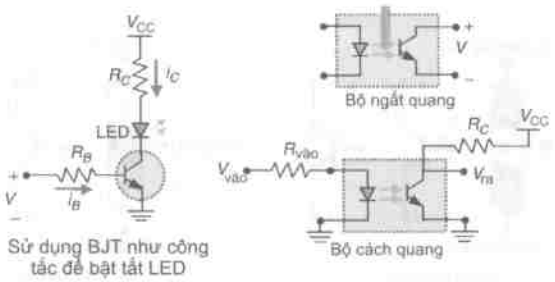
- *Vùng cắt mạch* (cutoff) - Khi điện áp BE (base-emitter) nhỏ hơn điện áp mở V_γ, dòng điện base i_B được bỏ qua. Tranzito hoạt động ở *vùng cắt mạch*, không có dòng qua collector và emitter (C và E). Thông thường, $V_\gamma = 0.6\text{-}0.7$ V. Ở chế độ này, tranzito tương tự một van đóng, C và E coi như hở mạch.
- *Vùng hoạt động tuyến tính* - Khi $V_{BE} = V_\gamma$, tranzito hoạt động ở *vùng tuyến tính* tích cực, ở chế độ này, tranzito được xem như bộ khuếch đại dòng điện được điều khiển bởi dòng điện trong đó dòng điện collector i_C tỉ lệ với dòng điện base i_B. Hằng số tỉ lệ (hệ số khuếch đại dòng điện) $\beta = 20 \sim 200$, thường được gọi là h, hf, hay h_{FE} trong bảng thông số của chúng. Ở chế độ này, tranzito được xem như van mở một phần, trong đó dòng điện tỉ lệ với độ mở của van (độ lớn dòng điện base). Công suất tiêu hao trên tranzito:

$$P_{BJT} = i_C \cdot V_{CE}$$

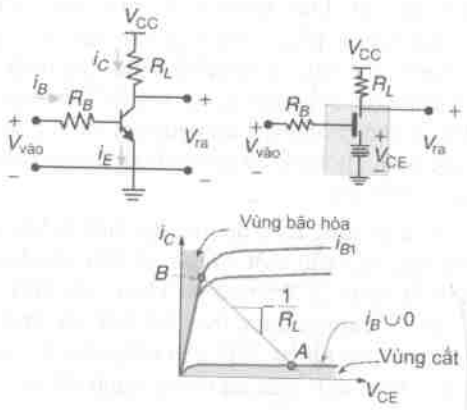
- *Vùng bão hoà* - Khi dòng điện base i_B lớn hơn dòng điện tối đa có thể i_C, tranzito rơi vào vùng *bão hoà*, trong đó:

$$\begin{cases} i_B > i_C / \beta \\ V_{BE} = V_\gamma \end{cases} \qquad V_{CE} = V_{SAT} \approx 0.2V \tag{20.13}$$

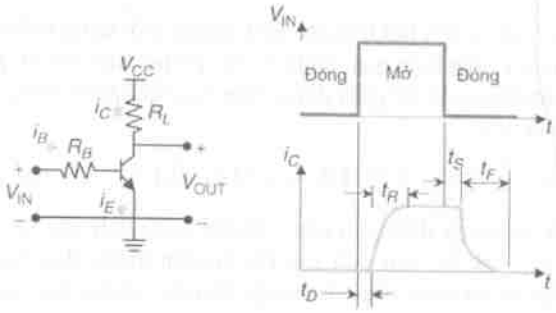
Ở chế độ này, tranzito mở thông từ C đến E. Dòng điện collector i_C được xác định bởi mạch collector. Tranzito tương tự một van mở hoàn toàn, dòng điện tuỳ thuộc nguồn và tải. Lưu ý rằng, khi tranzito trong trạng thái bão hoà, V_{CE} giữ ở giá trị nhỏ gọi là điện áp bão hoà V_{SAT}.



HÌNH 20.35 Một số ví dụ dùng BJT



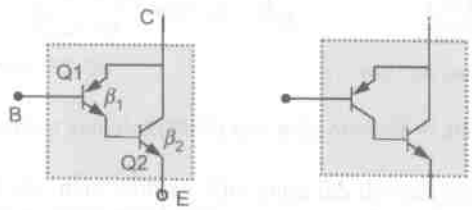
HÌNH 20.36 BJT với vai trò một khoá điều khiển dòng



HÌNH 20.37 Các đặc tính chuyển mạch của BJT

Tóm lại, khi bão hoà, tranzito hoạt động như một công tắc được đóng. Khi ở vùng cắt mạch nó hoạt động như một công tắc bị mở. Khi ở vùng tích cực, nó hoạt động như một bộ điều khiển dòng (i_C) được điều khiển bởi dòng (i_B). Mặc dù phần này chỉ mô tả một cách tương đối đơn giản nhưng nó giúp ta có những hiểu biết cơ bản về điện tử công suất và việc ghép nối các hệ điện cơ. Hình 20.35 minh hoạ một số ví dụ và các ứng dụng của BJT.

Khi điều khiển điện áp BE (base-emitter) V_{BE} và dòng điện base i_B, tranzito có thể hoạt động giữa hai vùng cắt mạch và vùng bão hoà, nó hoạt động như một chuyển mạch, hình 20.36. Thực tế, chuyển mạch tranzito không tức thời (hình 20.37). Thời gian mở t_{ON} của tranzito bằng tổng của thời gian trễ t_D và thời gian quá độ tăng t_R (rise time). Tương tự, thời gian đóng t_{OFF} bằng tổng thời gian lưu t_S (storage time) và thời gian quá độ giảm t_F (fall time). Thời gian đóng và mở của một tranzito giới hạn tần số chuyển mạch tối đa. Tần số chuyển mạch thông thường cho một BJT công suất là khoảng giữa 2 và 20 kHz. Ta thường nói, các BJT có thể chuyển mạch ở tần số cao hơn các thyristor, sử dụng công suất nhỏ hơn. Các BJT công suất có thể điều khiển dòng điện tới hàng trăm ampe và điện áp V_{CE} tới khoảng 1 kV.



HÌNH 20.38 Hai dạng của các cặp tranzito Darlington

Công suất tiêu tán là một yêu cầu chính khi thiết kế lựa chọn BJT. Khi BJT làm việc ở vùng tuyến tính tích cực (khuyếch đại tuyến tính), công suất tiêu hao là $P_{BJT} = i_C \cdot V_{CE}$ với $V_{CE} > V_\gamma$. Với dòng điện collector lớn trên đơn vị thể tích và nhiệt khối nhỏ của thiết bị, tranzito hoạt động không hiệu quả ở chế độ tuyến tính tích cực. Nói cách khác, khi BJT chuyển giữa vùng bão hoà và vùng cắt mạch, dòng điện collector sẽ nhỏ (trong chế độ ngưỡng) và V_{CE} sẽ nhỏ (trong chế độ bão hoà). Tổn hao công suất chuyển mạch nhỏ hơn nhiều so với hoạt động ở chế độ tuyến tính tích cực. Do vậy sự chuyển mạch hiệu quả hơn nhiều.

Khi BJT làm việc, cần cung cấp dòng base đủ lớn, đặc biệt là khi tranzito làm việc ở vùng bão hòa, công thức (20.13). Điều này yêu cầu một công suất đầu vào lớn và có thể quá tải tầng đầu vào. Như sẽ đề cập sau, đây là nguyên nhân chính khiến các BJT ít được sử dụng hơn trong chuyển mạch điện tử công suất và thường được thay thế bởi các thiết bị như MOSFET và IGBT, yêu cầu dòng điện điều khiển nhỏ hơn nhiều. Một giải pháp cho hạn chế này là tăng hệ số khuếch đại dòng điện β. Một cách thực hiện đơn giản và thông minh để tăng hệ số khuếch đại dòng điện hiệu dụng của các BJT là dùng cặp tranzito Darlington.

Cặp tranzito Darlington

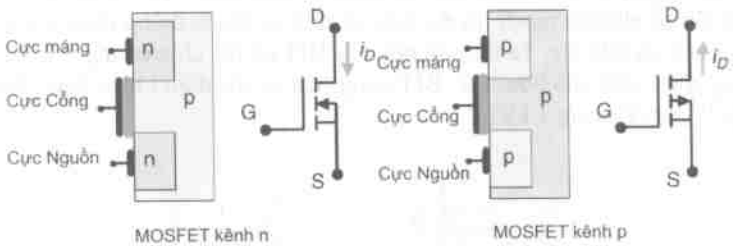
Một *cặp tranzito Darlington* nối hai tranzito BJT thành một dạng phần tử ba cực, làm tăng hệ số khuếch đại dòng điện một cách hiệu quả, hình 20.38. Trong hình 20.38, β_1 và β_2 là hệ số khuếch đại dòng điện của hai tranzito, quan hệ giữa dòng điện base của tranzito Q_1 và dòng điện collector của tranzito Q_2 được mô tả bởi:

$$i_{C2} = \beta_2 \cdot i_{B2} = \beta_2 \cdot (\beta_1 \cdot i_{B1}) = (\beta_2 \cdot \beta_1) \cdot i_{B1} = \beta_D \cdot i_{B1}$$

Do đó, hệ số khuếch đại dòng điện cho cặp tranzito bằng tích của hai hệ số khuếch đại dòng điện riêng phần tức là, $\beta_D = \beta_1.\beta_2$. Với một cặp Darlington thông thường, hệ số này có thể nằm trong dải 500-10000. Cần có sự phối hợp tốt vì cặp tranzito Darlington sử dụng hai tranzito thay cho một.

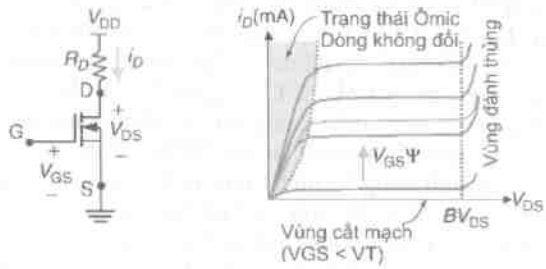
Tranzito hiệu ứng trường (MOSFET)

MOSFET là một dạng tranzito hiệu ứng trường (FET). Các FET là các phần tử ba cực được điều khiển điện áp, các cực tương ứng là cực máng (D), cực nguồn (S) và cực cổng (G). Các thuật ngữ đó bắt nguồn từ sự tương tự giữa hoạt động của tranzito và hệ thống thùng đặt phía trên cao dùng một van để điều khiển dòng nước từ nguồn tới máng. MOSFET dùng một bản kim loại là cực cổng và nó được cách điện với đế silicon dạng n hoặc p bởi một lớp oxit mỏng (hình 20.39). Khi một điện áp cổng V_G được cấp tới cực cổng một trường tĩnh điện sẽ tạo ra các điện tích ngược dấu ở cổng và đế. Các điện tích trên để tạo nên các đặc tính loại tranzito bằng việc tạo nên hoặc là kênh dẫu loại n hoặc loại p. Do đó có hai loại MOSFET loại n hoặc loại p (hình 20.39).



HÌNH 20.39 Tranzito công suất (MOS) hiệu ứng trường (FET)

Trong phần lớn ứng dụng khuếch đại công suất và điều biến, các MOSFET được thiết kế để hoạt động ở chế độ *kênh có sẵn* (enhancement mode). Hình 20.42 minh hoạ các đặc tính của chế độ này của một MOSFET kênh n:



HÌNH 20.40 Các đặc tính của MOSFET

1. *Vùng cắt mạch (cutoff)* : Khi điện thế trên cực cổng và đế (cực nguồn) V_{GS} nhỏ hơn điện thế ngưỡng mở V_T, MOSFET sẽ ở vùng cắt mạch và có dòng điện không đáng kể chảy qua cực máng (D), tức là:

$$\begin{cases} V_{GS} < V_T \\ i_G = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_D \approx 0 \\ V_{DS} \approx V_{DD} \end{cases}$$

Thông thường, $V_T \approx$ 1-2 V. Ở chế độ này, có thể xem như cắm từ D sang S (mạch hở).

2. *Vùng tích cực* (active) - Khi $V_{GS} > V_T$, MOSFET ở trong vùng tích cực, trong đó:

$$V_{GS} > V_T \text{ và } \begin{cases} i_D \propto (V_{GS} - V_T)^2 \\ V_{DS} > V_{GS} - V_T \end{cases}$$

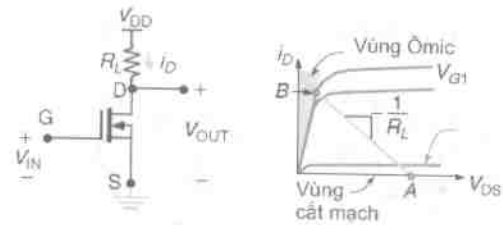
Ở chế độ này, tranzito có thể được xem như một khuếch đại dòng được điều khiển bằng điện áp, trong đó dòng điện cực máng i_C tỉ lệ thuận với bình phương độ chênh giữa điện áp cổng nguồn và điện áp ngưỡng. Dòng điện máng được điều khiển bởi điện áp cổng nguồn V_{GS}. Công suất tiêu tán qua tranzito PFET là:

$$P_{FET} = i_D \cdot V_{DS}$$

3. *Trạng thái Ômic* (Ohmic): Khi V_{GS} đủ lớn đến mức dòng điện máng được xác định bởi mạch máng - nguồn, MOSFET rơi vào trạng thái *bão hoà* và:

$$V_{GS} \gg V_T \qquad \begin{cases} i_D = V_{DD} / R_D \\ V_{DS} \approx i_D \cdot R_{ON}(V_{DS}) < V_{GS} - V_T \end{cases} \tag{20.14}$$

Ở chế độ này, tranzito có thể được xem như một khoá đóng giữa các cực D và S với một điện trở được điều khiển bằng điện áp R_{ON}. Dòng điện máng i_D được xác định bởi mạch máng. Với dòng điện định mức, V_{DS} giảm xuống trong dải bão hoà từ 2 tới 5 V.



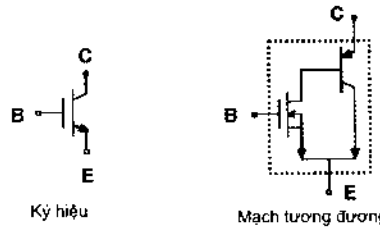
HÌNH 20.41 MOSFET như một khoá điều khiển điện áp

Khi hoạt động ở chế độ kênh có sẵn, một MOSFET hoạt động rất giống với một BJT. Thay vì dòng base, hoạt động của MOSFET được quyết định bởi điện áp cổng. Khi điều khiển điện áp của MOSFET, tranzito có thể hoạt động như một khoá được điều khiển bằng điện áp (hình 20.41) hoạt động giữa 2 chế độ cắt mạch (điểm A) và vùng Ômíc (điểm B).

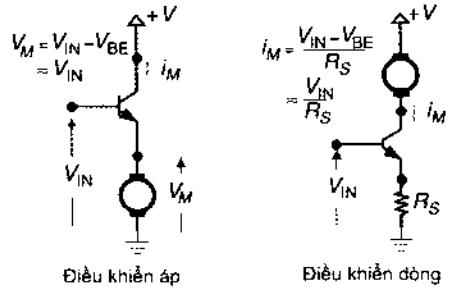
Một ưu điểm của MOSFET là có trở kháng đầu vào lớn đáng kể so với BJT. Việc này làm đơn giản hoá mạch điện điều khiển MOSFET vì dòng cực của nó rất nhỏ. Điều này có nghĩa rằng MOSFET có hiệu suất cao hơn các BJT do đó nó có thể chuyển mạch ở một tần số cao hơn nhiều. Thông thường tần số chuyển mạch của MOSFET ở giữa 20 và 200 kHz, cao hơn các BJT. Các MOSFET công suất có thể mang dòng điện máng tới vài trăm ampe và V_{DS} tới 500 V. Hiệu ứng trường là một trong những nguyên nhân chính tại sao MOSFET có hiệu suất chuyển mạch tốt hơn BJT. Tuy nhiên, điện trường tĩnh cũng là một trong những nguyên nhân chính gây hỏng. Các MOSFET rất nhạy cảm với tĩnh điện. Do lớp ôxit cách điện cổng và nền chỉ là một lớp màng mỏng (khoảng chừng một tới vài micro mét), điện áp tĩnh cao có thể dễ dàng đánh thủng lớp oxit cách điện. Điện áp đánh thủng của một cổng thông thường là khoảng 50 V. Do đó điều khiển điện tĩnh hoặc cách điện rất quan trọng khi điều khiển các MOSFET.

Khi so sánh BJT và MOSFET ta có kết luận sau:

- Cả hai có thể dùng như các bộ khuếch đại dòng điện.
- BJT là một khuếch đại điều khiển bằng dòng điện trong đó dòng điện collector i_C tỉ lệ với dòng điện base i_B.
- MOSFET là khuếch đại điều khiển điện áp trong đó dòng điện cực máng i_D tỉ lệ với bình phương điện áp cổng V_G.
- Cả 2 có thể dùng làm khoá chuyển mạch 3 cực hoặc làm bộ nghịch lưu điện áp.
- BJT: chuyển mạch với các cổng lôgic TTL.
- MOSFET: chuyển mạch với các cổng lôgic CMOS.
- BJT thường có điện dung lớn hơn MOSFET cùng kích cỡ.
- MOSFET có trở kháng vào cao hơn nhiều so với BJT.
- Các MOSFET dễ chế tạo hơn trong các mạch tích hợp.
- MOSFET thường ít xảy ra hiện tượng quá nhiệt hơn.
- MOSFET dễ bị ảnh hưởng điện áp tĩnh điện (vượt quá điện áp đánh thủng cực cổng ≈ 50 V).
- BJT được thay thế bởi các MOSFET ở các ứng dụng điện áp thấp (<500 V) và được thay thế bởi các IGBT ở các ứng dụng có điện áp trên 500 V.



HÌNH 20.42 Tranzito lưỡng cực cách điện (IGBT)



HÌNH 20.43 Hai bộ khuếch đại tuyến tính cơ bản

Tranzito lưỡng cực có cổng cách ly (IGBT)

IGBT là một dạng tranzito được điều khiển bằng điện thế, có các cực tương tự như các BJT. IGBT là linh kiện bốn lớp có cấu trúc tương tự MOSFET cộng thêm với một lớp *p*.

Hình 20.42 biểu diễn ký hiệu và mạch tương đương cho một IGBT. IGBT có các đặc tính kết hợp của BJT và MOSFET. Tương tự MOSFET, nó có trở kháng vào và tần số chuyển mạch cao. Nó cũng có công suất cao điều khiển như BJT.

Các bộ khuếch đại công suất điển hình của các cơ cấu chấp hành cơ điện

Dựa trên các phương pháp điện tử công suất tương ứng, có thể chia khuếch đại công suất và điều biến cho các cơ cấu chấp hành cơ điện thành hai loại cơ bản. Các bộ khuếch đại tuyến tính điều khiển BJT hoạt động trong vùng tuyến tính tích cực. Các bộ khuếch đại chuyển mạch điều khiển các tranzito ở chế độ bật tắt. Tuỳ thuộc vào đối tượng điều khiển, tín hiệu (hình 20.2) tới khuếch đại có thể là điện áp hoặc dòng điện, dùng để điều chỉnh năng lượng điện phân tới các thiết bị chuyển đổi năng lượng. Hầu hết các cơ cấu chấp hành cơ điện là tải có tính cảm như cuộn dây của nam châm điện hoặc rôto của động cơ một chiều. Phần sau sẽ đưa ra ví dụ với động cơ một chiều là tải điện cảm của bộ khuếch đại công suất.

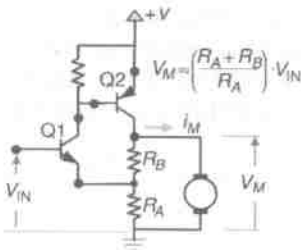
Các bộ khuếch đại tuyến tính

Hình 20.43 chỉ ra mạch điện điều khiển (mạch kích) cơ bản cho các bộ khuyếch đại điều khiển dòng và áp. Cả hai sơ đồ có các điểm chung sau:

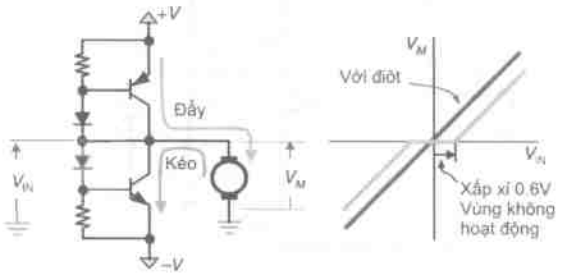
1. Điện áp vào $V_i(t)$ cung cấp cho base của tranzito.
2. Công suất điện cần thiết để điều khiển tải cung cấp bởi điện áp một chiều.
3. Tranzito hoạt động ở chế độ tuyến tính tích cực.

Bộ bộ khuếch đại điện áp

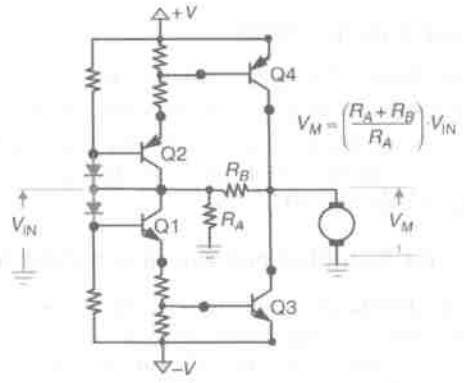
Trong hình 20.43(a), động cơ được điều khiển là tải của mạch emitter. Nếu bỏ qua điện áp base-emitter, điện áp qua động cơ V_M được điều khiển trực tiếp bởi điện áp vào V_{IN} và dòng điện được cấp bởi nguồn cung cấp. Mặc khác độ lớn dòng điện, phụ thuộc vào điện áp nguồn, tốc độ và thông số của động cơ.



HÌNH 20.44 Bộ bộ khuếch đại điện áp có hệ số khuếch đại biến đổi được



HÌNH 20.45 Bộ khuếch đại điện áp lưỡng cực



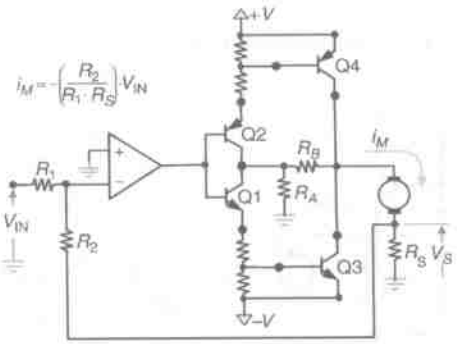
HÌNH 20.46 Bộ khuếch đại điện áp lưỡng cực có hệ số khuếch đại thay đổi được

Hình 20.44 là sơ đồ bộ khuếch đại điện áp có hệ số khuếch đại biến đổi được, trong đó hệ số khuếch đại từ điện áp đầu vào V_{IN} so với điện áp cung cấp cho động cơ (cuộn cảm) V_M có thể xấp xỉ bằng $(R_A+R_B)/R_A$. Nếu yêu cầu một dòng điện qua động cơ lớn hơn, tranzito Q2 có thể thay thế bởi một cặp tranzito Darlington. Các bộ khuếch đại mô tả trong 20.43 và 20.44 chỉ có thể điều khiển dòng điện qua động cơ (tải) theo một chiều. Do đó chúng cũng được gọi là các bộ khuếch đại đơn cực. Để cung cấp dòng điện đi theo hai chiều hai tranzito có thể nối với động cơ theo cấu trúc đẩy-kéo, như mô tả trong hình 20.45. Hai điôt trong mạch được dùng để hạn chế vùng chết (dead-zone) tạo bởi sụt áp base-emitter trên các tranzito. Chú ý rằng một nguồn điện áp lưỡng cực cần thiết cho sơ đồ này. Hình 20.46 mô tả một chế độ điện áp lưỡng cực với biến hệ số khuếch đại $(R_A+R_B)/R_A$. Tương tự, nếu cần dòng điện động cơ lớn hơn, các tranzito Q3 và Q4 có thể được thay thế bởi các cặp tranzito Darlington.

Bộ khuếch đại dòng điện

Như đã nêu ở phần trước, trong nhiều cơ cấu chấp hành điện tử, lực và mômen đầu ra của thiết bị có sự tương quan lớn với dòng điện cuộn dây, ví dụ với một động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu và cơ cấu chấp hành kiểu cuộn cảm, mômen và lực đầu ra tỉ lệ với dòng điện đầu vào. Do đó trong nhiều ứng dụng điều khiển chuyển động, rất cần có một chuyển đổi điện áp thành dòng điện (*chế độ khuếch đại dòng điện*) ở tầng công suất, trong đó điện áp đầu vào tỉ lệ với dòng điện chảy vào/ra động cơ (cuộn dây). Hình 20.43(b) mô tả một mạch điện cơ bản cho chế độ khuếch đại dòng điện. Quan hệ giữa dòng điện emitter (động cơ) i_M và điện áp vào V_{IN} là:

$$i_M = \frac{V_{IN} - V_{BE}}{R_S}$$



HÌNH 20.47 Bộ khuếch đại dòng điện lưỡng cực có hệ số thay đổi

Nếu điện áp base-emitter được bỏ qua, điện áp dòng điện qua động cơ i_M tỉ lệ với điện áp vào V_{IN}, tức là, $i_M \approx (1/R_S).V_{IN}$.

Hình 20.47 mô tả một bộ khuếch đại dòng lưỡng cực cơ bản. Một bộ khuếch đại thuật toán (Op-Amp) được dùng để điều khiển dòng điện theo vòng kín. Điện trở R_S, thường được gọi là điện trở đo, dùng để đo dòng điện động cơ phản hồi về bộ khuếch đại thuật toán. Tuỳ thuộc vào cường độ dòng điện mong muốn, điện trở R_S (đầu vào đảo) cần có đủ công suất tiêu tán nhiệt ($i_M^2.R_S$) tương ứng gây ra bởi dòng điện qua điện trở. Với xấp xỉ bậc không, ở trạng thái ổn định, bộ khuếch đại thuật toán sẽ cố gắng cân bằng điện thế ở cực dương và cực âm (đầu vào không đảo), tức là nó sẽ tạo ra:

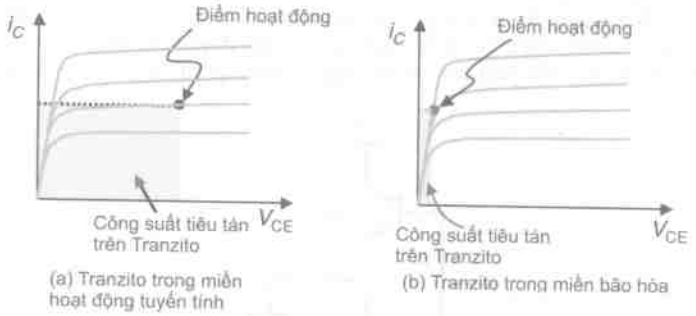
$$V_S = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right).V_{IN}$$

do đó:

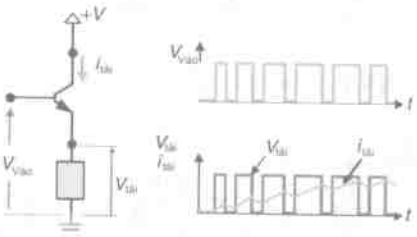
$$i_M \approx -\left(\frac{R_2}{R_S.R_1}\right).V_{IN}$$

Mặc dù một bộ khuếch đại dòng có xu hướng có một quan hệ tuyến tính giữa điện thế đầu vào và dòng điện cuộn dây, nhưng trên thực tế có giới hạn do nguồn điện áp giới hạn. Trong hình 20.47, điện áp cung cấp là ±V. Giả thiết rằng cuộn dây động cơ có điện trở R_M, dòng điện tối đa i_{max} nguồn có thể cung cấp được giới hạn trên bởi:

$$i_{Max} < \frac{V}{R_M + R_S}$$



HÌNH 20.48 Công suất tổn hao trên tranzito



HÌNH 20.49 Bộ khuếch đại chuyển mạch đơn giản với đầu vào chuyển mạch

Giới hạn trên không tính đến tác động của suất điện động cảm ứng trong cuộn dây nếu cuộn dây di chuyển. Do đó, dòng điện tổng của bộ khuếch đại dòng điện bị giới hạn và cần tính đến khi làm việc ở chế độ khuếch đại dòng điện.

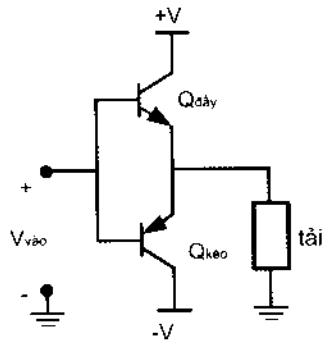
Các bộ khuếch đại chuyển mạch

Các bộ khuếch đại tuyến tính thì đơn giản và không tạo nhiễu điện. Tuy nhiên do các tranzito tầng cuối cùng hoạt động ở vùng tuyến tính tích cực, một công suất đáng kể bị tiêu tán sang dạng nhiệt, điều này sẽ làm giảm hiệu suất của thiết bị cũng như yêu cầu các bộ tản nhiệt lớn để bảo vệ các linh kiện. Tuy nhiên, như mô tả trong hình 20.48, khi hoạt động ở vùng bão hoà, nếu sụt điện áp collector-emitter cỡ 1V hoặc ít hơn, công suất tổn hao qua tranzito giảm đáng kể với cùng dòng điện.

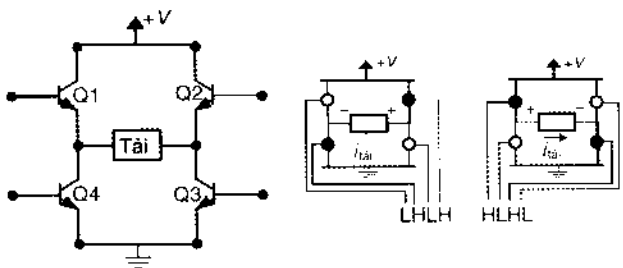
Hình 20.49 mô tả bộ khuếch đại chuyển mạch đơn giản, nó gồm một tranzito nối với tải. Về cơ bản, đây giống như bộ khuếch đại tuyến tính mô tả trong hình 20.43(a). Sự khác nhau là ở cách điều khiển tranzito. Với bộ khuếch đại chuyển mạch, điện áp vào (base) chỉ có hai giá trị (hai trạng thái) cao và thấp. Khi điện áp base (vào) ở mức cao, tranzito ở chế độ bão hoà và dòng điện sẽ đi qua tải. Nếu bỏ qua điện áp giảm trên collector-emitter, điện áp qua tải xấp xỉ điện áp nguồn cung cấp. Khi điện áp base thấp, tranzito ở trạng thái ngắt mạch và không có điện áp cung cấp cho tải. Nếu tải có đặc tính thông thấp, dòng điện/điện áp trung bình qua tải sẽ tỉ lệ với thời gian mở. Do đó nếu tần số chuyển mạch đủ lớn (liên quan tới tải trở kháng), điện áp/dòng điện hiệu dụng qua tải có thể được điều biến bởi phần trăm điện áp vào mức cao, chẳng hạn nếu V_{IN} mức cao chiếm 80% thời gian, điện áp trung bình qua tải sẽ ở mức 80% của điện áp cung cấp V. Đây được gọi là điều biến độ rộng xung (PWM). Một ưu điểm khác của bộ khuếch đại chuyển mạch là V_{IN} có thể được ghép nối trực tiếp với 1 thiết bị số mà không cần bộ chuyển đổi số - tương tự DAC.

Bộ khuếch đại công suất đẩy kéo Push-Pull (chế độ B)

Bộ khuếch đại chuyển mạch chỉ ra trong hình 20.49 là đơn cực, tức là nó chỉ có thể điều khiển dòng điện qua tải theo một chiều. Hình 20.52 mô tả một dạng tầng công suất đơn giản kiểu đẩy kéo (chế độ B) cung cấp dòng điện hai chiều cho tải. Mạch trong hình 20.50 tương tự bộ khuếch đại điện áp lưỡng cực mô tả trong hình 20.45. Sự khác nhau cũng ở chỗ cách điều khiển các tranzito. Khi điện áp base V_{IN} xác định dương (+V), tranzito đẩy Q_{push} sẽ mở và tranzito kéo Q_{pull} sẽ đóng. Kết quả là dòng điện qua tải sẽ đi theo chiều từ cực dương của nguồn xuống đất. Nếu điện áp base xác định âm (−V), Q_{push} đóng và Q_{pull} mở, dòng điện sẽ đi theo chiều từ đất tới cực âm của nguồn cung cấp. Để điều chỉnh điện áp/dòng điện tải, có thể dùng PWM. Cấu trúc này cũng được gọi là *mạch nửa cầu H*. Sơ đồ này yêu cầu cả hai nguồn dương và âm, sẽ làm tăng độ phức tạp và chi phí của mạch.



HÌNH 20.50 Bộ khuếch đại đẩy kéo



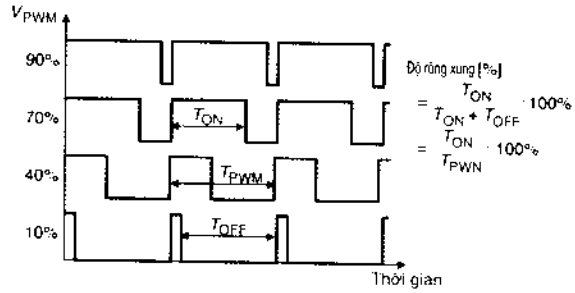
HÌNH 20.51 Cầu H

Mạch cầu H (H-Bridge)

Cấu trúc mạch cầu H là một giải pháp đơn giản có thể tạo ra điện áp lưỡng cực từ nguồn đơn cực. Hình 20.51 mô tả một mạch cầu H đơn giản với một tải. Một mạch cầu H bao gồm bốn tranzito được nối theo cấu trúc cầu Wheatstone. Bằng cách mở/đóng các cặp tranzito khác nhau (Q1-Q3) hoặc (Q2-Q4), có thể có điện áp lưỡng cực qua tải từ một nguồn cung cấp đơn cực (hình 20.51). Trong nhiều ứng dụng, các cặp tranzito trong mạch cầu H có thể được điều khiển trực tiếp bởi đầu ra của một thiết bị số (TTL hoặc CMOS). Các tranzito n-p-n hoặc kênh n có thể mở tới bão hoà bởi một tín hiệu đầu ra mức cao của cổng số và đóng bởi một tín hiệu đầu ra mức thấp. Nếu cần một dòng điện tổng lớn cho tải, các cặp Darlington có thể được dùng để thay thế các tranzito riêng lẻ. Do các MOSFET có trở kháng đầu vào lớn hơn và đặc tính chuyển mạch nhanh hơn, chúng được thay thế cho các BJT trong hầu hết các ứng dụng chuyển mạch.

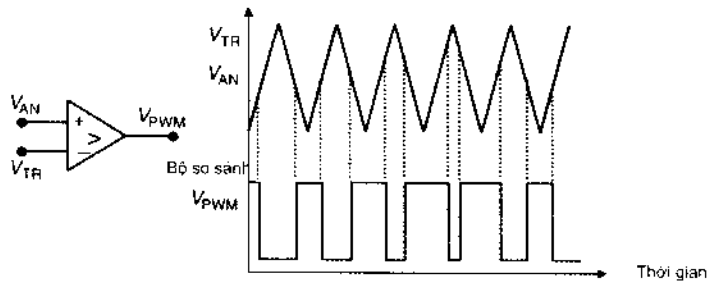
Điều chế độ rộng xung (PWM)

PWM là một trong nhiều cách chung để mã hoá các thông tin tương tự dùng tín hiệu số. Một tín hiệu PWM có dạng sóng với tần số cố định và độ rộng xung biến đổi. Độ rộng xung trong PWM là tỷ lệ phần trăm (trên chu kỳ xung) thời gian tín hiệu ở trạng thái tích cực - thường có nghĩa là trạng thái lôgic 1, hình 20.52. Về bản chất, PWM mã hoá (điều biến) thông tin trong miền thời gian chứ không phải là miền điện áp như các tín hiệu tương tự.



HÌNH 20.52 Tín hiệu điều biến độ rộng xung

PWM có một số ưu điểm hơn việc dùng các chuyển đổi D/A và các linh kiện tuyến tính. Nó hiệu quả vì bộ khuyếch đại chuyển mạch hiệu quả hơn các thành phần tuyến tính. Một ưu điểm khác là không cần chuyển đổi D/A. Tín hiệu số được duy trì từ bộ vi xử lý/vi điều khiển tới khuếch đại công suất. Thêm vào đó để có khả năng chống nhiễu tốt hơn, điều này cũng giảm sự cần có một DAC và có xu hướng làm mạch đơn giản hơn và hiệu quả hơn về chi phí. Một hạn chế của việc dùng PWM và các khuếch đại chuyển mạch là tần số chuyển mạch cao gây ra nhiễu tần số radiô (RFI) và nhiễu điện từ (EMI).



HÌNH 20.53 Tạo các tín hiệu PWM từ tín hiệu tương tự

Tần số mang của PWM là một thông số chính khi thiết kế. Trường hợp lý tưởng là tần số PWM lớn đủ để tránh sự tạo ra nhiễu chuyển mạch âm tần, có nghĩa là nên lớn hơn 20 kHz. Tuy nhiên có một vài hệ số đặt dưới ngưỡng trên ở tần số mang. Tổn hao chuyển mạch của thiết bị chuyển mạch có xu hướng tăng khi tăng tần số chuyển mạch. Việc này gây giảm hiệu suất của các chuyển mạch và các bộ khuếch đại. Tần số mang PWM cao cần các thành phần chuyển mạch nhanh hơn và chi phí lớn hơn. Lượng dòng điện qua thiết bị cũng giới hạn độ dốc chuyển mạch. Thông thường, các thiết bị công suất nhỏ và các thiết bị văn phòng dùng các PWM ở tần số 20-40 kHz. Với các ứng dụng công nghiệp ở phạm vi lớn hơn, tần số PWM nhỏ hơn 500 Hz. Một thông số khác là độ phân giải của PWM. Thông số này cần khi thiết lập một PWM từ một nguồn số. Độ phân giải PWM tương đương với độ phân giải lượng tử hoá của ADC. Một PWM 8 bit nghĩa là có $2^8 = 256$ độ xung khác nhau trong 1 chu kỳ tín hiệu mang PWM.

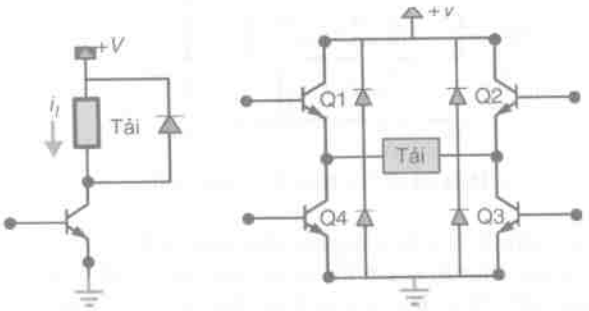
Các PWM được sử dụng rộng rãi trong hầu hết các bộ vi điều khiển và bộ vi xử lý. Chúng đều có ít nhất một cổng ra PWM. Tín hiệu PWM có thể dễ dàng tạo từ tín hiệu tương tự bằng cách so sánh tín hiệu tương tự với một tín hiệu có dạng tam giác tuần hoàn qua một bộ so sánh, hình 20.53.

Xem xét sự ghép nối

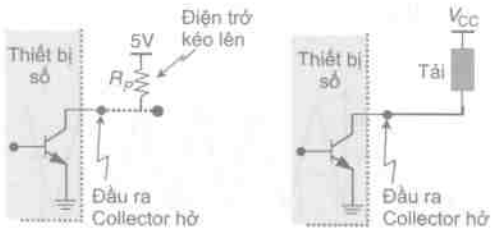
Chúng ta sẽ kết thúc phần này bằng việc thảo luận một số vấn đề liên quan tới việc ghép nối giữa cơ cấu chấp hành cơ điện với các thiết bị khuếch đại công suất.

Điều khiển tải điện cảm

Đa số các cơ cấu chấp hành cơ điện dùng các cuộn dây để chuyển năng lượng điện sang năng lượng từ. Theo quan niệm điều khiển công suất, các cuộn dây là các tải trở kháng và cảm kháng. Tải cảm kháng là phần tử lưu trữ năng lượng, trong đó năng lượng được lưu trữ dưới dạng từ trường cảm ứng.



HÌNH 20.54 Dùng các điôt để giảm điện áp chuyển mạch khi truyền động các tải cảm



HÌNH 20.55 Đầu ra hở collector

Điện áp qua một cuộn cảm lý tưởng $V_l(t)$ là:

$$V_l(t) = L.\frac{d}{dt} i_l(t) \qquad (20.15)$$

trong đó $i_L(t)$ là dòng điện qua cuộn cảm và L là điện cảm. Khi dòng điện qua cuộn cảm đột nhiên mất, ví dụ bằng cách chuyển sang (đóng) khoá tranzito điều khiển. Công thức (20.15) chỉ ra rằng sẽ có một điện áp tức thời lớn sinh ra qua cuộn cảm. Nếu không chặn được hoàn toàn điện áp, tức thời này có thể gây ngắn mạch thậm chí làm hỏng tranzito điều khiển. Hiện tượng này đôi khi được gọi là inductor kickback.

Một phương pháp đơn giản để giảm điện áp chuyển mạch tức thời này là tạo ra một mạch vòng rẽ cho lượng năng lượng dư thừa chảy qua. Việc này được thực hiện bằng cách đặt các điôt nối song song với tải, hình 20.54. Hình 20.54 mô tả hai phương pháp dùng điôt *quét ngược* hoặc dùng các điôt *nối vòng* để chặn điện áp lớn tức thời khi điều khiển các tải điện cảm.

Đầu ra collector hở

Đối với một số thiết bị số, tầng ra (chân ra) đơn giản chỉ là collector của một tranzito. Đây được gọi là đầu ra collector hở (open-collector), hình 20.55. Do đầu ra của thiết bị chỉ là collector của một tranzito nên nó không có khả năng điều khiển ra. Giá trị đầu ra có thể được đo qua điện trở kéo lên, hình 20.55. Đầu ra hở collector thuận lợi cho việc điều khiển các thiết bị cơ điện nếu đầu ra tranzito có thể chịu được dòng điện đủ lớn, hình 20.57.

Cách ly

Cần nhắc lại rằng, phần khuếch đại công suất và điều biến của cơ cấu chấp hành cơ điện bao gồm cả hai tín hiệu năng lượng cao và năng lượng thấp, hình 20.2. Vì lý do an toàn, tin cậy, cần ngăn chặn nhiễu đỉnh nhọn và tức thời ở phía công suất cao của hệ thống với ảnh hưởng tới phía xử lý tín hiệu (công suất thấp) của mạch điện. Rơle cơ khí là một sự lựa chọn. Bộ phận cách quang hay *optocouplers* dùng ánh sáng để kết nối phía năng lượng cao và thấp của thiết bị. Thông thường là một nguồn điôt phát quang (LED) kết hợp với một tranzito quang hay thyristor quang, hình 20.35. Ngoài việc cách ly tín hiệu, bộ cách quang cũng giúp làm giảm vòng nối đất giữa phần và phần công suất của mạch.

Tiếp đất

Tiếp đất nhằm cung cấp điểm đất chung giữa các thiết bị khác nhau. Với các cơ cấu chấp hành cơ điện, phần năng lượng cao thường chuyển mạch ở tần số cao; nếu điểm đất của phía năng lượng cao của mạch nối trực tiếp với điểm đất của phía năng lượng thấp của mạch, nhiễu chuyển mạch có thể truyền qua dây đất và tác động xấu tới hoạt động của phía năng lượng thấp của hệ thống. Cần lưu ý tách các tiếp đất của phía năng lượng cao và thấp và hai điểm đất sau đó được nối với nhau tại nguồn cung cấp. Ngoài ra, cần có một mặt phẳng nối đất có đủ kích thước để tối thiểu hóa độ lệch giữa các điểm đất.

Tài liệu tham khảo

[1] T. Wildi, *Electrial Machines, Drivers and Power Systems*, Prentical Hall, 2000

[2] T. Keujo and S. Nagamori, *Per manent-Magnet and Brushless DC Motors*, 1985, by permission of Oxford University Press.

[3] www.mems.sandia.com

20.2 Máy điện

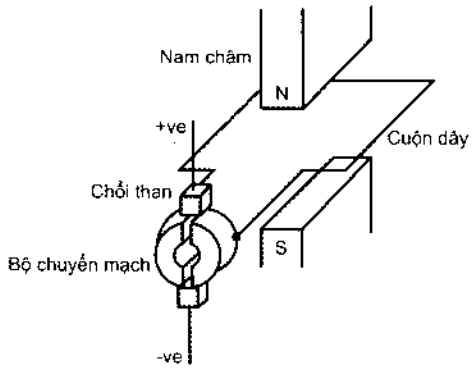
C. J. Fraser

Động cơ điện được sử dụng phổ biến làm các bộ truyền động trong các ứng dụng Cơ điện tử. Động cơ điện thường là nguồn động lực chính trong các hệ truyền động. Thông thường, đặc tính cơ của ứng dụng sẽ quyết định loại động cơ điện được sử dụng. Đặc tính mômen-tốc độ của động cơ và hệ thống truyền động cũng rất quan trọng. Có một nghịch lý là trong khi đặc tính mômen-tốc độ của động cơ thường được các nhà sản xuất cung cấp sẵn, đặc tính mômen-tốc độ của hệ thống truyền động lại không rõ ràng.

Động cơ một chiều

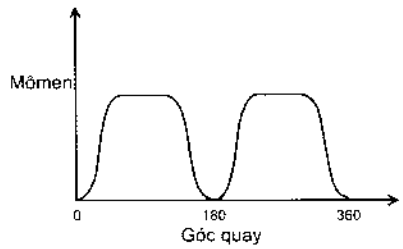
Tất cả các động cơ điện thông thường bao gồm một phần tĩnh và một phần quay, được phân cách bởi một khe hở không khí. Trong động cơ một chiều, phần tĩnh bao gồm các cực lồi với cấu tạo gồm tập hợp của nhiều lá thép kỹ thuật điện có các cuộn dây quấn quanh chúng sinh ra từ trường. Tác dụng của các lá thép kỹ thuật điện là làm giảm tổn hao do dòng điện xoáy gây ra. Phần quay còn gọi là phần ứng bao gồm một dãy các cuộn dây đặt giữa các rãnh, quanh mặt ngoài của phần ứng. Phần ứng cũng được chế tạo dưới dạng các lá trên một trục xác định. Một dạng đơn giản của động cơ một chiều được minh hoạ trong hình 20.56.

Cuộn cảm được đặt giữa hai cực đối xứng của một nam châm đơn giản. Khi cuộn cảm nằm trong mặt phẳng đứng, dòng quy ước của các điện tử theo chiều từ cực dương tới cực âm. Điện được cấp qua các chổi than tiếp xúc với các vành (đoạn) của một chuyển mạch. Theo quy tắc bàn tay trái và định luật Faraday về cảm ứng điện từ, phần trên của cuộn cảm sẽ chịu một lực điện từ theo chiều từ phải qua trái. Phần dưới xuất hiện một lực với chiều ngược lại.



HÌNH 20.56 Động cơ một chiều hai cực, một cuộn dây

Các lực điện từ đó tạo ra một mômen làm cuộn dây quay theo chiều ngược chiều kim đồng hồ. Nhiệm vụ của các vành chuyển mạch là bảo đảm dòng điện ở từng phía theo chiều đúng của cuộn cảm tương ứng với các cực nam châm. Các vành gồm nhiều miếng đồng thau ghép, được cách điện bởi các miếng mica. Chổi than trượt trên các vành.



HÌNH 20.57 Biến thiên mômen trong một vòng quay

Khi cuộn dây nằm ngang, từ thông khép kín của cuộn cảm là cực đại nhưng tốc độ thay đổi từ thông lại cực tiểu. Nói cách khác, khi cuộn dây ở trong mặt phẳng thẳng đứng, từ thông của cuộn cảm bằng không nhưng sự thay đổi từ thông móc vòng lại ở mức tối đa. Kết quả là sự thay đổi mômen tổng tác động lên cuộn cảm trong một vòng quay được chỉ ra như hình 20.57.

Nếu hai cuộn dây tạo với nhau một góc 90^0 kết hợp với hai nam châm cũng tạo với nhau một góc 90^0, thì mômen đầu ra thường là hằng số. Khi thêm một cuộn dây thứ hai, sẽ cần có bốn vành phân cách. Một máy điện một chiều điển hình có tới 36 cuộn dây và có một chuyển mạch cổ góp điện với 72 vành.

Động cơ một chiều trong hình 20.56 có thể được cải tiến theo ba cách. Một là, tăng số cuộn dây, hai là có thể tăng số vòng dây trong mỗi cuộn dây, ba là tăng số cực từ. Một động cơ một chiều phổ biến, thường có bốn cực, nối dây sao cho các cực liền kề nhau có cực tính ngược nhau. Để mômen trong các cuộn dây phần ứng có thể phối hợp với các cuộn khác thì một phía của cuộn dây phải đặt ở cực bắc, phía còn lại phải đặt dưới cực nam. Với các máy hai cực, cuộn dây phần ứng được đặt hoàn toàn đối xứng với cuộn còn lại. Trong máy bốn cực, các cuộn dây được đặt lệch nhau một góc 90^0. Công suất của máy là yếu tố quyết định số cuộn dây và số vòng quay trên mỗi cuộn bằng bao nhiêu là phù hợp.

Suất điện động phần ứng (emf)

Nếu một vật dẫn cắt qua một từ thông, một điện áp 1 V sẽ cảm ứng trên vật dẫn đó nếu từ thông cắt với tốc độ 1 Wb/s. Có nghĩa là với từ thông mỗi cực là ϕ, tốc độ quay (vòng/s) là N, với cuộn dây một vòng, suất điện động cảm ứng trên cuộn cảm được tính bởi:

$$E_{\text{cuộn cảm}} = \frac{\text{từ thông}}{\text{thời gian quay nửa vòng}} = \frac{\Phi}{1/2N} = 2N\Phi \tag{20.16a}$$

Với một máy có Z_s vật dẫn cảm ứng mắc nối tiếp, ví dụ $Z_s/2$ vòng dây và $2p$ cực từ, suất điện động cảm ứng tổng là:

$$E = \frac{2N\Phi Z_s 2p}{2} = 2N\Phi Z_s p \tag{20.16b}$$

Chiều của suất điện động phần ứng ngược với chiều của điện áp cung cấp. Vì suất điện động tỷ lệ tuyến tính với tốc độ môtơ khi khởi động, lúc đó nó sẽ không sinh ra suất điện động cảm ứng. Điều này sẽ có tác động tới dòng điện trong cuộn dây và do vậy cần phải thực hiện một vài phép đo để chống lại hiện tượng này. Vấn đề này sẽ được xem xét kỹ hơn ở phần sau.

Mômen phần ứng

Lực điện từ trên vật dẫn mang điện được tính bởi:

$$F = BLI \tag{20.17}$$

trong đó B là mật độ từ thông dưới một cực, I là dòng điện trong thanh dẫn, L là độ dài của thanh dẫn. Mômen trên một thanh dẫn phần ứng:

$$T = Fr = B_{av} L I_a r \tag{20.18}$$

trong đó, r là bán kính của phần ứng qua tâm quay, I_a là dòng điện trong thanh dẫn phần ứng, L là độ dài trục của thanh dẫn và B_{av} là mật độ từ thông trung bình dưới một cực.

Mômen tổng trên mỗi thanh dẫn là:

$$T = \frac{\Phi 2pLI_a r}{2\pi rL} = \frac{\Phi p I_a}{\pi} \tag{20.19}$$

Với Z_s cuộn dây phần ứng mắc nối tiếp, mômen tổng (Nm) trên phần ứng được xác định:

$$T = \frac{\Phi p I_a Z_s}{\pi} \tag{20.20}$$

Điện áp

Ký hiệu điện áp cực là V, trong điều kiện bình thường, chúng ta có một hệ điện cân bằng, tại đó:

$$V = E + I_a R_a \tag{20.21}$$

Do số cực và số thanh dẫn phần ứng là cố định, từ công thức (20.16) chúng ta có, mối quan hệ tỷ lệ giữa tốc độ, suất điện động phần ứng và mật độ từ thông:

$$N \propto \frac{E}{\Phi} \tag{20.22}$$

Kết hợp với (20.21) suy ra:

$$N \propto \frac{(V - I_a R_a)}{\Phi} \tag{20.23}$$

Do giá trị I_aR_a thường nhỏ hơn khoảng 5% điện áp cực, dẫn tới xấp xỉ chấp nhận được:

$$N \propto \frac{V}{\Phi} \tag{20.24}$$

Tương tự, công thức (20.19) cung cấp một quan hệ tỉ lệ xấp xỉ giữa mômen, dòng điện phần ứng và từ thông:

$$T \propto I_a \Phi \tag{20.25}$$

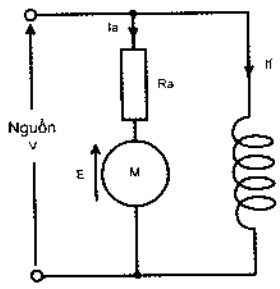
Công thức (20.24) chỉ ra tốc độ của động cơ thì tỉ lệ thuận với điện áp cung cấp và tỉ lệ nghịch với từ thông. Tất cả các phương pháp điều khiển tốc độ của động cơ một chiều dựa trên mối quan hệ này.

Công thức (20.25) chỉ ra rằng mômen của động cơ một chiều tỉ lệ thuận với tích của dòng điện phần ứng và từ thông trên một cực. Do đó, các phương pháp điều khiển tốc độ dựa trên việc biến đổi từ thông sẽ có tác động tới mômen đầu ra.

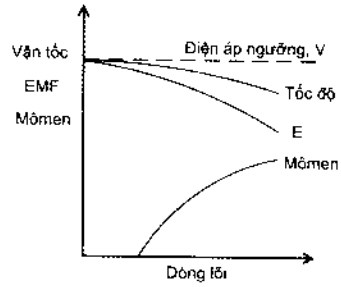
Các phương pháp kích từ

Động cơ kích từ song song

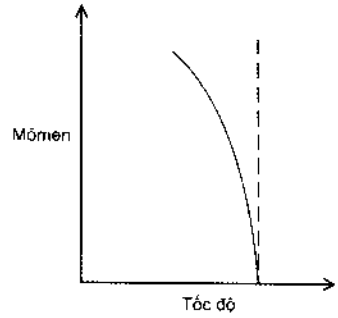
Động cơ kích từ song song (hình 20.58) có cuộn dây phần ứng và cuộn dây kích từ được nối song song với nguồn cung cấp. Dưới các điều kiện hoạt động bình thường, dòng điện kích từ là hằng số. Khi dòng điện phần ứng tăng, phản ứng phần ứng làm dòng điện kích từ yếu đi và tốc độ tăng lên. Tuy nhiên điện áp cảm ứng sẽ giảm do tăng sự sụt áp trên cuộn cảm ứng và dẫn tới làm giảm tốc độ. Hai kết quả này tác động lẫn nhau khiến tốc độ động cơ giảm chút ít do dòng điện phần ứng tăng. Mômen động cơ tăng xấp xỉ tuyến tính với dòng điện phần ứng cho đến khi phản ứng phần ứng bắt đầu làm trường kích từ yếu đi. Đặc điểm chung này được chỉ ra trong hình 20.59, có thể nhận thấy rằng mômen chỉ tăng khi dòng điện phần ứng đủ lớn để vượt qua mức tổn thất không đổi trong máy. Hình 20.60 chỉ ra đặc tính mômen-tốc độ. Vì mômen tăng đột ngột với sự giảm chút ít về tốc độ nên động cơ kích từ song song thường thích hợp cho các thiết bị truyền động như bơm, máy nén khí, máy công cụ trong đó tốc độ phải được duy trì "không đổi" trên một dải rộng của các điều kiện về tải.



HÌNH 20.58 Động cơ kích từ song song



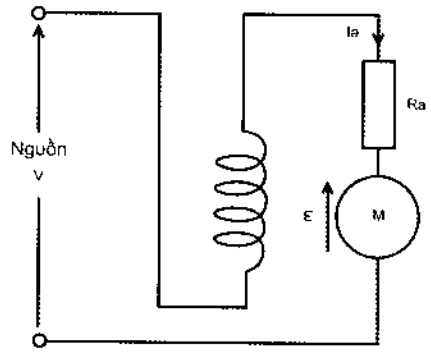
HÌNH 20.59 Đặc tính tải động cơ kích từ song song



HÌNH 20.60 Đặc tính mômen-tốc độ động cơ kích từ song song

Động cơ kích từ nối tiếp

Động cơ kích từ nối tiếp được mô tả trong hình 20.61. Khi dòng điện tải tăng, suất điện động cảm ứng E sẽ giảm do điện trở phần ứng và điện trở kích từ giảm. Do cuộn dây kích từ được mắc nối tiếp với phần ứng, từ thông tỉ lệ thuận với dòng điện phần ứng. Công thức (20.24) chứng tỏ rằng đặc tính tốc độ-dòng điện phần ứng có dạng hypebol. Tương tự, công thức (20.25) chứng tỏ rằng đặc tính mômen-dòng điện phần ứng sẽ xấp xỉ dạng parabôn. Hình 20.62 đưa ra các đường đặc tính phổ biến và hình 20.63 là đường đặc tính mômen-tốc độ.



HÌNH 20.61 Động cơ kích từ nối tiếp

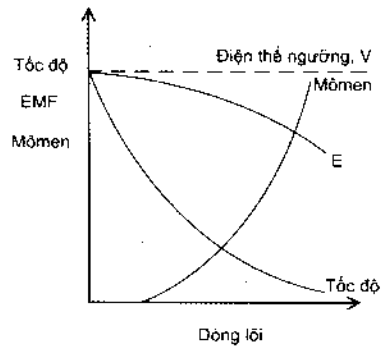
Các đặc tính này chứng tỏ rằng nếu giảm tải tới một giá trị quá thấp tốc độ có thể tăng cao gây nguy hiểm. Không nên dùng một động cơ kích từ nối tiếp trong trường hợp tải giảm đột ngột. Ưu điểm chính của động cơ dây quấn nối tiếp là cung cấp mômen lớn ở tốc độ thấp. Các động cơ kích từ nối tiếp thích hợp cho các ứng dụng trong đó yêu cầu mômen khởi động lớn. Ví dụ thang máy, cần trục và các bộ truyền động điện.

Động cơ kích từ hỗn hợp

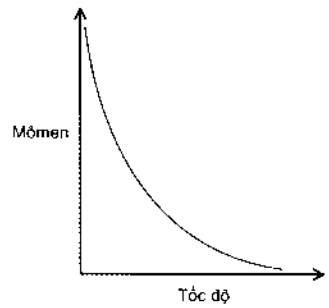
Động cơ kích từ hỗn hợp bao gồm cả hai dạng nối tiếp và song song. Các đường đặc tính của động cơ kích từ hỗn hợp sẽ ở giữa hai dạng động cơ trên.

Khởi động động cơ một chiều

Khi phần ứng không quay, suất điện động cảm ứng bằng không. Nếu khi bắt đầu khởi động động cơ mà cấp toàn bộ điện áp qua cuộn dây phần ứng thì dòng điện sẽ tăng vọt lên rất lớn. Một động cơ 40 kW thông thường có một điện trở phần ứng khoảng 0.06Ω. Nếu điện áp cung cấp là 240V, dòng điện sẽ là 4000A. Dòng điện này chắc chắn sẽ gây nổ cầu chì và ngắt nguồn điện cung cấp cho động cơ. Để giới hạn dòng điện khởi động, một biến trở phụ được nối nối tiếp với phần ứng. Khi khởi động, toàn bộ điện trở được nối nối tiếp với phần ứng. Khi máy tăng tốc độ và tăng suất điện động cảm ứng, ta giảm dần điện trở phụ cho đến khi đạt dải tốc độ thì ngắt điện trở đó ra khỏi mạch. Người ta cũng có thể dùng kết hợp một điện trở nối tiếp với khoá khởi động.



HÌNH 20.62 Đặc tính tải của động cơ kích từ nối tiếp



HÌNH 20.63. Đặc tính mômen-tốc độ của động cơ kích từ nối tiếp

Điều khiển tốc độ động cơ một chiều

Phương trình (20.24) chỉ ra rằng tốc độ của động cơ một chiều phụ thuộc cả hai thông số điện áp cung cấp và mật độ từ thông. Sự thay đổi của một trong hai thông số đó sẽ tác động đến sự thay đổi tốc độ động cơ.

Điều chỉnh kích từ

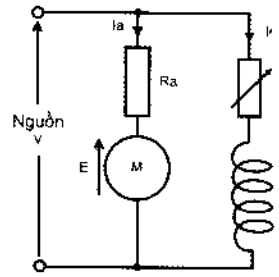
Đối với các động cơ kích từ song song và kích từ hỗn hợp, một biến trở gọi là "bộ điều chỉnh trường kích từ" có thể được nối nối tiếp với cuộn dây kích từ để giảm từ thông. Với động cơ kích từ nối tiếp, biến trở này được nối song song với cuộn dây kích từ và được gọi là bộ "phân tán". Các hình 20.64-20.66 chỉ ra các phương pháp làm giảm từ thông kích từ cho các loại động cơ trên.

Trong tất cả các phương pháp trên, từ thông chỉ có thể giảm và từ công thức 20.24, thấy rằng tốc độ chỉ có thể tăng trên tốc độ danh định. Thực tế tốc độ có thể tăng khoảng 3-4 lần tốc độ danh định. Tuy nhiên tốc độ tăng sẽ trả giá bằng việc giảm mômen do mômen giảm tuyến tính với từ thông.

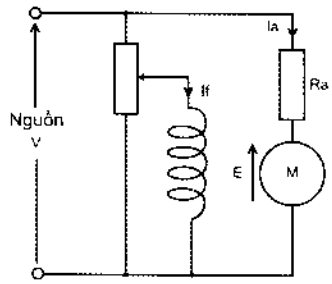
Điều chỉnh điện áp phần ứng

Tốc độ có thể tăng tới tốc độ định mức bằng cách thay đổi điện áp phần ứng từ giá trị không tới giá trị danh định. Hình 20.67 minh hoạ một phương pháp thực hiện điều chỉnh này.

Dòng điện qua bộ chia điện áp có cùng giá trị với dòng điện qua động cơ, giới hạn của phương pháp này là điều khiển tốc độ cho các máy nhỏ. Thêm vào đó, nhiều năng lượng đầu vào bị tổn hao trên các biến trở, do đó hệ thống kém hiệu quả.



HÌNH 20.64 Điều khiển tốc độ bằng cách giảm từ thông: động cơ kích từ song song



HÌNH 20.65 Điều khiển tốc độ bằng cách giảm từ thông: động cơ kích từ hỗn hợp

Phương pháp Ward Leonard

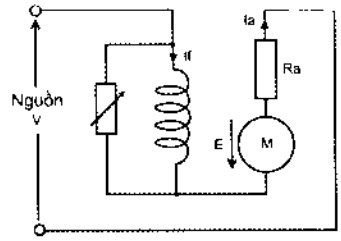
Trong trường hợp này, điện áp một chiều biến đổi dùng để điều khiển tốc độ động cơ nhận được từ một máy phát một chiều riêng biệt, máy phát đó được truyền động bởi một động cơ cảm ứng (động cơ lồng sóc).

Cuộn cảm kích từ cho máy phát một chiều được cung cấp từ bộ chia điện áp center-zero (có tốc độ 0 ở giữa). Khi tay gạt ở vị trí giữa bộ điều khiển tốc độ, động cơ ở trạng thái dừng. Khi di chuyển tay gạt xa khỏi vị trí giữa, tốc độ động cơ sẽ tăng theo chiều kim đồng hồ hoặc ngược chiều kim đồng hồ. Bộ điều khiển Ward Leonard cho phép điều khiển trơn và chính xác theo từng chiều với từng loại phanh tương ứng. Phương pháp này khá phức tạp, do đó hệ thống có chi phí cao và chỉ dùng trong những ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao.

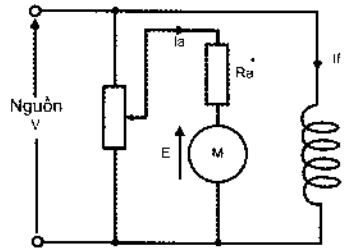
Điều khiển đóng-cắt xung

Hình 20.68 mô tả một mạch thyristor nối tiếp với phần ứng của động cơ một chiều. Mạch thyristor được khởi động theo cách hoạt động cơ bản như một khoá đóng cắt tốc độ cao. Dạng sóng đầu ra qua phần ứng mô tả trong hình 20.69. Tỉ lệ thời gian đóng/cắt (tức là tỉ số mark/space) có thể thay đổi theo sự thay đổi điện áp trung bình cung cấp cho phần ứng trong khoảng giữa 0 và

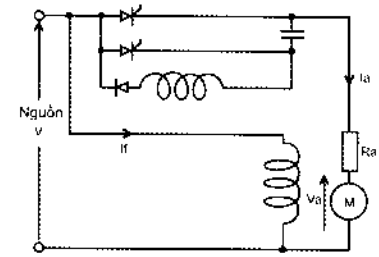
toàn chu kỳ. Tần số của tín hiệu có thể tới 3 kHz và mạch đồng bộ khá phức tạp. Tuy nhiên điều khiển tốc độ của động cơ một chiều dùng thyristor có hiệu quả và chi phí không cao.



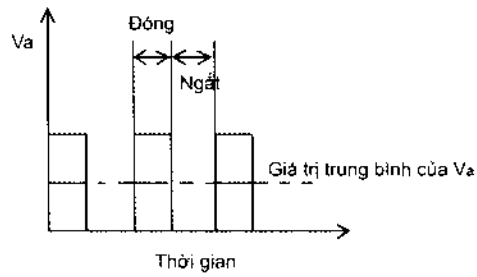
HÌNH 20.66 Điều khiển tốc độ bằng cách giảm từ thông: động cơ kích từ nối tiếp



HÌNH 20.67. Điều khiển tốc độ bằng cách thay đổi điện áp phần ứng



HÌNH 20.68. Điều khiển tốc độ dùng thyristors



HÌNH 20.69 Điện áp ở hai đầu phần ứng

Hiệu suất của các máy điện một chiều

Các tổn hao trong máy điện một chiều thông thường được phân loại như sau:

1. **Tổn hao phần ứng:** có giá trị bằng I^2R là tổn hao trong cuộn dây phần ứng, thường hiểu là "tổn hao đồng".

2. **Tổn hao sắt:** Tổn hao này là do từ trễ và dòng điện xoáy trong lõi phần ứng và lõi từ.
3. **Tổn hao chuyển mạch**: Tổn hao này do các điện trở tiếp xúc giữa chổi than và vành chuyển mạch. Tổng tổn hao chuyển mạch là do cả ma sát cơ khí và tổn hao điện áp trên các chổi than.
4. **Tổn hao kích từ:** Trong các máy kích thích song song, tổn hao công suất này bằng tích của dòng điện song song và điện áp cực.
5. **Ma sát trục và khe hở:** Ma sát trục tỉ lệ xấp xỉ với tốc độ, tổn hao do khe hở biến thiên với luỹ thừa bậc ba của tốc độ. Cả hai loại tổn hao này chỉ là thứ yếu trừ trường hợp máy điện được gắn một quạt làm mát, trong trường hợp đó tổn hao khe hở có thể là đáng kể.

Mặc dù có nhiều loại tổn hao ở động cơ một chiều nhưng nhìn chung, động cơ một chiều vẫn đạt hiệu suất cao, thông thường lớn hơn 90%.

Các máy điện xoay chiều

Động cơ đồng bộ

Động cơ đồng bộ là động cơ có tốc độ hoạt động bằng với tốc độ của từ trường quay. Từ trường quay được tạo ra do ba cuộn cảm stato đặt lệch nhau một góc 120° và được cung cấp bởi dòng điện ba pha. Tốc độ quay của từ trường có quan hệ với tần số của dòng điện:

$$N_s = \frac{60f}{\text{số cặp cực}} \tag{20.26}$$

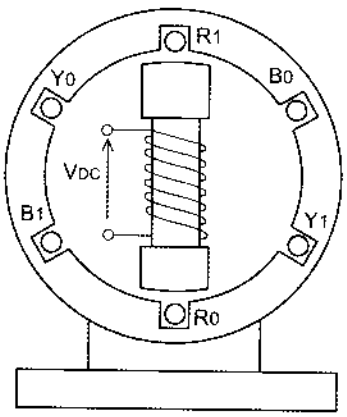
trong đó, N_s là tốc độ từ trường tính theo số vòng quay/phút và f là tần số của dòng điện cung cấp.

Cấu tạo cơ khí được chỉ ra trong hình 20.70. Từ trường quay được sinh ra do cảm ứng bởi các cuộn stato và rôto giống như một thanh nam châm. Từ trường này tự nó sắp xếp thành vị trí tự đồng chỉnh với từ thông quay được sinh ra bởi stato. Khi có tải cơ khí trên trục động cơ, từ trường được sinh ra bởi rôto bị kéo ra khỏi vị trí sắp hàng được tạo nên bởi stato. Góc lệch đó được gọi là "góc tải". Các đặc tính của động cơ đồng bộ thường thể hiện qua mômen đối với góc tải, mô tả trong hình 20.71.

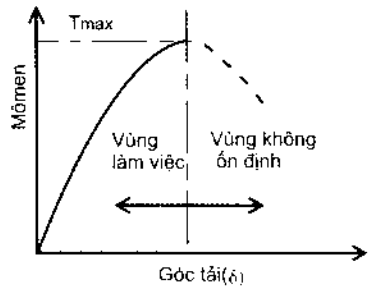
Đặc tính mômen về cơ bản có dạng hình sin với:

$$T = T_{max} \sin \delta \tag{20.27}$$

trong đó: T_{max} là mômen cực đại và δ là góc tải.



HÌNH 20.70 Động cơ đồng bộ đơn giản



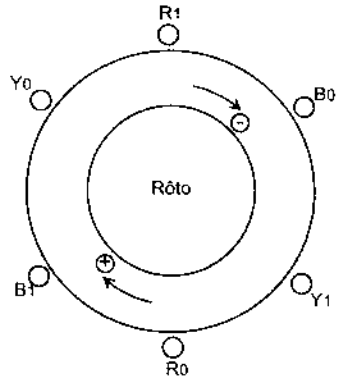
HÌNH 20.71 Đặc tính mômen của động cơ đồng bộ

Từ công thức 20.27 ta thấy, động cơ đồng bộ không có mômen khởi động và rôto phải quay đến tốc độ đồng bộ bằng một vài phương pháp khác nhau. Phương pháp thứ nhất là sử dụng một số thanh đồng ngắn mạch nối tiếp đặt ở phía ngoài cùng của các cực lồi. Từ trường quay sinh ra dòng điện trong các "lưới" này và máy gia tốc như động cơ không đồng bộ lồng sóc, xem phần sau. Một phương pháp khác là dùng rôto dây quấn tương tự với động cơ cảm ứng vòng trượt. Máy chạy tới tốc độ như động cơ không đồng bộ và sau đó kéo đồng bộ để hoạt động như một máy đồng bộ.

Ưu điểm của động cơ đồng bộ là có thể dễ dàng điều khiển với hệ số công suất với tốc độ quay của máy là không đổi, không phụ thuộc vào tác động của tải. Tuy nhiên máy điện đồng bộ thường đắt và cần có nguồn một chiều cung cấp để kích thích rôto. Nhược điểm này đi kèm với yêu cầu có chế độ khởi động độc lập làm cho nó ít phổ cập hơn động cơ cảm ứng.

Động cơ không đồng bộ (Động cơ cảm ứng)

Stato của động cơ không đồng bộ giống như trong máy phát điện xoay chiều và khi cấp dòng điện ba pha cho nó, từ trường quay được sinh ra. Rôto có thể có một trong hai dạng cơ bản, dạng lồng sóc hoặc dạng vòng trượt. Trong động cơ rôto lồng sóc, cuộn dây rôto là các lá và phần dẫn bao gồm các dây dẫn đồng hoặc nhôm, các thanh giữa các khe rôto. Các thanh được liên kết và hàn ở đầu bằng các vòng hoặc các miếng để ngắn mạch hoàn toàn phần dẫn. Rôto ở các máy điện vòng trượt gồm các phiến lõi và cuộn dây ba pha, tương tự như stato và được nối với ba vòng trượt trên trục phía trong. Hình 20.72 là sơ đồ mô tả một động cơ không đồng bộ có ba cuộn stato đặt lệch nhau góc 120^0.



HÌNH 20.72 Sơ đồ tương đương mô tả một động cơ không đồng bộ

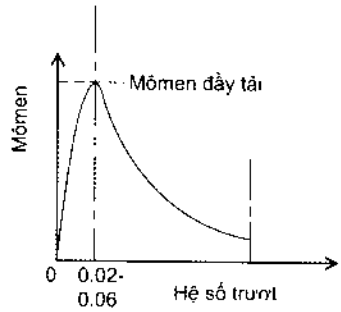
Nếu các cuộn stato được cung cấp bởi dòng điện ba pha, từ trường quay được sinh ra trong stato. Xét một cuộn dây rôto một vòng trong hình. Ở trạng thái dừng, từ trường quay sẽ sinh ra một điện áp trong cuộn dây rôto từ đó tạo ra sự thay đổi từ thông vòng kín trên cuộn dây. Nếu cuộn dây

tạo thành một mạch kín, suất điện động cảm ứng sẽ sinh ra dòng điện trong nó. Tổng lực trong vật dẫn mang dòng điện là kết quả của công thức (20.17), nó sẽ sinh ra một mômen làm quay động cơ. Tốc độ rôto sẽ tăng cho đến khi mômen điện từ cân bằng với mômen tải. Động cơ cảm ứng sẽ không bao giờ đạt tới tốc độ đồng bộ bởi nếu như vậy sẽ không có chuyển động tương đối giữa cuộn rôto và từ trường quay. Với các điều kiện đó, sẽ không có suất điện động cảm ứng trong cuộn rôto và do đó không có mômen điện từ. Động cơ không đồng bộ, do vậy luôn chạy ở tốc độ thấp hơn tốc độ đồng bộ. Tỉ số khác nhau giữa tốc độ đồng bộ và tốc độ rôto được gọi là hệ số trượt "slip":

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \tag{20.28}$$

Đường đặc tính tốc độ-hệ số trượt hình 20.73. Khi tốc độ rôto bằng tốc độ đồng bộ $s = 0$, mômen bằng không. Khi rôto giảm xuống dưới tốc độ đồng bộ, mômen tăng hầu như tuyến tính tới giá trị cực đại được tính bằng tổng của mômen tải đủ để thắng tổn hao trên rôto. Hệ số trượt ở trạng thái đầy tải biến thiên giữa 0.02 và 0.06. Động cơ không đồng bộ có thể được xem như một máy điện có tốc độ không đổi. Nhược điểm chính của động cơ không đồng bộ là khó điều chỉnh tốc độ.

Khi khởi động, hệ số trượt bằng 1, mômen khởi động đủ lớn để làm rôto quay. Khi rôto quay tới tốc độ đầy tải, mômen tăng tỉ lệ ngược với hệ số trượt. Đường cong khởi động và làm việc tiếp nối nhau ở vị trí đầy tải.



HÌNH 20.73 Đặc tính mômen-hệ số trượt của động cơ không đồng bộ

Khởi động động cơ không đồng bộ

Giống như động cơ một chiều, dòng điện khi khởi động của động cơ xoay chiều rất lớn, tới khoảng năm lần dòng điện đầy tải. Do vậy, một số thiết bị được dùng để giới hạn dòng điện khởi động, nhưng điều này cũng liên quan tới các phương tiện phụ trợ thường là với chi phí khá đắt.

Bộ khởi động Sao-Tam giác

Khi máy ở vị trí dừng và bộ khởi động ở vị trí khởi động, các cuộn stato được nối theo cấu hình sao. Khi máy đạt tới tốc độ quay, chuyển mạch nhanh chóng di chuyển tới vị trí chạy, các cuộn dây stato được nối thành hình tam giác. Bằng phương pháp đơn giản thích hợp này, dòng điện nguồn cung cấp giảm bằng 1/3 so với khi cuộn dây stato được nối theo dạng tam giác khi khởi động.

Bộ khởi động bằng máy biến áp tự ngẫu

Máy biến áp tự ngẫu là một phương pháp điều chỉnh giảm dòng điện khởi động của động cơ không đồng bộ. Máy biến áp tự ngẫu nối hình sao, điện áp được cung cấp từ điểm giữa ở mỗi pha. Do đó, điện áp cung cấp từ stato bằng một nửa điện áp nguồn. Với việc sắp xếp như vậy, dòng điện cung cấp và mômen khởi động chỉ bằng 1/4 giá trị so với khi cung cấp toàn bộ điện áp. Sau

khi động cơ được tăng tốc, thiết bị khởi động được chuyển sang vị trí chạy, động cơ kết nối trực tiếp với nguồn và loại kết nối sao của máy biến áp tự ngẫu. Tuy nhiên mômen khởi động cũng giảm, thiết bị này thường đắt do nó phải có cùng công suất như động cơ.

Điện trở rôto

Động cơ không đồng bộ rôto vành trượt có thể bao gồm điện trở phụ nối tiếp với mạch rôto. Việc thêm điện trở ngoài vào rôto sẽ giảm dòng điện và tăng mômen khởi động.

Dừng động cơ không đồng bộ

Các động cơ không đồng bộ có thể chuyển sang trạng thái dừng bởi cách hãm ngược hoặc phanh.

1. **Hãm ngược:** là phương pháp đảo chiều từ trường quay bằng cách đảo hai đầu cấp nguồn tới stato. Dòng điện trong chế độ này rất lớn.
2. **Phanh:** ở phương pháp này stato được ngắt khỏi nguồn xoay chiều và được nối lại với nguồn một chiều. Dòng điện một chiều trong stato sinh ra một từ trường tĩnh một chiều và khi đó rôto sẽ có xu hướng tự đồng chỉnh với từ trường và sẽ chuyển đến trạng thái dừng.

Điều khiển tốc độ của động cơ không đồng bộ

Trong các trường hợp thông thường, tốc độ quay của động cơ không đồng bộ sẽ bằng khoảng 94-98% của tốc độ đồng bộ, phụ thuộc tải. Với tốc độ đồng bộ được cho bởi công thức (20.26), dễ thấy có thể thay đổi tốc độ bằng cách thay đổi tần số của nguồn dòng cung cấp hoặc bằng thay đổi số cực.

Thay đổi tần số dòng điện cung cấp

Điều khiển biến tần dùng bán dẫn bắt đầu xuất hiện năm 1968. Đầu tiên, chúng được ứng dụng để điều khiển động cơ xoay chiều đồng bộ trong công nghiệp sợi tổng hợp sau đó nhanh chóng được nhân rộng. Trong thời gian gần đây, chúng được ứng dụng trong công nghiệp bơm, dây chuyền in đồng bộ, băng tải, máy công cụ như vai trò truyền động trục chính. Các động cơ dùng biến tần AC hiện đại có sẵn trong dải công suất từ 1 tới 750 kW và với dải tốc độ từ 10/1 tới 100/1.

Các động cơ đồng bộ và động cơ không đồng bộ lồng sóc là các dạng thông dụng nhất sử dụng các hệ thống biến tần bán dẫn có thể điều chỉnh được. Khi động cơ hoạt động ở chế độ gần hoặc đạt tới tốc độ đồng bộ quyết định bởi tần số dòng điện đầu vào. Mômen giảm ở tốc độ thấp do đó động cơ phải được tính toán để vẫn đảm bảo đủ hiệu năng ở các tốc độ thấp. Hệ thống tối ưu nhất có tích hợp một máy đo tốc độ số cung cấp tín hiệu phản hồi hiệu chỉnh để so sánh với tần số chuẩn. Điều này cho một điều chỉnh tốc độ khoảng 3%. Do đó, bộ điều khiển biến tần xoay chiều thông thường chỉ dùng cho các ứng dụng điều khiển vận tốc công suất lớn và không yêu cầu một dải tốc độ rộng. Khi so sánh động cơ không đồng bộ xoay chiều cần tính đến độ phức tạp và chi phí cho bộ điều khiển điện tử.

Thay đổi số cực

Bằng cách nối các đầu ra cuộn stato tới một khóa chuyển mạch được thiết kế đặc biệt, có thể thay đổi động cơ không đồng bộ từ một cấu trúc này sang một dạng cấu trúc khác. Có thể thay đổi ba số cực khác nhau bằng một khóa chuyển mạch khá phức tạp nhờ vậy thay đổi được ba tốc độ khác nhau. Thay đổi số cực dẫn đến một sự thay đổi tốc độ động cơ không liên tục và với sự biến thiên nhỏ về tốc độ trên dải chuyển mạch. Tuy nhiên với nhiều ứng dụng, chỉ cần thay đổi hai tốc độ gián đoạn thì thay đổi số cực là phương pháp đơn giản và hiệu quả để thực hiện việc này.

Thay đổi điện trở Rôto

Với các động cơ không đồng bộ vành trượt, các điện trở phụ có thể được mắc đôi nối tiếp với mạch rôto. Đây là một phương pháp chung dùng cho cả việc giới hạn dòng điện khởi động của các

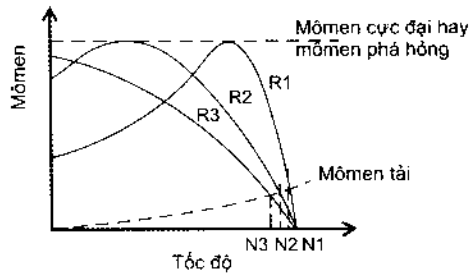
máy này. Nó cũng có thể dùng như một phương pháp điều khiển tốc độ dự trữ. Hình 20.74 mô tả các đặc tính mômen của động cơ không đồng bộ vành trượt trong một dải các điện trở khác nhau mắc nối tiếp với các cuộn dây rôto.

Khi các điện trở phụ tăng từ R_1 tới R_3, có một sự giảm tốc độ tương ứng được thực hiện ở một vài giá trị mômen đặc biệt. Dải tốc độ tăng ở các giá trị mômen lớn hơn.

Phương pháp này đơn giản và do đó có chi phí thấp, nhưng việc giảm tốc độ sẽ đi cùng với việc giảm hiệu suất tổng. Thêm vào đó, với một điện trở R_3 lớn trên mạch rôto, tốc độ thay đổi đáng kể khi có sự biến thiên mômen.

Giảm điện áp Stato

Với phương pháp giảm điện áp cung cấp cho stato, ta sẽ có một họ các đường đặc tính mômen-tốc độ kèm theo, được mô tả như trong hình 20.75. Nó chỉ rõ rằng khi điện áp stato giảm từ V_1 tới V_3, có sự thay đổi về tốc độ ở các giá trị đặc biệt của mômen. Đương nhiên mômen không vượt quá mômen tải cực đại tương ứng với điện áp giảm của stato. Điểm cuối cùng là hệ số giới hạn chính là sự ràng buộc của phương pháp điều khiển tốc độ này. Thông thường chỉ điều chỉnh được một dải tốc độ rất hẹp có thể đạt được bằng phương pháp thay đổi điện áp nguồn cung cấp stato.



HÌNH 20.74 Đặc tính mômen-tốc độ với các điện trở rôto khác nhau

Động cơ không đồng bộ một pha

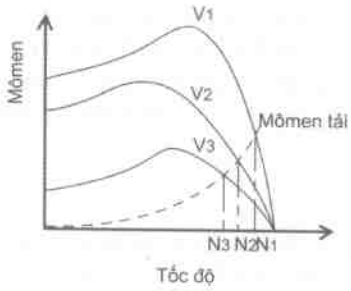
Chế độ hoạt động của động cơ không đồng bộ phụ thuộc vào việc tạo ra từ trường quay. Một cuộn cảm đơn không thể thực hiện được việc tạo từ trường quay do vậy các động cơ không đồng bộ một pha sử dụng một vài phương tiện khác phát ra xấp xỉ một nguồn cấp stato hai pha. Hai cuộn dây stato được đặt lệch nhau góc 90^0. Một cách lý tưởng, các dòng điện cung cấp cho mỗi cuộn dây có góc lệch pha 90^0. Ở đây đưa ra sự tương đương giữa động cơ không đồng bộ hai pha với động cơ không đồng bộ ba pha.

Động cơ cực từ xẻ rãnh (cực ẩn)

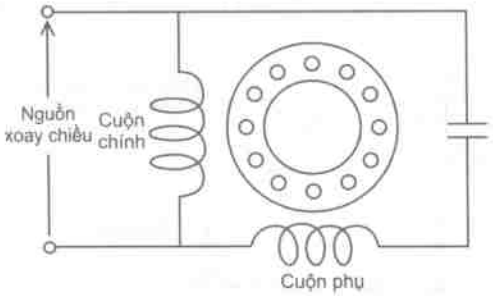
Stato của động cơ cực từ ẩn bao gồm cuộn dây một pha và rôto có dạng lồng sóc. Một nửa của stato được gắn một vòng ngắn mạch bằng đồng. Khi cuộn dây kích thích được cấp dòng điện xoay chiều, từ thông sinh ra cảm ứng với dòng điện trên các vòng ngắn mạch. Độ lệch pha giữa các dòng điện trong cuộn dây kích thích và vòng ngắn mạch là tương đối nhỏ và từ trường quay sinh ra khác xa so với lý tưởng. Do vậy, động cơ cực ẩn có hiệu suất thấp do tổn hao liên tục trong vòng ngắn mạch. Động cơ cực ẩn có mômen khởi động thấp và chỉ dùng với các ứng dụng có tải nhẹ như quạt nhỏ, máy thổi khí hoặc các thiết bị dễ khởi động khác. Các ưu điểm khác là sự đơn giản và chi phí sản xuất thấp.

Động cơ điện dung

Stato có hai cuộn dây đặt lệch nhau một góc 90°. Một tụ điện được nối nối tiếp với cuộn dây phụ do đó dòng điện trong hai cuộn dây này có độ lệch pha lớn (hình 20.76). Độ lệch pha dòng điện lý tưởng là 90^0, chế độ làm việc của động cơ điện dung gần tương tự với động cơ không đồng bộ ba pha.



HÌNH 20.75 Đặc tính mômen-tốc độ với các mức điện áp stato khác nhau



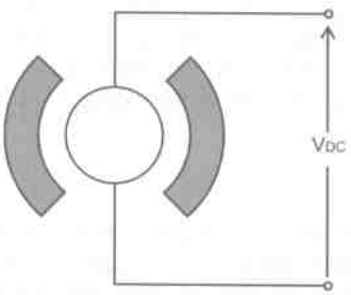
HÌNH 20.76 Động cơ điện dung

Động cơ vạn năng

Đó là các động cơ một chiều kích từ nối tiếp nhỏ hoạt động ở cùng tốc độ và công suất với nguồn một chiều hoặc dòng điện một pha với cùng điện áp hiệu dụng. Khi cấp dòng điện xoay chiều, từ thông stato và rôto biến thiên theo dạng hình sin nhưng với cùng mối quan hệ về pha. Khi điện áp cung cấp đổi chiều, dòng điện phần ứng và dòng điện kích từ cũng đổi chiều. Công thức (20.25) chứng minh rằng với các điều kiện đó, mômen cung cấp vẫn không đảo chiều và luôn giữ giá trị dương. Động cơ vạn năng chủ yếu được dùng trong các thiết bị nhỏ trong gia đình như máy sấy tóc, khoan điện, máy hút bụi, máy xén cỏ…

Động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu

Động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu là bộ phát động điện từ quay liên tục, có thể nối trực tiếp với tải. Hình 20.77 là sơ đồ mô tả động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu.



HÌNH 20.77 Động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu

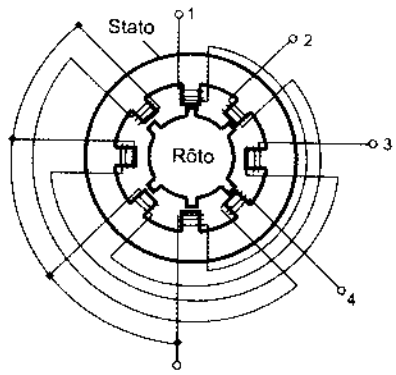
Động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu bao gồm một chối than hình khuyên vành stato nam châm vĩnh cửu, rôto dây quấn. Chúng đặc biệt phù hợp cho các hệ thống servo trong đó kích thước, cân nặng, công suất, thời gian đáp ứng phải được tối thiểu hoá và yêu cầu độ chính xác cao về vị trí và tốc độ. Thời gian đáp ứng với các động cơ nam châm vĩnh cửu rất nhanh và mômen tăng tuyến tính với dòng điện đầu vào, độc lập với tốc độ và vị trí góc. Các máy điện nhiều cực tối ưu hóa mômen đầu ra trên một watt công suất rôto. Các động cơ nam châm vĩnh cửu thương mại có nhiều kích cỡ từ 35 Nm với đường kính khoảng 25 mm tới 13.5 Nm ứng với đường kính khoảng 3 m. Các hệ thống điều khiển vị trí và tốc độ sử dụng động cơ PM thường dùng các máy đo tốc độ DC và các cảm biến vị trí trong các dạng khác nhau của các vòng phản hồi kín cho các mục đích điều khiển.

Động cơ bước

Động cơ bước là dạng động cơ có số vòng quay của trục động cơ tỉ lệ với chuỗi xung điện áp một chiều. Về bản chất, động cơ bước là một dạng động cơ đồng bộ. Do chuyển động của động cơ bước là không liên tục nên nó phù hợp với việc ứng dụng công nghệ số dựa trên cơ sở các hệ như vi điều khiển. Tốc độ của một động cơ bước có thể thay đổi bằng cách điều chỉnh tốc độ chuỗi xung đầu vào. Do vậy, nếu một động cơ bước cần 48 xung để quay trọn một vòng quay, một tín hiệu vào 96 xung/một giây, sẽ làm động cơ quay 120 vòng/phút. Một vòng quay được thực hiện trong một khoảng thời gian hữu hạn, tuy nhiên bề ngoài không thể thấy rõ tất cả ngay cả với tốc độ thấp nhất. Động cơ bước có thể kéo tải 2.2 kW với tốc độ bước từ 1000 tới 20,000 mỗi giây tương ứng với góc từ 180^0 giảm tới 0.75^0. Có ba dạng động cơ bước:

1. **Biến từ trở (Variable reluctance):** Động cơ bước dạng này có rôto làm bằng thép mềm, có nhiều răng với stato dây quấn. Số răng của rôto và stato, cùng với dạng dây quấn và kích thích quyết định góc bước. Động cơ bước dạng này có bước góc trung bình và có thể hoạt động ở tốc độ bước cao.
2. **Nam châm vĩnh cửu:** Rôto của động cơ bước loại nam châm vĩnh cửu (PM) bao bồm một nam châm vĩnh cửu hình tròn gắn trên trục. Động cơ bước PM có dải góc bước lớn từ 45° tới 120°.
3. **Dạng lai:** động cơ bước dạng lai là dạng kết hợp của hai dạng trên. Thông thường stato có tám cực lồi, được cung cấp năng lượng bởi cuộn dây hai pha. Rôto bao gồm nam châm hình trụ được từ hóa theo trục. Góc bước tùy thuộc cấu trúc, thông thường trong dải từ 0.9^0-5^0. Bước góc thông thường là 1.8°.

Nguyên lý làm việc của động cơ bước có thể được minh họa với dạng máy biến từ trở bốn pha. Động cơ này thường có tám răng stato và sáu răng rôto, hình 20.78. Nếu đưa điện vào pha một của stato, hai răng rôto đối diện nhau sẽ thẳng hàng với răng pha một của stato. Răng rôto liền kề theo chiều kim đồng hồ chênh bước 15^0 với stato tương ứng của nó. Đưa điện vào dây quấn pha hai sẽ làm rôto quay tiếp góc 15^0 ngược chiều kim đồng hồ để cặp răng rôto đối diện liền kề thẳng hàng với pha stato tương ứng. Nếu dây quấn stato được kích thích theo thứ tự 1, 2, 3, 4, rôto sẽ di chuyển liên tiếp các bước 15^0 theo chiều ngược chiều kim đồng hồ. Kích thích theo thứ tự ngược sẽ làm rôto quay ngược chiều lại.

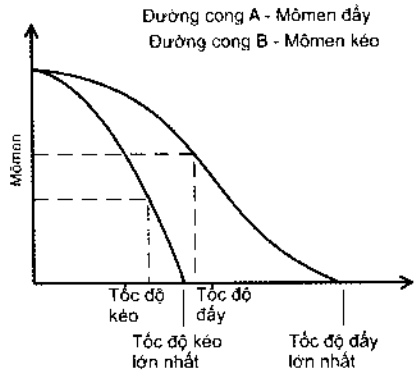


HÌNH 20.78 Động cơ bước biến từ trở

Một số thông số chính của động cơ bước

- **Mômen đẩy (Pull-out):** Mômen tối đa có thể cung cấp cho một động cơ, chạy với tốc độ bước định mức không làm mất tính đồng bộ.
- **Mômen kéo (Pull-in):** Mômen cản tối đa khi động cơ khởi động, với một tốc độ xung nhất định và đạt được đồng bộ mà không mất bước.
- **Mômen động lực học:** Mômen sinh ra bởi động cơ ở tốc độ bước rất thấp.
- **Mômen giữ:** Mômen tối đa có thể cung cấp cho phần tĩnh động cơ được cấp năng lượng không làm quay trục chính.
- **Tốc độ đẩy (Pull-out):** Tốc độ chuyển mạch tối đa để động cơ giữ đồng bộ khi tốc độ chuyển mạch tăng dần.
- **Tốc độ kéo (Pull-in):** Tốc độ chuyển mạch tối đa khi một động cơ có tải khởi động mà không bị mất bước.
- **Dải quay (Slew range):** Dải tốc độ chuyển mạch giữa pull-in và pull-out mà động cơ sẽ quay đồng bộ nhưng không thể khởi động hoặc đảo chiều.

Những đặc tính của một động cơ bước thông thường được mô tả trên hình 20.79.



HÌNH 20.79 Các đặc tính của động cơ bước

Khi có tác động của từng dãy xung, rôto của động cơ bước được gia tốc nhanh chóng tới vị trí mới. Nhưng thường sẽ có sự vượt quá vị trí đó và dao động nếu không được cung cấp một mômen trễ đủ lớn để ngăn hiện tượng trên xảy ra. Các dao động đó có thể là nguyên nhân gây ra sự cộng hưởng rôto ở những tần số xung nhất định và gây ra sự tổn hao mômen, thậm chí khi thỏa mãn các điều kiện pull-out. Các động cơ biến từ trở có rất ít các giảm chấn sẵn có, do đó chúng dễ bị cộng hưởng hơn các dạng động cơ nam châm vĩnh cửu hoặc các dạng động cơ hỗn hợp. Có thể dùng các bộ giảm chấn cơ khí và điện tử để tối thiểu những tác động có hại do hiện tượng cộng hưởng rôto. Tốt nhất nên chọn động cơ có tần số cộng hưởng của nó không là tới hạn với ứng dụng lựa chọn.

Với các đặc tính của mình, động cơ bước được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng điều chỉnh vị trí, tốc độ, thời gian và có tính đồng bộ. Chúng thông dụng trong các máy vẽ đồ thị *X-Y*, đĩa mềm, điều khiển đầu đọc ổ đĩa, bộ phận truyền động máy in, truyền động trượt máy công cụ điều khiển số, máy thu tiền tự động, các cơ cấu điều khiển máy camera.

Giới hạn của động cơ này là khả năng công suất thấp, hiện chỉ ở khoảng 2.25 kW.

Động cơ một chiều không chổi than

Các động cơ dạng này sử dụng phản hồi vị trí để các tín hiệu đầu vào có thể giữ trong khoảng thời gian thích hợp tương ứng với vị trí rôto. Các khóa chuyển mạch bán dẫn được dùng để điều khiển các tín hiệu đầu vào và động cơ một chiều không chổi than có thể hoạt động ở các tần số cao

hơn, với mômen toàn bộ ở các tốc độ đó. Động cơ không chổi than có thể gia tốc nhanh từ tốc độ không tới tốc độ hoạt động như động cơ nam châm vĩnh cửu PM. Khi đạt tới tốc độ hoạt động, động cơ được chuyển tới chế độ đồng bộ. Động cơ không chổi than bao gồm một stato dây quấn, một rôto nam châm vĩnh cửu, một cảm biến vị trí rôto và một chuyển mạch bán dẫn. Stato dây quấn có thể được làm với hai hoặc nhiều pha đầu vào. Hình 20.80 đưa ra sơ đồ tiêu biểu của 1 động cơ hai pha không chổi than. Mômen đầu ra của pha A là công thức (20.29).

$$T_A = I_A(Z\Phi/2\pi)\sin(p\theta/2) = I_A K_T \sin(p\theta/2) \tag{20.29}$$

trong đó:

I_A: dòng điện đồng pha A,

$K_T = (Z\phi/2\pi)$: hằng số mômen của động cơ,

p: số cực,

θ: vị trí góc của rôto,

Z: tổng số thanh dẫn, ϕ: từ thông.

Với một dạng tương tự, mômen đầu ra của pha B là:

$$T_B = I_B K_T \cos(p\theta/2) \tag{20.30}$$

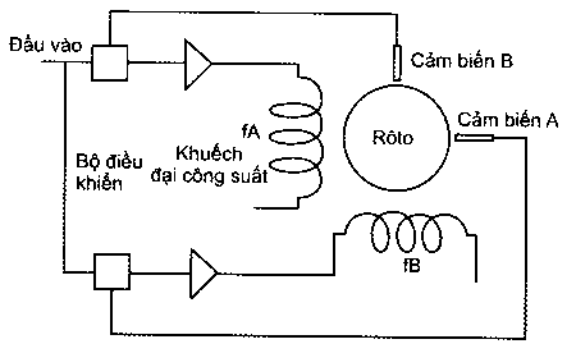
Nếu dòng điện động cơ thỏa mãn:

$$I_A = I\sin(p\theta/2) \qquad I_B = I\cos(p\theta/2)$$

mômen tổng cho động cơ hai cực trở thành:

$$T = T_A + T_B = IK_T[\sin^2(p\theta/2) + \cos^2(p\theta/2)] = IK_T \tag{20.31}$$

Công thức (20.31) chỉ ra rằng nếu tất cả các điều kiện trên đều thỏa mãn thì động cơ một chiều không chổi than hoạt động tương tự như động cơ một chiều, mômen tỉ lệ tuyến tính với dòng điện phần ứng. Lưu ý rằng dòng điện phần ứng trong trường hợp này liên quan tới dây quấn stato. Kích thích của các pha phải có đầu vào dạng sóng hình sin hoặc vuông. Sóng sin là hiệu quả nhất nhưng các tranzito đầu ra trong các mạch điện tử tiêu tốn nhiều năng lượng hơn dạng xung vuông. Xung vuông có thêm ưu điểm là có thể dùng với công nghệ số. Động cơ một chiều không chổi than sẽ là bản sao các đặc tính của động cơ một chiều chỉ khi nó có đảo chiều thích hợp. Sự đảo chiều phù hợp có nghĩa là các cuộn dây kích thích stato được sắp theo trình tự sao cho luôn giữ được từ trường sinh ra bởi stato sớm pha trước từ trường rôto xấp xỉ 90^0. Có thể thấy rằng động cơ không chổi than như mô tả không hoàn toàn là máy điện một chiều, mà có dạng máy điện xoay chiều với phản hồi vị trí.



HÌNH 20.80 Động cơ không chổi than hai pha

Chọn động cơ

Thông thường mối quan tâm chính của các kỹ sư cơ điện tử là lựa chọn động cơ phù hợp cho ứng dụng. Ít nhất động cơ phải có công suất đáp ứng các tải truyền động. Do đó, trong tất cả các trường hợp, công suất động cơ phải được tính toán với dự đoán trước các yêu cầu của tải. Ngoài ra, động cơ phải có mômen đủ lớn để khi khởi động thắng được ma sát tĩnh, gia tốc tải tới tốc độ làm việc và có thể kiểm soát độ quá tải tối đa. Hiện tượng quá mômen khi khởi động dẫn đến gia tốc khởi động quá lớn. Một số hệ thống yêu cầu "khởi động mềm" trong đó mômen động cơ được tăng dần để tải tăng tốc từ từ.

Tốc độ làm việc của động cơ được xác định ở điểm mômen cấp cho động cơ cân bằng với mômen yêu cầu của tải. Ở các điều kiện khác, động cơ và tải sẽ được gia tốc hoặc giảm tốc. Một động cơ truyền động chỉ được xác định là hoàn toàn phù hợp khi biết cả đặc tính mômen-tốc độ động cơ và tải. Các đặc tính mômen-tốc độ của động cơ thường được các nhà sản xuất cung cấp.

Các thiết bị có ma sát như máy đánh bóng công nghiệp, bộ đệm có đặc tính mômen-tốc độ ở đoạn khởi động rất cao nhưng lại đột ngột hạ khi một chuyển động được thiết lập. Khi tiếp tục tăng tốc thường thấy mômen yêu cầu của tải giảm hơn nữa nhưng với một tốc độ thấp hơn khi khởi động. Sự khác nhau giữa ma sát tĩnh và động cũng được xét đến trong trường hợp này.

Quạt và máy thổi khí có đặc tính mômen-tốc độ tăng từ 0 theo đường parabôn khi tốc độ tăng. Do đó các máy này không cần mômen lớn để khởi động động cơ. Các thiết bị quán tính cao như các hệ truyền động máy công cụ, máy cán và thang máy điện yêu cầu một mômen khởi động lớn để thắng quán tính. Khi chuyển động được thiết lập, mômen yêu cầu có xu hướng giảm tương ứng với sự tăng tốc độ. Động cơ một chiều dây quấn nối tiếp là lý tưởng cho các dạng tải này.

Trên đây, chỉ là những mô tả sơ lược về máy điện quay. Những vấn đề chi tiết hơn cần tham khảo trong các tài liệu về máy điện xoay chiều và một chiều của các tác giả Gray [1] và Sen [2]. Orthwein [3] đưa ra những ứng dụng thực tế của động cơ xoay chiều và một chiều trong ngành cơ khí và Kenjo & Nagamori [4] là nghiên cứu sâu hơn về động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu.

Tài liệu tham khảo

[4] Gray, C. B. (1989), *Electrical Machines and Drive Systems*, Longmans Scientific and Technical, Harlow.

[5] Sen, P. C. (1989), *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, Wiley, Chichester.

[6] Orthwein, W. (1990), Machine *Component Design, West Publishing*, St Paul, Minnesota.

[7] Kenjo, T. & Nagamori, S. (1985), *Permanent Magnet and Brushless dc Motors*, Monographs in Electrical & Electronic Engineering, Clarendon Press, Oxford.

20.3 Cơ cấu chấp hành áp điện

Ramutis Bansevicius and Rymantas Tadas Tolocka

Hiệu ứng áp điện

Hiệu ứng áp điện do Curie phát hiện năm 1880 [1]. Hiệu ứng áp điện thuận xảy ra ở một số vật liệu có khả năng tích điện tỉ lệ với lực bên ngoài tác động. Hiệu ứng áp điện ngược là hiện tượng các vật liệu biến dạng dưới tác động của điện trường song song với chiều phân cực. Hiệu ứng này tồn tại khi có lực điện động hoặc điện trường tác động. Các hiệu ứng này được sử dụng trong các cơ cấu chấp hành hoặc cảm biến trong các ứng dụng kỹ thuật.

Phương trình cơ bản

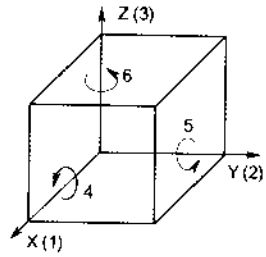
Các phương trình kết hợp điện và cơ của các vật liệu áp điện trong môi trường một chiều là:

$$S = s^E T + dE \tag{20.31}$$

$$D = \varepsilon^T E + dT \tag{20.32}$$

Trong đó S là sức căng (m), T là ứng suất (N/m^2), E: cường độ điện trường (V/m), D: độ dịch chuyển chất điện môi (lượng điện tích trên một đơn vị diện tích (C/m^2)), s^E: độ biến dạng (ép, nén) của vật liệu (m^2/N) khi điện trường là hằng số, ε^T: hằng số điện môi với ứng suất hằng (F/m) và d là hằng số áp điện (m/V hay C/N).

Các thành phần đầu tiên ở phía bên phải của phương trình trên tương ứng với các đặc tính cơ của vật đàn hồi, (công thức (20.31)) và đặc tính điện của môi trường chất điện môi (Công thức (20.32)). Các vật liệu áp điện nhân tạo tồn tại trạng thái phân cực trong suốt quá trình phân cực. Chiều của phân cực trùng với một cực của điện trường. Chiều này theo quy ước sẽ tương ứng với trục Z trong hệ tọa độ trực giao X, Y, Z. Thứ tự 1, 2, 3 tương ứng quy định các trục đó. Đặc tính áp điện của các vật liệu áp điện phụ thuộc vào chiều của các đầu vào/ra điện và cơ đồng nhất dọc trục 1 và 2. Do đó các đặc tính này được mô tả bởi các hằng số với 2 chỉ số, chỉ số thứ nhất liên quan tới điện, chỉ số thứ hai liên quan tới cơ. Các chỉ số 4, 5, 6 được dùng thêm để mô tả độ biến dạng trượt tương ứng với các chiều 1, 2, 3 (hình 20.81). Các chỉ số đó biểu diễn các chế độ hoạt động có thể của các vật liệu áp điện: độ dày giãn nở, độ giãn nở ngang, độ trượt dọc và độ trượt bề mặt. Chế độ chuyển động phụ thuộc vào hình dạng và định hướng của vật tương xứng với các trục tinh thể và vùng điện cực. Chiều cực điện trường là nguyên nhân gây giãn dài theo chiều này và co theo trục trực giao khác. Điện trường ngược là nguyên nhân gây ra sự co dọc theo chiều điện trường và giãn theo chiều vuông góc. Chế độ d_{33} có độ dịch chuyển lớn gấp ba lần chế độ d_{31}.



HÌNH 20.81

Các hằng số chính của hiệu ứng áp điện là:

- d_{ij} (hằng số áp điện) - sức căng hay hệ số tích điện biểu diễn bởi M/V hay C/N (tùy thuộc vào đặc tính cảm biến/cơ cấu chấp hành vật liệu áp điện). Chúng liên quan tới sức căng gây ra bởi điện trường E trong khi không có ứng suất cơ (Công thức (20.31)) và với điện tích trên một đơn vị do tác động của ứng suất dưới điện trường không (Công thức (20.32)). Ví dụ: d_{31} nghĩa là điện cực vuông góc với trục 3 (điện trường dọc theo nó) và ứng suất hay sức căng dọc theo trục 1.
- g_{ij} - hệ số điện áp hoặc điện trường đầu ra quan hệ với điện trường mạch hở gây ra do tác động của từng ứng suất cơ hay sức căng gây ra bởi mật độ điện tích tác động biểu thị bởi V m/N. Quan hệ giữa d_{ij} and g_{ij} được biểu diễn theo công thức (20.33):

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon^T} \tag{20.33}$$

- k_{ij} (Các hệ số kép) - mô tả tỉ lệ năng lượng chuyển đổi từ cơ sang điện và ngược lại. Hệ số k^2 là tỉ lệ giữa năng lượng chuyển đổi lưu trữ trên năng lượng đầu vào ở tần số hoạt động xa với tần số cộng hưởng:

$$k^2 = \frac{d^2}{s^E \varepsilon^T} \tag{20.34}$$

Hệ số k_p tương ứng với chế độ hoạt động phẳng (sức căng hoặc ứng suất bằng nhau trong tất cả các phương vuông góc với trục 3).

Các hằng số quan trọng khác là môđun Young, hằng số điện môi tương đối (tỉ lệ giữa hằng số điện môi của vật liệu và hằng số điện môi chân không), hệ số tổn hao điện môi (hệ số tổn hao điện môi trong vật liệu, biểu diễn bởi tang của góc tổn hao), nhiệt độ Curie (nhiệt độ khi vật liệu áp điện trở nên hoàn toàn phân cực)...

Vật liệu áp điện

Các vật liệu có thể dùng cho hiệu ứng áp điện chia thành ba nhóm: tự nhiên (thạch anh, muối Rochelle), các tinh thể nhân tạo (lithium sulfate, ammonium dihydrogen phosphate), sứ điện chứa sắt phân cực và các phim nhựa nhất định. Vật liệu chính cho kỹ thuật ứng dụng áp điện là gốm sắt điện (ferroelectric ceramics), đặc biệt là Lead Zirconate Titanate (PZT). Tiếp theo đó là các vật liệu có đặc tính hệ số ghép cao, các hằng số áp điện và hằng số điện môi vượt quá dải nhiệt độ mở rộng và ứng suất. Các hợp chất Barium titanate, lead magnesium niobate, modified lead titanate và bismuth titanate được dùng nhiều như các chất tổng hợp đặc biệt khác. Vì cấu trúc tự nhiên không đối xứng của chúng, các vật liệu tinh thể không được dùng nhiều. Tuy nhiên, gốm sắt điện phải được phân cực bởi một điện trường mạnh nhân tạo trong khi vật liệu này được nung trên điểm Curie của nó và sau đó được làm mát từ từ dưới tác động của điện trường. Sự phân cực còn dư được duy trì và vật liệu có được tính áp điện. Nhựa áp điện Piezopolymers-polyvinylidene fluorides (PVDF hoặc PVF2) là một dạng riêng của nhóm nhựa huỳnh quang (fluoropolymer) có độ áp điện cao. Chúng được dùng để sản xuất phim piezo với độ dày nhỏ hơn 30 μm, nó có thể được dát mỏng trên vật liệu xây dựng. Bảng 20.4 chỉ ra một số đặc tính của vật liệu áp điện, PZT do hãng sứ gốm áp điện Ferroperm Piezoceramics sản xuất [6].

BẢNG 20.4 Đặc tính của các vật liệu áp điện

Thông số	Đơn vị	Pz26	Pz27	Pz29
Hằng số điện môi tương đối K_{33}^T	-	1.300	1.800	2.900
Hệ số tổn hao điện môi, tan δ	-	0.003	0.017	0.019
Nhiệt độ Curie, T_c	^{0}C	330	350	235
Hệ số kép, k_p	-	0.57	0.59	0.64
Hệ số kép, k_{31}	-	0.33	0.33	0.37
Hệ số kép, k_{33}	-	0.68	0.71	0.75
Hệ số tích điện, d_{31}	m/V	-130×10^{-12}	-170×10^{-12}	-240×10^{-12}
Hệ số tích điện, d_{33}	m/V	290×10^{-12}	425×10^{-12}	575×10^{-12}
Hệ số điện áp, g_{31}	V m/N	-11×10^{-3}	-11×10^{-3}	-10×10^{-3}
Hệ số điện áp, g_{33}	V m/N	28×10^{-3}	27×10^{-3}	23×10^{-3}
Tần số hằng, N_p	Hz m	2.230	2.010	1.970
Tần số hằng, N_t	Hz m	2.040	1.950	1.960
Độ đàn hồi	m^2/N	13×10^{-12}	17×10^{-12}	17×10^{-12}
Độ đàn hồi	m^2/N	20×10^{-12}	23×10^{-12}	23×10^{-12}
Độ đàn hồi	m^2/N	12×10^{-12}	15×10^{-12}	15×10^{-12}
Độ đàn hồi	m^2/N	11×10^{-12}	12×10^{-12}	10×10^{-12}
Môđun Young	Pa	4.5×10^{-12}	4.5×10^{-12}	4.7×10^{-12}
Tỷ lệ Poison	-	0.33	0.39	0.34

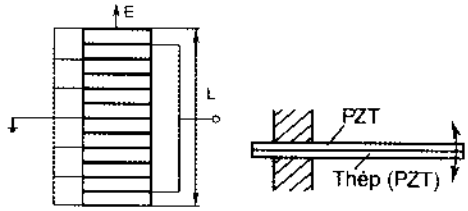
Các cơ cấu chấp hành áp điện

Các cơ cấu chấp hành áp điện có nhiều kích thước và hình dáng khác nhau như vuông, chữ nhật, vòng tròn, đĩa, cầu, bán cầu, thanh, trụ và các dạng riêng khác. Độ dày thông thường từ 20 μm tới 15 mm và chiều dài hoặc đường kính ngoài tới 100 mm. Do đặc tính thống nhất của vật liệu là đáp ứng nhanh, độ cứng vững cao, công suất tiêu thụ thấp, hiệu suất chuyển đổi cơ điện cao nên chúng có thể dùng trực tiếp làm các cơ cấu chấp hành. Hiệu ứng áp điện phụ thuộc tuyến tính

vào điện trường tác động; Độ lớn của nó trong khoảng 1-2 kV/mm và phụ thuộc vào điện trở ngắn mạch vật liệu áp điện.

BẢNG 20.5 Biểu thức tần số cộng hưởng của các phần tử áp điện

Chế độ hoạt động	Biểu thức (L: chiều dài; W: chiều rộng; T: độ dày; D: đường kính)
Chế độ ngang, thanh mỏng	$N_l = f_r \times L$
Chế độ vòng tròn, đĩa	$N_p = f_r \times D$
Chế độ dày, đĩa	$N_t = f_r \times T$
Chế độ dài, trụ	$N_3 = f_r \times L$
Chế độ trượt, tấm mỏng	$N_s = f_r \times T$



HÌNH 20.82

Điện áp điều khiển phụ thuộc vào độ dày của lớp vật liệu áp điện. Sự thay đổi tương đối tối đa theo độ dài có thể tới 0.13%. Khoảng thời gian ngắn nhất của biến dạng bằng 1/3 chu kỳ ở tần số dao động cộng hưởng của hệ cơ chứa các phần tử áp điện. Đặc tính cộng hưởng của các phần tử áp điện được mô tả bởi tần số hằng N_i, với tần số cộng hưởng f_r nhân với kích thước chiều dài cộng hưởng chủ yếu. Bảng 20.5 mô tả các chế độ hoạt động khác nhau.

Khi thay đổi điện áp (V giữ giá trị hằng số sau khi thay đổi), vật liệu áp điện tiếp tục giãn/co theo cùng một phương, hàm mũ suy giảm hướng tới trạng thái ổn định. Độ biến dạng được tính:

$$\Delta L(t) = \Delta L(1 + \gamma \lg 0.1) \tag{20.35}$$

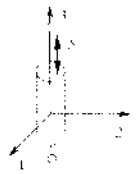
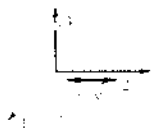
trong đó ΔL là độ biến dạng sau 0.1s, γ là hệ số lệch. Nó phụ thuộc vào thiết kế và tải cơ, thường nằm trong khoảng 0.01 và 0.02. Hiện tượng trễ là đặc điểm chung của các vật liệu áp điện. Trễ PZT là phần nhỏ xác định của tác động và độ rộng của đường cong trễ có thể bằng 20% của tác động. Do việc bù các sai số trễ giảm tới 3%. Phần tử áp điện với các phiến điện cực là các tụ điện. Do điện trở trong của vật liệu áp điện là cực kì cao (lớn hơn 100 MΩ), vật liệu áp điện chỉ cho một dòng điện nhỏ phóng qua khi vật liệu áp điện ở trạng thái biến dạng. Do đó, các phần tử áp điện cách biệt với nguồn điện áp cao, độ biến dạng của nó giảm chậm. Đây là nguyên nhân gây ra việc thay đổi điện tích và kết quả thay đổi dòng điện là:

$$i = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt} \tag{20.36}$$

trong đó Q: điện tích, C: điện dung, V: điện áp.

Bảng 20.6 biểu diễn các cảm biến/cơ cấu chấp hành áp điện khác nhau với các hình dáng nhất định. Các cơ cấu chấp hành áp điện cơ bản có thiết kế dạng ngăn hoặc phiến. Cơ cấu chấp hành thiết kế dạng phiến bao gồm nhiều mảnh với các điện cực được gắn chặt trên chúng. Các cơ cấu chấp hành dạng nhiều ngăn bao gồm một vài tấm mỏng vật liệu áp điện giữa các điện cực kim loại nối song song (hình 20.82(a)).

BẢNG 20.6 Các cảm biến/cơ cấu chấp hành áp điện

Chế độ tác động (*L*: chiều dài; *W*: chiều rộng; *T*: độ dày; *D*: đường kính)	Điện áp sinh ra, *V*	Độ dịch chuyển, ΔL (ΔT)	Điện dung, *C*
Dịch chuyển ngang theo độ dài: $L > 3W > 3T$	$V = \frac{g_{31}}{W} F$	$\Delta l = \frac{d_{31} L}{T} V$	$C = \frac{\varepsilon_3^T LW}{T}$
Dịch chuyển theo độ dày: $D > 5T$	$V = \frac{4Tg_{33}}{\pi D^2} F$	$\Delta T = d_{33} V$	$C = \frac{\pi \varepsilon_3^T D^2}{4T}$
Theo vòng tròn: $D > 5T$	Không	$\Delta D = \frac{d_{31} D}{T} V$	$C = \frac{\pi}{4} K_3^T \varepsilon_0 \frac{D^2}{T}$
Theo chiều dọc: $L > 3D$ 	$V = \frac{4L}{\pi D^2} g_{33} F$	$\Delta L = d_{33} V$	$C = \frac{\pi D^2}{4L} K_3^T \varepsilon_0$
Trượt theo chiều dày: $W > 5T$, $L > 5T$ 	$V = \frac{g_{15}}{W} F$	$\Delta x = d_{15} V$	$C = \frac{LW}{T} K_1^T \varepsilon_0$

Chú thích: *F* là lực và ε_3^T là hằng số điện môi của vật liệu với ứng suất hằng số theo phương 3, K_i^T là hằng số điện môi tương đối ($K_i^T = \varepsilon_i^T / \varepsilon_0$) và ε_0 là hằng số điện môi trong chân không.

Cấu trúc này cho phép dịch chuyển những khoảng lớn ở điện áp thấp hơn. Thường các phiến đó có độ dày 0.3-1 mm. Các cơ cấu dạng ngăn thường tương ứng với chế độ hoạt động d_{33}. Tổng dịch chuyển có thể tới 200 μm và trong trường hợp này, nó tỉ lệ với số các phiến, nếu không có tải phụ được sử dụng:

$$\Delta l = Vnd_{33} \tag{20.37}$$

trong đó *n* là số phần tử.

Do cấu trúc dạng ngăn xếp, lực đẩy lớn được sinh ra:

$$F = \frac{\Delta lA}{Ls_{33}Y} \tag{20.38}$$

Trong đó L là độ dài ngăn, A là diện tích các phần tử, s_{33}, Y là độ bù và môđun đàn hồi Young, tương ứng. Tham khảo thêm trong bảng 20.7, đặc tính của một số cơ cấu chấp hành ngăn (nhiều lớp) trích theo catalog của nhà cung cấp sứ áp điện [6].

BẢNG 20.7 Đặc tính của các cơ cấu chấp hành ngăn (nhiều lớp)

STT chuẩn	Vật liệu	Hình dạng	Dài × rộng × dày (mm) hoặc đường kính ngoài x đường kính trong x độ dày (mm)	V_{max} (V)	Hành trình (μm)	F_{max} (kN)
A01	Pz26	Chữ nhật	2.5 x 2.0 x 2.0	200	1.8	0.5
A06	Pz26	Vuông	10 x 10 x 2.0	200	2.0	10
A16	Pz27	Vuông	10 x 10 x 2.0	200	3.2	5.0
A21	Pz26	Tròn	6.0 x 2.0 x 2.0	200	1.7	2.5
A27	Pz26	Tròn	25 x15 x 2.0	200	2.2	31
A37	Pz27	Tròn	25 x15 x 2.0	200	3.4	16

Nếu yêu cầu biến dạng dài, phần tử áp điện có thể được mở rộng bằng việc sử dụng các đòn bẩy. Đòn bẩy là một thanh đỡ bằng vật liệu composite có hai lớp (hình 20.82(b)). Một lớp là vật liệu khung, một lớp là vật liệu áp điện. Vật liệu áp điện có thể dùng cho cả hai lớp. Trong trường hợp này, lớp đầu tiên sẽ giãn, lớp thứ hai co. Tuy nhiên, dạng này có độ cứng thấp.

Các lĩnh vực ứng dụng

Do đặc tính vốn có của vật liệu áp điện, các cơ cấu chấp hành với khá nhiều ưu điểm kỹ thuật được phát triển. Ví dụ như độ rắn chắc và nhẹ, lực lớn, dải tần số hoạt động rộng, độ cứng vững cao, chịu được nén và có độ dịch chuyển tỉ lệ với điện áp cung cấp, hiệu suất chuyển đổi năng lượng 50%. Chúng được dùng trong các hệ thống thao tác cỡ micro, giảm rung và ồn, các van laze và các thiết bị quang, động cơ siêu âm, các thiết bị định vị, các rơ le, máy bơm, trong công nghiệp tự động hóa, viễn thông, máy tính... Một vài ứng dụng được kể ra, hình 20.83.

a) *Giảm dao động*: Các bộ giảm chấn được chế tạo bằng các vật liệu áp điện biến đổi các dao động cơ thành năng lượng điện. Năng lượng được phát ra đó được tiêu tán thành dạng năng lượng như nhiệt, do vậy năng lượng dao động bị khử. Sơ đồ nguyên lý được đưa ra trong [2].

b) *Rôbôt micro*: Các chân rôbôt là các cơ cấu áp điện. Bằng việc cấp điện áp tới các điện cực, các chân áp điện (piezolegs) được dài ra, ngắn đi hoặc cong theo mọi hướng của quá trình dịch chuyển tinh tế.

c) *Bơm micro*: Màng ngăn, màng chắn được tác động bởi các cơ cấu chấp hành áp điện, các van kiểm tra đầu vào và đầu ra lần lượt mở để bơm chất lỏng và khí. Ưu điểm là chuyển mạch nhanh và công suất nén khí cao.

d) *Bộ kẹp micro*: Cơ cấu chấp hành áp điện làm việc trên sự co giãn của chuyển động kẹp dựa trên cơ cấu hợp lý. Bàn kẹp thường có kích thước rất nhỏ và có hầu hết các dạng hình học yêu cầu.

e) *Bộ thao tác micro*: Do có độ phân giải không hạn chế, cơ cấu chấp hành áp điện thường được dùng trong các ứng dụng định vị số.

f) *Thiết bị định lượng micro*: Các cơ cấu chấp hành áp điện cho phép đo liều lượng chính xác cao nhiều chất lỏng trong dải nano lít với nhiều ứng dụng.

Động cơ áp điện (Động cơ siêu âm)

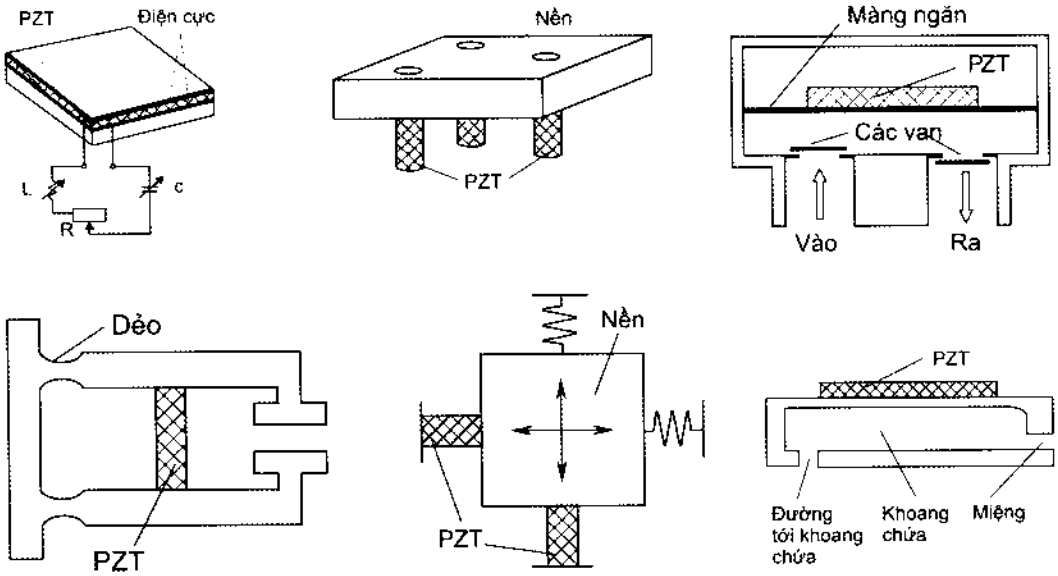
Động cơ rung [4] được ứng dụng rộng rãi như các cơ cấu chấp hành dựa trên việc chuyển đổi các dao động cơ tần số cao (nhiều kHz) sang các chuyển động liên tục [7, 8]. Các phần tử áp điện có thể dùng như các máy tạo dao động và trong trường hợp đó động cơ rung được gọi là động cơ áp điện [5, 7, 8]. Ưu điểm của động cơ áp điện là có mômen lớn, độ phân giải cao, dễ kiểm soát, hằng số thời gian nhỏ, nhỏ gọn, hiệu suất cao, không gây ồn, không gây nhiễu điện từ.

Các dạng chính của động cơ áp điện

Các động cơ áp điện khác với các phương pháp chuyển dao động sang chuyển động tuyến tính. Các dạng cơ bản được đưa ra trong bảng 20.8.

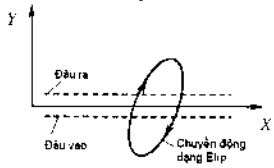
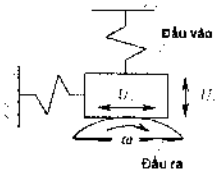
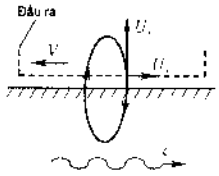
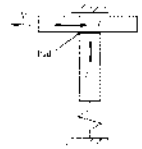
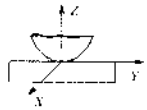
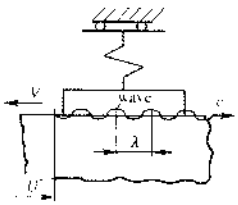
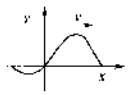
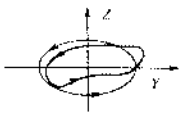
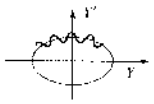
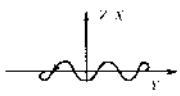
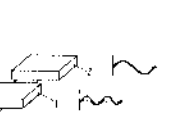
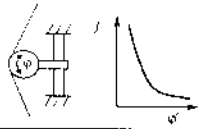
Các động cơ áp điện sinh ra chuyển động elip trong vùng tiếp xúc giữa các khâu liên kết vào và ra được sử dụng chính. Với mục đích này, các tác động xiên, chéo có được nhờ vào các liên kết ra hoặc các sóng lan truyền. Ở các động cơ áp điện, sử dụng các tác động xiên, lực ma sát truyền chuyển động và năng lượng giữa các khâu nối vào và ra. Có thể được thực hiện bởi hai dao động (thành phần pháp tuyến và tiếp tuyến) u_y và u_x trong vùng tiếp xúc với góc lệch pha φ, được dùng để thay đổi chiều chuyển động của khâu ra. Cả hai chuyển động có thể nhận ra bởi một hoặc hai khâu tích cực dao động cộng hưởng. Các dao động có thể phát triển các dạng khác nhau: theo chiều dọc, chiều ngang, chiều dịch chuyển và xoắn. Các động cơ áp điện tận dụng các tác động chéo chiếm một dải tần số rất rộng. Giới hạn thấp hơn của nó là ở tần số siêu âm thấp (loại trừ tác động của âm thanh), 16-20 kHz và giới hạn trên của nó ở vài MHz. Các động cơ áp điện dùng sóng lan truyền hoạt động dựa trên ma sát qua lại giữa chuyển động của sóng trên các vật đàn hồi và khâu ra, tức là nguyên tắc hoạt động của nó tương tự như sự truyền sóng điều hòa. Lan truyền sóng dọc theo bề mặt (sóng Rayleigh) của khâu lối vào tạo nên chuyển động elip trong vòng tiếp xúc. Sóng Rayleigh là sóng kết hợp của sóng dọc và sóng chạy, do vậy mỗi điểm bề mặt môi trường đàn hồi di chuyển dọc theo quỹ đạo elip. Các dạng sóng gấp khúc, chạy, xoắn và dọc được dùng trong động cơ áp điện. Sóng truyền trong gốm áp điện được kích thích bởi điện trường.

Các đặc tính chuyển động sóng của động cơ áp điện (ABB Corporate Research ITCRC/AS) được nêu ra trong bảng 20.9.



HÌNH 20.83

BẢNG 20.8 Nguyên lý hoạt động của động cơ áp điện

Khái niệm cơ bản	Sơ đồ thực hiện	Chú ý
A. Chuyển động Elip trong vùng tiếp xúc: hai chuyển động thành phần có độ lệch pha 	1. Một khớp tích cực 	$u_y = u_{y0}\sin(\omega t + \varphi)$ $u_x = u_{x0}\sin\omega t$
	2. Hai khớp tích cực 	$u_y = u_{y0}\sin(\omega t + \varphi)$ $u_x = u_{x0}\sin\omega t$ trong đó: u_{y0}, u_{x0}, ω và φ lần lượt là biên độ, tần số góc và pha của các chuyển động dao động của các phần tử áp điện.
B. Chuyển động Elip trong vùng tiếp xúc: sóng dịch chuyển 		$u_y = u_0 \cos 2\pi / \lambda(u^* - ct)$ trong đó: u_0, λ và c lần lượt là biên độ, độ dài và vận tốc của sóng tương ứng.
C. Tính không đẳng hướng của ma sát tại vùng tiếp xúc 	a) 	Thông thường $\frac{\tau_c}{T} \geq 0.05$ trong đó τ_c, T lần lượt là khoảng thời gian tiếp xúc và dao động.
	b) 	
	c) 	
D. Các chu kỳ dao động không đối xứng	d) 	
	b)	
		

BẢNG 20.9 Đặc tính của một số dạng sóng chạy của các động cơ áp điện

Động cơ	Đơn vị	USR60	USR45	USR30
Tần số làm việc	kHz	40	43	42
Điện áp làm việc	Vrms	100	100	100
Mômen định mức	Nm	0.38	0.15	0.04
Công suất định mức	W	4	2.3	1.0
Tốc độ quay định mức	rpm	100	150	250
Hằng số thời gian	ms	1	1	1
Khối lượng	G	175	69	33
Độ quay không đều	%	2	2	2
Tuổi thọ	H	1000	1000	1000
Dải nhiệt độ làm việc	^{0}C	-10+50	-10+50	-10+50

Việc kích thích sóng lan truyền được thực hiện đồng thời bằng việc kích thích các dao động có pha khác nhau với cùng tần số và chế độ. Việc này được thực hiện bằng cách chia các điện cực của bộ chuyển đổi thành n phần bằng nhau và nối với n pha của máy phát dao động điện, trong đó $n \geq 3$ luân phiên hai điện cực liền kề một góc $2\pi/n$ hoặc bằng cách dùng các chuyển đổi không liên tục.

Các động cơ áp điện với ma sát không đẳng hướng của tiếp xúc dựa trên sự biến thiên các dao động trong phần tiếp xúc tiếp tuyến của chu kỳ dao động. Việc này được thực hiện bởi các tác động điều hòa bổ trợ chồng chất trên vùng tiếp xúc. Đặc tính phân biệt là tỷ số τ_c/T của khoảng thời gian giảm tiếp xúc trên chu kỳ dao động trong các thông số. Tiếp xúc không đẳng hướng có thể thực hiện theo hai cách: (a) bằng cách khóa khớp tích cực trong một đoạn riêng biệt của quỹ đạo (Bảng 20.8, trường hợp C, a), (b) bằng cách thêm dao động ở các tần số cao hơn (Bảng 20.8, Trường hợp C, b), theo hướng của dao động cơ bản hoặc theo hướng vuông góc với hướng dao động cơ bản (Bảng 20.8, Trường hợp C, c) trên mặt phẳng pháp tuyến hoặc tiếp tuyến.

Động cơ áp điện với dao động không đối xứng dựa trên sự không đối xứng của các lực quán tính trong các dao động không điều hòa tần số cao, các dao động đa tần (bảng 20.8, trường hợp *D*, a) hoặc lực của ma sát tĩnh với quan hệ phi tuyến giữa lực và vận tốc (bảng 20.8, trường hợp *D*, b). Chu kỳ không đối xứng của các dao động được sinh ra bằng tổng các điều hòa của sóng đa tần. Biên độ của mỗi điều hòa được chọn bằng cách thay đổi hình dáng điện cực và diện tích của các điện cực riêng biệt hoặc biến đổi biên độ của điện áp cung cấp, có khi sử dụng sự dịch pha của điện áp cung cấp. Hiệu suất của động cơ áp điện trong trường hợp này thấp hơn nhưng các thiết bị được thiết kế có độ phân giải cao hơn đến 0.002μm trong truyền động tịnh tiến. Do đó, cho phép động cơ áp điện giới hạn về kích thước theo cả hai tọa độ, việc này quan trọng trong một số ứng dụng. Các động cơ áp điện có thể dễ dàng tối thiểu hóa kích thước, do đó các động cơ micro phát triển khá mạnh. Động cơ quay [5] là một ví dụ điển hình của dạng này. Nó có đường kính 2 mm, độ cao 0.3 mm, thể tích 0.49 mm^3. Động cơ quay ổn định ở một vài vị trí và mômen khởi động khoảng 3.2 μNm.

Động cơ áp điện nhiều bậc tự do

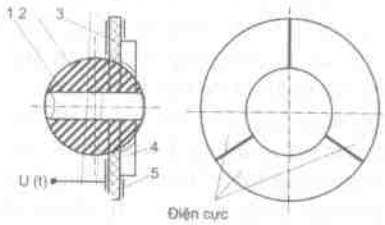
Động cơ áp điện nhiều bậc tự do là một dạng cấu trúc mới có thể thay đổi các thông số hoặc cấu trúc động học của chúng khi điều chỉnh. Nếu một hoặc cả hai khâu của cặp động học được làm từ vật liệu áp điện, nó có thể tạo ra độ dịch chuyển tĩnh giữa các phần tử của nó, giả tĩnh hoặc dao động cộng hưởng, kết quả là sinh ra các lực hoặc mômen tại vùng diện tích tiếp xúc của các khớp. Chuyển động tương đối của một khớp với những phần khác sẽ nhận được. Các cặp động học như vậy có thể được coi là tích cực. Các cặp động học tích cực được đặc trưng bởi:

- Điều khiển số bậc tự do. Đơn giản nhất là điều khiển ma sát của từng cặp, được dùng khi các phần tử của cặp đó khép kín lực. Ở đây cả hệ số ma sát hay biên độ của lực tác động có thể thay đổi. Việc này có được khi kích thích các dao động tiếp tuyến và pháp tuyến tần số cao trong vùng tiếp xúc của cặp.

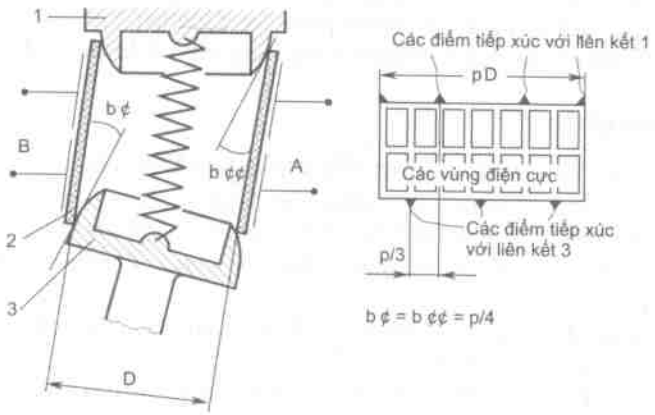
- Sinh lực hoặc mômen trong vùng tiếp xúc giữa các khớp nối. Phương của các lực sinh ra hoặc mômen được điều khiển bởi sự dịch chuyển của các dao động, ví dụ tác động riêng đến các điện cực của bộ chuyển đổi.
- Có các đặc tính phụ: tự chẩn đoán, đa chức năng, tự sửa chữa, tự thích nghi.

Ví dụ mắt của rôbôt (hình 20.84(a)) trong đó có một CCD camera 1 được đặt trong cầu thụ động 2, liên kết với vòng áp điện 3. Áp suất không đổi trong vùng liên kết được thực hiện bởi nam châm vĩnh cửu 4. Hệ thống này là cặp động học có 3 bậc tự do. Điện cực 5 trong vòng áp điện được chia vùng (trong trường hợp này - được chia thành ba phần đối xứng); kích hoạt bất kỳ vùng nào bằng tần số cộng hưởng AC sẽ gây quay hình cầu quanh trục của nó, vị trí của chúng được điều khiển bằng cách thay đổi tác động các điện cực khác nhau. Các sóng dịch chuyển trong vành (bằng cách cung cấp điện ba pha xoay chiều tới cả ba điện cực) sẽ làm cầu quay vòng quanh trục của vành. Các dạng động cơ này có độ phân giải xấp xỉ 2 góc giây theo mọi phương, cao hơn yêu cầu của hệ thống thị giác rôbôt.

Với những phương pháp hiện có, các dạng điều khiển và các loại dao động cộng hưởng, có thể cho phép thiết kế các cơ cấu máy với cùng khâu tích cực được sử dụng trong hai cặp động học nhằm làm tăng độ dư thừa trong hệ thống. Một rôbôt áp điện loại này được chỉ trong hình 20.84(b). Nó bao gồm các vật liệu thụ động (như thép) - cầu 1 và 3, với bộ chuyển đổi áp điện 2 giữa chúng. Các lò xo đảm bảo liên kết tất cả các khớp. Một rôbôt có cặp động lực cầu di chuyển do phương pháp thiết kế động cơ áp điện. Các điện cực trên các khớp tích cực được chia nhỏ. Hình 20.84(b) chỉ ra các dạng của chúng và sự phân phối của ba dao động thành phần trong vùng liên kết. Các dao động nhiều thành phần tần số cao sinh ra ở các điểm liên kết (các điện cực nhất định "A" của khâu 2 được tác động) quay thanh nối 2 so với thanh nối 1. Sự thay đổi $\pi/3$ về vị trí của các dao động (Sự thay đổi vị trí của các nút dao động trong các điểm liên kết) sẽ khiến thanh nối 3 quay với thanh nối 2. Dùng hiệu ứng áp điện thuận, có thể thu được các thông tin phụ (với điện cực "B") về lực và mômen, tác động lên thanh 2 và tác động lên trạng thái của các bề mặt tiếp xúc. Các thông tin này được dùng để giảm sai số vị trí và hiệu chỉnh quỹ đạo chuyển động.

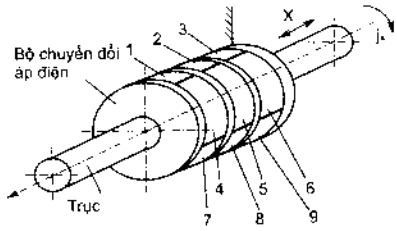


(a)

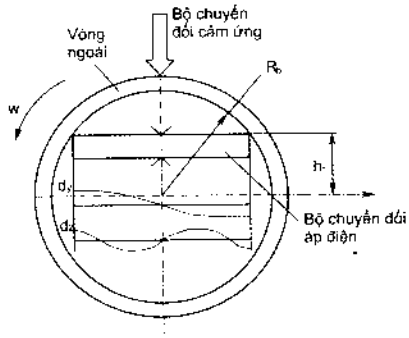


(b)

HÌNH 20.84



(a)



(b)

HÌNH 20.85

Bằng cách tăng độ chính xác và cứng vững của các phần tử hệ thống, sai số tĩnh và động trong hộp số, cột chống, thanh dẫn sẽ được giảm hoặc loại bỏ hoàn toàn. Kết hợp các đặc tính của chuyển đổi áp điện và các cơ cấu chấp hành trong hệ thống điều khiển có thể giảm mạnh mẽ thậm chí loại bỏ hoàn toàn hầu hết các sai số trong hộp số, cột chống và thanh dẫn dùng trong các thiết bị đo có độ chính xác cao. Nguyên nhân là do các hộp số, cột chống nhiều bậc tự do với một hai phần tử được làm từ vật liệu áp điện tích cực với các vùng kích thích đã xác định. Độ lệch tâm hoặc trục, khe hở và vùng chết, các sai số thông thường được tối thiểu hoá trong các thiết bị đó. Sơ đồ của ổ trục tích cực được chỉ ra trong hình 20.85(a) trong đó số trục n và bán kính m vùng điện cực là $n = m = 3$. Các ổ trục tích cực dùng trong các hệ thống đo chính xác bề mặt thành phần và độ nghiêng để quét bề mặt. Ví dụ như ước lượng sai số vòng ngoài của các ổ trục bi chính xác cao. Ở đây đo luân phiên đồng thời mặt nghiêng và mặt thẳng. Điều này có thể thực hiện được nhờ các bộ chuyển đổi áp điện (hình 20.85(b)) tiếp xúc với thành phần trong hai vùng với cùng kiểu phân bố dao động và sự dịch pha giữa các thành phần dao động tiếp tuyến và pháp tuyến. Không có lực suy rộng, rõ ràng sai số gây ra bởi mômen trong vùng liên kết là không đáng kể.

Tài liệu tham khảo

[1] Cady, W. G., *Piezoelectricity*, Dover Publications, New York, 1964.

[2] Volkov, V., *Some Theoretical Problems in Modern Techniques of Diagnostics in Mechanical Systems*, in Proc. Int. AMSE Conf. Systems Analysis, Control and Design, Lyon, France, 205.

[3] Uchino, K., *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Kluwer Academic Publishers, MA, 1997, 349.

[4] Ragulskis, K., Bansevicius, R., Barauskas, R., Kulvietis, G., *Vibromotors for Precision Microrobots*, Hemisphere Publishing Corporation, 1988, 310.

[5] Suzuki, Y., Tani, K., Sakuhara, T., *Development of new type piezoelectric micromotor, J. Sensors & Actuators*, 83, 244, 2000.

[6] Catalog Ceramic Multilayer Actuator CMA d33 & d31, July 2000.

[7] Sashida, T., Kenjo T., *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Oxford Science Publications, 1993, Oxford University Press, New York, 242.

[8] Ueha S., Tomikawa Y., *Ultrasonic Motors, Theory and Application*, Oxford Science Publications, Oxford Press, Oxford, 1993, 298.

20.4 Hệ thống chấp hành thuỷ lực và khí nén

Massimo sorli and Stefano Pastorelli

Mở đầu

Chức năng chính của một hệ thống chấp hành là tác động lên đối tượng cần điều khiển để đạt được mục đích mong muốn. Chức năng đó có thể thực hiện được nhờ hệ thống cơ cấu chấp hành có khả năng chuyển năng lượng sơ cấp sang dạng năng lượng cơ học cuối cùng.

Ba dạng năng lượng chính mà hệ thống cơ cấu chấp hành sử dụng là: điện, thuỷ lực và khí nén. Dạng năng lượng thứ nhất tương ứng với cơ cấu chấp hành điện như: động cơ điện, cuộn cảm và các nam châm điện. Hai dạng năng lượng còn lại tương ứng với các xi lanh (động cơ tịnh tiến) hoặc động cơ quay, cơ bản tương tự về hình dạng và kích thước. Sự chuyển động tương ứng của chúng được điều khiển nhờ tác động của lưu chất không nén được (dầu thuỷ lực, dầu thô hoặc một dạng chất lỏng với độ nhớt thấp hơn) hoặc lưu chất nén được (khí nén hoặc chất khí nói chung).

Ngoài ra còn có các dạng năng lượng khác nhưng ít thông dụng hơn trong các hệ thống tự động. Ví dụ, năng lượng hoá học và nhiệt năng gây ra sự chuyển pha của vật liệu hay sự giãn nở nhiệt động lực của hệ thống thành chuyển động cơ học.

Dưới đây ta sẽ xét các đặc tính của các hệ servo thủy lực và khí nén cho phép điều khiển liên tục một trong hai đại lượng vật lý đặc trưng cho năng lượng của dòng lưu chất là áp suất và lưu lượng. Thông thường, việc điều khiển áp suất được áp dụng trong những trường hợp cần phải tạo ra quy luật của lực hoặc mômen, trong khi đó việc điều khiển lưu lượng thường dùng để điều khiển độ lớn các đại lượng động học như vị trí, tốc độ và gia tốc.

Điều khiển liên tục lực hoặc tốc độ có thể được thực hiện một cách hiệu quả nhờ có cơ cấu chấp hành lưu chất, với những ưu điểm dễ thấy so với các cơ cấu chấp hành điện là khả năng duy trì hệ thống dưới tải không giới hạn với các thiết bị điều khiển phù hợp; khả năng thực hiện các di chuyển tịnh tiến trực tiếp ở tốc độ cao không cần các thiết bị biến chuyển động quay thành tịnh tiến và có dải thông tần rộng, đặc biệt các hệ thống thuỷ lực có kích thước và quán tính khá nhỏ.

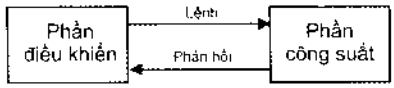
Hệ thống chấp hành thuỷ lực và khí nén

Hệ thống chấp hành là một phần trong các máy tự động, bao gồm phần công suất và phần điều khiển được minh hoạ trong hình 20.86. Phần công suất gồm các thiết bị tác động đến hoạt động di chuyển của hệ thống. Phần điều khiển thực hiện quá trình xử lý thông tin theo vòng kín với luật điều khiển được thiết lập dựa trên tín hiệu chuẩn và tín hiệu từ cảm biến nằm trên phần vận hành. Các tín hiệu lệnh từ phần điều khiển được gửi tới phần vận hành nhờ các thiết bị trung gian, các thiết bị này có nhiệm vụ chuyển và khuếch đại các tín hiệu (khi cần thiết) sao cho các cơ cấu chấp hành có thể sử dụng trực tiếp các tín hiệu này. Các phần trung gian có thể là bộ truyền động tốc độ, các công tắc tơ của các động cơ điện hay các van phân phối trong các cơ cấu chấp hành thuỷ lực hoặc khí nén. Hình 20.87 mô tả hoạt động của một hệ thống chấp hành dạng này. Phần công suất là bộ phận chấp hành - trong hình vẽ là xi lanh hai hướng - phần đầu và phần sau của xi lanh đều được nối với van phân phối 4/2, có chức năng điều chỉnh công suất dòng lưu chất.

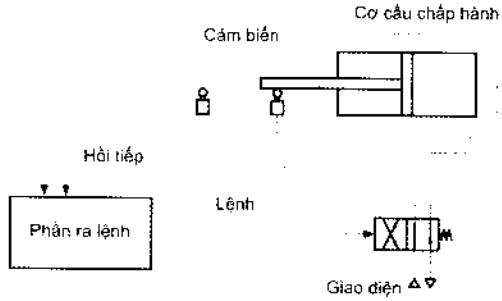
Lệnh chuyển van là lệnh từ phần điều khiển. Lệnh này được đưa ra căn cứ theo ý định chuyển động được xác lập trong chu kỳ vận hành mong muốn của xi lanh, dựa trên những tín hiệu phản hồi từ các cảm biến trong xi lanh - được mô tả trong hình vẽ dưới dạng các công tắc điểm cuối.

Các hệ thống chấp hành có thể có dạng không liên tục và liên tục tùy thuộc vào loại hình tự động hoá nhưng đều gồm phần điều khiển và phần cơ cấu chấp hành. Hệ thống chấp hành không

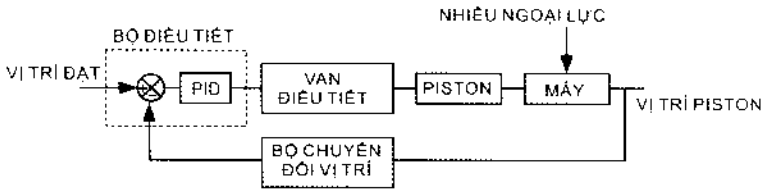
liên tục sẽ hiệu quả khi chúng được ứng dụng trong loại hình tự động hoá không liên tục, điển hình như dây chuyền lắp ráp và dây chuyền xử lý các bộ phận máy móc. Các hệ thống cơ cấu chấp hành liên tục được ứng dụng trong các quá trình xử lý liên tục, các thiết bị điều khiển tương tự và tạo thành các hệ servo thủy lực hoặc khí nén.



HÌNH 20.86 Hệ thống chấp hành



HÌNH 20.87 Hệ thống chấp hành dùng năng lượng lưu chất



HÌNH 20.88 Sơ đồ của một hệ thống servo dùng năng lượng lưu chất

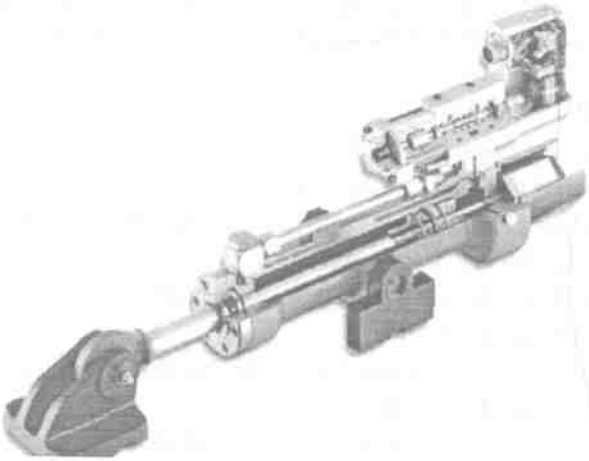
Các cơ cấu chấp hành thuỷ lực hay khí nén hoặc có dạng tịnh tiến (xi lanh) hoặc dạng quay (động cơ) là các hệ thống liên tục bởi chúng có thể xác định vị trí của các phần di động (của tay đòn ứng với trường hợp xi lanh; của trục ứng với trường hợp là động cơ) ở mọi điểm trong quá trình chuyển động. Sự hoạt động của xi lanh và động cơ chịu ảnh hưởng lớn của ma sát (tĩnh và động) tại nơi tiếp xúc giữa các phần di động. Ảnh hưởng của ma sát do thay đổi các điều kiện ma sát và độ dính trong chuyển động của các phần di động trong cơ cấu chấp hành làm tăng khả năng xảy ra hiện tượng "giật cục" đặc biệt trong các hệ thống khí nén hoặc các chuyển động không liên tục ở các tốc độ di chuyển rất thấp.

Khi tính đến ảnh hưởng của ma sát, sự có mặt của các thiết bị làm điểm tựa cho các phần di động của cơ cấu chấp hành và duy trì điều kiện áp suất chuẩn như giá đỡ, vòng đệm sẽ làm tăng độ phi tuyến tại ví trí cân bằng của cơ cấu chấp hành và làm cho việc định vị hệ thống rất khó đạt được độ chính xác cao. Để khắc phục vấn đề này trong một số ứng dụng cụ thể, cần sử dụng cơ cấu chấp hành không có vòng bịt kín nhưng có thể có các ổ đỡ thuỷ tĩnh và thuỷ động (*fluid static, fluid dynamic bearing).*

Các phần tử trung gian như van phân phối trong hình vẽ đóng vai trò quan trọng trong việc xác định chế độ hoạt động của cơ cấu chấp hành. Trong trường hợp khi nó chỉ chuyển động qua lại, với vị trí của cơ cấu chấp hành ở điểm cuối hành trình, thường dùng van phân phối dạng gián đoạn có từ hai đến ba vị trí, hình 20.87.

Trong trường hợp khi cần điều khiển vô cấp vị trí và lực truyền, cần dùng các thiết bị vô cấp như các van tỉ lệ và van servo hoặc dùng các thiết bị số kết hợp với điều biến tín hiệu, ví dụ các bộ điều khiển độ rộng xung PWM (Pulse Width Modulation).

Khi đó, hệ thống chấp hành thuỷ lực hoặc khí nén trở thành một hệ thống có phản hồi (hệ thống servo) với sơ đồ hoạt động như hình 20.88. Cấu trúc thực tế của cơ cấu chấp hành servo thuỷ lực dạng tịnh tiến có sơ đồ hoạt động như hình 20.88 được chỉ ra trong hình 20.89. Cơ cấu chấp hành này là một thiết bị độc lập tích hợp từ xi lanh, van và bộ cảm biến vị trí.



HÌNH 20.89 Hệ thống servo thủy lực dạng xi lanh

Hệ thống chấp hành lưu chất có điều khiển là một hệ cơ điện tử điển hình. Nó là sự kết hợp của các phần cơ khí, thuỷ lực, các thiết bị điều khiển và cảm biến; và nó thường đòi hỏi phải có quá trình mô phỏng để xác định kích thước và đặc tính của các phần tử khác nhau sao cho phù hợp với các đặc tính mong muốn.

Ký hiệu chuẩn của các thành phần khác nhau trong hệ thống thuỷ lực và khí nén cũng như các định nghĩa về các mạch phụ trợ được xác định theo chuẩn ISO 1219 "Các thành phần của hệ thống năng lượng thuỷ lực, khí nén - ký hiệu hình học và các sơ đồ mạch; Phần 1: Ký hiệu hình học, Phần 2: Sơ đồ mạch".

Hệ thống servo thuỷ lực và khí nén

Hệ thống servo thuỷ lực hay khí nén là các hệ điều khiển công suất cơ đầu ra, chúng có thể là các hệ thống servo điều khiển vị trí, tốc độ hoặc hệ servo điều khiển lực, mômen, áp suất.

Điều khiển các đại lượng đầu ra bao gồm việc điều khiển năng lượng lưu chất tức là năng lượng dòng chất lỏng hoặc chất khí qua các thành phần của hệ thống servo.

Hai dạng phổ biến thường dùng trong các ứng dụng hiện nay là: hệ thống servo thuỷ lực trong đó lưu chất tồn tại dưới dạng chất lỏng và hệ thống servo khí nén, trong đó lưu chất tồn tại dưới dạng khí nén. Áp suất làm việc của hệ thống servo thuỷ lực thường có giá trị trong khoảng từ 150 đến 300 bar, trong khi đó với các hệ thống khí nén áp suất này là dưới 10 bar.

Nhóm các hệ thống servo thuỷ lực sử dụng các loại dầu - các loại lưu chất có độ nhớt cao cho các hệ thống servo yêu cầu áp suất điều khiển cao và các chất có thể cháy như dầu cho ngành ô tô và hàng không (JPA, JPB,...), được ứng dụng trong các hệ thống nhiên liệu của các động cơ. Một số hệ thống servo sử dụng cả chất lỏng công nghiệp và nước biển làm chất lỏng công tác. Giải pháp này có ưu thế đặc biệt đối với các ứng dụng trên biển.

Các hệ thống servo khí nén được ứng dụng trong công nghiệp, tự động hoá sản suất, tự động hoá quá trình, giao thông: hàng không, đường biển, đường bộ, đường sắt. Khí nén trong những ứng

dụng nêu trên được tạo ra bởi máy nén lấy không khí từ môi trường. Trong các ứng dụng khác, lưu chất làm việc không phải là khí nén mà là chất khí đặc biệt. Hiện có những hệ thống servo dùng lưu chất làm lạnh ở thể khí được dùng trong các phương tiện đi lại và các hệ thống làm lạnh công nghiệp. Bên cạnh đó còn có những hệ thống servo dùng khí đốt (LPG, mêtan, prôpan) trong các ứng dụng gia dụng và dùng nitơ trong các ứng dụng áp suất cao. Từ những phân tích sơ bộ này, chúng ta nhận thấy rằng các hệ thống servo thủy lực và khí nén đã tham gia vào quá trình sản xuất sản phẩm và cùng với cơ cấu servo điện trở thành bộ phận không thể thiếu trong quá trình sản xuất tự động hoá. Ngoài ra, chúng còn đóng vai trò như các thiết bị phát động điều khiển được, tích hợp vào bản thân các sản phẩm. Sau đây chúng ta sẽ xem xét các cơ cấu chấp hành servo được lắp đặt trong máy bay và ngày càng phổ biến trong các phương tiện giao thông đường bộ hiện nay.

Hệ thống chấp hành thủy lực

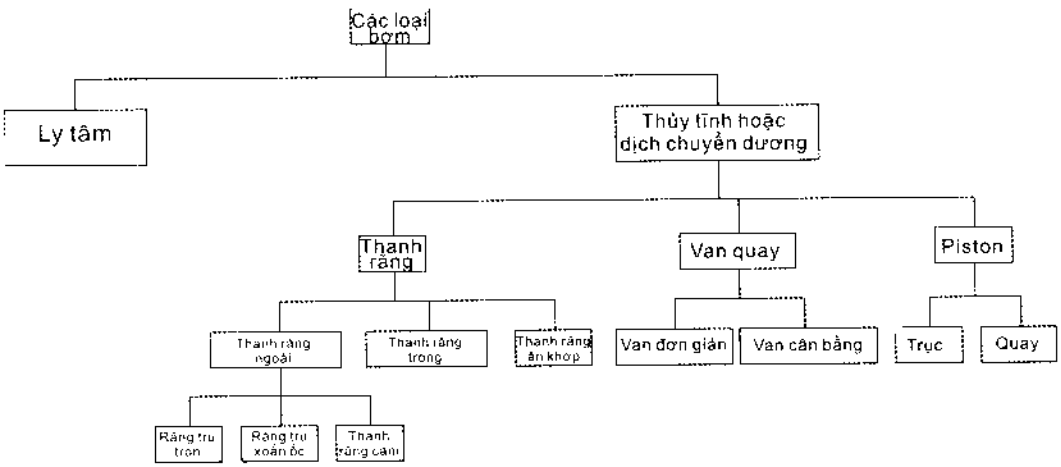
Thành phần của một hệ thống thủy lực gồm:

- Bơm: là hệ thống tạo công suất thủy lực;
- Cơ cấu chấp hành: là các phần tử chuyển năng lượng thủy lực sang năng lượng cơ học;
- Van: là bộ điều chỉnh năng lượng thủy lực;
- Ống nối: nối các thành phần của hệ thống chấp hành;
- Bộ lọc, bình tích áp, thùng chứa;
- Chất lỏng: là các chất truyền năng lượng giữa các phần tử khác nhau trong hệ thống;
- Các cảm biến và bộ chuyển đổi;
- Hệ thống hiển thị, đo lường và các thiết bị điều khiển.

Bơm

Bơm chuyển năng lượng điện hoặc năng lượng cơ học sang dạng năng lượng thuỷ lực. Chúng tạo ra dòng chất lỏng trong hệ thống thuỷ lực với áp suất được xác định bởi độ cản thuỷ lực theo hướng xuôi dòng từ phía phát. Các dạng chính của bơm được giới thiệu trên hình 20.90.

Các máy bơm ly tâm có lưu lượng cao ở áp suất thấp. Chúng không có các van trong nhưng có một khe hở lớn giữa phần quay và phần tĩnh để bảo đảm dòng chảy vô công phù hợp. Ngược lại, những loại bơm được ứng dụng phổ biến như bơm thủy tĩnh hay bơm có lượng đẩy dương lại có áp suất cao với lưu lượng hạn chế. Chúng gồm các phần tử như các van và nắp phân chia khu vực tạo áp với khu vực đầu vào, chúng có thể đưa các xung vào dòng chảy trên đầu ra và thường cần sử dụng các chất lỏng có đặc tính bôi trơn và khả năng chịu tải cao để giảm ma sát giữa các phần trượt của bơm. Có các dạng bơm có lượng đẩy không đổi và thay đổi. Các dạng chính của bơm có lượng đẩy dương: là bơm bánh răng, bơm cánh gạt và bơm piston.

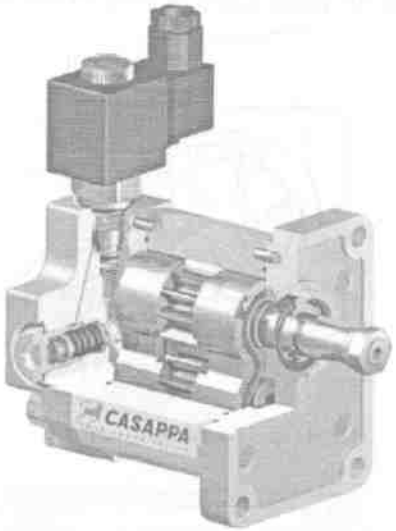


HÌNH 20.90 Phân loại bơm

Bơm bánh răng

Bơm bánh răng có các dạng bơm bánh răng ngoài, bơm bánh răng trong, bơm trục vít. Ở tất cả các dạng đó, bơm đều gồm 2 bánh răng đặt trong vỏ sao cho khe hở giữa chúng là nhỏ nhất.

Hình 20.91 là sơ đồ của bơm với các bánh răng ngoài. Các bánh răng quay ngược nhau sẽ khiến dầu nằm trong khoảng không gian giữa răng và thành của bánh răng được truyền từ chỗ hắt tới lối ra. Tùy theo dạng răng, bơm bánh răng ngoài có các dạng: bánh răng trụ, bánh răng xiên và bánh răng cam.



HÌNH 20.91 Bơm bánh răng trụ ngoài (Casappa)

Các dạng bơm với bánh răng trong có chức năng tương tự như trên nhưng các bánh răng quay theo cùng một chiều. Hình 20.92 mô tả cấu tạo của bơm 2 tầng. Với bánh răng trục vít, có thể có một hay nhiều rôto, các phần tử có răng xoắn ốc tương tự như đường ren xoáy trôn ốc của trục vít. Chất lỏng được đẩy dọc trục theo chiều quay của trục vít. Các dạng bơm này đảm bảo dòng chảy êm, giảm tiếng ồn, mức độ xung động thấp.

HÌNH 20.92 Bơm bánh răng trong (Truninger)

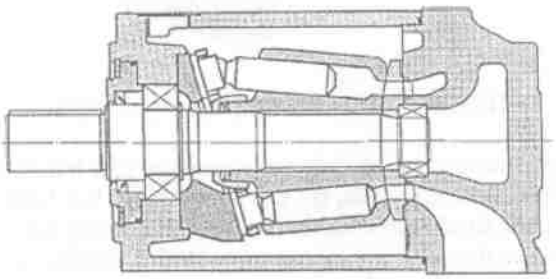
Tốc độ quay thông thường trong khoảng giữa 1000 và 3000 vòng/phút, công suất từ 1 và 100 kW. Áp suất có thể đạt đến 250 bar, ở các bơm bánh răng ngoài giá trị này còn cao hơn. Lưu lượng là hàm của lượng đẩy của bơm và tốc độ góc đầu vào, với các giá trị từ 0.1 tới 1000 cm^3/vòng quay. Để tăng các giá trị này có thể dùng bơm kép. Bơm bánh răng có hiệu suất cao, thường có giá trị trên dưới 90%.

Bơm cánh gạt

Bơm cánh gạt (hình 20.93) thường gồm 1 stato và 1 rôto, có thể quay độc lập đối với các phần khác. Các cánh gạt có thể di chuyển trong các rãnh riêng đặt quanh stato hoặc rôto và phân cách bởi các thể tích thay đổi tương ứng.

Trong hình 20.93, cũng như trong hầu hết các cấu trúc, các cánh gạt được đỡ bởi rôto có thể quay phía bên trong stato. Rôto quay đẩy khối chất lỏng giữa hai cánh gạt liên tiếp nhau từ đầu vào bơm sang khu vực cao áp. Dạng bơm này cho phép dải áp suất làm việc tới 100 bar và so với bơm bánh răng nó đảm bảo xung động lưu lượng ít hơn và tiếng ồn nhỏ hơn.

HÌNH 20.93 Bơm dạng cánh gạt



HÌNH 20.94 Bơm piston dạng trục (Bosch Rexroth)

Bơm piston

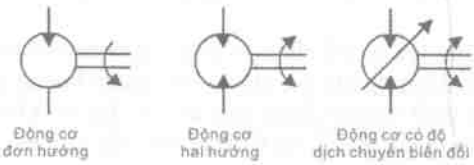
Các bơm piston có thể có một hoặc nhiều xi lanh, mỗi xi lanh có một piston trượt trong nó. Sự di chuyển của khối chất lỏng từ trong ra ngoài xác định bởi khoảng di chuyển của piston trong xi lanh, cung cấp bởi các van vào ra hoặc các cửa. Tuỳ theo dạng sắp xếp hình học của các xi lanh tương ứng với trục quay của động cơ, các bơm piston được chia ra bơm dạng trục (bent axis và swash plate) và bơm hướng tâm. Hình 20.94 mô tả sơ đồ của 1 bơm piston dạng trục di chuyển khoảng cố định dạng swash plate. Dải áp suất làm việc tương ứng của bơm piston lớn hơn các dạng trước, có thể đạt tới áp suất trong dải 400 - 500 bar nhưng nhược điểm là có nhiều dòng chảy không đều hơn.

Cơ cấu truyền động

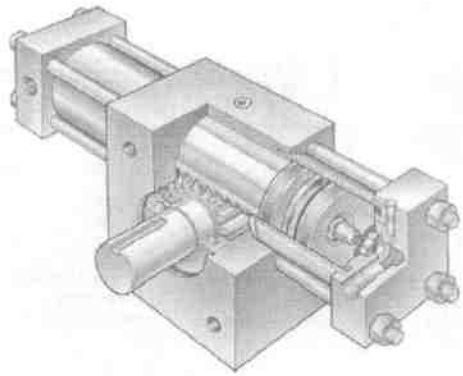
Các cơ cấu chấp hành này chuyển năng lượng thủy lực của chất lỏng bị nén sang dạng năng lượng cơ. Các cơ cấu chấp hành đó là các động cơ thuỷ lực. Về cơ bản, dạng chuyển động sinh ra, tương tự như trường hợp bơm, trong các động cơ quay, nửa quay mà phần tạo ra các chuyển động quay là các trục và trong các động cơ tuyến tính chuyển động qua lại mà phần tạo ra chuyển động quay là các xi lanh thuỷ lực.

Các động cơ quay và nửa quay

Trong các thuật ngữ giải thích, các động cơ quay gần giống như bơm quay. Có các động cơ dạng bánh răng, van, piston, dạng tròn hoặc ống. Tuy nhiên, nguyên lý hoạt động thì ngược lại với bơm. Hình 20.95 là ký hiệu động cơ thủy lực dạng quay. Các động cơ dạng nửa quay tạo các dao động hoặc chuyển động tuyến tính, chuyển động quay của một van nối trực tiếp với đầu ra của trục hoặc kết hợp với một cơ cấu thanh răng truyền động bởi một piston, với một bánh răng nối với đầu ra của trục như ví dụ trong hình 20.96. Các động cơ van nửa quay sinh ra mômen xoắn tức thời trên trục đầu ra; Vì vậy chúng được gọi là các động cơ mômen thủy lực.



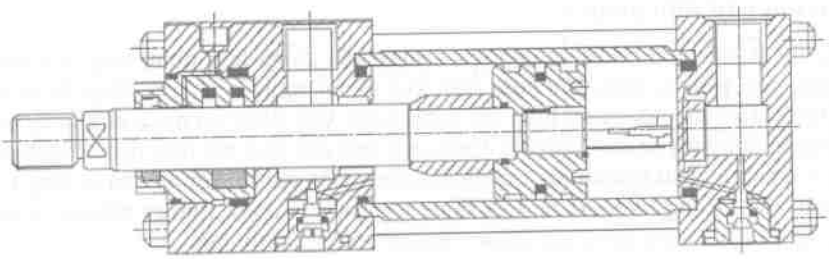
HÌNH 20.95 Ký hiệu các động cơ thuỷ lực quay



HÌNH 20.96 Cơ cấu chấp hành thuỷ lực quay (Parker Hannifin)

Động cơ tịnh tiến

Các động cơ thuỷ lực tuyến tính tiếp tục được sử dụng phổ biến nhất trong các dạng cơ cấu chấp hành. Chúng sinh ra chuyển động thẳng bởi hành trình của thanh truyền được nối với một piston trượt trong xi lanh. Có sự khác biệt giữa xi lanh tác động một hướng và tác động hai hướng. Các động cơ tác động một hướng chỉ có duy nhất một hành trình làm việc do vậy áp suất của chất lỏng chỉ tác dụng lên bề mặt của piston theo một chiều duy nhất; hành trình kéo lại được thực hiện nhờ lực tác động từ bên ngoài hoặc nhờ lực lò xo lắp đặt trong 1 khoang xi lanh. Loại động cơ thứ hai có cả hai hành trình cho phép chất lỏng tác động lần lượt lên cả hai mặt của piston, nhằm tạo ra cả hai hành trình tiến hoặc lùi. Các xi lanh tác động hai hướng có thể có thanh truyền đơn hoặc kép. Nó bao gồm một ống bịt cả hai đầu và một piston có vòng bịt kín gắn với một hoặc hai thanh truyền được nối ra bên ngoài để tạo chuyển động. Do có vòng đệm bịt kín, piston chia xi lanh thành hai khoang. Bằng cách đưa dầu bị nén với áp suất cao vào một trong các khoang thông qua các ống dẫn đặc biệt ở phía đầu, người ta tạo ra sự chênh lệch áp suất giữa hai mặt piston gây nên lực tác động ra phía ngoài nhờ thanh truyền. Hình 20.97 trình bày giải pháp kết cấu của một xi lanh thủy lực tác động hai hướng với một thanh truyền đơn. Cơ cấu chấp hành thanh truyền đơn được coi như các xi lanh không đối xứng bởi diện tích làm việc ở phía thanh truyền nhỏ hơn diện tích của piston. Do đó với cùng một áp suất lực tác động theo hai chiều khác nhau và lưu lượng chất lỏng vào ra cũng khác nhau.



HÌNH 20.97 Cơ cấu chấp hành piston tác động hai hướng, thanh truyền đơn (Atos)

Các cơ cấu chấp hành thủy lực có thể chịu được quá tải, nếu tải vượt quá lực đẩy có thể, thanh truyền sẽ dừng hoặc chuyển động ngược lại, nhưng nói chung không gây hỏng. Tuy nhiên, các xi lanh có thể bị hỏng hoặc ít nhất bị giảm hiệu suất do khi cấp tải không dọc theo trục của thanh truyền sẽ sinh ra phản lực từ thanh truyền và ổ đỡ piston dẫn tới hiện tượng nhanh mòn, giảm độ khít và gây ra sự rò rỉ dầu.

Những thông số chính của động cơ tịnh tiến là kích thước, hành trình piston, áp suất làm việc tối đa, dạng chất lỏng và cách liên kết. Ký hiệu các dạng cơ cấu chấp hành khác nhau được nêu trong hình 20.98.

HÌNH 20.98 Ký hiệu các cơ cấu chấp hành

Van

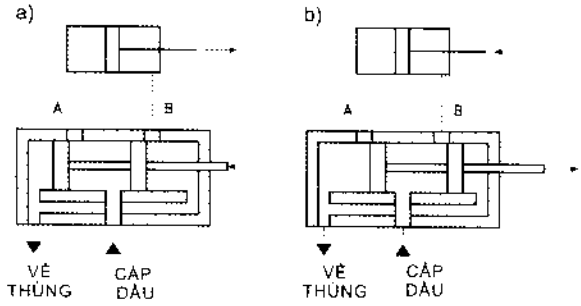
Van là bộ phận trong hệ thủy lực có nhiệm vụ điều chỉnh công suất thủy lực truyền tới cơ cấu chấp hành. Vai trò của chúng là đóng/mở dòng chảy của dầu hoặc phân hướng nó theo yêu cầu, do đó cho phép điều chỉnh hai đại lượng vật lý chính của việc truyền chất lỏng là áp suất và lưu lượng dòng chảy. Phân loại van theo chế độ hoạt động, có các dạng:

- Van định hướng
- Van đóng-mở
- Van điều chỉnh áp suất
- Van tiết lưu

Trong các ứng dụng cơ cấu servo vô cấp người ta thường sử dụng van tỉ lệ lưu lượng, van servo, van tỉ lệ áp suất.

Van định hướng

Van định hướng quyết định lượng và chiều dòng dầu qua nó bằng sự dịch chuyển của các phần di động tương ứng trong chúng do tác động từ bên ngoài. Van định hướng cũng được xem như van phân phối, được phân biệt nhờ dạng của các phần tử di động, do đó chúng được phân loại theo cấu trúc bên trong, bằng số lượng kết nối có thể với các ống dẫn ngoài và số vị trí chuyển mạch.



HÌNH 20.99 Sơ đồ của van bốn đầu, hai vị trí

Các phần tử di động có thể có dạng hạt hoặc dạng con trượt. Các van dạng hạt không phân biệt dạng chất lỏng và không chịu tác động bởi các tạp chất trong chất lỏng đó, nhưng yêu cầu lực tác động lớn vì nó không thể tạo ra sự bù trừ với áp lực dầu. Các van con trượt cho phép kết nối đồng thời theo một vài dạng khác nhau với các sơ đồ chuyển khác nhau, do đó thông dụng hơn bởi sự linh hoạt của chúng. Số kết nối có thể được xác định bởi số đường dầu trên bề ngoài thân van. Số vị trí chuyển tương ứng với số sơ đồ kết nối có thể của van tương ứng với các di chuyển thích hợp của các phần tử di động.

Hình 20.99 mô tả sơ đồ hoạt động của van con trượt bốn đầu, hai vị trí (ký hiệu là 4/2) nối với một động cơ tịnh tiến tác động hai hướng. Ở vị trí 1 (hình 20.99(a)) nguồn cấp dầu nối với khoang sau của xi lanh qua đầu ra A, còn khoang trước xả qua cổng B. Trong sơ đồ này, piston thực hiện một hành trình tiến về phía trước khi thanh truyền hướng ra ngoài. Ở vị trí 2 (hình 20.99(b)), sự di chuyển của van trượt khiến việc cấp và xả ở hai khoang ngược lại, piston thực hiện hành trình ngược lại.

Van định hướng nhiều vị trí được biểu diễn bởi các hình vuông đặt cạnh nhau mô tả các kết nối ở từng vị trí. Hình 20.100, biểu diễn một số ký hiệu van định hướng theo chuẩn ISO. Vị trí giữa của các van ba vị trí thường là vị trí dừng được xác định bởi hình dạng của con trượt và các vị trí phụ. Các van định hướng có thể điều khiển theo nhiều cách (hình 20.100): bằng tay; cơ khí: các thiết bị như cam, đòn bẩy... thủy lực và khí nén: các lưu chất bị nén; điện từ, trực tiếp hoặc gián tiếp phụ thuộc vào lực sinh ra do nam châm điện đặt thẳng hàng với van trượt hoặc bằng dòng chất lỏng, hướng của chúng được điều khiển bởi một van dẫn hướng nhỏ hơn van điều khiển chính.

Các van đóng/mở

Các van đóng ngắt là các van đơn hướng, chỉ cho phép dòng chất lỏng chảy theo một hướng. Do chúng cản dòng theo chiều ngược lại nên chúng còn được gọi là van một chiều (nonreturn). Các van đóng/mở thường được đặt trong mạch thủy lực giữa bơm và cơ cấu chấp hành nên khi máy phát dừng, dòng chất lỏng trong hệ thống không được đưa vào bể chứa mà lưu lại trong đường ống. Việc này sẽ ngăn sự lãng phí năng lượng cho việc điền đầy hệ thống sau đó và đảm bảo vị trí của cơ cấu chấp hành dưới tải.

Về mặt cấu trúc, các van này bao gồm một cơ cấu chấp hành là một hòn bi hoặc piston được duy trì tại vị trí của nó nhờ lực đẩy của lò xo (van một chiều) hoặc bằng áp suất chênh lệch giữa đầu vào và đầu ra (van đơn hướng).

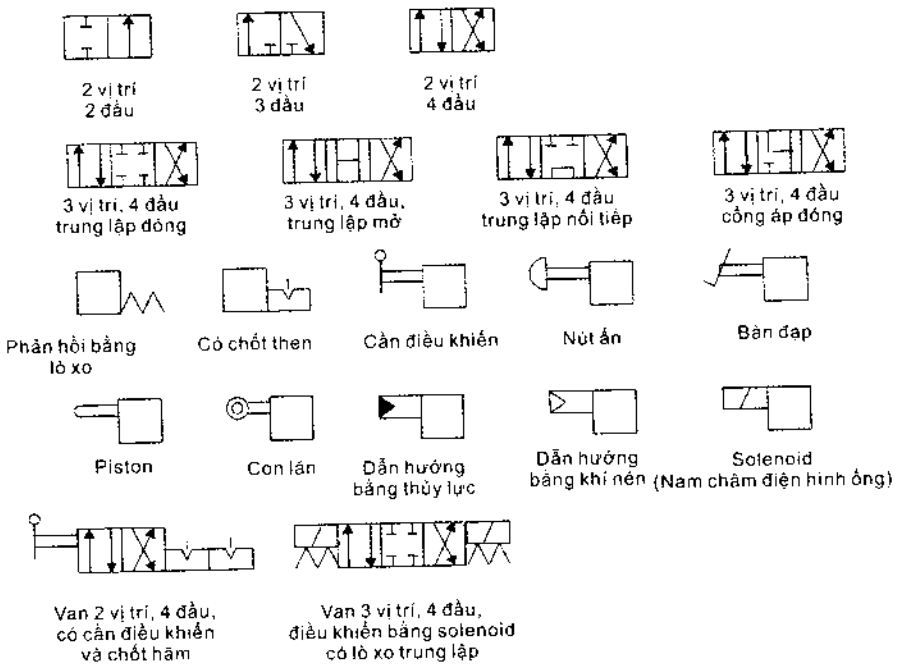
Van điều chỉnh áp suất

Có hai dạng van điều chỉnh áp suất cơ bản: các van hạn chế áp suất hay van an toàn và van giảm áp.

Các van hạn chế áp suất đảm bảo hoạt động chính xác của hệ thống, ngăn áp suất vượt quá các mức nguy hiểm của hệ thống. Thường có một van áp suất tối đa trong các mạch thủy lực để xả bất kỳ dòng chảy dư thừa nào vào bể chứa. Điều này là do các máy phát hoặc các bơm lượng đẩy dương, cung cấp dòng chất lỏng liên tục và nếu nó không được sử dụng hoặc không có van hạn chế áp hoặc van áp suất tối đa thì nó sẽ làm cho áp suất trong hệ thống tăng đến các giá trị không

cho phép. Các van hạn chế áp suất có thể tác động trực tiếp hoặc gián tiếp. Trường hợp trực tiếp, người ta lắp một lực lò xo với tải trọng cố định đặt trước, bằng với lực chống lại áp suất của cửa chắn hoặc cửa điều chỉnh đảm bảo cho áp suất mở tối đa. Trường hợp gián tiếp, người ta thay thế tác động của lò xo bằng tác động của dòng chất lỏng có điều khiển thuỷ lực bởi một van dẫn hướng.

Chức năng của các van điều chỉnh áp suất là giữ áp suất không đổi cuối dòng, không phụ thuộc sự thay đổi áp suất đầu dòng. Việc điều chỉnh các mức áp suất có thể đặt bằng tay bằng tín hiệu dẫn hướng hoặc bằng tín hiệu điện tương tự. Trong các trường hợp sau, các van điều chỉnh áp suất có thể hoạt động trong mạch điện vòng kín, khi chúng có bộ cảm biến để đo áp suất điều khiển.



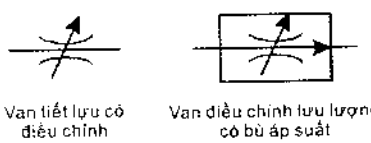
Hình 20.100 Ký hiệu các van

Các van tiết lưu

Các van dạng này dùng để điều chỉnh lưu lượng dòng chất lỏng đi qua nó. Nó hoạt động như van tiết lưu đơn giản tương tự một cửa van có diện tích thay đổi. Lưu lượng qua van tiết lưu là hàm của diện tích thông qua và hiệu giữa áp suất trước và sau van. Do đó, van tiết lưu dạng đơn giản rất nhạy cảm với tải, bởi lưu lượng dòng chảy cũng phụ thuộc sự giảm áp suất ở điểm cuối của nó và chịu sự chi phối của các thành phần khác trong hệ thống.

Trong trường hợp van tiết lưu có bù áp suất, lưu lượng dòng chảy được duy trì không đổi trên mức áp suất tối thiểu (thường bằng 10 bar) như một hàm riêng của các điểm đặt ngoài bằng tay hoặc bằng điện. Trong trường hợp này, van có hai van tiết lưu nối tiếp, một cái cố định và cái còn lại tự động thay đổi để duy trì sự chênh áp không đổi ở van tiết lưu cố định và bảo đảm lưu lượng dòng chảy không đổi.

Ký hiệu của các van tiết lưu theo chuẩn ISO được giới thiệu trong hình 20.101.



HÌNH 20.101 Ký hiệu của các van điều khiển lưu lượng

Van tỉ lệ và van servo

Các van servo bắt đầu xuất hiện từ cuối những năm 1930 và được ứng dụng chủ yếu trong lĩnh vực quân sự và hàng không. Sản phẩm thương mại đầu tiên xuất hiện giữa những năm 50. Ngày nay, các van servo và van tỉ lệ được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực dân sự, hàng không, vũ trụ, ô tô và các ngành công nghiệp. Thông thường, chúng được dùng cho điều khiển vô cấp vị trí, tốc độ và lực của một cơ cấu chấp hành thủy lực, yêu cầu độ chính xác về vị trí hoặc chính xác trong điều kiện chạy và dải tần số làm việc, trong cả hai cấu trúc điều khiển vòng hở và vòng kín.

Van servo hay van tỉ lệ là một bộ phận của hệ thủy lực có thể sinh ra đầu ra điều khiển được và là hàm của đầu vào dạng điện. Thiết bị chuyển đổi tín hiệu điện thành tác động vào cửa van là nam châm điện của động cơ mômen hoặc cuộn cảm tỉ lệ. Động cơ mômen chuyển dòng điện một chiều nhỏ sang mômen tác động lên mặt rôto ở chế độ lưỡng cực. Cuộn cảm tỉ lệ sinh ra lực đơn hướng trên hàm phần ứng di động của dòng điện trong cuộn dây, với đặc tính duy trì lực này xấp xỉ không đổi trong dải dịch chuyển con chạy. Động cơ mômen, với các giá trị dòng điện và điện cảm thấp, có thời gian đáp ứng ngắn hơn cuộn cảm servo, đặc biệt là hoạt động với dòng điện cao nhưng sinh ra công suất cơ thấp hơn. Do đó, động cơ mômen tạo thành tầng dẫn hướng thường thấy trong các van servo, còn cuộn cảm servo được dùng trong các van tỉ lệ tác động trực tiếp lên các con trượt.

Lưu lượng dòng chảy hoặc độ chênh áp suất có thể được điều khiển trực tiếp bởi các van servo hoặc van tỉ lệ, tùy dạng. Van servo và van tỉ lệ thường có các đặc điểm cơ bản sau:

- Các tín hiệu đầu vào
- Độ chính xác
- Vòng trễ
- Độ tuyến tính đầu vào và đầu ra
- Dải không nhạy
- Dải thông (tần)

Các tín hiệu đầu vào được đặc trưng bởi dạng tín hiệu và dải biến thiên. Phổ biến là các tín hiệu dòng điện (±10 mA hoặc 4 -20 mA) điện áp (0 - 10 V). Độ chính xác được đánh giá bởi hiệu giữa giá trị đặt và giá trị thực. Nó được tính theo phần trăm tỉ lệ toàn thang đo so với đặc tính vòng trễ nhận được từ độ chênh với điểm đặt theo chiều tăng lên và chiều giảm xuống tương ứng. Các giá trị của nó biểu diễn tỉ lệ giữa độ lệch tối đa và giá trị toàn thang đo. Độ tuyến tính là một đặc tính có thể ước lượng trên toàn dải làm việc. Trong dải tương đối, nó có thể được biểu diễn bằng tỉ lệ phần trăm độ lệch tối đa của quan hệ vào/ra của phần hồi quy tuyến tính của nó. Thông thường, điều khiển vị trí yêu cầu độ tuyến tính cao hơn so với điều khiển tốc độ, áp suất hoặc lực. Dải không nhạy xác định giá trị đầu vào tối thiểu để đảm bảo sự biến thiên đầu ra vẫn được chấp nhận. Không giống như các đặc tính trên, dải thông là một đặc tính động.

Đó là do nó liên quan tới biểu đồ tần số của các thành phần và được xác định là tần số ở đó đáp ứng bị suy giảm 3 dB so với giá trị đáp ứng ở tần số thấp. Thông thường các van điều khiển liên tục yêu cầu độ rộng dải thông lớn hơn 2-5 lần so với dải thông của hệ thống. Sự khác biệt chính giữa các van servo và các van tỉ lệ được chỉ trong bảng 20.11. Trừ sự khác nhau cơ bản trong các thiết bị chuyển đổi điện cơ, có thể có sự giống nhau về các đặc tính tĩnh và động của nhiều loại trên thị trường.

Về cơ bản do có các đặc tính tĩnh và động mạnh hơn, các van servo dùng chủ yếu trong các vòng điều khiển kín trong khi các van tỉ lệ thường dùng trong các hệ thống vòng hở.

Van servo

Các mô hình hai tầng rất phổ biến trong các van servo, trong đó tầng điều khiển đầu tiên chuyển các tín hiệu điện công suất nhỏ sang hiệu áp suất có khả năng tác động tới van trượt của tầng hai, thường là bốn đường và đối xứng. Các van servo điều chỉnh lưu lượng dòng chảy được chia thành hai nhóm dựa trên cách chúng tạo ra sự chuyển đổi điện-thủy lực:

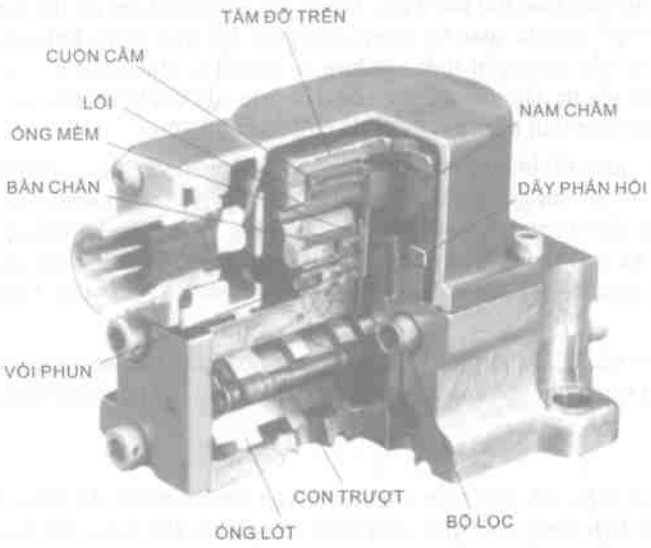
BẢNG 20.11 Những điểm khác nhau chính giữa các van servo và van tỉ lệ thuỷ lực

	Van servo	Van tỉ lệ
Chuyển đổi cơ điện	Động cơ mômen hai chiều (0.1 ÷0.2 W) với vòi phun bản chắn hoặc vòi phun ống thu	Cuộn cảm servo đơn hướng (10 ÷ 20W)
Dòng điện đầu vào	100 ÷ 200 mA	< 3A
Lưu lượng dòng chảy	2 ÷ 200 l/phút (dạng hai tầng) với độ chênh áp trên van = 70 bar	10 ÷ 500 l/phút (dạng một tầng) với độ chênh áp trên van = 10 bar
Vòng trễ	< 3% (< 1% với dao động)	< 6% (< 2% với phản hồi điện)
Dải thông	> 100Hz tuỳ thuộc vào biên độ của đầu vào và của áp suất cung cấp	< 100Hz tuỳ thuộc biên độ của đầu vào
Khe hở hướng kính của van con trượt	1 μm (hàng không vũ trụ) 4 μm (công nghiệp)	2 ÷ 6 μm
Dải không nhạy của con trượt	< 5% hành trình	Chồng lên 10 ÷ 20% hành trình, ít hơn nếu có bù

- Dạng vòi phun bản chắn,
- Dạng vòi phun ống thu.

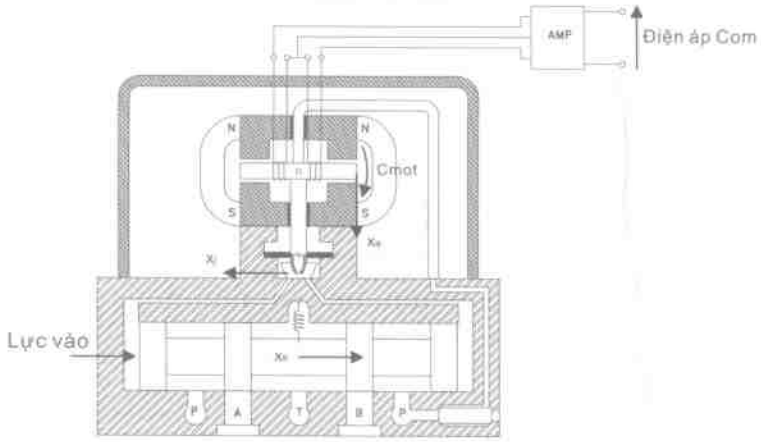
Một ví dụ của van servo dạng vòi phun bản chắn được vẽ trên hình 20.102. Nó gồm hai tầng: tầng trước bao gồm một động cơ mômen, bản chắn và một hệ thống vòi phun (nozzles) và các van điều tiết (chokes), bao gồm chủ yếu là con trượt và các cổng ra. Động cơ mômen cấu tạo bởi cuộn cảm, nam châm, phần ứng và các cực, có khả năng truyền mômen tới bản chắn để tạo ra độ lệch góc gây khó khăn cho một trong nhiều vòi phun ở mức cao hơn. Việc này gây ra sự chênh áp suất giữa hai đầu con trượt tạo ra chuyển động cho đến dây phản hồi, nối con trượt và bản chắn, đưa bản chắn về vị trí trung lập.

Thông qua các khe định lượng trên ống lót, con trượt sẽ kết nối các cổng tương ứng. Dây phản hồi là phần tử đàn hồi tạo ra sự phản hồi giữa 2 tầng công suất chính (con trượt) và tầng đầu (động cơ mômen). Dạng van vòi phun bản chắn dễ bị ảnh hưởng bởi tạp chất hơn so với dạng van vòi phun ống thu, do đó cần độ lọc dầu kỹ hơn.



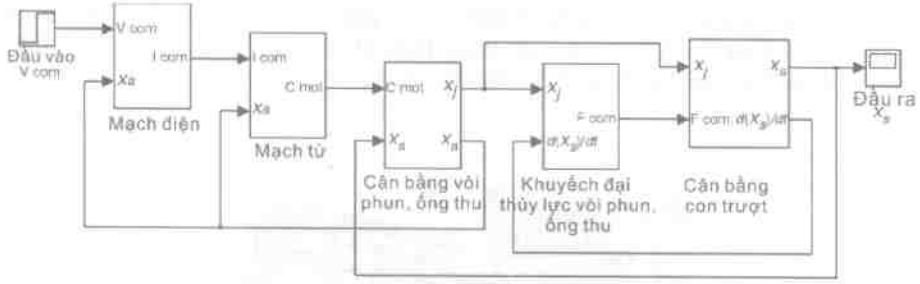
HÌNH 20.102 Van servo dạng vòi phun bản chắn (Moog)

Hình 20.103 chỉ ra sơ đồ mặt cắt của van servo dạng vòi phun ống thu. Vòi phun được nối với cổng P (nguồn) của van servo qua một bộ lọc và ống mềm. Nên chú ý rằng, không giống như van dạng vòi phun bán chắn, không cần thiết lọc toàn bộ lượng dầu qua van mà chỉ cần lọc dòng "chỉ huy" (dòng dầu đi qua vòi phun). Rõ ràng đây là ưu điểm cho phép tiết kiệm năng lượng và giảm thiểu ảnh hưởng của các tạp chất cơ học. Khởi động với một điện áp đầu vào chuẩn, bộ khuếch đại làm điện áp trong một cuộn cảm của động cơ mômen tăng lên đồng thời giảm tương ứng ở cuộn cảm còn lại.



HÌNH 20.103 Sơ đồ van servo dạng vòi phun ống thu

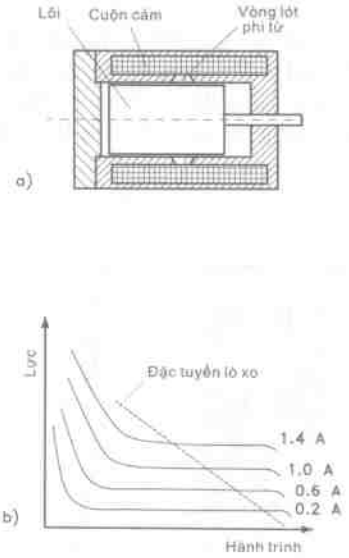
Sự kích thích này gây ra sự mất cân bằng các lực ở các đầu của thanh lõi, sinh ra mômen làm bản thân thanh này và ống phun quay. Sự dịch chuyển của miệng vòi phun tạo ra sự phân phối khác nhau giữa 2 ống thu dưới nó và kết quả là tạo ra độ chênh áp suất ở hai đầu con trượt và gây ra sự dịch chuyển. Phần lò xo nối con trượt và ống phun tạo ra phản hồi vị trí. Độ dịch chuyển của con trượt và ống phun làm biến dạng lò xo phản hồi, sinh ra một lực tăng tỉ lệ với nó, có thể cân bằng mômen cấp cho ống phun và lực do chênh áp trên con trượt sinh ra. Theo cách này, hệ thống sẽ có một vị trí cân bằng, tỉ lệ với điện áp đầu vào. Lò xo phản hồi đồng thời cũng định tâm con trượt ở điểm trạng thái không làm việc, do đó không cần phải có lò xo riêng để định tâm. Hình 20.104 là sơ đồ khối mô tả các thành phần van servo ống thu với phần chú thích các đại lượng vật lý đưa ra trong hình 20.103.



HÌNH 20.104 Sơ đồ khối của van servo dạng vòi phun ống thu

Van tỉ lệ

Các van tỉ lệ có thể được chia nhóm thành van tỉ lệ lưu lượng và nhóm van tỉ lệ áp suất (hạn chế và giảm áp suất). Trong trường hợp đầu, tác động của lõi cuộn cảm servo (hình 20.105(a)) làm dịch chuyển con trượt chính của van, được giữ bởi một lò xo trên thân van.



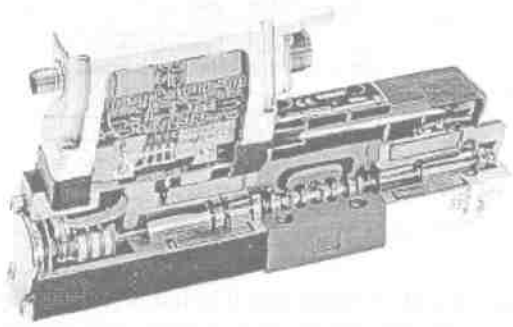
HÌNH 20.105 Cuộn cảm servo tỉ lệ (a) sơ đồ cuộn cảm, (b) đặc tính cuộn cảm

Các đặc tính lực của cuộn cảm servo trong toàn bộ hành trình của con trượt, là hàm của dòng điện đầu vào như minh họa trong hình 20.105(b). Ứng với các giá trị có thể của dòng điện vào, có một vị trí nhất định tại đó lực điện từ của cuộn cảm cân bằng với lực phản hồi của lò xo.

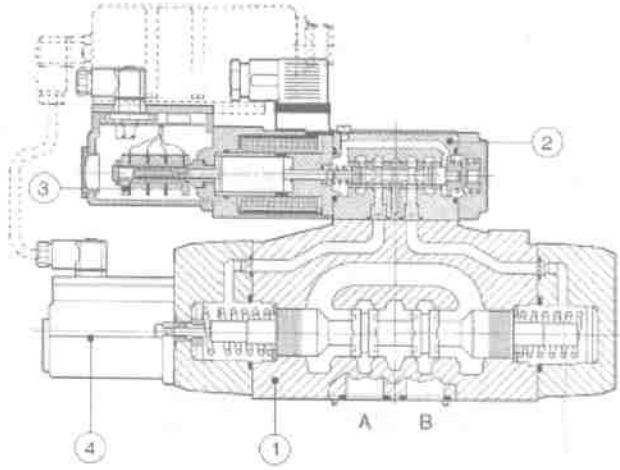
Với trường hợp yêu cầu vị trí chính xác của van trượt, có thể dùng phản hồi vị trí. Hình 20.106 minh họa một van tỷ lệ dạng này. Tín hiệu vào cuộn cảm servo, từ modul phản hồi là sai số được bù bởi mạng PID giữa tín hiệu đặt và tín hiệu phản hồi từ bộ cảm biến vị trí LVDT. Độ chính xác và khả năng lặp lại của van sẽ tăng nhờ phản hồi vị trí, đồng thời sai số trễ (hysteresis) và sai số do ma sát giữa các phần di động được bù một phần.

Các van lưu lượng tỉ lệ có thể có hai tầng. Trong trường hợp này, đầu ra của van tỉ lệ dẫn hướng đưa tới các khoang cuối của một van kiểu con trượt có kích cỡ lớn hơn, cho phép đạt được lưu lượng điều khiển lớn hơn đồng thời giảm được các sai số. Hình 20.107 là van lưu lượng tỉ lệ hai tầng.

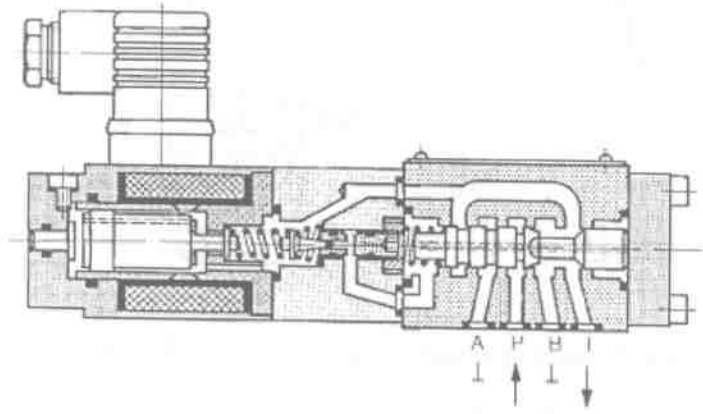
Trong các van tỉ lệ điều chỉnh áp suất, hoạt động của cuộn cảm servo sẽ tác động lên đỉnh chóp nón sao cho có thể điều chỉnh được áp suất trong khoang đầu từ phía đỉnh của nó. Hình 20.108 minh họa hoạt động của van tỉ lệ áp suất có van dẫn hướng.



HÌNH 20.106 Van tỉ lệ lưu lượng (Bosch Rexroth)



HÌNH 20.107 Van tỉ lệ lưu lượng hai tầng: (1) tầng van con trượt chính, (2) tầng dẫn hướng, (3) LVDT của tầng dẫn hướng, (4) LVDT của tầng chính (Atos)



HÌNH 20.108 Van tỉ lệ áp suất (Bosch Rexroth)

Mô hình hóa hệ thống servo thủy lực điều khiển vị trí

Hình 20.109 là sơ đồ một hệ thống servo thủy lực điều khiển vị trí tác động hai hướng, cơ cấu chấp hành hai thanh truyền được điều khiển bởi mạch vòng kín với van servo bốn đầu. Vị trí x của piston xác định khi các lực tác động lên nó cân bằng: ngoại lực, lực đẩy do áp suất P_1, P_2 tác động lên các khoang của piston, lực ma sát và lực quán tính. Áp suất P_1 và P_2 được xác định bởi lưu lượng dòng Q_{C1} và Q_{C2} vào ra các khoang. Tỉ lệ lưu lượng Q_{FI} tương ứng với lưu lượng dầu rò giữa piston và thân xi lanh. Van tỉ lệ lưu lượng điều khiển lưu lượng dầu dựa trên tín hiệu đặt *ref* từ cơ cấu bù G_C. Đầu vào của bộ bù là sai số e_V giữa tín hiệu V_{SET}, tương ứng với vị trí tay đòn mong muốn x_{SET} và tín hiệu phản hồi $V_{F/B}$ tương ứng với vị trí thực của thanh truyền x đo bởi cảm biến vị trí LVDT. Cơ cấu chấp hành được mô hình hóa bằng các phương trình lưu lượng liên tục trong khoang và phương trình cân bằng động lực học cho tay đòn. Các phương trình liên tục có dạng:

$$\rho\left(\sum Q_{IN} - \sum Q_{OUT}\right) = \frac{d(\rho V)}{dt} = \rho\frac{dV}{dt} + V\frac{d\rho}{dt} \tag{20.39}$$

trong đó:

$\sum Q_{IN}$ = tổng lưu lượng vào

$\sum Q_{OUT}$ = tổng lưu lượng ra

ρ = khối lượng riêng

V = thể tích

t = thời gian

Từ định nghĩa của mô đun nén (mục 10.2) của dầu thủy lực β, ký hiệu P là áp suất trong khoang đang xét:

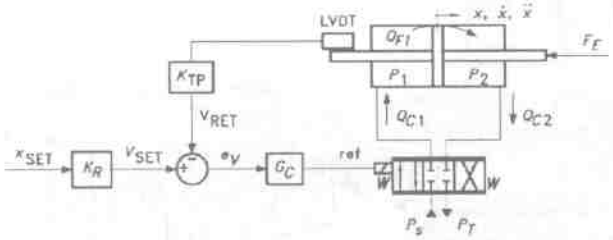
$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dP}{\beta} \tag{20.40}$$

Ta có:

$$\sum Q_{IN} - \sum Q_{OUT} = \frac{dV}{V} + \frac{V}{\beta}\frac{dP}{dt} \tag{20.41}$$

Phương trình liên tục cho khoang 1 là:

$$Q_{C1} - Q_{F1} = A_c\dot{x} + \frac{V_0 + A_c x + V_{sm}}{\beta}\frac{dP_1}{dt} \tag{20.42}$$



HÌNH 20.109 Sơ đồ của hệ thống servo thuỷ lực điều khiển vị trí

Phương trình liên tục cho khoang 2 là:

$$Q_{F1} - Q_{C2} = A_c\dot{x} + \frac{V_0 - A_c x + V_{sm}}{\beta}\frac{dP_2}{dt} \tag{20.43}$$

trong đó:

Q_{C1} = lưu lượng vào khoang 1

Q_{C1} = lưu lượng vào khoang 2

Q_{F1} = lưu lượng rò giữa piston và thân xi lanh

A_C = diện tích đẩy $= (D_{al}^2 - D_{st}^2)\pi/4$

D_{al} = đường kính trong của xi lanh

D_{st} = đường kính tay đòn

V_0 = thể tích khoang khi piston ở vị trí giữa = $A_C L/2$

L = độ dài hành trình chuyển động của piston

x = độ dịch chuyển của piston ($x = 0$ ở vị trí trung tâm)

V_{sm} = thể tích "chết"

Phương trình cân bằng động của piston là:

$$P_1 A_c - P_2 A_c - F_e - M\ddot{x} - F_A = 0 \tag{20.44}$$

trong đó:

M = khối lượng dịch chuyển

F_e = lực bên ngoài

F_A = lực ma sát $= \gamma \dot{x} + F_{ATT} sign(\dot{x})$

γ = hệ số ma sát nhớt

F_{ATT} = Lực ma sát Culông

Lượng rò có thể được mô hình hóa như dòng qua trở thủy lực trong các điều kiện chảy tầng ở trạng thái ổn định:

$$R = \frac{\Delta P}{Q} \tag{20.45}$$

trong đó:

R: trở thủy lực

Q: lưu lượng dòng chảy

ΔP: độ chênh áp suất

Trong trường hợp của một ống hình khuyên, ta có:

$$Q = \frac{\pi D h^3 (1 + 1.5\varepsilon^2)}{12 \mu l} \Delta P \tag{20.46}$$

trong đó:

D: đường kính mặt trong của xi lanh

h: độ sâu khe hở = $(D - d)/2$

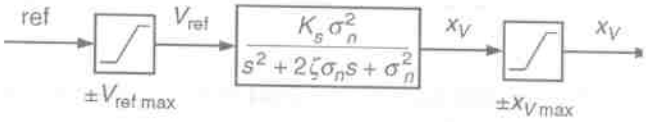
d: đường kính ngoài của piston

ε: độ lệch tâm = $2e/(D - h)$

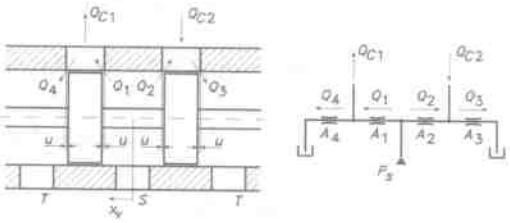
e: khoảng cách giữa trục xi lanh và trục piston

μ: độ nhớt động

l: độ dài khe hở



HÌNH 20.110 Sơ đồ khối của van



HÌNH 20.111 Sơ đồ tương đương biểu diễn lưu lượng dòng chảy qua van tỉ lệ

Đặc tính động của bộ chuyển đổi điện cơ và của con trượt có mô hình tuyến tính bậc hai giữa giá trị đặt và vị trí con trượt x_V, biểu thị như hình 20.110, trong đó K_S (m/V) là hệ số tĩnh của van, σ_n (rad/s) là tần số riêng của van và ζ là hệ số tắt dần của van.

Lưu lượng điều chỉnh bởi các van tỉ lệ được minh họa chi tiết trong sơ đồ hình 20.111. Ta có, các diện tích xác định A_1, A_2, A_3, A_4, hàm của dịch chuyển van x_V trên cơ sở hình học cơ bản, lưu lượng dịch chuyển qua van là hàm của áp suất được tính theo:

$$Q_1 = A_1 C_d sign(P_S - P_1)\sqrt{\frac{2}{\rho}|P_S - P_1|} \tag{20.47}$$

$$Q_4 = A_4 C_d sign(P_1 - P_T)\sqrt{\frac{2}{\rho}|P_1 - P_T|} \tag{20.48}$$

$$Q_2 = A_2 C_d sign(P_2 - P_T)\sqrt{\frac{2}{\rho}|P_S - P_2|} \tag{20.49}$$

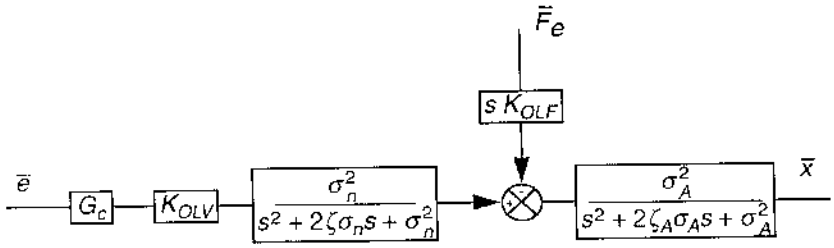
$$Q_3 = A_3 C_d sign(P_2 - P_T)\sqrt{\frac{2}{\rho}|P_2 - P_T|} \tag{20.50}$$

trong đó P_S: áp suất nguồn, P_T: áp suất xả về thùng chứa, C_d là hệ số xả (xem mục 10.3) qua các cửa định lượng. Do đó, ta có:

$$Q_{C1} = Q_1 - Q_4 \tag{20.51}$$

$$Q_{C2} = Q_3 - Q_2 \tag{20.52}$$

Hệ các phương trình đưa ra ở trên có thể tuyến tính hóa ở lân cận điểm làm việc, xác định bởi diện tích thông qua của van A_{V0}, chênh áp do tải $P_{L0} = P_1 - P_2$ và vị trí x_0 của piston.



HÌNH 20.112 Sơ đồ khối mô hình tuyến tính hóa của hệ servo thuỷ lực điều khiển vị trí

Với giả thiết độ rò không đáng kể, sơ đồ của hệ tuyến tính hóa được chỉ ra trên hình 20.112 với:

G_C hàm truyền của phần bù [V/V]

$K_{QLV} = \dfrac{K_S K_Q A_C}{A_C^2 - K_{PQ}\gamma}$ hệ số khuếch đại tốc độ tĩnh $\left[\dfrac{m/s}{V}\right]$

$K_{TP} = K_R$ khuếch đại tĩnh của cảm biến vị trí [V/m]

$K_{QLF} = \dfrac{K_{PQ}}{A_C^2 - K_{PQ}\gamma}$ hằng số lực $\left[\dfrac{m}{sN}\right]$

σ_n tần số riêng của van tỉ lệ [rad/s]

ζ hệ số giảm chấn của van tỉ lệ

$\sigma_A = \sqrt{\dfrac{C_0}{M}\left[1 - \left(K_{PQ}\gamma / A_C^2\right)\right]}$ tần số cộng hưởng thuỷ lực [rad/s]

$\zeta_A = \dfrac{\gamma - \left(MK_{PQ}C_0 / A_C^2\right)}{2\sqrt{C_0 M\left[1 - \left(K_{PQ}\gamma / A_C^2\right)\right]}}$ hệ số giảm chấn thủy lực

$\tau = \dfrac{A_C^2}{C_0 K_{PQ}}$ hằng số thời gian của nhiễu lực [s]

trong đó:

$K_S = \dfrac{A_{V\max}}{V_{\max}}$ hệ số tĩnh van tỉ lệ $\left[\dfrac{m^2}{V}\right]$

$K_Q = \left.\dfrac{\partial Q}{\partial A_V}\right|_{A_0, P_{L0}}$ hệ số khuếch đại lưu lượng van tỉ lệ $\left[\dfrac{m^3}{sm^2}\right]$

A_C diện tích piston [m^2]

$K_Q = \left.\dfrac{\partial Q}{\partial P_L}\right|_{A_0, P_{L0}}$ hệ số khuếch đại lưu lượng-áp suất van tỉ lệ $\left[\dfrac{m^3}{sPa}\right]$

γ hệ số ma sát nhớt $\left[\dfrac{N}{s/m}\right]$

$C_0 = \dfrac{4\beta A_C^2}{V_T}$ độ cứng thủy lực ở vị trí giữa [N/m]

V_T tổng thể tích của hai khoang [m^3]

M khối lượng các phần di chuyển [kg]

Hàm truyền vòng hở:

$$G_{OL} = \frac{V_{RET}}{e} = G_C \cdot K_{OLV} \cdot K_{TP} \frac{\sigma_n^2}{s^2 + 2\zeta\sigma_n s + \sigma_n^2} \cdot \frac{\sigma_A^2}{s^2 + 2\zeta_A\sigma_A s + \sigma_A^2} \cdot \frac{1}{s} \tag{20.53}$$

Giả thiết G_C là hằng số, hệ số khuyếch đại tĩnh của vòng hở sẽ là:

$$K_0 = G_C \cdot K_{OLV} \cdot K_{TP} = \frac{G_C K_S' K_Q A_C K_{TP}}{A_C^2 - K_{PQ}\gamma} \tag{20.54}$$

Hàm truyền của vòng kín là:

$$\begin{aligned} G_{CL} = \frac{x}{X_{set}} &= \frac{K_R G_C K_{OLV} \sigma_n^2 \sigma_A^2}{(s^2 + 2\zeta\sigma_n s + \sigma_n^2)(s^2 + 2\zeta_A\sigma_A s + \sigma_A^2)s + G_C K_{OLV}\sigma_n^2\sigma_A^2 K_{TP}} \\ &= \frac{1}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} \end{aligned} \tag{20.55}$$

trong đó:

$$a_5 = \frac{1}{\sigma_n^2\sigma_A^2 K_0}, \qquad a_4 = \frac{2}{\sigma_n\sigma_A K_0}\left(\frac{\zeta_A}{\sigma_n} + \frac{\zeta}{\sigma_A}\right)$$

$$a_3 = \frac{1}{K_0}\left(\frac{1}{\sigma_n^2} + \frac{4\zeta_A\zeta}{\sigma_n\sigma_A} + \frac{1}{\sigma_A^2}\right), \qquad a_2 = \frac{2}{K_0}\left(\frac{\zeta}{\sigma_n} + \frac{\zeta_A}{\sigma_A}\right), \qquad a_1 = \frac{1}{K_0}$$

Hàm truyền giữa đầu ra và nhiễu ngoại lực, "độ nhún" động là:

$$G_{FCL} = \frac{x}{F_e} = \frac{K_{QLF}(\tau s - 1)(s^2 + 2\zeta\sigma_n s + \sigma_n^2)\sigma_A^2}{(s^2 + 2\zeta\sigma_n s + \sigma_n^2)(s^2 + 2\zeta_A\sigma_A s + \sigma_A^2)s + G_C K_{QLV}\sigma_n^2\sigma_A^2 K_{TP}} \quad (20.56)$$

"Độ nhún" tĩnh là:

$$\left.\frac{x}{F_e}\right|_{s=0} = \frac{K_{QLF}}{G_C K_{QLV} K_{TP}} = \frac{K_{PQ}}{G_C K_S' K_Q A_C K_{TP}} = \frac{1}{G_C K_S' K_P A_C K_{TP}} \quad (20.57)$$

đặt:

$$K_{PQ} = \frac{K_Q}{K_P}, \quad K_P = \left.\frac{\partial P_L}{\partial A_V}\right|_{A_V = A_{V0}, P_{L0}} \text{ hệ số áp suất} \quad \left[\frac{Pa}{m^2}\right]$$

Cuối cùng, độ cứng tĩnh xác định bởi:

$$\left.\frac{F_e}{x}\right|_{s=0} = G_C K_S' K_P A_C K_{TP} \quad (20.58)$$

Hằng số thời gian chủ đạo suy từ hàm truyền vòng kín là hệ số $a_1 = 1/K_0$.

Kết luận:

- Hệ số khuếch đại tốc độ K_{QLV}, hệ số khuếch đại tĩnh vòng hở K_0 phụ thuộc đáng kể vào hệ số khuếch đại tỉ lệ lưu lượng K_Q và tăng khi K_Q tăng. K_Q tăng khi P_S tăng, giảm khi ΔP_{L0} tăng và không biến thiên với A_{V0}. Với giả thiết γ dưới 1000 Ns/m, tác động của K_{PQ} không lớn, thực tế không đáng kể.
- Hằng số lực K_{QLF} phụ thuộc hệ số khuếch đại lưu lượng-áp suất K_{PQ} và tăng theo K_{PQ}. $|K_{PQ}|$ tăng với A_{V0} và với ΔP_{L0}, giảm khi P_S tăng; do vậy $|K_{QLF}|$ giảm khi P_S tăng. Độ rò dẫn tới tăng K_{QLF}.
- Độ cứng tĩnh phụ thuộc nhiều vào độ khuếch đại áp suất của van và tăng theo thông số này. Do hệ số K_P giảm theo độ rò dẫn tới giảm độ cứng tĩnh. Hơn nữa, do $|K_{PQ}|$ tăng với A_{V0} trong khi K_Q không biến thiên theo A_{V0}, độ khuếch đại áp suất giảm khi A_{V0} tăng, vì vậy độ cứng tĩnh giảm nếu van làm việc với các điều kiện mở hơn. Hơn nữa, dựa vào $|K_{PQ}|$ giảm khi P_S tăng, trong khi K_Q tăng khi P_S tăng, hệ số khuếch đại áp suất tăng khi P_S tăng, do đó độ cứng tĩnh tăng với P_S.
- Tần số cộng hưởng thủy lực tăng với độ cứng thủy lực C_0 và giảm khi khối lượng M tăng. Thực tế nó không bị ảnh hưởng bởi hệ số khuếch đại lưu lượng-áp suất K_{PQ} nếu $\gamma < 1000$ Ns/m.
- Dễ thấy hằng số thời gian chủ đạo tỉ lệ nghịch với hệ số khuếch đại tốc độ, giảm khi K_Q tăng, hệ số K_Q giảm khi P_S tăng, tăng khi ΔP_{L0} tăng, không thay đổi khi A_{V0} biến thiên.

Hệ thống chấp hành khí nén

Giống các hệ thống thuỷ lực, hệ thống chấp hành khí nén bao gồm các thành phần:

- Hệ thống tạo khí nén, bao gồm máy nén, hệ thống làm mát, hệ thống sấy (có thể có hoặc không), bình chứa và các bộ lọc đầu vào và đầu ra;
- Bộ phận xử lý khí nén, thông thường bao gồm bộ FRL (bộ lọc, bộ điều chỉnh áp suất, có thể có cả hệ thống bôi trơn) cho phép lọc và điều chỉnh cục bộ áp suất cung cấp đến van chấp hành;
- Van điều chỉnh năng lượng khí nén;
- Cơ cấu chấp hành, thực hiện biến đổi năng lượng khí nén thành năng lượng cơ;
- Ống dẫn;
- Các cảm biến và các bộ biến đổi;

- Hệ thống hiển thị, đo lường các đại lượng vật lý và các thiết bị điều khiển.

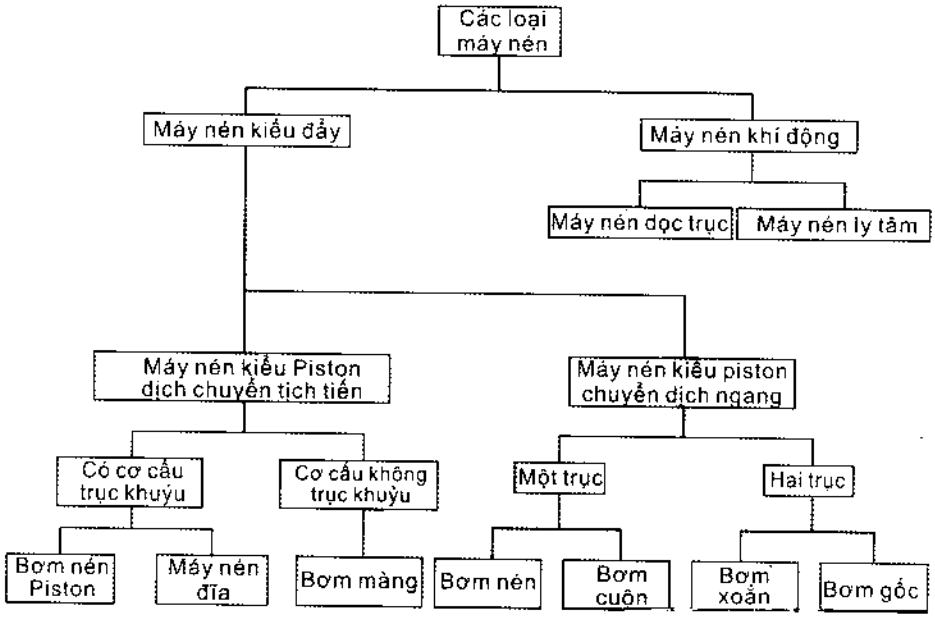
Một số thiết bị của hệ thống chấp hành khí nén như máy nén, các bộ phận xử lý và một số van được sử dụng trong các hệ servo khí nén sẽ được mô tả dưới đây. Các cơ cấu chấp hành có chức năng và cấu tạo tương tự như các cơ cấu chấp hành thuỷ lực, do áp suất làm việc thấp hơn, cho nên chúng được chế tạo nhẹ hơn một chút.

Máy nén

Các loại máy nén sử dụng để tạo ra khí nén được tổng kết trong hình 20.113. Trong các máy nén thể tích, chất khí được hút bằng van vào buồng nén nơi mà thể tích bị giảm làm cho chất khí bị nén. Khi đạt đến một áp suất định trước van cấp khí mở để dẫn khối khí đến nơi sử dụng.

Ngược lại, các máy nén khí động hay các máy tuabin nén khí, động năng được biến đổi thành áp lực truyền cho chất khí do quay bánh công tác.

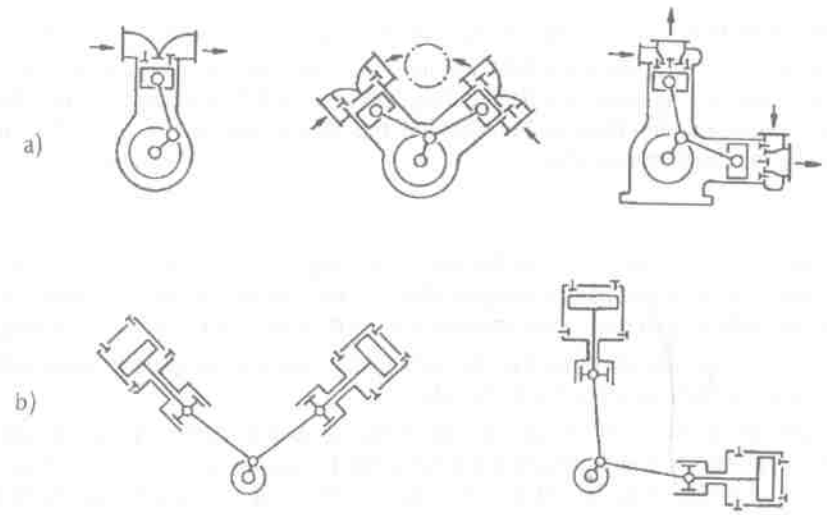
Các máy nén piston nén chất khí nhờ chuyển động của piston, chuyển động này gây ra bởi một thanh nối piston và cơ cấu trục khuỷu thanh truyền, bên trong một xi lanh kín khí. Chúng có thể là dạng tác động một hướng hoặc hai hướng, với một hay nhiều piston và một hay nhiều cấp. Chúng có thể đạt tới áp suất hàng trăm bar, trong trường hợp nhiều cấp và lưu lượng dòng khí là hàng nghìn mét khối khí mỗi giờ, trong trường hợp nhiều xi lanh. Các máy nén dạng cánh gạt có một rôto, đặt lệch tâm với trục của stato, do đó một số cánh có thể chuyển động theo hướng kính.



HINH 20.113 Phân loại các máy nén khí

Trong chuyển động quay liên tục của rôto, các cánh được lực ly tâm đẩy sát vào stato, ngăn cách thành các khoang riêng biệt, thể tích các khoang này thay đổi theo hành trình góc, đảm bảo khí nén hút vào ở một đầu và đẩy ra ở đầu còn lại. Áp suất nén là dưới 15 bar, với lưu lượng lớn nhất là 500m^3/h. So với các máy nén piston chuyển động qua lại, các máy nén loại này có độ ồn, độ rung thấp hơn, độ xung động dòng ít hơn, nhỏ gọn hơn.

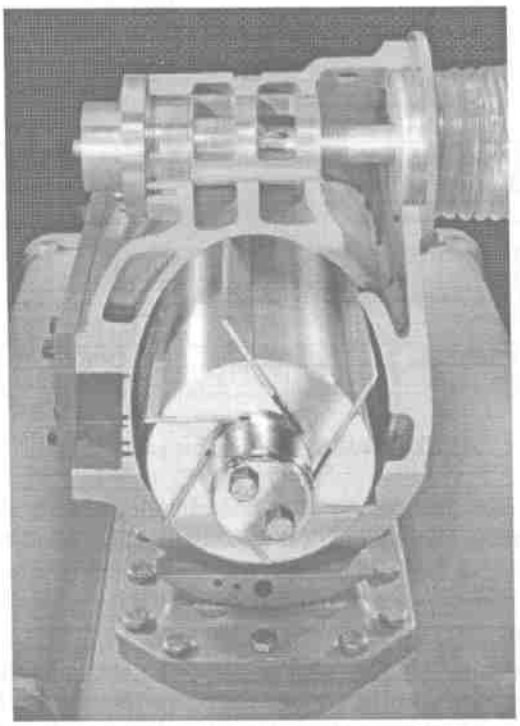
Các máy nén dạng xoắn có hai rôto quay ngược chiều nhau phía trong stato, một cùng chiều với các vấu (cam) lồi, một cùng chiều với các vấu (cam) lõm. Sự kết hợp các biên dạng của hai rôto làm giảm thể tích trong hành trình quay và nén khí. Với áp suất phổ biến là dưới 15 bar, dòng khí liên tục được cung cấp, đạt giá trị lên tới 3000 m^3/giờ.



HÌNH 20.114 Các máy nén piston: (a) tác động một hướng, (b) tác động hai hướng

Tương tự như vậy, các máy nén "Roots", cũng được xem như các máy siêu nạp, được lắp hai rôto hình số 8 quay ngược phía trong stato sao cho khí được truyền từ đầu vào tới đầu ra. Hiệu suất của các máy nén dạng này thấp do khe hở giữa bản thân hai rôto, giữa các vấu và stato, vì vậy chúng được sử dụng cho các áp suất nén thấp, dưới 2 bar. Tuy nhiên, chúng cho phép hoạt động mà không phải bôi trơn, giống như các máy nén xoắn, do đó thu được khí không có dầu.

Hai dạng máy nén hướng trục và hướng kính được sử dụng để tạo ra các luồng khí nén có lưu lượng từ vài nghìn đến 100 000 m^3/h.



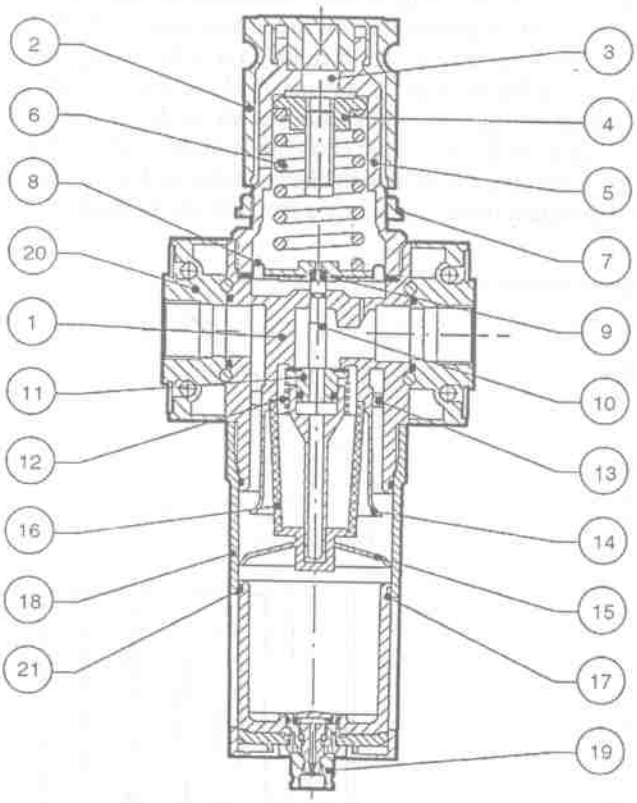
HÌNH 20.115 Máy nén cánh quay (Preumofore)

Các bộ xử lý khí nén

Nguồn cung cấp khí nén đến hệ thống tuỳ động (servosystem) thường qua một bộ phận xử lý khí tại chỗ, bao gồm một bộ lọc, được nối với một mạng lưới cung cấp và phân phối khí, một bộ điều chỉnh áp suất, đôi khi kèm theo một bộ tra dầu mỡ *L*. Hình 20.116 là một ví dụ về một bộ tích hợp lọc và điều chỉnh áp suất. Đầu tiên, khí được đưa qua bộ lọc và được lọc bởi một bộ phận làm lệch dòng, các tạp chất lỏng và rắn sẽ đập vào vỏ 18, lắng xuống đáy 17, đồng thời được lọc bởi tác dụng của màng đáy hình nón 15, được đặt dưới khối lọc hình trụ 16 bằng đồng thiêu kết có nhiều lỗ nhỏ hoặc bằng vải. Sau đó, khí đã được lọc lan truyền đến đầu vào của bộ điều chỉnh áp suất, tạo bởi cửa van 11 trong trạng thái cân bằng về áp lực nén. Việc điều khiển áp suất sau cửa van được xác định bởi vị trí của cửa van 11 chính để điều khiển dòng ra. Khe hở được đóng khi áp lực do áp suất sau cửa van, tác động lên màng ngăn 9 gắn với thanh truyền 10, cân bằng với áp lực từ phía lò xo 6. Độ nén của lò xo 6 được xác lập bằng cách vặn vít điều chỉnh 3. Ngược lại, nếu áp suất khí nén thấp hơn mức yêu cầu, luồng khí sẽ được điều khiển theo hướng bù áp suất cho đến khi cửa van 11 được đóng trở lại, khi đạt áp suất yêu cầu. Trường hợp nếu áp suất điều tiết cao hơn mức yêu cầu thì một khe hở sẽ được mở giữa vùng sử dụng và cửa xả.

Các van khí nén

Các van khí nén có chức năng tương tự với các van được sử dụng trong các hệ thống thuỷ lực đã mô tả ở trên. Đặc biệt, điều này cũng phù hợp đối với các van định hướng dạng số và dạng tỉ lệ. Thậm chí trong các hệ thống khí nén cũng có các van phân phối dạng con trượt hoặc dạng cửa có hai, ba, bốn đường với hai hay ba vị trí làm việc và được thao tác bằng tay, cơ khí, khí nén hoặc điện.



HÌNH 20.116 Bộ lọc khí nén kết hợp với van giảm áp (Metal Work)

Các van tỉ lệ lưu lượng về thực chất là tương tự như các van thuỷ lực và có thể dùng được với cả bộ biến đổi cơ điện mômen quay (động cơ mômen) hoặc cơ cấu cuộn cảm servo tác động trực tiếp lên con trượt. Tương tự như các van nói trên, để điều khiển dòng khí người ta cũng sử dụng các van hai, ba đường điều khiển số bằng điện, các tín hiệu điều khiển được điều chế bằng phương pháp điều chế độ rộng xung PWM (pulse width modulation), điều biến tần số xung PFM (pulse frequency modulation), điều biến mã xung PCM (pulse code modulation), điều chế số lượng xung PNM (pulse number modulation) hoặc kết hợp các phương pháp trên.

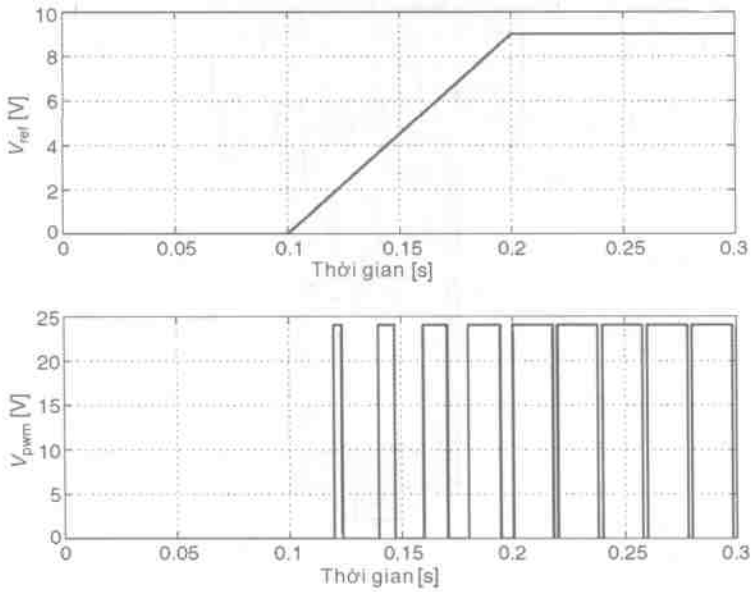
Cho đến khi các van điều áp được quan tâm, các van tỷ lệ áp suất ba đường đã có thể dùng được đối với cơ cấu chấp hành khí nén cho phép biến đổi tín hiệu điện đã chuẩn hoá đầu vào thành áp suất điều khiển ở đầu ra với đặc tính động tốt và độ chính xác cao.

Các van điều chế độ rộng xung PWM

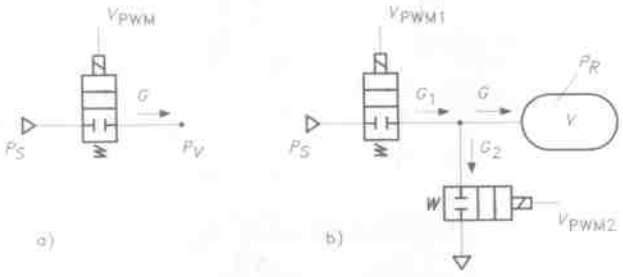
Cấu tạo của các van PWM tương tự như các van số điều khiển bằng điện, nhưng sử dụng kỹ thuật điều chế độ rộng các xung gửi tới cuộn dây để điều khiển tỷ lệ dòng khí cung cấp. Ở dạng điều khiển này, tín hiệu đặt của điện áp đầu vào có dạng tín hiệu tương tự V_{REF} (ví dụ 0-10V) được biến đổi thành tín hiệu số V_{PWM} (ON/OFF) bằng một bộ chuyển đổi riêng. Thông thường (tuỳ sự lựa chọn), tín hiệu điều biến được tạo trực tiếp từ một bộ điều khiển số, giống như PLC.

Hình 20.117 mô tả nguyên lý hoạt động của PWM. Tín hiệu điện áp số đưa đến cuộn dây được điều chỉnh bởi một chuỗi xung, với biên độ, chu kỳ T không đổi, nhưng có độ rộng t của mỗi xung là một hàm tuyến tính của giá trị điện áp tham chiếu. Giá trị mở trung bình của van là một hàm của độ rộng xung t, cụ thể là của tỷ số thời gian hiệu dụng t/T. Các van PWM nói chung không có hồi tiếp, nên áp lực sau van và lưu lượng khí phụ thuộc loại mạch khí nén hiện thời.

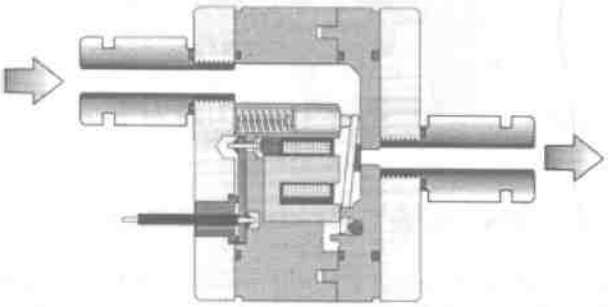
Hình 20.118 chỉ ra hai sơ đồ mô tả nguyên lý hoạt động của các van hai đường hai vị trí, với PWM, được sử dụng như một bộ điều chỉnh lưu lượng khí (hình 20.118 (a)) và bộ điều chỉnh áp suất (hình 20.118 (b)). Trong mô hình a, van điều khiển tỉ lệ lưu lượng khí đi qua hai điểm, điểm cung cấp có áp suất P_S và điểm sau van có áp suất P_V được duy trì không đổi (ổn định). Trong trường hợp này, lưu lượng chỉ là hàm của độ mở van và do đó là một hàm có dạng tuyến tính. Trong mô hình b, các van được đặt theo hình chữ thập là ví dụ về điều khiển áp suất P_R trong một bình có thể tích khí V, tương ứng với việc điều chỉnh lưu lượng khí vào G_1 và ra G_2. gradien theo thời gian của áp suất điều khiển tương ứng với lưu lượng G vào bình chứa.



HÌNH 20.117 Các tín hiệu đầu vào và đầu ra điều chế độ rộng xung PWM



HÌNH 20.118 Các van dạng số điều chế độ rộng xung PWM: (a) điều chỉnh lưu lượng, (b) điều chỉnh áp suất



HÌNH 20.119 Van dạng cửa kiểu số, hai đường

Các tham số ảnh hưởng đến việc điều chỉnh tắt/bật nhờ van điều chế độ rộng xung PWM bao gồm:

- Thời gian van đóng và mở
- Sự phụ thuộc của áp suất sau van và sau van vào số lần mở/đóng
- Kích cỡ van
- Chu kỳ T hay tần số sóng mang điều chế $f = 1/T$
- Tuổi thọ của van

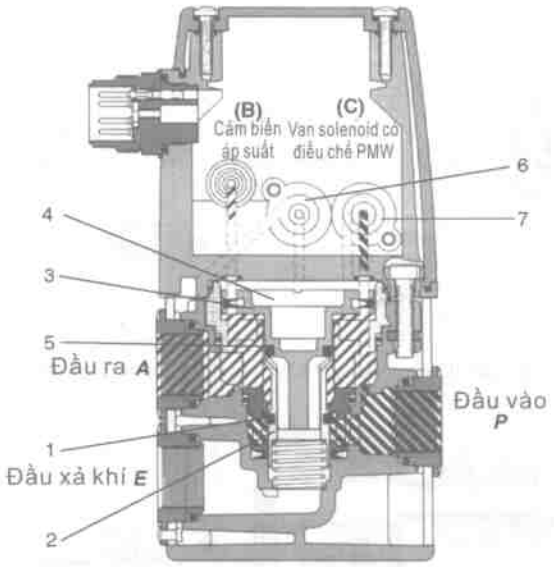
Dạng van đóng/mở này có những đặc tính trái ngược nhau như số lần đóng/mở nhỏ nhưng lưu lượng khí qua van lại lớn, do đó khi thiết kế hệ thống luôn luôn cần có sự dung hoà giữa một bên là độ phân giải điều khiển và tuyến tính tốt và một bên là đáp ứng động học nhanh.

Trong các ứng dụng cơ cấu servo khí nén, dải tần số sóng mang $f = 1/T$ thường nằm trong khoảng 20 đến 100 Hz, với thời gian đóng/mở của các van là từ 1 ÷ 5 ms.

Hình 20.119 mô tả van thường đóng 2/2, van này đảm bảo thời gian mở của van là nhỏ nhất (dưới 1ms). Các đặc tính thu được do giảm khối lượng các phần chuyển động, với việc sử dụng một van dạng cửa (poppet) nối với một thanh dao động nhỏ, khử được hầu hết ma sát giữa các phần có chuyển động tương đối.

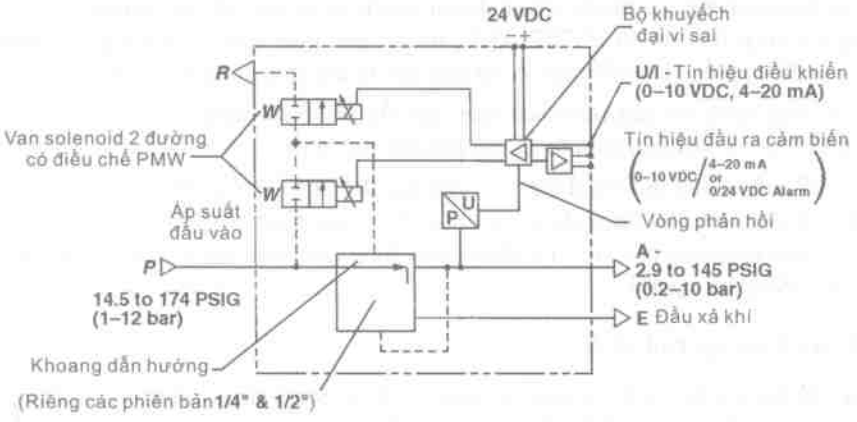
Các van điều chỉnh áp suất tỷ lệ

Các van này thường là van ba đường, với cửa đôi hoặc con trượt. Nguyên lý hoạt động của các van dạng cửa giống như các van điều chỉnh áp suất. Tương tự như các bộ điều chỉnh áp suất, ở van dạng cửa sự ngăn cách môi trường áp suất cao và môi trường áp suất điều chỉnh là nhờ trạng thái cân bằng giữa áp lực tạo bởi áp suất điều chỉnh và áp lực do khối điều khiển tạo ra. Áp lực này có thể là lực của phần ứng cuộn cảm servo hoặc do áp suất điều khiển bởi khối điều khiển tác động lên piston hoặc lên màng chắn nối với cửa van.



HÌNH 20.120 Van áp suất theo tỷ lệ (Parker)

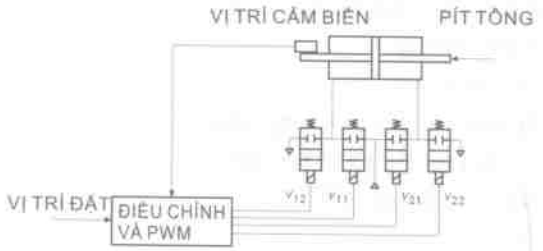
Hình 20.120 chỉ ra một ví dụ về van áp suất tỉ lệ với cửa đôi. Các cổng tương ứng với áp suất đầu vào, áp suất đầu ra và đầu xả khí lần lượt được ký hiệu là P, A và E. Trong hình vẽ, cửa van 2 đang ở điểm cuối hành trình của nó, vòng bịt kín 1 nằm đối diện với vị trí cố định. Tương tự, cửa van điều chỉnh 3 liên hệ với cửa van 2 bởi vòng bịt kín 5. Độ mở giữa cổng P và cổng A được xác định bởi sự cân bằng lực tác động lên piston của cửa van 3, cụ thể là lực F_R do áp suất chỉ huy P_R trong khoang dẫn hướng 4 tác dụng xuống, lực F_C do tác động của áp suất điều chỉnh P_C ở đầu ra tác dụng, hướng lên. Nếu $F_R = F_C$, các phần di chuyển trên van ở các vị trí như trên hình vẽ, do đó áp suất điều chỉnh P_C của khoang độc lập với phần nguồn và phần xả. Nếu $F_R > F_C$ thì 2 cửa van di chuyển hướng xuống và khe hở mở ra và chuyển khối khí tới đầu ra và cân bằng lại P_C ở một giá trị xác định. Trong trường hợp ngược lại, nếu $F_R < F_C$, cửa van điều chỉnh di chuyển lên, nhưng khi giữ nguyên vị trí điểm cuối hành trình của nó, vòng kín 5 mở và cho phép khối khí chuyển từ cổng A tới cửa xả E.



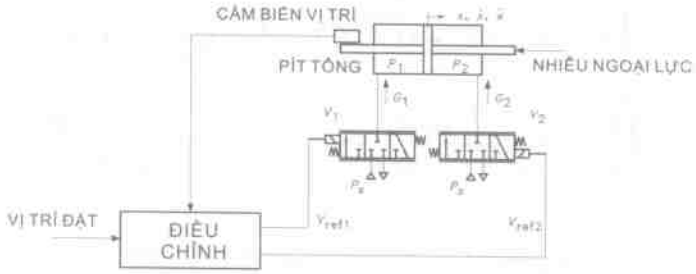
HÌNH 20.121 Sơ đồ điều khiển khí nén của van áp suất theo tỷ lệ

Trong hình 20.120, 6 và 7 là các van PWM mở/đóng để điều chỉnh áp suất chỉ huy P_R của khoang dẫn hướng 4. Sơ đồ điều khiển khí nén của van được chỉ ra trong hình 20.121. Các van

PWM, hai đường nhận tín hiệu điều biến từ khối điều chỉnh. Chúng gồm một đường điều khiển lưu lượng vào khoang 4 (hình 20.120), một đường điều khiển lưu lượng xả ra. Bằng tác động tương ứng, tín hiệu điều khiển được chuyển sang tín hiệu áp suất tỉ lệ.



Hình 20.122 Sơ đồ một hệ thống servo khí nén với các van số hai đường



Hình 20.123 Sơ đồ một hệ thống servo khí nén với các van tỉ lệ ba đường

Mô hình hoá hệ thống servo khí nén

Sơ đồ của một hệ thống servo khí nén có khả năng điều khiển vị trí, tốc độ, lực có thể tương tự như hệ thống chấp hành thuỷ lực mô tả trong hình 20.109. Tín hiệu của bộ chuyển đổi các đại lượng xác định, cần phải được hồi tiếp theo một mạch vòng kín, phụ thuộc đại lượng được điều khiển.

Trong sơ đồ hình 20.122, vị trí trục của piston, hồi tiếp bằng bộ cảm biến vị trí, được xác định bằng cách điều khiển áp suất buồng nén 1 và 2 do các van lưu lượng tỉ lệ. Vị trí đặt được so sánh với tín hiệu hồi tiếp và sai số được bù bằng một bộ điều chỉnh. Tùy theo độ mở van cần có, tín hiệu được gửi đến các van điều chỉnh, cấp khí nén cho các buồng của piston (giả thiết là đối xứng). Áp lực tác dụng lên bề mặt của piston sẽ chống lại ngoại lực. Giả thiết sơ đồ điện có bốn van số với hai đường ống, điều khiển bằng điện. Giải pháp này cho phép sử dụng các van kích thước nhỏ, tạo ra dải thông rộng phù hợp với yêu cầu về dải thông của cả hệ thống servo khí nén. Ở phương pháp này, tỷ lệ mở của các van được điều chỉnh bằng phương pháp điều chế độ rộng xung tín hiệu số. Mỗi cặp van V_{11}, V_{12} và V_{21},V_{22} tạo thành một van ba đường ở đầu ra kết nối với các khoang của piston, do đó sơ đồ hình 20.122 có thể được xem như tương đương với sơ đồ hình 20.123 với các van ba đường điều khiển tương tự V_1 và V_2.

Mô hình xi lanh được mô phỏng bằng một hệ ba phương trình vi phân, hai phương trình liên tục của khối không khí trong các khoang và một phương trình trạng thái cân bằng động.

Ký hiệu các đại lượng như sau (chỉ số dưới 1 và 2 tương ứng với các khoang 1 và 2 của piston):

A diện tích lên piston

F_e nhiễu của ngoại lực lên cần của piston

G lưu lượng khối không khí vào khoang

M khối lượng các phần di động của piston
n chỉ số đa biến của chất khí
P áp suất trong khoang xi lanh
P_i áp suất ban đầu trong khoang xi lanh
P_{amb} áp suất môi trường
R hằng số không khí
T_i nhiệt độ ban đầu trong khoang xi lanh
x vị trí tay đòn so với giá trị ban đầu là x_0
x_0 nửa hành trình piston
x_m dải chết
γ hệ số ma sát nhớt

Các phương trình liên tục (bảo toàn khối lượng) và phương trình cân bằng động sẽ là:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{G_1 nRT_{1i}}{A_1(x_0 + x_{m1} + x)(P_1 / P_{1i})^{(1-n)/n}} - \frac{P_1 n}{(x_0 + x_{m1} + x)} \frac{dx}{dt} \tag{20.58}$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{G_1 nRT_{2i}}{A_2(x_0 + x_{m2} - x)(P_1 / P_{2i})^{(1-n)/n}} - \frac{P_2 n}{(x_0 + x_{m2} - x)} \frac{dx}{dt} \tag{20.59}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{(P_1 - P_{amb})A_1 - (P_2 - P_{amb})A_2 - F_c - \gamma dx/dt}{M} \tag{20.60}$$

Van lưu lượng tỉ lệ V_1 được mô hình hoá như một trở khí nén biến đổi. Các phương trình được sử dụng để tính toán tốc độ khối khí G qua điện trở khí nén, được đặc trưng bởi một hệ số dẫn C và tỷ lệ tới hạn b, phù hợp với chuẩn ISO 6358, liên kết với hai môi trường A và B, với các áp suất tương ứng P_A và P_B, theo chiều dương từ A đến B là:

Luồng tốc độ âm thanh:

$$G = \rho_0 P_A C \qquad 0 < \frac{P_B}{P_A} \le b \tag{20.61}$$

Luồng dưới (tốc độ) âm thanh:

$$G = \rho_0 P_A C \sqrt{1 - \left(\frac{P_B / P_A - b}{1 - b}\right)^2} \qquad b < \frac{P_B}{P_A} \le 1 \tag{20.62}$$

Luồng tốc độ âm thanh:

$$G = -\rho_0 P_B C \text{ với } 0 < \frac{P_B}{P_A} \le b \tag{20.63}$$

Luồng dưới (tốc độ) âm thanh:

$$G = -\rho_0 P_B C \sqrt{1 - \left(\frac{P_A / P_B - b}{1 - b}\right)^2} \text{ với } b < \frac{P_A}{P_B} \le 1 \tag{20.64}$$

Giả sử có một tín hiệu lưỡng cực, giả thiết là $V_{ref} > 0$ tương ứng vùng nối nguồn cung cấp và vùng làm việc, $V_{ref} < 0$ tương ứng vùng nối vùng làm việc và cửa xả. Phương trình tương ứng của dòng khí cũng phải được viết lại theo cách trên.

Việc tính toán hệ số của van tỉ lệ lưu lượng sẽ dựa trên phương trình mô hình hoá bậc hai có dạng dưới đây trong đó thể hiện mối liên kết tĩnh và động giữa điện áp tham chiếu V_{ref} và độ mở phù hợp của khe hở A_v:

$$\frac{d^2Av}{dt^2} + 2\zeta\sigma_n \frac{dA_v}{dt} + \sigma_n^2 A_v = K_s\sigma_n^2 V_{ref} \tag{20.65}$$

trong đó ξ là hệ số giảm chấn, σ_n là tần số dao động riêng của van, K_s là hệ số khuếch đại tĩnh.

Giả thiết quan hệ tĩnh giữa độ mở A_V và hệ số C là tuyến tính như là bước xấp xỉ đầu tiên, ta có:

$$C = K_c A_v = K_c K_s V_{ref} = K_V V_{ref} \tag{20.66}$$

trong đó K_V là hệ số khuếch đại tĩnh lưu lượng của van, hàm hệ số dẫn lớn nhất C_{max} và giá trị lớn nhất của điện áp tham chiếu $V_{ref\,max}$:

$$K_V = \frac{C_{max}}{V_{ref\,max}} \tag{20.67}$$

Khi đó quan hệ giữa điện áp đặt và hệ số dẫn là:

$$\frac{d^2C}{dt^2} + 2\zeta\sigma_n \frac{dC}{dt} + \sigma_n^2 C = K_c\sigma_n^2 V_{ref} \tag{20.68}$$

Mô hình phi tuyến của hệ thống servo khí nén với vị trí đặt x_{set} và nhiễu lực F_e là đầu vào, là hệ phi tuyến với chín phương trình, tính chung là bậc 8, có dạng:

a)	$C_1 = C_1(V_{ref\,1}, t)$	bậc 2	hệ số dẫn của van V_1 (xem (20.68))
b)	$C_2 = C_2(V_{ref\,2}, t)$	bậc 2	hệ số dẫn của van V_2 (xem (20.68))
c)	$G_1 = G_1(C_1, P_1)$	bậc 0	lưu lượng của van V_1 (xem (20.61)-(20.64))
d)	$G_2 = G_2(C_2, P_2)$	bậc 0	lưu lượng của van V_2 (xem (20.61)-(20.64))
e)	$G_1 = G_1(P_1, \dot{P}_1, x, \dot{x})$	bậc 1	phương trình liên tục 1 (xem (20.58))
f)	$G_2 = G_2(P_2, \dot{P}_2, x, \dot{x})$	bậc 1	phương trình liên tục 2 (xem (20.59))
g)	$\ddot{x} = \ddot{x}(F_e, P_1, P_2, \dot{x})$	bậc 2	Cân bằng piston (xem (20.60)
h)	$V_{ref\,1} = V_{ref\,1}(x_{set}, x_{ref})$	bậc 0	Điều khiển van V_1
i)	$V_{ref\,2} = V_{ref\,2}(x_{set}, x_{ref})$	bậc 0	Điều khiển van V_2

Nếu chúng ta muốn thực hiện một phân tích tuyến tính, có thể giả thiết rằng các phương trình a), b), g), h), i) đã được viết dưới dạng tuyến tính.

Khi xem xét lưu lượng của các van c), d) chúng được giả thiết là tốc độ dòng chảy ở đầu vào tại mỗi điểm thuộc chúng nằm trong vùng dưới âm tức là $V_{ref} > 0$ và tốc độ âm thanh ở vùng xả với $V_{ref} < 0$. Điều này có nghĩa rằng, áp suất phải nằm trong khoảng $bP_s < P_1 \le P_s$ ở phía cung cấp và trong khoảng $P_1 \le P_{amb}/b$ ở phía cửa xả. Giả sử $b = 0.3$, $P_s = 10$ bar, $P_{amb} = 1$ bar, ta thấy P_1 thay đổi trong khoảng 3.33 bar đến 10 bar. Tương tự như vậy cho P_2.

Tuyến tính hóa đường cong lưu lượng cung cấp với tốc độ dưới âm qua các điểm
($P_1 = P_s$, $G_1 = 0$) và ($P_1 = b_1 * P_s$, $G_1 = G_{1\,\text{âm thanh}}$) với hệ số góc K_{L1}, ta có:

$$G_1 = K_{L1}(P_s - P_1) \tag{20.69}$$

trong đó:

$$K_{11} = \frac{G_{1,sonic}}{P_s - b_1^* P_s} = \frac{\rho_n C_1 P_s}{P_s(1-b_1^*)} = \frac{\rho_n C_1}{1-b_1^*} \tag{20.70}$$

hoặc:

$$G_1 = \frac{\rho_n (P_s - P_1)}{(1-b_1^*)} C_1 \tag{20.71}$$

Trong lân cận $P_1 = P_{1r}$ và $C_1 = C_{1r} = 0$ (r là giá trị đặt), ta có:

$$G_1 = \frac{\rho_n (P_s - P_{1r})}{(1-b_1^*)} C_1 = K_{11} C_1 \tag{20.72}$$

Công thức (20.72) có nghĩa khi $V_{ref1} > 0$, $C_1 > 0$ với phép giải tích tương ứng.

Lưu lượng xả khí sẽ là:

$$G_1 = \rho_n C_1 P_1 \tag{20.73}$$

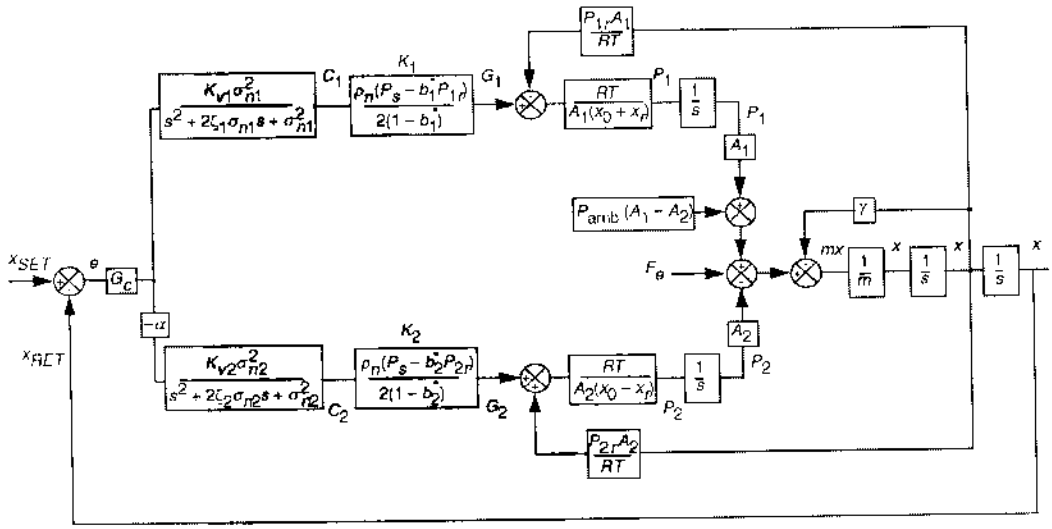
Lân cận $P_1 = P_{1r}$ sẽ là:

$$G_1 = \rho_n P_{1r} C_1 = K_{12} C_1 \tag{20.74}$$

Công thức (20.74) có ý nghĩa với $V_{ref1} < 0$, $C_1 < 0$ với phép giải tích tương ứng.

Tính trung bình K_{11} và K_{12} ta có hệ số K_{mean} xác định bởi:

$$K_{mean} = \frac{K_{11} + K_{12}}{2} = \frac{\rho_n (P_s - b_1^* P_{1r})}{2(1-b_1^*)} \tag{20.75}$$



Hình 20.124 Sơ đồ khối của mô hình tuyến tính của hệ servo khí nén với điều khiển vị trí

Lưu lượng tỉ lệ được tuyến tính hóa là hàm của C_1, do đó ta có:

$$G_1 = \frac{\rho_n (P_s - b_1^* P_{1r})}{2(1-b_1^*)} C_1 = K_1 C_1 \tag{20.76}$$

Tương tự với van 2, ta có:

$$G_2 = \frac{\rho_n (P_s - b_2^* P_{2r})}{2(1-b_2^*)} C_2 = K_2 C_2 \tag{20.77}$$

Phương trình liên tục của khối lượng trong buồng đốt piston *e*) và *f*), được tuyến tính quanh điểm đặt, xác định bởi:

$$x = x_r \qquad P_1 = P_{1r}, \quad P_2 = P_{2r},$$
$$\dot{P}_1 = \dot{P}_{1r} = 0, \qquad \dot{P}_2 = \dot{P}_{2r} = 0, \qquad \dot{x} = \dot{x}_r = 0$$
$$x_{m1} = x_{m2} = 0, \qquad n = 1$$

Suy ra:

$$G_1 = \frac{P_{1r} A_1}{RT} \dot{x} + A_1 \frac{x_0 + x_r}{RT} \dot{P}_1 \tag{20.78}$$

$$G_2 = \frac{P_{2r} A_2}{RT} \dot{x} + A_2 \frac{x_0 - x_r}{RT} \dot{P}_2 \tag{20.79}$$

Sơ đồ khối của mô hình tuyến tính chỉ ra trong hình 20.124.

Bằng cách dùng biến đổi Laplace của hệ thống của các phương trình tuyến tính, giả thiết các van giống nhau, ta có:

$$\bar{x} = \frac{\sigma_n^2}{(s^2 + 2\zeta\sigma_n s + \sigma_n^2)} \frac{\sigma_A^2}{(s^2 + 2\zeta_A \sigma_A s + \sigma_A^2)} G_c K_{OLV} \bar{e} - \frac{\sigma_A^2}{(s^2 + 2\zeta_A \sigma_A s + \sigma_A^2)} K_{OLF} s \bar{F}_e + C.I. \tag{20.80}$$

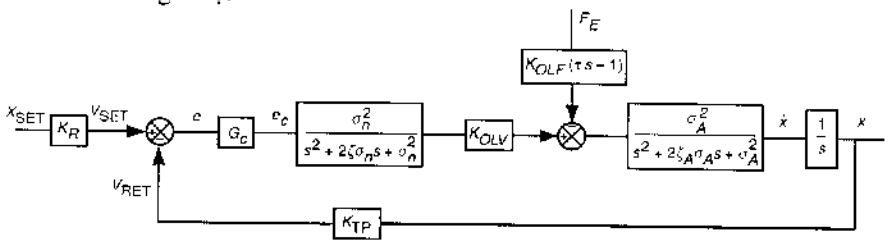
trong đó *C.I.* là các điều kiện đầu, K_{OLV} hệ số khuếch đại tốc độ tĩnh, K_{OLF} hệ số khuếch đại của nhiễu lực, $\sigma_A \xi_A$ và ξ_A tương ứng là tần số tự nhiên của cơ cấu chấp hành và hệ số giảm chấn và G_c thuật toán bù.

Kết quả này được chỉ ra trên sơ đồ khối hình 20.125. Hình 20.126, là sơ đồ vòng kín với phản hồi vị trí. Có thể thấy sự tương tự của sơ đồ này so với hệ thống thuỷ lực. Đặc biệt, giả thiết rằng:

$P_{1r} = P_{2r} = \delta P_s$ với $\delta \in 0.6 - 0.9$

$A_1 = A_2 = A$ cơ cấu chấp hành có hai thanh

$n = 1$ biến đổi đẳng nhiệt

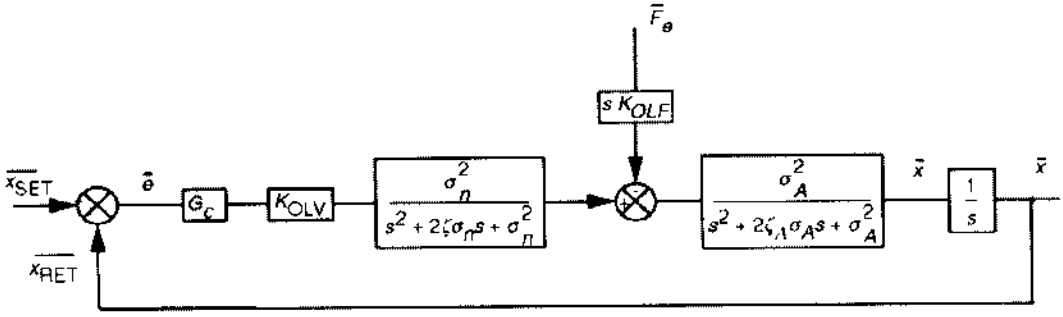


HÌNH 20.125 Sơ đồ khối của mô hình mạch hở

Chúng ta có thể mô tả các thông số chính của hệ thống servo khí nén:

$$K_{OLV} = \frac{RT\rho_n}{2} K_V \frac{1}{(1-b^*)} \frac{1}{A} \frac{(1/\delta - b^*)}{(1-b^*)} \tag{20.81}$$

$$K_{OLF} = \frac{x_0 [1 - (x_r / x_0)^2]}{2\delta P_s A} \tag{20.82}$$



HÌNH 20.126 Sơ đồ khối của mô hình vòng kín

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{2\delta P_s A}{x_0 m[1-(x_r/x_0)^2]}} \tag{20.83}$$

$$\zeta_A = \gamma\sqrt{\frac{x_0[1-(x_r/x_0)^2]}{8\delta P_s A m}} \tag{20.84}$$

Dựa vào các số liệu thiết kế, ta có thể chọn kích cỡ và các đặc tính của các thành phần của hệ thống servo, đầu tiên là hoạt động trên mô hình tuyến tính sau đó kiểm tra trên một mô hình phi tuyến đầy đủ.

Tài liệu tham khảo

[1] Andersen, B. W., *The analysis and design of pneumatic systems*, Wiley, New York, 1967. Bouteille,

[2] Bouteille, D., Belforte, G., *Automazione flessibile, elettropneumatica e pneumatica*, Tecniche Nuove, Milano, 1987.

[3] Belforte, G., D' Alfio, N., *Applicazioni e prove dell'automazione a fluido*, Levrotto & Bella, Torino, 1997.

[4] Belforte, G., Manuello Bertetto, A., Mazza, L., *Pneumatica: corso completo*, Tecniche Nuove, Milano, 1998.

[5] Blackburn, J. F., Reethof, G., Shearer, J. L., *Fluid power control*, MIT Press, Cambridge, 1960.

[6] Dransfield, P, *Hydraulic control systems—design and analysis of their dynamics*, Springer, Berlin, 1981.

[7] Esposito, A., *Fluid power with applications*, 5th ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.

[8] Gotz, W., *Hydraulics. Theory and applications*, Robert Bosch Automation Technology Division Training, Ditzingen, 1998.

[9] Hehn,A. H., *Fluid power troubleshooting*, 2nd ed., Dekker, New York, 1995.

[10] *Introduction to hydraulic circuits and components*, The University of Bath, Bath, 2000.

[11] *Introduction to control for electrohydraulic systems*, The University of Bath, Bath, 1999.

[12] Jacazio, G., Piombo, B., *Meccanica applicata alle macchine 3: Regolazione e servomeccanismi*, Levrotto & Bella, Torino, 1994.

[13] Johnson, J. E., *Electrohydraulic servo systems*, 2nd ed., Penton IPC, Cleveland, 1977.

[14] Johnson, J. L., *Design of electrohydraulic systems for industrial motion control*, Penton IPC, Cleveland, 1991.

[15] Johnson, J. L., *Basic electronics for hydraulic motion control*, Penton IPC, Cleveland, 1992.

[16] Lewis, E. E., Stern, H., *Design of hydraulic control systems*, McGraw-Hill, New York, 1962.

[17] Mang, T., Dresel, W., *Lubricants and lubrications*, Wiley-VCH, Weinheim, 2001.

[18] McCloy, D., Martin, H. R., *The control of fluid power*, Longman, London, 1973.

[19] Merritt, H. E., *Hydraulic control systems*, Wiley, New York, 1967. Moog, Technical Bulletins, 101-152, Moog, New York.

[20] Muller, R., *Pneumatics. Theory and applications*, Robert Bosch Automation Technology Division Training, Ditzingen, 1998.

[21] Nervegna, N., *Oleodinamica e Pneumatica*, Politeko, Torino, 1999.

[22] Parr, A., *Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide*, 2nd ed., Butterworth Heinemann, Oxford, 1998.

[23] Shetty, D., Kolk, R. A., *Mechatronics system design*, PWS publishing company, Boston, 1997.

[24] Tonyan, M. J., *Electronically controlled proportional valves: selection and application*, Dekker, New York, 1985.

[25] Viersma, T. J., *Analysis, synthesis and design of hydraulic servosystems and pipelines*, Elsevier, Amsterdam, 1980.

[26] Yeaple, F., *Fluid power design handbook*, 3rd ed., Dekker, New York,

20.5 MEMS: Phân tích, thiết kế và chế tạo các bộ chuyển đổi micro

Mở đầu

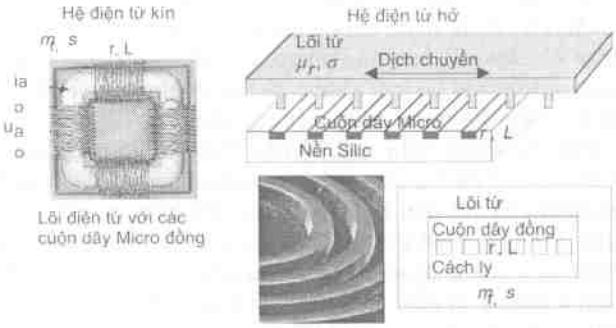
Trong nhiều ứng dụng (từ y học và công nghệ sinh học đến hàng không và an ninh), việc dùng các cấu trúc, thiết bị và hệ thống micro và nano là rất quan trọng [1-4]. Chương này sẽ xem xét việc phân tích, mô hình hóa, thiết kế và chế tạo các cấu trúc và thiết bị micro trên cơ sở điện từ (các bộ chuyển đổi micro điều khiển bằng IC). Rõ ràng để đạt được đối tượng và mục tiêu, cần sử dụng tổng hợp kỹ thuật, khoa học và công nghệ đa ngành. Cụ thể, lý thuyết điện từ và cơ học bao gồm các cơ sở cho phân tích, mô hình hóa, mô phỏng, thiết kế và tối ưu hóa trong khi đó việc chế tạo lại dựa trên các kỹ thuật cơ khí micro và kỹ thuật gia công với mật độ cao cùng với các quá trình mà sự mở rộng của các công nghệ CMOS đã được phát triển để chế tạo các IC. Trong nhiều năm, sự phát triển trong các hệ cơ điện tử micro (MEMS) tập trung vào việc chế tạo các cấu trúc micro đi từ việc kế tục, sửa và thiết kế lại các quy trình và công nghệ dựa trên silicon dùng trong mạch điện tử tích hợp micro. Nguyên nhân của việc cải tiến các quy trình và công nghệ truyền thống cũng như ứng dụng vật liệu mới là đơn giản: nói chung, các cấu trúc micro ở dạng ba chiều mật độ cao và cấu trúc lớn khác với các thiết bị vi điện tử phẳng hai chiều. Các cấu trúc silicon có thể hình thành từ việc gia công cơ micro khối silicon dùng quy trình ướt hoặc khô hoặc thông qua gia công cơ micro bề mặt. Các công nghệ khuôn micro kim loại, dựa trên quá trình in ảnh, cũng được dùng rộng rãi nhằm chế tạo các cấu trúc micro. Các khuôn được tạo trên các màng polyme (thường là chất cảm quang) trên các bề mặt phẳng và sau đó được phủ bởi kim loại kết tủa bằng điện (kết tủa bằng điện đóng vai trò quan trọng việc gia công các cấu trúc micro và thiết bị micro là các thành phần của MEMS). Công nghệ mật độ cao dùng in litô quang, tia điện tử và tia X để tạo rãnh sâu đến 1 mm trong chất cảm quang polymethylmethacrylate để mạ điện (được gọi là lớp mầm). Sự kết tủa bằng điện của vật liệu từ tính và các chất dẫn, sự mạ điện, khắc điện và giải phóng (lift-off) là các quá trình rất quan trọng để chế tạo các cấu trúc micro và thiết bị micro. Mặc dù, người ta đã thừa nhận rằng khả năng sử dụng và cải tiến các công nghệ và vật liệu gia công vi điện tử có sẵn là rất quan trọng và sự phát triển các quá trình mới nhằm chế tạo MEMS là nhân tố chính trong sự lớn mạnh nhanh chóng của MEMS, các lĩnh vực mới vẫn tiếp tục xuất hiện. Đặc biệt và rất quan trọng là việc phát minh, thiết kế, mô hình hóa, phân tích và tối ưu các loại MEMS mới. Vì vậy, gần đây, lý thuyết MEMS và cơ sở kỹ thuật micro đã được mở rộng để nghiên cứu thấu đáo các vấn đề then chốt khác như sự tổng hợp và tích hợp cấp độ hệ thống, sự phân loại và phân tích phối hợp, mô hình hóa và thiết kế, cũng như tối ưu hóa. Chương này sẽ nghiên cứu về việc chế tạo, phân tích và các vấn đề thiết kế cho các cấu trúc micro và thiết bị điện từ micro (bộ chuyển đổi micro với các IC). Đưa ra mô tả quá trình chế tạo, nhấn mạnh các vấn đề mô hình hóa, phân tích và thực hiện thiết kế.

Thiết kế và chế tạo

Trong MEMS, việc chế tạo các cấu trúc micro và thành phần từ tính màng mỏng cần sự kết tủa của các vật liệu dẫn, cách ly và từ tính. Một số hằng số vật liệu khối sẵn có (độ dẫn σ, điện trở suất ρ tại 20°C, độ từ thẩm tương đối μ_r, độ nở nhiệt t_e và hằng số điện môi ε_r) theo đơn vị SI được cho trong bảng 20.12.

BẢNG 20.12 Các hằng số của vật liệu

Vật liệu	σ	ρ	μ_r	$t_e \times 10^{-6}$	ε_r
Bạc	$6{,}17\times10^{7}$	$0{,}162\times10^{-7}$	0.9999998	Không có	
Đồng	$5{,}8\times10^{7}$	$0{,}172\times10^{-7}$	0.99999	16.7	
Vàng	$4{,}1\times10^{7}$	$0{,}244\times10^{-7}$	0.99999	14	
Nhôm	$3{,}82\times10^{7}$	$0{,}26\times10^{-7}$	1,00000065	24	
Vonfram	$1{,}82\times10^{7}$	$0{,}55\times10^{-7}$	Không có	Không có	
Kẽm	$1{,}67\times10^{7}$	$0{,}6\times10^{-7}$	Không có	Không có	
Coban	Không có	Không có	250	Không có	
Niken	$1{,}45\times10^{7}$	$0{,}69\times10^{-7}$	600 phi tuyến	Không có	
Sắt	$1{,}03\times10^{7}$	1×10^{-7}	4000 phi tuyến	Không có	
Si				2.65	11,8
SiO_2				0.51	3.8
Si_3N_4				2.7	7.6
SiC				3.0	6.5
GaAs				6.9	13
Ge				2.2	16.1



HÌNH 20.127 Hệ điện từ điểm cuối kín và điểm cuối hở trong các bộ chuyển đổi micro (các cấu trúc micro tôrôit với các cuộn dây đồng cách ly quấn quanh vật liệu từ và động cơ micro tuyến tính) với các lõi từ (stato và rôto làm từ màng mỏng được kết tủa bằng điện)

Mặc dù MEMS có hình học topo và cấu hình khác nhau (xem khái niệm phân loại MEMS [2]), nhưng nói chung, các bộ chuyển đổi micro đã được thiết kế như là các hệ thống điện từ điểm cuối đóng, điểm cuối mở và tích hợp. Ví dụ trên hình 20.127 minh họa tôrôit micro và động cơ micro tuyến tính tương ứng với các hệ thống điện từ điểm cuối đóng và điểm cuối mở. Dây đồng và lõi từ (cấu trúc micro) có thể được làm bằng cách mạ điện và hình 20.129 mô tả các dây dẫn đồng hình tròn được mạ điện hình thành nên cuộn dây (10 μm chiều rộng và chiều dài với khoảng cách 10 μm) được kết tủa trên lớp cách ly của lõi từ.

Phân tích điện từ một cách toàn diện phải được thực hiện với các cấu trúc micro và thiết bị micro. Ví dụ mômen xoắn (lực) phát ra và điện áp cảm ứng bởi các bộ chuyển đổi micro phụ thuộc

vào độ tự cảm và hiệu suất của các thiết bị micro là một hàm của điện trở cuộn dây, điện trở suất của các lõi được kết tủa, dòng xoáy, độ trễ... Để nghiên cứu tôrôit micro, hãy xem xét đường tròn với bán kính R trong mặt phẳng vuông góc với trục. Mật độ từ thông được tính theo công thức dưới đây:

$$\oint_s \mathbf{H} \cdot ds = 2\pi RH = Ni$$

ở đây N là số vòng. Như vậy, ta có:

$$H = \frac{Ni}{2\pi R}$$

Giá trị của H là một hàm của R và như vậy, từ trường không thay đổi.

Các cuộn dây micro phải đảm bảo độ tự cảm đầy đủ trong vùng giới hạn với điện trở nhỏ nhất. Ví dụ trong các bộ chuyển đổi micro và các bộ biến đổi công suất thấp, cần độ tự cảm 0.5 μH (hoặc cao hơn) tại tần số cao. So với các thiết bị nhỏ truyền thống, bộ chuyển đổi micro điện từ dạng màng mỏng có công suất thấp hơn do suất điện trở cao hơn của màng mỏng, dòng điện xoáy, hiện tượng trễ, hiệu ứng rò từ trường và các hiện tượng không xác định khác thường có hiệu ứng thứ yếu (không đáng kể) trong các thiết bị cơ điện cỡ mini và truyền thống. Có thể tăng độ tự cảm bằng cách đảm bảo số lượng vòng lớn, dùng các vật liệu lõi từ với độ từ thẩm tương đối cao, tăng diện tích mặt cắt lõi và giảm chiều dài đường đi. Thực tế, tại tần số thấp, công thức cho độ tự cảm là:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

ở đây μ là độ từ thẩm của vật liệu lõi, A là tiết diện mặt cắt của lõi từ và l là chiều dài đường đi của từ trường.

Dùng từ trở $\Re = l/(\mu_0 \mu_r A)$, ta có $L = N^2/\Re$. Với các bộ chuyển đổi micro, thông lượng là một biến rất quan trọng và dùng dòng điện *mạng*, ta có $\Phi = Ni/\Re$.

Nhớ lại rằng độ tự cảm liên quan tới năng lượng tích trữ trong từ trường và:

$$L = \frac{2W_m}{i^2} = \frac{1}{i^2}\int_v \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}\, dv$$

Như vậy, ta có:

$$L = \frac{1}{i^2}\int_v \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}\, dv = \frac{1}{i^2}\int_v \mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) dv = \frac{1}{i^2}\int_v \mathbf{A} \cdot \mathbf{J}\, dv = \frac{1}{i}\oint_l \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \frac{1}{i}\oint_s \mathbf{B} \cdot ds = \frac{\Phi}{i}$$

hay:

$$L = \frac{N\Phi}{i}$$

Chúng ta tìm được độ tự cảm là hàm của số vòng, thông lượng và dòng điện.

Dùng phương trình:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

ta kết luận là độ tự cảm tăng như là một hàm của bình phương số vòng dây. Tuy nhiên, một số lượng lớn vòng dây cần mật độ vòng dây cao (độ rộng rãnh và khoảng cách nhỏ sao cho các vòng dây vừa một diện tích cho trước). Song, việc giảm độ rộng rãnh dẫn đến việc tăng điện trở dây, do đó làm giảm hiệu suất. Vì vậy, sự cân bằng thiết kế giữa độ tự cảm và điện trở cuộn dây cần được

nghiên cứu. Để nhận được điện trở thấp, cần phải kết tủa các chất dẫn dày với độ dày cỡ 10 micro mét. Thực tế, điện trở một chiều được tính như sau $R = \rho_c l_c / A_c$, ở đây ρ_c là suất điện trở dây dẫn, l_c là chiều dài dây dẫn, A_c là diện tích mặt cắt của dây dẫn. Như vậy, quá trình khả thi nhất cho việc kết tủa chất dẫn là mạ điện. Các quy trình mật độ cao đảm bảo các chất dẫn dày và độ rộng cùng khe hở rãnh nhỏ (các chất dẫn mật độ cao có tỷ số độ dày/độ rộng lớn). Tuy nhiên, vùng hoạt động bị giới hạn không cho phép đạt được diện tích mặt cắt chất dẫn lớn. Giá trị độ tự cảm cao cũng có thể đạt được bằng cách tăng diện tích mặt cắt lõi từ dùng các lõi từ dày với A lớn. Tuy vậy, hầu hết vật liệu từ màng mỏng là các kim loại màng mỏng, thường có các đặc tính không tốt cho các vật liệu sắt từ dạng khối. Nó làm cho có dòng điện xoáy và các hiệu ứng trễ không mong đợi khác, làm tăng tổn thất lõi và giảm độ tự cảm. Cần nhấn mạnh rằng cần phải tối thiểu hóa các dòng điện xoáy.

Như đã mô tả, các lõi từ và các cuộn dây là các thành phần cơ bản của cấu trúc micro và cần tận dụng các quá trình và vật liệu từ và chất dẫn khác nhau để chế tạo các bộ chuyển đổi micro. Người ta thường dùng các màng mỏng *hợp kim pecmaloi* (hợp kim 80% niken và 20% sắt). Nên nhớ rằng *hợp kim pecmaloi* cũng như các vật liệu khác (như côban-phôphoric vô định hình) là các vật liệu từ mềm có thể được tạo ra thông qua kết tủa bằng điện. Nói chung, các kết tủa có độ dày và kết cấu không đồng nhất do tính không đồng nhất của dòng điện trên vùng kết tủa điện. Hơn nữa, các hiệu ứng động lực trong chất điện phân thường cũng làm tăng tính không đồng nhất (những tính không đồng nhất này được giảm bằng cách chọn các chất điện hóa riêng). Độ tự cảm và các tổn thất giữ không đổi đến một tần số nào đó (là một hàm của độ dày lớp, vật liệu được dùng, quá trình chế tạo...) và trong chế độ hoạt động tần số cao, độ tự cảm giảm nhanh và tổn thất tăng do dòng điện xoáy và các hiệu ứng trễ. Ví dụ với lõi từ màng mỏng *hợp kim pecmaloi* (80% niken và 20% sắt) và cuộn dây đồng, độ tự cảm giảm nhanh trên 1, 3 và 6 MHz với các lớp dày tương ứng 10. 8 và 5 μm. Cần nhấn mạnh rằng độ sâu lớp phủ của màng mỏng lõi từ là một hàm của các đặc tính từ và tần số f được cho như sau $\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)}$, ở đây μ và σ lần lượt là độ từ thẩm và độ dẫn của vật liệu lõi từ. Các tổn thất năng lượng tổng được tìm bằng cách dùng vectơ Pointing $\Xi = E \times H$ và tổn thất năng lượng tổng có thể nhận được một cách xấp xỉ bằng cách dùng biểu thức cho năng lượng ngang bề mặt dẫn trong một diện tích, nghĩa là:

$$P_{\text{trung bình}} = \int_s \Xi_{\text{trung bình}} ds = \frac{1}{4} \int_s \sigma \delta E_0^2 e^{-2/\delta\sqrt{\pi f \mu \sigma}} ds$$

Cần nhấn mạnh rằng độ sâu lớp phủ (độ sâu thấm) là có sẵn và với đồng khối nó là $\delta_{cu} = 0.066/\sqrt{f}$.

Nói chung, độ tự cảm bắt đầu tăng khi tỷ số độ dày dát mỏng/độ sâu lớp phủ lớn hơn 1. Như vậy, độ dày dát mỏng phải nhỏ hơn độ sâu lớp phủ tại tần số hoạt động f để đạt được giá trị độ tự cảm cao. Để thấy được sự cần thiết phải nghiên cứu đầy đủ các dây dẫn micro, chúng ta phân tích dây dẫn micro dạng xuyến (1mm × 1mm, độ dày lõi 3 μm, độ từ thẩm 2000). Độ tự cảm và điện trở cuộn dây được phân tích như là các hàm của tần số hoạt động. Các kết quả mô hình hóa chỉ ra rằng độ tự cảm giữ không đổi lên tới 100 kHz và giảm với tần số cao hơn. Điện trở tăng đáng kể tại các tần số cao hơn 150 kHz (độ dày dây dẫn đồng là 2 μm và điện trở cuộn dây 1 chiều là 10 Ω. Độ tự cảm giảm và điện trở tăng tại tần số cao là do các hiệu ứng trễ và dòng điện xoáy.

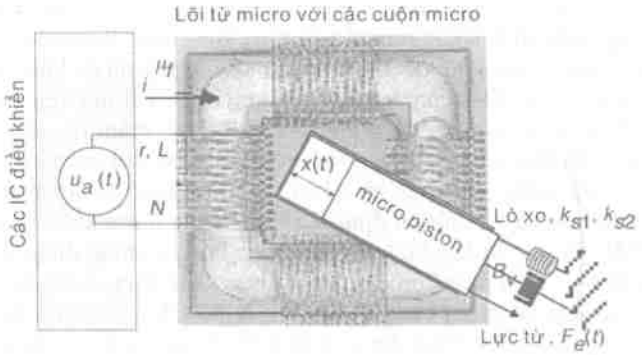
Nói chung, độ sâu lớp phủ trong vật liệu lõi từ phụ thuộc vào độ từ thẩm và độ dẫn. Các màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ có độ từ thẩm tương đối trong khoảng từ 600 đến 2000 và điện trở suất là khoảng 20 $\mu\Omega$m. Cần nhấn mạnh rằng các vật liệu với điện trở suất cao có tổn thất dòng điện xoáy thấp và cho phép kết tủa các lớp dày hơn do độ sâu lớp phủ cao. Như vậy, các vật liệu từ có điện trở suất cao đang được xem xét và các màng mỏng FeCo được mạ điện có suất điện trở 100-300 $\mu\Omega$m. Các vật liệu có điện trở suất cao khác có thể được kết tủa bằng cách thổi là FeZrO và CoHfTaPd (có ưu điểm đối với việc kết tủa các lớp vật liệu từ và vật liệu cách điện mỏng xen kẽ nhau do các vật liệu từ và cách điện có thể được kết tủa ở cùng một bước của quá trình công nghệ). Nói chung, mạ điện là kỹ thuật dùng cho kết tủa cấu trúc đa lớp được dát mỏng cần các quá trình khác nhau để kết tủa các vật liệu từ và cách điện (các lớp).

Các quá trình chính trong chế tạo bộ chuyển đổi micro điện từ là khắc và mạ điện các đường dẫn từ, các lỗ xuyên và sau đó chế tạo các cấu trúc micro dạng cuộn cảm phía trên tấm có lỗ xuyên dùng các quá trình cảm quang dày đa lớp [5-7]. Ví dụ chúng ta sẽ sử dụng đế silicon (các tấm silicon được đánh bóng hai mặt loại *n* có hướng 100) với một lớp silicon đioxit mỏng phát triển bằng nhiệt (SiO_2). Các lỗ xuyên được bố trí ở mặt trên của tấm Si-SiO_2 (quá trình in quang litô) và sau đó được khắc trong dung dịch KOH (với tốc độ khắc khác nhau theo nồng độ và nhiệt độ). Sau đó, lớp dung dịch KOH được loại khỏi để để giữ lại 20-30 μm silicon để khắc. Lớp tạo mầm Ti-Cu hoặc Cr-Cu (độ dày tương ứng 20-40 nm và 400-500 nm) được kết tủa trên mặt sau của tấm bằng cách bốc bay chùm điện tử. Lớp đồng tác dụng như là lớp tạo mầm mạ điện trong khi lớp titan (hoặc crôm) được dùng để tăng khả năng kết dính của lớp đồng đối với tấm silicon. Trên lớp tạo mầm bằng đồng, một lớp màng mỏng có tính bảo vệ NiFe được mạ điện trực tiếp trên các hố xuyên để đạt được tính bảo vệ và tính ổn định. Các hố xuyên được khắc hoàn toàn một lần nữa (trong dung dịch KOH) và sau đó lớp SiO_2 còn lại được bóc ra (dùng dung dịch BHF) để lộ mặt các lớp kim loại ở mặt sau. Tiếp theo, lớp đính titan được khắc bằng dung dịch HF (nếu dùng lớp tạo mầm Cr-Cu, có thể loại bỏ crôm bằng dung dịch $K_3Fe(CN)_6$-NaOH). Nó cho phép việc mạ điện các hố xuyên từ lớp tạo mầm bằng đồng lộ ra. Các lỗ xuyên trống được mạ điện với màng mỏng NiFe. Điều này tạo ra các đường dẫn từ. Do quá trình khắc dựa trên KOH phụ thuộc vào cấu trúc tinh thể nên các mặt bên của khuôn mạ điện là các mặt phẳng tinh thể hướng 111 (hướng góc 54.7° so với bề mặt). Như là một kết quả của các mặt bên hướng góc 54.7°, mạ điện có thể không đồng nhất. Để giải quyết vấn đề này, các hố xuyên có thể được mạ quá mức và đánh bóng với cấp bề mặt [5-7]. Sau khi mạ và đánh bóng hố xuyên, lớp tạo mầm sẽ bị loại bỏ và lớp phủ dày 10-20 μm (thí dụ bằng polyimzi PI26II) được quay phủ ở mặt sau và xử lý ở 300°C để phủ lớp NiFe bảo vệ. Lúc này, có thể chế tạo dây dẫn micro ở mặt trên của tấm. Cụ thể, các cuộn dây micro được gia công trên đỉnh các tấm có chứa lỗ thông với cấu trúc lõi từ riêng (thí dụ, dạng phẳng hoặc dạng móng ngựa) song song với bề mặt tấm. Các cuộn dây micro phải được cuộn quanh lõi từ để tạo thành hệ thống điện từ. Như vậy, cần các lớp cấu trúc bổ sung (ví dụ lớp thứ nhất là dây dẫn các đoạn dưới cùng của mỗi vòng cuộn dây micro, lớp thứ hai gồm lõi từ và các dây dẫn dọc nối phía trên và phía dưới của mỗi đoạn cuộn dây micro và lớp thứ ba gồm các dây dẫn trên cùng được nối với đường dẫn điện và như vậy hình thành các cuộn dây micro quấn quanh lõi từ). Rõ ràng, cần các lớp cách ly (chất điện môi) để cách ly lõi từ và các cuộn dây micro. Có thể thực hiện việc chế tạo thông qua sự bay hơi chùm điện tử của lớp tạo mầm Ti-Cu và sau đó hình thành các khuôn mạ điện 25-35 μm (có thể dùng chất cảm quang AZ-4000). Các cuộn dây micro đồng được mạ điện trên đỉnh khuôn. Sau khi việc mạ điện được hoàn thành, người ta loại bỏ quang bằng axeton. Tiếp theo, lớp tạo mầm được xóa (đồng được khắc trong dung dịch H_2SO_4, trong khi lớp bám titan được khắc bởi dung dịch HF). Một lớp cảm quang AZ-4000 mới được quay phủ trên tấm để cách ly các dây dẫn phía dưới với lõi từ. Phần ra của đường dây được tạo hình tại vị trí cuối của dây dẫn và chất cảm quang được xử lý để hình thành lớp cách ly. Ngoài việc cách ly, việc xử lý cứng làm chảy ngược chất cảm quang phục vụ mục đích làm phẳng cần cho việc tạo hình các lớp bổ sung. Một lớp tạo mầm khác được kết tủa từ việc tạo hình và mạ điện dây dẫn và lõi từ. Nó dẫn đến hai bước in liên tiếp và dây dẫn (Cu được mạ điện) cùng lõi từ (màng mỏng NiFe) được mạ điện dùng lớp tạo mầm giống nhau. Sau khi hoàn thành dây dẫn và lõi từ, người ta sẽ loại bỏ chất cảm quang và các lớp tạo mầm. Sau đó, thực hiện việc xử lý cứng. Các dây dẫn micro phía trên được tạo hình và kết tủa từ một lớp tạo mầm khác dùng quá trình giống như đã mô tả ở trên cho các dây dẫn phía dưới. Mô tả chi tiết về quá trình và các bộ chuyển đổi micro có thể xem trong [5-7]. Chúng ta đã phác thảo sự chế tạo các dây dẫn micro vì các công nghệ này có thể chấp nhận và dùng các công nghệ này để chế tạo các bộ chuyển đổi micro. Cũng lưu ý rằng có thể thực hiện sự phân tích và thiết kế đó bằng các phương trình đã cho.

Phân tích các bộ chuyển đổi micro tịnh tiến

Hình 20.128 minh họa một thiết bị cơ điện tử micro (bộ chuyển đổi micro tịnh tiến) với một thành phần đứng yên (lõi từ với các cuộn dây) và một thành phần chuyển động (piston micro) có thể được chế tạo bằng công nghệ gia công micro. Mục đích của chúng ta là thực hiện việc phân

tích và mô hình hóa bộ chuyển đổi micro này bằng việc phát triển mô hình toán học tham số tập trung. Như vậy, mục đích là tìm ra các phương trình vi phân mô tả hành vi động lực và trạng thái ổn định của bộ chuyển đổi micro.



HÌNH 20.128 Sơ đồ chuyển đổi micro tịnh tiến với các IC điều khiển

Áp dụng định luật II Newton cho chuyển động tịnh tiến, ta có:

$$F(t) = m\frac{d^2x}{dt^2} + B_v\frac{dx}{dt} + (k_{s1}x + k_{s1}x^2) + F_e(t)$$

ở đây x là dịch chuyển của piston micro, m là khối lượng thành phần chuyển động (piston micro), B_v là hệ số ma sát nhớt, k_{s1} và k_{s2} là độ cứng lò xo và $F_e(t)$ là lực từ:

$$F_e(i,x) = \frac{\partial W_e(i,x)}{\partial x}$$

Cần nhấn mạnh rằng lực kéo về tạo bởi lò xo được cho bởi $(k_{s1}x + k_{s1}x^2)$.

Giả thiết rằng hệ từ là tuyến tính, đồng năng lượng tìm được là $W_e(i,x) = \frac{1}{2}L(x)i^2$ và lực điện từ được cho như sau:

$$F_e(i,x) = \frac{1}{2}i^2\frac{dL(x)}{dx}$$

Ở công thức này, có thể tìm được biểu thức giải tích cho số hạng $dL(x)/dx$. Độ tự cảm là:

$$L(x) = \frac{N^2}{\Re_f + \Re_g} = \frac{N^2\mu_f\mu_0 A_f A_g}{A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)}$$

ở đây $\Re_f$ và $\Re_g$ là từ trở của vật liệu từ và khe hở không khí; A_f và A_g là các diện tích mặt cắt; l_f và $(x + 2d)$ là độ dài vật liệu từ và khe hở không khí.

Như vậy:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{2N^2\mu_f^2\mu_0 A_f^2 A_g}{[A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)]^2}$$

Dùng định luật Kirchhoff, phương trình điện áp cho mạch điện là:

$$u_a = ri + \frac{d\psi}{dt}$$

ở đây liên kết thông lượng ψ là $\psi = L(x)i$.

Do đó thu được:

$$u_a = ri + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}$$

Vì vậy, dẫn đến phương trình vi phân phi tuyến dưới đây cho kết quả:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{r}{L(x)}i + \frac{2N^2\mu_f^2\mu_0 A_f^2 A_g}{L(x)[A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)]^2}iv + \frac{1}{L(x)}\mu_a$$

Kết hợp phương trình này với phương trình vi phân và động lực học *cơ học xoắn*:

$$F(t) = m\frac{d^2x}{dt^2} + B_v\frac{dx}{dt} + (k_{s1}x + k_{s1}x^2) + F_c(t)$$

ta tìm được ba phương trình vi phân phi tuyến cho bộ chuyển đổi micro tịnh tiến như sau:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{r[A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)]}{N^2\mu_f\mu_0 A_f A_g}i + \frac{2\mu_f A_f}{A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)}iv + \frac{A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)}{N^2\mu_f\mu_0 A_f A_g}u_a$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{N^2\mu_f^2\mu_0 A_f^2 A_g}{m[A_g l_f + 2A_f\mu_f(x+2d)]^2}i^2 - \frac{1}{m}(k_{s1}x + k_{s2}x^2) - \frac{B_v}{m}v$$

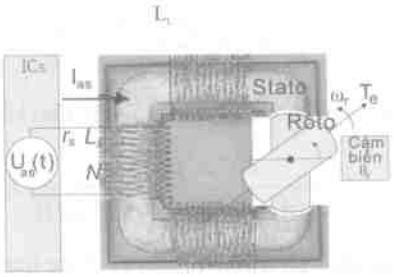
$$\frac{dx}{dt} = v$$

Các phương trình vi phân thu được biểu diễn mô hình toán học tham số tập trung của bộ chuyển đổi micro. Nói chung, mặc dù cần thực thiện việc mô hình hóa có độ trung thực cao tích hợp những tính chất phi tuyến (ví dụ, các đặc tính và hiện tượng trễ từ phi tuyến) và các hiệu ứng thứ cấp, các mô hình toán học tham số tập trung được cho dưới dạng phương trình vi phân phi tuyến là áp dụng được với các bộ chuyển đổi micro. Có thể thấy rằng các hiện tượng và hiệu ứng chính đã được mô hình hóa đối với dòng điện, vận tốc và dịch chuyển (các hiệu ứng thứ cấp như ma sát Culông, hiện tượng trễ và dòng điện xoáy, hiệu ứng rò từ trường và các hiện tượng khác đã không được mô hình và phân tích). Tuy nhiên, việc mô hình tham số tập trung cung cấp khả năng để thu được phân tích động lực học và trạng thái ổn định ban đầu bằng các biến cơ học và mạch điện cơ bản. Cũng cần nhấn mạnh rằng điện áp trên cuộn dây được điều khiển bởi các IC. Phần lớn IC điều khiển bộ chuyển đổi micro được thiết kế bằng hình học topo dạng điều chế độ rộng xung. Tần số chuyển mạch của IC thường là 1 MHz hoặc cao hơn. Như vậy, nghiên cứu hiện tượng của bộ chuyển đổi micro tại tần số hoạt động cao là rất quan trọng. Nó có thể thực hiện bằng việc dùng các phương trình Maxwell tạo các mô hình toán học có tính trung thực cao [2].

Các động cơ micro từ trở đơn pha: Chế tạo micro, mô hình hóa và phân tích

Xem xét các động cơ từ trở đơn pha được gia công cơ micro minh họa trên hình 20.129.

Hãy tập trung vào phân tích, mô hình và điều khiển các động cơ micro từ trở trong các ứng dụng chuyển đổi micro dạng quay. Như vậy, phải tìm các mô hình toán học. Kiểu mô hình tham số tập trung dựa trên việc dùng các biến cơ học (vận tốc và dịch chuyển) và các biến mạch (điện áp và dòng điện) để thu được phương trình vi phân bằng các định luật Newton và Kirchhoff. Trong các phương trình vi phân này, người ta dùng các tham số động cơ micro. Cụ thể, với động cơ micro được nghiên cứu, các tham số là điện trở stato r_s, độ tự cảm từ hóa trên trục *ngang* và *dọc* L_{mq} và L_{md}, độ tự cảm từ hóa trung bình $\bar{L}_m$, độ tự cảm khe hở L_{ls}, mômen quán tính J và hệ số ma sát nhớt B_m.



HÌNH 20.129 Động cơ micro từ trở đơn pha với các IC và cảm biến dịch chuyển (vị trí) rôto

Biểu thức cho mômen điện từ được dẫn ra từ [8]. Cụ thể:

$$T_e = L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r$$

ở đây $L_{\Delta m}$ là một nửa biên độ của biến thiên độ tự cảm từ hóa hình sin L_m:

$$L_m(\theta_r) = \bar{L}_m - L_{\Delta m} \cos 2\theta_r$$

Như vậy, để phát triển mômen xoắn điện từ, phải cấp dòng điện i_{as} như là một hàm của dịch chuyển góc rôto θ_r. Ví dụ nếu $i_{as} = i_M \operatorname{Re}\left(\sqrt{\sin 2\theta_r}\right)$, thì:

$$T_{\text{trung bình}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r d\theta_r = \frac{1}{4} L_{\Delta m} i_M^2$$

Động cơ micro đang xem xét là một máy micro đồng bộ và biểu thức thu được với dòng điện pha rất quan trọng cho việc điều khiển bộ chuyển đổi micro. Cụ thể, có thể dùng cảm biến hiệu ứng Hall để đo dịch chuyển rôto và các IC phải nuôi dòng điện pha với một hàm phi tuyến của θ_r. Hơn nữa, mômen xoắn điện từ được điều khiển bằng cách thay đổi cường độ dòng điện i_M.

Mô hình toán học của động cơ micro từ trở đơn pha được tìm bằng cách dùng các định luật Kirchhoff và Newton II. Ta có:

$$u_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \quad \text{(phương trình mạch - định luật Kirchhoff)}$$

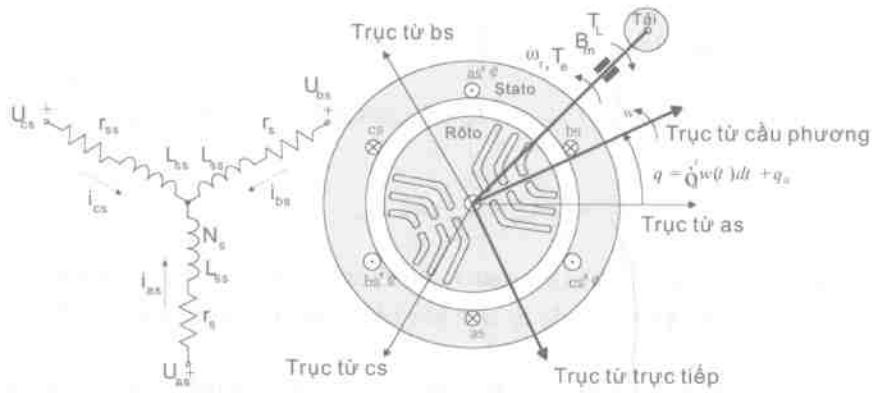
$$T_e - B_m \omega_r - T_L = J \frac{d^2\theta_r}{dt^2} \quad \text{(phương trình } \textit{cơ học xoắn}\text{-định luật Newton)}$$

Ở đây, vận tốc góc điện ω_r và dịch chuyển θ_r được dùng như là các biến của hệ cơ học.

Từ $u_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt}$ và phương trình liên kết thông lượng $\psi_{as} = \left(L_{ls} + \bar{L}_m - L_{\Delta m} \cos 2\theta_r\right)_{as}$, dùng động lực học *cơ học xoắn*, ta thu được hệ ba phương trình vi phân phi tuyến bậc nhất mô hình cho các động cơ micro từ trở đơn pha. Cụ thể, ta có:

$$\frac{di_{as}}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ls} + \bar{L}_m - L_{\Delta m} \cos 2\theta_r} i_{as} - \frac{2L_{\Delta m}}{L_{ls} + \bar{L}_m - L_{\Delta m} \cos 2\theta_r} i_{as} \omega_r \sin 2\theta_r + \frac{1}{L_{ls} + \bar{L}_m - L_{\Delta m} \cos 2\theta_r} u_{as}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(L_{\Delta m} i_{as}^2 \sin 2\theta_r - B_m \omega_r - T_L)$$



HÌNH 20.130 Động cơ micro từ trở đồng bộ 3 pha

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

Với mô hình toán học tìm được và các tham số động cơ micro đo được, có thể thực hiện trực tiếp việc phân tích và mô phỏng phi tuyến để nghiên cứu các đáp ứng động lực học và phân tích khả năng của động cơ micro. Cụ thể, có thể đo hoặc xác định trực tiếp điện trở, độ tự cảm, mômen quán tính, hệ số ma sát nhớt dựa trên việc kiểm tra động cơ micro. Phân tích động lực học và trạng thái ổn định dựa trên mô hình toán học tham số tập trung được thực hiện trực tiếp. Tuy nhiên, các mô hình toán học tham số tập trung làm đơn giản hóa sự phân tích và do đó khẳng định kết quả cần phải so sánh các mô hình toán học tham số tập trung với dữ liệu thực nghiệm.

Nhược điểm của các động cơ micro từ trở đơn pha là gợn mômen xoắn cao, dao động, nhiễu, độ tin cậy thấp... Vì vậy, chúng ta sẽ nghiên cứu các động cơ micro từ trở đồng bộ ba pha.

Động cơ micro từ trở đồng bộ ba pha: mô hình và phân tích

Mục đích của chúng ta là xác định và giải quyết một loạt vấn đề trong phân tích, mô hình hóa và điều khiển các máy micro từ trở đồng bộ. Cần phải phân tích kĩ càng các đặc tính điện từ trước khi có ý định điều khiển động cơ micro. Thực tế, các đặc tính điện từ khá hạn chế các thuật toán điều khiển được dùng. Tùy theo phương pháp khái niệm dùng để phân tích các máy micro từ trở đồng bộ, có thể thiết kế và thực hiện các luật điều khiển khác nhau bằng cách dùng IC. Có thể thực hiện việc phân tích và điều khiển các động cơ micro từ trở đồng bộ bằng cách dùng các khái niệm mô hình hóa, phân tích và tối ưu hóa khác nhau. Mô hình toán học tham số tập trung đầy đủ của động cơ micro từ trở đồng bộ với các biến *máy* (*abc*) và *ngang*, *dọc* và *không* (*qd*0) có thể được phát triển dưới dạng các phương trình vi phân phi tuyến. Cụ thể, người ta có thể tìm mô hình toán học tham số tập trung dạng mạch bằng cách dùng định luật điện áp Kirchhoff. Ta có, xem trên hình 20.130:

$$u_{abcs} = r_s i_{abcs} + \frac{d\psi_{abcs}}{dt}$$

ở đây u_{as}, u_{bs} và u_{cs} là các điện áp pha; i_{as}, i_{bs} và i_{cs} là các dòng điện pha; ψ_{as}, ψ_{bs} và ψ_{cs} là các liên kết thông lượng:

$$\psi_{abcs} = \mathbf{L}_s \mathbf{i}_{abcs}, \qquad \mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + \bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos(2\theta_r) & -\frac{1}{2}\bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi) & -\frac{1}{2}\bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi) \\ -\frac{1}{2}\bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi) & L_{ls} + \bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & -\frac{1}{2}\bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2}\bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi) & -\frac{1}{2}\bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + \bar{L}_m - L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}$$

$$\bar{L}_m = \frac{1}{3}(L_{mq} + L_{md}) \text{ và } L_{\Delta m} = \frac{1}{3}(L_{md} - L_{mq})$$

Các tham số máy micro là điện trở stato r_s, độ từ cảm từ hóa trên trục *ngang* và *dọc* L_{mq} và L_{md}, độ tự cảm từ hóa trung bình $\bar{L}_m$, độ tự cảm khe hở L_{ls}, mômen quán tính J và hệ số ma sát nhớt B_m.

Các biểu thức cho độ tự cảm là các hàm phi tuyến của dịch chuyển góc điện θ_r. Do đó, có thể dùng động lực học *cơ học xoắn*. Lưu ý định luật Newton II đối với chuyển động quay và dùng ω_r và θ_r (vận tốc và dịch chuyển góc điện) làm các biến trạng thái (biến cơ học), ta thu được:

$$T_e - B_m\frac{2}{P}\omega_r - T_L = J\frac{2}{P}\frac{d\omega_r}{dt}, \qquad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

ở đây T_e và T_L là mômen điện từ và mômen tải.

Phân tích việc tạo mômen xoắn - Dùng đồng năng lượng, có thể tìm được mômen xoắn điện từ là hàm phi tuyến của các biến động cơ micro (dòng điện pha và vị trí góc điện) và các tham số (số cực P và độ tự cảm $L_{\Delta m}$) [8]:

$$T_e = \frac{P}{2}L_{\Delta m}\left[i_{as}^2\sin 2\theta_r + 2i_{as}i_{bs}\sin 2\left(\theta_r - \frac{1}{3}\pi\right) + 2i_{as}i_{cs}\sin 2\left(\theta_r + \frac{1}{3}\pi\right)\right.$$
$$\left. + i_{bs}^2\sin 2\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) + 2i_{bs}i_{cs}\sin 2\theta_r + i_{cs}^2\sin 2\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right)\right]$$

Để điều khiển vận tốc góc, cần phải điều khiển mômen xoắn điện từ. Để mômen xoắn điện từ cực đại, các IC phải nuôi các dòng điện pha dưới đây theo hàm của dịch chuyển góc đang đo hoặc quan sát (điều khiển không cảm biến) θ_r:

$$i_{as} = \sqrt{2}i_M\sin\left[\theta_r + \frac{1}{3}\varphi_i\pi\right]$$
$$i_{bs} = \sqrt{2}i_M\sin\left[\theta_r - \frac{1}{3}(2-\varphi_i)\pi\right]$$
$$i_{cs} = \sqrt{2}i_M\sin\left[\theta_r + \frac{1}{3}(2+\varphi_i)\pi\right]$$

Như vậy, với $\varphi_i = 0.3245$, ta thu được:

$$T_e = \sqrt{2}PL_{\Delta m}i_M^2$$

Do đó, T_e được cực đại hóa và điều khiển bằng cách thay đổi cường độ dòng điện pha i_M. Hơn nữa, nó không có gợn mômen xoắn (thực tế, dựa trên kết quả thực nghiệm và việc thực hiện mô hình điện từ phi tuyến tích hợp dùng các phương trình Maxwell, ta tìm thấy rằng tồn tại của gợn mômen xoắn gây bởi mômen xoắn ăn khớp, độ lệch tâm, bánh răng, điều chế độ rộng xung và các hiện tượng khác).

Đa số các IC được thiết kế để điều khiển các điện áp pha u_{as}, u_{bs} và u_{cs}. Do đó, việc cân bằng điện áp ba pha là quan trọng. Ta có:

$$u_{as} = \sqrt{2}u_M \sin\left[\theta_r + \frac{1}{3}\varphi_i\pi\right]$$

$$u_{bs} = \sqrt{2}u_M \sin\left[\theta_r - \frac{1}{3}(2-\varphi_i)\pi\right]$$

$$u_{cs} = \sqrt{2}u_M \sin\left[\theta_r + \frac{1}{3}(2+\varphi_i)\pi\right]$$

ở đây u_M là cường độ của điện áp đặt vào.

Mô hình toán học của động cơ micro từ trở đồng bộ đối với các biến abc được tìm như sau:

$$\frac{di_{as}}{dt} = \frac{1}{L_D}\{(r_s i_{as} - u_{as})(4L_{ls}^2 + 3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 8\bar{L}_m L_{ls} - 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2\theta_r)$$
$$+ (r_s i_{bs} - u_{bs})[3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 2\bar{L}_m L_{ls} + 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi)]$$
$$+ (r_s i_{cs} - u_{cs})[3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 2\bar{L}_m L_{ls} + 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi)]$$
$$+ 6\sqrt{3}L_{\Delta m}^2 L_{ls}\omega_r(i_{cs} - i_{bs}) + (8L_{\Delta m}L_{ls}^2\omega_r + 12L_{\Delta m}\bar{L}_m L_{ls}\omega_r)$$
$$\times(\sin 2\theta_r i_{as} + \sin 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi)i_{bs} + \sin 2\left(\theta_r + \frac{1}{3}\pi\right)i_{cs}))\}$$

$$\frac{di_{bs}}{dt} = \frac{1}{L_D}\{(r_s i_{as} - u_{as})[3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 2\bar{L}_m L_{ls} + 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r - \frac{1}{3})]$$
$$+ (r_s i_{bs} - u_{bs})[4L_{ls}^2 + 3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 8\bar{L}_m L_{ls} - 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi)]$$
$$+ (r_s i_{cs} - u_{cs})[3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 2\bar{L}_m L_{ls} + 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2\theta_r]$$
$$+ 6\sqrt{3}\,L_{\Delta m}^2 L_{ls}\,\omega_r(i_{as} - i_{cs}) + (8L_{\Delta m}L_{ls}^2\omega_r + 12L_{\Delta m}\bar{L}_m L_{ls}\omega_r)$$
$$\times(\sin 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi)i_{as} + \sin 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi)i_{bs} + \sin 2\theta_r i_{cs})\}$$

$$\frac{di_{cs}}{dt} = \frac{1}{L_D}\{(r_s i_{as} - u_{as})[3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 2\bar{L}_m L_{ls} + 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi)]$$
$$+ (r_s i_{bs} - u_{bs})[3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 2\bar{L}_m L_{ls} + 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2\theta_r]$$
$$+ (r_s i_{cs} - u_{cs})[4L_{ls}^2 + 3\bar{L}_m^2 - 3L_{\Delta m}^2 + 8\bar{L}_m L_{ls} - 4L_{ls}L_{\Delta m}\cos 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi)]$$
$$+ 6\sqrt{3}\,L_{\Delta m}^2 L_{ls}\,\omega_r(i_{bs} - i_{as}) + (8L_{\Delta m}L_{ls}^2\omega_r + 12L_{\Delta m}\bar{L}_m L_{ls}\omega_r)$$
$$\times[\sin 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi)i_{as} + \sin 2\theta_r i_{bs} + \sin 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi)i_{cs}]\}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P^2}{4J}L_{\Delta m}\left[i_{as}^2\sin 2\theta_r + 2i_{as}i_{bs}\sin 2(\theta_r - \frac{1}{3}\pi) + 2i_{as}i_{cs}\sin 2(\theta_r + \frac{1}{3}\pi)\right.$$
$$\left. + i_{bs}^2\sin 2(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) + 2i_{bs}i_{cs}\sin 2\theta_r + i_{cs}^2\sin 2(\theta_r + \frac{2}{3}\pi)\right] - \frac{B_m}{J}\omega_r - \frac{P}{2J}T_L$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

Ở đây:

$$\overline{L}_m = \frac{1}{3}(L_{mq} + L_{md}), \qquad L_{\Delta m} = \frac{1}{3}(L_{md} - L_{mq}) \qquad L_D = L_{ls}(9L_{\Delta m}^2 - 4L_{ls}^2 - 12\overline{L}_m L_{ls} - 9\overline{L}_m^2)$$

Có thể đơn giản hóa mô hình toán học. Cụ thể, trong hệ qui chiếu rôto, ta áp dụng biến đổi Park [8]:

$$\mathbf{u}_{qd0s}^r = \mathbf{K}_s^r \mathbf{u}_{abcs}, \qquad \mathbf{i}_{qd0s}^r = \mathbf{K}_s^r \mathbf{u}_{abcs}, \qquad \psi_{qd0s}^r = \mathbf{K}_s^r \psi_{abcs}$$

$$\mathbf{K}_s^r = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\theta_r & \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

ở đây u_{qs}, u_{ds}, u_{0s}, i_{qs}, i_{ds}, i_{0s} và ψ_{qs}, ψ_{ds}, ψ_{0s} là các điện áp $qd0$, dòng điện, liên kết thông lượng.

Dùng động lực học mạch và *cơ học xoắn*, ta tìm được các phương trình vi phân phi tuyến dưới đây để mô hình động cơ micro từ trở đồng bộ trong hệ qui chiếu rôto:

$$\frac{di_{qs}^r}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ls} + L_{mq}} i_{qs}^r - \frac{L_{ls} + L_{md}}{L_{ls} + L_{mq}} i_{ds}^r \omega_r + \frac{1}{L_{ls} + L_{mq}} u_{qs}^r$$

$$\frac{di_{ds}^r}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ls} + L_{md}} i_{ds}^r + \frac{L_{ls} + L_{mq}}{L_{ls} + L_{md}} i_{qs}^r \omega_r + \frac{1}{L_{ls} + L_{md}} u_{ds}^r$$

$$\frac{di_{0s}^r}{dt} = -\frac{r_s}{L_{ls}} i_{0s}^r + \frac{1}{L_{ls}} u_{0s}^r$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3P^2}{8J}(L_{md} - L_{mq}) i_{qs}^r i_{ds}^r - \frac{B_m}{J}\omega_r - \frac{P}{2J}T_L$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

Có thể dễ dàng thấy rằng mô hình này đơn giản hơn nhiều so với mô hình toán học tham số tập trung ở trên dùng các biến *abc*.

Để thu được hoạt động cân bằng, cần phải bắt nguồn từ các điện áp và dòng điện *ngang* và *dọc* dùng biến đổi Park *trực tiếp* $\mathbf{i}_{qd0s}^r = \mathbf{K}_s^r \mathbf{i}_{abcs}$, $\mathbf{u}_{qd0s}^r = \mathbf{K}_s^r \mathbf{u}_{abcs}$. Do đó, điện áp $qd0$ u_{qs}^r, u_{ds}^r,và u_{0s}^r được tìm bằng cách dùng tập điện áp cân bằng ba pha. Cụ thể, ta có:

$$u_{qs}^r = \sqrt{2}u_{sf}, \qquad u_{ds}^r = 0, \qquad u_{0s}^r = 0$$

Chúng ta đã xuất phát từ các mô hình toán học của động cơ micro từ trở đồng bộ ba pha. Dựa trên các phương trình thu được, có thể thực hiện phân tích phi tuyến và có thể tìm dòng điện và điện áp pha cần để đảm bảo các điều kiện hoạt động cân bằng. Có thể dùng trực tiếp kết quả nhận được cho mô phỏng phi tuyến.

Các khía cạnh chế tạo micro

Việc chế tạo các cấu trúc micro và bộ chuyển đổi cơ điện tử micro có thể được thực hiện bằng cách kết tủa các chất dẫn (dây và cuộn dây), lõi từ, lớp cách ly, cũng như các cấu trúc micro khác (thành phần chuyển động và đứng yên). Yêu cầu của các quy trình, vật liệu và các bước tuần tự là khác nhau phụ thuộc vào MEMS cần được sáng chế, thiết kế, phân tích và tối ưu trước.

Kết tủa màng mỏng dây dẫn

Có thể chế tạo các dây dẫn (dây micro tạo nên cuộn dây) trong cấu trúc micro và chuyển đổi micro bằng cách kết tủa bằng điện đồng và các kim loại điện trở thấp khác. Việc kết tủa bằng điện của các kim loại được làm bằng cách nhúng bề mặt dẫn trong một dung dịch chứa các ion kim loại được kết tủa. Bề mặt này được nối điện với một nguồn điện bên ngoài và dòng điện được dẫn qua bề mặt vào trong dung dịch. Nói chung, phản ứng của ion kim loại ($Metal^{x+}$) với x điện tử (xe^-) để hình thành kim loại (Metal) là $Metal^{x+} + xe^- = Metal$.

Để kết tủa bằng điện đồng trên tấm silicon, người ta thường phủ tấm bằng một lớp dẫn mỏng bằng đồng (lớp tạo mầm) và nhúng trong một dung dịch chứa các ion đồng. Tiếp xúc điện được tạo ra từ lớp mầm, dòng điện được chạy theo phản ứng $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$ trên bề mặt tấm. Được tương tác điện làm cho các ion kim loại chuyển thành các nguyên tử kim loại nên tấm là catôt. Một bề mặt hoạt động điện khác (anôt) là dung dịch dẫn tạo nên đường dẫn điện. Tại anôt, phản ứng oxy hóa diễn ra làm cân bằng dòng điện tại catôt, như vậy sẽ giữ tính trung hòa điện. Trong trường hợp mạ đồng bằng điện, tất cả các ion rời khỏi dung dịch tại catôt tấm được thay thế bởi sự phân hủy từ anôt đồng. Theo định luật điện phân Faraday, khi không có phản ứng thứ cấp, dòng điện được đưa tới bề mặt dẫn trong khi mạ điện tỷ lệ với số lượng kim loại kết tủa. Như vậy, kim loại được kết tủa có thể được điều khiển bằng cách thay đổi dòng điện mạ (mật độ dòng điện) và thời gian kết tủa.

Phản ứng hydrat các ion Cu là:

$$Cu^{++} \rightarrow Cu(H_2O)_6^{++}$$

và các phản ứng ở catôt là:

$$Cu^{++} + 2e^- \rightarrow Cu, \qquad Cu^{++} + e^- \rightarrow Cu^+, \quad 2Cu^+ \rightarrow Cu^{++} + Cu, \quad H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{2}H_2$$

Dung dịch mạ đồng thường được dùng là: $CuSO_4$ - $5H_2O$ (250 g/l) và H_2SO_4 (25 ml/l).

Các quy trình cơ bản được mô tả trên hình 20.131 trong đó có mô tả tóm tắt về các bước tuần tự và thiết bị sử dụng.

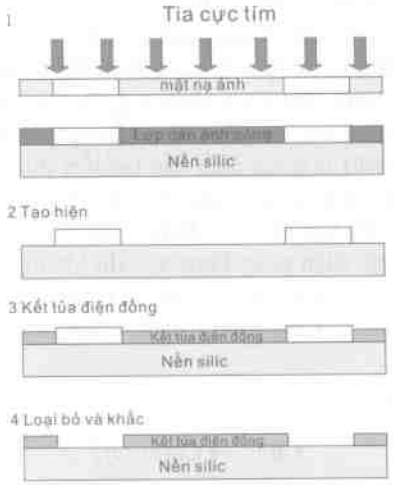
Lưu ý rằng các vật liệu từ tính và chất dẫn thường được dùng không dính tốt với silicon. Vì vậy, như đã mô tả, các lớp dính (như titan Ti hoặc crôm Cr) được kết tủa trên bề mặt silicon trước khi mạ vật liệu từ.

Tốc độ kết tủa tỷ lệ với mật độ dòng điện và như vậy, cần mật độ dòng điện không đổi tại lớp tạo đế để đạt được độ dày kết tủa đồng nhất. Để kết tủa có độ dày thay đổi, người ta phủ lên các phần của lớp tạo đế bằng chất cản (mật độ dòng điện tại các cạnh của mặt nạ không đồng nhất làm khả năng mạ không giống nhau). Ngoài sự phụ thuộc vào mật độ dòng điện, tốc độ kết tủa là hàm phi tuyến của nhiệt độ, dung dịch (chất hóa học), độ pH, biên độ điện áp hay dòng điện thuận/nghịch, xung dạng sóng, hệ số công suất, điện tích mạ... Trong dạng đơn giản nhất, độ dày và thời gian kết tủa cho các vật liệu cụ thể được tính như sau:

$$\text{Độ dày}_{\text{vật liệu}} = \frac{\text{Thời gian}_{\text{mạ điện}} \times \text{Dòng điện}_{\text{mật độ}} \times \text{Khối lượng}_{\text{phân tử}}}{\text{Faraday}_{\text{hằng số}} \times \text{Mật độ}_{\text{vật liệu}} \times \text{Electron}_{\text{số}}}$$

$$\text{Thời gian}_{\text{mạ điện}} = \frac{\text{Độ dày}_{\text{vật liệu}} \times \text{Faraday}_{\text{hằng số}} \times \text{Mật độ}_{\text{vật liệu}} \times \text{Electron}_{\text{số}}}{\text{Dòng điện}_{\text{mật độ}} \times \text{Khối lượng}_{\text{phân tử}}}$$

Chúng ta đã nhấn mạnh rằng mạ điện được dùng để kết tủa các dây dẫn màng mỏng và các vật liệu từ. Tuy nhiên, các bộ chuyển đổi micro cần các lớp cách ly nếu không lõi từ và cuộn dây cũng như các cuộn dây micro đa lớp tự nó cũng sẽ bị ngắn mạch. Lưu ý rằng, các lớp tạo mầm được nhúng trong quá trình chế tạo micro. Khi gia công lõi từ ở phía trên của các cuộn dây micro (hoặc các cuộn dây micro được làm trên lõi từ), khó có thể loại bỏ lớp tạo mầm do nó nằm ở phía dưới hoặc tại vị trí chính giữa cấu trúc micro. Lớp tạo mầm dạng lưới có thể dùng như là lớp tạo mầm mạ cho các dây dẫn thấp hơn và khi cấu trúc micro được tạo ra, các cạnh của lớp tạo mầm dạng lưới có thể được làm lộ ra và loại bỏ bằng cách ăn mòn plasma [6]. Như vậy, các cuộn dây micro sẽ được cách ly. Lưu ý rằng cần sử dụng các kỹ thuật tỷ số mật độ đủ cao để chế tạo lõi từ và cuộn dây micro; đồng thời các vấn đề tạo hình cũng như làm phẳng bề mặt cũng phải được quan tâm.



HÌNH 20.131 Kết tủa đồng và các quá trình cơ bản: silic, kapton và các đế khác, có thể được dùng. Sau khi làm sạch, người ta phủ lên đế silic bằng cách phun một lớp crôm hoặc titan 5-10 nm và 100-200 nm đồng. Các cuộn dây đồng micro (cấu trúc micro) được tạo hình bằng cách dùng kỹ thuật quang litô UV. Có thể phủ quay và làm khô ban đầu chất cảm quang AZ-4562 trên đĩa nóng tại 90-100°C (30-40 % với nhiệt độ ban đầu 20-25°C) trong 1 giờ. Sau đó, phơi chất cảm quang trong (máy tạo mặt nạ tiếp xúc Karl Suss) với năng lượng 1200-1800 mJ cm^2. Chất cảm quang được giải phóng trong dung dịch alkaline loãng tỉ lệ 1:4 (AZ-400) trong 4-6 phút. Ta thu được độ dày chất cảm quang cỡ 15-25 μm. Đồng được kết tủa với một hệ thống ba cực có một anốt đồng và điện cực tham chiếu calomen bão hòa (nguồn dòng là nguồn công suất dòng điện Parkin Elmer EG&G 263). Dùng bình sunfat Shipley với chất tẩy quang 5-10 ml/l để làm mịn chất kết tủa. Kết tủa điện được thực hiện tại nhiệt độ 20-25°C với kích thích từ và mật độ dòng điện 1 chiều 40-60 mA/cm^2 (mật độ dòng điện này làm mịn màng mỏng ứng với độ nhám rms 5-10 nm và độ dày 10 μm của màng mỏng đồng kết tủa). Điện trở của màng mỏng đồng kết tủa (cuộn dây micro) là 1,6-1,8 $\mu\Omega$ cm (gần bằng điện trở của đồng khối). Sau khi kết tủa, chất cảm quang sẽ được loại bỏ

Kết tủa màng mỏng NiFe

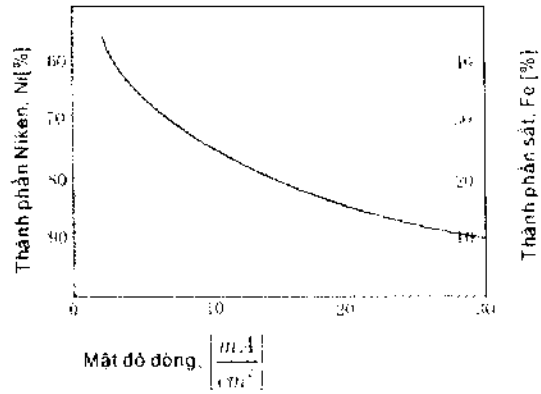
Trong rất nhiều ứng dụng cần phải tạo các lõi từ trong các cấu trúc micro và chuyển đổi micro. Ví dụ các màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ mạ, như *hợp kim pecmaloi* $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$, có thể được kết tủa để hình thành lõi từ của bộ chuyển đổi micro (cơ cấu chấp hành và cảm biến), bộ điện cảm, bộ biến đổi, công tắc... Các quá trình và các bước tuần tự cơ bản được dùng tương tự với các quá trình kết tủa và mạ điện đồng được thực hiện trong bể mạ. Cần cách ly các cuộn dây (cuộn dây micro) với lõi từ và do đó, cần kết tủa các lớp cách ly. Vật liệu thường được dùng để cách ly các cuộn dây với

lõi từ là benzocyclobutene, polyimide (PI-2611)... Ví dụ cyclotene 7200-35 nhạy sáng và có thể được tạo hình nhờ quang litô. Benzocyclobutene được dùng như là chất cảm quang vì có ưu điểm là dễ tạo hình và làm phẳng tốt, ổn định tại nhiệt độ thấp và hút nước ít.

Quá trình chế tạo bộ chuyển đổi micro có bộ phận chuyển động được minh họa trên hình 20.132. Trên đế silic, lớp tạo mầm dạng lưới crôm-đồng-crôm (Cr-Cu-Cr) được kết tủa (nhờ bốc bay điện tử) hình thành lớp tạo mầm cho mạ điện. Lớp cách ly (polyimide Dupont PI-2611) được quay trên lớp tạo mầm dạng lưới để hình thành khuôn mạ. Người ta phủ một vài lớp để thu được độ dày mong muốn của khuôn polyimide (một lớp phủ sẽ cho độ dày lớp cách ly từ 8-12 μm). Sau khi phủ, polyimide được xử lý (tại 280°C-310°C) trong nitơ 1 giờ. Lớp nhôm mỏng được kết tủa ở mặt trên của polyimide để hình thành mặt nạ cứng cho ăn mòn khô. Các khuôn để chế tạo dây dẫn thấp được tạo hình và khắc plasma đến khi lớp tạo mầm lộ ra. Sau khi khắc nhôm (mặt nạ cứng) và crôm (lớp tạo mầm crôm-đồng-crôm trên cùng), các khuôn được phủ bằng đồng mạ, áp dụng quá trình mạ đồng đã được mô tả ở phần trước. Một lớp phủ polyimide dùng để cách ly dây dẫn bậc thấp với lõi từ (do đó, hoàn thành sự cách ly). Lớp tạo mầm được kết tủa, tạo hình dạng lưới, phủ polyimide và xử lý cứng. Các lớp nhôm mỏng (mặt nạ cứng cho khô) được kết tủa và làm khuôn cho lõi từ được tạo hình và ăn mòn đến khi lớp tạo mầm lộ ra. Sau khi ăn mòn nhôm (mặt nạ cứng) và crôm (lớp tạo mầm crôm-đồng-crôm trên cùng), khuôn được phủ bằng các màng mỏng mạ $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ (quá trình mạ). Vỏ của lớp cách ly (polyimide) được đúc quay và xử lý để cách ly lõi từ với dây dẫn phía trên. Các lỗ xuyên được tạo hình trong lớp nhôm phun xạ (mặt nạ cứng) và được ăn mòn tới polyimide dùng plasma oxit. Các lỗ xuyên được phủ bằng đồng mạ (quá trình mạ). Người ta kết tủa một lớp tạo mầm đồng-crôm và tạo khuôn cho dây dẫn phía trên dùng chất cảm quang dày. Khuôn được phủ bằng đồng mạ rồi loại bỏ. Sau đó, khe hở cho các thành phần chuyển động được tạo bằng các quá trình truyền thống. Sau khi loại bỏ lớp tạo mầm, người ta phủ và xử lý lớp chống rỉ để bảo vệ các dây dẫn trên cùng. Lớp Polyimide được tạo mặt nạ và ăn mòn tới đế silic. Lớp tạo mầm dạng lưới phía dưới được ăn mòn ướt, sau đó bộ chuyển đổi micro (với các IC điều khiển) được cắt và đóng gói.

HÌNH 20.132 Trình tự các bước gia công cơ bản bộ chuyển đổi micro

Nhôm mạ là vật liệu cần thiết để chế tạo cấu trúc micro. Cụ thể, có thể dùng nhôm như là dây dẫn để chế tạo các cuộn dây micro cũng như các cấu trúc micro cơ học (bánh răng, trục, chốt, bề mặt phản xạ...). Có thể tìm hiểu các công nghệ và quá trình tiên tiến cho việc kết tủa nhôm trong [9].



HÌNH 20.133 Thành phần cấu tạo của niken và đồng trong màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ là một hàm của mật độ dòng điện

Như đã trình bày, cần phải chế tạo lõi từ của cấu trúc micro và chuyển đổi micro. Hai khó khăn chính trong chế tạo các cấu trúc micro hiệu suất cao là việc tạo các màng mỏng từ được mạ với các đặc tính từ tốt cũng như các cấu trúc phẳng (các thành phần chuyển động hoặc đứng yên) [10]. Có thể dùng các kỹ thuật và quá trình dùng khuôn micro và mạ điện để kết tủa hợp kim NiFe (màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$) và $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$ gọi là *hợp kim pecmaloi*, còn $Ni_{50\%}Fe_{50\%}$ được gọi là *orthonol*.

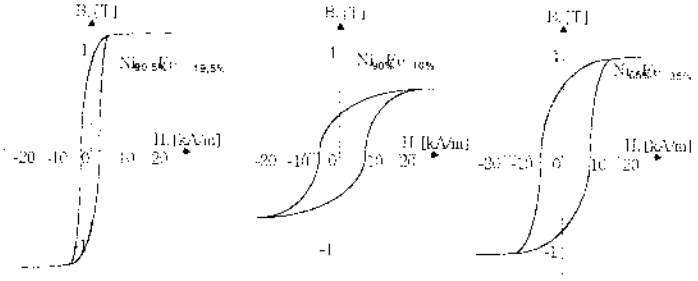
Để kết tủa các màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$, người ta phủ lên đế silic một lớp tạo mầm (ví dụ 15-25 nm crôm, 100-200 nm đồng và 25-50 nm crôm) được kết tủa bằng cách bay hơi chùm điện tử. Lớp cảm quang (ví dụ 10-20 μm Shipley STR-1110) được kết tủa trên lớp tạo mầm và được tạo hình. Sau đó, thực hiện việc kết tủa $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ tại 20-30°C bằng cách dùng một hệ thống hai điện cực và mật độ dòng điện trong khoảng từ 1 đến 30 mA/cm^2. Nên giữ nhiệt độ và độ pH theo các giá trị được khuyến nghị. Độ pH cao làm cho các màng mỏng NiFe quá căng, còn độ pH thấp sẽ giảm độ bằng phẳng và dẫn đến việc phân hủy hóa học của các anôt sắt gây nên sự phá vỡ cân bằng bể chứa và sự không đồng nhất. Nhiệt độ cao làm cho sự kết tủa yếu và nhiệt độ thấp dẫn đến việc tăng mật độ dòng điện lên cao. Để thực hiện quá trình kết tủa, có thể dùng điều chế độ rộng xung (khi dạng sóng thay đổi, biên độ thuận và nghịch thay đổi và chu kỳ công suất được điều khiển) bằng cách sử dụng các bộ công suất xung tự làm hoặc thương mại. Gọi độ dài chu kỳ công suất là T, độ dài xung thuận và nghịch là T_f và T_r. Độ dài xung T có thể là 5-20 μs và chu kỳ công suất (tỷ số T_f/T_r) có thể thay đổi từ 1 đến 0.1. Tỷ số T_f/T_r ảnh hưởng đến tỷ lệ phần trăm Ni trong các màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$, nghĩa là thành phần của $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ có thể điều khiển dựa trên các tích chất mong muốn sẽ được mô tả sau. Tuy nhiên, khi thay đổi tỷ số T_f/T_r, thì tỉ lệ Ni cũng thay đổi tương đối (từ 85% đến 79%) nên, các tham số khác cũng phải thay đổi để đạt được thành phần mong muốn.

Lưu ý rằng thành phần niken (và sắt) là một hàm của mật độ dòng điện, hình 20.133 minh họa thành phần niken (sắt) trong các màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$.

Các màng mỏng $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$ có độ dày khác nhau (là một hàm của thời gian kết tủa) thường được chế tạo với mật độ dòng điện 14-16 mA/cm^2. Khoảng giá trị này của mật độ dòng điện dùng để chế tạo các màng mỏng *pecmaloi* có các độ dày khác nhau (từ 500 nm đến 50 μm). Giá trị căn quân phương (rms) của độ nhám màng mỏng là 4-7nm ứng với độ dày 20 μm. Lưu ý rằng để đảm bảo chất lượng bề mặt, nên giữ mật độ dòng điện trong một khoảng xác định và thường xuyên thay đổi thành phần của màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$, phải điều khiển được dòng điện nghịch.

Để đạt được kết tủa *pecmaloi* tốt, bể mạ cần chứa $NiSO_4$ (0.7 mol/l), $FeSO_4$ (0.03 mol/l), $NiCl_2$ (0.02 mol/l), sacarin (0.0016 mol/l) làm chất san phẳng (leveler) (nhằm giảm ứng suất dư để gia công các màng dày hơn) và axit boric (0.4 mol/l).

Không khí và sacarin đã được thêm vào để giảm biến dạng trong và giữ cho thành phần Fe ổn định. Tốc độ kết tủa thay đổi tuyến tính như là một hàm của mật độ dòng điện (tuân theo định luật Faraday) và độ dốc kết tủa là 100-150 nm cm^2/min mA. Tỷ khối màng mỏng *pecmaloi* là 9 g/cm^3 (với *pecmaloi* khối).



HÌNH 20.134 Các đường cong B-H với các màng mỏng pecmaloi $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ khác nhau

Các tính chất từ tính của các màng mỏng $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$ (*hợp kim pecmaloi*) đã được nghiên cứu và độ kháng từ trường (H_c) là một hàm của độ dày. Ví dụ H_c = 650 A/m khi độ dày là150 nm và H_c = 30 A/m khi độ dày là 600 nm.

Các dung dịch mạ khác $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$ (kết tủa tại 25°C) và $Ni_{50\%}Fe_{50\%}$ (kết tủa tại 55°C) là:

- $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$: $NiSO_4$-$6H_2O$ (200 g/l), $FeSO_4$-$7H_2O$ (9 g/l), $NiCl_2$-$6H_2O$ (5 g/l), H_3BO_3 (27 g/l), sacarin (3 g/l) và pH (2.5-3.5);
- $Ni_{50\%}Fe_{50\%}$: $NiSO_4$-$6H_2O$ (170 g/l), $FeSO_4$-$7H_2O$ (80 g/l), $NiCl_2$-$6H_2O$ (138 g/l), H_3BO_3 (50 g/l), sacarin (3 g/l) và pH (3.5-4.5).

Để mạ màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$, có thể dùng các phụ gia và thành phần khác nhau (của M&T Chemicals và các nhà cung cấp khác) để điều khiển ứng suất nội và độ mềm của kết tủa, giữ hàm lượng sắt được hòa tan, màng phim sáng và bằng phẳng có độ nhám bề mặt mong muốn và quan trọng nhất là đảm bảo các tính chất từ mong muốn.

Nói chung, các màng mỏng *pecmaloi* cho ta các chất từ tính tối ưu khi thành phần có: 80.5% Ni và 19.5% Fe. Với màng mỏng $Ni_{80.5\%}Fe_{19.5\%}$, hiện tượng từ giảo vật liệu đi qua điểm 0. Các màng có độ từ giảo nhỏ nhất thường có các tính chất kháng từ và độ từ thẩm tối ưu. Nói chung, độ kháng từ (phụ thuộc độ dày của màng) là 20 A/m (và cao hơn khi độ dày giảm), độ từ thẩm là từ 600 đến 2000. Việc thay đổi thành phần Fe và Ni sẽ thay đổi các đặc tính của màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$. Thành phần của màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ được điều khiển bằng cách thay đổi mật độ dòng điện, tỷ số T_f/T_r (chu kỳ công suất), nhiệt độ bể (nhờ thay đổi nhiệt độ, sẽ thay đổi thành phần Ni từ 75 đến 92%), dòng điện nghịch (nhờ thay đổi dòng điện nghịch trong khoảng 0-1 A, có thể thay đổi thành phần Ni từ 72 đến 90%), bổ sung không khí cho dung dịch, tần số thấp paddle (0.1-1 Hz), dạng sóng xung thuận và nghịch... Các đường cong B-H cho ba màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ khác nhau được minh họa trên hình 20.134. Các màng mỏng $Ni_{80.5\%}Fe_{19.5\%}$ có mật độ thông lượng bão hòa 1,2 T, độ từ dư B_r = 0.26 T-A/m và độ từ thẩm tương đối 600-2000.

Lưu ý rằng các nam châm vĩnh cửu được mạ khác (NiFeMo, NiCo, CoNiMnP...) và các nam châm polyme được gia công micro thể hiện các tính chất từ tốt và có thể dùng làm dung dịch thay thế để màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ được dùng rộng rãi.

Kết tủa màng mỏng NiFeMo và NiCo

Để thu được các tính chất từ tính (mật độ thông lượng, độ kháng từ, độ từ thẩm...) và độ dày mong muốn, có thể dùng các hợp kim màng mỏng khác nhau dựa trên thiết kế cấu trúc micro và chuyển đổi micro, các ứng dụng và các điều kiện hoạt động (nhiệt độ, shock, bức xạ, độ ẩm...).

Như đã trình bày ở trên, có thể dùng các màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ một cách hiệu quả và có thể dễ dàng đạt được các tính chất từ mong muốn bằng cách thay đổi thành phần Ni và Fe. Với các cảm biến, nhà thiết kế thường cực đại hóa mật độ thông lượng và độ từ thẩm và cực tiểu hóa độ kháng từ. Các màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$ có mật độ thông lượng lên tới 1,2 T, độ kháng từ từ 20 (*pecmaloi*) tới 500 A/m đồng thời độ từ thẩm 600-2000 (lưu ý rằng các chất từ tính cũng phụ thuộc vào độ dày). Sau khi làm nổi bật các thuộc tính của màng mỏng $Ni_{x\%}Fe_{100-x\%}$, chúng ta sẽ hãy thực hiện việc so sánh. Vấn đề này được trình bày trong tài liệu [11]:

> Các màng mỏng $Ni_{79\%}Fe_{17\%}Mo_{4\%}$ có mật độ thông lượng 0.7 T, độ kháng từ 5 A/m và độ từ thẩm 3400, các màng mỏng $Ni_{85\%}Fe_{14\%}Mo_{1\%}$ có mật độ thông lượng 1-1, 1 T, độ kháng từ 8-300 A/m và độ từ thẩm 3000-20000, các màng mỏng $Ni_{50\%}Co_{50\%}$ có mật độ thông lượng 0.9-1,1 T, độ kháng từ 1200-1500 A/m và độ từ thẩm 100-150 (các màng mỏng $Ni_{79\%}Co_{21\%}$ có độ từ thẩm 20).

Nói chung, mật độ thông lượng cao, độ kháng từ thấp và độ từ thẩm cao làm tăng khả năng của MEMS. Tuy nhiên, các vấn đề khác (khả năng cung cấp, sự tuân theo, điều kiện hoạt động, sự chế tạo...) cũng phải được xác định khi lựa chọn cuối cùng. Lưu ý rằng các đặc tính từ và độ dày màng, chịu ảnh hưởng lớn bởi các quá trình chế tạo và hóa chất (vật liệu) được dùng.

Người ta cần chế tạo lõi từ trong các cấu trúc micro và chuyển đổi micro. Hai khó khăn chính trong chế tạo cấu trúc micro và chuyển đổi micro tiên tiến là tạo các màng mỏng từ tính được mạ điện với các tính chất từ tốt cũng như phẳng hóa các thành phần cố định và chuyển động. Các kỹ thuật và quy trình mạ điện và tạo khuôn micro được dùng để kết tủa các màng mỏng NiFe, NiFeMo và NiCo. Cụ thể, các dung dịch mạ của $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$, NiFeMo và NiCo (được kết tủa tại nhiệt độ 25°C) là:

- $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$: $NiSO_4$-$6H_2O$ (200 g/l), $FeSO_4$-$7H_2O$ (9 g/l), $NiCl_2$-$6H_2O$ (5 g/l), H_3BO_3 (27 g/l) và sacarin (3 g/l). Mật độ dòng điện là 10-25 mA/cm^2 (có thể dùng niken lá làm anôt);
- NiFeMo: $NiSO_4$-$6H_2O$ (60 g/l), $FeSO_4$-$7H_2O$ (4 g/l), $NiCl_2$-$6H_2O$ (2 g/l), NaCl (10 g/l), axit xitric (66 g/l) và sacarin (3 g/l). Mật độ dòng điện là 10-30 mA/cm^2 (có thể dùng niken lá làm anôt);
- NiCo: $NiSO_4$-$6H_2O$ (300 g/l), $NiCl_2$-$6H_2O$ (50 g/l), $CoSO_4$-$7H_2O$ (30 g/l), H_3BO_3 (30 g/l), natri lauryl sunfat (0.1 g/l) và sacarin (1,5 g/l). Mật độ dòng điện là 10-25 mA/cm^2 (có thể dùng niken hoặc côban làm anôt).

Đặc tính quan trọng nhất là có thể chế tạo các màng mỏng $Ni_{80\%}Fe_{20\%}$-NiFeMo-NiCo (nano compozit đa lớp) hình thành các tính chất từ của vật liệu thu được để đạt được các đặc tính hoạt động mong muốn thông qua các quá trình thiết kế và chế tạo.

Nam châm vĩnh cửu polyme

Có thể thiết kế và chế tạo các chấp hành điện từ micro mới bằng cách dùng các màng mỏng nam châm điện được gia công micro có các nam châm polyme (bột gốm ferit từ cứng được trộn trong nhựa epoxi). Có nhiều dạng và hình dáng nam châm polyme khác nhau. Đĩa và tấm màng mỏng là sự thích hợp duy nhất cho các ứng dụng bộ chấp hành micro. Ví dụ để khởi động gương trong các thiết bị quang học và MEMS quang, người ta dùng các nam châm vĩnh cửu trong các bộ chuyển đổi micro quay và tịnh tiến (tuyến tính), cảm biến micro, công tắc micro... Các nam châm polyme này có độ dày trong khoảng hàng trăm micro mét đến vài mili mét. Có thể đạt được các tính chất từ rất tốt. Ví dụ đĩa nam châm vĩnh cửu polyme được gia công micro với 80% stronti ferit cô đặc (bán kính 4 mm và độ dày 90 μm), được từ hóa trực giao với mặt phẳng màng mỏng (theo hướng độ dày), có độ kháng từ trong H_{ci} = 320000 A/m và độ tự cảm dư B_r =0.06 T [12]. Các nam châm polyme vĩnh cửu với độ dày lên tới vài mili mét có thể được chế tạo bằng các quá trình ở nhiệt độ thấp. Để tạo các nam châm vĩnh cửu, có thể dùng bột stronti ferit của Hoosier Magnetics Co. (kích thước hạt 1,1-1,5 μm) và nhựa epoxi (được xử lý tại nhiệt độ 80°C trong 2 giờ) [12]. Hỗn hợp polyme gồm nhựa epoxi dựa trên bisphenol-A được pha loãng với cresylglycidyl và dùng amiđo amin béo để xử lý. Để chuẩn bị các hỗn hợp nam châm polyme, người ta trộn bột stronti

ferit với nhựa epoxi trong hệ thống cán quay (với tốc độ 0.5 rad/s trong nhiều giờ). Sau khi thêm amiđo amin béo, cầu oxi được kết tủa và tạo hình bằng cách dùng kỹ thuật in lụa. Tiếp theo, người ta xử lý nam châm tại 80°C trong 2 giờ và từ hóa theo hướng mong muốn.

Lưu ý rằng cần phải từ hóa nam châm. Tức là, ngoài quá trình chế tạo, ta nên nghiên cứu các vấn đề khác, ví dụ động lực học từ hóa. Từ trường trong các màng mỏng được mô hình, phân tích và mô phỏng bằng cách giải các phương trình vi phân và lấy cả kết quả giải tích lẫn kết quả số.

Động lực học từ hóa của màng mỏng

Từ trường, bao gồm phân bố từ hóa trong màng mỏng được mô hình, phân tích và mô phỏng bằng cách giải các phương trình vi phân. Các biến số động lực học là mật độ và cường độ từ trường, độ từ hóa, hướng từ hóa, miền vị trí vách,... Người ta thấy rằng cần phải từ hóa các màng mỏng. Vì vậy, chúng ta sẽ nghiên cứu động lực học từ hóa của các màng mỏng. Để thu được mô hình có tính trung thực cao, người ta mô tả động lực học từ hóa trong hệ tọa độ góc bằng các phương trình Landay-Lifschitz-Gilbert [13]:

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\gamma}{M_s(1+\alpha^2)}\left(\sin^{-1}\psi\frac{\partial E(\theta,\psi)}{\partial\theta} + \alpha\frac{\partial E(\theta,\psi)}{\partial\psi}\right)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\gamma\sin^{-1}\psi}{M_s(1+\alpha^2)}\left(\alpha\sin^{-1}\psi\frac{\partial E(\theta,\psi)}{\partial\theta} - \frac{\partial E(\theta,\psi)}{\partial\psi}\right)$$

ở đây M_s là độ từ hóa bão hòa; $E(\theta, \psi)$ là tổng mật độ năng lượng tự do màng mỏng Gibb; γ và α là các hằng số từ hồi chuyển và hiện tượng học.

Năng lượng tổng cộng gồm năng lượng dị hướng từ tinh thể, năng lượng trao đổi và năng lượng tĩnh từ tự có (năng lượng trường tạp tán) [14]:

$$E = \int_v \left(\frac{k_{exh}}{J_s^2}\sum_{j=1}^{3}(\nabla J_j)^2 - \frac{k_J}{J_s^2}(a_J\mathbf{J})^2 - \frac{1}{2}\mathbf{J}\cdot\mathbf{H}_D - \mathbf{J}\cdot\mathbf{H}_{ex}\right)dv \quad \text{(năng lượng Zeeman)}$$

$$\frac{\partial\mathbf{J}}{\partial t} = -|\gamma|\,\mathbf{J}\times\mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{J_s}\mathbf{J}\times\frac{\partial\mathbf{J}}{\partial t} \quad \text{(phương trình Gilbert)}$$

ở đây **J** là vectơ phẳng hóa từ, $\mathbf{H}_D$ và $\mathbf{H}_{ex}$ là các từ trường khử từ và từ trường ngoài, $\mathbf{H}_{eff}$ là từ trường hiệu dụng (tổng các trường tác dụng, khử từ và dị hướng), k_{exh} và k_J là các hằng số trao đổi và dị hướng tinh thể từ, $\mathbf{a}_J$ là vectơ đơn vị song song với đơn trục dễ từ.

Dùng ký hiệu véctơ, ta có:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2}\left(\mathbf{M}\times\mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s}\mathbf{M}\times(\mathbf{M}\times\mathbf{H}_{eff})\right)$$

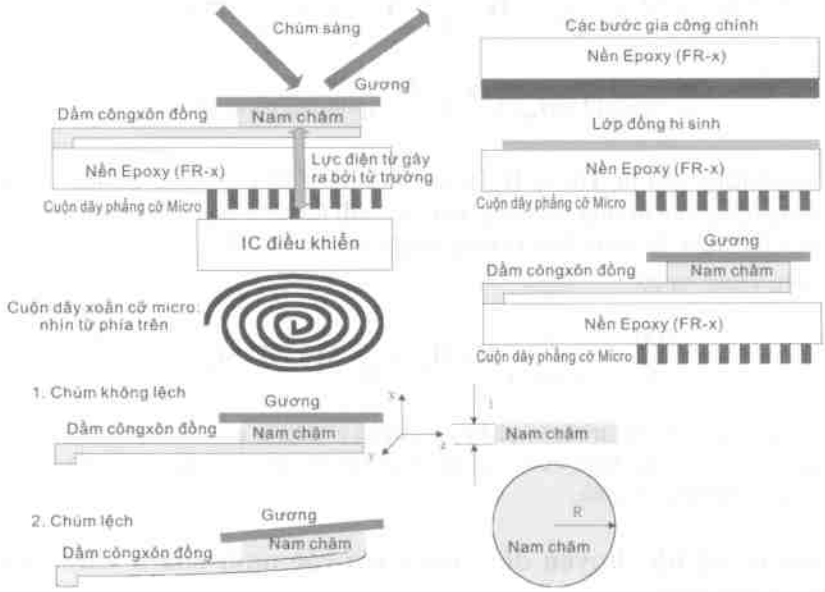
Như vậy, dùng các phương trình vi phân phi tuyến ở trên ta có thể thực hiện mô hình hóa và phân tích chính xác các nam châm vĩnh cửu nano compozit có cấu trúc nano bằng cách dùng các thông số vật liệu, tham số, hằng số.

Cấu trúc micro và bộ chuyển đổi micro với các nam châm vĩnh cửu: cơ cấu chấp hành gương micro

Chấp hành điện từ micro (nam châm vĩnh cửu trên thanh dầm linh hoạt và các cuộn dây phẳng dạng xoắn được điều khiển bởi các IC chế tạo bằng công nghệ CMOS-MEMS) được minh họa trên hình 20.135.

Có thể sản xuất các chấp hành điện từ micro bằng cách dùng các công nghệ gia công bề mặt micro và chế tạo CMOS truyền thống thông qua mạ điện, in lụa, các quá trình dát mỏng, các kỹ

thuật dùng lớp hy sinh, quang litô, ăn mòn... Cụ thể, để sản xuất chấp hành điện từ micro cần nghiên cứu trên các đế epoxi thương mại (ví dụ chuỗi FR), có lớp đồng dát mỏng một mặt (độ dày lớp đồng có thể từ 10 μm hoặc lớn hơn được xác định bằng mật độ dòng điện chấp nhận và giá trị dòng điện cần để thiết lập từ trường mong muốn nhằm đạt được độ lệch gương xác định, tốc độ võng, thời gian lắng và các đặc tính động lực và trạng thái ổn định khác). Có thể sản xuất các cuộn dây micro phẳng dạng xoắn trên lớp đồng dát mỏng một mặt bằng cách dùng kỹ thuật quang litô và ăn mòn ướt trong dung dịch sắt clorua. Cuộn dây micro dày x -μm có N vòng thu được sẽ tạo nên từ trường (số vòng là hàm số của diện tích hoạt động sẵn có, độ dày, khoảng cách, các bán kính ngoài và trong, hình dạng, các kỹ thuật và quy trình chế tạo được dùng...). Sau khi chế tạo các cuộn dây micro phẳng, người ta chế tạo thanh dầm với nam châm vĩnh cửu và gương trên mặt khác của đế. Trước tiên, lớp cảm quang hy sinh được quay phủ và định hình trên đế. Sau đó, người ta kết tủa lớp tạo mầm Ti-Cu-Cr để thực hiện việc mạ đồng (nếu đồng được dùng để chế tạo cấu trúc dầm công xôn linh hoạt). Lớp cảm quang thứ hai được quay và định hình để tạo khuôn cho việc mạ thanh dầm công xôn bằng đồng. Thanh dầm bằng đồng được mạ trong bể mạ đồng sunfat. Sau khi mạ, người ta loại bỏ khuôn mạ cảm quang và lớp tạo mầm để giải phóng cấu trúc thanh dầm công xôn. Lưu ý rằng tùy theo nam châm vĩnh cửu được dùng, cần phải thực hiện các quá trình chế tạo tương ứng trước hoặc sau khi giải phóng thanh dầm. Người ta định vị đặt đĩa nam châm vĩnh cửu trên đầu tự do của thanh dầm(ví dụ có thể in lụa nam châm polyme, sau đó xử lý nam châm epoxi, nam châm này được từ hóa bằng từ trường bên ngoài). Sau đó, người ta giải phóng thanh dầm với gương được chế tạo bằng cách loại bỏ lớp cảm quang hy sinh bằng axêtôn. Phải nhấn mạnh rằng chấp hành điện từ micro đang nghiên cứu được chế tạo bằng cách dùng gia công micro hiệu quả cao giá thành thấp (có thể chấp nhận được)-công nghệ CMOS, các quá trình và vật liệu. Đặc trưng hấp dẫn nhất là các ứng dụng dùng cuộn dây phẳng có thể thực hiện một cách dễ dàng. Việc dùng các nam châm vĩnh cửu polyme (có các tính chất từ tốt) cho phép chúng ta thiết kế các chấp hành micro tiên tiến. Cần lưu ý rằng có thể dùng silic đa tinh thể để chế tạo thanh dầm và có thể áp dụng cho các nam châm vĩnh cửu khác.



HÌNH 20.135 Chấp hành điện từ micro với các IC điều khiển

Trong tài liệu [12], lực điện từ thẳng F_{ze}, tác động trên nam châm vĩnh cửu, được cho bởi:

$$F_{ze} = M_z \int_v \frac{dH_z}{dz} dv,$$

ở đây M_z là độ từ hóa, H_z là thành phần dọc của mật độ từ trường sinh bởi các cuộn dây phẳng (H_z là hàm phi tuyến của dòng điện cung cấp vào hoặc điện áp đặt vào cuộn dây, số vòng dây, cuộn dây micro, hình dạng...; như vậy, độ dày cuộn dây được xác định dựa trên giá trị lớn nhất của dòng điện cần thiết và mật độ dòng điện có thể chấp nhận).

Các cấu trúc micro chấp hành công xôn từ tính cũng đã được nghiên cứu trong tài liệu [15, 16] và các biểu thức cho mômen xoắn điện từ là các hàm của từ trường với các giả thiết và đơn giản hóa sẽ làm giới hạn khả năng ứng dụng của kết quả. Có thể dùng các phương trình vi phân dùng để mô hình hóa động lực học điện từ và *cơ học xoắn*. Cụ thể, các phương trình trường điện từ được xây dựng bằng cách dùng lý thuyết điện từ và điều khiển cường độ trường điện từ H_z bằng cách thay đổi dòng đặt vào các cuộn dây phẳng. Khi sử dụng phương pháp phân tích ổn định sẽ dùng lý thuyết độ võng nhỏ [17], vì cũng tin cậy được. Độ võng tĩnh của thanh dầm x có thể tìm trực tiếp bằng cách dùng các thông số của lực và thanh dầm. Cụ thể, $x = (l^3/3EJ)F_n$, ở đây, l là độ dài hiệu dụng của dầm; E là môđun Young (đàn hồi); J là mômen quán tính tương đương của thanh dầm với nam châm vĩnh cửu và gương, và với thanh dầm riêng rẽ tiết diện hình chữ nhật thì $J = \frac{1}{12}wh^3$; trong đó w và h là độ rộng và độ dày của thanh dầm; F_n là tổng hợp lực vuông góc với thanh dầm.

Nói chung, giả thiết từ thông không đổi trên toàn mặt phẳng từ (mạch), mômen xoắn trên mạch điện phẳng của bất cứ kích thước và hình dáng nào trong từ trường đồng nhất là:

$$\mathbf{T} = is \times \mathbf{B} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

ở đây i là dòng điện và $\mathbf{m}$ là mômen lưỡng cực từ [Am^2].

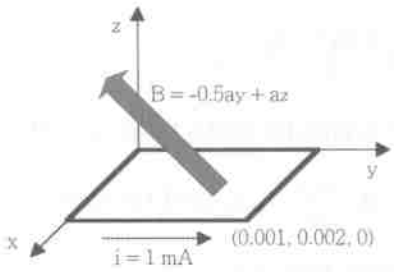
Như vậy, mômen trên mạch điện thường hướng vòng mạch để làm thẳng hàng từ trường sinh bởi vòng với từ trường nam châm vĩnh cửu gây nên mômen điện từ.

Ví dụ với vòng dòng điện cho trên hình 20.136, mômen (Nm) được tìm như sau:

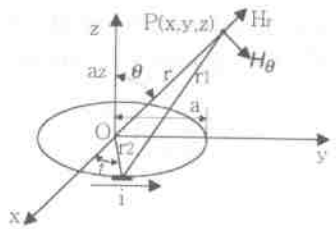
$$\mathbf{T} = is \times \mathbf{B} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} = 1\times10^{-3}\left[(1\times10^{-3})(2\times10^{-3})\mathbf{a}_z\right] \times (-0.5\mathbf{a}_y + \mathbf{a}_z) = 1\times10^{-9}\mathbf{a}_x$$

Lực điện từ được tìm như sau:

$$\mathbf{F} = \oint_l id\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$



HÌNH 20.136 Cuộn phẳng hình chữ nhật trong từ trường đồng nhất với mật độ từ thông $\mathbf{B} = -0.5\mathbf{a}_y + \mathbf{a}_z$



HÌNH 20.137 Cuộn dòng điện phẳng

Nói chung, các đại lượng từ trường được tính:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \oint_l \frac{d\mathbf{l} \times r_0}{r^2} \text{ hoặc } \mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} i \oint_l \frac{d\mathbf{l} \times r_0}{r^2}$$

và định luật Ampe cho mạch điện:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_{\text{tương}} \text{ hoặc } \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni$$

Dùng các biểu thức này và các tham số được xác định trong hình 20.137, ta có:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} i \oint_l \frac{d\mathbf{l} \times r_1}{r_1^3} \text{ và } \mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \oint_l \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_1}{r_1^3}$$

ở đây $d\mathbf{l} = \mathbf{a}_\phi a d\phi = (-\mathbf{a}_x \sin\phi + \mathbf{a}_y \cos\phi) a d\phi$ và $\mathbf{r}_1 = \mathbf{a}_x (x - a\cos\phi) + \mathbf{a}_y (y - a\sin\phi) + \mathbf{a}_z z$.

Như vậy:

$$d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_1 = [\mathbf{a}_x z \cos\phi + \mathbf{a}_y z \sin\phi - \mathbf{a}_z (y\sin\phi + x\cos\phi - a)] a d\phi$$

Tiếp theo, bỏ qua các đại lượng nhỏ ($a^2 \ll r^2$), ta có:

$$r_1^3 = (x^2 + y^2 + z^2 + a^2 - 2ax\cos\phi - 2ay\sin\phi)^{3/2} \approx r^3 \left(1 - \frac{2ax}{r^2}\cos\phi - \frac{2ay}{r^2}\sin\phi\right)^{3/2}$$

Do đó, ta thu được:

$$\frac{1}{r_1^3} = \frac{1}{r^3}\left(1 + \frac{3ax}{r^2}\cos\phi + \frac{3ay}{r^2}\sin\phi\right)$$

Vì vậy:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 a}{4\pi} i \int_0^{2\pi} \left[\mathbf{a}_x z\cos\phi + \mathbf{a}_y z\sin\phi - \mathbf{a}_z (y\sin\phi + x\cos\phi - a)\right] a \frac{1}{r^3}\left(1 + \frac{3ax}{r^2}\cos\phi + \frac{3ay}{r^2}\sin\phi\right) d\phi$$

$$= \frac{\mu_0 a^2}{4\pi r^3} i \left[\mathbf{a}_x \frac{3xz}{r^2} + \mathbf{a}_y \frac{3yz}{r^2} - \mathbf{a}_z \left(\frac{3x^2}{r^2} + \frac{3y^2}{r^2} - 2\right)\right]$$

Hơn nữa, dùng các phương trình biến đổi tọa độ, trong hệ tọa độ cầu, ta có:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 a^2}{4\pi r^3} i (2\mathbf{a}_r \cos\theta + \mathbf{a}_\theta \sin\theta)$$

Ta có các công thức cho các thành phần ở xa:

$$B_r = \frac{\mu_0 a^2 \cos\theta}{2\pi r^3} i, \qquad B_\theta = \frac{\mu_0 a^2 \sin\theta}{4\pi r^3} i, \qquad B_\phi = 0$$

(do tính đối xứng qua trục z, mật độ từ thông không có thành phần B_ϕ.

Dùng kỹ thuật ở trên, ta có thể dễ dàng tìm điện thế vectơ từ. Nói chung có dạng:

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \oint_l \frac{d\mathbf{l}}{r_1}$$

Giả sử $a^2 \ll r^2$, ta có:

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r}\left(1 + \frac{ax}{r^2}\cos\phi + \frac{ay}{r^2}\sin\phi\right)$$

Như vậy:

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0 a}{4\pi} i \int_0^{2\pi} (-\mathbf{a}_x \sin\phi + \mathbf{a}_y \cos\phi) \frac{1}{r}\left(1 + \frac{ax}{r^2}\cos\phi + \frac{ay}{r^2}\sin\phi\right) d\phi$$

$$= \frac{\mu_0 a}{4\pi r^3} i(-\mathbf{a}_x y + \mathbf{a}_y x)$$

Vì thế, trong hệ tọa độ cầu, ta thu được:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{A}\cdot\mathbf{a}_r)\mathbf{a}_r + (\mathbf{A}\cdot\mathbf{a}_\phi)\mathbf{a}_\phi + (\mathbf{A}\cdot\mathbf{a}_\theta)\mathbf{a}_\theta$$

$$= \frac{\mu_0 a}{4\pi r^2} i\mathbf{a}_\phi \sin\theta = A_\phi \mathbf{a}_\phi$$

Cần nhấn mạnh rằng các phương trình thu được có thể biểu diễn bằng cách dùng lưỡng cực từ.

Tuy nhiên, trong bộ chuyển đổi micro được nghiên cứu, nên thực hiện phân tích có độ chính xác cao. Vì thế, chúng ta thực hiện phân tích toàn diện.

Điện thế vectơ được tìm là:

$$A_\phi(r,\theta) = \frac{\mu_0 a i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\phi d\phi}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2ar\sin\theta\cos\phi}}$$

và:

$$B_r = \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial(\sin\theta A_\phi)}{\partial\theta}, \qquad B_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial(rA_\phi)}{\partial r}, \qquad B_\phi = 0$$

Dùng xấp xỉ dưới đây:

$$A_\phi(r,\theta) = \frac{\mu_0 a i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\phi d\phi}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2ar\sin\theta\cos\phi}} \approx \frac{\mu_0 a^2 r\sin\theta i}{4(a^2+r^2)^{3/2}}\left(1 + \frac{15a^2r^2\sin^2\theta}{8(a^2+r^2)^2} + \cdots\right)$$

ta tìm được:

$$B_r(r,\theta) = \frac{\mu_0 a^2\cos\theta i}{2(a^2+r^2)^{3/2}}\left(1 + \frac{15a^2r^2\sin^2\theta}{8(a^2+r^2)^2} + \cdots\right)$$

$$B_\theta(r,\theta) = \frac{\mu_0 a^2\sin\theta i}{4(a^2+r^2)^{5/2}}\left(2a^2 - r^2 + \frac{15a^2r^2\sin^2\theta(4a^2-3r^2)}{8(a^2+r^2)^2} + \cdots\right)$$

$$B_\phi = 0$$

Ta có thể xác định ba vùng:

- gần trục $\theta \ll 1$,
- tại tâm $r \ll a$,
- khi xa trường $r \gg a$,

Mômen và trường điện từ phụ thuộc vào dòng điện trong các cuộn dây micro và là các hàm phi tuyến của độ dịch chuyển.

Phải xuất phát từ biểu thức của lực và mômen điện từ để mô hình và phân tích động lực học *cơ học xoắn*. Có thể áp dụng định luật chuyển động Newton để nghiên cứu động lực cơ học trong hệ tọa độ vuông góc và các hệ tọa độ khác (chẳng hạn, trước đây với chuyển động tịnh tiến trên trục *x*, ta đã dùng:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}(F_e - F_L) \text{ và } \frac{dx}{dt} = v$$

để mô hình động lực học *cơ học xoắn* tịnh tiến của các chấp hành điện từ micro bằng cách dùng lực điện từ F_e và lực tải F_L).

Với chấp hành micro đang nghiên cứu, có thể nghiên cứu chuyển động quay và có thể xấp xỉ hóa mômen điện từ như sau:

$$T_e = 4R^2 t_{ff} M H_p \cos\theta$$

ở đây R và t_{ff} là bán kính và độ dày của đĩa màng mỏng nam châm vĩnh cửu; M là độ từ hóa màng mỏng nam châm vĩnh cửu; H_p là trường sinh bởi các cuộn dây phẳng; θ là góc dịch chuyển.

Tiếp theo, động lực học quay của chấp hành micro được cho như sau:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_L) \text{ và } \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

ở đây T_L là mômen tải, là tổ hợp của mômen ma sát và mômen nhiễu.

Cần nhấn mạnh rằng có thể phát triển và dùng các mô hình toán học phức tạp và toàn diện hơn bằng cách tích hợp điện từ phi tuyến với các chuyển động quay-tịnh tiến 6 bậc tự do (động lực học *cơ học xoắn*) của thanh dầm công xôn. Để minh họa, chúng ta xét mô hình có tính trung thực cao của hệ điện từ.

Mô hình hóa hệ thống điện từ trong cơ cấu chấp hành micro với các nam châm vĩnh cửu: mô hình hóa và phân tích có độ trung thực cao

Trong phần này, chúng ta bắt nguồn từ các phương trình mở rộng cho mômen và lực điện từ trên màng mỏng nam châm điện hình trụ, xem hình 20.135. Người ta giả thiết màng mỏng nam châm điện được từ hóa đồng nhất và các phương trình được phát triển với hai hướng vectơ từ hóa (một hướng song song với trục đối xứng và một hướng vuông góc với góc này). Có thể tìm trường và gradient điện từ được sinh bởi các cuộn dây phẳng tại một điểm trên không gian quán tính trùng với gốc hệ trục nam châm điện trong sự sắp xếp ban đầu của nó. Mục đích chính của chúng ta là điều khiển cơ cấu chấp hành micro và như vậy, phải xuất phát từ mô hình toán học có độ trung thực cao (sẽ dẫn đến phân tích, điều khiển và tối ưu). Để đạt được mục tiêu này, người ta tìm đủ các phương trình cho mômen và lực điện từ trên màng mỏng nam châm vĩnh cửu hình trụ.

Người ta dùng một số ký hiệu sau: A, R *và* l là diện tích, bán kính và độ dài của nam châm vĩnh cửu hình trụ; $\mathbf{B}$ là vectơ mật độ từ thông; $\mathbf{B}_e$ là vectơ mật độ từ thông mở rộng; $[\partial\mathbf{B}]$ là ma trận các gradient trường [T/m]; $[\partial\mathbf{B}_e]$ là ma trận các gradient trường mở rộng [T/m]; $\mathbf{F}$ và $\mathbf{T}$ là các vectơ lực tổng và mômen tổng trên màng mỏng nam châm điện; i là dòng điện trong cuộn dây phẳng; $\mathbf{m}$ là vectơ mômen từ [A m^2]; $\mathbf{M}$ là vectơ từ hóa [A/m]; $\mathbf{r}$ là vectơ vị trí (x, y, z là tọa độ trong hệ Đề-các):

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

T_r là ma trận chuyển đổi vectơ tọa độ quán tính; W và $\prod$ là năng lượng công và thế năng; θ là hướng Euler cho chuỗi quay tuần tự 3-2-1; ∇ là toán tử gradient; chỉ số ij biểu thị vi phân từng phần của thành phần i trong hướng j; chỉ số $(ij)k$ biểu thị vi phân từng phần của vi phân từ phần ij trong hướng k; gạch trên một biến số chỉ ra rằng nó tham chiếu đến các tọa độ chấp hành micro.

Mômen và lực điện từ

Người ta tìm các phương trình cho mômen và lực điện từ trên màng mỏng nam châm vĩnh cửu hình trụ bằng cách tích hợp các phương trình cho mômen và lực trên một khối màng mỏng nam châm vĩnh cửu tăng dần với mômen từ $\mathbf{M}dv$ trên khối này. Hình 20.135 minh họa chấp hành micro với màng mỏng nam châm vĩnh cửu trong hệ tọa độ bao gồm các trục hệ quy chiếu vật cố định

trực giao được thiết lập thẳng hàng với một tập các trục *x*-, *y*-, *z*- trực giao cố định trong không gian quán tính.

Có thể xuất phát từ các phương trình cho mômen và lực điện từ trên một dòng điện vô cùng nhỏ bằng cách dùng quan hệ cơ bản của lực trên phần tử dây dẫn mang dòng điện trong một từ trường không đổi. Cụ thể, với mạch dòng điện phẳng (cuộn dây phẳng micro) có dòng điện không đổi i trong từ trường đồng nhất **B** (vectơ **B** cho ta biên độ và hướng của mật độ thông lượng từ trường ngoài), lực trên một phần tử $d\mathbf{l}$ của dây dẫn được xác định bằng cách dùng định luật lực Lorentz:

$$\mathbf{F} = \oint_l id\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

Giả thiết rằng từ thông không đổi khi qua mạch từ, mômen xoắn trên mạch dòng điện phẳng của bất kỳ vòng dây có kích thước và hình dạng bất kỳ trong từ trường đồng nhất là:

$$\mathbf{T} = i\oint_l \mathbf{r} \times (d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) = i\oint_l \left((\mathbf{r} \cdot \mathbf{B}) d\mathbf{l} - \mathbf{B} \oint_l \mathbf{r} \cdot d\mathbf{l} \right)$$

Dùng định lý Strokes, ta có:

$$\mathbf{T} = i\left(\oint_s d\mathbf{A} \times \nabla(\mathbf{r} \cdot \mathbf{B}) - \mathbf{B} \oint_s (\nabla \times \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{A} \right) = i\oint_s d\mathbf{A} \times \mathbf{B}$$

hoặc:

$$\mathbf{T} = i\mathbf{A} \times \mathbf{B} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

Mômen điện từ **T** tác động trên mạch dòng điện vô cùng nhỏ để hướng mômen từ **m** theo từ trường ngoài **B** và nếu **m** và **B** bị làm lệch bởi góc θ, ta có:

$$\mathbf{T} = \mathbf{mB}\sin\theta$$

Độ tăng thế năng và công được xác định như sau:

$$dW = d\prod = \mathbf{T}\,d\theta = m\mathbf{B}\sin\theta d\theta \quad \text{và} \quad W = \prod = -m\mathbf{B}\cos\theta = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$$

Dùng lực điện từ, ta có:

$$dW = -d\prod = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = -\nabla \prod \cdot d\mathbf{r}$$

và:

$$F = -\nabla \prod = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}) = (\mathbf{m} \cdot \nabla)\mathbf{B}$$

Các hệ tọa độ và trường điện từ

Phép chuyển đổi từ các tọa độ quán tính sang các tọa độ nam châm vĩnh cửu là:

$$\bar{\mathbf{r}} = T_r \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y \cos\theta_z & \cos\theta_y \sin\theta_z & -\sin\theta_y \\ \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z - \cos\theta_x \sin\theta_z & \sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_x \sin\theta_z & \sin\theta_x \cos\theta_y \\ \cos\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \sin\theta_x \sin\theta_z & \cos\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z - \sin\theta_x \cos\theta_z & \cos\theta_x \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}$$

Chúng ta dùng ma trận chuyển đổi:

$$T_r = \begin{bmatrix} \cos\theta_y \cos\theta_z & \cos\theta_y \sin\theta_z & -\sin\theta_y \\ \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z - \cos\theta_x \sin\theta_z & \sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_x \sin\theta_z & \sin\theta_x \cos\theta_y \\ \cos\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \sin\theta_x \sin\theta_z & \cos\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z - \sin\theta_x \cos\theta_z & \cos\theta_x \cos\theta_y \end{bmatrix}$$

Nếu độ lệch nhỏ, ta có:

$$T_{rx} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & -\theta_y \\ -\theta_z & 1 & \theta_x \\ \theta_y & -\theta_x & 1 \end{bmatrix}$$

Lưu ý rằng chúng ta dùng ma trận biến đổi trực giao 3-2-1 cho phép quay tuần tự Euler *z-y-x* và θ_x, θ_y, θ_z là góc quay Euler quanh trục *x, y và z.*

Từ trường **B** và các gradient của **B** được sinh bởi các cuộn dây micro cố định trong hệ quán tính và được biểu diễn với giả thiết trường điện từ có thể mô tả bằng chuỗi Taylor bậc hai. Khai triển **B** quanh gốc của hệ *x, y, z* như một chuỗi Taylor, ta có [18]:

$$\mathbf{B}_c = \mathbf{B} + (\mathbf{r}\cdot\nabla)\mathbf{B} + \frac{1}{2}(\mathbf{r}\cdot\nabla)^2\mathbf{B}$$

hoặc:

$$B_{ei} = B_i + \frac{\partial B_i}{\partial \mathbf{r}}\mathbf{r} + \frac{1}{2}\mathbf{r}^T\frac{\partial^2 B_i}{\partial \mathbf{r}^2}\mathbf{r}$$

ở đây:

$$\frac{\partial B_i}{\partial \mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_i}{\partial x} & \frac{\partial B_i}{\partial y} & \frac{\partial B_i}{\partial z} \end{bmatrix} \text{ và } \frac{\partial^2 B_i}{\partial \mathbf{r}^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial x}}{\partial x} & \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial x}}{\partial y} & \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial x}}{\partial z} \\ \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial y}}{\partial x} & \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial y}}{\partial y} & \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial y}}{\partial z} \\ \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial z}}{\partial x} & \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial z}}{\partial y} & \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial z}}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Chúng ta định nghĩa:

$$B_{ij} = \frac{\partial B_i}{\partial j} \text{ và } B_{(ij)k} = \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial j}}{\partial k}$$

Tiếp theo:

$$\frac{\partial B_i}{\partial \mathbf{r}} = [B_{ix} \quad B_{iy} \quad B_{iz}] \text{ và } \frac{\partial^2 B_i}{\partial \mathbf{r}^2} = \begin{bmatrix} B_{(ix)x} & B_{(ix)y} & B_{(ix)z} \\ B_{(iy)x} & B_{(iy)y} & B_{(iy)z} \\ B_{(iz)x} & B_{(iz)y} & B_{(iz)z} \end{bmatrix}$$

Như vậy, các gradient bậc nhất được cho như sau:

$$B_{eij} = B_{ij} + \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial j}}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{r} = B_{ij} + [B_{(ij)x} \quad B_{(ij)y} \quad B_{(ij)z}]\mathbf{r}$$

Từ trường mở rộng được biểu diễn trong các tọa độ nam châm vĩnh cửu như sau:

$$\bar{\mathbf{B}}_e = \bar{\mathbf{B}} + (\bar{\mathbf{r}} \cdot \bar{\nabla})\bar{\mathbf{B}} + \frac{1}{2}(\bar{\mathbf{r}} \cdot \bar{\nabla})^2 \bar{\mathbf{B}}$$

ở đây $\bar{\mathbf{B}} = T_r \mathbf{B}$ và $\bar{\nabla} = T_r \nabla$.

Dùng $\mathbf{r} = T_r^T \bar{\mathbf{r}}$, ta có:

$$B_{ei} = B_i + \frac{\partial B_i}{\partial \mathbf{r}} T_r^T \bar{\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{r}}^T T_r \frac{\partial^2 B_i}{\partial \mathbf{r}^2} T_r^T \bar{\mathbf{r}}$$

và:

$$\bar{\mathbf{B}}_e = T_r \begin{bmatrix} B_x + \frac{\partial B_x}{\partial r} T_r^T \bar{\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{r}}^T T_r \frac{\partial^2 B_x}{\partial \mathbf{r}^2} T_r^T \bar{\mathbf{r}} \\ B_y + \frac{\partial B_y}{\partial r} T_r^T \bar{\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{r}}^T T_r \frac{\partial^2 B_y}{\partial \mathbf{r}^2} T_r^T \bar{\mathbf{r}} \\ B_z + \frac{\partial B_z}{\partial r} T_r^T \bar{\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{r}}^T T_r \frac{\partial^2 B_z}{\partial \mathbf{r}^2} T_r^T \bar{\mathbf{r}} \end{bmatrix}$$

Mômen và lực điện từ

Bây giờ, chúng ta sẽ bắt đầu từ các từ trường và gradient tại điểm bất kỳ trong nam châm vĩnh cửu bằng cách dùng xấp xỉ chuỗi Taylor bậc hai. Để bỏ các phép biến đổi giữa các hệ tọa độ quán tính và nam châm vĩnh cửu và đơn giản hóa các thành phần nhỏ có thể bỏ bậc hai, chúng ta giả thiết rằng chuyển động tương đối giữa nam châm và hệ tọa độ quán tính tham chiếu bằng không và ma trận biến đổi T_{rs} được dùng (nói cách khác, các số hạng gradient bậc hai sẽ dẫn đến các kết quả cồng kềnh.

Độ từ hóa (mômen từ trên thể tích đơn vị) không đổi trên các màng mỏng nam châm vĩnh cửu và $\mathbf{m} = \mathbf{M}v$.

Giả thiết rằng từ thông không đổi, mômen và lực điện từ tổng cộng trên mạch dòng điện phẳng (cuộn dây micro) trong từ trường đồng nhất là:

$$\bar{\mathbf{T}} = \int_v (\bar{\mathbf{M}} \times \mathbf{B}_e + \bar{\mathbf{r}} \times (\bar{\mathbf{M}} \cdot \nabla)\mathbf{B}_e) dv$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \int_v (\bar{\mathbf{M}} \cdot \nabla)\mathbf{B}_e dv$$

ở đây:

$$(\bar{\mathbf{M}} \cdot \nabla)\mathbf{B}_e = [\partial \mathbf{B}_e]\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} B_{exx} & B_{exy} & B_{exz} \\ B_{eyx} & B_{eyy} & B_{eyz} \\ B_{ezx} & B_{ezy} & B_{ezz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\bar{x}} \\ M_{\bar{y}} \\ M_{\bar{z}} \end{bmatrix}$$

Trường hợp 1: Từ hóa dọc theo trục đối xứng

Với hướng của vectơ từ hóa dọc theo trục đối xứng (trục x) của màng mỏng nam châm vĩnh cửu, ta có:

$$(\bar{\mathbf{M}}\cdot\nabla)\mathbf{B}_e = [\partial\mathbf{B}_e]\bar{\mathbf{M}} = M_{\bar{x}}\begin{bmatrix} B_{exx} \\ B_{exy} \\ B_{exz} \end{bmatrix}$$

Như vậy, trong biểu thức $\bar{\mathbf{T}} = \int_v (\bar{\mathbf{M}}\times\mathbf{B}_e + \bar{\mathbf{r}}\times(\bar{\mathbf{M}}\cdot\nabla)\mathbf{B}_e)dv$,

các số hạng là:

$$\bar{\mathbf{r}}\times(\bar{\mathbf{M}}\cdot\nabla)\mathbf{B}_e = M_{\bar{x}}\begin{bmatrix} -B_{exy}\bar{z} + B_{exz}\bar{y} \\ B_{exx}\bar{z} - B_{exz}\bar{x} \\ -B_{exx}\bar{y} + B_{exy}\bar{x} \end{bmatrix} \text{ và } \bar{\mathbf{M}}\times\mathbf{B}_e = M_{\bar{x}}\begin{bmatrix} 0 \\ -B_{ez} \\ B_{ey} \end{bmatrix}$$

Như vậy:

$$T_{\bar{x}} = M_{\bar{x}}\int_v (B_{exz}\bar{y} - B_{exy}\bar{z})dv$$
$$T_y = -M_{\bar{x}}\int_v (B_{ez}dv + M_{\bar{x}}\int_v (B_{exx}\bar{z} - B_{exz}\bar{x})dv$$

và:

$$T_{\bar{z}} = M_{\bar{x}}\int_v (B_{ey}dv + M_{\bar{x}}\int_v (B_{exy}\bar{x} - B_{exx}\bar{y})dv$$

Cần phải định lượng các số hạng trong các phương trình xuất phát.

Chúng ta cùng tìm biểu thức giải tích cho mômen điện từ $T_{\bar{x}}$. Cụ thể, ta có:

$$\int_v B_{exz}\bar{y}dv = B_{xz}\int_v \bar{y}dv + B_{(xx)z}\int_v \bar{x}\,\bar{y}\,dv + B_{(xy)z}\int_v \bar{y}^2 dv + B_{(xz)z}\int_v \bar{z}\,\bar{y}\,dv$$

ở đây:

$$\int_v \bar{y}dv = 0, \quad \int_v \bar{x}\,\bar{y}\,dv = 0, \quad \int_v \bar{z}\,\bar{y}\,dv = 0$$

và:

$$\int_v \bar{y}^2 dv = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}}\int_{-R}^{R}\int_{\sqrt{R^2-\bar{z}^2}}^{\sqrt{R^2-\bar{z}^2}} \bar{y}^2 d\bar{y}d\bar{z}d\bar{x} = \frac{1}{4}\pi l R^4 = \frac{1}{4}vR^4$$

Như vậy:

$$M_{\bar{x}}\int_v B_{exz}\bar{y}dv = M_{\bar{x}}\frac{1}{4}B_{(xy)z}vR^4$$

Hơn nữa:

$$M_{\bar{x}}\int_v B_{exy}\bar{z}dv = M_{\bar{x}}\frac{1}{4}B_{(xy)z}vR^4$$

Như vậy, với $T_{\bar{x}}$, ta có:

$$T_{\bar{x}} = M_x\int_v (B_{exz}\bar{y} - B_{exy}\bar{z})dv = M_{\bar{x}}\left(\frac{1}{4}B_{(xy)z}vR^4 - \frac{1}{4}B_{(xy)z}vR^4\right) = 0$$

Sau đó, với T_y, ta thu được:

$$T_{\bar{y}} = -M_{\bar{x}} \int_v B_{ezz} dv + M_{\bar{x}} \int_v (B_{exx}\bar{z} - B_{exz}\bar{x}) dv$$

$$= M_{\bar{x}} \left[-\left(B_z + B_{(zx)x} \frac{1}{24} l^2 + B_{(zy)y} \frac{1}{8} R^2 + B_{(zz)z} \frac{1}{8} R^2 \right) v + B_{(xx)z} \left(\frac{1}{4} R^2 - \frac{1}{24} l^2 \right) v \right]$$

$$= -vM_{\bar{x}} \left[B_z + B_{(xx)z} \left(\frac{1}{4} R^2 - \frac{1}{8} l^2 \right) + B_{(yy)z} \frac{1}{8} R^2 + B_{(zz)z} \frac{1}{4} R^2 \right]$$

Cuối cùng, ta thu được biểu thức $T_{\bar{z}}$ như sau:

$$T_{\bar{z}} = M_{\bar{x}} \int_v B_{eyy} dv + M_{\bar{x}} \int_v (B_{exy}\bar{x} - B_{exx}\bar{y}) dv$$

$$= vM_{\bar{x}} \left[B_y + B_{(xx)y} \left(\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{4} R^2 \right) - B_{(yy)y} \frac{1}{8} R^2 - B_{(yz)z} \frac{1}{8} R^2 \right]$$

Như vậy, các phương trình mômen điện từ dưới đây cho kết quả:

$$T_{\bar{x}} = 0$$

$$T_{\bar{y}} = -vM_{\bar{x}} \left[B_z + B_{(xx)z} \left(\frac{1}{4} R^2 - \frac{1}{8} l^2 \right) + B_{(yy)z} \frac{1}{8} R^2 + B_{(zz)z} \frac{1}{4} R^2 \right]$$

$$T_{\bar{z}} = vM_{\bar{x}} \left[B_y + B_{(xx)y} \left(\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{4} R^2 \right) - B_{(yy)y} \frac{1}{8} R^2 - B_{(yz)z} \frac{1}{8} R^2 \right]$$

Lực điện từ cũng được tìm như thế. Cụ thể, từ:

$$F_{\bar{x}} = M_{\bar{x}} \int_v B_{exx} dv$$

$$F_{\bar{y}} = M_{\bar{x}} \int_v B_{exy} dv$$

và:

$$F_{\bar{z}} = M_{\bar{x}} \int_v B_{exz} dv$$

dùng các biến thức cho từ thông mở rộng, chẳng hạn:

$$\int_v B_{exx} dv = \int_v B_{xx} + B_{(xx)x}\bar{x} + B_{(xx)y}\bar{y} + B_{(xx)z}\bar{z}) dv$$

và tính tích phân, ta có biểu thức dưới đây cho lực điện từ như là hàm của từ trường:

$$F_{\bar{x}} = vM_{\bar{x}} B_{xx}, \qquad F_{\bar{y}} = vM_{\bar{x}} B_{xy}, \qquad F_{\bar{z}} = vM_{\bar{x}} B_{xz}$$

Trường hợp 2: Từ hóa vuông góc với trục đối xứng

Với hướng của vectơ từ hóa vuông góc với trục đối xứng, người ta dùng phương trình dưới đây để tìm mômen điện từ:

$$\bar{\mathbf{T}} = \int_v (\bar{\mathbf{M}} \times \mathbf{B}_e + \bar{\mathbf{r}} \times (\bar{\mathbf{M}} \cdot \nabla) \mathbf{B}_e) dv$$

ở đây:

$$(\bar{\mathbf{M}} \cdot \nabla) \mathbf{B}_e = [\partial \mathbf{B}_e] \bar{\mathbf{M}} = M_{\bar{x}} \begin{bmatrix} B_{exx} \\ B_{eyx} \\ B_{ezx} \end{bmatrix} \qquad \bar{\mathbf{r}} \times (\bar{\mathbf{M}} \cdot \nabla) \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} -B_{exz}\bar{z} + B_{ezz}\bar{y} \\ B_{exz}\bar{z} - B_{ezz}\bar{x} \\ B_{exz}\bar{y} + B_{eyz}\bar{x} \end{bmatrix}$$

và:

$$\bar{\mathbf{M}} \times \mathbf{B}_e = M_{\bar{z}} \begin{bmatrix} -B_{ey} \\ B_{ex} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Như vậy:

$$T_{\bar{x}} = -M_{\bar{z}} \int_v B_{ey} dv + M_{\bar{z}} \int_v (B_{exz}\bar{y} - B_{eyz}\bar{z}) dv$$

$$T_{\bar{y}} = M_{\bar{z}} \int_v B_{ex} dv + M_{\bar{z}} \int_v (B_{ezz}\bar{z} - B_{exz}\bar{x}) dv$$

$$T_{\bar{z}} = M_{\bar{z}} \int_v B_{eyz}\bar{x} - B_{exz}\bar{y}) dv$$

Biểu diễn thông lượng và tính tích phân, ta có các biểu thức dưới đây cho các thành phần mômen như là hàm của từ trường:

$$T_{\bar{x}} = -vM_{\bar{z}} \left(B_y + B_{(xx)y} \frac{1}{24} l^2 + B_{(yy)y} \frac{1}{8} R^2 + B_{(yz)z} \frac{1}{8} R^2 \right)$$

$$T_{\bar{y}} = vM_{\bar{z}} \left(B_x + B_{(xz)y} \left(\frac{3}{8} R^2 - \frac{1}{24} l^2 \right) + B_{(xx)x} \frac{1}{24} l^2 + B_{(xy)y} \frac{1}{8} R^2 \right)$$

$$T_{\bar{z}} = vM_{\bar{z}} B_{(xy)y} \left(\frac{1}{12} l^2 - \frac{1}{4} R^2 \right)$$

Các lực điện từ được tìm như sau:

$$F_{\bar{x}} = M_{\bar{z}} \int_v B_{exz} dv = vM_{\bar{z}} B_{xz}$$

$$F_{\bar{y}} = M_{\bar{z}} \int_v B_{eyz} dv = vM_{\bar{z}} B_{yz}$$

$$F_{\bar{z}} = M_{\bar{z}} \int_v B_{ezz} dv = vM_{\bar{z}} B_{zz}$$

Như vậy, người ta xuất phát từ các biểu thức cho các thành phần lực và mômen điện từ. Các phương trình này cho chúng ta toàn cảnh rõ ràng về cách mô hình, phân tích và điều khiển các lực và mômen điện từ bằng cách thay đổi từ trường đặt vào do các số hạng:

$$B_{ij} = \frac{\partial B_i}{\partial j} \text{ và } B_{(ij)k} = \frac{\partial \frac{\partial B_i}{\partial j}}{\partial k}$$

có thể được xem là biến điều khiển. Cần phải nhấn mạnh rằng trường điện từ (B_{ij} và $B_{(ij)k}$) được điều khiển bằng cách điều chỉnh dòng điện trong các cuộn dây micro phẳng và thiết kế các cuộn dây micro (hoặc các thiết bị phát xạ năng lượng khác). Như đã trình bày ở trên, cần phải dùng các lực và mômen thu được trong các phương trình chuyển động cơ học xoắn và nói chung, các kết quả động lực học chấp hành micro sáu bậc tự do. Các phương trình chuyển động cơ học này được tích hợp dễ dàng với các phương trình điện từ mong muốn và hệ vòng kín có thể thiết kế để đạt được các tính năng của chấp hành micro mong đợi. Các phương trình này cho chúng ta các đặc tính điện từ quan trọng trong việc mô hình, phân tích và thiết kế các chấp hành micro.

Một số khía cạnh khác trong thiết kế và tối ưu hóa chấp hành micro

Ngoài việc phân tích và thiết kế cơ-điện từ (Cơ điện tử), người ta cũng quan tâm đến các vấn đề thiết kế và tối ưu khác. Ví dụ chúng ta tập trung vào các cuộn dây phẳng. Các cuộn dây phẳng lý tưởng phải sinh ra trường điện từ lớn nhất, cực tiểu hóa diện tích hoạt động, xem xét đến đặc tính vật liệu, điều kiện hoạt động, các ứng dụng, yêu cầu công suất và rất nhiều nhân tố khác.

Nhiều tham số và đặc tính của cuộn dây phẳng có thể được tối ưu, ví dụ cần phải tối thiểu điện trở một chiều để cải thiện tính hiệu quả, tăng từ thông, giảm tổn thất... Để đạt được tính năng tốt, nói chung, các cuộn dây có đường điện vòng tròn đồng tâm và không có điện trở liên kết. Với cuộn dây N vòng, điện trở một chiều tổng cộng r_t được tìm như sau:

$$r_t = \frac{2\pi\rho}{t_w}\sum_{k=1}^{N}\frac{1}{\ln(r_{ok}/r_{ik})}$$

ở đây ρ là suất điện trở của vật liệu cuộn dây, t_w là độ dày cuộn dây, r_{Ok} và r_{Ik} tương ứng là bán kính ngoài và trong của cuộn dây vòng thứ k.

Để thu được điện trở thấp nhất, có thể tối ưu các bán kính cuộn dây phẳng bằng cách tối thiểu điện trở và điện trở nhỏ nhất được định nghĩa là r_{min}. Cụ thể, dùng điều kiện cần thiết bậc nhất và bậc hai cho cực tiểu, ta có:

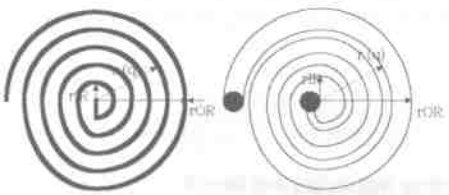
$$\frac{dr_t}{dr_w} = 0 \text{ và } \frac{d^2r_t}{dr_w^2} > 0$$

ở đây r_w là bán kính trong hoặc ngoài của vòng dây bất kỳ của các cuộn dây phẳng được tối ưu tính từ điểm đứng yên của điện trở cực tiểu.

Tiếp theo, giá trị nhỏ nhất của điện trở cuộn dây micro được cho bởi:

$$r_{t\min} = \frac{2\pi\rho}{t_w}\frac{N}{(r_{OR}/r_{IR})}$$

ở đây r_{OR} và r_{IR} tương ứng là các bán kính ngoài và trong của các cuộn dây ($r_{O\ cuộn\ dây\ micro\ thứ\ N}$ và $r_{I\ cuộn\ dây\ micro\ thứ\ 1}$).



HÌNH 20.138 Cuộn dây micro hình xoắn phẳng

Như vậy, dùng số vòng và khoảng cách vòng thì các bán kính ngoài và trong của cuộn dây vòng thứ k được tìm như sau:

$$\frac{r_{Ok}}{r_{Ik}} = \left(\frac{r_{OR}}{r_{IR}}\right)^{1/N}$$

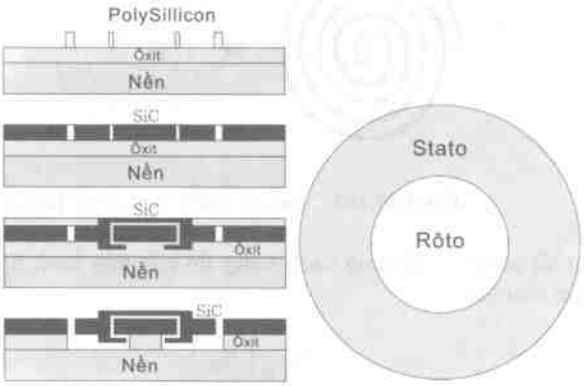
Với các cuộn dây dạng xoắn, nên dùng khái niệm *trung bình* (*tương đương*) bởi vì các bán kính ngoài và trong là hàm của góc phẳng, (xem hình 20.138). Cuối cùng, Lưu ý rằng độ rộng của cuộn dây thứ N được xác định bởi tỉ lệ giữa mật độ dòng điện điện áp tiêu thụ đối với mật độ dòng điện lớn nhất cần thiết, các công nghệ chế tạo được dùng, các đặc tính vật liệu...

Gia công động cơ đa tinh thể silic cacbua micro

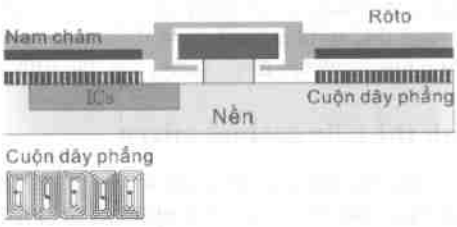
Tài liệu [19, 20] trình bày việc chế tạo các động cơ micro từ trở trên silic. Phần này được tập trung vào công nghệ mới để chế tạo các bộ chuyển đổi micro. Các quá trình chế tạo đa lớp tại nhiệt độ thấp và các kỹ thuật khuôn micro được phát triển để chế tạo các cấu trúc SiC và các động cơ micro cực nhỏ có thể hoạt động tại nhiệt độ rất cao (400°C và hơn) [21, 22]. Điều này thực hiện

được nhờ công nghệ gia công micro bề mặt SiC. Ưu điểm của gia công micro SiC và công nghệ SiC (nhiệt độ và độ nhám cao) phải được đánh giá với các nhược điểm gia công do các quá trình mới cần phải thiết kế và tối ưu. Người ta dùng ăn mòn ion phản ứng để tạo hình các màng mỏng SiC; tuy nhiên, cần phải xác định và giải quyết nhiều vấn đề như tạo mặt nạ, tốc độ ăn mòn thấp, khả năng lựa chọn ăn mòn kém. Các tài liệu [21, 22] cho thấy hai quá trình gia công micro bề mặt SiC đa tinh thể ăn mòn ion phản ứng đơn lớp dùng silic đa tinh thể hoặc SiO_2 làm lớp hy sinh. Ngoài ra, người ta cũng giới thiệu các quá trình khuôn micro được dùng để chế tạo các khuôn silic đa tinh thể chung với việc kết tủa màng SiC đa tinh thể và có độ bóng để tạo hình các màng SiC đa tinh thể. Có thể dùng quá trình khuôn micro cho gia công micro bề mặt SiC đơn lớp và đa lớp.

Các quá trình chế tạo động cơ micro được minh họa trên hình 20.139. Một silic đa tinh thể đúc dùng làm lớp hy sinh dày 5-10 μm được kết tủa thông qua LPCVD trên một lớp oxit nhiệt hy sinh dày 3-5μm. Có thể tạo khuôn rôto-stato trên bề mặt silic đa tinh thể được làm bóng (làm bóng cơ học-hóa học), cho phép chế tạo chính xác tới 2 μm dùng công nghệ quang litô và ăn mòn ion phản ứng. Sau khi hình thành và phác họa khuôn, SiC được kết tủa trên đế bằng cách dùng lò phản ứng bốc hơi hóa học áp suất khí quyển. Cụ thể, các màng SiC đa tinh thể cấy phôtpho (loại *n*) được kết tủa trên lớp hy sinh SiO_2 tại 1050°C với tốc độ 0.5-1μm/h (sự kết tủa không chọn lọc và SiC cũng sẽ kết tủa trên bề mặt của khuôn silic đa tinh thể). Việc làm bóng cơ học của SiC là cần thiết để làm lộ silic đa tinh thể và làm phẳng bề mặt đế (trong [21,22], việc làm bóng được thực hiện với dầm treo kim cương đường kính 3 μm, lực pháp tuyến 360 N, quay 15 rad/s-tốc độ loại bỏ SiC là 100 nm/phút). Các đế được làm bóng đến khi bề mặt trên cùng của khuôn silic đa tinh thể được làm lộ ra (việc làm bóng phải được kết thúc ngay do tốc độ làm bóng nhanh). Gờ khuôn nổi được gia công nhờ ăn mòn silic đa tinh thể và lớp oxit hy sinh (tương ứng có thể dùng KOH và BHF). Oxit nhiệt độ thấp có độ hở trục 0.5 μm được kết tủa và tôi tại nhiệt độ 1000°C. Sau đó màng SiC đa tinh thể 1 μm được kết tủa và tạo hình bằng ăn mòn ion phản ứng để tạo trục. Sự giải phóng bắt đầu nhờ ăn mòn bằng axit (dung dịch BHF) để loại bỏ oxit không cần thiết trên trục. Khuôn hy sinh được loại bỏ bằng ăn mòn (hệ thống KOH) silic đa tinh thể. Cần nhấn mạnh rằng SiC và SiO không được ăn mòn trong bước loại bỏ khuôn. Sau đó, người ta giải phóng các phần chuyển động của động cơ micro. Động cơ micro được rửa trong nước và rượu mêta rồi làm khô trong vòi phun không khí.



HÌNH 20.139 Gia công động cơ SiC micro: sơ đồ tiết diện ngang



HÌNH 20.140 Động cơ điện từ micro trục không có khe (sơ đồ tiết diện ngang) với IC điều khiển

Dùng quá trình chế tạo này, động cơ micro với đường kính rôto 100-150 μm, khe hở không khí 2 μm và bán kính trục 21 μm đã được chế tạo và thử nghiệm trong [21, 22]. Điện áp tiêu thụ là 100 V và vận tốc góc lớn nhất là 30 rad/s. Với các động cơ micro silic và silic đa tinh thể, hai vấn đề then chốt nhất là trục và độ nhám. Ứng dụng SiC sẽ làm giảm ma sát và cải thiện độ nhám. Chúng góp phần làm tăng độ tin cậy của các máy micro được chế tạo dựa trên SiC.

Động cơ micro điện từ dạng trục

Vấn đề chính là phát minh các bộ chuyển đổi micro mới nhằm loại bỏ những khó khăn trong chế tạo và đảm bảo tính khả thi, hiệu quả, tin cậy và khả năng điều khiển của MEMS. Thực tế, người ta đã thấy ở động cơ micro tĩnh điện và phẳng được chế tạo và thử nghiệm không thể ứng dụng rộng do những khó khăn công nghệ và giá thành còn cao. Vì vậy, phần này góp phần để đưa ra các động cơ micro quay khả thi mới.

Hình 20.140 minh họa động cơ micro dạng trục được tạo ra, có hệ thống điện từ *kiểu vòng kín*. Stato được làm trên đế với các cuộn dây được kết tủa (có thể làm các cuộn dây đồng được in bằng cách dùng các quá trình chế tạo đã được mô tả hay dùng một đế hai mặt với các màng mỏng đồng được kết tủa trên một mặt thông qua các quá trình quang litô truyền thống). Cột trụ được gia công trên đế stato và phần đỡ trụ là một phần của cấu trúc micro rôto. Rôto với màng mỏng nam châm vĩnh cửu được quay do mômen điện từ đặt vào. Lưu ý rằng stato và rôto được chế tạo bằng các quá trình và vật liệu truyền thống.

Rõ ràng rằng các công nghệ silic và SiC truyền thống. Động cơ micro quả thực có rất nhiều ưu điểm. Ưu điểm nổi bật nhất là chế tạo đơn giản. Thực tế, có thể chế tạo trực tiếp các động cơ micro và nó sẽ cho phép tạo ra các ứng dụng rộng rãi như chấp hành micro và cảm biến micro. Tuy nhiên, phải thiết kế và tối ưu động cơ micro dạng trục để thu được khả năng tốt. Việc tối ưu hóa dựa trên thiết kế điện từ, cơ học và nhiệt. Có thể thực hiện việc tối ưu hóa động cơ micro bằng cách dùng khái niệm trạng thái ổn định (phân tích phần tử hữu hạn) và mô hình động lực học (mô hình nhiều tham số hoặc mô hình toán học có độ trung thực cao điện từ-cơ học-nhiệt được coi như là một tập các phương trình vi phân từng phần dùng các phương trình Maxwell, *cơ học xoắn* và nhiệt). Nói chung, cần xác định các vấn đề tối ưu hóa phi tuyến, lập công thức và giải để đảm bảo hoạt động của bộ chuyển đổi micro tiên tiến. Ngoài thiết kế bộ chuyển đổi micro, cần tập trung thiết kế các IC và bộ điều khiển. Cụ thể, các mạch được thiết kế dựa trên hình học topo máy đối điện thuận hoặc nghịch (ví dụ công tắc cứng hoặc mềm, cùng xét về phần tư thứ nhất, thứ hai hoặc thứ tư...), bộ lọc và cảm biến được dùng, điện áp và dòng điện tiêu thụ... Toàn cảnh, cần phải khảo sát đầy đủ các đặc trưng điện từ. Ví dụ động cơ micro điện từ được nghiên cứu là máy micro đồng bộ. Vì vậy, để phát triển mômen điện từ, cần phải cung cấp điện áp đặt vào các cuộn dây stato như là hàm của độ dịch chuyển góc rôto. Do đó, phải dùng cảm biến hiệu ứng Hall hoặc phải thiết kế và thực thi các bộ điều khiển không động cơ (vị trí rôto được quan sát hoặc ước lượng bằng cách dùng các biến số đo trực tiếp) dùng IC. Sự thảo luận ngắn này đề cập tới các vấn đề cơ bản liên quan tới việc thiết kế các bộ chuyển đổi micro tích hợp cùng với việc điều khiển và xử lý tín hiệu dùng IC.

Kết luận

Chủ đề chính khi phát triển và thực thi MEMS là sự tổng hợp, thiết kế và tạo mẫu nhanh thông qua việc nghiên cứu cơ điện tử một cách hệ thống, đa ngành. Cụ thể, cần phải tạo ý tưởng, thực hiện việc mô hình hóa, mô phỏng, phân tích, thiết kế và tối ưu MEMS. Các quy trình nay liên quan tới kinh nghiệm nghiên cứu, phân loại và tổng hợp. Các bộ chuyển đổi micro và MEMS đã được phát minh, các công nghệ và quá trình chế tạo cũng được phát triển và thực thi. Việc phát minh các bộ chuyển đổi micro là một quá trình tiến hóa khép kín để nghiên cứu tiến trình ở cấp độ hệ thống khả thi dựa trên sự tích hợp của các cấu trúc và thiết bị micro trong lõi chức năng thống nhất. Khả năng phát minh và tối ưu hóa các bộ chuyển đổi micro phụ thuộc nhiều vào tính đúng đắn và tính chính xác của các mô hình toán học. Vì vậy, người ta đã phát minh và phân tích các mô hình toán học của các bộ chuyển đổi micro khác nhau. Người ta đã cho thấy rằng việc mô hình hóa, phân tích, mô phỏng và thiết kế bộ chuyển đổi micro phải được dựa trên các mô hình toán học tích hợp các đặc trưng điện từ phi tuyến. Cần nhấn mạnh rằng không thể loại bỏ các hiệu ứng và hiện tượng ít vai trò hơn và thường không được quan tâm trong các thiết bị chuyển động cơ điện cỡ nhỏ truyền thống. Các quá trình chế tạo đã được trình bày để sản xuất các chuyển đổi micro tiên tiến.

Tài liệu tham khảo

[1] Campbell, S. A., The science and Engineering of Microelectronic Fabrication, Oxford University Press, New York, 2001.

[2] Lyshevski, S. E., *Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamental of Micro- and Nano-Engineering,* CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.

[3] Lyshevski, S. E., *MEMS and NEMS: Systems, Devices, and Structures,* CRC Press, Boca Raton, FL, 2001.

[4] Madou, M., *Fundamentals of Microfabrication,* CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.

[5] Kim, Y.-J. and Allen, M. G., "Surface micromachined solenoid inductors for high frequency applications", *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology,* part C, vol. 21, no. 1, pp. 26–33, 1998.

[6] Park, J. Y. and Allen, M. G., "Integrated electroplated micromachined magnetic devices using low temperature fabrication processes," *IEEE Trans. Electronics Packaging Manufacturing,* vol. 23, no. 1, pp. 48–55, 2000.

[7] Sadler, D. J., Liakopoulos, T. M., and Ahn, C. H., "A universal electromagnetic microactuator using magnetic interconnection concepts," *Journal Microelectromechanical Systems,* vol. 9, no. 4, pp. 460–468, 2000.

[8] Lyshevski, S. E., *Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics,* CRC Press, Boca Raton, FL, 1999.

[9] Frazier, A. B. and Allen, M. G., "Uses of electroplated aluminum for the development of microstructures and micromachining processes," *Journal Microelectromechanical Systems,* vol. 6, no. 2, pp. 91–98, 1997.

[10] Guckel, H., Christenson, T. R., Skrobis, K. J., Klein, J., and Karnowsky, M., "Design and testing of planar magnetic micromotors fabricated by deep x-ray lithography and electroplating," *Technical Digest of International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers 93,* Yokohama, Japan, pp. 60–64, 1993.

[11] Taylor, W. P., Schneider, M., Baltes, H., and Allen, M. G., "Electroplated soft magnetic materials for microsensors and microactuators," *Proc. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Transducers 97,* Chicago, IL, pp. 1445–1448, 1997.

[12] Lagorce, L. K., Brand, O., and Allen, M. G., "Magnetic microactuators based on polymer magnets," *Journal Microelectromechanical Systems,* vol. 8, no. 1, pp. 2–9, 1999.

[13] Smith, D. O., "Static and dynamic behavior in thin permalloy films," *Journal of Applied Physics,* vol. 29, no. 2, pp. 264–273, 1958.

[14] Suss, D., Schrefl, T., and Fidler, J., "Micromagnetics simulation of high energy density permanent magnets," *IEEE Trans. Magnetics,* vol. 36, no. 5, pp. 3282–3284, 2000.

[15] Judy, J. W. and Muller, R. S., "Magnetically actuated, addressable microstructures," *Journal Microelectromechanical Systems,* vol. 6, no. 3, pp. 249–256, 1997.

[16] Yi, Y. W. and Liu, C., "Magnetic actuation of hinged microstructures," *Journal Microelectromechanical Systems,* vol. 8, no. 1, pp. 10–17, 1999.

[17] Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., *Mechanics of Materials,* PWS Press, 1997.

[18] Groom, N. J. and Britcher, C. P., "A description of a laboratory model magnetic suspension test fixture with large angular capability," *Proc. Conf. Control Applications, NASA Technical Paper – 1997,* vol. 1, pp. 454–459, 1992.

[19] Ahn, C. H., Kim, Y. J., and Allen, M. G., "A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stato and coils," *Journal Microelectromechanical Systems,* vol. 2, no. 4, pp. 165–173, 1993.

[20] O'Sullivan, E. J., Cooper, E. I., Romankiw, L. T., Kwietniak, K. T., Trouilloud, P. L., Horkans, J., Jahnes, C. V., Babich, I. V., Krongelb, S., Hegde, S. G., Tornello, J. A., LaBianca, N. C., Cotte, J. M., and Chainer, T. J., "Integrated, variable-reluctance magnetic minimotor," *IBM Journal Research and Development,* vol. 42, no. 5, 1998.

[21] Yasseen, A. A., Wu, C. H., Zorman, C. A., and Mehregany, M., "Fabrication and testing of surface micromachined polycrystalline SiC micromotors," *IEEE Trans. Electron Device Letters,* vol. 21, no. 4, pp. 164–166, 2000.

[22] Yasseen, A. A., Zorman, C. A., and Mehregany, M., "Surface micromachining of polycrystalline silicon carbide films microfabricated moldsof SiO and polysilicon," *Journal Microelectromechanical Systems,* vol. 8, no. 1, pp. 237–242, 1999.

NHÀ XUẤT BẢN ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
16 Hàng Chuối – Hai Bà Trưng – Hà Nội
Điện thoại: (04) 9718312; (04) 9724770. Fax: (04) 9714899
E-mail: nxb@ vnu.edu.vn

Chịu trách nhiệm xuất bản:
Giám đốc: PHÙNG QUỐC BẢO
Tổng biên tập: NGUYỄN BÁ THÀNH

Biên tập: PHẠM ANH TUẤN
ĐỖ THỊ NGỌC OANH
NGUYỄN HUY THỤY
PHÙNG VĂN HIỆP
BÙI HUY HOÀNG

Trình bày: ĐỖ THỊ NGỌC OANH
PHAN MẠNH QUÂN

CƠ ĐIỆN TỬ

Mã số: 1L-137 ĐH2006
In 500 cuốn, khổ 18,2×25,7 cm tại Công ty Cổ phần Đầu tư thiết bị và in Bộ Văn hoá Thông tin
Số xuất bản: 728 – 2006/CXB/6 – 137/ĐHQG, ngày 25/09/2006
Quyết định xuất bản số: 330 LK/XB
In xong và nộp lưu chiểu quý IV năm 2006.

CƠ ĐIỆN TỬ

Cơ điện tử hiện nay đã mở ra một phương pháp mới trong ứng dụng kỹ thuật và đã thực sự bao trùm lên mọi diện mạo của thế giới hiện đại. Cơ điện tử chính là sự tích hợp hữu cơ của các hệ cơ khí, điện tử và máy tính. Để xây dựng thành công các hệ cơ điện tử đòi hỏi trí tuệ tổng hợp của các chuyên gia trong những lĩnh vực trên.

Với mục đích trở thành tài liệu tham khảo chuẩn cho các chuyên gia kỹ thuật trên khắp thế giới, Cuốn ***CƠ ĐIỆN TỬ*** đã đưa ra một cách nhìn toàn diện, thống nhất, chi tiết và đầy đủ về lĩnh vực năng động, ấn tượng này, và nêu ra xu hướng phát triển của các hệ cơ điện tử hiện đại. Hơn 60 bài viết của các nhà khoa học và công nghệ hàng đầu thế giới trình bày mọi khía cạnh của cơ điện tử, từ cái nhìn tổng quát về lịch sử cơ điện tử qua những lý thuyết cơ bản, các hệ thống, các quá trình và thực tiễn sản xuất đến viễn cảnh tương lai của cơ điện tử.

Cơ điện tử đang rộng mở, đầy những tiềm năng và cơ hội xán lạn. Cuốn ***CƠ ĐIỆN TỬ*** là một dấu ấn, đồng thời là cánh cửa và con đường dẫn bạn đến với thế giới cơ điện tử.

CÁC ĐIỂM NỔI BẬT CỦA CUỐN SÁCH:

- Giới thiệu những nghiên cứu toàn diện và mới nhất hiện nay của cơ điện tử.
- Tác giả là các nhà khoa học và công nghệ hàng đầu thế giới.
- Gồm đầy đủ công thức, dữ liệu, minh họa và tài liệu tham khảo.
- Các giải thích rõ ràng của mỗi lĩnh vực kỹ thuật đảm bảo để người đọc mặc dù không phải là chuyên gia cũng có thể hiểu và sử dụng các thông tin trong cuốn sách.
- Các tài liệu tham khảo từ nhiều nguồn khác nhau.

Chủ biên: **Robert H. Bishop** là giáo sư hạng Joe J. King ngành kỹ thuật của Khoa Công nghệ vũ trụ và Cơ kỹ thuật, trường Đại học Texas tại Austin (Mỹ). Ông là tác giả, nhà giáo, và nhà biên tập đã đạt được nhiều danh hiệu lớn. Các nghiên cứu hiện nay của ông tập trung chủ yếu vào lĩnh vực hàng không vũ trụ.

NHÀ XUẤT BẢN CRC

Giá: 180 000 VNĐ