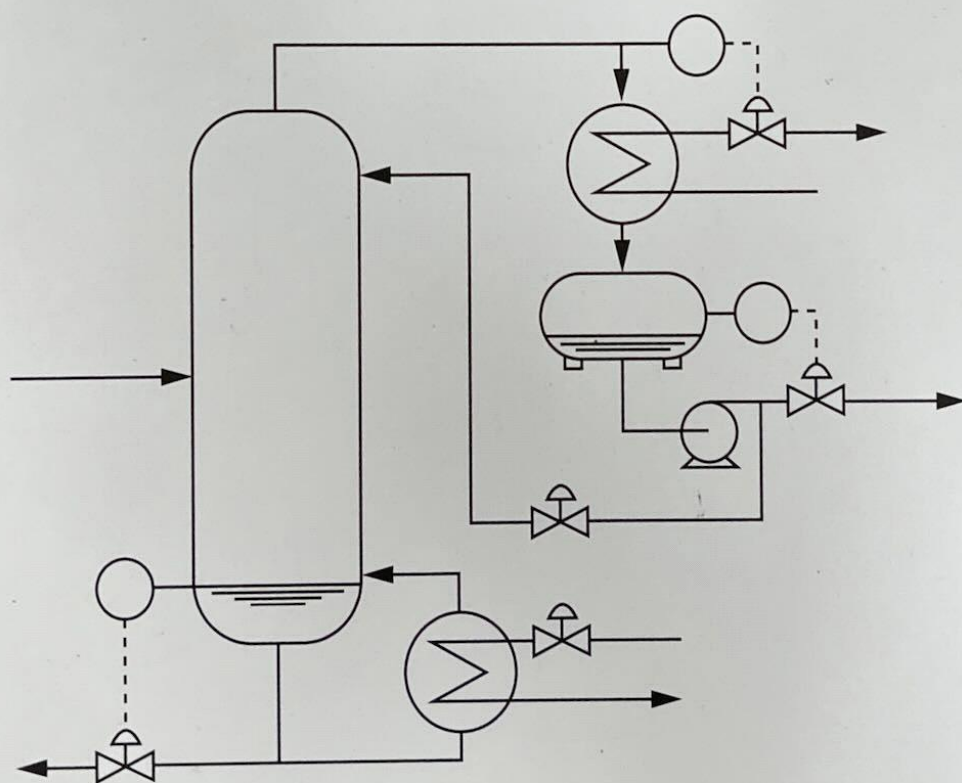
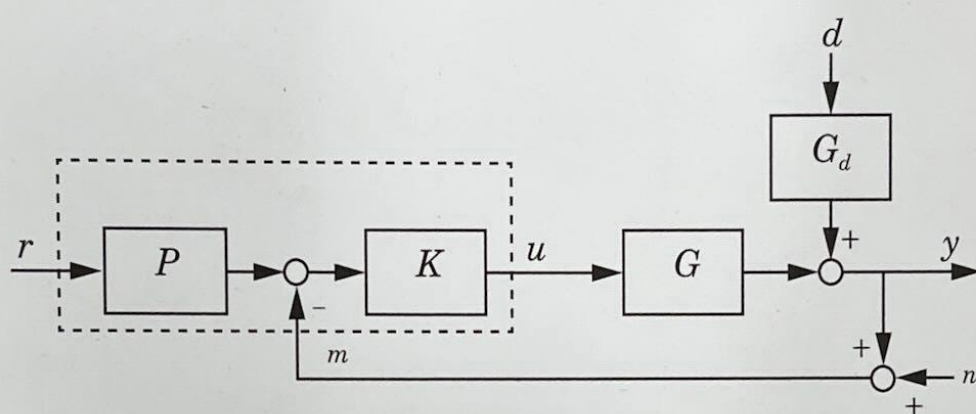


HOÀNG MINH SƠN

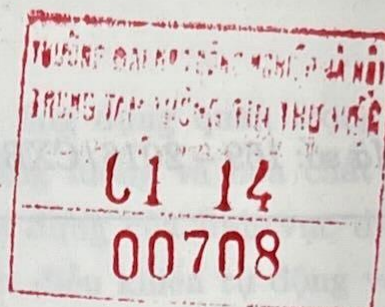
TỦ SÁCH
NGÀNH ĐIỆN

CƠ SỞ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN QUÁ TRÌNH



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

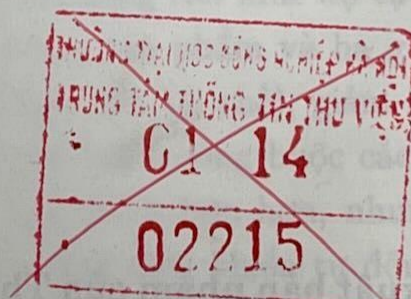
Hoàng Minh Sơn



CƠ SỞ HỆ THỐNG

Điều khiển quá trình

(Tái bản lần 4, có sửa chữa và bổ sung)



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

- 2016 -

Lời nói đầu

Điều khiển quá trình là một lĩnh vực ứng dụng quan trọng của kỹ thuật điều khiển trong các ngành công nghiệp năng lượng và hóa chất (gọi chung là *công nghiệp chế biến, process industry*). Nội dung của lĩnh vực điều khiển quá trình kết nối chặt chẽ nền tảng của lý thuyết điều khiển tự động với các bài toán của quá trình công nghệ. Phạm vi đề cập cụ thể ở đây là các bài toán mô hình hóa, phân tích, thiết kế và thực thi hệ thống điều khiển cho các đối tượng là quá trình công nghệ.

Điều khiển quá trình không phải là một lĩnh vực mới, nhưng luôn chiếm vị trí quan trọng hàng đầu trong tự động hóa công nghiệp. Khác với những ngành công nghiệp chế tạo, ngày nay bất cứ một nhà máy xi măng, một nhà máy điện hay một nhà máy lọc dầu nào cũng không thể vận hành được nếu thiếu hệ thống điều khiển tự động. Quá trình toàn cầu hóa gần đây tạo ra nhiều thị trường tiêu dùng mới, đồng thời gia tăng sự cạnh tranh mạnh mẽ giữa nhiều tập đoàn sản xuất. Các doanh nghiệp buộc phải nâng cao mức độ tự động hóa dây chuyền sản xuất để tăng năng suất, chất lượng sản phẩm và hạ giá thành sản xuất. Sức ép giảm sử dụng nguyên liệu thô (yêu cầu tái chế), giảm tiêu thụ nhiên liệu và khả năng thích ứng nhanh với yêu cầu thị trường buộc các kỹ sư phải đưa ra những thiết kế quá trình công nghệ mới thích hợp hơn, nhưng đồng thời cũng đặt ra những yêu cầu cao hơn cho hệ thống điều khiển tự động và cho những người kỹ sư thiết kế điều khiển. Nhìn từ một góc độ khác, những tiến bộ về công nghệ thiết bị điều khiển (DCS, PLC/HMI, IPC, bus trường,...) ngày càng tạo điều kiện thuận lợi hơn cho việc cài đặt các sách lược và thuật toán điều khiển tiên tiến. Một điều đáng nói là trong khi công nghệ sản xuất hoặc công nghệ thiết bị điều khiển đã có thể lạc hậu chỉ sau 10-15 năm, cơ sở phương pháp luận cho thiết kế hệ thống điều khiển quá trình vẫn giữ nguyên giá trị sau hàng nửa thế kỷ – tất nhiên được bổ sung và phát triển lên một tầm cao mới.

Cuốn sách *Cơ sở hệ thống Điều khiển quá trình* là giáo trình môn học “Điều khiển quá trình” cho sinh viên đại học ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa của trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Nội dung chính của cuốn sách cũng có thể sử dụng làm tài liệu học tập cho sinh viên các ngành công nghệ liên quan (Nhiệt, Hóa, Sinh học-Thực phẩm, Môi trường,...). Để làm việc hiệu quả với cuốn sách, các sinh viên cần được trang bị kiến thức cơ sở của lý thuyết điều khiển tự động. Đặc biệt, cuốn sách được trình bày theo một phong cách diễn giải kết hợp nhiều ví dụ minh họa cụ thể, phù hợp cho mục đích tự nghiên cứu của một số

nhóm bạn đọc. Tác giả cũng hy vọng nhiều đồng nghiệp trong các trường đại học và viện nghiên cứu tìm thấy trong cuốn sách những tư liệu tham khảo bổ ích.

Cuốn sách được biên soạn dựa trên kinh nghiệm từ nhiều năm giảng dạy môn học “Điều khiển quá trình” và một số môn liên quan trong trường đại học, cũng như các khóa đào tạo nâng cao cho kỹ sư bên ngoài. Ngoài chương mở đầu, nội dung cuốn sách bao gồm hai phần chính là **Cơ sở mô hình hóa** (chương 2 đến chương 4) và **Thiết kế điều khiển** (chương 5 đến chương 9). Hầu hết các ví dụ minh họa được thực hiện với sự hỗ trợ của công cụ MATLAB.

Tác giả bày tỏ lòng cảm ơn chân thành tới các đồng nghiệp và các bạn sinh viên – những người đã giúp đỡ và hỗ trợ nhiệt tình cho sự ra đời của cuốn sách. GS.TS Phan Xuân Minh đã cho nhiều lời khuyên cho thiết kế nội dung cuốn sách. GS.TS Nguyễn Doãn Phước là người đã đọc phần lớn các chương và đưa ra nhiều bình luận, góp ý quý báu. PGS.TS Trần Trung Kiên đã đọc và góp ý rất chi tiết cho chương 3. TS Nguyễn Thu Hà đã đọc kỹ lưỡng và sửa lỗi nhiều chương của bản thảo. Nhóm sinh viên làm đồ án tốt nghiệp K46 đã đóng góp một số tư liệu và ví dụ cho nội dung chương 8. Những ý kiến phản hồi từ phía sinh viên qua nhiều khóa học cũng đã tác động quan trọng tới việc lựa chọn và hiệu chỉnh các nội dung trình bày.

Để có thể hoàn thành cuốn sách, tác giả đã nhận được sự cảm thông sâu sắc từ những người thân trong gia đình, đặc biệt là từ người vợ và con gái yêu quý. Họ là những người chịu thiệt thòi nhiều nhất, khi mà trong nhiều tháng không được chia sẻ những “cuối tuần” và “buổi tối”. Cuốn sách này tác giả muốn dành tặng trước tiên cho hai người thân yêu của mình, dù biết là không thể bù đắp được sự hy sinh của họ.

Trong quá trình chỉnh sửa, bổ sung cho lần tái bản này, tác giả đã nhận được nhiều góp ý, bình luận quý báu từ đồng nghiệp và bạn đọc, đặc biệt những chỉ dẫn sai sót từ các bạn sinh viên. Tác giả chân thành cảm ơn và xin được tiếp tục tiếp nhận thông tin phản hồi theo địa chỉ:

PGS.TS Hoàng Minh Sơn
Bộ môn Điều khiển tự động
Viện Điện – Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
Số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội
Email: son.hoangminh@hust.edu.vn

Hà Nội, Mùa Thu 2016

HMS

Mục lục

CHƯƠNG 1 MỞ ĐẦU	1
1.1 Điều khiển quá trình là gì?	2
1.1.1 Quá trình và các biến quá trình	2
1.1.2 Phân loại quá trình	5
1.1.3 Bài toán điều chỉnh và bài toán bám	6
1.1.4 Các vấn đề đặc thù của điều khiển quá trình	7
1.2 Mục đích và chức năng điều khiển quá trình	10
1.2.1 Vận hành ổn định	11
1.2.2 Năng suất và chất lượng sản phẩm	12
1.2.3 Vận hành an toàn	13
1.2.4 Bảo vệ môi trường	14
1.2.5 Hiệu quả kinh tế	15
1.3 Phân cấp chức năng điều khiển quá trình	16
1.3.1 Giao diện quá trình	17
1.3.2 Điều khiển cơ sở	17
1.3.3 Điều khiển vận hành và giám sát	19
1.3.4 Điều khiển cao cấp	20
1.4 Các thành phần cơ bản của hệ thống	20
1.4.1 Thiết bị đo	22
1.4.2 Thiết bị điều khiển	23
1.4.3 Thiết bị chấp hành	24
1.5 Các nhiệm vụ phát triển hệ thống	24
1.5.1 Phân tích chức năng hệ thống	24
1.5.2 Xây dựng mô hình quá trình	26
1.5.3 Thiết kế cấu trúc điều khiển	26
1.5.4 Thiết kế thuật toán điều khiển	27
1.5.5 Lựa chọn giải pháp hệ thống	27
1.5.6 Phát triển phần mềm ứng dụng	27
1.5.7 Chỉnh định và đưa vào vận hành	28
1.6 Mô tả chức năng hệ thống	28
1.6.1 Các tài liệu mô tả đồ họa	28
1.6.2 Lưu đồ P&ID	29
1.7 Ghi chú và tài liệu tham khảo	32

1.7.1	Bàn thêm về khái niệm điều khiển quá trình	33
1.7.2	Về tài liệu tham khảo	35
1.8	Câu hỏi và bài tập	39
CHƯƠNG 2 MÔ HÌNH QUÁ TRÌNH		41
2.1	Giới thiệu chung	42
2.1.1	Mô hình và mục đích mô hình hóa	42
2.1.2	Nguyên tắc chung của mô hình hóa quá trình	44
2.1.3	Các phương pháp xây dựng mô hình toán học	45
2.2	Tổng quan về quy trình mô hình hóa	47
2.2.1	Đặt bài toán mô hình hóa	47
2.2.2	Phân chia hệ thống	50
2.2.3	Xây dựng các mô hình thành phần	51
2.2.4	Kết hợp các mô hình thành phần	52
2.2.5	Phân tích và kiểm chứng mô hình	52
2.3	Phân loại mô hình toán học	53
2.3.1	Mô hình tuyến tính và mô hình phi tuyến	53
2.3.2	Mô hình đơn biến và mô hình đa biến	54
2.3.3	Mô hình tham số hằng và mô hình tham số biến thiên	55
2.3.4	Mô hình tham số tập trung và mô hình tham số rải	55
2.3.5	Mô hình liên tục và mô hình gián đoạn	56
2.4	Các dạng mô hình liên tục	57
2.4.1	Phương trình vi phân	57
2.4.2	Mô hình trạng thái	58
2.4.3	Mô hình đáp ứng quá độ	63
2.4.4	Mô hình hàm truyền đạt	66
2.4.5	Mô hình đáp ứng tần số	69
2.5	Các mô hình gián đoạn	70
2.5.1	Phương trình sai phân	70
2.5.2	Mô hình trạng thái	71
2.5.3	Mô hình đáp ứng quá độ	74
2.5.4	Các mô hình đa thức và hàm truyền đạt xung	76
2.5.5	Mô hình hàm truyền đạt gián đoạn	81
2.6	Ghi chú và tài liệu tham khảo	84
2.7	Câu hỏi và bài tập	85
CHƯƠNG 3 MÔ HÌNH HÓA LÝ THUYẾT		87
3.1	Tổng quan các bước tiến hành	87
3.2	Nhận biết các biến quá trình	88
3.2.1	Ví dụ bình chứa chất lỏng	91

3.2.2	Ví dụ thiết bị khuấy trộn liên tục	92
3.2.3	Ví dụ thiết bị gia nhiệt	93
3.2.4	Ví dụ tháp chưng luyện hai cấu tử	94
3.3	Xây dựng các phương trình mô hình	95
3.3.1	Phương trình cân bằng vật chất	96
3.3.2	Phương trình cân bằng năng lượng	101
3.3.3	Phương trình truyền nhiệt	105
3.3.4	Phương trình động học phản ứng hóa học	108
3.3.5	Phương trình cân bằng pha	109
3.4	Phân tích bậc tự do của mô hình	111
3.4.1	Bậc tự do của hệ thống	111
3.4.2	Ví dụ thiết bị khuấy trộn liên tục	112
3.4.3	Ví dụ thiết bị gia nhiệt	113
3.4.4	Ví dụ nồi hơi bão hòa	114
3.5	Tuyến tính hóa và mô hình hàm truyền đạt	115
3.5.1	Biến chênh lệch và mô hình hàm truyền đạt	115
3.5.2	Tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc	117
3.5.3	Độ phi tuyến của mô hình	124
3.5.4	Tuyến tính hóa với phép đổi biến vào-ra	126
3.6	Mô phỏng quá trình	128
3.6.1	Phân loại các phương pháp mô phỏng	129
3.6.2	Giải hệ phương trình vi phân (phi tuyến)	132
3.6.3	Giải hệ phương trình vi phân tuyến tính	134
3.6.4	Mô phỏng quá trình sử dụng MATLAB	134
3.7	Một số ví dụ quá trình tiêu biểu	142
3.7.1	Chuỗi ba thiết bị phản ứng liên tục đẳng nhiệt	142
3.7.2	Thiết bị phản ứng thu nhiệt sợi đốt	146
3.7.3	Thiết bị phản ứng liên tục tỏa nhiệt	149
3.7.4	Tháp chưng luyện hai cấu tử	153
3.8	Ghi chú và tài liệu tham khảo	163
3.9	Câu hỏi và bài tập	165
CHƯƠNG 4 NHẬN DẠNG QUÁ TRÌNH		171
4.1	Khái niệm và những nguyên tắc cơ bản	171
4.1.1	Các bước tiến hành	171
4.1.2	Phân loại phương pháp nhận dạng	172
4.1.3	Đánh giá và kiểm chứng mô hình	174
4.2	Các phương pháp dựa trên đáp ứng quá độ	175
4.2.1	Mô hình quán tính bậc nhất có trễ	177
4.2.2	Mô hình quán tính bậc hai có trễ	184

4.2.3	Mô hình dao động bậc hai	186
4.2.4	Mô hình chứa thành phần tích phân	190
4.3	Các phương pháp dựa trên đáp ứng tần số	190
4.3.1	Kích thích trực tiếp tín hiệu hình sin	191
4.3.2	Kích thích tín hiệu dạng xung	195
4.3.3	Phương pháp phân tích phổ tín hiệu	196
4.4	Các phương pháp bình phương tối thiểu	198
4.4.1	Nguyên lý bình phương tối thiểu	198
4.4.2	Ước lượng tham số mô hình FIR	200
4.4.3	Ước lượng tham số mô hình ARX	203
4.4.4	Ước lượng tham số mô hình liên tục SOPDT	206
4.5	Nhận dạng trong vòng kín	212
4.5.1	Nhận dạng trong vòng phản hồi rơ-le	213
4.5.2	Nhận dạng trong vòng điều khiển P/PI	219
4.6	Sử dụng Matlab Identification Toolbox	221
4.6.1	Biểu diễn số liệu thực nghiệm	222
4.6.2	Dạng mô hình sử dụng	222
4.6.3	Các thuật toán nhận dạng	225
4.6.4	Khảo sát và kiểm chứng mô hình	229
4.7	Lựa chọn phương pháp nhận dạng	232
4.8	Ghi chú và tài liệu tham khảo	233
4.9	Câu hỏi và bài tập	236
CHƯƠNG 5 CÁC SÁCH LƯỢC ĐIỀU KHIỂN CƠ SỞ		237
5.1	Điều khiển truyền thẳng	237
5.1.1	Ví dụ điều khiển thiết bị gia nhiệt hơi nước	237
5.1.2	Cấu trúc cơ bản và bộ điều khiển lý tưởng	239
5.1.3	Các tính chất của điều khiển truyền thẳng	241
5.1.4	Ứng dụng của điều khiển truyền thẳng	245
5.2	Điều khiển phản hồi	246
5.2.1	Ví dụ điều khiển thiết bị gia nhiệt hơi nước	246
5.2.2	Cấu trúc cơ bản	247
5.2.3	Vai trò của điều khiển phản hồi	249
5.2.4	Các vấn đề của điều khiển phản hồi	253
5.2.5	Điều khiển phản hồi kết hợp truyền thẳng	254
5.3	Điều khiển tỉ lệ	255
5.3.1	Ví dụ điều khiển thiết bị khuấy trộn liên tục	255
5.3.2	Ví dụ điều khiển thiết bị gia nhiệt hơi nước	256
5.3.3	Hai cấu hình điều khiển tỉ lệ	257
5.3.4	Bản chất và ý nghĩa của điều khiển tỉ lệ	259

5.3.5	Điều khiển tỉ lệ kết hợp điều khiển phản hồi.....	262
5.4	Điều khiển tầng.....	263
5.4.1	Ví dụ điều khiển thiết bị gia nhiệt hơi nước.....	264
5.4.2	Hai cấu trúc điều khiển tầng.....	265
5.4.3	Điều khiển vị trí van.....	266
5.4.4	Ứng dụng của điều khiển tầng.....	267
5.5	Điều khiển suy diễn.....	269
5.5.1	Ví dụ điều khiển lưu lượng khí.....	270
5.5.2	Ví dụ điều khiển thiết bị gia nhiệt dầu nóng.....	271
5.5.3	Ví dụ điều khiển nồng độ sản phẩm chưng luyện.....	273
5.6	Điều khiển lựa chọn.....	274
5.6.1	Điều khiển lần át.....	274
5.6.2	Điều khiển giới hạn.....	276
5.7	Điều khiển phân vùng.....	277
5.8	Ghi chú và tài liệu tham khảo.....	279
5.9	Câu hỏi và bài tập.....	280
CHƯƠNG 6 ĐẶC TÍNH CÁC THÀNH PHẦN HỆ THỐNG		283
6.1	Thiết bị đo.....	284
6.1.1	Cấu trúc cơ bản.....	284
6.1.2	Đặc tính vận hành.....	285
6.1.3	Đặc tính tĩnh.....	288
6.1.4	Đặc tính động học.....	292
6.1.5	Khái quát một số cảm biến công nghiệp.....	295
6.2	Thiết bị chấp hành và van điều khiển.....	300
6.2.1	Cấu trúc cơ bản của van điều khiển.....	300
6.2.2	Kiểu tác động của van.....	303
6.2.3	Đặc tính dòng chảy.....	304
6.2.4	Đặc tính động học.....	307
6.2.5	Bộ định vị van.....	308
6.3	Các bộ điều khiển phản hồi.....	309
6.3.1	Chiều tác động.....	310
6.3.2	Bộ điều khiển hai vị trí.....	312
6.3.3	Bộ điều khiển P.....	313
6.3.4	Bộ điều khiển PI.....	314
6.3.5	Bộ điều khiển PID lý tưởng.....	315
6.3.6	Bộ điều khiển PID thực.....	318
6.4	Ghi chú và tài liệu tham khảo.....	324
6.5	Câu hỏi và bài tập.....	325

CHƯƠNG 7 PHÂN TÍCH HỆ ĐIỀU KHIỂN PHẢN HỒI	329
7.1 Bài toán chuẩn.....	329
7.1.1 Cấu hình chuẩn	329
7.1.2 Sơ đồ khối và mô hình hàm truyền đạt	332
7.1.3 Chuẩn hóa mô hình	337
7.1.4 Phát biểu bài toán chuẩn và các quan hệ cơ bản	341
7.2 Tính ổn định của hệ điều khiển phản hồi.....	344
7.2.1 Khái niệm tính ổn định	345
7.2.2 Tính ổn định nội của hệ điều khiển phản hồi	350
7.2.3 Tiêu chuẩn Nyquist	356
7.2.4 Tiêu chuẩn Bode	362
7.2.5 Độ dự trữ ổn định	363
7.2.6 Tính ổn định được	366
7.3 Chất lượng điều khiển phản hồi.....	367
7.3.1 Đánh giá chất lượng trên miền thời gian	367
7.3.2 Đánh giá chất lượng trên miền tần số	371
7.3.3 Phân tích chất lượng điều khiển tăng.....	380
7.4 Ghi chú và tài liệu tham khảo	384
7.5 Câu hỏi và bài tập	385
CHƯƠNG 8 CHỈNH ĐỊNH BỘ ĐIỀU KHIỂN PID	389
8.1 Cơ sở chung	390
8.1.1 Các dạng mô hình quá trình thông dụng.....	390
8.1.2 Xấp xỉ mô hình bậc cao – luật chia đôi.....	392
8.1.3 Các cấu hình điều khiển và kiểu bộ điều khiển	393
8.1.4 Đặc tính vòng điều khiển sử dụng bộ PID	394
8.1.5 Lựa chọn luật điều khiển.....	399
8.2 Các phương pháp dựa trên đặc tính đáp ứng.....	402
8.2.1 Phương pháp dựa trên đáp ứng bậc thang	402
8.2.2 Phương pháp dựa trên đặc tính dao động tới hạn	403
8.2.3 Phương pháp tự chỉnh phản hồi rơ-le.....	405
8.2.4 Phương pháp của Tyreus và Luyben.....	406
8.3 Các phương pháp dựa trên mô hình mẫu.....	410
8.3.1 Phương pháp Haalman	410
8.3.2 Phương pháp tổng hợp trực tiếp.....	411
8.3.3 Phương pháp tổng hợp trực tiếp ưu tiên kháng nhiễu.....	413
8.3.4 Phương pháp IMC.....	416
8.3.5 Phương pháp IMC cho quá trình không ổn định.....	421
8.3.6 Phương pháp xấp xỉ đặc tính tần.....	426
8.4 Các phương pháp nắn đặc tính tần.....	430

8.4.1	Phương pháp tối ưu đối xứng	430
8.4.2	Phương pháp 'kappa-tau'	432
8.4.3	Phương pháp dựa trên dự trữ biên-pha	433
8.5	Điều khiển PID kết hợp bù trễ	437
8.5.1	Bộ dự báo Smith	437
8.5.2	Bộ điều khiển PI dự báo	439
8.6	Ghi chú và tài liệu tham khảo	441
8.7	Câu hỏi và bài tập	445

CHƯƠNG 9 THIẾT KẾ CẤU TRÚC ĐIỀU KHIỂN CHO QUÁ TRÌNH ĐA BIẾN 447

9.1	Giới thiệu chung	447
9.1.1	Cấu trúc điều khiển là gì?	447
9.1.2	Cơ sở thiết kế cấu trúc điều khiển	452
9.2	Lựa chọn biến quá trình	453
9.2.1	Một số chỉ dẫn lựa chọn	454
9.2.2	Phân tích giá trị suy biến	457
9.3	Điều khiển đa biến/tập trung	460
9.4	Điều khiển đơn biến/phi tập trung	462
9.4.1	Cặp đôi các biến vào-ra	464
9.4.2	Tính ổn định của hệ điều khiển phi tập trung	466
9.5	Ghi chú và tài liệu tham khảo	467

PHỤ LỤC A 469

A.1	Tóm tắt chuẩn ANSI/ISA 5.1	469
A.2	Tóm tắt chuẩn ANSI/ISA 5.2	474
A.3	Tóm tắt chuẩn ANSI/ISA 5.3	477

PHỤ LỤC B 477

B.1	Chuẩn vector và chuẩn ma trận	477
B.2	Chuẩn tín hiệu và chuẩn hệ thống	480
B.3	Phép phân tích giá trị suy biến (SVD)	483
B.4	Ma trận khuếch đại tương đối (RGA)	486

CHỈ MỤC 491

