

NGUYỄN DOÃN PHƯỚC

LÝ THUYẾT

Đ

ỀU

KHIỂN

TUYẾN

TÍNH



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Lời nói đầu

Sau lần xuất bản đầu tiên năm 2002, tác giả đã nhận được rất nhiều đóng góp từ phía bạn đọc để có được nội dung với chất lượng tốt hơn ở lần xuất bản thứ hai này. Tác giả hy vọng với sự sửa đổi đó, các bạn sinh viên đang theo học các ngành Điều khiển tự động, Đo lường và Tin học công nghiệp, Tự động hóa, học viên cao học, nghiên cứu sinh thuộc các ngành liên quan, sẽ có được một tài liệu với chất lượng tốt hơn hỗ trợ cho việc tự học, cũng như cho việc hiểu kỹ, hiểu sâu bài giảng.

Lý thuyết điều khiển tuyến tính là phần nền tảng cơ bản và quan trọng nhất của Lý thuyết điều khiển nói chung. Rất nhiều các phát triển mới về khái niệm cũng như phương pháp của Điều khiển nâng cao như Ổn định đều, Ổn định theo hàm mũ, Ổn định ISS, Điều khiển tuyến tính hóa chính xác, Điều khiển thích nghi kháng nhiễu ... đều có được sự gợi ý về tư tưởng từ Lý thuyết điều khiển tuyến tính. Nắm vững và làm chủ Lý thuyết điều khiển tuyến tính sẽ giúp ta có được một kiến thức cơ bản chắc chắn để tự tin tiến sâu hơn vào các lĩnh vực khác của Điều khiển.

So với lần xuất bản thứ nhất, ở lần tái bản này, quyển sách được bố cục lại hoàn toàn bằng việc phân chia các chương theo chủ đề từng dạng mô hình mô tả hệ thống được sử dụng. Cụ thể là:

- Chương 1 được dành cho phần nhập môn Lý thuyết điều khiển tuyến tính, các bước cơ bản cần phải thực hiện khi phải giải quyết một bài toán điều khiển.
- Chương 2 trình bày các bước thực hiện bài toán điều khiển khi mô hình toán học của đối tượng là mô hình trong miền phức (miền tần số).
- Chương 3 là nội dung các bước thực hiện bài toán điều khiển ứng với mô hình trạng thái của đối tượng (điều khiển trong không gian trạng thái).
- Chương 4 là nội dung từng bước thực hiện bài toán điều khiển khi đối tượng có mô hình không liên tục.

trong đó, từng chương 2, 3 và 4 lại được trình bày theo đúng thứ tự thực hiện các bước một bài toán điều khiển, như: 1. Công cụ toán học cần thiết, 2. Xây dựng mô hình mô tả đối tượng, 3. Phân tích đối tượng và 4. Thiết kế bộ điều khiển.

Cũng so với lần xuất bản thứ nhất, ở lần tái bản này, tác giả đã đưa thêm một số nội dung được cho là cần thiết của điều khiển nâng cao, nhưng có liên quan đến mô hình tuyến tính của đối tượng. Các phần được bổ sung thêm bao gồm:

- Phân tích tính bền vững của hệ tuyến tính có mô hình toán học của đối tượng là hàm truyền đạt.

- Thuật toán thiết kế bộ điều khiển theo mô hình mẫu.
- Phương pháp tham số hóa Youla, phương pháp thiết kế bộ điều khiển ổn định mạnh và ổn định song hành để điều khiển ổn định bên vững đối tượng tuyến tính (nguyên lý điều khiển đa mô hình).
- Thiết kế bộ điều khiển tuyến tính theo nguyên lý bám tín hiệu mẫu (tracking control).
- Thiết kế bộ điều khiển bù bất định cho đối tượng tuyến tính.

Quyển sách đã được viết với sự giúp đỡ, chia sẻ rất to lớn của hai thành viên khác trong gia đình tác giả là vợ Ngô Kim Thư và con gái Nguyễn Phước My. Không có họ chắc chắn quyển sách không thể hoàn thành được.

Quyển sách còn được hoàn thành nhờ sự cổ vũ, khuyến khích và tạo điều kiện thuận lợi của các đồng nghiệp trong Bộ môn Điều khiển Tự động, Trường Đại học Bách khoa, nơi tác giả đang công tác. Tác giả xin được gửi tới các bạn lời cảm ơn chân thành.

Mặc dù đã rất nỗ lực, song chắc không thể không có thiếu sót. Do đó tác giả rất mong nhận được những góp ý sửa đổi, bổ sung thêm của bạn đọc để hoàn thiện. Thư góp ý xin gửi về:

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
Khoa Điện, Bộ môn Điều khiển Tự động
 phuocnd-ac@mail.hut.edu.vn

Hà Nội, ngày 4-5 tháng 11 năm 2004

PGS. TS. Tô Đăng Hải
 Nguyễn Đăng
 Tác giả
 Trần Thắng
 Phó tác giả

Cũng so với lần xuất bản thứ nhất, ở lần tái bản này, tác giả đã đưa thêm một số nội dung được cho là cần thiết của điều khiển nâng cao, nhưng có liên quan đến mô hình tuyến tính của đối tượng. Các phần được bổ sung thêm bao gồm:

- Phân tích bền vững của hệ tuyến tính có mô hình toán học của đối tượng là

Mục lục

1	Nhập môn	11
1.1	Nội dung bài toán điều khiển	11
1.1.1	Bài toán có tín hiệu tiền định (Điều khiển tiền định)	13
	Khái niệm tín hiệu tiền định	13
	Phân loại tín hiệu tiền định	14
	Một số tín hiệu tiền định điển hình	16
	Chuẩn của tín hiệu (hay hàm số)	17
1.1.2	Bài toán có tín hiệu ngẫu nhiên (Điều khiển ngẫu nhiên)	19
	Khái niệm quá trình ngẫu nhiên	19
	Quá trình ngẫu nhiên dừng và ngẫu nhiên egodic	20
1.2	Những cấu trúc cơ bản của hệ thống điều khiển	21
1.2.1	Xác định tín hiệu điều khiển thích hợp	22
1.2.2	Sử dụng bộ điều khiển	22
	Điều khiển hở	22
	Điều khiển phản hồi trạng thái	23
	Điều khiển phản hồi tín hiệu ra	23
2	Điều khiển liên tục trong miền phức	25
2.1	Các công cụ toán học	25
2.1.1	Lý thuyết hàm biến phức	25
	Định nghĩa, khái niệm hàm liên tục, hàm giải tích	25
	Tích phân phức và nguyên lý cực đại modulus	27
	Hàm bảo giác (conform)	28
2.1.2	Phép biến đổi Fourier	31
	Ảnh Fourier của tín hiệu tuần hoàn	31
	Ảnh Fourier của tín hiệu không tuần hoàn	31
	Hàm mở rộng dirac, hàm trích mẫu và ảnh Fourier của nó	34
2.1.3	Phép biến đổi Laplace thuận	35
2.1.4	Phép biến đổi Laplace ngược	40
	Biến đổi ngược hàm hữu tỷ	41
	Phương pháp residue	44
2.1.5	Một ứng dụng của toán tử Laplace: Giải phương trình vi phân	48
2.1.6	Mối quan hệ giữa ảnh Fourier và ảnh Laplace	51

2.2 Xây dựng mô hình toán học	52
2.2.1 Phương trình vi phân mô tả quan hệ vào-ra	56
2.2.2 Hàm truyền đạt, hàm trọng lượng và hàm quá độ	59
2.2.3 Phép biến đổi sơ đồ khối (đại số sơ đồ khối)	68
Hai khối song song	68
Hai khối nối tiếp	69
Hệ có hai khối nối hồi tiếp	69
Chuyển nút nối tín hiệu từ trước ra sau một khối	70
Chuyển nút nối tín hiệu từ sau tới trước một khối	70
Chuyển nút rẽ nhánh tín hiệu từ trước ra sau một khối	71
Chuyển nút rẽ nhánh tín hiệu từ sau tới trước một khối	71
Chuyển nút rẽ nhánh từ trước ra sau một nút nối	71
Chuyển nút rẽ nhánh từ sau tới trước một nút nối	72
2.2.4 Sơ đồ tín hiệu và công thức Mason	74
2.2.5 Đường đặc tính tần biên-pha	81
2.2.6 Đường đặc tính tần logarith - Đồ thị Bode	88
2.2.7 Quan hệ giữa phần thực và ảo của hàm đặc tính tần-Toán tử Hilbert	94
Bài toán thứ nhất: Xác định hàm truyền đạt từ phần thực hàm đặc tính tần	95
Bài toán thứ hai: Xác định hàm truyền đạt từ phần ảo hàm đặc tính tần	97
Toán tử Hilbert: Trường hợp tổng quát	99
2.2.8 Xây dựng mô hình toán học của các khâu động học cơ bản bằng thực nghiệm chủ động	101
Khâu quán tính bậc nhất	101
Khâu tích phân-quán tính bậc nhất	103
Khâu tích phân-quán tính bậc n	104
Khâu quán tính bậc hai	106
Khâu quán tính bậc n	109
Khâu (bù) Lead/Lag	111
Khâu dao động bậc hai	114
Khâu chậm trễ (khâu trễ)	116
2.3 Phân tích hệ thống	118
2.3.1 Những nhiệm vụ cơ bản của công việc phân tích	118
2.3.2 Xác định tính ổn định từ đa thức đặc tính	120
Mối liên hệ giữa vị trí các điểm cực và tính ổn định của hệ thống	120
Tiêu chuẩn đại số thứ nhất: Tiêu chuẩn Routh	122
Tiêu chuẩn đại số thứ hai: Tiêu chuẩn Hurwitz	127
Tiêu chuẩn đại số thứ ba: Tiêu chuẩn Lienard-Chipart	129
Tiêu chuẩn hình học: Tiêu chuẩn Michailov	131
2.3.3 Phân tích chất lượng hệ kín từ hàm truyền đạt của hệ hở	134
Xét tính ổn định: Tiêu chuẩn Nyquist	135
Kiểm tra tính ổn định hệ kín nhờ biểu đồ Bode	140

Đánh giá sai lệch tĩnh	142
Thông số đặc trưng của quá trình quá độ: Độ quá điều chỉnh và thời gian quá độ	144
Thông số đặc trưng của quá trình quá độ: Sai lệch bám	148
2.3.4 Quan hệ giữa chất lượng hệ thống với vị trí điểm cực và điểm không của hàm truyền đạt	151
Một số kết luận chung	151
Điều kiện tồn tại độ quá điều chỉnh	152
Khâu thông tần và hệ pha cực tiểu	155
Phân tích bằng phương pháp quỹ đạo nghiệm số	157
2.3.5 Phân tích tính bền vững	164
Đánh giá chất lượng bền vững nhờ hàm nhạy	164
Đánh giá tính ổn định bền vững với sai lệch mô hình không có cấu trúc	166
Hệ vừa có tính ổn định bền vững vừa có độ nhạy nhỏ	167
Tính ổn định bền vững của hệ bất định có cấu trúc: Tiêu chuẩn Kharitonov	168
2.4 Thiết kế bộ điều khiển	172
2.4.1 Chọn tham số cho bộ điều khiển PID	172
Hai phương pháp xác định tham số PID của Ziegler-Nichols	174
Phương pháp Chien-Hrones-Reswick	177
Phương pháp tổng T của Kuhn	179
Phương pháp tối ưu độ lớn	181
Phương pháp tối ưu đối xứng	187
Chọn tham số PID tối ưu theo sai lệch bám	196
2.4.2 Phương pháp điều khiển cân bằng mô hình	198
Thiết kế bộ điều khiển cân bằng hàm truyền đạt của hệ hở	198
Thiết kế bộ điều khiển cân bằng hàm truyền đạt của hệ kín	200
Thiết kế bộ điều khiển dự báo Smith cho đối tượng có trễ	202
2.4.3 Thiết kế bộ điều khiển theo mô hình mẫu	204
Thuật toán tìm nghiệm phương trình Euclid	206
Thuật toán thiết kế hai bộ điều khiển theo mô hình mẫu	207
2.4.4 Tập các bộ điều khiển làm ổn định đối tượng và khái niệm ổn định mạnh, ổn định song hành	209
Một số khái niệm cơ bản	209
Nội dung phương pháp tham số hóa Youla	210
Khả năng điều khiển ổn định mạnh (strongly stable)	215
Bộ điều khiển ổn định song hành (simultane stable)	216
Câu hỏi ôn tập và bài tập	219
3 Điều khiển liên tục trong miền thời gian	229
3.1 Công cụ toán học	229
3.1.1 Những cấu trúc đại số cơ bản	229
Nhóm	229

Vành	230
Trường	230
Không gian vector	231
Đại số	232
3.1.2 Đại số ma trận	233
Các phép tính với ma trận	234
Hạng của ma trận	235
Định thức của ma trận	236
Ma trận nghịch đảo	237
Vết của ma trận	238
Ma trận là một ánh xạ tuyến tính	238
Phép biến đổi tương đương	239
Không gian nhân và không gian ảnh của ma trận	240
Giá trị riêng và vector riêng	241
3.2 Xây dựng mô hình toán học	242
3.2.1 Phương trình trạng thái	242
Cấu trúc chung	242
Quan hệ giữa mô hình trạng thái và hàm truyền đạt	246
3.2.2 Quỹ đạo trạng thái	253
Khái niệm ma trận hàm mũ và cách xác định	254
Nghiệm của phương trình trạng thái có tham số không phụ thuộc thời gian	261
Nghiệm của phương trình trạng thái phụ thuộc thời gian	263
Quá trình cưỡng bức và quá trình tự do	266
3.3 Phân tích hệ thống	267
3.3.1 Những nhiệm vụ cơ bản của công việc phân tích	267
3.3.2 Phân tích tính ổn định	268
Phân tích tính ổn định BIBO	268
Tiêu chuẩn ổn định Lyapunov' - Hàm Lyapunov	271
3.3.3 Phân tích tính điều khiển được	276
Khái niệm điều khiển được và điều khiển được hoàn toàn	276
Các tiêu chuẩn xét tính điều khiển được cho hệ tham số hằng	280
Tiêu chuẩn xét tính điều khiển được cho hệ tham số phụ thuộc thời gian	284
3.3.4 Phân tích tính quan sát được	290
Khái niệm quan sát được và quan sát được hoàn toàn	290
Một số kết luận chung về tính quan sát được của hệ tuyến tính	291
Tính đối ngẫu và các tiêu chuẩn xét tính quan sát được của hệ tham số hằng	293
3.3.5 Phân tích tính động học không	296
3.4 Thiết kế bộ điều khiển	298
3.4.1 Bộ điều khiển phản hồi trạng thái gán điểm cực	298
Đặt vấn đề và phát biểu bài toán	298

Phương pháp Ackermann	300
Phương pháp Roppenecker	306
Phương pháp modal phản hồi trạng thái	310
3.4.2 Điều khiển tách kênh	320
Bộ điều khiển phản hồi trạng thái tách kênh Falb-Wolovich	320
Thiết kế bộ điều khiển tách kênh nhờ phép biến đổi Smith-McMillan	325
3.4.3 Điều khiển phản hồi trạng thái tối ưu	327
Thiết kế bộ điều khiển LQR phản hồi dương	327
Thiết kế bộ điều khiển LQR phản hồi âm	334
Phương pháp tìm nghiệm phương trình Riccati trực tiếp	335
Thuật toán truy hồi tìm nghiệm phương trình Riccati	339
3.4.4 Điều khiển bám (tracking control) bằng phản hồi trạng thái	340
3.4.5 Điều khiển phản hồi trạng thái thích nghi	344
Trường hợp đối tượng đã có chất lượng mong muốn khi không có tạp nhiễu	345
Trường hợp tổng quát	347
3.4.6 Điều khiển phản hồi tín hiệu ra	348
Đặt vấn đề	348
Thiết kế bộ quan sát Luenberger	352
Giảm bậc bộ quan sát Luenberger	354
Thiết kế bộ quan sát Kalman	355
Thiết kế bộ điều khiển tối ưu phản hồi đầu ra LQG	358
Kết luận về chất lượng hệ kín: Nguyên lý tách	359
3.4.7 Loại bỏ sai lệch tĩnh bằng bộ tiền xử lý	360
Câu hỏi ôn tập và bài tập	363
4 Điều khiển hệ không liên tục	369
4.1 Công cụ toán học	369
4.1.1 Dãy số và chuỗi số	369
Dãy số, tính hội tụ và giá trị giới hạn	369
Chuỗi và giới hạn của chuỗi	371
4.1.2 Toán tử Fourier không liên tục	372
Nhiệm vụ của toán tử Fourier không liên tục	372
Hai sai số của ảnh Fourier không liên tục và kỹ thuật giảm thiểu	373
4.1.3 Phép biến đổi Z thuận	376
4.1.4 Phép biến đổi Z ngược	380
Phương pháp residue	380
Phương pháp biến đổi ngược hàm hữu tỷ	382
Phương pháp phân tích chuỗi	384
4.1.5 Quan hệ giữa toán tử Z và toán tử Laplace	384

4.2 Xây dựng mô hình toán học	386
4.2.1 Khái niệm hệ không liên tục	386
4.2.2 Mô hình trong miền phức	388
Dãy trọng lượng	388
Đại số sơ đồ khối hệ không liên tục	392
4.2.3 Mô hình trong miền thời gian	395
Mô hình trạng thái	396
4.2.4 Chuyển đổi mô hình không liên tục của hệ SISO	399
Xác định hàm truyền đạt từ phương trình trạng thái	400
Xác định phương trình trạng thái từ hàm truyền đạt	400
4.2.5 Vài điều lưu ý	401
4.3 Phân tích hệ không liên tục	402
4.3.1 Phân tích tính ổn định	402
Quá trình tự do, điều kiện cần và đủ để hệ ổn định	402
Tiêu chuẩn Schur-Cohn-Jury	404
Sử dụng các tiêu chuẩn xét tính ổn định hệ liên tục	408
4.3.2 Tính điều khiển được và quan sát được	410
Phân tích tính điều khiển được	410
Phân tích tính quan sát được	413
4.3.3 Quan hệ giữa tần số trích mẫu và chất lượng hệ thống	417
4.4 Thiết kế bộ điều khiển	418
4.4.1 Chọn tham số cho bộ điều khiển PID số	418
Cấu trúc bộ điều khiển PID số	418
Xác định tham số cho PID số bằng thực nghiệm	420
4.4.2 Sử dụng ánh xạ lưỡng tuyến tính để thiết kế bộ điều khiển	422
4.4.3 Thiết kế bộ điều khiển dead-beat	425
4.4.4 Thiết kế bộ điều khiển không liên tục theo mô hình mẫu	431
Câu hỏi ôn tập và bài tập	432
Ảnh Laplace và ảnh Z của một số tín hiệu cơ bản	435
Tài liệu tham khảo	436