

NGUYỄN DOÃN PHƯỚC

LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN NÂNG CAO

⇒ Điều khiển tối ưu

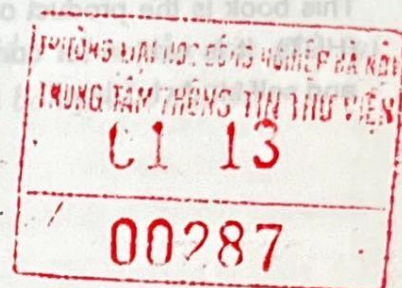
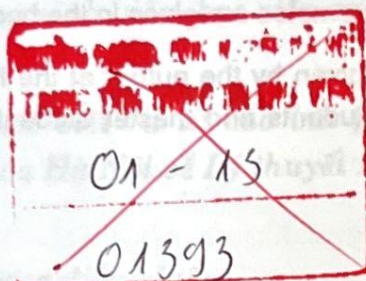
⇒ Điều khiển bền vững

⇒ Điều khiển thích nghi



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Nguyễn Doãn Phước



LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN NÂNG CAO

ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU – ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG – ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI

(IN LẦN THỨ BA – CÓ SỬA ĐỔI VÀ BỔ SUNG)



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

Hà Nội 2009

Lời nói đầu

Để có được lần xuất bản thứ ba này với nội dung và chất lượng tốt hơn hai lần xuất bản trước (lần đầu là vào năm 2005), tác giả xin được gửi lời cảm ơn về những nhận xét, góp ý của bạn đọc, các bạn sinh viên, học viên cao học, nghiên cứu sinh đã gửi tới cho tác giả.

Quyển sách này được viết ra từ các bài giảng trong nhiều năm của tác giả tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội về Lý thuyết Điều khiển, gồm bốn phần chính:

- Điều khiển tối ưu,
- Nhận dạng đối tượng điều khiển,
- Điều khiển bền vững và
- Điều khiển thích nghi.

Mục đích của tác giả khi viết quyển sách này chỉ đơn giản là mong muốn cung cấp cho các bạn sinh viên đang theo học các ngành Điều khiển tự động, Đo lường và Tin học công nghiệp, Tự động hóa, thêm một tài liệu bổ trợ cho việc hiểu kỹ, hiểu sâu bài giảng cũng như hỗ trợ việc tự học của sinh viên, học viên cao học, nghiên cứu sinh thuộc các ngành liên quan.

Quyển sách đã được viết với sự cảm thông, chịu đựng rất to lớn của gia đình tác giả. Nó cũng 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 gia đình và 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.huf.edu.vn

Hà Nội, ngày 28 tháng 5 năm 2007

Mục lục

1 Điều khiển tối ưu tĩnh	11
1.1 Nhập môn	11
1.1.1 Thế nào là bài toán điều khiển tối ưu tĩnh?	11
1.1.2 Phân loại bài toán tối ưu	15
Bài toán tối ưu tuyến tính/phi tuyến	15
Bài toán cận tối ưu (suboptimal)	16
Bài toán tối ưu có ràng buộc/không ràng buộc	18
Nghiệm tối ưu địa phương/toàn cục	18
1.1.3 Công cụ toán học: Tập lồi và hàm lồi	19
1.2 Những bài toán tối ưu điển hình	23
1.2.1 Bài toán tối ưu lồi	23
1.2.2 Bài toán tối ưu toàn phương	25
1.2.3 Bài toán tối ưu hyperbol	27
1.3 Tìm nghiệm bằng phương pháp lý thuyết	29
1.3.1 Mối quan hệ giữa bài toán tối ưu và bài toán điểm yên ngựa	29
1.3.2 Phương pháp Kuhn–Tucker	31
1.3.3 Phương pháp Lagrange	34
1.4 Tìm nghiệm bằng phương pháp số	36
1.4.1 Bài toán tối ưu tuyến tính và phương pháp đơn hình (simplex)	36
1.4.2 Phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn	40
1.4.3 Phương pháp Newton–Raphson	41
1.5 Tìm nghiệm bằng phương pháp hướng đến cực trị	44
1.5.1 Nguyên lý chung	44
1.5.2 Xác định bước tìm tối ưu	46
Xác định bằng phương pháp giải tích	46
Xác định bằng phương pháp số	47
Thuật toán nhát cắt vàng	47
1.5.3 Phương pháp Gauss–Seidel	49
1.5.4 Phương pháp gradient	51
1.5.5 Kỹ thuật hàm phạt và hàm chặn	53
Kỹ thuật hàm phạt	53
Kỹ thuật hàm chặn	56
1.6 Một số ví dụ ứng dụng	57
1.6.1 Xác định tham số tối ưu cho bộ điều khiển PID	57
1.6.2 Nhận dạng tham số mô hình đối tượng tiến định	60
Nhận dạng tham số mô hình không liên tục	60
Nhận dạng tham số mô hình liên tục	62

1.6.3	Ứng dụng vào điều khiển bền vững trong không gian trạng thái	63
	Phát biểu bài toán.....	63
	Phương pháp Roppenecker.....	65
	Phương pháp Konigorski.....	68
1.6.4	Ứng dụng vào điều khiển thích nghi.....	73
	Mục đích của điều khiển thích nghi.....	73
	Vai trò của điều khiển tối ưu tĩnh trong điều khiển thích nghi.....	77
	Câu hỏi ôn tập và bài tập	78
2	Điều khiển tối ưu động	81
2.1	Nhập môn	81
2.1.1	Thế nào là bài toán điều khiển tối ưu động?	81
	Bài toán tối ưu động liên tục	81
	Bài toán điều khiển tối ưu không liên tục.....	83
2.1.2	Phân loại bài toán tối ưu động	84
2.2	Phương pháp biến phân	86
2.2.1	Hàm Hamilton, phương trình Euler-Lagrange và điều kiện cần	86
2.2.2	Bàn thêm về hàm Hamilton.....	92
2.2.3	Phương trình vi phân Riccati và bộ điều khiển tối ưu không dừng cho đối tượng tuyến tính (trường hợp thời gian hữu hạn)	94
	Phát biểu bài toán và tìm nghiệm nhờ phương pháp biến phân.....	94
	Tìm nghiệm tối ưu từ phương trình vi phân Riccati	96
	Thiết kế bộ điều khiển tối ưu, phản hồi trạng thái, không dừng.....	99
2.2.4	Phương trình đại số Riccati và bộ điều khiển tối ưu tĩnh, phản hồi trạng thái cho đối tượng tuyến tính (trường hợp thời gian vô hạn) – Bộ điều khiển LQR	100
	Phát biểu bài toán.....	100
	Lời giải của bài toán – Bộ điều khiển tối ưu LQR phản hồi dương	101
	Bộ điều khiển tối ưu LQR phản hồi âm.....	103
2.3	Nguyên lý cực đại	104
2.3.1	Điều khiển đối tượng nửa tuyến tính, đã biết trước điểm trạng thái đầu và khoảng thời gian xảy ra quá trình tối ưu	105
2.3.2	Điều khiển tối ưu tác động nhanh đối tượng tuyến tính.....	108
	Nguyên lý cực đại	108
	Xây dựng quỹ đạo trạng thái tối ưu.....	112
	Định lý Feldbaum về số lần chuyển đổi giá trị và ý nghĩa ứng dụng	118
2.3.3	Nguyên lý cực đại dạng tổng quát: Điều kiện cần, điều kiện hoành	123
	Điều kiện cần	123
	Điều kiện hoành (điều kiện trực giao).....	126
	Bài toán tối ưu có khoảng thời gian cố định và cho trước.....	131
	Bài toán tối ưu có đối tượng không autonom	132
2.3.4	Về ý nghĩa vector biến động trạng thái	133
2.4	Phương pháp quy hoạch động (Bellman)	137
2.4.1	Nội dung phương pháp.....	139
	Nguyên lý tối ưu của Bellman	139
	Hai vòng tính của phương pháp: Vòng ngược (kỹ thuật nhúng) và vòng xuôi.....	140

2.4.2 Mở rộng cho trường hợp hàm mục tiêu không ở dạng tổng	144
2.4.3 Mở rộng cho trường hợp điểm cuối không cố định	147
2.4.4 Mở rộng cho hệ liên tục và phương trình Hamilton–Jacobi–Bellman	148
Câu hỏi ôn tập và bài tập	155
3 Điều khiển tối ưu ngẫu nhiên	159
3.1 Một số khái niệm nhập môn	159
3.1.1 Quá trình ngẫu nhiên	159
Định nghĩa và mô tả chung	159
Quá trình ngẫu nhiên dừng	161
Quá trình ngẫu nhiên egodic	161
Hàm mật độ phổ và ảnh Laplace của quá trình ngẫu nhiên egodic	162
3.1.2 Hệ ngẫu nhiên và mô hình toán học trong miền phức	163
Phương pháp biến đổi Fourier	163
Xác định mô hình hàm truyền đạt	164
3.1.3 Bài toán điều khiển tối ưu ngẫu nhiên	165
3.2 Điều khiển tối ưu ngẫu nhiên tĩnh	167
3.2.1 Nhận dạng trực tuyến tham số mô hình không liên tục	167
3.2.2 Nhận dạng trực tuyến (on-line) mô hình tuyến tính liên tục	169
Nhận dạng trực tuyến mô hình không tham số	169
Nhận dạng trực tuyến tham số mô hình đối tượng không có thành phần vi phân	172
Nhận dạng trực tuyến tham số mô hình đối tượng không có thành phần tích phân	173
3.2.3 Nhận dạng chủ động (off-line) mô hình tuyến tính không liên tục	174
Nhận dạng chủ động tham số mô hình AR (Autoregressive)	174
Sử dụng thuật toán Levinson để tìm nghiệm phương trình Yule-Walker	176
Nhận dạng off-line tham số mô hình MA và ARMA	183
3.3 Điều khiển tối ưu ngẫu nhiên động	186
3.3.1 Bộ lọc Wiener	186
Mục đích của bộ lọc	186
Các bước thiết kế	188
3.3.2 Bộ quan sát trạng thái Kalman (lọc Kalman)	191
Mục đích của bộ quan sát	191
Thiết kế bộ quan sát trạng thái cho đối tượng tuyến tính	192
3.3.3 Bộ điều khiển LQG (Linear Quadratic Gaussian)	195
Nội dung bộ điều khiển LQG	195
Nguyên lý tách (separation principle)	199
Câu hỏi ôn tập và bài tập	200
4 Điều khiển tối ưu RH_∞ (Điều khiển bền vững)	203
4.1 Không gian chuẩn Hardy	203
4.1.1 Không gian chuẩn L_2 và H_2 (RH_2)	203

Không gian L_2	203
Không gian H_2 và RH_2	204
Mở rộng cho ma trận hàm phức (hệ MIMO)	206
Cách tính chuẩn bậc hai	206
4.1.2 Không gian chuẩn H_∞ và RH_∞	208
Khái niệm không gian H_∞ và RH_∞	208
Tính chuẩn vô cùng	209
4.2 Tham số hóa bộ điều khiển	212
4.2.1 Hệ có các khâu SISO	212
Trường hợp đối tượng là ổn định	212
Trường hợp đối tượng không ổn định	214
Thuật toán tìm nghiệm phương trình Bezout	216
Tổng kết: Thuật toán xác định tập các bộ điều khiển ổn định	222
4.2.2 Hệ có các khâu MIMO	225
Khái niệm hai ma trận nguyên tố cùng nhau	225
Phân tích ma trận truyền đạt thành cặp các ma trận nguyên tố cùng nhau	227
Xác định tập các bộ điều khiển làm ổn định hệ thống	230
Thuật toán tìm nghiệm hệ phương trình Bezout	232
Tổng kết: Thuật toán tham số hóa bộ điều khiển ổn định	236
4.2.3 Ứng dụng trong điều khiển ổn định nội	238
Khái niệm ổn định nội	238
Tính ổn định nội được (internal stabilizable)	240
Bộ điều khiển ổn định nội	243
4.3 Điều khiển tối ưu RH_∞	244
4.3.1 Những bài toán điều khiển RH_∞ điển hình	244
Bài toán cân bằng mô hình	244
Bài toán cực tiểu độ nhạy với sai lệch mô hình	245
Bài toán tối ưu RH_∞ mẫu (standard)	246
Bài toán ổn định bền vững với sai lệch mô hình	249
4.3.2 Trình tự thực hiện bài toán tối ưu RH_∞	251
Bước 1: Chuyển thành bài toán cân bằng mô hình	251
Bước 2: Tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình	252
4.3.3 Khả năng tồn tại nghiệm của bài toán cân bằng mô hình	252
4.3.4 Phương pháp 1: Tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình nhờ toán tử Hankel và định lý Nehari	255
Phân tích hàm trong và hàm ngoài	255
Toán tử Hankel	257
Định lý Nehari và nghiệm của bài toán (4.73)	259
Thuật toán xác định nghiệm bài toán cân bằng mô hình	260
4.3.5 Phương pháp 2: Tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình nhờ phép nội suy Nevannlinna–Pick	262
Nội suy Nevannlinna–Pick	263
Tìm giá trị chặn dưới lớn nhất	266
Tổng kết: Thuật toán tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình	268
4.3.6 Nghiệm cận tối ưu (suboptimal)	270

Câu hỏi ôn tập và bài tập	273
5 Điều khiển thích nghi và bền vững	275
5.1 Lý thuyết Lyapunov	275
5.1.1 Tiêu chuẩn ổn định Lyapunov và định lý LaSalle	275
Tư tưởng chung	278
Tiêu chuẩn Lyapunov và hàm Lyapunov	279
Định lý LaSalle	282
Áp dụng cho hệ tuyến tính và phương trình Lyapunov	286
5.1.2 Thiết kế bộ điều khiển GAS nhờ hàm điều khiển Lyapunov (CLF)	290
Khái niệm hàm điều khiển Lyapunov	290
Thiết kế hàm điều khiển Lyapunov cho hệ affine	292
Thiết kế cuốn chiếu (backstepping) hàm CLF cho hệ truyền ngược	295
Thiết kế cuốn chiếu (backstepping) hàm CLF cho hệ tam giác	297
Thiết kế hàm CLF cho hệ truyền ngược chặt nhờ phép đổi biến vi phôi	301
Thiết kế hàm CLF cho hệ affine-truyền ngược nhờ phép đổi biến vi phôi	306
Điều khiển tuyến tính hóa chính xác gần điểm cực cho hệ tam giác	309
5.2 Điều khiển thích nghi tự chỉnh (STR)	312
5.2.1 Tổng quát về cơ cấu nhận dạng tham số mô hình, phương pháp bình phương nhỏ nhất và mô hình hồi quy	313
Phương pháp bình phương nhỏ nhất	313
Nhận dạng tham số mô hình không liên tục	315
Nhận dạng tham số mô hình liên tục	316
5.2.2 Cơ cấu xác định tham số bộ điều khiển từ mô hình đối tượng	316
Xác định tham số bộ điều khiển PI theo phương pháp tối ưu độ lớn	317
Xác định tham số bộ điều khiển PID theo phương pháp tối ưu đối xứng	317
Xác định tham số bộ điều khiển tối ưu theo nhiều	318
Thiết kế bộ điều khiển phản hồi, tĩnh, theo nguyên tắc cho trước điểm cực	319
Thiết kế bộ điều khiển động, phản hồi tín hiệu ra có điểm cực cho trước	321
Thiết kế bộ điều khiển với mô hình mẫu (model following)	323
Xác định tham số bộ điều khiển không liên tục	330
5.2.3 Sử dụng mô hình mẫu như một thiết bị theo dõi: Điều khiển thích nghi tự chỉnh trực tiếp	332
Xác định trực tiếp tham số bộ điều khiển không liên tục	332
Xác định trực tiếp tham số bộ điều khiển liên tục	335
5.3 Điều khiển thích nghi có mô hình theo dõi (MRAC)	336
5.3.1 Hiệu chỉnh tham số bộ điều khiển theo luật MIT	338
Nội dung phương pháp	338
Đánh giá chất lượng cơ cấu chỉnh định	343
5.3.2 Hiệu chỉnh tham số bộ điều khiển nhờ cực tiểu hóa hàm mục tiêu hợp thức (xác định dương)	345
5.4 Điều khiển ổn định ISS và điều khiển bất định, thích nghi kháng nhiễu	356
5.4.1 Đặt vấn đề	356
5.4.2 Điều khiển thích nghi đối tượng phi tuyến có tham số hằng bất định	358
Phương pháp giả định rõ (certainty equivalence)	358

Thiết kế cuốn chiếu (backstepping) bộ điều khiển thích nghi giả định rõ cho đối tượng truyền ngược	364
Thiết kế cuốn chiếu (backstepping) bộ điều khiển bám thích nghi cho đối tượng tam giác có tham số hằng bất định	369
5.4.3 Điều khiển thích nghi đối tượng phi tuyến có tham số bất định phụ thuộc thời gian.....	372
Phương pháp nén miền hấp dẫn (damping)	373
Khái niệm ổn định ISS, hàm ISS–Lyapunov và hàm ISS–CLF	376
Phương pháp điều khiển ISS thích nghi kháng nhiễu.....	383
Thiết kế cuốn chiếu (backstepping) hàm ISS–CLF	389
5.5 Sử dụng phương pháp điều khiển trượt	393
5.5.1 Xuất phát điểm của phương pháp điều khiển trượt	393
5.5.2 Thiết kế bộ điều khiển trượt ổn định bền vững.....	396
5.5.3 Thiết kế bộ điều khiển trượt bám bền vững.....	401
5.6 Điều khiển thích nghi bù bất định	402
5.6.1 Điều khiển thích nghi bù bất định đối tượng tuyến tính	402
Bù bất định bằng phản hồi tín hiệu ra.....	402
Bù bất định bằng phản hồi trạng thái.....	406
5.6.2 Điều khiển thích nghi bù bất định đối tượng phi tuyến	407
Điều khiển tuyến tính hóa chính xác hệ có một đầu vào.....	407
Điều khiển tuyến tính hóa chính xác hệ có nhiều đầu vào	415
Điều khiển thích nghi bù bất định đối tượng phi tuyến affine.....	430
Câu hỏi ôn tập và bài tập	435
6 Một số khái niệm cơ bản của điều khiển và những vấn đề bổ sung	439
6.1 Những khái niệm cơ bản	439
6.1.1 Cấu trúc đại số	439
Nhóm	439
Vành.....	440
Trường.....	441
Không gian vector	441
Đa tạp tuyến tính.....	443
Đại số.....	444
Ideale	445
6.1.2 Đại số ma trận và mô hình hệ tuyến tính	445
Các phép tính với ma trận.....	446
Hạng của ma trận	447
Định thức của ma trận.....	448
Ma trận nghịch đảo	449
Vết của ma trận	450
Ma trận là một ánh xạ tuyến tính	450
Phép biến đổi tương đương.....	452
Giá trị riêng và vector riêng	453
Mô hình trạng thái hệ tuyến tính	455
6.1.3 Không gian hàm số và mô hình hệ phi tuyến.....	458
Không gian metric.....	458

Không gian đủ.....	459
Không gian compact.....	460
Không gian chuẩn.....	460
Không gian Banach.....	462
Không gian Hilbert.....	462
Không gian các ánh xạ liên tục.....	463
Mô hình trạng thái hệ phi tuyến.....	465
6.2 Lý thuyết hàm biến phức	468
6.2.1 Định nghĩa, khái niệm hàm liên tục, hàm giải tích.....	468
6.2.2 Hàm bảo giác (conform).....	469
6.2.3 Tích phân phức và nguyên lý cực đại modulus.....	472
6.3 Lý thuyết ổn định Kharitonov	474
6.3.1 Nội dung định lý Kharitonov.....	474
6.3.2 Thiết kế bộ điều khiển ổn định bền vững cho đối tượng tuyến tính có tham số bất định.....	475
6.4 Ứng dụng hình học vi phân vào điều khiển	48
6.4.1 Hệ affine.....	48
6.4.2 Các phép tính cơ bản.....	48
Đạo hàm của hàm vô hướng (đạo hàm Lie).....	48
Phép nhân Lie, hay đạo hàm của vector hàm.....	48
Hàm mở rộng (distribution).....	48
6.4.3 Phép đổi biến vi phân đưa hệ affine về dạng chuẩn.....	49
Nguyên lý chung.....	49
Ứng dụng trong thiết kế bộ điều khiển hai cấp.....	49
Tài liệu tham khảo	49