

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

Hà Nội 2005

Author: **Nguyen Doan Phuoc**

Assoc. Prof. of Department of Automatic Control, Hanoi University of Technology.

Title: **Theory of Advanced Control**

This book aims to provide basic knowledges of optimal control, adaptive control and of robust control. It presents not only the conceptual basis such as optimizations, optimal control, Lyapunov theory, ISS stabilization, exact linearization control, but also their applications in identification, in RH₂ control and in disturbance attenuation control. Many examples are given in the book to illustrate the theory.

This book is the product of several courses given by the author at the Hanoi University of Technology (HUT). It is written for control engineering students and master students in Universities as a course and self study textbook.

Chịu trách nhiệm xuất bản:	PGS. TS. Tô Đăng Hải
Biên tập:	Nguyễn Đăng
Trình bày và chế bản:	Tác giả
Vẽ bìa:	Trần Thăng

In tại: Xưởng in NXB Văn hoá Dân tộc
Số lượng: 700 cuốn, khuôn khổ 16 x 24cm
Giấy phép xuất bản số: 1527-34CXB ngày 20/10/2004
In xong và nộp lưu chiểu tháng 3 năm 2005.

Lời nói đầu

Quyển sách này được viết ra từ các bài giảng trong nhiều năm của tác giả cho sinh viên, học viên cao học ngành Điều khiển tự động, Đo lường và Tin học công nghiệp thuộc Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội về Lý thuyết Điều khiển nâng cao, gồm bốn phần chính:

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

Để có thể mô tả được mối liên kết hữu cơ giữa bốn phần trên trong một bài toán điều khiển, trước tiên quyển sách tập trung trình bày các kiến thức cơ bản của điều khiển tối ưu, bao gồm: Điều khiển tối ưu tĩnh; Điều khiển tối ưu động; Điều khiển tối ưu ngẫu nhiên; Điều khiển tối ưu RH_∞ , sau đó mới đi vào các nội dung: Nhân dạng đối tượng điều khiển, Điều khiển bền vững, Điều khiển thích nghi, dưới dạng các ứng dụng khác nhau của điều khiển tối ưu.

Quyển sách được bố cục thành sáu chương:

- 1) Chương 1 trình bày về các phương pháp điều khiển tối ưu tĩnh (tối ưu hóa), những ứng dụng của chúng trong việc chọn tham số tối ưu cho bộ điều khiển, trong nhân dạng đối tượng điều khiển, cũng như để thiết kế bộ điều khiển bền vững trong không gian trạng thái
- 2) Nội dung của chương 2 là ba phương pháp cơ bản để giải quyết một bài toán tối ưu động. Đó là phương pháp biến phân, nguyên lý cực đại của Pontryagin và phương pháp quy hoạch động của Bellman. Ứng dụng của điều khiển tối ưu động vào thiết kế bộ điều khiển phân hồi trạng thái tối ưu LQR cũng được trình bày trong chương này.
- 3) Chương 3 viết về các phương pháp thiết kế bộ điều khiển tối ưu ngẫu nhiên, gồm bộ lọc Wiener, bộ lọc Kalman và vai trò của chúng trong việc thiết kế bộ điều khiển tối ưu LQG.
- 4) Chương 4 trình bày các nguyên tắc điều khiển bền vững thông qua phương pháp tham số hóa Youla, phục vụ việc chuyển bài toán điều khiển bền vững thành bài toán tối ưu RH_∞ dưới dạng cân bằng mô hình. Chương này cũng trình bày hai phương pháp tìm nghiệm bài toán tối ưu cân bằng mô hình đó gồm phương pháp nội suy Nevanlinna–Pick và phương pháp xấp xỉ chuẩn Hankel–Nehari.

- 5) Nội dung của chương 5 là các phương pháp điều khiển thích nghi, tập trung chủ yếu vào hai cấu trúc điều khiển điển hình của điều khiển thích nghi đối tượng tuyến tính là thích nghi tự chỉnh (STR) và thích nghi cơ mô hình theo dõi (MRAC). Sau đó là các ứng dụng mở rộng của lý thuyết Lyapunov, ISS vào điều khiển thích nghi đối tượng phi tuyến, như phương pháp cuốn chiều thích nghi (adaptive backstepping), phương pháp giá định rõ (certainty equivalence), phương pháp cơ miễn hấp dẫn (damping), điều khiển thích nghi kháng nhiễu (disturbance attenuation), điều khiển tuyến tính hóa chính xác thích nghi. ...
- 6) Phần bổ sung thêm trong chương 6 là những khái niệm toán học cơ bản, lý thuyết hàm biến phức và các vấn đề rời rạc còn lại có liên quan đến điều khiển nâng cao, như kỹ thuật phân tích phổ tín hiệu, lý thuyết ổn định Kharitonov cũng như ứng dụng của chúng vào bài toán thiết kế bộ điều khiển bền vững.

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 hỗ 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 cam thông, chu đáo 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, không có sự cố vũ, khuyến khích, sự bền vững của tổ ấm gia đình, chắc chắn quyển sách không thể hoàn thành được.

Quyển sách còn được hoàn thành nhờ sự cố 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, đặc biệt là bạn PGS.TS. Phan Xuân Minh. Tác giả xin được gửi 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

phucnd-ac@mail.hut.edu.vn

Hà Nội, ngày 4-5 tháng 11 năm 2004

Mục lục

1 Điều khiển tối ưu tĩnh	13
1.1 Nhập môn	13
1.1.1 Thế nào là bài toán điều khiển tối ưu tĩnh?	13
1.1.2 Phân loại bài toán tối ưu	17
Bài toán tối ưu tuyến tính/phi tuyến	17
Bài toán cân tối ưu (suboptimal)	18
Bài toán tối ưu có ràng buộc/không ràng buộc	20
Nghiệm tối ưu địa phương/toàn cục	20
1.1.3 Công cụ toán học: Tập lồi và hàm lồi	21
1.2 Những bài toán tối ưu điển hình	25
1.2.1 Bài toán tối ưu lồi	25
1.2.2 Bài toán tối ưu toàn phương	28
1.2.3 Bài toán tối ưu hyperbol	29
1.3 Tìm nghiệm bằng phương pháp lý thuyết	31
1.3.1 Mối quan hệ giữa bài toán tối ưu và bài toán điểm yên ngựa	31
1.3.2 Phương pháp Kuhn–Tucker	33
1.3.3 Phương pháp Lagrange	36
1.4 Tìm nghiệm bằng phương pháp số	39
1.4.1 Bài toán tối ưu tuyến tính và phương pháp đơn hình (simplex)	39
1.4.2 Phương pháp tuyến tính hóa từng đoạn	43
1.4.3 Phương pháp Newton–Raphson	44
1.5 Tìm nghiệm bằng phương pháp hướng đến cực trị	47
1.5.1 Nguyên lý chung	47
1.5.2 Xác định bước tìm tối ưu	49
Xác định bằng phương pháp giải tích	49
Xác định bằng phương pháp số	49
Thuật toán nhất cắt vàng	50
1.5.3 Phương pháp Gauss–Seidel	51
1.5.4 Phương pháp gradient	54
1.5.5 Kỹ thuật hàm phạt và hàm chặn	55
Kỹ thuật hàm phạt	56
Kỹ thuật hàm chặn	58

1.6 Một số ví dụ ứng dụng	60
1.6.1 Xác định tham số tối ưu cho bộ điều khiển PID	60
1.6.2 Nhận dạng tham số mô hình đối tượng tiến định	62
Nhận dạng tham số mô hình không liên tục	63
Nhận dạng tham số mô hình liên tục	65
1.6.3 Ứng dụng vào điều khiển bền vững trong không gian trạng thái	66
Phát biểu bài toán	66
Phương pháp Roppenecker	68
Phương pháp Konigorski	71
1.6.4 Ứng dụng vào điều khiển thích nghi	76
Mục đích của điều khiển thích nghi	76
Vai trò của điều khiển tối ưu trong điều khiển thích nghi	80
Câu hỏi ôn tập và bài tập	80
2 Điều khiển tối ưu động	83
2.1 Nhập môn	83
2.1.1 Thế nào là bài toán điều khiển tối ưu động?	83
Bài toán tối ưu động liên tục	83
Bài toán điều khiển tối ưu không liên tục	85
2.1.2 Phân loại bài toán tối ưu động	86
2.2 Phương pháp biến phân	88
2.2.1 Hàm Hamilton, phương trình Euler-Lagrange và điều kiện cần	88
2.2.2 Phương trình vi phân Riccati và bộ điều khiển tối ưu không dừng cho đối tượng tuyến tính (trường hợp thời gian hữu hạn)	93
Phát biểu bài toán và tìm nghiệm nhờ phương pháp biến phân	93
Tìm nghiệm tối ưu từ phương trình vi phân Riccati	94
Thiết kế bộ điều khiển tối ưu, phản hồi trạng thái, không dừng	96
2.2.3 Phương trình đại số Riccati và bộ điều khiển tối ưu tình, phản hồi trạng thái cho đối tượng tuyến tính (trường hợp thời gian vô hạn)	98
Phát biểu bài toán	98
Lời giải của bài toán - Bộ điều khiển tối ưu phản hồi dương	99
Bộ điều khiển tối ưu phản hồi âm	101
2.2.4 Một số kết luận bổ sung, rút ra được từ phương pháp biến phân	102
Phương trình xác định tín hiệu điều khiển tối ưu	103
Bàn thêm về hàm Hamilton	104
2.3 Nguyên lý cực đại	105
2.3.1 Điều khiển đối tượng nửa tuyến tính, đa 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	109

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.....	122
Điều kiện cần.....	122
Điều kiện hoành (điều kiện trực giao).....	125
Bài toán tối ưu có khoảng thời gian cố định và cho trước.....	130
Bài toán tối ưu có đối tượng không autonom.....	130
2.3.4 Về ý nghĩa vector biên đồng trạng thái.....	131
2.4 Phương pháp quy hoạch động.....	136
2.4.1 Nội dung phương pháp.....	137
Nguyên lý tối ưu của Bellman.....	137
Hai vòng tính của phương pháp: Vòng ngược (kỹ thuật nhúng) và vòng xuôi.....	138
2.4.2 Mở rộng cho trường hợp hàm mục tiêu không ở dạng tổng.....	143
2.4.3 Mở rộng cho trường hợp điểm cuối không cố định.....	145
2.4.4 Mở rộng cho hệ liên tục và phương trình Hamilton-Jacobi-Bellman.....	146
Câu hỏi ôn tập và bài tập.....	150
3 Điều khiển tối ưu ngẫu nhiên.....	153
3.1 Một số khái niệm nhập môn.....	153
3.1.1 Quá trình ngẫu nhiên.....	153
Định nghĩa và mô tả chung.....	153
Quá trình ngẫu nhiên dừng.....	155
Quá trình ngẫu nhiên ergodic.....	156
Hàm mật độ phổ và ảnh Laplace của quá trình ngẫu nhiên ergodic.....	156
3.1.2 Hệ ngẫu nhiên và mô hình mô tả trong miền phức.....	157
Phép biến đổi Fourier.....	157
Xác định mô hình hàm truyền đạt.....	158
3.1.3 Bài toán điều khiển tối ưu ngẫu nhiên.....	159
3.2 Điều khiển tối ưu ngẫu nhiên tĩnh.....	161
3.2.1 Nhận dạng trực tuyến tham số mô hình không liên tục.....	161
3.2.2 Nhận dạng trực tuyến mô hình tuyến tính liên tục.....	163
Nhận dạng trực tuyến mô hình không tham số.....	163
Nhận dạng trực tuyến tham số mô hình đối tượng không có thành phần vi phân.....	166
Nhận dạng trực tuyến tham số mô hình đối tượng không có thành phần tích phân.....	167
3.3 Điều khiển tối ưu ngẫu nhiên động.....	168
3.3.1 Bộ lọc Wiener.....	168
Mục đích của bộ lọc.....	168
Các bước thiết kế.....	169
3.3.2 Bộ quan sát trạng thái Kalman (lọc Kalman).....	172

Mục đích của bộ quan sát	172
Thiết kế bộ quan sát trạng thái cho đối tượng tuyến tính	174
3.3.3 Bộ điều khiển LQG (Linear Quadratic Gaussian)	177
Nội dung bộ điều khiển LQG	177
Nguyên lý tách (separation principle)	180
Câu hỏi ôn tập và bài tập	182
4 Điều khiển tối ưu RH_∞ (Điều khiển bền vững)	183
4.1 Không gian chuẩn Hardy	183
4.1.1 Không gian chuẩn L_2 và H_2 (RH_2)	183
Không gian L_2	183
Không gian H_2 và RH_2	184
Mở rộng cho ma trận hàm phức (hệ MIMO)	186
Cách tính chuẩn bậc hai	186
4.1.2 Không gian chuẩn H_∞ và RH_∞	188
Khái niệm không gian H_∞ và RH_∞	188
Tính chuẩn vô cùng	189
4.2 Tham số hóa bộ điều khiển	192
4.2.1 Hệ có các khâu SISO	192
Trường hợp đối tượng là ổn định	192
Trường hợp đối tượng không ổn định	194
Thuật toán tìm nghiệm phương trình Bezout	196
Tổng kết: Thuật toán xác định lập các bộ điều khiển ổn định	201
4.2.2 Hệ có các khâu MIMO	203
Khái niệm hai ma trận nguyên tố cùng nhau	203
Phân tích ma trận truyền đạt thành cặp các ma trận nguyên tố cùng nhau	205
Xác định lập các bộ điều khiển làm ổn định hệ thống	208
Thuật toán tìm nghiệm hệ phương trình Bezout	210
Tổng kết: Thuật toán tham số hóa bộ điều khiển ổn định	214
4.2.3 Ứng dụng trong điều khiển ổn định nội	216
Khái niệm ổn định nội	216
Tính ổn định nội được (internal stabilizable)	218
Bộ điều khiển ổn định nội	221
4.3 Điều khiển tối ưu RH_∞	222
4.3.1 Những bài toán điều khiển RH_∞ điển hình	222
Bài toán cân bằng mô hình	222
Bài toán cực tiểu độ nhạy với sai lệch mô hình	222
Bài toán tối ưu RH_∞ mẫu (standard)	224
Bài toán ổn định bền vững với sai lệch mô hình	227

4.3.2	Trình tự thực hiện bài toán tối ưu RH	229
	Bước 1. Chuyển thành bài toán cân bằng mô hình	229
	Bước 2. Tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình	230
4.3.3	Khả năng tồn tại nghiệm của bài toán cân bằng mô hình	230
4.3.4	Phương pháp 1. Tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình nhờ toán tử Hankel và định lý Nehari	233
	Phân tích hàm trong và hàm ngoài	233
	Toán tử Hankel	235
	Định lý Nehari và nghiệm của bài toán (4.73)	238
	Thuật toán xác định nghiệm bài toán cân bằng mô hình	239
4.3.5	Phương pháp 2. Tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình nhờ phép nội suy Nevannlinna–Pick	240
	Nội suy Nevannlinna–Pick	241
	Tìm giá trị chặn dưới lớn nhất	244
	Tổng kết. Thuật toán tìm nghiệm bài toán cân bằng mô hình	246
4.3.6	Nghiệm cận tối ưu (suboptimal)	249
Câu hỏi ôn tập và bài tập		251

5 Điều khiển thích nghi **253**

5.1	Điều khiển thích nghi tự chỉnh (STR)	253
5.1.1	Tổng quát về cơ cấu nhận dạng tham số mô hình, phương pháp bình phương nhỏ nhất và mô hình hồi quy	254
	Phương pháp bình phương nhỏ nhất	254
	Nhận dạng tham số mô hình không liên tục	256
	Nhận dạng tham số mô hình liên tục	257
5.1.2	Cơ cấu xác định tham số bộ điều khiển từ mô hình đối tượng	257
	Xác định tham số bộ điều khiển PI theo phương pháp tối ưu độ lớn	258
	Xác định tham số bộ điều khiển PID theo phương pháp tối ưu đối xứng	258
	Xác định tham số bộ điều khiển tối ưu theo nhiều	259
	Thiết kế bộ điều khiển phản hồi, tĩnh, theo nguyên tắc cho trước điểm cực	260
	Thiết kế bộ điều khiển động, phản hồi tín hiệu ra có điểm cực cho trước	261
	Thiết kế bộ điều khiển với mô hình mẫu (model following)	264
	Xác định tham số bộ điều khiển không liên tục	271
5.1.3	Sử dụng mô hình mẫu như một thiết bị theo dõi: Điều khiển thích nghi tự chỉnh trực tiếp	272
	Xác định trực tiếp tham số bộ điều khiển không liên tục	272
	Xác định trực tiếp tham số bộ điều khiển liên tục	276
5.2	Điều khiển thích nghi có mô hình theo dõi (MRAC)	277
5.2.1	Hiệu chỉnh tham số bộ điều khiển theo luật MIT	278
	Nội dung phương pháp	278
	Đánh giá chất lượng cơ cấu chỉnh định	282

5.2.2	Hiệu chỉnh tham số bộ điều khiển nhờ cực tiểu hóa hàm mục tiêu xác định đường	284
	Hàm xác định đường và hàm hợp thức	285
	Thiết kế cơ cấu chỉnh định	289
5.3	Lý thuyết ổn định Lyapunov, ổn định ISS và bài toán điều khiển bất định, thích nghi kháng nhiễu	298
5.3.1	Đặt vấn đề	298
5.3.2	Ổn định lại tiêu chuẩn ổn định Lyapunov	299
	Khái niệm ổn định Lyapunov	299
	Tiêu chuẩn ổn định Lyapunov	302
5.3.3	Phương pháp thiết kế bộ điều khiển ổn định nhờ hàm điều khiển Lyapunov (CLF)	306
	Hàm điều khiển Lyapunov	306
	Thiết kế cuộn chiếu ham CLF qua khâu tích phân (backstepping)	309
	Thiết kế cuộn chiếu ham CLF cho hệ truyền ngược	312
5.3.4	Các trường hợp mở rộng của phương pháp thiết kế cuộn chiếu	316
	Thiết kế cuộn chiếu ham CLF cơ cấu trúc đơn giản cho hệ truyền ngược	316
	Thiết kế cuộn chiếu ham CLF cho hệ affine-truyền ngược	320
	Cuộn chiếu ham tuyến tính hóa chính xác có điểm cực đặt trước	324
5.3.5	Điều khiển thích nghi đối tượng phi tuyến có tham số bất định	327
	Phương pháp giả định rõ (certainty equivalence)	328
	Thiết kế cuộn chiếu bộ điều khiển giả định rõ qua khâu tích phân	334
	Phương pháp nền miễn hấp dẫn (damping)	336
	Tuyến tính hóa chính xác thích nghi nhờ bộ điều khiển bù thành phần bất định	340
5.3.6	Điều khiển thích nghi kháng nhiễu (disturbance attenuation)	346
	Định nghĩa tính ổn định ISS và hàm ISS-CLF	347
	Điều khiển ổn định ISS kháng nhiễu đầu vào	353
	Điều khiển ổn định ISS kháng nhiễu hệ thống	354
	Thiết kế cuộn chiếu hàm ISS-CLF (disturbance backstepping)	363
5.4	Điều khiển tuyến tính hóa chính xác thích nghi	373
5.4.1	Các phép tính cơ bản của hình học vi phân	374
	Đạo hàm Lie	374
	Phép nhân Lie (còn gọi là ngoặc vuông Lie)	375
	Mô tả đa tạp băng không gian tiếp tuyến (hàm mở rộng)	377
5.4.2	Phân tích hệ phi tuyến bằng công cụ hình học vi phân	380
	Bậc tương đối của hệ SISO và vector bậc tương đối của hệ MIMO	380
	Phép đổi biến chuyển hệ phi tuyến affine về dạng cascade của hai hệ con	391
	Phép đổi biến đưa hệ về dạng chuẩn (normal form)	396
	Phân tích tính động học không và khái niệm hệ pha cực tiểu	399
5.4.3	Tuyến tính hóa chính xác thích nghi hệ có một tín hiệu vào	403
	Nội dung phương pháp tuyến tính hóa chính xác hệ affine có một tín hiệu vào	403
	Điều khiển thích nghi tách nhiễu hệ thống	409