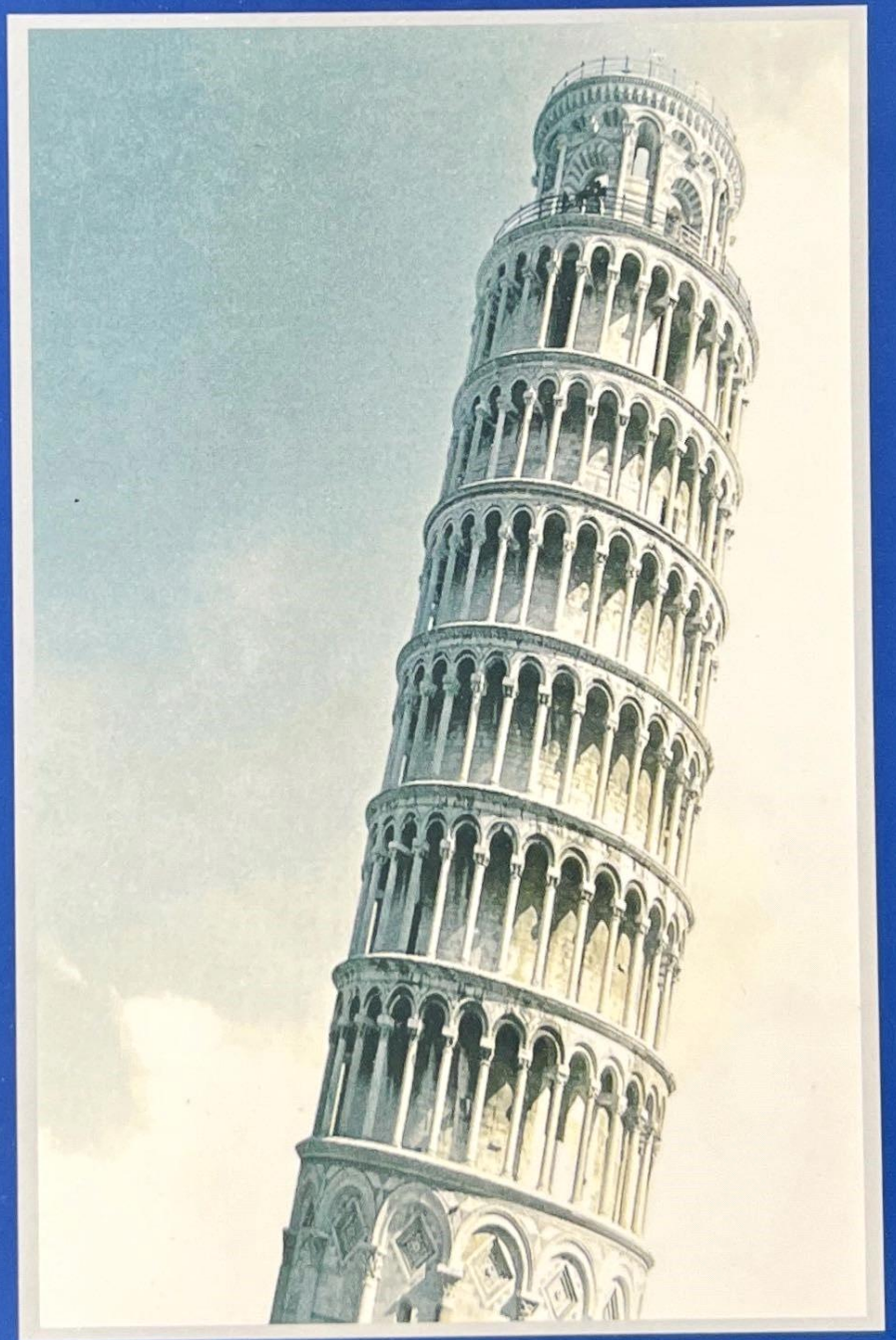


NGUYỄN DOÃN PHƯỚC

PHÂN TÍCH VÀ ĐIỀU KHIỂN² HỆ PHI TUYẾN



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

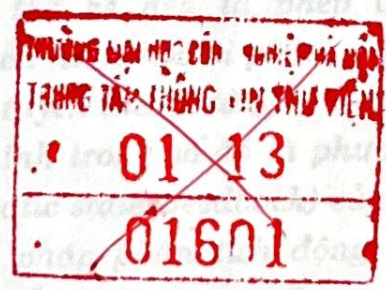
NGUYỄN DOÃN PHƯỚC

LỜI NÓI ĐẦU

Bản quyền thuộc về trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

PHÂN TÍCH VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ PHI TUYẾN

(Xuất bản lần thứ hai, có sửa chữa)



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

LỜI NÓI ĐẦU

Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến luôn là vấn đề thời sự, thu hút được sự quan tâm của những người làm việc trong lĩnh vực kỹ thuật hệ thống. Những phương pháp phân tích và tổng hợp hệ thống trên cơ sở lý thuyết các hệ thống điều khiển phi tuyến đã đưa con người đến gần hơn nữa trong các ứng dụng thực tế cũng như khả năng nâng cao được chất lượng cho các hệ thống điều khiển hiện tại. Nó chính là chiếc cầu nối giữa lý thuyết và ứng dụng thực tiễn. Chính vì thế, ngay từ khi lý thuyết điều khiển được khai sinh, mảng lý thuyết các hệ thống điều khiển phi tuyến đã khẳng định được vị trí của mình. Nhiều phương pháp phân tích và điều khiển hệ phi tuyến đã ra đời và phát triển song song cùng lý thuyết điều khiển tuyến tính cơ bản. Đó là các phương pháp phân tích mặt phẳng pha, phương pháp phân tích và điều khiển hệ Hammerstein, hệ Wiener, phương pháp cân bằng điều hòa, lý thuyết Lyapunov hay phương pháp điều khiển trượt (Sliding Mode Control-SMC)....

Đặc biệt, trong những năm gần đây, với sự trợ giúp của nhiều ngành khoa học khác nhau, chuyên ngành phân tích và điều khiển hệ phi tuyến đã có những bước nhảy vọt về chất lượng, cả trong lý thuyết lẫn ứng dụng. Nền móng cho sự phát triển về mặt lý thuyết trước tiên có thể kể đến là phép đối trực tọa độ vi phân (diffeomorphism) xây dựng trên nền hình học vi phân, đã tạo ra khả năng nghiên cứu, phân tích, điều khiển hệ phi tuyến theo hướng tận dụng các kết quả đã có của điều khiển tuyến tính, mà điển hình trong số đó là phương pháp thiết kế bộ điều khiển tĩnh phản hồi trạng thái (static states feedback) của Isidori để tuyến tính hóa chính xác hệ phi tuyến, phương pháp phân tích động học không hệ phi tuyến, phương pháp điều khiển kháng nhiễu.... Tương tự, Sontag cùng các đồng sự đưa ra khái niệm hàm điều khiển Lyapunov (Control Lyapunov Function-CLF) đã giúp cho việc giải quyết bài toán thiết kế các bộ điều khiển ổn định được chặt chẽ hơn, rõ ràng hơn, nhất là khi đối tượng có mô hình bất định (uncertainties), hoặc bị thay đổi ngẫu nhiên không biết trước.... Cũng như vậy, phương pháp backstepping của Krstic và đồng sự ra đời đã cho phép ta xác định được một cách rất đơn giản hàm CLF cho lớp hệ phi tuyến truyền ngược.... Và gần đây nhất là phương pháp điều khiển hệ phẳng (flat) của Fliess cùng cộng sự trên nền đại số vi phân cho phép thiết kế được bộ điều khiển bám phi tuyến và bộ điều khiển động phản hồi trạng thái (dynamic states feedback) để tuyến tính hóa được hệ phi tuyến trong toàn bộ không gian trạng thái.

Xét về khía cạnh ứng dụng thì với sự trợ giúp của lý thuyết tập mờ, công cụ mạng neural, giải thuật di truyền hay kỹ thuật vi điều khiển..., khoảng cách giữa lý thuyết và thực tế của hệ phi tuyến đã được thu hẹp đáng kể trong khoảng 18 năm trở

lại đây. Điều này có thể nhận thấy được thông qua sự xuất hiện khá nhiều của các dòng sản phẩm thiết bị điều khiển số tự chỉnh định thích nghi cho hệ cơ điện tử, hay các bộ điều khiển lai trên thị trường công nghiệp hiện nay, như các bộ chỉnh định mờ, mờ-neural, các module điều khiển khả trình có tích hợp chức năng thông minh như lọc Kalman mở rộng, quan sát trạng thái phi tuyến SMO, thiết bị chẩn đoán và cảnh báo lỗi hệ thống....

Bên cạnh sự phát triển mới về chất lượng trên, trường phái phân tích và điều khiển hệ phi tuyến kinh điển cũng đã được bổ sung thêm nhiều kỹ thuật hữu ích khác rất gần với ứng dụng, như kỹ thuật gain-scheduling, kỹ thuật điều khiển dự báo theo mô hình (Model Predictiv Control-MPC), phương pháp đa tạp trung tâm.... Không những thế, lý thuyết các hệ thống điều khiển phi tuyến còn được ứng dụng thành công cho lớp đối tượng phi tuyến có tính chất động học đặc biệt như các hệ thụ động, các hệ hồi tiếp chặt tham số, hệ tiêu tán

Sự tiến bộ to lớn đó của chuyên ngành phân tích và điều khiển hệ phi tuyến cần phải được phổ cập và nhanh chóng ứng dụng vào thực tiễn công nghiệp Việt Nam. Đó cũng chính là lý do thôi thúc tác giả viết cuốn sách này. Cuốn sách có mục đích chính là giới thiệu với bạn đọc những phương pháp từ dạng kinh điển tới cấu trúc hiện đại, phục vụ cho bài toán phân tích và thiết kế bộ điều khiển hệ phi tuyến. Vì mong muốn được cùng bạn đọc tiếp tục trao đổi, nên sau mỗi phần trình bày một phương pháp, tác giả đã cố gắng đưa thêm vào những kết quả mở rộng của riêng mình cũng như các suy nghĩ về khả năng mở của nó dưới dạng các lời bàn.

Một điều không thể phủ định là lý thuyết điều khiển tuyến tính luôn là nền tảng cơ bản và quan trọng nhất của lý thuyết các hệ thống điều khiển nói chung, trong đó rất nhiều các phát triển mới về khái niệm cũng như phương pháp của điều khiển phi tuyến đều có được sự gợi ý về tư tưởng từ lý thuyết điều khiển tuyến tính. Bởi vậy việc nắm vững và làm chủ lý thuyết điều khiển tuyến tính sẽ giúp ta có được những kiến thức cơ bản, chắc chắn để tự tin tiến sâu hơn vào các lĩnh vực khác của điều khiển. Bạn đọc có thể tìm đọc cuốn sách "Lý thuyết điều khiển tuyến tính" đã xuất bản trước đó của tác giả để tìm hiểu những kiến thức cơ sở về phân tích và điều khiển hệ tuyến tính, qua đó có thể sử dụng cuốn sách này một cách hữu ích hơn.

Cuốn sách này được xem như phiên bản mở rộng và nâng cao của cuốn "Lý thuyết điều khiển phi tuyến" cũng của tác giả và đồng nghiệp đã được xuất bản từ năm 2002. Sách được bố cục thành bốn chương, với mỗi chương được trình bày theo từng đặc điểm ứng dụng của các phương pháp. Do đó trong từng chương sẽ có cả những nội dung nền tảng cơ bản và cả những kết quả mở rộng, nâng cao mới được công bố trong những năm gần đây.

Trước tiên, chương 1 tập trung vào trình bày những vấn đề cơ bản nhất của lĩnh vực phân tích và điều khiển hệ phi tuyến. Đây là những khái niệm, những phương pháp luôn có mặt trong mọi bài toán điều khiển liên quan tới hệ phi tuyến, như định nghĩa, phân loại hệ phi tuyến, nhiệm vụ bài toán phân tích và điều khiển,

lý thuyết Lyapunov.... Từ nền cơ bản đó, chương 1 sẽ trình bày tiếp các kết quả nâng cao như ổn định theo hàm mũ, ổn định ISS, phương pháp backstepping hay thích nghi giả định rõ (certainty equivalence) và thích nghi nén miền hấp dẫn (damping)....

Toàn bộ chương 2 là dành riêng cho việc trình bày các phương pháp phân tích và điều khiển hệ phi tuyến được xây dựng trên nền lý thuyết điều khiển tuyến tính kinh điển, như tuyến tính hóa xấp xỉ xung quanh điểm cân bằng, phân tích tính ổn định hệ phi tuyến tại điểm cân bằng nhờ đa tạp trung tâm, điều khiển tuyến tính hình thức hệ phi tuyến, kỹ thuật gain-scheduling, các phương pháp phân tích, tổng hợp bộ điều khiển phi tuyến trên nền hình học vi phân. Trọng tâm của phần trình bày về những kết quả nâng cao mới được công bố trong những năm gần đây của chương 2 bao gồm các phương pháp xác định phép đổi trục tọa độ vi phân, phương pháp thiết kế bộ điều khiển tĩnh phản hồi trạng thái (static states feedback) để tuyến tính hóa hệ phi tuyến trong toàn bộ không gian trạng thái, các phương pháp phân tích động học không, tính điều khiển được, quan sát được của hệ phi tuyến affine.

Tiếp theo, chương 3 trình bày về các phương pháp phân tích và điều khiển những hệ phi tuyến có đặc thù động học riêng, thường gặp trong thực tế. Đó là những hệ Hammerstein, hệ Wiener, hệ hai cấp, hệ thụ động, hệ Euler-Lagrange, hệ phẳng. Các phương pháp phân tích và điều khiển kinh điển được trình bày trong chương 3 bao gồm phương pháp phân tích tính ổn định tuyệt đối, khả năng tự dao động và tính ổn định của dao động, phương pháp điều khiển trượt.... Ngoài ra, chương 3 còn trình bày những phương pháp mới được bổ sung trong các năm gần đây như điều khiển hai cấp, điều khiển tựa theo thụ động, điều khiển thích nghi bằng mô hình ngược, điều khiển thích nghi giả định rõ hệ Euler-Lagrange, điều khiển tựa phẳng với khả năng tuyến tính hóa chính xác hệ phi tuyến trong toàn bộ không gian trạng thái nhờ bộ điều khiển động phản hồi trạng thái (dynamic states feedback).

Cuối cùng, chương 4 là phần trình bày về nội dung các phương pháp thiết kế bộ quan sát trạng thái hệ phi tuyến và điều khiển hệ phi tuyến bằng phản hồi đầu ra (dynamic outputs feedback). Đây cũng là những kết quả mới được công bố trong những năm gần đây. Nhiều kết quả lý thuyết đã được chuyển sang thành dạng thuật toán để bạn đọc có thể dễ dàng cài đặt thành chương trình ứng dụng của riêng mình.

Cuốn sách này được viết ra từ các bài giảng của tác giả cho lớp cao học ngành Điều khiển và Tự động hóa và chuyên đề nghiên cứu sinh tại Đại học Bách khoa Hà Nội về Lý thuyết điều khiển phi tuyến với những nội dung chính như sau:

- Các phương pháp phân tích và điều khiển hệ phi tuyến;
- Ứng dụng các phương pháp tối ưu hóa trong điều khiển;
- Điều khiển tối ưu;
- Điều khiển thích nghi.

Mục đích của tác giả khi viết cuốn 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.

Cuốn sách cũng đã được viết với sự cảm thông, chịu đựng, chia sẻ rất to lớn của những thành viên trong gia đình tác giả là vợ Ngô Kim Thư, con gái Nguyễn Phước My và hai cháu ngoại Bông, Bo. Không có họ chắc chắn cuốn sách không thể hoàn thành. Sách cũng 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 Hà Nội, 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 chắn không thể tránh khỏi thiếu sót. Do đó tác giả rất mong nhận được những góp ý sửa đổi, bổ sung của bạn đọc để cuốn sách được hoàn thiện hơn. Thư góp ý xin gửi về:

Đại học Bách khoa Hà Nội

Viện Điện, Bộ môn Điều khiển Tự động - số 1 Đại Cổ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Email: phuocnd-ac@mail.hut.edu.vn

Tác giả

MỤC LỤC

Lời nói đầu	3
Chương 1 Lý thuyết phi tuyến cơ bản	11
1.1 Phân loại hệ thống điều khiển	11
1.1.1 Nhiệm vụ của bài toán điều khiển.....	11
1.1.2 Phân loại hệ thống	14
Phân loại theo tín hiệu vào–ra.....	14
Quá trình ngẫu nhiên, hệ ngẫu nhiên và nguyên lý trực giao.....	17
Phân loại theo mô hình toán học.....	21
Phân loại theo cấu trúc mô hình.....	33
Phân loại theo tính chất động học.....	34
1.2 Nhiệm vụ phân tích hệ thống	35
1.2.1 Những tính chất động học điển hình	35
Điểm trạng thái cân bằng và điểm dừng	35
Tính ổn định tại điểm cân bằng	38
Khả năng tự dao động hoặc dao động cưỡng bức và tính ổn định của dao động.....	43
Hiện tượng hỗn loạn tự do và hỗn loạn cưỡng bức (chaos).....	46
Hiện tượng phân nhánh	51
Bậc tương đối của hệ phi tuyến affine SISO	52
Tính động học không và khái niệm hệ pha cực tiểu.....	54
1.2.2 Phân tích trong mặt phẳng pha.....	56
Xây dựng quỹ đạo pha bằng phương pháp tách biến	57
Xây dựng quỹ đạo pha bằng phương pháp đường đẳng tà.....	60
Phân tích chất lượng hệ phi tuyến nhờ mặt phẳng pha.....	63
1.3 Lý thuyết Lyapunov	65
1.3.1 Tiêu chuẩn ổn định Lyapunov.....	65
Tính chất nghiệm phương trình vi phân (1.64).....	66
Tiêu chuẩn xét tính ổn định cho hệ phi tuyến dừng	68
Phương trình Lyapunov.....	72
Tích Kronecker và phương pháp tìm nghiệm phương trình Sylvester–Lyapunov.....	75
Một số phương pháp tìm hàm LF cho hệ tự trị.....	76
Tiêu chuẩn xét tính ổn định cho hệ không dừng	81
Khái niệm ổn định tiệm cận đều và ổn định theo hàm mũ	84
Khái niệm ổn định ISS (ổn định vào–trạng thái).....	89
Khái niệm ổn định bán toàn cục (semiglobal asymptotic stable)	92
Hệ ổn định tiệm cận với khoảng thời gian hữu hạn (finite–time stable)	93
1.3.2 Thiết kế bộ điều khiển làm hệ ổn định	94
Khái niệm hàm CLF và nguyên lý thiết kế bộ điều khiển GAS	94
Phương pháp thiết kế cuốn chiếu (backstepping)	99
Điều khiển GAS hệ truyền thẳng (feedforward systems).....	106

Phương pháp giả định rõ trong điều khiển thích nghi (certainty equivalence)	111
Thiết kế cuốn chiếu (backstepping) bộ điều khiển giả định rõ	117
Điều khiển thích nghi ISS và phương pháp damping (nén miền hấp dẫn).....	118
Câu hỏi ôn tập và bài tập	125
Chương 2 Các phương pháp tuyến tính hóa	129
2.1 Xấp xỉ tuyến tính xung quanh điểm dừng và điểm cân bằng	129
2.1.1 Xây dựng mô hình xấp xỉ tuyến tính.....	129
2.1.2 Phân tích tính ổn định nhờ mô hình xấp xỉ tuyến tính	133
Tính ổn định tiệm cận của hệ phi tuyến và giá trị riêng của mô hình tuyến tính xấp xỉ	134
Phương pháp đa tạp trung tâm.....	138
Vài điều bàn thêm.....	147
2.1.3 Thiết kế bộ điều khiển nhờ mô hình xấp xỉ tuyến tính.....	148
Điều khiển phản hồi trạng thái.....	148
Quan sát trạng thái và điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách.....	151
Kỹ thuật gain-scheduling	156
2.2 Điều khiển tuyến tính hình thức	159
2.2.1 Tuyến tính hóa nhờ phản hồi trạng thái	159
Xác định bộ điều khiển tuyến tính hóa	159
Định hướng tuyến tính nhờ gán điểm cực.....	164
2.2.2 Phương pháp điều khiển tiệm cận tuyến tính của Sieber	166
Mục đích của phương pháp	166
Công cụ toán học: Phép đổi hàng/cột trong ma trận	168
Các bước thiết kế bộ điều khiển	169
2.3 Tuyến tính hóa chính xác	172
2.3.1 Những gợi ý ban đầu.....	172
Điều khiển GAS cho hệ truyền ngược chặt dạng chuẩn	172
Điều khiển GAS cho hệ truyền ngược chặt	173
Phương pháp điều khiển tách kênh hệ tuyến tính của Falb–Wolovich	175
2.3.2 Công cụ toán học: Hình học vi phân.....	178
Các phép tính vector và quỹ đạo vector trong không gian ba chiều	178
Không gian tiếp tuyến.....	181
Phép đổi biến vi phân	182
Phép đổi trục tọa độ giữa các không gian tiếp tuyến	183
Đạo hàm Lie và tích Lie.....	184
Hàm mở rộng (distribution).....	186
2.3.3 Tuyến tính hóa chính xác hệ affine một đầu vào.....	190
Phép đổi biến đưa hệ affine về dạng chuẩn.....	190
Xác định bộ điều khiển tuyến tính hóa vào-ra	195
Xác định bộ điều khiển tuyến tính hóa vào-trạng thái	197
Ứng dụng vào điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu	201
2.3.4 Phân tích hệ affine một đầu vào nhờ phép đổi biến vi phân.....	206
Phân tích tính động học không và tính pha cực tiểu.....	206
Bài toán nghịch đảo mô hình (điều khiển tùy động).....	209
Phân tích tính điều khiển được	211

Phân tích tính quan sát được	218
2.3.5 Tuyến tính hóa chính xác hệ affine nhiều đầu vào	220
Khái niệm vector bậc tương đối tối thiểu	220
Tuyến tính hóa chính xác và tách kênh vào-ra	225
Tuyến tính hóa chính xác vào-trạng thái	231
Ứng dụng vào điều khiển thích nghi kháng nhiễu	241
Ứng dụng vào điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu	244
Câu hỏi ôn tập và bài tập	247

Chương 3 Các phương pháp phân tích – điều khiển đặc thù **251**

3.1 Hệ Hammerstein và hệ Wiener **251**

3.1.1 Phân tích tính ổn định tuyệt đối	251
Khái niệm hàm thực-dương	252
Khái niệm hệ tuyến tính thụ động	257
Tiêu chuẩn ổn định tuyệt đối của Popov cho hệ NL	259
Xét tính ổn định tuyệt đối cho hệ NL có khâu tuyến tính ổn định	260
Xét tính ổn định tuyệt đối cho hệ NL có khâu tuyến tính không ổn định	262
Phân tích tính ổn định tuyệt đối nhờ tiêu chuẩn đường tròn	265
3.1.2 Phân tích khả năng tự dao động và tính ổn định của dao động	271
Nguyên tắc xác định hệ số khuếch đại phức	271
Xác định hệ số khuếch đại phức của các khâu relay	273
Xác định hệ số khuếch đại phức của các khâu khuếch đại bão hòa	276
Xác định dao động và tính ổn định của nó	278

3.2 Điều khiển ổn định bằng bộ điều khiển hai lớp **283**

3.2.1 Điều khiển trượt	283
Mặt trượt và điều kiện trượt cho hệ truyền ngược chặt dạng chuẩn	283
Thiết kế bộ điều khiển trượt làm hệ ổn định bền vững	285
Bàn về chất lượng ổn định của hệ trượt	288
Điều khiển trượt bám theo tín hiệu vào	289
Thiết kế mặt trượt cong và bộ điều khiển trượt cho hệ phi tuyến affine SISO	291
3.2.2 Phương pháp thiết kế hai cấp (two-scale design)	298
Nguy cơ finite-escape-time của hệ kín	302
Khả năng ổn định tiệm cận của bộ điều khiển hai cấp	304

3.3 Phương pháp điều khiển thụ động **306**

3.3.1 Khái niệm hệ phi tuyến thụ động	306
Định nghĩa hệ phi tuyến thụ động	306
Những tính chất cơ bản của hệ thụ động	307
3.3.2 Điều khiển thụ động	310
Ý nghĩa bài toán điều khiển thụ động	310
Điều kiện cần cho bài toán điều khiển thụ động	311
Thụ động hóa hệ có cấu trúc truyền ngược	316
Thụ động hóa hệ có cấu trúc truyền thẳng	318
3.3.3 Ứng dụng vào điều khiển hệ Euler-Lagrange	324
Khái niệm hệ Euler-Lagrange	324
Phân tích tính ổn định Lyapunov và tính thụ động	328

Điều khiển ổn định tiệm cận	330
Điều khiển tuyến tính hóa chính xác.....	331
Nâng cao chất lượng nhờ điều khiển thích nghi giả định rõ bằng mô hình ngược	332
Phương pháp điều khiển thích nghi Li-Slotine	335
Điều khiển ổn định thích nghi ISS (điều khiển bền vững)	337
Điều khiển thích nghi ISS và bù sai lệch.....	339
Điều khiển bám ổn định bền vững theo nguyên lý trượt.....	344
3.4 Hệ phẳng (flat) và điều khiển tựa phẳng	346
3.4.1 Khái niệm hệ phẳng và ý nghĩa trong điều khiển.....	346
Định nghĩa hệ phẳng	346
Vai trò của hệ phẳng trong phân tích và điều khiển hệ phi tuyến.....	352
3.4.2 Kiểm tra tính phẳng và bài toán điều khiển tựa phẳng	356
Mô tả hệ phi tuyến trong không gian vô hạn chiều	357
Hệ phi tuyến tương đương (equivalent systems).....	359
Kiểm tra tính phẳng	364
Bài toán điều khiển tựa phẳng.....	367
3.4.3 Vài lời tổng kết	378
Câu hỏi ôn tập và bài tập	380
Chương 4 Điều khiển phản hồi đầu ra	383
4.1 Điều khiển theo nguyên lý tách	384
4.1.1 Quan sát trạng thái và không gian quan sát.....	385
Khả năng phát hiện trạng thái và quan sát trạng thái	385
Không gian quan sát.....	390
Vài lời tổng kết.....	391
4.1.2 Thiết kế bộ quan sát trạng thái	392
Mô hình toán cơ bản của bộ quan sát	392
Bộ quan sát tựa Luenberger.....	393
Bộ quan sát tựa Luenberger cho hệ Lipschitz (bộ quan sát Lipschitz)	396
Bộ quan sát hệ số khuếch đại lớn (HGO–high gain observer).....	400
Bộ quan sát trượt (SMO–sliding mode observer).....	403
Lọc Kalman mở rộng và bộ quan sát Kalman–Bucy mở rộng.....	408
Bộ quan sát tựa tối ưu MHO (moving horizon observer).....	413
4.1.3 Các vấn đề nảy sinh khi ghép chung bộ quan sát trạng thái với bộ điều khiển phản hồi trạng thái tĩnh	418
Hiện tượng tiến tới vô cùng sau khoảng thời gian hữu hạn (FET).....	419
Tính ổn định bán toàn cục (semi global stable).....	421
Lớp các hệ thỏa mãn nguyên lý tách.....	423
4.2 Bài toán điều khiển phản hồi đầu ra trực tiếp	426
4.2.1 Nguyên lý chung	426
4.2.2 Thụ động hóa và điều khiển hệ thụ động bằng phản hồi đầu ra.....	428
Câu hỏi ôn tập và bài tập	432
Tài liệu tham khảo	433