

Conteúdo

1	Introdução	17
1.1	O que é o controlo no espaço de estados?	17
1.1.1	O que é o controlo?	18
1.1.2	O que é o modelo de estado?	21
1.1.3	Controlo com base no modelo de estado	24
1.1.4	Estimação do estado	26
1.2	Um pouco de História	27
1.2.1	Origens do controlo	27
1.2.2	O Método direto de Lyapunov	27
1.2.3	A Eletrónica e os modelos entrada/saída	28
1.2.4	O modelo de estado e a engenharia aeroespacial	29
1.2.5	O ponto de vista contemporâneo	30
1.3	Estrutura do livro	34
1.3.1	Conteúdo científico	34
1.3.2	Organização da leitura	35
1.4	Pontos principais do capítulo	36
1.5	Questões	36
1.6	Problemas	37

I	Modelo de Estado de Sistemas lineares	39
2	Equações de estado	41
2.1	Modelo de estado de sistemas lineares	41
2.1.1	As equações do modelo de estado	41
2.1.2	Escolha das variáveis de estado	44
2.1.3	Diagrama de blocos do modelo de estado	50
2.2	Conversão entre modelos	53
2.2.1	Função de transferência a partir do modelo de estado	53
2.2.2	Realização de estado com variáveis de fase	57
2.2.3	Outras realizações de estado	59
2.3	Pontos principais do capítulo	67
2.4	Questões	67
2.5	Problemas	70
3	Solução das equações de estado	79
3.1	A equação homogénea	80
3.1.1	Retrato de fase	80
3.1.2	Campo de vetores	81
3.1.3	Decomposição modal	89
3.1.4	Comportamento qualitativo	90
3.2	A matriz de transição	95
3.2.1	Cálculo com a transformada de Laplace	96
3.2.2	Conjuntos fundamentais de soluções	97
3.2.3	Exponencial de uma matriz	100
3.2.4	Reversibilidade no tempo	100
3.2.5	Forma canónica de Jordan*	101
3.2.6	Cálculo da exponencial com o teorema de Cailey-Hamilton	105

3.2.7	A propriedade de semigrupo	106
3.3	A fórmula de variação das constantes	110
3.4	Modelo de estado em tempo discreto	112
3.4.1	Amostragem	113
3.4.2	Matriz de transição em tempo discreto	114
3.4.3	A fórmula de variação das constantes em tempo discreto	117
3.5	Pontos fundamentais do capítulo	121
3.6	Questões	121
3.7	Problemas	122

II Realimentação linear de variáveis de estado **149**

4 Controlabilidade e observabilidade **151**

4.1	Controlabilidade	155
4.1.1	Definições e critérios	155
4.1.2	Transferência do estado	161
4.1.3	Controlabilidade para a origem	162
4.1.4	Graminano de controlabilidade*	165
4.2	Observabilidade	168
4.2.1	Sistemas contínuos	168
4.2.2	Sistemas discretos	170
4.2.3	Gramiano de observabilidade*	172
4.2.4	Transformações de coordenadas	173
4.3	Controlabilidade e observabilidade conjuntas	176
4.4	Pontos fundamentais do capítulo	179
4.5	Questões	179
4.6	Problemas	180

5	Controlo por realimentação do estado	183
5.1	Colocação de pólos por realimentação do estado	184
5.1.1	O problema de regulação	184
5.1.2	Método dos coeficientes indeterminados	188
5.1.3	Cálculo sistemático dos ganhos	189
5.1.4	Demonstração da fórmula de Bass-Gura	192
5.1.5	Especificação dos pólos	195
5.2	Estimação do estado	198
5.2.1	Observador em cadeia aberta	198
5.2.2	Observador assintótico	199
5.2.3	Cálculo sistemático dos ganhos do observador	202
5.2.4	O filtro de Kalman-Bucy	208
5.3	Retroação das variáveis estimadas	212
5.3.1	O teorema de separação	212
5.3.2	Projeto conjunto do controlador e do estimador	215
5.3.3	Função de transferência do controlador	218
5.4	Introdução da referência	220
5.4.1	Equação de erro independente da referência	221
5.4.2	Controlador que amplifica o erro de seguimento	222
5.4.3	Controlador com dois graus de liberdade	223
5.4.4	Efeito integral	225
5.5	Estabilidade robusta*	226
5.6	Pontos fundamentais do capítulo	229
5.7	Questões	230
5.8	Problemas	231

III	Controlo de sistemas não lineares	239
6	A biologia dos não-elfantes	241
6.1	Modelo de estado de sistemas não lineares	242
6.2	Comportamentos dos sistemas não lineares	248
6.2.1	Múltiplos pontos de equilíbrio	250
6.2.2	Oscilações estáveis e ciclos limite	251
6.2.3	Escape em tempo finito	257
6.2.4	Existência e unicidade da solução	257
6.2.5	Sensibilidade aos parâmetros e condições iniciais e caos	259
6.3	Pontos fundamentais do capítulo	264
6.4	Questões	264
6.5	Problemas	264
7	Equilíbrio, linearização e estabilidade local	269
7.1	Pontos de equilíbrio	270
7.1.1	Sistemas autónomos	270
7.1.2	Sistemas não-autónomos	272
7.2	Linearização	274
7.3	Conceitos de estabilidade	277
7.4	O método indireto	281
7.5	Projeto de controladores	287
7.6	Exemplo: Controlo da anestesia geral	292
7.7	Atribuição de ganhos	297
7.8	Pontos fundamentais do capítulo	298
7.9	Questões	300
7.10	Problemas	300

8	O Método Direto de Lyapunov	319
8.1	O método direto de Lyapunov	319
8.1.1	Funções definidas positivas	320
8.1.2	Funções de Lyapunov	321
8.1.3	Estabilidade local e estabilidade global	325
8.1.4	Demonstração do teorema de estabilidade local*.	329
8.2	A equação de Lyapunov	332
8.3	Demonstração do método indireto*	335
8.4	O teorema do conjunto invariante	338
8.5	Pontos fundamentais do capítulo	341
8.6	Questões	341
8.7	Problemas	342
9	Linearização por realimentação e controlo adaptativo	351
9.1	Funções de Lyapunov de controlo	352
9.2	Linearização por retroação*✕	358
9.3	Controlo adaptativo de um campo de coletores solares	360
9.4	Pontos fundamentais do capítulo	365
9.5	Questões	365
9.6	Problemas	365
IV	Controlo ótimo	371
10	Uma nova classe de problemas de otimização	373
10.1	Optimização de dimensão finita	374
10.2	Optimização de dimensão infinita.	375
10.2.1	Funcionais	380
10.3	Problemas de Controlo Ótimo	381

10.4 Pontos principais do capítulo	393
10.5 Para saber mais	394
10.6 Questões	394
11 O Princípio de Pontryagin	395
11.1 Um problema básico de controlo ótimo	395
11.2 O Princípio de Pontryagin	396
11.3 Exemplos	399
11.3.1 Exercício 11-1. Um problema geométrico.	399
11.3.2 Exercício 11-2. Robot móvel: Controlo de energia mínima.	400
11.3.3 Exercício 11-3. Robot móvel: Controlo de combustível mínimo	402
11.3.4 Exercício 11-4. Controlo de um reator de fermentação de penicilina.	404
11.4 Demonstração do Princípio de Pontryagin	410
11.5 A hamiltoniana	414
11.6 Formulações alternativas	419
11.6.1 Os problemas de Bolza, Lagrange e Mayer	419
11.6.2 Dependência explícita do tempo	420
11.7 Pontos fundamentais do capítulo	423
11.8 Questões	423
11.9 Problemas	424
12 Problemas com restrições no estado terminal	441
12.1 Restrições de igualdade no estado terminal	441
12.1.1 Trajecto mais curto entre dois pontos	446
12.1.2 Trajecto de um robot móvel entre dois pontos	448
12.2 Problemas de instante terminal livre	451
12.3 Pontos fundamentais do capítulo	457

12.4	Questões	458
12.5	Problemas	458
13	Controlo linear-quadrático gaussiano	497
13.1	Problema Linear-Quadrático de horizonte finito	498
13.2	Problema de horizonte infinito	502
13.3	Regulação quadrática da saída com horizonte infinito	510
13.4	Demonstração do teorema 13-1*.	511
13.5	Pólos ótimos	514
13.6	O lugar geométrico das raízes simétrico.	518
13.7	Demonstração da igualdade de Chang-Letov*	521
13.8	Margens de estabilidade do LQG	524
13.9	O filtro de Kalman-Bucy	526
13.10	O regulador LQG	528
13.11	Recuperação do ganho de malha	536
13.12	Pontos fundamentais do capítulo	537
13.13	Questões	538
13.14	Problemas	539