
Sumário

1	Visão Geral e um Breve Histórico da Teoria de Controle Realimentado	1
	Visão geral do capítulo	2
	1.1 Um sistema de controle retroativo simples	2
	1.2 A primeira análise da realimentação	5
	1.3 Uma breve história	8
	1.4 Uma visão geral do livro	12
	Resumo	14
	Questões de revisão	14
	Problemas	14
2	Modelos Dinâmicos	17
	Visão geral do capítulo	17
	2.1 Dinâmica de sistemas mecânicos	18
	2.1.1 Movimento de translação	18
	2.1.2 Movimento rotacional	23
	2.1.3 Combinando rotação e translação	30
	2.1.4 Sistemas com parâmetros distribuídos	33
	2.1.5 Resumo: desenvolvimento de equações de movimento para corpos rígidos	34
	2.2 Modelos de circuitos elétricos	35
	2.3 Modelos de sistemas eletromecânicos	38
	△ 2.4 Modelos de sistemas fluidos e térmicos	43
	2.4.1 Fluxo de calor	43
	2.4.2 Fluxo de fluido incompressível	46
	2.5 Perspectiva histórica	51
	Resumo	53
	Questões de revisão	53
	Problemas	54
3	Resposta Dinâmica	63
	Visão geral do capítulo	64
	3.1 Revisão das transformadas de Laplace	64
	3.1.1 Resposta por convolução	64
	3.1.2 Funções de transferência e resposta em frequência	69

3.1.3	A transformada de Laplace unilateral (\mathcal{L})	74
3.1.4	Propriedades da transformada de Laplace	76
3.1.5	A transformada inversa de Laplace por expansão em frações parciais	78
3.1.6	Teorema do Valor Final	79
3.1.7	Resolução de problemas com a transformada de Laplace	81
3.1.8	Polos e zeros	83
3.1.9	Análise de sistemas lineares usando o MATLAB	84
3.2	Representação de sistemas por diagramas	88
3.2.1	Diagrama de blocos	88
3.2.2	Redução de diagrama de blocos usando o MATLAB	92
3.3	Efeitos da localização dos polos	93
3.4	Especificações no domínio do tempo	100
3.4.1	Tempo de subida	100
3.4.2	Sobressinal e tempo de pico	100
3.4.3	Tempo de acomodação	102
3.5	Efeitos de zeros e polos adicionais	104
3.6	Estabilidade	112
3.6.1	Estabilidade entrada limitada-saída limitada	112
3.6.2	Estabilidade de sistemas LIT	113
3.6.3	Critério de estabilidade de Routh	114
△ 3.7	Obtenção de modelos a partir de dados experimentais	121
3.7.1	Modelos a partir de dados da resposta transitória	122
3.7.2	Modelos de outros dados	126
△ 3.8	Escalonamento em amplitude e no tempo	126
3.8.1	Escalonamento de amplitude	126
3.8.2	Escalonamento no tempo	127
3.9	Perspectiva histórica	128
	Resumo	129
	Questões de revisão	130
	Problemas	131

4 Uma Primeira Análise da Realimentação

146

	Visão geral do capítulo	147
4.1	Equações básicas de controle	147
4.1.1	Estabilidade	148
4.1.2	Rastreamento	149
4.1.3	Regulação	149
4.1.4	Sensibilidade	150
4.2	Controle de erro em estado estacionário para entradas polinomiais: tipo de sistemas	153
4.2.1	Tipo de sistema para rastreamento	153
4.2.2	Tipo do sistema para regulação e rejeição de distúrbios	157
4.3	Controlador de três termos: controlador PID	160
4.3.1	Controlador proporcional (P)	160
4.3.2	Controle proporcional mais controle integral (PI)	161
4.3.3	Controle PID	162
4.3.4	Método de Ziegler-Nichols para sintonia de controladores PID	165
4.4	Introdução ao controle digital	170
4.5	Perspectiva histórica	175
	Resumo	176
	Questões de revisão	177
	Problemas	178

5 O Método do Lugar das Raízes 189

- Visão geral do capítulo 190
- 5.1 Lugar das raízes de um sistema realimentado básico 190
- 5.2 Diretrizes gerais para determinar o lugar das raízes 194
 - 5.2.1 Regras para traçar o lugar das raízes positivo (180°) 196
 - 5.2.2 Resumo das regras para determinar o lugar das raízes 200
 - 5.2.3 Seleção do valor do parâmetro 201
- 5.3 Lugar das raízes ilustrativo 203
- 5.4 Projeto usando compensadores dinâmicos 214
 - 5.4.1 Projeto usando o compensador de avanço 215
 - 5.4.2 Projeto usando o compensador de atraso 219
 - 5.4.3 Projeto usando o compensador de rejeição de faixa 220
 - 5.4.3 Implementação analógica e digital 221
- 5.5 Um exemplo de projeto usando o lugar das raízes 224
- 5.6 Extensões do método do lugar das raízes 229
 - 5.6.1 Regras para esboçar um lugar das raízes negativo (0°) 229
 - △ 5.6.2 Considerando dois parâmetros 232
 - △ 5.6.3 Retardo no tempo 234
- 5.7 Perspectiva histórica 236
 - Resumo 238
 - Questões de revisão 240
 - Problemas 240

6 O Método de Projeto Baseado na Resposta em Frequência 254

- Visão geral do capítulo 254
- 6.1 Resposta em frequência 255
 - 6.1.1 Técnicas para traçar o diagrama de Bode 261
 - 6.1.2 Erro em regime permanente 271
- 6.2 Estabilidade neutra 272
- 6.3 O critério de estabilidade de Nyquist 274
 - 6.3.1 Princípio do argumento 275
 - 6.3.2 Aplicação em controle 276
- 6.4 Margens de estabilidade 286
- 6.5 Relação entre ganho e fase no diagrama de Bode 293
- 6.6 Resposta em frequência de malha fechada 297
- 6.7 Compensação 298
 - 6.7.1 Compensador PD 299
 - 6.7.2 Compensador de avanço 299
 - 6.7.3 Compensador PI 310
 - 6.7.4 Compensador de atraso 311
 - 6.7.5 Compensador PID 315
 - 6.7.6 Considerações de projeto 319
 - △ 6.7.7 Especificações em termos da função de sensibilidade 321
 - △ 6.7.8 Limitações no projeto em termos da função de sensibilidade 325
- △ 6.8 Retardo no tempo 328
- △ 6.9 Representação alternativa dos dados 329
 - 6.9.1 Carta de Nichols 329
- 6.10 Perspectiva histórica 332
 - Resumo 333
 - Questões de revisão 335
 - Problemas 336

7 Projeto no Espaço de Estados 356

- Visão geral do capítulo 356
- 7.1 Vantagens do espaço de estados 357
- 7.2 Descrição de sistemas no espaço de estados 358
- 7.3 Diagrama de blocos e espaço de estados 363
 - 7.3.1 Escalonamento de tempo e amplitude em espaço de estados 366
- 7.4 Análise das equações de estado 366
 - 7.4.1 Diagrama de blocos e formas canônicas 367
 - 7.4.2 Resposta dinâmica a partir das equação de estado 377
- 7.5 Projeto de lei de controle para realimentação completa de estados 383
 - 7.5.1 A lei de controle 383
 - 7.5.2 Introdução de uma entrada de referência com realimentação completa de estados 391
- 7.6 Seleção da localização dos polos para um bom projeto 394
 - 7.6.1 Polos dominantes de segunda ordem 395
 - 7.6.2 Lugar das raízes simétrico (LRS) 396
 - 7.6.3 Comentários sobre os métodos 404
- 7.7 Projeto de estimador 404
 - 7.7.1 Estimadores de ordem completa 404
 - 7.7.2 Estimadores de ordem reduzida 409
 - 7.7.3 Seleção dos polos do estimador 412
- 7.8 Projeto do compensador: lei de controle e estimador combinados 415
- 7.9 Introdução da entrada de referência com o estimador 426
 - 7.9.1 Estrutura geral para uma entrada de referência 427
 - 7.9.2 Selecionando o ganho 435
- 7.10 Controle integral e rastreamento robusto 436
 - 7.10.1 Controle integral 436
 - △ 7.10.2 Controle robusto de rastreamento: abordagem no espaço do erro 438
 - △ 7.10.3 O estimador estendido 447
- △ 7.11 Recuperação de função de transferência de malha (RFTM) 450
- △ 7.12 Projeto direto via funções de transferência racionais 455
- △ 7.13 Projeto para sistemas com atraso puro de tempo 458
- 7.14 Perspectiva histórica 460
 - Resumo 463
 - Questões de revisão 464
 - Problemas 464

8 Controle Digital 484

- Visão geral do capítulo 484
- 8.1 Digitalização 485
- 8.2 Análise dinâmica de sistemas discretos 487
 - 8.2.1 Transformada z 487
 - 8.2.2 Inversão da transformada z 488
 - 8.2.3 Relação entre s e z 490
 - 8.2.4 Teorema do Valor Final 491
- 8.3 Projeto usando equivalentes discretos 493
 - 8.3.1 Método de correspondência polo-zero (MPZ) 496
 - 8.3.2 Método modificado de correspondência polo-zero (MMPZ) 499
 - 8.3.3 Comparação dos métodos de aproximação digital 499
 - 8.3.4 Limites da aplicabilidade do método de projeto equivalente discreto 500

- 8.4 Características físicas 501
 - 8.4.1 Conversores analógico-digital (A/D) 501
 - 8.4.2 Conversores digital-analógico (D/A) 501
 - 8.4.3 Pré-filtros antialias 502
 - 8.4.4 O computador 503
- 8.5 Seleção de taxa de amostragem 503
 - 8.5.1 Eficiência de rastreamento 504
 - 8.5.2 Rejeição ao distúrbio 504
 - 8.5.3 Efeito do pré-filtro antialias 505
 - 8.5.4 Amostragem assíncrona 506
- △ 8.6 Projeto discreto 506
 - 8.6.1 Ferramentas de análise 506
 - 8.6.2 Propriedades de realimentação 508
 - 8.6.3 Exemplo de projeto discreto 508
 - 8.6.4 Análise discreta de projetos 510
- 8.7 Perspectiva histórica 512
 - Resumo 513
 - Questões de revisão 514
 - Problemas 514

9 Sistemas não Lineares 519

- Visão geral do capítulo 519
- 9.1 Introdução e motivação: por que estudar sistemas não lineares? 520
- 9.2 Análise por linearização 522
 - 9.2.1 Linearização por análise de sinais pequenos 522
 - 9.2.2 Linearização por realimentação não linear 527
 - 9.2.3 Linearização pela não linearidade inversa 527
- 9.3 Análise por ganho equivalente usando o lugar das raízes 528
 - 9.3.1 Integrador antiwindup 533
- 9.4 Análise do ganho equivalente usando resposta em frequência: funções descritivas 536
 - 9.4.1 Análise de estabilidade usando funções descritivas 542
- △ 9.5 Análise e projeto baseados na estabilidade 546
 - 9.5.1 O plano de fase 546
 - 9.5.2 Análise de estabilidade de Lyapunov 550
 - 9.5.3 O critério do círculo 557
- 9.6 Perspectiva histórica 562
 - Resumo 563
 - Questões de revisão 563
 - Problemas 564

10 Projeto de Sistemas de Controle 572

- Visão geral do capítulo 572
- 10.1 Um esquema de projeto de sistemas de controle 573
- 10.2 Projeto do controle de atitude de um satélite 578
- 10.3 Controle lateral e longitudinal de um Boeing 747 593
 - 10.3.1 Amortecedor de guinada 597
 - 10.3.2 Piloto automático de manutenção de altitude 603
- 10.4 Controle da razão ar-combustível em um motor automotível 609
- 10.5 Controle do cabeçote de leitura/escrita de um disco rígido 615
- 10.6 Controle de sistemas de PTR na fabricação de pastilhas de semicondutores 623

10.7	Quimiotaxia ou como a <i>E. coli</i> se movimenta	635
10.8	Perspectiva histórica	641
	Resumo	643
	Questões de revisão	644
	Problemas	644

Apêndice A Transformada de Laplace 655

A.1	A transformada de Laplace \mathcal{L}_-	655
A.1.1	Propriedades da transformada de Laplace	656
A.1.2	Transformada inversa de Laplace por expansão em frações parciais	663
A.1.3	Teorema do Valor Inicial	666
A.1.4	Teorema do Valor Final	667

Apêndice B Soluções das Questões de Revisão 668

Apêndice C Comandos do MATLAB® 681

Bibliografia 685

Índice 691