

INDICE

Guida alla lettura	X	1.7 L'ingegnere dei sistemi di controllo	24
Prefazione all'edizione italiana	XIII	Riepilogo	25
Prefazione	XV	Domande di ripasso	25
L'editore ringrazia	XXII	Problemi	26
		Laboratorio virtuale	31
		Bibliografia	32
Capitolo 1		Capitolo 2	
INTRODUZIONE		MODELLAZIONE NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA	
1.1 Introduzione	3	2.1 Introduzione	35
1.1.1 Definizione di un sistema di controllo	4	2.2 La trasformata di Laplace	36
1.1.2 Vantaggi dei sistemi di controllo	4	2.2.1 Espansione in frazioni parziali	39
1.2 Storia dei sistemi di controllo	5	2.2.2 Caso 1: le radici del denominatore di $F(s)$ sono reali e distinte	39
1.2.1 Controllo del livello del liquido	5	2.2.3 Caso 2: le radici del denominatore di $F(s)$ sono reali ma con una molteplicità non unitaria	42
1.2.2 Controlli della temperatura e della pressione del vapore	5	2.2.4 Caso 3: le radici del denominatore di $F(s)$ sono complesse o immaginarie	43
1.2.3 Controllo della velocità	6	2.3 La funzione di trasferimento	47
1.2.4 Stabilità, stabilizzabilità e guida	6	2.4 Le funzioni di trasferimento delle reti elettriche	50
1.2.5 Sviluppi del Ventesimo secolo	7	2.4.1 Analisi delle maglie per circuiti semplici	51
1.2.6 Applicazioni contemporanee	7	2.4.2 Analisi dei nodi per circuiti semplici	53
1.3 Configurazione dei sistemi	8	2.4.3 Partitori di tensione per circuiti semplici	54
1.3.1 Sistemi ad anello aperto	8	2.4.4 L'analisi alle maglie per circuiti complessi	54
1.3.2 Sistemi a ciclo chiuso (con retroazione di controllo)	10	2.4.5 L'analisi ai nodi per circuiti complessi	56
1.3.3 Sistemi controllati da un calcolatore	11	2.4.6 Tecnica di risoluzione di un problema	59
1.4 Analisi e obiettivi di progetto	11	2.4.7 Gli amplificatori operazionali	61
1.4.1 Risposta nel transitorio	12	2.4.8 L'amplificatore operazionale invertente	61
1.4.2 Risposta a regime	12	2.4.9 Amplificatore operazionale non invertente	62
1.4.3 Stabilità	12	2.5 Le funzioni di trasferimento dei sistemi meccanici traslazionali	64
1.4.4 Altre considerazioni	13	2.6 Le funzioni di trasferimento dei sistemi meccanici rotativi	71
1.5 Il processo di progettazione	17		
1.5.1 Passo 1: trasformazione delle specifiche richieste nel sistema fisico	18		
1.5.2 Passo 2: disegno di un diagramma a blocchi funzionale	18		
1.5.3 Passo 3: creazione di uno schema	18		
1.5.4 Passo 4: sviluppo di un modello matematico (diagramma a blocchi)	19		
1.5.5 Passo 5: riduzione degli schemi a blocchi	20		
1.5.6 Passo 6: analisi e progettazione	20		
1.6 Progettazione assistita dal calcolatore	22		
1.6.1 Matlab	22		
1.6.2 LabVIEW	23		

2.7 Le funzioni di trasferimento per i sistemi con ingranaggi	76	4.2.3 Poli e zeri di un sistema del primo ordine: un esempio	161
2.8 Le funzioni di trasferimento dei sistemi elettromeccanici	80	4.3 Sistemi del primo ordine	163
2.9 Analoghi di circuiti elettrici	86	4.3.1 Costante di tempo	164
2.9.1 Analogo seriale	86	4.3.2 Tempo di salita, T_r	165
2.9.2 Analogo parallelo	88	4.3.3 Tempo di assestamento, T_s	165
2.10 Non linearità	89	4.3.4 Funzioni di trasferimento del primo ordine attraverso testing sperimentale	165
2.11 Linearizzazione	90	4.4 Sistemi del secondo ordine: introduzione	166
Caso di studio	95	4.4.1 Risposta sovrasmorzata, Figura 4.7(b)	168
Riepilogo	99	4.4.2 Risposta sottosmorzata, Figura 4.7(c)	168
Domande di ripasso	99	4.4.3 Risposta non smorzata, Figura 4.7(d)	169
Problemi	100	4.4.4 Risposta smorzata criticamente, Figura 4.7(e)	170
Laboratorio virtuale	113	4.5 Il generico sistema del secondo ordine	172
Bibliografia	113	4.5.1 Pulsazione naturale, ω_n	172
		4.5.2 Coefficiente di smorzamento, ζ	172
Capitolo 3		4.6 Sistemi del secondo ordine sottosmorzati	175
MODELLISTICA NEL DOMINIO DEL TEMPO		4.6.1 Calcolo di T_p	177
		4.6.2 Calcolo di %OS	178
3.1 Introduzione	115	4.6.3 Calcolo di T_s	179
3.2 Alcune osservazioni	116	4.6.4 Calcolo di T_r	180
3.3 La rappresentazione nello spazio di stato	120	4.6.5 Funzioni di trasferimento del secondo ordine attraverso testing sperimentale	184
3.4 Applicazione della rappresentazione nello spazio di stato	122	4.7 Risposte di sistemi con poli aggiuntivi	185
3.4.1 Variabili di stato linearmente indipendenti	122	4.8 Risposta di sistemi che presentano zeri	189
3.4.2 Numero minimo di variabili di stato	122	4.9 Effetti delle non linearità sulla risposta nel dominio del tempo	195
3.5 Convertire una funzione di trasferimento in una rappresentazione nello spazio di stato	130	4.10 Soluzione delle equazioni di stato attraverso la trasformata di Laplace	198
3.6 Convertire una rappresentazione nello spazio di stato in una funzione di trasferimento	137	4.10.1 Autovalori e poli della funzione di trasferimento	199
3.7 Linearizzazione	139	4.11 Soluzione delle equazioni di stato nel dominio del tempo	202
Casi di studio	142	Casi di studio	207
Riepilogo	146	Riepilogo	211
Domande di ripasso	147	Domande di ripasso	212
Problemi	148	Problemi	213
Laboratorio virtuale	155	Laboratorio virtuale	225
Bibliografia	157	Bibliografia	228
		Capitolo 5	
Capitolo 4		RIDUZIONE DI SOTTOSISTEMI MULTIPLI	
RISPOSTA NEL DOMINIO DEL TEMPO			
4.1 Introduzione	159	5.1 Introduzione	231
4.2 Poli, zeri, e risposta del sistema	160	5.2 Schema a Blocchi	232
4.2.1 Poli di una funzione di trasferimento	160	5.2.1 Struttura a cascata	233
4.2.2 Zeri di una funzione di trasferimento	161	5.2.2 Struttura in parallelo	235

5.2.3	Struttura in retroazione	235
5.2.4	Movimenti dei blocchi onde ritrovare configurazioni note	236
5.3	Analisi e sintesi di sistemi in retroazione	241
5.4	Grafi di flusso di segnale	244
5.5	Regola di Mason	247
5.5.1	Definizioni	247
5.5.3	Regola di Mason	248
5.6	Grafi di flusso di segnale di equazioni di stato	250
5.7	Rappresentazioni alternative nello spazio di stato	252
5.7.1	Configurazione a cascata	253
5.7.2	Configurazione in parallelo	255
5.7.3	Forma canonica di controllabilità	257
5.7.4	Forma canonica di osservabilità	258
5.8	Trasformazioni di similitudine	261
5.8.1	Diagonalizzare una matrice di sistema	264
5.8.2	Definizioni	265
Casi di studio		269
Riepilogo		275
Domande di ripasso		276
Problemi		276
Laboratorio virtuale		292
Bibliografia		293

Capitolo 6 STABILITÀ

6.1	Introduzione	295
6.2	Criterio di Routh-Hurwitz	298
6.2.1	Creazione di una tabella di Routh elementare	299
6.2.2	Interpretazione di una tabella di Routh elementare	300
6.3	Criterio di Routh-Hurwitz: casi particolari	301
6.3.1	Zeri solo sulla prima colonna	301
6.3.2	Un'intera riga uguale a zero	303
6.4	Criterio di Routh: esempi aggiuntivi	307
6.5	Stabilità nello spazio di stato	313
Caso di studio		316
Riepilogo		318
Domande di ripasso		318
Problemi		319
Laboratorio virtuale		327
Bibliografia		328

Capitolo 7 ERRORI A REGIME

7.1	Introduzione	331
7.1.1	Definizione e ingressi di test	332
7.1.2	Applicazioni a sistemi stabili	333

7.1.3	Calcolare gli errori a regime	333
7.1.4	Cause di errore a regime	335
7.2	Errori a regime per sistemi in retroazione unitaria	335
7.2.1	Errori a regime in termini di $T(s)$	336
7.2.2	Errore a regime in termini di $G(s)$	337
7.3	Costanti di errore statico e tipo del sistema	341
7.3.1	Costanti di errore statico	341
7.3.2	Tipo del sistema	345
7.4	Specifiche sull'errore a regime	346
7.5	Errore a regime rispetto a disturbi	348
7.6	Errore a regime per sistemi in retroazione non unitaria	350
7.7	Sensitività	354
7.8	Errore a regime per sistemi nello spazio di stato	357
7.8.1	Analisi attraverso il teorema del valore finale	357
7.8.2	Analisi attraverso sostituzione dell'ingresso	358
Casi di studio		361
Riepilogo		363
Domande di ripasso		364
Problemi		365
Laboratorio virtuale		376
Bibliografia		377

Capitolo 8 TECNICHE DEL LUOGO DELLE RADICI

8.1	Introduzione	379
8.1.1	Il problema del controllo di un sistema	380
8.1.2	Rappresentazione vettoriale di numeri complessi	381
8.2	Definizione del luogo delle radici	384
8.3	Proprietà del luogo delle radici	386
8.4	Tracciare il luogo delle radici	389
8.5	Migliorare lo schizzo qualitativo del luogo delle radici	394
8.5.1	Punti di congiunzione e punti di diramazione sull'asse reale	394
8.5.2	Intersezioni con l'asse $j\omega$	397
8.5.3	Fasi di partenza e di arrivo	399
8.5.4	Tracciare e calibrare il luogo delle radici	402
8.6	Un esempio	403
8.6.1	Regole basilari per tracciare uno schizzo del luogo delle radici	403
8.6.2	Regole addizionali per rifinire lo schizzo del luogo delle radici	404
8.7	Progetto della risposta in transitorio attraverso taratura del guadagno	407
8.8	Luogo delle radici generalizzato	411

8.9 Luogo delle radici per sistemi in retroazione positiva	413	10.1.2 Espressione analitica della risposta in frequenza	525
8.10 Sensitività dei poli	416	10.1.3 Graficare la risposta frequenziale	527
Casi di studio	418	10.2 Approssimazioni asintotiche: i diagrammi di Bode	529
Riepilogo	423	10.2.1 Diagrammi di Bode di $G(s) = (s + a)$	530
Domande di ripasso	423	10.2.2 Diagrammi di Bode di $G(s) = 1/(s + a)$	533
Problemi	424	10.2.3 Diagrammi di Bode di $G(s) = s$	535
Laboratorio virtuale	440	10.2.4 Diagrammi di Bode di $G(s) = 1/s$	535
Bibliografia	442	10.2.5 Diagrammi di Bode per $G(s) = s^2 + 2\zeta j\omega_n s + \omega_n^2$	538
 		10.2.6 Correzione dei diagrammi di Bode del secondo ordine	539
Capitolo 9		10.2.7 Diagrammi di Bode per $G(s) = 1/(s^2 + 2\zeta j\omega_n s + \omega_n^2)$	541
SINTESI ATTRAVERSO IL LUOGO DELLE RADICI		10.3 Introduzione al criterio di Nyquist	548
9.1 Introduzione	445	10.3.1 Derivazione del criterio di Nyquist	549
9.1.1 Migliorare le performance della risposta in transitorio	446	10.3.2 Applicazione del criterio di Nyquist per determinare la stabilità	552
9.1.2 Migliorare le performance dell'errore a regime	447	10.4 Tracciatura dei diagrammi di Nyquist	553
9.1.3 Configurazioni	447	10.5 La stabilità tramite il diagramma di Nyquist	559
9.1.4 Controllori	448	10.5.1 Stabilità tramite la mappatura del solo semiasse positivo $j\omega$	561
9.2 Migliorare l'errore di regime attraverso controllo in cascata	449	10.6 Margini di guadagno e di ampiezza con i diagrammi di Nyquist	563
9.2.1 Controllo integrale ideale (PI)	449	10.7 Stabilità e margini di ampiezza e di fase con i diagrammi di Bode	566
9.2.2 Rete ritardatrice	453	10.7.1 Determinazione della stabilità	566
9.3 Migliorare la risposta in transitorio attraverso il controllo in cascata	459	10.7.2 Valutazione dei margini di guadagno e di fase	568
9.3.1 Controllore derivativo ideale (PD)	459	10.8 Relazione tra la risposta nel transitorio a ciclo chiuso e la risposta in frequenza a ciclo chiuso	570
9.3.2 Reti anticipatrici	467	10.8.1 Coefficiente di smorzamento e risposta in frequenza a ciclo chiuso	570
9.4 Migliorare l'errore a regime e la risposta in transitorio	472	10.8.2 Velocità della risposta e risposta in frequenza a ciclo chiuso	571
9.4.1 Progetto di un controllore PID	472	10.9 Relazione tra la risposta frequenziale a ciclo aperto e a ciclo chiuso	573
9.4.2 Progetto di una rete a ritardo e anticipo	477	10.9.1 Circonferenze a M costanti e circonferenze a N	573
9.4.3 Filtro Notch (filtro elimina banda)	482	10.9.2 Carte di Nichols	577
9.5 Controllo in retroazione	485	10.10 Relazioni tra la risposta nel transitorio a ciclo chiuso e la risposta in frequenza ad anello aperto	579
9.5.1 Approccio 1	486	10.10.1 Coefficiente di smorzamento dalle circonferenze M	579
9.5.2 Approccio 2	490	10.10.2 Coefficiente di smorzamento dal margine di fase	580
9.6 Realizzazione fisica di un controllore	494	10.11 Velocità del transitorio del sistema a partire dalla risposta in frequenza ad anello aperto	581
9.6.1 Realizzazione di circuiti attivi	494		
9.6.2 Realizzazione di reti passive	496		
Casi di studio	499		
Riepilogo	504		
Domande di ripasso	505		
Problemi	506		
Laboratorio virtuale	519		
Bibliografia	521		
Capitolo 10			
TECNICHE BASATE SULLA RISPOSTA IN FREQUENZA			
10.1 Introduzione	523		
10.1.1 Il concetto di risposta frequenziale	524		

