

Contenido

Prefacio	xix
Prefacio al software de computadora para sistemas de control	xxii
<hr/>	
1 Introducción	1
<hr/>	
1-1 Introducción	1
1-1-1 Componentes básicos de un sistema de control	2
1-1-2 Ejemplos de aplicaciones de sistemas de control	3
1-1-3 Sistemas de control en lazo abierto (Sistemas no realimentados)	9
1-1-4 Sistemas de control en lazo cerrado (Sistemas de control realimentados)	9
1-2 ¿Qué es realimentación y cuáles son sus efectos?	11
1-2-1 Efecto de la realimentación en la ganancia global	12
1-2-2 Efecto de la realimentación en la estabilidad	12
1-2-3 Efecto de la realimentación en la sensibilidad	13
1-2-4 Efecto de la realimentación en las perturbaciones externas o ruido	14
1-3 Tipos de sistemas de control realimentado	15
1-3-1 Sistemas de control lineales contra no lineales	15
1-3-2 Sistemas invariantes con el tiempo contra variantes con el tiempo	16
1-4 Resumen	19
<hr/>	
2 Fundamentos matemáticos	21
<hr/>	
2-1 Introducción	21
2-2 Conceptos sobre variable compleja	22
2-2-1 Variable compleja	22
2-2-2 Funciones de una variable compleja	22
2-2-3 Función analítica	23

2-2-4	Singularidades y polos de una función	24
2-2-5	Ceros de una función	24
2-3	Ecuaciones diferenciales	25
2-3-1	Ecuaciones diferenciales ordinarias lineales	25
2-3-2	Ecuaciones diferenciales no lineales	25
2-3-3	Ecuaciones diferenciales de primer orden: ecuaciones de estado	26
2-4	Transformada de Laplace	28
2-4-1	Definición de la transformada de Laplace	29
2-4-2	Transformada inversa de Laplace	30
2-4-3	Teoremas importantes de la Transformada de Laplace	31
2-5	Transformada inversa de Laplace mediante la expansión en fracciones parciales	34
2-5-1	Expansión en fracciones parciales	35
2-5-2	Solución por computadora de la expansión en fracciones parciales	39
2-6	Aplicación de la transformada de Laplace a la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias lineales	41
2-7	Teoría de matrices elemental	44
2-7-1	Definición de una matriz	45
2-8	Álgebra de matrices	49
2-8-1	Igualdad de matrices	50
2-8-2	Suma y resta de matrices	50
2-8-3	Ley asociativa de matrices (suma y resta)	51
2-8-4	Ley conmutativa de matrices (suma y resta)	51
2-8-5	Multiplicación de matrices	51
2-8-6	Reglas de multiplicación de matrices	52
2-8-7	Multiplicación por un escalar k	53
2-8-8	Inversa de una matriz	53
2-8-9	Rango de una matriz	54
2-8-10	Solución de matrices con ayuda de computadora	55
2-9	Forma matricial de las ecuaciones de estado	55
2-10	Ecuaciones en diferencias	57

2-11	La transformada z	58
2-11-1	Definición de la transformada z	58
2-11-2	Relación entre la transformada de Laplace y la transformada z	59
2-11-3	Algunos teoremas importantes de la transformada z	61
2-11-4	Transformada z inversa	64
2-11-5	Solución por computadora de la expansión en fracciones parciales de $Y(z)/z$	66
2-12	Aplicación de la transformada z a la solución de ecuaciones en diferencias lineales	67
2-13	Resumen	68
<hr/>		
3	Funciones de transferencia, diagramas de bloques y gráficas de flujo de señales	77
<hr/>		
3-1	Introducción	77
3-2	Respuesta al impulso y función de transferencia de sistemas lineales	78
3-2-1	Respuesta al impulso	78
3-2-2	Función de transferencia (sistemas de una entrada y una salida)	78
3-2-3	Función de transferencia (sistemas multivariables)	81
3-3	Diagramas de bloques	83
3-3-1	Diagramas de bloques de un sistema de control	84
3-3-2	Diagramas de bloques y funciones de transferencia de un sistema multivariable	86
3-4	Gráficas de flujo de señales	89
3-4-1	Elementos básicos de una gráfica de flujo de señales	89
3-5	Resumen de las propiedades básicas de una gráfica de flujo de señales	90
3-6	Definiciones de los términos de una gráfica de flujo de señales	91
3-7	Álgebra de las gráficas de flujo de señales	94
3-7-1	Gráfica de flujo de señales de un sistema de control realimentado	94

3-8	Fórmula de ganancia para gráficas de flujo de señales	96
3-8-1	Aplicaciones de la fórmula de ganancia entre nodos de salida y nodos intermedios	98
3-9	Aplicación de la fórmula de ganancia a diagramas de bloques	99
3-10	Diagramas de estado	100
3-10-1	De ecuaciones diferenciales al diagrama de estado	102
3-10-2	De diagramas de estado a la función de transferencia	104
3-10-3	De diagramas de estado a las ecuaciones de estado y de salida	105
3-11	Funciones de transferencia de sistemas en tiempo discreto	106
3-11-1	Funciones de transferencia de sistemas en tiempo discreto con elementos en cascada	111
3-11-2	Función de transferencia del retén de orden cero	113
3-11-3	Funciones de transferencia en lazo cerrado de sistemas en tiempo discreto	114
3-12	Resumen	117
<hr/>		
4	Modelado matemático de sistemas físicos	134
<hr/>		
4-1	Introducción	134
4-2	Ecuaciones de circuitos eléctricos	135
4-3	Modelado de elementos de sistemas mecánicos	138
4-3-1	Movimiento de traslación	138
4-3-2	Movimiento de rotación	142
4-3-3	Conversión entre movimientos de traslación y de rotación	145
4-3-4	Trenes de engranes, palancas y bandas	147
4-3-5	Juego y zona muerta	150
4-4	Ecuaciones de sistemas mecánicos	151
4-5	Detectores y codificadores en sistemas de control	160
4-5-1	Potenciómetro	160
4-5-2	Tacómetros	166
4-5-3	Codificador incremental	168

4-6	Motores de cd en sistemas de control	171
4-6-1	Principios de operación básicos de motores de cd	172
4-6-2	Clasificación básica de motores de cd de imán permanente	173
4-6-3	Modelado matemático de motores de cd de imán permanente	175
4-6-4	Curvas par-velocidad de un motor de cd	180
4-6-5	Curvas par-velocidad de un sistema amplificador/motor de cd	181
4-7	Linealización de sistemas no lineales	183
4-8	Sistemas con retardo	189
4-8-1	Aproximación de funciones de retardo mediante funciones racionales	190
4-9	Amplificadores operacionales	191
4-9-1	Amplificador operacional	192
4-9-2	Sumas y restas	192
4-9-3	Configuraciones de amplificadores operacionales de primer orden	194
4-10	Sistema de seguimiento del sol	197
4-10-1	Sistema de coordenadas	198
4-10-2	Detector de error	198
4-10-3	Amplificador operacional	199
4-10-4	Amplificador de rastreo	200
4-10-5	Tacómetro	200
4-10-6	Motor de cd	200
4-11	Resumen	200
<hr/>		
5	Análisis de variable de estado	226
<hr/>		
5-1	Introducción	226
5-2	Representación matricial de las ecuaciones de estado	227
5-3	Matriz de transición de estado	230
5-3-1	Significado de la matriz de transición de estado	232
5-3-2	Propiedades de la matriz de transición de estado	232

5-4 Ecuación de transición de estado	233
5-4-1 Ecuación de transición de estado a partir del diagrama de estado	236
5-5 Relación entre las ecuaciones de estado y ecuaciones diferenciales de orden superior	240
5-6 Relación entre las ecuaciones de estado y las funciones de transferencia	242
5-7 Ecuación característica, valores y vectores característicos	245
5-7-1 Valores característicos	247
5-7-2 Vectores característicos	248
5-8 Transformaciones de similitud	250
5-8-1 Propiedades invariantes de las transformaciones de similitud	252
5-8-2 Forma canónica controlable	253
5-8-3 Forma canónica observable	256
5-8-4 Forma canónica diagonal	258
5-8-5 Forma canónica de Jordan	261
5-9 Descomposición de funciones de transferencia	263
5-9-1 Descomposición directa	263
5-9-2 Descomposición en cascada	269
5-9-3 Descomposición en paralelo	271
5-10 Controlabilidad de sistemas lineales	273
5-10-1 Concepto general sobre controlabilidad	275
5-10-2 Definición de controlabilidad de estado	276
5-10-3 Pruebas alternas sobre controlabilidad	277
5-11 Observabilidad de sistemas lineales	279
5-11-1 Definición de observabilidad	280
5-11-2 Pruebas alternas sobre observabilidad	280
5-12 Relación entre controlabilidad, observabilidad y funciones de transferencia	281

5-13 Teoremas invariantes sobre controlabilidad y observabilidad	284
5-14 Ecuaciones de estado de sistemas lineales en tiempo discreto	286
5-14-1 Ecuaciones de estado discretas	287
5-14-2 Soluciones de las ecuaciones de estado discretas: Ecuaciones de transición de estado discreto	289
5-15 Solución de las ecuaciones de estado discreto mediante la transformada z	291
5-15-1 Matriz función de transferencia y ecuación característica	292
5-16 Diagramas de estado de sistemas en tiempo discreto	294
5-16-1 Diagramas de estado de sistemas de datos muestreados	296
5-17 Ejemplo final: sistema de suspensión magnética de una bola	299
5-18 Resumen	303
<hr/>	
6 Estabilidad de sistemas de control lineales	327
<hr/>	
6-1 Introducción	327
6-2 Estabilidad de entrada acotada y salida acotadas: Sistemas en tiempo continuo	328
6-2-1 Relación entre las raíces de la ecuación característica y la estabilidad	329
6-3 Estabilidad de entrada cero y estabilidad asintótica de sistemas en tiempo continuo	330
6-4 Métodos para determinar la estabilidad	333
6-5 Criterio de Routh-Hurwitz	334
6-5-1 Criterio de Hurwitz	335
6-5-2 Arreglo de Routh	336
6-5-3 Casos especiales cuando el arreglo de Routh termina prematuramente	339

6-6	Estabilidad de sistemas en tiempo discreto	343
6-6-1	Estabilidad BIBO	344
6-6-2	Estabilidad de entrada cero	344
6-7	Pruebas de estabilidad para sistemas en tiempo discreto	345
6-7-1	Método de la transformada bilineal	346
6-7-2	Pruebas de estabilidad directas	349
6-8	Resumen	351
<hr/>		
7	Análisis de sistemas de control en el dominio del tiempo	361
<hr/>		
7-1	Respuesta en el tiempo de sistemas en tiempo continuo: Introducción	361
7-2	Señales de prueba típicas para obtener la respuesta en tiempo de sistemas de control	363
7-3	Error en estado estable	365
7-3-1	Error en estado estable causado por elementos de sistemas no lineales	365
7-3-2	Error en estado estable de sistemas de control lineales en tiempo continuo	367
7-4	Respuesta al escalón unitario y especificaciones en el dominio del tiempo	385
7-5	Respuesta transitoria de un sistema prototipo de segundo orden	387
7-5-1	Factor de amortiguamiento relativo y factor de amortiguamiento	388
7-5-2	Frecuencia natural no amortiguada	390
7-5-3	Sobrepaso máximo	394
7-5-4	Tiempo de retardo y tiempo de levantamiento	396
7-5-5	Tiempo de asentamiento	398
7-6	Análisis en el dominio del tiempo de un sistema de control de posición	402
7-6-1	Respuesta transitoria al escalón unitario	405
7-6-2	Respuesta en estado estable	409
7-6-3	Respuesta en el tiempo a una entrada rampa unitaria	409
7-6-4	Respuesta en el tiempo de un sistema de tercer orden	411

7-7	Efectos de añadir polos y ceros a las funciones de transferencia	415
7-7-1	Adición de un polo en la función de transferencia de la trayectoria directa: Sistemas con realimentación unitaria	416
7-7-2	Adición de un polo en la función de transferencia en lazo cerrado	417
7-7-3	Adición de un cero en la función de transferencia en lazo cerrado	419
7-7-4	Adición de un cero en la función de transferencia de la trayectoria directa: Sistemas con realimentación unitaria	420
7-8	Polos dominantes de las funciones de transferencia	422
7-8-1	Factor de amortiguamiento relativo	423
7-8-2	Forma apropiada para despreciar los polos insignificantes considerando la respuesta en estado estable	424
7-9	Aproximación a sistemas de orden superior por sistemas de bajo orden: El enfoque formal	424
7-9-1	Criterio de aproximación	425
7-10	Propiedades en el dominio del tiempo de sistemas en tiempo discreto	437
7-10-1	Respuesta en el tiempo de sistemas de control en tiempo discreto	437
7-10-2	Transformación de trayectorias entre el plano s y el plano z	442
7-10-3	Relación entre las raíces de la ecuación característica y la respuesta transitoria	445
7-10-4	Análisis de error en estado estable de sistemas de control en tiempo discreto	447
7-11	Resumen	454
<hr/>		
8	La técnica del lugar geométrico de las raíces	470
<hr/>		
8-1	Introducción	470
8-2	Propiedades básicas del lugar geométrico de las raíces	472
8-3	Propiedades y construcción del lugar geométrico de las raíces	477
8-3-1	Puntos $K = 0$ y $K = \pm \infty$	477
8-3-2	Número de ramas del lugar geométrico de las raíces	478

8-3-3	Simetría del lugar geométrico de las raíces	479
8-3-4	Ángulos de las asíntotas del lugar geométrico de las raíces: comportamiento del lugar geométrico de las raíces en $ s = \infty$	479
8-3-5	Intersección de las asíntotas (centroide)	481
8-3-6	Lugar geométrico de las raíces sobre el eje real	483
8-3-7	Ángulos de salida y ángulos de entrada del lugar geométrico de las raíces	485
8-3-8	Intersección del lugar geométrico de las raíces con el eje imaginario	488
8-3-9	Puntos de ruptura (puntos de silla) sobre el lugar geométrico de las raíces	488
8-3-10	Sensibilidad de las raíces	495
8-3-11	Cálculo de K sobre el lugar geométrico de las raíces	498
8-4	Solución por computadora	505
8-4-1	rplot de CSAD	505
8-4-2	Root del programa CC	508
8-5	Algunos aspectos importantes sobre la construcción del lugar geométrico de las raíces	509
8-5-1	Efectos de la adición de polos y ceros de $G(s)H(s)$	509
8-6	Contornos de las raíces: variación de parámetros múltiples	517
8-7	Lugar geométrico de las raíces de sistemas en tiempo discreto	524
8-8	Resumen	528
<hr/>		
9	Análisis en el dominio de la frecuencia	539
<hr/>		
9-1	Introducción	539
9-1-1	Respuesta en frecuencia de sistemas en lazo cerrado	541
9-1-2	Especificaciones en el dominio de la frecuencia	543
9-2	M_r, ω_r y ancho de banda del prototipo de segundo orden	544
9-2-1	Pico de resonancia y frecuencia de resonancia	544
9-2-2	Ancho de banda	547
9-3	Efectos de la adición de un cero en la función de transferencia de la trayectoria directa	551

9-4	Efectos de la adición de un polo en la función de transferencia de la trayectoria directa	555
9-5	Criterio de estabilidad de Nyquist: Fundamentos	557
9-5-1	El problema de estabilidad	557
9-5-2	Definición de encierro e incluido	559
9-5-3	Número de encierros e inclusiones	560
9-5-4	Principio del argumento	560
9-5-5	Trayectoria de Nyquist	565
9-5-6	Criterio de Nyquist y la gráfica de $L(s)$ o $G(s)H(s)$	567
9-6	Criterio de Nyquist para sistemas con función de transferencia de fase mínima	568
9-6-1	Aplicación del Criterio de Nyquist a funciones de transferencia de fase mínima que no son estrictamente propias	570
9-7	Relación entre el lugar geométrico de las raíces y el diagrama de Nyquist	570
9-8	Ejemplos ilustrativos: Criterio de Nyquist aplicado a funciones de transferencia de fase no mínima	574
9-9	Criterio general de Nyquist: para funciones de transferencia de fase mínima y no mínima	578
9-9-1	Sistema con funciones de transferencia de fase mínima	582
9-9-2	Sistemas con funciones de transferencia en lazo impropias	583
9-10	Ejemplos ilustrativos: Criterio general de Nyquist para funciones de transferencia de fase mínima y no mínima	583
9-11	Efectos de la adición de polos y ceros a $L(s)$ sobre la forma del lugar geométrico de Nyquist	594
9-12	Análisis de estabilidad de sistemas en lazos múltiples	598
9-13	Estabilidad de sistemas de control lineales con retardos puros	600
9-13-1	Trayectoria crítica	603
9-13-2	Aproximación de e^{-Td^s}	605

9-14 Estabilidad relativa: Margen de ganancia y margen de fase	605
9-14-1 Margen de ganancia	608
9-14-2 Margen de fase	610
9-15 Análisis de estabilidad con las trazas de Bode	613
9-15-1 Trazas de Bode para sistemas con retrasos puros	615
9-16 Estabilidad relativa relacionada con la pendiente de la curva de magnitud de las trazas de Bode	618
9-16-1 Sistema condicionalmente estable	618
9-17 Análisis de estabilidad con la traza de magnitud-fase	621
9-18 Lugar geométrico de M-constante en el plano $G(j\omega)$	622
9-19 Lugar geométrico de fase constante en el plano $G(j\omega)$	625
9-20 Lugar geométrico de M-constante en el plano de magnitud-fase: la Carta de Nichols	627
9-21 Solución por computadora	631
9-22 Carta de Nichols aplicada a sistemas con realimentación no unitaria	634
9-23 Estudios de sensibilidad en el dominio de la frecuencia	636
9-24 Análisis en el dominio de la frecuencia de sistemas de control de datos muestreados	638
9-24-1 Trazas de Bode con la transformación w	641
9-25 Resumen	645
<hr/>	
10 Diseño de sistemas de control	664
<hr/>	
10-1 Introducción	664
10-1-1 Especificaciones de diseño	665
10-1-2 Configuraciones de controladores	667
10-1-3 Principios fundamentales de diseño	670
10-2 Diseño con el controlador PD	671
10-2-1 Interpretación en el dominio del tiempo del control PD	674

10-2-2	Interpretación del control PD en el dominio de la frecuencia	676
10-2-3	Resumen de los efectos de un control PD	678
10-3	Diseño con el controlador PI	691
10-3-1	Interpretación en el dominio del tiempo y diseño del control PI	694
10-3-2	Interpretación en el dominio de la frecuencia y diseño del control PI	695
10-4	Diseño con el controlador PID	708
10-5	Diseño con el controlador de adelanto de fase	714
10-5-1	Interpretación y diseño en el dominio del tiempo del control de adelanto de fase	715
10-5-2	Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia del control de adelanto de fase	717
10-5-3	Efectos de la compensación de adelanto de fase	736
10-5-4	Limitaciones del control de adelanto de fase de una sola etapa	736
10-5-5	Controlador de adelanto de fase de etapas múltiples	737
10-5-6	Consideraciones sobre sensibilidad	742
10-6	Diseño con el controlador de atraso de fase	743
10-6-1	Interpretación y diseño en el dominio del tiempo del control de atraso de fase	743
10-6-2	Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia del control de atraso de fase	747
10-6-3	Efectos y limitaciones del control de atraso de fase	758
10-7	Diseño con el controlador de atraso-adelanto	759
10-8	Diseño mediante cancelación de polos y ceros: Filtro de muesca	761
10-8-1	Filtro activo de segundo orden	764
10-8-2	Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia	766
10-9	Controladores prealimentados y en la trayectoria directa	775
10-10	Diseño de sistemas de control robusto	778
10-11	Control realimentado de lazos menores	789
10-11-1	Control realimentado de velocidad o tacométrico	790
10-11-2	Control realimentado de lazos menores mediante filtros activos	790

10-12	Control mediante realimentación de estado	794
10-13	Diseño por ubicación de polos a través de la realimentación de estado	796
10-14	Realimentación de estado con control integral	802
10-15	Resumen	809
<hr/>		
11	Diseño de sistemas de control en tiempo discreto	836
<hr/>		
11-1	Introducción	836
11-2	Implantación digital de controladores analógicos	837
11-2-1	Implantación digital del controlador PID	838
11-2-2	Implantación digital de los controladores de atraso y adelanto	842
11-3	Controladores digitales	843
11-3-1	Realizaciones físicas de controladores digitales	843
11-4	Diseño de sistemas en tiempo discreto en el dominio de la frecuencia y en el plano z	847
11-4-1	Controladores de adelanto y atraso de fase en el dominio w	847
11-5	Diseño de sistemas de control en tiempo discreto de respuesta con oscilaciones muertas	855
11-6	Diseño por ubicación de polos mediante la realimentación de estado	857
11-7	Resumen	859
Apéndice A	Trazas en el dominio de la frecuencia	864
Apéndice B	Tabla de transformadas de Laplace	887
Apéndice C	Tabla de transformadas z	889
	Respuestas y sugerencias a problemas selectos	890
	Índice	898