

Sistemas de control automático. -- 7a ed

Kuo, Benjamin C.

ISBN 9688807230

Índice del Contenido

Prefacio

Prefacio al software de computadora para sistemas de control

1 Introducción

1-1 Introducción

1-1-1 Componentes básicos de un sistema de control

1-1-2 Ejemplos de aplicaciones de sistemas de control

1-1-3 Sistemas de control en lazo abierto (Sistemas no realimentados)

1-1-4 Sistemas de control en lazo cerrado (Sistemas de control realimentados)

1-2 ¿Qué es realimentación y cuáles son sus efectos?

1-2-1 Efecto de la realimentación en la ganancia global

1-2-2 Efecto de la realimentación en la estabilidad

1-2-3 Efecto de la realimentación en la sensibilidad

1-2-4 Efecto de la realimentación en las perturbaciones externas o ruido

1-3 Tipos de sistemas de control realimentado

1-3-1 Sistemas de control lineales contra no lineales

1-3-2 Sistemas invariantes con el tiempo contra variantes con el tiempo

1-4 Resumen

2 Fundamentos matemáticos

2-1 Introducción

2-2 Conceptos sobre variable compleja

2-2-1 Variable compleja

2-2-2 Funciones de una variable compleja

2-2-3 Función analítica

2-2-4 Singularidades y polos de una función

2-2-5 Ceros de una función

2-3 Ecuaciones diferenciales

2-3-1 Ecuaciones diferenciales ordinarias lineales

2-3-2 Ecuaciones diferenciales no lineales

2-3-3 Ecuaciones diferenciales de primer orden: ecuaciones de estado

2-4 Transformada de Laplace

2-4-1 Definición de la transformada de Laplace

2-4-2 Transformada inversa de Laplace

2-4-3 Teoremas importantes de la Transformada de Laplace

2-5 Transformada inversa de Laplace mediante la expansión en fracciones parciales

2-5-1 Expansión en fracciones parciales

2-5-2 Solución por computadora de la expansión en fracciones parciales

2-6 Aplicación de la transformada de Laplace a la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias lineales

2-7 Teoría de matrices elemental

2-7-1 Definición de una matriz

2-8 Álgebra de matrices

2-8-1 Igualdad de matrices

2-8-2 Suma y resta de matrices

2-8-3 Ley asociativa de matrices (suma y resta)

2-8-4 Ley conmutativa de matrices (suma y resta)

2-8-5 Multiplicación de matrices

2-8-6 Reglas de multiplicación de matrices

2-8-7 Multiplicación por un escalar k

2-8-8 Inversa de una matriz

2-8-9 Rango de una matriz

2-8-10 Solución de matrices con ayuda de computadora

2-9 Forma matricial de las ecuaciones de estado

2-10 Ecuaciones en diferencias

2-11 La transformada z

2-11-1 Definición de la transformada z

2-11-2 Relación entre la transformada de Laplace y la transformada z

2-11-3 Algunos teoremas importantes de la transformada z

2-11-4 Transformada z inversa

2-11-5 Solución por computadora de la expansión en fracciones parciales de $Y(z)/z$

2-12 Aplicación de la transformada z a la solución de ecuaciones en diferencias lineales

2-13 Resumen

3 Funciones de transferencia, diagramas de bloques y gráficas de flujo de señales

3-1 Introducción

3-2 Respuesta al impulso y función de transferencia de sistemas lineales

3-2-1 Respuesta al impulso

3-2-2 Función de transferencia (sistemas de una entrada y una salida)

3-2-3 Función de transferencia (sistemas multivariables)

3-3 Diagramas de bloques

3-3-1 Diagramas de bloques de un sistema de control

3-3-2 Diagramas de bloques y funciones de transferencia de un sistema multivariable

3-4 Gráficas de flujo de señales

3-4-1 Elementos básicos de una gráfica de flujo de señales

3-5 Resumen de las propiedades básicas de una gráfica de flujo de señales

3-6 Definiciones de los términos de una gráfica de flujo de señales

3-7 Álgebra de las gráficas de flujo de señales

3-7-1 Gráfica de flujo de señales de un sistema de control realimentado

3-8 Fórmula de ganancia para gráficas de flujo de señales

3-8-1 Aplicaciones de la fórmula de ganancia entre nodos de salida y nodos intermedios

3-9 Aplicación de la fórmula de ganancia a diagramas de bloques

3-10 Diagramas de estado

3-10-1 De ecuaciones diferenciales al diagrama de estado

3-10-2 De diagramas de estado a la función de transferencia

3-10-3 De diagramas de estado a las ecuaciones de estado y de salida

3-11 Funciones de transferencia de sistemas en tiempo discreto

3-11-1 Funciones de transferencia de sistemas en tiempo discreto con elementos en cascada

3-11-2 Función de transferencia del retén de orden cero

3-11-3 Funciones de transferencia en lazo cerrado de sistemas en tiempo discreto

3-12 Resumen

4 Modelado matemático de sistemas físicos

4-1 Introducción

4-2 Ecuaciones de circuitos eléctricos

4-3 Modelado de elementos de sistemas mecánicos

4-3-1 Movimiento de traslación

4-3-2 Movimiento de rotación

4-3-3 Conversión entre movimientos de traslación y de rotación

4-3-4 Trenes de engranes, palancas y bandas

4-3-5 Juego y zona muerta

4-4 Ecuaciones de sistemas mecánicos

4-5 Detectores y codificadores en sistemas de control

4-5-1 Potenciómetro

4-5-2 Tacómetros

4-5-3 Codificador incremental

4-6 Motores de cd en sistemas de control

4-6-1 Principios de operación básicos de motores de cd

4-6-2 Clasificación básica de motores de cd de imán permanente

4-6-3 Modelado matemático de motores de cd de imán permanente

4-6-4 Curvas par-velocidad de un motor de cd

4-6-5 Curvas par-velocidad de un sistema amplificador/motor de cd

4-7 Linealización de sistemas no lineales

4-8 Sistemas con retardo

4-8-1 Aproximación de funciones de retardo mediante funciones racionales

4-9 Amplificadores operacionales

4-9-1 Amplificador operacional

4-9-2 Sumas y restas

4-9-3 Configuraciones de amplificadores operacionales de primer orden

4-10 Sistema de seguimiento del sol

4-10-1 Sistema de coordenadas

4-10-2 Detector de error

4-10-3 Amplificador operacional

4-10-4 Amplificador de rastreo

4-10-5 Tacómetro

4-10-6 Motor de cd

4-11 Resumen

5 Análisis de variable de estado

5-1 Introducción

5-2 Representación matricial de las ecuaciones de estado

5-3 Matriz de transición de estado

5-3-1 Significado de la matriz de transición de estado

5-3-2 Propiedades de la matriz de transición de estado

5-4 Ecuación de transición de estado

5-4-1 Ecuación de transición de estado a partir del diagrama de estado

5-5 Relación entre las ecuaciones de estado y ecuaciones diferenciales de orden superior

5-6 Relación entre las ecuaciones de estado y las funciones de transferencia

5-7 Ecuación característica, valores y vectores característicos

5-7-1 Valores característicos

5-7-2 Vectores característicos

5-8 Transformaciones de similitud

5-8-1 Propiedades invariantes de las transformaciones de similitud

5-8-2 Forma canónica controlable

5-8-3 Forma canónica observable

5-8-4 Forma canónica diagonal

5-8-5 Forma canónica de Jordan

5-9 Descomposición de funciones de transferencia

5-9-1 Descomposición directa

5-9-2 Descomposición en cascada

5-9-3 Descomposición en paralelo

5-10 Controlabilidad de sistemas lineales

5-10-1 Concepto general sobre controlabilidad

5-10-2 Definición de controlabilidad de estado

5-10-3 Pruebas alternas sobre controlabilidad

5-11 Observabilidad de sistemas lineales

5-11-1 Definición de observabilidad

5-11-2 Pruebas alternas sobre observabilidad

- 5-12 Relación entre controlabilidad, observabilidad y funciones de transferencia
- 5-13 Teoremas invariantes sobre controlabilidad y observabilidad
- 5-14 Ecuaciones de estado de sistemas lineales en tiempo discreto
 - 5-14-1 Ecuaciones de estado discretas
 - 5-14-2 Soluciones de las ecuaciones de estado discretas: Ecuaciones de transición de estado discreto
- 5-15 Solución de las ecuaciones de estado discreto mediante la transformada z
 - 5-15-1 Matriz función de transferencia y ecuación característica
- 5-16 Diagramas de estado de sistemas en tiempo discreto
 - 5-16-1 Diagramas de estado de sistemas de datos muestreados
- 5-17 Ejemplo final: sistema de suspensión magnética de una bola
- 5-18 Resumen
- 6 Estabilidad de sistemas de control lineales
 - 6-1 Introducción
 - 6-2 Estabilidad de entrada acotada y salida acotadas: Sistemas en tiempo continuo
 - 6-2-1 Relación entre las raíces de la ecuación característica y la estabilidad
 - 6-3 Estabilidad de entrada cero y estabilidad asintótica de sistemas en tiempo continuo
 - 6-4 Métodos para determinar la estabilidad
 - 6-5 Criterio de Routh-Hurwitz
 - 6-5-1 Criterio de Hurwitz
 - 6-5-2 Arreglo de Routh
 - 6-5-3 Casos especiales cuando el arreglo de Routh termina prematuramente
 - 6-6 Estabilidad de sistemas en tiempo discreto
 - 6-6-1 Estabilidad BIBO
 - 6-6-2 Estabilidad de entrada cero
 - 6-7 Pruebas de estabilidad para sistemas en tiempo discreto
 - 6-7-1 Método de la transformada bilineal
 - 6-7-2 Pruebas de estabilidad directas
 - 6-8 Resumen
- 7 Análisis de sistemas de control en el dominio del tiempo
 - 7-1 Respuesta en el tiempo de sistemas en tiempo continuo: Introducción
 - 7-2 Señales de prueba típicas para obtener la respuesta en tiempo de sistemas de control
 - 7-3 Error en estado estable
 - 7-3-1 Error en estado estable causado por elementos de sistemas no lineales
 - 7-3-2 Error en estado estable de sistemas de control lineales en tiempo continuo

7-4 Respuesta al escalón unitario y especificaciones en el dominio del tiempo

7-5 Respuesta transitoria de un sistema prototipo de segundo orden

7-5-1 Factor de amortiguamiento relativo y factor de amortiguamiento

7-5-2 Frecuencia natural no amortiguada

7-5-3 Sobrepasso máximo

7-5-4 Tiempo de retardo y tiempo de levantamiento

7-5-5 Tiempo de asentamiento

7-6 Análisis en el dominio del tiempo de un sistema de control de posición

7-6-1 Respuesta transitoria al escalón unitario

7-6-2 Respuesta en estado estable

7-6-3 Respuesta en el tiempo a una entrada rampa unitaria

7-6-4 Respuesta en el tiempo de un sistema de tercer orden

7-7 Efectos de añadir polos y ceros a las funciones de transferencia

7-7-1 Adición de un polo en la función de transferencia de la trayectoria directa:
Sistemas

con realimentación unitaria

7-7-2 Adición de un polo en la función de transferencia en lazo cerrado

7-7-3 Adición de un cero en la función de transferencia en lazo cerrado

7-7-4 Adición de un cero en la función de transferencia de la trayectoria directa:
Sistemas con realimentación unitaria

7-8 Polos dominantes de las funciones de transferencia

7-8-1 Factor de amortiguamiento relativo

7-8-2 Forma apropiada para desprestigiar los polos insignificantes considerando la
respuesta en estado estable

7-9 Aproximación a sistemas de orden superior por sistemas de bajo orden: El enfoque
formal

7-9-1 Criterio de aproximación

7-10 Propiedades en el dominio del tiempo de sistemas en tiempo discreto

7-10-1 Respuesta en el tiempo de sistemas de control en tiempo discreto

7-10-2 Transformación de trayectorias entre el plano s y el plano z

7-10-3 Relación entre las raíces de la ecuación característica y la respuesta transitoria

7-10-4 Análisis de error en estado estable de sistemas de control en tiempo discreto

7-11 Resumen

8 La técnica del lugar geométrico de las raíces

8-1 Introducción

8-2 Propiedades básicas del lugar geométrico de las raíces

8-3 Propiedades y construcción del lugar geométrico de las raíces

8-3-1 Puntos $K=0$ y $K=+\infty$

8-3-2 Número de ramas del lugar geométrico de las raíces

8-3-3 Simetría del lugar geométrico de las raíces

8-3-4 Ángulos de las asíntotas del lugar geométrico de las raíces: comportamiento del
lugar geométrico de las raíces en módulo de $s = \infty$

8-3-5 Intersección de las asíntotas (centroide)

- 8-3-6 Lugar geométrico de las raíces sobre el eje real
- 8-3-7 Ángulos de salida y ángulos de entrada del lugar geométrico de las raíces
- 8-3-8 Intersección del lugar geométrico de las raíces con el eje imaginario
- 8-3-9 Puntos de ruptura (puntos de silla) sobre el lugar geométrico de las raíces
- 8-3-10 Sensibilidad de las raíces
- 8-3-11 Cálculo de K sobre el lugar geométrico de las raíces

- 8-4 Solución por computadora
- 8-4-1 r1plot de CSAD
- 8-4-2 Root del programa CC

- 8-5 Algunos aspectos importantes sobre la construcción del lugar geométrico de las raíces
- 8-5-1 Efectos de la adición de polos y ceros de $G(s)H(s)$

- 8-6 Contornos de las raíces: variación de parámetros múltiples

- 8-7 Lugar geométrico de las raíces de sistemas en tiempo discreto

- 8-8 Resumen

- 9 Análisis en el dominio de la frecuencia

- 9-1 Introducción
- 9-1-1 Respuesta en frecuencia de sistemas en lazo cerrado
- 9-1-2 Especificaciones en el dominio de la frecuencia

- 9-2 M_r , ζ y ancho de banda del prototipo de segundo orden
- 9-2-1 Pico de resonancia y frecuencia de resonancia
- 9-2-2 Ancho de banda

- 9-3 Efectos de la adición de un cero en la función de transferencia de la trayectoria directa

- 9-4 Efectos de la adición de un polo en la función de transferencia de la trayectoria directa

- 9-5 Criterio de estabilidad de Nyquist: Fundamentos
- 9-5-1 El problema de estabilidad
- 9-5-2 Definición de encierro e incluido
- 9-5-3 Número de encierros e inclusiones
- 9-5-4 Principio del argumento
- 9-5-5 Trayectoria de Nyquist
- 9-5-6 Criterio de Nyquist y la gráfica de $L(s)$ o $G(s)H(s)$

- 9-6 Criterio de Nyquist para sistemas con función de transferencia de fase mínima
- 9-6-1 Aplicación del Criterio de Nyquist a funciones de transferencia de fase mínima que no son estrictamente propias

- 9-7 Relación entre el lugar geométrico de las raíces y el diagrama de Nyquist

- 9-8 Ejemplos ilustrativos: Criterio de Nyquist aplicado a funciones de transferencia de fase no mínima

9-9 Criterio general de Nyquist: para funciones de transferencia de fase mínima y no mínima

9-9-1 Sistema con funciones de transferencia de fase mínima

9-9-2 Sistemas con funciones de transferencia en lazo impropias

9-10 Ejemplos ilustrativos: Criterio general de Nyquist para funciones de transferencia de fase mínima y no mínima

9-11 Efectos de la adición de polos y ceros a $L(s)$ sobre la forma del lugar geométrico de Nyquist

9-12 Análisis de estabilidad de sistemas en lazos múltiples

9-13 Estabilidad de sistemas de control lineales con retardos puros

9-13-1 Trayectoria crítica

9-13-2 Aproximación de e-T ds

9-14 Estabilidad relativa: Margen de ganancia y margen de fase

9-14-1 Margen de ganancia

9-14-2 Margen de fase

9-15 Análisis de estabilidad con las trazas de Bode

9-15-1 Trazas de Bode para sistemas con retrasos puros

9-16 Estabilidad relativa relacionada con la pendiente de la curva de magnitud de las trazas de Bode

9-16-1 Sistema condicionalmente estable

9-17 Análisis de estabilidad con la traza de magnitud-fase

9-18 Lugar geométrico de M-constante en el plano $G(j^*)$

9-19 Lugar geométrico de fase constante en el plano $G(j^*)$

9-20 Lugar geométrico de M-constante en el plano de magnitud-fase: la Carta de Nichols

9-21 Solución por computadora

9-22 Carta de Nichols aplicada a sistemas con realimentación no unitaria

9-23 Estudios de sensibilidad en el dominio de la frecuencia

9-24 Análisis en el dominio de la frecuencia de sistemas de control de datos muestreados

9-24-1 Trazas de Bode con la transformación w

9-25 Resumen

10 Diseño de sistemas de control

10-1 Introducción

10-1-1 Especificaciones de diseño

10-1-2 Configuraciones de controladores

10-1-3 Principios fundamentales de diseño

10-2 Diseño con el controlador PD

10-2-1 Interpretación en el dominio del tiempo del control PD

10-2-2 Interpretación del control PD en el dominio de la frecuencia

10-2-3 Resumen de los efectos de un control PD

10-3 Diseño con el controlador PI

10-3-1 Interpretación en el dominio del tiempo y diseño del control PI

10-3-2 Interpretación en el dominio de la frecuencia y diseño del control PI

10-4 Diseño con el controlador PID

10-5 Diseño con el controlador de adelanto de fase

10-5-1 Interpretación y diseño en el dominio del tiempo del control de adelanto de fase

10-5-2 Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia del control de adelanto de fase

10-5-3 Efectos de la compensación de adelanto de fase

10-5-4 Limitaciones del control de adelanto de fase de una sola etapa

10-5-5 Controlador de adelanto de fase de etapas múltiples

10-5-6 Consideraciones sobre sensibilidad

10-6 Diseño con el controlador de atraso de fase

10-6-1 Interpretación y diseño en el dominio del tiempo del control de atraso de fase

10-6-2 Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia del control de atraso de fase

10-6-3 Efectos y limitaciones del control de atraso de fase

10-7 Diseño con el controlador de atraso-adelanto

10-8 Diseño mediante cancelación de polos y ceros: Filtro de muesca

10-8-1 Filtro activo de segundo orden

10-8-2 Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia

10-9 Controladores prealimentados y en la trayectoria directa

10-10 Diseño de sistemas de control robusto

10-11 Control realimentado de lazos menores

10-11-1 Control realimentado de velocidad o tacométrico

10-11-2 Control realimentado de lazos menores mediante filtros activos

10-12 Control mediante realimentación de estado

10-13 Diseño por ubicación de polos a través de la realimentación de estado

10-14 Realimentación de estado con control integral

10-15 Resumen

11 Diseño de sistemas de control en tiempo discreto

11-1 Introducción

11-2 Implantación digital de controladores analógicos

11-2-1 Implantación digital del controlador PID

11-2-2 Implantación digital de los controladores de atraso y adelanto

11-3 Controladores digitales

11-3-1 Realizaciones físicas de controladores digitales

11-4 Diseño de sistemas en tiempo discreto en el dominio de la frecuencia y en el plano z

11-4-1 Controladores de adelanto y atraso de fase en el dominio w

11-5 Diseño de sistemas de control en tiempo discreto de respuesta con oscilaciones muertas

11-6 Diseño por ubicación de polos mediante la realimentación de estado

11-7 Resumen

Apéndice A Trazas en el dominio de la frecuencia

Apéndice B Tabla de transformadas de Laplace

Apéndice C Tabla de transformadas z

Respuestas y sugerencias a problemas selectos

Índice