Victor Manuel Leiva Requene

Ing. Computación

Resumen del Capítulo 7 del libro "Ingeniería de Control Moderna" de Ogata

Introducción

El capítulo 7 del libro "Ingeniería de Control Moderna" de Ogata explora el análisis y diseño de sistemas de control mediante el método de la respuesta en frecuencia. Este método, desarrollado por científicos como Nyquist, Bode y Nichols en las décadas de 1930 y 1940, se centra en analizar la respuesta de un sistema en estado estacionario ante una entrada sinusoidal. Los métodos de respuesta en frecuencia son esenciales tanto en la teoría de control convencional como en la teoría de control robusto, permitiendo evaluar la estabilidad relativa y absoluta de sistemas de control en lazo cerrado a partir de las características de frecuencia en lazo abierto.

Diagramas de Bode

Los diagramas de Bode son una herramienta fundamental en el análisis de la respuesta en frecuencia. Representan la ganancia y la fase de un sistema en función de la frecuencia en una escala logarítmica. Estos diagramas permiten visualizar cómo un sistema responde a diferentes frecuencias de entrada, siendo cruciales para el diseño de sistemas de control. Ajustando los diagramas de Bode, los ingenieros pueden optimizar las características de respuesta transitoria, equilibrando estabilidad y rendimiento.

La construcción de un diagrama de Bode implica identificar las frecuencias de corte y las pendientes asociadas con los polos y ceros del sistema. Estos diagramas no solo facilitan el análisis, sino también el diseño de compensadores que mejoran el rendimiento del sistema, adaptándolo para una mejor estabilidad y rechazo de perturbaciones.

Diagramas Polares

Los diagramas polares proporcionan otra perspectiva del análisis de la respuesta en frecuencia, mostrando la relación entre la magnitud y la fase en un formato circular. Son especialmente útiles para aplicar el criterio de estabilidad de Nyquist, que evalúa la estabilidad de un sistema en lazo cerrado a partir de su respuesta en lazo abierto. Además, permiten identificar márgenes de ganancia y fase, indicadores críticos de la robustez del sistema.

Cada punto en un diagrama polar representa la respuesta del sistema a una frecuencia específica, ofreciendo una visualización clara de cómo las variaciones en la frecuencia afectan la estabilidad del sistema. Este enfoque complementa los diagramas de Bode y es indispensable para un análisis completo de la estabilidad.

Diagramas de Magnitud Logarítmica Respecto de la Fase

Este tipo de diagramas combina las características de los diagramas de Bode y los polares, representando la magnitud logarítmica de la respuesta del sistema en función de la fase. Facilitan la identificación de las propiedades de la respuesta en frecuencia y son útiles para el diseño de sistemas de control con características específicas de rendimiento.

Estos diagramas permiten a los ingenieros de control evaluar de manera precisa cómo la magnitud y la fase de la respuesta de un sistema se relacionan, proporcionando una herramienta adicional para el diseño y análisis de sistemas de control.

Criterio de Estabilidad de Nyquist

El criterio de estabilidad de Nyquist es una técnica poderosa para determinar la estabilidad de sistemas de control en lazo cerrado a partir de su respuesta en frecuencia en lazo abierto. Utiliza el diagrama polar de la función de transferencia del sistema para evaluar la cantidad de encierros alrededor del punto crítico (-1,0), determinando así la estabilidad.

Este criterio es esencial para el diseño de sistemas de control robustos, ya que permite evaluar la estabilidad en presencia de incertidumbres en el modelo del sistema y perturbaciones externas.

Análisis de Estabilidad y Estabilidad Relativa

El análisis de estabilidad mediante métodos de respuesta en frecuencia permite evaluar no solo si un sistema es estable, sino también cuán robusta es su estabilidad ante variaciones en los parámetros del sistema. La estabilidad relativa se evalúa utilizando márgenes de ganancia y fase, que indican la capacidad del sistema para mantener su estabilidad bajo cambios en la ganancia del lazo.

Estos análisis son cruciales para diseñar sistemas de control que no solo sean estables en condiciones nominales, sino que también puedan mantener su rendimiento ante perturbaciones y variaciones en sus parámetros.

Respuesta en Frecuencia en Lazo Cerrado de Sistemas con Realimentación Unitaria

Este apartado del capítulo analiza cómo la respuesta en frecuencia de un sistema cambia cuando se cierra el lazo de control, especialmente en sistemas con realimentación unitaria. Se examinan las características de la respuesta en frecuencia del sistema en lazo cerrado y cómo estas se relacionan con las características del sistema en lazo abierto.

El diseño de sistemas de control se beneficia de este análisis, ya que permite ajustar los parámetros del sistema en lazo abierto para obtener una respuesta deseada en lazo cerrado.

Determinación Experimental de Funciones de Transferencia

Finalmente, el capítulo aborda cómo determinar experimentalmente las funciones de transferencia de sistemas complejos mediante pruebas de respuesta en frecuencia. Este enfoque es práctico para sistemas donde deducir un modelo matemático exacto es difícil o impráctico.

Compensación de adelanto

La compensación de adelanto se utiliza para mejorar la estabilidad y el ancho de banda del sistema de control, lo que resulta en una respuesta más rápida. Un compensador de adelanto tiene la función de transferencia (G_c(s) = K frac{T s + 1}{alpha T s + 1}) donde (alpha < 1). Esta configuración introduce un cero y un polo en el plano complejo, ajustando la fase y la ganancia del sistema a altas frecuencias.

Para diseñar un compensador de adelanto, se utiliza el diagrama de Bode para identificar las frecuencias en las que se requiere un adelanto de fase. Luego, se seleccionan los parámetros (T) y (alpha) para lograr el adelanto de fase deseado, asegurando que se cumplan los márgenes de estabilidad especificados. Este método es útil en sistemas que requieren una respuesta rápida y un mayor ancho de banda, aunque puede aumentar la sensibilidad al ruido.

Compensación de retardo

La compensación de retardo se utiliza para mejorar la precisión en estado estacionario de un sistema de control, disminuyendo la velocidad de respuesta transitoria. Un compensador de retardo tiene la función de transferencia (G_c(s) = K frac{T s + 1}{beta T s + 1}) donde (beta > 1). Esta configuración introduce un polo y un cero cercanos al origen, afectando principalmente las bajas frecuencias.

El diseño de un compensador de retardo también se basa en el uso del diagrama de Bode, donde se ajustan los parámetros (T) y (beta) para obtener la reducción de ganancia a altas frecuencias y mejorar la precisión sin afectar significativamente la estabilidad del sistema. Esta técnica es adecuada cuando se requiere mejorar la precisión en estado estacionario sin necesidad de una respuesta transitoria rápida.

Compensación de retardo-adelanto

La compensación de retardo-adelanto combina las ventajas de los compensadores de adelanto y retardo, permitiendo mejorar tanto la respuesta transitoria como la precisión en estado estacionario. Un compensador de retardo-adelanto tiene la función de transferencia (G_c(s) = K frac{T_1 s + 1}{alpha T_1 s + 1} frac{beta T_2 s + 1}{T_2 s + 1}), donde (alpha < 1) y (beta > 1).

Este tipo de compensador se diseña ajustando los parámetros (T_1), (alpha), (T_2) y (beta) para lograr las mejoras deseadas en ambas respuestas. La técnica de diseño se basa en el diagrama de Bode, donde se identifican las frecuencias que requieren ajuste en fase y ganancia. Este método es útil en sistemas complejos que necesitan un equilibrio entre precisión y rapidez de respuesta.

Ejemplos

1. Ejemplo de compensación de adelanto: Consideremos un sistema con la función de transferencia (G(s) = frac{10}{s(s+1)(s+2)}). Para mejorar su margen de fase en 30 grados, se puede diseñar un compensador de adelanto con (alpha = 0.5) y (T = 1), resultando en (G_c(s) = frac{2(s + 1)}{s + 2}). Este compensador incrementa el margen de fase y ajusta la ganancia para mejorar la estabilidad.

2. Ejemplo de compensación de retardo-adelanto: Un sistema con la función de transferencia (G(s) = frac{20}{s(s+3)(s+5)}) necesita mejorar tanto su precisión en estado estacionario como su respuesta transitoria. Se diseña un

compensador de retardo-adelanto con (alpha = 0.4), (beta = 2), (T_1 = 0.5) y (T_2 = 2), obteniendo (G_c(s) = frac{0.8(s + 2)}{s + 5} frac{2(s + 0.25)}{s + 0.5}). Este compensador mejora ambas características del sistema .