

## ÍNDICE

### VOLUME 1

#### PREFÁCIO

#### AGRADECIMENTOS

#### INTRODUÇÃO

##### 1 SISTEMAS FÍSICOS, MODELOS E REPRESENTAÇÕES

1.1 Estudo de Sistemas Físicos: Modelação, Representação Matemática, Análise e Projecto

1.2 Exemplos de Modelação e Representação Matemática de Sistemas Físicos

1.2.1 Sistemas mecânicos

1.2.2 Sistemas eléctricos

1.2.3 Sistemas hidráulicos

1.2.4 Sistemas térmicos

1.2.5 Sistemas em economia e gestão

1.2.6 Outros sistemas

1.3 Classificação e Caracterização dos Sistemas

1.4 Representação de Entrada-Saída de SLITs. Função de Transferência

1.4.1 Equação diferencial linear de ordem  $n$

1.4.2 Resposta impulsional

1.4.3 Função de transferência

1.4.4 Função de transferência e resposta impulsional

1.4.5 Diagrama de blocos

1.4.6 Pólos, zeros, polinómio característico

1.4.7 Matriz de transferência

1.4.8 Conceitos para SLITs discretos

1.5 Representação de Estado

1.5.1 Variável de estado. Vector de estado. Espaço de estados

1.5.2 Modelo de estado: equação de estado e de saída

1.5.3 Representação gráfica do modelo de estado

1.5.4 Formas canónicas

1.5.5 Transformação de coordenadas

1.6 Conversão Entre Representações

1.6.1 Do modelo de estado para a matriz de transferência

1.6.2 Da função de transferência para o modelo de estado

1.6.3 Obtenção de formas canónicas

1.7 O MATLAB e a Representação de SLITs

1.8 Problemas

##### 2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO DE SLITs

2.1 Introdução

2.2 Resposta no Tempo de SLITs Contínuos Com Representação Externa

2.2.1 Valores particulares da resposta

2.2.2 Cálculo da resposta

2.3 Casos Particulares

2.3.1 SLIT de primeira ordem sem zeros

2.3.2 SLIT de primeira ordem com um zero

2.3.3 SLIT de segunda ordem sem zeros

2.3.4 Outros casos particulares de sistemas de segunda ordem e de ordem superior

2.3.5 sistemas de ordem superior. Pólos dominantes

2.4 Identificação de Sistemas

2.5 Resposta no Tempo de SLITs Discretos Com Representação Externa

2.5.1 Valores particulares da resposta

2.5.2 Cálculo da resposta

2.5.3 SLIT de primeira ordem

2.5.4 SLIT de segunda ordem

2.6 Resposta no Tempo de SLITs Contínuos Com Representação de Estado

2.6.1 Solução da equação dinâmica  $\dot{x}(t) = A(t)x(t)$

2.6.2 Solução da equação dinâmica  $\dot{x}(t) = Ax(t)$

2.6.3 Propriedades da matriz de transição

2.6.4 Sistemas dinâmicos não homogéneos. A fórmula de variação das constantes

2.6.5 Matriz resposta impulsional e matriz de transferência

2.7 Cálculo de  $e^{At}$  Pelo Método Directo

2.8 Cálculo de  $e^{At}$  Com Recurso à Transformada de Laplace

2.8.1 Expansão em fracções parciais de  $(sI - A)^{-1}$

2.8.2 Cálculo de  $(sI - A)^{-1}$

2.9 Cálculo de  $e^{At}$  Como Função da Matriz  $A$

2.9.1 Teorema de Cayley-Hamilton

2.9.2 Cálculo de  $e^{At}$  como combinação linear de  $A^0, A^1, \dots, A^{n-1}$

2.10 Cálculo de  $e^{At}$ , Usando Transformações de Semelhança

2.10.1 Estrutura simples e não simples de uma matriz  $A$

2.10.2 Cálculo de  $e^{At}$  para matrizes de estrutura simples

- 2.10.3 Cálculo de  $e^{At}$  para matrizes de estrutura não simples
- 2.10.4 Vetores próprios generalizados de uma matriz
- 2.10.5 Polinômios invariantes e divisores elementares de uma matriz polinomial
- 2.11 Modos de um SLIT
  - 2.11.1 Interpretação dinâmica dos modos
  - 2.11.2 Os modos e a decomposição espectral da matriz A
  - 2.11.3 Interpretação dinâmica dos zeros
- 2.12 Resposta no Tempo de SLITs Discretos, com Representação de Estado
  - 2.12.1 Solução da equação dinâmica  $x(k+1) = A(k)x(k)$
  - 2.12.2 Solução da equação dinâmica  $x(k+1) = Ax(k)$
  - 2.12.3 Propriedades da matriz de transição
  - 2.12.4 Cálculo da matriz de transição
  - 2.12.5 Fórmula de variação das constantes
- 2.13 Amostragem e Discretização de SLITs Contínuos
  - 2.13.1 Amostragem de SLITs contínuos
  - 2.13.2 Discretização de SLITs contínuos
- 2.14 Problemas

## ÍNDICE REMISSIVO

## VOLUME 2

### 3 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

- 3.1 Introdução
- 3.2 Função Resposta em Frequência de SLITs Contínuos
- 3.3 Representação Gráfica da Função Resposta em Frequência de SLITs Contínuos
  - 3.3.1 Diagrama de Bode
  - 3.3.2 Diagrama de Nyquist
  - 3.3.3 Diagrama de Nichols
- 3.4 Representação Assintótica do Diagrama de Bode
  - 3.4.1 Relação amplitude-fase
- 3.5 Diagrama de Bode para Sistemas Particulares
  - 3.5.1 Sistemas de fase não mínima
  - 3.5.2 Sistemas com atraso de transporte
- 3.6 Especificações
  - 3.6.1 Largura de banda e relações tempo-frequência
- 3.7 Identificação de Sistemas
- 3.8 Resposta em Frequência de SLITs Discretos
  - 3.8.1 Sistemas de primeira ordem
  - 3.8.2 Sistemas de segunda ordem
  - 3.8.3 Sistemas com zeros
- 3.9 Problemas

### 4 ESTABILIDADE DE SISTEMAS LINEARES

- 4.1 Introdução
- 4.2 O Conceito de Estabilidade
- 4.3 Estabilidade Interna
  - 4.3.1 Estabilidade interna para sistemas contínuos
  - 4.3.2 Estabilidade interna para sistemas discretos
- 4.4 Estabilidade Externa - no Sentido BIBO
  - 4.4.1 Critérios de estabilidade BIBO para SLITs contínuos
  - 4.4.2 Critérios de estabilidade BIBO para SLITs discretos
- 4.5 Critério de Routh-Hurwitz
  - 4.5.1 Teste de Hurwitz
  - 4.5.2 Critério de Routh
  - 4.5.3 Aplicação do critério de Routh-Hurwitz a sistemas discretos
- 4.6 Critério de Jury
  - 4.6.1 Teste de Schur Cohn
  - 4.6.2 Descrição do Critério de Jury
- 4.7 Problemas

### 5 CONTROLABILIDADE E OBSERVABILIDADE DE SISTEMAS LINEARES

- 5.1 Apresentação dos Conceitos
- 5.2 Controlabilidade para SLITs Contínuos
  - 5.2.1 Equivalência entre conceitos de controlabilidade/acessibilidade
  - 5.2.2 Critério de controlabilidade para SLITs contínuos
- 5.3 Observabilidade para SLITs Contínuos
  - 5.3.1 Observabilidade
  - 5.3.2 Reconstituibilidade
  - 5.3.3 Equivalência entre os conceitos de observabilidade e de reconstituibilidade
  - 5.3.4 Critério de observabilidade para SLITs contínuos
- 5.4 Controlabilidade para SLITs Discretos
  - 5.4.1 Critérios de controlabilidade e de acessibilidade para SLITs discretos
- 5.5 Observabilidade para SLITs Discretos
  - 5.5.1 Critérios de observabilidade e de reconstituibilidade para SLITs discretos
- 5.6 Dualidade
- 5.7 Controlabilidade, Observabilidade e Formas Canônicas

- 5.8 Controlabilidade, Observabilidade e Função de Transferência
- 5.9 Análise Modal da Controlabilidade e Observabilidade
- 5.9.1 Análise modal da controlabilidade
- 5.9.2 Análise modal da observabilidade
- 5.10 Controlabilidade, Observabilidade e Amostragem
- 5.11 Decomposição Canônica do Espaço de Estados
- 5.11.1 Alguns resultados sobre realização
- 5.11.2 Representação de realizações não controláveis
- 5.11.3 Representação de realizações não observáveis
- 5.11.4 Caso geral
- 5.12 Problemas

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### A ELEMENTOS DE ÁLGEBRA LINEAR

- A.1 Igualdade, Adição e Multiplicação por um Escalar
- A.2 Multiplicação de Matrizes
- A.3 Transposta de Uma Matriz
- A.4 Determinante de uma Matriz
- A.5 Inversa de uma Matriz
- A.6 Traço de uma Matriz
- A.7 Valores Próprios e Vectors Próprios
- A.8 Decomposição Espectral de uma Matriz
- A.9 O MATLAB como Ferramenta de Manipulação Algébrica

### B TABELAS DE TRANSFORMADAS

### C ÁLGEBRA DOS DIAGRAMAS DE BLOCOS

- C.1 Introdução
- C.2 Blocos em Cascata
- C.3 Forma Canônica da Realimentação
- C.4 Simplificação Sucessiva de Diagramas de Blocos
- C.4.1 Método algébrico
- C.4.2 Método gráfico
- C.5 Sistemas com Mais do que uma Entrada

### D SIMULAÇÃO

- D.1 Simulação Analógica
- D.1.1 Simulação analógica de funções de transferência
- D.1.2 Simulação analógica de um sistema em cadeia fechada
- D.1.3 Escala de tempo
- D.1.4 Simulação de sistemas de controlo por resolução analógica de equações diferenciais
- D.1.5 Escala de amplitude
- D.2 Simulação Digital

### E FUNÇÕES DE MATRIZES

### F ESPAÇO DOMÍNIO E ESPAÇO NULO DE UM OPERADOR LINEAR

### G REGRA DE LEIBNITZ

### ÍNDICE REMISSIVO