
Indice del libro

Alessandro Giua, Carla Seatzu
Analisi dei sistemi dinamici,
Springer-Verlag Italia, II edizione, 2009
Pagina web: <https://alessandro-giua.it/UNICA/ASD/>

| | |
|--|----|
| Prefazione | V |
| 1 Introduzione | 1 |
| 1.1 Automatica e sistemi | 1 |
| 1.2 Problemi affrontati dall'Automatica | 2 |
| 1.2.1 Modellazione | 2 |
| 1.2.2 Identificazione | 3 |
| 1.2.3 Analisi | 3 |
| 1.2.4 Controllo | 4 |
| 1.2.5 Ottimizzazione | 4 |
| 1.2.6 Verifica | 5 |
| 1.2.7 Diagnosi di guasto | 5 |
| 1.3 Classificazione dei sistemi | 5 |
| 1.3.1 Sistemi ad avanzamento temporale | 6 |
| 1.3.2 Sistemi ad eventi discreti | 8 |
| 1.3.3 Sistemi ibridi | 9 |
| 2 Sistemi, modelli e loro classificazione | 11 |
| 2.1 Descrizione di sistema | 11 |
| 2.1.1 Descrizione ingresso-uscita | 12 |
| 2.1.2 Descrizione in variabili di stato | 14 |
| 2.2 Modello matematico di un sistema | 16 |
| 2.2.1 Modello ingresso-uscita | 16 |
| 2.2.2 Modello in variabili di stato | 18 |
| 2.3 Formulazione del modello matematico | 19 |
| 2.3.1 Sistemi idraulici | 19 |
| 2.3.2 Sistemi elettrici | 21 |
| 2.3.3 Sistemi meccanici | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.4 | Sistemi termici | 26 |
| 2.4 | Proprietà dei sistemi | 28 |
| 2.4.1 | Sistemi dinamici o istantanei | 28 |
| 2.4.2 | Sistemi lineari o non lineari | 30 |
| 2.4.3 | Sistemi stazionari o non stazionari | 33 |
| 2.4.4 | Sistemi propri o impropri | 35 |
| 2.4.5 | Sistemi a parametri concentrati o distribuiti | 37 |
| 2.4.6 | Sistemi senza elementi di ritardo o con elementi di ritardo | 39 |
| | Esercizi | 40 |
| 3 | Analisi nel dominio del tempo dei modelli ingresso-uscita . . | 45 |
| 3.1 | Modello ingresso-uscita e problema di analisi | 46 |
| 3.1.1 | Problema fondamentale dell'analisi dei sistemi | 46 |
| 3.1.2 | Soluzione in termini di evoluzione libera e evoluzione forzata | 47 |
| 3.2 | Equazione omogenea e modi | 48 |
| 3.2.1 | Radici complesse e coniugate | 51 |
| 3.3 | L'evoluzione libera | 54 |
| 3.3.1 | Radici complesse e coniugate | 56 |
| 3.3.2 | Istante iniziale diverso da 0 | 58 |
| 3.4 | Classificazione dei modi | 60 |
| 3.4.1 | Modi aperiodici | 60 |
| 3.4.2 | Modi pseudoperiodici | 64 |
| 3.5 | La risposta impulsiva | 68 |
| 3.5.1 | Struttura della risposta impulsiva | 69 |
| 3.5.2 | Calcolo della risposta impulsiva [*] | 71 |
| 3.6 | L'evoluzione forzata e l'integrale di Duhamel | 75 |
| 3.6.1 | Integrale di Duhamel | 76 |
| 3.6.2 | Scomposizione in evoluzione libera ed evoluzione forzata | 78 |
| 3.6.3 | Calcolo della risposta forzata mediante convoluzione . . . | 79 |
| 3.7 | Altri regimi canonici [*] | 81 |
| | Esercizi | 83 |
| 4 | Analisi nel dominio del tempo delle rappresentazioni in variabili di stato | 87 |
| 4.1 | Rappresentazione in variabili di stato e problema di analisi . . . | 87 |
| 4.2 | La matrice di transizione dello stato | 88 |
| 4.2.1 | Proprietà della matrice di transizione dello stato [*] | 89 |
| 4.2.2 | Lo sviluppo di Sylvester | 90 |
| 4.3 | Formula di Lagrange | 95 |
| 4.3.1 | Evoluzione libera e evoluzione forzata | 96 |
| 4.3.2 | Risposta impulsiva di una rappresentazione in VS | 98 |
| 4.4 | Trasformazione di similitudine | 99 |
| 4.5 | Diagonalizzazione | 103 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.5.1 | Calcolo della matrice di transizione dello stato tramite diagonalizzazione | 106 |
| 4.5.2 | Matrici con autovalori complessi [*] | 107 |
| 4.6 | Forma di Jordan | 110 |
| 4.6.1 | Determinazione di una base di autovettori generalizzati [*] | 114 |
| 4.6.2 | Matrice modale generalizzata [*] | 120 |
| 4.6.3 | Calcolo della matrice di transizione dello stato tramite forma di Jordan | 123 |
| 4.7 | Matrice di transizione dello stato e modi | 126 |
| 4.7.1 | Polinomio minimo e modi | 126 |
| 4.7.2 | Interpretazione fisica degli autovettori | 127 |
| | Esercizi | 130 |
| 5 | La trasformata di Laplace | 135 |
| 5.1 | Definizione di trasformata e antitrasformata di Laplace | 135 |
| 5.1.1 | Trasformata di Laplace | 136 |
| 5.1.2 | Antitrasformata di Laplace | 137 |
| 5.1.3 | Trasformata di segnali impulsivi | 138 |
| 5.1.4 | Calcolo della trasformata della funzione esponenziale | 139 |
| 5.2 | Proprietà fondamentali delle trasformate di Laplace | 140 |
| 5.2.1 | Proprietà di linearità | 140 |
| 5.2.2 | Teorema della derivata in s | 141 |
| 5.2.3 | Teorema della derivata nel tempo | 143 |
| 5.2.4 | Teorema dell'integrale nel tempo | 146 |
| 5.2.5 | Teorema della traslazione nel tempo | 147 |
| 5.2.6 | Teorema della traslazione in s | 149 |
| 5.2.7 | Teorema della convoluzione | 150 |
| 5.2.8 | Teorema del valore finale | 151 |
| 5.2.9 | Teorema del valore iniziale | 153 |
| 5.3 | Antitrasformazione delle funzioni razionali | 154 |
| 5.3.1 | Funzioni strettamente proprie con poli di molteplicità unitaria | 155 |
| 5.3.2 | Funzioni strettamente proprie con poli di molteplicità maggiore di uno | 160 |
| 5.3.3 | Funzioni non strettamente proprie | 164 |
| 5.3.4 | Antitrasformazione di funzioni con elementi di ritardo | 165 |
| 5.3.5 | Esistenza del valore finale di una antitrasformata | 166 |
| 5.4 | Risoluzione di equazioni differenziali mediante le trasformate di Laplace | 167 |
| | Esercizi | 169 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6 | Analisi nel dominio della variabile di Laplace | 175 |
| 6.1 | Analisi dei modelli ingresso-uscita mediante trasformate di Laplace | 175 |
| 6.1.1 | Risposta libera | 178 |
| 6.1.2 | Risposta forzata | 179 |
| 6.2 | Analisi dei modelli in variabili di stato mediante trasformate di Laplace | 179 |
| 6.2.1 | La matrice risolvete | 181 |
| 6.2.2 | Esempio di calcolo dell'evoluzione libera e forzata | 183 |
| 6.3 | Funzione di trasferimento | 185 |
| 6.3.1 | Definizione di funzione e matrice di trasferimento | 185 |
| 6.3.2 | Funzione di trasferimento e risposta impulsiva | 186 |
| 6.3.3 | Risposta impulsiva e modello ingresso-uscita | 187 |
| 6.3.4 | Identificazione della funzione di trasferimento | 188 |
| 6.3.5 | Funzione di trasferimento per modelli in variabile di stato | 188 |
| 6.3.6 | Matrice di trasferimento | 189 |
| 6.3.7 | Matrice di trasferimento e similitudine | 191 |
| 6.3.8 | Passaggio da un modello in VS a un modello IU | 191 |
| 6.3.9 | Sistemi con elementi di ritardo | 193 |
| 6.4 | Forme fattorizzate della funzione di trasferimento | 193 |
| 6.4.1 | Rappresentazione residui-poli | 193 |
| 6.4.2 | Rappresentazione zeri-poli | 194 |
| 6.4.3 | Rappresentazione di Bode | 196 |
| 6.5 | Studio della risposta forzata mediante le trasformate di Laplace | 199 |
| 6.5.1 | Risposta forzata ad ingressi canonici | 200 |
| 6.5.2 | La risposta a regime permanente e la risposta transitoria | 203 |
| 6.5.3 | Risposta indiciale | 205 |
| | Esercizi | 213 |
| 7 | Realizzazione di modelli in variabili di stato e analisi dei sistemi interconnessi | 219 |
| 7.1 | Realizzazione di sistemi SISO | 219 |
| 7.1.1 | Introduzione | 219 |
| 7.1.2 | Caso $n = m = 0$ | 221 |
| 7.1.3 | Caso $n > 0$ e $m = 0$ | 221 |
| 7.1.4 | Caso $n \geq m > 0$ | 225 |
| 7.1.5 | Passaggio da un insieme di condizioni iniziali sull'uscita ad uno stato iniziale | 231 |
| 7.2 | Studio dei sistemi interconnessi | 233 |
| 7.2.1 | Collegamenti elementari | 235 |
| 7.2.2 | Determinazione della matrice di trasferimento per sistemi MIMO | 238 |
| 7.2.3 | Algebra degli schemi a blocchi [*] | 241 |
| | Esercizi | 244 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 8 | Analisi nel dominio della frequenza | 249 |
| 8.1 | Risposta armonica | 250 |
| 8.1.1 | Risposta a regime ad un ingresso sinusoidale | 250 |
| 8.1.2 | Definizione di risposta armonica | 252 |
| 8.1.3 | Determinazione sperimentale della risposta armonica | 252 |
| 8.2 | Risposta a segnali dotati di serie o trasformata di Fourier | 253 |
| 8.3 | Diagramma di Bode | 254 |
| 8.3.1 | Regole per il tracciamento del diagramma di Bode | 256 |
| 8.3.2 | Esempi numerici | 271 |
| 8.4 | Parametri caratteristici della risposta armonica e azioni filtranti | 275 |
| 8.4.1 | Parametri caratteristici | 275 |
| 8.4.2 | Azioni filtranti | 279 |
| | Esercizi | 283 |
| 9 | Stabilità | 287 |
| 9.1 | Stabilità BIBO | 287 |
| 9.2 | Stabilità secondo Lyapunov delle rappresentazioni in termini di variabili di stato | 293 |
| 9.2.1 | Stati di equilibrio | 295 |
| 9.2.2 | Definizioni di stabilità secondo Lyapunov | 295 |
| 9.2.3 | Movimento e traiettoria [*] | 303 |
| 9.3 | Stabilità secondo Lyapunov dei sistemi lineari e stazionari | 308 |
| 9.3.1 | Stati di equilibrio | 308 |
| 9.3.2 | Stabilità dei punti di equilibrio | 310 |
| 9.3.3 | Esempi di analisi della stabilità | 313 |
| 9.3.4 | Movimento e traiettoria [*] | 316 |
| 9.3.5 | Confronto tra stabilità BIBO e stabilità alla Lyapunov | 317 |
| 9.4 | Criterio di Routh | 318 |
| 9.4.1 | Criteri elementari per valutare il segno delle radici di un polinomio | 319 |
| 9.4.2 | Tabella e criterio di Routh | 321 |
| 9.4.3 | Casi singolari | 323 |
| 9.4.4 | Criterio di Routh in forma parametrica | 329 |
| | Esercizi | 331 |
| 10 | Analisi dei sistemi in retroazione | 335 |
| 10.1 | Controllo in retroazione | 335 |
| 10.2 | Luogo delle radici | 339 |
| 10.2.1 | Regole per il tracciamento del luogo | 342 |
| 10.3 | Criterio di Nyquist | 354 |
| 10.3.1 | Diagramma di Nyquist | 355 |
| 10.3.2 | Criterio di Nyquist | 364 |
| 10.4 | Luoghi per calcolare $W(j\omega)$ quando $G(j\omega)$ è assegnata graficamente | 376 |
| 10.4.1 | Carta di Nichols | 377 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10.4.2 | Luoghi sul piano di Nyquist | 383 |
| | Esercizi | 387 |
| 11 | Controllabilità e osservabilità | 391 |
| 11.1 | Controllabilità | 392 |
| 11.1.1 | Verifica della controllabilità per rappresentazioni arbitrarie | 393 |
| 11.1.2 | Verifica della controllabilità per rappresentazioni diagonali | 397 |
| 11.1.3 | Controllabilità e similitudine | 399 |
| 11.1.4 | Forma canonica controllabile di Kalman [*] | 401 |
| 11.2 | Retroazione dello stato [*] | 404 |
| 11.2.1 | Ingresso scalare | 405 |
| 11.2.2 | Ingresso non scalare | 407 |
| 11.3 | Osservabilità | 413 |
| 11.3.1 | Verifica della osservabilità per rappresentazioni arbitrarie | 414 |
| 11.3.2 | Verifica della osservabilità per rappresentazioni diagonali | 417 |
| 11.3.3 | Osservabilità e similitudine | 419 |
| 11.3.4 | Forma canonica osservabile di Kalman [*] | 420 |
| 11.4 | Dualità tra controllabilità e osservabilità | 423 |
| 11.5 | Osservatore asintotico dello stato [*] | 425 |
| 11.5.1 | Osservatore di Luenberger | 426 |
| 11.5.2 | Osservatore di ordine ridotto | 429 |
| 11.6 | Retroazione dello stato in presenza di un osservatore [*] | 436 |
| 11.7 | Controllabilità, osservabilità e relazione ingresso-uscita | 438 |
| 11.7.1 | Forma canonica di Kalman | 439 |
| 11.7.2 | Relazione ingresso-uscita | 439 |
| 11.8 | Raggiungibilità e ricostruibilità [*] | 442 |
| 11.8.1 | Controllabilità e raggiungibilità | 442 |
| 11.8.2 | Osservabilità e ricostruibilità | 443 |
| | Esercizi | 443 |
| 12 | Analisi dei sistemi non lineari | 447 |
| 12.1 | Cause ed effetti tipici di non linearità | 447 |
| 12.1.1 | Cause tipiche di non linearità | 447 |
| 12.1.2 | Effetti tipici delle non linearità | 449 |
| 12.2 | Studio della stabilità mediante i criteri di Lyapunov | 455 |
| 12.2.1 | Studio della stabilità mediante funzione di Lyapunov | 455 |
| 12.2.2 | Linearizzazione intorno ad uno stato di equilibrio e stabilità | 461 |
| 12.3 | Analisi mediante funzione descrittiva [*] | 467 |
| 12.3.1 | Funzione descrittiva | 468 |
| 12.3.2 | Analisi mediante funzione descrittiva | 479 |
| | Esercizi | 484 |

| | |
|--|-----|
| Appendici | 489 |
| A Richiami ai numeri complessi | 491 |
| A.1 Definizioni elementari | 491 |
| A.2 I numeri complessi | 491 |
| A.2.1 Rappresentazione cartesiana | 491 |
| A.2.2 Esponenziale immaginario | 492 |
| A.2.3 Rappresentazione polare | 493 |
| A.3 Formule di Eulero | 495 |
| B Segnali e distribuzioni | 497 |
| B.1 Segnali canonici | 497 |
| B.1.1 Il gradino unitario | 497 |
| B.1.2 Le funzioni a rampa e la rampa esponenziale | 498 |
| B.1.3 L'impulso | 499 |
| B.1.4 Le derivate dell'impulso | 501 |
| B.1.5 Famiglia dei segnali canonici | 502 |
| B.2 Calcolo delle derivate di una funzione discontinua | 502 |
| B.3 Integrale di convoluzione | 504 |
| B.4 Convoluzione con segnali canonici | 507 |
| C Elementi di algebra lineare | 509 |
| C.1 Matrici e vettori | 509 |
| C.2 Operatori matriciali | 512 |
| C.2.1 Trasposizione | 512 |
| C.2.2 Somma e differenza | 513 |
| C.2.3 Prodotto di una matrice per uno scalare | 513 |
| C.2.4 Prodotto matriciale | 514 |
| C.2.5 Potenza di una matrice | 516 |
| C.2.6 L'esponenziale di una matrice | 517 |
| C.3 Determinante | 518 |
| C.4 Rango e nullità di una matrice | 521 |
| C.5 Sistemi di equazioni lineari | 523 |
| C.6 Inversa | 525 |
| C.7 Autovalori e autovettori | 528 |
| D Matrici in forma compagna e forme canoniche | 535 |
| D.1 Matrici in forma compagna | 535 |
| D.1.1 Polinomio caratteristico | 536 |
| D.2 Forme canoniche delle rappresentazioni in variabili di stato ... | 537 |
| D.2.1 Forma canonica di controllo | 538 |
| D.2.2 Forma canonica di osservazione | 543 |
| D.3 Autovettori di una matrice in forma compagna | 546 |
| D.3.1 Autovettori | 546 |
| D.3.2 Autovettori generalizzati [*] | 547 |

| | | |
|----------|--|------------|
| D.3.3 | Matrici in forma compagna trasposta | 549 |
| E | Lineare indipendenza di funzioni del tempo | 551 |
| F | Serie e integrale di Fourier | 555 |
| F.1 | Serie di Fourier | 555 |
| F.1.1 | Forma esponenziale | 555 |
| F.1.2 | Forma trigonometrica | 557 |
| F.2 | Integrale e trasformata di Fourier | 559 |
| F.2.1 | Forma esponenziale | 559 |
| F.2.2 | Forma trigonometrica | 561 |
| F.3 | Relazione tra trasformata di Fourier e di Laplace | 562 |
| G | Teorema di Cayley-Hamilton e calcolo di funzioni matriciali | 565 |
| G.1 | Teorema di Cayley-Hamilton | 565 |
| G.2 | Teorema di Cayley-Hamilton e polinomio minimo | 566 |
| G.3 | Funzioni analitiche di una matrice | 568 |
| | Bibliografia | 573 |
| | Indice analitico | 575 |