

Rolf Isermann

Identifikation dynamischer Systeme 2

Besondere Methoden, Anwendungen

Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 121 Abbildungen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen

C Identifikation mit parametrischen Modellen – zeitdiskrete Signale

2. Teil: Iterative und rekursive Parameterschätzmethoden

12	Maximum-Likelihood-Methode	3
12.1	Nichtrekursive Maximum-Likelihood-Methode (ML)	4
12.2	Rekursive Maximum-Likelihood-Methode (RML)	11
12.3	Erreichbare Genauigkeit, Cramér-Rao-Ungleichung	13
12.4	Zusammenfassung	16
13	Bayes-Methode	17
14	Parameterschätzung mit nichtparametrischem Zwischenmodell (zweistufige Methoden)	21
14.1	Antwortfunktionen auf nichtperiodische Testsignale und Methode der kleinsten Quadrate	22
14.2	Korrelationsanalyse und Methode der kleinsten Quadrate (COR-LS)	25
14.3	Zusammenfassung	32
15	Rekursive Parameterschätzmethoden	33
15.1	Einheitliche Darstellung rekursiver Parameterschätzmethoden	33
15.2	Konvergenz rekursiver Parameterschätzmethoden	35
15.2.1	Konvergenz im deterministischen Fall	36
15.2.2	Konvergenz bei stochastischen Störsignalen über gewöhnliche Differentialgleichungen	38
15.2.3	Konvergenz bei stochastischen Störsignalen mit der Martingale-Theorie	44
15.3	Eigenwertverhalten, rekursive Parameterschätzverfahren	46
15.4	Zusammenfassung	52

16 Parameterschätzung zeitvarianter Prozesse	54
16.1 Exponentielle Gewichtung mit konstantem Vergessensfaktor	54
16.2 Exponentielle Gewichtung mit variablem Vergessensfaktor	60
16.3 Beeinflussung der Kovarianzmatrix	61
16.4 Modelle für die Parameteränderung	63
16.5 Zusammenfassung	67
17 Numerisch verbesserte rekursive Parameterschätzmethoden	69
17.1 Wurzelfilterung	69
17.2 UD-Faktorisierung	71
17.3 Zusammenfassung	73
18 Vergleich verschiedener Parameterschätzmethoden	74
18.1 Vorbemerkungen	74
18.2 Vergleich der A-priori-Annahmen	75
18.3 Gütevergleich durch Simulation	80
18.4 Vergleich des Rechenaufwandes	92
18.5 Zusammenfassung	95
19 Parameterschätzung im geschlossenen Regelkreis	98
19.1 Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	99
19.1.1 Indirekte Prozeßidentifikation (Fall $a + c + e$)	100
19.1.2 Direkte Prozeßidentifikation (Fall $b + d + e$)	104
19.2 Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal	108
19.3 Methoden zur Identifikation im geschlossenen Regelkreis	110
19.3.1 Indirekte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	110
19.3.2 Direkte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	110
19.3.3 Direkte Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal	111
19.4 Zusammenfassung	111
20 Verschiedene Probleme der Parameterschätzung	112
20.1 Wahl des Eingangsignals	112
20.2 Wahl der Abtastzeit	115
20.3 Ermittlung der Modellordnung	117
20.3.1 Bestimmung der Totzeit	117
20.3.2 Bestimmung der Modellordnung	119
20.4 Parameterschätzung bei integralwirkenden Prozessen	127
20.5 Störsignale am Eingang	129

D Identifikation mit parametrischen Modellen – kontinuierliche Signale	133
21 Parameterbestimmung aus Übergangsfunktionen	135
21.1 Parameterbestimmung mit einfachen Modellen (Kennwertermittlung)	135
21.1.1 Approximation durch Verzögerungsglied erster Ordnung und Totzeit	135
21.1.2 Approximation durch Verzögerungsglied n -ter Ordnung mit gleichen Zeitkonstanten	135
21.1.3 Approximation durch Verzögerungsglied zweiter Ordnung mit ungleichen Zeitkonstanten	137
21.1.4 Approximation durch Verzögerungsglied n -ter Ordnung mit gestaffelten Zeitkonstanten	138
21.1.5 Approximation durch Verzögerungsglieder n -ter Ordnung mit verschiedenen Zeitkonstanten	140
21.2 Parameterbestimmung mit allgemeineren Modellen	141
21.2.1 Methode der mehrfachen Integration	141
21.2.2 Methode der mehrfachen Momente	143
21.3 Zusammenfassung	145
22 Parametereinstellung durch Modellabgleich	146
22.1 Verschiedene Modellanordnungen	146
22.2 Modellabgleich mittels Gradientenmethode	149
22.2.1 Paralleles Modell	150
22.2.2 Serielles Modell	153
22.2.3 Paralleles-serielles Modell	154
22.3 Modellabgleich mit Referenzmodellmethoden und Stabilitätsentwurf	156
22.3.1 Zustandsfehler	157
22.3.2 Verallgemeinerter Fehler	159
22.4 Zusammenfassung	160
23 Parameterschätzmethoden für Differentialgleichungen	162
23.1 Methode der kleinsten Quadrate	162
23.1.1 Grundgleichungen	162
23.1.2 Konvergenz	165
23.1.3 Ermittlung der Ableitungen	166
23.1.4 Ergänzungen	170
23.2 Konsistente Parameterschätzmethoden	170
23.2.1 Methode der Hilfsvariablen	170
23.2.2 Erweitertes Kalman-Filter, Maximum-Likelihood- Methode	171

23.2.3	Korrelation und kleinste Quadrate	171
23.2.4	Umrechnung zeitdiskreter Modelle	173
23.3	Schätzung physikalischer Parameter	174
23.4	Parameterschätzung bei teilweise bekannten Parametern	185
23.5	Zusammenfassung	186
24	Parameterschätzung für Frequenzgänge und periodische Signale	188
24.1	Einfache Approximationsmethoden	188
24.1.1	Gegenseitige Abhängigkeit der Frequenzgang- koordinaten	188
24.1.2	Graphische Methoden	189
24.1.3	Analytische Methoden	190
24.2	Methoden der kleinsten Quadrate für Frequenzgänge	192
24.3	Zusammenfassung	195
<i>E</i>	<i>Identifikation von Mehrgrößensystemen</i>	197
25	Modellstrukturen zur Identifikation von Mehrgrößensystemen	199
25.1	Übertragungsmodelle	199
25.1.1	Übertragungsmatrix-Darstellung	199
25.1.2	Matrizenpolynom-Darstellung	201
25.2	Zustandsmodelle	201
25.2.1	Allgemeines Zustandsmodell	201
25.2.2	Beobachtbarkeitskanonisches Zustandsmodell	203
25.2.3	Steuerbarkeitskanonisches Zustandsmodell	206
25.3	Gewichtsfunktions-Modelle, Markov-Parameter	210
25.4	Zusammenfassung	213
26	Methoden zur Identifikation von Mehrgrößensystemen	214
26.1	Korrelationsmethoden	214
26.1.1	Entfaltung	214
26.1.2	Testsignale	215
26.2	Parameterschätzmethoden	216
26.2.1	Methode der kleinsten Quadrate	218
26.2.2	Korrelationsanalyse und kleinste Quadrate	219
26.3	Zusammenfassung	220
<i>F</i>	<i>Identifikation nichtlinearer Systeme</i>	221
27	Parameterschätzung nichtlinearer Systeme	223
27.1	Dynamische Systeme mit stetig differenzierbaren Nichtlinearitäten	223
27.1.1	Volterrareihe	223

27.1.2	Hammerstein-Modelle	224
27.1.3	Wiener-Modelle	227
27.1.4	Modell nach Lachmann	228
27.1.5	Parameterschätzmethoden	228
27.2	Dynamische Systeme mit nicht stetig differenzierbaren Nichtlinearitäten	230
27.2.1	Systeme mit Reibung	231
27.2.2	Systeme mit Lose (Tote Zone)	236
27.3	Zusammenfassung	238
G	Zur Anwendung der Identifikationsmethoden – Beispiele	240
28	Praktische Aspekte zur Identifikation	241
28.1	Elimination besonderer Störsignale	241
28.2	Verifikation des Ergebnisses	243
28.3	Besondere Geräte für die Identifikation	245
28.4	Identifikation mit Digitalrechnern	246
28.5	Zusammenfassung	248
29	Identifikation von Prozessen der Energie- und Verfahrenstechnik	250
29.1	Dampfbeheizter Wärmeaustauscher 1 – zeitdiskretes, lineares Modell	250
29.2	Dampfbeheizter Wärmeaustauscher 1 – zeitdiskretes, nichtlineares Modell	252
29.3	Dampfbeheizter Wärmeaustauscher 2 – zeitkontinuierliches, lineares Modell	255
29.4	Klimaanlage – zeitdiskretes Mehrgrößenmodell	258
29.5	Folientrocknungsanlage – zeitdiskretes Mehrgrößenmodell in Zustandsdarstellung	259
29.6	Trommeltrockner – zeitdiskretes P-kanonisches Mehrgrößenmodell	263
30	Identifikation von Kraftmaschinen	266
30.1	Gleichstrommotor-Kreiselpumpe – zeitkontinuierliches nichtlineares Modell	266
30.2	Dynamischer Motorprüfstand – zeitkontinuierliches lineares Modell	270
31	Identifikation von Arbeitsmaschinen	277
31.1	Industrieroboter	277
31.2	Werkzeugmaschinen-Vorschub	285
31.3	Werkzeugmaschinen-Antrieb	291
31.4	Werkzeugmaschine – Fräsen und Bohrprozeß	298

32 Identifikation von Aktoren	306
32.1 Hubmagnet	306
32.2 Pneumatischer Antrieb	310
Literaturverzeichnis	314
Sachverzeichnis	333