

Fernando Puente Leon • Uwe Kiencke

Messtechnik

Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker

8., gründlich überarbeitete Auflage

fy Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Messsysteme und Messfehler	3
1.1	Messskalen.	3
1.2	Metrische Größen.	5
1.2.1	Einheitensystem.	5
1.2.2	Anpassung der Definitionen der Einheiten.	8
1.3	Messsysteme.	9
1.3.1	Struktur von Messsystemen.	9
1.3.2	Beschreibung von Messsystemen im Zustandsraum	11
1.3.3	Physikalische Messkennlinie.	12
1.3.4	Messsignale als Informationsträger.	13
1.4	Messfehler.	15
1.4.1	Absoluter und relativer Fehler.	15
1.4.2	Fehlerursachen.	16
1.4.3	Spezifizierte Normalbedingungen.	18
2	Kurvenanpassung	25
2.1	Approximation.	26
2.1.1	Approximation mit orthonormalen Funktionensystemen	26
2.1.2	Least-Squares-Schätzer.	30
2.1.3	Regressionsanalyse.	31
2.2	Interpolation.	33
2.2.1	Polynominterpolation.	34
2.2.2	Interpolation durch Lagrange-Polynome.	35
2.2.3	Interpolation durch Newton-Polynome.	37
2.2.4	Spline-Interpolation.	40
2.2.5	Systemtheoretische Deutung der Interpolation.	44
2.3	Kennfeldinterpolation.	45
3	Stationäres Verhalten von Messsystemen	53
3.1	Stationäre Messkennlinie und deren Fehler. ^s	53
3.1.1	Ideale und reale Messkennlinie.	53
3.1.2	Abgleich der Messkennlinie	54
3.1.3	Kennlinienfehler bei realer Kennlinie.	56
3.1.4	Abschätzung des Kennlinienfehlers.	58
3.2	Kennlinienfehler unter Normalbedingungen.	62
3.2.1	Herabsetzen des Messbereichs.	62
3.2.2	Reihenschaltung zweier nichtlinearer Glieder.	65

3.2.3	Wahl des günstigsten Messbereichs.	68
3.2.4	Differenzmethode.	74
3.2.5	Gegenkopplung.	80
3.3	Kennlinienfehler bei Abweichungen von den Normalbedingungen	83
3.3.1	Superponierende Störgrößen.	84
3.3.2	Unterdrückung superponierender Störgrößen mit der Differenzmethode.	85
3.3.3	Deformierende Störgrößen.	87
3.3.4	Deformierende Störgrößen bei Gegenkopplung	89
3.3.5	Superponierende Störgrößen bei Gegenkopplung	93
3.3.6	Kompensation systematischer Störeinflüsse.	93
3.3.7	Abschirmung.	94
3.3.8	Superponierende Störgrößen in Messketten.	94
3.3.9	Zerhackerverstärker.	95
3.4	Rückwirkung des Messsystems.	99
4	Zufällige Messfehler	105
4.1	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie.	105
4.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte.	108
4.1.2	Wahrscheinlichkeitsdichten abgebildeter Größen	111
4.1.3	Erwartungswerte 1. Ordnung.	112
4.1.4	Erwartungswerte 2. Ordnung	114
4.1.5	Korrelationskoeffizient	116
4.1.6	Charakteristische Funktion	119
4.2	Stichproben.	120
4.2.1	Häufigkeitsverteilung und Histogramm.	120
4.2.2	Stichprobenmittelwert	122
4.2.3	Stichprobenvarianz	124
4.2.4	Gesetz der großen Zahlen.	127
4.2.5	Mittelung zur Störungsunterdrückung.	129
4.3	Normalverteilte Zufallsvariable.	131
4.3.1	Ndrmalverteilung.	131
4.3.2	Zentraler Grenzwertsatz	133
4.3.3	χ^2 -Verteilung.	134
4.3.4	Student'sche t-Verteilung.	139
4.4	Statistische Testverfahren.	140
4.4.1	Konfidenzintervall und statistische Sicherheit	140
4.4.2	Hypothesen und statistische Tests.	146
4.4.3	Signifikanztest für den Stichprobenmittelwert	147
4.4.4	χ^2 -Anpassungstest	149

Inhaltsverzeichnis

4.5	Qualitätssicherung	153
4.5.1	Beurteilung von Fertigungsprozessen	153
4.5.2	Bestimmung der Ausfallrate	155
4.5.3	Statistische Prozessüberwachung	159
4.6	Fehlerfortpflanzung	164
5	Dynamisches Verhalten von Messsystemen	171
5.1	Beschreibung von Messsystemen	171
5.1.1	Systemeigenschaften	171
5.1.2	Lineare, zeitinvariante Systeme (LTI-Systeme)	172
5.1.3	Stabilität	174
5.2	Empirische Analyse von Messsystemen	175
5.2.1	Kennwerte der Sprungantwort	176
5.2.2	Nichtlineares dynamisches Verhalten	177
5.2.3	Bestimmung des Frequenzganges	178
5.3	Verbesserung des dynamischen Systemverhaltens	180
5.4	Parameteroptimierung	183
5.4.1	Kriterium „verschwindende Momente der Impulsantwort“	186
5.4.2	Kriterium „konstanter Amplitudengang für kleine Frequenzen“	189
5.4.3	Kriterium „konstanter Realteil des Frequenzganges“	194
5.4.4	ITAE-Kriterium	200
5.4.5	Kriterium „quadratisches Fehlerintegral“	206
5.5	Strukturänderung zur Optimierung des Zeitverhaltens	212
5.5.1	Kompensation des Zeitverhaltens	212
5.5.2	Zeitverhalten bei Gegenkopplung	217
6	Messung stochastischer Signale	229
6.1	Stochastische Prozesse	229
6.1.1	Wahrscheinlichkeitsverteilung und Wahrscheinlichkeitsdichte	231
6.1.2	Schar- und Zeitmittelwerte, Momente erster Ordnung	233
6.1.3	Momente zweiter Ordnung	235
6.1.4	Stationäre Prozesse	237
6.1.5	Ergodische Prozesse	238
6.2	Korrelationsfunktionen	242
6.2.1	Signalklassen	242
6.2.2	Korrelation für Leistungssignale	245
6.2.3	Korrelation für Energiesignale	247
6.2.4	Eigenschaften der Korrelationsfunktionen	249

6.3	Korrelationsmesstechnik	251
6.3.1	Messung von Korrelationsfunktionen	251
6.3.2	Ähnlichkeit von Signalen, Laufzeitmessung	252
6.3.3	Closed-loop-Korrelation	257
6.3.4	Polaritätskorrelation	260
6.3.5	Ähnlichkeit von Spektren, Dopplerfrequenzmessung	261
6.3.6	Selbstähnlichkeit	263
6.4	Leistungsdichtespektrum	265
6.4.1	Rauschen	267
6.4.2	Überlagerung zufälliger Störsignale	272
6.4.3	Übertragung stochastischer Signale durch LTI-Systeme	273
6.4.4	Systemidentifikation	276
6.4.5	Wiener-Filter	282
7	Erfassung analoger Signale	295
7.1	Abtastung	296
7.1.1	Bandüberlappungsfehler (<i>Aliasing</i>)	298
7.1.2	Anti-Aliasing-Filter	299
7.1.3	Mittelwertbildung bei endlicher Abtastdauer	302
7.1.4	Zeitliche Abtastfehler	305
7.2	Quantisierung	310
7.2.1	Wahrscheinlichkeitsdichten von Signalamplituden	312
7.2.2	Amplitudendichte einer Fourier-Reihe	314
7.2.3	Quantisierungstheorem	317
7.2.4	Wahrscheinlichkeitsdichte des Quantisierungsfehlers	321
7.2.5	Optimale Quantisierung	324
7.2.6	Minimierung des relativen Quantisierungsfehlers	325
7.2.7	Dithering	328
7.3	Analog-Digital-Umsetzer	333
7.3.1	A/D-Nachlaufumsetzer	333
7.3.2	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Approximation	334
7.3.3	Integrierende A/D-Umsetzer	336
7.3.4	Delta-Sigma-Umsetzer	338
7.3.5	Ratiometrische Messung	347
7.4	Digital-Analog-Umsetzer	347
7.4.1	Parallele D/A-Umsetzer	348
7.4.2	Serielle D/A-Umsetzer	350
8	Erfassung frequenzanaloger Signale	355
8.1	Allgemeiner Frequenzbegriff	356

8.2	Digitale Drehzahlmessung.	362
8.2.1	Periodendauermessung.	363
8.2.2	Frequenzmessung.	365
8.2.3	Maximaler Quantisierungsfehler für einen Zählvorgang	366
8.2.4	Mittelwertbildung bei der Drehzahlmessung.	368
8.2.5	Abtastung bei der Drehzahlmessung.	370
8.2.6	Quantisierung bei fortlaufenden Periodendauermessungen.	371
8.2.7	Leistungsdichte des Quantisierungsfehlers.	375
8.2.8	Kompensation mechanischer Fehler des Sensorrades .	378
8.3	Kontinuierliche Frequenzmessung.	382
8.3.1	Phasenregelkreis.	384
8.3.2	Frequenzregelkreis.	388
8.4	Positions- und Richtungserkennung.	390
8.4.1	Drehrichtungserkennung.	390
8.4.2	Positionsbestimmung.	392
A	Symbole und Tabellen	397
A.1	Symbole.	397
A.2	Tabellen.	400
	Literaturverzeichnis	401
	Index	405