

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Struktur und Einsatz von Optimierungsmethoden	2
1.2	Einsatz der Optimierung in der Steuerungs- und Regelungstechnik	6
	Literatur	7
 Teil I Statische Optimierung		
2	Allgemeine Problemstellung der statischen Optimierung	11
2.1	Übungsaufgaben	18
	Literatur	18
3	Minimierung einer Funktion einer Variablen	21
3.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	21
3.2	Numerische Verfahren	24
3.2.1	Eingrenzungsphase	25
3.2.2	Interpolations-Verfahren	26
3.2.3	Goldener-Schnitt-Verfahren	30
3.3	Übungsaufgaben	34
4	Minimierung einer Funktion mehrerer Variablen ohne Nebenbedingungen	37
4.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	37
4.2	Numerische Verfahren	40
4.2.1	Algorithmische Struktur	41
4.2.2	Liniensuche	43
4.2.3	Gradientenverfahren	45
4.2.4	Newton-Verfahren	46
4.2.5	Konjugierte-Gradienten-Verfahren	51
4.2.6	Trust-Region-Verfahren	52
4.2.7	Skalierung	54

4.2.8	Ableitungsfreie Verfahren	56
4.2.9	Stochastische Verfahren	60
4.3	Beispiel: Optimale Festlegung von Reglerparametern	63
4.4	Übungsaufgaben	67
	Literatur	71
5	Minimierung einer Funktion mehrerer Variablen unter Nebenbedingungen	73
5.1	Minimierung unter Gleichungsnebenbedingungen	73
5.1.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	74
5.1.2	Reduzierter Gradient	80
5.1.3	Beispiel: Optimale statische Prozesssteuerung	83
5.2	Minimierung unter Ungleichungsnebenbedingungen	84
5.2.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	86
5.2.2	Sattelpunkt-Bedingung und Dualität	94
5.2.3	Beispiel: Optimale Festlegung von Reglerparametern unter Beschränkungen	96
5.3	Konvexe Probleme	102
5.4	Numerische Verfahren	103
5.4.1	Penalty-Verfahren	103
5.4.2	Verfahren der Multiplikatoren-Penalty-Funktion	107
5.4.3	QP-Verfahren	111
5.4.4	SQP-Verfahren	113
5.4.5	Innere-Punkte-Verfahren	117
5.5	Übungsaufgaben	120
	Literatur	130
6	Methode der kleinsten Quadrate	133
6.1	Lineare kleinste Quadrate	133
6.1.1	Kleinste Quadrate unter Gleichungsnebenbedingungen	136
6.1.2	Gewichtete kleinste Quadrate	137
6.1.3	Rekursive kleinste Quadrate	138
6.1.4	Adaptive kleinste Quadrate	141
6.2	Probleme der Parameterschätzung	144
6.2.1	Parameterschätzung statischer Systeme	144
6.2.2	Parameterschätzung linearer dynamischer Systeme	146
6.3	Nichtlineare kleinste Quadrate	147
6.4	Übungsaufgaben	148
	Literatur	151

7	Lineare Programmierung	153
7.1	Simplex-Methode	155
7.2	Initialisierungsphase	160
7.3	Beispiele	161
7.3.1	Netzplantechnik	162
7.3.2	Transportproblem	163
7.3.3	Maximalstromproblem	166
7.4	Übungsaufgaben	167
	Literatur	170
8	Weitere Problemstellungen	173
8.1	Minimierung von Vektorfunktionen	173
8.2	Kombinatorische Optimierung	177
8.3	Spieltheorie	180
8.4	Übungsaufgaben	181
	Literatur	182

Teil II Dynamische Optimierung

9	Variationsrechnung zur Minimierung von Funktionalen	185
9.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	186
9.1.1	Feste Endzeit	187
9.1.2	Freie Endzeit	191
9.1.3	Allgemeine Endbedingung	192
9.2	Legendresche Bedingung	195
9.3	Starke lokale Minima	195
9.4	Weitere Nebenbedingungen	199
9.4.1	Gleichungsnebenbedingungen	199
9.4.2	Ungleichungsnebenbedingungen	203
9.5	Übungsaufgaben	204
	Literatur	206
10	Optimale Steuerung dynamischer Systeme	207
10.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	208
10.2	Behandlung der Randbedingungen	211
10.2.1	Feste Endzeit	211
10.2.2	Freie Endzeit	213
10.3	Optimale Steuerung und optimale Regelung	214
10.4	Beispiele	216

10.5	Weitere Nebenbedingungen	223
10.5.1	Integrationsnebenbedingungen	223
10.5.2	Gleichungsnebenbedingungen an internen Randpunkten	225
10.5.3	Diskontinuierliche Zustandsgleichungen	228
10.6	Hybride dynamische Systeme	231
10.7	Übungsaufgaben	233
	Literatur	239
11	Minimum-Prinzip	241
11.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	242
11.2	Bedingungen an die Hamilton-Funktion	253
11.3	Weitere Nebenbedingungen	254
11.3.1	Gleichungsnebenbedingungen	254
11.3.2	Ungleichungsnebenbedingungen der Zustandsgrößen	257
11.4	Singuläre optimale Steuerung	261
11.5	Beispiele	266
11.5.1	Zeitoptimale Steuerung	266
11.5.2	Verbrauchsoptimale Steuerung	275
11.5.3	Periodische optimale Steuerung	280
11.6	Übungsaufgaben	282
	Literatur	293
12	Lineare-Quadratische (LQ-)Optimierung dynamischer Systeme	295
12.1	Zeitvarianter Fall	296
12.2	Zeitinvarianter Fall	302
12.3	Rechnergestützter Entwurf	307
12.4	Robustheit zeitinvarianter LQ-Regler	309
12.5	LQ-Regler mit vorgeschriebener minimaler Stabilitätsreserve	310
12.6	Regelung der Ausgangsgrößen	313
12.7	LQ-Regelung mit Störgrößenreduktion	317
12.7.1	Bekannte Störgrößen	317
12.7.2	Messbare Störgrößen	319
12.7.3	Bekanntes Störgrößenmodell	322
12.8	Optimale Folgeregung	323
12.8.1	Zeitvarianter Fall	323
12.8.2	Zeitinvarianter Fall	326
12.9	LQ-Regelung mit Integralrückführung	328
12.9.1	Stationäre Genauigkeit von LQ-Reglern	328
12.9.2	LQI-Regler	328
12.9.3	LQI-Regelung von Mehrgrößensystemen	331

12.10 Optimale Regelung linearisierter Mehrgrößensysteme 336

12.11 Übungsaufgaben 338

Literatur 342

13 Optimale Steuerung zeitdiskreter dynamischer Systeme 343

13.1 Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum 344

13.2 Zeitdiskrete LQ-Optimierung 348

13.2.1 Zeitvarianter Fall 348

13.2.2 Zeitinvarianter Fall 350

13.3 Übungsaufgaben 353

Literatur 355

14 Dynamische Programmierung 357

14.1 Bellmansches Optimalitätsprinzip 357

14.2 Kombinatorische Probleme 359

14.3 Zeitdiskrete Probleme 362

14.4 Diskrete dynamische Programmierung 367

14.5 Zeitkontinuierliche Probleme 374

14.6 Übungsaufgaben 380

Literatur 386

15 Numerische Verfahren für dynamische Optimierungsprobleme 387

15.1 Zeitdiskrete Probleme 388

15.2 Anfangswertprobleme 391

15.3 Indirekte Verfahren 393

15.3.1 Indirekte Schießverfahren 395

15.3.2 Indirekte Gradienten-Verfahren 398

15.3.3 Quasilinearisierung 407

15.4 Direkte Verfahren 411

15.4.1 Parameteroptimierung 412

15.4.2 Direkte Einfachschießverfahren 417

15.4.3 Direkte Kollokationsverfahren 419

15.4.4 Direkte Mehrfachschießverfahren 423

15.5 Übungsaufgaben 425

Literatur 427

Teil III Stochastische optimale Regler und Filter

16 Stochastische dynamische Programmierung 433

16.1 Zeitdiskrete stochastische dynamische Programmierung 440

16.2 Diskrete stochastische dynamische Programmierung 443

16.3 Zeitinvarianter Fall 446

16.4	Approximate dynamic Programming	450
16.5	Stochastische LQ-Optimierung	456
16.6	Stochastische Probleme mit unvollständiger Information	459
16.7	Übungsaufgaben	463
	Literatur	465
17	Optimale Zustandsschätzung dynamischer Systeme	467
17.1	Zustandsschätzung zeitkontinuierlicher linearer Systeme	467
17.1.1	Kalman-Bucy-Filter	469
17.1.2	Zeitinvarianter Fall	473
17.1.3	Korrelierte Störungen	476
17.2	Zustandsschätzung zeitdiskreter linearer Systeme	477
17.2.1	Kalman-Filter	478
17.2.2	Zeitinvarianter Fall	483
17.2.3	Korrelierte Störungen	484
17.3	Zustandsschätzung statischer Systeme	484
17.3.1	Konstanter Zustand	485
17.3.2	Adaptive Schätzung	486
17.4	Zustandsschätzung nichtlinearer Systeme	487
17.4.1	Erweitertes Kalman-Filter	488
17.4.2	Zustands- und Parameterschätzung	489
17.4.3	Unscented Kalman-Filter	491
17.5	Übungsaufgaben	495
	Literatur	498
18	Lineare quadratische Gaußsche (LQG-)Optimierung	499
18.1	Zeitkontinuierliche Probleme	499
18.2	Zeitdiskrete Probleme	506
18.3	Übungsaufgaben	511
	Literatur	511
19	Mathematische Grundlagen	513
19.1	Vektoren und Matrizen	513
19.1.1	Notation	513
19.1.2	Definitionen	514
19.1.3	Differentiationsregeln	515
19.1.4	Quadratische Formen	516
19.1.5	Transponieren und Invertieren von Matrizen	518
19.1.6	Übungsaufgaben	518
19.2	Mathematische Systemdarstellung	519
19.2.1	Dynamische Systeme	519
19.2.2	Statische Systeme	524

19.3	Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie	524
19.3.1	Wahrscheinlichkeit	524
19.3.2	Zufallsvariablen	525
19.3.3	Bedingte Wahrscheinlichkeit	528
19.3.4	Stochastische Prozesse	529
Sachverzeichnis		531