

Hans Dresig · Franz Holzweißig

Maschinendynamik

8., neu bearbeitete Auflage

Unter Mitarbeit von L. Rockhausen

Mit 235 Abbildungen und 38 Tabellen

Inhaltsverzeichnis

0	Aufgaben und Gliederung der Maschinendynamik	1
1	Modellbildung und Kennwertermittlung	5
1.1	Einteilung der Berechnungsmodelle	5
1.1.1	Allgemeine Grundsätze	5
1.1.2	Beispiele	10
1.2	Bestimmung von Massenkennwerten	14
1.2.1	Übersicht	14
1.2.2	Masse und Schwerpunktlage	15
1.2.3	Trägheitsmoment um eine Achse	17
1.2.4	Trägheitstensor	21
1.3	Federkennwerte	25
1.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	25
1.3.2	Maschinenelemente, Baugruppen	29
1.3.3	Gummifedern	35
1.3.4	Aufgaben A1.1 bis A1.3	37
1.3.5	Lösungen L1.1 bis L1.3	39
1.4	Dämpfungskennwerte	41
1.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	41
1.4.2	Bestimmungsmethoden für Dämpfungskennwerte	47
1.4.3	Erfahrungswerte zur Dämpfung	50
1.5	Erregerkennwerte	54
1.5.1	Periodische Erregung	54
1.5.2	Nichtperiodische Erregung	57
1.5.3	Aufgaben A1.4 bis A1.6	61
1.5.4	Lösungen L1.4 bis L1.6	62
2	Dynamik der starren Maschine	65
2.1	Einleitung	65
2.2	Zur Kinematik eines starren Körpers	66
2.2.1	Koordinatentransformationen	66
2.2.2	Bewegungsgrößen	71
2.2.3	Kinematik des kardanisch gelagerten Kreisels	73
2.2.4	Aufgaben A2.1 und A2.2	74
2.2.5	Lösungen L2.1 und L2.2	75
2.3	Zur Kinetik des starren Körpers	79
2.3.1	Kinetische Energie und Trägheitstensor	79
2.3.2	Kräftesatz und Momentensatz	84

2.3.3	Kollergang	87
2.3.4	Aufgaben A2.3 und A2.4	92
2.3.5	Lösungen L2.3 und L2.4	93
2.4	Zur Kinetik der Mehrkörpersysteme	98
2.4.1	Mechanismen mit mehreren Antrieben	98
2.4.1.1	Zu räumlichen Starrkörper-Mechanismen	98
2.4.1.2	Bewegungsgleichungen eines Planetengetriebes	104
2.4.1.3	Kardanisch gelagerter Rotor	107
2.4.2	Ebene Mechanismen	110
2.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge	110
2.4.2.2	Hubwerksgetriebe	114
2.4.2.3	Viergelenkgetriebe	115
2.4.2.4	Großpresse	118
2.4.3	Bewegungszustände der starren Maschine	119
2.4.4	Lösung der Bewegungsgleichungen	121
2.4.5	Beispiel: Pressenantrieb	126
2.4.6	Aufgaben A2.5 bis A2.8	130
2.4.7	Lösungen L2.5 bis L2.8	133
2.5	Gelenkkräfte und Fundamentbelastung	139
2.5.1	Allgemeine Zusammenhänge	139
2.5.2	Berechnung der Gelenkkräfte	140
2.5.3	Berechnung der auf das Gestell wirkenden Kraftgrößen	143
2.5.4	Gelenkkräfte im Koppelgetriebe einer Verarbeitungsmaschine	146
2.5.5	Aufgaben A2.9 und A2.10	148
2.5.6	Lösungen L2.9 und L2.10	149
2.6	Methoden des Massenausgleichs	151
2.6.1	Aufgabenstellung	151
2.6.2	Auswuchten starrer Rotoren	151
2.6.3	Massenausgleich von ebenen Koppelgetrieben	158
2.6.3.1	Vollständiger und harmonischer Ausgleich	158
2.6.3.2	Massenausgleich beim Schubkurbelgetriebe	162
2.6.3.3	Harmonischer Ausgleich bei Mehrzylindermaschinen	163
2.6.3.4	Optimaler Massenausgleich	165
2.6.4	Aufgaben A2.11 bis A2.14	166
2.6.5	Lösungen L2.11 bis L2.14	168
3	Fundamentierung und Schwingungsisolierung	175
3.1	Vorbemerkungen	175
3.2	Fundamentbelastung bei periodischer Erregung	179
3.2.1	Minimalmodelle mit einem Freiheitsgrad	179
3.2.1.1	Modellbeschreibung	179
3.2.1.2	Harmonische Erregung	182
3.2.1.3	Periodische Erregung/Fourierreihe	186
3.2.2	Blockfundamente	189
3.2.2.1	Eigenfrequenzen und Eigenformen	189
3.2.2.2	Modellzerlegung bei Symmetrie	191
3.2.2.3	Ausführungsformen der Blockfundamente	194

3.2.3	Fundament mit zwei Freiheitsgraden – Schwingungstilgung . . .	197
3.2.4	Beispiel: Schwingungen eines Motor-Generator-Aggregates . . .	201
3.2.5	Aufgaben A3.1 bis A3.3	204
3.2.6	Lösungen der Aufgaben L3.1 bis L3.3	206
3.3	Fundamente unter Stoßbelastung	208
3.3.1	Zur Modellierung von Schmiedehämmern	208
3.3.2	Berechnungsmodell mit zwei Freiheitsgraden	210
3.3.3	Periodische Erregung – Kumulationsfaktor	213
3.3.4	Aufgaben A3.4 bis A3.6	217
3.3.5	Lösungen L3.4 bis L3.6	218
4	Torsionsschwinger und Schwingerketten	223
4.1	Einleitung	223
4.2	Freie Schwingungen der Torsionsschwinger	228
4.2.1	Modelle mit zwei Freiheitsgraden	228
4.2.1.1	Lineare Torsionsschwinger mit zwei Freiheitsgraden . . .	228
4.2.1.2	Antriebssystem mit Spiel	230
4.2.2	Torsionsschwingerkette mit mehreren Freiheitsgraden	234
4.2.3	Zur Bewertung von Eigenfrequenzen und Eigenformen	238
4.2.4	Beispiele	241
4.2.4.1	Vierzylindermotor	241
4.2.4.2	Torsionsschwingungen einer Druckmaschine	242
4.2.4.3	Fahrzeug-Antriebsstrang	245
4.2.5	Aufgaben A4.1 bis A4.3	248
4.2.6	Lösungen L4.1 bis L4.3	250
4.3	Erzwungene Schwingungen diskreter Torsionsschwinger	257
4.3.1	Periodische Erregung	257
4.3.2	Beispiele	260
4.3.2.1	Motorradmotor	260
4.3.2.2	Fahrzeugantrieb mit Zweimassenschwungrad	263
4.3.2.3	Schrittgetriebe mit HS-Kurvenprofil	266
4.3.3	Transiente Erregung	270
4.3.3.1	Mehrere Momentensprünge	270
4.3.3.2	Anlauffunktionen	273
4.3.4	Aufgaben A4.4 bis A4.6	275
4.3.5	Lösungen L4.4 bis L4.6	277
4.4	Tilger und Dämpfer in Antriebssystemen	280
4.4.1	Einleitung	280
4.4.2	Auslegung eines ungedämpften Tilgers	281
4.4.3	Auslegung eines federgefestelten Dämpfers	283
4.4.4	Auslegung eines federlosen Dämpfers	287
4.4.5	Beispiele	288
4.4.5.1	Besonderheiten des Viskositätsdreh-schwingungs-dämpfers	288
4.4.5.2	Zum Tilgerpendel	289

4.5	Parametererregte Schwingungen durch ungleichmäßig übersetzende Getriebe	292
4.5.1	Problemstellung/Bewegungsgleichung	292
4.5.2	Zur Lösung der Bewegungsgleichung, Stabilitätsverhalten	294
4.5.3	Beispiele	296
4.5.3.1	Transfer-Manipulator	296
4.5.3.2	Veränderliche Zahnsteifigkeit als Schwingungserregung	300
4.5.4	Aufgaben A4.7 und A4.8	303
4.5.5	Lösungen L4.7 und L4.8	304
5	Biegeschwinger	307
5.1	Zur Entwicklung der Problemstellungen	307
5.2	Grundlegende Zusammenhänge	308
5.2.1	Selbstzentrierung beim symmetrischen Rotor	308
5.2.2	Durchfahren der Resonanzstelle	311
5.2.3	Rotierende Welle mit Scheibe (Kreiselwirkung)	312
5.2.4	Biegeschwinger mit endlich vielen Freiheitsgraden	321
5.2.5	Beispiele	323
5.2.5.1	Eigenfrequenzen einer Milchzentrifuge	323
5.2.5.2	Aufprallen eines bewegten Balkens	328
5.2.6	Aufgaben A5.1 bis A5.3	329
5.2.7	Lösungen L5.1 bis L5.3	331
5.3	Massebelegter Balken	332
5.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	332
5.3.2	Gerader Balken auf zwei Stützen	339
5.3.3	Abschätzungen von Dunkerley und Neuber	340
5.4	Zur Modellbildung bei Rotoren	341
5.4.1	Allgemeine Bemerkungen	341
5.4.2	Beispiel: Schleifspindel	344
5.5	Aufgaben A5.4 bis A5.6	345
5.6	Lösungen L5.4 bis L5.6	346
6	Lineare Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden	349
6.1	Einleitung	349
6.2	Bewegungsgleichungen	352
6.2.1	Massen-, Feder- und Nachgiebigkeitsmatrix	352
6.2.2	Beispiele	357
6.2.2.1	Gestell/Kraftgrößenmethode	357
6.2.2.2	Balkenelement/Deformationsmethode	359
6.2.2.3	Fahrzeug/Energiemethode	361
6.2.2.4	Tragwerk, bestehend aus Substrukturen	362
6.2.3	Aufgaben A6.1 bis A6.3	365
6.2.4	Lösungen L6.1 bis L6.3	366
6.3	Freie ungedämpfte Schwingungen	369
6.3.1	Eigenfrequenzen, Eigenformen, Eigenkräfte	369
6.3.2	Orthogonalität und Hauptkoordinaten	372
6.3.3	Anfangsbedingungen	374

6.3.4	Beispiele	377
6.3.4.1	Zur Modalanalyse von Maschinen	377
6.3.4.2	Stoß auf ein Gestell	382
6.3.4.3	Eigenschwingungen eines Tragwerkes	387
6.3.5	Aufgaben A6.4 bis A6.6	389
6.3.6	Lösung L6.4 bis L6.6	390
6.4	Struktur- und Parameteränderungen	393
6.4.1	Rayleigh-Quotient	393
6.4.2	Sensitivität von Eigenfrequenzen und Eigenformen	394
6.4.3	Reduktion von Freiheitsgraden	398
6.4.4	Einfluss von Zwangsbedingungen auf Eigenfrequenzen und Eigenformen	400
6.4.5	Beispiele zur Reduktion von Freiheitsgraden	403
6.4.5.1	Einfaches Gestell (von vier zu zwei)	403
6.4.5.2	Textilspindel (zur Sensitivität)	404
6.4.5.3	Tragwerk (Reduktion von zehn auf fünf)	408
6.4.6	Aufgaben A6.7 bis A6.9	411
6.4.7	Lösungen L6.7 bis L6.9	412
6.5	Erzwungene ungedämpfte Schwingungen	418
6.5.1	Allgemeine Lösung	418
6.5.2	Harmonische Erregung (Resonanz, Tilgung)	419
6.5.3	Instationäre Erregung (Rechteckstoß)	425
6.5.4	Beispiele	429
6.5.4.1	Gestell	429
6.5.4.2	Schwingförderer	430
6.5.5	Aufgaben A6.10 bis A6.12	431
6.5.6	Lösungen L6.10 bis L6.12	433
6.6	Gedämpfte Schwingungen	435
6.6.1	Zur Erfassung der Dämpfung	435
6.6.2	Freie gedämpfte Schwingungen	436
6.6.3	Harmonische Erregung	438
6.6.4	Periodische Erregung	444
6.6.5	Beispiele	447
6.6.5.1	Textilspindel	447
6.6.5.2	Riemengetriebe	448
6.6.6	Aufgaben A6.13 bis A6.16	452
6.6.7	Lösungen L6.13 bis L6.16	454
6.7	Beziehungen zur Systemdynamik	459
6.7.1	Einige Grundbegriffe	459
6.7.2	Zum Superpositionsprinzip	461
7	Einfache nichtlineare und selbsterregte Schwinger	463
7.1	Einführung	463
7.2	Nichtlineare Schwinger	465
7.2.1	Ungedämpfte freie nichtlineare Schwinger	465
7.2.2	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung	468
7.2.2.1	Erste Harmonische bei nichtlinearer Federung	468

7.2.2.2	Superharmonische und Subharmonische beim ungedämpften Duffing-Schwinger	470
7.2.2.3	Erste Harmonische bei nichtlinearer Dämpfung	473
7.2.3	Beispiele	476
7.2.3.1	Schwingförderer mit gestuften Federn	476
7.2.3.2	Hochlauf und Bremsen einer Verarbeitungsmaschine mit nichtlinearer Kupplung	479
7.2.3.3	Selbtsynchronisation von Unwuchterregern	482
7.2.4	Aufgaben A7.1 und A7.2	486
7.2.5	Lösungen L7.1 und L7.2	486
7.3	Selbsterregte Schwinger	488
7.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	488
7.3.2	Beispiele	489
7.3.2.1	Stick-Slip-Schwingungen	489
7.3.2.2	Flatterschwingungen einer angeströmten Platte	493
7.3.2.3	Rattern von Werkzeugmaschinen bei der Zerspanung	495
7.3.3	Aufgaben A7.3 und A7.4	498
7.3.4	Lösungen L7.3 und L7.4	499
8	Regeln für dynamisch günstige Konstruktionen	503
	Formelzeichen	509
	Literaturverzeichnis	513
	Sachverzeichnis	515