
Maschinendynamik

von
Prof. Dr.-Ing. Uwe Hollburg

2., verbesserte und erweiterte Auflage

Oldenbourg Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Aufgaben der Maschinendynamik	2
2	Kinematik	5
2.1	Bewegung des materiellen Punktes	5
2.1.1	Begleitendes Dreibein	5
2.1.2	Darstellung der Bewegung in ebenen Polarkoordinaten	9
2.2	Bewegung des starren Körpers im Raum	12
2.2.1	Koordinatentransformationen	12
2.2.2	Kardanwinkel	13
2.2.3	Eulerwinkel	15
2.2.4	Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	21
2.2.5	Relativbewegung	23
2.3	Momentanpol	24
2.4	Kinematik von Koppelgetrieben	27
2.4.1	Aufbau von Koppelgetrieben	28
2.4.2	Laufgrad	29
2.4.3	Graphische Ermittlung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	30
2.4.4	Geschwindigkeiten	30
2.4.5	Beschleunigungen	32
2.4.6	Berechnung des kinematischen Übertragungsverhaltens	36
2.4.7	Übertragungsfunktionen für Koppel- und Schwingendrehwinkel	37
2.4.8	Winkelgeschwindigkeiten	39
3	Verfahren der Dynamik	45
3.1	Dynamische Grundgesetze	45
3.1.1	Schwerpunktsatz	45
3.1.2	Drallsatz	47
3.1.3	Massenträgheitsmomente von zusammengesetzten Körpern	49
3.1.4	Hauptachsentransformation	51
3.1.5	Eulersche Kreiselgleichungen	52
3.2	Prinzip der virtuellen Arbeiten	56
3.2.1	Prinzip der virtuellen Verrückungen	57
3.2.2	D'Alembertsches Prinzip in der Lagrangeschen Fassung	57
3.2.3	Prinzip der virtuellen Kräfte	60
3.2.4	Berechnung statisch unbestimmter Systeme	64

3.2.5	Nachgiebigkeiten	69
3.2.6	Steifigkeiten	70
3.3	Lagrangesche Bewegungsgleichungen	74
4	Grundlagen der Schwingungstechnik	79
4.1	Schwinger mit einem Freiheitsgrad	79
4.2	Modellbildung	79
4.3	Bewegungsdifferentialgleichung	80
4.4	Lösung der Bewegungsgleichung	82
4.5	Eigenschwingungsverhalten	83
4.6	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Anregung	88
4.6.1	Kraftanregung	88
4.6.2	Fußpunktanregung über Feder	92
4.6.3	Fußpunktanregung über Dämpfer	94
4.6.4	Fliehkraftanregung	95
4.6.5	Fußpunktanregung über Feder und Dämpfer	97
4.6.6	Anregung durch Beschleunigungskräfte	99
4.7	Verhalten in der Resonanz	100
4.8	Schwingungsisolation	112
4.8.1	Aktive Schwingungsisolation	113
4.8.2	Passive Schwingungsisolation	117
4.9	Periodische Anregung	118
4.10	Nichtperiodische Anregung	128
4.10.1	Lösung mit dem Faltungintegral	129
4.11	Transiente Anregung	134
4.11.1	Stoßartige Belastungen	135
4.12	Darstellung im Frequenzbereich	139
5	Lineare Schwingungssysteme	145
5.1	Struktur der Bewegungsdifferentialgleichungen	145
5.2	Schwingerkette	147
5.2.1	Bewegungsgleichungen	147
5.3	Verzweigte Systeme	149
5.4	Eigenschwingungsverhalten	154
5.4.1	Ungedämpfte Eigenschwingungen	154
5.4.2	Gedämpfte Eigenschwingungen	160
5.4.3	Symmetrisches Eigenwertproblem	163
5.4.4	Transformation in eine spezielle Eigenwertaufgabe	164

5.4.5	Orthogonalitätsbedingungen	166
5.4.6	Eigenwerte der Zustandsmatrix	167
5.5	Auswahl der Verfahren	168
5.5.1	Jacobi-Verfahren	168
5.5.2	Simultane Vektoriteration	169
5.6	Modale Transformation	171
5.6.1	Konservatives Ersatzsystem	171
5.6.2	Gedämpftes Schwingungssystem	172
5.6.3	Proportionale Dämpfung	176
5.7	Schwingungsantwort bei äußerer Anregung	177
5.7.1	Direkte Lösung bei harmonischer Anregung	177
5.7.2	Direkte Lösung bei beliebiger Anregung	188
5.7.3	Modale Analyse	189
5.8	Schwingungstilgung	194
5.9	Mechanisch-elektrische Analogie	198
5.9.1	Spannungsdifferentialgleichungen des Asynchronmotors	204
5.9.2	Drehmomentenbildung	205
5.9.3	Normierung der Spannungsdifferentialgleichungen	206
6	Unwuchterregte Schwingungen	211
6.1	Statische Unwucht	211
6.2	Dynamische Unwucht	213
6.3	Statische und dynamische Unwucht	215
6.4	Auswuchten starrer Rotoren	222
6.4.1	Kompensation der kinetischen Lagerreaktionen	225
6.4.2	Korrektur der Massenverteilung	227
6.5	Elastisch gelagerter starrer Rotor	233
6.5.1	Bewegungsverhalten scheibenförmiger Rotoren	233
6.5.2	Instationärer Zustand	236
6.5.3	Betrieb im Nennzustand	236
6.5.4	Bewegungsverhalten zylindrischer Rotoren	240
6.5.5	Instationärer Zustand	244
6.5.6	Nennzustand	245
6.6	Elastische Plattform	251
6.6.1	Kinematische Beziehungen	252
6.6.2	Rückstellkräfte und -momente	253
6.6.3	Anregung	254
6.6.4	Schwerpunktsatz im raumfesten Koordinatensystem	255
6.6.5	Drallsatz im körperfesten Hauptachsensystem	255
6.6.6	Zusammenfassende Darstellung der Bewegungsgleichungen	255

7	Biegeschwingungen von Wellen	257
7.1	Der transversal schwingende Balken	257
7.1.1	Eigenschwingungsverhalten des transversal schwingenden Balkens	259
7.2	Ortsdiskretisierung	261
7.2.1	Elementmatrizen	262
7.2.2	Gesamtsystem	266
7.2.3	Element mit Massenexzentrizität und Kreiselwirkung	270
7.3	Dämpfung	273
7.3.1	Ansätze für die äußere und innere Dämpfung	274
7.3.2	Bewegungsgleichung mit Dämpfung	274
7.4	Biegekritische Drehzahlen	275
7.5	Schwingungsantwort beim Betrieb der Welle	279
8	Drehschwingungen von Wellen	283
8.1	Der Drehstab als Kontinuum	283
8.1.1	Eigenkreisfrequenzen und Eigenfunktionen	284
8.2	Diskrete Torsionsschwingungsmodelle	285
8.2.1	Finites Torsionsschwingungsmodell	285
8.2.2	Einzelrehmassenmodell	290
8.2.3	Verzweigter Torsionsstrang	293
8.3	Torsionskritische Drehzahlen	296
8.4	Erzwungene Torsionsschwingungen	298
8.4.1	Harmonische Anregung	298
8.4.2	Beliebige Anregung	299
9	Aufgaben	305
A	Matrizen	331
A.1	Definition	331
A.1.1	Schreibweise	331
A.1.2	Anordnungen von Zeilen und Spalten	331
A.1.3	Diagonalmatrix	332
A.1.4	Bandmatrix	332
A.1.5	Nullmatrix	332
A.1.6	Einheitsmatrix, Kronecker- δ	332
A.1.7	Transponierte Matrix	332
A.1.8	Symmetrische Matrix	332
A.1.9	Determinante einer Matrix	333
A.2	Rechenregeln	333
A.2.1	Gleichheit	333
A.2.2	Summe und Differenz	333

A.2.3	Multiplikation mit einem Skalar	333
A.2.4	Matrizenmultiplikation	333
A.2.5	Quadratische Form	334
A.2.6	Bilinearform	334
A.3	Determinanten	334
A.3.1	Entwicklung mehrreihiger Determinanten	335
A.3.2	Rechenregeln für Determinanten	335
A.4	Inverse Matrix	335
A.4.1	Berechnung der inversen Matrix	336
A.5	Orthogonale Matrix	336
A.6	Komplexe Matrizen	336
A.6.1	Hermitesche Matrix	336
A.7	Beispiele	337
B	Symbole	341
	Literaturverzeichnis	345
	Sachverzeichnis	348