

Meherwan P. Boyce

Gasturbinen Handbuch

Mit 398 Abbildungen

Übersetzung aus dem Englischen
Karl Schmitt

Originaltitel
Gas Turbine Engineering Handbook
Gulf Publishing Company, Houston, Texas



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Ein Überblick über Gasturbinen	3
1.1	Industriegasturbinen in Schwerbauweise (Heavy Duty)	8
1.2	Luftfahrtabgeleitete Gasturbinen	10
1.3	Mittelgroße Gasturbinen	12
1.4	Kleine Gasturbinen	13
1.5	Hauptkomponenten der Gasturbine	14
1.5.1	Kompressoren	14
1.5.2	Regeneratoren	16
1.5.3	Brennkammern	17
1.5.4	Turbinen	22
1.6	Dampfgeneratoren mit Wärmerückgewinnung	24
2	Analyse des theoretischen und realen Zyklus	26
2.1	Allgemeiner Brayton-Zyklus	26
2.1.1	Effekt der Regeneration	28
2.1.2	Zwischenkühlungs- und Wiedererwärmungseffekte	30
2.2	Analyse des wirklichen Zyklus	33
2.2.1	Der einfache Zyklus	33
2.2.2	Einfacher Zyklus mit geteilten Wellen	35
2.2.3	Der regenerative Zyklus	37
2.2.4	Der zwischengekühlte einfache Zyklus	38
2.2.5	Der wiedererwärmte Zyklus	40
2.2.6	Der zwischengekühlte regenerative Wiedererwärmungszyklus	41
2.2.7	Der Dampfeinspritzzyklus	42
2.2.8	Der regenerative Zyklus mit Verdampfung	45
2.2.9	Der Brayton-Rankine-Zyklus	48
2.3	Zusammenfassung	50
3	Leistungscharakteristika der Kompressoren und Turbinen	53
3.1	Thermodynamik der Luftströmung in den Turbomaschinen	53
3.1.1	Ideales Gas	54
3.1.2	Kompressibilitätseffekt	56
3.2	Die Aerothermischen Gleichungen	57
3.2.1	Die Kontinuitätsgleichung	58
3.2.2	Die Impulsgleichung	58
3.2.3	Die Energiegleichung	61
3.3	Wirkungsgrade	62
3.3.1	Adiabater Wirkungsgrad	62
3.3.2	Polytroper Wirkungsgrad	64
3.4	Dimensionsanalyse	65
3.5	Leistungscharakteristika der Kompressoren	70
3.6	Leistungscharakteristika von Turbinen	72
3.7	Leistungsberechnung zur Gasturbine	74

4	Normen zur mechanischen Ausrüstung	81
4.1	API-Norm 616	82
4.2	API-Norm 617	87
4.3	API-Norm 613	90
4.4	API-Norm 614	92
4.5	API-Norm 670	96
4.6	Spezifikation	97
5	Rotordynamik	104
5.1	Mathematische Analyse	104
5.1.1	Ungedämpftes freies System	107
5.1.2	Gedämpftes System	108
5.1.3	Erzwungene Schwingungen	111
5.1.4	Auslegungsüberlegungen	115
5.2	Anwendungen für rotierende Maschinen	116
5.2.1	Steife Aufhängungen	116
5.2.2	Flexible Aufhängungen	118
5.3	Kritische Drehzahlberechnungen für Rotor-Lager-Systeme	120
5.4	Elektromechanische Systeme und Analogien	123
5.4.1	Kräfte an einem Rotor/Lager-System	124
5.4.2	Rotor-Lager-System-Instabilitäten	126
5.4.3	Selbsterregte Instabilitäten	129
5.5	Campbell-Diagramm	135
5.6	Literatur	140
6	Radialkompressoren	145
6.1	Komponenten der Radialkompressoren	147
6.1.1	Einlaßleitschaufeln	152
6.1.2	Lauftrad	154
6.1.3	Einströmteil	159
6.1.4	Zentrifugalabschnitt eines Laufrads	160
6.1.5	Gründe der Strömungsabweichung (Slip) in einem Laufrad	162
6.1.6	Stodola-Verschiebungsfaktor	165
6.1.7	Stanitz-Verschiebungsfaktor	166
6.1.8	Diffusoren	166
6.1.9	Schneckengehäuse (Scroll oder Volute)	169
6.2	Leistung des Radialkompressors	171
6.2.1	Rotorverluste	172
6.2.2	Statorverluste	175
6.3	Kompressorumpen	177
6.3.1	Pumpdetektion und -steuerung	179
6.4	Radiale Prozeßkompressoren	182
6.4.1	Kompressorkonfiguration	185
6.4.2	Laufradfertigung	187
6.5	Literatur	188
7	Axial durchströmte Kompressoren	190
7.1	Nomenklatur für Schaufeln und Gitter	192
7.2	Elementare Tragflügeltheorie	194
7.3	Laminarumströmte Tragflügel	197
7.4	Gitterversuche	198
7.5	Geschwindigkeitsdreiecke	205
7.6	Reaktionsgrad	207
7.7	Radiales Gleichgewicht	212

7.8	Diffusionsfaktor	213
7.9	Die Regel für den Eintrittsstoß	213
7.10	Die Abweichungsregel	215
7.11	Strömungsabriß im Kompressor (stall)	221
	7.11.1 Rotierender Strömungsabriß	221
	7.11.2 Oszillierender Strömungsabriß	224
	7.11.3 Individueller Strömungsabriß an der Schaufel	224
7.12	Leistungscharakteristika eines Axialkompressors	224
7.13	Analyse des Strömungsabrisses in einem Axialkompressor	227
7.14	Literatur	229
8	Radial eingeströmte Turbinen	230
8.1	Beschreibung	232
8.2	Theorie	234
8.3	Überlegungen zur Turbinenauslegung	239
8.4	Verluste in einer radial eingeströmten Turbine	241
8.5	Leistung einer radial eingeströmten Turbine	243
8.6	Literatur	246
9	Axial durchströmte Turbinen	247
9.1	Geometrie der Turbine	247
	9.1.1 Reaktionsgrad	249
	9.1.2 Nützlichkeitsfaktor	250
	9.1.3 Arbeitsfaktor	250
	9.1.4 Geschwindigkeitsdiagramme	251
9.2	Impulsturbine	253
9.3	Die Reaktionsturbine	256
9.4	Kühlungskonzepte für Turbinenschaufeln	258
	9.4.1 Konvektive Kühlung	259
	9.4.2 Aufprallkühlung	260
	9.4.3 Filmkühlung	260
	9.4.4 Transpirationskühlung	260
	9.4.5 Wasserkühlung	260
9.5	Konstruktionen zur Kühlung der Turbinenschaufeln	260
	9.5.1 Konvektive und Prallkühlung / Konstruktion mit eingebauten Streben	261
	9.5.2 Film- und Konvektionskühlungskonstruktion	262
	9.5.3 Konstruktion mit Transpirationskühlung	262
	9.5.4 Konstruktion mit vielen kleinen Löchern	265
	9.5.5 Wassergekühlte Turbinenschaufeln	266
9.6	Aerodynamik der gekühlten Turbine	266
9.7	Turbinenverluste	268
9.8	Literatur	272
10	Brennkammern	275
10.1	Termini zur Verbrennung	277
10.2	Verbrennung	278
10.3	Brennkammerkonstruktionen	280
	10.3.1 Flammenstabilisierung	284
	10.3.2 Verbrennung und Verdünnung	284
	10.3.3 Filmkühlung der heißen Brennkammerwände	285
10.4	Brennstoffverdampfung und -zündung	285
	10.4.1 Überlegungen zur Brennkammerkonstruktion	287
	10.4.2 Luftverschmutzungsprobleme	289

10.5	Typische Brennkammeranordnungen	291
10.6	Literatur	295
11	Werkstoffe	299
11.1	Allgemeines, metallurgisches Verhalten in Gasturbinen	301
11.1.1	Kriechen und Bruch	301
11.1.2	Dehnbarkeit und Bruch	303
11.1.3	Thermische Ermüdung	303
11.1.4	Korrosion	305
11.1.5	Reaktionen nickel-basierter Legierungen	305
11.2	Werkstoffe für Gasturbinenschaufeln	307
11.3	Legierungen für Turbinenräder	308
11.4	Zukunftswerkstoffe	309
11.4.1	Schaufelwerkstoffe	309
11.4.2	Werkstoffe für Turbinenräder	311
11.4.3	Keramische Werkstoffe	312
11.5	Beschichtungen für Gasturbinenwerkstoffe	312
11.5.1	Zukunftsbeschichtungen	316
11.5.2	Neuere Fortschritte in Beschichtungstechnologien	316
12	Brennstoffe	318
12.1	Brennstoffspezifikation	320
12.2	Brennstoffeigenschaften	325
12.3	Brennstoffbehandlung	328
12.4	Schwere Brennstoffe	334
12.5	Reinigung von Turbinenkomponenten	336
12.6	Brennstoffwirtschaftlichkeit	337
12.7	Betriebserfahrung	339
12.8	Literatur	340
13	Lager und Dichtungen	343
13.1	Lager	343
13.2	Prinzipien zur Lagerauslegung	345
13.3	Die Kippsegment-Wellenzapfenlager	350
13.4	Lagermaterialien	353
13.5	Lager- und Welleninstabilitäten	354
13.6	Axiallager	355
13.7	Faktoren, die die Axiallagerausrichtung berühren	358
13.8	Leistungsverlust des Axiallagers	359
13.9	Dichtungen	360
13.10	Berührungsfreie Dichtungen	361
13.10.1	Labyrinthdichtungen	361
13.10.2	Ringdichtungen	365
13.11	Mechanische Dichtungen	368
13.12	Auswahl der mechanischen Dichtungen und Anwendung	373
13.12.1	Produkt	373
13.12.2	Zusätzliche Produktüberlegungen	375
13.12.3	Dichtungsumgebung	375
13.12.4	Überlegung zum Dichtungsaufbau	376
13.12.5	Ausrüstung	376
13.12.6	Sekundärpackung	376
13.12.7	Dichtungsflächenkombinationen	376
13.12.8	Dichtungsstutzenplatte	377
13.12.9	Hauptkörper der Dichtung	377

13.13	Dichtungssysteme	377
13.14	Zugehöriges Ölsystem	379
13.15	Literatur	381
14	Getriebe	382
14.1	Getriebetypen	383
14.2	Faktoren, die die Verzahnungskonstruktionen berühren	385
14.2.1	Druckwinkel	386
14.2.2	Helix-Winkel	387
14.2.3	Zahnhärte	389
14.2.4	Kerbentstehung	389
14.2.5	Zahngenaugigkeit	390
14.2.6	Lagertypen	390
14.2.7	Servicefaktor	391
14.2.8	Getriebegehäuse	392
14.2.9	Schmierung	392
14.3	Herstellungsverfahren	393
14.3.1	Wälzfräsen	393
14.3.2	Fräsen und Schaben	394
14.3.3	Schaben und Läppen	394
14.3.4	Schleifen	394
14.3.5	Verzahnungs-Rating	395
14.4	Getriebegeräusch	396
14.5	Installation und anfänglicher Betrieb	396
14.6	Literatur	399
15	Schmierung	403
15.1	Basis Ölsystem	403
15.1.1	Schmierölsystem	403
15.1.2	Dichtungsölsystem	409
15.2	Schmiermittelauswahl	411
15.3	Ölsammlung und Prüfung	411
15.4	Ölverschmutzung	412
15.5	Filterauswahl	413
15.6	Säuberung und Spülung	415
15.7	Kupplungsschmierung	416
15.8	Schmierungsmanagement-Programm	417
15.9	Literatur	419
16	Spektrumanalyse	420
16.1	Schwingungsmessungen	425
16.1.1	Wegaufnehmer	426
16.1.2	Geschwindigkeitsaufnehmer	427
16.1.3	Beschleunigungsaufnehmer	427
16.2	Aufzeichnung von Daten	429
16.3	Interpretation von Schwingungsspektren	429
16.4	Subsynchrone Schwingungsanalyse mittels RTA	434
16.5	Synchrone und harmonische Spektren	438
16.6	Literatur	443
17	Auswuchtung	444
17.1	Rotorunwucht	444
17.2	Auswuchtverfahren	450
17.2.1	Orbitalauswuchtung	450

17.2.2	Modalauswuchtung	453
17.2.3	Mehrebenenauswuchtung (Einflußkoeffizientenmethode)	454
17.3	Anwendung von Auswuchttechniken	456
17.4	Nutzeranweisungen für Mehrebenen-Auswuchtung	460
17.5	Literatur	462
18	Kupplungen und Ausrichtung	463
18.1	Zahnkupplungen	465
18.1.1	Ölgefüllte Kupplungen	469
18.1.2	Fettgefüllte Kupplungen	470
18.1.3	Kontinuierlich geschmierte Kupplungen	470
18.1.4	Ausfallmoden von Zahnkupplungen	471
18.2	Metallmembrankupplungen	473
18.3	Metallscheibenkupplungen	476
18.4	Turbomaschinen-Vergrößerungen	478
18.5	Wellenausrichtungen	481
18.5.1	Das Verfahren zur Wellenausrichtung	483
18.6	Literatur	489
19	Regelungssysteme und Instrumentierung	491
19.1	Schwingungsmessungen	491
19.2	Druckmessungen	492
19.3	Temperaturmessungen	493
19.3.1	Thermoelemente	494
19.3.2	Widerstandstemperaturfühler	494
19.4	Regelungssysteme	495
19.4.1	Hochfahrsequenz	496
19.5	Monitoring- und Diagnosesysteme	499
19.5.1	Anforderungen an ein effektives Diagnosesystem	500
19.5.2	Diagnostiksystemkomponenten und Funktionen	501
19.5.3	Dateneingabe	502
19.5.4	Anforderungen an die Instrumentierung	502
19.5.5	Typische Instrumentierung (Minimale Anforderungen für jede Maschine)	503
19.5.6	Empfehlenswerte Instrumentierung (Optional)	503
19.5.7	Kriterien für die Sammlung aerothermischer Daten	504
19.5.8	Druckabfall im Filtersystem	507
19.5.9	Temperatur- und Druckmessungen für Kompressoren und Turbinen	507
19.5.10	Auswahl der Schwingungsinstrumentierung	508
19.5.11	Auswahl von Systemen zur Analyse von Schwingungsdaten	508
19.6	Nebenanlagen-Systemüberwachung	510
19.6.1	Brennstoffsystem	510
19.6.2	Drehmomentmessung	511
19.6.3	Bezugslinie für Maschinen	512
19.6.4	Datentrends	512
19.6.5	Aerothermische Kompressorcharakteristika und Kompressorumpen	515
19.7	Fehlerdiagnose	516
19.8	Kompressoranalyse	516
19.8.1	Brennkammeranalyse	517
19.8.2	Turbinenanalyse	518
19.8.3	Turbinenwirkungsgrad	520
19.9	Diagnosen mechanischer Probleme	522

19.9.1	Datengewinnung	523
19.10	Zusammenfassung	524
20	Versuche und Überprüfungen an Kompressoren	525
20.1	Versuchsplanungen	525
20.2	Klassifikation von Versuchen	527
20.2.1	Klasse 1	527
20.2.2	Klasse 2 und Klasse 3	527
20.3	Rohranordnungen	530
20.3.1	Verrohrung am Einlaß	531
20.3.2	Verrohrung am Austritt	532
20.3.3	Geschlossener Rohrkreislauf	533
20.4	Datenaufnahme	534
20.4.1	Druckmessungen	537
20.4.2	Temperaturmessungen	539
20.4.3	Strömungsmessungen	540
20.4.4	Leistungsmessung	542
20.4.5	Drehzahlmessungen	543
20.5	Versuchsverfahren	543
20.6	Versuchsberechnungen	544
20.7	Literatur	552
21	Instandhaltungstechniken	553
21.1	Personaltraining	553
21.1.1	Basistraining für Maschinisten	553
21.1.2	Praktisches Training	554
21.1.3	Auffrischungstraining	554
21.2	Werkzeuge und Werkstattausrüstung	554
21.3	Austauschteile	555
21.4	Verbesserung der Maschinenzuverlässigkeit	555
21.4.1	Inspektion	555
21.4.2	Endoskop-Inspektion	558
21.5	Reinigung von Turbomaschinen	559
21.5.1	Verschmutzungsindikatoren	560
21.5.2	Reinigungstechniken	560
21.6	Instandhaltung des Heißgasbereichs	562
21.7	Kompressorinstandhaltung	565
21.8	Lagerinstandhaltung	566
21.8.1	Spielprüfungen	567
21.8.2	Axiallagerausfall	568
21.9	Kupplungsinstandhaltung	571
21.10	Rückverjüngung gebrauchter Turbinenschaufeln	572
21.10.1	Betriebsschäden in Turbinenschaufeln	572
21.11	Reparatur und Rehabilitation von Turbomaschinenfundamenten	574
21.11.1	Installationsdefekte	576
21.11.2	Erhöhung von Masse und Festigkeit	577
21.12	Anfahrverfahren für große Maschinen	578
21.13	Typische Probleme, die an Gasturbinen auftreten	579
21.14	Literatur	590
Sachverzeichnis		591