

热力透平机

(特性与结构强度)

〔瑞士〕 W. 特劳佩尔 著

机械工业出版社

本书是根据联邦德国施普林格出版社1982年出版的德文版“Thermische Turbomaschinen”一书第三版的第二卷翻译而成，是比较系统且全面地介绍热力透平机的重要参考书。

原书共有二十一章，第一卷有十章，主要介绍热力透平机工作原理。本书是原书第二卷中的内容，共十一章，前四章阐述了热力透平机特性及其调节，第五章为强度理论基础。第六至八章介绍了热力透平机的典型零件，如叶片、叶盘和壳体等的强度计算，第九章介绍了热力透平机的传热问题，第十、十一章介绍了叶尖流动及转子动力学问题，书中列举了大量参考文献、图表及实例。

本书可供从事透平机设计研究的工程技术人员参考，亦可作为高等院校有关专业的教学参考书。

Thermische Turbomaschinen

Zweiter Band

Geänderte Betriebsbedingungen, Regelung,

Mechanische Probleme, Temperaturprobleme

Walter Traupel

3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1982

热 力 透 平 机

(特性与结构强度)

[瑞士] W. 特劳佩尔 著

郑松宇 郑棋选 译

责任编辑：王 琳

封面设计：刘 代

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京图书刊例表开印可送印张112号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，新华书店经售

开本 850×1168 1/32 · 印张 21 3/8 · 字数 559 千字

1988年5月北京第一版，1988年5月北京第一次印刷

印数 0,001—1,050 · 定价：6.50 元

ISBN 7-111-00596-0/TK·18

译 者 的 话

“thermische Turbomaschinen”一书是瑞士工业大学热力透平机械研究所所长W. 特劳佩尔 (Walter Traupel) 教授所著。此书自出版以来不断更新, 深受读者欢迎, 被公认为论述热力透平机的权威性经典著作。现在我们所译出的是该书1982年所出版的第三版的第二卷。

第一卷论述了热力透平机的工作原理, 而第二卷主要介绍热力透平机特性及强度、振动的理论基础和计算方法。由于从内容上看, 第二卷基本上是独立的, 故单独译出。凡内容涉及第一卷之处均已具体指明。

和前几版相比, 本书有了相当大的改动。作者介绍了近代发展的新理论、新方法, 而且还收集了很多未正式发表过的文章中的内容、实验数据、图表等, 因而内容更加丰富。它是一本在深度和广度两方面综合得较好的专业书籍。鉴于国内尚无一本系统、完整地介绍西欧有关这方面的书籍, 我们特将此书译出, 以供参考。

本书特请张津同志对第一、二、四章, 毛可久同志对第三章, 熊昌炳同志对第五章, 郑光华同志对第六至八章, 朱谷君、袁修干同志对第九章, 张锦同志对第十、十一章作了技术校对。此外, 在译书过程中董静安同志曾给予了很大的帮助, 在此对他们表示感谢。

本书的前四章由郑祺选翻译, 后七章由郑松宇翻译。由于水平所限, 译文难免会有错误之处, 恳请读者批评指正。

第三版前言

出自与第一卷同样的原因,本书第二卷也几乎全部作了改写。

工作条件改变时的透平机特性这一章以前属于第一卷,这次收在第二卷内,并且增加了很多内容(尤其是关于稳定边界及旋转失速的论述)。与此相反,有关调节的几章作了相当大的精简。调节系统及其动力学,如今在很大的程度上属于电气工作者的工作范围,所以本书只就透平机本身的动态特性作出说明就足够了。

在实际工作中,对强度问题的处理发生了特别深刻的变革。通过加入强度计算一般原理这一章,使强度计算可以按令人满意的方法来进行。这一章包括对有限元素法的简单明了的叙述,以及关于断裂力学在内的评价应力状态方法的概貌。在论述中把重点放在透平机有关的典型强度问题上是很理所当然的,然而这一概括性的描述或许也可以应用于透平机以外的领域中,因为就我所知,至今还没有这样的参考书。希望通过本书能对那些不专门从事强度研究工作,因而对这一领域的现代研究方法不太了解的工程师有所帮助。本书中关于叶片、转子和壳体应力分析方面的专门论述大大地缩减了,因为用有限元算法在很多地方代替了老的近似计算方法。附入的材料数据也被取消了,因为可以在其它地方找到较之更为丰富的资料。

最后,关于温度场计算以及叶片振动和转子动力学这几章,有很大的改变。一方面是由于引入了现代数值方法,另一方面吸收了新的实验方面的资料。

本书不仅适应于目前的技术水平,而且它在许多方面包括了至今尚未公开发表的资料。一般来说,由于篇幅所限,难以满足内容广泛和叙述透彻的要求。我希望本书在这方面做得比较理想些。和第一卷一样,数值计算方法只限于叙述基本关系,因为它

本身已成为一个内容丰富的专门领域了。对于计算过程，在书中作了详细的叙述，所以把附上的流程框图取消了，否则会增加本书的篇幅和成本。

我要对所有为本著作的成功作出贡献的人们表示我的谢意。首先是已在第一卷前言中所提到过的那些公司。我还特别感谢为手稿作续写的我的秘书布里吉特·杜弗尔-西班牙尼 (Bri-gitte Dufour-Spāni) 夫人，还有我的助手，J. 比梯科弗尔 (J. Büttikofer), H. R. 登茨勒 (H. R. Denzler), L. 加斯塔弟 (L. Gastaldi), K. 海尼格 (K. Heiniger), E. 里克利 (E. Rikli), P. 鲁夫利 (P. Ruffli) 以及 A. 福格尔 (A. Vogel) 等先生，他们为本书作了校阅，并在其它方面给予了协助。我还要再次感谢施普林格出版社，感谢他们认真细致的工作和相互谅解的合作。

W. 特劳佩尔

1981年8月于苏黎士

符 号 表

以下列出常用的符号。如果字母用作另外的含义，则根据文中的内容确定。在流体力学-热力学部分中的符号和在力学部分中的含义不同，故分别列出。

a) 流体力学-热力学部分

a	单位功
A	功
b	轴向宽度，子午宽度
B	比奥数 al/λ_{eff}
c	绝对速度
c_0, c_1, c_2, c_3	前置导轮进口绝对速度，动轮进口绝对速度，动轮出口绝对速度，后置导轮出口绝对速度
$c_{\theta 0} \dots c_{\theta 3}$	$c_0 \dots c_3$ 的法向分量(子午向)
$c_{r 0} \dots c_{r 3}$	$c_0 \dots c_3$ 的径向分量
$c_{\theta 0} \dots c_{\theta 3}$	$c_0 \dots c_3$ 的周向分量
$c_{\theta 0} \dots c_{\theta 3}$	$c_0 \dots c_3$ 的轴向分量
c_T, c_w	比热
c^*	临界速度
c_{max}	膨胀到真空中的极限速度
Δc_w	$ c_{w1} - c_{w2} $
C	有关的绝对速度 c/w_2 ，下标表示地点
C	克罗河数 c/c_{max}
D_a, D_H, D_S, D_L	平均直径，轮毂直径，最大直径，水力学直径
e	方程1.3(14)和(20)的函数
E	方程1.3(15)和(20)的椭圆系数
f, F	函数符号
FO	傅里叶数
g	函数符号

Gr	葛拉晓夫数
h	单位焓, 下标表示地点
$\Delta h, \Delta h', \Delta h''$	焓差, 导轮中的焓差, 动轮中的焓差
$\Delta h_s, \Delta h'_s, \Delta h''_s$	等焓焓差, 导轮中的焓差, 动轮中的焓差
i	表达式 $\kappa p v / (\kappa - 1)$
k	系数
$k_0 \dots k_2$	流量系数, 下标表示控制面
K	系数
l	长度
$l_0 \dots l_2$	叶片高度(通道高度), 下标表示控制面
m, m_0	流量, 流量的比值
M	马赫数
M^*	用临界速度构成的马赫数(拉瓦尔数)
n	多变指数, 转速
n_s	每秒转数
n^*	转速变量 $(n/n_0) \sqrt{I_{00}/I_0}$
Nu	努赛数 $al/\lambda_{\text{流体}}$
p	压力, 下标表示位置
q	单位质量的热量
q	有关的速度 c/u^* , u^* 是对所有级元为相同的周向速度, 下标表示地点
r, r_m, r_H, r_g	半径, 平均半径, 轮毂半径, 最大半径
r	反动度
R	气体常数
Re	雷诺数
s	叶型弦长
s	单位熵
St	斯坦顿数 $\alpha / (c_p w)$
t	时间
t	叶片节距
T	温度
Tu	紊流度
u	圆周速度, 下标表示位置

X Ⅱ

U	κ/u_2
U	圓周
U	克羅柯數 u/c_{max}
v	比容
V	容積
w, w_1, w_2	相對速度, 動輪進口相對速度, 動輪出口相對速度, 下標同 c
W	相對速度的比值
W	克羅柯數 w/c_{max}
x	變量, 坐標
y	量 $\int \lambda dp$
Y	比值 D_s/D_H
z	軸向坐標
z	葉片數
α	絕對速度的流動角
$\alpha_0 \cdots \alpha_3$	速度 $c_0 \cdots c_3$ 的角度
α	放熱系數
β	相對流動角
β_1, β_2	相對速度 w_1, w_2 的角度
γ_m	調整角
δ	間隙寬度
ε	進汽比
ε	子午流線的傾斜角
ζ	損失系數
$\zeta_D, \zeta_s, \zeta_R, \zeta_T$	擴壓器損失系數, 間隙損失系數, 葉輪摩擦損失系 數, 鼓風損失系數
η	粘度, 效率
η_D	擴壓器效率
η', η''	導輪效率, 動輪效率
η_s, η_e	多變和等熵效率
η_{ts}	熱效率
ϑ	溫度比
Θ	轉子系統的质量慣性矩

κ	等熵指数
λ	功率系数 $\bar{a}_e / u_2^3$
λ_D	扩压度
μ	通流系数 $m v_{01} / \Omega_2 \sqrt{2 \Delta h_0}$
ν	转速系数 $u_2 / \sqrt{2 \Delta h_0}$
π	压力比 < 1
Π	压力比 > 1
ρ	密度
φ	流量系数 $m v_2 / \Omega_2 u_2$
Φ	特征流量值, 方程式符号
χ	表达式 $(\kappa - 1) / \kappa$
ψ, ψ_0, ψ_1	压力系数, 等熵压力系数 $\Delta h_0 / u_2^2$, 多变压力系数 $\int v dp / u_2^2$
Ψ	斯托克斯流函数
Ψ_0	表达式 $1 - \pi^x$
Ψ_1	表达式 $\Pi^x - 1$
ω	角速度
Ω	环面积

下标主要意义如下:

0	相对状态, 设计状态
0, 1, 2, 3	前置导轮进口, 动轮前, 动轮后, 后置导轮后
m, N, S	平均半径, 轮毂半径, 最大半径
p	多变过程
s	等熵过程
α, ω	叶道前和后
E, A	透平机进口和出口

上标 0 表示滞止状态, l 和 n 表示导轮和动轮, 上标 (ts) 表示从进口滞止状态到出口静态。

b) 强度问题, 动力学问题

a	半裂纹长度, 系数
A	面积, 系数, 功
b	宽度, 系数
B	比奥数

X

c, C	系数
d, D	直径, D 也是延伸性
D_a, D_N, D_g	平均圆直径, 轮毂直径, 顶圆直径
e	偏心
E	弹性模量
f	杆、叶片、轴的截面积
f_m, f_N, f_a	在叶片中间、底部、尖部的截面积
G	剪切模量
h	平板厚度, 油隙宽度
H_n, H_{1n}	n 阶激振的形状系数(弯曲和扭转)
J	截面惯性矩
J_p	极惯性矩
k	弹性系数(刚性系数)
k_f	比值 f/s^3
k_d	比值 J/s^4
k_w	比值 W/s^3
$k_{i, j}$	支点系数
K	缺口效应系数, 系数
K_{10}	断裂韧性
l	长度, 叶片长度
m	质量, 指数
M, M_1, M_2	力矩, 弯矩, 扭矩
n	转速, 振动阶次, 指数
P	力, 功率
q	热流密度, 间隙激振系数
Q	横向力, 热量
r	半径, 圆周振动振幅
r_a, r_i	外圆半径, 内圆半径
r_m, r_N, r_g	平均圆, 底圆, 顶圆半径
$r_b, r_{1/4}$	重心半径和轮毂内半径
Δr	支点径向间隙
S, S_i	对弯曲和扭转的激振因子
S_b, S_i	强度和寿命安全系数

S_0	索玛菲尔德数
t	时间, 时间
T	温度, 动能
u	圆周速度
u	振动体局部振幅
v	位移, 振动速度
V	振幅放大系数
W	功
x	坐标
X	力的分量, 盘的半径比
y	坐标, 半径比 r/r_N
y	振幅的局部瞬时值
Y	半径比 r_a/r_N 或 r_a/r_i
Y	局部振幅
z	坐标, 轴向坐标
z	叶轮的叶片数
z_p	叶片组的叶片数
Z	离心力, 激振阶数
α	放热系数, 形状系数
β	线膨胀系数, 形状系数
γ	扭角, 角变形
δ	对数衰减率
$\varepsilon, \varepsilon_t, \varepsilon_r, \varepsilon_a$	应变, 切向应变, 径向应变, 轴向应变
$\varepsilon_e, \varepsilon_s, \varepsilon_p$	蠕变应变, 弹性应变, 塑性应变
$\Delta\varepsilon$	应变范围
η	粘度
θ	比值 J/J_0 (0 为参考点), 方位角
Θ	质量惯性矩
κ_n, κ'_n	n 阶特征值
μ	摩擦系数
ν, ν_n, ν_{nn}	频率, 自振频率, n 阶自振频率
ξ	坐标
ρ	密度

X 理

σ	正应力
σ_m	时间平均应力
σ_A	应力幅值
σ_b	弯曲应力
$\sigma_\theta, \sigma_r, \sigma_z$	周向、径向、轴向应力
$\sigma_B, \sigma_F, \sigma_W$	强度极限, 屈服极限, 疲劳强度极限
σ_e	当量应力
σ_c	离心力产生的应力
τ	剪应力
τ	无因次时间变量
τ_L	相对寿命
φ	相位角, 比值 f/f_0 (0 为参考点)
ψ	相位角, 考虑截面弯曲的系数
Ψ	势能
ω	角速度, 圆频率
ω_s, ω_{sn}	自振圆频率, n 阶自振圆频率
ω_r	转子角速度
Ω	无因次自振频率

目 录

符号表

第一章 工作条件变化时之特性	1
1.1 叶栅特性和级特性	1
1.2 透平级特性	4
1.3 圆锥律	8
1.4 透平叶道的总特性	16
1.5 透平工作状态的验算	21
a) 一维的方法	21
b) 二维的方法	28
1.6 压缩机级特性	31
1.7 多级压缩机特性	38
1.8 喘振过程和喘振边界	43
1.9 旋转失速	47
1.10 多级压缩机通用特性计算	52
1.11 稳定边界的估算	55
参考文献	64
第二章 蒸汽轮机的调节	66
2.1 调节方法	66
2.2 稳定工作状态的计算	78
2.3 效率与功率之间的关系	87
2.4 各种调节方案的能量对比	95
2.5 调节阀的结构和尺寸	105
2.6 汽轮机调节动力学	115
2.7 超转速计算	120
参考文献	127
第三章 压缩机的调节	128
3.1 调节方法	128

3.2 通用特性表示方法	135
3.3 压缩机调节的典型情况计算	140
a) 转速调节	140
b) 节流调节	141
c) 放气调节	142
d) 放气回流调节	142
e) 中间放气和中间放气回流	144
f) 具有中间冷却的压缩机	146
3.4 可调导向叶片的调节	146
3.5 防喘调节	149
参考文献	158
第四章 燃气轮机的调节	159
4.1 调节方法	159
4.2 稳定工作状态的计算	164
a) 一般情况	164
b) 单轴设备	170
c) 双轴设备	173
4.3 用可调透平导轮进行调节	178
4.4 防喘调节	184
4.5 燃气轮机调节动力学	187
参考文献	193
第五章 强度计算基础	194
5.1 引言	194
5.2 应力状态描述, 当量应力	194
5.3 弹性状态	197
5.4 塑性状态	199
5.5 粘塑性状态 (蠕变)	202
5.6 弹性状态下的有限元素法	206
a) 概述	206
b) 平面应力状态下的三角形元素	208
c) 平面应变状态下的三角形元素	214
d) 三角形截面的环元素	216
e) 元素间的关系, 解法	219

5.7 塑性状态的有限元素法	223
5.8 外界条件随时间变化的蠕变	227
5.9 无蠕变时的循环负荷	232
5.10 带有蠕变的循环负荷	241
5.11 缺口效应	246
5.12 断裂力学	251
5.13 判断准则, 安全系数	257
a) 概论	257
b) 静态承载极限	258
c) 无蠕变的循环负荷	261
d) 有蠕变的准循环负荷	263
参考文献	265
第六章 叶片强度	267
6.1 叶片由离心力产生的负荷	267
6.2 叶片的扭转负荷	272
6.3 由气流力产生的弯曲负荷	275
6.4 悬臂式叶片中离心力对由气流力所产生负荷的抵消作用	
6.5 气流力在叶片组上的负荷	290
6.6 叶片的热应力	296
6.7 叶片粘塑性应力状态	300
6.8 叶片的固定方式	302
6.9 叶根的计算	311
6.10 总负荷	317
参考文献	318
第七章 转子强度	319
7.1 旋转圆环	319
7.2 盘上带叶片的轮缘	320
7.3 旋转盘在弹性变形状态下的微分方程	325
7.4 等强度盘	328
7.5 等厚盘	329
7.6 双曲线型线的盘	333
7.7 任意型线的盘	335
7.8 鼓筒	341

7.9 紧配合的应力计算	345
7.10 应力计算的补充	349
7.11 转子应力状态的判据	353
7.12 转子的结构	360
参考文献	370
第八章 静子零件的强度问题	371
8.1 概述	371
8.2 薄壁回转壳体	371
8.3 旋转对称厚壁零件	377
8.4 水平安装边及螺栓	382
8.5 导轮隔板	389
8.6 热气导引筒	391
参考文献	399
第九章 温度和冷却的问题	401
9.1 热传导和热交换的基本原理	401
9.2 换热的经验公式	405
9.3 叶片的换热	412
9.4 热传导方程的精确解	416
a) 稳态温度场	416
b) 非稳态简单解	416
c) 非稳态通解	418
9.5 非稳态温度分布的准稳态计算	421
9.6 在杆、盘和壳体上的一维热传导	428
9.7 在叶片及盘上的一维温度分布	432
9.8 二维温度分布	441
9.9 有限元素法	448
9.10 带冷却的燃气轮机	452
9.11 冷却系统计算	458
9.12 冷却叶片的温度特征量	462
9.13 热膨胀	465
9.14 燃烧室	467
参考文献	473
第十章 叶片和盘的振动	475

10.1	简谐振荡器	475
10.2	在简谐振荡器的基础上研究物体振动的一般情况	479
10.3	耦合振动	483
10.4	振动杆件的微分方程	485
10.5	振动杆单值问题的解	488
10.6	直杆的扭转振动	493
10.7	按能量法确定自振频率	495
10.8	短粗杆件的附加效应	500
10.9	变截面叶片和成组叶片的自振频率	505
10.10	离心力对自振频率的影响	512
10.11	大扭向叶片的振动	518
10.12	用传递矩阵计算盘的振动	526
10.13	叶片和盘的耦合振动	535
10.14	有限元素法计算叶片振动	541
10.15	叶片振动的实验研究	545
10.16	在单个振动叶片上的激振和应力值	551
10.17	叶片组振动时的激振和应力	558
10.18	激振力的大小	561
10.19	自激、随机激振和撞击激振	568
10.20	阻尼	573
10.21	补充资料	577
	参考文献	580
第十一章	转子动力学	583
11.1	概述	583
11.2	拉瓦尔转子、元素理论	584
11.3	各向异性弹性支承的拉瓦尔转子	589
11.4	非轴对称的拉瓦尔转子	592
11.5	机械自激	595
a)	概述	595
b)	内阻尼	595
c)	油膜自激	598
d)	间隙激振	600
e)	人工阻尼	601