

叶轮机械

(计算与设计)

[联邦德国] W·鲍尔 著

续表

公式符号	推荐单位	意义
μ	—	不足功率系数
μ	—	泊松比 (泊松系数)
μ	—	摩擦系数
μ	—	通流系数
ν	m^2/s	运动粘度
π	—	压力比
ρ	m, mm	半径
ρ	kg/m^3	密度
σ	—	速度系数
σ	$\text{N}/\text{m}^2, \text{N}/\text{mm}^2$	应力
τ	$\text{N}/\text{m}^2, \text{N}/\text{mm}^2$	扭转应力
Φ	—	通流系数
φ	—	流量系数
φ	grd	角度
X	—	系数
ψ	—	压力系数
ψ	—	系数
ψ	—	相对轴承间隙
Ω	—	缩减系数

译 序

本书是联邦德国海尔布隆工业大学机械工程学教授、工程师W·鲍尔 (Bohl) 继他的《叶轮机械 (原理与结构)》一书之后撰写的续篇。

这本《叶轮机械 (计算与设计)》(《Strömungsmaschinen (Berechnung und Konstruktion)》) 于1980年在联邦德国出版。该书以读者熟悉叶轮机械的原理和结构作为基础, 着重阐述其流体动力参数以及强度和结构设计问题。书中未作过多的数学和力学推导, 但对问题的本质却讲得透彻、精辟, 这不仅便于阅读, 而且节省了文字; 作者在坚持理论上的完整性和严密性的同时, 密切联系实际, 尽力汲取这一学科的新成就, 这就极大地提高了书的实用价值; 将叶轮机械的设计、运行、安装以至机器基础等问题有机地结合起来, 汇集于一本篇幅有限的科技书中, 是值得称道的; 另外, 书中还提供了大量的设计数据和算例, 这对读者无疑是十分珍贵的。

本书是集体劳动的成果。没有化学工业出版社的通力合作, 没有中国科学院蒋潮教授、河北工学院舒志良同志的精心审校, 没有许多同行的帮助并提出宝贵意见, 它是难以和广大读者见面的, 在此一并表示深切的谢意。我们并热忱地期望读者对译文中的缺点或错误提出批评意见。

译者

1986年9月于河北工学院

前 言

本书是《叶轮机 械（原理与结构）》（《Strömungsmaschinen (Aufbau und Wirkungsweise)》）一书的补充和续集。读者在修完本教材后，不仅可以深入了解各种叶轮机 械的作用原理，还能从事涡轮机 械的参数计算以及零部件的强度验算和结构设计。

本书共分两部分，第一部分为流体力学计算，第二部分为强度计算和结构设计。

本书是结合一台轴流通风机和一台离心泵的主要零部件的特性参数和结构设计实例展开讨论的。为了便于掌握书中提供的最简单而与实际联系密切的材料，尽可能运用流体力学、热力学、材料力学和机械零件中的有关知识，并以读者已熟知叶轮机 械（原理与结构）一书中的内容为前提。在一本篇幅有限的教科书中不可能完全包括叶轮机 械计算和设计这一内容广泛的领域，因此，建议那些对细节感兴趣的读者，查阅本书所引用的大量专门文献。正在学习和已参加工作的工程师，可将有关各章的、内容丰富的文献目录，编入自己的文献汇集之中，因为对于工程师来说，没有比一些具有实际意义的、附有专业文献、公司说明以及目录的文献汇集更重要的了。

对Vogel出版社的协作者提供的、一如既往的密切合作表示谢意。对我的同事、同行以及向我提出建议并给予帮助的大学生也致以谢意。倘若没有工业部门的大力支持，本书绝不可能与实际结合得如此紧密。因此，对这种无私的帮助特致深切谢意。

本书对结合实践培养的大学生，特别是专业大学生，以及对已参加工作的同行的深造和进修，会有所裨益，并必然加强他们对有关工业部门必不可少的接触。

恳请读者对工作和印刷上的错误提出意见。并请提出对再版工作的合理化建议以及修改意见。

威利·鲍尔 (Willi Bohl) 海尔布隆

主要公式符号和单位

公式符号	推荐单位	意义
A	m^2, mm^2	面积、断面面积
a	m, mm	距离、宽度
a	m/s	音速
B	m, mm	宽度
b	m, mm	宽度
C	—	系数
C	N	滚动轴承的动力支承系数
c	m/s	绝对速度
c_a	—	升力系数
c_w	—	阻力系数
D	m, mm	直径
d	m, mm	直径、厚度
E	m	高度
E	$N/m^2, N/mm^2$	弹性模数
e	m, mm	叶片轴向长度、偏心度
F	N	力
F	—	系数
f	—	系数
f	—	加热系数
f	s^{-1}	频率
f	m, mm	叶片拱高
f	m, mm	挠度
G	N	重量、重力
G	$N/m^2, N/mm^2$	剪切弹性模数
g	m/s^2	重力加速度
H	m	水头、扬程
h	J/kg	比焓
h	m, mm	高度
h	m, mm	通道宽度
h	m, mm	间隙宽度
I	m^4, mm^4	平面惯性矩
I_t	m^4, mm^4	扭转阻力
I_p	m^4, mm^4	极惯性矩
K	—	常量、系数
K	N/mm^2	强度系数

续表

公式符号	推荐单位	意 义
	—	系数
h	mm	粗糙度
L	m, mm	长度
L	h	寿命
l	m, mm	长度、型面长度
M	—	马赫数
M	N·m	转矩、弯矩、扭矩、摩擦力矩
m	kg	质量
\dot{m}	kg/s	质量流量
n	$s^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	转速
n	—	序号
n_q	min^{-1}	比转速
P	W, kW, MW	功率、功率需要量
p	Pa, bar	压力
q	$\text{N}/\text{m}^2, \text{N}/\text{mm}^2$	比压
R	m, mm	半径、曲率半径
Re	—	雷诺数
R_i	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	专用气体常数
r	m, mm	半径
r	—	反动度
S	m^2, mm^2	静力矩
S	—	系数
S	—	安全系数
S	—	间隙系数
S	—	通流能力
S_0	—	索玛菲尔德数
s	m, mm	叶片厚度、板厚
s	m, mm	壁厚
s	m, mm	距离
T	K	温度
T	N·m	转矩
t	$^{\circ}\text{C}$	温度
t	m·mm	栅距、距离
u	m/s	圆周速度
\dot{V}	$\text{m}^3/\text{s}, \text{m}^3/\text{h}$	体积流量、排量、泄漏量

续表

公式符号	推荐单位	意义
v	m^3/kg	比容
v	—	削弱系数
v	m/s	滑动速度
w	m/s	相对速度
x	m, mm	长度
x	m, mm	座标
Y	J/kg	比接管功
y	m, mm	座标
y	m, mm	挠度
z	m, mm	标高
z	—	系数、数量、叶片数
α	grd	角度
α	$1/K$	热膨胀系数
α	—	Maxwell影响系数
β	grd	角度
β	—	系数
γ	grd	角度
δ	—	直径系数
δ	—	相对油膜厚度
δ	grd	角度
ϵ	—	进气度、入口速度系数
ϵ	—	切变系数、应变、流量系数
ϵ	grd	角度
ζ	—	损失系数、系数
η	—	效率
η	$Pa \cdot s$	动力粘度
θ	grd	角度、流动偏转
θ	$kg \cdot m^2$	质量惯性矩
θ	—	温升系数
θ	grd	角度
κ	—	绝热指数
κ	—	系数
λ	—	系数
λ	—	管道摩擦系数
λ	—	功率系数

目

主要公式符号和单位

A 部分 叶轮机械零部件的流体动力设计和计算

1. 确定叶轮的主要尺寸	1
1.1 概述	1
1.2 水轮机叶轮	2
1.2.1 切击式水轮机叶轮	2
1.2.2 混流式水轮机叶轮	8
1.2.3 转桨式水轮机叶轮	11
1.2.4 斜流式水轮机叶轮	13
1.2.5 灌注式水轮机叶轮	14
1.3 轴流式汽轮机和燃气轮机的叶轮	18
1.3.1 引言	18
1.3.2 简化的级理论	19
1.3.3 级特性参数	24
1.3.4 级数的估计	25
1.3.5 叶栅通道变化	25
1.3.6 型面形状	27
1.4 向心涡轮机叶轮	29
1.4.1 引言	29
1.4.2 简化的级理论	29
1.4.3 用特性参数确定主要尺寸	31
1.5 叶轮泵的叶轮	33
1.5.1 引言	33
1.5.2 离心泵叶轮	33
1.5.3 轴流泵叶轮	41
1.6 道流式叶轮	52

1.6.1	引言	52
1.6.2	离心通风机叶轮	52
1.6.3	轴流通风机叶轮	60
1.6.4	贯流式通风机叶轮	71
1.7	压缩机叶轮	74
1.7.1	压缩机级理论的简要说明	74
1.7.2	确定离心压缩机级的尺寸	77
1.7.2.1	引言	77
1.7.2.2	用无因次特性参数确定叶轮尺寸	78
1.7.2.3	用计算图和参考值确定叶轮尺寸	79
1.7.2.4	级数选择	82
1.7.3	确定轴流压缩机级的尺寸	85
1.7.3.1	引言	85
1.7.3.2	轴流压缩机的主要参数	85
1.7.3.3	由无因次特性参数确定主要尺寸	87
1.7.3.4	用计算图设计轴流压缩机	88
2.	叶栅	94
2.1	概述	94
2.2	径流式叶栅	95
2.2.1	旋转径流式叶栅(叶轮)	95
2.2.1.1	在旋转径流式叶栅中的流动原则	95
2.2.1.2	收缩系数 k	98
2.2.1.3	不足功率系数	100
2.2.1.4	叶片设计	107
2.2.2	固定的径流式叶栅(导轮)	115
2.2.2.1	引言	115
2.2.2.2	泵的导轮	115
2.2.2.3	回流器叶片	117
2.2.2.4	离心压缩机导轮	119
2.2.2.5	混流式和转桨式水轮机的导轮	122
2.2.2.6	向心涡轮机导轮	124
2.3	轴流式叶栅	125

2.3.1	引言	125
2.3.2	轴流式叶栅的分类和基本概念	126
2.3.3	轴流式叶栅内的流动和作用力	127
2.3.4	轴流式叶栅的基本尺寸方程	136
2.3.5	叶栅设计	140
2.3.6	关于确定导轮和叶轮之间间距的几点提示	150
3.	叶轮机械的其它部件	162
3.1	喷嘴	162
3.1.1	进口喷嘴	162
3.1.2	拉瓦尔喷管	165
3.1.3	切击式水轮机的喷嘴	168
3.2	扩压器	173
3.2.1	引言	173
3.2.2	流动情况	173
3.2.3	环形扩压器	174
3.3	蜗壳	179
3.3.1	估计进口或出口截面	179
3.3.2	确定蜗壳截面	179
3.4	入流室和出流室	187

B 部分 叶轮机械各部件的强度计算和设计

4.	回转部件	190
4.1	简化的基本元件	190
4.1.1	棱柱形杆	190
4.1.1.1	应力	191
4.1.1.2	径向伸长	192
4.1.1.3	弯曲固有频率	192
4.1.1.4	扭转固有频率	193
4.1.2	环(转鼓, 轮缘)	194
4.1.3	等厚度圆盘(宽度一定)	196
4.2	任意型面圆盘(变厚度)	201
4.3	等强度圆盘	206

4.4	径流式叶轮	207
4.4.1	引言	207
4.4.2	Eck的近似计算	208
4.4.3	叶轮分解成轮盘和叶片	209
4.4.4	径流式叶轮叶片的弯曲计算	211
4.4.5	几点设计原则	213
4.5	轴流式叶轮	215
4.5.1	引言	215
4.5.2	离心载荷	216
4.5.3	轴流叶片的弯曲载荷	218
4.5.4	叶片的扭转载荷	220
4.5.5	刚性固定叶片的弯曲固有频率	221
4.6	轴	228
4.6.1	转子形状	228
4.6.2	力和力矩	229
4.6.2.1	引言	229
4.6.2.2	轴向力	231
4.6.2.3	径向力	233
4.6.3	应力和变形	235
4.6.4	弯曲临界转速	236
4.6.4.1	引言	236
4.6.4.2	弯曲临界转速的近似计算	239
4.6.4.3	影响临界转速的其它因素	246
4.6.5	扭转临界转速	251
4.6.6	设计规则和操作说明	252
4.7	转子	253
4.7.1	转子的结构	253
4.7.2	转子的计算	254
5.	壳体	258
5.1	概述	258
5.2	内压圆柱形壳体	258
5.3	圆形平板	262
5.4	球形底	268

5.5	球形壳体	269
5.6	接管	270
5.7	法兰	273
5.7.1	法兰型式	273
5.7.2	管法兰(圆形法兰)	275
5.7.2.1	外力	277
5.7.2.2	螺钉力	284
5.7.2.3	法兰的计算	284
5.7.3	壳体法兰(水平中分面法兰)	285
5.7.4	螺钉	290
5.8	壳体定位	293
6.	密封	296
6.1	接触密封	296
6.1.1	填料函	296
6.1.1.1	引言	296
6.1.1.2	结构组成和工作原理	297
6.1.1.3	填料	298
6.1.1.4	结构提示	300
6.1.1.5	作用在填料表面及其内部的力、压力和力矩	303
6.1.1.6	一些特殊的填料函结构	307
6.1.2	轴向端面密封	310
6.1.2.1	引言	310
6.1.2.2	结构和工作原理	311
6.1.2.3	端面密封上的力和力矩	313
6.1.2.4	端面密封的布置和结构	316
6.1.2.5	泄漏量	317
6.1.2.6	实例	319
6.1.3	径向轴封圈	321
6.1.3.1	结构和工作原理	321
6.1.3.2	密封的选择	322
6.1.3.3	结构设计原则	323
6.2	非接触密封	327
6.2.1	引言和分类	327

6.2.2	无压力非接触密封	328
6.2.3	间隙密封	328
6.2.3.1	轴向间隙	328
6.2.3.2	径向间隙	338
6.2.3.3	浮环密封	339
6.2.4	迷宫式间隙密封	340
6.2.4.1	流量方程(泄漏)	340
6.2.4.2	结构提示	343
7.	轴承	346
7.1	概述	346
7.2	滑动轴承	346
7.2.1	构造形式	346
7.2.2	径向轴承	347
7.2.3	止推轴承	353
7.2.3.1	引言	353
7.2.3.2	平滑止推轴肩式止推轴承的计算	354
7.2.3.3	斜楔面式止推轴承的计算	356
7.2.3.4	倾斜块式止推轴承	361
7.3	滚动轴承	365
7.3.1	引言	365
7.3.2	选择轴承型式	365
7.3.3	选择轴承规格(定尺寸)	367
7.3.4	极限转速	370
7.3.5	公差与配合	371
7.3.6	轴承空隙	372
7.3.7	设计问题	372
7.3.8	密封	373
7.3.9	润滑	373
7.3.10	安装	377
7.3.11	实例	379
8.	联轴节	388
8.1	刚性联轴节	388
8.2	弹性联轴节	393

8.3 齿形联轴节	397
9. 基础	401
9.1 概述	401
9.2 基础设计	401
参考文献	404

A 部 分

叶轮机械零部件的流体动力设计和计算

1. 确定叶轮的主要尺寸

1.1 概 述

目前，尚不能用纯理论的方法来确定叶轮的尺寸，特别是它的直径、宽度、角度、叶片形状和叶片数。即使从叶轮机械叶轮的三维流动状况出发，作大量的物理和数学运算，仍必须利用经验系数以考虑摩擦和不稳定振动的影响。因此，若没有从新机器的验收试验或模型机上的模型实验中取得有关的实验数据，那就不可能作出涡轮机叶轮的可靠的设计计算，即无法根据给定的工作介质的运转参数确定出叶轮的主要尺寸。

为了使大学生能借助详尽而实用的数据，进行各种叶轮机械叶轮的流体动力方面的设计练习和研究，在下面将提供有关的计算方法和数据。对在水轮机、汽轮机和燃气轮机等制造部门工作的设计者来说，应针对所要设计的叶轮，从试验工程师和计算工程师那里得到有关的尺寸。

在泵、通风机和鼓风机的制造部门里，当然，主要是指大量的中小企业，它们不仅技术力量薄弱，而且一般不具备装备优良的实验室，这样设计者就不得不对整套机器进行设计和计算，就是说也要自己来确定叶轮尺寸。

无疑，叶轮泵、通风机以及鼓风机等不仅生产数量大，而且应

用范围也相当广。为了只用少量的计算，就能迅速求得实际上完全可以使用的叶轮尺寸，已经对上述叶轮机械的叶轮积累了许多详尽而实用的设计数据。

但这样确定出的叶轮尺寸，仍需借助第二章有关叶片组精确计算的资料加以核算。

因叶轮前后的流动元件，如导轮或蜗壳的尺寸，主要是取决于叶轮的尺寸，故对叶轮尺寸作严格计算是完全必要的。

正常的叶轮机械设计，总是从确定叶轮尺寸入手，因为它是进行能量转换的重要元件。其它元件只是与叶轮相匹配而已。

1.2 水轮机叶轮

1.2.1 切击式水轮机叶轮

切击式水轮机属于冲击式的水轮机。这种机器的全部有效压头将在喷嘴中（或多喷嘴机器的喷嘴组中）转变成速度。射流经斗式叶轮约回转 170° （图1-3）。由射流回转所产生的冲击力就形成作用在叶轮上的转矩。因为受射流冲击的总是少数轮斗，故其叶轮是部分负荷的。

在设计水轮机时，一般要给出：

体积流量 \dot{V}

水头 H

在确定叶轮和喷嘴数之后，只要借助[1.1]中的图7-4，叶轮的各最主要参数，即：

转速 n

射流圆直径 D_1

射流直径 d_1

} 图1-3

等便能确定。

a. 转速 n ，既可根据水头 H 和体积流量 \dot{V} /喷嘴从图1-1查出（转速值是50Hz时的同步转速），也可以由比转速 n_s 来计算：

$$n_{s/\text{喷嘴}} = n \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}/\text{喷嘴}}}{H^{0.75}} \quad (\text{见}[1.1] \text{中的方程4-17})$$

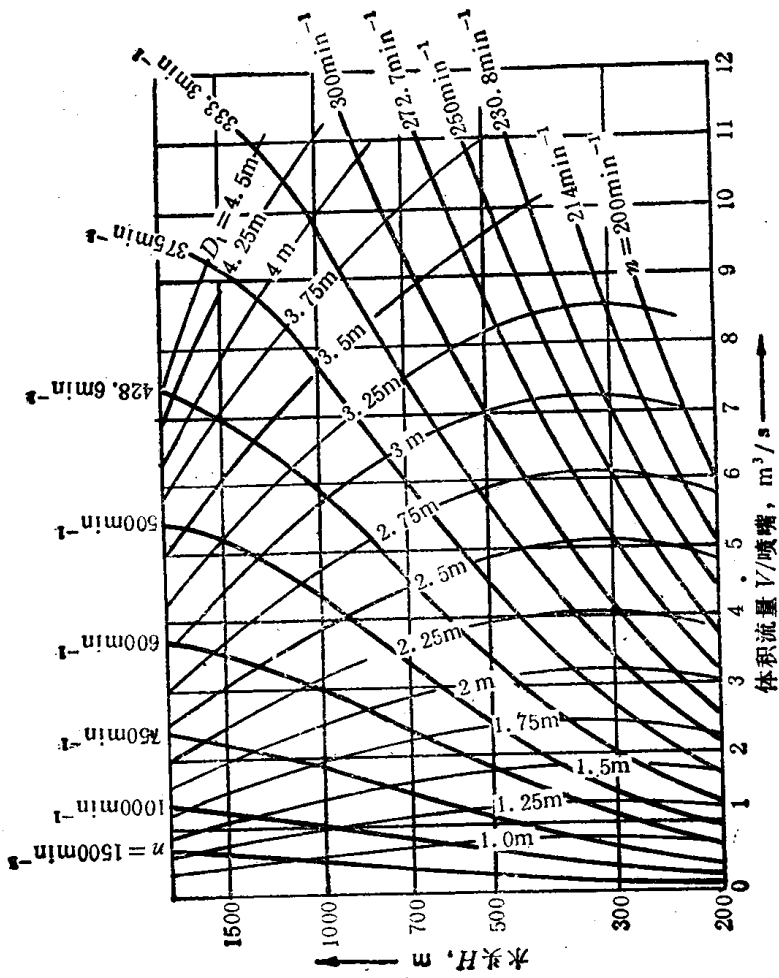


图 1-1 切击式水轮机计算图(引自Escher-Wyss公司)