

TK263.6
1023

03016

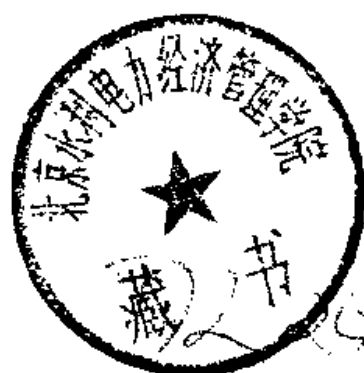
叶 轮 机 械

(原理与结构)

〔西德〕W·鲍尔 著

王俊宝 卞昭浚 译

蒋 潮 舒志良 校



京电力大 00120536

化学工业出版社

内 容 提 要

本书简明而系统地介绍了叶轮机机械的基本理论,分析了各种叶轮机机械的工作原理、结构性能以及应用范围。

全书共分十三章,前六章介绍叶轮机机械的一般概念、主要参数、能量转换、模型定律和特性参数、汽蚀以及超音极限;第七至十二章主要阐述水轮机、蒸汽轮机、燃气轮机、叶轮泵、压缩机(鼓风机、通风机)以及液力联轴器和液力变矩器;最后一章对叶轮机机械的特性曲线作了综合说明;附录提供了书中使用到的热力图表。

本书可供石油化工、机械、冶金、动力等专业的工程技术人员阅读,也可供工科院校有关专业师生参考。

Prof. Dipl.-Ing. Willi Bohl

Strömungsmaschinen

(Aufbau und Wirkungsweise)

1. Auflage, 1977

Vogel-Verlag

叶 轮 机 械

(原理与结构)

王俊宝 卞昭浚 译

蒋 潮 舒志良 校

责任编辑:刘 欢

封面设计:许 立

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张10插页1字数270千字印数1—0,200

1984年6月北京第1版1984年6月北京第1次印刷

统一书号15063·3580定价1.36元

译 序

本书作者W·鲍尔 (Bohl) 是西德海尔布隆工业大学机械工程学教授、工程师。

这本叶轮机机械 (原理与结构) (《Strömungsmaschinen (Aufbau und Wirkungsweise)》) 是他从事多年工厂工作和教学工作的总结, 于1977年在西德出版。作者在这样一本篇幅不长的书中, 不仅概括了叶轮机机械的共同原理、结构, 而且汲取了许多有关叶轮机机械的新经验, 充分反映了这一学科的近代发展水平; 作者除注意理论的系统性和完整性之外, 还特别注重工程实际应用, 列举了许多从工程实践问题中提炼概括出来的例题; 另外, 书中还收录了大量有价值的叶轮机机械的性能曲线以及有关数据、表格, 从而为其正确的理解和合理选用提供了必要条件。

作者近期撰写的另一本叶轮机机械 (计算与设计) (《Strömungsmaschinen (Berechnung und Konstruktion)》), 已于1980年在西德出版, 我们准备继续把它译成中文, 奉献给读者。

对原书中存在的错、漏之处, 我们都已作了改正, 一般都未另加译注。尽管我们在翻译过程中, 力求表达作者的原意并尽量采用了我国通用的工程技术术语, 但限于水平, 译文尚有不妥和错误之处, 恳请读者指正。

译稿完成后, 承蒙中国科学院蒋潮教授精心审校并提出宝贵意见, 此外河北工学院舒志良讲师也对本书的译稿作了认真校对, 在此特致谢意!

译者

一九八二年五月于河北工学院

前 言

本书是1963年以来我在海尔布隆工业大学为机械制造专业学生讲授课程“叶轮机械”的基础上逐步形成的。

书中综合说明了各类叶轮机械的结构和工作原理，这就为未来的工程师在工作实践中进一步掌握各种叶轮机械的专门知识打下基础。因此，它主要面向机械制造专业的大学生，但也为已经工作的工程师更新其叶轮机械制造方面的基础知识，提供了一个有利条件。

为了理解叶轮机械的这一类问题——共同的物理基础、工作原理、结构以及运转情况，应具备数学、流体力学、热力学以及工程力学等方面的基础知识，而对微积分学却使用的很少。文中推导出的或从其它来源中引用的方程和公式，除少数例外，大都是无量纲方程，即与度量单位制无关。例题中一律使用国际单位制（SI制）。

叶轮机械的各个部件，如叶轮、导轮、轴、壳体、密封以及轴承等的流体力学计算和强度计算以及结构设计，将在另一书中讨论。

谨对 Vogel出版社在书稿完成中所给予的热情支持和专业上提供的意见，以及对本书精心的印刷表示感谢，同时对我的同事、合作者以及许多企业公司表示敬意，只有在他们大力协助之下本书的出版才得以实现。

威利·鲍尔 (Willi Bohl) 海尔布隆

目 录

公式符号和单位

1. 概论	1
2. 叶轮机的主要工作参数	4
2.1. 质量流量	4
2.2. 体积流量	4
2.3. 比接管功	6
2.4. 功率	7
2.5. 效率	7
2.6. 转速	15
2.7. 参考文献	19
3. 叶轮的 $\dot{E}$ 转换	20
3.1. 概述	20
3.2. 速度平面图	20
3.3. 欧拉涡轮机基本方程	22
4. 模型定律和特性参数	30
4.1. 概述	30
4.2. 相似条件	30
4.3. 几何相似的机器主要参数之间的相似关系	30
4.3.1. 比例系数	30
4.3.2. 体积流量 $\dot{V}$ 的相似关系	32
4.3.3. 比接管功 Y 的相似关系	32
4.3.4. 功率 P 的相似关系	33
4.4. 增值公式	34
4.5. 特性参数	38
4.5.1. 引言	38
4.5.2. 压力系数 ψ	38
4.5.3. 流量系数 ϕ	38
4.5.4. 功率系数 λ	39

4.5.5. 速度系数 σ	40
4.5.6. 直径系数 δ	42
4.5.7. 总结	43
4.6. Cordier-图	43
4.7. 比接管功和体积流量在多级叶轮上的分布	46
4.8. 参考文献	47
5. 汽蚀	49
5.1. 一般原理	49
5.2. 比固有能	50
5.3. 托马(Thoma)数	55
5.4. 无因次抽吸参数 S_a	59
5.5. 叶轮泵的NPSH值	60
5.6. 材料问题	64
5.7. 参考文献	64
6. 超音极限	66
6.1. 概述	66
6.2. 压缩机的超音极限	67
6.2.1. 最大马赫数	67
6.2.2. 临界马赫数	69
6.2.3. 试验结果	72
6.2.4. Pfleider 声参数	73
6.2.5. 超音压缩机	76
6.3. 蒸汽轮机和燃气轮机的超音极限	77
6.3.1. 马赫数对叶片损失的影响	77
6.3.2. 大型凝汽式蒸汽轮机末级的闭锁效应	79
6.3.3. 射流偏转	81
6.4. 参考文献	83
7. 水轮机	85
7.1. 概述	85
7.2. 水轮机结构型式概述	86
7.3. 切击式水轮机	91
7.4. 混流式水轮机	96
7.5. 转桨式水轮机	102

7.5.1. 蜗壳型转桨式水轮机	102
7.5.2. 管状转桨式水轮机	104
7.6. 斜流式水轮机	106
7.7. 灌流式水轮机(Ossberger水轮机)	110
7.8. 水泵水轮机	110
7.9. 参考文献	116
8. 蒸汽轮机	118
8.1. 概述	118
8.2. 作为蒸汽动力循环组成部分的汽轮机	119
8.2.1. 凝汽式汽轮机	119
8.2.2. 背压式汽轮机	119
8.2.3. 抽汽式汽轮机	120
8.3. 汽轮机的工作原理和结构	121
8.3.1. 引言	121
8.3.2. 反动度	122
8.3.3. 冲动级和反动级之间的比较	122
8.3.4. 室式冲动汽轮机和鼓筒式转子汽轮机的比较	124
8.3.5. 径流式汽轮机	124
8.4. 发电站汽轮机	127
8.4.1. 结构组成	127
8.4.2. 对汽轮机结构的限制	132
8.5. 工业汽轮机	134
8.6. 调节和监视(安全性)装置	139
8.6.1. 调节	139
8.6.2. 安全装置和监视装置	144
8.7. 参考文献	145
9. 燃气轮机	146
9.1. 概述	146
9.2. 燃气轮机的循环过程	147
9.2.1. 没有热交换的开式燃气轮机循环	147
9.2.2. 有热交换的开式燃气轮机循环	152
9.2.3. 闭式燃气轮机循环	153
9.3. 燃气轮机装置的主要部件	155

9.3.1. 引言	155
9.3.2. 燃烧室	155
9.3.3. 涡轮机	157
9.4. 燃气轮机的应用范围	160
9.4.1. 固定式装置	160
9.4.2. 移动式装置	167
9.5. 参考文献	175
10. 叶轮泵	176
10.1. 概述	176
10.2. 叶轮型式	177
10.3. 单级离心泵	180
10.4. 多级离心泵	192
10.5. 双流泵	191
10.6. 半轴流泵(混流泵)	208
10.7. 轴流泵	211
10.8. 参考文献	222
11. 通风机、鼓风机、压缩机	224
11.1. 概述	224
11.2. 叶轮型式	224
11.3. 通风机和低压鼓风机	226
11.3.1. 引言	226
11.3.2. 离心鼓风机和离心通风机	226
11.3.3. 轴流鼓风机和轴流通风机	236
11.3.4. 贯流式鼓风机	242
11.4. 涡轮压缩机	244
11.4.1. 引言	244
11.4.2. 离心压缩机	246
11.4.3. 轴流压缩机	248
11.4.4. 组合式轴流-径流压缩机	256
11.5. 参考文献	257
12. 液力联轴器器和液力变矩器	259
12.1. 概述	259
12.2. 液力联轴器器(Föttinger联轴器)	260

12.3. 变矩器(Pöttinger变矩器).....	267
12.4. 参考文献.....	272
13. 叶轮机械的工作状态(通用特性曲线).....	274
13.1. 概述.....	274
13.2. 叶轮发动机的通用特性曲线.....	274
13.2.1. 水轮机.....	274
13.2.2. 汽轮机.....	275
13.2.3. 燃气轮机.....	277
13.3. 叶轮工作机械的通用特性曲线.....	280
13.3.1. 管道特性曲线.....	280
13.3.2. 节流特性曲线.....	282
13.3.3. 全套特性曲线图.....	285
13.3.4. 并联和串联.....	287
13.3.5. 转速变化时的节流特性曲线.....	290
13.3.6. 外径变化时的节流特性曲线.....	293
13.3.7. 叶片数不同时的节流特性曲线.....	293
13.3.8. 工作叶片位置变化时的节流特性曲线.....	293
13.3.9. 预旋调节时的节流特性曲线.....	295
13.3.10. 各种调节方法的比较.....	295
13.3.11. 粘度对叶轮泵特性曲线的影响.....	298
13.4. 液力联轴器和变矩器的通用特性曲线.....	301
13.4.1. 液力联轴器的特性曲线.....	301
13.4.2. 变矩器的特性曲线.....	301
13.5. 参考文献.....	305
附录.....	306

1. 概 论

叶轮机械中的能量转换，是在任意流量的、连续流动的工作介质（液体、蒸汽、气体）和镶有弯曲叶片并匀速旋转的转子之间来实现的。

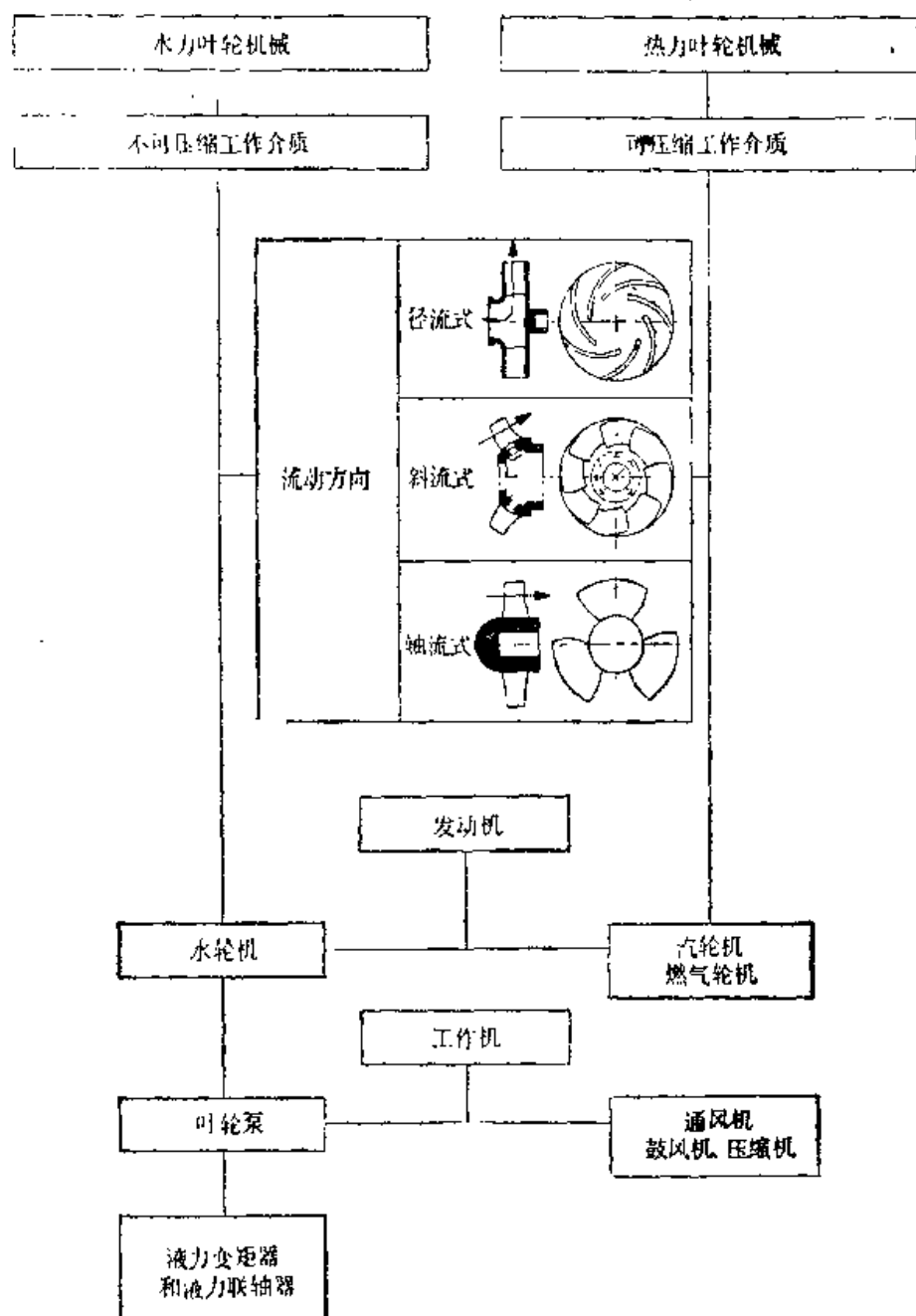
对叶轮发动机（涡轮机）来说，是通过工作介质的压力和速度对转子叶片的作用，而在轴上产生用来驱动例如发电机等的转矩。

对叶轮工作机械（泵、压缩机）来说，是把如由电动机等施加于轴上的转矩，再通过其叶片传递给工作介质并使之产生压力能和速度能。

叶轮机械可按不同的观点分类或编排：如按工作介质，按工作原理或按叶轮的几何形状。

表1-1列出本书中所讨论的“典型叶轮机械”概况。

表 1-1 叶轮机械的分类



本书的单位制是以国际单位制 (SI制) 为基础的, 表 1-2 中汇集了有关叶轮机械计算和运行方面的最重要物理量及其所属单位。

表 1-2 常用的物理量和单位

物 理 量	单 位	
	名 称	符 号
a 基 本 单 位		
长 度	米	m
质 量	公斤	kg
时 间	秒	s
温 度	开尔文	K
b 导 出 单 位		
力	牛顿	$N = \text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$
能 量	焦耳	$J = N \cdot \text{m}$
比 能	焦耳/公斤	J / kg
功 率	瓦特	$W = J / s$
压 力	帕	$\text{Pa} = N / \text{m}^2$
密 度	公斤/立方米	kg / m^3
比 容	立方米/公斤	m^3 / kg
质 量 流 量	公斤/秒	kg / s
体 积 流 量	立方米/秒	m^3 / s
速 度	米/秒	m / s
加 速 度	米/平方秒	m / s^2
运 动 粘 度	平方米/秒	m^2 / s

2. 叶轮机械的主要工作参数

2.1. 质量流量

叶轮机械的质量流量可理解为工作介质在单位时间内流经机器的质量。

如果不考虑少量的泄漏损失，则就一定的工况而言，质量流量是不变的。

按DIN^① 1943和VDI^② 2045采用 $\dot{m}$ 作为公式符号，按DIN1301采用kg/s作为单位。

$$\dot{m} = \frac{m}{\tau} \quad (2-1)$$

式中 $\dot{m}$ ——质量流量，

m ——质量，

τ ——时间。

质量流量的概念，主要是在热力涡轮机械，即汽轮机、燃气轮机和涡轮压缩机中使用。

在有关汽轮机的IEC规则^③ Nr.46中，采用字母M作为质量流量的公式符号，kg/h作为单位。

2.2. 体积流量

就水力叶轮机械和低压通风机而言，实际上总是认为流动是不可压缩的，即密度 ρ 可视为常数。

因此，通常以体积流量的概念来代替质量流量。

① 西德工业标准。

② 德国工程师协会。

③ “国际”电工委员会标准建议。

推荐 $\dot{V}$ 作为公式符号, m^3/s 作为单位。

$$\dot{V} = \frac{V}{\tau} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{m} \cdot v \quad (2-2)$$

$\dot{V}$ —— 体积流量;

V —— 体积;

τ —— 时间;

$\dot{m}$ —— 质量流量;

ρ —— 密度;

v —— 比容。 } (参见 DIN1306)

遗憾的是制造水力涡轮机械的个别部门, 仍沿用在表 2-1 中引用的有关体积流量的名称、公式符号和单位。

表 2-1 体积流量的名称、公式符号和单位

叶轮机械型式	来 源	名称	公式符号	单 位
水 轮 机	DIN 4323 (旧的) DIN 1948 IEC 规则 Nr 41和193	水量	Q	m^3/s
叶 轮 泵	DIN 24260 DIN 1944	排量	Q	m^3/s m^3/h

就热力涡轮机而言, 当流体穿过机器时, 其密度和体积流量随着压力和温度的变化而变化。对于涡轮机, 体积流量沿流动方向是增加的, 而对压缩机来说则是减少的。

在热力涡轮机械某 x 位置 (图 2-1) 上, 体积流量 $\dot{V}_x$ 为:

$$\dot{V}_x = \dot{m} \cdot v_x = \frac{\dot{m}}{\rho_x} \quad (2-3)$$

$\dot{V}_x$ —— 某 x 位置上的局部体积流量;

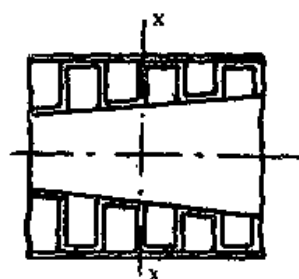


图 2-1 热力涡轮机械叶片组的剖面 (原理图)

$\dot{m}$ ——质量流量；

v_x ——比容 = $f(p_x, T_x)$ ；

ρ_x ——密度 = $f(p_x, T_x)$ 。

有关介质的比容 v_x 或密度 ρ_x ，可根据其压力和温度，由表（如 VDI-水蒸汽图表）或图（如书中附录的图表1，Mollier-(h-s)图）中查出。

如果没有表或图，则 v_x 或 ρ_x 也可以从气体状态方程算出。

a. 理想气体；

$$v_x = \frac{1}{\rho_x} = \frac{R_i \cdot T_x}{p_x} \quad (2-4)$$

v_x ——比容；

ρ_x ——密度；

R_i ——专用气体常数；

T_x ——绝对温度；

p_x ——压力。

b. 真实气体

$$v_x = \frac{1}{\rho_x} = \frac{Z \cdot R_i \cdot T_x}{p_x} \quad (2-5)$$

v_x ——比容；

ρ_x ——密度；

R_i ——专用气体常数；

T_x ——绝对温度；

p_x ——压力；

Z ——真实气体因子（参见VDI2045第3页或Vogel出版社出版Bohl著“工程流体理论”的图表3）。

对湿_点气作精确计算时，还必须考虑湿度。

2.3. 比接管功

叶轮机械的比接管功 Y ，对发动机是指进口接管和出口接管之间的比能差，而对工作机是指出口接管和进口接管之间的比能差。

建议以 J/kg ($\equiv \text{Nm/kg} \equiv \text{m}^2/\text{s}^2$) 作为单位, 但 1J/kg 所表示的能量值太小, 故实际上经常以 kJ/kg 作为比接管功单位。

除本书对各种类型的叶轮机机械一律使用比接管功这个概念之外, 实际上还经常沿用其它名称, 比如在水轮机里用水头 H , 燃气轮机和汽轮机里用热降 Δh , 叶轮泵里用扬程 H 等。

对于各个物理量, 象压力、速度、标高等的符号选择, 也已在很大程度上实行了标准化。

表2-2和表2-3分别对水力叶轮机机械和热力叶轮机机械的比接管功给出了定义并作了比较。

2.4. 功率

叶轮机机械的功率, 对于发动机是指联轴节处的输出功率, 而对于工作机是指联轴节处的输入功率。功率可由流经机器的质量流量, 机器的比接管功及其总效率来计算:

$$\text{发动机:} \quad P = \dot{m} \cdot Y \cdot \eta \quad (2-23)$$

$$\text{工作机:} \quad P = \frac{\dot{m} \cdot Y}{\eta} \quad (2-24)$$

P ——功率;

$\dot{m}$ ——质量流量;

Y ——比接管功;

η ——总效率。

在水力叶轮机机械的功率公式中, 多数以体积流量和密度的乘积代替质量流量。

在泵和通风机中, 称 P 为驱动功率。

至于额定功率、部分功率、指示功率、空载功率等专用功率值的确定, 可以由相应的标准和规范查出 (参见2.7.节文献索引)。

2.5. 效率

叶轮机机械的总效率, 如同所有发动机和工作机里所定义的那样:

表 2-2 水力机械的比接管功

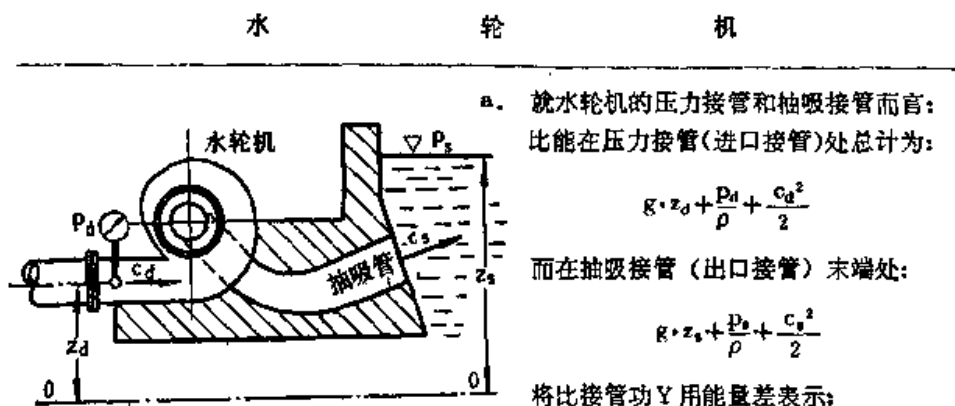


图 2-2 水轮机

$$Y = g(z_d - z_s) + \frac{P_d - P_s}{\rho} + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2} \quad (2-6)$$

Y——比接管功；

g——重力加速度=9.81m/s²；z_d——进口接管标高；z_s——下游水标高；P_d——进口接管压力；P_s——下游水面压力；

ρ——密度；

c_d——进口接管里的平均速度；c_d—— $\dot{V}/A_d$ (A_d——进口接管横截面面积)；c_s——抽吸接管出口处平均速度；c_s—— $\dot{V}/A_s$ (A_s——抽吸接管出口横截面面积)。

按照DIN4323和IEC 规则Nr.41利用水头H的概念来代替比接管功Y。

$$H = \frac{Y}{g} \quad (2-7)$$

H的单位是kpm/kp或简写为m(米)。

关于各种型式水轮机及其不同构筑方案的H的专门定义，可由DIN4323或IEC 规则Nr.41引用。

b. 就水力装置而言：

由水轮机所产生的比接管功等于上游水和下游水之间的比能量差，再扣除管道里的摩擦损失E_R (抽吸管损失不在其内，因为抽吸管业已计入水轮机)。

$$Y = g(z_0 - z_u) + \frac{P_0 - P_u}{\rho} + \frac{c_0^2 - c_u^2}{2} - E_R \quad (2-8)$$

Y——比接管功；

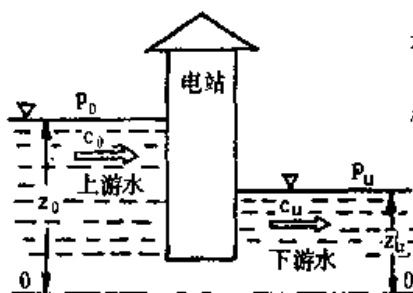
g——重力加速度=9.81m/s²；z₀——上游水标高；z_u——下游水标高；

图 2-3 水力装置