



高等学校“十一五”精品规划教材

水轮机

郑源 鞠小明 程云山 编

SHUILUNJI



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

水轮机

郑源 鞠小明 程云山 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书着重阐述水轮机的工作原理,设计计算和选择方法。其主要内容包括水轮机基本概念、工作原理、相似原理,模型试验,空化与空蚀,各种型式水轮机的结构特点及设计计算,水轮机特性曲线与选型设计及水轮机运行与检修。

本书为高等学校“热能与动力工程”专业水轮机课程的教材,也可供相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水轮机/郑源,鞠小明,程云山编. —北京:中国水利水电出版社,2007

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-4465-9

I. 水… II. ①郑…②鞠…③程… III. 水轮机—高等学校—教材 IV. TK73

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第030380号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 水轮机
作 者	郑源 鞠小明 程云山 编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 13.5印张 320千字
版 次	2007年4月第1版 2007年4月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	26.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

《水轮机》是热能与动力工程专业水动方向的重要专业课。中国水利水电出版社原来出版的教材《水轮机》第一版、第二版、第三版均适用多学时,一般不少于 64 学时。中国科学文化出版社出版的《水轮机》适用于少学时, 32~40 学时。

本书为高等学校“能源与动力”类专业水轮机课程教材,适用于热能与动力工程专业新修订的 40 学时的教学计划。

本教材第一章~第四章介绍水轮机的基本理论,内容包括水轮机基本概念、工作原理、相似理论与模型试验和空化与空蚀,第五章~第七章介绍水轮机的基本结构,第八章介绍水轮机特性曲线与选型设计,第九章介绍水轮机运行与检修。

本教材较以往水轮机版本,新增了我 国近年来水电发展、水轮机流场数值模拟与优化设计、计算机辅助设计及高水头、低水头水轮机的基本知识。

本书由郑源任主编,鞠小明、程云山任副主编。其中第一章、第三章由河海大学郑源编写,第二章、第四章由四川大学鞠小明编写,第五章由四川大学桂林编写,第六章、第七章由河海大学程云山编写,第八章由河海大学周大庆编写,第九章由四川大学王文蓉编写。另外,长江勘测规划设计研究院杨晓林参与了第一章、第五章、第八章和第九章部分内容的编写。全书由河海大学郑源和程云山负责统稿。

本书由河海大学陈新方教授主审,刘大凯教授提出了许多宝贵意见。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏与不妥之处,恳请读者给予批评指正。

编者

2006 年 12 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水电站与水轮机	1
第二节 水轮机的主要类型及适用水头	3
第三节 水轮机的工作参数	7
第四节 水轮机的型号	10
第五节 水轮机的装置型式	11
第六节 水轮机发展综述	15
第七节 我国水电发展前景	18
第二章 水轮机的工作原理	24
第一节 水流在反击式水轮机转轮中的运动	24
第二节 水轮机的基本方程式	27
第三节 水轮机的效率及最优工况	30
第四节 水斗式水轮机的工作原理	33
第三章 水轮机的相似理论与模型试验	37
第一节 水轮机的相似理论与单位参数	37
第二节 水轮机的效率换算与单位参数修正	42
第三节 水轮机的比转速	45
第四节 水轮机的模型试验	48
第四章 水轮机的空化与空蚀	60
第一节 水流的空化	60
第二节 水轮机空化与空蚀的类型	62
第三节 水轮机的空化系数与吸出高度	64
第四节 水轮机抗空化与空蚀的措施	69
第五章 反击式水轮机的基本结构	75
第一节 混流式水轮机的基本结构	75
第二节 轴流式水轮机的基本结构	84
第三节 反击式水轮机引水室	92
第四节 反击式水轮机的导水机构	107

第五节	反击式水轮机的尾水管	116
第六章	冲击式水轮机	125
第一节	冲击式水轮机主要类型及工作特点	125
第二节	冲击式水轮机和反击式水轮机工作原理的异同点	126
第三节	切击式水轮机结构及主要工作部件	127
第四节	切击式水轮机发展概况	132
第七章	贯流式水轮机	137
第一节	贯流式水轮机的特点	137
第二节	贯流式机组布置型式	137
第三节	贯流式水轮机的发展概况	141
第四节	贯流式机组的应用范围	145
第八章	水轮机的特性曲线与选型设计	146
第一节	水轮机的特性曲线	146
第二节	水轮机的线性特性曲线	146
第三节	水轮机模型综合特性曲线	151
第四节	水轮机模型综合特性曲线的绘制	154
第五节	水轮机运转综合特性曲线	158
第六节	水轮机的选型	164
第七节	计算机辅助水轮机选型设计	174
第八节	水轮机的数值模拟	183
第九章	水轮机的运行与检修	195
第一节	概述	195
第二节	水轮机的泥沙磨损	195
第三节	水轮机的振动	199
第四节	水轮机主要部件检修	205
参考文献		209

第一章 绪 论

第一节 水电站与水轮机

自然界有多种能源，目前已被开发利用的能源中主要有热能、水能、风能和核能。水能是一种可再生能源。地球上江河纵横，湖泊星罗棋布，海洋辽阔，蕴藏着丰富的水力资源。地球上的水蒸发成水蒸气，在天空中水蒸气又凝聚成雨雪降至大地，通过江河又流入海洋，如此循环不已，永无止境。所以利用水能发电的电能转换方式与火力发电和核能发电相比有许多的优点，例如成本低，运行管理简单，启动快，消耗少，适于调峰和调频，污染少等。

自然界的河流都具有一定的坡降，水流在重力作用下，沿着河床流动，在高处的水蕴藏着丰富的位能，如果没有把这种水能加以利用，当水流向低处流动时，则所有的能量都消耗在克服水流的黏性、摩阻、冲刷河床和夹带泥沙等方面了。

水轮机是一种将河流中蕴藏的水能转换成旋转机械能的原动机。水流流过水轮机时，通过主轴带动发电机将旋转机械能转换成电能。水轮机与发电机连接成的整体称为水轮发电机组，它是水电站的主要设备之一。

水电站是借助水工建筑物和机电设备将水能转换为电能的企业。为了利用水流发电，就要将天然落差集中起来，并对天然的流量加以控制和调节（如建造水库），形成发电

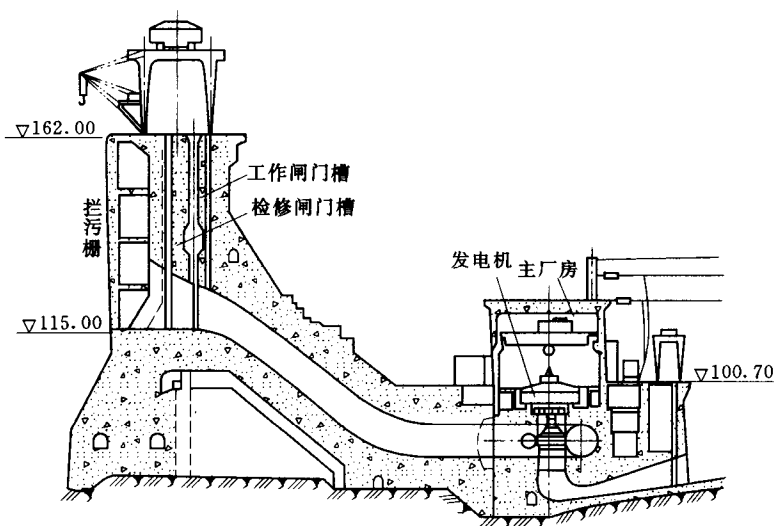


图 1-1 坝后式水电站厂坝横剖面示意图

所需要的水头和流量。水电站的型式主要取决于集中水头的方式，根据集中水头方式的不同，水电站分为坝后式水电站、引水式水电站和混合式水电站，如图 1-1~图 1-3 所示。

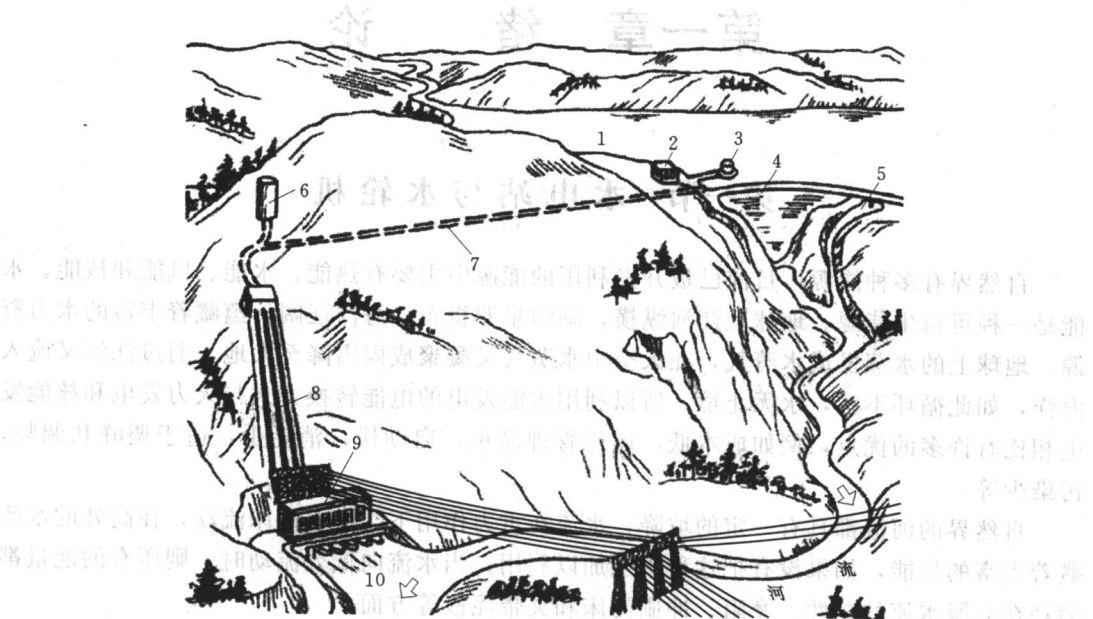


图 1-2 有压引水式水电站示意图

- 1—水库；2—闸门室；3—进水口；4—坝；5—泄水道；6—调压室；
- 7—有压隧道；8—压力管道；9—厂房；10—尾水渠

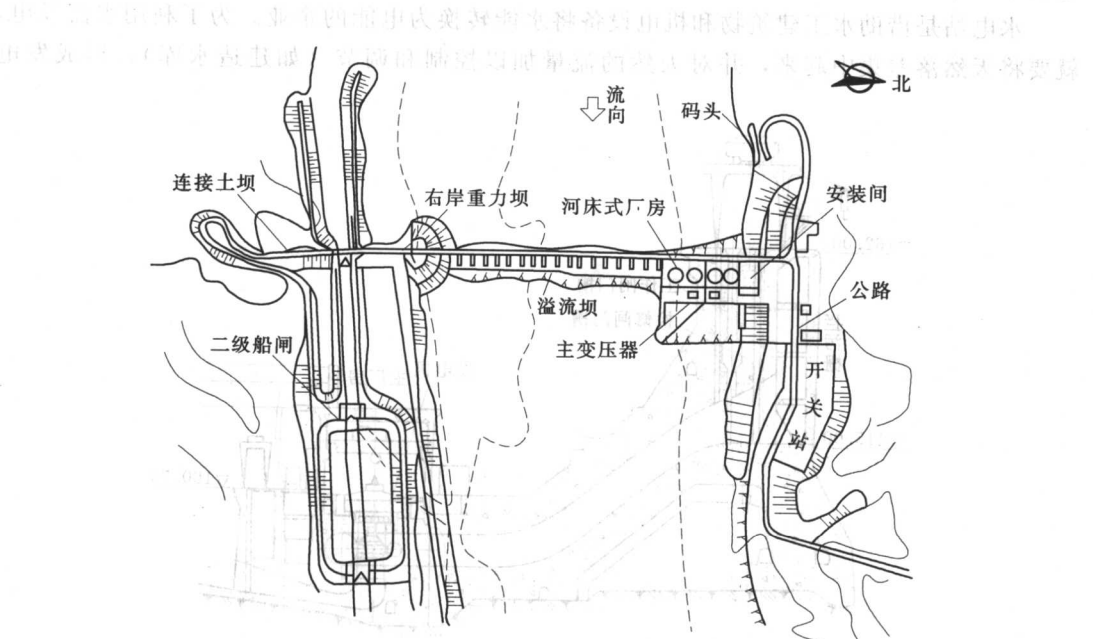


图 1-3 混合式水电站枢纽布置示意图

第二节 水轮机的主要类型及适用水头

水轮机是将水能转换成旋转机械能的一种水力原动机。根据转轮转换水流能量方式的不同，水轮机分成两大类：反击式水轮机和冲击式水轮机。反击式水轮机包括混流式、轴流式、斜流式和贯流式水轮机；冲击式水轮机分为水斗式、斜击式和双击式水轮机。

一、反击式水轮机

反击式水轮机转轮区内的水流在通过转轮叶片流道时，始终是连续充满整个转轮的有压流动，并在转轮空间曲面型叶片的约束下，连续不断地改变流速的大小和方向，从而对转轮叶片产生一个反作用力，驱动转轮旋转。当水流通过水轮机后，其动能和势能大部分被转换成转轮的旋转机械能。

1. 混流式水轮机

如图 1-4 所示，混流式水轮机水流从四周沿径向进入转轮，然后近似以轴向流出转轮。其应用水头范围较广，约为 20~700m，结构简单，运行稳定且效率高，是应用最广泛的一种水轮机。

2. 轴流式水轮机

如图 1-5 所示，轴流式水轮机水流在导叶与转轮之间由径向流动转变为轴向流动，而在转轮区内水流保持轴向流动，其应用水头约为 3~80m。轴流式水轮机在中低水头、大流量水电站中得到了广泛应用。根据其转轮叶片在运行中能否转动，又可分为轴流定桨式和轴流转桨式水轮机两种。轴流定桨式水轮机的转轮叶片是固定不动的，因而结构简单、造价较低，但它在偏离设计工况运行时效率会急剧下降，因此这种水轮机一般用于水头较低、出力较小以及水头变化幅度较小的水电站。轴流转桨式水轮机的转轮叶片可以根据运行工况的改变而转动，从而扩大了高效率区的范围，提高了运行的稳定性。但是，这种水轮机需要有一个操作叶片转动的机构，因而结构较复杂，造价较高，一般用于水头、出力均有较大变化幅度的大中型水电站。

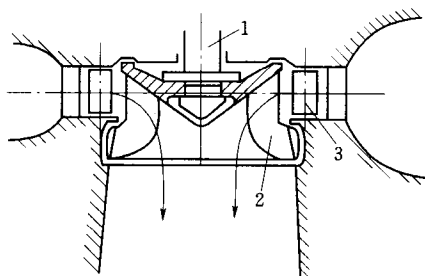


图 1-4 混流式水轮机

1—主轴；2—叶片；3—导叶

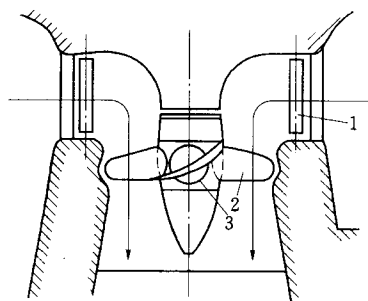


图 1-5 轴流式水轮机

1—导叶；2—叶片；3—轮毂

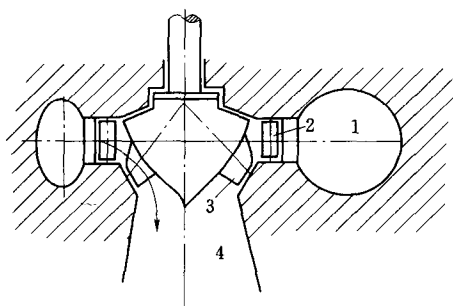


图 1-6 斜流式水轮机

1—蜗壳；2—导叶；3—转轮叶片；4—尾水管

所以一般只在大中型水电站中使用，目前这种水轮机应用还不普遍。

4. 贯流式水轮机

贯流式水轮机是一种流道近似为直筒状的卧轴式水轮机，它不设引水蜗壳，叶片可做成固定的和可转动的两种。根据其发电机装置形式的不同，分为全贯流式和半贯流式两类。

全贯流式水轮机的发电机转子直接安装在转轮叶片的外缘，如图 1-7 所示。它的优点是流道平直、过流量大、效率高。但由于转轮叶片外缘的线速度大、周线长，因而旋转密封困难。目前这种机型已很少使用。

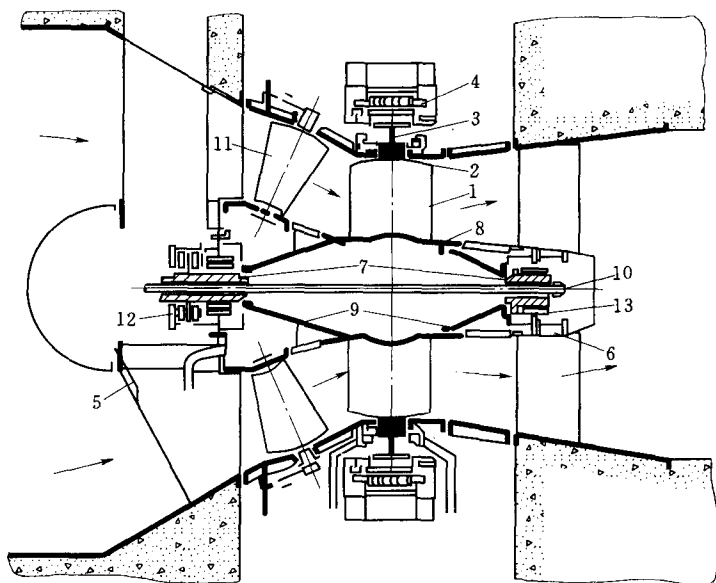


图 1-7 全贯流式水轮机

1—转轮叶片；2—转轮轮缘；3—发电机转子轮轴；4—发电机定子；
5、6—支柱；7—轴颈；8—轮毂；9—锥形插入物；10—拉紧杆；
11—导叶；12—推力轴承；13—导轴承

半贯流式水轮机有轴伸式、竖井式和灯泡式等装置形式，如图 1-8~图 1-10 所示，其中轴伸式和竖井式结构简单、维护方便，但效率较低，一般只用于小型水电站。目前广泛使用的是灯泡贯流式水轮机，其结构紧凑、稳定性好、效率较高，其发电机布置在被水绕流的钢制灯泡体内，水轮机与发电机可直接连接，也可通过增速装置连接。

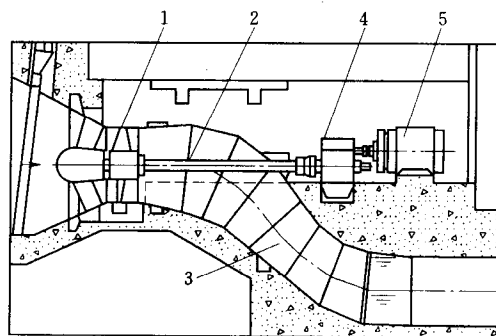


图 1-8 轴伸贯流式水轮机

1—转轮；2—水轮机主轴；3—尾水管；
4—齿轮转动机构；5—发电机

贯流式水轮机的适用水头为 1~25m，适用于低水头、大流量的水电站。由于其卧轴式布置及流道形式简单，所以土建工程量少，施工简便，因而在开发平原地区河道和沿海地区潮汐等水力资源中得到较为广泛的应用。目前我国自行研制的最大的灯泡贯流式水轮机转轮直径为 5.5m，单机出力为 15MW。

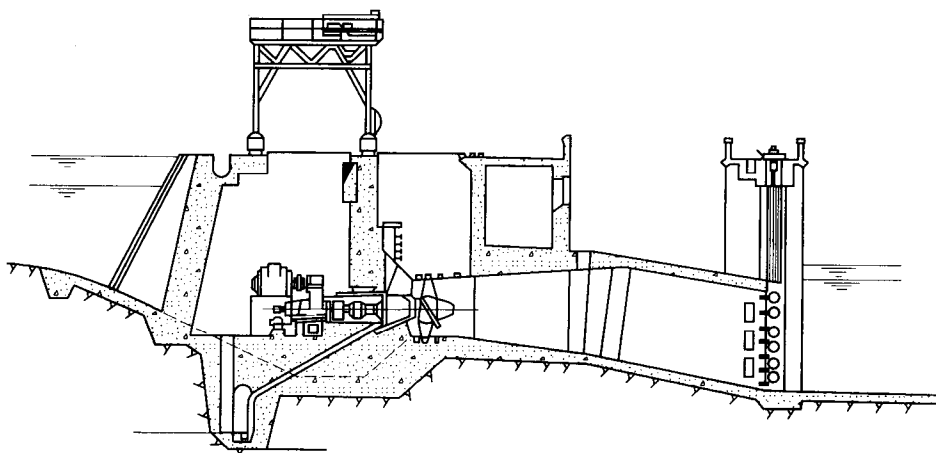


图 1-9 竖井贯流式水轮机

二、冲击式水轮机

冲击式水轮机的转轮始终处于大气中，来自压力钢管的高压水流在进入水轮机之前已转变成高速自由射流，该射流冲击转轮的部分轮叶，并在轮叶的约束下发生流速大小和方向的急剧改变，从而将其动能大部分传递给轮叶，驱动转轮旋转。在射流冲击轮叶的整个过程中，射流内的压力基本不变，近似为大气压。

冲击式水轮机按射流冲击转轮的方式不同可分为水斗式、斜击式和双击式 3 种。

1. 水斗式水轮机

水斗式水轮机亦称切击式水轮机，如图 1-11 所示。从喷嘴出来的高速自由射流沿转圆周切线方向垂直冲击轮叶。这种水轮机适用于高水头、小流量的水电站，特别是当水头超过 400m 时，由于结构强度和气蚀等条件的限制，混流式水轮机已不太适用，则常采

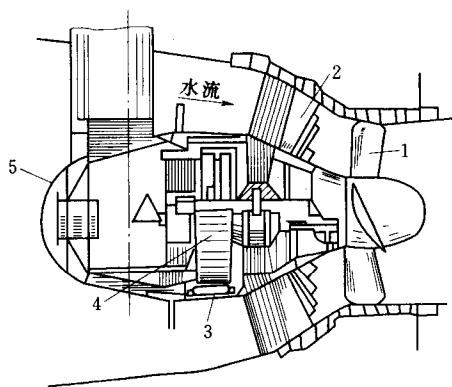


图 1-10 灯泡贯流式水轮机

1—转轮叶片；2—导叶；3—发电机定子；
4—发电机转子；5—灯泡体

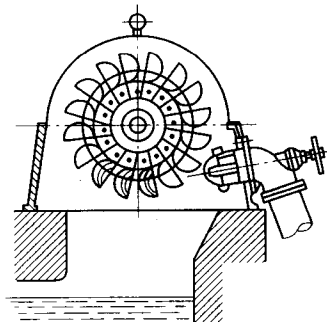


图 1-11 水斗式水轮机

用水斗式水轮机。大型水斗式水轮机的应用水头约为 300~1700m，小型水斗式水轮机的应用水头约为 40~250m。目前水斗式水轮机的最高水头已用到 1767m（奥地利莱塞克电站），我国天湖水电站的水斗式水轮机设计水头为 1022.4m。

2. 斜击式水轮机

如图 1-12 所示，从喷嘴出来的自由射流沿着与转轮旋转平面成一角度的方向，从转轮的一侧进入轮叶再从另一侧流出轮叶。与水斗式相比，其过流量较大，但效率较低，因此这种水轮机一般多用于中小型水电站，适用水头一般为 20~300m。

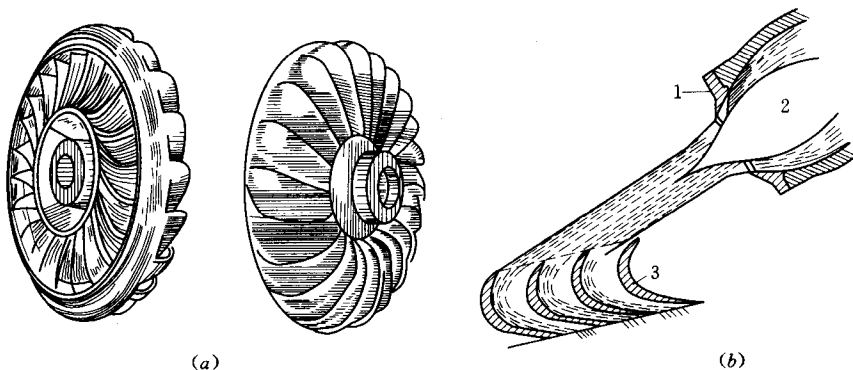


图 1-12 斜击式转轮

(a) 转轮；(b) 斜击式转轮进水示意图
1—管帽；2—针阀；3—轮叶

3. 双击式水轮机

如图 1-13 所示，从喷嘴出来的射流先后两次冲击在转轮叶片上。这种水轮机结构简单、制作方便，但效率低、转轮叶片强度差，仅适用于单机出力不超过 1000kW 的小型水电站，其适用水头一般为 5~100m。

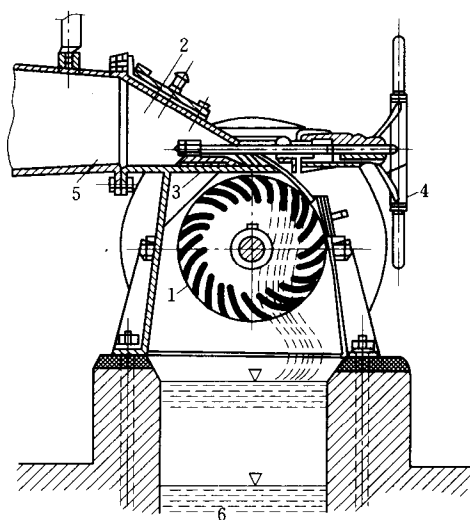


图 1-13 带有闸板阀门的双击式水轮机
1—工作轮；2—喷嘴；3—调节闸板；4—舵轮；
5—引水管；6—尾水槽

各种类型水轮机及应用水头范围如表 1-1 所示。

表 1-1 水轮机类型及应用水头范围

类 型	型 式		适应水头范围 (m)
反击式	混流式	混流式	20~700
		混流可逆式	80~600
	轴流式	轴流转桨式	3~80
		轴流定桨式	3~50
	斜流式	斜流式	40~200
		斜流可逆式	40~120
	贯流式	贯流转桨式	1~25
		贯流定桨式	
冲击式	水斗式		40~1700
	斜击式		20~300
	双击式		5~100

第三节 水轮机的工作参数

水轮机的工作参数是表征水流通过水轮机时水流能量转换为转轮机械能过程中的一些特性的数据。水轮机的基本工作参数主要有水头 H 、流量 Q 、出力 P 、效率 η 、转速 n 。

一、水头 H

水轮机的水头（亦称工作水头）是指水轮机进口和出口截面处单位重量的水流能量差，单位为 m ，如图 1-14 所示。对反击式水轮机，进口断面取在蜗壳进口处 I—I 断面，出口取在尾水管出口 II—II 断面。列出水轮机进、出口断面的能量方程，根据水轮机工作水头的定义可写出其基本表达式

$$H = E_I - E_{II} = \left(Z_I + \frac{P_I}{\gamma} + \frac{\alpha_I V_I^2}{2g} \right) - \left(Z_{II} + \frac{P_{II}}{\gamma} + \frac{\alpha_{II} V_{II}^2}{2g} \right) \quad (1-1)$$

式中 E ——单位重量水体的能量， m ；

Z ——相对某一基准的位置高度， m ；

P ——相对压力， N/m^2 或 Pa ；

V ——断面平均流速， m/s ；

α ——断面动能不均匀系数；

γ ——水的重度，其值为 $9810 N/m^3$ ；

g ——重力加速度， $9.81 m/s^2$ 。

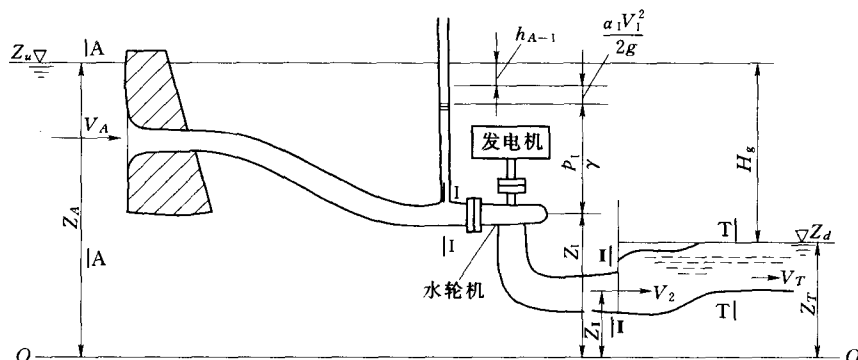


图 1-14 水电站和水轮机的水头示意图

式 (1-1) 中，计算常取 $\alpha_I = \alpha_{II} = 1$ ， $\alpha V^2/2g$ 称为某截面的水流单位动能，即比动能，其单位为 m ； P/γ 称为某截面的水流单位压力势能，即比压能，其单位为 m ； Z 称为某截面的水流单位位置势能，即比位能，其单位为 m 。 $\alpha V^2/2g$ 、 P/γ 与 Z 的 3 项之和为某水流截面水的总比能。

水轮机水头 H 又称净水头，是水轮机做功的有效水头。上游水库的水流经过进水口拦污栅、闸门和压力水管进入水轮机，水流通过水轮机做功后，由尾水管排至下游，在这一过程中，产生水头损失 Δh 。上、下游水位差值称为水电站的毛水头 H_g ，其单位为 m 。

因而，水轮机的工作水头又可表示为

$$H = H_g - \Delta h \quad (1-2)$$

式中 H_g ——水电站毛水头， m ；

Δh ——水电站引水建筑物中的水力损失， m 。

从式 (1-2) 可知，水轮机的水头随着水电站的上下水位的变化而改变，常用几个特

征水头表示水轮机水头的范围。特征水头包括最大水头 $H_{\max}$ 、最小水头 $H_{\min}$ 、加权平均水头 H_a 、设计水头 H_r 等，这些特征水头由水能计算给出。

(1) 最大水头 $H_{\max}$ ，是允许水轮机运行的最大净水头。它对水轮机结构的强度设计有决定性的影响。

(2) 最小水头 $H_{\min}$ ，是保证水轮机安全、稳定运行的最小净水头。

(3) 加权平均水头 H_a ，是在一定期间内（视水库调节性能而定），所有可能出现的水轮机水头的加权平均值，是水轮机在其附近运行时间最长的净水头。

(4) 设计水头 H_r ，是水轮机发出额定出力时所需要的最小净水头。

水轮机的水头，表明水轮机利用水流单位机械能的多少，是水轮机最重要的基本工作参数，其大小直接影响着水电站的开发方式、机组类型以及电站的经济效益等技术经济指标。

二、流量 Q

水轮机的流量是单位时间内通过水轮机某一既定过流断面的水流体积，常用符号 Q 表示，常用的单位为 m^3/s 。在设计水头下，水轮机以额定转速、额定出力运行时所对应的水流量称为设计流量。

三、转速 n

水轮机的转速是水轮机转轮在单位时间内的旋转次数，常用符号 n 表示，常用单位为 r/min 。

四、出力 P 与效率 η

水轮机出力是水轮机轴端输出的功率，常用符号 P 表示，常用单位为 kW 。

水轮机的输入功率是单位时间内通过水轮机的水流的总能量，即水流的出力，常用符号 P_n 表示，则

$$P_n = \gamma QH = 9.81QH (\text{kW}) \quad (1-3)$$

由于水流通过水轮机时存在一定的能量损耗，所以水轮机出力 P 总是小于水流出力 P_n 。水轮机出力 P 与水流出力 P_n 之比称为水轮机的效率，用符号 η 表示。

$$\eta = \frac{P}{P_n} \quad (1-4)$$

由于水轮机在工作过程中存在能量损耗，故水轮机的效率 $\eta < 1$ 。

由此，水轮机的出力可写成

$$P = P_n \eta = 9.81QH \eta (\text{kW}) \quad (1-5)$$

水轮机将水能转化为水轮机轴端的出力，产生旋转力矩 M 用来克服发电机的阻力矩，并以角速度 ω 旋转。水轮机出力 P 、旋转力矩 M 和角速度 ω 之间有以下关系式

$$P = M\omega = \frac{M2\pi n}{60} \quad (1-6)$$

式中 ω ——水轮机旋转角速度， rad/s ；

M ——水轮机主轴输出的旋转力矩， $N \cdot m$ ；
 n ——水轮机转速， r/min 。

第四节 水 轮 机 的 型 号

根据我国“水轮机型号编制规则”规定，水轮机的型号由三部分组成，每一部分用短横线“—”隔开。第一部分由汉语拼音字母与阿拉伯数字组成，其中拼音字母表示水轮机型式，阿拉伯数字表示转轮型号，入型谱的转轮的型号为比转速数值，未入型谱的转轮的型号为各单位自己的编号，旧型号为模型转轮的编号，可逆式水轮机在水轮机型式后加“N”表示；第二部分由两个汉语拼音字母组成，分别表示水轮机主轴布置形式和引水室的特征；第三部分为水轮机转轮的标称直径以及其他必要的数字。

常见水轮机型号和代表符号及布置型式如表 1-2 所示。

表 1-2 水轮机型号的代表符号

水轮机型式	代表符号	主轴布置型式及引水室特征	代表符号
混流式	HL	立轴	L
轴流转桨式	ZZ	卧轴	W
轴流定桨式	ZD	金属蜗壳	J
斜流式	XL	混凝土蜗壳	H
冲击（水斗）式	CJ	灯泡式	P
贯流转桨式	GZ	明槽式	M
贯流定桨式	GD	罐式	G
可逆式	N	竖井式	S
双击式	SJ	虹吸式	X
斜击式	XJ	轴伸式	Z

对于冲击式水轮机，上述第三部分表示为：转轮标称直径（cm）/每个转轮上的喷嘴数×射流直径（cm）。

各种型式水轮机的转轮标称直径（简称转轮直径，常用 D_1 表示）如图 1-15 所示，具体的规定如下：

（1）混流式水轮机转轮直径是指其转轮叶片进水边的最大直径。

（2）轴流式、斜流式和贯流式水轮机转轮直径是指与转轮叶片轴线相交处的转轮室内径。

（3）冲击式水轮机转轮直径是指转轮与射流中心线相切处的节圆直径。

反击式水轮机转轮标称直径 D_1 的尺寸系列规定见表 1-3。

水轮机型号示例：

（1）HL220—LJ—250，表示转轮型号为 220 的混流式水轮机，立轴、金属蜗壳，转轮直径为 250cm。

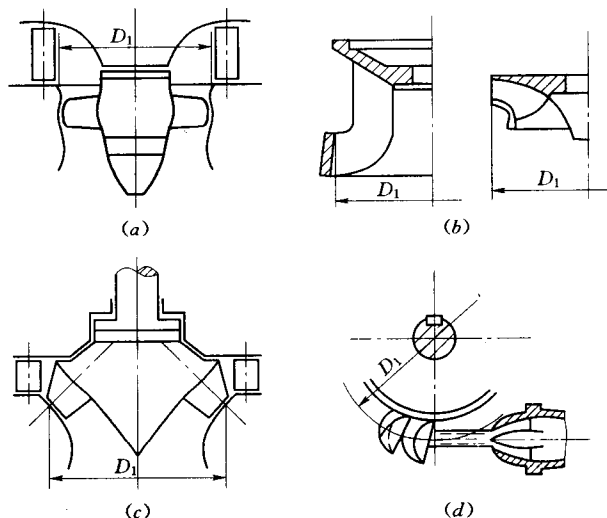


图 1-15 各种类型的水轮机转轮直径规定示意图

(a) 轴流式水轮机标称直径；(b) 混流式水轮机标称直径；

(c) 斜流式水轮机标称直径；(d) 冲击式水轮机标称直径

表 1-3

反击式水轮机转轮标称直径系列

单位：cm

25	30	35	(40)	42	50	60	71	(80)	84
100	120	140	160	180	200	225	250	275	300
330	380	410	450	500	550	600	650	700	750
800	850	900	950	1000					

注 表中括号内的数字仅适用于轴流式水轮机。

(2) ZZ560—LH—500，表示转轮型号为 560 的轴流转桨式水轮机，立轴、混凝土蜗壳，转轮直径为 500cm。

(3) GD600—WP—300，表示转轮型号为 600 的贯流定桨式水轮机，卧轴、灯泡式引水，转轮直径为 300cm。

(4) 2CJ20—W—120/2×10，表示转轮型号为 20 的水斗式水轮机，一根轴上装有 2 个转轮，卧轴、转轮直径为 120cm，每个转轮具有 2 个喷嘴，射流直径为 10cm。

第五节 水轮机的装置型式

水轮机的装置型式，是指水轮机主轴的布置型式和引水室型式相结合的总体。它取决于使用水头、单机容量和上下游水位等的变化情况。水轮机装置型式对水电站厂房设计有着密切的关系，下面对水轮机常用的几种装置型式作简要介绍。

一、反击式水轮机装置型式

反击式水轮机使用水头范围大，单机容量的差别大，机型繁多，所以装置型式各不相