

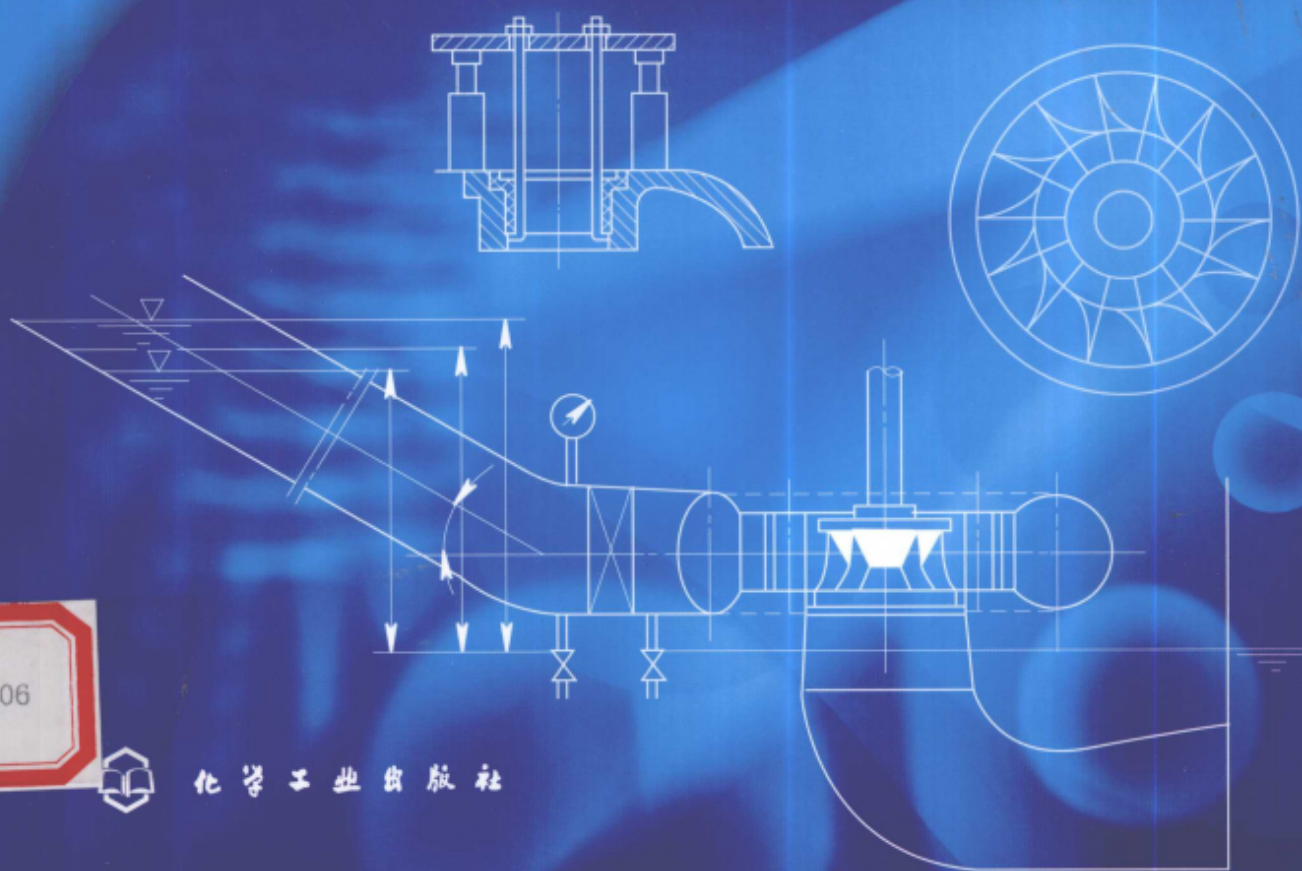
SHUIDIANZHAN

JIZU SHEBEI JI YUNXING

水电站

机组设备及运行

盛国林 编著



312.06
73



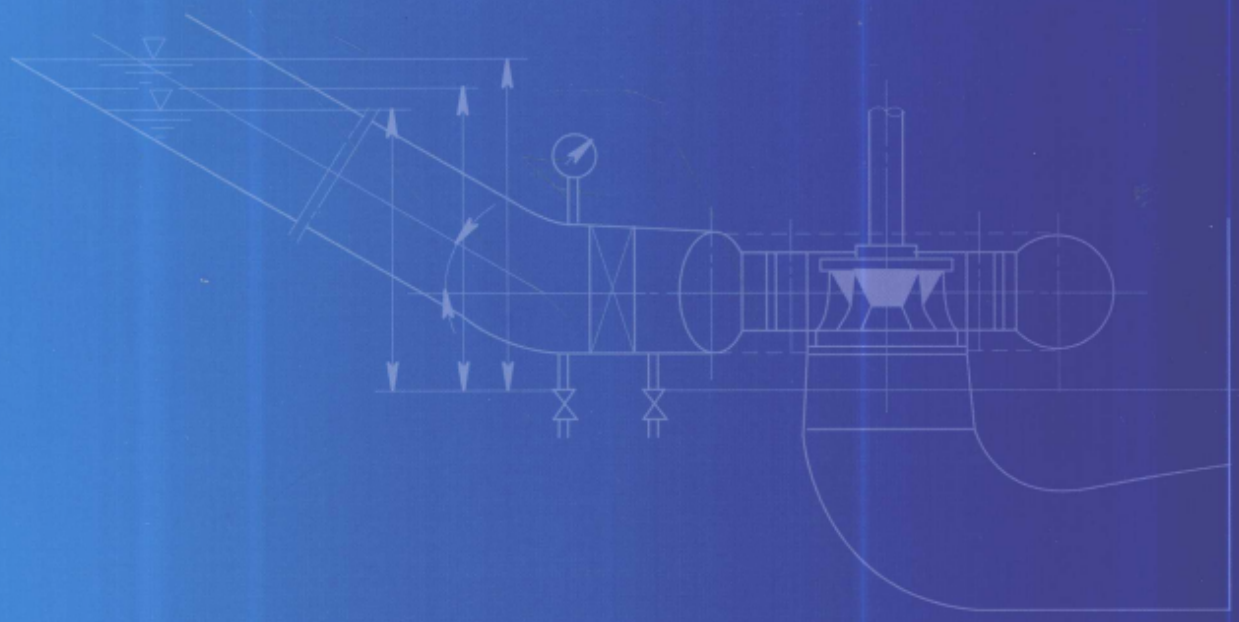
化学工业出版社

水电站

机组设备及运行

SHUIDIANZHAN

JIZU SHEBEI JI YUNXING



 www.cip.com.cn
读科技图书 上化工社网

销售分类建议：能源/水电

ISBN 978-7-122-07305-1



9 787122 073051 >

定价：38.00元

SHUIDIANZHAN

JI ZU SHE BEI JI YUN XING

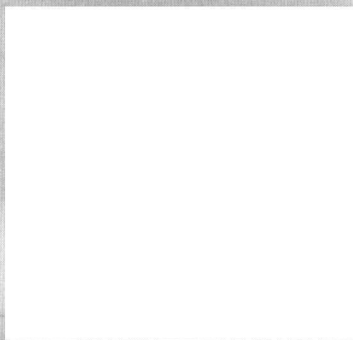
TM312.06
S473

水电站

81

机组设备及运行

盛国林 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

定价：32.00元

本书为职业教育与成人教育培训系列教材。该书紧密结合生产实际, 主要内容包括: 水电站及水力机组概述, 水轮机的结构, 水轮发电机, 水轮机调节, 水电站的油、水、气系统及主阀, 水轮发电机组的启动试运行及水轮发电机组的检修等基本知识。

本书既可作为高等职业院校水电站动力设备、发电厂及电力系统等专业专业课教材, 也可作为水电厂机电安装、检修及运行专业技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

水电站机组设备及运行/盛国林编著. —北京: 化学工业出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-122-07305-1

I. 水… II. 盛… III. 水轮发电机-机组-运行
IV. TM312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 232259 号

责任编辑: 戴燕红 郑宇印

装帧设计: 刘丽华

责任校对: 周梦华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 296 千字 2010 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着科学技术的不断进步与社会生产力的不断发展，电能的需求日益高涨。为了保障电能供应的可靠性与稳定性，广大电力工作者更应该具备高的业务能力与思想素质，为此我们组织编写了这本职业教育与成人教育培训教材《水电站机组设备及运行》。

本教材体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可作为职业资格和岗位技能培训教材，也可作为学历教育教学用书。

本教材结合我国水电系统的实际情况，紧密联系生产实际，注重实际动手能力的培养，内容通俗、简明扼要、易学、易懂、易会，图文并茂。整个教材突出了新知识、新技术、新方法、新工艺的引进与运用。

本教材由三峡电力职业学院盛国林编著，在整个教材的编写过程中，也得到了许多同行的帮助与支持，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编著者

2009年12月

目 录

第一章 水电站及水力机组概述	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.....	8
第四节 水轮机的型号.....	10
第五节 水轮机的装置型式.....	11
复习与思考题.....	16
第二章 水轮机的结构	17
第一节 混流式水轮机转轮.....	17
第二节 轴流式水轮机转轮.....	24
第三节 反击式水轮机主轴和导轴承.....	35
第四节 反击式水轮机的引水部件.....	45
第五节 反击式水轮机尾水管.....	66
第六节 水轮机密封装置.....	71
第七节 水轮机的附属装置.....	74
第八节 水斗式水轮机.....	78
复习与思考题.....	85
第三章 水轮发电机	86
第一节 水轮发电机的类型和型号.....	86
第二节 水轮发电机的主要参数.....	87
第三节 水轮发电机通风冷却方式.....	88
第四节 水轮发电机的基本结构.....	90
复习与思考题.....	96
第四章 水轮机调节	97
第一节 概述.....	97
第二节 水轮机调速器的安装、调整与试验.....	106
复习与思考题.....	117
第五章 水电站的油、水、气系统及主阀	118
第一节 水电站的油系统.....	118
第二节 水电站的水系统.....	125

第三节	水电站的压缩空气系统·····	135
第四节	主阀·····	143
	复习与思考题·····	150
第六章	水轮发电机组的启动试运行 ·····	151
第一节	机组启动试运行的目的和内容·····	151
第二节	机组启动试运行的程序 and 基本要求·····	152
第三节	水轮发电机组的振动和平衡简介·····	157
	复习与思考题·····	162
第七章	水轮发电机组的检修 ·····	163
第一节	检修项目及质量标准·····	163
第二节	水轮机主要部件的修复·····	166
第三节	发电机主要部件的修复·····	179
第四节	水轮发电机组的常见故障及处理方法·····	182
	复习与思考题·····	184
参考文献	·····	185

第一章

水电站及水力机组概述

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。水力发电与火力发电和核能发电相比有许多的优点，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化成电能，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。

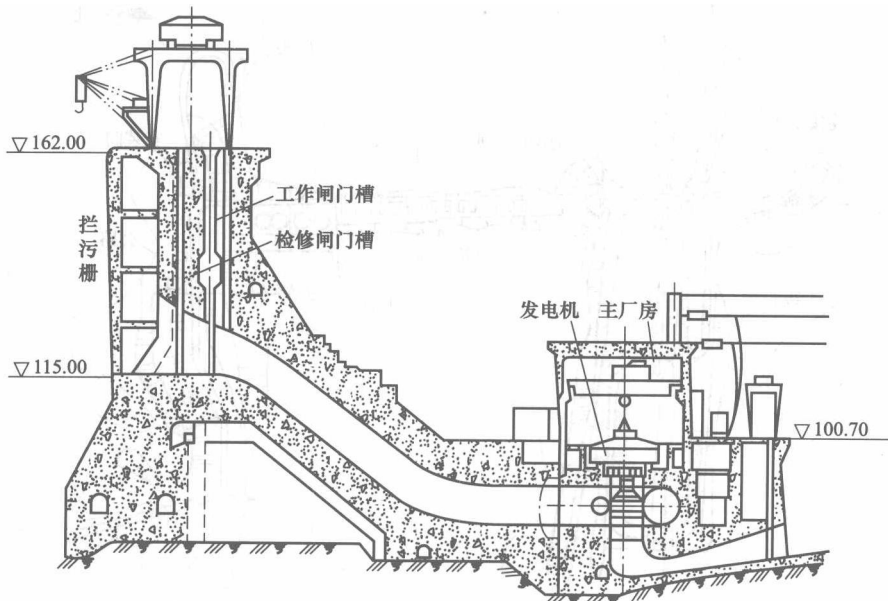


图 1-1 坝后式水电站厂坝横剖面示意图

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。

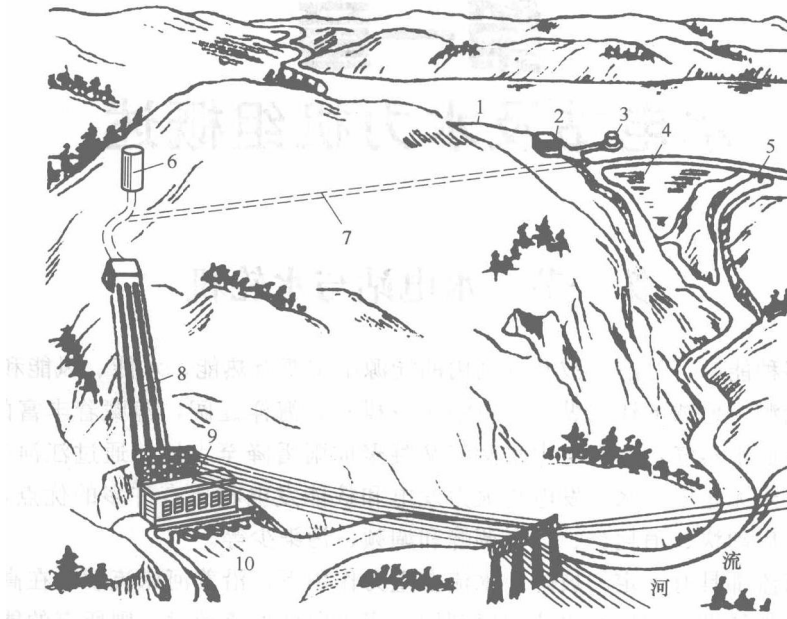


图 1-2 有压引水式水电站示意图

- 1—水库；2—闸门室；3—进水池；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

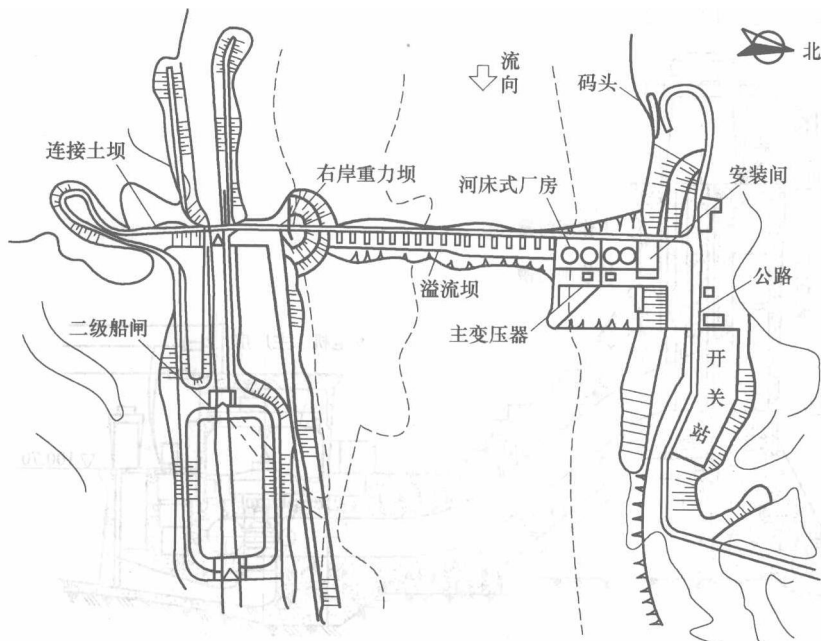


图 1-3 混合式水电站枢纽布置示意图

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的，因而结构简单、造价较低、适用于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。

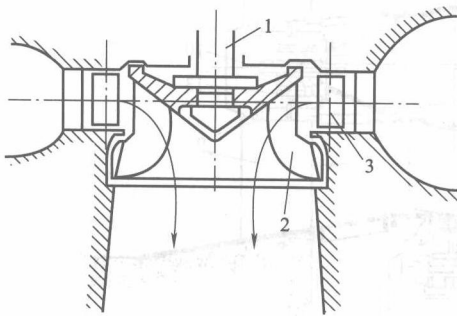


图 1-4 混流式水轮机
1—主轴；2—叶片；3—导叶

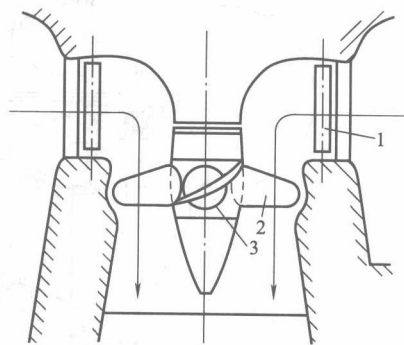


图 1-5 轴流式水轮机
1—导叶；2—叶片；3—轮毂

3. 斜流式水轮机

如图 1-6 所示，斜流式水轮机水流在转轮区内沿着与主轴成某一角度的方向流动，其转轮叶片大多做成可转的形式。因此，斜流式水轮机具有较宽的高效率区，适用水头在轴流式与混流式水轮机之间，约为 40~200m。它是在 20 世纪 50 年代初为了提高轴流式

水轮机的适用水头而在轴流转桨式水轮机基础上改进提出的新机型，其结构形式及性能特征与轴流转桨式水轮机类似，但由于其倾斜桨叶操作机构的结构特别复杂，加工工艺要求和造价均较高，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。

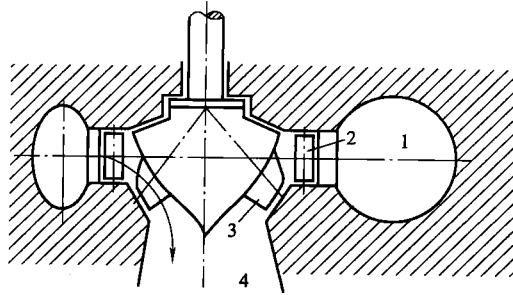


图 1-6 斜流式水轮机

1—蜗壳；2—导叶；3—转轮叶片；4—尾水管

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，它不设蜗壳，叶片可做成固定的和可转动的两种。根据其发电装置形式的不同，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。

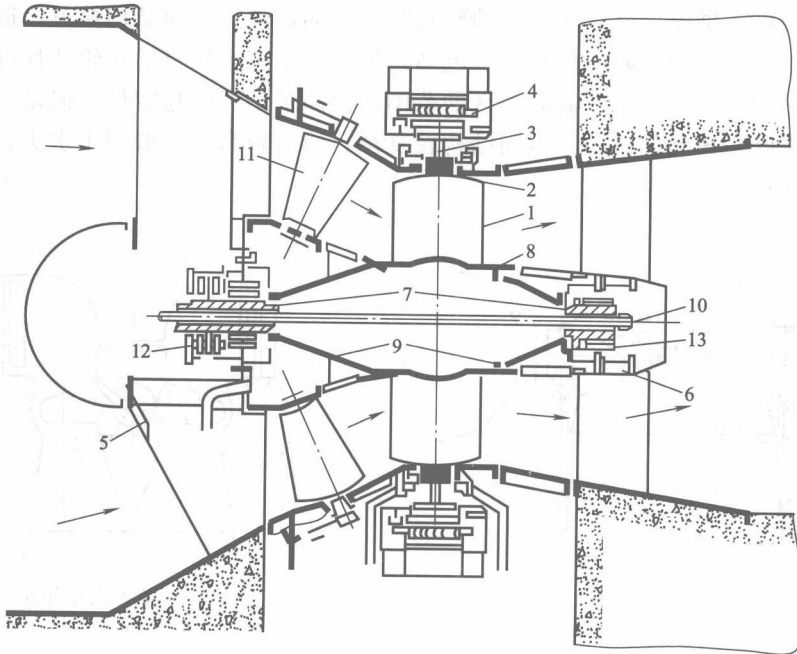


图 1-7 全贯流式水轮机

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。

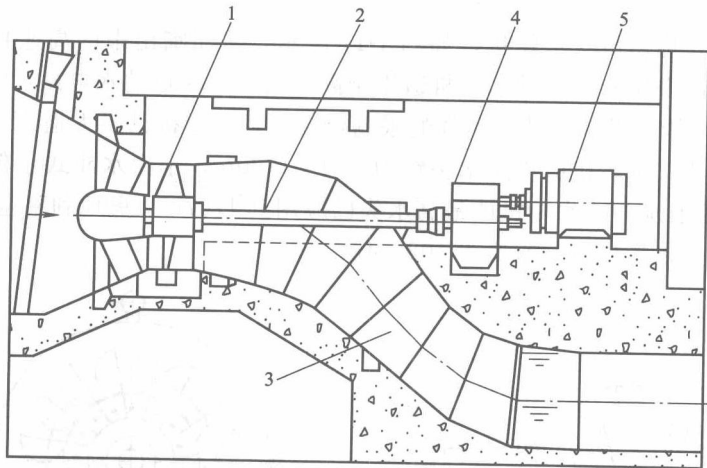


图 1-8 轴伸贯流式水轮机
 1—转轮；2—水轮机主轴；3—尾水管；
 4—齿轮转动机构；5—发电机

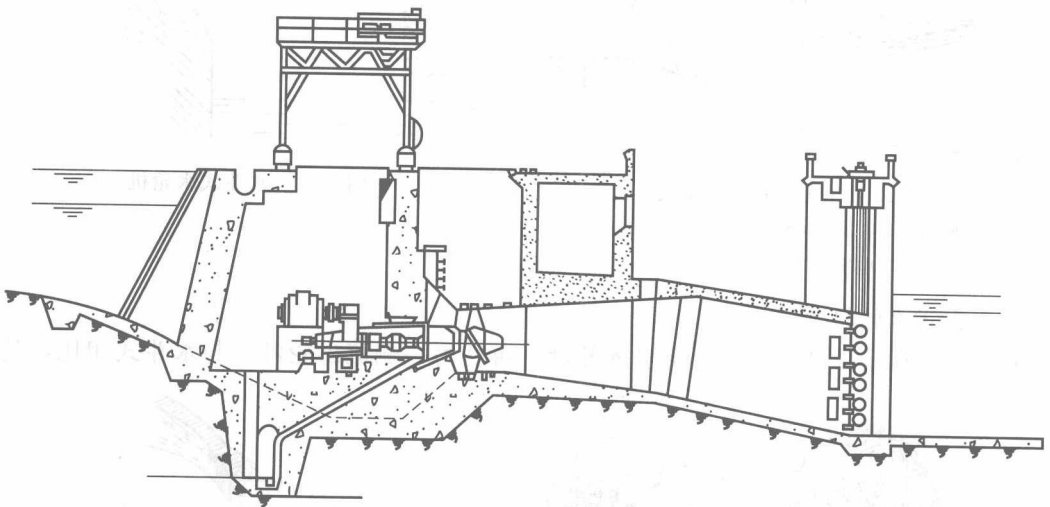


图 1-9 竖井贯流式水轮机

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，施工简单，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。

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。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、斜击式和双击式三种。

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轮周围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，由于结构强度和汽蚀等条件的限制，混流式水轮机已不太适用，则常采用水斗式水轮机。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应用到 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。

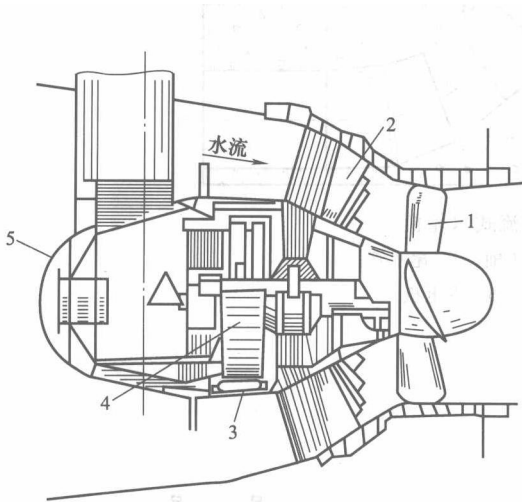


图 1-10 灯泡贯流式水轮机

1—转轮叶片；2—导叶；3—发电机定子；
4—发电机转子；5—灯泡体

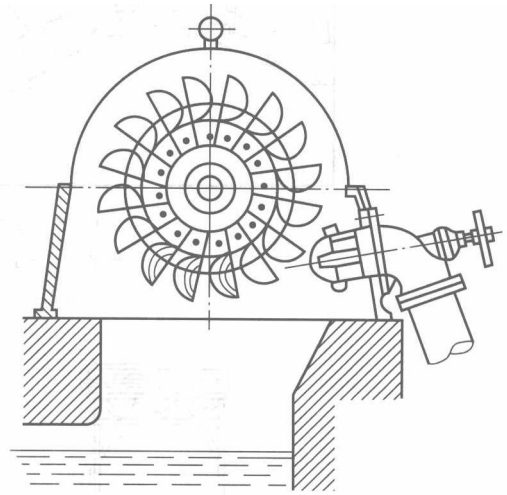


图 1-11 水斗式水轮机

2. 斜击式水轮机

如图 1-12 所示，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

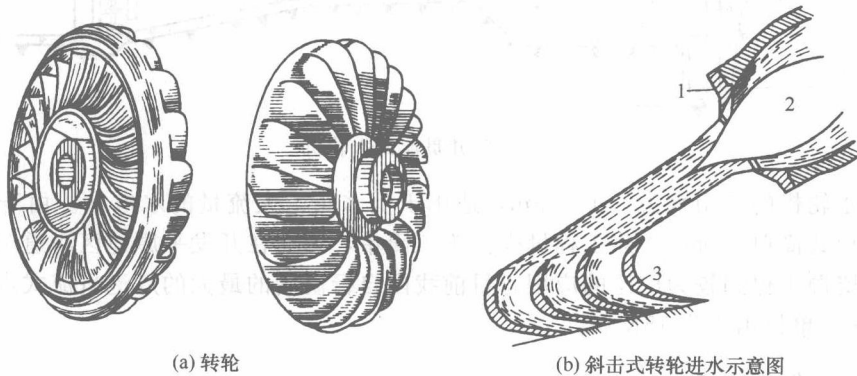


图 1-12 斜击式转轮

1—管帽；2—针阀；3—轮叶

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。

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。

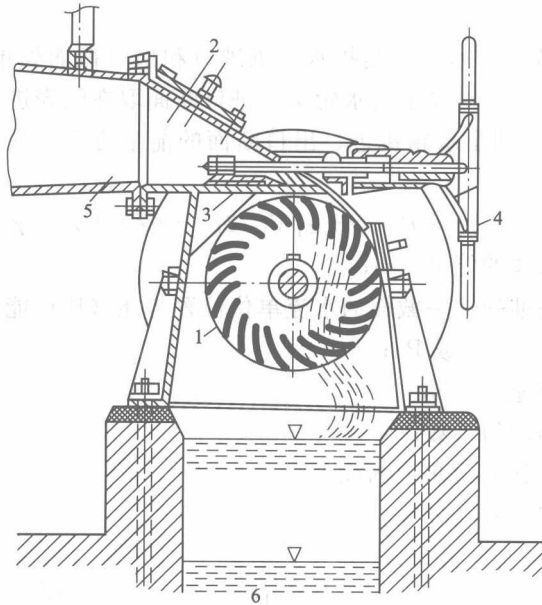


图 1-13 带有闸板阀门的双击式水轮机

1—工作轮；2—喷嘴；3—调节闸板；
4—舵轮；5—引水管；6—尾水槽

各种类型水轮机及其应用水头范围如表 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

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

式中 E ——单位重量水体的能量， m ；

Z ——相对某一基准的某一截面的水流单位位置势能（比位能）， 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 ——水的密度，其值为 $9810N/m^3$ ；

g ——重力加速度， $9.81m/s^2$ 。

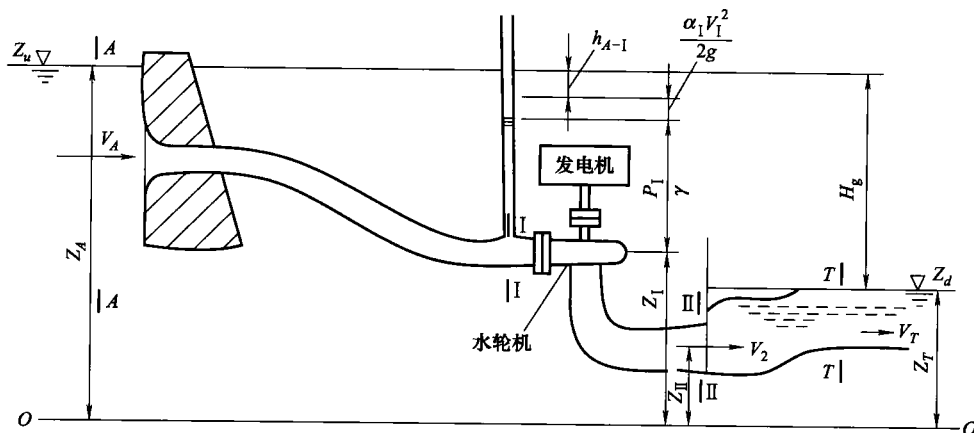


图 1-14 水电站和水轮机的水头示意图

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 称某截面的水流单位压力势能，即比压能，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 ——水电站的毛水头，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，是水轮机发出额定出力时间最长的净水头。

(4) 设计水头 H_r 是水轮机发出额定出力时所需要的水头。

水轮机的水头表明了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特定过流断面的水体积，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

水轮机的出力是指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：

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

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。

$$\eta = P/P_n \quad (1-4)$$

由于水轮机水能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

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

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抗力矩，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：

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

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的型式，阿拉伯数字表示转轮型号，人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号后加“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及布置型式

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。

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。