



高等学校教材

水力机械

(第二版)

西安理工大学 金钟元 编



高等学校教材

水 力 机 械

(第二版)

西安理工大学 金钟元 编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书主要论述在建设水电站、水泵站和抽水蓄能电站中所必备的水力机械基本知识。书中重点论述了常用的大中型水轮机的分类、基本构造、工作原理、动力特性及选择；对水轮机的调速设备（包括调速器及油压装置）、叶片式水泵及可逆式水泵水轮机的结构、工作原理、特性及选择也作了必要的论述；并对水轮机、调速设备和水泵的选择计算作了实例介绍。

本书主要作为高等学校水利水电工程建筑专业水力机械课程的教材，并可供有关专业和工程技术人员参考。

高等学校教材

水 力 机 械

（第二版）

西安理工大学 金钟元 编

*

中国水利水电出版社 出版
(原水利电力出版社)

(北京三里河路6号 100044)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市密云县印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.25印张 251千字

1986年6月第一版

1992年6月第二版 1998年10月北京第五次印刷

印数 21621—24620册

ISBN 7-80124-627-6/TV·343

(原 ISBN 7-120-01472-2/TV·533)

定价: 11.20 元

第一版前言

本书是根据水电部教育司1983年3月颁发（试行）的水利水电工程建筑专业中水力机械教学大纲编写的。考虑到目前的发展和水电建设的需要，书中最后增加了水泵水轮机一章。各校在采用时，可根据具体情况对教材内容进行适当的删减和增补。

本书主要叙述在建设水电站、水泵站和抽水蓄能电站中所必备的水力机械基本知识。全书共分七章，前四章着重叙述了目前常用的大中型水轮机的类型、基本构造、工作原理、特性曲线及选择计算，其中以混流式水轮机和轴流转桨式水轮机作为重点。后三章对水轮机的调速设备（包括调速器及油压装置）、叶片式水泵及水泵水轮机的类型、结构、工作原理、特性及选择计算作了必要的叙述。

本书主要作为水利水电工程建筑专业水力机械课程的教材，并可供有关专业和工程技术人员参考。

本书由武汉水利电力大学王永年副教授审阅，他对书稿提出了许多宝贵意见，谨在此表示衷心感谢。

限于编者的水平，书中的缺点和错误在所难免，希望读者给予指正。

编 者

1984年9月

第 二 版 前 言

本书是根据水电部教育司1983年3月颁发（试行）的水利水电工程建筑专业中水力机械课程教学大纲和第一版教材在教学实践的基础上进行修订的，修订时针对专业培养目标和从实用的观点对各章内容和例题均作了补充和删节，并力求作到有系统有重点，使读者便于阅读和应用。

由于各院校在教学改革中对水力机械课程的设置和学时的分配有所不同，在采用本教材时可本着加强技术基础课的精神根据具体情况对教材内容作适当的删减和增补。

各院校从事水力机械课程教学工作的老师们对本书第二版的编写提供了宝贵意见，武汉水利电力大学王永年教授对书稿再一次作了详细审阅，又提出了许多宝贵意见，谨在此一并表示衷心感谢。

限于编者的水平，在修订中可能仍会有缺点和错误之处，希望读者给予指正。

编 者

1991年5月

目 录

第一版前言	
第二版前言	
绪 论	1
第一章 水轮机的主要类型及其构造	2
第一节 水轮机的工作参数	2
第二节 水轮机的主要类型	4
第三节 水轮机的基本构造	11
第四节 水轮机的型号及标称直径	20
第二章 水轮机的工作原理	22
第一节 水流在反击式水轮机转轮中的运动	22
第二节 水轮机工作的基本方程式	24
第三节 水轮机的效率及最优工况	27
第四节 尾水管的工作原理	29
第五节 水轮机的汽蚀	32
第六节 水轮机的汽蚀系数、吸出高及安装高程	37
第七节 水斗式水轮机的工作原理	42
第三章 水轮机的相似理论及模型综合特性曲线	46
第一节 相似理论概述	46
第二节 水轮机的相似律、单位参数和比转速	47
第三节 水轮机的效率换算与单位参数的修正	53
第四节 水轮机的模型试验	56
第五节 水轮机的飞逸转速和轴向力	59
第六节 水轮机的模型综合特性曲线	62
第四章 水轮机选择	69
第一节 水轮机的标准系列	69
第二节 水轮机的选择	73
第三节 水轮机的工作特性曲线和运转特性曲线	87
第四节 蜗壳的型式及其主要尺寸的确定	101
第五节 尾水管的型式及其主要尺寸的确定	107
第五章 水轮机的调速设备	113
第一节 水轮机调节的基本概念	113
第二节 调节系统的特性	115
第三节 水轮机调速器的基本工作原理	117
第四节 调速器的类型与系列	122
第五节 调速系统的油压装置	125
第六节 水轮机调速设备的选择	128

第六章 叶片式水泵.....	133
第一节 叶片式水泵的类型及工作参数	133
第二节 水泵工作的基本方程式	140
第三节 水泵的特性及运行工况	141
第四节 水泵的汽蚀与安装高度	146
第五节 水泵的选择	148
第七章 水泵水轮机.....	152
第一节 抽水蓄能电站和水泵水轮机	152
第二节 水泵水轮机的理论基础	155
第三节 水泵水轮机的结构与特性	156
第四节 水泵水轮机的选择	162
附录一 水轮机的主要参数	167
附录二 水轮机标准座环尺寸系列.....	170
主要参考书及参考文献.....	171

绪 论

从物理学得知，水流的运动具有动能和势能，而势能又包括位置势能和压力势能，这种水流的运动和水流的能量可以转换为另一种形式的机械运动和机械能；同样，机械运动和机械能也可以转换为水流的运动和水流的能量。水力机械就是实现这种转换的一种机器，将水流能量转换为机械能的机器称为水力原动机，将机械能转换为水流能量的机器称为水力工作机。

由此，水流通过水力机械时能量将发生变化：通过水力原动机时水流的能量将减少，而通过水力工作机时水流的能量将增加。

水轮机是将水流能量转换为转轮旋转机械能的一种水力原动机，它主要利用水流的动能和压能作功，是水电站的主要动力设备，用来带动发电机工作以获取电能。水轮机和发电机联接为一整体，称为水轮发电机组，简称为机组。

水泵是把原动机的机械能传递给水流，使水流能量增加的一种水力工作机，它主要的作用是输送水流。水泵的种类很多，主要有叶片式水泵，容积式水泵和其他类型的水泵（如水锤泵、射流泵等）。其中以叶片式水泵应用最广，它通常是用电动机或内燃机通过泵轴带动水泵的叶轮旋转，旋转着的叶轮对水流作功使其能量增加，从而把一定的流量输送到要求的高度或要求有压力的地方。电动机和水泵联接为一整体，称为水泵抽水机组。

水轮机和水泵是现代最重要和最通用的水力机械，水轮机主要用于水力发电，而水泵则在灌溉、排水、工业供水和城市生活用水等方面起着很大作用。

自1931年以来，一种可逆式水力机械得到了广泛的应用并取得了很大的发展。这种可逆式水力机械的转轮，当它正向旋转时可以将水流的能量转换为机械能，而在反向旋转时又能将机械能转换为水流能量。水泵水轮机就是一种可逆式水力机械，它应用同一转轮，利用刚体叶片的可逆性质，即可作水轮机运行又可作水泵运行，因而它具有结构紧凑、设备及建筑投资少和运行灵活可靠等优点，所以被广泛应用于抽水蓄能电站上。近年来，随着抽水蓄能电站的大量建设和规模不断扩大，可逆式水泵水轮机也正在向着高效率、高水头和大容量的方向发展。

本书着重论述目前在水电站、供排水系统和抽水蓄能电站中广泛使用的水轮机、叶片式水泵和水泵水轮机，对其他一些水力机械，如水力传动机械（水轮泵等）和水力推进机械（船舶螺旋桨等）等，将不作为本书的内容。

第一章 水轮机的主要类型及其构造

第一节 水轮机的工作参数

水轮机在不同工作状况（以下简称工况）下的性能，通常是用水轮机的工作水头、流量、出力、效率、工作力矩及转速等参数以及这些参数之间的关系来表示，现将这些参数的意义分述如下：

一、工作水头

水轮机的工作水头如图1-1所示，水流从上游水库进水口经压力管道流入水轮机做功后，再由尾水管排入下游尾水渠。所以水轮机的工作水头 $H(\text{m})$ 应为水轮机进口断面(B—B)和尾水管出口断面(C—C)处单位重量水流能量之差，当采用下游水面为基准面时，则可写为：

$$H = E_B - E_C \quad (1-1)$$

其中

$$E_B = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g} \quad (1-2)$$

式中 E_B 、 E_C ——单位重量水流的能量，m；
 Z_B ——相对于基准面的单位位能，m；
 P ——压强，N/m²或Pa；
 V ——过水断面的平均流速，m/s；

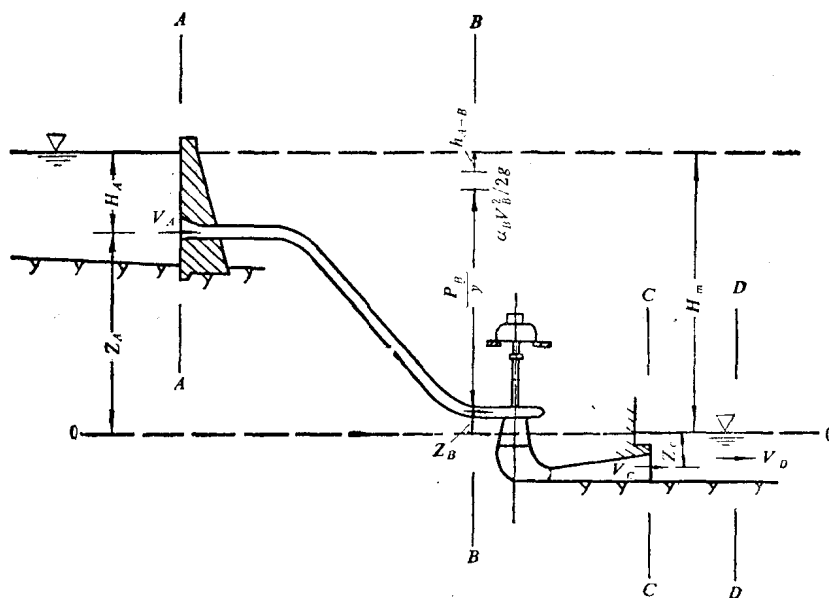


图 1-1 水电站和水轮机水头示意图

α ——动能校正系数;

γ ——水的重度, 其值为 9810 N/m^3 ;

g ——重力加速度, 一般为 9.81 m/s^2 。

为了求得单位压力势能 $\frac{P_B}{\gamma}$, 则可列出上游进水口 $A-A$ 断面和水轮机进口 $B-B$ 断面之间的伯诺里方程式:

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{\alpha_B V_B^2}{2g} + h_{A-B} \quad (1-3)$$

式中 h_{A-B} 是进水口和压力管道中的水头损失, 它包括沿程损失和局部损失, 这可根据工程情况予以计算。

如果采用相对压力表示, 并忽略水电站上、下游表面大气压力的差别, 则上式中 $Z_A + \frac{P_A}{\gamma} = Z_A + H_A = H_m$, H_m 称为水电站的毛水头, 即上下游水位之差, 于是可以得到:

$$\frac{P_B}{\gamma} = H_m - Z_B + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g} - \frac{\alpha_B V_B^2}{2g} - h_{A-B} \quad (1-4)$$

将 (1-4) 式代入 (1-2) 式, 则有:

$$E_B = H_m + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g} - h_{A-B} \quad (1-5)$$

对尾水管出口 $C-C$ 断面:

$$E_C = \frac{\alpha_C V_C^2}{2g} - Z_C \quad (1-6)$$

将 (1-5) 式及 (1-6) 式代入 (1-1) 式, 则得:

$$H = H_m - h_{A-B} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g} - \frac{\alpha_C V_C^2}{2g} + Z_C \quad (1-7)$$

如果取尾水管 $D-D$ 断面时:

$$E_D = \frac{\alpha_D V_D^2}{2g} \quad (1-8)$$

则

$$H = E_B - E_D = H_m - h_{A-B} + \frac{\alpha_A V_A^2}{2g} - \frac{\alpha_D V_D^2}{2g} \quad (1-9)$$

考虑到上游 $A-A$ 断面和下游 $D-D$ 断面处流速都很小, 当忽略其流速水头差时, 则水轮机的工作水头为:

$$H = H_m - h_{A-B} \quad (1-10)$$

(1-10) 式表明, 水轮机的工作水头即等于水电站毛水头扣除压力引水系统中水头损失后的净水头, 这也就是水轮机利用的有效水头。

水轮机的工作水头随着水电站上、下游水位的变化也经常发生变化。为此, 一般选用几个特征水头来表示水轮机的运行工况和运行范围, 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_0 和设计水头 (也称为计算水头) H_r , 这些特征水头由水能计算确定。

二、流量

水轮机的流量是水流在单位时间内通过水轮机的体积,通常用 Q 表示,其单位为 m^3/s 。水轮机的引用流量主要随着水轮机的工作水头和出力的变化而变化。在设计水头下水轮机以额定出力工作时其过水流量最大。

三、出力和效率

水头为 $H(\text{m})$,流量为 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 的水流,通过水轮机时,给予水轮机的输入功率 N_s 为:

$$N_s = \gamma Q H = 9810 Q H \quad (\text{W}) \quad (1-11)$$

在实际应用中,功率通常用 kW 表示:

所以
$$N_s = 9.81 Q H \quad (\text{kW}) \quad (1-12)$$

水轮机轴端的输出功率,也称为水轮机的出力,用 N 表示,单位为 kW ,由于水流通过水轮机进行能量转换时,产生了水力损失、漏水损失和机械损失,因而水轮机的出力 N 要小于它的输入功率 N_s 。把水轮机的出力与其输入功率的比值称为水轮机的效率,用 η 表示:

则
$$\eta = \frac{N}{N_s} \quad (1-13)$$

$$N = N_s \eta = 9.81 Q H \eta \quad (\text{kW}) \quad (1-14)$$

水轮机的效率也常用百分数表示,现代大型水轮机的最高效率可达90%~95%。

四、工作力矩与转速

水轮机的出力使主轴旋转作功,因而出力亦可用旋转机械运动的公式来表达:

$$N = M \omega = M \frac{2\pi n}{60} = \gamma Q H \eta \quad (\text{W}) \quad (1-15)$$

式中 M 为水轮机主轴上的工作力矩($\text{N}\cdot\text{m}$),它是用来克服发电机对主轴形成的阻力矩。 ω 为水轮机旋转角速度(rad/s)。 n 为水轮机的转速(r/min),对大中型水轮发电机组,水轮机的主轴和发电机轴都是用法兰和螺栓直接刚性联接的,所以水轮机的转速和发电机的转速相同并符合标准同步转速,即应满足下列关系式:

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-16)$$

式中 f ——电流频率,我国规定为50Hz;

p ——发电机的磁极对数。

所以
$$n = \frac{3000}{p} \quad (\text{r/min}) \quad (1-17)$$

对不同磁极对数的发电机,其标准同步转速见表4-7。

对一定的发电机,其磁极对数也一定,因此为了保证供电质量,使电流频率保持50Hz不变,在正常情况下,机组的转速亦应保持为相应的固定转速,此转速称为水轮机或机组的额定转速。

第二节 水轮机的主要类型

由于各个水电站上水头、流量和出力的差别往往较大,因此需要设计和制造各种类型

的水轮机以求高效率地适应不同情况的需要，从而达到充分利用水力资源的目的。

不同类型的水轮机，其水流能量转换的特征也不一样。水轮机的转轮是将水流能量转换为旋转机械能的核心部分，如图1-2所示，取转轮进口点①和转轮出口点②，则转轮所利用的单位水重的能量 H 即为①点和②点的能量之差，当忽略其间的水力损失时可用下式表示：

$$H = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (1-18)$$

上式亦可写为：

$$\frac{\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right)}{H} + \frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2gH} = 1$$

令

$$\frac{\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right)}{H} = E_p$$

$$\frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2gH} = E_c$$

即

$$E_p + E_c = 1 \quad (1-19)$$

(1-19) 式表明水轮机所利用的水流能量为水流势能量 E_p 与水流动能 E_c 的总和。

若 $E_p = 0$ ，则 $E_c = 1$ ，这种完全利用水流动能工作的水轮机称为冲击式水轮机。

若 $0 < E_p < 1$ ， $E_p + E_c = 1$ ，这种同时利用水流动能和势能工作的水轮机称为反击式水轮机。

由此，按水流作用原理可将水轮机分为反击式和冲击式两大类，而每一大类又有多种不同型式的水轮机，现分述如下：

一、反击式水轮机

反击式水轮机的转轮是由若干个具有空间扭曲面的刚性叶片组成，当压力水流通过整个转轮时，由于弯曲叶道迫使水流改变其流动的方向和流速的大小，因而水流便以其势能和动能给叶片以反作用力，并形成旋动力矩使转轮转动。

反击式水轮机按转轮区水流相对于主轴的方向不同又可分为混流式、轴流式、斜流式和贯流式水轮机。

1. 混流式水轮机

混流式水轮机，如图1-2所示，水流流经转轮时，以辐向从四周进入转轮而以轴向流出转轮，故称为混流式水轮机。这种水轮机的适用水头范围为30~700m，由于其适用水头范围广，而且结构简单，运行稳定，效率高，所以是现代应用最广泛的一种水轮机。我国刘家峡水电站30万kW和龙羊峡水电站32万kW的水轮发电机组应用的就是这种水轮机。

2. 轴流式水轮机

轴流式水轮机，如图1-3所示，这种水轮机的水流在进入转轮之前，流向已经变得与水轮机主轴中心线平行，因此水流在经过转轮时沿轴向进入而又依轴向流出，所以称为轴流式水轮机。

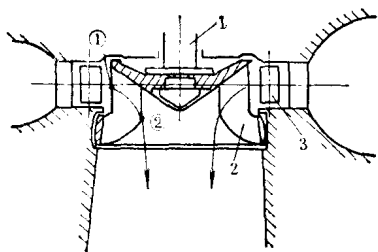


图 1-2 混流式水轮机
1—主轴；2—叶片；3—导叶

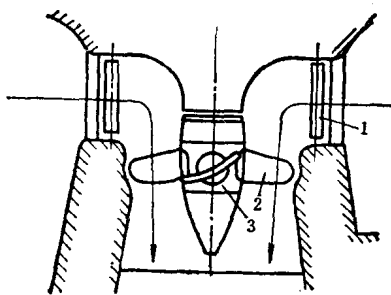


图 1-3 轴流式水轮机
1—导叶；2—叶片；3—轮毂

轴流式水轮机按其叶片在运行中能否转动的情况又可分为定桨式和转桨式两种：轴流定桨式水轮机在运行时其叶片是固定不动的，因而其结构简单，但当水头和流量变化时，其效率相差较大，所以多应用在负荷变化不大，水头和流量比较固定的小型水电站上，其适用水头范围一般为3~50m；轴流转桨式水轮机在运行时转轮的叶片是可以转动的，并和导叶的转动保持一定的协联关系，以适应水头和流量的变化，使水轮机在不同工况下都能保持有较高的效率，因此轴流转桨式水轮机多应用在大中型水电站上，其应用水头范围为3~80m，我国长江葛洲坝水电站上17万kW和12.5万kW的水轮发电机组应用的就是这种水轮机。

3. 斜流式水轮机

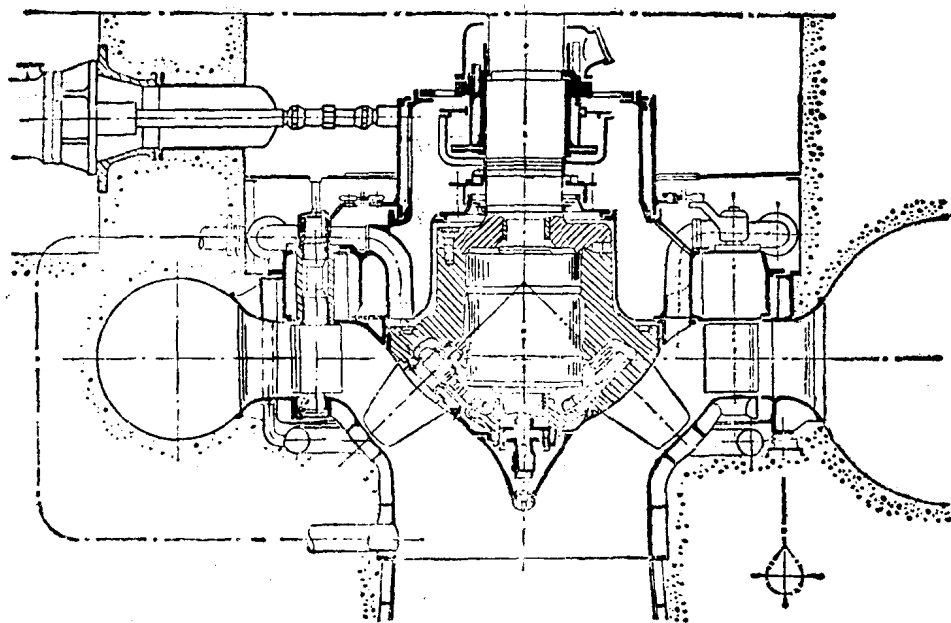


图 1-4 X1.003-LJ-160斜流式水轮机剖面图

斜流式水轮机，如图1-4所示，水流流经转轮时倾斜于轴向，故称为斜流式水轮机。这种水轮机转轮的叶片也是可以转动的，叶片的轴线与主轴轴线斜交，因而与轴流转桨式水轮机相比较就能装置较多的叶片（一般轴流式水轮机为4~8片，斜流式水轮机为8~12片），适用水头范围也有所提高，一般为40~120m。1969年我国制成了第一台斜流式水轮机并在毛家村水电站安装运行，其容量为8000kW，图1-4即为该水轮机的剖面图。1973年为密云水电站制成了15000kW的斜流式水泵水轮机。目前正在向高水头大容量方面发展。

4. 贯流式水轮机

当轴流式水轮机的主轴装置成水平或倾斜，而且不设置蜗壳，使水流直贯转轮，这种水轮机称为贯流式水轮机，它是开发低水头水力资源的新型机组，适用于水头小于20m的情况。由于发电机装置方式的不同，这种水轮机又可分为全贯流式和半贯流式两大类。

如图1-5所示，将发电机转子安装在转轮外缘时称为全贯流式水轮机。它的优点是水力损失小，过流量大，结构紧凑，但由于转子外缘线速度过大，而且密封十分困难，故应用较少。

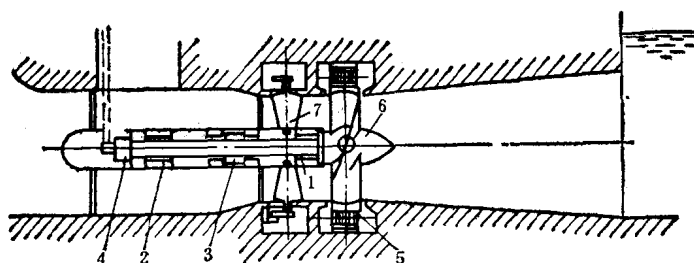


图 1-5 全贯流式水轮机

1、2—径向轴承；3—推力轴承；4—受油器；5—发电机转子与外围的定子；
6—水轮机转轮；7—圆盘式导叶

为了避免上述问题，发电机可采用轴伸式、竖井式和灯泡式装置，采用这种装置的水轮机统称为半贯流式水轮机。

轴伸式装置，如图1-6所示，其特点是将水轮机主轴向下游伸出尾水管以外，并与安装在尾水管外面的发电机相联接。

竖井式装置，如图1-7所示，其特点是将发电机布置在混凝土竖井内，水轮机布置在竖井下游，两者以主轴直接联接，上游来水可从两边绕过竖井进入水轮机转轮。

灯泡式装置，如图1-8所示，其特点是将发电机布置在灯泡型的密闭机壳内并与壳体下游的水轮机直接联接，此时水流可从四周绕过壳体进入水轮机。

前两种半贯流式水轮机结构简单，发电机的安装、运行和检修都较方便，但由于应用水头较低，效率也低，机组容量不大，故多应用于小型水电站中。后一种灯泡贯流式机组，由于其结构紧凑，流道平直，过流量大，多适用于较大容量的机组。我国马迹塘水电站的设计水头为6.2m，应用的就是这种机组，其单机容量为2万kW，过水流量为362 m³/s。

二、冲击式水轮机

冲击式水轮机主要由喷管和转轮组成。来自钢管的高压水流通过喷管端部的喷嘴变为

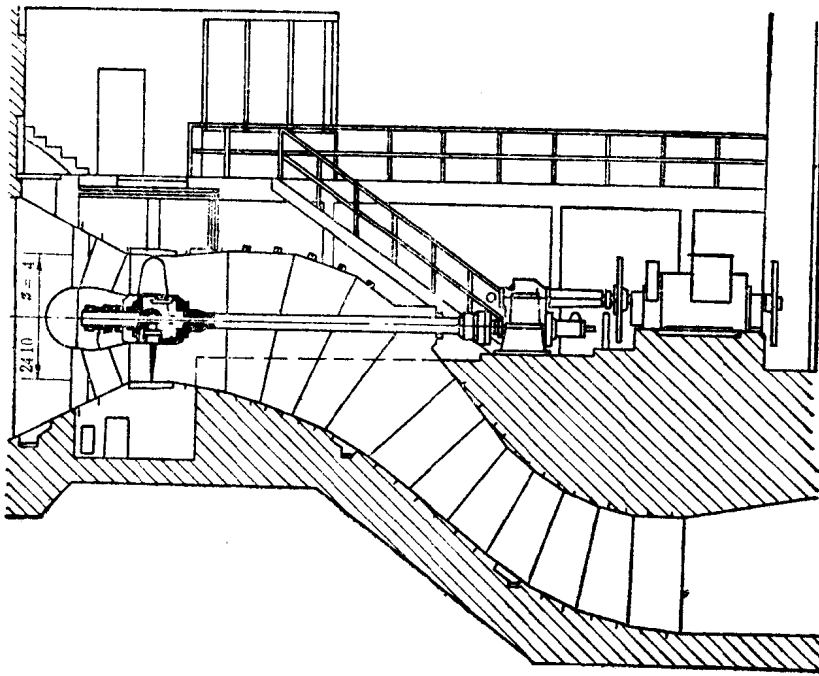


图 1-6 轴伸贯流式机组

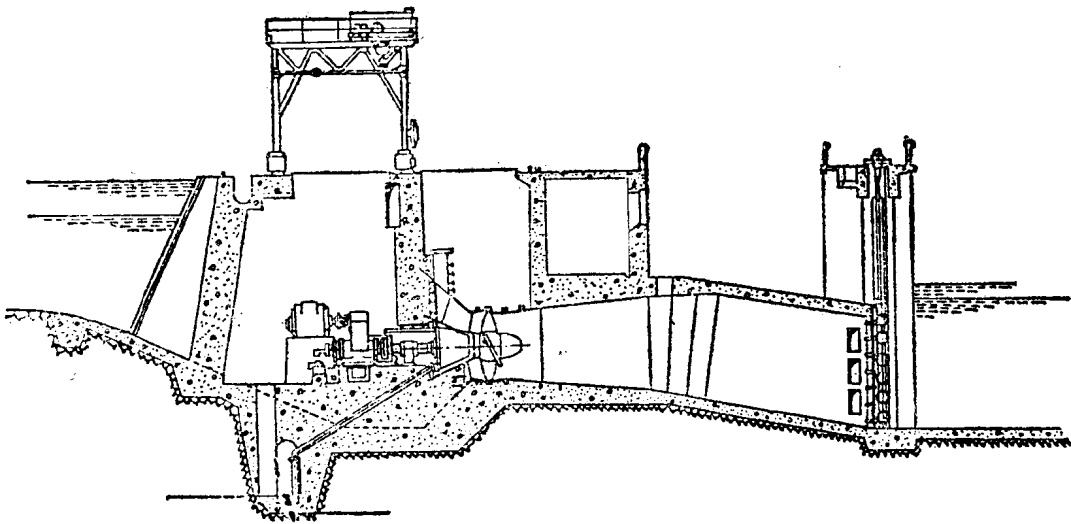


图 1-7 竖井贯流式机组

具有高速的自由射流，此时射流内的压力为大气压力，而且在整个工作过程中都不发生变化。当射流冲击转轮时，从进入到离开转轮的过程中，其速度的大小和方向也都发生变化，因而将其动能传给转轮，并形成旋转力矩使转轮转动。冲击式水轮机按射流冲击转轮的方式不同又可分为水斗式、斜击式和双击式三种。

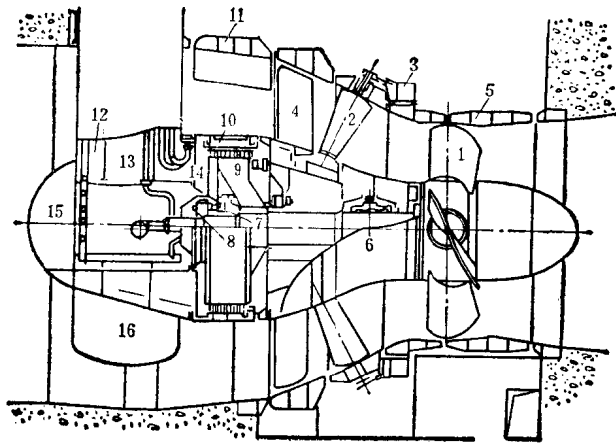


图 1-8 灯泡贯流机组

1. 水斗式水轮机

水斗式水轮机，如图1-9所示，其特点是由喷嘴出来的射流沿圆周切线方向冲击转轮上的水斗而做功，它的适用水头范围为100~2000m。

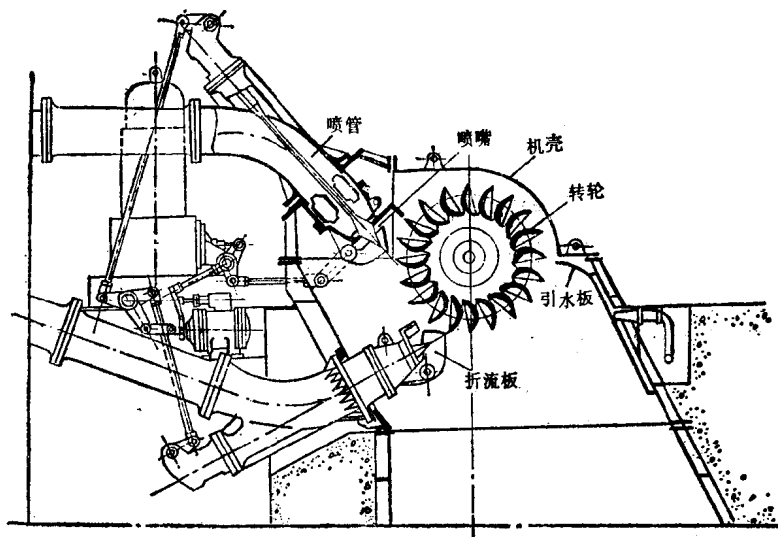


图 1-9 水斗式水轮机

2. 斜击式水轮机

斜击式水轮机如图1-10所示，其特点是由喷嘴出来的射流，是沿着与转轮平面成某一

α 角 (约为 22.5°) 的方向冲击转轮, 它的实用水头范围为 $25 \sim 300\text{m}$ 。

3. 双击式水轮机

双击式水轮机如图1-11所示, 其特点是由喷嘴出来的射流首先从转轮外缘冲击叶片, 接着水流又自内缘再一次冲击叶片, 它的适用水头范围为 $5 \sim 80\text{m}$ 。

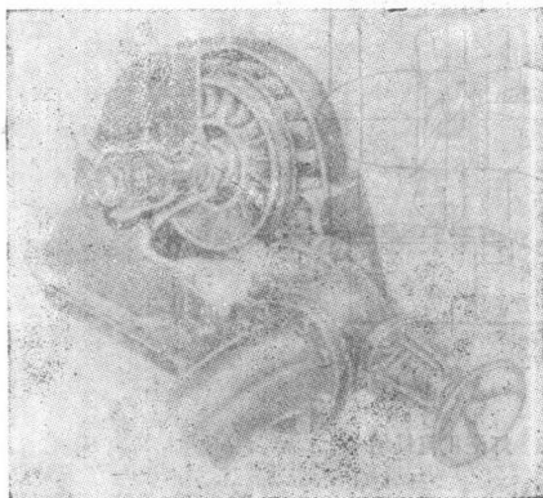
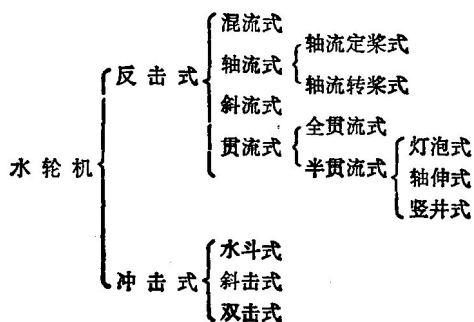


图 1-10 斜击式水轮机

斜击式和双击式水轮机构造简单, 但效率较低, 因而多用于小型水电站。水斗式水轮机效率高, 工作稳定, 适用水头范围广, 因而是现代最常用的一种冲击式水轮机, 我国磨坊沟水电站安装运行的水斗式水轮发电机组, 其单机容量为 12500kW , 设计水头为 458m ; 最近在广西天湖水电站安装的水斗式水轮发电机组, 其单机容量为 12625kW , 设计水头 $H = 1022.4\text{m}$, 设计流

量为 $1.8\text{m}^3/\text{s}$, 额定转速为 $780\text{r}/\text{min}$, 是我国应用水头最高的水斗式水轮机。

根据以上所述, 现将各类水轮机归纳简列于下:



对于抽水蓄能电站所应用的可逆式水轮机, 通常有混流式、斜流式、轴流式和贯流式。

大中型水电站的水轮发电机组大都采用竖向立式装置, 水轮机轴和发电机轴的中心线均在同一铅垂线上, 通过法兰盘用螺栓刚性联接。这样, 使发电机安装的位置较高不易受潮, 机组的传动效率高, 安装、拆卸、维护管理方便, 而且水电站厂房占地面积小, 也易于布置。