

高等学校教材

水力机械

金 钟 元

水利电力出版社

3.6
57

高等学校教材

水 力 机 械

金 钟 元

水利电力出版社

高等学校教材
水 力 机 械
金钟元

*

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 10.25印张 227千字
1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷
印数0001—6420册 定价2.15元
书号 15143·5950·70

内 容 提 要

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。书中重点叙述了目前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）、叶片式水泵以及可逆式水泵水轮机的结构、工作原理、特性及选择也都作了必要的论述；并对水轮机和水泵的选择计算也作了实例介绍。

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。

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。考虑到水力机械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。本书共分七章,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、特性及选择计算也都作了必要的叙述。

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学院王永年副教授审阅,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

目 录

前 言

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 水轮机的主要类型及其构造	4
第三节 水轮机的牌号及标称直径	18
第二章 水轮机的工作原理	20
第一节 水流在反击式水轮机转轮中的运动	20
第二节 水轮机的基本方程式	22
第三节 水轮机的效率及最优工况	24
第四节 尾水管的工作原理	27
第五节 水轮机的汽蚀	30
第六节 水轮机的汽蚀系数、吸出高及安装高程	35
第七节 水斗式水轮机的工作原理	40
第三章 水轮机的相似原理及主要综合特性曲线	43
第一节 相似原理的概述	43
第二节 水轮机的相似定律、单位参数和比转速	45
第三节 水轮机的效率换算与单位参数的修正	50
第四节 水轮机的模型试验	53
第五节 水轮机的主要综合特性曲线	56
第四章 水轮机选择	64
第一节 水轮机的标准系列	64
第二节 水轮机选择	68
第三节 水轮机的工作特性曲线和运转特性曲线	81
第四节 蜗壳的型式及其主要尺寸的确定	95
第五节 尾水管的型式及其主要尺寸的确定	101
第五章 水轮机的调速设备	107
第一节 水轮机调节的基本概念	107
第二节 调节系统的特性	108
第三节 水轮机调速器的基本工作原理	112
第四节 调速器的类型与系列	116
第五节 调速系统的油压装置	118
第六节 水轮机调速设备的选择	120
第六章 叶片式水泵	123
第一节 水泵的类型及工作参数	123

第二节 水泵的基本能量方程式	128
第三节 水泵的特性及运行工况	130
第四节 水泵的汽蚀与安装高度	136
第五节 水泵的选择	138
第七章 水泵水轮机	141
第一节 水泵水轮机的应用	141
第二节 水泵水轮机的结构与特性	142
第三节 水泵水轮机的选择	149
附录	153
主要参考书及参考文献	156

水 力 机 械

从物理学知，液体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，这种液体的运动可以转换为另一种形式的机械运动；同样，机械运动和机械能也可以转换为液体的运动和液体能。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。

水流经过水力机械时，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水力原动机，它是水电站厂房中的主要动力设备之一，用来带动发电机工作以获取电能。水轮机和发电机连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。其主要的作用是输送水流，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做功使其能量增加，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。

水轮机和水泵是现代最重要和最通用的水力机械，它已被广泛应用到国民经济各部门中，特别是在水利和水电建设中。对发电、灌溉、排水、工业供水和城市生活用水等方面，都起着很大的作用。

自1931年以来，一种可逆式水力机械得到了广泛的应用和取得了很大的发展。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，而在反方向旋转时又能将机械能转换为水流的能量。水泵水轮机就是一种可逆式水力机械，它应用同一转轮既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，所以被广泛应用在抽水蓄能电站上。抽水蓄能电站有上、下游两座水库并形成一定的落差，在系统尖峰负荷时上游水库放水，水泵水轮机正转作水轮机运行，并带动发电机发电；在系统低谷负荷时，可利用系统多余的电能使发电机反方向旋转作电动机运行，带动转轮作水泵运行从而将下游水库的水抽送到上游水库以水的势能方式储存起来。由于能量的往复转换、损失较大，所以这种抽水蓄能电站的综合效率是比较低的（一般在60~70%）。但它消耗的是系统多余的电能，而提供的却是系统急需的峰荷电能，因而对系统负荷起到了调峰填谷的作用，所以经济效益是很显著的。随着抽水蓄能电站的大量建设和规模的不断扩大，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。

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明。现将这些参数的意义分述如下：

一、工作水头

水轮机工作水头如图1-1所示，水流从上游水库进口经压力管道流入水轮机后，再由尾水管排入下游河道。所以水轮机的工作水头 H （米）应为水轮机进口断面（ $B-B$ 断面）和尾水管出口断面（ $C-C$ 断面）处单位重量水流能量之差，即

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

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

- 式中 E ——单位重量水流的机械能（ m ），
 Z ——单位位能（ m ），
 P ——压力（ Pa ），
 V ——流速（ m/s ），
 α ——动能校正系数，
 γ ——水的重度， $\gamma = \rho g$ ，其值为 9810N/m^3 ，
 ρ ——水的密度，一般为 1000kg/m^3 ，
 g ——重力加速度，一般为 9.81m/s^2 。

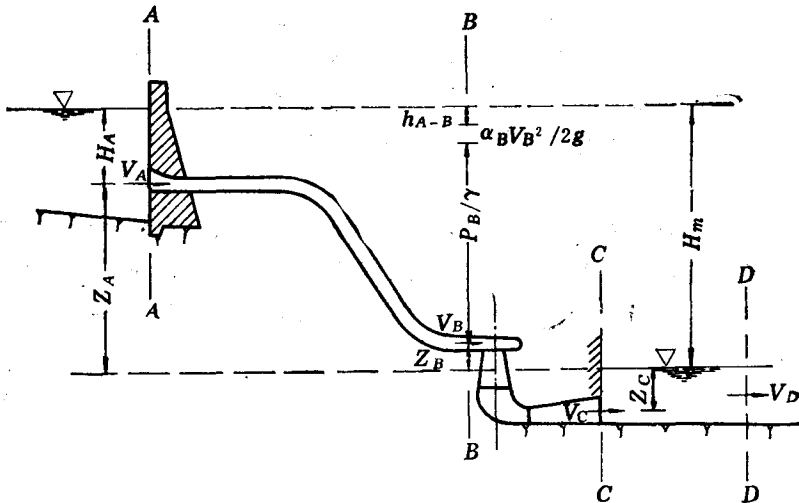


图 1-1 水电站和水轮机水头示意图

为了求得单位压力势能 $\frac{P_B}{\gamma}$ ，可列出上游进口 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} 是压力管道中的水头损失，包括沿程损失和局部损失，这可根据工程情况予以计算。

如果采用相对压力和采用下游水面为基准面时，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

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

如果取尾水渠 D-D 断面为出口断面时

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

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

考虑到上游 A-A 断面和下游 D-D 断面处流速都很小，当忽略其速度水头差时，则水电站的工作水头为

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

这也就是说，水轮机的工作水头即等于水电站的净水头。

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，一般用几个特征水头来表明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_{av} 和设计水头（也称为计算水头） H_r ，这些特征水头可由水能计算求得。

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，通常以 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

当水头为 $H(\text{m})$ ，流量为 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 的水流，流经水轮机时，给予水轮机的功率 N_s 为

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

在实际应用中，功率通常用千瓦表示，所以

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

水轮机的输出功率，也称为水轮机的出力，用 N 表示，单位为千瓦，由于水流通过水轮机时有摩擦和漏水等损失，所以水轮机的出力 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

$$\eta = \frac{N}{N_s} \times 100\% \quad (1-13)$$

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

现代大中型水轮机的最高效率一般在 90~95%。

四、工作力矩与转速

水轮机的出力亦可用旋转机械运动的形式表示为

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

式中 M 为水轮机主轴上的旋转工作力矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)，它是用作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，水轮机的主轴与发电机的轴都是直接连接的，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。

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

对不同磁极对数时的发电机标准同步转速见表 4-8。

第二节 水轮机的主要类型及其构造

一、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来适应不同情况的需要，以便充分而有效地利用水力资源。

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_0 即为①点和②点的能量之差，当忽略其间的水头损时可用下式表示

$$H_0 = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (1-18)$$

上式亦可写为

$$\frac{\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma}\right)}{H_0} + \frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2gH_0} = 1$$

令

$$\frac{\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma}\right)}{H_0} = E_P$$

$$\frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2gH_0} = E_C$$

即 $E_P + E_C = 1$

上式表明水轮机所利用的水流能量为水流势能量 E_P 与水流动能量 E_C 的总和。

若 $E_P = 0$, $E_C = 1$, 这种利用水流动能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的水轮机称为反击式水轮机。

由此, 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型式不同的水轮机, 现分述如下:

1. 反击式水轮机

反击式水轮机的转轮是由若干个具有空间曲面的叶片组成, 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转轮以反作用力, 并形成旋转载矩使转轮转动。

反击式水轮机按水流经过转轮的方向不同又分为混流式、轴流式、斜流式和贯流式水轮机。

(1) 混流式水轮机: 如图 1-2 所示, 水流流经转轮时, 以幅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。它的水头应用范围一般为 20~450m, 目前最高已应用到 672m, 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 的水轮发电机组应用的就是混流式水轮机。

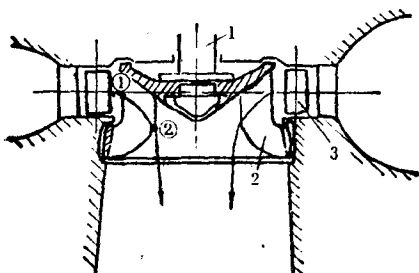


图 1-2 混流式水轮机
1—主轴, 2—叶片, 3—导叶

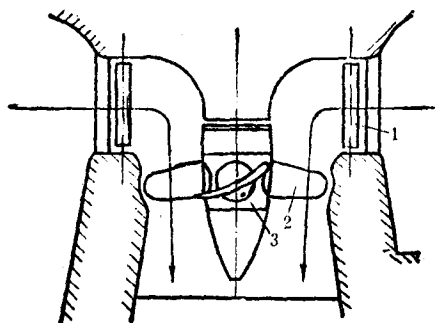


图 1-3 轴流式水轮机
1—导叶, 2—叶片, 3—轮毂

(2) 轴流式水轮机: 如图 1-3 所示, 这种水轮机水流在进入转轮之前, 流向已经变得和水轮机轴平行, 因此, 水流在通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。它的水头应用范围一般在50m以下，目前最高已应用到88m。轴流式水轮机按其叶片结构上的特点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，所以多应用于负荷变化不大、水头和流量比较固定的小型水电站上。轴流转桨式水轮机在运行时转轮的叶片是可以转动的，以适应水头和流量的变化，使水轮机在不同工作状况（以下简称工况）下都能保持较高的效率，因此轴流转桨式水轮机多用在大中型水电站上。在我国长江葛洲坝水电站上，17万kW和12.5万kW的轴流转桨式水轮发电机组已安装运行。

（3）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。这种水轮机在结构和特性方面均介于混流式和轴流转桨式水轮机之间，它的水头应用范围一般在20~200米之间。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。1973年为密云水电站制成15000kW的斜流式水泵水轮机，目前正在进一步试制10万kW的斜流式水泵水轮机。

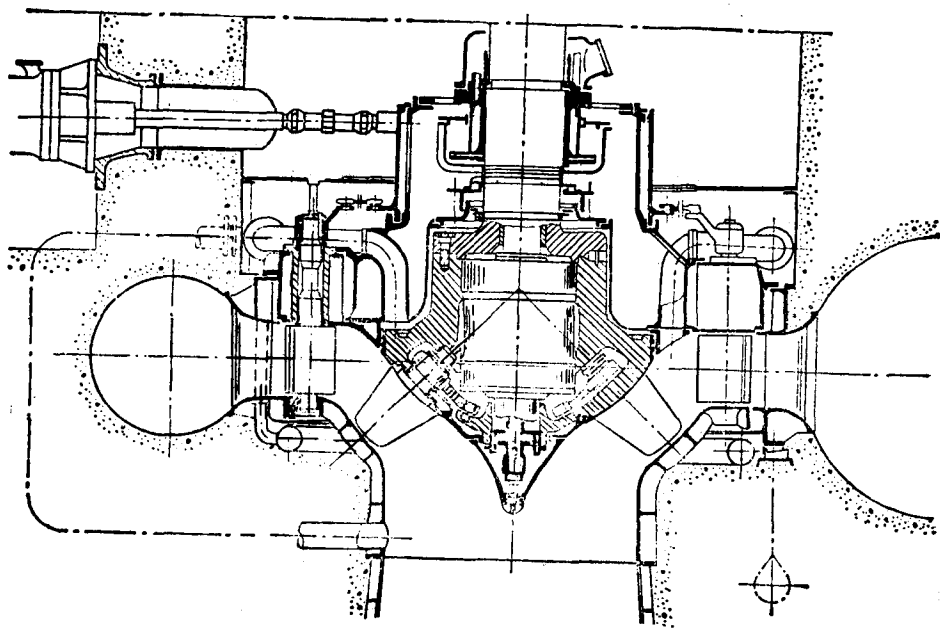


图 1-4 XL003-LJ-160斜流式水轮机剖面图

（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型，适用于水头小于20m的情况。由于发电机装置的不同，这种水轮机又分为全贯流式和半贯流式两大类。将发电机转子安装在转轮外缘时称为全贯流式水轮机，但由于转轮外缘线速度较大，而且密封十分困难，故现已很少使用。当发电机采用灯泡式或其他轴伸式、竖井式布置时的这种水轮机统称为半贯流式水轮机。其中灯泡贯流式水轮机组应用较为广泛，如图1-5所示。这种机组是将发电机装置在灯泡型的密闭机壳内并与水轮机直接连接，这样机组结构紧凑，流道形状平直，水力效率较高。我国已制成直径为5.5m、单机容量

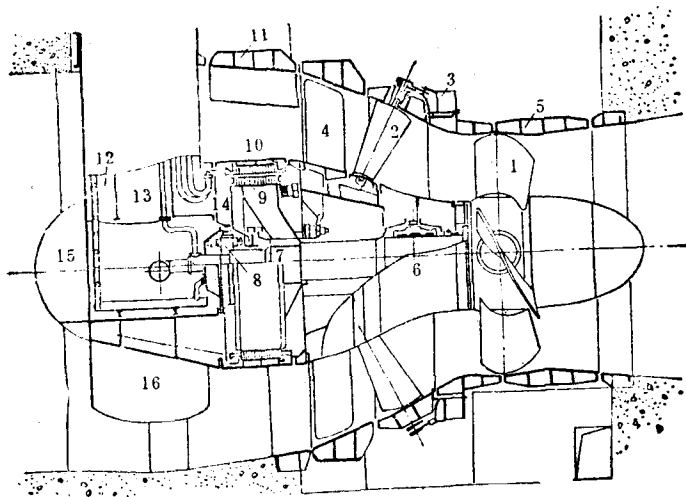


图 1-5 灯泡贯流式机组

为 1 万 kW 的灯泡贯流式机组，安装在白垢水电站中。

2. 冲击式水轮机

冲击式水轮机主要由喷嘴和转轮组成。来自压力钢管的高压水流通过喷嘴变为具有动能的自由射流，此射流内的压力为大气压力，而且在整个工作过程中不发生变化。当射流冲击轮叶时，从进入到离开转轮的过程中，速度的大小和方向都发生变化，因而将其动能传给转轮，并形成旋转载矩使转轮转动。冲击式水轮机按射流冲击转轮的方式不同又分为水斗式、斜击式和双击式三种。后两种结构简单便于制造，但效率较低，多应用在小型水电站上。水斗式水轮机是目前应用最广泛的一种冲击式水轮机，如图 1-6 所示，它适用于

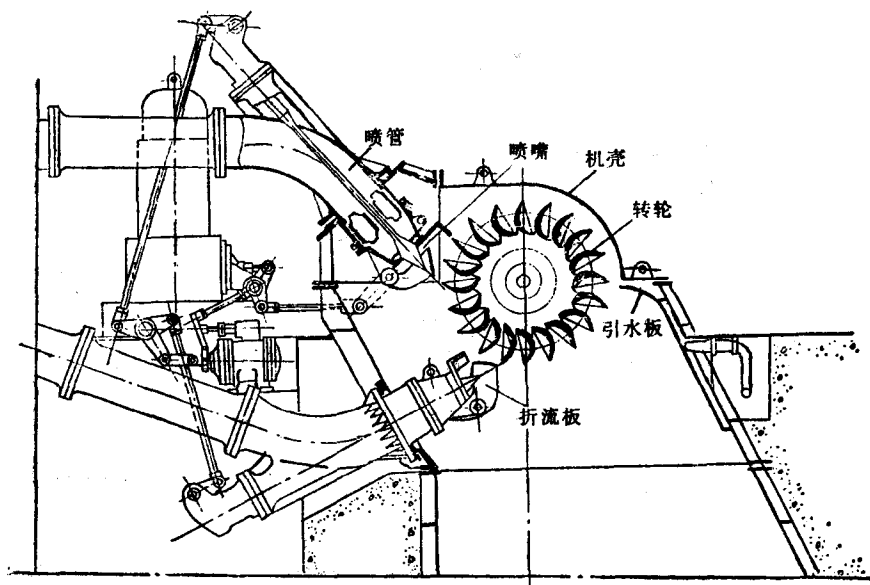
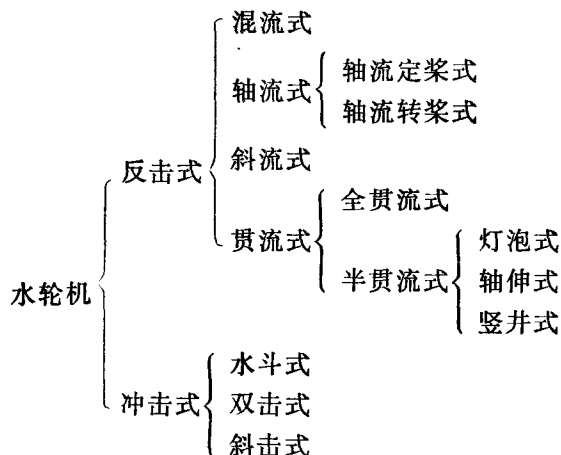


图 1-6 水斗式水轮机

高水头小流量的情况，现代大型水斗式水轮机的水头应用范围大都在 400~1000m，世界上最高水头已应用到1767m。我国磨坊沟所安装的水斗式水轮机组单机容量为12500kW，设计水头为458m。

根据以上所述，现将各种类型的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，通常应用的也有混流式、斜流式、轴流式和贯流式。

大中型水电站上的水轮发电机组多采用竖向立式装置，水轮机轴和发电机轴在同一铅垂线上，并通过法兰盘用螺栓直接连接。这样使发电机安装的位置较高不易受潮，机组的传动效率最高、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。

二、水轮机的基本构造

现代水轮机一般是由进水设备、导水机构、转轮和出水设备所组成。对于不同类型的水轮机，上述四个组成部分在型式上都具有其特点，其中转轮是直接将水能转换为旋转机械能的过流部件，它对水轮机的性能、结构、尺寸等都起着决定性的作用，是水轮机的核心部分。现将几种主要水轮机的基本构造分述如下：

（一）混流式水轮机的构造

图1-7是混流式水轮机的结构图，图1-8是沿水轮机蜗壳中心的水平剖面图。压力水流通过进水设备——蜗壳，流经座环1，导叶2，进入转轮3，经过转轮做功后再由转轮尾部的出水设备——尾水管排入下游。为了密封水流和支承导水机构，在转轮上部设有顶盖4，并固定在座环上。水轮机主轴11的下端用法兰和螺栓与转轮相连接，上端与发电机轴相连接。

1. 转轮

混流式水轮机的转轮基本上是由上冠、叶片、下环、止漏环及泄水锥等组成，如图1-9所示。

上冠的外形与圆锥体相似，其上面有法兰与主轴连接，在法兰外围开有几个减压孔，将冠体上、下的水流连成通路，以减小作用在转轮上的轴向水压力，在上冠的下端固定

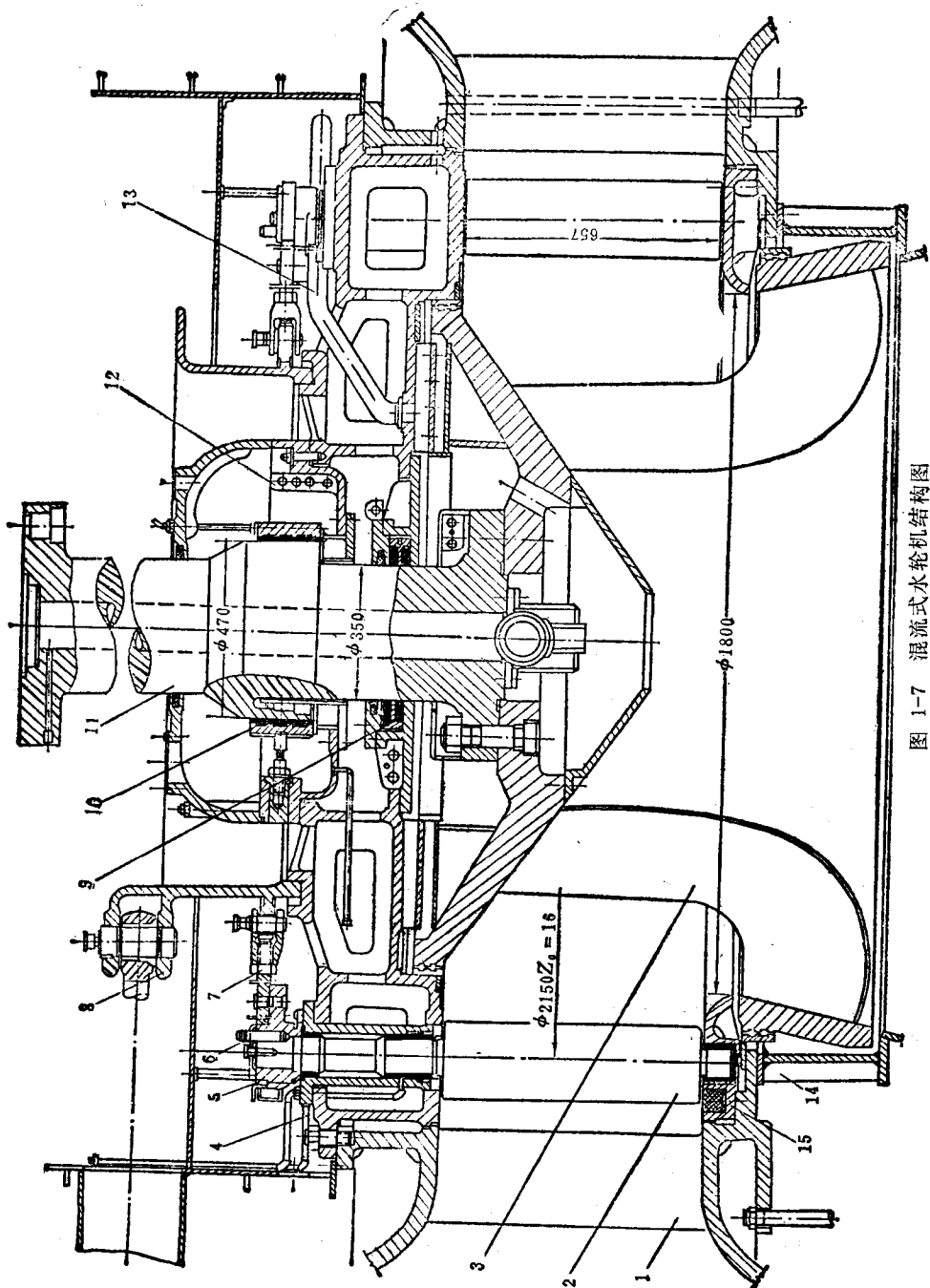


图 1-7 混流式水轮机结构图

1—座环, 2—导叶, 3—转轮, 4—顶盖, 5—拐臂, 6—键, 7—连杆, 8—控制环, 9—密封装置,
10—导轴承, 11—主轴, 12—油冷却器, 13—顶盖排水管, 14—基座环, 15—底环

着泄水锥，用以引导水流顺利地形成轴向流动，以消除水流漩涡。

叶片的上端与上冠相固定，下端与下环相固定，三者连成一个整体。叶片呈扭曲状，其断面为翼形，叶片的数目通常为14~19片，均匀分布在上冠与下环之间。

止漏环也称为迷宫环，它由固定部分和转动部分组成。为了防止高压水流在转动与不转动部分的间隙中向上和向下漏出，所以在上冠和下环的外缘处安装着止漏环的转动部分，它与相对应的固定部分之间形一系列忽大忽小的空间或梳齿状的直角转弯，使水流受到很大的阻力而不容易通过，以达到减小漏水损失的目的。

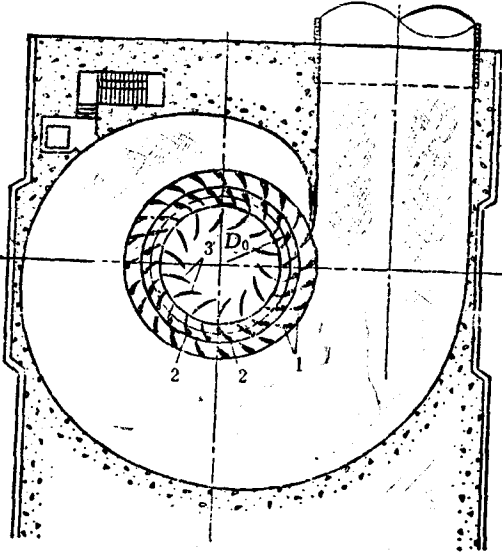


图 1-8 混流式水轮机水平剖面图

1—座环，2—导叶，3—转轮

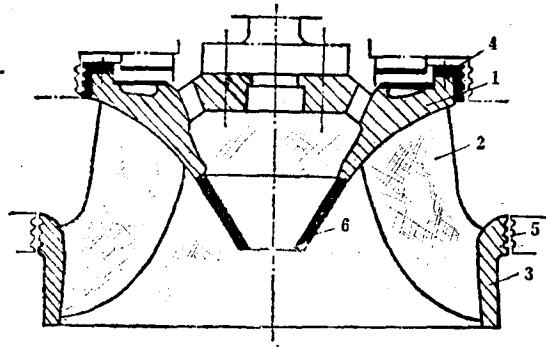


图 1-9 混流式水轮机转轮

1—上冠，2—叶片，3—下环，4、5—止漏环，6—泄水锥

2. 导水机构

导水机构的主要作用是根据机组负荷变化来调节水轮机的流量以达到改变水轮机输出功率的目的，并引导水流按必须的方向进入转轮，形成一定的速度矩。为达到上述目的，通常导水机构是由导叶及其转动机构（包括转臂、连杆和控制环等）所组成，而控制环的转动是由油压接力器来操作的，如图1-10、图1-12所示。

在图1-10中，导叶15均匀分布在转轮的外围，导叶轴的下端为底环14，上端为顶盖1，为减小水力损失，导叶的断面形状作成翼形，首端较厚，尾端较薄。导叶可以围绕其转轴转动，改变导叶的开度 α 。（相邻两导叶之间可以通过的最大圆柱体直径），就可调节通过水轮机的流量，如图1-11所示。当 $\alpha = 0$ 时导叶首尾相接，处于关闭位置，流量为零，则使水轮机停止转动。导叶在结构上的最大开度是发生在当导叶处于径向位置的情况，但水轮机在这种开度下工作时水力损失很大，所以在实际运行中，导叶允许的最大开度 α_{max} 应根据水轮机的效率变化和出力来确定。

导叶的转动是通过其转动机构来实现的，每一个导叶轴的上端穿过水轮机的顶盖1并固定在转臂5上（见图1-10），转臂通过连接板4和连杆10与控制环12相连接。当接力器的油压活塞移动时，则推拉杆11带动控制环转动，使导叶的开度 α 亦随之发生变化。

当导叶被其他东西卡住而不能关闭时，则会严重影响水轮机的工作，因此在导叶转动