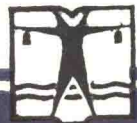


高等学校教材
专科适用

水 轮 机

河北水利专科学校 顾锡元 主编



高等学校教材

===== 专 科 适 用 =====

水 轮 机

河北水利专科学校 顾锡元 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材

专科适用

水 轮 机

河北水利专科学学校 顾锡元 主编

*

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

北京市地质矿产局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 19.75印张 445千字

1993年10月第一版 1993年10月北京第一次印刷

印数 0001—3800 册

ISBN 7-120-01833-7/TV·662

定价 9.10 元

内 容 提 要

本书主要叙述中小型水轮机的分类、结构、工作原理、汽蚀与磨损、相似理论、试验和特性曲线，以及选型计算方法和实例等内容，同时对水电站中常用的水泵也作了介绍。

本书是水利水电高等专科学校小型水电站动力设备专业（水利水电电机设备专业）水轮机课程的教材，同时还可供有关专业和工程技术人员参考。

前 言

本书根据水利部科教司1990~1995年高等学校水利水电类专业专科教材选题和编审出版规划的要求,按70学时编写,为水利水电院校小型水电站动力设备专业(水利水电机电设备专业)水轮机课程的高等专科教材。

全书共分十章,第一至八章主要叙述中小型反击式水轮机的工作原理、汽蚀与磨损、相似理论、试验和特性曲线、选型计算、过流部件、水轮机结构;第九章介绍冲击式水轮机;第十章对水泵的类型、结构、工作原理、特性作了介绍。

本书由河北水利专科学校顾锡元主编。书中第一、二、三、四、五、六、八章由顾锡元编写,第七、九、十章由南昌水利水电专科学校尹致和编写。

南昌水利水电专科学校连廷栋副教授主审本书,对书稿提出了许多宝贵意见,编者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中存在的缺点或错误,望读者批评指正。

编 者

1992年7月

目 录

前 言

第一章 水轮机概论	1
第一节 水轮机的工作参数	1
第二节 水轮机的类型和牌号	5
第三节 水轮发电机组简介	11
第四节 水轮机发展概况	16
第二章 水轮机的工作原理	18
第一节 水流在水轮机转轮中的运动	18
第二节 水轮机的基本方程式	22
第三节 水轮机效率和能量损失	26
第四节 水轮机的运行工况	30
第三章 水轮机的汽蚀与磨损	36
第一节 水轮机的汽蚀现象	36
第二节 汽蚀类型及等级	38
第三节 水轮机汽蚀系数、吸出高度和安装高程	42
第四节 水轮机在含沙水流中的磨蚀破坏	48
第五节 改善水轮机汽蚀与磨损的途径	54
第四章 水轮机相似理论	63
第一节 水轮机相似理论的概念	63
第二节 水轮机相似公式及单位参数	67
第三节 水轮机模型换算到原型的参数修正	72
第四节 水轮机比转速和型谱	77
第五章 水轮机模型试验及特性曲线	77
第一节 水轮机的模型试验	77
第二节 水轮机特性曲线分类	93
第三节 水轮机模型综合特性曲线及其绘制	96
第四节 水轮机运转综合特性曲线及其绘制	100
第五节 水轮机的飞逸特性曲线	116
第六节 水轮机的轴向力估算	120
第六章 水轮机选型计算	136
第一节 如何选择水轮机	136
第二节 水轮机台数和转轮型号的选择	137
第三节 水轮机主要参数的选择和计算	142
第四节 微型水电站微型机组的选择	161
第七章 反击式水轮机的过流部件	168
第一节 水轮机引水室的作用、类型和选择	168

第二节	蜗壳的类型及主要参数选择	172
第三节	蜗壳水力计算的基本公式	176
第四节	混凝土蜗壳的水力计算	179
第五节	金属蜗壳的水力计算	181
第六节	导水机构	188
第七节	尾水管	197
第八章	反击式水轮机的结构	211
第一节	混流式水轮机	211
第二节	轴流式水轮机	235
第三节	贯流式水轮机	244
第四节	抽水蓄能式机组	250
第九章	冲击式水轮机	252
第一节	切击式水轮机	252
第二节	斜击式和双击式水轮机	267
第十章	水泵	275
第一节	水泵概述	275
第二节	水泵工作原理和相似定律	283
第三节	水泵特性曲线和安装高程	291
第四节	水泵的运行和调节	300
参考文献		307

第一章 水轮机概论

水力机械是世界上应用最为广泛的一种机器。

由水力学知，水流运动时水能具有位能、压能和动能三种形式，并且它们之间可以相互转换。同时，在一定的条件下，水流的运动和水能还可以转换为另一种形式的机械运动和机械能；反之，机械运动和机械能也可以转换成水流的运动和水能。水力机械就是将水能转换成机械运动能，或将机械运动能转换成水能的机器。

通常将水能转换成机械能的机器称为水力原动机，如水轮机，其作用是利用水流的能量转换成旋转的机械能，用来带动发电机工作，以获得电能；将机械能转换成水能的机器称为水力工作机，如水泵，其作用是输送水流，一般可采用电动机带动水泵工作，使水流的能量增加，以获得一定的高度或压力；将正向（顺时针方向）旋转时作为水力原动机，而反方向旋转时又可作为水力工作机的机器，称为可逆式水力机械，如水泵水轮机，其同一个转轮既可作水轮机运行，又可作水泵运行，具有结构紧凑、设备和建筑投资少、运行操作灵活等优点，被广泛应用在抽水蓄能电站上。

随着水利水电建设事业的迅速发展，水轮机和水泵得到了广泛的应用，并取得了很大的发展。因此，正确地掌握水轮机和水泵的选型设计、安装和运行知识，对提高水电站经济效益是十分重要的。

第一节 水轮机的工作参数

水轮机是利用水流能量进行工作的一种动力机械，它与发电机连接在一起组成水轮发电机组（简称机组），是水电厂的重要设备。水轮机的工作参数，用来表明水轮机的主要工作性能，是正确合理地选择和使用水轮机的主要依据。基本的工作参数有水头、流量、出力、效率和转速等，其表示的意义如下。

一、水头 H (m)

水头是决定水流经过机组转换成电能的一个重要因素。从水力学中知道：水头是两个断面间水的单位能量差。水流单位能量 E 是每千克水所含有的能量，由单位位能 Z 、单位压能 P/γ 和单位动能 $av^2/2g$ 组成，其表达式为

$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{aV^2}{2g} \quad (1-1)$$

式中 Z ——单位位能，m；
 P ——压强，Pa；
 V ——流速，m/s；
 a ——动能不均匀系数；

γ ——水的重度, $\gamma = \rho g$, 其值为 9810 N/m^3 ;

ρ ——水的密度, 一般为 1000 kg/m^3 ;

g ——重力加速度, 一般取 9.81 m/s^2 。

由图1-1所示, 水流从上游水库 (或压力前池) 进口经压力管道流入水轮机做功后, 再由尾水管排入下游渠道。图中断面 $B-B$ 、 $E-E$ 、 $C-C$ 、 $K-K$ 分别表示水电站引水管道进口断面、水轮机进、出口断面和尾水渠出口断面。

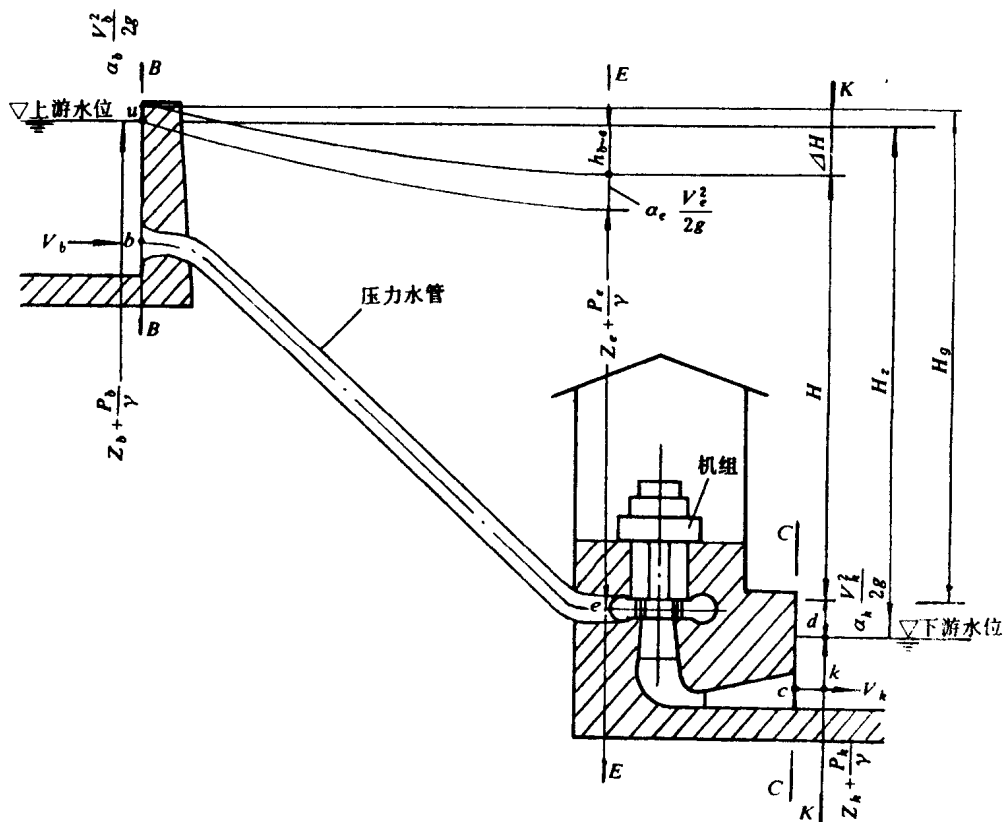


图 1-1 水轮机工作水头示意图

1. 水电站的毛水头

水电站的毛水头是指电站引水道进口断面 $B-B$ 与尾水渠出口断面 $K-K$ 间水流的单位能量差, 用 H_g 表示。

由于在渐变流中, 同一过水断面上各点的单位势能 $(Z + \frac{P}{\gamma})$ 相等和以平均流速表示的单位动能 $\frac{\alpha V^2}{2g}$ 相同, 所以两个过水断面上相应的点可以任意选定。为计算方便, 分别选取进出口管道的中心点 (b 、 k) 和自由液面上的点 (u 、 d)。这两个断面水流具有的单位能量分别为:

$$E_b = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \frac{\alpha_b V_b^2}{2g} = Z_u + \frac{P_u}{\gamma} + \frac{\alpha_u V_u^2}{2g} \quad (1-2)$$

$$E_k = Z_k + \frac{P_k}{\gamma} + \frac{a_k V_k^2}{2g} = Z_d + \frac{P_d}{\gamma} + \frac{a_d V_d^2}{2g} \quad (1-3)$$

式中 $\frac{P_a}{\gamma}$ ——大气压力, m;

Z_u ——上游水位, m;

Z_d ——下游水位, m。

水电站的毛水头为

$$H_g = E_b - E_k = \left(Z_u + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{a_u V_u^2}{2g} \right) - \left(Z_d + \frac{P_d}{\gamma} + \frac{a_d V_d^2}{2g} \right) \quad (1-4)$$

当两断面处的流速和水位差不太大时, 可不考虑两断面的流速和大气压力的差别, 则

$$H_g = Z_u - Z_d \quad (1-5)$$

这样, 水电站上、下游两断面的单位能量差就是上、下游断面的水位差 (即装置水头 H_z)。因此, 通常把上、下游水位之差称为水电站的毛水头。

2. 水轮机的工作水头

水轮机的工作水头 H 是指水轮机进口断面 $E-E$ 和尾水管出口断面 $C-C$ 之间的单位能量差。因水流在流动时要产生能量损失, 所以这两个断面的单位能量等于 $B-B$ 和 $K-K$ 两断面分别减去水头损失 h_{b-e} 和 h_{c-k} , 即

$$\begin{aligned} H &= E_e - E_c = (E_b - h_{b-e}) - (E_k + h_{c-k}) \\ &= (E_b - E_k) - h_{b-e} - h_{c-k} \\ &= H_g - h_{b-e} - h_{c-k} \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 h_{b-e} ——引水建筑物水头损失;

h_{c-k} ——排水建筑物水头损失。

当排水建筑物水头损失 h_{c-k} 主要是尾水管的出口动能损失, 而且这部分损失又较小时, 可不予考虑, 则

$$H = H_g - h_{b-e} \quad (1-7)$$

由此可知, 水轮机的工作水头等于水电站毛水头减去引水建筑物进口到水轮机进口之间的水头损失, 是水电站的净水头, 也称有效水头。通常还把工作水头 H 简称为水头, 单位用 m 表示。

3. 水轮机的特征水头

水轮机的工作水头通常是随着水电站上、下游水位的改变而不断地变化。因此, 一般采用一些特征水头来表示水轮机的工况, 它是选择水轮机的主要依据。

水轮机的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 和设计水头 H_r , 由水能计算得出。在选择水轮机时, 最大水头 $H_{\max}$ 和最小水头 $H_{\min}$ 表示水轮机的水头变化范围, 要保证在最大水头下水轮机应具有足够的强度, 在最小水头下能具有良好的能量指标和运行的稳定性; 在加权平均水头 H_a 左右, 应保证水轮机的运行效率为最高; 设计水头 H_r 是水轮机发出额定功率时的最低水头。

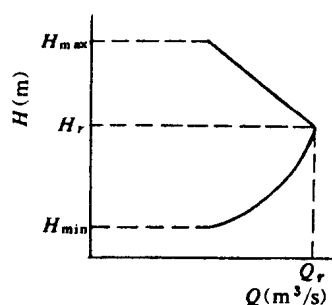


图 1-2 水轮机 $Q_{\max} = f(H)$ 关系曲线

二、流量 Q (m^3/s)

流量是水经过机组转换成电能的另一个主要因素。水轮机的流量是指单位时间内通过水轮机的水量，用 Q 表示。

如图1-2所示，水轮机在设计水头下发出额定出力时所需的流量值最大，称为设计流量 Q_r 。当水头超过设计水头 ($H > H_r$) 后，由于受发电机额定出力的限制，水头越高，则流量越小；当 $H < H_r$ 时，水轮机的过流能力受工作水头的影响，在最大导叶开度下，工作水头越小，流量越小。所以，水轮机的流量是随水轮机工作水头和出力的变化而变化。

三、出力 N (kW) 和效率 η (%)

具有一定水头和流量的水流，就可以使水轮机做功。水在流动过程中所做的功 A ，可用水的重量 γW 与水头 H 的乘积表示。即

$$A = \gamma W H = \gamma H Q t \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-8)$$

式中 W ——水量， $W = Qt$ ， m^3 ；

t ——时间， s 。

水流在单位时间内所做的功，称为出力（或功率），则水流在单位时间内供给水轮机的出力 N_h 为

$$N_h = \frac{A}{t} = \gamma Q H = 9.81 Q H \quad (\text{kW}) \quad (1-9)$$

但在水轮机工作过程中，由于水流要发生摩擦、漏水等损失，有部分水能要消耗在水轮机内部，所以水轮机输出的出力 N 总是小于水流输入的出力 N_h ，通常用二者比值来反映水流能量被充分利用的程度，称为水轮机的效率，用 η (%) 表示。水轮机的水力损失越小，水能利用的程度就越充分，效率就越高。水轮机效率的表达式为

$$\eta = \frac{N}{N_h} \quad (1-10)$$

η 为水轮机的总效率，是水轮机工作性能好坏的主要指标之一。由式 (1-10) 可知，水轮机出力 N 为

$$N = N_h \eta = 9.81 Q H \eta \quad (\text{kW}) \quad (1-11)$$

当水轮机和发电机直接连接时，水轮机的输出出力 N 即为发电机的输入出力。若发电机效率用 η_g 表示，则发电机的出力 N_g 为

$$N_g = N \eta_g = 9.81 Q H \eta \eta_g \quad (\text{kW}) \quad (1-12)$$

发电机效率，大中型发电机为 0.96~0.98，小型发电机为 0.92~0.95。

四、转速 n (r/min)

水轮机每分钟旋转的速度称为水轮机的转速。由式 (1-11) 知，水轮机的出力使主轴产生旋力矩 M ，用来克服发电机的阻力矩。所以，水轮机的出力亦可用旋转的机械形式表示为

$$N = M\omega = M \frac{2\pi n}{60} \quad (1-13)$$

式中 ω ——水轮机旋转角速度, rad/s;

n ——水轮机转速, r/min;

M ——水轮机主轴的旋转力矩, N·m。

对水轮机主轴与发电机轴直接连接的水轮发电机,水轮机的转速与发电机的转速相同,所以要符合发电机的标准同步转速,应满足下列关系式

$$n = \frac{60f}{p} \quad (\text{r/min}) \quad (1-14)$$

式中 f ——频率,我国规定为50Hz;

p ——发电机磁极对数。

若 $f=50\text{Hz}$, 则

$$n = \frac{3000}{p} \quad (\text{r/min}) \quad (1-15)$$

因此,凡符合式(1-15)的转速叫做标准同步转速,见表1-1。

表 1-1

发 电 机 同 步 转 速

单 位: r/min

p	3	4	5	6	7	8	9	10	12
n	1000	750	600	500	428.6	375	333.3	300	250
p	14	16	18	20	22	24	26	28	30
n	214.3	187.5	166.7	150	136.4	125	115.4	107.1	100

第二节 水轮机的类型和牌号

一、水轮机的类型

在水轮机的工作参数中,水头和流量是两个主要参数,它直接影响水轮机的工作性能。但由于河流的自然条件不同,水头和流量的大小,就会有着很大的差别,为了充分利用各种水力资源,因此就要设计和制造各种类型的水轮机,以满足水电建设的需要。

水轮机是把水流能量转换为旋转机械能量的一种水力机械,根据水轮机转轮转换水流能量的形式(位能、压能和动能),可将水轮机分为反击式和冲击式两大类。

(一) 反击式水轮机

反击式水轮机利用水流的位能、压能和动能进行工作。上游水库中的水,在进入转轮前已大部分转化成压能,动能仅是一小部分。水流经过转轮时,由于受转轮叶片的作用改变了速度大小和方向,因而对转轮产生了作用力,使转轮旋转作功。其特点是转轮处于压力水流的包围之中,不与大气接触。

反击式水轮机根据水流在转轮中流动形式的特征,又可分为混流式、轴流式、贯流式和斜流式等几种主要型式的水轮机。

1. 混流式水轮机

混流式水轮机，又称法兰西斯式水轮机，也称辐向轴流式水轮机。水流沿辐向进入转轮，然后逐渐地转为轴向流出转轮，如图1-3所示。

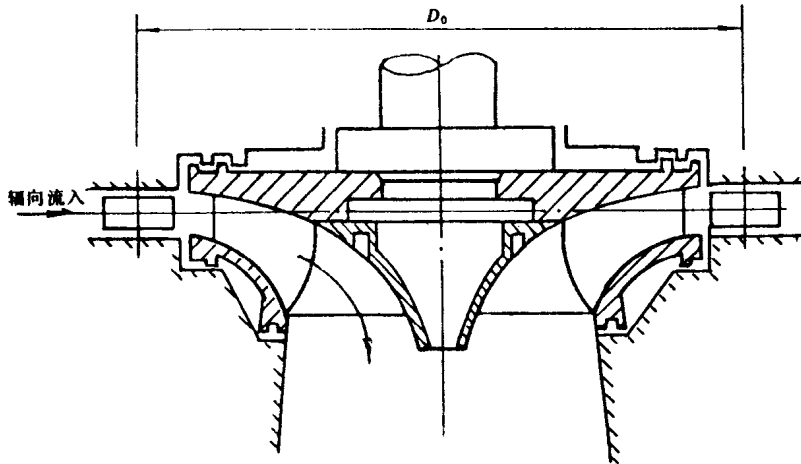


图 1-3 混流式水轮机

混流式水轮机的结构紧凑，效率较高，能适应较大的水头范围，是目前国内外广泛采用的水轮机。混流式水轮机使用水头一般低于700m，其中小型水轮机使用水头为200m以下。

2. 轴流式水轮机

轴流式水轮机转轮内水流运动的方向始终沿着轴向流过转轮，如图1-4所示。

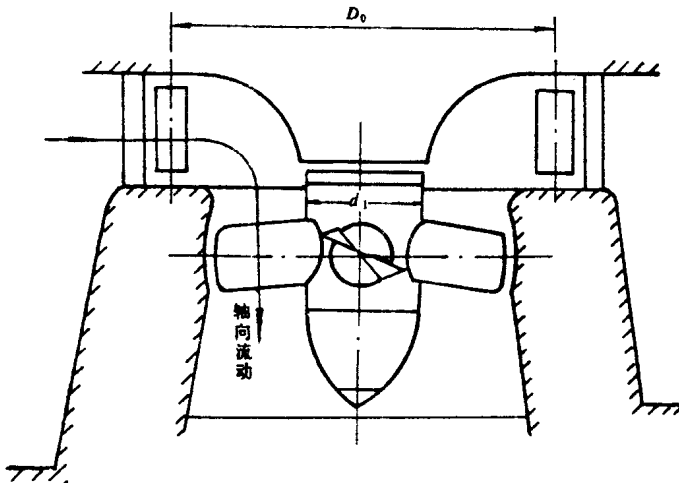


图 1-4 轴流式水轮机

轴流式水轮机根据转轮叶片能否转动调节，又可分为轴流定桨式和轴流转桨式两种。轴流定桨式水轮机的转轮叶片是固定不动的，不能随工况的变化而转动调节，但可将转轮叶片固定在几个转角工作。一般适用在中小型水电站上，水头可达50m左右。

轴流转桨式水轮机，又称卡普兰式水轮机，其转轮叶片可随运行工况的变化而转动。因此，除了导叶可以调节外，还要有一套转轮叶片的调节机构，两者通过协联配合，实现导叶与转轮叶片的双重调节。应用水头范围为 $3 \sim 80\text{m}$ ，最高水头达 88m 。

3. 贯流式水轮机

贯流式水轮机水流由引水管进口到尾水管出口都是轴向流动，使水直贯转轮(图1-5)，因而具有轴流式的特征，也可分为贯流定桨式和贯流转桨式两种。贯流式水轮机一般布置成卧轴式，广泛应用在低水头水电站和潮汐电站上，应用水头为 $2 \sim 30\text{m}$ 。

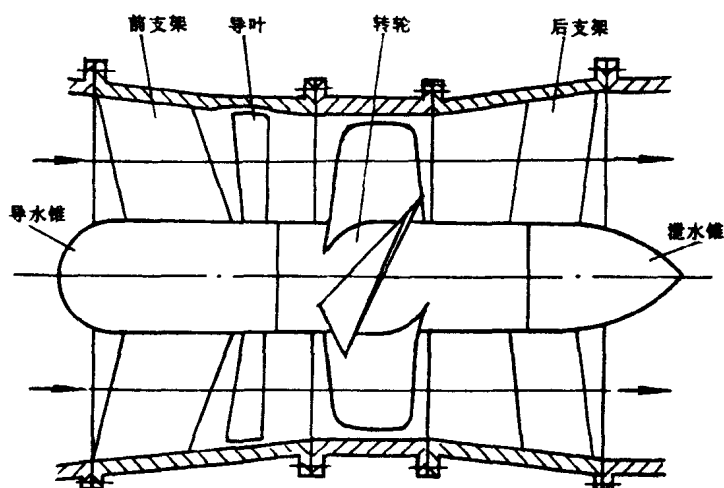


图 1-5 贯流式水轮机

4. 斜流式水轮机

斜流式水轮机在工作时，其水流是沿着与转轮轴线倾斜一个角度的方向流过转轮（图1-6）。这种水轮机的结构特点是转轮叶片可随工况变化而转动，转轮叶片转动轴线和水轮

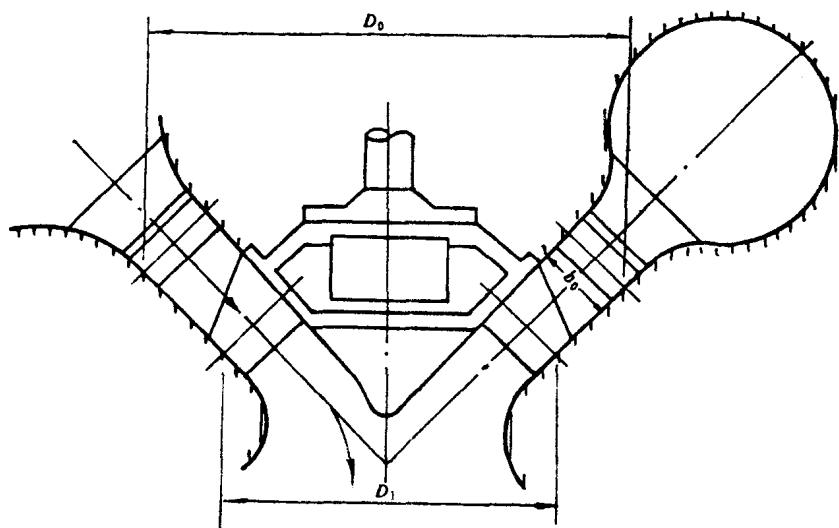


图 1-6 斜流式水轮机

机轴线有一夹角，因而比轴流式能设置更多的转轮叶片数，提高了应用水头范围，一般用于40~200 m。这种水轮机做成水泵水轮机，被广泛应用在抽水蓄能电站上。

(二) 冲击式水轮机

冲击式水轮机利用水流的动能进行工作。由压力水管引来的高压水流，经喷嘴把全部水流的能量均转化成速度能的形式，并以高速的自由射流冲向转轮，使转轮产生旋转力矩而转动做功，如图1-7所示。其特点是水流由喷嘴射出后，射流和转轮的工作过程都在大气中进行。

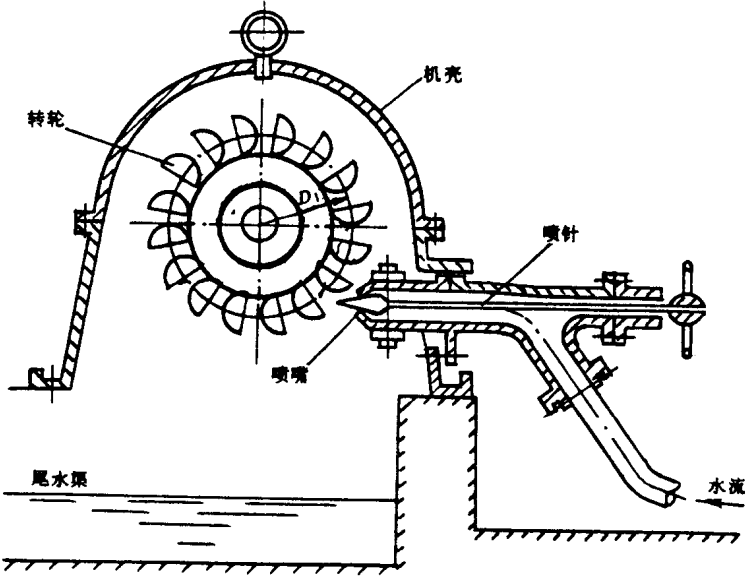


图 1-7 冲击式水轮机

冲击式水轮机，按射流冲击转轮的方式可分为切击式（图1-7）、斜击式（图9-21）和双击式（图9-24）三种型式。

1. 切击式水轮机

切击式水轮机又称培尔顿水轮机，其喷嘴的射流沿着转轮圆周切线方向冲击转轮的斗叶而做功，所以也称水斗式水轮机。切击式水轮机是唯一使用在700m以上的高水头水轮机，应用水头一般为100~2000m，小型切击式水轮机应用水头为40~250 m。

2. 斜击式水轮机

斜击式水轮机的主要部件与切击式水轮机大致相同，但喷嘴的射流与转轮进口平面有一个斜射角 α_1 ，通常取 $\alpha_1=22.5^\circ$ 。斜流式水轮机应用水头为25~400 m，适用在中小型水电站上。

3. 双击式水轮机

双击式水轮机的射流，首先是将70%~80%的水流能量传递给转轮上部的叶片，其次水流又从转轮内腔再次进入转轮下部的叶片，付出剩余的20%~30%的水流能量。双击式水轮机的应用水头为5~80 m，因效率较低，只适用于小型水电站。

综上所述, 可将水轮机的分类和应用水头用表1-2表示。

除了按上述方法进行水轮机分类外, 根据水轮机主轴布置方式还可分卧式和立式两种, 一般转轮直径小于1 m的为卧式, 转轮直径大于1 m的为立式。

二、水轮机牌号的表示方法

水轮机牌号的內容包括用汉语拼音字母和阿拉伯数字表示水轮机的型式、结构、特征和转轮直径。按照我国水轮机牌号的统一规定, 由三部分代号组成, 各部分之间用一短横线分开。

1) 牌号的第一部分由水轮机型式及转轮型号组成。水轮机型式用两个汉语拼音字母表示, 其统一规定见表1-3, 如在水轮机型式代号后加N表示可逆式水轮机。

表 1-3 水轮机型式的代号

水轮机型式	代表符号	水轮机型式	代表符号
混流式	HL	贯流定桨式	GD
轴流转桨式	ZZ	冲击(切击)式	CJ
轴流定桨式	ZD	斜击式	XJ
斜流式	XL	双击式	SJ
贯流转桨式	GZ		

转轮型号用阿拉伯数字表示水轮机的比转速。型谱规定, 比转速计算值均假定效率为88%, 水头为m, 出力为kW。

2) 牌号的第二部分是由水轮机主轴的布置形式和引水室特征的代号组成。这些代号都采用一个汉语拼音字母表示, 见表1-4。对冲击式水轮机只表示主轴的布置形式。

表 1-4 主轴布置形式与引水室特征的代号

名 称	代表符号	名 称	代表符号
立 轴	L	卧 轴	W
金属蜗壳	J	罐 式	G
混凝土蜗壳	H	竖井式	S
灯泡式	P	虹吸式	X
明槽式	M	轴伸式	Z

3) 牌号的第三部分, 对反击式水轮机是转轮的标称直径 D_1 (以cm为单位), 用阿拉伯数字表示。对冲击式水轮机是用转轮标称直径和其它必要的指标表示, 具体表示方法为:

$$\frac{\text{转轮标称直径}}{\text{作用在每个转轮的喷嘴数目} \times \text{射流直径}}$$

各种类型水轮机转轮标称直径 D_1 规定为:

混流式水轮机是指转轮叶片进水边的最大直径, 如图1-8(a)。

表 1-2 水轮机分类和应用水头

分 类	型 式	应用水头(m)
反 击 式	混流式	5 ~ 700
	轴流转桨式	3 ~ 80
	轴流定桨式	1 ~ 50
	斜流式	40 ~ 200
	贯流式	2 ~ 30
冲 击 式	切击式	40 ~ 2000
	斜击式	25 ~ 400
	双击式	5 ~ 80

斜流式和轴流式水轮机是指与转轮叶片轴线相交处的转轮室内径,如图1-8(b)、(c)。切击式水轮机是指转轮斗叶与射流中心线相切的节圆直径,如图1-8(d)。

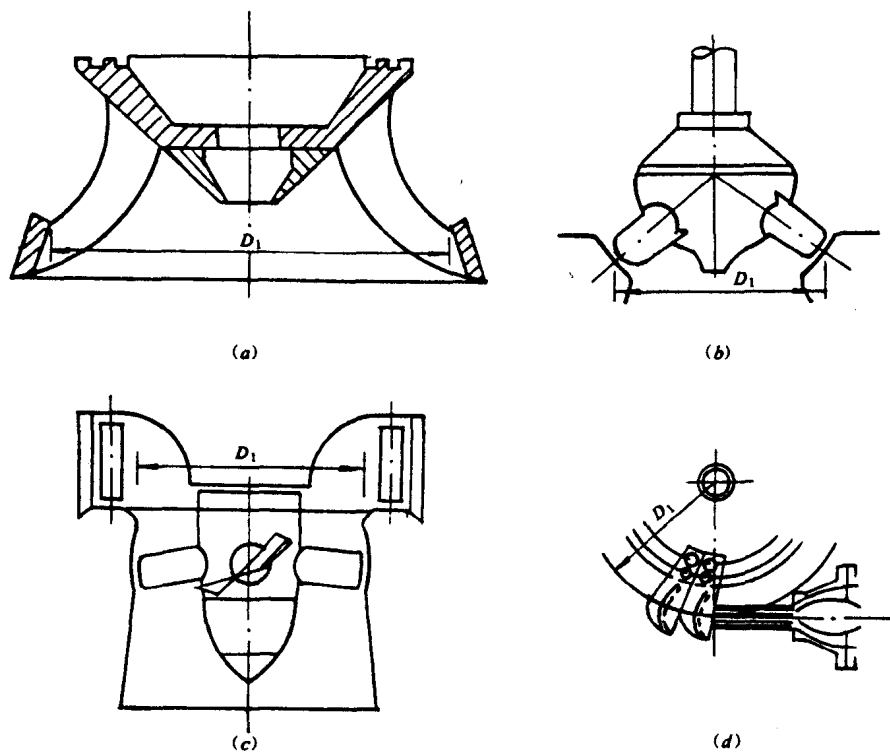


图 1-8 水轮机转轮标称直径

水轮机转轮标称直径 D_1 的系列尺寸(以cm表示)规定如表1-5。

表 1-5 反击式水轮机转轮标准直径 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 括号内的数值只适用于轴流式水轮机。

水轮机牌号举例:

1) HL240-LJ-140, 表示混流式水轮机, 转轮型号为240, 立轴, 金属蜗壳, 转轮标称直径为140cm。

2) ZZ440-LH-330, 表示轴流转桨式水轮机, 转轮型号为440, 立轴, 混凝土蜗壳, 转轮标称直径为330cm。

3) XLN200-LJ-300, 表示斜流可逆式水轮机, 转轮型号为200, 立轴, 金属蜗壳, 转轮标称直径为300cm。