

水 轮 机

上 册

武汉水利电力学院编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是高等学校水轮机课程的教材。全书共十五章，分上、下两册出版。上册第一章至第七章主要介绍水轮机的工作原理，相似理论，模型试验，特性和选型设计。下册第八章至十五章主要介绍反击式水轮机过流部件水力设计的基本理论和方法，反击式水轮机主要零、部件的结构和强度计算，以及斜流式、贯流式、水斗式水轮机和水泵的工作原理、结构与选型。

本书除作专业课程教材外，也可供水电站的设计、科研、运行、安装、施工等单位以及其他从事水轮机工作的科技人员参考。

水 轮 机

上 册

武汉水利电力学院编

(根据电力工业出版社纸型重印)

*

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

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8.5印张 194千字

1980年10月第一版

1984年6月新一版 1984年6月北京第一次印刷

印数0001—5240册 定价0.95元

书号 15143·5378

前 言

本书是高等学校“水电站动力设备”专业水轮机课程的教材。全书共十五章，分上、下两册。上册主要介绍水轮机的工作原理，相似理论，模型试验，水轮机特性和选型设计。下册主要介绍反击式水轮机过流部件水力设计的基本理论和方法，反击式水轮机主要零、部件的结构和强度计算，以及斜流式、贯流式、水斗式水轮机和水泵的工作原理、结构与选型。这些内容可为从事水轮机的技术工作和科学研究奠定必要的理论基础。

本书上册由武汉水利电力学院编写，参加编写的有魏先导（主编人）、刘国柱和李植鑫。下册由华东水利学院主编，季盛林（主编人）、支培法、陈新方、杨惠美和成都科学技术大学孙诗杰参加编写。全书由清华大学、西北农学院、云南工学院共同审订，并由清华大学姚志民主审。

本书除供“水电站动力设备”专业作为教材外，还可供其他从事有关水轮机工作的科技人员参考。

编 者

1980年4月

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 水力机械的种类	1
第二节 水轮机的工作参数	1
第三节 水轮机的结构	3
第四节 水轮机牌号	8
第五节 水轮机的发展	9
第二章 水轮机的工作原理	10
第一节 水流在水轮机转轮中的运动	10
第二节 水轮机的基本方程式	15
第三节 势水头和反击度	18
第四节 水流对转轮叶片的作用力	19
第五节 水轮机的最优工况与非最优工况	21
第六节 水轮机内的能量平衡与效率	23
第三章 水轮机的汽蚀	24
第一节 水轮机中的汽蚀现象	24
第二节 汽蚀的类型及侵蚀等级	27
第三节 反击式水轮机翼型汽蚀与汽蚀系数	31
第四节 反击式水轮机装置汽蚀系数和吸出高度的确定	33
第五节 空腔汽蚀对水轮机运行稳定性的影响	36
第六节 原型水轮机的汽蚀	38
第七节 水轮机抗汽蚀措施	39
第四章 水轮机的相似理论	43
第一节 相似理论概述	43
第二节 水轮机的相似律与单位参数	44
第三节 水轮机的比转速	50
第四节 效率换算与单位参数修正	52
第五节 水轮机型谱	55
第五章 水轮机的模型试验	58
第一节 模型试验的意义及任务	58
第二节 反击式水轮机模型能量试验	59
第三节 反击式水轮机模型汽蚀试验	63
第四节 水轮机的飞逸特性	65
第五节 水轮机的轴向水推力	68

第六章 水轮机的特性曲线	69
第一节 水轮机特性曲线的分类	69
第二节 混流式水轮机综合特性曲线绘制	72
第三节 转桨式水轮机综合特性曲线绘制	75
第四节 原型水轮机特性曲线	76
第五节 水电厂特性曲线	79
第七章 水轮机的选型设计	81
第一节 选型设计的一般原则及原始资料	81
第二节 选型设计的内容及程序	82
第三节 机组台数的拟定	84
第四节 水轮机型号的选择	85
第五节 用系列应用范围图选择水轮机的主要参数	88
第六节 用模型综合特性曲线选择水轮机主要参数	90
第七节 水轮机运转综合特性曲线的绘制	93
第八节 反击式水轮机安装高程的确定	97
第九节 不同选型方案的分析比较	99
第十节 选型例题	101
附 录	111
附表 1 大、中型轴流式转轮型谱参数	111
附表 2 大、中型混流式转轮型谱参数	111
附表 3 中、小型轴流式、混流式转轮型谱参数	112
附表 4 国产大、中型水轮机型号及主要参数	112
附表 5 轴流转桨式水轮机转轮主要参数	114
附表 6 混流式水轮机转轮主要参数	116
附图 1~附图 15 入谱转轮综合特性曲线(包括型谱推荐或建议使用的转轮)	118
参考文献	133

第一章 概 论

第一节 水力机械的种类

在液体与固体之间进行机械能转换的机器叫做水力机械。将液体机械能转换成固体机械能的，称为水力原动机，液体流过这种机器时能量减少；将固体机械能转换成液体机械能的，称为水力工作机，液体流过这种机器时能量增加。

水轮机是普遍应用的一种水力原动机，它具有转动的叶轮，主要利用水流压力能和动能（或仅利用动能）做功。重力水轮是水力原动机，但并不是水轮机。

水力工作机一般也称为水泵（或泵），它是一种输送液体的机械。水泵主要有两类：容积式（如活塞泵、齿轮泵）和叶片式（如离心泵、轴流泵）。

抽水蓄能电站和潮汐电站还应用各种可逆式水力机械，如斜流可逆式、混流可逆式和贯流可逆式等。可逆式水力机械既能作为水轮机工作，又能作为水泵工作。

有时也将液力传动装置（如液力耦合器、液力变矩器）划归水力机械。液力传动装置是由水泵和水力原动机联合组成的，用以实现主动轴和从动轴之间的转速和力矩的改变。

第二节 水轮机的工作参数

当水流通过水轮机时，发生水力能转换为固体机械能的工作过程，用水轮机的工作参数表明这一过程的特性。

1. 水头

水轮机水头是指单位重量水流通过水轮机时的能量减值，该能量减值除去部分损耗外，在水轮机内转换成固体机械能向外输出。水轮机水头用 H 表示，其单位为公斤·米/公斤，或米（水柱高）。

水轮机水头等于水轮机进口断面I与出口断面II之间（图1-1）单位重量水流能量之差

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

近似取 $\alpha_I = \alpha_{II} = 1$ ，则

$$H = \left(Z_I + \frac{p_I}{\gamma} + \frac{V_I^2}{2g} \right) - \left(Z_{II} + \frac{p_{II}}{\gamma} + \frac{V_{II}^2}{2g} \right) \quad (1-1')$$

式中 Z —— 位置高度（米）；

p —— 压力（公斤/米²）；

V —— 流速（米/秒）；

α —— 动能系数；

γ —— 水比重（公斤/米³）；

g —— 重力加速度（米/秒²）。

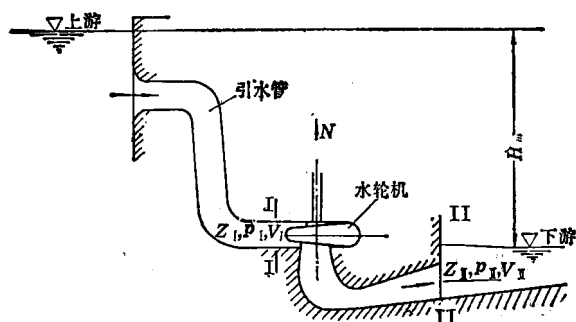


图 1-1 反击式水轮机装置略图

水轮机水头有别于水电站的毛水头 H_m 。若忽略电站上、下游流速和表面大气压力的差别，毛水头 H_m 就等于电站上、下游水位差（见图 1-1）。从 H_m 中扣除电站引水和泄水建筑物中的能量损耗便得到 H 。

2. 流量

单位时间内通过水轮机的水体积称为水轮机流量，一般采用单位为 $\text{米}^3/\text{秒}$ ，用 Q 表示。

3. 出力

水轮机出力是水轮机轴上向外输出的机械功率，用 N 表示，可由下式求得

$$N = \frac{\gamma Q H \eta}{102} = 9.81 Q H \eta \quad (1-2)$$

式中 N ——出力（千瓦）；

γ ——水比重（公斤/米³）；

Q ——流量（米³/秒）；

H ——水头（米）；

η ——水轮机效率。

4. 效率

按式（1-2），水轮机效率等于水轮机轴上的出力 N 与进入水轮机的水流出力 $\gamma Q H$ 之比： $\eta = 102 N / \gamma Q H$ 。由于水轮机工作过程中产生能量损耗，效率 η 恒小于 1。

5. 转速

水轮机转速是水轮机转子单位时间内旋转的次数，常采用的单位为转/分，用 n 表示。

例 题

水轮机效率试验时在某一导叶开度测得下列数据：蜗壳进口压力表读数 2.26 公斤/厘米²，压力表中心高程 88.7 米，压力表所在处钢管直径 $D = 3.35$ 米，电站下游水位为 84.9 米，流量 $Q = 33$ 米³/秒，发电机功率 $N_g = 7410$ 千瓦。今取发电机效率 $\eta_g = 0.966$ ，试求机组效率 η_u 与水轮机效率 η 。

解：

根据式（1-1'），采用下式计算水轮机工作水头

$$H = Z_I + \frac{p_I}{\gamma} + \frac{V_I^2}{2g} - Z_{II}$$

式中

$$Z_I = 88.7 \text{ 米}$$

$$p_I/\gamma = 22.6 \text{ 米}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g(\pi D^2/4)^2} = \frac{33^2}{2 \times 9.81(\pi \times 3.35^2/4)^2} = 0.714 \text{ 米}$$

$$Z_{II} = 84.9 \text{ 米}$$

将各数据代入，得

$$H = 27.1 \text{ 米}$$

$$\eta_u = \frac{N_g}{9.81QH} = \frac{7410}{9.81 \times 33 \times 27.1} = 0.845$$

$$\eta = \eta_u/\eta_g = 0.845/0.966 = 0.875$$

第三节 水 轮 机 的 结 构

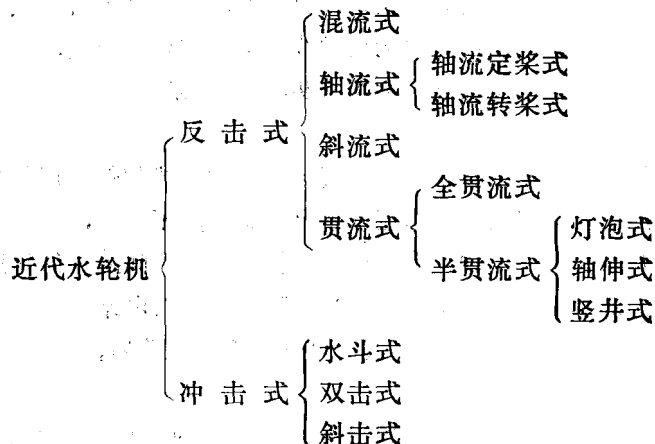
一、水轮机的种类

近代水轮机分成两大类：反击式和冲击式。

在转轮内转换成固体机械能的水流能量形式是位能、压能和动能的水轮机，称为反击式水轮机。在这种水轮机中，从转轮的进口至出口水流压力是逐渐减小的，转轮中的水流具有大于大气压的压力，充满全部流道。根据转轮区域水流运动方向的特征，反击式水轮机又分为混流式、轴流式、斜流式和贯流式等不同型式。

在转轮内转换成固体机械能的水流能量形式仅仅是动能的水轮机，称为冲击式水轮机。在这种水轮机里水流沿转轮斗叶流动过程中压力保持不变（一般等于大气压），具有与空气接触的自由表面，转轮不是整周进水。根据转轮的进水特征，冲击式水轮机又分为水斗式、斜击式和双击式等不同的型式。

近代水轮机主要类型如下：



二、各型水轮机的应用特点

1. 混流式水轮机

混流式水轮机（图1-2）又叫法兰西斯水轮机。水流沿径向进入转轮，然后大体上沿轴向自转轮流出。大型混流式水轮机一般用于水头50~700米。混流式水轮机由于应用水

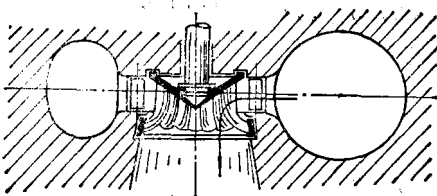


图 1-2 混流式水轮机

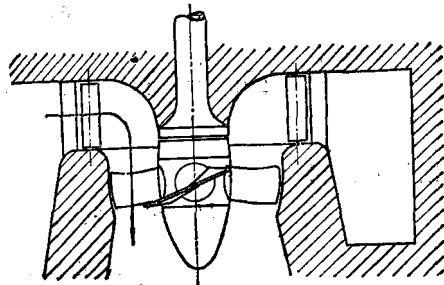


图 1-3 轴流式水轮机

头适合多数地区的需要，以及结构简单、运行可靠和效率高，是现代应用最广泛的一种水轮机。

2. 轴流式水轮机

轴流式水轮机（图1-3）转轮区域的水流是沿轴向流动的，水流在导叶至转轮之间转为轴向，然后进入转轮。根据转轮桨叶在运行时是否可以转动，轴流式水轮机分为轴流定桨式和轴流转桨式（又叫卡普兰式）两种。

轴流定桨式水轮机在运行时其转轮桨叶固定不动，制造简单，但它处于高效率区的流量和出力范围远较混流式窄，当离开高效区运行时效率便急剧下降。因此，这种水轮机多用于功率不大和水头变化幅度较小的水电站。目前它的应用水头一般为3~50米。

轴流转桨式水轮机在运行时转轮桨叶可以转动。由于桨叶的转动与导叶的转动相配合，实现流量和出力的双重调节，使其高效率区的流量和出力范围显著扩大，并提高了它的运行稳定性。目前它的适用水头达70米。

3. 斜流式水轮机

斜流式水轮机（图1-4）转轮区域的水流是沿斜向流动的。这种水轮机大约在1950~1952年提出。由于转轮叶片可以转动而实现双重调节，它象轴流转桨式，处于高效率区的流量、出力范围大。又因叶片轴线与水轮机轴线斜交，它象混流式，可比轴流式装较多叶片（一般8~12片），应用水头较高，适用水头40~200米。

4. 贯流式水轮机

这是一种流道呈直线状的卧轴水轮机，其转轮与轴流式相似，可作成定桨和转桨两种。贯流式水轮机的主要优点是：①水流基本上沿轴向，不转弯，提高了效率和过流能力；②由于流道外形象管子且主轴卧置，可缩短机组高度、间距和简化厂房水工结构，减少土建工程量。贯流式水轮机适用于水头25米以下的低水头电站。目前常用灯泡贯流式（图1-5）、竖井贯流式和轴伸贯流式，其中灯泡式应用最普遍。

5. 水斗式水轮机

水斗式水轮机（图1-6）又叫培尔顿水轮机，其特点为从喷嘴出来的射流是沿转轮圆周切线方向冲击在斗叶上做功。小型水斗式用于水头40~250米。大型水斗式用于水头在400~450米以上的水电站，目前最高应用水头达1770米。

6. 斜击式水轮机

在斜击式水轮机中，由喷嘴出来的射流不是沿着切向，而是沿着与转轮旋转平面成某

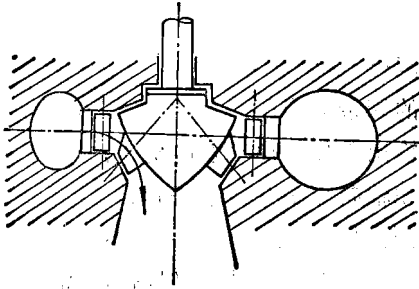


图 1-4 斜流式水轮机

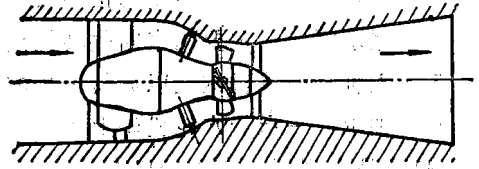


图 1-5 灯泡贯流式水轮机

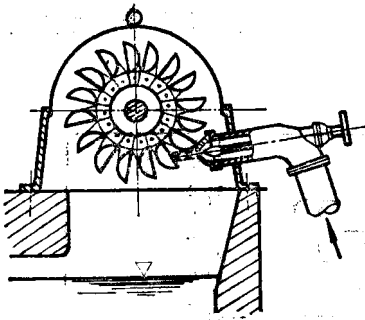


图 1-6 水斗式水轮机

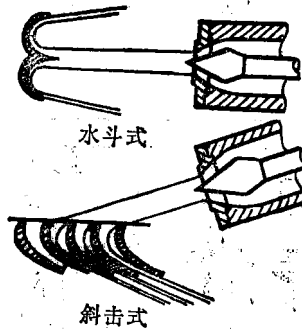


图 1-7 斜击式和水斗式的射流与叶片的相对位置

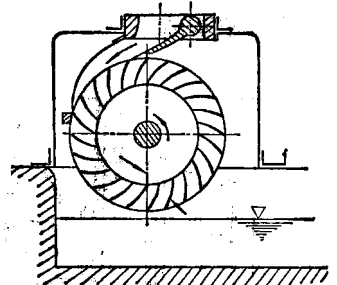


图 1-8 双击式水轮机

一角度（大约 22.5° ）的方向，从转轮的一侧进入斗叶，再从另一侧离开斗叶（图1-7）。斜击式适用水头50~400米，出力达4000千瓦，主要用于混流式与单喷嘴水斗式均不适宜的水头、出力范围。

7. 双击式水轮机

双击式水轮机（图1-8）在工作时，来自喷嘴的水流首先从转轮外周进入叶片流道，大约70~80%的水流能量变为转轮的机械能，然后离开流道穿过转轮中心部分的自由空间，第二次从内周进入叶道，剩下的20~30%的水流能量，再转变为转轮的机械能。最后水流由转轮外周泄走。双击式水轮机结构简单，但效率低，仅用于小型水电站，适用水头10~150米，出力达300千瓦。

8. 可逆式水力机械

可逆式水力机械的工作特点是当它按某一方向旋转时，让水流从某一方向通过，能作为泵工作；而按另一相反方向旋转时，则让水流从另一相反方向通过，又能作为水轮机工作。可逆机组在机械结构上与同类的普通水力机组很相似。应用于抽水蓄能电站的可逆式水力机械有混流式、斜流式和贯流式三种，其中斜流式应用日益普遍。现代潮汐电站采用贯流式可逆机组，其中主要是灯泡贯流式可逆机组。

三、水轮机结构简述

反击式水轮机具有下列主要部件：

- 1) 引水室——将水引入转轮前的导水机构；
- 2) 导水机构——引导水流按一定方向进入转轮，并通过导叶位置的改变使水流流量

改变，调整出力；

- 3) 转轮——将水流能量直接转换成固体机械能；
- 4) 尾水管——主要用来回收转轮出口水流中的剩余动能；
- 5) 主轴——将机械能以旋转力矩的形式向外输出（如传递给发电机）；
- 6) 轴承——承受水轮机轴上的载荷（径向力和轴向力）并传给基础。

图1-9是大型混流式水轮机的结构示例。水轮机的引水室是蜗壳1，水从压力输水管首先进入蜗壳。蜗壳为形如蜗牛的壳体，水流在其中一方面环绕导水机构作圆周运动，另一方面又作径向运动，均匀、对称地进入导水机构。蜗壳连接于座环2的上、下环四周，座环的上、下环之间有若干个沿圆周均布的固定导叶。座环用以承受轴向载荷，并把载荷传给电站基础。

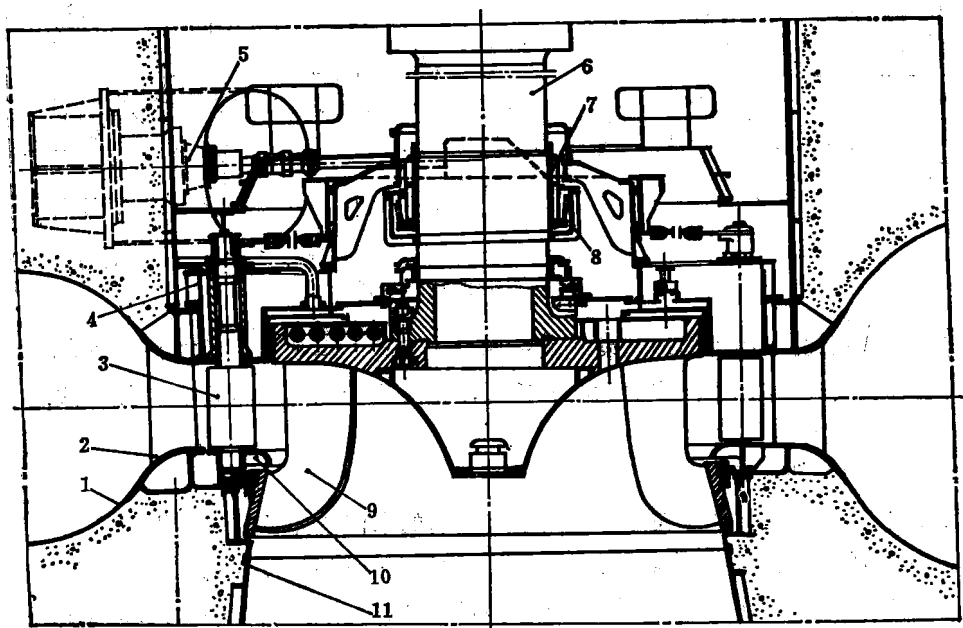


图 1-9 混流式水轮机剖面图

1—蜗壳；2—座环；3—导叶；4—顶盖；5—接力器；6—水轮机轴；7—导轴承；8—润滑油箱；9—转轮；10—底环；11—尾水管

导水机构是一套有机地联系在一起的零部件的总称。导水机构的主要工作元件是导叶3。导叶沿圆周均布于座环和转轮9之间的环形空间内。导叶支承在位于顶盖4和底环10内的轴套上，能绕本身轴线旋转。相邻导叶之间构成水流通通道，此通道的最小宽度叫做导水机构开度。当导叶转动时开度即改变，进入转轮的水流方向也随之改变，使流量有所增减，因而达到调节出力的目的。导叶的转动由专门的传动机构控制，此传动机构的动力部分是接力器5，而接力器的动作则由电液调速器控制。

由导水机构控制的水流进入转轮做功以后，沿转轮下方的尾水管11泄入下游尾水。尾水管是弯肘形的，其剖面面积沿水流方向逐渐扩大，因而在转轮下方形成真空使转轮出口的动能大部分得以回收。

为了引导机组主轴 6 正常旋转和承受各种失衡径向力，设有导轴承 7，导轴承及润滑用的油箱 8 均置于顶盖中央。

轴流式水轮机许多零、部件的结构与混流式的相似，其主要区别首先表现在转轮（流道、叶片和转叶机构）上。图 1-10 是大型轴流转桨式水轮机结构示例。水轮机转轮体 2 的上方置有接力器活塞 1，活塞受调速器控制的油压作用而上下移动时，就通过铰接于活塞上的连杆和套于叶片枢轴 5 上的转臂 3 等零件组成的转叶机构，带动叶片 4 转动。

转轮周围是转轮室 6。为了更好地与混凝土结合并加强刚性，在转轮室的外围布筋，并用拉紧器、千斤顶等牢固地固定于混凝土上。叶片转动轴线以上的转轮室内表面通常作成圆柱形，这样，尽管转轮室埋设于混凝土内而仍能从上面安装和拆卸转轮。叶片轴线以下的转轮室内表面通常作成球形，以保证叶片转动时间隙为较小的定值而减少漏损。

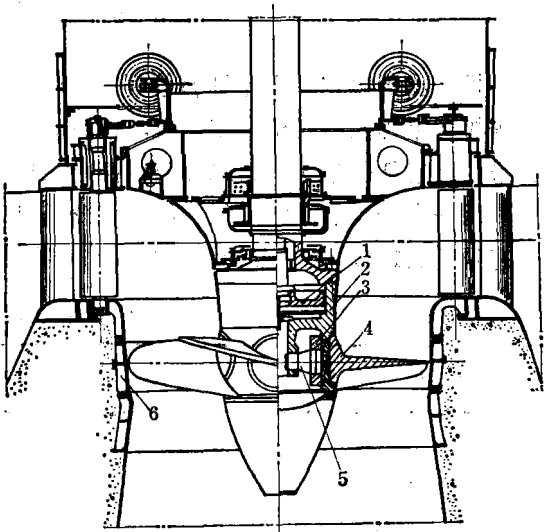


图 1-10 轴流转桨式水轮机剖面图

1—转轮接力器活塞；2—转轮体；3—转臂；4—叶片；5—叶片枢轴；6—转轮室

图 1-11 是一个双喷嘴水斗式水轮机结构示例。由压力输水管 7 来的水流经由喷嘴 4 冲击在转轮 2 的斗叶上。水轮机的流量由喷针 3 和喷嘴管 5 组成的针阀机构进行调节。当喷针移动时，喷嘴出口环形断面面积随之改变而起调节作用。喷针由调速器 6 控制的接力器操作。喷嘴前有偏流器 8，调节时首先通过偏流器的快速动作使射流偏转而改变流量，与

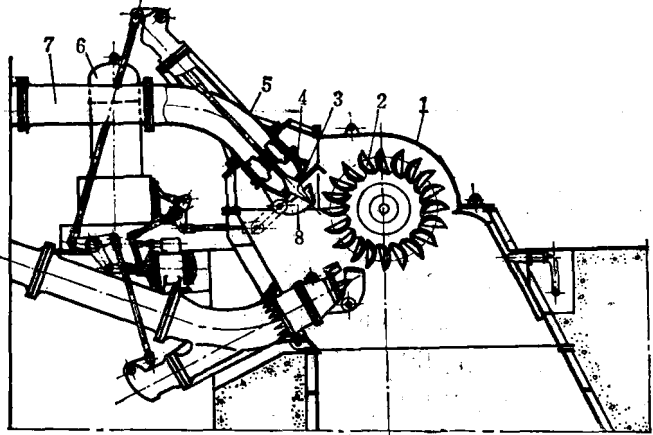


图 1-11 水斗式水轮机剖面图

1—机壳；2—转轮；3—喷针；4—喷嘴；5—喷嘴管；6—调速器；7—压力输水管；8—偏流器

此同时喷针缓慢地移动至相应位置，以避免引水系统中出现过高的压力上升。喷嘴和转轮均置于机壳 1 内，以防水流溅入主厂房。

第四节 水 轮 机 牌 号

根据我国规定，水轮机牌号由三部分组成，每一部分之间用“-”分开。第一部分由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成，前者表示水轮机型式，后者表示转轮型号（入型谱的转轮采用比速^①代号）。第二部分由两个汉语拼音字母组成，前一个表示水轮机主轴布置型式，后一个表示引水室特征。第三部分是以厘米为单位的转轮标称直径。各型水轮机的代表符号见表1-1，主轴布置型式及引水室特征的代表符号见表1-2。

表 1-1 水 轮 机 型 式 的 代 表 符 号

水 轮 机 型 式	代 表 符 号	水 轮 机 型 式	代 表 符 号
混流式水轮机	H L	贯流定桨式水轮机	G D
轴流转桨式水轮机	Z Z	水斗式水轮机	C J
轴流定桨式水轮机	Z D	斜击式水轮机	X J
斜流式水轮机	X L	双击式水轮机	S J
贯流转桨式水轮机	G Z		

表 1-2 主 轴 布 置 型 式 与 引 水 室 特 征 的 代 表 符 号

名 称	代 表 符 号	名 称	代 表 符 号
立 轴	L	明 槽	M
卧 轴	W	罐 式	G
金属蜗壳	J	竖 井 式	S
混凝土蜗壳	H	虹 吸 式	X
灯 泡 式	P	轴 伸 式	Z

在水轮机型式代表符号后加“N”表示可逆式水轮机。

牌号第三部分对于冲击式水轮机应表示为：

水轮机转轮标称直径

作用在每一个转轮上的射流数目×射流直径

各型水轮机的转轮标称直径规定如下（图1-12），

- 1）混流式水轮机是其转轮叶片进水边上的最大直径；
- 2）轴流式和斜流式水轮机是与转轮叶片轴线相交处的转轮室内径；

① 比速等于 $n\sqrt{N(\text{马力})/H\sqrt{H}}$ ，详见第四章第三节。

3) 冲击式水轮机是转轮与射流中心线相切处的节圆直径。

转轮直径尺寸系列(以厘米表示)规定如下。括号内的尺寸仅适用于轴流式水轮机。

25、30、35、42、(40)、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。

水轮机牌号示例:

- 1) HL220-LJ-550 表示转轮型号为220的混流式水轮机,立轴、金属蜗壳,转轮标称直径为550厘米。
- 2) ZZ560-LH-800表示转轮型号为560的轴流转桨式水轮机,立轴、混凝土蜗壳,转轮标称直径为800厘米。
- 3) XLN200-LJ-300表示转轮型号为200的斜流可逆式水轮机,立轴、金属蜗壳,转轮标称直径为300厘米。
- 4) GD600-WP-250表示转轮型号为600的贯流定桨式水轮机,卧轴、灯泡式引水,转轮标称直径为250厘米。
- 5) 2CJ30-W-120/2×10表示转轮型号为30的水斗式水轮机,一根轴上具有两个转轮,卧轴,转轮节圆直径为120厘米,每个转轮具有两个喷嘴,射流直径为10厘米。

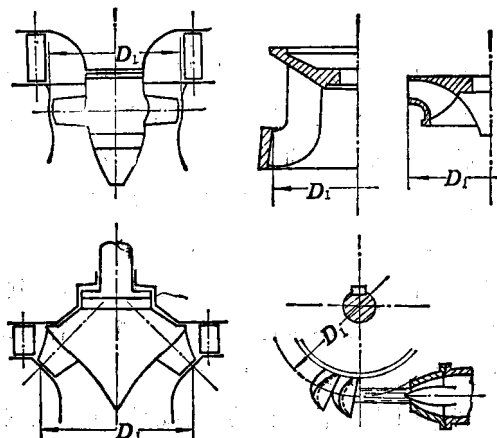


图 1-12 各型水轮机的转轮标称直径

第五节 水 轮 机 的 发 展

最古老的水力原动机是水轮。大约公元前二世纪末在希腊出现了浸入水中的水轮带动的水磨。我国在公元270年左右出现了水碓,用水轮驱动碾米,代替人力舂米。

1745年英国人巴克斯和1750年匈牙利人辛格聂尔提出了一种新型式水力原动机,其工作过程类似现代的水轮机。

1827~1834年法国人富聂隆制造了第一个工作得较好的水轮机——离心式水轮机。

随着社会生产的发展,从十九世纪中叶开始,陆续出现了近代广泛应用的水轮机型式。1847~1849年美国人法兰西斯提出向心式水轮机,这就是现代的混流式机型,1880年美国人培尔顿提出水斗式水轮机,1912年捷克人卡普兰提出轴流转桨式水轮机。

近代水轮机发展的主要趋势是提高单机容量、比速和适用水头。

提高单机容量可以降低水轮机单位容量造价、提高效率 and 缩减土建工程量。在本世纪五十年代以前,用了将近100年时间才达到最大单机容量10万千瓦。至1978年已投入运行的水轮机最大单机出力已达:混流式达71.6万千瓦(美国,大库里水电站);轴流式达17.7万千瓦(罗马尼亚、南斯拉夫,铁门水电站);水斗式达31万千瓦(挪威,艾德福特水电

站)。

提高比速可以缩小机组尺寸,降低电站投资。近年来,水轮机的比速已有相当大的提高(各型水轮机的比速范围见第四章第三节)。

反击式水轮机的应用水头在不断提高。目前混流式水轮机已达到672米,斜流式水轮机可达到200米,而轴流转桨式水轮机有超过70~80米的可能。

我国水力资源非常丰富,理论蕴藏量约为五亿八千万千瓦。但在解放前的旧中国,除了日本帝国主义侵占我国东北、台湾时修建了一些水电站以外,全国共计只有十几个小型水电站,总容量不过12000千瓦,其中容量最大的也只有300千瓦。当时我国几乎没有水轮机制造工业和水力发电事业。

新中国成立后,在共产党的领导下我国水力发电事业有很大的发展。目前水电装机容量达1500万千瓦左右。在实现社会主义四个现代化的过程中,我国水力发电事业必将有更大的发展。

建国三十年来,我国逐步建立了自己的水轮机设计、制造和试验研究体系。已有20多个水轮机厂纳入国家计划,30多座水轮机试验台在进行各种试验研究。水轮机的单机容量以较快的速度逐年增长。1952年制成800千瓦混流式机组,1958年制成16000千瓦轴流式机组,1972年制成30万千瓦混流式机组,1970年制成6万千瓦轴流式机组,长江葛州坝17万千瓦轴流式机组已制成并开始安装,12.5万千瓦轴流式机组也即将制成。

第二章 水轮机的工作原理

第一节 水流在水轮机转轮中的运动

水轮机中某一点的水流运动情况可用该点的速度三角形来描述。速度三角形是流场中同一点的速度与分速度按平行四边形法则构成的向量三角形。转轮进、出口处的速度三角形,是研究水轮机工作过程和进行转轮水力设计的有力工具。考虑到实用与方便,通常应用下述两种速度三角形。

转轮中的水流运动是一种复杂运动,水流既跟随转轮旋转(牵连运动),同时又对转轮有相对运动。根据这个特点可以用下列速度与分速度构成一种速度三角形:

(1) 绝对速度 $\vec{V}$ 即在地面静止部分见到的水流速度。

(2) 相对速度 $\vec{W}$ 即跟随转轮一起转动时见到的水流速度。如果认为转轮的叶片无限薄和无限多(无限数叶片假定),则转轮内的水流运动是轴对称的,其相对运动轨迹与叶片表面重合,相对速度的方向就是叶片表面上过考察点的相对运动轨迹的切线方向。水流运动当然与无限数叶片假定不相符合,实际上只有紧贴叶片的质点的相对运动轨迹才与叶片表面重合,速度沿圆周的分布也很不均匀,叶片背面的相对速度大于工作面的相对速度。

(3) 圆周速度 $\vec{U}$ 即考察点随转轮转动时的线速度,其数值为

$$U = \frac{\pi D n}{60}$$

式中 U ——圆周速度（米/秒）；
 D ——考察点所在圆周直径（米）；
 n ——水轮机转速（转/分）。

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W} \quad (2-1)$$

构成的速度三角形示于图2-1(a)。

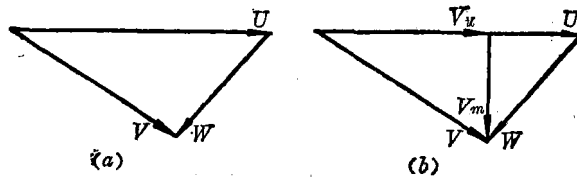


图 2-1 速度三角形

将绝对速度沿圆周速度方向和垂直于圆周速度的方向作正交分解，可以得到两个分速度：

(1) 速度的圆周分速度 $\vec{V}_u$ 。即绝对速度按正交分解在圆周速度方向的分速度。这个分速度很重要，它与考察点半径 r 的乘积 $V_u r$ 称为速度矩，表示单位质量的动量矩，水流能量的转换与 $V_u r$ 的变化密切相关。

(2) 轴面速度 $\vec{V}_m$ 。即绝对速度按正交分解在轴向平面（简称轴面）上的分速度，所谓轴面就是通过转轮旋转中心线与考察点的平面。轴面速度与圆周速度垂直，它的数值可由下式确定

$$V_m = \frac{Q}{F} \quad (2-2)$$

式中 F ——与 $\vec{V}_m$ 垂直的轴面水流过水断面面积。

轴面水流是根据正交分解而在轴面中得到的一种分流动，此流动的速度就是轴面速度。为了求得通过考察点（如图2-2的 c_2 点）的轴面水流过水断面面积 F ，可在轴面中作出通过该点的与轴面水流流线（如 A 、 B 、 C 、 D 、 E 等）垂直的线段 ae ，以 ae 为母线的旋转面面积就是 F 。由古鲁金定理

$$F = 2\pi R_g l_{ae} \quad (2-3)$$

式中 R_g ——线段 ae 的重心所在半径；
 l_{ae} ——线段 ae 的长度。

图2-2中的曲线段1-1与2-2表示叶片进、出水边的轴面投影。当叶片上的点保持其半径不变，旋转投影到通过水轮机轴心线的平面上，就得到这种轴面投影。

$$\vec{V} = \vec{V}_u + \vec{V}_m \quad (2-4)$$

可构成另一种速度三角形。将上述两种速度三角形重叠在一起，如图2-1(b)，就得到了水轮机中广泛使用的形式。

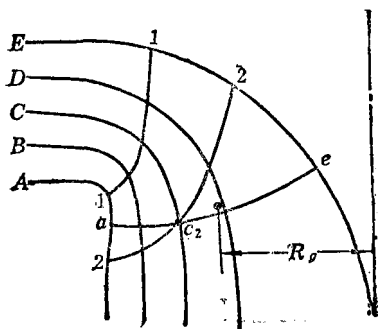


图 2-2 轴面水流的过水断面

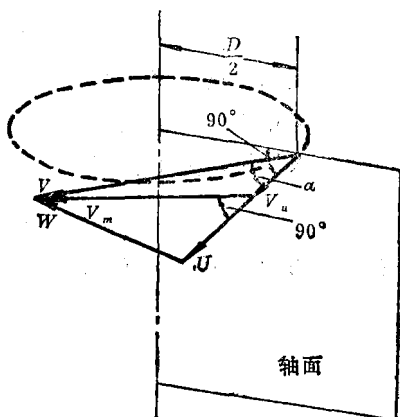


图 2-3 各种速度在空间的相互关系

图2-3表示速度三角形中各元素在空间的相互关系。

现说明转轮进、出口速度三角形的作法。采用下列标记：

下标“0”表示水流尚未受到叶片作用时的转轮进口点；

下标“1”表示水流已经受到叶片作用时的转轮进口点；

下标“2”表示水流还受叶片作用时的转轮出口点；

下标“3”表示水流已经不受叶片作用时的转轮出口点。

混流式转轮进口速度三角形（图2-4）可根据以下三个已知条件作出。

1) 圆周速度 U_0 、 U_1 。

2) 轴面速度 $V_{m0} = \frac{Q}{F_1}$ 及 $V_{m1} = \frac{Q}{F_1 \Psi_1}$ ，称 Ψ_1 为转轮进口排挤系数。叶片占据过水断面愈多，系数 Ψ_1 愈小。若不考虑叶片排挤，则 $V_{m0} = V_{m1}$ 。

3) 绝对速度 $\vec{V}_0$ 的方向，即 $\vec{V}_0$ 与 $\vec{U}_0$ 的夹角 α 。可根据导叶安置方向确定，转轮进口点愈接近导叶， α 就愈接近导叶出口部分与圆周切线的夹角 α'_0 （图2-5）。

由转轮进口速度三角形(对进口点“0”)可求得 $\vec{V}_0$ 、 $\vec{V}_{u0}$ 、 $\vec{W}_0$ 和 β_0 ($\vec{W}_0$ 与 $-\vec{U}$ 。

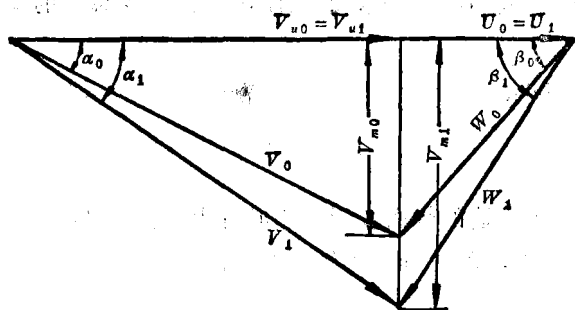


图 2-4 混流式转轮进口速度三角形

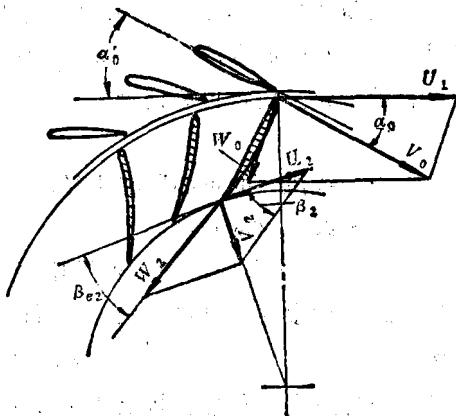


图 2-5 混流式转轮进、出口速度三角形