

水电站动力设备专业适用

水 轮 机

东北水利水电学校编

电力工业出版社

内 容 提 要

本书重点叙述了目前常用的大中型水轮机的结构型式及应用情况,对水轮机选型计算的方法和步骤也进行了一般介绍。书中列有各种型式的大中型水轮机的结构实例,提供了反击型水轮机暂行系列型谱和特性曲线,可供水轮机选型初步设计参考。本书对水轮机的基本原理、模型试验、汽蚀、振动等也作了简要叙述,为从事水电站安装、检修、运行人员提供了理论基础和解决有关问题的基本方法。

本书可供水电站机电专业人员学习,并可做为中等专业学校水电站动力设备专业教材使用,亦可供大专院校有关专业人员参考。

水电站动力设备专业适用

水 轮 机

东北水利水电学校编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六辅坑)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

农业出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 24.5印张 559千字

1980年5月第一版 1980年5月北京第一次印刷

印数 0001—9470册 定价 2.15元

书号 15036·4026

前 言

我国是世界上水力资源最丰富的国家之一，水力发电在我国有广阔的发展前途。但解放前，开发利用的很少。解放后，在党的领导下修建了几十座大中型水电站，使我国的水力发电设备，在制造、安装和运行等方面都积累了丰富的经验。我们在总结实践经验和广泛收集资料、调查研究的基础上，编写了《水轮机》一书，供水电建设机电方面的有关人员参考，并做为中等专业学校水电站动力设备专业教材使用。

本书的选材立足于国内的水轮机设计、制造、运行和检修的成果，重点介绍了水轮机结构，其中以混流式水轮机为主。为便于学习和比较，书中还列有各种型式水轮机的结构实例。对水轮机的选型设计，结合生产实践经验，也进行了一般介绍。书中提供了反击型水轮机暂行系列型谱和特性曲线图，并编有实际例题。对水轮机的能量特性、汽蚀特性、相似理论、模型试验、泥沙磨损、振动以及主要过流部件的水力计算等也做了简要的介绍，为解决水轮机检修和运行中的一些实际问题提供了理论基础和基本方法。

本书由我校水动教研室编写，参加编写工作的有史振声、王蕴莹、周全光。

本书在编写过程中得到制造厂、科研单位、设计院、水电站、工程局和大专院校等大力协助，提供了资料，并对书稿提出了宝贵意见。成都水力发电学校、华北水利水电学院、西津水电站等单位还参加了书稿的修改工作，在此我们表示衷心感谢。

对于书中存在的缺点和错误，希望读者批评指正。

东北水利水电学校

一九七九年十二月

目 录

前 言

第一章 水轮机概述	1
第一节 水轮机的基本参数	1
第二节 近代水轮机的基本类型和应用范围	3
第三节 水轮机装置方式	6
第四节 水轮机基本部件	8
第五节 水轮机型号编制规则	17
第二章 混流式水轮机结构	19
第一节 概述	19
第二节 混流式水轮机转轮	21
第三节 混流式水轮机主轴	28
第四节 混流式水轮机导水机构	30
第五节 混流式水轮机引水室	48
第六节 混流式水轮机尾水管	53
第七节 混流式水轮机导轴承	55
第八节 混流式水轮机密封装置	62
第九节 混流式水轮机附属装置	68
第十节 混流式水轮机结构实例	70
第三章 轴流式水轮机结构	83
第一节 概述	83
第二节 轴流转桨式水轮机转轮	83
第三节 轴流转桨式水轮机其余部件	98
第四节 水轮机防飞逸装置	101
第五节 贯流式水轮机概述	104
第六节 轴流转桨式水轮机结构实例	109
第七节 贯流式水轮机结构实例	117
第四章 斜流式水轮机和水泵-水轮机	124
第一节 斜流式水轮机概述	124
第二节 斜流式水轮机转轮	124
第三节 水泵-水轮机	130
第四节 结构实例	131
第五章 冲击型水轮机	136
第一节 冲击型水轮机概述	136
第二节 水斗式水轮机结构	138

第三节	水斗式水轮机结构实例	144
第六章	水轮机中的能量转换	147
第一节	水轮机中能量损失和效率	147
第二节	水流在水轮机中的运动	149
第三节	水流作用于转轮上的力及力矩	153
第四节	水轮机的基本方程式	155
第五节	水轮机能量转换的最优工况	156
第六节	变工况对水轮机能量转换的影响	159
第七章	水轮机中的汽蚀、泥沙磨损和振动	162
第一节	汽蚀的一般概念	162
第二节	水轮机汽蚀的类型及影响	164
第三节	水轮机的汽蚀系数	166
第四节	水轮机的吸出高度和安装高程	168
第五节	空腔汽蚀对水轮机运行稳定性的影响	171
第六节	水轮机的汽蚀破坏	171
第七节	防止和消除汽蚀的方法	173
第八节	水轮机泥沙磨损	176
第九节	水轮机的振动	180
第八章	水轮机的相似理论	186
第一节	相似理论的一般概念	186
第二节	水轮机的相似条件	186
第三节	相似水轮机主要参数之间的关系	188
第四节	水轮机相似理论的近似公式	190
第五节	比转速与水轮机的关系	192
第六节	模型换算到原型的修正	195
第七节	水斗式水轮机相似公式	198
第九章	反击型水轮机模型试验	200
第一节	水轮机试验的一般概念	200
第二节	反击型水轮机模型能量试验台	201
第三节	混流式水轮机模型能量试验	206
第四节	轴流转桨式水轮机模型能量特性试验	211
第五节	反击型水轮机模型汽蚀试验台	214
第六节	反击型水轮机模型汽蚀试验	216
第七节	水轮机的飞逸特性试验	219
第八节	水轮机的轴向水推力试验	222
第九节	水轮机的力特性试验	225
第十章	水轮机特性曲线	233
第一节	水轮机特性曲线的一般概念	233
第二节	水轮机线性特性曲线	233
第三节	水轮机综合特性曲线	236

第四节	水轮机运转综合特性曲线的绘制	243
第五节	绘制水轮机运转综合特性曲线实例	253
第十一章	水轮机的标准系列和选型计算	264
第一节	水轮机标准系列的意义	264
第二节	反击型水轮机的标准系列	264
第三节	中小型水轮机系列应用范围图	289
第四节	水轮机选择的一般概念	294
第五节	水轮机台数选择	296
第六节	水轮机型号的选择	298
第七节	混流式和轴流式水轮机主要参数的选择	298
第八节	水泵-水轮机的选择	301
第九节	水斗式水轮机的选择	304
第十节	水轮机选择实例	308
第十二章	水轮机蜗壳的水力计算	316
第一节	水流在蜗壳中的运动	316
第二节	蜗壳的形式及其主要参数的选择	317
第三节	圆形断面蜗壳的水力计算方法	320
第四节	混凝土蜗壳的水力计算	324
第五节	蜗壳水力计算的其它方法	328
第六节	座环固定导叶的水力设计	328
第七节	蜗壳水力计算例题	332
第十三章	水轮机导水机构水力计算	339
第一节	径向式导水机构的几何参数	339
第二节	导水机构调节流量和形成环量	344
第三节	导叶的标准化和导叶的布置图	345
第十四章	水轮机尾水管的水力计算	352
第一节	尾水管的功用	352
第二节	直锥形尾水管的性能及其主要参数	355
第三节	弯肘形尾水管及其主要参数	358
第四节	弯肘形尾水管的选择	360
第十五章	转轮的水力计算	368
第一节	转轮水力计算的基本要求	368
第二节	混流式转轮流道几何参数的选择	369
第三节	混流式转轮叶片参数的确定	374
第四节	混流式转轮的水力设计方法和典型转轮	378
第五节	轴流式转轮流道参数的确定	382
附表	国产部分水轮机主要参数表	385

第一章 水轮机概述

第一节 水轮机的基本参数

水轮机一般都装在水电站的厂房内，如图 1-1 所示。水流经引水道进入水轮机，由于水流和水轮机的相互作用，水流便把自己的能量传给了水轮机，水轮机获得了能量后开始旋转而做功。因为水轮机和发电机相连，水轮机便把它获得的能量传给了发电机，带动发电机转子旋转，在定子内感应出电势，带上外负荷后便输出了电流。

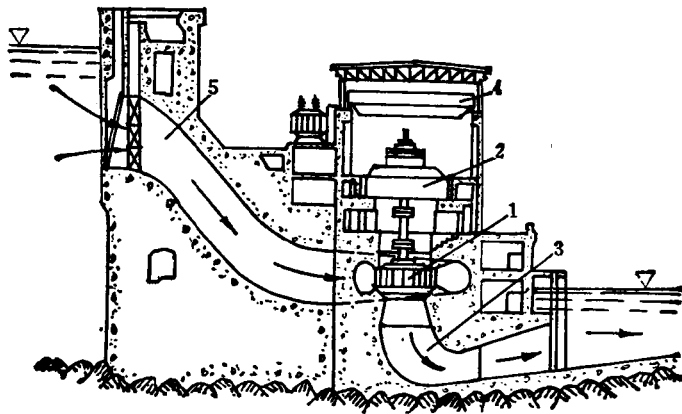


图 1-1 拦河坝式水电站坝后式厂房

1—水轮机；2—发电机；3—尾水管；4—吊车；5—引水钢管

水流流经水轮机时，水流能量发生改变的过程，就是水轮机的工作过程。反映水轮机工作过程特性值的一些参数，称为水轮机的基本参数，其中主要有：水轮机工作水头、流量、出力、效率。

一、工作水头

水总是由高处向低处流，这就是水流流动的客观规律，它不依人们的意志而转移，人们只能根据这一规律来利用它。水流为什么能从高处流向低处呢？从能量的观点来说，就是高处的水流能量大，低处水流能量小，这样高处与低处就自然形成一个水流能量差。根据能量不灭定律，这种能量差不能消失，它只能通过由高处向低处流动而做功，将水流能量差转变成其它形式能量。当某河段修建水电站装置水轮机后，水流便由水轮机进口经水轮机流向出口，这就是说在水轮机进口和出口存在着能量差，其大小可以根据水流能量转换规律来确定。

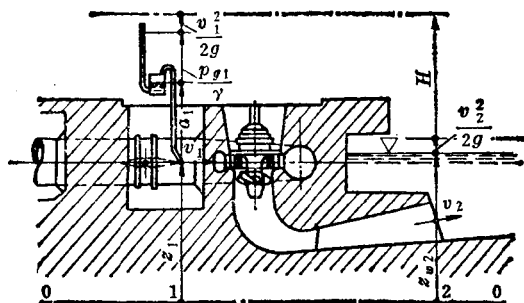
我们以某水电站为例来说明，下面给出该电站装置图，如图1-2。为研究方便和便于比较，在实际工程中只研究单位能量，即单位重量水流所具有的能量。

水轮机进口（测量面）所具有的单位能量为：

$$E_1 = z_1 + a_1 + \frac{p_{g1}}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (1-1)$$

水轮机出口（测量面）所具有的单位能量为：

$$E_2 = z_{w2} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1-2)$$



式中 E —— 单位能量（米）；

z —— 单位位能（米）；

$\frac{p_{g1}}{\gamma}$ —— 为以大气压力表示的表压（米）；

a_1 —— 测压表到测点高程（米）；

$\frac{v_2^2}{2g}$ —— 单位动能（米）；

γ —— 水的比重（1000公斤/米³）；

g —— 重力加速度（9.81米/秒²）。

图 1-2 水轮机的水头

水轮机进出口单位能量差，一般称为水轮机工作水头，通常用 H 表示，单位为米。

$$H = E_1 - E_2 \quad (1-3)$$

水轮机的工作水头是水轮机的重要工作参数，其大小表示水轮机所利用水流单位能量的多少。

二、流量

水流在流经水轮机时有一定的水量，流经时间长水量就多，时间短水量就少。同样为研究方便和便于比较，在实际工程中，只研究单位时间内流经水轮机的水量，即称为流量，通常以 Q 表示，其单位为米³/秒。水轮机流量为水轮机的另一个重要工作参数，其大小同样表示水轮机利用能量的多少。

三、出力和效率

上面谈到水轮机是利用水流能量的机械，而水流能量的多少可以通过水头和流量的大小来表示。具有一定水头和流量的水流在流经水轮机时便可以做功，在单位时间内所做的功，在工程上称为出力或功率。

水流输入给水轮机的出力为：

$$N_{sr} = \gamma Q H \quad (\text{公斤} \cdot \text{米} / \text{秒}) \quad (1-4)$$

式中 γ —— 水的比重，为1000公斤/米³。

在实际生产中，水轮机出力不采用公斤·米/秒单位，而采用千瓦，因1千瓦 = 102公斤·米/秒，所以：

$$N_{sr} = \frac{1000}{102} Q H = 9.81 Q H \quad (\text{千瓦}) \quad (1-5)$$

由于水流经水轮机时有摩擦、漏水等损失，实际水流输入给水轮机的出力，不能被水轮机全部利用并传输出去。由于有损失的原因，真正输出的出力小于输入的出力。一般我们所说水轮机出力，系指水轮机输出出力而言，通常用 N 表示，单位为千瓦，其大小为：

$$N = N_r \eta = 9.81QH\eta \text{ (千瓦)} \quad (1-6)$$

η 为小于1的系数，一般称为水轮机的效率，它表示水轮机对水流的有效利用率，水流经水轮机时损失越小，有效利用率越大，即效率越高。

同样，出力和效率也是水轮机两个主要工作参数，其大小表示水轮机做功的多少。

第二节 近代水轮机的基本类型和应用范围

为了进一步学习和掌握水轮机的类型以及基本部件，就必须弄清水轮机的本质。一般所说的水轮机就是由于在水流作用下而转动的机器，或者说能带动发电机等机械而转动的机器。这些都是现象，它的实质是什么呢？从上面水轮机工作过程和工作参数的分析，我们可以知道，水流之所以能使水轮机转动，是因为水流本身具有一种能量，一般称为水能，它包括有位能、压能和动能，由于它的作用而使水轮机转动，水轮机转动后又带动发电机等机械转动。这就是说，水轮机将获得的水能转换为能带动发电机等机械转动的另一种能量，一般称为机械能，这就是水轮机的本质。所谓水轮机，就是将水能转换为机械能的机器。

不同型式的水轮机，水流能量转换的特征是不同的，各有其特点，据此水轮机可分为两大类：反击型水轮机和冲击型水轮机。

一、反击型水轮机

反击型水轮机是整个水流充满过流通道，没有自由表面，图1-3为早期反击型水轮机转轮旋转示意图，当压力水流以一定速度从各喷管同时喷出时，在水流的反作用力推动下，转轮便按箭头所示方向旋转，这种按水流的反作用原理而工作的水轮机，称为反击型水轮机。

具有一定位能的水流流入转轮时，仅仅一小部分能量转换为动能，而大部分转换为压能，在叶片前后形成压力差，促使转轮转动。也就是说反击型水轮机，水能主要以压能的形态由转轮转换成机械能，这就是反击型水轮机水力作用的基本特征。反击型水轮机在我国应用很普遍，它应用水头可以从几米到450米或更高，适合我国河流的自然条件。

反击型水轮机按其水流流经转轮的方向不同，又分为混流式水轮机、轴流式水轮机、斜流式水轮机和贯流式水轮机。

混流式水轮机其水流流经叶片时，开始进入为辐向，经旋转和改变方向，然后转为轴向流出，故称为混流式或辐向轴流式水轮机，如图1-4。混流式水轮机一般应用水头为20~450米，属于中水头。近年来，应用水头已提高到600多米，最高已达672米。

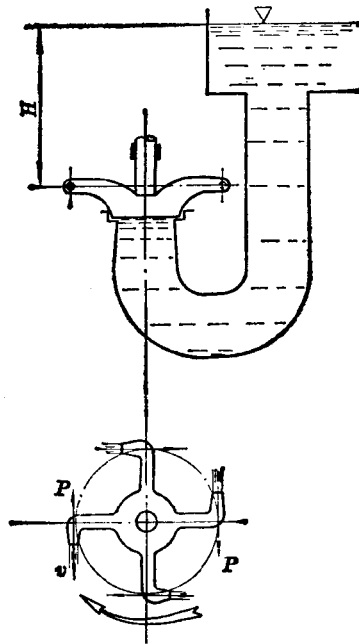


图 1-3 反击型水轮机转轮示意图

轴流式水轮机其水流流经叶片时，一直是轴向，故称为轴流式，如图1-5。轴流式水轮机应用水头，一般在55米以下，属于低水头。但近二十年来它的使用水头已达到80多米，目前最高已应用到88米。

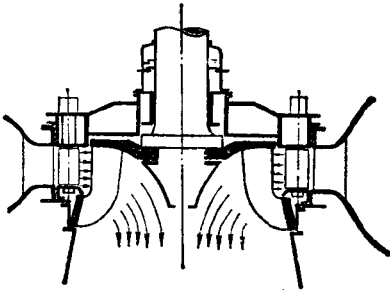


图 1-4 混流式水轮机

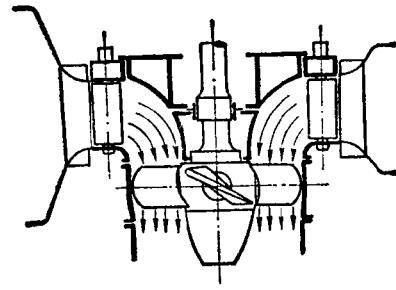


图 1-5 轴流式水轮机

斜流式水轮机，其水流流经叶片时，倾斜于轴向某一角度的方向，因而得名为斜流式，如图1-6。这种水轮机在结构和特性方面，均介于混流式和轴流式水轮机之间，它的应用水头在20~200米之间。当它做成水泵水轮机时，被广泛应用在抽水蓄能电站上。斜流式水轮机是近十几年发展起来的新式反击型水轮机。

贯流式水轮机，水流流经水轮机时，几乎是沿轴向到底“直贯”，因而得名贯流式，如图1-7。贯流式水轮机结构和特性与轴流式相近，它是在轴流式水轮机基础上发展起来的，仅有三十几年的历史，其应用水头在2~30米之间，多应用在低水头和潮汐电站上。

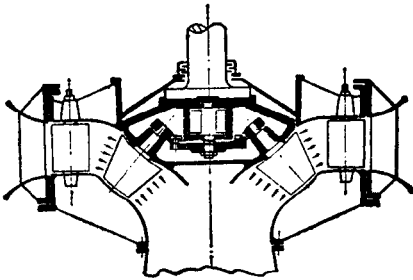


图 1-6 斜流式水轮机

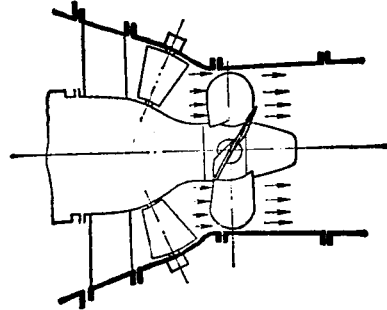


图 1-7 贯流式水轮机

二、冲击型水轮机

冲击型水轮机，水流不充满过流通道，是在大气压力下工作。冲击型水轮机，水能全部以动能形态由转轮转换为机械能，这就是冲击型水轮机水力作用的基本特征。

图1-8为冲击型水轮机示意图，当把具有一定位能的水流引入喷嘴时，位能转换为压能，当水流从喷嘴射出时，又由压能转换为动能，当水流冲击到转轮时，转轮便旋转，把动能转换成机械能，这种按水流冲击作用原理而工作的水轮机，称为冲击型水轮机。冲击型水轮机按射流冲击水斗的方式不同，又可分为水斗式(图1-8)，斜击式(图1-9)和双击式(图1-10)三种型式。

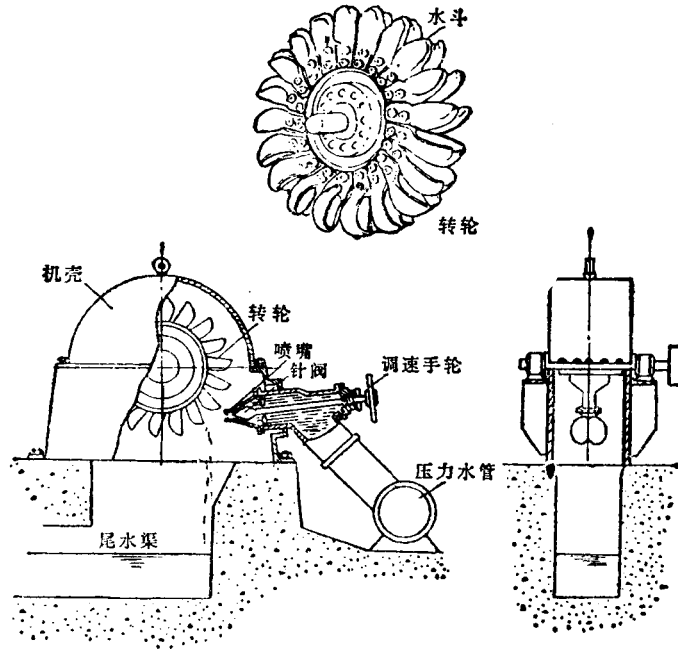


图 1-8 冲击型水轮机

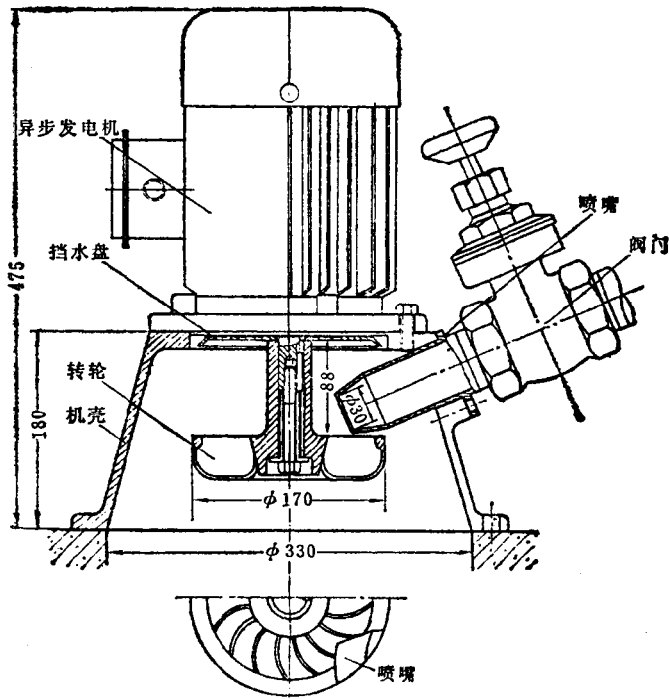


图 1-9 斜击式水轮机 (单位: 毫米)

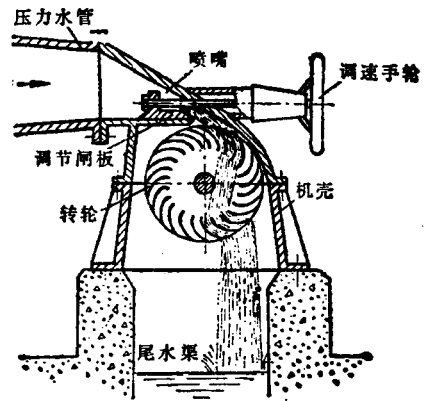


图 1-10 双击式水轮机

在冲击型水轮机中，目前应用最多的是水斗式水轮机，它应用在高水头，一般在100~2000米之间。目前它是唯一适用于700米以上的高水头水轮机，最高水头已应用到1767米。

斜击式水轮机，一般应用水头25~300米，它比双击式效率高，能做成中型机组。

双击式水轮机，一般应用水头为5~80米，结构简单，制造容易，常为高水头小型水电站所采用。为学习方便，我们把水轮机类型和应用范围列表表示，如表1-1。

表 1-1 水 轮 机 类 型 和 应 用 范 围

类 型	型 式	应 用 水 头 (米)	n_s
反 击 型	混 流 式	30~600	50~300
	轴 流 式	转 桨 式	200~850
		定 桨 式	250~700
	斜 流 式	40~120	100~350
	贯 流 式	转 桨 式	2~30
定 桨 式			
冲 击 型	水 斗 式	100~2000	5~35
	斜 击 式	25~300	
	双 击 式	5~80	

第三节 水 轮 机 装 置 方 式

水轮机装置方式，系指水轮机轴的装置方向和机组的连接方式。在电站中，水轮机轴的装置分为立式和卧式两种，主轴竖装者称为立式装置，主轴横装者称为卧式装置。机组连接方式分为直接和间接两种形式：水轮机与发电机轴在同一轴线上，通过法兰盘用螺栓刚性或弹性连接者，称为直接连接；水轮机轴与发电机轴不在同一轴线上，通过传动装置连接者，称为间接连接。

一、立式装置方式

此种装置方式为水轮机与发电机在同一垂直平面内。其优点是：安装、拆卸方便，轴与轴承受力情况良好，发电机安装位置较高，不易受潮，管理维护方便；其缺点是：负载比较集中，水下部分深度增加，因而使土建投资大。立式装置方式多应用在大中型水轮机中。

按其连接方式又可分为：

1. 直接连接

直接连接不需装设复杂的传动装置，机械损失小，传动效率高，运行维护方便。因此机组尽可能采用直接连接方式，特别是大中型水轮机应用最为普遍。图1-11为我国某水电站立式机组直接连接方式布置图。

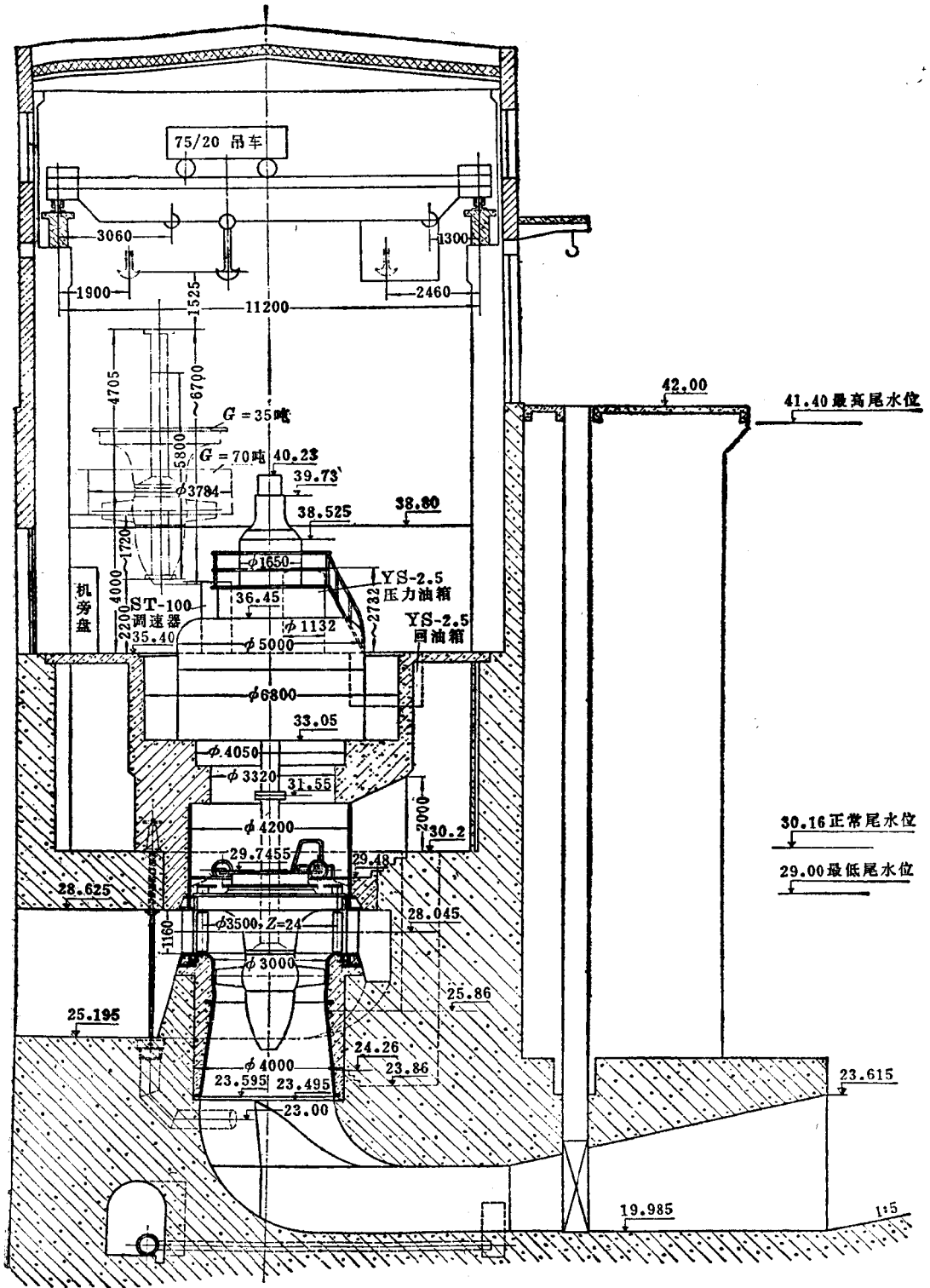


图 1-11 立式直接连接水轮发电机组布置图 (单位: 毫米)

2. 间接连接

间接连接主要应用在农村小型水电站，因水轮机转速较低，而发电机的转速一般较高，无法直接连接，在这种情况下，就必须采用间接连接。

二、卧式装置方式

卧式装置方式因机组支承面积较大，故不致产生很大的集中荷重，厂房高度较低但轴和轴承受力情况不好。目前我国水斗式水轮机、贯流式水轮机和小型混流式水轮机多采用卧式装置方式。它按连接方式不同亦可分为：

1. 直接连接

卧式直接连接主要应用于大中型水斗式水轮机、贯流式水轮机和中小型混流式水轮机，图1-12为卧式装置直接连接的混流式水轮发电机组布置图。

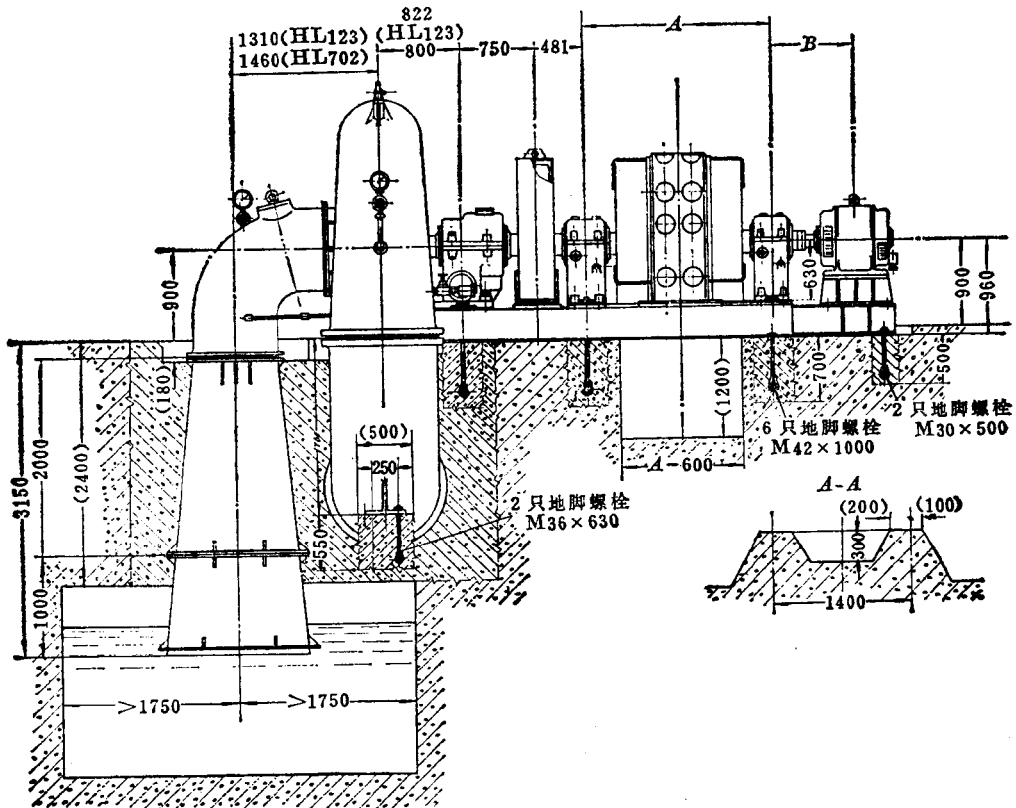


图 1-12 卧式装置直接连接的混流式水轮发电机组布置图（单位：毫米）

2. 间接连接

卧式间接连接的传动方式与立式间接传动基本相同，它主要应用于农村小型水轮机。

第四节 水轮机基本部件

水轮机是将水能转换为机械能的机械。所谓水轮机的基本部件即对能量转换有直接影

响的过流部件，是绝大多数水轮机普遍具有的部件。近代水轮机一般都具有四个基本过流部分，它们分别为：引导并集中水流流入转轮的引水部分——称为引水部件；使流入转轮的水具有所需要的速度和大小的导向部分——称为导水部件；把引入水流的水能转换为转动机械能的能量转换部分——称为工作部件（转轮）；将转轮流出的水引向下游并利用其余能的泄水部分——称为泄水部件。对不同类型的水轮机，上述四个重要部件在型式上都具有各自的特点。

在复杂事物的发展过程中，有许多矛盾存在，其中必有一种是主要的矛盾，由于它的存在和发展，规定或影响着其他矛盾的存在和发展。水轮机的工作部件在四个基本部件中尤为重要，它对水轮机性能的好坏有决定性的影响。它的型式和尺寸决定着其他三个部件的型式和尺寸。因此下面叙述的顺序是：工作部件、引水部件、导水部件和泄水部件。

一、工作部件

工作部件就是转轮（或叫工作轮），它是水轮机的核心。转轮是直接将水能转换为机械能的过流部件，也是对水轮机性能、结构、尺寸等起决定性影响的部件，因此转轮的型式决定了水轮机的型式。一般所指水轮机的型式，实质是指该水轮机转轮的型式。

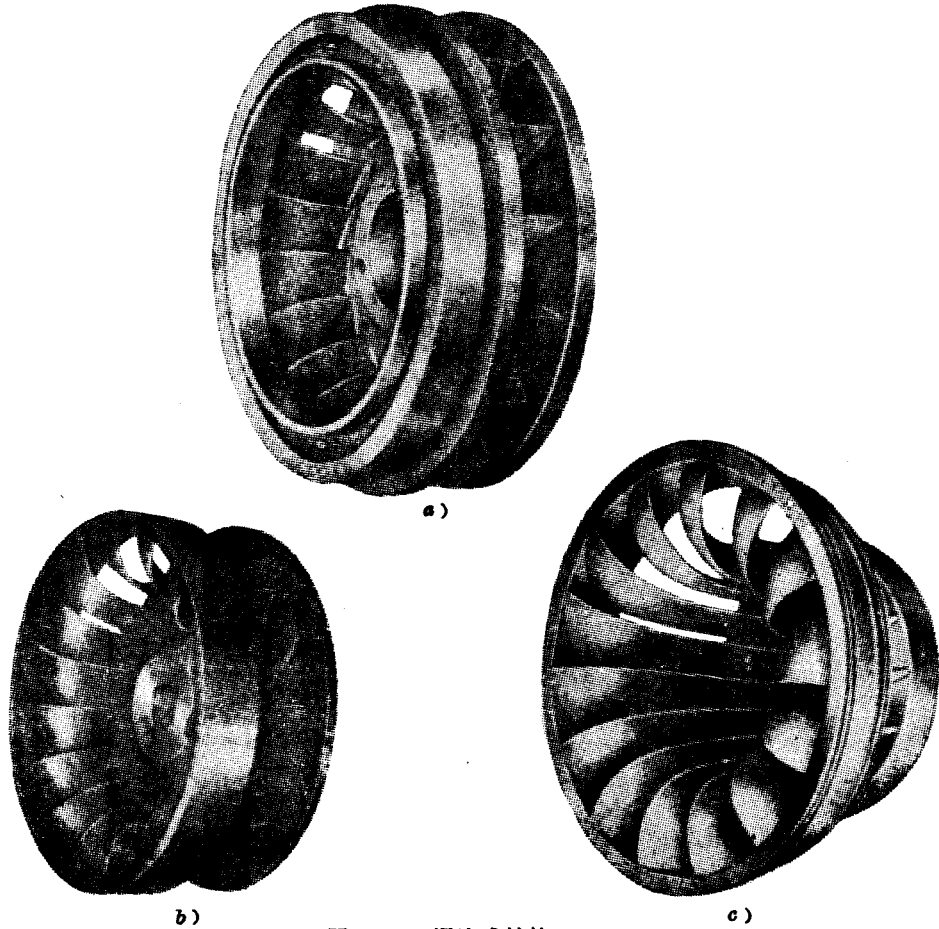


图 1-13 混流式转轮
a) $D_1 > D_2$, b) $D_1 \approx D_2$, c) $D_1 < D_2$

反击型水轮机转轮的型式，根据水流流经转轮叶片的方向的不同有：混流式、轴流式、斜流式。

由于应用水头不同，混流式转轮的型式亦有所改变，图1-13 a) 转轮直径 D_1 大于出口直径 D_2 ，一般应用水头大于300米；图1-13 b) 转轮进出口直径近似相等，通常应用水头150米以上；图1-13 c) 转轮进口直径小于出口直径，一般应用水头40米以下。

轴流式转轮由于结构的不同，又分为轴流转桨式转轮，即转轮叶片可以绕其自身轴转动的；轴流定桨式转轮，即转轮叶片是固定的，如图1-14。

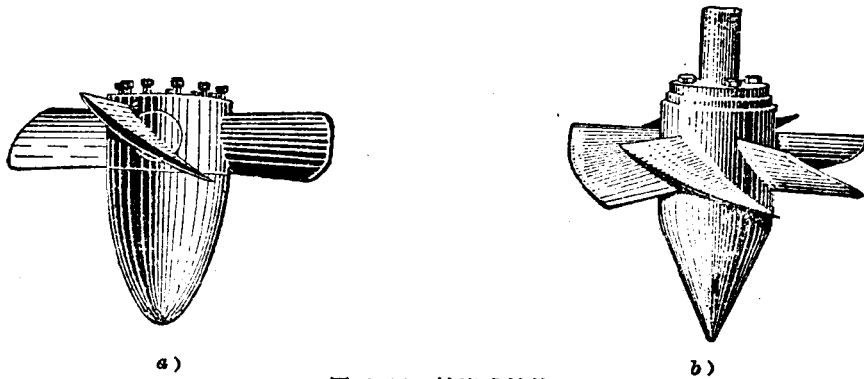


图 1-14 轴流式转轮
a) 转桨式；b) 定桨式

斜流式转轮，即水流流经叶片时与轴倾斜某一角度，故有斜流式转轮之称，如图1-15。



图 1-15 斜流式转轮

冲击型水轮机的转轮，根据其结构不同可分为水斗式、斜击式、双击式三种，如图1-16所示。

转轮的主要几何尺寸为转轮的标称直径，用符号 D_1 表示，标称直径的规定如图1-17所示。对于轴流式和斜流式转轮，指转轮叶片轴心处的转轮室内径；对于混流式水轮

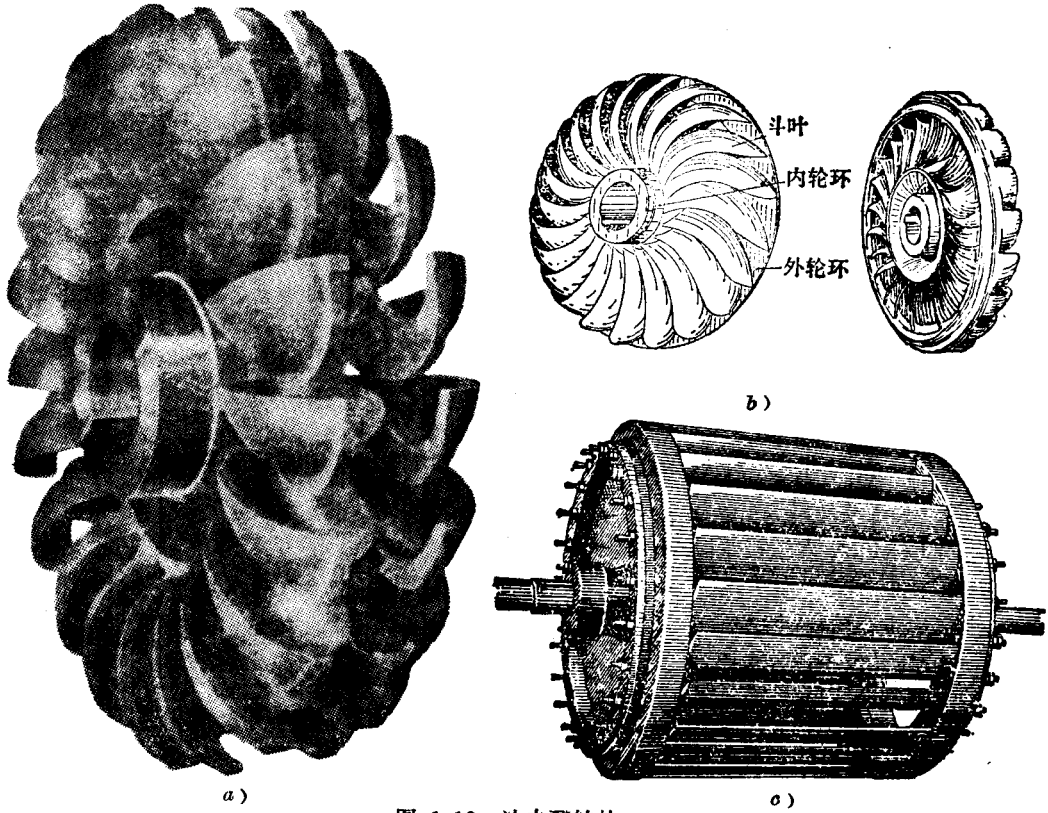


图 1-16 冲击型转轮
a) 水斗式; b) 斜击式; c) 双击式

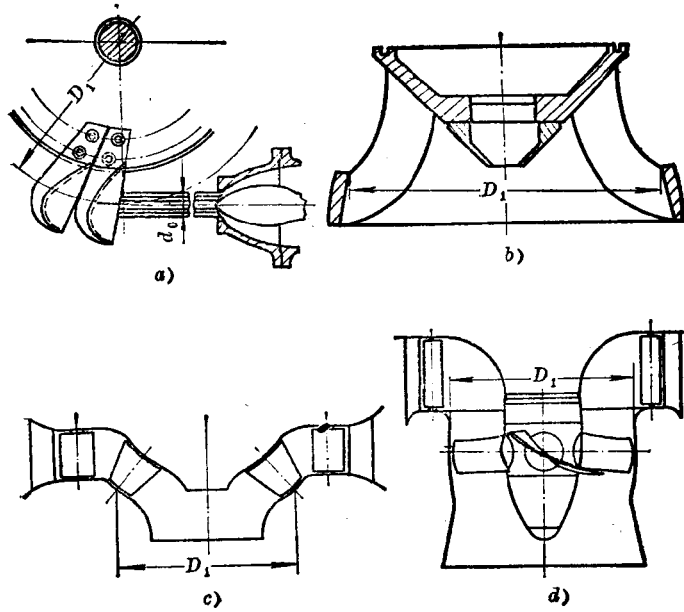


图 1-17 各类水轮机转轮的标称直径 D_1
a) 水斗式水轮机; b) 混流式水轮机; c) 斜流式水轮机; d) 轴流式水轮机