

中小型水电站运行与管理技术丛书

中小型水轮发电机组

运行与检修

肖惠民 主编



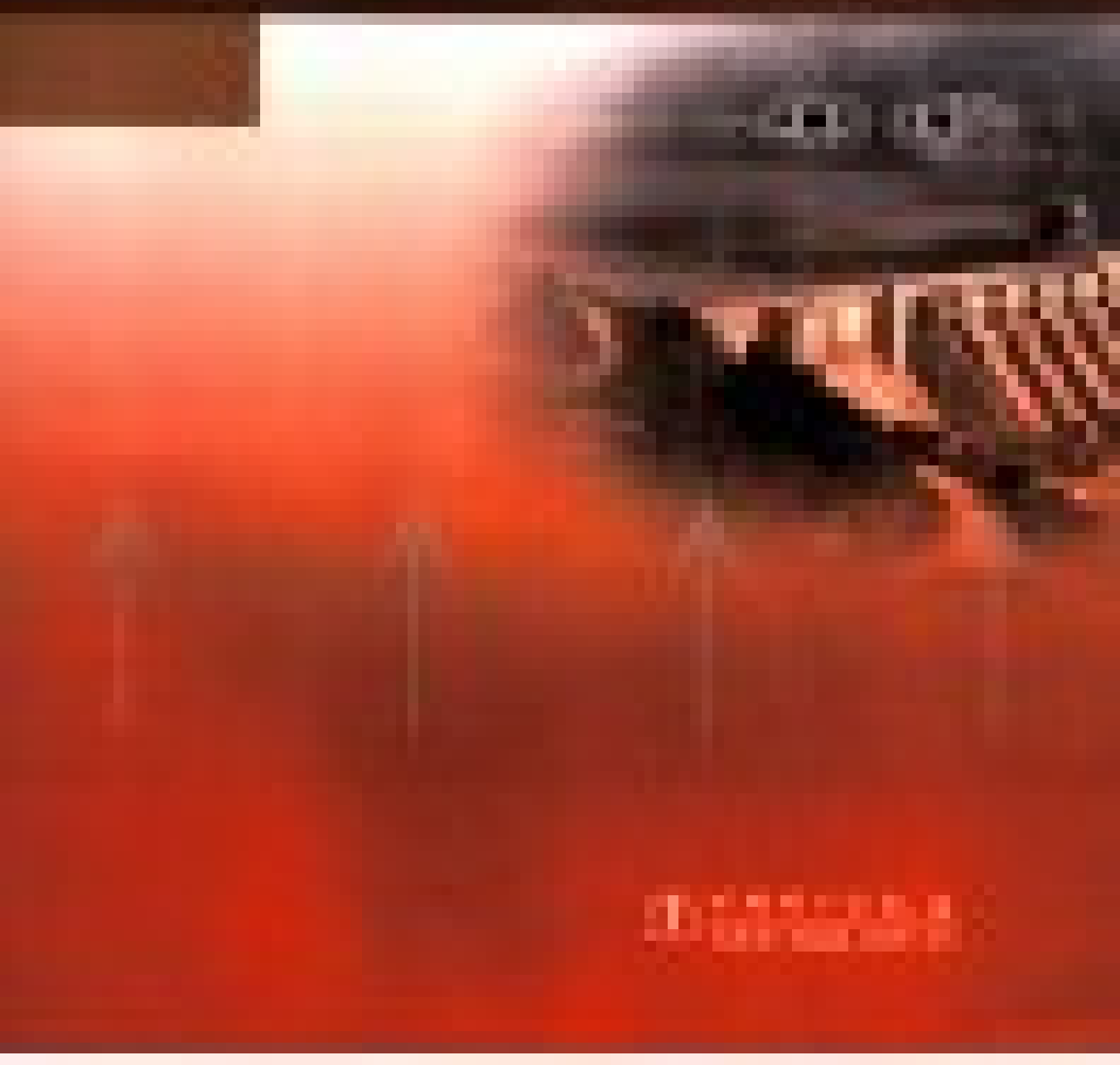
中国电力出版社

www.cepp.com.cn

· · · · ·

中国铁路总公司

运行与检修



中国铁路总公司

中 小 型 水 电 站 运 行 与 管 理 技 术 丛 书

中小型水轮发电机组 运行与检修

肖惠民 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《中小型水电站运行与管理技术丛书》之一，共十章。系统、全面地介绍了中小型水电站各类水轮发电机组（包括冲击式、贯流式）的基本工作原理、构造及选型，以及水力机组运行、维护和检修方面的知识，并用大量实例讲解了机组运行故障分析与事故处理方法。

本书主要作为中小型水电站生产人员、工人、技术人员和管理干部的培训教材，同时也可作为高等学校相关专业的选修课程，亦可供从事中小型水电站设计、运行和管理人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

中小型水轮发电机组运行与检修/肖惠民主编. —北京：中国电力出版社，2007

（中小型水电站运行与管理技术丛书）

ISBN 978 - 7 - 5083 - 4273 - 3

I . 中… II . 肖… III . ①水轮发电机 - 机组 - 运行
②水轮发电机 - 机组 - 维修 IV . TM312

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 104145 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 [http: //www. cepp. com. cn](http://www.cepp.com.cn)）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 16.625 印张 406 千字

印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

编 委 会

主 任：余卫国

副主任：谭少华 蔡维由 王贞伟 刘克兴

委 员：（以姓氏笔划为序）

王贞伟	毛慧和	付国锋	江小兵	刘克兴
刘金山	刘国钢	刘柄文	陈启卷	陈 涛
李学超	肖志怀	肖惠民	余卫国	张天明
张成平	罗仁彩	姬巧玲	职小前	程远楚
谭少华	蔡天富	蔡维由		

前 言

中国小水电资源十分丰富,广泛分布在全国的 1500 多个县市,经济上可开发的容量约为 1 亿 kW 左右,经过 50 多年的建设,取得了世人瞩目的成就。截止 2001 年底,全国已建成小水电站 43027 座,总装机 26262MW,占可开发容量的 1/4 左右,小水电年发电量的约为 871 亿 kW·h。小水电属于非炭清洁能源,既不存在资源枯竭问题,又不会对环境造成污染,是中国实施可持续发展战略不可缺少的组成部分。因地制宜地开发小水电等可再生能源,把水力资源转变成高品位的电能,不仅对于农村地区的脱贫致富,提高人民生活水平具有现实意义,而且对保护生态环境,促进农村社会、经济环境协调发展也有着十分重要的作用。

水轮机是水电站生产电能的水力原动机,是水电站最重要的动力设备之一。水轮机运行性能的优劣,直接影响水电站乃至电力系统运行的技术经济水平。

水轮机运行性能的优劣除与水电站的运行方式和管理水平有关外,还与水轮机的设计、制造、安装、检修等多方面的质量和技术水平有关。因此,要提高水轮机的运行质量,除改善水轮机运行方式外,还必须从多方面入手:提高水轮机的设计和制造水平,采用新工艺、新结构,从流体动力学方面改善水轮机的能量、空蚀和稳定性;在机组的安装、检修过程中,各零部件以及水轮机整体的最终状态应充分满足规范的技术要求。此外,对水轮机运行中存在的各类重大技术问题,必须开展广泛的理论和试验研究,寻找切实可行的解决方法。

运行性能良好的水轮机应具备较高的运行经济性、可靠性、灵活性和稳定性。为此,水轮机必须具有较高的运行效率和宽广的高效率运行区域;具有良好的空蚀性能和抗泥砂磨损性能;运行过程中机组的振动和噪音小,为减振所采取的技术措施行之有效;水轮机具有良好的过渡过程品质和改善水轮机过渡过程特性的有效措施。此外,水电站还应采取合理的经济运行方式和设备检修计划。

水轮机由于各种原因而发生振动,剧烈的振动能导致机组结构破坏,降低机组使用寿命,而且大大降低运行效率和机组功率,同时也会引起水工建筑物的振动。剧烈振动亦影响各种电气仪表的正常运行和使用。由振动产生的噪音还危及操作人员的身心健康,污染环境。

安装在多泥沙河流水电站的水轮机,过流部件常遭到强烈的泥砂磨损而破坏,所以泥砂磨损常常是决定机组大修周期的主要因素。修复遭到严重损坏的零、部件需要消耗大量的工时和材料。由于停机检修所带来的电能损失和运行中过流部件损坏使水轮机效率下降所带来的电能损失,都是非常可观的。因此,改善多泥沙河流水电站水轮机的抗泥砂磨损性能,具有很重要的实际意义。

全书共十章，系统、全面地介绍了中小型水电站各类水轮发电机组（包括冲击式、贯流式）的基本工作原理、构造及选型，以及水力机组运行、维护和检修方面的知识，并通过大量实例分析了机组的各种运行故障及事故处理方法。本书的主要大纲结构由武汉大学刘金生教授制订，刘金生教授还编写了第一章的部分内容，其余章节由肖惠民完成。

本书是《中小型水电站运行与管理技术丛书》之一。中小型水电站计算机监控系统、辅助设备及自动化、励磁装置、水电站运行和管理等内容，请参考丛书的其他分册。

本书参考和引用了国内部分文献、书籍，在此对这些作者表示衷心地感谢！

由于编者水平、经验有限，又兼本书所涉及的内容甚广，本书不足之处在所难免，恳请广大读者批评、指正。

编 者

2006年5月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 水轮机的工作参数	1
第二节 水轮机类型	3
第三节 水轮机牌号	13
第四节 水轮发电机及机组装置型式	14
第二章 反击式水轮机工作原理及特性	24
第一节 水流在转轮中的运动	24
第二节 水轮机基本方程式及效率	25
第三节 水轮机最优工况与非最优工况	28
第四节 水轮机相似理论	29
第五节 水轮机特性曲线	32
第三章 水轮机空蚀与泥沙磨损	36
第一节 水轮机空化和空蚀	36
第二节 水轮机空蚀类型及空蚀评定	38
第三节 水轮机吸出高度与安装高程	44
第四节 水轮机空蚀防护	48
第五节 水轮机泥沙磨损	50
第四章 冲击式水轮机	54
第一节 概述	54
第二节 水斗式水轮机工作原理	59
第三节 水斗式水轮机特性	61
第五章 贯流式水轮机	68
第一节 贯流式水轮发电机组型式	68
第二节 贯流式水轮机发展概况	70
第三节 灯泡贯流式机组运行特性	72

第四节 贯流式水轮机的选型	75
第六章 水轮机选型	85
第一节 水轮机选型的基本原则	85
第二节 水轮机选型的基本方法	87
第三节 机组选型参数的选择	88
第四节 水轮机主要参数的选择	92
第五节 水轮机选型计算举例	100
第七章 水轮发电机组的运行	107
第一节 水轮发电机组的试运行	107
第二节 水轮机运行	124
第三节 水轮发电机运行	138
第八章 机组故障分析与事故处理	152
第一节 水轮机功率不足及解决途径	152
第二节 水轮机抬机事故	153
第三节 轴承故障及处理	154
第四节 水力机组振动	166
第五节 水轮发电机故障分析	180
第九章 水电站厂内经济运行	182
第一节 水轮发电机组的动力特性	182
第二节 机组段动力特性曲线	185
第三节 机组间最优负荷分配	187
第十章 水轮发电机组的检修	192
第一节 检修类型、周期和质量标准	192
第二节 基本测量方法和工具	200
第三节 水轮机转轮的检修	207
第四节 水轮机其他部件的修复	213
第五节 水轮发电机检修	219
第六节 立式机组轴线测量及调整	221
第七节 转动部分的静平衡及机组的动平衡	231
第八节 卧式机组轴承研刮和间隙测量	240
第九节 卧式机组发电机的安装	242
第十节 卧式机组轴线测量与调整	245
附录 I 反击式水轮机型谱参数表	255
附录 II 冲击式水轮机型谱参数表	257
参考文献	258

第一章

中小型水电站运行与管理技术丛书
中小型水轮发电机组运行与检修

概 述

自然界的河流蕴藏着丰富的水力资源。在某一河段水流能量的大小,取决于流量和落差这两个要素。在天然状态下,河段落差是沿河分散的,流量是多变的,它们构成的能量在流动中被消耗了。为了把河流中蕴藏的水力资源加以利用,就必须采取一系列的技术措施,将分散的落差集中起来形成可资利用的水头,并对天然的流量加以控制和调节,这样就可以利用水流的能量发电。如果我们在河流上筑坝,抬高上游水位,以形成一定的落差,并让水流通过管道进入水力机械,就可以驱动水力机械旋转,这样,水流的能量就变成了旋转的机械能。若旋转的水力机械再带动电动机旋转,那么发电机便将旋转的机械能转换成电能,这就是水力发电的基本过程。

这种将水流能量转换成旋转机械能的水力机械就称为水轮机。水轮机和发电机构成水轮发电机组,其中水轮机是原动机,它将水流的能量转换成旋转的机械能,并带动发电机旋转发电。

水轮发电机组是水电站中最重要的动力设备,因此提高水轮发电机组的运行、维护水平具有重要实际意义,本书将对水轮发电机组的运行及维护作详细阐述。

第一节 水轮机的工作参数

水轮机的工作参数是用来表明水轮机本身的性能特点及其所处的工作状态的特征值,最基本的工作参数有:工作水头 H 、流量 Q 、转速 n 、功率 P 和效率 η , 分别说明如下。

一、工作水头 H

1. 水电站毛水头 H_g (水电站上、下游水位的高程差)

依靠水工建筑物,如大坝和引水渠道或管道,在水电站上、下游之间形成水位差,这个水位差就叫做水电站毛水头(见图 1-1),即

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

式中: Z_u 为水电站上游水位, m; Z_d 为水电站下游水位, m。

2. 工作水头 H (水轮机进口与出口测量断面的水头差,即水轮机的水头)

水电站毛水头并非完全为水轮机所利用,因为水流在进入水轮机之前流经引水建筑物(如图 1-1 中的引水道)时,损失掉一部分水头。这样,真正作用在水轮机上的水头应该是水轮机进口断面 I-I 和尾水管出口断面 II-II 的单位重量水流的能量差值,即水轮机工作水头为

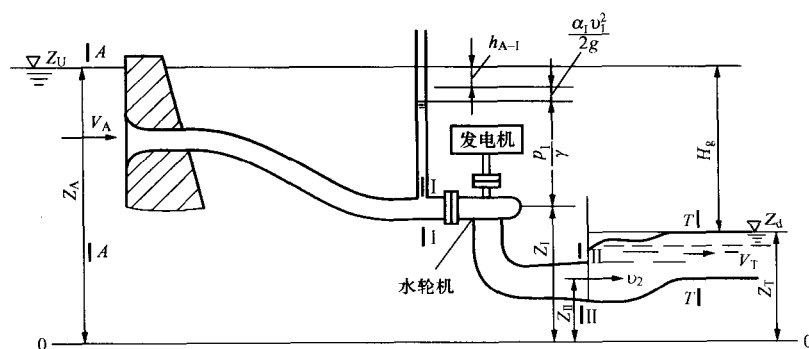


图 1-1 水电站和水轮机的水头

$$H = \left(Z_I + \frac{p_I}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_I^2}{2g} \right) - \left(Z_{II} + \frac{p_{II}}{\gamma} + \frac{\alpha_{II} v_{II}^2}{2g} \right) \quad (1-2)$$

近似取 $\alpha_I = \alpha_{II} = 1$ ，则

$$H = \left(Z_I + \frac{p_I}{\gamma} + \frac{v_I^2}{2g} \right) - \left(Z_{II} + \frac{p_{II}}{\gamma} + \frac{v_{II}^2}{2g} \right) \quad (1-3)$$

式中： Z 为单位位能， m ； $\frac{p}{\gamma}$ 为单位压能， m ； $\frac{v^2}{2g}$ 为单位动能， m ； α 为动能不均系数（考虑过水断面流速分布不均匀的系数）； $\gamma = 9810 N/m^3$ 。

通常我们把水头 H 称为水轮机工作水头，又称为净水头，是水轮机做功的有效水头。水轮机工作水头又可表示为

$$H = H_g - \Delta h_{A-I} \quad (1-4)$$

式中： H_g 为水电站毛水头； Δh_{A-I} 为水电站引水建筑物中的水头损失。

水轮机工作水头等于水电站水头扣除引水建筑物中的能量损失。

水轮机的工作水头随着水电站的上下游水位的变化而改变，一般用几个特征水头表示水轮机工作水头的范围。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_a 、设计水头 H_d 、额定水头 H_r 等，这些特征水头由水能计算给出。

- (1) 额定水头 H_r ：水轮机在额定转速下，输出额定功率时的最小水头；
- (2) 设计水头 H_d ：水轮机在最高效率点运行时水头；
- (3) 最大（最小）水头 H_{max} (H_{min})：在运行范围内，水轮机水头的最大（最小）值；
- (4) 加权平均水头 H_a ：在电站运行范围内，考虑负荷和工作历时的水轮机水头的加权平均值。

二、流量 Q

单位时间内通过水轮机进口测量断面的水的体积，用符号 Q 表示，通常采用 m^3/s 为单位。

常用的水轮机流量有以下两种：

- (1) 额定流量 Q_r ：水轮机在额定水头、额定转速下，输出额定功率时的流量；
- (2) 水轮机空载流量 Q_0 ：水轮机在额定水头和额定转速下，输出功率为零时的流量。

三、转速 n

水轮机转轮单位时间内旋转的次数，称水轮机转速，用符号 n 表示，通常采用 r/min 为单位。

额定转速 n_r ：设计时选定的稳态转速。

一般情况下，水轮机的主轴与发电机主轴是直接联接的，所以水轮机的转速与发电机的转速相同。

四、功率 P 与效率 η_t

(1) 水流功率 P_n ：水轮机进口水流所具有的水力功率，即水轮机输入功率。

水流的功率即单位时间内流经水轮机的水流所具有的能量，水流的功率 P_n 为

$$P_n = \gamma QH (\text{W}) = 9.81 QH \quad (\text{kW}) \quad (1-5)$$

(2) 水轮机功率 P ：水轮机主轴输出的机械功率，即水轮机输出功率。

通过水轮机的水流的功率并不能全部被水轮机利用，这是因为有一部分能量被消耗于水力损失、容积损失和机械损失等方面，所以水轮机从主轴轴端的功率 P 小于 P_n 。我们称 P 为水轮机的功率，通常以 kW 为单位。

(3) 效率 η_t ：输出功率与输入功率之比。

水轮机功率 P 与通过水轮机的水流功率 P_n 之比，称为水轮机的效率，用 η_t 表示，即

$$\eta_t = \frac{P}{P_n} \times 100\% \quad (1-6)$$

效率是表明水轮机对水流能量的有效利用程度，是一个无量纲的物理量，用百分数 (%) 表示。

根据效率概念，水轮机的功率可表示为

$$P = P_n \eta_t = 9.81 QH \eta_t \quad (\text{kW}) \quad (1-7)$$

第二节 水 轮 机 类 型

一、水轮机种类

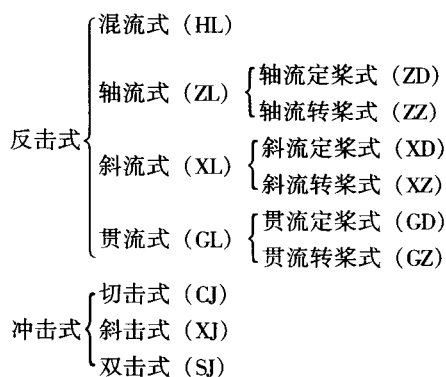
根据转轮转换水流能量形式的不同，现代水轮机可以划分为反击式和冲击式两种类型。

反击式水轮机转轮利用水流的压力能和动能做功。水流流经这种水轮机时充满整个转轮流道，转轮的叶片受到水流的作用力，这一作用力的产生是因为压力水流绕流过转轮叶片时，其压能和动能产生了变化（变小了），亦即水流的能量以压能和动能的形式交付给水轮机转轮，其中，主要是以压能转换而获得水轮机的机械能。

冲击式水轮机转轮只利用水流动能做功。这类水轮机是靠高速水流冲击转轮而做功的。水流自水库、压力前池经引水钢管进入水轮机的进水管，然后通过喷嘴，形成一股高速射流，射向转轮圆周的叶片上，水流将其具有的能量（水头）交给转轮，推动转轮旋转。

在冲击式水轮机中，水并没有充满整个转轮室，在转轮室中有自由表面，即转轮室内是处在大气压力下。从喷嘴射出的射流也是处在大气压力下的自由射流，故这种水轮机是通过水流动能的转变而获得水轮机的机械能的。

根据转轮内流道水流特征和水轮机结构特征，上述两类水轮机又可分为如下若干类型：



二、各种类型水轮机的特点

1. 混流式水轮机

轴面水流径向流入、轴向流出转轮的反击式水轮机 (见图 1-2), 又称弗朗西斯式水轮机 (Francis turbine)。

特点如下:

- (1) 应用水头范围广泛;
- (2) 结构简单, 运行可靠;
- (3) 效率高。

混流式水轮机是现代应用最广泛的水轮机之一。

适用水头范围: 10 ~ 700m。

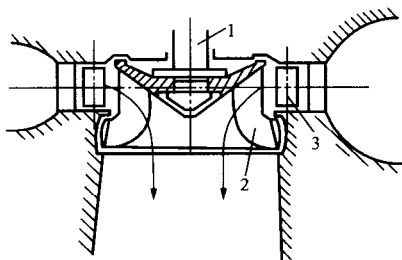


图 1-2 混流式水轮机
1—主轴; 2—叶片; 3—导叶

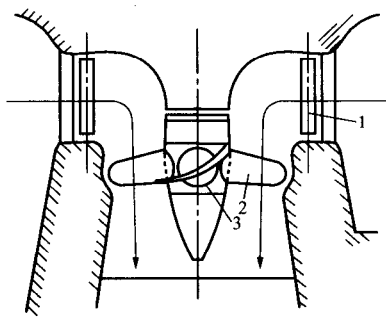


图 1-3 轴流式水轮机
1—导叶; 2—叶片; 3—轮毂

2. 轴流式水轮机

轴面水流轴向进、出转轮的反击式水轮机 (见图 1-3)。

根据转轮叶片在运行中能否转动, 又可分为轴流定桨式和轴流转桨式两种。

(1) 轴流定桨式水轮机: 转轮叶片不可调的 (或停机可调的) 轴流式水轮机。

特点如下:

- 1) 结构简单;
- 2) 偏离设计工况时效率会急剧下降。

因此这种水轮机一般用于功率不大及水头变化幅度较小的电站。

适用水头范围：3~50m。

(2) 轴流转桨式水轮机：转轮叶片可与导叶协联调节的轴流式水轮机，又称卡普兰（Kaplan）式水轮机。

特点如下：

1) 由于实现了叶片与导叶的双重调节，其高效率区范围宽广；

2) 结构较复杂，因它需有转动叶片的操作机构。

适用水头范围：3~80m。

3. 斜流式水轮机

轴面水流以倾斜于主轴的方向进、出转轮的反击式水轮机（见图 1-4）。

特点如下：

(1) 由于实现了转轮叶片与导叶的双重调节，其高效率区范围宽广；

(2) 由于叶片轴线和水轮机轴线斜交，因而，与轴流式相比能装设较多的叶片（轴流式 4~8 片，斜流式 8~12 片），这样提高了应用水头；

(3) 结构较复杂。

适用水头范围：40~200m。

4. 贯流式水轮机

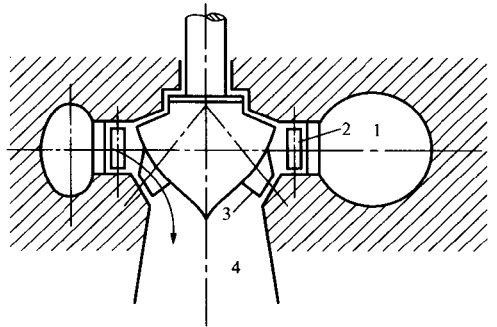


图 1-4 斜流式水轮机

1—蜗壳；2—导叶；3—转轮叶片；4—尾水管

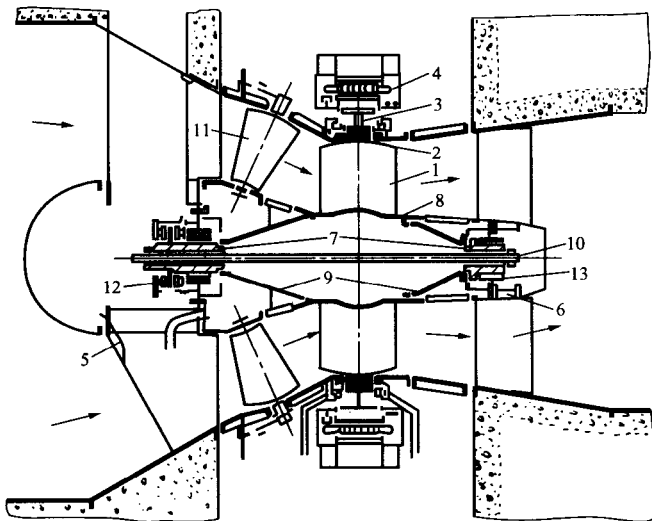


图 1-5 全贯流式水轮机

1—转轮叶片；2—转轮轮缘；3—发电机转子轮轂；4—发电机定子；5、6—支柱；7—轴颈；8—轮毂；9—锥型插入物；10—拉紧杆；11—导叶；12—推力轴承；13—导轴承

过流通道呈直线（或 S 形）布置的轴流式水轮机。

根据贯流式水轮机及其发电机传动方式的不同，可分为全贯流式和半贯流式两类。

全贯流式的发电机转子直接装在转轮叶片外缘上（见图 1-5），这种贯流式具有结构简单，轴向尺寸小等优点，但是由于转子外缘线速度大，密封十分困难，目前很少采用。半贯流式包括灯泡贯流式、轴伸式和竖井式三种类型（见图 1-6~图 1-8），目前使用最广泛的是灯泡贯流式，其发电机置于流道中灯泡体内。

特点如下：

(1) 效率高（进水呈直线，出水为直锥形尾水管）；

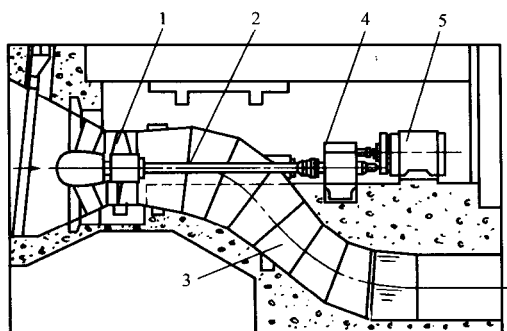


图 1-6 轴伸贯流式水轮机

1—转轮；2—水轮机主轴；3—尾水管；
4—齿轮传动装置；5—发电机

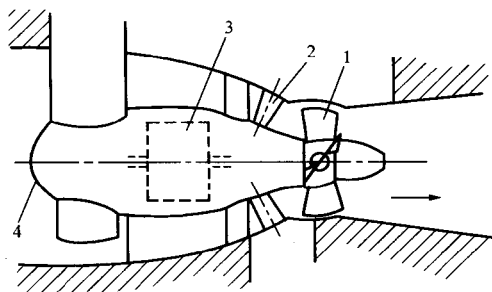


图 1-7 灯泡贯流式水轮机

1—转轮叶片；2—导叶；3—发电机转子；
4—灯泡体

- (2) 过流能力大，比转速高；
- (3) 结构紧凑；
- (4) 制造要求高，运行、检修不便。

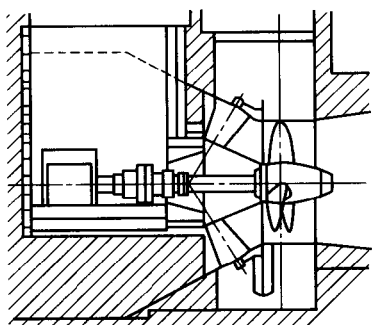


图 1-8 竖井贯流式水轮机

适用水头范围：25m 以下。

5. 水斗式水轮机

转轮叶片呈斗形，且射流中心线与转轮节圆相切的冲击式水轮机（见图 1-9），又称培尔顿（Pelton）水轮机。

特点如下：

- (1) 应用水头较高；
- (2) 结构简单；
- (3) 不受空蚀条件限制。

适用水头范围：40 ~ 1770m。

6. 可逆式水泵水轮机

水泵水轮机既可作为水轮机，又可作为水泵使用，主要应用于抽水蓄能电站。有混流式、轴流式和斜流式三种，其中混流式应用最为广泛，其结构与同类水轮机相似。

抽水蓄能电站和普通水电站不同，它有上下两个水库。当电力系统夜间有剩余电力时。

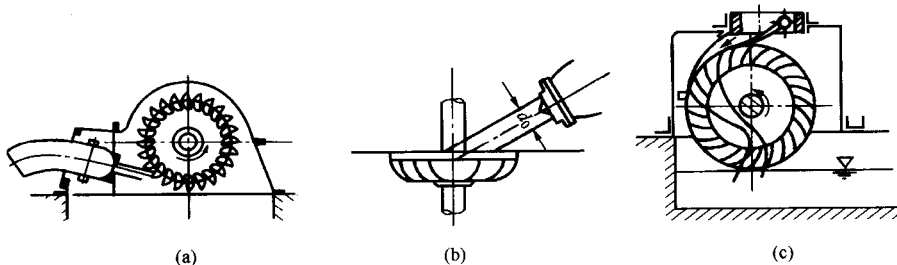


图 1-9 冲击式水轮机

(a) 水斗式；(b) 斜击式；(c) 双击式

将下库的水抽至上库储存；在电力尖峰负荷时，则利用上库的水发电。适用水头范围：

- (1) 混流式：80 ~ 600m；
- (2) 斜流式：小于 120m；
- (3) 贯流式：25m 以下。

三、反击式水轮机的过流部件

反击式水轮机有四个过流部件，它们的功能如下：

(1) 引水部件：由蜗壳和座环（见图 1-10）组成，将水流均匀而轴对称地引入转轮前的导水机构，并使水流具有一定的速度环量；座环还承担机组的轴向载荷，并把载荷传递给混凝土基础。

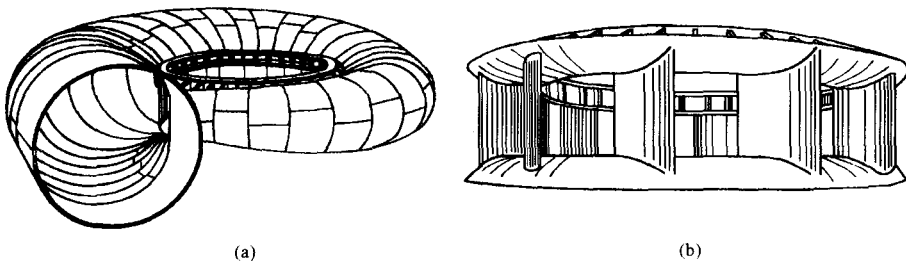


图 1-10 蜗壳和座环

(a) 蜗壳；(b) 座环

(2) 导水机构：引导水流按一定的方向进入转轮，并通过改变导叶位置来改变流量，调整功率，并可截断水流停机（见图 1-11）。

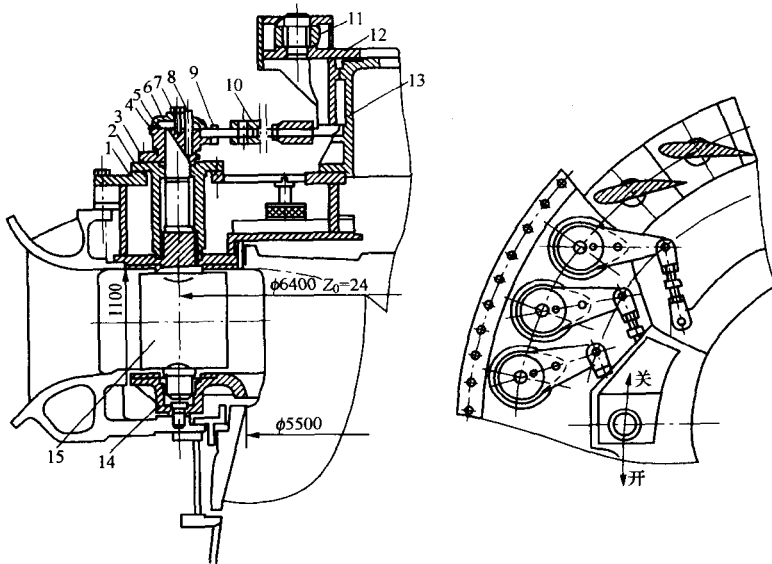


图 1-11 导水机构

- 1—顶盖；2—套筒；3—止推压板；4—连接板；5—导叶臂；6—端盖；7—调节螺钉；8—分半键；
9—剪断销；10—连杆；11—推拉杆；12—控制环；13—支座；14—底环；15—导叶

(3) 转轮：将水流的能量转换成旋转的机械能（见图 1-12、图 1-13）。

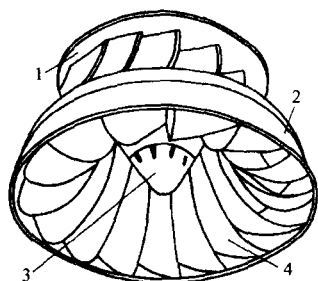


图 1-12 混流式转轮

1—上冠；2—下环；3—泄水锥；4—叶片

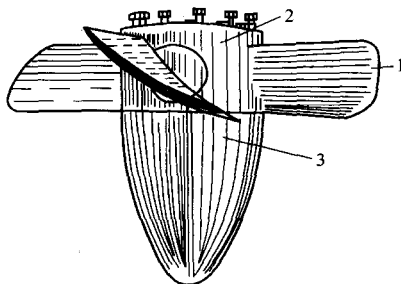


图 1-13 轴流式水轮机转轮

1—桨叶；2—轮毂；3—泄水锥

(4) 尾水管：主要用来回收转轮出口水流中的剩余能量（见图 1-14）。

四、反击式水轮机非过流部件

除过流部件外，水轮机还包括主轴、导轴承和密封装置等非过流部件。

1. 主轴

主轴将转轮的机械能以旋转力矩的形式传递给发电机转子，一般采用实心结构或空心结构：当直径较小时，采用实心结构；当直径较大时，为节省材料和减轻质量，并且当水轮机需要通过大轴轴心补气时，主轴和法兰均采用空心结构。对于轴流转桨式水轮机，由于主轴内需布置桨片液压操作油管，因此主轴只能采用空心结构。

水轮机主轴有以下三种形式：

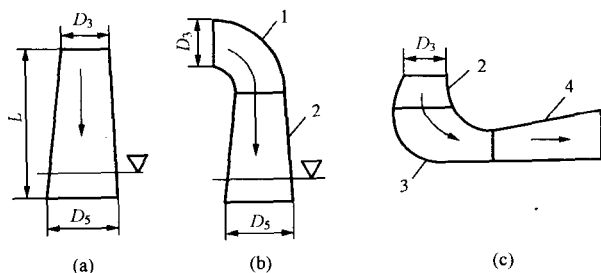


图 1-14 尾水管主要形式

(a) 直锥型；(b) 肘型；(c) 弯肘型

1—弯管段；2—直锥段；3—弯肘段；4—扩散段

(1) 无法兰的光轴，通常用在中小型卧式机组和小型立轴轴流定桨式水轮机中。光轴的一端采用柱面配合键紧固转轮（见图 1-15），另一端通过弹性联轴器与发电机主轴相连。

(2) 单法兰轴，有两种形式：一种是用柱面配合键把转轮固定在水轮机上，带法兰的一端采用联轴螺栓与发电机主轴法兰连接；另一种是将转轮套在轴上用螺帽固定，带法兰的一端采用螺栓与发电机主轴法兰相连。

(3) 双法兰轴。这种型式应用最为广泛，它由轴身和两个法兰组成，两端用特制螺栓与转轮和发电机主轴相连接（见图 1-16）。

2. 水轮机导轴承

导轴承作用是承受水轮机轴上的径向力，并把它传给基础部分。

水轮发电机组在运行时，转动部件会产生径向力

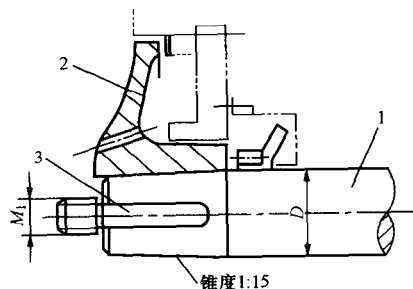


图 1-15 主轴与转轮的柱面配合键连接

1—主轴；2—转轮；3—键槽