

高级工培训教材



水轮发电机组运行技术

甘肃省电力工业局

图书在版编目(CIP)数据

水轮发电机组运行技术/甘肃省电力工业局编. —北京:中国电力出版社, 1995

发电厂和变电所运行高级工培训教材

ISBN 7-80125-027-3

I. 水… II. 甘… III. 水轮发电机-机组-运行-技术培训-教材 IV. TM312.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 14709 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1996 年 3 月第一版 1996 年 3 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 32 开本 20.25 印张 446 千字

印数 0001—6650 册 定价 36.50 元

版权专有 翻印必究

出 版 说 明

为满足高级工培训工作的需要,根据部颁《电力工人技术等级标准》的要求,我社组织出版了发电厂和变电所运行高级工培训教材。本套教材第一批共 9 种,是由河南省电力工业局和甘肃省电力工业局在其省内广为使用、多次办培训班所采用的运行高级工培训教材的基础上,根据教学中的经验和使用单位与读者的意见,对内容进行了增、删,结构上进行了调整,经重新修改而成,使之更适应运行高级工培训的要求。其中,火电厂运行高级工培训教材分为 4 种,即《火电厂电气设备及运行》、《火电厂继电保护及自动装置》、《锅炉设备运行技术》、《汽轮机设备运行技术》;变电所运行高级工培训教材分为 2 种,即《变电所电气设备及运行》、《变电所继电保护及自动装置》;水电厂运行高级工培训教材分为 2 种,即《水轮发电机组运行技术》、《水工观测技术》。另外,《电力系统运行及过电压保护(火电厂、水电厂和变电所共用)》为共用教材。本套教材供运行高级工培训及自学用,也可供相关专业的工人及技术人员参考。

中国电力出版社

1995 年 7 月

前 言

继 1987 年我国的发电装机容量达 1 亿 kW 以来,电力发展每年都保持了 8%到 9%的增长速度,有的年份在 10%以上。近 5 年来每年投产的大中型发电设备都超过 1200 万 kW,截止 1995 年 3 月我国发电装机容量突破 2 亿 kW 大关,电厂规模和电网规模也进一步扩大。目前百万千瓦级发电厂已达 34 座,大电网已经覆盖了全国的全部城市和大部分乡村。我国水电建设近几年连续跨过年投产 200 万、300 万、400 万 kW 几个台阶,一批新建的大中型水电站的相继开工和投产,提高了我国水能资源的开发利用比重。

为了提高广大水电系统生产人员的技术业务素质,以适应水电生产发展的需要,由甘肃省电力工业局组织有关工程技术人员按部颁《电力工人技术等级标准》、《电力生产人员岗位规范》要求,编写了《水轮发电机组运行技术》这本书。

本书是按工人培训考核特点和规律建立的新教材体系,具有重点突出,层次分明,内容丰富,针对性强,具体实用,联系实际,通俗易懂,图文并茂的特点,融基础知识、专业理论和操作技能为一体,克服了以前教材存在的偏多、偏深、偏难问题。同时全书各章还附有复习题,供自学和培训考核时参考。

本书由甘肃省电力工业局教育处蒋芳林、李清义同志主持统编,参编的有刘家峡水电厂聂福华、刘军、李永清、李建军、朱国海、任煜峰等同志。在编审过程中得到了有关领导和有关院校的帮助和支持,在此表示谢意。

由于编写时间仓促，加上水平有限，缺点和错误在所难免，恳切希望广大读者批评指正和提出修改意见，以利再版时提高教材质量。

编 者

1995 年 5 月

目 录

出版说明

前言

第一篇 水 轮 机

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	5
第三节 水轮机型号编制规则	9
复习题	11
第二章 混流式水轮机结构	14
第一节 概述	14
第二节 混流式水轮机转轮	17
第三节 混流式水轮机主轴	25
第四节 混流式水轮机导水机构	26
第五节 混流式水轮机引水室	41
第六节 混流式水轮机尾水管	43
第七节 混流式水轮机导轴承	44
第八节 混流式水轮机密封装置	50
第九节 混流式水轮机附属装置	54
第十节 混流式水轮机结构实例	57
复习题	60
第三章 轴流式水轮机结构	63
第一节 概述	63
第二节 轴流转桨式水轮机转轮	64
第三节 轴流转桨式水轮机其余部件	77

第四节	水轮机防飞逸装置	82
第五节	轴流转桨式水轮机结构实例	86
复习题		88
第四章	水轮机中的能量转换	92
第一节	水轮机中能量损失和效率	92
第二节	水轮机中水流的速度三角形和环量的基本概念	96
第三节	反击型水轮机中的水流运动	99
第四节	水流作用于转轮上的力及力矩	110
第五节	水轮机的基本方程式	114
第六节	水轮机能量转换的最优工况	116
第七节	变工况对水轮机能量转换的影响	119
复习题		122
第五章	水轮机中的汽蚀、泥沙磨损和振动	126
第一节	汽蚀的一般概念	126
第二节	水轮机汽蚀的类型及影响	129
第三节	水轮机的汽蚀系数	131
第四节	水轮机的吸出高度和安装高程	135
第五节	空腔汽蚀对水轮机运行稳定性的影响	139
第六节	水轮机的汽蚀破坏	141
第七节	防止和消除汽蚀的方法	145
第八节	水轮机泥沙磨损	149
第九节	水轮机振动	154
复习题		164
第六章	水轮机的相似理论	167
第一节	相似理论的一般概念	167
第二节	水轮机的相似条件	168
第三节	相似水轮机主要参数之间的关系	169
第四节	比转速与水轮机的关系	172
复习题		174

第七章 水轮机特性曲线	176
第一节 水轮机特性曲线的一般概念	176
第二节 水轮机线性特性曲线	176
第三节 水轮机综合特性曲线	181
复习题	184

第二篇 水 轮 发 电 机

第八章 水轮发电机的基本知识	186
第一节 水轮发电机的基本工作原理	186
第二节 水轮发电机的类型	187
第三节 水轮发电机的型号及基本参数	192
复习题	199
第九章 水轮发电机的结构及工作原理	202
第一节 定子	202
第二节 转子	211
第三节 机架	214
第四节 水轮发电机组推力轴承与水轮发电机导轴承	217
第五节 水轮发电机的通风系统与制动	231
第六节 同轴励磁机的结构和工作原理	250
复习题	255
第十章 水轮发电机组轴线调整及有关试验	259
第一节 水轮发电机组的轴线	259
第二节 水轮发电机组的振动测试	268
第三节 原型水轮机的效率试验	282
复习题	294

第三篇 调 速 器

第十一章 水轮机调节基本概念	297
第一节 水轮机调节基本任务	297

第二节	自动调节的基本概念	302
第三节	调速器的分类及其发展	310
	复习题	315
第十二章	水轮机调节系统的工作原理	317
第一节	调节系统动作原理	317
第二节	反馈的作用	324
第三节	调差机构及转速调整机构的作用	329
第四节	双重调节系统工作原理	335
	复习题	339
第十三章	电气液压型调速器	342
第一节	概述	342
第二节	测频回路	343
第三节	电液调速器的位移传感器	355
第四节	功率给定、调差及人工失灵区	358
第五节	综合放大回路	361
第六节	开度限制和成组调节回路	367
第七节	电气协联装置	371
第八节	稳压电源回路	380
第九节	电液转换器	382
第十节	电液调速器的工作原理	386
第十一节	直流操作回路	397
	复习题	406
第十四章	调速器的调整试验	411
第一节	电液调速器主回路的调整试验	411
第二节	调速器的整机调整和静特性试验	417
第三节	水轮机调速器的动态特性试验	426
	复习题	431
第十五章	调速器常见故障分析与处理	435
	复习题	444

第十六章 调节保证计算	447
第一节 概述	447
第二节 水击压力上升计算	449
第三节 转速上升计算	458
第四节 减小水击压力的措施	461
第五节 调节保证计算步骤及实例	468
复习题	472
第十七章 WT-S 双微机调速器简介	475
第一节 WT-S 双微机调速器结构特点	475
第二节 WT-S 型双微机调速器工作原理	479
第三节 环喷式电液伺服阀简介	489
第四节 块式直连型机械液压系统简介	492
复习题	495

第四篇 水 电 厂 自 动 化

第十八章 水轮发电机组自动控制	497
第一节 概述	497
第二节 水轮发电机组润滑系统的自动化	498
第三节 水轮发电机组冷却系统的自动化	504
第四节 水轮发电机组制动系统的自动化	508
第五节 水轮发电机组控制系统的自动化	512
第六节 计算机监控系统	529
第七节 水轮发电机组的保护及信号	547
复习题	552
第十九章 辅助设备的自动化	556
第一节 油压装置的自动化	557
第二节 空气压缩装置的自动化	562
第三节 技术供水装置的自动化	568
第四节 集水井排水装置的自动化	573
第五节 进水口闸门和蝴蝶阀的自动化	578

复习题	589
-----------	-----

第五篇 机组正常操作与运行维护

第二十章 机组的正常操作	593
第一节 机组开机操作	593
第二节 机组的停机操作	596
第三节 发电机、调相机互变操作	597
第四节 机组设备检修措施	598
第二十一章 机组的试验与操作注意事项	601
第一节 电液调速器的电气试验	601
第二节 电液调速器的机械试验	603
第三节 发电机试验	605
第四节 水轮机试验	606
第五节 机组进水口工作闸门试验	607
第六节 新机组启动试验	608
第二十二章 设备的运行维护	611
第一节 设备的巡视检查	611
第二节 机组维护定期工作	614
第三节 调速器的运行与维护	615
第四节 调速器异常现象的分析	619
第五节 机组设备的事故处理	622
复习题	627
参考文献	631

第一篇 水 轮 机

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厂的厂房内,如图 1-1 所示。水流经引水管道进入水轮机,由于水流和转轮的相互作用,水流便把自身的能量传递给水轮机,水轮机获得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,在发电机定子内感应出电势,发电机带上外界负荷后便有电流输出。

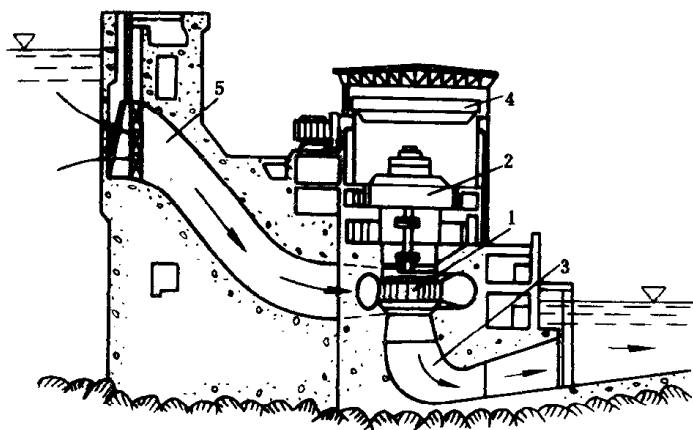


图 1-1 拦河坝式水电站坝后式厂房

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的一些参数，称为水轮机的基本参数，基本参数主要有：水轮机工作水头 H 、流量 Q 、转速 n 、出力 N 和效率 η 。

一、工作水头

水向低处流，这是水流流动的客观规律，人们只能根据这一规律来利用它。水流为什么能从高处向低处流呢？从能量的观点来说，就是高处的水流势能大，低处水流势能小，这样高处与低处就自然形成一个水流势能差。根据能量不灭定律，这种势能差不能消失，它只能通过高处向低处流动做功，将水流势能差转变成其它形式能量。当某河段修建水电站装设水轮机后，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。

现以某电站为例来说明，下面给出该电站装置原理图，如图 1-2 所示。为了研究方便和便于比较，在实际工作中只研究单位能量，即单位重量水流所具有的能量。

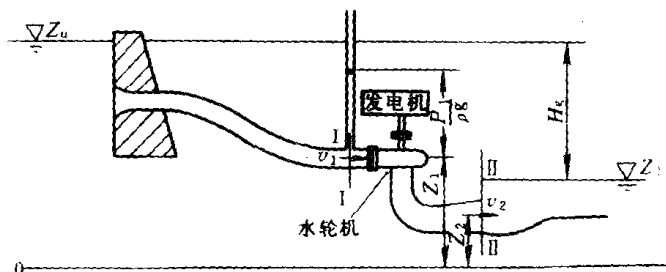


图 1-2 水电站和水轮机的水头

上游水库的水流经过进水口拦污栅、闸门和压力引水管

进入水轮机,水流通过水轮机做功后,由尾水管排至下游。上、下游水位差值称为水电站的毛水头 H_g , 其单位为 m。

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

式中 Z_u ——水电站上游水位 (m);

Z_d ——水电站下游水位 (m)。

水轮机的工作水头 H 是水轮机进口断面 I—I 和出口断面 II—II 之间单位重量水流能量的差值:

$$H = E_1 - E_2 \quad (1-2)$$

水轮机进口断面所具有的单位能量为:

$$E_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \quad (1-3)$$

式中 E ——单位能量 (m);

Z ——单位位能, 相对于某一零点为基准点的位置高度 (m);

p ——压强 (Pa);

v ——过流断面的平均流速 (m/s);

α ——考虑过水断面速度分布不均匀的系数, 称为动能不均匀系数;

ρ ——水的密度 (1000kg/m^3);

g ——重力加速度 (9.81m/s^2)。

水轮机出口断面所具有的单位能量为:

$$E_2 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \quad (1-4)$$

$$\text{则有 } H = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \quad (1-5)$$

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

单位时间内通过水轮机的水体积称为水轮机的流量，通常用 Q 表示，其单位是 m^3/s 。水轮机的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、转速

水轮机转速是水轮机转轮单位时间内旋转的次数，常用 n 表示，转速的单位为 r/min 。

四、出力和效率

水轮机是转换水流能量的机械，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流经转轮时便可以做功，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：

$$N_{\text{sr}} = \rho g Q H (\text{kW}) \quad (1-6)$$

式中 $\rho g = 9.81 \text{kN}/\text{m}^3$ ，故有

$$N_{\text{sr}} = 9.81 Q H \quad (1-7)$$

由于水流经过水轮机时有摩擦、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。由于有损失的存在，真正输出的出力小于输入的出力。一般我们所说的水轮机出力，指水轮机的轴端输出功率，通常用 N 表示，其大小为：

$$N = N_{\text{sr}} \eta = 9.81 H Q \eta (\text{kW}) \quad (1-8)$$

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，水流流经水轮机时损失越小，有效利用率越大，即效率越高。目前大型水轮机最高效率可达 90%~95%。

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和基本部件，就必须弄清水轮机的本质。从上面对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相同的，根据水轮机转轮所转换水流能量的形式不同，水轮机可分为反击型和冲击型两大类。

一、反击型水轮机

将水流的位能、压能和动能转换成机械能的水轮机称为反击型水轮机。在这种水轮机中，水流充满整个过流通道，没有自由表面，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，而大部分能量转换成压能，在转轮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 450m 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，又可分为

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 1-3 所示。混流式水轮机一般应用水头为 20~450m，属于中高水头。近年来应用水头已提高到 600 多米，最高已达 672m。

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 1-4 所示。根据转轮叶片在运动中能否转动，又可分为轴流定桨式和轴流转桨式两种。轴流式水轮机应用水头一般在 55m 以下，属于低水头。但近 20 年来轴流式水轮机的应用水头已达到 80 多 m。

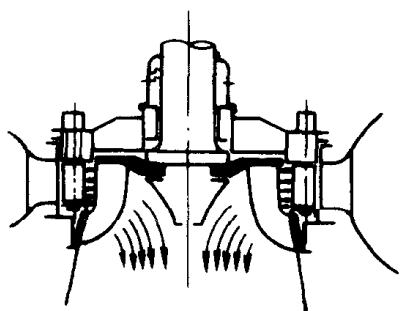


图 1-3 混流式水轮机

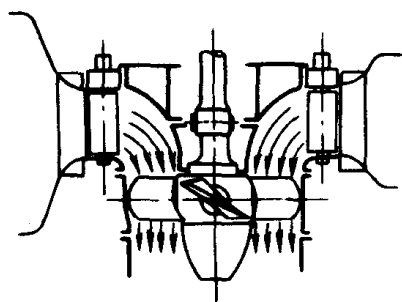


图 1-4 轴流式水轮机

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 1-5 所示。这种水轮机在结构和特性方面，均介于混流式和轴流式之间，它的应用水头在 20~200m。当它做成水泵水轮机时，被广泛应用于抽水蓄能电站上。

贯流式水轮机，水流流经水轮机时，几乎是沿轴向到底