

XINBIAN XIAO SHUIDIAN PEIXUN JIAOCAI

水轮发电机组及辅助设备 运行与维修

富丹华 吕建平 徐伟 编著



新编小水电培训教材

河海大学出版社

XINBIAN XIAO SHUIDIAN PEIXUN JIAOCAI

水轮发电机组及辅助设备 运行与维修

● 富丹华 吕建平 徐伟 编著



新编小水电培训教材

河海大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了小型水电站水轮发电机组及其辅助设备结构、运行、维护的实用知识;重点叙述了水轮机、水轮发电机、水轮机调速设备、水轮机进水阀和油水气系统的运行和一般故障处理;扼要地介绍了微机型调速器。

本书可作为小型水电站工人技术培训和等级考试教材、水电行业职业院校的参考教材,以及从事小水电设计、施工和运行管理的技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水轮发电机组及辅助设备运行与维修 / 富丹华等
编著. —南京: 河海大学出版社, 2005. 1
新编小水电培训教材
ISBN 7-5630-2055-1

I. 水... II. 富... III. ① 水轮发电机—运行—
技术培训—教材② 水轮发电机—维修—技术培训—
教材 IV. TM312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 132785 号

书 名/水轮发电机组及辅助设备运行与维修
书 号/ISBN 7-5630-2055-1/TV·254
作 者/富丹华 吕建平 徐 伟
责任编辑/谢业保
特约编辑/诸一骅 陈吉平
封面设计/黄 炜
出 版/河海大学出版社
地 址/南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话/(025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)
电子信箱/hhup@hhu.edu.cn
经 销/江苏省新华书店
印 刷/丹阳市兴华印刷厂
开 本/787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张/22.75
字 数/547 千字
版 次/2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷
定 价/35.00 元

发展小水电的关键
是培训人才
钱正英

原全国政协副主席、原水利电力部部长钱正英同志为《小水电培训教材》题词。

《新编小水电培训教材》编委会

主 任：吴存荣 孙晓山 陈生水

副 主 任：马 民 王贞伟 程夏蕾 朱 辉 丁坚钢

编 委：（以姓氏笔画为序）

马金华 吕建平 吴卫国 吴劭文 应明耕

金永琪 徐 伟 徐锦才 黄林根 梅荣柱

富丹华 熊 杰

丛书审稿：程夏蕾 应明耕

前 言

本书是根据小水电站对机电运行值班员的要求,按照小水电站的实际和有关规程并结合一些电站的多年运行经验编写的。

本书在介绍小水电站机组设备和辅助设备的基础上,介绍了一般的机组运行操作方法和运行维护措施,并对水电站机组的事故处理作了简要介绍。

本书第一章至第六章由水利部农村电气化研究所吕建平同志编写,第七章、第十三章至第十八章由浙江水电学校富丹华同志编写,第八章至第十二章由水利部农村电气化研究所徐伟同志编写。全书由浙江水电学校富丹华同志统稿,水利部农村电气化研究所程夏蕾同志主审。

本书在编写过程中,得到了水利部农村电气化研究所李永国高级工程师、武汉博士荣达水电设备有限公司杨志荣博士以及浙江水电学校高级讲师陈建农等同志的大力支持,在此深表感谢。

由于编者水平和经验有限,书中缺点错讹定会不少,热诚希望广大读者提出宝贵意见,以利进一步提高书稿质量。

编 者

2005 年 3 月

目 录

第一篇 水轮发电机组

第一章 水轮机的基本知识	3
第一节 水轮机的基本工作参数	3
第二节 水轮机的分类和型号	7
第三节 水轮机工作原理	11
第四节 水轮机特性曲线	15
第五节 水轮机空蚀、振动及防护措施	19
复习思考题	25
第二章 反击式水轮机结构	26
第一节 引水部件	27
第二节 导水部件	29
第三节 水轮机转轮	35
第四节 主轴与主轴密封	39
第五节 导轴承	42
第六节 尾水管	47
第七节 水轮机附属装置	49
第八节 反击式水轮机结构实例	50
复习思考题	56
第三章 冲击式水轮机结构	57
第一节 水斗式水轮机	57
第二节 斜击式水轮机	61
第三节 双击式水轮机	63
复习思考题	64
第四章 水轮发电机概述	65
第一节 水轮发电机的类型和型号	65
第二节 水轮发电机的主要参数	66
第三节 水轮发电机通风冷却方式	68
复习思考题	70
第五章 水轮发电机结构	71
复习思考题	76
第六章 水轮发电机组布置	77
第一节 水轮发电机组概述	77

目

录

第二节 立轴水轮发电机组的布置	78
第三节 卧轴水轮发电机组的布置	79
复习思考题	83
第七章 水轮发电机组的检修	84
第一节 基本测量方法和特制工具	84
第二节 检修项目及质量标准	86
第三节 水轮机转轮的检修	91
第四节 卧式机组转子串芯	96
第五节 卧式机组轴线找正	100
第六节 卧式机组轴瓦间隙测定	110
第七节 立式机组的轴线校正	111
第八节 立式机组轴瓦间隙调整	120
第九节 立式机组固定部件中心找正	128
第十节 导水机构检修	130
第十一节 机组的振动与平衡	136
第十二节 机组检修故障处理实例	146
复习思考题	154

第二篇 水轮机调节

第八章 水轮机调节的基本知识	159
第一节 水轮机调节的任务和方法	159
第二节 调速器的组成和分类	161
第三节 调速器的工作原理	165
复习思考题	173
第九章 调速器的主要特性	174
第一节 调速器的静特性	174
第二节 调速器的动态特性	176
第三节 水轮机调速器系列、型号、主要参数与调速器的选择	178
复习思考题	186
第十章 机械液压调速器	187
第一节 飞摆与引导阀	189
第二节 缓冲器	190
第三节 主配压阀与主接力器	193
第四节 油压装置	197
第五节 控制反馈机构	202
第六节 双调节调速器的专用机构与工作原理	205
第七节 YT 调速器的整机动作过程及运行操作	207
第八节 调速器静态调试	215
第九节 调速器动态调试	224

第十节 调节参数对调节系统动态品质的影响	232
第十一节 常见故障与处理	233
复习思考题	243
第十一章 电气液压型调速器和微机型液压调速器	244
第一节 电气液压型调速器	244
第二节 微机型液压调速器	250
复习思考题	271
第十二章 几种常见调速器	273
第一节 TC 型弹簧储能操作器	273
第二节 CJT 型中小型冲击式水轮机调速器	279
第三节 HPU 系列高油压水轮机操作器	286
复习思考题	291

第三篇 辅助设备及机组运行操作

第十三章 油系统	295
第一节 油系统的任务及对油质的要求	295
第二节 油系统组成及系统图	301
复习思考题	305
第十四章 压缩空气系统	306
第一节 压缩空气的用途及压缩空气系统组成	306
第二节 水电站压缩空气系统图	307
复习思考题	310
第十五章 水系统	311
第一节 供水系统	311
第二节 排水系统	317
第三节 水系统图	320
复习思考题	322
第十六章 水轮机进水阀	324
第一节 进水阀的分类和作用	324
第二节 蝴蝶阀	326
第三节 球阀	329
复习思考题	331
第十七章 机组设备的正常操作与检修措施	332
第一节 机组设备的正常操作	332
第二节 机组设备的检修措施	335
第三节 水电站机组经济运行简介	337
复习思考题	344
第十八章 机组故障与事故处理	345
第一节 如何预防和处理事故	345

第二节 机组事故处理.....	346
复习思考题.....	350
参考文献.....	351

第一篇

水轮发电机组

第一节 水轮机的基本工作参数

我国水力资源十分丰富,而且为可再生能源。水力发电技术成熟又不污染环境,已成为我国电力工业发展的重要途径。水轮机是水力发电的关键设备,一般装于电站厂房内,如图 1-1 所示。从高处引水流进水轮机,通过水流与水轮机转轮的相互作用,水流就把自己的能量传给了水轮机。水轮机获得能量后就开始旋转起来,把水能转换成了旋转的机械能。由于水轮机与发电机相连,于是发电机转子跟着水轮机一起旋转,这样水轮机就把能量传递给了发电机,给发电机转子绕组通入励磁电流,在定子绕组内感应出电动势,带上外负荷后便输出电流。

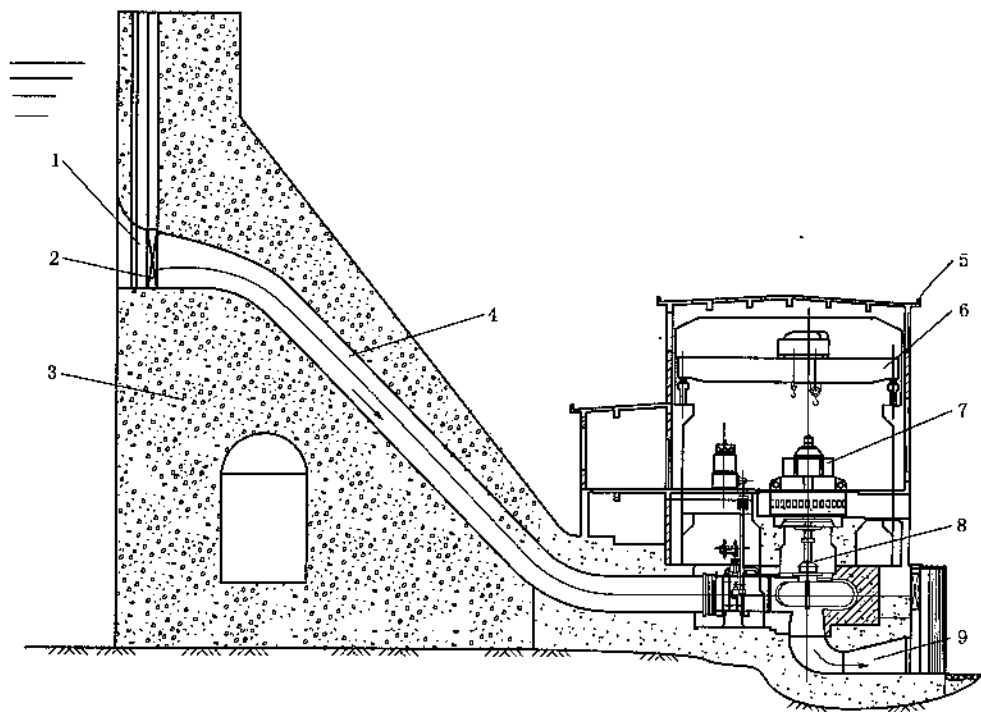


图 1-1 坝后式水电站示意图

1—拦污栅；2—闸门；3—坝；4—引水管道；5—厂房；6—桥机；7—发电机；8—水轮机；9—尾水管

水流进入水轮机后,就与水轮机的转轮相互作用,能量交换就开始;水流出尾水管,能量交换就结束。这个能量交换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,称为水轮机的基本工作参数。主要参数有工作水头 H 、流量 Q 、功率 N 、效率 η 、转速 n 等。

一、工作水头

构成河流水能的两个基本要素是河中流量和河段的落差。水总是从高处流向低处,这是因为高处的水流能量大,低处的水流能量小,高处与低处有一个水流能量差。在天然状态下,河段落差是分散的,水流中的能量在克服摩擦阻力、挟带泥沙、冲刷河床等方面沿程消耗。通过筑坝将分散的落差集中起来,形成可利用的水头(大坝上游水库内的水位与大坝下游的水位,形成了一定的水位差,专业术语称其为“水头”)。具有一定水头和流量的水流,通过压力管道进入水轮机后就能使水轮机转动起来,即水流将能量传给了水轮机。而传递能量的数量就是水流在水轮机的进口到出口之间的能量差。

为了研究方便,在实际工程中只研究单位能量,即单位水体所具有的能量。因此,水轮机的工作水头 H 就是单位水体在水轮机进口和出口处的能量差,如图 1-2 所示。

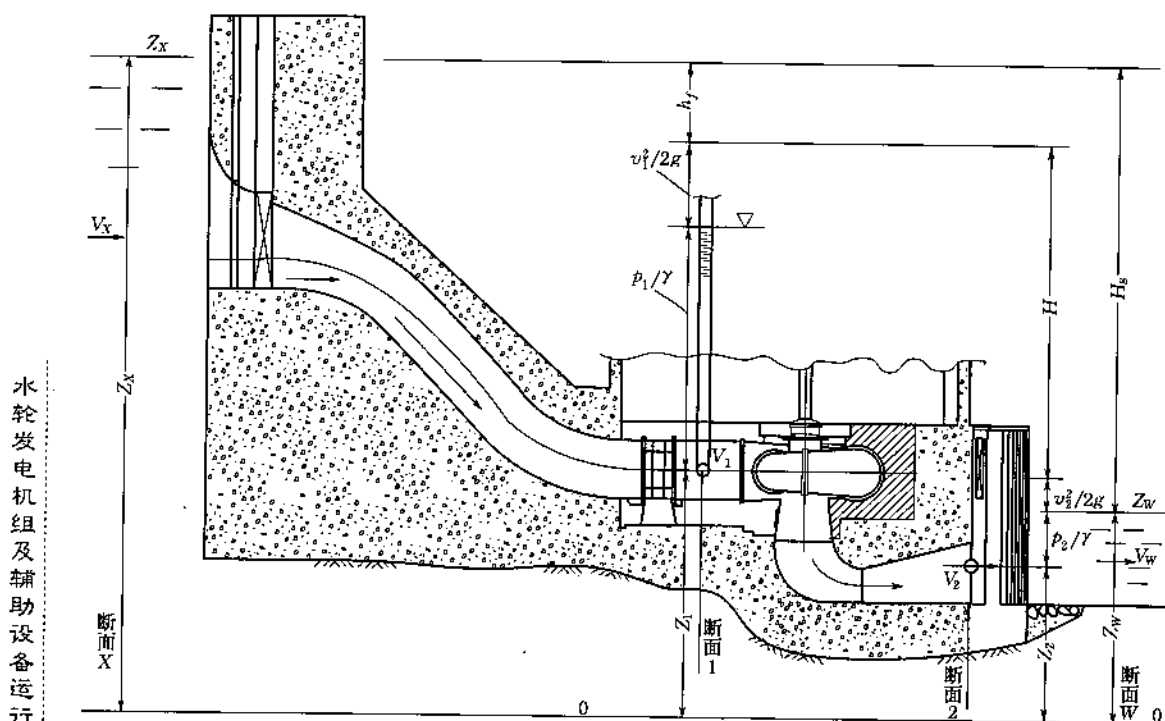


图 1-2 水电站和水轮机的水头

水轮机进口(断面 1)处水流所具有的单位能量为

$$E_1 = Z_1 + p_1/\gamma + \alpha_1 v_1^2/2g \quad (1-1)$$

水轮机出口(断面 2)处水流所具有的单位能量为

$$E_2 = Z_2 + p_2/\gamma + \alpha_2 v_2^2/2g \quad (1-2)$$

式中: E ——单位能量, m。

Z ——单位势能, m。

p/γ ——单位压力能, m。

$\alpha v^2/2g$ ——单位动能, m。

因此, 水轮机工作水头

$$H = E_1 - E_2 = (Z_1 + p_1/\gamma + \alpha_1 v_1^2/2g) - (Z_2 + p_2/\gamma + \alpha_2 v_2^2/2g) \quad (1-3)$$

它是水轮机的重要工作参数, 单位为 m, 其大小表示水轮机所利用水流单位能量的多少。水电站的装置水头也称毛水头, 等于水电站的上、下游水位差。

从断面 X 与 W 来说, 水轮机工作水头 H 可写成

$$H = E_X - E_W - h_{X-W} = (Z_X + p_X/\gamma + v_X^2/2g) - (Z_W + p_W/\gamma + v_W^2/2g) - h_{X-W} \quad (1-4)$$

式中: E_X ——断面 X 处的单位能量, m。

E_W ——断面 W 处的单位能量, m。

h_{X-W} ——引水系统的水头损失。

在式(1-4)中, $Z_X - Z_W = H_g$, 可认为 $p_X/\gamma = p_W/\gamma$, v_X 与 v_W 的值都较小, $v_X^2/2g \approx v_W^2/2g$, 因此式(1-4)可写成

$$H = H_g - h_{X-W} \quad (1-5)$$

即水轮机的工作水头 H 近似地等于电站的毛水头 H_g 减去引水系统的水头损失 h_{X-W} 。

水轮机的最大水头为水电站最大毛水头减去一台机空载运行时引水系统水头损失后的工作水头。其量的符号为 $H_{\max}$, 单位为 m。

水轮机的最小水头为水电站最小毛水头减去在该水头下水轮机发出允许功率相应的引水系统损失后的工作水头。其量的符号为 $H_{\min}$, 单位为 m。

额定水头为水轮机在额定转速下输出额定功率时所需的最小水头。其量的符号为 H_r , 单位为 m。

设计水头为水轮机在最高效率点运行时的净水头。其量的符号为 H_d , 单位为 m。

二、流量

水轮机流量指单位时间内通过水轮机进口测量断面的水的体积。其量的符号为 Q , 单位为 m^3/s 。

额定流量指水轮机在额定水头、额定转速下输出额定功率时的流量。其量的符号为 Q_r , 单位为 m^3/s 。

三、功率

水轮机进口水流具有的水力功率, 即水流对水轮机每秒钟付出的机械能, 称为水轮机输入功率。其量的符号为 P_d , 单位为 kW。

水轮机轴输出的机械功率,称为水轮机输出功率。量的符号为 P_t ,单位为 kW。

$$P_t = \gamma Q H \eta = 9.81 Q H \eta \quad (1-6)$$

式中: Q ——水轮机流量, m^3/s 。

H ——水轮机工作水头, m 。

γ ——水的比重, kgf/m^3 。

η ——代表水轮机效率。

通常所说的水轮机功率,指水轮机输出功率。

四、效率

由于水流在通过水轮机进行能量转换的过程中存在一定的损耗即容积损耗、水力损耗和机械损耗,因此水轮机输出功率总是小于输入功率。水轮机输出功率与输入功率之比称为水轮机效率,量的符号为 η ,为无因次量。

$$\eta = P_t/P_d = P_t/(9.81 Q H) \quad (1-7)$$

水轮机效率 η 由容积效率 η_v 、水力效率 η_h 和机械效率 η_j 三部分组成,因此

$$\eta = \eta_v \eta_h \eta_j \quad (1-8)$$

水轮机容积效率 η_v 。进入水轮机的流量 Q 并非都进行能量转换,其中有小部分流量 q 从水轮机的转动部件与固定部件的间隙处漏掉,真正进行能量转换的流量只有 $Q-q$,故容积效率

$$\eta_v = (Q-q)/Q = 1 - q/Q \quad (1-9)$$

水轮机水力效率 η_h 。水流在通过水轮机进行能量转换的过程中,因水轮机流道的沿程摩擦损失和局部阻力损失形成的水头损失 $\sum \Delta H$,实际进行能量转换的水头只有 $H - \sum \Delta H$,故水轮机水力效率

$$\eta_h = (H - \sum \Delta H)/H = 1 - \sum \Delta H/H \quad (1-10)$$

水轮机机械效率 η_j 。水流在通过水轮机进行能量转换后,由于水轮机本身存在各种机械损耗,如主轴与轴承的摩擦损耗等,减去这些机械损耗 ΔP 后才是水轮机轴的输出功率,故水轮机机械效率

$$\eta_j = (P - \sum \Delta P)/P = 1 - \sum \Delta P/P \quad (1-11)$$

五、转速

水轮机轴每分钟转动的圈数,称为水轮机的转速,单位为 r/min 。设计时选定的稳态转速称为水轮机额定转速。其量的符号为 n_r ,单位为 r/min 。

对于水轮机与同步发电机直接联接的机组,水轮机的额定转速必须与发电机转速同步。我国电网的额定频率为 50 Hz,水轮机额定转速与发电机磁极对数 P 有以下关系:

$$n_r = 3000/P \quad (1-12)$$

当水轮发电机突然甩全负荷而调速器又失灵,即水轮机处于失控状态时,轴端负荷力矩为零,进入水轮机的水能除小部分消耗于机械损失等外,大部分转化为机组转动部分的动能,造成机组转速急剧升高,这种情况称为飞逸。机组飞逸达到的最高稳态转速称为飞逸转速。其量的符号为 n_R ,单位为 r/min 。

飞逸情况对机组有破坏作用,制造厂家一般规定机组飞逸时间不超过 2 min。

第二节 水轮机的分类和型号

一、水轮机的分类

水轮机是把水流能量转变为机械能的一种动力机械,它利用水电站的水头和流量来做功。由于水力资源的自然条件、开发方式、电站运行情况不同,所以每个水电站所形成的水头和流量是各不相同的。为适应各种水头和流量,人们在实践中造出了各种类型的水轮机。

水流能量的形式有位能、压能和动能三种。水轮机按转轮对水流能量转换的形式,可分为反击式水轮机和冲击式水轮机两大类,每类又分为若干型式。

将水流的位能、压能和动能转换成旋转机械能的水轮机称为反击式水轮机。具有一定位能的水流进入这种水轮机转轮中,仅一小部分转换成动能,而大部分转换成压能,在叶片前后形成的压力差促使转轮转动。从转轮进口至出口,水流压力逐渐减小,水流充满水轮机整个流道。根据转轮区域水流运动方向的特征,反击式水轮机分为混流式、斜流式、轴流式和贯流式。

将水流的动能转换成旋转机械能的水轮机称为冲击式水轮机。水流在沿转轮斗叶流动的过程中,能量转换是在大气压下进行的,水流有与空气接触的自由表面,不充满流道,转轮不是整周进水。根据转轮的水流特征,冲击式水轮机又分为水斗式、斜击式和双击式。

二、各种水轮机的特点

1. 混流式水轮机

混流式水轮机,又称法兰西斯(Francis)式水轮机。水流特征如图 1-3 所示,水流沿径向进入转轮,近似地沿轴向流出。

2. 轴流式水轮机

轴流式水轮机,水流特征如图 1-4 所示,水流在导叶与转轮间由径向转为轴向,进入转

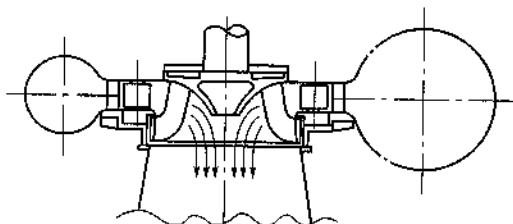


图 1-3 混流式水轮机

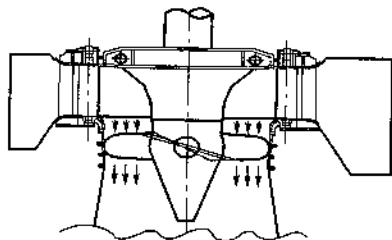


图 1-4 轴流式水轮机