

《小水电培训教材》

水轮机及辅助设备 运行与维修



河海大学出版社

封面设计:刘旭东

《小水电培训教材》

- (一)水轮机及辅助设备运行与维修
- (二)调速器的调试与故障处理
- (三)电气一次设备运行与维修
- (四)电气二次回路运行与维护
- (五)低压水轮发电设备运行与维修
- (六)小型水电站运行规程与管理

ISBN 7-5630-0276-6
TK·10 定价:12.00元

小水电培训教材(一)

水轮机及辅助设备运行与维修

(修订本)

陈建农 方勇耕 编

河海大学出版社

内 容 提 要

本书共分7章,简要介绍了水轮机基本工作原理、汽蚀和运转特性曲线,较系统地介绍了小型水电站常见的各类水轮机的性能和结构,以及水轮发电机组和油、水、气系统的操作、运行、维护及故障处理。此外,根据小型水电站实际情况和笔者多年实践经验,对小型水轮发电机组的检修与调试作了较详细的阐述,并附有调试参数计算举例和检修故障处理的实例与问答。

本书可作为具有初中文化程度的中小型水电站运行检修职工的培训和自学教材,也可供同类技工学校作专业教材,并可供电站技术人员和管理人员参考。书中第一章第三节和第六章第十节的内容在职工培训教学中可略去不讲。

责任编辑:龚 俊

责任校对:张世立

水轮机及辅助设备运行与维修
(修订本)

陈建农 方勇耕 编

*

河 海 大 学 出 版 社 出 版
(邮编 210024 南京市西康路1号)
河 海 大 学 出 版 社 发 行
江苏省扬中市印刷有限公司印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张:11.125 插页:3 字数:285 千字

1991年7月第2版 2002年10月第4次印刷

印数:16001—21000 册

ISBN 7-5630-0276-6/TK·10

定 价:12.00 元

发展小水电的关键
是培训人才

钱正英
一九九一年十一月十四日

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。

《小水电培训教材》编委会

主 审：单克明

主 任：王经权

副 主 任：查一民 周仲钺 陈彩云

编 委：陈建农 虞 放 李淑勤 方勇耕

李永国 张新干 程泾川 唐文品

余国治

编委会秘书：吴俊燕

加強專業培訓 提高職工素質

楊振懷

水利部部长杨振怀同志一九九一年二月为《小水电培训教材》
题词。

万发展祖国水电
工业而奋斗

陈绍沂

一九六〇

浙江省水利厅厅长陈绍沂题词

序

我国幅员广大、山峦起伏、河流纵横、水力资源十分丰富，理论蕴藏量为6.8亿千瓦，可开发蕴藏量为3.7亿千瓦，居世界首位。建国四十年来，我国农村水电事业取得了很大成绩。到1990年底，全国农村水电装机容量已达一千四百万千瓦，年发电量四百十八亿千瓦小时。与此同时，建成了具有相当规模的配套电网，拥有高、低压输、配电线路二百零八万公里，变电设备四千六百万千伏安，担负着全国三分之一以上县（市）的工农业生产和广大人民生活的供电任务。为全国五百二十万平方公里国土上的三亿亩耕地、三亿人口提供了廉价的电力。

农村水电关系着国民经济中农业和能源两个战略重点，农村水电的建设和地方电网的发展，有力地促进了这些地区的经济发展和精神文明建设，对发展地方工业特别是乡镇企业、改善人民生活、脱贫致富方面起着十分重要的作用。

如何把这些工程设施和机电设备管好用好，使其充分发挥作用，这是摆在我们全国农村水电战线上五十万职工的一项迫切而艰巨的任务，当前最大的问题是管理人员素质偏低，技术水平和技术装备远远赶不上发展的需要。

由浙江省水利部门的领导和专家历经辛苦编写的《小水电培训教材》现已由河海大学出版社出版。

这套培训教材图文并茂，内容简明扼要、生动而丰富，教材实用性强，第一版发行后，经过几期培训班的教学，深受广大职工的普遍欢迎。这套教材可以作为我国农村水电职工学习基本知识和进行岗位培训的教材，这对加强专业培训、提高广大职工的技术素质和岗位生产工作能力将发挥积极的促进作用。

水利部农村水电司司长邓秉礼

一九九一年六月

再 版 前 言

“八五”计划和十年规划的实施，将使我国小水电事业进一步迅猛发展。新形势对小水电提出了新要求，为了提高职工素质和对新职工进行上岗技术培训，就必须进行系统的教育，“百年大计，教育为本”。我们在1990年6月出版了“小型水电站培训教材”，全套书共六本：（一）《水轮机及辅助设备运行与维修》；（二）《调速器调试与故障处理》；（三）《电气一次设备运行与维修》；（四）《电气二次回路运行与维护》；（五）《低压水轮发电设备运行与维修》；（六）《小型水电站运行规程与管理》。本书第一版一万一千余套，时仅数月，即告售罄。各地纷纷要求再版，经水利部农电司邓秉礼司长同意，决定再版后本书为全国小水电系统统一的职工培训专用教材，并指定作为统考命题的根据。有鉴于此，水利电力出版社音像部以这套教材为依据，正在配套制作音像教材。

再版前，水利部老部长、全国政协副主席钱正英同志，水利部杨振怀部长都肯定了这套教材，并分别为本书题了词。

这套书除《低压水轮发电设备运行与维修》一书外，其余都是针对高压机组的机电设备进行编写的，因此全套书可供不同工作类型的水电站职工选用。整套书的内容涉及面广，包括小型水电站全部机电设备的运行、维修和故障处理等。读者依据本教材经过技术培训后，能直接上岗对设备进行操作运行，并能独立进行一般的设备故障处理和完成常规的设备检修工作。

考虑到读者大部分为初中文化程度这一特点，在编写过程中，我们力求“短小精悍，通俗实用”。对必需用到的理论公式一般不作深入的推导，在简明扼要地导出公式后，重点放在公式所揭示的物理意义和应用中需着重解决的问题上。对复杂的设备，我们尽量多地配置插图，并以立体图、透视图作辅助手段，以便于读者看懂图，建立实物空间概念。对运行、维修的常规操作和处理手段，书中提供了较多实例，以便于读者针对工作中遇到的实际问题及时查阅。

本书曾作为浙江省小水电系统统一的职工培训教材和考试发证用书，于1984年前后在浙江省水电系统内部发行了八千余套，得到读者普遍好评。1988年又被定为浙江省小水电行业农民技术职称评定的理论考试用书。1984年10月原水电部在广西恭城县召开的全国小水电培训工作座谈会上，各地选送推荐了一批教材，对这套教材反映较好。会后，根据各方面的反映，原水电部农电司有关负责同志多次函告浙江省水利厅，要求对这套书进一步修改充实后，作为全国小水电统一的职工培训教材。

本书出版一年多来，各地反映良好，并提出了不少的宝贵意见，在此基础上，我们又组织原班人马进行了修订，聘请专家作了核实，其中有的还作了较大的改动，使全书的内容更为全面、翔实。

这套书由浙江省水利厅再次组织编写，编写委员会主任为浙江水利水电专科学校王经权，副主任为河海大学出版社查一民，水利电力出版社杭州发行站周仲钺、浙江省水电开发管理中心陈彩云，委员为陈建农、虞放、李淑勤、方勇耕、李永国、张新干、程泾川、唐文品、余国治。浙江省水利水电勘测设计院张道宏、苏孝炆、吕诚源、胡文宝、周宁垦、陈家骢负责审稿。

在再版过程中，得到了浙江水利水电专科学校、水利电力出版社杭州发行站、浙江省水电开发管理中心、浙江省水利水电勘测设计院、浙江水电技工学校等单位大力协助，在此表示衷心感谢。

全书再版时虽作了认真的修改，但难免还会存在缺点和错误，热忱希望读者予以批评指正。

单克明

一九九一年七月

注：再版前言作者单克明同志为浙江省水利厅副厅长。

目 录

第一章 水轮机的一般概念	(1)
第一节 水轮机工作参数.....	(1)
第二节 水轮机分类和代号.....	(3)
第三节 水轮机工作原理.....	(7)
第四节 水轮机汽蚀.....	(13)
第五节 水轮机运转特性曲线.....	(17)
第二章 水轮发电机组的布置形式	(19)
第一节 立式机组布置.....	(19)
第二节 卧式机组布置.....	(21)
第三节 水轮机与发电机的联接.....	(22)
第三章 反击式水轮机	(25)
第一节 引水机构.....	(28)
第二节 导水机构.....	(31)
第三节 工作机构.....	(41)
第四节 泄水机构.....	(45)
第五节 非过流部件.....	(48)
第四章 冲击式水轮机	(61)
第一节 水斗式水轮机.....	(62)
第二节 斜击式水轮机.....	(70)
第三节 双击式水轮机.....	(71)
第五章 水轮机的主阀	(73)
第一节 主阀的作用和种类.....	(73)
第二节 蝴蝶阀.....	(74)
第三节 球阀.....	(77)
第六章 水轮发电机组的检修	(79)
第一节 检修项目及质量标准.....	(79)
第二节 基本测量方法和自制工具.....	(79)
第三节 卧式机组转子串芯.....	(85)
第四节 卧式机组轴线找正.....	(89)
第五节 卧式机组轴瓦间隙测定.....	(98)
第六节 立式机组的轴线找正.....	(99)
第七节 立式机组轴瓦间隙调整.....	(108)
第八节 立式机组固定部件中心找正.....	(116)
第九节 导水机构检修.....	(118)
第十节 机组的振动与平衡.....	(123)

第十一节 机组检修故障处理实例.....	(134)
第七章 水轮发电机组及辅助设备运行.....	(143)
第一节 油、水、气系统原理图.....	(143)
第二节 机组设备的运行与维护.....	(144)
第三节 油系统的运行与维护.....	(150)
第四节 水系统的运行与维护.....	(153)
第五节 气系统的运行与维护.....	(157)
第六节 水轮发电机组的经济运行.....	(159)
附录 小型水轮机使用范围总图.....	(164)

第一章 水轮机的一般概念

第一节 水轮机工作参数

水轮机的工作参数是表明水轮机对水流能量利用的特性值,主要有水头 H 、流量 Q 、 ω 、效率 η 、额定转速 n_n 和飞逸转速 n_F 等。

1. 工作水头 水流都具有能量,单位重量水体所具有的能量称为水头。水轮机的工作水头等于水轮机进口 I—I 断面和出口 II—II 断面 (图1-1) 单位重量水体的能量的差值,用“ H ”表示,单位:米。

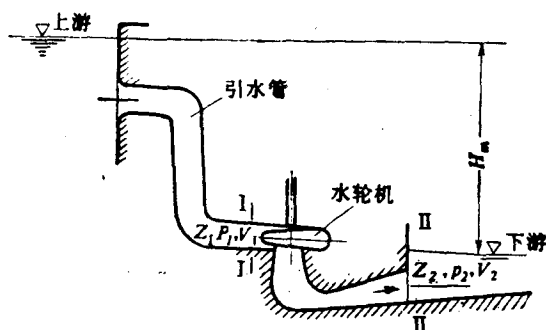


图1-1 反击式水轮机装置略图

$$H = \left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (1-1)$$

式中 Z ——位置高度 (米);
 p ——压力 (千帕);
 V ——流速 (米/秒);
 α ——动能修正系数;
 γ ——水的比重 (千牛/米³);
 g ——重力加速度 (米/秒²)。

注: 1 千帕 = 10³ 帕; 1 帕 = 1 牛顿/米²; 1 千克力 = 9.81 牛顿。

水电站的装置水头亦称毛水头 H_m , 等于水电站上、下游水位差。因此, 水轮机的工作水头 H 近似等于电站毛水头 H_m 减去引水系统的水头损失 $h_{w引}$ 。即:

$$H \approx H_m - h_{w引} \quad (1-2)$$

水头的单位应该是“米水柱”, 使用中常简称“米”。1 千克力/厘米² = 10 米水柱, 也就是每平方厘米上 1 千克力 (9.81 牛顿) 的压力等于 10 米水柱高的水所产生的压力。

2. 流量 单位时间内通过水轮机的水体积为水轮机的流量, 用“ Q ”表示, 单位: 米³/秒。

3. 功率 是指水轮机轴单位时间内向外输出的机械功, 用“ N ”表示, 单位: 千瓦。

$$N = 9.81 Q H \eta \quad (1-3)$$

式中 Q ——水轮机的流量 (米³/秒);

H ——水轮机工作水头（米），

η ——水轮机效率。

4. 水轮机效率 水轮机效率等于水轮机的输出功率与进入水轮机的水流功率的比值，即：

$$\eta = \frac{N}{9.81QH} \quad (1-4)$$

水轮机效率 η 由三部份组成，即容积效率 η_0 、水力效率 η_s 和机械效率 η_i ，而水轮机效率 η 为上述三项效率的乘积。

(1) 水轮机容积效率 η_0 进入水轮机的流量 Q 并非全部经转轮叶片做功，其中有小部分流量 q 从水轮机的固定部件和转动部件间隙处泄漏掉（如混流式止漏环间隙，轴流式叶片和转轮室之间的间隙）。所以容积效率 η_0 等于进入水轮机的有效流量 $Q-q$ 和水轮机流量之比，即：

$$\eta_0 = \frac{Q-q}{Q} = \frac{Q_0}{Q} \quad (1-5)$$

(2) 水力效率 η_s 水轮机的工作水头 H 所表示的水能不能全部转换为转轮的机械能输出，其中一小部分能量在流经水轮机的过流部件时，用来克服各种水流阻力（如沿程摩擦阻力和漩涡脱流引起的局部摩擦阻力），而形成水头损失 $\Sigma\Delta H$ ，所以水轮机的水力效率等于有效水头 H_0 与工作水头的比值。即：

$$\eta_s = \frac{H_0}{H} = \frac{H - \Sigma\Delta H}{H} \quad (1-6)$$

(3) 机械效率 η_i 水流传给转轮的有效功率 N_0 为：

$$N_0 = 9.81Q_0H_0 = 9.81(Q-q)(H - \Sigma\Delta H) \quad (1-7)$$

N_0 不能全部输出，有一部分消耗在各种机械损失中，如主轴与轴承的摩擦损失，转轮的外表面与水流之间的摩擦损失。水轮机的机械效率 η_i 等于水轮机的输出功率与水流传给转轮的有效功率之比。即：

$$\eta_i = \frac{N}{N_0} = \frac{N}{9.81Q_0H_0} \quad (1-8)$$

由式(1-5)，(1-6)，(1-8)可得：

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_0 \eta_s \eta_i = \frac{Q-q}{Q} \cdot \frac{H - \Sigma\Delta H}{H} \cdot \frac{N}{9.81(Q-q)(H - \Sigma\Delta H)} \\ &= \frac{N}{9.81QH} \end{aligned} \quad (1-9)$$

所得结果与式(1-4)相同，现代中小型水轮机的效率一般为85—90%。

5. 额定转速 设计时规定的稳态转速称额定转速，用“ n_0 ”表示，单位：转/分。我国电网采用频率为50赫兹，所以水轮机额定转速和直接传动的发电机磁极对数 P 有以下关系：

$$n_0 = \frac{3000}{P} \quad (\text{转/分}) \quad (1-10)$$

6. 飞逸转速 当水轮机突然丢弃全部负荷，而调速机构又失灵，或其它原因使水轮机导水机构不能关闭时，水流输入水轮机的全部能量除了小部分消耗于机械损失外，大部分驱动机组的转动系统加速旋转，以致转速急剧升高，直至达到某一最大值，这种状态称为机组进

入飞逸状态，这个转速称为飞逸转速，用“ n_R ”表示，单位：转/分。水轮机的飞逸转速和工作水头、转轮型号、直径和导叶开度有关，可查水轮机的飞逸特性曲线。

国产水轮机的飞逸转速与额定转速 n_0 的关系大致范围如下：

混流式或水斗式水轮机： $n_R = (1.7 \sim 2.0)n_0$ ；

转桨式水轮机保持协联关系： $n_R = (2.0 \sim 2.2)n_0$ ；

转桨式水轮机协联关系破坏： $n_R = (2.4 \sim 2.6)n_0$ 。

机组飞逸是极为有害的，它的危害性在于：

(1) 物理学指出：离心力与角速度平方成正比，如转速增加 2 倍，则离心力增加 4 倍。若不及时制止，强大的离心力会使机组的机械结构遭到破坏。

(2) 因为转速的增高有可能使机组和厂房发生强烈的振动。

(3) 可能因转速迅速增高，使推力瓦和径向瓦温度升高而烧毁。

水轮机是不允许在飞逸情况下长期运行的，制造厂规定飞逸时间不得超过 2 分钟。所以电站设计时必须考虑防止飞逸措施，下面介绍三种常用方法：

(1) 在水轮机前方设置快速闸门或主阀，当机组过速到 $1.4 \sim 1.5n_0$ 时，用电动机或液压操作在动水情况下快速关闭闸门或主阀。

(2) 在调速器中增设事故配压阀，当调速器工作失灵时，事故配压阀动作，操作接力器使导叶紧急关闭。此种方法缺点是当油压装置失去油压或导水机构发生故障时起不了保护作用。

(3) 中小型机组可以在调速器中增设手动操作机构，在调速器失灵或失去油压情况下，运行人员迅速地把调速器切换到手动操作，关闭导叶。

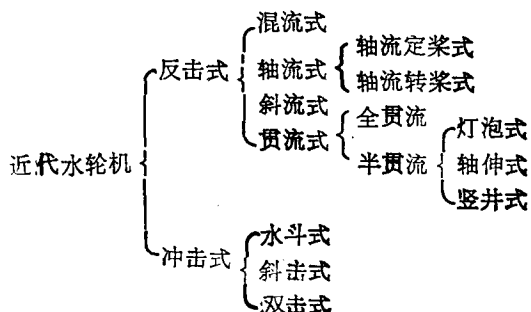
第二节 水轮机分类和代号

一、水轮机的分类

近代水轮机分为两大类：反击式水轮机和冲击式水轮机。

反击式水轮机利用水能的方法是以压能形式为主，动能形式为辅，通过转轮转换为主轴的机械能。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，转轮中的水流具有压力且充满流道。根据在转轮区域内水流方向的特征，反击式水轮机又可分为混流式、轴流式、斜流式和贯流式等四种型式。

冲击式水轮机利用水能是全部以动能形式的方法，通过转轮变为主轴的机械能。在这种水轮机中水流沿斗叶表面流动过程中压力保持不变（等于大气压力），具有与空气接触的自由表面。根据射流的冲击特征，冲击式又可分为水斗式、斜击式和双击式三种。



除上述各机型外,随着蓄能电站、潮汐电站的开发,出现了既可作水轮机正向发电运行、也可作水泵反向抽水运行的可逆式水轮机,常见的可逆式水轮机有混流式、斜流式和轴流式。

二、各种水轮机的应用特点

1. 混流式水轮机(图1-2) 在这种水轮机中,水流首先径向流入转轮,然后近似于轴向流出转轮。中小型混流式水轮机一般使用在水头为10~300米的电站。混流式水轮机由于应用水头适合多数场合的需要,并且有结构简单、运行可靠和效率高等优点,因此是应用最广泛的一种水轮机。

2. 轴流式水轮机(图1-3) 水流进入水轮机后在导叶至转轮之间转为轴向,然后进入转轮,转轮区域内水流是沿轴向流动的。根据叶片运行时是否可以转动,轴流式水轮机又分为定桨式和转桨式两种。

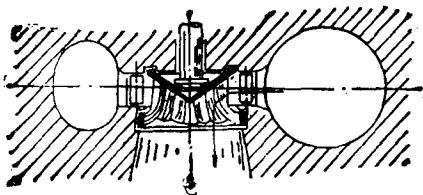


图1-2 混流式水轮机

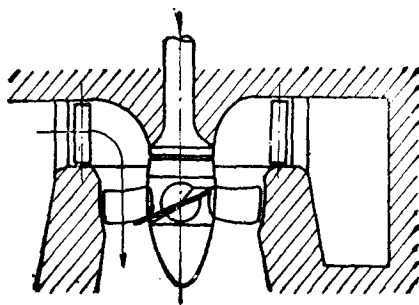


图1-3 轴流式水轮机

轴流定桨式水轮机在运行时叶片固定,不转动,它制造简单,但是处于高效率区域的工作范围比较狭窄,当离开高效率区域运行时效率便急剧下降。因此,这种水轮机多用于功率和水头变化幅度较小的中小型水电站,它的使用水头为3~50米。

轴流转桨式水轮机在运行时叶片可以转动,通过叶片与导叶的协联进行双重调节,使高效率区域显著扩大,并提高了它的运行稳定性。轴流转桨式水轮机一般用在大中型电站,一般使用水头为3~80米。

3. 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,也能实现双重调节,象轴流转桨式水轮机那样,高效率区域的出力范围较大,又因叶片与水轮机轴线斜交,能象混流式水轮机那样运行较稳定,因此兼有两者的优点,适用水头范围约在40~200米。但在中小型机组中很少采用,因为转轮结构复杂。

4. 贯流式水轮机 这是一种流道呈直线状的卧式水轮机,其转轮与轴流式相似,可做成

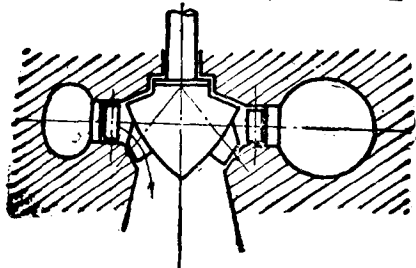


图1-4 斜流式水轮机

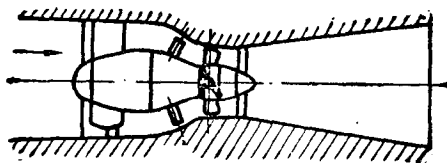


图1-5 灯泡贯流式水轮机