

最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南

水轮发电机组及 辅助设备运行与维修

《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写组 编

单文培 刘孟桦 洪余和 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南

水轮发电机组及 辅助设备运行与维修

《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写组 编

单文培 刘孟桦 洪余和 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》中的《水轮发电机组及辅助设备运行与维修》分册，主要针对小型机组，参考水利和电力系统工人职业技能鉴定的内容，从培训和学习角度出发，精心编写而成。

全书共3篇11章。第一篇为水轮发电机组运行与维修，包括：水轮发电机组及构造、水轮机工作原理及参数、水轮发电机组的运行、水轮发电机组经济运行、水轮发电机组检修、水轮发电机组自动控制。第二篇为水轮发电机组辅助设备。第三篇为调速器调试及故障处理，包括：调速器的工作原理、调节系统特性及其试验、调速器的调试、调节系统的维护和检修。

本书在编写过程中，密切结合我国小水电发展技术水平的实际，并采用当前执行的规程、规范、标准与名词、术语，力求图文并茂、语言精炼、通俗易懂，着重说明概念和应用，对理论公式不作深入推导，重点揭示公式、参数和概念的物理意义及其应用中需要解决的问题。

本书可作为小型水电站在职职工和新上岗职工的岗位技术培训、等级考试教材及日常工作的必备工具书，并且可作为中专及高职高专水电类相关专业的参考教材，也可供初中以上文化水平的技术工人学习、阅读，还可供有关技术人员查阅、参考。

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 / 单文培等主编；
《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写
组编. —北京：中国水利水电出版社，2006

最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南

ISBN 7-5084-3623-7

I. 水... II. ①单... ②最... III. ①水轮发电机—
机组—运行—技术培训—教材②水轮发电机—机组—维
修—技术培训—教材 IV. TM312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 016436 号

书 名	最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南 水轮发电机组及辅助设备运行与维修
作 者	《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写组 编 单文培 刘孟桦 洪余和 主编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010)63202266(总机), 68331835(营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 21.5印张 513千字 1插页
版 次	2006年7月第1版 2006年7月第1次印刷
印 数	0001—5100册
定 价	36.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

党中央、国务院十分重视农村水电及电气化事业。上世纪八十年代初，在邓小平同志亲自倡导下，国务院决定在农村水电资源丰富的地区，开发农村水电，推动具有中国特色的农村电气化建设。“七五”至“九五”期间全国共建成了653个农村水电初级电气化县，有力地促进了农村经济发展和社会进步。2001年国务院批准在农村初级电气化县建设的基础上，建设更高标准的水电农村电气化县。“十五”期间，全国共建成410个水电农村电气化县，累计完成投资1151亿元，新增农村水电装机1060万千瓦，占同期全国农村水电新增装机的2/3。在电气化建设的带动下，农村水电快速发展，截至2005年底，全国农村水电装机容量达到4309万千瓦，占全国水电装机的37%，年发电量1357亿千瓦时，占全国水电发电量的34%。四川、云南、湖南、广西等省区，农村水电发电装机和年发电量均占所在省区电力总量的1/4以上。全国共建成了近800个县级电网和40多个区域性电网，近1/2的地域、1/3的县、1/4的人口主要靠农村水电供电。农村水电累计解决了3亿多无电人口的用电问题。

通过电气化建设，开发农村水电资源，形成了广大山区农村的发电和供电生产力，带动了其他资源的开发以及农村产品加工业、山区特色产业的发展，把山区的资源优势变成了经济优势；引导了农村劳动力的转移，增加了农民收入，促进了农村产业结构优化调整；带动了乡村公路、防洪灌溉设施、人畜用水设施以及广播、电视设施的建设，改善了农村基础设施、公共设施和生产生活条件，提高了农民的生活质量，促进了农村经济与人口、资源、环境协调发展。因此，水电农村电气化建设在水能资源丰富的广大山区、贫困地区的社会主义新农村建设中具有不可替代的作用。

在全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化建设新的历史时期，党中央、国务院将农村水电列为覆盖千家万户、促进农民增收效果更显著的农

村中小型基础设施和公共设施，并要求放在更加重要的位置，增加投资规模，充实建设内容，扩大建设范围。根据全国“十一五”水利发展规划和农村水电“十一五”及2020年发展规划，“十一五”期间将继续建设400个水电农村电气化县，扩大小水电代燃料生态工程建设的规模和范围，实施农村水电扶贫解困工程等，到2010年全国农村水电装机将达到5900万千瓦左右，再经过10年的努力，全国农村水电装机容量将达到1亿千瓦左右。

发展农村水电人才是关键。要保证农村水电事业的快速、健康发展，离不开成千上万的各种专业技术人才和管理人才。随着科学技术的迅猛发展，农村水电技术进步进一步加快，单机容量、变压器容量的不断增大，新技术、新产品的大量采用，特别是计算机自动化技术和网络技术的广泛应用，都给广大水电职工提出了新的更高的要求。为适应新时期加速培养水电专业人才，满足农村水电各专业、各层次职工的岗位培训需要，中国水利水电出版社组织全国小水电领域的专家学者，编写、出版了这套《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》（一套五本）。我希望全国农村水电行业以科学发展观为指导，认真贯彻落实中央关于建设社会主义新农村的战略部署，下大力气抓好职工的岗位培训工作，不断提高职工队伍的整体素质，保障农村水电及电气化事业的健康发展，为建设社会主义新农村做出新贡献。

水利部副部长

2006年7月

前 言

改革开放以来，我国的小水电事业得到了迅速发展，为我国广大农村，特别是边远山区提供了清洁、廉价的能源，有力地促进了这些地区的经济发展和两个文明建设，极大地改变了当地的经济和社会生活的落后状况。尤其是20世纪90年代末期以来，我国小水电投资的体制发生了根本变化，实现了多元化，进一步促进了小水电事业的蓬勃发展，可以说是新中国成立50多年来第二个建设高峰时期，对促进我国水力资源的开发和充分利用，缓解电力能源的紧张局面，改善农村生态环境和流域水土条件，发展当地经济等，都起到了积极的推动作用。

原全国政协副主席钱正英同志曾指出：“发展小水电的关键是培训人才”。如何把已建和在建的水电站管理好、用好，使其充分发挥作用，提高利用率和保证安全经济运行，是我国小水电事业的一项艰巨而长期的任务。由于小水电事业的迅速发展和水电技术水平的不断提高，对职工技能的要求也越来越高，因此急需对大批在职职工和新上岗职工进行技术培训。

为适应我国小水电发展新形势的需要，大力加强对小水电运行维护和管理人员的培训，中国水利水电出版社组织编写了这套《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》。本套教材内容简明扼要，图文并茂，实用性强，并采用了我国当前执行的最新规程、规范、标准与名词、术语，力争反映我国21世纪初小水电行业的新技术和新水平。

《水轮发电机组及辅助设备运行与维修》主要针对小型机组，参考水利和电力系统工人职业技能鉴定的内容，从培训和学习角度出发，精心编写而成。

全书共三篇十一章。第一篇为水轮发电机组运行与维修，包括：水轮发电机组及构造、水轮机工作原理及参数、水轮发电机组的运行、水轮发电机组经济运行、水轮发电机组检修、水轮发电机组自动控制。第二篇为水轮发

电机组辅助设备。第三篇为调速器调试及故障处理，包括：调速器的工作原理、调节系统特性及其试验、调速器的调试、调节系统的维护和检修。

本书可作为小型水电站在职职工和新上岗职工的岗位技术培训、等级考试教材及日常工作的必备工具书，并且可作为中专及高职高专水电类相关专业的参考教材，也可供初中以上文化水平的技术工人学习、阅读，还可供有关技术人员查阅、参考。

本书由单文培、刘孟桦、洪余和主编。参加编写的还有：单欣安、王兵、艾水平、罗雪斌、王善书、孙玉民。全书由洪余和同志统稿。

本书在编写过程中，查阅了大量的文献、资料，参考和引用了有关书籍的部分内容，并且得到了各级水电管理部门和一些科研、设计、设备及运行单位的指导和大力支持，在此一并表示衷心地感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2006年5月

目 录

序	1
前言	2
第一篇 水轮发电机组运行与维修	
第一章 水轮发电机组及构造	1
第一节 水轮机的类型和型号	1
第二节 反击式水轮机结构	4
第三节 冲击式水轮机结构	26
第四节 水轮发电机组的组成及布置	29
第五节 立轴机组的结构	34
第六节 卧轴机组的结构	40
复习思考题	44
第二章 水轮机工作原理及特性	45
第一节 水轮机工作参数	45
第二节 水轮机基本工作原理	46
第三节 水轮机气蚀	49
第四节 水轮机的吸出高度与安装高程	51
第五节 水轮机特性	53
复习思考题	59
第三章 水轮发电机组的运行	60
第一节 水轮发电机组的试运行	60
第二节 水轮发电机组的正常运行	68
第三节 机组运行故障与事故处理	71
第四节 水轮发电机组事故(故障)实例	76
复习思考题	79
第四章 水轮发电机组经济运行	81
第一节 水轮发电机组经济运行概述	81
第二节 水轮发电机组的动力特性	82

第三节	用微增率法进行机组间有功负荷的最优分配	86
第四节	机组最优投入次序及工作台数的确定	87
第五节	机组间无功负荷和随机负荷的最优分配	88
第六节	水电站厂内经济运行总图	89
复习思考题		90
第五章	水轮发电机组检修	91
第一节	检修项目及质量标准	91
第二节	检修计划及网络图	97
第三节	基本测量方法和自制工具	100
第四节	导水机构检修	102
第五节	水轮机转轮气蚀修补	107
第六节	立轴机组固定部件中心找正	117
第七节	立轴机组的轴线调整	119
第八节	推力轴承装配	129
第九节	立轴机组导轴承安装和轴瓦应调间隙计算	138
第十节	轴承故障诊断	142
第十一节	机组的振动与平衡	148
第十二节	卧轴机组转子串心	158
第十三节	卧轴机组轴线找正	162
第十四节	卧轴机组轴瓦间隙测定	171
第十五节	机组检修故障处理实例	172
复习思考题		174
第六章	水轮发电机组自动控制	176
第一节	概述	176
第二节	主阀的自动控制	176
第三节	水轮发电机组的自动化	186
第四节	立轴水轮发电机组自动控制	189
第五节	小型卧式机组自动控制	201
复习思考题		203

第二篇 水轮发电机组辅助设备

第七章	水轮发电机组辅助设备	205
第一节	油系统	205
第二节	压缩空气系统	209
第三节	水系统	211
第四节	水轮机主阀	214

第五节 辅助设备自动控制	221
复习思考题	226

第三篇 调速器调试及故障处理

第八章 调速器的工作原理	227
第一节 概述	227
第二节 水轮机调节的任务和方法	228
第三节 调速器的分类和标准系列	229
第四节 机械液压型调速器	231
第五节 电气液压型调速器	243
第六节 微机调速器	257
复习思考题	265
第九章 调节系统特性及其试验	266
第一节 测频元件的静特性试验	266
第二节 调速器的静特性试验	268
第三节 调节系统静特性及其应用	270
第四节 调节系统的动态特性	275
第五节 调节系统的动态特性试验	277
第六节 被控制系统的特性对调节过程的影响	286
复习思考题	287
第十章 调速器的调试	288
第一节 油压装置的调整试验	288
第二节 机械液压型调速器的整机调整	291
第三节 电气液压型调速器的整机调整	302
复习思考题	305
第十一章 调节系统的维护和检修	306
第一节 调节系统维护和检修的主要内容	306
第二节 主要部件的检修	308
第三节 引起调节系统故障的主要因素	311
第四节 机械液压型调速器的主要故障分析及处理	316
第五节 电气液压型调速器的主要故障分析及处理	324
复习思考题	326
附录	327
参考文献	330

第一篇 水轮发电机组运行与维修

第一章 水轮发电机组及构造

第一节 水轮机的类型和型号

一、水轮机的主要类型

由于水能开发条件不同,有不同类型的水轮机。近代水轮机分为反击式和冲击式两大类。

(一) 反击式水轮机

反击式水轮机利用水能的压能形式为主,动能形式为辅,通过转轮转换为机械能,转轮中的水流具有压力且充满流道。反击式水轮机按水流进入和流出转轮的方向不同又可分为以下几类。

1. 轴流式水轮机

水流进入和流出转轮时都是轴线方向的称轴流式水轮机。根据叶片运转中能否转动,又分为轴流定桨式和轴流转桨式两种。前者的转轮叶片固定不动,当水头及负荷变化时水轮机效率急剧下降;后者的转轮叶片随水轮机工况的改变自动调整,水轮机高效率区较宽,能适应出力变化。轴流式水轮机多用于低水头大流量的水电站,适用水头范围3~90m,多用于50m以下,如图1-1(a)所示。

2. 混流式水轮机

水流由辐向进入转轮而轴向流出转轮的水轮机称混流式水轮机,又称辐向轴流式水轮机,它适用水头范围10~700m,是应用最多的机型之一,如图1-1(b)所示。

3. 贯流式水轮机

水流由管道进口到尾水管出口均为轴向流动,转轮与轴流式水轮机相同,且水轮机主轴水平或倾斜装置,称为贯流式水轮机,如图1-1(d)所示。根据轮叶结构不同,有贯流定桨式和贯流转桨式两种。贯流式水轮机过流能力较好,适用水头范围为1~30m,多用在河床式与潮汐式水电站中。

4. 斜流式水轮机

水流在转轮中流动倾斜于轴线方向,转轮叶片轴线与水轮机轴线有一夹角且转轮叶片可以转动。高效率区较宽,其性能界于轴流式与混流式之间,适用水头范围为20~200m,如图1-1(c)所示。

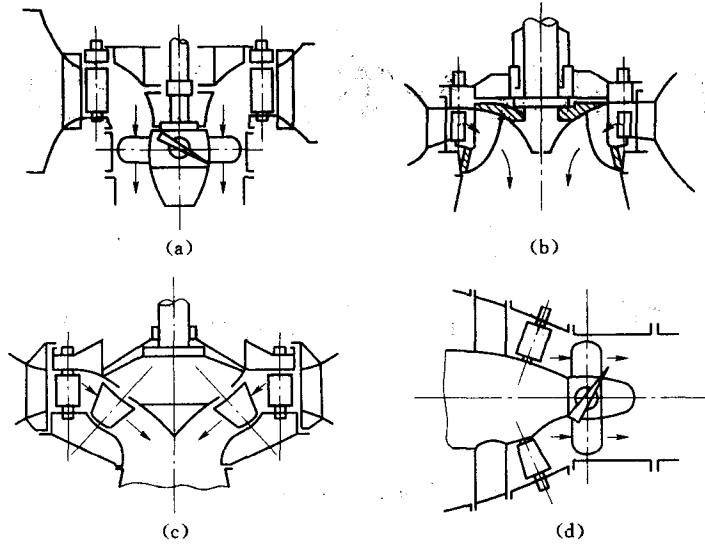


图 1-1 反击式水轮机类型

(a) 轴流式; (b) 混流式; (c) 斜流式; (d) 贯流式

(二) 冲击式水轮机

冲击式水轮机是在大气中进行工作的，水流全部以动能形态转换为转轮的机械能。根据转轮的进水特征，冲击式水轮机又分为以下三种型式。

1. 水斗式水轮机

水流能量由喷嘴以高速射流沿转轮圆周切线方向冲击水轮机转轮的斗叶。适用水头 80~800m，如图 1-2 (a) 所示。

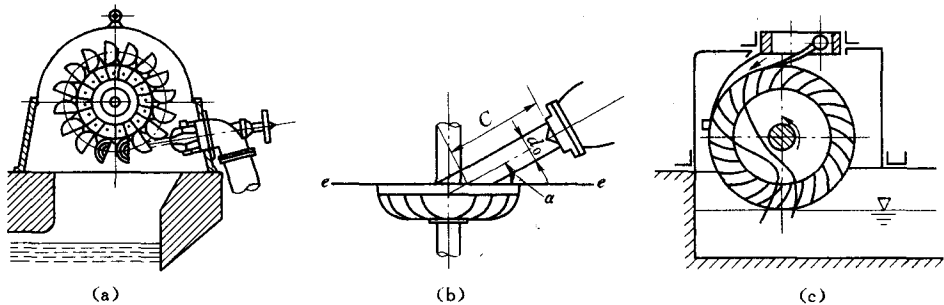


图 1-2 冲击式水轮机类型

(a) 切击式 (水斗式); (b) 斜击式; (c) 双击式

2. 斜击式水轮机

射流与转轮放置平面成一斜射角 α ，射流由勺斗一侧进入，从另一侧流出，增加了水轮机过流量，适用水头在 300m 以下，如图 1-2 (b) 所示。

3. 双击式水轮机

由喷嘴出来的射流两次作用于转轮轮叶，故称双击式。适用水头 5~100m，出力较小，如图 1-2 (c) 所示。

二、水轮机型号表示方法

水轮机型号由三部分组成，其间用“—”号分开。

第一部分表示水轮机型式和转轮型号（比转速代号），水轮机型式用两个汉语拼音字母表示，见表 1-1。转轮型号用阿拉伯数字表示，采用统一规定的比转速（在 $\eta=88\%$ 情况下）。

表 1-1 水轮机型式的代表符号

水轮机型式	代表符号	水轮机型式	代表符号
混流式	HL	贯流转桨式	GZ
轴流转桨式	ZZ	水斗式	CJ
轴流定桨式	ZD	双击式	SJ
斜流式	XL	斜击式	XJ
贯流定桨式	GD	可逆式	N

第二部分由两个汉语拼音字母组成，前者表示水轮机主轴布置形式，后者表示引水室特征，见表 1-2。

表 1-2 主轴布置型式与引水室特征

名称	代表符号	名称	代表符号
主轴	L	罐式	G
卧轴	W	灯泡式	P
斜轴	X	竖井式	S
金属蜗壳	J	虹吸式	X
混凝土蜗壳	H	轴伸式	Z
明槽	M		

第三部分为水轮机的标称直径 D_1 (cm)。

混流式水轮机： D_1 为转轮叶片进口边最大直径，如图 1-3 (b) 所示。轴流式、斜流式、贯流式水轮机： D_1 为转轮叶片中心线与转轮室交点处转轮室直径，如图 1-3 (c)、(d) 所示。冲击式水轮机： D_1 为射流中心的节圆直径，如图 1-3 (a) 所示。

对冲击式水轮机，第三部分表示为

$$\frac{\text{标称直径}(D_1)}{\text{每个转轮喷嘴数}(Z_0) \times \text{射流直径}(d_0)}$$

例：HL240—LJ—140，表示混流式水轮机，转轮型号 240（比转速为 240），立轴金属蜗壳，转轮直径 $D_1=140\text{cm}$ 。

例：ZZ440—LH—300 表示轴流转桨式水轮机，转轮型号 440（比转速为 440），立轴混凝土蜗壳，转轮直径 $D_1=300\text{cm}$ 。

例：2CJ26—W—120/2×8.5，表示主轴上装有两个转轮，转轮型号为 26（比转速），卧轴，转轮直径 $D_1=120\text{cm}$ ，每个转轮上的喷嘴为 2 个，射流直径 8.5cm。

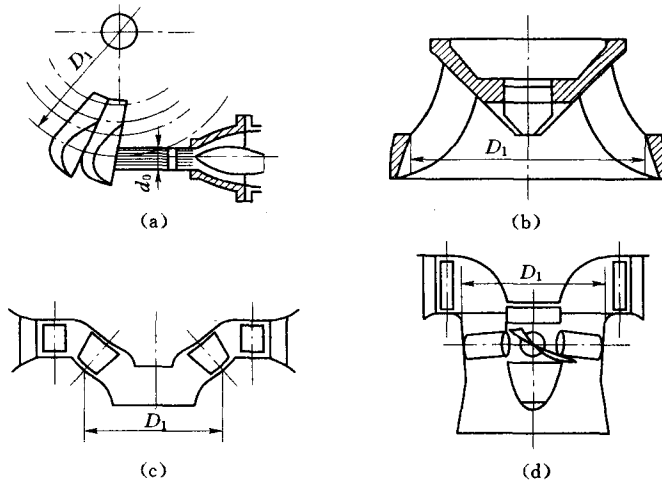


图 1-3 转轮标称直径

(a) 冲击式；(b) 混流式；(c) 斜流式；(d) 轴流式

例：XLN200—LJ—300，表示斜流可逆式水轮机，转轮型号（比转速）为 200，立轴金属蜗壳，转轮直径 $D_1 = 300\text{cm}$ 。

例：GD600—WP—250，表示贯流定桨式水轮机，转轮型号（比转速）为 600，卧轴灯泡式引水室，转轮直径为 $D_1 = 250\text{cm}$ 。

第二节 反击式水轮机结构

反击式水轮是应用最广泛的水轮机，从电站压力水管或进水口引入发电流量进入水轮机引水设备（即蜗壳），通过导水机构引入转轮，将水能转换为水轮机的机械能输出。发电尾水通过水轮机的泄水机构（即尾水管）泄往下游河道。

水轮机转轮是能量转换的核心部件。引水室的作用是将压力水管的水流平顺地、均匀地、轴对称地引入导水机构，形成环量，减小水力损失。导水机构起调节流量大小改变机组出力的作用。尾水管回收离开转轮的水流中部分能量。除这四个主要过流部件外，还有水轮机非过流部件及附属设备，共同构成一个完整的水轮机。

一、水轮机的引水设备

（一）引水室的作用

将压力水管的水流平顺地、均匀地、轴对称地引入导水机构，使水流在进入转轮前形成一定的环量，减小水力损失。

（二）引水室的型式和结构

单机 500kW 以上水轮机一般为蜗壳引水室；对低水头与微水头电站的水轮机常用贯流式引水室与明槽引水室。

（1）蜗壳引水室。蜗壳引水室沿水流方向过水断面面积逐渐变小的蜗形道紧围住导水机构，使进入导水机构的水流具有一定的旋转环量，并保证水流的轴对称与均匀性，提高

效率。根据应用水头与材料不同，有如下两种型式：

1) 金属蜗壳。用于水头为 35m 以上机组和卧式机组中，采用圆形断面的金属蜗壳经济合理，防渗性能好，结构紧凑，制造安装方便。图 1-4 (a) 为金属蜗壳平面图，图中 1-1 断面为蜗壳进口断面（圆形），该断面垂直压力管轴线。尾部断面 0-0 与进口断面夹角 φ ，称蜗壳包角（ $340^\circ \sim 350^\circ$ ）。尾部称鼻端。由于蜗壳断面半径从进口至鼻端逐渐变小，座环高度不变，蜗壳断面从进口圆形过渡为椭圆形断面，如图 1-4 (c) 所示。在结构上金属蜗壳包括引水室和座环。对立轴水轮机的蜗壳，一般为钢板卷制后焊接在座环上制成，较大蜗壳在工厂分片加工后在现场拼焊。中小型卧轴水轮机蜗壳采用整体铸造，如图 1-5 所示。

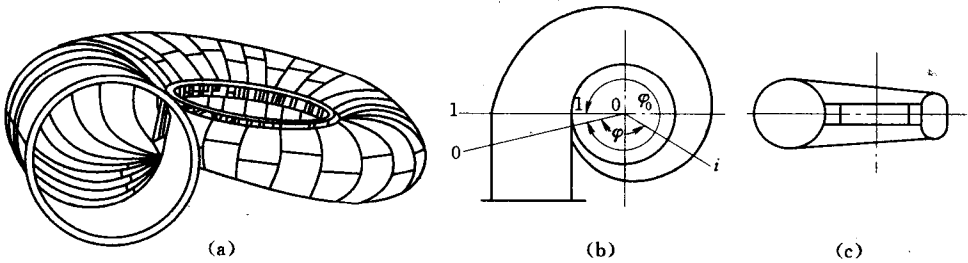


图 1-4 金属蜗壳

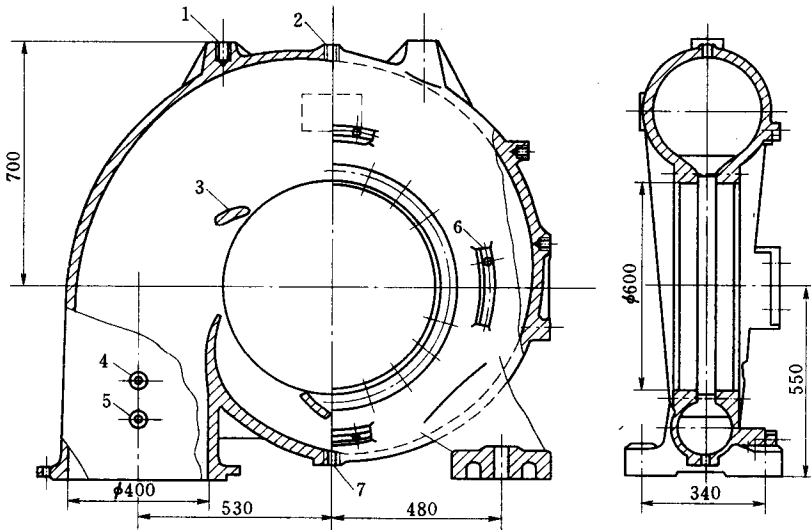


图 1-5 浇钢蜗壳 (单位: cm)

1—起重吊耳孔；2—放气阀孔；3—固定导叶（共六个）；4—压力表孔；
5—机组冷却取水孔；6—控制环座；7—放水阀孔

座环是水轮机过流部件与承重部件。座环位于蜗壳与导水机构之间，由上环、下环与若干流线型立柱组成。立柱（水轮机的固定导水叶）为导水叶数目的一半，高度与导水叶高度相同，机组固定部分和转动部分重量、轴向水推力及蜗壳上部混凝土重量，都经座环

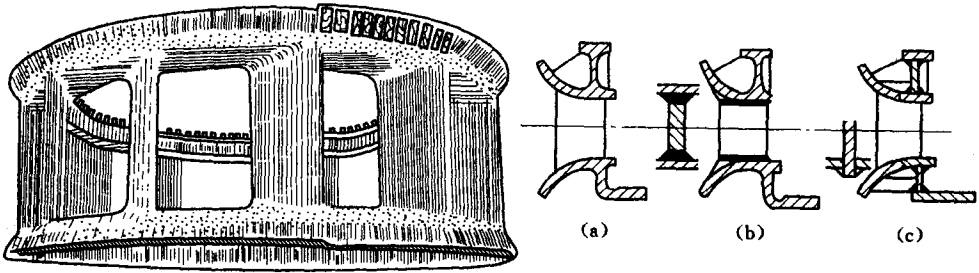


图 1-6 带蝶形边座环

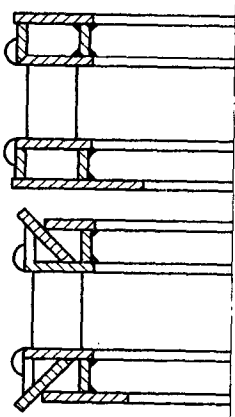


图 1-7 无蝶形边座环

传给基础。座环是水轮机安装的基准面。座环有两种：一种是带蝶形边座环，如图 1-6 所示，可分为整体铸造、铸焊结构或全焊结构。另一种是不带蝶形边结构，如图 1-7 所示，它为钢板焊接结构，特点是上下环为箱形结构，刚度好。

2) 混凝土蜗壳。轴流式水轮机当水头小于 40m 时，采用梯形断面的混凝土蜗壳，它是在厂房水下部分混凝土中做成蜗形空腔，蜗壳包角 φ_0 为 $180^\circ \sim 270^\circ$ ，多为 180° 。图 1-8 为 $\varphi_0 = 180^\circ$ 混凝土蜗壳图。

混凝土蜗壳的座环有两种：一是整体结构座环，上环、下环和固定导水叶为一个整体结构，如图 1-9 (a) 所示。另一种是装配式结构座环，由立柱与上环组成，两者装配后埋入混凝土内，如图 1-9 (b) 所示。

(2) 贯流式引水室。灯泡贯流式水轮机的引水室为贯流式引水室，水流从进口引进后直贯流过水轮机，水流方向不转弯，水流呈均匀轴对称状，水力损失小，水能效率高，水流无环量。如图 1-10 所示为灯泡贯流式水轮机贯流式引水室。

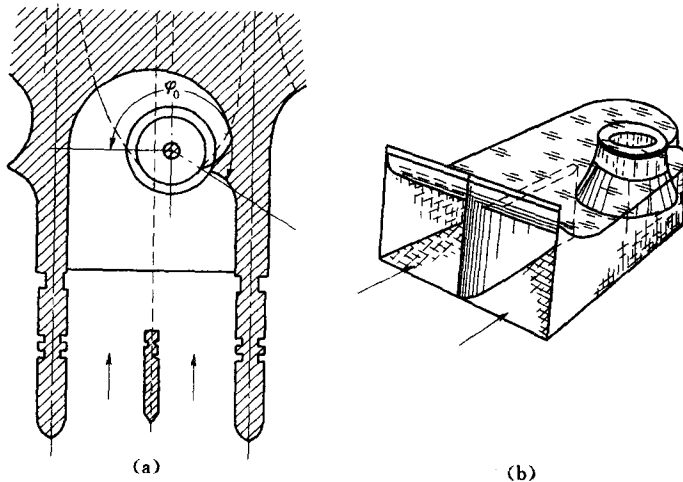


图 1-8 混凝土蜗壳
(a) 水平剖视图；(b) 透视图

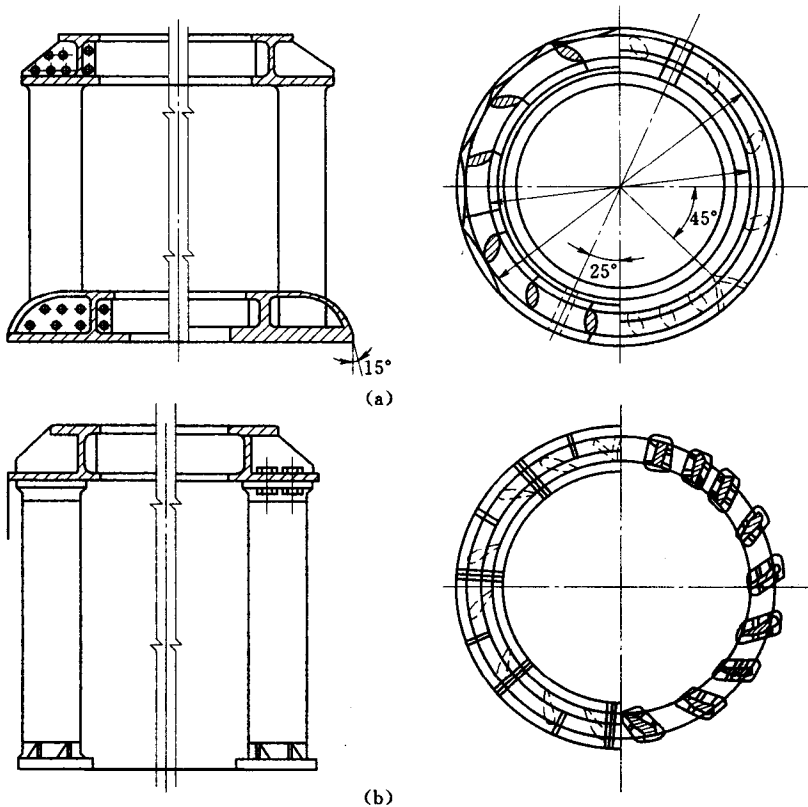


图 1-9 混凝土蜗壳座环
(a) 整体结构座环；(b) 装配式座环

二、水轮机的导水机构

(一) 导水机构的作用与型式

1. 导水机构的作用

根据机组的负荷变化情况随时调节水轮机的引用流量，改变机组出力，并进行开机和停机操作。机组甩负荷时防止产生飞逸。

2. 导水机构的型式

根据水流流经导叶时的特点，导水机构可分为三种：

(1) 径向式导水机构。水流沿着垂直于转轮轴线的平面流动，水流方向是径向，如图 1-11 所示。它结构简单，操作方便，应用广泛。

(2) 轴向式导水机构。水流沿着与水轮机同轴的圆柱面流动，水流的方向与水轮机轴平行，它用于贯流式水轮机，如图 1-12 所示。

(3) 斜向式导水机构。水流沿着与水轮机同轴的圆锥面流动，水流方向与水轮机轴线成一角度，一般用于灯泡贯流式与斜流式水轮机，如图 1-13 所示。

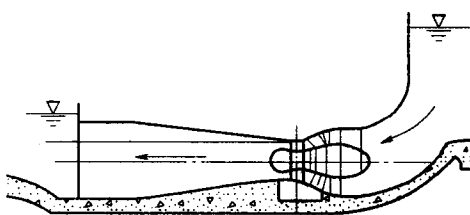


图 1-10 贯流式引水室