

清华大学水利工程系列教材

水力发电站

马吉明 张明 罗先武 郑双凌 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是清华大学水利工程系水利专业的教学参考书,主要内容包括:水力发电工程概述,常用水轮机、水泵水轮机,水轮机调节,无压引水沿线的建筑物、有压引水沿线的建筑物,水电站压力管道,发电引水系统中的不稳定问题,调压室,水电站厂房,地下水电站与抽水蓄能电站等。每章后附有习题。书中内容涵盖了水利水电专业必须掌握的有关水电站建筑物方面和水力机械方面的知识。

本书体系清晰,深入浅出,图文并茂,作业经过精选,适合高等院校水利专业的学生作为教材使用,也可供从事水利水电专业的教师、工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

水力发电站/马吉明等编著. —北京:清华大学出版社,2022.7
清华大学水利工程系列教材
ISBN 978-7-302-57291-6

I. ①水… II. ①马… III. ①水力发电站—高等学校—教材 IV. ①TV74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 005957 号

责任编辑:张占奎

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:203mm×253mm 印 张:14.25 插 页:4 字 数:363 千字

版 次:2022 年 7 月第 1 版

印 次:2022 年 7 月第 1 次印刷

定 价:49.80 元

产品编号:078690-01

前 言

本教材是在李仲奎、马吉明、张明编写的高等学校教材《水力发电建筑物》的基础上,结合编者多年清华大学水利专业课《水电站》的教学实践重新编写的。编写工作得到了“清华大学教学改革项目”的资助。

从《水力发电建筑物》2007 年出版至今,我国的水力发电事业有了很大的发展,以三峡水电站为代表的一批水头高、容量大、技术先进的水电站陆续建成,与水电站建设相关的技术规范也有了更新。为了能够及时反映水能资源开发的新理念、工程上采用的新技术,同时为了配合教学改革,去掉过时冗长的内容和做到与时俱进,我们编写了此教材。

此次编写,在如下方面有大的变动:

一是教材体系有了大的变化。首先概述了水能利用的历史和中国水力发电的概况,从中可以了解到人类如何利用水能、世界水力发电的状况,尤为重要的是能够了解到我国劳动人民很早就开始利用水能,而今中国的水力发电事业是走在世界前列的;然后介绍了水电站中的机电设备,便于学习掌握不同类型的机电设备所必需的基本知识以及水轮机调节的知识;再然后按水流路线介绍涉及到的各类建筑物、设备、压力管道,最后介绍厂房,这样安排内容的好处是便于辨识不同建筑物(及附属设备)所处的位置,掌握其功能;鉴于目前常规水电站多采用地下厂房,抽水蓄能电站与风电、光伏发电等可再生新能源的结合发展很快,其厂房也多为地下厂房,故而将地下厂房与抽水蓄能电站单独辟为一章。

二是扩充了水力机械方面的内容,将原教材“水电站主要机电设备”一章,扩充为“水轮机与水泵水轮机”和“水轮机调节”两章。

教材尽量做到体系完整,为适应专业课时普遍减少的情况,对内容做了适当剪裁,做到“少而精”。书后附有主要术语的英文词,便于参阅。

本书第 1、4、7、8、10 章由马吉明教授编写,第 2 章由罗先武教授编写,第 3 章由罗先武教授、樊红刚副教授共同编写,第 5 章由马吉明教授、张明副教授共同编写,第 6、9 章张明副教授编写,习题由郑双凌老师编写。全书统稿工作由马吉明教授完成。

清华大学李仲奎教授审阅了全书,给出了不少指导和修改意见,特此致谢!

黄伟博士校阅了本书的第 4 章、第 7 章和第 8 章,特此致谢!

本教材脉络清晰,深入浅出,图文并茂,适合作为高等院校水利专业教材使用。本书的主要内容虽然为水利水电专业学生的必备知识,但对学科的新发展、新方向也有所反映,教师在讲授时可有所侧重,有所选择。本书对相关专业的工程技术人员或研究者也有一定的参考价值。限于编者水平,其中不免有错误和不当之处,请读者随时批评指正。

作 者

2022 年 4 月

清华大学出版社

目 录

第 1 章 水力发电工程概述	1
1.1 水能利用与中国水力发电概况	1
1.1.1 人类对水能资源利用的历程	1
1.1.2 中国的水能资源与水力发电事业	3
1.2 水电站的装机容量和水电的开发方式	6
1.2.1 水电站的装机容量与出力公式	6
1.2.2 水电站的开发方式	6
1.2.3 中国水电开发的未来	10
习题及思考题	11
参考文献	11
第 2 章 水轮机与水泵水轮机	12
2.1 水轮机的工作原理	12
2.2 水轮机的类型、基本参数及适用条件	13
2.2.1 水轮机分类	13
2.2.2 水轮机的基本参数	14
2.2.3 水轮机的适用条件	15
2.2.4 水轮机的牌号	15
2.3 水轮机的典型结构	16
2.3.1 反击式水轮机的过流部件	16
2.3.2 反击式水轮机的典型结构	20
2.3.3 冲击式水轮机	24
2.4 水泵水轮机	25
2.5 水轮机的相似特性	27
2.5.1 水轮机的单位参数	27
2.5.2 水轮机相似换算	28
2.5.3 水轮机效率换算	28
2.6 水轮机的综合特性曲线	29
2.7 水轮机的空化与空蚀	30
2.7.1 水轮机内的空化与空蚀	30
2.7.2 水轮机吸出高度	30
2.7.3 水轮机安装高程	32

IV 水力发电站

习题及思考题	33
参考文献	34
第3章 水轮机调节	35
3.1 水轮机调节的基本概念	35
3.1.1 水轮机调节的任务	35
3.1.2 水轮机调节的基本原理	36
3.1.3 水轮机调节系统的静态特性	37
3.1.4 水轮机调节系统的动态特性	38
3.2 水轮机调节系统的构成	39
3.2.1 调节系统的构成	39
3.2.2 被调节控制系统的特征参数	40
3.2.3 对调节控制装置的总体要求	41
3.3 调速器的分类与典型调节系统	42
3.3.1 调速器分类	42
3.3.2 调速器的型号	43
3.3.3 调速器的典型系统结构	43
3.4 调速器的主要部件	46
3.4.1 飞摆	47
3.4.2 电液转换器	47
3.4.3 主配压阀	48
3.4.4 接力器	49
习题及思考题	50
参考文献	50
第4章 无压引水式电站沿线建筑物	51
4.1 无压进水口	51
4.2 进水口防沙及排沙措施	52
4.3 沉沙池	54
4.4 无压引水渠	55
4.4.1 渠线选择所遵循的原则	55
4.4.2 两种类型的渠道	55
4.4.3 渠道水力学计算	56
4.5 无压引水隧洞	57
4.6 调节池	58
4.7 前池	59
4.7.1 前池的位置与功用	59
4.7.2 前池的进流方式和组成	59

4.7.3 前池的特征水位及轮廓尺寸拟定的原则	61
4.8 尾水渠	62
习题及思考题	63
参考文献	63
第5章 有压引水式电站沿线建筑物	64
5.1 有压进水口	64
5.1.1 坝式进水口	64
5.1.2 塔式进水口	65
5.1.3 岸式进水口	65
5.1.4 生态进水口	67
5.2 有压进水口前的最小淹没深度	67
5.3 有压进水口的轮廓与渐变段	68
5.4 有压进水口的主要设备	69
5.4.1 拦污设备	69
5.4.2 闸门及启闭机	71
5.4.3 通气孔和充水阀	72
5.5 有压隧洞	72
5.5.1 隧洞布置的一般原则	73
5.5.2 隧洞的断面型式及面积	74
5.5.3 引水隧洞水力计算	74
5.6 调压室	74
5.7 尾水建筑物	75
习题及思考题	75
参考文献	76
第6章 水电站压力管道	77
6.1 地面压力管道	77
6.1.1 功用与特点	77
6.1.2 布置	77
6.1.3 敷设方式和支承结构	79
6.1.4 材料、组成和阀门	81
6.1.5 管身设计	84
6.2 地下压力管道	89
6.2.1 特点	89
6.2.2 布置	90
6.2.3 构造与施工要求	90
6.2.4 承受内压分析	91

VI 水力发电站

6.2.5	外压稳定分析	93
6.3	岔管	95
6.3.1	功用、特点和要求	95
6.3.2	布置	96
6.3.3	结构型式	96
6.3.4	荷载及结构设计要求	100
6.4	坝内埋管	100
6.4.1	特点	100
6.4.2	布置	100
6.4.3	结构分析	102
6.5	坝后背管	104
6.5.1	特点	104
6.5.2	明背管	105
6.5.3	钢衬钢筋混凝土背管	106
	习题及思考题	107
	参考文献	108
第7章	水电站水力系统中的瞬变流及调节保证计算	109
7.1	电力系统及引水系统中的瞬变现象	109
7.1.1	瞬变现象简述	109
7.1.2	阀门突然关闭的水击现象及不稳定工况	110
7.1.3	水击的分类	112
7.2	水击基本方程组及波的传播速度	112
7.2.1	水击基本方程组	112
7.2.2	水击波的传播速度	113
7.2.3	常用初始条件与边界条件	115
7.3	简单管中最大正、负水击压力的计算	116
7.3.1	开度按任意规律变化时水击压力的计算	116
7.3.2	直线关闭规律时水击压力的计算	117
7.3.3	阀门开启时最大负水击的计算	119
7.3.4	起始开度与关闭规律对水击的影响	121
7.4	复杂管道水击的简化计算	123
7.4.1	串联管的水击计算	123
7.4.2	分岔管的水击计算	124
7.4.3	蜗壳、尾水管的水击计算	125
7.5	水击计算的特征线法	125
7.5.1	特征线与特征方程	126
7.5.2	差分方程及边界条件	127

7.6 调节保证计算	130
7.6.1 基本概念与计算任务	130
7.6.2 机组转速变化计算	130
7.6.3 水击计算的条件选择	132
7.6.4 限制水击压力与转速上升常用的措施	133
习题及思考题	134
参考文献	134
第8章 调压室	136
8.1 调压室的设置条件、类型及布置方式	136
8.1.1 调压室的设置条件	136
8.1.2 调压室的基本类型、基本要求	138
8.1.3 调压室的基本布置方式	140
8.2 调压室的涌浪计算及压力叠加	141
8.2.1 简单、阻抗调压室涌浪计算的解析法	141
8.2.2 涌浪计算的条件选择	144
8.2.3 涌浪压力与水击压力的叠加	145
8.3 调压室的波动稳定问题	145
8.3.1 调压室水位波动的稳定条件	146
8.3.2 波动稳定性分析	148
8.4 调压室构造与结构设计	149
8.4.1 荷载及其组合	149
8.4.2 计算假定与结构设计	150
习题及思考题	151
参考文献	151
第9章 水电站厂房	153
9.1 厂房的功用、组成和类型	153
9.1.1 功用与特点	153
9.1.2 组成	153
9.1.3 类型	157
9.2 厂房内的机电设备	161
9.2.1 发电机	161
9.2.2 起重设备	165
9.2.3 油系统	167
9.2.4 压缩空气系统	168
9.2.5 水系统	168
9.3 主厂房平面尺寸的确定	170

VIII 水力发电站

9.3.1 主厂房的长度	170
9.3.2 主厂房的宽度	173
9.4 主厂房高程的确定	175
9.5 厂房典型结构的结构设计	178
9.5.1 厂房的结构特点	178
9.5.2 厂房的整体稳定和地基应力计算	180
9.5.3 发电机机墩结构设计	181
9.5.4 蜗壳结构设计	185
9.5.5 弯肘形尾水管结构设计	189
习题及思考题	193
参考文献	194
第 10 章 地下厂房与抽水蓄能电站	195
10.1 地下厂房的布置及地下水电站的优缺点	195
10.1.1 地下厂房的布置	195
10.1.2 地下厂房方案的优缺点	197
10.2 地下厂房设计中的围岩稳定问题	198
10.3 缩小地下厂房空间尺寸的主要措施	201
10.4 地下厂房其他方面的特殊事项	201
10.5 地下水电站的结构设计	202
10.5.1 支护设计	202
10.5.2 岩锚吊车梁与顶棚	205
10.6 抽水蓄能电站	206
10.6.1 抽水蓄能的概念及发展历程	206
10.6.2 抽水蓄能电站的主要分类型式及特点	207
习题及思考题	210
参考文献	211
附录 专业英语词汇	212

第 1 章 水力发电工程概述

水力发电工程,简称水力发电,是指通过水工建筑物和机电设备,将水体的机械能转化为电能的工程。水力发电是现代社会开发和利用水能资源的主要手段。“水力发电站”是水利水电工程专业的一门重要专业课,其重点在于学习如何修建水电站。水电站,可以是只有单一发电功能的水力发电站,也可以是具有综合利用功能的水利枢纽工程(hydraulic complex engineering),因此,水电站也常常成为水利枢纽工程的简称。

1.1 水能利用与中国水力发电概况

1.1.1 人类对水能资源利用的历程

人类的文明演化离不开对能源的开发利用,水能资源是最容易获得的一种能源,因而其利用历史久远。

事实上,人们难以确切知晓早期的人类是从什么时候开始,以及用什么样的方式利用水能资源的。水体动能的表现型式最为直观,也最易于被直接利用。早期的水能利用装置多采用“冲击”的方式,即通过水流的冲击力带动水轮做功。据记载,约在公元前 2 世纪,古希腊就有使用水磨的例子。我国古代水利科技发达,春秋战国时期已有成熟的大面积灌区;时至西汉末,堰、闸、坝、涵洞、渡槽等各类水工技术的应用已经成熟,已有利用水力驱动水碓的确切记载;东汉的著名科学家张衡发明了水力浑天仪;据《后汉书·杜诗传》记载,公元 31 年,杜诗发明了水排,通过水力冲击转轮,拨动皮制排橐鼓风冶金,水排中还引入了曲柄连杆机构;晋代,发明了水转连磨,用于粮食加工(元,王桢《农书》。中国国家博物馆根据《后汉书》和《农书》,制作有水排和水转连磨的模型);唐宋时期,水力机具已经普遍被应用,主要用于粮食加工,明宋应星《天工开物》对水碓总结记载:“凡水碓,山国之人,居河滨者之所为也。攻稻之法,省人力十倍,人乐为之。”再如明徐光启《农政全书》卷十九对龙尾车的记载:“龙尾车者,河滨挈水之器也。”我国古代的许多机械极具奇思妙想,明代时的德国传教士曾加以总结,其中就包括水力机构,可参阅《奇器图说》。图 1-1 是古代水碓示意图(源于《奇器图说》)。



图 1-1 古代水碓示意图

中世纪末期,欧洲最值得令人称道的技术进步就是非人力动力的使用。非人力动力主要来自于水力,可用来锯木、推动风箱、排干沼泽和矿井中的积水、加工粮食和木头等。水轮机的雏形早在我国宋代就已经出现,“古之所创泾函(涵洞)在运河之下,用长梓木为之,中用铜轮刀,水冲之则可以刈草”。工业革命之后,有关水力机械的理论和技術都有了长足的进步。1755 年,瑞士科学家 Euler 给出了描述动量变化规律的流体动力学方程,这可视为反击式水轮机的理论基础;1834 年,法国人 Fourneyron 发明了向心式水轮机;1849 年,美国工程师 Francis 发明了混流式水轮机;1878 年,法国建成世界第一座水电站;1880 年,美国人 Pelton 发明了水斗式水轮机;1920 年,奥地利工程师 Kaplan 改进发明了轴流式水轮机。这些水力机械被广泛应用于矿山开采、机械纺织等领域,随着电力应用技术的发展成熟和社会对电力需求的不断增高,水力发电事业就以澎湃之势发展起来了。

苏联曾修建了不少有影响的水电站,如当时最大的水电站萨扬-舒申斯克(Саяно-Шушенская ГЭС)水电站,单机容量达 640MW,总装机容量 6400MW;克拉斯诺雅尔斯克水电站(Красноярская),单机容量 500MW,总装机 6000MW。在北美,美国的大古力(Grand Coulee)水电站是相当长时间内都是世界最大水电站,并装设有抽水蓄能机组,最大单机容量达 805MW,经过多次扩容后的总装机容量达 6809MW;美国的胡佛大坝(Hoover Dam)在世界坝工史上占有重要地位,扩容后的水电站装机容量达 2080MW,胡佛水电站修建于美国大萧条时期,为促进美国的经济复苏做出了重要贡献,这也说明,大型水利水电工程在国民经济发展中具有举足轻重的地位。加拿大的丘吉尔瀑布(Churchill Falls)水电站是一个大型引水式电站,总装机容量达 5428MW,最大水头 322m。在南美,巴西与巴拉圭两国共建的伊泰普水电站,单机容量 700MW,总装机容量 14GW,是继美国大古力水电站之后世界最大规模的水电站,是典型的以发电为主要功能的电站,伊泰普水电站为巴西、巴拉圭两国的社会经济提供了重要的能源支撑;委内瑞拉的古里(Guri)水电站,最大单机容量 610MW,两期总装机容量达 10.305GW;此外,巴西的图库鲁伊(Tucuruí)水电站,两期总装机容量 8370MW,是将水电站与矿产资源的开发相结合的典型例子,很具借鉴价值(类似功能的水电站欧洲也有,如挪威的 Aura 水电站,主要为铝厂供电)。在非洲,埃及的阿斯旺高坝(Aswan high dam)水电站,电站总装机容量

2100MW,水库总库容达1689亿 m^3 ,库容极大,具有极大的综合效益,但也因负面效应明显而引起争议。在欧洲,水电开发得较早,许多国家的水电开发程度高,挪威多山,水电事业最为发达,全国95%~99%的电力供应来源于水电(因风能等新能源的开发利用,水电所占比例近年有少许降低),是世界上水电比例最高的国家。挪威发展成一个富裕的国家,水电的开发功不可没。中国的水力发电事业居于世界领先水平,三峡水电站是世界第一大水电站,安装有32台大型水发电机组,单机容量为700MW,其中26台为地面厂房机组,6台为地下厂房机组,总装机容量22.4GW,此外,尚有两台50MW的电源机组。目前,白鹤滩水电站最大单机容量已达1000MW,是世界上单机容量最大的机组。

抽水蓄能电站是专门用于电网调峰而设置的特殊水电站。1882年,世界上首座抽水蓄能电站诞生在瑞士,装机容量仅为515kW,是一座季节调节型抽水蓄能电站。到1950年,全世界建成抽水蓄能电站28座,投产容量仅有1994MW。之后,抽水蓄能开始规模化发展,西欧各国的抽水蓄能装机总量曾占到世界总装机的35%~40%,其中具有代表性的有:英国的狄诺维克(Dinorwic)抽水蓄能电站,电站设计水头534m,装设有6台单机容量300MW的可逆式水泵-水轮机;法国大屋(Grand Maison)抽水蓄能电站则是一座混合式抽水蓄能电站,由常规冲击式水轮机组和混流式水泵-水轮机组组成。到20世纪60年代后期,美国抽水蓄能装机跃居世界第一,其中巴斯康蒂(Bath County)抽水蓄能电站装有6台可逆式水泵水轮机,机组总容量为2280MW,于1986年全部投产,一度是世界上装机容量最大的抽水蓄能电站,后被日本和中国超越。2009年,巴斯康蒂电站增容至3003MW,再次成为世界上装机容量最大的抽水蓄能电站。进入20世纪90年代之后,日本后来居上,超过美国成为抽水蓄能装机容量最大的国家,其中葛野川(Kazunogawa)抽水蓄能电站装设4台可逆式机组设计水头达714m,单机容量400MW,是世界上水头最高的单级可逆式水泵-水轮机组,且有两台变速机组;神流川(Kannagawa)抽水蓄能电站是日本最大的抽水蓄能电站,总装机容量2820MW,一期厂房内安装有4台单机容量470MW的抽水蓄能机组,设计水头也达到了653m;这两座电站的机组代表了当时世界单级可逆式水泵-水轮机的最高技术水平。20世纪90年代以后,世界抽水蓄能电站的建设重心已转移至亚洲,尤其是中国。

1.1.2 中国的水能资源与水力发电事业

1. 中国的水能资源

中国的地形,总体上西高东低,分为三个阶梯。巨大的地形差异,使我国的水能资源蕴藏量居世界第一位。水能资源,又称水力资源,或叫水电资源。水能资源不是水资源,但依赖于水资源,水力发电转换的是水能资源,但不消耗水资源。我国曾在不同时期对水力资源蕴藏量进行过普查,见表1-1和表1-2。其中表1-1为不同年代普查的结果,表1-2是2005年对不同流域的普查结果。

由表1-2可以看出,我国的水力资源主要富集于西南地区的诸河流。西南地区,地形上处于第一级阶梯,地形高差大,水能资源蕴藏量丰富;而经济发达的东部地区,处于第三级阶梯,地形高差小,水能资源蕴藏量小。另外,水能资源依赖于河川径流,南方河流众多,径流量大,水能资源较北方丰富。由此知道,中国水能资源的分布在空间上是不均匀的;由于河流有丰水期和枯

水期,水能资源在时间分布上也不均匀。水能资源的这些特点与水资源的特点一致。有鉴于此,水库的调节作用就非常重要。

表 1-1 我国水力资源历年普查概况

普 查 时 间		1950 年	1955 年	1980 年	2005 年
统计河流/条			1598	3019	3886 **
理论蕴藏量	平均功率/GW	149	544(583*)	650	694.4
	年发电量*/(10 ¹² kW·h)	1.30	4.76(5.11)	5.7	6.0829
技术可开发量	装机容量/GW	—	—	378.53	541.64
	年发电量*/(10 ¹² kW·h)	—	—	1.9233	2.4740
经济可开发量	装机容量/GW	—	—	—	401.795
	年发电量*/(10 ¹² kW·h)	—	—	—	1.7534

* 1958 年修正,包括台湾的水能资源 8840MW。

** 水力资源理论蕴藏量在 10MW 及以上的河流,和这些河流上单站装机容量 0.5MW 及以上的水电站,不含港澳台地区。

表 1-2 2005 年全国各流域水力资源普查结果

流 域	理论蕴藏量		技术可开发量		经济可开发量	
	年发电量/ (10 ⁸ kW·h)	平均功率/ MW	年发电量/ (10 ⁸ kW·h)	装机容量/ MW	年发电量/ (10 ⁸ kW·h)	装机容量/ MW
长江	24 335.98	277 808.0	11 878.99	256 272.9	10 498.34	228 318.7
黄河	3794.13	43 312.1	1360.96	37 342.5	1111.39	31 647.8
珠江	2823.94	32 236.7	1353.75	31 288.0	1297.68	30 021.0
海河	247.94	2830.3	47.63	2029.5	35.01	1510.0
淮河	98.00	1118.5	18.64	656.0	15.92	556.5
东北诸河	1454.80	16 607.4	465.23	16 820.8	433.82	15 729.1
东南沿海诸河	1776.11	20 275.3	593.39	19 074.9	581.35	18 648.3
西南国际诸河	8630.07	98 516.8	3731.82	75 014.8	2684.36	55 594.4
雅鲁藏布江及西藏其他河流	14 034.82	160 214.8	4483.11	84 663.6	119.69	2595.5
北方内陆及新疆诸河	3633.57	41 479.1	805.86	18 471.6	756.39	17 174.0
合计	60 829.36	694 399.0	24 740.00	541 640.0	17 534.00	401 795.0

中国大型水电站的比例大,统计装机容量超过 2000MW 的水电站,其资源量要占到 50%。以长江为例,除三峡水电站为世界第一大水电站外,金沙江梯级的乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水电站,装机规模均居世界前列。

根据表 1-2,通过计算可知,年理论发电量的发电小时数为 8760h,受制于河流流量随季节的变化,水电站不可能做到全年全时满发,洪水季节还会产生弃水,所以,理论发电量只具有参考意义。而在计算水电的技术可开发量 and 经济可开发量时,各条河流所采用的发电小时数又各不相同,这反映了每条河流流量过程的不同。

2. 中国水能资源的开发

中国的第一座水电站,是 1912 年建于云南昆明的石龙坝水电站。石龙坝水电站最初装设两台单机容量 240kW 的机组,为民间集资建造,采用西门子机组。当年《西门子》杂志为该电站专门刊发了消息,盛赞中国有识之士的开拓精神。

1937 年,为配合侵华战争,日本人在吉林市松花江上开始修建丰满电站。当时丰满电站的规模为亚洲最大,及至日本战败投降,工程并未完工。至 1949 年,中国大陆实际运行的水电站总规模只有约 360MW。可以说,中国的水能资源基本上是 1949 年以后开发的。

1957 年,我国自行设计、建造了第一座大型水电站——新安江水电站,装机容量 855MW。新安江水电站的建设,除提供巨大的电力外,还形成了美丽的“千岛湖”。1958 年,黄河刘家峡水电站开始建设,为我国第一座百万千瓦级水电站。目前,黄河龙羊峡以下梯级大多数已经开发,而龙羊峡以上梯级正在开发建设中。万里长江第一坝为葛洲坝,葛洲坝水电站为中国最大的河床式水电站,该水电站的建设为三峡电站的建设提供了良好的基础。截至目前,三峡水电站,为世界第一大水电站;而长江上游金沙江梯级乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水电站的建设,又使该地区成为世界上水力发电站最为集中的区域。根据国家统计局的数据,至 2021 年底,中国的水电装机容量已达 390 920MW。图 1-2 为中国水电站历年装机容量统计图。

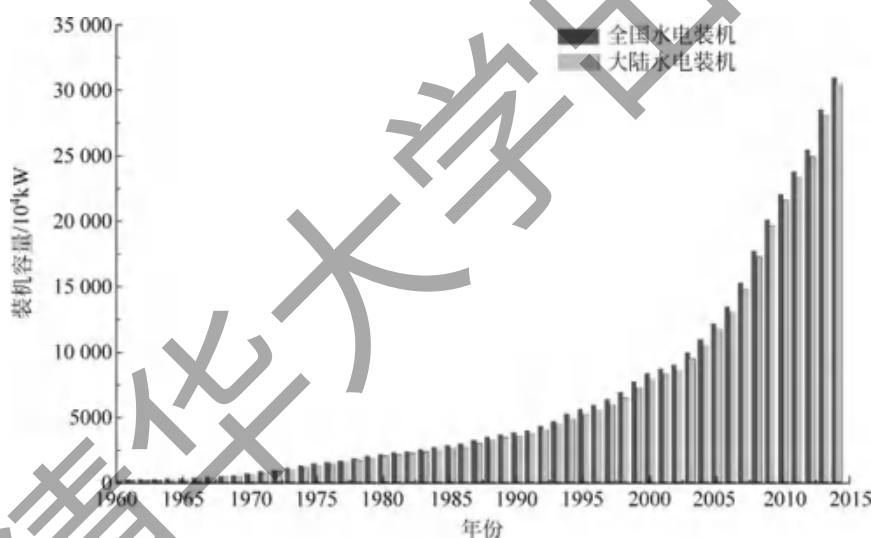


图 1-2 中国水电站历年装机容量统计图

我国于 1968 年和 1973 年先后在华北地区建成岗南和密云两座小型混合式抽水蓄能电站(抽水蓄能机组单机容量 11MW)。中国抽水蓄能建设的发展速度很快,浙江长龙山抽水蓄能电站总装机容量 2100MW,2021 年底全部完工,最大发电水头 756m,世界第一。河北丰宁抽水蓄能电站总装机容量高达 3600MW,为世界上装机规模最大的抽水蓄能电站,共安装 12 台 300MW 的水泵水轮机机组,2021 年底已有两台机组投产。

1.2 水电站的装机容量和水电的开发方式

1.2.1 水电站的装机容量与出力公式

水电站的装机容量指本电站所有机组的出力之和。单个机组的出力公式为

$$N = 9.81\eta QH \quad (1-1)$$

式中, N 为出力, kW; η 为效率, 是水轮机效率与发电机效率的乘积; Q 为机组的引用流量, m^3/s ; H 为作用在水轮机上的净水头, m。

水轮机的效率是变化的, 不但与水轮机的类型有关, 也与引用流量和水头有关; 不同类型的机组具有不同的效率, 一般来说, 机组越大, 效率越高, 小型机组的效率为 0.65~0.80, 中型机组的效率为 0.80~0.85, 大型机组的效率一般在 0.9 之上。

水轮机的净水头, 指水轮机进口断面与出口断面的水流总能量之差。在水电站中, 有不同名称的水头称谓, 其含义各不相同, 请参阅后面章节与水轮机相关的内容。

实际进行水电站设计时, 流量是变化的, 水头也是变化的, 因此, 要科学、合理地决定一个水电站的装机容量, 就必须进行水能计算, 可参见《水能规划》等相关书籍。

1.2.2 水电站的开发方式

开发水能资源, 利用水力发电, 就是将水流的机械能转化为电能。由式(1-1)知道, 水流机械能转化为电能需要两个必要因素: 一是流量 Q , 二是净水头 H 。流量 Q 取决于河道来流, 可看作天然因素(无论流量是否可调节); 而净水头 H , 近似等于地形高差。虽然地形高差也是天然因素, 但如何集中水头, 则取决于人们所采用的开发方案, 也就成为水电站开发建设中的关键因素。

水电站的分类方式有多种。按有无调节能力, 可分为径流式水电站(常见的如山区小水电, 依赖于天然来流发电, 无调节能力)、有调节水电站(通过水库、调节池等予以调节); 按水头的大小又可分为低水头电站、中水头电站、高水头电站; 按装机规模又可分为大型水电站、中型水电站和小型水电站; 按水电站厂房是处于地面还是地下, 可分为地面水电站和地下水电站。

鉴于集中水头的方式取决于所采取的开发方案, 而水头的大小, 是水电开发中首先考虑的因素, 因此, 本书按集中水头的方式对水电站进行分类。

按集中水头的方式, 水电站分为三类: 坝式水电站、引水式水电站以及混合式水电站, 其中前两种水电站最为常见。另外, 还有一种特殊的水电站, 即抽水蓄能电站。抽水蓄能电站的水头是由有压隧洞集中的, 引水系统的建筑物与有压引水式电站相同, 事实上可归为引水式电站。与常规水电站不同的是, 抽水蓄能电站并不产生电力的净输出, 属于蓄能装置, 但在电力系统中起着重要的调节作用。

就引水系统来讲, 有压引水式电站、坝后式电站(电站厂房直接处于挡水坝下游侧)、坝后河

岸引水式(厂房远离挡水建筑物,厂房可位于地面或地下)电站、混合式电站及抽水蓄能电站都是相同的,不同的只是压引水管道的长度,这类电站众多,所涉及的建筑物较多,问题具有代表性,因而,本书以引水式电站为重点进行讲授。

1. 坝式水电站

坝式水电站是通过在河流上筑坝壅水,抬高水位,将河段的高差集中于坝的上下游,从而引水发电的一类水电站。图 1-3 是坝后式水电站的示意图(隶属于坝式),上游河段天然水位 Z_1 ,下游河段天然水位 Z_2 ,通过筑坝,获得了坝前后水位差 H_{1-2} (H_{1-2} 一般称为毛水头,也叫装置水头,真正作用在水轮机上、推动机组发电的水头需要扣除各种损失)。

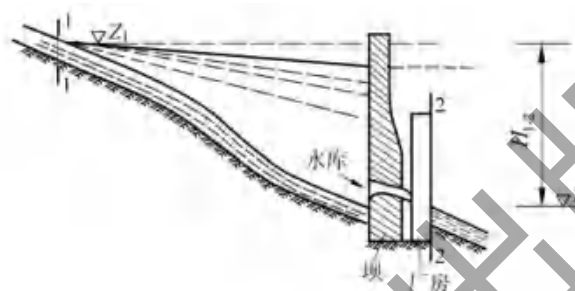


图 1-3 坝式水电站的示意图

坝式水电站主要适用于河道坡度较小(但在适当的河段长度内,能够获得可观的落差)、河流流量较大、有成库条件的场合。

根据大坝与厂房之间的位置关系,坝式水电站又分为若干类型:坝后式水电站,电站位于挡水坝的下游,典型的如三峡水电站;坝内式水电站,厂房置于坝体内部,如枫树坝水电站;河床式水电站,电站厂房具有挡水功能,如葛洲坝水电站;河岸引水式电站,有大坝,但水头是由坝集中的,虽然有较长的引水道,但引水道只起输水的作用,并不集中水头,其发电厂房,或位于地面之上,如隔河岩水电站,或处于地下,如小浪底水电站;厂顶溢流式水电站,如新安江水电站;挑越式水电站,如乌江渡水电站等。

相应于这些类别的水电站,称其厂房为某类厂房,如坝后式厂房、河床式厂房等。为避免重复,将细分的各类型电站(以及各类型厂房)的适用条件、典型特征等详细的内容,放置在厂房部分。

坝式水电站中,发电水头由挡水坝集中,水头一般小于 300m。目前,国内坝高最大的水电站为锦屏一级水电站,最大坝高 305m。需注意的是,筑坝壅水,坝体不宜太高,坝体过高、库容过大,上游淹没损失太大,同时下游所承担的安全负担也过重,技术难度和要求也会过高。因此,坝高的选择,要通过利弊分析,给出优选方案。

坝式水电站由于有水库,因此流量有保证,具有调节功能,依据调节库容的大小,可以进行日调节、周调节,甚至年际调节。该类水电站的水能利用充分,具有较高的发电效益。

坝式水电站的规模一般较大,有综合利用功能,诸如防洪、发电、供水、航运、旅游、生态等,具有较高的社会、经济效益,因此,坝式水电站一般又称为水利枢纽(complex)工程,如三峡水利枢纽工程、小浪底水利枢纽工程。坝式水电站的枢纽建筑物较多,相关内容参阅《水工建筑物》。

本书所涉及的建筑物为水电站建筑物。

坝式水电站中,除河岸引水式以外,各类建筑物及设备相对集中,便于进行运行管理。

需要注意的是,坝式水电站由于必须淹没河谷地带才能成库,因此会带来淹没损失和移民问题。从自然地理的角度来讲,一方面,傍河地带,一般具有肥沃的田地,筑坝壅水,一部分土地资源就会损失掉;另一方面,村落傍水而居,水库淹没,移民成本高,还会带来社会问题。如果想获得较高的水头,在条件合适情况下,可采用引水式开发或混合式开发的方案,切不可盲目追求高坝大库而导致淹没损失过大,发电效益的考虑必须有全局的眼光。拦河筑坝,阻断了原本通畅的河道,不可避免地会带来生态与环境问题,必须予以充分的重视,因为根据热力学第二定律,“要使自然界任何已经发生的过程完全逆转是不可能的”“而且明确说明自然界所有过程都是不可逆的”。虽然如此,但要正确和客观地评价生态、环境的正负影响,大型水利水电工程具有巨大的社会效益,任何时候,都要把人民的生命财产安全放在第一位,防洪本身也是巨大的生态工程、环境工程,清洁、绿色水电也具有巨大的减排效益。因此,对水电开发的态度要客观,不可走极端,因噎废食的态度更不可取。

河谷地带,有时还会有非常珍贵的文物或人类文化遗产,这就需要妥善地保护或搬迁。埃及的阿斯旺水库、我国的三门峡水库以及三峡水库,都有非常成功的经验可资借鉴。

2. 引水式水电站

引水式水电站是利用引水道集中水头的电站。引水道可以是无压引水渠(free headrace channel)、无压引水隧洞(free headrace tunnel),也可以是有压引水隧洞(pressure tunnel)。通过相对平缓的引水道引水,可以在厂房上游形成集中的水头。相应地,引水式水电站可分为无压引水式水电站和有压引水式水电站两类。无论是无压引水式水电站还是有压引水式水电站,厂房前都有一段压力管道。

无压引水式水电站的开发适应于坡度较陡的河段上游,或在较短距离内能够获得较大水头的场合,比如截弯取水。为了能够顺利引到水,保证有足够的水量,常需在进水口前建低坝或堰;如果原河流的水量较大,可以采用无坝引水。

图 1-4 为无压引水式水电站开发示意图,接近于截弯取水;图 1-5 为有压引水式水电站开发示意图。

河流上游,河道较陡,通过筑坝,不可能获得更高的水头,这就要采用引水式开发。引水式水电站,可以获得远远大于坝式水电站的水头,目前引水式水电站的水头已接近 2000m。目前世界上最高水头的电站是瑞士毕奥德隆(Bieudron)地下水电站,最大水头 1883m。但限于引用流量小,该水电站规模较小。山区小水电站一般都是引水式水电站。

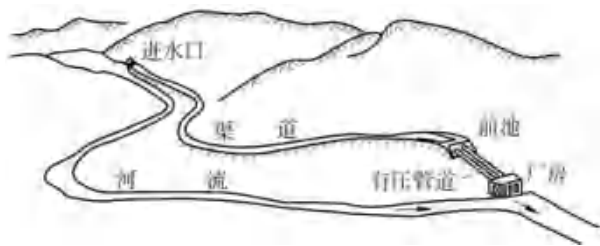


图 1-4 无压引水式水电站开发示意图

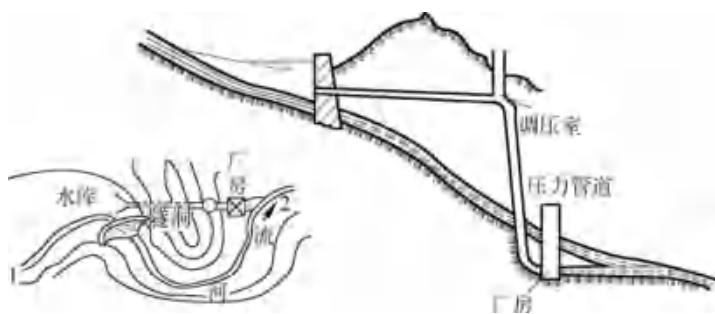


图 1-5 有压引水式水电站开发示意图

由于只有低坝或无坝,引水式水电站的淹没损失小、移民少,甚至完全没有淹没损失;但也因为没有调节水库,只能依靠径流发电,河流水量利用率低,综合效率低。

引水式水电站的引水线路通常比较长,因而建筑物比较分散,管理起来不方便。在有压引水的情况下,因为有压管道长,多需设置调压室,调压室由于尺寸大,特别是高度大,造价昂贵;管道长,水击压力比较大,因此对压力管道(或高压管道)的质量和安要求比较高。

引水式水电站,无论是在河道上游通过修建引水渠道开发,还是跨流域开发,特别是裁弯取直的方式开发,一定要注意,不能引走原有河道所有的流量,要保证原来河道的生态流量,或满足原河道供水的要求。我国是小水电大国,有为数众多的小水电,小水电在解决山区的用电问题和以电代柴方面有诸多效益,应当鼓励发展,但是,有的小水电(或引水式开发的水电)将原河道的水流全部引走,导致一段河流完全干涸,这是不可取的。

近些年,国外出现了潜坝引水式开发的例子,即在河道内建潜坝(也可以视为低堰),在潜坝前设置水下进水口,采取有压引水的方式开发,原始河道几乎未受干扰,能够保持原河道的自然风貌,有很好的环境效益,也不影响鱼类的洄游,这是值得借鉴的一种方式——因为,到目前为止,水工建筑物中鱼道或鱼梯的设置,无论中国还是国外,成功的例子不多,如果某河道有珍稀的鱼类,但计划进行水电开发,就可采用潜坝开发的方案。采取潜坝引水式开发的方案,必须有合适的地形,即旁通的发电引水管道(bypass)能够在较短的距离内获得较大的落差,比如流入位置高程较低的另一条河道。

3. 混合式水电站

混合式水电站实际上是上述两种方式的结合,即集中的水头由两部分组成:一部分由坝集中,一部分由有压管道集中。这种类型的电站依赖于合适的地形条件,即坝体上游坡度较缓,有成库的条件;坝体下游坡度较陡,在较短的距离之内能够集中较大的落差。这是一种较为理想的开发方式,上游的水库,除了具有诸如防洪、发电、供水等综合效益外,很重要的一点是为发电的可靠性提供了保证,并具有调节的能力,而下游的引水道又集中了较大的落差,因此,混合式电站兼具坝式开发和引水式开发的优点。

以上叙述水电站的类型是按集中水头的方式划分的,概念上很清楚。需说明的是,随着地下工程技术的进步,结合西南地区高山峡谷的地形条件,很多水电站都采取筑坝拦水、隧洞引水、再接厂房的方案(多为地下厂房),这在建筑物布置上与混合式电站是一样的,只是引水隧洞不集中水头。这类电站,也称为河岸引水式电站。

1.2.3 中国水电开发的未来

中国水电总的蕴藏量位居世界第一,随着科学技术的进步,无论是经济可开发容量,还是技术可开发容量,还会进一步增加,因此,中国的水电开发还有一段路要走。这不仅仅是开发水能资源的问题,还因为我国的化石能源缺乏,石油储量不多,而探明储量的煤炭资源,以现在的开发速度,在不足百年的时间内也将挖掘殆尽。此外,化石能源的燃烧会带来严重的环境问题,比如排放大量温室气体会带来酸雨。很显然,比之于煤电,水电是一种绿色、清洁的能源,开发水电对控制温室气体的排放有着举足轻重的意义。

1. 高水头坝式开发

这是中国水利水电工程的主战场,将来一段时间,仍会是中国水利水电工程建设的主要方式。中国尚未开发的水电资源多集中在西南地区,该地区因为处于高山峡谷地区,多会采用坝式开发的方案;也因为河流流量大,河谷窄,为解决总体布置问题,为泄洪建筑物留下空间,会采取地下厂房方案。很显然,这是在单一河流上开发的。该类地区的水电站多采用的布置方案为:坝—长引水道—地下厂房。过去,受制于地下施工技术和开发区域,地面厂房的情况较多;随着地下施工技术的进步,以及水电向西南进军,地下电站的情况会显著增多。

2. 引水式开发

我国过去的引水式开发主要是小型电站,针对的也是单一的河流。事实上,在高山地区,可能近距离内溪流纵横,而将这些溪流通过输水隧洞集中起来,是集中水头、进行水电开发的好方法,也就是说,视点不能局限于一条河流。如果将每一条小溪都视作一个“流域”,则可谓之为“跨流域”开发。国际上,挪威有许多这样的电站,挪威现在所从事的水电建设,多采取这种开发方式,即无坝开发。

另外,单一河流上的低坝引水式开发方案也是值得提倡的,主要原因是可以避免高坝所带来的弊端。

3. 低水头开发

我国东部地区,特别是东南地区,河网纵横,河水丰沛,许多地区或局部地段具有修建低水头水电站的条件,过去,可能因为历史的原因,看不上这些“低水头”的资源;或者即使开发了,近些年来因为水变得比电更为宝贵或缺水而废弃了(如北京近郊的田村水电站)。从可持续发展的视点看,这种开发方式不存在或只存在较小的环境负效应,应当纳入开发的视野。

4. 抽水蓄能电站

抽水蓄能电站在电网系统中起着重要的调节作用,按装机比例进行类比分析,我国目前抽水蓄能的装机容量仅占全国电力总装机的 1.5%,远远不能满足电网的要求,其装机比例远低于日本与欧美国家。因此,抽水蓄能在我国将会大力发展。

但也应注意到,水电的发展存在着制约因素。中国的水电技术居于世界前列,制约水电发展的不是技术因素;随着我国经济的发展,水电投资也不是制约因素。制约水电发展的因素主要来自两方面:一是移民因素,二是生态环境因素。进行水电规划和水电开发,首先必须解决好这两方面的问题,才能走出一条水电开发的可持续发展之路。

习题及思考题

1. 试以装机容量和年发电量两种视角来分析我国水电开发的水平,简述自己的观点。
2. 掌握中国水能资源的特点,熟悉水能资源蕴藏量丰富的主要河流。
3. 掌握进行水能开发的三种方式及适用特点。

参考文献

- [1] 姚汉源. 中国水利发展史[M]. 上海: 上海人民出版社, 2005.
- [2] [德]邓玉函口述, 王徵笔述绘图. 奇器图说[M]. 雷钊, 译注. 重庆: 重庆出版社, 2010.
- [3] [美]斯塔夫里阿诺斯. 全球通史[M]. 吴象婴, 梁赤民, 董书慧, 译. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [4] 邱彬如. 世界抽水蓄能电站新发展[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 张春生, 姜忠见. 抽水蓄能电站设计(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [6] 中国水力发电工程学会. 中国水力发电年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [7] 李仲奎, 马吉明, 张明. 水力发电建筑物[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [8] 中国水力发电工程学会. 中国水力发电年鉴[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [9] 中国水力发电工程学会. 截至 2016 年 4 月全国抽水蓄能电站装机容量详表[EB/OL]. <http://www.hydropower.org.cn/showNewsDetail.asp?nsId=19431>, 2016-09-22.
- [10] HOKIKIAN J. 无序的科学[M]. 吴象婴, 梁赤民, 董书慧, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2007: 16-17.
- [11] 李胜兵, 赵琨. 浅议我国大型水电机组的发展[J]. 水力发电, 2013, 39(7): 64-67.
- [12] 陆佑楣. 中国水电开发与可持续发展[J]. 水利水电技术, 2005(2): 1-4.

第 2 章 水轮机与水泵水轮机

2.1 水轮机的工作原理

水轮机是一种实现能量转换的装置。水轮机工作时,利用拦河坝上下游水位差所集聚的水体能量对转轮叶片做功,通过主轴将转轮的机械能输入发电机。因此,水轮机的作用就是将水体积蓄的能量转化为机械能。

如图 2-1 所示,水轮机所能利用的电站总落差为 $(Z_A - Z_B)$,即电站上库与下库的高程差。我国习惯称之为“毛水头”。从严格意义上讲,电站的有效落差 H_g 应按式(2-1)计算:

$$H_g = \left(\frac{p_{a,A}}{\rho_A g_A} - \frac{p_{a,B}}{\rho_B g_B} \right) + \left(\frac{v_A^2}{2g_A} - \frac{v_B^2}{2g_B} \right) + (Z_A - Z_B) \quad (2-1)$$

式中,下标 A 表示电站的取水口截面(图 2-1 中的 A 处);下标 B 表示出水口截面(图 2-1 中的 B 处); p_a 、 v 分别为截面上的大气压与水流速度; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; Z 为截面相对海平面的高程。

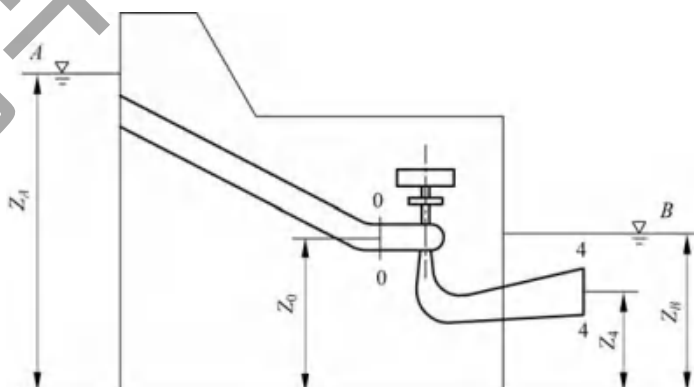


图 2-1 水轮机的各种高程

通常电站上库与下库的大气压相等、重力加速度相等。因而,式(2-1)可简化为

$$H_g = \frac{v_A^2 - v_B^2}{2g} + Z_A - Z_B \quad (2-2)$$

若取水口与出水口的动压差可以忽略,则电站的有效落差与电站毛水头相等。

对于水轮机而言,水头等于在蜗壳进口截面 0—0 与在尾水管出口截面 4—4 上单位重量水体的平均能量差,其表达式为

$$H = \frac{p_0 - p_4}{\rho g} + \frac{v_0^2 - v_4^2}{2g} + Z_0 - Z_4 \quad (2-3)$$

式中,下标 0 表示水轮机的入口截面(图 2-1 中的截面 0—0);下标 4 表示出口截面(图 2-1 中的截面 4—4); p 、 v 分别为截面上的压力与速度。

由水轮机水头的定义式(2-3)可知,

(1) 电站毛水头应大于水轮机的水头,二者之间的差值主要来源于水体从电站上库至水轮机蜗壳进口截面 0—0 之间的流动损失;

(2) 水轮机可以利用的单位重量水体能量包括三部分:①位能, $Z_0 - Z_4$;②压能, $\frac{p_0 - p_4}{\rho g}$;③动能, $\frac{v_0^2 - v_4^2}{2g}$ 。

2.2 水轮机的类型、基本参数及适用条件

2.2.1 水轮机分类

按照水轮机在能量转换过程中利用水体能量的型式,可将水轮机分为反击式和冲击式两大类。为此,先定义“反击度”的概念。

水轮机的反击度(degree of reaction) R 是指在水轮机转轮中的压力变化与水轮机总能量变化的比值,可定义为

$$R = (p_{in} - p_{out}) / (\rho g H) \quad (2-4)$$

式中, p_{in} 为转轮进口的静压, p_{out} 为转轮出口的静压。

当 $R > 0$ 时,水轮机利用了水体的压能或动能做功。这类水轮机称为反击式水轮机(reaction turbine)。

当 $R = 0$ 时,水轮机转轮中仅利用了水体的动能做功。这类水轮机称为冲击式水轮机(pelton turbine)。

1. 反击式水轮机

反击式水轮机主要利用水体的压能和动能,水体的位能在水流进入转轮前就已经转换为压能和动能了。在转轮中,水流的压能和动能再发生变化而转化为机械能。

由反击式水轮机利用水流能量的方式可知,转轮内的流动就必然是有压流动,转轮的工作

过程不可能在大气中,而必须在密闭的流道中进行。这是反击式水轮机的主要特点。

反击式水轮机的另一特点是由于转轮必须处于有压的水流包围之中,转轮的四周均可进水,所以水轮机的过流量大。

反击式水轮机属于叶片式流体机械,根据水轮机转轮中的流动方向不同而选择不同的结构型式:混流式(Francis)、轴流式(Kaplan,定桨轴流式也称 propeller)或贯流式(tubular)、斜流式(Deriaz 或 diagonal)。

2. 冲击式水轮机

冲击式水轮机的转轮仅仅利用水流的动能做功,在转轮前后水流的压能基本保持不变。因此,冲击式水轮机的工作过程在大气中进行,水流不可能充满转轮室,这是冲击式水轮机的主要工作特点。

冲击式水轮机的另一工作特点是,在同一时刻,只有部分水斗接触由喷嘴喷射出的水流。

在冲击式水轮机组中,上游水流由压力钢管引向水轮机的喷嘴,在喷嘴内水流的能量均转变为动能,形成高速的射流冲向转轮的水斗上,产生相对于水轮机主轴的扭矩,使转轮发生旋转而做功。

按照水流作用型式的不同,冲击式水轮机可分为切击式、斜击式、双击式三种。

2.2.2 水轮机的基本参数

水轮机的基本运行参数包括流量、水头、出力、效率、转速等。

1. 流量

在单位时间内通过水轮机水体的体积或质量称为流量(flow discharge)。流量常以字母 Q 表示,体积流量的单位为 m^3/s 或 m^3/h ,而质量流量的单位为 kg/s 或 kg/h 。

2. 水头

水头(head)表示单位质量水体具有的能量。水头以字母 H 表示,单位为 m 。对于通过水轮机流量为 Q 、水头为 H 的水体,其具有的能量为

$$P = \rho g Q H \quad (2-5)$$

3. 出力

水轮机通过主轴输出的功率称为出力(output),有时也直接称为功率。出力以字母 N_T 表示,出力的单位是 kW 。

4. 效率

水轮机效率(efficiency)指水轮机出力与在单位时间内通过水轮机水体能量的比值。因此,效率不是水轮机工作的直接参数。水轮机效率以字母 η 表示, $\eta = N_T / P$, 则

$$\eta = N_T / (\rho g Q H) \quad (2-6)$$

5. 转速

转速(rotational speed 或 revolution speed)指水轮机主轴在单位时间(如 1min)内转动的圈数,用符号 n 表示,单位为 r/min 。尽管转速与水轮机的能量转化没有直接关联,但水轮机的工作特性与转速密切相关。

2.2.3 水轮机的适用条件

原则上,电站水轮机选型须考虑水轮机的水头。对于高水头、较小流量的电站,优先选择冲击式水轮机;对于低水头、大流量的电站,推荐采用轴流式水轮机或贯流式水轮机;对于大量中等水头段的电站,常选用水力效率较高的混流式水轮机。目前斜流式水轮机应用较少。

表 2-1 给出了各种水轮机的适用情况。实际上,现代水轮机的水头应用范围越来越广,各种机型的应用水头相互重叠。

表 2-1 现代水轮机的适用情况

水轮机型式	冲击式	混流式	斜流式	轴流式		贯流式
				转桨式	定桨式	
水头 H/m	300~1770(大型) 40~250(小型)	40~700(大型) 10~200(小型)	40~120	5~80	2~70	2~25
转轮最大直径 D_1/m	5.2	10.44	7.65	11.3	9.0	7.5
最大额定出力 P_{max}/MW	315	1000	250	200	150	55

近年来随着水能利用技术和现代制造水平的不断进展,水轮机的应用水平有了很大的提高。一方面不断突破水轮机的使用水头与单机容量,另一方面采用新型设计手段大幅度提升了水能的利用效率。我国已经成功研制了 1000MW 级巨型水轮机及水轮发电机。从效率水平来说,200m 水头段水轮机模型转轮的水力效率达到 95.2%,属世界领先水平。

2.2.4 水轮机的牌号

作为产品的法定标示,水轮机在铭牌上都注有标准的牌号。水轮机的牌号是反映水轮机的型式、转轮型号、结构特征以及水轮机特征尺寸等的一组简明符号。

水轮机的牌号由三部分组成。第一部分为以汉语拼音字母和阿拉伯数字表达的转轮型式。转轮型式以水流在转轮区域的流动方向和叶片的固定方式表示,如 HL300,表示混流式水轮机,其转轮型号为 300(转轮实验序号)。第二部分表达水轮机主轴的布置方式及引水室特征,也以汉语拼音字母表示。第三部分表达水轮机的特征尺寸,如以 cm 为单位表示的水轮机转轮的标称直径 D_1 。

表 2-2 为水轮机型式的代表符号,表 2-3 为主轴布置方式或引水室特征的代表符号。

按以上符号的规定,举例说明如下:

(1) HLA858a-LJ-1044,“HL”表示混流式水轮机;“A858a”为转轮型号,是根据转轮开发商设计时确定的代号;“LJ”表示立轴、金属蜗壳;“1044”表示转轮标称直径为 1044cm。

(2) ZZ560-LH-1130,“ZZ”表示轴流转桨式水轮机,转轮型号 560;“LH”表示立轴、混凝土蜗壳;转轮标称直径 1130cm。

(3) XLN200-LJ-300,“XLN”表示斜流式可逆水泵水轮机,转轮型号 200;“LJ”表示立轴、金属蜗壳;转轮标称直径 300cm。

表 2-2 水轮机型式的代表符号

水轮机型式	代 表 符 号
混流式	HL
斜流式	XL
轴流定桨式	ZD
轴流转桨式	ZZ
贯流定桨式	GD
贯流转桨式	GZ
切击式	CJ
斜击式	XJ
双击式	SJ
可逆式	加标“N”

表 2-3 主轴布置方式或引水室特征的代表符号

主轴布置方式或引水室特征	代表符号
立轴或立式	L
横轴或卧式	W
金属蜗壳	J
混凝土蜗壳	H
灯泡式	P
明槽式	M
罐式	G
竖井式	S
虹吸式	X
轴伸式	Z

(4) GZV301-WP-560,“GZV”表示贯流转桨式水轮机,转轮型号 301;“WP”表示横轴、灯泡式引水室;转轮标称直径 560cm。

(5) CJA779-L-156.5/3×11,“CJA”表示切击式水轮机,转轮型号 779;“L”表示立轴;转轮节圆直径 156.5cm,喷嘴数量 3 个、射流直径 11cm。

2.3 水轮机的典型结构

2.3.1 反击式水轮机的过流部件

按照水流经过水轮机的途径,反击式水轮机具有四大过流部件,即引水部件(suction passage)、导水机构或导叶、转轮和尾水管。

1. 引水部件

对反击式水轮机,设置引水部件的目的是根据水头和机组尺寸,采用不同的引水室将水流沿圆周方向相对均匀地引入转轮或导水机构之前。水轮机引水室的型式概括起来有四种:明槽式、罐式、蜗壳式及引水管道。

(1) 明槽式引水室(open channel suction chamber)属于开敞的明槽、水面和大气相接,且转轮和导水机构直接安装在明槽的底板上,引水室结构简单。该引水室型式一般使用于水头在 10m 以下,且机转轮直径小于 2m 的情况。

(2) 罐式引水室(pot type suction chamber)属于有压、类似罐状的引水室,通常应用于横轴小型水轮机。由于罐式引水室沿水轮机主轴方向进水,而在转轮进口处转为径向,所以水力损失较大。目前罐式引水室已很少使用。

(3) 蜗壳式引水室(volute casing)形状类似蜗牛,简称蜗壳。与前两种引水室相比,蜗壳式引水室的效率高,且具有如下优点:

- ① 蜗壳断面从进口到尾部逐渐缩小,因此能满足流量逐渐减小、在导叶进口前沿圆周均匀

进水的要求,同时在导水机构前形成均匀分布的环量,为水轮机转轮进行能量转化创造良好的入流条件;

- ② 由于采用闭式引水,可以适合于各种水头条件;
- ③ 具有最小的外形尺寸,结构紧凑,可减小厂房尺寸及土建投资;
- ④ 水轮机主要零部件都不被引水室包围,处于其外部,便于检修和维护;
- ⑤ 具有足够的强度,原则上可适用于任何水头和尺寸的水轮机。

因此,蜗壳式引水室在反击式水轮机中得到广泛应用。在水头低于 40m 时,尤其是轴流式水轮机常用混凝土浇注的混凝土蜗壳。为了方便施工,混凝土蜗壳的断面为梯形。在水头高于 40m 时,对大型水轮机采用钢板焊接的金属蜗壳,如图 2-2 为岩滩焊接蜗壳在哈尔滨电机厂内预装的照片。因为在不同断面处受力不同,将蜗壳分成若干锥形环节,每个环节采用不同厚度的钢板,以节省钢板、减轻蜗壳的质量。蜗壳断面形状一般为圆形。但在蜗壳尾部,蜗壳断面变为椭圆形以便与座环搭接。

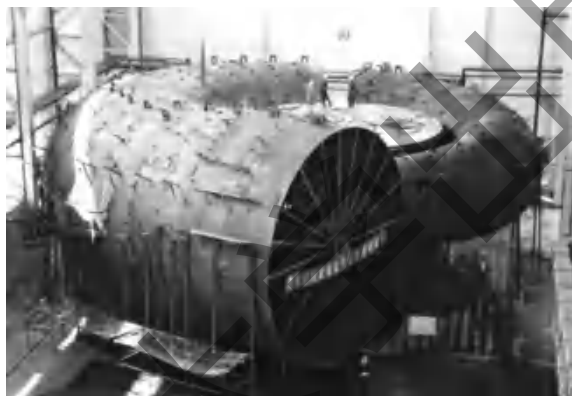


图 2-2 混流式水轮机蜗壳

(4) 引水管道。贯流式水轮机采用均匀收缩形引水管道作为引水部件,可以获得较好的水力性能。引水管道的形状和尺寸与灯泡体的设计有密切联系。如果采用较小的灯泡体,则引水管道尺寸小,流道平直,水流转弯小,从而减小水力损失。

2. 导叶

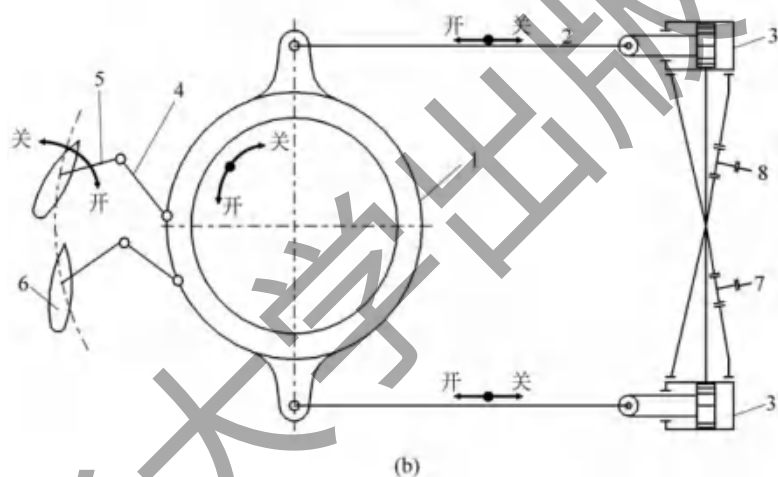
导叶是水轮机导水机构的过流部件。导叶(guide vane)的作用在于:一方面必须在水流进入转轮之前形成必需的环量;另一方面,还必须保证水轮机能够随时调节水流的流量适应电站负荷的变动,在停机时能够截断水流进入转轮。

导水机构的导叶数量一般为 16~32 个,视水轮机的大小而定。混流式与轴流式水轮机的导叶均匀、轴对称地布置在转轮外圈(径向),通过传动机构可调节导叶的角度,从而起到控制水流的方向、调节流量及关闭机器的作用。图 2-3(a)为五强溪电站水轮机导水机构的装配现场照片。这种导叶称为圆柱形导水机构,其导叶分布在与水轮机共同轴线的圆柱面上,而水流沿径向流过导叶后进入转轮。圆柱形导水机构的结构简单,便于制造与安装,所以在反击式水轮机中应用广泛。

图 2-3(b)表示圆柱形导水机构的传动原理。图中,接力器 3 的活塞两端分别连通第一油管



(a)



(b)

1—控制环；2—推拉杆；3—接力器；4—连杆；5—转臂；6—活动导叶；7—第一油管；8—第二油管

图 2-3 导水机构

(a) 现场装配；(b) 传动原理图

7 与第二油管 8, 由于两个油管中的压力不同, 压力差导致接力器产生直线位移。接力器 3 连接推拉杆 2, 两个推拉杆分别推、拉控制环 1 的两个耳环, 使控制环 1 发生旋转; 一端固定在控制环 1 上的连杆 4 带动转臂 5 运动。由于转臂 5 与活动导叶 6 的枢轴固定连接在一起, 当转臂运动时将驱动活动导叶 6 绕其枢轴转动, 从而改变了活动导叶的开度, 达到调整进入水轮机转轮流量的目的。

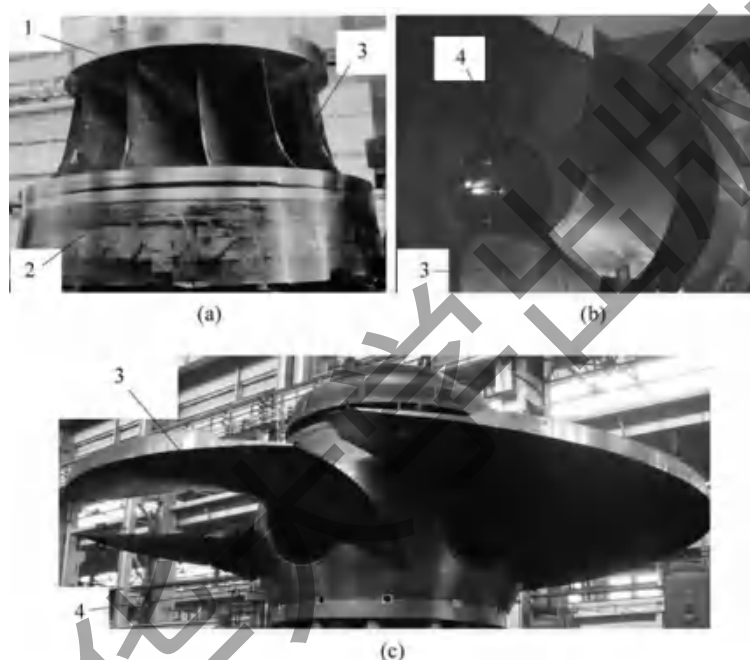
需要说明的是, 贯流式水轮机一般采用轴向式导水机构, 使用的导叶也为锥形, 所以这种导水机构也称圆锥形导水机构。显然, 水流是沿着轴向通过导叶后进入转轮的。圆锥形导水机构与圆柱形导水机构具有相同的传动原理, 它们的构成零件也基本一样。

3. 转轮

转轮(runner)是水轮机实现能量转换的部分, 是水轮机的核心过流部件。转轮的水力性能决定了水轮机组的性能。

混流式转轮由于比转速的不同,其外形略有差异。混流式转轮都由上冠、下环和叶片组成,如图 2-4(a)所示。上冠、下环分别为一整体,它们与叶片相连接的面均为流面(S1 流面)。上冠与叶片连接的部分为转轮的流道,而另外的一侧则与水轮机主轴连接;下环的作用除了形成流道外,主要是将转轮的叶片连接在一起。叶片的作用就是进行能量转换,一般设计为三维扭曲形,数量为 7~22 片,且随应用水头的升高而增加。

图 2-4(b)、(c)分别表示贯流式和轴流式转轮。贯流式和轴流式转轮的叶片数一般为 3~6 片。转轮叶片呈桨叶形,固定在转轮体上。转轮体的表面也是转轮流道的一部分,所以呈流线形。目前,较大容量的贯流式和轴流式水轮机一般都设计为转桨式,即叶片安装在转轮体上的角度可以通过油压装置操作而改变,目的是使得转轮内的流动适应水轮机运行工况变化的要求。



1—上冠; 2—下环; 3—叶片; 4—转轮体

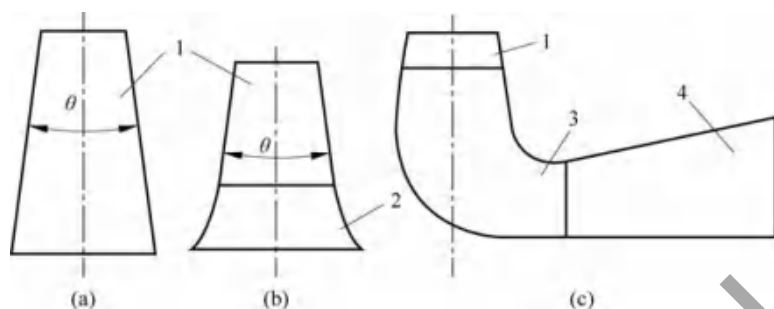
图 2-4 反击式水轮机转轮的实体照片

(a) 混流式; (b) 贯流式; (c) 轴流式

4. 尾水管

反击式水轮机的尾水管(draft tube)位于转轮之后。常用的尾水管有直锥型(cone type)、带喇叭口的截短直锥型(cone type with bell-mouth)和弯肘型(elbow type)等几种形状,如图 2-5 所示。

直锥型尾水管的水力性能好,但水电站的开挖深度较大,因而通常用于小型水轮机。因为贯流式水轮机水头低,而且流道沿轴向布置,非常适宜采用直锥型尾水管。直锥型尾水管的锥角为 $10^{\circ} \sim 26^{\circ}$,锥角越小,尾水管的水力性能越佳,但土建开挖量越大;当电站水头较低、开挖深度受限制时,可采用如图 2-5(b)所示的带喇叭口(bell-mouth)的截短直锥型尾水管,其水力性能与弯肘型尾水管的情况相当。



1—锥管；2—喇叭口；3—肘管；4—出口扩散管

图 2-5 尾水管的形状

(a) 直锥型；(b) 带喇叭口的截短直锥型；(c) 弯肘型

弯肘型尾水管由进口锥管、肘管和出口扩散管三部分组成。为了减少水电站的基础开挖深度,大中型水轮机通常选用弯肘型尾水管。

反击式水轮机尾水管的作用是回收转轮出口的水流动能以及转轮出口高出下游水面的一段位能。在图 2-6 中,截面 2—2 为转轮出口,截面 5—5 为尾水管出口。由于从转轮出口至尾水管出口的流道截面积逐渐扩大,则水流不断减速,这使得转轮出口处的动能转化为压能。

因此,尾水管恢复的动能可表示为 $\frac{v_2^2 - v_5^2}{2g} - h_d$ 。

相对于水轮机转轮出口可利用的全部动能 $\frac{v_2^2}{2g}$,则尾水管的动能恢复系数定义为

$$\eta_d = \frac{\frac{v_2^2 - v_5^2}{2g} - h_d}{\frac{v_2^2}{2g}} \quad (2-7)$$

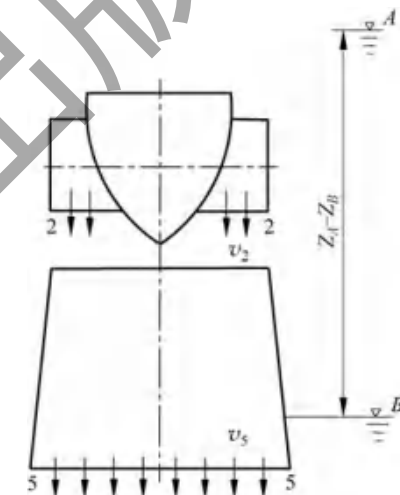


图 2-6 尾水管动能恢复关系示意图

式中, v_2 、 v_5 分别为截面 2—2、截面 5—5 的平均流速; h_d 是自转轮出口至尾水管出口的水力损失。由式(2-7)可知,当尾水管出口截面积越大时,水轮机出口的动能 $\frac{v_5^2}{2g}$ 越小,尾水管的动能恢复系数越大;当尾水管内的水力损失 h_d 越小,尾水管恢复的动能也越大。因此, η_d 也称尾水管效率,表征了尾水管的能量转换能力和尾水管的综合质量。

2.3.2 反击式水轮机的典型结构

本节主要针对现代水能开发中应用比较广泛的混流式、轴流式及贯流式等三种型式的水轮机,描述典型的机组布置方式和结构特点。目前斜流式水轮机的应用已经很少,故本书不进行具体介绍。