



土木工程设计宝典丛书

TUMU GONGCHENG SHEJI BAODIAN CONGSHU

小水电站 设计要点

姜晨光 主编

XIAOSHUIDIANZHAN

SHEJI

YANDIAN



化学工业出版社



土木工程设计宝典丛书

TUMU GONGCHENG SHEJI BAODIAN CONGSHU

小水电站 设计要点

姜晨光 主编

XIAOSHUIDIANZHAN

SHEJI

YAODIAN



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以最新的国家规范和标准为依据,以近几年国内外小水电站建设的最新成就为着眼点,结合我国国情,从实用的角度出发,系统地阐述了小水电站设计的基本程序与核心要点(包括水电站进水口建筑物设计、水电站引水道建筑物设计、水电站压力管道设计、水电站水击问题及调节保证设计、水电站调压室设计、水电站地面厂房规划设计、水电站厂房结构设计等),对水电站的勘察、规划、设计、施工、管理及相关科学研究工作具有一定的指导意义和参考价值。

本书可供工作在水电建设第一线的工程技术人员、工程管理人员工作或学习参考,也可作为各级政府与水电站建设相关的行政主管部门以及电力和水利水电类企业管理人员的工具书,还可以作为电力类、电站类、水利类专业以及土木工程类专业高年级学生的学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

小水电站设计要点/姜晨光主编.——北京:化学工业出版社,2012.7
(土木工程设计宝典丛书)
ISBN 978-7-122-14487-4

I. ①小… II. ①姜… III. ①水力发电站-设计
IV. ①TV73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 123903 号

责任编辑:董琳
责任校对:王素芹

文字编辑:汲永臻
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张13 $\frac{3}{4}$ 字数391千字 2012年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00 元

版权所有 违者必究

前言

Preface



电的发现和应用极大地解放了生产力,使人类的信息触角不断延伸。电对人类生活的影响主要表现在能量及信息的获取、转化和传输上。电是人类科技发展的重要里程碑,由它产生的动能每天都在源源不断地释放。1819年奥斯特发现了电磁作用,1821年英国人法拉第完成了一项重大的电发明并基于奥斯特的发现于1831年制出了世界上最早的发电机,1866年德国人西门子(Siemens)制成了世界上第一台工业用发电机,1878年法国建成了世界第一座水电站。水电站是将水能转换为电能的综合工程设施,水库的高水位水经引水系统流入厂房推动水轮发电机组发出电能,再经升压变压器、开关站和输电线路输入电网。我国大陆最早建成的水电站是云南省昆明市郊的石龙坝水电站(1912年),正在运行的三峡水利枢纽是目前为止世界最大的水电站。据不完全统计,截至2011年底,全球水力发电厂的总装机容量已近9000亿瓦、向全球提供约4万亿度电力(相当于生产了全球20%的电力),在可再生能源所供应的电力当中水力发电占91%。目前,水力发电是唯一技术成熟并可大规模开发的清洁可再生能源,水电每度电的发电成本明显低于火电、核电、太阳能电、风电,面对地球传统能源日益紧张、温室气体过度排放的威胁,各国都优先考虑发展水电。水电是一种清洁能源,可再生、无污染、运行费用低并便于进行电力调峰且有利于提高资源利用率和经济社会综合效益。当然,水力发电有其不利的一面(比如生态破坏、水库地震、筑坝移民、水位波动效应、下游肥沃冲积土的减少等),因此,应综合权衡、趋利避害、扬长避短。人类水力发电活动是从小水电站开始的,我国小水电资源丰富(共有15亿千瓦的蕴藏量和7000万千瓦的可开发资源量),我国的水能资源蕴藏量和可开发水能资源量都居世界第一,我国小水电设计、施工、设备制造也已达国际领先水平,我国是世界小水电行业的主要技术输出国。截至2011年底,我国建有近7万座小水电站(装机容量约2千万千瓦,占全国水力发电总装机容量的1/3)。我国小水电主要分布在远离大电网的山区,它既是农村能源的重要组成部分,也是大电网的有力补充。

本书是笔者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一,希望本书的出版能对我国水电建设事业的健康可持续发展有所贡献。

全书由江南大学姜晨光主笔完成。山东华源莱动内燃机有限公司孙旭东;湖南省岳阳市质量技术监督局计量检定所郭同兵;中国有色金属工业长沙勘察设计院尹建章;莱阳市住房和城乡建设管理局于蕾、纪少林、王世周、孙有国;莱阳市农业局吕松梅;莱阳市开发区林业站刘彩建;中共莱阳市委于京良、郭立众;山东省小清河管理局李瑞青;山东省水利厅石伟南;山东省海河流域水利管理局巩亮生;华仁建设集团有限公司陈晓江、施其虎、王纪明、丁科学、王同文、陈爱岚、吴华杰、邹鹏、程文丽;江南大学王凤芹、欧元红、卢林、陈丽、邵玉鲜等同志(排名不分先后)参与了部分章节的撰写工作。初稿完成后,苏文馨、徐至善、李锦铭、王浩闻、黄建文五位教授级高工提出了不少改进意见,为本书的最终定稿作出了重大的贡献,谨此致谢!

限于水平、学识和时间关系,书中疏漏与欠妥之处,敬请读者批评与指正。

姜晨光
2012年3月于江南大学

目录

Contents



第 1 章 水电站的作用与特点	1
1.1 水力发电资源的基本特点	1
1.1.1 我国陆地水力发电资源的基本情况	1
1.1.2 我国陆地水力发电资源利用现状	4
1.2 水力发电的基本原理与特征参数	6
1.2.1 水电站的输出功率（或称出力）	6
1.2.2 水电站的发电量	7
1.2.3 水电站动能参数	7
1.2.4 水电站的经济指标	8
1.2.5 水电站的分等指标	8
1.3 水电站的类型与设计总体要求	8
1.3.1 小水电站设计的基本要求	8
1.3.2 小水电站水文分析计算要求	9
1.3.3 小水电站经济评价原则	11
1.3.4 小水电站工程概（估）算	11
1.3.5 小水电站工程管理的的基本要求	11
1.3.6 小水电站的环境保护原则	11
1.3.7 小水电站水库淹没处理及工程占地规定	12
1.3.8 小水电站消防的基本要求	13
1.3.9 小水电站电气系统的基本要求	13
1.3.10 小水电站水力机械及采暖通风的基本要求	16
1.3.11 小水电站金属结构的基本要求	18
1.4 构成水电站的主要建筑物及基本设计要求	19
1.4.1 小水电站工程地质勘察基本要求	19
1.4.2 小水电站水利及动能计算基本要求	21
1.4.3 小水电站工程布置及建筑物设计的基本规定	22
1.4.4 小水电站施工的基本要求	30
第 2 章 水电站进水口建筑物设计	32
2.1 水电站进水口的功用和基本要求	32
2.2 水电站有压进水口设计	32
2.2.1 水电站有压进水口设计的基本要求	32
2.2.2 设计范例——清风口水利枢纽进水口设计	36
2.3 水电站无压进水口及沉沙池设计	39
2.3.1 水电站无压进水口设计的基本要求	39
2.3.2 沉沙池设计的基本要求	39
2.3.3 无压进水口设计范例——刘家峡水电站进水口	39
第 3 章 水电站引水道建筑物设计	43
3.1 水电站引水道的特点及设计要求	43

3.1.1	水电站引水渠道设计	43
3.1.2	水电站引水隧洞设计	45
3.1.3	工程示例——印度戈伊纳梯级电站湖泊双叉引水道	45
3.1.4	引水道充排水试验方法	46
3.2	水电站压力前池与日调节池的设计	50
3.2.1	压力前池的作用	50
3.2.2	压力前池的组成	51
3.2.3	压力前池的布置原则	51
3.2.4	压力前池的尺寸拟定方法	51
3.2.5	日调节池设计	53
第4章	水电站压力管道设计	54
4.1	水电站压力管道的功用、类型与要求	54
4.2	水电站压力管道的线路选择及尺寸拟定	55
4.2.1	水电站压力管道的供水方式	55
4.2.2	水电站压力管道明管布置的基本方式	55
4.2.3	水电站压力管道线路选择的基本要求	56
4.2.4	水电站压力管道直径的选择要求	56
4.3	水电站明敷钢管的敷设方式及附件	57
4.3.1	水电站明敷钢管的敷设及支承方式	57
4.3.2	水电站明敷钢管上的闸门和附件形式	58
4.4	作用在明敷钢管上的荷载及组合	60
4.4.1	荷载计算及其分项系数	60
4.4.2	荷载组合	62
4.5	明敷钢管的结构分析方法	62
4.5.1	明敷钢管管壁厚度的估算	62
4.5.2	明敷钢管的管身应力分析	63
4.5.3	明敷钢管极限状态验算	70
4.6	明敷钢管的抗外压稳定设计	70
4.6.1	光滑管段的临界外压力	71
4.6.2	加劲钢管的外压稳定设计	71
4.6.3	水电站明敷钢管的设计步骤	72
4.7	分岔管设计	73
4.7.1	分岔管设计的基本要求	73
4.7.2	岔管的布置形式	73
4.7.3	岔管的结构形式	73
4.8	水电站地下埋管设计	76
4.8.1	水电站地下埋管的布置要求及工作特点	76
4.8.2	地下埋管承受内压时的强度计算方法	78
4.8.3	影响钢衬应力的因素	79
4.8.4	地下埋管的抗外压稳定分析	80
4.8.5	不用钢衬砌的地下管道稳定分析	81
4.8.6	设计实例——老黑河电站压力管道设计	82
4.9	水电站混凝土坝体压力管道设计	84
4.9.1	坝内埋管设计	85
4.9.2	坝后背管设计	87
4.9.3	设计范例——果子沟水电站压力管道结构设计	88
第5章	水电站的水击问题及调节保证计算	92

5.1	水电站的水击问题及调节保证计算要求	92
5.2	水击现象及其传播规律	92
5.2.1	$t=0\sim L/a$ 的过程	92
5.2.2	$t=L/a\sim 2L/a$ 的过程	93
5.2.3	$t=2L/a\sim 3L/a$ 的过程	93
5.2.4	$t=3L/a\sim 4L/a$ 的过程	93
5.3	水击的基本方程与边界条件	94
5.3.1	水击方程的构建	94
5.3.2	水击的边界条件	95
5.4	简单管道水击的解析计算方法	97
5.4.1	直接水击和间接水击问题	97
5.4.2	水管末端各相水击压力计算	98
5.4.3	水击波在水管特性变化处的反射特征	99
5.4.4	开度依直线变化的水击特征	100
5.4.5	起始开度对水击的影响	103
5.4.6	开度变化规律对水击压力的影响特征	104
5.4.7	水击压力沿管长的分布特征	104
5.5	复杂管道水击的计算方法	105
5.5.1	串联管水击简化计算	105
5.5.2	分岔管的水击压力计算	106
5.5.3	蜗壳及尾水管的水击压力计算	106
5.6	水击计算的数值解法	107
5.6.1	管道水击特征线方程的构建	107
5.6.2	管道水击特征线方程的基本求解方法	108
5.6.3	管道水击计算数值解法的基本求解步骤	110
5.7	机组转速变化的计算方法	110
5.7.1	机组运动方程的基本形式	111
5.7.2	机组转速变化率近似计算方法	111
5.8	水击调节保证计算的标准及改善调节保证的措施	112
5.8.1	水击调节保证计算的基本标准	112
5.8.2	减小水击压强的措施	113
5.8.3	调节保证设计范例——蚂蚁河水电站调节保证计算	114

第6章 调压室设计 119

6.1	水电站调压室设置的条件及基本要求	119
6.2	水电站调压室工作原理及基本方程	120
6.2.1	水电站调压室工作原理	120
6.2.2	调压室水位波动的基本方程	121
6.3	水电站调压室常见布置方式及类型	121
6.4	调压室水位波动的解析计算方法	123
6.4.1	丢弃全负荷情况的解析计算	123
6.4.2	增加负荷时的最低涌波水位计算	124
6.5	调压室水位波动的图解计算方法	125
6.5.1	图解法的基本原理	125
6.5.2	图解法进行圆筒式调压室水力计算	126
6.5.3	图解法进行阻抗式调压室水力计算	127
6.6	调压室水位波动的数值求解方法	128
6.6.1	调压室水位波动数值求解的基本原理	128

6.6.2	调压室水位波动数值求解的主要步骤	129
6.7	调压室水位波动的稳定要求	130
6.7.1	小波动稳定断面的计算方法	130
6.7.2	波动稳定条件分析	130
6.8	调压室的水力计算条件	131
6.9	调压室的结构布置要求	132
6.9.1	调压井结构的荷载及其组合	133
6.9.2	调压井结构计算的基本原理	133
6.9.3	调压室设计范例——果子沟水电站调压室设计	134
第7章	水电站地面厂房规划设计	138
7.1	水电站厂房的组成及基本类型	138
7.1.1	水电站厂房的组成	138
7.1.2	水电站厂房的基本类型	139
7.2	水电站厂房设计所需的资料及基本设计程序	139
7.2.1	水电站厂房设计所需资料	139
7.2.2	水电站厂房的设计程序	140
7.3	水轮发电机的基本特点	140
7.3.1	水轮发电机的类型及传力方式	140
7.3.2	发电机的励磁系统	141
7.3.3	发电机的支承结构（机墩）	141
7.3.4	发电机的布置方式	142
7.4	水电站厂房内各种辅助设备的基本特点	142
7.4.1	调速系统	142
7.4.2	油系统	142
7.4.3	供水系统	143
7.4.4	排水系统	143
7.4.5	气系统	144
7.4.6	水电站厂房起重设备	144
7.5	水电站主厂房布置的基本要求	145
7.5.1	发电机层设备布置的基本要求	145
7.5.2	水轮机层设备布置的基本要求	145
7.5.3	蜗壳层布置的基本要求	145
7.5.4	安装间布置的基本要求	145
7.6	水电站主厂房的轮廓尺寸设计	147
7.6.1	水电站主厂房平面尺寸的确定方法	147
7.6.2	水电站主厂房高度及各层高程的确定方法	148
7.7	水电站副厂房的布置要求	150
7.7.1	水电站副厂房的位置要求	151
7.7.2	水电站副厂房平面布置设计的原则和要求	151
7.8	水电站厂房的采光、通风、交通、防火设计要求	153
7.9	水电站厂区总体布置要求	154
7.9.1	水电站厂区总体布局设计的基本要求	154
7.9.2	水电站总体规划范例——呼玛河梯级水电站规划	155
7.9.3	水电站流域规划范例——黄河流域规划	157
7.9.4	水电站流域规划及水资源综合利用范例——长江流域规划	158
第8章	水电站厂房结构设计	162
8.1	水电站厂房的结构特点	162

8.1.1	水电站厂房的结构组成及作用	162
8.1.2	水电站地面厂房结构的受力及传力途径	163
8.1.3	水电站地面厂房混凝土浇筑的分期与分块问题	164
8.1.4	水电站地面厂房结构的分缝与止水	164
8.2	水电站厂房整体稳定及地基应力计算方法	165
8.2.1	水电站厂房整体稳定和地基应力计算的荷载及其组合	165
8.2.2	水电站厂房整体稳定和地基应力计算方法及要求	165
8.3	水电站厂房吊车梁及排架柱结构计算方法	167
8.3.1	水电站厂房吊车梁结构计算方法	167
8.3.2	水电站厂房排架柱结构计算方法	168
8.4	机墩与风罩设计	170
8.4.1	作用在机墩上的荷载及荷载组合	170
8.4.2	圆筒式机墩的结构计算	171
8.4.3	圆筒式机墩的配筋计算	174
8.4.4	风罩墙的结构计算	174
8.5	蜗壳结构计算方法	175
8.5.1	钢蜗壳外围混凝土结构计算	175
8.5.2	钢筋混凝土蜗壳计算	177
8.6	尾水管设计	180
8.6.1	尾水管的荷载及荷载组合	181
8.6.2	尾水管的设计计算方法	182
8.6.3	尾水管的配筋原则	183
8.6.4	水电站厂房结构设计示例——观音庙一级水电站厂房结构设计	183
8.6.5	水电站厂房分层分块设计示例——火龙沟电站厂房分层分块设计	186
8.6.6	水电站厂房总体设计示例——克孜勒水电站厂房设计	189
8.6.7	水电站厂房排架柱设计示例——梦娘沽电站厂房排架柱结构设计	193
第9章	其他类型的水电站厂房设计	197
9.1	坝后式、溢流式、坝内式水电站厂房设计的特点与要求	197
9.1.1	坝后式水电站厂房	197
9.1.2	溢流式水电站厂房	197
9.1.3	坝内式厂房	198
9.2	河床式水电站厂房设计特点与要求	198
9.3	地下式水电站厂房设计特点与要求	199
9.3.1	地下式水电站厂房的特点	199
9.3.2	地下式水电站厂房的基本布置形式	200
9.3.3	地下式水电站厂房的基本洞室组成	200
9.3.4	地下式水电站厂房的基本洞室布置	201
9.4	小水电站技术改造	201
9.4.1	小水电站技术改造的基本要求	201
9.4.2	小水电站技术改造中现状分析的基本方法	203
9.4.3	既有小水电站性能测试的基本方法	203
9.4.4	小水电站技术改造的技术经济指标要求	204
9.4.5	小水电站技术改造工程验收的基本要求	205
9.4.6	小水电站技术改造的基本方法	205
	参考文献	212

第 1 章

水电站的作用与特点

1.1 水力发电资源的基本特点

1.1.1 我国陆地水力发电资源的基本情况

我国是一个缺水严重的国家。我国淡水资源总量为 2.8 万亿立方米，占全球水资源的 6%，仅次于巴西、俄罗斯和加拿大，居世界第四位，但人均只有 2300m^3 ，仅为世界平均水平的 $1/4$ 、美国的 $1/5$ ，在世界上名列 121 位，是全球 13 个人均水资源最贫乏国家之一。扣除难以利用的洪水径流和散布在偏远地区的地下水资源后我国实际可利用的淡水资源量则更少，仅为 11000 亿立方米左右，人均可利用水资源量约为 900m^3 且其分布极不均衡。截止 2011 年底，全国 600 多座城市中有 400 多个存在供水不足问题，其中比较严重的缺水城市达 120 个，全国城市缺水总量为 80 亿立方米。在所有淡水资源中地表水 2.7 万亿立方米、地下水 0.83 万亿立方米，由于地表水与地下水相互转换、互为补给，扣除两者重复计算量 0.73 万亿立方米，与河川径流不重复的地下水资源量约为 0.1 万亿立方米。

1.1.1.1 我国水资源的主要特点

按照国际公认的标准，人均水资源低于 3000m^3 为轻度缺水；人均水资源低于 2000m^3 为中度缺水；人均水资源低于 1000m^3 为重度缺水；人均水资源低于 500m^3 为极度缺水。我国目前有 16 个省（区、市）人均水资源量（不包括过境水）低于严重缺水线，有 6 个省、区（宁夏、河北、山东、河南、山西、江苏）人均水资源量低于 500m^3 。我国水资源的主要特点如下。

（1）总量并不丰富、人均占有量更低 我国水资源总量居世界第六位，人均占有量为 2240m^3 ，约为世界人均的 $1/4$ ，在世界银行连续统计的 153 个国家中居第 88 位。

（2）地区分布不均、水土资源不相匹配 长江流域及其以南地区国土面积只占全国的 36.5%，其水资源量却占全国的 81%。淮河流域及其以北地区的国土面积占全国的 63.5%，其水资源量仅占全国水资源总量的 19%。

（3）年内年际分配不均、旱涝灾害频繁 大部分地区年内连续四个月降水量占全年的 70% 以上，连续丰水或连续枯水年较为常见。

1.1.1.2 我国水资源的状况

据监测，目前全国多数城市地下水受到一定程度的点状和面状污染且有逐年加重的趋势，日趋严重的水污染不仅降低了水体的使用功能，还进一步加剧了水资源短缺的矛盾。对我国的可持续发展战略带来严重影响，并严重威胁到城市居民的饮水安全和人民群众的健康。水利部预测，2030 年我国人口将达到 16 亿，届时人均水资源量仅有 1750m^3 。在充分考虑节水情况下，预计用水总量为 7000 亿~8000 亿立方米，要求供水能力比现在增长 1300 亿~2300 亿立方米。全国实际可利用水资源量接近合理利用水量上限，水资源开发难度极大。根据 1956~2011 年的全国水文气象资料，我国水资源量的状况可概况为以下 5 点。

（1）降水总量 平均年降水总量为 6.3 万亿立方米，折合降水深为 651mm，比全球陆地平

均值低约 21%。受气候和地形影响,降水的地区分布极不均匀,从东南沿海向西北内陆递减。我国台湾省多年平均年降水为 2541mm,而塔里木盆地和柴达木盆地的多年平均年降水深则不足 25mm。

(2) 河川径流量 在我国,降水量中约有 56% 通过陆面蒸发返回空中,其余 44% 形成径流。全国河川径流量为 2.8 万亿立方米,折合径流量深为 286mm。其中,地下水排泄量为 6791 亿立方米,约占 28%;冰川融水补给量为 572 亿立方米,约占 3%;从我国境外流入的水量约为 171 亿立方米。

(3) 土壤水通量 根据陆面蒸散发量和地下水排泄量估算,全国土壤水通量约为 4.3 万亿立方米(约占降水总量的 68%),其中约有 16% 通过重力作用补给地下含水层,最后由河道排泄形成河川基流量,其余 3.6 万亿立方米消耗于土壤和植被的蒸散发。

(4) 地下水资源量 地下水资源量是指与降水、地表水有直接补排关系的地下水总补给量。根据水资源开发利用现状,全国多年平均地下水资源量约为 8297 亿立方米,其中有 6773 亿立方米分布于山丘区,1882 亿立方米分布于平原区,山区与平原区的重复交换量约为 358 亿立方米。

(5) 水资源总量 扣除地表水和地下水相互转化的重复量,我国水资源总量为 2.9 万亿立方米;其比河川径流量多的 1009 亿立方米水量是平原、山间河谷与盆地中降水和地表水补给地下水的部分水量,在不开采地下水的情况下,这部分水量以潜水蒸发的形式消耗,通过地下水开采,可以从蒸发中夺取部分水量加以利用。经过计算,平均年潜水蒸发量在北方平原地区为 845 亿立方米,在南方平原地区为 120 亿立方米。

联合国一项研究报告指出“全球现有 12 亿人面临中度到高度缺水的压力,80 个国家水源不足,20 亿人的饮水得不到保证。预计到 2025 年,形势将会进一步恶化,缺水人口将达到 28 亿~33 亿”,世界银行的官员预测在未来 5 年内“水将像石油一样在全世界运转”。我国属于缺水国之列,人均淡水资源仅为世界人均量的 1/4,居世界第 109 位。我国已被列入全世界人均水资源 13 个贫水国家之一而且分布不均,大量淡水资源集中在南方,北方淡水资源只有南方水资源的 1/4。据统计,全国 600 多个城市中有一半以上城市不同程度缺水,沿海城市也不例外,甚至更为严重。目前,我国城市供水以地表水或地下水为主,或者两种水源混合使用,有些城市因地下水过度开采,造成地下水位下降,有的城市形成了几百平方千米的大漏斗,使海水倒灌数十千米。由于工业废水的肆意排放,导致 80% 以上的地表水、地下水被污染。许多专家们警告“20 年后中国将可能找不到可饮用的水资源”。美国民间有影响的智囊机构(世界观察研究所)发表的一份报告中称:“由于中国城市地区和工业地区对水需求量的迅速增大,中国将长期陷入缺水状况”。我国的黄河在近二十年年年断流(其中 1997 年断流 226 天),流经我国一些人口稠密地区的淮河也曾经断流 90 天。卫星遥感整理显示,我国的数百个湖泊正在干涸,一些地方性的河流也在消失。目前全国 600 多座城市中有 300 多座缺水,其中严重缺水的有 108 个。北京市的人均占水量为全世界人均占水量的 1/13,连一些干旱的阿拉伯国家都不如。就生产用水来说,在宁夏的一些地方,每亩水稻一年大约需要浇 2000 多立方米的水,一亩小麦需要 1200 多立方米的水。我国农村普遍的水资源利用率只有 40% 左右。在宁夏,每公斤大米耗水超过 2t。大水漫灌如果真的对庄稼有好处,倒也罢了,但事实上这种做法是引起土地盐碱化的最根本原因。工业用水方面,我国炼钢等生产过程的单位耗水量比国外先进水平高几倍甚至几十倍,水的重复利用率不到发达国家的 1/3。以河北省为例,这个人均水资源比以色列还少的地区,靠大量超采地下水掩盖着极度缺水这一重要事实,全省累计超采地下水 600 亿立方米,其中深层地下水 300 亿立方已无法补充。据初步估计再过 15 年石家庄的地下水就能采完。目前,华北平原已出现了全世界面积最大的地下复合漏斗区,达四五万平方千米。西部的许多地区,因地下水超采严重,大片已成活多年的树木枯死。以色列的自然条件比我国西部的许多地方更为恶劣,以色列不但居家过日子极重节水,而且其享誉世界的节水农业使世界上最缺水国家之一的以色列成为世界农产品出口大国,同时其出口节水农业技术与设备的收入更超过出口农产品的收入。

我国的水存在两大主要问题:一是水资源短缺,二是水污染严重。为缓解严峻的水形势应采

用以下措施：①节水优先战略。这主要体现在控制需求、创建节水型社会上。在国家发展过程中，选择适当的发展项目建立“有多少水办多少事”的理念，杜绝水资源浪费。同时需要采用良好的管理和技术手段提高水资源利用率。积极发展节水工业、农业技术，大力推广应用节水器具，发现并杜绝水的漏泄，包括用水器具及输水管网中的漏泄。②确定“治污为本”理念。这就要求我国的水污染防治战略应尽快实行调整，从末端治理转向源头控制和全过程控制。③提倡“多渠道开源”，这主要是指开发非传统水资源。现在世界各国纷纷转向非传统水资源的开发。非传统水资源包括雨水、再生的污废水、海水、空中水资源。据介绍，目前我国工业用水重复利用率只有60%，城市废水利用几乎没有。而以色列的城市废水利用则达到90%，美国的洛杉矶也是利用处理过的城市废水浇灌绿地。城市废水的再利用不仅减少了污染，还可以缓解水资源紧张的矛盾。另外，随着技术进步，海水淡化成本趋低，并且海水可以直接用作工业冷却用水和冲洗用水。我国香港很多公用卫生场所的冲洗就是采用海水。中国政府水行政主管部门自1988年《中华人民共和国水法》颁布起，就确定每年的7月1~7日为“中国水周”。考虑到世界水日与中国水周的主旨和内容基本相同，从1994年开始，把时间改为每年的3月22~28日，进一步提高全社会关心水、爱惜水、保护水和水忧患意识，促进水资源的开发、利用、保护和管理。

1.1.1.3 我国水资源的分布特点

我国按河流域系将全国划分成十大流域，即黑龙江流域、辽河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域、珠江流域、东南诸河流域、海南诸河流域和内陆河流域。我国的水资源主要是由大气降水补给的河流、湖泊、土壤水和地下水等淡水资源。我国水资源的分布特点可归纳为以下4点。

(1) 河流众多 全国流域面积大于1000km²的河流约有1500条；流域面积在100km²以上的河流有50000多条。在河流两岸形成了我国主要的农业区、运输网和发达的工业区。长江属世界第三大河流，黄河为世界第五大河流（以长度计）。

(2) 径流量大 所谓径流量，是指单位时间内通过河流量某断面的水量。我国的年平均径流总量为2.72×10¹²m³，居世界第六位。人均径流量为2200m³，为世界人均径流量的1/4。

(3) 水能资源丰富 我国大中型水电站约2000座，其中100万千瓦级大型水电站约100座，25万千瓦以上中型水电站约200座。上个世纪90年代对各大江河流域的水能资源进行了复查（包括我国台湾省在内），中国水能资源理论蕴藏量约为6.878亿千瓦，其中技术可开发的装机容量为4.47亿千瓦，经济可开发的装机容量为2.96亿千瓦，均占世界首位。在技术可开发蕴藏量中长江流域占59.2%、雅鲁藏布江流域（流入印度洋）占14.7%、澜沧江流域（流入湄公河，已建有漫湾、小湾、糯扎渡水电站）占7.3%、黄河流域占8.9%、珠江流域占7.4%、怒江流域占3.7%。

(4) 水资源分布特异性强 在我国幅员辽阔的国土上，山地占全国总面积的33%、高原占全国总面积的26%、丘陵占全国总面积的10%、盆地占全国总面积的19%、平原占全国总面积的12%。各地降水量时空分布很不均匀（以斜贯我国大陆的400mm等雨量线划界，在此线西北为干旱和半干旱地区，约占全国国土面积的45%，气候干燥、雨量稀少、农作物需要常年灌溉。在此线以东，降水量由西北到东南逐步增加，但受季风的影响，降水量在时间和空间分布很不均匀）。降水量在地区上的分布见表1-1-1。降水量在时间上分布不均，汛期雨量占全年降水量的50%~70%（7~10月），冬春枯水期雨量占全年降水量的10%~20%（11~3月）。

表 1-1-1 我国大陆降水量在地区上的分布

序号	流域	特点
1	长江流域和长江以南	降水量为全国降水量的80%；人口为全国人口的53%；耕地为全国耕地的36%
2	长江以北地区	降水量为全国降水量的20%；人口为全国人口的47%；耕地为全国耕地的65%
3	黄河、海河、淮河、辽河流域	降水量为全国降水量的10%；人口为全国人口的45%；耕地为全国耕地的43%

总之,我国的水资源状况不容乐观,典型表现是北方资源性缺水、南方水质性缺水、中西部工程性缺水。

1.1.1.4 我国的水资源现状

我国的水资源现状可归结为以下5个方面。

(1) 水旱灾害依然频繁并有加重趋势 我国水资源时空分布不均,与土地资源分布不相匹配,南方水多、土地少,北方水少、土地多。耕地面积的一半以上处于水资源紧缺的干旱、半干旱地区,约1/3的耕地面积位于洪水威胁的大江大河中下游地区,干旱和洪涝引发的自然灾害,是我国损失最为严重的自然灾害。由于气候变化等原因,我国的水旱灾害呈现加重的趋势。20世纪70年代,我国农田受旱面积平均每年约1100万公顷,80~90年代约2000多万公顷,近五年来,平均每年受旱面积上升到3500多万公顷,因旱灾减产粮食约占同期全国平均粮食产量的6%左右。1950~2011年的52年中,我国平均农田因洪涝灾害受灾面积1021万公顷,而1990~2000年的10年间年均受洪涝灾害面积为1580万公顷(因水灾减产粮食约占同期全国平均粮食产量的3%)。

(2) 农业用地减少、农业用水短缺程度加剧 随着城市化和经济社会发展,土地被大量占用,非农业灌溉用水需求急剧增加,农业与工业、农村与城市、生产与生活、生产与生态等诸多用水矛盾进一步加剧。尽管我国采取了最严格的耕地保护措施,但大量的农田和农业灌溉水源被城市和工业占用,耕地资源减少的势头难以逆转,水资源短缺的压力进一步增大。1980~2011年的三十多年间,我国经济发展速度较快,全国总用水量增加了25%,而农业用水总量基本没有增加。全国农业用水量在总用水量中所占比例不断下降,由1980年的88%下降到2004年的66%。

(3) 中国水土流失尚未得到有效控制,生态脆弱 我国众多的山地、丘陵,因季风型暴雨极易造成水土流失。同时,对水土资源不合理的开发利用加剧了水土流失。目前,我国水土流失面积361万平方千米,占国土面积的38%,每年流失的土壤总量达50亿吨。严重的水土流失导致土地退化、生态恶化并造成河道及湖泊的泥沙淤积,加剧了江河下游地区的洪涝灾害。由于干旱和超载过牧导致草原出现退化、沙化现象。

(4) 污染负荷急剧增加,加重了水体污染 2011年全国废污水排放总量达750亿吨,比1980年增加了1倍多。大量的工业和生活污水未经处理直接排入水中,农业生产中化肥和农药大量使用使得部分水体污染严重。水污染不仅加剧了灌溉可用水资源的短缺,成为粮食生产用水的一个重要制约因素,而且直接影响到饮水安全、粮食生产和农作物安全,造成了巨大经济损失。

(5) 农村水利基础设施亟待完善 我国约有55%的耕地还没有灌排设施,农村有3亿多人饮水不安全。全国灌溉面积中有1/3以上是中低产田,已建的灌排工程大多修建于上世纪五六十年代,受当时经济和技术条件的限制,一些灌排工程标准低、配套不全,经过几十年的运行,很多工程存在工程老化严重、效益衰减等问题,灌溉用水效率低,因此,节约用水和提高土地粮食生产率的潜力还很大。

1.1.2 我国陆地水力发电资源利用现状

我国的水资源相对比较匮乏,但水力资源却还是极其丰富的,仅各水系水力资源理论蕴藏量就达676亿千瓦,其中可开发的500kW以上的水电站总装机容量为3.78亿千瓦,年发电量为19233.04亿千瓦·时(居世界首值)。此外,我国大陆海岸线长达18000km以上可开发的潮汐动力资源约2100万千瓦,预计年发电量约580亿千瓦·时。我国各水系水力资源蕴藏量分布见表1-1-2,我国水能蕴藏量及可开发的水能资源(按地区)统计情况见表1-1-3。1949年,全国水电总装机容量仅为 3.6×10^6 kW,年发电量为 1.2×10^9 kW·h。经过60多年的努力,我国的水电事

业得到了蓬勃发展。截至 2011 年底，全国水电总装机容量已达 $1.3912\times 10^9\text{kW}$ ，年发电量 $8.575\times 10^{11}\text{kW}\cdot\text{h}$ 。水力资源开发利用程度由 1949 年新中国成立之初的 0.04% 提高到 2011 年的 35%。新中国成立后的 60 多年，我国先后建成了黄坛口、新安江、狮子滩、官厅、新丰江、三门峡、拓队陈村、恒仁、刘家峡、三峡、二滩等大型水电站，我国 20 世纪 80 年代成功修建了装机容量 $2.715\times 10^7\text{kW}$ 的葛洲坝水电站和装机容量为 $1.28\times 10^7\text{kW}$ 的龙羊峡水电站，标志着我国已具有修建不同形式的千兆瓦级水电站的技术能力，已建成并胜利运转三峡水电站，装机容量达到了 $1.82\times 10^8\text{kW}$ 、单机容量 $7\times 10^6\text{kW}$ ，是当今世界上最大的水利水电工程。从我国水力资源蕴藏分布及开发利用的现状看，我国水力资源具有以下 3 方面特点。

表 1-1-2 我国各水系水力资源概况统计

水系	水能蕴藏量		可开发水能资源		占全国的比例 /%
	蕴藏量/MW	年发电量 /亿千瓦·时	装机容量/MW	年发电量 /亿千瓦·时	
长江	268017.7	23478.4	197243.3	10274.98	39.6
黄河	40548.0	3552.0	28003.9	1169.91	6.0
珠江	33483.7	2933.2	24850.2	1124.78	5.0
海河、滦河	2944.0	257.9	2134.8	51.68	0.4
淮河	1449.6	127.0	660.1	18.94	0.2
东北诸河	15306.0	1340.8	13707.5	439.42	2.3
东南沿海诸河	20667.8	1810.5	13896.8	547.41	3.1
西南国际诸河	96901.5	8488.6	37684.1	2098.68	14.3
雅鲁藏布江及西藏其他河流	159743.3	13993.5	50382.3	2968.58	23.6
北方内陆及新疆诸河	36985.5	3239.9	9969.4	538.66	5.5
全国	676047.1	59221.8	378532.4	19233.04	100.0

表 1-1-3 我国水能蕴藏量及可开发的水能资源（按地区）统计情况

地区	水能蕴藏量			可能开发的水能资源		
	蕴藏量/MW	年发电量 /亿千瓦·时	占全国比重/%	装机容量/MW	年发电量 /亿千瓦·时	占全国比重/%
华北地区	12299.3	1077.4	1.8	6919.8	232.25	1.2
东北地区	12126.6	1062.3	1.8	11994.5	383.91	2.0
华东地区	30048.8	2632.3	4.4	17902.2	687.94	3.6
中南地区	64083.7	5613.8	9.5	67434.9	2973.65	15.5
西南地区	473311.8	41462.1	70.0	232343.3	13050.36	67.8
西北地区	84176.9	7373.9	12.5	41937.7	1904.93	9.9
全国	676047.1	59221.8	100.0	378532.4	19233.04	100.0

（1）水力资源在地区分布上不均衡、与经济发展现状不匹配 我国经济相对落后的西南、西北地区的水力资源约占全国可开发水力资源的 7%，中南地区的水力资源约占全国可开发水力资源的 15.5%，东北、华北和华东三大区的水力资源共占全国可开发水力资源的 6.8%。全国 70% 以上的大型水电站和 80% 以上的特大型水电站集中分布在云、贵、川、藏等西南四省区。从我国经济发展的现状来看，用电负荷主要集中在东部地区，因此，搞好西电东送工程可以解决水力

资源分布与经济发展现状不匹配的矛盾。

(2) 河流主要由降雨形成, 径流年内水量分配很不均匀、丰枯流量相差悬殊。因此, 在开发水力资源时要建造调节性能好的水库, 提高总体水电质量。

(3) 水力资源相对集中在一些高山、大河地区, 不少水电站装机容量超过 $1 \times 10^6 \text{ kW}$ 。这些大型水电站水头高、单机容量大, 带来很多技术难题, 制约了水力资源的开发利用速度。

2001 年底时我国常规水电站的装机容量已超过美国, 居世界第一位 (达到了 $7.7 \times 10^8 \text{ kW}$), 截至 2011 年底, 全国水电装机容量已达 $1.3912 \times 10^9 \text{ kW}$, 占可开发水力资源的 34%。预计 2015 年, 我国全国的水电装机容量将达 $1.5 \times 10^9 \text{ kW}$, 占可开发水力资源的 40%, 到 2020 年全国水电装机容量将达 $2 \times 10^9 \text{ kW}$, 占可开发水力资源的 53%, 从而超过水力资源开发程度较高国家的开发利用率 (50%)。为了实现上述目标, 我国把 12 条水量丰富、水力资源集中的河流作为水电开发的重点 (它们是长江上游水电基地; 大渡河水电基地; 东北水电基地; 黄河上游水电基地; 黄河中游水电基地; 金沙江水电基地; 澜沧江干流水电基地; 闽、浙、赣水电基地; 南盘江、红水河水电基地; 怒江水电基地; 乌江水电基地; 湘西水电基地; 雅砻江水电基地。十三大基地的总装机容量将达 $2.2725 \times 10^8 \text{ kW}$, 年发电量可达 $1.0085 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$)。因此, 随着这十三大水电基地的开发, 我国将逐步优化“西电东送”布局、缓解电力供应紧张局面以适应国民经济日益发展的需要。2050 年, 我国水电装机容量将达 4.3 亿千瓦, 水电资源将基本开发完毕, 水电开发率将达到 90% 以上, 届时, 我国将真正成为水电资源大国、开发规模大国和水电电能生产大国, 其水电技术水平将稳居世界领先地位。

1.2 水力发电的基本原理与特征参数

水力发电是通过水电站枢纽实现的, 在这里, 水电站相当于一个将水能转换为电能的工厂, 水能 (水头和流量) 相当于这个工厂的生产原料, 电能相当于其生产的产品, 水轮机和水电发电机则是其最主要的生产设备。经过一系列工程措施, 有压水流通过水轮发电机组转换为电能, 该过程即被称为水力发电, 其生产电能的过程见图 1-2-1, 所谓水轮发电机组 (机组) 就是水轮机和水电发电机的组合, 见图 1-2-2。水库中的水体具有较大的位能, 当水体通过隧洞、压力水管流经安装在水电站厂房内的水轮机时, 水流带动水轮机转轮旋转, 此时水能转变为旋转机械能, 水轮机转轮带动发电机转子旋转切割磁力线, 在发电机的定子绕组上就产生了感应电势, 一旦发电机和外电路接通, 就可供电, 这样旋转的机械能又转变为电能。水电站就是为实现上述能量的连续转换而修建的水工建筑物及其所安装的水轮发电设备和附属设备的总体。

1.2.1 水电站的输出功率 (或称出力)

见图 1-2-2, 水电站上、下游水位差 H_0 称为水电站静水头, 设水电站某时刻静水头为 H_0 ,

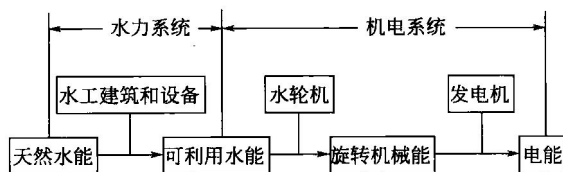


图 1-2-1 水力发电系统的组成

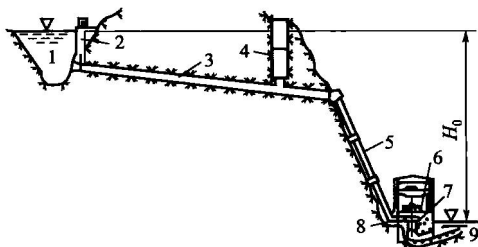


图 1-2-2 水电站发电原理

1—水库；2—进水建筑物；3—隧洞；

4—调压室；5—压力钢管；6—发电机；

7—水轮机；8—蝶阀；9—泄水道

在时间 t 内有体积为 V 的水体经水轮机排入下游。若不考虑进出口水流动能变化和能量损失, 则体积为 V 的水体在时间 t 内向水电站供给的能量等于水体所减少的位能。单位时间内水体向水电站所供给的能量称为水电站理论出力 N_t (电站出力的单位用 kW 表示), 即

$$N_t = \gamma V H_0 / t = \gamma Q H_0 = 9.81 Q H_0 \quad (1-2-1)$$

式中, γ 为水的容重 ($\gamma = 9.81 kN/m^3$); Q 为水轮机流量, m^3/s , $Q = V/t$; H_0 为水电站上、下游水位差, 称为水电站静水头, m , $H_0 = Z_{\text{上}} - Z_{\text{下}}$ 。

水头和流量是构成水能的两个基本要素, 是水电站动力特性的重要表征。实际上, 在由水能到电能的转变过程中, 不可避免地会产生能量损失, 这种损失表现在两个方面, 即: 一方面, 在水流自上游引到下游的过程中存在引水道的水头损失; 另一方面, 在水轮机、发电机和传动设备中也将损失一部分能量。因此, 水电站的实际出力小于由式 (1-2-1) 的理论出力。考虑引水道水头损失和水轮发电机组的效率后水电站的实际出力为

$$N = 9.81 \eta Q (H_0 - \Delta h) = 9.81 \eta Q H \quad (1-2-2)$$

式中, η 为水轮发电机组总效率; H 为水轮机的工作水头, m 。 η 的大小与设备的类型和性能、机组传动方式和机组工作状态等因素有关, 同时也受设备生产和安装工艺质量的影响。在初步计算过程中可近似认为总效率 η 是一个常数。若令 $K = 9.81 \eta$, 则式 (1-2-2) 可改写为

$$N = K Q H \quad (1-2-3)$$

式中, K 为水电站出力系数, 大、中型水电站 K 可取 $8.0 \sim 8.5$, 中、小型水电站 K 可取 $6.5 \sim 8.0$ 。

1.2.2 水电站的发电量

水电站的发电量 E 是指水电站在一定时段内发出的电能总量, $kW \cdot h$, 对较短的时段 (比如日、月等) 来讲, 其发电量 E 可由该时段内电站的平均出力 N' 和该时段的小时数 T 相乘获得, 即

$$E = N' T \quad (1-2-4)$$

对较长的时段 (比如季、年等) 来讲, 可先根据式 (1-2-4) 计算该季或年内各日 (或月) 的发电量, 然后再相加得到总发电量。

1.2.3 水电站动能参数

水电站动能参数是表征水电站动能规模、运行可靠程度和工程效益的指标, 它包括设计保证率和保证出力、装机容量、多年平均发电量和水电站装机年利用小时数等。

(1) 设计保证率和保证出力 水电站设计保证率是指水电站正常的保证程度, 一般用正常发电总时段与计算期总时段比值的百分数来表示, 它是根据系统中水电容量比重、水库调节性能、水电站规模及其在电力系统中的作用等因素而选定的, 初步设计时可参考表 1-2-1 选用。保证出力则是指水电站相应于设计保证率正常发电总时段发电的平均出力。

表 1-2-1 水电站设计保证率的选用标准 (参考值)

电力系统中水电容量的比重/%	25 以下	25~50	50 以上
水电站设计保证率/%	80~90	90~95	95~98

(2) 装机容量 装机容量是指水电站内全部机组额定出力的总和。比如某水电站 6 台机组, 每台机组的额定出力 (也称为单机容量) 为 $1.5 \times 10^5 kW$, 则该电站的装机容量为 $9 \times 10^5 kW$ 。

(3) 多年平均发电量 多年平均发电量是指水电站各年发电量的平均值, 计算时应先将应用的水文系列分为若干时段 (可以是日、旬或月, 视水库的调节性能和设计需要选定), 然后按照天然来水量和用水量进行水库调节计算和水能计算得出逐年的发电量, 最后求其平均值便可得到

多年平均发电量。

(4) 水电站装机年利用小时数 水电站装机年利用小时数相当于全部装机满载运行时的多年平均工作小时数，是反映设备利用程度和检验装机合理性的一个指标。将水电站的多年平均发电量除以装机容量便可得出水电站装机年利用小时数。

1.2.4 水电站的经济指标

水电站的经济指标包括水电站总投资、水电站年运行费用和水电站年效益等。

(1) 水电站总投资 水电站总投资是指水电站在勘测、设计和施工安装过程中所投入资金的总和，它主要包括水工建筑物、水电站建筑物和机电设备的投资。目前习惯用单位千瓦时的投资和单位电能的投资来表示水电站投资的经济性和合理性。单位千瓦时的投资是指 1kW 的装机容量所需要的投资，它可由总投资除以装机容量求得。单位电能的投资是指平均一年中每发 1kW·h 电所需要的投资，它可由总投资除以多年平均发电量求得。

(2) 水电站年运行费用 水电站年运行费用是指水电站在运行过程中每年所必须付出的各种费用的总和，它主要包括建筑物和设备每年所提存的折旧费、大修费和经常支出的生产、行政管理费及工资等。

(3) 水电站年效益 水电站年效益是指水电站每年售电总收入减去年运行费用后所获得的净收益。

1.2.5 水电站的分等指标

为保证水电站工程及下游人民生命财产和经济建设的安全，也为了降低工程造价和加快建设进度，我国《水利水电工程等级划分及洪水标准》中，对以发电为主的水利枢纽工程根据其装机容量的大小将水电站划分为五等（见表 1-2-2）。

表 1-2-2 以发电为主的水利枢纽工程分等指标

工程等别	工程规模	水库总库容 V/亿立方米	水电站装机容量 P/MW
一	大(1)型	$V \geq 10$	$P \geq 1200$
二	大(2)型	$1 \leq V < 10$	$300 \leq P < 1200$
三	中型	$0.10 \leq V < 1.00$	$50 \leq P < 300$
四	小(1)型	$0.01 \leq V < 0.10$	$10 \leq P < 50$
五	小(2)型	$V < 0.01$	$P < 10$

1.3 水电站的类型与设计总体要求

水电站的分类标准和分类方式很多。按水电站的组成建筑物及其特征不同，可将水电站分为坝式、河床式和引水式三种基本类型，见图 1-3-1。坝式水电站常修建于河流中、上游的高山峡谷中。河床式水电站常修建在河流中、下游河道较平缓处，水电站厂房位于河床内和坝共同组成挡水建筑物。引水式水电站一般修建在河流坡度大、水流湍急的山区河段，见图 1-3-2。

1.3.1 小水电站设计的基本要求

我国规定装机容量 50~5MW、机组容量 15MW 以下、出线电压等级不超过 110kV 的水电站为小型水力发电站（本书以下简称电站），装机容量小于 5MW 的电站也称小型水力发电站。水电站设计包括新建、扩建和改建电站设计三方面。电站设计应在河流、河段或地区水利水电规划和地方电力规划的基础上进行，对上、下游有影响的电站进行开发时应征求相邻地区意见。电站设计必须执行国家现行的技术经济政策并根据地方水利、水电、航运、水土保持、环境保护等的要求和电力市场的需要统筹安排、因地制宜，应合理利用水资源。电站设计必须进行调查研究、