

水利工程设计宝典丛书

TUMU GONGCHENG SHEJI BAODIAN CONGSHU

水工结构 设计要点

姜晨光 主编

SHUIGONG
JIEGOU
SHEJI
YAODIAN



化学工业出版社



土木工程设计宝典丛书

TUMU GONGCHENG SHEJI BAODIAN CONGSHU

水工结构 设计要点

姜晨光 主编

SHUIGONG

JIEGOU

SHEJI

YAOPIAN



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,以近几年国内外水工结构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,通俗、系统地阐述了水工结构设计的基本程序与核心要点,包括水利水电枢纽工程设计、水工建筑物的作用及作用效应组合、重力坝设计、拱坝设计、土石坝设计、水闸设计、河岸溢洪道设计、水工隧洞设计、水利枢纽设计等,对水工结构工程的勘察、规划、设计、施工、管理和相关科学研究工作具有一定的指导意义和参考价值。

本书可供工作在水利水电工程建设第一线的工程技术人员、工程管理人员、工人作为工作或学习中的参考,也可成为各级政府涉及水工结构技术的行政主管部门以及水利水电类企业管理人员的工作助手和工具书,还可以作为水利类、土木工程类专业本科生的辅修教材或阅读材料。

图书在版编目(CIP)数据

水工结构设计要点/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 978-7-122-14231-3

I. 水… II. 姜… III. 水工结构-结构设计 IV. TV314

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第090123号

责任编辑:董琳
责任校对:宋玮

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 装:三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{1}{4}$ 字数417千字 2012年9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:48.00元

版权所有 违者必究

前言

Preface

水工结构历史悠久，早在公元前 2900 年，埃及就在尼罗河上建造了一座高 15m、长 240m 的挡水坝。在中国，从春秋时期开始，就在黄河下游沿岸修建堤防，经历代整修加固，形成长约 1500km 的黄河大堤。公元前 256~公元前 251 年兴建并沿用至今的都江堰工程，利用鱼嘴分水，飞沙堰泄洪、排沙，宝瓶口引水，是引水灌溉工程的典范。从春秋时期开始兴建至公元 1293 年全线通航的京杭运河是世界上最长的运河。中世纪及其以前的水利工程建设大都凭借经验，缺乏理论分析。19 世纪中期特别是进入 20 世纪以后，由于生产发展和科学技术进步，水工设计理论不断完善，施工技术水平逐步提高，水工建设取得了较快的进展。20 世纪 80 年代最高的重力坝是瑞士的大迪克桑思坝（高 285m）。20 世纪 60 年代以来，拱坝建设发展较快，目前，世界最高的拱坝是中国云南小湾水电站大坝（最大坝高达 292m），在此之前世界最高的拱坝是前苏联的英古里坝（高度 272m，水库总库容 11 亿立方米，下游设有引水式电站，装机 130 万千瓦），前苏联的罗贡坝是 20 世纪 80 年代世界上最高的土石坝（高达 335m）。岩石力学的发展促使采用隧洞等地下结构的工程日益增多，规模也不断扩大，施工技术和机械化水平不断提高，预应力衬砌隧洞、锚喷支护、在软基上用高压喷射灌浆开挖洞室等都在发展。利用混凝土防渗墙或帷幕灌浆解决坝基渗漏，在深厚覆盖层地基上修建土石坝，在岩溶地区和复杂地基修建高坝均获得了成功。埃及阿斯旺高坝帷幕已深达 170m，中国在岩溶地区成功地建成了高 165m 的乌江渡拱形重力坝其灌浆帷幕已深达 260m。大容量电子计算机和有限元方法的采用又为解决过去用人工难以完成的许多计算课题和数据处理创造了良好条件。水工结构工程从萌芽到今天已发展成为内涵广泛、门类众多、结构复杂的综合性科学体系。2011 年是我国水利发展史上具有里程碑意义的一年，中央出台一号文件、中央水利工作会议对加快水利改革发展做出全面部署，掀开了中华民族治水兴邦史册的新篇章。

水是生命之源、生产之要、生态之基。由于历史等原因，长期以来，我国水利建设发展远远落后于电力、交通等国家基础部门发展，农田水利建设滞后制约农业稳定发展，水资源供需矛盾成为可持续发展主要瓶颈。2011 年，国家安排中央投资 770 亿元用于民生水利占全年中央水利投资的 67.5%。中央一号文件指出，要实行最严格的水资源管理制度，确立水资源开发利用控制、用水效率控制、水功能区限制纳污“三条红线”。

为满足水利水电工程建设者及时更新知识以及普及水工建筑技术的需要，笔者不揣浅陋撰写了本书。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，也是笔者 30 余年土木工程生涯不断追踪科技发展脚步的部分收获，本书的撰写借鉴了当今国内外的最新研究

成果和大量的实际工程资料，吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识，也尽最大可能地包含了当今最新的水电建设成就，希望本书的出版能有助于水利科学技术的普及、发展与提高，对从事水利水电事业的人们有所帮助，为我国水利水电工程建设事业的健康可持续发展做出贡献。

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，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爱岚、吴华杰、邹鹏、程文丽、陈晓江、施其虎、王纪明、丁科学、王同文，江南大学王风芹、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，苏文磬、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，为本书的最终定稿做出了重大的贡献，谨此致谢！

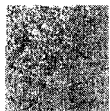
限于水平、学识和时间关系，书中内容难免粗陋，欠妥之处敬请读者多多提出批评与宝贵意见。

姜晨光

2012年5月于江南大学

目录

Contents



第 1 章	水工结构的特点	1
1.1	水资源与水工结构的关系	1
1.2	水利水电工程的特点	2
1.2.1	防洪治河	2
1.2.2	水力发电	3
1.2.3	农田水利	4
1.2.4	给水排水	4
1.2.5	航运	4
1.3	水利枢纽及水工建筑物的特点	5
1.3.1	水利枢纽	5
1.3.2	水工建筑物	5
1.3.3	水利枢纽及水工建筑物的发展趋向	8
第 2 章	水利水电枢纽工程设计要求	10
2.1	河流开发规划要求	10
2.1.1	我国河流开发规划的基本规定	10
2.1.2	我国流域的开发规划特点	10
2.2	环境影响评价要求	11
2.2.1	水利水电工程环境影响评价应注意的问题	11
2.2.2	水利水电工程环境影响评价的基本要求及程序	11
2.2.3	环境评价中地表水水质影响的预测方法	21
2.2.4	环境评价中的生态影响评价方法	26
2.3	工程水文要求	27
2.3.1	水文学的基本问题	27
2.3.2	水利水电工程中水文设计评价方法	30
2.3.3	水利水电工程中水文研究的意义及应注意的问题	32
2.4	工程地质要求	33
2.4.1	工程地质学的基本问题	33
2.4.2	水利水电对工程地质的基本要求	35
2.4.3	GPS 技术概貌	36
2.4.4	GIS 技术概貌	39
2.4.5	现代工程物探技术	42
2.5	建筑材料要求	46
2.6	经济评价分析要求	47
2.6.1	水利水电工程经济评价分析的基本要求	47

2.6.2	水利水电工程经济评价分析中的一些关键问题	47
2.7	设计研究报告的编制要求	48
2.7.1	水利工程设计的阶段划分及工作内容	48
2.7.2	水电站工程设计的阶段划分及工作内容	49
2.7.3	水利水电工程设计研究报告应遵循的相关技术标准	49

第3章 水工建筑物的作用及作用效应组合 51

3.1	水工建筑物的作用及分类	51
3.1.1	水工建筑物作用及分类概况	51
3.1.2	水工建筑物作用的总体规定	52
3.2	水工建筑物的自重作用	53
3.2.1	水工建筑物自重作用的基础理论	53
3.2.2	水工建筑物自重作用的具体规定	54
3.2.3	水工建筑物永久设备自重作用的具体规定	57
3.2.4	挡土建筑物土压力确定的具体规定	57
3.2.5	上埋式埋管土压力确定的具体规定	59
3.2.6	淤沙压力确定的具体规定	60
3.3	水工建筑物的温度作用	61
3.3.1	水工建筑物温度作用的特点及基本计算理论	61
3.3.2	水工建筑物温度作用的具体规定	63
3.3.3	水库坝前水温计算方法	67
3.3.4	拱坝运行期温度作用标准值的确定	68
3.4	水工建筑物的渗流作用	69
3.4.1	水工建筑物渗流的基本理论及分析方法	69
3.4.2	水工建筑物渗流分析中关于扬压力的具体规定	71
3.4.3	改进阻力系数法确定水闸的扬压力	77
3.5	水工建筑物的流体作用	79
3.5.1	水工结构流体作用的基本理论	79
3.5.2	水工结构流体作用中静水压力的具体规定	82
3.5.3	水工结构流体作用中动水压力的具体规定	85
3.5.4	水工结构流体作用中冰压力和冻胀力的具体规定	91
3.5.5	水工结构流体作用中浪压力的具体规定	95
3.5.6	简单管路的水锤压力计算	99
3.5.7	波浪要素和爬高计算	99
3.6	水工建筑物的地震作用	102
3.6.1	水工结构地震作用的基本理论	102
3.6.2	水工结构地震作用的具体规定	104
3.6.3	设计地震加速度及设计反应谱	105
3.6.4	地震作用的水库计算水位	106
3.7	水工建筑物的其它作用	106
3.7.1	地应力及围岩压力	107
3.7.2	风荷载和雪荷载	109
3.7.3	楼面及平台活荷载	112
3.7.4	桥机和门机荷载	113

3.7.5	灌浆压力	116
3.8	3.8 水工建筑物的作用效应组合	117
3.8.1	作用效应组合的基本原则	117
3.8.2	水工结构作用效应组合的具体规定	117
3.8.3	主动土压力系数 K_a 和静止土压力系数 K_0 的计算	119
第4章	水工结构作用效应分析方法	121
4.1	4.1 水工结构作用效应主要分析方法的特点	121
4.1.1	虚拟仿真技术的技术方案	122
4.1.2	虚拟仿真技术的应用方法	123
4.2	4.2 物理模拟分析	125
4.2.1	水工结构物理模拟分析的特点与基本要求	125
4.2.2	拱坝结构整体模型的物理模拟分析	125
4.3	4.3 数学模拟分析	127
4.4	4.4 监测数学模型	127
第5章	重力坝设计	130
5.1	5.1 重力坝的基本特点	130
5.1.1	混凝土重力坝的特点	130
5.1.2	混凝土重力坝设计的主要内容	131
5.1.3	混凝土重力坝的分类	131
5.2	5.2 重力坝的荷载及组合	132
5.2.1	重力坝的荷载计算	132
5.2.2	重力坝的荷载组合	134
5.3	5.3 重力坝的稳定分析要求	134
5.3.1	沿坝基面的抗滑稳定分析	135
5.3.2	深层抗滑稳定分析	136
5.3.3	提高坝体抗滑稳定性的措施	137
5.4	5.4 重力坝的应力分析要求	137
5.4.1	重力坝应力分析的目的与方法	137
5.4.2	用材料力学法计算坝体应力	138
5.4.3	重力坝的应力控制标准	140
5.5	5.5 重力坝的剖面设计要求	140
5.5.1	非溢流重力坝剖面设计	140
5.5.2	溢流重力坝剖面设计	141
5.6	5.6 重力坝构造及坝体材料选择方法	143
5.6.1	重力坝的构造	143
5.6.2	溢流坝坝顶的结构布置	144
5.6.3	重力坝的材料	145
5.7	5.7 重力坝对地基的要求及地基处理方法	146
5.7.1	重力坝对建坝地基的要求	146
5.7.2	坝基的开挖和清理	146
5.7.3	坝基的固结灌浆	146
5.7.4	帷幕灌浆	146
5.7.5	坝基排水	147

5.7.6 断层破碎带和溶洞的处理	147
-------------------------	-----

第6章 拱坝设计

149

6.1 拱坝的特点、适用条件与分类	149
6.1.1 拱坝的特点	149
6.1.2 拱坝的适用条件	150
6.1.3 拱坝的分类	151
6.2 拱坝的基本尺寸和拱冠梁剖面设计	153
6.2.1 拱坝的半中心角的选择	153
6.2.2 拱坝的基本尺寸和拱冠梁剖面确定	154
6.3 拱坝的荷载与应力计算方法	156
6.3.1 拱坝的荷载	156
6.3.2 荷载组合	157
6.3.3 拱坝变位	157
6.3.4 拱坝的应力计算	158
6.4 拱坝的泄洪设计	161

第7章 土石坝设计

163

7.1 土石坝的特点与类型	163
7.1.1 土石坝的特点	163
7.1.2 土石坝的类型	163
7.1.3 土石坝的设计原则及要求	164
7.2 土石坝的剖面尺寸设计要求	165
7.2.1 坝顶高程设计	165
7.2.2 坝顶宽度的确定	165
7.2.3 坝坡确定	165
7.2.4 土石坝的构造设计内容	166
7.2.5 防渗体设计	166
7.2.6 排水设施设计	167
7.2.7 反滤层设计	168
7.3 土坝的渗流分析及渗流控制方法	168
7.3.1 土石坝中的渗流特性	168
7.3.2 土石坝渗流分析的基本方法	169
7.3.3 土石坝渗流计算的水力学法	169
7.3.4 土石坝渗透变形及防止措施	172
7.4 土坝坝坡稳定分析要求	173
7.4.1 土坝坝坡稳定分析的基本理论	173
7.4.2 土坝滑坡的型式	174
7.4.3 圆弧滑裂面法坝体稳定分析	174
7.4.4 折线法稳定分析	176
7.4.5 土料的抗剪强度指标的选取	176
7.4.6 计算工况和安全系数设计	177
7.5 土坝的材料要求	177
7.5.1 土坝坝体各组成部分对材料的基本要求	177
7.5.2 土石料的坝筑标准	178

7.6	土石坝的地基处理方法	178
7.6.1	土石坝砂砾石地基处理	178
7.6.2	细砂和淤泥层地基处理	180
7.6.3	淤泥地基处理	180

第8章 水闸设计 181

8.1	水闸的特点	181
8.1.1	水闸的分类及作用	181
8.1.2	水闸的组成	183
8.2	水闸闸址的选择和闸孔尺寸确定方法	184
8.2.1	水闸闸址选择	184
8.2.2	水闸闸孔尺寸设计	184
8.3	水闸的消能防冲设计	185
8.3.1	水闸下游发生冲刷的原因	185
8.3.2	消能防冲的工程措施	185
8.3.3	防冲加固措施	186
8.4	水闸的防渗设计	186
8.4.1	渗流对水闸的危害及防渗设计内容	186
8.4.2	水闸地下轮廓线布置	187
8.4.3	渗流计算	187
8.5	闸室的布置及构造要求	189
8.5.1	闸底板	189
8.5.2	闸墩	190
8.5.3	胸墙	190
8.5.4	工作桥	190
8.5.5	交通桥	190
8.6	闸室的稳定计算方法	191
8.6.1	荷载计算与组合	191
8.6.2	基底压力计算	192
8.6.3	闸室的抗滑稳定计算	193
8.6.4	提高闸室稳定性的措施	193
8.6.5	闸基的沉降	193
8.6.6	地基处理	194
8.7	闸室的结构计算方法	194
8.7.1	平面闸门闸墩的应力计算	194
8.7.2	整体式底板的结构计算	196
8.7.3	底板内力计算的简化方法	198
8.8	对两岸连接建筑物的基本要求	199
8.8.1	水闸两岸连接建筑物的布置	199
8.8.2	挡土墙的结构计算	199
8.9	闸门与启闭机设计	200
8.9.1	平面闸门的结构组成和结构布置	200
8.9.2	门槽的埋固件	201
8.9.3	启闭机的形式及选择	201

第 9 章	河岸溢洪道设计	203
9.1	泄水建筑物的类型及特点	203
9.2	河岸式溢洪道设计要求	203
9.3	正槽式溢洪道设计要求	204
9.3.1	正槽式溢洪道的位置选择	204
9.3.2	正槽式溢洪道组成与布置	204
9.3.3	水力计算	206
9.3.4	结构计算及构造要求	206
第 10 章	水工隧洞设计	208
10.1	水工隧洞的特点	208
10.2	泄水隧洞的布置、类型和构造要求	209
10.2.1	泄水隧洞布置与选线	209
10.2.2	水工隧洞的类型	209
10.2.3	水工隧洞的总体布置	209
10.3	隧洞衬砌的设计计算	212
10.3.1	水工隧洞衬砌的计算方法	212
10.3.2	水工隧洞衬砌上的荷载	213
10.3.3	圆形有压隧洞的衬砌计算	214
第 11 章	水利枢纽设计	217
11.1	水利枢纽设计的基本内容	217
11.2	水利枢纽的设计阶段划分要求	217
11.3	水利枢纽工程的布置要求	218
11.3.1	水利枢纽工程布置的基本特点	218
11.3.2	我国典型水利枢纽工程概况	218
参考文献		226

第 1 章

水工结构的特点

1.1 水资源与水工结构的关系

水是地球上最丰富的资源，覆盖地球表面约 71% 的面积，但是，地球上的水有约 98% 是既不能供人饮用，也无法灌溉农田的海水，淡水不足 3%。20 世纪以来，随着人口膨胀与工农业生产规模的迅速扩大，全球淡水用量飞快增长，1900~1975 年世界农业量增加了 7 倍、工业用水量增加了 20 倍且近几十年来用水量正以每年 4%~8% 的速度持续增加，淡水供需矛盾日益突出。陆地淡水资源主要来自降雨，由于地球水资源分布在时间和空间上不均衡使得有的国家洪灾不断，有的却干旱无雨。世界上至少有 80 个国家属于干旱半干旱国家，约 40% 的世界人口受到周期性干旱的影响。大气变暖加剧了干旱的程序，而干旱又使越来越多的人离开祖辈繁衍生息的地方而成为“环境难民”。在水资源短缺越发突出的同时，人们又在大规模污染水源并导致水质恶化，水资源污染主要来自人类所有制造排放的废水、废气和废渣。全世界目前每年排放污水约为 4510 亿吨、造成 67000 亿立方米的水体受到污染，约占全球径流量的 17% 以上。联合国调查统计，全球河流稳定流量的 40% 左右已被污染。水污染不仅只存在于淡水，海洋污染的情况同样触目惊心，海洋的浩瀚无边与自动净化能力使人类一直把海洋当作最好最大的天然垃圾坑，倾废是人类利用海洋的主要方式。各国特别是工业国家每年都向海洋倾废大量废物，比如下水污泥、工业废物、疏浚污泥、放射性废物等。在各种倾废中，倾废放射性废物尤为令人关注，因为这相当于在人们四周放置了一个又一个失控的核弹。尽管如此，海上倾废至今仍然为一些国家所热衷。另外，海上石油污染也是海洋污染的凶手，石油污染形成海面油膜影响海水复氧和海洋生物的生存，石油中所含的有毒成分又通过食物链传递给人类，危害不易忽视。1977 年，联合国警告全世界“水不久将成为一项严重的社会危机，石油危机之后的下一个危机是水”。

地球储水量非常丰富，共有 14.5 亿立方千米之多，地球上的水尽管数量巨大但能直接被人们生产和生活利用的却少得可怜。首先，海水又咸又苦，不能饮用，不能浇地，也难以用于工业。其次，地球的淡水资源仅占其总水量的 2.5%，而在这极少的淡水资源中，又有 70% 以上被冻结在南极和北极的冰盖中，加上难以利用的高山冰川和永冻积雪，有 87% 的淡水资源难以利用。人类真正能够利用的淡水资源是江河湖泊和地下水的一部分，约占地球总水量的 0.26%。全球淡水资源不仅短缺而且地区分布也极不平衡，按地区分布讲，巴西、俄罗斯、加拿大、中国、美国、印度尼西亚、印度、哥伦比亚和刚果 9 个国家的淡水资源占了世界淡水资源的 60%。约占世界人口总数 40% 的 80 个国家和地区约 15 亿人口淡水不足，其中 26 个国家约 3 亿人极度缺水。更可怕的是，预计到 2025 年，世界上将会有 30 亿人面临缺水，40 个国家和地区淡水严重不足。

从广义上讲，地球上的水资源是指水圈内的水量总体。由于海水难以直接利用，因而我们所说水资源主要指陆地上的淡水资源。通过水循环，陆地上的淡水得以不断更新、补充，满足人类生产、生活需要。事实上，陆地上的淡水资源总量只占地球上水体总量的 2.53% 且大部分为主要分布在南北两极地区的固体冰川。虽然科学家们正在研究冰川的利用方法，但在目前技术条件下还无法大规模利用。除此之外，地下水的淡水储量也很大但绝大部分是深层地下水，开采利用

的也很少。人类目前比较容易利用的淡水资源主要是河流水、淡水湖泊水以及浅层地下水，这些淡水储量只占全部淡水的 0.3%，占全球总水量的十万分之七，即全球真正有效利用的淡水资源每年约有 9000km³。陆地水体从运动更新的角度看，以河流水最为重要，与人类的关系也最为密切，河流水具有更新快、循环周期短的特点，因此，科学家们又据此把水资源分为静态水资源和动态水资源：静态水资源包括冰川、内陆湖泊、深层地下水，其循环周期长、更新缓慢，一旦污染短期内不易恢复；动态水资源包括河流水、浅层地下水，循环快、更新快、交替周期短，利用后短期即可恢复。所以，人类开发水资源时一定要根据水循环的规律合理、充分地利用水资源，只有促进水资源的更新、人人爱惜水资源才能可持续地利用水资源。

马林·福马肯马克曾提出过一个衡量缺水状况的人均标准，即所谓水关卡。按这一标准，每人每年应有可用淡水 1000m³，低于这个标准现代社会就会受到制约。若用这个标准来衡量则目前许多国家都低于这个标准，比如肯尼亚每人每年只有 600m³，约旦仅有 300m³，埃及仅有 20m³。联合国认为，到 2025 年将有一大批国家年人均水量低 1000m³，其中科威特、利比亚、约旦、沙特、也门等缺水严重的国家人均年用水有可能低于 100m³。也有人估计到 2025 年世界人口将达到 83 亿，人们有可能耗尽所有的储备水。

21 世纪水资源正在变成一种宝贵的稀缺资源，水资源问题已不仅仅是资源问题，更成为关系到国家经济、社会可持续发展和长治久安的重大战略问题。全球每年水资源降落在大陆上的降水量约为 110 万亿立方米，扣除大气蒸发和被植物吸收的水量，世界上江河径流量约为 42.7 万亿立方米，按 2011 年的世界人口计算，每人每年可获得的平均水量约为 6500m³。由于世界人口不断增加，这一平均数已较 1970 年下降了 41%。20 世纪 80 年代后期全球淡水实际利用的数量大约每年 3000 亿立方米，占可利用总量的 1.3%。随着人口的增长及人均收入的增加，人们对水资源的消耗量也将数以亿计地增长。

1.2 水利水电工程的特点

水利水电工程是对自然界的水资源进行有效地控制和合理地调配，以达到兴利除害目的的工程措施。水利水电工程的主要工作任务是防洪治河、水力发电、农田水利、给水排水、航运等。

1.2.1 防洪治河

防洪治河工程包括整修堤防即构建河流防洪体系，兴建大中型水库拦蓄洪水。

(1) 整修堤防，构建河流防洪体系 以长江为例，长江发源于青藏高原唐古拉山，干流流经青海、西藏、四川、云南、湖北、河南、江西、安徽、江苏、上海 10 个省市区，支流延伸甘肃、陕西、贵州、河南、浙江、福建、广西、广东 8 个省市区，全长 6300km。过去，自古就有万里长江险在荆江（荆江：藕池—城陵）之称，其险表现在荆江段河宽 700m 左右、河道迂回曲折、行洪能力仅为 6 万~6.8 万立方米/秒（流量 6 万~6.8 万立方米/秒时城陵矶水位为 34m；1998 年 8 月 20 日城陵矶水位 35.94m）。荆江大堤堤基为中细砂、卵石组成的透水层，堤身高出地面 12~16m。川水、南水遭遇时会受下游洪水顶托导致全流域大洪水。上游有岷江、金沙江、沱江、嘉陵江等支流存在着发生大洪水的可能性，中游有汉江、洞庭湖四水（湘、沅、资、醴）洪水的威胁，下游有鄱阳湖五河、太湖洪水的顶托。丰水年宜昌站流量可达 10 万立方米/秒以上（宜昌站流量频率为 $P=10\%$ 时 $Q=6.68$ 万立方米/秒； $P=5\%$ 时 $Q=7.39$ 万立方米/秒； $P=1\%$ 时 $Q=9.0$ 万立方米/秒），水土流失、河床高程增高、行洪断面减小、洪水泄洪不畅。1952 年建成荆江分洪工程，太平口分洪闸，设计分洪流量 $Q=8000\text{m}^3/\text{s}$ ；有效蓄洪容量 54 亿立方米。1954 年太平口分洪闸实际分洪流量 $Q=6900\text{m}^3/\text{s}$ ，分洪时需临时转移人口 50 万。20 世纪 50 年代建成的杜家台分洪闸和 60 年代建成的丹江口水库可以将汉江的洪水拦截或分流至蓄洪区以减轻长江中游的防洪压力。尽管这样，长江中下游防洪问题仍十分严峻，为了解决长江中下游

防洪问题人们当时主要想了3个办法：即另开河道（其工程量太大，不易实施）；加高大堤（但目前荆江大堤堤身已高出地面12~16m）；修建三峡水利枢纽工程拦蓄洪水以减轻长江中游的防洪压力。这样三峡工程就应运而生。长江三峡水利枢纽工程是开发和治理长江的关键性骨干工程，大坝位于湖北省宜昌市三斗坪，在葛洲坝水利枢纽工程上游约40km，其综合效益主要为防洪、发电、航运。另外，长江干流青海玉树至宜宾段（为金沙江）河道两岸高山峡谷可建高坝大库，拟规划为19个梯级水库，装机容量7793.8MW，具有显著的防洪、拦沙、灌溉、水保等综合效益。长江干流宜宾至宜昌为上游段。重庆以上河段，两岸地势较低、淹没损失较大，只宜修建低水头水利枢纽。重庆以下建设三峡水利枢纽工程，三峡水利枢纽工程为控制性综合利用枢纽工程，能较好地解决长江中下游的防洪问题，并使水能资源得到充分开发，航运条件得到根本改善。再以黄河为例，黄河发源于青海省巴颜喀拉山北麓4500m高程的约古宗列盆地，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东9个省市，在山东省垦利县注入渤海。从河源到内蒙古的河口为上游（3472km），内蒙古的河口到河南的桃花峪为中游（1206km），桃花峪以下为下游（786km）。黄河是著名的多泥沙河流，20世纪以来，黄河下游河道平均每年淤积抬高3~5cm（有的年份达10cm），因此，黄河的治理方案为“上游水土保持、减少泥沙流失，下游防洪减淤”，目前黄河下游临黄大堤全长1400km，能通过22000~11000m³/s的洪水流量。

（2）兴建大中型水库，拦蓄洪水 2011年统计，全国水库总数91008座，其中大型水库456座，中型水库3217座，总库容5412869m³。长江中下游防洪体系中的水库工程包括长江中游的汉江支流上1958年9月1日兴建的丹江口水利枢纽、安康水利枢纽；长江中游的漳河支流上兴建的漳河水利枢纽；长江中游的清江支流上兴建的隔河岩水利枢纽、高坝洲水利枢纽、水布垭水利枢纽；长江中下游已建成的水库包括资水的柘溪水库、沅水的五强溪水库、修水的柘林水库、赣江的万安水库等以及青弋江的陈村水库，这些均可缓解长江中下游的洪水压力。

1.2.2 水力发电

1949年全国水力发电装机1.62万千瓦。截至2011年，随着三峡、龙滩、小湾、公伯峡、水布垭等一大批常规水电站的建成发电以及东部及部分中部地区建设的一批大型抽水蓄能电站，我国的水电站装机达到了1.5亿千瓦，开发率达到了45%，水电站装机容量已超过美国，居世界第一。2011~2049年中国人均装机将达到1kW，全国总装机将达到15亿千瓦，基本完成常规水电的开发，水能开发利用率将达到85%~90%，水电站装机将达到4.3亿千瓦（约占全国总装机的33%），届时中国的水电技术将达到世界领先水平。目前，长江中上游已建成的水电站有三峡水电站和葛洲坝水电站，其中三峡水电站装机容量为1820万千瓦，居世界第一，长江中上游建设有奚落渡水电站（装机容量为1200万千瓦）、向家坝水电站（装机容量为600万千瓦）。

黄河开发按河段进行。第一河段为从龙羊峡至青铜峡的中上游河段，以开发水电资源为主，该河段全长918km、天然落差1324m，目前规划开发25级水电站工程，利用水头1245m，为该河段总落差的94%，总装机容量1605万千瓦。现已开发、完成了的几座水电站工程有1961年建成发电的盐锅峡水电站（装机39.6万千瓦）、1967年建成发电的青铜峡水电站（装机27.2万千瓦）、1974年建成发电的刘家峡水电站（装机116.0万千瓦）、1975年建成发电的八盘峡水电站（装机18.0万千瓦）、1987年建成发电的黄河上游最大的水电站——龙羊峡水电站（装机128万千瓦）、1996年建成发电的大峡水电站（装机32.5万千瓦）、1997年建成发电的李家峡水电站（装机200万千瓦）以及近几年建设的拉西瓦、公伯峡、积石峡等水电站。第二河段（从青铜峡至内蒙古河口镇）以发展灌溉为主。第三河段（从内蒙古河口镇至晋、陕之间的禹门口）修建中低水头枢纽梯级发电。第四河段（从禹门口至河南桃花峪）以防洪为主结合灌溉、发电和航运，小浪底（180万千瓦）为关键性枢纽工程。

世界有名的超级水电站还有巴西—巴拉圭的伊泰普水电站（装机容量为1260万千瓦）。

1.2.3 农田水利

我国现有耕地面积 14.2455 亿亩 (9497 万平方千米), 占国土面积的 9.89%。我国人口多、可耕地少、水旱灾频繁, 所以我国的农业发展史就是与水旱灾害作斗争的历史, 就是农田水利工程的发展史。5000 年以前我国就有大禹治水的传说, 都江堰引水渠是国人的骄傲, 秦汉时期修建了引泾水的白渠和引渭灌溉的成国渠, 隋唐至北宋时期江南一带塘堰灌溉、提水灌溉等农田水利工程得到了长足的发展, 明清两代在洞庭湖区的筑堤围垦形成“湖广熟而天下足”的形势。1949 年全国有灌溉面积 2.4 亿亩, 约占当时耕地面积的 16.3%。截至 2011 年统计, 我国农田水利工程的现状的各项指标如下。

(1) 灌溉面积 灌溉面积 1600 万平方千米, 其中农田灌溉面积 5116 万平方千米, 旱涝保收面积 3718 万平方千米。

(2) 机电排灌 全国机电排灌动力保有量 7020 万千瓦; 机电排灌面积 1240 万平方千米。

(3) 除涝治碱 除涝面积达 2027 万平方千米, 占需要治理的易涝面积 2442 万平方千米的 83%; 改良盐碱地面积 551 万平方千米, 占需要治理的盐碱地面积 765 万平方千米的 72%。

(4) 灌区与水库 全国有万亩以上的灌区 5605 处, 其中 30 万亩以上的灌区 183 处; 全国有水库 91008 座, 其中大型水库 456 座, 中型水库 3217 座。除少数大型水库主要用于防洪、发电外, 绝大部分水库都具有灌溉供水功能。

(5) 水土保持 水土保持成效显著。

1.2.4 给水排水

所谓“给水工程”是指为居民、工矿企业、交通运输等提供生活用水、生产用水。排水工程则是指排除工业及生活废水、江河洪水、雨水等, 为工业、农业生产及人民生活提供良好环境。我国已建的大型引水工程有引滦入津工程、引黄济青工程、万家寨引水工程等。在建的大型引水工程有南水北调工程。引滦入津工程是引滦河(河北省)向天津市和唐山市供水的跨流域的调水工程, 水源工程为位于滦河干流上的大黑汀水库, 向唐山市供水流量 $60\text{m}^3/\text{s}$ 、向天津市供水流量 $80\text{m}^3/\text{s}$ 。南水北调工程分东、中、西三线, 目前东、中 2 线已动工。东线工程从长江干流江都三江营抽水, 供江苏、山东、安徽、河北、天津等省市用水。输水路线为利用京杭大运河及与京杭大运河平行的河道, 途经洪泽湖等, 需设 13 级泵站, 逐级抽水至黄河南岸。克服高差 40m, 总扬程约 73m, 通过过河隧洞可自流至天津。中线工程从湖北丹江口水库引水, 向黄淮海平原西部和北京、天津供水, 多年平均调水量 150 亿立方米。总干渠从丹江口水库至北京玉渊潭全长 1241.2km, 落差 100m。渠道设计流量 $630\text{m}^3/\text{s}$, 过黄河设计流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ 。西线工程从长江上游通天河、雅砻江、大渡河引水到黄河上游, 解决西北地区缺水问题。三个引水源进行自流和提水方案的比较显示工程技术问题均很复杂, 最长的隧洞达 130km, 最大提水高程 330 余米, 最大坝高 385m。目前在重点研究雅砻江调水线方案。

1.2.5 航运

水利水电工程的兴建能改善河流的航运条件。长江自有“黄金水道”之称, 1949 年以来, 航运部门对长江上游宜昌至宜宾的川江航道进行了系统的整治和维护, 航运能力有所提高。在葛洲坝枢纽建成后提高坝前水位 20 余米、回水长度达 110~180km, 淹没急流险滩达 30 多处, 水面坡降由 1/5000 下降至 1/20000, 有效地改善了川江航道的航运条件, 使宜昌至宜宾的通航条件达到 1000 吨级, 运输成本降低 35%~37%。三峡水库建设更进一步改善了 660km 的川江航道, 开通上海重庆航道, 万吨级船队可直达重庆港。由于三峡水库的调节作用, 宜昌下游枯水期流量可从现在的 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 提高到 $5000\text{m}^3/\text{s}$ 以上, 从而还可改善长江中下游枯水季节的航运条件。但近 2 年鄱阳湖有史以来罕见的超低水位及干枯现象又为水利的人工调度问题提出了异常严

峻的挑战,水资源人工改造中存在的许多现实问题也许在很长一个历史时期内仍是一个难解之谜。

1.3 水利枢纽及水工建筑物的特点

1.3.1 水利枢纽

水利枢纽(hydro project或hydro complex)是指为实现一项或多项水利任务,在一个相对集中的场所修建若干不同类型的水工建筑物组合体以控制调节水流的综合工程措施。也是为满足各项水利工程兴利除害目标,在河流或渠道的适宜地段修建的不同类型水工建筑物的综合体。

水利枢纽常以其形成的水库或主体工程(坝或水电站)的名称来命名,比如密云水库、于桥水库、潘家口水库、罗贡坝、新安江水电站、二滩水电站等,也有直接称水利枢纽的,比如葛洲坝水利枢纽。

水利枢纽按其取水形式分为水库枢纽、有坝取水枢纽、无坝取水枢纽等几种。水库枢纽是指由挡水、泄水、取水(电站取水系统、进水闸)等一般性建筑物和电站厂房、通航过木等专门性建筑物组成的综合体系,比如丹江口水利枢纽。有坝取水枢纽是指由挡水、泄水、取水(电站取水系统、进水闸)等一般性(通用性)建筑物和专门性建筑物(比如电站厂房)等组成的综合体系,特点是调蓄作用小。比如韶山灌区渠首工程、葛洲坝水利枢纽等。无坝取水枢纽则主要由取水建筑物(比如进水闸)和排砂闸、导流堤等组成,比如都江堰水利枢纽工程。

水利枢纽按承担任务的不同可分为防洪枢纽、灌溉(或供水)枢纽、水力发电枢纽和航运枢纽等。多数水利枢纽均承担多项任务,因此也被称为综合性水利枢纽。

影响水利枢纽功能的主要因素是位置选定的合理性和布置方案的科学性,水利枢纽工程的位置一般通过河流流域规划或区域水利规划确定,具体位置则须充分考虑地形、地质条件,使各个水工建筑物都能布置在安全可靠的地基上并能满足建筑物的尺度和布置要求以及施工的必需条件。

水利枢纽工程的布置一般通过可行性研究和初步设计确定,枢纽布置必须使各个不同功能的建筑物在位置上各得其所,在运用中相互协调以充分有效地完成所承担的任务。各个水工建筑物单独使用或联合使用时水流条件应良好,上下游的水流和冲淤变化应不影响或少影响枢纽的正常运行,即技术上要安全可靠。在满足基本要求的前提下应力求建筑物布置紧凑并使每个建筑物均能发挥多种作用以减少工程量和工程占地、减小投资,同时还要充分考虑管理运行的要求和施工的便利性并尽量缩短工期。一个大型水利枢纽工程的总体布置是一项复杂的系统工程,需要按系统工程的分析研究方法进行论证确定。

在我国,水利枢纽常按其规模、效益和对经济及社会影响的大小进行分等,并将枢纽中的建筑物按其重要性进行分级。级别高的水工建筑物在抗洪能力、强度及稳定性、建筑材料、运行可靠性等方面的要求都相对要高一些(反之则可相应地要求低一些)以达到安全、经济目的。我国目前是根据水利枢纽的工程规模、效益及在国民经济中的重要性划分水利枢纽等级的,共划分为五等,见表1-1,其中1亩=666.666m²,根据具体情况经过充分论证后允许对它们的级别有所提高或降低。具体可参考《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252—2000)、《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》(DL 5180—2003)。

1.3.2 水工建筑物

水工建筑物(hydraulic structure)是指为开发、利用和保护水资源及减免水害而修建的承受水作用的建筑物,或指为控制调节水流、防治水患和开发利用水资源而兴建的承受水作用的建筑物。水工建筑涉及许多学科领域,除基础学科外,还与水力学、水文学、工程力学、土力学、

表 1-1 水利水电工程等级划分标准

工程等级	水库		防洪		治涝	灌溉	供水	发电
	工程规模	总库容 /10 ⁸ m ³	保护城镇及 工矿企业的 重要性	保护农田 /10 ⁴ 亩	治涝面积 /10 ⁴ 亩	灌溉面积 /10 ⁴ 亩	供水对象 重要性	装机容量 /10 ⁴ kW
I	大(1)型	≥10	特别重要	≥500	≥200	≥150	特别重要	≥120
II	大(2)型	10~1.0	重要	500~100	200~60	150~50	重要	120~30
III	中型	1.0~0.10	中等	100~30	60~15	50~5	中等	30~5
IV	小(1)型	0.10~0.01	一般	30~5	15~3	5~0.5	一般	5~1
V	小(2)型	0.01~0.001	—	<5	<3	<0.5	—	<1

岩石力学、工程结构、工程地质、建筑材料以及水利勘测、水利规划、水利工程施工、水利管理等密切相关，它的设计和研究方法主要有理论分析、试验研究、原型观测和工程类比等。水工建筑物作为控制和调节水流、防治水害、开发利用水资源的建筑物是实现各项水利工程目标的重要组成部分。

水工建筑物历史悠久。早在公元前 2900 年，埃及就在尼罗河上建造了一座高 15m、长 240m 的挡水坝。在中国，从春秋时期就开始在黄河下游沿岸修建堤防，经历代整修加固逐步形成了长约 1500km 的黄河大堤。公元前 256~公元前 251 年兴建并沿用至今的都江堰工程利用鱼嘴分水、飞沙堰泄洪及排沙、宝瓶口引水，成为千古传唱的引水灌溉工程典范。从春秋时期开始兴建至公元 1293 年全线通航的京杭大运河是世界上最长的人工运河。中世纪及其以前的水利工程建设大都凭借经验、缺乏理论分析。19 世纪中期（特别是进入 20 世纪以后）由于生产发展和科学技术的进步，水工设计理论得以不断完善，施工技术水平得以逐步提高，水工建设取得了较快的进展，比如重力坝剖面的底宽与坝高之比在逐渐减小，再比如在适宜条件下通过改变结构形式（如腹拱坝）或采用减压排水系统以减小坝体工程量等，而碾压混凝土筑坝等技术的出现又为简化坝体施工、加快工程进度和降低造价提供了有利条件。20 世纪 80 年代最高的重力坝是瑞士的大蒂克桑斯坝（高 285m）。20 世纪 60 年代以来，拱坝建设发展较快，对坝址地形和地质条件的要求逐渐放宽，在宽高比大于 5 和地质条件复杂的地基上也能修建拱坝，为改善坝肩稳定条件拱圈已从过去的单圆弧拱发展出多圆心拱、椭圆拱、抛物线拱和对数螺旋线拱等多种形式，对不太对称的河谷则常采用周边缝，比如双曲拱坝将坝体与地基分开以改善坝体应力和减少工程量。世界最高的拱坝是苏联的岩谷里坝（最大坝高 272m），水库总库容 11 亿立方米，下游设有引水式电站，装机 130 万千瓦。坝址为石灰岩和白云岩，被裂隙和断层切割，地质条件复杂，地震烈度 8 度。坝型为双曲拱坝，坝面由多心圆拱组成。2010 年 8 月中国云南小湾水电站建成投产后已成为目前世界上最高的拱坝（最大坝高达 292m）。随着土力学理论的发展、施工技术水平的提高以及大功率、高效施工机械的采用和对上坝土料要求的放宽，加之有些国家地质条件较好的坝址已经不多等原因致使高土石坝的修建越来越多，前苏联的罗贡坝高达 335m，是 20 世纪 80 年代世界上最高的土石坝。另外，钢筋混凝土面板堆石坝也得到迅速发展。岩石力学及理论的发展导致采用隧洞等地下结构的工程日益增多、规模不断扩大、施工技术和机械化水平不断提高，预应力衬砌隧洞、锚喷支护、在软基上用高压喷射灌浆开挖洞室等都得到发展，利用混凝土防渗墙或帷幕灌浆解决坝基渗漏、在深厚覆盖层地基上修建土石坝、在岩溶地区和复杂地基修建高坝均获得了成功。埃及阿斯旺高坝的帷幕深 170m，加拿大马尼克三级土坝防渗墙也深达 131m，中国在岩溶地区成功地建成了高 165m 的乌江渡拱形重力坝，灌浆帷幕深达 260m。由于高坝建设增多，大流量泄洪消能设施发展迅速，单宽流量不断加大，有些工程高达 300m³/(s·m) 以上。为解决由于高速水流引起的空蚀问题，除做好体型设计外还采用了掺气减蚀等措施。在高山峡谷地区，为适应泄水建筑物与水电站厂房的布置，厂房顶溢流式、跳越式厂坝联合泄洪以及厂房位于坝内的腹拱式等形式也逐渐付诸实施。大容量电子计算机和有限元方法的采用又为解决过去用人工难以