



普通高等教育“十二五”规划教材

流域治理工程概论

主编 孙开畅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

流域治理工程概论

主编 孙开畅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材以流域水资源的综合开发、充分利用与有效保护为背景,系统地阐述了水利水电工程中流域治理工程的相关基本理论和方法,以及维持流域生态健康与可持续发展的相关内容。全书除绪论外,分为五章,包括:枢纽工程;堤防工程;泥沙工程;水环境与水生态以及水土保持。

根据普通高等教育“十二五”规划教材的要求,全书按照现行国家标准、部及行业标准和现行规范编写。

本教材吸收了国内外流域治理的最新研究成果和实践经验,内容较全面,体系较完整,可作为高等院校水利水电工程、水文与水资源工程本科专业教材,也可供水利水电等行业有关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

流域治理工程概论 / 孙开畅主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-8334-4

I. ①流… II. ①孙… III. ①流域—综合治理—高等学校—教材 IV. ①TV88

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第008846号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 流域治理工程概论
作 者	主编 孙开畅
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 11印张 261千字
版 次	2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	25.00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

前言

本教材是水利水电专业学生修完《水利工程施工》、《水工建筑物》教材后继续扩展知识面的一本教材，全书为了开阔以枢纽知识为主体的水利工程专业学生的视野，选编了在枢纽工程中讲解相对较少的内容，编写了一些较新的内容，具体包括枢纽工程、堤防工程、河道泥沙工程、水环境与水生态、水土保持等五方面内容，涵盖了流域治理工程的各个方面，使水利工程关于整个流域治理方面的理论成为一个体系。

本教材在着重讲述比较成熟的理论和经验的同时，还尽可能多地介绍事物的发展过程、最新成就、当前动态、存在的问题和今后的发展方向，以利于培养学生独立思考和独立分析解决实际问题的能力。

本教材由三峡大学水利与环境学院的教师编著，具体分工如下：

绪论：孙开畅；

第一章 枢纽工程：孙开畅；

第二章 堤防工程：李 昆 孙开畅；

第三章 河道泥沙工程：孙开畅；

第四章 水环境与水生态：晋良海；

第五章 水土保持：吴海林 晋良海。

附录 浑江流域治理工程实例：孙开畅 蔡宜洲

本教材主编为三峡大学孙开畅副教授，主审为三峡大学田斌教授、周宜红教授。全书框架内容由孙开畅副教授提出，田斌教授做出修改并确定最终框架，周宜红教授对主要内容提出调整和补充意见，最后由孙开畅副教授统稿、定稿。在编写过程中，三峡大学水利与环境学院给予了大力支持、武汉大学余明辉教授、卢文波教授提出很多宝贵的修改意见。此外还得到了三峡大学许文年教授、陈和春教授的指点；得到了中水东北勘测设计研究院施工设计处的王福运高级工程师的帮助，三峡大学学生商雄、刘传占参加了部分文字校对和绘图的工作，在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者指正。

编者

2010年10月

目 录

前言

绪论	1
第一章 枢纽工程	6
第一节 中国大坝枢纽概述	6
第二节 高混凝土重力坝枢纽	10
第三节 高拱坝枢纽布置	16
第四节 高土石坝枢纽布置	20
第五节 发展中的坝型与展望	23
第二章 堤防工程	28
第一节 堤前波浪要素的确定	28
第二节 波浪计算基本方法	32
第三节 堤坝防洪标准及堤岸防护工程	35
第四节 堤防设计的原则与方法	42
第五节 堤防工程施工	56
第六节 堤防工程新技术和发展方向	61
第三章 河道泥沙工程	65
第一节 泥沙工程概述	65
第二节 河床演变的一般问题	68
第三节 河道整治规划	73
第四节 浅滩的演变及整治	79
第五节 水库淤积及其防治	87
第六节 坝区以及下游河道泥沙问题及其防治	90
第七节 河流泥沙研究理论与新进展	94
第四章 水环境与水生态	99
第一节 水环境与水生态的基本关系	99
第二节 河道中污染物的迁移转化	105
第三节 河流水质模型	110

第四节	水库水质模型	111
第五节	生物多样性及水利工程长期生态学效应	115
第六节	河流生态修复	118
第七节	河流生态系统健康评价及生态环境影响评价	122
第五章	水土保持	126
第一节	概述	126
第二节	水土流失的影响因素	129
第三节	水土保持规划	140
第四节	水土保持工程措施	145
第五节	我国水土保持发展现状及趋势	147
附录	浑江流域治理工程实例	153
参考文献		166

绪 论

“流域治理工程概论”是一门以水利水电工程可持续发展为核心的、理论与实践联系较为紧密的专业课，以反映当前水电开发已进入社会因素与公众可接受制约阶段的需求，其主要特点是涵盖面广，能够就具体工程问题进行多方面分析，兼顾流域河道治理的各个方面，提出切实有效的解决方法。水利工程满足了人们对水的各种不同需求，但水体的自身需求往往被忽略。水的需求是它希望留在一个完整的、健康的生态系统中。人们为了控制水流，把水从生态系统中分割出来，放到一个在空间由人工设定的、特定的或规则的形状中，再用人工材料如混凝土、金属、塑料等为分割出来的水体制作某种人工环境。在这种人工制作出的环境中，水体脱离了生物群落，自净能力降低，稍有外界干扰因素出现，如污水加入，水体的健康就将是迟早会出现的问题。就目前水利工程建设的情况而言，忽略了如下问题：①河流形态的多样化；②河流湖泊与岸上生态系统的有机联系；③河道断面的硬质化，水体循环与水生生物食物链中断；④人水争地，河流失去浅滩与湿地等。

随着生产的发展和科学技术的进步，社会对水资源的需求渐趋迫切，如何科学地利用与保护水源，合理治理流域，成为发展中国家水利建设与水电开发密切关注的问题之一。基于人与自然和谐的治水理念，水利工程不仅是满足人们对水需要的工程，也是有利于改善和恢复健全生态的系统工程，同时更是有利于环境保护的可持续发展工程，因此流域的综合治理成为水利工程需妥善解决的关键问题。

我国河流众多，其中流域面积 100km^2 以上的河流达 5 万多条，流域面积 1000km^2 以上的有 1500 多条。从枢纽建设、堤防修筑、泥沙工程的治理以及人们对于水生态和环境的充分认识，流域治理越来越成为人们关注的焦点。本课程就上述问题进行系统阐述，从一般规律出发，与最新科技相结合，对于流域治理工程进行概括性、系统性的介绍。

流域的综合治理是指对整个河道进行干流水能、航运及灌溉开发，兼顾水土保持、水生态、环境保护等项目的治理。江河流域的水电开发规划，基本上是按河流或河段梯级开发规划和流域综合开发规划两个层次，分别由国家和各省区有关部门协作组织进行的，前者侧重河道干流或河段以发电为主要开发任务的梯级开发规划，后者同时考虑全流域水土等资源的统一开发利用问题。

流域综合规划治理具体是指：①中上游进行水能开发，即是常说的梯级电站的建设开发；②对下游河道要以防洪治涝、航运以及河道整治等工程为主；③对整个河道进行灌溉、水土保持、水生态以及水环境的综合治理。

一、我国流域的基本状况

我国拥有称为世界屋脊的青藏高原，多数河流发源于此，我国的水能资源居世界第一，按照流域的地域规划，我国有十一大江河流域，分别是长江流域、黄河流域、珠江流

域、淮河流域、东北诸河、海滦河流域、东南沿海诸河、西南国际诸河、雅鲁藏布江及西藏其他河流、北方内陆及新疆诸河，以及台湾省诸河。

近半个世纪以来，为了全面查实和促进水电能源的开发利用，曾对全国 3000 多条河流进行了四次水能资源的普查规划分析。1949 年新中国成立伊始，即着手准备和组织了全国第二大河——黄河流域的开发规划研究，1954 年提出《黄河综合利用规划技术经济报告》。其后，分期分批对十一大江河流域或区域的 112 条重要干支流以及 69 个主要河段，分别进行了水电综合开发规划。根据有关技术经济与社会环境条件的初步比较分析与迭代筛选，推荐了各河流的基本开发方式和梯级电站布置方案以及首期建设工程，为大规模进行水电建设提供了优选方案，为研究地区的能源构成与制订长远规划和安排建设布局，提供了可靠的基础资料。同时，由于我国能源资源分布极不均衡，为优先和充分利用清洁再生水能资源，以满足缺能地区经济发展的用电需要。在河流或河段规划的基础上，设想在水能资源丰富和开发条件好的地区，建设金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江、红水河、澜沧江、黄河上游、黄河中游、湘西、闽浙赣和东北等十三大水电基地。

在水电事业大发展时期，我国在各个流域都兴建了具有代表性的电站，其中 2009 年，在长江流域完成了 21 世纪巨型水利枢纽——三峡工程的建设，同年，在珠江流域完成了世界上最高的碾压混凝土龙滩水利枢纽的建设，目前正在各个流域干流以及主要支流上开工建设的水利枢纽都是规模宏大的枢纽，可见我国水电能源的远期规模开发，将以特大型水电站为主导，以中小电站为辅，按照全面发展的目标对流域进行科学的综合治理。

二、枢纽工程取得的成就和发展方向

进入 20 世纪以后，西方发达国家兴起了水工建设的高潮，水工建筑物的形式和规模得以迅速发展。以坝工建设为例，无论在建坝的高度，还是技术难度上都有了一个飞跃。新中国成立以来，水利工程建设取得了举世瞩目的成就。据不完全统计，截至 2007 年底，我国已修筑堤防 25 万 km（新中国成立初期仅 2 万 km），建造各类船闸 3 万余座及无数的水闸，兴建各类水库 86353 座，总库容约 6924 亿 m^3 ，占全世界总库容的 9.9%，水电装机突破 2 亿 kW，按照我国水电“十二五”规划，到 2020 年我国水电装机容量达到 3.8 亿 kW，将重点开发黄河上游、长江中上游、红水河、乌江、澜沧江等流域的水电基地。西方发达国家水电开发程度普遍在 70% 以上，法国、瑞士更达到 95% 以上。我国水能资源居世界第一，技术可开发容量达 4.93 亿 kW，但目前开发程度只有 34%，我国向国际社会承诺，到 2020 年非化石能源在我国一次能源的比重将提高到 15%，其中至少有 9% 的份额要靠水电来完成，因此，水电在我国能源结构中占有重要的战略地位，在未来相当长的时间里，水利水电工程建设仍需保持稳步的发展。自 20 世纪 80 年代以来，水利工程建设逐步实行国家投资兴建大型骨干、控制性工程和地方兴建中小型工程，一般都能依照有关法规和一定的基本建设程序进行，其中国家投资的大型水利工程建设已与国际接轨。目前，已经成功建设了一批 200m 级的高坝，规划建设或正在建设中的高坝，不少是在 200~300m 之间，有的还超过 300m。其中，不少大坝工程建在高山峡谷地区，泄洪流量大，地震烈度高，地质条件复杂，建设难度大。

混凝土面板堆石坝在我国已得到快速发展，已建成的 170 多座各类面板堆石坝中，坝

高 100m 级的有 50 余座, 已建的水布垭面板堆石坝, 最大坝高 233m, 这一世界上最高的面板堆石坝大坝的建成将使我国在面板堆石坝施工技术上处于国际领先水平, 规划中的古水、日冕面板堆石坝坝高将达到 250~300m。在高碾压混凝土坝方面, 我国 1986 年建成第一座碾压混凝土重力坝——56.8m 高的福建坑口大坝, 建成蓄水的砂牌碾压混凝土拱坝坝高超过 130m, 并经过汶川“5.12”地震的考验; 三峡三期碾压混凝土围堰的施工速度也举世瞩目; 已建的龙滩碾压混凝土重力坝最大坝高 216.5m, 为同类坝型世界之最。在高混凝土拱坝方面, 随着 292m 高的小湾混凝土双曲拱坝建成蓄水以及 305m 高的锦屏混凝土双曲拱坝、278m 高的溪洛渡混凝土双曲拱坝等一批高拱坝工程在强震区相继开工建设, 2009 年底最具代表性的三峡混凝土重力坝的完工, 标志我国在混凝土筑坝技术方面跻身世界领先水平。

三、堤防与护岸工程现状与展望

我国筑堤防洪已有上千年的历史。历代修筑的各级堤防达到 27 万 km。其中长江堤防总长达 3 万 km, 中下游主干堤防 3600km。由于历史原因, 规划布置不尽合理, 堤地质条件复杂, 质量参差不齐。以长江堤防为例, 它们均在冲积平原上沿河而建。由于历代修堤不可能按照现代挡水建筑理论方法进行科学规划、设计和施工, 往往是就近取土, 堤后取土坑形成沟塘, 堤身填土密实度一般达不到标准, 存在生物洞穴、杂物和其他隐患; 堤前水下滩地因冲刷淘深出现崩塌, 危及堤防本身安全。据长江水利委员会多年险情统计, 最为严重和普遍的汛期险情是渗透破坏 (俗称管涌), 占总险情的 60% 以上, 其中尤以堤基渗透破坏的危害为烈。1998 年九江市溃堤出现的四大溃口, 均由堤基“管涌”引起。另外, 在汛期高洪水位下, 堤身渗漏、散浸等险情十分严重。汛期堤身失稳 (俗称脱坡、跌窝等) 是另一种重要的险情, 占险情的 14.4%。1998 年洪水也暴露出我国江河堤防安全性评价及管理水平尚有待发展和提高。堤防管理已成为我国江河防洪防汛工作的薄弱环节之一, 它不仅影响防洪减灾的科学决策, 也影响到流域水利规划的合理制定。因此, 我国十分重视堤防工程的设计、施工和管理。

目前, 堤防工程基本包括以下几个方面。

1. 防渗与稳定的研究

对于土坡的稳定、变形和渗透及其引起的破坏问题国内外的学者已经进行了长期系统的研究。堤防工程中形成的水力学破坏的“管涌”, 包含了流土和管涌等复杂的渗透破坏现象。近年来的现场调查表明: 堤防渗透破坏具有十分复杂的机理和影响因素, 因而除需要在开展理论分析和模型试验外, 还需要深入现场调查, 揭示各种地质条件下渗透破坏形成的内在成因和规律, 对管涌发生距离的风险做出科学的论证, 为堤防加固工程中保护区宽度这一重要指标的确定提供理论依据。

2. 堤防工程的加固技术

(1) 垂直防渗。在规模巨大的堤防加固工程中, 我国工程技术人员开发了一系列堤基垂直防渗和减压的新技术。此外, 土工膜垂直防渗墙也获得了广泛使用。这些垂直防渗措施在一些管涌多发的地区起了保证大堤安全的关键性作用。

(2) 减压井技术。减压井具有造价低, 不影响地下水环境等优点, 是防止管涌的有效措施。

四、河流泥沙工程现状和研究体系的建立

我国河流众多，它们具有两个突出特点：一是水资源时空分布极不均匀；二是挟带大量泥沙，特别是在北方，由于流域水土流失严重，大量的泥沙被挟带到河流中，形成黄河这种世界上独特的多沙河流。泥沙造成河道和水库的淤积抬高，不仅给水利水电工程建设带来了许多问题，也给河道防洪、沿岸工农业发展和人民生活带来了严重的影响。与水资源问题相比，泥沙问题在我国尤为突出，因此泥沙问题的研究具有重要意义。

传统意义上的泥沙学科只包括两方面的内容：泥沙运动力学、河床演变学与治河工程。传统基础理论进行深入研究仍是今后泥沙研究的重点方向。不过，河流泥沙学科也是一门边缘学科，从建立之时起，就不断地与其他学科相互交叉、相互渗透。现阶段泥沙学科与其他学科的交叉日趋活跃，主要体现在下述几个方面。

- (1) 与环境学科相交叉，形成环境泥沙研究的若干领域。
- (2) 与地貌学相交叉，形成动力地貌学的若干领域。
- (3) 与沉积学相交叉，盆地沉积动特性学。
- (4) 与海洋动力学相交叉，研究在海流、潮汐与波浪作用下的泥沙运动规律。

随着对大江大河治理的深入，泥沙学科在我国蓬勃发展，取得了巨大成就，既建立了泥沙学科的理论体系，还应用泥沙运动基本理论解决了我国重大水利工程和河道治理工程的关键技术问题。

五、水土保持状况及水生态与水环境新领域研究方向

水土流失是一个长期受到社会多方关注的全球性环境问题。水土流失和水土保持是世界性的热点研究课题。我国水土保持科学研究在过去的近一个世纪内，取得了较大的进展，并得到了一定的发展，但是，随着我国经济社会的发展，特别是随着西部大开发，加之我国水土资源的日益紧缺，对水土保持科学研究与发展提出了愈来愈高的目标与要求。面对这种态势，有必要对未来水土保持科学的研究思路进行认真的思考，这对推进我国水土保持科学的发展，以及推进我国不同自然地理带侵蚀环境的整治，尤其是黄土高原和长江中上游生态环境的建设，实施生态环境建设有重要的意义与作用。国内外学者通过田间调查、室内外试验研究以及理论分析，探讨了土壤侵蚀内在机制，分析了影响土壤侵蚀过程的主要因子及其关系，建立了以实验资料为基础的经验模型和以土壤侵蚀物理过程为基础的物理模型，为水土保持措施的优化与评价提供了手段。同时在对土壤侵蚀类型进行分区的基础上，形成了以工程措施、耕作措施和生物措施为主体的水土保持措施，并在水土流失治理实践中发挥了巨大作用，取得了巨大的经济、社会和生态环境效益。在现代流域治理中越来越强调水土保持的重要性。

近年来，随着人口与经济的快速增长，我国水生态与水环境问题日益突出，并成为制约我国经济社会可持续发展的一个重要因素。解决水生态与水环境问题，协调好经济—社会—生态与环境的关系，已经成为我国经济社会可持续发展战略最重要的内容。如何保护水与相关生态系统，加强流域生态保护与修复，是新世纪水利面临的严峻挑战。目前，水及其相关生态系统的保护已经成为全球最受关注的科学热点之一。作为新兴的热点研究领域，水及其相关生态系统科学研究，在近几十年来的发展中一个最重要的特点就是与其他学科相互渗透、相互促进。由于水生态系统的多样性和复杂性，对水生态系统的深入研究

需要生态学、环境科学、水力学、泥沙科学等多学科的交叉融合，涌现了大量的突破与创新研究成果。

水利工程是流域水资源开发的重要组成部分，由闸、坝、堤防护坡、河道衬砌等建筑物组成，在流域防洪、发电、航运、抗旱、排涝、供水、渔业等方面发挥了巨大作用。然而水利工程改变了流域原存生态系统的平衡，对流域水生态环境产生了一定的影响，这些影响既有正面效应和也存在负面效应。其正面效应包括洪泄枯蓄、引水治污、水体流动、蓄浑放清等；负面效应主要包括改变了流域水体原有的自然循环规律，占用了下游生态用水，降低了水生态系统的净化能力，破坏了水生生物的生境，造成了水生态环境的恶化。流域水利工程的环境影响和生态效应的判定，应以流域水利工程类型和结构特点的分析为基础。

如何减少水利工程对流域水生态环境的负面影响，增大正面效益是当今流域治理中面临的重大问题之一。应重点研究典型水利工程对流域水生态系统净污能力的影响规律及修复理论，探讨典型水利工程对流域水生生物的胁迫机理以及水生生物的响应机制，分析水利工程在水生态系统中的环境功能，揭示典型水利工程引起自然水流结构变化和水生植被消亡所造成的水体净污能力退化的规律，寻求水利工程与生态工程功能协同技术改善水环境和修复水生态系统。

总之，《流域治理工程概论》教材以枢纽工程、堤防与护岸工程、河道泥沙工程、水环境与水生态、水土保持工程等内容为重点，系统阐述以维持流域健康与可持续发展为核心的流域治理工程的主要内容，体现了当前社会对水电可持续发展的基本要求。各部分内容既相对独立、自成体系，又相互联系、形成系统，具有较好的逻辑性与系统性。

第一章 枢纽工程

修建大坝、利用水库调节天然水量，是人类防止水旱灾害和合理开发水资源的需要，对农业灌溉、城市供水、防洪、开发水电以及改善航运等，都起到了积极的作用。特别是在中国，由于水资源总量少，而且时空、地区分布又十分不均匀，依靠自然来水约 $28124\text{m}^3/\text{a}$ ，无法满足缺水地区或缺水季节的需要，也无法保证社会生活的正常运转和社会的进步。所以，中国自古就重视水利，重视对水资源的控制和调节，因而必须兴修水库，建设足够的水利枢纽。

在综合开发水资源的前提下，防洪、灌溉、供水、航运、养殖和发电都要兼顾，同时为了改善人类的生存环境，天然的和人工的水体是十分重要的。可以设想，任何风景名胜如果没有水，会有很多缺憾；任何地区如果没有电力，会给生活带来不便。因此国家经济建设的发展，大坝建设是不可缺少的。

水利枢纽大坝工程，从材料和结构分析的角度来看，最终总可以划归为混凝土结构和土石结构两大结构类型中的一种。本章就其分析研究中的几个热点问题，作为专题按节予以论述。

第一节 中国大坝枢纽概述

一、水工建筑物的发展历程及状况

早期的蓄水工程，是兴建堤坝提高低洼地带蓄水能力以形成淹没很大的平原水库。这种堤坝，长度很大，形状不规则，宽度、特别是高度尺寸都很小，但这确实是挡水建筑物，即堰坝。现保留最完整最典型的是安徽省寿县的安丰塘，也称芍陂，建于公元前 598～前 591 年间，至今已有 2600 年历史。这类水库在宋代以前的历史上，黄河、淮河、海河以及长江中下游广泛存在，相应的堰坝很多，著名的如汉代的鸿隙陂（今河南省信阳地区淮河与支流汝河之间），六门陂（今河南省南阳地区）等，在古代地理名著《水经注》中有大量的关于平原水库的记载，有的成群存在。

平原水库淹没土地面大，管理和维护很不方便，特别是库区，低水位时，滩涂易被围垦和挤占，从宋代开始，随人口增加，平原水库的消失就是必然的了。利用山丘间的沟谷洼地蓄水，堰坝的工程量将大为减少，维护与使用十分方便，也相对节省工程量。汉代建造的马仁陂（今河南省泌阳县境内）、陈公塘（今江苏省仪征市境内）和唐代扩建的东钱湖（今浙江省鄞县境内）等，都是历史上很有影响的工程。其中，东钱湖至今仍在在使用，马仁陂经改造仍在发挥作用。

中国历史建造最多的坝是引水工程中的壅水坝，它不形成水库，在古文献中称堰、堰或遏等，都是这一类。最早的这类坝智伯渠坝（今山西省太原市境内），建于公元前 453 年。

随后,引漳十二渠(今河北省邯郸地区)、灵渠(今广西壮族自治区安县境内)、戾陵堰(今北京市西郊)等工程相继出现。多年来,这类工程越来越多,广泛运用在农田水利、城市供水和航运水源等方面,其中有许多长时间利用,保留至今的也有一些,灵渠是最为著名的。

中国古代堰坝数量众多,规模不一,最大的工程是在南北朝时建造的浮山堰,明代开始形成的高家堰,今称洪泽湖大堤。有大量的古代文献包括历史著作、地理著作、工程专著、个人文集、地方志,对古代堰坝的建设、使用和效益作了多方面的记述,是发掘和研究古代堰坝发生、发展和效益的珍贵资料依据。

二、20 世纪上半叶坝工技术的发展

进入 20 世纪以来,中国留学欧美学者陆续归来,促进了西方坝工技术的传入,结合中国实际情况和传统技术成就,开展科学研究与规划设计工作。但因资金匮乏,只有少量的工程得到建设,其中最著名的是李仪祉先生在陕西建成的现代水利灌溉体系,为关中农业增产发挥了巨大效益,闻名于世。后来,在日本占领下的东北的松花江、鸭绿江上分别开始建设丰满重力坝和水丰混凝土重力坝。

1917~1924 年为了解决供水,在大连市马栏河上曾修过第一座叫做王家店的砌石坝,坝高 29.09m,库容 505 万 m^3 ,有溢流设施。1920~1926 年在小溪修建了龙王塘砌石坝,坝高 37.9m,长 326.6m,库容 157.8 万 m^3 。1927~1939 年在马栏河上又完成了大西山砌石坝,长 583.3m,砌体总量 12.54 万 m^3 ,库容 1680.3 万 m^3 。这三座坝都属自来水公司,迄今仍在继续使用。1927 年在福建厦门为供水修建的上里砌石坝为中国第一座拱坝,坝高 27.3m,长 113m,库容 105.4 万 m^3 (图 1-1),也属自来水公司,在继续使用中。

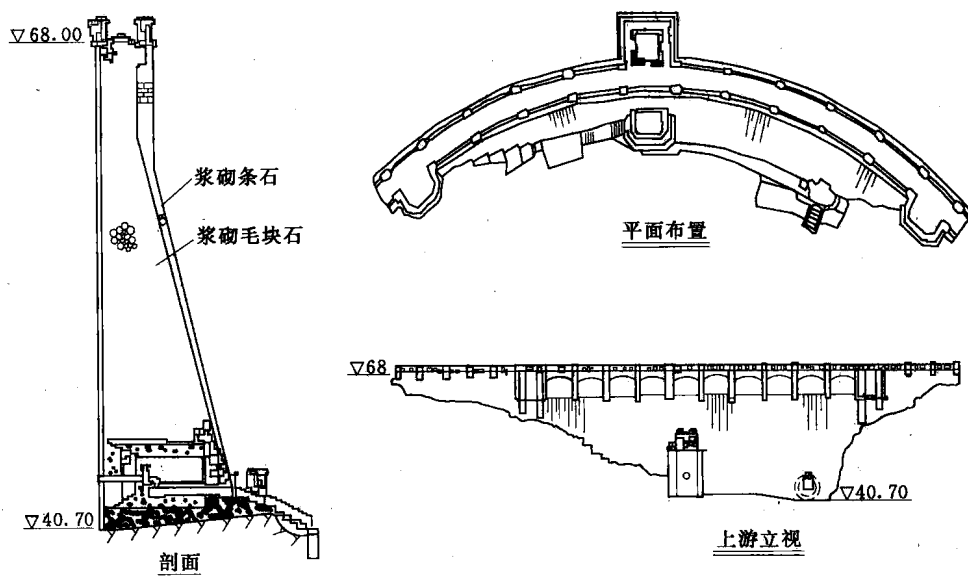


图 1-1 厦门上里砌石拱坝平面、断面

(1) 1912 年,为了发展水电,在云南昆明曾修建了石龙砌石闸坝,坝高仅 2.0m、长 55m,经长 1960m 引水渠发电。1922 年在四川泸州修建了济和水电厂,洞窝拦河坝用条石砌成,高 2.5m。

(2) 1944~1947 年甘肃金塔县讨赖河建成了鸳鸯池土坝,坝高 30.3m,长 220m,库

容 5345 万 m^3 ，目的是灌溉防洪。1958~1964 年陆续加高 7.4m，库容加大到 1.1 亿 m^3 ，又增加了电站。

(3) 1950 年根据国际大坝委员会统计世界大坝登记资料，在坝高 15m 以上大坝 5196 座坝中，中国只有 22 座，可见落后程度。

三、20 世纪下半叶坝工技术进展

随着生产的发展和科学技术的进步，尤其是进入 20 世纪以后，在西方发达国家兴起了水工建设的高潮，水工建筑物的形式和规模得以迅速发展。以坝工建设为例，无论在建坝的高度，还是在技术难度上都有了一个飞跃。如瑞士在 1962 年建成了世界上最高的混凝土重力坝——大狄克逊坝，高度达到 285m；在混凝土拱坝方面，前苏联在 1980 年建成了目前世界上最高的拱坝——英古里双曲拱坝，高 272m；至于土石坝的建设更是发展迅速，前苏联在 1961 年开工建设努列克水电站，1972 年首台机组运行，总装机 270 万 kW，建成的世界第一高坝——努列克心墙土石坝，最大坝高 300m。建坝高度的增长，一方面反映了筑坝设计理论的逐步改善和提高；另一方面和施工技术水平的提高，尤其是施工机械能力的增强关系极为密切。自 20 世纪 80 年代以后，发达国家大型水利水电工程建设的高潮已基本停息，水电能源的开发已接近饱和，如法国和瑞士水力资源的开发程度已近 100%，德国、瑞典、挪威、意大利、日本已分别达到 80%~90%，美国和加拿大已接近 70%~80%，而我国的开发率按电量算至今仍不够 20%，远远落后于发达国家的平均水平，而且也落后于巴西、埃及、印度等发展中国家。

新中国成立以后，坝工技术的发展大体分为 4 个阶段：

第一阶段：1950~1957 年发展初期，从治淮开始，根治海河、开始治黄。比较著名的大坝在北方有永定河的官厅土坝（坝高 46m），淮河北支流有白沙（坝高 47.82m）等土坝，淮河南支流有佛子岭（坝高 74.40m）、梅山连拱坝（高 88.00m），响洪甸重力拱坝（高 87.50m）等。在海河流域各支流上也开始建设。1955 年黄河流域开发规划完成，首批开工的有三门峡重力坝（坝高 106m）。

第二阶段：1958~1966 年进入高速发展时期，全国基本建设全面展开。特别是中小型坝建设，因各地积极投入，数量猛增，大型工程比较著名的有黄河刘家峡重力坝（坝高 147m）、新丰江支墩坝（高 105m）、新安江水电站重力坝（坝高 105m）、云峰重力坝（高 114m）、流溪河拱坝（坝高 78m），以礼河一级水电站的毛家村土坝（坝高 82m）等。

第三阶段：1967~1986 年属停滞期，建坝速度降低，但重视工程质量，特别是后期实行了开放政策，技术上有明显提高。这一阶段兴建的大坝有：龙羊峡（坝高 178m）、乌江渡拱形重力坝（坝高 165m）、白山重力坝（坝高 149m）、湖南镇支墩坝（坝高 129m）、龚嘴重力坝（坝高 86m）、凤滩重力坝（高 113m）、石头河土石坝（高 105m）、碧口土石坝（坝高 102m）等，最大的长江葛洲坝水电站（坝高 48m）也在此时完成，装机容量 271.5 万 kW，此外，还完成了群英砌石重力坝（高 101m）。

第四阶段：1987~1999 年巩固和技术大发展时期。在改革开放经济发展阶段，大坝建设速度显著回升，新型坝出现而且迅速发展。一些达到世界先进水平的工程陆续开工，完成了一大批高坝和大型水电站，包括安康重力坝（高 120m）、紧水滩拱坝（高 102m）、东江拱坝（高 155m）、东风拱坝（高 168m）、隔河岩拱坝（高 151m）、漫湾重力坝（高 132m）、鲁布革土石坝（高 101m）等水电站。举世瞩目的三峡巨型水电站（坝高

181.00m, 装机容量 18200MW), 最高的二滩拱坝 (坝高 240m, 装机容量 3300MW) 和小浪底水利枢纽土石坝 (坝高 154m, 装机容量 1800MW) 等陆续开工。这些工程都将于 20 世纪末或 21 世纪初投产。除这些大型工程外, 还有一大批中小型水电和大型抽水蓄能电站竣工, 不仅改善了电网的构成, 也使一些河流的防洪、灌溉、供水、航运有了明显的进展。更为 21 世纪的更大发展打下了可靠的基础。

根据统计资料表明, 世界各国总平均施工期限为 3.5 年左右, 而我国则约为 2.5 年。当然对大型工程则时间要长得得多, 若资金到位及时, 施工期需要 5~6 年, 特大工程 10 年以上。

从中国地区来看, 1999 年正建的坝以福建 (80 座)、云南 (58 座) 最多, 浙江 (23 座)、广东 (20 座)、湖北 (19 座)、贵州 (20 座) 次之。在北方, 包括东北、华北各省区正建的坝数仅几座, 这是由于水资源较少, 也是因为过去建坝较早的缘故。我国主要河流已建和待建的控制性大水库枢纽及其主要特性见表 1-1。

表 1-1 主要河流已建和待建的控制性大水库枢纽及其主要特性

序号	江河名称	控制性大水库枢纽工程名称	装机容量 (MW)	最大坝高 (m)	控制的年径流总量 (亿 m ³)	总库容 (亿 m ³)	调节库容 (亿 m ³)	库容系数	调节性能
1	长江 (干流及金沙江)	三峡	18200	181	4510	393	221.5	0.05	季调节
		溪洛渡	12000	278	1550	115.7	64.6	0.045	季调节
		向家坝	6000	183	1550	54.1	9.05	0.0062	—
2	大渡河	瀑布沟	3300	186	381	51.7	38.82	0.1	季调节
3	雅砻江	锦屏一级	300	305	372	100	—	—	年调节
		二滩	3300	240	527	58	33.7	0.064	年调节
4	嘉陵江	碧口	300	101.8	90.4	5.21	2.21	0.02	季调节
5	乌江	乌江渡	630	165	158	23	13.5	0.085	季调节
6	牡丹江	莲花	550	71.8	71.9	41.8	27.2	0.38	多年调节
7	第二松花江	白山	1500	149.5	74.03	62.9	35.4	0.42	多年调节
		丰满	1020	90.5	136.7	107.8	53.5	0.39	多年调节
8	汉江	丹江口	900	97	379	208.9	106.5	0.28	年调节
9	清江	水布垭	1500	233	94.7	47.08	25.74	0.272	不完全多年调节
10	沅水及酉水	三板溪	1000	185.5	75.4	40.9	—	—	多年调节
11	黄河 (干流)	龙羊峡	1280	178	205	242.7	195	0.95	完全多年调节
		李家峡	2000	165	209.4	16.48	0.64	—	—
		刘家峡	1225	147	273	57	41	0.15	年调节
		三门峡	250	106	420	96	17.5	0.042	季调节
		小浪底	1800	154	405.5	126.5	51	0.12	不完全年调节
12	澜沧江	小湾	4200	292	382	151.32	98.95	0.26	不完全多年调节
		漫湾	1500	132	388	10.8	2.57	0.066	季调节
		糯扎渡	5000	258	552	217.5	121.95	0.22	不完全多年调节
13	南盘江红水河干流	天生桥一级	1200	178	193.7	90	57.96	0.299	不完全多年调节
		龙滩	5400	216.5	517	272.7	205.3	0.397	多年调节
14	闽江干流	水口	1400	101	545	26	11	0.02	季调节

四、21 世纪中国大坝建设概况

进入 21 世纪至 2010 年,是中国水电站和大坝枢纽继续发展的 10 年,如果按水电装机容量比 2000 年大致再增 1.6~1.7 倍估计,全国水电总容量将达 110000~120000MW。目前建成世界上最大的三峡水利枢纽;完成长江上游支流最高的二滩拱坝枢纽;完成黄河中、下游最大的小浪底水库和最高的土石坝枢纽;在红水河上游完建最高的天生桥一级面板堆石坝枢纽,并将建成一批大型和特大型水电站及其高坝。其中 1000MW 以上的水电站共 20 座,250~1000MW 的水电站共 18 座。

随着改革开放的不断深入,国家综合实力迅速增强,近年来我国坝工建设水平有了极大的提高,很多水工建筑物的规模已跃居世界第一位,一些被世界坝工权威、专家定为“难以克服”的技术难题也已被相继征服。毫无疑问,中国已经成为水利工程建设最具权威技术的国家之一。

第二节 高混凝土重力坝枢纽

据不完全统计,中国已建、在建的装机容量在 15MW 以上水电站中,高、中、低混凝土重力坝达 149 座。目前已建的三峡大坝是高混凝土重力坝的代表,最大坝高 181m,也是装机容量最大的水电站枢纽,首批机组在 2003 年投产,已经于 2009 年底完工。

选择重力坝坝型,主要是中国大多数河流的径流在年际和年内分布不均匀,洪水洪峰量大,需设置泄洪能力大的泄水、排沙和导流设施,并妥善解决其消能防冲问题。混凝土重力坝抵御洪水和地震等自然灾害的能力较强,施工质量较易保证,结构安全度较明确,又易于在坝体内布置泄洪表孔、深孔和导流底孔,以及灵活的布置形式的电站厂房,所以建设者较多地倾向于采用这种坝型。

随着筑坝技术的进步和发展,高拱坝和高土石坝的发展也很快,但是重力坝坝型仍具有竞争优势。在已建的大型电站中,重力坝坝型比重最大,例如,已建的三峡(181m)、江垭(131m)、大朝山(115m)、棉花滩(111m),已建的漫湾、宝珠寺、安康、岩滩、潘家口、水口等大型水电站,均是坝高在 100m 以上的重力坝枢纽。

一、高混凝土重力坝枢纽布置的分类

从已建和在建的 100.00m 以上的重力坝枢纽的布置来看,如以泄洪和电站厂房布置为中心,大致可以分为以下几种形式。

1. 坝后厂房、厂顶(或厂前)挑流泄洪

以 20 世纪 60 年代建成的新安江、80 年代初建成的乌江渡和 90 年代初建成的漫湾水电站等重力坝枢纽为例,它们的共同特点包括以下几点。

(1) 大坝泄洪和电站厂房等建筑物重叠布置,占据整个河床。除新安江为宽缝重力坝外,其余均为实体重力坝。

(2) 采用坝顶表孔从坝后厂房顶泄洪或跨越厂房挑流泄洪,单宽泄量均较大。

(3) 电站厂房的进水口设在表孔的闸墩内。

(4) 施工导流分别采用坝内设导流底孔、河床分期截流或采用导流洞导流。大坝和厂房混凝土均采用大型缆机浇筑。

这种枢纽布置非常紧凑,整体安全性能好,工程量省,建设周期短,经济效益显著。由于受峡谷地形的制约,为减少两岸岩质边坡的开挖,采取挑流入河床消能形式。20世纪60年代以来,这种枢纽布置形式积累了不少成功的经验;在大中型水电站中被广泛运用。

2. 坝后(地下)混合式厂房、岸边溢洪道及深孔泄洪

以20世纪70年代初建成的黄河刘家峡水电站大坝枢纽为例,布置特点包括以下几点。

(1) 在峡谷河床中布置147m高的重力坝;两岸基岩较低,布设混凝土副坝和黏土心墙土石坝。

(2) 在峡谷河床和岸坡陡岩内坝后地下混合式厂房,地下电站和安装厂布设呈窑洞式,以缩短引水道系统长度。厂房内安装有4台225~250MW和1台300MW大型机组,总装机容量1225MW。

(3) 泄洪排沙建筑物分散布置,以改善峡谷的消能冲刷。利用右岸垭口地形布设溢流溢洪道,在左右岸布设坝内底孔和深孔隧道,最大泄洪量为 $9220\text{m}^3/\text{s}$ 。

(4) 由于黄河为多泥沙河流,年均输沙量为8700万t,左右岸底孔和泄洪洞主要用来泄洪排沙,控制库内泥沙淤积面,排除机组进水口前泥沙,并考虑人防安全,对枯水位进行有效控制。

(5) 220kV、330kV开关站和出现建筑物均分别利用左右岸导流隧洞及其施工支洞,布设成地下式。

刘家峡水电站是我国第一座1000MW以上大型水电站,其枢纽特点是布置紧凑。

3. 岸边坝后厂房,河床泄洪

以20世纪80年代末建成的安康、90年代初建成的岩滩、20世纪末建成的万家寨水电站大坝枢纽等为例,它们的共同特点包括以下几点。

(1) 采用实体重力坝,坝体内不同高程布有大直径泄洪孔或进水口。坝后厂房在河床右岸岸边;河床及左侧为泄洪坝段,布设有表、中、底孔,进行泄洪和排沙。

(2) 选用大容量机组以缩短厂房进水口前沿长度,减少两岸边坡的开挖。泄洪量很大时,采取开挖两岸边坡,力求不另设地下厂房的方法。如安康、岩滩电站,靠岸边的机组段,是在岩基上开挖成的,大坝、厂房基础形成“高、低腿”。

(3) 采用坝内导流底孔和明渠导流,明渠成为泄洪坝段的底流消能护坦。

(4) 设有不同形式的排沙(或冲沙)底孔,排泄厂房进水口前的淤沙,控制淤积面。

(5) 有通航要求的岩滩、安康水电站,利用导流明渠专设为下游引航道,设置垂直升船机。

(6) 大坝、厂房的混凝土均采用大型缆机浇筑。

这种类型的枢纽布置紧凑,结构不复杂,施工较方便。设计、施工中广泛地吸取了国内重力坝建设中的经验和教训,特别是在泄洪、排沙建筑物的布置中,均较妥善地选用表、中、底孔相结合的泄洪消能布置形式,较好地对机组进水口前进行“门前清”排沙。20世纪70年代以来,已较广泛地采用这种枢纽布置,尤其是1980~2000年建成的坝高100.00m上下的重力坝枢纽,基本上都是这种布置形式。实践经验说明,其工程量较少,投资造价较低,施工较简便,建设周期短,技术经济指标优越,可以边施工、边蓄水、边