

第二卷

枢 纽 设 计

黄河小浪底

水利枢纽工程

■ 总主编 殷保合



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

第二卷 枢纽设计

■ 总主编 殷保合

黄河小浪底

水利枢纽工程



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为《黄河小浪底水利枢纽工程》的第二卷,由直接参与工程规划、设计的人员撰写。本书分工程设计综述和工程重大问题研究与实践两篇,共16章。在全面综述该工程规划设计的基础上,对工程规划设计中的一些专门问题作了较为详细的介绍,并对工程设计的优化与创新,以及规划设计中的经验与体会作了介绍。

本书内容丰富,实用性强,可供从事土木及水利水电工程规划设计、建设管理的有关人员参考,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

【编者特别声明】 本书的观点、结论和数据,对黄河小浪底水利枢纽工程的有关合同无任何影响。

图书在版编目(CIP)数据

黄河小浪底水利枢纽工程.第2卷,枢纽设计/殷保合主编.—北京:中国水利水电出版社,2004

ISBN 7-5084-2110-8

I.黄... II.殷... III.黄河—水利枢纽—设计—
洛阳市 IV.TV632.613

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第045180号

书 名	黄河小浪底水利枢纽工程 第二卷 枢纽设计
作 者	总主编 殷保合
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 25印张 593千字
版 次	2004年6月第1版 2004年6月第1次印刷
印 数	0001—2200册
定 价	70.00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

《黄河小浪底水利枢纽工程》

编审委员会

- 顾 问 陈 雷
- 名 誉 主 任 张基尧
- 名 誉 副 主 任 陆承吉 朱卫东 袁松龄 曹征齐
- 主 任 殷保合
- 副 主 任 张善臣 曹应超 庄安尘 孙景林 李其友 王咸儒
张光钧 沈凤生 林秀山
- 委 员 (按姓氏笔画排列)
- | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 王江涛 | 王庆明 | 王卓甫 | 文 锋 | 孙国纬 | 刘云杰 |
| 刘经迪 | 李纯太 | 但懋相 | 张利新 | 杜清平 | 陈怡勇 |
| 陈中泉 | 邹远勤 | 吴 喜 | 杨法玉 | 杨建基 | 钟光华 |
| 赵新民 | 袁全义 | 徐运汉 | 高广淳 | 常献立 | 崔学文 |
| 谢才萱 | 董德中 | 葛书田 | 温贤柯 | 潘家铨 | 燕子林 |
| 魏小同 | | | | | |
- 总 主 编 殷保合
- 副 总 主 编 张善臣 曹应超 庄安尘 林秀山 李其友 孙国纬
- 策 划 孙国纬 覃谷昌

编审委员会办公室

- 主 任 王江涛
- 副 主 任 覃谷昌 薛喜文
- 成 员 张东升 王庆明 王和平 李松慈 肖金凤 刘凤翔

《枢纽设计》卷编审人员名单

主 编 林秀山

副 主 编 王庆明

章 名	主要撰稿人
第一章 工程规模与枢纽布置	林秀山
第二章 枢纽主要建筑物设计	林秀山 景来红
第三章 工程机电设计	王庆明
第四章 金属结构设计	金树训 行少阜
第五章 枢纽监控系统设计	王庆明 王 跃
第六章 斜心墙堆石坝动力稳定性分析	沈凤生
第七章 泄水建筑物进口防泥沙淤堵措施	罗义生
第八章 进出口高边坡施工期稳定性研究及加固技术	高广淳
第九章 进水塔群动力稳定性研究	刘存禄
第十章 多级孔板消能泄洪洞的试验研究与设计	林秀山 王咸儒 沈凤生
第十一章 排沙洞无粘结后张预应力混凝土衬砌技术的研究与应用	沈凤生
第十二章 地下厂房围岩稳定分析及支护设计	杨法玉
第十三章 左岸洞群围岩稳定分析及支护设计	潘家铨
第十四章 水库运行方式的研究与实践	李世滢
第十五章 水库渗漏分析及安全评价	高广淳
第十六章 保证汛期发电的综合措施	王庆明

序



黄河小浪底水利枢纽工程位于洛阳以北黄河中游最后一段峡谷的出口处，是黄河干流三门峡以下唯一能够取得较大库容的控制性工程，在黄河治理开发中具有重要的战略地位，其防洪、防凌、减淤、供水、灌溉和发电等社会效益巨大。1991年4月，七届全国人大四次会议批准小浪底工程在“八五”期间动工兴建。1991年9月开始前期工程建设，1994年9月主体工程开工，1997年10月实现截流，2000年1月首台机组并网发电，2001年底主体工程全面完工。

小浪底工程规模宏大，地质情况复杂，水沙条件特殊，技术难题多，运用要求严格，被国内外水利专家公认为极具挑战性的工程。小浪底工程成功地创造、引进并应用了许多新的设计和施工方法。如：解决了垂直防参与水平防渗相结合问题和进水口防淤堵问题；设计建造了世界上最大的孔板消能泄洪洞；设计建造了单薄山体下的地下洞室群；实现了高强度机械化施工，等等。在大胆启用新技术、新工艺的同时，小浪底工程建设者以强烈的爱国主义精神和高度的责任感，拼搏进取，艰苦奋斗，克服了许多施工过程中的困难，面对主体工程开工不久，因塌方、设计变更、施工管理等原因，造成进度严重滞后、截流有可能被推迟一年的严峻形势，小浪底建设者们创造性地应用合同条款，以劳务分包的方式较好地组织了截流关键项目的施工，用13个月时间抢回被延误的工期，顺利实现了按期截流。截流以后，承包商又以地质变化、设计变更、赶工、后继法规影响等理由向业主提出巨额索赔，作为业主方的水利部小浪底水利枢纽建设管理局精心准备，艰苦

谈判,通过协商处理了全部索赔,使工程投资控制在概算范围以内,并最终圆满地完成了小浪底工程的建设任务。

小浪底水利枢纽工程是我国利用外资、全面引进国际承包商进行施工的大型水利项目,建设管理推行了项目法人责任制、招标投标制和建设监理制,工程建设管理的过程也是国内建设管理体制与国际项目管理体制全面接轨的过程。小浪底工程建设在党中央、国务院的正确决策和水利部的正确领导下,在河南、山西两省及有关地方人民政府、全国水利界专家学者和广大移民群众的关心和大力支持下,通过全体工程建设者的共同努力,取得了工期提前、投资节约、质量优良的业绩,被世界银行誉为该行与发展中国家合作项目的典范,在国内外赢得了广泛赞誉。

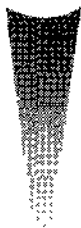
小浪底工程建设者以“建设一流工程、总结一流经验、培养一流人才”为目标,坚持高标准、严要求,既实现了工程质量优良,又培养了一批优秀水利技术和管理人才,成功地走出了一条具有中国小浪底特色的国际工程建设的管理道路,为中国的工程建设管理全面与国际接轨积累了宝贵的经验。在小浪底工程建设收尾阶段,通过对工程建设进行全面总结,形成了六卷本的《黄河小浪底水利枢纽工程》。内容包括:建设管理、枢纽设计、工程技术、施工监理、移民环保和文明创建六个方面,详细记录了工程的建设思想、建设历程、技术手段和经验体会,从而使小浪底工程建设管理经验得到系统和全面的反映,同时也为其他工程建设提供了可资借鉴的第一手资料。

希望小浪底工程的建设者在工程竣工验收后的运行管理过程中,以“三个代表”重要思想为指导,树立和落实科学发展观,积极实践可持续发展的治水思路,深化改革,锐意进取,科学调度,强化管理,让小浪底水利枢纽这一举世瞩目的宏伟工程更好地为国民经济和社会发展服务。



2004年6月

前言



黄河小浪底水利枢纽工程是以防洪、防凌、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电的大型综合利用水利工程。经过 30 余年的规划、设计和研究论证，枢纽主体工程于 1994 年 9 月 12 日开工。经过建设者们 7 年多的努力奋斗，2001 年底枢纽主体工程全部完工。

黄河小浪底水利枢纽工程规划设计中遇到了一系列的技术难题，如进水口防泥沙淤堵、高速含沙水流磨蚀、大坝深覆盖层处理、地下洞室群围岩稳定、进出口岩石开挖高边坡加固处理、水电站汛期发电、左岸单薄山体稳定和水库运行方式等，被国内外专家公认为是世界坝工史上最具挑战性的工程之一。针对工程中的这些技术难题以及关键技术，工程建设单位组织了 400 余项科学研究以及大量的方案比较和论证。

多年来，参与工程规划设计和研究的人员如履薄冰，认真总结、借鉴前人的经验，以求实创新的精神开展工作，攻克了工程规划设计中的许多技术难关，保证了工程规划设计达到先进水平，在建造深 82m 的混凝土防渗墙、将 3 条直径 14.5m 的导流洞改建为永久的多级孔板消能泄洪洞、在地质条件极为复杂的左岸单薄山体内建造规模宏大和数量众多的地下洞室群、在高水头大直径排沙洞设计中采用双圈缠绕的后张无粘结预应力混凝土衬砌结构、在国内大规模采用双层保护的预应力锚索和钢纤维喷混凝土技术等多方面取得了突破，在国内外处于领先地位。

小浪底工程的规划设计、研究和论证，以及工程建设一直

得到中央领导和水利部的关注，并得到国内外许多专家的支持和帮助，融会了他们的心血和智慧。

为总结小浪底工程规划设计方面的经验和教训，丰富水利水电工程建设的宝库，并为水利水电规划设计人员提供参考，我们组织编写了本书。本书分工程设计综述、工程重大问题研究与实践两篇，共 16 章。工程设计综述篇对小浪底工程主要建筑物设计、机电设计和金属结构设计等作了概要性介绍；工程重大问题研究与实践篇则对工程规划设计中的一些亮点和工程中专题研究成果作了介绍。

本书为《黄河小浪底水利枢纽工程》的第二卷，由水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院负责编写。黄河小浪底水利枢纽建设管理局对本书的出版给予了大力支持，河海大学工程管理研究所为本书的统稿做了大量工作，在此一并表示谢意。

限于编审者的水平，书中难免有错漏之处，敬请同行专家批评指正。

编 者

2004 年 5 月

序
前言

第一篇 工程设计综述

第一章 工程规模与枢纽布置.....	3
第一节 工程设计条件.....	3
第二节 工程规模的研究与论证.....	7
第三节 枢纽总体布置.....	9
第二章 枢纽主要建筑物设计	12
第一节 坝址、坝型选择及大坝设计	12
第二节 泄洪排沙方案研究及建筑物设计	29
第三节 引水发电建筑物设计	33
第三章 工程机电设计	36
第一节 水轮机抗磨蚀技术措施	36
第二节 水轮发电机设计	40
第三节 电气主接线及主要电气设备选择	46
第四章 金属结构设计	49
第一节 小浪底工程的闸门设计	49
第二节 小浪底工程的启闭机设计	72
第五章 枢纽监控系统设计	81
第一节 电站计算机监控系统	81
第二节 枢纽闸门控制系统	83
第三节 工程安全监控系统	92

第二篇 工程重大问题研究与实践

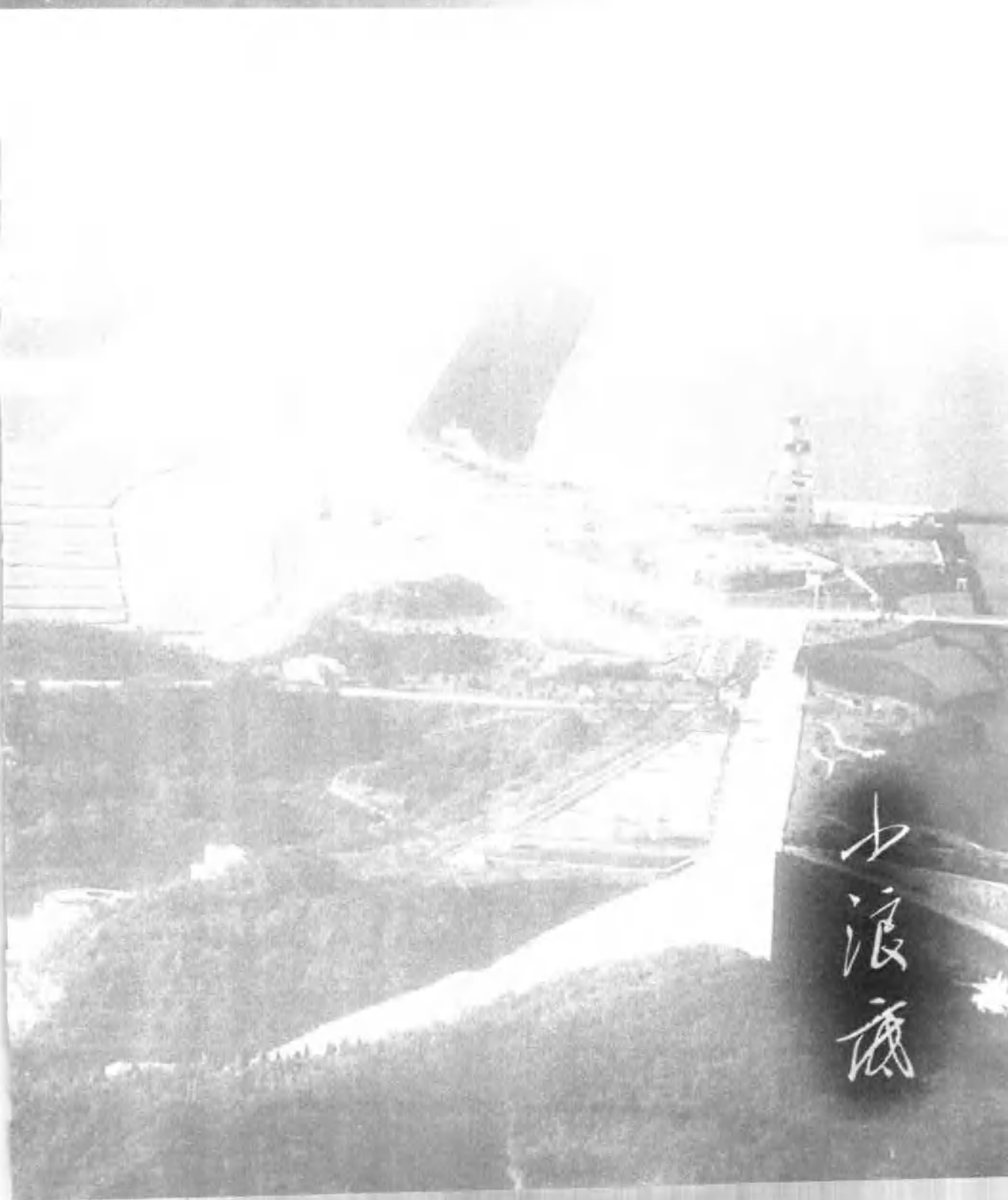
第六章 斜心墙堆石坝动力稳定性分析.....	111
第一节 概述.....	111

第二节	地震动工程参数的确定	112
第三节	河床覆盖层土层划分及工程性质	113
第四节	坝基、坝体材料动力特性试验研究	116
第五节	抗震稳定分析研究	130
第六节	结语	143
第七章	泄水建筑物进口防泥沙淤堵措施	144
第一节	概述	144
第二节	进水口防沙措施	146
第三节	水工模型试验	155
第四节	结语	157
第八章	进出口高边坡施工期稳定性研究及加固技术	158
第一节	工程地质条件	158
第二节	节理岩体的抗剪强度研究	159
第三节	稳定性研究	165
第四节	加固设计	167
第五节	预应力锚索设计	173
第六节	ROTEC 混凝土运输、浇筑设备	175
第七节	结语	177
第九章	进水塔群动力稳定性研究	179
第一节	概况及研究任务	179
第二节	抗震设防标准	184
第三节	进水塔塔型优化和塔群抗震布置	186
第四节	进水塔抗震稳定分析	188
第五节	进水塔振型分解反应谱法三维有限元分析	198
第六节	孔板塔抗震动力模型试验研究	208
第七节	进水塔结构设计	213
第八节	进水塔群动力稳定性结论	215
第十章	多级孔板消能泄洪洞的试验研究与设计	218
第一节	最初提出的多级孔板消能泄洪洞方案及初步试验研究	218
第二节	不设中闸室的多级孔板消能泄洪洞方案的试验研究	221
第三节	设中闸室的四级孔板消能泄洪洞方案的试验研究	222
第四节	碧口排沙洞增建两级孔板消能试验研究	226
第五节	三级孔板消能泄洪洞的试验研究	229
第六节	原型过流试验	243
第七节	结语	245
第十一章	排沙洞无粘结后张预应力混凝土衬砌技术的研究与应用	247

第一节	概述	247
第二节	后张法有粘结预应力混凝土衬砌方案的设计研究	248
第三节	室外 1:1 模型试验与分析研究	252
第四节	无粘结后张法预应力混凝土衬砌结构分析研究	262
第五节	现场试验段测试分析研究	275
第六节	施工技术与结论	276
第十二章	地下厂房围岩稳定分析及支护设计	281
第一节	厂区工程地质条件	281
第二节	厂区洞群布置及主要洞室开挖尺寸	284
第三节	地下洞室喷锚支护设计	288
第四节	设计变更	311
第五节	地下厂房围岩稳定性评价	312
第十三章	左岸洞群围岩稳定分析及支护设计	320
第一节	洞群布置特点及设计难点	320
第二节	工程地质条件简述	323
第三节	洞群围岩稳定分析	325
第四节	洞群围岩喷锚支护	332
第五节	洞群原型观测	335
第六节	孔板消能对洞身结构及洞群围岩的振动效应分析	338
第七节	洞群围岩及其衬砌结构稳定性评价	341
第十四章	水库运行方式的研究与实践	343
第一节	小浪底水库拦沙初期运行方式研究	343
第二节	2000 年水库运行实践	349
第三节	2001 年水库运行实践	351
第四节	2002 年度汛方案	353
第十五章	水库渗漏分析及安全评价	356
第一节	枢纽区水文地质条件	357
第二节	灌浆帷幕设计和施工	361
第三节	水库初期蓄水两岸坝肩出现的渗漏及处理	365
第四节	F ₁ 断层带处理方案及实施	371
第五节	库水位超过 235m 后出现的问题及处理	373
第六节	坝肩基岩漏水对枢纽建筑物安全的影响分析	378
第十六章	保证汛期发电的综合措施	380
第一节	泥沙对黄河干流已建水电站运行的影响和减免泥沙影响的措施	380
第二节	保证小浪底水电站汛期安全发电的措施	382
第三节	水电站过机泥沙及汛期发电的可靠性分析	385



第一篇 工程设计综述



少浪底

工程规模与枢纽布置

小浪底水利枢纽工程位于河南省洛阳市以北约 40km 的黄河干流之上。黄河因含沙量高而闻名于世，她不仅水少沙多，而且水沙在时间上分布不均。黄河下游有地上悬河之称，其特点是，河道上宽下窄，比降上陡下缓，排洪能力上大下小，同时，凌汛也威胁着黄河两岸人民的安全。我国近代治河的先驱者，总结我国的治河经验，引进西方科技，提出了“全面开发，综合利用”的水利规划思想。新中国成立以后，开始了人民治黄的历程。历经 50 多年，治黄取得了举世瞩目的成就。在黄河流域整体规划的基础上，小浪底工程的开发论证经历了近半个世纪漫长的历程。根据黄河的特点及小浪底工程在黄河流域规划中所处位置，对小浪底工程的开发目标进行了多次分析论证，一致认为小浪底水库处在控制黄河下游水沙的关键部位，是黄河干流三门峡以下唯一能取得最大库容的重大控制工程。在治黄中具有重要的战略地位。1986 年 5 月，国家计划委员会明确小浪底水利枢纽的开发目标为“以防洪（包括防凌）、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，蓄清排浑，除害兴利，综合利用”。要求达到的目标是：提高下游防洪标准；基本消除下游凌汛威胁，在一定时段内遏制黄河下游河床淤积的趋势；调节径流提高下游灌溉供水保证率；水电站在系统中担任调峰。小浪底工程为黄河治理开创了新的局面，工程的建成投用在国民经济中将发挥重要的作用。

第一节 工程设计条件

一、水文条件

小浪底工程水利枢纽为国家一等工程，主要建筑物为一级建筑物，按千年一遇洪水设计，万年一遇洪水校核，百年一遇洪水导流。

1. 设计洪水

黄河的洪水系由暴雨形成，洪水发生时间为 6~10 月。黄河的大洪水和特大洪水主要来自黄河中游的河口镇至龙门区间、龙门至三门峡区间和三门峡至花园口区间这三大地区。三门峡以上为主的大洪水（简称上大洪水）系由西南东北向切变线低窝暴雨所形成，

其特点是洪峰高, 洪量大, 含沙量也大, 对黄河下游防洪威胁严重。如三门峡河段 1843 年 $36000\text{m}^3/\text{s}$ 的历史调查特大洪水和 1933 年实测 $20200\text{m}^3/\text{s}$ 的大洪水就属于上大洪水。三门峡至花园口区间为主的暴雨洪水(简称下大洪水)系由南北向切变线加低窝或台风间接影响所形成, 其特点是洪峰来势猛, 峰高, 含沙量小, 预见期短, 对黄河下游防洪威胁也很严重。花园口 1761 年历史调查特大洪水 $32000\text{m}^3/\text{s}$ 和 1958 年实测 $22300\text{m}^3/\text{s}$ 的大洪水就是下大洪水。据实测、调查和历史资料分析, 黄河上大和上下大洪水不发生遭遇。

黄河上于 1919 年建站的三门峡(陕县)水文站观测资料最长, 小浪底工程水文站于 1955 年建站至今也有 40 多年的观测资料。通过水文资料相关, 插补延长了黄河上各主要水文站点的水文系列, 并对历史洪水进行了发掘考证, 确定了历史洪水的量级及重现期, 为黄河水文分析创造了有利条件。按 1919~1969 年水文系列, 运用经验频率分析法, 于 1976 年对黄河下游各主要测站的洪水进行了分析, 其成果如表 1-1。

表 1-1 小浪底工程设计洪水频率分析采用的成果

站名	项目	计算年份	均值	C_v	C_s/C_v	万年	千年	百年
花园口	Q_m	1976	9780	0.54	4	55000	42300	29200
	W_5	1980	26.5	0.49	3.5	125	98.4	71.3
	W_{12}	1976	53.5	0.42	3	201	164	125
	W_{45}	1976	153	0.33	2	417	358	294
小浪底	Q_m	1985				52300	40000	27500
	W_5	1980	22.3	0.51	3.5	111	87.0	62.4
	W_{12}	1980	44.1	0.44	3	172	139	106
	W_{45}	1985	128	0.35	2	366	312	256
三门峡	Q_m	1976	8880	0.56	4	52300	40000	27500
	W_5	1980	21.6	0.50	3.5	104	81.8	59.1
	W_{12}	1976	43.5	0.43	3	168	136	104
	W_{45}	1976	126	0.35	2	360	308	251
三花间	Q_m	1976	5100	0.92	2.5	46700	34600	22700
	W_5	1976	9.80	0.90	2.5	87.0	64.7	42.8
	W_{12}	1976	15.03	0.84	2.5	121.5	91.0	61.0
	W_{45}	1976	31.6	0.56	2.5	165	132	96.5
无控制区	Q_m	1976	2910	0.88	3	27400	20100	12900
	W_5	1976	5.06	1.04	2.5	55.0	40.1	25.4
	W_{12}	1980	7.14	0.96	2.5	69.3	51.0	33.1
三小间	Q_m	1980				28000	20400	12900
	W_5	1980				26.6	19.7	12.8
	W_{12}	1980				33.3	25.1	16.7
小花间	Q_m	1976	4230	0.86	2.5	35400	26500	17600
	W_5	1976	8.65	0.84	2.5	70.0	52.6	35.3
	W_{12}	1976	13.2	0.80	2.5	99.5	75.3	51.2

注 Q_m 为洪峰流量, m^3/s ; W_5 、 W_{12} 、 W_{45} 分别为 5d、12d 和 45d 洪量, 亿 m^3 。

经原水电部水利水电规划设计总院审查,同意上述成果作为小浪底工程初步设计的依据。

1985年,考虑到实测洪水系列有较多的增加,特别是1982年花园口又出现了建站以来仅次于1958年的大洪水,再加上对历史特大洪水的定量及重现期有所修正,故又对黄河下游和小浪底工程的设计洪水做了补充分析(采用系列年为1919~1982年),并提出了“黄河小浪底水利枢纽设计洪水报告(初步设计阶段)”。此次分析成果与1976年原水电部审定成果相比,偏小10%左右。考虑到目前科学技术水平和资料条件的限制,经原水电部复审,认为小浪底工程初设阶段仍可采用1976年的审定成果。1986年5月,中国国际工程咨询公司又对上述报告进行了审查,维持采用1976年审定成果的结论。

考虑到小浪底水库控制流域面积太大,采用水文气象法推求可能最大洪水存在很大的难度,故决定采用万年一遇洪水标准作为小浪底工程可能的最大洪水。

2. 设计径流

黄河花园口以上天然径流深77mm,是一条资源性缺水的河流。黄河径流具有地区分布不均,年内年际变化大,水流含沙量高,水质污染日益严重等特点。

小浪底工程坝址控制黄河流域面积694155km²,占黄河流域总面积的92.3%。实测多年平均径流量(1919~1980年)为423.2亿m³,径流还原后多年平均天然径流量(1919~1980年)为503.76亿m³。确定2000年为设计水平年,预测设计水平年城镇、工业耗水量32.8亿m³,农业需耗水量189.5亿m³,小浪底水库多年平均入库径流量281.46亿m³,扣除南岸灌溉引水量4.23亿m³,设计径流量为277.2m³。

上述预测设计水平年2000年上游工农业耗水量,是按照国务院国办发[1987]第61号文件规定的黄河可供水量分配方案,即全河可供分配水量370亿m³计算的,这个方案也代表了南水北调生效以前的全河可供水水平。根据目前全河用水情况分析,小浪底工程坝址以上用水未达到国务院分水指标,小浪底工程水文站1980~1997年实测平均年径流量313.77亿m³,上述时段包括了20世纪90年代以来的部分枯水年份。

3. 设计入库泥沙量

黄河以高含沙量而著称于世。黄河上游为少沙河流,河口镇实测年平均水量248.2亿m³,沙量1.44亿t,平均含沙量5.8kg/m³。中游流经世界上最大的黄土高原,水土流失严重,是主要产沙区。按三门峡站1919~1960水文年统计,实测平均水量432.2亿m³,沙量16亿t,平均含沙量37.5kg/m³。1933年陕县站实测年最大输沙量39.1亿t,最大一日输沙量7.66亿t。三门峡至小浪底区间年平均水量9亿m³,悬移质输沙量约470万t,含沙量5.2kg/m³,因此三门峡站的水沙可作为小浪底工程的人库水沙。

1919~1960年水文统计是自然条件下的水沙情况,受工程影响少。小浪底入库水沙受气候、地理条件、干支流水库工程和人类活动等因素影响。1960~1968年受三门峡水库蓄水和泄流能力小的影响,三门峡水库共淤积55.65亿t,故小浪底汛期来沙减小,非汛期来沙略有增加,年平均入库沙量10.6亿t。1968~1974年三门峡经两次增建泄流设施,形成相对稳定的槽库容,自然来水偏少,来沙偏多,小浪底平均入库沙量14.45亿t。1974~1986年自然条件黄河上游清水区来水多,河口镇至龙门产沙区无大的暴雨洪水,以及支流工程的拦沙作用,水多沙少,这个时段的年平均入库沙量为10.75亿t。随着上