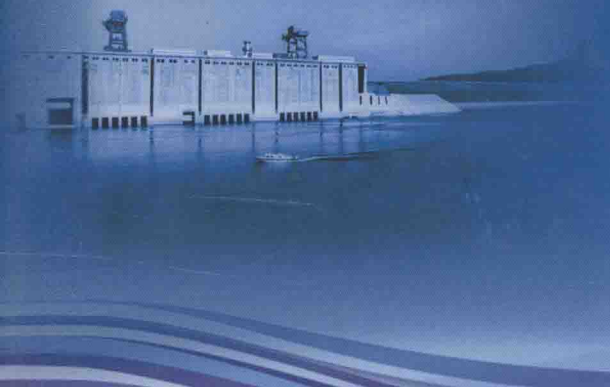


总 主 编 殷保合

副总主编 张善臣



小浪底 水利枢纽运行管理

XIAOLANGDI

SHUILI SHUNIU YUNXING GUANLI
SHUIGONG JIANCEJUAN

水工监测卷



黄河水利出版社

小浪底水利枢纽运行管理

· 水工监测卷 ·

总 主 编 殷保合

副总主编 张善臣

黄 河 水 利 出 版 社

· 郑 州 ·

内 容 简 介

小浪底水利枢纽建设管理局水力发电厂在十余年的枢纽运行管理中,借鉴国内外水电企业先进管理经验,不断探索和创新,逐步形成了与小浪底水利枢纽运行管理相适应的管理体制。本书从水工建筑物的运行、缺陷修补、金属结构设备安装、运行维护和技术更新改造、枢纽安全监测、大坝安全会商专题研究等方面介绍了小浪底水利枢纽水工建筑物的运行维护情况。全书分为3篇11章,内容包括水工建筑物的运行、水工建筑物缺陷修补、金属结构设备设计与安装、运行维护与检修、设备改造与技术更新、枢纽安全监测项目概述、水库初期运行监测成果、设备改造与技术更新、大坝安全会商及专题研究、水工建筑物运行初期安全评价等。

图书在版编目(CIP)数据

小浪底水利枢纽运行管理. 水工监测卷/殷保合主编;
张利新分册主编. —郑州:黄河水利出版社,2012. 10
ISBN 978-7-5509-0365-4

I. ①小… II. ①殷… ②张… III. ①黄河-水利
枢纽-运行-管理-洛阳市 IV. ①TV632.613

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第238008号

组稿编辑:王志宽 电话:0371-66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:22.75

字数:527千字

版次:2012年10月第1版

印数:1—1 000

印次:2012年10月第1次印刷

定价:96.00元

《小浪底水利枢纽运行管理》丛书 编委会

总 主 编:殷保合

副总主编:张善臣

委 员:董德中 陈怡勇 曹应超 张利新

崔学文 刘云杰

《小浪底水利枢纽运行管理·水工监测卷》 编委会

主 编:张利新

副主编:李明安 肖 明 肖 强 魏 皓 王 琳

于永军

编 委:肖 强 魏 皓 王 琳 于永军 屈章彬

陈 琳 张 凡 蔡勤学 唐红海 张 冰

统 稿:魏 皓 王 琳

《小浪底水利枢纽运行管理·水工监测卷》编写人员名单

主要编写人	章节
肖 强	第一章 第十一章 第十章(第一、三、四节)
魏 皓	第二章 第四章(第一、三节) 第六章(第一节)
王 琳	第七章 第八章 第九章(第四、五节)
于永军、张 冰	第四章(第二节) 第五章
屈章彬	第十章(第二、五、六节)
陈 琳、蔡勤学	第三章
张 凡	第九章(第一、二、三节)
唐红海	第六章(第二、三节)

前 言

中央水利工作会议是新中国成立以来第一次以中央名义召开的水利工作会议,是继 2011 年中央 1 号文件后党中央、国务院再次对水利工作作出动员部署的重要会议,必将成为新中国水利事业继往开来的里程碑,开启我国水利事业跨越式发展的新征程。

黄河小浪底水利枢纽工程是国家“八五”重点建设项目,是黄河治理开发的关键控制性工程。在“八五”期间开工兴建,工程总工期 11 年,2001 年底主体工程全部完工,2009 年 4 月 7 日顺利通过国家竣工验收。小浪底水利枢纽工程开创了世界多沙河流上建设高坝大库的成功先例,工程建设水平步入了世界先进行列,为我国大型水利水电工程积累了现代建设管理与国际合作经验,成为世界了解中国水利水电建设与发展的重要窗口。小浪底水利枢纽工程先后荣获国际堆石坝里程碑工程奖、新中国成立 60 周年“百项经典暨精品工程”称号、中国土木工程詹天佑奖、中国水利工程优质(大禹)奖、中国建设工程鲁班奖(国家优质工程)等奖项。

小浪底水利枢纽工程投入运行以来,持续安全稳定运行,发挥了巨大的综合效益;有效缓解了黄河下游洪水威胁,基本解除了黄河下游凌汛威胁,黄河下游连续 12 年安全度汛;成功进行了 13 次调水调沙运用,减少了下游河道泥沙淤积,大大增加了下游主河道的过流能力;实现了黄河连续 12 年不断流,并多次进行跨流域调水运用;黄河生态系统得到修复和改善;充分发挥了清洁能源、可再生能源的优势,为地区经济社会发展作出了积极的贡献。

运行实践证明,小浪底水利枢纽工程对维持黄河健康生命,保障黄河下游防洪及供水安全,保护中下游生态环境,促进黄河下游两岸经济社会可持续发展具有不可替代的战略作用,是重要的民生工程,做好枢纽运行管理工作具有十分重要的意义。多年以来,小浪底水利枢纽建设管理局始终高度重视安全生产工作,牢固树立民生工程理念,坚持水资源统一调度、公益性效益优先、电调服从水调的原则,在枢纽安全管理、调度运用和运行管理等方面,做了很多卓有成效的工作。

本丛书分管理、发电、水工监测三卷,翔实记录了小浪底水利枢纽投入运行以来各个方面的运行管理工作,并对运行管理工作的经验和体会进行了全面系统总结,旨在为进一步提高枢纽运行管理水平提供借鉴。

本书成稿之际,正值全国上下认真贯彻落实中央水利工作会议精神的关键时期。小浪底水利枢纽建设管理局将以科学发展观为指导,深入贯彻落实中央水利工作会议精神,积极实践可持续发展治水思路,按照水利部党组“争当水利行业排头兵”和“六个一流”的要求,抓住机遇、迎接挑战,开拓进取、真抓实干,管好民生工程,谋求多元发展,努力推动水利建设实现跨越式发展,为实现全面建设小康社会宏伟目标提供更为有力的水利保障。

编 者

2011 年 11 月

目 录

前 言

第一篇 水工建筑物

第一章 概 述	(1)
第一节 大 坝	(2)
第二节 泄洪建筑物	(5)
第三节 引水发电建筑物	(10)
第二章 水工建筑物的运行	(13)
第一节 枢纽运用方式	(13)
第二节 枢纽安全管理	(17)
第三节 巡视检查	(24)
第四节 维护检修	(29)
第五节 孔板洞过流试验	(32)
第六节 左岸山体渗流场示踪研究	(39)
第三章 水工建筑物缺陷修补	(45)
第一节 F_1 断层带处理	(45)
第二节 水库蓄水初期两岸及坝基渗漏问题与防渗补强处理	(49)
第三节 主坝维护及修补	(78)
第四节 排沙洞锚具槽渗油处理	(82)
第五节 正常溢洪道混凝土裂缝处理	(92)
第六节 地下厂房顶拱渗水引排处理	(95)

第二篇 金属结构设备

第四章 设计与安装	(96)
第一节 闸门及启闭机设计与安装	(96)
第二节 压力钢管设计制作与安装	(108)
第三节 闸门控制系统	(121)
第五章 运行维护与检修	(125)
第一节 巡视检查	(125)
第二节 运行管理	(131)
第三节 维护管理	(140)
第四节 检修管理	(143)

第六章 设备改造与技术更新	(153)
第一节 充水平压系统改造	(153)
第二节 排沙洞偏心铰弧门转铰顶止水形式改造	(172)
第三节 小浪底水利枢纽偏心铰弧形闸门面板抗磨防腐蚀研究	(177)

第三篇 枢纽安全监测

第七章 监测项目概述	(181)
第一节 枢纽安全监测及自动化系统	(181)
第二节 水文泥沙测验	(191)
第三节 水库地震监测	(194)
第四节 渗漏水水质监测	(198)
第八章 水库初期运行监测成果	(201)
第一节 枢纽安全监测成果	(201)
第二节 库区泥沙测验与坝前漏斗区监测成果	(209)
第三节 库区诱发地震监测成果	(228)
第四节 渗漏水水质监测成果	(239)
第九章 设备改造与技术更新	(256)
第一节 安全监测自动化采集系统改造	(256)
第二节 大坝安全监控系统改造	(262)
第三节 小浪底水利枢纽地震监测系统数字化改造	(270)
第四节 监测仪器鉴定中的电缆检测技术研究	(282)
第五节 原型观测现场数据记录仪技术更新	(286)
第十章 大坝安全会商及专题研究	(292)
第一节 安全监测系统鉴定	(292)
第二节 小浪底水利枢纽排沙洞预应力分析与研究	(299)
第三节 小浪底工程初期运用渗流状况分析与安全性评价	(308)
第四节 大坝变形及坝顶表层裂缝监测分析	(313)
第五节 小浪底水库库区支流泥沙淤积监测分析	(332)
第六节 小浪底坝前泥沙淤积对大坝基础渗流的影响	(335)
第十一章 水工建筑物运行初期安全评价	(338)

第一篇 水工建筑物

第一章 概 述

小浪底水利枢纽位于河南省洛阳市以北 40 km 黄河中游最后一段峡谷的出口,是治理黄河的控制性骨干工程,控制流域面积 69.4 万 km^2 ,占黄河流域面积的 92.3%。正常运用水位为 275 m,最大坝高为 160 m,总库容为 126.5 亿 m^3 ,其中长期有效库容为 51 亿 m^3 ,淤沙库容为 75.5 亿 m^3 ,属国家大(一)型 I 等工程,主要建筑物为 1 级建筑物。枢纽按 100 年一遇洪水导流,1 000 年一遇洪水设计,10 000 年一遇洪水校核。小浪底水库多年平均入库流量为 281.46 亿 m^3 ,扣除库区南岸灌溉引水量 4.23 亿 m^3 ,年设计径流量为 277.23 亿 m^3 。设计多年平均入库沙量为 13.23 亿 t,小浪底实测最大含沙量为 941 kg/m^3 。小浪底水利枢纽的开发目标是“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”。

小浪底水利枢纽设计正常蓄水位为 275 m,设计洪水位为 274 m,校核洪水位为 275 m,水库正常死水位为 230 m,水库非常死水位为 220 m,水库防凌运用限制水位为 267 m。正常蓄水位 275 m 时最大泄流量为 17 327 m^3/s ,正常死水位 230 m 时泄流量为 8 048 m^3/s ,非常死水位 220 m 时泄流量为 7 056 m^3/s 。

小浪底水利枢纽在黄河治理中具有重要的战略地位,水沙条件特殊,地质条件复杂,水库运用方式严格。枢纽主要建筑物由拦河大坝、泄洪排沙建筑物和引水发电系统三大部分组成,其总体布置特点鲜明:斜心墙堆石坝坐落在深厚覆盖层基础上;所有泄洪、发电及引水建筑物均集中布置在相对比较单薄的左岸山体上;采用以具有深式进水口的隧洞群泄洪为主的方案,9 条泄洪洞总泄流量为 13 563 m^3/s ,占总泄流量的 78%,其中 3 条泄洪洞为由导流洞改建的多级孔板消能泄洪洞;所有泄洪、发电机引水建筑物的 16 个进口错落有致地集中布置在 10 座进水塔内,9 条泄洪洞和 1 座陡槽式溢洪道采用出口集中消能的方式;采用以地下厂房为核心的引水发电系统。

小浪底水利枢纽的投入运用,黄河下游的防洪标准从约 60 年一遇提高到了千年一遇;基本解除了黄河下游的凌汛威胁;利用水库 75.5 亿 m^3 的拦沙库容,在 20~25 年内可使下游河床基本不淤积抬升;平均每年可增加 17.9 亿 m^3 的调节水量,提高黄河下游的用水保证率;小浪底水电站装机 1 800 MW,设计多年平均年发电量前 10 年为 45.99 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,10 年后为 58.51 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,在基本以火电为主的河南电网中担任调峰,是理想的调峰电站。

第一节 大 坝

小浪底水利枢纽大坝由坝体、混凝土防渗墙、基础固结灌浆、基础帷幕灌浆、右坝肩基础排水幕、上游围堰基础防渗系统、心墙与基础的连接、其他工程和原型观测仪器等组成。

一、坝体

大坝坝体为土质斜心墙堆石坝,最大坝高为 160 m,坝顶高程为 281 m,河床部位考虑预留 2 m 沉降,其竣工高程为 283 m;坝顶长度为 1 666.29 m,坝顶宽为 15 m,坝底最大宽度为 870 余 m。上游坝坡在 185 m 以下为 1:3.5,185~274.33 m 为 1:2.6,274.33 m 以上为 1:2.0;下游坝坡在 269 m 以下为 1:1.75,269 m 以上为 1:1.5,在 250 m 和 220 m 高程分别设有宽为 6.0 m 和 14.0 m 的马道。下游坝址 155 m 高程设有宽 80 m 的压戗平台。心墙上部约 1/5 为正心墙,以下为斜心墙,上游面坡度为 1:1.2,下游面坡度为 0.5:1(倒坡),顶宽为 7.5 m,底宽最大为 101.9 m。上游围堰置于大坝上游坝踵,是大坝的一个组成部分,如图 1-1 所示。

二、混凝土防渗墙

心墙基础混凝土防渗墙由地下槽孔混凝土防渗墙和地上常态混凝土加高墙两部分组成。

地下槽孔混凝土防渗墙总长为 407.4 m,宽为 1.2 m,分为两期施工。一期为右岸滩地部分,长为 256.4 m,最大深度为 81.9 m,形成阻水面积 10 540.63 m²,是工程准备期由国内承包商在 1994 年前完成的。二期为左半河床部分,长为 151.0 m,最大深度为 70.3 m,形成阻水面积 5 085.7 m²。在地表附近 125~130 m 高程设有钢筋笼,在泥浆固壁下回填 C5 混凝土,强度 $R_{28} = 35$ MPa,弹模 $\leq 30\,000$ MPa,坍落度为 18~22 cm,抗渗强度等级为 S_8 (1×10^{-7} cm/s),骨料最大粒径为 40 mm。二期工程槽孔混凝土墙工程量为 6 700 m²。

常态混凝土加高墙从槽孔墙顶开始,总长为 466.52 m,分两期施工。一期右岸滩地部分槽孔墙顶有两个高程,左半约 30% 长段为 126 m 高程,右段高程为 138 m。二期河床部分槽孔墙顶高程均为 130 m。加高墙顶高程除左端局部升高到 152 m 高程,右端头为一个坡下降到底外,余均为 144 m 高程。河床部分墙高 14.0 m,插入心墙 12.0 m;右岸滩地部分墙高 18.0 m 及 6.0 m。混凝土为 C6 级,强度 $R_{28} = 35$ MPa,抗渗强度等级为 S_8 ,最大骨料粒径 40 mm。C6 级混凝土工程量为 6 100 m³。

三、基础固结灌浆

大坝两岸坡心墙基础岩石中均进行固结灌浆,均匀、梅花形布置,孔排距为 3.0 m,孔深一般为 5.0 m,工程量为 45 000 m。

四、基础帷幕灌浆

除河谷基岩较深的区域外,大坝基础均作水泥灌浆帷幕防渗,帷幕灌浆轴线总长为

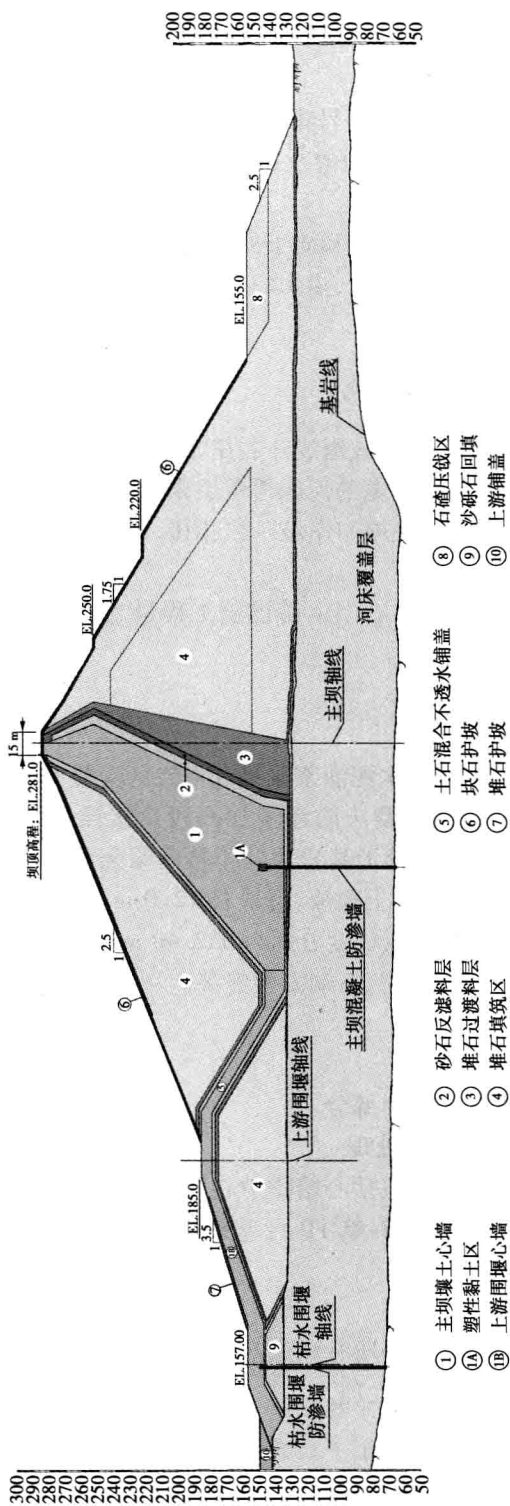


图 1-1 大坝典型剖面

1 557.74 m, 总计深度为 64 233.3 m, 平均孔深为 40.7 m。

五、右坝肩基础排水幕

右坝肩基础排水幕设于右岸 1 号排水洞中, 成 Γ 形布置在灌浆帷幕后, 用以排除绕过灌浆帷幕底部和透过灌浆帷幕的渗水, 以及绕右岸坝肩的渗水, 以降低基础岩体中的渗压。

排水幕在 1 号排水洞中由向上和向下的铅直钻孔形成, 总长为 16 283.37 m, 孔距为 3.0 m, 总计向上和向下共 484 个孔, 渗水高程控制范围为 100 ~ 180 m, 渗压控制(即 1 号排水洞洞底)高程约为 147 m。

六、上游围堰基础防渗系统

上游围堰基础防渗由 3 种形式组成。右岸滩地范围采用了水平防渗铺盖和基础塑性混凝土防渗墙; 右岸约有 300 m 宽的河床覆盖层未封死, 只靠水平铺盖防渗。河床部分采用了单排高压旋喷灌浆帷幕, 左端与岸坡基岩相接, 向右与右岸滩地的塑性混凝土防渗墙妥善连接。

上游围堰基础防渗系统中, 右岸上游铺盖工程量为 100 万 m^3 , 高压旋喷防渗幕工程量为 11 000 m^2 。

七、心墙与基础的连接

心墙基础防渗系统由两岸水泥灌浆帷幕和河谷区混凝土防渗墙组成。心墙与河谷区的混凝土防渗墙的连接是由混凝土防渗墙加高段直接插入心墙土中的, 插入深度为 12 m。两岸坡基础灌浆帷幕通过设于基岩面的帷幕灌浆盖板与心墙土紧密连接; 沿帷幕轴线上、下游侧全程设置钢筋混凝土盖板, 每块长 12.0 m, 宽 4.0 m, 厚 1.0 m; 钢筋混凝土结构, $R_{28} = 15 \text{ MPa}$; 左、右岸盖板长度分别为 632.40 m 及 669.09 m, 总长为 1 301.49 m, 分别与河谷段混凝土防渗墙的左、右端妥善连接。

八、大坝基础面处理

大坝基础面的处理分为两个部分。

(一) 两岸坡防渗体基础面处理

两岸坡防渗体基础面处理包括心墙槽中心墙 1 区, 内铺盖混合不透水料 5 区, 心墙下游反滤料 2A、2B 区及上游围堰斜墙 1B 区基础面的处理。这些区域的基础均为岩石基础, 采用有盖板固结灌浆。

(二) 土基础面处理

土基础面处理包括河床部分所有料区基础面、两岸坡坝壳区基础面、压戥 8 区基础面及右岸上游铺盖 10 区基础面的处理。

九、坝顶结构(含 15 号路)

坝顶结构工程包括了坝顶混凝土结构和坝顶公路两部分。坝顶公路及 15 号公路填

筑土结砂石料 $25\,500\text{ m}^3$, 顶混凝土分为 460 块, 混凝土浇筑量为 $2\,557\text{ m}^3$ 。

十、其他工程

- (1) 大坝下游交通步梯。
- (2) 孔板泄洪洞中闸室竖井接高工程。
- (3) 左岸 4 号交通洞延长段。
- (4) 1 号通气井接高工程。

十一、原型观测仪器

大坝原型观测仪器主要布置在 3 个横断面和 2 个纵断面上。横断面包括: A 断面, 右岸 $D0+693.74\text{ m}$ 处; B 断面, 河床中部 $D0+387.5\text{ m}$ 处; C 断面, 左岸 $D0+217.5\text{ m}$ 处。纵断面包括: D 断面, 防渗轴线; E 断面, 坝下 12.0 m 。

第二节 泄洪建筑物

泄洪建筑物集中布置在左岸山体中, 进、出口距离约为 $1\,200\text{ m}$ 。泄洪建筑物的进口共分九层布置: 1 号导流洞高程为 132 m , 2~3 号导流洞高程为 141.5 m , 1~3 号孔板洞和 1~3 号排沙洞高程为 175 m , 5~6 号发电洞高程为 190 m , 1 号明流洞和 1~4 号引水发电洞高程为 195 m , 2 号明流洞高程为 209 m , 灌溉洞高程为 223 m , 3 号明流洞高程为 225 m , 正常溢洪道高程为 258 m 。

泄洪建筑物区域内, 基岩主要由 T_1^3 、 T_1^4 、 T_1^5 和 T_1^6 岩层组成, 一般产状为 $NW350^\circ \sim NE10^\circ$, 倾角为 $8^\circ \sim 12^\circ$, 倾向下游。主要断层有 F_{28} 、 F_{236} 、 F_{238} 、 F_{240} 、 F_{241} 。 F_{28} 断层南北走向, 规模较大。其主断层东西走向, 横切山梁。该区域还存在 4 组比较发育的陡倾角节理。因此, 可以说泄洪建筑物区域内的地质条件是比较复杂的。

进水口的土石方开挖及岩石支护规模较大, 最大开挖高差为 158 m , 天然地形岸坡坡度在 30° 以上, 个别地区达 70° 。出口地势比较平缓, 天然地形岸坡坡度为 $20^\circ \sim 25^\circ$, 开挖高差近 100 m 。由于出口边坡的岩层倾向是顺坡向的, 给开挖及岩石支护和边坡稳定造成了不利影响。山梁南侧邻黄河, 岸坡陡峻, 呈 75° 陡壁。

一、泄洪排沙建筑物布置

按工程规划对枢纽的运用要求, 枢纽总泄洪能力不小于 $17\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 非常死水位 220 m 的泄洪能力不小于 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 据此形成了小浪底以洞群泄洪为主, 且进口集中、洞线集中、出口消能集中布置的明显特点。小浪底泄洪方式的选择是枢纽布置的核心。经过大量方案的论证比选, 设计推荐采用了 3 条直径为 6.5 m 的压力式排沙洞、3 条断面尺寸为 $(10 \sim 10.5)\text{ m} \times (11.5 \sim 13)\text{ m}$ 的明流洞、3 条前压后明式多级孔板消能泄洪洞和表面陡槽式溢洪道等 10 个泄洪排沙建筑物, 另考虑修建 1 座泄洪能力为 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的非常溢洪道。万年一遇校核洪水最大泄量为 $13\,990\text{ m}^3/\text{s}$, 隧洞总泄洪能力达 $13\,480\text{ m}^3/\text{s}$, 枢纽

总泄洪能力为 $17\,327\text{ m}^3/\text{s}$,留有一定的安全备用裕量。

(一) 进水塔群

为了防止进水口泥沙淤堵,小浪底水利枢纽的进水口采用了集中布置的方式,9条泄洪洞和6条发电引水洞以及1条灌溉洞共16条洞的进口布置在位于左岸风雨沟内一字形排列的10座进水塔内,形成了前缘宽度为276.4 m、高为113 m、总混凝土方量约为100万 m^3 的进水塔群。其中,3条由导流洞改建的多级孔板消能泄洪洞的进口高程为175 m,分别布置在3座进水塔内,以利于泄洪排沙,保持进口冲刷漏斗;3条排沙洞的进口高程为175 m,直接位于发电引水口下方15 m(5号和6号机组)和20 m(1~4号机组)处,以利于减少过机沙量;3条明流洞的进口分别布置在195 m、209 m和225 m高程,具有泄流能力大的特点,在系统中担任泄洪和排漂、排污任务。16个洞的进口高低错落,间隔排列,形成了上层泄洪排污、中层引水发电、下层泄洪排沙的有机整体。塔群与进口开挖高边坡之间回填堆石至230 m高程,并上覆反滤,进口高边坡的排水系统插入堆石体中,形成通畅的排水通道,保证在水位骤降时高边坡的稳定,如图1-2所示。

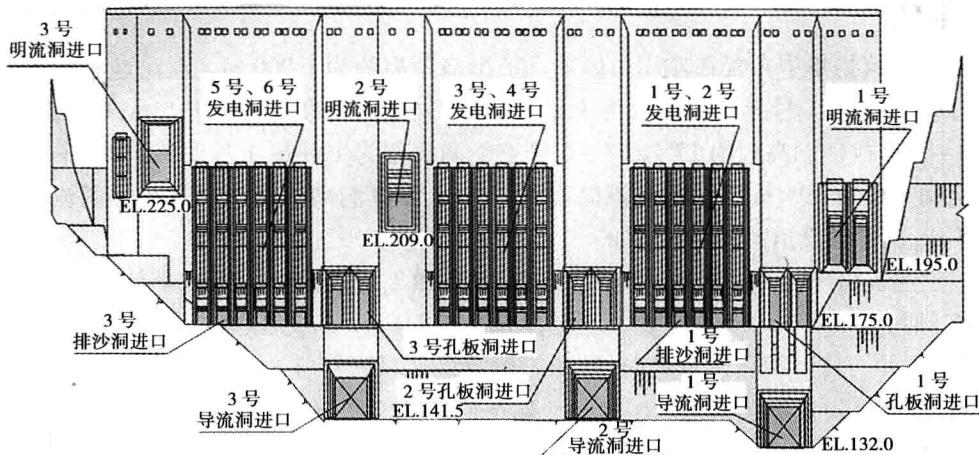


图1-2 进水塔上游立视图

(二) 孔板泄洪洞

小浪底水利枢纽施工期按100年一遇洪水导流标准,设计围堰高程为185 m,采用3条直径为14.5 m的隧洞导流。1号导流洞贴近河床布置,进口高程为132 m,2号和3号导流洞进口高程为141.5 m。截流后第一年汛期100年一遇洪水位为177.3 m,最大下泄流量为 $8\,270\text{ m}^3/\text{s}$;截流后第二年汛期大坝填筑至200 m高程以上,由2号、3号导流洞及3条排沙洞泄洪,300年一遇洪水最高洪水位194.6 m。这3条导流洞在左岸单薄山体中占据了很大的空间,若完成导流任务后废弃不用,则给以隧洞群泄洪为主要特点的枢纽建筑物总体布置带来巨大的难度。小浪底泄洪方式选择的核心就是如何将这3条大直径的临时导流洞有效地利用起来,改建为永久泄洪设施。经过大量的科学试验论证,将3条导流洞分两期改建为永久的多级孔板消能泄洪洞,如图1-3所示。

导流洞进口封堵后,在 175 m 高程平台建进水塔,通过龙抬头弧段将进水口和原导流洞连接起来,按 3 倍洞径加设直径分别为 10 m、10.5 m 和 10.5 m 的孔板环,在左岸排水幕线附近建中间工作闸门室。通过孔板环对水流的突然收缩和突然放大,在孔板后形成环状剪切涡流在洞内进行消能。三级孔板共可消刹 50 m 水头,消能后的水流通过闸孔射流形成壅水明流流态入下游消能水垫塘。这 3 条导流洞经过改建后,总泄流能力为 4 825 m^3/s ,控制洞内最大流速(闸室出口)不超过 35 m/s 。1 号孔板洞经过两次放水原型观测试验进一步验证,孔板洞的设计是成功的。小浪底多级孔板消能泄洪洞的实践,为洞内消能开创了一条新路,为世界坝工发展作出了贡献。

(三) 明流泄洪洞

小浪底水利枢纽设有 3 条进口高程分别为 195 m、209 m 和 225 m,断面尺寸分别为 10.5 m $\times$ 13 m、10 m $\times$ 12 m 及 10 m $\times$ 11.5 m 的城门洞形明流泄洪洞。3 条洞分别与 3 个独立的进水塔相连,塔内设检修门、事故门和弧形工作闸门,出口挑射入消能水垫塘消能。1 号明流洞设计水头为 80 m,最大流速达 35 m/s ,在泄水流道上设有四级掺气坎用以掺气减蚀。在 3 条隧洞的高流速段采用 70 MPa 的高强混凝土抗磨。3 条明流洞泄流能力分别为 2 680 m^3/s 、1 973 m^3/s 和 1 796 m^3/s 。

明流泄洪洞具有结构简单、泄洪能力大的特点,采用高位布置可以简化金属结构的设计荷载,除宣泄洪水外,还可兼顾排泄洪水期的漂浮物,对左岸单薄山体的稳定也不造成影响。根据左岸山体的地形特点,该明流泄洪设施由进水塔、明流泄洪洞、明渠、出口挑坎等组成,最后以挑射方式入消能水垫塘消能。

(四) 排沙洞

为了保持进水口冲刷漏斗、减少过机沙量和调节径流,小浪底的泄洪设施中有 3 条低位排沙洞,分别布置在发电引水口的下方 15 m(5 号和 6 号机)和 20 m(1~4 号机),即 175 m 高程。每条排沙洞有 6 个进口分别与两条发电洞的 6 个进口相对应,在进水塔内合并成由两个事故门控制的叉洞,然后以直径为 6.5 m 的压力式隧洞进入山体。在隧洞出口设可以局部开启的偏心铰弧形工作闸门。这 3 条排沙洞设计水头为 122 m,设计最大泄流能力为 675 m^3/s 。在一般运用情况下,泄流能力不超过 500 m^3/s ,控制洞内最大流速为 15 m/s ,以减少高速含沙水流对流道的磨蚀。

这种高水头压力隧洞布置在左岸单薄山体内,如有高压水外渗,必将影响左岸山体的稳定。为此,对这 3 条压力隧洞的衬砌方式进行了认真的研究和论证。在防渗帷幕之前的压力洞段,由于内外水平压采用了普通 C40 钢筋混凝土衬砌,对于在帷幕后 3 条共长 2 000 m 的洞段曾研究过钢板衬砌、高压灌浆预应力衬砌、复合衬砌等形式,最后选择了从意大利引进的有黏结后张预应力混凝土衬砌结构,经现场作了 1:1 的模型测验对比,采纳了无黏结预应力混凝土衬砌方案替代原设计方案,并进行了优化布置,编制了施工技术规范。

排沙洞最终采用双圈缠绕的无黏结预应力混凝土衬砌,填补了国内的空白。多年的运行实践证明,这是一项成功的设计。

(五) 进口导墙

小浪底水利枢纽所有的泄洪排沙和引水发电设施的进水口集中布置在左岸风雨沟