



SHUIGONG
JIANZHUYU
SHEJI YU JIAGU

水工建筑物 设计与加固

武永新 吴正桥 于玉森 主编



黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是对一批大中型水利水电工程项目枢纽布置、水工建筑物设计、基础处理、安全评价、除险加固,以及新技术、新材料运用经验的认真总结。其中有部分工程项目获得了国家或水利部优秀设计金奖,部分新技术属国内首创,经鉴定,达到了国际先进水平,并获得省部级科技进步奖。

本书专业性强、内容翔实,可供水利水电工程技术人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工建筑物设计与加固/武永新,吴正桥,于玉森主编.
郑州:黄河水利出版社,2004.9

ISBN 7-80621-715-0

I. 水… II. ①武… ②吴… ③于… III. ①水工
建筑物-建筑设计②水工建筑物-加固 IV. TV6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 094128 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:河南第二新华印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:24.625

插页:4

字数:570 千字

印数:1—1 500

版次:2004 年 9 月第 1 版

印次:2004 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-715-0/TV·329

定价:60.00 元



塞北明珠——黄河万家寨水利枢纽



万家寨水利枢纽混凝土重力坝



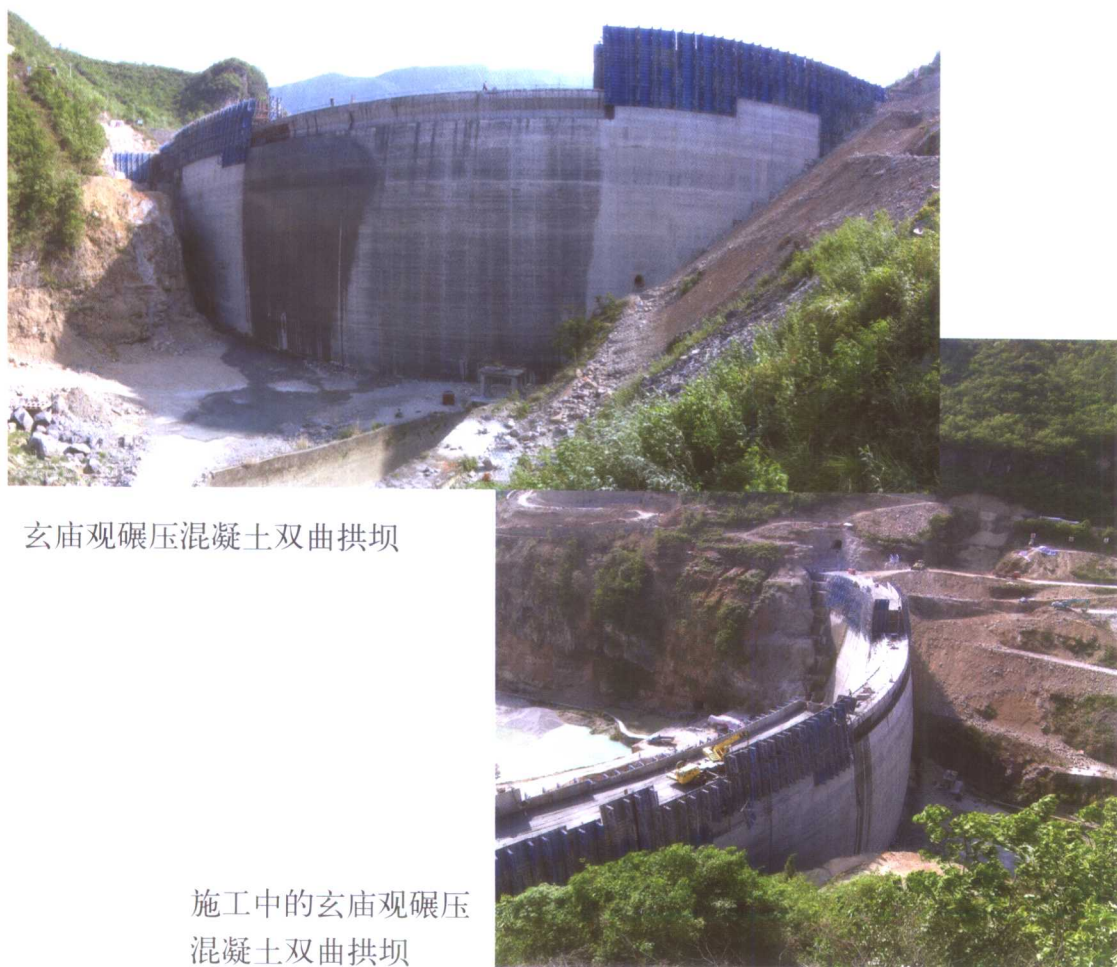
治淮第一水库——石漫滩水库



石漫滩水库
碾压混凝土
重力坝



潘家口水库混凝土重力坝



玄庙观碾压混凝土双曲拱坝

施工中的玄庙观碾压
混凝土双曲拱坝



独流减河防潮闸



屈家店枢纽永定新河进洪闸

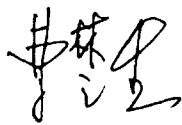
序

当今我国科学技术突飞猛进,带动各行各业正以雷霆万钧、势如破竹之势走向一个空前繁荣的新时期。水利水电作为国家的基础产业,发展尤为迅猛,我国已经成为或正在走向世界水电和水利大国。

水利部天津水利水电勘测设计研究院水工处承担了国内外众多水利水电工程的设计工作,主要有潘家口、万家寨、石漫滩、马来西亚里瓦古等一大批大型水利水电枢纽工程和屈家店、独流减河进洪闸、宁车沽等一大批平原地区水闸以及大黑汀等几十座病险水库(水闸)的除险加固设计工作。多元化的国内、国际市场,使水利工作者在设计过程中时时面对新的挑战,在注重采用新材料、新工艺的同时,为加快工程进度、节约工程投资、促进科技进步,进行了科技创新,在上述工程中采用了一些新的技术,如混凝土大坝裂缝水下综合处理、改性水泥帷幕灌浆、新老混凝土结合粘结、高喷法处理软基、软基防渗排水技术、大吨位预应力锚固、RCC坝面防渗、低热微膨胀混凝土、土工格栅、零坍落度混凝土、混凝土防炭化处理、地基防地震液化处理等。这些工程中有相当一批获得了国家和水利部优秀设计奖,其中3项工程为水利部优秀设计金奖,此外获国家及省部级科技进步奖共7项,其中一等奖3项,有许多新技术经水利部鉴定达国际先进水平,为推动水利水电领域的技术发展做出了贡献。

《水工建筑物设计与加固》一书是在对上述工程的设计工作进行认真总结的基础上编写的,主要涵盖了改革开放近20年来取得的新成果。书中对工程的枢纽布置、水工建筑物设计、水库(水闸)除险加固技术进行了阐述,对工程中采用的新技术、新材料、新工艺等进行了专门介绍。这些对今后水利水电工程的设计、科研、施工和运行管理,具有一定的借鉴、参考和指导意义。

中国工程院院士



2004年7月

目 录

序	曹楚生
万家寨水利枢纽工程设计重大技术问题综述	郭 潇(1)
石漫滩碾压混凝土重力坝设计、施工及科技创新	武永新 高晓梅(8)
万家寨水利枢纽工程主要建筑物设计及技术创新	吴正桥(18)
万家寨水利枢纽工程电站厂房设计特点及优化	于玉森 顿海丽 白俊岭(27)
万家寨水利枢纽工程泄洪排沙建筑物设计	张军劳(31)
万家寨水利枢纽工程引黄取水口设计	庞书聪 郭西方 朱伟君(37)
万家寨水利枢纽工程低热微膨胀混凝土筑坝技术研究及应用	
.....	吴正桥 包冀邢 郭晓轩(42)
塑料排水板加固软土地基的有限元分析	张社荣 李 志 高晓梅 王志国(54)
单桩竖直承载力的有限元超载求解法	张社荣 蔡胜利 武永新 王 浩(60)
重力坝深层抗滑稳定空间分析方法	武永新(64)
戈兰滩水电站碾压混凝土重力坝设计	耿振云 包冀邢 白素萍(69)
戈兰滩水电站碾压混凝土重力坝三维温控仿真计算	
.....	白俊岭 张秀崧 王立成 李 梅(73)
玄庙观水库工程枢纽布置	包日新 裴彦青 韩 强(79)
玄庙观水库碾压混凝土双曲拱坝设计	裴彦青 韩 强 王晓辉 王志国(85)
玄庙观水库拱坝坝肩稳定分析及加固处理设计	王晓辉 苗 青 谢 坤(92)
玄庙观水库 RCC 拱坝分缝及接缝灌浆设计	王 浩 裴彦青 鲁永华(98)
南水北调中线工程管道输水方案	杨志河 王永生(104)
黄河海勃湾水利枢纽基础处理措施研究	门乃姣 于海江(109)
黄河大柳树水利枢纽工程开挖高边坡稳定性	杨志河 王永生(113)
黄河大柳树水利枢纽工程地下洞群围岩稳定性	杨志河 王永生(120)
潘家口水库 41# 坝段上游坝面水平裂缝处理设计及效果评价	武永新(126)
黄河山坪水电站工程设计方案比较	陈能玉 李新媛 王永生(131)
引黄入晋工程总干线一、二级泵站钢筋混凝土高压出水岔管设计	
.....	杨海燕 陈能玉 程 靖(136)
沥青混凝土心墙堆石坝设计	白俊岭(142)
浅谈混凝土面板堆石坝设计的几个问题	顿海丽 刘战生(149)
用时程分析法对大坝进行动力分析	杨海燕 刘战生(153)
西藏岗巴水电站设计的几个特点	翟兴无 李红军 刘万新 包日新(164)
西藏江达县独曲水电站引水工程设计	于海江 耿振云 顾春利(168)
永定河滞洪水库工程设计特点	翟兴无 李红军 刘万新(176)

黄河沙坡头水利枢纽左岸副坝绕渗分析·····	余伦创	时铁城	蒋志勇	柴玉梅(181)
黄河沙坡头水利枢纽工程水工结构优化设计·····	王小青	余伦创	时铁城	徐宪平(186)
巴基斯坦汗华水电站竖井式厂房设计·····	朱伟君	苏广新	顾小兵(189)	
巴基斯坦汗华水电站工程坝基抗滑稳定分析·····	郭西方	高文军	岳丽霞(192)	
巴基斯坦汗华水电站工程泄水建筑物设计·····	郭西方	陈能玉	朱伟君(196)	
橡胶坝设计要点·····	于玉森	白素萍(199)		
地下厂房岩锚吊车梁设计·····	王峰山	王立成	李梅(204)	
边坡及坝坡三维稳定分析·····	王立成	王峰山(210)		
坝后式水电站厂房机墩组合结构动力特性分析·····	郭晓轩	赵小娜	卢玉明(217)	
万家寨水利枢纽工程电站进水口拦污栅墩框架结构动力分析·····	余伦创	于海江	白俊岭(225)	
水电站厂房安装场平面布置优化·····	耿振云	于海江(230)		
降低不衬砌和喷锚隧洞输水糙率的方法·····	郭端英	宋海钟(234)		
气垫式调压室与溢流式调压井双调压系统在大干沟水电站的应用·····	柴玉梅	金宏安(239)		
大黑汀水库除险加固工程设计·····	高晓梅	林元旦	杨宗敏(245)	
北大港水库除险加固工程设计·····	时长波	靖颖卓	顾小兵(250)	
湖北省蕲春县花园水库大坝防渗加固设计·····	李新媛	阎国兰(254)		
大同水库塑性混凝土防渗墙设计·····	陆永学	靖颖卓	李新媛(259)	
大黑汀水库除险加固工程底孔修补优化设计与施工·····	王浩	王晓辉	谢淑兰(267)	
岳城水库大副坝防渗墙设计·····	时长波(271)			
湖北省黄坡水库低输水管采用粘贴玻璃纤维布加固设计·····	田玉梅	叶玉珍(275)		
三门峡水利枢纽底孔改建效果分析·····	苏广新(280)			
预填骨料混凝土在三门峡1 [#] 机组转轮室改造中的应用·····	苏广新(287)			
官厅水库塌岸成因及治理措施·····	靖颖卓(291)			
天津市饮用水源保护工程集料碱活性试验研究·····	于德泉(296)			
水工混凝土建筑物裂缝及修补方法·····	叶玉珍(302)			
独流减河进洪闸除险加固工程设计·····	李红军	李秀明	高文军	阮建飞(309)
大涌口水闸重建工程初步设计·····	王浩	于玉森	倪世生(314)	
天津市耳闸重建工程设计·····	于卓敏(320)			
闸幢节制闸除险加固设计·····	杨宗敏	于玉森	任杰(324)	
引滦渠首枢纽工程地基振冲加固处理·····	邵月顺	王广欣	焦凤磊(328)	
漳卫新河治理庆云拦河蓄水闸加固设计·····	王景涛	许煜忠	柴玉梅(333)	
扩底灌注桩与普通灌注桩的有限元对比分析·····	鲁永华	苗青(337)		
马来西亚槟城 TELUK BAHANG 供水工程进水塔设计·····	许煜忠(340)			
水泥搅拌桩技术在海河防潮闸挡潮墙软土地基处理中的应用·····	靖颖卓	王永生	徐宪平(344)	

引黄入晋工程总干线一级泵站供水系统竖井施工组织设计.....	郭端英(348)
CAD 技术在水利水电工程设计中的应用	耿振云 骆福英(352)
不同土质地基的水闸渗流稳定分析方法.....	鲁永华 苗 青(363)
考虑自生体积变形的混凝土温度应力计算.....	吴桂兰 叶玉珍 王景涛(369)
永定河三家店—落坡岭水库河道综合治理工程特点 and 设计优化	柴玉梅 叶玉珍(373)
山西省引黄工程总干线 6# 隧洞钢衬洞段水力学模型试验研究	岳丽霞(377)
首都机场新航站楼伸缩缝处双柱结构设计.....	张国彦 顿海丽(384)

万家寨水利枢纽工程设计 重大技术问题综述

郭 潇

万家寨水利枢纽位于黄河北干流上段托克托至龙口峡谷河段内,是黄河中游梯级开发的第一级。坝址左岸为山西省偏关县,右岸为内蒙古自治区准格尔旗。

枢纽的主要任务是供水结合发电调峰,同时兼有防洪、防凌作用。枢纽年供水量 14 亿 m^3 ,其中向内蒙古自治区供水 2 亿 m^3 ,向山西省供水 12 亿 m^3 。枢纽水电站装机 1 080MW,年发电量 27.5 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

枢纽主体工程于 1994 年 11 月开工,1998 年 10 月下闸蓄水,1998 年 11 月 28 日第一台机组并网发电,2000 年 12 月 11 日最后一台机组并网发电。2002 年 9 月 15 日,枢纽工程顺利通过竣工验收。

一、枢纽布置

枢纽由拦河坝、电站厂房、电站引水系统、泄水建筑物、引黄取水建筑物、GIS 开关站等建筑物组成。枢纽主要建筑物均布置在宽约 400m 的 U 形河谷中,枢纽总体布置采用混凝土直线重力坝和坝后式电站厂房的布置形式。电站主厂房布置在河床右侧,副厂房布置在主厂房右侧,与主厂房呈 T 形布置。泄水建筑物采取以底孔、中孔为主的布置形式,布置在河床左侧。GIS 开关站布置在厂坝之间,引黄取水口设在大坝左岸 2[#]、3[#] 坝段上,电站进水口设在大坝 12[#]~17[#] 坝段。电站与泄水建筑物之间设长导墙分隔。

枢纽总体布置紧凑、协调合理,满足枢纽供水、发电、防洪、排沙、防凌等工程任务的要求。

二、水库采用“蓄清排浑”的运行方式

黄河是世界著名的多泥沙河流之一,为确保水库长期维持有效库容和泥沙淤积末端不上延,万家寨水利枢纽水库调度采用“蓄清排浑”运行方式。库水位除满足泥沙冲淤要求以外,还要满足供水、防洪、防凌和发电等要求。

每年 8、9 两月为排沙期,水库保持低水位运行。库水位控制在 952.00~957.00m 之间。汛期流量较大时,库水位短期降至 948.00m 冲沙运行(5~7d)。10 月底库水位蓄到 970.00m,以使机组能满发出力。11 月至翌年 2 月底,最低库水位 970.00m。3 月初至 4 月初是内蒙古河段开河流凌期,降低水位至 970.00m 运行。春季流凌结束后即可蓄水

至 977.00m,4 月底前蓄至 980.00m。5 月至 7 月供水期水位由 980.00m 逐渐降到排沙期运用水位。

根据水库“蓄清排浑”的运行要求以及防洪、发电、供水、排沙冲沙、排冰(凌)、排漂等综合要求,枢纽泄水建筑物采取以底孔、中孔为主的布置形式,泄水建筑物由 1 个表孔、8 个底孔和 4 个中孔组成。此外,在电站坝段设有 5 个排沙孔,以减少电站进水口前泥沙淤积和过机含沙量。计算及试验结果表明,枢纽泄水建筑物的泄流能力满足规划设计要求,即校核洪水位 979.10m 时,相应泄量为 $8\,326\text{m}^3/\text{s}$,设计洪水位 974.99m 时,相应泄量为 $7\,899\text{m}^3/\text{s}$ 。当水库排沙期最低运用水位 952.00m 时,泄流能力满足 $5\,000\text{m}^3/\text{s}$ (其中包括机组引用流量),当水库冲沙水位 948.00m 时,底孔泄流能力满足 $3\,500\text{m}^3/\text{s}$,满足下泄 $3\,000\sim 5\,000\text{m}^3/\text{s}$ 造床流量的要求,从而可以有效地降低库水位进行冲沙,排沙效率较高。水库运行 5 年多以来,泄水建筑物运行正常,水库淤积在预测范围以内,表明水库“蓄清排浑”运行方式和泄水建筑物设计是合理的。

三、河床左侧坝基层间剪切带加固处理及大坝浅层抗滑稳定

坝基局部存在的层间剪切带影响到大坝浅层抗滑稳定,是坝基主要工程地质问题。

河床右侧电站坝段采取了厂坝平缝灌浆联合受力的结构措施,厂房与坝体一起维持坝体抗滑稳定。电站坝段在厂坝联合作用下整体稳定满足规范要求。

对河床左侧泄水坝段采取了以下工程措施:①在坝基和护坦基础设混凝土抗剪平洞,并对基础进行超细水泥补强灌浆。②枢纽大坝为半整体式重力坝,大坝各横缝下部灌浆连成整体。③泄水坝段采取长护坦挑流消能方式,使下游冲刷坑远离坝体。④坝基和泄水坝段下游侧设防渗帷幕和排水,并进行封闭抽排。⑤在护坦下游设有 15m 长防冲板和 10m 深的齿墙,切断和封闭各层剪切带,能有效地防止剪切带软化,有利于大坝稳定。⑥左岸坝基和护坦基础进行了全面的固结灌浆,孔深均超过 SCJ_{10} 剪切带,灌浆前后弹模测试结果表明,固结灌浆对提高坝基岩体的完整性和抗剪强度是有成效的。

计算结果表明,泄水坝段坝基加固处理后,左侧泄水坝段沿 SCJ_{08} 、 SCJ_{10} 剪切带抗滑稳定安全系数,基本组合 K' 均大于 3.0,特殊组合 K' 均大于 2.5,且坝体自身稳定安全系数 K' 大于或接近 2.0。利用纯摩公式计算,河床左侧坝段浅层滑动坝体自身安全系数 K 基本组合情况下大于或接近 1.10,特殊组合情况下大于 1.0,说明坝基加固以后,河床左侧泄水坝段具有相当的安全度,可以正常蓄水运行。

枢纽已经下闸蓄水 5 年多,2002 年 3~5 月,水库最高水位达到 978.75m,超过水库正常蓄水位 977.00m,大坝运行正常,证明坝基层间剪切带加固处理方案稳妥可靠,大坝抗滑稳定具有足够的安全储备。

四、电站发电引水压力钢管设计

枢纽电站 6 条引水压力钢管初步设计审定为坝内埋管式布置。技施设计阶段将发电引水压力钢管由坝内埋管优化为坝面浅埋管的设计方案。

发电引水钢管采用单机单管引水方式,钢管直径为 7.5m,单机设计引用流量为 $300\text{m}^3/\text{s}$,管道最大内水压力为 1.11MPa,管道 PD 值为 $8.33 \times 10^3 \text{kN/cm}$ 。压力钢管斜直段平行于下游坝面布置,外包混凝土厚度为 1.5m。为充分发挥钢管的承载能力,改善外包混凝土的受力条件,在钢管上方 220° 范围内铺设高压闭孔塑料垫层。钢管本身的安全度满足规范要求,钢管与外围钢筋混凝土联合受力的综合安全度高于坝内埋管和坝后背管。

万家寨水利枢纽工程采用的浅埋式压力钢管是一种创新的压力管道布置形式,拓宽了压力管道设计思路。实践证明,采用浅埋式发电引水钢管,对减少钢管安装和坝体混凝土的施工干扰,降低钢管安装施工难度,争取工期,为工程度汛、下闸蓄水和第一台机组提前发电均创造了有利的条件。另外,将坝内埋管改为浅埋式压力钢管后,由于钢管外移,调整了电站坝段排沙孔的布置,减少了坝基开挖及混凝土工程量各 1万 m^3 ,效益显著。

枢纽工程采用浅埋式压力钢管设计研究成果,在浅埋管、垫层管设计理论上较大的突破和创新,特别是在高寒地区防止冻融破坏、垫层材料选择、二期回填混凝土与坝体混凝土光面连接、温度控制等方面均有独特的创新设计,经水利部科技司组织鉴定,达到国际先进水平,并获得水利部 1999 年度科技进步三等奖。

五、低热微膨胀混凝土新技术的应用

枢纽坝址地处北纬 39.6° 地区,夏季炎热,冬季寒冷,风沙大,气温骤降频繁,气候条件恶劣。拦河坝孔洞多,温控难度大,施工工期紧张。为了节省投资,简化温控措施,缩短建设工期,并获得优良工程质量,水利部于 1992 年将万家寨水利枢纽采用低热微膨胀混凝土筑坝技术研究列为水利部水利科技重点项目。

“万家寨水利枢纽工程应用低热微膨胀补偿收缩混凝土筑坝技术研究”项目共分为 4 个课题 15 个专题,4 个课题分别为“低热微膨胀水泥及补偿收缩混凝土性能研究”、“应用补偿收缩混凝土快速建坝设计理论和方法研究”、“补偿收缩混凝土建坝的施工方法和施工组织”、“大坝原型观测布置设计、观测及反馈”,由长江科学院、水科院、天津大学和水利部天津设计院共同承担试验研究、计算分析工作。1994 年 9 月和 1995 年 5 月,分别在左岸低缆基础和上游纵向围堰进行了两期低热微膨胀混凝土现场试验。4 个课题的最终研究成果分别于 1995 年 10 月、1997 年 7 月和 2002 年 6 月通过专家组审查验收。根据工程建设的进展情况,先后在大坝边坡坝段、导流底孔封堵、预留钢管槽回填及左侧坝基抗剪平洞回填等部位采用了低热微膨胀水泥混凝土。枢纽工程采用低热微膨胀混凝土筑坝技术,减少了坝体纵缝,简化了温控措施,加快了施工进度,提高了混凝土的抗裂性能,获得了一定的技术经济效益。课题的研究成果对低热微膨胀混凝土筑坝技术的提高和推广应用也具有积极作用。

六、水库防凌及库尾冰塞、冰坝壅水处理

万家寨水利枢纽上游内蒙古河段,在冬季由流凌而封河,在春季解冻开河。在这两个

时期,有流冰进入库区。分析结果表明,冬季封河期最大入库冰花量约 4 020 万 m^3 ,春季开河时总冰量估算最大为 6 000 万 m^3 。

防凌措施主要是调节冰期运用水位,使上游来冰蓄入库区,并以不影响拐上断面为准。在冬季流凌封冰期,有大量冰花流入库区,在封冻前的流凌时段,保持库水位在 975m 以下。入库流凌比降保持在 0.3‰到 1.2‰,便于流凌顺利入库。另外,采取降低水位预留一定库容容纳冰量,使冰凌蓄于库内,不致影响拐上及其上游河道。待上游河道封冻稳定后,视具体情况,再适当提高水库运行水位。在春季开河前,采取迅速升降水位的办法,促使水库盖面冰破坏和融化。水位降到 970m 保持正常发电,这样 970~980m 之间有库容 2.4 亿 m^3 ,可作临时(几天内)容纳冰量之用。

万家寨水利枢纽的建成和运用,使枢纽电站的出库水温有所提高,对下游天桥水电站和即将建设的龙口水利枢纽的防凌有利。几年的运行实践表明,枢纽工程的建设已基本消除了河曲县的冰凌危害。

枢纽工程于 1998 年 10 月 1 日下闸蓄水,已经历了 5 个凌汛期。凌汛期在库尾河段不同程度地产生了冰塞、冰坝壅水现象。通过对冰塞、冰坝壅水问题进行深入的分析研究,并经水利部审查同意,库尾按 987m 水位方案确定的淹没范围实施移民搬迁。

七、库区右岸岩溶渗漏

库区右岸岩溶渗漏是水库主要工程地质问题。前期勘察针对该问题做了大量工作,得出了基本结论,并建议继续进行深入研究。前期根据库区右岸长观孔水位资料分析,将库区右岸分为上、中、下 3 个渗漏段,其中中段(从龙王沟口下游 2km 至黑岱沟口下游 7.5km,河段长 15km)由于冲沟发育、奥陶系中统马家沟组灰岩出露面积大,且有焦稍沟断层存在,为主要渗漏段;水库蓄水后,库水渗漏形式以岩溶裂隙式渗漏为主,初设估算蓄水后最大渗漏量为 $10.63\text{m}^3/\text{s}$ 。1993 年水规总院对初步设计右岸岩溶渗漏的主要审查意见为:“库区右岸渗漏问题基本清楚,同意对入渗地段的划分和以中段马家沟灰岩岩溶渗漏为主要形式的意见。本阶段估算的渗漏量是可信的,相应于入库流量水库渗漏量不大。鉴于岩溶渗漏的复杂性和重要性,建议对右岸渗漏区建立和完善地下水长期监测网,监测水库蓄水前后(运行期)的地下水位、水质和各出水点水量的变化,计算蓄水前后的渗漏量变化,分析渗漏的途径和部位,进一步论证防渗措施的必要性。”

在施工运行期,对库区右岸 19 个钻孔的地下水位、下游相关泉水水量,实施了长期监测,并针对重点渗漏段进行了补充勘察,包括地质调查、测绘、山地开挖、钻探及示踪试验研究等。补充勘察及监测资料表明,前期勘察对库区右岸存在岩溶渗漏的判断是正确的。库区右岸岩溶渗漏的形式以岩溶裂隙式渗漏为主,局部存在集中渗漏现象。在水库上段和下段,尚未发现较大渗漏现象,与前期勘察预测的结果一致。通过对蓄水前后岩溶地下水的监测证实,前期勘察对岩溶地下水动态预测符合实际,对入渗区、径流区(岩溶地下水低缓带)、排泄区的认识基本正确。示踪试验模拟计算水库水位为 980.00m 时,漏失水量为 $15.81\text{m}^3/\text{s}$ 。根据目前渗漏状况判断,水库右岸渗漏量仍在前期勘察研究的预测范围之内,右岸岩溶渗漏对大坝和电站的安全没有影响,也没有出现对环境的明显负面影响。

在主要渗漏段(水库中段)出现的较大渗漏点,虽然不会改变整个库区右岸岩溶渗漏模式,但鉴于本区岩溶发育特征及焦稍沟断层(F4)在长期渗流水作用下可能进一步恶化等因素。因此,应对整个库区右岸加强监测,密切关注主要渗漏段动态,必要时进一步补充勘察和采取相应措施进行处理。

八、引黄取水口分层取水

针对水库水位涨落幅度大、库水泥沙含量高的特点,利用水库泥沙含量垂线分布上小下大的规律,引黄取水口的设计采用了分层取水方案,引取水库表层清水。

引黄取水口采用坝上取水口的形式。在枢纽大坝上设 2 套各自独立的取水系统,每套取水系统均由分层取水口、坝内引水钢管及控制系统组成。其中 2 个分层取水口分别布置在 2[#]、3[#] 坝段上,并通过 2 条穿过 1[#] 坝段的引水钢管与左岸引黄入晋引水隧洞相接。取水口附属建筑物(闸门启闭控制室和清污设施)布置在 1[#]~3[#] 坝段。单个取水口引水流量为 $24.0\text{m}^3/\text{s}$,每年除 8、9 两个月外,其余 10 个月为引水期,年供水量为 12 亿 m^3 。

为达到分层取水的目的,采用多门组合、门顶溢流的分层取水方式。取水口建筑物由拦污栅、隔水竖井及隔水闸门、上部检修及启闭设施、坝内进水口、事故检修闸门与启闭设施等组成。每个取水口在不同高程设置 2 扇隔水闸门,分别封挡隔水胸墙上的 2 个孔口。取水时隔水闸门随库水位的涨落而升降,门顶始终处于库水位以下一定深度,通过左、右侧隔水闸门的升降组合来引取水库表层清水。

引黄取水口分层取水设计构思新颖。采用坝上取水口的形式,结构简洁紧凑,节约了工程投资。分层取水和避开集中排沙期引水,可以最大限度地减少引水中的泥沙含量,极大改善了引水水质。与常规固定取水方式相比,预计取水含沙量可减少 $1/3$,泥沙中有害粒径($d \geq 0.05\text{mm}$)含量可减少 $2/3$,全年可减少输沙量 80 万~90 万 t。

九、电站接入系统和电气主接线

枢纽电站在山西侧以 220kV 一级电压接入山西电网,共出线 3 回,其中 2 回接入方城变电站,1 回经义井接入原平变电站。

电站在内蒙古侧以 220kV 一级电压接入蒙西电网,共出线 3 回,其中 1 回接入薛家湾变电站,1 回接入昭君变电站,1 回备用。

电站发电机与变压器的连接采用单元接线,220kV 升高电压侧采用单联双母线接线,即山西侧和内蒙古侧各为双母线接线,中间用 1 组隔离开关连接。

从 1[#]、3[#]、5[#] 机端分别引出了 1 个厂用电分支,并在这 3 台机的机端装设发电机出口断路器,在另外 3 台机组的机端装设隔离开关。

正常运行时,山西电网和蒙西电网各带 3 台机,220kV 母线断开,各侧成双母线运行。某段时间,经两电网协商,也可以一侧电网多带 1 台机运行,即运行 4 台机组,而另一侧则带 2 台机组。此时,电站升高电压侧,一侧为双母线,另一侧为单母线运行。在运行中应

防止两侧电网在此联网。

万家寨水电站的主接线,在同类型电站中是首次采用,它的主要特点是:

(1)220kV 的开关进出线较多,采用 2 个双母线接线,中间又用 1 组隔离开关进行连接。相当于 2 个既独立又相连的开关站。

(2)开关站采用了 SF₆ 全封闭组合电器,提高了设备的可靠性,虽然进出线回路数多,但也不必考虑增设旁路设施。

(3)厂用电分支首次采用了与离相封闭母线配套的单相负荷开关组合柜。

(4)主接线设计保证了供电可靠性,而且接线简单、布置清晰、操作灵活、维护方便。

十、220kV GIS 开关站

开关站布置在厂坝间,纵轴线平行于坝轴线,下游侧紧靠主厂房,上游侧与拦河坝之间为消防通道。GIS 开关室全长 144m,宽 15.95m,共 4 层,地下 1 层,地上 3 层。地下 1 层为发电机电压母线室、厂用配电盘室及电缆廊道;地上 1 层为主变压器室;地上 2 层为 SF₆ 管道和电缆层;地上 3 层为 GIS 配电装置室,室外为同高程的避雷器平台。

220kV 配电装置采用的是六氟化硫全封闭组合电器(GIS),共 19 个间隔,是国内当时规模最大的 220kV 级 GIS 开关站。GIS 的断路器为立式布置,每个间隔均为分相式,主母线为共筒式。为减少分支母线长度,GIS 采用了非紧凑型布置。每个间隔的汇控柜对应布置在每个间隔的下游侧。GIS 的元件操作及与出线场之间的隔离开关之间均有严格的联锁。

十一、计算机监控系统

电站综合自动化按少人值班原则设计,全厂集中监控采用以计算机监控系统为基础的方案。电站计算机监控系统采用符合国际开放系统标准的开放式环境下的分层分布系统。在中央控制室,除在模拟屏上保留紧急停机、紧急关闭快速闸门等常规操作按钮及少量全厂性水力测量仪表外,取消了其他常规设备,电站正常时的实时监控任务全部由计算机监控系统承担。全厂公用控制系统均采用相对独立的控制装置,一些重要的状态量通过公用 LCU 直接送入监控系统;此外全厂公用油、汽、水系统及各闸门系统控制装置还可通过 MB⁺ 网与公用 LCU 通信。

电站计算机监控系统在结构上分为主控级和单元控制级两级。主控级是电站实时监控中心,主要负责全厂重要机电设备的实时监视和控制,进行全厂的自动化运行(包括 AGC、优化运行、AVC 等)、历史数据处理、系统管理,以及进行全厂的人机对话等。主控级主要硬件设备包括厂级计算机 2 套,值班操作员工作站 2 套,工程师工作站 1 套。

单元控制级主要负责生产过程的实时数据采集和预处理,控制与调节,以及与上位机的通信联络等。设备包括机组现地控制单元 6 套,开关站现地控制单元 1 套,公用设备现地控制单元 1 套。

十二、结 语

(1)在枢纽工程勘察设计过程中,对工程的重大技术问题进行了深入研究,提出了合理的解决方案。所有重大技术问题的解决方案,均及时上报上级主管部门审查或备案。工程设计基础资料齐全,总体设计质量优良,满足工程建设的需要。

(2)工程开工以来,各专业设计人员深入施工现场,优化设计方案,积极配合施工,及时解决施工中出现的技术问题,对工程建设顺利进行、提前蓄水发电和节省投资均起到了积极的促进作用。

(3)枢纽布置合理,结构紧凑,满足枢纽供水、发电、防洪、排沙、防凌等工程任务的要求。大坝采用半整体式混凝土重力坝,泄水建筑物采用长护坦挑流消能方式,电站坝段采用厂坝联合受力的结构形式,有利于大坝抗滑稳定。坝基剪切带加固处理措施稳妥可靠,大坝抗滑稳定安全度满足规范要求。电站引水压力钢管国内首次采用坝面浅埋管布置形式,取得了显著的经济效益和社会效益。引黄取水口建筑物布置合理紧凑,分层取水设施设计构思新颖。电气主接线首次采用了单联双母线的接线方式,电站配电装置采用 SF₆ 全封闭组合电器,电站综合自动化按“无人值班、少人职守”原则设计,监控系统采用开放式全分布计算机监控系统。

在工程设计中采用了多项先进技术,如浅埋式压力钢管、低热微膨胀补偿收缩混凝土、泄水建筑物过流面抗冲磨混凝土、引黄取水口分层取水、先进的电气主接线、计算机监控系统等,都取得了良好的效果,获得了显著的经济效益。

(作者单位:水利部天津水利水电勘测设计研究院)