

金鸡滩水利枢纽设计优化及新技术应用

何善国, 谭巧矛, 张任芬, 梁 英, 许吉雨

(广西南宁水利电力设计院, 广西南宁 530001)

摘要 介绍金鸡滩水利枢纽设计优化、技术创新与新技术的应用情况。闸坝溢流堰通过设计优化改善了水力条件, 消力池长度由 40 m 缩短至 25 m; 船闸上下游引航道通过设计优化长度由 540 m 缩短至 385 m; 船闸结构布置和门型优化后闸室及闸首长度共缩短 19.5 m。厂房设置天井, 解决了副厂房自然通风与采光的问题。通过设计创新改善了闸室闸墙长廊道短支孔输水出流水力条件。坝顶多功能门机变频调速技术、液压新技术、固体自润滑免维护轴承等的应用解决了工程设计及运行中的一些技术难题。

关键词 工程优化设计; 船闸; 溢流闸坝; 河床式厂房; 金鸡滩水利枢纽工程

中图分类号 TV222 **文献标识码** B **文章编号** 1006-7647(2008)S1-0106-03

1 工程概况

金鸡滩水利枢纽位于右江下游、广西隆安县境内, 是珠江流域西江水系郁江干流综合利用规划 10 个梯级中的第 6 个梯级工程, 为河床径流式水利枢纽, 以发电和航运为主, 兼有灌溉等综合利用效益。坝址位于隆安县城上游 8 km 的右江金鸡滩河段, 距南宁市 96 km。坝址以上集雨面积为 32 506 km², 多年平均流量为 472 m³/s, 多年平均径流量为 149 亿 m³; 水库正常蓄水位为 88.6 m, 总库容为 2.309 亿 m³; 装机容量为 72 MW, 多年平均发电量为 3.343 亿 kW·h; 船闸设计通航能力为 1 000 t 级。

工程初步设计概算总投资为 6.152 亿元, 设计工期 3 年零 8 个月。主体工程于 2003 年 12 月开工, 2005 年 12 月船闸建成并通过验收正式通航, 2006 年 3 月第 1 台机组并网发电, 2007 年 2 月 3 台机组全部建成上网运行。

2 工程设计及优化

2.1 枢纽总体布置

枢纽总体布置曾拟定右岸船闸左岸厂房方案、左岸船闸右岸厂房方案和左岸船闸左岸厂房方案进行比选。经综合比较, 推荐采用左岸船闸左岸厂房方案。理由是坝区河段右河槽为天然航道, 电站厂房和船闸同在左岸并作为一期工程先施工, 有利于一

期施工导流和一期工程施工期间的正常通航, 虽然资金投入及施工强度均很大, 但可获得二期施工截流后船闸建成通航和电站 1 号机组利用二期围堰水位提前发电的工程效益。

枢纽水工建筑物有左岸接头坝、船闸、河床式厂房、溢流闸坝、右岸接头坝, 坝顶全长 310 m。一期工程施工中, 由于地质原因, 船闸闸室基坑开挖形成的左岸高边坡下部塌方并牵引中上部边坡变形开裂, 危及工程施工及山顶高压塔架的安全。经研究论证, 对枢纽局部布置做了优化调整: ①船闸往河中方向平移 2 m, 厂房安装间左边墙上部结构相应压缩 2 m; ②移走山顶高压输电塔架, 削挖降低高边坡高度并形成 120.0 m 平台, 把开关站从左岸坝头上游侧调移至该平台; ③在船闸上闸首左边下游侧增设一框架结构平台作为主变平台。枢纽布置调整后更显合理, 有利于船闸基坑下部边坡开挖, 也使电站厂房至主变平台、开关站出线更短更顺。

2.2 溢流闸坝布置及设计优化

溢流闸坝位于河床右主河槽, 为缩短溢流前沿宽度、增大泄洪能力、降低坝前洪水位、减少库区淹没损失, 采用开敞式低堰大孔口有闸控制布置形式, 设 7 孔净宽为 16 m 的溢流孔口, 溢流前沿全长 135 m。坝型为混凝土重力坝, 采用 WES 曲线实用堰, 堰顶高程 75.0 m, 消能方式采用底流消能。工作闸门选用弧形钢闸门, 由液压启闭机控制启闭, 工作闸门上

初步设计阶段溢流坝面曲线设计水头为 18 m ,消力池池面高程 1 号 ~ 2 号闸孔段为 65.0 m 3 号 ~ 7 号闸孔段为 67.0 m ,消力池长度为 40.0 m。技施设计阶段根据水工模型试验研究成果^[1-2] ,坝面曲线设计水头降为 13.6 m ,消力池长度缩短至 25.0 m。由试验成果可知 ,堰面设计水头降低后坝面压力分布更趋合理 ,坝面最大负压力值为 9.8 kPa ,既减少了坝体工程量 ,又改善了堰面水力条件。根据开挖揭露的坝地质条件 ,1 号 ~ 2 号消力池池面高程由 65.0 m 抬高至 67.0 m ,坝建基面抬高了 2 m。

2.3.1 上下游引航道优化

本船闸工程按 1 000 t 级船闸设计, 闸室有效长度为 190 m, 净宽 12 m, 吃水深度 3.5 m, 设计最大水头 13.8 m。初步设计阶段上下游引航道长度均为 540 m。由于坝址河段呈 S 状, 直线河段长度不足, 上下游引航道转变半径较大造成岸上开挖量较大。为解决此问题, 在技施设计阶段广西南宁水利电力设计院委托广西大学进行水工模型试验, 研究上下游引航道缩短的可能性及上游引航道导航墙采用透空式结构的可行性等。研究试验成果^[2]表明, 上下游引航道均可以缩短, 但上游导航墙不宜设计为透空式结构, 下游口门区外缘 120 m 航段需设置隔流板, 引航道内水流条件能满足通航要求。广西南宁水利电力设计院采用了该项试验成果并进行了设计优化, 优化后上下游引航道直线段长度均为 385 m, 上下游引航道共缩短 310 m, 节省工程投资 670 万元, 缩短了水下施工时间, 效益显著。2005 年 12 月船闸通过了验收并正式通航, 据现场观察及船主反映, 船只通过上下游引航道及口门区时较为平顺。

2.3.2 船闸结构布置及门型优化

在满足布置要求的前提下,为减少船闸主体工程量,结构设计阶段对船闸结构布置及门型进行了优化。为减小两侧墩墙的宽度并节省工程量,上闸首及闸室第 1~4 段采用整体式结构,取两边墩宽 8 m,闸首净宽 12 m,故上闸首总宽 28 m,比同类型的船闸约小 6 m。按规范要求,本闸室的有效长度为 190 m,在布置上充分利用上闸首的下游侧及下闸首的上游侧工作门外的有效空间,把闸室段的结构长度缩短至 178.5 m,闸室段缩短了 11.5 m。上闸首工作闸门选用下沉门,闸首长度缩短 8 m。船闸结构布置和门型优化后闸室及闸首长度共缩短 19.5 m,节省了工程量及投资,缩短了闸室施工期,优化设计效益显著。

3.1 电站厂房设置自然采光通风天井^[3]

为抵御洪水和保证厂房安全运行,一般将高变幅尾水位的中小型河床式水电站厂房设计成近乎封闭的建筑物。电站副厂房中下部各运行层以往常用的通风与采光措施是人工照明和机械通风,中央控制室等重要值班区域安装空调设备,工作人员长期在这样的环境中工作对身心健康不利。为改善副厂房自然通风与采光条件,提高运行值班区工作环境质量,金鸡滩水利枢纽工程发电厂房设计时在自然通风与采光措施方面进行了有益探索。该电站厂房横向底部宽度达 69.304 m,利用贯流式厂房流道长这一特点,把下游防洪墙往后移至尾水启闭平台处,下游防洪墙后移所留出的空间设置成天井,副厂房临天井一侧增设普通砌体围护墙,墙体布设可开启的普通玻璃窗,根据副厂房底部运行层工作环境及需要,天井范围从主机间延伸至安装间,为一槽形天井,其底部落至尾水管顶面,顶部开口宽取主厂房底宽的 1/12,即 6.1 m,因顶部外挑作交通通道故实际开口净宽为 4.74 m(图 1)。

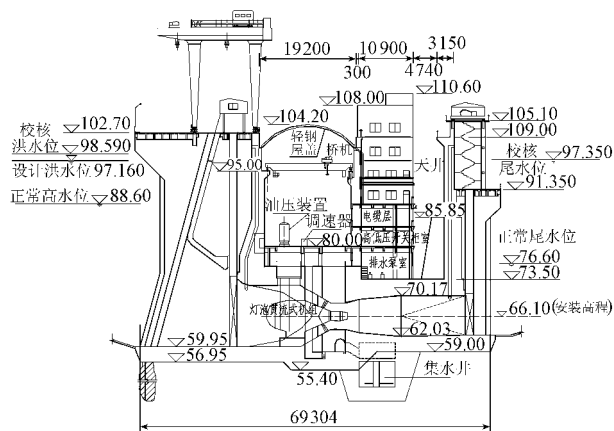


图 1 金鸡滩水利枢纽电厂主机间横剖面(单位:mm)

本工程应用建筑天井技术解决水电站副厂房中下部房间自然通风及采光问题,在广西中型水电站贯流式厂房工程设计上是首次尝试和创新。设置自然通风采光天井,使厂房及下游防洪墙结构受力更明确,实践证明其技术经济可行,之后在右江百色东笋水电站、左江龙州一级和二级水电站等多个工程中得到了应用。

3.2 船闸输水系统水力设计创新

本工程船闸闸室有效尺寸为 $190\text{ m} \times 12\text{ m} \times 3.5\text{ m}$, 最大通航水头为 13.80 m , 属中水头大型船闸, 闸室长宽比大于 $15:1$, 属长窄型闸室。船闸输水系统采用闸墙长廊道短支孔分散输水系统形式, 在国内同等规模且同类型输水系统中设计水头最高

(目前已建成同等规模且同类型输水系统船闸中,通航水头最高的贵港船闸为 13.10 m)。船闸采用闸墙长廊道短支孔输水系统形式,对于采用分离式结构的船闸闸室而言在闸墙底部布置主廊道是经济的,但该输水系统形式对阀门单边运行的适应性较差,出流水力条件不是很好,单边出流使船舶所受的横向力较大,对船舶稳定不利。为了解决这些问题,在金鸡滩船闸输水系统的水力设计中进行了一些探索与尝试,并经过了船闸模型试验^[4]验证和实际运行的检验。主要创新点有:

a. 闸室出水支孔间距突破了规范规定。根据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》、JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》规定,出水孔间距宜为闸室宽度的 1/4。金鸡滩船闸闸室净宽为 12 m,长宽比大于 15:1,如按 1/4 闸室宽度布置,出水孔间距为 3.0 m,则出水孔数量多达 48 个,出水孔较多且尺寸过小,施工难度增大。通过分析比较,最后短支孔间距采用 4.0 m,每侧布置 36 个出水孔,且自上游向下游分成 3 组不同尺寸的出水孔。模型试验成果及实际运行情况表明,出水孔段在输水过程较长时段内能均匀进入闸室,闸室内水流较平稳。

b. 闸室出水孔段设消力槛消能,改善了闸室水流条件。在闸室出水孔段内距离闸墙边 1.2 m 处各设一消力槛,槛高 0.35 m,槛宽 0.50 m,对调整闸室水流条件、改善闸室水流流态作用明显。

c. 进、出水口形式先进实用。上闸首廊道进水口采用闸墙垂直多支孔布置,下闸首增加旁侧泄水廊道,解决了船闸泄水时引航道平均流速较大、水流条件较差的问题。

3.3 坝顶多功能门机设计采用新技术

金鸡滩水利枢纽 $2 \times 1000 \text{ kN} / 2 \times 400 \text{ kN}$ 双小车双向门机装设于厂房上游坝顶,轨距 12.0 m,用于水轮发电机组及其附属设备等竖直运输进厂房安装和厂坝船闸金属结构的启闭。该坝顶门机的设计,除保持和借鉴已建工程的先进技术外,为满足电站设备进厂安装检修及闸门启闭的需要,大小车起升机构、运行结构均采用目前国内最先进的变频调速技术,为满足门机主小车斜拉启吊拦污栅的要求,在主小车上设置了拉紧装置,解决了主小车斜拉启吊拦污栅时产生水平分力和拦污栅吊入栅槽就位的问题。

3.4 船闸上闸首工作闸门采用平板下沉门

一般来说人字门适用于孔口尺寸较大、受力较大的闸首控制闸。金鸡滩船闸上闸首孔口尺寸为 $12.0 \text{ m} \times 8.55 \text{ m}$,通常情况下工作闸门应采用人字门,但从经济角度考虑,人字门门盒的存在必然使上闸首结构尺寸较大,工程量相应增大,同时,从技术

和运行方面考虑,采用人字门上闸首左、右侧均须布置控制闸门运行的液压泵站,造成设备投资增加,因而不采用人字门。上闸首工作闸门采用平板下沉门的优势是可以较大限度地减小上闸首结构尺寸,同时仅设置 1 个液压泵站即可控制上闸首闸门所有液压油缸的运行,大幅度节省了投资。但下沉门技术要求较高,因为闸门挡水高度大,液压启闭机油缸活塞行程达 9.5 m,根据该工程船闸通过能力和一次过闸时间要求,下沉门油缸启闭速度为 0.8 m/min (近期)和 2.0 m/min (远期),按此标准计算,油泵运行流量达 300 L/min ,这对液压系统的设计和设备性能的要求比较高,目前在国内较为罕见。

3.5 液压新技术的应用

金鸡滩船闸闸门及启闭机设计积极应用液压新技术,以提高闸门运行控制和维护管理水平。闸坝段 7 孔 $16.0 \text{ m} \times 14.5 \text{ m}$ 大型弧形钢闸门,船闸上闸首下沉式工作闸门,左、右侧输水廊道工作闸门,下闸首人字门,左、右侧泄水廊道工作闸门等均采用液压启闭机操作启闭。溢流坝弧形门液压启闭机液压泵站、上下闸首液压泵站液压系统的设计应用了比例控制技术,并采用了德国力士乐原装进口电液比例泵,满足了系统对油缸速度控制(如上闸首下沉式工作闸门油缸运行需要大流量)同步控制的要求,与常规设计相比精度更高、响应更快。

3.6 固体自润滑免维护轴承的应用

闸门液压启闭机吊头内均装设有免维护的自润滑球面向心关节轴承,该轴承具有调心、对偏斜不敏感、轴承受力均匀、承载能力高、可同时受径向和轴向荷载等诸多优点,可微量补偿闸门及油缸安装时产生的误差。以往国内船闸在进行人字门设计时,顶枢、底枢轴承均采用常规材料(如 ZQAl9-4)制造,而顶枢、底枢是人字门的承重设备,人字门频繁启闭的摩擦力对顶枢、底枢轴承的磨损很大,易发生老化、变形甚至卡阻现象,通常解决的办法是增设加油润滑装置,其缺点是人工加油的工作量很大,运行一段时间后顶枢及底枢易损坏(船闸人字门损坏的部件往往是顶枢、底枢轴承或轴头,如葛洲坝 3 号船闸下闸首人字门右侧底枢损坏),也不利于运行维护。三峡工程船闸人字门顶枢和底枢轴承采用德国迪瓦公司制造的自润滑免维护轴承,但价格较高。鉴于国内厂家产品质量已较高,金鸡滩船闸人字门顶枢、底枢轴承采用了国产固体自润滑免维护轴承。该轴承耐腐蚀,无须密封,可在水中或潮湿空气中工作,无需人工加油润滑,完全自润滑,50 年免维护,解决了下闸首人字门顶枢、底枢轴承老化、变形和卡阻问题。

(下转第 136 页)

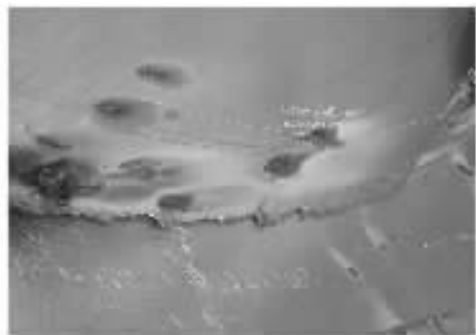


图 6 葛洲坝水电站导叶喷涂前后叶片裙边磨蚀状况



图 6 葛洲坝水电站导叶喷涂前后叶片裙边磨蚀状况

图 6 葛洲坝水电站导叶喷涂前后叶片裙边磨蚀状况

4 结 语

我国多泥沙河流上水轮机过流部件遭受磨蚀破坏,导致机组事故率上升,出力及效率下降,机组检修费用增加,水轮机磨蚀破坏已成为当前水电生产中亟待解决的问题。由于不同流域的泥沙含量、粒径级配、砂粒形状、硬度和过机流速不同,水轮机的材质、设计参数、加工工艺、机械性能、运行工况也不同,导致不同电站水轮机的磨蚀部件和破坏程度也

不尽相同。目前水轮机抗磨蚀破坏采用的主要方法是补焊打磨修型方法,不仅工作量大,检修工期长,花费大量的人力物力,而且很难控制变形,不能保证叶型的精确性,也不能保证过流面的光洁度。在材料研究方面,目前还没有一种可机加工的材料达到既抗空蚀又抗磨损的要求,所以通过过流面增强技术形成抗磨蚀涂层进行抗磨蚀防护很有必要。高速火焰喷涂方法在水轮机抗磨蚀方面应用效果显著。

参考文献:

- [1] 田震. 纳米塑料合金整体浇铸高抗磨蚀水轮机零部件 [C]// 顾四行, 胡金荣. 水轮机抗磨蚀技术研讨会论文集. 北京: 中国文史出版社, 2006: 235-236.
- [2] 李仁年, 李琪飞, 韩伟, 等. 水轮机引水、导水部件内部泥沙两相流动的数值模拟研究 [C]// 顾四行, 胡金荣. 水轮机抗磨蚀技术研讨会论文集. 北京: 中国文史出版社, 2006: 1-10.
- [3] 顾四行. 水轮机磨蚀综述 [C]// 顾四行, 胡金荣. 水轮机抗磨蚀技术研讨会论文集. 北京: 中国文史出版社, 2006: 28-33.
- [4] 高云涛, 朱国海, 付廷勤. 刘家峡水电厂 3 号机组扩容改造前后稳定性能分析 [C]// 胡金荣, 顾四行, 徐洪泉. 水轮发电机组稳定性技术研讨会论文集. 北京: 经济日报出版社, 2007: 83-85.
- [5] 李启章. 对大型机组振动、裂纹问题的看法 [C]// 胡金荣, 顾四行, 徐洪泉. 水轮发电机组稳定性技术研讨会论文集. 北京: 经济日报出版社, 2007: 115-118.
- [6] 侯辉昌. 泥沙对水轮机磨蚀成因与防止分析 [C]// 顾四行. 水机磨蚀论文集. 天津: 《水机磨蚀》编辑部, 2003: 30-53.

(收稿日期 2008-03-03 编辑 骆超)

(上接第 108 页)

4 结 语

a. 金鸡滩水利枢纽工程闸坝建成投产运用已近 3 年, 运行情况正常, 闸后消能充分, 流态稳定。

b. 设置通风采光天井, 使电站副厂房内部实现了自然通风和采光, 改善了运行区室内的工作环境。建筑天井技术简单, 经济可行, 值得推广应用。

c. 船闸采用闸墙长廊道短支孔输水系统, 通过设计创新, 改进其结构及出水孔布置, 改善了船闸窄型闸室单边出流的水力条件。模型试验和实际运行情况表明, 闸室内冲水及放水时水流较平稳, 引航道口门区水流平顺。

d. 坝顶多功能门机变频调速技术、船闸上闸首下沉式工作闸门、闸门液压泵站液压系统比例控制

技术、人字门顶枢及底枢固体自润滑免维护轴承等的应用, 解决了本工程设计及运行维护中的一些技术难题, 工程投产以来运行情况正常。

参考文献:

- [1] 广西大学. 金鸡滩水利枢纽整体水工模型试验研究报告 [R]. 南宁: 广西大学, 2003.
- [2] 广西大学. 广西隆安金鸡滩水利枢纽(技术设计)水工模型试验研究报告 [R]. 南宁: 广西大学, 2004.
- [3] 何善国, 张任芬, 袁国培. 贯流水电站厂房设置通风采光天井初探 [J]. 水利水电技术, 2006(9): 65-68.
- [4] 南京水利科学研究院. 广西右江金鸡滩水利枢纽船闸输水系统模型试验研究报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2004.

(收稿日期 2008-01-29 编辑 骆超)