



百色水利枢纽通航设施工程 省水船闸选型方案

阚栋栋，朱旭，张发茂

(中水珠江规划勘测设计有限公司，广东 广州 510610)

摘要：广西百色水利枢纽通航设施工程率先采用“省水船闸+升船机+辅助船闸”组合式通航建筑物总体布置方案，其省水船闸带两级独立梯形断面省水池，省水率可达 55%。介绍百色水利枢纽通航设施工程通航建筑物形式选择，阐述采用“省水船闸+升船机+辅助船闸”组合方案后，船闸下泄水流进入中间渠道后引起的升船机上游水位波动情况，以及全平衡式升船机在对接过程中对于水位变化的要求。为解决水位波动对升船机安全运行的影响问题，提出非省水船闸+泄水外排方案与省水船闸方案，并对两方案进行技术经济对比分析，最终确定采用省水船闸方案。

关键词：百色水利枢纽；通航设施；省水船闸

中图分类号：U641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)06-0135-07

Type-selecting scheme of water-saving ship lock for navigation facilities project at Baise water conservancy hub

KAN Dongdong, ZHU Xu, ZHANG Famao

(China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

Abstract: Baise water conservancy hub navigation facilities project in Guangxi takes the lead in the navigation building layout using a combination of “water-saving ship lock + ship lift + auxiliary ship lock”, with a water-saving ship lock that includes a two-level independent trapezoidal section water-saving pool, which can save up to 55% of water resources. We introduce the selection of the type of navigation building for Baise water conservancy hub navigation facilities project, and explain the water level fluctuations caused by the discharge flow of the ship lock into the middle channel after adopting the “water-saving ship lock + ship lift + auxiliary ship lock” combination scheme, as well as the requirements for water level changes during the docking process of the fully balanced ship lift. In order to solve the problem of the impact of water level fluctuations on the safe operation of the ship lift, we propose two schemes including non-water-saving ship lock + water discharge scheme and the water-saving ship lock scheme, and compare in terms of technical and economic aspects to determine the water-saving ship lock as the finally scheme.

Keywords: Baise water conservancy hub; navigation facilities; water-saving ship lock

省水船闸可大幅降低高水头船闸的工作水头，减小船闸下泄水流对下游水流条件的不良影响，还可有效缓解水资源贫乏地区航运用水和其他用

水之间的冲突。德国在 19 世纪 80 年代开始修建省水船闸，在美因—多瑙运河，从班贝克到克尔海姆共建造了 14 座省水船闸^[1]。我国从 20 世纪

收稿日期：2023-10-08

作者简介：阚栋栋（1978—），男，高级工程师，从事港口与航道工程设计。

60年代开始，先后进行了长江三峡、郑家岗、乌江银盘等多个省水船闸工程的研究，但实施得很少。2016年建成的长洲三四线船闸、2019年建成的飞来峡二三线船闸均采用双线互灌互泄省水模式，未配备独立省水池。国内建成的首座带独立省水池的省水船闸是小清河金家堰船闸，于2023年6月建成，配备一级独立省水池。国内对于带独立省水池的省水船闸的设计尚处于起步阶段。

本文以百色水利枢纽通航设施工程省水船闸为例，阐述省水船闸对于解决下泄水流影响下游渠道水流条件所起的关键作用，通过省水船闸与非省水船闸的方案对比展示省水船闸的经济性，

可为类似工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

广西百色水利枢纽通航设施工程是国务院《关于新时代支持革命老区振兴发展的意见》^[2]中明确支持的重大基础设施工程，是《全国内河航道与港口布局规划》^[3]和《珠江流域综合规划(2012—2030年)》^[4]等规划的重点建设工程，是贯穿通向云贵的南线右江航道关键性工程。工程布置于广西百色水利枢纽主坝左岸的那禄沟，上游接百色水库，下游于东笋电站坝下600 m处接入右江，距百色市区约12 km。工程总体布置见图1。



图1 工程总体布置

百色通航设施工程规模为 2×500 吨级船队兼顾 $1\ 000$ 吨级单船，采用船闸+升船机组合方案，船闸有效尺度为 $130\text{ m}\times 12\text{ m}\times 4.7\text{ m}$ (有效长度×有效宽度×门槛水深)，升船机承船厢有效尺度为 $130\text{ m}\times 12\text{ m}\times 3.9\text{ m}$ (有效长度×有效宽度×有效水深)。主要建筑物包括船闸及两侧挡水坝、垂直升船机、通航渡槽、中间渠道挡水土坝、中间渠道和边坡工程，线路全长4 384 m，设计年单向通过能力为602万t。

2 通航建筑物总体方案

船闸和升船机是通航建筑物的两种主要形式。单级船闸适应的通航水头通常不超过40 m，但采

用多级船闸时则不受水头的限制；升船机则多用以解决高坝通航问题。

百色通航设施工程最大通航水头113.6 m，属高坝通航，多级船闸、升船机两种形式以及船闸与升船机的组合均可实现过坝功能。对于本工程的通航建筑物形式，可考虑船闸+升船机组合、两级升船机、单级升船机及多级船闸等4个方案。

船闸+升船机组合方案投资最少、技术风险最低，金属结构设备较少，后期维护费用较低；两级升船机方案投资大、金属结构设备多，不利于后期维护；单级升船机方案具有建筑物少、布置集中、金属结构设备少、后期管理简单的优点，

但库区航道的岸坡稳定、主体段开挖高边坡安全问题, 以及建于高边坡上的挡水坝、渡槽、上闸首的安全稳定问题都较突出, 金属结构设备技术难度大, 投资也较高; 1级+连续3级船闸方案输水系统及省水池布置复杂、施工难度大、工程投资最高, 工程开挖工程量大且弃渣困难有可能导致投资进一步增加。综合考虑, 最终推荐采用船闸+升船机组合方案。

百色通航设施工程通航规模为 2×500 吨级船队兼顾1000吨级单船, 最大通航水头113.60 m, 上、下游水位变幅分别为25.00、5.64 m。通航设施工程采用“1级船闸+中间渠道+1级钢丝绳卷扬全平衡直升船机+辅助船闸”的组合式通航建筑物方案。船闸主要用于应对上游水位变幅, 升船机主要用于克服通航水头, 辅助船闸主要用于克服下游水位变率。该方案很好地适应了百色水利枢复杂环境条件和高水头、大变幅、快变率的复杂运行条件。该组合式通航建筑物方案存在的不足之处在于船闸泄水进入中间渠道不可避免地会造成中间渠道的水位波动, 严重时将会影响升船机的运行。

3 船闸泄水影响升船机运行的解决方案

百色通航设施工程通航建筑物形式采用船闸+升船机组合方案后, 位于第1级的船闸下游连接长距离的中间渠道和第2级升船机, 上游船闸运行过程中下泄的大量水体将会在两端封闭且狭长的中间渠道中产生涌浪、反射、叠加和振荡, 形成极其复杂的通航水流条件。由于全平衡式垂直升船机在承船厢对接过程中对于水位变化极其敏感, 要求承船厢内误载水深不大于 ± 15 cm^[5], 中间渠道内周期性振荡的水位将对升船机的安全高效运行产生直接影响。本工程船闸最大通航水头25 m, 一次泄水量约4.56万m³。根据中间渠道模

型试验成果, 如此大的泄水量进入中间渠道后, 升船机上闸首处产生较大的水位波动, 最大水位变幅超30 cm, 无法满足升船机的运行要求。

为解决中间渠道水位波动问题, 可考虑2种工程方案: 1) 非省水船闸+泄水外排方案, 船闸泄水不进入中间渠道, 通过工程措施外排至船闸下游的右江, 中间渠道水位恒定不变; 2) 省水型船闸方案, 可减少船闸下泄水量, 再通过对船闸工作阀门开启速度进行优化, 降低泄水峰值流量后, 配合升船机上游停泊段溢流堰溢水削峰, 减小中间渠道水位波动, 使升船机承船厢误载水深处于安全范围^[6]。

4 船闸形式比选

4.1 非省水船闸+泄水外排方案

非省水船闸闸室两侧根据闸室墙结构进行开挖, 开挖量相对省水船闸小, 闸室墙混凝土结构浇筑完成后两侧回填开挖料至适当高程。

船闸上闸首为分离式结构, 平面外轮廓尺寸为47.0 m×50.0 m(长×宽), 孔口净宽12.0 m。两侧边墩顶高程分为两级布置, 上游侧长10.75 m的顶高程为满足公路桥下净空需要取240.0 m, 下游侧长36.25 m的部分顶高程为232.0 m; 边墩宽11.5 m; 边墩底高程190.3 m; 底板宽8.0 m, 门槛顶高程为197.0 m。上闸首两侧边墩布置有灌泄水廊道及工作、检修阀门井。非省水船闸最大工作水头25.0 m, 上、下闸首灌泄水廊道工作阀门采用反弧门。

闸室结构长106 m, 利用上、下闸首长24 m的部分停船, 闸室有效长度为130 m, 孔口净宽12.0 m, 闸室墙顶高程232 m。闸室底板内布置有1条纵向输水廊道, 廊道截面尺寸为5.5 m×3.0 m(宽×高)。闸室两侧墙后填土高程为216.0 m^[7]。闸室结构断面见图2。

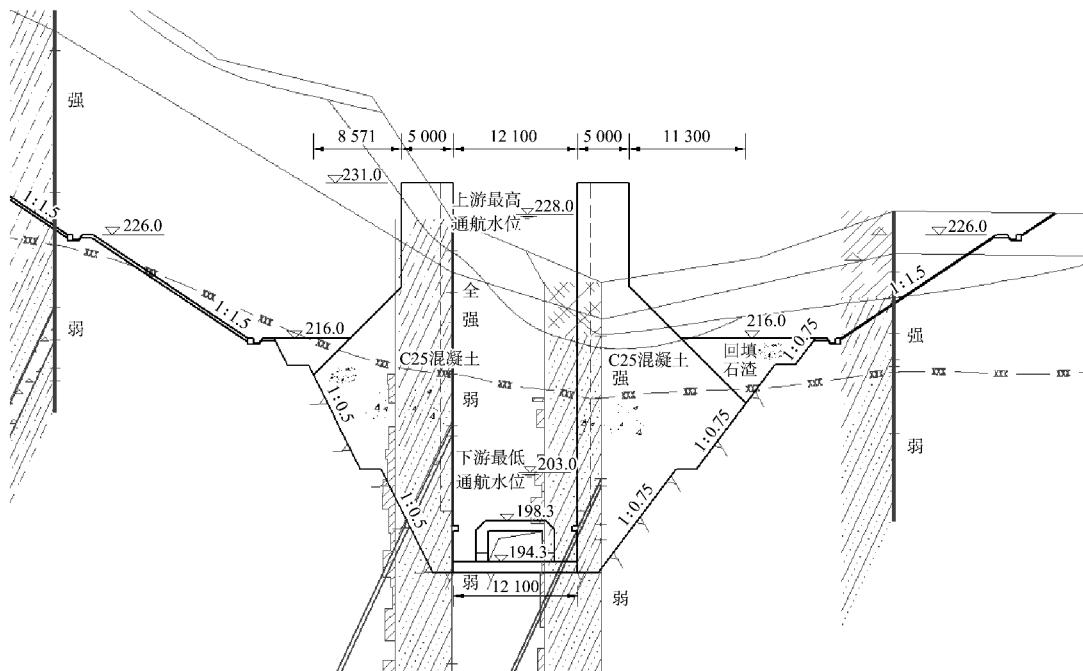


图 2 非省水船闸闸室断面 (尺寸: mm; 高程: m)

下闸首平面外轮廓尺寸为 $47.0 \text{ m} \times 50.0 \text{ m}$ (长×宽)，孔口净宽 12.0 m 。结构布置与上闸首下游段基本一致。为避免船闸泄水进入中间渠道引起水面波动，进而影响升船机正常运行，下闸首泄水廊道考虑采用旁侧泄水，下泄水体先泄入下游

主导航墙后的集水池，再通过泄水箱涵沿中间渠道底部外排至下游，泄水箱涵线路总长 2786 m ，见图 3。船闸运行期间，泄水间隔 $40\sim50 \text{ min}$ ，每次泄水量约 4.56 万 m^3 ，根据水力计算，箱涵采用双孔结构，单个孔口尺寸为 $4.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ (宽×高)。

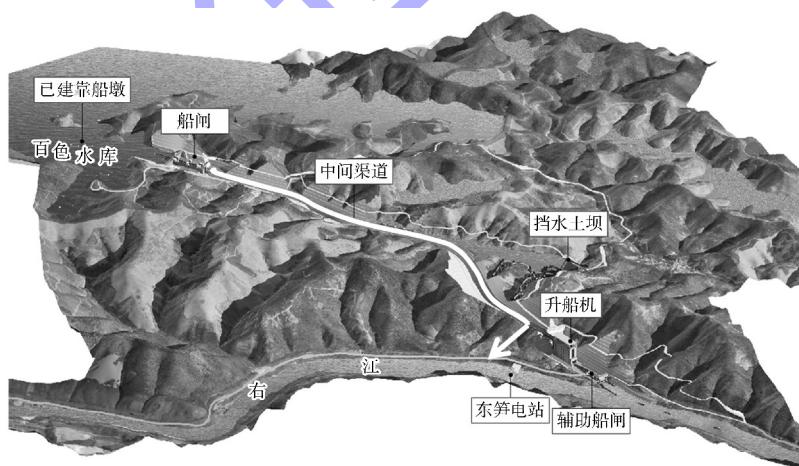


图 3 非省水船闸泄水箱涵线路

非省水船闸金属结构设备布置有上闸首挡洪事故闸门、上闸首人字工作闸门、下闸首人字工作闸门、下闸首检修闸门、防撞装置，以及左右两侧充泄水廊道工作阀门、充水廊道进口拦污栅、廊道检修阀门和浮式系船柱等。

上闸首挡洪事故闸门 1 孔设 1 扇，采用露顶

式平面叠梁定轮钢闸门形式，通过闸顶 $1 \times 1250 \text{ kN}$ 单向门机配液压自动抓梁装置(含定位销)进行启闭操作，闸门平时存放在挡水坝段两侧门库内。船闸上、下闸首各 1 孔设 1 扇工作闸门，采用人字门，每扇工作闸门通过 1 台水平摇摆卧式液压启闭机进行启闭操作。下闸首 1 孔设 1 扇

检修闸门, 采用露顶式平面叠梁钢闸门, 通过闸室顶部 1 台 630 kN 双向门机配液压自动抓梁进行启闭操作。设 1 套防撞装置, 采用钢丝绳防撞形式, 通过闸室顶部 1 台 2×320 kN 固定卷扬机进行升降操作。

输水廊道(含充、泄水)4 孔设 4 扇工作阀门, 形式均采用反弧门, 每扇阀门通过 1 台 1 000 kN/200 kN 液压启闭机配拉杆进行启闭操作。为保证输水廊道工作阀门具备检修条件, 充、泄水廊道工作阀门的上下游各设有 1 扇检修阀门, 共设 8 扇, 均采用潜孔平面滑动钢闸门形式, 共用闸室顶部 630 kN 双向门机配拉杆进行启闭操作, 闸门平时锁定在孔口上方。船闸闸室内共设 16 套浮式系船柱。

船闸共设置 16 扇闸门、6 套拦污栅、16 个浮

式系船柱、1 套防撞装置、39 套门(棚、柱)槽埋件、4 个门库、1 台固定卷扬机、1 台双向门机、1 台单向门机、6 套液压启闭机。

4.2 省水船闸方案

带省水池的省水船闸工作原理见图 4。一般在船闸边上设若干级蓄水池, 当船闸泄水时, 不是直接泄向下游, 而是先泄向蓄水池。泄水顺序为先泄向高处的蓄水池, 再依次泄向低处的蓄水池, 但总有一部分水无法泄入蓄水池, 只能泄向下游。船闸充水时, 先从蓄水池向闸室充水。充水的顺序恰好同泄水顺序相反, 首先从低处的蓄水池向闸室充水, 然后依次到高处的蓄水池。同样, 蓄水池的水也不能充满闸室, 不足部分由上游补充^[8]。

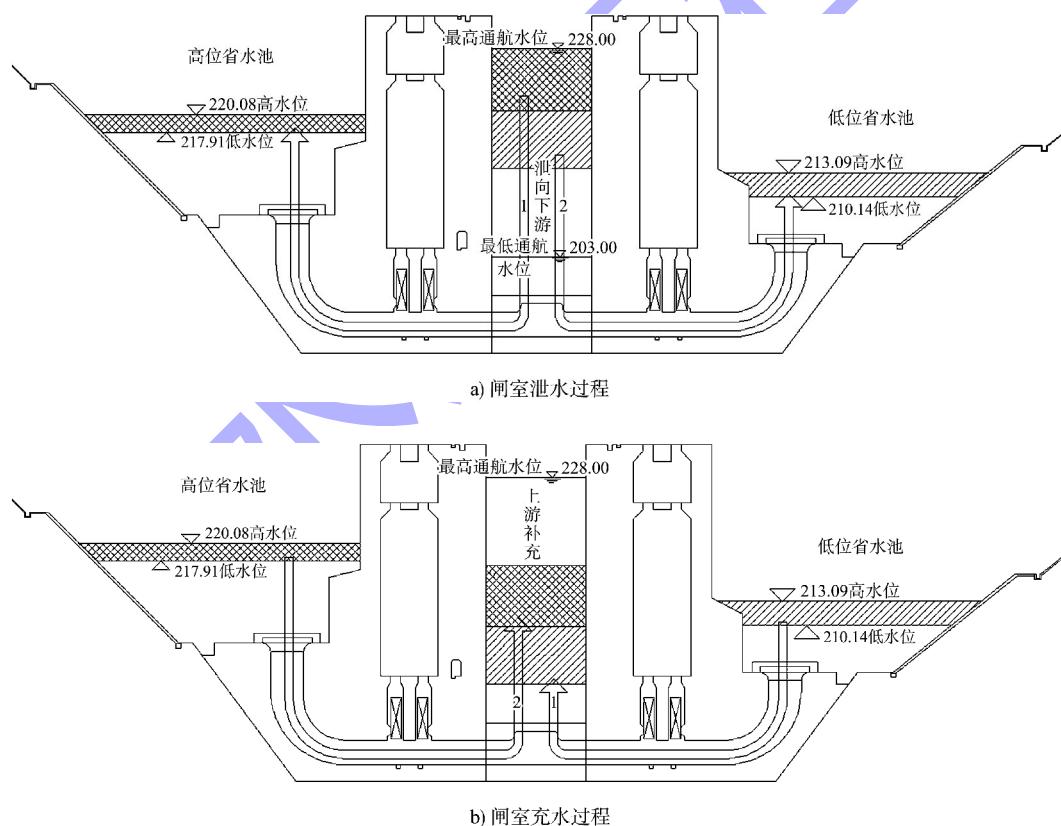


图 4 省水池工作原理 (单位: m)

省水船闸须在闸室一侧或两侧布置省水池, 根据本工程的地形特点, 利用闸室基础开挖形成的两侧开挖边坡布置省水池。为布置闸室与省水池间的廊道及满足省水池体积要求, 对闸室两侧的山体进行适当扩挖, 并在两侧省水池下游设置

挡水墙。通过两级省水池的调节, 船闸下泄水量可减少约 55%。

上闸首结构布置与非省水船闸相似。不同之处在于设置两级省水池后, 船闸最大工作水头由 25 m 消减至 11 m, 闸首廊道工作阀门采用平面

闸门。

闸室结构长 106 m，利用上、下闸首长 24 m 的部分停船，闸室有效长度为 130 m，孔口净宽 12.0 m，闸室墙顶高程 232 m。闸室底板内布置有 1 条纵向输水廊道，廊道截面尺寸为 5.5 m×3.0 m

(宽×高)。闸室两侧墙后设有梯形断面省水池，左侧为高位省水池，右侧为低位省水池。闸室中部结构段两侧闸墙墙身各设有 2 条省水池灌泄水廊道，与闸室底板输水主廊道连通。闸室结构断面见图 5。

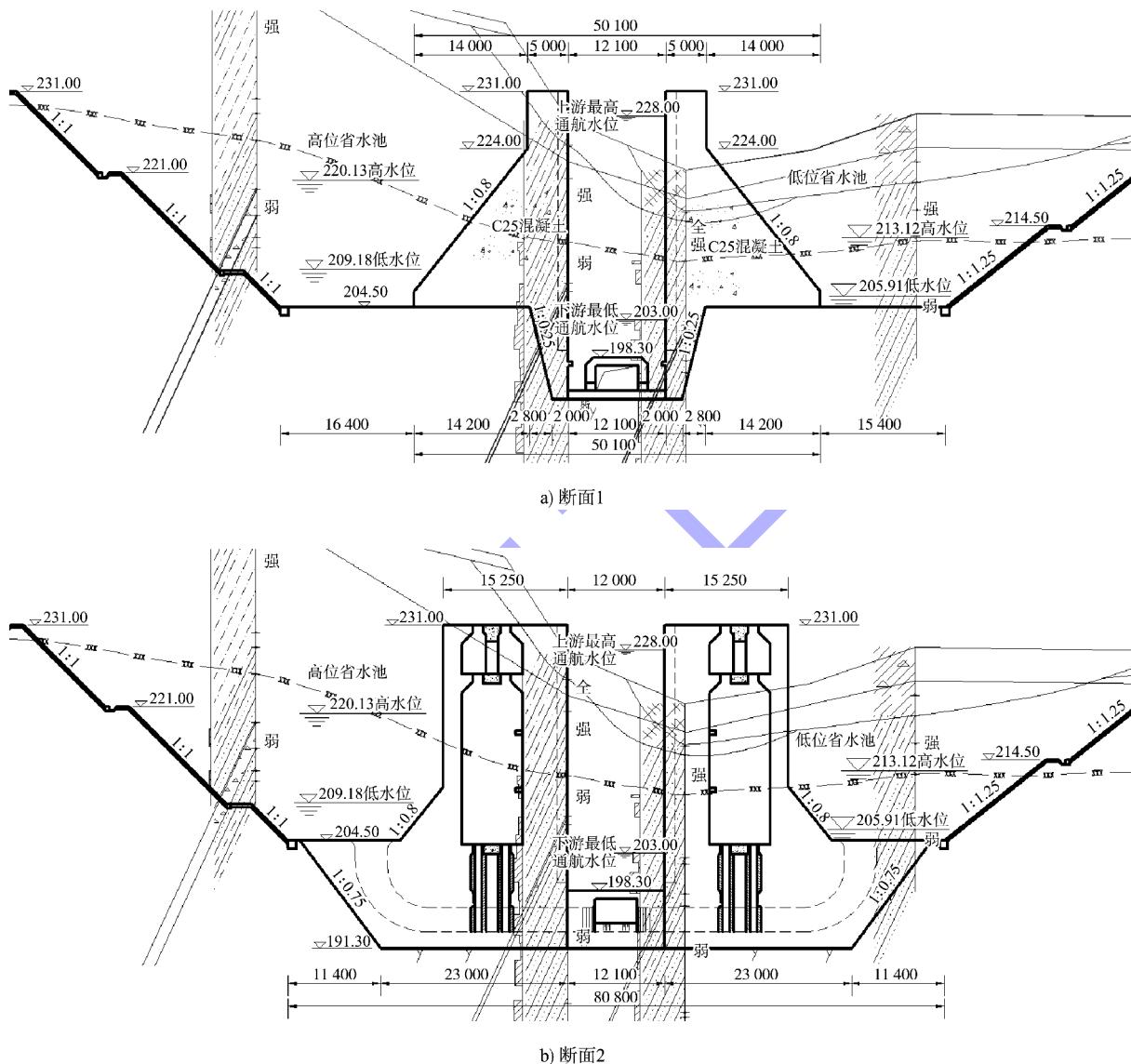


图 5 省水船闸闸室断面 (尺寸: mm; 高程: m)

下闸首结构布置与非省水船闸相似。下闸首的泄水廊道出口位于引航道内，泄水进入下游中间渠道。

金属结构方面，省水船闸方案相对于非省水船闸，由于船闸最大工作水头由 25 m 消减至 11 m，上、下闸首廊道工作阀门采用平面闸门，省水池充泄水廊道增加 8 扇平面工作阀门。其他金属结构设备与非省水船闸相同。

4.3 方案比选

省水船闸方案与非省水船闸方案投资对比见表 1。

采用省水船闸可减小船闸工作水头，优化输水阀门工作条件，使用平板门即可满足水力条件要求，结构简单、维护方便，且可减少约 55% 耗水量，节约水资源；由于工作水头较高，非省水船闸工作阀门采用反向弧形门，阀门工作条件较差，

但省去了省水池输水廊道, 总体上金属结构投资更少。非省水船闸工作流程简单, 通行效率较省水船闸高。工程总投资方面, 省水船闸建设省水池需增加工程开挖量, 但非省水船闸需建设规模更大的集水池与排水箱涵, 总投资较省水船闸多2 644万元。由于本工程的整体通过能力受升船机控制, 船闸按省水模式运行时虽然通行效率低于非省水船闸, 但仍高于升船机, 不影响整个通航设施的通行效率, 故综合考虑, 推荐采用更为经济、环保的省水船闸形式。

表1 省水船闸与非省水船闸投资对比

项目	省水船闸 投资/万元	非省水船闸 投资/万元	投资差值/ 万元
船闸主体结构	36 685	34 830	1 855
金属结构	8 839	8 316	523
排水箱涵	0	5 500	-5 500
溢流堰	478	0	478
合计	46 002	48 646	-2 644

5 结论

1) 百色通航设施工程采用的新型省水船闸, 通过两级省水池的调节, 降低船闸下泄水流的峰值流量, 解决了因中间渠道水位波动大而影响下游升船机运行的技术难题, 取得了较好的经济和环境效益。

2) 高水头船闸运行过程中下泄水量大, 船闸下游的通航水流条件通常难以满足, 在旁侧泄水条件不好的情况下, 采用省水船闸也是一种可行

(上接第98页)

比模型流量系数增大4.1%。阀门启门力随开度变化规律与模型基本一致, 流量系数增大不超过5%, 说明此前模型试验模拟效果较好。充泄水阀门净动水启门力略大于模型净动水启门力, 主要与水流影响增强和模型未设置顶止水和侧止水有关。

参考文献:

- [1] 李君, 宣国祥, 黄岳. 西津水利枢纽二线船闸工程可行性研究阶段输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [2] 胡亚安, 王新, 严秀俊. 西津水利枢纽二线船闸工程初

的解决方案。

3) 梯形断面两级独立省水池利用闸室基础开挖形成的两侧边坡形成, 省水池结构投资少、表面积大、省水率较高, 相比矩形断面省水池具有较好的经济性。

参考文献:

- [1] 钮新强, 童迪, 吴俊东. 高坝通航建筑物设计与研究[M]. 武汉: 长江出版社, 2020.
- [2] 国务院. 关于新时代支持革命老区振兴发展的意见[A]. 北京: 国务院, 2021.
- [3] 交通部. 全国内河航道与港口布局规划[A]. 北京: 交通部, 2007.
- [4] 水利部珠江水利委员会. 珠江流域综合规划(2012—2030年)[A]. 广州: 水利部珠江水利委员会, 2013.
- [5] 水利部水利水电规划设计总院, 长江勘测规划设计研究院. 升船机设计规范: GB 51177—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [6] 交通运输部天津水运工程科学研究院. 广西百色水利枢纽通航设施工程中间渠道通航条件物理模型及船舶航行试验研究[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究院, 2021.
- [7] 中水珠江规划勘测设计有限公司. 广西百色水利枢纽通航设施工程初步设计[R]. 广州: 中水珠江规划勘测设计有限公司, 2021.
- [8] 周玉华, 刘锋. 省水船闸初探[J]. 水运工程, 2006(10): 156-159.

(本文编辑 王璁)

- 步设计阶段输水廊道阀门水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [3] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992.
- [4] 刘平昌. 贵港和西津二线船闸扩能改造关键技术研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2015.
- [5] 中交水运规划设计院. 船闸启闭机设计规范: JTJ 309—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [6] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 赵娟)