



受限空间下龙头山二线船闸建设方案与运行方式研究

王志鹏¹, 吴凌波², 范红霞³, 邓伟², 胡鹏³

(1. 江西省港航建设投资集团有限公司, 江西 南昌 330200;

2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 已建赣江龙头山枢纽位于弯道段, 右岸一线船闸上下游引航道位于主流区, 受枢纽运行和施工不完善影响, 通航水流条件较为恶劣。拟在一线船闸右侧新建二线船闸, 综合考虑对一线船闸的完善, 提出降低现有隔流墙透空率并延长、增建一线船闸导航墙与靠船墩、新建下游护岸和辅以疏浚等措施, 统筹优化二线船闸布置方案。采用整体物理模型试验的技术手段, 在厂坝联合调度典型工况下验证两座船闸通航水流条件。结果表明, 采用新型结构将隔流墙透空率降低至20%以内, 同时泄水闸尽可能采用均匀开启方式, 尤其是2 a一遇流量泄洪时, 靠近船闸的20[#]~24[#]闸孔只能局开, 可将一线船闸最大通航流量自5 000 m³/s提高至5 a一遇的15 100 m³/s, 同时二线船闸最大通航流量也可达到5 a一遇。

关键词: 龙头山枢纽; 受限条件; 一线船闸完善工程; 二线船闸; 建设方案; 运行方式

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0143-07

Building scheme and operation mode of second-line ship lock in Longtoushan Junction under confined space

WANG Zhipeng¹, WU Lingbo², FAN Hongxia³, DENG Wei², HU Peng³

(1. Jiangxi Port Construction Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330200, China;

2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The built Longtoushan Junction on the Ganjiang River is situated on a bend, where the upstream and downstream approach channels of the first-line ship lock on the right bank are located in the main flow area. Affected by hydro-junction operation and incomplete construction, the navigation flow conditions remain poor. The second-line ship lock is planned to be constructed on the right side of the existing first-line ship lock. Comprehensive improvements are proposed to improve the flow condition, such as reducing the porosity rate of existing partition walls and extending the length, constructing additional guide walls and berthing piers for the first-line ship lock and building new downstream revetments with complementary dredging measures. The layout scheme of the second-line ship lock is optimized comprehensively. Navigable water flow conditions for the two ship locks are validated by physical model tests under typical operating conditions involving joint operation of the power plant and dam. The results demonstrate that implementing the new wall structure can decrease the partition wall permeability low than 20%. Uniform opening patterns for sluice gates are adopted, and 20[#] to 24[#] holes adjacent to the ship locks maintain partial opening when flood discharges reach once in two years specifically. The maximum navigable discharge of the first-line ship lock can increase from 5,000 m³/s to once in five years (15,100 m³/s), while the second-line ship lock can also achieve navigation flow of once in five years.

Keywords: Longtoushan Junction; constraint condition; first-line ship lock improvement project; second-line ship lock; building scheme; operation mode

收稿日期: 2024-08-07

作者简介: 王志鹏 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程项目建设和管理。

船闸是内河航道重要节点,随着国家高等级航道网和支线航道建设和完善,水运货运量快速增长,船舶大型化均要求新建或改建高等级船闸。一方面,高等级船闸通航时间要求高,如Ⅱ级船闸要求在20 a一遇洪水条件下通航^[1];另一方面,高等级船闸规模大,建设时需要占用更多的空间。而往往受多种因素限制,可供布置空间非常有限,枢纽大流量泄洪时,船闸引航道和口门区通航水流条件难以满足JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[2]要求,由此不得不寻求更优的船闸总体布置方案和改善通航水流条件的措施。

根据已有的类似研究可知,宋文涛等^[3]对改扩建船闸总平面布置的流程进行分析并应用于临淮岗复线船闸设计;李社平等^[4]通过船舶仿真模拟试验验证临淮岗复线船闸采用折线形引航道新型布置的合理性;北江清远枢纽已建一、二线船闸,在此基础上新建三线船闸预留四线船闸,苏莹等^[5]提出需要采取上游口门区增设导流墩、下游大燕河口布置导流顺坝和导流墩、拓宽浚深大燕河口的组合措施保障三线船闸通航安全;常山江招贤枢纽位于S形山溪河道,孙爱萍等^[6]通过枢纽整体物理模型试验,提出除采取疏浚工程措施外,还需要调整枢纽运行方式改善口门区通航水流条件;江西袁河龙尾洲枢纽布置在两个弯道的过渡段,肖钦等^[7]提出经多种组合措施后,船闸仍难以达到在20 a一遇洪水条件下安全通航,建议采用最大流量管理;王伟等^[8]提出应结合派河口一线船闸通航水流条件改善建设复线船闸并实施限制性通航管理;李华勇等^[9]针对万安枢纽二线船闸通航水流条件改善开展优化试验;祁永升^[10]总结船闸口门区不良流态的影响因素和改善措施,指出改善措施可分为工程和非工程两大类,其中工程类措施主要针对隔流墙平面布置和结构优化,非工程类措施主要指调整枢纽泄洪调度方式。

龙头山枢纽位于赣江下游丰城市境内,现状建有1座1 000吨级船闸,目前工程并未竣工验收,表现在一线船闸导航墙及靠船设施建设不完备、隔流墙透空率实施不到位,导致通航水流条件较为恶劣,洪水期经常停航。在龙头山枢纽二线船闸前期论证阶段,肖钦等^[11]对一线船闸通航

流量不足进行分析并提出采用降低现有隔流墙透空率的改善措施。至初步设计阶段,建设单位拟在龙头山枢纽二线船闸建设时统一谋划一线船闸完善工程,设计和研究单位提出的主要措施为降低现状隔流墙透空率并适当延长隔流墙长度,采用枢纽整体模型试验研究的技术手段对方案布置和枢纽运行方式进行比选优化,结果表明新型均匀透空隔流墙可有效改善口门区流态并降低工程对河道行洪的影响。

1 龙头山枢纽已建船闸运行概况

龙头山枢纽是赣江下游7座枢纽中的第6座,正常蓄水位24.2 m,总库容3.93亿m³,电站装机容量240 MW,自左岸至右岸依次为鱼道、河床式厂房、24孔溢流坝、1 000吨级船闸、右岸连接坝(含预留二线船闸),坝轴线全长约1 000 m,坝顶高程31.0 m。枢纽于2019年6月蓄水,2019年10月发电,2022年9月龙头山枢纽卫星图见图1。



图1 2022年9月龙头山枢纽卫星图

Fig. 1 Satellite image of Longtoushan Junction in September 2022

龙头山枢纽已建船闸布置于右岸,等级为Ⅲ级,可通航1 000吨级船舶,2019年4月试运行,2020年货物通过量21万t,2023年增长至330万t。采用“直进曲出”的过闸方式,闸室有效尺度为230 m×23 m×3.5 m(长×宽×门槛最小水深),上下游实体隔流墙分别长100和90 m(图2),上下游靠船段布置于透空式隔流墙末端,透空率达75%~80%,上下游引航道宽均为60 m,底高程分别为15.7和6.3 m。上游设计最高通航水位为20 a一遇坝上水位25.75 m,设计最低通航水位为开闸

调度最低水位的 22.3 m; 下游设计最高通航水位为 20 a 一遇洪水坝下水位的 25.5 m, 设计最低通航水位为 95% 保证率的水位 9.8 m。一线船闸自试运行

以来, 因上下游隔流墙透空率较大, 通航水流条件恶劣, 出于安全考虑, 洪季入库流量超 5 000 m³/s 后即停止运营, 严重制约了船闸通过能力。

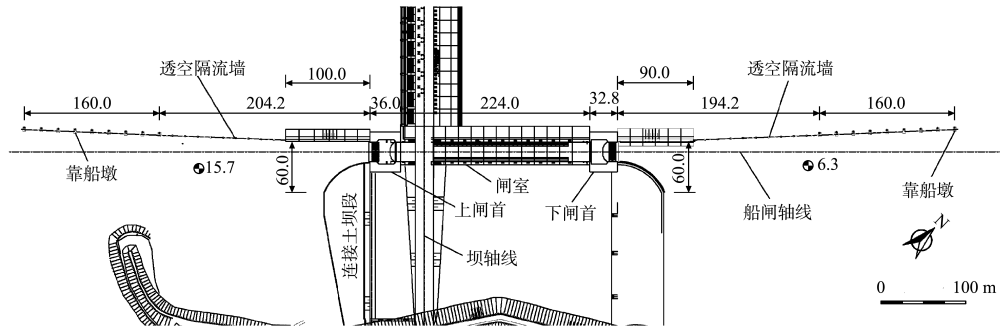


图 2 龙头山枢纽已建一线船闸平面布置 (单位: m)

Fig. 2 Layout of first-line ship lock built at Longtoushan Junction (unit: m)

2 二线船闸建设方案形成过程

2.1 工程可行性研究阶段独立建设方案

2021 年启动龙头山二线船闸论证工作。经论证, 拟建船闸布置于一线船闸右侧 100 m, 等级 II 级, 通航 2 000 吨级船舶, 设计船型主尺度为 85 m×13.8 m×(2.6~3.5) m(长×型宽×吃水), 闸室有效尺度 300 m×34 m×5.6 m(长×宽×门槛最小水深); 考虑下游枢纽调节, 下游设计最低通航水位 10.05~11.94 m, 上游设计通航水位和下游设计最高通航水位同一线船闸。由于一线船闸与二

线船闸权属不同, 工程可行性研究的第 1 阶段未考虑一线船闸完善工程, 独立进行二线船闸方案设计, 方案见图 3。二线船闸引航道为不对称式布置, 过闸方式为“曲进直出”, 上下游引航道长度均为 495.5 m、宽度均为 75 m, 其中导航调顺段长 195.5 m, 停泊段长 300 m, 上下游隔流墙掩护至停泊段末端, 在停泊段外侧设置长 85 m(1 倍船长)制动段; 隔流墙布置在二线船闸辅导航墙下游, 为更好地分水导流, 透空率为约 20%。工程总投资为 17.3 亿元。

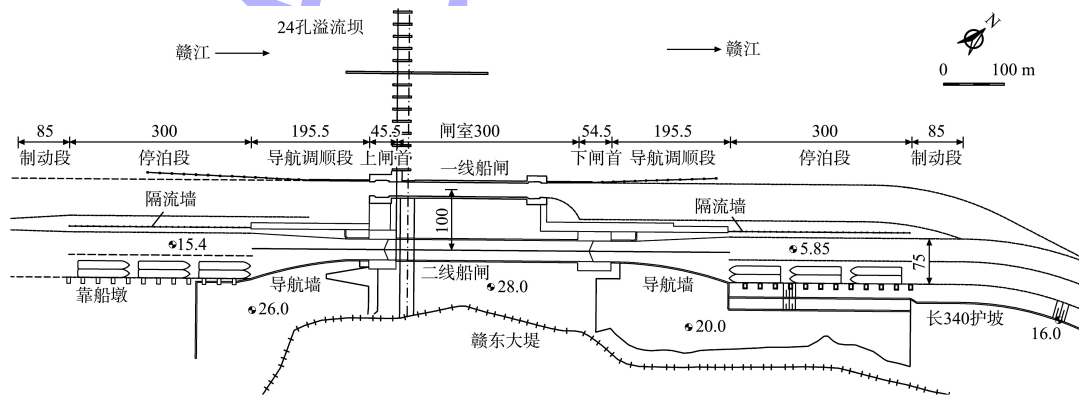


图 3 龙头山二线船闸工程可行性研究阶段的布置方案 (单位: m)

Fig. 3 Layout scheme for second-line ship lock project of Longtoushan Junction at feasibility study stage (unit: m)

2.2 初步设计阶段统筹建设方案

2021 年 11 月, 主管部门研判龙头山枢纽上下游航道整治工程、一线船闸运行现状和今后两座船闸运行维护管理形势, 结合模型试验单位和行业专家提出的二线船闸建设应充分考虑对一线船闸进行完善的建议, 决定将一线船闸完善工程纳

入龙头山二线船闸建设统筹考虑。设计单位提出综合考虑两座船闸通航水流条件的布置方案, 保持两座船闸中心距离 100 m 不变, 将新建隔流墙移动至一线船闸上下游引航道处。一线船闸过闸方式由“直进曲出”调整为“曲进直出”, 增建导航墙和靠船段, 对一线船闸透空率较大的隔流墙进

行改建,透空率由75%~80%降至20%,隔流墙上游向外延伸165 m、下游向外延伸390 m,均采用均匀透水的“百叶窗式”结构,改建和新建的隔流墙同时起到对二线船闸的掩护作用,本阶段设计

方案见图4。综合统筹考虑一线船闸完善工程和二线船闸新建工程后项目总投资20.46亿元,较二线船闸独立建设方案增加约3.16亿元。

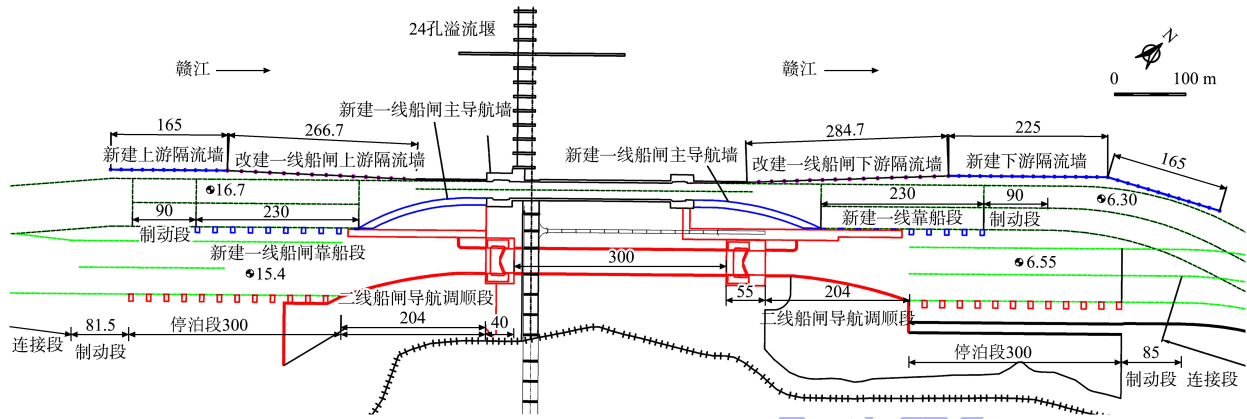


图4 初步设计阶段统筹考虑龙头山一线、二线船闸的布置方案(单位:m)

Fig. 4 Layout schemes of first-line and second-line ship locks at Longtoushan after fully considering in preliminary design stage (unit: m)

3 龙头山船闸通航水流条件试验结果分析

3.1 整体物理模型建立与验证

模型试验采用2021年5—7月实测1:5 000及2022年3月实测1:1 000水下地形,设计并制作了龙头山枢纽整体物理模型,模型几何比尺为1:100,模拟天然河道长度6.0 km。在2021年5月24日赣江1号洪水涨水期间进行了一次现场水文测验,布置6把临时水尺、3个声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)测流断面,模型和测验布置见图5。测验期间,龙头山枢纽处于三期围堰施工期,利用右侧8孔泄水闸施工导

流,入库流量7 100 m³/s,枢纽坝上和坝下水位分别为22.4和19.4 m,CS1测流断面位于枢纽上游,断面实测流速0.18~1.31 m/s,主流位于河道中间略偏右;CS2测流断面位于龙头山卡口段,主流位于河道中间偏左,最大实测流速2.32 m/s,右岸为回流区;CS3测流断面主流位于河道左侧,实测流速0.18~2.10 m/s。CS2和CS3测流断面流速分布验证见图6。经验证,水位相差在±0.05 m以内,流速相差一般在±0.1 m/s以内,满足JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[12]要求。

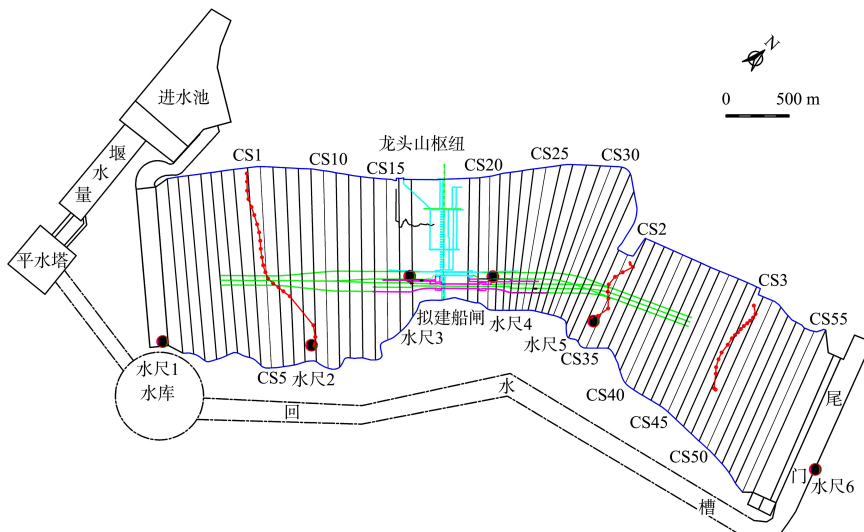


图5 龙头山枢纽整体物理模型布置

Fig. 5 Physical model layout of Longtoushan Junction

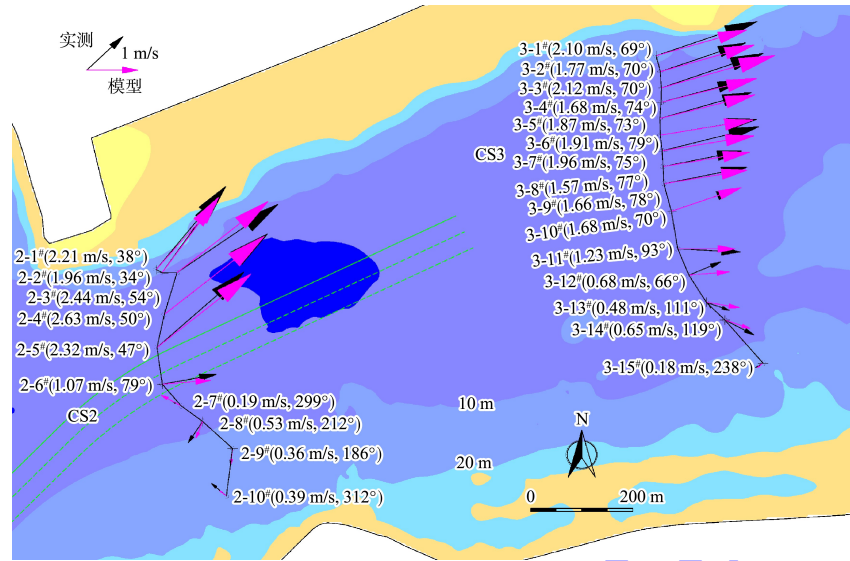


图 6 CS2 和 CS3 断面流速分布验证对比

Fig. 6 Verification and comparison of cross-sectional velocity distribution of CS2 and CS3 sections

3.2 试验工况

龙头山枢纽厂坝联合调度运行方式为: 当入库流量小于电厂满发流量 3 640 m³/s 时, 电厂发电, 泄水闸关闭, 坝前正常蓄水位 24.2 m; 流量大于满发流量后, 开启中间泄水闸弃水; 流量达到 6 530 m³/s 时电厂停机, 全部流量经右侧泄水

闸下泄, 库区水位下降至汛前水位 22.3~22.8 m; 入库流量达 13 408 m³/s 后, 泄水闸全开泄洪, 基本恢复天然河道状态。采用 2019 年 10 月—2022 年 6 月水位-流量关系并结合坝址处设计洪水控制坝下水位。试验工况见表 1。

表 1 龙头山船闸通航水流条件试验工况

Tab. 1 Test conditions for navigation water conditions of Longtoushan ship lock

工况	入库流量/(m ³ ·s ⁻¹)	坝前水位/m	坝下水位/m	运行方式	特征
1	1 890	22.40	13.90	电厂发电, 泄水闸关闭	电厂 4 台机组运行
2	3 640	24.20	17.26	电厂满发, 泄水闸关闭	电厂满发
3	5 000	24.20	17.15	12 [#] ~16 [#] 孔局开 2.1 m	电厂满发
4	6 530	22.80	18.50	12 [#] ~24 [#] 孔局开 3.3 m	电厂停机
5	11 000	21.05	19.85	6 [#] ~11 [#] 孔局开 3.0 m, 12 [#] ~19 [#] 孔全开, 20 [#] ~24 [#] 孔局开 3.5 m	2 a 一遇流量
6	15 100	22.79	22.59	24 孔全开	5 a 一遇流量
7	17 600	24.05	23.85	24 孔全开	10 a 一遇流量
8	19 900	25.75	25.50	24 孔全开	20 a 一遇流量

3.3 原设计方案试验结果

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》, II 级船闸制动段和停泊段水域最大纵向流速不大于 0.5 m/s、横向流速不大于 0.15 m/s, 口门区及连接段最大纵向流速不大于 2.0 m/s、横向流速不大于 0.3 m/s。

原设计方案改建现有隔流墙, 将其透空率降为 15%~25%, 上和下游分别新建隔流墙 165 和 390 m, 见图 4。工程后在电厂满发流量 3 640 m³/s

的条件下, 两座船闸上游侧通航水流条件均较好, 下泄尾水经弯曲河道约束后, 在下游通航水域形成较为明显的横流和回流, 停泊段、制动段、连接段(含口门区)部分水域横向和回流流速均超 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》要求。5 a 一遇流量 15 100 m³/s 的条件下, 一线船闸上游连接段、二线船闸停泊段、制动段和连接段部分水域横向流速超标, 一线船闸停泊段、制动段和二线船闸制动段部分水域纵向流速超标。

3.4 推荐方案试验结果

针对原设计方案流速超标的情况，进行了多组优化比选试验，最终提出推荐方案：上游段隔流墙向岸侧折线延长 105 m，透空率为 15% ~ 20%；对下游最后一个靠船墩至锚地上端间的弧形滩地进行扩挖，底高程由 8.5 m 降至 6.55 m，开挖线与岸按 1:3 衔接，下游新建隔流墙长度不变，轴线随船墩至锚地上端间的弧形滩地扩挖而向右岸略偏靠，隔流墙透水率由 20%~25% 进一步降为 18% ~ 23%。推荐方案上下游平面布置见图 7。

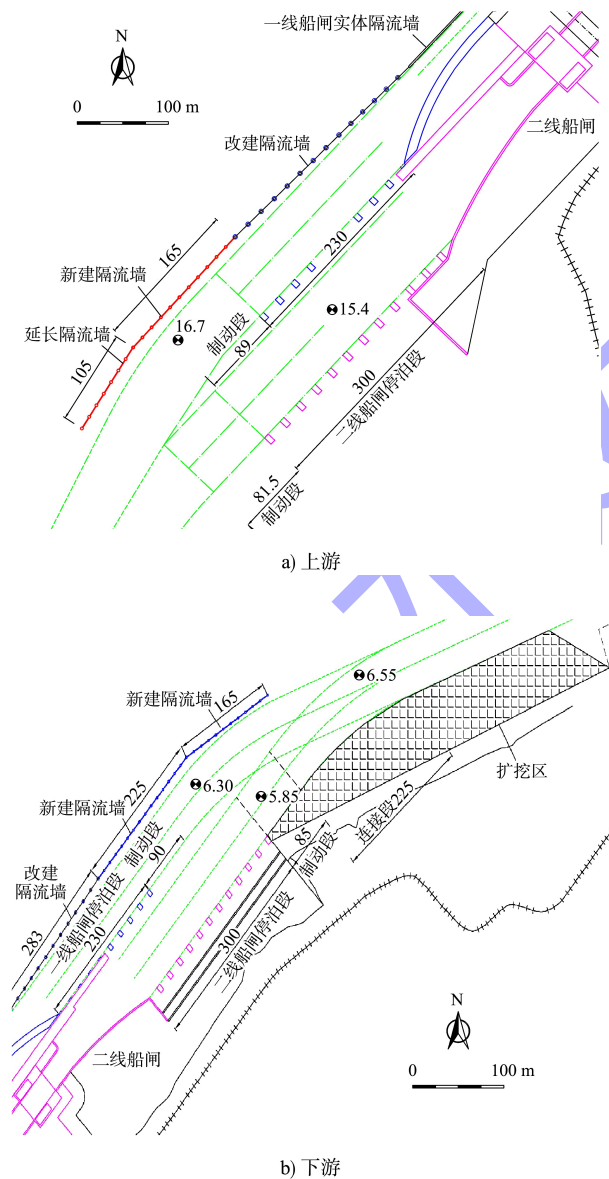


图 7 推荐方案的上下游平面布置 (单位: m)
Fig. 7 Upstream and downstream layouts of recommendation scheme (unit: m)

上游隔流墙向岸折线延长 105 m 后，上游通航水域横流范围和强度明显减小，两座船闸通航水流条件均得到了改善，一线船闸上游侧最大通航流量可由现状的 5 000 m³/s 提高至 5 a 一遇的 15 100 m³/s；10 a 一遇流量 17 600 m³/s 以下，二线船闸上游航道各区域纵横向流速均满足 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》要求，仅在 20 a 一遇流量 19 900 m³/s 时制动段部分水域横向流速超标。

将下游区右侧弧形滩地扩挖浚深，并将隔流墙透空率进一步降低后，两座船闸下游引航道隔流和减弱电厂尾水回流影响的效果提高，优化后一线船闸最大通航流量由现状的 5 000 m³/s 提升至 5 a 一遇的 15 100 m³/s，二线船闸的最大通航流量也能达到 15 100 m³/s。

综合试验结果，推荐方案的最大通航流量为 5 a 一遇的 15 100 m³/s。推荐方案上游 5 a 一遇流量下的流态见图 8a)，下游侧厂坝联合运行流量下的流态见图 8b)。



a) 上游 15 100 m³/s



b) 下游 5 000 m³/s

图 8 推荐方案流态

Fig. 8 Flow regime of recommendation scheme

通过试验,推荐龙头山枢纽调度运行方式为:当上游来流量小于或等于 $3\ 640\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,水量全部用于发电,根据来流量从小到大,对应的1#~8#机组依次运行,水库水位为24.2 m;当入库流量继续增大但仍不超过 $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,电站机组全开发电,均匀局部开启12#~16#闸门弃水,水库水位在23.7~24.2 m;增加至停机流量 $6\ 530\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,保持12#~16#闸门均匀局开,同时均匀局开17#~24#闸门,水库水位不超过23.0 m;来流量增加至 $9\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,12#~19#闸门全开,20#~24#闸门均匀局开,水库水位为22.3 m;来流量小于或等于2 a一遇的 $11\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,为保通航,仍需要控制水库水位不低于22.3 m,且继续保持20#~24#闸门均匀局开(由于这5个孔靠近船闸,试验结果表明如果闸门继续开大,将使得上游引航道内流速超标),6#~11#闸门均匀局开;来流量小于或等于5 a一遇的 $15\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,优先全开1#~19#闸门,20#~24#闸门最后全开,随着流量进一步增大,直至24孔全部打开,河道恢复天然状态。

4 结论

1) 龙头山枢纽坝址选择在河道逐渐束窄段,下游左岸为龙头山的山体、右岸为高滩,一线和二线船闸上下游引航道位于主流区,枢纽轴线与水流交角较大,加之一线船闸隔流墙透空率较大,泄水闸流量泄洪、厂坝联合调度运行时,上下游引航道及口门区通航水流条件较差。

2) 在初步设计阶段提出兼顾两座船闸通航水流条件改善的综合布置方案,并采用枢纽整体物理试验,分析研究两座船闸通航水流条件。结果表明,受现有条件限制,在10 a和20 a一遇洪水流量条件下,两座船闸引航道及口门区流速难以满足规范要求,建议最大通航流量降至5 a一遇。

3) 为保障两座船闸通航安全,龙头山枢纽一线船闸外侧应建设较长隔流墙,考虑降低工程影响,提出采用均匀透空式结构,可有效改善引航道及口门区水流条件。

参考文献:

- [1] 内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [2] 船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [3] 宋文涛,刘江林.改扩建船闸总平面布置的流程分析与应用研究[J].港口航道与近海工程,2024,61(3):42-47.
SONG W T, LIU J L. Research on process and application of general layout of ship lock reconstruction and expansion project[J]. Port, waterway and offshore engineering, 2024, 61(3): 42-47.
- [4] 李社平,邓伟.临淮岗复线船闸上游引航道船舶仿真模拟试验[J].水运工程,2022(7):168-172.
LI S P, DENG W. Simulation experiment of ship passing through upstream approach channel of Linhuaigang double-line ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2022(7): 168-172.
- [5] 苏莹,付菁,张春泽,等.北江清远枢纽三线船闸通航水流条件及优化措施[J].水运工程,2022(6):150-157,189.
SU Y, FU J, ZHANG C Z, et al. Navigation flow conditions of third-line ship lock of Qingyuan Hub in the Beijiang River and optimization measures [J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 150-157.
- [6] 孙爱萍,余春辉,颜志庆,等.山溪性弯道河段船闸通航水流条件试验研究[J].水运工程,2023(1):97-102,142.
SUN A P, YU C H, YAN Z Q, et al. Navigable flow conditions of ship lock in bend section of mountainous river [J]. Port & waterway engineering, 2023 (1): 97-102, 142.
- [7] 肖钦,赵凯,范红霞,等.复杂河道边界条件下新建船闸布置方案及运行方式[J].水运工程,2023(9):93-100.
XIAO Q, ZHAO K, FAN H X, et al. Layout and operation of new navigation lock under complicated river condition [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 93-100.