



复杂河道边界条件下 新建船闸布置方案及运行方式^{*}

肖钦¹, 赵凯², 范红霞³, 王建中³, 王勇³

(1. 江西省港口集团有限公司, 江西南昌 330008; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
3. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

摘要:袁河为赣江一级支流,中下段属丘陵与平原过渡段,河道蜿蜒曲折,平均比降0.2‰,洪水涨落较快。拟建龙尾洲枢纽为袁河航道提升工程最后1座梯级,坝址上下游为连续弯道,且有挑流凸嘴和多处边滩,复杂的河道边界给船闸方案的布置带来困难。本文建立龙尾洲枢纽整体物理模型,开展船闸通航水流条件试验,指出在现有边界条件以及规范要求20 a一遇洪水条件下,船闸难以达到安全通航,因此研究改善措施,结合袁河洪水特点,给出了适合船舶航行的水闸调度方式和最大通航流量,为工程设计和管理提供了依据。在洪水历时较短的河流上建设高等级船闸时,在满足过闸货运量的基础上,建议采用最大通航流量管理运行,优化设计隔流墙、靠船墩和导航墙,保证通航安全,节约投资成本。

关键词:过渡段河流;高等级船闸;物理模型;通航水流条件;改善措施;最大通航流量

中图分类号: U642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0093-08

Layout and operation of new navigation lock under complicated river condition

XIAO Qin¹, ZHAO Kai², FAN Hongxia³, WANG Jianzhong³, WANG Yong³

(1. Jiangxi Port Group Co., Ltd., Nanchang, 330008 China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The Yuan River is a primary tributary of the Ganjiang River. The middle and lower reaches of the Yuan River are meandering, which belong to a transitional river between hills and plains. The average bed slope is 0.2‰, and the flood rise and fall fast. The proposed Longweizhou project is the last step of the Yuan River channel upgrading project. The upstream and downstream reaches of the dam site are continuous bends, and there exists protruding banks deflecting flow and point bars. The complex boundary conditions make it difficult to design the ship-lock. The overall physical model of Longweizhou project is constructed to carry out the tests of navigable water flow conditions of the ship-lock. Under the current boundary conditions, the ship-lock is difficult to achieve safe navigation under the 20-year flood conditions required by the standard. Thus, the study of improvement measures is carried out to determine the operation regulation of lock gates and maximum navigable discharge suitable for ship navigation in combination with the flood characteristics of the Yuan River, which provides the basis for engineering design and management. When constructing high-grade ship-locks on rivers with short flood duration, it is recommended to adopt the maximum navigable discharge for ship-locks management and optimizing the design of the partition wall, berthing dolphin and navigation wall to ensure navigational safety and save investment costs on the basis of satisfying the cargo volume through the ship-lock.

Keywords: transitional river; high-grade ship-lock; physical model; navigable flow condition; improvement measures; maximum navigable discharge

收稿日期: 2023-01-13

*基金项目: 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y220011)

作者简介: 肖钦(1984—),男,高级工程师,从事港口与港航工程管理、研究工作。

随着内河水运的快速发展，河道上新建航运枢纽、已建枢纽船闸扩能工程增多。山区和过渡段河道蜿蜒曲折，具有弯道多、洲滩多、顺直段短和挑流凸嘴等复杂边界，给船闸工程方案布置带来困难，船闸口门区及连接段通航水流条件难以达到规范要求。因此，枢纽工程设计建设需采用整体水工物理模型试验或数学模型计算的方法，论证布置方案的合理性，通过优化试验完善方案。为消除或减少口门区和连接段存在的横流、回流甚至纵向流速超标的问题，开展了广泛的实践。目前改善船闸通航水流条件的措施主要分为两大类，一类为非工程措施^[1-5]，包含泄水闸及电厂运行方案优化和航线调整等；另外一类为工程措施^[6-10]，包含局部河势调整措施：修建丁坝、顺坝及洲滩疏浚或凸嘴切除；泄水闸或电厂与船闸间隔流措施：隔流堤长短、走向、透空率等，引航道口门区及连接段的扩挖。试验研究成果和国内已建船闸运行经验表明，在采取各种优化改善措施后，大部分船闸尤其在规范要求的高重现期洪水条件下，通航水流条件仍难以满足规范要求，需设置最大通航流量来保证船舶过闸安全，建议根据船闸通航管理流量优化设计隔流堤、船闸导航墙和靠船墩，节约投资成本。研究成果对复杂河道上新建航运枢纽方案布置和安全运行具有指导意义。

1 工程概况

1.1 袁河航道提升工程

赣江主要支流袁河是赣中地区主要水上交通运

输干线，20世纪50年代后先后新建了多处拦河坝，之后被截成数段，尤其是袁惠渠拦河坝引水工程引流，枯季下泄流量减少，造成袁河通航环境和条件降低。江西省水运重点项目袁河航道提升工程位于袁河下游段，上起浩吉铁路大桥，下至袁河河口荷湖馆村，全长103.5 km，河道平均比降0.2‰，为丘陵与平原相接过渡段，河道蜿蜒曲折，见图1。

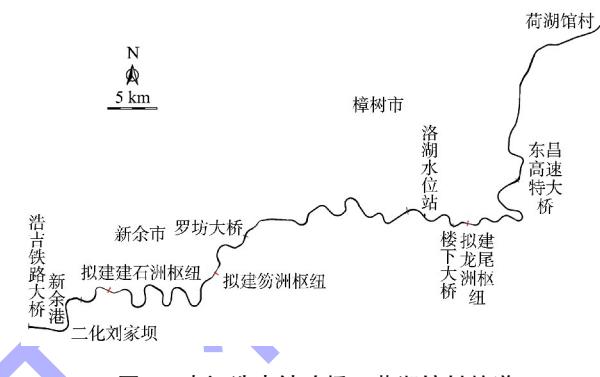


图 1 袁河浩吉铁路桥—荷湖馆村航道

1.2 龙尾洲航运枢纽工程

袁河航道提升工程自上而下布置石洲、笏洲和龙尾洲3座梯级航运枢纽，龙尾洲枢纽为最后一级经多组选址方案论证，选择在距离袁河河口35.5 km的龙尾洲。工程河段的河道弯曲，洲滩和凸嘴众多，自洛湖往下左岸分布有南蒲洲、兰溪洲、新江洲、碧环洲，右岸分布有新溪洲、龙尾洲和任家洲。坝址位于上下游两弯道中间较短的直线段，上游紧邻兰溪洲和楼下嘴，下游紧邻新江洲，见图2。自左岸至右岸依次为左岸连接坝（鱼道穿越）、泄水闸、船闸和右岸连接坝。

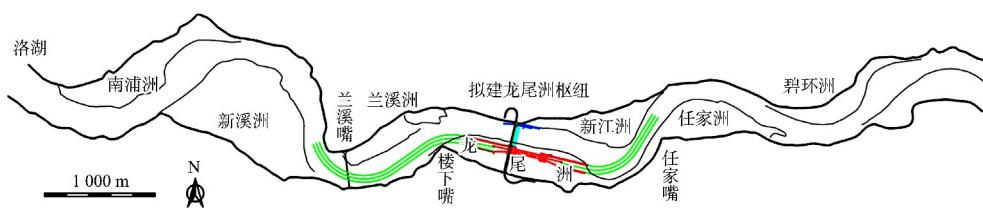


图 2 龙尾洲枢纽所在河段河势

龙尾洲枢纽正常蓄水水位 30.5 m, 右岸布置Ⅱ级船闸 1 座, 阀室有效尺度为 $230\text{ m} \times 34\text{ m} \times 5.0\text{ m}$ (长度 \times 宽度 \times 门槛水深), 上下游最高通航水位为 20 a 一遇设计洪水位, 考虑河道疏挖后分别为

34.95 和 34.75 m, 上游最低通航水位为水库汛期最低水位 30.0 m, 下游最低通航水位为赣江龙头山枢纽上游的最低通航水位 23.7 m。船舶进出闸方式为曲进直出, 上下游导航调顺段各长 141 m,

泄水闸与船闸之间布置墩板式隔流墙, 长度为329 m。上下游停泊段长度均为230 m, 各设12个靠船墩, 间距为20 m。上下游引航道底高程分别

为25.5和19.5 m, 宽度均为70.0 m。泄水闸位于左岸, 采用宽顶堰形式, 总宽169.5 m, 由10孔组成, 每孔净宽14.0 m, 底高程24.0 m, 见图3。

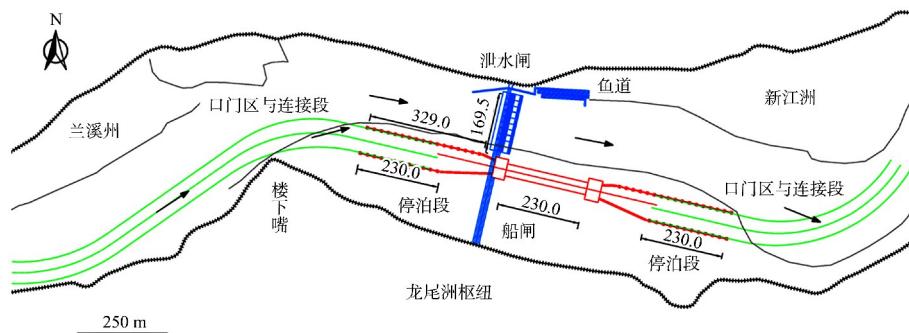


图3 袁河龙尾洲枢纽总平面布置 (单位: m)

1.3 河道水流特性

袁河航道提升工程干流上的主要测站为芦溪、宜春、茅洲、江口、洛湖5站。江口站位于航道整治工程起点上游; 洛湖站位于龙尾洲坝址上游5.5 km处。根据水文分析, 拟建龙尾洲坝址处年均流量为149 m³/s, 3—7月径流占全年67.6%, 6和7月平均流量分别为790和761 m³/s, 见表1。多年1%、2%、50%、98%保证率流量分别为1 000、700、85、12 m³/s, 见图4。

表1 龙尾洲枢纽1975—2020年月径流量统计

月份	月径流量/(m ³ ·s ⁻¹)			百分比/%
	最大	最小	均值	
1	417	13	67	3.7
2	374	18	90	5.0
3	542	33	182	10.2
4	547	70	243	13.5
5	653	68	265	14.8
6	790	79	311	17.4
7	761	27	209	11.7
8	466	31	116	6.4
9	266	19	89	5.0
10	290	17	66	3.7
11	243	11	74	4.1
12	232	25	81	4.5
平均	227	73	149	100

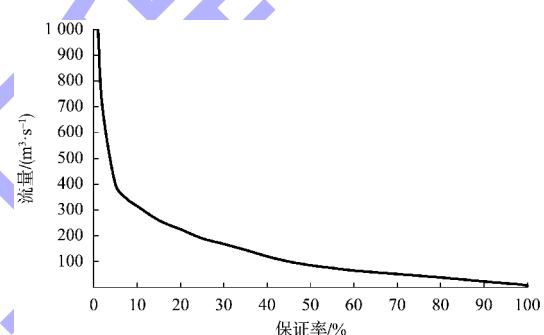


图4 龙尾洲坝址日均流量保证率曲线

袁河属雨洪式河流, 洪水由暴雨形成, 基本遵循山区河流暴涨暴落的特性, 一般发生在3月下旬—7月上旬, 年最大洪水多出现在5—6月, 受台风影响也可能出现在7—9月, 1次洪水历时约3 d。袁河洪水易受赣江洪水顶托影响, 1次洪水过程可达3~5 d。根据江口水文站资料, 推算龙尾洲坝址断面设计洪峰流量成果见表2, 坝址处频率为5%和50%的洪水流量分别为3 410和1 590 m³/s。

2019-07-10和2022-06-06分别发生了流量为3 330 m³/s(相当于5%频率洪水)和1 490 m³/s(相当于50%频率洪水)的大洪水, 现场观测水面线, 统计坝址上下游11 km河段水面平均比降分别为0.12‰和0.13‰, 坝址上游卡口段最大水面比降达0.26‰。

表2 龙尾洲坝址断面设计洪水成果

频率/%	0.33	0.5	1	2	3	5	10	20	50	90
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	4 960	4 710	4 270	3 810	3 550	3 410	2 760	2 280	1 590	1 150

2 龙尾洲整体水工物理模型

2.1 模型设计与制作

物理模型几何比尺 1:80, 范围上起枢纽轴线以上 2.6 km、下至枢纽轴线以下 2.4 km, 模拟天然河道长度为 5.0 km, 见图 5。水工模型满足

几何和水流运动相似, 计算得到水流流速比尺为 1:8.94, 流量比尺为 1:57 216, 糙率比尺为 1:2.08, 主河槽为拉毛的水泥面、洲滩上塑料草加糙后满足阻力相似。根据 2021 年 11 月 1:2 000 实测地形, 初拟设计枢纽方案制作模型, 见图 6。

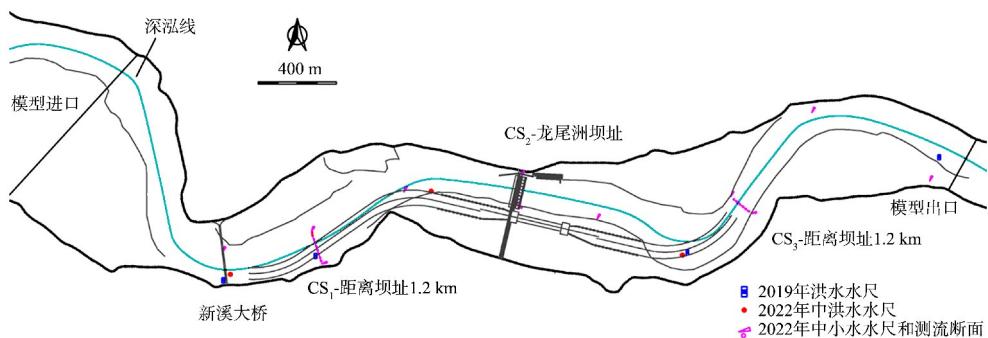
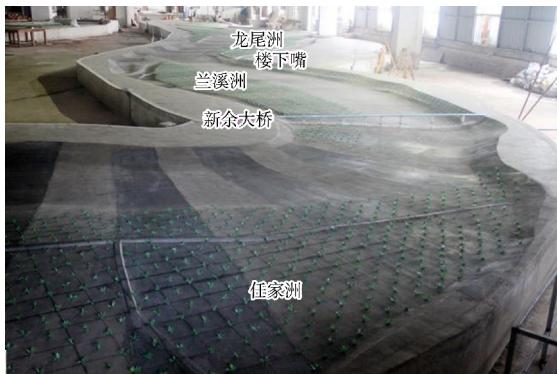


图 5 模型布置与水文测验布置



a) 主体河道



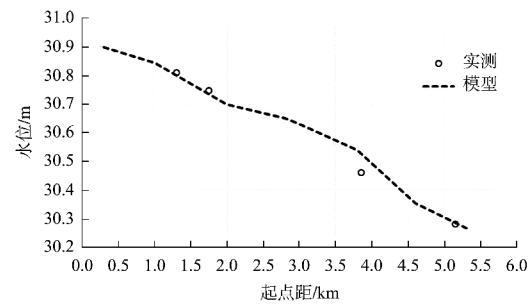
b) 水工建筑物

图 6 枢纽方案制作模型

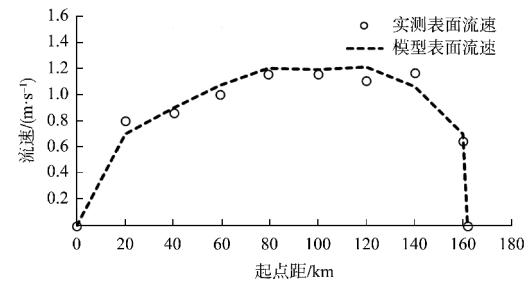
2.2 模型验证

采用 2019-07-10 流量 $3 330 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 2022-06-06

流量 $1 490 \text{ m}^3/\text{s}$ 两次洪水位、2022-07-09 流量 $298 \text{ m}^3/\text{s}$ 水位与断面流速分布资料, 开展模型水流运动相似验证, 水文站与断面位置见图 5。2022 年 6 月洪水水面线和 2022 年 7 月中小水流速分布验证见图 7。由图和试验观测可知, 模型可以模拟龙尾洲枢纽所在河段水流运动特性。



a) $Q=1 490 \text{ m}^3/\text{s}$ 时 2022-06-06 中洪水水面线验证



b) CS₁-上游距离坝址 1.2 km

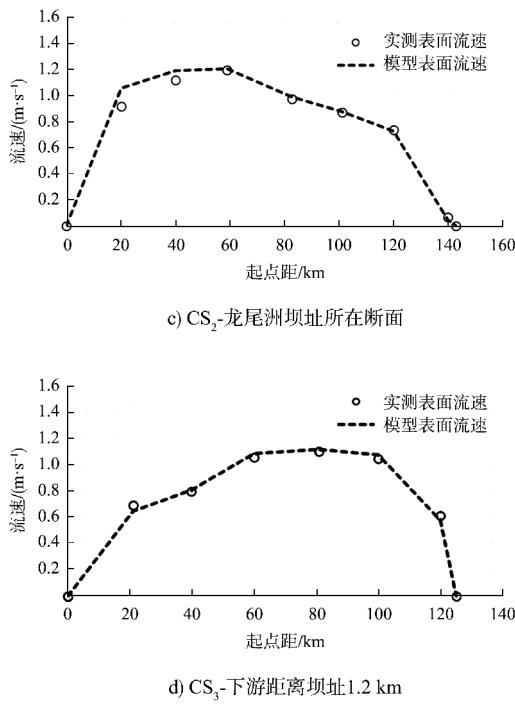


图 7 模型水面线和断面流速分布验证

3 通航水流条件及改善措施

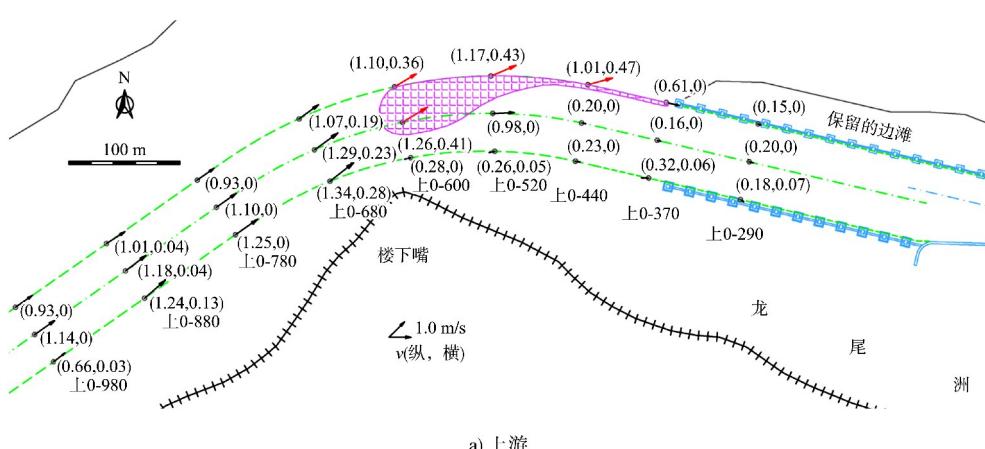
3.1 通航水流条件判别标准

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》，Ⅱ级船闸引航道与口门区水域通航标准为：1) 口门区纵向流速低于 2.00 m/s，横向流速低于 0.30 m/s，回流流速低于 0.40 m/s；2) 引航道导航和调顺段宜为静水，上两段以外引航道内平行航线的最大表面流速不应大于 0.50 m/s，垂直航线的最大流速不应大于 0.15 m/s。

3.2 原方案通航水流条件试验结果

原方案上游引航道布置在弯道与直线段的过渡区，受楼下嘴挑流影响，口门区及过渡段横流显著，

当上游来流量达 750 m³/s 时，隔流堤至楼下嘴通航水域横向流速开始超标；当来流量为 950 m³/s 时，横流最大达 0.47 m/s，见图 8a)、9a)。下游侧引航道布置在凹岸弯顶处，当中间区闸门集中开时，受左岸新江洲边滩的挤压，下泄水流斜向流入口门区及连接段，当来流量为 950 m³/s 时，最大横流流速达 1.32 m/s，同时还有强劲的回流，最大回流流速达 0.61 m/s，见图 8b)、9b)。

图 8 上游来流量 $Q=950 \text{ m}^3/\text{s}$, 水闸 4#~5# 阀门集中开时, 原方案上下游侧通航水域流态

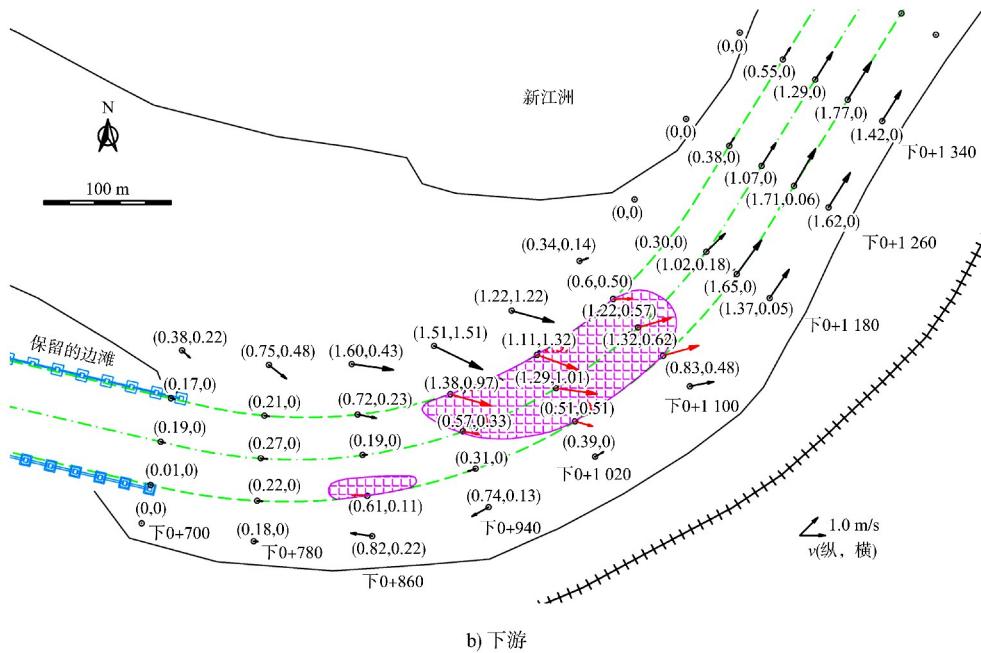


图 9 $Q=950 \text{ m}^3/\text{s}$, 4[#]~5[#]闸门集中开时, 原方案上下游通航水域表面流速分布

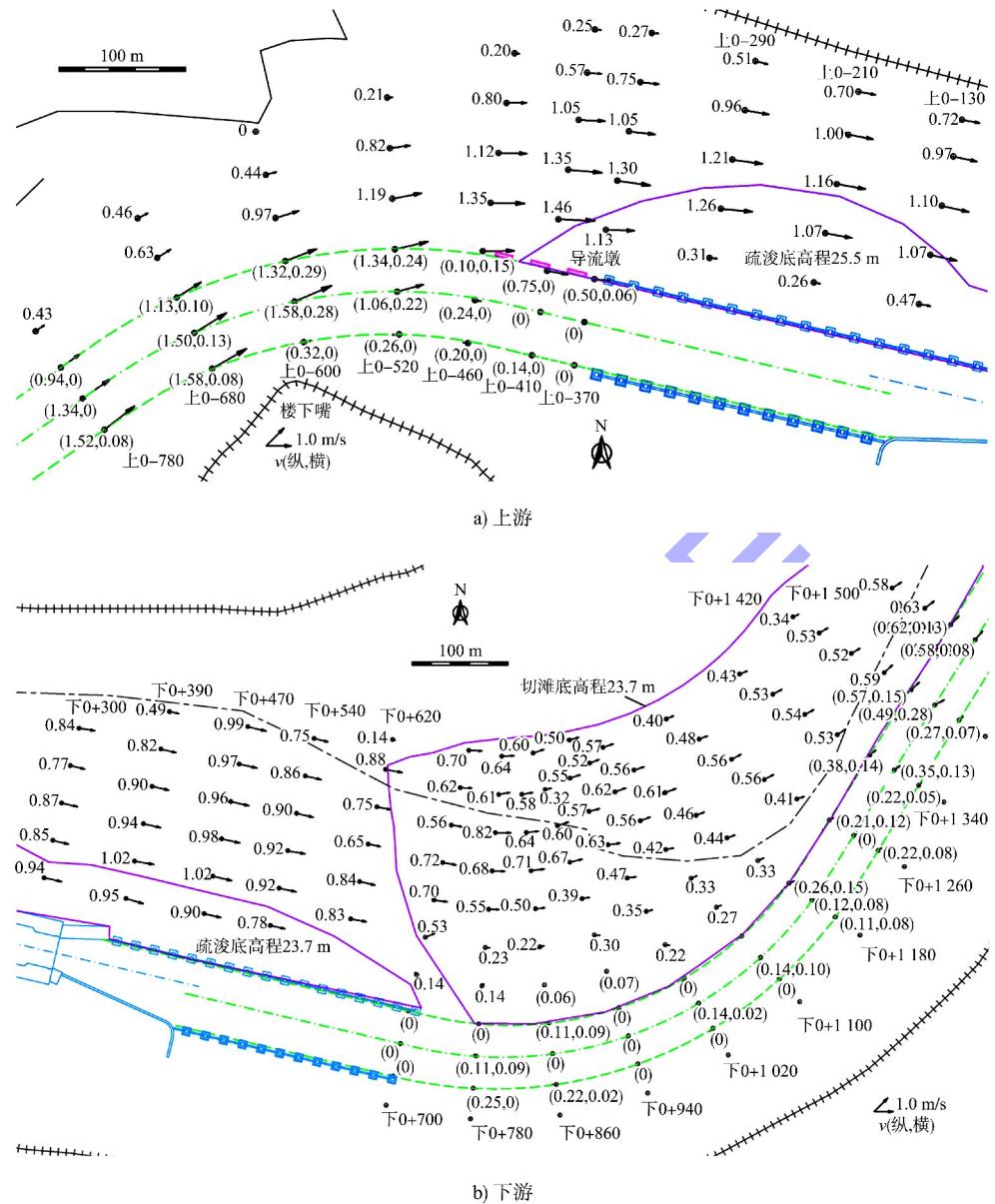
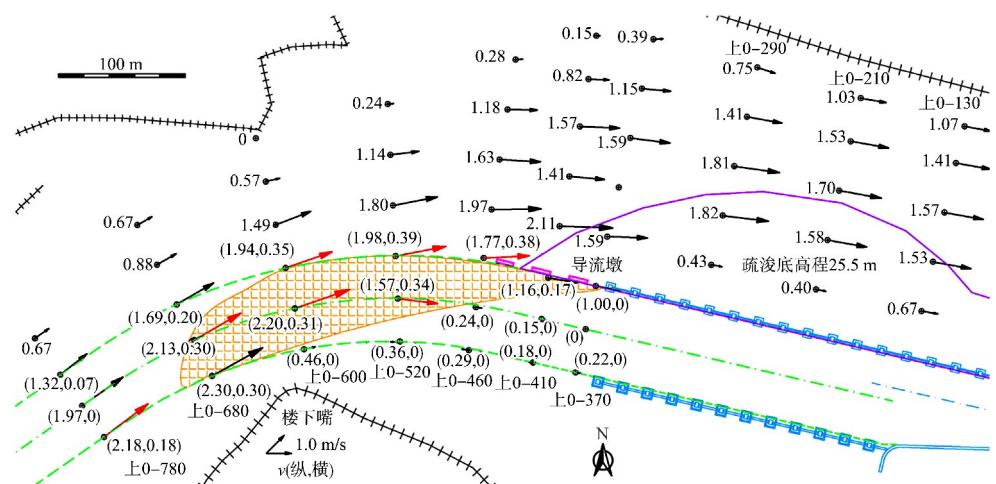
3.3 优化方案通航水流条件试验结果

龙尾洲船闸为Ⅱ级船闸, 最高通航水位为 20 a 一遇洪水, 对应流量为 $3410 \text{ m}^3/\text{s}$, 在该流量时船闸各区域通航水流条件应满足规范要求。由原方案试验结果可知, 由于坝址处直线段较短、上下游为连续弯道、上游楼下嘴挑流和下游新江洲凸岸边滩挤压影响, 在较小流量时, 上游楼下嘴外侧横流即明显超标, 下游侧口门区、连接段横流和回流均严重超标。

针对上述问题开展优化试验, 改善措施包括: 1) 泄水闸采用不同运行方式: 左、中、右集中开或全部平均开。2) 上下游船闸外侧龙尾洲保留边滩疏挖。3) 上游兰溪州边滩和下游新江洲边滩疏挖。4) 导流堤延长或新增隔流墩。

受征地和水利堤防限制, 上游楼下嘴无法切除, 在该条件下经多组试验, 采取闸门平均分散开运行+上游保留龙尾洲边滩疏浚至 25.5 m(与上

游航道及河道疏浚保持一致)+上游隔流堤外新增 3 个菱形隔流墩+下游保留龙尾洲边滩疏浚至 23.7 m(与水闸下游疏浚保持一致)+下游新江洲边滩疏浚至 23.7 m(与水闸下游疏浚保持一致)的组合优化措施, 当来流量为 $950 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上下游通航水域水流条件均满足规范要求, 见图 10。当来流量为 $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上游引航道口门区与连接段航道纵向流速为 2.30 m/s , 超过规范要求的 2.00 m/s , 最大横向流速 0.39 m/s , 也超规范, 见图 11。受复杂河道边界条件约束, 即使采取多种改善措施, 最高通航水位对应流量条件下, 龙尾洲船闸的通航水流条件仍未达到规范要求, 船舶不能安全过闸。根据试验结果, 推荐龙尾洲船闸的最大通航流量为 $950 \text{ m}^3/\text{s}$ 。其累计保证率为 $1\% \sim 2\%$, 每年遭遇的天数非常有限, 未降低船闸货运量通过能力。

图 10 $Q=950 \text{ m}^3/\text{s}$, 1[#]~10[#]闸门平均开时, 优化方案上下游侧流场分布图 11 $Q=1350 \text{ m}^3/\text{s}$, 1[#]~10[#]闸门平均开时, 优化方案上游侧流场分布

4 结语

1) 在弯曲河道布置航运枢纽, 受弯道水流、挑流凸嘴和众多边滩及顺直段较短等影响, 船闸布置受限, 通航水流条件难以达到规范要求, 可采用分散平均开启水闸调度运行、疏挖边滩、延长隔离墙或布设隔离墩、拓宽或浚深引航道等组合措施改善通航水流条件。

2) 复杂边界河道上修建高等级船闸, 采取多种改善措施后仍难满足在最高通航水位时安全通航, 当河道洪水历时较短, 不影响过闸货运量时, 可采取最大通航流量管理船闸运行, 保证船舶过闸安全, 同时优化船闸隔流墙、靠船墩和导航墙结构设计。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韩康, 余凯文, 赵建钧, 等. 常山江阁底枢纽通航水流条件及方案优化试验研究[J]. 水运工程, 2021(8): 139-144.
- [3] 颜志庆, 赵建钧, 翁晋德, 等. “S”形急弯河段通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(6): 128-134.
- [4] 赵家强, 于广年. 韩江东溪船闸通航水流条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2019(10): 134-140.
- [5] 黄骏, 赵建钧, 翁晋德. 大角度弯道河流通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2017(4): 146-150.
- [6] 王彪, 何飞飞, 王效远, 等. 弯曲窄槽型河段多线船闸通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(4): 108-115.
- [7] 王伟, 王建中, 杨志, 等. 引江济淮工程派河口船闸通航水流条件及改善措施[J]. 水运工程, 2021(3): 138-144.
- [8] 彭永勤, 张绪进. 虎渡溪枢纽下引航道口门区通航水流条件研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(1): 18-19, 22.
- [9] 郑红杰. 上游引航道透空隔流堤布置与通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2022(12): 146-151.
- [10] 吴惠国, 孙逸豪, 史英标, 等. 曹娥江清风船闸引航道通航水流条件[J]. 水运工程, 2022(4): 138-145.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 92 页)

北槽承接了上游的绝大部分流量, 泄水不畅, 从而导致了卡口段水流过急。

2) 整治方案实施后, 航槽内浅区段流速较工程前, 整治流量下增加 0.13 m/s, 多年平均流量下增加 0.32 m/s, 消滩判数均小于急滩消滩判数临界值, 过渡段浅区的冲刷历时增长, 水流与航槽走向较为一致, 航槽内无明显的斜流和横流等碍航流态, 船舶通行水流条件良好。整治方案有效缓解卡口段急流特性的同时, 维持疏浚区的稳定。

参考文献:

- [1] 长江航道规划设计研究院, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 航道工程设计规范: JTJ 181—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [2] 张万富, 舒荣龙, 姚志珍. 西南水运工程科学研究所汊道水流特征和阻力损失[J]. 水运工程, 1988(7): 13-20.
- [3] 李永贵. 溪锥滩航道的整治[J]. 中国水运, 2001(10): 41.
- [4] 吴家浩. 乌江航道滩险整治研究[J]. 水运工程, 2002(9): 62-64.

- [5] 国家发改委. 长江经济带发展规划纲要[R]. 北京: 国家发改委, 2016.
- [6] 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江上游合江门—界石盘河段生态航道建设工程工可报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2016.
- [7] 长江航道局. 川江航道整治 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [8] 史明礼, 苏娅, 乔丛林, 等. 山区河道糙率变化规律浅析[J]. 水文, 2000(2): 19-22.
- [9] 交通运输部天津水运工程科学研究院. 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程: JTS/T 231-4—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [10] 许光祥, 曾峰. 急滩消滩水力指标的合理表达式[J]. 水运工程, 2010(11): 103-106.
- [11] 许光祥, 邓明文, 童思陈, 等. 急滩通航水力工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [12] 杨胜发, 赵晓马, 王涵. 长江上游卵石急滩消滩水力指标研究[J]. 水运工程, 2007(8): 78-81, 92.
- [13] 交通部天津水运工程科学研究所. 叉鱼礁浅滩整治效果分析[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 1978.

(本文编辑 王璁)