

· 航道及通航建筑物 ·



抚河疏山水利枢纽船闸通航水流条件研究*

付旭辉, 何京霖, 张波, 唐荣岭, 刘予希, 杜洪源
(重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 为满足水运需求, 解决船闸引航道口门区受河段地形和涉河建筑物影响而导致的通航条件困难等问题, 保障船舶安全通行, 以抚河疏山水利枢纽船闸工程为例, 采用数值模拟方法, 对枢纽船闸上游引航道口门区通航条件进行计算分析, 针对不良流态问题提出优化方案措施, 并对方案前后枢纽通航条件进行对比分析。研究表明, 调整船闸平面布置等措施对改善设计阶段的枢纽船闸上引航道口门区通航条件是有效的。研究成果可为抚河疏山水利枢纽船闸工程通航及其他类似河段工程提供技术支持。

关键词: 船闸; 引航道; 通航水流条件; 数学模型

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0072-07

Navigable flow condition of ship lock of Shushan water conservancy project in Fu River

FU Xuhui, HE Jinglin, ZHANG Bo, TANG Rongling, LIU Yuxi, DU Hongyuan
(National Inland Waterway Rehabilitation Engineering and Technology Research Center,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To meet the needs of water transportation, solve the problems such as difficult navigation conditions caused by the river section topography and river-related buildings in the entrance area of the ship lock approach channel, and ensure the safe passage of ships, this paper takes Shushan water conservancy project in Fu River as an example, and uses numerical simulation method to calculate and analyze the navigation conditions of the entrance area of the upstream approach channel of the lock. Aiming at the problem of bad flow pattern, the optimization scheme and measures are proposed, and the navigation conditions of the hub before and after the scheme are compared and analyzed. The research shows that the measures such as adjusting the plane layout of the lock are effective in improving the navigation conditions of the entrance area of the upper approach channel of the lock in the design stage. The research results can provide technical support for the navigation of Shushan water conservancy project in Fu River and other similar river section projects.

Keywords: ship lock; approach channel; navigable flow condition; mathematical model

船闸是使船舶顺利通行而形成集中水面落差的通航水工建筑物, 船闸口门区、上下游引航道和连接段作为船舶通行的重要通道^[1], 应避免产生横流、回流等不良流态, 保障通航安全。近年

来, 随着区域经济的飞速发展, 通航需求量日益增加, 流域梯级规划中需要建设枢纽通航建筑物, 其中船闸修建会受到河道地形条件、船闸布置形式以及涉河建筑物等因素的限制^[2], 引发通航困

收稿日期: 2023-06-15

*基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021-05); 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCXZD2020030); 贵州省交通运输厅科技项目(GZJT2021-221-012); 长江航道局科研项目(CJHDJHT20211200041)

作者简介: 付旭辉 (1976—), 男, 博士, 副教授, 从事水利工程、生态水利研究。

难等问题。目前，已有众多学者在改善通航水流条件方面做出了相应研究，并提出一些工程和非工程等有效措施^[3]。彭永勤等^[4]对白石窑改扩建船闸通航水流条件进行试验，得出增设直线隔流堤、开挖边滩等措施对改善下引航道口门区通航条件是有效的。蒋春钢等^[5]针对口门区出现横流和斜流的问题，基于室内模型试验，提出疏深挖槽、延长隔流堤和回填隔流带等综合措施降低口门区纵、横向流速和回流速度。孙爱萍等^[6]探究了山溪性弯道河段不良水流条件形成的主要原因，依托物理模型试验得出，调整枢纽运行方式和疏浚局部河道是降低口门区纵、横向流速和回流流速的有效综合措施。陈明等^[7]针对新建船闸水流条件困难的问题，提出合理的凸岸开挖、凹岸潜坝和分水墙的布置等综合措施能有效改善水流条件。李明德等^[8]对株洲枢纽船闸下引航道口门区及连接段的河道右岸滩地采取综合整治措施，较好地解决了下引航道口门区及连接段通航、淤积等问题。现有改善通航水流条件的方法虽然颇多，但仍没有一种由点及面的措施可以直接解决因不同地理因素导致通航水流条件困难的问题，需要

根据具体情况展开分析。

疏山水利枢纽拟建船闸工程上引航道口门区临近左岸山峰处，同时，上引航道上游 1.1 km 处有抚吉高速大桥，受山峰和涉河建筑物影响，设计航线较为蜿蜒，船闸口门区流态和通航水流条件较差，且涉河建筑物通航孔处航线与河道主流交角较大，存在不利影响。本文以疏山水利枢纽拟建船闸工程为研究背景，对工程河段进行数值模拟研究，对比分析设计方案和优化方案，因地制宜地提出调整船闸平面布置的方法，以期在船闸设计阶段能有效改善上引航道口门区的通航水流条件且减少工程造价，并为抚河疏山水利枢纽拟建船闸工程通航以及其他类似河段工程提供技术支持。

1 工程概况

1.1 河段概况

抚河疏山水利枢纽位于江西省抚州市金溪县浒湾镇、临川区嵩湖乡境内，距离下游浒湾镇 2.5 km，距离上游抚吉高速大桥 1.1 km。枢纽现状河道河势见图 1。

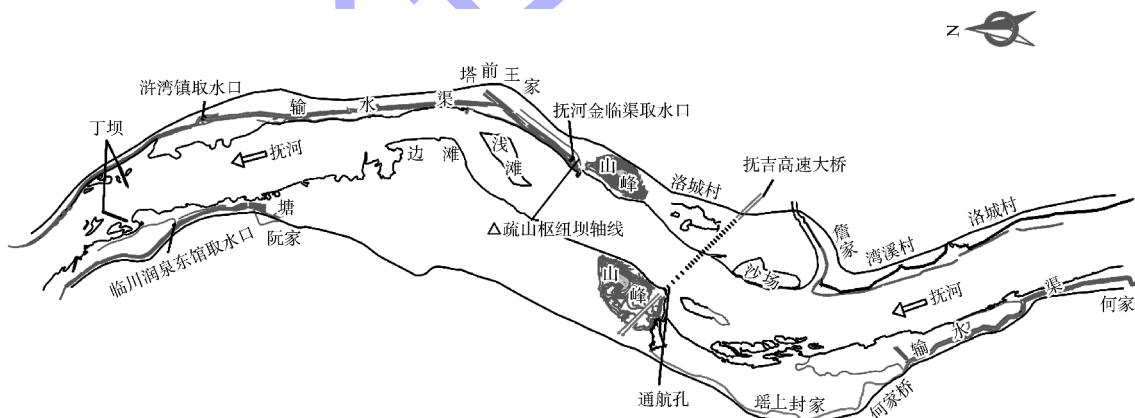


图 1 枢纽河道河势

1.2 设计船闸平面布置

枢纽船闸总平面布置同时考虑左岸、右岸两种方案，但右岸空间狭窄且紧邻金临渠灌溉进水闸。为便于灌溉引水，避免船闸过船和油污影响，本文主要考虑对左岸船闸方案的通航水流条件开展研究。

疏山水利枢纽主要建筑物从左至右依次为左

岸拟建船闸位置、泄水闸(23孔)、河床式发电站、鱼道、右岸重力坝、灌溉进水闸等,船闸布置方案见图2。设计船闸轴线位于坝纵桩号0+058.00,设计船闸轴线与坝轴线基本成85°交角,船闸左侧设长37m的连接土坝与岸滩连接,右侧与泄水闸坝毗邻。船闸上游引航道为曲线进闸、直线出闸布置,宽38m,总长534m,引航道连接段底板高

程 42 m, 按与闸首距离由近至远分别由导航段、调顺段、停泊段组成, 停泊段通过圆弧接河流主航道, 并在引航道内设有主导航墙、靠船建筑物和辅导航墙, 主导航线均采用斜线与平行船闸中心线的直线相结合的形式。

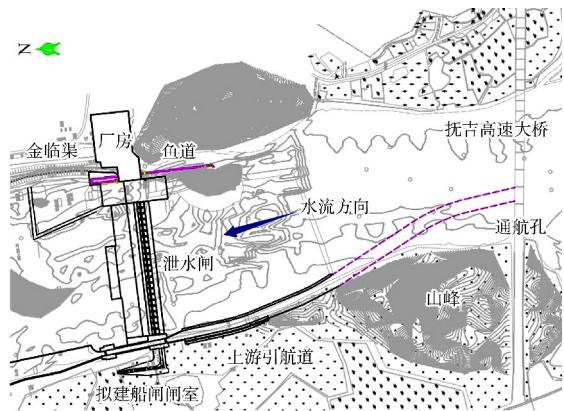
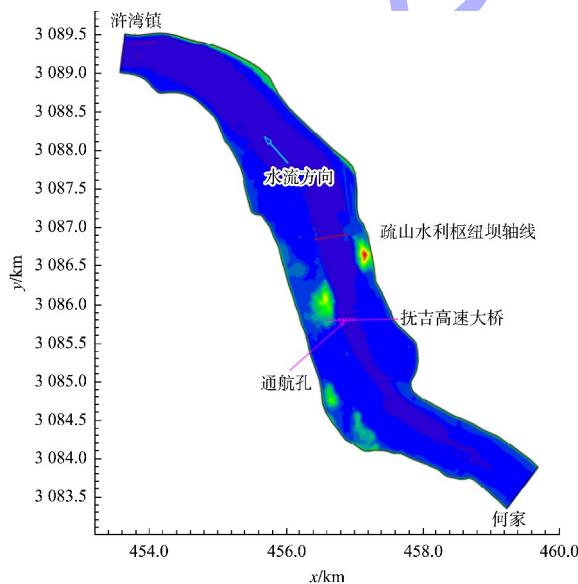


图 2 船闸布置方案

2 平面二维水流数学模型的建立与验证

2.1 模型建立

根据工程所处位置以及工程后可能引起的流场影响范围, 考虑计算所需的进出口长度, 选取计算区域为何家—浒湾约 9.2 km 范围。模型采用三角形非结构网格, 以控制地形为原则进行网格布置, 对地形变化较大以及工程区域进行局部加密, 见图 3。



a) 模型计算范围

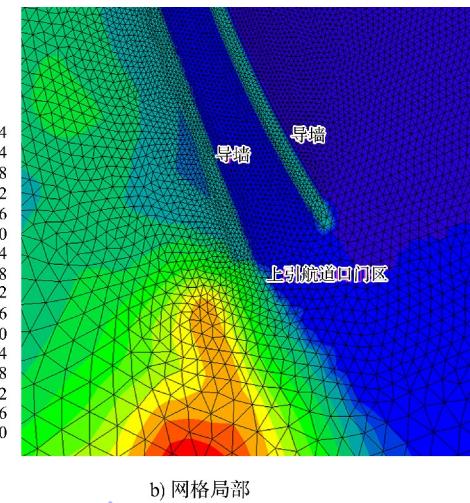
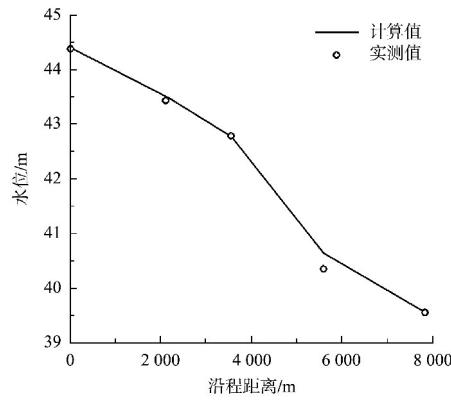


图 3 平面二维水流数学模型

2.2 模型验证

基于有限体积方法, 构建何家—浒湾段河段的平面二维水动力数学模型。采用工程河段实测地形和水位流速资料, 对数学模型可靠性进行水位和流速验证。综合考虑实测河槽地形地貌、河床组成及床面特性, 并参照我国天然河流河道糙率值, 确定研究河段糙率系数 n 为 0.032~0.043。

实测流量 $Q=604 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $n=0.033$ 时, 模拟计算的沿程水位与实测水尺的误差基本控制在 $\pm 0.1 \text{ m}$ 内。测流断面模拟流速的分布趋势与实测趋势保持一致, 其最大值和最小值的位置均与实测资料较为吻合, 流速值误差大部分控制在 $\pm 0.10 \text{ m/s}$ 以内, 水位、流速验证见图 4、5。经试算, n 选定为范围内其他值时, 会出现水位、流速验证误差过大或模型计算迭代不收敛的情况, 故本次二维水流数学模型最终选定 $n=0.033$ 进行下步方案计算。



a) 左岸

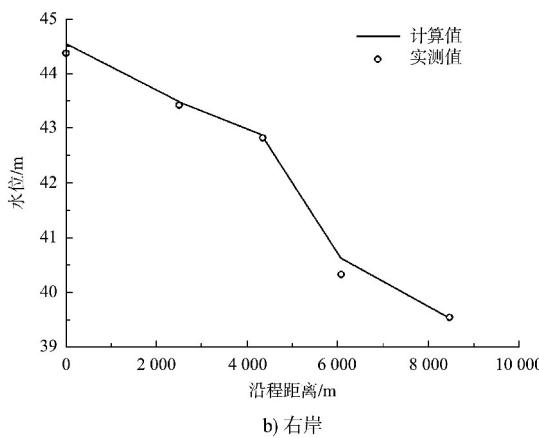


图4 左右岸水位验证

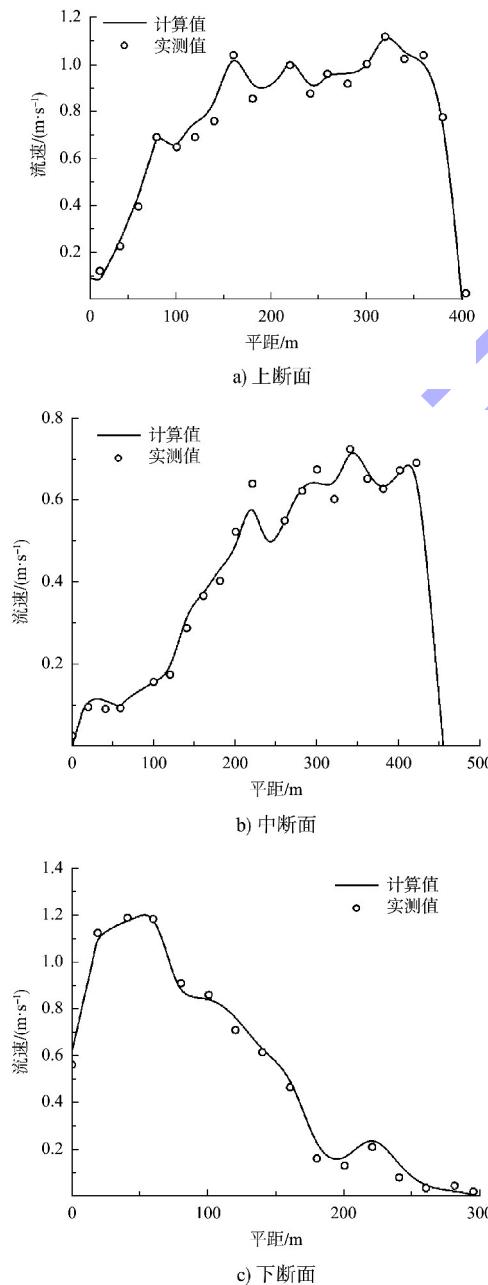


图5 各测流断面流速验证

3 设计方案数值模拟成果

3.1 流速限值

根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[9]及 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[10]相关规范规定, V~VII级船闸口门区应满足平行航线的纵向流速不大于 1.5 m/s, 垂直航线的横向流速不大于 0.25 m/s, 回流流速不大于 0.4 m/s 的要求。

3.2 计算工况

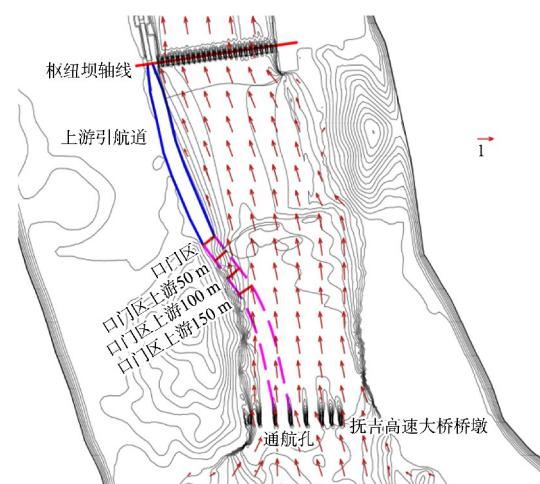
由于原型观测资料较少, 为更全面分析该河段的水流特性, 在开展枢纽船闸工程方案研究之前, 进行了天然情况下的水流特性模拟。根据当地多年水文资料中水位-流量关系, 确定此次数模计算工况见表 1, 从单机低功率发电流量(70 m³/s)到最高通航流量(4 570 m³/s)共计 5 种流量水位组合, 对疏山水利枢纽设计船闸进行方案计算。

表1 数模计算工况

工况	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	上游水位/m	下游水位/m	数模尾水位/m	备注
1	70.0	45.00	39.33	38.73	单机低功率发电流量
2	598.5	45.00	41.44	40.84	满发流量
3	1 540.0	45.00	43.40	42.95	最大发电流量
4	2 640.0	45.06	45.00	44.55	闸门全开流量
5	4 570.0	45.15	46.98	46.70	最高通航流量(5 a一遇)

3.3 设计方案上引航道

设计方案上引航道通航水流条件及流场流态见表 2 和图 6。

a) $Q=2 640 \text{ m}^3/\text{s}$

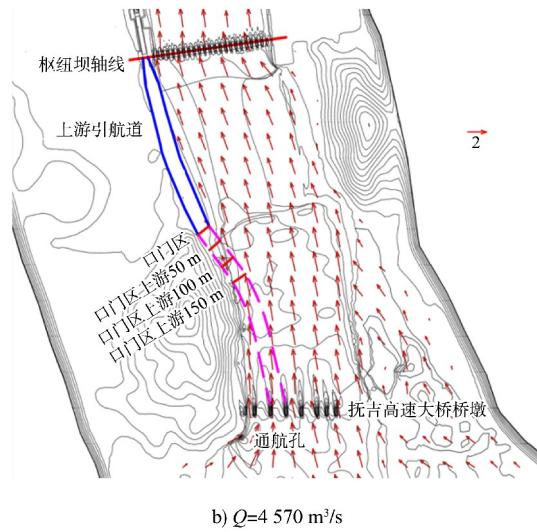


图 6 不同流量下拟建船闸设计方案上引航道局部流场

表 2 设计方案上引航道通航水流条件

工况	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	最大纵向 流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大横向 流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	回流 流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	通航孔最大 流向夹角/ ($^\circ$)
1	70.0	0.13	0.04	无回流	12.4
2	598.5	0.66	0.15	无回流	9.8
3	1 540.0	0.87	0.20	无回流	7.2
4	2 640.0	1.19	0.23	0.02	5.1
5	4 570.0	1.31	0.28	0.08	2.7

3.4 通航问题分析

1) 水流条件。设计船闸上引航道的总体流速随计算工况流量的增加而增大, 引航道连接段内的水流流态较好, 基本没有横流、回流等不良流态, 流速值也在安全限值内; 但引航道口门区和口门区上游因受左岸山峰影响, 高流量工况下的横流逐渐显著。当 $Q \geq 4 570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 口门区上游 150 m 处右侧横流超出安全限值 0.25 m/s, 通航条件差。

2) 流向夹角。设计船闸采用曲进直出的方式布置, 船舶在经过上游抚吉高速大桥通航孔时, 虽然涉河建筑物轴线的法线方向与水流流向的交角随流量的增大而逐渐减小, 但仅有最高通航流量时基本满足交角不大于 5° , 其余流量下船舶途经涉河建筑物通航孔时会存在一定的通航风险。

3) 航线。疏山水利枢纽坝址位置的确定考虑了工程地形地质条件、淹没及工程占地、投资等多方面因素。枢纽坝址距离上游抚吉高速大桥仅 1.1 km, 设计船闸方案布置后, 桥区通航孔距引航道口门区处仅有约 500 m 距离, 且规划航线距离左岸山峰较近, 船舶在通过桥区通航孔至引航道口门区时需要不断调整航向, 避免在山峰或通航孔处发生事故。

4 优化方案数值模拟成果

4.1 优化方案

根据上述结果, 疏山水利枢纽拟建船闸受山峰和桥区通航孔影响, 规划设计航线蜿蜒, 上引航道口门区上游 150 m 处的航线右侧水流流速较大, 随通航流量增加, 易产生超出安全限值的横流, 不便于船舶调整航向, 存在一定安全隐患。经计算, 在最高通航流量时, 船闸口门区的最大纵向流速 1.31 m/s, 最大横向流速 0.28 m/s, 最大回流流速 0.08 m/s。针对横流超出安全规范的情况, 亟需采取相应措施改善通航水流条件。

诸多学者已在改善通航水流条件方面提出多种有效措施, 如增设隔流堤、开挖边滩、回填隔流带、局部疏浚、布置潜坝、调整引航道长度、优化航线、调整泄洪时长等方案。但本工程仍处于设计阶段, 采用开挖或疏浚等方法虽能一时保障通航安全, 但难以保证船闸建成通航后工程河段不被冲刷、回淤或受上游枢纽回水影响导致河床朝不利通航情况演变。故方案优化时考虑了众多因素, 为减少工程造价, 在不影响泄洪的前提下, 拟将泄水闸门由 23 孔改为 22 孔, 即船闸总体布置向靠近河心方向调整约 19 m, 以改善船舶通航的水流条件。上引航道规划新航线向上游曲线延伸, 与通航孔连接, 优化方案的枢纽船闸平面布置见图 7。

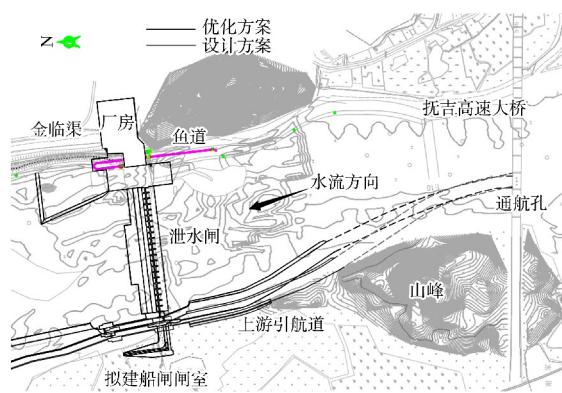


图 7 船闸布置优化方案

4.2 优化方案上引航道

优化方案上引航道通航水流条件及流场流态

见表 3 和图 8、9。

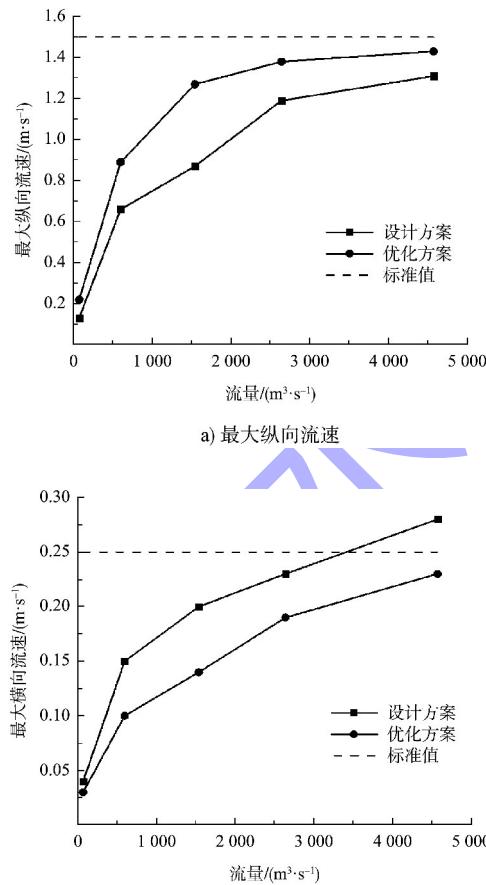


图 8 不同流量下船闸设计方案及优化方案上引航道最大流速分布

表 3 优化方案上引航道通航水流条件

工况	流量/(m³·s⁻¹)	最大纵向流速/(m·s⁻¹)	最大横向流速/(m·s⁻¹)	回流流速/(m·s⁻¹)	通航孔最大流向夹角/(°)
1	70.0	0.22	0.03	无回流	11.2
2	598.5	1.15	0.10	无回流	8.9
3	1 540.0	1.27	0.14	无回流	6.2
4	2 640.0	1.38	0.19	0.06	4.7
5	4 570.0	1.43	0.23	0.12	2.6

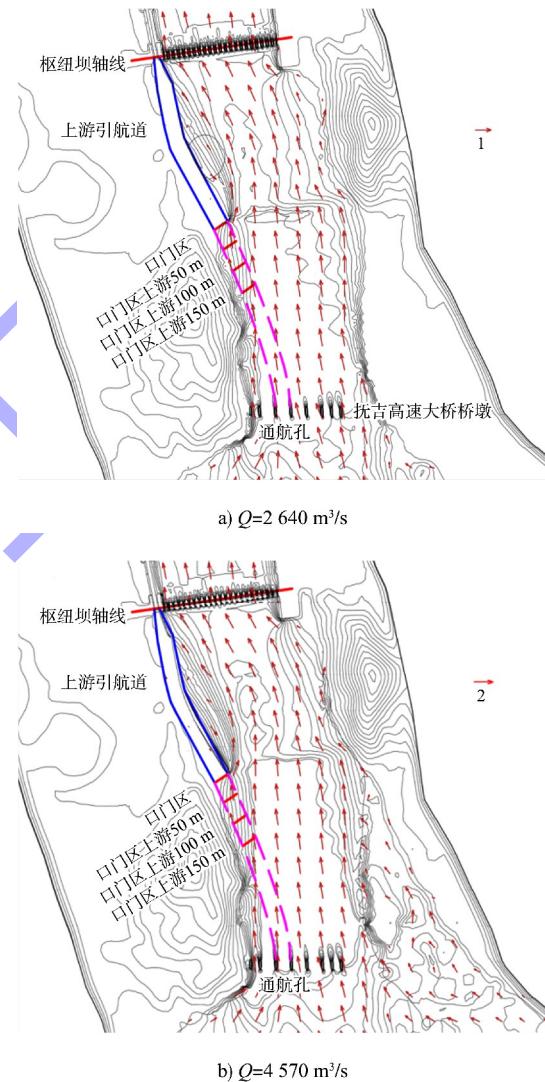


图 9 不同流量下拟建船闸优化方案上引航道局部流场

4.3 优化方案上引航道数值模拟成果分析

1) 水流条件。将拟建船闸设计轴线向靠河心调整后, 由于泄水闸门减少 1 孔, 上游引航道口门

区离主河道更近,故优化方案的纵向流速较设计方案有一定程度增加,但仍在规范要求的1.5 m/s流速范围内;横向流速较设计方案有所降低,由0.28 m/s调整为0.23 m/s。两种方案的回流流速均符合要求。

2) 流向夹角。优化方案口门区流态较设计方案更为顺直,船舶在通过抚吉高速大桥通航孔时,优化方案的最大流向夹角比设计方案有小幅降低,一定程度上确定了调整船闸布置对通航条件是有利的。

3) 航线。规划新航线后,在流量为2 640和4 570 m³/s条件下,船舶经过桥区通航孔时,水流与规划航行方向基本保持一致,降低了船舶进出通航孔时的风险,且在进出上引航道口门区处水流条件有所改善,有助于船舶调整航向顺利进出引航道。

5 结论

1) 本文采用数值模拟研究方法,对疏山枢纽船闸工程设计方案进行计算分析,发现拟建船闸上引航道口门区横流不符合相关规范要求,流量为最高通航流量4 570 m³/s时,横流超出安全限值0.25 m/s,通航条件较差,且通航时因受山峰和抚吉高速大桥影响,航线蜿蜒,存在不利通航影响。

2) 针对船闸上引航道口门区横流较大、通航孔流向夹角偏大以及航线蜿蜒等问题,结合实际情况,采取设计方案23孔泄水闸改为优化方案22孔泄水闸、船闸轴线向河心调整19 m的方法改善上引航道通航水流条件。

(上接第52页)

参考文献:

- [1] 柏猛.提高长江岸线资源利用效率的几种方式[J].中国水运(上半月),2019(11):45-46.
- [2] 梁双波,刘玮辰,曹有挥,等.长江港口岸线资源利用及其空间效应[J].长江流域资源与环境,2019,28(11):2672-2680.
- [3] 袁洪春,谢耀峰.内河港口岸线利用效率评价指标[J].

3) 调整船闸平面布置后,优化方案的上引航道口门区更加靠近河道主流,可有效降低口门区横流流速,使其满足规范要求;且船舶在通过桥区通航孔至引航道口门区时可及时调整航向,顺利通航。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院.船闸水工建筑物设计规范:JTJ 307—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 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.
- [3] 王云莉,孙国栋,向美熹.船闸口门区不良流态改善措施[J].水运工程,2016(3):83-88.
- [4] 彭永勤,彭涛.白石窑一线船闸闸室尺度变更后下引航道通航水流条件试验研究[J].水运工程,2022(6):106-111.
- [5] 蒋春钢,颜志庆,赵建钧,等.多线船闸下游极低通航水位通航水流条件试验研究[J].水运工程,2021(11):134-141.
- [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.
- [7] 陈明,李初民,王多银,等.左江山秀船闸改扩建工程引航道通航水流条件[J].水运工程,2021(11):66-73.
- [8] 李明德,黄伦超,桑雷.株洲枢纽船闸下引航道口门区整治措施及效果分析[J].水运工程,2006(8):79-82.
- [9] 中交水运规划设计院有限公司.内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [10] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.

(本文编辑 王传瑜)

水运工程,2015(11):67-71.

- [4] 朱吉双.基于效率评判的港口岸线使用管理制度设计[J].综合运输,2016,38(10):46-49,63.
- [5] 交通运输部规划研究院.长江干线航道发展规划修编研究[R].北京:交通运输部规划研究院,2017.
- [6] 交通运输部规划研究院.长江干线港口岸线利用规模调控研究[R].北京:交通运输部规划研究院,2020.

(本文编辑 王传瑜)