



湘江大花滩航道整治方案优化及 效果数值研究^{*}

田红伟, 官志鑫, 易振宇, 张健

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 针对湘江渠化河段大花滩连续弯道滩险航道整治措施进行研究。采用非结构化网格, 建立工程河段二维水流数学模型和船舶操纵运动数学模型。验证原型实测水位验证模型的可靠性后, 计算得到了不同流量情况下工程河段的航道水深、流场以及船模操纵的舵角、漂角、最小航速等主要参数。结果表明: 工程河段内不实施切嘴及整治建筑物也可通过优化航线、拓宽航宽并结合适当的疏浚、护岸工程措施满足通航标准要求。

关键词: 连续弯道; 航道整治; 二维水流模型; 船舶操纵模型; 数值模拟

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0127-07

Numerical study of waterway regulation optimization and effect of Dahuatan shoal in the Xiangjiang River

TIAN Hong-wei, GUAN Zhi-xin, YI Zhen-yu, ZHANG Jian

(Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: The research is carried out on the regulation measures of the continuous curve shoal dangerous waterway of Dahuatan in the canalized section of the Xiangjiang River. The mathematical model of two-dimensional flow and ship maneuvering motion of project river section is established using unstructured mesh. After verifying the reliability of the model through the actual measured water level of the prototype, the main parameters such as the water depth, flow field, rudder angle, drift angle, and minimum speed of the ship model control of the engineering river section under different flow conditions are calculated. The results show that without the implementation of cut-off and waterway regulation buildings in project river section, the navigation standards can also be met by optimizing the waterway route, broadening the navigation width, and combining with appropriate dredging and revetment engineering measures.

Keywords: continuous curved channel; waterway regulation; two-dimensional flow model; ship maneuvering motion; numerical simulation

湘江作为国家规划的全国内河高等级航道, 是湖南省综合运输体系中南北向重要通道。全线实现湘江航道规划等级, 是适应湖南省及湘江流域经济社会发展形势、远期打通汉湘桂水运大通道的需要。大花滩连续弯道滩险位于湘

江浯溪枢纽库区, 上距潇湘枢纽 24 km、下距浯溪枢纽 26 km, 由 3 个弯道组成, 岸线弯曲不规则, 河道滩险密布, 水流流态复杂, 是湘江中游重要的碍航滩险之一, 工程河段位置见图 1。

收稿日期: 2021-01-20

*基金项目: 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室开放基金项目(2018DT03)

作者简介: 田红伟(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程设计与咨询。

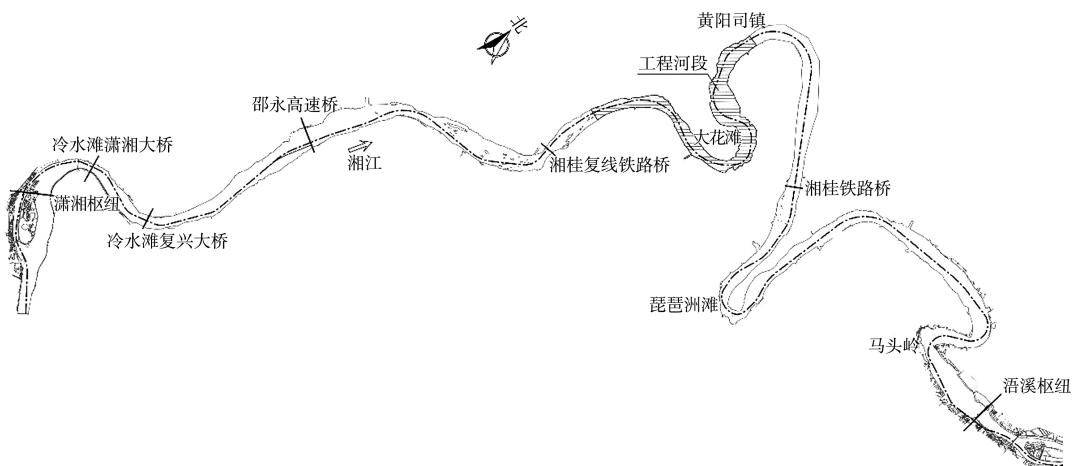


图 1 工程河段位置

采用水流数学模型研究航道整治效果是目前较为常用的方法,王建军等^[1]在河道演变分析基础上运用水流数学模型研究了韩江高陂枢纽至东山枢纽段的航道治理效果;刘佳仑^[2]利用水流数学模型分析了航道的通航安全问题;杨明远等^[3]采用水流数学模型研究北江的航道整治方案;何国健等^[4]基于 Navier-Stokes 方程建立了三维水流数学模型,分析桥墩群修建后不同防洪标准下的壅水情况,为河道的整治提供了参考。此外还可建立船舶操纵运动数学模型分析船舶航行情况,主要有两类模型:一是以 Abkowitz^[5] 方程为代表的整体性模型;二是以日本 MMG (Maneuvering Modeling Group) 小组于 1977 年提出的 MMG 方程为代表的分离型数学模型^[6-7]。因 MMG 模型中各参数有明确的物理意义,更能合理表达出作用在船体上的流体动力和螺旋桨、舵的作用以及船、桨和舵之间的互相干扰,且有经验公式,在工程中应用中更方便、直观。刘虎英^[8]、海显盛等^[9]基于 MMG 方程建立了船舶操纵运动数学模型,计算得到工程影响下的船舶操纵参数,为河段的通航安全论证提供了科学依据。

为确保大花滩整治后满足 1 000 吨级航道标准要求,采用二维水流数学模型和基于 MMG 模型的船舶操纵数学模拟两种方法进行分析,在分析通航水流条件的基础上,根据 1 000 吨级内河船舶操纵等性能参数,再对船舶航行情况进行模拟分析,综合论证后提出科学合理的优化整治方案,为工

程设计提供依据。

1 工程概况

1.1 滩险特性

大花滩连续弯道滩险由中间的大花滩急弯及上游的莺山岩村、下游的枣茅岭两个弯道组成,地形见图 2,河道最宽处 800 m、最窄处 230 m。

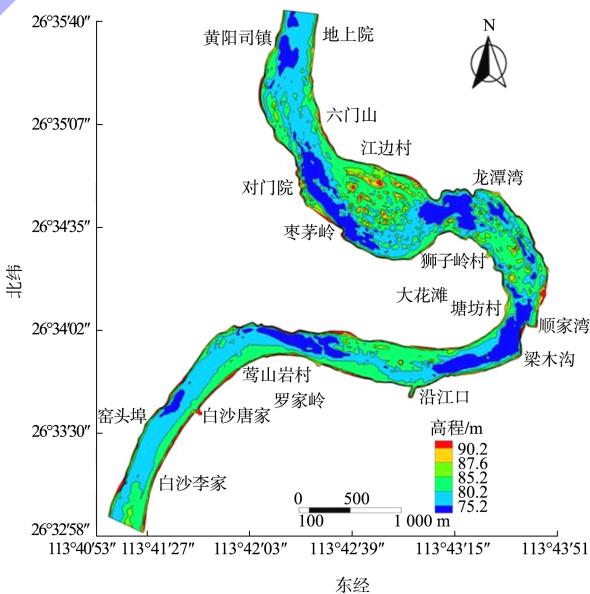


图 2 大花滩连续弯道滩险段河道地形

枯水期河段流速很小,多处水深较浅且有较多废弃砂堆造成的出浅碍航,在河面较宽处的弯道凸岸形成河漫滩,甚至有江心洲出现。中、洪水期存在明显的凸岸扫弯水、凹岸回流,严重影响船舶通航。

1.2 设计整治方案

该段航道设计标准为1 000吨级，航道设计尺度为2.4 m×60 m×480 m(航道水深×航宽×弯曲半径)。考虑到工程河段两岸有密集居民区且防洪问题敏感等制约性因素，不宜实施切嘴及整治建筑物工程，设计方案仅考虑河道疏浚工程。且为减少疏浚工程量，航线基本沿弯道凹岸的深槽布置，航道设计底宽60 m，设计航线布置见图3。

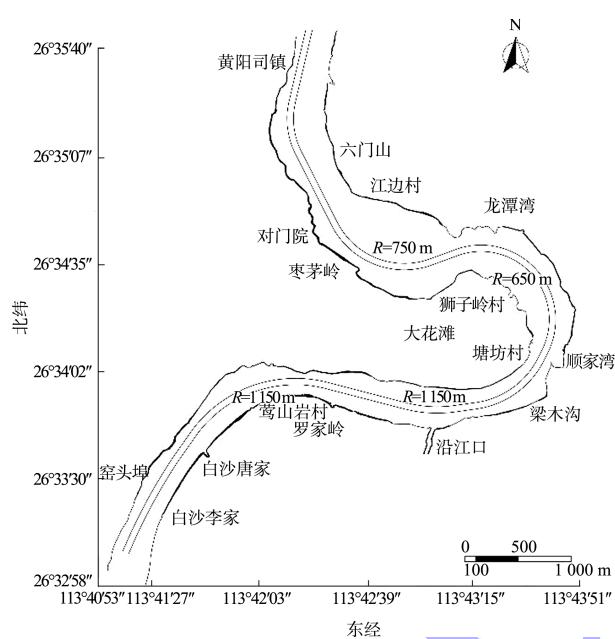


图 3 设计方案航线布置

该段航道设计最低通航水位采用下一梯级浯溪枢纽水库死水位 87.6 m，河底高程高于 85.2 m

的范围主要是顺家湾—龙潭湾段及对门院附近，总体疏浚量较小。根据水文分析及航道管理实际情况，航道最高通航水位拟采用2 a一遇洪水标准。

2 数学模型的建立与验证

2.1 平面二维水流数学模型

研究范围以大花滩急弯段为主，并包括上游的莺山岩村、下游的枣茅岭弯道，上游起点为白沙李家、下游出口为黄阳司镇，研究河段全长约10 km。

基于笛卡尔坐标系及浅水方程,采用非结构化网格建立二维水动力模型,控制方程采用单元中心的有限体积法求解。为有利于拟合河道边线,采用三角形非结构化网格,为使计算更为精确,对航道、疏浚区加密网格并分开建模。计算域内共布置网格 127 197 个、节点 64 211 个,其中最大网格长度约为 20 m,最小网格约为 2 m。

验证流量为枯水 $Q = 517 \text{ m}^3/\text{s}$ 和中水 $Q = 4783 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由平面二维水流数学模型水位验证(表1)可见,模型水位与原型实测水位吻合较好,误差均小于0.1 m。由图4可见,数模计算流速与原型实测流速分布基本一致。水流数学模型验证结果满足JTS/T 231-4—2018《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》的相关要求,可作为研究分析的基础。

表 1 平面二维水流数学模型水位验证

$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	实测、模型	水位/m					
		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
517	实测	88.41	88.38	88.33	88.33	88.32	88.31
	模型	88.35	88.33	88.32	88.31	88.31	88.31
	差值	-0.06	-0.05	-0.01	-0.01	-0.01	0.00
4 783	实测	91.88	91.31	91.02	90.81	90.64	90.40
	模型	91.97	91.26	90.93	90.73	90.55	90.36
	差值	0.09	-0.05	-0.09	-0.08	-0.09	-0.04

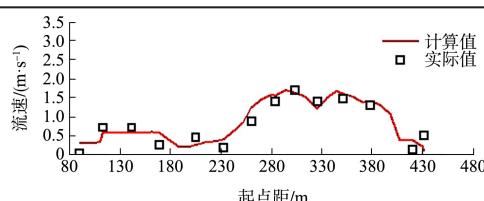
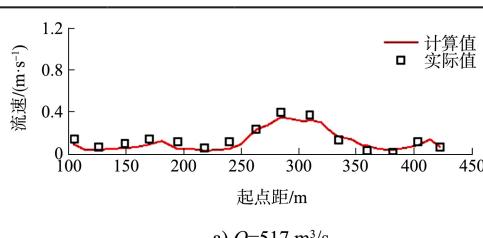


图4 断面实测流速与数值模拟结果对比

2.2 船舶操纵运动数学模型

根据 MMG 建模思想, 用船体上的水动力公式模拟船舶控制力, 并考虑船舶航行时受到的复杂环境影响(风、浪、流及限制性航道等), 建立考虑外环境影响的船舶操纵模拟自动舵系统, 用龙格-库塔法求解运动方程。通过该系统研究水流对航行中船舶的动力作用及船舶做出的合理反应, 模拟船舶航行操纵过程, 借此判断是否满足船舶航行要求。

以 1 000 吨级内河船舶为研究代表船型, 主要参数为: 船长 85.0 m, 船宽 10.5 m, 吃水 2 m, 螺旋桨直径 1.55 m, 螺距 1.305 m, 螺旋桨 2 叶, 舵高 1.82 m, 两柱间长 82 m, 水线长 83.3 m, 排水体积 1 590 m³, 菱形系数 0.851, 方形系数 0.847, 船体水线上的侧投影面积 51 m², 船体水线上的正投影面积 33 m²。

通过对船舶航向稳定性指标、航向改变性指标及定常旋回性指标等操作性能指标的率定, 来验证船舶模型。航向稳定性试验在无流情况下进行, 正舵操船 3 min, 经测定航向稳定性指标 $\Delta C_0=0(<3.0)$; 航向改变性试验在常车稳速且航向稳定初始状态下进行, 按单船情况下规定舵角 15°操舵, 航向由 0°变为 15°, 经测定平均变向角速度 $\bar{r}_{0-15}=0.55(^{\circ})/s(>0.50(^{\circ})/s)$; 定常回转性试验在宽阔的静水水域、常车稳速及满舵旋回的情况下进行, 经测定圆弧运动轨迹的直径 D_0 与船长 L 的比值 \bar{D}_0 均小于 3.5。上述 3 个指标均满足 JTJ 258—2004《长江运输船舶操纵性衡准》中规范值的要求, 表明该数学模型的结果满足工程上的精度要求, 可以应用在工程中。

3 试验研究

3.1 研究工况

选取枯、中、洪 7 个典型流量级研究航道的整治效果, 枯水流量为 290、580 m³/s, 中水流量为 2 000、4 000 m³/s, 洪水流量为 7 550(2 a 一遇)、8 930(3 a 一遇)、9 980 m³/s(5 a 一遇)。

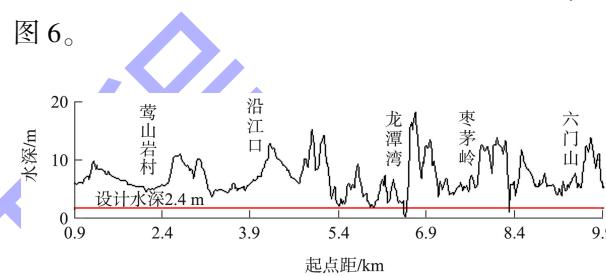
3.2 设计方案整治效果分析

3.2.1 通航水流条件分析

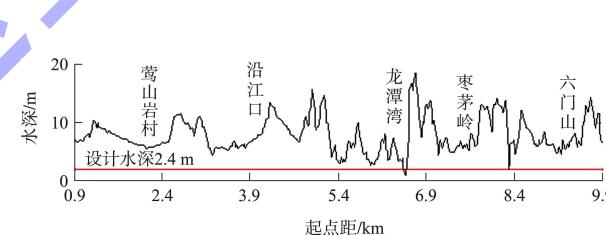
3.2.1.1 航道水深

现状情况下, 流量在 2 000 m³/s 以下时航槽

水深不能满足 2.4 m 设计要求, 且在枯水期流量为 $Q=290 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 由于龙潭湾附近存在浅滩, 最小航道水深约为 0.85 m, 其中零星浅滩长度约占研究河段总长度的 1%, 见图 5。该段碍航的主要原因是河岸岸线弯曲而且不规则, 导致水流流态复杂, 加上河道宽度的束窄和拓宽, 可能造成船只航行困难和河床水浅碍航。流量较小时, 浅滩会形成河漫滩, 导致船只因为航道宽度不够而碍航。按设计方案实施后, 各级流量下航道水位和比降相对整治前变化很小, 但因疏浚工程的实施, 航道水深条件得到改善, 各级流量下均可满足 1 000 吨级航道设计水深要求且有一定的富余, 见图 6。

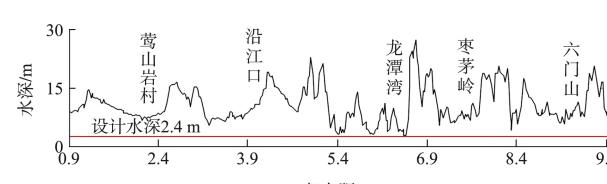


a) 枯水期 290 m³/s

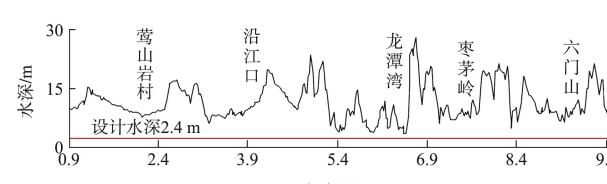


b) 中水期 2 000 m³/s

图 5 整治工程河段现状水深



a) 枯水期 290 m³/s



b) 中水期 2 000 m³/s

图 6 按设计方案实施后航道水深

3.2.1.2 航道流场

现状情况下, 流量较小时河段流速较小、比降缓, 通航水流条件较好; 随着流量增大, 河段流速增大, 中水期弯道段即出现凸岸及河心区域明显的扫弯水和凹岸的回流区, 通航水流条件恶化。按设计方案实施后, 整体流场改变不大, 主要是航槽附近局部流速的变化, 流量超过4 000 m³/s时弯道处同样会出现较明显的扫弯水和回流, 流态较为紊乱, 其中大花滩急弯段局部流场见图7。

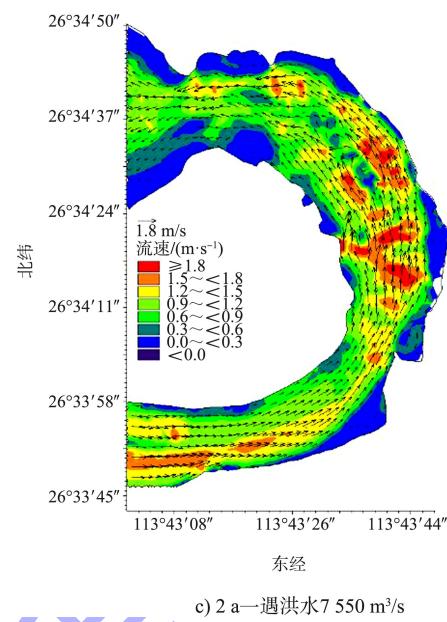
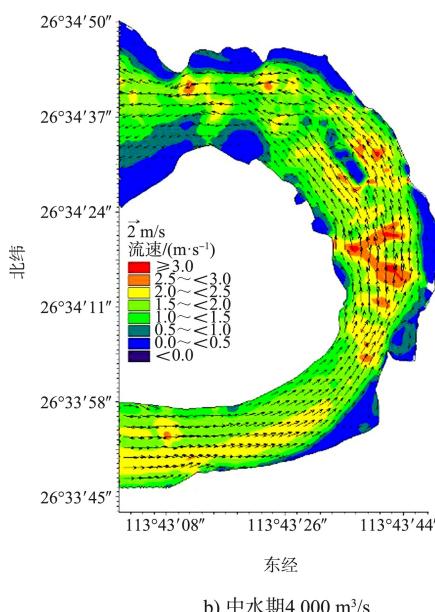
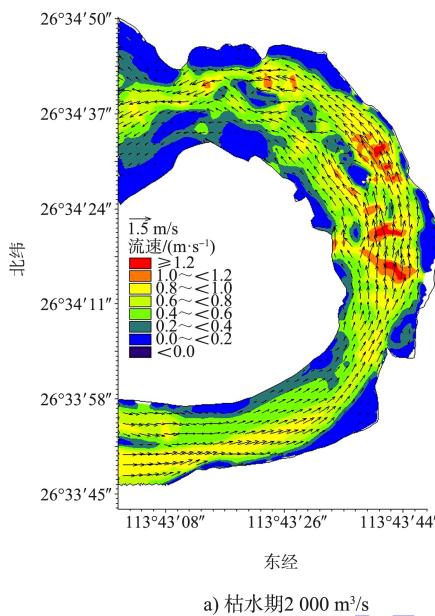


图7 设计方案实施后大花滩急弯段局部流场

3.2.2 船舶操纵模拟分析

参考 JTT 258—2004《长江运输船舶操纵性衡准》中规范值的要求, 本文采用的船舶安全航行状态判断标准如下: 船舶舵角控制在25°以内, 漂角控制在20°以内, 上行航速不小于0.4 m/s。基于湘江河段船舶实际航行速度调研成果, 确定该河段内船舶静水航速一般为3~5 m/s。

对枯、中、洪共7种流量, 按航行速度3、4、5 m/s共计21种工况, 分别进行船舶上、下行操纵模拟试验。试验结果得出: 按设计方案实施后, 在流量小于4 000 m³/s时, 船舶上行最大舵角为12.94°、最大漂角为13.53°、最小航速为1.25 m/s, 均未超过船模试验安全限值; 但流量增加至2a—遇洪水时($Q=7 550 \text{ m}^3/\text{s}$), 船舶上行最小航速为0.38 m/s, 低于最低航速安全限值0.4 m/s, 且船舶下行最大舵角基本超过安全值25°, 接近满舵, 受扫弯水影响, 在枣茅岭、龙潭湾、顺家湾和莺山岩村附近发生较大偏转和偏移, 其中在枣茅岭和莺山岩村附近, 船舶挤占上行航道, 在龙潭湾—顺家湾急弯段, 船尾摆出航道边线, 极易出现落弯险情。

3.2.3 综合结果分析

综合水流条件及船舶操纵模拟分析,按设计方案(即仅沿弯道深槽布置航线并结合疏浚工程)实施后,水位和水面比降变化很小,航道水深可满足通航要求;整体流场改变不大,难以有效解决连续弯道段存在的扫弯水和回流的不良流态,流量大于4 000 m³/s时,会出现明显的不良流态,船舶操纵困难,可能出现落弯险情。

故按设计方案实施后,难以达到设计拟定的2 a一遇通航标准的要求,须优化工程方案。

3.3 优化方案及整治效果分析

3.3.1 优化思路

针对设计方案难以满足设计通航标准要求的问题,结合试验结果,提出3方面优化思路:

1)优化航线布置。根据试验反映的随着流量增加主流向凸岸摆动的趋势,大花滩急弯段航线布置适当向凸岸移动,可增加弯曲半径,缓解扫弯水造成的船舶冲向凹岸的不安全因素。

2)拓宽航宽。大花滩和枣茅岭弯道处,航道底宽由设计的60 m加宽至100 m。

3)适当修正边坡,防护冲刷的凹岸侧。优化方案航线布置见图8。

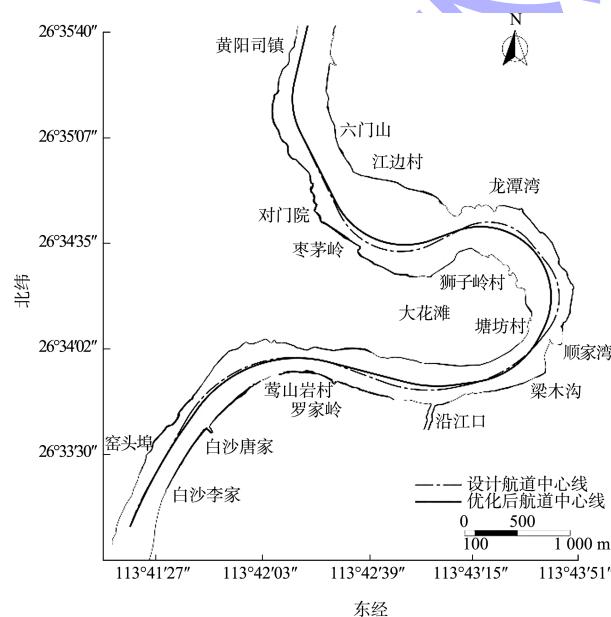


图 8 优化方案航线布置

相对于原设计方案,因弯道段航线向水深较浅的凸岸偏移且航宽加宽,故疏浚工程量有所增加,但因不涉及切嘴、占地等敏感问题,并未增

加工程的实施难度。

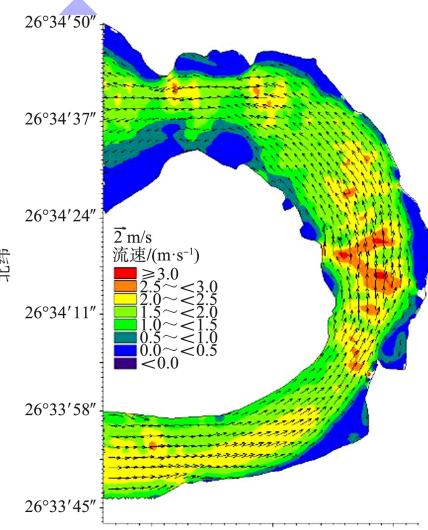
3.3.2 通航水流条件分析

3.3.2.1 航道水深

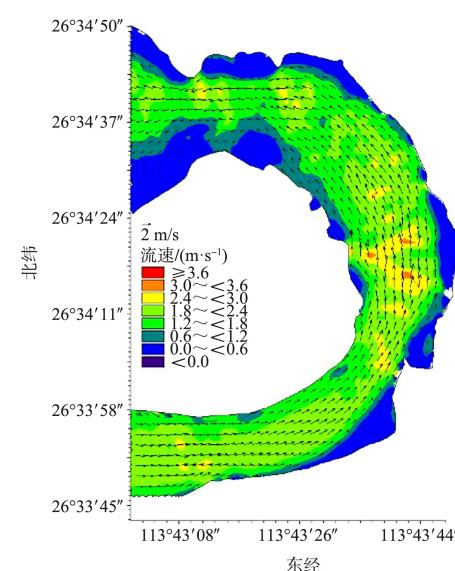
各级流量下航道水位和比降变化情况基本同设计方案,航道水深条件得到改善,枯水期可满足1 000吨级航道设计水深要求且有一定富余。

3.3.2.2 航道流场

按优化方案实施后,水流较为平顺,流态改善明显,3 a一遇及以下洪水流量下,主流归槽,基本未偏离优化后的航槽。随着流量增大至3 a一遇洪水以上时,弯道段会出现扫弯水和回流区,其中大花滩急弯段局部流场见图9。



a) 2 a一遇洪水 7 550 m³/s



b) 3 a一遇洪水 8 930 m³/s

图 9 按优化方案实施后大花滩急弯段局部流场

3.3.3 船舶操纵模拟分析

模拟结果表明, 按优化方案实施后, 低于 2 a 一遇洪水情况时 ($Q=7550 \text{ m}^3/\text{s}$), 3 种航速下 (3、4.5 m/s) 1 000 吨级船舶可以安全上、下行。超过 2 a 一遇洪水流量情况下, 受大花滩急弯处扫弯水流流速较大的影响, 导致静水航速为 3 m/s 的船舶难以安全上行, 其他情况下船模的舵角、漂角、最小航速等控制参数均未超过规定值, 表明优化设计航线基本可以符合大花滩 2 a 一遇设计通航标准。

3.3.4 综合结果分析

综合水流条件及船舶操纵模拟分析, 按优化方案 (主要是优化航线布置并拓宽航道) 实施后, 流态有所改善, 最高通航水位可提高至设计要求的 2 a 一遇洪水标准。超过 2 a 一遇洪水时, 受大花滩急弯处扫弯水影响, 船舶操纵困难。

4 结论

1) 对水深不足、水流条件复杂的连续弯道滩险渠化河段, 通过优化航线布置并结合适量疏浚等工程措施, 可以实现增加水深、改善水流条件的整治目的, 从而满足航道通航标准的要求。非渠化河段应结合下游梯级最低通航水位的回水范围和航道通航条件具体确定。

2) 弯道段航线沿凹岸深槽布置虽可减少疏浚工程量, 但对水流条件的改善作用有限。通过航线适当向凸岸移动并拓宽航宽的优化设计, 可使水流平

(上接第 122 页)

3) 模型试验研究表明, 工程提出的守护池湖港边滩、延长已建鱼骨坝工程、守护乐家湾边滩、加固戴家洲右缘护岸, 疏浚戴家洲直水道进口及出口浅区等工程措施, 辅以不利水文年的维护性疏浚, 能够实现航道尺度 $6.0 \text{ m} \times 110 \text{ m} \times 1050 \text{ m}$ 、保证率 98% 的建设目标。

参考文献:

- [1] 蔡大富. 长江中游戴家洲河段航道整治一期工程效果分析[J]. 水运工程, 2011(2): 91-96.
- [2] 黄蓓蓓, 蔡大富. 长江中游戴家洲河段戴家洲右缘下段

顺、主流归槽, 减少扫弯水造成的不良水流条件。

参考文献:

- [1] 王建军, 杨云平, 李晓星, 等. 韶江高陂枢纽至东山枢纽段河床演变及治理效果研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(9): 48-55.
- [2] 刘佳仑. 基于二维流场数值模拟的桥群河段通航影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [3] 杨明远, 杨武, 郁达, 等. 北江千吨级航道整治研究: II 二维数学模型与整治河段通航水流条件分析[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(4): 66-72.
- [4] 何国建, 方红卫, 府仁寿. 桥墩群对河道水流影响的三维数值分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007(3): 345-351.
- [5] ABKOWITZ M A. Lectures on ship hydrodynamics-steering and manoeuvrability[R]. Lyngby: Hydro-and Aerodynamic Laboratory, 1964.
- [6] 胡旭跃, 尹愈强, 沈小雄, 等. 连续弯曲河道段桥位布置及通航安全分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 141-145.
- [7] 张庆河, 李炎保, 韩涛. 考虑外环境影响的船舶操纵模拟自动舵系统[J]. 中国造船, 2001(3): 36-40.
- [8] 刘虎英. 桥群河段船舶通航安全数值模拟分析[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(2): 51-57.
- [9] 海显盛, 刘博雅, 刘虎英. 小间距桥梁并建对内河桥区航道通航安全影响分析: 以浏阳河景观桥为例[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(10): 38-40.

(本文编辑 武亚庆)

守护工程效果分析[J]. 水运工程, 2014(12): 110-115.

- [3] 刘旺喜. 长江中游戴家洲河段航道整治二期工程方案研究[J]. 水运工程, 2015(10): 148-153.
- [4] 彭松柏, 黄成涛, 江凌. 长江干线宜昌至安庆段航道尺度提升可行性研究[J]. 人民长江, 2017(4): 1-4.
- [5] 长江航道规划设计研究. 长江干线武汉至安庆段 6 m 水深航道整治工程初步设计[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2018.
- [6] 刘万利, 伍文俊, 余新明. 长江中游典型分汊河段河床演变[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(5): 613-617.
- [7] 杨艳华. 长江中游戴家洲河段稳定性分析[J]. 水道港口, 2015(12): 533-536.

(本文编辑 郭雪珍)