



某船闸上游引航道通航水流条件研究*

帅志斌¹, 陈莹颖², 马海涛²

(1. 安徽省亳州港航投资有限公司, 安徽 亳州 236815; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对某船闸因受河道地形条件、总体布置等多种不同因素的限制, 上游引航道斜穿河道主流且交角较大, 通航水流横向流速较高的问题, 采用数值模拟和水工模型试验相结合的方法, 分析提出航线调整、凸岸切滩等改善上游引航道通航水流条件的优化调整方案, 对上游引航道通航水流条件进行研究。结果表明: 上述措施能有效改善上游引航道通航水流条件, 口门区横向流速超过 0.30 m/s 的流速值和测点数量比优先前大幅降低(约 33%)和减少(约 69%)。研究成果可为类似工程提供借鉴和参考。

关键词: 船闸; 引航道; 通航水流条件; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: U641.7+3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0135-07

Navigational flow conditions in upstream approach channel of a ship lock

SHUAI Zhibin¹, CHEN Yingying², MA Haitao²

(1. Anhui Bozhou Port and Shipping Investment Co., Ltd., Bozhou 236815, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: To the limitation of various factors such as river terrain conditions and overall layout of a ship lock, the upstream approach channel obliquely passes through the mainstream of the river and has a large intersection angle, and the lateral flow velocity of the navigable water is high. Numerical simulation and hydraulic model test are used to observe the overall upstream flow conditions of a newly built lock, and the optimization engineering measures combining the adjustment of the upstream route and the cutting of the convex bank are proposed and analyzed. The results shows that the above measures can effectively improve the navigable water flow conditions in the upstream approach channel, with a significant reduction(about 33%) and a decrease(about 69%) in the number of flow velocity values and measurement points in entrance area exceeding 0.30 m/s compared to before optimization. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: ship lock; navigational channel; navigable flow condition; numerical simulation; model test

近年来, 随着腹地经济的快速发展, 通航需求量日益增长, 航道等级急需提升, 船闸通过能力不足的问题也愈加明显, 迫切需要对部分老旧船闸进行扩建, 以满足货物运输的需要, 适应腹地社会经济发展对货运量增长的需求。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, 应避免产生横流、回流等不良流态, 保证

良好的通航水流条件^[1]。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, 并提出多种有效措施。李恒昌等^[2]通过对青年船闸工程开展物理模型试验, 提出设置隔离墩、隔流墙等工程措施来改善通航水流条件; 钟林斌等^[3]采用三维数值模拟方法, 得出某双线船闸分水墙采用透空形式可有效减小另一线船闸引航段内的回流,

收稿日期: 2024-05-10

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y124018)

作者简介: 帅志斌(1992—), 男, 工程师, 研究方向为水运工程项目管理。

延长分水墙长度能有效减小引航段横向流速和回流影响范围；丘佳永等^[4]通过船闸水工模型试验，提出河道清淤、延长导航墙、限制最大通航流量的优化组合措施来改善沧江水利枢纽船闸通航水流条件，提高了通航安全性；肖钦等^[5]在物理模型试验的基础上，提出新型的百叶窗式横向透空隔流堤结构，可改善已建一线船闸通航水流条件，有效提升最大通航流量；颜志庆等^[6]通过采用布设隔流墙、疏浚航道以及调整航道布线等综合方法，研究并优化了犬木塘船闸在“S”形弯道时的通航水流条件；张羽等^[7]采用物理模型与数值模拟相结合的方法，分析闸门不同调度方式对船闸上游引航道及口门区水力特性的影响；何飞飞等^[8]、王彪等^[9]研究了隔流堤高度和透空式隔流墙等对八字嘴枢纽貂皮岭船闸引航道水流条件的影响。

在急弯河段已有枢纽上增建船闸工程受河道地形条件和已有涉河建筑物的限制，船闸布置选择余地十分有限，通航水流条件较为复杂，引航道流速和流态往往难以满足通航要求^[10]。对于此类工程的通航水流条件需开展针对性研究，提出

适宜的改善措施，优化通航条件。

某新建船闸上游引航道口门区与主河道交角较大，水流条件复杂，船舶进出引航道口门区可能存在一定困难。本文采用数值模拟和水工模型试验相结合的方法，观测某新建船闸上游整体水流条件，细致量测上游引航道、口门区及连接段的水流流速分布，分析提出改善上游引航道通航水流条件的工程措施，旨在保障船舶通航安全。

1 工程概况

1.1 河道概况

某新建船闸按Ⅲ级标准设计，设计代表船型为1 000吨级货船，尺寸为60.0 m×10.8 m×2.7 m（长×宽×设计吃水），船闸有效尺寸为240 m×23 m×4.5 m（长×宽×最小门槛水深）。拟新建船闸紧邻运行频繁的水利枢纽浅孔闸工程，位于航道整治工程中自下而上的第2个梯级，上游河道存在弯道，且弯段主河槽宽度较窄，水流相对较为湍急，枢纽上游河道走势见图1。

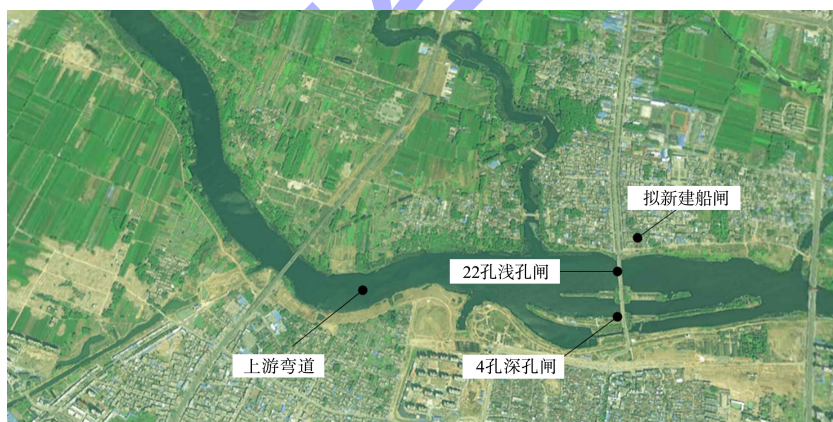


图1 水利枢纽上下游河道走势

Fig. 1 Upstream and downstream river trends of hydro-junction

1.2 船闸上引航道布置

某新建船闸工程建设的初步方案为在北岸新建单线船闸，新建船闸与枢纽深孔闸中心线在轴线处相距约185 m，船闸上闸首（防洪闸首）从枢纽深孔闸中心线上游约69 m处起向下游布置。新建船闸上游引航道宽60 m，底高程22.28 m，水平方向夹角为14°和20°。为方便分析并结合区域

设计功能作用，定义引航道导航段末端为起点，则向上游起点距0~185 m 直线段为引航道调顺段、停泊段，起点距195~825 m 为主河道与引航道的过渡段，起点距195~495 m 范围为停泊段、制动段，起点距495~825 m 范围为口门区。新建船闸上游引航道布置见图2。

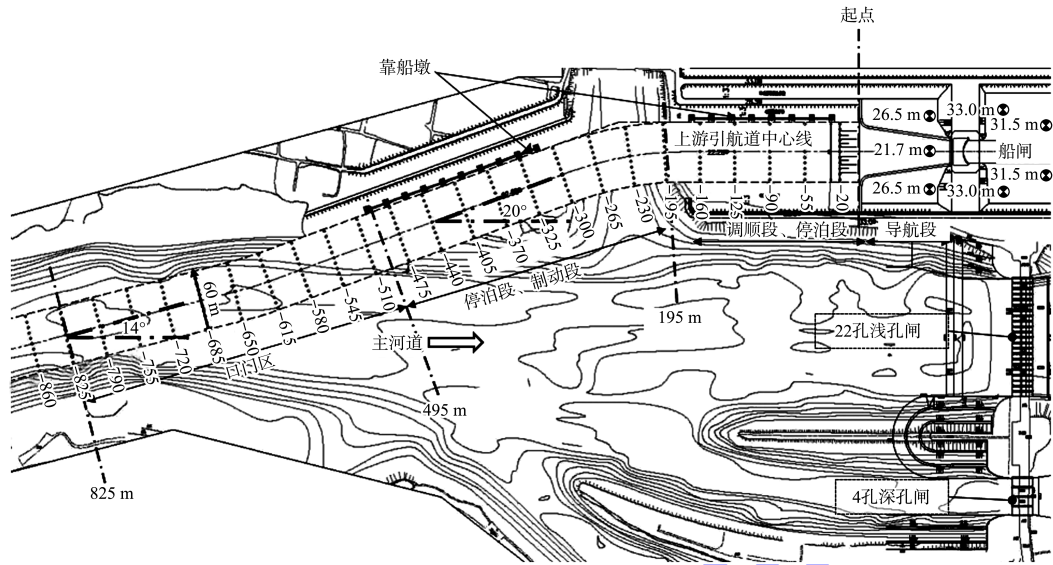


图 2 新建船闸上游引航道布置

Fig. 2 Layout of upstream approach channel of new ship lock

2 模型设计与试验工况

2.1 物理模型设计

物理模型采用正态模型, 以重力相似为准则, 兼顾阻力相似。模型比尺确定为 1:70, 以保障足够的模拟精度, 消除水流黏滞力的影响。考虑新建

船闸上下游均存在弯道, 其水流条件复杂, 因此模型模拟范围上游至枢纽深孔闸中心线以上 1.7 km, 下游为枢纽深孔闸中心线以下 1.5 km, 模拟范围总长 3.2 km, 总宽 1.3 km。相关水力学参数的比尺见表 1。

表 1 模型各物理量相似比尺

Tab. 1 Similarity scale of each physical quantity of model

水平比尺 λ_L	垂直比尺 λ_h	流速比尺 λ_v	糙率比尺 λ_n	水流时间比尺 λ_t	流量比尺 λ_Q	力比尺 λ_f
70	70	8.367	2.03	8.367	40 996.34	343 000

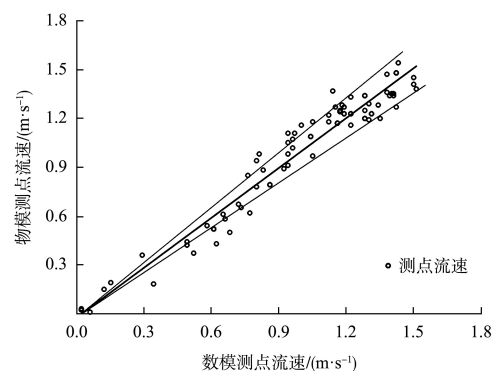
2.2 数学模型建模

因物理模型制模耗时较长且调整不易, 因此同步建立数学模型, 针对初步方案先行分析研究和优化方案比选, 与物理模型互为验证。

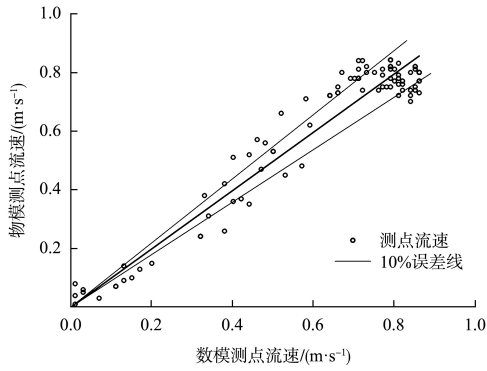
对枢纽上游水流条件研究区域建模, 引航道及口门区重点关注区域计算网格尺寸 1~3 m, 枢纽附近计算网格尺寸 3~4 m, 远端过渡区域计算网格尺寸 5~7 m。上游计算网格总数约 9.19 万个。

取 10 a 一遇洪水和 750 m³/s 流量枢纽闸正常运行水位条件下新建船闸上游水流条件进行物模和数模对比验证, 结果见图 3。上游大部分测点流速模型试验值与数值模拟结果相对误差基本在

10%以内, 满足水流条件数值模拟精度要求, 说明数学模型对研究宽浅河道水流流速分布具有较好的适应性, 计算结果基本反映了原型水流的运动情况。



a) 10 a 一遇洪水



b) 750 m³/s流量枢纽闸正常运行水位

图3 上游测点流速计算误差分析

Fig. 3 Calculation error of flow velocity at upstream measuring points

2.3 试验工况

通过现场调研,收集统计了枢纽闸在非汛期正常调度时2016—2020年实际闸上水位及过闸流量。分析收集统计的实际运行资料,可得枢纽闸上游水位与流量关系,见图4。

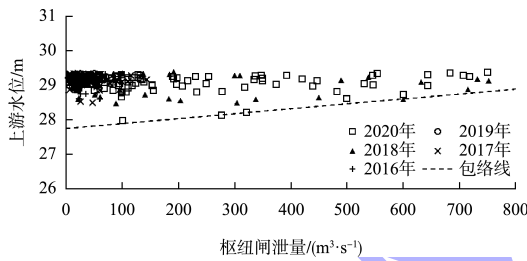


图4 枢纽闸非汛期正常运行调度时上游水位与过闸流量关系

Fig. 4 Relationship between upstream water level and discharge during normal operation of hub gate in non-flood season

综合分析调研结果,确定新建船闸工程通航水流条件试验主要针对河道10 a一遇洪水、5 a一遇洪水、泄量750 m³/s正常运行水位和泄量750 m³/s船闸最低通航水位这4种工况,见表2,各试验工况基本可以涵盖新建船闸运行时可能遇到的各种水位流量组合,具有代表性和典型性。

表2 新建船闸上游引航道通航水流条件试验工况

Tab. 2 Test conditions of navigable water flow conditions in upstream approach channel of new ship lock

工况	水位/m		枢纽闸流量/(m ³ ·s ⁻¹)	备注
	闸上	闸下		
C ₁	29.85	28.76	1 900	10 a一遇
C ₂	28.91	28.76	1 500	5 a一遇
C ₃	29.43	26.50	750	正常运行水位
C ₄	26.28	22.39	750	最低通航水位

3 上游引航道通航水流条件

3.1 水流总体流态

新建船闸上游引航道附近流态见图5。由图5可知,由于上游引航道位置偏离河道,因此河道主流对引航道口门区内水流形成较为明显的剪切,导致起点距510 m范围形成较大范围的低流速回流,长度近300 m。起点距510~825 m范围,上游引航道与水平方向夹角14°和20°,航道基本顺直,但河道主流方向大致水平,因此引航道斜穿主流,二者交角,水流横向流速较大。此外上游引航道出弯道局部,受地形影响,局部主流宽度束窄,近凸岸侧水流流速较高。引航道起点距825 m以上,主流贴合引航道行进,流速1.50~2.10 m/s。

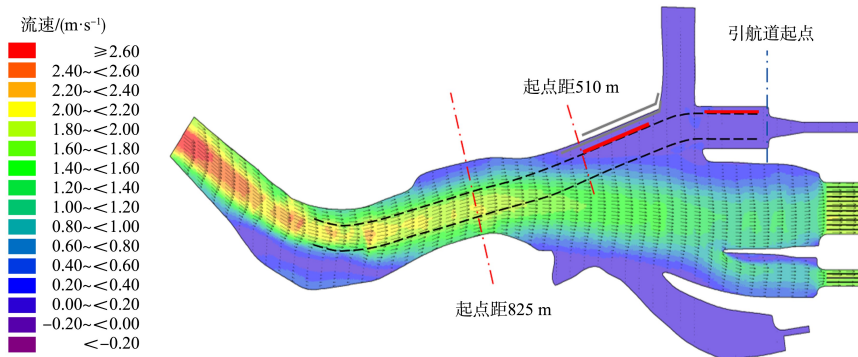


图5 新建船闸上游整体水流流态

Fig. 5 Overall flow pattern in upstream of new ship lock

3.2 引航道流速分布

新建船闸上游引航道各区域如图 2 所示, 起点距 0~185 m 直线段为引航道停泊段, 基本为静水, 通航水流条件满足要求。起点距 195 m 起两段区域范围及水流条件要求见表 3。C₁~C₄ 工况下新建船闸上游引航道水流流向、横向流速及纵向流速分布见表 4(数模结果), C₂ 工况初步方案条件下新建船闸上游引航道水流横向流速见图 6。综

合图表数据, 起点距 495~825 m 口门区在洪水期的多断面过半测点横向流速大于 0.30 m/s, 通航水流条件不满足要求。

表 3 上游引航道各区范围及水流条件要求

Tab. 3 Range and flow conditions in upstream approach channel

位置	范围	水流流速要求
停泊段、制动段	195~495 m	横向≤0.15 m/s, 纵向≤0.50 m/s
口门区	495~825 m	横向≤0.30 m/s, 纵向≤2.00 m/s

表 4 初步方案上游引航道通航水流条件

Tab. 4 Navigable water flow conditions in upstream approach channel for preliminary scheme

工况	闸上水位/m	枢纽闸流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	横向流速/(m·s ⁻¹)		纵向流速/(m·s ⁻¹)		备注
			停泊段/制动段	口门区	停泊段/制动段	口门区	
C ₁	29.85	1 900	0.16	0.58	0.41	2.04	10 a 一遇
C ₂	28.91	1 500	0.13	0.51	0.47	1.88	5 a 一遇
C ₃	29.13	750	0.07	0.25	0.25	0.91	正常运行水位
C ₄	26.28	750	0.09	0.26	0.44	1.13	最低通航水位

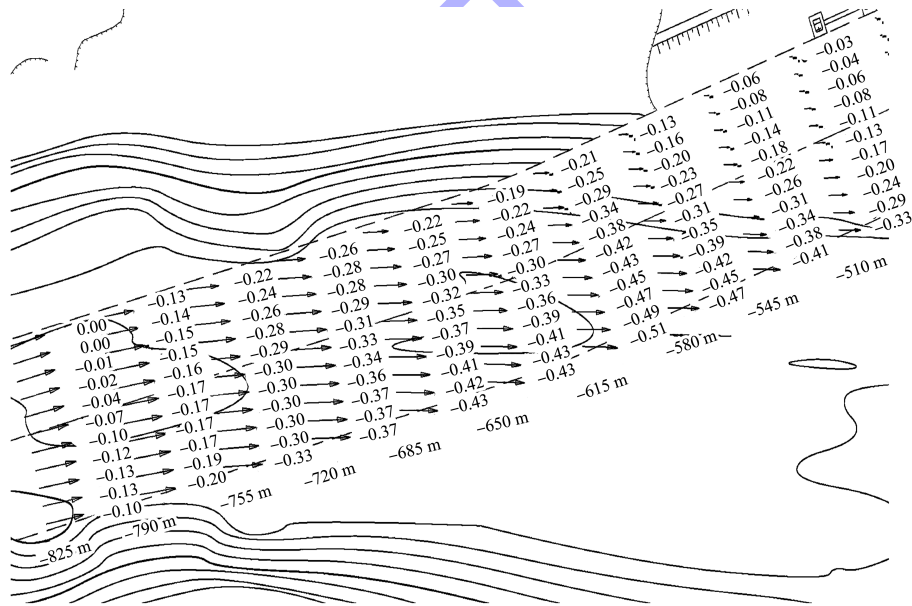


图 6 C₂ 工况下初步方案新建船闸上游引航道口门区水流横向流速 (单位: m/s)

Fig. 6 Lateral velocity of water flow in entrance area of upstream approach channel for preliminary scheme under C₂ condition (unit: m/s)

4 优化方案上引航道水流条件

4.1 优化工程措施

根据数值模拟计算结果, 按初步布置方案新建船闸上游引航道口门区多断面横向流速较大, 不利于船舶平稳靠泊, 因此, 有必要提出改善上游引航道通航水流条件的工程措施, 保障船舶通航安全。

上游引航道布置优化方案拟采取航线调整、断面拓宽的工程措施, 见图 7。措施 1: 航线调整, 将上游航线偏转 3° 与上游弯道出弯点顺接, 使得起点距 510~825 m 范围引航道整体左移, 避开原航道右侧高横向流速区, 近闸锚地靠船设施也相应偏转。措施 2: 断面拓宽, 将起点距 650~1 035 m 范围内河道右侧切滩, 以增加

该区域过水断面面积，降低水流流速。根据提出的上游引航道布置优化方案，开展 C₁ ~ C₄ 试验工

况物理模型试验，验证上游引航道通航水流条件优化效果。

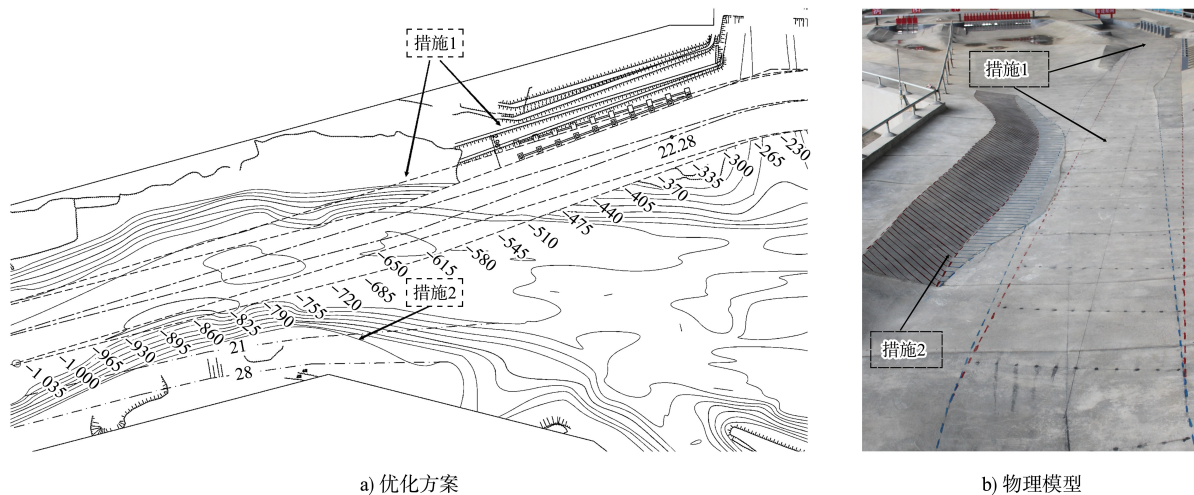


图 7 优化工程措施 (单位: m)

Fig. 7 Optimized engineering measures (unit: m)

4.2 优化方案上引航道流速分布

C₁ ~ C₄ 工况下，优化方案新建船闸上游引航道水

流横向流速及纵向流速分布见表 5。C₂ 工况下，优化方案条件新建船闸上游引航道水流横向流速见图 8。

表 5 优化方案上游引航道通航水流条件

Tab. 5 Navigable water flow conditions in upstream approach channel for optimization scheme

工况	闸上水位/m	枢纽闸流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	横向流速/(m·s ⁻¹)		纵向流速(m·s ⁻¹)		备注
			停泊段/制动段	口门区	停泊段/制动段	口门区	
C ₁	29.85	1 900	0.15	0.39	0.46	2.18	10 a 一遇
C ₂	28.91	1 500	0.16	0.38	0.33	1.92	5 a 一遇
C ₃	29.13	750	0.08	0.17	0.21	0.91	正常运行水位
C ₄	26.28	750	0.06	0.28	0.21	1.42	最低通航水位

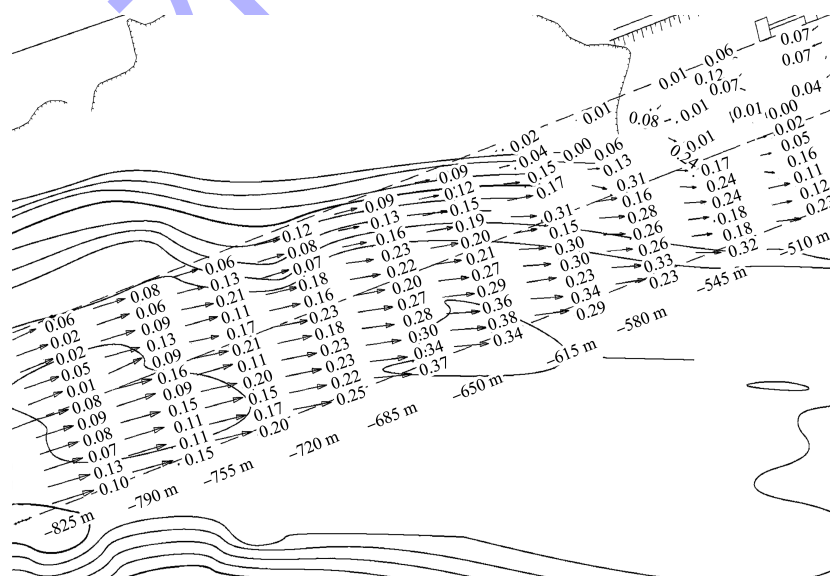


图 8 优化方案 C₂ 工况下新建船闸上游引航道口门区水流横向流速 (单位: m/s)

Fig. 8 Lateral velocity of water flow in entrance area of upstream approach channel for optimization scheme under C₂ condition (unit: m/s)

综上,新建船闸初步布置方案上游引航道停泊段通航水流条件仍可满足要求;口门区最大横向流速 0.39 m/s(与优化前该段最大横向流速 0.58 m/s 相比,降低约 33%),横向流速超过 0.30 m/s 的测点数量仅 18 个,与优化前该段横向流速超过 0.30 m/s 的测点数量 58 个相比,减少约 69%,即横向流速超过 0.30 m/s 的流速值和测点数量比优化前大幅降低和减少,最大纵向流速仅在 C_1 工况个别测点略超 2.00 m/s,船舶在该段航行条件得以明显改善;通航水流条件基本满足要求。因此,上游引航道优化方案可有效改善通航水流条件,提出的工程措施合理可行。

5 结论

1) 对某枢纽船闸工程初步方案进行数值模拟计算分析,由于引航道斜穿主流且与之交角较大,发现拟建船闸上游引航道口门区水流横向流速较高,最大横向流速 0.58 m/s,且多断面过半测点横向流速超过 0.30 m/s,不利于船舶平稳航行靠泊。

2) 针对上游引航道斜穿主流且与之交角较大、引航道口门区横流较大等问题,根据试验成果提出优化布置方案:调整上游引航道航线及对应靠船设施偏转、疏浚上游河道近闸束窄段右岸凸体(降低水流流速)等工程措施,以改善上游引航道通航水流条件。

3) 在优化方案下,上游引航道及口门区通航水流条件基本满足通航水流条件要求,口门区横向流速超过 0.30 m/s 的流速值和测点数量比优化前大幅降低(约 33%)和减少(约 69%),船舶在该段航行条件得到了显著改善,措施合理可行。

参考文献:

[1] 付旭辉,何京霖,张波,等.抚河疏山水利枢纽船闸通航水流条件研究[J].水运工程,2024(2):72-78.

- FU X H, HE J L, ZHANG B, et al. Navigable flow condition of ship lock of Shushan water conservancy project in Fu River [J]. Port & waterway engineering, 2024(2): 72-78.
- [2] 李恒昌,段君邦,冯仲林,等.平陆运河青年船闸通航水流条件优化方案研究[J].西部交通科技,2023(12):25-27.
- LI H C, DUAN J B, FENG Z L, et al. Optimization scheme of navigation flow conditions of Youth Ship Lock on Pinglu Canal [J]. Western China communications science & technology, 2023(12): 25-27.
- [3] 钟林斌,陈玉梅,黄毓斌,等.双线船闸分水墙体型对下游引航道水流条件的影响研究[J].西部交通科技,2023(12):28-30,66.
- ZHONG L B, CHEN Y M, HUANG Y B, et al. Influence of diversion wall shape of double-line ship lock on flow conditions of downstream approach channel [J]. Western China communications science & technology, 2023(12): 28-30, 66.
- [4] 丘佳永,练伟航,张广传,等.沧江水利枢纽船闸通航水流条件优化试验研究[J].广东水利水电,2023(12):69-72.
- QIU J Y, LIAN W H, ZHANG G C, et al. Experimental study on optimization of navigation flow conditions for ship locks of Cangjiang Hydro-project [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2023(12): 69-72.
- [5] 肖钦,范红霞,邓伟,等.赣江龙头山枢纽一线船闸通航水流条件及改善措施研究[J].水利水运工程学报,2023(6):213-220.
- XIAO Q, FAN H X, DENG W, et al. Study on navigation flow conditions and improvement measures at Longtoushan Junction in the Ganjiang River [J]. Hydro-science and engineering, 2023(6): 213-220.
- [6] 颜志庆,赵建钧,辜晋德,等.“S”形急弯河段通航水流条件研究[J].水运工程,2021(6):128-134.
- YAN Z Q, ZHAO J J, GU J D, et al. Study on navigable flow conditions of S-shaped abrupt bend [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 128-134.

(下转第 202 页)