



富池复线船闸与长江连接段 通航条件试验研究

张信伟¹, 刘哲², 张明², 李晓松², 孙保虎¹

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 针对富池复线船闸与长江连接段的通航条件问题, 采用平面数值模拟试验和船舶操纵模拟试验方法对多种工况下的水流条件、船舶操纵和航行轨迹进行研究。结合设计方案在通航条件方面存在的不足, 从拓宽口门南岸尺度以及下行进闸在小流量下及早下线进闸、大流量下在下游适当位置掉头后顶流进闸两个方面进行优化。结果表明, 优化后的方案改善了连接段的通航条件、降低了船舶操纵风险, 船舶最大通航流量从 5.41 万 m^3/s 提高至 6.82 万 m^3/s , 为工程设计确定了合理的流量参数。

关键词: 船闸; 通航条件; 数值模拟; 船舶操纵模拟试验

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0152-08

Experiment on navigation conditions at connecting section of Fuchi's second-line ship lock with the Yangtze River

ZHANG Xin-wei¹, LIU Zhe², ZHANG Ming², LI Xiao-song², SUN Bao-hu¹

(1. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: In view of the navigation condition problem at the connecting section of Fuchi's second-line ship lock with the Yangtze River, we adopt the two-dimensional numerical simulation experiment and the simulation experiment of ship handling to study flow conditions, ship handling, and ship navigation trajectories under multiple working conditions. According to the disadvantages of the design scheme in navigation conditions, we propose two measures for optimization: One is to widen the dimension of the entrance south coast, and the other is the adjustment of navigation trajectories. In other words, under low flow rates, ships heading downward could enter the ship lock as early as possible, and under large flow rates, the ship could turn round in a suitable position downstream to enter the ship lock with counter-flow. The results indicate that the optimized scheme can improve the navigation conditions of the connecting section and reduce the risk of ship handling, and the maximum navigable flow rate is increased from 54 100 m^3/s to 68 200 m^3/s , which determines the reasonable flow parameters for engineering design.

Keywords: ship lock; navigation condition; numerical simulation; simulation experiment of ship handling

富水为长江中游南岸一级支流, 流经通山、阳新两县, 于富池汇入长江。现有富池船闸已无法满足航运需求, 因此新建富池复线船闸。船闸

下游引航道进出口处于长江鲤鱼山水道, 受风、浪、流和航线夹角的影响, 船闸与长江连接段的通航条件较为复杂。平面二维数学模型计算和船

收稿日期: 2022-02-14

作者简介: 张信伟(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计及研究。

舶操纵模拟试验为通航条件研究的常用技术方法, 张信伟等^[1]运用数值模拟进行汉江雅口航运枢纽工程施工期通航研究; 应翰海等^[2]运用船模操纵试验分析不同工况下船舶交汇的安全距离及航迹带宽度。本文通过开展平面二维数值模拟及船舶操纵仿真模拟试验, 对船闸下游连接段通航条件进行分析和讨论。

1 工程概况

1.1 航道特征

长江鲤鱼山水道上起半边山、下迄仙姑山, 全长约 12 km, 为两头窄、中间宽的微弯河道, 河势多年来保持相对稳定, 现行主航槽稳定在黄连洲心滩左槽, 航道维护标准尺度为 4.5 m×200 m×1 050 m(水深×航宽×弯曲半径)。富水干流全长 194.6 km, 两岸为湖网地带, 地势平坦, 河势稳定, 下游段富池—阳新城关段航道等级为Ⅲ级, 设计航道尺度 2.8 m×60 m×480 m^[3]。工程河段河势见图 1。

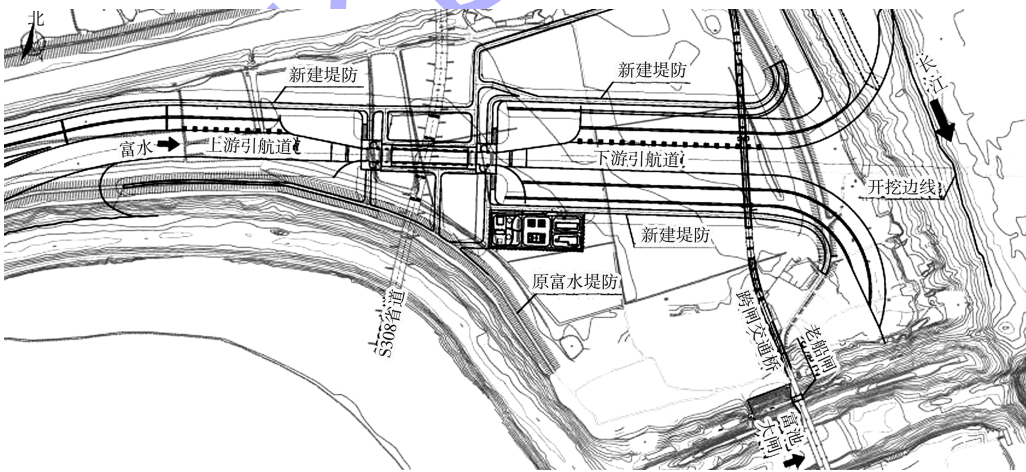


图 1 工程河段河势

1.2 船闸工程布置

富池复线船闸布置在老船闸左岸侧^[4], 闸室从 308 省道大桥预留通航孔穿过。船闸级别Ⅲ级, 有效尺度 180 m×23 m×4.0 m(有效长度×有效宽度×门槛水深)。上、下游引航道平面布置均采用不对称形式布置, 船舶进出闸方式均为曲线进闸、直线出闸, 上、下游主导航墙及靠船墩均布置在左岸侧。下游引航道与长江主航道连接, 宽 50 m, 底高程 3.05 m。代表船型为 1 000 吨级货船, 尺寸为 85.0 m×10.8 m×2.0 m(总长×型宽×设计吃水)。船闸布置见图 2。

图 2 船闸布置

2 平面二维数学模型

2.1 模型建立

基本方程采用通用微分方程式。模型进口取船闸上游 11 km, 出口取下游 16 km, 长度共 27 km, 最大宽度约 3.2 km。模型共布置 21.1 万个网格,

局部加密。初始水位场利用计算域上、下游水位和断面间距进行线性插值。随不同流量、水位波动, 边滩和江心洲等边界位置发生相应的变化。数学模型见图 3。

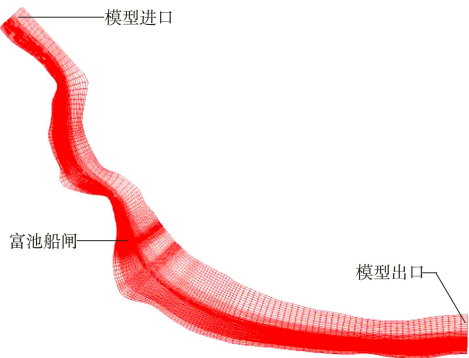


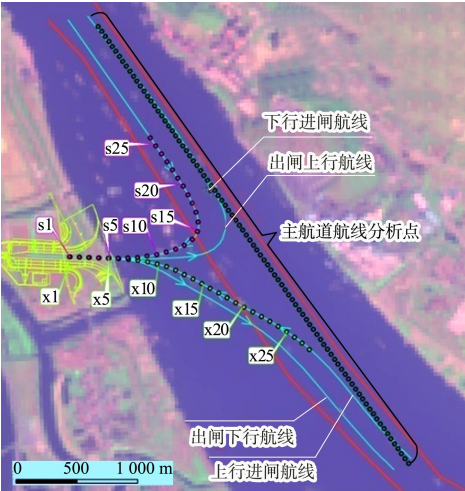
图 3 数学模型网格

2.2 数值模拟及结果分析

2.2.1 计算条件

船舶从长江主航道进出船闸共有 4 条设计航线，分别是长江下行进船闸航路(下行进闸)、出船闸长江上行航路(出闸上行)、长江上行进船闸航路(上行进闸)和出船闸长江下行(出闸下行)航

路，见图 4。口门区范围为距船闸 640~1 040 m 处，即图 4 中的 s3 与 s8 之间。8 种代表性工况见表 1。



注：s1~s25 为下行进闸航线分析点，
x1~x25 为上行进闸航线分析点。

图 4 进出闸航路及特征点

表 1 计算工况

工况	流量/(万 m ³ ·s ⁻¹)	流量类型	工况	流量/(万 m ³ ·s ⁻¹)	流量类型
1	0.803	三峡蓄水后最小流量	5	5.410	2 a 一遇流量
2	1.800	接近平滩流量	6	6.380	5 a 一遇流量
3	2.200	平均流量	7	6.820	10 a 一遇流量
4	3.058	实测流量	8	7.210	20 a 一遇流量

2.2.2 计算结果

船闸下游口门内最大纵、横向流速分别为 0.04、0.02 m/s，基本为静水；口门区各工况最大纵、横向流速分别为 0.71、2.02 m/s，最大值发生在工况 8 距船闸 1 040 m 处；口门区外航线有较

大纵横向流，典型流场及流速分布见图 5。进闸航线流速见表 2 和图 6。上行与下行的进闸航线流速差别不大，横向流速随流量增加呈增加态势，由于上行进闸航线与水流夹角稍小，其横向流速略有减小。

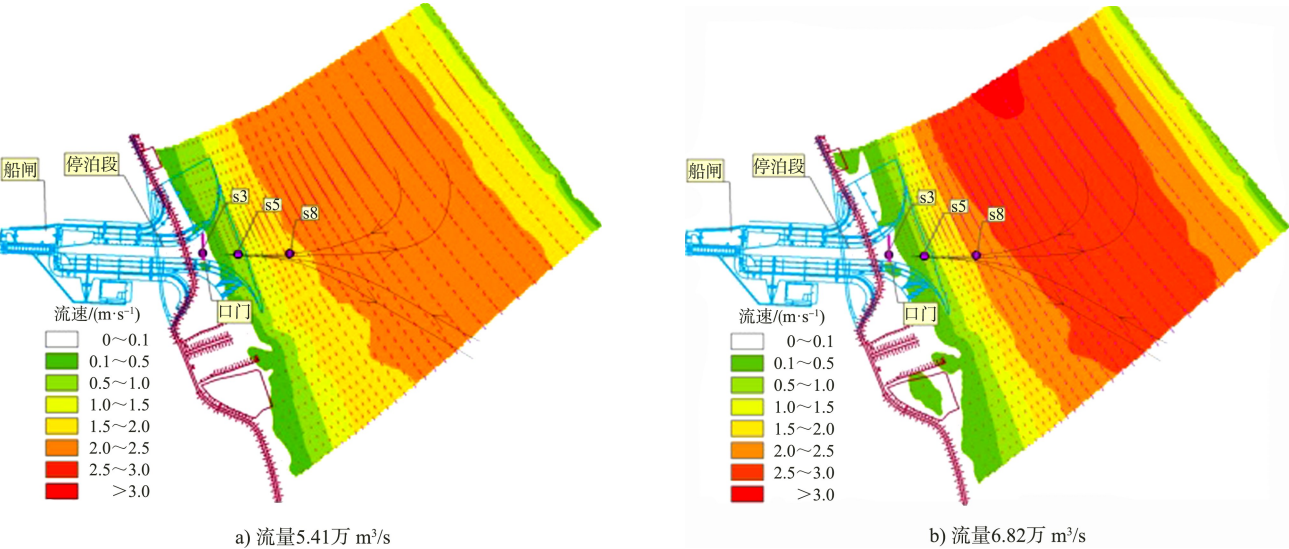
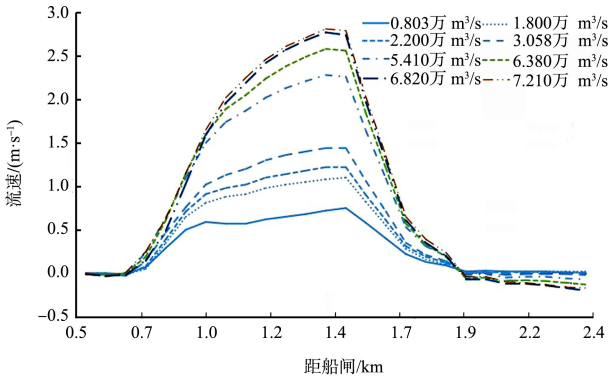


图 5 下游流场及流速分布

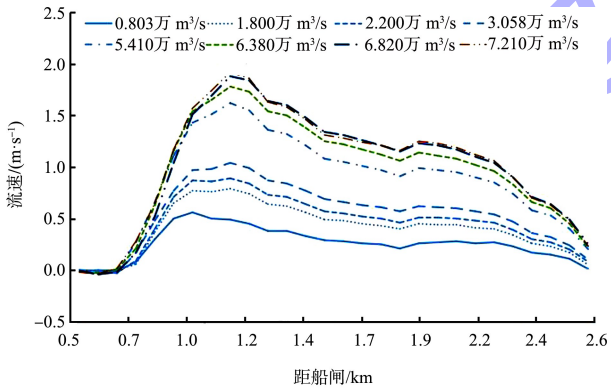
表 2 进闸航线流速

工况流量/ (万 m ³ ·s ⁻¹)	最大横向流速/(m·s ⁻¹)		最大纵向流速/(m·s ⁻¹)	
	下行进闸	上行进闸	下行进闸	上行进闸
0.803	0.75	0.56	0.77	-0.93
3.058	1.44	1.04	1.57	-1.41
5.410	2.28	1.62	2.49	-2.12
7.210	2.81	1.92	3.19	-2.56

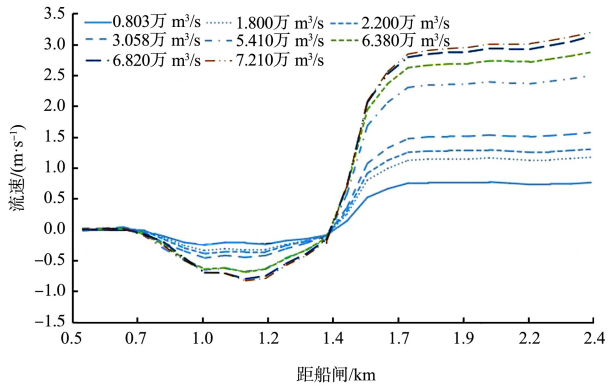
注: 表中仅列 4 种工况结果; 横向流速以向左侧为正, 纵向流速以与航线方向相同为正、相反为负。



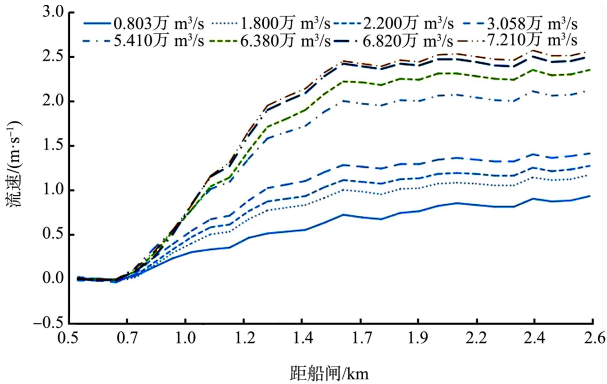
a) 下行进闸横向流速



b) 上行进闸横向流速



c) 下行进闸纵向流速



d) 上行进闸纵向流速

图 6 航线流速

3 船舶操纵仿真模拟试验

3.1 试验概况

采用 V. Dragon-4000AT 型操纵模拟器, 模拟环境、模拟方案、船舶模型均与实际具有相似性, 模拟结果可以记录、打印及再现。船舶模型率定^[5]: 1 000 吨级货船, 在无流情况下, 以正舵(舵角为零)航行 3 min 的航向改变 $\Delta C_0 = 0^\circ < 3.0^\circ$; 在常车稳速且航向稳定初始状态下, 以从首动达到变向 15° 之间的平均变向角速度 $\bar{r}_{0 \sim 15} = 0.84(^{\circ})/s$ 。经验证, 船舶模型旋回操纵特性满足规范要求。

3.2 船舶运动数学模型

基于分离型船舶运动数学模型 (maneuvering modeling group, MMG) 的思想将船体看作刚体, 建立船舶在风流浪中的六自由度运动数学模型^[6-7], 模型不仅考虑船舶本身的操纵性能, 还考虑了风流浪等环境干扰力的影响。船舶操纵运动方程:

$$\begin{cases} (m+m_x)(u-vr)=X_H+X_P+X_R+X_{WD}+X_{WV}+X_c \\ (m+m_y)(v+ur)=Y_H+Y_P+Y_R+Y_{WD}+Y_{WV}+Y_c \\ (I_z+J_z)r=N_H+N_P+N_R-Y_Hx_c+N_{WD}+N_{WV}+N_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为船舶质量; m_x 、 m_y 为 x 、 y 向的船舶附加质量; u 、 v 、 r 为船舶的纵向速度、横向速度、转首角速度; X_H 、 Y_H 、 N_H 为不包括惯性力在内的船体纵向水动力、横向水动力、首摇力矩; X_P 、 Y_P 、 N_P 分别为螺旋桨产生的纵向力、横向力、力矩; X_R 、 Y_R 、 N_R 分别为舵产生的纵向力、横向力、力矩; X_{WD} 、 Y_{WD} 、 N_{WD} 分别为风的纵向力、横向力、力矩; X_{WV} 、 Y_{WV} 、 N_{WV} 分别为波浪的纵向力、横向力、力矩; X_c 、 Y_c 、 N_c 分别为水流的

纵向力、横向力、力矩； J_z 为船舶附加惯性矩； I_z 为船舶绕 z 轴的惯性矩； x_c 为船舶重心横向长度。

3.3 试验条件

试验选取 8 种流量工况(表 1)、4 条设计航线(图 4)，风向 N、风力 6 级(简称为 N-6)，进行单向、双向航行 2 种方案。试验以船舶安全进出长江和船闸引航道为控制条件。

3.4 试验结果分析

3.4.1 单向模拟

1)下行进闸航路。当 $Q \leq 6.380 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时，船舶成功驶入，航迹带宽度最大为 250.8m 发生在里程 900~1 700 m，见图 7； $Q=6.820 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时，长江最大流速可达 2.68 m/s，里程 1 000~1 600 m 水域船舶漂移量较大，存在操纵风险； $Q=7.210 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时，口门区航速较快、所压流偏角较大，试验失败。

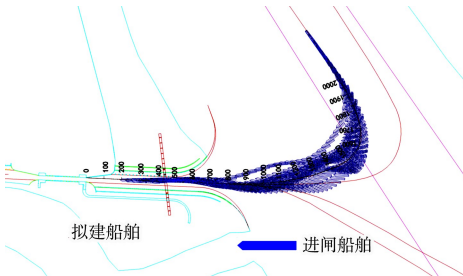


图 7 $Q \leq 6.380 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时航行轨迹叠加

$Q \leq 6.380 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时，船舶所压舵角、漂角、横移最大位置发生在里程 1 300~2 000 m 水域，通过合理操控可以驶入； $Q=6.820 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时，在里程 1 300~2 000 m 水域须长时间打满舵、横移速度及漂距均较大，船舶成功驶入，存在操纵风险。各工况操纵参数变化曲线见图 8。

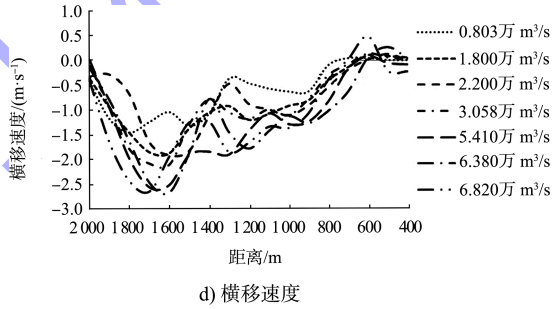
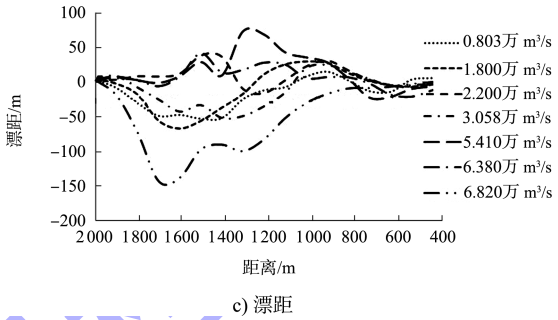
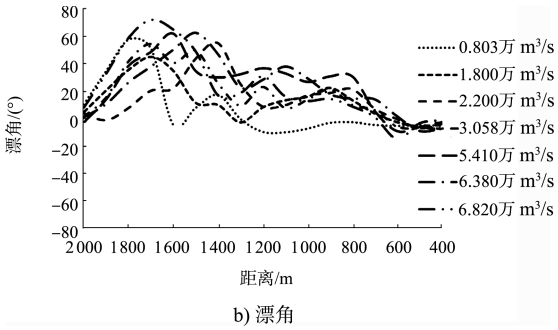
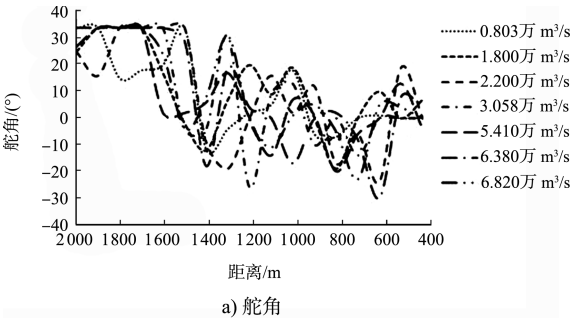
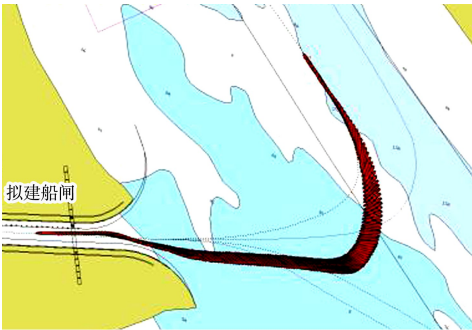


图 8 操纵参数变化曲线

风、流叠加试验结果为： $Q=5.410 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时，船舶成功驶入； $Q=6.380 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时，船舶所压舵角、漂角较大，产生的横移也较大； $Q=6.820 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时船舶在驶入口门水域后出现擦碰情况，试验失败。航行轨迹叠加见图 9。



a) $Q=6.380 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ ，N-6，有风险

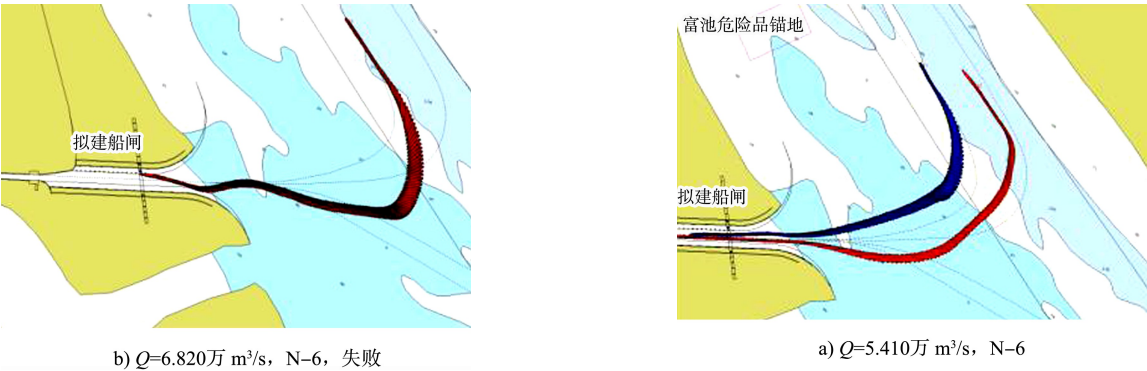


图 9 航行轨迹叠加

2) 出闸上行航路。当 $Q\leq 6.820\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时, 船舶成功驶入, 航迹带宽度最大为 191.4 m ; $Q\leq 7.210\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时, 船舶在里程 $1\ 000\sim 1\ 600\text{ m}$ 水域存在失控的风险; $Q\leq 6.380\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时, 船舶成功驶入; $Q\leq 6.820\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 工况下, 船舶在口门水域航迹带距离南侧岸线较近, 在口门外水域横移速度较大, 存在一定风险。

3) 上行进闸航路。当 $Q\leq 6.820\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时, 船舶成功驶入, 航迹带最大可达 103.6 m ; $Q=7.210\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、无风时, 船舶通过口门区后船位及航态不当, 撞上北侧靠船墩, 试验失败; $Q=6.820\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时, 船舶成功驶入; $Q=7.210\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 工况下进行了 4 次试验, 其中 2 次擦碰, 2 次顺利驶入船闸。

4) 出闸下行航路。各工况下, 船舶均可成功驶入, 航迹带维持在 $40\sim 60\text{ m}$ 之间。仅 $Q=7.210\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 工况下, 船舶在口门水域航迹带距离南侧岸线较近, 在口门外横移速度较大, 存在一定风险。

3.4.2 双向模拟

1) 上游进出闸。当 $Q\leq 5.410\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时, 船舶均可成功驶入(出)船闸; $Q=6.380\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时, 在口门水域交汇处, 进闸航迹带距离北侧岸线较近, 出闸船位距离南侧岸线较近, 严重时均出现擦碰情况; $Q=6.820\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时, 进闸船舶漂移量较大, 与出闸船舶在口门水域交汇时, 进闸船舶撞上北侧岸坡, 试验失败; $Q=7.210\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时, 同样试验失败。典型流量工况航行轨迹叠加见图 10。

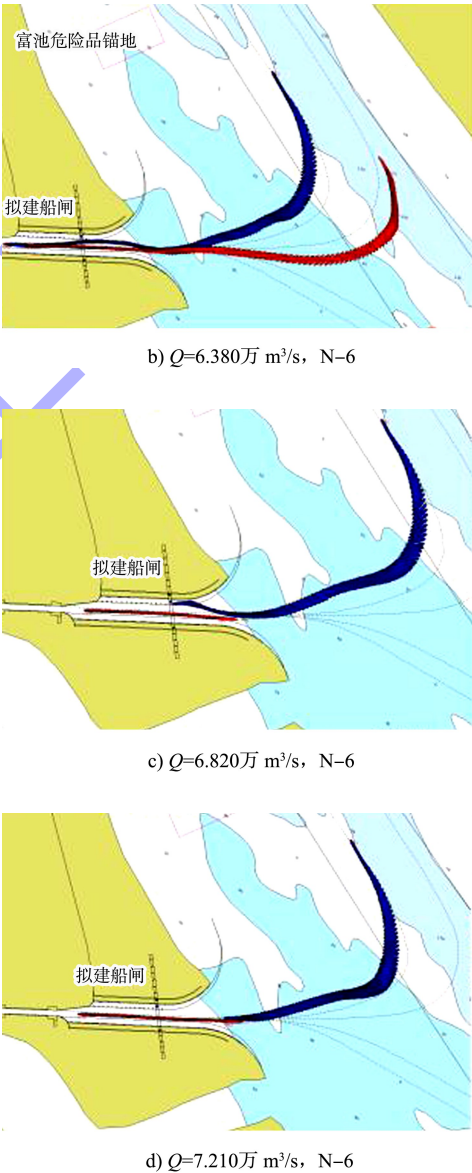


图 10 航行轨迹叠加

2) 下游进出闸。当 $Q\leq 6.38\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时, 船舶成功驶入(出)船闸; $Q=6.820\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、N-6 时, 上下行船舶在口门水域可安全避开, 但上行船舶距离靠船墩较近, 出现擦碰情况, 存在一定

风险； $Q=7.210$ 万 m^3/s 时，上下行船舶在口门水域发生碰撞，试验失败。

试验表明，单向通航的最大通航流量，下行进闸为 5.410 万 m^3/s ，出闸上行为 6.380 万 m^3/s ，上行进闸和出闸下行均为 6.820 万 m^3/s ；双向通航的最大通航流量，上游进出闸为 5.410 万 m^3/s ，下游进出闸为 6.380 万 m^3/s 。

4 优化方案布置及试验

4.1 优化工程措施

为改善通航条件，从两方面进行方案优化。口门布置优化内容：对口门南侧在里程 500 m 处开始拓宽，里程 600 m 处拓宽 15.6 m、700 m 处拓宽 43.8 m，拓宽段最大加宽约 65 m。下行进闸航路优化内容：小流量情况下长江下行船舶及早下线，大流量情况下在船闸下游适当位置掉头，然后顶流驶入船闸。方案优化见图 11。

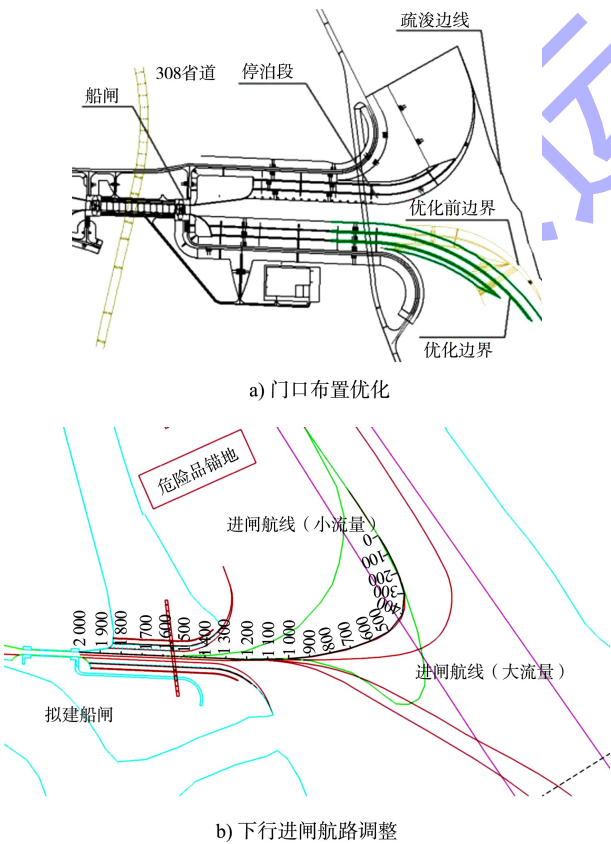


图 11 方案优化

4.2 试验结果

4.2.1 数值模拟结果

计算结果显示，横向流速随流量增加呈增加

态势。进闸航线流速见表 3。

表 3 进闸航线流速

工况流量/ (万 $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		最大纵向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	下行进闸	上行进闸	下行进闸	上行进闸
0.803	0.59	0.56	-0.24	0.29
3.058	1.14	0.99	-0.44	0.65
5.410	1.74	1.51	-0.64	1.00
7.210	2.00	1.71	-0.76	1.21

注：表中仅列 4 种工况结果。横向流速以向左侧为正，纵向流速以与航线方向相同为正、相反为负。

4.2.2 船舶仿真模拟试验结果分析

1) 单向模拟结果分析。 $Q\leq 6.820$ 万 m^3/s 、N-6 时，船舶利用水流航线航行，在船位下游位置完成掉头后顶流驶入口门及引航道，此时，由于流速迅速减小，船舶漂角、横移速度也逐渐减小，船舶成功驶入。 $Q=7.210$ 万 m^3/s 时，进行了多次试验，船舶在驶入口门水域时受水流的影响压向南侧岸线，或者船位摆得过高而撞上北侧岸坡，试验失败。下行进闸航线轨迹见图 12。

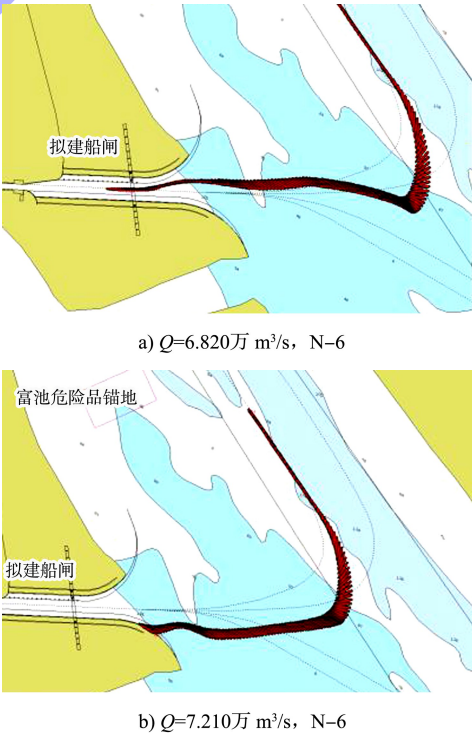


图 12 下行进闸航行轨迹

对 6.380 万、6.820 万 m^3/s 流量下的舵角进行分析。在航线弯曲段，优化方案与设计方案的操纵风险相当；在里程 600~1 100 m 水域，优化航线水流夹角较小，操纵风险较低。下行进闸的

设计航线与优化航线舵角曲线对比见图 13。

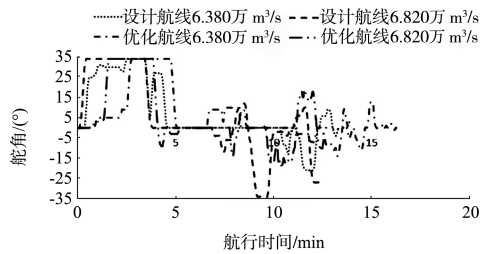


图 13 不同方案情况下 1 000 吨级货船进闸舵角变化曲线

2) 双向模拟试验结果分析。上游双向试验： $Q \leq 6.380$ 万 m^3/s 、N-6 时，上下行船舶均可成功进出； $Q = 6.820$ 万 m^3/s 、N-6 时，在口门水域交汇时漂移量较大，存在操纵风险，但通过合理操纵，风险可控； $Q = 7.210$ 万 m^3/s 时，进闸船舶在驶入口门水域时撞上岸线，试验失败。下游双向试验：当 $Q \leq 6.820$ 万 m^3/s 、N-6 时，上下行船舶均可成功进出； $Q = 7.210$ 万 m^3/s 时，在口门交汇区存在较大风险，失败概率较高。

方案优化后，单向通航下行进闸和出闸上行工况的最大通航流量均提高至 6.820 万 m^3/s ，双向通航上游进出闸、下游进出闸工况的最大通航流量分别提高至 6.380 万、6.820 万 m^3/s ，通航条件得到改善。

5 结语

1) 船闸下游口门区内存在小范围回流，回流流速不大，由于下游引航道轴线与水流夹角约 64° ，横向流速过大。优化方案通过口门拓宽和航路调整的工程措施，有效降低船舶进出闸的风险，改善了连接段的通航条件。

2) 口门拓宽和修改航路后，南侧岸坡在 $Q = 0.803$ 万 m^3/s 时流速增加最为明显，最大值为 0.39 m/s， $Q = 7.210$ 万 m^3/s 时主要呈减小态势；北侧岸坡工程前后各流量级流速变化范围介于 $-0.08 \sim 0.13$ m/s，变化总体较小。口门附近南北侧岸坡流速以 $Q = 5.410$ 万 m^3/s 时最大，为 1.12 m/s。优化方案后，船舶最大通航流量从 5.410 万 m^3/s 提高至 6.820 万 m^3/s 。

3) 平面数学模型试验和船舶仿真操纵模拟试验研究为改善船闸通航提供了有效的工程措施，建议船闸建成后，及时布设航路标牌、进行过闸船舶调度等加强通航管理，保证通航安全。

参考文献:

[1] 张信伟,孙保虎,胡峰军,等.汉江雅口航运枢纽工程施工期通航研究[J].水运工程,2020(12):155-160,171.

[2] 应翰海,关宏旭.福姜沙中水道船舶操纵模拟试验研究[J].水运工程,2020(9):126-131.

[3] 交通运输部天津水运工程科学研究所.富水富池—排市段航道工程富池船闸下游通航关键技术研究[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2021.

[4] 湖北省交通规划设计院股份有限公司.富水富池—排市段航道工程初步设计报告[R].武汉:湖北省交通规划设计院股份有限公司,2021.

[5] 长江航运科学研究所有限公司.长江运输船舶操纵性衡准:JT/T 258—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

[6] 徐静.船舶在波浪中的六自由度操纵运动模型研究[D].上海:上海交通大学,2014.

[7] 孔宪卫.船舶操纵运动数学模型及其在通航安全论证中应用[D].天津:天津大学,2007. (本文编辑 王璁)

(上接第 151 页)

[12] SILLERO J A, JIMÉNEZ J, MOSER R D. Two-point statistics for turbulent boundary layers and channels at Reynolds numbers up to $\delta^+ \approx 2000$ [J]. Physics of fluids, 2014, 26(10): 105109.

[13] 张建梅,钟亮,刘珺洁.密排粗糙床面明渠水流的流速结构[J].水电能源科学,2018,36(10):108-112.

[14] MATSUBARA K, MUROMOTO T. Two-point correlation and integral scale of spatially advancing curved channel flow at friction-velocity-based Reynolds number 550 [J]. International journal of heat and fluid flow, 2019, 77: 31-39.

[15] OZKAN G M, ELSINGA G E, BREUGEM W P, et al. Stereoscopic PIV measurements of flow over a riblet surface at high Reynolds number [J]. Experimental thermal and fluid science, 2021, 120: 110246.

[16] 陈槐,李丹勋,陈启刚,等.明渠恒定均匀流试验中尾门的影响范围[J].实验流体力学,2013,27(4):12-16. (本文编辑 王璁)