



汉江兴隆枢纽 2 000 吨级二线船闸 通航水流条件试验研究

卜美飞¹, 杨洪祥¹, 孙保虎¹, 李君涛², 白国文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: 采用水工整体物理模型试验的方法, 研究兴隆枢纽 2 000 吨级二线船闸引航道口门区及连接段通航水流条件, 以及二线船闸建设对一线船闸通航水流条件的影响。为解决二线船闸建设对一线船闸的影响, 通过多组试验提出延长并加高一、二线船闸间下游隔流堤, 同时在一、二线船闸隔流堤端部增加导流墩的优化方案, 并对优化方案进行进一步试验研究。结果表明, 二线船闸通航水流条件较好, 但二线船闸建设由于下游引航道开挖吸流效应对一线船闸下游口门区横向流速增加较大; 优化方案的工程措施改善一线船闸下游口门区水流条件, 实施优化方案后除 $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$ 外的各级流量下游口门区最大横向流速相对于优化方案前均有所减小。

关键词: 兴隆二线船闸; 整体物理模型试验; 通航水流条件; 口门区

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0122-10

Experiment of navigation flow conditions of 2,000-ton level second-line ship lock at Xinglong Hub of Hanjiang River

BU Meifei¹, YANG Hongxiang¹, SUN Baohu¹, LI Juntao², BAI Guowen¹

(1. Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute, Wuhan 430051, China;

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

Abstract: We adopt the experimental method of hydraulic overall physical model to study the navigation flow conditions of the entrance area and connecting section of the 2,000-ton level second-line ship lock of Xinglong Hub, and the impact of the construction of the second-line ship lock on the navigation flow conditions of the first line ship lock. To eliminate the impact of the second-line ship lock construction on the first-line ship lock, we propose an optimization plan through multiple experiments to extend and raise barriers between the first-line ship lock and second-line ship lock, while adding diversion piers at the end of the first-line ship lock barriers. Then, we conduct further experimental research on the optimization plan. The results show that the navigation flow conditions of the second-line ship lock are good. However, the construction of the second-line ship lock has resulted in a significant increase in lateral flow velocity in the downstream entrance area of the first line ship lock due to the excavation and suction benefits of the downstream approach channel. The engineering measures of the optimization plan improve the flow conditions in the downstream entrance area of the first-line ship lock. After implementing the optimization plan, the maximum lateral flow velocity in the downstream entrance area of each level of flow decreased compared to that before the optimization plan, except for $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$.

Keywords: Xinglong second-line ship lock; overall physical model experiment; navigation flow condition; entrance area

收稿日期: 2025-02-07

作者简介: 卜美飞(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

1 工程概况

兴隆枢纽位于汉江下游, 湖北省潜江、天门市境内, 上距丹江口枢纽 351 km、下距河口 266 km, 是汉江流域梯级开发中湖北省境内的最下一级。工程于 2009 年 2 月开工建设, 2013 年建成运行。兴隆枢纽的开发任务以灌溉和航运为主, 兼顾发电。枢纽采用一线式布置, 坝轴线总长 2 830 m, 自右至左依次为右岸过流滩地段(滩地过流流量 1 万 m^3/s)、一线船闸段、连接段(鱼道)、电站厂房、56 孔泄水闸、左岸过流滩地过流段, 见图 1。兴隆一线船闸为 1 000 吨级船闸, 尺度为 $180 \text{ m} \times 23 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ (闸室有效长度 $\times$ 闸室有效宽度 $\times$ 门槛水深)。



图 1 兴隆枢纽总平面布置

Fig. 1 General Layout of Xinglong Hub

根据《湖北省港口与航道布局规划(2035 年)》^[1], 一线船闸等级与航道规划达到二级的航道标准不匹配, 同时一线船闸设计通过能力无法适应汉湘桂大通道对汉江航运服务能力提出的新要求, 需要建设兴隆枢纽二线船闸。二线船闸建设标准为单线单级 II 级船闸, 设计船型为 2 000 吨级货船、1 顶 2 驳双排单列 2 000 吨级船队, 船闸有效尺度 $300 \text{ m} \times 34 \text{ m} \times 5.6 \text{ m}$, 船闸近期(2035 年)年单向设计通过能力为 3 198 万 t, 远期(2050 年)为 3 873 万 t^[2-3]。

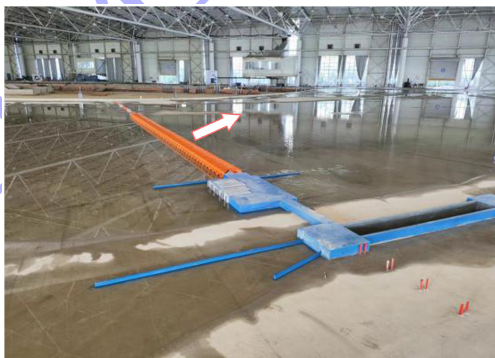
2 模型试验设计概况

依据试验目的和要求, 并根据河道特征、河床形态、地形特点, 同时为保证模型的水流运动相似和船模航行相似, 整体模型为定床正态, 几何比尺选用 1:100, 按重力相似准则进行模型设计。物理模型的范围为: 模型的左、右边界至防洪大

堤, 最大宽度为 6.5 km。模型全长约 15.0 km, 进口位于坝轴线上游约 6.0 km(主河道里程)处, 模型出口位于坝轴线下游弯道以下的直线段, 距离枢纽坝线约 9.0 km, 物理模型见图 2, 范围见图 3。



a) 物理模型场地布置



b) 枢纽模型制作

图 2 物理模型

Fig. 2 Physical model

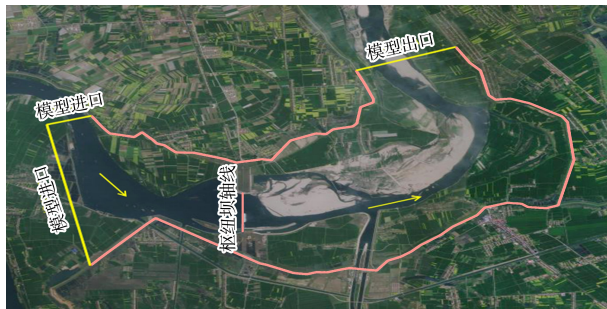


图 3 物理模型范围

Fig. 3 Scope of physical model

根据 JTS 305—2025《船闸总体设计规范》^[4], 上游停泊段的水面最大纵向流速不应大于 0.50 m/s, 横向流速不应大于 0.15 m/s, 下游停泊段的水面最大纵向流速不应大于 1.00 m/s, 横向流速不应

大于 0.20 m/s。制动段水流条件宜与停泊段一致。口门区水面纵向流速不宜大于 2 m/s，上游引航道口门区水面最大横向流速不宜大于 0.30~0.50 m/s，下游口门区的水面最大横向流速不宜大于 0.50 m/s。考虑到本文设计中口门区宽度取 120 m，在引航道直线段宽度 75 m 基础上增加了约 3 倍的设计船型宽度，故上游口门区横向流速限制按照 0.50 m/s 考虑。

依据模型模型试验研究任务及目标，结合二线船闸设计通航流量、兴隆枢纽运行调度方式等综合选择了 7 级典型流量进行试验研究^[5]，试验工况见表 1。

表 1 物理模型试验工况

Tab. 1 Experiment condition of physical model

工况	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	坝上 水位/m	坝下 水位/m	运行方式
1	420	35.00	26.51	二线船闸最小通航流量
2	820	35.00	27.79	整治流量
3	1 156	35.00	29.11	电站最大引流量
4	3 500	36.28	33.50	泄水闸电站联合运行
5	5 000	36.28	34.92	电站关闭泄水闸控泄
6	7 080	-	36.30	泄水闸敞泄流量
7	10 000	-	37.74	二线船闸最大通航流量

3 原设计方案

3.1 二线船闸总体方案布置

兴隆二线船闸布置在枢纽右岸滩地、一线船闸右侧。二线船闸推荐方案轴线位于一线船闸右侧约 130 m 处，船闸轴线与坝轴线正交，上闸首位于坝轴线处，为枢纽挡水建筑物的组成部分。上、下游引航道采用不对称布置，均向右侧拓宽，主导航墙及靠船墩布置在引航道右侧，辅导航墙布置在左侧，上、下游船舶过闸方式均为“曲线进闸、直线出闸”。

上游引航道直线段长度为 482 m，其中导航段长 182 m、停泊段长 300 m，上游引航道弯曲段为制动段，弯道中心角度 40°，弯曲半径 730 m，制动段长度为 514 m；上游口门区为直线段，长度

按 2.5 倍设计顶推船队长度取 455 m；上游引航道通过 130.7 m 直线连接段与主航道相接。上游引航道左侧布置隔流堤，隔流堤长度为 427 m，堤头与停泊段末端齐平，隔流顶高程 35.50 m。

下游引航道直线段长度为 482 m，其中导航段长 182 m、停泊段长 300 m，下游引航道弯曲段为制动段，弯道中心角度 40°，弯曲半径 730 m，制动段长度为 507 m；下游口门区为直线段，长度按 2 倍设计顶推船队长度取 364 m；下游引航道通过 589 m 连接段与主航道相接。下游引航道左侧布置隔流堤，隔流堤长度为 1 056 m，隔流顶高程 27.70 m。

上、下游引航道直线段底宽 75 m，均在制动段逐渐加宽并与口门区衔接，口门区底宽 120 m，引航道最小弯曲半径为 730 m。兴隆二线船闸平面布置见图 4，上、下游航线见图 5。

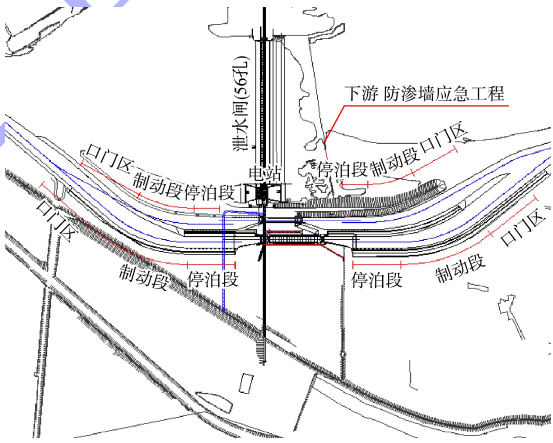
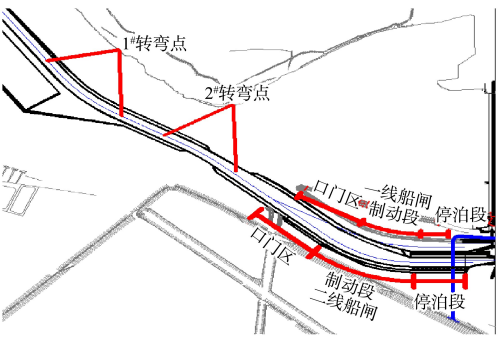


图 4 兴隆二线船闸平面布置

Fig. 4 Layout of Xinglong second-line ship lock



a) 上游

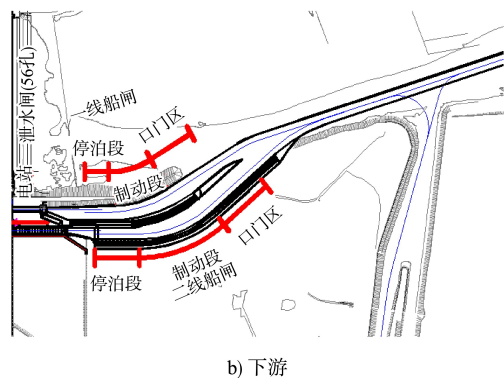


图 5 兴隆二线船闸上、下游航线
Fig. 5 Upstream and downstream route of
Xinglong second-line ship lock

3.2 二线船闸引航道通航水流条件试验

本文采用整体物理模型试验以及船舶航行条件试验, 进行 420、820、1 156、3 500、5 000、7 080、10 000 m^3/s 共 7 级典型流量下船闸上、下游引航道口门区及连接段航道的通航水流条件试验, 结果见表 2。 $Q=10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时引航道口门区及连接段横向流速分布见图 6。

表 2 引航道通航水流条件试验结果
Tab. 2 Experimental results of navigation flow conditions
in approach channel

工程 部位	试验工 况流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	停泊段、 制动段流 速情况	口门区最大 横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	连接段最大 横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
上游 引航道	420	基本为 静水	基本为静水	0.25
	820		基本为静水	0.25
	1 156		基本为静水	0.25
	3 500		0.15	0.43
	5 000		0.25	0.65
	7 080		0.32	0.80
	10 000		0.31	0.94
下游 引航道	420	基本为 静水	0.43	0.30
	820		0.41	0.40
	1 156		0.53	0.51
	3 500		0.53	0.52
	5 000		0.48	0.51
	7 080		0.50	0.62
	10 000		0.52	0.63

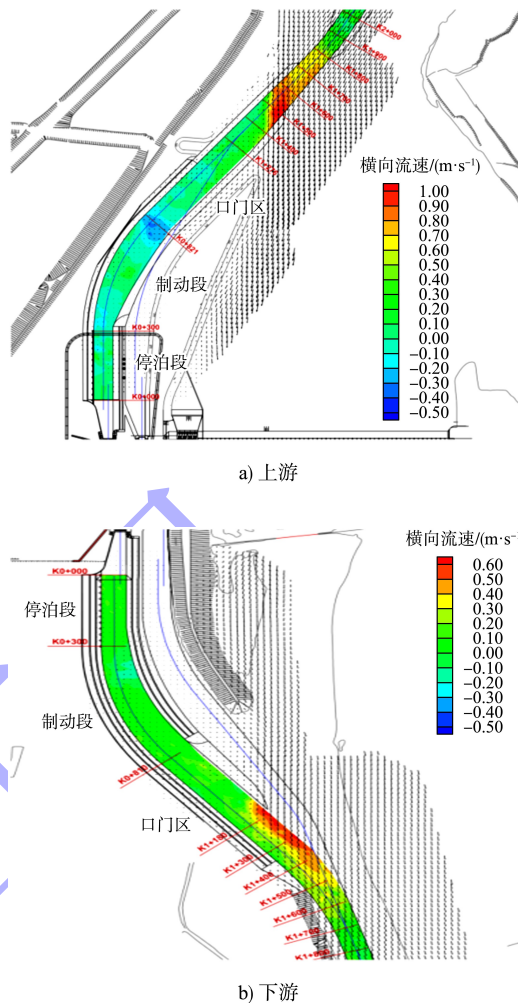


图 6 $Q=10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时引航道口门区及
连接段横向流速分布

Fig. 6 Lateral flow velocity distribution of entrance area
and connecting section of approach channel when
 $Q=10,000\text{ m}^3/\text{s}$

二线船闸设计方案布置条件下, 船闸上游在流量 $Q \leq 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 引航道口门区水流条件均满足要求。

二线船闸下游引航道在一线左侧隔流堤和右侧滩地未淹没工况 ($Q \leq 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$), 仅在 1 156、3 500 m^3/s 两级流量口门区末端个别测点横向流速略超规范限值, 其余流量引航道口门区通航水流条件均满足要求。

3.3 二线船闸建设对一线船闸影响

兴隆枢纽二线船闸在原一线船闸右侧岸滩上开挖建设, 二线船闸的兴建、引航道的开挖造成

原一线船闸引航道口门区及上下游附近河段的右边岸线位置发生改变。二线船闸建成后，坝轴线上 1.4 km—坝轴线下 2.0 km 河段右岸线均不同程度地向右侧移动，最大右移量约 170 m。为研究工程前后一线船闸通航水流条件的变化，模型进行 820、1 156、3 500、5 000、7 080、10 000 m³/s 共 6 级典型流量下一线船闸上、下游引航道口门区及连接段通航水流条件试验，试验结果见表 3。 $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$ 时一线船闸下游引航道口门区及连接段横向流速分布见图 7。

表 3 工程前后一线船闸引航道通航水流条件
Tab. 3 Navigation flow conditions of first-line ship lock's approach channel before and after project

工程部位	试验工况流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	工程前		工程后	
		停泊段、 制动段流 速情况	口门区最大 横向流速/ (m·s ⁻¹)	停泊段、 制动段流 速情况	口门区最大 横向流速/ (m·s ⁻¹)
一线船闸上游 航道	820	基本为静水	基本为静水	基本为静水	基本为静水
	1 156		基本为静水	基本为静水	基本为静水
	3 500		0.11	基本为静水	0.14
	5 000		0.15	静水	0.23
	7 080		0.19		0.31
	10 000		0.33		0.35
一线船闸下游 航道	820	基本为静水	0.46		0.67
	1 156		0.44		0.59
	3 500		0.42	基本为静水	0.54
	5 000		0.39	静水	0.39
	7 080		0.48		0.51
	10 000		0.49		0.54

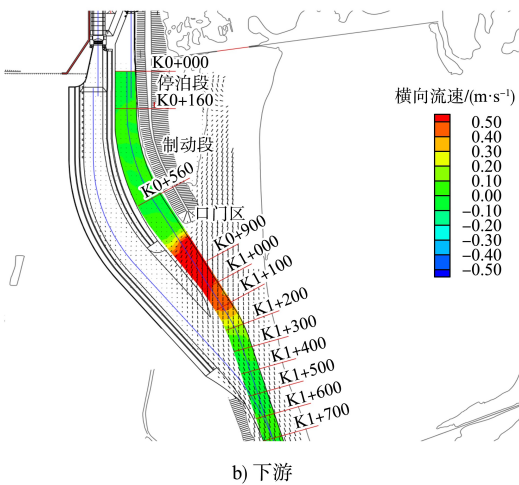
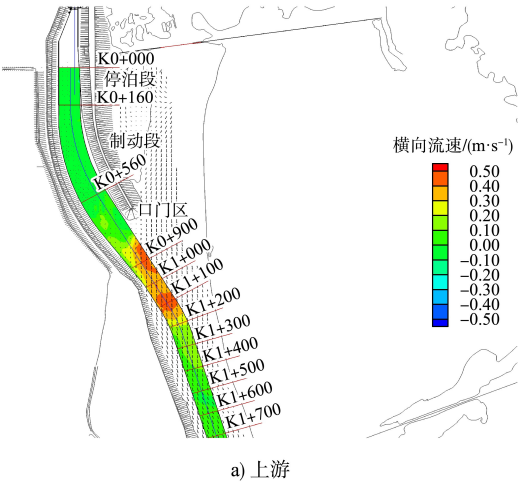


图 7 $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$ 时一线船闸下游引航道口门区及连接段横向流速分布

Fig. 7 Lateral flow velocity in entrance area and connecting section of downstream approach channel of first-line ship lock when $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$

对于一线船闸上游引航道，与现状条件相比，二线船闸的建设，主要是对兴隆二闸以下的右岸进行了开挖，使得一线船闸制动段及口门区所处航段的水域宽度增加。根据试验结果，在 $Q<3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时，上游库区流速较小，引航道口门区基本为静水，工程前后一线船闸上游通航水流条件基本无变化。在 $Q\geq 3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时，船闸上游制动段末端及口门区为回流，与现状相比，工程后由于水域宽度的增加，回流的范围与强度稍有增加，回流强度的增加使得回流区端部垂直航线的横向流速略有增大，3 500、5 000、7 080、10 000 m³/s 流量下回流区端部最大横向流速分别为 0.14、0.23、0.31、0.35 m/s，较现状分别增大 0.03、0.08、0.12、0.02 m/s。

对于一线船闸下游引航道，由于二线船闸引航道的开挖吸流影响，造成一线船闸下游口门区斜流强度增加，横向流速增大。其影响程度在枯水流量更为明显，在 $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$ 时，口门区内横向流速增加 0.21 m/s。随着流量的增加，影响逐渐减弱，在 $Q>5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 后，二线船闸建设的影响已不明显，工程前后一线船闸下游引航道口门区内的横向流速变化值均在 0.10 m/s 以内。

4 优化方案

4.1 船闸上游优化方案试验

设计方案船闸上游通航条件存在的问题主要是在 $Q \geq 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 连接段外附近主航道斜流过大, 船舶航行时产生横漂, 船舶操纵有一定难度。为了改善船舶航行条件, 优化方案的思路为将连接段航线右移, 其目的是尽量远离主流区, 减小航道内流速^[6-9]; 另外, 航线的右移, 能够增大与左侧隔流堤的距离, 保障船舶有充足的调整航态空间, 以降低航行风险。由于受兴隆取水闸影响, 航线右移空间受限, 其中兴隆二闸附近航线向右侧的偏移量仅为 6 m, 口门上游弯道段最大偏移约 15 m。调整后航线布置见图 8。

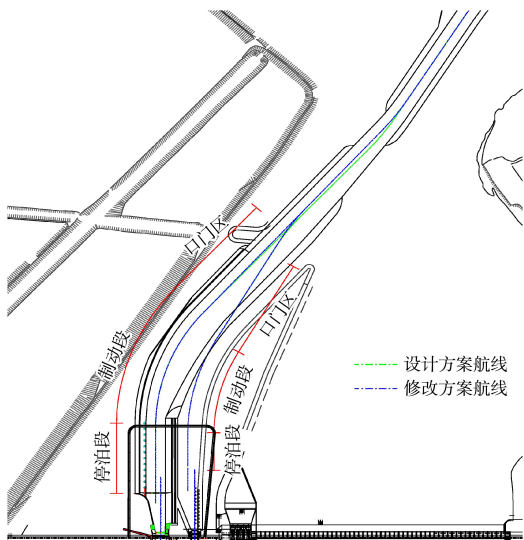


图 8 二线船闸上游优化方案布置

Fig. 8 Optimization plan layout for upstream of second-line ship lock

优化方案分别进行了 5 000、7 080、10 000 m^3/s 流量下的试验。结果表明, 航线调整后, 二线船闸上游停泊段、制动段及口门区水流条件与设计方案基本一致, 但连接段及附近斜流区航段的横向流速有所减小, 3 级流量下该航段内最大横向流速减小值分别为 0.15、0.17、0.24 m/s 。 $Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时二线船闸上游引航道口门区及连接段横向流速分布见图 9。

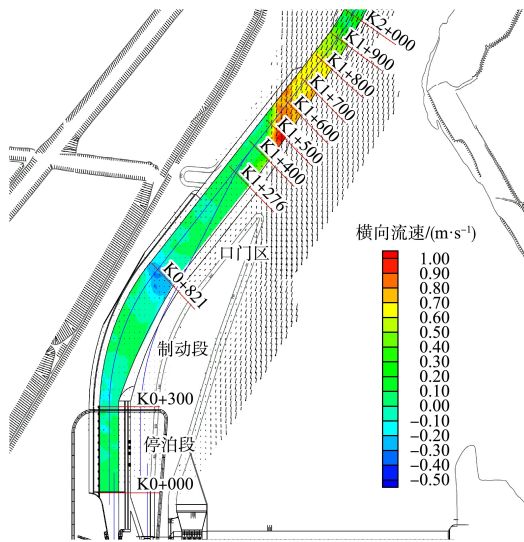


图 9 $Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时二线船闸上游引航道口门区及连接段横向流速分布

Fig. 9 Lateral flow velocity distribution of entrance area and connecting section of upstream approach channel of second-line ship lock when $Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$

4.2 船闸下游优化方案试验

4.2.1 优化过程试验

设计方案布置条件下, 一、二线船闸引航道之间的隔堤顶高程为 27.70 m ($Q > 820\text{ m}^3/\text{s}$ 淹没), 堤头位置与一线船闸左侧隔流堤基本齐平。枢纽下泄水流过一线船闸左侧隔流堤的堤头后, 斜穿一线船闸口门区进入二线船闸下游航道, 受二线船闸引航道吸流影响, 一线船闸口门区斜流较工程前明显增大。对此, 优化方案提出将一、二线船闸间隔流堤进行加高和延长, 以减弱二线船闸引航道的吸流影响。为保证船闸灌泄水时引航道水流条件满足要求, 需要将隔堤顶高程加高至 33.00 m, 优化方案隔堤加高高度与其一致。对于隔堤长度的优化, 模型进行了隔堤延长 150、200、250 m 共 3 组方案的试验^[10-13], 见图 10。

试验在 $Q = 1\,156\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下进行, 3 组隔堤延长方案及其与现状工况和设计方案工况下的一线船闸下游口门区及连接段横向流速对比见图 11。

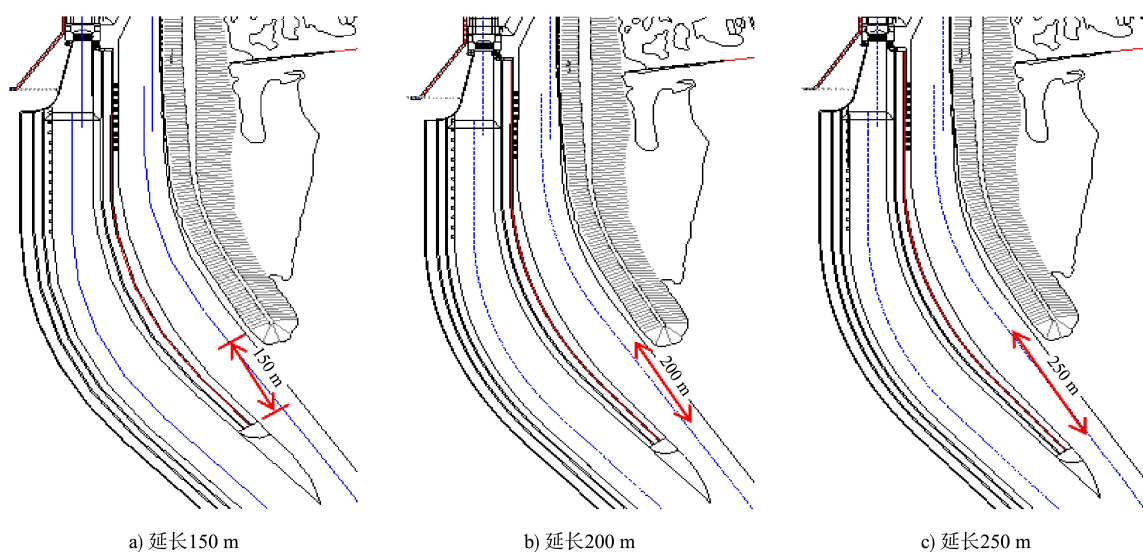
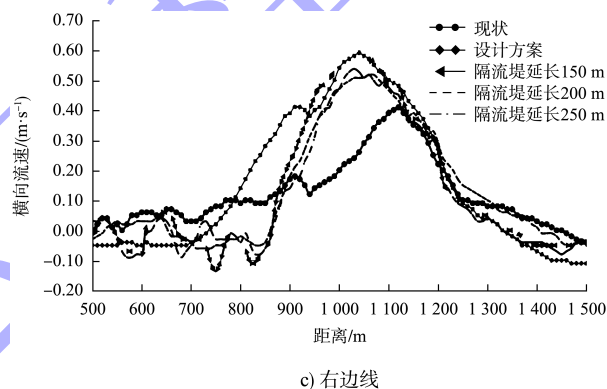


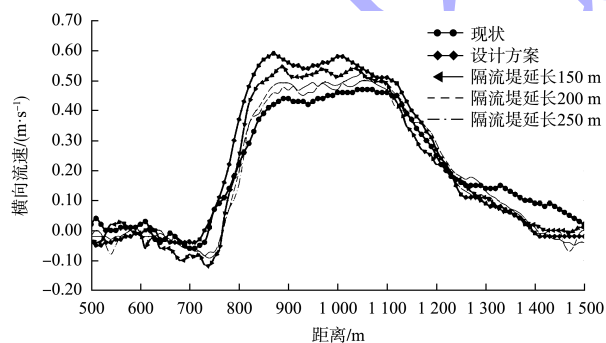
图 10 隔流堤长度优化系列方案布置 (单位: m)

Fig. 10 Layout of optimization series scheme for embankment length (unit: m)

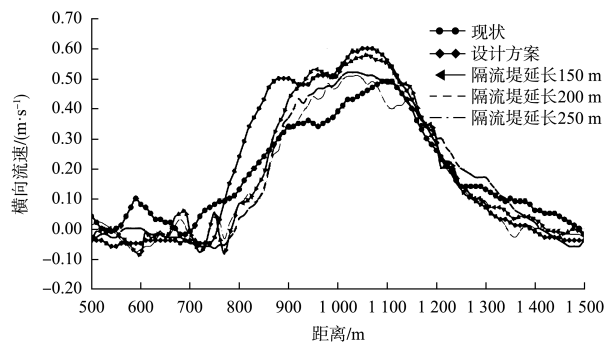
试验结果表明,隔流堤的加高延长对改善一线船闸口门区水流条件起到了明显作用,航中线左侧横向流速基本减小 0.10~0.20 m/s,航中线右侧横向流速减小 0.20~0.30 m/s。从 3 组长度优化方案的对比结果来看,延长 200 与 250 m 方案相差不大,其效果要略优于 150 m 方案,200 与 250 m 方案口门区和连接段大部分区域的横向流速较 150 m 方案减小 0.05~0.08 m/s。



c) 右边线

图 11 $Q=1\,156\text{ m}^3/\text{s}$ 时隔流堤延长方案一线船闸下游口门区及连接段横向流速沿程变化Fig. 11 Lateral flow velocity variation along downstream entrance area and connection section of first-line ship lock in extension plan when $Q=1\,156\text{ m}^3/\text{s}$ 

a) 左边线



b) 航中线

两线船闸引航道间隔流堤延长 200 m 方案虽然较设计方案水流条件有所改善,但是与现状相比,口门区及连接段航段横向流速仍增大 0.10 m/s 左右,其中航道右边线附近部分区域横向流速增大值在 0.20 m/s 左右,并且口门区左侧航边线附近仍有局部区域横向流速接近 0.50 m/s 的规范限值。

为了进一步论证隔流堤延长对其他流量级的影响情况,模型在隔流堤延长 200 m 方案下开展了 $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$ 的试验,结果见图 12。可以看出,隔流堤延长后较设计方案水流条件也大幅改善,其中航中线左侧横向流速减小约 0.20 m/s,航中线右侧横向流速减小约 0.30 m/s,但与现状相比,横向流速增大值仍然超过 0.15 m/s,且口门区航中

线左侧部分区域横向流速超过 0.50 m/s, 最大为 0.57 m/s。从流场来看, 该流量口门区横向流速超标主要是由于水流过一线船闸左侧隔堤后以近乎垂直航线的角度进入口门区。对此, 模型提出在一线船闸左侧的隔流堤下游附近增设导流墩削弱进入口门区的大角度集中横流, 经多组方案的试验, 提出增设导流墩的具体布置方案为: 在堤头下游增设 3 个导流墩, 单个导流墩长度为 20 m, 间距为 14 m。增设导流墩后, 此方案较单一的延长导堤方案, 口门区内横向流速减小约 0.15 m/s, 与现状条件基本一致。

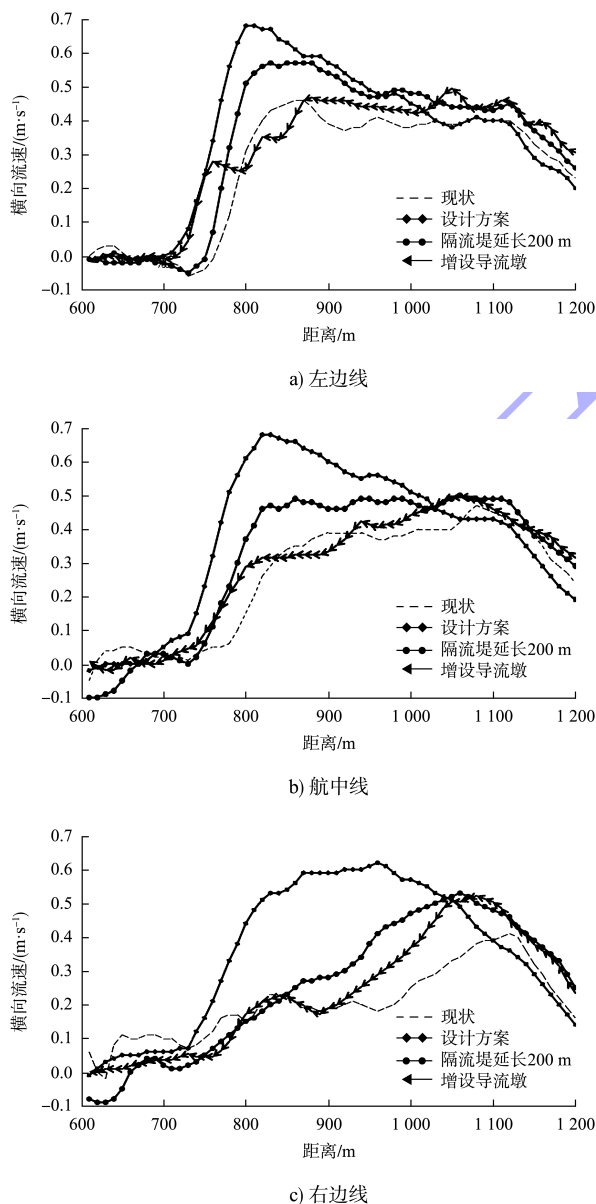


图 12 $Q=820 \text{ m}^3/\text{s}$ 时各方案一线船闸下游口门区及连接段横向流速沿程变化
Fig. 12 Lateral flow velocity variation along downstream entrance area and connecting section of first-line ship lock in each scheme when $Q=820 \text{ m}^3/\text{s}$

4.2.2 二线船闸建设对一线船闸影响

基于优化过程试验成果, 提出船闸下游通航水流条件优化方案具体改善措施为: 1) 将两线船闸间隔堤向下延长 200 m, 同时将堤顶高程由 27.70 m 加高至 33.00 m; 2) 在一线船闸左侧隔流堤堤头下游布设 3 个导流墩, 单个导流墩长度为 20 m, 间距为 14 m。墩顶高程为 38.00 m, 布置见图 13。

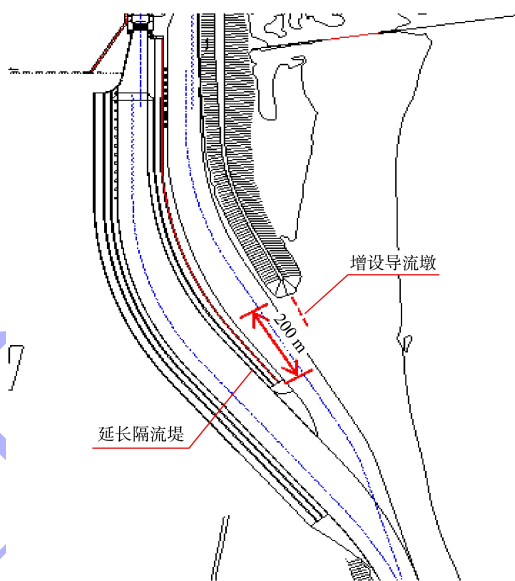


图 13 优化方案一线船闸下游改善工程措施布置
Fig. 13 Layout of improvement measures for downstream of first-line ship lock in optimization plan

该优化方案进行了 820、1 156、3 500、5 000、7 080 和 10 000 m^3/s 共 6 级典型流量船闸下游引航道口门区及连接段通航水流条件试验, 结果见表 4。

表 4 优化方案下工程前后一线船闸下游引航道通航水流条件
Tab. 4 Navigation flow conditions of downstream approach channel of first-line ship lock before and after project under optimization plan

试验工况流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	工程前		工程后	
	停泊段、 制动段流 速情况	口门区最大 横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	停泊段、 制动段流 速情况	口门区最大 横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
820		0.46		0.47
1 156		0.44		0.42
3 500	基本为静水	0.42	基本为静水	0.40
5 000		0.39		0.38
7 080		0.48		0.45
10 000		0.49		0.46

试验结果表明：优化方案工程措施改善了一线船闸下游口门区水流条件，除 $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$ 下，横向流速相对于现状工况下增加 0.01 m/s 外，其余各级工况相对于现状工况一线船闸下游口门区流速都有不同程度的减小。

4.2.3 优化方案后二线船闸下游通航水流条件

为了解优化方案工程措施对二线船闸下游通航水流条件的影响，模型进行了 820 、 $1\ 156$ 、 $3\ 500$ 、 $5\ 000$ 、 $7\ 080$ 和 $10\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 共 6 级典型流量试验，结果表明：优化方案工程措施对调整二线船闸下游口门区水流条件也起到了积极作用，各级流量下口门区及连接段横向流速较设计方案均有所减小，见表 5。

表 5 优化方案前后二线船闸下游引航道通航水流条件试验结果

Tab. 5 Experimental results of navigation flow conditions in downstream approach channel of second-line ship lock before and after optimization plan

试验工况 流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	优化方案前		优化方案后	
	口门区最大 横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	连接段最大 横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	口门区最大 横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	连接段最大 横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
820	0.41	0.40	0.36	0.35
1 156	0.53	0.51	0.42	0.43
3 500	0.53	0.52	0.50	0.50
5 000	0.48	0.51	0.45	0.48
7 080	0.50	0.62	0.46	0.57
10 000	0.52	0.63	0.50	0.59

5 结语

1) 二线船闸在原设计方案布置条件下，船闸上游在 $Q\leq 10\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，引航道口门区水流条件均满足要求；在 $Q\geq 5\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时连接段及附近主航道横流偏大，船舶下行时受横流影响，产生横漂，由于该段水域较宽，船舶调整航态空间较大，能够顺利通过该航段进入口门区及引航道。二线船闸下游引航道在一线左侧隔流堤和右侧滩地未淹没工况 ($Q\leq 10\ 000\text{ m}^3/\text{s}$)，仅在 $1\ 156$ 、 $3\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ 两级流量口门区末端个别测点横向流速略超规范限值，其余流量下引航道口门区通航水流条件均满足要求，连接段水流条件也满足船舶航行要求。

2) 二线船闸原设计方案由于下游引航道的开挖吸流影响，造成一线船闸下游口门区斜流强度增加，横向流速增大。其影响程度在枯水流量更为明显，在 $Q=820\text{ m}^3/\text{s}$ 时，口门区内横向流速增加值为 0.21 m/s 。随着流量的增加，影响逐渐减弱，在 $Q>5\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 后，二线船闸建设的影响已不明显，工程前后一线船闸下游引航道口门区内的横向流速变化值均在 0.10 m/s 以内。

3) 优化工程方案提出了上游航线右移、下游一二线船闸之间隔流堤延长并加高，同时在一线船闸左侧隔流堤端部增设导流墩等措施。通过试验可知，优化方案工程措施改善了二线船闸上游连接段通航条件，同时改善了一线船闸下游口门区水流条件，其效果明显。

参考文献：

- [1] 湖北省交通运输厅. 湖北省港口与航道布局规划(2035年)[A]. 武汉: 湖北省交通运输厅, 2025.
Department of Transportation of Hubei Province. Port and waterway layout plan of Hubei Province (2035) [A]. Wuhan: Department of Transportation of Hubei Province, 2025.
- [2] 孙保虎, 杨洪祥, 卜美飞. 汉江兴隆枢纽 2000 吨级二线船闸工程初步设计[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 2024.
SUN B H, YANG H X, BU M F. Preliminary design of 2000-ton level second-line ship lock project at Xinglong Hub of Hanjiang River [R]. Wuhan: Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute, 2024.
- [3] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
WANG Z G. Ship lock design [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1992.
- [4] 船闸总体设计规范: JTS 305—2025[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.
Code for master design of shiplocks: JTS 305-2025 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.
- [5] 李君涛. 汉江兴隆枢纽 2000 吨级二线船闸工程模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2024.
LI J T. Research report on model test of 2000-ton second-line ship lock project at Xinglong Hub of Hanjiang River [R].

- Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2024.
- [6] 李君, 赵建钧. 船闸凹岸布置上下游引航道水流条件优化[J]. 水运工程, 2016(12): 101-105, 131.
- LI J, ZHAO J J. Flow condition optimization for upstream and downstream approach channels when ship lock lies on concave bank [J]. Port & waterway engineering, 2016(12): 101-105, 131.
- [7] 张信伟, 刘哲, 张明, 等. 富池复线船闸与长江连接段通航条件试验研究[J]. 水运工程, 2022(11): 152-159.
- ZHANG X W, LIU Z, ZHANG M, et al. Experiment on navigation conditions at connecting section of Fuchi's second-line ship lock with the Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 152-159.
- [8] 孙保虎, 李君涛. 汉江雅口航运枢纽船闸通航条件试验研究[J]. 水运工程, 2017(1): 94-98.
- SUN B H, LI J T. Experimental study on shiplock navigation condition of Yakou hydro-junction in Hanjiang river[J]. Port & waterway engineering, 2017(1): 94-98.
- [9] 郝品正, 李伯海, 李一兵. 大源渡枢纽通航建筑物优化布置及通航条件试验研究[J]. 水运工程, 2000(10): 29-33.
- HAO P Z, LI B H, LI Y B. Optimized arrangement of navigation structures and test & study of navigation conditions of Dayuandu Junction [J]. Port & waterway engineering, 2000(10): 29-33.
- [10] 丁坚, 吴腾, 邵雨辰, 等. 成子河船闸引航道与泄洪河道交汇处区域通航水流条件与改善措施研究[J]. 水道港口, 2016, 37(2): 166-169.
- DING J, WU T, SHAO Y C, et al. Flow characteristics and channel security research of Chengzi river ship lock approach and flood discharge channel intersection area[J]. Journal of waterway and harbor, 2016, 37(2): 166-169.
- [11] 田进, 徐启航. 濠里枢纽二线船闸通航水流条件试验研究[J]. 水科学与工程, 2017(3): 83-86.
- TIAN J, XU Q H. Study on flow conditions about second-line shiplock of Mengli hydro-junction in different layout schemes[J]. Water sciences and engineering technology, 2017(3): 83-86.
- [12] 叶玉康, 刘晓平, 张宇, 等. 弯曲河段船闸口门区通航水流条件探讨[J]. 长江科学院院报, 2017(6): 72-75, 87.
- YE Y K, LIU X P, ZHANG Y, et al. Discussion on the flow conditions at the entrance area of ship lock in curved reach [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017(6): 72-75, 87.
- [13] 李艳, 张绪进, 刘洋, 等. 韩江南溪新建船闸通航水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2020, 41(5): 585-589, 618.
- LI Y, ZHANG X J, LIU Y, et al. Experimental research on navigation flow conditions of Hanjiang Nanxi new shiplock [J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(5): 585-589, 618.

(本文编辑 王璁)

(上接第54页)

- [10] BURCHARTH H F, FRIGAARD P, UZCANGA J, et al. Design of the Ciervana breakwater, Bilbao[C]//Institution of Civil Engineers. Proceedings of the Advances in Coastal Structures and Breakwaters Conference. London: Thomas Telford, 1995: 26-43.
- [11] 吴中, 林民标, 杨越. 斜坡堤天然块石护脚的稳定性计算[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 19-23.
- WU Z, LIN M B, YANG Y. Stability calculation of rubble mound toe berm in the front of the sloping breakwater[J]. The ocean engineering, 2002, 20(2): 19-23.
- [12] 黄哲, 徐孟飘, 王登婷, 等. 复杂礁盘地形对防波堤堤脚稳定性影响试验研究[J]. 水运工程, 2019(8): 70-73.
- HUANG Z, XU M P, WANG D T, et al. Experimental research on toe rock stability of breakwater under complex reef terrain condition [J]. Port & waterway engineering, 2019(8): 70-73.
- [13] Coastal Engineering Manual: EM 1110-2-1100 [S]. Washington: CERC Dept. of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, 2006.

(本文编辑 王传瑜)