



凤凰颈排灌站运行对船闸下游口外连接段通航水流条件的影响及改善措施

刘艳秋¹, 庄千棉², 王云莉², 周世良², 刘 洋²

(1. 安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011;

2. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016)

摘要: 针对凤凰颈排灌站下游出口斜向汇入船闸下游口外连接段, 其调度运行方式对通航水流条件产生不利影响。通过整体定床物理模型试验, 系统研究了凤凰颈强排泵站在不同调度运行方式下对船闸下游口外连接段通航水流条件的影响规律。试验结果表明: 在西河侧向长江排水的自排工况下, 水流斜向汇入船闸下游连接段, 导致交汇区最大横向流速达 0.48 m/s, 对连接段通航水流条件影响较大; 相比之下, 在长江侧向西河引水的机引工况下, 横向流速仅为 0.28 m/s, 影响程度较小。研究进一步发现, 长江侧水位越低, 排灌站出流对连接段通航水流条件的影响越显著。以自排工况为最不利工况, 研究提出泵站引排水渠与连接段之间增设透空导流墙的工程优化方案, 试验表明该措施可有效将横向流速控制在 0.30 m/s 以内。

关键词: 口外连接段; 调度运行方式; 通航水流条件; 定床物理模型试验

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0125-10

Impact of Fenghuangjing pumping and drainage station operation on navigable flow conditions in downstream outlet connection section of ship lock and improvement strategies

LIU Qiuyan¹, ZHUANG Qianmian², WANG Yunli², ZHOU Shiliang², LIU Yang²

(1. Anhui Provincial Traffic Survey and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China;

2. Southwest Waterway Engineering Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: In view of the downstream outlet of Fenghuangjing pumping and drainage station that diagonally flows into the downstream outlet connection section of the ship lock, its dispatching and operation mode has adverse impact on the navigation flow conditions. Through the physical model test of the whole fixed bed, the influence of the Fenghuangjing pumping and drainage station on the navigation flow conditions of the outer connecting section of the downstream gate of the ship lock under different dispatching modes is systematically studied. The test results show that under the self-discharge condition of the drainage from the West River to the Yangtze River, the water flow obliquely flows into the downstream connection section of the ship lock, resulting in the maximum lateral velocity of the intersection area reaching 0.48 m/s, which has a great influence on the navigation flow conditions of the connection section. In contrast, the lateral flow velocity is only 0.28 m/s under the mechanical diversion condition of the Yangtze River to the West River diversion, and the influence degree is relatively small. Further research has found that the lower the water level on the Yangtze River side, the more significant the influence of the outflow of the pumping and drainage station on the navigation flow conditions of the connecting section. Taking the self-discharge

收稿日期: 2025-02-21

作者简介: 刘艳秋(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水运设计工作。

通信作者: 王云莉(1974—), 女, 博士, 副研究员, 从事水利水运工程科学研究工作。E-mail: 1649591194@qq.com

condition as the most unfavorable condition, the engineering optimization scheme of adding a permeable diversion wall between the drainage channel and the connecting section of the pumping station is proposed. The test shows that the measure can effectively control the transverse velocity within 0.30 m/s.

Keywords: outlet connection section; operation mode; navigable flow condition; physical model test of fixed bed

合肥市是长江三角洲城市群副中心城市,“长江经济带”“一带一路”双节点城市、内陆开放型经济高地、全国性综合交通枢纽,而水路运输短板与较高的城市定位不相适应,迫切需要通过提升水路通道的等级弥补短板。建设兆西河通江航道,可以实现合肥市水路运输跨越式发展,可以实现真正意义上的“通江达海”。而凤凰颈船闸是兆西河通江航道的关键工程和瓶颈工程,其船闸引航道的布置及通航条件对于船闸建设目标具有极其重要的意义。

水运工程布置受到的制约因素较多,生态、环保、已建工程及建设用地对工程的布置影响均较大;受这些因素的制约,凤凰颈船闸下游口外连接段布置于凤凰颈排灌站出口下游约 300 m 附近,距离较短,且下游出口渠道水流斜向汇入船闸下游口外连接段,船闸下游口外连接段底宽为 80 m,相对较窄,泵站的调度运行会对船闸下游口外连接段的通航水流条件及船舶通航产生不利影响^[1-5]。同时船闸下游口外连接段进、出支流(闸)航道与长江干流为水流来流方向交汇角约为 90°,在无排灌站运行条件下,船舶进出干支流航道也较为困难。

泵闸排水时,闸下出流集中,增加了下泄流量,导致流速分布不均,水流难以通过自我调整进行充分扩散,泵站交汇处产生较大的横向流速^[6-8]。泵站引水时,引水河的分流必然改变主河道的流向,进而造成引水河河口附近出现横流,使得通航水流条件发生变化^[9-10]。因此,本文采用定床物理模型分析凤凰颈排水泵站调度运行方式对船闸下游口外连接段通航水流的影响,对船闸下游口外连接段交汇水域的平面布置进行优化,旨在改善船闸下游口外连接段及下游进出支流(闸)航道的通航水流条件,以确保通航安全。

1 工程概况

凤凰颈排灌站是以排泄西河流域洪水和引江灌溉为主的大型排引结合的闸站枢纽工程,凤凰颈泵站位于安徽省无为县刘渡镇无为大堤,是引江济淮工程西兆线引江线路上的提水泵站。凤凰颈排灌站运行包括自流、机排、机引 3 种情况。自流时不开抽排机组,水流根据长江和西河水位高低自由流动;机排时西河侧水位低于长江侧水位,开启抽水机组将内河水抽排至长江;机引时长江水位低于西河水位,开启抽水机组将长江水抽灌至西河。长江侧设计最大强排流量 240 m³/s,最大自排流量为 380 m³/s,设计最大引江流量为 150 m³/s。凤凰颈排灌站运行特征水位见图 1。

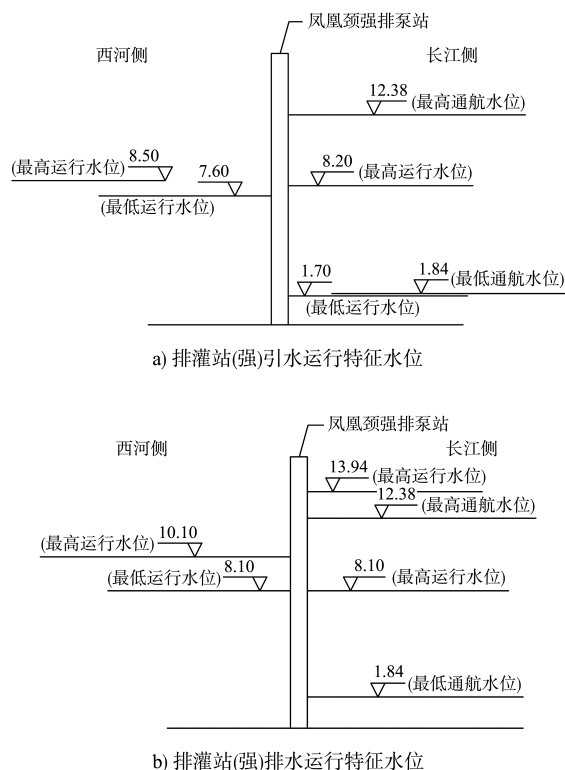


图 1 排灌站调度运行特征水位 (单位: m)

Fig. 1 Characteristic water level for dispatching and operation of pumping and drainage station (unit: m)

凤凰颈船闸下引航道及连接段平面布置见图 2, 船闸布置在泵站东侧, 下闸首距原泵站约 1 392 m, 船闸中心线与现有排灌站中心线平行布置, 相距 337 m, 在泵站引水渠东侧扩挖航道入江, 入江航道中心线向上游侧偏转 20° , 与长江主航道夹角约为 59° 。通航建筑物为 II 级船闸, 闸室尺度为 $340 \text{ m} \times 34 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 门槛水深), 代表船型尺度为 $110 \text{ m} \times 16.3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 吃水)。凤凰颈船闸下游引航道接长江主航道, 属太阳洲水道。

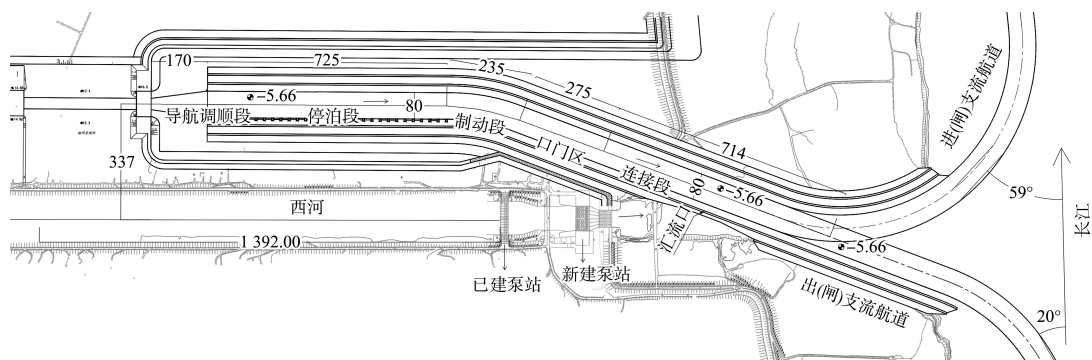


图 2 拟建凤凰颈船闸下引航道及连接段平面布置 (单位: m)

Fig. 2 Plan layout of lower approach channel and connecting section of proposed Fenghuangjing ship lock (unit: m)

2 模型设计与验证

2.1 模型设计与制作

长江上游来流量较大, 支流凤凰颈排灌站引、排水流量均相对较小, 因此长江与西河凤凰颈船闸下引航道、连接段及下游航道汇流口航道通航水流条件受长江干流水流条件影响较大, 因此模型首先应对西河与长江汇流口长江河段的水流条件进行精确模拟, 同时凤凰颈排灌站出口距船闸下游引航道较近, 且引排水渠两水流斜交, 模型也应对凤凰颈排灌站进行精确模拟, 模型布置见图 3。

汇流口下游为一个大弯段, 弯道河势对汇流口水流条件有一定程度的影响, 因此在汇流口下游模型应模拟出正确反映弯道水流特性的河段长度, 长江干流河道较宽, 为 $1.2 \sim 2.7 \text{ km}$ 。综合分析研究河道水流特征和船闸布置等, 选取模型范围包括: 1) 西河段。西河长江汇流口至以上 4.7 km 。2) 长江河段。西河汇流口以上 3.2 km ,

太阳洲水道上起灯笼地, 下迄太阳洲尾, 全长 16.3 km 。该段河道弯曲度较大, 呈 S 形, 沿程深泓傍凹岸, 凹岸侧有扫湾水。太阳洲水道左岸刘家渡以上为陡岸, 右岸有铜陵弧形沙滩上接章家洲, 并下延至太阳洲下口。船闸下游口外连接段处于西河与长江汇流口, 进出航道与长江来流交角近 90° , 且下游受长江干流顶托影响, 连接段河段水流条件较为复杂。

汇流口以下 9.5 km , 合计 12.7 km 。模型按照重力相似准则设计, 采用几何比尺 $1:125$ 正态模型。

干、支流河段模型均采用 2024 年 2 月实测 $1:1\,000$ 河道地形为基础, 平面位置采用三角网和主、副导线进行控制, 高程由水准仪进行测定。同时, 模型采用塑料板对排灌站的抽排水建筑物进行精细模拟, 采用潜水泵对排灌站进行模拟, 以及采用水泥对凤凰颈船闸进行精细模拟。

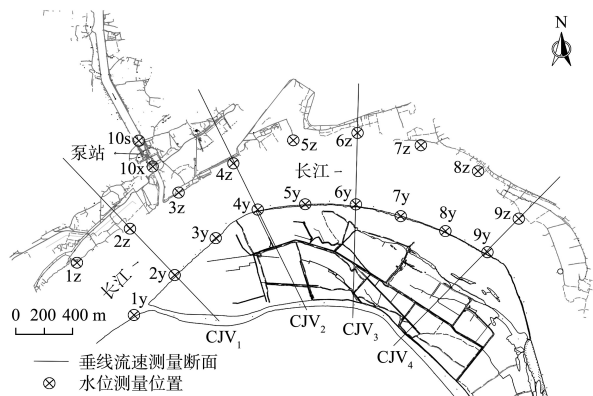


图 3 模型布置

Fig. 3 Model layout

2.2 模型验证

在水面线验证方面,模型主要采用 2024 年 3 月 26 日的长江上游来流量 $Q=1.6$ 万 m^3/s 水面线资料,作为校核模型与原型河床阻力相似的依据。最终经分析,模型水位与原型水位差值基本在 ± 0.05 m 以内,符合相关规范要求,见图 4。

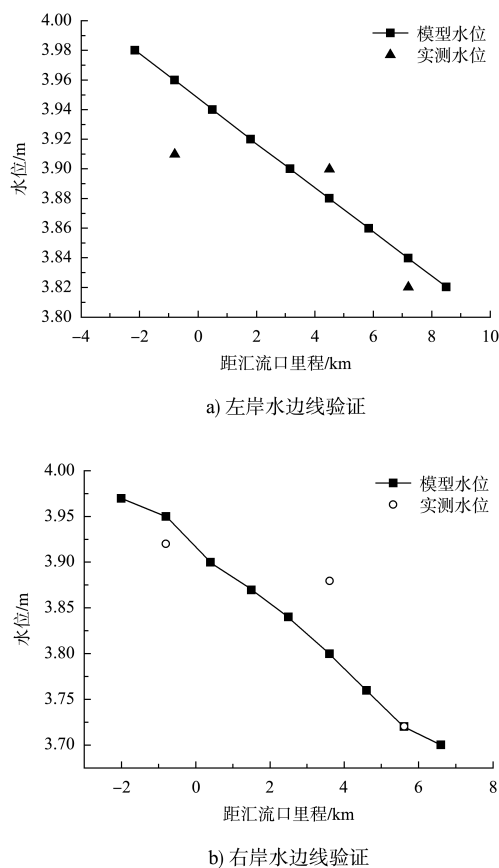


图 4 模型水位验证

Fig. 4 Model water level verification

在流速、流向验证方面,根据 2024 年 3 月 26 日实测的西河汇流口长江河段中水流速、流向资料,在模型上相同位置投放浮标,观察浮标的运动轨迹,并与原型比较,模型与原型浮标的运动轨迹相近,运动方向基本一致,表明模型表流流向与原型相似性较好。

在断面流速分布验证方面,根据 2024 年 3 月 26 日的实测全河段 3 个控制断面流速分布资料进行验证,见图 5。结果表明,模型实测与原型河道实测典型断面流速分布规律基本一致,模型流速与原型流速差值与原型实测值的百分比大部分在

10% 以内,少数在 10%~20%,基本满足相关规范要求。

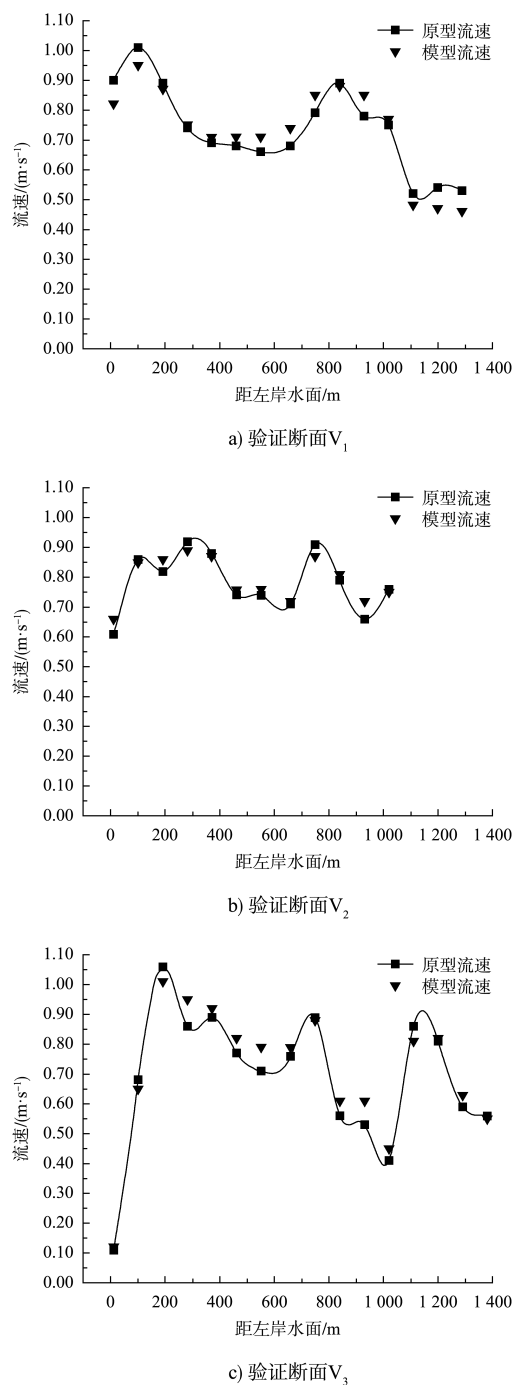


图 5 测流断面垂线平均流速分布验证

Fig. 5 Verification of vertical average velocity distribution of flow measurement section

3 模型试验条件

3.1 通航水流条件控制标准

在引航道内,应尽量避免出现泄水波、泡漩和乱流等不良水流状况,这些现象可能对船舶和船队的航行及停泊安全产生不利影响。因此,引

航道与连接段之间的水流状况应实现平稳过渡, 以保证航行过程中的安全。

依据 JTJ 305—2025《船闸总体设计规范》^[11]要求: 船闸引航道及连接段纵向流速不应大于 2.00 m/s, 横向流速不应大于 0.30 m/s, 回流流速不应大于 0.40 m/s。周勤等^[12]对引航道口外连接段通航水流条件标准进行研究, 依据嘉陵江苍溪、新政、金溪、凤仪场等实际工程, 船闸引航道口外连接段纵向流速不应大于 2.60 m/s, 横向流速不应大于 0.40 m/s, 船舶可安全通过连接段。

3.2 水位及流场测量设备

模型河段沿程水尺用测针观读(测量精度为 0.1 mm); 表面流速用 XKVMS-03 型大范围表面流

场测量仪进行观测, 局部流速用 HD-4 型电脑流速仪和小威龙多普勒三维流速仪进行测量; 模型水流流线采用浮标断面法测量; 原测断面流速分布及流量测量采用声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)进行测量。

3.3 模型试验工况

凤凰颈排灌站的下游出口下距凤凰颈船闸下引航道的连接段汇流口约 300 m, 船闸下游口外连接段水流条件将会受到凤凰颈排灌站泄流和引水的影响。根据凤凰颈船闸的设计标准及强排泵站的调度运行方式, 分析在排水和引水工况下, 不同流量及水位组合对船闸下游口外连接段通航水流的影响, 试验工况见表 1。

表 1 设计方案工程河段模型试验观测工况
Tab. 1 Model test observation conditions of design scheme engineering river

工况组号	长江汇流口 上游来流量/ (万 m ³ ·s ⁻¹)	排灌站引 排水流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	排灌站 下游水位/ m	排灌站运行情况	备注
1	1.10	200	1.84	排灌站引水	最低通航水位
2	2.45	380	5.10	排灌站自引	引水量 380 m ³ /s, 可能出现最低水位
3	2.45	380	5.10	排灌站自排最大流量+排灌站下极端最低水位	自排极端最不利工况
4	4.00	240	8.10	排灌站设计最大流量+排水最低运行水位	排灌站设计最不利工况

4 设计方案通航水流条件研究

4.1 平面布置

凤凰颈船闸上、下游引航道采用不对称式布置, 船舶进出闸方式均为“直线进闸, 曲线出闸”。上、下游主导航墙和靠船墩均布置在引航道右侧, 引航道底宽为 80 m。上、下游导航调顺段长度(沿船闸轴线投影长度)为 170 m, 靠船段长度均为 350 m。上下游主导航墙均位于右侧, 与船闸轴线平行, 上下游辅导航墙均位于左侧。引航道采用复式断面, 底宽 80 m, 边坡 1:4。上游引航道两侧退建西河大堤, 堤顶高程 12.3 m; 下游引航道两侧退建长江大堤, 堤顶高程 16.6 m。堤顶和引航道底之间的边坡上设置 2~3 道平台, 上游平台高程为 3.3、7.8 m; 下游平台高程左右侧均为 -0.5、5.0、10.0 m。上游引航道通过一段弯曲半径 750 m 圆弧接入上游主航道; 下游引航道向上游偏转 20° 后, 再通过两段弯曲半径为 550、750 m 的圆弧分别接入长江上、下游主航道。

4.2 通航水流条件试验结果

4.2.1 水位及比降情况

模型实测结果表明, 当长江上游来流量分别为 $Q=1.65$ 万~8.16 万 m³/s 的各级流量情况下, 汇合口上游 2.15 km 至下游 8.50 km, 共约 10.65 km 工程河段内的水位差仅为 0.17~0.75 m, 平均比降范围为 0.016‰~0.070‰, 比降较小, 水流较为平缓, 凤凰颈船闸下引航道及连接段位于长江干流左侧支流内, 其水位及河道比降主要受长江干流顶托的影响, 由于下引航道及连接段航道高程为同一高程, 因此其水面比降较长江干流更小, 水流更为平缓。

4.2.2 排灌站向西河侧引水工况下的流速流态

试验主要考虑 2 组不利工况: 在排灌站机引最大设计流量为 200 m³/s、口外连接段为最低通航水位(汇流口长江上游来流量为 1.10 万 m³/s); 在排灌站向西河侧自排流量为 380 m³/s、汇流口长江上游来流量为 2.45 万 m³/s(可能自排出现的

最低水位对应流量)。

设计方案排灌站引水工况下船闸下游口外连接段水流条件试验结果见表 2、图 6。在引水工况下,受排灌站电机的引流作用,使得引水渠轴线方向附近较大流速从船闸下游口外连接段左侧斜向引入连接段右侧排灌站下游引水渠,并在引流水体两侧由于高低流速剪切力的作用下出现一定范围和一定程度的水流相对运动,在船闸下游口外连接段与排灌站下游引排水渠交汇区域上、下游附近形成了 2 处回流区域。

试验研究结果表明,在汇流口长江上游来流

量为 1.10 万 m^3/s 、排灌站机引流量为 200 m^3/s 斜向引水时,船闸下游口外连接段最大纵向流速为 0.42 m/s ,最大横向流速为 0.28 m/s ,最大回流流速为 0.35 m/s 。在汇流口长江上游来流量为 2.45 万 m^3/s 、排灌站自引流量为 380 m^3/s 斜向引水时,船闸下游口外连接段最大纵向流速为 0.57 m/s ,最大横向流速为 0.27 m/s ,最大回流流速为 0.50 m/s 。自引工况和机引工况下,横向及纵向流速均满足规范要求,但自引工况下,船闸下游口外连接段部分回流流速略超出规范要求。

表 2 设计方案船闸下游口外连接段特征流速

Tab.2 Characteristic flow velocity of downstream outlet connection section of ship lock in design scheme

工况组号	汇流口长江上游来流量/(万 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排灌站引水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	船闸下游口外连接段		
			最大纵向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.10	200	0.42	0.28	0.35
2	2.45	380	0.57	0.27	0.50

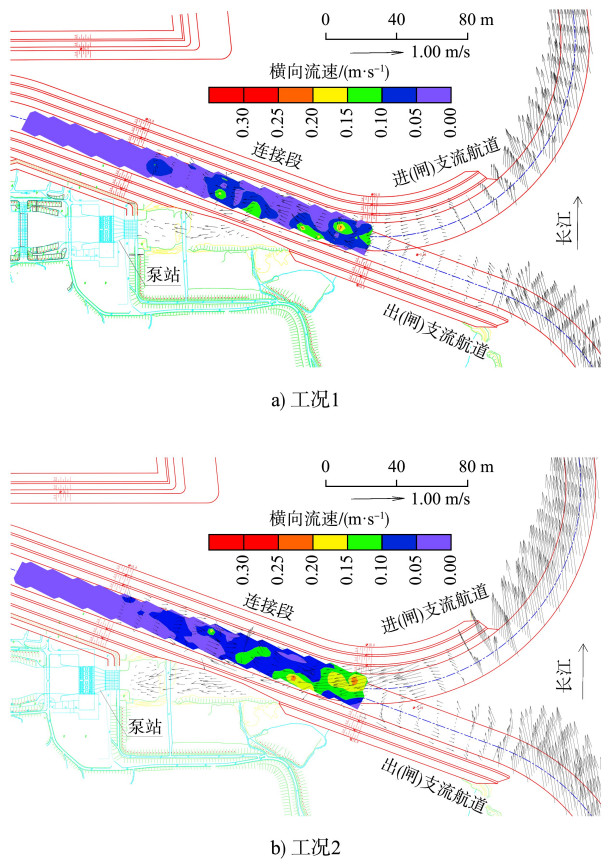


图 6 设计方案排灌站引水工况口外连接段流速矢量图及横向流速云图

Fig.6 Flow velocity vector diagram and transverse velocity cloud diagram of outlet connection section of water diversion condition of pumping and drainage station in design scheme

4.2.3 排灌站向长江侧排水工况下的流速流态

设计方案排灌站排水工况下船闸下游口外连接段水流条件试验结果见表 3、图 7。排水工况下,泵站出流较为集中,短距离内难以充分扩散,出闸后水流以较大流速直接冲入船闸下游口外连接段,船闸下游口外连接段主流逐渐偏向左侧,产生横向流速;部分水流向上游连接段扩散形成反向流速,与下引航道上游来流产生了相对运动,形成回流区。

试验研究结果表明,在汇流口长江上游来流量为 2.45 万 m^3/s 、排灌站自排流量为 380 m^3/s 斜向汇入时,船闸下游口外连接段最大纵向流速为 1.02 m/s ,最大横向流速为 0.35 m/s ,最大回流流速为 0.41 m/s 。在汇流口长江上游来流量为 4.00 万 m^3/s 、排灌站机排流量为 240 m^3/s 斜向汇入时,船闸下游口外连接段最大纵向流速为 0.68 m/s ,最大横向流速为 0.48 m/s ,最大回流流速为 0.33 m/s 。机排工况及自排工况下,船闸下游口外连接段部分横向流速不满足规范要求;自排工况下,船闸下游口外连接段部分回流流速略超出规范要求。

表 3 设计方案船闸下游口外连接段特征流速

Tab. 3 Characteristic flow velocity of downstream outlet connection section of ship lock in design scheme

工况组号	汇流口长江上游来流量/(万 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排灌站排水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	船闸下游口外连接段		
			最大纵向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
3	2.45	380	1.02	0.35	0.41
4	4.00	240	0.68	0.48	0.33

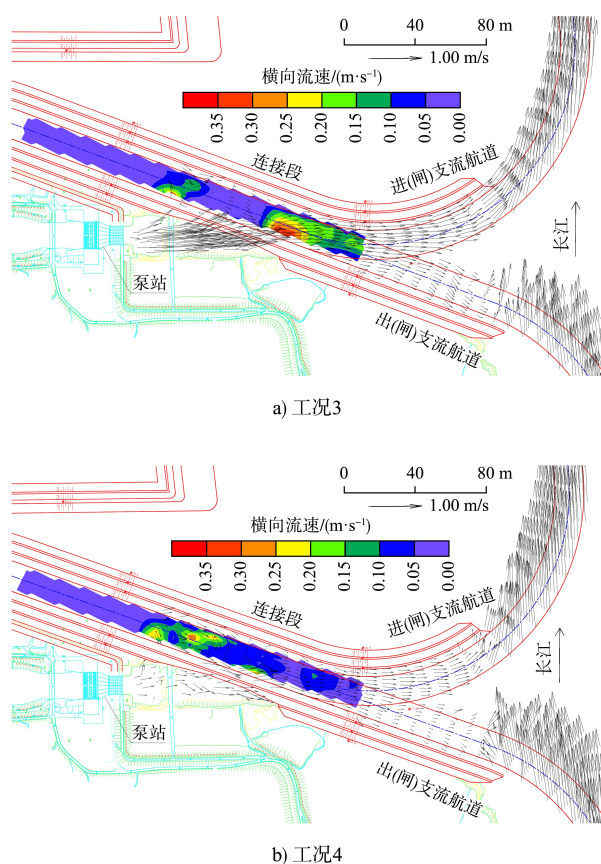


图 7 设计方案排灌站排水工况口外连接段流速矢量图及横向流速云图

Fig. 7 Flow velocity vector diagram and transverse velocity cloud diagram of outlet connection section under drainage condition of pumping and drainage station in design scheme

5 推荐方案通航水流条件试验与分析

5.1 改善措施

设计方案水流条件试验表明, 船闸下游口外连接段横向流速及回流流速超标主要有 3 个方面原因: 1) 排灌站出口距船闸下游口外连接段距离为 300 m, 出流扩散距离相对较短, 导致排灌站出口具有一定流速的出流在汇入船闸下游口外连接

段航道之前不能充分扩散消能; 2) 排灌站下泄水流直接从相对引航道底板高程为 5.26 m 的平台以较大入汇角下跌直冲船闸下游口外连接段, 易形成回流区; 3) 凤凰颈排灌站下游出流明渠右侧边壁与下游连接段航道右岸为折线衔接, 不利于泵站下游明渠出流的扩散, 同时易造成出流以较大角度斜向汇入船闸下游口外连接段。

试验通过对口外连接段的通航水流改善进行系统的研究。首先, 将泵站下游排水渠汇流口挖深并适当扩宽, 以促进排灌站出流尽早的扩散和消能; 其次, 右岸岸壁与连接段航道采用弧线衔接, 确保强排泵站下游引排水渠出流与船闸下游口外连接段水流平顺衔接; 最后, 增设导流墙, 以减小泵站下泄水流与船闸下游口外连接段的入汇角。导流墙结构选用透空式, 以减小导流墙对泵站的运行调度的影响, 从而优化船闸下游口外连接段通航水流条件。

5.2 工程布置

结合上述优化措施, 推荐方案工程布置方案为: 1) 将排灌站下游高程为 -0.4 m 的施工平台长度由 162 m 缩短至 100 m, 排水渠底部挖深至高程 -5.66 m 与船闸下游口外连接段河床衔接。拓宽泵站出流和航道的交汇附近的最窄卡口宽度为 94 m。2) 将连接段排水渠右侧折线改为弧线衔接, 弧线半径为 1 200 m。3) 排水渠下游末端采用喇叭型。4) 在强排泵站下游引排水渠出口左侧设置全长为 75 m 的透空导流墙, 透孔导流堤底板高程由试验确定, 顶部高程采用最大通航水位。推荐方案平面布置见图 8, 透空导流墙结构见图 9。

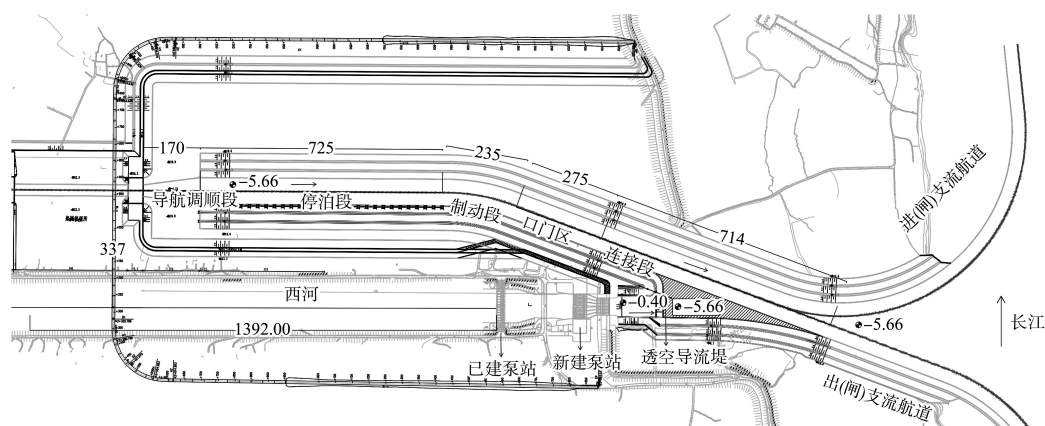


图8 推荐方案工程平面布置 (单位: m)

Fig. 8 Plan layout of recommended scheme engineering (unit: m)

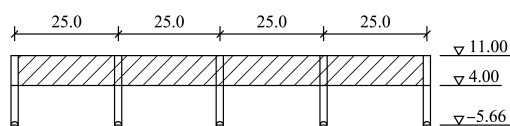


图9 透空导流墙结构布置 (单位: m)

Fig. 9 Structure layout of permeable diversion wall (unit: m)

5.3 通航水流条件分析

5.3.1 排灌站引水工况

推荐方案排灌站引水工况下船闸下游口外连接段水流条件试验结果见表4、图10。引水工况下,凤凰颈泵站水流从强排泵站延长线方向引水,使周围水体产生加速运动,引起惯性分离,必须由表层、底层及侧面水体予以补充,与船闸下游口外连接段上方水流产生相对运动,在船闸下游口外连接段交汇处产生回流区。

试验研究结果表明,在汇流口长江上游来流量为 $1.10 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、排灌站机引流量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 斜向引水时,船闸下游口外连接段最大纵向流速为 0.49 m/s ,最大横向流速为 0.22 m/s ,最大回流流速为 0.26 m/s 。在汇流口长江上游来流量为 $2.45 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、排灌站自引流量为 $380 \text{ m}^3/\text{s}$ 斜向引水时,船闸下游口外连接段最大纵向流速为 0.45 m/s ,最大横向流速为 0.25 m/s ,最大回流流速为 0.26 m/s 。船闸下游口外连接段内的各项流

速指标满足规范要求。

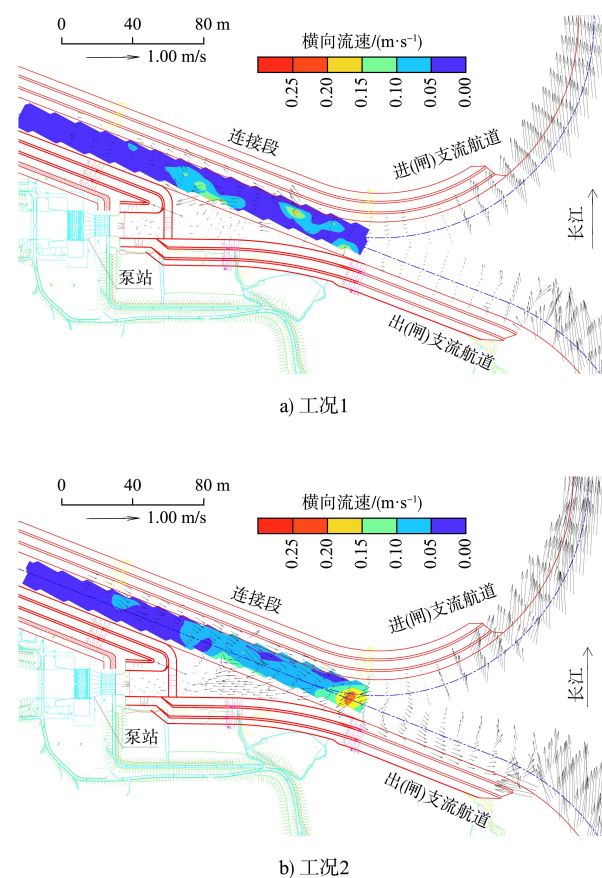


图10 推荐方案排灌站引水工况口外连接段流速矢量图及横向流速云图

Fig. 10 Flow velocity vector diagram and transverse velocity cloud diagram of outlet connection section of water diversion condition of pumping and drainage station in recommended scheme

表 4 推荐方案船闸下游口外连接段特征流速

Tab. 4 Characteristic flow velocity of downstream outlet connection section of ship lock in recommended scheme

工况组号	汇流口长江上游来流量/($\text{万 m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排灌站排水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	船闸下游口外连接段		
			最大纵向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.10	200	0.49	0.22	0.26
2	2.45	380	0.45	0.25	0.26

5.3.2 排灌站排水工况

推荐方案排灌站排水工况下船闸下游口外连接段水流条件试验结果见表 5、图 11。排水工况下, 受导流堤阻挡作用, 泵站出流未直冲入船闸下游口外连接段, 使泵站出流进一步扩散和消能之后, 泵站出流斜向汇入口外连接段左侧; 部分水流在航道内向上游扩散形成反向流速与上游来流产生了相对运动, 形成回流区。

试验研究结果表明, 在汇流口长江上游来流

量为 $2.45 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、排灌站自排流量为 $380 \text{ m}^3/\text{s}$ 斜向汇入时, 船闸下游口外连接段最大纵向流速为 0.60 m/s , 最大横向流速为 0.30 m/s , 最大回流流速为 0.30 m/s 。在汇流口长江上游来流量为 $4.00 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 、排灌站机排流量为 $240 \text{ m}^3/\text{s}$ 斜向汇入时, 船闸下游口外连接段最大纵向流速为 0.53 m/s , 最大横向流速为 0.30 m/s , 最大回流流速为 0.40 m/s 。船闸下游口外连接段内的各项流速指标符合规范要求。

表 5 推荐方案船闸下游口外连接段特征流速

Tab. 5 Characteristic flow velocity of downstream outlet connection section of ship lock in recommended scheme

工况组号	汇流口长江上游来流量/($\text{万 m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排灌站排水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	船闸下游口外连接段		
			最大纵向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
3	2.45	380	0.60	0.30	0.30
4	4.00	240	0.53	0.30	0.40

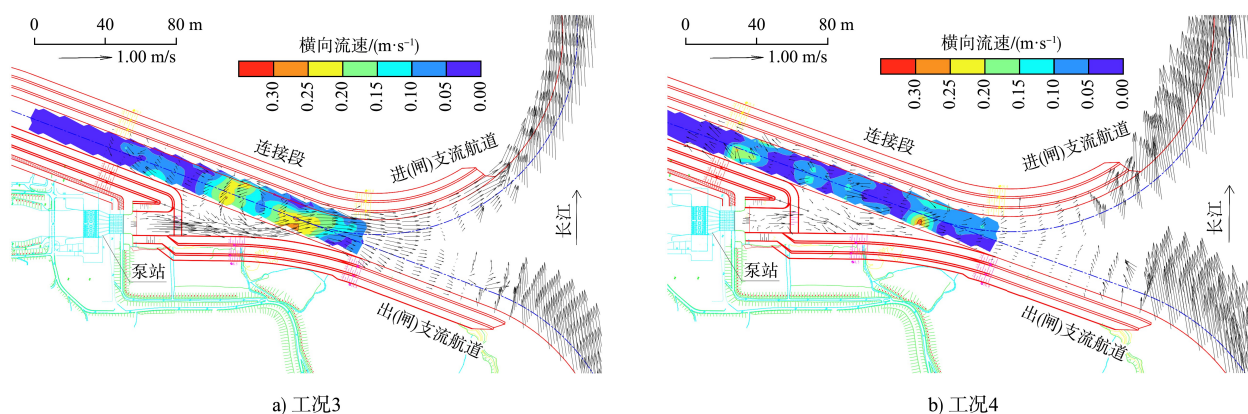


图 11 推荐方案排灌站排水工况口外连接段流速矢量图及横向流速云图

Fig. 11 Flow velocity vector diagram and transverse velocity cloud diagram of outlet connection section of pumping and drainage station in recommended scheme

6 结论

1) 凤凰颈排灌站距船闸下游口外连接段较近且引排水渠与口外连接段斜交, 排灌站引排水均会对船闸下游口外连接段通航水流条件产生影响, 容易导致连接段航道内横向流速及回流流速超出规范要求。

2) 泵站自排工况下水流从水面斜向排入船闸下游口外连接段, 在连接段交汇区产生较大横向流速, 而在泵站引水条件下从船闸下游口外连接段水下斜向引水, 水面波动较小, 从而引起连接段横向流速较小, 因此在相同流量下, 排灌站自排工况对船闸下游口外连接段通航条件影响最大。

3) 通过将泵站下游排水渠汇流口挖深并适当扩宽、右岸岸壁与连接段航道平顺衔接以及在泵站引排水渠与连接段之间增设透空导流墙等措施, 可使横向流速降低至 0.30 m/s 以内, 能够有效改善船闸下游口外连接段通航水流条件。

参考文献:

- [1] 郝媛媛, 李君涛, 孔宪卫. 引水工程江渠交汇水域通航条件研究[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 73-76.
HAO Y Y, LI J T, KONG X W. Navigation condition study of the confluence of river channels from water diversion project [J]. Journal of waterway and harbor, 2018, 39(1): 73-76.
- [2] 刘利. 泵闸引排水对桥区段航道通航条件的影响[J]. 港口科技, 2019(5): 38-41.
LIU L. Influence of pump-gate drainage on the navigation conditions of bridge section waterway [J]. Port science & technology, 2019 (5): 38-41.
- [3] 霍中迁, 段育慧, 郭瑞. 井头泵站引水对通航的影响分析[J]. 江苏水利, 2015 (3): 27-28, 30.
HUO Z Q, DUAN Y H, GUO R. Analysis of impact of water diversion from Jingtong pumping station on navigation [J]. Jiangsu water resources, 2015 (3): 27-28, 30.
- [4] 陆倩, 崔冬, 田利勇, 等. 平原河网地区泵闸合建枢纽布置形式[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 62-67.
LU Q, CUI D, TIAN L Y, et al. Arrangement types of a combined sluice-pump hub in plain river network region[J]. Advances in science and technology of water resources, 2019, 39(3): 62-67.
- [5] 张岳松, 吴姗姗, 季树凯. 海河口泵站对引水河口通航安全影响数值分析[J]. 海河水利, 2015 (2): 49-50.
ZHANG Y S, WU S S, JI S K. Numerical analysis of impact of Haihekou pumping station on navigation safety of diversion estuary[J]. Haihe water resources, 2015 (2): 49-50.
- [6] 王法猛, 傅宗甫, 吕家才, 等. 闸站合建枢纽对河口通航影响的模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 29-31.
WANG F M, FU Z F, LYU J C, et al. Model tests on influence of combined construction of sluices and pump stations on estuarine navigation [J]. Advances in science and technology of water resources, 2012, 32(5): 29-31.
- [7] 严忠民, 周春天, 阎文立, 等. 平原水闸泵站枢纽布置与整流措施研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 50-53.
YAN Z M, ZHOU C T, YAN W L, et al. Study on the layout of combined sluice-pump station projects and modification of flow pattern [J]. Journal of Hohai University (natural science), 2000, 28 (2): 50-53.
- [8] 张婧, 陆倩, 田利勇. 泵闸口门航道段通航水流条件改善措施研究[J]. 城市道桥与防洪, 2019(6): 242-245.
ZHANG J, LU Q, TIAN L Y, et al. Research on improvement measures for navigation flow conditions at the entrance of sluice-pump station channel [J]. Urban roads bridges & flood control, 2019(6): 242-245.
- [9] 季树凯. 海河口泵站对大沽沙航道通航安全影响数值分析[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(8): 33-35.
JI S K. Analysis on influence values of Haihekou pumping station on Dagusha Channel navigation safety [J]. Water conservancy construction and management, 2015, 35 (8): 33-35.
- [10] 赵洪军, 苏叶平, 丁浩, 等. 马甸枢纽船闸引航道口门区水流特性数值分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 18-23.
ZHAO Y J, SU Y P, DING H, et al. Numerical analysis of water flow characteristics of the port gate area of the Madian Hub Locks [J]. China rural water and hydropower, 2022(5): 18-23.
- [11] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [12] 周勤, 尹崇清. 山区河流船闸引航道连接段通航水流条件标准[J]. 水运工程, 2007(12): 77-79, 102.
ZHOU Q, YIN C Q. Navigable flow condition criteria for connection reach of shiplock approach channel on mountainous river [J]. Port & waterway engineering, 2007(12): 77-79, 102.

(本文编辑 赵娟)