



引江济淮工程派河口船闸通航水流条件及改善措施

王伟¹, 王建中^{2,3}, 杨志¹, 范红霞^{2,3}

(1. 安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011;

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 3. 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 派河口船闸是引江济淮派河口枢纽重要组成部分, 位于派河入巢湖口门段, 建设条件复杂。综合已有工程、河道边界和相关规划, 提出了复线船闸平面布置初步方案。采用定床河工模型试验的技术手段对船闸下游引航道与口门区通航水流条件开展了详尽研究, 探明了节制闸泄洪时下游通航水域纵向和横向表面流速、流态特征, 分析了通航水流条件不满足规范要求的原因, 指出可通过岸线平顺、新开泄洪分流通道和控制临界安全泄洪流量等措施进行改善。优化后的方案可满足设计要求, 为工程设计和今后运行管理提供技术支撑。

关键词: 派河口枢纽; 船闸; 通航水流条件; 改善措施; 物理模型试验

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0138-07

Navigation flow condition and improvement measures of the Paihekou ship lock in water diversion project from the Yangzi River to the Huaihe River

WANG Wei¹, WANG Jian-zhong^{2,3}, YANG Zhi, FAN Hong-xia^{2,3}

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

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

3. Key Lab of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of MOT, Nanjing 210024, China)

Abstract: The Paihekou ship lock is an important part of the Paihekou hub for diversion project from the Yangtze River to the Huaihe River. It is located at the entrance of the Paihe River into the Chaohu Lake and has complex construction conditions. Based on the existing engineering, river boundary, and related planning, a preliminary plan for the layout of the double-track ship lock is proposed. A detailed study of the navigable flow conditions in the downstream approach channel and the entrance area of the ship lock is carried out using the technical means of the fixed-bed river engineering model test. The longitudinal and transverse surface velocity and flow pattern characteristics of the downstream navigable water area when the check-gate releases flood water are analyzed. The reasons why the conditions do not meet the requirements of the specification are pointed out, and they could be improved by measures such as smoothing coastline, newly opened flood diversion channels, and control of critical and safe flood discharge. The optimized scheme can help meet the design requirements and provide technical support for engineering design and operation and management in the future.

Keywords: the Paihekou hydro-junction; ship lock; navigation flow condition; improvement measures; physical model

收稿日期: 2020-06-10

作者简介: 王伟(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港航设计研究工作。

派河口枢纽位于派河入巢湖湖口段,是引江济淮工程八大枢纽之一,由船闸、节制闸、泵站等构成^[1],其中节制闸与泵站主体基本完工,一线船闸已批复。派河口船闸是派河口枢纽的重要组成部分,也是引江济淮工程航运建设的重要节点,一线船闸等级为Ⅱ级,设计年单向过闸货运量2 480万t。据预测,2030、2040、2050年派河口枢纽最大单向过闸货运量分别为4 070万、5 315万、6 270万t,一线船闸设计通过能力不能满足各水平年持续增长的运量需求,急需建设派河口复线船闸。受现状河道与陆域边界条件限制,复线船闸拟布置于一线船闸西北侧新开挖河道内,与一线船闸(闸室长280 m、口门宽23 m、门槛水深5.2 m)、已建节制闸(设计流量1 000 m³/s,5孔,边孔净宽9.5 m,中孔净宽14 m)并排排列,节制闸泄水运行时老派河南岸凸堤挑流对船闸下游通航水域的水流条件将产生极大影响。开展复杂船闸通航水流条件及其优化方案研究^[2-4],有助于新建船闸总平面方案布置,保障船闸通航安全。本文采用整体定床物理模型试验对派河口一线、复线船闸下游引航道及口门区通航水域水流条件开展了详尽研究,分析了通航水流条件不满足设计要求的原因,基于调整河道岸线、新开泄洪分流通道的控制临界泄洪流量的优化试验,提出了通航水流条件满足规范要求的工程和非工程改善措施,为本工程建设和管理提供技术支撑,也为复杂边界条件下枢纽工程平面布置和管理运行提供借鉴。

1 概况

1.1 派河口枢纽

派河口泵站枢纽位于引江济淮工程江淮沟通

段起点,为Ⅰ等大(1)型水利工程,枢纽的主要建筑物包括抽水泵站、节制闸、船闸等。建设场地内有派河口泵站枢纽、牛角大圩生态农业区、环巢湖旅游大道、派河口大桥、派河服务区、派河上下游锚地等,见图1。



图1 拟建工程区卫星图片

1.2 派河口船闸

派河口一线、复线船闸均按Ⅱ级船闸设计,闸室有效尺度分别为280 m×23 m×5.2 m和340 m×34 m×5.2 m(长×宽×门槛水深),设计单向年通过能力分别为2 480万、4 233万t,满足远期预测6 270万t运量需要。设计最高通航水位取巢湖20 a一遇水位,为10.6 m;设计最低通航水位取98%保证率水位,为5.8 m。

受已建工程和现有河道边界条件限制,派河口复线船闸紧邻一线船闸布置(图2),并开挖新河道,下游引航道采取对称式布置,船舶采用“曲线进闸,曲线出闸”形式。一线、复线船闸导航墙长225、185 m,一线船闸与节制闸的间隔流堤长245 m,靠船墩长480 m、布置16对导航墩。在巢湖口门处新建1 123 m北防波堤和388 m中防波堤,口门内建设锚地与派河口服务区。

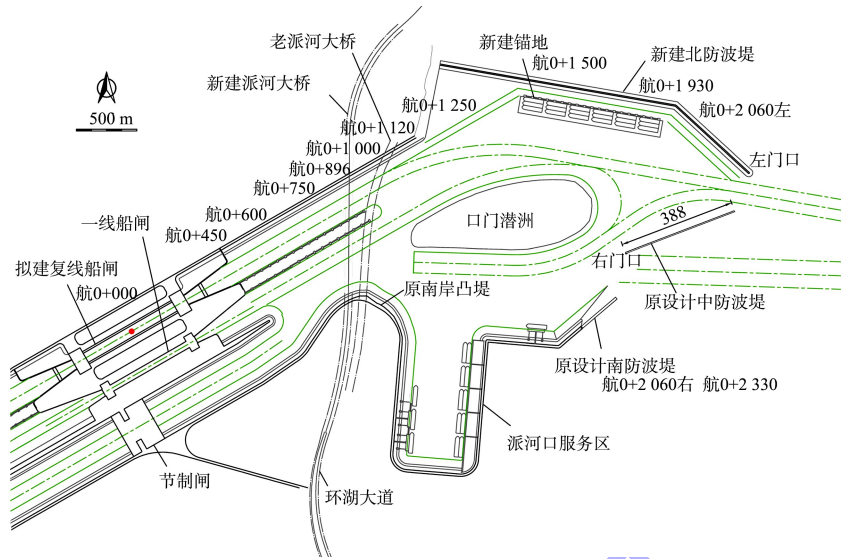


图 2 派河口船闸下游设计布置方案 (单位: m)

1.3 河道概况与水文泥沙特征

派河是巢湖主要入湖支流之一，也是引江济淮工程的重要输水通道，发源于合肥市肥西县江淮分水岭，流域总面积 584.6 km²，河道全长 66 km，平均坡降 0.4‰。派河下游因泥沙淤积和巢湖风浪作用，河道弯曲，河宽 130~200 m，河口扇形三角洲发育(图 1)。派河入湖口门段 10、20、50 a 一遇洪峰流量分别为 631、804、1 000 m³/s^[5]。

派河船闸设计等级为Ⅱ级，相应航道设计底宽为 70 m，现状河道不满足航道建设要求，须配合船闸建设进行拓宽与疏浚治理，治理后河道典型横断面见图 3，断面形式为复式结构，两侧二级边坡上、下坡度分别为 1:4 与 1:3，平台高程 8.6 m，两岸堤防顶高程为 12.6 m，航道底宽 70 m，航道区疏浚底高程 1.8 m，船闸引航道与口门区疏浚底高程 1.0 m。

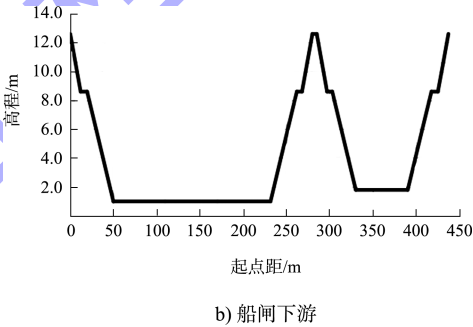
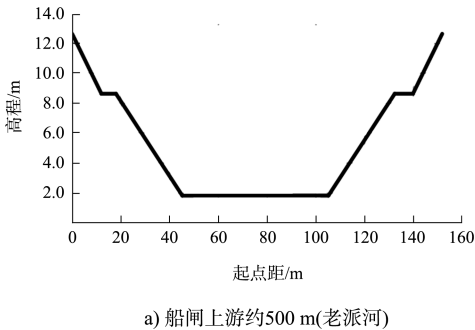


图 3 典型断面形态

巢湖是典型的浅水湖泊，湖底高程一般为 3~4 m^[6]。巢湖接纳杭埠河、白石天河、兆河、丰乐河、南淝河、派河、柘皋河等来水，经湖泊调蓄后由裕溪河和牛屯河分洪道注入长江，水位受流域自身来水和巢湖闸、裕溪闸的控制运用双重影响。1963 年巢湖闸建成后，巢湖历年最高、最低水位分别为 10.87、4.57 m，多年平均水位为 6.43 m，正常蓄水位 6.1 m。根据洪水频率曲线分析，巢湖 10、20、50 a 一遇洪水位分别为 9.70、10.60、10.85 m，98% 频率水位为 5.80 m。其中 20 a 一遇洪水位和 98% 频率水位分别为派河口船闸设计最高、最低通航水位。

1963 年巢湖闸建成后，巢湖历年最高、最低水位分别为 10.87 和 4.57 m，多年平均水位为 6.43 m，正常蓄水位 6.1 m。巢湖主要特征水位见表 1。



a) 船闸上游约500 m(老派河)

表 1 巢湖主要特征水位						
水位频率/%	98	20	10	5	2	1
洪水位/m	5.80	8.90	9.70	10.60	10.85	11.46

2 模型设计

派河口船闸建成后,派河口泵站向派河上游输水、派河口节制闸泄洪分别对船闸上、下游通航水域水流条件产生影响。针对研究需求,

定床河工模型范围上起派河韩院村、下至派河口巢湖口门,平面比尺 1:80,模型长×宽为 85 m×30 m,模拟天然河段河长约 8 km,包含上游派河、派河口泵站输水和巢湖口门 3 个边界,模型平面布置见图 4。利用本模型对原设计方案船闸下游各水域通航水流条件进行论证,并提出了改善措施。

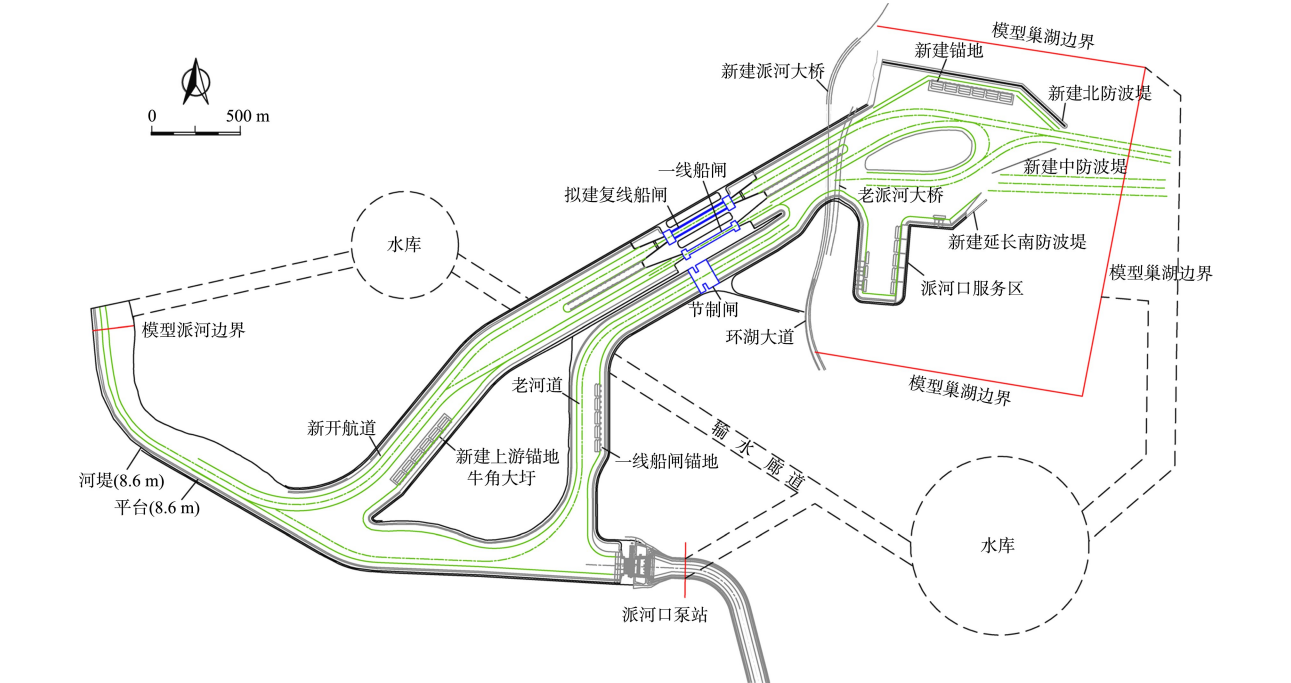


图 4 派河口复线船闸河工模型布置

3 通航水流条件及改善措施

3.1 通航水流条件判别标准

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》,Ⅱ级船闸引航道与口门区水域通航标准为:1)口门区纵向流速低于 2.0 m/s,横向流速低于 0.3 m/s,回流流速低于 0.4 m/s;2)引航道导航和调顺段宜为静水,上两段以外引航道内平行航线的最大表面流速不应大于 0.5 m/s、垂直航线的最大流速不应大于 0.15 m/s。

派河口船闸设计标准为 10 a 一遇洪水流量、20 a 一遇洪水水位,对应的节制闸泄水流量为 631 m³/s,巢湖侧水位为 10.6 m。在上述水文条件下研究初拟设计方案船闸下游引航道与口门区通航水域流场特征,若达不到规范要求,则保持水闸和船闸枢纽建筑物布置不变,研究调整河道

岸线、边界等的改善效果。

3.2 设计方案通航水流条件试验结果分析

3.2.1 下游引航道区

复线船闸下游引航道位于一线船闸西北侧,与泄洪通道间有一线船闸掩护,受节制闸泄洪影响相对较小。节制闸泄洪时,复线船闸下游引航道水域为逆时针回流区,流速为 0.08~0.19 m/s,纵向、横向表面流速分别为-0.19~0.03 m/s(负值表示流速方向指向上游)和 0.03~0.05 m/s,通航水流条件符合规范要求。

复线船闸建设后,原一线船闸下游引航道长度延长,节制闸泄洪时,一线船闸下游引航道上段处于逆时针弱回流区,下段处于受南岸凸堤强烈挑流作用的水流紊动区。遇判别条件 10 a 一遇泄洪流量 631 m³/s 工况时,下游引航道区纵向表面流速为

-0.12~0.83 m/s、横向表面流速为0~0.29 m/s，交角为0°~35°，下段右侧局部水域纵向表面流速大于0.5 m/s、横向表面流速大于0.15 m/s，通航水流条件不满足船闸设计规范要求的范围为50 m×250 m，最大纵向流速和最大横向流速位于一线船闸下游引航道末端。

3.2.2 下游引航道口门区

下游引航道口门区水域为弯道航道段，节制闸泄洪时，复线船闸下游引航道口门区左侧水域

为回流区，右侧水域为横流区，纵、横向表面流速分别为-0.19~0.63 m/s 和 0~0.30 m/s，横流夹角 10°~54°；一线船闸下游引航道口门区大部分水域处于横流区，纵、横向表面流速分别为0.12~0.86 m/s 和 0~0.30 m/s，横流夹角 10°~20°。对标Ⅱ级船闸引航道口门区通航水流条件设计标准，设计方案两船闸下游引航道口门区虽存在一定程度回流和横流，但均满足规范要求。

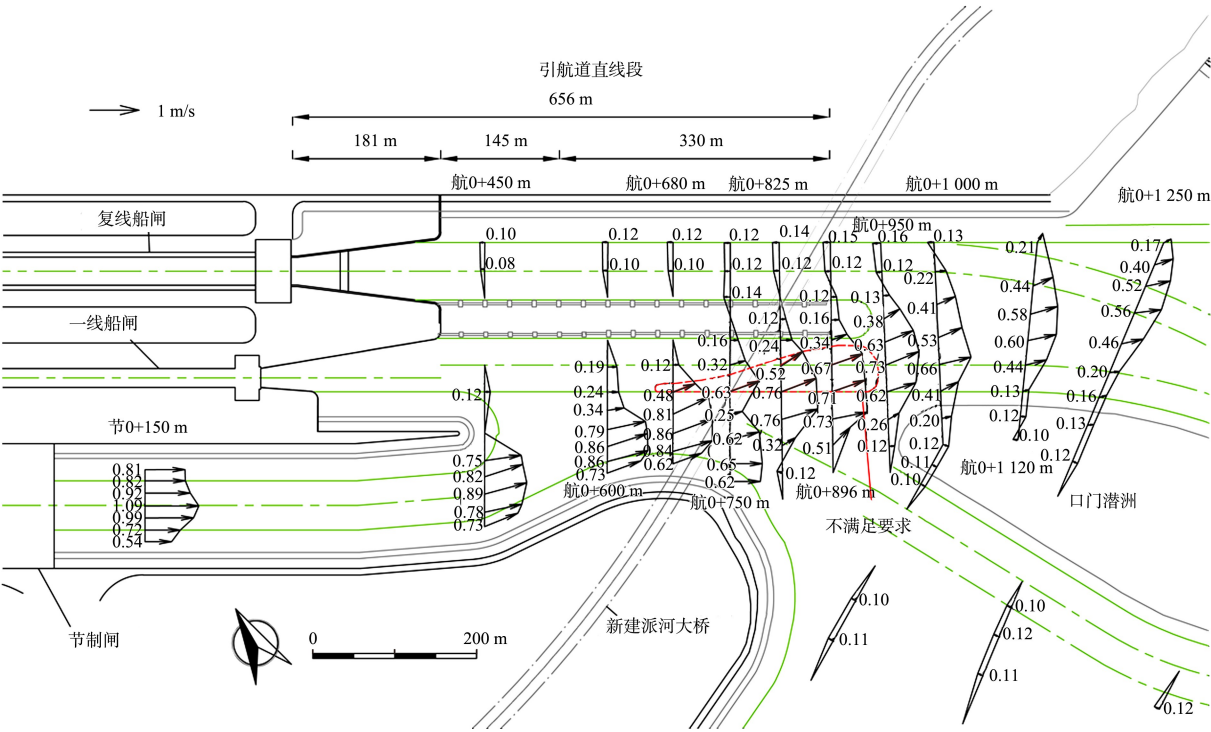


图5 派河船闸原设计方案下游引航道与口门区流速分布（速度：m/s）

3.3 改善措施

3.3.1 堤线平顺调整工程措施

由模型试验过程中观察及流场测量结果可知，在现状河道边界和设计方案工况下，一线船闸下游引航道区部分水域通航水流条件不满足设计要求，其原因是节制闸下游派河大桥处南岸岸线呈半圆形，凸出约75 m，类似于码头的挑流作用明显，节制闸下泄水流经其挑流后斜冲至一线船闸引航道下段水域，造成该水域流态紊乱、流速加大；同时码头的存在也使得一线船闸与节制闸间的隔水堤延长的空间受限。因此，从水力学角度

提出了对该段岸线进行平顺调整的优化措施，旨在减弱挑流作用，使得节制闸下泄水流趋于相对平顺，从而达到改善引航道通航水流条件、满足设计要求的目。

经过多组优化比选试验，发现将原凸出75 m的圆弧状大堤(包括岸边桥墩)后退50 m后，节制闸下泄水流较平顺，一线船闸下游引航道区通航水流条件得到大幅改善，纵、横向表面流速分别达到小于0.50 m/s 和小于0.15 m/s 的规范标准。优化措施实施后流速分布见图6，引航道区流态见图7。

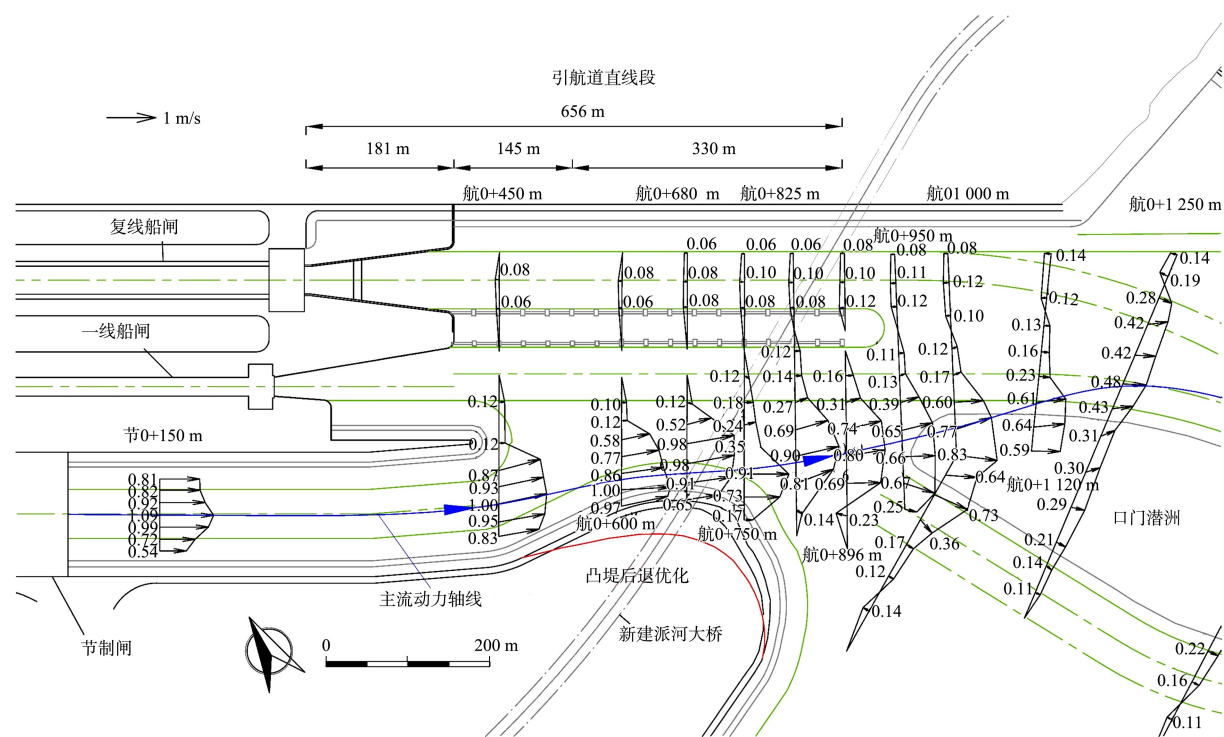


图 6 凸堤后退优化措施实施后下游引航道与口门区流速分布 (速度: m/s)

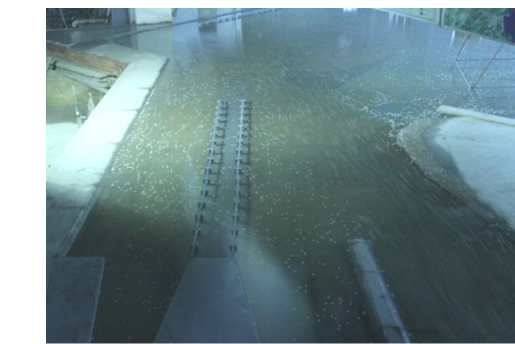


图 7 实施退堤 50 m 措施后下游引航道流态

3.3.2 新开分流通道工程措施

要实施前述的堤线调整方案,除了凸堤后退 50 m,新派河大桥南岸处桥墩也须同步后退,相应桥梁跨度须增加 50 m,工程投资将大幅增大。因此进一步探寻既不增加桥跨(保留桥墩)又能保证下游引航道通航水流条件的方案。从试验过程来看,只要减小原泄洪通道内的过流量,就能有效降低下游引航道内的流速,由此提出了新开下泄水流通道的方案:在桥墩右侧新开长 280 m 的泄洪分流通道,保留桥墩所在陆域,如河中梭子状岛屿,类似于分流鱼嘴,形成节制闸下泄水流行近桥位前左右分流泄洪的格局。通过试验比选,

节制闸下游新开分流通道的理想河底宽度为 45 m,分流效果显著,主流改走新开通道,分流比达 57%;桥墩左侧原泄洪通道过流量大幅降低,一线船闸下游引航道水域的紊动影响显著减小,水动力明显减弱,通航水流条件能满足规范要求。该措施实施后引航道区流态见图 8。



图 8 实施分流泄洪通道措施后流态

3.3.3 管理调度非工程措施

若宏观政策上无法实施前述南岸岸线平顺调整或新开分流通道的工程措施,提出了按原设计方案施工后满足船闸通航安全的节制闸调度管理措施。

通过试验确定了不同水位条件下满足下游引航道通航水流要求的节制闸临界泄洪流量,为船

闸安全运行科学管理提供技术支撑。当巢湖侧水位在常水位 6.6~10.6 m 最高通航水位间变动时，满足设计要求的相应节制闸临界泄洪流量为 230~415 m³/s。具体试验研究结果见表 2 和图 9。

表 2 节制闸临界泄洪流量

巢湖侧水位/m	10.6	10.2	9.7	9.3	8.9	8.3	7.6	7.1	6.6
临界泄水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	415	382	368	335	320	295	270	247	230

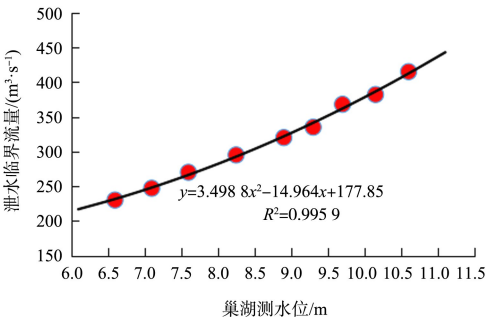


图 9 满足一线船闸下游引航道通航水流条件的节制闸泄洪临界流量与水位关系曲线

4 结语

1) 设计方案在节制闸泄洪时，受派河口南岸凸堤挑流影响，船闸下游引航道区局部水域最大纵、横向流速达 0.86、0.30 m/s，不满足设计规范要求 0.50、0.15 m/s 的限值。

2) 针对引起通航水流条件不满足要求的原因，提出了将河道原凸堤后退 50 m 或在桥墩右侧新开底宽 45 m 分流通道的 2 种工程措施，工程后船闸下游引航道区通航水流条件得到大幅改善，纵、横向表面流速均能满足设计要求。

3) 在工程措施无法实施的前提下，提出了按原设计方案施工后，不同水位条件下满足船闸通航安全的节制闸临界泄洪流量，为管理部门制定调度计划提供依据。

参考文献：

[1] 安徽省水利水电勘测设计院, 合肥经济技术开发区规划建筑设计研究院. 派河中下游河道综合治理规划报告[R]. 合肥: 安徽省水利水电勘测设计院, 2018.

[2] 孙天霆, 夏伟, 刘清君, 等. 引江济淮工程巢湖水域风浪特性研究[J]. 水运工程, 2018(12): 57-61.

[3] 周家俞, 徐奎, 黄成林, 等. 西津水利枢纽二线船闸下引航道布置方案对比[J]. 水运工程, 2018(11): 108-113.

[4] 胡浩, 王崇宇, 舒适. 复杂条件下扩建船闸口门区布置及改善措施[J]. 水运工程, 2019(3): 103-120.

[5] 东培华, 马洪亮, 尤薇, 等. 多线船闸下游引航道通航水流条件及改善方案研究[J]. 水道港口, 2013, 34(5): 420-424.

[6] 王伟, 杨志. 引江济淮工程(安徽段) 派河口复线船闸和蜀山复线船闸工程可行性研究报告[R]. 合肥: 安徽省交通勘察设计院有限公司, 2019.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 111 页)

[2] 刘怀汉. 长江上游宜宾至重庆河段航道整治关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[3] 张小峰. 河流动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

[4] 李家星, 赵振兴. 水力学[M]. 2 版. 南京: 河海大学出版社, 2001.

[5] 肖立敏. 顺直微弯河段整治水位与整治线宽度对航道整治效果影响研究[D]. 南京: 南京水利科学研究

院, 2007.

[6] 许光祥, 蒋孜伟. 基于极速法的卵石浅滩整治线宽度的确定[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(12): 86-91.

[7] 长江航道局. 航道工程手册(精)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

(本文编辑 武亚庆)