



湘祁二线船闸平面布置方案及设计优化创新

刘志敏, 李志成

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 扩建二线船闸应综合考虑地形、施工、通航、征拆、投资等制约因素。以湘祁二线船闸工程为例, 重点论述二线船闸设计原则、选址及平面布置思路及方法, 比选得出布置在一一线船闸左岸、两闸轴线间距 80 m、船舶直进曲出的方案。通过物理模型试验对口门区通航水流条件进行分析与优化, 提出延长上、下游隔流墙、疏浚电站下游河床、优化调度方式等措施, 改善了口门区水流条件。针对浮式检修门库、靠船墩、隔流墙, 提出了具有较强通用性的创新与优化设计理念。

关键词: 二线船闸; 平面布置; 模型试验; 通航水流条件; 设计优化

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0137-06

Layout plan and optimal design innovation of Xiangqi second-line ship lock

LIU Zhi-min, LI Zhi-cheng

(Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: During the expansion of a second-line ship lock, constraints such as the terrain, construction, navigation, land acquisition and demolition, and investment should be comprehensively considered. Taking the Xiangqi second-line ship lock project as an example, this paper focuses on the design principles, site selection, and layout ideas and methods of the second-line ship lock and comparatively selects a layout scheme: It should be on the left bank of the first-line ship lock, and the distance between the axes of the two locks is 80 m, with the ship going straight in and curving out. We use the physical model test to analyze and optimize the navigable flow conditions of the entrance area and put forward the measures to improve the navigable flow conditions, such as extending the upstream and downstream partition walls, dredging the downstream riverbed of the power station, and optimizing the dispatching mode. Moreover, we propose the innovation and optimal design concept with strong universality for the floating access gates, breasting dolphins, and partition walls.

Keywords: second-line ship lock; layout; model test; navigable flow conditions; optimal design

近年来, 随着沿江腹地经济的快速增长, 内河水运货运量日益增加^[1]。湘江作为湖南省水运大通道, 是湖南省综合运输体系的重要组成部分。随着土谷塘、大源渡、株洲、长沙枢纽等航电枢纽的建成, 湘江中下游株洲—城陵矶河段 2 000 吨级航道全线贯通, 而衡阳以上湘江河段船闸规模小、航道等级低, 难以满足日益增长的大宗散货水路运输需求, 亟待推进航道扩能升级、突破航运瓶颈, 以充分发挥湘江水运优势及航运效益。

对此, 湖南省交通运输厅启动湘江永州—衡阳Ⅲ级航道改扩建工程, 其中包括湘祁枢纽二线船闸工程。已建湘祁枢纽总布置从左至右依次为左岸土坝、一线船闸、19 孔泄水闸、电站厂房和右岸土坝, 其中一线船闸为 1 000 吨级船闸, 有效尺度为 $180 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$, 设计年通过能力为 166 万 t。扩建二线船闸为Ⅲ级船闸, 有效尺度为 $180 \text{ m} \times 23 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$, 设计代表船型为 1 000 吨级货船, 设计单向通过能力为 1 065 万 t。

1 平面布置方案

1.1 选址

坝址河段较顺直，两岸为丘陵，电站建成后形成局部凹岸，布置较为紧凑。根据以往船闸建设经验，扩建二线船闸需遵循安全性、经济性、美观性、生态环保等设计原则^[2-4]，并考虑地形、现有建筑物、施工、通航、征拆等制约因素，因

此宜对闸址左、右岸布置方案进行比选(表1)。

由表 1 可知, 阀址选在左岸一线船闸岸侧有利于降低施工难度、减少征地拆迁数量和土石方量, 两闸同侧布置且靠近枢纽管理区便于后期统一管理和调度、增强工程协调美观性, 因此推荐将二线船闸布置在左岸一线船闸岸侧, 工程总体布置效果见图 1。

表 1 闸址方案比选

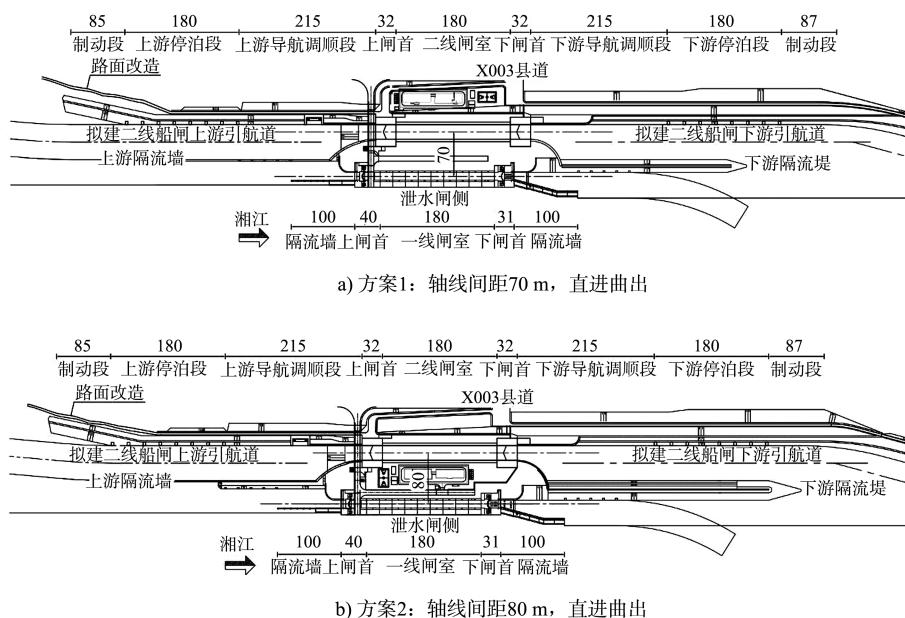
选址	地形及现有建筑物	施工条件	通航水流条件	船闸联合调度	征地拆迁	土石方量/万 m ³
左岸一线 船闸岸侧	左岸船闸岸侧 200 m 范围内地势平坦,现有枢纽管理区、临时砂石场、1 座高压铁塔和 X003 县道,无其他居民楼	在岸上开挖基坑,自然形成船闸主体建筑物施工围堰,施工条件较好	可利用一线船闸隔流建筑物隔流,保证口门区通航水流条件的难度相对右岸更小	两闸同岸布置,便于船闸联合运营管理	工程用地及拆迁少	260
右岸电站 厂房岸侧	右岸电站开关站距山体较高,现有较多居民楼和 X003 县道。	距岸较远,地势较高,引航道要求较长,需大量开挖山体,施工困难	二线船闸隔流建筑物应足够长,口门区需布置在制动段以外,保证口门区通航水流条件的难度很大	两闸异岸布置,船闸联合运营管理不便	距岸侧较远,占地较多,征拆费用高	550



图 1 工程总体布置效果

1.2 平面布置方案

左岸上游山体距离河岸较近，坡度较陡，山顶有归阳自来水厂，山脚为沿河道路。考虑最大限度减少两闸轴线距离、紧凑布置、节省土地资源和工程投资，同时保证山体边坡稳定、减小对左岸沿江道路及电站副坝工程的影响，拟将两闸轴线平行布置，结合两闸轴线间距及船舶进出闸方式，形成3个平面布置方案^[5-6]，见图2。



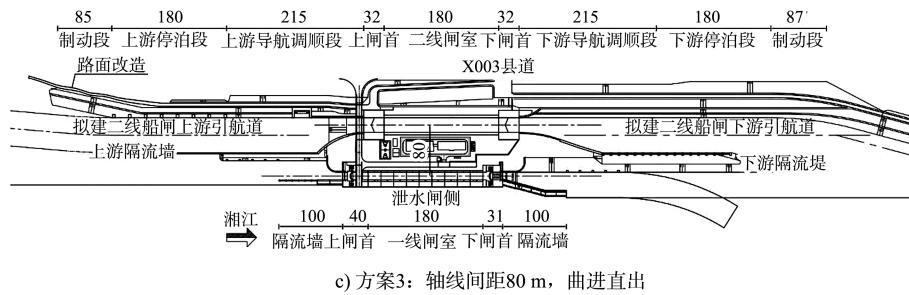


图2 二线船闸布置方案 (单位: m)

对上述3种布置方案进行经济技术比选, 结果见表2。方案1永久占地及土石方量最小, 但是二线船闸基坑开挖期结构安全隐患较大、基坑支护复杂程度高、工程施工工序多、施工难度大, 并存在施工期一线船闸断航及桥梁拆除重建等突出问题, 大量排桩支护投资后失去了技术经济优势; 方案2和方案3基本不需基坑支护, 一线船

闸及纵向围堰安全稳定性更高, 也无需拆除桥梁重建, 二者工期更短、投资接近且更省。考虑到方案2船舶靠岸侧进入引航道、通航水流条件相对较好, 且施工期对一线船闸通航及两岸交通均无不利影响、施工条件也相对更优, 推荐方案2作为二线船闸在各种限制条件下的最优平面布置方案。

表2 平面布置方案比选

方案	相邻结构 安全性	施工条件	施工期通航	桥梁利用 可行性	通航条件	永久用地/亩	土石方量/万 m ³	总投资/亿元
1	需大量排桩支护来保证一线船闸结构安全及正常使用	上游隔流墙全线需采取筑岛施工, 施工条件差	需拆除一线船闸上游靠船墩, 上游隔流墙施工需在一线船闸上游引航道填筑施工平台, 施工期断航	需改造跨一线船闸桥	船舶靠岸进入引航道, 水流条件相对较好	237.2 (0.158 km ²)	199	5.633
2	仅局部需要少量支护, 较方案1更安全	下游隔流墙在常水位以上施工, 施工难度小	正常通航	可利用原跨一线船闸桥	同方案1	244.0 (0.163 km ²)	219	5.112
3 同方案2		下游隔流墙施工需在河侧填筑围堰, 施工条件相对较差	临时围堰部分占用一线船闸引航道, 施工期对一线船闸通航产生一定影响	同方案2	靠船墩设置在河侧不利于船舶停靠	242.0 (0.161 km ²)	211	5.102

2 引航道口门区通航水流条件优化

采用1:100整体定床物理模型研究方案2(原始方案)在不同试验流量工况下的口门区通航水流

条件, 并提出改善口门区流速的工程措施与非工程措施^[7-8]。试验流量工况见表3。

表3 通航水流条件研究工况

工况	试验流量/(m ³ ·s ⁻¹)	枢纽调度方式	坝前水位/m	尾门水位/m	备注
C-1	265	电站发电, 泄水闸关闭	75.50	65.20	下游最低通航水位
C-2	1 000	电站发电, 泄水闸关闭	75.50	67.30	-
C-3	1 400	电站满发, 泄水闸关闭	75.50	67.91	机组满发
C-4	2 500	电站满发, 3 [#] 、5 [#] 、7 [#] 孔开度2.5 m	74.52	69.18	-
C-5	6 000	电站发电, 1 [#] ~7 [#] 孔开度4.5 m	75.00	72.00	原始调度方案
C-6	6 000	电站停机, 泄水闸1 [#] ~19 [#] 开启	73.00	72.00	优化调度方案
C-7	8 000	电站停机, 1 [#] ~7 [#] 孔全开, 8 [#] ~19 [#] 孔开启	74.38	73.33	2 a一遇洪水

续表3

工况	试验流量/(m ³ ·s ⁻¹)	枢纽调度方式	坝前水位/m	尾门水位/m	备注
C-8	9 200	电站停机, 1 [#] ~7 [#] 孔全开, 8 [#] ~19 [#] 孔开启	74.80	74.10	3 a 一遇洪水
C-9	10 400	电站停机, 1 [#] ~7 [#] 孔全开, 8 [#] ~19 [#] 孔开启	75.05	74.83	5 a 一遇洪水
C-10	12 000	电站停机, 1 [#] ~19 [#] 孔全开	75.82	75.77	10 a 一遇洪水

2.1 引航道口门区通航水流条件

原始方案模型试验表明, 二线船闸上游引航道口门区在流量 $Q=6 000\sim 12 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时横流流速均超过 0.3 m/s 的规范限值 ($v_{x\max} = 1.44 \text{ m/s}$), 下游引航道口门区在流量 $Q=1 400\sim 8 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时横流流速与回流流速均有超标 ($v_{x\max} = 0.79 \text{ m/s}$, $v_{r\max} = 1.13 \text{ m/s}$), 上、下游均无法满足 2 a 一遇 $8 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的通航要求。二线船闸存在的主要问题是隔流墙掩护长度不足、电站下泄水流与引航道水流存在明显对冲。上、下游隔流墙长度为 240、294 m 时, 引航道停泊段和部分导航调顺段未受到掩护, 对口门区横流的抑制作用小, 右岸靠电站泄水口附近河底高程 65~66 m, 而下游河道高程 62~64 m, 造成电站下泄水流朝左冲向引航道, 在口门区引起较强的横流与回流。

2.2 优化措施及效果

优化措施: 1) 将二线船闸上游引航道隔流墙延长至 407 m, 其中, 上游段设置 135 m 长透空段隔流墙, 顺船闸方向保持 25% 透空率布置独桩式隔流桩; 下游连续段设置 272 m 长密排桩, 并辅以上游左岸凸嘴修整。2) 将二线船闸下游引航道隔流墙(堤)延长至 345 m。3) 对电站下游河床进行疏浚, 长 1.0 km、宽 90 m、疏浚底高程 62.0 m, 疏浚边坡坡度为 1:3。4) 在采用工程措施 1)~3) 后通航流量仍不满足 2 a 一遇标准的情况下, 进一步采取非工程措施进行改善, 即优化电站泄水闸调度方式, 在流量 Q 为 $6 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 均匀开启 1[#]~19[#]孔泄水闸。

调整后, 二线船闸上下游引航道口门区通航水流条件得到明显改善, 在流量 $Q < 9 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 时横流、回流及纵流流速均满足规范要求, 最大通航流量可提高至 2 a 一遇 $8 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的标准。

3 结构设计优化与创新

3.1 浮式检修门库

浮式检修闸门一般布置在上游引航道导航墙与靠船墩之间的门库内, 通过钢缆系靠在门库上的系船柱上。以往, 门库多采用重力式结构, 结构尺寸较大, 2 扇浮门并靠存在碰撞严重等问题。因此, 本项目将门库设计为桩柱式结构。图 3 为浮式检修门系靠方式。

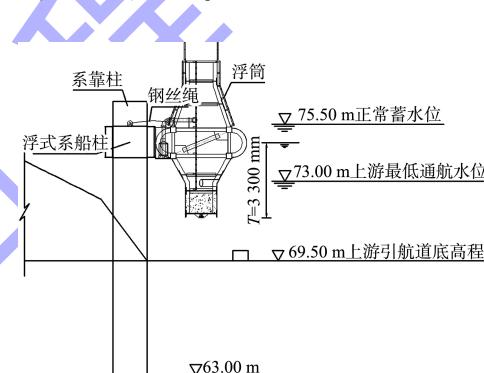


图 3 浮式检修门系靠方式

浮式检修门库仅在导航墙与靠船墩之间布置 4 根系靠柱, 间距为 $10.15 \text{ m} + 15.5 \text{ m} + 10.15 \text{ m}$, 系靠柱桩基采用 C30 钻孔灌注嵌岩桩, 桩径 $D = 1.5 \text{ m}$, 柱体同样采用直径 1.5 m 的圆柱。系靠柱上设置可上下浮动的浮筒, 每扇浮门通过钢架固定在 2 个浮筒上, 随水位变化而上下浮动。该设计的优点为: 1) 深基础有利于水上施工; 2) 单桩基础与柱体设计尺寸一致, 施工方便; 3) 工程投资省, 有效解决了浮门碰撞问题。

3.2 靠船墩

3.2.1 上游靠船墩

根据国内已建船闸运营经验, 考虑上游引航道水位因泄水闸开闸和船闸灌水时可能出现急剧下降情况, 若解缆不及时容易导致船舶侧翻事故发生。为避免此类事故, 拟将二线船闸靠船墩设

计为浮式系船柱靠船墩, 见图4。

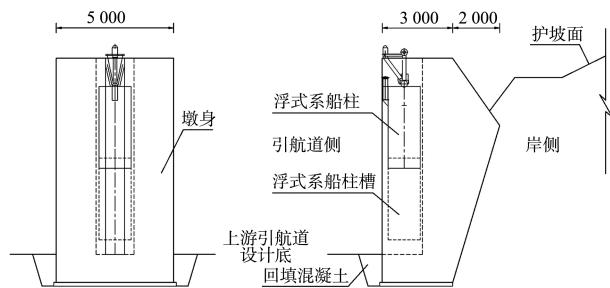


图4 浮式系船柱靠船墩 (单位: mm)

根据靠船墩所处地质地形情况, 为减少岩石开挖量, 靠船墩采用折背重力式, 墙背结合引航道护坡采用凸形折线, 上部俯斜、下部仰斜, 墩身平面尺寸为3.0 m×5.0 m(垂直水流向×顺水流向), 靠船墩内设置150 kN浮式系船柱, 二期混凝土尺寸2.9 m×1.7 m。利用浮式系船柱自适应水位变化的特点, 一方面可提高船舶的停泊安全性; 另一方面可减少解缆次数、提高船舶过闸效率。在满足地质与结构安全的前提下, 该理念也适用于桩基承台墩式结构。

3.2.2 下游靠船墩

与上游引航道相反, 下游引航道水位仅会因泄水闸开闸泄水而急剧上升, 但采用固定系船钩(柱), 随着水位上升缆绳会自动脱钩, 不会出现不能解缆而造成的危险的情况。为节省投资和方便施工, 下游靠船墩系船设施仍采用传统的固定

系船钩(柱), 并在折背重力式结构的基础上, 采用“圆墩身+方底板+衡重台”结构, 见图5。该结构扩大了基础, 上部结构由衡重台与圆柱体相组合, 整体外形美观、受力合理、施工方便, 经济性强。

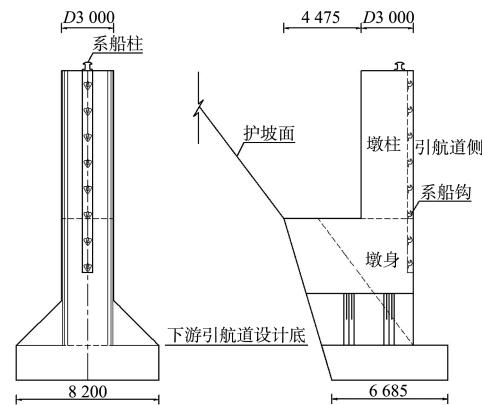


图5 “圆墩身+方底板+衡重台”靠船墩结构 (单位: mm)

3.3 隔流墙

上游隔流墙采用排桩衬砌结构, 兼做库区上游引航道枯水围堰, 见图6, 该结构采用直径1.2 m钻孔灌注桩, 间距1 300 mm, 顶部设置帽梁, 灌注桩二线船闸引航道侧设250 mm厚衬砌。下游隔流墙(堤)采用“倒T形混凝土结构+岩土堤”结构, 兼做下游引航道枯水围堰, 见图7, 该结构下部引航道开挖形成土石堤, 堤顶设T形墙, 墙身厚1.5 m, 扩大基础底宽5 m、厚1.5 m。两种结构形式均分担了围堰工程量, 工程投资更省。

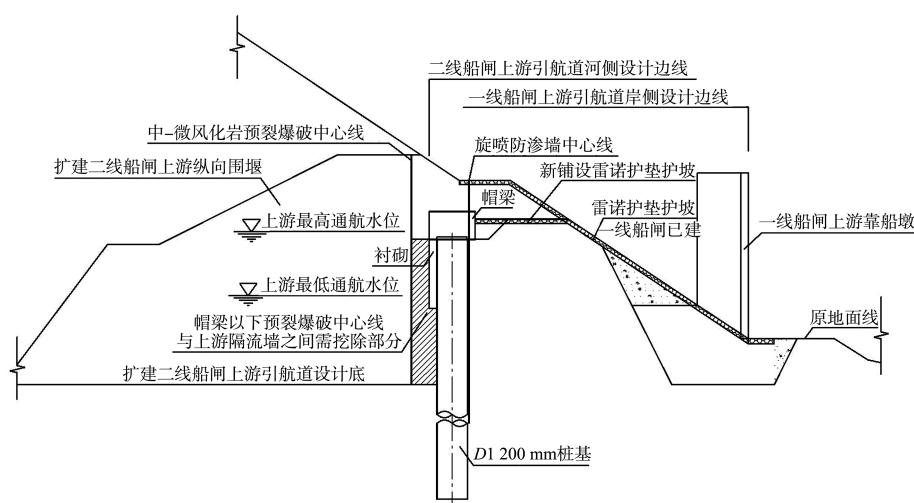


图6 上游引航道隔流墙断面

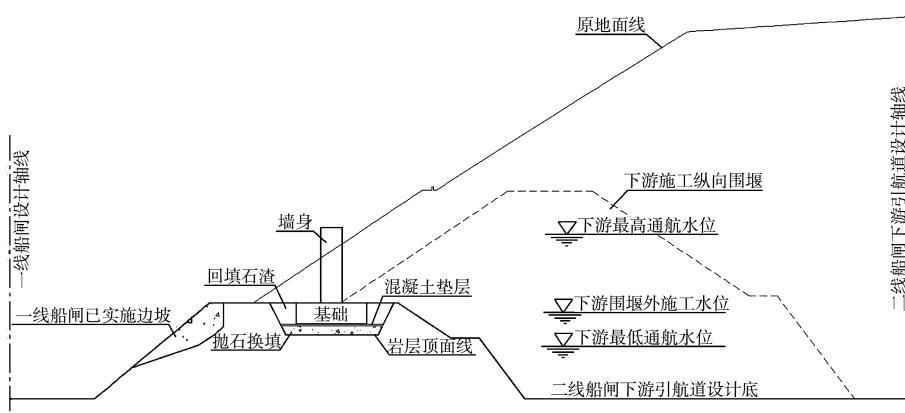


图 7 下游引航道隔流墙(堤)断面

4 结论

1) 扩建二线船闸选址及平面布置方案比选应综合考虑相邻建筑物结构安全稳定、施工条件、施工期影响、通航水流条件、征地拆迁、土石方量、工程投资等制约因素, 选择安全、经济、美观、环境影响小、通航条件好的布置方案。

2) 通过整体定床物理模型试验进行二线船闸平面布置优化, 采取延长上游隔流墙至 407 m, 延长下游隔流堤至 345 m、疏浚电站下游河床、优化电站泄水闸调度方式等综合优化措施, 有效削弱了口门区的横流和回流, 口门区通航水流条件得到明显改善。建议将流量 $Q=8000 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为湘祁二线船闸的最大通航流量, 该流量满足 2 a 一遇设计要求。

3) 结合安全、经济、美观、适用等设计目标, 对浮式检修门库、靠船墩、隔流墙(堤)提出了具有较强通用性的创新与优化设计理念, 可为类似船闸的结构设计提供参考和借鉴。

(上接第 102 页)

参考文献:

- [1] 姜楚, 赵建钧, 娜晋德. 青田水利枢纽通航水流条件试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(2): 74-80.
- [2] 王云莉, 孙国栋, 向美焘. 船闸口门区不良流态改善措施[J]. 水运工程, 2016(3): 83-88.
- [3] 徐进超, 宣国祥, 刘本芹, 等. 贵港二线船闸下引航道物理模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 9-13.
- [4] 李君涛, 普晓刚, 张明. 导流墩对狭窄连续弯道枢纽船

参考文献:

- [1] 潘海涛, 吴晓磊, 刘晓玲, 等. 新时代我国内河航运高质量发展思路[J]. 水运工程, 2021(10): 14-19.
- [2] 袁和平. 京杭运河万年闸复线船闸平面布置方案[J]. 水运工程, 2019(5): 135-140.
- [3] 张珊, 吴澎. 长洲水利枢纽 3-4 号船闸平面布置研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 1-5.
- [4] 周丁, 姜兴良. 株洲二线船闸轴线布置方案[J]. 水运工程, 2015(9): 138-142.
- [5] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [6] 湖南省交通规划勘察设计有限公司. 湘江永州至衡阳三级航道建设一期工程初步设计报告[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计有限公司, 2018.
- [7] 长沙理工大学. 湘祁枢纽扩建二线船闸通航整体定床物理模型试验研究报告[R]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- [8] 刘中峰, 刘达, 黄本胜, 等. 孟洲坝枢纽二线船闸上引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2019(1): 119-125.

(本文编辑 武亚庆)

引航道口门区水流条件改善规律研究[J]. 水运工程, 2011(6): 100-105.

- [5] 张亮, 卢启超. 船闸引航道口门区通航水流条件改善措施的综述[J]. 科技信息, 2009(25): 780, 779.
- [6] 朱卫国, 何贞俊. 大藤峡水利枢纽船闸上引航道口门区水流条件模型试验[J]. 水运工程, 2017(9): 137-143.
- [7] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 赵娟)