



# 青山枢纽船闸上游口门区 通航水流条件优化试验研究

陈明慧<sup>1</sup>, 刘筹资<sup>2</sup>, 夏 波<sup>2,3</sup>, 程永舟<sup>2,3</sup>, 王 能<sup>4</sup>

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410100;  
2. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114;  
3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;  
4. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

**摘要:** 针对澧水青山枢纽在上游口门区受到弯曲水流、分汊河道地形、口门区水流断面的突扩和缩小及流量等水流问题, 采用定床物理模型试验方法对上游口门区水流条件的改善及影响因素进行研究, 并提出改善水流条件的优化措施。结果表明, 在上游口门区原设计方案及改善方案1条件下不能满足通航水流条件; 根据方案2的布置, 在上游口门区无缺口地布置3个导流墩, 且对右汊河道进行疏浚至43.0 m时, 能够较好地改善上游口门区的水流条件, 且船闸口门区在设计通航水位下的水流条件均能满足船舶安全通航的要求。

**关键词:** 青山枢纽; 船闸; 通航水流条件; 口门区

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0122-06

## Optimization test on navigable flow conditions in upstream entrance area of ship lock of Qingshan Junction

CHEN Ming-hui<sup>1</sup>, LIU Chou-zi<sup>2</sup>, XIA Bo<sup>2,3</sup>, CHENG Yong-zhou<sup>2,3</sup>, WANG Neng<sup>4</sup>

(1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410100, China;  
2. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;  
3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;  
4. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

**Abstract:** The Qingshan Junction of the Lishui River confronts some flow problems in the upstream entrance area, such as meandering rivers, the topography of bifurcated channels, sudden expansion and reduction of flow sections, and flow rates. This study uses the fixed-bed physical model to study the improvement in flow conditions in the upstream entrance area and the influencing factors and proposes optimization measures to improve flow conditions. The results reveal that the navigable flow conditions cannot be satisfied under the design scheme and Scheme 1 for the improvement to the upstream entrance area. According to the arrangement of Scheme 2, when three current diversion piers are arranged in the upstream entrance area in a non-staggered manner, and the right bifurcated diversion is dredged up to 43.0 m, the flow conditions of the upstream entrance area can be better improved, and the flow conditions in the entrance area of the ship lock under the design navigable water level can meet the requirements of safe navigation of ships.

**Keywords:** Qingshan Junction; ship lock; navigable flow conditions; entrance area

收稿日期: 2022-01-17

作者简介: 陈明慧(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运建设管理。

船闸口门区是船舶进出航道的咽喉,同时也是河流流动、静水相交的位置,在此区域通常会形成斜向水流、泡漩等不利流态,影响船舶通航。为了保证船舶通航安全,通常需要对口门区的水流条件进行改善<sup>[1]</sup>。国内对口门区的通航水流条件的改善进行了大量的研究工作:彭伟等<sup>[2]</sup>、陈明等<sup>[3]</sup>针对具体的工程实例对口门区的通航水流条件进行研究,发现了桩基透空式导流屏能改善口门区的通航问题;李兴亮等<sup>[4]</sup>、李君等<sup>[5]</sup>、程璐等<sup>[6]</sup>都认为,对于弯曲河道利用不同导流结构进行组合优化能更好地解决口门区流速较大的问题;李艳富等<sup>[7]</sup>、张树青等<sup>[8]</sup>发现在优化口门区时适当改变引航道的长度和角度可以有效地改变口门区的不利流态。虽然有很多学者对改善口门区的措施进行了研究,但是受到工程地形因素的影响,每一种工程措施都需要根据当地水流条件的影响因素进行改善。

由于青山枢纽新建船闸口门区位于弯曲分汊河段,在弯道处会产生横向环流,同时在分汊河段处,水流受到两汊地形的影响,也会对水流产生不容忽视的影响。青山枢纽同时受到弯曲河流及分汊河流两种因素的影响,口门区的水流条件复杂多变,对进出口门的船舶影响较大,不能满足船闸施工标准,因此需要对青山枢纽船闸口门区的通航水流条件进行研究。

## 1 工程概况

澧水青山枢纽坝址位于石门县下游,始建于20世纪60年代,是一个多功能综合利用的水利枢纽。枢纽处澧水右汊河道向右弯曲,右汊主坝址处河宽约600 m,从右至左主要建筑物为水轮泵站、100吨级船闸(已废弃)、青山电站1(旁侧引水)、中加电站、副坝、20×13 m(孔数×单孔净宽)泄水闸和青山电站2。枢纽左汊坝址段河道较为顺直,河宽约430 m,从左至右主要建筑物为滚

水坝、12孔泄水闸、滚水坝。因青山枢纽建于澧水右汊河道,且船闸等级为VI级,设计通过能力为120万t,加上船闸设备简陋,维护和管理已不适应运输现状,需要新建船闸以满足航运要求。

澧水青山枢纽新建船闸由右汊改建至左汊,增大了过往船只吨级,以及新建船闸位于弯曲分汊河段,对船舶安全通航造成了很大的影响,主要体现在以下3方面问题:

1)船闸口门区上游连接段1 km处为弯曲河道,水流通过弯道时产生横向环流,使船只无法顺利通过弯道,易造成重大事故。2)船闸处于分汊河道,右汊地形稍高于左汊,水流向左汊流动,严重影响了左汊口门区的安全航行。3)在船闸口门区建设过程中,过流断面的减小增大了口门区的横向流速,导致船舶在进出口门区时产生较大的横向位移,不利于船舶航行。

## 2 试验概况

### 2.1 模型试验

基于几何相似、重力相似、动力相似等准则,结合试验场地大小、模型最小水深要求等,物理模型几何相似采用1:110正态比尺,流速比尺 $\lambda_v = 10.488$ ,糙率比尺 $\lambda_n = 2.189$ ,流量比 $\lambda_Q = 126905.871$ 。根据枢纽河段的综合糙率0.031~0.068,设定模型综合糙率为0.014~0.031,采用水泥砂浆粗糙抹面(糙率0.014~0.015),并对其进行局部梅花加糙,使模型各段综合糙率与原型相似。

为了保证模型与原型水流运动相似,整体物理模型制作完成后进行验证试验。依据实测枢纽沿程水位、流量、断面流速等资料,进行水位、断面流速等验证,且对模型梅花配糙进行多次调整,最终达到模型水位、断面流速及分部、分流比等相似验证要求。枢纽模型布置见图1。水位及

断面流速对其在洪水流量  $4\ 631\text{ m}^3/\text{s}$ 、中水流量  $822\text{ m}^3/\text{s}$ 、枯水流量  $136\text{ m}^3/\text{s}$  中进行验证, 结果如图 2、3 所示。本文仅选取洪水中左汊水面线结果及部分断面流速结果进行分析。

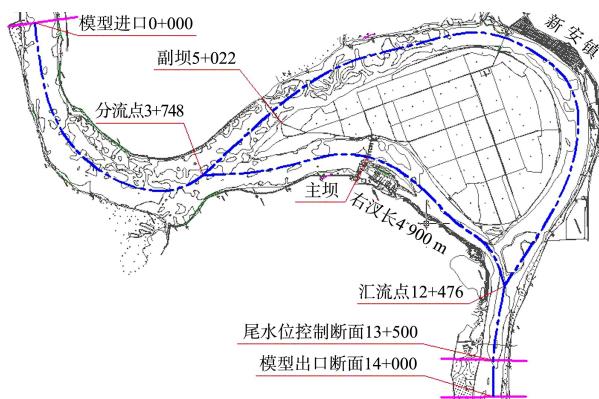


图 1 青山枢纽整体模型及水尺布置

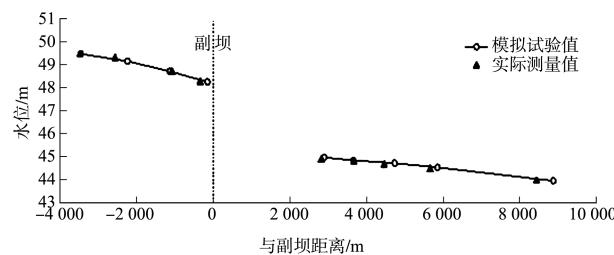


图 2  $Q=4\ 631\text{ m}^3/\text{s}$  洪水水位验证结果

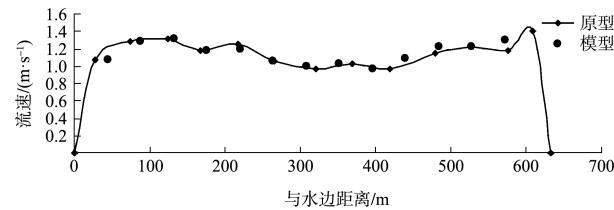


图 3  $Q=4\ 631\text{ m}^3/\text{s}$  断面流速分布验证结果

## 2.2 试验条件

根据初步拟用的枢纽调度运行方式, 选取 4 级典型流量对通航条件进行试验研究, 工况见表 1。

表 1 通航条件试验工况

流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	坝址水位/m	尾门控制水位/m	枢纽调度方式
2 200	48.20	40.91	右汊过流 $600\text{ m}^3/\text{s}$ 、泄水闸全关; 左汊泄水闸间隔局部开启泄流 $1\ 600\text{ m}^3/\text{s}$
8 910(2 a 一遇洪水)	不低于 47.00	46.59	
12 100(5 a 一遇洪水)	不低于 47.00	48.54	电站停机, 左右两汊泄水闸全开泄流
14 200(10 a 一遇洪水)	不低于 47.00	49.55	

## 3 原设计方案

### 3.1 原设计方案布置

青山枢纽原设计方案船闸位于左岸侧, 为单线船闸, 突出在下游, 船闸的中心轴线与坝轴线垂直。设计近、远期最大通航流量为  $8\ 910$ 、 $14\ 200\text{ m}^3/\text{s}$ , 船闸引航道为不对称形式布置, 船舶曲进直出。引航道底宽、长分别为  $60$ 、 $560\text{ m}$ ; 上、下游引航道底高程分别为  $41.0$ 、 $37.0\text{ m}$ 。在导流堤向上游方向平行于航线交错布置 3 个导流墩, 导流墩的长度、相对间距均为  $20\text{ m}$ 。

### 3.2 原设计方案通航水流条件

当流量为  $2\ 200\text{ m}^3/\text{s}$  时, 上游引航道口门区纵向流速最大不超过  $0.7\text{ m/s}$ , 横向流速均不超过

$0.3\text{ m/s}$ , 满足通航水流条件要求, 同时, 上游连接段水流流速较小, 水流流速普遍为  $0.4\sim0.8\text{ m/s}$ , 通航水流条件较好, 流场如图 4 所示。在进行船模试验时发现: 船模以静水航速  $3.0\text{ m/s}$  上行, 以静水航速  $2.5\text{ m/s}$  下行, 经过口门区时航态均较好, 航行参数均在规定范围内, 沿左、右航线航行能够顺利通过连接段。

当  $8\ 910\text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 14\ 200\text{ m}^3/\text{s}$  时, 上游引航道口门区纵向流速最大不超过  $1.5\text{ m/s}$ , 大部分水域横向流速不超过  $0.3\text{ m/s}$ , 仅在口门上游约  $100\text{ m}$  范围近引航道右边线, 局部横向流速较大, 最大约  $0.45\text{ m/s}$ , 存在一定安全隐患, 如图 5 所示。

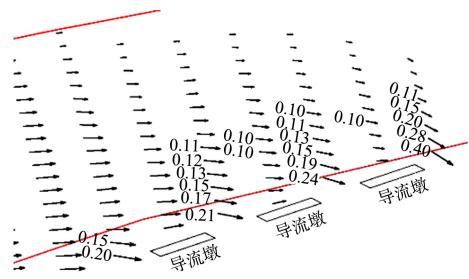


图 4 上引航道口门区局部流场 (单位: m/s)

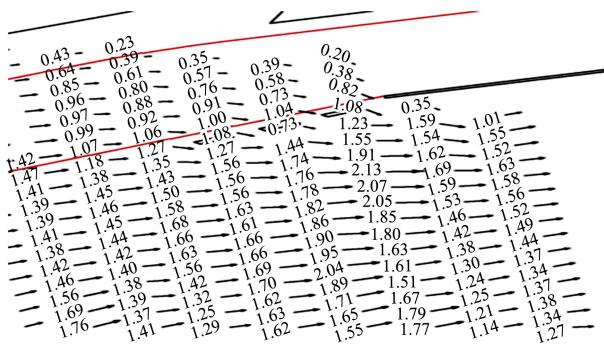


图 5 上引航道口门区局部流场 (单位: m/s)

上引航道船模上行航态见图6。可以看出船模在上行时，船头飘向导流墩，通过改变舵角控制船模恢复航线，但是船尾触碰到了导流墩；下行时船模受到分汊地形的影响，向左岸的横流流速，使船模向左岸偏移，易与靠船墩碰撞，且上下行的航行参数均超过限值，口门区的通航水流条件不能满足要求，需要对设计方案下口门区的船闸布置进行优化。

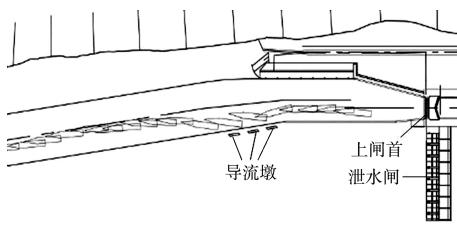


图 6 上引航道船模上行航态

## 4 优化方案

#### 4.1 优化方案 1 的通航水流条件

1) 在上游导航墙头部加长 34 m, 并向河侧外挑 7°, 在原设计方案导流墩的基础上增加 3 个导

流墩，导流墩长度与原设计相同为 20 m，将导流墩间距由原 20 m 缩小至 10 m。

2) 当上游来流量为  $8\ 910\ m^3/s$  时, 上引航道口门区及连接段流场如图 7 所示。可以看出, 上游引航道口门区纵向流速最大不超过  $1.5\ m/s$ , 大部分水域横向流速不超过  $0.3\ m/s$ , 在口门上游  $150\sim250\ m$  范围近引航道右边线, 局部横向流速较大, 最大约  $0.35\ m/s$ ; 当上游来流量  $14\ 200\ m^3/s$  时, 上游引航道口门区纵向流速最大约  $1.8\ m/s$ , 大部分水域横向流速不超过  $0.3\ m/s$ , 在口门上游约  $180\ m$  范围近引航道右边线, 局部横向流速较大, 最大约  $0.4\ m/s$ 。可见两级流量下, 仅在引航道右边线附近局部横向流速超过  $0.3\ m/s$ 。

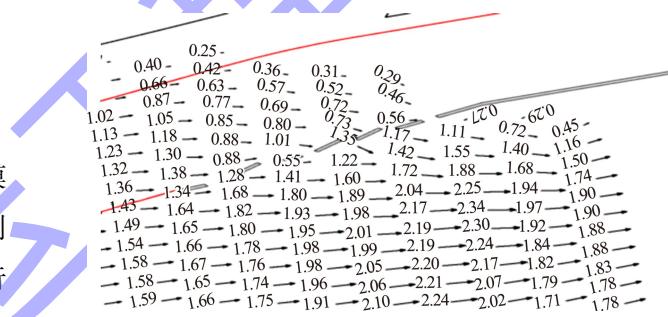


图 7 上引航道口门区及连接段流场 (单位: m/s)

从船模试验结果来看，船模在口门区内上行时基本是沿着航道线驶出口门区，但是航线也会受到横向水流的影响发生部分偏移；且船模在口门区下行时，受到口门区过流断面减小所形成的横向流速的影响，在进入口门区时会发生偏转。虽然自航船模基本能顺利进出口门区，但在局部水域横向流速超出规定，船模行驶受到一定程度的影响。

## 4.2 优化方案 2 的通航水流条件

1) 优化方案 2 见图 8, 上游口门区仍采用 3 个导流墩方案, 且与导流堤之间平顺衔接(无错口), 间距 20 m, 停泊段停靠单排船舶。为了进一步减小优化方案 1 口门区局部横向流速, 右汊坝上游 2 km 范围河底高程疏浚至 43 m。

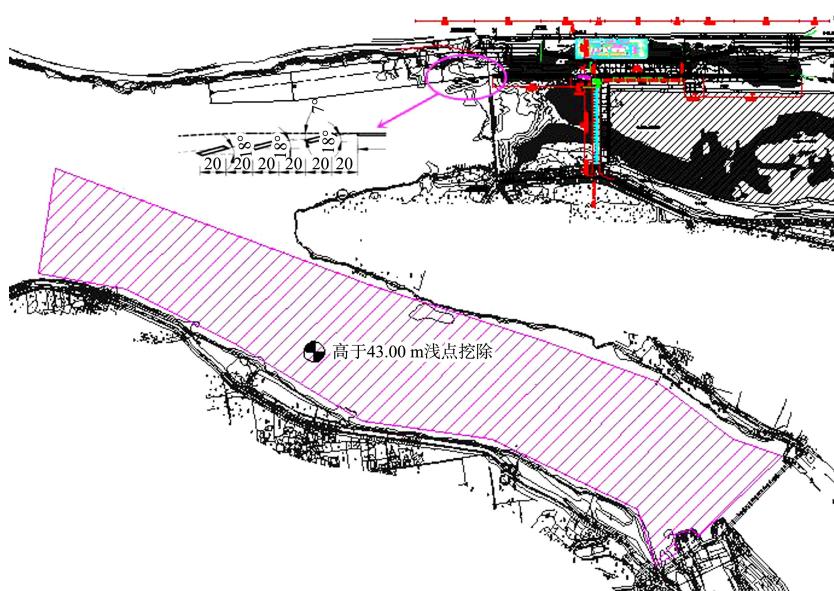


图 8 优化方案 2 的开挖区域

2) 当上游来流量为  $8910 \text{ m}^3/\text{s}$  时(图 9), 上游引航道口门区纵向流速最大不超过  $1.2 \text{ m/s}$ , 大部分水域横向流速不超过  $0.25 \text{ m/s}$ , 在连接段上游  $150\sim250 \text{ m}$  范围近引航道右边线, 局部横向流速较大, 最大约  $0.35 \text{ m/s}$ ; 当上游来流量为  $14200 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 大部分水域横向流速不超过  $0.3 \text{ m/s}$ , 在连接段约  $180 \text{ m}$  范围近引航道右边线, 局部横向流速较大, 最大约  $0.4 \text{ m/s}$ 。可见两级流量下, 仅在引航道右边线附近局部横向流速超过  $0.3 \text{ m/s}$ 。

上引航道船模下行航态见图 10。可以看出, 船舶以静水航速  $3.0 \text{ m/s}$  沿规划航线上行, 在上行过程中船模航行航态顺利通过口门区; 以静水航速  $2.5 \text{ m/s}$  沿规划航线下行, 在下行过程中船模顺利进入口门区, 且没有偏离航线, 自航船模基本能顺利进出口门区。

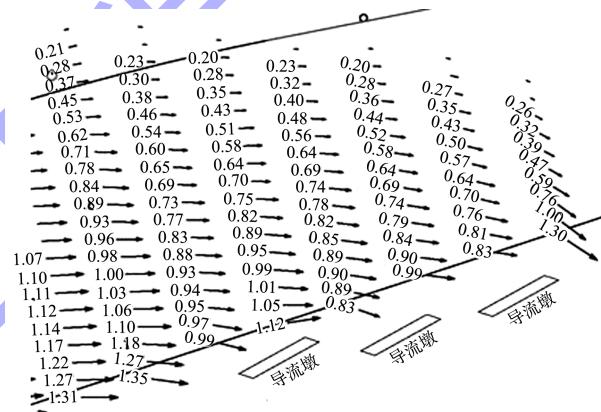
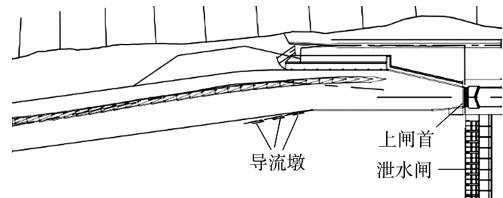
图 9 优化方案 2 在  $Q=8910 \text{ m}^3/\text{s}$  时上引航道口门区及连接段流场 (单位:  $\text{m/s}$ )

图 10 上引航道船模下行航态

#### 4.3 优化方案通航水流条件对比

各方案对比分析结果见表 2。可以看出, 优化方案 2 相对较优, 可以作为枢纽的平面布置推荐方案。

表 2 各方案对比分析结果

方案	工程布置	水流条件
原设计	平行于航线有缺口地布置 3 个导流墩, 导流墩长度、相对间距为 $20 \text{ m}$ , 高度与上游隔水墙齐高	水流条件不能满足要求, 最大横向流速达到 $0.45 \text{ m/s}$ , 且在进出口门区会发生一定的危险
优化方案 1	在导航墙头部加长 $34 \text{ m}$ , 并向河外挑 $7^\circ$ ; 其次新增加 3 个导流墩, 相对间距缩小为 $10 \text{ m}$	一定程度上优化了水流条件, 但仍不满足条件, 新增的 3 个导流墩不符合经济适中的原则
优化方案 2	采用 3 个导流墩, 且平顺衔接, 间距 $20 \text{ m}$ , 单排停靠。右汊坝上 $2 \text{ km}$ 范围河底疏浚至 $43 \text{ m}$	降低经济成本, 改善水流流速。右汊的疏浚, 减小对口门区水流的影响, 满足规范要求

## 5 结语

1) 原设计方案口门区的纵横向流速不能满足船舶安全通航的要求,需要对口门区的通航水流条件进行改善。

2) 针对船闸上游引航道口门区通航水流条件存在的问题,对原设计方案进行2种优化试验。通过对比,优化方案2导流墩的布置方式以及对右汊进行疏浚的方式更能满足口门区的通航水流条件。

3) 综合对比优化方案下的口门区通航水流条件,推荐优化方案2为青山枢纽的口门区布置方案。

4) 由于存在对右汊地形的疏浚开挖,为了防止淤泥回填、改变地形,需要定期清淤,确保通航安全。

## 参考文献:

[1] 王作高.船闸设计[M].北京:水利电力出版社,1992.

(上接第40页)

2) 高架桥式起重机堆场方案创新地将集装箱垂直于堆场轨道布置,使堆场在陆域纵深上布置更加灵活,由于设备的特殊性,使该方案能够大幅提高堆场利用率和运行效率,是一种极有推广价值的自动化堆场技术。

3) 高层集装箱智能货架方案将传统堆垛集装箱堆场切分为若干片状货架,将倒箱率降为零,突破了现有堆高。经过试运营验证,堆场运作效率很高,可以在未来更多的规划和设计中应用。

## 参考文献:

- [1] 刘广红,程泽坤,林浩,等.自动化集装箱码头总体布局模式对比分析[J].水运工程,2016(9):14-18.
- [2] 周强,黄倩,李建成,等.高架轨道交通式集装箱码头装卸新工艺与性能评价[J].水运工程,2014(10):67-70.
- [3] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.自动化集装箱码头建设指南:JTS/T 199—2021 [S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

- [2] 彭伟,冯小香,普晓刚.船闸下游引航道口门区急流碍航改善措施比选[J].中国港湾建设,2017,37(10):47-52.
- [3] 陈明,段黎明,王多银,等.融江麻石船闸改扩建工程下引航道通航水流条件模型试验[J].水运工程,2020(7):175-180,193.
- [4] 李兴亮,陈野鹰.弯曲河段下游引航道口门区通航水流条件研究[J].水运工程,2016(2):127-130,141.
- [5] 李君,赵建钧,洪娟,等.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.
- [6] 程璐,赵建钧,辜晋德.S形弯曲河段低水头闸坝枢纽口门区通航水流条件研究[J].水运工程,2016(12):106-112.
- [7] 李艳富,杨宇,韩昌海,等.瓯江三溪口航电枢纽引航道布置优化试验研究[J].水利水运工程学报,2014(2):89-94.
- [8] 张树青,彭永勤,谢春航.东江下矶角枢纽上引航道口门区通航水流条件试验研究[J].中国水运(下半月),2020,20(1):156-158,160.

(本文编辑 王璁)

- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港集装箱码头设计规范:JTS 165-4—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [5] 程泽坤,刘广红,张斌,等.国外自动化集装箱码头应用现状及建设借鉴[J].水运工程,2016(9):3-8.
- [6] KOCH F. A new concept in handling mega-ships[J]. Port technology international, 2015(68): 86-88.
- [7] DOBNER M, BRUECK V, MEER R V D, et al. Boxbay—the future is vertical[J]. Port technology international, 2019(84): 16-19.
- [8] 王施恩,何继红,林浩,等.自动化集装箱码头堆场布置新模式[J].水运工程,2016(9):23-26,45.
- [9] 罗勋杰.全自动化集装箱码头水平运输方式对比[J].水运工程,2016(9):76-82.
- [10] 何继红,林浩,罗勋杰,等.多种形式轨道吊在自动化集装箱堆场的应用[J].水运工程,2016(9):83-86,95.
- [11] 赵彦虎.新型自动化集装箱码头装卸工艺系统研究[J].港口装卸,2009(3):22-24.

(本文编辑 王璁)