



# 构皮滩通航设施第一级中间渠道水力学 观测与实船试验

王新<sup>1</sup>, 黄金根<sup>2</sup>, 左邦祥<sup>3</sup>, 陈小虎<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;

2. 杭州国电机械设计研究院有限公司, 浙江杭州 310030; 3. 贵州乌江水电开发有限责任公司, 贵州贵阳 550002;

4. 长江勘测规划设计研究院有限公司, 湖北武汉 430010)

**摘要:** 依托乌江构皮滩通航工程, 开展了含长距离通航隧洞中间渠道的水力学观测与实船试验, 揭示了中间渠道波动传播时空变化规律及船舶航行特性。观测表明: 中间渠道波动传播速度约 5.0~6.8 m/s, 波幅与水面宽度呈反比, 中间渠道两端的水面波动最大, 通航隧洞内次之, 大型渡槽交汇区波动最小; 在中间渠道船舶卧倒门启闭产生的波幅在 2 cm 内, 船舶正常航行产生的最大波幅约 10 cm 以内, 主要波动周期为 120~160 s, 水面波动对船舶航行富余水深影响不大; 船舶在中间渠道正常航行速度达到了设计指标, 最大下沉量发生于船舶出厢连续加速阶段, 实测上行和下行最大下沉量分别约 25 和 13 cm, 船舶在中间渠道内航行下沉量约 10 cm 以内, 富余水深较大, 通航隧洞断面设计总体合理。

**关键词:** 构皮滩水电站; 中间渠道; 通航隧洞; 大型渡槽; 实船试验

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0072-06

## Hydraulics observation and ship test of first-step intermediate channel of Goupitan navigation structure

WANG Xin<sup>1</sup>, HUANG Jingen<sup>2</sup>, ZUO Bangxiang<sup>3</sup>, CHEN Xiaohu<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Hangzhou State Power Machinery Research & Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;

3. Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

4. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Relying on the navigation project of Wujiang River, the hydraulics observation and ship test of the intermediate channel containing the long-distance navigation tunnel are carried out. Wave regulation of time and space of intermediate channel and ship navigation characteristics are revealed. The observation presents the intermediate channel wave propagation speed is about 5.0~6.8 m/s. The wave amplitude is inversely proportional to the water width. The water surface at the two ends of the intermediate channel fluctuates the most, second in the navigation tunnel, and the large aqueduct intersection area fluctuates the least. The amplitude of the wave generated in the intermediate channel by the open and close of the chamber gate is within 2 cm, while that caused by ship navigation is basically within 10 cm. The main wave period is between 120 and 160 s. The water surface fluctuation has little impact on the underkeel clearance of the ship navigation. The normal navigation speed of the ship in the intermediate channel reaches the design index, and the maximum sinkage occurs in the continuous acceleration stage of the ship out of the chamber. The measured maximum sinkage of the upward and down is about 25 and 13 cm respectively. The maximum navigation sinkage of the ship in the intermediate channel is basically within 10 cm. The underkeel clearance is rich and the design of the navigable tunnel section is generally reasonable.

**Keywords:** Goupitan hydropower station; intermediate channel; navigation tunnel; large aqueduct; ship test

收稿日期: 2022-12-07

作者简介: 王新 (1983—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事高坝通航科研工作。

“交通强国”“一带一路”等国家战略加快了内河水运发展,干支航道畅通延伸、既有通航设施扩能升级、跨水系运河建设等均涉及隧洞通航方式,在未来内河水运工程建设中隧洞通航将得到广泛的应用。目前关于通航隧洞设计尚无相关规范,仅开展过相关设计研究,吴德兴等<sup>[1]</sup>以富春江七里泷通航隧道为依托,通过优化设计,提出了同时满足水下断面形状、水上建筑界限要求及安全保障的通航隧道断面;张弦等<sup>[2]</sup>通过原线位改造方案和新线位新建方案技术经济比较,推荐新安江水电站过坝通航设施采用单升船机和大通航隧洞方案;汤建宏等<sup>[3]</sup>提出船舶通过隧洞的时间与通航建筑物单向过闸时间基本相等为最佳原则,设计隧洞断面尺寸,并以溪洛渡枢纽通航隧洞为例进行了隧洞断面经济性分析;李焱等<sup>[4]</sup>采用水工物理模型和船模试验,对构皮滩第一级中间渠道的航行水力条件、单线通航隧洞和渡槽的尺度进行了研究;邓斌等<sup>[5]</sup>建立了通航隧洞内船行波运动的数值模型,分析船舶在通航隧洞中诱导生成的船首孤立波波高以及波速的时空分布规律;邓健等<sup>[6]</sup>以乌江思林二线通航隧洞工程为研究对象,通过多种仿真试验,分析船舶在通航隧洞内不同阶段的航行特点,提出适用于狭长隧洞通航船舶的航行方案;汪瑞等<sup>[7]</sup>建立船舶尾气排放的三维计算模型,开展典型通航隧洞模拟研究,

认为公路隧道的设计标准对船舶通航隧洞具有一定的不适用性。干伟东等<sup>[8]</sup>以乌江构皮滩通航隧洞为例,采用鱼骨图分析法找出隧洞通航风险的影响因素,认为人员失误是隧洞通航安全问题的主导因素。

综上所述,目前成果主要为通航隧洞优化设计及试验研究,既无相关的规范依据,也未涉及工程应用实践。本文依托建成通航的构皮滩第一级中间渠道(含通航隧洞)开展水力学观测及实船试验,揭示含通航隧洞的中间渠道波动特性及船舶航行特性,验证设计的合理性,旨在为相关设计研究提供参考和借鉴。

## 1 构皮滩第一级中间渠道

构皮滩升船机第一级中间渠道上接第一级升船机、下接第二级升船机,由通航隧洞、渡槽和明渠组成一个封闭的狭长水域,全长 981.2 m,其中隧洞段长 425.0 m,渡槽段总长 429.0 m,明渠段总长 127.2 m。中间渠道工作水位高程 637.0 m,宽 12~38 m,渡槽和明渠段设计水深 3.0 m,隧洞段水深 4.0 m、水域宽度 16 m。为充分利用既有地形条件,减少开挖工程量及边坡高度,并满足船舶迎向运行要求,中间渠道布置交汇区供船舶交汇错船,见图 1。通航隧洞的断面见图 2,建成后的中间渠道各部分实景见图 3。

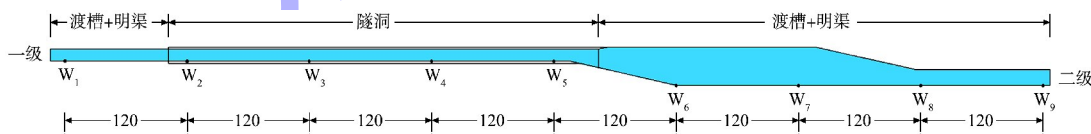


图1 第一级中间渠道平面布置 (单位: m)

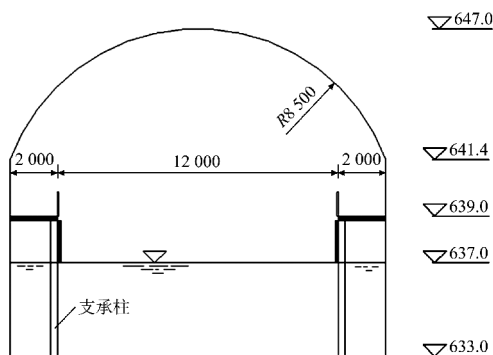
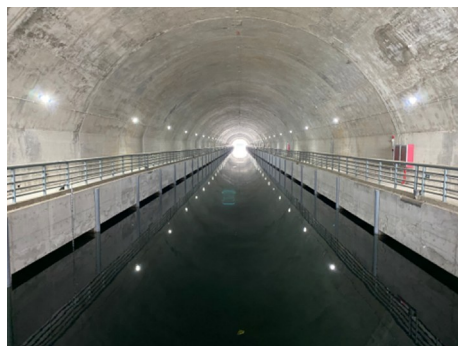


图2 通航隧洞断面 (尺寸: mm; 高程: m)



a) 通航隧洞



b) 渡槽和明渠

图3 第一级中间渠道实景

构皮滩升船机设计通航 500 吨级船舶,吃水要求不大于 1.6 m,根据中间渠道物理模型试验成果<sup>[9]</sup>,中间渠道的单向渠道船舶设计航行速度为 0.7~1.0 m/s、双向渠道船舶设计航行速度为 1.0~1.4 m/s。

## 2 实船试验

实船试验选择乌江航道代表性船舶“航电 1 号”多用途集装箱船,船舶尺寸为 55 m×10.8 m×1.6 m (总长×船宽×试验吃水),试验船舶载质量约 400 t。

在中间渠道内一侧沿程布置 9 支波高传感器,测量正常通航条件下中间渠道内水面的波动特性,从上到下测点编号为  $W_1 \sim W_9$ ,测点位置见图 1,为便于数据相关性分析,对中间渠道内多个水面波动测点进行同步采集。船舶航行特性主要采用高精度自动跟踪式全站仪测量,可同步测量船舶位置、航速及下沉量。实船拟按 0.7~1.4 m/s 航速正常航行,现场共观测 3 次上行和 3 次下行通过第一级中间渠道。

## 3 观测结果分析

### 3.1 水面波动传播特性

中间渠道波动传播规律和波动特性关系到船舶的航行和两端升船机的工作条件,掌握中间渠道波动特性十分必要。在第一级中间渠道水面平

静且没有任何扰动的情况下,利用第二级升船机上游卧倒门开启造成水面波动,较好地考察波动沿第一级中间渠道的传播特性。卧倒门开启引起的水面波动传递过程见图 4,卧倒门开启造成闸首水面下降,形成波谷,从闸首  $W_9$  测点向上游传播至  $W_1$ ,传播过程非常清晰,波谷到达各测点的时间间隔基本一致,各测点的波谷值有所差异。统计波动传播过程用时及波谷值见表 1,由首波到达各测点的传播距离和传播时间可知,水面波动传播稳定,传播距离较远,渡槽内平均波速约 5.2 m/s,隧洞内平均波速约 6.3 m/s。

表1 波动传播参数

测点	传播距离/m	传播时间/s	传播速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	首波波谷/ cm
$W_9$	0	0.0		1.80
$W_8$	120	23.6	5.1	0.87
$W_7$	240	46.3	5.3	0.67
$W_6$	360	69.5	5.2	0.45
$W_5$	480	92.6	5.2	1.23
$W_4$	600	110.5	6.7	1.59
$W_3$	720	128.0	6.8	1.28
$W_2$	840	149.7	5.5	1.43
$W_1$	960	173.5	5.0	1.75

注:传播速度为测点到测点之间的传播速度。

根据浅水波动理论波速简化计算公式:

$$C = \sqrt{gh} \quad (1)$$

式中:  $C$  为波速,  $g$  为重力加速度,  $h$  为水深。

实测中间渠道内波速主要受水深影响,与浅水波动传播理论吻合。卧倒门开启在中间渠道引起的波动很小,首波波谷值在 2 cm 内,首波传递过程中波谷值变化明显,见图 4,波谷在第二级升船机上闸首  $W_9$  测点为 1.8 cm,到达宽阔渡槽时,波谷值明显减小,到达  $W_6$  测点时仅 0.45 cm,在进入隧洞断面变窄后,水面波动增大,波谷值增大到 1.2 cm 以上,且向端部传播有进一步增大的趋势,端部  $W_1$  测点波谷值增大到 1.75 cm。沿程水面波动受水域宽度影响较大,中间渠道两端断

面宽度仅 12 m, 通航隧洞断面宽度 16 m, 渡槽交汇区最大断面宽度 38 m, 波谷值与断面宽度呈反比。

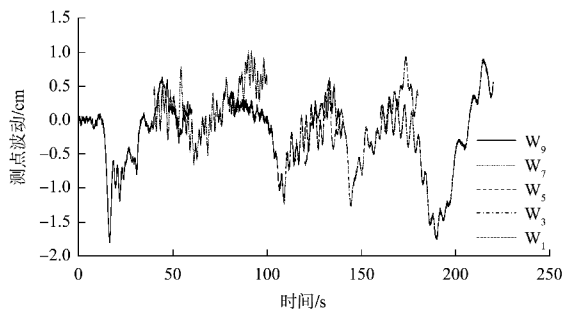
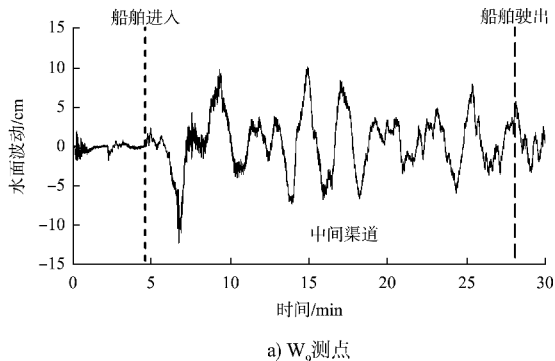


图4 波动传递过程线

### 3.2 船舶航行水面波动特性

对船舶 3 次上、下行通过中间渠道产生的水面波动进行观测, 以船舶上行的 1 个工况为例, 船舶从第二级升船机船厢驶入中间渠道, 直至进入第一级升船机船厢, 该过程  $W_9$  和  $W_1$  两个测点的波动过程线见图 5, 船舶航行引起的中间渠道各测点水面波动较明显, 主要波动周期为 120~160 s。统计 6 个航次各测点的最大波幅见表 2, 不同航次各测点波幅差异不大, 与船舶航行过程航速的变化等因素有关, 船速参见船舶航行特性; 同一航次沿程各测点的最大波幅特征明显, 中间渠道两端测点波动相对较大, 通航隧洞内波动次之, 船舶交汇区渡槽位置波动相对较小, 与上述波动的传播规律一致, 沿程波动变化规律与模型试验成果较吻合。总体上看, 船舶通航过程中水面波动不大, 对船舶航行富余水深和升船机运行无明显影响。



a)  $W_9$ 测点

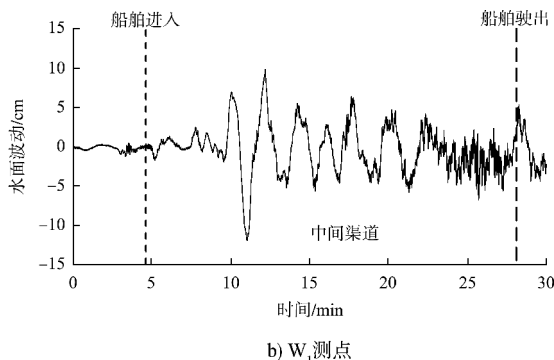


图5 典型测点波动过程线

表2 水面波动最大波幅

测点	水面最大波幅/cm					
	船舶上行			船舶下行		
	1	2	3	1	2	3
$W_1$	5.5	10.8	7.5	5.4	4.1	4.3
$W_2$	3.7	4.4	6.9	4.4	4.1	4.0
$W_3$	4.3	5.0	5.4	4.6	3.8	3.1
$W_4$	4.2	5.6	7.6	4.0	3.7	5.1
$W_5$	5.0	4.7	7.7	3.8	3.9	3.4
$W_6$	3.4	3.2	4.9	2.9	2.3	2.7
$W_7$	4.4	2.8	5.2	3.0	2.0	2.7
$W_8$	3.4	4.0	6.4	3.6	3.0	3.6
$W_9$	6.5	11.0	7.9	4.2	4.3	4.6

### 3.3 船舶航行特性

中间渠道(含通航隧洞)是典型的限制性航道, 断面尺度设计是关注的重点。本文通过设计代表性船舶实船试验进行验证, 重点考察船舶的航速与下沉量、操纵性及适航性能。“航电 1 号”标船 2 次上、下行通过中间渠道的航速与下沉量过程线见图 6, 可知船舶在中间渠道上、下行总的耗时接近, 约 23~24 min, 航速过程线也总体一致, 统计宽阔人工渡槽和通航隧洞两个主要航段的最大航速和平均航速见表 3, 船舶在人工渡槽航速最大达 1.4 ~ 2.0 m/s, 平均航速达 1.1~1.6 m/s(由于在交汇区减速停靠避让上行船舶, 导致第 2 次下行平均航速降低), 隧洞内航速略低, 最大航速达 1.0 ~ 1.3 m/s, 平均航速约 0.6~1.0 m/s, 总体上看, 船舶在中间渠道正常航行航速达标。在上行经过隧洞口时航速较低, 主要因为风的影响, 船舶从宽阔渡槽进入隧洞时并不顺利。



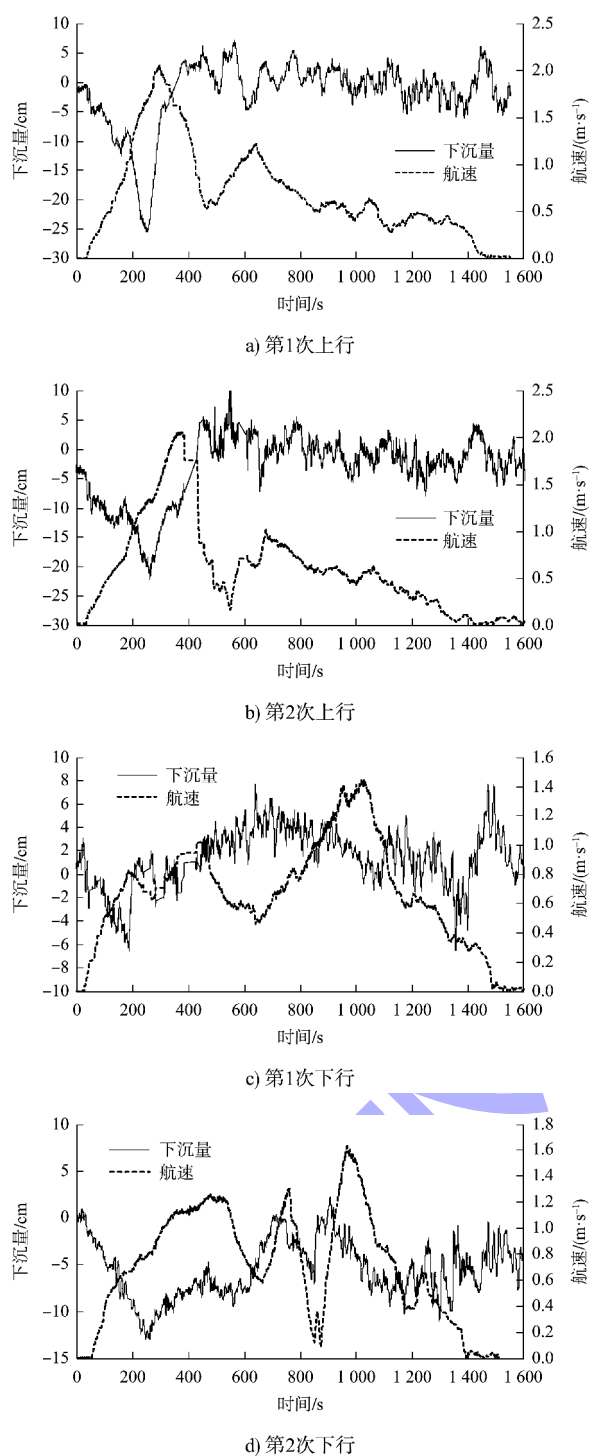


图6 船舶航速与下沉量过程线

表3 不同航段船舶航速

航次	船舶航速/(m·s <sup>-1</sup> )			
	渡槽内		隧洞内	
	最大值	平均值	最大值	平均值
1 上	2.05	1.55	1.22	0.73
2 上	2.06	1.57	1.02	0.58
1 下	1.44	1.16	1.02	0.73
2 下	1.63	0.95	1.30	0.99

船舶航行过程中下沉量主要发生于船舶驶出船厢阶段, 船厢断面系数(水域断面面积与船舶水面以下断面面积之比)仅约 1.7, 船舶出厢过程连续加速, 下沉量不断增大, 进入通航隧洞后, 断面系数增大至 3.7, 下沉量明显减小, 实测上、下行出厢阶段最大下沉量分别约为 25 和 13 cm, 在出厢后中间渠道内航行船舶下沉量约 10 cm 以内, 与水面波动基本一致。原型观测船舶在中间渠道内下沉量明显小于模型试验预测值(20~30 cm), 模型试验船舶为匀速航行, 与实际船舶航行有明显差异, 下沉量预测偏保守。若采用相同规模的升船机(思林、沙沱升船机)船舶出厢下沉量原型观测经验公式<sup>[10]</sup>预测, 中间渠道的最大下沉量约 7 cm, 与本文原型观测值较接近。在断面系数确定时, 最大下沉量与航速以及船舶的加速方式密切相关, 在船舶航速达到或超过设计要求的情况下, 船舶的航行下沉量总体较小, 对于 1.6 m 的设计最大容许吃水标船, 在 3~4 m 水深中间渠道内航行, 富余水深在 1~2 m 以上, 船舶无触底的风险, 航行浅水效应不明显, 隧洞断面设计总体合理。

### 3.4 其他影响因素

1) 隧洞有效宽度: 通航隧洞水域宽度为 16 m, 但水面以上两侧混凝土导墙之间的净宽仅约 11.7 m, 500 吨级代表性船舶宽度为 10.8 m, 再考虑船舶两侧防撞轮胎厚度, 船舶与导墙之间的距离非常小, 隧洞的有效宽度略显不足, 在实船试航中, 船首船尾频繁碰擦两侧导墙表面和凸出的半圆柱状防护结构, 不仅影响船舶的航行, 同时对导墙结构安全也产生不利影响。因此在隧洞总体宽度较大的情况下, 可适当增大两侧导墙之间的有效距离, 且在隧洞两侧导墙上布置柔性防护装置或滚动支承, 便于船舶平顺行驶。

2) 风的影响: 第一级中间渠道位置高程较大, 被誉为船在天上行, 在实船试验中发现, 大型人工渡槽位置风速较大, 船舶在渡槽中航行易被吹到一侧岸边, 船舶操纵受到明显影响, 且大型渡槽较宽, 而通航隧洞有效宽度较窄, 受风的影响, 船舶上行从大型渡槽驶入隧洞较困难, 船

舶在隧洞口基本处于低速状态进行船位方向调整,相对而言,船舶下行从通航隧洞驶入渡槽较为顺畅。为保障船舶顺利进入隧洞,建议在隧洞口外采取相关措施,减小风的影响。

#### 4 结论

1) 开展构皮滩通航设施第一级含通航隧洞中间渠道水力学观测与实船试验,中间渠道波动传播速度约 5.0~6.8 m/s,波幅与水面宽度成反比,中间渠道两端的水面波动最大,通航隧洞内次之,大型渡槽交汇区波动最小。

2) 船舶卧倒门启闭在中间渠道产生的波幅在 2 cm 内;船舶多次正常航行产生的波动时空分布规律基本一致,主要波动周期约为 120~160 s;中间渠道内水面波动对船舶航行富余水深影响不大。

3) 船舶在中间渠道正常航行航速达标,多次上、下行总的耗时接近;船舶最大下沉量发生于船舶出厢连续加速阶段,实测上、下行出厢最大下沉量分别约 25 和 13 cm,在中间渠道内航行船舶下沉量约 10 cm 以内,与水面波动基本一致,对于设计代表性船舶,中间渠道富余水深较大,通航隧洞断面设计总体合理。

#### 参考文献:

- [1] 吴德兴,周红升,郭洪雨,等. 富春江通航隧道建筑限界及内轮廓设计研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1182-1187.
- [2] 张弦,于青,熊立刚. 新安江水电站过坝通航设施方案研究[J]. 水力发电, 2021, 47(11): 41-44, 49.
- [3] 汤建宏,阚得静. 高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析[J]. 水运工程, 2017(7): 141-144.
- [4] 李焱,郑宝友,周华兴. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J]. 水道港口, 2012, 33(1): 45-50.
- [5] 邓斌,王孟飞,蒋昌波,等. 通航隧道内船行波传播特性及对船舶连续通航安全影响[J]. 科学通报, 2021, 66(9): 1101-1112.
- [6] 邓健,廖芳达,谢澄,等. 船舶操纵仿真的狭长通航隧洞航行安全研究[J]. 中国航海, 2021, 44(4): 7-12.
- [7] 汪瑞,黄立文,谢澄,等. 通航隧洞船舶尾气排放扩散数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(3): 580-585.
- [8] 干伟东,李延伟,乔华倩. 隧洞通航风险评价指标体系构建[J]. 船海工程, 2021, 50(1): 122-125.
- [9] 李中华,胡亚安,陈莹颖. 中间渠道交汇区尺度及船舶航行方式研究[J]. 水运工程, 2016(12): 142-147.
- [10] 周承芳,韩俊,王新. 乌江思林和沙沱升船机船舶超吃水可行性研究[J]. 水运工程, 2021(4): 91-96.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 71 页)

#### 参考文献:

- [1] 吴文浩. 长江下游河床形态初步分析[J]. 泥沙研究, 1990(3): 65-72.
- [2] 杨达源,赖莲英. 试论长江三峡河段深槽的成因[J]. 山地研究, 1992(3): 141-147.
- [3] 张丽萍,杨达源,朱大奎. 长江渝宜河段深槽分布特征及成因[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 311-316.
- [4] 杜德军,冯中华,夏云峰,等. 长江口南支深潭成因及其对过江通道布设影响研究[C]//第二届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 河海大学出版社, 2022: 332-338.
- [5] 李伯昌,施慧燕. 基于河势变化条件的张靖过江通道线位比选分析[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 1-6.
- [6] 胡鹏,张胡. 海太过江通道工程航道通航条件影响评价报告[R]. 武汉: 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 2021.
- [7] 夏云峰,闻云呈,徐华,等. 长江河口段水沙运动及河床演变[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 杜德军,闻云呈. 海太过江隧道工程河段河床演变分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.
- [9] 卢中一,高正荣,黄建维,等. 苏通长江公路大桥桥墩基础的局部冲刷[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 1300-1304.
- [10] 杜德军,夏云峰,闻云呈,等. 沪通长江大桥桥墩布设水动力特性试验研究[J]. 水道港口, 2016, 37(1): 12-17.
- [11] 夏云峰,徐华. 海太过江通道工程潮流泥沙河工模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2021.

(本文编辑 王传瑜)