



山溪性狭窄河段航运枢纽水流条件 优化试验研究*

叶建国¹, 王宇², 张文³, 郑星伟⁴, 范洪浩⁴, 赵建钧²

(1. 衢州衢通控股集团有限公司, 浙江 衢州 324003; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

3. 衢州市信安航运建设发展有限公司, 浙江 衢州 324000; 4. 衢州机场建设发展集团有限公司, 浙江 衢州 324003)

摘要: 钱塘江中上游常山江梯级黄塘桥枢纽位于山溪性河流狭窄河段, 其口门区及连接段水流条件复杂, 存在较为严重的横流、回流等不利流态, 难以满足通航要求; 山溪性窄河道上布设的低水头大泄量枢纽水流条件面临更大的考验和更小的优化空间。依托 1:80 整体物理模型试验, 分析枢纽泄流能力减小和下游航道不良水流条件的形成原因, 通过移动泄水闸位置及疏浚下游局部河道高程等工程措施, 有效增加枢纽泄流能力, 降低下游口门区纵、横向流速和回流流速, 大幅改善了下游引航道口门区及连接段通航水流条件, 确保过闸船舶的通行安全。

关键词: 船闸; 泄流能力; 通航水流条件; 模型试验

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0121-06

Experiment on navigable flow conditions of ship hubs in narrow sections of mountainous river

YE Jianguo¹, WANG Yu², ZHANG Wen³, ZHENG Xingwei⁴, FAN Honghao⁴, ZHAO Jianjun²

(1. Quzhou Qutong Holding Group Co., Ltd., Quzhou 324003, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Quzhou Xin'an Shipping Construction and Development Co., Ltd., Quzhou 324000, China;

4. Quzhou Airport Construction and Development Co., Ltd., Quzhou 324003, China)

Abstract: The Huangtangqiao Hydro-junction of Changshan River of upstream and the middle reaches of Qiantang River is located in the narrow section of the mountain stream. There are unfavorable flow regimes such as lateral-flow and backflow in the entrance area and the connecting section, making it difficult to meet the navigation requirements. The flow conditions of low-head and high-discharge junction set up on the narrow river channels of mountain streams face greater tests and have less optimized space. The causes of the reduction in discharge capacity and the adverse flow conditions of the downstream channel are analyzed by the 1:80 overall physical model test. On the basis of engineering measures such as moving the discharge lock and dredging the local downstream channel, the discharge capacity of the junction is effectively increased, the longitudinal flow, lateral flow and backflow velocity in the entrance area are reduced. Therefore, the navigable flow conditions in the entrance area and connection section of the downstream approach channel are greatly improved, which ensure the ships safety of passing through the ship lock.

Keywords: ship lock; discharge capacity; navigable flow condition; model experiment

通航水流条件在航运枢纽建设中是重要的评价指标, 洪水工况时能否排泄足量的洪水也是枢

纽建设的核心。广泛兴建的低水头通航枢纽工程在汛期泄洪时上下游水位差较小, 特别是对于山

收稿日期: 2025-06-05 录用日期: 2025-07-07

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52009083); 浙江省交通运输厅重大交通建设工程科研项目(2024-GCKY-05)

作者简介: 叶建国(1976—), 男, 高级工程师, 从事交通运输管理研究工作。

溪性狭窄河段，河床上下游之间地势差别大，枢纽通航建筑物挤占河道加剧了泄水闸布置难度，枢纽泄流能力和通航水流条件更加难以满足设计要求。

通航枢纽工程中，常见的改善过流能力的工程措施有：调整泄水闸孔数、调整泄水闸堰型和堰顶高程^[1-2]、航电分岸运行^[3]、调顺岸线^[4]等；常见的改善通航水流条件的措施有：调整隔流堤形式^[5-7]、局部地形开挖^[8-9]、优化航线^[10-11]等。狭窄河段因其自身特点及枢纽布置受限较多，通常泄流能力与通航水流条件的优化措施相辅相成。本文依托常山江梯级黄塘桥枢纽工程，通过 1:80 整体水工模型试验，对设计方案进行优化，提出满足枢纽泄流能力和通航水流条件的工程措施。研究成果可为改善黄塘桥枢纽水流条件提供技术支撑。

1 工程概况

黄塘桥航运枢纽作为钱塘江中上游常山江梯级开发的第 6 个梯级枢纽工程，位于衢州市柯城区。工程布置自西向东依次为：电站、泄洪闸和船闸，见图 1。枢纽船闸尺度为 180 m×23 m×4.5 m（长×宽×门槛水深），上、下游引航道均呈直线布置，上、下游引航道总长均为 320.0 m，引航道底宽均为 60.0 m，下游引航道底高程 55.1 m，航道等级Ⅲ级。泄洪闸顺水流方向依次布置上游段、闸室段、下游段，闸上游河道疏浚高程 58.00 m，闸室上游侧铺盖高程与河道疏浚高程相同；闸底板顶高程 58.50 m。泄洪闸共 16 孔，单孔净宽 14 m，总净宽 216 m；泄洪闸采用底流消能，闸室下游接消力池，消力池顺水流向总长 39 m。考虑梯级枢纽总体开发条件，黄塘桥枢纽最大通航流量为 1 000 m³/s，最大通航流量保证率 98.6%。

黄塘桥枢纽河段河道宽度约 200 m，枢纽的总体特点是：1) 电站向左岸堤突出，泄流总宽度相对较窄，影响泄流能力；2) 泄洪闸左岸房屋密集，布置受限；3) 下游引航道口门区附近河道狭窄，局部地形较高，通航水流条件受到制约。因此，需要进一步论证和优化泄流能力和通航水流条件，并提出改进措施。

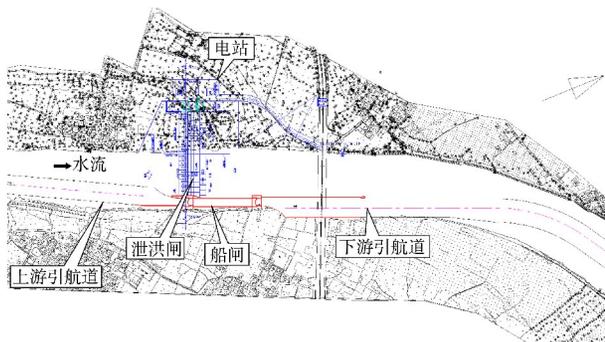


图 1 黄塘桥枢纽总体布置

Fig. 1 Overall layout of Huangtangqiao Junction

2 研究方法

2.1 模型制作与量测手段

模型采用弗劳德相似准则设计，综合考虑模型相似律、枢纽上下游地形条件和实验室场地等条件，将模型的几何比尺设定为 1:80 正态模型。黄塘桥枢纽上下游河道较为顺直，物理模型上边界布置于坝址上游 1 020 m 处；由于下游存在弯道，水流条件复杂，故物理模型下边界应考虑足够的水流调整长度，取至坝址下游 2 160 m 处。

地形制作采用断面法，平面放样采用三角网导线系统。模型高程用水准仪测定。枢纽采用塑料板制作，河道表面采用水泥砂浆制作。

沿程共布设 6 个水位测点，以坝轴线为零点，其测点位置分别为 -555.20 m (1[#])、-319.20 m (2[#])、-112.00 m (3[#])、218.40 m (4[#])、940.60 m (5[#])、1 526.30 m (6[#])（负号代表坝轴线上游）。制模后进行模型率定，施放 200 m³/s 流量观测沿程水位，并与原型观测的水位进行对比验证。率定试验结果表明，模型所得水位与原型水位较为接近，说明模型具有良好的模拟精度。流量采用标准矩形薄壁堰测定，误差小于 1%；水位采用水位测针测量，精度 0.02 mm。流速采用声学多普勒点式流速仪测量。

2.2 通航标准

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》（简称规范），船闸上下游引航道口门区及连接段的最大流速限制为：1) 引航道导航调顺段宜为静水；2) 引航道制动段和停泊段纵向流速小于 0.5 m/s，横向流速小于 0.15 m/s；3) 口门区纵向流速小于 2 m/s，

横向流速小于 0.3 m/s, 回流流速小于 0.4 m/s。

3 试验结果及优化措施讨论

3.1 设计方案

试验观测结果表明, 枢纽上游河道比降较小, 无明显跌流和局部壅高。受闸后局部地形的影响, 坝轴线下游 0~330 m 范围内存在明显的跌流; 坝轴线下游 330~700 m 范围内, 水面线缓慢降低。枢纽原布置泄流能力结果见表 1。可以看出, 各频率流水位壅高试验值明显大于设计值, 设计方案泄流能力不足。

表 1 枢纽设计方案泄流能力结果

Tab. 1 Discharge capacity of junction initial design scheme

频率/ %	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下游 水位/m	上游水位/m		水位壅高/m	
			设计值	试验值	设计值	试验值
1	8 050	69.62	69.80	69.90	0.18	0.28
2	7 380	69.11	69.26	69.42	0.15	0.31
5	6 470	68.41	68.57	68.83	0.16	0.36
10	5 900	67.77	67.89	68.10	0.12	0.33
20	5 090	66.92	67.07	67.08	0.15	0.16

泄流能力不足的原因是左区 1#~3# 闸孔过流流量明显偏小, 河道主流较为集中在泄洪闸右区及右区偏左的闸孔下泄。分析原因为: 1) 黄塘桥枢纽左侧伸入岸堤, 闸上岸坡影响使左区泄洪闸孔前易形成回流区, 影响泄洪闸左区过流能力, 这或许也是泄洪闸泄流能力与设计值有较大的差距的主要原因之一; 2) 下游河道束窄也可能是设计方案泄流能力不满足要求的重要原因, 船闸下游隔流堤束窄河道后, 坝下河道过水断面面积减小, 局部阻力增大, 河道过流能力降低, 从而使枢纽上、下游水位均将出现壅高; 3) 下游口门区河槽较窄, 水流流速增大, 局部产生跌流, 导致泄洪闸泄流能力下降。

设计方案流量 Q 为 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时下游引航道口门区及连接段流速分布见图 2。可以看出, 受下游口门区左侧局部漫滩影响, 在口门距 120~200 m 区间航道中心线左侧纵横向流速大于规范要求, 在口门距 40~160 m 区间回流流速大于规范要求, 需要采取工程措施调整口门区流态。

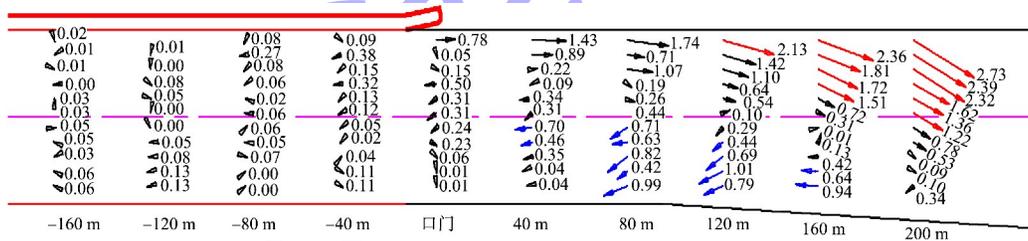


图 2 设计方案 $Q=1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时下游引航道流速分布 (单位: m/s)

Fig. 2 Velocity distribution of downstream approach channel for design scheme under a discharge of $1,000\text{ m}^3/\text{s}$ (unit: m/s)

3.2 优化方案 1

考虑到设计方案枢纽泄洪闸伸入左侧岸堤导致左区过流量不足, 将枢纽右移 50 m。调整后的上下游水位差见表 2。可以看出, 泄洪闸右移后上下游水位差明显减小, 与设计值相差较小, 泄流能力基本满足设计要求。各闸孔流量分配见图 3。可以看出, 右移后左岸的岸坡对 1#~3# 闸孔过流量的抑制明显减弱, 与设计方案相比 1#~3# 闸孔过流量明显增加。这也进一步说明了泄洪闸右移

对于泄流能力的改善作用, 右移 50 m 后对于左区凸入岸坡的泄洪闸闸孔的泄流能力有明显的积极作用。

受闸下左岸局部地形影响(高程为 58.3~58.8 m), 过闸水流受漫滩挤压沿漫滩与航道之间的河槽下泄并直冲下游引航道口门区, 另外口门区下游存在弯道, 斜向水流叠加弯道作用使主流流向与引航道中心线交角较大, 隔流堤下游口门区附近形成明显的斜流和回流, 流态见图 4。

表 2 优化方案 1 上下游水位差

Tab. 2 Water level difference between upstream and downstream for optimized layout 1

频率/%	设计值/m	设计方案试验值/m	优化方案 1 试验值/m
1	0.18	0.28	0.19
2	0.15	0.31	0.15
5	0.16	0.36	0.16
10	0.12	0.33	0.13
20	0.15	0.16	0.13

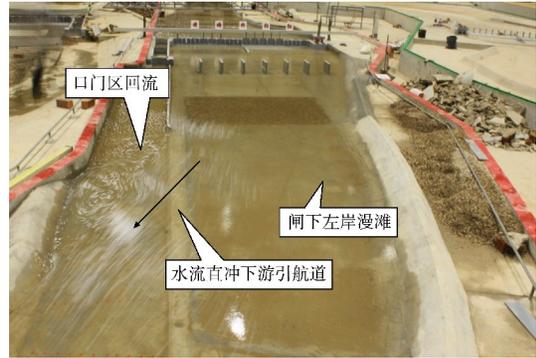


图 4 优化方案 1 流量为 1 000 m³/s 时水流流态
Fig. 4 Flow regimes for optimized layout 1 under a discharge of 1,000 m³/s

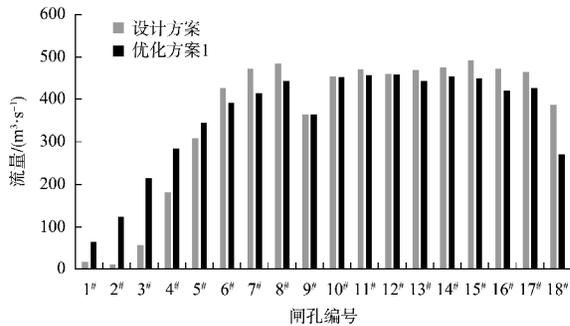


图 3 优化方案 1 频率为 5% 时各闸孔流量分配

Fig. 3 Discharge capacity distribution of each sluice hole for optimized layout 1 at a 5% frequency

观测数据表明： $Q \leq 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，下游引航道口门区及连接段纵横向流速及回流流速满足通航要求， $Q > 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时下游引航道口门距 80 m 范围内纵横向流速均满足通航要求，80~160 m 范围内形成了较为明显的回流，回流流速大于规范要求的 0.4 m/s；160~240 m 范围内航道中心线左侧范围横向流速大于规范要求的 0.3 m/s，口门区水流条件不满足通航要求，见图 5。因此，需要进一步采取工程措施改善口门区附近的流态，以降低口门区横向流速。

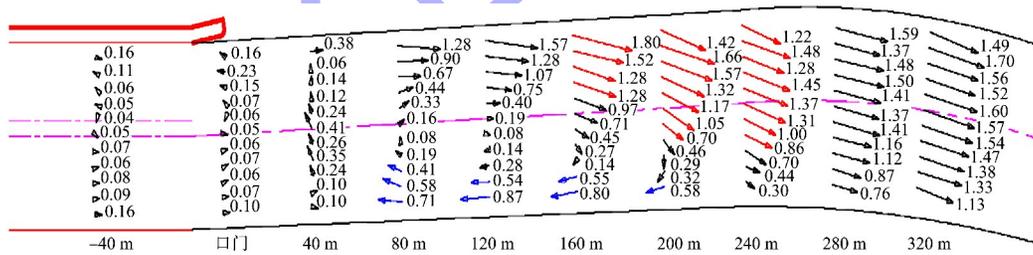


图 5 优化方案 1 流量为 1 000 m³/s 时下游引航道流速分布 (单位: m/s)

Fig. 5 Velocity distribution of downstream approach channel for optimized layout 1 under a discharge of 1,000 m³/s (unit: m/s)

3.3 优化方案 2

此外，由于下游口门区河道狭窄且左侧存在河漫滩，采用局部河道疏浚的工程措施，扩大河道过流断面，分散下泄水流，使口门区附近主流向左岸扩散。疏浚范围为坝轴线下游 420~860 m 区间，河道疏浚高程至 56 m，左侧与原堤防连接，右侧与航道衔接，以 1:4 的坡比过渡，疏浚区上下边界采用 1:30 的坡比与原河道地形衔接，优化方案 2 见图 6。

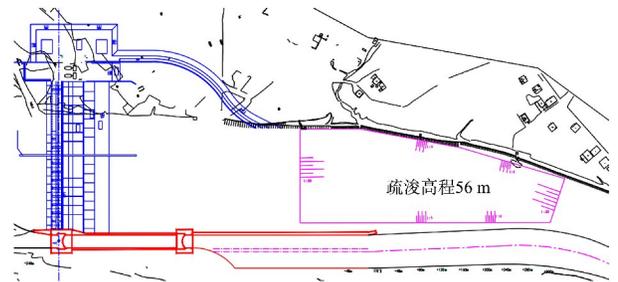


图 6 优化方案 2 调整

Fig. 6 Adjustment of optimized layout 2

流态观测表明, 疏浚后过闸主流扩散更加充分, 航道区的流速更加均匀, 斜向水流明显减弱, 回流基本消除。 $Q=1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时下游口门区及连接段流速分布见图 7。可以看出, 口门下游 320 m

范围最大流速 1.19 m/s, 较优化方案 1 下降了约 40%, 最大回流流速 0.33 m/s; 口门下游 240 m 附近航道左侧边缘最大横向流速 0.38 m/s, 略有超标, 其他区域位置的横向流速均小于 0.30 m/s。

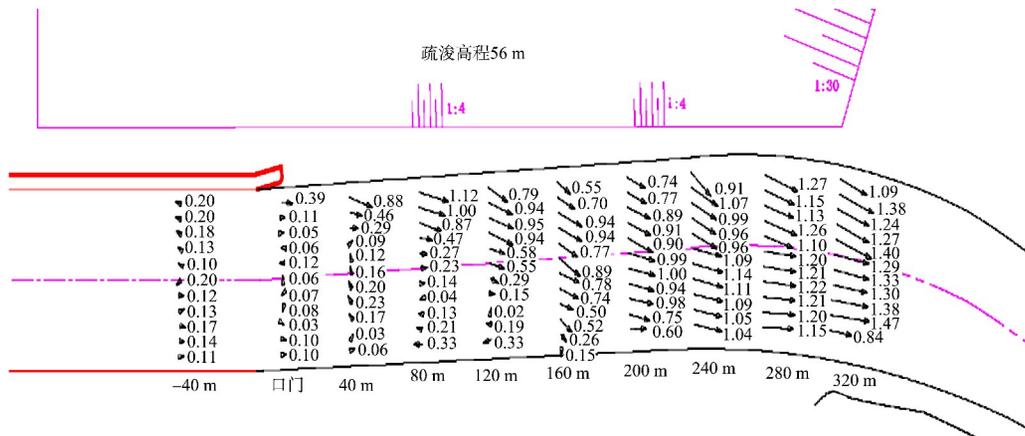


图 7 优化方案 2 流量为 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时下游引航道流速分布 (单位: m/s)

Fig. 7 Velocity distribution of downstream approach channel for optimized layout 2 under a discharge of $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ (unit: m/s)

优化方案 2 下游引航道各流量级典型流速值见表 3。可以看出, $600\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下下游引航道口门区流速满足通航要求, $800\sim 1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 下游引航道口门区纵向流速和回流流速满足通航要求, 横向流速在口门下游 240 m 附近航道左岸略有超标, 最大横向流速 0.38 m/s, 影响较小, 因此优化方案 2 的水流条件基本满足通航要求。

表 3 优化方案 2 下游引航道各流量级典型流速

Tab. 3 Velocity data of each flow level of downstream approach channel for optimized layout 2

流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大纵向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大回流流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
200	0.22	0.38	0.09
400	0.27	0.63	0.17
600	0.28	0.99	0.27
800	总体 0.22, 局部 0.36	1.08	0.30
1 000	总体 0.25, 局部 0.38	1.40	0.33

综上, 针对山溪性窄河道布置的航运枢纽, 面临泄流能力不足及水流条件不满足通航要求时, 通过泄洪闸移动增加部分闸孔泄量, 结合整治河道滩地, 可满足枢纽泄流能力与引航道通航水流条件。

4 结论

1) 黄塘桥枢纽河段河宽约 200 m, 单宽最大过流量 $40\ \text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$, 且泄洪闸左侧伸入岸堤, 下游口门区位置河道更为狭窄, 满足过流能力和通航要求的条件较为苛刻。

2) 通过泄洪闸右移、下游狭窄处疏浚等措施, 显著增加了枢纽过流能力并改善通航水流条件。试验结果表明, 原设计方案泄流能力因左侧 3 个闸孔过流量较少, 与设计值差距较大; 受下游河道漫滩影响, 下游引航道口门区流速不满足通航要求。通过泄洪闸右移, 泄流能力和通航水流条件均有改善, 泄流能力比设计值相比超泄约 2%; 口门区横向流速和回流流速不满足通航水流条件。再通过合理的河道漫滩疏浚, 在最大通航流量 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 下, 下游引航道口门区及连接段流速指标满足规范要求。对于山溪性狭窄河道, 合理的下游疏浚等工程措施可作为山溪性窄河道优化过流能力和通航水流条件的重要措施, 为类似设计和研究提供参考。

参考文献:

- [1] 李金合, 曹玉芬, 周华兴. 那吉航运枢纽泄流能力和闸下冲刷试验[J]. 水道港口, 2002, 23(3): 116-121.
LI J H, CAO Y F, ZHOU H X. Test on discharging capacity and downstream scour of Naji Hydro-junction[J]. Journal of waterway and harbor, 2002, 23(3): 116-121.
- [2] 李金合, 杜仲凯, 章日红. 松花江大顶子山航电枢纽泄流能力试验研究[J]. 水道港口, 2006, 27(3): 170-174.
LI J H, DU Z K, ZHANG R H. Test on discharge capacity of Dadingzishan Hydro-junction of Songhuajiang River [J]. Journal of waterway and harbor, 2006, 27(3): 170-174.
- [3] 张绪进, 樊卫平, 张厚强. 低闸枢纽泄流能力研究[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1246-1251.
ZHANG X J, FAN W P, ZHANG H Q. Discharge capacity of low head sluice [J]. Journal of hydraulic engineering, 2005, 36(10): 1246-1251.
- [4] 杨宇, 李艳富, 韩昌海, 等. 贵州清水江城水电站通航水流条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2016(12): 126-131.
YANG Y, LI Y F, HAN C H. Experimental study on navigation flow condition of Chengjing hydro-power station in Guizhou Qingshui River[J]. Port & waterway engineering, 2016(12): 126-131.
- [5] 颜志庆, 赵建钧, 辜晋德, 等. “S”形急弯河段通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(6): 128-134.
YAN Z Q, ZHAO J J, GU J D, et al. Study on navigable flow conditions of S-shaped abrupt bend [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 128-134.
- [6] 周勤, 谢灵运, 马倩, 等. 古顶水利枢纽二线船闸下引航道布置物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2019(6): 105-110, 116.
ZHOU Q, XIE L Y, MA Q, et al. Experimental study on physical model of lower approach channel layout of Guding water conservancy hub second-line ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2019(6): 105-110, 116.
- [7] 邱颂曦, 刘达, 刘中峰. 剑潭水利枢纽船闸改扩建工程下引航道通航水流条件试验研究[J]. 广东水利水电, 2019(7): 11-16.
QIU S X, LIU D, LIU Z F. Experimental research on navigable flow condition of the lower approach channel of the ship lock reconstruction and expansion project of the Jiantan Hydro-junction[J]. Guangdong water resources and hydropower, 2019(7): 11-16.
- [8] 孙爱萍, 余春辉, 颜志庆, 等. 山溪性弯道河段船闸通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2023(1): 97-102, 142.
SU A P, YU C H, YAN Z Q, et al. Navigable flow conditions of ship lock in bend section of mountainous river[J]. Port & waterway engineering, 2023(1): 97-102, 142.
- [9] 韩康, 余凯文, 赵建钧, 等. 常山江阁底枢纽通航水流条件及方案优化试验研究[J]. 水运工程, 2021(8): 139-144.
HAN K, YU K W, ZHAO J J, et al. Experimental study on navigation flow condition and scheme optimization of Gedi junction in Changshan River[J]. Port & waterway engineering, 2021(8): 139-144.
- [10] 施得兵, 李宁, 焦婷丽. 碾盘山水利枢纽泄水闸泄流能力模型试验研究[J]. 水电与新能源, 2021, 35(2): 15-16, 71.
SHI D B, LI N, JIAO T L. Model Test study on the discharge capacity of sluice gates in Nianpanshan water conservancy project [J]. Hydropower and new energy, 2021, 35(2): 15-16, 71.
- [11] 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.
ZHU W G, HE Z J. Model test of flow condition at entrance area of approach channel in Datengxia water conservancy project [J]. Port & waterway engineering, 2017(9): 137-143.

(本文编辑 王璁)