



湘江湘祁枢纽船闸下游引航道口门区 通航水流条件影响及对策

段元振¹, 邹开明^{1,2}

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;

2. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 湘江湘祁枢纽二线船闸是在已有建筑物岸侧增建的二线船闸, 造成二线船闸引航道与主航道曲线连接。因一线船闸引航道的限制, 且一线船闸与二线船闸轴距较短, 使得拟建二线船闸上下游口门区及连接段通航水流条件较为复杂。因此, 依托湘祁枢纽二线船闸扩建工程, 采用1:100定床水流物理模型试验, 分析双线船闸下游引航道口门区通航水流条件。对泄水闸开启方式优化、二线船闸下游引航道隔水堤优化、电站下游右岸大堤优化、电站出流口下游河道局部疏浚等系列措施开展试验研究, 提出了改善通航水流条件的优化措施。

关键词: 口门区; 水流条件; 模型试验; 二线船闸

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0116-06

Influence of navigable flow conditions and countermeasures at entrance area of downstream approach channel of ship lock in Xiangqi Junction on the Xiangjiang River

DUAN Yuan-zhen¹, ZOU Kai-ming^{1,2}

(1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The second-line ship lock of the Xiangqi Junction on the Xiangjiang River is an additional second-line ship lock on the shore of existing buildings, resulting in a curved connection between the approach channel of the second-line ship lock and the main channel. Due to the limitation of the approach channel of the first-line ship lock and the short wheelbase between the first-line ship lock and the second-line ship lock, the navigable flow conditions in the upstream and downstream entrance areas and connecting sections of the proposed second-line ship lock are relatively complicated. Therefore, relying on the expansion project of the second-line ship lock of the Xiangqi Junction, we conduct a 1:100 fixed-bed physical model test on flow to analyze the navigable flow conditions at the entrance area of the downstream approach channel of ship locks. A series of experimental studies are carried out on the optimization of the opening method of the sluice lock, the optimization of the dike of the downstream approach channel of the second-line ship lock, the optimization of the embankment on the right bank downstream of the power station, and the local dredging of the river channel downstream of the outlet of the power station. Moreover, optimization measures are proposed to improve the navigable flow conditions.

Keywords: entrance area; flow conditions; model test; second-line ship lock

船闸引航道口门区通航水流条件是影响船舶安全进出船闸的重要影响因素, 也是通航枢纽规

划布置需考虑的关键问题^[1-3], 《船闸总体设计规范》对引航道口门区纵向、横向、回流流速做出了

具体规定。但是, 在自然河道中修建的通航建筑物往往会在口门区出现复杂的不良流态^[4-7]。国内外学者针对碍航流态, 在不同的工程中提出了诸多改善措施, 主要包括布置潜坝、口门区挖槽、优化导航墙布置、平顺岸线、调整引航道长度、优化航线等^[8-15]。这些优化方案有效改善了口门区通航水流条件, 也为后续工程提供了借鉴意义。

根据湘江水运发展需求, 拟通过扩建二线船闸提高湘祁船闸上水过坝运量, 扩建船闸位于原

有一线船闸左侧, 级别为Ⅲ级, 二线船闸与一线船闸分设引航道, 上游引航直线进闸、曲线出闸, 下游引航曲线进闸、直线出闸, 见图1。上游导航墙顺水流方向长73 m、隔流墙长240 m。下游引航道轴线与船闸轴线平行, 导航调顺段长130 m; 停泊段长180 m, 停靠一闸次船舶; 直线制动段长86 m; 连接段弯曲航道岸边线弧长131 m、半径500 m; 连接段直线航道与主航道平顺连接, 与船闸轴线的夹角15°。

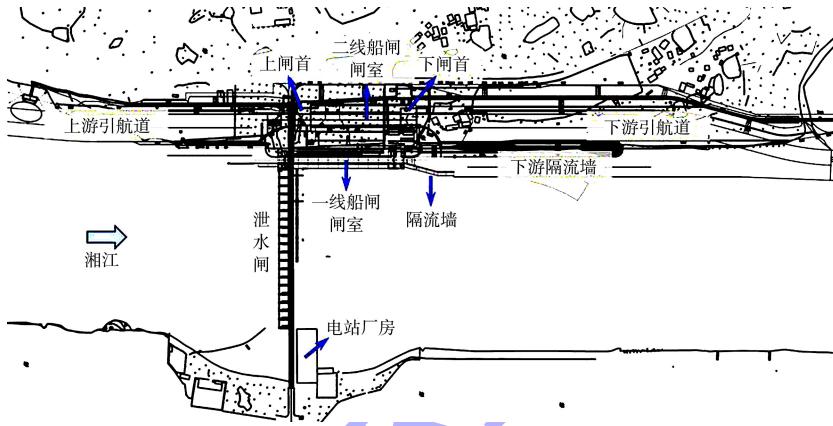


图1 湘江湘祁枢纽二线船闸平面布置

鉴于该工程是在湘祁枢纽一线船闸的基础上, 在已有建筑物岸侧增建二线船闸, 造成二线船闸引航道与主航道曲线连接。因一线船闸引航道的限制, 且一线船闸与二线船闸轴距仅为80 m, 使得拟建二线船闸上下游口门区及连接段附近通航水流条件相对较为复杂, 造成横向流速和回流流速超出规范要求, 形成碍航水流。根据试验结果分析, 相对上游引航道, 下游引航道口门区水流条件更难满足通航要求。因此, 本文依托湘祁枢纽二线船闸扩建工程, 采用定床水流物理模型试验, 研究二线船闸下游引航道口门区通航水流条件, 提出优化方案并分析改善效果, 为类似工程设计提供参考。

1 模型设计

本研究主要讨论二线船闸下游引航道口门区

及其连接段的通航水流条件, 为了使模型能真实准确地反映河道的水流状态, 必须保证河道模型与原型的水力相似。基于1:5 000实测地形图, 根据几何相似、水流运动相似、动力相似及阻力相似准则, 采用1:100正态比尺制作模型, 入口位于坝址上游1.0 km、出口位于下游1.8 km处、宽度取整个河道宽度。制模平面采用三角形导线网控制: 模型地形采用断面控制法, 模型断面间距为50~100 cm, 特殊地形采用等高线法控制。模型采用水泥砂浆制作, 糙率为0.012~0.014, 通过抹光或抹面的方式调节糙率, 使模型糙率与实际情况相似。

模型建成后, 主要观测中水($Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$)和枯水($Q=975\text{ m}^3/\text{s}$)情况, 根据观测结果, 针对水面线和流速分布进行了验证, 验证水尺断面位置见图2。验证结果表明: 模型中、枯水的水面线与原型水文测验结果误差绝对值不大于0.050 m

(表 1), 中、枯流量水位验证结果满足规定的误差要求; 对于中、枯水大断面流速, 模型与原型流速偏差不大于 10%, 流场相似度较高(图 3)。验证试验表明模型与原型水面线基本一致, 流速分布吻合较好, 符合定床河工模型的技术规范要求, 物理模型可作为湘祁枢纽扩建二线船闸整体定床物理模型试验的基础。

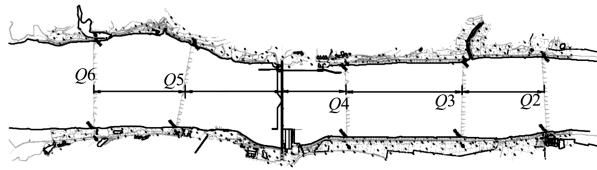


图 2 验证水尺及测流断面位置

表 1 水位验证结果

流量	水尺编号	水位/m		
		原型实测值	模型试验值	差值
枯水 $Q=975 \text{ m}^3/\text{s}$	Q6	75.70	75.68	0.02
	Q5	75.70	75.68	0.02
	Q4	67.57	67.62	-0.05
	Q3	67.49	67.50	-0.01
	Q2	67.46	67.43	0.03
中水 $Q=6000 \text{ m}^3/\text{s}$	Q6	72.93	72.98	-0.05
	Q5	72.93	72.87	0.05
	Q4	72.20	72.25	-0.05
	Q3	72.19	72.21	-0.02
	Q2	72.16	72.16	0.01

表 2 模型试验研究工况设置

工况	上游来流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	枢纽调度方式	坝前水位/m	尾门水位/m	备注
1	265	电站发电, 泄水闸关闭	75.50	65.20	下游最低通航水位对应流量
2	1 000	电站发电, 泄水闸关闭	75.50	67.30	-
3	1 400	电站满发, 泄水闸关闭	75.50	67.91	机组满发
4	2 500	电站满发, 泄水闸 3#、5#、7#孔开度 2.5 m	74.52	69.18	-
5	6 000	电站发电, 泄水闸 1#~7#孔开度 4.5 m	75.00	72.00	-
6	8 000	电站关闭, 泄水闸 1#~7#孔全开, 8#~19#孔开启	74.38	73.33	2 a —遇洪水
7	9 200	电站关闭, 泄水闸 1#~7#孔全开, 8#~19#孔开启	74.80	74.10	3 a —遇洪水
8	10 400	电站关闭, 泄水闸 1#~7#孔全开, 8#~19#孔开启	75.05	74.83	5 a —遇洪水
9	12 000	电站关闭, 泄水闸 1#~19#孔全开	75.82	75.77	10 a —遇洪水

2 常规开闸方式对通航水流条件的影响

为了解船闸引航道口门区通航水流条件, 对船闸上、下游引航道口门区的流场进行了观察和测量, 根据试验结果提取出二线船闸下游引航道

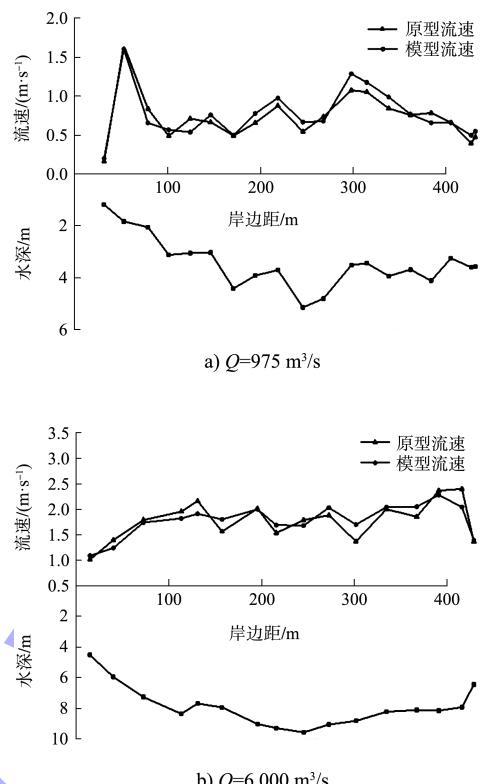


图 3 Q3 断面流速分布验证结果

为准确得到各级流量的水流特性和通航水流条件, 针对设计方案和优化方案, 根据水文资料, 结合湘祁水电站水库汛期运行控制方案, 拟定了试验流量工况, 见表 2。

口门区通航水流条件特征值, 见表 3。试验表明, 实施二线船闸工程后, 针对下游引航道口门区通航水流条件存在两种结果: 1) 上游来流流量为 $Q=265 \text{ m}^3/\text{s}$ 、3 a —遇 $Q=9200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、5 a —

遇 $Q=10\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 、10 a一遇 $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 引航道口门区纵向、横向、回流流速均满足规范要求; 2) 上游来流流量 Q 为1 000、1 400、2 500、6 000、8 000 m^3/s 时, 在下游隔水堤端一定区域内, 横向流速和回流流速超过规范要求, 不满足通航水流条件。综上所述, 在常规开闸方式条件下, 根据枢纽调度方式, 选取来流流量 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 作为最不利通航流量进行下游引航道口门区优化措施研究, 该工况下枢纽流速分布见图4。

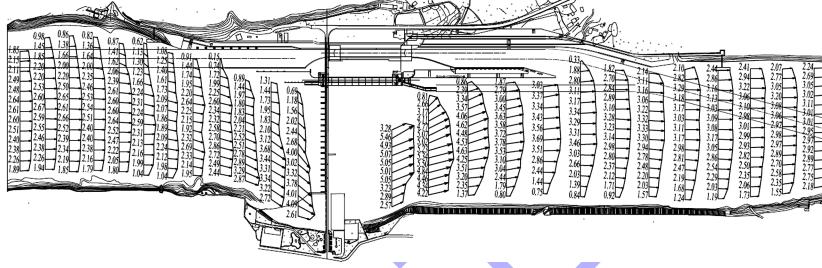


图4 来流流量 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时湘祁枢纽流速分布结果(单位: m/s)

3 下游引航道口门区通航水流条件影响因素及优化措施

3.1 泄水闸开启方式优化

根据前述试验结果, 对来流流量 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时泄水闸开启方式进行优化, 优化措施见表4。

表4 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时泄水闸开启方式优化措施

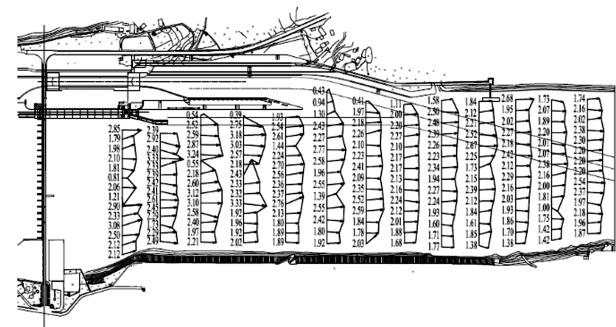
开启方式	优化措施
原泄水闸开启方式	电站发电, 泄水闸1#~7#孔开度4.5 m
优化后的泄水闸开启方式	优化方式1: 电站发电, 泄水闸1#~7#孔、13#~19#孔开启2.8 m 优化方式2: 电站发电, 泄水闸1#~19#孔均匀开启2.0 m

为了解泄水闸开启方式优化后船闸下游引航道连接段通航水流条件, 对船闸下游引航道连接段的流场进行了观察和测量, 试验结果见图5。表5给出泄水闸开启方式优化前后二线船闸下游引航道口门区通航水流条件变化情况。在 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 其他条件保持不变, 泄水闸开启方式优化后, 可以看出: 1) 右岸泄水闸(1#~7#)开启时, 适当开启左岸泄水闸(13#~19#), 对减小二线船闸下游引航道口门区横流、回流是有利的; 2) 均匀开启全部泄水闸(1#~19#), 减小了下游引航道口门区及

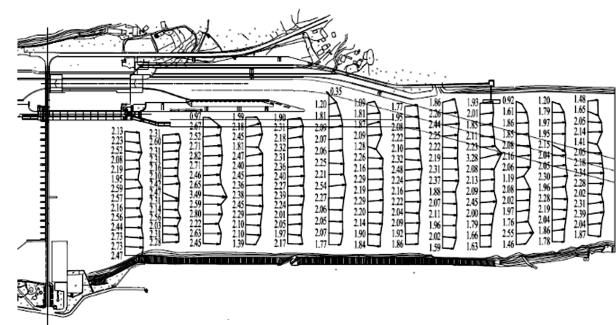
表3 二线船闸下游引航道口门区通航水流条件特征值

工况	上游来流/ (m^3/s)	二线船闸下游引航道			备注
		最大纵向流速	最大横向流速	最大回流流速	
1	265	0.14	0.06	-	下游最低通航水位 对应流量
2	1 000	0.52	0.21	0.60	-
3	1 400	1.12	0.38	0.63	机组满发
4	2 500	0.82	0.10	0.70	-
5	6 000	1.39	0.79	0.60	-
6	8 000	0.13	0.61	1.13	2 a一遇洪水
7	9 200	0.24	0.19	0.31	3 a一遇洪水
8	10 400	0.53	0.25	0.30	5 a一遇洪水
9	12 000	1.20	0.23	0.38	10 a一遇洪水

连接段横向流速, 对二线船闸下游引航道口门区通航水流条件有利。



a) 优化方式1



b) 优化方式2

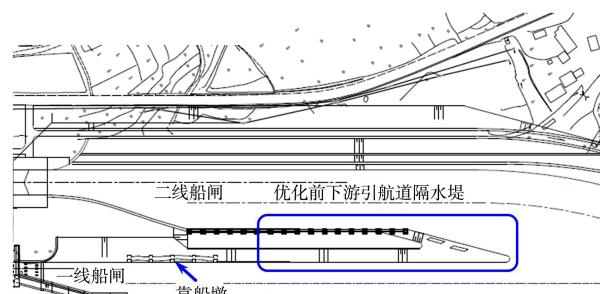
图5 泄水闸开启方式优化后枢纽下游流速分布(单位: m/s)

表 5 泄水闸开启方式优化前后通航水流条件对比

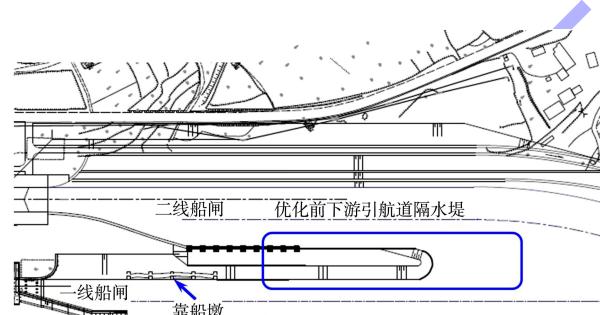
优化前后	最大流速/(m·s ⁻¹)		
	纵向	横向	回流
优化前	1.39	0.79	0.60
优化方式 1	0.46	0.02	0.33
优化方式 2	0.28	0.28	0.31

3.2 二线船闸下游引航道隔水堤优化

根据前述试验结果,为调整下游引航道口门区流速分布特征,考虑对下游引航道隔水堤进行优化,优化方案见图 6。



a) 原设计方案



b) 优化设计方案

图 6 二线船闸下游引航道隔水堤优化方案

为了解二线船闸下游引航道隔水堤优化对下游引航道口门区及连接段水流条件的影响,对下游流场进行了观察和测量,试验结果表明:

1)从总体上看,二线船闸下游引航道隔水堤优化后,对整个河道水流影响较小,对下游引航道连接段河流主流与航道中心线的夹角、连接段内的横向流速影响较小,仅对二线船闸下游引航道口门区流速产生影响。

2)对于二线船闸下游引航道口门区,当上游来流较小时,二线船闸下游引航道隔水堤长度减少对减小回流有利;但当上游来流大于 $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以后,二线船闸下游引航道隔水堤长度的减少对

整个河道水流影响很小,但是会引起口门区回流流速的增大,平均增大 20%左右。

3)二线船闸下游引航道隔水堤长度减少,导致一线船闸下游引航道口门区横向流速有所减小,平均降幅达 10%;同时引起了回流流速的增大,平均增大 55%左右。

综合考虑,不建议优化下游隔水堤。

3.3 电站出流口下游河道局部疏浚

电站下游右岸大堤优化后,虽然引航道口门区水流条件有所改善,但是电站下泄水流仍然冲向引航道。考虑到将下游右岸大堤后移实施难度较大,提出局部疏浚电站出流口附近下游河道右岸的方案(图 7),将河底高程 65~66 m 的地形疏浚至 64 m,与周围左岸高程接近,根据地形图估计疏浚量约为 13600 m^3 。

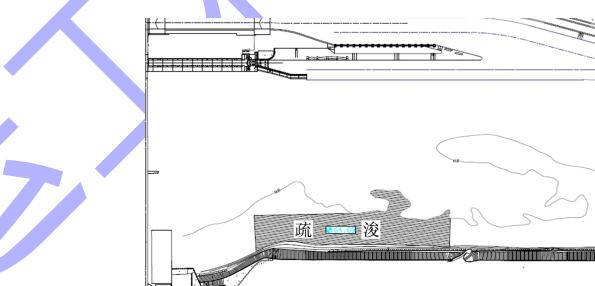


图 7 电站下游出流口河道疏浚方案

为了解电站出流口下游河道局部疏浚对下游引航道口门区及连接段水流条件的影响,对下游流场进行了观察和测量,结果表明:

1)局部疏浚二线船闸下游引航道口门区、电站出流口下游河道后,口门区的纵向、横向、回流均有所减小。在电站满发、泄水闸关闭情况下,二线船闸下游引航道口门区的纵向流速减小 87%、横向流速减小 65%、回流流速减小 56%;在电站发电、泄水闸 3#、5#、7#孔开度 2.5 m 情况下,口门区的纵向流速减小 27%、横向流速减小 24%、回流流速减小 39%。

2)局部疏浚一线船闸下游引航道口门区、电站出流口下游河道后,在电站满发、泄水闸关闭情况下,口门区的纵向流速减小 90%、横向流速减小 65%,但是造成了回流的产生,回流流速达 0.5 m/s ,不满足规范要求。

3) 对下游引航道连接段河流主流与航道中心线的夹角影响较小, 但是减少了连接段内的横向流速, 在电站满发泄水闸关闭情况下, 减少幅度达50%左右。

3.4 综合优化调整方案

综合前述试验结果, 考虑电站下游疏浚和泄水闸开启方式优化等措施, 针对上游来流流量 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 通过综合优化的措施进行试验。为了解船闸引航道连接段通航水流条件, 对船闸上、下游引航道连接段的流场进行了观察和测量, 结果见图8, 此时, 下游引航道口门区纵向、横向、回流流速均满足规范要求。

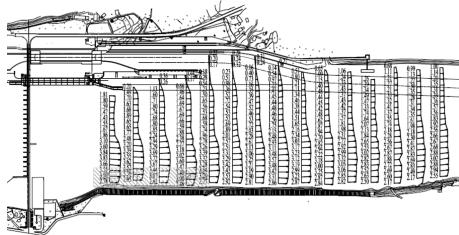


图8 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时综合优化方案条件下
枢纽下游流速分布 (单位: m/s)

对比二线船闸实施后一线船闸口门区水流条件与原一线船闸下游引航道口门区水流条件, 得到结论: 1) 在流量 $2\,500\sim6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 下游引航道口门区会产生超过规范的回流; 原一线船闸在流量大于 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时口门区最大横流大于 $0.30\text{ m}/\text{s}$, 不能正常通航。因此扩建二线船闸对原一线船闸不产生恶化。2) 在流量为 $2\text{ a}\sim8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 情况下, 纵向流速大于 $2.0\text{ m}/\text{s}$, 超过规范限值, 无法通航。因此扩建二线船闸, 不影响一线船闸正常通航。

4 结论

1) 在常规开闸方式条件下, 上游来流流量 Q 为 $1\,000\text{、}1\,400\text{、}2\,500\text{、}6\,000\text{、}8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 在下游隔水堤一定区域内, 横向流速和回流流速超过规范要求, 不满足通航水流条件。为改善口门区水流条件, 须优化方案。

2) 二线船闸下游引航道口门区的水流受枢纽

运行方式影响较大。试验结果表明右岸泄水闸($1^\# \sim 7^\#$)开启时, 适当开启左岸泄水闸($13^\# \sim 19^\#$), 对减小二线船闸下游引航道口门区横流、回流有利; 均匀开启全部泄水闸($1^\# \sim 19^\#$), 减小了下游引航道口门区及连接段横向流速, 对二线船闸下游引航道口门区通航水流条件有利。

3) 通过优化泄水闸开启方式、二线船闸下游引航道隔水堤、电站下游右岸大堤, 局部疏浚电站出流口下游河道等一系列措施的试验研究, 提出了综合电站下游疏浚和泄水闸开启方式优化措施, 使下游引航道口门区通航水流条件满足规范要求。按照优化方案扩建二线船闸, 没有恶化原一线船闸通航条件。

参考文献:

- [1] 祁永升, 许光祥, 许锡宾, 等.湘江近尾洲二线船闸下游引航道口门区通航水流条件改善措施[J].水运工程, 2021(3): 126-131.
- [2] 伍志元, 蒋昌波, 陈杰, 等.泄水闸开启方式对通航水流条件的影响[J].水利水电科技进展, 2016, 36(03): 73-77, 82.
- [3] 刘剑明, 王新, 黄群, 等.景洪升船机下游引航道口门区通航水流条件观测研究[J].水运工程, 2021(1): 6-11, 16.
- [4] 胡亚安, 安建峰, 赵建钧, 等.向家坝升船机下游引航道口门区水力波动特性原型观测[J].水运工程, 2020(12): 22-26.
- [5] 徐艳亮, 王志鹏.赣江井冈山航电枢纽总体布置[J].水运工程, 2020(12): 172-177, 190.
- [6] 李艳, 张绪进, 刘洋, 等.韩江南溪新建船闸通航水流条件试验研究[J].水道港口, 2020, 41(5): 585-589, 618.
- [7] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬, 等.山秀船闸扩能工程上游引航道口门区方案优化研究[J].水道港口, 2020, 41(4): 448-453.
- [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.
- [9] 王建平, 陈奕芬, 邢方亮, 等.浮石船闸改扩建工程上游引航道口门区方案优化研究[J].人民珠江, 2017, 38(12): 82-85.