



东江龙潭水电枢纽船闸整改工程 通航水流条件及改善措施

陈 建¹, 张会杰¹, 汪 越¹, 宫鹏杰²

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046;
2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

摘要: 针对龙潭水电站引航道区域不利水流影响船舶进出安全问题, 为改善上、下游引航道及口门区的流速, 进行了优化上、下游引航道导航墙延长方案的研究。建立龙潭水电站船闸整改物理模型, 研究运行过程中的各个典型工况。得出结论: 1) 上游河道来流量大于 $1\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 、闸门全开泄洪时, 上游引航道口门区水流条件仍不能满足规范要求。2) 下游引航道将主导航墙由透水改为不透水后, 引航道及口门区水流条件可满足规范要求的结果。

关键词: 船闸; 引航道; 口门区; 导航墙

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0114-06

Navigational flow conditions of ship lock rectification project for Longtan hydropower project on East River and improvement measures

CHEN Jian¹, ZHANG Hui-jie¹, WANG Yue¹, GONG Peng-jie²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The unfavorable water flow in the approach channel area of the Longtan hydropower station affects the access safety of ships. To improve the flow velocity of the upstream and downstream approach channels and the entrance area, this study optimizes the extension scheme of the navigation wall of the upstream and downstream approach channels. Specifically, we build a physical ship-lock rectification model of the Longtan hydropower station to study each typical working condition in the operation process. The following conclusions are drawn: 1) When the flow rate of the upstream river channel is greater than $1\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$, and the ship lock is fully opened, the water flow conditions in the entrance area of the upstream approach channel still cannot meet the requirements of the specification. 2) After the downstream approach channel changes the main navigation wall from permeable to impermeable, the flow conditions of the approach channel and the entrance area can meet the requirements of the specification.

Keywords: ship lock; approach channel; entrance area; navigation wall

船闸引航道区域含有斜向水流、回流等不利流态, 影响着船舶进出安全^[1-2]。为保障航行安全、通畅, 其影响程度不能超出船舶正常操作的

有效控制范围^[3-5]。国内外学者针对不同的工程提出了布置潜坝、口门区挖槽、优化导航墙布置、平顺岸线、调整引航道长度、优化航线等方

收稿日期: 2022-03-21

作者简介: 陈建(1979—), 男, 博士, 副教授, 从事河流水沙水环境数值模拟研究、航道规划论证方面的教学及科研。

案改善口门区水流条件^[6-8]。已有研究较多对下游引航道进行优化^[9-10], 对上下游引航道同时优化的研究较少。龙川县龙潭水电站于 2005 年 1 月开工建设, 2007 年 8 月蓄水发电, 但水电站船闸至今仍未建成通航。为使其达到通航要求, 对上下游引航道导航墙同时进行延长, 并且下游导航墙延长部分采用透水式, 寻找最优导航墙布置方案。

龙潭水电站上游实心主导航墙现状顶高程为 91.50 m, 长 67.4 m, 走向与船闸中心线平行, 与坝轴线成 90°交角, 本次船闸整改方案将上游

现有实心主导航墙延长至 81 m, 实心主导航延长部分顶高程 91.50 m, 上游引航道口门宽度为 18 m。下游引航道实心主导航墙现状顶高程为 90.50 m, 长 31.76 m, 走向与船闸中心线交角为 18.56°。本次船闸整改方案对下游实心主导航墙延长, 在现有实心导航墙后接半径 60 m 的圆弧形不透水导航墙长 31.9 m, 顶高程与现状一致。下引航道内河床底高程为 81.80 m, 主导航墙净高为 8.7 m, 下游引航道口门宽度 29 m (图 1)。为了论证上述工程整改措施的有效性, 进行模型试验研究。

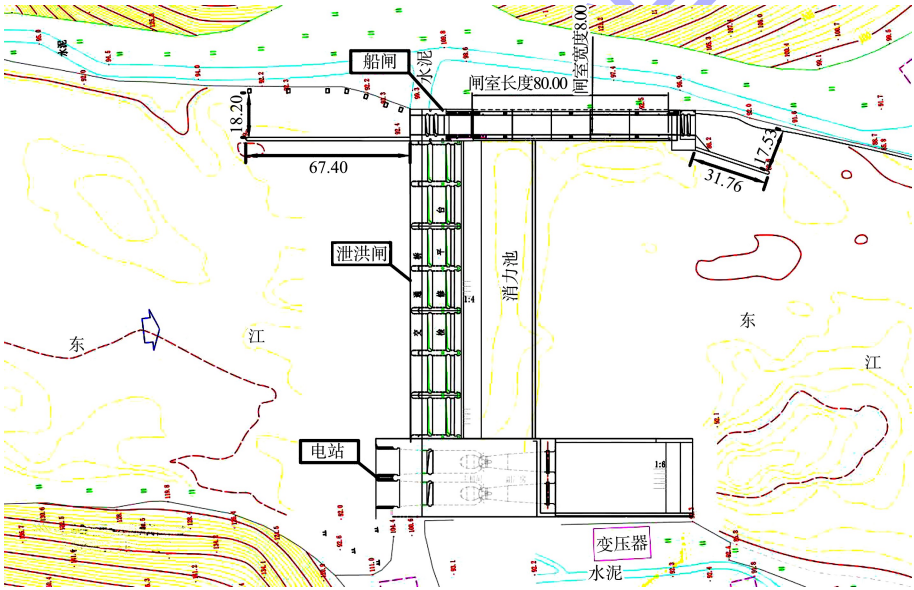


图 1 龙潭水电站工程现状平面布置 (单位: m)

1 试验模型及工况

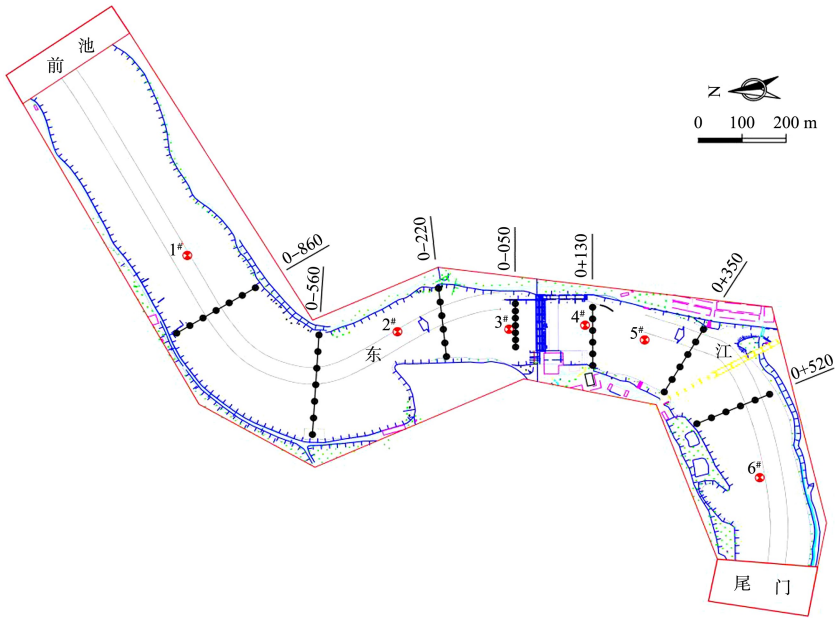
1.1 试验模型

在保证龙潭电站工程整体流态相似的前提下, 尽可能提高进、出口流态的相似性, 确保研究范围内的流态相似, 也就是采用正态模型并尽量选择较小的几何比尺。依照模型试验的相似律理论, 本模型按重力相似准则设计成正态模型。综合考虑试验河段水流特性、试验场地、水闸大小等条件, 并结合以往试验经验, 确定模型试验比尺见表 1。

表 1 模型试验比尺

比尺名称	比尺关系	比尺值
几何比尺	λ_L	60
流量比尺	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	27 885. 48
流速比尺	$\lambda_v = \lambda_L^{0.5}$	7. 75
糙率比尺	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	1. 98
时间比尺	$\lambda_t = \lambda_L^{0.5}$	7. 75

根据相关规范、规程要求, 为保证泄洪闸闸室平稳进流, 模型构建区域为工程上游约 1.6 km 处、工程下游 1 km 处(图 2)。



注：1. 1#~8#为沿程水位测点；2. 测流断面桩号 km+m 计；3. ●为沿程流速测点。

图 2 模型范围

模型建成后观测流量 $Q=1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ (泄洪闸全开)，依照观测结果对特征断面水面线和流速分布进行验证。验证试验表明：模型与原型(断面中间点)水面线测量结果相差不大于 0.05 m ，满足误差要求，见表 2；特征断面流速分布取 0-220 断面，见图 3，流速分布吻合度较好，满足定床河工模型的技术要求。

表 2 模型与原型(断面中间点)水面线测量结果

水尺断面编号	水位/m		
	原型实测值	模型试验值	差值
0-860	90.52	90.10	0.01
0-560	90.52	90.50	0.02
0-220	90.51	90.50	0.02
0+350	88.01	88.03	-0.02
0+520	87.99	87.96	0.03

1.2 试验工况

根据泄洪闸、电站以及船闸的调度运行情况，将上游来流量 $Q=1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q=1\,652\text{ m}^3/\text{s}$ 作为流量节点，将船闸通航试验工况分为 2 个组合：1) $Q\leq 1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ ，泄洪闸控泄运行；2) $1\,100\text{ m}^3/\text{s}\leq Q\leq 1\,652\text{ m}^3/\text{s}$ ，泄洪闸全开运行。

2 通航水流条件限制要求

由《船闸总体设计规范》^[11] 可知，引航道内必须设置取水、排水设施时，制动段和停泊段的水面最大流速纵向不应大于 0.50 m/s ，横向不应大于 0.15 m/s 。

引航道口门区的流态、流速应满足船舶正常航行的要求。在《船闸总体设计规范》中 V~Ⅶ级船闸引航道口门区水面最大流速限制值为：平行航线的纵向流速 $v_{\text{纵}}\leq 1.50\text{ m/s}$ ，垂直航线的横向流速 $v_{\text{横}}\leq 0.25\text{ m/s}$ ，回流流速 $v_{\text{回}}\leq 0.40\text{ m/s}$ 。

3 试验成果及分析

3.1 泄洪闸控泄运行通航试验成果分析

3.1.1 泄洪闸+电站运行工况船闸通航水流条件分析

当泄洪闸控泄(4 孔闸开度 1.0 m ，3 孔闸开度

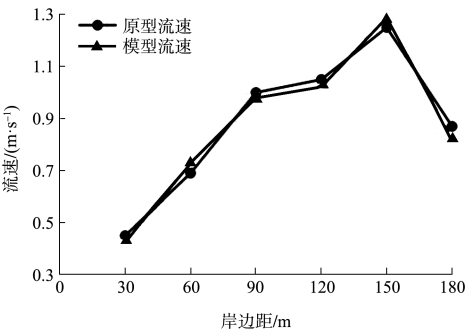


图 3 0-220 断面流速分布验证结果

1.5 m)、闸上游最高通航水位 90.50 m、电站满发运行,河道总流量为 $1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{电站}}=782\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{\text{水闸}}=318\text{ m}^3/\text{s}$),相应闸下游水位为 88.00 m。

1)上游引航道及口门区。上游引航道口门区 0-130断面水流方向与船闸中心线基本一致,流速 0.5~0.9 m/s 时 0-120 断面开始受主导航墙挑流及阻

水影响,水流开始向右侧水闸偏转,水流方向与船闸中心线之间产生明显夹角,至主导航墙附近 0-090断面水流与船闸中心线夹角达 22° ,顺水流方向面流速 0.6~0.8 m/s,计算的横向流速最大值为 0.24 m/s,引航道内回流流速约 0.14 m/s,上游引航道及口门区水流满足规范要求。流速分布见图 4。

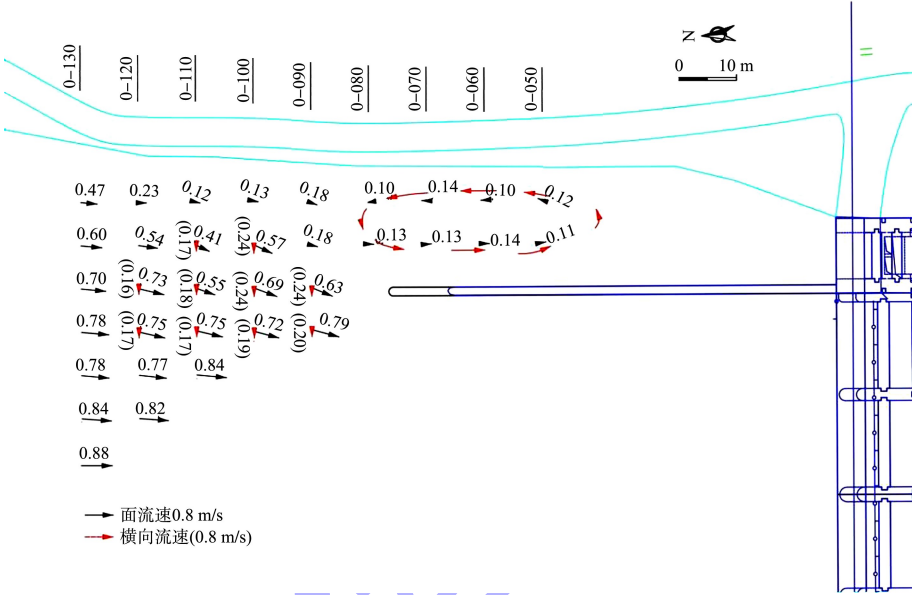


图 4 上游引航道及口门区流速分布

2)下游引航道及口门区。闸下游河道水流横向分布较为均匀,泄洪闸左侧水流沿下引航道导航墙下泄,部分水流在透水导航墙段进入下游引航道内,引航道内 0+060 断面纵向流速 0.44 m/s, 0+070 断面纵向流速 0.42 m/s, 口门区 0+080 断面最右侧测

点流速 0.89 m/s,其他测点流速约 0.3 m/s,口门区 0+100 断面最右侧测点流速 1.08 m/s,其他测点流速在 0.5 m/s 以内,水流方向与引航道中心线基本一致。下游引航道及口门区水流满足规范要求。流速分布见图 5。

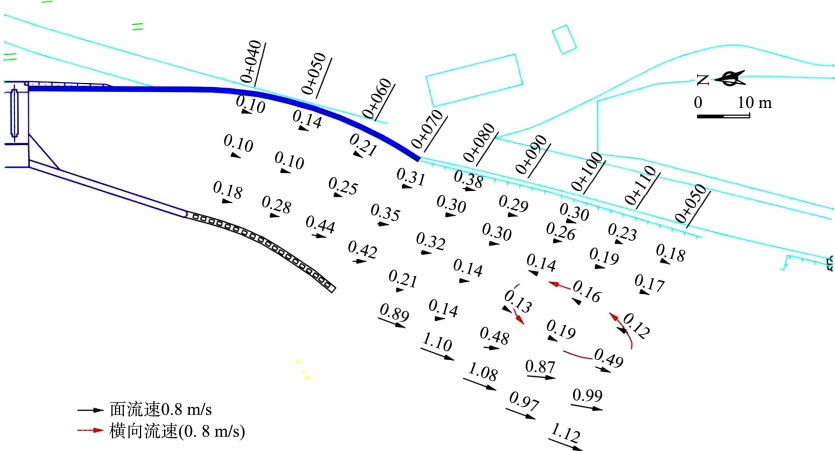


图 5 下游引航道及口门区流速分布

3.1.2 泄洪闸单独运行工况船闸通航水流条件分析

当泄洪闸控泄(7孔闸开度2.0 m)、泄洪闸上游最高通航水位90.50 m、电站停机,过泄洪闸总流量为 $1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{电站}}=0\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{\text{水闸}}=1\,100\text{ m}^3/\text{s}$),相应闸下游通航水位为88.00 m。

1)上游引航道及口门区。船闸上游引航道口门区0-130断面水流方向与船闸中心线基本一致,流速0.5~0.9 m/s,0-120断面水流开始向右侧水闸偏转,至主导航墙附近0-080和0-090断面水流与船闸中心线夹角达 23° ,顺水流方向流速较大值0.9 m/s以内,计算的横向流速最大值为0.24 m/s,引航道内有弱回流流速约0.1 m/s。上游引航道及口门区水流满足规范要求。

2)下游引航道及口门区。泄洪闸下游部分水流在透水导航墙段进入下游引航道内,引航道内0+060断面纵向流速约0.5 m/s,0+070断面纵向流速0.6 m/s(大于0.5 m/s的限制值),口门区0+080断面最右侧测点流速1.33 m/s,其他测点流速在0.5 m/s,口门区0+100断面最右侧测点流速1.45 m/s,其他测点流速在0.5 m/s以内,水流方向与引航道中心线基本一致。下游引航道内局部区域纵向流速不能满足规范要求。

3.2 泄洪闸全开运行通航试验成果分析

试验表明:上游河道来流量 $1\,100$ 或 $1\,652\text{ m}^3/\text{s}$ 、泄洪闸全开泄流时,泄洪闸上游水位分别为船闸上游最低通航水位88.15或89.60 m。上游引航道附近流速明显增大,且河道左岸船闸一侧水流在引航道口门附近受主导航墙阻水挑流影响,水流在导航墙上游流向40 m处开始向右偏转,越接近引航道口门区偏转角度越大,在主导航墙附近偏转角度达 25° ,上游引航道口门区横向流速最大值接近0.5 m/s,不能满足《船闸总体设计规范》等相关规范规程中引航道口门区水面最大流速限制值要求。下游引航道内受透水导航墙进流影响,引航道内水流流速达0.7 m/s,不能满足《船闸总体设计规范》等相关规范规程中引航道水面最大流速限制值要求。

3.3 船闸整改设计方案优化试验

3.3.1 上游引航道布置及试验分析

根据以上试验成果分析,在泄洪闸闸门全开泄流运行工况时,船闸上游引航道口门区水流条件不能满足相关规范要求。因此开展了将上游主导航墙由整改方案的81 m延长至91、101 m两个修改方案的泄洪闸全开试验。

当上游来流量达 $1\,100$ 或 $1\,652\text{ m}^3/\text{s}$,泄洪闸全开运行时,试验显示:1)上引航道修改方案1(延长主导航墙至91 m)。延长导航墙后口门区相应向上游推移,口门区水流仍与引航道中心线存在 $10^\circ\sim 25^\circ$ 的夹角,计算的横向面流速最大值分别为0.47和0.6 m/s;另外,引航道内均出现较大范围的回流流态,靠右岸一侧回流流速接近0.3 m/s,不能满足规范要求。2)上引航道修改方案2(延长主导航墙至101 m)。延长导航墙后口门区相应向上游推移,口门区水流仍与引航道中心线存在 $10^\circ\sim 25^\circ$ 的夹角,计算的横向流速最大值分别为0.56和0.58 m/s;另外,引航道内同样出现较大范围的回流流态,靠右岸一侧回流流速接近0.2 m/s,不能满足规范要求。

试验表明,受河势影响,在水闸闸门全开泄流时,船闸引航道所在水域水流呈斜向经过船闸口门区,且口门区相应横向流速均超过规范要求的限制流速0.25 m/s,通过调整优化上游引航道布置等手段难以改善引航道口门区水流条件。建议调整后的龙潭船闸通航运行条件为:上游河道来流量在 $1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ 以内、泄洪闸控泄工况下船闸正常运行;上游河道来流量大于 $1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ 、泄洪闸全开泄流工况下,船闸停止运行。

3.3.2 下游引航道布置及试验分析

根据以上试验成果分析,在泄洪闸控泄或全开泄流运行工况时,船闸下游引航道内水流条件均不能满足相关规范要求。因此试验开展了将下游引航道透水导航墙改为不透水导航墙的试验。

1)泄洪闸控泄运行工况($Q=1\,100\text{ m}^3/\text{s}$)。在电站满发运行或停机时,下游不透水导航墙引航

道内纵向流速约为 0.1 m/s, 无明显横向和回流流态, 口门区纵向流速约为 1.3 m/s, 水流方向与引航道中心线方向基本一致, 口门区 0+090—0+120 断面之间靠河岸一侧存在回流流速不超过 0.2 m/s 的弱回流流态。下游引航道及口门区水流条件满足规范要求。

2) 泄洪闸全开运行工况 ($Q=1\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$)。下游不透水导航墙引航道内纵向流速约为 0.1 m/s, 无明显横向和回流流态, 口门区纵向流速基本在 0.45 m/s 以内(口门区右侧靠近主流测点流速略大于 1.5 m/s), 水流方向与引航道中心线方向基本一致, 口门区 0+090—0+120 断面之间靠河岸一侧存在回流流速不超过 0.2 m/s 的弱回流流态。下游引航道及口门区水流满足规范要求。

3) 泄洪闸全开运行工况 ($Q=1\ 652\ \text{m}^3/\text{s}$)。下游不透水引航道内纵向流速约为 0.15 m/s, 无明显横向和回流流态, 口门区纵向流速基本在 0.6 m/s 以内(口门区右侧靠近主流个别测点流速略大于 1.5 m/s), 口门区 0+090—0+120 断面之间靠河岸一侧存在回流流速不超过 0.25 m/s 的弱回流流态。下游引航道及口门区水流基本满足规范要求。

试验表明, 下游主导航墙修改为实心后, 上游来流量在 $1\ 100\ \text{m}^3/\text{s} \leq Q \leq 1\ 652\ \text{m}^3/\text{s}$ 、泄洪闸控泄或全开运行时, 下游引航道及口门区水流条件均满足规范要求。

4 结 论

1) 船闸整改方案试验表明, 在上游河道来流量达到 $1\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 、电站停止运行、泄洪闸全开泄流时, 船闸上游引航道口门区横向流速超过 0.5 m/s, 下游引航道内纵向流速超过 0.5 m/s, 均不能满足规范要求。

2) 针对船闸整改方案上、下游引航道及口门区水面流速不满足规范要求的情况, 测试了多个组合的优化布置。试验表明, 上游河道来流量大于 $1\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 、闸门全开泄洪时, 上游引航道口门

区水流条件仍不能满足规范要求; 而下游引航道将透水主导航墙改为不透水后, 引航道及口门区水流条件可满足规范要求。

3) 船闸整改推荐方案: 上游引航道实心主导航墙延长至 81 m, 顶高程 91.50 m, 上引航道宽度调整为 18 m; 下游引航道主导航墙顶高程为 90.50 m, 其中实心主导航墙直线段长 31.3 m, 后接半径 60 m 的圆弧形实心导航墙长 31.9 m, 下游引航道口门宽度为 29 m。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

[5] 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.

[6] 王斐, 彭伟, 王义安. 沙溪口水电站船闸下引航道口门区通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2017(10): 186-191, 196.

[7] 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.

[8] 刘晓平, 徐大彬, 李祥, 等. 大源渡下游口门区通航水流条件改善措施试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(1): 56-61.

[9] 王晓刚, 王小东, 宣国祥, 等. 五里亭船闸下游引航道综合整治[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 1-7.

[10] 毕墨. 盐邵船闸下游引航道流态改善研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.

[11] 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, 2001.