



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

祁永升¹, 许光祥^{1,2}, 许锡宾¹, 刘志敏³, 王定³

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
3. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008)

摘要: 湘江近尾洲枢纽二线船闸为升级改造工程, 位置和轴线没有选择余地, 下游引航道口门区的通航水流条件只能依靠优化开闸方式或修建导流墩来改善。采用1:100定床正态河工物理模型试验, 在充分认识常规开闸泄流方式下游引航道口门区水流条件的基础上, 通过多种开闸泄流方式的组合试验以及导流墩布置数量、间距、角度等优化试验, 提出常规开闸+边孔补流的泄流方式, 或布设单墩长度20 m、走向与航线平行、间距20 m的3个导流墩, 均可将通航流量提高到2 a一遇洪水标准。

关键词: 口门区; 泄水闸; 河工试验; 导流墩; 通航水流条件

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0126-06

Measures of improving navigable flow conditions in entrance area of downstream approach channel of Jinweizhou second-line ship lock in the Xiangjiang River

QI Yong-sheng¹, XU Guang-xiang^{1,2}, XU Xi-bin¹, LIU Zhi-min³, WANG Ding³

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China;
3. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410008, China)

Abstract: The second-line ship lock of Jinweizhou Junction in Xiangjiang is an upgrade and reconstruction project. There is no choice of location and axis. The navigational flow conditions in the entrance area of the downstream approach channel can only be improved by optimizing the opening method or constructing a diversion pier. Using 1:100 fixed-bed normal river physics model test, on the basis of fully understanding the water flow conditions of the downstream approach channel entrance area of the conventional gate discharge method, through a combination of multiple-gate discharge methods and diversion pier layout optimization experiments such as number, spacing, angle, etc., we propose the conventional way of opening gate + side hole supplementary discharge, or the arrangement of three diversion piers with a single pier length of 20 m, a direction parallel to the route, and a spacing of 20 m. Both can be opened to the traffic flow increased to a flood in 2 years.

Keywords: entrance area; sluice gate; river test; diversion pier; navigable flow condition

船闸上、下游引航道口门区的通航水流条件直接影响到船舶进出船闸的安全, 是通航枢纽规划布置的关键问题之一。在自然河段上修建水工

建筑物, 因航运需求, 部分枢纽不得不修筑在弯曲河道, 使得引航道口门区出现复杂流态, 通常以回流、斜流为主。当回流和斜流达到一定强度

收稿日期: 2020-06-10

作者简介: 祁永升(1995—), 男, 硕士研究生, 从事航道整治研究。

通讯作者: 许光祥(1966—), 男, 博士, 教授, 从事航道工程研究工作。E-mail: 527867610@qq.com。

后, 便演变为碍航不良流态^[1]。

针对船闸口门区流态问题, 《船闸总体设计规范》对通航水流条件作了具体规定^[2]。对于I~IV级船闸, 其口门区范围内最大纵向流速、回流流速、横向流速应分别低于2.0、0.4、0.3 m/s。国内外学者亦对改善措施开展了诸多研究, 提出调整隔流堤位置、采用透空式导航墙、设置丁潜坝以及优化堤头形式等方法^[3-8]。这些学者在研究口门区通航水流条件改善措施时, 基本上是针对具体河段工程提出改善措施, 虽然有很好的借鉴性但缺乏通用性。同时, 随着经济的发展及水路交通运输需求的增长, 船闸改扩建工程取得了快速发展^[9-11]。因此, 在改善口

门区通航水流条件方面, 不仅要沿用已有的工程措施, 还要研究通用性较强、紧密联系新建船闸的改善措施^[12]。

近尾洲枢纽位于湘江中游, 主要建筑物包括大坝、发电厂房和船闸(图1)。水库总库容4.6亿m³, 正常蓄水位66.10 m, 相应库容1.543亿m³, 坝址以上控制流域面积2.86万km², 多年平均流量752 m³/s。枢纽所处河段平面上看似“烟斗状”, 坎下2 km左右河势左向急转90°。坝上游库区, 河段水深富足, 深泓最小水深近10 m, 水深超过2.4 m的最小河面宽度达340 m, 通航水域优良; 而下游河段, 通航水域宽度有限, 且连续性较差, 进闸航道尺度明显不足, 通航条件较差。

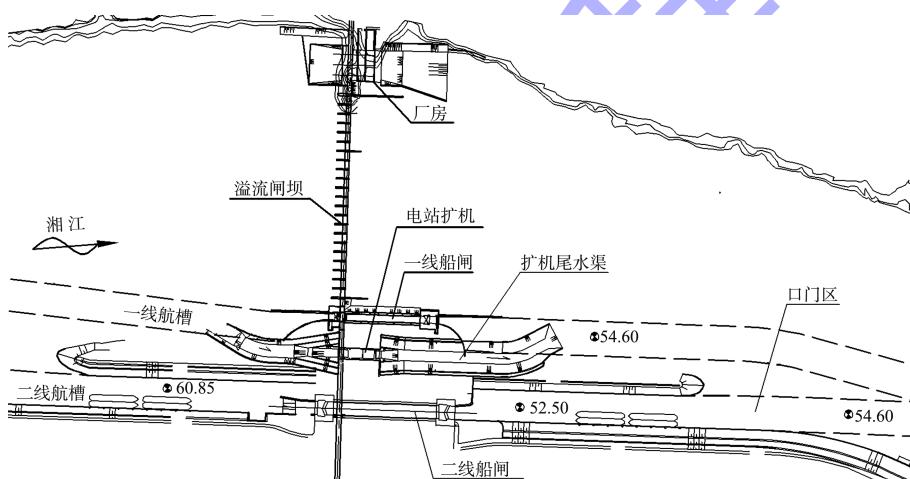


图1 近尾洲枢纽平面布置 (单位: m)

二线船闸扩建受地形、河势及一线船闸的制约, 船闸扩建工程的外部边界条件较为复杂, 其位置和轴线没有选择余地, 下游引航道口门区的通航水流条件只能依靠优化开闸方式或修建导流墩来改善。因此, 本文依托近尾洲水利枢纽二线船闸扩建工程, 采用定床水流物理模型试验, 分析不同开闸方式及导流墩布设对二线船闸下游引航道口门区通航水流条件的改善效果, 为类似工程设计提供参考。

1 模型试验设计

为详细了解不同方案口门区通航水流条件, 近尾洲枢纽采用1:100的几何比尺建造定床正态河工

模型, 满足几何相似、重力相似及阻力相似条件。研究段主要集中在枢纽上、下游各约1.2 km的河段。模型制作依据的主要地形资料是1:1 000河道地形图, 河道模型采用断面板法用水泥沙浆刮制而成, 水工建筑物模型采用树胶板、水泥砂浆等制作。模型建成后主要对洪水和枯水水面线、大断面流速分布进行了验证。验证结果表明: 模型洪、枯水水面线与原型水文测验结果误差多数在±0.050 m范围内, 个别洪水最大偏差为0.087 m, 均未超过0.100 m, 洪、枯流量水位验证结果满足规定的误差要求; 对于洪、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2)。模型设计满足定床河工模型的相似性要求, 可进行水流特

性、工程方案等下一步试验。各断面水位验证见表 1。

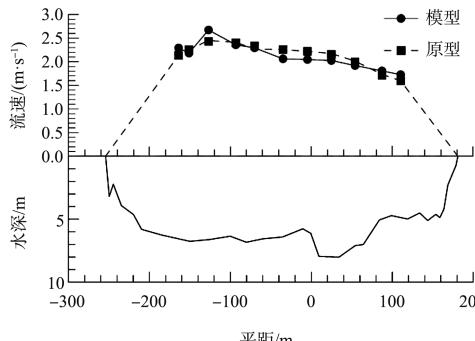


图 2 大断面流速验证

表 1 水位验证结果($Q=4200 \text{ m}^3/\text{s}$)

里程/km	原型水位/m	模型水位/m	偏差/m
-1.437	66.343	66.341	-0.002
-0.727	66.294	66.277	-0.017
-0.271	66.258	66.268	0.010
0.400	61.327	61.240	-0.087
1.871	61.003	61.010	0.007

近尾洲枢纽共设有 22 孔溢流闸坝(图 3)，闸门启、闭方式依水库调度和泄洪消能的情况确定。闸门分Ⅲ个区调度：根据入库流量，按以下顺序进行调度 7#~9#孔、10#~14#孔、7#~14#孔、15#~22#孔、1#~6#孔闸门。

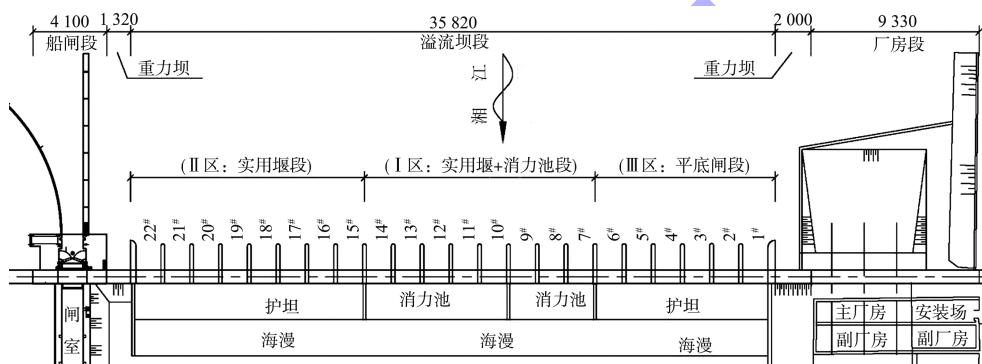


图 3 枢纽泄洪闸平面布置 (单位: mm)

2 常规开闸方式对通航水流条件的影响

根据近尾洲枢纽设计资料及泄洪调度安排，选取 373、1 393、2 193、3 493、5 210、6 963、8 200、12 300 m^3/s 的流量进行常规泄流开闸试验。试验结果如图 4 所示。

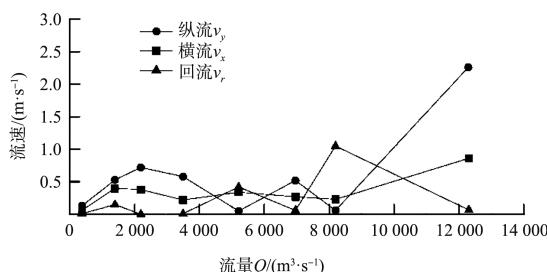


图 4 常规开闸方式下口门区特征流速

从图 4 可见，在常规开闸方式下，对于口门区纵向流速，当流量 $Q \leq 8200 \text{ m}^3/\text{s}$ (2 a 一遇洪水流量)时，其纵流较小，一般不超过 0.5 m/s；但当流量 $Q = 12300 \text{ m}^3/\text{s}$ (10 a 一遇洪水流量)时，

口门区纵流为 2.26 m/s，略超标。对于口门区横向流速，当流量小于 2 a 一遇洪水时，横流绝大多数小于 0.3 m/s，虽有超标但不大于 0.41 m/s；当流量达到 10 a 一遇洪水时，横流可达到 0.86 m/s，明显超标。对于口门区回流流速，除 2 a 一遇洪水流量外，其余工况回流流速均不大于 0.4 m/s，但在 $Q=8200 \text{ m}^3/\text{s}$ 集中泄流工况下，口门区回流最大为 1.05 m/s，超标严重。综上分析，在常规开闸方式下，口门区通航流量基本可以达到 5 210 m^3/s ，但要达到 2 a 或 10 a 一遇的通航流量有一定困难，因此，选取 2 a 一遇流量($Q=8200 \text{ m}^3/\text{s}$)作为最不利通航流量进行口门区改善措施研究。

3 边孔补流优化方案

3.1 方案布置

为优化二线船闸下游引航道口门区通航水流

条件, 选用 22#泄洪闸作为边孔, 进行边孔补流试验研究。综合特征通航流量、水库调度需求以及常规调度最不利通航流量, 边孔补流优化方案针

对 $Q=8\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 流量设置了 6 种开闸工况(表 2), 重点分析靠近船闸的 22#边孔泄水孔下泄流量大小对通航水流条件的影响。

表 2 边孔补流开闸方式试验工况($Q=8\,200\text{ m}^3/\text{s}$)

编号	工况说明	总流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	坝上水位/m	坝下水位/m	尾门水位/m	流量说明	开闸方式
A1	边孔未开						泄洪闸 7#~14#全开
A1-1	边孔开 1 m						泄洪闸 22#(边孔)开 1 m, 剩余流量由 7#~14#匀泄
A1-2	边孔开 2 m						$P=50\%$ 洪水, 边孔开 2 m, 剩余流量由 7#~14#匀泄
A1-3	边孔开 4 m	8 200	66.1	64.76	63.60	停机控泄	边孔开 4 m, 剩余流量由 7#~14#匀泄
A1-4	边孔开 6 m						边孔开 6 m, 剩余流量由 7#~14#匀泄
A1-5	边孔全开						边孔全开, 剩余流量由 7#~14#匀泄

3.2 边孔补流通航水流条件改善效果

工况 A1、A1-1、A1-2 为边孔不补流或补流不大的方式, 其口门区、连接段回流较强, 3 种工况最大回流达到 $1.0\sim1.2\text{ m/s}$ (图 5), 不满足船闸总体设计规范要求。

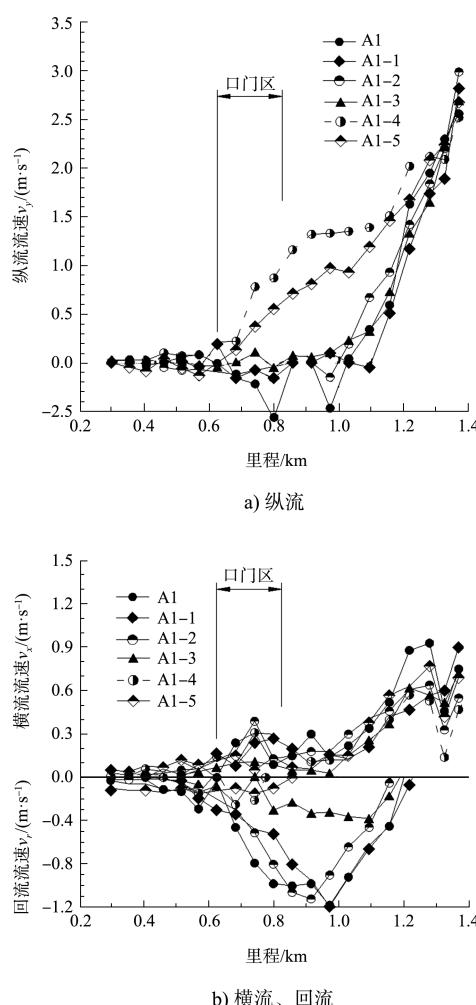


图 5 边孔补流对二线船闸下游通航水流条件的影响

工况 A1-4、A1-5 为边孔补流较多的方式, 其口门区、连接段纵流不大, 回流较小, 横流也基本满足规范要求, 总体通航条件优于工况 A1, 为比较合理的开闸方式。

工况 A1-3 纵流较小, 口门区最大纵流为 0.17 m/s ; 回流不超标, 最大回流为 0.36 m/s ; 横流较为微弱, 口门区最大横流为 0.11 m/s , 均满足通航水流条件, 为最佳的开闸方式。

对于二线船闸下游引航道口门区横、回流均满足规范要求的工况有 A1-3、A1-4、A1-5, 其中 A1-3 最佳。其他主要体现为泄洪工况的回流超标。

根据 $Q=8\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下的边孔补流开闸方式试验研究分析得知, 边孔(22#闸孔)适当补流可明显减弱口门区及连接段回流, 同时纵、横流无显著增大。因此, 对二线船闸通航条件有利的开闸方式为: $Q \leq 3\,493\text{ m}^3/\text{s}$ (保证率 $P \approx 3.1\%$)时, 泄洪采用常规开闸方式; $Q > 3\,493\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 泄洪采用常规开闸+边孔补流的方式, 即开启常规闸孔的同时, 22#边孔需要开闸补流 $310\text{ m}^3/\text{s}$ 左右流量, 这时主泄洪闸孔的开度比常规开闸略小。

4 导流墩优化方案

近尾洲闸门调度不隶属于航道管理部门, 如何开闸难以掌控, 因而还需要研究其他可行备选方案。布设导流墩是解决船闸下游口门区横、回流偏大问题的常用措施。

4.1 方案布置

导流墩单个长度取 $L=20$ m, 布置轴线从左导航墙堤头开始, 顺航槽布置, 如图 6 所示。

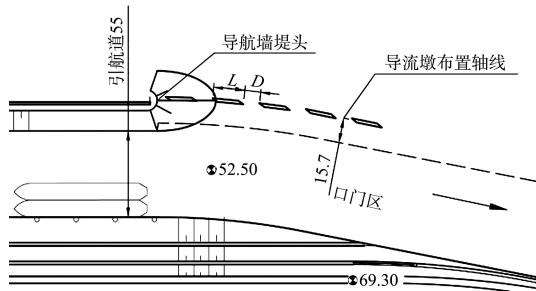


图 6 导流墩轴线及工况布置 (单位: m)

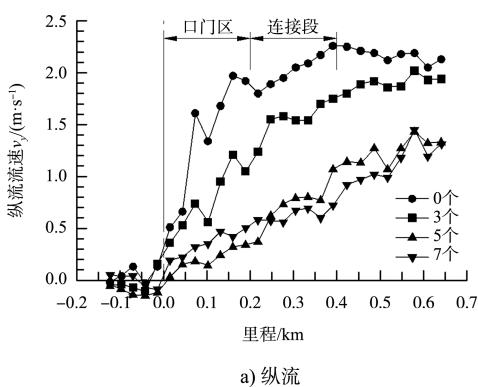
导流墩优化设置 3 个参数: 数量 N 、间距 D 和角度 β 。其中 N 取 3、5、7 个, D 取 10、20、30 m, β 取 0° (导流墩平行布置轴线)、 -20° (顺时针)、 10° 、 20° 等工况进行优化。

4.2 导流墩通航水流条件改善效果

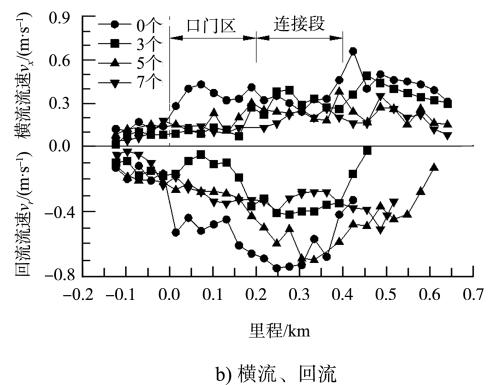
4.2.1 导流墩数量的影响

以间距 $D=10$ m, 角度 $\beta=0^\circ$ 研究导流墩个数对口门区水流条件的影响, 图 7 为不同导流墩数量试验流速对比。试验发现导流墩可明显减小口门区纵流, 其最大减幅可达 1.5 m/s。 $N=3$ 时纵流小于 1.5 m/s, $N=5$ 、 $N=7$ 时小于 1.2 m/s, 均满足最大纵流要求。导流墩对横流和回流的影响也较为明显, 口门区横向流速最大减幅可达 0.4 m/s, 回流流速最大减幅可达 0.4 m/s, 所测工况横、回流基本满足规范要求。

综上可知, $N=3$ 能满足通航要求, 工程量最少, 因此导流墩宜取 3 个。



a) 纵流

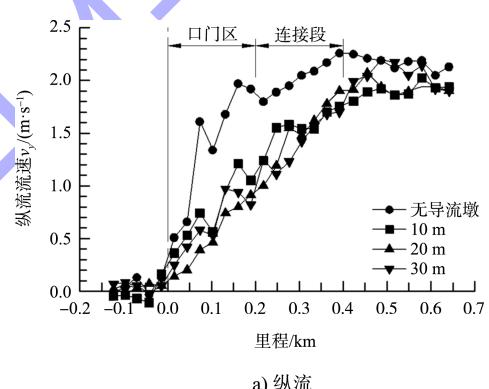


b) 横流、回流

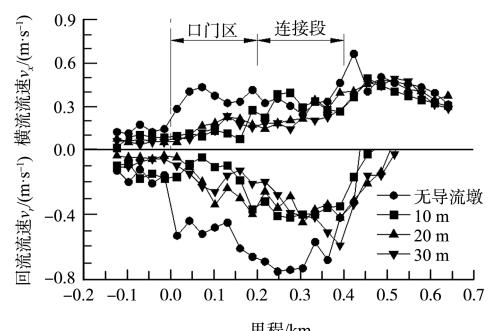
图 7 导流墩数量对流速的影响 ($D=10$ m, $\beta=0^\circ$)

4.2.2 导流墩间距的影响

取 $N=3$, $\beta=0^\circ$ 研究不同间距对口门区水流条件的影响, 试验结果见图 8。总体上看, 间距的影响没有数量的影响明显, 但各工况之间仍存在一定差异。



a) 纵流



b) 横流、回流

图 8 导流墩间距对流速的影响 ($N=3$, $\beta=0^\circ$)

对于纵流, 口门区各间距均满足要求, 且 $D=20$ m 的纵流最小; 对于横流, 在各间距下口门区流速均小于 0.3 m/s, 满足横流要求; 对于回流, $D=10$ m 和 $D=20$ m 差异不大, 在口门区和连接段均不超过 0.4 m/s, $D=30$ m 时在连接段末段为

0.6 m/s, 有一定的超标。

综上可知, $D=10\text{ m}$ 和 $D=20\text{ m}$ 的流速均不超限, 考虑到 $D=20\text{ m}$ 的纵流、横流条件稍优, 且控制长度略长, 因此导流墩间距宜取 20 m 。

4.2.3 导流墩角度的影响

取 $N=3$, 间距 $D=20\text{ m}$ 研究不同角度对口门区水流条件的影响, 试验结果如图 9 所示。在 $\beta=-20^\circ$ 时水流条件最差, 纵流、横流及回流最大, 同时在口门区局部地方出现超标; 当 $\beta=10^\circ$ 和 $\beta=20^\circ$ 时水流条件较差, 在连接段末端横流出现超标, 整体均不优于 $\beta=0^\circ$ 。

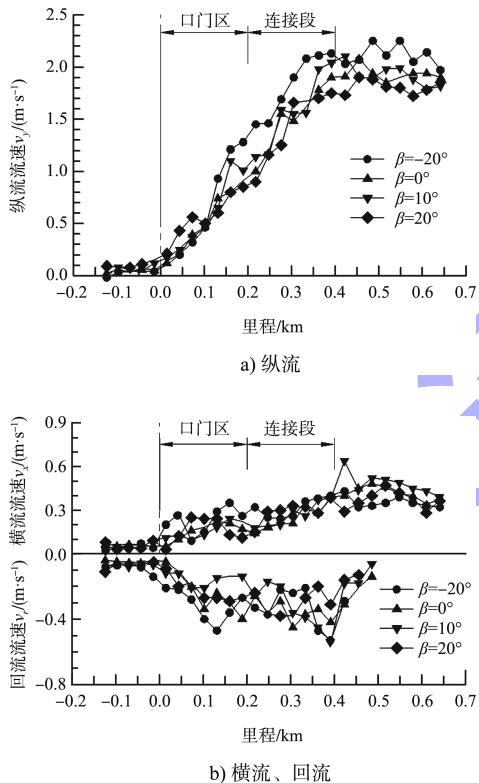


图 9 导流墩角度对流速的影响 ($N=3$, $D=20\text{ m}$)

综上, $\beta=0^\circ$ 的水流条件最好, 即导流墩与航槽平行, 此种布置使导流墩占据的水域最窄, 对二线船闸引航道航槽的影响最小。

5 结语

1) 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, 经分析可知边孔(22#闸孔)适当补流可增加口门区回流的能量损失, 进而减弱口门区回流, 同时使纵、横流也满足规范要求。

2) 对枢纽二线船闸通航条件有利的开闸方式为: $Q \leq 3493\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 泄洪采用常规开闸方式; $Q > 3493\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 泄洪采用常规开闸+边孔补流的方式, 即开启常规闸孔的同时, 22#边孔需要开闸补流 $310\text{ m}^3/\text{s}$ 流量。综合二线船闸下游引航道的通航水流条件, 建议 $Q=8200\text{ m}^3/\text{s}$ 为近尾洲枢纽二线船闸的最高限制通航流量。

3) 导流墩与航槽平行时, 优化效果最佳, 可设置 3 个导流墩, 单墩长度 $L=20\text{ m}$, 间距 $D=20\text{ m}$ 进行口门区水流条件优化设计。

参考文献:

- [1] 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(3): 73-77, 82.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸总体设计规范: JT/T 305—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 王云莉, 孙国栋, 向美焘. 船闸口门区不良流态改善措施[J]. 水运工程, 2016(3): 83-88.
- [4] 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.
- [5] 赵江, 刘晓平, 任启明, 等. 大源渡航电枢纽二线船闸下游通航条件优化试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(6): 32-36.
- [6] 蒋孜伟, 许光祥, 童思陈. 引航道导墙透空技术改善流态的数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 98-102.
- [7] 杨校礼, 李昱, 孙永明, 等. 弧形短导墙对船闸引航道水流结构影响的研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2016, 31(5): 621-625.
- [8] 徐进超, 宣国祥, 刘本芹, 等. 贵港二线船闸下引航道物理模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 9-13.
- [9] 吴琼琳, 高清洋, 普晓刚. 桩基透空式导流屏结构对船闸下游口门区通航的影响[J]. 水运工程, 2018(4): 98-103.
- [10] 李寿千, 朱昊, 朱明成, 等. 感潮河段支流口门枢纽通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2016(12): 132-136.
- [11] 李艳, 周勤, 米家彬, 等. 瓦村枢纽下游引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2018(2): 136-141.
- [12] 王云莉, 孙国栋, 向美焘. 船闸口门区不良流态改善措施[J]. 水运工程, 2016(3): 83-88.