



改善二线船闸下游引航道口门区流态的 补流措施研究

祁永升¹, 许光祥², 李昌耀¹

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 针对闸门开启方式对枢纽下游引航道口门区水流特征及通航水流条件的影响, 以湘江近尾洲枢纽二线船闸为例, 建立可以较好模拟复杂河道边界条件的二维水流数学模型, 在充分认识常规设计泄流开闸方式的下游引航道口门区水流条件的基础上, 开展多种开闸泄流方式的组合试验研究。结果表明: 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; 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, 同时使纵流、横流也满足规范要求。为保证船舶航行安全, 建议该工程在下泄洪水时尽可能采用常规开闸+边孔补流方式。

关键词: 口门区; 二线船闸; 泄水闸; 数学模型; 通航水流条件

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0157-07

Supplementary flow measures to improve flow pattern at entrance area of downstream approach channel of second ship lock

QI Yongsheng¹, XU Guangxiang², LI Changyao¹

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China;

2. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In view of the influence of the gate opening mode on the flow characteristics and navigation flow conditions of the downstream approach channel entrance area of the junction, taking the second ship lock of Jinweizhou junction in the Xiangjiang River as an example, we build a two-dimensional flow mathematical model that can better simulate the complex river boundary conditions. On the basis of fully understanding the flow conditions of the downstream approach channel entrance area under the conventional design discharge and sluice opening mode, we carry out a combination test study of multiple sluice opening and discharge modes. The results show that the flow at the entrance area of the downstream approach channel of the second ship lock is greatly affected by the operation mode of the junction. The rational arrangement of the side hole (22[#] sluice hole) can increase the energy loss of the reflux flow at the entrance area, thereby reducing the reflux flow at the entrance area, and at the same time, the longitudinal and transverse flows can also meet the code requirements. To ensure the safety of ship navigation, it is suggested that the project should adopt the mode of the conventional gate opening and side hole improving flow as far as possible when discharging flood.

Keywords: entrance area; second ship lock; sluice gate; mathematical model; navigable water flow conditions

船闸上下游引航道口门区是船舶出入水利枢纽的咽喉, 其通航水流条件优劣直接影响船舶进

出船闸的安全, 是水利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

收稿日期: 2022-09-17

作者简介: 祁永升(1995—), 男, 硕士, 工程师, 从事航道整治研究。

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后,便演变为碍航不良流态^[1]。

针对船闸口门区流态问题, JTJ/T 305—2001《船闸总体设计规范》^[2]对通航水流条件做了具体规定:对于 I~IV 级船闸,其口门区最大纵向、回流、横向流速应分别低于 2.0、0.4、0.3 m/s。国内外学者也开展了多项改善措施研究,如调整隔流堤位置、采用透空式导航墙、设置丁潜坝等方法^[3-8]。这些改善措施虽有很好的借鉴性但缺乏通用性,具有一定的局限性,同时,随着经济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^[9-12]。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^[13]。潘雅真等^[14]、李茜希等^[15]、张声鸣^[16]借助概化模型研究枢纽调度方式对口门区不良流态的影响时,发现枢纽泄水调度等非工程措施也可改善口门区通航水流条件。

当扩建二线船闸时受地形、河势及一线船闸的制约,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等非工程措施进行改善。因此,本文依托湘江近尾洲枢纽二线船闸扩建工程,采用平面二维水流数学模型,开展改善船闸引航道口门区流态的补流措施研究,分析不同开闸方式对二线船闸下游引航道口门区通航水流条件的改善效果,为类似二线船闸的设计提供参考。

1 工程概况

近尾洲枢纽位于湘江中游,为 III 级船闸,主要建筑物包括大坝、发电厂房和船闸,见图 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”,坝下 2 km 左右河势左向急转 90°,且下游河段的通航水域宽度有限,连续性较差,进出闸航道尺度明显不足,通航条件较差。

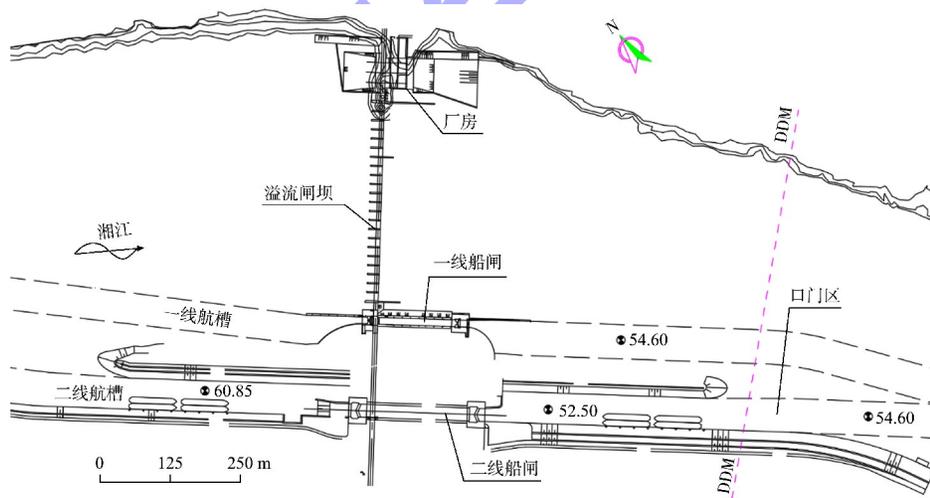


图 1 近尾洲枢纽平面布置 (单位: m)

2 平面二维水流数学模型设计

为详细了解不同方案口门区通航水流条件,枢纽采用能较好模拟复杂河道关系的平面二维水流数学模型进行计算研究。对枢纽下游河段的水位、流速等资料进行相似性验证,并由此建立数学模型分析河段水流特性。

平面二维水流数学模型的基本控制方程以 Navier-Stokes 方程为基础,其控制方程采用沿水深积分的二维连续方程和动量方程,其中连续方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程为:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g \omega n^2}{(1.486h^{\frac{1}{6}})^2} + (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2h\omega v \sin \phi = 0 \quad (2)$$

y 方向动量方程为:

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g \omega n^2}{(1.486h^{\frac{1}{6}})^2} + (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} - \zeta V_a^2 \sin \psi - 2h\omega v \sin \phi = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间; u 、 v 分别为 x 、 y 方向流速; h 为水深; ρ 为水的密度; E_{xx} 、 E_{xy} 、 E_{yx} 、 E_{yy} 为涡黏系数; z 为河床高程; n 为曼宁系数; ζ 为风应力系数; v_a 为风速; ψ 为风向; ω 为地球自转角速度; ϕ 为纬度。

模型计算区域选择枢纽坝址至下游约 3.50 km 的河段, 见图 2。

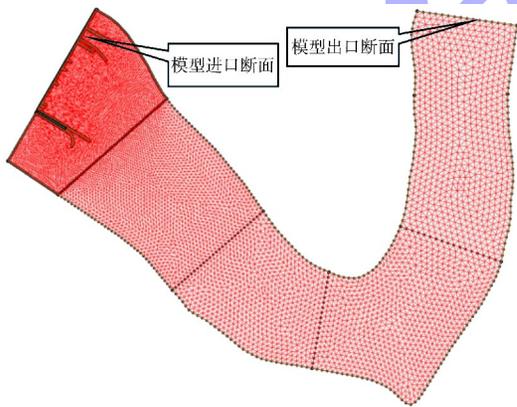


图 2 模型计算域网格

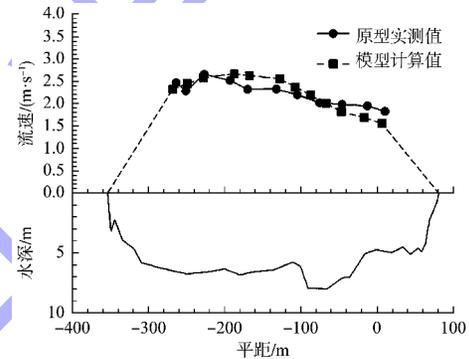
计算河段共设置 76 030 个网格节点, 37 437 个网格单元, 其中网格节点的最小间距为闸墩宽度 (2 m), 最大间距为 30 m。

模型建成后对洪、枯水水面线、大断面流速分布进行了验证, 结果见表 1 和图 3。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均在 ± 0.05 m 范围内, 满足 JTS/T 231—2021 《水运工程模拟试验技术规范》^[17] 中“山区河流的水位允许偏差为原型水位的 ± 0.1 m”的误差要求;

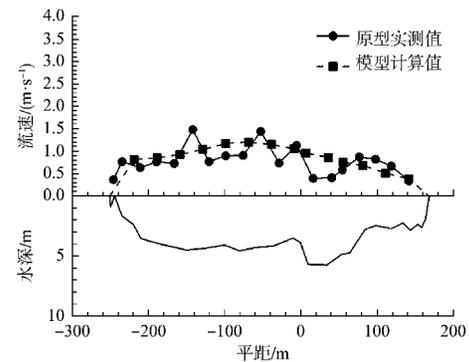
对于洪、枯水大断面流速, 除个别特殊、突变测点外, 数学模型与原型流速偏差均不大于 $\pm 10\%$, 且流速分布形式基本一致, 模型与原型流场相似程度较高。

表 1 水位验证结果

洪枯水	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	里程/ km	原型 水位/m	模型 水位/m	偏差/ m
洪枯水		0.400	58.990	58.989	-0.001
		1.072	58.930	58.941	0.011
洪水	4 200	1.871	58.880	58.881	0.001
		0.400	61.327	61.267	-0.006
		1.175	61.194	61.242	0.048
		1.871	61.003	60.956	-0.047



a) 洪水



b) 枯水

注: 验证断面为 DDM。

图 3 洪、枯水流速验证

数学模型验证结果与实测资料吻合较好, 满足相似性要求, 验证了枢纽数学模型的可靠性和实用性, 可以进行枢纽泄洪水流特性、口门区不良流态改善方案的数学模型计算研究。

3 设计开闸方式对通航水流条件的影响

枢纽共设有 22 孔溢流闸坝, 见图 4。弧门启、

闭方式由水库调度和泄洪消能的情况确定。弧门分3个区调度：根据入库流量，依次调度7#~9#、10#~14#、7#~14#、15#~22#及1#~6#弧门。

为了更加全面地分析引航道口门区流态，本文将二线船闸下游航槽分为两种布置方案进行比选：

1) 原设计航槽：下游引航道直接过渡到左侧凸岸深槽区，称X₀槽。

2) 优化方案：航槽出引航道后向右岸侧转动10.8°贴右岸布置，然后在引航道口门下游400~800 m左右逐渐过河到左侧凸岸(X₁槽)，此种航

槽布置方案减小了口门区、连接段与主流的夹角可相对优化区域内的横流。二线船闸下游口门区航槽布置如图5所示。

根据枢纽设计资料及泄洪调度安排，在进行数学模型计算研究时，为了较为准确地获知枢纽扩建二线船闸坝下河段在不同泄流情况下的水流特性和通航水流条件，同时结合主要特征通航流量，选取1 083、1 883、3 183、4 900、6 653、8 200、10 700、12 300 m³/s共8种流量工况进行设计泄流开闸水流特性试验研究。

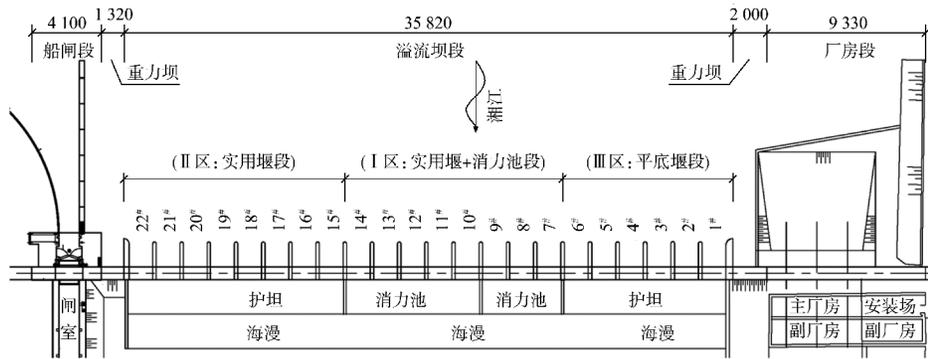


图4 枢纽泄洪闸平面布置 (单位: mm)

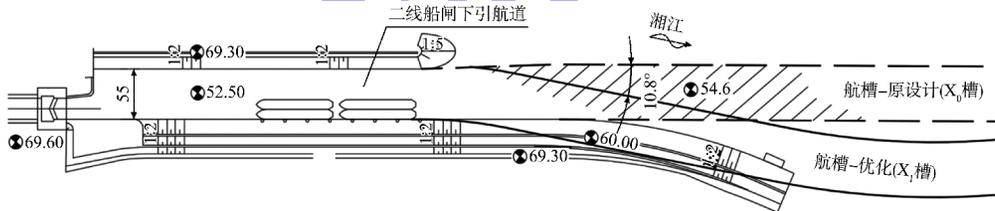


图5 二线船闸下游口门区航槽布置 (单位: m)

3.1 X₀ 航槽通航水流条件

二线船闸 X₀ 航槽口门区特征流速见图6。可以看出，Q 为 1 083~4 900 m³/s 时，枢纽二线船闸下游引航道口门区纵、横、回流均不大，最大回流流速为 0.30 m/s，可满足规范规定的限值；但当 Q ≥ 6 653 m³/s 时，口门区横流有所超标，同时回流明显增大，最大回流流速达到 0.65 m/s，超标较多，且超标河段有一定的长度，船舶通航较为困难。

综合枢纽二线船闸口门区在各级泄流工况下纵流、横流、回流条件分析可知，X₀ 航槽口门区通航流量只能达到 4 900 m³/s，当 Q ≥ 6 653 m³/s 时主要是口门区回流受限。

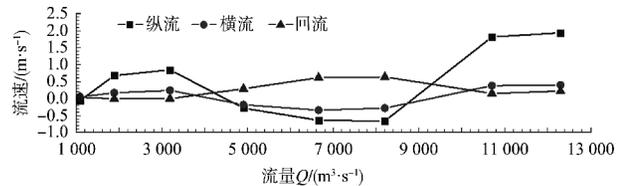


图6 二线船闸 X₀ 航槽口门区特征流速

3.2 X₁ 航槽通航水流条件

二线船闸 X₁ 航槽口门区特征流速见图7。可以看出，Q 为 1 083~4 900 m³/s 时，枢纽二线船闸下游引航道口门区纵流、横流、回流流速均不大，最大回流流速为 0.28 m/s，小于规范规定的限值；但当 Q ≥ 6 653 m³/s 时，口门区横流流速为

0.32 m/s, 有微弱超标, 同时回流明显增大, 最大回流流速达到 0.67 m/s, 超标 0.27 m/s, 船舶通航较为困难。

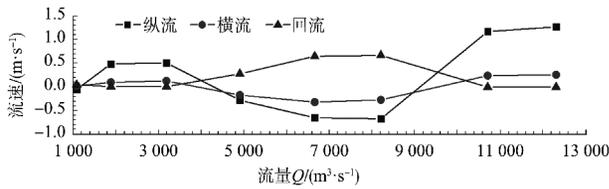


图 7 二线船闸 X_1 航槽口门区特征流速

综上分析, 在常规设计开闸方式下, 口门区通航流量基本可以达到 $4\ 900\ m^3/s$, 但要达到 2 a 一遇 ($6\ 653\ m^3/s$) 有一定困难, 因此, 选取 $Q=6\ 653\ m^3/s$ 作为最不利通航流量进行口门区改善措施研究。

4 边孔补流优化方案

4.1 方案布置

二线船闸隔流堤外侧的斜流对口门区流态影响较大, 当靠近二线船闸左侧的泄洪闸泄流时, 其下泄流量可顶托扩散的主流, 进而减弱二线船闸引航道口门区、连接段斜流及回流, 改善船闸通航水流条件。基于此, 提出边孔(靠近二线船闸引航道的 22#泄洪孔)补流改善措施, 进行数学模型试验研究。综合特征通航流量、水库调动需求及常规调度最不利通航流量, 边孔补流优化方案针对 $Q=6\ 653\ m^3/s$ 设置 7 种开闸工况(表 2), 重点分析靠近 22#边孔下泄流量大小对通航水流条件的影响, 并提出合理的边孔泄流量。

表 2 边孔补流开闸方式试验工况

工况	特征	总流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	坝上 水位/m	坝下 水位/m	尾门 水位/m	开闸方式
A_1	8 孔集中开					泄洪闸 7#~11#孔匀泄 $4\ 200\ m^3/s$, 12#~14#孔匀泄 $1\ 370\ m^3/s$
A_2	边孔补流 $80\ m^3/s$					泄洪闸 22#边孔泄流 $80\ m^3/s$, 泄洪闸 7#~11#孔匀泄 $4\ 120\ m^3/s$, 12#~14#孔匀泄 $1\ 370\ m^3/s$
A_3	边孔补流 $240\ m^3/s$					泄洪闸 22#边孔泄流 $240\ m^3/s$, 泄洪闸 7#~11#孔匀泄 $3\ 960\ m^3/s$, 12#~14#孔匀泄 $1\ 370\ m^3/s$
A_4	边孔补流 $320\ m^3/s$	6 653 (泄洪流量 5 570+电站满发 流量 1 083)	66.10	63.38	62.28	泄洪闸 22#边孔泄流 $320\ m^3/s$, 泄洪闸 7#~11#孔匀泄 $3\ 880\ m^3/s$, 12#~14#孔匀泄 $1\ 370\ m^3/s$
A_5	边孔补流 $480\ m^3/s$					泄洪闸 22#边孔泄流 $480\ m^3/s$, 泄洪闸 7#~11#孔匀泄 $3\ 720\ m^3/s$, 12#~14#孔匀泄 $1\ 370\ m^3/s$
A_6	边孔补流 $560\ m^3/s$					泄洪闸 22#边孔泄流 $560\ m^3/s$, 泄洪闸 7#~11#孔匀泄 $3\ 640\ m^3/s$, 12#~14#孔匀泄 $1\ 370\ m^3/s$
A_7	边孔补流 $720\ m^3/s$					泄洪闸 22#边孔泄流 $720\ m^3/s$, 泄洪闸 7#~11#孔匀泄 $3\ 480\ m^3/s$, 12#~14#孔匀泄 $1\ 370\ m^3/s$

4.2 边孔补流通航水流条件改善效果

4.2.1 X_0 航槽通航水流条件改善效果

各工况下二线船闸 X_0 航槽最大纵流、横流、回流流速见图 8。由图 8a) 可看出, 工况 A_1 为相对均匀的开闸方式, 口门区纵流流速不大, 连接段较强, 最大为 $1.76\ m/s$, 但未超标; 工况 $A_2 \sim A_4$ 的口门区纵流均体现为纵向回流, 整体流速不大, 最大为 $0.63\ m/s$; 工况 $A_5 \sim A_7$ 的口门区纵流流速随边孔补流量的增加逐渐正向增大, 最大为 $0.83\ m/s$, 满足规范要求。由图 8b) 可看出, 工况 $A_1 \sim A_7$ 的口门

区横流流速均不大, 最高为 $0.29\ m/s$, 小于 $0.3\ m/s$ 。但连接段横流流速均超标, 无法满足通航要求。由图 8c) 可看出, 工况 $A_1 \sim A_3$ 的口门区回流流速分别为 0.63 、 0.57 、 $0.41\ m/s$, 均超过规定限值; 工况 $A_4 \sim A_7$ 的回流流速分别为 0.32 、 0.22 、 0.12 、 $0.05\ m/s$, 均小于规定限值 $0.4\ m/s$, 且综合对比各工况可以发现, 口门区、连接段回流流速随 22#边孔补流量的增加逐级减小, 并在工况 A_4 时, 口门区回流流速降低到 $0.4\ m/s$ 以下, 满足规范限值要求。

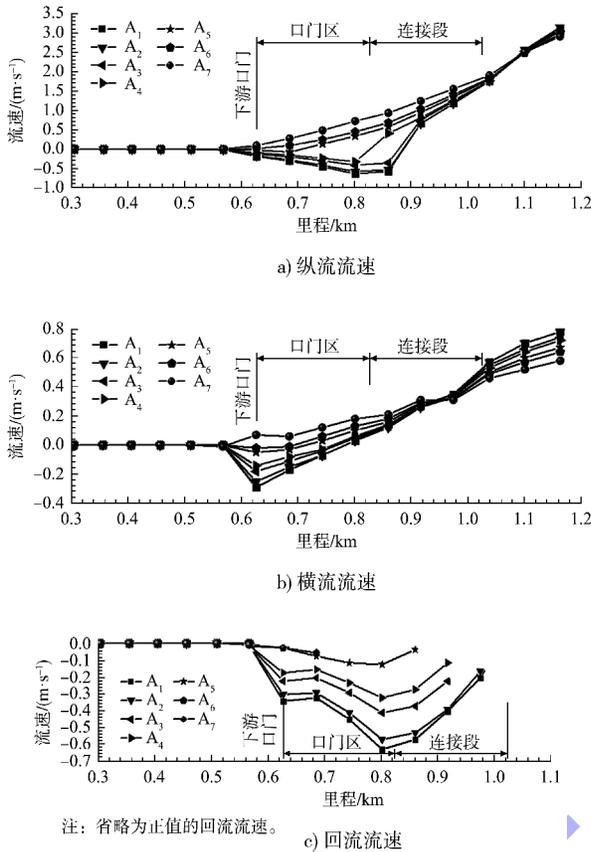


图8 各工况下二线船闸 X₀ 航槽最大纵流、横流和回流流速

综合二线船闸下游引航道口门区、连接段通航条件分析可知，工况 A₅ 纵流流速较小，口门区最大纵流流速为 0.46 m/s；回流流速微弱，口门区、连接段最大为 0.12、0.03 m/s，且相较于工况 A₆，回流流速减小较多，相对而言流态也更佳，同时补流量也不大；横流流速在口门区满足规范要求，在连接段最大为 0.50 m/s，虽有所超标，但相比其他工况横流流速不大，因此工况 A₅(边孔补流 480 m³/s)可作为 X₀ 航槽相对最佳的开闸方式。

4.2.2 X₁ 航槽通航水流条件改善效果

各工况下二线船闸 X₁ 航槽最大纵、横流和回流流速见图 9。由图 9a)可看出，工况 A₁~A₅ 的口门区纵流均体现为纵向回流，最大流速为 0.65 m/s，符合口门区纵流流速的规范要求；工况 A₆、A₇ 口门区纵流流速分别为 0.32、0.45 m/s，满足规范要求。由图 9b)可看出，工况 A₁ 为 7#~14# 集中开闸泄流，口门区横流流速稍微超标，最大横流流

速为 0.32 m/s，基本满足规范要求；工况 A₂~A₇ 为边孔补流，口门区、连接段横流流速均不超标，满足规范要求。由图 9c)可看出，工况 A₁~A₃ 的口门区回流流速相较于 X₀ 航槽有微弱增加，最大回流流速分别为 0.65、0.59、0.43 m/s，不满足通航要求；工况 A₄~A₇ 的回流流速分别为 0.34、0.24、0.13、0.07 m/s，均小于规定限值 0.4 m/s，且综合对比各工况可以发现，口门区回流流速随 22# 边孔补流量的增加呈现逐级削弱的态势，并在工况 A₄ 下，口门区回流流速降低到 0.4 m/s 以下，满足规范限值要求。

综合二线船闸下游引航道口门区、连接段通航条件分析可知，工况 A₅ 边孔补流量适中，纵流流速较小(口门区、连接段最大分别为 0.13、0.50 m/s)，回流、横流流速微弱，均满足通航水流条件，流态改善效果较佳，且补流量不大，因此可将工况 A₅(边孔补流 480 m³/s)作为 X₁ 航槽相对最佳的开闸方式。

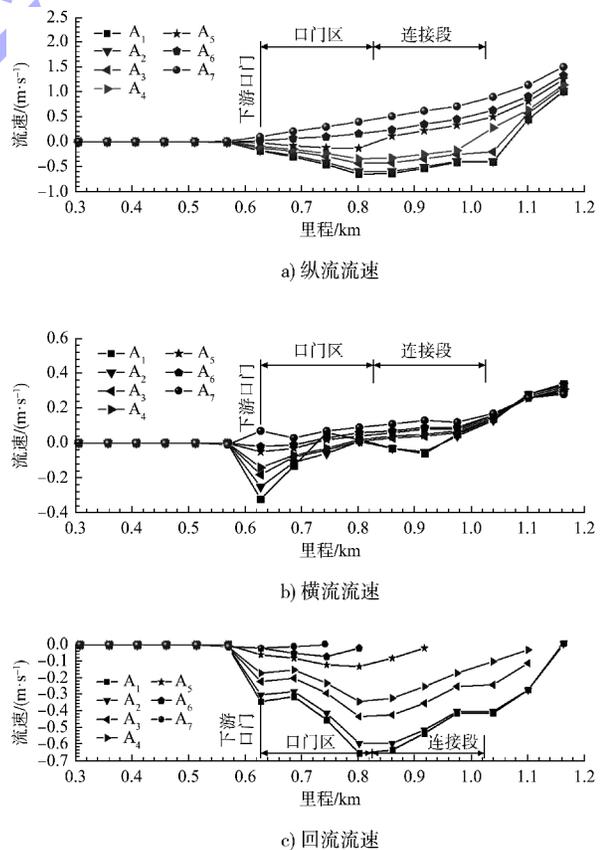


图9 各工况下二线船闸 X₁ 航槽最大纵流、横流和回流流速

4.2.3 合理的开闸方式

为直观体现二线船闸下游引航道口门区、连接段在特征通航流量下水流流态的变化情况,绘制边孔未补流工况和边孔补流 $480 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流态云图,见图10。

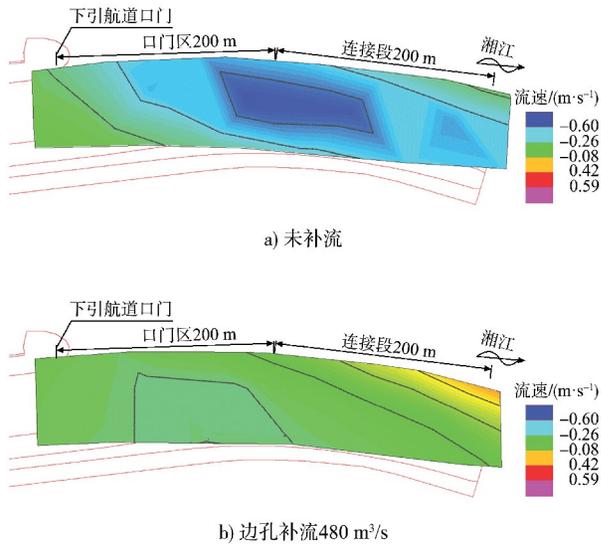


图10 下引航道口门区、连接段流场分布云图

综合 $Q=6\ 653 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下的边孔补流开闸方式试验研究可知,边孔(22#闸孔)适当补流可明显减弱口门区及连接段回流流速,同时纵、横流流速无显著增大。

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流速,同时使纵、横流流速也满足规范要求。

2) 对枢纽二线船闸通航条件有利的开闸方式为: $Q \leq 6\ 653 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,泄洪采用常规开闸方式; $Q > 6\ 653 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 $480 \text{ m}^3/\text{s}$ 。同时本文试验成果可为改善枢纽二线船闸口门区不良流态提供参考。

3) 对比原设计航槽和优化航槽可知,原设计 X_0 航槽在边孔补流方案下,连接段横流均有所超标,无法满足通航要求;而优化方案(X_1 航槽),

横流流速明显减弱,通过适当补流,横流流速可满足要求,同时其纵、回流流速也相对较优,满足规范要求。因而,优化航槽相比原设计航槽流态更优,且 X_1 航槽充分利用了天然河势和自然水流条件,更加利于通航,宜作为推荐航槽。

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.船闸总体设计规范:JTJ/T 305—2001[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):105-110,166.
- [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,米家杉,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] 祁永升.改善船闸引航道口门区流态的补流措施研究:以湘江近尾洲枢纽二线船闸为例[D].重庆:重庆交通大学,2021.