



白石窑一线船闸闸室尺度变更后下引航道 通航水流条件试验研究

彭永勤¹, 彭 涛²

(1. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016; 2. 中煤科工集团重庆设计研究院, 重庆 400016)

摘要: 白石窑枢纽位于广东省英德市上游约 25 km 的北江干流上, 是北江干流上的第 3 个梯级。为提高船闸通过能力, 将白石窑一线船闸闸室长度由 140 m 延长至 220 m, 船闸尺度为 220 m×23 m×4.5 m(长×宽×门槛水深)。通过建立 1:100 比尺的物理模型, 对扩建后下引航道口门区通航水流条件进行研究, 提出下引航道口门区通航条件的改善措施。研究表明: 开挖三板洲及增设直线隔流堤等措施对改善下引航道口门区通航条件是有效的。

关键词: 下引航道; 口门区; 通航水流条件; 开挖

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0106-06

Experimental research on navigation condition of downstream approach channel after change of lock chamber's size of Baishiyao first line shiplock

PENG Yong-qin¹, PENG Tao²

(1. Chongqing Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing 400016, China;

2. CCTEG Chongqing Engineering(Group) Co., Ltd., Chongqing 400016, China)

Abstract: Baishiyao hub locates on the Beijiang River main stream, 25 km upstream from Yingde city. It is the third cascade of the Beijiang River. To improve the passage capacity of the ship lock, the length of the lock chamber of the Baishiyao first line ship lock is extended from 140 m to 220 m. The effective scale of first-line ship lock design is 220 m×23 m×4.5 m (length×width×doorsill water depth). This paper studies the flow condition of the entrance gate of the downstream approach channel by establishing a 1:100 scale physical model. Through the overall hydraulic model test, the paper puts forward the improvement measures of the navigation condition in the entrance area of the downstream approach channel. The study shows that measures such as the excavation of Sanbanzhou and the addition of linear dikes are effective to improve the navigation condition at the entrance of the downstream approach channel.

Keywords: downstream approach channel; entrance area; navigation condition; excavation

船闸的上、下游引航道与河流相连接的口门区及连接段是过闸船舶(队)进、出引航道的咽喉, 船闸引航道口门区水流条件是影响船舶航行安全和通航效率的重要因素, 因此研究改善船闸引航道口门区水流条件具有重要意义。国内已有大量针对引航道通航水流条件的研究成果: 赵志舟等^[1]对乌江银盘电站下游引航道布置及口门区通

航条件进行研究, 主要研究下游引航道长度、隔流墙堤头布置形式、堤身开孔等工程措施以及非工程措施对口门区通航条件的影响, 提出合理的引航道布置方式及运行措施。李伟等^[2]对不同引航道宽度、水流流速、水深等对下引航道口门区回流长度等特性的影响进行研究, 得出船闸下引航道口门区回流长度的计算公式; 朱红等^[3]对顺

直河段船闸下游引航道口门区在无、有导流墩情况下的水流条件进行概化试验研究,认为导流墩是削弱口门区回流、减小横向流速的有效工程措施;韩昌海等^[4]针对飞来峡水利枢纽下游引航道口门区泥沙淤积碍航问题,提出将下游引航道堤头改为浮堤形式的方案,并采用相应的辅助设施,可减小口门区回流强度和泥沙碍航淤积量,从而改善引航道口门区的通航条件;李一兵等^[5]通过对通航水流条件、实船航行情况和船模航行试验资料的分析,提出修筑隔流堤对改善葛洲坝三江下引航道口门区通航条件是有效的;黄明海等^[6]和黄国兵^[7]采用二维非恒定流数学模型,模拟三峡工程上游和下游引航道在不同布置方案和各种枢纽运行方式下的引航道内非恒定水流;李明德等^[8]通过对株洲枢纽船闸下引航道口门区及连接段的河道右岸滩地采用综合整治措施,较好地解决了下引航道口门区及连接段通航、淤积等问题;黄伦超等^[9]对株洲航电枢纽工程施工期通航水流条件进行了研究。

为提高船闸通过能力,将白石窑一线船闸闸室长度由140 m延长至220 m,船闸尺度与二线船闸一致,均为220 m×23 m×4.5 m(长×宽×门槛水深)。一线船闸延长后,主河道被束窄,受船闸和右侧三板洲滩地的约束,主流将斜向流过一、二线船闸口门区和连接段,造成横向流速超标,口门区通航条件较差。为研究白石窑一线船闸闸室尺度变更后下引航道通航水流条件,并提出优化

改善措施,笔者基于北江(曲江乌石—三水河口)航道扩能升级工程白石窑一线船闸闸室尺度变更整体物理模型试验研究成果^[10],提出采取开挖三板洲及增设直线隔流堤等措施改善下引航道口门区通航条件。

1 工程概况

白石窑枢纽位于广东省英德市上游约25 km的北江干流上,是北江干流上的第3个梯级。为提高船闸通过能力,将白石窑一线船闸闸室长度由140 m延长至220 m,船闸尺度与二线船闸一致,均为220 m×23 m×4.5 m。

根据航运规划、航道规划、水运量预测、船型等要求,北江干流上的白石窑枢纽工程通航等級为Ⅲ等,船闸设计代表船型为1 000吨级货船;根据枢纽实际调度运行方式,船闸最高通航流量为敞泄分界流量,即3 860 m³/s,最低通航水位保证率为95%。船闸引航道及口门区最大表面流速纵向不超过2 m/s,横向不超过0.3 m/s,回流流速不超过0.4 m/s。制动段和停泊段的水面最大流速纵向不应大于0.5 m/s,横向不应大于0.15 m/s,静水区与动水区之间的流态可有过渡。

受右侧三板洲及河道河势走向(图1)的影响,在枢纽来流流量 $Q>260$ m³/s时下引航道口门区水流条件较差,横向流速超过规范标准,口门区通航条件较差。笔者对改善下引航道口门区通航条件措施进行研究。

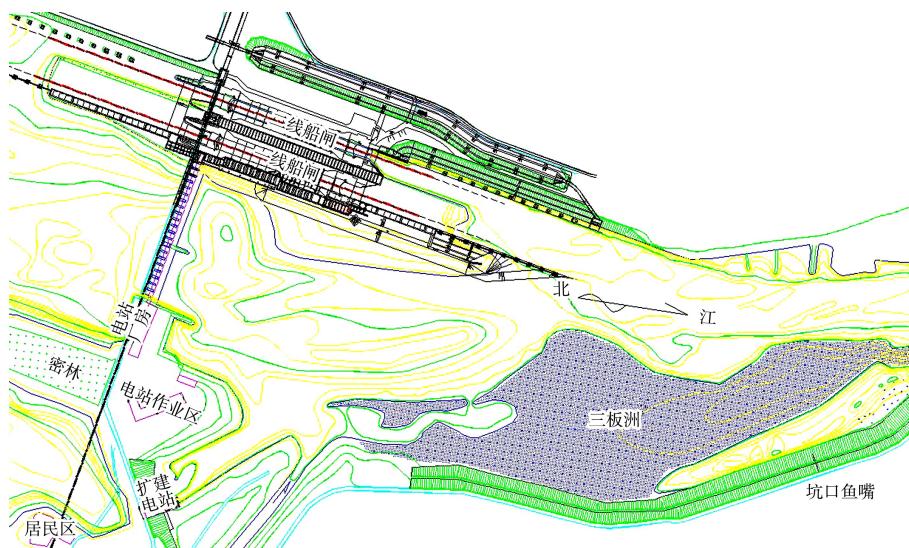


图1 船闸下引航道平面布置

2 设计方案船闸下引航道口门区的通航条件

根据设计拟定的水库运行方式、枢纽通航论证和规范规定, 确定船闸下引航道口门区通航水

流条件的试验工况(表 1)。各测流断面纵横向流速变化范围见表 2 和图 2。

表 1 船闸下游引航道口门区通航水流条件试验工况

| 工况 | 流量/($m^3 \cdot s^{-1}$) | 坝前控制水位/m | 电站开启方式 | 闸门开启情况 | 备注 |
|----|---------------------------|----------|------------------------|--|--------------|
| 1 | 260 | 37.32 | 单机满发 | 全闸关闭 | - |
| 2 | 500 | 37.32 | 1#、3#机组各引用 $250 m^3/s$ | 全闸关闭 | - |
| 3 | 1 000 | 37.32 | 1#~4#机组各引用 $250 m^3/s$ | 全闸关闭 | - |
| 4 | 1 300 | 37.32 | 1#~5#机组各引用 $260 m^3/s$ | 全闸关闭 | - |
| 5 | 2 000 | 36.82 | 电站满发 | 14#~20#闸各开 1 m(右区控开) | - |
| 6 | 3 000 | 36.32 | 电站满发 | 14#~20#闸各开 3 m(右区控开) 1#~22#闸开 1 m(全闸均开) | - |
| 7 | 3 860 | 34.82 | 电站满发 | 14#~21#闸各开 4.5 m, 22#闸开 2.7 m(右区控开) | 枢纽敞泄 分界流量 |

表 2 船闸下引航道口门区设计方案流速

| 断面位置 | 流向 | 流速/($m \cdot s^{-1}$) | | | | | | |
|------|----|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 | 工况 4 | 工况 5 | 工况 6 | 工况 7 |
| X10 | 纵向 | 0~0.27 | 0~0.11 | 0~0.36 | 0~0.56 | 0~0.44 | 0~0.40 | 0~0.77 |
| | 横向 | 0~0.15 | 0~0.07 | 0.01~0.27 | 0~0.23 | 0~0.20 | 0.01~0.13 | 0.08~0.35 |
| | 回流 | 0~0.11 | 0~0.04 | 0~0.16 | 0~0.05 | 0~0.11 | 0~0.02 | 0~0.94 |
| X11 | 纵向 | 0~0.39 | 0~0.35 | 0~0.65 | 0~0.79 | 0~0.61 | 0~0.76 | 0~1.31 |
| | 横向 | 0~0.17 | 0.01~0.16 | 0~0.46 | 0~0.31 | 0.01~0.26 | 0~0.29 | 0~0.41 |
| | 回流 | 0~0.12 | 0~0.04 | 0~0.20 | 0~0.08 | 0~0.05 | 0~0.07 | 0~1.02 |
| X12 | 纵向 | 0~0.39 | 0~0.49 | 0~0.68 | 0~0.87 | 0~0.72 | 0.01~0.78 | 0~1.88 |
| | 横向 | 0~0.17 | 0.01~0.24 | 0.01~0.50 | 0~0.35 | 0~0.28 | 0.04~0.20 | 0.08~0.69 |
| | 回流 | 0~0.07 | 0~0.03 | 0~0.16 | 0~0.08 | 0~0.14 | 0 | 0~1.10 |
| X13 | 纵向 | 0~0.47 | 0~0.81 | 0~0.84 | 0~1.02 | 0~1.04 | 0~1.11 | 0~2.04 |
| | 横向 | 0.03~0.23 | 0.02~0.37 | 0~0.58 | 0.01~0.40 | 0.05~0.45 | 0.01~0.27 | 0.23~0.80 |
| | 回流 | 0~0.07 | 0 | 0~0.18 | 0~0.08 | 0~0.07 | 0~0.04 | 0~1.06 |
| X14 | 纵向 | 0~0.43 | 0.08~0.87 | 0~0.91 | 0~1.05 | 0.08~1.18 | 0~1.13 | 0~2.17 |
| | 横向 | 0.04~0.25 | 0.1~0.53 | 0.08~0.53 | 0.04~0.56 | 0.01~0.52 | 0.02~0.51 | 0.27~1.01 |
| | 回流 | 0~0.05 | 0 | 0~0.15 | 0~0.07 | 0 | 0~0.20 | 0~0.84 |
| X15 | 纵向 | 0.03~0.39 | 0.28~0.92 | 0.04~0.94 | 0.14~1.14 | 0.21~1.37 | 0.09~1.33 | 0~2.28 |
| | 横向 | 0.02~0.29 | 0.12~0.46 | 0.07~0.59 | 0.15~0.70 | 0.06~0.60 | 0.05~0.74 | 0.16~1.09 |
| | 回流 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0~0.50 |
| X16 | 纵向 | 0.04~0.46 | 0.39~0.92 | 0.17~1.02 | 0.25~1.31 | 0.21~1.43 | 0.23~1.48 | 0~2.22 |
| | 横向 | 0.01~0.16 | 0.15~0.45 | 0.07~0.61 | 0.13~0.74 | 0.03~0.58 | 0.09~0.66 | 0.27~1.09 |
| | 回流 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

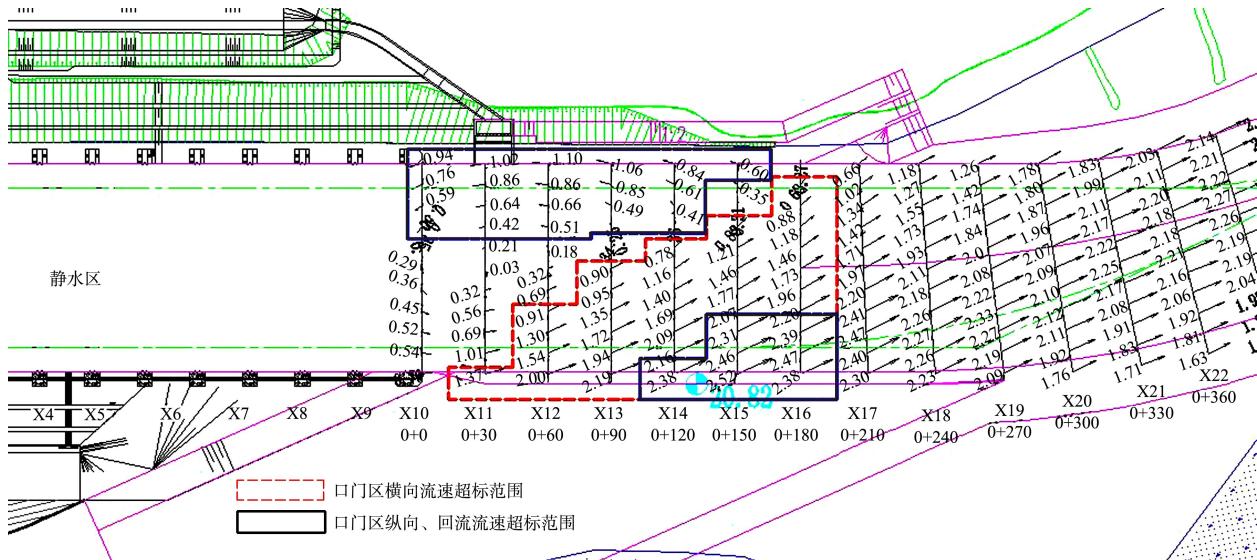


图2 船闸下引航道口门区水流流态($Q=3860 \text{ m}^3/\text{s}$) (单位: m/s)

试验结果表明:受整体河势及下引航道布置方案影响,下引航道口门区及连接段位于三板洲中下部的左侧主河槽和航线转弯段。引航道轴线与上游三板洲左侧主河槽走向交角达到 24° ,上游下泄来流基本斜向进入下引航道口门区及连接段。同时,在三板洲的束窄作用下,该处过流宽度明显不足,造成主流集中于口门区及连接段内,流速较大。因此,在设计方案下,制动段、口门区及连接段处不仅流速较大且流速与航线夹角也较大,在枢纽下泄流量 $Q>260 \text{ m}^3/\text{s}$ (1台机组发电)时,通航水流条件均较差,不能满足船舶通航安全的要求。

3 优化调整方案船闸下引航道口门区的通航条件

通过对设计方案船闸下引航道口门区通航水流条件的分析,经多种优化调整方案对比,推荐采用开挖三板洲及增设直线隔流堤等措施,达到调顺下引航道口门区通航水流条件的目的(图3)。主要优化调整措施如下。

1)对河道右侧三板洲进行开挖疏浚。自上游至下游第4个靠船墩右侧河道开始疏浚,疏浚宽

度210 m,疏浚高程为21.82 m;至下引航道靠船墩末端附近,长约160 m区域内,疏浚高程为20.82 m;其后以1:10的坡比进一步降低疏浚开挖高程,在下引航道靠船墩下游约300 m、横向宽度为94~165 m的区域内,疏浚开挖高程为19.82 m;其后继续以1:10的坡比进一步降低疏浚开挖高程,在下游约400 m、横向宽度30~90 m的区域内疏浚开挖高程为19.32 m。三板洲右侧疏浚开挖边坡坡比为1:4。

2)在下引航道右侧靠船墩末端增设180 m长隔流堤。对于该优化调整方案,隔流堤对下引航道口门区起到了较好的保护作用,进一步降低了口门区整体流速。同时,在隔流堤的保护作用下,下引航道靠船段下游180 m区域内形成制动段,并配合右侧三板洲疏浚开挖,拓宽了口门区及连接段的通航水域宽度,使得在枢纽下泄流量 $Q \leq 3860 \text{ m}^3/\text{s}$ 的各种运行工况下,下引航道口门区及连接段通航水流条件均能满足船舶通航安全的要求(表3、图4)。因此,在不改变电站原有调度运行方式的前提下,本研究将该优化调整方案作为推荐方案。

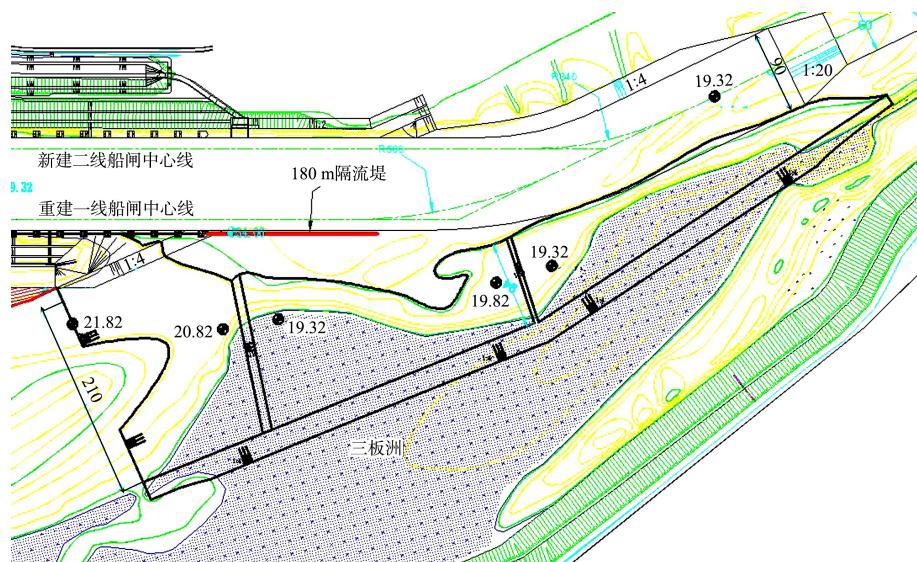


图 3 优化调整方案布置 (高程: m)

表 3 船闸下引航道口门区优化调整方案流速

| 断面位置 | 流向 | 流速/(m·s ⁻¹) | | | | | | |
|------|----|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 | 工况 4 | 工况 5 | 工况 6 | 工况 7 |
| X16 | 纵向 | 0~0.14 | 0.01~0.15 | 0~0.29 | 0~0.40 | 0~0.22 | 0~0.40 | 0.02~0.25 |
| | 横向 | 0~0.01 | 0~0.01 | 0~0.13 | 0.01~0.06 | 0~0.03 | 0~0.03 | 0~0.18 |
| | 回流 | 0~0.02 | 0 | 0~0.01 | 0~0.03 | 0~0.05 | 0~0.03 | 0 |
| X17 | 纵向 | 0~0.3 | 0.01~0.39 | 0~0.71 | 0~0.76 | 0~0.84 | 0~1.36 | 0~1.56 |
| | 横向 | 0~0.05 | 0~0.11 | 0~0.13 | 0~0.13 | 0~0.19 | 0~0.20 | 0.02~0.15 |
| | 回流 | 0~0.02 | 0 | 0~0.01 | 0~0.03 | 0~0.10 | 0~0.02 | 0~0.19 |
| X18 | 纵向 | 0~0.34 | 0.01~0.76 | 0~0.98 | 0~1.21 | 0~1.08 | 0.03~1.60 | 0~1.94 |
| | 横向 | 0~0.04 | 0~0.15 | 0.01~0.14 | 0~0.23 | 0.04~0.22 | 0~0.15 | 0.04~0.26 |
| | 回流 | 0~0.03 | 0 | 0~0.04 | 0~0.04 | 0~0.20 | 0 | 0~0.30 |
| X19 | 纵向 | 0~0.46 | 0~0.83 | 0~1.23 | 0~1.36 | 0~1.31 | 0~1.81 | 0~2.23 |
| | 横向 | 0~0.06 | 0~0.13 | 0.01~0.23 | 0.05~0.23 | 0~0.21 | 0~0.17 | 0.01~0.28 |
| | 回流 | 0~0.04 | 0~0.02 | 0~0.10 | 0~0.08 | 0~0.16 | 0~0.21 | 0~0.41 |
| X20 | 纵向 | 0~0.42 | 0~0.82 | 0~1.05 | 0~1.25 | 0~1.37 | 0~1.73 | 0~2.25 |
| | 横向 | 0~0.08 | 0~0.10 | 0.01~0.11 | 0.08~0.21 | 0.04~0.25 | 0.02~0.29 | 0.01~0.28 |
| | 回流 | 0~0.03 | 0~0.02 | 0~0.08 | 0~0.18 | 0~0.21 | 0~0.20 | 0~0.44 |
| X21 | 纵向 | 0~0.42 | 0~0.79 | 0~1.23 | 0~1.29 | 0~1.39 | 0~1.83 | 0~2.35 |
| | 横向 | 0.02~0.09 | 0~0.09 | 0.01~0.13 | 0.06~0.22 | 0.02~0.25 | 0~0.33 | 0.02~0.33 |
| | 回流 | 0~0.02 | 0~0.02 | 0~0.08 | 0~0.20 | 0~0.16 | 0~0.11 | 0~0.45 |
| X22 | 纵向 | 0.05~0.42 | 0~0.76 | 0~1.23 | 0~1.33 | 0.10~1.43 | 0.02~1.87 | 0~2.33 |
| | 横向 | 0.06~0.10 | 0~0.07 | 0~0.15 | 0.05~0.21 | 0.04~0.25 | 0.03~0.35 | 0.01~0.33 |
| | 回流 | 0 | 0~0.05 | 0~0.10 | 0~0.14 | 0 | 0 | 0~0.30 |

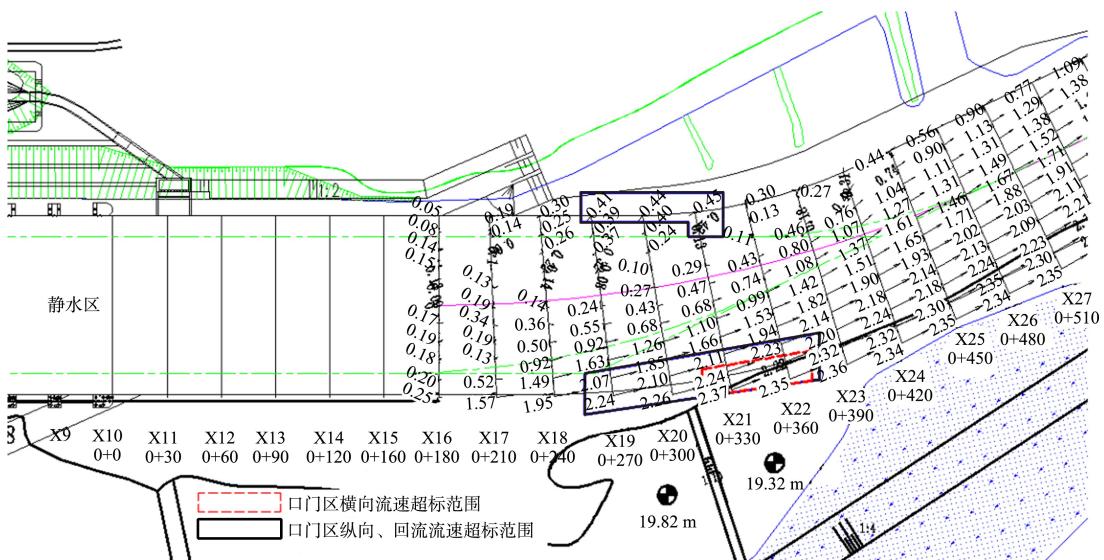


图4 $Q=3860 \text{ m}^3/\text{s}$ 优化调整方案船闸下引航道口门区水流流态 (流速: m/s)

4 结语

1) 白石窑一线船闸闸室尺度变更后, 受船闸和右侧三板洲滩地的约束, 主流将斜向流过一、二线船闸口门区和连接段, 造成横向流速严重超标。通过研究采取梯级开挖三板洲滩地及增设180 m直线隔流堤等优化调整措施来改善制动段、口门区及连接段通航水流条件。

2) 隔流堤对下引航道口门区起到了较好的保护作用, 进一步降低了口门区整体流速。同时, 在隔流堤的保护作用下, 下引航道靠船段下游180 m区域内形成制动段, 并配合右侧三板洲疏浚开挖, 拓宽了口门区及连接段的通航水域, 将通航流量由 $260 \text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $3860 \text{ m}^3/\text{s}$, 极大地改善了下引航道口门区通航水流条件, 为类似工程提供了参考经验。

参考文献:

- [1] 赵志舟, 徐红, 彭凯. 乌江银盘电站下游引航道布置及口门区通航条件研究[J]. 水运工程, 2008(3): 82-86.
- [2] 李伟, 张宝航. 船闸下引航道口门区回流特性及改善措

- [3] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2005(2): 109-112.
- [4] 韩昌海, 王博文. 飞来峡水利枢纽下游引航道口门区通航条件改善途径探讨[J]. 水运工程, 1996(12): 26-29.
- [5] 李一兵, 李发忠. 葛洲坝三江下引航道口门区通航条件改善措施探讨[J]. 水道港口, 2005, 26(3): 154-158.
- [6] 黄明海, 黄国兵. 三峡工程引航道通航水流数值模拟应用研究[J]. 湖北水力发电, 2007(3): 36-39.
- [7] 黄国兵. 三峡工程上游引航道非恒定流数值分析与计算[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 10-14.
- [8] 李明德, 黄伦超, 桑雷. 株洲枢纽船闸下引航道口门区整治措施及效果分析[J]. 水运工程, 2006(8): 79-82.
- [9] 黄伦超, 江诗群, 刘诚. 湘江株洲枢纽工程施工期通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2001(11): 31-34.
- [10] 重庆西南水运工程科学研究所. 北江(曲江乌石至三水河口)航道扩能升级工程白石窑一线船闸闸室尺度变更整体物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2021.

(本文编辑 郭雪珍)