



赣江南支吉里枢纽通航水流条件试验研究 及其优化措施

方锦涛^{1,2}, 赵建钧¹, 辜晋德¹, 王 宇¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 赣江南支吉里枢纽位于 S 形急弯河道, 河势地形复杂, 引航道口门区及连接段水流条件较差, 依托 1:100 整体水工物理模型对其通航水流条件进行研究。结果表明: 1) 枢纽上游水流条件复杂, 通过调整上游航线与主流交角至 31.08°、整治滩地子堤高程至 17 m、土堤退后 30 m、合龙等工程措施, 基本满足水流横向流速在 0.3 m/s 之内的要求。2) 枢纽下游口门区及连接段可通过调整下游切滩角度至 10°使得各项流速指标满足规范要求。

关键词: 船闸; 通航水流条件; 连接段; 弯曲河段

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0139-06

Experimental study on navigable flow conditions of Jili junction in southern branch of Ganjiang River and optimization measures

FANG Jin-tao^{1,2}, ZHAO Jian-jun¹, GU Jin-de¹, WANG Yu¹

(1.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2.Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Jili junction of the southern branch of Ganjiang River is located in the channel with an S-shaped sharp bend and complex river regime topography, and thus the flow conditions in the entrance area of the approach channel and the connecting section are poor. Therefore, this paper studies its navigable flow conditions by the overall hydraulic physical model of 1: 100. The results reveal that 1) the upstream flow conditions of the junction are complicated. The requirement of maintaining the lateral flow velocity within 0.3 m/s can be met by engineering measures including adjusting the intersection angle between the upstream route and the main flow to 31.08°, regulating the elevation of the sub-embankment on the beach to 17 m, retreating the earth embankment by 30 m, and joining the embankment. 2) In the downstream entrance area and the connecting section of the junction, the downstream beach cutting angle can be adjusted to 10° to make each flow velocity indicator satisfy the requirements of the code.

Keywords: ship lock; navigable flow conditions; connecting section; curved reach

船闸上下游引航道口门区及连接段是船舶进出引航道的咽喉^[1], 口门区及连接段的纵、横向流速不应过大, 应避免出现不利水力现象, 如泡漩、严重回流等^[2], 该区域水流状态的好坏直接影响船舶进出船闸顺利与否。在弯曲河段上, 航电枢纽通航建筑物一般具有“滩多、弯道多、直

线段短”的特征^[3-5], 这使得引航道口门区及连接段水流流态较差, 影响船舶的正常航行。赣江南支蜿蜒曲折, 此处滩地发育, 水流条件极其复杂。当前许多文献已对不利通航水流条件的整治进行研究, 但不同工程的情况差别较大, 仍需通过模型试验进一步研究归纳。本文依托吉里枢纽整体

水工模型试验, 分析 S 形急弯河段且河势地形较为复杂时引航道口门区及连接段通航水流条件, 并依此提出相应的优化工程措施。

1 工程概况

赣江南昌枢纽是赣江下游尾闾综合整治控制性工程, 工程在主支、北支、中支及南支河道中下游建闸抬水。吉里枢纽为赣江南支河道修建工程, 其整体布置见图 1。该枢纽主要任务为控制赣江枯期水位, 改善南昌城区水环境, 改善航道、港口运行条件, 为打造赣江“黄金水道”创造有利条件。枢纽主体建筑物从左至右依次为: 明水渠段 117.45 m、滩地溢流堰段 495.53 m(包括鱼道)、底轴驱动翻板闸段 354.1 m、溢流堰段 25 m、船闸段 47 m、值班管理房平台段 54.20 m, 坝轴线总长 1 093.28 m。船闸为单线单级船闸, 主要建筑物包括船闸主体段, 上下游引航道, 导航、靠船、隔流建筑物, 其中线路总长度约 3.6 km。上、下游引航道受场地条件的限制, 为减少岸坡开挖, 导航墙、靠船建筑物设置在左侧, 辅助导航墙设置在右侧。上、下游引航道均采用曲线进闸、直线出闸的不对称布置方式。上游导航墙 518 m、制动段 40 m、停泊段 238 m、调顺段 240 m, 布设 18 个独立靠船墩; 下游导航墙长 569 m、制动段 92 m、停泊段 238 m、调顺段 245 m。为满足枢纽建筑物布置宽度要求并使航道顺直, 船闸轴线与泄水闸轴线垂直。泄水闸泄流总净宽 300 m, 共设 6 孔, 正常蓄水位 15.5 m。拟建南支吉里枢纽船闸等级为Ⅲ级, 设计水头 4 m, 闸室尺寸 180 m×23 m×4 m(长×净宽×门槛水深)。

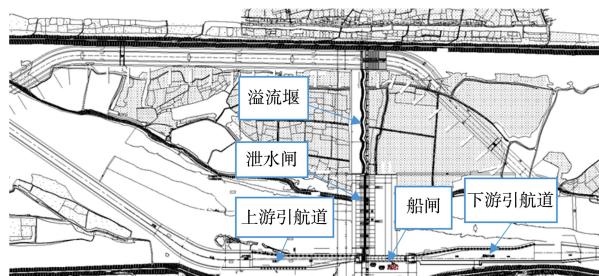


图 1 吉里枢纽整体布置

由图 2 可看出吉里枢纽闸址上游为约 135° 弯道段, 弯道凸岸的滩地高程约 16 m, 河流经凹岸后至较顺直的闸址处, 河流呈东西向流经闸址。河道右侧大堤内侧为筑堤开挖取土而形成的明渠, 明渠沿程局部有残留堤埂, 堤埂高程约在 16 m。右岸滩地外围筑有土堤且存在局部缺口, 堤顶高程约 18.5 m。弯道附近深泓偏向左岸, 通过弯道后, 深泓逐步右移偏向右岸, 弯道下游主流流向基本与深泓线保持一致。



图 2 吉里枢纽区洪期卫星图

2 模型制作及量测手段

2.1 整体物理模型

模型几何比尺 1:100, 主要采用 Fr 相似准则进行设计。考虑到枢纽整体布置及吉里枢纽上下游河段河势特点, 模拟范围确定为闸址上游 5 km 河段至下游 4 km 河段。流速采用 ADV 三维流速测速系统测量, 量程 0.1~400 cm/s; 流量采用标准量水堰测控, 误差范围 $\leq 1\%$; 水位采用自动跟踪水位计及测针进行测量, 精度 0.02 mm。

根据河段实测资料, 选取 $795 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量进行模型水面线率定(图 3)。结果表明: 模型实测水位与原型水位基本一致, 两者相差在 0.06 m 之内, 满足相关规范要求, 因此, 模型与原型之间的相似性良好。

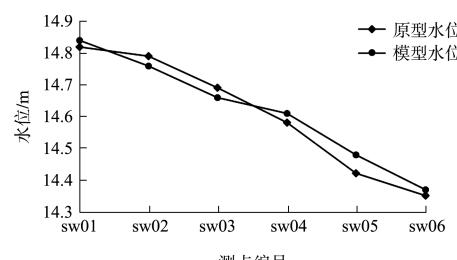


图 3 $Q=795 \text{ m}^3/\text{s}$ 时水面线验证

JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[6]规定口门区流速指标限值: III 级航道, 纵向流速 $v_y \leq 2.0 \text{ m/s}$, 横向流速 $v_x \leq 0.3 \text{ m/s}$, 回流流速 $v_{\text{回}} \leq 0.4 \text{ m/s}$, 引航道内宜为静水区。

2.2 试验工况

吉里枢纽根据实际水文条件及枢纽布置, 并结合畅洪调枯的水位原则, 通过多种泄洪方案比较优选不同流量级下的闸孔开启方式作为试验工况, 其中工况 6 为 3# 闸门全开、4# 闸门开启 26° 、其余闸门开启 90° , 各试验工况见表 1。

表 1 吉里枢纽试验工况

| 工况 | 频率/% | 泄流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | 上游水位/m | 下游水位/m | 备注 |
|----|------|---|--------|--------|----|
| 1 | 5 | 5 050 | 18.16 | 18.11 | 敞泄 |
| 2 | 10 | 4 320 | 17.95 | 17.91 | 敞泄 |
| 3 | 常遇洪水 | 3 000 | 17.62 | 17.60 | 敞泄 |
| 4 | 常遇洪水 | 1 840 | 16.72 | 16.70 | 敞泄 |
| 5 | 常遇洪水 | 1 000 | 15.02 | 15.00 | 敞泄 |
| 6 | 常遇洪水 | 795 | 14.88 | 14.48 | 控泄 |
| 7 | 常遇洪水 | 350 | 13.31 | 13.31 | 敞泄 |

3 上游引航道通航水流条件

3.1 原设计方案下通航水流条件

对 7 个工况分别进行试验, 试验结果表明: 吉里枢纽河道主流位于凹岸一侧, 当上游引航道口门区位于凹岸时有利于航线与主流的衔接, 故在 7 个工况下上游引航道口门区纵、横向流速均满足规范要求。当 $Q \leq 1 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 口门区及连接段上最大纵向流速为 0.96 m/s , 最大横向流速为 0.24 m/s , 满足通航要求; 当 $Q > 1 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 连接段上部分范围内(口门上游 1 km 处、连接段与深泓连接部位、连接段弯道末端)的横向流速超过规范要求, 需采取工程措施予以整治。

3.2 优化方案下通航水流条件

当前改善通航水流条件分为两大措施: 工程措施及非工程措施。工程措施主要包括调整水流与航线夹角、布设导流墩^[7]、导航堤开孔^[8-9]、优化疏浚、修建丁坝潜坝^[10]等; 非工程措施主要包括调节泄水闸不同开启方式^[11]及机组发电台数^[12], 但不管是工程还是非工程措施, 最终都是

从降低流速、调整流向、改善流态等方面入手^[13]。

原布置方案下上游引航道口门区与连接段上横向流速超标的原因主要有以下 3 个方面: 1) 口门上游 1 km 处滩地上来流在土堤缺口部位水流集中流出, 并对河道主流产生压迫; 2) 由于闸址上游存有约 135° 急弯河段, 弯道附近主流偏向左岸, 主流与连接段起始段中心线夹角较大; 水流经 135° 急弯河段后由于受到闸址处凹岸的影响, 主流偏向右侧, 在上引航道连接段直线段上, 主流流向与航线夹角基本呈 35° , 导致连接段直线段与深泓连接部位横向流速过大; 3) 右侧明渠来流冲击连接段弯道末端。经模型试验发现: 在 $Q = 5 050 \text{ m}^3/\text{s}$ 通航流量下, 闸前水位 18.11 m , 残留堤埂处水深约 2 m , 见图 4, 堤水从堤埂顶部溢流, 此时堤埂下游形成类似于实用堰流态, 船闸上引航道口门区以上基本处于堰流消能区, 该区域内流态复杂。

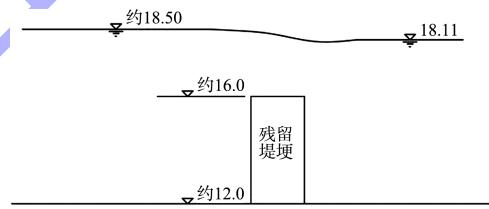


图 4 $Q = 5 050 \text{ m}^3/\text{s}$ 下残留堤埂处示意 (单位: m)

针对上述原因采取如下措施: 1) 对滩地土堤缺口进行适当加高封堵以减弱集中出流的影响; 2) 为减小航道连接段起始处横向流速, 连接段起始处航线向右侧偏移, 转弯段末端向下游偏移, 同时对连接段直线段与深泓连接处航线进行调整, 为减小水流流向与航线交角, 将连接段直线段偏转角调整为 31.08° , 以削弱横流强度; 3) 如欲避免形成堰流, 则应对残留堤埂进行拆除, 但拆除堤埂必然增加过流流量, 导致连接段水流条件更加复杂, 故应结合右侧明渠内的残留堤埂, 对其进行加高, 切断明渠来流。但右岸滩地子堤整治过高会造成滩地不过流, 导致出现明显壅水现象, 经模型试验比较优选子堤顶高加高到 17.0 m 的措施。调整措施见图 5。

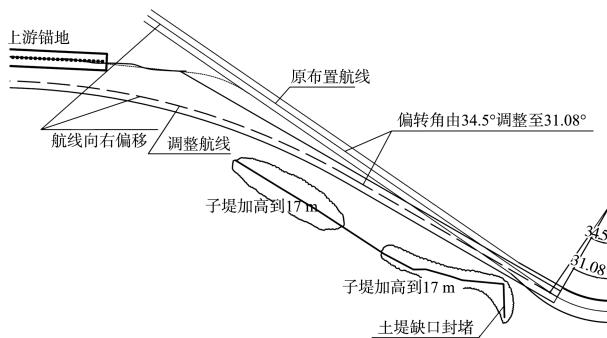
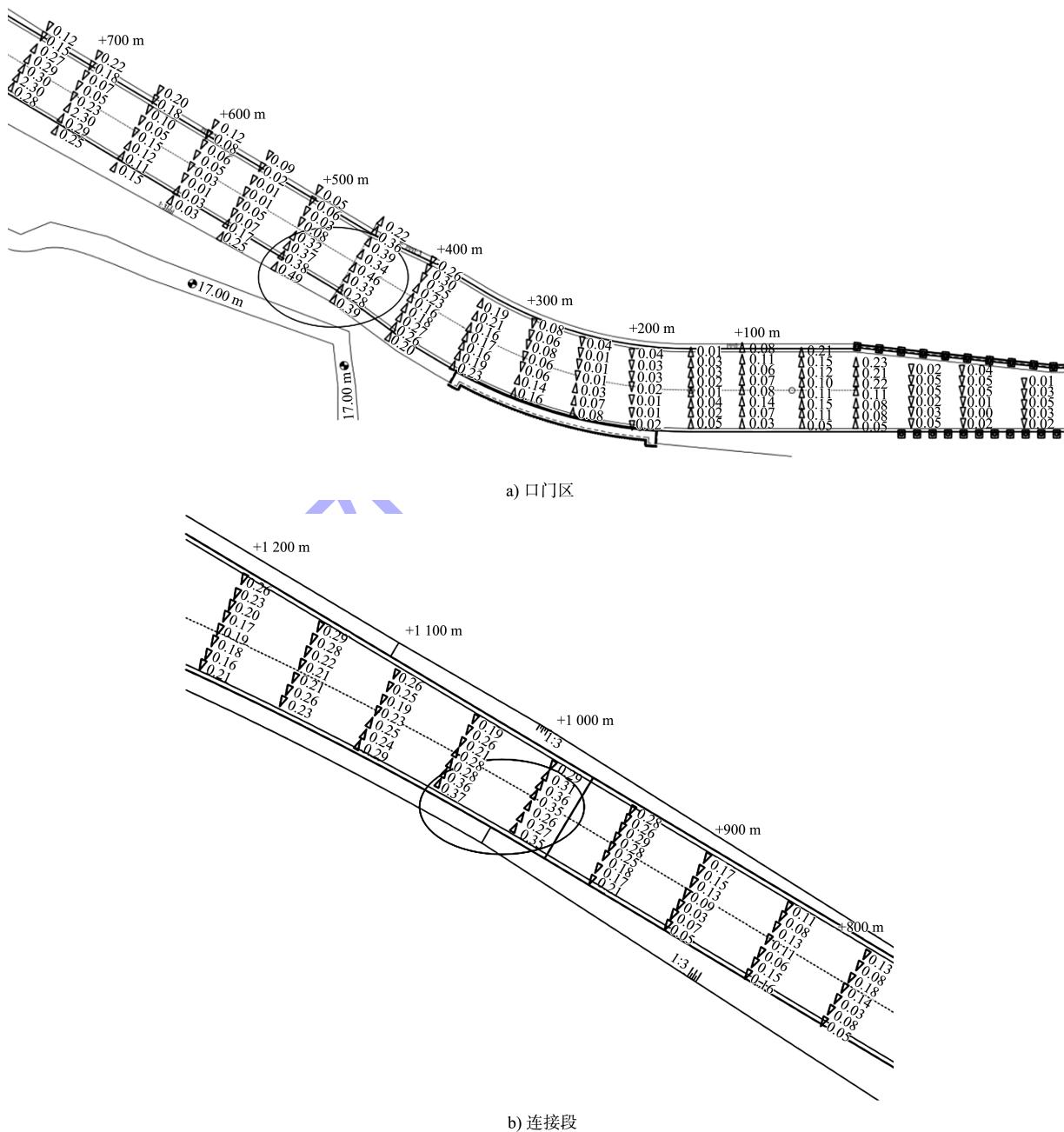


图 5 上游调整布置 I

对各工况下流速进行测量,结果表明:当 $Q \leq 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,上游引航道口门区及连接段流

速指标均符合规范要求。在 $Q = 5\,050 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q = 4\,320 \text{ m}^3/\text{s}$ 通航流量下,航道内大部分位置横向流速小于 0.30 m/s ,与原布置方案相比,调整方案 I 采取土堤加高措施使缺口附近航道内的流速分布均匀,主流扩散充分,明显改善了原布置方案下大范围横向流速过大的问题,但在航道弯道处的右侧(口门上游约 450 m)和口门上游 1 km 处土堤缺口附近航道内部分位置(图 6),平均横向流速超过 0.35 m/s 。由上述分析可知需对横向流速超标位置进行局部地形调整。

图 6 $Q = 5\,050 \text{ m}^3/\text{s}$ 优化后枢纽上游引航道口门区及连接段横向流速分布 (流速: m/s)

3.3 进一步优化方案下通航水流条件

在调整方案Ⅰ下, 航道弯道处土堤距离航道较近, 水流越过土堤后, 流线在较短的范围内急剧弯曲, 导致弯道处水流横向流速偏大; 另外口门上游1 km处土堤存在缺口, 水流通过缺口直冲航道, 导致航道右侧部分位置横向流速超标。

针对上述原因, 在调整方案Ⅰ的基础上, 调整方案Ⅱ将弯道处的土堤退后30 m以减小土堤对水流的不利影响; 并将口门上游1 km处的土堤缺口合龙以避免航道弯曲处水流出现横向扩散过大的现象, 此外保证土堤前后高程为17 m不变。采取相应措施后, 不同工况下的上游口门区及连接段的流速测量结果见表2。

表2 优化方案下上游引航道口门区及连接段流速测量结果

| 流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) | 最大纵向流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 最大横向流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 备注 |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|
| 5 050 | 1.30 | 0.31 | 口门上游1 200 m处航道左侧极小部分测点横向流速超标, 超标幅度较小 |
| 4 320 | 1.35 | 0.32 | 口门上游1 150~1 200 m区间航道右侧极小部分测点横向流速超标, 超标幅度较小 |
| 3 000 | 1.16 | 0.27 | 横向流速未超限值 |
| 1 840 | 1.12 | 0.13 | 横向流速未超限值 |
| 1 000 | 0.87 | 0.15 | 横向流速未超限值 |
| 795 | 0.85 | 0.14 | 横向流速未超限值 |
| 350 | 0.72 | 0.24 | 横向流速未超限值 |

试验结果表明: $Q=5 050 m^3/s$ 通航流量下, 航道弯曲处最大横向流速为0.25 m/s, 原土堤缺口处最大横向流速为0.28 m/s, 调整方案Ⅱ明显改善了调整方案Ⅰ中航道弯曲和土堤缺口附近水流条件。可以看出, 上游引航道口门区及连接段采取一系列优化工程措施后, 通航流量由原先的 $Q=1 000 m^3/s$ 提高至 $Q=5 050 m^3/s$ 。

针对上述原因分析并结合下游引航道连接段附近河道地形条件, 需对切滩角度进行调整, 以此削弱切滩绕流压迫作用并减小航线与水流的交角以降低横向流速分量。

下游调整布置Ⅰ将左岸切滩边线偏转角调整为15°(图7), 试验结果表明: 在 $Q=5 050 m^3/s$ 通航流量下, 下游引航道口门区及连接段上航道中心线左侧基本超过了0.30 m/s, 最大横向流速0.48 m/s, 较原方案下横向流速有一定改善, 但该调整布置仍不满足通航要求。

针对在调整布置Ⅰ下横向流速依旧超标的问题, 调整布置Ⅱ, 再次减小左岸切滩边线偏转角(由15°调整为10°), 见图7。

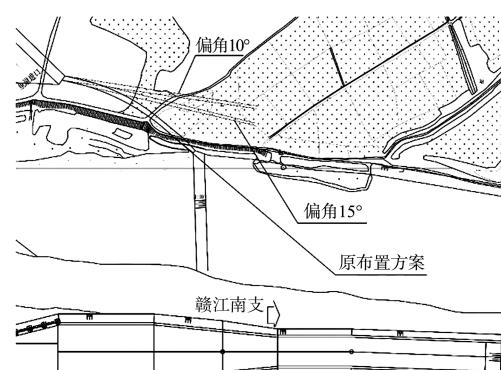


图7 下游调整布置Ⅰ(偏角15°)和调整布置Ⅱ(偏角10°)

4 下游引航道通航水流条件

4.1 原设计方案下通航水流条件

试验结果表明: 当 $Q < 3 000 m^3/s$ 时, 下游引航道口门区及连接段内流速指标均满足规范要求。当 $Q \geq 3 000 m^3/s$ 时, 在口门区连接段内距导航墙顶部180~450 m区间水流横向流速均普遍超过0.30 m/s。因此, 在 $Q \geq 3 000 m^3/s$ 下枢纽原布置水流条件不满足通航要求。

4.2 优化方案下通航水流条件

枢纽下游原布置方案下横向流速超标主要原因是: 1)泄水闸下泄水流向右横向扩散; 2)受泄水闸下游左侧切滩线的压迫转向(水流流向与切滩线延长线近似平行), 主流偏转角度较大且过水断面面积偏小, 口门区及连接段水流流态较差。

对下游调整布置Ⅱ下 $Q=5\,050\text{ m}^3/\text{s}$ 通航流量工况进行流速测量, 横向流速分布见图8。试验结果表明: 在下游连接段上航道左边线附近个别点横向流速超过了 0.30 m/s , 最大 0.31 m/s , 基本可以满足通航水流条件要求。对在下游调整布置Ⅱ

下其他6个工况分别进行了试验, 结果表明: 在所有工况下, 下游引航道口门区及连接段流速指标均基本满足规范要求。可以看出, 通过调整切滩角度, 扩大了下游过水断面的面积, 水流平顺, 通航流量由原先的 $Q=3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 提高至 $Q=5\,050\text{ m}^3/\text{s}$ 。

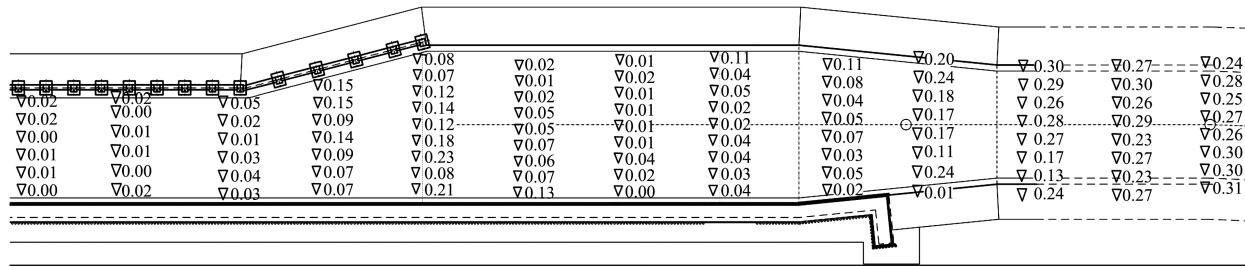


图8 调整布置Ⅱ下 $Q=5\,050\text{ m}^3/\text{s}$ 时下游口门区及连接段横向流速分布 (流速: m/s)

5 结论

1) 受坝址河段弯道和地形的影响, 枢纽原设计布置上下游引航道通航水流条件复杂, 在流量 $Q>1\,840\text{ m}^3/\text{s}$ 时上下游引航道连接段局部横向流速超过 0.3 m/s , 须采取工程措施以满足船舶的正常航行。

2) 通过将上引航道连接段偏转角度调整为 31.08° 、整治右侧滩地子堤高程到 17 m 、将口门上游土堤退后、缺口合龙、调整下游泄水闸段左岸边界使挑流角度至 10° 等工程措施, 改善了船闸上下游引航道口门区及连接段通航水流条件, 最大通航量基本满足规范要求的 20 a 一遇洪水标准。

参考文献:

- [1] 姜楚, 赵建钧, 翁晋德. 青田水利枢纽通航水流条件试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(2): 74-80.
- [2] 黄骏, 赵建钧, 翁晋德. 大角度弯道河流通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2017(4): 146-150.
- [3] 韩康, 余凯文, 赵建钧, 等. 常山江阁底枢纽通航水流条件及方案优化试验研究[J]. 水运工程, 2021(8): 139-144.
- [4] 韩昌海, 余之光, 杨宇. 小溪滩枢纽通航建筑物平面优化布置[J]. 水运工程, 2013(6): 99-102.
- [5] 郝媛媛, 普晓刚, 李君涛. 长沙枢纽船闸下游口门区出

- [6] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [7] 徐国兵. 株洲航电枢纽平面布置研究[J]. 水运工程, 2008(6): 108-111.
- [8] DE JONG R J, VRIJER A. Mathematical and hydraulic model investigation of longitudinal forces on ships in locks with door filling systems[R]. Delft: Delft Hydraulic Laboratory, 1980.
- [9] CASULLI V. Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal co-ordinates[J]. International journal for numerical methods in fluids, 1997, 25 (6): 645-648.
- [10] 程璐, 赵建钧, 翁晋德. S形弯曲河段低水头闸坝枢纽口门区通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2016(12): 106-112.
- [11] 张羽, 杜庆君, 李卓普, 等. 泄水闸调度方式对凸岸船闸通航水流条件影响的试验研究[J]. 水运工程, 2021(4): 97-101, 152.
- [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.
- [13] 韩昌海, 余之光, 杨宇. 小溪滩枢纽通航建筑物平面优化布置[J]. 水运工程, 2013(6): 99-102.

(本文编辑 武亚庆)