



白河包营枢纽船闸下游口门区优化方案研究*

付旭辉, 杜洪源, 龚慧玲, 何京霖, 张 波

(重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 包营枢纽下游引航道口门区流场复杂、混乱。为保障内河船舶通航安全, 对枢纽下游河道整体水域进行数值模拟研究, 分别对比分析扩宽河道、扩宽河道+口门区设置导流墩、扩宽河道+布置隔流堤 3 种优化方案前后的枢纽通航条件。结果表明, 原始方案中, 当流量最大时横流、纵流最大流速分别为 0.95、3.60 m/s, 超出 0.65、1.60 m/s 的安全限值, 且延长隔流堤导致末尾处下泄主流出现较大回流、横流的不良流态。最终选定在扩宽河道的基础上设置导流墩为最佳优化方案, 与其他方案相比, 此方案可加强主流与口门区局部流场的动量交换, 减小速度梯度以及主流与口门区夹角, 显著改善口门区水流条件, 保障船舶通航安全。

关键词: 口门区; 下游引航道; 通航水流条件; 方案优化

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0090-08

Optimization scheme for downstream entrance area of Baoying Hub ship lock in White River

FU Xuhui, DU Hongyuan, GONG Huiling, HE Jinglin, ZHANG Bo

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The flow field in the entrance area of the downstream approach channel of Baoying Hub is complicated and chaotic. In order to ensure the safety of the inland ship's navigation, we conduct a numerical simulation study on the overall waters of the downstream riverway of Baoying Hub, and compare and analyze the navigable flow conditions before and after the implementation of three optimization schemes, such as widening riverway, widening riverway + arranging diversion piers in the entrance area, and widening riverway + arranging partition dikes. The results show that in the original plan, the maximum rates of transverse and longitudinal flow are 0.95 m/s and 3.60 m/s when the flow is maximum, which exceed the safety limits of 0.65 m/s and 1.60 m/s. The extension of the partition dikes causes the bad flow pattern of large backflow and cross flow at the end. Arranging diversion piers on the basis of the widening river is selected as the best optimization scheme. Compared with other schemes, this scheme can strengthen the momentum exchange of mainstream and local flow fields in the entrance area, reduce the rate gradient and the angle between the main stream and the entrance area, and significantly improve the flow conditions of the entrance area to ensure the safety of ship navigation.

Keywords: entrance area; downstream approach channel; navigable flow condition; scheme optimization

船闸是使船舶克服航道集中水位落差的厢形通航建筑物, 船闸上下游引航道是船舶通航的关键部分。而引航道口门区的水流条件直接受河道地形以及闸门泄洪调控方式等方面的影响。部分

键部分。而引航道口门区的水流条件直接受河道地形以及闸门泄洪调控方式等方面的影响。部分

收稿日期: 2023-12-25

*基金项目: 重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目 (cstc2018jszx-zdyfxmX0021-05); 重庆市教育委员会“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目 (KJCXZD2020030); 贵州省交通运输厅科技项目 (GZJT2021-221-012); 长江航道局科研项目 (CJHDJHT20211200041)

作者简介: 付旭辉 (1976—), 男, 博士, 副教授, 从事水利工程、生态水利研究。

主流受自身挤压和扩散影响与口门区水流存在较大的流速梯度, 会在口门区产生局部斜流、横流、漩涡以及回流^[1]等不良流态, 严重影响船舶通航安全, 作用原理见图 1。故上下游引航道口门区水流条件是否满足通航安全指标至关重要。

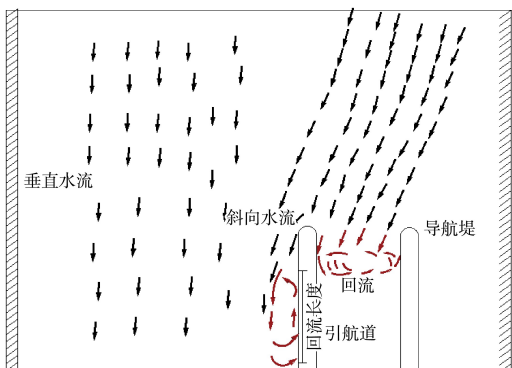


图 1 斜流和回流作用原理

近年来, 为提升和改善船舶通航能力和航运效益已有很多学者对改善船闸通航水流条件进行研究, 并提出了相关工程措施和改进方案, 例如改善泄流闸门开启方式、河道边界, 建立隔流堤^[2]和导流墩^[3]等。杨忠超等^[4]建立麻石枢纽下游河道的整体二维水流模型并开展仿真模拟, 通过布置隔流堤与导流墩分析比较各个优化方案的口门区的通航水流条件, 得出满足通航安全指标的最优布置方案; 郑红杰^[5]依托某航电工程通航水力学模型试验, 对比分析不同流量和不同隔流堤与导流墙夹角条件下的上游口门区的流场分布, 得出隔流堤与导流墙之间夹角存在阈值; 张羽等^[6]采用物理模型试验与数值模拟相结合的方式, 通过改变节制闸调度方式对船闸上游引航道及口门区通航水流的水力特性进行研究, 得出在流量一定的情况下, 通过控制调度方式, 可以有效削弱回流及斜流效应的结论; 祁永生等^[7]针对引航道不良水流流态, 通过孔口补流、人工补流等措施建立边孔泄流量与总泄流量河道特性的关系, 改善引航道口门区水流条件; 唐溪^[8]针对窄深河道枢纽在引航道口门区设置潜坝, 通过改变潜坝挑流角度改善口门区的水流条件。

综上所述, 目前改善引航道水流条件的措施很多, 但针对上游弯曲河道和下游缩窄河道地形的口门区水流特性研究较少。本文依托白河流域包营枢纽, 对河道缩窄河段口门区水流条件进行数值模拟研究, 针对不良流态提出优化措施, 并对比实施方案前后通航条件。研究结果可为后续建设包营枢纽物理模型以及改善包营枢纽船闸工程通航水流条件提供技术支持。

1 工程概况

包营枢纽船闸及上下游引航道工程布置于白河左岸, 建筑物区地貌由河床、漫滩、一级阶地组成。由于受地形地势和河流走势的制约, 包营枢纽大坝轴线位于上游一个“S”弯道下部的直线过渡段上, 下游引航道衔接处河道逐渐缩窄, 枢纽河段河势见图 2。

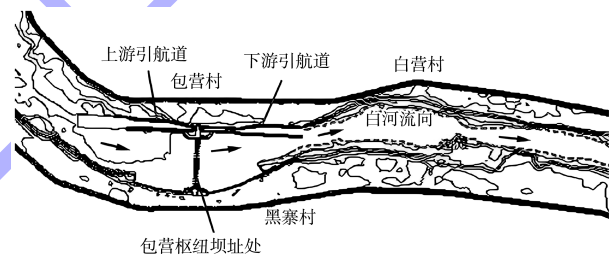


图 2 枢纽河段河势

挡水建筑物的闸顶高程为 107.7 m, 最大坝高 21.7 m。泄水建筑物的形式为开敞式泄水闸, 消能方式为底流消能枢纽布置为左岸船闸+河床泄水闸, 从左至右分别为 8 孔控泄区、12 孔敞泄区, 右侧为空箱式岸墙, 枢纽平面布置见图 3。包营枢纽所在河段航道等级为Ⅲ级, 包营枢纽船闸为单线单级船闸, 船闸最大过船吨位为 1 000 t, 年设计通过能力为 1 316 万 t。设计代表船型尺度为 85.0 m×11.0 m×2.0 m(长×宽×吃水), 闸室有效尺度为 200.0 m×23.0 m×4.0 m(长×宽×槛上水深)。整个船闸由上游引航道、上闸首、闸室、下闸首及下游引航道组成, 船闸整体布置呈对称性。制动、停泊、导航段长分别为 130、200、196.26 m, 船闸主体段 253 m, 其中闸室段 193 m, 上下闸首各 30 m。

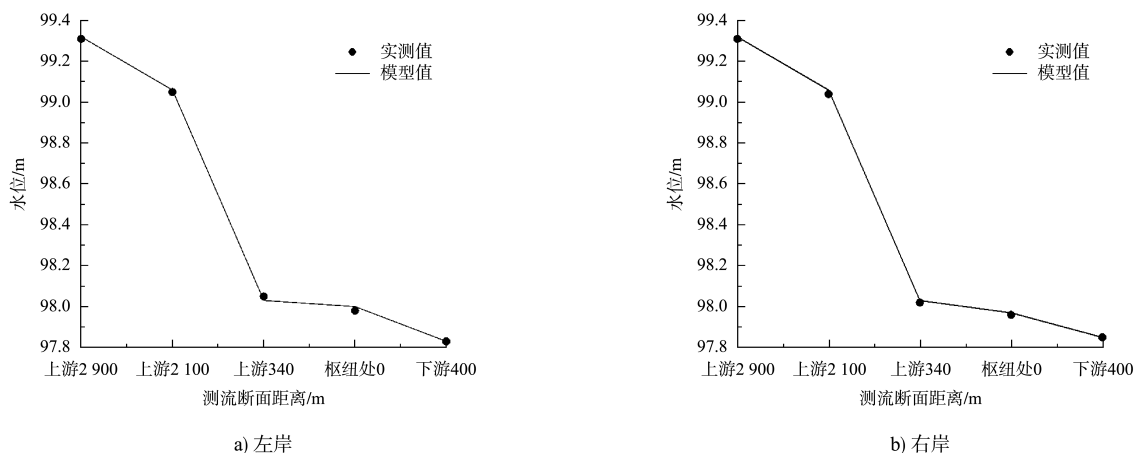


图 5 左、右岸水位验证

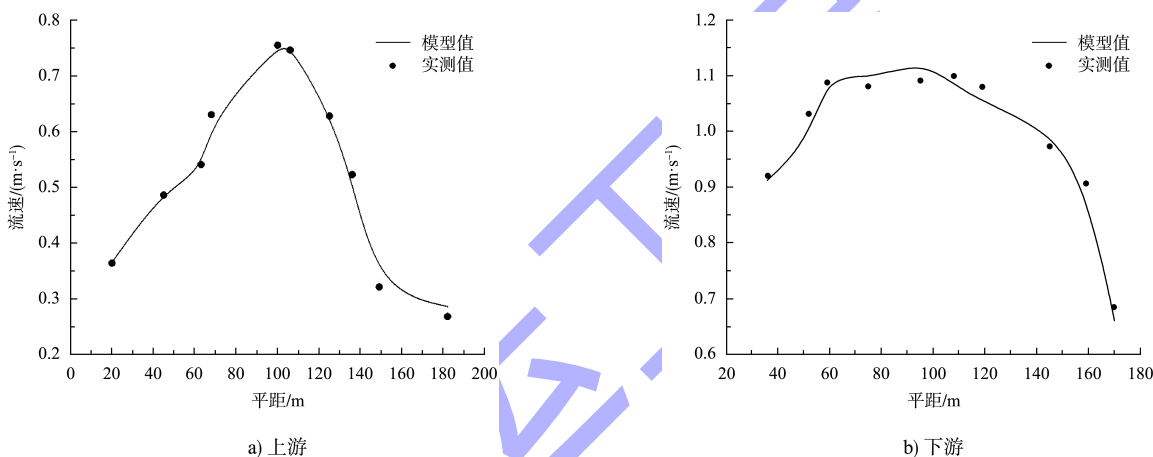


图 6 上、下游断面流速验证

通过不同糙率系数的试算得出, 当流量为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$, 且模型糙率曼宁系数为 0.032 时, 模型的左右岸计算水位与实测左右岸水位误差均保持在 $\pm 0.1 \text{ m}$ 以内。且上下游各断面的平距流速变化与实测断面流速基本一致, 相对误差控制在 5% 以内, 达到了水流相似要求, 可以进行下一步的水流特性研究。

3 下游口门区通航条件分析与比选

3.1 口门区安全通航标准

根据泄水系统不同的运行工况以及白河多年来流分析, 共选取覆盖枯水、中水、洪水期的 10 级流量 $426 \sim 5\,660 \text{ m}^3/\text{s}$ 。以口门区出口为 0 断面, 在上下游每隔 50 m 设置 6 个测流断面 ($-50 \sim 200 \text{ m}$), 较为全面地探究上下游口门区不同方案的优化效果。

依据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[9] 以及 GB 50139—2014《内河通航标准》^[10], III 级航道船闸上下游引航道口门区最大流速限值见表 1。

表 1 设计方案上引航道通航水流条件

位置	最大纵向流速 $v_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	最大横向流速 $v_x/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	最大回流流速 $v_r/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
口门区	2.0	0.30	0.40
引航道停泊区	0.5	0.15	0.15

3.2 下游口门区方案布置

由于受地形限制, 主流河道与下游引航道入汇处河道较窄, 可能导致下游口门区在主流入汇后流速较大, 水流条件较差。为此在原有方案基础上对岸边滩突出部分进行开挖, 拓宽主流过流面积, 右岸开挖断面见图 7。并在改造后的基础上分别在口门区处设置 7 个 10 m 导流墩, 每个导流墩间距为 5 m, 共计 100 m, 以及 100 m 长隔流

堤。下游口门区各方案布置见图 8，通过对比 3 种优化方案的水流条件选取引航道最优方案。

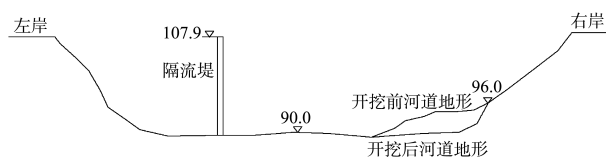


图 7 右岸开挖部分断面 (单位: m)

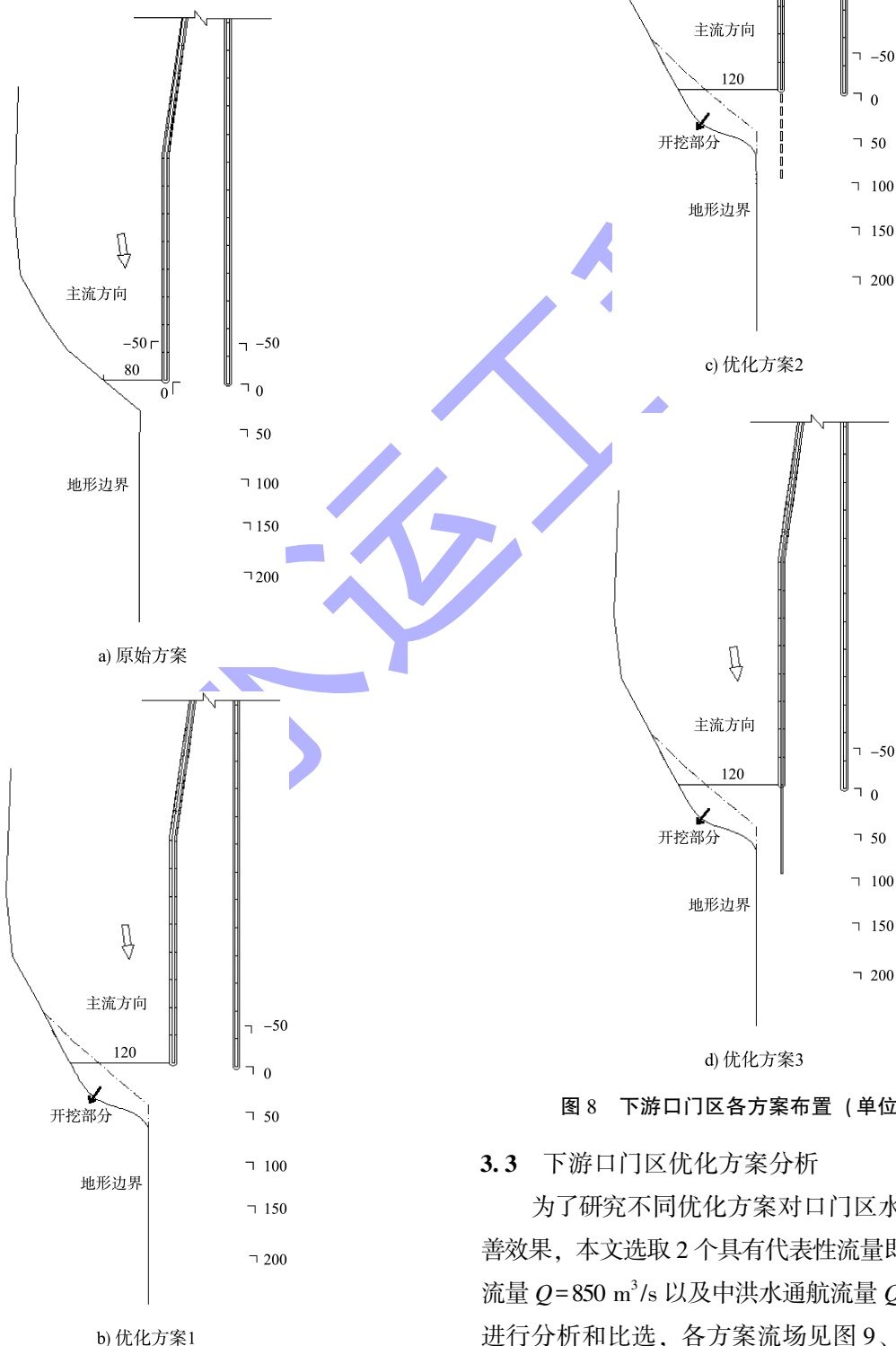
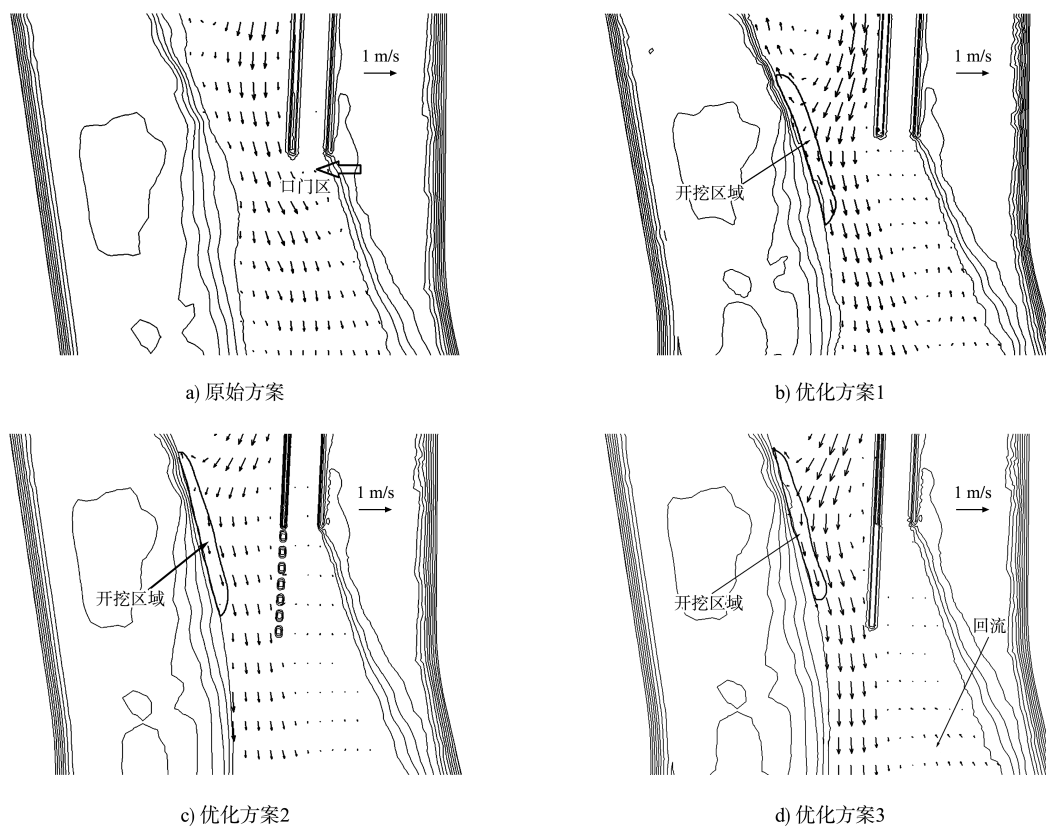
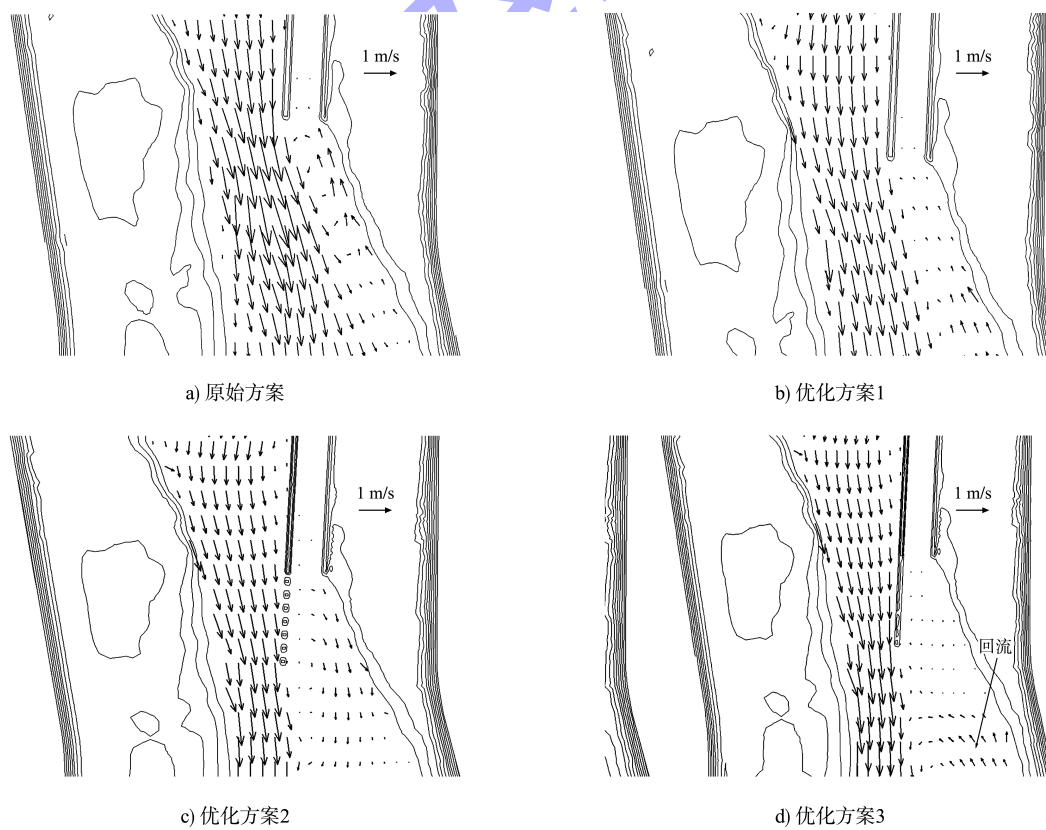


图 8 下游口门区各方案布置 (单位: m)

3.3 下游口门区优化方案分析

为了研究不同优化方案对口门区水流条件的改善效果, 本文选取 2 个具有代表性流量即常水位通航流量 $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ 以及中洪水通航流量 $Q=2\,980 \text{ m}^3/\text{s}$ 进行分析和比选, 各方案流场见图 9、10。

图 9 下游口门区 $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ 各方案流场图 10 下游口门区 $Q=2980 \text{ m}^3/\text{s}$ 各方案流场

由图 9a)、10a) 可看出, 原始方案下, 由于受上游河道地势在口门区变窄的影响, 主流在口门区产生斜向流, 且水流横向和纵向流速变大, 最大分别为 0.9 和 3.4 m/s, 对船舶航行方向可能会产生影响, 存在安全隐患。优化方案 1 通过对岸边进行拓宽, 河道宽度由原来的 80 m 增加到 120 m, 有效增加了主流的过流面积。由图 9b)、10b) 可以清晰看出, 开挖边滩改变了主流方向, 使口门区附近的水流流速明显减小, 但部分区域在较大流量下流速还会超标, 不满足 GB 50139—2014《内河通航标准》的流速限制。优化方案 2 通过设置导流墩改变主流来流方向, 减小主流方向与口门区的夹角。由图 9c)、10c) 可看出, 在水流经过口门区时, 导流墩能有效阻隔主流的冲击, 口门区内流速均大幅度下降。虽然随着流量的增加主流纵向流速增大, 但在口门区范围外, 水流流向顺直不影响船舶航行。由图 9d)、10d) 可看出, 优化方案 3 设置隔流堤同样能有效阻隔主流对口门区的冲击, 末尾处由于主流流速过大与口门区的低流速水流存在较大流速梯度出现大面积回流、泡漩流区域, 水流特性较为复杂, 会对船舶通航造成安全隐患。

口门区下游 200 m 处的最大纵向、横向流速见图 11。可以看出, 随着流量的增加, 该位置的流速有不断上涨的趋势。原始方案在流量 2 000 m^3/s 时, 纵向流速超过 2 m/s 的规范最大值, 而横向流速在 1 500 m^3/s 后超过 0.3 m/s 的规范最大值, 最大纵向流速在流量 5 660 m^3/s 时达到了 3.6 m/s, 最大横向流速在流量 5 100 m^3/s 时达到了 0.95 m/s。在流量 4 000 m^3/s 时因为泄洪方式的调整, 横向流速有所减小而纵向流速有所增加, 总流速基本一致。优化方案 1 通过增加过流面积, 其流速与原始方案变化规律基本一致, 平均流速较原始方案降低了 25%, 但在流量达到 3 000 m^3/s 时纵向、横向流速超标不满足通航要求, 而且继续开挖边滩增加过流面积会增加船闸建设成本, 影响经济

效益。优化方案 2 和 3 在设置导流墩和隔流堤后, 主流会减小对口门区流速的挤占, 横向、纵向流速并不随流量增加而显著变化, 波动幅度较小。且优化方案 2 和 3 的横纵向流速满足规范要求。

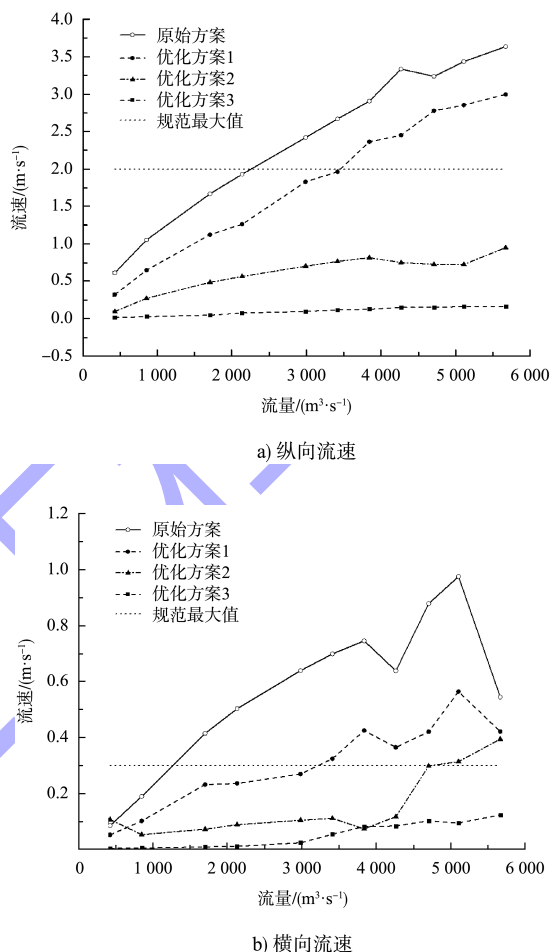
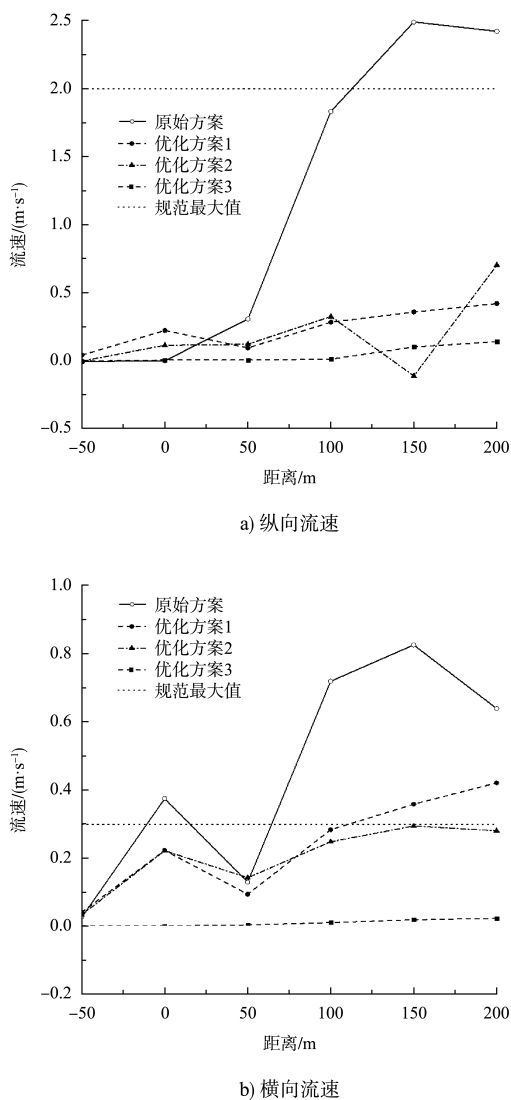


图 11 口门区下游 200 m 处各方案流速变化

中洪水期 $Q=2\,980\text{ m}^3/\text{s}$ 时口门区不同位置流速沿程变化见图 12。可以看出, 在口门区上游 50 m 处基本为静水, 在 0 m 处由于主流的汇入及摩擦, 横向流速出现第 1 个峰值。口门区下游横向、纵向流速显著增加, 优化方案 2 导流墩之间的间隔可以使主流与口门区的水流进行动量交换, 也减少了主流区表面流速对口门区产生的挤压与摩擦, 有效改善了横向和纵向的水流流速。而优化方案 3 虽然流速较小, 但由图 9d)、10d) 可看出, 在隔流堤末尾处下泄主流仍会对口门区横流与回流产生影响, 导致在隔流堤尾部会出现横流与回流流速超标的情况。

图12 $Q=2\,980\text{ m}^3/\text{s}$ 时口门区不同位置流速沿程变化

4 结论

1) 包营枢纽船闸工程下游引航道口门区原始设计方案分别在流量增加到 $1\,500$ 、 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,横流和纵流最大流速超过相关规范要求,横向、纵向流速最大分别为 0.95 、 3.60 m/s ,超出 0.65 、 1.60 m/s 的安全限值,通航条件较差,存在极大的通航安全隐患。

2) 针对口门区流场复杂、混乱的问题,本文通过数值模拟研究并综合分析实际情况,最终采

用优化方案2,即将口门区右岸河道由原始宽度 80 m 拓宽至 120 m ,并在口门区下游间隔为 5 m 设置7个长 10 m 导流墩。该方案可基本满足通航安全指标,并为后续整体物理模型试验提供理论依据。

3) 实施优化方案后,导流墩将口门区出口延伸至下游河道开阔平直段,导流墩间隙可以加强口门区局部流场与主流的动量交换,减小口门区水流与主流的速度梯度,改善由主流引起的斜流、回流等不良流态问题,保障通航安全。

参考文献:

- [1] 王波,程子兵,金峰.水电站引航道透空式隔流堤水力学试验研究[J].人民长江,2012,43(7):67-69,76.
- [2] 胡亮亮,谭家万,袁浩.基于隔流堤的下游引航道通航水流条件优化[J].水运工程,2022(5):72-77.
- [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] 杨忠超,魏涛涛,黄秋杰.麻石船闸改扩建工程下引航道优化布置数值模拟[J].水运工程,2018(5):127-131,144.
- [5] 郑红杰.上游引航道透空隔流堤布置与通航水流条件优化[J].水运工程,2022(12):146-151.
- [6] 张羽,杨朝辉,赵集云,等.弯曲河段船闸引航道通航水流条件模拟[J].水运工程,2022(6):132-138.
- [7] 祁永升,许光祥,李昌耀.改善二线船闸下游引航道口门区流态的补流措施研究[J].水运工程,2023(7):157-163,224.
- [8] 唐溪.窄深河道枢纽上引航道及口门区改善措施水流条件三维数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- [9] 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,2002.
- [10] 长江航道局.内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

(本文编辑 王璁)