

· 航道及通航建筑物 ·



基于隔流堤的下游引航道 通航水流条件优化^{*}

胡亮亮¹, 谭家万¹, 袁 浩²

(1. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院, 重庆 400074;

2. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 针对某航电枢纽下游引航道口门区通航水流条件复杂、恶劣等问题, 依托该工程整体通航水力学模型试验, 对比分析不同隔流堤布置方案下的口门区水流条件。结果表明, 隔流堤堤身设置透水孔可以加强主河槽与口门区的动量交换, 减小隔流堤末端两者之间的速度梯度。与未设置透空隔流堤方案相比, 设置透空隔流堤后可减小下泄主流在弯道处引起的横流与回流。而增加透空隔流堤长度后可通过改变主流表面流速方向, 达到改善处于弯道上的下游口门区通航水流条件的目的。合理应用隔流堤可避免口门区处于河道弯道处, 减小主流引起的斜流与回流。

关键词: 下游引航道; 通航水流条件; 流速分布; 流场优化

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0072-06

Optimization of navigable flow conditions of downstream entrance channel with separation levee

HU Liang-liang¹, TAN Jia-wan¹, YUAN Hao²

(1. School of Shipping and Naval Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing 400016, China)

Abstract: Regarding the complicated and harsh navigable flow conditions at the approaching entrance region downstream of a navigation power hub, we compare and analyze the water flow conditions of the approaching entrance region under different separation levee arrangement schemes relying on an experimental study of a navigational power project. The results indicate that the separation levee can change the flow directions of the downstream flow in the main channel, and reduce the squeezing and friction by the mainstream on the water flow in the approaching entrance region. Compared with the scheme without the air-permeable separation levee, the installation of the air-permeable separation levee can reduce the cross flow and backflow caused by the main flow of the leakage at the bend. After increasing the length of the permeable separation levee, the direction of the flow velocity on the surface of the main flow can be changed to improve the navigable flow conditions of the downstream approaching entrance region on the curve. Furthermore, the reasonable application of the separation levee effectively reduces the lateral and reverse velocity caused by the main flow.

Keywords: downstream approaching channel; navigation flow conditions; velocity distribution; flow field optimization

收稿日期: 2021-08-14

^{*}基金项目: 国家自然科学基金项目(52109076)

作者简介: 胡亮亮(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为通航水力学。

通讯作者: 谭家万(1974—), 男, 副教授, 从事通航水力学研究。E-mail: 578563378@qq.com

船闸下游引航道内与主航道中存在流速梯度, 引航道内的水流在下游口门区发生突扩, 导致横流、斜流、泡漩并存的复杂流态^[1-2]。这类复杂流态作用到船舶上, 会导致船舶发生横漂与倾转, 直接影响船舶航行的舵角与漂距。口门区存在的复杂流态在中小流量下可能引起船舶操作困难, 大流量条件下更可能导致船舶倾覆, 给通航埋下安全隐患^[3-4]。因此优化不同流量下口门区流态对通航安全具有重要的意义。

对于船闸口门区流态优化, 人们开展了系统性研究, 包括调整泄洪闸开启方式和设置水流条件优化结构物, 如导流堤^[5-6]、挑流潜坝^[7-8]、导流墩^[9-10]等。但针对不同枢纽的地形分布和通航流量, 这些措施在布设上仍存在优化的可能。

引航道接透空型隔流堤是常见的流态调整措施之一。下游引航道后接隔流透空堤, 一方面在引航道出口处限制了引航道和主河道之间的表面流速梯度; 另一方面, 通过下设透空孔实现主河道与引航道内水流的动量交换, 最终达到减小横

向流速、优化引航道出口流态的目的。目前, 针对上游引航道中透空隔流堤对流场影响的研究较多, 但对于下游引航道中隔流透空堤的布置方式、布设长度的研究仍较缺乏, 尤其是不同通航流量条件下流场分布、最大纵流、横流、回流流速分布与隔流堤长度之间的关系仍需要进一步探索。

本研究依托某航电枢纽通航水力学模型试验, 分析下游口门区不同透空隔流堤长度条件下流场分布, 重点研究口门区附近表面流场分布, 并探究最大纵流、横流、回流流速与通航流量、透空隔流堤长度之间的关系。

1 试验方案设计

航电枢纽平面布置如图 1 所示。下游引航道出口处于弯曲河段, 河床地形呈左高右低分布, 大流量条件下河道内存在潜在二次流。加之电厂及主要泄洪建筑物集中布置在右岸船闸一侧, 导致在通航的各级流量都导向引航道口门区, 造成口门区通航水流条件恶化, 对船舶通航造成严重影响。

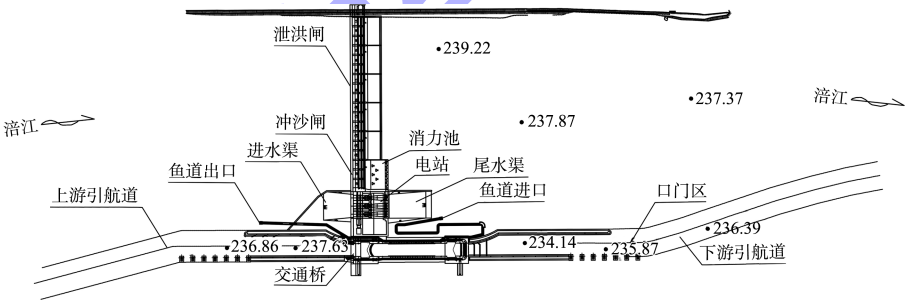
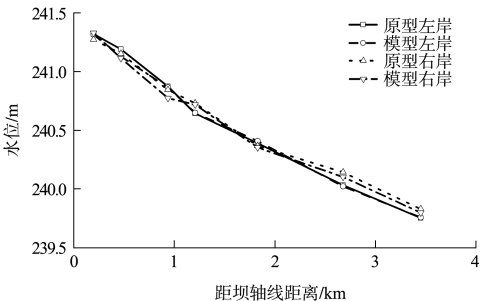


图 1 工程枢纽平面布置 (单位: m)

模型试验研究在 1:100 整体模型上开展, 通过布设在下游口门区上的光学表面流场测试系统获得整个下游口门区域内的流场分布。为验证模型试验数据的准确性, 针对未建枢纽时 $Q=2\,880\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下河道原型观测流速和模型观测流速进行对比验证(图 2)。模型组左、右岸水位与原型水位的误差均在 $\pm 0.03\text{ m}$ 以内, 左岸个别测点的误差为 0.06 m , 所有测点水位的误差均在 $\pm 0.1\text{ m}$ 以内, 满足通航模型试验规范要求。试验测得断面平均流速变化与原型观测流速变化一致, 不同测

点两者相对误差均在 5% 以内, 模型达到了水流运动相似要求。模型设计满足定床河工模型的相似性要求, 可进行下一步试验。



a) 水面线

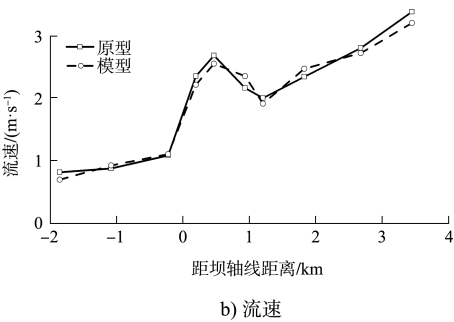


图 2 $Q=2\,880\text{ m}^3/\text{s}$ 流量条件下试验与原型观测水面线及流速对比

以坝轴线为桩号 0 断面，获得下游口门区桩号为 0+315 m—0+655 m 共 340 m 范围内流场分布 (图 3)。

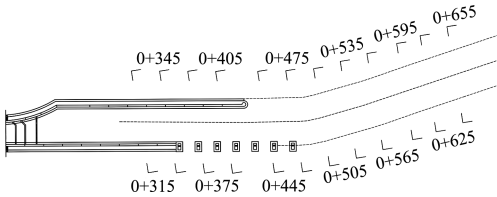


图 3 下游引航道及流速测量断面布置形式 (单位: m)

试验共设置 3 个方案，各方案引航道及下游透空隔流堤布置如图 4 所示。其中，方案 1 不设置透空隔流堤；方案 2 仅在下游引航道出口处布设 50 m 长透空隔流堤；方案 3 在 50 m 长透空隔流堤外外接 270 m 隔流堤，但仅在新增隔流堤最后 50 m 设置透空结构。隔流堤透空孔大小及布置方式如图 5 所示。隔流堤开孔的角度由主河道内的主流方向与隔流堤开孔部位的夹角共同决定。增设的隔流堤布置为斜孔后，孔轴线方向与主流方向呈小角度相交，促进水流平稳进入到引航道内，在不影响引航道内船舶吃水深度的情况下，达到改善引航道内的水流流态的目的。

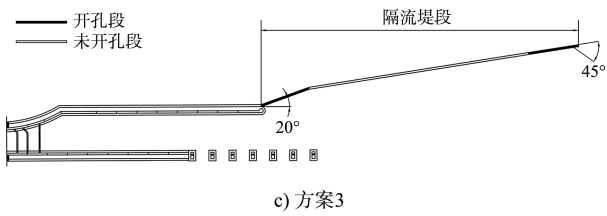
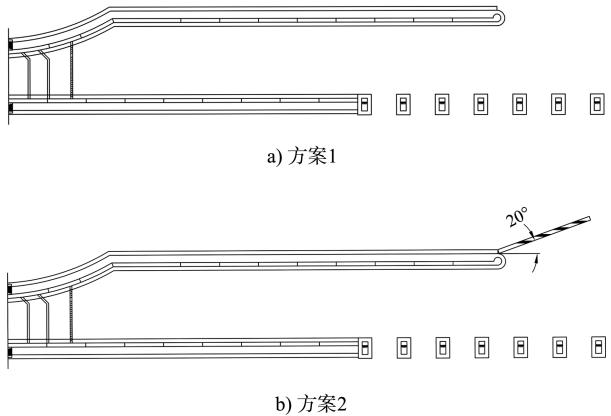


图 4 不同方案下游引航道口门区布置形式

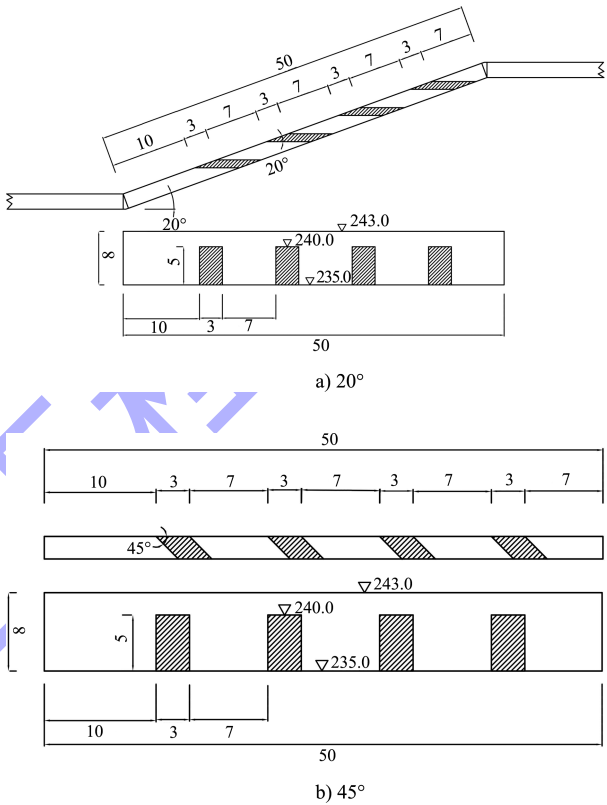


图 5 透空隔流堤开孔结构 (单位: m)

根据航电系统不同运行工况，本研究共选取 176.9~5 500.0 m^3/s 共 7 种流量工况，覆盖了枯水期和洪水期航电系统运行工况，探究不同下游口门区方案下流场分布和优化效果。

2 结果分析与讨论

图 6 为最高通航流量 ($Q=5\,500\text{ m}^3/\text{s}$) 时下引航道口门区流场分布。受电站泄流扩散的影响，方案 1 在 0+565 m—0+595 m 断面上存在偏向右岸的斜流，口门区最大回流流速达 1.0 m/s，最大横流流速达 2.0 m/s，纵向流速更是高达 6.0 m/s，导致船舶发生横漂和扭转，严重影响通航安全。在引航道下游增设 50 m 透空隔流堤后，航道口门区的斜向水流得到极大的改善，方案 2 流场中最

大回流流速降到 0.25 m/s, 最大横流流速下降到 0.6 m/s, 最大纵向流速则下降到 1.8 m/s, 明显改善了下游口门区流场, 但口门区横向流速仍不满足《内河通航标准》^[11] 要求, 因此该方案存在进一步优化的必要。方案 3 则在方案 2 的基础上增加 270 m 长隔流堤, 并在隔流堤下游端 50 m 长度增设透空孔。该方案相比于方案 2 减小了口门区最大横流流速, 其中最大横流流速降到 0.25 m/s, 较方案 1 降低了 87.5%, 较方案 2 降低了 58%。

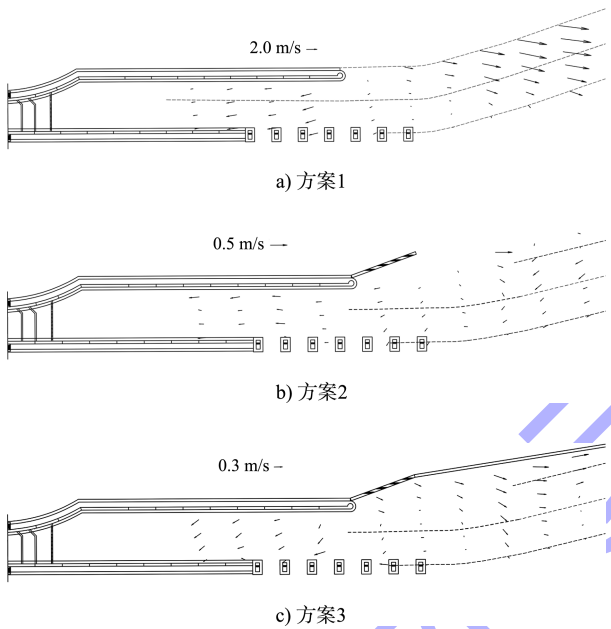


图 6 $Q=5\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时不同布置方案下游引航道流场分布

各方案最大纵向、横向、回流流速随流量变化情况如图 7 所示。图 7 a) 为纵向流速随流量的变化过程, 在小通航流量下, 由于泄洪闸下泄流量极小, 在流量为 $176.9\sim1\,800.0\text{ m}^3/\text{s}$ 范围内时, 各方案最大流速接近, 变化规律一致, 均在 $0.8\sim1.7\text{ m/s}$ 范围内变化。随着流量进一步增大, 方案 1 中最大纵向流速增大, 在 $Q=5\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时最大纵向流速达到 6.0 m/s 。方案 2 与方案 3 通过隔流堤引导, 改变了下游口门区主流方向, 不同流量下最大纵向流速均在 $0.4\sim1.8\text{ m/s}$ 范围内变化。

不同流量条件下, 方案 1 中横向流速仍呈现随下泄流量增大而增大的趋势, 横向流速分布在 $0.6\sim2.9\text{ m/s}$, 均高于通航标准所规定的横向流速。随着下游透空隔流堤的布设, 尽管方案 2 中横向流速仍高于标准, 但可以看出导流堤改变下

泄主流流向后, 主流会减小对口门区流速的挤占, 横向流速并不随流量增加而显著变化, 见图 7b)。当隔流堤进一步加长时, 下游口门区横向流速则进一步减小, 横向流速变化范围更小, 且均满足通航标准要求。

流量在 $176.9\sim5\,500.0\text{ m}^3/\text{s}$ 范围内各方案的回流流速变化如图 7c) 所示。方案 1 中 $Q=2\,880\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 由于河道中下泄流量扩散速度较慢, 在下游引航道口门区形成较大的回流区, 导致引航道内回流流速出现一个峰值, 最大回流流速为 3.0 m/s 。但随着流量增加, 下泄主流对口门区的压缩导致回流区域面积减小。口门区设置隔流堤后, 受下泄水流影响, 下游引航道内仍会存在回流, 但回流流速相比于方案 1 迅速减小。而挡墙进一步加长后, 各流量条件下最大回流流速呈明显减小趋势, 且满足标准要求。

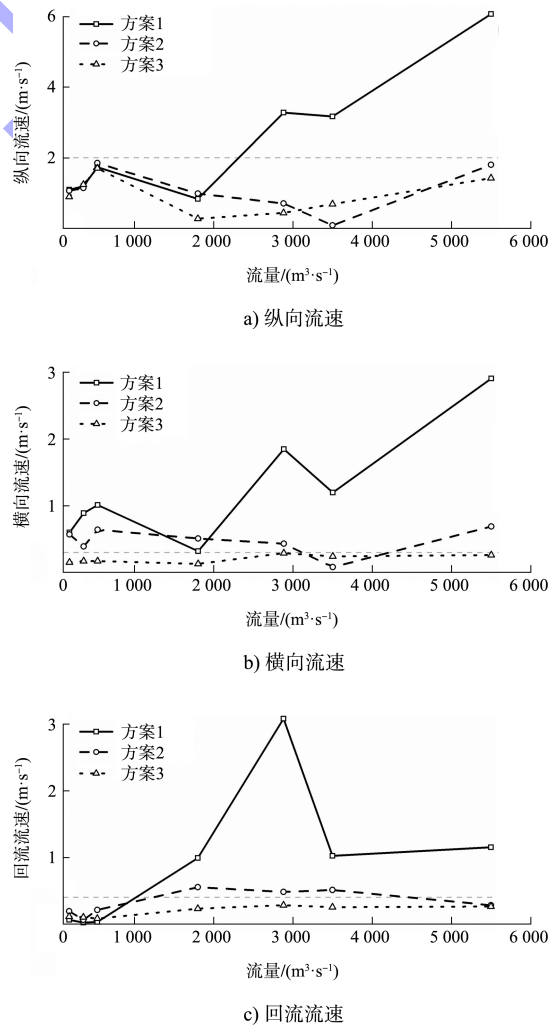


图 7 各方案最大纵向、横向速、回流流速随流量变化

为获得透空隔流堤长度与最大流速分布之间的关系，选取 3 个代表性流量，即最低通航水位流量 176.9 m³/s、常水位通航流量 2 880.0 m³/s、最高通航水位流量 5 500.0 m³/s 进行分析。最低通航水位流量条件下，沿程各断面最大纵向、横向、回流流速如图 8 所示。对比该流量条件下 3 种方案纵向流速可知，由于引航道和主河道内的流速梯度，方案 1 最大流速在下游引航道末端获得。与之相比，方案 2 与方案 3 在下游引航道后设置了 50 m 的透空隔流堤，加强了主河槽与下游引航道之间的动量交换，这 2 种方案的最大纵向流速位置均向下游推移。主流的扩散、挤压与摩擦会导致口门区形成横流与回流。小流量下，下游引航道外缓流区横流主要是由主流的扩散挤压引发斜流产生，因此在方案 1 中可以在最大横流沿程分布中发现存在一个高流速区间。而在方案 2 设置的较短的透空隔流堤仍不能改变这一趋势，仅导致最大横流分布位置下移。方案 3 中由于透空隔流堤进一步加长，船闸口门区已在下游平直河道段，显著减小了横流流速。

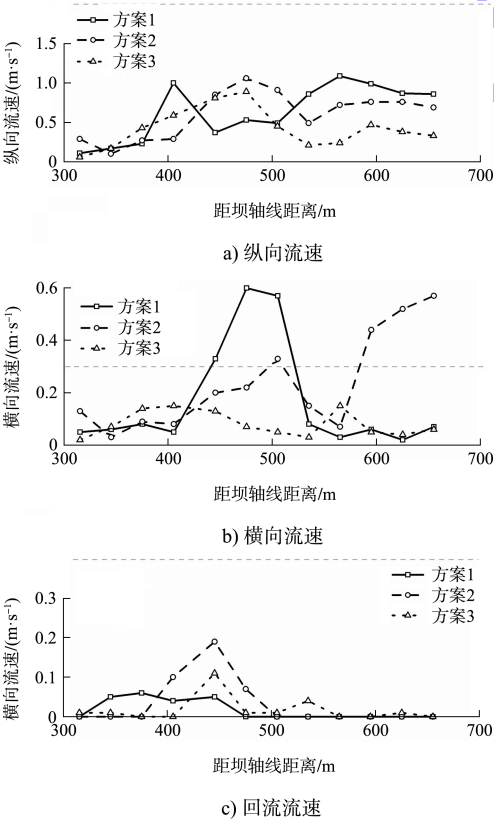


图 8 $Q=176.9\text{ m}^3/\text{s}$ 时不同断面最大纵向、横向、回流流速变化过程

图 9 为常通航水位流量条件下沿程各断面最大纵向、横向、回流流速。随着流量增大，引起口门区最大纵向流速的原因由引航道与主河槽之间的流速梯度变为下泄流量的扩散。方案 1 中口门区最大纵向流速存在位置比小流量条件下明显向下游移动。而最大横向流速和回流流速由于受到下泄主流的摩擦，在口门区形成回流区，因此在口门区位置明显观测到横流流速和回流流速的峰值。此外，受下泄主流扩散挤压的作用，口门区下游受斜流影响，还会出现另一个峰值。与方案 1 相比，方案 2 与方案 3 通过透空隔流堤对主流流向进行调整，显著减小了口门区的纵向、横向和回流流速。但由于方案 2 中，隔流堤长度较短，下泄主流仍会对口门区横流与回流流速产生影响，导致在隔流堤尾部会出现横流与回流超标的情况。

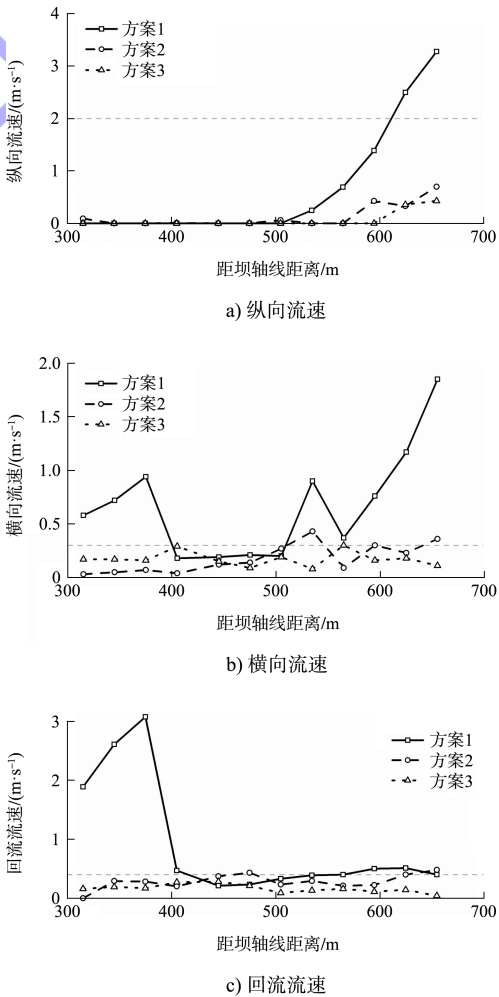


图 9 $Q=2\,880\text{ m}^3/\text{s}$ 时不同断面最大纵向、横向、回流流速变化过程

图 10 为最高通航水位流量条件下沿程各断面最大纵向、横向、回流流速。该流量条件下, 方案 1 各断面最大纵向流速分布存在 2 个峰值, 第 1 个峰值是由于引航道内与口门区回流之间的流速梯度引起的, 而在断面 0+600 m 后的峰值则由于下泄主流扩散引发, 同时该方案下最大横流流速存在于 0+600 m 后断面, 同样是由主流扩散所引发。同时主流扩散引发的口门区的缓流和斜流也会导致下游引航道内及口门区的横流和回流流速显著超标。但在下游引航道出口设置镂空隔流堤后, 有效改变了主流方向, 保证主河槽与口门区的动量交换的同时, 也防止了主流区表面流速对口门区产生的挤压与摩擦, 减小了口门区横向流速和回流流速。

- 3 结论
- 1) 与未设置透空隔流堤方案相比, 设置透空隔流堤可减小下泄主流在弯道处引起的横流与回流。而增加透空隔流堤长度可通过改变主流表面流速方向, 达到改善处于弯道上的下游口门区通航水流条件的目的。
- 2) 隔流堤增设透水孔可以加强主河槽与口门区的动量交换, 减小隔流堤末端两者之间存在的速度梯度。
- 3) 下游引航道出口处于弯道时, 可通过隔流堤将出口延伸至下游平直段, 能够减小主流引起的斜流与回流, 减小横向流速与回流流速。

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] 李霞, 左宁, 彭永勤. 多线船闸口门区及连接段通航水流条件试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9): 68-73.

[3] 徐瑛. 草街航电枢纽船闸引航道优化布置研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.

[4] 赵健. 富金坝枢纽船闸引航道布置及通航条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.

[5] 郑星伟, 张铭, 范洪浩, 等. 小溪滩枢纽下游导流堤布置及形式优化[J]. 水运工程, 2018(9): 96-100, 118.

[6] 高盼盼. 新疆某引水枢纽工程导流堤工程设计[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(2): 108-109, 136.

[7] 欧阳澍, 刘成林, 程永舟, 等. 透空潜坝附近水流特性的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 109-118.

[8] 刘辛愉. 库区急滩整治措施: 潜坝群水流特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.

[9] 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.

[10] 冯倜倜, 梁金栋, 孙晨光, 等. 导流墩偏斜角度对侧向进水泵站前池整流效果的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 121-125.

[11] 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.

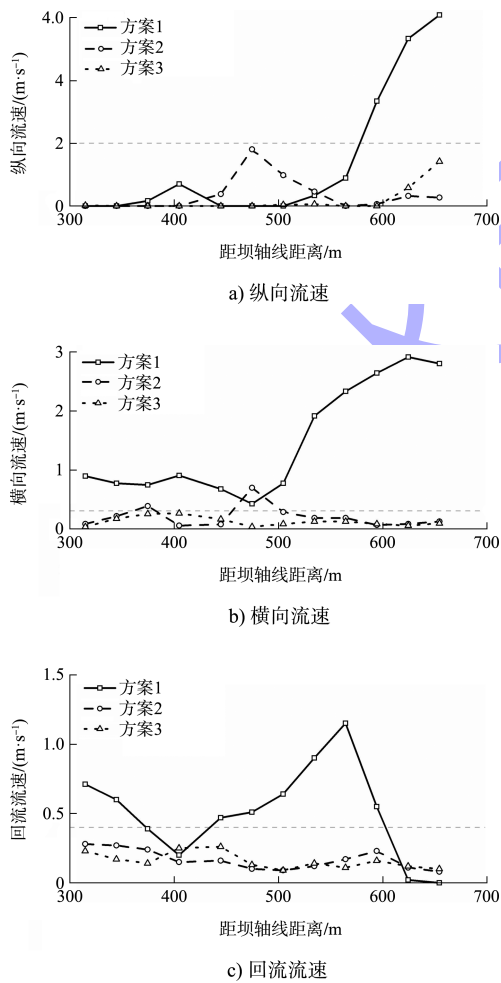


图 10 $Q=5\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时不同断面最大纵向、横向、回流流速变化过程

(本文编辑 郭雪珍)