



上游引航道透空隔流堤布置与通航水流条件优化^{*}

郑红杰

(中国铁建港航局集团有限公司第四工程分公司, 重庆 400025)

摘要: 针对急弯下游布设的上游引航道口门区通航水流条件复杂等问题, 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, 探究隔流堤与导流墙夹角和上游引航道口门区水流条件之间的关系。结果表明, 隔流堤可以有效减小上游引航道内与主航道中存在的流速梯度, 减小主流对口门区水流的挤压和摩擦, 进而减小口门区横流和回流流速, 消除不利于通航的流态。隔流堤与导流墙之间夹角存在阈值, 当小于该值时, 纵向流速和横向流速均随着夹角的增大而减小; 进一步增大则会导致部分主流流入, 恶化口门区流态。

关键词: 上游引航道; 流速分布; 通航水流条件; 流场优化

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0146-06

Layout of open-type separation levee and optimization of navigation flow conditions in upstream approach channel

ZHENG Hong-jie

(No.4 Engineering Branch Company of CRCC Harbor & Engineering Bureau Group Co., Ltd., Chongqing 400025, China)

Abstract: The navigation flow conditions at the entrance area of the upstream approach channel laid at the downstream of sharp turns are complex. In order to address this issue, this paper carries out a hydraulic model navigation test for a navigation-power project to compare and analyze the flow field distribution at the upstream entrance area under different flow rates and different angles between the separation levee and the guide wall. In addition, the paper explores the relationship between the flow conditions at the entrance area of the upstream approach channel and the angles between the separation levee and the guide wall. The results indicate that the separation levee can effectively reduce the flow velocity gradient in the upstream approach channel and the main channel, alleviate the squeezing and friction caused by the main flow on flows at the entrance area, and then slow the transverse flow and backflow velocities at the entrance area to eliminate flow patterns not conducive to navigation. Furthermore, there is a threshold value for the angle between the separation levee and the guide wall. Specifically, when the angle is smaller than this value, both the longitudinal and transverse flow velocities decrease as the angle increases. On the contrary, once the angle is larger than this value, a partial inflow of mainstream appears, and flow patterns at the entrance area get worse.

Keywords: upstream approach channel; flow velocity distribution; navigation flow conditions; flow field optimization

河流丰水期航电工程上游引航道受电站发电引水和闸门泄洪影响, 由于主流扩散、挤压, 以

及上游口门区水流与主流之间的流速梯度, 在上游口门区易形成横流、斜流和泡漩并存的复杂流

收稿日期: 2022-04-11

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52109076)

作者简介: 郑红杰(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事路桥、港航类工程管理和技术工作。

态^[1-2]。受此类复杂流动的影响, 船舶进出上游口门区时可能发生横漂和倾转, 影响船舶航行安全和航道通畅, 为通航带来安全隐患^[3-4]。因此, 深入开展上游口门区流态优化研究对通航安全具有重要意义。

为实现上下游口门区的优化, 通常采用调整航电枢纽运行调度方案和构建导流建筑物对口门区流态进行优化。前者包括优化泄流闸门开启方式和机组发电方式, 后者则包括构建隔流堤^[5-6]、挑流潜坝^[7-8]、导流墩^[9-10]等。受限于河道地形条件, 这些措施往往不具有普适性, 需要根据具体工程展开。引航道外接透空型隔流堤是常见的口门区流态调整措施, 透空型隔流堤阻断主河道与口门区表面水体的交换; 另一方面, 下设透空孔仍保持主河道水流与口门区水流的动量交换, 以实现减小口门区与主河道之间的表面流速梯度, 最终达到减小横流、回流和纵向流速的目的。

目前已开展的上游引航道外接透空隔流堤的研究, 主要集中在隔流堤长度、开孔方式等对口门区流场的影响, 其中的大部分研究都着眼于具体工程, 受船闸地形和布置方案限制, 研究成果不具有系统性。因此本文依托于某航电工程通航水力学模型试验, 分析不同角度布置的透空型隔流堤对口门区流场分布的影响, 重点分析最大纵向、横向和回流流速与通航流量和透空隔流堤与引航道夹角 θ 之间的关系。研究成果可为类似航电工程上游引航道的布置提供参考。

1 试验方案设计

本文所依托的航电工程布设于急弯下游, 如图 1 所示。大流量条件下, 弯道中产生的二次流、结合主流与口门区之间的流速梯度将造成口门区流态紊乱。同时受地形影响, 上游引航道入口呈右岸高、左岸低的特点, 导致上游库区存在由右岸向左岸流动的表面流, 造成口门区水动力条件恶化, 影响通航安全。

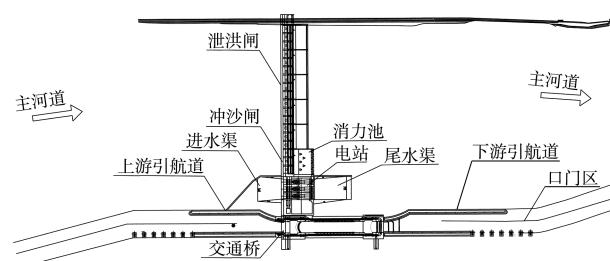


图 1 某航电工程枢纽平面布置

模型试验在 1:100 的整体模型上开展, 根据航电枢纽的不同运行情况, 共选取枯水期到洪水期共 7 种通航流量, 分别为 176.9、353.8、530.7、1 800、2 800、3 500、5 500 m^3/s 。为优化上游引航道水流流态, 上游引航道外接 50 m 长的透空型隔流堤。为进一步系统研究透空型隔流堤与上游引航道之间夹角 θ 对流场优化的影响, 共选取 $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 的布置方案。上游口门区引航道与透空隔流堤布置如图 2 所示。

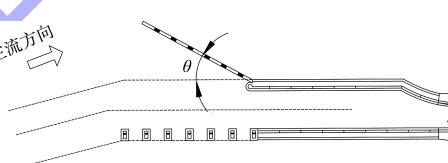


图 2 上游口门区引航道及透空隔流堤布置

透空型隔流堤开孔布置方式如图 3 所示, 为保证主河道与口门区水流平稳的实现动量和能量交换, 减小对口门区流速的影响, 其开孔方式布置为斜孔, 斜孔中轴线与隔流堤中轴线呈 45° 角相交。

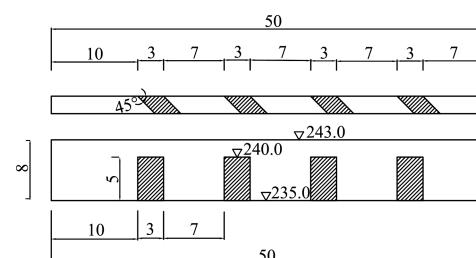


图 3 透空型隔流堤结构 (单位: m)

为量化夹角 θ 对纵向、横向和回流流速的影响, 以坝轴线为 0 断面, 在上游口门区桩号为 0-175 m—0-408 m 共 233 m 范围内布设 6 个流速测

量断面，并利用光学表面流场测量系统对表面流场进行测量，测量断面布置如图 4 所示。

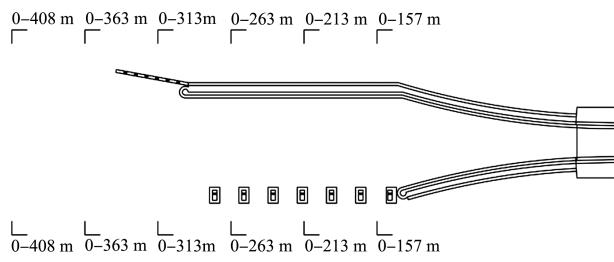


图 4 上游口门区流速测量断面布置形式

2 结果分析与讨论

透空隔流堤起到导流和限制船闸进口流量的作用，进而优化口门区流态，满足《内河通航标准》^[11]（简称《标准》）的要求。不同夹角 θ 条件下，最高通航流量（ $Q=5500 \text{ m}^3/\text{s}$ ）时上游引航道口门区流场分布见图 5。对比 $\theta=10^\circ$ 、 30° 、 45° 布置方案的口门区流场，在远离口门区的 0-480 m 断面，其断面流速大小较为接近，受河道主流与上游口门区流速梯度和上游弯道的共同作用，该断面流速在不同布置方案下均呈现向主河道偏移的流态。随着水流逐渐向口门区靠拢，隔流堤的分水与导水效果逐渐显现，对比 $\theta=10^\circ$ 与 30° 的布置形式，随着夹角 θ 的增大，河道主流区与口门区梯度对口门区流态的影响逐渐减小，水流更平稳地进入引航道，口门区（0-313 m 断面）最大横向流速由 0.47 m/s 减小到 0.27 m/s 。同时由于过水断面增加，口门区内该断面的最大纵向流速也由 1.67 m/s 减小到 1.21 m/s 。随着夹角 θ 进一步增大到 45° ，由于透空隔流堤影响了河道主流流向，导致部分主流流量涌入引航道，口门区横向流速再次增大到 0.38 m/s ，口门区流态再次恶化，同时纵向流速也增大到 1.53 m/s 。

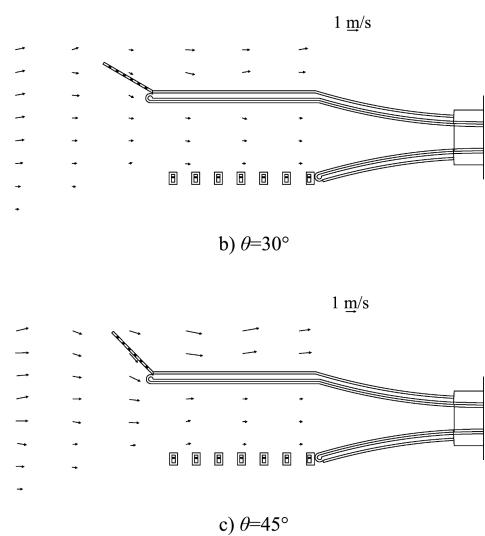
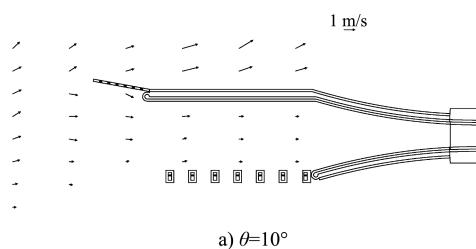


图 5 $Q=5500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时不同布置方案夹角 θ 下游引航道流场分布

不同夹角 θ 条件下，最大纵向、横向和回流流速随通航流量变化规律如图 6 所示。可以看出，受到弯道下游主流与口门区水流的流速梯度影响，不同夹角 θ 条件下口门区最大纵向和横向流速均随着通航流量的增加而改变，而回流流速则并未随之增加大幅变化，整体保持稳定。对于 $\theta=45^\circ$ 条件下，口门区纵向和横向流速均随着流量增大而增大。但随着 θ 减小，口门区纵向流速总体随着通航流量增大而增大，但在 $530.7 \sim 2800 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $3500 \sim 5500 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量区间内，最大纵向流速值存在波动。在小通航流量条件下（ $176.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ），下泄水流仅依靠电站厂房下泄，河道主流对口门区水流的影响较小，此时不同夹角 θ 条件下纵向流速（ $0.73 \sim 0.77 \text{ m/s}$ ）、横向流速（ $0.15 \sim 0.27 \text{ m/s}$ ）和回流流速（ $0.06 \sim 0.12 \text{ m/s}$ ）均满足通航标准。随着通航流量增大，通过泄洪闸和电站的下泄流量增大，河道内主流的影响更为明显，在通航流量 $353.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $\theta=10^\circ$ 条件下，最大横向流速达到 0.39 m/s 。在相同流量条件下，随着 θ 增大，通道透空隔流堤的导流和调节作用，有效减小了最大横向流速，在 $\theta=30^\circ$ 时，最大横向流速减小到 0.19 m/s 。随着夹角 θ 进一步增加到 45° ，透空隔流堤头伸入主河道，影响主流流动，导致部分主流导入口门区，最大横向流速再次增加到 0.36 m/s 。



a) $\theta=10^\circ$

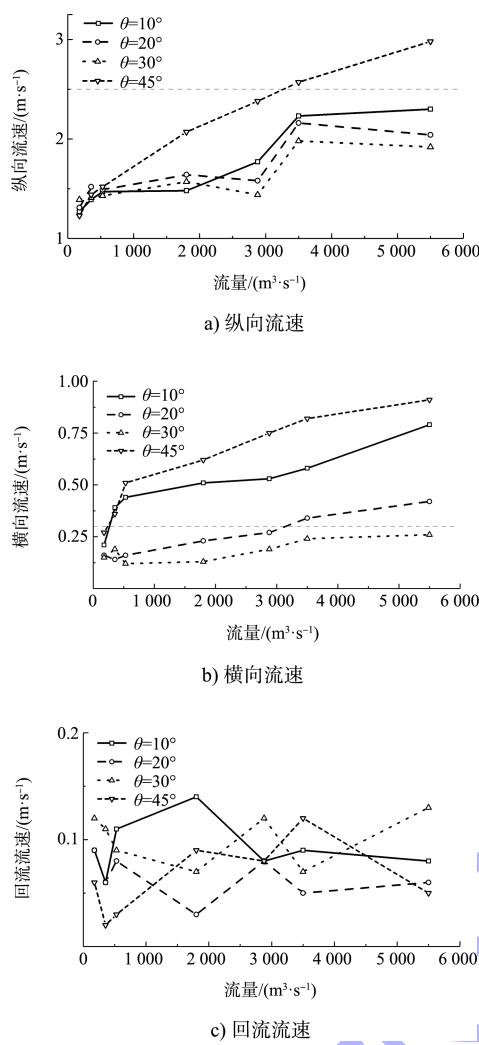


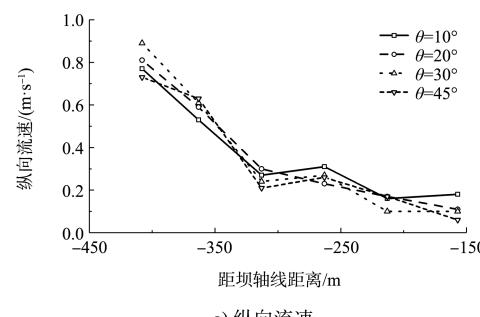
图 6 不同 θ 条件下最大纵向、横向、回流流速随流量变化

随着流量进一步增大, 弯道后主流对口门区水流之间流速梯度的作用进一步增强, 在 3 500 和 5 500 m^3/s 的通航流量条件下, 口门区纵向流速进一步增大, 对于 $\theta = 10^\circ$ 、 20° 和 30° 条件下, 其最大流速均小于 2 m/s 。但对于 $\theta = 45^\circ$ 夹角条件下, 主流被透空型隔流堤导入口门区, 导致引航道流态恶化, 纵向流速超过《标准》的上限值, 如图 6a) 所示。而对比相应流量下不同夹角 θ 条件下最大横向流速可知, 当 θ 处于 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时, 随着夹角 θ 的增大, 透空型隔流堤可以有效调节水流流态, 减小口门区最大横向流速, 在 $\theta = 30^\circ$ 条件下, 口门区横向流速满足《标准》的要求; 但随着夹角 θ 进一步增大到 45° , 隔流堤与主流呈交角增大, 横向流速反而呈现增大的趋势, 最大横向流速增加到

0.91 m/s , 如图 6b) 所示。根据图 6c) 可看出, 由于口门区布置与弯道侧, 弯道水流形成的回流被引航道和透空型隔流堤阻隔, 尽管不同 θ 和流量条件下, 引航道内回流流速存在小幅波动, 但均满足《标准》的要求。

考虑到在本工程修建透空隔流堤后, 可以通过隔流与导流减小弯道下游和上游引航道口门区处回流强度, 在不同夹角 θ 条件下, 均能满足《标准》的要求。因此下文仅讨论不同流量和不同夹角 θ 条件下, 各断面最大纵向和横向流速的沿程分布规律。为进一步开展不同夹角 θ 与最大纵向和横向流速沿程分布规律的研究, 选取 3 个具有代表性的流量, 分别为最低通航水位流量 $Q = 176.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、常水位通航流量 $Q = 2 880 \text{ m}^3/\text{s}$ 以及最高通航水位流量 $Q = 5 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

最低通航水位流量 $Q = 176.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下上游引航道各断面最大纵向和横向流速变化如图 7 所示。对于最低通航水位流量, 由于此时河道主流流速较低, 主流与口门区水流之间的流速梯度小、动量交换弱, 同时主流产生的扩散、挤压和摩擦对口门区的流场影响较弱。因此不同夹角 θ 条件下, 纵向流速变化规律趋于一致, 最大纵向流速均位于 0-408 m 断面, 最大纵向流速大小在 0.73~0.89 m/s 。而不同夹角 θ 条件下, 受隔流堤导流的影响, 该流量条件下最大横向流速均出现在 0-363 m 断面, 且随着夹角 θ 由 10° 增加到 30° , 最大横向流速由 0.21 m/s 减小到 0.15 m/s , 而随着夹角 θ 进一步增加到 45° , 部分主流被隔流堤阻挡, 流向改变进入口门区, 导致口门区最大横向流速增加到 0.27 m/s 。



a) 纵向流速

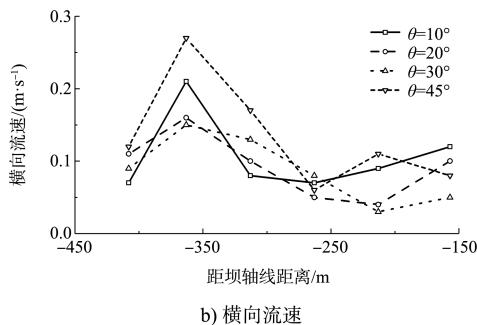


图 7 $Q=176.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 时各断面最大纵向和横向流速变化

常水位通航流量条件下, 沿程各断面最大纵向和横向流速变化如图 8 所示。随着通航流量增大, 库区主流流速增加, 口门区流速与主流之间流速梯度增大, 同时弯道后主流发生扩散后与口门区水体发生摩擦与挤压, 带动口门区水体产生朝向主流方向的斜向流速。由图 8a) 可看出, 对于 $\theta=10^\circ \sim 30^\circ$ 时, 其纵向流速变化规律与 $Q=176.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量条件下纵向流速变化规律一致, 最大流速出现在 0-408 m 断面, 随后通过隔流堤的导流和透空孔之间水流的动量交换, 口门区纵向流速逐渐减小。当夹角 θ 进一步增加到 45° , 其最大纵向流速增大, 且位置更靠近坝轴线, 位于 0-363 m 断面。其原因为在 $\theta=45^\circ$ 条件下, 隔流堤改变了部分主流流速, 导致在堤头处的流速迅速增加, 影响口门区流态。由图 8b) 可知, 由于隔流堤的导流作用, 不同夹角 θ 条件下最大横向流速均出现在 0-363 m 断面, 且与 $Q=176.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量条件下横向流速变化规律一致, 但 $\theta=10^\circ$ 和 45° 条件下, 其最大横向流速均超过 0.3 m/s , 无法满足《标准》的要求。

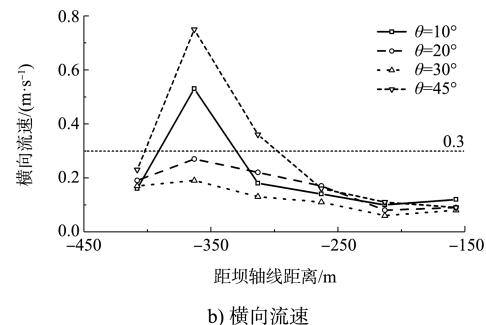
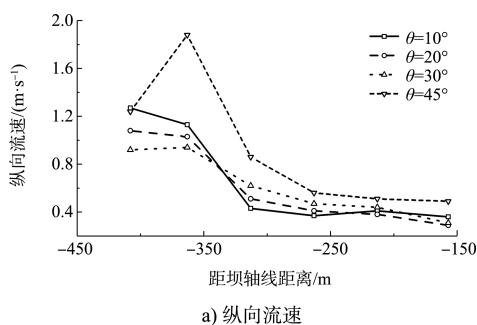
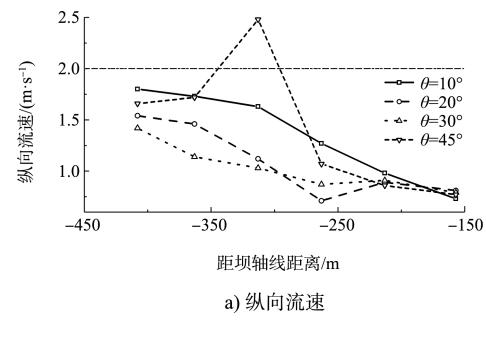


图 8 $Q=2 880 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下各断面最大纵向和横向流速变化

最高通航水位流量条件下, 沿程各断面最大纵向和横向流速见图 9。该流量条件下, 主流流速进一步增大, 主流对口门区水体的挤压与摩擦也随之增强, 对于 $\theta=10^\circ \sim 30^\circ$ 条件下, 其口门区沿程最大纵向流速随着距坝轴线之间距离减小而减小, 最大纵向流速位于 0-408 m 断面。其原因可归结于口门区水体与主流水体之间的流速梯度, 导致口门区水体向主流方向发生运动。而对于 $\theta=45^\circ$, 由于隔流堤将部分主流导入口门区, 导致最大纵向流速位于 0-313 m 断面, 超过通航安全标准。而对于横向流速, 由于隔流堤的导流作用, 口门区水体会在隔流堤堤头处发生分离, 部分水体朝向口门区流动, 而剩余水体则继续随着主流下泄。因此对于 $\theta=10^\circ \sim 30^\circ$, 最大横向流速均出现在 0-363 m 断面处, 且仅有 $\theta=30^\circ$ 时, 满足《标准》要求。而随着 θ 进一步增加到 45° , 隔流墙导人的主流随着隔流墙延伸方向发生偏转, 最终在 0-313 m 断面处出现横向流速最大值 0.91 m/s 。



a) 纵向流速

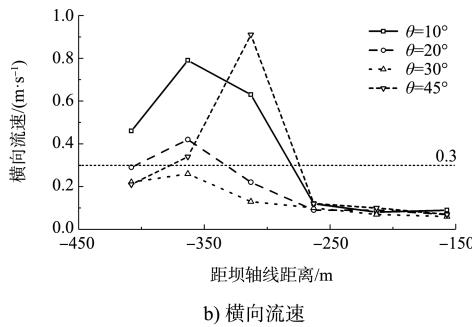


图 9 $Q=5\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时各断面最大纵向和横向流速变化

上述结果表明, 当隔流堤不对主流产生影响时, 其纵向和横向流速均随着夹角 θ 的增大而减小, 但当隔流堤将主流导入口门区后, 会对口门区流场产生较大影响, 导致其通航条件恶化。

3 结论

1) 弯道下游内侧布设上游船闸入口, 并通过透空隔流堤调整流态, 可以有效减小上游口门区回流流速, 优化通航流态。对于 $\theta=45^\circ$ 条件下, 口门区纵向流速和横向流速均随着流量增大而增大。但随着 θ 减小, 口门区纵向流速总体随着通航流量增大而增大, 但在不同流量区间内, 最大纵向流速值存在波动。

2) 透空式隔流堤可通过隔流与导流对上游口门区流态进行优化, 隔流堤与导流墙夹角 θ 的变化会导致口门区形成不同流态, 适当增大夹角 θ 至 30° , 在不影响主流流动条件下, 可以实现口门区流态的优化, 改善通航条件。但当夹角 θ 增大到 45° , 将部分主流导入口门区后, 会导致口门区流态迅速恶化。

(上接第 145 页)

- [2] 许炳心. 黄河下游游荡河段清水冲刷时期河床调整的复杂响应现象[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 291-299.
- [3] 卢金友, 黄悦, 宫平. 三峡工程运用后长江中下游冲淤变化[J]. 人民长江, 2006, 37(9): 55-57, 87.
- [4] 张春燕, 陈立, 张俊勇, 等. 水库下游河流再造床过程中的河岸侵蚀[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 356-360.
- [5] 傅开道, 黄河清, 钟荣华, 等. 水库下游水沙变化与河床演变研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1239-1250.
- [6] 许全喜, 袁晶, 伍文俊, 等. 三峡工程蓄水运用后长江中游河道演变初步研究[J]. 泥沙研究, 2011(2): 38-46.
- [7] 马爱兴, 曹民雄, 胡颖, 等. 多重因素影响下西江长洲枢

3) 夹角 θ 阈值可使上游口门区达到流态最优。针对本工程, 夹角 θ 阈值宜为 30° 。受上游弯道曲率影响, 类似工程的口门区流态最优夹角 θ 仍须开展系统试验研究确定。

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试验研究[J]. 人民长江, 2012, 43(7): 67-69, 76.
- [2] 刘亚辉, 王云莉, 张绍培, 等. 窄深河道急弯下游枢纽上引航道布置及通航水流条件试验[J]. 水运工程, 2020(9): 118-125.
- [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] 刘辛渝. 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. (本文编辑 王璁)
- [12] 纽至界首段枯水位降落特征[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(11): 97-98, 101.
- [13] 庞雪松, 杜敬民, 假冬冬, 等. 西江长洲枢纽下游近坝段水位下降特征及调控措施[J]. 水利水运工程学报, 2014(3): 42-48.
- [14] 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.
- [15] 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院. 西江贵梧 3000 吨级航道长洲坝下航道整治模型试验报告[R]. 南京: 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 2021. (本文编辑 王璁)