· 航道及通航建筑物 ·

白河包营枢纽船闸上引航道口门区通航水流条件研究*

付旭辉，张　波，杜洪源，何京霖，龚慧玲
（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：包营枢纽位于白河干流上游S弯道的末尾衔接段，该河段呈现出非雨期流量较小、暴雨期流量猛涨的特点，且船闸上游引航道受弯道及所处河段地形条件的影响，口门区水流条件十分紊乱，难以满足通航要求。针对船闸上游口门区复杂流态，结合坝址河段特点及船闸通航要求，对枢纽上游河道整体水流条件进行数值模拟研究，通过分析不良水流条件的形成原因，提出“喇叭”式入口+透水式隔流堤的治理措施并进行比选优化。结果表明，调整岸线形状并增设合适的透水式隔流堤工程能够显著改善口门区复杂流态，确保过闸船舶的通航安全。研究结果可为类似工程提供技术参考。

关键词：通航水流条件；“喇叭口”式护岸；口门区；弯曲河段

中图分类号：U641.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)04-0106-08

Navigable flow conditions at entrance area of upper approach channel of Baoying junction ship lock on Baihe River

FU Xuhui, ZHANG Bo, DU Hongyuan, HE Jinglin, GONG Huiling
(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Baoying junction is located at the end of the connecting section of the S-shaped bend in the upper reaches of the main stream of the Baihe River. The river section has the characteristics of small flow in non rainy season and sharp rise in rainstorm season. The upstream approach channel of the ship lock is affected by the topographic conditions of the bend and the river section, and the flow conditions in the entrance area are very disordered, which is difficult to meet the navigation requirements. In view of the complex flow regime in the upstream entrance area of the ship lock, combined with the characteristics of the dam site and the navigation requirements of the ship lock, this study conducts a numerical simulation of the overall flow conditions in the upstream channel of the junction. By analyzing the causes of the adverse flow conditions, this study proposes the treatment measures of “horn” inlet+permeable breakwater and carries out comparison and optimization. The results show that adjusting the shoreline shape and adding a suitable permeable breakwater project can significantly improve the complex flow regime in the entrance area and ensure the navigation safety of ships passing through the ship lock. The research results can provide technical reference for similar projects.

Keywords: navigable water flow condition; “bell mouth” type revetment; entrance area; curved reach

收稿日期：2024-05-24

***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)

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。

水运工程

船闸作为保证船舶顺利通行的水工建筑物，是连接枢纽上下游航道的重要通道，其口门区及连接段水流条件直接影响船舶航行安全与通航效率[1]。近年来，全国各地开启了新一轮的水运开发，船闸作为流域梯级开发中必不可少的通航建筑物，其修建往往会受到河道地形、布置形式等一系列因素的限制[2]。船闸口门区域受河道地形及枢纽闸门泄洪调控影响，极易形成局部横流、斜流、回流等不良流态，严重影响船舶安全进出闸。针对口门区出现的不良碍航流态，众多学者对此进行了大量研究，并提出设置隔流堤、导流墩、丁潜坝等结构，结合河道疏浚、增加边孔补流、调整泄流方式等措施对口门区流态进行治理[3-5]。王晨晨等[6]针对清远枢纽周边建筑物众多引起的三线船闸平面布置困难的问题，通过对比分析考虑结构预留、空间预留等因素的不同平面布置方案，最终确定互灌互泄、结构预留方案，保证平面布置的科学性和合理性；肖钦等[7]为解决赣江龙头山枢纽船闸试运行期通航流量未能达到原设计标准的问题，依托物理模型试验，分析船闸现状通航问题，提出新型百叶窗式横向结构，有效提升了最大通航流量；祁永升等[8]为探究引航道口门区水流条件改善的非工程措施，以湘江近尾洲枢纽二线船闸为例，建立平面二维水流数学模型，开展多种开闸泄流方式的组合试验研究，最终得到能够保证通航安全的枢纽运行方案与边孔补流措施。虽然很多学者针对口门区碍航流态及改善措施进行了研究，但由于口门区水流条件的复杂性以及工程项目的唯一性，不同船闸口门区水流流态不尽相同，改善方案也需要根据实际水流情况及其影响因素进行调整和优化。

本研究依托白河包营枢纽，对雨洪式河流弯曲河段通航水流条件进行数值模拟研究，通过分析现状口门区碍航水流特征，对原设计方案进行优化，提出“喇叭”式入口+透水式隔流堤的治理措施，旨在为后续枢纽河段物理模型和船闸布置方案提供技术支持。

1　工程概况

1.1　河段概况

包营枢纽位于南阳市宛城区黄台岗镇包营村西部，为白河梯级开发的最上游，该河段河势弯曲，四周大部分被山地所围绕，呈盆地形态，为典型的平原河流地貌，枢纽所在河段现状河势见图 1。

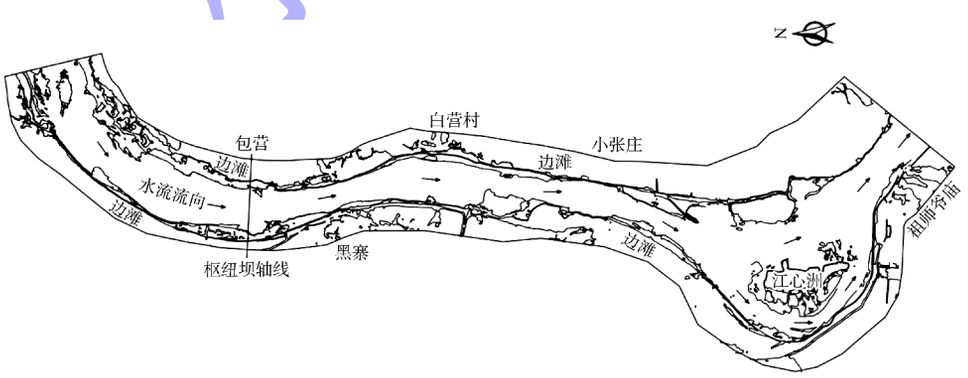


图 1　枢纽河段河势

Fig. 1　River regime of junction reach

1.2　设计方案船闸平面布置

包营枢纽是白河南阳至省界段梯级枢纽的第一级，该河段航道规划等级为Ⅲ级，船闸尺寸为 200 m×23 m×4 m(长×宽×水深)，设计水头 11.5 m。设计方案船闸整体布置见图 2。

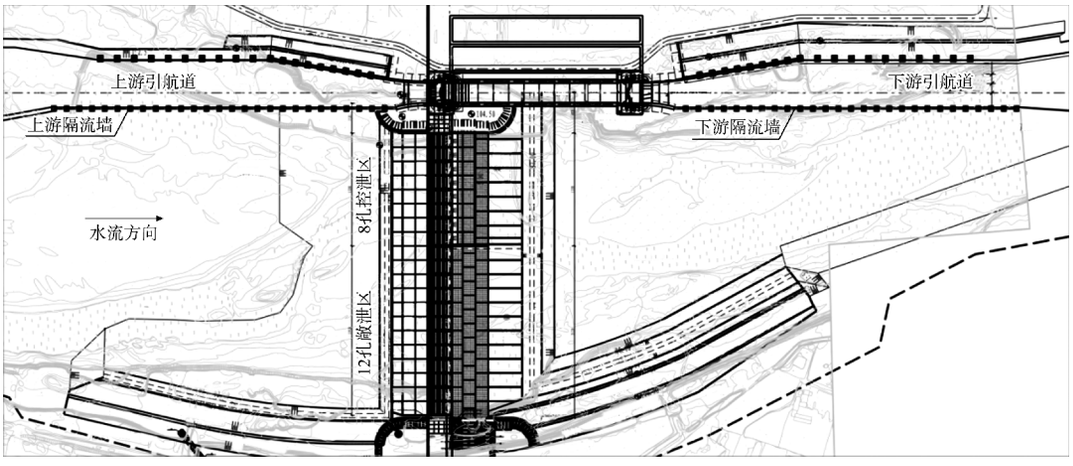


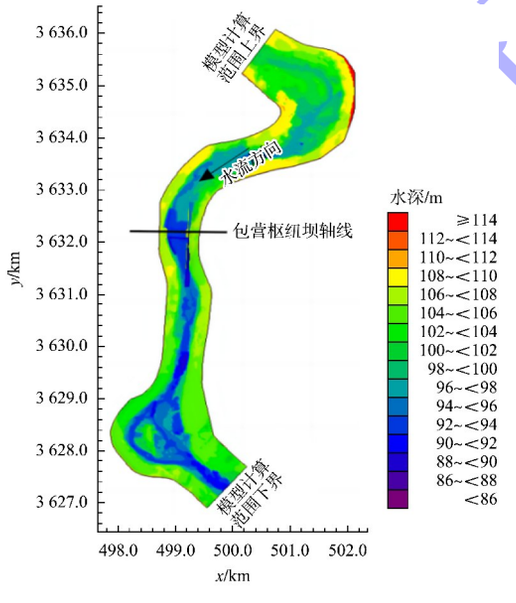
图 2　船闸整体布置

Fig. 2　Overall layout of ship lock

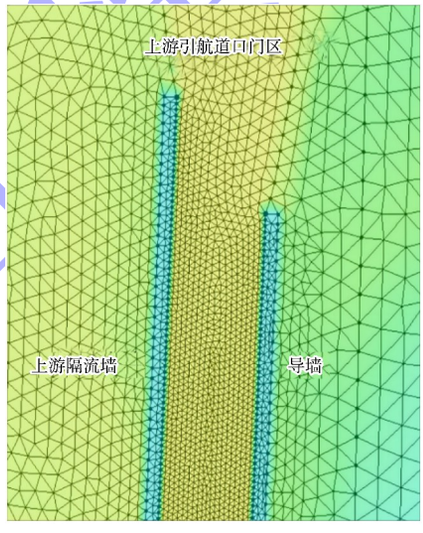
2　二维水流数学模型建立与验证

2.1　模型建立

根据工程所处位置及工程后可能引起的流场影响范围确定计算所需的进出口长度，选取计算区域为 10.4 km 范围。模型采用非结构三角网格，以控制地形为原则进行网格布置，对地形变化较大及需要改进的区域进行局部加密，见图 3。



a) 模型计算范围



b) 局部网格

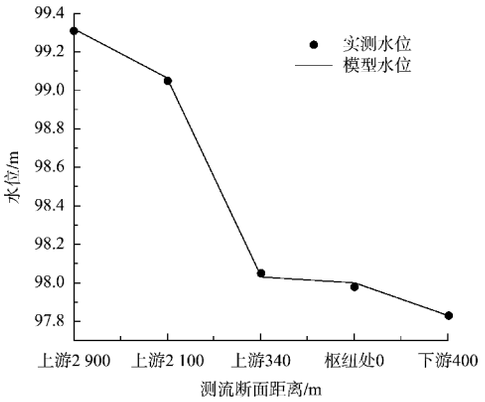
图 3　平面二维水流数学模型

Fig. 3　Two-dimensional horizontal flow mathematical model

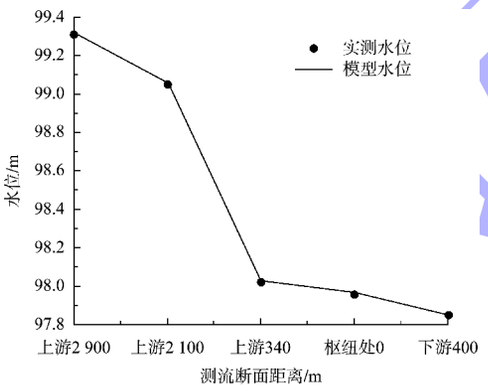
2.2　模型验证

基于有限体积法，建立包营枢纽河段的平面二维水动力数学模型。采用工程河段实测地形和水位流速资料，对数学模型可靠性进行水位和流速验证。

水位、流速验证见图 4、5。实测流量 Q = 500 m^3/s、糙率 n = 0.032 时，测流断面模拟流速的分布趋势与实测趋势保持一致，其最大值和最小值的位置均与实测资料较为吻合，模型的左右岸计算水位与实测左右岸水位误差均保持在±0.1 m 以内，且上下游各断面的平均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。



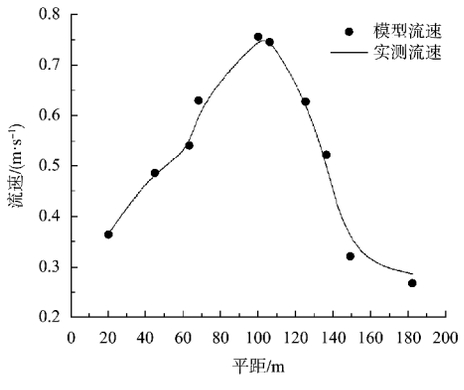
a) 左岸



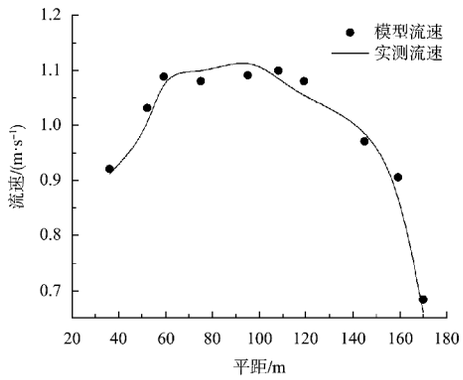
b) 右岸

图 4　左右岸水位验证

Fig. 4　Verification of water levels on left and right banks



a) 上游



b) 下游

图 5　上下游断面流速验证

Fig. 5　Verification of flow velocity at upstream and downstream cross-sections

3　设计方案船闸上游口门区水流条件分析

根据白河包营枢纽运行调度规律及河段来流特点，共选取覆盖洪中枯水期的 8 级流量(426～5 100 m^3/s)进行计算。为了得到船闸上游口门区通航水流条件，在船闸上游引航道内及连接段共设置 9 个监测断面。起点为距坝轴线 250 m 的引航道内，终点为距离坝轴线 650 m 的口门区连接段，其中相邻断面间距为 50 m。

3.1　船闸口门区流速限值

依据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》[9]和 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　引航道流速限值

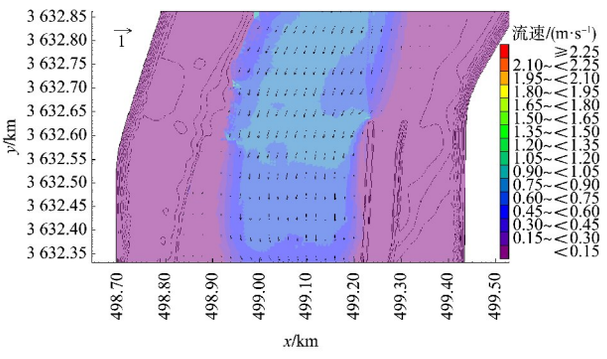
Tab. 1　Velocity limit in approach channel

位置	最大纵向流速 v_y/(m·s⁻¹)	最大横向流速 v_x/(m·s⁻¹)	最大回流流速 v_r/(m·s⁻¹)
口门区	2.0	0.30	0.40
引航道停泊区	0.5	0.15	0.15

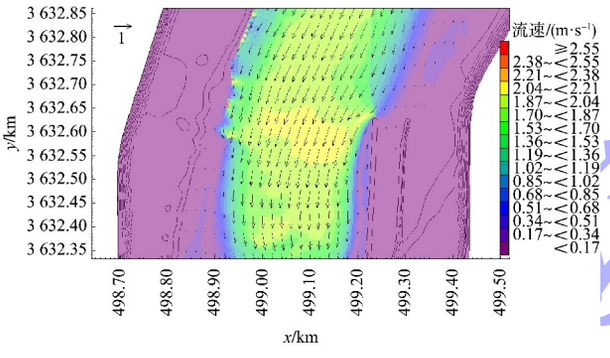
3.2　水流条件分析

设计方案上引航道通航水流条件及流场流态见图 6 和表 2。在枢纽上游，引航道口门区的水流方向主要受到弯道的影响。该河段弯道转角较大，出弯后河道主流向右偏移。受此影响，船闸上引航道分水隔墙头部存在斜流，其通航条件随流量

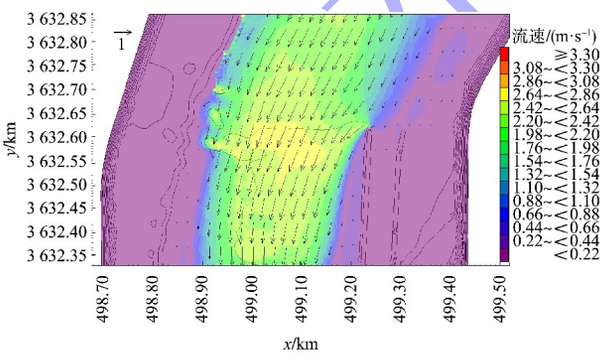
的增加而逐渐变差。当流量达到 2 130 m^3/s 时，上引航道口门区的横向流速开始出现超标情况；在上游弯道左岸沿程部分区域存在大面积湍流和泡漩水流态，且随着流量的增大，水流速度和范围也不断增加。



a) Q=850 m^3/s



b) Q=2 980 m^3/s



c) Q=4 700 m^3/s

图 6　设计方案上引航道局部流场

Fig. 6　Local flow field of upper approach channel of designed scheme

表 2　设计方案上引航道口门区流速

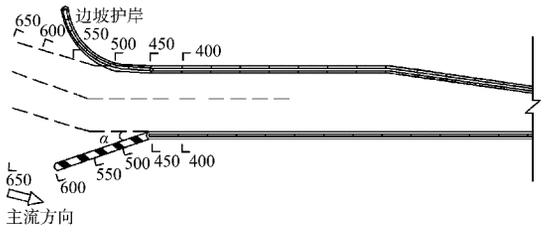
Tab. 2　Flow velocity at entrance area of upper approach channel of designed scheme

工况	Q/($m^3 \cdot s^{-1}$)	v_y/($m \cdot s^{-1}$)	v_x/($m \cdot s^{-1}$)	备注
1	426	0.31	0.05	–
2	850	0.46	0.10	–
3	1 700	0.96	0.22	–
4	2 130	1.10	0.31	–
5	2 980	1.33	0.44	–
6	3 834	1.53	0.58	–
7	4 700	1.65	0.70	最大回流流速超出规范限制
8	5 100	1.70	0.76	最大回流流速超出规范限制

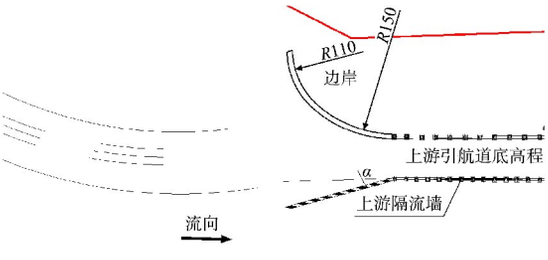
4　上引航道布置方案优化

4.1　优化方案设计

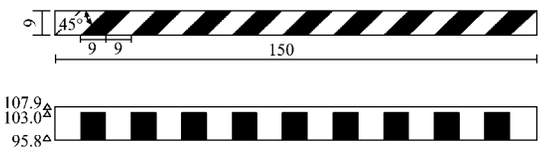
针对上引航道口门区水流横向流速超标、回流范围过大、水流偏角过大等问题，进行优化方案研究。通过对口门区不良流态成因的分析可知，上游隔流堤的斜流和回流对口门区流态的影响较为显著。为此，本研究提出在上游引航道增设 150 m 透水式隔流堤的改善措施，并在此基础上将靠岸一侧的挡墙采用“喇叭口”形状与岸边衔接布置，前半段 75 m 弧度采用 R150 m，后半段 75 m 采用 R110 m。优化方案见图 7。



a) 平面布置



b) 边坡



c) 结构

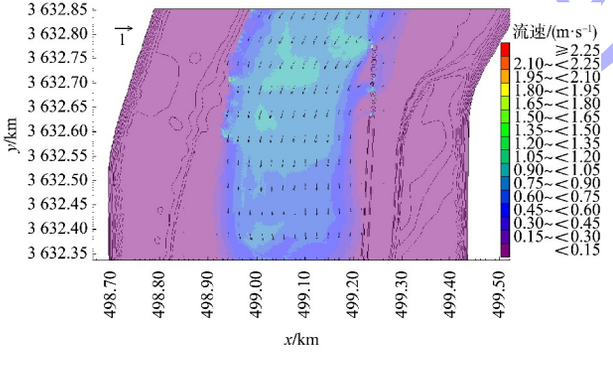
图 7　引航道优化方案（单位：m）

Fig. 7　Optimization scheme of approach channel (unit: m)

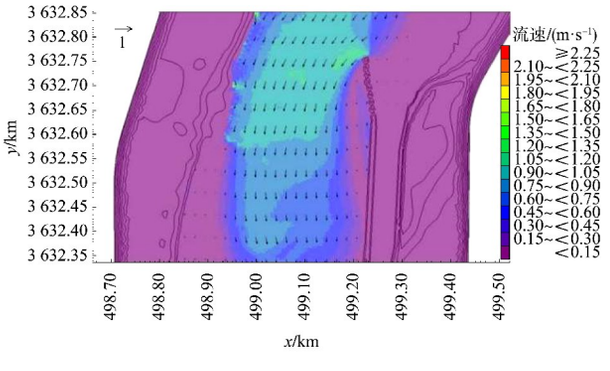
隔流堤夹角会显著影响口门区水流条件[11]，为进一步优化口门区方案，在“喇叭”式入口+透水式隔流堤方案基础上，针对隔流堤的不同夹角布置，研究不同角度方案的口门区水流条件变化规律，以期找出合理的夹角方案。

4.2　优化方案比选

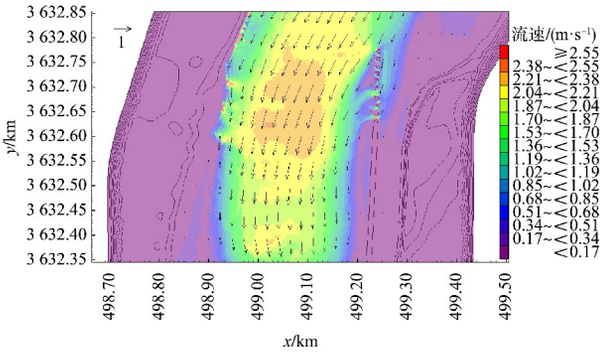
选取典型流量 850 m^3/s（常水位通航流量）、2 980 m^3/s（中洪水通航流量）、4 700 m^3/s（5 a 一遇洪水流量）下透水式隔流堤与导航墙夹角 α 分别为−15°、0°、15°、30°、45°，针对上游口门区水流条件改善效果采用数值模拟进行方案比选。部分角度的上引航道局部流场见图 8。



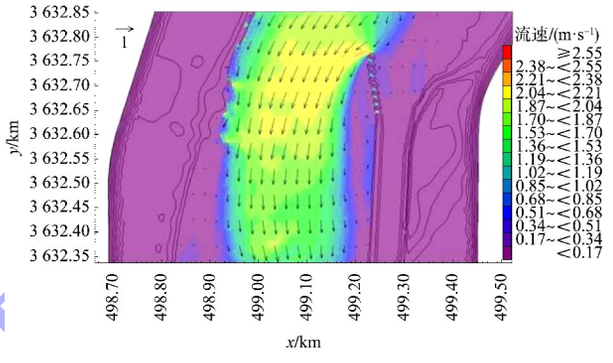
a) α=0°，Q=850 m^3/s



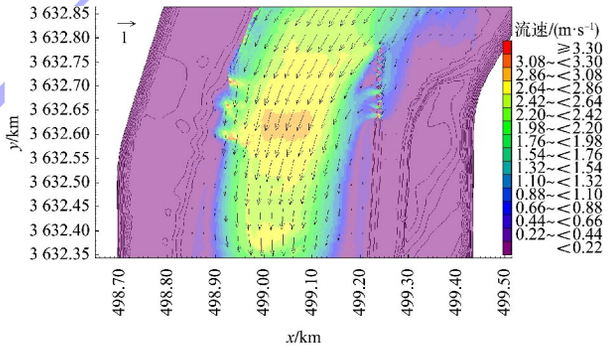
b) α=15°，Q=850 m^3/s



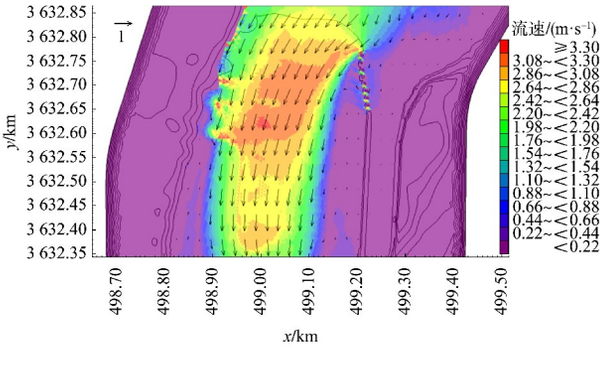
c) α=0°，Q=2 980 m^3/s



d) α=15°，Q=2 980 m^3/s



e) α=0°，Q=4 700 m^3/s

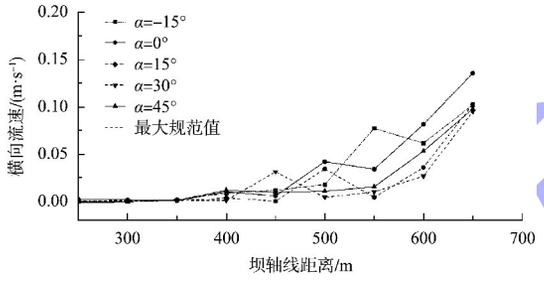


f) α=15°，Q=4 700 m^3/s

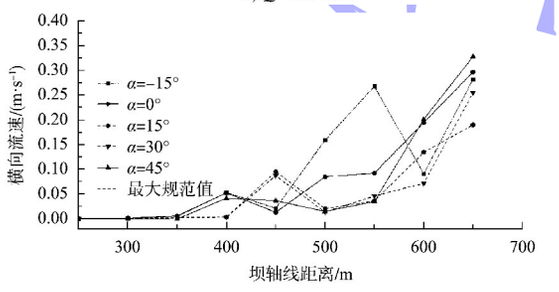
图 8　典型工况下上引航道局部流场

Fig. 8　Local flow field of upper approach channel under typical conditions

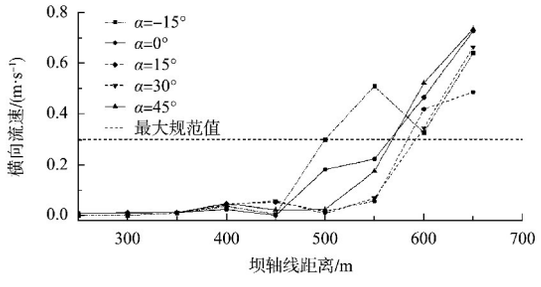
当 Q=850 m³/s 时，河道主流流速较低，主流与口门区水流之间的流速梯度较小，动量交换弱，同时主流引起的扩散、挤压和摩擦对口门区流场的影响较弱。因此，在不同 α 条件下，横向流速均相对较小。在 650 m 断面，α=0°方案显示最大横向流速，而 α=15°方案在 550 m 断面处呈急剧增大，这是由于隔流堤向内侧延伸，随着流量的增大该位置受到斜向水流的冲击越来越明显(图 9)。其余方案在 550 m 断面以外横向流速逐渐增加，当流量升至 2 980 m³/s 时，最大横向流速与其他流量变化规律基本一致。在不同 α 条件下，受到隔流堤导流的影响，最大横向流速均出现在 650 m 断面，其中 α=45°方案达到 0.34 m/s。随着 α 由 0°增加到 15°，最大横向流速由 0.30 m/s 减小至 0.17 m/s；而随着 α 进一步增加到 30°至 45°，口门区最大横向流速又增加至 0.25 m/s。



a) Q=850 m³/s



b) Q=2 980 m³/s

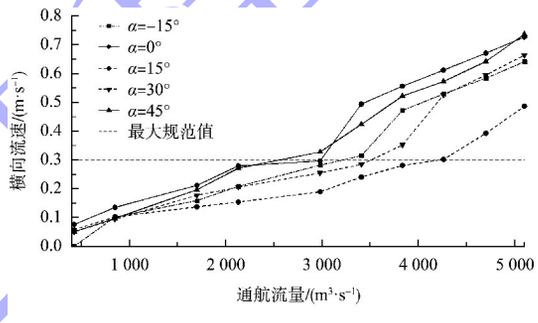


c) Q=4 700 m³/s

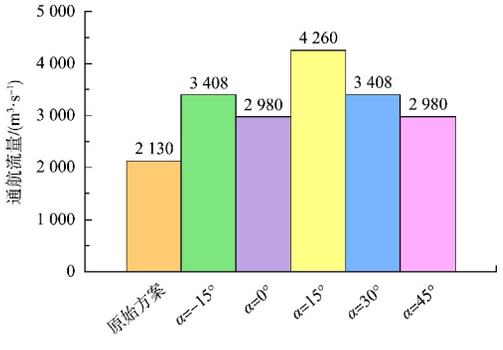
图 9　典型工况下沿程最大横向流速

Fig. 9　Maximum lateral flow velocity along path under typical conditions

通过对各个方案沿程流场分析发现，横向流速最大值均在 650 m 断面处。故将针对各角度下口门区水流流态最不利 650 m 处的最大横向流速以及最大通航流量进行对比分析，见图 10。由图 10 可以看出，α=0°时，流量超过 2 980 m³/s 时横向流速超过最大规范值。当透水式隔流堤向航道内侧倾斜 α=-15°时，通航流量提升至 3 408 m³/s 时横向流速才会超标。当隔流堤向外侧主流延伸至 α=15°时，横向流速达到 0.3 m/s 时通航流量达到 4 260 m³/s，随着倾斜角度的增加，α=30°时，通航流量由 4 260 m³/s 降低至 3 408 m³/s。进一步扩大倾斜角度至 45°，口门区横向流速再次增大，最高通航流量降低至 2 980 m³/s。



a) 650 m处最大横向流速



b) 最高通航流量

图 10　不同角度下最高通航流量及最大横向流速

Fig. 10　Maximum navigable flow rate and maximum lateral flow velocity at different angles

由图 10 可知，当 α=0°时，口门区最大横向流速为 0.73 m/s，最高通航流量较设计方案提升 40%。随着 α 向内侧偏移至-15°时，口门区横向流速最大为 0.63 m/s，最高通航流量较设计方案提升 60%。当 α 向外侧倾斜时，透水式隔流堤的壅水作用增强。α=15°时，口门区最大横向流速

为 0.49 m/s，通航流量由设计方案的 2 130 m^3/s 提升至 4 260 m^3/s，上升 100%，优化效果较其他方案更为显著。随着角度 α 增加到 30°时，主流的过流断面减小，流速显著增大，口门区最大横向流速为 0.66 m/s，最高通航流量为 3 408 m^3/s，较 α=15°方案略有下降。当 α 增大到 45°时，隔流堤已延伸至主流，对主流影响较大，口门区水流条件开始恶化，最大横向流速为 0.73 m/s，最高通航流量为 2 980 m^3/s。综合对比分析，α=15°为上游最优化方案。

5　结论

1）采用数值模拟方法，针对白河包营枢纽船闸工程上游引航道方案进行计算分析，发现当上游来流量达到 2 130 m^3/s 时，上游口门区横向流速开始超出规范限值，且随着流量的增大，口门区横向流速不断增大且在上游弯道左岸沿程部分区域存在大面积湍流和泡漩水流态，严重影响船舶安全进出闸。

2）针对口门区横向流速较大、流态紊乱的问题，结合实际情况，采取“喇叭”式入口+透水式隔流堤的优化方案，能显著改善口门区水流条件，满足船舶通行要求。

3）隔流堤的不同角度能够影响优化方案的改善效果，当透水式隔流堤与导航墙夹角为 15°时，隔流堤的分水和导流效果达到最佳，口门区横向流速改善效果最为显著。研究成果可为白河包营枢纽船闸提供技术支持。

参考文献：

[1] 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.
ZHANG Y, YANG C H, ZHAO J Y, et al. Simulation of navigable flow conditions for approach channel of ship lock in curved reach[J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 132-138.

[2] 方锦涛, 赵建钧, 辜晋德, 等. 赣江南支吉里枢纽通航水流条件试验研究及其优化措施[J]. 水运工程, 2022(6): 139-144.
FANG J T, ZHAO J J, GU J D, et al. Experimental study on navigable flow conditions of Jili junction in southern branch of Ganjiang River and optimization measures[J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 139-144.

[3] 王熔荣, 赵根生, 张首元, 等. 导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用[J]. 水运工程, 2023(3): 99-104.
WANG R R, ZHAO G S, ZHANG S Y, et al. Improvement effect of diversion pier on flow conditions in downstream entrance area of sharp bend channel[J]. Port & waterway engineering, 2023(3): 99-104.

[4] 李泳龙, 吴礼国, 程艳, 等. 龙溪口枢纽最低蓄水位下船闸上游通航条件及改善措施[J]. 水运工程, 2023(10): 13-18.
LI Y L, WU L G, CHENG Y, et al. Flow conditions for navigation and improvement measures of upstream of ship lock under lowest water level of Longxikou Junction[J]. Port & waterway engineering, 2023(10): 13-18.

[5] 付旭辉, 何京霖, 张波, 等. 抚河疏山水利枢纽船闸通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2024(2): 72-78.
FU X H, HE J L, ZHANG B, et al. Navigable flow condition of ship lock of Shushan water conservancy project in Fu River[J]. Port & waterway engineering, 2024(2): 72-78.

[6] 王晨晨, 黄承兵. 清远枢纽三线船闸平面布置方案[J]. 水运工程, 2024(1): 173-177.
WANG C C, HUANG C B. Layout plan of third-line ship lock of Qingyuan Hub[J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 173-177.

[7] 肖钦, 范红霞, 邓伟, 等. 赣江龙头山枢纽一线船闸通航水流条件及改善措施研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(6): 213-220.
XIAO Q, FAN H X, DENG W, et al. Study on navigation flow conditions and improvement measures at Longtoushan Junction in the Ganjiang River[J]. Hydro-science and engineering, 2023(6): 213-220.

[8] 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.
QI Y S, XU G X, LI C Y. Supplementary flow measures to improve flow pattern at entrance area of downstream approach channel of second ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 157-163, 224.

（下转第 126 页）

水运工程