



灌溉总渠行洪限制下淮安东船闸隔流堤布置*

王勤振¹, 胡鹏², 江涛¹, 范红霞², 邓伟³

- 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
- 南京水利科学研究院, 水灾害防御重点实验室, 江苏南京 210029;
- 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北武汉 430060)

摘要: 拟建淮安东船闸位于京杭运河淮安枢纽下游, 布置在淮入海水道南侧枯水河槽上, 船闸上游紧邻苏北灌溉总渠和运东分水闸, 受灌溉总渠行洪影响, 引航道及口门区横流不满足规范要求, 需布置隔流堤。采用数值模拟的手段, 对船闸上游隔流堤结构、长度、透空率及疏浚措施等对通航水流条件影响规律进行研究。结果表明: 灌溉总渠行洪时, 最大横流位于隔流堤堤头, 随着上游隔流堤长度缩短, 隔流堤堤头最大横流强度减弱, 超标范围基本不变; 透空后横流强度随隔流堤长度缩短变化不明显, 超标范围显著增大; 采用导流墩+墩板式隔流堤组合结构形式、增大隔流堤透空率均能有效降低堤头横流; 辅以运东闸前疏浚措施后, 能有效减少进入口门区水流, 改善通航水流条件。研究成果可为类似船闸隔流堤设计提供技术支持。

关键词: 淮安东船闸; 隔流堤; 通航水流条件; 透空率; 数值模拟

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0095-08

Layout of separation levee of Huai'an East Shiplock under restriction of irrigation canal flood

WANG Qinzhen¹, HU Peng², JIANG Tao¹, FAN Hongxia², DENG Wei³

- CCCC Water Transport Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
- The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
- CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: The proposed Huai'an East Shiplock is located in the south bank of floodway of Huai River, closed to the irrigation canal and Yundong sluice. Effected by the flood of irrigation canal, the flow condition in upstream navigation channel do not meet the requirements of the specifications, therefore separation levee needs to be constructed. By using numerical simulation methods, the influence laws of the upstream separation levee structure, length, permeability, and dredging measures of the ship lock on the navigation water flow conditions are studied. The results indicate that maximum crossflow is at the head of the separation levee under the flood of irrigation canal. With the shortening of upstream separation levee, the maximum transverse velocity decreases and the range of transverse velocity remains basically unchanged. When permeable structure is adopted, the maximum transverse velocity has no evident changes and the range increases obviously. The combined use of diversion pier and separation levee and the increase of permeability of separation levee can effectively reduce the transverse velocity at entrance area. The dredging in front of Yundong sluice can reduce the flow into the upper entrance area and weaken the transverse velocity. The research can provide technical support for the design of separation levee of ship lock.

Keywords: Huai'an East Shiplock; separation levee; navigable flow condition; permeability; numerical simulation

收稿日期: 2025-03-08

*基金项目: 南京水利科学研究院基金项目(Y224002)

作者简介: 王勤振(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事内河航运研究工作。

通航枢纽工程上、下游引航道受电站发电引水和闸门泄洪影响,在隔流堤堤头附近主流与口门区静水区域的交界面上存在流速梯度,易形成横流、回流和泡漩并存的复杂流态,船舶进出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^[1]。以往的工程实践经验表明,仅依靠对枢纽运行调度方案和建筑物总体布置进行优化难以从根本上改善口门区通航水流条件,往往需要构建合适的引航道导流建筑物来达到优化流态的目的^[2]。隔流堤的工程效果与枢纽的总体平面布置及枢纽所在河段的河势、水流条件以及泄洪闸的开启方式等密切相关,要根据实际情况具体分析^[3-5]。在国外,隔流堤墙身与墙头开孔是改善上游口门区水流条件的主要措施,墙头开孔长度一般为20~70 m。如德国摩赛尔河上的列门枢纽、萨尔河上雷灵根壅水坝枢纽以及方凯尔枢纽的船闸上游导航墙均采用了堤头开孔的形式,从而减弱回流强度和范围^[6]。国内也有对导流堤开孔的实践,如綦江新滩枢纽、渠江风洞子枢纽、喜陵江新政枢纽和金溪电航枢纽的船闸^[7],研究表明,船闸引航道导航墙采取一定范围和合适的透空形式可以调整口门区的流速分布,改善不良流态,但是透空隔流堤也可能对引航道停泊段造成不利影响。导流墩也具有一定的导流作用,朱红等^[8]、吴志龙等^[9]通过数学模型和水槽试验研究了导流墩数量、相对间距、长度等对引航道口门区水流条件的影响;但导流墩附近容易出现淤积,要合理清淤或者采用导流墩与丁潜坝等措施相结合的形式^[10]。

淮安东船闸布置于运东分水闸北侧,上游引航道和口门区通航水流条件主要受制于灌溉总渠行洪,本文以淮安东船闸为例,采用数值模拟的

手段,研究船闸上游隔流堤结构、长度、透空率、疏浚措施等对通航水流条件影响规律,以期为类似工程提供参考。

1 研究区域概况

淮河入海水道二期配套通航工程淮安段上起京杭运河与苏北灌溉总渠交汇处,终于淮阜漫水路下游淮安市与盐城市分界处,航道总长约35 km,规划等级为Ⅱ级,是江苏省“两纵五横”干线航道网中的“一横”淮河出海通道的重要组成部分。新建淮安东船闸沟通苏北灌溉总渠、京杭运河与淮河入海水道的一个重要梯级,为尽量减少占用入海水道行洪水域,船闸主体和上下游引航道沿入海水道南侧大堤堤脚布置,见图1。船闸闸室尺度为300 m×34 m×5.0 m(有效长度×有效宽度×门槛水深),上游导航调顺段长195 m,下游导航调顺段长195 m,导航段斜率为1:6,上下游引航道宽度均为75 m,上下游停泊段均布置在入海水道侧,长300 m。上下游引航道均采用曲线进闸、直线出闸平面布置形式。船闸上游为京杭大运河和总渠,设计最高通航水位10.63 m,设计最低通航水位8.33 m;下游为入海水道,设计最高通航水位10.13 m,设计最低通航水位2.33 m。船闸周边河、渠、水道纵横交错,船闸、水闸、涵闸、桥梁密布,水流条件十分复杂。

苏北灌溉总渠西起洪泽湖高良涧,东至扁担港入黄海,全长168 km,设计行洪流量800 m³/s,具有防洪、排涝、输水、航运、发电等功能。运东分水闸是灌溉总渠二级控制工程,设计灌溉流量250 m³/s,洪水期间设计泄洪流量800 m³/s,2023年开始实施运东分水闸除险加固工程,闸室净宽10.0 m,共7孔。考虑淮安东船闸上游口门区临近运东分水闸,灌溉总渠行洪时影响上游通航水流条件,为保障船舶安全通航,改善船闸上游通航水流条件,拟在靠近运东分水闸侧设置墩板式隔流堤。



图 1 淮安东船闸平面布置
Fig. 1 Layout of Huai'an East Shiplock

2 研究方法及工况

2.1 数学模型

针对淮安东船闸的布置特点, 考虑不同来流条件及运行工况下通航水流条件, 采用丹麦 DHI 研制的 MIKE21 中的水动力模块, 建立淮安东船闸灌溉总渠和运河侧数学模型, 模型基本方程为二维浅水方程, 采用有限体积法进行离散^[11-12]。隔流堤采用 MIKE 模型中的 Gates 模块进行概化。

2.2 模型范围及网格

模型模拟范围包括灌溉总渠河道 10.4 km, 京杭运河 3.8 km, 以及淮安抽水站、淮安船闸运西分水闸、淮安东船闸等水利交通设施, 模型范围见图 2。计算网格采用能适应复杂边界水体流动的非结构化三角形网格, 对局部区域进行网格加密, 网格尺寸在 2~10 m, 总共划分 153 060 个网格, 局部网格布置见图 3。

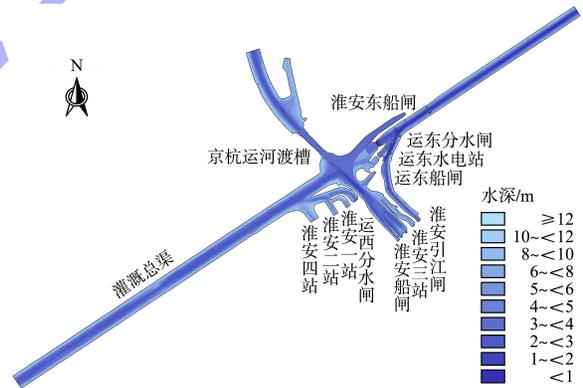


图 2 数值模型研究范围
Fig. 2 Study region of numerical simulation

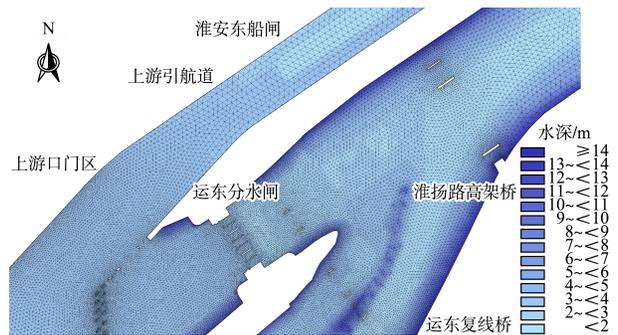


图 3 局部网格布置
Fig. 3 Partial grid layout

2.3 模型验证

模型验证采用2021年4月27日淮安一、二线船闸同时灌水运行工况下工程近区河道内的非恒定水位变化过程资料，验证结果见图4，模型水位误差在±0.05 m之内，满足规范要求。计算时曼宁综合糙率取值为0.022~0.031，其中深槽糙率

小，滩地及已有水工建筑物附近糙率大。

由于缺乏现场流速验证资料，采用物理模型试验结果对数值模型流速模拟结果进行验证，结果见图5，流速误差在0.05 m/s之内，表明模型可以很好地模拟工程区水动力情况。

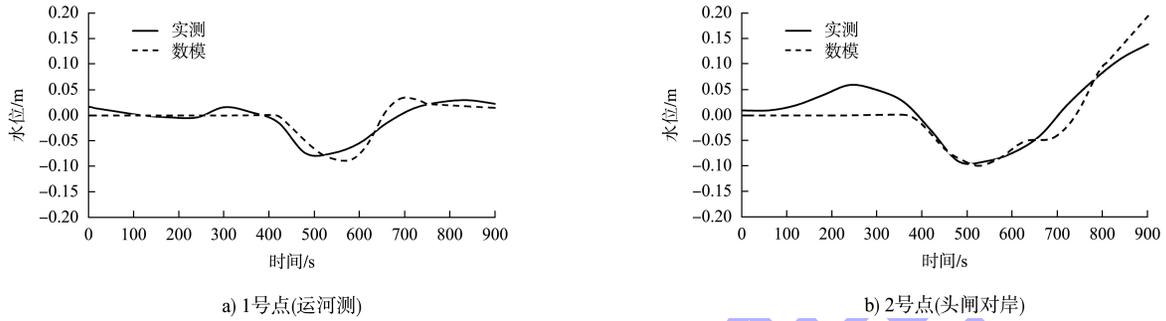


图4 数值模型水位验证
Fig. 4 Water level validation of numerical model

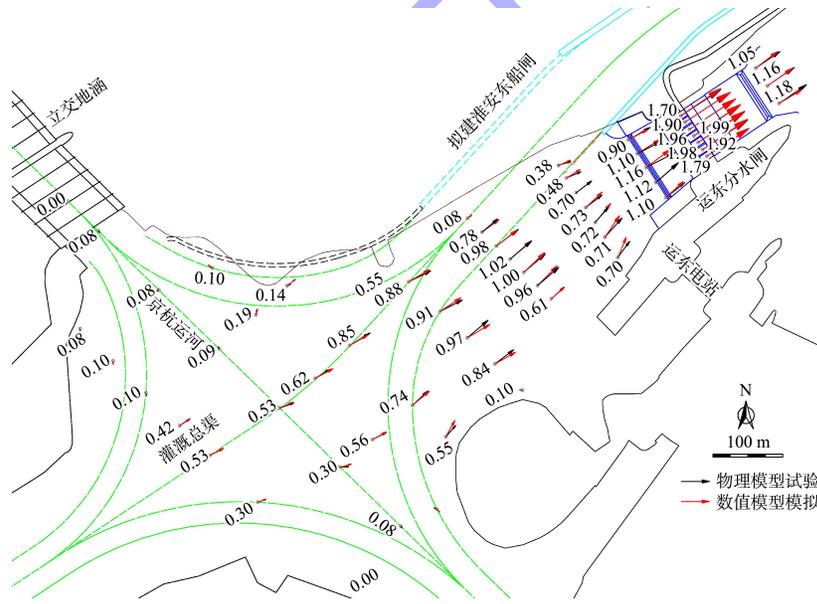


图5 数值模型流速验证 (单位: m/s)
Fig. 5 Flow velocity validation of numerical model (unit: m/s)

2.4 模拟工况设置

淮安东船闸上游最高通航水位10.63 m，对应灌溉总渠设计行洪流量800 m³/s，此时运东闸闸

门全开，计算该条件下不同隔流堤长度、透空率、结构、疏浚措施对通航水流条件的影响，数值模拟工况见表1。

表 1 数值模拟工况

Tab. 1 Working conditions of numerical simulation

| 工况 | 隔流堤形式 | 隔流堤长度/m | 隔流堤透空率/% | 运东闸前疏浚 |
|----|---------|---------|----------|--------------------------------|
| 1 | 墩板式 | 40 | 0 | 无 |
| 2 | 墩板式 | 60 | 0 | |
| 3 | 墩板式 | 80 | 0 | |
| 4 | 墩板式 | 40 | 38 | |
| 5 | 墩板式 | 60 | 38 | |
| 6 | 墩板式 | 80 | 38 | |
| 7 | 导流墩+墩板式 | 80 | 38 | |
| 8 | 导流墩+墩板式 | 80 | 67 | |
| 9 | 导流墩+墩板式 | 80 | 67 | 范围 370 m×160 m 疏浚底高程 3.68 m |

3 结果与讨论

淮安东船闸建设周期约 4 a, 拟于 2029 年完工, 而《船闸总体设计规范》修订版于 2025 年颁布, 因此淮安东船闸设计运行可按新规范考虑。根据该规范, 船闸上游引航道及口门区的通航水流条件判别标准为: 停泊段和制动段的水面最大纵向流速不应大于 0.5 m/s, 横向流速不应大于 0.15 m/s; 口门区最大纵向流速宜小于 2.0 m/s; 当口门区的水面最大横向流速为 $0.3 \text{ m/s} < v_T \leq 0.4 \text{ m/s}$ 时, 宜加宽 0.5 倍船长, 当 $0.4 \text{ m/s} < v_T \leq 0.5 \text{ m/s}$ 时, 宜加宽 1 倍船长, 同时应通过工程措施避免回流形成。淮安东船闸上游口门区宽度 112.5 m, 大于引航道宽度(75 m)与 1 倍设计船宽(16 m)之和(91 m), 口门区横流标准可按 0.5 m/s 控制。

3.1 隔流堤长度

初步选定隔流堤采用墩板式结构, 两墩之间隔板长 17.5 m, 墩宽 2.5 m, 墩板式结构见图 6。各工况下大部分水域纵、横向流速均满足规范要求, 横向流速在 0.5 m/s 以内, 最大横流位于隔流堤堤头, 仅在隔流堤堤头局部水域横向流速超标。在隔流堤不透空与透空情况下, 分析比较不同长度隔流堤堤头近区流场情况, 最大横流量值和超标范围统计结果见表 2。

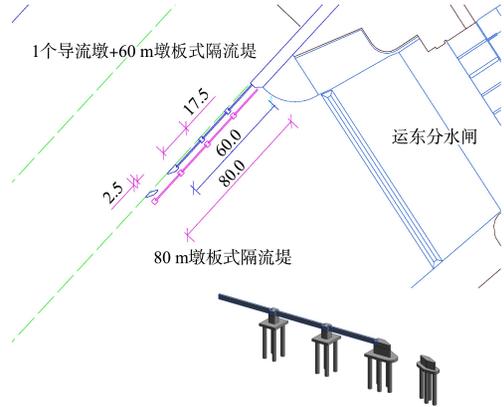


图 6 不同形式隔流堤 (单位: m)

Fig. 6 Different types of separation levee (unit: m)

表 2 不同长度隔流堤最大横流与超标范围

Tab. 2 Maximum transverse velocity and exceeding range under different lengths of the separation levee

| 工况 | 隔流堤长度/m | 透空率/% | 最大横流流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 横流超 0.5 m/s 范围/($\text{m}\times\text{m}$) |
|----|---------|-------|---|--|
| 1 | 80 | 0 | 1.15 | 40×15 |
| 2 | 60 | 0 | 0.83 | 44×15 |
| 3 | 40 | 0 | 0.77 | 50×15 |
| 4 | 80 | 38 | 0.78 | 25×13 |
| 5 | 60 | 38 | 0.75 | 33×13 |
| 6 | 40 | 38 | 0.73 | 50×13 |

当隔流堤不透空时, 80、60 和 40 m 长方案的堤头最大横流分别为 1.15、0.83、0.77 m/s, 随着长度的缩短, 最大横流量值减小, 但超标范围相差不大, 约 $45 \text{ m}\times 15 \text{ m}$ 。透空后, 各方案最大横流分别为 0.78、0.75、0.73 m/s, 最大横流位置仍在堤头, 横流最大值随隔流堤长度变化不明显, 但随着隔流堤长度缩短, 横流超标范围增加, 80 m 长透空隔流堤方案超标范围为 $25 \text{ m}\times 13 \text{ m}$, 缩短至 40 m 时超标范围增加至 $50 \text{ m}\times 13 \text{ m}$ 。从横流超标量值与范围两方面综合考虑, 淮安东船闸上游隔流堤宜采用透空结构, 长度为 80 m 左右。80 m 长透空墩板式隔流堤工况下航道区表面流场见图 7。

3.4 疏浚措施

根据实测地形, 运东分水闸上游局部地形最高达 7 m 以上, 而航道内疏浚底高程为 3.63 m, 淮安东船闸工程实施后, 灌溉总渠下泄流量受隆起地形及航道疏浚影响, 主流偏向航道, 导致航道区表面流速较大。因此, 考虑对运东分水闸前较高地形进行疏浚, 疏浚范围见图 10, 疏浚范围长 372 m、宽 162 m, 疏浚底高程 3.68 m, 与运

东分水闸改建后闸前疏浚底高程保持一致。在运东闸泄洪 800 m³/s 工况下, 进入航道区水流有所减少, 隔流堤堤头处表面流速由疏浚前的 0.76 m/s 降低至疏浚后 0.66 m/s, 降低 16.4%, 隔流堤堤头最大横向流速降低至 0.43 m/s, 满足规范要求的 0.5 m/s, 说明疏浚措施效果较好, 且堤头最大横流与物理模型试验结果 0.44 m/s 基本一致, 物理模型试验流态见图 11。

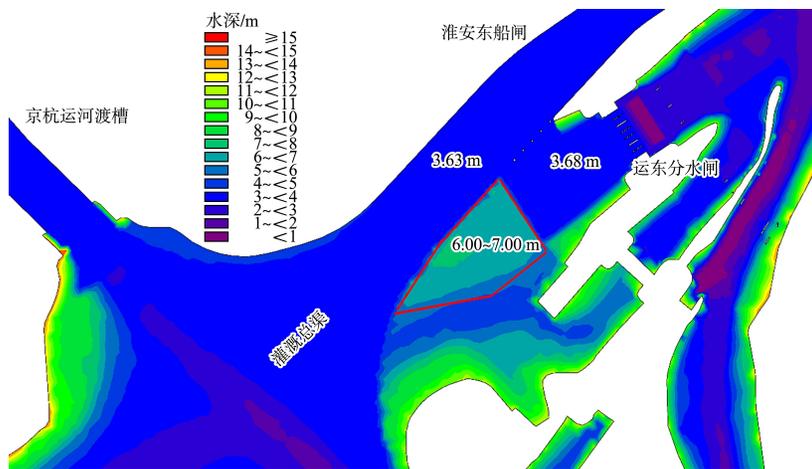


图 10 运东闸前实测地形

Fig. 10 Measured terrain in front of Yundong sluice

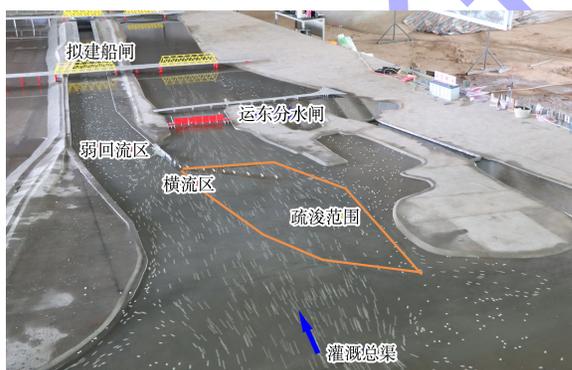


图 11 疏浚后流态

Fig. 11 Flow field after dredging

综上所述, 淮安东船闸初步推荐设置 80 m 长、1 个导流墩+60 m 墩板式透空组合隔流墙, 插板底高程 8.33 m, 透空高度 4.7 m, 透空率 67%, 且需辅以运东分水闸前局部水域疏浚措施以改善通航水流条件, 疏浚底高程 3.68 m, 疏浚总量 10.3 万 m³。

4 结论

1) 对于紧邻泄水闸的船闸, 上游隔流堤长度应综合考虑口门区通航水流条件和隔流堤对泄水闸影响后确定。不透空隔流堤长度缩短, 虽然堤头最大横流量值减小, 但横流超标范围基本不变; 透空后隔流堤长度缩短, 最大横流值变化不大, 但超标范围显著增大, 应综合考虑横流量值与范围确定合适的隔流堤长度。

2) 采用导流墩+墩板式隔流堤组合结构形式、适当增加隔流堤透空率均能有效降低隔流堤堤头横流强度。

3) 淮安东船闸受灌溉总渠行洪限制, 口门区横流超标, 在设置透空隔流堤的基础上需辅以运东闸闸前疏浚的工程措施, 减少进入引航道内水流, 降低隔流堤堤头横流强度, 改善船闸口门区通航水流条件。

参考文献:

- [1] 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.
ZHENG H J. Layout of open-type separation levee and optimization of navigation flow conditions in upstream approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 146-151.
- [2] 路莅枫, 王能, 普晓刚. 山区复杂条件下已建船闸通航条件改善措施研究 [J]. 水道港口, 2018, 39 (5): 579-583.
LU L F, WANG N, PU X G. Study on improvement measures of navigation conditions of ship locks constructed under complex conditions in mountainous areas [J]. Journal of waterway and harbor, 2018, 39(5): 579-583.
- [3] 邹永超, 袁浩, 冉彬君, 等. 基于透空隔流堤布置的上游引航道通航水流条件优化 [J]. 水运工程, 2023 (6): 96-101.
ZOU Y C, YUAN H, RAN B J. Optimization of navigation flow conditions at upstream entrance of approach channel with separation levee [J]. Port & waterway engineering, 2023(6): 96-101.
- [4] 何飞飞, 严秀俊, 王彪, 等. 山溪性河流船闸通航水流条件研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 116-119.
HE F F, YAN X J, WANG B, et al. Study of navigable water flow conditions in mountain stream locks [J]. Water resources and power, 2022, 40(1): 116-119.
- [5] 何飞飞, 王晓刚, 王彪, 等. 基于等面积法的透空式隔流堤二维水流数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 86-91.
HE F F, WANG X G, WANG B, et al. Numerical simulation of two-dimensional water flow through a permeable bulkhead based on the equal area method[J]. China rural water and hydropower, 2021(10): 86-91.
- [6] 张亮, 卢启超. 船闸引航道口门区通航水流条件改善措施的综合述[J]. 科技信息, 2009(25): 387-388.
ZHANG L, LU Q C. Review of measures to improve navigational flow conditions in the estuary and approach area of lock [J]. Science and technology information, 2009(25): 387-388.
- [7] 陈桂馥, 张晓明, 王召兵. 船闸导航建筑物透空形式对通航水流条件的影响 [J]. 水运工程, 2004 (9): 56-58, 73.
CHEN G F, ZHANG X M, WANG Z B. Influence of open-type guide works on flow condition for navigation of shiplock [J]. Port & waterway engineering, 2004 (9): 56-58, 73.
- [8] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件的试验研究[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 109-112.
ZHU H, HAO P Z. Tests on improving flow conditions at the entrance of approach channel by diversion pier [J]. Journal of waterway and harbor, 2005, 26(2): 109-112.
- [9] 吴志龙, 姜兴良. 株洲二线船闸引航道平面布置方案及水流条件分析[J]. 水运工程, 2019(3): 89-93.
WU Z L, JIANG X L. Layout plan and flow condition of Zhuzhou second-lane lock's navigable channel [J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 89-93.
- [10] 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.
OUYANG S, LIU C L, CHENG Y Z, et al. Numerical simulation of flow characteristics near the permeable submerged dam [J]. Hydro-science and engineering, 2019(1): 109-118.
- [11] RODI W. Turbulence models and their applications in Hydraulics [M]. Delft : International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 1984.
- [12] ZHAO D H, SHEN H W, TABIOS G, et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins [J]. Journal of hydraulic engineering, 1994, 120 (7): 863-883.

(本文编辑 王传瑜)