



木京船闸输水系统进水口优化布置数值研究*

谭 静^{1,2}, 袁 浩^{3,4}, 胡瑞昌³, 谢春航^{4,5}, 梁浩然⁵, 谭家万¹

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆万州技师学院, 重庆 404000;

3. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 402247;

4. 重庆交通大学, 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247; 5. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 船闸灌泄时会引起闸室内水流流态不稳定, 极端情况下还会扰乱自由液面流场, 严重威胁船舶的停泊安全、影响船闸通航效率。受多因素影响, 木京船闸目前正面临进出口水流条件恶化、闸室内往复流影响、引航道通航水流条件超标、船舶航行条件差等多重技术难题。采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对船闸输水系统进水口布置进行三维模拟, 研究其水力特性、局部水流条件等, 基于木京船闸输水系统进水口设计方案, 详细分析讨论船闸在运行过程中的水力学关键技术问题, 提出优化建议措施。结果表明: 喉口宽度和布置顺序显著影响进水口水流流态, 通过改变喉口宽度与间距可有效改善进水条件、稳定水流流态, 改善进流不均的问题。

关键词: 通航船闸; 进水口布置; 水力特性; 输水系统

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0110-08

Numerical study on optimal arrangement of water inlet in water delivery system for Mujing ship locks

TAN Jing^{1,2}, YUAN Hao^{3,4}, HU Ruichang³, XIE Chunhang^{4,5}, LIANG Haoran⁵, TAN Jiawan¹

(1. The College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Artificer College of Wanzhou, CQ, Chongqing 404000, China;

3. Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 402247, China;

4. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China;

5. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Unstable flow pattern inside the ship lock is caused by filling and draining the ship lock. In extreme cases, jets can disrupt the free-surface flow field, which poses a serious threat to the safety of the ship at berth and affects the efficiency of ship lock navigation. Influenced by many factors, Mujing ship locks are now facing technical problems such as deterioration of water flow conditions at the entrance and exit of the approach channel, mutual influence of water flow in the approach channel during filling and draining, influence of reciprocating flow, exceeding of navigational water flow conditions in the shared approach channel, and poor navigational conditions for ships. The RNG $k-\varepsilon$ turbulent model is adopted to simulate the layout of the water inlet in the water delivery system for ship locks, and hydraulic characteristics and localized hydrographic conditions are studied. Based on the design scheme of water delivery system of Mujing ship locks, the key technical problems of hydraulics during the operation of ship locks are analyzed and discussed in detail, and optimization measures are proposed. The results show that the width of the throat and the order of arrangement significantly affect the flow pattern of the water inlet. The width and spacing of the throat can be changed to effectively improve the water inlet conditions, stabilize the water flow pattern and improve the problem of uneven inlet flow.

Keywords: navigable ship lock; water inlet arrangement; hydraulic characteristic; water delivery system

收稿日期: 2023-12-27

*基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX1175); 重庆市交通科技项目(CQJT-ZCXM2023-11)

作者简介: 谭静 (1988—), 男, 硕士研究生, 讲师, 从事通航水力学研究。

通航船闸作为内河航道中最为常见的通航建筑物形式之一,用于调节上下游航道集中水位落差,使得船舶能够顺利通过闸坝,平稳地在水系中航行,是沟通和连接各等级航道的控制性节点,直接影响高等级航道网络的通畅和运输能力。在内河水运需求飞速增长的背景之下,我国已有的近千座通航建筑物中,其中有九百余座为船闸^[1-2]。

船闸的通航效率和停泊安全与输水系统布置方式等紧密相关。船闸闸墙廊道侧支孔输水系统侧支孔水流从孔口以水股的形式向相对体积更大的闸室中排放。目前已经有许多学者^[3-7]利用物理模型试验和数值模拟计算的方法对闸室内的流场分布和流场结构进行过分析。闸室内射流的局部水力冲击、两侧闸壁相对应侧支孔出流对冲(或末端相切)均会在闸室自由面引起漩涡,从而使船体受到较大的作用力。极端情况下射流还会发生偏转,导致射流主流位置抬高,造成射流直冲自由液面。

因此,闸室内射流消能不仅关系到船舶的通航效率还严重影响船舶的停泊安全。不同的消能坎布置方式、支流孔间距和射流流量等^[8-9]是当前研究的重点。目前关于在不同布置方式下闸室内水流各剖面分布、消能率特性和漩涡特性等方面的研究颇丰^[10-13],但对进水口灌泄水全过程的水力特性以及闸室内进水口水力学条件的研究较少,需要继续深入。

本文基于木京船闸输水系统设计方案,详细分析讨论船闸在运行过程中一系列的水力学关键技术问题,并提出优化建议措施,给船闸输水系统进水口布置提供科学依据和技术支撑。本文采用三维数学模型进行水力计算分析,研究其水力特性、局部水流条件等,对于保障船闸高效、安全、平稳的运转具有十分重要的意义。

1 木京双线船闸概况

木京船闸有效尺度为220 m×34 m×4.5 m(长×宽×门槛水深),设计水头为9.1 m,设计输水时间8~10 min,船闸规模大、输水时间要求相对较

短、输水强度高、水力指标要求高,可能存在输水系统进水口、廊道、闸室、出水口等关键位置水流条件较差的问题,不能满足船舶安全过闸及泊稳的要求。

同时由于木京船闸是在枢纽已建成条件下进行建设,受河势条件、城镇规划、陆域用地及已建枢纽泄洪要求等因素制约,船闸建设用地极为有限,木京船闸上下游引航道平面布置空间有限,引航道最窄处仅为75.5 m,而且下游引航道弯曲。受多因素影响,必然导致引航道进出口水流条件恶化往复流影响、引航道通航水流条件超标、船舶航行条件差等技术难题。

2 数值模拟

2.1 控制方程

本文采用重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ 紊流模型,其控制方程如下。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中: u_i 、 u_j 为 i 、 j 向速度分量, x_i 、 x_j 为 i 、 j 向位移分量, t 为时间, ρ 为密度, μ 为流体黏度, μ_t 为紊动涡黏度, p 为时均压强。

紊动能 k 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

紊动能耗散率 ε 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为由于平均速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为由于浮力产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中波动膨胀对整体耗散率的影响; α_k 、 α_ε 为

k 、 ε 的逆有效普朗特数； S_k 和 S_ε 为用户定义的源项； R_ε 为附加项； μ_{eff} 为 μ 与 μ_t 之和； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数，分别取 1.42、1.68、-0.33。

2.2 模型构建

为完整模拟整个船闸全过程充泄水过程，船闸三维模型模拟范围包括进水口段、船闸上下闸首、闸室、输水系统(包括上游阀门段，输水廊道支孔段)、下游出水口段，纵向长度约 500 m。木京船闸三维模型研究范围见图 1。木京船闸三维模型见图 2。

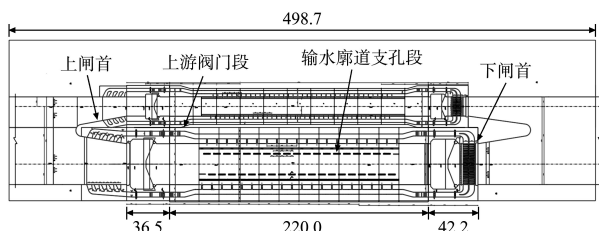


图 1 木京船闸三维模型研究范围 (单位: m)

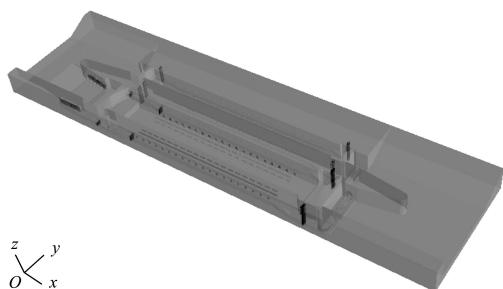


图 2 木京双线船闸输水系统三维模型整体效果

在整个模拟计算区域内，计算网格均采用六面体结构化网格。对于研究重点区域如进出水口段、输水廊道及侧支孔采用渐变网格的处理方法进行局部加密。船闸输水系统网格划分中，最小网格边长为 0.2 m，最大网格边长为 0.5 m，网格总数量约为 1 400 万个。

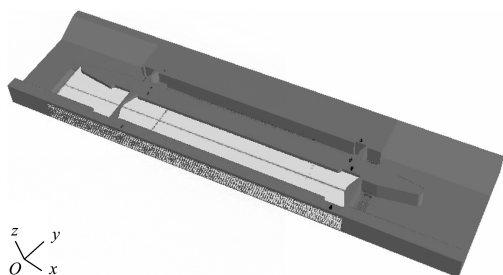


图 3 船闸输水系统网格划分

在计算区域网格块的上表面边界，由于自由表面为水体与大气的交界面，边界条件设定为压力边界条件。工作阀门采用流固耦合计算模型，根据充泄水工况给定匀速开启速率。闸室、廊道等为固壁边界，混凝土糙率 0.017。为了提高计算效率，计算初始时刻根据充泄水上下游水位及闸室水位给定初始静水流体，初始静水流体服从静压分布规律。边界条件见图 4。

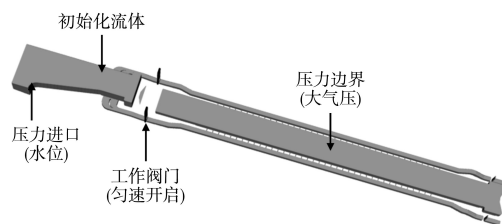


图 4 船闸输水系统三维数学模型边界条件设置

2.3 数值模型工况

针对设计最大水头工况，考虑不同的充、泄水阀门开启时间，拟定的计算工况见表 1。

表 1 木京船闸输水系统计算工况

计算工况	阀门开启时间/s	上游水位/m	下游水位/m
SC1	240	42.74	33.64
SC2	300		
SC3	360		
SC4	420		

2.4 数值模拟可靠性分析

本文利用类似输水系统物理模型的泄水过程进行验证，船闸物理模型布置见图 5。

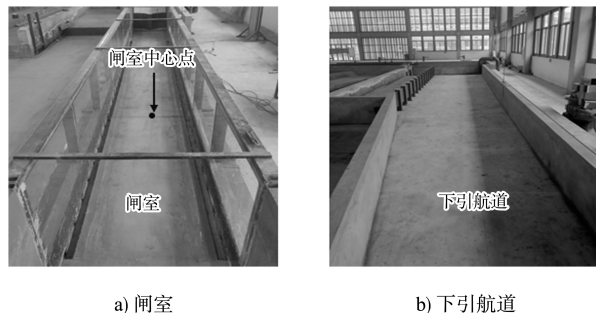


图 5 物理模型布置

本文选取闸室中心点处的水位数值模拟和物理模型试验结果进行对比验证，见图 6。其中， h 和 h_m 分别为实际水位和泄水前水位。

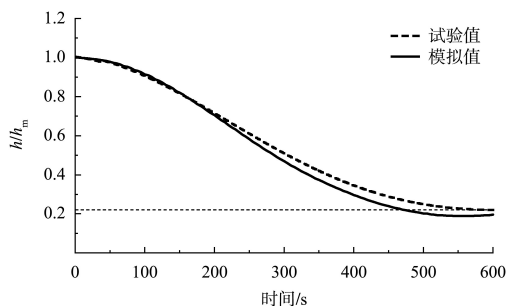


图 6 船闸中心点水位对比验证

对比结果表明, 数值模拟和物理模型水位变化趋势基本一致; 数值模拟和物理模型水位下降到与下引航道齐平的时刻分别为 470 和 530 s, 相差 11.3%。考虑到物理模型尺寸较小, 会产生比尺效应, 因此本文认为数值模拟结果与物理试验结果基本一致, 数值模拟结果可靠。

3 结果与分析

3.1 船闸进水口设计方案结果分析

根据原始设计资料, 船闸设计方案采用导墙垂直 5 支孔进水口, 进水口总面积为 189 m^2 , 与阀门面积比为 5.25, 支孔喉口宽度由下至上依次为 2.2、2.6、3.0、3.4 和 3.8 m, 其布置见图 7。

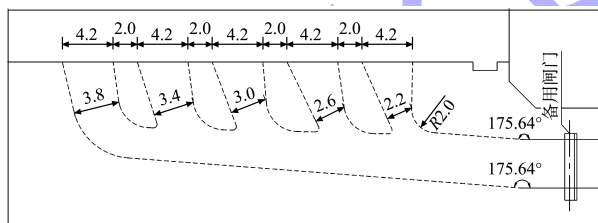


图 7 船闸进水口设计方案平面布置 (单位: m)

进水口平面及立面流速矢量云图, 见图 8~10。在充水阀门开启时间 4 和 5 min 条件下, 充水初期, 由于输水流量较小, 水深较大, 进水口附近表面流速较低 ($0.1 \sim 0.3 \text{ m/s}$); 随着充水阀门开度逐渐增大, 输水流量逐渐增加, 进水口附近流速也逐渐增大, 至输水流量达到最大时刻, 进水口附近表面流速达到 $0.2 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 。随着充水阀门全开直至充水结束, 输水流量基本呈线性关系减小, 进水口附近表面流速流态基本与充水初期一致。在整个充水过程中, 受动静水交替及边壁影响, 进水口下游与人字门之间的水域形成一定范围的

表面漩涡回流, 但漩涡回流的强度和范围均相对较小, 回流流速均不超过 0.1 m/s 。

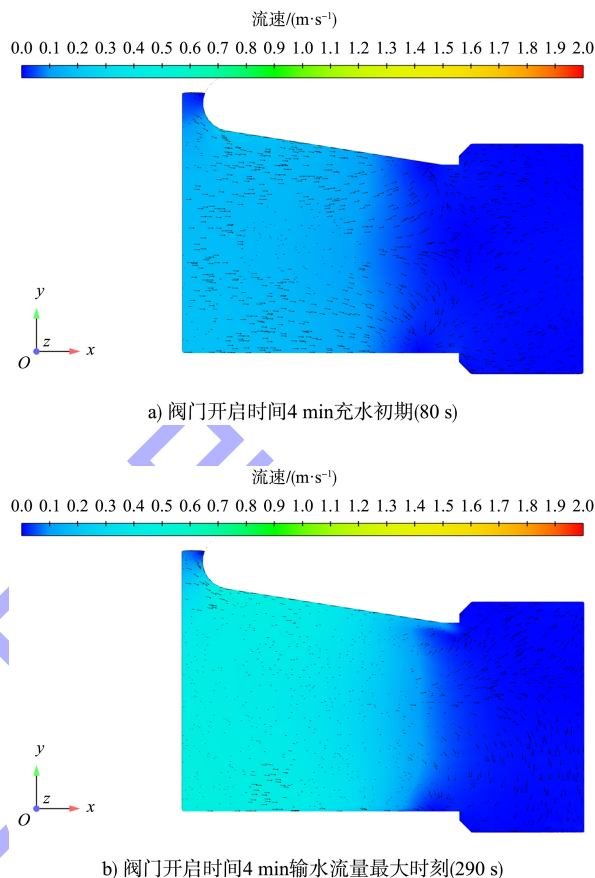
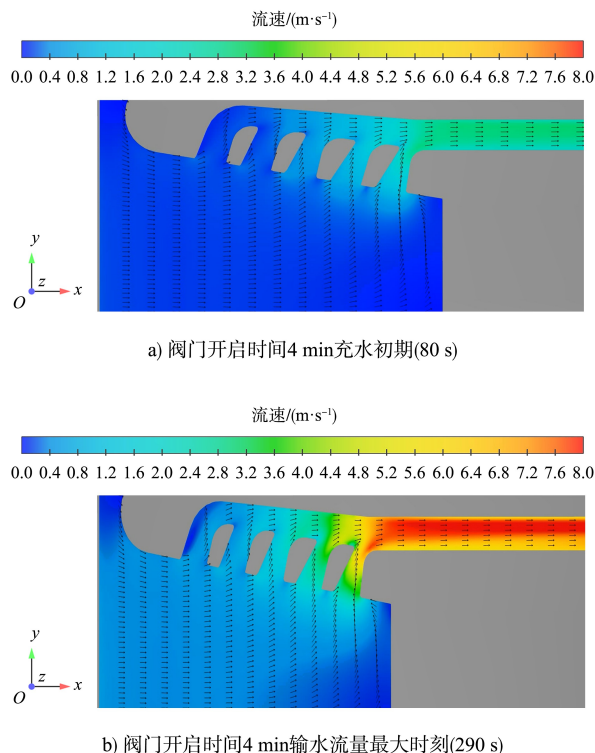
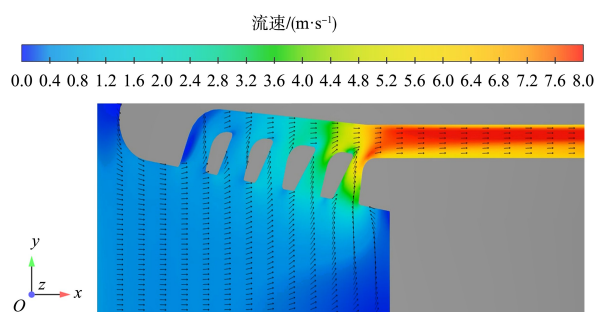
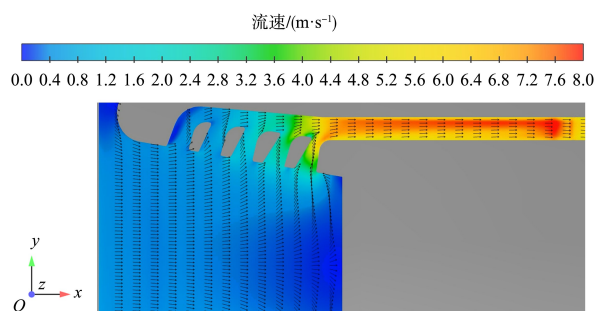


图 8 船闸进水口表面流速分布矢量云图



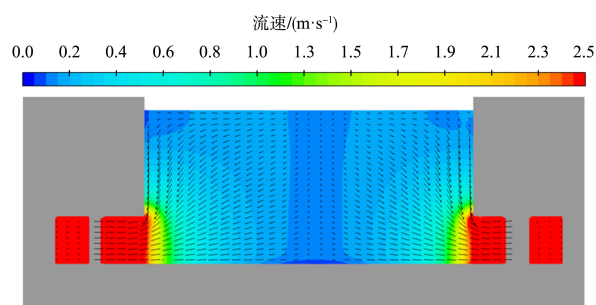


c) 阀门开启时间5 min 充水初期(80 s)

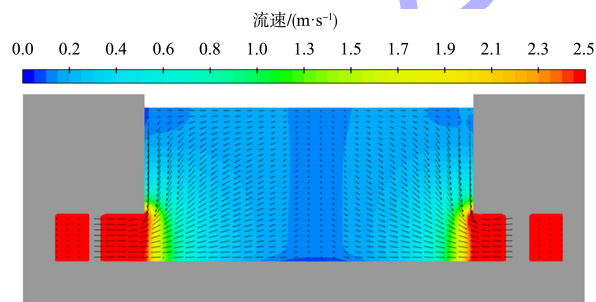


d) 阀门开启时间5 min 输水流量最大时刻(290 s)

图9 进水口平面流速分布矢量云图



a) 阀门开启时间4 min(充水时间205 s)



b) 阀门开启时间5 min(充水时间290 s)

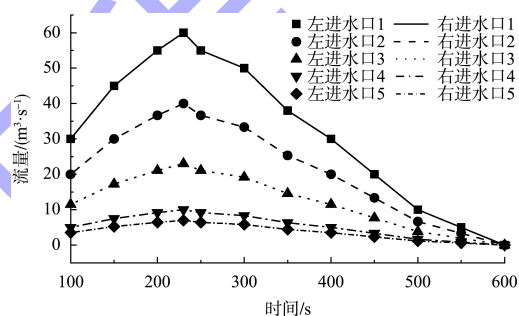
图10 最下游进水口中心最大输水流量时刻断面流速矢量云图

受水流惯性影响, 进水口及其喉口流速也呈现从上游至下游逐渐增大的规律; 整个充水过程中进水口中心平面流速变化趋势、过程与进水口表面流速一致。在充水初期(80 s), 输水流量较小, 进水口流速在0.2~1.4 m/s, 进水口喉口流速

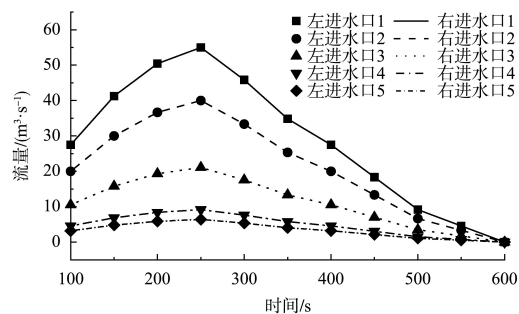
在0.3~3.0 m/s; 至输水流量达到最大时刻, 进水口流速增大到0.6~3.0 m/s, 进水口喉口流速在0.8~7.0 m/s; 其后随着输水流量逐渐减小, 进水口及其喉口流速也逐渐减小。

在整个充水过程中, 进水口水流进流相对平顺, 流线顺直, 无明显不良流态, 进流条件相对较好; 但在输水流量达到最大时刻, 最下游的进水口平面流速相对较大; 结合断面流场来看(图10), 在整个垂向上流速均超过2.5 m/s, 流速较大。

为进一步分析船闸设计方案进水口水力学条件, 各进水口输水流量过程及断面平均流速过程见图11、12。

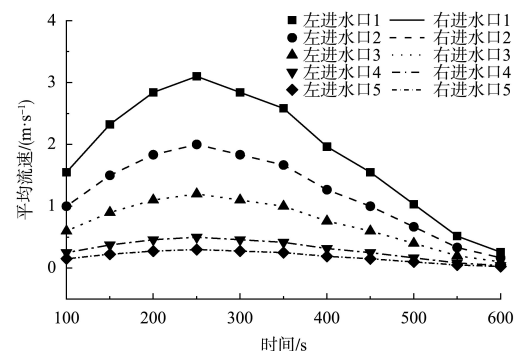


a) 阀门开启时间4 min

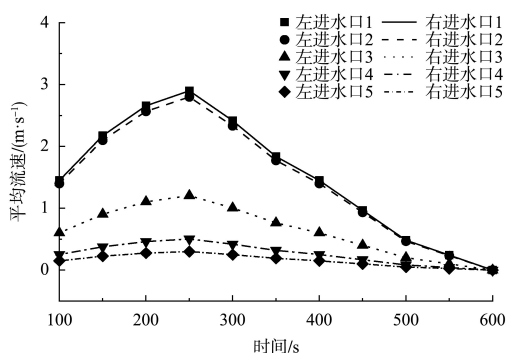


b) 阀门开启时间5 min

图11 进水口输水流量过程



a) 阀门开启时间4 min



b) 阀门开启时间5 min

图 12 进水口断面平均流速过程

随着充水工作阀门开度不断增加, 受水流的惯性作用, 各进水口输水流量差异逐渐增大, 呈现从上游至下游进水口输水流量逐渐增大的规律。至整体输水流量达到最大时刻, 这种流量分布差异也达到最大。整个充水过程中, 靠上游的 2 个进水口输水流量过程差异较小, 基本一致, 靠下游的 3 个进水口输水流量明显大于上游进水口。

综上, 在整个充水过程中, 设计方案每侧垂直 5 支孔进水口水流进流相对平顺、流线顺直、无串通的漏斗漩涡等不良流态, 但各进水口流量差异较大, 最下游进水口断面平均流速超过了 2.5 m/s, 应进一步优化进水口喉口及导流墩布置, 以获得更均匀的进流条件。

3.2 船闸进水口优化方案结果分析

由前所述, 进水口设计方案各支孔流量差异较大, 且最下游进水口断面平均流速较大, 超过了 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[14] (简称“规范”)要求 (2.5 m/s)。为此, 优化方案减小了各进水口喉口宽度, 以调整其各个进水口的流量分配。优化后, 喉口宽度由下至上依次为 1.8、2.2、2.6、3.0 和 3.4 m, 其布置见图 13。船闸进水口优化方案水流条件见图 14、15。

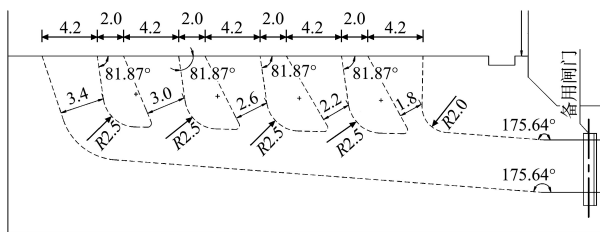
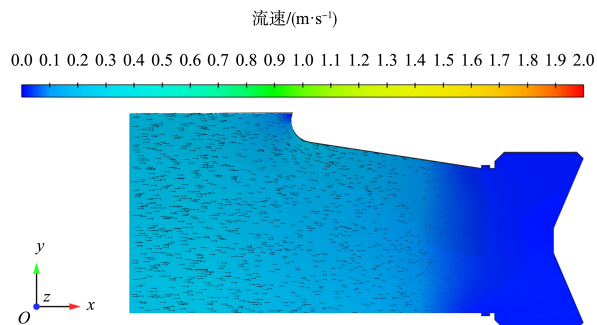
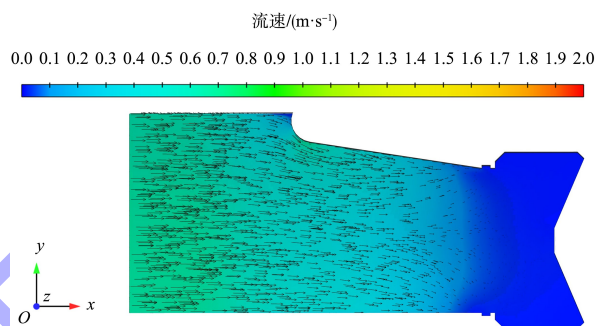


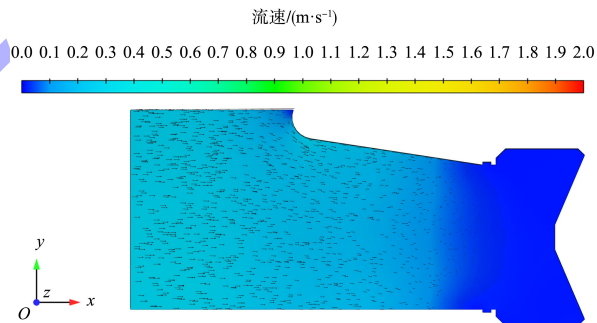
图 13 船闸进水口优化方案平面布置 (单位: m)



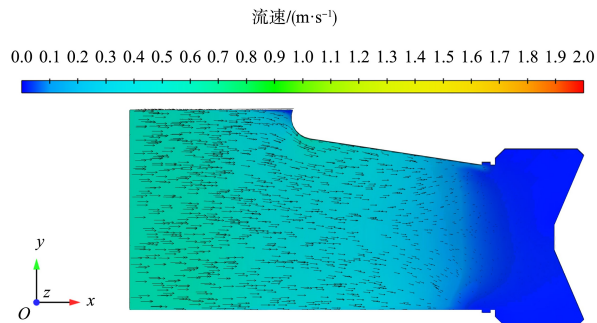
a) 阀门开启时间4 min充水初期(65 s)



b) 阀门开启时间5 min输水流量最大时刻(225 s)



c) 阀门开启时间5 min充水初期(80 s)



d) 阀门开启时间5 min输水流量最大时刻(750 s)

图 14 进水口表面流速分布矢量云图

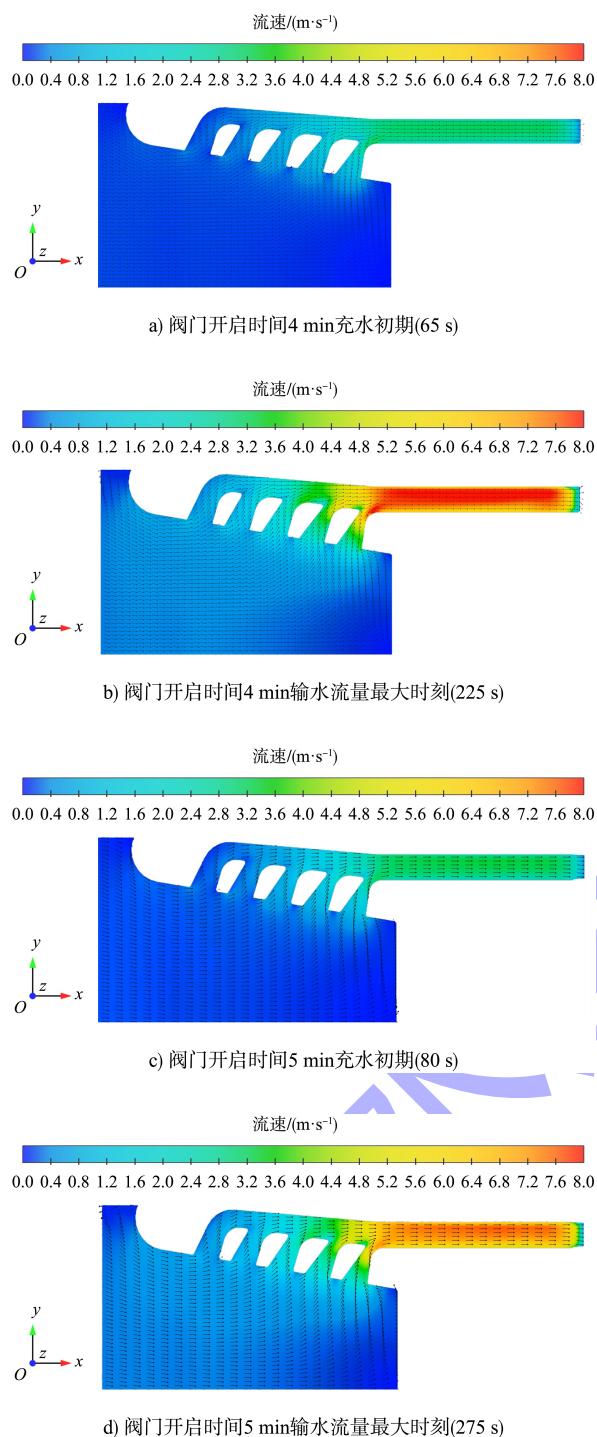


图 15 进水口平面流速分布矢量云图

在充水阀门开启时间 4 和 5 min 工况条件下, 充水初期, 输水流量较小, 水深较大, 进水口附近表面流速在 0.1~0.3 m/s; 至输水流量达到最大时刻, 进水口附近表面流速在 0.2~0.6 m/s; 随着充水阀门全开直至充水结束, 进水口附近表面流速和流态基本与充水初期一致。同样受动静水交替

及边壁影响, 进水口下游与人字门之间的水域形成一定范围的表面漩涡回流, 但漩涡回流的强度和范围均相对较小, 回流流速均不超过 0.1 m/s。

在进水口中心平面, 充水初期, 输水流量较小, 进水口流速在 0.3~1.3 m/s, 进水口喉口流速在 0.5~3.2 m/s。至输水流量达到最大时刻, 进水口流速在 0.8~2.4 m/s, 进水口喉口流速在 1.0~7.5 m/s。其后随着输水流量逐渐减小, 进水口及其喉口流速也逐渐减小。在整个充水过程中, 进水口水流进流相对平顺, 流线顺直, 无明显不良流态, 进流条件相对较好。结合图 16 的进水口在输水流量最大时刻的断面流场来看, 各充水工况条件下, 下游的进水口 5 中心在整个垂向上流速并未全断面超过 2.5 m/s, 且未出现贯通的立轴漩涡, 流速和流态满足规范要求, 表明优化方案效果良好。

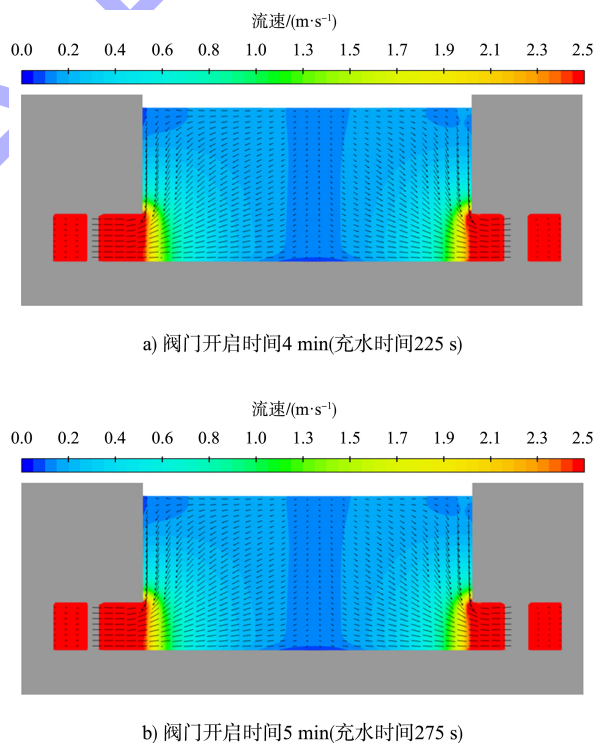
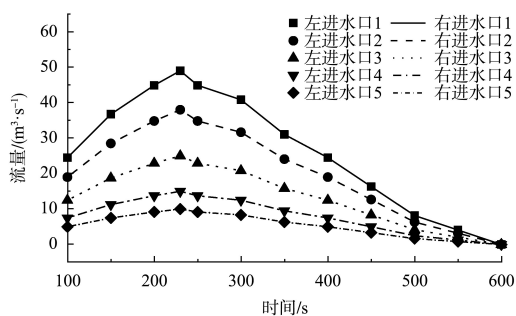
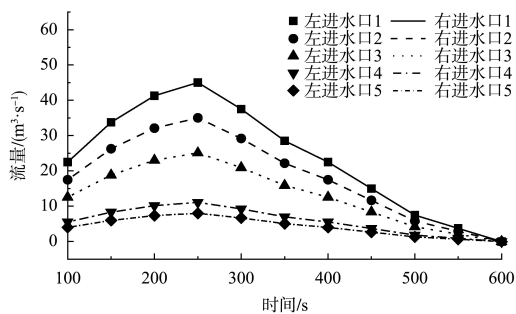


图 16 最下游进水口中心最大输水流量时刻断面流速矢量云图

为进一步分析船闸进水口优化方案水力学条件, 各进水口输水流量过程及断面平均流速过程见图 17、18。

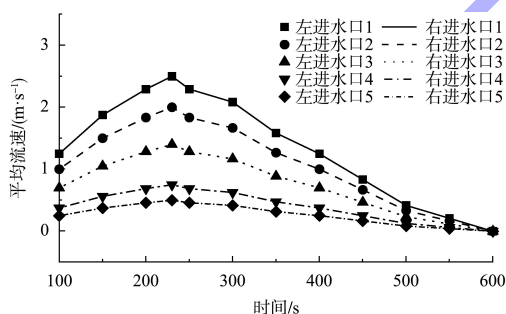


a) 阀门开启时间4 min

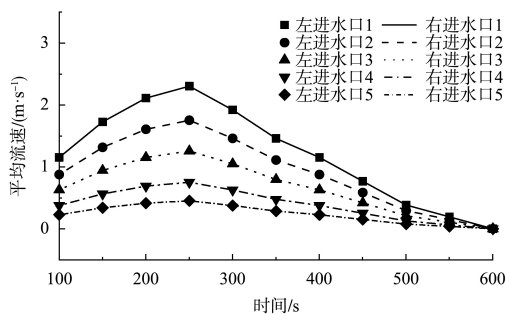


b) 阀门开启时间5 min

图 17 进水口断面输水流量过程



a) 阀门开启时间4 min



b) 阀门开启时间5 min

图 18 进水口断面平均流速过程

优化方案输水流量和流速过程与设计方案的类似, 整个充水过程中, 上游的 2 个进水口输水流量过程差异较小, 下游的 3 个进水口输水流量较大。

综上, 在整个充水过程中, 进水口优化方案垂直 5 支孔进流相对平顺、流线顺直、无串通的漏斗漩涡等不良流态, 进水口处断面平均流速未超过 2.5 m/s, 流速和流态满足规范要求, 进流条件相对较好, 故优化方案整体效果良好。

4 结论

1) 喉口宽度和布置形式对改善进水口水流进条件、串通漏斗漩涡等不良流态有重要作用。本文优化方案通过改变喉口宽度和布置顺序以达到优化喉口进水条件、稳定各进水口流量差异, 获得更均匀进流条件的目的。

2) 采用本文推荐的优化方案可以有效避免边界不对称漩涡流态的形成; 同时优化进水口布置空间有限时进流在纵向上进流较为集中、横向上进流分布不均的问题。此外, 本文提出的优化方案还能在充水过程中明显降低串通漏斗漩涡的影响, 避免空气卷吸到输水廊道内, 使船闸水流条件得到优化, 保障船舶过闸安全。

参考文献:

- [1] 刘晓平, 陶桂兰. 渠化工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] 中华人民共和国交通部. 第二次全国内河航道普查资料汇编[G]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 黎贤访, 李云, 王勇. 船闸闸墙廊道侧支孔射流研究[J]. 水利水运工程学报, 2011 (1): 97-102.
- [4] 郭婷婷, 李少华, 徐忠. 横向紊动射流的数值与实验研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 211-220.
- [5] 芦绮玲, 陈刚. 多孔紊动射流的数值模拟与实验研究进展[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 137-146.
- [6] 陈明, 梁应辰, 宣国祥, 等. 船闸输水过程三维水力特性动态仿真研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28(5): 559-565.
- [7] 陈明. 船闸集中输水系统水力特性与闸室船舶系缆力数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [8] 李艳玲, 杨永全, 华国春, 等. 多股多层水平淹没射流的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 32-36.

(下转第 157 页)