



木京一线船闸泄水对下引航道 水流条件的影响*

王召兵¹, 郭婷婷², 周昔东², 胡瑞昌^{1,2}, 袁浩^{1,3}

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 402247; 2. 重庆交通大学, 河海学院, 重庆 400074;
3. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247)

摘要: 在双线船闸共用引航道工程背景下, 船闸泄水时引航道内易产生非恒定流, 造成引航道内流场紊乱, 严重影响引航道内船舶航行和停泊安全。以木京船闸为例, 基于 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 对引航道通航水力特性开展数值模拟研究, 针对一线船闸泄水时对二线船闸及引航道内非恒定流通航条件进行分析。结果表明, 一线船闸双边同时泄水时, 引航道内流速不满足船舶航行和停靠要求, 且在二线船闸隔流堤前沿形成回流及斜、横流, 进而影响船舶进出二线船闸的安全; 采用推荐的旁侧泄水方式后, 引航道内水流流态得到改善, 通航水流条件满足安全通航要求。研究成果可为双线船闸泄水方式提供解决思路。

关键词: 船闸泄水; 共用引航道; 水流条件; 数值模拟

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0127-08

Impact of Mujing first-lane ship lock discharge pattern on flow conditions in lower approach channel

WANG Zhaobing¹, GUO Tingting², ZHOU Xidong², HU Ruichang^{1,2}, YUAN Hao^{1,3}

(1. Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China;

2. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China;

3. Chongqing Xike Consultation for Water Transport Co., Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract: In the context of the double-lane ship locks sharing approach channel project, unsteady flow is prone to occur in the approach channel during lock discharge, causing turbulence in the flow field inside the approach channel, seriously affecting the safety of ship navigation and docking in the approach channel. Taking Mujing ship lock as an example, based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulent flow model, the navigation hydraulic characteristics of the approach channel are numerically simulated, and the unsteady navigation conditions inside the second-lane lock and the approach channel are analyzed during the discharge of the first-lane ship lock. The results show that when both sides of the first-lane ship lock release water simultaneously, the flow velocity in the approach channel does not meet the requirements of ship navigation and docking, and the formation of reflux, oblique and transverse flow patterns at the front of the separation dike of the second-lane ship lock affects the safety of ships entering and exiting the second-lane ship lock. After adopting the recommended side discharge method, the flow pattern in the approach channel has been improved, and the navigation flow conditions meet the requirements of safe navigation. The research results can provide a solution for the discharge method of double-lane ship locks.

Keywords: ship lock discharge; sharing approach channel; flow conditions; numerical simulation

收稿日期: 2024-04-15

*基金项目: 重庆市交通科技项目(CQJT-ZCXM2023-11); 重庆西科水运工程咨询有限公司科研项目(2024990002)

作者简介: 王召兵(1973—), 男, 正高级工程师, 从事港口航道及通过建筑物研究。

船闸是重要的箱型通航水工建筑物,用来保证船舶顺利安全通过水位落差集中的航段^[1-2]。近年随着水运事业蓬勃发展,原建单线船闸过闸能力已达饱和。扩建共用引航道的多线船闸逐渐被采用以提高船闸过闸效率。国内通航河流上拟建、在建或已建的二线、多线船闸越来越多。如已建的西津枢纽二线船闸、广西西江桂平枢纽二线船闸和柳江红花枢纽二线船闸等^[3]。物理模型试验和数值模拟计算方法在共用引航道问题的相关研究中应用广泛。迄今为止,众多学者^[4-8]采用数值模拟手段对双线船闸下游引航道内的水流动态特性进行计算分析。同时,也有学者采取物理模型试验对该领域进行深入研究,如王召兵等^[9]通过建立物理模型对船闸消能室内消力槛及中间辅导墙的布置形式进行研究;步晓斌等^[10]通过模型试验研究引航道内泄水波运动特征、水面比降、流速分布、回流强度等。

对于共用引航道的双线船闸,由于引航道较窄,一线船闸泄水时,容易引起另一线引航道水流流速分布不均匀,产生斜流、回流等不良流态,影响船舶进出闸门安全。近年来,伴随着东江航运的迅猛发展,现行的木京船闸已不足以应对不断增长的航运需求。鉴于此,迫切需要扩建木京二线船闸。由于地形条件限制,该扩建项目需采用共用下引航道的布局方案。

本文基于木京船闸输水系统设计方案,主要研究木京一线船闸泄水时对二线船闸水流条件及下引航道内船舶通航条件和停泊安全的影响。

1 木京双线船闸基本概况

木京枢纽位于广东东江干流中游,是东江干流梯级规划枫树坝以下第9个梯级。木京水电站工程等级为Ⅲ等中型工程,枢纽主要建筑物包括拦河闸坝、左右岸连接土坝、船闸、发电厂房、变电站及厂区建筑物。木京双线船闸上下游引航道采用共用引航道布置,受地形条件和泄流流量影响,平面布置空间有限,共用下引航道狭窄且弯曲,从而导致船闸泄水时下引航道内水流相互影响、引航道内通航与泊稳水流条件及局部水流条件差等问题。

木京双线船闸有效尺寸分别为一线船闸:220 m×34 m(长×宽);二线船闸:220 m×16 m。一线船闸规模大,泄水时间要求短、泄水强度高、水力特性复杂,可能造成出水口、二线船闸下闸首等关键位置水流条件差的问题,研究船闸如何高效、安全、平稳地运转具有重要意义。

2 数值模拟

2.1 控制方程

选用 RNG (re-normalization group) $k-\varepsilon$ 紊流模型,不可压缩非定常流张量形式的控制方程。

连续方程:

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

动量方程:

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

紊动能 k 方程:

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

耗散率 ε 方程:

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

式中: t 为时间; ρ 为密度; P 为时均压强; μ 、 μ_t 为黏性系数和紊动涡黏系数; g 为重力加速度; u_i 、 u_j 为速度分量; 通用经验常数取值分别为 $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ ^[11]; 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; $G_{3\varepsilon}$ 为由于浮力产生的耗散率的修正; Y_M 为可压缩湍流中波动膨胀对整体耗散率的影响; S_k 和 S_ε 为用户定义的源项; R_ε 为附加项; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 。

2.2 数模验证

选取其他相似的船闸泄水过程进行验证,在开展船闸非恒定流验证中,采用水流时间变化曲线进行验证是一种常见的方法。对比闸首中心点水位数值模拟与物理模型试验的时间变化曲线,验证结果见图1。由图可见,数值模拟结果与物理模型实验时间误差约为11%,总体基本吻合,表明数模计算是可靠的。

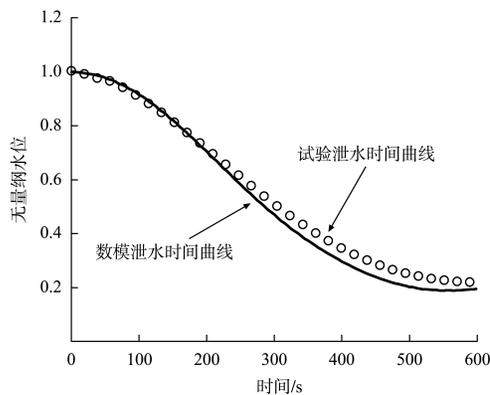


图1 某船闸闸首中心点水位验证

Fig. 1 Verification of water level at centre point of lock bow

3 三维水流数学模型的建立

3.1 计算域与网格划分

木京双线船闸共用引航道三维模型均采用三维建模软件建立,如图2所示。模型网格采用收敛性较好的六面体网格对计算区域进行划分,网格总数约为600万个,同时对研究重点区域如船闸出水口段、下引航道边壁处进行局部加密,以便更好地反映引航道内的水流流态。

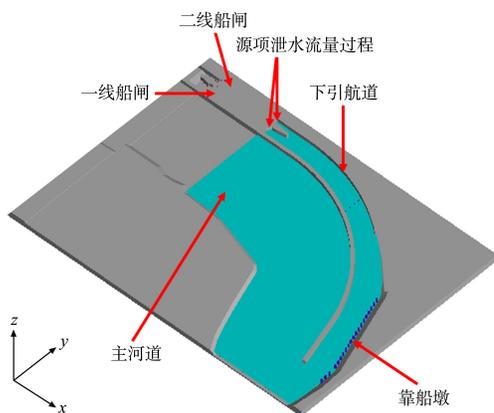


图2 木京双线船闸三维模型整体效果

Fig. 2 Overall effect of three-dimensional model of Mujing double-lane ship lock

3.2 数值模拟工况

在一线船闸泄水时,将泄水阀门开启时间设置为5 min,分别对双边泄水和旁侧泄水的不同工况进行比较计算。

基于前期对木京船闸灌泄水关系的研究^[12],一线船闸泄水流量随时间变化曲线如图3所示。

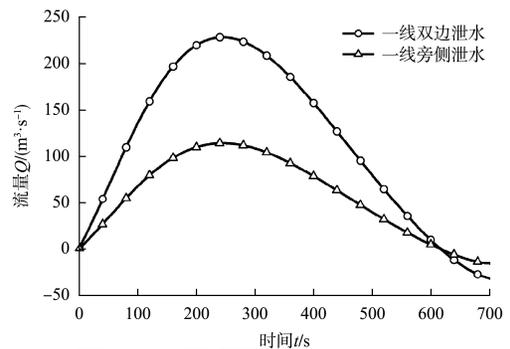


图3 船闸泄水流量随时间变化

Fig. 3 Changing curves of ship lock discharge flow rate with time

4 一线船闸泄水时下引航道的水力特性

4.1 一线船闸双边同时泄水

4.1.1 出水口附近水力特性

引航道水力特性各典型时刻下出水口附近流速分布见图4。一线船闸阀门以5 min 双边开启后,船闸刚开启即泄水前期(75 s左右),水流流量较小,水流扩散作用相对较慢,二线船闸中间隔流堤前沿几乎为静水。随着水流流量逐渐增大,在170 s左右,一线船闸双边流出的水流在中间进行对撞而扩散开来,形成流速超过1.0 m/s的剪刀水流态,向二线船闸及引航道扩散。同时,二线船闸中间隔流堤前沿出现漩涡回流(流速为0.15~0.30 m/s)及一定强度的斜、横流(流速为0.60~0.85 m/s)。到了泄流中期(240 s左右),下泄流量接近最大,阀门即将完全开启,不良流态强度及范围进一步加剧,回流流速为0.20~0.40 m/s,斜流流速为0.50~0.85 m/s。在阀门泄水后期(420 s左右),下泄水流流量达到最大后开始逐渐衰减,水流流速仍比较大,且二线船闸中间隔流堤前沿仍出现有漩涡回流(流速为0.20~0.5 m/s)及一定强度的斜、横流(流速为0.50~0.85 m/s)。

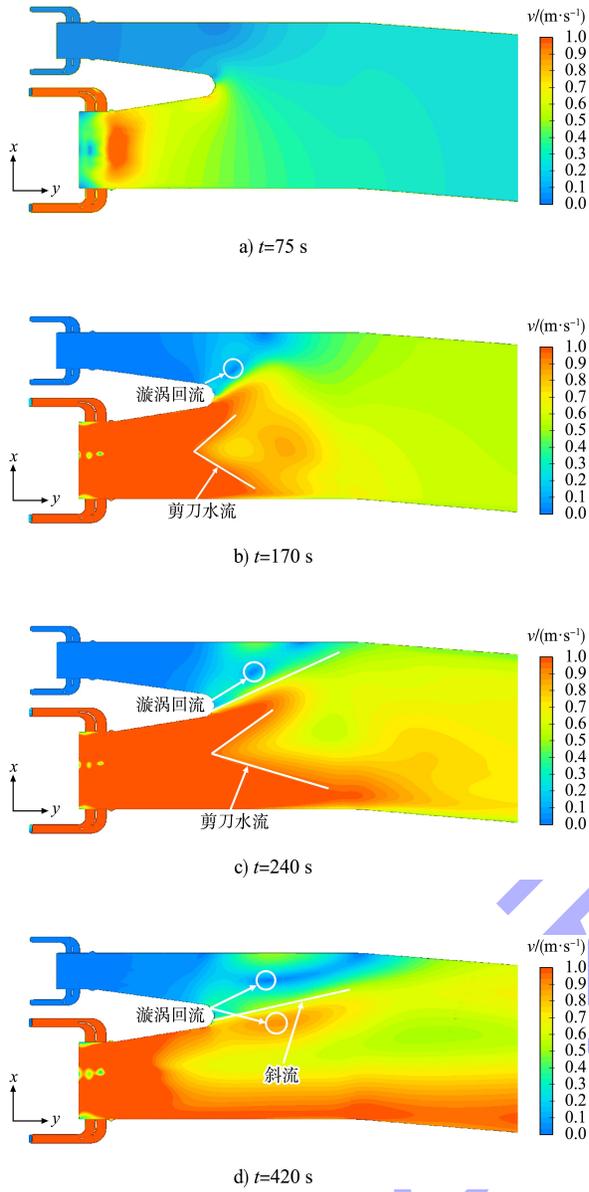


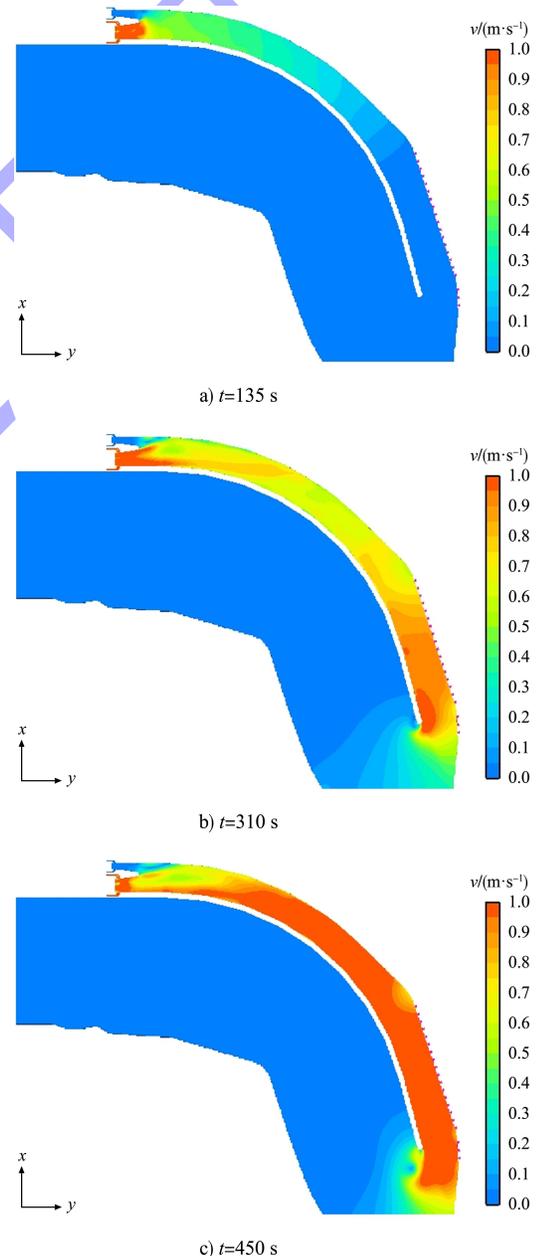
图4 一线船闸5 min 双边泄水各典型时刻出水口附近流速分布

Fig. 4 Flow velocity distribution near outlet at each typical moment under 5 min bilateral discharge of first-lane ship lock

由此可见, 该工况条件下, 一线船闸5 min 双边泄水时, 将在二线船闸中间隔流堤前沿引起大范围、大强度且持续时间长的回流及斜、横流流态, 影响船舶进出二线船闸安全, 同时一线船闸出水口附近存在剪刀水流态向下引航道不均匀扩散, 因此, 应避免一线船闸双边同时泄水至下引航道。

4.1.2 引航道及停泊段水力特性

一线船闸双边同时泄水各典型时刻下引航道流速分布如图5所示。一线船闸阀门以5 min 双边开启后, 下泄流量开始向引航道传递。由于引航道较长, 在135 s左右时, 下泄水流逐渐传递到停泊段(靠船墩附近)。泄水流量随时间增大, 在310 s左右, 水流及非恒定流持续传递, 停泊段小范围流速超过1.0 m/s, 并在450 s左右停泊段全断面纵向流速基本超过1.0 m/s, 最大达1.2 m/s, 后随泄水流量衰减, 在525 s后, 停泊段流速逐渐减小至1.0 m/s 以下。



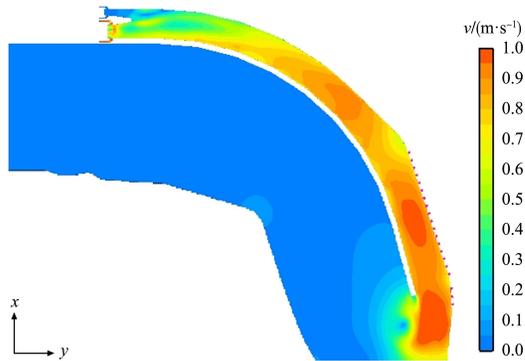
d) $t=525$ s

图5 一线船闸5 min 双边泄水各典型时刻下
引航道流速分布

Fig. 5 Flow velocity distribution in lower approach channel
at each typical moment under 5 min bilateral discharge
of first-lane ship lock

由此可见, 在一线船闸双边同时泄水时, 泄水强度较大, 引航道内流速大范围、长时间超过 1.0 m/s , 不能满足船舶航行及停泊要求, 故一线船闸应采取不同泄水方式, 以改善引航道内水流条件, 且在一线船闸双边同时泄水至引航道内时, 应避免下游停泊段靠船。

4.1.3 二线船闸下闸首附近水位波动特性

一线船闸泄水时, 二线船闸下闸首附近(非泄水处)水位波动最为明显, 且二线船闸下闸首附近水面波动幅度均随距下闸首出水口距离的增加而减小。距二线船闸闸首最近测点 1-1# 的反向水头最大达到 0.44 m , 根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[13], 超灌、超泄值应不大于 0.25 m 。各水位测点最大水位壅高均大于 0.25 m , 二线船闸处的人字门壅高值不满足要求, 反向水头最大达到 0.44 m , 超出规范允许值的 76%, 严重影响二线船闸下人字门运行安全, 应避免一线船闸双边同时泄水, 考虑采用一线船闸旁侧泄水方式。二线船闸下闸首中心线水位观测点距下闸首分别为 1-1# 15 m 、1-2# 35 m 、1-3# 85 m 。二线船闸下闸首附近水位过程线见图 6。

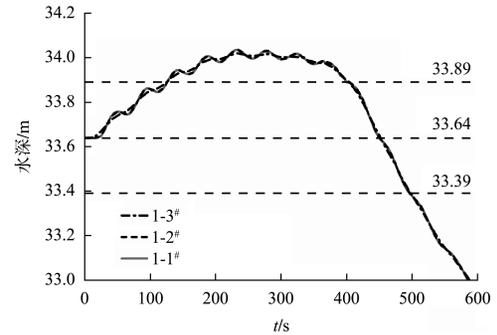
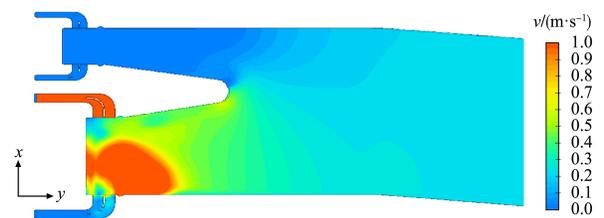


图6 一线船闸5 min 双边泄水二线船闸下闸首附近水位过程线
Fig. 6 Water level process line near lower head of
second-lane ship lock under 5 min bilateral discharge
of first-lane ship lock

4.2 一线船闸旁侧泄水

4.2.1 出水口附近水力特性

引航道水力特性各典型时刻出水口流速分布见图 7。一线船闸阀门以 5 min 左侧单边开启后, 船闸刚开启即泄水前期 (125 s 左右), 水流流量较小, 水流扩散作用相对较慢, 一线下泄水流通过中间隔流堤堤头逐渐向二线船闸扩散, 速度为 0.40 m/s 。泄水中期 (245 s 左右), 随水流流量逐渐增大, 下泄流量接近最大, 阀门即将完全开启, 一线船闸左侧水流在右侧与闸墙对撞后向左侧散开, 形成剪刀水流态, 向下引航道扩散, 且二线船闸中间隔流堤前沿出现漩涡回流 (流速为 $0.05 \sim 0.25 \text{ m/s}$) 及一定强度的斜、横流 (流速为 $0.40 \sim 0.65 \text{ m/s}$)。在 355 s 左右, 由于水流流量较小, 剪刀水流态快速消散, 但在二线船闸中间隔流堤前沿仍出现漩涡回流 (流速为 $0.05 \sim 0.25 \text{ m/s}$) 及一定强度的斜、横流 (流速为 $0.40 \sim 0.70 \text{ m/s}$)。在 430 s 左右, 二线船闸中间隔流堤前沿仍出现漩涡回流 (流速为 $0.05 \sim 0.25 \text{ m/s}$) 及一定强度的斜、横流 (流速为 $0.30 \sim 0.45 \text{ m/s}$)。

a) $t=125$ s

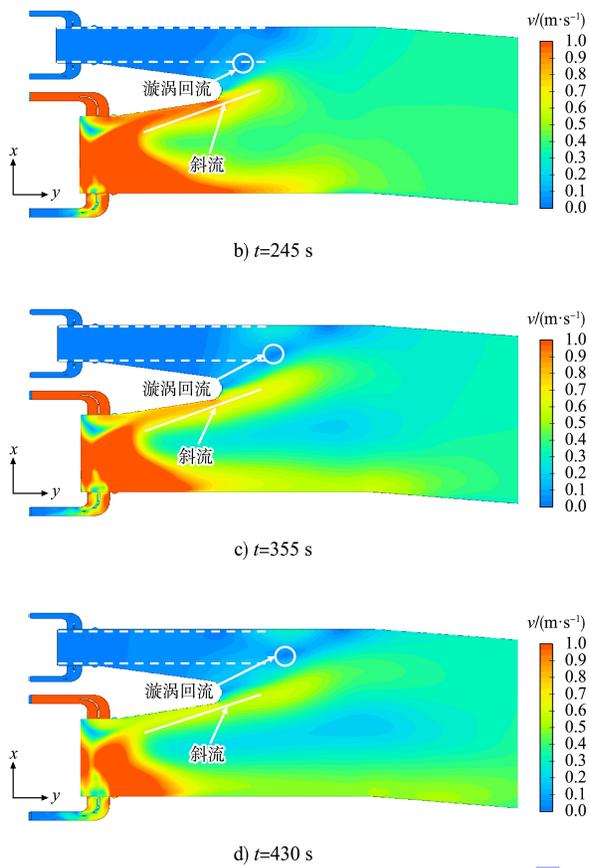


图7 一线船闸5 min左廊道单边泄水各典型时刻
出水口附近流速分布

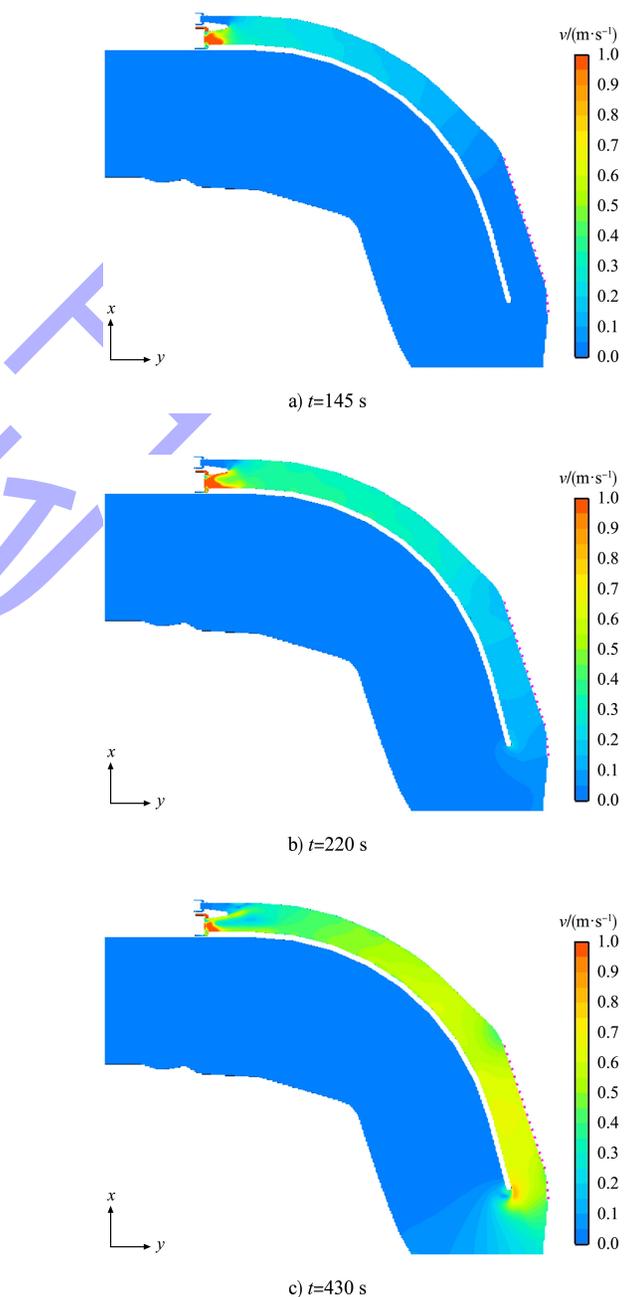
Fig.7 Flow velocity distribution near outlet
at each typical moment under 5 min unilateral discharge
in left corridor of first-lane ship lock

由此可见，一线船闸左侧廊道单边泄水时，会在出水口以及船闸中间隔流堤前沿出现不良流态，但相对于一线船闸双边同时泄水时有所改善，满足船舶进出闸门安全。当船闸双边泄水至共用下引航道内时，会产生回流、斜流等不良流态和水位超高等问题。然而，船闸采用旁侧泄水方式时，进入引航道内的流量减半，相比船闸双边泄水方式，引航道内水流流态有所改善。由于流量减小且引航道流态得到改善，使船闸过闸时间较船闸双边同时泄水过闸时间稍快。

4.2.2 引航道及停泊段水力特性

一线船闸旁侧泄水各典型时刻下引航道流速

分布如图8所示。一线船闸阀门以5 min左侧单边开启后，下泄流量开始向引航道传递，在145 s左右时，下泄水流逐渐传递到停泊段(靠船墩附近)；泄水流量随时间增大，水流及非恒定流持续传递，下引航道内水流流速逐渐增大，但引航道内及停泊段全断面流速均未超过1.0 m/s，在430 s左右，流速达到最大，其中停泊段最大流速为0.64 m/s，满足船舶停靠和航行要求。



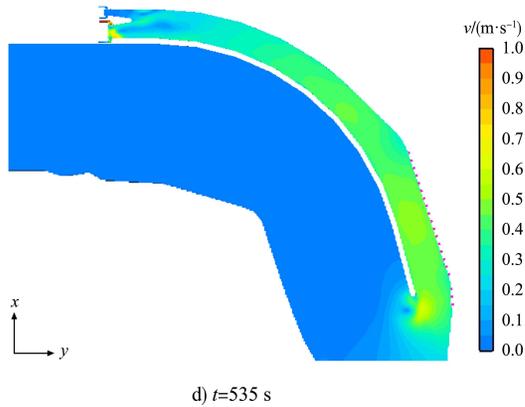


图8 一线船闸5 min左廊道单边泄水各典型时刻下引航道流速分布

Fig. 8 Flow velocity distribution in lower approach channel at each typical moment under 5 min unilateral discharge in left corridor of the first-lane ship lock

4.2.3 二线船闸下闸首附近水位波动特性

一线船闸旁侧泄水较双边同时泄水的泄水强度减半,二线船闸下闸首附近水位波动明显减小,各水位测点最大水位壅高为0.24 m,反向水头满足规范要求。二线船闸下闸首附近水位过程线见图9。

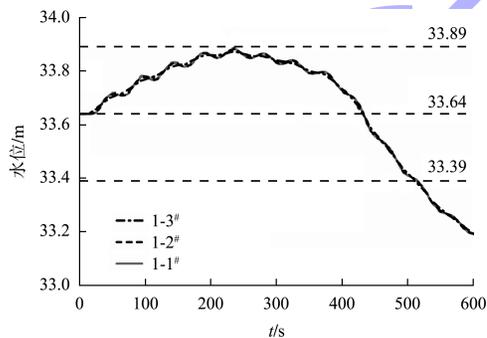


图9 一线船闸5 min旁侧泄水二线船闸下闸首附近水位过程线

Fig. 9 Water level process line near lower head of second-lane ship lock under 5 min side discharge of first-lane ship lock

5 结语

1) 一线船闸双边同时泄水时,会在二线船闸隔流堤前沿形成大范围、大强度且持续时间长的回流以及斜、横流,严重影响船舶进出二线船闸安全。此时二线船闸下闸首附近水面波动较大,船舶无法进出二线船闸。同时,引航道内及停泊段流速大范围、长时间超过1.0 m/s,不满足船舶航行和停靠要求。

2) 一线船闸采取旁侧泄水后,泄水强度减半,二线船闸下闸首附近最大反向水头不超过0.24 m,满足规范要求,且引航道水流条件有所改善,停泊段最大流速不超过0.64 m/s,满足船舶停靠和航行要求。

3) 船闸旁侧泄水模式基本满足船舶停靠、航行及进出闸安全,可有效改善不良流态,对于多线船闸共用引航道通航水流和停泊条件有重要的工程意义。

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.
LIU X P, TAO G L. Drainage Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [2] 廖鹏. 内河船闸通过能力研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2009(3): 34-40.
LIAO P. Progress of inland waterway lock capacity study [J]. Hydro-science and engineering, 2009 (3): 34-40.
- [3] 原国智,陈明,张萌,等. 柳江红花二线船闸阀门段廊道压力特性三维数值模拟[J]. 水运工程, 2024(2): 79-85, 138.
YUAN G Z, CHEN M, ZHANG M, et al. Three-dimensional numerical simulation of culvert pressure characteristics of valve section of Liujiang Honghua second-line ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(2): 79-85, 138.
- [4] 黄伦超. 双线船闸共用下游引航道水流特性及其影响[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(4): 37-44.
HUANG L C. Flow characteristics and effects on the approach channel during the co-operation of the double-lane shiplock [J]. Journal of transport science and engineering, 2012, 28(4): 37-44.
- [5] 周冉,杨忠超,杜兆辉. 贵港船闸灌泄水非恒定流对通航水流条件影响的数值模拟研究[J]. 水运工程, 2015(6): 119-126.
ZHOU R, YANG Z C, DU Z H. Numerical simulation of unsteady flow effect on navigable flow condition of Guigang [J]. Port & waterway engineering, 2015 (6): 119-126.

- [6] 王崇宇,周丁,唐玉元.不同级别船闸共用引航道的水流条件研究[J].水运工程,2019(3):110-115.
WANG C Y, ZHOU D, TANG Y Y. Study on flow conditions of approach channel shared by different levels of ship locks[J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 110-115.
- [7] 周作茂,陈野鹰,杨忠超.双线船闸引航道水力特性数值模拟[J].水利水运工程学报,2013(4):67-72.
ZHOU Z M, CHEN Y Y, YANG Z C. Numerical simulation of hydraulic characteristics of a double-line locks approach channel [J]. Hydro-science and engineering, 2013(4): 67-72.
- [8] 李加浩.双线船闸共用引航道非恒定流特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
LI J H. Research on non-constant flow characteristics of shared approach channel for double-lane locks [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [9] 王召兵,陈亮,周家俞,等.共用引航道船闸下游引航道的平面布置[J].水运工程,2018(1):117-122.
WANG Z B, CHEN L, ZHOU J Y, et al. Approach channel arrangement of ship lock with sharing approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2018 (1): 117-122.
- [10] 步晓斌,王龙,申霞.运东船闸下游引航道非恒定流模型试验[J].水运工程,2015(12):118-122.
BU X B, WANG L, SHEN X. Experimental study on unsteady flow in Yuandong ship lock's lower approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2015 (12): 118-122.
- [11] 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.
CHEN M, LIANG Y C, XUAN G X, et al. Numerical simulation for dynamic characteristics of 3D flow during shiplock filling process [J]. Chinese journal of hydrodynamics(Part A), 2013, 28(5): 557-566.
- [12] 谭静,袁浩,胡瑞昌,等.木京船闸输水系统进水口优化布置数值研究[J].水运工程,2024(10):110-117,157.
TAN J, YUAN H, HU R C, et al. Numerical study on the optimal arrangement of inlet of water conveyance system in Mujing lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 110-117, 157.
- [13] 南京水利科学研究院,天津水运工程科学研究所.船闸输水系统设计规范:JTJ 306—2001[S].北京:人民交通出版社,2002.
Nanjing Hydraulic Research Institute, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. Design specification for water conveyance system of ship locks: JTJ 306—2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2002.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第93页)

- [8] PIANC. Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships[M]. Brussels: PIANC, 2015.
- [9] 中大智能科技股份有限公司.新海港码头泊位检测与评估项目检测检验报告[R].长沙:中大智能科技股份有限公司,2023.
Zhongda Intelligent Technology Co., Ltd. Xinhai Harbor berth inspection and evaluation project inspection report [R]. Changsha: Zhongda Intelligent Technology Co., Ltd., 2023.
- [10] 交通运输部天津水运工程科学研究所.海口港新海港区汽车客货滚装码头工程二维潮流泥沙数值模拟(修编)研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2015.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Research report on two dimensional tidal current and sediment numerical simulation (revised) of the automobile passenger and freight roll on/roll off terminal project in Xinhai Harbor district, Haikou Port [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2015.

(本文编辑 赵娟)