



双线船闸共用上引航道非恒定流 水力特性数值模拟*

袁浩^{1,2,3}, 蒲春秀², 胡瑞昌^{1,2}, 周昔东², 谢春航^{1,4}

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;
3. 重庆市交通规划和技术发展中心, 重庆, 400060; 4. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247)

摘要: 双线船闸共用引航道灌泄水时, 引航道内由于水面流量变化大易形成非恒定流, 水流流态复杂, 严重影响船闸正常运行和通航效率。以白石窑双线船闸为工程背景, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 针对双线船闸在共用上引航道时产生的非恒定流问题, 对双线船闸在共用上引航道灌水时不同运行组合情况下引航道与船闸进水口处的流速、流态分布和水位波动等水力特性进行分析。结果表明: 灌水期间引航道进水口处流速和水位波动最为显著, 并在进水口附近形成局部漩涡; 双线船闸同时运行时, 进水口处水流条件更为复杂, 甚至出现小范围立轴漩涡, 对输水条件及阀门运行产生显著影响。通过分析上引航道非恒定流规律, 评估其对船舶航行和停泊产生的不利影响, 可为工程实际运行提供参考。

关键词: 共用引航道; 非恒定流; 水力特性; 双线船闸

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0087-08

Numerical simulation of hydraulic characteristics of unsteady flow in shared upper approach channel with double-line ship lock

YUAN Hao^{1,2,3}, PU Chunxiu², HU Ruichang^{1,2}, ZHOU Xidong², XIE Chunhang^{1,4}

(1. Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;
2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Chongqing Transportation Planning and Technology Development Center, Chongqing 400060, China;
4. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China)

Abstract: When double-line ship locks share a common approach channel for both irrigation and discharge purposes, the hydraulic system becomes susceptible to unsteady flow conditions. This phenomenon primarily stems from substantial water surface fluctuations within the approach channel, leading to complex flow patterns that significantly compromise lock operational reliability and navigation safety. In this study, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model is used to analyze the hydraulic characteristics such as flow velocity, flow distribution and water level fluctuation at the inlet of the approach channel and the ship locks under different operation combinations when the ship locks share the upper approach channel with the Baishiyao double-line ship locks as the background of the project, in view of the unsteady flow problem generated when the ship locks share the upper approach channel. The results show that during the irrigation period, the flow velocity and water level fluctuations at the intake of the diversion channel are the most significant, and a local vortex is formed near the intake. When the double-line ship

收稿日期: 2025-02-13

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206104); 重庆市交通科技项目(CQJT-ZCXM2023-11); 四川省科技计划资助项目(2023YFS0370); 重庆西科水运工程咨询有限公司科研项目(2024990002)

作者简介: 袁浩(1989—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为通航水力学。

通信作者: 谢春航(1991—), 男, 高级工程师, 研究方向为通航水力学。E-mail: xiechunhang@126.com

lock is operating simultaneously, the water flow conditions at the intake are even more complex, and even small-scale vertical vortexes appears, which have a significant impact on the water delivery conditions and the operation of the valves. By analyzing the unsteady flow law of the upper diversion channel and evaluating its adverse effects on ship navigation and berthing, it can provide a reference for the actual operation of the project.

Keywords: shared approach channel; unsteady flow; hydraulic characteristics; double-line ship lock

船闸为常见通航建筑物,一般由上、下引航道和闸室3大部分组成,而引航道处于连接船闸闸首与主航道的关键位置,其作用主要为引导船舶安全进出闸以及为船舶提供安全停泊场所^[1]。

引航道内存在往复流、回流等不同形式的水流运动,其水流条件对船舶航行和停泊安全产生显著影响,通航水流条件较差会对船闸运行和船舶停靠产生不利影响。引航道水流条件受多种因素影响,如船闸整体布置、船闸灌泄水过程、引航道的地形地势及内部的基础设施布置,均可使引航道内的水流条件发生变化^[2-3]。在船闸灌、泄水对通航水流条件影响方面,主要关注航道水深、航行阻力和系缆力3个方面。其流速、比降和波幅等水力要素受非恒定流流量、引航道尺度、上下游水位及运行方式影响。引航道内的横流和回流会使航行船舶产生横漂和扭转,船闸灌泄水时航道内产生的长波运动会使船舶系缆力增加;并且当纵向水面坡降与流速和航向一致时,会影响航行船舶的操纵性及舵效,与航向相反时会增大航行阻力,影响航速,严重威胁船舶航行。因此,进行船闸设计时应尽量避免出现复杂流态等问题,确保通航安全^[4]。这也说明研究船闸灌泄水时引航道内的水流条件具有重要意义。

目前许多学者^[5-7]针对引航道内非恒定流特性进行了大量研究,并提出了相应的解决措施。王多银等^[8]对融江麻石船闸进行研究,提出优化隔流堤的曲率半径和过流孔高度,改善了引航道内的水流条件。王能等^[9]采用水工物理模型对大洪潭已建船闸通航水流碍航进行研究,提出相关的优化改善措施。以上研究对于双线或多线船闸的研究大多数是针对下引航道在泄水时的通航水流条件研究,而针对上引航道内的通航水流条件的

相关研究主要基于单线船闸,对于双线船闸共用上引航道在灌水时通航水流条件研究较少,需继续深入研究。

白石窑船闸是位于北江河道的重要枢纽,而北江是粤北地区连接珠江三角洲及港澳地区唯一的水运通道。本文以白石窑枢纽为工程背景,采用 RNG (renormalization group,重整化群) $k-\varepsilon$ 紊流模型对双线船闸共用上引航道时不同灌水过程中上引航道内的非恒定流特性以及两侧进水口的水流条件进行分析,以期工程实际运行提供参考。

1 工程概况

为提高通航能力,新建白石窑一线船闸规模由 $140\text{ m}\times 23\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ (闸室长度 \times 闸室宽度 \times 门槛水深)变更为 $220\text{ m}\times 23\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ (与二线船闸建设规模一致),两线船闸共用引航道。由于白石窑一线船闸闸室尺寸扩大,双线船闸轴线距离短,且两船闸共用上引航道,运行中互相干扰较大。受两线船闸灌水相互作用影响,导致船闸上游引航道内会产生斜向水流、回流、漩涡等不良流态问题。

该枢纽上游最高通航水位为 37.32 m ,设计最大工作水头为 13.5 m 。为了确保船舶在引航道内安全行驶,我国 JTS 305—2025《船闸总体设计规范》和 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》规定了引航道内水流速度的限值:上游引航道中最大纵向流速应不大于 $0.5\sim 0.8\text{ m/s}$,下游引航道中应不大于 $0.8\sim 1.0\text{ m/s}$,但在上游引航道码头处应不大于 0.5 m/s 。为研究共用引航道灌水时上引航道内的水力特性是否满足规范要求,本文采用三维数值模拟对白石窑双线船闸引航道内的水流条件进行计算。

2 数值模拟

2.1 控制方程

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 利用 VOF (volume of fluid, 流体体积法) 捕捉自由水面, 假设流体为不可压缩的黏性流体, 连续方程和动量方程如下:

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:

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

紊动能耗散率 ε 方程:

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

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 $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39^{[10]}$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68^{[11]}$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012^{[12]}$; 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 三维模型构建

本文研究针对上引航道和船闸进水口建立三维局部模型, 见图 1。本次计算采用六面体结构化网格形式, 网格总数量约为 203 万个。对于研究重点区域, 船闸进水口段采用渐变网格处理方法进行加密, 以便更好地反映引航道内水流流态。白石窑双线船闸进水口即为本模型出口, 为精确控制模型出口流量过程, 在船闸进水口处添加质

量汇项给定相应灌水流量曲线进行灌水。

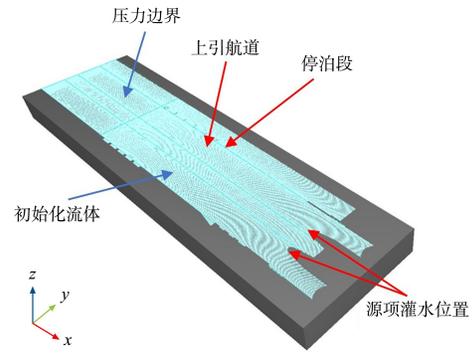
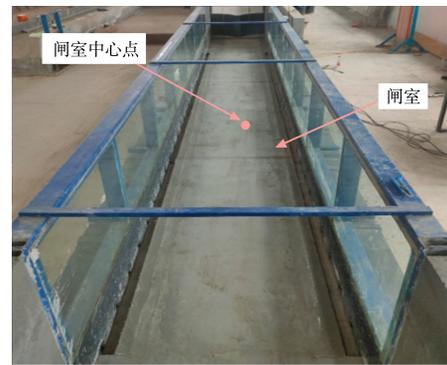


图 1 船闸上引航道三维模型网格划分

Fig. 1 Grid delineation of three-dimensional model of upper approach channel of ship lock

2.3 数学模型验证

本文选用船闸物理模型泄水试验过程的试验值对数值模型进行验证。船闸物理模型见图 2, 船闸模拟范围纵向长度约为 820 m, 横向宽度约为 154 m, 下引航道水位为 0.22 m, 模型网格数量约为 600 万个, 粗糙度为 0.007 m, 阀门开启时间 $t_v = 5$ min。



a) 闸室



b) 下引航道

图 2 船闸物理模型试验布置

Fig. 2 Physical model test layout of ship lock

水流时间变化曲线是船闸非恒定流验证中一种常见的方法^[13]。本文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3。在船闸泄水时,当数值模拟泄水时间大约为470 s时,船闸水位下降至下引航道水位。由于物模与数模存在比尺效应,导致物理模型泄水时间 T 比数值模拟多约60 s,时间误差 Δt 约为11%,但闸首水位变化数值模拟与物理模型结果总体基本吻合,表明数模计算成果是可信的。

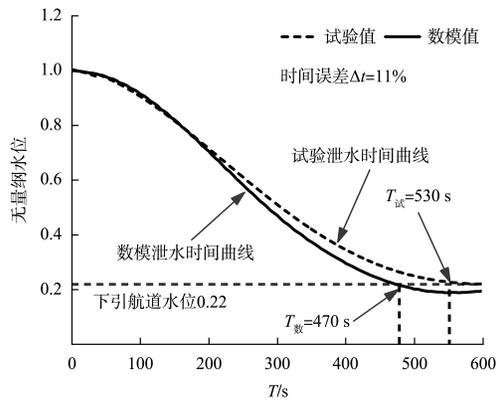


图3 船闸中心点水位对比

Fig. 3 Comparison of water levels at center point of ship lock

2.4 计算工况

根据前期原型观测与实船试验研究发现,白石窑二线船闸泄水阀门双边均速开启时间在6 min左右时运行良好。但由于双线船闸同时灌水5 min时,可能使引航道内流速过大,影响停泊段安全,因此将灌水阀门开门时间设置为5、6 min,拟定的计算工况见表1。

表1 计算工况

Tab. 1 Working conditions of calculation

计算工况	闸门开启方式	t_v /min	水位/m
1	单线船闸单独运行	5	23.82~37.32
2	单线船闸单独运行	6	
3	双线船闸同时运行	5	
4	双线船闸同时运行	6	

2.5 测点布置

为观测一、二线船闸灌水时上游引航道非恒定流特性,在上引航道内两船闸中心线上每隔100 m设采集点,共8个,可直观反映进水口附近及停泊段流速、水位变化,测点位置见图4。

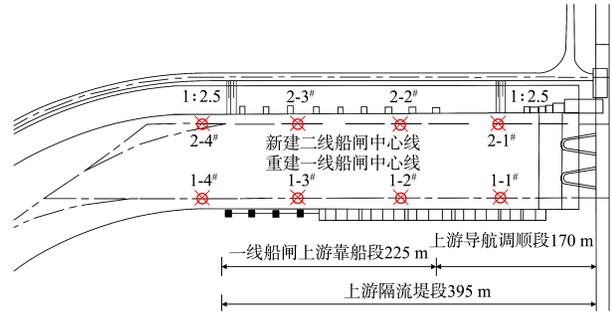


图4 上引航道测点布置

Fig. 4 Layout of measurement points in upper approach channel

3 结果与分析

上游边界水位维持在37.32 m,船闸运行方式分别为单线船闸单独运行和双线船闸同时运行,灌水阀门开启时间分别为5和6 min,灌水方式为双边廊道灌水,基于前期对白石窑枢纽灌泄水研究,不同灌水阀门开启时间船闸出水口灌水流量曲线由二线船闸闸室灌水水力特征曲线确定,灌水流量过程线见图5。

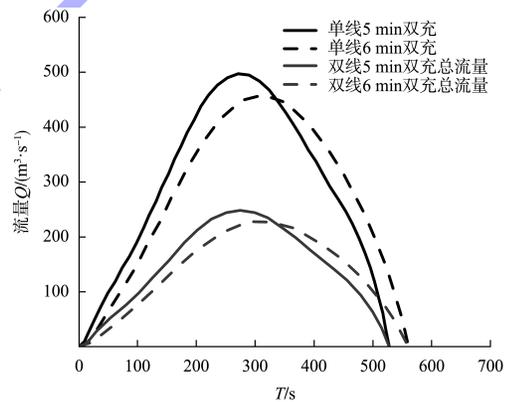


图5 白石窑船闸灌水流量过程线

Fig. 5 Process line of irrigation flow at Baishiyao ship lock

3.1 上引航道流态变化

单线和双线船闸灌水时上引航道平面流线等值线见图6、7。当灌水阀门开启时间为5、6 min时,上游引航道过水断面收缩导致水流弯曲形成斜向水流,并在进水口下游侧形成直径0.45~0.75 m沿逆时针方向的小漩涡。由于双线船闸灌水时总流量翻倍,导致漩涡直径是单线运行时的2倍左右(1.1~1.3 m),且在进水口上方贴壁处形成直径约1.0 m左右的立轴漩涡,见图8,但由于进水口附近水深较大,因此漩涡强度和范围较小。

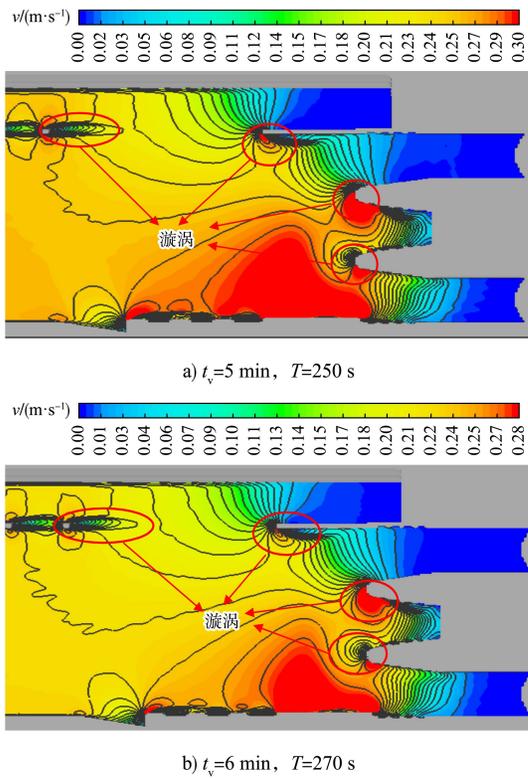


图 6 单线船闸灌水时上引航道平面流速等值线
Fig. 6 Contour plot of flow velocity in the plane of upper approach channel when single-line ship locks are operated separately

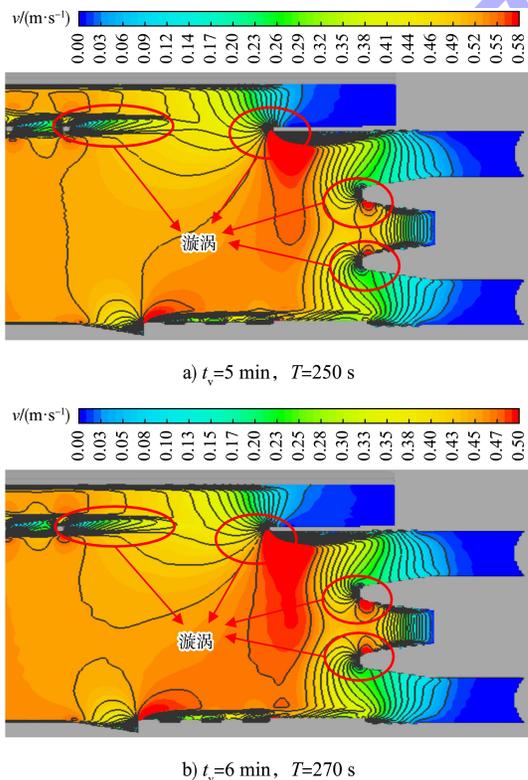


图 7 双线船闸同时灌水时上引航道平面流速等值线
Fig. 7 Contour plot of flow velocity in the plane of upper approach channel during simultaneous irrigation of double-line ship lock

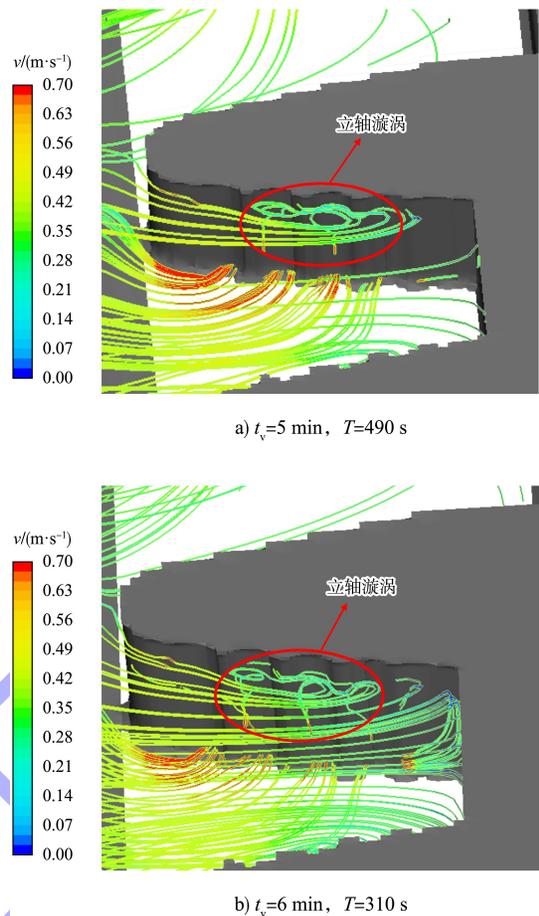


图 8 闸首进水口三维流场
Fig. 8 Three-dimensional flow field at the inlet of gate intake

3.2 上引航道流速变化

上引航道中心线最大流速变化见表 2。由表可知, 在船闸灌水过程中, 水流自闸室灌水时开始运动, 距上闸首越近流速越大, 其流速随灌水阀门开启时间的延长呈先增后减的变化趋势。在单线船闸灌水期间, 当灌水阀门开启时间为 5、6 min 时, 250~270 s 上引航道整体流速最大(0.19~0.29 m/s), 最大流速基本在 0.3 m/s 以下; 而在双线船闸同时灌水期间, 上引航道整体流速达到最大值的时间与单线运行时基本一致, 最大流速基本在 0.55 m/s 以下, 为单线运行的 2 倍(0.42~0.55 m/s)。

结合以上分析发现, 无论是单线船闸运行或是双线船闸运行, 流速变化均较小, 且引航道内整体流速分布都较均匀。受一线船闸斜向水流影响, 在二线船闸靠船墩附近形成扰流和

回流流态, 但扰流及回流流速均较小, 且仅限于靠船墩局部范围内。此外, 当双线船闸运行时, 两侧进水口附近流态相似, 但回流强度和范围显著增加。

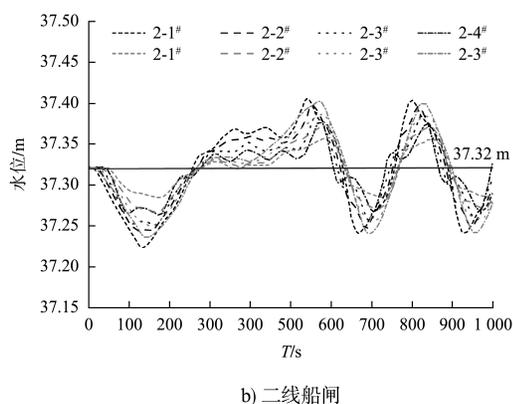
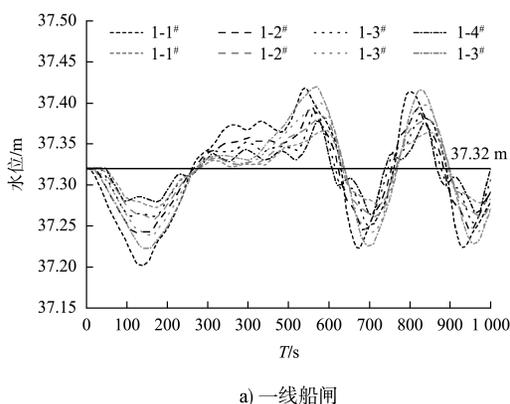
表 2 上引航道中心线最大流速变化
Tab. 2 Changes of maximum flow velocities in centerline of upper approach channel

船闸	测点	单线船闸灌水时 最大流速/(m·s ⁻¹)		双线船闸同时灌水时 最大流速/(m·s ⁻¹)	
		t _v = 5 min	t _v = 6 min	t _v = 5 min	t _v = 6 min
一线船闸	1-1#(0-100)	0.29	0.26	0.54	0.48
	1-2#(0-200)	0.26	0.23	0.53	0.46
	1-3#(0-300)	0.27	0.23	0.55	0.48
	1-4#(0-400)	0.27	0.24	0.54	0.48
二线船闸	2-1#(0-100)	0.22	0.19	0.47	0.42
	2-2#(0-200)	0.26	0.23	0.53	0.46
	2-3#(0-300)	0.27	0.24	0.55	0.48
	2-4#(0-400)	0.28	0.25	0.55	0.49

注: “0-100” 表示距起点 100 m。

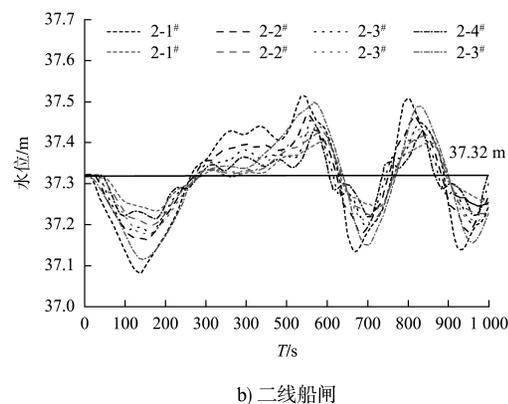
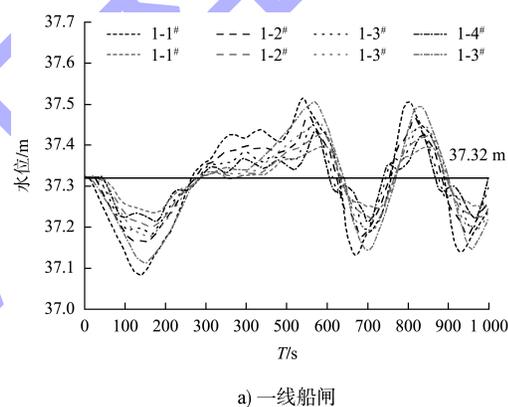
3.3 上引航道水位波动

单线灌水、双线船闸同时灌水时一、二线船闸中心线水位变化见图 9、10。由图可知, 各水位观测点波幅虽有差异, 但波动趋势相似: 船闸灌水后, 上引航道水位先迅速落至波谷再上升, 但受惯性作用影响, 水位超起始水位后缓慢回落, 形成一个周期, 反复形成往复流, 能量衰减后趋于平衡、恢复至起始的平静。



注: 深色线为 t_v = 5 min, 浅色线为 t_v = 6 min。

图 9 单线船闸灌水时船闸中心线水位变化
Fig. 9 Variation of water level in centerline of ship locks when single-line ship locks are operated separately



注: 深色线为 t_v = 5 min, 浅色线为 t_v = 6 min。

图 10 双线船闸同时灌水时船闸中心线水位变化
Fig. 10 Change of water level in centerline of ship locks during simultaneous irrigation of double-line ship lock

单线船闸灌水、双线船闸同时灌水时上引航道非恒定流水位变化见表 3。可见各工况下, 上引航道内的水位随时间变化趋势和规律相似, 不同点在于波高, 单线船闸运行时, 一、二线船闸停泊段水位振动幅度为 0.04~0.12 m。双线运行时各工况下产生的最大跌水波高及最大回复波高比

单线运行时要大很多, 振动幅度约为单线的 2 倍 (0.09~0.24 m), 特别是双线船闸同时灌水时非恒定流现象最显著。这是由于双线船闸同时运行时水流相互干扰, 不同方向和速度的水流交汇使波动相互叠加的结果。

表 3 上引航道非恒定流水位变化
Tab. 3 Changes of unsteady flow water levels in upper approach channel

工况	船闸	测点	最高水位/m		最低水位/m		平均水位/m		最大跌水波高/m		最大回复波高/m	
			$t_v = 5 \text{ min}$	$t_v = 6 \text{ min}$	$t_v = 5 \text{ min}$	$t_v = 6 \text{ min}$	$t_v = 5 \text{ min}$	$t_v = 6 \text{ min}$	$t_v = 5 \text{ min}$	$t_v = 6 \text{ min}$	$t_v = 5 \text{ min}$	$t_v = 6 \text{ min}$
单线 船闸 灌水	一线 船闸	1-1 [#] (0-100)	37.42	37.42	37.20	37.22	37.31	37.31	0.12	0.10	0.10	0.10
		1-2 [#] (0-200)	37.40	37.40	37.24	37.24	37.32	37.31	0.08	0.08	0.08	0.08
		1-3 [#] (0-300)	37.39	37.38	37.25	37.26	37.32	37.32	0.07	0.06	0.07	0.06
		1-4 [#] (0-400)	37.38	37.37	37.25	37.27	37.32	37.32	0.06	0.05	0.06	0.05
	二线 船闸	2-1 [#] (0-100)	37.40	37.40	37.22	37.24	37.32	37.31	0.10	0.08	0.08	0.08
		2-2 [#] (0-200)	37.40	37.39	37.24	37.25	37.32	37.31	0.08	0.07	0.08	0.07
		2-3 [#] (0-300)	37.39	37.37	37.25	37.27	37.31	37.32	0.07	0.05	0.07	0.05
		2-4 [#] (0-400)	37.38	37.36	37.26	37.28	37.32	37.32	0.06	0.04	0.06	0.04
双线 船闸 同时 灌水	一线 船闸	1-1 [#] (0-100)	37.51	37.50	37.08	37.11	37.31	37.30	0.24	0.21	0.19	0.18
		1-2 [#] (0-200)	37.47	37.46	37.16	37.18	37.31	37.31	0.16	0.14	0.15	0.14
		1-3 [#] (0-300)	37.45	37.43	37.19	37.20	37.31	37.31	0.13	0.12	0.13	0.11
		1-4 [#] (0-400)	37.43	37.40	37.21	37.23	37.31	37.31	0.11	0.09	0.11	0.08
	二线 船闸	2-1 [#] (0-100)	37.52	37.50	37.08	37.11	37.31	37.30	0.24	0.21	0.20	0.18
		2-2 [#] (0-200)	37.47	37.44	37.16	37.18	37.31	37.31	0.16	0.14	0.15	0.12
		2-3 [#] (0-300)	37.45	37.43	37.18	37.20	37.31	37.31	0.14	0.12	0.13	0.11
		2-4 [#] (0-400)	37.43	37.40	37.21	37.23	37.31	37.31	0.11	0.09	0.11	0.08

4 结论

1) 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 对船闸在 4 种不同灌水情况下上引航道与进水口处的流速、流态及水位波动等水力特性进行分析, 揭示了上引航道内非恒定流变化规律。

2) 在船闸灌水过程中, 引航道进水口附近因动静水交替作用和边壁效应产生局部表面漩涡, 其强度和范围均较小。但在双线船闸同时灌水时, 漩涡强度和范围更大, 并且在中部进水口上方贴壁一侧形成直径约 1.0 m 未贯通、小范围的立轴漩涡。总体而言双线船闸进水口进流条件较好。

3) 库区蓄水运行时上引航道具有较大的水深和过水断面面积, 计算表明, 各运行工况下, 引航道内的整体流速分布较为均匀, 最大流速介于 0.20~0.55 m/s, 满足规范不大于 0.8 m/s 的要求。

4) 船闸灌水过程中, 上引航道水位出现显著波动, 水位变幅在进水口附近出现最大值。各计算工况下, 双线船闸同时灌水时引起的水位波动明显大于单线船闸运行, 其振幅约为单线船闸灌水时的 2 倍, 对船舶停泊及通航安全造成一定影响。因此应尽量避免双线船闸同时灌水。

参考文献:

- [1] 周权. 白石窑双线船闸共用下引航道通航水流条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
ZHOU Q. Study on navigation flow condition in common lower approach channel of Baishiyao double-line ship lock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [2] 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.
- [3] 王丰来, 孔增增, 杨元平, 等. 强潮河口船闸口门区建挡潮闸水流条件及回淤分析[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(11): 83-86.
WANG F L, KONG Z Z, YANG Y P, et al. Analysis of navigation flow conditions and siltation in the entrance area of ship lock with tidal gate in the strong tidal estuary[J]. *Water resources and power*, 2024, 42(11): 83-86.
- [4] 王柏明, 史英标, 曹颖, 等. 曹娥江出口船闸建设若干关键问题初探[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(8): 61-64, 37.
WANG B M, SHI Y B, CAO Y, et al. Preliminary discussion on some key issues in construction of Cao'ejiang ship lock[J]. *Water resources and power*, 2019, 37(8): 61-64, 37.
- [5] 郭红民, 张淑梅, 汪森, 等. 三峡工程新增一线船闸对上游引航道通航水流条件的影响[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(5): 128-130, 135.
GUO H M, ZHANG S M, WANG M, et al. Influence of newly increased lock of Three Gorges Project on navigation flow condition of upstream approach channel [J]. *Water resources and power*, 2017, 35(5): 128-130, 135.
- [6] 彭永勤, 彭涛. 白石窑一线船闸闸室尺度变更后下引航道通航水流条件试验研究[J]. *水运工程*, 2022(6): 106-111.
PENG Y Q, PENG T. Experimental research on navigation condition of downstream approach channel after change of lock chamber's size of Baishiyao first line ship lock[J]. *Port & waterway engineering*, 2022(6): 106-111.
- [7] 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.
- [8] 陈明, 段黎明, 王多银, 等. 融江麻石船闸改扩建工程下引航道通航水流条件模型试验 [J]. *水运工程*, 2020(7): 175-180, 193.
CHEN M, DUAN L M, WANG D Y, et al. Model experiment of navigable flow conditions of low approach channel for expansion project of Mashi lock in Rongjiang River[J]. *Port & waterway engineering*, 2020(7): 175-180, 193.
- [9] 王能, 张爱平, 普晓刚. 大沃潭已建船闸下游航道通航水流条件改善措施研究 [J]. *水运工程*, 2020(10): 143-148.
WANG N, ZHANG A P, PU X G. Improvement measures of navigational flow condition in downstream channel of Dafutan ship lock [J]. *Port & waterway engineering*, 2020(10): 143-148.
- [10] 王远成, 吴文权. 基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型钝体绕流的数值模拟 [J]. *上海理工大学学报*, 2004, 26(6): 519-523.
WANG Y C, WU W Q. Numerical simulation of flow around blunt bodies using RNG $k-\varepsilon$ turbulence model[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2004, 26(6): 519-523.
- [11] 赵君, 陈雅倩, 闫桂霞, 等. 基于 RNG $k-\varepsilon$ 与 LES 模型的盲肠河段口门区水力特性数值模拟分析 [J]. *水电能源科学*, 2018, 36(3): 93-95, 109.
ZHAO J, CHEN Y Q, YAN G X, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of closed end river reach based on LES and RNG $k-\varepsilon$ models [J]. *Water resources and power*, 2018, 36(3): 93-95, 109.
- [12] 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*, 2013, 28(5): 559-565.
- [13] 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.
Chen M. Numerical simulation of hydraulic characteristics of centralized water transfer system and ship bollard force in lock [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.

(本文编辑 王传瑜)