



双线船闸开通闸水流条件模型试验^{*}

李仪文¹, 周世良², 王勤振³

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对平原河网水运繁忙地区, 船闸通过能力有限过闸船舶常态化拥堵问题, 以裕溪双线船闸工程为依托, 开展船闸开通闸运行条件模型试验研究, 采用二维水动力数值模型, 研究水位差、船闸运行方式和节制闸运行方式等关键影响因素对于船闸开通闸水流条件的影响规律。试验结果表明: 船闸开通闸通航水流条件的控制节点位于上闸首; 裕溪枢纽双线船闸开通闸的合理运行水位差不应大于 20 cm; 开通闸运行条件的营造时间与船闸运行方式有关, 船闸尺度越大、线数越多, 营造时间越短, 一般需要约 30 min; 在水位差一定的前提下, 采用多线船闸及节制闸等同时开启的组合运行方式可以有效改善船闸开通闸通航水流条件, 降低船闸内水流流速 50% 以上。研究成果可供类似船闸工程拟采用开通闸方式提高通过能力时参考借鉴。

关键词: 船闸开通闸; 通航水流条件; 上闸首; 运行方式; 模型试验

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0153-08

Model test of water flow conditions for navigable open-gate mode of double-line ship lock

LI Yiwu¹, ZHOU Shiliang², WANG Qinzen³

(1. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To the problem of normalized congestion of ships passing through locks with limited capacity in areas with busy water transportation in plain river networks, this paper is based on Yuxi double-line ship lock project to carry out a model study on the operating conditions for navigable open-gate mode. A two-dimensional hydrodynamic numerical model is used to research the influence law of key influencing factors, such as the difference in water level, the operation mode of ship locks, and the operation mode of the regulation lock on the water flow conditions for navigable open-gate mode. The test results show that the control node for water flow conditions during open-gate operation is located at the upper gate head. The reasonable operating water level difference for the navigable open-gate mode of the Yuxi Hub double-line ship lock should not exceed 20 cm. The formation time of the open-gate operational conditions is related to the operation mode of the ship lock. The larger the scale of the ship lock and the more lines it has, the shorter the creation time, which generally takes about 30 min. Under the premise of a certain water level difference, the combined operation mode of using multi-line locks and control gates can effectively improve the water flow conditions during open-gate operation and reduce the water flow velocity in the lock by more than 50%. The research results can be used as a reference for similar ship lock projects that plan to use the method of navigable open-gate mode to improve throughput capacity.

Keywords: navigable open-gate mode of ship lock; navigable water flow condition; upper lock head; lock operation mode; model test

收稿日期: 2025-04-25 录用日期: 2025-05-23

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206103); 安徽港航重大工程科技项目(2023AFABZ02644)

作者简介: 李仪文(2000—), 女, 硕士, 研究方向为通航水力学。

内河航运的快速发展为我国交通运输体系的现代化、经济的持续增长和生态环境的保护提供了有力支撑，成为推动国家经济高质量发展的重要力量。然而，随着航运需求的增加，船闸拥堵成为重点关注的问题，为了缓解拥堵现象，开展船闸开通闸运行条件研究，对提高船闸通过能力具有重要的理论意义及应用价值。

目前，学者们对开通闸的相关研究主要集中于三角闸门运行条件及输水系统整体布置等方面。针对船闸开通闸运行条件的系统性研究仍较为匮乏。朱瑞虎等^[1]、姜育松^[2]、汪昕等^[3]针对开通闸条件下船闸安全运行问题，进行了水流流态、流速和启闭机受力的研究，建立潮位差与最大纵向流速关系以及确定开通闸安全运行条件的成果。瞿剑钧等^[4]针对船闸通过能力不足的问题，利用潮汐开放通闸提高船闸通过能力的研究，通过充分利用潮汐、减少套闸次数以提高船舶过闸效率。刘本芹等^[5]、吴腾等^[6]、丁坚等^[7]、张桂秀^[8]、徐泽中^[9]针对船闸短廊道和三角门门缝联合输水的水力特性问题，进行了输水系统布置及其水力特性分析的研究，确定输水系统合理布置和提高船闸运行效率。杨斌等^[10]、吴英杰^[11]、邢述炳等^[12]采用水力计算与物理模型相结合的方法，针对短廊道和三角闸门门缝组合输水的水力特性问题，进行了灌水和泄水条件下的水力计算研究，推导出组合输水条件下水力计算公式。姜兴良等^[13]、李树海等^[14]、Zhang 等^[15]针对具备长期开通闸条件的船闸设计问题，进行了门机电系统、输水系统和平面布置方案的研究，优化船闸设计方案以提高船闸通过能力。可见，目前船闸开通闸相关研究侧重于船闸结构工程，对开通闸通航水流条件及其高效运行方式的相关研究偏少。因此，亟需开展船闸开通闸运行条件研究，明确船闸开通闸通航水流条件的控制节点及营造时间，提出改善船闸开通闸运行条件的优化措施，对于提升船闸通行效率、降低等待时间、确保航运安全等均具有重要的理论与实践意义。同时，该研究有助

于为我国其他船闸的运营管理提供参考，推动内河航运的可持续发展。

本文以裕溪双线船闸为例建立船闸开通闸二维数学模型，开展船闸开通闸运行条件研究。裕溪闸水利枢纽位于合裕线航道裕溪口，裕溪河入长江口门附近，见图 1。裕溪船闸地处长江下游感潮河段与裕溪河交汇处，其地理位置兼具潮汐动力与河流水位的复合影响，是长江干流与巢湖流域航运网络的关键节点。裕溪水利枢纽由一线、复线共同组成，船闸的通航需求逐年增加，形成常态化船舶滞留及拥堵问题，故有必要开展船闸开通闸运行条件研究，提升船闸通过能力，缓解拥堵现象。该研究依托裕溪双线船闸工程，构建二维开通闸数学模型，研究不同水位差、船闸组合运行方式及节制闸联合调控下的通航水流条件。



图 1 裕溪枢纽照片
Fig. 1 Photo of Yuxi Hub

1 船闸开通闸数值模型建立

1.1 控制方程

使用二维计算方法，通过垂向积分简化三维流动问题，将水流运动分解为水平方向的动量传递与垂向平均的连续性响应，显著降低了计算复杂度，适用于水平尺度远大于垂向尺度的浅水流动(如河流、河口及近岸海域)。其核心假设为静水压力分布与垂向流速均一化，从而忽略垂向加速度及强分层效应，使得方程在计算效率与工程适用性间取得平衡。二维浅水方程通过连续方程与动量方程耦合求解，能够有效描述洪水演进、潮汐传播等大范围水动力过程。

垂向采用平均水深流速分布，即可得二维水

流控制方程如下:

$$\begin{cases} h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \\ h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \end{cases} \quad (1)$$

水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (2)$$

式中: h 为水深, 表示某一点的水体垂直高度, m; u 、 v 为水流在 x 和 y 方向的水平速度分量, m/s; \bar{u} 、 \bar{v} 为垂向平均后的二维水平速度分量; η 为自由水面高程(相对于静水位); d 为静止水深(从静水位到床底的距离); $h=\eta+d$ 为总水深(自由水面到床底的距离); t 为时间, s; S 为源汇项, 表示外部质量输入或输出。

x 、 y 方向水平动量方程分别如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{xx} - \tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \\ \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{xy} - \tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为压力, Pa; ν 为水的运动黏性系数, m^2/s ; f 为科里奥利参数; 剪应力 T_{ij} 包括黏性应力、涡黏应力和对流梯度应力, N; S_{ij} 为湍流应力, N; 通过下式进行估算。

$$\begin{cases} T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \\ T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ_{bx} 、 τ_{by} 为河床切应力, 可由下式计算。

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \\ \mathbf{u}_b = (u_b, v_b) \\ \frac{\boldsymbol{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \mathbf{u}_b |\mathbf{u}_b| \end{cases} \quad (5)$$

式中: c_f 为阻力系数。

对于二维问题 \mathbf{u}_b 为平均水深流速, 摩阻流速 U_{tb} 与床面阻力 c_f 关系如下:

$$U_{tb} = \sqrt{c_f |u_b|^2} \quad (6)$$

c_f 可通过谢才系数 C 或曼宁系数 M 来计算:

$$\begin{cases} c_f = g/C^2 \\ c_f = g/(Mh^{1/6})^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为曼宁系数, 根据物理模型床面粗糙度确定; 谢才系数 C 通过曼宁公式计算。

$$C = \frac{1}{n} h^{1/6} \quad (8)$$

式中: n 为曼宁糙率系数。

1.2 船闸开通闸数值模型

本次数值模拟研究旨在探究水位差、船闸运行方式和节制闸运行方式对于通航水流条件的综合性影响。根据枢纽工程特性及试验目标需求, 选取的计算区域为裕溪枢纽闸上 3 km(顺直河段)至闸下 4.5 km(裕溪口附近)。采用三角形网格离散计算区域, 网格大小疏密沿河道河势宽窄变化不等, 在船闸及引航道附近的网格进行局部加密, 模型网格共计 13.036 9 万个, 网格节点共计 6.697 6 万个。根据船闸开通闸实际运行方式, 模型上下游均采用水位边界条件控制, 节制闸采用流量边界条件来模拟泄流过程。裕溪船闸开通闸数学模型范围见图 2。

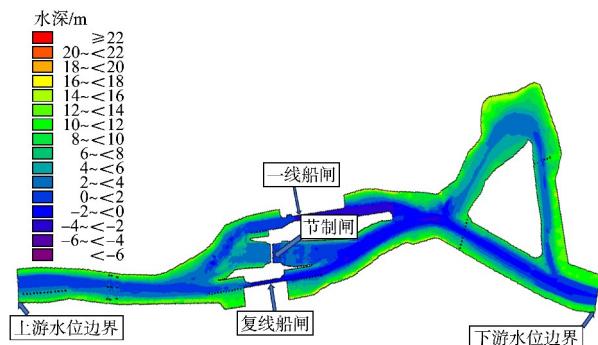


图 2 裕溪船闸开通闸数学模型范围

Fig. 2 Mathematical model range of Yuxi Ship Lock for navigable open-gate mode

1.3 平面二维数学模型验证

结合工程河段河势条件, 研究采用二维数值模拟模型同工程物理模型试验成果进行验证, 裕溪枢纽整体物理模型采用正态模型, 模型比尺为 1:100, 按重力相似准则设计。物理模型现场照片, 见图 3。结合开通闸工程特性, 验证工况为裕溪船闸上游水位边界 8 m, 下游水位边界 7.76 m, 节制闸流量为 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过验证船闸引航道沿程水位来修正数学模型河道糙率。验证结果, 见表 1。模型验证结果表明, 由于裕溪枢纽上游为人工控制河道, 下游受长江顶托作用, 总体而言, 工程河段流量不大、沿程水面比降较小, 模型水位与原型水位相差在 0.05 m 以内, 模型模拟精度达到了河床阻力相似的要求。模型河床糙率为 0.031, 与物理模型基本保持一致。

表 1 模型水位验证成果

Tab. 1 Model water level verification results

测点位置	模型水位/m	模拟值/m	差值/m
上游引航道	7.48	7.52	0.04
闸室	7.46	7.50	0.04
下游引航道	7.41	7.46	0.05

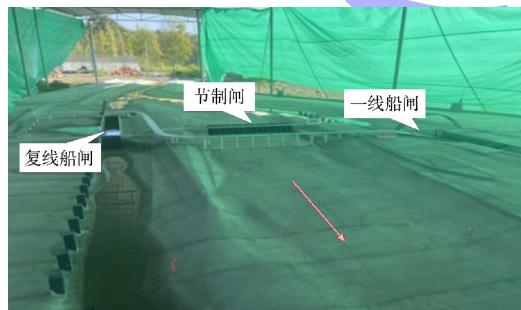


图 3 裕溪船闸开通闸物理模型范围

Fig. 3 Physical model range for navigable open-gate mode of Yuxi Ship Lock

1.4 研究工况

为了系统研究水位差、船闸运行方式及节制闸组合运行方式对通航水流条件的影响, 基于类似工程经验, 结合裕溪枢纽开通闸工程特性, 上下

游水位差小, 不超过 0.2~0.3 m, 基本没有漂浮物与泥沙, 保证上游水位为 8.0 m, 下游水位控制在 7.7~7.9 m, 节制闸流量选取 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。节制闸流量选取依据不处于汛期的条件下, 节制闸的运行调度严格控制开启, 并非长期保持开启状态。具体工况见表 2。按照上述工况, 船闸与节制闸联合调度。以模拟不同水位差条件下船闸运行时的水流变化规律, 水位差直接影响流速、水流分布及闸室内外流态, 进而影响通航安全与效率。节制闸运行时节制闸流量为 $600 \text{ m}^3/\text{s}$, 节制闸不运行时总流量为船闸开通闸正常流量。旨在分析不同组合运行方式下水流分配的差异性及节制闸对水流的调控作用。通过多工况对比, 可以全面揭示水位差与运行方式对水流模式的影响机制, 为船闸运行优化和通航安全保障提供科学依据。船闸上下游附近的 30 个监测点编号为 Y1~Y15, F16~F30, 见图 4。

表 2 裕溪船闸开通闸运行工况

Tab. 2 Operating conditions for navigable open-gate mode of Yuxi Ship Lock

上游水位/m	下游水位/m	船闸运行方式	节制闸运行方式
7.9	8.0	仅一线运行	不运行 运行
		仅复线运行	不运行 运行
7.8	7.9	双线运行	不运行 运行
		仅一线运行	不运行 运行
7.7	7.8	仅复线运行	不运行 运行
		双线运行	不运行 运行
7.6	7.7	仅一线运行	不运行 运行
		仅复线运行	不运行 运行
7.5	7.6	双线运行	不运行 运行
		仅一线运行	不运行 运行
7.4	7.5	仅复线运行	不运行 运行
		双线运行	不运行 运行

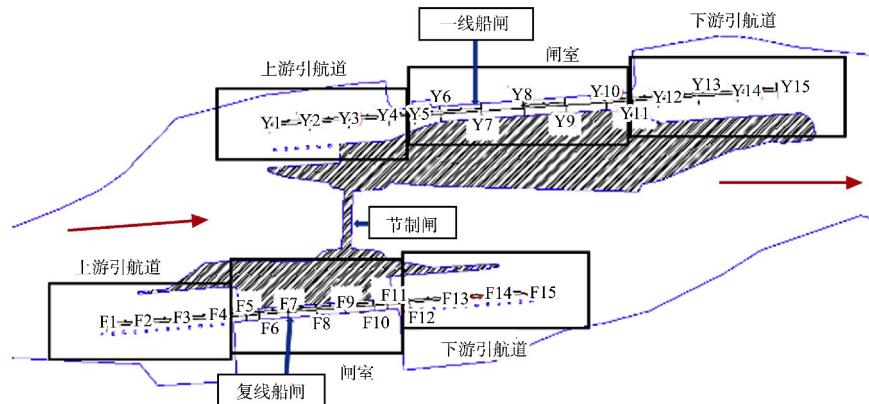


图 4 裕溪船闸开通闸监测点位置

Fig. 4 Location of monitoring points for navigable open-gate mode of Yuxi Ship Lock

2 船闸开通闸运行条件分析

根据研究中船闸开通闸运行条件的关键影响因素: 水位差、船闸运行方式、节制闸运行方式。针对不同工况, 对船闸开通闸运行条件分析。

2.1 水位差的影响

通过统计相同水位差、不同船闸及节制闸运行方式条件下的通航水流条件, 仅复线运行时水流条件最为恶劣, 为控制工况, 分析水位差影响时, 因此选取复线船闸单独运行工况进行对比。不同水位差下复线流速云图见图 5。

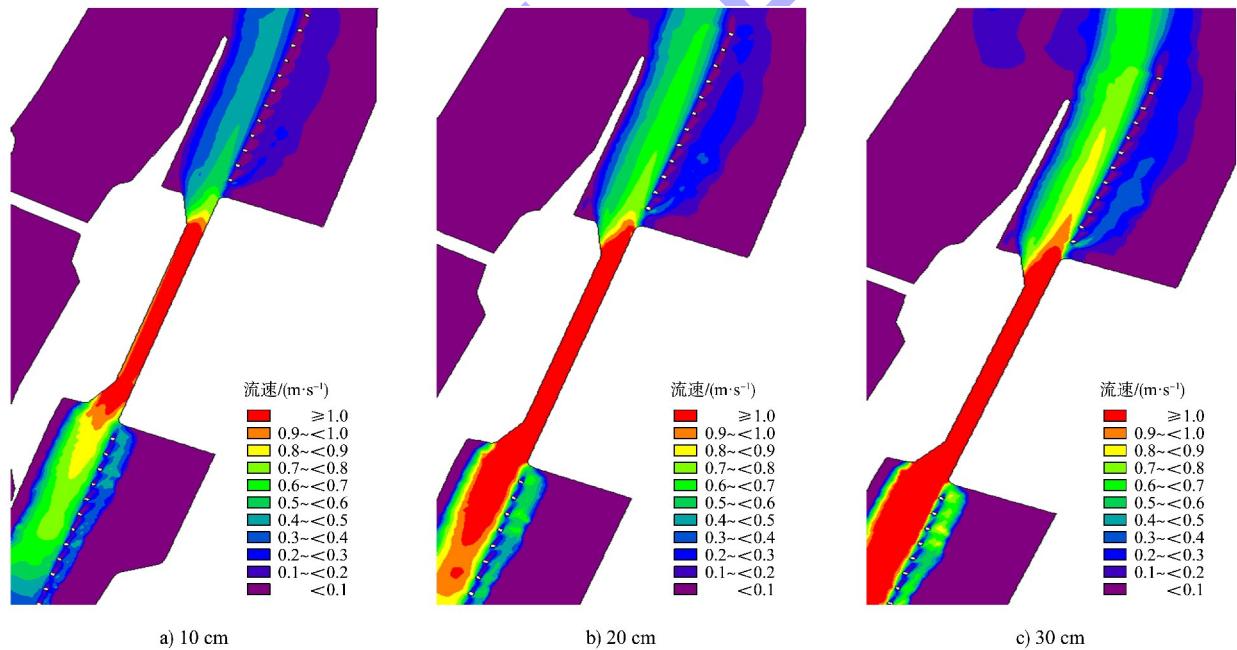


图 5 不同水位差下复线流速云图

Fig. 5 Contour of compound flow velocity under different water level differences

由图 5 可知, 在上游水位 8.0 m 与下游水位 7.9 m 的工况下, 上游引航道流速为 0.4~0.8 m/s, 阀室流速 ≥ 1.0 m/s, 下游引航道流速为 0.2~0.4 m/s。在 20 cm 水位差下, 上游引航道流速 ≥ 0.8 m/s, 阀室流速 1.5 m/s, 下游引航道流速为 0.2~0.8 m/s。

在 30 cm 水位差下, 上游引航道 1.0 m/s 和阀室流速 ≥ 1.8 m/s, 下游引航道流速 0.4~0.9 m/s。通过对比不同水位差条件下的流速云图可知, 上闸首附近流速较高, 处于通航水流条件影响的敏感区, 过流面积最小, 断面平均流速最大, 是船闸开通

闸运行条件的控制节点。通过对比不同工况下的船闸开通闸通航水流条件, 不同水位差裕溪船闸上闸首监测点 F5 流速变化过程线, 见图 6。

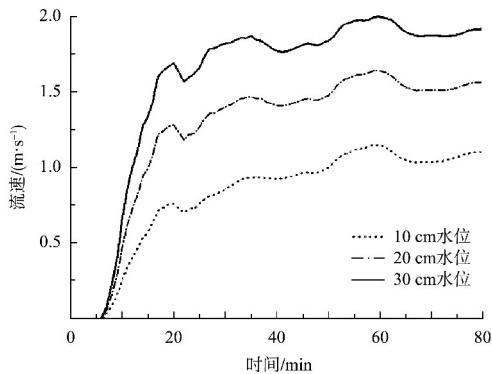


图 6 不同水位差上闸首监测点 F5 流速

Fig. 6 Flow velocity at monitoring point F5 of upper gate head under different water level differences

试验成果表明, 随船闸开通闸后, 各监测点流速逐步增大直至稳定, 流速增幅随时间推移逐步变缓。10 cm 水位差条件下, 复线船闸上闸首合速度约为 1.0 m/s; 20 cm 水位差下, 复线船闸上闸首合速度约为 1.5 m/s; 30 cm 水位差下, 复线船闸上闸首合速度约为 1.8 m/s。可见, 试验工况条件下, 船闸闸室段由于过水面积较窄, 水流流速较引航道更高, 根据类似工程经验, 在限制性航道内水流流速大于 2.0 m/s 时, 船舶航行条件将明显变差, 以此为依据, 基本可判断裕溪枢纽开通闸的合理运行水位差不应大于 20 cm。

2.2 船闸运行方式的影响

不同水位差试验成果表明, 在 20 cm 水位差(裕溪河侧水位 8.0 m, 长江侧水位 7.8 m)处于临界水位, 因此, 在研究船闸运行方式时采用 20 cm 水位差进行研究。

通过对复线、一线及双线船闸运行方式下上闸首监测点(F5、Y5)的流速与水面比降变化过程线, 见图 7。可知, 复线监测点稳定流速约为 1.6 m/s, 一线监测点稳定流速约为 1.5 m/s, 双线监测点稳定流速为 1.3 m/s。复线监测点的水面比降峰值约 1.4%。一线监测点水面比降相对稳定在 0.4‰~0.8‰ 之间, 小幅波动, 未出现显著峰值。在相同水位差下, 仅复线运行, 随时间变化流速

最大, 水面比降同步增大。结合流速下降趋势推测, 复线运行下的水面比降同步减小, 水流结构趋于平顺, 可有效减少横向水流对船舶的侧推力, 从而提升通航安全性。仅复线运行在流速稳定性和水面比降监测方面, 具备常态化运行的可行性, 但其实际效果需结合长期监测数据进一步验证。

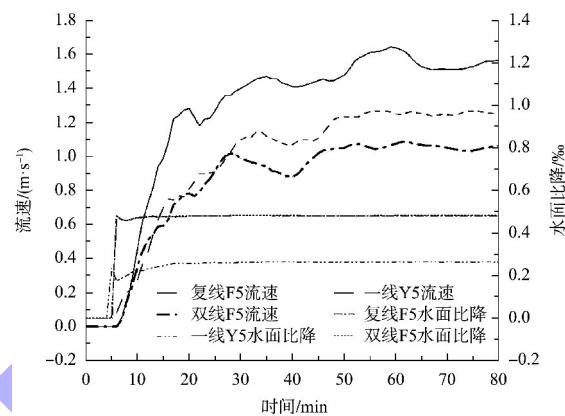


图 7 20 cm 水位差监测点 F5 流速和水面比降变化过程

Fig. 7 Flow velocity and water surface gradient change process at 20 cm water level difference monitoring point F5

2.3 节制闸运行方式的影响

在 20 cm 水位差仅复线运行时, 此时通航水流条件处于临界状态, 仅复线运行时最不利。节制闸作为重要的水流调控设施, 通过动态平衡流量、水位及泥沙分布, 显著提升了通航水流条件的稳定性和安全性。对比分析仅复线运行模式下调控节制闸运行工况下的流速, 见图 8。

由图 8 可知, 在节制闸不运行时, 上游引航道流速约为 1.0 m/s, 闸室流速 1.5 m/s, 下游引航道流速约 0.6 m/s; 节制闸运行时, 上游引航道流速为 0.1 m/s, 闸室流速为 0.2 m/s, 下游引航道流速为 0.1 m/s。结合上闸首 F5 监测点流速, 节制闸不运行时, 稳定后流速 1.5 m/s; 节制闸运行时, 稳定后流速 0.2 m/s。研究表明, 在流量一致的条件下, 节制闸运行增加过流断面的面积, 导致流速降低, 反之亦然。通过主动调控节制闸, 可精准控制流速与流量分布, 从而在通航安全、效率及航道维护间取得平衡。实际应用表明, 节

制闸的运行可使复线航道流速稳定在 $0.2\sim0.5\text{ m/s}$ 的安全区间, 船舶操纵性显著增强, 通航事故率降低超 30%。然而, 其长期运行需配套泥沙疏浚与断面形态监测, 以应对低流速引发的淤积风险。因此在水位差一定的前提下, 采用多线船闸及节制闸等同时开启的组合运行方式可以有效改善船闸开通闸通航水流条件。

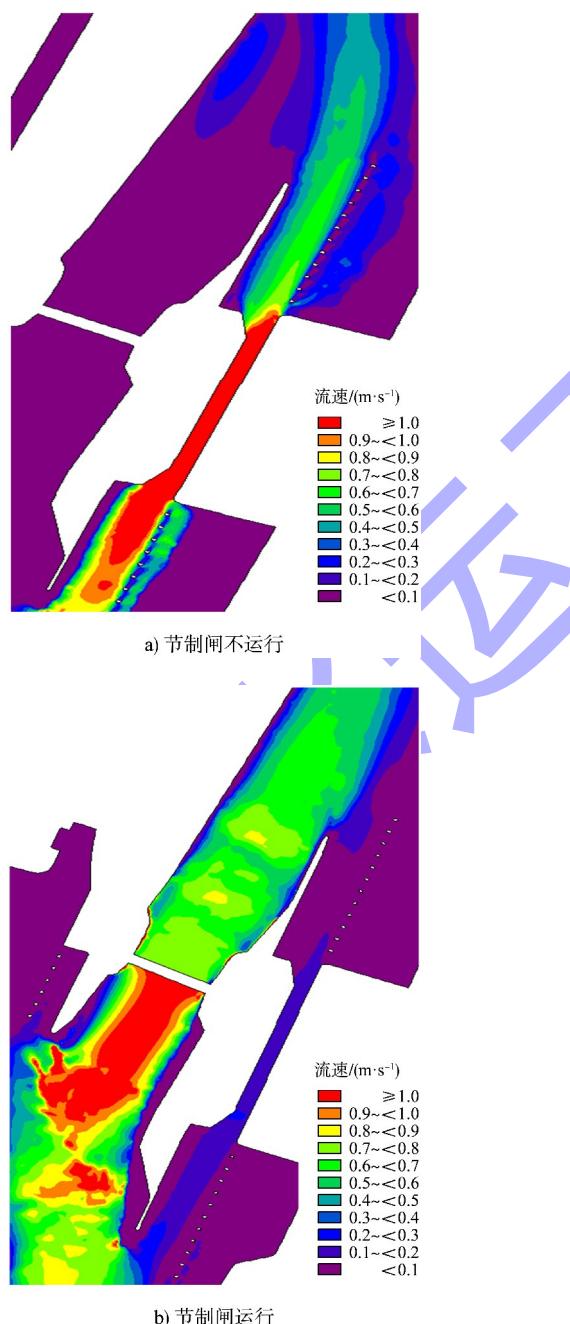


图 8 流速云图

Fig. 8 Velocity contour

3 结论

1) 船闸开通闸通航水流条件的控制节点位于上闸首。基于类似工程经验, 仅复线单独运行时水流条件最为恶劣。裕溪枢纽开通闸的合理运行水位差不应大于 20 cm , 上闸首区域因过水断面缩窄, 形成流速显著升高的“临界敏感区”。

2) 开通闸通航水流条件与船闸运行方式有关。在上下游水位差恒定时, 过流断面面积与流速成反比, 与水面比降成正比的关系。多线船闸的过流断面面积大于单线船闸, 开通多线船闸比单线船闸水流条件更优。在不同的船闸尺度规模下, 船闸尺度越大, 流速越小, 更有利于船舶安全航行。船闸尺度越大、线数越多, 营造时间越短, 一般需要约 30 min 。

3) 当枢纽工程采用节制闸等泄水建筑时, 能够有效改善通航水流条件。由于节制闸增大了过水断面面积, 减小流速, 改善了通航水流条件。在水位差一定的前提下, 采用多线船闸及节制闸等同时开启的组合运行方式可以有效改善船闸开通闸通航水流条件, 降低船闸内水流流速 50% 以上。因此, 优先采用船闸运行时联合节制闸调控。

4) 本文研究不针对具体工程应用展开, 此类情形在现实中出现的可能性较低, 旨在探索开通闸运行规律。数值模拟结果论证了节制闸与多线船闸协同运行的可行性, 但考虑二维数值方法的局限性, 未来可进一步开展三维数学模型下的船闸开通闸水流条件研究, 精细分析船闸段局部流场结构水流特性。

参考文献:

- [1] 朱瑞虎, 吴腾, 丁坚. 开通闸条件下船闸安全运行试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 445-450.
ZHU R H, WU T, DING J. Experimental study on the safe operation of ship lock running as an open channel [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2017, 45(5): 445-450.

- [2] 姜育松. 不同工况下三角闸门启闭力计算[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(11): 99-100.
JIANG Y S. Calculation of opening and closing force of triangular gate under different working conditions [J]. China water transport (the second half of the month), 2019(11): 99-100.
- [3] 汪昕, 王新, 孙立武, 等. 大型三角闸门门缝输水运用条件试验研究[J]. 水运工程, 2021(3): 12-16, 40.
WANG X, WANG X, SUN L W, et al. Experimental study on the operation conditions of door water delivery of large sector gate [J]. Port & waterway engineering, 2021 (3): 12-16, 40.
- [4] 龚剑钧. 利用潮汐开放通闸提高船闸通过能力[J]. 水运工程, 2001(1): 37-38.
QU J J. Utilizing the tide to open lock and improve shiplock capacity [J]. Port & waterway engineering, 2001(1): 37-38.
- [5] 刘本芹, 宣国祥, 李中华. 船闸短廊道和三角门门缝联合输水的水力计算 [J]. 水道港口, 2008, 29 (4): 278-282.
LIU B Q, XUAN G X, LI Z H. Hydraulic calculations of the lock short culvert associated with sector gate gap filling and emptying system [J]. Journal of waterway and harbor, 2008, 29(4): 278-282.
- [6] 吴腾, 朱瑞虎, 丁坚. 三角门船闸开通闸运行条件试验研究[J]. 水道港口, 2014, 35(3): 247-253.
WU T, ZHU R H, DING J. Experimental study on critical conditions of Jiaogang ship lock running as an open channel [J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(3): 247-253.
- [7] 丁坚, 宋荔钦. 焦港船闸开通闸适航水力条件研究[J]. 水道港口, 2014, 35(6): 613-617.
DING J, SONG L Q. Study on hydraulic condition of Jiaogang ship lock at the time of locks opening [J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(6): 613-617.
- [8] 张桂秀. 江阴船闸通闸水流条件试验[J]. 水运工程, 1989(4): 15-17.
ZHANG G X. Experimental study on flow conditions of Jiangyin Ship Lock [J]. Port & waterway engineering, 1989(4): 15-17.
- [9] 徐泽中. 三角闸门门缝输水方式的商榷[J]. 华东水利学院学报, 1982, 10(3): 83-93.
XU Z Z. Discussion about charging-discharging scheme of triangular lock gate [J]. Journal of East China Technical University of Water Resources, 1982, 10(3): 83-93.
- [10] 杨斌, 黄启亮. 短廊道和三角闸门门缝组合输水的水力计算 [J]. 重庆交通大学学报, 1996, 15(S1): 91-98, 121.
YANG B, HUANG Q L. The hydraulic calculation of the composite water transport of short passageway and crash of triangle gate [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1996, 15(S1): 91-98, 121.
- [11] 吴英杰. 三角闸门门缝输水水动力及启闭力特性研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2023.
WU Y J. Research on hydrodynamic and opening and closing force characteristics of triangular gate force of the gate [D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2023.
- [12] 邢述炳, 丁兆铭, 董浩. 三角闸门门缝输水运行工况研究[J]. 水运工程, 2020(8): 146-151.
XING S B, DING Z M, DONG H. Research on the operation conditions of door water delivery of triangular gate [J]. Port & waterway engineering, 2020 (8): 146-151.
- [13] 姜兴良, 周广群, 袁淑文. 具备长期开通闸条件的船闸设计方案[J]. 水运工程, 2015(12): 104-107.
JIANG X L, ZHOU G Q, YUAN S W. Design scheme of long-term opened shiplock [J]. Port & waterway engineering, 2015(12): 104-107.
- [14] 李树海, 赵月桂, 陶书东. 大跨度升卧式闸门在船闸上的应用[J]. 水运工程, 2013(8): 152-155.
LI S H, ZHAO Y G, TAO S D. Application of large-span lift gate on ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2013(8): 152-155.
- [15] ZHANG S Y, WANG X, MA H T. Operating force characteristics of sector gates based on prototype testing [J]. Water, 2024, 16(5): 762.

(本文编辑 赵娟)