

互通式与独立式省水船闸闸室水流条件比较

张毅濠, 王曙光, 董思远, 叶子豪, 俞小彤

Comparison of flow conditions in the lock chambers of interconnected and independent water-saving ship locks

ZHANG Yihao, WANG Shuguang, DONG Siyuan, YE Zihao, YU Xiaotong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240430002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

贵港二线船闸输水系统水力特性原型观测

Prototype observation of hydraulic characteristics of filling and emptying system of Guigang Second Line Ship Lock

水利水运工程学报. 2022(4): 55 <https://doi.org/10.12170/20220107001>

赣江龙头山枢纽一线船闸通航水流条件及改善措施研究

Study on navigation flow conditions and improvement measures at Longtoushan Junction in the Ganjiang River

水利水运工程学报. 2023(6): 213 <https://doi.org/10.12170/20221231002>

干支流垂直交汇下跌水工程下游通航水流条件优化

Navigable flow condition optimization at vertical channel confluence in the downstream of a water drop project

水利水运工程学报. 2023(3): 29 <https://doi.org/10.12170/20220929003>

船闸末级闸首超长输水廊道泄水水力特性数值模拟

Numerical simulation of hydraulic characteristics of the ultra-long water conveyance corridor at the head of the last-step ship lock chamber

水利水运工程学报. 2021(4): 92 <https://doi.org/10.12170/20200728003>

超高水头大型船闸闸室明沟消能特性研究

Energy dissipation characteristics of the open ditch located in a large-scale ship lock chamber with an extreme high water head

水利水运工程学报. 2022(5): 69 <https://doi.org/10.12170/20210805008>

江苏省节水分区研究

Study on water saving divisions in Jiangsu Province

水利水运工程学报. 2023(5): 78 <https://doi.org/10.12170/20220527001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240430002

张毅濠, 王曙光, 董思远, 等. 互通式与独立式省水船闸闸室水流条件比较 [J]. 水利水运工程学报, 2025. (ZHANG Yihao, WANG Shuguang, DONG Siyuan, et al. Comparison of flow conditions in the lock chambers of interconnected and independent water-saving ship locks[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(in Chinese))

互通式与独立式省水船闸闸室水流条件比较

张毅濠¹, 王曙光¹, 董思远¹, 叶子豪², 俞小彤²

(1. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 省水系统类型选择和设计是省水船闸输水系统的重难点, 互通式和独立式两种型式的闸室水力特性尚不明晰。通过建立互通式和独立式布置下金家堰省水船闸整体输水系统三维数学模型, 分析省水池向闸室输水过程中闸室水体流速分布、消能特性、船舶泊稳条件。研究表明, 互通式布置下, 最大流量时刻上闸首格栅室正、顶支孔出流不均匀, 下闸首消力槛处出现显著漩涡, 导致流速空间分布不均匀, 省水池对侧且靠近下闸首的水体紊动显著, 输水过程产生的长波运动会在闸室中部叠加, 导致较大的水面纵向升降; 独立式布置下, 闸室流场分布对称性强, 横支廊道侧支孔出流均匀, 水面平稳, 较互通式泊稳条件更优。在现有的布置条件下, 独立式布置的闸室水流条件优于互通式, 若采用互通式方案, 需优化上下闸首消能工。

关键词: 省水船闸; 互通式省水系统; 支孔流量; 水流条件

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号:

省水船闸能在灌泄水过程中进行蓄放水, 从而节约航运用水, 是解决水资源贫乏河段农业、发电、航运间矛盾的有效手段^[1]。当前, 带省水池的船闸是最普遍的省水船闸型式^[2]。相较于常规船闸, 带省水池的船闸输水系统由两部分构成, 一是连接上下游与闸室的主系统, 二是连接省水池与闸室的省水系统。船闸输水系统的水力特性是船闸设计的关键内容, 相较于主系统成熟的输水系统布置和设计方法, 省水系统的类型选择和设计研究尚不充分。

省水系统有互通式和独立式两种布置型式。已建成的双线省水船闸及带多级省水池的船闸省水系统大多采用独立式布置, 主系统与省水系统廊道在闸室墙或底板内互通^[3-4]。巴拿马运河新建省水船闸采用闸墙长廊道分散式输水, 省水池通过多个次级输水廊道汇集至主廊道并与闸室相连^[5]; 绣江白马枢纽省水船闸主系统通过闸底长廊道侧支孔出水明沟消能, 省水池由独立输水廊道与闸室中部水平分流口相连^[6]。这些船闸设计水头往往较大, 主系统主要采用分散式输水, 省水系统分担水头也较大, 常采用独立式布置以优化闸室水流条件。然而, 对于主系统采用集中式输水的省水船闸而言, 省水系统的布置型式并不统一。按照《船闸输水系统设计规范》^[7], 小清河复航工程上的水牛韩、金家堰、王道省水船闸闸首均采用集中输水系统, 但前 2 个船闸省水系统采用互通式布置型式^[8-9], 而王道船闸则采用独立式布置^[10]。尽管这些布置方案都满足省水、闸室安全及船舶过闸安全等要求, 但并未给出省水系统布置型式的选取依据, 互通式与独立式省水系统输水过程中闸室水流条件差异尚不明晰, 难以直接为类似工程提供参考。

船闸输水时, 上下闸首水流条件、闸室内消能设施消能效果及闸室内整体水流分布情况是保证船舶安

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206103); 山东省交通规划设计院集团有限公司科技计划项目(KJ-2021-SJYJT-03)

作者简介: 张毅濠(1995—), 男, 山东淄博人, 硕士, 主要从事船闸水力学方面的研究。

E-mail: 15194190318@163.com 通信作者: 俞小彤(E-mail: xiaotongyu@hhu.edu.cn)

全过闸的关键水力特性^[11-12]。本文以金家堰省水船闸为例,建立互通式与独立式省水船闸输水系统数学模型,对省水运行第一阶段(泊稳最不利工况),即省水池向闸室输水过程进行三维紊流数值模拟,对比分析两种方案在流场分布、消能效果、泊稳条件等方面的差异及其成因,为省水系统布置型式选取提供参考。

1 工程概况

金家堰船闸是小清河复航工程的主中心船闸,为Ⅱ级通航建筑物,设计船型为1 000 t级。船闸有效尺寸为280 m×34 m×5 m(有效长度×有效宽度×门槛最小水深)。船闸设计水头5.4 m,水头差大于3 m时考虑省水运行,省水运行最不利水位组合为上游水位9.6 m,下游水位4.2 m,省水池水位7.8 m。闸首采用带消能工的短廊道集中输水系统,输水系统布置方式和尺寸设计参见文献^[9]。由于本文重点研究省水系统布置型式对闸室水力特性的影响,故主要介绍省水池输水系统布置。

1.1 省水池互通式输水系统

省水池互通式输水系统平面布置如图1所示,省水池上下游输水廊道分别与上下闸首的一侧短廊道平交连接,省水池通过三通连接廊道向闸室输水。为便于船闸检修维护,省水阀门段与闸首阀门段廊道尺寸一致,均为4.0 m×5.0 m(宽×高)。省水阀门段廊道平底平顶布置,高程与闸首一致。上闸首采用格栅消能室,顶部出水支孔4组×11个,每个出水支孔尺寸均为3.00 m×0.22 m(长×宽);正面出水支孔2组×11个,每个出水支孔尺寸均为4.0 m×1.0 m(宽×高);格栅室内设置3道消力槛,消力槛中间高度为2.0 m,两侧高度均为0.5 m,距中间消力槛距离为0.9 m。下闸首进水口外采用简单消能工,设置3道消力槛,消力槛中间高度为2.50 m,两侧高度均为1.25 m,距中间消力槛0.85 m。

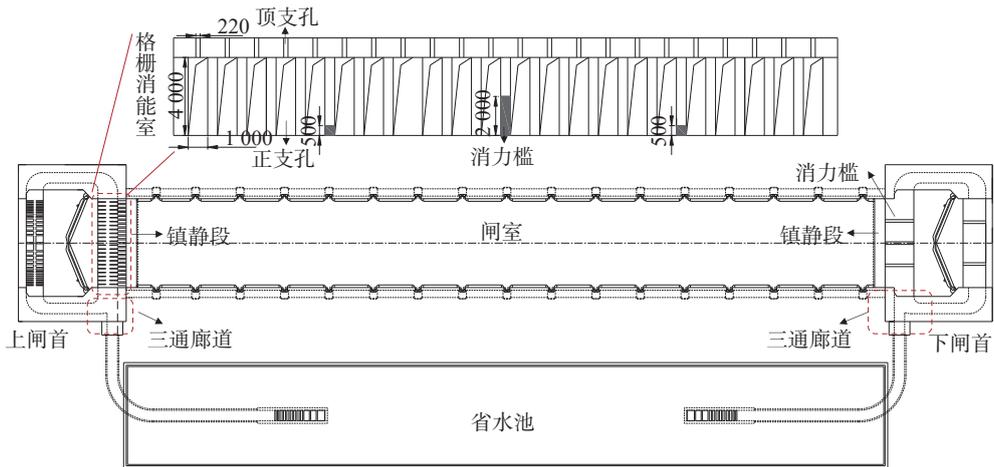


图1 互通式输水系统平面布置(单位:mm)

Fig. 1 Plan layout of the interconnected water delivery system (unit: mm)

1.2 省水池独立式输水系统

省水池独立式输水系统平面布置如图2所示,省水系统采用闸底中段2个横支廊道侧支孔出水布置。横支廊道尺寸为5.2 m×3.5 m(宽×高),两侧各设9个对称布置的出水支孔(长0.5 m,高1.8 m),出水支孔断面总面积约占横支廊道断面面积90%,支孔外设明沟进行消能。省水池底部中上、下游两侧分别布置输水廊道,与伸出闸室的渐缩横支廊道相连,阀门段廊道尺寸为4.0 m×3.5 m(宽×高)。省水池出流通过进水口顶部消能格栅进行消能,确保闸室与省水池互相输水时均匀出流。

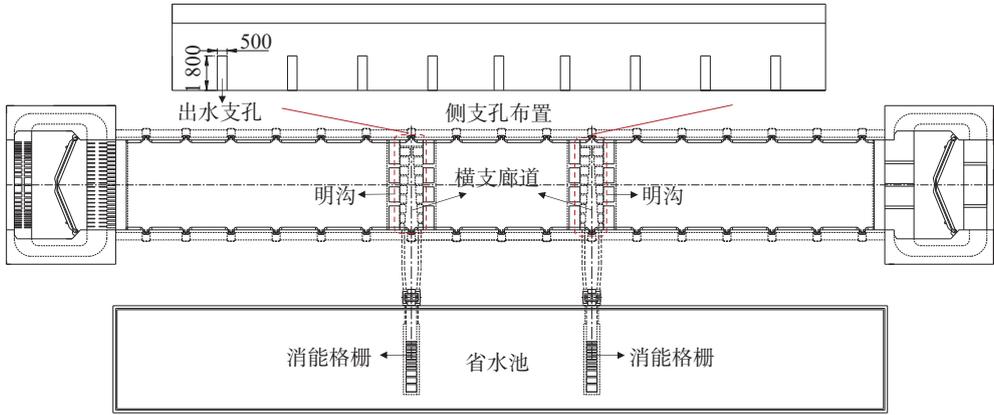


图2 独立式输水系统平面布置(单位: mm)

Fig. 2 Plan layout of the independent water delivery system (unit: mm)

2 数学模型

2.1 控制方程

本文运用计算流体动力学(CFD)软件模拟省水系统向闸室输水过程, 计算时采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型^[13], 运用有限容积法离散偏微分方程。流场数值计算采用分离式压力修正法中 PISO 算法, 固壁边界采用壁面函数法, 自由水面采用水气两项流的 VOF 模型。

连续方程和动量方程分别为:

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_{rmt}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

式中: x_i 、 u_i 、 g_i 分别为坐标位置、速度、重力加速度在 i 方向上的分量, $i, j = 1, 2, 3$; t 为时间; ρ 、 p 、 v 分别为体积分数加权平均密度、修正压力、分子黏性系数; v_{rmt} 为紊流黏性系数, $v_{rmt} = \rho C_v k^2 / \varepsilon$, $C_v = 0.0845$, k 、 ε 为紊动能、紊动耗散率。

紊动能和紊动耗散率方程分别为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_{rmt} (v + v_{rmt}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_{rmt} - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon (v + v_{rmt}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon}{k} G_{rmt} - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: G_{rmt} 表示流速梯度引起的紊动能, $G_{rmt} = u_{rmt} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ (补充说明该式中符号 u_t 的含义? ? ?); $C_{1\varepsilon}^*$ 为系数, $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \eta(1 - \eta/\eta_0) / (1 + \beta\eta^3)$, 其中 $\eta = k/\varepsilon \sqrt{2E_{ij} \cdot E_{ij}}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, 其他参数及其取值为: $\alpha_{rmt} = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$ 。

2.2 网格剖分及边界条件

为兼顾计算精度和时间, 将模型在消能工一定范围的复杂部分采用四面体网格, 闸室、输水廊道、省水池均采用六面体结构化网格, 并将复杂段网格加密。省水池互通式船闸的计算区域包括闸室、上下闸首、省水池, 尺度为 $342.2 \text{ m} \times 108.8 \text{ m} \times 17.0 \text{ m}$ (长×宽×高), 在上下闸首消能处、闸阀门、省水池进口处加密网格, 网格单元总数约 820 万个, 船闸数值模型及局部网格加密如图 3 所示。为减小计算量, 省水池独立式船

闸仅对闸室、上下闸首、中部省水廊道进行建模,未建立省水池,模型尺度为 $335.0\text{ m} \times 58.0\text{ m} \times 19.3\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),在明沟消能处加密网格,网格单元总数约 530 万个,船闸模型及局部网格加密见图 4。建模过程中,设定 X 为闸室长度方向, $X=0$ 为镇静段后的闸室起点; Y 为闸室高度方向, $Y=0$ 为闸室底高程; Z 为闸室宽度方向, $Z=0$ 为闸宽中心。

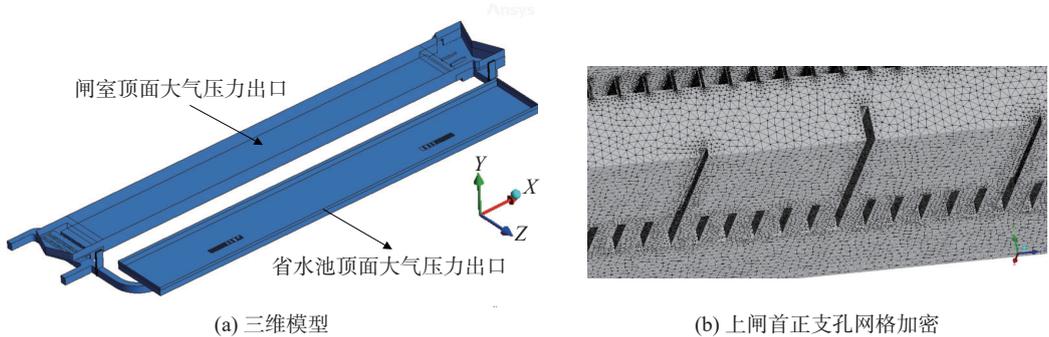


图 3 互通式布置船闸三维模型及网格剖分

Fig. 3 Three-dimensional model and grid division of the ship lock under the interconnected configuration

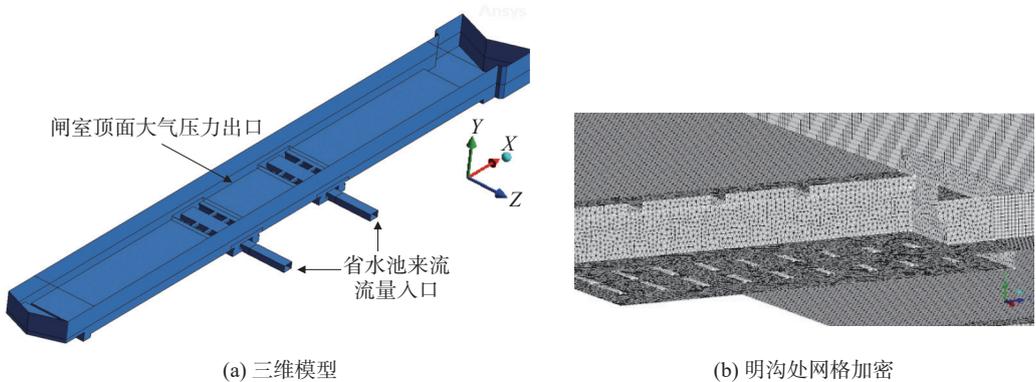


图 4 独立式布置船闸三维模型及网格剖分

Fig. 4 Three-dimensional model and grid division of the ship lock under the independent configuration

两种布置型式下闸室均与大气连通,故闸室顶部采用大气压力出口边界。对于互通式布置,省水池顶部亦为大气出口边界,阀门启闭采用动网格边界处理。对于独立式布置,廊道入口采用质量流量入口边界。为保证两种布置型式的输水过程具有可比性,设置两个模型输水流量系数相同,即独立式模型的廊道入口流量分布与时程数据与互通式相同。其余边界均采用壁面边界条件,粗糙高度设置为 0.003 m 。

2.3 数学模型验证

采用几何比尺为 $1:30$ 的船闸整体水工物理模型试验结果^[14]对三维紊流数学模型的准确性进行验证。以省水池互通式布置模型为例,闸室输水过程中闸室中心点水位与物模实测值比较如图 5 所示。可见,省水运行第一阶段即省水池向闸室输水过程中,二者的闸室水位变化曲线吻合良好,水位最大误差为 2.73% ,误差较小,说明本文所建立的三维数学模型具有可靠的模拟精度。

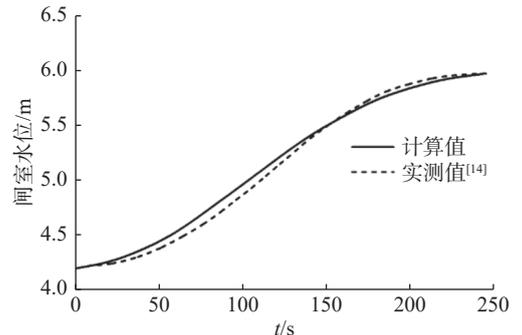


图 5 闸室水位过程线对比(省水运行第一阶段)

Fig. 5 Comparison of lock chamber water level curves (first phase of water-saving operation)

3 结果与分析

船闸省水运行存在两阶段输水过程, 第一阶段为省水池向闸室输水, 第二阶段为上游向闸室输水。金家堰船闸省水运行最不利工况中, 第一阶段闸室与省水池水位差 3.6 m, 高于第二阶段闸室与上游水位差, 且第一阶段闸室水位低, 易产生较大波浪, 水流条件恶劣。因此, 限于篇幅, 本文主要分析第一阶段省水池向闸室输水过程中闸室水力特性。

试算 3 种省水池阀门开启时间(150 s、120 s、90 s), 发现闸室水流条件随着输水时间缩短而显著恶化, 为兼顾输水时间和水流条件, 设计省水池阀门开启时间 120 s, 停止时间 35 s, 关闭时间 90 s。由于本文重点研究两种省水系统布置型式的差异性, 故仅选取最大流量($t = 120$ s)作为典型时刻进行流速、消能特性分析, 而泊稳最不利时刻并非流量最大时刻, 故泊稳条件分析时考虑水面波动时程变化特性。

3.1 流速分布

3.1.1 闸室水平剖面 图 6 展示了最大流量时刻, 两种省水系统布置型式下闸室水面高度处水平剖面流速分布。可以看出, 互通式省水系统中上下闸首来流在闸室内分布极不均匀, 而独立式系统中来流沿闸室纵轴线及中心横轴线均呈现一定的对称性, 且紊动区流速远低于互通式。

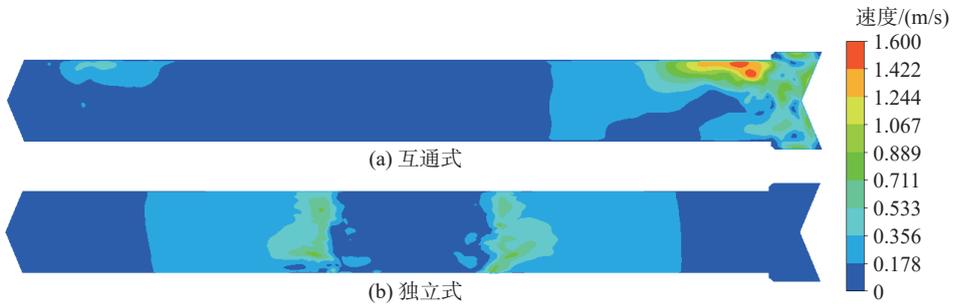


图 6 闸室水平剖面流场分布

Fig. 6 Horizontal sectional flow field distribution in the lock chamber

由于省水池在闸室一侧布置, 互通式系统输水过程中, 水流由省水廊道单边输入消能室, 沿闸室宽度方向射向省水池对侧闸墙, 导致流场沿闸室纵轴线不对称, 省水池对侧水体紊动明显。此外, 下闸首进水口仅设置了 3 道消力槛, 来流未经充分消能便强制改变方向, 导致省水池对侧下闸首区域水体剧烈紊动, 表面流速大, 也使得流场沿闸室横轴线不对称。独立式布置时, 来流由两根廊道向闸室中部涌入, 闸室中部靠近上下闸首的明沟区域水体紊动明显, 上游、下游及廊道中间闸室段水体流速较小。

3.1.2 闸室纵剖面 3 个典型闸室纵剖面的水体表面流速分布如图 7 所示, $Z = -17$ m/0 m/17 m 分别为省水池对侧闸墙、闸室中心、省水池侧闸墙位置。可以发现, 纵剖面流速分布规律与上述水平剖面流场分布规律类似。互通式布置时, 闸室中部范围内($X = 80 \sim 200$ m)流速较低, 且省水池对侧水体流速显著高于省水池侧, 由于下闸首水体紊动剧烈, $X = 271$ m 处流速最大, 达 1.50 m/s。独立式布置时, 表面流速沿闸室中心横轴近似对称, 上下闸首及中部左右各 20 m 处流速较低, 明沟附近出现流速峰值(0.57 m/s)。

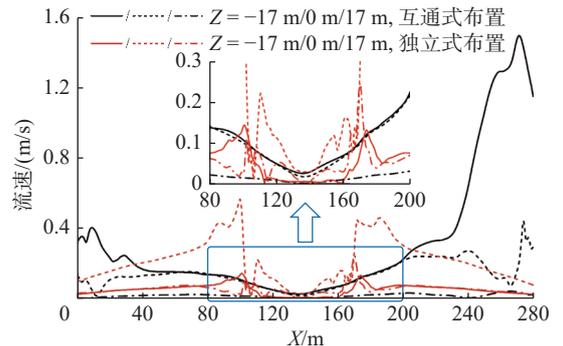


图 7 闸室纵剖面水体表面流速

Fig. 7 Surface flow velocity along the longitudinal section of the lock chamber

为进一步量化闸室水体流速分布均匀程度,采用陈明等^[15]提出的闸室横断面上流速分布均匀度(m)进行分析。计算公式为:

$$m = E_{\min}/E = \frac{1}{2}\rho \int_{A_c} \bar{v}^3 dS \Big/ \frac{1}{2}\rho \int_{A_c} v^3 dS = \omega \bar{v}^3 \Big/ \int_{A_c} v^3 dS \quad (5)$$

式中: E_{\min} 为最小断面剩余动能; E 为断面剩余动能; ρ 为流体密度; A_c 为闸室横断面; ω 为闸室横断面面积; \bar{v} 为断面平均流速; v 为水流流速。

图 8 展示了 m 沿闸室长度方向的变化规律, m 值范围为 0~1, m 值越大意味着断面流速分布越均匀。

互通式布置时,上下闸首附近 m 值较低,小于 0.40; 闸室中上部范围 m 值较高,约为 0.80,这与闸室水体表面流速分布规律一致。值得注意的是,闸室中心横轴线处 m 值突然降至 0.41,使 m 值沿闸室长度呈“M”形,与上述闸室中部水体表面流速低的现象不一致,这是因为上下游水体向中部推进过程中波能叠加导致水体紊乱。因此,有必要在流场、流速分析的基础上计算流速分布均匀度,以充分了

解闸室水流条件。独立式布置时,靠近上下闸首 80 m 范围内 m 值均较高(0.85~0.97),明沟处流速极不均匀, m 值最小为 0.07,均匀度曲线整体呈“W”形。尽管这两种布置型式下闸室横断面流速均呈现一定的不均匀性,但独立式布置下 m 均值为 0.70,高于互通式(0.59),现有的布置条件下,独立式优于互通式。

3.2 消能特性

3.2.1 出水支孔流速分布 两种布置型式对应的消能工特征水平剖面流场如图 9 所示,其中互通式上闸首选取 $X=10.8\sim 5.0$ m 范围,正支孔中心 $Y=-1.0$ m; 下闸首选取 $X=290.2\sim 306.0$ m 范围,由于无出水孔,选取闸室底处($Y=0$)水平剖面; 独立式则选取两个廊道范围($X=104.9\sim 123.5$ m, $166.5\sim 185.1$ m),侧支孔中心 $Y=-3.6$ m。对比发现,互通式消能工附近流场较独立式布置不均匀得多,且互通式上下闸首流速分布也有显著差异。

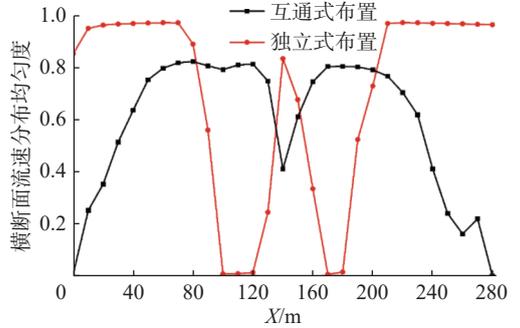


图 8 闸室横断面流速分布均匀度

Fig. 8 Flow velocity uniformity across the lock chamber cross-section

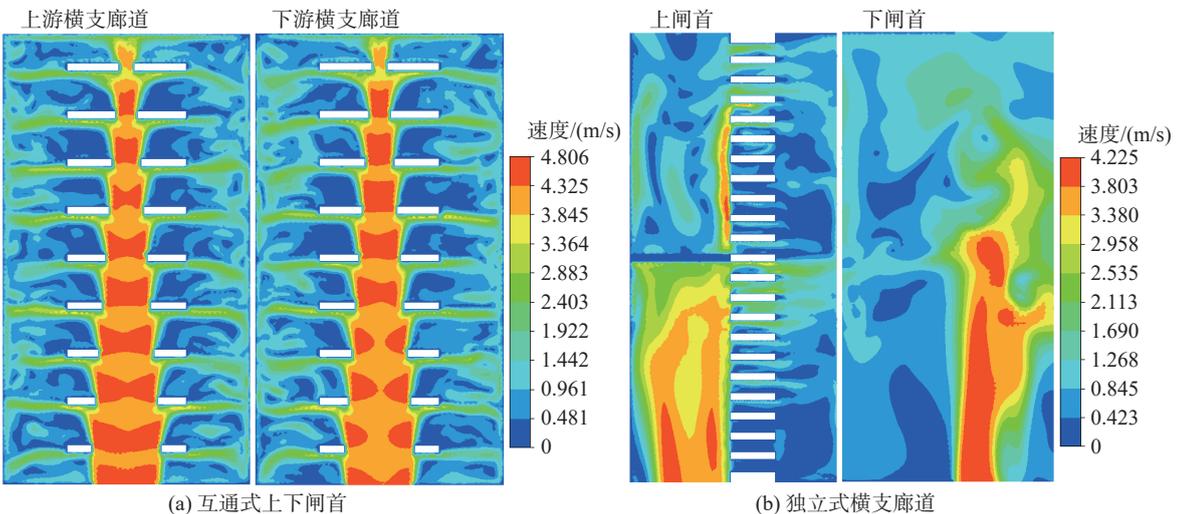


图 9 消能工处特征水平剖面流速分布

Fig. 9 Horizontal sectional flow velocity distribution at the energy dissipation structures

互通式布置时,上闸首经过 120 s 消力槛、格栅、消能室墙壁约束作用消能,底部流速分布仍呈现一定的不均匀性。由于中间消力槛(高 2 m)有效阻挡了来流冲击并使得部分水流转向,尽管省水池侧的消能室区域流速较高,但分布相对均匀。跃过中间消力槛的部分水流撞击消能室墙壁并产生回流,省水池对侧的消能室区域流态紊乱。下闸首来流在前两道消力槛作用下斜向射水,在省水池对侧的闸墙约束下产生回流,形成明显漩涡,较上闸首流场更不均匀。为使下闸首来流平顺地进入闸室,可将现有的消力槛中间开孔以改善消能效果,中间槛改为回字型,两侧槛改为锯齿型。

独立式布置时,横支廊道过水面积逐步收缩,流速沿闸室宽度方向分布均匀,各支孔附近流态相近。水流经支孔出流后,撞击明沟壁产生回流,形成漩涡,明沟中部水流紊乱,这与计算得到的极小 m 值相吻合。

3.2.2 支孔流量分配 图 10(a)、(b)分别展示了互通式上闸首格栅室正支孔和顶支孔、独立式靠近上游横支廊道侧支孔的流量分布,也标示了支孔编号。可以看出,最大流量时刻,互通式上闸首格栅孔流量分布较不均匀,而独立式的横支廊道两侧支孔流量相对均匀。

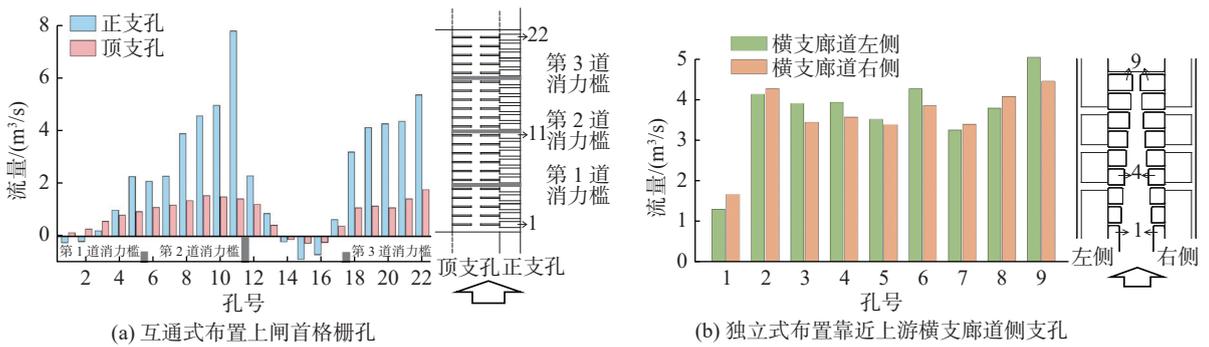


图 10 出水支孔流量对比

Fig. 10 Comparison of discharge flow rates from outlet orifices

互通式布置时,从水流入口至第 2 道消力槛,支孔流量逐渐增加,第 2、3 道消力槛之间各支孔流量分布极不均匀,甚至出现负流量,第 3 道消力槛与省水池对侧闸墙间支孔流量增加且分布均匀。由于水流由省水池单边输入消能室,缺少两侧对称输水时存在的对冲消能,出流情况较差。5、6 号孔之间的第 1 道消力槛高度仅 0.5 m,对流量调整有限,故 6 号孔流量稍低于 5 号孔。第 2 道消力槛高度为 2.0 m,有效阻挡水流,使得大部分来流在入口和第 2 道消力槛之间支孔出流,这也导致底流被挑向上部,故虽然 11 号正支孔流量远大于 12 号,但顶支孔流量差异不大。来流经过第 2 道消力槛射向墙壁并产生回流,充分消能并使水流转变方向,故 18~22 号支孔出流量大且较为均匀。由于回流水体流速较低,故经过第 3 道消力槛(高 0.5 m)后支孔出流显著降低,又因闸墙附近的漩涡,14~16 号支孔出现负流量。为缓解上闸首出流不均匀程度,一方面可增加入口处第 1 道消力槛高度,上挑水流并通过撞击消能扩散;另一方面可降低顶部出水支孔数量和面积,从而调整正支孔和顶支孔流量差值,使断面流速分布趋于均匀。

独立式布置时,横支廊道两侧的出水支孔流量差异不大,2~8 号出水支孔流量为 3.4~4.2 m³/s,分流稳定。1 号支孔由于靠近廊道出水口,横向流速大,故侧向支孔出流量稍小于其他支孔。在现有的布置条件下,相较于互通式布置,独立式采用的横支廊道侧支孔出水分流效果优异,这也是闸室流场分布更加均匀的原因。

3.3 船舶泊稳条件

3.3.1 水面波动 两种布置型式下,不同输水时刻闸室自由水面($Z=0$)的变化见图 11。可以看出,在现有的布置条件下,互通式闸室水面随着输水时间的波动特征与独立式显著不同,且波动幅度高于独立式。

省水池向闸室输水过程中产生的非恒定流将在闸室内形成长波运动,波高很小,当波高很小且水流速度为 0 时,波浪传递速度 $c \approx \sqrt{gh}$ ^[16],故本研究中初始波速约 6.4 m/s。互通式布置时,上下闸首同时产生波浪向对侧推进,21.8 s 时到达中部并叠加,此时上下闸首理论波高 $z = Q_{(21.8s)}/(cb)$ (b 为闸室水面宽度 (m), c 为波浪传递速度 (m/s)),而中部波高为 0 m,与图 11 中 20 s 时刻水面线形状一致。上闸首波浪到达下闸

首闸门后, 以与初始波浪波形相同的反射波向上闸首推进, 并与初始波、下闸首波浪的反射波叠加, 随后继续反射叠加, 引起闸室水面随输水时间波动。在 140 s 时波浪叠加, 且大流量提供了大波高, 导致水面显著波动, 而后随着流量逐渐减小, 水深增加, 波高大幅降低, 水面趋于稳定。

独立式布置的 2 根输水廊道分别位于 $X = 114.2$ m/175.8 m 处, 产生的波浪由中部向上下闸首推进, 在 17.8 s 到达闸首闸门处并反射, 此时输水廊道处理论波高 $z = Q_{(17.8s)}/(cb)$, 上下闸首波高为 0, 与图 11 中 20 s 时刻水面线波动趋势相符。由于波浪推进距离短于互通式, 故初始波高小于互通式, 且明沟区域水深较大, 可有效衰减波浪, 因此独立式闸室水面波动小于互通式。然而独立式布置下充水初期产生的水面波动仍有减缓的可能, 若将省水廊道分别布置在闸室长度的 1/4 和 3/4 处, 那么波浪仅需 10.9 s 到达闸门并反射, 此时输水廊道处波高 $z = Q_{(10.9s)}/(cb)$, 比现有布置条件下初始波高小, 引起的水面波动也将有所降低。

3.3.2 水面纵向比降 考虑到 1 000 t 级标准船型船长为 60 m, 闸室有效长度为 280 m, 故将闸室从上闸首至下闸首分为 4 段, 分别计算水面纵向比降。图 12 展示了 4 个闸室段水面纵向比降随时间变化。由图 12 可知, 互通式布置下闸室水面纵向比降高于独立式。

对于互通式布置, 由于充水初期水面波动明显, 闸室各段的水面比降均较高 (0.58% ~ 0.82%), 又由于 140 s 时波动剧烈, 首尾两段闸室纵向比降达分别达到 0.89%、1.45%。此外, 闸室第 4 段, 即下闸首附近比降显著高于其他段, 这是由于下闸首采用简单消能工, 消能作用差, 导致水体紊动剧烈、水面起伏大。对于独立式布置, 仅充水初期纵向比降较高, 随后随时间降低, 由于水体波动导致曲线略有振荡。在现有的布置条件下, 采用独立式布置的闸室船舶泊稳条件显著优于互通式。

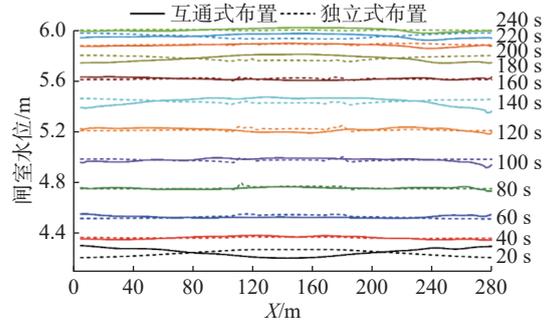
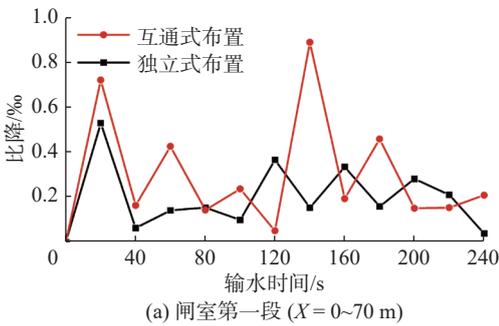
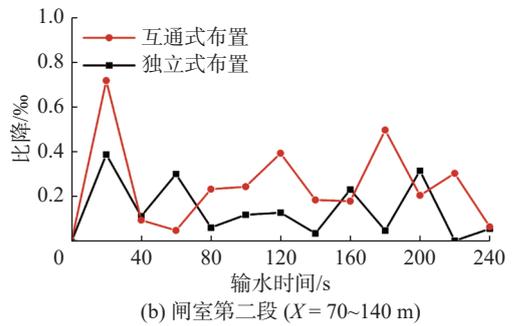


图 11 闸室水面线

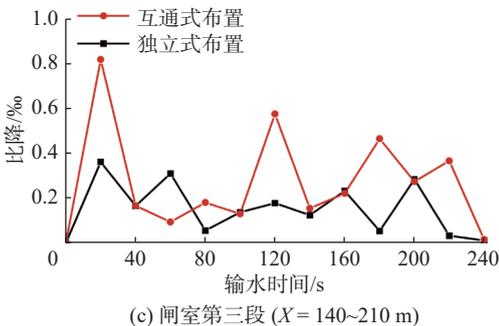
Fig. 11 Water surface profile of the lock chamber



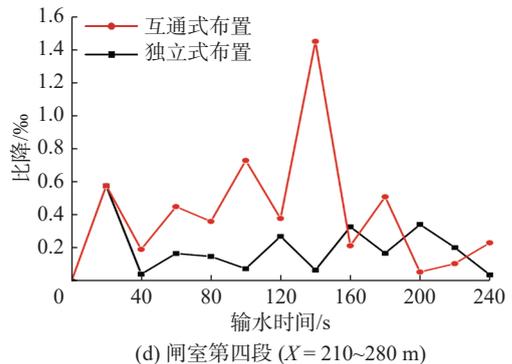
(a) 闸室第一段 ($X = 0 \sim 70$ m)



(b) 闸室第二段 ($X = 70 \sim 140$ m)



(c) 闸室第三段 ($X = 140 \sim 210$ m)



(d) 闸室第四段 ($X = 210 \sim 280$ m)

图 12 闸室水面纵向比降变化过程

Fig. 12 Variation process of longitudinal water surface slope in the lock chamber

4 结 语

本文以金家堰船闸为例,对互通式与独立式省水系统布置方案下省水池向闸室输水过程进行数值模拟,分析现有的布置条件下闸室水体流场分布、消能效果、水面波动等差异及其成因,主要结论如下:

(1)互通式布置时,闸室水体流场分布不均匀,最大流量时刻,省水池对侧且靠近下闸首的水体紊动剧烈,横断面流速均匀度呈“M”形分布。独立式布置时,闸室流场分布对称性较强,横断面流速均匀度呈“W”形,流速及其不均匀度均小于互通式。

(2)由于水流由省水池单边输入闸室,最大流量时刻,互通式上闸首格栅正支孔、顶支孔出流均匀性差,靠近省水池一侧的支孔分流较多;下闸首消能效果差,水体出现显著漩涡。独立式布置采用横支廊道侧支孔出水明沟消能,各出水支孔流态相近,分流较均匀。

(3)互通式布置时,上下闸首产生的波浪向对侧推进,不断叠加、反射,在140 s出现显著波动,导致纵向比降达1.45%。独立式布置的水面波动和纵向比降均较小,充水初期出现的较大波动可通过将省水廊道分别布置在闸室长度1/4、3/4处加以改善。

(4)在现有的布置条件下,独立式省水系统的闸室水流条件较互通式更优。如果从经济性方面选取互通式布置,那么可将现有下闸首的消力槛中间开孔以改善消能效果,提高上闸首格栅室内第1道消力槛高度或减小顶支孔面积和数量以调整出流均匀性。

参 考 文 献:

- [1] 陈明,吕森鹏,刘原,等.省水船闸输水系统水力学研究综述[J].*水运工程*,2021(9):106-112,119.(CHEN Ming, LÜ Senpeng, LIU Yuan, et al. Review of hydraulics investigations of filling and emptying system in ship locks with water-saving basins[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021(9): 106-112, 119. (in Chinese))
- [2] 吴澎,曹凤帅.省水船闸建设技术和进展[C]//中国工程院.中国科技论坛:水安全与水利水电可持续发展.北京:高等教育出版社,2014:188-192.(WU Peng, CAO Fengshuai. Technology and progress in the construction of provincial locks[C]// Chinese Academy of Engineering. China science and technology forum: water security and sustainable development of hydropower. Beijing: Higher Education Press, 2014: 188-192. (in Chinese))
- [3] 吴波,李文轩,傅陆志丹,等.双线互输水船闸剩余水头优化研究[J].*水利水运工程学报*,2018(4):61-67.(WU Bo, LI Wenxuan, FU Luzhidan, et al. Optimization study of residual head of mutual water filling and emptying double-line lock[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(4): 61-67. (in Chinese))
- [4] 杨忠超,陈明栋,杨斌.乌江银盘省水船闸整体水力学模型试验研究[J].*水利水运工程学报*,2010(2):61-66.(YANG Zhongchao, CHEN Mingdong, YANG Bin. Experimental studies on the overall hydraulic model of Yingpan saving basin ship lock in Wujiang River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(2): 61-66. (in Chinese))
- [5] CALVO GOBBETTI L E. Design of the filling and emptying system of the new Panama Canal locks[J]. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2013, 1(1): 28-38.
- [6] 陶园园,麦建清,陈明栋,等.绣江复航工程白马枢纽省水船闸三维水力特性数值模拟[J].*水运工程*,2018(3):112-117,123.(TAO Yuanyuan, MAI Jianqing, CHEN Mingdong, et al. Three-dimension numerical simulation of hydraulic characteristics of Baima Junction with water-saving lock for Xiujiang River navigation project[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018(3): 112-117,123. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国交通部.船闸输水系统设计规范:JTJ 306—2001[S].北京:人民交通出版社,2002.(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design code for filling and emptying system of shiplocks: JTJ 306—2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 陈莹颖,李中华,许铎.小清河水牛韩省水船闸输水系统布置及水力计算[J].*水运工程*,2020(1):63-69,102.(CHEN Yingying, LI Zhonghua, XU Duo. Layout and hydraulic calculation of filling and emptying system for Shuiniuhan water-saving

- ship lock of Xiaoqing River[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2020(1): 63-69, 102. (in Chinese))
- [9] 何良德, 戈国庆, 杨晓松, 等. 金家堰省水船闸互通式短廊道输水系统计算[J]. *水运工程*, 2021(2): 64-70, 88. (HE Liangde, GE Guoqing, YANG Xiaosong, et al. Calculation of filling and emptying system with interconnected short culvert for Jinjiayan water-saving lock[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021(2): 64-70, 88. (in Chinese))
- [10] 钱黎辉, 江涛. 小清河王道船闸省水工程措施[J]. *水运工程*, 2022(Suppl1): 149-154. (QIAN Lihui, JIANG Tao. Water saving engineering measures of Wangdao ship lock in the Xiaoqing River[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(Suppl1): 149-154. (in Chinese))
- [11] 罗慧婧, 严秀俊, 李中华. 贵港二线船闸输水系统水力特性原型观测[J]. *水利水运工程学报*, 2022(4): 55-61. (LUO Huijing, YAN Xiujun, LI Zhonghua. Prototype observation of hydraulic characteristics of filling and emptying system of Guigang Second Line Ship Lock[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(4): 55-61. (in Chinese))
- [12] 王彪, 王晓刚, 安建峰, 等. 船闸末级闸首超长输水廊道泄水水力特性数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2021(4): 92-98. (WANG Biao, WANG Xiaogang, AN Jianfeng, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of the ultra-long water conveyance corridor at the head of the last-step ship lock chamber[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(4): 92-98. (in Chinese))
- [13] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (REN Yuxin, CHEN Haixin. Fundamentals of computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese))
- [14] 胡亚安, 李中华, 郭超, 等. 小清河区水船闸水力学关键问题研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2018. (HU Ya'an, LI Zhonghua, GUO Chao, et al. Research on the hydraulic key issues for the water-saving locks in Xiaoqing River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2018. (in Chinese))
- [15] 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 Ming, LIANG Yingchen, XUAN Guoxiang, et al. Numerical simulation for dynamic characteristics of 3D flow during shiplock filling process[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2013, 28(5): 559-565. (in Chinese))
- [16] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (WANG Zuogao. Ship lock design[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1992. (in Chinese))

Comparison of flow conditions in the lock chambers of interconnected and independent water-saving ship locks

ZHANG Yihao¹, WANG Shuguang¹, DONG Siyuan¹, YE Zihao², YU Xiaotong²

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan 250101, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The selection and design of water-saving systems are critical challenges in water-saving ship lock operations. However, the hydraulic characteristics of lock chambers in interconnected and independent water-saving system configurations remain unclear. A three-dimensional numerical model of the complete water delivery system for the Jinjia Weir water-saving ship lock was established for both configurations. The study analyzed flow velocity distribution, energy dissipation, and ship berthing stability during water transfer from the water-saving basin to the lock chamber. Results indicate that under the interconnected configuration, at maximum flow rates, uneven outflow occurs at the grille chamber near the upper head gate, and significant vortices emerge near the energy dissipation sill at the lower head gate, leading to uneven spatial flow velocity distribution. Turbulence is pronounced on the side opposite the water-saving basin near the lower head gate, and long-wave movements generated during the water transfer process amplify in the middle of the lock chamber, resulting in a significant longitudinal water surface slope. Under the independent configuration, the flow field distribution in the lock chamber exhibits strong symmetry, uniform outflow from lateral culvert side orifices, and stable water surfaces, offering better berthing conditions than the interconnected configuration.

Under current conditions, the independent configuration demonstrates superior hydraulic performance. If the interconnected configuration is adopted, optimization of energy dissipation structures at the head gates is required.

Key words: water-saving ship lock; interconnected water-saving system; orifice flow rate; flow conditions