闸室初始水深及侧支孔尺寸对闸室水流条件影响研究*

董　杨[1]，刘　浩[2,3]，何进朝[2,3]，邱周华[2]，严春浩[2]

（1. 重庆交通大学 河海学院，重庆 400074；2. 重庆交通大学，重庆西南水运工程科学研究所，重庆 400016；
3. 重庆西科水运工程咨询有限公司，重庆 402247）

摘要：针对闸墙长廊道侧支孔输水系统船闸因支孔流量分配不均从而影响闸室水流条件的问题，依托国内现有船闸进行了闸室初始水深与侧支孔尺寸对闸室水流条件耦合影响的研究。采用三维数学模型，分别讨论了闸室初始水深与侧支孔尺寸对船舶最大系缆力、闸室自由液面波动以及液面平均流速 3 个闸室水流条件评价指标的影响规律。数值研究结果表明，增加闸室初始水深以及减小侧支孔尺寸均可有效改善闸室水流条件。其中，提高闸室初始水深对于优化水流条件的影响优于降低侧支孔尺寸，不同侧支孔尺寸下闸室初始水深 $h=8.5$ m 相较于 $h=5.5$ m 对闸室系缆力优化效率为 34%～51%，闸室液面水位波动与自由表面流速降低，，低侧支孔尺寸相较于高侧支孔尺寸的各项参数指标均有所改善。研究成果可为该类输水系统船闸的设计优化提供理论指导和技术支撑。

关键词：船闸；数值模拟；初始水深；侧支孔尺寸；水流条件

中图分类号：U641.1；TV662　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)09-0176-12

Effects of initial water depth and lateral branch orifice sizes on flow conditions in lock chamber

DONG Yang[1], LIU Hao[2,3], HE Jinchao[2,3], QIU Zhouhua[2], YAN Chunhao[2]

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Southwestern Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;
3. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402274, China)

Abstract: Aiming at the problem that uneven flow distribution of lateral branch orifices deteriorates the flow conditions inside the lock chamber of ship locks adopting long-wall corridor lateral branch orifice filling and emptying systems, this paper investigates the coupled effects of lock chamber initial water depth and lateral branch orifice sizes on lock chamber flow characteristics based on existing domestic ship locks. A three-dimensional numerical model is adopted to investigate the effects of initial water depth and lateral branch orifice sizes on three evaluation indices for flow conditions in lock chambers, namely the maximum ship mooring force, free surface fluctuation and average surface flow velocity. Numerical results show that both increasing the initial water depth and reducing the side orifice sizes effectively improve the flow conditions inside the lock chamber. The optimization effect of increasing the initial water depth is superior to that of decreasing lateral branch orifice sizes. Under various lateral branch orifice sizes, lock mooring force optimization efficiency reaches 34%−51% at initial depth $h=8.5$ m versus $h=5.5$ m, with milder water fluctuation and surface velocity. Smaller orifices yield better hydraulic indices. The research findings can provide theoretical guidance and technical support for the optimized design of ship locks equipped with this type of filling and emptying system.

Keywords: ship lock; numerical simulation; initial water depth; lateral branch orifice size; flow conditions

收稿日期：2026-02-03　　**录用日期：**2026-03-11

***基金项目：**国家重点研发计划项目(2022YFC3800505)；重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2023TIAD-KPX0073，CSTB2024TIAD-KPX0064)；重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202400706，KJQN202500762)

作者简介：董杨(2000—)，男，硕士研究生，从事计算水力学方向的研究。

通信作者：刘浩(1993—)，男，博士，高级工程师，硕士生导师，研究方向为计算流体力学。E-mail:liuh@cqjtu.edu.cn

水运工程

闸墙长廊道侧支孔输水系统属于分散式输水系统，因其可弱化水流惯性影响，有效改善闸室水流均匀性，降低船舶系缆力，提升船舶停泊安全，为我国船闸输水系统的首选布置形式。学者们依据已有规范，采用物理模型试验研究该输水系统布置形式在不同实际工程中的应用，结果表明，船闸各项输水水力特征值均达到预期设计目标，验证了输水系统布置的合理性[1-4]。相关理论研究中，彭永勤等[5]采用计算流体动力学（computational fluid dynamics，CFD）软件 fluent 建立三维数学模型，分析闸室流场垂向演变规律，发现侧支孔数量增加有利于船体停泊。齐春风等[6]通过数值模拟研究表明，闸室输水过程中各支孔流量及支孔流量分配呈先增大后减小的趋势。孙倩等[7]采用动网格与用户自定义函数（user-defined function，UDF）模拟平面输水阀门开启过程得到侧支孔的流速、流量、射流长度随输水时间呈先增大后减小的趋势，上下游支孔间的流速差异呈现先减小后增大的趋势。然而，随着闸室水头的升高，受水流惯性影响，各支孔存在出流不均的问题，国内外学者开始针对支孔出流流量的沿程分配问题进行了深入研究。Sforza 等[8]进行了矩形孔口发出的 3D 壁面射流实验，将壁面射流分为射流核心区、特征衰减区和径向衰减区。Stockstill[9]将各支孔作为一个离散单位，开发了一套计算廊道与支孔出流流量的沿程分布水力计算程序，用以研究支孔射流情况。黎贤访等[10-11]通过研究二维壁面射流，提出侧支孔射流概念，建立侧支孔射流物理模型，运用粒子图像测速技术（particle image velocimetry，PIV）探究侧支孔射流垂向中轴面的流速分布，得出沿射流中心线的流速分布公式。针对关键设计参数优化方面，研究多集中于调整进水口与侧支孔尺寸、布设消力槛及调整阀门开启方式[12-15]。

JTS 305—2025《船闸总体设计规范》规定，闸室初始水深（最小水深）不应小于设计船型满载吃水的 1.6 倍[16]。本文数值模型依托原型船闸构建，该船闸初始水深 5.5 m，设计船舶满载吃水 3.4 m，满足规范要求。在改变闸室初始水深时，应保证船闸上下游水位不变，通过降低船闸底板高程的方式进行调节。初始水深可以利用船底富余水深消能，但初始水深提高将导致相应工程量的增加，因此合理调节初始水深十分必要，不应简单依据规范中有关闸室最小水深与最小门槛水深关系的描述。

本文运用三维数值模拟软件建立三维模型，探究闸室初始水深及侧支孔尺寸变化对闸室水流条件的影响规律，并指出闸室初始水深及侧支孔尺寸的推荐范围，以期为工程设计优化提供科学依据。

1　数学模型理论及方法

1.1　三维紊流控制方程

船闸输水过程中处于非恒定流状态，需要在离散化的三维空间和时间域内对复杂边界流动的物理场进行详细描述，因此本文采用 CFD 软件 FlOW-3D 进行数值模拟，计算假设流体为不可压缩牛顿流体，流动状态为三维非定常湍流。连续性方程和动量守恒方程如下：

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\boldsymbol{u} - \rho\nabla(\overline{u'u'}) + \boldsymbol{F}_{\mathrm{b}} \tag{2}$$

式中：∇为哈密顿算子；$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量；t 为流动时程；p 为压力；μ 为动力黏度；ρ 为流体密度；u'为湍流速度波动；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{b}}$ 为重力和合外力。

湍流封闭问题采用重整化群（renormalization group，RNG）k-ε 模型求解，该模型通过引入应变率修正项 R 能够更准确地模拟高剪切率流动。k 和 ε 的运输方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_k\mu_{\mathrm{eff}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_{\mathrm{b}} - \rho\varepsilon - Y_{\mathrm{M}} + S_k \tag{3}$$

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

式中：u_i 为时均速度分量；k 为紊动能；ε 为湍动

能耗散率；x_i、x_j 为坐标分量；α_k、α_ε 分别为 k 和 ε 对应的普朗特数；G_k、G_b 分别为平均速度梯度和浮力作用紊动能生成项；Y_M 为可压缩流体脉动膨胀耗散修正项；μ_{eff} 为有效黏性系数；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$ 为经验常数，分别取 1.42、1.68 和 0；R_ε 为 *RNG* 应变率修正项；S_k、S_ε 为对应源项。

1.2　模型建立

本文试验以袁河航道笏州船闸为研究对象，笏州船闸实际尺度为 230 m×34 m×5 m(有效长度×宽度×门槛水深)，上游正常蓄水位 37.5 m，下游最低通航水位 30 m，总水头 7.5 m；上游每侧布置 4 个进水孔(高 5 m、宽 4.5 m)，阀门段廊道高 5 m、宽 4.5 m，主廊道高 5 m、宽 5.5 m；闸墙两侧共布置 40 个侧支孔，单侧侧支孔中心间距 8.5 m，对向侧支孔中心间距 4.25 m，左侧首个侧支孔距廊道转弯处 17.00 m，右侧首个侧支孔距廊道转弯处 12.75 m，错孔排布，侧支孔段总长 165.75 m，占闸室有效长度的 72.1%。其中，首段(1#~7#)、中段(8#~13#)、末段(14#~20#)支孔尺寸宽度分别为 1.34、1.22、1.18 m，支孔高度均为 1.1 m，闸室总体布置与闸室侧支孔布置见图 1。

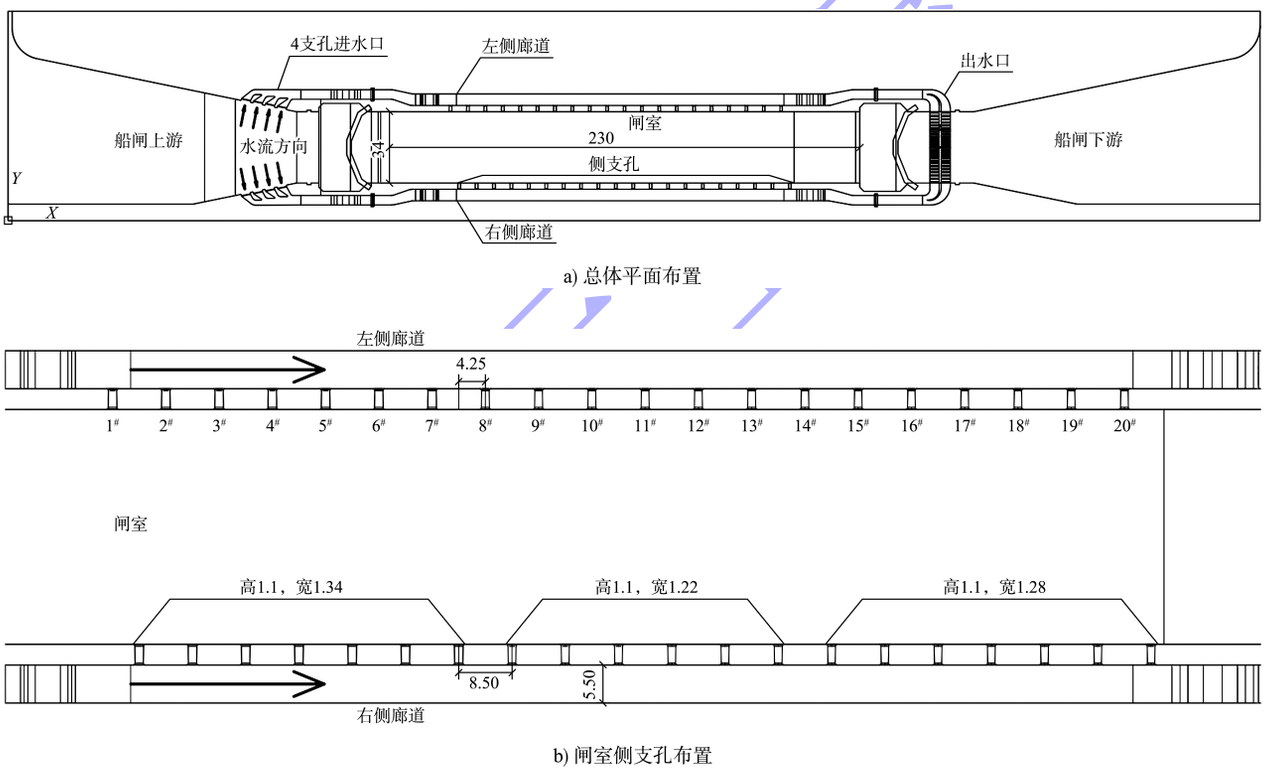


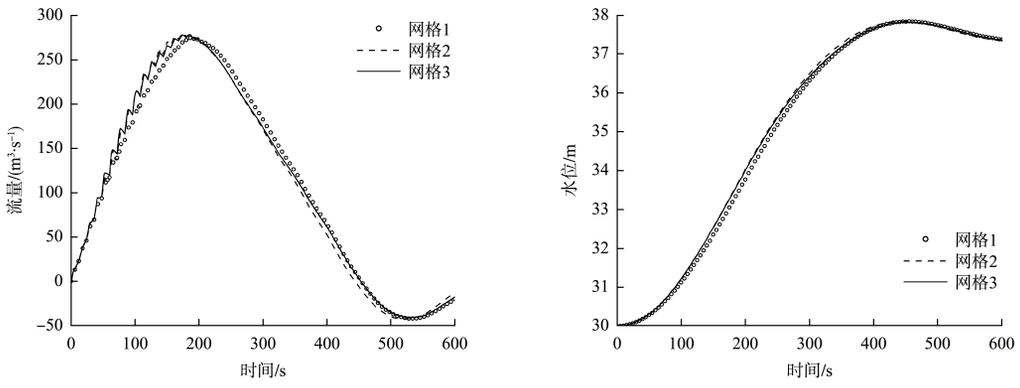
图 1　数学模型示意图(单位：m)

Fig. 1　Schematic diagram of numerical model(unit:m)

数学模型采用矩形网格，计算区域包括上游引航道与闸首部分及整个闸室区域，在廊道及支孔区域进行局部加密。模型采用压力入口边界，固定水位 37.5 m；模型出口(计算域上表面边界)设置为标准大气压边界；船闸廊道、支孔以及闸墙设置为固壁边界条件。

1.3　网格收敛性分析与模型验证

网格质量与密度是影响数值模拟计算结果的关键因素。本文研究采用 3 套网格(网格 1~3)进行网格收敛性分析。3 种网格除网格数不同，其余参数均保持一致。计算结果见图 2 及表 1，可以看出，网格 2、3 工况的水位和流量过程曲线基本重合，网格 3 与网格 2 的峰值流量仅相差 0.42 m^3/s，与网格 1 相差 4.93 m^3/s。但网格 2 的计算时间显著优于网格 3，综合考虑效率和精度，试验拟采用网格 2 作为网格划分方式。



a) 流量　　b) 水位

图 2　网格收敛性分析对比

Fig. 2　Comparison of grid convergence analysis

表 1　网格收敛性分析工况

Tab. 1　Grid convergence analysis cases

工况	船闸整体网格尺寸(*XYZ* 方向)/(m×m×m)	侧支孔区域加密网格尺寸(*XYZ* 方向)/(m×m×m)	网格数量/万个	峰值流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	计算时长
网格 1	0. 50×0. 50×0. 25	0. 25×0. 25×0. 25	887	274. 62	8 h
网格 2	0. 25×0. 50×0. 25	0. 25×0. 25×0. 25	2 058	279. 97	1 d
网格 3	0. 25×0. 25×0. 25	0. 25×0. 25×0. 25	3 548	279. 55	3 d

通过监测船闸输水过程的水位流量过程，结合已有物理模型试验结果，对比阀门匀速开启时间 $t_v = 4$ min 时的水位、流量过程线，见图 3。结果表明，两者水位变化曲线吻合较好；模型与模拟流量最大值分别为 306、285 m^3/s，相差 6. 9%。考虑到物理模型试验存在缩尺效应，因此认为数值模拟结果准确，数值模拟结果可靠。

1. 4　工况布置

本次数模试验共设置 16 组工况，旨在探究闸室初始水深 h 与侧支孔总面积和主廊道面积比值 β 对闸室水流条件的耦合影响，重点分析两种因素耦合作用下闸室水流均匀度的变化规律。试验中侧支孔首段、中段、末段面积比例固定为 1∶0. 92∶0. 88，闸室初始水深在 5. 5～8. 5 m 范围内以 1 m 为间隔取值；β 值在 0. 8～1. 1 范围内以 0. 1 为间隔调整。试验设定阀门匀速开启时长为 4 min，模拟计算时长 600 s，工况布置见表 2。

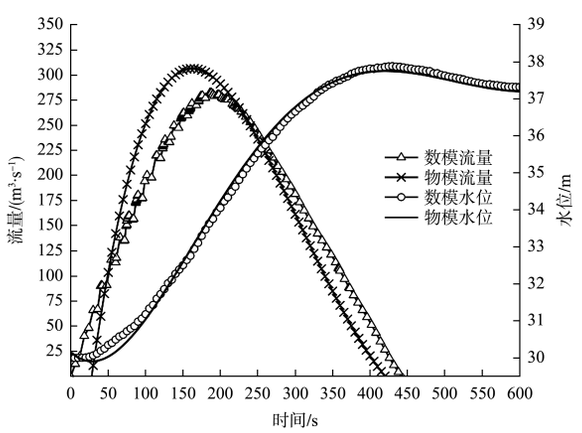


图 3　模型对比验证

Fig. 3　Model comparison and validation

表 2　各工况初始水位与侧支孔尺寸

Tab. 2　Initial water levels and lateral branch orifice sizes under various working conditions

工况	闸室初始水深/m	首段支孔宽×高/(m×m)	中段支孔宽×高/(m×m)	末段支孔宽×高/(m×m)	β
1	5. 5	1. 08×1. 1	0. 97×1. 1	0. 94×1. 1	0. 8
2	6. 5	1. 08×1. 1	0. 97×1. 1	0. 94×1. 1	0. 8
3	7. 5	1. 08×1. 1	0. 97×1. 1	0. 94×1. 1	0. 8
4	8. 5	1. 08×1. 1	0. 97×1. 1	0. 94×1. 1	0. 8
5	5. 5	1. 21×1. 1	1. 10 ×1. 1	1. 06×1. 1	0. 9

续表2

工况	闸室初始水深/m	首段支孔宽×高/(m×m)	中段支孔宽×高/(m×m)	末段支孔宽×高/(m×m)	β
6	6.5	1.21×1.1	1.10×1.1	1.06×1.1	0.9
7	7.5	1.21×1.1	1.10×1.1	1.06×1.1	0.9
8	8.5	1.21×1.1	1.10×1.1	1.06×1.1	0.9
9	5.5	1.34×1.1	1.22×1.1	1.18×1.1	1.0
10	6.5	1.34×1.1	1.22×1.1	1.18×1.1	1.0
11	7.5	1.34×1.1	1.22×1.1	1.18×1.1	1.0
12	8.5	1.34×1.1	1.22×1.1	1.18×1.1	1.0
13	5.5	1.48×1.1	1.34×1.1	1.30×1.1	1.1
14	6.5	1.48×1.1	1.34×1.1	1.30×1.1	1.1
15	7.5	1.48×1.1	1.34×1.1	1.30×1.1	1.1
16	8.5	1.48×1.1	1.34×1.1	1.30×1.1	1.1

2　试验结果分析

2.1　最大纵向系缆力

系缆力是评估船闸输水过程中闸室水流条件的重要指标之一，Rigo 等[17]在 2009 年的 PIANC 国际会议上提出采用水面比降计算闸室内纵向最大系缆力 F_{max} 的公式：

$$F_{max} = W'\rho gI = L_s B_t S_t c_b \rho g I \tag{5}$$

式中：W'为船舶排水量；L_s 为船长；B_t 为船宽；S_t 为船舶吃水；c_b 为阻力系数；ρ 为流体密度；g 为重力加速度；I 为水面比降。

根据工程报告，笏州船闸的设计船型主尺度为 88 m×13.8 m×3.4 m(船长×船宽×设计吃水)，设计船舶等级为 2 000 吨级，计算阻力系数取 0.85。根据 JTS 305—2025《船闸总体设计规范》，船舶富余长度取 10 m，富余宽度取 1.4 m，结合船舶可能靠泊位置，选取闸室中段两侧作为停泊泊位，分别在不同泊位的船头、船尾各布置 1 个水深测点，每隔 5 s 提取 1 次水深，泊位及测点布置见图 4。

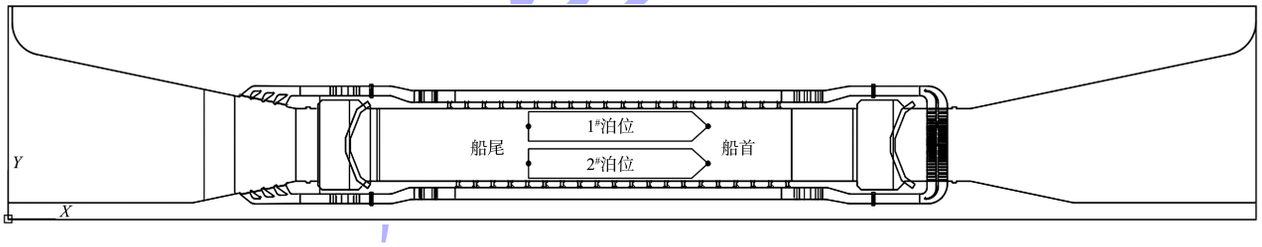
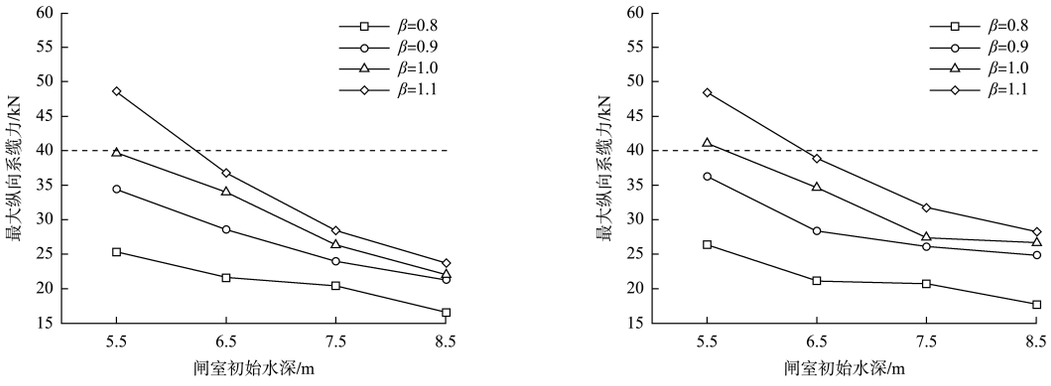


图 4　泊位水深测点布置

Fig. 4　Measurement point layout for berth water depth

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》，2 000 吨级船舶 F_{max} 不应超过 40 kN。通过计算得到不同工况下 1#、2#泊位的系缆力，见图 5。可以看出，提高 h 与降低 β 值均可以有效降低船舶系缆力，改善闸室水流条件。1#泊位 F_{max} 为 16.57～48.54 kN；2#泊位 F_{max} 为 17.85～48.48 kN，不同船舶停泊位置时 F_{max} 无显著差异且变化趋势基本一致。当 β 值不变，h 增加，F_{max} 逐渐降低且变化幅度逐渐趋于平缓；在同一 h 下，β 值越大 F_{max} 越大，当 h=5.5 m 时 β=1.0 和 1.1 在 1#、2#泊位的 F_{max} 值分别为 39.70、48.54 kN 和 41.16、48.48 kN，已接近甚至高于规范值，但当 h 增加 1 m 后，所有工况均满足规范值。以 1#泊位为例，同一水深下 β=0.8 相较于 β=1.1 的优化效率分别为 47%、41%、28%和 29%，在 β 值为 0.8～1.1 时，h=8.5 m 相较于 h=5.5 m 的优化效率分别为 34%、38%、44%和 51%。随 h 增大，不同 β 值下的 F_{max} 逐渐减小，分别为 23.15、15.09、8.03 和 7.08 kN，表明初始水深虽然可以有效降低 F_{max}，但优化能力并非线性变化。



a) 1#泊位　　b) 2#泊位

图 5　各工况下不同泊位最大纵向系缆力变化

Fig. 5　Variations of maximum longitudinal mooring force at different berths under various working conditions

2.2　自由液面波动

为探究不同工况下闸室自由液面波动的变化规律，沿闸室长度方向（X 向）于建模范围 185 m 处起每隔 10 m 布设一列水位测点，共 23 列；沿宽度方向（Y 向）于 20 m 处起每隔 5 m 布设一行水位测点，共 7 行。总计布设 161 个水位测点覆盖整个闸室，测点布置见图 6，通过监测不同测点在同一时刻下的水位来探究水流均匀性。

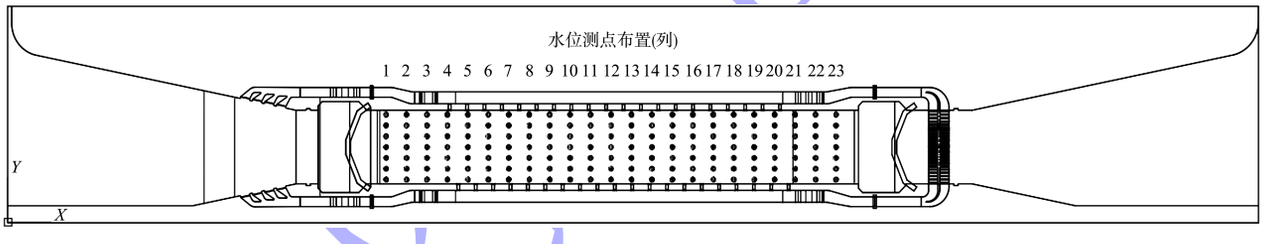
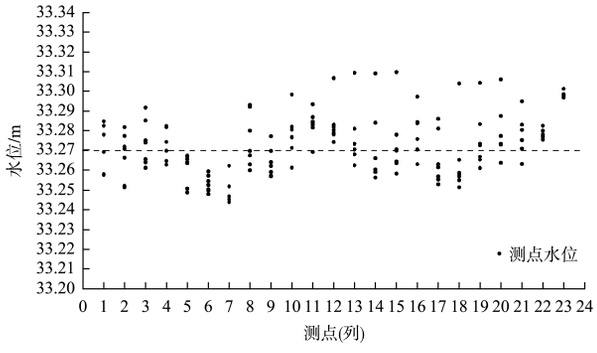


图 6　水位测点布置

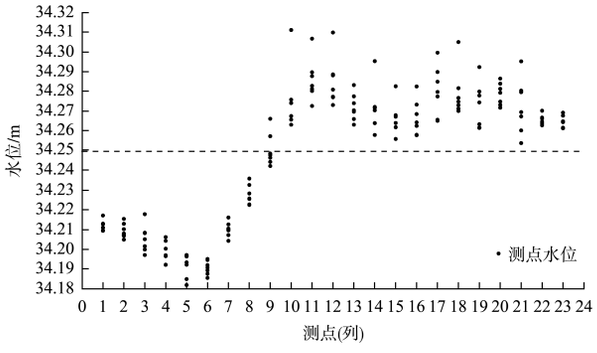
Fig. 6　Layout of water level measurement points

为探究闸室纵向水面测点水位在不同工况下的变化规律，选取笏州船闸原型侧支孔尺寸 $\beta=1.0$ 时初始水深变化以及 $h=5.5$ m 时 β 在 0.8～1.1 之间变化下的 8 个典型工况，绘制散点水位在输水过程中峰值流量时刻（$T=175$ s）下的散点分布，见图 7、8。

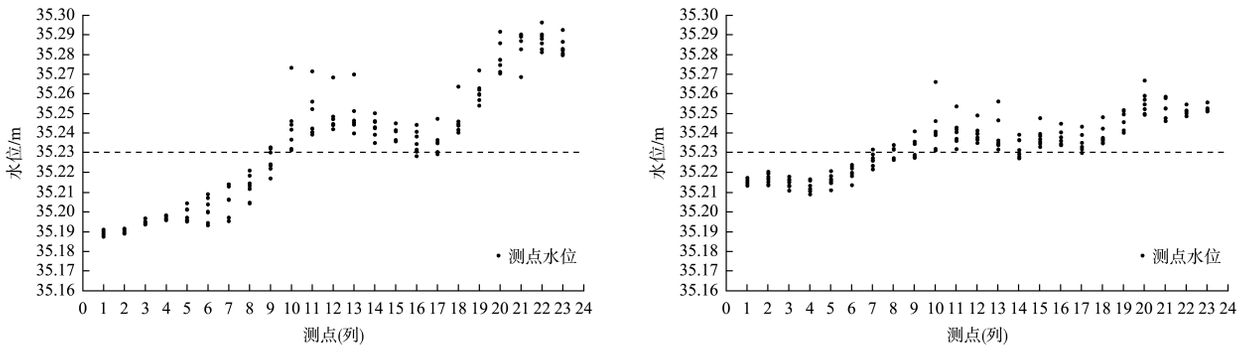
每列共计 7 个测点，虚线为该时刻下的平均水位。



a) h=5.5 m



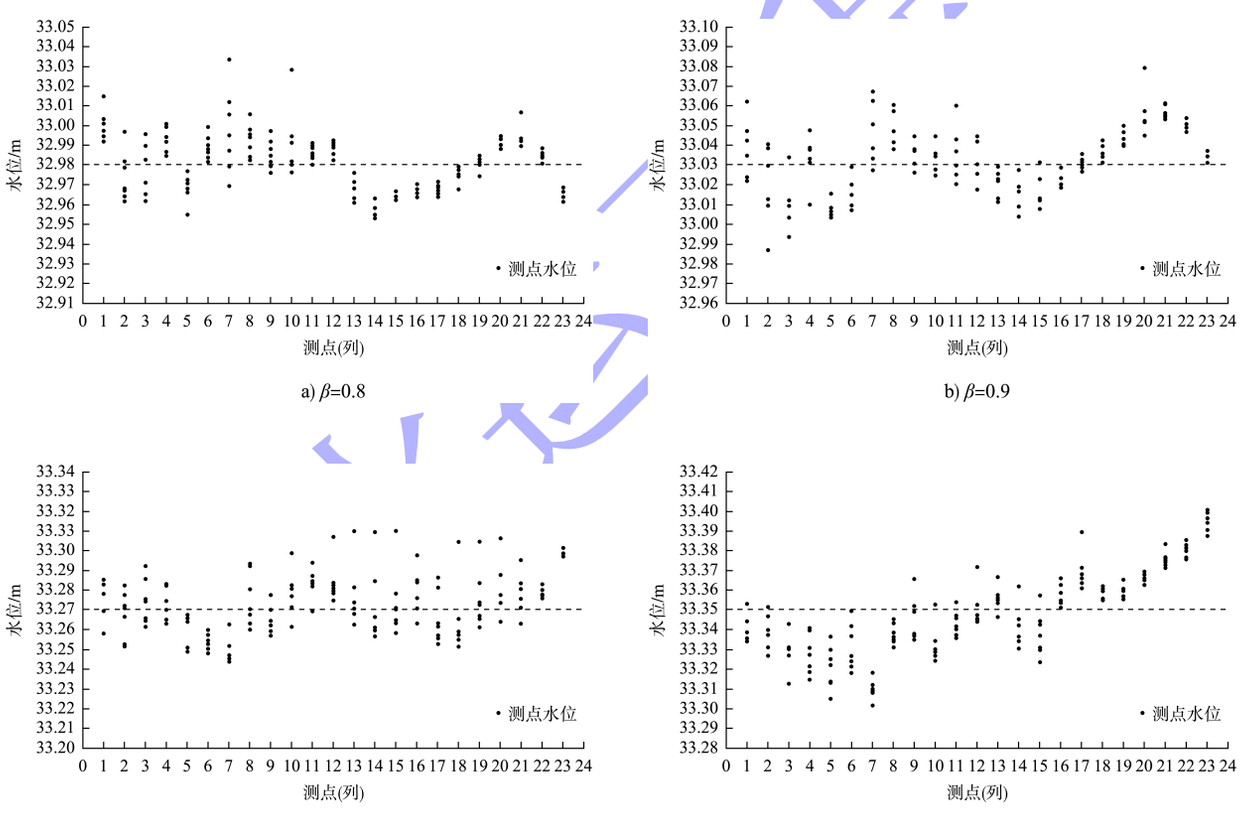
b) h=6.5 m



c) h=7.5 m　　d) h=8.5 m

图 7　不同初始水深下测点水位分布（T=175 s，β=1.0）

Fig. 7　Distribution of measurement points water level under different initial water depths (T=175 s, β=1.0)



a) β=0.8　　b) β=0.9

c) β=1.0　　d) β=1.1

图 8　不同侧支孔尺寸下测点水位分布（T=175 s，h=5.5 m）

Fig. 8　Distribution of measurement points water level under different lateral branch orifice sizes (T=175 s, h=5.5 m)

由图 7、8 可以看出，当 h=5.5 m 时散点总体呈现出闸室上半段测点水位较闸室下半段测点水位更分散，且上半段水位明显低于下半段水位，可能的原因是越靠近上游廊道水平转弯处的侧支孔出流越不均匀，导致水位变化混乱，侧支孔出流量均匀性随着廊道距离的增加逐渐改善，且上游侧支孔面积大于下游侧支孔，导致下游侧支孔出流量大于上游侧支孔，进一步导致闸室下游水

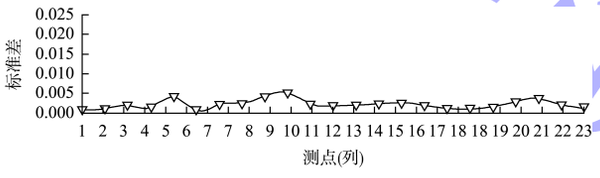
位高于上游水位。同时，由于闸室内富余水深的消能作用，在同一β值的前提下，随着h的增加，闸室内单列测点水位的离散程度存在不同程度的降低。其中，h=5.5~8.5 m 的单列最大水位测点差值分别为 0.053、0.048、0.042、0.035 m，h越大，水位测点离散度越均匀，闸室上下游水位差越小，闸室水面越平稳。当保证初始水深不变时，随着β值的增大，闸室内的水流逐渐变得不均匀，在β=1.1 时，上下游具有明显的水位差。

标准差可以较好地体现数据分布的离散程度，计算公式为：

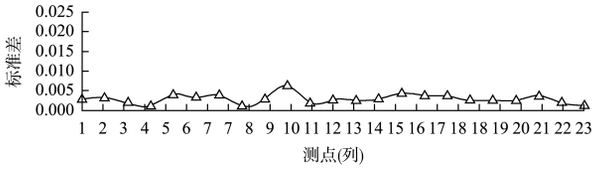
$$S=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{6}$$

式中：S为标准差，数值越小越均匀；n为样本个数；x_i为第i个样本值；$\bar{x}$为样本均值。

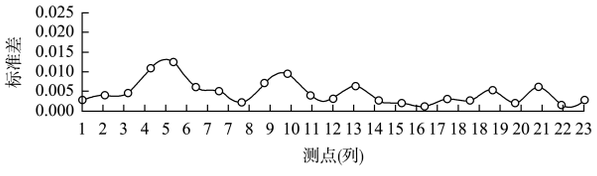
计算典型时刻各工况下每列水位测点标准差变化，见图 9。可以看出，当h增大时，不同β值下的水位离散度显著降低，当β在 0.8~1.1 范围内变化时，h=5.5 m 的标准差均值分别为 0.006、0.008、0.010、0.006，h=8.5 m 的标准差均值分别为 0.002、0.003、0.004、0.003，初始水深的整体优化效率为 60%。在同一水深条件下，β值越大，测点水位的标准差也越大，水面波动越剧烈。同时，当β=0.8 和 0.9 时，1~11 列的测点离散度显然高于 12~23 列，但当β值进一步增大时，闸室中后段的水位离散度开始上升。在典型时刻下，最大标准差出现在工况 1，为 0.022，最小标准差出现在工况 4，为 0.001，虽然当h=5.5 m 时β=0.8 的最大离散值高于β=1.1 的 0.020，但此时β=0.8 的最大水位差为 0.08 m，而β=1.1 的最大水位差为 0.10 m。综合来看，工况 13 为最不利工况，此时的水面波动以及水位差都不利于船舶的停泊条件。



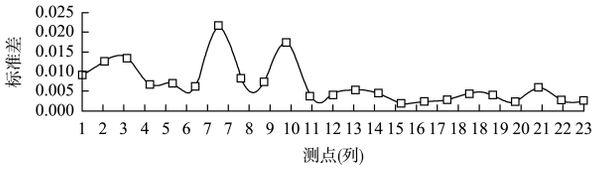
a) β=0.8，h=8.5 m



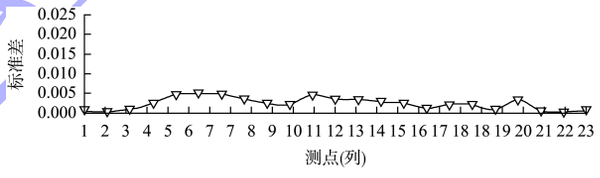
b) β=0.8，h=7.5 m



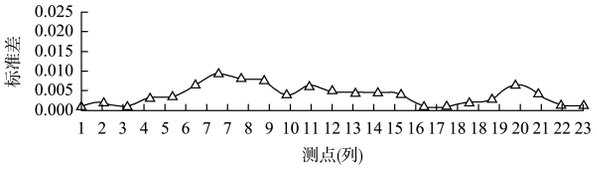
c) β=0.8，h=6.5 m



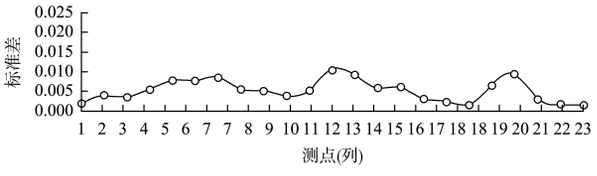
d) β=0.8，h=5.5 m



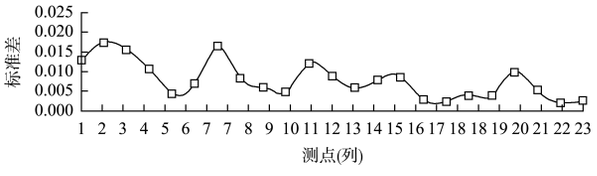
e) β=0.9，h=8.5 m



f) β=0.9，h=7.5 m



g) β=0.9，h=6.5 m



h) β=0.9，h=5.5 m

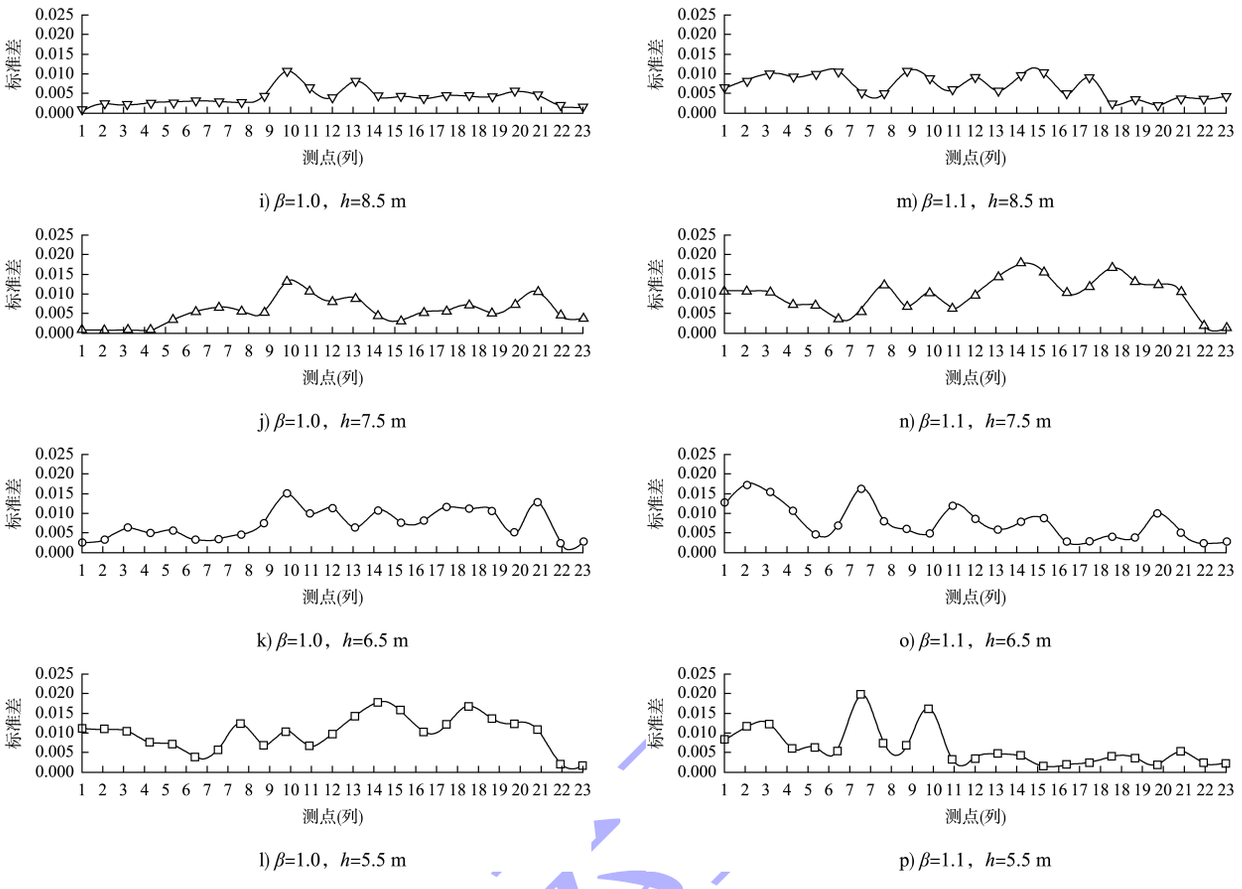


图 9　单列测点水位标准差变化

Fig. 9　Variation in water level standard deviation at single-column measurement points

2.3　自由液面流速

闸室自由液面流速变化是评价闸室水流条件的重要因素。不同工况闸室自由液面流速均值 $\bar{v}$ 随时间变化对比见图 9，当 β 在 0.8~1.1 之间时，随着 h 的增加，$\bar{v}$ 分别为 0.25、0.21、0.21、0.20 m/s；0.31、0.28、0.25、0.23 m/s；0.38、0.36、0.34、0.33 m/s；0.32、0.33、0.32、0.31 m/s。可见，当 h 增大时，输水前中期（0~250 s）$\bar{v}$ 显著降低，随着输水时间的增加，侧支孔出流流量下降，闸室水位上升，不同 h 下的 $\bar{v}$ 差异逐渐缩小。同时，自由液面流速均值具有随 h 增加前中期曲线波动越平缓的现象，表明 h 越低，闸室自由液面的流速变化越剧烈，从而不利于船舶靠泊。当 β 值不断增大时，$\bar{v}$ 也不断增加，水流条件不断恶化。但当 $\beta=1.1$，$\bar{v}$ 相较于 $\beta=1.0$ 却略有降低，且 h 变化仅在输水前中期有影响，但最大流速均值变化较小，可能的原因是：当侧支孔尺寸不断增加，侧支孔射流流速降低，同时两侧支孔射流相互作用较大，射流能量耗散较快，导致闸室内水流自由液面流速降低。总体来看，对于不同 β 值，h 对闸室内自由液面流速均值的优化率在 7%~25% 之间；对于不同初始水深，侧支孔尺寸优化率在 35%~40%之间。与闸室自由液面波动不同，侧支孔尺寸对闸室自由液面的平均流速影响更大。

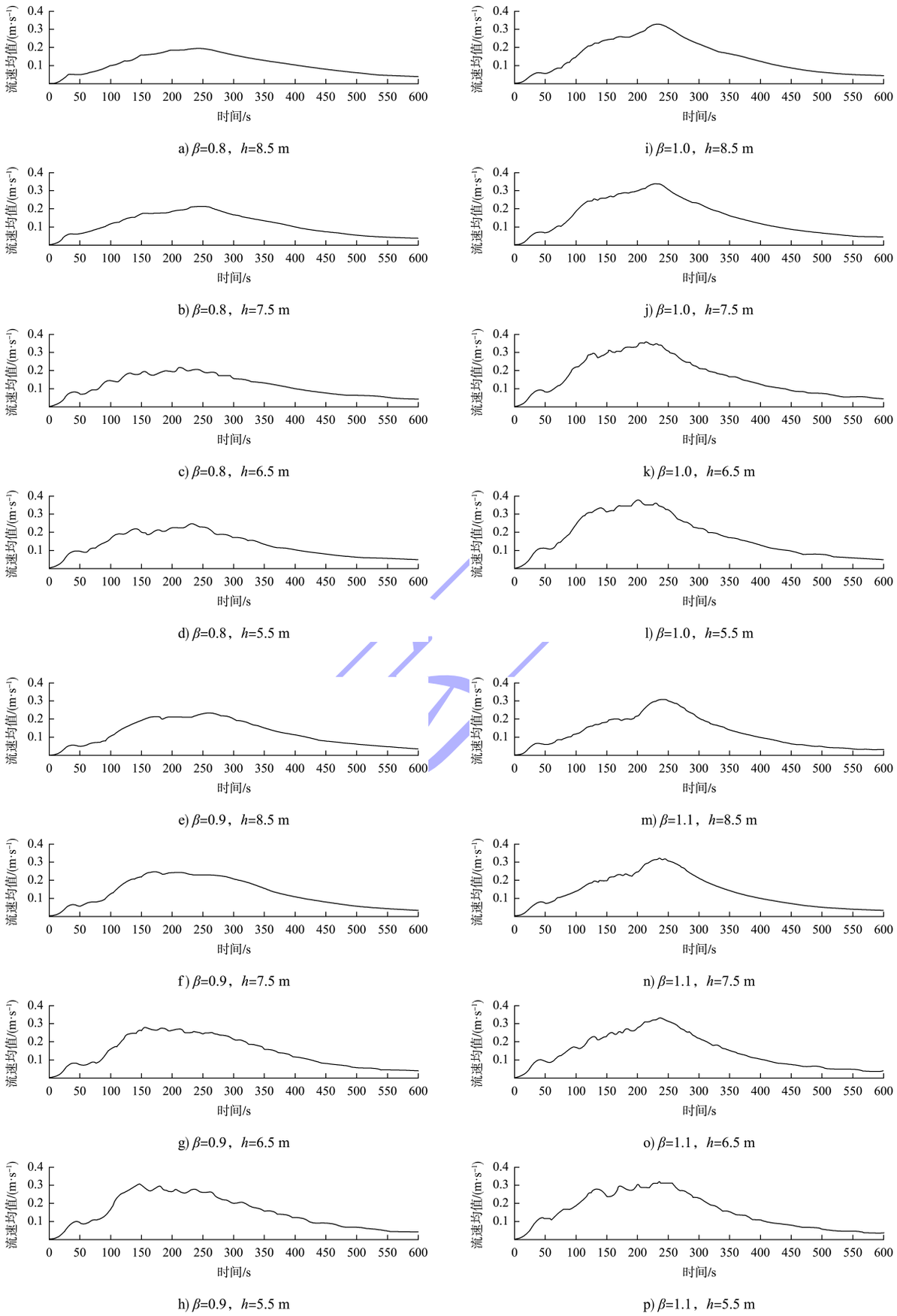


图 10　闸室自由液面流速均值变化

Fig. 10　Variation of mean free-surface velocity in lock chamber

3　结论

1）通过提取并计算闸室中段两侧泊位的最大纵向系缆力，表明提高闸室初始水深以及降低侧支孔尺寸均可有效降低船舶系缆力，且变化呈现一定的规律性，系缆力优化效率随初始水深增加及侧支孔尺寸降低逐级递减。同时，闸室初始水深对最大纵向系缆力变化的影响优于侧支孔尺寸的改变。

2）闸室纵向水位测点整体呈现出峰值流量时刻下闸室上半段水位低于闸室下半段水位，且上游水位测点离散度普遍高于下游水位测点离散度。提高闸室初始水深可有效降低闸室水面波动程度，水位离散度总体优化率60%；低初始水位下改变β值对于闸室水位测点离散度及分布的影响敏感度较低，但当初始水位进一步增加，水位测点离散度随β值升高不断增加。

3）初始水深越高，闸室液面平均流速越低，且变化主要集中在输水前中期。同时，自由液面平均流速变化与水面波动程度呈正相关。当β值在0.8~1.0时，支孔尺寸越大，闸室水面平均流速越高，随着支孔尺寸进一步增加，射流相互作用导致闸室液面平均流速略微降低，但仍然高于低β值下的液面平均流速。

4）采用最大纵向系缆力、闸室自由液面波动以及液面平均流速分析输水水流条件并综合考量各因素，建议在实际工程设计优化过程中可优先考虑提升闸室初始水深1~2 m以确保良好的水流条件；同时建议侧支孔总面积与主廊道面积比在0.9~1.0之间。

参考文献：

[1] 廖劲松. 嘉陵江利泽航运枢纽船闸输水系统的布置与研究[J]. 四川水力发电, 2019, 38(4): 132-136.
LIAO J S. Layout and research of shiplock water conveyance system in lize navigation junction of Jialing River[J]. Sichuan water power, 2019, 38(4): 132-136.

[2] 王蛟, 许灿亮, 陈亮, 等. 笏洲船闸输水系统水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2024(12): 115-123.
WANG J, XU C L, CHEN L, et al. Experimental study on hydraulic characteristics for filling andemptying system of Huzhou ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(12): 115-123.

[3] 阚延炬, 李君, 宣国祥, 等. 蜀山泵站枢纽船闸输水系统水力学模型试验[J]. 水运工程, 2017(9): 126-130, 143.
KAN Y J, LI J, XUAN G X, et al. Hydraulic modelling test of lock filling and emptying system of Shushan Pump Station[J]. Port & waterway engineering, 2017(9): 126-130, 143.

[4] 刘领. 艳州枢纽船闸工程输水系统布置优化及水力特性验证分析[J]. 水道港口, 2022, 43(6): 759-767.
LIU L. Validation analysis of layout optimization and hydraulic characteristics of filling and emptying system for Yanzhou ship lock project[J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(6): 759-767.

[5] 彭永勤, 彭涛. 船闸闸墙长廊道输水系统闸室三维流场数值模拟研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 72-75.
PENG Y Q, PENG T. Three dimensional flow fields numerical simulation of long corridor filling-emptying system chamber of ship lock wall [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2015, 34(3): 72-75.

[6] 齐春风, 冯小香, 李君涛, 等. 闸墙长廊道输水系统侧支孔均匀布置的水力特性[J]. 水运工程, 2019(5): 102-108.
QI C F, FENG X X, LI J T, et al. Hydraulic characteristics of long-culvert filling and emptying system with uniformly arranged side branch orifice inside lock wall[J]. Port & waterway engineering, 2019(5): 102-108.

[7] 孙倩, 张绪进, 陈亮, 等. 船闸闸墙长廊道侧支孔水动力研究[J]. 水运工程, 2019(10): 93-97.
SUN Q, ZHANG X J, CHEN L, et al. Hydrodynamic

study of wall culvert side ports in ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 93-97.

[8] SFORZA P M, HERBST G. A study of three-dimensional, incompressible, turbulent wall jets[J]. AIAA journal, 1970, 8(2): 276-283.

[9] STOCKSTILL R L, NEILSON F M, ZITTA V L. Hydraulic calculations for flow in lock manifolds[J]. Journal of hydraulic engineering, 1991, 117(8): 1026-1041.

[10] 黎贤访, 李云, 邓润兴. 船闸闸墙长廊道侧支孔水力特性[J]. 水运工程, 2015(4): 177-179, 193.
LI X F, LI Y, DENG R X. Hydraulic characteristics of long culvert with side branch orifices in wall of lock chamber[J]. Port & waterway engineering, 2015(4): 177-179, 193.

[11] 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.
LI X F, LI Y, WANG Y. A study of lateral orifice jet of side-port longitudinal culvert filling and emptying system of ship lock[J]. Hydro-science and engineering, 2011(1): 97-102.

[12] 辛玮琰, 于广年, 梁砚. 进水口形式对闸墙长廊道船闸输水系统影响的数值模拟[J]. 水运工程, 2024(7): 68-74.
XIN W Y, YU G N, LIANG Y. Numerical simulation of influence of inlet type on water conveyance system of lock wall long corridor ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 68-74.

[13] 丁乐雨, 李中华, 安建峰, 等. 闸墙长廊道侧支孔输水系统出流均匀性分析与布置优化[J]. 水运工程, 2024(5): 130-135, 199.
DING L Y, LI Z H, AN J F, et al. Flow uniformity and arrangement optimization for side-branch discharge holes in dam wall long corridor channel water conveyance system[J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 130-135, 199.

[14] 沈立群, 刘浩源, 聂艺博, 等. 船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统闸室内消力槛研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 217-223.
SHEN L Q, LIU H Y, NIE Y B, et al. Research on the baffle sill of long-culvert filling and emptying system with lateral holes of ship lock[J]. China rural water and hydropower, 2020(12): 217-223.

[15] 袁浩, 邹翼遥, 林晶晶. 闸墙长廊道侧支孔船闸阀门运行方式优化试验研究[J]. 水运工程, 2024(2): 101-106.
YUAN H, ZOU Y Y, LIN J J. Optimization of valve operation mode in wall culvert side ports in ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2024(2): 101-106.

[16] 船闸总体设计规范: JTS 305—2025[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.
Code for master design of shiplocks: JTS 305-2025[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.

[17] RIGO P, DANIEL R. Innovative concepts in navigation lock design and gate contact aspects[C]//The Port Infrastructure Seminar. Delft: TU Delft, 2010: 1-20.

（本文编辑　王传瑜）

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部