



## 船闸进流方式优化布置数值模拟研究\*

李林泽<sup>1</sup>, 郭婷婷<sup>2</sup>, 吴虑<sup>1</sup>, 谢春航<sup>2</sup>, 袁浩<sup>2,3,4</sup>, 邓海<sup>5</sup>, 谢博逸<sup>5</sup>

(1. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

3. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

4. 重庆市交通规划和技术发展中心, 重庆 400060; 5. 重庆航运建设发展(集团)有限公司, 重庆 401120)

**摘要:** 针对船闸进水口充水过程中上引航道出现串通漏斗漩涡, 进而影响进水口及闸室输水条件、恶化阀门工作状态的问题, 采用重整化群(renormalization group, RNG)  $k-\varepsilon$  紊流模型对船闸进水过程进行了三维数值模拟, 重点研究船闸进水口处的流速及漩涡等水力特性。研究表明: 当进水口顶面格栅进流面积为  $139.8 \text{ m}^2$  时, 进水过程中最大表面流速为  $1.6 \text{ m/s}$ , 且在进水口处形成了明显的串通漏斗漩涡; 当进水口进流面积增大  $26.95\%$  时, 最大表面流速降低了  $6.25\%$ , 并有效减缓了进水口处串通漏斗漩涡的形成; 当进水口进流面积增大  $39.86\%$  时, 最大表面流速降低了  $12.5\%$ , 且进水口处漩涡未出现明显的串通现象。通过增大闸首边墩进流总净宽并进一步增加顶格栅进流面积, 能够有效稳定进水口流态, 降低流速且减缓串通漏斗漩涡的形成, 减少阀门工作负荷, 从而提高船闸的输水效率。

**关键词:** 船闸; 进流方式; 优化布置; 水力特性; 数值模拟; 进水口

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0126-09

### Numerical simulation study on optimization of in flow mode layout for ship lock

LI Linze<sup>1</sup>, GUO Tingting<sup>2</sup>, WU Lü<sup>1</sup>, XIE Chunhang<sup>2</sup>, YUAN Hao<sup>2,3,4</sup>, DENG Hai<sup>5</sup>, XIE Boyi<sup>5</sup>

(1. School of Shipping and Naval Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Southwestern Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

4. Chongqing Transportation Planning and Technology Development Center, Chongqing 400060, China;

5. Chongqing Shipping Construction Development (Group) Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

**Abstract:** To address the issue of the formation of connected funnel vortices in the upper approach channel during the ship lock inlet filling process, which adversely affects the inlet and chamber water delivery conditions and deteriorates valve operation, a three-dimensional numerical simulation of the ship lock's water intake process is conducted using the RNG (renormalization group)  $k-\varepsilon$  turbulence model. The study focuses on the hydraulic characteristics, including flow velocity and vortex evolution at the ship lock inlet. The results indicate that when the inflow area of the top grid at the inlet is  $139.8 \text{ m}^2$ , the maximum surface flow velocity during the inflow process is  $1.6 \text{ m/s}$ , and a distinct interconnected funnel vortex is formed at the inlet. When the inlet flow area is increased by  $26.95\%$ , the maximum surface flow velocity decreases by  $6.25\%$ , effectively slowing the formation of connected funnel vortices at the inlet. When the inlet flow area is increased by  $39.86\%$ , the maximum surface flow velocity decreases by  $12.5\%$ , and no significant vortex connection occurs at the inlet. By increasing the total net width of the

收稿日期: 2025-08-28 录用日期: 2025-11-07

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206104)

作者简介: 李林泽(2004—), 男, 硕士研究生, 研究方向为通航水力学。

通信作者: 袁浩(1989—), 男, 博士, 教授, 研究方向为通航水力学。E-mail: yuanhao@cqjtu.edu.cn

inlet at the lock head side pier and further expanding inflow area of the top grille, the flow pattern can be effectively stabilized, the flow velocity reduced, and the formation of connected funnel vortices slowed. This reduces the operating load on the valves and thereby improves the water delivery efficiency of the ship lock.

**Keywords:** ship lock; inflow mode; optimal layout; hydraulic characteristics; numerical simulation; inlet

船闸是一种保证船舶顺利通过的通航建筑物,也是航道上用于集中水位落差的厢形水工建筑物<sup>[1]</sup>。其进水口通常采用顶面进水,或顶、侧面联合进流的方式<sup>[2-4]</sup>。格栅布置方式直接影响到进水口阀门工作状态。根据相关船闸设计规范<sup>[5-6]</sup>,在采用上顶面格栅进流方式时,水流在闸首边墩进水口两侧将形成明显的串通漏斗漩涡<sup>[7]</sup>,可能将空气卷吸入输水廊道内,影响进水口及闸室输水条件,恶化阀门工作状态,需优化进水口布置。

目前,已有众多学者着手研究改善船闸进水口进流条件<sup>[8]</sup>,并提出一些有效措施。辛玮琰等<sup>[9]</sup>采用在进水口外侧设置斜拉导墙工程措施,以控制惯性超高和闸室水面最大上升速度,增强进水支孔流量稳定性、改善进水口水流流态。童迪等<sup>[10]</sup>通过优化阀门段廊道体型、调整淹没深度级采取通气等措施,较好地解决了阀门底缘及阀门段廊道防空化技术难题。王丽雯等<sup>[11]</sup>采用在上游航道左侧滩地修筑导流堤,并将电站与水闸之间的导流墙由实体改为空心透水墙等措施,改善了电站进水口水流流态及船闸下游引航道的通航条件。现有改善船闸进水口布置的措施虽多,但对于优化进水口充水流态、改善水流条件的研究较少,需要继续深入研究。

本文以淮安东船闸为工程背景,采用重整化群(renormalization group, RNG)  $k-\varepsilon$  紊流模型分析了双边充水条件下船闸进水口平面及断面的流速分布及漩涡分布特性,对船闸进水口格栅提出改进(增大格栅进流面积),以改善进水口水流条件,旨在为类似水利枢纽船闸的改扩建提供技术支持。

## 1 工程概况

淮安东船闸位于淮安市淮安区,距二河枢纽

约 30 km,是沟通苏北灌溉总渠、京杭运河与淮入海水道的一个重要梯级,该船闸对通航和防洪排涝均有重要影响。目前该水域工程布置密集。淮安东船闸所在航道规划等级为 II 级,闸室有效尺度为 300 m×34 m×5 m(有效长度×有效宽度×有效水深),最大通行 2 000 吨级船舶,最大设计水头为 8.3 m,常遇水头为 7.0 m。

## 2 数值模拟

### 2.1 控制方程

研究表明, FLOW-3D 可以有效模拟船闸充泄水过程<sup>[12-13]</sup>。因此,本文采用 FLOW-3D 软件模拟船闸进流过程,选用船闸通航水流特性研究领域较为常见的 RNG  $k-\varepsilon$  紊流模型<sup>[14-15]</sup>,其控制方程见式(1)~(4),对应方程采用有限差分法进行离散求解。

连续性方程:

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

动量方程:

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

式中:  $x_i$ 、 $u_i$  和  $g_i$  分别为坐标位置、速度及重力加速度在  $i$  方向上的分量;  $x_j$ 、 $u_j$  和  $g_j$  分别为坐标位置、速度及重力加速度在  $j$  方向上的分量;  $t$  为时间;  $p$  为修正压力;  $\rho$  和  $\mu$  分别为体积分数加权平均密度及分子黏性系数;  $\mu_t$  为紊流黏性系数,  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ ,  $C_\mu = 0.0845$ ,  $k$  和  $\varepsilon$  分别为紊动能及紊动能耗散率。

紊动能  $k$  及紊动能耗散率  $\varepsilon$  方程:

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

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_s \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏性系数； $G_k$  为因流速梯度产生的紊动能； $C_{1\varepsilon}^*$  为与紊动能和紊动耗散率有关的系数；其他常数取值： $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ ， $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.68^{[16]}$ 。

## 2.2 几何模型构建

### 2.2.1 整体模型

为完整模拟整个船闸充、泄水过程，本文船闸输水系统三维模型模拟范围包括上下游部分引航道（导航调顺段和部分直线段）、进出水口段、船闸上下闸首、整个闸室及输水系统，纵向长度约 820 m，横向宽度约 154 m。船闸三维数学模型计算范围按原型尺寸进行建模，见图 1。

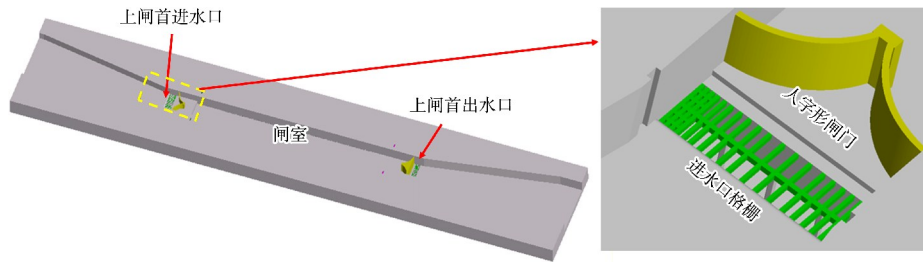


图 1 船闸输水系统三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of ship lock water delivery system

### 2.2.2 网格划分及敏感性分析

为分析船闸输水系统模拟结果对网格的敏感性，针对 3 组网格尺寸组合模拟结果进行对比分

析。以船闸纵向为 X 方向，横向为 Y 方向，竖向为 Z 方向，网格组合见表 1。

表 1 网格敏感性分析网格尺度组合

Tab. 1 Grid size combinations for grid sensitivity analysis

网格组合		网格尺度/m			网格总量	计算时长
		纵向 X	横向 Y	竖向 Z		
1	主体	0.50	0.50	0.50	约 600 万个	1 d
	进口格栅	0.25	0.25	0.25		
	加密区域	0.50	0.50	0.50		
	输水廊道	0.50	0.50	0.50		
	工作阀门	0.50	0.50	0.50		
2	主体	0.50	0.50	0.25	约 2 000 万个	4 d 10 min
	进口格栅	0.25	0.125~0.500	0.25		
	加密区域	0.25	0.25	0.25		
	输水廊道	0.25	0.25	0.25		
	工作阀门	0.25	0.25	0.25		
3	主体	0.50	0.50	0.25	约 2 700 万个	7 d 10 min
	进口格栅	0.25	0.125~0.500	0.25		
	加密区域	0.25	0.25	0.25		
	输水廊道	0.125	0.125	0.125		
	工作阀门	0.125	0.125	0.125		
	闸室出水段	0.125	0.125	0.125		

本文针对阀门段廊道尺寸为 5 m×5 m、主廊道尺寸为 5 m×5.5 m 输水系统方案, 选取设计最大水头 8.3 m、工作阀门开启时间  $t_v=5$  min、双边匀速开启充水作为典型工况进行网格敏感性计算分析, 分别对比了水力特性曲线和在最大输水流量时刻闸室表面及侧支孔中心平面流场分布情况。输水水力特性对比见表 2 和图 2, 流场分布情况见图 3、4。由于网格组合 1 的网格尺寸较大, 对廊道及侧支孔流道边界的识别精度较低, 导致过流断面尺寸大于实际情况。鉴于该网格组合下计算结果存在较大误差, 以下仅对网格组合 2、3 进行分析对比。

表 2 各网格组合下输水系统充、泄水水力特征值  
Tab. 2 Hydraulic characteristic values of water filling and discharge in the water delivery system under each grid combination

网格组合	$H_u/m$	$H_d/m$	$t_v/s$	$T/s$	$Q_{max} / (m^3 \cdot s^{-1})$
1	10.63	2.33	300	450	336
2	10.63	2.33	300	475	314
3	10.63	2.33	300	470	320

注:  $H_u$ 、 $H_d$  分别为上下游水位;  $T$  为闸室输水时间;  $Q_{max}$  为最大流量。

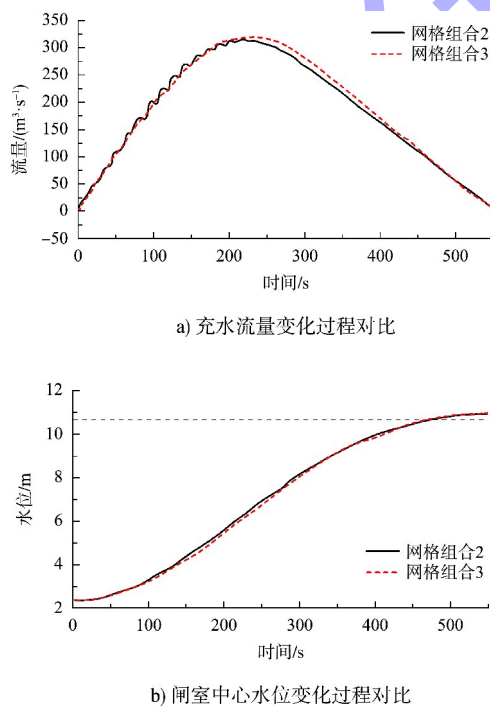


图 2 不同网格组合下水力特性曲线  
Fig. 2 Hydraulic characteristic curves under different grid combinations

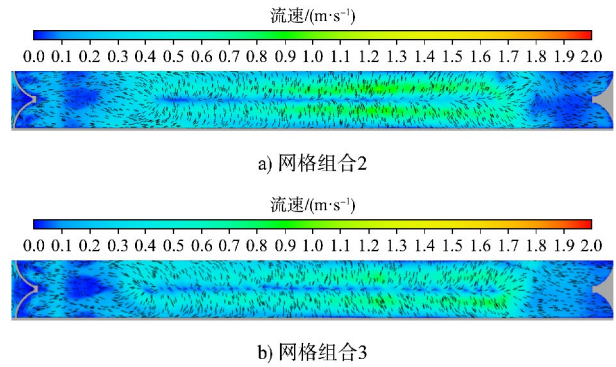


图 3 输水流量最大时刻 ( $t=215$  s) 闸室表面流场对比  
Fig. 3 Comparison of flow fields on the lock chamber surface at the moment of maximum water delivery flow rate ( $t=215$  s)

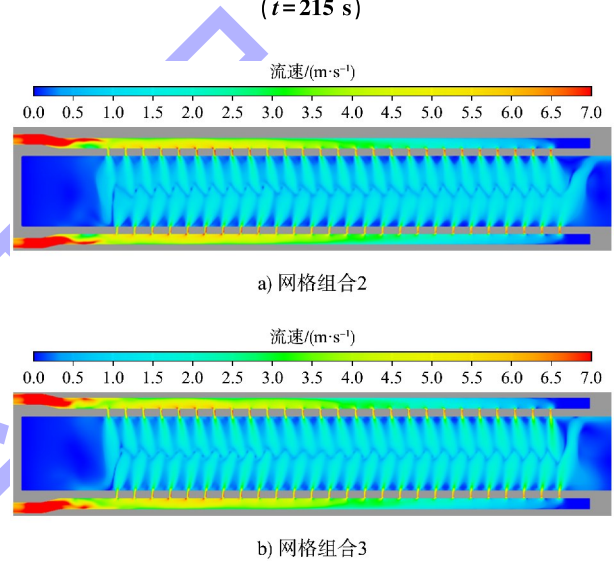


图 4 输水流量最大时刻 ( $t=215$  s) 侧支孔中心平面流态对比  
Fig. 4 Comparison of flow patterns at the central plane of the side branch holes at the moment of maximum water delivery flow rate ( $t=215$  s)

从图 2a) 可以看出, 总体上两者流量过程吻合较好, 流量峰值相差  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对偏差为 2%; 在阀门开启过程中(前 300 s), 网格组合 2 的流量过程存在一定程度的振荡, 而网格组合 3 流量过程更为平滑, 这是由于网格组合 3 的阀门段网格尺度更小, 能更为精确地捕捉阀门的运动过程。从图 2b) 可以看出, 两者闸室中心水位变化过程吻合较好, 同一时刻水位最大差异为 0.1 m。由此可见, 两套网格计算结果在输水水力特性方面差异很小。从图 3 和图 4 可以看出, 在流场分布上, 输水流量最大时刻两套网格闸室表面和侧支孔中心断面流场分布整体上较为相似, 局部流速大小略有差异, 但两者流速差值仅在 0.1 m/s 以内。综

合考虑计算效率和精度，本文采用网格组合 2 进行模拟计算。

### 2.2.3 边界条件设定

输水系统上下游进出口边界采用压力边界条件，给定充泄水上游的特征水位高程及水面压强  $P = P_a$  (大气压强)。在计算区域网格块的上表面边界，由于自由表面为水体与大气的交界面，边界条件设定为压力边界条件，给定水面压强  $P = 1.013 \times 10^5$  Pa，充满空气，边界条件设置见图 5。闸室、廊道边界等为固壁边界，根据相应糙率换算得到墙面粗糙厚度，本文对粗糙厚度  $k$  取 0.007 m。工作阀门采用流固耦合计算模型，根据充泄水工况给定匀速开启速率。计算初始时刻根据充泄水上下游水位及闸室水位给定初始静水流体，初始静水流体服从静压分布规律。

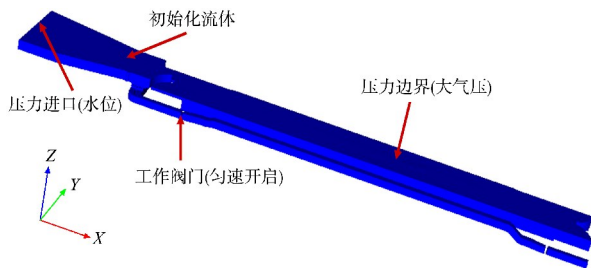


图 5 船闸输水系统三维数学模型边界条件设置  
Fig.5 Boundary condition settings of the three-dimensional mathematical model of ship lock water delivery system

## 3 进水口方案研究

JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》表明船闸进水口水面不应产生具有危害性的串状吸气漩涡，进口断面最大平均流速不宜大于 2.5 m/s。因此，本文对船闸不同进水口方案开展了局部三维计算，各方案均采用设计最大水头 8.3 m、 $t_v = 5$  min、双边匀速开启充水作为研究代表工况。各进水口方案计算结果见表 3。

表 3 进水口方案计算结果

Tab.3 Calculation results of inlet schemes

进水口方案	进水方式	边墩进水口最小净宽/m	格栅孔/多支孔进水总面积/m <sup>2</sup>
方案 1	槛上顶面格栅进水	9.0	139.80
方案 2		9.0	177.48
方案 3		9.0	195.52

## 3.1 方案 1 水力学条件

### 3.1.1 方案概况

方案 1 为槛上顶面格栅进水，其中闸首边墩进水口最小净宽 9.0 m，高 5.0 m，顶面格栅进流总面积为 139.80 m<sup>2</sup>，约占总面积的 42%，其平面布置及三维效果见图 6。

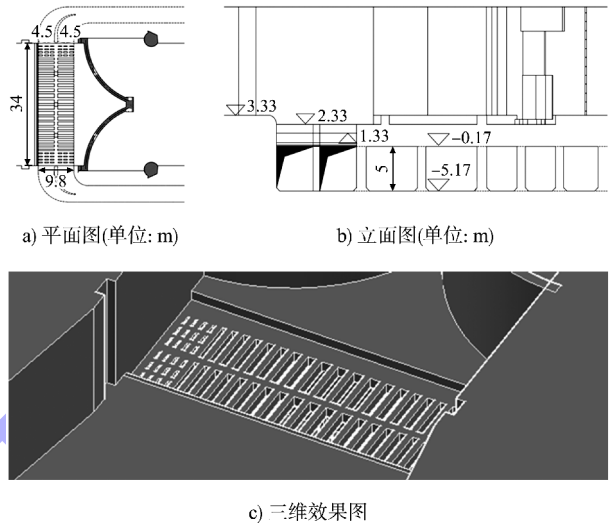


图 6 方案 1 槛上顶面格栅进水口  
Fig.6 Top grille inlet above the sill for Scheme 1

### 3.1.2 水流条件

为分析淮安东船闸进水口方案 1 条件下的水流特性，本文对充水初期、输水流量最大时刻及充水后期典型时刻的进水口表面、平面及立面流速进行了分析。

在充水初期，水流由上引航道进入闸首内的进水口，由于输水流量较小且水流未向引航道内回流，靠近闸墙两侧水流仅发生轻微流向偏转，未出现明显漩涡流态。至充水流量达到最大时刻，随着输水强度增加至最大，进水口附近流速也达到最大，表面流速为 0.4~1.6 m/s，在闸首边墩进水口两侧，水流流线发生剧烈偏转，并形成漩涡流态。结合底流和立面矢量云图来看，已形成串通的漏斗漩涡，结果见图 7。在充水后期( $t = 400$  s)，虽然输水流量有所减小，但到达三角门的水流形成的往复流与上游来流相遇叠加，漩涡强度并没有减弱，最大漩涡表面流速在 1.5 m/s 左右，且漩涡范围进一步扩大。充水后期也形成了串通漏斗漩涡，但漩涡中心处水位存在明显跌落。

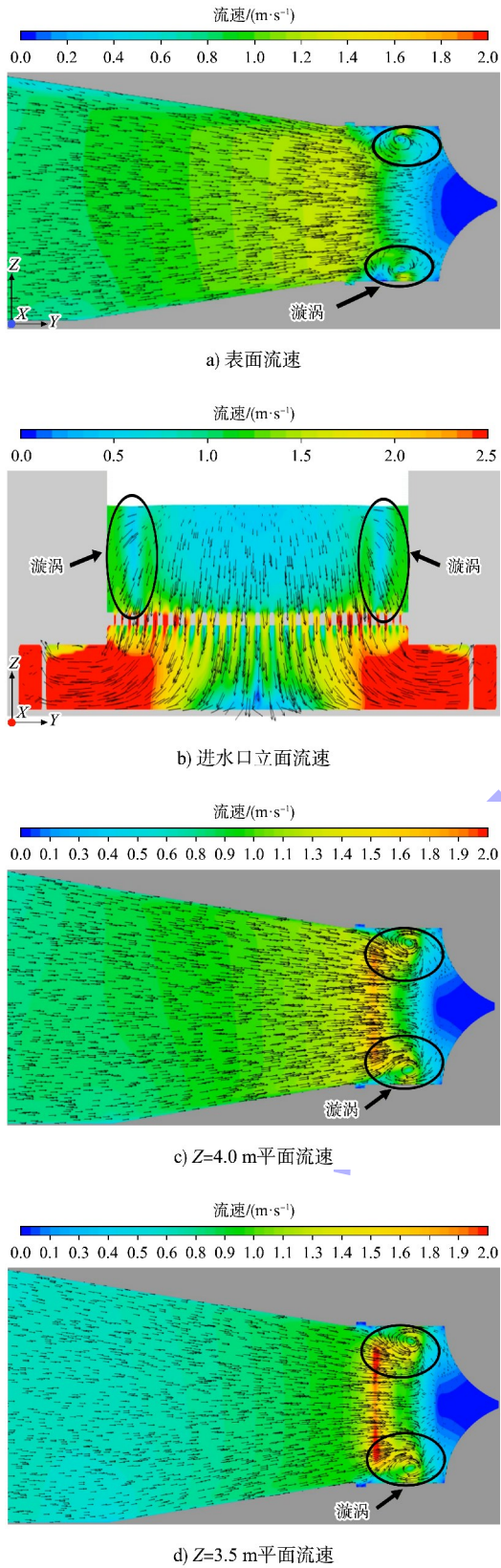


图 7 方案 1 输水流量最大时刻 ( $t=215\text{ s}$ ) 进水口流速矢量云图

Fig. 7 Velocity vector nephogram at the inlet for Scheme 1 at the moment of maximum water delivery flow rate ( $t=215\text{ s}$ )

总体来看, 在进水口方案 1 条件下, 由于进水格栅进流面积偏小, 局部范围内输水强度较大, 在闸首边墩进水口两侧形成了明显的串通漏斗漩涡, 可能将空气卷吸入输水廊道内, 影响进水口及闸室输水条件, 恶化阀门工作状态, 需优化进水口布置。

### 3.2 方案 2 水力学条件

#### 3.2.1 方案概况

由前所述, 进水口方案 1 顶面格栅总进流面积偏小, 导致局部范围内输水强度较大, 形成了明显的串通漏斗漩涡。为此, 方案 2 增加了顶面格栅总进流面积。优化后, 进口顶面格栅总面积增大至  $177.48\text{ m}^2$ , 约占总面积的 53%, 其平面布置、三维效果图见图 8。

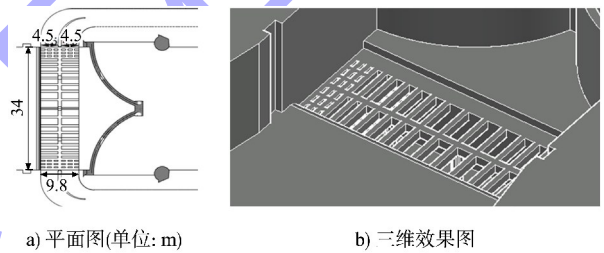


图 8 方案 2 槛上顶面格栅进水口

Fig. 8 Top grille inlet above the sill for Scheme 2

#### 3.2.2 水流条件

对进水口方案 2 的充水初期、输水流量最大时刻及充水后期进水口表面、平面及立面流速进行了分析。在充水初期, 充水流量较小, 进水口附近表面流速为  $0.5\sim 0.8\text{ m/s}$ , 未出现漩涡等不良流态。随着输水强度逐渐增加, 同时往复流叠加, 水流流线弯曲, 局部输水强度较大, 在闸首边墩进水口两侧逐渐形成串通漏斗漩涡; 在充水流量达到最大时刻, 进水口附近表面流速为  $0.4\sim 1.5\text{ m/s}$ , 漩涡由两侧逐渐向中间发展, 流速分布见图 9。与方案 1 相同, 这种串通漏斗漩涡流态一直持续到充水后期, 只是范围及强度均明显减小。

总体来看, 在进水口方案 2 水流条件下, 由于进口顶面格栅的进流面积比方案 1 增加了 26.95%, 同时最大表面流速降低 6.25%, 串通漏斗漩涡的强度和范围有所减弱, 但依然较为明显。

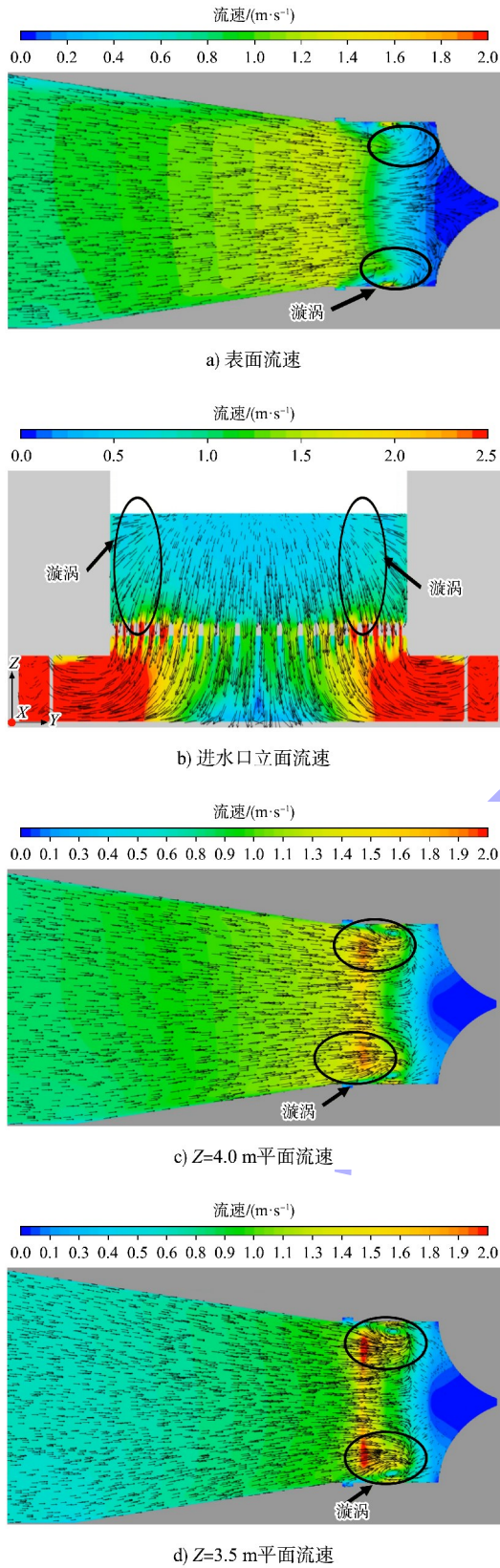


图9 方案2输水流量最大时刻( $t=215\text{ s}$ )  
进水口流速矢量云图

Fig. 9 Velocity vector nephogram at the inlet for  
Scheme 2 at the moment of maximum water  
delivery flow rate ( $t=215\text{ s}$ )

### 3.3 方案3水力学条件

#### 3.3.1 方案概况

进水口方案2通过增大进口顶面格栅进流面积,对削弱漩涡强度有一定的作用。因此在方案2的基础上,进水口方案3闸首边墩进流总净宽由9.0 m增大至10.0 m,顶面格栅总进流面积相应增大,增大至195.52 m<sup>2</sup>,约占进总面积的59%,其平面布置、三维效果图见图10。

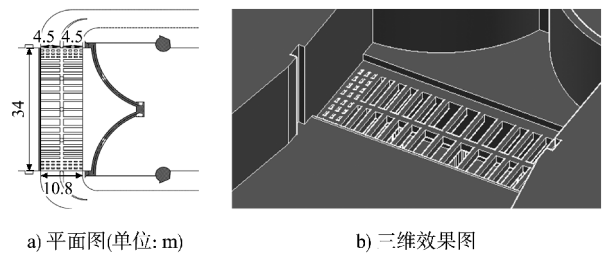


图10 方案3 槛上顶面格栅进水口

Fig. 10 Top grille inlet above the sill for Scheme 3

#### 3.3.2 水流条件

对进水口方案3充水初期、输水流量最大时刻及充水后期进水口表面、平面及立面流速进行分析。在充水初期,充水流量较小,随着进流面积进一步加大,进水口附近表面流速略有减小,为0.3~0.8 m/s,未出现漩涡等不良流态。在充水流量达到最大时刻,进水口附近表面流速亦较方案2有所减小,为0.4~1.4 m/s,闸首边墩进水口两侧的漩涡强度也相应明显减小,流速分布见图11。结合立面图来看,随着漩涡强度的减小,漩涡并未发生明显串通。

总体来看,在进水口方案3的水流条件下,由于进一步增大了进口格栅的总进流面积,相比方案2增加了10.16%,且最大表面流速降低了6.67%;相比方案1增加了39.86%,且最大表面流速降低了12.5%。此时,漩涡的强度和范围明显减弱,且不再发生串通。综合考虑工程投资与水流条件,研究建议将进水口方案3作为推荐方案。

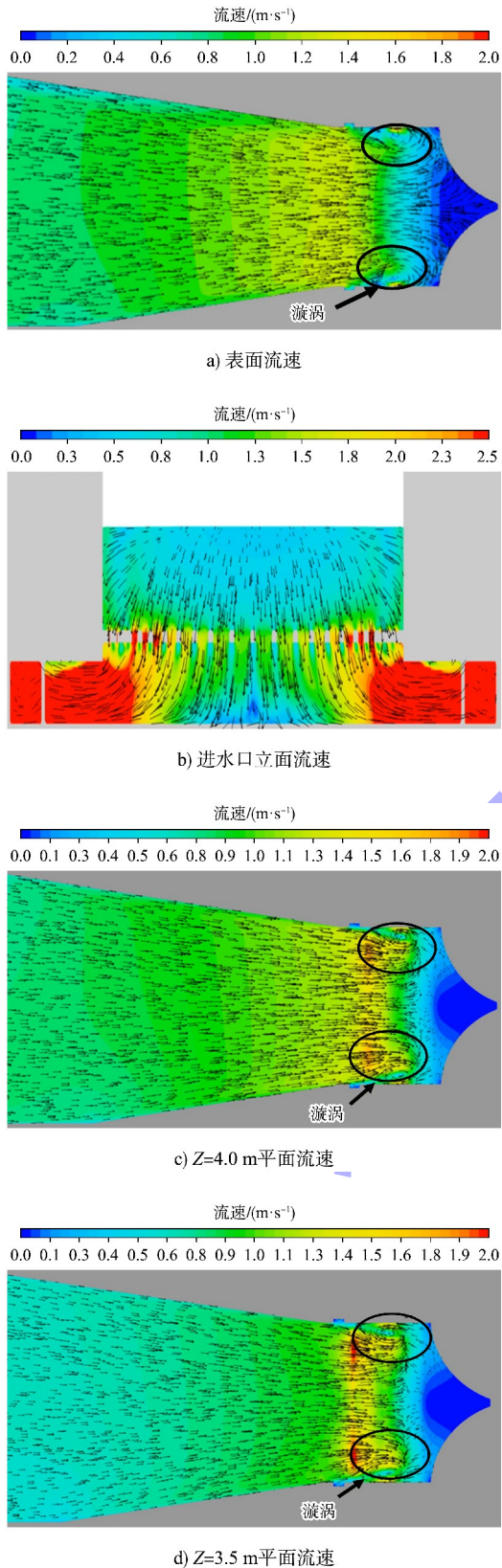


图 11 方案 3 输水流量最大时刻 ( $t=215$  s)  
进水口流速矢量云图

Fig. 11 Velocity vector nephogram at the inlet for  
Scheme 3 at the moment of maximum water  
delivery flow rate ( $t=215$  s)

#### 4 结论

1) 方案 1 的进流面积为  $139.80 \text{ m}^2$ , 占总进水口面积的 42%, 最大表面流速为  $1.6 \text{ m/s}$ , 进水口处形成了串通的漏斗漩涡。

2) 方案 2 的进流面积为  $177.48 \text{ m}^2$ , 占总进水口面积的 53%, 最大表面流速为  $1.5 \text{ m/s}$ 。与方案 1 相比, 方案 2 的进流面积增大了 26.95%, 最大表面流速减小了 6.25%。尽管如此, 在闸首边墩进水口两侧, 仍逐渐形成了串通漏斗漩涡。

3) 方案 3 的进流面积为  $195.52 \text{ m}^2$ , 占总进水口面积的 59%, 最大表面流速为  $1.4 \text{ m/s}$ 。与方案 1 相比, 方案 3 的进流面积增大了 39.86%, 最大表面流速减小了 12.5%。在闸首边墩进水口两侧虽然也形成了漩涡, 但由于最大流速的减小, 漩涡未出现明显的串通现象。因此, 增加进口格栅的总进流面积能够有效改善水流流态, 减少对进水口及闸室输水条件的影响。

#### 参考文献:

- [1] 张星星, 陈明, 许光祥, 等. 有限空间中三维壁面紊动射流流动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 93-101.  
ZHANG X X, CHEN M, XU G X, et al. An experimental study on the flow characteristics of a three-dimensional turbulent wall jet in a limited space [J]. Advances in water science, 2019, 30(1): 93-101.
- [2] 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 optimal arrangement of water inlet in water delivery system for Mujing ship locks [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 110-117, 157.
- [3] 陈辉, 杨文俊, 史德亮, 等. 三峡船闸进水口三维水动力特性数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(6): 16-20.  
CHEN H, YANG W J, SHI D L, et al. Numerical simulation of 3D hydraulic characteristics of inlet for Three Gorges project lock [J]. Journal of Yangtze River

- Scientific Research Institute, 2009, 26(6): 16-20.
- [4] 曾敏, 林勇, 孙利敏. 船闸上游进水口布置试验研究[J]. 中国水运, 2023(3): 102-104.  
ZENG M, LIN Y, SUN L M. Experimental study on layout of upstream intake of ship lock [J]. China water transport, 2023(3): 102-104.
- [5] 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
Design code for filling and emptying system of shiplocks: JTJ 306-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [6] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [7] 吴英卓, 江耀祖, 周赤, 等. 船闸短廊道输水系统进口漩涡成因及消除措施研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(11): 52-56, 61.  
WU Y Z, JIANG Y Z, ZHOU C, et al. Causes and eliminating measures of vortices at the intake of short culvert conveyance system of shiplock [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(11): 52-56, 61.
- [8] 周华兴. 消除船闸输水廊道进口漩涡措施的研究[J]. 水运工程, 1993(4): 29-35.  
ZHOU H X. Study on measures of eliminating eddy current at the entrance of the filling & emptying culvert of shiplocks[J]. Port & waterway engineering, 1993(4): 29-35.
- [9] 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.
- [10] 蒋筱民, 童迪, 吴英卓. 乌江银盘船闸输水系统设计与试验研究[J]. 人民长江, 2008, 39(4): 77-79.  
JIANG X M, TONG D, WU Y Z. Design and experimental study on water conveyance system of Yinpan shiplock in Wujiang River [J]. Yangtze River, 2008, 39(4): 77-79.
- [11] 王丽雯, 张广传, 赖冠文. 柳城水电站工程枢纽优化布置试验研究[J]. 广东水利水电, 2008(5): 18-20.  
WANG L W, ZHANG G C, LAI G W. An experimental research of optimized arrangement of Liucheng hydropower station [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2008(5): 18-20.
- [12] 谭静. 木京双线船闸共用下引航道水流特性及船舶通航影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.  
TAN J. Investigate on the hydraulic characteristics and ship navigation of the shared downstream approach channel of the mu Jing double-line ship locks [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [13] 王召兵, 郭婷婷, 周昔东, 等. 木京一线船闸泄水对下引航道水流条件的影响[J]. 水运工程, 2025(2): 127-134.  
WANG Z B, GUO T T, ZHOU X D, et al. Impact of Mujing first-lane ship lock discharge pattern on flow conditions in lower approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 127-134.
- [14] GORDEEV S, HEINZEL V, SLOBODCHUK V. Simulation of single and multiple impinging jet cooling and comparison with experimental data[C]//ASME 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2006: 143-158.
- [15] PARHAM K, ESMAEILZADEH E, ATIKOL U, et al. A numerical study of turbulent opposed impinging jets issuing from triangular nozzles with different geometries[J]. Heat and mass transfer, 2011, 47(4): 427-437.
- [16] 陈亮, 孙倩, 徐启航, 等. 船闸顶扩廊道阀门段水力特性模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 274-279.  
CHEN L, SUN Q, XU Q H, et al. Numerical research on the hydraulic characteristics of valve section with top expansion culvert for the ship lock [J]. China rural water and hydropower, 2023(6): 274-279.

(本文编辑 王传瑜)