

· 航道及通航建筑物 ·



# 进水口形式对闸墙长廊道船闸输水系统影响的数值模拟

辛玮琰, 于广年, 梁 砚

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 船闸进水口水流条件关系到输水系统的输水效率、船舶停泊安全, 因此进水口的形式布置是船闸水力设计和模型试验的重要内容之一。针对两种常见的进水口布置形式, 结合某船闸输水系统的具体条件, 采用数值模拟的方法, 从输水水力特性、水流流态方面对比分析了这两种进水口布置形式对于输水系统的影响, 研究表明: 对于闸墙长廊道船闸输水系统, 相对于进水口外侧导墙拉直, 进水口外侧导墙斜拉的工程措施在控制惯性超高和闸室水面最大上升速度、增强进水支孔流量过程稳定性、改善进水口水流流态方面更具优势。研究成果可为船闸输水系统进水口布置提供技术参考。

**关键词:** 船闸; 输水系统; 进水口形式; 数值模拟

中图分类号: U617; TV143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0068-07

## Numerical simulation of influence of inlet type on water conveyance system of lock wall long corridor ship lock

XIN Weiyen, YU Guangnian, LIANG Yan

(Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications,

Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** The flow conditions at the inlet of a ship lock are related to the efficiency of the water conveyance system and the safety of ship berthing. The layout of the inlet is an important part of the hydraulic design and model testing of the ship lock. This paper focuses on two common types of inlet layout, combined with the specific conditions of the water conveyance system of a ship lock, and uses numerical simulation methods to compare and analyze the impact of these two types of inlet layout on the water conveyance system from the aspects of water conveyance hydraulic characteristics and flow state. The results show that for the lock wall long corridor ship lock water conveyance system, the engineering measures of diagonal pulling of the outer guide wall of the water inlet have more advantages in controlling the ultra-high inertia and the maximum rising speed of the gate chamber water surface, enhancing the stability of the flow process of the inlet branch hole, and improving the flow state of the water inlet relative to the outer guide wall of the inlet. The results can provide technical reference for the layout of the inlet of the lock water.

**Keywords:** ship lock; water conveyance system; inlet type; numerical simulation

为适应船闸规模和尺度的扩大、提高输水效率、改善船舶停泊条件, 分散输水系统被广泛采用, 对于分散输水系统已开展了大量研究<sup>[1-3]</sup>。闸墙长廊道输水系统是一种适合于中低水头船闸的分散输水系统形式<sup>[4-5]</sup>。输水系统进水口处水流条件关系到船舶的泊、航安全和船闸输水系统的输

水特性, 因此进水口是输水系统设计中的一个重要问题。相关研究多以数学模型和物理模型试验的方式开展。周华兴<sup>[6]</sup>根据山区、丘陵地区船闸输水廊道进(出)口的布置形式, 研究了几种典型布置进(出)口面积比与阻力系数关系, 提出了设计原则; 吴英卓等<sup>[7]</sup>通过物理模型试验分析阀门

收稿日期: 2023-11-06

作者简介: 辛玮琰(1987—), 女, 博士, 助理研究员, 从事内河航道研究。

运行条件、进口淹没水深、进口形式及固体边界条件对输水系统进口漩涡的影响; 杨伟等<sup>[8]</sup>通过对若干布置方案的进流均匀性、防淤性能、闸前流态等方面的综合比较, 分析三峡工程永久船闸上游取水采用正向进水布置方案的优化比选试验成果; 金国强等<sup>[9]</sup>结合富春江船闸输水系统形式及具体布置, 重点研究了进水口布置方案; 仁启江等<sup>[10]</sup>通过物理模型对旁海枢纽工程船闸输水系统的进水口布置进行了优化; 陈辉<sup>[11]</sup>开展了船闸符合管道输水系统进口水动力特性的研究, 对三峡船闸两种不同体型方案的进水口水流条件进行了数值模拟。

目前, 现有船闸进口形式的研究成果主要集中在进水口面积、进口淹没深度和流态等的研究, 对于分散输水系统导墙布置形式的研究较少。鉴于此, 本文针对船闸输水系统进水口导墙布置形式对闸墙长廊道输水系统非恒定灌水过程影响的问题, 利用 Flow3D 软件进行三维数值模拟。通过模型构建、边界类型设置、网格生成, 采用 RNG  $k-\varepsilon$  方程紊流模型对输水系统灌水过程进行计算模拟。

## 1 数学模型及数值方法

### 1.1 控制方程

本文采用的 RNG 紊流模型为  $k-\varepsilon$  改善的模型<sup>[12-13]</sup>, 通过在大尺度运动和修正后的黏度项体现小尺度的影响, 使小尺度运动系统地控制方程中除去, 所得到的紊流动能  $k$  方程和耗散率  $\varepsilon$  方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} - u'_i u'_j \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

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

$$\text{其中: } G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (4)$$

$$\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中:  $x_i$ 、 $x_j$  为坐标分量,  $i, j=1, 2, 3$ ;  $u_i$ 、 $u_j$  为  $x_i$ 、 $x_j$  方向的瞬时速度分量, m/s;  $u'_i$ 、 $u'_j$  为脉动分量;  $t$  为时间, s;  $\rho$  为密度, kg/m<sup>3</sup>;  $k$  为紊动动能;  $\varepsilon$  为紊动耗散率。  $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ ;  $\mu_{\text{eff}}$  为  $\mu$  与  $\mu_t$  之和,  $\mu$  为动力黏滞系数,  $\mu_t$  为紊动黏度系数;  $G_k$  为平均速度梯度引起的紊动能  $k$  的产生项;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为  $\varepsilon$  的常数,  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ,  $\eta_0 = 4.377$ ,  $\beta = 0.012$ 。

采用控制体积法对上述偏微分方程组进行离散, 流场数值计算采用分离式压力修正法中的 PISO 算法。对固壁边界采用壁面函数法。采用水汽两相流的 VOF 模型<sup>[14]</sup>处理自由液面。

### 1.2 网格剖分及边界条件

本文选取某船闸进行计算, 该船闸闸室有效尺寸为 280 m×34 m×5.6 m (有效长度×宽×门槛水深), 输水系统的体型为闸墙长廊道侧支孔出水, 上游水库正常蓄水位为 39.00 m, 下游最低通航水位 28.00 m。上游进口段每侧导墙设垂直 4 支孔进水口, 闸室内对称设 48 个出水孔, 出水孔分 3 组, 每组 16 孔。

计算区域选取了包括一部分上游引航道、进水口、整个闸室区域进行模拟研究。采用结构化矩形网格对计算区域进行划分, 在输水廊道、进水口、闸首、工作阀门及闸底出水段各区域分别进行网格加密处理, 网格单元总数约为 150 万个。模型上游侧进口边界设为压力边界, 给定水位 39.00 m; 闸室上方临大气侧设为气压边界, 压强为 0, 用以模拟大气边界; 廊道壁面设为固壁边界; 下游出口采用固壁边界。计算全区域网格剖分及边界条件见图 1。

对比研究进水口形式对于输水系统的影响, 第 1 种形式见图 2a), 左侧进水口导墙外侧转角 106°, 转弯半径 5.00 m, 即对外侧导墙作拉直处理, 记为工况 1; 第 2 种形式见图 2b), 左侧进水口导墙外侧转角 133°, 转弯半径 3.9 m, 即对外侧导墙作斜

拉处理,记为工况2;两种工况下右侧进水口布置形式相同,见图2c)。研究针对以上两种进水口形式,对灌水过程进行计算,计算时长0~800 s。

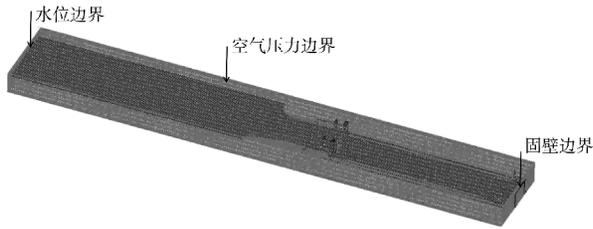
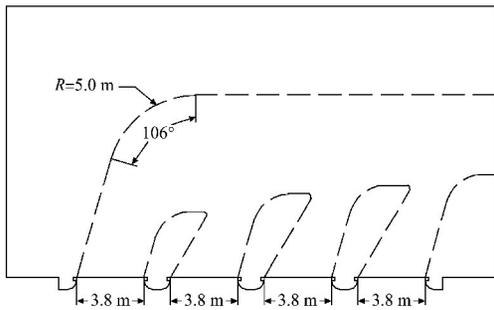
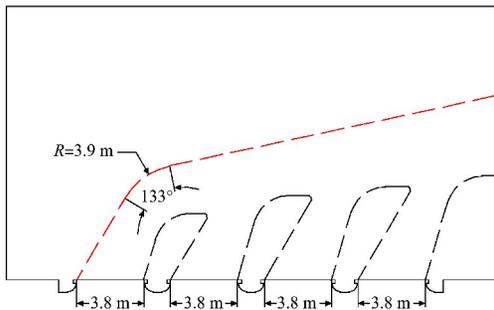


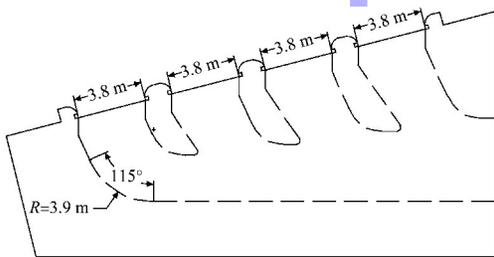
图1 计算全区域网格剖分及边界条件



a) 工况1左侧进水口



b) 工况2左侧进水口



c) 工况1、2右侧进水口

图2 输水系统进水口形式

### 1.3 数学模型验证结果

计算过程中监测输水系统流量过程,导出闸室前中后段共3点的水位过程线,将3点的水位平均值作为闸室平均水位。图3比较灌水工况下,阀门开启时间 $t_v = 5 \text{ min}$ 数学模型计算结果与物理

模型试验的水位、流量过程线,由图可以看出,二者的曲线吻合较好,说明该数学模型可以准确模拟船闸输水过程。

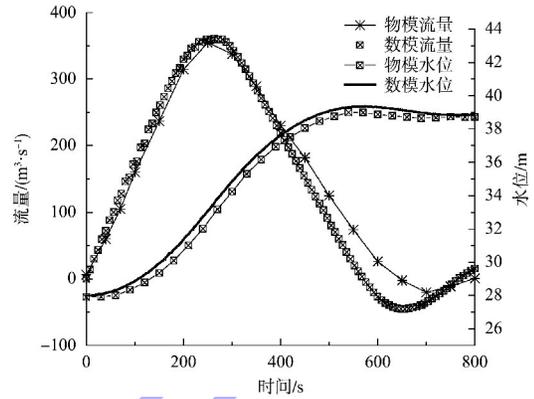


图3 模型验证

## 2 研究结果分析

拟定输水廊道阀门采用300 s匀速开启方式,对比不同进水口形式对于闸墙长廊道侧支孔输水系统的影响。

### 2.1 输水水力特性

从输水效率、闸室水位变化、流量过程、水面升降速度几个方面对比两种工况的差异。图4统计两种工况的流量过程。工况1和工况2输水水力特性对比见表1。

表1 工况1、2输水水力特性对比

工况	流量系数	输水时间/s	惯性超高/m	最大流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大流量发生时刻/s	闸室水面最大上升速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.799	494	0.37	360.54	264	3.38
2	0.779	500	0.35	354.50	280	3.32

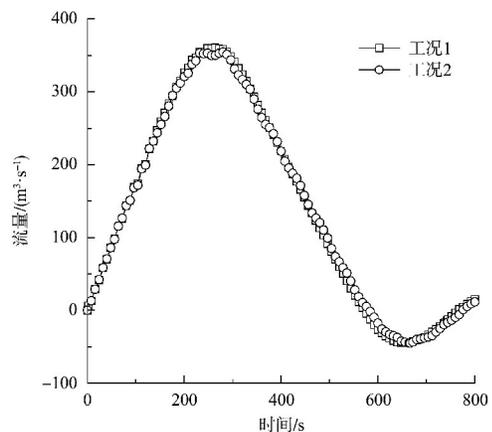


图4 工况1和2的流量过程

## 2.2 进水支孔

在每个进水支孔处设置监测断面, 记录每个进水支孔的水流量随时间变化情况。对各进水孔进行标记, 例如, 左侧进水第1支孔记为“J-1L”, 右侧第2支孔记为“J-2R”。两种工况下, 左右第1进水孔水流量随时间变化情况见图5a)。

对于左侧进水第1支孔而言, 工况2中的进水口处导墙斜拉处理, 降低了输水前期经J-1L支孔的流量, 但在输水后期J-1L支孔正向流量逐渐下降直至出现反向流量, 工况2中的反向流量值小于工况1。导墙斜拉对于J-1R支孔前期流量影响不大, 只在输水末期降低了反向流量。

两种工况下, 左右第2进孔水流量随时间变化情况见图5b)。左侧第2支孔, 工况2的导墙斜拉降低了其通过流量, 也降低了输水后期反向流量。在输水时间 $T=300$  s前, 工况2导墙斜拉的工程措施增大了右侧第2支孔通过流量; 在 $T=300$  s后, 工况2的J-2R支孔流量略小于工况1。

两种工况下, 左右第3进孔水流量随时间变化情况见图5c)。左侧第3支孔, 工况2导墙斜拉增大了其通过流量, 这种增强程度在输水前期更为明显。对于右侧第3支孔, 导墙斜拉的工程措施在输水前期增大了其通过流量, 输水后期工况2中J-3R支孔流量小于工况1。

两种工况下, 左右第4进孔水流量随时间变化情况见图5d)。左侧第4支孔, 工况2导墙斜拉整体增大了其通过流量, 这种增强程度在输水前期更为明显。对于右侧第4支孔, 导墙斜拉的工程措施在输水前期增大了其通过流量, 输水后期工况2中J-4R支孔流量小于工况1。

综上, 对于左侧进水支孔, 导墙斜拉的工程措施(工况2)使得左侧第1、2支孔(J-1L、J-2L)的通过流量下降, 第3、4支孔通过流量都有所增大; 对于右侧进水支孔, 导墙斜拉(工况2)对于右侧第1支孔(J-1R)流量过程影响不显著, 对于第2(J-2R)、3(J-3R)、4(J-4R)支孔的影响均使得支孔在输水前期流量升高, 在输水后期流量下降。

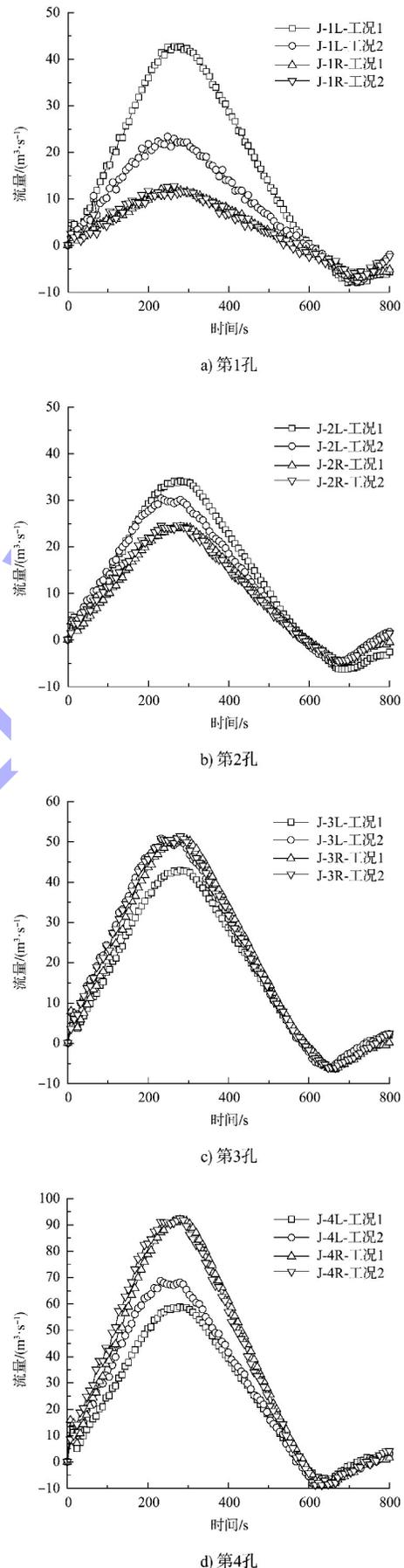
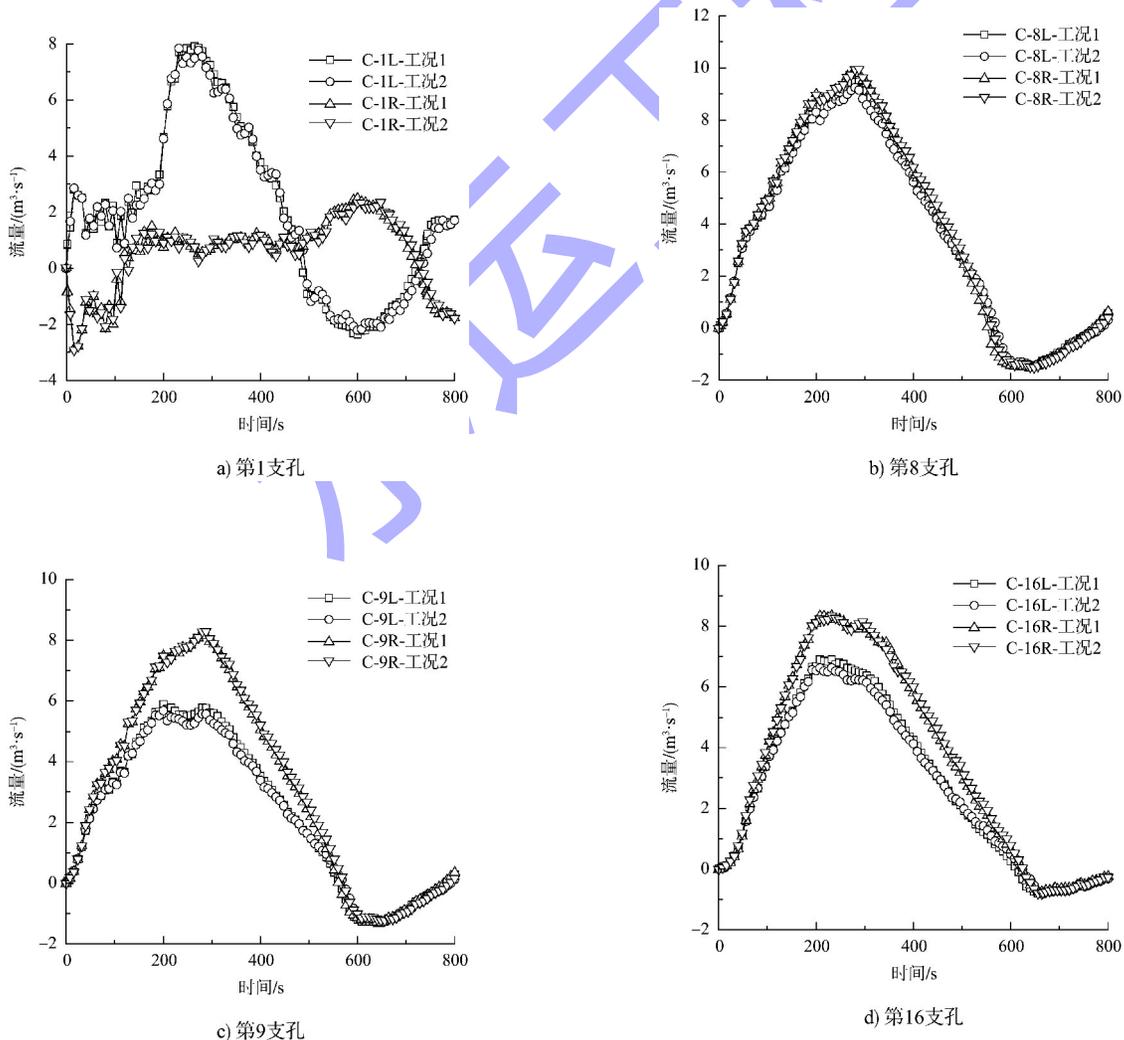


图5 进水支孔流量随时间变化

### 2.3 出水支孔

出水支孔共 48 孔，分两列分布于闸室两侧。将出水支孔分为 3 组，每组 16 个，3 组出水孔分别位于闸室的前、中、后部。3 组支孔沿纵支廊道内水流方向宽度分别为 1.0、0.9、0.8 m，高度保持 1.25 m 不变，支孔长 3.0 m，支孔中心间距 8.5 m。支孔出水后采用消力槛消能，消力槛宽 0.5 m、高 0.5 m，两条消力槛分别位于闸室内距离闸墙边 1.5 m 处。由于该系统为等惯性输水系统布置，因此每组中的前后两孔可以体现由于水流惯性造成支孔组内、组间出流的差异。第 1 组中选择第 1、8 孔(闸室左侧第 1 孔记为“C-1L”，右侧第 8 孔记为“C-8R”，其他类推)，第 2 组中选择第 9、16 孔，第 3 组中选择第 17、24 孔作为每组的代表，统计

各孔流量随时间变化情况见图 6。对于第 1 孔，工况 2 使得通过 C-1L、C-8L、C-9L、C-16L、C-17L、C-24L 孔的流量较工况 1 偏小，对于 C-1R、C-8R、C-9R、C-16R、C-17R、C-24R 孔则使其通过流量整体偏大。将流量最大时刻作为典型时刻，统计以上支孔在典型时刻的支孔流量，将同一支孔在两种工况条件下的流量进行对比，计算结果见表 2。由计算结果可知，工况 2 的导墙斜拉措施使得闸室前部支孔的大部分出流量减少 1.82%~5.14%，只有 C-1R 孔流量有所增加；闸室中部支孔的大多出流量也减少 2.57%~8.95%，只有 C-16R 孔流量有所增加；闸室后部两对支孔，左侧支孔出流量均减少 1.14%~4.79%，右侧支孔出流量均增加 1.23%~2.80%。



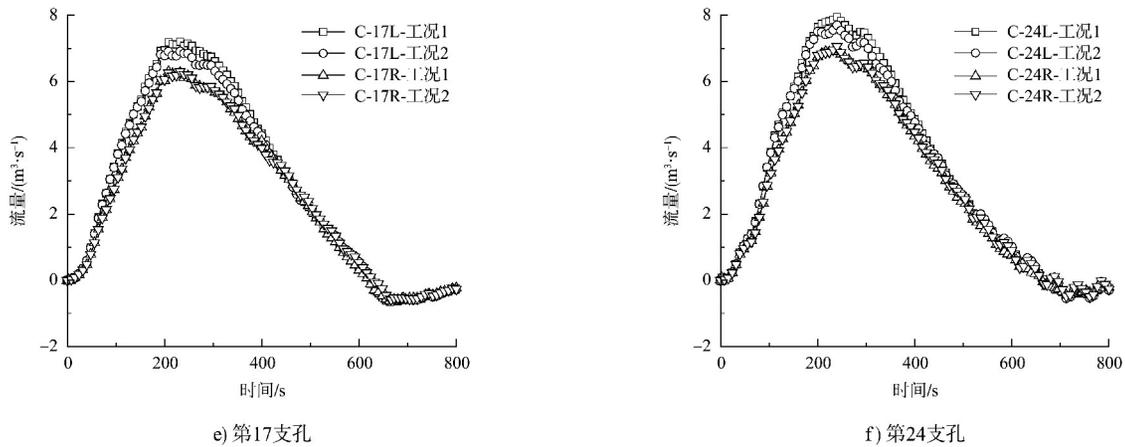


图6 出水支孔流量随时间变化

表2 两工况典型时刻下出水支孔流量对比

出水支孔	工况	典型时刻流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	工况2较工况1 增加百分比/%
C-1L	1	7.739	-3.35
	2	7.480	
C-1R	1	0.568	33.45
	2	0.758	
C-8L	1	9.477	-5.14
	2	8.990	
C-8R	1	9.818	-1.82
	2	9.639	
C-9L	1	5.778	-8.95
	2	5.261	
C-9R	1	8.178	-2.57
	2	7.968	
C-16L	1	6.538	-4.74
	2	6.228	
C-16R	1	7.895	0.44
	2	7.930	
C-17L	1	6.828	-4.79
	2	6.501	
C-17R	1	5.795	1.23
	2	5.866	
C-24L	1	7.369	-1.14
	2	7.285	
C-24R	1	6.398	2.80
	2	6.577	

### 2.4 进水口流态

提取两种工况进水口附近流速云图进行对比分析, 见图7。工况1条件下 J-1L、J-2L 支孔附近

水流流态稍不平顺, J-1L 支孔前部墩头附近存在1个高流速区, J-2L 支孔后部墩尾附近存在1个高流速区。导墙拉直, 使得水流进入支孔后向前(y向)流动的空间变大, 水流未及时沿导墙布置方向转向(x向)。右侧支孔附近流态相差不大。

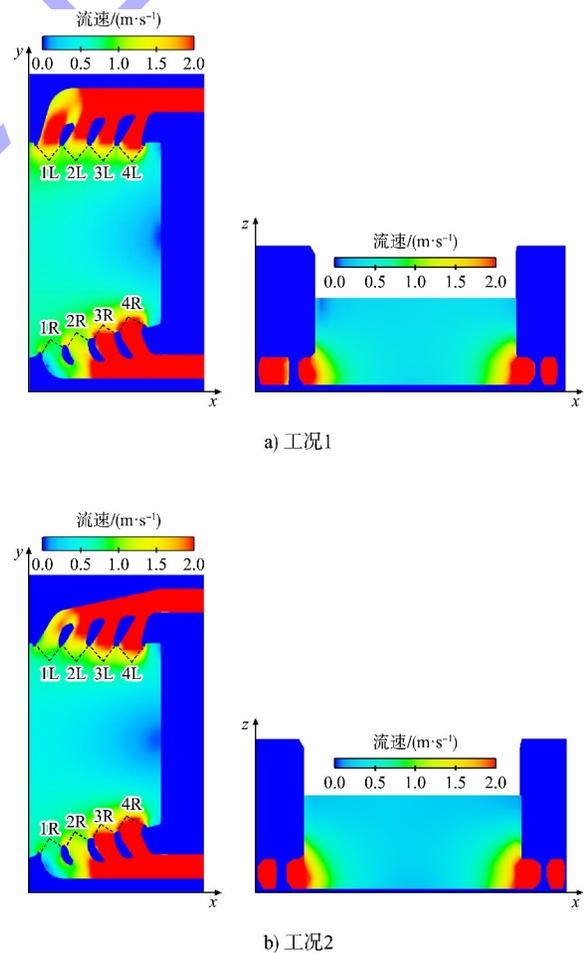


图7 进水口处平面和立面流速云图

工况1左侧墙体处形成明显漩涡流态,流速在0.5 m/s内,结合立面云图来看,并未形成明显的串通漏斗漩涡。工况2进水口附近未观察到漩涡流态。

### 3 结论

1) 工况1惯性超高0.37 m,大于工况2的0.35 m;工况1最大流量360.54 m<sup>3</sup>/s,大于工况2的354.50 m<sup>3</sup>/s;工况1输水时间为494 s,短于工况2输水时间500 s;工况1灌水流量系数0.799,大于工况2的0.779;工况1闸室水面最大上升速度为3.38 cm/s,大于工况2的3.32 cm/s。

2) 工况1增大了左侧1、2进孔的流量,降低了左侧3、4进孔流量;对右侧进孔的影响均为在300 s前工况1降低进孔流量,300 s后增大进孔流量,总体来说对右侧进水支孔的影响不大。

3) 工况1增大了闸室中前部(1~16孔)几乎所有出水支孔典型时刻的出流量(除C-1R和C-16R支孔);工况1增大了左侧C-17L、C-24L孔在典型时刻的出流量,降低了右侧C-17R、C-24R孔的出流量。

4) 典型时刻时,工况1左侧墙体处形成未串通漏斗漩涡,工况2并未观察到此现象。

5) 工况1导墙拉直的工程措施增大了廊道局部的过水面积,能够小幅增加系统的输水效率。但在控制惯性超高和闸室水面最大上升速度、增强进水支孔流量过程稳定性、改善进水口水流流态方面,工况2中进水口外侧导墙斜拉的工程措施更具优势。

### 参考文献:

[1] 李君,宣国祥,黄岳,等.等惯性两区段分散输水系统在40 m级单级巨型船闸中的应用[J].水运工程,

2016(12):20-25.

[2] 张绪进,吕伟东,刘平昌,等.贵港航运枢纽二线船闸输水系统水力学试验[J].水利水运工程学报,2012(4):34-38.

[3] 康立荣,张娟.中等水头船闸输水系统选型分析探讨[J].水运工程,2013(2):107-110,122.

[4] 孙倩.船闸闸墙长廊道输水系统灌水过程闸室水流条件模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[5] 宣国祥,李君,黄岳,等.中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水动力学研究[J].水运工程,2016(12):36-41.

[6] 周华兴.船闸输水廊道进(出)口布置型式的研究[J].水道港口,1998(4):22-30.

[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.

[8] 杨伟,姚伟,董红燕,等.三峡工程永久船闸正向进水口布置优化比试验研究[C]//第五届全国水动力学学术会议暨第十五届全国水动力学研讨会论文集.北京:中国力学学会,2001:423-430.

[9] 金国强,刘本芹,宣国祥,等.富春江船闸改扩建工程船闸输水系统布置研究[J].水利水运工程学报,2012(4):60-64.

[10] 任启江,叶雅思.旁海枢纽工程船闸输水系统布置及试验研究[J].水运工程,2018(12):129-133.

[11] 陈辉.船闸输水系统进水口水动力特性数值模拟研究[D].武汉:长江科学院,2009.

[12] DAVIS J P. Hydraulic design of navigation locks [M]. Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1989.

[13] 朱磊.船闸明沟消能研究综述[J].东北水利水电,2015,33(7):67-70,72.

[14] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.

(本文编辑 赵娟)