



# 弯曲河段船闸引航道通航水流条件模拟

张 羽，杨朝辉，赵集云，丁梦霞

(华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 弯曲河段船闸上游引航道口门区存在复杂的流态, 如回流、斜流等。采用物理模型试验与数值模拟相结合的方法, 通过改变节制闸调度方式对船闸上游引航道及口门区通航水流的水力特性进行研究。结果表明, 当上游来流  $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ , 节制闸开启中四孔最大横向流速及回流流速明显小于节制闸开启左八孔; 当上游来流  $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ , 节制闸开启中四孔最大横向流速及回流流速大于节制闸开启左八孔; 流量一致情况下, 断面测点流速分布差别较大; 控制节制闸调度方式可以有效削弱回流及斜流效应, 保证通航安全。

**关键词:** 引航道; 口门区; 数值模拟; 物理模型; 调度

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0132-07

## Simulation of navigable flow conditions for approach channel of ship lock in curved reach

ZHANG Yu, YANG Zhao-hui, ZHAO Ji-yun, DING Meng-xia

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** There are complex flow patterns in the entrance area of the upstream approach channel of ship locks in the curved reach, such as reflux and oblique flow. The hydraulic characteristics of navigable flow in the upstream approach channel and the entrance area of ship locks are studied by changing the scheduling method of a check gate with the combination of physical model tests and numerical simulations. The results show that with the upstream inflow of  $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ , the maximum lateral flow velocity and reflux velocity upon opening the fourth hole in the middle by the check gate are greatly smaller than those upon opening the eighth hole on the left; with the upstream inflow of  $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ , the maximum lateral flow velocity and reflux velocity upon opening the fourth hole in the middle are greater than those upon opening the eighth hole on the left. When the flow rate is consistent, the flow velocity distribution of the measuring points on the section varies greatly. Controlling the scheduling method of a check gate can effectively weaken the reflux and oblique flow effect and ensure navigation safety.

**Keywords:** approach channel; entrance area; numerical simulation; physical model; scheduling

口门区是连接船闸与河道的纽带, 位于引航道内静水与河道中动水的交界处, 引航道口门区通航水流条件关系到船队能否安全出入船闸。因此, 有必要进一步研究该类工程引航道口门区的通航水流条件。为保证船只安全、平稳航行, 引航道口门区水流横向与纵向速度不应过大, 并且不应有复杂的水流条件, 如涡流、回流等。为此

很多学者进行了深入研究, 如李茜希等<sup>[1]</sup>分析不同流量下河道主流与引航道口门区回流流速变化情况; 陈辉等<sup>[2]</sup>通过模拟河道主流与引航道中心线夹角变化, 分析引航道口门区水位、流速分布等水流特征; 王云莉等<sup>[3]</sup>分析引航道口门区不良水流流态特点, 根据相关标准的要求, 提出改善措施; 齐庆辉等<sup>[4]</sup>利用 Mike 软件数值模拟研究

引航道口门区流速等水力特性, 并提出当引航道水流流态不满足规范要求时, 在导流墩附近加格栅等措施; 李君涛等<sup>[5]</sup>研究利用导流墩等工程措施, 可以减少斜流和回流对船只通航的影响; 祁永生等<sup>[6]</sup>通过河工模型试验, 发现闸门的调度组合及导流墩等优化方案, 可以改善船闸的通航水流条件; 李兴亮等<sup>[7]</sup>通过研究发现, 在引航道口门区采用多种工程措施组合, 可以有效减少水流对船只航行的影响, 确保船只安全通过; 杨升耀等<sup>[8]</sup>研究船闸引航道口门区交界处, 不同工况下导航墙分流情况对通航的影响; 王建平等<sup>[9]</sup>根据河势走向和弯曲河段水流运动特性, 上游调整岸线如设置丁坝群等, 在引航道口门区产生过渡段区域, 改善口门区水流流态; 杨忠超等<sup>[10]</sup>采用二维数值模拟研究, 采用设置导航墙及增加导流墩等优选设计方案, 经过对比分析其通航水流条件变化情况, 得到符合标准要求的优化方案。

上述研究大多侧重于河工模型试验或数学模拟, 对数学模型与物理模型相结合的方式研究较少。本文以南阳唐河郭滩航运枢纽为例, 通过调度方式对船闸引航道口门区水力特性影响进行数值模拟研究计算, 与弯曲河段船闸引航道口门区通航水流条件模型试验进行对比分析, 并与前人研究结果进行验证, 分析节制闸对水力特性的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 数学模型的建立

本文对研究河段进行数学建模, 范围为上游引航道口门区附近约 1.2 km 区域的河段(节制闸上游 1.2 km 的区域), 通过数值模拟计算结果可知, 引航道口门区通航水流条件引航道口门区的水流呈明显的二维平面流动, 其中忽略垂向流速的影响。模型拟采用非结构网格有限体积法进行数值离散, 整个计算空间被划分为多个相互连接但无重叠的三角形网格单元。为了保持模型计算的稳定性, 调整模型中的时间步长, 确定收敛条

件判断数 CFL 的数量小于 1。以二维平面模型对船闸引航道口门区进行数值模拟, 采用 Mike21 流体模拟软件, 采用非结构化三角网格, 网格边长最大每 1.4 m 一个, 最小每 0.3 m 一个, 另外还对重点计算域引航道口门区的网格进行加密处理, 共布置网格单元 3.381 6 万个, 网格节点 1.747 1 万个, 以保证计算的准确, 网格划分见图 1。

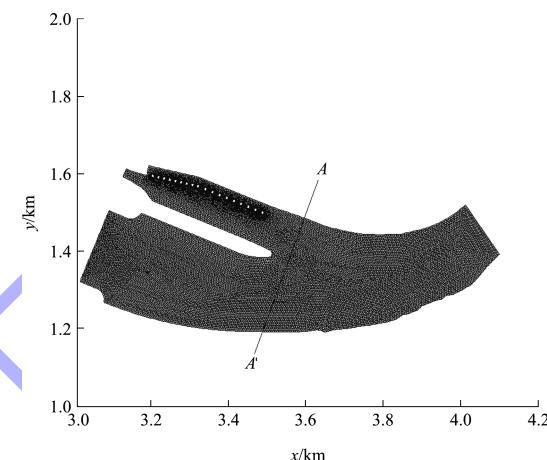


图 1 网格划分

根据河道形态及水流特征, 采用水深平均的平面二维浅水数学模型, 其基本控制方程为: 水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$x$  方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \\ \frac{\varepsilon_{xy} \partial^2 u}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy} \partial^2 u}{\rho \partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$y$  方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) - \\ \frac{\varepsilon_{xy} \partial^2 v}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy} \partial^2 v}{\rho \partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间;  $u$ 、 $v$  分别为沿  $x$ 、 $y$  方向的流速;  $h$  为水深;  $\eta$  为床面高程;  $\varepsilon_{xy}$ 、 $\varepsilon_{xx}$ 、 $\varepsilon_{yy}$  为紊动黏性系数;  $n$  为糙率;  $\rho$  为水密度。

## 1.2 模型验证

对该引航道进行二维建模，模型进口采用流量进口，模型出口为水位边界，将引航道口门处的流速分布与模型的测量结果进行比较。以  $326 \text{ m}^3/\text{s}$  流量为例，对引航道口门处的水面线及断面流速分布进行验证，将模拟计算结果的 A-A' 断面的流速、水位与实测数据、模型试验值进行对比，见图 2。可以看出，实测水面线与模型验证水面线较为吻合，符合规范要求。根据实测断面流速水深，在相同位置模型试验进行了流速水深测量，试验结果与原型实测也基本一致，故水流运动满足相似要求。数学模型计算结果与原型实测资料基本吻合，该数学模型能很好地模拟引航道口门区的水流结构。

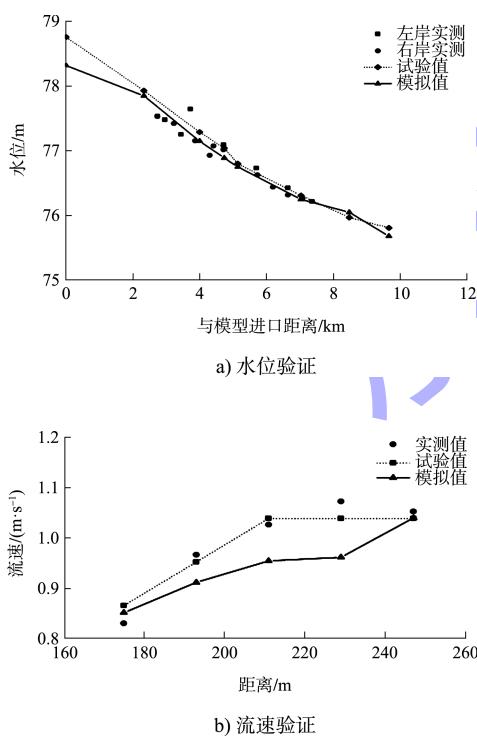


图 2 数值模拟-验证试验测量数据对比

## 2 试验方案与分析

### 2.1 通航水流条件限值

GB 50139—2014《内河通航标准》<sup>[11]</sup> 的相关要求见表 1。南阳郭滩航运枢纽为 IV 级，引航道口

门区纵向、横向、回流流速分别不应大于  $2.00$ 、 $0.30$ 、 $0.40 \text{ m/s}$ 。

表 1 口门区水面流速最大限值

船闸级别	纵向流速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	横向流速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	回流流速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
I ~ IV	$\leq 2.00$	$\leq 0.30$	$\leq 0.40$
V ~ VIII	$\leq 1.50$	$\leq 0.25$	

### 2.2 试验工况的选择

根据唐河多年来流分析，模拟流量工况范围为  $326 \sim 1810 \text{ m}^3/\text{s}$ ，选择  $326$ 、 $500$ 、 $1000$ 、 $1500$  与  $1810 \text{ m}^3/\text{s}$  等 5 个流量进行试验分析。由物理模型试验得出，上游来流量在  $326 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$  时，改变节制闸闸门调度方式，发现河道主流与引航道口门区夹角发生变化，此时河道主流稳定在距左岸  $84 \sim 90 \text{ m}$  处，主流在引航道口门区断面最大纵向主流流速为  $1.12 \text{ m/s}$ ，引航道连接段内水流紊动作用弱，对船只通航影响低。

上游来流量在  $1000 \sim 2000 \text{ m}^3/\text{s}$  时，引航道口门区左侧出现回流漩涡，此时河道主流流速大，河道主流最大纵向流速  $1.68 \text{ m/s}$ ，引航道连接段内水流紊动作用强，有小范围往复流出现，最大横向流速为  $0.26 \text{ m/s}$  回流区随着河道主流的行进（前行）而逐渐消失；且口门区回流造成引航道湍流，形成斜流，不利于航运。在来流流量超过  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  时，节制闸处于全开状态，调度方式对水流条件几乎无影响。

本文主要选择上游来流为  $1000$  和  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  两种工况进行试验，根据设计调度方案<sup>[12]</sup>，节制闸门共 12 孔，从左岸依次向右为  $1^{\#} \sim 12^{\#}$  闸门。在相同流量下，通过调节节制闸闸门调度中四孔、左八孔等方式，分析引航道口门区通航水流条件。上游引航道口门区断面测点布置见图 3，其中从导航墙堤头附近开始，沿引航道口门区断面呈  $1 \times 10$  矩阵布置（1 行 1 列，共 10 个测点，口门左侧每个点间距  $20 \text{ cm}$ ，右侧点距  $30 \text{ cm}$ ）。

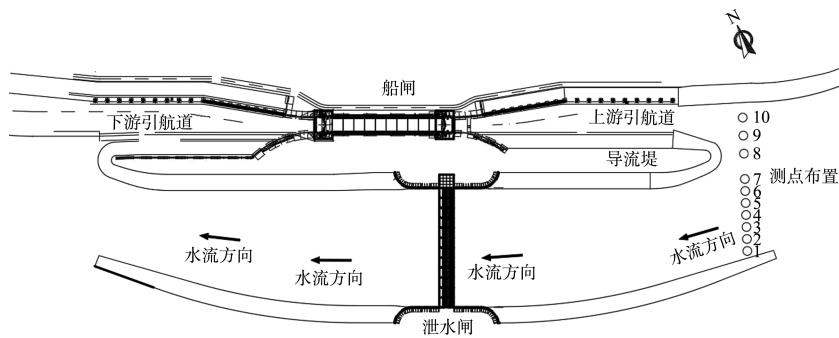


图3 测点布置

### 3 试验结果及对比分析

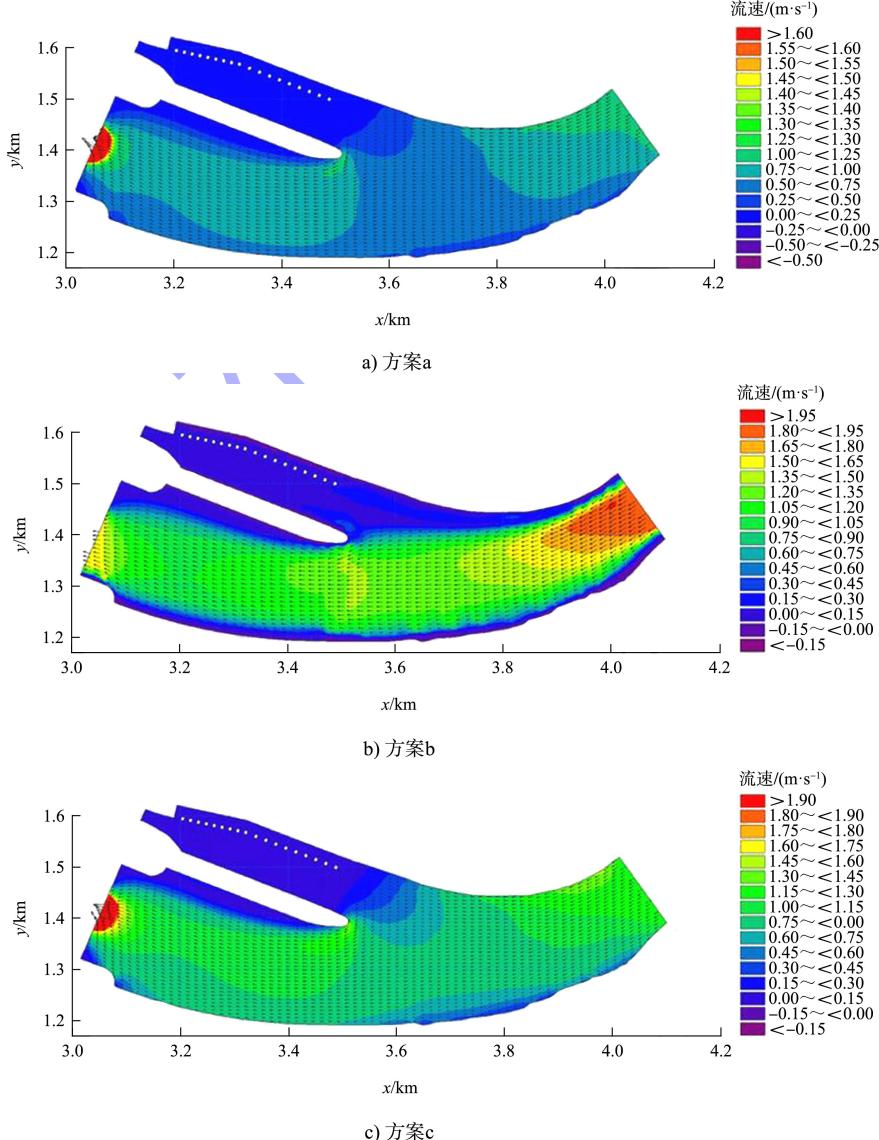
#### 3.1 模型试验结果

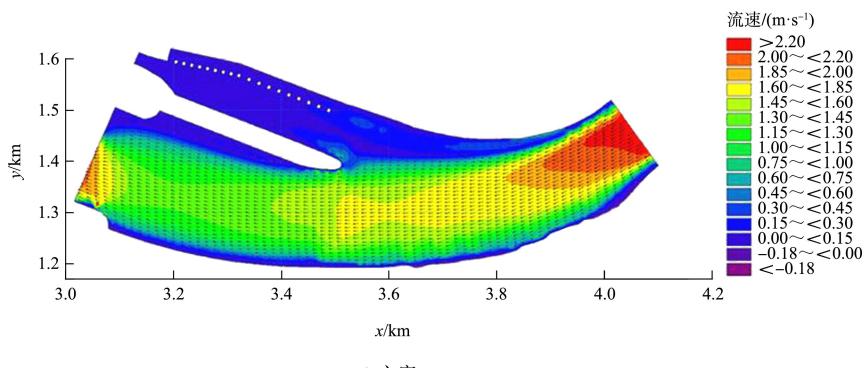
引航道口门区通航水流条件工况见表2, 主要介绍2种流量下的4种不同调度方案。对2种通航流量为1 000、1 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 不同调度方式下的上游引航道口门区通航水流条件进行数值模拟, 引

航道口门区整体、局部的流速分布云图见图4、5。

表2 调度方案设置

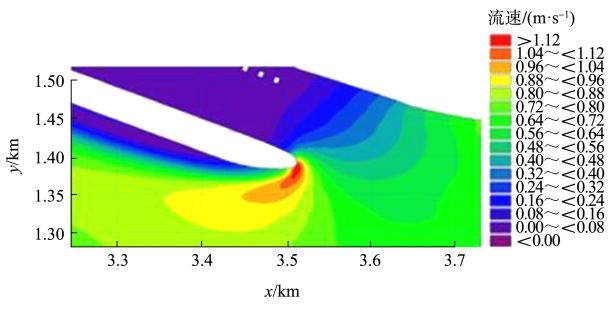
流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	方案	调度方式
1 000	a	开中四孔
	b	开左八孔
1 500	c	开中四孔
	d	开左八孔



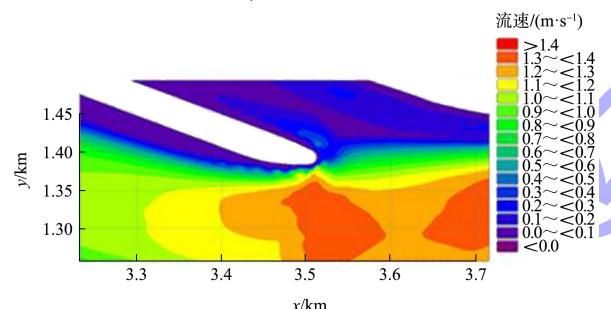


c) 方案c

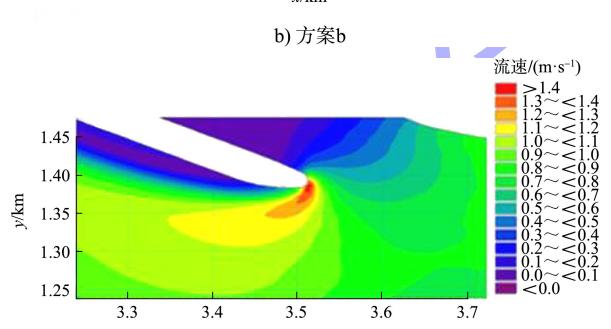
图 4 引航道口门区整体流速分布云图



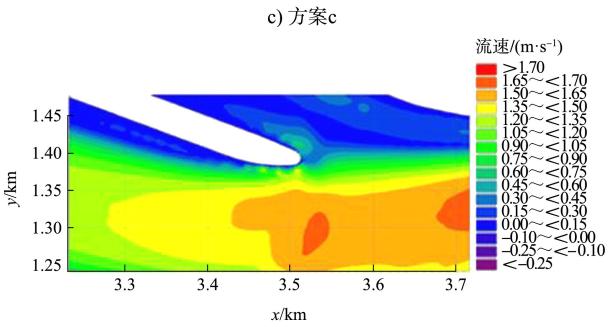
a) 方案a



b) 方案b



c) 方案c



d) 方案d

图 5 引航道口门区局部区域流速分布云图

可以看出,当上游来流为  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  时,引航道口门区断面纵向流速为  $-0.2 \sim 1.2 \text{ m/s}$ ,横向流速为  $-0.5 \sim 0.3 \text{ m/s}$ ,导航墙堤头左侧位置形成回流漩涡,漩涡中最大流速为  $0.14 \text{ m/s}$ ,此时口门区右航线(出口下  $40 \sim 60 \text{ m}$ )通航水流条件较差。上游水位满足通航水位的要求,此时仅中四孔闸门打开,从流速分布上看,河道主流流速较两岸最高流速大  $1.12 \text{ m/s}$ ,引航道内最大流速  $0.32 \text{ m/s}$ 。当闸门在  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、闸门调度为左八孔时,发现引航道口门区断面纵向流速为  $-0.80 \sim 1.41 \text{ m/s}$ ,横向流速  $-0.45 \sim 0.18 \text{ m/s}$ ,导航墙堤头正前方形成回流漩涡,且漩涡区域大。此时主流流速较大,引航道内流速较小仅  $0.17 \text{ m/s}$ 。口门区右航线(出口下  $40 \sim 70 \text{ m}$ )通航水流条件较差。当上游来流为  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、闸门调度为中四孔时,引航道口门区断面纵向流速为  $-0.85 \sim 1.24 \text{ m/s}$ ,横向流速  $-0.65 \sim 0.23 \text{ m/s}$ ,导航墙堤头左侧有局部回流漩涡,回流流速小于  $0.4 \text{ m/s}$ 。此时口门区断面流速较大,水流流态湍急,从流速分布上看,河道主流区略偏向左岸,引航道内流速偏大,最大流速仅  $0.15 \text{ m/s}$ ,并未出现紊乱水流,满足通航要求。当闸门在  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、闸门调度为左八孔时,发现引航道口门区断面纵向流速为  $-0.64 \sim 1.68 \text{ m/s}$ ,横向流速为  $-0.56 \sim 0.26 \text{ m/s}$ ,导航墙堤头正前方附近产生回流漩涡,此时口门区主河道断面流速较大,水流流态湍急。但从流速分布上看,河道主流区略偏向左岸,但引航道内最大流速仅  $0.15 \text{ m/s}$ ,并未出现紊乱水流,满足通航要求。

总体上,在上游引航道口门区转弯处主流水流向左岸轻微滑移,至节制闸的泄水口,引航道

口门区连接段与航道轴线形成一定交角, 即斜流, 斜流效果明显, 侧向流速较高, 对口门区通航水流条件不利。同时, 在口门区左岸形成顺时针三角形回流区。再循环的回流流速较低。引航道内有较弱回流, 其余为弱往复流。

### 3.2 调度方式及结果分析

由计算结果可知, 当上游来流一致时, 通过控制闸门的调度组合方式, 可以有效改善引航道口门区的水力特性。当上游来流总量为 1 000、1 500 m<sup>3</sup>/s 时, 对方案 a 与 b、方案 c 与 d 之间上游引航道口门区通航水流条件进行对比分析。可以看出随着节制闸闸门的开启, 闸门组成越来越靠近船闸, 河堤与引航道轴线的交角减小; 河流主流越接近引航道口门区。此时, 对口门区域和引航道的水流条件不利。

根据相同流量条件下计算结果可知, 当控制闸门调度方式时, 河道主流受导航墙阻碍而分流, 在导航墙前产生回流漩涡, 回流漩涡在导航堤附近向左偏移, 最终随主流前进而消失。当上游来流一致时, 控制闸门开启调度组合方式, 随着引航道与河道主流夹角增大, 口门区的回流作用变小, 引航道内横向流速降低, 斜流效应也减弱, 水流流态相对趋于稳定, 满足通航水流标准。

不同方案的口门区流速特征见表 3。结合图 7 可以看出, 在  $Q=1\ 000\text{ m}^3/\text{s}$  条件下, 方案 a 与 b 在流量一致的情况下, 方案 a 口门区最大纵横流速相对较小, 流态稳定, 回流流速满足内河航运标准。方案 c 与 d 在  $Q=1\ 500\text{ m}^3/\text{s}$  条件下, 方案 d 口门区最大横向流速极值差别较小, 但回流区域范围及流速较小, 回流流速满足内河航运标准, 因此, 在流量一定的情况下, 通过控制调度方式, 可以有效削弱(减弱)回流及斜流效应。

表 3 口门区流速特征

调度方式	流量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	纵向流速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	横向流速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	回流流速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
开中四孔	1 000	1.12	0.08	0.120
	1 500	1.24	0.23	0.175
开左八孔	1 000	1.41	0.18	0.140
	1 500	1.68	0.26	0.090

注: 以上流速为最大流速。

### 3.3 物理模型与数学模型结果对比分析

将数值模拟结果与物理模型试验(模型几何比尺为 1:75)相应流量下口门区的相同测点流速进行对比分析, 结果见表 4。可以看出, 各级流量下数学和物理模型的流速分布吻合较好, 断面纵向流速最大误差为 0.09 m/s, 该数学模型能较好地模拟船闸引航道口门区的水流条件。

表 4 数学和物理模型的口门区流速比较

断面与出口 距离/m	口门区最大纵向流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )							
	326 $\text{m}^3/\text{s}$		500 $\text{m}^3/\text{s}$		1 000 $\text{m}^3/\text{s}$		1 500 $\text{m}^3/\text{s}$	
	数模	物模	数模	物模	数模	物模	数模	物模
7.5	0.35	0.34	1.04	0.98	1.39	1.41	1.13	1.14
30.0	0.78	0.74	1.10	1.08	1.38	1.36	1.21	1.18
52.5	0.78	0.72	0.87	0.85	1.04	0.98	1.21	1.16
75.0	0.69	0.65	0.87	0.79	1.04	0.96	1.18	1.15
97.5	0.52	0.60	0.69	0.71	1.04	0.95	1.16	1.17
120.0	0.26	0.30	0.17	0.2	0.35	0.36	1.16	1.17
142.5	0.26	0.27	0.17	0.15	0.35	0.34	1.14	1.07
180.0	0.23	0.22	0.17	0.18	0.26	0.27	0.38	0.34
202.5	0.11	0.12	0.13	0.11	0.18	0.16	0.20	0.18
225.0	0.08	0.10	0.07	0.06	0.09	0.10	0.11	0.09

## 4 结语

1) 物理模型与数值模拟结果进行对比验证,两者结果吻合良好。

2) 结合 Mike21 软件建立引航道数学模型,并得到引航道口门区水流变化规律,主流在上游引航道口门区正前方分流,产生回流漩涡,向左岸轻微滑移,并随着主流前进至节制闸的泄水口。

3) 当其他条件一定时引航道口门区断面流速随流量增大而增大,斜流随回流漩涡与引航道轴线形成的夹角增大而增大。

4) 当上游来流  $1\ 000\ m^3/s$ , 节制闸开启中四孔较开左八孔方案优。当上游来流  $1\ 500\ m^3/s$ , 节制闸开启左八孔较开中四孔方案优。方案 a 与 d 的口门区横向流速与回流流速较低,在流量一定的情况下,通过控制调度方式,可以有效削弱(减弱)回流及斜流效应。

## 参考文献:

- [1] 李茜希, 韩昌海, 汪罗. 泄水闸泄流方式对引航道口门区水流的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(2): 128-131.
- [2] 陈辉, 刘志雄, 江耀祖. 引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 13-18.
- [3] 王云莉, 孙国栋, 向美焘. 船闸口门区不良流态改善措

(上接第 131 页)

## 参考文献:

- [1] 齐庆辉, 曲红玲, 东培华, 等. 韩庄双线船闸下游引航道水力特性模拟研究[J]. 水运工程, 2015(9): 117-122.
- [2] 张羽, 杜庆君, 李卓普, 等. 泄水闸调度方式对凸岸船闸通航水流条件影响的试验研究[J]. 水运工程, 2021(4): 97-101, 152.
- [3] 王建平, 刘超, 张世宝, 等. 风光枢纽扩建船闸上游口门区通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2021(1): 156-161.
- [4] 王建平, 刘霞, 邢方亮. 红花水电站二线船闸下游引航道口门区通航水流条件改善研究[J]. 人民珠江, 2015, 36(2): 50-52.

施[J]. 水运工程, 2016(3): 83-88.

- [4] 齐庆辉, 曲红玲, 东培华, 等. 韩庄双线船闸下游引航道水力特性模拟研究[J]. 水运工程, 2015(9): 117-122.
- [5] 李君涛, 张公略, 冯小香. 导流墩改善口门区水流条件机理研究[J]. 中国港湾建设, 2011(2): 1-3.
- [6] 祁永升, 许光祥, 许锡宾, 等. 湘江近尾洲二线船闸下游引航道口门区通航水流条件改善措施[J]. 水运工程, 2021(3): 126-131.
- [7] 李兴亮, 陈野鹰. 弯曲河段下游引航道口门区通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2016(2): 127-130, 141.
- [8] 杨升耀, 秦杰, 杜志水, 等. 引航道与泄洪河道交汇区流速及通航条件研究[C]//吴有生, 邵雪明, 王军. 第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2019: 512-517.
- [9] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬. 弯曲河道船闸口门区通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2019(11): 86-91.
- [10] 杨忠超, 魏涛涛, 黄秋杰. 麻石船闸改扩建工程下引航道优化布置数值模拟[J]. 水运工程, 2018(5): 127-131, 144.
- [11] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [12] 张羽, 杜庆君, 李卓普, 等. 泄水闸调度方式对凸岸船闸通航水流条件影响的试验研究[J]. 水运工程, 2021(4): 97-101, 152.

(本文编辑 王璁)

- [5] 毕墨. 盐邵船闸下游引航道流态改善研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- [6] 黄智敏, 陈卓英, 钟勇明, 等. 龙船厂航电枢纽船闸布置优化研究[J]. 广东水利水电, 2015(1): 5-8.
- [7] 周玉洁. 键为航电枢纽总体布置及通航问题研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [8] 叶海桃. 船闸引航道口门区流态的模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [9] 李发政, 孙家斌. 三峡船闸下游引航道通航条件研究[J]. 长江科学院院报, 1999(5): 13-16, 32.
- [10] 杨桦. 韩庄双线船闸通航水流条件改善措施[J]. 水运工程, 2015(9): 143-146.

(本文编辑 郭雪珍)