



风洞子闸坝调度方式对 船闸下引航道口门区通航条件的影响

程 艳, 吴礼国, 徐 红, 李 维
(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 针对风洞子船闸下引航道口门区及连接段的通航条件, 进行闸坝调度运行方式对船闸下引航道口门区及连接段的水流特性的影响研究。采用数学模型, 研究风洞子航运枢纽工程闸坝开启不同位置 and 不同数量时下引航道口门区及连接段的水流条件。结果表明, 在相同流量级时开启左岸闸门, 下引航道口门区及连接段的水流条件更有利于船舶安全航行; 在满足闸孔过流条件时, 开启左侧闸门数量越少水流条件更有利于船舶安全航行。

关键词: 风洞子航运工程; 调度方式; 通航条件

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0179-06

Influence of lock and dam dispatching mode for Fengdongzi ship lock on navigation conditions of entrance area in downstream approach channel

CHENG Yan, WU Li-guo, XU Hong, LI Wei

(Sichuan Communication Surveying and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Considering the navigation conditions of the entrance area in the downstream approach channel and the connecting section of the Fedongzi ship lock, we study the influence of the lock and dam dispatching mode on the flow characteristics of the entrance area and connecting section. A mathematical model is employed to study the flow conditions in the entrance area and connecting section when the lock and dam of the Fengdongzi navigation project are open in different positions and quantities. The results indicate that when the lock gates on the left bank are open at the same flow rate, the flow conditions in the entrance area and connecting section are more favorable to the safe navigation of ships; assuming the discharge condition of lock gates is met, the flow conditions are better when fewer lock gates on the left bank are open.

Keywords: Fengdongzi navigation project; dispatching mode; navigation condition

枢纽在运行过程中, 闸坝的调度运行方式是根据上游来流量及电站发电需求进行调节, 一般运行方式为小流量时调度闸坝控制下泄流量, 船闸通航, 流量增大至分界流量后闸坝敞泄, 船舶停航。闸坝的调度运行方式不同, 枢纽上下游的水流条件会有所不同, 而船闸引航道口门区水流特性是影响船舶航行安全和通航效率的重要因素^[1]。

船闸通航主要集中在小流量情况下, 此时枢纽通过开启不同闸孔数及闸孔高度, 控制下泄流量, 维持坝前正常蓄水位, 使电站正常发电。而泄水闸有多种开启方式, 包括集中、分散、均匀、区段、局部(均匀)或分段间隔等^[2]。泄水闸不同的开启方式, 使河道水能量再分配, 改变水流流速和流向, 造成回流范围和强度的差异, 影响船

收稿日期: 2021-11-04

作者简介: 程艳(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事港航工程设计。

通讯作者: 徐红(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港航工程设计。E-mail: 593050683@qq.com

闸引航道及口门区的水流和航行条件，尤其是下引航道。本文以数学模型为依托，研究风洞子航运枢纽工程泄水闸调度运行方式对船闸下引航道口门区的通航条件影响。

1 模型建立与验证

1.1 模型基本原理

河道水流一般可视为不可压缩牛顿流体，其水流运动规律可用 Navier-Stokes 方程组描述，对该方程进行时均化得到其 Reynolds 形式，包括质量守恒方程和动量守恒方程^[3]。从 Reynolds 方程

出发，考虑到工程所在河段水平尺度远大于垂直尺度，水力参数在垂直方向的变化明显小于水平方向的变化，可忽略垂向加速度，设定压强服从静水分布；不计垂直方向的流动时间和空间的微分，将方程沿水深积分，得到平面二维的河道水流运动控制方程^[4]。

水流连续方程：

$$\frac{\partial Z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m$$
 (1)

水流动量方程：

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \cdot \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \cdot \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \Omega q_2 + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0$$
 (2)

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \cdot \frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \cdot \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + g H \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \Omega q_1 + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial (H \tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0$$
 (3)

式中： Z_w 为水面高度； Z_b 为床面高度； t 为时间； H 为水深； q_1 、 q_2 为 x 、 y 方向的单宽流量； q_m 为单位面积的旁侧入流流量（为正）或出流流量（为负），式(1)假定水流密度在整个模拟区域内保持不变^[5]； β 为各向同性的动量修正系数； ρ 为水流密度； p_a 为水面大气压力； Ω 为科里奥利力参数； τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为 x 、 y 方向的河床剪切应力； τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为 x 、 y 方向的表面风剪切应力； τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 为由紊流引起的剪切应力。

1.2 模型建立与验证

本文选用风洞子航运枢纽工程坝轴线以下 1.8 km 范围内的实测地形，采用三角形网格对计算区域进行离散，既可以较好地描述河道边界和河道中建筑物边界，又能达到较高精度，网格最大长度约 20 m，模型中对船闸引航道、电站、闸坝区等部位进行网格加密，网格最小长度约 2 m。研究区域网格划分见图 1。

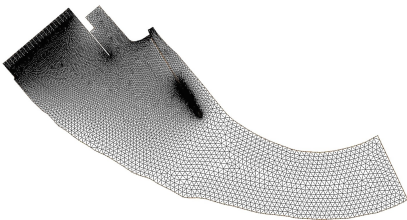


图 1 研究区网格划分

为保证模型参数选取的合理性，在模型建立后对其进行验证，验证资料为实测流量 1 150 m³/s 时沿程瞬时水位，验证结果见图 2。可以看出，模型水位与原型最大水位偏差为 0.06 m，差值较小，建立的模型可做进一步研究。

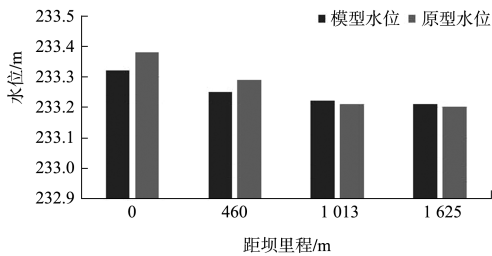


图 2 模型与原型沿程水位

2 方案拟定

2.1 风洞子航运工程常规调度方式

渠江风洞子航运枢纽工程泄洪冲沙闸布置于主河槽，为开敞式宽顶平底闸。共布置 20 孔泄水冲沙闸，从左岸至右岸为 1[#]~20[#]，单孔净宽 15 m，堰顶高程 230.0 m，闸顶高程 260.6 m。本枢纽为径流式日调节运行，枢纽运行调度方案主要考虑电站本身的日调节作用和枢纽冲排泥沙的要求。枢纽拟定的调度运行方式为：当入库流量小于发电引用流量 843 m³/s 时，水库水位在 242.6 m（死水位）~243.0 m（正常蓄水位）之间消落发电；当

入库流量大于 $843\text{ m}^3/\text{s}$ 且小于 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 电站引用流量以外多余流量通过冲沙闸下泄, 水库水位维持正常蓄水位 243.0 m 发电; 当入库流量大于 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水库闸门逐步开启泄洪冲沙, 电站停机, 枢纽平面布置见图 3。

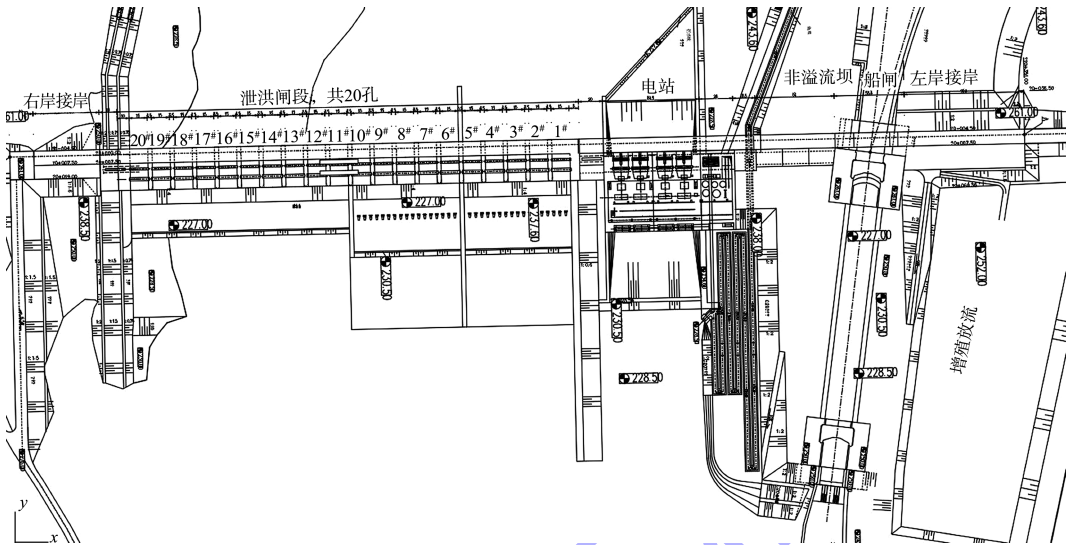


图 3 风洞子航运枢纽工程平面布置 (单位: m)

2.2 研究方案

根据枢纽调度运行方式, 选取流量小于 $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、泄水闸控泄时的 4 级流量进行研究, 此时电站满发, 电站下泄流量 $843\text{ m}^3/\text{s}$ 。为全面分析泄水闸开启方式对船闸下游引航道口门区及连接段水流条件的影响, 从闸坝开启位置和闸坝开启孔数两方面进行研究, 各方案及边界条件见表 1。

表 1 风洞子航运枢纽工程闸坝调度方案

方案	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	闸门开启情况
闸门开启不同位置	1 500	a 工况: 3 [#] 、4 [#] 闸门开启; b 工况: 10 [#] 、11 [#] 闸门开启; c 工况: 17 [#] 、18 [#] 闸门开启
	3 000	a 工况: 1 [#] ~4 [#] 闸门开启; b 工况: 9 [#] ~12 [#] 闸门开启; c 工况: 17 [#] ~20 [#] 闸门开启
	4 500	a 工况: 1 [#] ~5 [#] 闸门开启; b 工况: 8 [#] ~12 [#] 闸门开启; c 工况: 16 [#] ~20 [#] 闸门开启
	5 000	a 工况: 1 [#] ~6 [#] 闸门开启; b 工况: 8 [#] ~13 [#] 闸门开启; c 工况: 15 [#] ~20 [#] 闸门开启
	6 000	a 工况: 1 [#] ~8 [#] 闸门开启; b 工况: 7 [#] ~14 [#] 闸门开启; c 工况: 13 [#] ~20 [#] 闸门开启
闸门开启不同孔数	1 500	a 工况: 3 [#] 、4 [#] 闸门开启; b 工况: 2 [#] ~4 [#] 闸门开启; c 工况: 1 [#] ~4 [#] 闸门开启
	3 000	a 工况: 1 [#] ~4 [#] 闸门开启; b 工况: 1 [#] ~5 [#] 闸门开启; c 工况: 1 [#] ~6 [#] 闸门开启
	4 500	a 工况: 1 [#] ~5 [#] 闸门开启; b 工况: 1 [#] ~6 [#] 闸门开启; c 工况: 1 [#] ~7 [#] 闸门开启
	5 000	a 工况: 1 [#] ~6 [#] 闸门开启; b 工况: 1 [#] ~7 [#] 闸门开启; c 工况: 1 [#] ~8 [#] 闸门开启
	6 000	a 工况: 1 [#] ~7 [#] 闸门开启; b 工况: 1 [#] ~8 [#] 闸门开启; c 工况: 1 [#] ~9 [#] 闸门开启

3 结果与分析

在船闸下引航道口门区及连接段布置 17 个断面, 共 148 个测点(图 4), 用以观测各工况条件下测点范围内的最大纵向、最大横向及回流流速, 探讨泄水闸不同开启方式对下引航道口门区及连接段的通航水流条件影响。根据《船闸总体设计规范》^[6] 规定, I ~ IV 级船闸口门区的最大流速限值为: 平行于航线的纵向流速 $v_y \leq 2.0\text{ m/s}$, 垂直于航线的横向流速 $v_x \leq 0.30\text{ m/s}$, 回流流速 $v_0 \leq 0.4\text{ m/s}$ 。

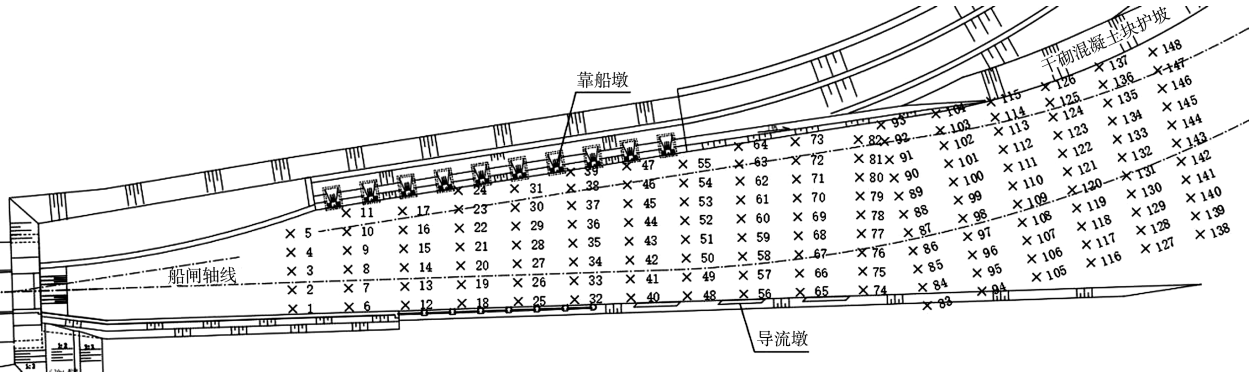


图 4 研究区测点布置

3.1 闸门开启位置对船闸下游水流条件的影响

流量 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、闸门开启不同位置时下游河道的流速流态分布见图 5。可以看出，闸门集中开启位置不同，下引航道口门区及连接段的流速流态有所不同。当集中开启左岸 1#~4# 闸门时，下游流场如图 5a) 所示，下泄水流集中在左岸，水流出闸孔后与电站尾水汇合顺流而下，右侧有大范围的回流。水流在导航堤头开始向右偏转，口门区及连接段大部分处于回流区，流速较小，河道断面流速分布不均匀，主流偏右岸。当集中开启中间 9#~12# 闸门时，下游流场如图 5b) 所示，下泄水流集中在中部，两侧各形成一个小范围的回流区，口门区有小范围的回流，流速较小。当集中开启右岸 17#~20# 闸门时，下游流场如图 5c) 所示，开启闸孔远离电站，下泄水流集中在右岸，在河道中间形成一个小范围的回流，两股水流在导航堤处汇合后顺流而下，主流仍在右岸，口门区及连接段大部分处于回流区，流速较小。

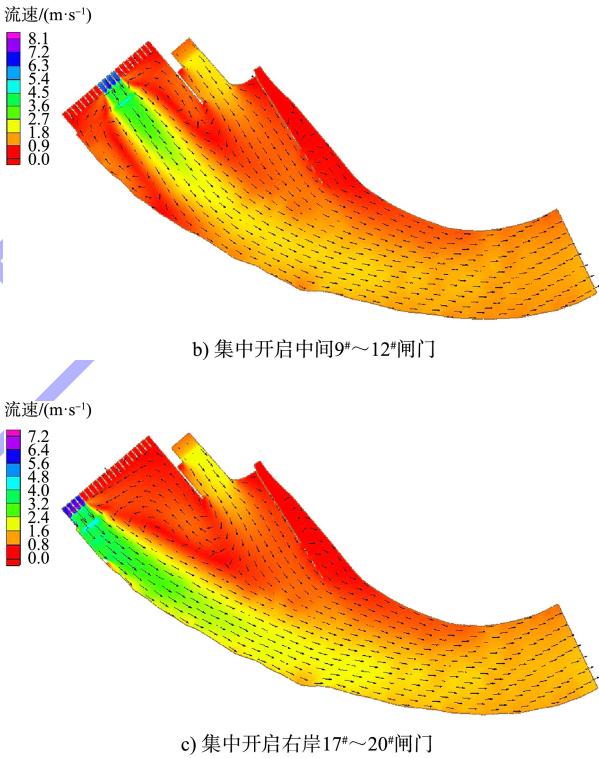
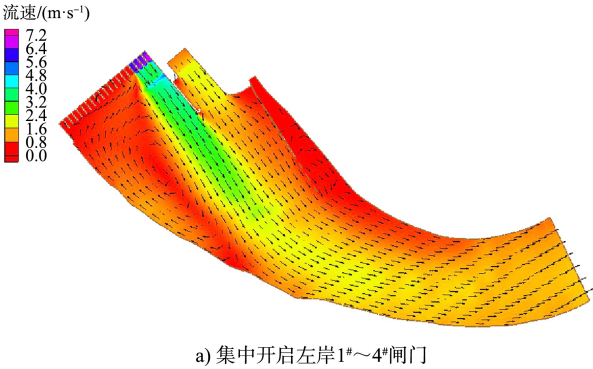


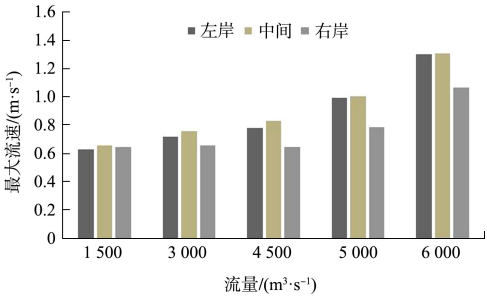
图 5 $Q=3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时风洞子航运枢纽下游流速流态分布

开启不同位置闸门时船闸下引航道口门区及连接段测点流速对比见图 6。各级流量下集中开启左岸闸孔的最大流速与开启中间闸孔相差不大，开启右岸闸孔的较小，最大流速值都没有超过规范限值，见图 6a)；集中开启左岸闸孔的横向最大流速小于集中开启右岸闸孔，开启中间闸孔的最大，其中当流量等于 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ，开启中间和右岸 8 孔闸门时，横向最大流速超过规范规定的限值，最大值为 0.328 m/s ，见图 6b)；各级流量下的回流流速相差不大，开启左岸和中间闸孔时基本一致，

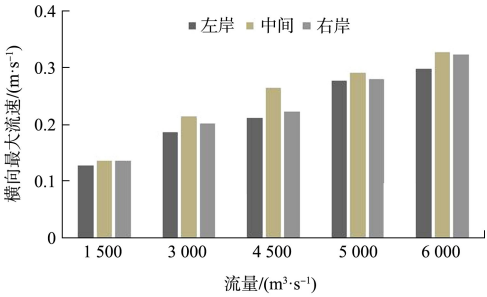


a) 集中开启左岸 1#~4# 闸门

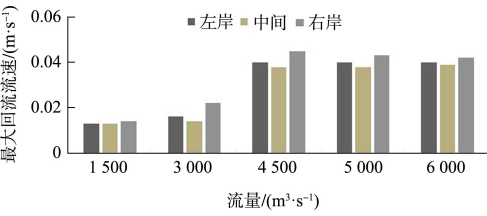
开启右岸时稍大,但都在规范限值以内,见图 6c)。



a) 最大流速



b) 横向最大流速



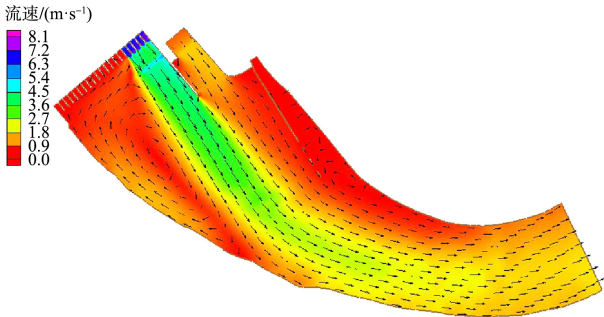
c) 回流流速

图 6 不同闸门开启位置测点流速对比

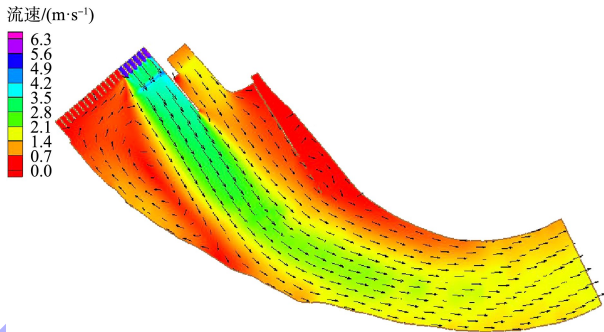
综合分析,当流量小于 6 500 m³/s,风洞子闸坝集中开启左岸闸门时,横向流速整体较小,没有超过规范限值,下引航道口门区及连接段的流速流态更有利于船舶安全航行。

3.2 闸门开启数量对船闸下游水流条件的影响

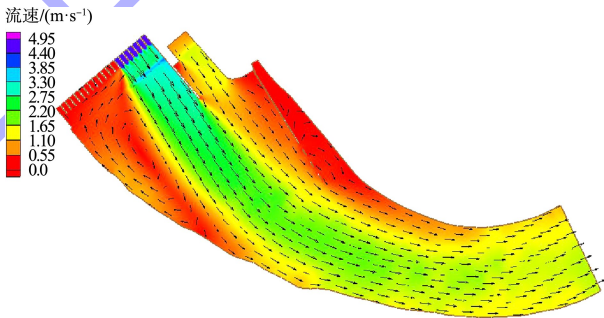
流量 4 500 m³/s、左岸闸门开启不同数量时下游河道的流速流态分布见图 7。可以看出,下游流速流态基本都满足船舶安全航行的要求。但闸门开启数量不同,下游河道及口门区的回流范围有所不同,流速流态也有所差别。下泄水流集中在左岸,水流出闸孔后与电站尾水汇合顺流而下。泄水闸下游右侧河槽是回流区,主流在导流墩处穿入航道,从船闸口门区以下逐渐向右过渡,口门区及连接段的航道左侧处于回流区,连接段最大回流流速为 0.293 m/s。



a) 集中开启左岸5孔(1#~5#)闸门



b) 集中开启左岸6孔(1#~6#)闸门



c) 集中开启左岸7孔(1#~7#)闸门

图 7 $Q=4\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 风洞子航运枢纽下游流速流态分布

开启左岸不同数量闸门时船闸下引航道口门区及连接段测点流速对比见图 8。可以看出,各级流量下开启闸门数量越多,测点范围内的最大流速和横向最大流速越大,回流流速越小。当流量为 6 000 m³/s,开启 8 孔闸门时最大流速为 1.329 m/s,横向最大流速为 0.298 m/s,接近规范限值;开启 9 孔闸门时最大流速为 1.391 m/s,横向最大流速为 0.316 m/s,超过规范限值要求。造成这种现象的主要原因为水流出闸孔后与电站尾水汇合顺流而下,开启闸门越多泄水闸单宽流量越小,闸孔下游水位越平稳,与电站出水水流的相互抵冲作用越弱,此时电站出流对船闸引航道口门区及引航道的水流条件影响越明显,从而

造成开启闸门越多，测点范围内水流流速和横向流速较大。

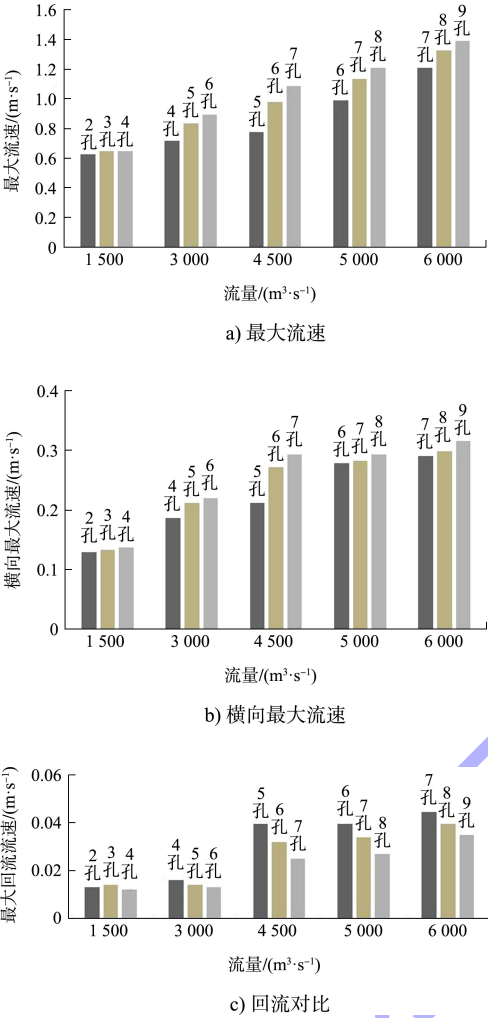


图 8 不同闸门开启数量测点流速对比

综合分析，当流量小于 6 500 m³/s，风洞子闸坝在满足闸孔过流条件时，开启闸门孔数越少，下游引航道口门区及连接段的最大流速和横向流速越小，没有超过规范限值，水流条件更有利于船舶安全航行。

4 结论

1) 风洞子航运枢纽工程闸门调度运行方式不同，下游引航道口门区及连接段的水流条件不同。相同流量级下，集中开启左侧闸门时，下游引航道口门区及连接段的水流条件最优。相比于集中开启中间闸孔和右侧闸孔，横向流速更小，更有利于船舶安全航行。

2) 相同流量级下，在满足闸孔过流条件时，开启左侧闸门孔数目越少，下游引航道口门区及连接段的最大流速和横向流速越小，水流条件更有利于船舶安全航行。

3) 在枢纽设计过程中，可通过建立数学模型，不断试验闸孔调度方式对下游引航道口门区及连接的水流条件影响，为初步拟定闸坝调度运行方式、保证船舶顺利安全通航提供依据。

参考文献：

[1] 李伟,张宝航.船闸下引航道口门区回流特性及改善措施[J].水运工程,2013(8):160-164.

[2] 卢文蕾,戈龙仔.枢纽泄水闸开启方式对通航条件的影响[J].水运工程,2011(4):126-131.

[3] 孟雪峰.云南水富港二期扩建工程通航研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.

[4] 宋禹辰.温中坝河段卵石输移规律与航道治理对策研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[5] 周舟.黄河中卫段航道整治参数的确定及数值模拟[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[6] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.

(本文编辑 王璁)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www.sygccom.cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部