



# 贵港船闸灌、泄水非恒定流对通航水流条件影响的数值模拟研究\*

周冉, 杨忠超, 杜兆辉

(重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 拟在贵港航运枢纽右侧增设二线船闸, 但双线船闸灌泄水时引航道内非恒定流态水流十分复杂。采用体积控制法建立平面二维水动力数学模型, 对贵港引航道内通航条件进行评价。对多个工况进行计算比较, 结果表明双线船闸同时运行时最为不利, 此时上下游引航道内最小水深均满足要求, 但流速过大, 对船舶系靠安全有一定影响。由计算结果可知, 将泄水时间相对错开, 可减小最大纵向流速。

**关键词:** 引航道; 水流条件; 通航条件; 数学模型

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0119-08

## Numerical simulation of unsteady flow effect on navigable flow condition of Guigang

ZHOU Ran, YANG Zhong-chao, DU Zhao-hui

(Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The second-line ship lock is planned on the right of the first-line ship lock, but the flow pattern in the approach channel is very complex when the double locks are irrigating or draining. Adopting the volume control method, we establish a two-dimensional mathematical numerical model of hydrodynamics to evaluate the navigation condition of the approach channel. The calculation results of various working conditions show that double locks' simultaneous running is the most disadvantageous. In this case, the minimum water depth of the lower approach is enough, however, the flow rate is too large, and there is a certain impact on the safety of the ship. According to the calculation results, the relative displacement of the discharge time can reduce the maximum longitudinal velocity.

**Keywords:** approach channel; flow condition; navigation condition; numerical model

近年来, 各航运枢纽船闸的过闸货运量大幅度增长, 极大地促进了经济和社会发展, 但爆发式的经济和货运量需求的增长给西江航运水运带来了巨大的压力, 也暴露了船闸通过能力严重不足等方面的问题。贵港航运枢纽由于现有一线船闸已不能满足运量增长和船舶大型化的需要, 拟在其右侧修建二线船闸, 采取上游共用引航道和下游引航道分开的布置方式。贵港综合枢纽双线

船闸灌泄水时引航道内非恒定流态水流十分复杂, 对船舶航行和停泊安全影响较大。

目前, 研究手段主要有物理模型和数学模型。物理模型实验作为重要的常规的研究手段, 在引航道问题研究中发挥了突出作用。重庆交通大学的刘玲<sup>[1]</sup>采用枢纽整体水工模型和船模试验相结合的方法, 对银盘枢纽通航建筑物的布置、引航道口门区尺度、导航隔流墙平面和结构形式及枢

收稿日期: 2014-09-30

\*基金项目: 西部交通建设科技项目 (20113283501580)

作者简介: 周冉 (1991—), 女, 硕士研究生, 从事水力学及和河流动力学方面的研究。

枢纽调度运行方式对通航水流条件的影响及其对策进行了研究；四川大学的陈作强<sup>[2]</sup>通过物模、船模和现场水流测验，研究了不同航道等级、不同布置方式通航建筑物引航道口门区和连接段内，船舶（队）的航行条件，并提出了相应的水流条件限值；长江科学院的史德亮等<sup>[3]</sup>结合三峡水利枢纽上游引航道通航水流条件的试验研究，阐述了上游引航道往复流的运动特征及其产生发展过程，并分析了往复流对通航条件的影响，提出了消减往复流强度，改善通航水流条件的一系列工程措施。

随着计算机软硬件的快速发展和计算方法不断改进，它迅速发展成为与理论流体力学和实验流体力学相辅相成、并驾齐驱的重要研究手段。针对三峡工程引航道通航水流特点，长江科学院的黄明海等<sup>[4]</sup>建立了平面二维非恒定流数学模型，分别模拟了三峡工程上游和下游引航道在不同布置方案和各种枢纽运行方式下的引航道内非恒定水流，为引航道布置方案的比选、优化和坝区通航水流条件研究提供了参考依据；天津水运工程科学研究所的陈阳等<sup>[5]</sup>采用二维非恒定流数学模型和船闸灌泄水一维数学模型联解这一模型考虑了船闸灌泄时水流惯性的影响，较好地模拟了三峡工程上引航道船闸灌水产生的水面波动。重庆交通大学的杨忠超<sup>[6]</sup>采用动网格技术和VOF方法对高水头船闸阀门开启过程进行非恒定流三维紊流数值模拟，取得良好的效果。

因此，本文采用二维数学模型针对船闸的多种运行方式进行计算研究，对引航道内非恒定流通航条件进行评价，确定其是否满足船舶安全过闸要求。

## 1 工程概况

贵港航运枢纽工程位于广西西江干流中游，下距贵港市6.5 km，是广西西江综合利用规划十个梯级中的第九个梯级，具体布置见图1。从左至右主要建筑物依次为厂房、泄洪大坝、一线船闸、二线船闸。二线船闸布置于一线船闸右侧约120 m

处，船闸中心线与枢纽坝轴线呈约 $22^\circ$ 交角。进出闸方式为曲线进闸直线出闸，引航道布置方式为不对称型，上、下引航道靠船墩均布置于左侧。船闸上、下闸首顶高程均为50.5 m，闸室有效尺寸为 $280\text{ m} \times 34\text{ m} \times 5.8\text{ m}$ ，上引航道底高程为35.5 m，下引航道底高程为23.4 m，引航道底宽75 m，左侧与一线船闸共用。

具体研究内容为：1) 船闸在灌、泄水时，上、下游引航道内非恒定水力特性研究；2) 大坝泄洪时，上、下游引航道内水力特性研究；3) 大坝泄洪，船闸灌、泄水时，上、下游引航道内非恒定水力特性研究。

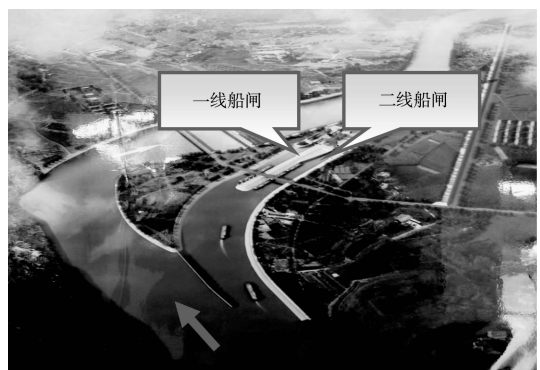
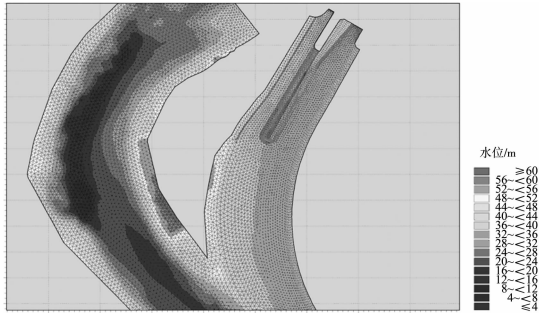


图1 广西贵港航运枢纽船闸总体布置

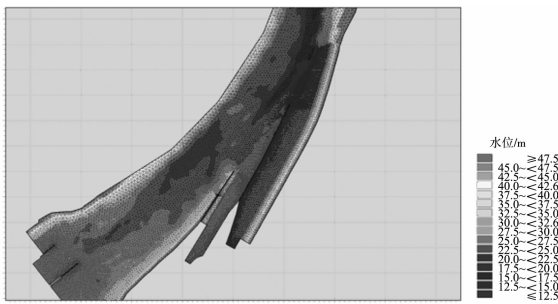
## 2 引航道数学模型及验证

本文建立的二维数学模型基本方程包括水流连续方程、动量方程、控制方程离散、时间积分、有关模型的基本控制方法、数值解法、初始边界条件及动边界技术。根据船闸所处位置、工程对洪水水位的影响范围及资料情况，且更好更平稳地处理进口边界，选取的计算区域为：全长约7.1 km，其中大坝上游计算长度约为4.3 km，大坝下游计算长度约2.8 km。本模型采用判定露滩点并引入动边界处理方法来解决不间断露滩问题，并采用三角形网格离散计算区域，网格大小疏密沿河道河势宽窄变化不等，在船闸及引航道附近的网格进行局部加密，上游计算河段布置网格共30 872个，网格节点64 971个，下游计算河段布置网格共24 664个，网格节点51 559个，网格节点间间距10 m左右（图2）。边界条件为上游河段数学模型上游边界条件控制水位为43.1 m，下游边界条件

为一、二线船闸灌水流量过程线; 下游河段数学模型上游边界条件为一、二线船闸泄水流量过程线, 下游边界条件控制水位为 29 m。



a) 上游河段



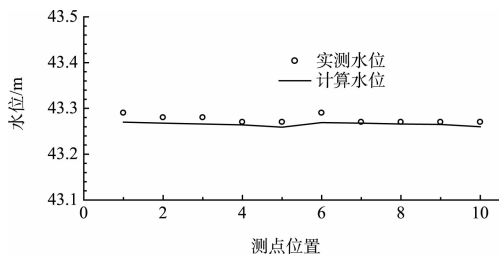
b) 下游河段

图 2 局部计算网格

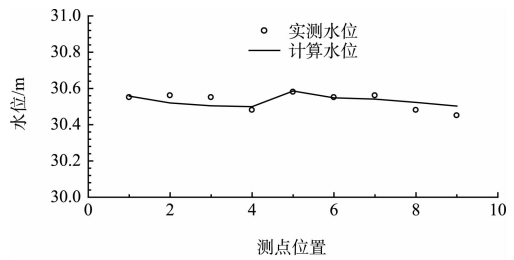
## 2.1 数模验证

### 2.1.1 水面线验证

水面线验证的主要依据是广西贵港水文水资源分局提供的 2010 年 4 月分段实测的枢纽工程河段瞬时水面线资料, 其上游河段实测流量为  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ , 下游河段为  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上、下游水位验证见图 3。从水位误差来看, 多数定点误差小于 0.05 m, 最大误差为 0.046 m, 其原因是测点位置位于坝下较近, 水位波动较大, 受此影响致使计算值与模型实测值间的误差比较大, 总体看来, 计算结果与实验成果基本吻合。



a) 上游  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$

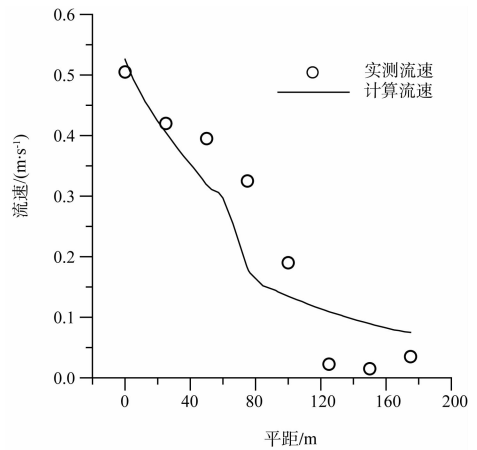


b) 下游  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$

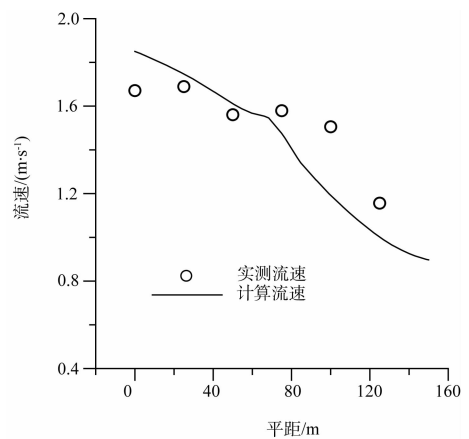
图 3 水位验证

### 2.1.2 流速分布验证

流速分布验证主要依据大坝泄洪流量为  $7\ 080 \text{ m}^3/\text{s}$  时上、下游河段物理模型试验实测流速资料。分别在上下游断面选取几个典型断面与物理模型流速资料对比, 做出流速验证图 (图 4)。结果表明个别点流速相差较大, 但总体上计算结果与实验成果基本吻合, 说明数模计算成果是可信的。



a) 上游断面1



b) 上游断面2

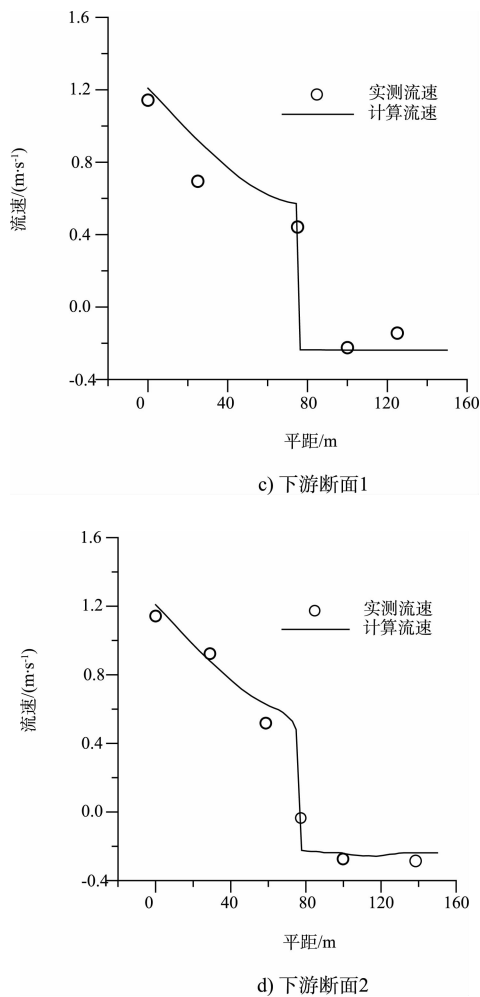


图4 流速验证

### 3 上引航道非恒定流计算成果分析

泄水量、流量增率以及最大流量是决定初始

波形的主要因素，因此双线船闸单独、同时或错时向引航道灌水时，整个引航道内的水位波动及流速都较大，通航水流条件相对恶劣，尤其是下闸首处。尽管船闸灌泄水时都会使引航道水流产生波动现象，但不同的开启方式和流量级对上下游水面产生的波是有所不同的。

本文建立了多个工况进行比较计算。限于篇幅，本文只对最不利工况进行详述，边界条件为上游边界水位维持 43.1 m，双线船闸同时运行。

灌水流量过程线如图 5 所示。

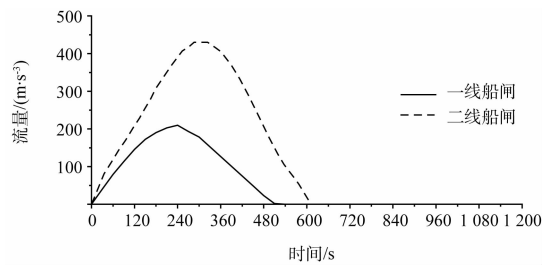


图5 双线船闸运行灌水流量过程线

计算成果表明：船闸灌水时，上闸首附近波动最为强烈，向口门区逆向沿程递减，形成落水波，且随时间增长而逐渐减缓。在一、二线船闸单独、错峰或同时运行的各种工况中，两线船闸同时灌水时产生的非恒定流现象最为明显。计算结果见表 1~2。

表1 上引航道非恒定流水位过程

		m				
船闸	测点	最高水位	最低水位	平均水位	最大跌水波高	最大回复波高
一线船闸	S1-1#(上闸首)	43.687	42.457	43.100	0.644	0.587
	S1-2#(0+100)	43.676	42.566	43.100	0.534	0.576
	S1-3#(0+200)	43.650	42.616	43.100	0.484	0.550
	S1-4#(0+300)	43.609	42.650	43.100	0.450	0.509
	S1-5#(0+450)	43.534	42.689	43.100	0.411	0.434
	S1-6#(0+700)	43.440	42.780	43.100	0.320	0.340
	S1-7#(0+960)	43.356	42.864	43.100	0.236	0.255
	S1-8#(0+1200)	43.278	42.957	43.100	0.143	0.178
二线船闸	S2-1#(上闸首)	43.574	42.635	43.100	0.465	0.474
	S2-2#(0+100)	43.562	42.672	43.100	0.428	0.462
	S2-3#(0+200)	43.542	42.693	43.100	0.407	0.442
	S2-4#(0+300)	43.501	42.723	43.100	0.377	0.401
	S2-5#(0+450)	43.455	42.765	43.100	0.335	0.355
	S2-6#(0+700)	43.326	42.888	43.100	0.212	0.226
	S2-7#(0+960)	43.288	42.969	43.100	0.132	0.188
	S2-8#(0+1200)	43.299	42.971	43.100	0.129	0.199

表 2 上引航道最大流速变化

船闸	位置	最大流速/(m·s <sup>-1</sup> )
一线船闸	S1-1#(上闸首)	1.754
	S1-2#(0+100)	0.940
	S1-3#(0+200)	0.907
	S1-4#(0+300)	0.931
	S1-5#(0+450)	0.846
	S1-7#(0+700)	0.496
	S1-8#(0+960)	0.562
	S1-9#(0+1200)	0.559
	二线船闸	S2-1#(上闸首)
S2-2#(0+100)		0.987
S2-3#(0+200)		0.788
S2-4#(0+300)		0.768
S2-5#(0+450)		0.806
S2-7#(0+700)		0.595
S2-8#(0+960)		0.688
S2-9#(0+1200)		0.293

由数据结果得船闸上闸首至口门区沿程各测点最低水位, 一线船闸上引航道底高程为 37.6 m, 因此一线引航道水深最小水深为 4.857 m; 二线船闸上引航道底高程为 35.5 m, 引航道最小水深 7.135 m, 满足 I 级航道设计水深要求。最大流速可达 0.97 m/s, 对船舶进出闸安全和停靠有一定影响。另外, 波谷时水位降低, 使引航道水深减少 0.15 ~ 0.65 m (图 6)。

二线船闸上引航道距闸首 200 m 的停泊段最大流速小于一线船闸。船舶灌水过程中, 水体往返进出上引航道, 形成往复流 (图 7)。由于上引航道过水面积较大, 故流速变化较小, 其值多在 0.4 ~ 1.0 m/s, 变化规律是上闸首处最大, 向上游逐渐减小, 至一线靠船墩处减至 0.4 ~ 0.8 m/s, 至二线靠船墩处减至 0.4 ~ 0.6 m/s。对上引航道停泊区船舶系靠安全有一定的影响。

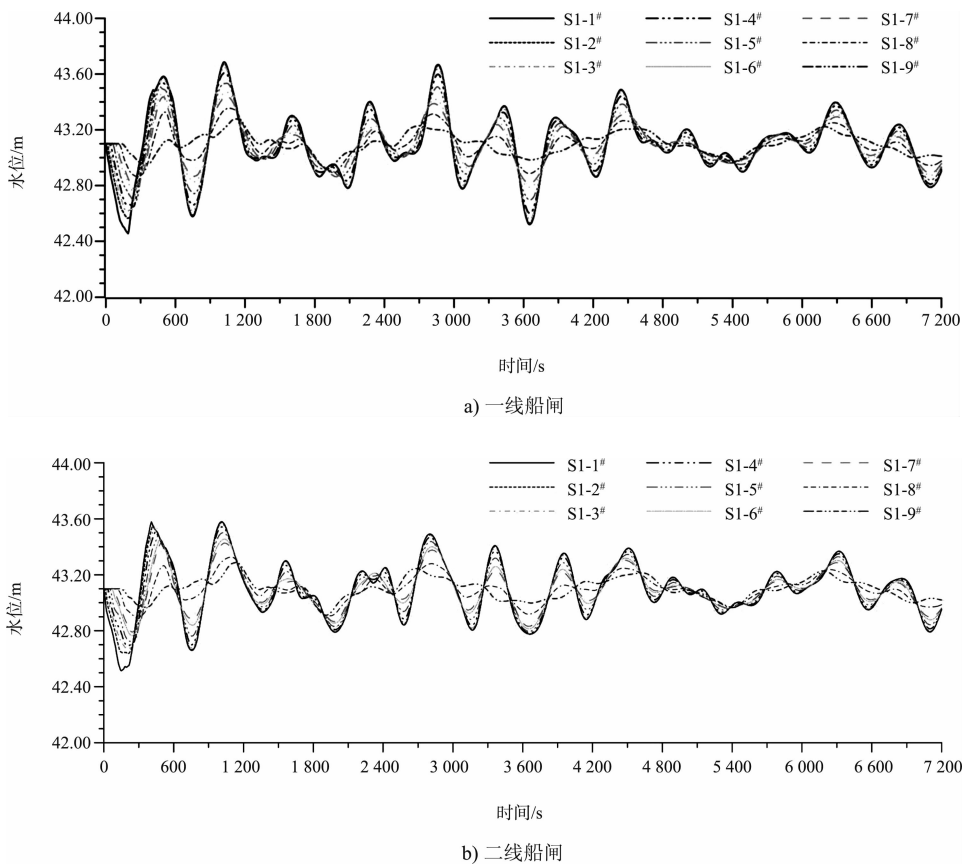


图 6 上引航道水位变化过程

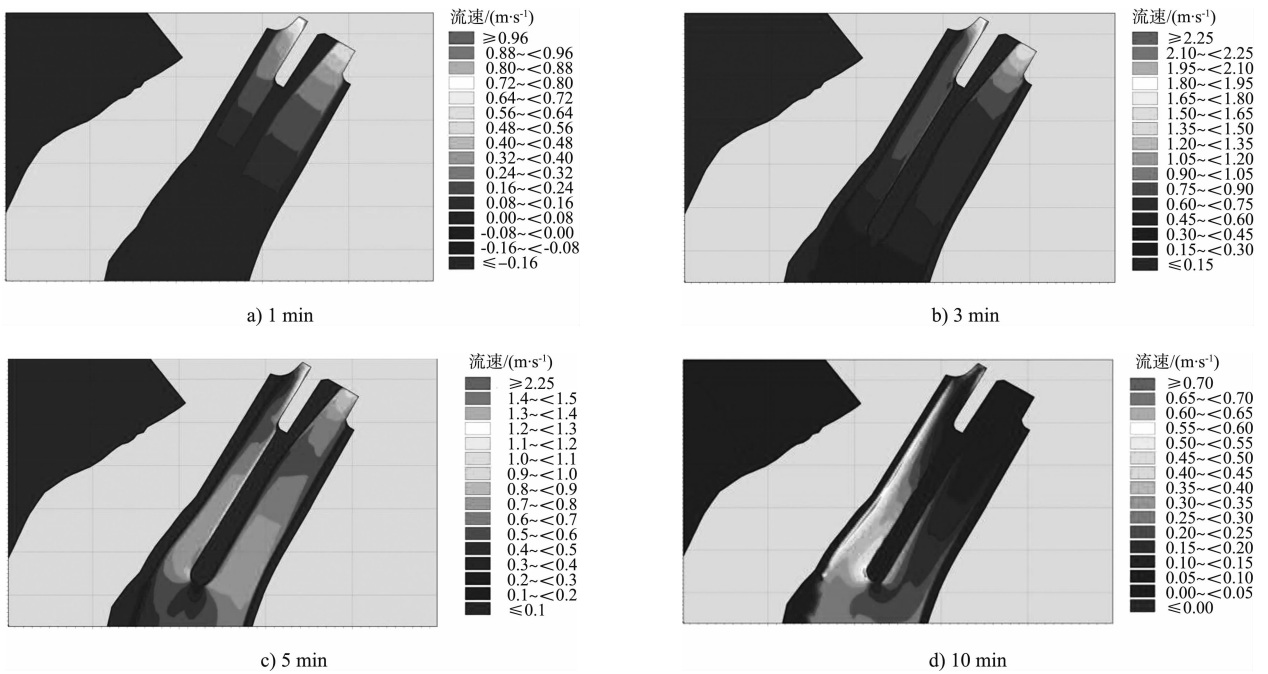


图7 双线船闸灌水过程中上引航道内流场变化过程

4 下引航道非恒定流计算成果分析

同样也只分析最不利工况的情况，边界条件为

下游边界水位维持 29 m，一、二线船闸同时运行。

泄水流量过程线如图 8 所示。计算结果见表 3~4。

表3 上引航道非恒定流水位过程

船闸	测点	最高水位	最低水位	平均水位	最大跌水波高	最大回复波高
一线船闸	X1-1#(下闸首)	29.405	28.837	29.000	0.404	0.163
	X1-2#(0+60)	29.435	28.876	29.000	0.435	0.124
	X1-3#(0+125)	29.394	28.945	29.000	0.394	0.055
	X1-4#(0+230)	29.300	28.929	29.000	0.300	0.071
	X1-5#(0+480)	29.264	28.923	29.000	0.264	0.077
	X1-6#(0+630)	29.071	28.917	29.000	0.071	0.083
二线船闸	X2-1#(下闸首)	29.126	28.924	29.000	0.126	0.076
	X2-2#(0+100)	29.124	28.970	29.000	0.124	0.030
	X2-3#(0+200)	29.121	28.966	29.000	0.121	0.034
	X2-4#(0+500)	29.107	28.959	29.000	0.107	0.041
	X2-5#(0+650)	29.094	28.948	29.000	0.094	0.052
	X2-6#(0+800)	29.074	28.941	29.000	0.074	0.059

表4 下引航道最大流速变化

船闸	位置	最大流速/(m·s <sup>-1</sup> )
一线船闸	X1-1#(下闸首)	2.164
	X1-2#(0+60)	1.422
	X1-3#(0+125)	1.205
	X1-4#(0+230)	1.150
	X1-5#(0+480)	0.949
	X1-6#(0+630)	0.748
二线船闸	X2-1#(下闸首)	2.179
	X2-2#(0+100)	1.633
	X2-3#(0+200)	1.324
	X2-4#(0+500)	1.361
	X2-5#(0+650)	1.327
	X2-6#(0+800)	0.807

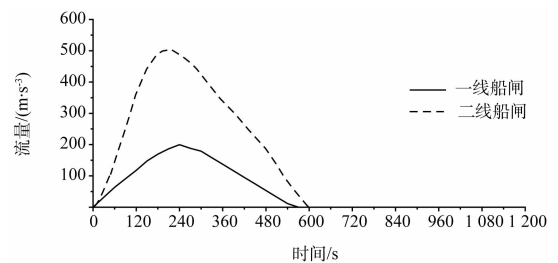


图8 双线船闸运行泄水流量过程线

计算成果表明：由于下引航道过水面积较小，其船闸泄水引起的水面波动较上引航道更为剧烈，各工况最大波动均发生在下闸首附近，泄水后 1 h

左右下引航道水面基本恢复平静。一线船闸上引航道底高程为 25.5 m, 一线引航道水深最小水深 3.337 m; 二线船闸上引航道底高程为 23.5 m, 二线引航道水深最小水深 5.424 m, 满足 I 级航道设计水深要求。泄水前下引航道水位为 29 m, 泄水过程中下闸首附近的航深减小约 0.55 m, 其余部位依次减少, 至口门区基本复原 (图 9)。

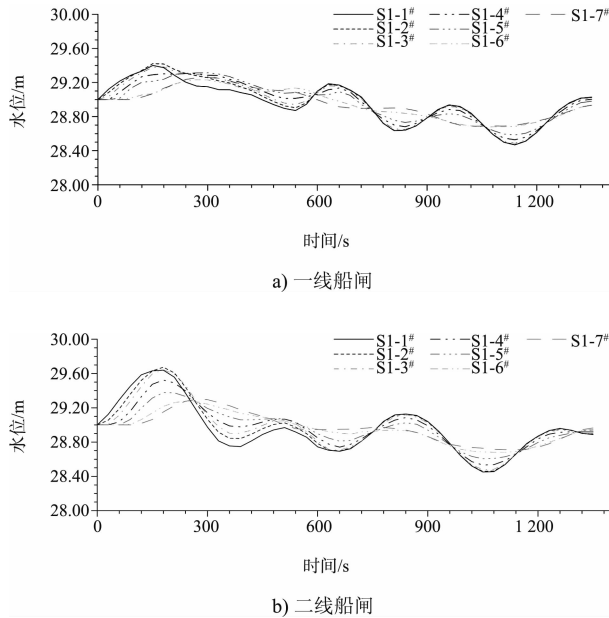


图 9 下引航道水位变化过程线

船闸泄水过程中在下引航道形成的往复流较为强烈, 流速较大。各工况的最大流速均出现在下闸首附近, 其值达 2.2 m/s 左右, 流速变化规律基本相同, 即下闸首至口门区沿程递减, 至二线下引航道停泊区流速尚有 0.95 ~ 1.04 m/s。加上此处水位波动较大, 停泊段最大水位变幅达 0.6 m 左右, 最大流速可达 1.6 m/s, 对船舶正常停靠有明显影响 (图 10)。

结果表明距闸首越远, 流速越小。双线船闸灌、泄水在上、下游引航道内引起水流流态变化较为剧烈, 在上、下游引航道停泊段处最大水流速度均超过规范规定值, 相比其他工况的计算结果, 建议继续优化错峰时间, 尽量避免一、二线船闸同时灌、泄水时涨、跌水波叠加导致水位变幅增加。同时, 计算中还发现一线船闸下引航道泄水团贴着导墙运动, 造成导墙局部区域形成低

压区, 靠泊船只可能撞击导墙。可适当调整导墙长度, 优化水流流态, 保障靠泊船只安全。

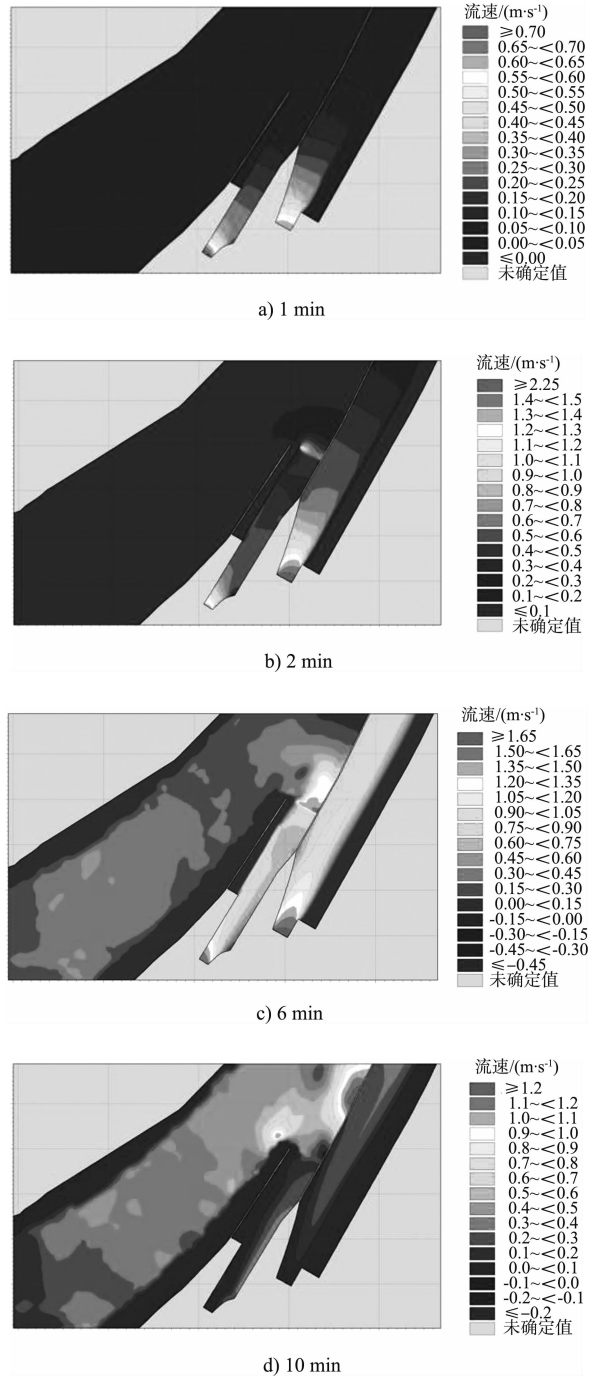


图 10 双线船闸灌水过程中上引航道内流场变化过程

表 5 为最大流量时口门区的水面比降值, 选择局部测点数据, 船闸泄水引起的波流运动全过程中, 比降不是一个常值, 而是一系列变化着的值, 但随着流量的减小比降也减小。由计算结果可知: 最大流量时口门区水面平顺, 水面纵比降均较小, 且距离闸门越远, 水面比降越小。

表 5 最大流量时口门区水面比降

断面离 闸门距 离/m	上引航道/‰		断面与 闸门距 离/m	下引航道/‰	
	一线 纵比降	二线 纵比降		一线 纵比降	二线 纵比降
100			60		
200	0.537	0.390	125	-0.650	-0.417
300	0.470	0.220	230	-0.323	-0.200
450	0.401	0.093	480	-0.200	-0.143
700	0.384	0.052	650	-0.108	-0.028

5 结语

1) 采用体积控制法建立平面二维水动力数学模型,模拟了船闸引航道内的水面波动,利用数模成果,进行了验证,表明利用数学模型研究航道内水面波动是可行的。

2) 对多个工况进行计算比较,发现双线船闸同时运行时最为不利,应尽量避免。将泄水时间相对错开,可减小最大纵向流速。

参考文献:

[1] 刘玲. 银盘水利枢纽通航建筑物引航道平面布置研究[D]. 重庆: 重庆交通大学河海学院, 2008.

[2] 陈作强. 通航建筑物口门区及连接段通航水流条件研究[D]. 四川: 四川大学, 2006.

[3] 史德亮, 刘力中, 孙尔雨. 三峡工程上游引航道往复流对通航的影响[J]. 长江科学院院报, 1998(4): 11-15.

[4] 黄明海, 黄国兵, 李发政. 三峡工程引航道通航水流数值模拟研究[C] //中国水利学会. 第二届全国水力学与水利信息学学术大会论文集, 2005.

[5] 陈阳, 李焱, 孟祥玮. 船闸引航道内水面波动的二维数学模型研究[J]. 水道港口, 1998(3): 21-27.

[6] 杨忠超, 杨斌, 陈明栋, 等. 高水头船闸阀门开启过程水力特性仿真研究[J]. 重庆交通大学学报, 2009 (4): 758-762.

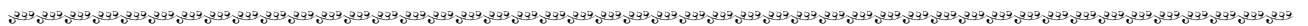
[7] 陈辉, 刘志雄, 江耀祖. 引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 13-18.

[8] 夏军强, 王光谦, 杨文俊, 等. 三峡工程明渠截流水流数学模型研究及其应用[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 1-3.

[9] 潘雅真, 罗序先, 李穗清, 等. 贵港航运枢纽船闸引航道口门区水流条件的研究[J]. 水运工程, 1996(7): 30-35.

[10] 周作茂, 陈野鹰, 杨忠超. 双线船闸引航道水力特性数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 67-73.

( 本文编辑 郭雪珍 )



( 上接第 118 页 )

参考文献:

[1] 长江重庆航道工程局勘察设计院. 长江重庆到宜宾河段滩险整治情况资料集(1953—1999) [R]. 重庆: 长江重庆航道工程局勘察设计院, 2000: 11-19.

[2] 长江航道规划设计研究院, 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江三峡工程航道泥沙原型观测 2008—2009 年度分析报告[R]. 重庆: 长江航道规划设计研究院, 长江重庆航运工程勘察设计院, 2009.

[3] 长江航道规划设计研究院, 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江三峡工程航道泥沙原型观测 2009—2010 年度分析报告[R]. 重庆: 长江航道规划设计研究院, 长江重庆航运工程勘察设计院, 2010.

[4] 长江航道规划设计研究院, 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江三峡工程航道泥沙原型观测 2010—2011 年度分析报告[R]. 重庆: 长江航道规划设计研究院, 长江

重庆航运工程勘察设计院, 2011.

[5] 长江航道规划设计研究院, 长江重庆航运工程勘察设计院. 长江三峡工程航道泥沙原型观测 2011—2012 年度分析报告[R]. 重庆: 长江航道规划设计研究院、长江重庆航运工程勘察设计院, 2012.

[6] 长江重庆航运工程勘察设计院. 三峡水库变动回水区航道维护性疏浚技术方案[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2011.

[7] 长江重庆航运工程勘察设计院. 三峡库区航道维护性疏浚工程实施方案(2012—2013 年度) [R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2012.

[8] 长江重庆航运工程勘察设计院. 2013—2014 年度三峡库区航道维护性疏浚技术方案[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2013.

( 本文编辑 郭雪珍 )