



# 刘老涧船闸通航水流条件改善措施

东培华, 董佳, 尤薇, 马洪亮

(江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏南京 210000)

**摘要:** 刘老涧船闸是位于京杭运河苏北段上的复线船闸。为解决船闸在二、三线同时泄水时, 一线船闸下闸首反向水头过高而使人字门启闭机机构损坏的问题, 建立了平面二维水流数学模型对船闸上、下游水流条件进行计算, 并按照《船闸总体设计规范》相关要求, 判别改善方案通航水流条件的优劣, 提出符合实际要求的工程措施。针对天然河道边界复杂等特点, 采用非结构三角形网格, 利用有限体积法对水流控制方程进行了离散计算。

**关键词:** 船闸; 二维数学模型; 反向水头; 水流条件

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0094-005

## Improvement measures of navigation flow condition of Liulaojian shiplock

DONG Pei-hua, DONG Jia, YOU Wei, MA Hong-liang

(Jiangsu Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Liulaojian multiline-lock is located at Beijing-Hangzhou Grand Canal. To solve the problem that when the No.2 and No.3 lock to drain, the No.1 lock reverse waterhead is too high to make the lower miter gate hoist mechanism damage, a two-dimensional flow mathematical model is developed to calculate the upstream and downstream flow condition of the ship lock, in accordance with the *Code for Master Design of Shiplocks*, compare the navigation flow condition of various scheme, and choose the engineering measures which is satisfied the demands. Due to the complex characteristics of the natural river's boundary, we adopt the unstructured triangular mesh and use the finite volume method to discrete the flow control equation.

**Key words:** shiplock; 2-D mathematical model; reverse waterhead; flow condition

苏北运河最繁忙的大王庙至淮安闸航段上, 是苏北运河自蔺家坝而下的第6个梯级船闸, 主要承担着北煤南运及其它水运物资的运输。刘老涧船闸为复线船闸, 上、下游引航道平面布置采用不对称形式, 船舶进出闸方式上、下游均为“直线进闸, 曲线出闸”。上、下游引航道宽度为70 m, 长度分别为630 m、600 m, 均为单独引航道, 其中主导航墙各长70 m, 靠船墩各长400 m, 各设间距20 m的靠船墩20个, 墩之间以驳岸相连。

刘老涧三线船闸工程完工通航后, 由于下游

线船闸引航道下闸首人字门处产生较大的反向水头, 导致反向推力过大而使人字门启闭机机构损坏。自2010年以来, 共发生10次一线船闸人字门安全销断裂的事故, 船闸不得不停航检修, 严重影响了船闸的航运及社会效益。

通过二维水流数学模型<sup>[2]</sup>, 计算研究刘老涧船闸下游引航道非恒定流特性, 并根据计算结果提出相应的改善措施<sup>[3]</sup>, 解决船闸现存的问题, 确保船闸安全、快捷运行, 充分发挥其航运效益。

### 1 通航水流条件的标准

按照JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》

收稿日期: 2012-11-15

作者简介: 东培华(1976—), 男, 工程师, 从事港口规划、设计和研究工作。

(简称规范)。船闸口门区及引航道水流限制条件如下:

- 1) 引航道口门区水面流速: 纵向流速 $v_y \leq 2.0$  m/s, 横向流速 $v_x \leq 0.3$  m/s, 回流流速 $v_0 \leq 0.4$  m/s;
- 2) 引航道内流速: 导航段和调顺段内宜为静水区, 制动段和停泊段的水面最大纵向流速

$v_y \leq 0.5$  m/s, 横向流速 $v_x \leq 0.15$  m/s。

## 2 现状条件

根据已知资料分析<sup>[5]</sup>, 下游引航道水流条件主要针对一线船闸发生故障时最大泄水水头运行进行计算, 计算工况见表1。

表1 下游引航道水流条件计算工况

工况编号	上、下游水位/m	阀门开启时间/s			泄水量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	备注
		一线船闸	二线船闸	三线船闸		
X1			171		118.15	二线单独泄水
X2	18.9 ~ 15.9			196	104.02	三线单独泄水
X3			171	196	221.07	二、三线同时泄水

为分析不同工况下的水流条件, 计算时记录了下闸首、下游引航道及下游航道典型位置的水位及流速过程, 测点具体布置见图1。

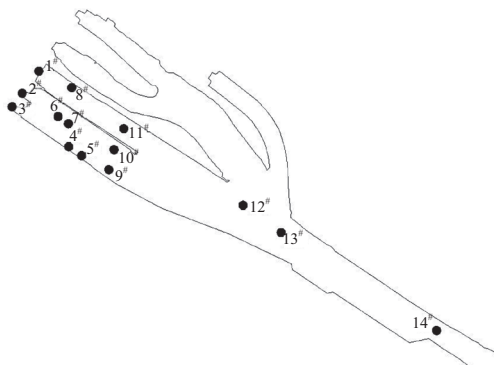


图1 下游引航道水流条件计算测点布置

### 2.1 水位

下游引航道水流条件3种计算工况中的下闸

首、下游引航道系船墩附近、下游航道缩窄处典型测点(图1)的最大水位波动见表2。

由于刘老涧船闸下游引航道口门区水域比较开阔, 但在下游较短范围内河道突然变窄, 船闸泄水时的非恒定流会在此产生较强的反射波, 泄水结束后, 仍有部分回流流向船闸下闸首, 产生较大的反向水头。在一、二线船闸间有较长的隔堤, 由泄水产生的推进波会绕过隔堤传递到一线船闸下闸首, 从而进一步加剧了一线船闸下闸首处的反向水头。二、三线船闸同时泄水运行时船闸下游引航道水流流态的计算结果(工况X3): 一线船闸下闸首人字门处产生的反向水头为0.34 m, 超出了规范允许的最大限值0.25 m, 因此若不采取改善措施, 一线船闸闸门仍将有遭受破坏的危险。

表2 下游引航道最大水位波动

工况	一线下闸首	二线下闸首	三线下闸首	一线系船墩	二线系船墩		三线系船墩		航道
	1#	2#	3#	8#	6#	7#	4#	5#	13#
X1	19(-24)		16(-15)	18(-22)	13(-13)	14(-12)	13(-10)	11(-9)	5(-4)
X2	22(-22)	18(-14)		20(-21)	17(-13)	16(-12)	15(-11)	13(-10)	5(-3)
X3	34(-36)			32(-33)	26(-21)	23(-18)	22(-15)	19(-13)	10(-4)

### 2.2 流速

下游引航道各典型测点流速最大值见表3。

由表3可见, 刘老涧船闸3种不同运行工况下, 制动段和停泊段(4#, 5#, 6#, 7#, 8#, 9#)的纵向流速满足规范中不大于0.5m/s的要求; 下游引航道(10#, 11#, 12#, 13#, 14#)纵向流速

值均满足规范中不大于2.0m/s的要求; 引航道内流态良好, 主流向基本与船舶航行方向一致, 如图2所示。

## 3 改善方案

根据现状条件下水流模型计算结果知, 刘老

表3 船闸泄水运行各测点纵向流速最大值

工况	m/s										
	三线系船墩		二线系船墩		一线系船墩	三线引航道	二线引航道	一线引航道	航道缩窄处		
	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#
X1	0.18	0.19	0.18	0.18	0.10	0.19	0.21	0.20	0.10	0.08	0.10
X2	0.17	0.18	0.15	0.17	0.07	0.17	0.19	0.15	0.09	0.07	0.09
X3	0.33	0.36	0.31	0.34	0.16	0.36	0.39	0.32	0.19	0.14	0.19

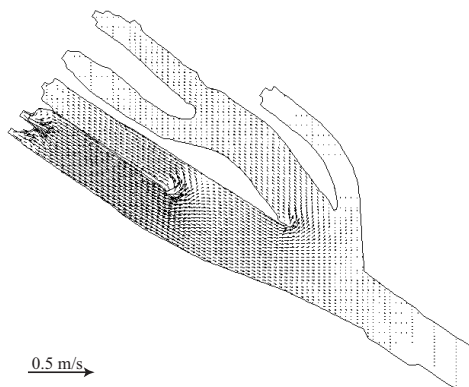


图2 工况X3下游引航道流场

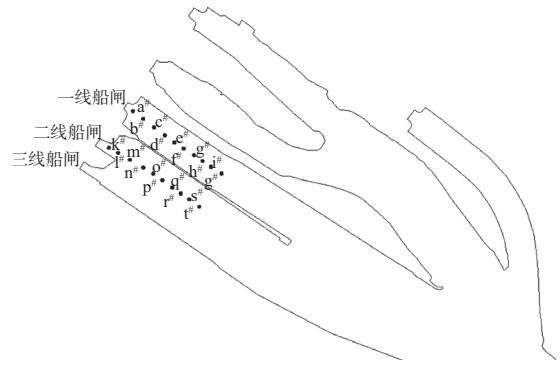


图3 横流测点布置

润船闸一线下闸首在二、三线船闸同时泄水时出现最大反向水头34 cm，导致启闭机损坏，其因由回流与绕过一、二线中间隔堤的泄水水流叠加而成。据刘老涧船闸地形条件限制并结合实际工程经验，为保证一、二、三线船闸的整体性，针对最不利工况X3，在隔堤堤前预留一段再开挖，开挖段的底高程为14 m，垂直于挖除段的开挖范围为隔堤左右各20 m，改善方案见表4，横流测点见图3。

3.1 方案1计算结果分析

该方案下一线船闸下闸首处最大反向水头为14 cm，各具体措施下的反向水头的改善效果都达到60%以上。但挖除50 m和150 m措施下的导航段即a#、b#横流流速过大，不满足规范宜为静水

的要求；挖除100 m措施下的e#横流流速最大为11.48 cm/s，不满足规范中调顺段到制动段横流流速应从静水到动水平稳过渡的要求。

3.2 方案2计算结果分析

该方案下一线船闸下闸首处最大反向水头为15 cm，各具体措施下的反向水头的改善效果都达到55%以上。但挖除50 m措施下的导航段的a#横流流速过大，不满足规范宜为静水的要求，且f#最大横向流速为34.01 cm/s，大大超出规范要求的15 cm/s；挖除100 m措施下的f#横流流速最大为12.79 cm/s，不满足规范中调顺段到制动段横流流速应从静水到动水平稳过渡的要求；挖除150 m措施下的f#横流流速最大为10.22 cm/s，且a#、b#点横流流速较小，接近静水，满足规范要求，可做为推荐方案。

3.3 方案3计算结果分析

该方案下一线船闸下闸首处最大反向水头为17 cm，各具体措施下的反向水头的改善效果都达到50%以上。但挖除50 m措施下的g#横流流速最大值为17.34 cm/s，不满足规范15 cm/s限值的要求；挖除100 m措施下的导航段a#横流流速过大，不满足规范中宜为静水区的要求；挖除150 m措施下的h#横流流速最大为9.96 cm/s，且a#、b#点横流流速较小，可做为推荐方案。

表4 改善方案一览表

改善方案	隔堤堤前预留段长度/m	挖除段长度/m
方案1	1-1	50
	1-2	100
	1-3	150
方案2	2-1	50
	2-2	150
	2-3	150
方案3	3-1	50
	3-2	200
	3-3	150

根据3种改善方案(9种工程措施)的结果分析可知,所有方案反向水头均小于25 cm,且隔堤端部预留长度越短反向水头越小;在隔堤预留长度一致的情况下,挖除段越长横流流速越小,反向水头越大。

#### 4 推荐方案

根据改善方案计算结果分析,综合考虑航运安全及工程投资等因素,认为改善方案中的堤前预留150 m、挖除150 m、开挖底高程为14 m(方案2-3)及堤前预留200 m、挖除150 m、开挖底高程为14 m(方案3-3)2种工程措施较为合适,根据计算结果可知其反向水头、纵向流速和横流流速均满足规范要求。

2种推荐方案在工况X3下,即3 m(18.9~15.9 m)水头差下的各计算结果分别见表5和6,2种方案的水位图及流场见图4,5。

方案2-3在二、三线同时泄水时,一线船闸下闸首1#反向水头值为15 cm,较工程前减小了19 cm,改善效果为56%;下游引航道各典型测点(图1)的纵向流速比工程前要小,最大纵向流速值0.30 m/s出现在6#处,较工程前流速最大减幅值

发生在二线引航道的10#,减小了0.19 m/s;一线船闸引航道横向流速(图3)在二、三线同时泄水时,其横向流速最大值10.22 cm/s出现在f#处(距离闸门约200 m),二线船闸引航道横向流速在一线船闸单独泄水时,其横向流速最大值5.63 cm/s出现在p#处,二线船闸引航道横向流速在三线船闸单独泄水时,其横向流速最大值7.24 cm/s出现在m#处,一线泄水400 s后三线泄水(水位差最大)泄水时二线船闸引航道横向流速最大值7.31 cm/s出现在m#处,各值均满足规范要求。

方案3-3在二、三线同时泄水时,一线船闸下闸首1#反向水头值为17 cm,较工程前减小了17 cm,改善效果为50%;下游引航道各典型测点的纵向流速比工程前要小,最大纵向流速值0.36 m/s出现在6#处,较工程前流速最大减幅值发生在二线引航道的10#,减小了0.19 m/s;一线船闸引航道横向流速在二、三线同时泄水时,其横向流速最大值9.96 cm/s出现在h#处(距离闸门约250 m),二线船闸引航道横向流速在一线船闸单独泄水时,其横向流速最大值6.25 cm/s出现在r#处,二线船闸引航道横向流速在三线船闸单独泄水时,其横向流速最大值7.02 cm/s出现在m#处,一线泄水420 s后

表5 推荐方案在3 m水头差下典型测点纵向流速最大值

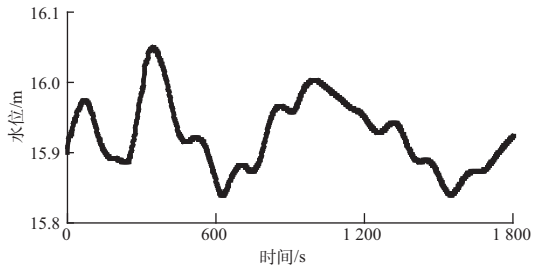
工况	推荐方案	m/s										
		三线系船墩		二线系船墩		一线系船墩	三线引航道	二线引航道	一线引航道	航道缩窄处		
		4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#
X3	10-3-2	0.21	0.21	0.30	0.24	0.20	0.19	0.20	0.19	0.19	0.14	0.20
	11-3-2	0.24	0.22	0.36	0.31	0.24	0.19	0.20	0.18	0.19	0.14	0.20

表6 推荐方案在3 m水头差下横流流速及反向水头值

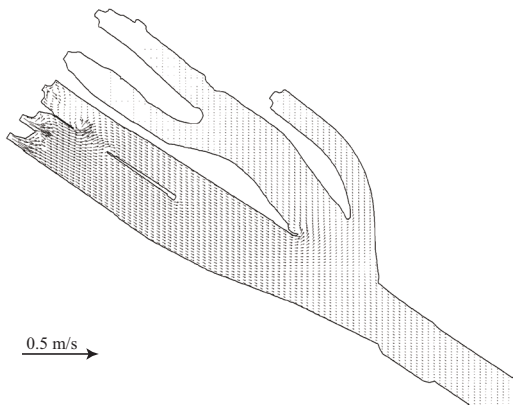
推荐方案	泄水方式	二线下闸首测点最大横流流速/(cm·s <sup>-1</sup> )									
		k#	l#	m#	n#	o#	p#	q#	r#	s#	t#
2-3	一线单独泄水	0.12	0.22	0.66	1.91	4.32	5.63	5.06	4.23	3.12	1.54
	三线单独泄水	0.59	4.19	7.24	5.09	5.33	5.44	4.40	3.27	2.41	1.32
	三线在一线泄水400 s后泄水	0.64	4.27	7.31	6.03	7.06	6.92	5.06	4.23	3.12	1.54
3-3	一线单独泄水	0.09	0.07	0.19	0.59	1.41	3.32	6.01	6.25	5.29	3.81
	三线单独泄水	0.57	4.27	7.02	4.37	3.46	4.10	5.02	4.46	3.81	2.88
	三线在一线泄水420 s后泄水	0.61	4.31	7.11	4.55	3.84	5.14	6.45	6.25	5.29	3.81

推荐方案	反向水头(二、三线同时泄水)		一线下闸首测点最大横流流速/(cm·s <sup>-1</sup> )									
	一线下闸首处1#反向水头/cm	改善效果/%	a#	b#	c#	d#	e#	f#	g#	h#	i#	j#
2-3	15	56	1.73	3.80	1.03	2.38	5.06	10.22	6.67	5.12	3.79	1.87
3-3	17	50	2.36	5.54	3.20	1.14	1.63	4.90	9.83	9.96	6.86	4.95

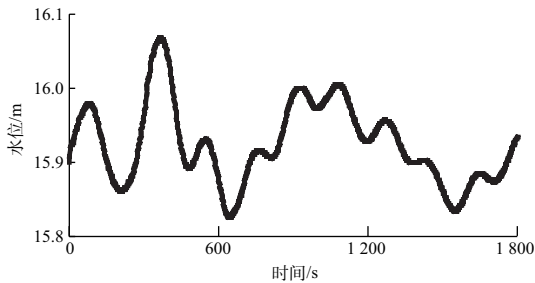


a) 一线下闸首水位波动

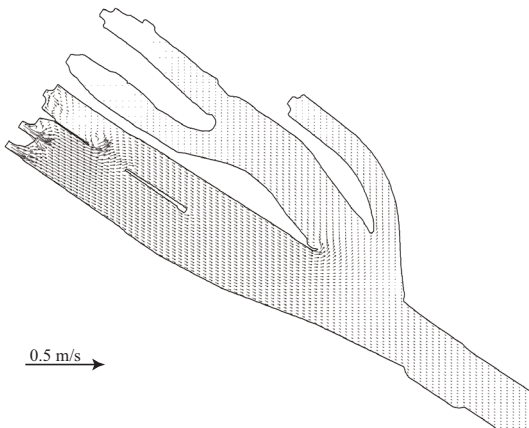


b) 船闸下游引航道流场

图4 方案2-3水位和流场



a) 一线下闸首水位波动



b) 船闸下游引航道流场

图5 方案3-3水位和流场

三线泄水（水位差最大）二线船闸引航道横向流速最大值7.11 cm/s出现在 $m^{\#}$ 处，各值均满足规范要求。

建议相关部门在隔堤开挖150 m处设置导航防撞设施（图6）。

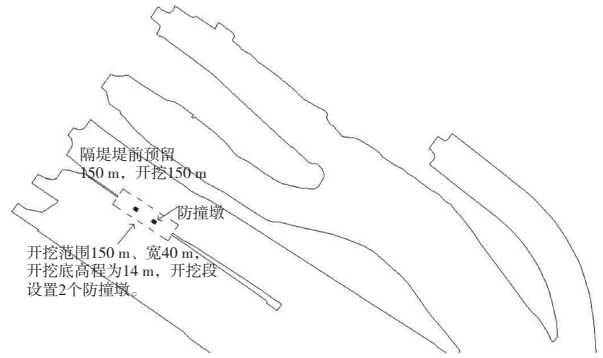


图6 推荐方案2-3开挖示意图

### 5 结语

刘老涧船闸在二、三线船闸同时泄水时，一线船闸下闸首处出现34 cm左右反向水头，影响人字门的正常运行。本研究采用二维水流模型，对船闸上下游通航水流条件进行模拟并提出工程措施，分析得出堤前预留150 m、挖除150 m、开挖底高程为14 m（方案2-3）及堤前预留200 m、挖除150 m、开挖底高程为14 m（方案3-3）2种工程措施能解决目前船闸遇到的实际问题，且相关技术指标满足规范要求，此结论可为工程的设计和施工提供参考。

### 参考文献:

- [1] 陆四雄, 张延辉. 刘老涧三线船闸上闸首裂缝研究[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(12): 942-945.
- [2] 刘运化, 王峰. 钱塘江上游游埠航电枢纽通航水流条件数值模拟[J]. 水运工程, 2011, 451(3): 107-110.
- [3] 张亮, 卢启超. 船闸引航道口门区通航水流条件改善措施的综合述[J]. 科技信息, 2009 (25): 779-780.
- [4] JTJ 305—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [5] 朱志夏, 东培华. 江苏刘老涧船闸下游引航道非恒定流及改善措施研究报告[R]. 南京: 江苏省水运工程技术研究中心, 2012.

( 本文编辑 郭雪珍 )