

嘉陵江草街船闸上游引航道水力学问题研究

胡亚安¹, 全强¹, 严秀俊¹, 张志崇¹, 蒋筱民²

(1. 南京水利科学研究院 水文资源与水利工程科学国家重点实验室, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 嘉陵江草街船闸闸室尺寸为 200.0 m×23.0 m×3.5 m(长×宽×门槛水深), 最大工作水头 26.7 m, 其综合水力指标居我国已建单级船闸前列。施工期通航上游水位 192.0 m, 此时其上游引航道水深仅为 2.9 m, 如果阀门按设计指标正常开启, 船闸灌水时上游引航道非恒定流特征明显, 浮式导航墙存在较强斜流和漩涡, 引航道水面比降及纵向流速较大, 危及船舶通航安全, 此外船闸进水口淹没深度较小, 流量达到一定值时将出现较强漩涡, 严重时还会出现贯穿吸气漩涡, 影响闸室船舶安全。通过原型调试结合数学模型计算, 解决了草街船闸施工期通航上游引航道特殊水力学问题, 确定了船闸施工期通航运行方式, 保证了船闸施工期通航安全运行。

关键词: 船闸; 水力学; 原型观测

中图分类号: TV135.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)04-0055-05

由于船闸灌泄水取自或泄向引航道, 可能在引航道内形成较大的水面波动, 对引航道内船舶航行及停泊条件产生不利影响, 国内外学者对此进行了大量研究^[1-5]。嘉陵江草街船闸施工期通航上游水位 192.0 m, 此时其上游引航道水深仅为 2.9 m。这一工况在前期模型试验阶段并未涉及^[6], 为此本文首先利用数学模型快速有效的计算出引航道内存在的水面波动问题及引航道内水流流速, 然后通过调节阀门运行方式以控制流量, 有效解决了草街船闸施工期通航引航道水力学问题, 确保了船舶通航安全, 为草街船闸顺利完成施工期通航奠定了基础。

1 数值计算方法

船闸灌泄水与引航道内水体的运动或波动是相互影响的, 由于灌泄水过程引航道内水位也发生波动, 故利用河道及引航道内非恒定流数值计算, 结合船闸灌泄水水力数值计算来研究引航道内水位变化情况。

1.1 基本方程与边界条件

沿水深的平面二维水流数学模型基本方程由连续方程和动量方程组成^[7], 其形式为:

连续方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uH}{\partial t} + \frac{\partial uuH}{\partial x} + \frac{\partial uvH}{\partial y} = & -gH \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_t H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_t H \frac{\partial u}{\partial y} \right) - g \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{c^2} \\ \frac{\partial vH}{\partial t} + \frac{\partial uvH}{\partial x} + \frac{\partial vvH}{\partial y} = & -gH \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_t H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma_t H \frac{\partial v}{\partial y} \right) - g \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{c^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: H, Z 分别为水深和水位(m); u, v 分别为 x 及 y 向水流速度(m/s); γ_t 为紊动黏性系数(m^2/s);

收稿日期: 2011-10-23

作者简介: 胡亚安(1965-), 男, 湖北云梦人, 教授级高级工程师, 主要从事通航建筑物水力学研究。

C 为谢才系数, $C=\frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}$; n 为河床糙率, R 为水力半径(m).

考虑惯性影响和船闸灌泄水过程的水力计算基本方程^[8]为:

$$H-Z=\frac{1}{\mu^2}\frac{V^2}{2g}+\frac{L_n}{g}\frac{\partial V}{\partial t}$$

(3)

闸室内水位变化过程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t}=-\frac{w}{\Omega}V$$

(4)

式中: H 为引航道水位; Z 为闸室水位; V 为廊道计算断面平均流速; μ 为流量系数; L_n 为输水廊道惯性换算长度; w 为输水廊道计算断面面积; Ω 为闸室水域面积.

初始条件:假设整个计算域内

$$H(x,y)|_{t=0}=192.0,\quad u(x,y)|_{t=0}=0,\quad v(x,y)|_{t=0}=0$$

边界条件: $H(x,y)|_{\text{进口}}=192.0\text{ m}$,出口采用非恒定流量边界条件 $Q(t)$.

1.2 计算结果分析

在上游引航道水位 192.0 m, 闸室水位 176.3 m, 水头 15.7 m 情况下灌水流量过程线如图 1, 灌水过程最大流量 222.15 m³/s. 船闸灌水初期, 水流由进水口进入闸室, 引航道内水位下降, 约 140 s 左右引航道水位下降到最低, 纵向流速同时达到最大. 数模分别计算了进水口前 3.27, 30.14, 86.89 和 145.75 m 处的纵向最大流速及水面降幅(见表 1). 进水口前 3.27 m 处水面降幅及纵向流速变化过程线见图 2.

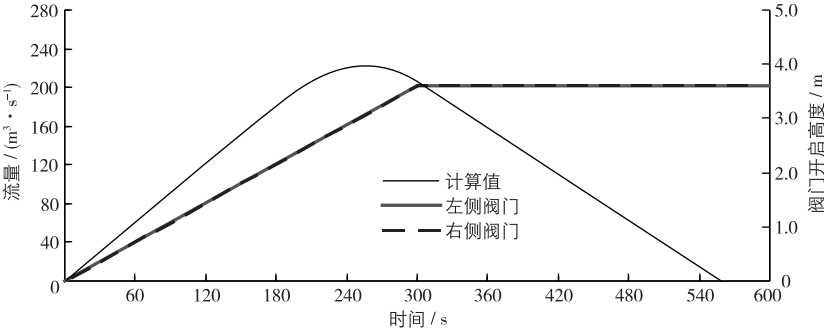


图 1 船闸灌水输水特性曲线

Fig. 1 Characteristic curves of water filling into ship lock

表 1 引航道内水体运动特性统计

Tab. 1 Characteristic statistics of water motion in the approach channel

	进水口前 145.75 m			进水口前 86.89 m			进水口前 30.14 m			进水口前 3.27m		
	1-1#	1-2#	1-3#	2-1#	2-2#	2-3#	3-1#	3-2#	3-3#	4-1#	4-2#	4-3#
最大纵向流速(m/s)	1.34	1.45	1.46	2.10	2.10	2.10	3.07	3.13	3.05	4.80	4.50	4.00
最大水位降幅(m)	0.35	0.36	0.37	0.54	0.54	0.54	0.90	0.90	0.90	1.51	1.37	1.30

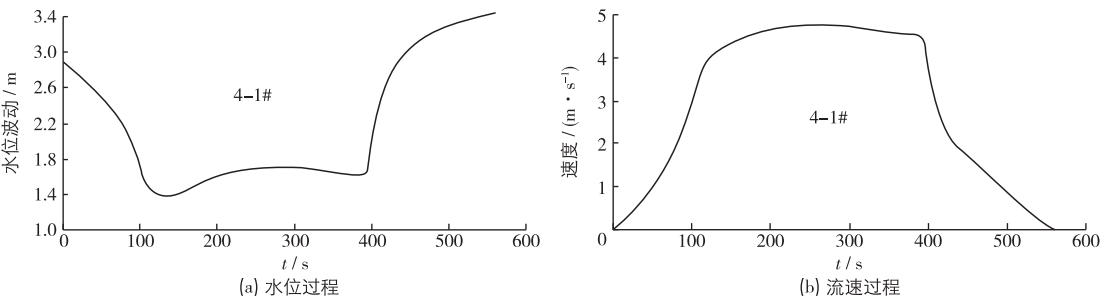


图 2 距进水口 3.27m 处水位及流速过程线

Fig. 2 Water-level and velocity hydrograph at 3.27m away from inlet

数学模型计算表明:在水位及纵向流速达到最大值后上游水体没能及时补充到引航道内,导致测点水位在140 s后持续保持在1.67 m低水位.上游引航道最大纵向流速达4.8 m/s(最窄断面),而且在高流速情况下持续一段时间,这样对引航道内停泊的船只存在很大的威胁.对应的最大水位降幅达1.5 m,此时测点处水深仅1.4 m,低于进水口的高度1.8 m,所以进水口露空,会出现贯穿性漩涡,进水口大量进气又将恶化闸室流态从而危及船舶停泊安全^[9],同时引航道流态极有可能出现急流流态甚至水跃(红水河大化船闸调试中中间渠道曾经发生该流态^[10]),不仅严重影响引航道口门区船舶安全,而且对上游人字门运行将产生严重影响.为确保草街船闸施工期通航安全,须通过调整阀门开启方式降低输水系统流量的方法,解决施工期通航因上游水深较浅所带来的引航道非恒定流水力学问题.

2 原型调试解决引航道内水力学问题

在明确了灌水阀门不能采用连续开启至全开的运行方式后,首先进行了阀门开启至0.3开度的局部开启方式.船闸灌水初期,大量水体进入闸室,引航道水位急剧下降,在120 s左右水位下降到最低,引航道内流速达2.6 m/s.观测发现由于上游水库不能及时补水到引航道内,导致引航道内水位下降严重,上游浮式导航墙斜流及回流强度较大.由于纵向流速过大,停靠在靠船墩边的船只可能被水流拉断缆绳,从而危及船舶安全及对人字门形成威胁.人字门前水位波动过程如图3所示,最大波幅达0.6 m,进水口也出现明显漩涡.因此,此种运行方式下上游引航道水流条件对口门区船舶航行及停泊存在安全隐患,应进一步减小输水流量.

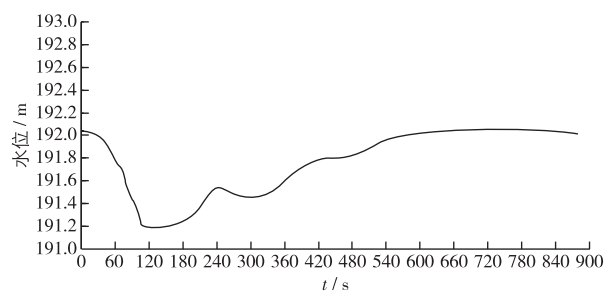


图3 人字门前水位波动过程线

Fig. 3 Water-level fluctuation hydrograph in front of the miter gate

原型调试中,分别比较了阀门局部开启至0.15、0.2开度情况下,上游引航道内水流波动情况和流量变化过程.观测表明:引航道浮式导航墙及进水口流态明显改善,水位波动小,可以满足通航要求.因此确定的控制流量为 $110\text{ m}^3/\text{s}$,相应的停机开度为0.2.如果一直采用0.2开度局部开启方式,尽管流态较好,但输水时间过长,影响通航效率.

为缩短输水时间,进行了间歇开启方式研究,间歇开启方式的原则是,第2次开启阀门后输水系统流量峰值不能超过第1次的峰值,因此对第2次开启的时机(即剩余水头)和停机开度进行了试验.阀门开启方式:第1次开至0.15开度停机,当剩余水头5 m时再开至0.6开度,实测的流量过程线如图4所示,由图可知第2次开到0.6开度后,流量达到 $130\text{ m}^3/\text{s}$,超过了控制值 $110\text{ m}^3/\text{s}$,不能满足要求.

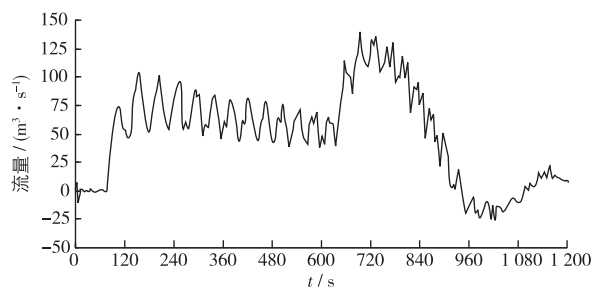


图4 间歇开启方式下流量过程线

Fig. 4 Discharge hydrograph with intermittent open

为此重新调整了阀门第2次开启方式,确定4 m剩余水头时开至0.4开度,实测的流量过程线如图5所示.结果表明,第2次开启后的峰值流量与第1次停机时相当,达到预期要求.同时在这种开启方式下,测试了上游引航道和人字门前水流流态,实测的结果如图5所示:输水系统最大流量控制在 $110\text{ m}^3/\text{s}$ 以下,引航道测点1水面最大降幅为0.34 m;引航道测点2(人字门库前)水面最大降幅仅为0.28 m;离船闸最近的隔流堤柱墩断面流速控制在1.0 m/s左右;进水口上方仅有旋转水流,未形成穿心吸气漩涡.上游引航道的非恒定流问题得到较好解决.

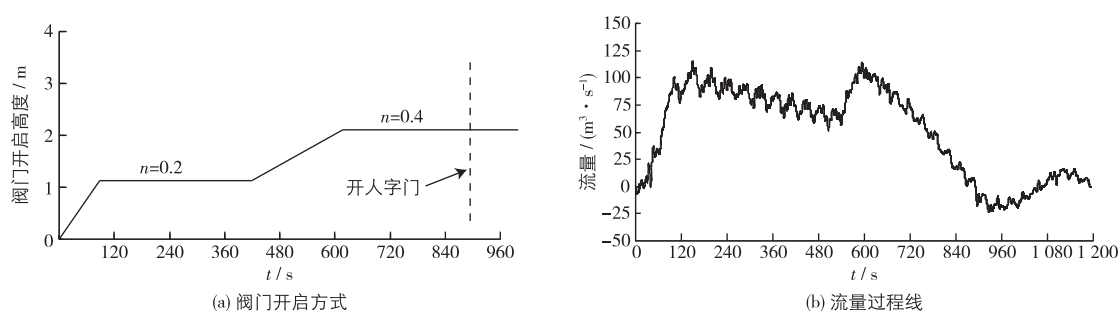


图 5 阀门开启方式及对应流量过程线

Fig. 5 Valve open types and corresponding discharge hydrograph

3 结 语

(1) 利用二维非恒定流的数学模型结合船闸灌泄水一维数学模型联合求解,模拟了草街船闸施工期通航上下游引航道水面波动及流速情况,计算结果表明在施工期船闸最大运行水头为 15.7 m(上游 192.0 m,下游为最低通航水位 176.3 m)条件下,若阀门采用连续开启至全开的运行方式,输水系统最大流量可达 $222.15 \text{ m}^3/\text{s}$ (不考虑进水口出现吸气漩涡问题);上游引航道最大纵向流速达 4.8 m/s (进口前 3 m 处),引航道流态极有可能出现急流流态甚至水跃,不仅严重影响引航道口门区船舶安全,而且对上游人字门运行将产生严重影响,同时进水口可能出现贯穿性漩涡,进水口大量进气又将恶化闸室流态从而危及船舶停泊安全. 根据相关工程原型调试经验,需要通过改变阀门开启方式来控制输水系统流量,解决引航道水力学问题.

(2) 在草街船闸原型调试中,改变阀门开启方式控制输水系统最大流量,通过多组实测试验对比分析,以及观察上游引航道及进水口流态,最终确定草街船闸施工期通航阶段阀门开启方式:阀门先开启至 0.2 开度,待水位差 $H=4 \text{ m}$ 时开启至 0.4 开度;并且确定该方式可以有效的解决草街船闸施工期通航(上游引航道水深仅 2.9 m)上游引航道水力学问题,通过原型调试,确定船闸施工期通航运行参数,从而保证该船闸的正常安全运行,充分发挥船闸的航运效益.

参 考 文 献:

- [1] 胡旭跃,李彪,徐立君. 水利枢纽通航水流条件研究综述[J]. 水运工程,2005(11): 59-64. (HU Xu-yue, LI Biao, XU Li-jun. A review of research on navigation flow condition of hydro-junction[J]. Port & Waterway Engineering, 2005(11): 59 -64. (in Chinese))
- [2] 孟祥玮. 船闸灌泄水引航道非恒定流研究[D]. 天津: 天津大学,2010. (MENG Xiang-wei. Study on unsteady flow in the approach channel of ship lock[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese))
- [3] 涂启明. 船闸通航条件研究[M]. 北京: 人民交通出版社,2010. (TU Qi-ming. Study on navigation condition of ship lock [M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [4] 周华兴. 船闸通航水力学研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社,2007. (ZHOU Hua-xing. Study on navigation hydraulics of ship lock[M]. Harbin: Northeast Forest University Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 须清华,张瑞凯. 通航建筑物应用基础研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社,1999. (XU Qing-hua, ZHANG Rui-kai. Applied basic research for navigation structure[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [6] 赵世强,胡亚安,赵健,等. 嘉陵江草街航电枢纽总体布置及通航水力学关键技术研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所,2007. (ZHAO Shi-qiang, HU Ya-an, ZHAO Jian, et al. Key technologies of general layout and navigation hydraulics for Caojie navigation-hydropower junction on Jialingjiang river[R]. Chongqing: Chongqing Southwest Water Transport Engineering Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [7] 汪德瑾. 计算水力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社,2011. (WANG De-guan. Computational hydraulics theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

- [8] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (WANG Zuo-gao. Ship lock design[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1992. (in Chinese))
- [9] 胡亚安, 李君, 宗慕伟. 红水河乐滩船闸输水系统水力特性原型调试研究[J]. 水利水运工程学报, 2008(1): 6-12. (HU Ya-an, LI Jun, ZONG Mu-wei. Prototype debug study on hydraulic characteristics of the filling and emptying system of Letan ship lock on Hongshui River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(1): 6-12. (in Chinese))
- [10] 胡亚安, 李君, 李中华. 红水河大化船闸输水系统水力特性原型调试研究[J]. 水运工程, 2008(3): 87-92. (HU Ya-an, LI Jun, LI Zhong-hua. Prototype debug study on the hydraulic characteristics of the filling and emptying system of Dahua ship lock on Hongshui river[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(3): 88-92. (in Chinese))

Hydraulic characteristics of upstream approach channel during construction of Caojie shiplock on Jialingjiang River

HU Ya-an¹, QUAN Qiang¹, YAN Xiu-jun¹, ZHANG Zhi-cong¹, JIANG Xiao-min²

(1. Key Laboratory of Navigation Structures, State Key Laboratory of Hydro-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: Lock chamber size of Caojie shiplock on Jialingjiang River is 200.0 m×23.0 m×3.5 m (length×width×sill depth), the highest operating head is 26.7 m, the integrated hydraulic index of Caojie shiplock is top-ranked in the shiplocks that have been constructed in China. It is found from prototype debug that under condition of navigable water level 192.0 m, the water depth of the upstream approach channel is only 2.9 m during construction, the characteristics of unsteady flow in the upstream approach channel is obvious and there is a strong oblique flow and swirl near the floating type navigation wall, water surface gradient ratio and vertical velocity is high. It may endanger safe navigation of ships. In addition, a strong vortex will appear near the intake upstream when discharge is up to a certain value because the submerged depth in the intake is quite small; in some severe cases, it will appear the throughout suction vortexes which affect safety of ship in the chamber. Through prototype debugging, special hydraulic problems in the upstream approach channel during construction have been solved and a mode of shiplock operation have been determined, and so that ship safe navigation must be ensured in ship lock during construction.

Key words: ship lock; hydraulic characteristics; prototype debug

《江苏省中小河流水文监测系统报讯通信系统》项目合同签字仪式在南自所举行

2012年7月18日,《江苏省中小河流水文监测系统报讯通信系统》项目合同签字仪式在南自所举行.江苏省水文水资源勘测局局长张春松、水利部南京水利水文自动化研究所所长蒋兆宏等双方领导出席了签字仪式.

张春松局长希望中标的南水所严格遵守合同条款,合理制定施工方案,以一流的队伍、一流的速度、一流的质量按期完成建设任务.蒋兆宏所长感谢江苏省水文局对我所的信任,并作出了安全第一、保质保量、保证进度、确保优良工程的项目实施承诺.

《江苏省中小河流水文监测系统报讯通信系统》建设项目包括南京等13个水文分中心所有298个中小河流水文监测站点的水雨情自动测报系统的建设.

摘自南京水利科学研究院网站