



八堡双线船闸引航道通航水流条件观测研究*

胡天娅¹, 严秀俊¹, 李海健¹, 孔增增²

(1. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室,
水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 杭州交投建设工程有限公司, 浙江杭州 310024)

摘要: 八堡双线船闸为京杭运河沟通钱塘江第二通道的关键性节点工程, 其上下游引航道均采用共用引航道的布置形式。为保障双线船闸运行时的船舶过闸安全, 通过实船试验及水力学观测对引航道水流条件及船舶停泊条件等参数进行测量, 并对船闸通航安全进行分析。结果表明: 引航道水面波动在 $-0.29\sim 0.38$ m, 不会导致船舶擦底现象发生; 双线船闸同时充泄水时, 引航道内的最大流速为 0.44 m/s, 船闸人字门处最大瞬时反向水头为 0.143 m, 船舶最大系缆力为 5.74 kN, 均满足规范要求; 船闸单线运行时, 对另一侧船闸的船舶进出闸不造成影响。

关键词: 八堡船闸; 通航条件; 双线船闸; 原型观测

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0122-07

Observational study on navigational water flow conditions in approach channel of Babao double-lane ship lock

HU Tianya¹, YAN Xiujun¹, LI Haijian¹, KONG Zengzeng²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology,
Ministry of Transport, National Key Laboratory of Water Hazard Defense, Nanjing 210029, China;
2. Hangzhou Communications Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310024, China)

Abstract: The Babao double-lane ship lock is a key node project for the Beijing-Hangzhou Canal to connect the second channel of the Qiantang River. Its upstream and downstream approach channels are arranged in a shared approach channel. To ensure the safety of ships passing through the ship lock when the double-lane ship lock is operating, we measure parameters such as water flow conditions in the approach channel and ship berthing conditions through real ship tests and hydraulic observations, and analyze the navigation safety of the ship lock. The results show that the water surface in the approach channel fluctuates between -0.29 m and 0.38 m, which will not cause the ship to rub against the bottom. When the double-lane ship lock is filled and discharged at the same time, the maximum flow velocity in the approach channel is 0.44 m/s, the maximum instantaneous reverse water head at the ship lock herringbone gate is 0.143 m, and the maximum mooring force of the ship is 5.74 kN, both of which meet the code requirements. When the ship lock operates in a single line, it will not affect the entry and exit of ships on the other side of the ship lock.

Keywords: Babao ship lock; navigational condition; double-lane ship lock; prototype observation

随着内河航运的高速发展, 船闸规模不断扩大, 多线船闸运行时的安全问题日渐突出, 许多学者对引航道内因多线运行而产生的非恒定流的

影响因素^[1-2]及水力学特性^[3-4]进行多角度的研究, 为实际的工程建设提供了参考。原型观测研究因具备直接性、真实性, 可以充分考虑实际环

收稿日期: 2024-03-29

*基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2021026); 浙江省交通运输科技示范工程项目(202229)

作者简介: 胡天娅(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为通航建筑物。

境中各种因素的影响, 对保障船闸的安全高效运行具有极其重要的作用。目前对于多线船闸引航道通航水流条件的原型观测数据较少, 研究多集中于物理模型试验及数值模拟研究。本文通过对八堡双线船闸进行原型观测, 总结基本规律, 为理论分析及数值模拟等方法提供验证及对比参考。

1 工程概况

八堡船闸位于钱塘江北岸钱塘区八堡村与头格村的交界处, 为京杭运河浙江段Ⅲ级航道整治工程杭州段新开挖航道的终端。作为京杭运河沟通钱塘江第二通道的关键性节点工程, 通航内河1 000吨级船舶, 同时建设双线船闸, 两线闸室的有效尺寸均为长300 m、宽23 m、门槛水深4.2 m, 双线合计设计年单向过闸货运量通过能力为4 200万t^[5]。船闸为Ⅲ级船闸, 轴线为南北方向, 内河侧(北侧)为上游, 钱塘江侧(南侧)为下游。船闸具备双线并列、采用集中输水系统、尺度较大、输水水力指标较高等突出特点, 船闸运行安全问题突出。

船闸引航道是引导船舶从航道进入闸室的限制性航道, 是隔流墙掩护的水域, 其平面布置应保证通航期间船舶、船队畅通无阻, 安全行驶^[6]。八堡船闸上下游引航道均采用共用引航道的布置形式, 两线船闸主体中心线距离55 m, 平面布置见图1。在双线船闸灌泄水过程中, 引航道内的水流往往会存在叠加和相互影响, 可能会引起引航道内水流流速超标、有效水深减小等问题^[7]。为保障船舶航行及停泊的安全, 有必要对八堡双线船闸引航道的通航条件进行水力学观测及实船试验, 判断其是否能够满足船舶安全过闸的要求。

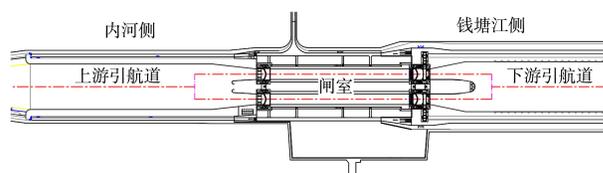


图1 八堡船闸总平面布置

Fig. 1 General layout of Babao ship lock

2 试验内容及方法

2.1 试验内容

八堡船闸在日常运行时, 其水头集中在3 m左右, 因此选取上游水位为1.23 m、下游水位为4.02 m的近常水位组合作为研究工况, 对八堡双线船闸不同运行工况下的通航水流条件进行原型观测, 具体内容包括: 1) 引航道波动。在两线船闸不同的运行工况下, 对引航道水位及闸室水位进行测量, 并分析引航道内的水位波动幅值、波动时间和人字门处的最大反向水头。2) 引航道流速。分别测验双线船闸在共同运行时引航道内的流速变化及东线船闸运行时对西线船闸引航道流速的影响。3) 船舶停泊条件。在最恶劣工况条件下, 对停靠在引航道内的船舶系缆力进行测试。

2.2 设备及测点安排

引航道靠船墩位置的船舶停泊条件为观测的重点关注内容之一。试验时在船首和船尾缆绳处各布置1个拉力传感器, 测量船舶在上下游引航道靠船墩停泊的系缆力。船舶系缆力受系缆方式影响较大, 因此将船舶首尾呈“八”字系缆以获得可靠的系缆力。

观测采用声学多普勒流速仪(ADV)测量靠船墩处的流速, 采用波高仪观测靠船墩处的波动, 测点布置见图2。未进行实船试验时, 测点布置在引航道靠船墩附近, 进行长时间监测; 在实船试验时则布置在船首、船尾(或船舷)处, 在船舶停靠时测量。为监测船闸充泄水过程中上下游及闸室水位的变化情况, 在船闸的相应位置布置水位计。其中, 上游(内河侧)水位测点位于上闸首人字门前引航道典型部位; 下游(钱塘江侧)水位测点布置在下闸首人字门后; 闸室水位测点布置于闸室两端爬梯内。流速测点及水位测点布置见图3。

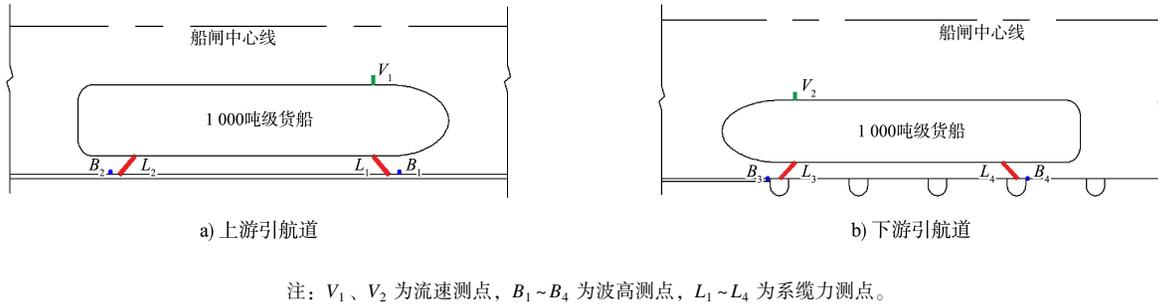


图 2 船舶引航道停泊条件测点布置
 Fig. 2 Measurement points layout of ship in approach channel under mooring condition

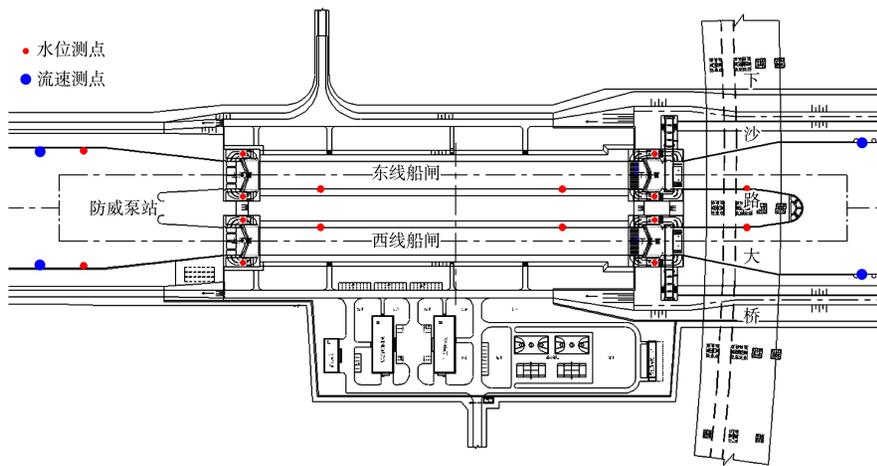


图 3 船闸水力学测点整体布置
 Fig. 3 Overall layout of hydrodynamic measurement points at ship lock

3 引航道波动

引航道水位波动过大时，会导致引航道的水深不足，从而导致船舶擦底现象的发生，如葛洲坝 2#、3# 船闸共用的三江引航道，在建成运行后不久就发生由于泄水长波运动而导致的船舶擦底事故。同时，过大的水位波动会对船舶在引航道的靠船系缆造成困难。因此，有必要对引航道的波动峰值进行监测，并在综合考虑引航道水深及波动周期等条件下，对船闸因灌泄水而导致的引航道长波运动进行分析。

在上游水位为 1.23 m、下游水位为 4.02 m 的近常水位组合条件下，引航道波动的观测工况见表 1、2，表中基本涵盖了船闸运行时可能出现的所有工况。

船闸充水时，东、西两线船闸下游引航道最

大峰值波幅分别为 0.23、0.25 m，最大谷值波幅分别为 -0.29、-0.27 m，出现在双线船闸同时充水的工况。该工况下，下游引航道的水深为 4.02 m，其水位波动导致的水位降低远高于船闸下游引航道的最低通航水位 2.7 m，不会导致船舶擦底。船闸泄水时，东、西线船闸上游引航道最大峰值波幅分别为 0.38、0.37 m，最大谷值波幅分别为 -0.05、-0.06 m，出现在双线船闸同时泄水工况。该工况下，上游引航道的水深为 1.24 m，其水位波动导致的水位降低远高于船闸下游引航道的最低通航水位 0.6 m，同样不会导致船舶擦底。双线船闸运行过程中，东西线船闸引航道的水位波动规律基本一致，双线船闸充水时波动周期约 8.1 min，泄水时波动周期约 11.6 min，为长波运动，对引航道船舶泊稳性影响不大。

表 1 双线船闸充水运行时下游引航道水位波动

Tab. 1 Fluctuation of water level in lower approach channel during filling of double-lane ship lock

工况	运行方式	东线船闸		西线船闸	
		波幅/m		波幅/m	
		峰值	谷值	峰值	谷值
C ₁	东线船闸单充	0.15	-0.21	0.11	-0.17
C ₂	东线船闸充水, 间隔 4 min 后西线船闸充水	0.20	-0.20	0.18	-0.17
C ₃	东线船闸充水, 间隔 2 min 后西线船闸充水	0.17	-0.15	0.23	-0.22
C ₄	东线、西线船闸同时充水	0.23	-0.29	0.25	-0.27

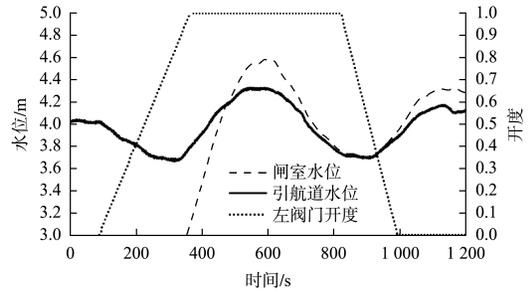
表 2 双线船闸泄水运行时上游引航道水位波动

Tab. 2 Fluctuation of water level in upper approach channel during discharge of double-lane ship lock

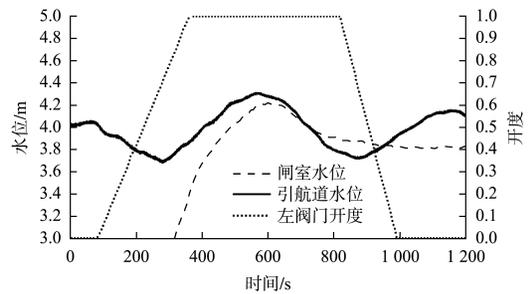
工况	运行方式	东线船闸		西线船闸	
		波幅/m		波幅/m	
		峰值	谷值	峰值	谷值
X ₁	东线船闸单泄	0.13	-0.04	0.13	-0.04
X ₂	东线船闸泄水, 间隔 6 min 后西线船闸泄水	0.14	-0.03	0.14	-0.01
X ₃	东线船闸泄水, 间隔 4 min 后西线船闸泄水	0.15	-0.02	0.10	-0.04
X ₄	东线船闸泄水, 间隔 2 min 后西线船闸泄水	0.18	-0.04	0.20	-0.01
X ₅	东线、西线船闸同时泄水	0.38	-0.05	0.37	-0.06

郭超等^[8]对八堡船闸引航道水流条件进行数值模拟研究, 其中涉及对船闸单充、单泄时引航道的水面波动进行模拟。结果表明, 在二线船闸(即东线船闸)单独充水时, 引航道瞬时最大水位降幅为 0.22 m; 在二线船闸单独泄水时, 引航道停泊段最大水位降幅为 0.06 m。该数值模拟结果与观测所得的结果基本一致, 数据真实可信。

由上述引航道波幅的观测结果可知, 最不利工况出现在船闸同时灌泄水时, 此时两线的引航道水位和闸室水位的波动对比见图 4、5。可以看出, 在船闸充水时, 船闸人字门附近产生的瞬时反向水头最大为 0.143 m; 泄水时的反向水头最大为 0.038 m。船闸充泄水时的反向水头峰值均出现在东线船闸处且未超过 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[9]的允许值 0.25 m。



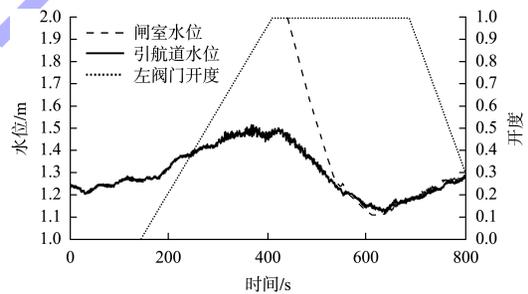
a) 西线船闸



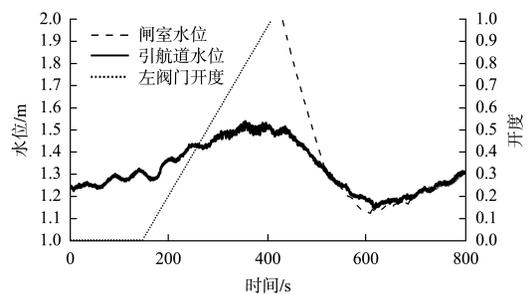
b) 东线船闸

图 4 双线船闸同时充水时引航道水位及闸室水位

Fig. 4 Water level of approach channel and chamber during simultaneous filling of double-lane ship lock



a) 西线船闸



b) 东线船闸

图 5 双线船闸同时泄水时引航道水位及闸室水位

Fig. 5 Water level of approach channel and chamber during simultaneous discharge of double-lane ship lock

4 引航道流速

JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》对引航道的流速有着明确的要求，同时，对于共用引航道的双线船闸有“一线船闸灌泄水，不应影响另外一线船闸的正常运用”的额外要求。因此，本文从两个方面分别测验双线船闸不同时序共同运行时引航道内的流速变化，东线船闸运行时对西线船闸引航道流速的影响。

双线船闸不同时序运行时，引航道流速见图6。由观测结果可知：随着东西线输水阀门开启间隔时间的缩短，引航道流速波动幅值呈现明显增大。东线、西线船闸间隔4 min 充水时，引航道最大流速为0.36 m/s；东线、西线船闸间隔2 min 充水时，引航道最大流速为0.38 m/s；东线、西线船闸同时充水时，引航道流速最大值为0.44 m/s。当双线船闸泄水时，考虑其最不利工况即双线船闸同时泄水时，该工况下的上游引航道水流流速见图7，此时引航道内的最大流速为0.43 m/s。综上，双线船闸同时充泄水时，其上下游引航道内的最大流速均满足JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[10]“上游最大流速不应大于0.5 ~ 0.8 m/s，下游引航道中不应大于0.8 ~ 1.0 m/s”的要求。

当东线船闸开始充水时，对西线船闸下游引航道最接近船闸的靠船墩处的引航道水面流速进行测量，结果见图8，图中纵向流速方向指向上游为正，横向流速方向指向右岸为正。可以看出，在东线船闸充水时，西线船闸下游引航道横向流速最大值为0.08 m/s，方向指向右岸；纵向流速最大值为0.14 m/s，方向指向上游。双线船闸下游引航道靠船墩处水域总宽度约为78 m，双线船闸隔流墙断面水域总宽度约为46 m，按照水域宽度计算，该工况双线船闸隔流墙断面纵向流速最大值为0.24 m/s，双线船闸隔流墙断面横向流速最大值为0.14 m/s。

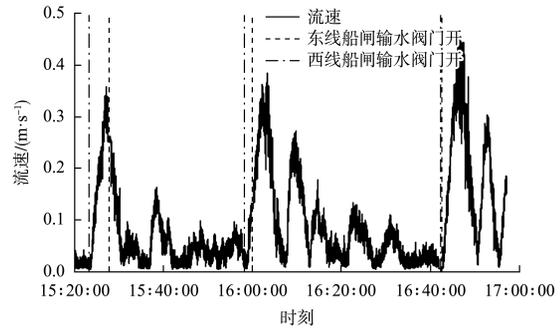


图6 东线、西线船闸不同时序输水时引航道水流流速
Fig. 6 flow velocity of approach channel during different timing of filling at eastern and western ship locks

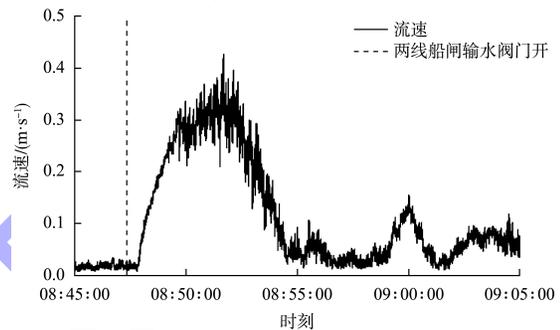
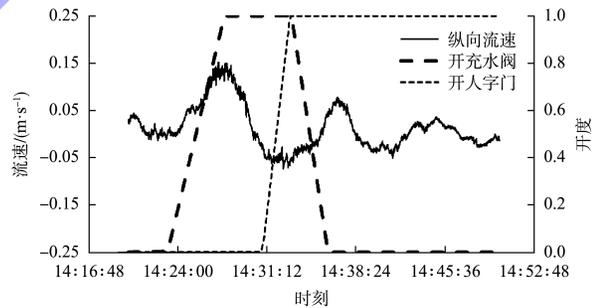
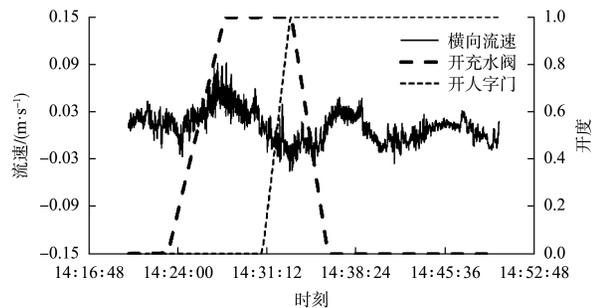


图7 东线、西线船闸同时泄水时上游引航道水流流速
Fig. 7 Flow velocity of upper approach channel during simultaneous discharge at eastern and western ship locks



a) 纵向流速



b) 横向流速

图8 东线船闸充水时西线船闸下游引航道水面流速
Fig. 8 Surface wave velocity in lower approach channel of western ship lock during filling of eastern ship lock

当东线船闸开始泄水时, 对西线船闸上游引航道最接近船闸的靠船墩处的引航道水面流速进行观测, 结果见图9, 图中的流速方向与上述方向一致。可以看出, 在东线船闸泄水时, 西线船闸上游引航道横向流速最大值 -0.08 m/s , 方向指向左岸; 纵向流速最大值为 0.16 m/s , 方向指向上游。东线船闸泄水时的双线船闸隔流墙断面流速的计算方法与上述东线船闸充水时的计算方法相同, 通过计算可知, 在东线船闸泄水时, 双线船闸隔流墙断面纵向流速最大值为 0.27 m/s , 双线船闸隔流墙断面横向流速最大值为 0.14 m/s 。

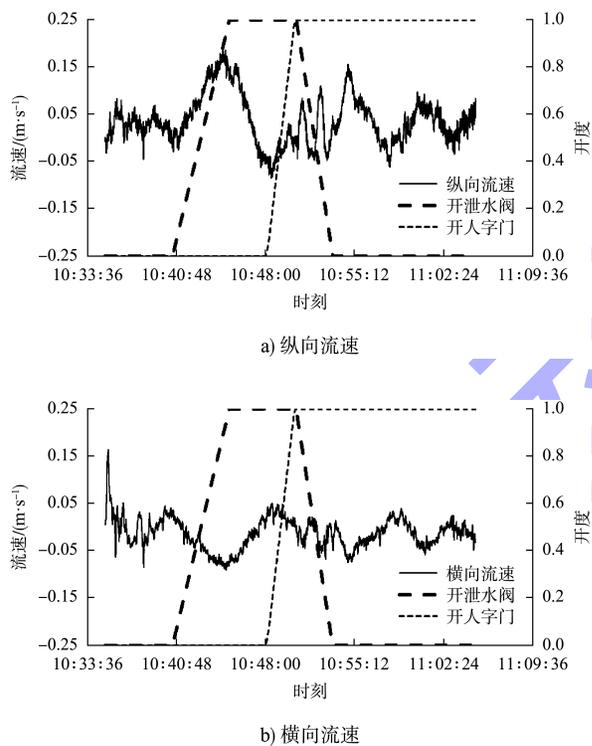


图9 东线船闸泄水时西线船闸上游引航道水面流速
Fig. 9 Surface wave velocity in upper approach channel of western ship lock during discharge of eastern ship lock

由上述测量及计算结果可知, 当东线船闸开始运行时, 西线船闸最接近船闸的靠船墩处的引航道水面纵向及横向流速和双线船闸隔流墙断面的纵向及横向流速均满足 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》“纵向流速不应大于 0.5 m/s , 横向流速不应大于 0.15 m/s ”的要求, 即一线船闸的运行对另一侧船闸船舶进出闸的影响不大。

5 船舶停泊条件

由于船舶所受的外部荷载均通过系缆绳传递至系船设施上, 因此船舶系缆力是影响船舶停泊安全的重要指标。由上述试验结果可知, 在水位组合为上游水位 1.23 m 、下游水位 4.02 m 的工况下, 双线船闸同时泄水时, 上游引航道水面波动最大, 水面流速最大, 船舶停泊条件最为恶劣, 因此在泄水之前于试验船舶上安装拉力传感器, 测试在该工况下的船舶停泊条件, 结果见图10。

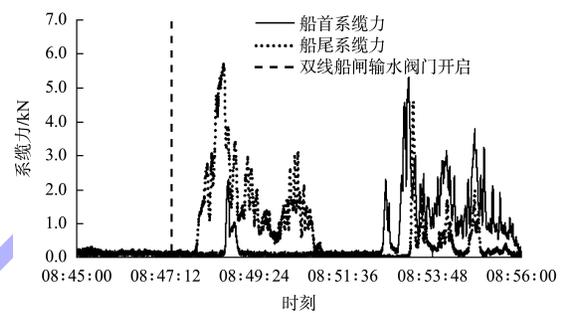


图10 双线船闸同时泄水时船舶停泊系缆力
Fig. 10 Mooring force of ship during simultaneous discharge of double-lane ship lock

试验船舶“浙萧山货 25091”为500吨级船舶, 实载488 t, 其外侧并列停靠了另一艘500吨级船舶, 其缆绳也系在“浙萧山货 25091”船舶上, 也就是说, 测试时“浙萧山货 25091”船舶缆绳承受2条500吨级船舶的系缆力。由图10可看出, 双线船闸泄水阀门同时开启后, 随着时间的推移, 水位及流速波动抵达系船柱处, 船首及船尾处缆绳均开始绷紧受力, 其中船尾处系缆力远大于船首处, 其原因可能为水流对船舶的冲击导致船舶发生偏移; 随后, 在下一波动来临时, 缆绳再次受力, 此时两处缆绳的受力大小相差无几, 船首系缆力略大于船尾, 最大系缆力较第一次波动有所下降。总体而言, 船舶呈船首、船尾交替受力状态, 船首、船尾的最大系缆力分别为 5.31 kN 、 5.74 kN , 均小于 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[11]关于船舶允许系缆力的要求, 船闸双线运行不会对船舶停泊造成危害。

6 结论

1) 在上游水位为 1.23 m、下游水位为 4.02 m 的水位组合下, 船闸双线运行时, 双线船闸充泄水的时间间隔越短, 引航道流速及波动幅度越大。同时充水时, 下游引航道最大流速为 0.44 m/s, 最大峰值波幅为 0.25 m, 最大谷值波幅为 -0.29 m; 同时泄水时, 上游引航道最大流速为 0.43 m/s, 最大峰值波幅为 0.38 m, 最大谷值波幅为 -0.06 m。引航道内的流速及波幅均满足要求。双线船闸充水时波动周期约 8.1 min, 泄水时波动周期约 11.6 min, 为长波运动, 对引航道船舶泊稳性影响不大。

2) 双线船闸同时充水时, 船闸人字门附近产生的瞬时反向水头最大为 0.143 m, 同时泄水时最大为 0.038 m, 反向水头峰值均出现在东线船闸处且未超过规范允许值。

2) 单线船闸充泄水时, 会使得另一侧船闸产生最大值为 0.16 m/s 的纵向流速以及最大值为 0.08 m/s 的横向流速, 隔流墙断面处纵向流速最大值约为 0.27 m/s, 横向流速最大值约为 0.14 m/s, 均满足规范要求。一线船闸充泄水时对另一侧船闸的船舶进出闸不造成影响。

3) 在双线船闸同时泄水时, 即在最恶劣工况条件下, 停泊在引航道内的船舶呈船首、船尾交替受力状态, 船首、船尾的最大系缆力分别为 5.31、5.74 kN, 均小于规范中船舶允许系缆力的要求, 船闸双线运行不会对船舶停泊造成危害。

参考文献:

[1] 韦德鉴, 宣国祥, 李君, 等. 长洲四线并列船闸运行方式对下游引航道水流条件的影响[J]. 水运工程, 2012(8): 119-124.

[2] 钟林斌, 陈玉梅, 黄毓斌, 等. 双线船闸分水墙体型对下游引航道水流条件的影响研究[J]. 西部交通科技, 2023(12): 28-30, 66.

[3] 黄伦超, 李珊, 游涛, 等. 双线船闸共用下游引航道水流特性及其影响[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(4): 37-44.

[4] 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): 67-72.

[5] 金国强, 史英标, 李浙江, 等. 京杭运河沟通钱塘江八堡船闸口门综合整治方案[J]. 水运工程, 2022(12): 98-105.

[6] 王定. 船闸口门区布置及其通航安全判别标准[J]. 水运工程, 2024(3): 87-91.

[7] 周权. 白石窑双线船闸共用下引航道通航水流条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

[8] 郭超, 宣国祥. 京杭运河(浙江段)八堡船闸引航道水流条件数值模拟研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.

[9] 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, 2021.

[10] 王蛟, 杨斌. 闸室船舶系缆力研究综述[J]. 水道港口, 2014, 35(5): 527-531.

[11] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)

(上接第 101 页)

[18] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

[19] 李洁, 张有兴, 彭赤彬, 等. 沅水尾间金石垸河段综合治理方案研究[J]. 湖南水利水电, 2023(4): 57-60.

[20] 李炜. 水力计算手册[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[21] 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.

[22] 南京水利科学研究院. 湖南省汉寿县沅水尾间金石垸

河段采砂技术论证河工模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.

[23] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 沅水尾间金石河采砂河段二维水流数学模型研究[R]. 长沙: 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 2020.

[24] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 湖南省汉寿县沅水尾间太湖垸采砂河段二维水流数学模型分析报告[R]. 长沙: 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 2020.

(本文编辑 王传瑜)