



八堡船闸在钱塘江潮影响下 运行特性的原型观测

邓倩玉, 严秀俊, 李海健, 蔡致远

(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, 江苏南京 210029)

摘要: 八堡船闸是京杭运河沟通钱塘江第二通道的关键性节点工程, 船闸运行时受到钱塘江潮涌影响。为了确保八堡船闸长期稳定高效运行, 针对钱塘江不同节令下的不同潮涌高度潮水进行船闸整体运行调试和实船试验, 测量八堡船闸在潮汛期间的运行、通航状态, 保障船闸安全。结果表明, 在钱塘江小潮汛期间, 潮水对八堡船闸影响有限, 八堡船闸可正常运行; 在大潮期间, 引航道条件恶劣, 八堡船闸应放下挡潮门、停止运行, 待退潮后再进行通航。

关键词: 八堡船闸; 水力特性; 原型观测; 京杭运河

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0132-06

Prototype observation of operating characteristics of Bapu ship lock under influence of Qiantang River tide

DENG Qianyu, YAN Xiujun, LI Haijian, CAI Zhiyuan

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology,
Ministry of Transport, Nanjing 210029, China)

Abstract: Bapu ship lock is a key node project of the second channel connecting Beijing-Hangzhou Canal and Qiantang River, and the operation of the locks is affected by the tidal surges of Qiantang River. To ensure the long-term stable and efficient operation of Bapu ship lock, the overall operation of the locks debugging and the real ship test are carried out for the tidal surges of different tide heights in different seasons of Qiantang River, and the operation and navigation status of Bapu ship lock during tidal flooding is measured to ensure the safety of the lock. The results show that during the small tidal flood of Qiantang River, the tidal water has limited influence on Bapu ship lock, and the Bapu ship lock can operate normally. During the big tidal flood, the conditions of the approach channel are poor, and the Bapu ship lock should put down the tidal gate to stop the operation, and then carry on the navigation after the tide goes out.

Keywords: Bapu ship lock; hydraulic characteristic; prototype observation; Beijing-Hangzhou Canal

1 工程概况

八堡船闸是京杭运河沟通钱塘江第二通道的关键性节点工程, 船闸位于钱塘江北岸下沙镇八堡村与头格村的交界处, 船闸主体布置于下沙路北侧, 下闸首下游边界距离钱塘江堤约 450 m。八堡船闸为新建的Ⅲ级双线船闸, 闸室尺寸为 300 m×23 m×4.2 m(有效长度×闸室宽度×最小门槛水深), 新

建的两线船闸平行并列布置, 两线闸室中心距离为 55 m, 设计代表船型以 1 000 吨级单船为主^[1-3]。

对八堡船闸运行进行调试, 不仅可以保障八堡船闸运行安全、提高船闸运行效率、保障京杭运河沟通钱塘江第二通道畅通, 也是对现有科研成果的有益补充和完善, 旨在推广到其他船闸建设中, 提高我国船闸的建设水平^[4]。

收稿日期: 2024-03-01

作者简介: 邓倩玉(1998—), 女, 硕士研究生, 从事通航建筑物相关领域研究。

与其他船闸相比,八堡船闸具有如下特点及问题:

1) 八堡船闸是采用闸首短廊道集中输水形式布置规模较大的船闸^[5-6],采用集中输水系统水力指标较高,同时下游受钱塘江潮影响水位变化频繁,使得其水力条件复杂,上下游水位变化大。船闸规模较大、等级较高,年货运量通过能力大。

2) 项目地处钱塘江强涌潮河段,水动力条件复杂,且上游引航道连通临近工程八堡排涝泵站,下游引航道下穿艮山快速路大桥、之江东路大桥和在建的九乔路大桥,出口处紧邻九堡大桥;受自然条件影响也较大,需综合考虑台风、汛期对项目的影响。

3) 双线船闸平行并列布置,上、下游引航道采用共用引航道方案,上、下游引航道均采用曲进曲出布置形式,两线船闸主体中心线距离为55 m。双线船闸充泄水时,存在上下游引航道水流及口门区相互影响的问题。

4) 船闸充(泄)水时,两侧进(出)水口均在上(下)游引航道进(出)水,其对上(下)游进(出)水口流态及引航道停泊条件影响较为明显。

此外,钱塘江河口潮汐为非正规浅海半日潮,1 d内两涨两落,潮水影响频繁,大潮期潮波可达富春江电站大坝坝下。八堡船闸引航道口门附近七堡潮位站实测多年平均高潮位4.43 m,最大潮差4.22 m^[7]。口门区附近段潮流多为往复流,涨落潮历时长,流速大,涨潮历时最长达4 h,落潮历时最长达12 h;八堡出口附近最大涌潮高度约2.5 m,涌潮行进速度为6.0~7.3 m/s,潮涌及快水流速持续时间15 min左右,考虑到涌潮强弱与潮差大小密切相关,潮差大涌潮强,潮差小涌潮弱,如七堡一带潮差若小于1.0 m,几乎没有涌潮现象。但八堡船闸出口的最大涌潮高度可达2.5 m,需要对其原型进行观测。况且潮水过后立即形成回潮,对待闸船舶具有很大危险性,尤其每年5—10月,潮水高而急,虽然八堡船闸设计有挡潮门作为保障,但仍需严格的管控措施才能确保船舶航行安全。

此前关于潮汐对船闸的研究多聚焦在利用涨落潮平潮段时间开放通闸提高船闸通过能力方面

和潮汐产生双向水流方面的研究,对于八堡船闸此类由于潮水上涨导致运行水头上升的相关研究较少。考虑到钱塘江潮汐对船舶航行安全影响较大,且钱塘江潮引起增(减)水位明显,航道通航条件恶劣,应对其进行安全性相关研究。

综上,鉴于八堡船闸的上述特点和问题,开展船闸原型调试与水力学观测十分必要。本文重点介绍钱塘江汛期对船闸输水系统水力学影响的主要调试观测成果。

为监测充泄水过程上游、门井、闸室、下游水位变化情况及一、二线船闸充泄水的相互影响,分别在东西线船闸上下游人字门前后、各阀门井、各检修门井布置水位测点,利用高精度水位传感器监测水位涨落情况;东西线船闸的各输水阀门、各人字门有杆腔、无杆腔安装油压传感器,监测阀门、人字门启闭特性;采用缆绳拉力仪测量船舶系缆力,传感器监测信号通过多功能数据采集系统集中采集、分析处理。实船试验中采用多普勒超声流速仪测量引航道靠船墩处流速变化以及惯导系统测量船舶行驶过程中船舶航速、方位角、横倾、纵倾等航行特性。

2 小潮汛期间运行情况

2.1 船闸受潮汐影响情况

农历每月初一—初五、十五—二十钱塘江均有潮涌现象,因此选取农历四月初四观测小潮汛对八堡船闸运行的影响。

2023年5月22日(农历四月初四),根据布置于八堡船闸钱塘江侧口门区的水位监测站实测数据可知,钱塘江小潮汛潮水约于16:17:00抵达八堡船闸口门区,水位缓慢提高约0.17 m,引起引航道水位提升0.22 m,而后在引航道形成波幅0.04 m的小幅度振动。显见,小潮汛对船闸引航道影响微弱,引起的波动远小于船闸充水时引起的水位波动幅度0.40 m。小潮汛下口门区和引航道水位波动见图1。

小潮汛下充水阀门振动见图2。由图可知,在起潮期间,阀门有轻微的纵向振动,出现在引航道水位由于潮汛水位上升之后的第1个下降区间,最大值不

超过±0.10 m/s²，平均振动幅度在 0.03 m/s² 范围内。整体来看，小潮汛对八堡船闸整体输水系统及引航道水力特性等影响较小，均在正常运行设计范围内，能保证日常整体安全稳定可靠。

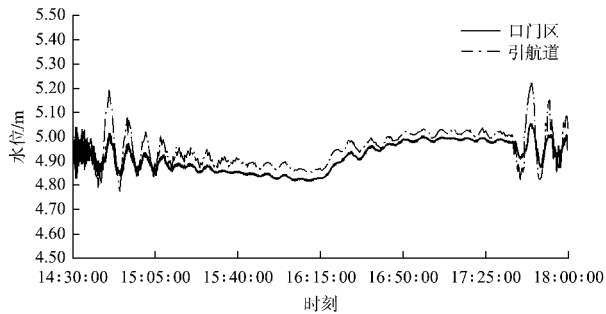


图1 小潮汛下口门区和引航道水位波动对比

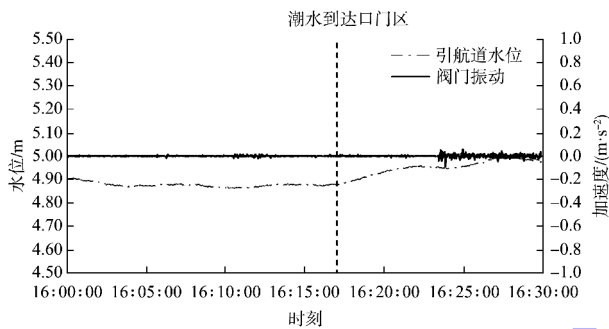


图2 小潮汛下充水阀门振动

2.2 船闸运行

涨潮前后船闸充水闸室水位对比见图3，涨潮前后船闸充水水力特性对比见表1。通过对比当天涨潮前后2组充水试验水力特性可知，小潮汛期间船闸在涨潮过后即开始正常充泄水运行，船闸的闸、阀门运行特性和涨潮前基本保持一致，闸室内水位、充水阀门井、钱塘江侧引航道水位波动影响等均保持相似变化规律，闸、阀门的启闭油压、启闭力、振动特性等在潮汐前后差别较小。可见，钱塘江平日的小潮汛对八堡船闸的正常运行未产生明显安全隐患，八堡船闸在小潮汛期间可正常充泄水。

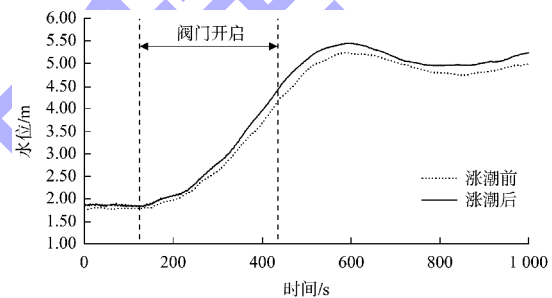


图3 涨潮前后船闸充水闸室水位对比

表1 涨潮前后船闸充水水力特性对比

阶段	阀门有杆腔 最大压力/ MPa	阀门无杆腔 最大压力/ MPa	阀门最大 启闭力/ kN	阀门振 动峰值/ (m·s ⁻²)	闸室有杆腔 最大压力/ MPa	闸室无杆腔 最大压力/ MPa	闸室最大 启闭力/ kN	最大输 水流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	船闸充 水时间/ s	引航道水位 波动幅度/ m	引航道水 位波动 周期/s
涨潮前	5.9	0.37	126.43	0.45	6.82	2.42	52.53	90.67	370	0.40	489
涨潮后	6.5	0.40	136.22	0.6	6.14	2.51	29.26	98.98	380	0.39	461

注：以西线右侧闸阀门开启过程为例。

2.3 小潮汛期间实船试验

小潮汛期间实船试验船舶航行航速特性见图4，船舶过闸全过程最大航速 1.94 m/s，离开船闸后江上航速可达 2.04 m/s，最大横倾角 0.31°，最大纵倾角 0.44°，方位角 180°~195°，最大漂角 33°，船舶航行各项参数变化平稳。

小潮汛前后实船试验船舶航行特性见表2，在未受到钱塘江涌潮和钱塘江小潮汛影响的情况下，船舶航行状态较好，船舶横摇角、纵倾角均很小；船舶离开八堡船闸驶向三堡船闸试验过程中航速均在 2 m/s 以上，船舶漂角和操舵角均较小，小潮

汛前后各项特性差距均较小。总体而言，八堡船闸在钱塘江日常小潮汛期间均能满足正常安全运行，船舶安全过闸能够得到保障。

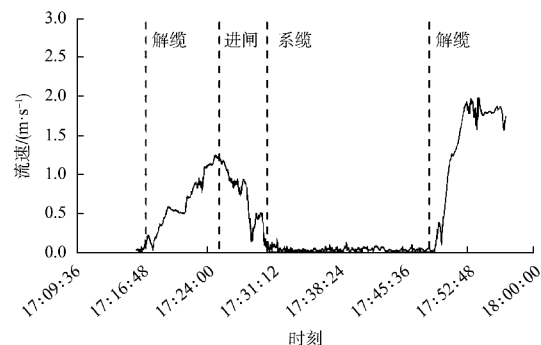


图4 小潮汛期间实船试验船舶航行航速特性

表 2 涨潮前后实船试验船舶航行船舶特性

阶段	最大航速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大横倾角/ ($^{\circ}$)	最大纵倾角/ ($^{\circ}$)	方位角/ ($^{\circ}$)	最大漂角/ ($^{\circ}$)
涨潮前	1.74	0.20	0.20	182~220	36
涨潮后	1.94	0.31	0.44	180~195	33

注: 表中为船闸充水运行后, 船舶出闸驶向钱塘江过程的数据。

3 大潮汛期间运行情况

3.1 船闸受潮汐影响情况

除了农历每月初一—初五、十五—二十的潮水之外, 每年农历八月十六—十八, 钱塘江都会掀起震惊中外的大潮, 根据历史实测资料, 二通道八堡出口附近最大涌潮高度约 2.5 m, 涌潮行进速度 6.0~7.3 m/s, 涌潮及快水流速持续时间 15 min 左右; 而潮涌强弱又与潮差大小密切相关, 对于八堡船闸所面对的高潮差, 需要对大潮汛下八堡船闸能否安全运行进行试验。

大潮汛下口门区、引航道水位波动和潮流流速见图 5。在 2023 年 10 月 1 日(农历八月十七), 根据布置于八堡船闸钱塘江侧口门区的水位监测站实测数据可知, 钱塘江潮水约于 14:47:00 抵达八堡船闸口门区, 使口门区水位迅速提高约 1.72 m。来潮后, 口门区水位变化大致呈现为“波动上升-平缓下降”。引航道由于受枢纽建筑空间分配的制约, 水域空间相对狭窄, 且受到航道墙线形的约束, 受潮水影响引发的水位波动更为剧烈, 起潮时引航道水位迅速提高 2.38 m, 比口门区提高水位高 0.66 m, 而后呈周期 385 s 的振荡, 最大振幅 2.24 m, 在 15:20:00—16:00:00 内波动周期较为固定, 平均振幅 0.52 m, 平均周期 280 s, 至 16:00:00 前后引航道和口门区水位开始平缓下降。

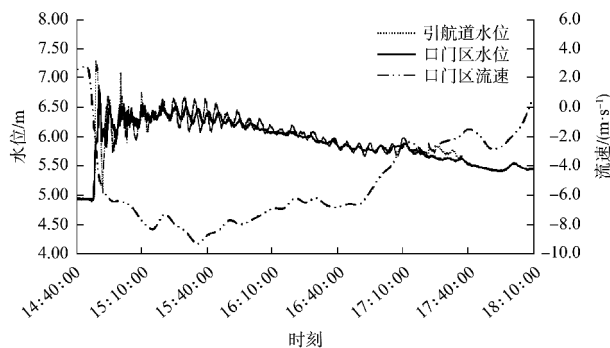


图 5 大潮汛下水位波动和潮流流速

在钱塘江潮到达口门区时, 附近潮流换向并逐渐提速, 15:35:00 时最大流速为 9.3 m/s。潮水开始引发引航道水位波动时, 流速约为 6.4 m/s, 钱塘江涨潮全过程中, 口门区流速均大于 6.4 m/s, 当引航道和口门区水位开始平稳下降后, 潮流流速同时缓慢下降, 17:30:00 后流速基本在 2.0 m/s 范围内波动, 退潮后潮流流速不超过 1.0 m/s。

大潮汛下引航道、闸室、充水阀门井水位对比见图 6。钱塘江涨潮引起引航道水位上升时, 充水阀门井水位有 0.13 m 的波动, 阀门止水(高水位侧)受到一定程度冲击但影响不大, 阀门井水位仍能维持稳定, 且止水有效挡水, 保障闸室内水位平稳, 不受涨潮影响。

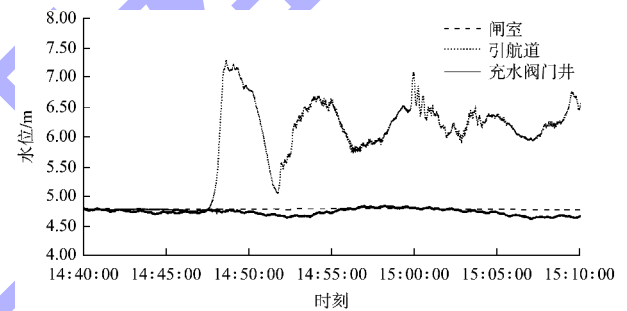


图 6 大潮汛下闸室、引航道、充水阀门井水位对比

大潮汛下引航道水位和充水阀门振动强度见图 7。可以发现其规律和小潮汛时近似, 都在引航道水位迅速上涨达到第 1 个潮峰开始下降后, 阀门振动幅度加强。阀门振动主要集中在潮水到达八堡船闸的 10 min 之内, 最大振幅 2.69 m/s^2 , 平均振幅 0.78 m/s^2 , 略大于阀门日常启闭振幅。潮涌对阀门造成一定程度冲击, 而后引航道水位波动则未再引发明显振动。

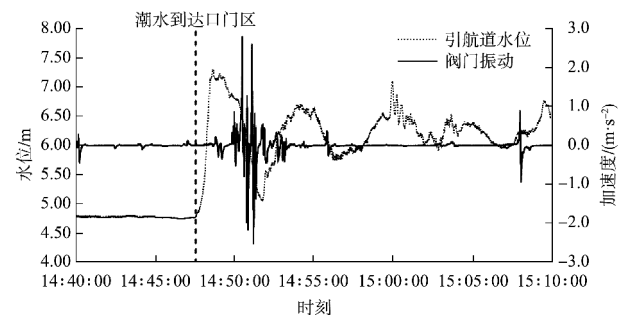


图 7 大潮汛下引航道水位及充水阀门振动

可以看出，大潮期间船闸受到潮涌影响，其中人字门由于有挡潮门“庇护”，能够保障系统稳定；阀门启闭系统受到涨潮冲击，但整体影响值较小；阀门井水位波动和阀门吊杆振动均在设计范围安全值内，且持续时间短，无明显不利影响。船闸在钱塘江侧航行停泊条件不良，潮涌带来的水头升高和流速加快均不利于行船，此时船闸不运行，而应将挡潮门放下，保障船闸整体安全稳定，船舶也应停泊在闸内或在八堡船闸附近的闻家堰深水区，以避免涌潮，尽量避免大潮期间过闸。

3.2 船闸运行

为确保安全，船闸充水及实船试验在钱塘江涨潮末期潮水趋于平稳后展开。以萧山地方海事处出台航行通告为例，钱塘江海月桥报潮 1.5 m 以上，潮后 2 h 禁止调度船舶入浦阳江，且八堡船闸在大潮期间不通航运行，试验选在涨潮末期仍具有指导和研究意义。

涨潮前后船闸充水闸室水位对比见图 8，涨潮前后八堡船闸充水水力特性对比见表 3。通过对比当天涨潮前后两组充水试验水力特性可知，大潮汛期间，在涨潮末期开始船闸充水试验，船闸的闸、阀门运行特性和涨潮前基本保持一致，涨潮后船闸运行水头增大，但涨潮末期水头仍在设计水头范围内，闸室内水位和充水阀门井水位平缓上升，闸室充水对引航道水位波动影响也较为平缓，与涨潮前相比无明显叠加不良效应。闸、阀门的启闭油压、启闭力、振动特性等均能保持良好运行特性，在设计安全范围内运行良好。

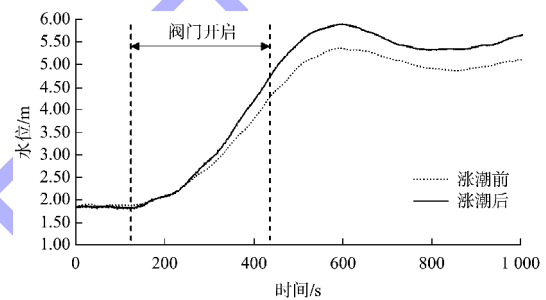


图 8 涨潮前后船闸充水闸室水位对比

表 3 涨潮前后船闸充水水力特性对比

阶段	阀门有杆腔 最大压力/ MPa	阀门无杆腔 最大压力/ MPa	阀门最大 启闭力/ kN	阀门振 动峰值/ (m·s ⁻²)	闸门有杆腔 最大压力/ MPa	闸门无杆腔 最大压力/ MPa	闸门最大 启闭力/ kN	最大输 水流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	船闸充 水时间/ s	引航道水位 波动幅值/ m	引航道水 位波动 周期/s
涨潮前	4.70	0.39	91.25	0.53	8.49	5.87	28.25	116.37	376	0.43	348
涨潮后	4.33	0.34	83.94	0.62	10.12	5.95	26.16	118.52	398	0.39	389

注：以西线右侧闸阀门开启过程为例。

综上，八堡船闸在涨潮末期水位趋于平缓后即可保障安全运行。考虑到钱塘江上受潮涌影响的船闸通常在退潮后才运行，因此八堡船闸大潮汛下可在起潮阶段停止通航、保证安全的同时，在退潮后继续通航运行。

3.3 大潮汛期间实船试验

大潮汛期间实船试验船舶航行航速特性见图 9，大潮涨潮末期船舶过闸全过程中，最大航速 2.12 m/s，最大横倾角 0.33°，最大纵倾角 0.22°，方位角 120°~240°，最大漂角 21°，船舶航行各项参数变化平稳，钱塘江大潮末期船舶过闸安全性能得到保障。

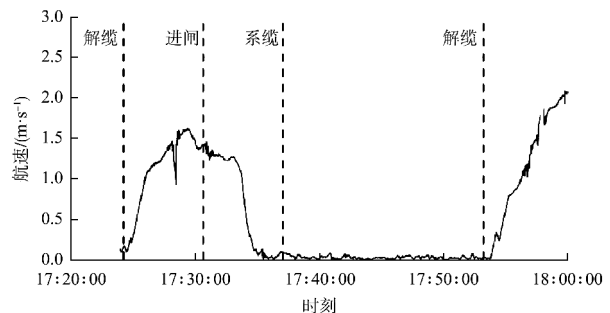


图 9 大潮汛期间实船试验船舶航行航速特性

大潮汛前后实船试验船舶航行特性见表 4，实船试验借助内河侧土方外运船舶、外运集装箱船舶，在钱塘江无洪水及涨潮末期潮涌平稳条件下，顺利完成了八堡船闸 1 000 吨级设计船舶实船试

验, 全面观测了上下游引航道及闸室内的停泊条件、船舶进出闸室的航行特性, 验证了船舶通航的安全性和阀门运行方式的合理性。涨潮末期水位上涨, 虽然一定程度上使得船舶航行的各方向倾角略微增大, 但水深的增加也为引航道区域提供了更好的航行条件, 船舶航行速度得以提高。此外, 不同水头涨潮前后的进闸舵角均在 40° 以内, 未超过舵角机械结构的最大值。总体而言, 船舶驾引操纵容易, 通航水流条件良好, 船舶可顺利在八堡船闸完成通航。

表 4 涨潮前后实船试验船舶航行船舶特性

阶段	最大航速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横倾角/ ($^\circ$)	最大纵倾角/ ($^\circ$)	方位角/ ($^\circ$)	最大漂角/ ($^\circ$)
涨潮前	1.80	0.20	0.20	182~220	36
涨潮后	2.12	0.33	0.22	120~240	21

注: 表中为船闸充水运行后, 船舶出闸驶向钱塘江过程数据。

4 结论

1) 钱塘江小潮汛期间, 潮水到达八堡船闸时引起引航道水位抬升值约 0.22 m , 引发水位波动幅度小于充水时引航道水位波动幅度, 对引航道航行条件基本无影响。

2) 小潮汛对八堡船闸整体输水系统影响较小, 充水阀门井内水位不受影响, 阀门吊杆受到冲击引发振动幅值不超过 $\pm 0.10\text{ m/s}^2$, 平均振动幅度在 0.03 m/s^2 范围内, 远小于阀门吊杆日常启闭振动值。

3) 小潮汛期间船闸充水过程中, 闸、阀门液压启闭机油缸的压力变化平稳, 无高强冲击油压和明显脉动现象, 工作状态良好, 油压及启闭力满足设计要求。各项水力特性运行规律和无潮水期间基本相似, 水位平稳上升, 充水时间满足设计运行要求。引航道形成小于 0.40 m 的长周期水位波动, 对船舶安全性影响不大。实船试验时, 船舶航行状态良好, 各项航行参数稳定, 船舶操控容易, 满足安全航行条件。

4) 钱塘江大潮期间, 潮水到达八堡船闸引发口门区和引航道水位较大抬升, 引航道水位迅速提高 2.38 m , 而后呈 2.24 m 幅值的水位波动, 且

此时潮流流速可达 6.40 m/s , 引航道航行条件不利, 故大潮期间船闸禁止运行, 船舶应停靠在避潮区。

5) 大潮到达八堡船闸引发引航道水位上升后, 引起阀门井水位波动值小于 0.13 m , 影响较弱, 且止水有效阻止闸室内水位波动, 涨潮期间闸室内水位始终保持平稳。潮水对阀门吊杆造成一定冲击, 最大振幅 2.90 m/s^2 , 平均振幅 0.78 m/s^2 , 略大于阀门日常启闭振幅, 但持续时间较短, 在涨潮 10 min 之内趋于平稳。整体来看, 八堡船闸在大潮期间放下挡潮门能够有效保障船闸整体系统安全稳定。

6) 钱塘江大潮末期实船试验结果表明, 涨潮末期水位趋于平缓后, 航行条件较好。船闸充水时, 闸、阀门的启闭特性、水力特性保持稳定, 在设计安全范围下运行良好, 闸室水位平缓上升。船舶航行特性各项参数稳定, 船舶操纵容易, 可保障安全通航。

7) 现行运行方式下, 小潮汛涨落对八堡船闸的运行影响不大, 大潮汛期间八堡船闸须停止运行, 放下挡潮门以保障船闸和船舶安全, 大潮汛末期在确保安全的前提下, 船闸可运行。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 四川省交通厅内河勘察规划设计院. 船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 中交水运规划设计院. 船闸启闭机设计规范: JTJ 309—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [4] 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院. 船闸调试技术规程: JTS320-4—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [5] 宣国祥, 李君. 京杭运河(浙江段)八堡船闸输水系统布置、水力计算与模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.
- [6] 李君, 陈莹颖. 八堡船闸输水系统水力计算和消能设施优化分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.
- [7] 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.

(本文编辑 王传瑜)