



北江清远枢纽二线船闸水力特性 原型观测及实船试验

欧阳彪¹, 陈亮^{2,3}, 欧泽全¹, 舒岳阶^{2,3}, 王召兵²

(1. 广东省北江航道开发投资有限公司, 广东 清远 511500;

2. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

3. 重庆西科水运工程咨询中心, 重庆 400016)

摘要: 清远二线船闸平面尺度较大, 且采用槛梁结合形式的新型消能工, 为了解船闸充泄水水力特性、停泊条件和双线船闸之间的相互影响, 并提出解决办法, 确保船闸安全高效地运行, 开展了水力学原型观测及实船试验, 对清远二线船闸水力特性等运行参数进行详细观测, 并对各项指标进行分析。试验结果表明: 在现有的运行方式下, 闸、阀门运行状态良好, 各项水力指标均满足规范设计要求, 但由于一、二线船闸于同岸并列布置, 二线船闸建成后导致一线船闸边界条件发生改变, 一线船闸上游靠船墩距离二线船闸进水口较近, 二线船闸灌水时, 对一线船闸靠船段水流条件有一定的影响, 因此应加强一、二线船闸的联合调度。

关键词: 船闸; 水力特性; 原型观测; 实船试验

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0112-07

Prototype observation on hydraulic characteristics and full-scale ship test for Qingyuan second line lock on Beijiang River

OUYANG Biao¹, CHEN Liang^{2,3}, OU Ze-quan¹, SHU Yue-jie^{2,3}, WANG Zhao-bing²

(1. Guangdong Provincial Beijiang Channel Development Investment Co., Ltd., Qingyuan 511500, China;

2. The Southwestern Research Waterway Engineering Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

3. Chongqing Xike Consultation Center for Water Transport Engineering, Chongqing 400016, China)

Abstract: Qingyuan second-line ship lock has a large plane scale and adopts a new type of energy dissipater with a combination of sill and beam. In order to understand the hydraulic characteristics when ship lock filling and discharging, berthing conditions and the interaction between double line ship locks, propose solutions to ensure the safe and efficient operation of locks, the hydraulic prototype observation and the full-scale ship test were carried out, and the hydraulic characteristics and other operation parameters of Qingyuan second-line lock were observed in detail, and various indexes were analyzed. The test results show that under the existing operation mode, the gate and the valve operate well, and all hydraulic indexes meet the design requirements of the specifications. However, due to the side-by-side arrangement of the first- and second-line ship locks on the same bank, the completion of the second-line lock leads to the change of the boundary conditions of the first-line lock. The upstream piers of the first-line lock are close to the inlet of the second-line ship lock. During the second-line lock filling, it will have a certain impact on the flow conditions of the berthing section of the first-line lock. Therefore, the joint dispatching of the first- and second-line locks should be strengthened.

Keywords: ship lock; hydraulic characteristics; prototype observation; full-scale ship test

收稿日期: 2021-10-26

作者简介: 欧阳彪(1992—), 男, 助理工程师, 从事船闸水力学、工程管理、工程监测检测等研究。

清远水利枢纽位于北江干流清远城区下游, 石角镇大燕河口上游约 1.0 km 处, 坝址上距清远市区 16 km, 距飞来峡水利枢纽 46.73 km; 下距石角水文站 4.8 km。工程开发任务以航运和改善水环境为主, 兼顾发电、灌溉、旅游、养殖和水资源配置等用途。

清远枢纽为北江最下游一级枢纽, 目前已建成 2 座 1 000 吨级船闸。随着北江运量快速发展, 该枢纽货运量已远远大于清远一线船闸通过能力, 导致船舶拥堵严重, 待闸船舶数平均为 200 多艘, 平均待闸时间已达 2~3 d。随着北江航运扩能升级的开展, 清远二线船闸已于 2019 年 5 月建成通航, 新建二线船闸位于一线船闸右岸, 闸室有效

尺度为 220 m×34 m×4.5 m (长×宽×门槛水深), 设计水头 10.35 m, 输水系统采用侧墙廊道侧支孔+槛梁结合的消能工, 设计代表船型为 1 000 吨级机驳, 输水系统特征尺寸见表 1, 船闸输水系统布置见图 1。

表 1 清远二线船闸输水系统特征尺寸

部位	面积/m ²	与阀门面积比
上、下闸首工作阀门廊道	36.0	1.00
进水口	216.0	6.00
主廊道	45.0	1.25
闸室段出水支孔	43.2	1.20
闸室消能工	—	—
出水口	105.0	2.92
格栅消能室	316.2	8.70

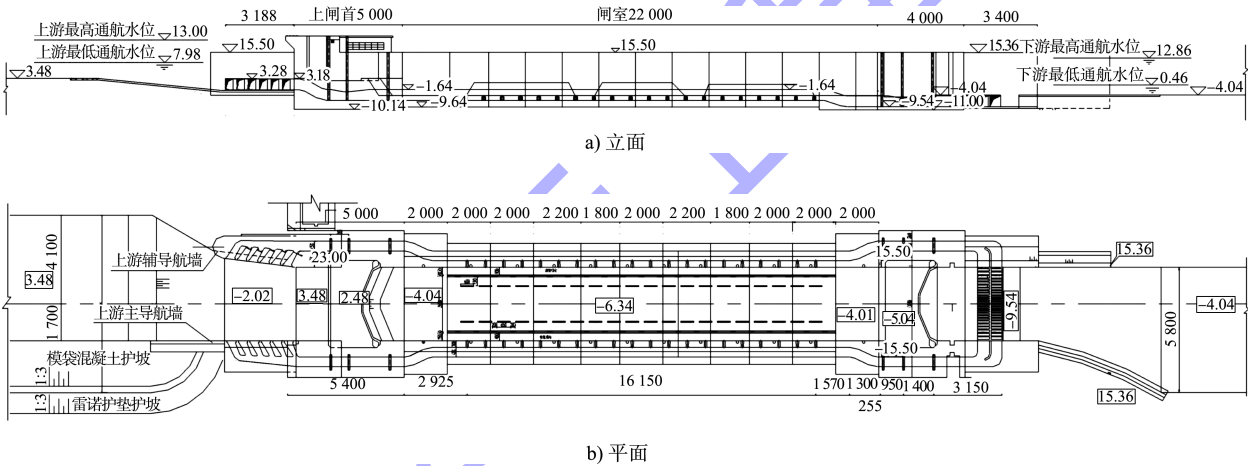


图 1 二线船闸输水系统布置 (尺寸: mm; 高程: m)

二线船闸前期曾开展过输水系统水力学模型试验研究^[1], 试验推荐闸室采用槛梁结合形式的新型消能工, 为验证原模差异, 确定原型运行方式, 2019 年 4 月对二线船闸进行了有水观测及实船试验^[2], 通过原型观测和船闸调试, 船闸性能可达到较佳状态, 保证过闸船舶及船闸设备的安全^[3-4]。

1 观测方法

2019 年 4 月北江汛期期间进行原型观测, 并未观测到船闸最不利运行水头工况, 观测水头分别为 5.49、7.22、8.20 m, 对阀门双边连续运行多种工况进行了观测。实船试验采用 1 000 吨级空

载和实载两种船型, 空载船型为 52.80 m×11.48 m×2.72 m (长×宽×满载吃水); 实载船型为: 49.90 m×9.94 m×2.70 m。

主要观测参数^[5-6]包括: 水位、流速、流态、系缆力、船舶的纵倾和横摇等。用水位传感器记录水位变化过程, 布设在二线上游进水口、闸室、下游引航道及一线船闸下游人字门门后; 用多普勒超声流速仪测量一线上引航道靠船墩处流速变化; 用缆绳拉力计测量船舶系缆力; 用相机记录流态等。

2 进出水口及闸室充水过程流态观测

在上游水位 10.81 m、下游水位 3.88 m、阀

门 325 s 匀速双边开启工况下,对闸室灌、泄水过程进行流态观测。二线船闸进水口布置于引航道两侧导墙上,采用垂直多支孔形式,在上游进水口处观测到闸室灌水过程无串通漏斗漩涡,水面平稳,输水过程最大跌水为 17 cm,随着充水流量的减小,上游水位很快恢复至充水之前。

二线船闸采用闸墙长廊道侧支孔输水系统+槛梁结合式消能工,在整个灌泄水过程中闸室流态较好,未见明显的纵、横向流,未观察到漩涡、泡漩等不良水流,闸室水面平静,水面平稳上升(下降),闸室停泊条件好。

下引航道出水口消能采用顶部、侧面格栅联合出水的布置形式,消能室内设 3 道不对称挑流

坎以调整格栅出水孔水流流量分配,使下泄水流在下引航道内均匀扩散。在闸室泄水过程中,格栅顶部水出流均匀,下泄水流消能工后,迅速均匀扩散。整个泄水过程中下游引航道内水面波动小、未观测到泡漩、剪刀水和大漩涡等不良流态,格栅顶部最大水位壅高为 29 cm,出下引航道扩散段后水位壅高在 20 cm 以内,未见水面有明显波动。

3 闸室充泄水水力特性观测

原型观测了 2 种水位组合,组合 1:上游水位 10.81 m、下游水位 5.32 m、水头 5.49 m;组合 2:上游水位 11.10 m、下游水位 3.88 m、水头 7.22 m。输水主要特征值见表 2,典型水力特性曲线见图 2。

表 2 船闸非恒定流水力特性参数

开启方式		开启时间 t_v/s	闸室充泄水 时间 T/s	最大流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	水面最大上升或 下降速度 $/(m \cdot s^{-1})$	超灌或 超泄/cm	上下游最大跌 水或壅高/cm	工作水头/ m
充水	双边	325	423	167	0.020	—	—	5.49
泄水	双边	315	432	155	0.018	—	—	
充水	双边	325	497	218	0.026	36	17	7.22
泄水	双边	315	502	192	0.023	34	30	

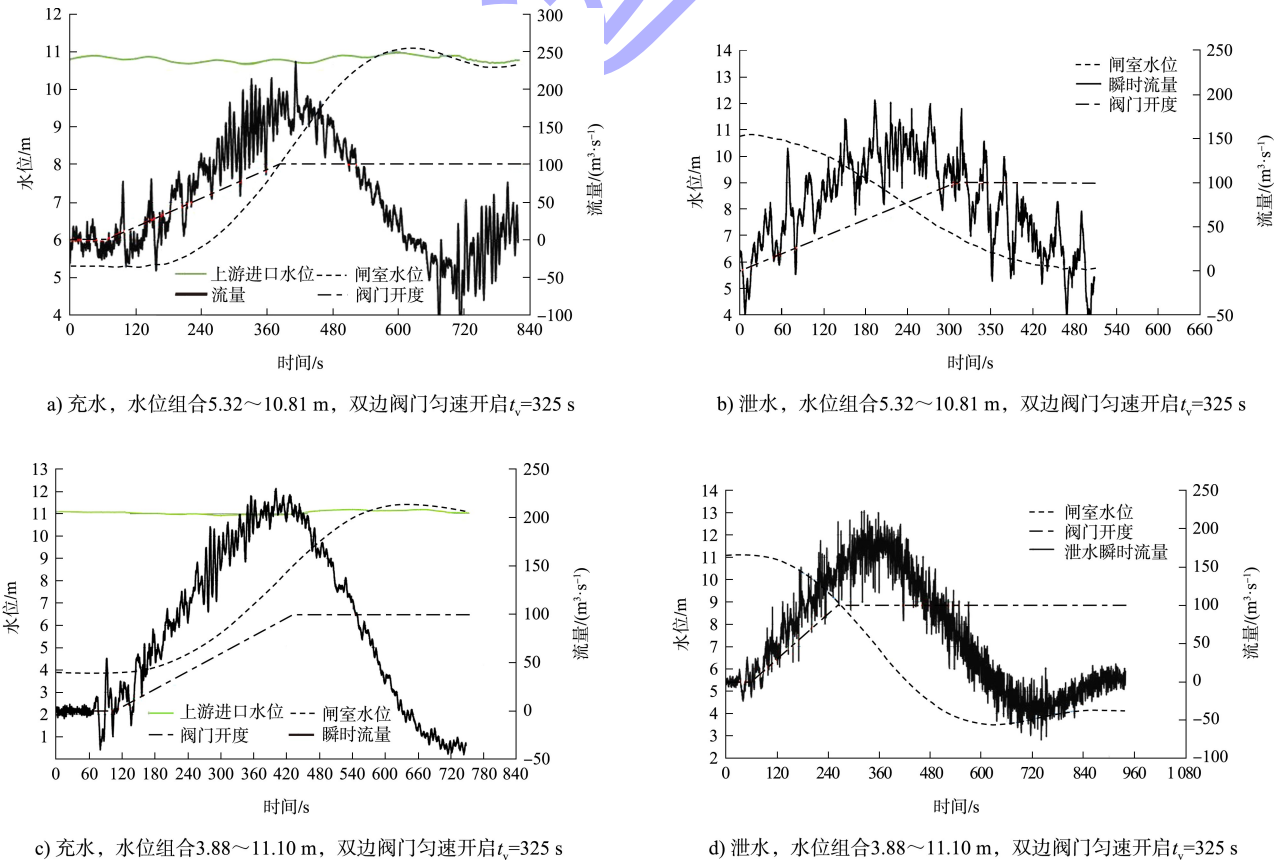


图 2 典型水力特性曲线

由表 2、图 2 可以看出, 在阀门双边 $t_v=325\text{ s}$ 充水工况下, 闸室输水时间分别为 423、497 s, 最大瞬时流量分别为 167、218 m^3/s , 输水廊道瞬时最大平均流速分别为 3.71、4.84 m/s ; 在阀门双边 $t_v=315\text{ s}$ 泄水工况下, 闸室泄水时间分别为 432、502 s, 最大泄水瞬时流量分别为 155、192 m^3/s , 泄水廊道瞬时最大平均流速为 3.44、4.27 m/s 。以上数据表明, 船闸在观测工况下的闸阀门启闭时间及闸室充、泄水时间满足设计要求; 廊道的最大平均流速远小于规范最大允许值 15 m/s , 说明闸室充泄水不会造成廊道混凝土破坏。

此外, 充泄水过程超灌、超泄值分别为 36、34 cm, 该值与船闸水力学模型测得的超灌、超泄值相当, 两者均大于船闸规范最大允许值 25 cm。二线船闸阀门启闭方式为平时动水开启, 静水闭门, 应急时采用动水闭门, 设计时未考虑平时动水闭门, 因此本次观测未进行提前关闭输水阀门的动水调试。对于超灌、超泄, 本次调试采用平水开启人字门方式, 即测量水位平压时, 立即泄压打开人字门, 对于平水开启人字门, 超灌、超泄值有所减小, 分别为 28、27 cm, 尽管大于规范值, 但可避免人字门活塞杆受反向压力过大, 并有效减小启门力, 保证船闸启闭设备的安全, 建议在船闸运行管理时, 采用平水开门的运行方案来减小超灌、超泄值。

4 二线船闸灌泄水对一线船闸的影响分析

4.1 水位分析

一线船闸下游水位测点布置在下引航道靠近一线现有人字门处; 二线船闸上游水位测点布置在上游右岸进水口附近; 闸室水位测点布置在右岸靠下闸首相对静水区域; 二线下引航道测点布置在下游格栅出口以外约 20 m 处。在上游水位 11.10 m, 下游水位 3.88 m, 阀门 $t_v\approx 6\text{ min}$ 匀速开启工况下, 实测二线船闸充水时一线船闸上引航道水位最大跌落 11 cm, 二线船闸进口处最大跌落 17 cm, 随着流量的减小, 跌落值逐渐回升; 实测二线船闸泄水时, 一线船闸下引航道靠下闸首(人字门附近)最大水位壅高为 16 cm, 二线船闸

下游出口处最大水位壅高 29 cm, 出扩散段后, 二线引航道内水位壅高基本在 20 cm 以内, 壅高值和跌落值均在规范范围内, 见图 3。如在最不利水位组合下, 一、二线船闸间的相互影响将进一步增大, 因此, 除加强最不利水位组合下一、二线船闸间相互影响的观测外, 应考虑一、二线船闸的联合调度, 统一管理, 尽量避免同时、同向运行和引航道内水位及流速的叠加, 影响下游靠泊船舶安全。

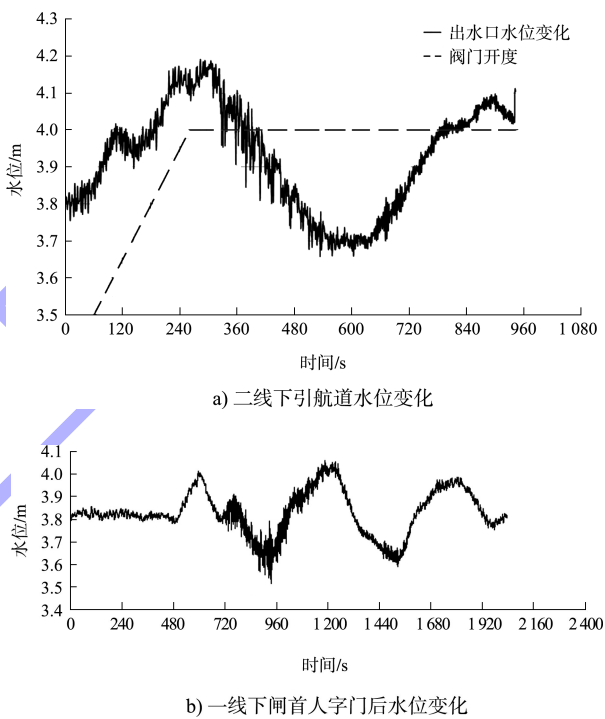


图 3 二线船闸泄水时一、二线船闸下引航道内水位变化过程线

4.2 流速分析

一、二线船闸共用部分上下游引航道, 一线船闸采用独立靠船墩, 二线建成后, 一线靠船墩处于共用引航道中心线附近, 根据现场观测, 二线船闸灌水时, 一线船闸靠船墩侧横流较大, 对一线进闸船舶有一定影响, 因此本次原观采用 2 种手段重点对二线船闸充泄水时上下游引航道内流速进行测量, 第一种为多普勒超声流速仪(ADV), 主要对二线充水时上引航道内个别点流速进行三维流速测量; 第二种为无人机大范围表面流场仪, 主要对二线充水时引航道内局部区域表面流场进行测量。上游流速观测工况: 上游水位 11.00 m, 下

游水位 2.80 m，水头 8.20 m，阀门 $t_v \approx 6\text{ min}$ 双边
匀速开启；下游流速观测工况：上游水位 11.10 m，
下游水位 3.88 m，水头 7.22 m，阀门 $t_v \approx 6\text{ min}$ 双

边匀速开启。上引航道流速测点布置见图 4。二线
船闸充水时一线船闸上游靠船墩处流速过程线见
图 5。

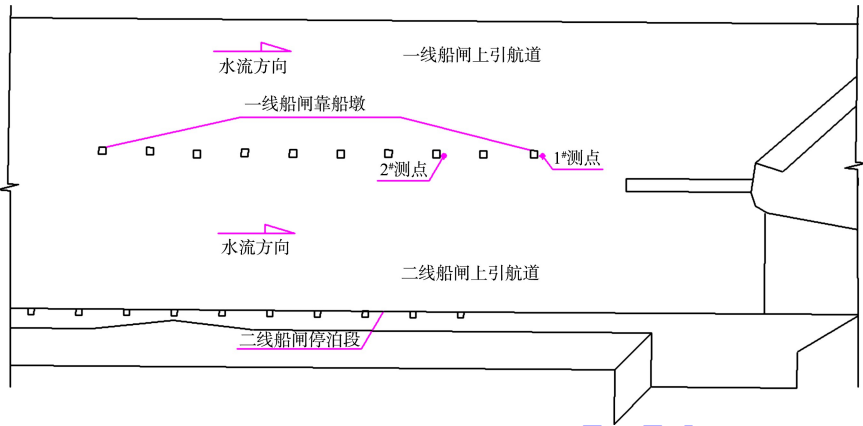


图 4 船闸上引航道流速测点布置

上游实测流场表明，在双边开启 $n=0.5$ 开度，
二线左岸副导墙顶部位置最大流速为 0.3 m/s，从副
导墙顶至上游第 2 个靠船墩段平均流速约为 0.2 m/s，
流向基本为横向；在双边开启 $n=0.8$ 开度，二线
左岸副导墙顶部至第 1 个靠船墩处位置，最大流
速为 0.31 m/s，从副导墙顶至上游第 2 个靠船墩
段平均流速约为 0.25 m/s，水流与纵向夹角有所
减小，但有明显斜流，第 1 个靠船墩附近最大横
向流速约 0.22 m/s。

一、二线船闸均布置于右岸，电站位于左岸，
观测当天泄洪闸未开闸，仅电站发电。根据《清远
枢纽设计报告及清远整体模型试验报告》，当流量
 $Q \leq 1\,102.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时，电站发电，泄水闸关闭，流
量在 $900\text{ m}^3/\text{s}$ 左右。下游实测流场结果表明：上
引航道口门区附近流速均在 0.2 m/s 以下，下引航
道口门区（北江大堤下游 140 m 左右）附近测量范
围内实测最大纵向流速 0.48 m/s，最大横向流速
0.168 m/s（测量范围：顺水流方向 200 m，垂直于水
流方向 380 m），实测流速当天并未观测到回流，
二线船闸引航道停泊段基本无流速，一、二线船
闸引航道口门区通航水流条件较好，满足规范要
求的口门区纵向流速小于 2.0 m/s、横向流速小于
0.3 m/s、回流小于 0.4 m/s。

综上所述，在二线船闸充水过程中，一线上

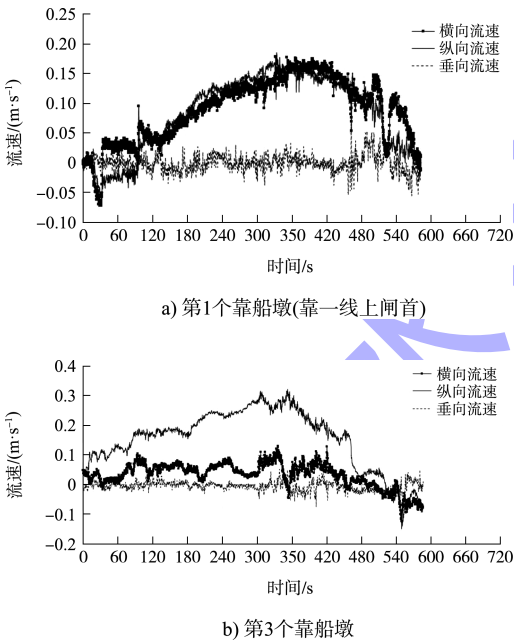


图 5 二线船闸充水时一线船闸上游靠船墩处流速过程线

上游单点流速实测结果表明：二线船闸充水过
程中，一线船闸上游第 1 个靠船墩位置最大横向流
速为 0.172 m/s，最大纵向流速 0.181 m/s，最大垂
向流速为 0.05 m/s，最大纵、横向流速出现时间均
为 360 s 左右，即阀门双边全开时；一线船闸上游
第 3 个靠船墩位置最大横向流速为 0.126 m/s，最大
纵向流速 0.316 m/s，最大垂向流速为 -0.074 m/s，
最大纵、横向流速出现时间也为 360 s 左右，即阀
门双边全开时。

游停泊段 1[#]、2[#]靠船墩处及导航墙至靠船墩之间水域，局部水流速度略超《船闸总体设计规范》的允许值^[7]。清远船闸设计最大工作水头为 10.35 m，水位组合为上游 10.81 m，下游 0.46 m。实测流速时，上游水位为 11.00 m，上游淹没水深与最不利水位组合时相差不大，下游水位为 2.8 m，较下游最低通航水位 0.46 m 高 2.34 m。待最不利水位组合时，二线船闸灌水时最大瞬时流量将有所增大，

上引航道内流速也将有所增大，但增量较小。因此二线建成运行后，改变了一线船闸边界条件，二线船闸充水时，一线船闸侧不应安排船舶进闸，且前 3 个靠船墩不应在此时安排上游来船靠泊。

5 实船试验

实测了空载和载重 2 种工况在 2 种水位组合下的情况，见表 3。

表 3 实船试验测验工况及内容

工况	水位/m	阀门开启方式	闸室停泊条件	引航道停泊条件	航迹线	纵倾、横摇	用车、用舵情况
空载	上游 10.81	双边充水	√	-	-	√	√
	下游 5.32	双边泄水	√	√(下引航道)	-	√	√
载重	上游 11.10	双边充水	√	√(上引航道)	√	√	-
	下游 3.88	双边泄水	√	-	√	√	-

注：√为实际观测组次，-为未观测组次。

按照实船试航要求选定代表性的试验用船，采用专用船舶姿态采集器测量船舶纵横倾变化，该采集器集成高精度陀螺仪、加速度计、地磁场传感器，采用高性能微处理器、先进的动力学解算与卡尔曼动态滤波算法，能够快速求解出模块当前的实时运动姿态，其静态精度≤0.05°，动态精度≤0.1°。

船舶的安全航行是由驾乘人员来保证的，把人员所能忍受的船舶横摇基准作为保证船舶在船闸及引航道内安全通行的横摇值具有一定的参考价值。

实测两种船型横摇和纵倾值均远小于《内河船舶法定检验技术规则》和《船舶设计实用手册》要求值，实测两种船型最大横摇值为 1.12°、最大纵倾值为 0.41°，且均发生在进闸或靠泊时，输水过程基本上无横摇、纵倾，说明输水过程闸室水面平稳，无明显纵横比降和局部不良流态，见表 4。船舶在引航道及闸室内航速基本在 1.5 kn 内，最大舵角均在 20°以内，最大舵角发生在调整船舶姿态的停泊段进闸段。

表 4 实测船舶纵倾、横摇最大值

工况		纵倾/(°)	横摇/(°)	最大舵角/(°)
空载	上行	0.29	0.31	20.5
	下行	0.41	0.52	16.3
载重	上行	0.31	1.12	18.2
	下行	0.20	0.56	16.0

实测充水过程系缆力过程线见图 6。系缆力测量时，缆绳拉力计一端与直径 26 mm、挂在浮式系船柱上的钢缆连接，另一段与船上缆绳连接。26 mm 钢缆破断力为 426.5 kN，远大于规范允许的系缆力。船舶停靠后，系紧缆绳，使其基本处于拉紧状态，测量过程未对缆绳进行调整。实测 1 000 吨级货船(空载情况)船舶最大系缆力，充水过程为 3.54 kN，泄水过程为 2.80 kN。实测 1 000 吨级集装箱船(载重情况)船舶最大系缆力，充水过程为 4.80 kN，泄水过程为 4.20 kN。船舶停于上引航道停泊段，充水过程最大系缆力为 6.10 kN；船闸灌泄水过程，船舶停于下引航道停泊段，泄水过程最大系缆力为 7.10 kN。上述数据说明，船舶系缆力远小于规范值 32.00 kN，考虑此次实船试验并非最不利水位组合工况，且试验船舶未满载，实际运行后，如遇最不利水位组合和船舶满载情况，船舶停于闸室灌泄水过程系缆力将有所增大，但此次测量系缆力富余较大，由此推测，即使以后遇最不利情况，船舶系缆力仍在规范允许范围内，船闸输水条件较好。值得注意的是，上下游人字门在开启时，闸室超灌、超泄引起的纵向水流会导致缆绳受力陡增，但实测值仍只有规范允许值的约 1/3。

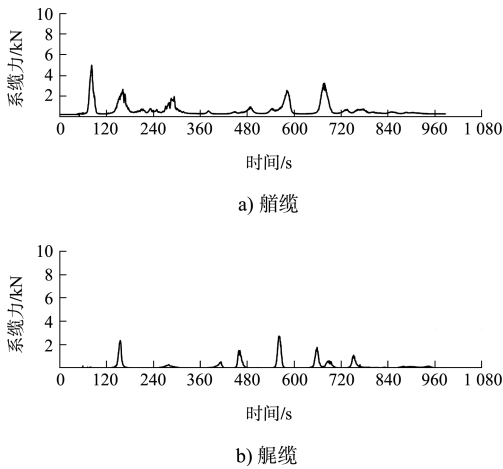


图 6 载重船舶停于闸室尾部充水过程系统缆力过程线

6 原型和模型对比分析

由于原型观测时上、下游水位组合与模型试验时不同，且模型试验实测为船舶受力，与原型缆绳拉力有所差异，因此，本文只对阀门全开时刻船闸流量系数进行对比分析，原型和模型流量系数对比见表 5。

表 5 原型、模型阻力系数和流量系数			
工况		流量系数	原型较模型增幅/%
双边充水	原型	0.866	9.1
	模型	0.794	
双边泄水	原型	0.768	8.3
	模型	0.709	

流量系数不受阀门开启时间及水位组合的影响，对前期模型试验与原型观测成果进行比较可知，原型较模型流量均有所增大，充水流量系数增大 9.1%，泄水流量系数增大 8.3%。此外物理模型试验推荐 $t_v=6\text{ min}$ 充水工况，实测 1 000 吨级船舶最大纵向系缆力 6.40 kN，最大横向系缆力为 7.20 kN，原型观测实测最大系缆力为 4.80 kN，虽水头和试验船舶有所差异，但在原型流量系数有所增大的情况下，原型实测系缆力较模型所测船舶受力仍偏小，由此可见，模型试验所测船舶受力和原型实测系缆力仍存在一定的差异，值得进一步探索。

7 结语

1)在观测水位组合下，船闸灌泄水各项水力指标均满足规范要求，超灌、超泄值超过规范值，

可采取平水开启人字门的措施解决。

2)二线船闸灌泄水时，一、二线船闸上下游引航道内水位变化均较小；一线灌泄水时，另外一线人字门处反向水头较小，影响较小。

3)由于一、二线船闸布置特点，二线船闸建成后，二线船闸上游左侧进水口离一线船闸停泊段较近，二线船闸灌水时，一线船闸停泊段 1[#]、2[#]测点（靠近上闸首）横向流速超过规范允许值 0.15 m/s。因此，二线船闸充水时，一线船闸上游不应安排船舶进闸，且前 3 个靠船墩不应在此时安排上游来船靠泊，两线船闸应加强联合调度。

4)实船试验结果表明，在现有运行方式下，实测船舶上下行船舶纵倾、横摇值均较小，船舶停于闸室及上、下游引航道系缆力均较小，停泊条件好，满足规范要求。

5)经试验对比可知，原型充泄水流量系数较模型增大约 8%~9%。

参考文献：

[1] 重庆西南水运工程科学研究所.北江航道扩能升级工程清远二线船闸输水系统模型试验研究[R].重庆:重庆西南水运工程科学研究所,2014.

[2] 重庆西南水运工程科学研究所.北江航道扩能升级工程清远二线船闸原型观测与调试[R].重庆:重庆西南水运工程科学研究所,2019.

[3] 陈勇,李君,宣国祥.西江桂平二线船闸水力特性原型观测与实船试验[J].水运工程,2014(9):109-114.

[4] 李君,宣国祥,黄岳.赣江石虎塘航运枢纽船闸输水系统水力学模型试验[J].水利水运工程学报,2009(1):17-21.

[5] 王力军,刘火箭,吴英卓,等.汉江兴隆船闸输水系统水力学原型观测研究[J].人民长江,2020,51(S2):340-343.

[6] 刘平昌,周家俞,王召兵,等.渠江金盘子船闸输水系统水力学原型观测研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(6):1396-1399,1419.

[7] 中华人民共和国交通部.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 王传瑜)