



犍为枢纽施工期船闸低水通航条件研究^{*}

王召兵, 徐奎, 段金宏, 陈亮

(重庆西南水运工程科学研究所, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆交通大学, 重庆 400016)

摘要: 岷江犍为航电枢纽工程是岷江乐宜段近期渠化的 4 个梯级中的第 3 级, 对发展岷江航运和流域经济具有重要作用。为保证低水施工时段过闸船舶的安全, 通过实船试验测定船闸上下引航道通航水流条件及船舶航行姿态等相关参数, 分析低水期船闸通航的可行性及安全性。结果表明, 船舶基本可安全进出闸, 船闸灌泄水无不良流态, 船舶系缆力满足要求, 但船闸下游口门区斜流较大, 应谨慎驾驶, 必要时情况下应停航。

关键词: 犍为船闸; 引航道; 低水期; 实船试验

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0033-05

Navigation conditions of ship lock under dry season during construction of Qianwei junction

WANG Zhao-bing, XU Kui, DUAN Jin-hong, CHEN Liang

(Southwest Hydro-Engineering Research Institute for Waterway, National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The Qianwei navigation and hydropower project of the Minjiang River is the third of the four cascades in the recent channelization of the Leyi section of the Minjiang River. It plays an important role in the development of Minjiang shipping and river basin economy. In order to ensure the safety of ships passing the lock during the dry season period, we apply the actual ship test to determine the navigable current conditions of the upper and lower approach channels of the ship lock navigable current conditions and ship navigation posture and other relevant parameters, analyze the feasibility and safety of navigable locks during the dry season period. The results show that the ship can basically enter and exit the ship lock safely, there is no bad flow state of the shiplock's filling and discharging water, and the ship's mooring force meets the requirements. However, the sloped current in the downstream entrance area of shiplock is large, so the ship should be steered cautiously, and the navigation should be suspended if necessary.

Keywords: Qianwei ship lock; approach channel; dry season; navigable actual ship test

1 工程概况

四川省乐山市岷江犍为枢纽位于岷江下游乐山市犍为县境内, 上距东风岩梯级约 18.1 km, 下距龙溪口梯级约 31.8 km。坝址控制流域面积 12.69 万 km², 多年平均流量 2 520 m³/s, 枢纽设计正常蓄水位为 335 m, 电站总装机容量为 500 MW, 总库容为 2.27 亿 m³, 工程建设总工期为 65 个月^[1]。

犍为船闸布置于右岸连接坝与泄洪闸之间, 由上下游引航道、上下游闸首和闸室段组成, 布置见图 1。闸室有效尺度 200 m×34 m×4.5 m(闸室有效长×宽×门槛水深), 设计水头为 19.0 m。上、下游引航道采用向岸边扩展的不对称型布置方案。坝址上、下游分别布置船舶锚地, 上游锚地布置于右岸上游引航道口门区上游, 下游锚地布置于左岸犍为大桥下游, 属于龙溪口枢纽库区。

收稿日期: 2021-05-28

^{*}基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2019016)

作者简介: 王召兵(1973—), 男, 正高级工程师, 从事港口航道工程设计。



图 1 岷江犍为枢纽建成后效果

根据施工组织计划，大坝施工分为三期围堰，在三期导流时段内完成预留临时航道段 10 孔泄水闸坝工程施工，期间利用永久船闸通航、右岸已建 18 孔泄水闸坝过流及控制上游水位^[2]。由于在低水期 325.0 m 时，船闸上游水位未达到船闸上游最低设计水位，上游水深较浅，泄流对上游引航道水流条件影响较大，其次下游局部河道也未达到设计要求，且采用右岸已建 18 孔泄水闸坝过流及控制上游水位，导致主流位于右岸一侧，对下游引航道水流条件干扰较大，再者此阶段为船闸第 1 次启用，也可检验船闸的运行状态、相关设施设备的可靠性及适应性。

为保证低水施工时段过闸船舶的安全，须进行船闸上下引航道通航水流条件测试及实船试验，以发现和解决其存在的问题，判断其能否满足船舶安全过闸要求，保证船闸正常运行和过闸船舶的安全。

2 试验内容和工况

2.1 试验范围

实船试验时间为 2019-11-15—2019-11-16，为岷江枯水期。实船试验范围为犍为枢纽船闸上引航道连接段、上引航道、船闸、下引航道及下引航道连接段，具体为上游乐宜岷江大桥—下游犍为大桥。实船试验流量为上游来流量 1 000 m³/s 左右。

实船试验工况为犍为枢纽船闸一期蓄水 325 m（上游水位），口门区流速测量的 3 个流量等级分别为 1 000、1 500、2 000 m³/s。

2.2 试验内容

实船试验测试的主要内容：1) 上引航道船舶进出闸航迹线和操纵性能的测定，下引航道船舶进出闸航迹线和操纵性能的测定；2) 上、下引航

道及口门区水流流态（包括流速、比降、流向）测量；3) 船舶进出上、下引航道、口门区及船闸的航行参数（舵角、漂角、航速、纵横倾角）测量；4) 船舶进入船闸候闸停泊时系缆力及在船闸灌泄水过程中船舶姿态测量。主要测试内容及对应工况见表 1。

表 1 实船试验测试内容

工况	$Q/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	闸开启 方式	闸室停 泊条件	航迹 线	纵倾、 横摇	用车、 用舵情况
空载	1 000	双边充水	√	√	√	√
		双边泄水	√	√	√	√

2.3 试验船型

试验船型为乐山市航务管理局提供的“风顺号”（载质量 728 t，长 38 m，宽 12.8 m，吃水 2.8 m）和“永久号”（载质量 728 t，长 52.8 m，宽 8.5 m，吃水 2.6 m）。

2.4 试验测量设备

航行参数：船舶航行过程中用舵的变化过程是通过船上测量人员记录完成，航速、漂角以及航迹线则是采用 GPS（全球定位系统）测量。船舶航行轨迹采用 RTK（载波相位差分技术）定位系统观测。将两个 RTK 定位端分别安装在船首和船尾，参考端设置于船闸岸边，船舶进出船闸过程中，实时监测 RTK 定位端的信号输出，通过数据处理与分析，即可得到船舶的航行轨迹。

流速测量：引航道及口门区流态采用自行研制的无人机搭载式大范围表面流场测量系统，结合小威龙多普勒三维流速仪，对部分引航道及口门区的流速流场进行快速准确测量。

系缆力测量：船舶系缆力利用缆绳拉力计测量，并结合 Sirius R2D 动态测试分析系统对压力数据进行采集分析。

航行姿态测量：船舶在行进或者待闸过程，试验船舶的纵倾、横摇通过倾角仪测定，并结合 Sirius R2D 动态测试分析系统对数据进行采集分析。

水位测量：下引航道及停泊段水位均通过压力传感器测量，通过压力数据换算得到。压力传感器选用中科泰斯特生产的 PY210 型高精度压力传感器，并结合 Sirius R2D 动态测试分析系统对

压力数据进行采集分析。

3 引航道口门流速及下引航道水位变化测试

3.1 上游引航道及口门区水流流态

在按 325.0 m 蓄水时, 现场实测下泄流量 Q 分别为 1 000、1 500、2 000 m^3/s 时下引航道口门及连接段水流流场, 上游引航道及口门区水流流态情况如下:

1) 引航道上游岸坡向右侧拓宽, 在岸坡突变区域有斜流和回流, 在来流量较小时表现为偏向河心的斜流; 在流量增大后, 表现为回流, 对船舶航行有一定影响。

2) 在流量小于 2 000 m^3/s 时, 上游引航道纵向和横向流速等各项指标均小于规范要求, 能满足船舶安全进出上引航道要求。

3) 由于在上游口门区存在斜流或回流, 且其强度随流量增大而增大, 且该水域处于船舶进闸航线上, 对船舶安全进闸影响较大。

4) 为保证船舶进闸安全, 应加强流场观测, 同时建议进出上引航道船舶尽可能沿船闸中心线航行, 以避免斜流或回流。

3.2 下游引航道及口门区水流流态

1) 在所测试电站三级泄流量中, 下引航道从下引航道外导墙至下游第 3 个靠船墩长约 60 m 范围内, 有斜流存在, 距外导墙堤头越近, 水流夹角越大, 且斜流随下泄流量的增大而增大。

2) 在下泄流量 $Q = 1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 实测流速 0.27~1.31 m/s, 水流横向流速为 0.06~0.34 m/s,

基本满足规范要求^[3]。

3) 在下泄流量 $Q = 1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 实测流速 0.83~1.54 m/s, 水流与引航道轴线夹角 $15^\circ \sim 40^\circ$, 水流横向流速为 0.18~0.30 m/s, 口门大部分水域横向水流超过规范最大允许值; 过第 5 个靠船墩后, 水流横向流速小于 0.30 m/s, 基本满足规范要求, 与文献[4]的研究结论基本一致。

4) 在下泄流量 $Q = 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 实测流速 0.79~1.76 m/s, 水流与引航道轴线夹角 $20^\circ \sim 42^\circ$, 水流最大横向流速达到 0.32~0.57 m/s, 大部分水域横向水流超过规范最大允许值, 船舶进出引航道存在一定风险。

5) 在下引航道外导墙下游 30~150 m 左侧布置有 6 个靠船墩, 由于该水域为非静水区, 根据《船闸总体设计规范》^[5] 规定“引航道导航段和调顺段宜为静水区, 制动段和停泊段的水面最大流速纵向应不大于 0.5 m/s, 横向流速不应大于 0.15 m/s, 静水区与动水区之间的流态, 可有过渡”。实测三级下泄流量工况下的水流纵横向水流指标均大于规范允许值, 船舶在该水域停靠存在较大风险, 建议上行船舶直接进闸, 不在口门动水区停靠。

4 实船试验及结果

4.1 船舶航迹线测试

采用 RTK 定位系统和经纬仪光学交叉两种方法分别测试“永久号”和“风顺号”的船舶航迹线, 见图 2(两船航迹线重合)。

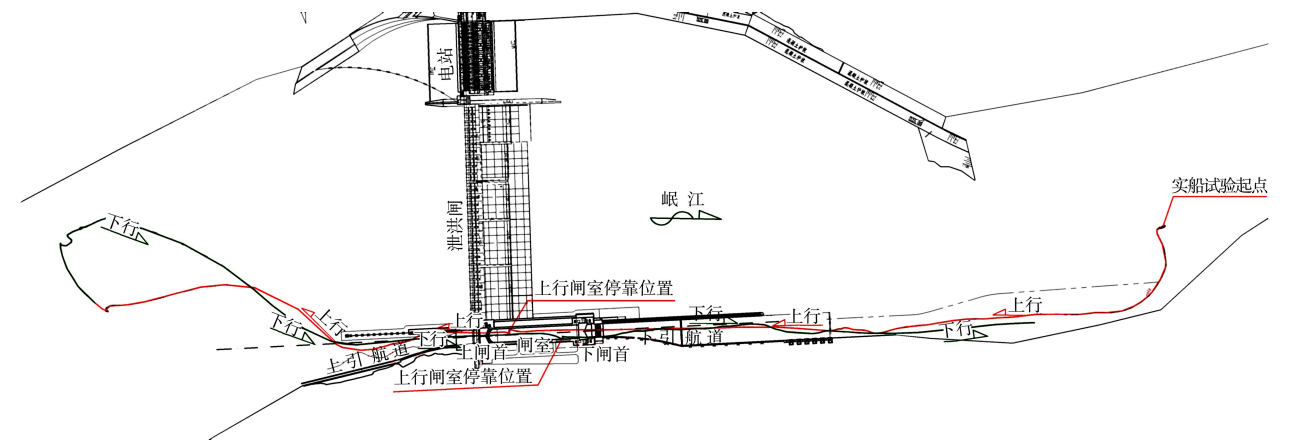


图 2 犍为枢纽施工工期船闸通航实测航迹线

根据航迹线观测结果可以看出,船舶出下游锚地后,顶水上行慢慢调整航向过河,过河后调整航向沿键为大桥通航孔顶水上行,船舶略偏向河心,在下游口门区附近,受横向水流影响,船舶向岸侧漂移,而后船舶调整航向,船头朝河心侧偏移以克服横向漂移,过停泊段,船舶逐渐过渡至引航道中心线进入下引航道静水区,沿航道中心线进闸。船舶上行出闸过导航段后,航行朝岸侧调整,与上引航道靠船墩保持一定距离,在口门处逐渐调整航向,船头慢慢向河心偏移,出口门后,沿右岸上行,然后逐渐过河至左岸。在船舶下行时,从左岸朝上游锚地方向逐渐过河,在上游锚地处调整航向沿航道中心线进闸,出闸时船舶沿航道中心线下行,出引航道外导墙后,受横向水流影响,船舶向右岸有一定距离漂移,然后沿左岸下行至键为大桥。

根据航迹线测试结果,船舶在进出下引航道口门及停泊段处,船舶均有一定的横向漂移,上行时须调整航向以克服横向漂移,横向水流对船舶进闸和对准航道中心线有一定影响,但试验船舶能通过调整航向克服横向漂移。下行出闸时,由于下引航道向内侧扩宽,船舶顺水沿右岸下行,横向水流对船舶航行影响小。

4.2 船舶舵角、漂角及航速测试

船舶在上行进闸过程中,航行难点主要受口门区附近斜横流影响,应适当操舵,谨慎驾驶进入下引航道,直接进闸。根据实船试验的情况,除了在上游回转掉头及进闸靠泊时舵角较大外,其余实船过程舵角均没有超过 20° ,除此外上游掉头及上行经过下游口门区时漂角较大。实船试验整个过程较为顺利地完成了上行进闸→等候进闸→上行出闸→上游掉头下行→下行进闸→下行出闸。

4.3 试航船舶纵横倾角测试

如何判定安全通行的横摇值,目前尚无相应的规范或规定,在《内河船舶法定检验技术规则》^[6]中有船舶极限静倾角的相关规定:“5类客船 $\leq 10^{\circ}$;其他客船 $\leq 12^{\circ}$;消防船 $\leq 8^{\circ}$;其他船 $\leq 14^{\circ}$ ”。不过直接套用并不妥当,因为极限静倾

角为对船舶稳性的特殊要求,且为保证船舶不倾覆的极限指标,船舶安全航行的倾值应更为保守。在《船舶设计实用手册》^[7]对船上人员所能忍受的船舶横摇角度做了限定:“轻手工业劳动者 $\leq 6^{\circ}$;重手工业劳动者 $\leq 4^{\circ}$;运送旅客 $\leq 2.5^{\circ}$;邮船旅客 $\leq 2^{\circ}$ ”。由于船舶是由人操纵的,其安全航行在很大程度上是由驾乘人员保证的,因此把人员所能忍受的船舶横摇角度作为保证船舶在船闸及引航道内安全通行的标准具有一定的参考价值。

无论采用上述哪种标准,实测实船横摇和纵倾角度均远小于要求值,最大横摇角度为 0.69° ,最大纵倾角度为 0.42° ,且均发生在上行进闸经过下游引航道口门区处,输水过程基本无横、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。

4.4 船舶进入船闸候闸停泊时的系缆力分析

实船观测结果表明,船舶在充、泄水过程中,闸室水流平稳,无明显波动和漩涡等不良流态。充、泄水过程闸室内船舶系缆力均较小,实测充水过程船舶最大系缆力为 0.62 kN ,泄水过程船舶最大系缆力为 0.35 kN ,由于目前蓄水位较低,且试验船舶为空载,因此在船闸充泄水过程中系缆力均较小。值得注意的是,在下行过程中,船闸泄水完成打开人字门的过程,实测船舶系缆力陡增,最大船舶系缆力达 8.4 kN ,应适当优化人字门开启方式,采用三段变速开启,即加速→匀速→减速,具体须经现场调试优化。上述数据表明,此阶段的船舶系缆力远小于规范允许值 32 kN ,考虑实船试验仅为施工期船闸通航实船,并非最不利水位组合工况,且试验船舶并非满载情况,实际运行后,遇最不利水位组合、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,待实际建成后应加强闸室充、泄水流态观测,复测满载设计船舶系缆力,保障船舶过闸安全。

5 结论

1) 根据航迹线测试结果,船舶在进出下引航道口门及停泊段处,船舶均有一定的横向漂移,

上行时须调整航向以克服横向漂移, 横向水流对船舶进闸和对准航道中心线有一定影响, 但试验船舶能通过调整航向克服横向漂移。下行出闸时, 由于下引航道向内侧扩宽, 船舶顺水沿右岸下行, 横向水流对船舶航行影响小。

2) 实测资料表明, 船舶航行过程中, 除在上游回转掉头及进闸靠泊时舵角较大外, 舵角均没有超过 20°。但在上行进入口门区时, 为克服斜流影响, 船舶舵角和漂角均较大, 船舶进出闸时须谨慎操舵。

3) 实测实船横摇和纵倾值均远小于要求值, 最大横摇角度为 0.69°, 最大纵倾角度为 0.42°, 且均发生在上行进闸经过下游引航道口门区处, 输水过程基本上无横向、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。

4) 充水过程船舶最大系缆力为 0.62 kN, 泄水过程船舶最大系缆力为 0.35 kN, 船舶系缆力远小于规范值的 32 kN。

5) 由于下游泄水闸处地形未达到设计要求, 导致口门区斜流较大, 船舶横向漂移距离较大, 在该工况下, 船舶进出下引航道口门区时, 应密切关注口门区水流流态, 尽量沿引航道中心线航

行, 当斜流达到一定强度后, 应停航以保证过闸船舶安全。

6) 船闸下引航道右侧靠船墩布置于动水区, 水流条件难以满足规范要求, 上行船舶靠泊困难, 建议船舶尽量不在口门外停靠, 上行船舶采用直接进闸的调度管理方式。

参考文献:

[1] 重庆西南水运工程科学研究所.四川省岷江犍为航电枢纽工程施工导截流与通航模型试验研究报告[R].重庆:重庆西南水运工程科学研究所,2012.

[2] 周玉洁.犍为航电枢纽总体布置及通航问题研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.

[3] 长江航道局.内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.

[4] 王蝶,张绪进,周玉洁.岷江犍为航电枢纽下引航道口门区通航条件研究[J].水运工程,2012(2):113-118.

[5] 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,2001.

[6] 中华人民共和国海事局.内河船舶法定检验技术规则(2019)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[7] 陈可越.船舶设计实用手册[M].北京:中国交通科技出版社,2007.

(本文编辑 王璁)

(上接第 32 页)

3) 输水过程中闸室内水流较为平稳, 闸室内无明显纵向水流, 横向水流分布也较为均匀, 设计船舶(队)的系缆力均小于规范允许值。

4) 船闸上、下游进、出水口水流条件良好, 满足规范要求。但低水工况时上游引航道内流速超过规范要求, 该工况仅可能出现在施工通航期, 运行时间较短, 可采用慢速或局部开启等措施加以解决。

参考文献:

[1] 吴礼国,徐红.岷江犍为航电枢纽船闸工程初步设计[R].

成都:四川省交通运输厅交通勘察设计研究院,2015.

[2] 郝岭,程艳.岷江犍为航电枢纽施工期通航研究[J].中国勘察设计,2020(10):88-92.

[3] 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.

[4] 南京水利科学研究院.四川省岷江航电犍为枢纽工程可行性研究阶段船闸水力学模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2010.

[5] 阚延炬,李君,宣国祥,等.蜀山泵站枢纽船闸输水系统水力学模型试验[J].水运工程,2017(9):126-130,143.

(本文编辑 王璁)