



犍为船闸 335 m 库水位输水系统 水力特性原型调试研究*

傅陆志丹, 胡亚安, 严秀俊, 李中华, 陈 林, 金 英

(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: 输水系统是船闸的重要组成部分之一, 为避免船闸水力学中模型缩尺效应的影响并保证犍为船闸在 335 m 库水位的安全运行, 对其输水系统水力特性进行原型观测与调试。通过在船闸闸室、各阀门井(检修阀门井)、上(下)闸首人字门前后、上下游引航道等部位布置 19 个水位计测点, 得出输水系统充泄水工况下的水力特性。结果表明: 充水阀门以推荐 $t_v=4$ min 启闭时, 闸室内出现明显的超灌(泄)现象, 双边充(泄)水惯性超高(降)分别为 0.40、0.10 m, 对船闸人字门及过闸船舶安全产生不利影响。通过对闸、阀门运行方式的优化, 有效缓解了闸室超灌(泄)现象, 双边充(泄)水惯性超高(降)分别降至 0.15、0.10 m 以下。提出适应 335 m 库水位的船闸运行方式, 为船闸的安全运行和船舶高效通航提供保障。

关键词: 犍为船闸; 输水系统; 水力特性; 原型观测

中图分类号: U 641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0116-07

Prototype debugging research on hydraulic characteristics of filling and emptying system of Qianwei ship lock with water level of 335 m

FU Lu-zhi-dan, HU Ya-an, YAN Xiu-jun, LI Zhong-hua, CHEN Lin, JIN Ying

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

Abstract: The filling and emptying system is one of the important parts of the ship lock. To avoid the influence of the model scale effect in the ship lock hydraulics and ensure the safe operation of Qianwei ship lock at water level of 335 m, the prototype observation and commissioning of the hydraulic characteristics of filling and emptying system are carried out. Through the arrangement of 19 water level indicators in lock chamber, valve wells (service valve wells), upper(lower) miter gate, the hydraulic characteristics of filling and emptying system during the commissioning are obtained. The results show that when the filling valve is opened and closed at the recommended speed $t_v=4$ min, the overfilling(over emptying) phenomenon occurs in the lock chamber obviously, which can be 0.40m and 0.10 m respectively, and it has an adverse influence on the safety of the miter gate and the ships passing through the lock. By optimizing the operation mode of the lock and valve, the phenomenon of over-filling(discharge) in the lock room is effectively alleviated, and the inertia of bilateral water filling(discharge) is reduced to 0.15 m and 0.10 m respectively. The paper puts forward the operation mode of the ship lock adapted to the water level of 335 m, which provides guarantee for the safe operation of the ship lock and the efficient navigation of ships.

Keywords: Qianwei ship lock; filling and emptying system; hydraulic characteristics; prototype observation

收稿日期: 2022-06-01

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402006/04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(重大项目)(Y120011)

作者简介: 傅陆志丹(1994—), 女, 博士研究生, 从事通航建筑物领域研究。

岷江(乐山—宜宾段)规划建设老木孔、东风岩、犍为、龙溪口 4 个梯级。犍为航电枢纽工程是梯级规划的第 3 级, 从左至右分别布置生态鱼道、电站、泄水闸、船闸^[1]。作为乐山市“千亿交通工程”的重中之重, 犍为航电枢纽工程对促进乐山市乃至四川省的经济发展具有重要作用。犍为船闸已于 2019 年 10 月通航试运行(330 m 库水位), 但由于船闸输水具有非常显著的非恒定流特征, 船闸水力学领域原型与模型存在明显的缩尺效应, 须通过原型调试掌握模型试验与实际情况的差别。因此, 本次 335 m 库水位输水系统水力特性原型观测调试也是在船闸运行近 2 a 后对船闸输水系统的一次检测, 提出适应 335 m 库水位的运行方式, 保障船闸运行安全及船舶通航安全。

1 输水系统布置

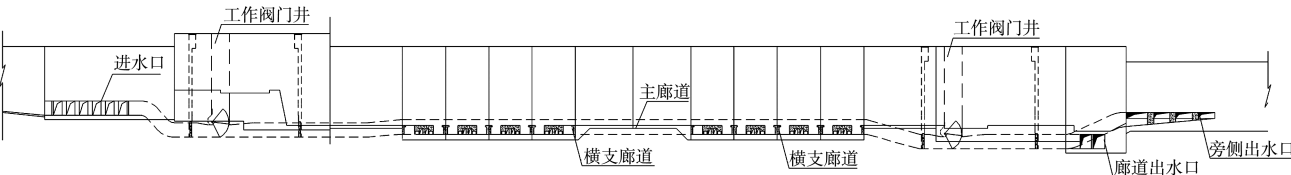
犍为航电枢纽为Ⅲ级船闸, 设计尺度为 200 m×

34 m×4.5 m(有效长度×有效宽度×门槛水深), 设计水头 19.0 m。船闸施工期上游通航水位 330.00 m, 上游设计最高通航水位 335.00 m, 运行期上游最低通航水位 334.00 m; 下游设计最高通航水位 325.11 m, 下游设计最低通航水位 316.00 m。其上下游通航水位变幅大, 为中高水头巨型船闸, 相关水力指标较高, 上下游不同的通航水位使得其水力条件变化大^[2]。

根据枢纽总体布置与《船闸输水系统设计规范》^[3], 经过模型试验, 犍为船闸采用闸墙长廊道、闸底横支廊道输水系统布置方案, 输水廊道采用“平底+顶部渐扩”的简单形式^[4]。左侧的泄水廊道采用旁侧泄水方式以降低下游引航道流速和水位波动, 改善下游引航道水流和船舶停泊条件。输水系统各部分尺寸见表 1, 输水系统总体布置方案见图 1。

表 1 闸墙长廊道和闸底横支廊道输水系统特征

部位	特点	面积/m ²	与输水阀门面积比
充水阀门段廊道	阀门底高程 305.50 m, 顶高程 309.70 m, 最大水头时淹没水深 6.3 m	33.6	1.00
进水口	导墙上垂直 6 支孔进水布置	180.0	5.36
主廊道	充水阀门后通过顶部渐扩将廊道高度抬高至 5 m, 再通过水平及垂直转弯与闸室出水廊道相连接	40.0	1.19
闸室出水段廊道	分 2 个出水区域, 每个出水区域 8 根廊道, 每根廊道进口三面修圆, 上下区域廊道进口修圆半径沿充水水流方向分为 2.5、1.5 m, 相邻 2 根廊道组合成复合式横支廊道	进口 51.2 末端 19.2	进口 1.52 末端 0.57
闸室出水支孔	每组复合式横支廊道每侧设 8 孔出水支孔, 出水支孔之间中心距离 4.0 m, 出水支孔与闸墙之间距离 3.0 m, 支孔长为 1.6 m, 每个支孔进口两面修圆、出口三面修圆, 修圆半径 0.3 m	61.4	1.83
消能明沟	闸室内出水段出水孔外侧采用单明沟消能布置, 明沟宽 3.7 m, 深 2.5 m	—	—
泄水阀门段廊道	通过水平及垂直转弯与闸室出水廊道相连接, 之后通过顶部渐缩的方式将廊道高度由 5.0 m 调整为 4.2 m, 与泄水阀门相连, 阀门后廊道再采用顶部渐扩的方式将廊道高度由 4.2 m 调整至 5.0 m。泄水阀门底高程 302.50 m, 顶高程 306.70 m, 最大水头时淹没水深 9.3 m	33.6	1.00
出水口	左侧泄水廊道采用旁侧泄水方式, 出水口采用导墙上垂直 4 支孔布置, 出水口外设消力池; 右侧泄水廊道则将出水口面积放大 1 倍, 并设中间导墙, 下闸首内设置格栅消能室, 采用顶支孔出水形式, 消能室内设不对称挑流坎	左侧 32.0 右侧 100.0	3.93



a) 立面

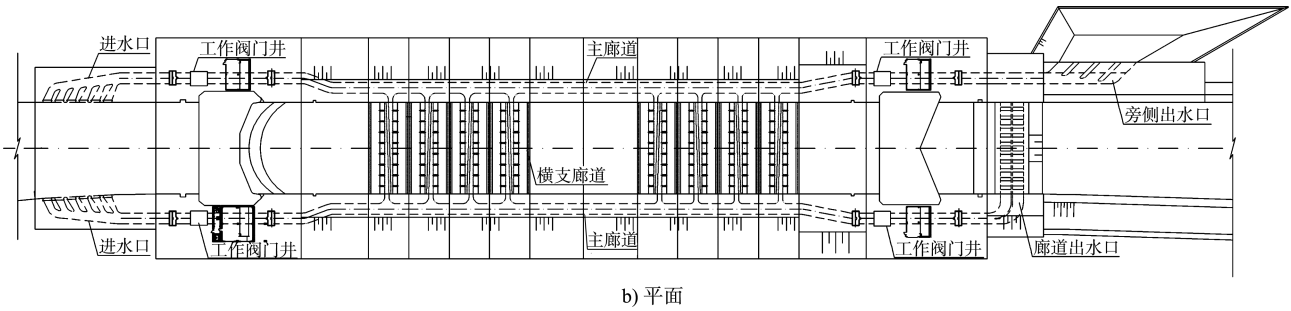


图 1 键为船闸输水系统总布置

2 测试方法与测点布置

为监测闸室充泄水过程中上游、门井、闸室及下游水位变化情况，在船闸相应位置布置水位计，见图 2。其中上游水位测点布置于上闸首人字门前，传感器吊装高程 333 m。门井水位测点布置于上闸首上下检修门井、充水阀门门井、泄水阀

门井以及下闸首上下检修门井内，以监测船闸充泄水过程中门井水位涨落情况，传感器吊装高程 317 m。闸室水位测点布置于闸室两端爬梯内，传感器吊装高程 317 m。下游水位测点布置于下闸首人字门后爬梯内，传感器吊装高程 317 m^[5]。

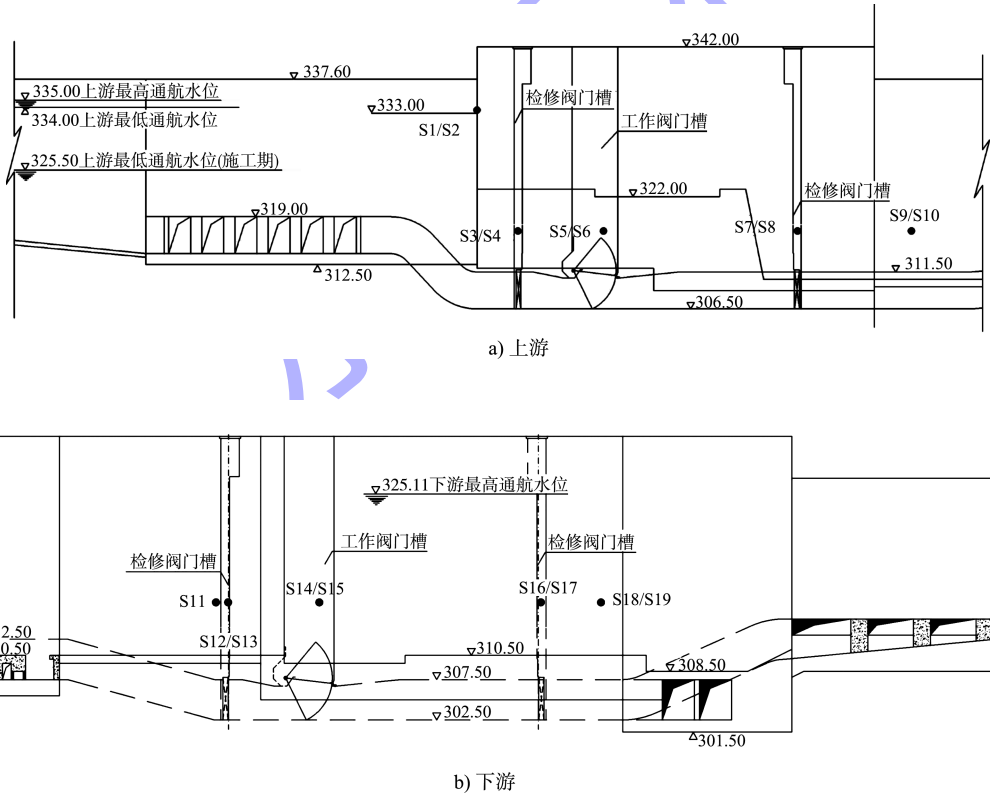


图 2 输水系统观测调试测点布置 (单位: m)

3 船闸充水水力特性

3.1 双边充水

3.1.1 优化前

为初步了解键为船闸 335 m 库水位充水水力特性，首先进行不控制惯性超高的调试，此运行

方式下闸室水位流量过程线见图 3。上游水位 334.5 m，闸室初始水位 318.9 m。船闸工作水头 15.6 m 时，充水阀门以推荐 $t_v = 4$ min 全开 (阀门吊杆行程 4.54 m)，实际左、右侧阀门启门时间分别为 3.92、4.00 min。在此运行方式下，为观

测闸室超灌现象,人字门在闸室水位与上游引航道水位第 1 次齐平时刻不开启,输水时间按闸室水位与引航道水位第 1 次齐平时计算,为 9.4 min,输水最大流量 454.3 m³/s,闸室水面最大上升速度 3.17 m/min,平均上升速度 1.66 m/min,充水末期闸室内最大超高 0.40 m。

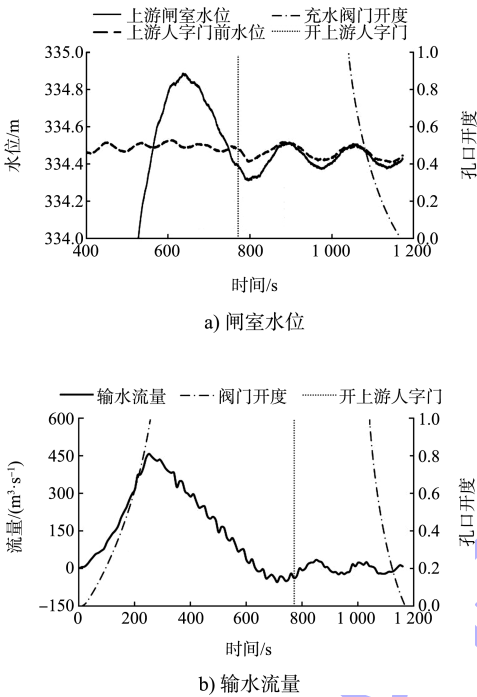


图 3 不控制惯性超高的充水闸室水位流量过程线

3.1.2 优化后

为控制惯性超高,充水阀门以推荐 $t_v=4\text{ min}$ 全开(阀门吊杆行程 4.54 m),实际左、右两侧阀门启门时间分别为 3.96、4.06 min,剩余水头 0.6 m 时动水关阀至 0.3 开度(阀门吊杆行程 2 m),闸室内外水位齐平后立即开启上闸首人字门。此运行方式下闸室水位流量过程线见图 4。

观测表明,上游水位 334.5 m,闸室初始水位 318.8 m,船闸工作水头 15.7 m 时,输水时间 10.1 min,输水最大流量 448.7 m³/s,闸室水面最大上升速度 3.13 m/min,平均上升速度 1.55 m/min。充水过程中引航道产生水位波动,波动幅值为 0.1 m,周期约 145 s。与不控制惯性超高工况相比,调整后的阀门运行方式改善超灌现象明显,闸室最大超高为 0.15 m。在熟悉人字门延时特性的基础上,

及时开启人字门可将惯性超高进一步降低到 0.10 m 以下。

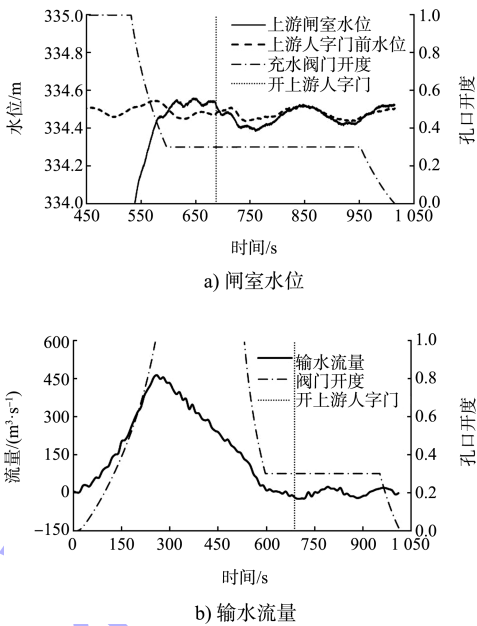
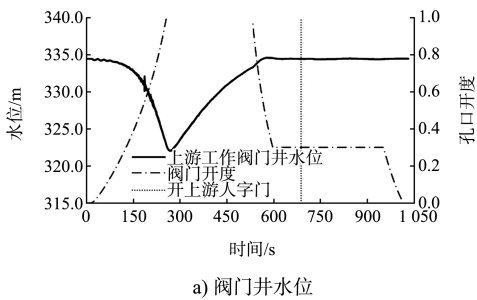


图 4 控制惯性超高的充水闸室水位流量过程线

闸室充水过程中,充水阀门井水位平稳跌落,无明显涌波现象,最大跌落值 12.40 m;充水阀门上检修门井水位跌落值 8.52 m;上游下检修门井水位跌落值 1.88 m,开门初期由于水流惯性作用,有约 0.30 m 压力抬升,随阀门开度增大,流速增大,压力略有跌落,此后呈上升趋势;泄水阀门上检修门井及泄水阀门井水位基本呈上升趋势,最终与闸室水位齐平。输水水力特性见图 5。

根据本次调试实测数据计算,双边充水阀门全开流量系数 0.849、阻力系数 1.387,相较于设计阶段物理模型试验测得的双边充水阀门全开流量系数 0.809^[6]、阻力系数 1.529,原型流量系数增大 4.9%。



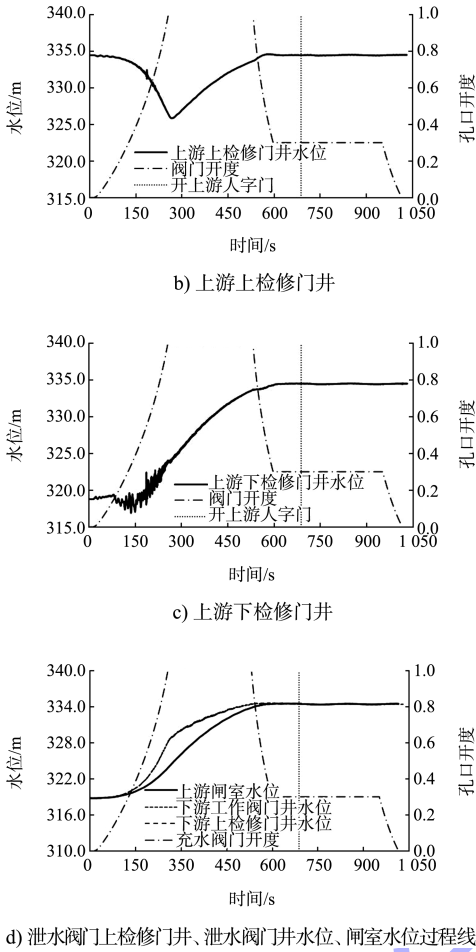


图 5 双边充水工况各门井水位变化过程线

3.2 充水过程水流流态

船闸进水口布置在导墙上，单侧为 6 支孔进水布置。因采用闸墙垂直多支孔形式、多支孔的喉口宽度采用顺水流方向依次缩小的布置、且支孔总面积较大，从而保证了各支孔进流量的均匀分配。因此，进水口断面平均流速相对较小，闸室充水过程中船闸进水口区域的水面较为平稳。

闸室及门井内水流流态见图 6、7。键为船闸采用闸墙长廊道闸、底横支廊道输水系统的整体布置，消能效果较好，闸室充水时水面平稳上升，闸室未见明显的漩涡、泡漩等不良流态。充水阀门埋深相对较浅，在阀门全开后的 50 s 内，阀门井水流有一定的漩滚，但阀门没有脱空，水面也没有破碎，没有形成吸气漩涡，未对阀门及吊杆产生明显不利影响。随着输水过程阀门井水位逐渐抬升，阀门井漩滚逐渐消失，恢复平静。充水

末期，采用提前动水关闭输水阀门的方式控制惯性超高效果明显，充水结束开启上闸首人字门时，门缝流现象较弱。



图 6 闸室

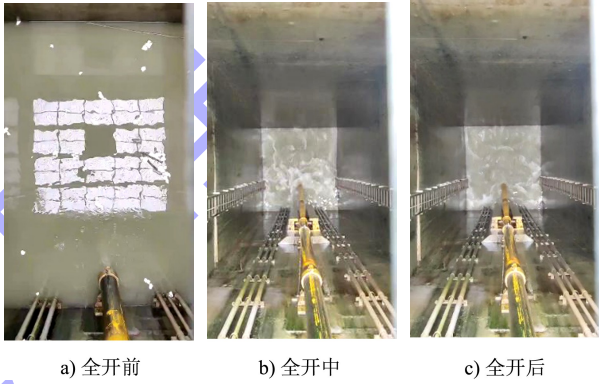


图 7 阀门全开过程充水阀门井内水流流态

4 船闸泄水水力特性

4.1 双边泄水

4.1.1 优化前

船闸泄水的调试与充水相同，先进行不控制惯性超降的调试，该运行方式下闸室输水水力特性见图 8。闸室初始水位 334.5 m，下游水位 317.8 m，船闸工作水头 16.7 m 时，泄水阀门以推荐 $t_v=4$ min 全开(阀门吊杆行程 4.54 m)，实际左、右两侧阀门启门时间分别为 3.72、3.90 min。为观测闸室超泄现象，人字门没有在闸室水位与引航道水位第 1 次齐平时刻开启。在此运行方式下，输水时间 10.6 min，输水最大流量 425.8 m³/s，闸室水面最大下降速度 2.97 m/min，平均下降速度 1.58 m/min，闸室水面下降平稳，流态良好，闸室最大超降为 0.1 m(左侧泄水口布置在外江,由于发电原因,一般来说外江水位高于引航道水位,惯性超降得以部分抵消)。

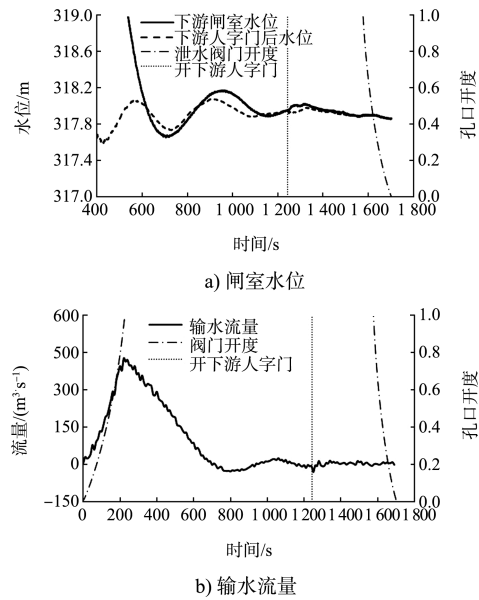


图 8 不控制惯性超降的泄水闸室水位流量过程线

4.1.2 优化后

经过多组次调试比选，双边泄水时阀门按以下方式运行时水力特性较优，闸室内超泄现象得到改善：闸室水位 334.5 m，下游水位 318.9 m，船闸工作水头 15.6 m 时，泄水阀门以推荐 $t_v = 4$ min 全开（阀门吊杆行程 4.54 m），实际左、右侧阀门启门时间分别为 3.83、3.86 min，剩余水头 0.3 m 时动水关阀至 0.3 开度（阀门吊杆行程 2 m），闸室内外水位齐平后立即开启下闸首人字门，惯性超降控制在 0.1 m 以下。此开启方式下闸室输水水力特性见图 9。在此运行方式下，输水时间 11.7 min，输水最大流量 406.2 m³/s，闸室水面最大下降速度 2.83 m/min，平均下降速度 1.33 m/min，闸室水面下降平稳，流态良好，闸室未出现明显超泄现象。双边泄水工况各门井水位变化过程线见图 10。可以看出，在此情况下，输水阀门井水位平稳跌落，无明显涌波现象，最低水位 315.5 m，下游上检修门井最低水位 316.8 m，下游下检修门井最低水位 316.9 m。

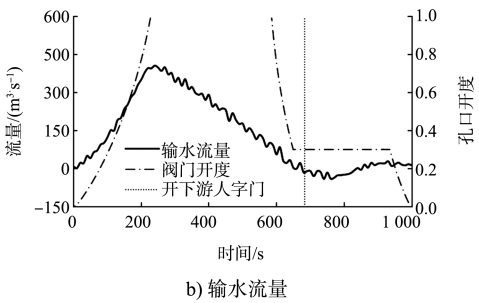
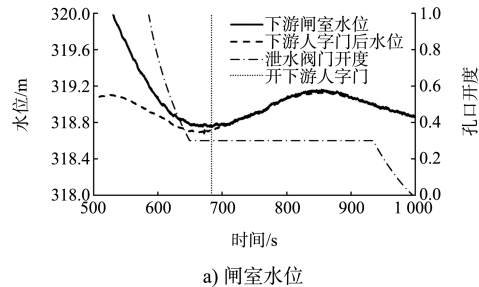


图 9 控制惯性超降的泄水闸室水位流量过程线

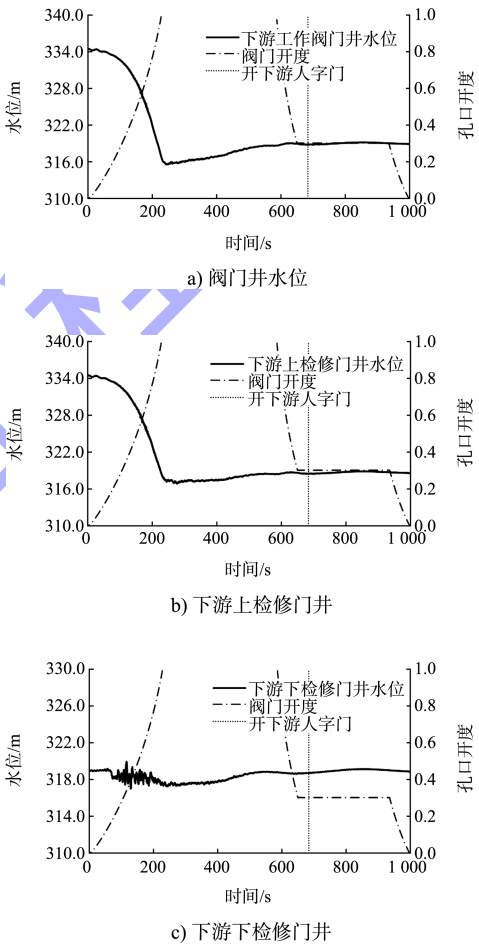


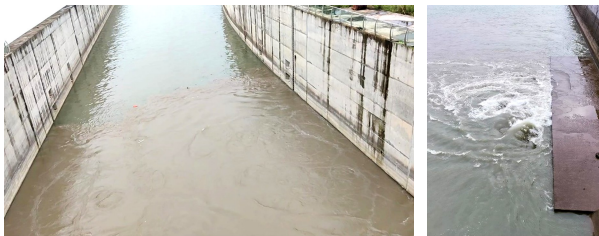
图 10 双边泄水工况各门井水位变化过程线

根据本次调试实测数据计算，双边泄阀门全开流量系数 0.713、阻力系数 1.967，相较于物理模型试验测得的双边泄水阀门全开流量系数 0.674、阻力系数 2.202，原型流量系数增大 5.8%。

4.2 泄水过程水流流态

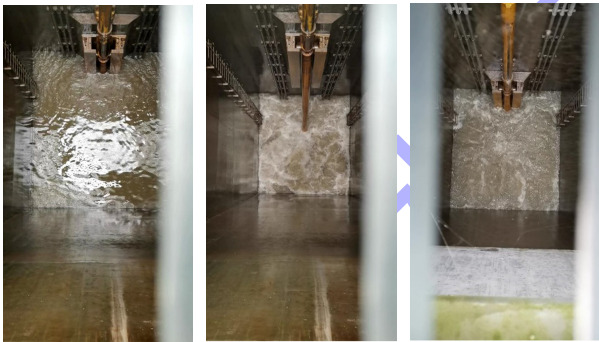
双边泄水过程中，出水口、下游引航道见图 11，门井水流流态见图 12。犍为船闸左侧泄水廊道采用旁侧泄水的方式，右侧泄水廊道则将出水口面积放大 1 倍，并设中间导墙，下闸首内设

置格栅消能室，采用顶支孔出水形式，消能室内设不对称挑流坎。船闸泄水过程中，闸室及引航道内水流流态较为平稳，引航道水面壅高幅度不大，出流也较为均匀。江侧出水口水面起先较为平静，后有一定程度的漩滚，泄水过程中漩滚逐渐消失，水面恢复平静。泄水过程中阀门井水位逐渐下降，阀门井漩滚逐渐消失，恢复相对平静。泄水末期，采用动水关闭输水阀门的方式控制惯性超降效果明显，泄水结束开启下闸首人字门时，门缝流现象较弱。



a) 下游右侧出水口及引航道 b) 下游江侧出水口

图 11 双边泄水出水口、引航道



a) 全开前 b) 全开中 c) 全开后

图 12 阀门全开过程泄水阀门井内水流流态

5 结 论

1) 充泄水阀门按连续开启方式 $t_v = 4\text{ min}$ 开启，在接近设计水头的情况下，双边充水和双边泄水时，闸室内会出现较为严重的超灌（泄）现象。通过调整后，充水阀门在剩余水头 0.6 m 时动水关阀至 0.3 开度，泄水阀门在剩余水头 0.3 m 时动水关阀至 0.3 开度，可有效改善闸室超灌（泄）现象，输水结束开启上下游闸首人字门时，门缝流现象较弱。

2) 经过多次调试，提出适应 335 m 库水位的

键为船闸运行方式，船闸充、泄水时输水系统性能较好，闸室水位升降平稳，上游引航道及进水口流态良好，出水口、下游引航道波动不大，整个充、泄水过程中各项水力指标均满足规范和设计要求。

3) 为节省工程量，设计阶段输水系统及阀门水力学试验提出“廊道小淹没水深”措施，原型观测验证表明其效果较好，在阀门全开后的 50 s 内，阀门井水流有一定的漩滚，但阀门没有脱空，水面也没有破碎，没有形成吸气漩涡，未对阀门及吊杆产生明显不利影响。

4) 根据原型观测数据计算，双边阀门全开充水输水系统流量系数为 0.849，双边阀门全开泄水输水系统流量系数为 0.713，比模型值分别增大 4.9% 和 5.8%。

5) 输水末期，须综合参与集控程序的水位计特性、程序指令、油泵特性、人字门实际动作等因素，摸索总结规律，实现水位第 1 次齐平时立即开启人字门，确保人字门系统及过闸船舶安全的同时，提高输水效率。

参考文献：

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

[2] 严秀俊,王敬鹏.岷江键为航电枢纽工程船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2010.

[3] 南京水利科学研究院.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] 徐红,吴礼国,郝文字.键为船闸输水系统布置[J].水运工程,2021(12):28-32,37.

[5] 严秀俊,李中华,傅陆志丹,等.岷江键为航电枢纽通航船闸输水系统及阀门水力学原型调试观测(335 m 库水位)[R].南京:南京水利科学研究院,2022.

[6] 严秀俊,陈林,王敬鹏,等.键为船闸输水反弧门廊道非恒定流水力特性研究[J].水运工程,2021(12):21-27.

(本文编辑 王传瑜)