



西津二线船闸输水系统水力特性原型观测

邓倩玉, 严秀俊, 李海健, 许 铎

(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, 西津二线船闸是西江航运干线中的重要通航枢纽, 为确保西津二线船闸能够安全高效运行, 试通航前, 通过在闸室、阀门井、检修门井、上(下)闸首人字门前后和上游引航道等部位布置水位计, 各输水阀门及人字门有杆腔、无杆腔布设油压传感器, 对船闸输水系统水力特性、阀门启闭特性及人字门启闭特性进行综合监测、调试与分析, 提出合理的运行方式。结果表明: 在推荐的运行方式下, 惯性超高(降)基本控制在 0.10 m 之内, 大幅改善人字门及活塞杆受力条件, 保障船闸的安全运行和高效通航。

关键词: 西津二线船闸; 输水系统; 水力特性; 原型观测

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0091-08

Prototype observation of hydraulic characteristics for water transmission system in Xijin Second Line Ship Lock

DENG Qianyu, YAN Xiujuan, LI Haijian, XU Duo

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

Abstract: The water transmission system is one of the important components of the locks, and the Xijin Second-Line Lock is an important navigable hub in the Xijiang River Shipping Main Line. To ensure the safe and efficient operation of the Xijin Second Line Lock, before the trial opening, water level meters are arranged in the lock chamber, valve well, maintenance door well, the front and rear of the upper (lower) lock head miter gate and the upstream approach channel. Oil pressure sensors are layed in the rod cavity and rodless cavity of each miter gate. The hydraulic characteristics of the water transmission system, the opening and closing characteristics of the valve and herringbone gate are comprehensively monitored, commissioned and analyzed. A reasonable operation mode is proposed. The results show that under the recommended operation mode, the inertia super-elevation (drop) is basically controlled within 0.10 m, which significantly improves the force conditions of the piston rod of the manned gate and can guarantee the safe operation and efficient navigation of the locks.

Keywords: Xijin Second Line Ship Lock; water transmission system; hydraulic characteristics; prototype observation

1 工程概况

西津水利枢纽位于横贯两广的水上运输大动脉西江航运干线上, 是以发电、通航为主, 兼顾灌溉的水利水电综合枢纽工程^[1]。作为一座高水头船闸, 西津二线船闸的输水阀门段水流空化及闸室内船舶系缆力等水力学问题较为突出; 且该

船闸是西江航运干线南宁—梧州段 4 个渠化梯级的第 1 个梯级, 其性能优劣将直接影响西江黄金水道航运的畅通, 具有十分重要的航运地位; 加之船闸的充、泄水具有显著的非恒定流特征, 为保障船闸正常运行及船舶停泊安全, 进行船闸试通航前的充、泄水原型观测和联合调试非常必要。

收稿日期: 2023-09-19

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。

根据枢纽总体布置与《船闸输水系统设计规范》，参考南京水利科学研究院 1:30 输水系统水力学模型试验研究，西津二线船闸采用闸底双长廊道侧支孔输水系统的整体布置^[2]。输水系统的主要特征尺寸见表 1，输水系统整体布置见图 1。

表 1 输水系统特征尺寸

部位	特征	面积/m ²	与输水阀门面积比
输水阀门段廊道	最大水头时淹没水深 8.02 m	54.0	1.00
进水口	导墙上垂直 6 支孔进水口,喉部高度不变、宽度分级收缩	388.8	7.20
充水主廊道	采用顶部渐扩的方式将廊道高度由 6.0 m 调整至 7.2 m,再通过水平转弯进入闸底与出水段廊道连接	64.8	1.20
闸室出水段廊道	闸底布置 2 根出水段廊道,廊道侧面布置出水支孔,支孔外布置消能明沟	66.0	1.22
闸室出水支孔	自上游向下游分 3 组,每组 9 孔,孔口尺寸分别为:0.50 m×1.50 m、0.46 m×1.50 m 及 0.42 m×1.50 m	74.5	1.38
消能明沟	靠近闸墙的 2 道明沟宽 3.0 m、深 3.6 m,闸室中间的明沟宽 6.0 m、深 3.6 m	—	—
泄水主廊道	通过水平转弯与闸室出水廊道相连接,之后采用顶部渐缩的方式将廊道高度由 7.2 m 调整为 6.0 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 6.0 m 调整至 7.2 m	64.8	1.20
出水口	泄水廊道出口将宽度放大为原来的 2 倍,高度不变,并与出水口消能室连接	129.6	2.40
格栅消能室	采用顶支孔和正面支孔联合出水形式,正面出水孔外布置消力池	顶面 190.8	3.53
		正面 127.2	2.36

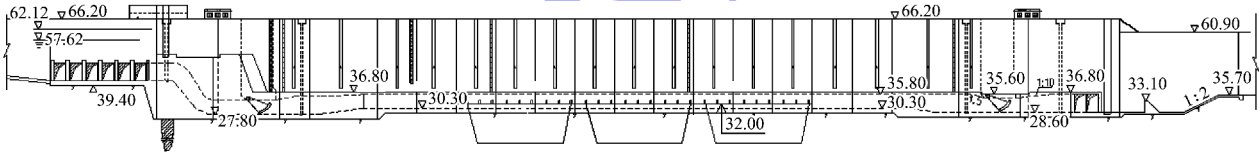


图 1 船闸输水系统平面布置 (单位: m)

与一般泄水建筑物研究领域差异较大的是船闸输水具有非常显著的非恒定流特征(船闸输水过程中流量由 0 至最大再减少至 0),模型试验在满足几何相似和重力相似的前提下兼顾阻力相似,但仍无法实现原型与模型廊道水流雷诺数相等,导致船闸水力学领域原型与模型存在明显的缩尺效应,该效应使得原型和模型的水力特性有所区别。此前高水头船闸相关研究表明,即使模型试验采用糙率校正,原型观测所得的水力特性、流量系数、阀门启闭力等水力特性都较模型的结果更大^[3]。

2 工程特点及难点

1) 西津二线船闸采用闸底双长廊道侧支孔输

水系统布置规模较大^[4],相关水力指标较高,同时上下游不同的通航水位使得其水力条件变化大。闸室平面尺寸达 280 m×34 m×5.8 m(有效长度×闸室宽度×最小门槛水深),船闸上下游水位变化大,最大水头为 20.30 m,是规模较大的高水头单级船闸。

2) 西津二线船闸有效宽度为 34.0 m,上下游人字闸门尺度及门槛水深皆位于国内外前列,设计阶段未对人字闸门进行专题研究,原型工作闸门及启闭机运行特性将直接影响船闸的安全运转,须在试通航前进行专门调试^[5]。

3) 较大的阀门孔口尺寸及较长的惯性长度导致输水末期惯性超高(降)也较大,如果得不到较好的控制,可能引起人字门及启闭系统损坏,甚

至危及停泊于闸室内的船舶安全。

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。

5) 阀门段孔口尺寸为 $4.50\text{ m} \times 6.00\text{ m}$ (宽 \times 高), 阀门尺寸位列世界前列, 高水头船闸的输水阀门是船闸咽喉, 其运行特性、空化特性、振动特性及启闭系统是否正常运转关系到船闸设施安全、过闸效率和通过能力^[6]。

6) 二线船闸建成后, 西津水利枢纽为双线船闸平行并列布置, 双线船闸共用上下游口门区, 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。

综上, 鉴于西津二线船闸的上述特点、难点, 开展船闸原型调试与水力学观测十分必要。南京水利科学研究院于 2022 年 11—12 月对西津二线船闸开展了无水、有水观测与调试, 本文重点介绍船闸输水系统水力学主要调试观测成果。

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, 分别在二线船闸上下游人字门前、各阀门井、各检修门井及一线船闸一/二级闸室及上游人字门前、下游人字门前布设水位测点, 利用高精度水位传感器监测水位涨落情况; 二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、人字门的启闭特性; 二线船闸各阀门吊杆及启闭机活塞杆铰接处布设三向振动加速度; 以上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。

3 船闸充水水力特性

3.1 运行方式优化前

为了解西津二线船闸充水水力特性, 首先进行不控制惯性超高的观测, 船闸工作水头 18.50 m , 阀门以 $t_v=4.83\text{ min}$ 速率开启至 1.25 开度(阀门远高于 1.00 开度是工程程序和吊杆限位开过位置问题, 考虑到水力特性基本不受阀门开关影响, 而

阀门启闭特性对此情况研究较少, 因此本次原型观测不改变控制程序, 依旧采用阀门开过工况), 其中 4.28 min 时开至 1.00 开度, 水位齐平后, 为了观测闸室超高现象, 没有立即开启人字门, 人字门前水位和闸室水位见图 2。

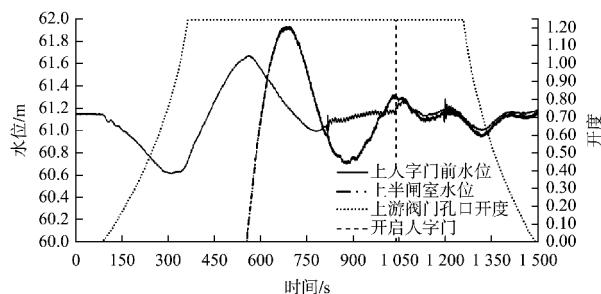


图2 不控制惯性超高的充气过程人字门前及闸室水位

3.2 运行方式优化后

为控制惯性超高, 双边充水时阀门按推荐方式运行, 即双边开启速率约 7.00 min , 水头 3.00 m (上游水位与闸室水位差), 动水关阀至阀门孔口 $n=0.30$ 开度(吊杆直线行程 32%), 水位齐平, 开启人字门。实际充水阀门以 $t_v=7.65\text{ min}$ 速率开启至 1.25 开度, 其中 6.67 min 时开至 1.00 开度, 此运行方式下人字门前水位和闸室水位见图 3。人字门开启时, 惯性超高约 0.10 m , 充水过程中上游引航道产生水位波动, 波动最大幅值约 0.66 m 。

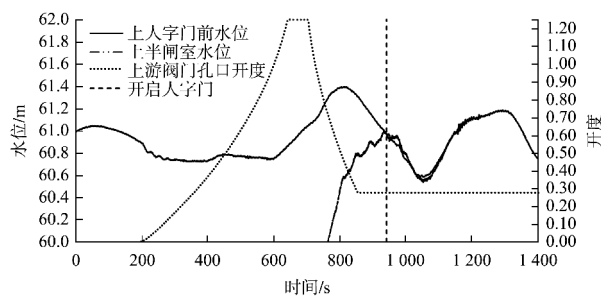


图3 控制惯性超高的充气水位

3.3 优化前后人字门运行特性

双边充水不控制惯性超高, 输水末期反向水头逐渐增大, 最大值约 0.70 m 。至人字门开启前, 闸室内水位呈现较大振荡, 最大水位变幅达到 0.61 m 。优化前后水力特性见表 2。优化前后输水时间和输水最大流量基本不变。

表 2 双边充水优化前后水力特性对比

工况	T/min	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta H/\text{m}$	F/kN
优化前	10.08	601.39	0.70	-2 834
优化后	10.68	612.05	0.10	-88

注: T 为输水时间, Q 为输水最大流量, ΔH 为超高, F 为人字门活塞杆受力(负号表示受压力)。

以上游左侧人字门为例, 未控制惯性超高人字门开启前后油缸压力和启门力见图 4。反向水头水体推人字门导致人字门推活塞杆, 有杆腔压力从 3.54 MPa 逐渐减小到 0.05 MPa, 无杆腔压力从 1.45 MPa 逐渐增大到 13.91 MPa, 且无杆腔压力一直高于有杆腔, 反向水头作用下人字门活塞杆受力为 -2 834 kN, 超过上闸首人字门活塞杆上最大受压荷载 2 500 kN, 导致反向水头推人字门。

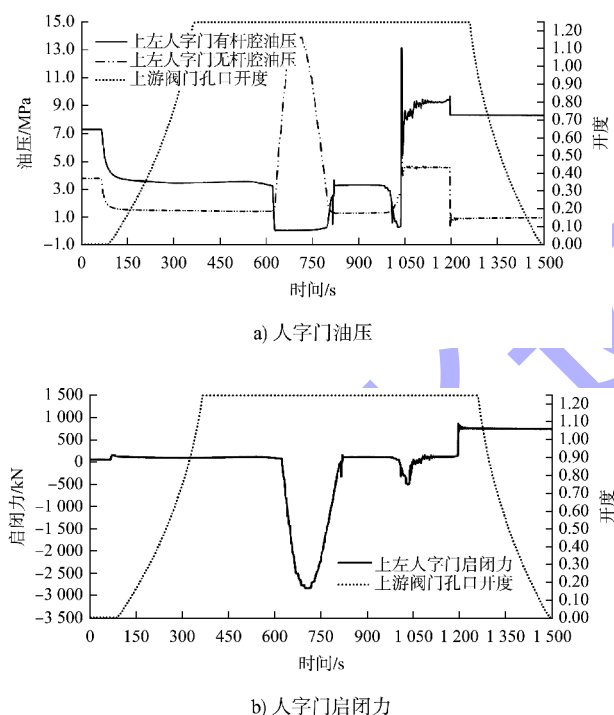


图 4 不控制惯性超高的人字门开启前后运行特性

人字门被推开后, 闸室内水体通过人字门缝隙流向上游引航道, 人字门反向水头降低, 人字门及活塞杆呈向全关状态回复的趋势, 有杆腔压力逐渐增大, 无杆腔压力逐渐减小, 直到闸室内水位与上游引航道水位齐平后, 有杆腔压力超过无杆腔压力, 之后继续增大到 3.31 MPa, 无杆腔压力减少到 1.31 MPa, 活塞杆重新受正向拉力。

在闸室水位与上游水位第 2 次齐平时刻, 控

制程序发出人字门开启命令, 人字门油泵开启瞬间, 人字门有杆腔油压为 13.15 MPa, 无杆腔油压为 8.90 MPa; 人字门开启阶段, 人字门有杆腔油压为 8.00 MPa, 无杆腔油压为 4.02 MPa, 人字门启门力为 47 kN, 平稳开门阶段启门力 110 kN。

双边充水控制惯性超高, 人字门开启前后油缸压力和启门力见图 5。输水末期人字门活塞杆承受拉力为 41 kN, 人字门油泵开启时启闭力为 286 kN, 人字门开启初期由于惯性, 水流通过局部开启状态的阀门, 仍向闸室内输水, 反向水头逐渐增大, 最大值约 0.10 m, 反向水头作用下人字门活塞杆受力为 -88 kN。可见, 控制惯性超高前后, 人字门活塞杆受到的最大推力从 -2 834 kN 下降到 -88 kN, 活塞杆及人字闸门受力条件有较大改善。

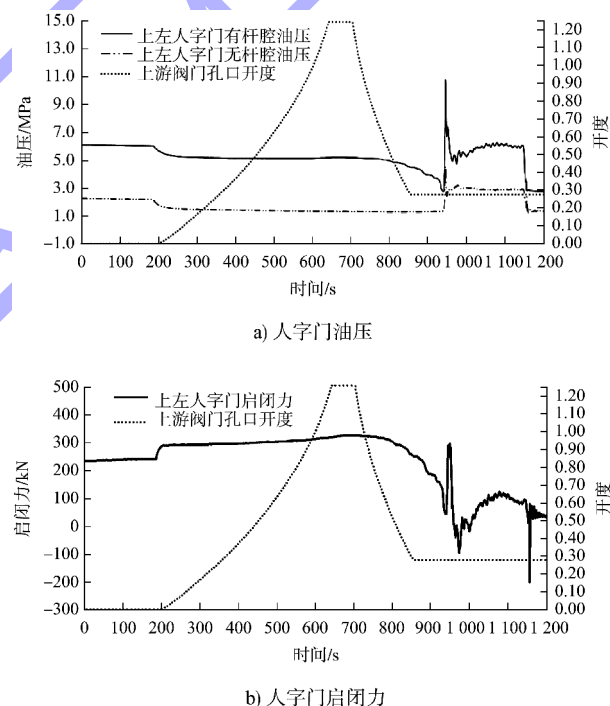


图 5 控制惯性超高的人字门开启前后运行特性

3.4 优化后阀门运行特性

为了更好地表征水流对阀门的作用, 采用净动水启门力(动水启门力与静水启门力的差值)分析水流对阀门启闭系统的作用, 在阀门采用推荐工况运行时, 原型充水运行时最大启门力约 1 117 kN, 最大净动水启门力 369 kN, 比模型试验 7.00 min 开门速率下最大净动水启门力 302 kN 增大 18.16%。阀门启闭力随开度变化规律基本一致, 先逐渐上

升,到0.45~0.55开度附近达到峰值,表明此时来流对底缘的下吸力最大,而后净动水启门力逐渐下降。充水阀门净动水启门力见图6。

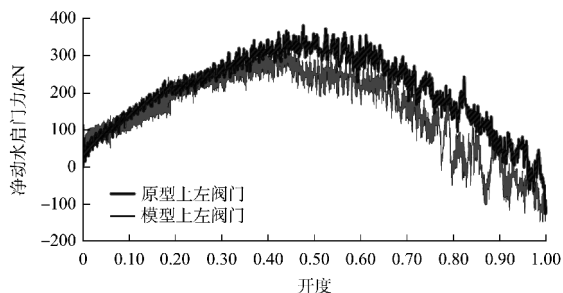


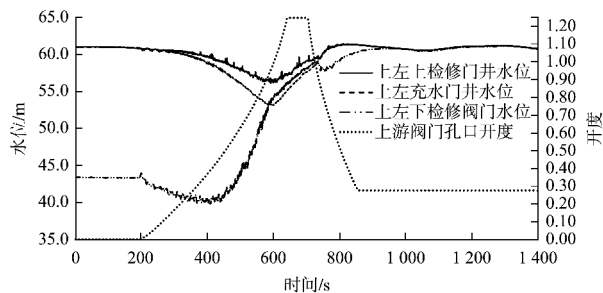
图6 充水阀门净动水启门力

由于净动水启门力已经排除门自重力的影响,因此原型净动水启门力较大,主要是由于原型中水流漩滚扰动对门体结构的冲击力以及主流在底缘边界分离和贴附所导致的下吸力大于模型试验中的水流影响,此外,模型难以针对阀门的止水摩阻力、支承摩阻力等进行模拟,因此模型试验时门顶未设置顶止水,两侧也未设置侧止水,模型不考虑摩阻力对阀门启门力影响,这也是导致原型阀门启门力略大于模型的原因之一。

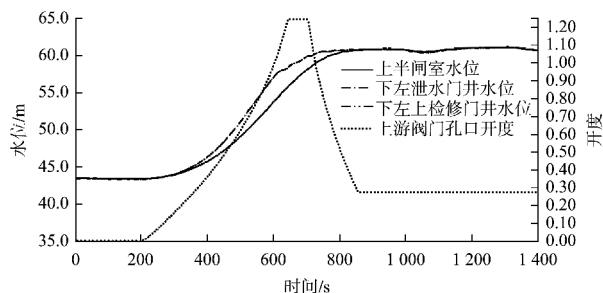
3.5 水力特性

根据本次调试实测数据计算,双边充水阀门全开流量系数0.880、阻力系数1.290,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0.841、阻力系数1.415,原型流量系数增大4.6%。这是由于模型试验即使兼顾几何相似、重力相似和阻力相似,仍无法实现水流雷诺数相等造成的。

闸室充水过程中,输水水力特性见图7。充水阀门上检修门井跌落值为4.96 m;充水阀门井水位平稳跌落,无明显涌波现象,跌落值为7.88 m;开门初期由于水流惯性作用,充水阀门下检修门井水位,压力抬升约0.51 m,随阀门开度增大,下检修门井处廊道流速增大,压力下降,跌落值4.15 m,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。



a) 充水门井及下检修门井



b) 上半闸室、泄水阀门井及上检修门井

图7 双边充水各门井及闸室水位变化

3.6 充水过程中水流流态

上游进水口采用闸墙垂直多支孔布置,多支孔的喉口宽度布置顺水流方向依次缩小,且支孔总面积较大,从而保证各支孔进流量的均匀分配。因此,闸室充水过程中,进水口断面平均流速相对较小,进水口区域未见明显旋转水流,水面较为平稳,进水口流态见图8。



图8 双边充水时进水口流态

西津二线船闸采用“闸墙长廊道+闸底双明沟消能”输水系统形式,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。充水时闸室流态见图9,输水末期采用“动水关阀到局部开度停机,水位齐平开启人字门”的方式控制惯性超高效果明显,人字门开门后缝隙流态见图10。



图 9 双边充水时闸室内流态

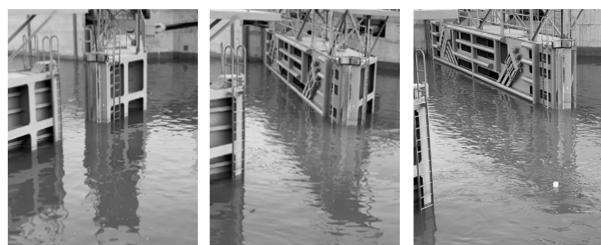


图 10 双边充水控制超高人字门开启时缝隙段流态

4 船闸泄水水力特性

4.1 运行方式优化前

船闸工作水头 18.80 m，阀门以 $t_v = 4.38$ min 速率开启至开度 1.25，其中 3.65 min 时开至 1.00 开度，为初步了解西津二线船闸泄水水力特性，首先进行不控制惯性超降的观测，水位齐平后，未开启人字门，闸室水位见图 11，充水过程中闸室最大超降 0.49 m。

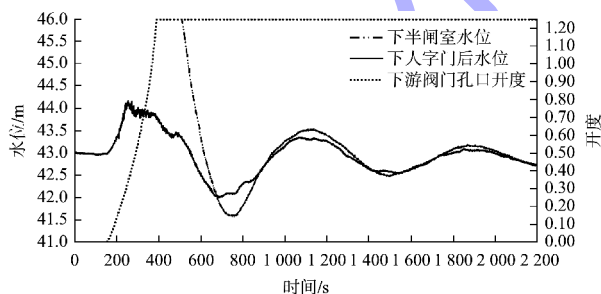


图 11 不控制惯性超降的泄水闸室水位

4.2 运行方式优化后

为控制惯性超降，双边泄水时阀门按推荐方式运行，即双边开启速率约 7.00 min，水头 1.60 m（闸室水位与下游水位差），动水关阀至阀门孔口 $n=0.30$ 开度，水位齐平时开启人字门。实际泄水阀门以 $t_v = 6.75$ min 速率开启至开度 1.25，其中 6.23 min 时开至 1.00 开度，闸室水位见图 12。

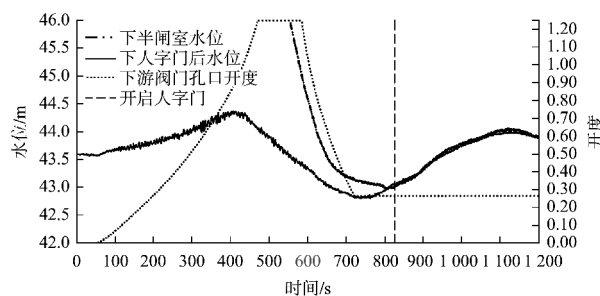


图 12 控制惯性超降的泄水水位

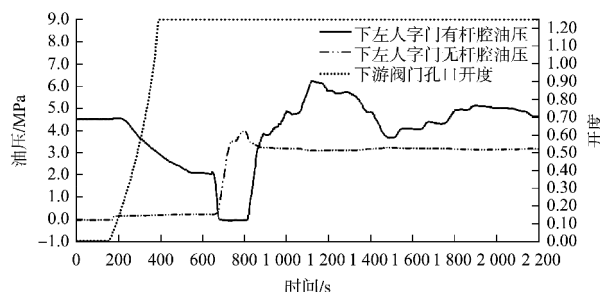
4.3 优化前后人字门运行特性

优化前后水力特性见表 3。优化前后输水时间和输水最大流量基本不变，满足设计要求。

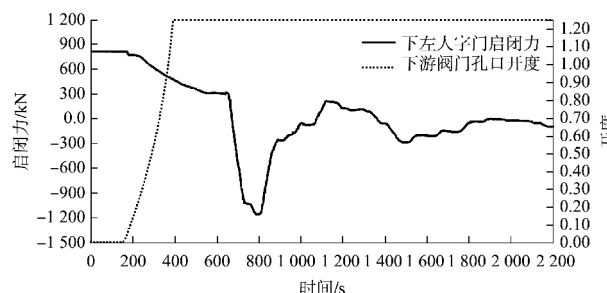
表 3 双边泄水优化前后水力特性对比

工况	T/min	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta H/\text{m}$	F/kN
优化前	9.77	656.08	0.49	-1 156
优化后	11.67	637.30	0.05	-163

双边泄水不控制惯性超降，输水末期，反向水头逐渐增大，最大值约 0.49 m，在此条件下人字门开启前后油缸压力和启门力见图 13。反向水头水体推人字门导致人字门推活塞杆，有杆腔压力从 2.08 MPa 逐渐减小到 0.04 MPa，无杆腔压力从 0.21 MPa 逐渐增大到 3.92 MPa，且无杆腔压力一直高于有杆腔，反向水头作用下活塞杆承受 -1 156 kN 的推力。



a) 人字门油压



b) 人字门启闭力

图 13 不控制惯性超降的人字门开启前后运行特性

双边泄水控制惯性超降输水末期,反向水头最大值约 0.05 m,人字门开启前后油缸压力和启门力见图 14。人字门活塞杆全程承受-163 kN 的推力,人字门油缸开启瞬间启门力 68 kN,平稳开门阶段启门力 156 kN。可见控制惯性超降前后,人字门活塞杆最大受力从-1 156 kN 下降到-163 kN,活塞杆及人字门受力条件有较大改善。

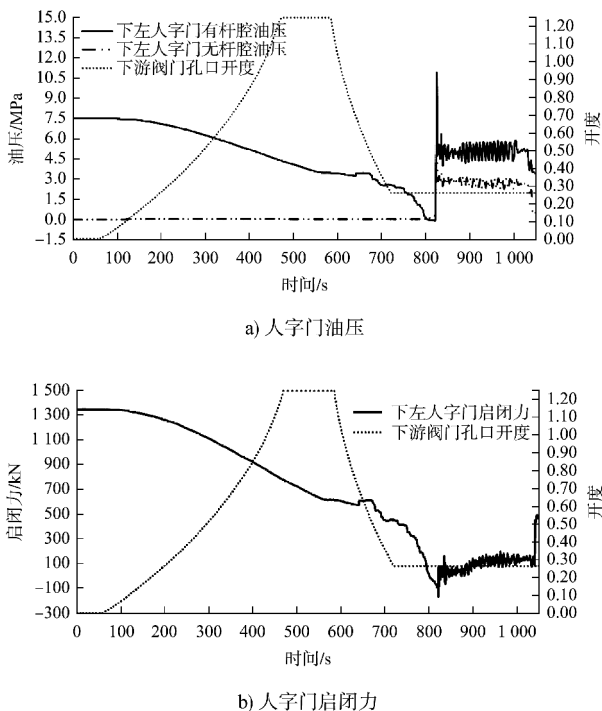


图 14 控制惯性超降的人字门开启前后运行特性

4.4 优化后阀门运行特性

同充水阀门分析,采用净动水启门力分析水流对阀门启闭系统的作用,泄水阀门净动水启门力见图 15。在阀门采用推荐工况运行时,原型泄水运行时最大启门力约 1 174 kN,最大净动水启门力 371 kN,比模型试验 7.00 min 开门速率下最大净动水启门力 315 kN 增大 15.10%,阀门启闭力随开度变化规律基本一致,阀门启闭力随开度变化规律基本一致,先逐渐上升,到 0.45~0.55 开度附近达到峰值,表明此时来流对底缘的下吸力最大,而后净动水启门力逐渐下降。

同充水阀门净动水启门力,原型泄水阀门净动水启门力略大于模型净动水启门力,主要与原型水流影响增强和模型未设置顶止水和侧止水有关。

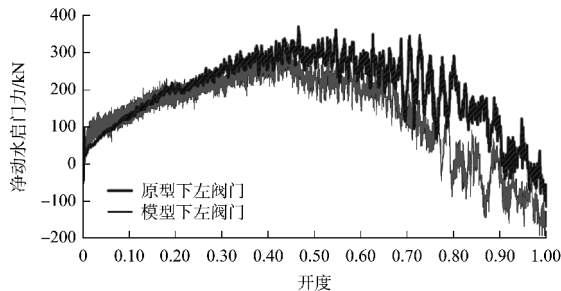


图 15 泄水阀门净动水启门力

4.5 水力特性

根据本次调试实测数据计算,双边泄水阀门全开流量系数 0.759、阻力系数 1.736,相较于设计阶段物理模型试验测得的双边泄水阀门全开流量系数 0.729、阻力系数 1.884,原型流量系数增大 4.1%。泄水流量系数增强缘由同充水流量系数增强,这是由原模型阻力系数和水流雷诺数不同导致的。

输水水力特性见图 16。泄水过程中泄水阀门上检修门井水位平稳跌落,无明显漩滚现象,跌落值约 17.63 m;在阀门全开时,阀门井有一定的漩滚,阀门井最大跌落 20.40 m;泄水阀门下检修门井水位整体呈“上升—下降—上升”振荡波动,在阀门开度 $n=0.30\sim 0.80$ 范围时,泄水阀门下检修门井水位波动幅值约 ± 2.0 m,与下游人字门后水位波动趋于一致。

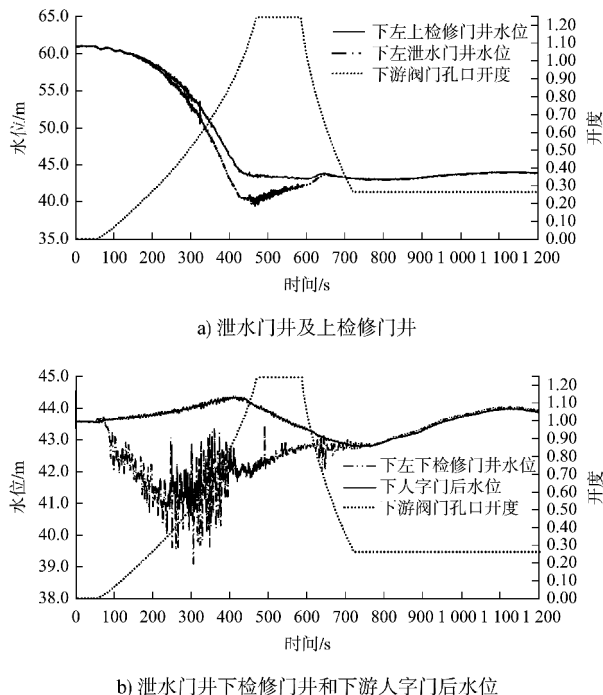


图 16 双边泄水各门井水位变化

4.6 泄水过程中水流流态

船闸采用“闸墙长廊道+闸底双明沟消能”的输水系统形式,具有良好的消能效果,闸室泄水时水面平稳下降,闸室未见明显的漩涡、泡漩等不良流态。泄水时期闸室流态见图 17。



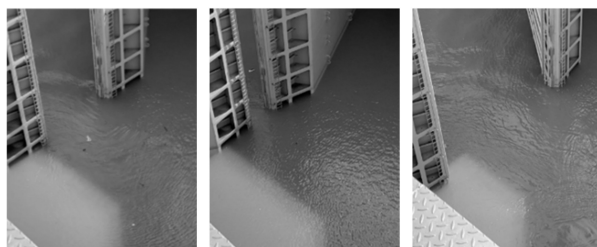
图 17 双边泄水时闸室内流态

泄水廊道在泄水阀门后平底转弯至出水口,与下闸首出水口消能室相连接,在廊道内设隔流墩,使得闸室泄水时出流均匀。在泄水达到最大下泄流量时,出水口有一定壅高。泄水水流均匀向下游引航道推进和扩散。引航道为闸室封闭端狭长河段,随泄水时程,引航道水流被整体推向下流,再往返,形成周期为 733 s 的振荡长波,该长波对下游停泊船舶未产生明显消极影响。下游出水口流态见图 18。



图 18 双边泄水时出水口流态

采用动水关闭输水阀门的方式控制惯性超降效果明显,惯性超降约 0.05 m,泄水结束后开启下闸首人字门时门缝流现象较弱,下游人字门开启时缝隙流流态见图 19。



a) 小开度 b) 中开度 c) 大开度

图 19 双边泄水控制超降人字门开启时缝隙段流态

5 结论

1) 惯性超高(降)控制效果明显。充水阀门推荐运行方式下,惯性超高从不控制工况的 0.70 m 减少到 0.10 m;人字门活塞杆受到的最大推力从 -2 834 kN 下降到 -88 kN,人字门及活塞杆受力条件得到较大优化;泄水阀门推荐运行方式下,惯性超降从不控制工况的 0.49 m 减少到 0.05 m;人字门活塞杆最大受力从 -1 156 kN 下降到 -163 kN,人字门活塞杆受力条件得到较大优化;同时改善充(泄)水末期人字门缝隙流流态,消除了该时段闸室停泊船闸的安全隐患。

2) 上游进水口、输水系统、下闸首出水口等布置合理,船闸双边充水时,上游进水口区域未见明显旋转水流,水面较为平稳,对上游引航道停泊船舶未产生不良影响。充泄水期间,闸室内水面平稳上升,未见明显的漩涡、泡漩等不良流态。泄水出口段出流均匀,最大下泄流量时,出水口有一定壅高;下游引航道为闸室封闭端狭长河段,泄水水流均匀向下游引航道推进和扩散,随泄水时程,引航道水流被整体推向下流,再往返形成周期为 733 s 的振荡长波,未对下游停泊船舶产生明显消极影响。

3) 双边充水阀门最大净动水启门力 369 kN,比模型最大净动水启门力增大 18.16%,全开流量系数 0.880,比模型流量系数增大 4.6%;双边泄水阀门最大净动水启门力 371 kN,比模型最大净动水启门力增大 15.10%,全开流量系数 0.759,

(下转第 141 页)