



船闸输水阀门运行工艺现场测试优化

张 勇

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 通过高水头船闸输水阀门运行工艺优化, 改善闸室内船舶停泊条件及输水廊道阀门段水流条件, 这是解决过闸船舶大型化导致系统力超过设计值等问题的重要技术方法。结合某大型船闸输水阀门运行实例, 通过动水关(开)阀开度调整、动水关阀剩余水头等不同工况的输水阀门运行工艺, 开展水力学现场测试, 选定充泄水时间、惯性超高(降)均满足设计及规范要求的充泄水阀门优化运行工艺。现场测试表明: 采用推荐的输水阀门运行工艺, 可有效地改善闸室内船舶停泊及输水廊道水力学条件, 双边充水时船舶最大系统力比现状工况降低近39.3%, 人字门开启时船舶最大系统力比现状工况降低近59%。

关键词: 大型船闸; 水力学; 原型观测; 阀门运行优化; 船舶系统力

中图分类号: U653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0133-06

Optimization of operation process of filling and emptying valve of ship lock based on field test

ZHANG Yong

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

Abstract: By optimizing the operation of the filling and emptying valve of a high-head lock, the berthing conditions of ships in the lock chamber and the flow conditions of the valve section of the water-delivery corridor can be improved. This is an essential technical means to solve the problem that the mooring force exceeds the designed value due to the large size of the ship passing the lock. Combined with the operation status of the filling and emptying valve of a large ship lock through adjusting the opening of the dynamic water closing (opening) valve, the residual head of the dynamic water shutoff valve under different working conditions of the filling and emptying valve operation process and the hydraulic field test, the optimized operation process of the water filling valve with the water filling and discharging time and inertia superelevation (drop) meeting the design and specification requirements is selected. The field test shows that the recommended operation process of the water conveyance valve can effectively improve the berthing conditions of the ship in the lock chamber and the hydraulic conditions of the water conveyance corridor. The maximum mooring force of the ship during bilateral water filling is 39.3% lower than the current working condition. When the miter door is opened, the maximum mooring force of the ship is reduced by nearly 59% compared with the current working condition.

Keywords: large locks ship; hydraulics; prototype observation; valve operation optimization; mooring force

某大型船闸是长江干流的通航枢纽, 也是我国涉足水头超过20 m的大型高水头船闸。为解决高水头船闸输水阀门声振、气蚀以及闸室船舶停

泊条件等水力学问题, 通过建设期间的反复论证和试验, 某大型船闸按照“阀门段浅埋深+阀门后廊道顶板通气”的被动防护理念进行输水系统设

收稿日期: 2023-01-13

作者简介: 张勇(1965—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事船闸通航和港航工程建设技术工作。

计^[1-2]。1981 年船闸投入运行初期, 即出现输水阀门开启过程中产生巨大声振、建筑物振动强烈、输水末期因船舶系缆力过大导致缆绳断裂等问题。通过改造输水阀门门楣补气系统, 采用 $n=0.3$ 开度阀门间歇开启等技术方法, 改善输水廊道水力学条件^[3-4], 保障了船舶正常过闸需求。

2003 年 6 月, 三峡船闸建成通航促进了长江航运的快速发展, 过闸船舶逐步向大型化、标准化发展^[5-7]。经统计, 2021 年船闸额定载质量超过 4 000 t 的过闸船舶数占比近 60%, 6 000 t 以上占比超过了 28%。船舶大型化导致闸室内系缆力远超设计要求, 船闸闸室出现多次系船柱被拉弯、船舶断缆等安全问题^[8]。船闸设施及船舶过闸安

全面临挑战, 亟需优化输水阀门运行工艺, 改善闸室内船舶停泊条件以及输水廊道水力学条件。

1 船闸设计及运行现状

1.1 主要设计运行参数

某大型船闸闸室有效尺寸为 280 m×34 m×5 m, 上游及下游设计通航水位分别为 63.0~66.0 m 及 39.0~54.5 m, 常规最大水头 24.0~25.0 m, 设计最高通航流量 60 000 m³/s。设计代表船型为 4×3 000 t 或 9×1 000 t, 闸室内采用浮式系船柱结构, 设计系缆力 80 kN。输水系统为 3 区段纵横支廊道侧壁出水明沟消能分散输水系统。船闸水力学相关设计指标见表 1。

表 1 船闸水力学相关设计指标

最大水头/m	最大水位变幅/m	阀门孔口(宽×高)/(m×m×个)	阀门型式	阀门最小埋深/m	阀门后廊道体形	通气措施	闸室尺寸(长×宽)/(m×m)	Ω/m^2	ω/m^2
27	上游 4.0 下游 16.0	5.0×5.5×2	反弧门	8.5	充水 1:9.8 顶扩	廊道顶自然通气	280×34	11 000	55.00

注: Ω 为闸室水域面积; ω 为阀门孔口面积。

1.2 阀门现况运行工艺

针对该船闸运行初期出现的声振、气蚀和闸室停泊条件差等问题, 通过水力学与现场测试发现, 当阀门开启开度 $n \geq 0.5$ 时, 输水阀门下游廊道顶板附近存在空化, 根源在于船闸阀门段埋得太浅, 阀门段压力较低, 带来强烈的门楣缝隙和阀门底缘水流空化, 而顶板和门楣通气不良, 未

起到掺气减蚀作用。对于已建船闸, 解决阀门振动和空化问题最经济可行的办法是寻求输水阀门的最佳运行方式。通过该船闸充水阀门门楣通气设施改造以及阀门运行工艺调试, 确定了输水阀门现况运行工艺(表 2), 闸室停泊条件及阀门振动空化问题明显改善。

表 2 船闸现况阀门运行工艺

充水阀门		泄水阀门	
连续开启	未动水关阀	间歇开启	未动水关阀
$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=1.0, T_j=0.0 \text{ min}$	$\Delta H=0.0 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=1.0$	$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=0.3, T_j=1.0 \text{ min}$	$\Delta H=0.0 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=1.0$

注: t_{vk} 为开阀速率; n_j 为开阀间歇开度; T_j 为间歇时间; ΔH 为剩余水头; t_{vg} 为关阀速率; n_d 为关阀等待齐平小开度。

2 工艺优化方法

根据该船闸现况运行方式下的输水水力特性和阀门水动力特性, 结合数模计算及该船闸既有设备提供的运行工艺条件, 选取不同阀门开度、间隔时间以及动水关阀剩余水头等多种工况。其中改善闸室内停泊条件的主要方式是优化动水关阀过程, 降低闸室最大充(泄)水流量和惯性超

(降)值; 改善输水廊道水力学条件的主要方式是优化阀门开启过程, 增加阀门段水压力, 减小廊道空化及地面振动。通过现场水力学测试, 选择输水时间、超灌(泄)水头满足设计及规范要求的阀门运行工艺作为推荐工艺, 进行船闸运行水头的适应性验证, 对比观测现状和推荐工况输水系统的水动力特性和船舶闸室停泊条件。

3 测试方法

现场测试主要仪器包括高精度水位计、水听器、高灵敏度三向振动传感器、油压传感器、单向振动加速度传感器以及电阻应变拉力传感器等。

高精度水位计采用吊装及绑扎方式布置在闸室、工作阀门井以及上下检修门井，用于观测船闸充泄水过程闸室和阀门井的水位变化；水听器采用吊装及绑扎方式布置在船闸工作阀门井及上下检修门井，与高精度水位计布置位置及测点基本一致，用于观测船闸充泄水过程阀门段空化噪声；高灵敏度三向振动传感器采用焊接方式布置在船闸泄水阀门左/右支臂、弧形面板等位置，通

过测量船闸充泄水过程阀门的振动加速度，分析阀门运行特性；油压传感器采用标准接口布置在船闸充泄水阀门液压启闭系统油杆腔(无杆腔及有杆腔)连接在油管上，通过测量油压计算阀门启闭力，分析阀门启闭机运行特性；单向振动加速度传感器布置在下闸首振动较大的地面结构物上，测量船闸泄水过程的结构振动情况；电阻应变拉力传感器布置在船首和船尾的缆绳上，每1根缆绳上串联1个，传感器一端与浮式系船柱端采用 $\phi 20$ mm钢丝绳连接，另一端与船上专用缆绳连接，通过电阻应变拉力测量进行船舶系缆力检测。现场测试仪器布置见图1。

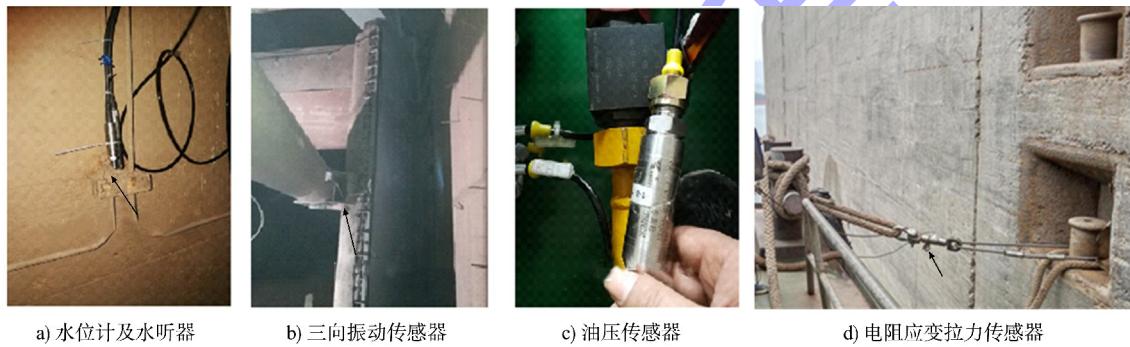


图1 现场测试仪器布置

现场测试共分3个阶段：1) 阀门运行工艺优化阶段的现场测试，主要进行闸室水力特性及阀门井水位监测和分析计算；2) 现况与推荐工艺的水力特征对比监测，主要进行输水系统水下噪声、结构振动以及阀门启闭力监测；3) 闸室停泊条件观测，主要进行船闸充(泄)水以及人字门开启过程中的系缆力监测。

2018年8月—2020年9月，开展了该船闸输水阀门运行工艺优化调试以及水力学现场测试。为保证各物理量的同步采集，建立了现场临时观测站，采用由动态应变仪、电荷放大器、数据采集系统及计算机等组成的测量系统，完成了各传感器信号的采集和分析处理。其中DASP大容量数据采集分析系统完成振动、应变的采集和分析处理；泰斯特采集系统完成高精度水位计及油压传感器的采集和分析处理；水下噪声的监测采用美国尼高力公司研制的ODYSEEV

大容量数据采集分析系统。

4 运行工艺分析

4.1 双边充水阀门运行工艺

2019年3月，开展3组现况工艺的船闸充水水力特性及水动力学特性现场观测，结果表明现况运行工艺下，阀门开启过程中存在较大的廊道空化噪声及地面振动现象，且输水末期惯性超高值较大。为减小惯性超高及地面振动，通过数值模拟计算确定优化方向及措施，选择5种阀门运行工艺进行7组原型监测试验确定阀门运行推荐工艺，开展2组工作水头(20.20、17.97 m)的变水头试验，进行推荐工艺船闸运行水位条件的适应性验证。当船闸双边充水时，现况工艺、优化验证调试运行以及适应性试验的主要水力特征值见表3，现况及推荐工艺充水阀门和人字门运行开度-时间曲线见图2。

表 3 船闸双边充水主要水力特征值

工况	组次	阀门运行方式	T/s	$Q_{\max}/(m^3 \cdot s^{-1})$	$U_{\max}/(m \cdot s^{-1})$	阀门井最低水位		
				z_1	z_2	z_3		
现况工艺	2-SC1	$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=1.0, T_j=0.0 \text{ min};$	620	743	4.16	56.1	50.9	35.3
	2-SC2	$\Delta H=0.0 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=1.0$	608	732	4.10	56.1	51.0	36.2
	2-SC3		617	747	4.18	56.0	50.8	35.2
优化阀门开启过程及动水关阀过程	2-SC4	$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=1.0, T_j=0.0 \text{ min};$ $\Delta H=4.5 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=0.6$	677	730	4.09	55.5	50.8	36.3
	2-SC5	$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=0.4, T_j=1.0 \text{ min};$	692	701	3.93	55.9	52.3	35.9
	2-SC6	$\Delta H=4.2 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=0.6$	723	700	3.92	55.9	52.0	36.0
	2-SC7	$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=0.4, T_j=2.0 \text{ min};$	748	693	3.88	56.5	52.9	34.9
	2-SC8	$\Delta H=4.2 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=0.65$	823	603	3.38	58.0	55.1	35.7
	2-SC9	$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=0.4, T_j=1.0 \text{ min};$ $\Delta H=3.6 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=0.7$	700	702	3.94	56.0	52.1	35.7
变水头试验	2-SC10	$t_{vk}=5 \text{ min}, n_j=0.4, T_j=1.0 \text{ min};$	687	703	3.95	54.9	52.0	35.7
	2-SC11	$\Delta H=3.4 \text{ m}, t_{vg}=7 \text{ min}, n_d=0.7$	645	646	3.62	56.8	53.6	38.7
	2-SC12		631	594	3.33	57.6	55.1	41.7

注: T 为闸室输水时间; Q_{\max} 为闸室输水最大流量; U_{\max} 为闸室水面最大上升速度; z_1 为上检修门井最低水位; z_2 为工作门井最低水位; z_3 为下检修门井最低水位。

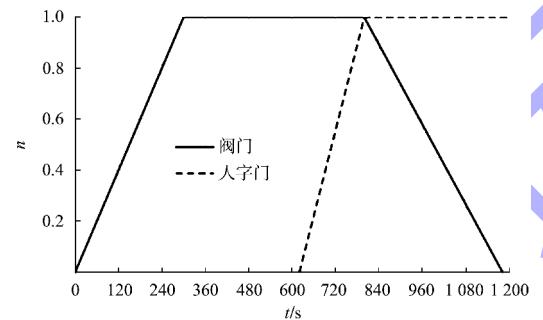
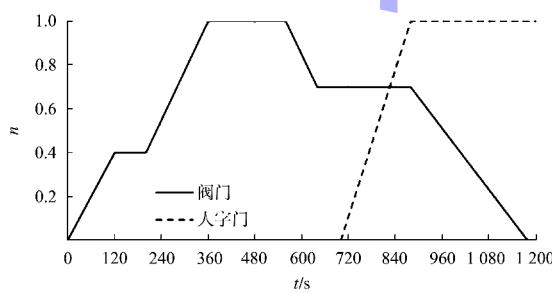
a) 现况工艺($n_j=1.0, T_j=0.0 \text{ min}; \Delta H=0.0 \text{ m}, n_d=1.0$)b) 推荐工艺($n_j=0.4, T_j=1.0 \text{ min}; \Delta H=3.4 \text{ m}, n_d=0.7$)

图 2 船闸充水阀门及人字门运行开度-时间曲线

4.2 双边泄水阀门运行工艺

2019 年 3 月, 开展了 2 组现况工艺的船闸泄水水力特性及水动力特性观测, 结果表明现况工艺下, 阀门开启过程中存在较大的声振现象。选

择 6 种阀门运行工艺进行 8 组原型监测试验确定阀门运行推荐工艺, 开展 2 组不同船闸工作水头 (20, 22, 17, 9.6 m) 的变水头试验, 进行推荐工艺船闸运行水位条件的适应性验证。当船闸双边泄水时, 现况工艺、优化验证调试运行以及适应性试验的主要水力特征值见表 4, 现况及推荐工艺阀门和人字门运行开度-时间曲线见图 3。

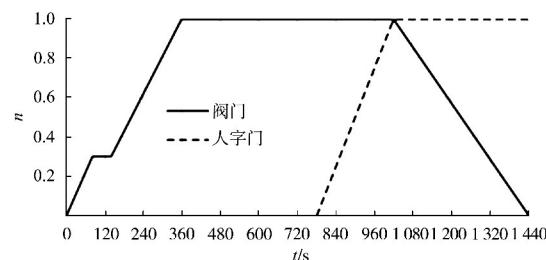
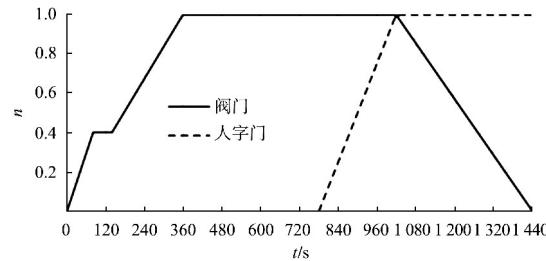
a) 现况工艺($n_j=1.0, T_j=0.0 \text{ min}; \Delta H=0.0 \text{ m}, n_d=1.0$)b) 推荐工艺($n_j=0.4, T_j=1.0 \text{ min}; \Delta H=0.0 \text{ m}, n_d=1.0$)

图 3 船闸泄水阀门及人字门运行开度-时间曲线

表4 船闸双边泄水工况主要水力特征值

工况	组次	阀门运行方式	T/s	$Q_{\max}/$	$U_{\max}/$	阀门井最低水位		
				($m^3 \cdot s^{-1}$)	($m \cdot s^{-1}$)	z_1	z_2	z_3
现况工艺	2-SX1	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.3, T_j = 1.0 \text{ min};$ $\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	801	584	3.27	—	—	35.1
	2-SX2	$\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	802	577	3.23	—	—	35.1
优化阀门开启过程及动水关阀过程	2-SX3	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 1.0 \text{ min};$ $\Delta H = 2.2 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 0.7$	796	571	3.20	—	—	34.2
	2-SX4	$\Delta H = 2.2 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 0.7$	796	573	3.21	—	—	34.8
变水头试验	2-SX5	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 0.5 \text{ min};$ $\Delta H = 2.2 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 0.75$	769	583	3.27	—	—	34.0
	2-SX6	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 2.0 \text{ min};$ $\Delta H = 2.2 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 0.8$	832	547	3.06	—	—	35.3
	2-SX7	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 2.0 \text{ min};$ $\Delta H = 1.8 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 0.8$	830	548	3.07	—	—	35.2
	2-SX8	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 1.0 \text{ min};$	779	577	3.23	—	—	34.6
	2-SX9	$\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	769	575	3.22	—	—	34.6
	2-SX10	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 2.0 \text{ min};$	812	554	3.10	—	—	33.7
	2-SX11	$\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	781	506	2.84	—	—	35.4
	2-SX12	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 1.0 \text{ min};$	746	526	2.94	—	—	35.5
	2-SX13	$\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	705	491	2.75	—	—	34.7

4.3 输水阀门运行工艺优化

通过双边充水及双边泄水阀门优化调试和现场水力学测试, 形成船闸双边运行推荐阀门运行工艺见表5。通过现状和推荐工艺的闸室充水水力特性、输水系统水下噪声特性、结构振动特性、阀门启闭力特性等, 对比观测结果表明: 推荐的双边充水阀门运行工艺除充水时间有所延长(640 s

延长至 700 s, 仍低于 720 s 的设计值)以外, 闸室最大充水流量由 740 m^3/s 降至 700 m^3/s , 惯性超高值由 0.40 m 降至 0.25 m 以下, 输水系统噪声、结构振动及阀门启闭力等运行工艺也有明显改善; 推荐的双边泄水阀门运行工艺泄水时间由 800 s 降至 770 s, 闸室最大泄水流量降低, 输水系统噪声、结构振动及阀门启闭力也有不同程度的改善。

表5 船闸双边运行推荐阀门运行工艺

阀门	工况	阀门运行工艺			输水时间/min
		$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 1.0, T_j = 0.0 \text{ min}$	(连续开启) $\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	(未动水关阀)	
充水阀门	现况工艺	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 1.0, T_j = 0.0 \text{ min}$	(连续开启) $\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	(未动水关阀)	10.3
泄水阀门	推荐工艺	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 1.0 \text{ min}$	(间歇开启) $\Delta H = 3.4 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 0.7$	(动水关阀)	11.7
充水阀门	现况工艺	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.3, T_j = 1.0 \text{ min}$	(间歇开启) $\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	(未动水关阀)	13.3
泄水阀门	推荐工艺	$t_{vk} = 5 \text{ min}, n_j = 0.4, T_j = 1.0 \text{ min}$	(间歇开启) $\Delta H = 0.0 \text{ m}, t_{vg} = 7 \text{ min}, n_d = 1.0$	(未动水关阀)	12.8

5 船舶系缆力对比

2020年7月, 分别进行了阀门运行现况和推荐工艺的船舶系缆力对比观测, 测试船舶尺

度 130 m×16.3 m×4.3 m(长×宽×吃水), 实载货物 6 000 t。系缆力测试结果见表6。

表6 船闸系缆力测试主要指标

编号	船闸阀门运行工艺	水位组合/m	水头/m	流量峰值/($m^3 \cdot s^{-1}$)	系缆力/kN			
					闸室充泄水过程		人字门开门过程	
2-CS1	双边充水(现况)	66.55~52.25	14.30	478	12.1	36.4	72.8	150.5
2-CS2	双边充水(推荐)	66.49~52.62	13.87	447	13.1	22.1	29.3	61.7
2-XS1	双边泄水(现况)	66.42~51.36	15.06	408	0.6	2.4	93.4	75.9
2-XS2	双边泄水(推荐)	66.52~51.26	15.26	407	0.6	0.8	84.5	9.9

通过阀门运行工艺优化研究, 推荐工艺显著改善了闸室内船舶停泊条件, 充(泄)水过程和人字门开启时的船舶最大系缆力低于设计值 80 kN, 船舶最大系缆力明显降低。其中: 双边充水过程中船尾最大系缆力由 36.4 kN 降至 22.1 kN, 降幅达 39.29%; 人字门开启时的船尾系缆力由 150.5 kN 降至 61.7 kN(设计值以下), 降幅达 59%。此次双边泄水人字门开启时, 出现推荐工艺系缆力由 75.9 kN 降至 9.9 kN 的情况, 考虑到船舶系缆力的影响因素较多, 其结果具有一定的偶然性, 综合同期进行的其他 2 座船闸类似工况检测情况, 将该结果作为假值处理。

6 结论

1) 通过水力学现场测试进行输水阀门运行工艺的优化, 采取合适的动水关阀参数以及提前动水关阀工艺, 较好地改善既有船闸输水系统水力学特征和闸室内船舶停泊条件, 有利于保障船闸设施及过闸船舶的安全。

2) 由于水力学现场测试的制约条件较多, 在船闸设计运行条件下难以全面进行水力学监测, 应结合模型试验、数值计算等方法, 系统全面地

分析船闸运行水力学特性, 更好地指导船闸运行工艺的优化调整。

3) 某大型船闸运行期间出现的船闸水力学及闸室停泊条件等问题, 通过工程建设期间优化船闸输水系统设计等方法妥善解决, 此经验已较好地应用于其他项目研究与设计中。

参考文献:

- [1] 董士镛, 宋维邦. 葛洲坝工程丛书-通航建筑物 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [2] 王作高. 船闸设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 邓廷哲, 金峰, 彭爱琳, 等. 葛洲坝船闸水力学问题综合分析 [J]. 人民长江, 2002, 33(2): 41-47.
- [4] 邓廷哲. 葛洲坝船闸水力学原、模型试验比较 [J]. 长江科学院院报, 1993, 10(2): 67-72, 77.
- [5] 齐俊麟. 三峡—葛洲坝船闸通过能力分析及扩能工程对策 [J]. 船海工程, 2019, 48(3): 169-174.
- [6] 杨秋平, 宁涛, 杜立达, 等. 船舶大型化极限问题研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(7): 40-46.
- [7] 唐冠军, 赵洪祥, 甘明玉. 关于长江干线船型标准化的思考 [J]. 水运工程, 2005(1): 38-44.
- [8] 张晨, 王丽铮, 张伟. 基于实船试验的三峡船闸船舶过闸系缆力影响因素 [J]. 水运工程, 2018(11): 11-15, 32.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 118 页)

参考文献:

- [1] 江涛. 大藤峡枢纽运行方式调整对来桂航道方案的影响 [J]. 水运工程, 2022(4): 133-137.
- [2] 中华人民共和国国务院. 铁路安全管理条例 [Z]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2013.
- [3] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [4] 江涛. 来宾至桂平 2000 吨级航道工程通航水位计算与

分析 [J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(9): 260-262.

- [5] 庄爱军, 等. 来宾至桂平 2000 吨级航道工程测量设计高水位文观测 [R]. 南京: 江苏省水文地质工程地质勘察院, 2017.
- [6] 王建中, 王东志, 张永胜, 等. 大藤峡水利枢纽工程初步设计报告 [R]. 长春: 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 2015.

(本文编辑 王传瑜)