



微山三线船闸输水系统优化设计

刘慧芳¹, 禹化强¹, 姜兴良^{1,2,3}

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007; 3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘要: 输水系统是船闸的核心, 其设计方案直接影响船闸通过能力, 是船闸设计的关键参数。针对微山三线船闸输水规模较大、水力指标和输水效率要求较高的问题, 通过比尺 1:30 的物理模型试验, 对各工况及船闸输水系统布置方案下的水力特性、船舶泊稳条件及输水系统的消力设施等进行研究。结果表明, 进水口取消进水格栅, 采用消涡板, 从技术和经济上优化了船闸设计; 出水口消能工布置和下游引航道辅导航墙线型优化使得水流条件得到明显改善。优化方案输水系统布置在闸门开启方式下, 各项水力指标均满足设计和规范要求, 输水系统整体设计是合理可行的。

关键词: 船闸; 集中输水系统; 优化; 模型试验

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0164-07

Optimization design of filling-emptying system for Weishan third-line ship lock

LIU Huifang¹, YU Huaqiang¹, JIANG Xingliang^{1,2,3}

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Research and Development Center on Inland Navigation Construction Technology, CCCC, Beijing 100007, China;

3. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The filling-emptying system, which is a key parameter in lock design is the core of a ship lock, and its design directly affects the lock's carrying capacity. In response to the large-scale filling-emptying, and high requirements for hydraulic indicators and conveyance efficiency of the Weishan third-line ship lock, the hydraulic characteristics, ship berthing stability conditions, and dissipation facilities of the filling-emptying system under various working conditions and layout of the filling-emptying system are studied by a physical model test with a scale of 1:30. The results indicate that the lock design is optimized technically and economically by removal of inlet grilles and the use of vortex plates at the inlet. The arrangement of energy dissipation work at the outlet and the optimization of the navigation wall shape for the downstream approach channel guidance significantly improves the water flow conditions. Under valve opening mode of optimized layout of the filling-emptying system, all hydraulic indexes can meet the requirements of the design and the codes, and the overall design of the filling-emptying system is reasonable and feasible.

Keywords: ship lock; concentrated filling-emptying system; optimization; model test

京杭运河是《国家综合立体交通网布局》确定的“四纵四横两网”高等级航道规划中的一纵向, 是山东省“一纵两横、三干多支”内河航道总体规

划布局的核心。京杭运河山东段全部为Ⅱ级船闸, 其中微山、韩庄船闸双线运行。“十四五”以来, 先后完成了京杭运河济宁段航道“三改二”、湖西

收稿日期: 2024-03-29

作者简介: 刘慧芳 (1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计研究工作。

航道(下级湖)及白马河和梁济运河的航道升级,可以通航2 000吨级船舶。微山船闸是沟通京杭运河济宁至徐州段的第一座通航建筑物,也是京杭运河湖东、湖西航道的咽喉,很大程度上影响着京杭运河山东段的整体通过能力。微山三线船闸工程的建设可以更好地满足腹地经济发展需求。船闸输水系统是船闸结构设计的核心^[1-2]。通常,船闸工程的技术指标主要包括船闸水头、闸室尺寸、充泄水时间及船舶系缆力等^[3]。由于微山三线船闸规模较大,水力指标要求较高,需通过输水系统模型试验加以研究,以满足船闸正常运行、过闸船舶的安全和船闸设计通过能力^[4]。该船闸原方案采用短廊道集中输水系统,为提高闸室利用率、减小镇静段长度,改善引航道水流条件,根据重力相似准则,选择模型几何比尺 $\lambda_L = 30$,建立整体物理模型^[5],对进水口和泄水口的消能工布置及结构形式进行优化研究和实船试验,以

确保过闸船舶及船闸设备的安全^[6-8]。

1 工程概况

微山三线船闸位于京杭运河山东段,地处济宁市微山县内,布置在已建微山二线船闸与二级坝一期泵站之间。微山三线船闸中心线与二线船闸中心线平行,中心线间距180 m,船闸下闸首下游侧与二线船闸下闸首下游侧齐平。工程位置见图1。船闸等级为Ⅱ级,船闸有效尺寸为280 m×34 m×5.5 m(有效长度×有效宽度×槛上水深),最大设计船型为1顶2×2 000吨级船队。承受单向水头,最大设计工作水头为4 m(水位组合35.30 m-31.30 m),常遇水头为2.0 m(水位组合34.30 m-32.30 m)。输水试验研究对于4.0 m水头输水时间应控制在8 min内,对于2.0 m水头输水时间应控制在6 min内,以达到优化结构、提高输水效率、控制输水时间的目的。



图1 微山三线船闸位置

Fig. 1 Location of Weishan third-line ship lock

2 输水系统选择及布置

2.1 输水系统选择

根据JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[9]中的输水类型判别公式:

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

式中: m 为判别系数; T 为输水时间,min; H 为最

大水头,m。对于微山三线船闸4 m和2 m水头, m 值分别为4.00和4.24,大于3.5,应采用集中输水形式。工程实践经验表明,在设计阶段选择输水形式时,除设计水头和输水时间外,还应考虑闸室尺度、船舶泊稳标准、闸墙结构形式、地质条件及闸室初始水深与船舶吃水的比值等因素。结合地基条件及已建周边地区微山一、二线船闸

结构形式，初步推荐采用集中输水形式。

2.2 输水系统布置

集中输水系统输水阀门处廊道断面面积 ω 可按式(2)计算：

$$\omega = \frac{2C\sqrt{H}}{\mu T\sqrt{2g}[1-(1-\alpha)k_v]} \quad (2)$$

式中： C 为闸室水域面积， m^2 ； H 为设计水头， m ； μ 为阀门全开时输水系统的流量系数，取 0.8； T 为闸室灌水时间， s ，取 300~480 s； k_v 为系数，取 0.6； g 为重力加速度， m/s^2 ， α 为系数，根据规范取值。计算求得 $\omega = 34.7 \sim 39.3 m^2$ 。综合考虑

输水时间要求及水流条件，初步确定输水阀门尺寸为 $(2.0 \sim 4.0)m \times 5.0 m$ (宽×高)， ω 取 $40.0 m^2$ 。

上闸首段廊道进水口采用顶面格栅进水方式，廊道进口通过平面转弯与廊道连接。工作阀门布置在廊道进水口平面转弯段后；廊道通过平面转弯与廊道出口连接；转弯段的起点至出口设置隔流墩。上闸首闸室采用复杂消能工形式，上闸首廊道出口的格栅式消能室由消力格栅及消力池组成。下闸首采用侧面进水，门后采用简单消能工形式，出口布置 2 道消力槛。输水系统布置见图 2^[10]，各部位特征尺寸见表 1。

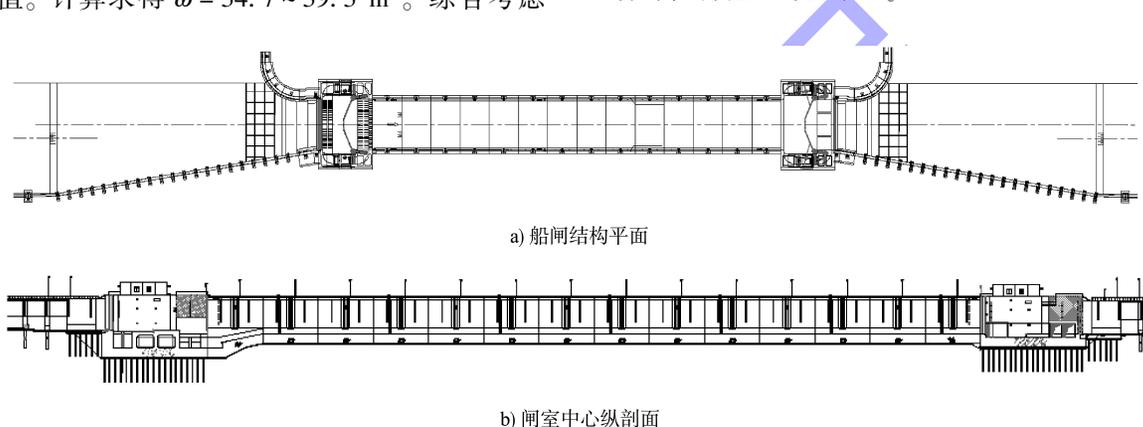


图 2 原方案输水系统布置

Fig. 2 Layout of water filling-emptying system of original plan

表 1 输水系统特征尺寸

Tab. 1 Characteristic dimensions of water filling-emptying system

部位	尺寸	面积/ m^2	与阀门面积比	
上闸首	进水口	顶面格栅进水, 进水孔总宽 5.7 m、总长 19 m; 廊道进水口宽 6.5 m、高 5.0 m, 最小淹没水深 7.0 m	格栅: 108.3 进水口: 65.0	格栅: 2.71 进水口: 1.63
	充水阀门段廊道	进口水平转弯后接着工作阀门, 最小淹没水深 7.0 m	40.0	1.00
	上闸首廊道出口	上闸首廊道出口水平转弯, 出口宽 7.5 m、高 5.0 m, 中间设 0.8 m 宽隔墩, 最小淹没水深 7.0 m	75.0	1.88
上闸首消能工	消能室主要由消力格栅及 2 道倒 L 形消力梁组成。消力格栅顶面和正面出水, 出水总面积 $56.4 m^2$, 消力池下游设置倒 L 形挑槛	格栅顶面: 56.4 格栅正面: 70.0	-	
下闸首	进水口	采用侧面进水口, 进水口宽 7.5 m、高 5.0 m, 最小淹没水深 1.8 m	75.0	1.88
	阀门段	进口水平转弯后接工作阀门, 最小淹没水深 1.8 m	40.0	1.00
	下闸首廊道出口	下闸首廊道出口水平转弯, 出口宽 8.7 m、高 5.0 m, 中间设 0.8 m 宽隔墩, 最小淹没水深 1.8 m	87.0	2.18
	下闸首消能工	出口布置 2 道消力槛, 宽 1.0 m、高 1.3 m	-	-

3 输水系统水力特性试验与方案优化

3.1 闸室输水水力特性

在最不利水位组合运行工况下 (水位组合

35.30 m-31.30 m, 水头 4.00 m), 充、泄水阀门双边匀速开启时, 输水主要特征值见表 2, 阀门开启时间 $t_v = 5 \text{ min}$ 时输水系统水力特征曲线见图 3。

表 2 最不利水位组合下船闸非恒定流水力特性参数

Tab. 2 Unsteady hydrodynamic characteristic parameters of ship lock under the most unfavorable water level combination

阀门开启方式	t_v/min	T/min	最大流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大能量 E_{max}/MW	最大比能 $E_{\text{pl}}/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	闸室最大断面平均流速 $v_{\text{max}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	水位最大变幅/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
双边 充水	4	5.88	194	4.90	22	0.78	1.8
	5	6.29	180	4.00	18	0.70	1.7
	6	6.84	163	3.70	16	0.63	1.5
	7	7.29	149	3.50	15	0.58	1.4
双边 泄水	4	6.06	189	-	-	0.70	1.8
	5	6.56	169	-	-	0.65	1.6
	6	7.11	152	-	-	0.61	1.4
	7	7.57	140	-	-	0.58	1.3

由表 2 可知, 在最大设计工作水头 4.00 m 下, 船闸充、泄水阀门均采用 4~7 min 双边匀速开启时, 闸室平均输水时间在 7.5 min 以内, 均可满足规范 ≤ 8 min 的设计要求。实测水力特征值均符合规范要求, 说明输水系统各部分尺寸布置是合理的。输水系统水力特征曲线见图 3。

在最不利水位组合条件下, 当微山三线船闸阀门双边开启 $t_v = 4 \sim 7$ min, 实测超高值为 0.28~0.14 m, 计算值为 0.12 m; 泄水实测超降值为 -0.25~-0.12 m, 计算值为 -0.10 m。试验表明, 除在 $t_v = 4$ min 工况下, 实测惯性超高、超降值 0.28 m, 略大于规范允许值 0.25 m; 其余各工况下, 实测惯性超高、超降值均小于规范允许值。通过类似船闸的工程经验, 可在实际运行中采用提前关闭充、泄水阀门并在水位齐平时打开人字门的措施解决闸室充泄水水面超高的问题。

常遇水头水位组合条件下, 充、泄水时的实测超高值满足规范要求。

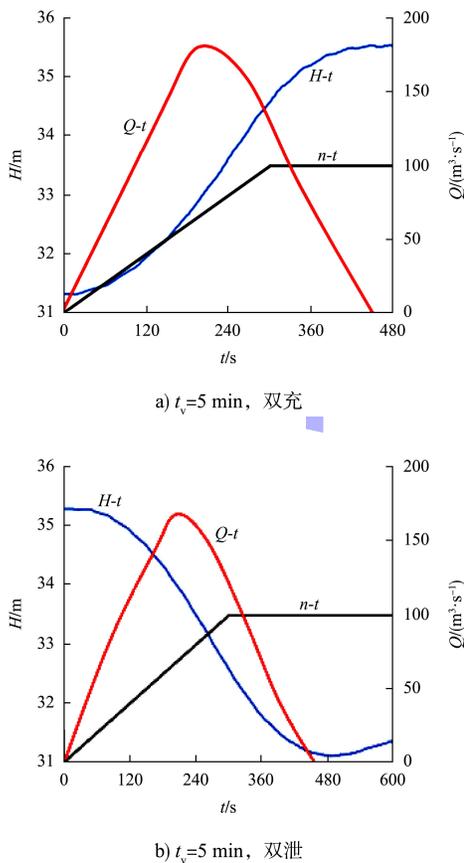
3.2 闸室停泊条件

3.2.1 闸室水流条件

原方案条件下, 上闸首出口消能格栅室顶部出流存在两侧流速大于中间流速的现象, 对顶部格栅进行优化, 适当缩减格栅两侧出水支孔面积, 增大中部出流面积, 优化后该现象明显改善, 沿横向的表面流速分布也更加均匀, 沿纵向所需的均匀扩散长度也有所减小, 分析特征时刻闸室内最大流速值可知, 试验条件下 ($t_v = 4 \sim 7$ min), 闸室内纵向流速在 0.5~0.8 m/s, 横向流速在 0.1 m/s 以内。由此可见, 调整消能格栅室顶部出流比后, 闸室表面流场均匀度和闸室内水流条件均得以改善, 上闸首出口顶部格栅优化达到较好的效果。

3.2.2 船舶系缆力

本工程控制工况为最不利水位组合(水位组合



注: H 为闸室水位, n 为阀门开度, h 为工作门井水位。

图 3 输水系统水力特征曲线

Fig. 3 Hydraulic characteristic curve of water filling-emptying system

35.30 m-31.30 m, 最大设计工作水头 4.00 m) 工况, 对充水过程中 1 000 吨级和 2 000 吨级代表船型进行受力观测, 6 个测点分别位于闸室上段、闸室中段和闸室下段的中部和侧部, 阀门开启方式为双边 $t_v=4\sim 7$ min, 上闸首出口消能格栅优化方案船舶最大系缆力观测值见表 3。

表 3 闸室内船舶最大系缆力
Tab. 3 Maximum mooring force of ships inside lock chamber

船型	停泊方式	船舶停泊位置	t_v / min	最大纵向力/kN	最大前横力/kN	最大后横力/kN	
1 000 吨级 单船	闸室上段		4	25	8	10	
			5	19	9	9	
			6	17	9	9	
			7	13	11	9	
	闸室中段		4	21	10	11	
			5	15	9	10	
			6	15	7	7	
			7	12	7	6	
	闸室下段		4	19	9	10	
			5	18	8	9	
			6	17	8	9	
			7	16	6	8	
	2 000 吨级 单船	闸室上段		4	30	17	15
				5	25	13	14
6				25	11	12	
7				19	10	8	
闸室中段			4	30	8	8	
			5	24	11	7	
			6	24	8	8	
			7	23	8	7	
闸室下段			4	24	10	10	
			5	21	9	7	
			6	16	8	7	
			7	14	7	7	
双船 (侧部)		闸室中段		4	40	9	15
				5	30	9	9
	6			28	7	8	
	7			21	7	5	

由表 3 可知, 在上闸首出口消能格栅优化方案试验工况下, 船闸双边充水过程中闸室内船舶受力均满足规范要求。1 000 吨级代表船舶最大纵

向系缆力约 25 kN, 最大横向系缆力约 11 kN; 2 000 吨级代表船舶最大纵向系缆力约 30 kN, 最大横向系缆力约 17 kN。不同船型系缆力实测最大值增幅与规范限值的增幅相近, 说明两种船型均为控制性船舶。船舶停于闸室上段系缆力最大, 中段次之, 下段最小。

考虑实际中存在并排停船的情况, 补充进行双船试验, 观测 2 条 2 000 吨级船舶并排停于闸室中部时侧部船舶的受力特性。对比可知, 双船条件下, 船舶所受纵向系缆力增幅明显, $t_v=4$ min 双边充水时相对于单船工况增加 10 kN, 达到 40 kN; 横向系缆力也由 8 kN 增至 15 kN。说明双船试验条件下船舶间的相互作用明显, 在试验模拟方式下, 旁侧船舶侵占了闸室有限的过流面积, 导致船舶所受局部水流力及各向水面比降均有所增加, 从而体现为船舶受力明显增大, 但随启门时间的增加, 这一影响程度不断减小, $t_v=7$ min 双边充水工况下, 单船与双船实测船舶受力基本一致。

同时对原方案条件下的船舶系缆力进行测定, 对比原方案与优化上闸首出口消能格栅室方案相同工况时的系缆力过程及极值可知, 通过优化顶部格栅室分流比、适当增加中部出流、减小两侧流量后, 船舶停于闸室中部所受系缆力略有增大, 船舶停于闸室侧部的系缆力略有减小, 变幅在 5 kN 以内, 对船舶停于闸室侧部的停泊条件有所改善。

根据试验结果, 综合考虑通过能力、闸室停泊条件、阀门工作条件及引航道水流条件, 推荐采用阀门双边连续开启 $t_v=5$ min 方式, 相应的船闸充水时间为 6.3 min, 泄水时间为 6.6 min, 平均时间为 6.45 min。

3.3 输水廊道阻力系数和流量系数

通过在输水廊道布置测压点, 测定恒定流下廊道各部位的压力、船闸各部位水位, 计算出输水廊道各区段的阻力系数、廊道总阻力系数和流量系数, 见表 4。由表可知, 船闸采用短廊道集中式输水系统, 输水效率较高。

表 4 输水廊道分段流阻系数
Tab. 4 Segmented flow resistance coefficient of water conveyance corridor

工况	阻力系数					合计	μ
	上游进水口与转弯段	输水阀门段	消能格栅室段	下游进水口与转弯段	下闸首出水口		
双边充水	0.432	0.355	0.761	-	-	1.548	0.804
双边泄水	-	0.382	-	0.505	0.730	1.617	0.786

3.4 进水口水流条件及上引航道通航条件

3.4.1 进水口水流条件

由于输水强度较大, 原方案充水中后期出现强度较大的漏斗型漩涡, 且漩涡由边墙向中部游移, 说明格栅两侧过流面积不足。因此, 从优化格栅布置形式角度考虑方案优化, 3 种进水口优化方案见图 4。原方案为进水口宽 6.5 m, 并在顶部设置消能格栅; 优化方案 1 为进水口宽 8.8 m, 同时取消顶部格栅; 优化方案 2 为进水口宽 8.8 m, 并增加消能格栅; 优化方案 3 为进水口宽 8.8 m, 采用透空型消涡板。

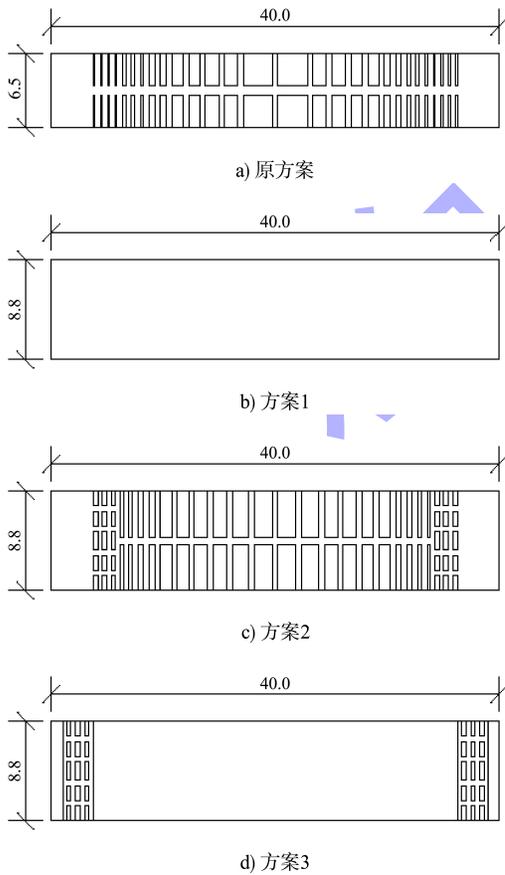


图 4 上游进水口格栅优化方案 (单位: m)

Fig. 4 Modification plan for upstream inlet grille (unit: m)

物理模型试验观测结果表明, 当 $t_v = 5$ min 双边充水时, 方案 1 在门库转角处依然会形成贯穿性漩涡, 但漩涡强度及影响范围较原方案有所改善。采用方案 2 时, 充水过程中的贯穿性漩涡消失, 仅在充水后期出现短期的表面漩涡, 进水口流态明显改善。为进一步缩减工程投资, 将格栅简化为透空型消涡板(方案 3), 贯穿性漩涡不再贯通, 强度也明显降低。方案 2、3 均达到消除贯穿型漩涡的效果, 而方案 3 工程量更小, 比原方案减小混凝土工程量 1 863 m³, 因此推荐方案 3 为进水口实施方案。

3.4.2 上游引航道通航条件

上游引航道较为顺直, 引航道内水流整体分布较为均匀, 充水过程中未出现回流、漩涡等不良流态。试验结果表明, $t_v = 4 \sim 7$ min 双边充水时, 纵向流速小于 0.3 m/s, 横向流速小于 0.1 m/s, 满足规范要求。停泊段最大跌水 0.18 m, 最大塞高 0.08 m, 最大纵向比降小于 0.3%。纵向系缆力小于 16 kN, 横向系缆力小于 12 kN, 停泊段泊稳条件良好。

3.5 泄水口水流条件及下引航道通航条件

由于原方案下引航道采用非对称布置形式, 船闸泄水时水流下泄沿横向分布不均, 泄水后期引航道内逐步形成两个反向的回流区。为改善下引航道内水流扩散不均匀问题, 通过多方案比选, 适当延长左侧辅导航墙(延长长度按 1 倍代表船型长度考虑), 并优化泄水廊道出口消能工布置形式, 以改善下引航道内的水流流态。见图 5。

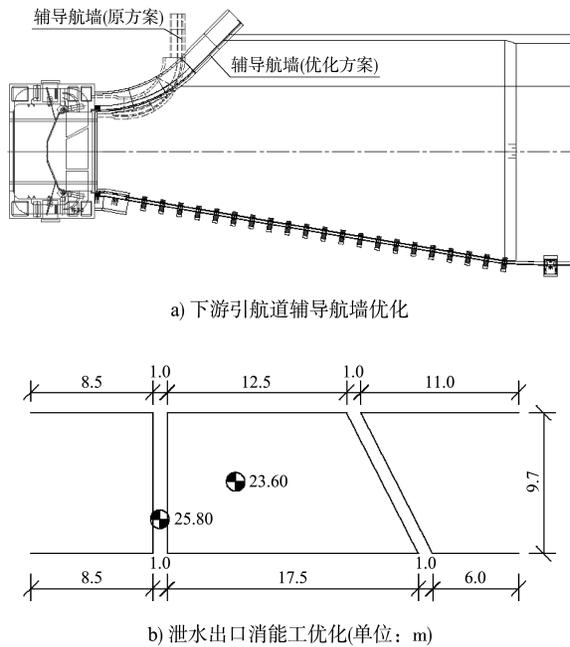


图5 下引航道优化方案

Fig. 5 Optimization plan for downstream approach channel

模型试验结果表明,通过方案优化,泄水口中部的壅高现象略有减缓,下游泄水流出流均匀度明显改善,中部出流流量有所消减。泄水中后期的回流现象基本消失;泄水完成后,由于引航道往复流和引航道导航墙非对称布置的综合作用,在导航墙末端附近仍会形成局部回流,但其强度及范围均明显改善,且未影响下游引航道停泊段。分析特征时刻停泊段最大流速值可知,试验条件下($t_v = 4 \sim 7$ min),下游停泊段内纵向流速小于0.5 m/s,横向流速小于0.1 m/s。由此可见,优化方案泄水过程中下游引航道内的出流不均和回流现象得到明显改善,停泊段流速满足规范要求,泊稳条件良好。

4 结论

1) 船闸推荐双边充水和双边泄水阀门开启时间 $t_v = 5$ min 时,船闸充、泄水时间分别为 6.29、6.56 min,船闸输水总时间满足设计要求。

2) 设计船舶在最大设计工作水头 4.00 m(控制工况)下,微山三线船闸闸室内船舶受力均满足规范要求。

3) 船闸进水口宽度修改为 8.8 m,两侧增加透空型消涡板后,可达到消除贯穿性漩涡的效果,且上闸首混凝土工程量减少 1 863 m³,从技术和经济上优化了船闸设计。

4) 船闸下引航道采用“适当延长左侧导航墙+优化泄水廊道出口消能工布置形式”的优化方案,泄水过程中明显改善了下引航道内的出流不均和回流现象,有效优化了下游引航道停泊条件。

参考文献:

- [1] 吴澎,宣国祥. 船闸设计的新进展[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 122-127.
- [2] 王仕民,江耀祖,吴英卓,等. 超高水头大型船闸输水系统研究[J]. 人民长江, 2017, 48(24): 75-79, 100.
- [3] 黄国勋,乔华倩. 船闸输水系统发展及研究进展[J]. 中国水运(下半月), 2022(11): 74-76.
- [4] 张震,王勤振. 某枢纽船闸输水系统水力学模型试验[J]. 水运工程, 2022(4): 111-115, 132.
- [5] 重庆西科水运工程咨询有限公司. 京杭运河微山三线船闸输水系统水力学物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西科水运工程咨询有限公司, 2024.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 于钦民,张顺顺,罗少桢. 江西省新干航电枢纽船闸输水系统研究[J]. 水运工程, 2013(5): 94-99.
- [9] 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.
- [10] 中交水运规划设计院有限公司. 京杭运河微山三线船闸工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2019.

(本文编辑 王传瑜)