



# 某枢纽省水船闸输水系统水力学模型试验

韩莹莹, 刘海民, 张丽媛, 钱黎辉

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 某枢纽船闸所处航道沿线水资源匮乏, 且船闸一次输水过程耗水量大, 船闸需带省水功能。根据船闸最大工作水头及闸址地形条件, 提出采用带 1 个省水池的短廊道集中输水系统布置方案。为解决省水船闸设计中的输水系统布置的水力学关键技术难题, 通过采用 1:30 物理模型, 对船闸非省水运行和省水运行时的输水系统水力特性、船舶(队)停泊条件进行了试验研究。结果表明: 采用的输水系统布置合理可行, 各项输水水力指标满足规范和设计要求。

**关键词:** 省水船闸; 输水系统; 水力学特性; 模型试验

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0121-06

## Hydraulic model test of filling and emptying system for a water-saving ship lock

HAN Yingying, LIU Haimin, ZHANG Liyuan, QIAN Lihui

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

**Abstract:** Due to the channel that a ship lock located is lack of water resources, and the water consumption of one filling and emptying process is large, the ship lock should have water-saving function. According to the maximum difference between water level and the topographic conditions of the lock site, we propose a short-culvert filling and emptying system with a water-saving pool. To solve the key hydraulic problems of the filling and emptying system layout during the design of water-saving ship lock, we test the hydraulic characteristics and berthing conditions during lock filling and emptying with non-water-saving and water-saving operations by lock physical model with a scale of 1:30. The results show that the layout of the filling and emptying system is reasonable and feasible, and the hydraulic characteristics meet the specifications and design requirements.

**Keywords:** water-saving ship lock; filling and emptying system; hydraulic characteristics; model test

本文研究的航道现状等级低, 通航水位难以保证, 修建枢纽船闸对航道全线航运梯级开发起到重要作用。该枢纽级别为Ⅱ级<sup>[1]</sup>, 省水船闸有效尺度为 280 m×34 m×5 m(长×宽×槛上水深), 设计代表船型分别为 1 000 吨级单船和 2×1 000 吨级顶推船队, 设计水头 5.4 m。由于沿线水资源比较匮乏, 而该船闸工作一次输水过程耗水量达 5.5 万 m<sup>3</sup>, 为减少航运用水量, 该船闸需带有省水功能。省水船闸的输水系统布置及水力学问题是船闸

设计中的关键技术难题, 需通过输水系统水力学模型试验为省水船闸输水系统设计、船闸运行方式等提供依据, 以确保船闸运行及过闸船舶的安全。

### 1 省水船闸省水效果

根据省水船闸原理, 省水船闸灌泄水过程的省水量取决于省水池的数量和大小。单个省水池的省水率计算公式为<sup>[2]</sup>:

收稿日期: 2022-06-24

作者简介: 韩莹莹 (1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道及海岸工程设计。

$$E_w = \frac{1}{A_1/A_2 + 2} \quad (1)$$

式中:  $E_w$  为每次过闸的省水率;  $A_1$  为闸室面积;  $A_2$  为省水池面积。由式(1)可以看出, 在单级省水池与闸室之间无剩余水头情况下, 可达到的省水率与省水池数量及省水池与闸室的面积比密切相关。省水池的建造费用主要取决于其面积的大小, 因此大多数已建船闸都选用与闸室面积大致相等的省水池面积, 故该省水船闸的最大省水率  $E_w$  为 33.3%。该枢纽船闸采用带 1 个省水池的布置方案, 省水池平面面积与船闸闸室水域面积一致。在最大设计水头 5.4 m 下非省水运行, 船闸一次过闸耗水量为 5.50 万  $\text{m}^3$ ; 省水运行下, 船闸一次过闸的省水量为 1.83 万  $\text{m}^3$ 。

## 2 省水船闸输水系统的布置选型

### 2.1 闸首输水系统布置

#### 2.1.1 输水系统形式

依据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》(简称“规范”)中输水系统类型的判别公式<sup>[3]</sup>:

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} \quad (2)$$

式中:  $m$  为判别系数, 当  $m > 3.5$  时采用集中输水系统, 当  $m < 2.5$  时采用分散输水系统, 当  $m$  在 2.5~3.5 时应进行技术经济论证, 参照类似工程选用;  $T$  为输水时间, 在 8~10 min;  $H$  为水头。计算可得  $m = 4.3$ , 大于 3.5, 可采用闸首短廊道集中输水系统。

#### 2.1.2 输水系统各部位尺寸及布置

1) 输水阀门段廊道断面面积根据规范, 按下式计算:

$$\omega = \frac{2C\sqrt{H}}{\mu T \sqrt{2g} [1 - (1-\alpha)k_v]} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为输水阀门处廊道断面面积( $\text{m}^2$ ), 结合闸首结构布置, 确定闸首输水阀门处廊道断面尺寸  $\omega = 40.0 \text{ m}^2$ ;  $C$  为计算闸室水域面积( $\text{m}^2$ );  $H$  为设计水头(m), 取  $H = 5.4 \text{ m}$ ;  $\mu$  为阀门全开时

输水系统的流量系数, 取  $\mu = 0.8$ ;  $T$  为闸室灌水时间(s), 取  $T = 480 \text{ s}$ ;  $\alpha$  为与阀门有关的系数, 查表得  $\alpha = 0.53$ ;  $k_v$  为输水阀门开启时间与闸室灌水时间的比值, 取 0.72;  $g$  为重力加速度( $\text{m/s}^2$ )。

2) 上闸首进水口采用槛上多支孔的布置形式, 槛顶共布置 44 个进水支孔, 支孔总面积为  $125.4 \text{ m}^2$ 。进水口槛顶高程取 3.7 m, 槛顶水深 5.0 m。出水口采用格栅消能室的布置形式, 消能室淹没水深 2.0 m, 顶部出水支孔为 4 组×11 个(尺寸均为  $3.0 \text{ m} \times 0.22 \text{ m}$ ), 正面出水支孔为 2 组×11 个(尺寸均为  $4.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ )。

3) 下闸首进水口采用门库内侧向进水口的布置形式。每侧闸墙各布置 1 个进水孔, 尺寸均为  $7.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ (长×高), 进水口顶高程取 1.7 m, 槛顶最小水深为 2.5 m。出水口采用设置消力坎的简单消能工布置形式, 消能室底高程为 -3.3 m, 出水口顶高程为 1.7 m, 出水口最小淹没水深为 2.5 m。

### 2.2 省水池输水系统布置

采用带 1 个省水池的布置方案省水运行时<sup>[4]</sup>, 将工作水头分为 3 级, 在最大设计水头工况下每一级的工作水头均为 1.8 m, 在上游最低通航水位工况下每一级的工作水头均为 1.5 m。省水池平面面积与船闸闸室水域面积一致, 平面尺度为  $280 \text{ m} \times 34 \text{ m}$ (长×宽)。综合考虑船闸运行后维护的便捷性, 取连接廊道输水阀门处廊道尺寸与闸首廊道一致, 即  $\omega = 40.0 \text{ m}^2$ 。

省水池输水系统与上、下闸首短廊道输水系统均采用平交连接方式, 廊道交汇处采用弧线修圆连接方式。上闸首汇合廊道与格栅消能室连接处设置一挑流坎, 以避免省水池向闸室输水时水流集中在正面。下闸首进水口外门库内设置 3 道消力坎, 以避免省水池向闸室输水时出流不均匀。

省水池底部上、下游侧分别布置 1 个进(出)水口与连接廊道相连, 进(出)水口尺寸均为  $20 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ (长×宽), 进水口顶部四面修圆, 底部与连接廊道连接处亦做修圆处理。省水船闸特征尺寸见表 1, 输水系统布置见图 1。

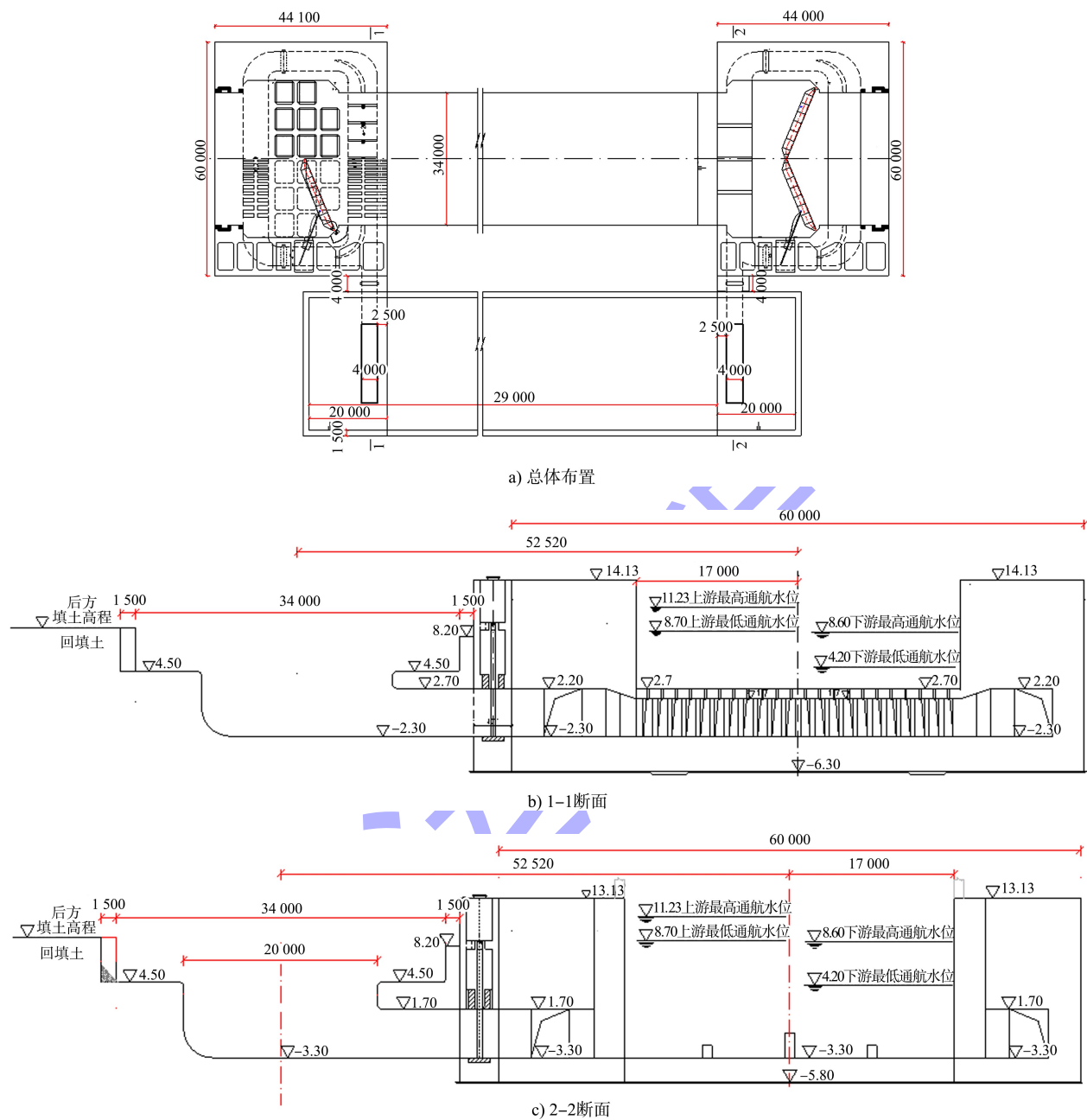


图 1 省水船闸输水系统布置 (高程: m; 尺寸: mm)

表 1 省水船闸输水系统设计方案特征尺寸

上闸首			下闸首		
部位	面积/m <sup>2</sup>	与输水阀门面积比	部位	面积/m <sup>2</sup>	与输水阀门面积比
进水口	125.4	3.14	进水口	75.0	1.88
输水阀门段廊道和省水池阀门段连接廊道	40.0	1.00	输水阀门段廊道和省水池阀门段连接廊道	40.0	1.00
出水口	顶面: 29.0 正面: 88.0	2.93	出水口	75.0	1.88
			省水池 进(出)水口	160.0	4.00

3 输水系统水力特性试验与成果分析

船闸水力学模型的范围包括上游引航道、船闸和省水池闸室、输水系统 (包括进水口、上闸

首、下闸首、泄水出水段) 以及下游引航道。依据省水船闸结构和输水系统布置进行模型制作 (图 2)。模型按重力相似设计, 比尺为 1:30。

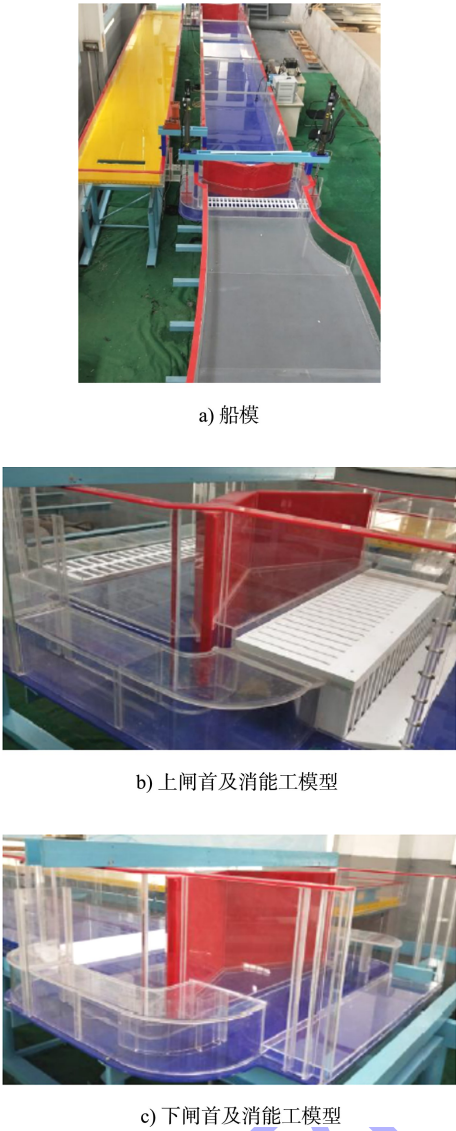


图 2 省水船闸水力学模型

3.1 非省水运行输水水力特性

在最大设计水头 5.4 m 下非省水运行<sup>[5]</sup>，充、泄水阀门双边匀速开启时，闸室输水时间、最大流量、惯性超高(降)等主要水力特性值见表 2，对应的闸室水位、流量变化过程线如图 3、4 所示。

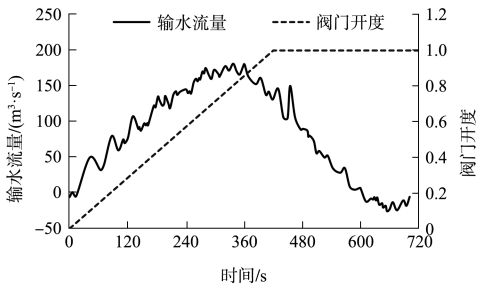
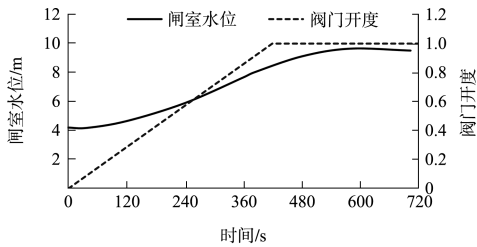


图 3 非省水运行闸室开启  $t_v = 7\text{ min}$  充水水力特性曲线

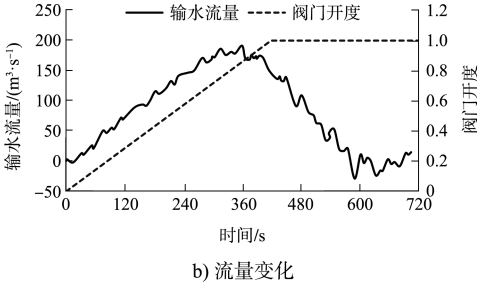
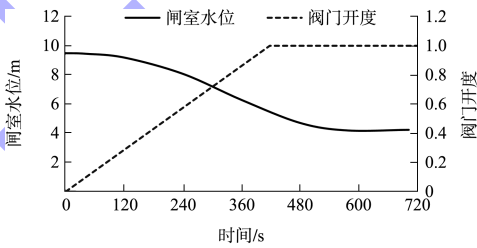


图 4 非省水运行闸室开启  $t_v = 7\text{ min}$  泄水水力特性曲线

表 2 船闸非省水运行时闸室输水水力特征值

输水方式	水头/m	阀门开启时间 $t_v/\text{min}$	闸室输水时间 $T/\text{min}$	最大流量 $Q_{\text{max}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	闸室水面最大上升(下降)速度 $u_{\text{max}}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	最大流速 $v_{\text{max}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	断面最大平均流速 $v_{\text{imax}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
充水	5.4	6	8.81	193.88	0.99	4.85	1.55
		7	9.33	183.01	0.93	4.58	1.46
		8	9.82	170.93	0.86	4.27	1.36
泄水	5.4	6	7.82	220.42	1.07	5.51	2.94
		7	8.32	192.14	0.98	4.80	2.56
		8	8.81	176.44	0.91	4.41	2.35

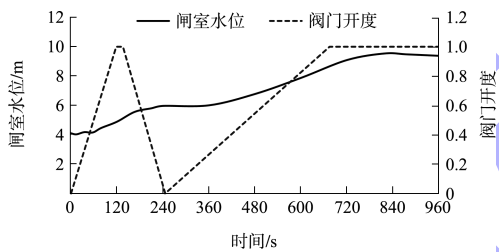
通过模型试验, 由图表分析可知, 在最大设计水头工况下, 充、泄水时阀门开启时间控制在 7 min 左右, 计算所得的闸室输水时间为 9.33 min, 阀门段廊道断面最大流速为 4.41 m/s, 闸室断面最大平均流速为 2.56 m/s, 所有的水力特征指标均满足规范和设计要求<sup>[6]</sup>。

3.2 省水运行输水水力特性

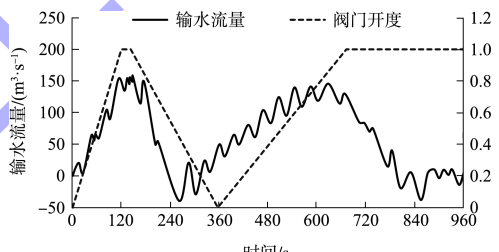
在最大设计水头 5.4 m 和上游最低通航水位工况下省水运行, 闸室输水时间、最大流量、闸室水位最大上升速度等主要水力特性值见表 3。

表 3 船闸省水运行时闸室输水水力特征值

输水方式	阀门开启时间 $t_{v1}/\text{min}$	省水阀门开启时间 $t_{v2}/\text{min}$	省水阀门全开后停留时间 $t_{v3}/\text{min}$	省水阀门关闭时间 $t_{v4}/\text{min}$	闸室输水时间 $T/\text{min}$	最大流量 $Q_{\max}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	闸室水面最大上升(下降)速度 $u_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	闸室水面平均上升(下降)速度 $u_a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	惯性超高(降) $d/\text{m}$
充水	7	2.5	0.25	2	12.97	196.76	0.85	0.42	0.13
泄水	7	2.5	0.25	2	12.10	162.43	0.79	0.45	-0.14

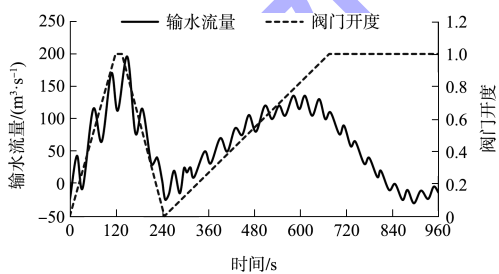


a) 水位变化



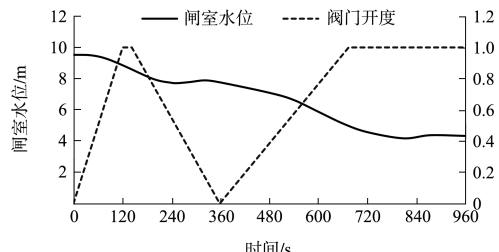
b) 流量变化

图 6 省水运行泄水水力特性



b) 流量变化

图 5 省水运行充水水力特性曲线



a) 水位变化

对应的闸室水位变化过程线、流量变化过程线如图 5、6 所示。

通过模型试验, 由图表结果分析可知, 在最大设计水头工况 5.4 m 和上游最低通航水位工况下省水运行充水时, 只要充泄水阀门开启时间控制在 7 min、省水阀门开启时间 2.5 min、全开后停 0.25 min、省水阀门关闭时间 2 min, 则船闸省水运行的输水时间能控制在 13 min 以内, 闸室水面最大平均流速为 0.45 m/s, 所有的水力特征指标均满足规范和设计要求。

3.3 闸室船舶停泊条件

闸室船舶(队)停泊条件试验工况按最大设计水头 5.4 m 和上游最低通航水位工况下运行状态考虑; 试验船舶(队)采用设计船型中 1 000 吨级单船和 1 顶 2×1 000 吨级船队, 试验测得的船舶停泊条件特征值见表 4。

船闸非省水运行时, 输水阀门开启时间采用满足输水时间要求的 6~8 min, 试验测得船舶(队)位于闸室左侧时所受纵向和横向系缆力较大。由表 4 可知, 设计船舶(队)的最大纵向系缆力分别为 23.48、20.04、17.21 kN, 最大横向系缆力分别为 16.03、15.86、14.04 kN, 设计船舶(队)最大纵向系缆力小于规范允许值 32 kN, 横向系缆力基本小于规范允许值 16 kN。



表 4 闸室内船舶(队)停泊条件特征值

运行方式	船型	阀门开启时间/min	停泊位置		最大纵向系缆力/kN	最大前横向系缆力/kN	最大后横向系缆力/kN
非省水运行	1 顶 2×1 000 t 船队	7	左侧		20.04	-15.68	15.86
		7	中间		19.01	15.54	14.95
		7	右侧		19.31	15.80	-11.25
		6	左侧		-23.23	15.59	16.03
		8	左侧		17.21	-14.04	10.82
	1 000 t 单船	6	左侧		-23.48	16.22	-14.35
		7	左侧		-15.20	14.53	-12.76
		8	左侧		-15.00	13.97	-12.63
省水运行	1 顶 2×1 000 t 船队	-	左侧		18.97	15.10	14.94
			上半闸室	中间	16.56	-15.76	13.38
				右侧	-18.39	14.04	8.78
	1 000 t 单船	-	上半闸室	左侧	-17.01	10.25	-10.86
				左侧	-25.91	12.19	-10.16
	1 顶 2×1 000 t 船队	-	下半闸室	中间	-25.16	-15.82	-14.20
				右侧	-19.94	-15.37	14.52
	1 000 t 单船	-	下半闸室	中间	-25.35	15.73	15.27

注：纵向系缆力方向向下游为正，向上游为负；前横向系缆力方向向左为正，向右为负；最大后横向系缆力方向向右为正，向左为负。

船闸省水运行时，采用充水阀门开启时间  $t_{v1}=7\text{ min}$ 、省水阀门开启时间  $t_{v2}=2.5\text{ min}$ 、省水阀门全开后停留时间  $t_{v3}=0.25\text{ min}$ 、省水阀门关闭时间  $t_{v4}=2\text{ min}$ 。由表 4 可知，当船舶(队)停在上半闸室段时，试验测得船队位于闸室左侧时所受纵向和横向系缆力较大，在最大设计水头和上游最低通航水位工况下最大纵向系缆力为 18.79 kN，最大横向力为 15.76 kN；当船舶(队)停在下半闸室位置时，试验测得当船队位于闸室中间时所受纵向和横向系缆力较大，在最大设计水头和上游最低通航水位工况下最大纵向系缆力为 25.91 kN，最大横向系缆力为 15.82 kN，设计船舶系缆力均满足规范要求。

4 结论

1) 船闸非省水运行状态充水和泄水阀门开门速度  $t_v=7\text{ min}$  时，船闸充、泄水时间分别为 9.33、8.32 min，船闸输水总时间满足设计要求。

2) 船闸省水运行状态时，充水和泄水阀门 7 min 开启、省水池阀门 2.5 min 开启（停留 0.25 min 后 2 min 关闭）时，船闸充水和泄水时

间分别为 12.97、12.10 min，满足设计要求。

3) 设计船舶(队)在最大设计水头 5.4 m 和上游最低通航水位工况下，在船闸非省水运行和省水运行时船舶系缆力均能够满足规范要求。

参考文献：

[1] 中交水运规划设计院有限公司. 小清河复航工程(滨州段)初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2017.

[2] 陈莹颖, 李中华, 许铎. 小清河金牛湖省水船闸输水系统布置及水力学计算[J]. 水运工程, 2020(1): 63-69.

[3] 南京水利科学研究院. 船闸输水系统设计规范: JTS 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[4] 何良德, 戈国庆, 杨晓松, 等. 金家堰省水船闸互通式短廊道输水系统计算[J]. 水运工程, 2021(2): 64-70, 88.

[5] 南京水利科学研究院. 小清河省水船闸水利学关键问题研究: 金家堰省水船闸输水系统布置、水力计算和物理模型试验[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2018.

[6] 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.

(本文编辑 王传瑜)