



山区省水船闸输水系统水力学研究^{*}

刘本芹¹, 杨 锦², 黄 岳¹, 汪 磊²

(1. 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;
2. 百色枢纽通航投资有限公司, 广西百色 533099)

摘要: 与运河省水船闸不同, 山区航电枢纽省水船闸具有通航水位变幅大、两岸地形复杂等特点, 在省水池布置、水位分级和船闸运行方式等方面均面临一些难题。针对山区通航建筑物与枢纽分开布置的工程, 研究省水船闸布置方法, 充分利用地形条件将高、低省水池分别设置在船闸两侧。针对上游通航水位变幅大的特点, 确定船闸采用省水和非省水两种运行方式, 两种方式的上游临界水位为 214.0 m。在此条件下, 计算分析船闸水位分级, 确定省水池高程, 提出省水船闸输水系统布置。通过物理模型试验, 得到省水船闸不同运行方式下的输水水力特征指标、输水廊道压力及闸室船舶停泊条件, 并给出各部位输水阀门推荐的启闭方式。结果表明, 提出的省水船闸方案在水力学上是合理可行的。

关键词: 山区省水船闸; 水位分级; 输水系统; 运行方式

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0114-06

Hydraulics of filling and emptying system of water-saving ship lock in mountainous rivers

LIU Benqin¹, YANG Jin², HUANG Yue¹, WANG Lei²

(1. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Baise Hydro Project Navigation Investment Co., Ltd., Baise 533099, China)

Abstract: Unlike the water-saving ship locks on canals, the water-saving ship lock of the navigation-power junction in mountainous areas has a large variation of navigable water level and complex terrains on both banks. It faces some difficulties in the layout of water-saving basins, water level classification, and operation mode of the ship lock. For the project in the mountainous area with the navigation structures and the hub separately arranged, this paper studies the layout scheme of the water-saving ship lock. A high water-saving basin and a low one are set on both sides of the ship lock respectively to make full use of the topographic conditions of the project. Given the large variation of upstream navigable water level, it is determined that the ship lock adopts two operation modes of water-saving and non-water-saving, and the upstream critical water level is 214.0 m. In these conditions, the water level classification of the ship lock is calculated and analyzed to determine the elevations of the water-saving basins, and the layout of the filling and emptying system of the water-saving ship lock is put forward. The hydraulic characteristic indexes, the pressures of the culverts near the valves, and the ship berthing conditions in the lock chamber of the ship lock under different operation modes are obtained through the physical model test. Furthermore, the opening and closing modes of the valves are recommended. The results show that the proposed scheme of the water-saving ship lock is reasonable and feasible in hydraulics.

Keywords: water-saving ship lock in mountainous river; water level classification; filling and emptying system; operation mode

收稿日期: 2022-08-09

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402001)

作者简介: 刘本芹 (1977—), 女, 教授级高工, 从事通航建筑物水力学研究。

1 工程概述

山区河流航电枢纽上、下游水位落差大, 通航船闸水头高, 为了节省船闸用水量, 同时便于解决高水头船闸的水力学问题, 近年来省水船闸在山区航电枢纽上得到了一些研究与应用^[1-3]。与运河省水船闸不同, 山区河流省水船闸具有通航水位变幅大、两岸地形复杂等特点, 在省水池布置、水位分级和船闸运行方式等方面均面临一些难题。

本文研究的工程条件为: 山区航电枢纽通航建筑物与枢纽主体建筑物分开布置, 船闸设计最大水头为 25.0 m, 省水运行时上游通航水位变幅为 14.0 m, 船闸有效尺度为 120 m×12.0 m×4.5 m(长×宽×门槛水深), 设计通航船型为 2×500 吨级船队, 兼顾 1 000 吨级单船。该省水船闸具有以下工程特点: 1) 运行水头高, 属于高水头船闸; 2) 省水运行上游通航水位变幅大, 变幅范围高达设计最大水头的 56%; 3) 通航线路地形复杂, 两岸多为高山; 4) 省水船闸下游布置了中间渠道, 船闸泄水运行受中间渠道水流条件限制。

2 省水池布置与水位计算

2.1 省水船闸运行方案

本工程水库正常蓄水位 228.0 m、汛限水位 214.0 m、死水位 203.0 m, 船闸是为适应上游水位变幅而建设的。船闸下游中间渠道的最低通航水位为 203.0 m, 为了降低船闸工作水头、减小船闸向中间渠道的泄水量, 进而有利于中间渠道水位波动条件满足要求, 船闸采用省水船闸建设方案。省水船闸设计运行方式为: 上游水位在 214.0~228.0 m 时, 采用省水运行方式; 上游水位为汛限水位 214.0 m 或以下时, 采用非省水运行方式。

2.2 省水池布置方案

结合工程布置条件、船闸尺度规模、运行水头、运行方式及通过能力要求, 经分析计算, 确定船闸设置两级省水池。船闸闸址处地形特征为

中间低、两岸高, 为充分利用工程地形条件, 并减少开挖及回填量, 研究提出省水池采用分散式布置形式, 将高、低省水池分别布置于闸室左、右两侧, 矩形断面省水池的水域面积与闸室水域面积之比为 1.8:1^[4]。

2.3 省水池特征水位

近年来, 国内学者曾针对省水船闸水位分级开展了相应的基础研究^[5-6], 在省水池级数与面积确定后, 通过建立省水船闸水位分级数学模型, 可计算得到省水池的特征水位。由本工程船闸设计运行方式可知, 省水运行时的上游水位变幅仍达 14.0 m, 因此在上游不同水位条件下, 对应的省水池内的高、低水位差别较大。不同水位组合工况船闸与省水池输水时的始末特征水位计算结果见表 1, 省水池底高程在最低水位基础上降低 1.0 m, 预留一定初始水深。

表 1 充水和泄水过程的始末特征水位

过程	上游 水位/m	下游 水位/m	H_{pb}/m	H_{eb}/m	H_e/m
低池向闸室 充水	228.00	203.00	213.94	203.00	210.03
	226.00	203.00	213.06	203.00	209.47
	224.00	203.00	212.19	203.00	208.91
	222.00	203.00	211.31	203.00	208.34
	220.00	203.00	210.44	203.00	207.78
	218.00	203.00	209.56	203.00	207.22
	216.00	203.00	208.69	203.00	206.66
	214.00	203.00	207.81	203.00	206.09
高池向闸室 充水	228.00	203.00	220.97	210.03	217.06
	226.00	203.00	219.53	209.47	215.94
	224.00	203.00	218.09	208.91	214.81
	222.00	203.00	216.66	208.34	213.69
	220.00	203.00	215.22	207.78	212.56
	218.00	203.00	213.78	207.22	211.44
	216.00	203.00	212.34	206.66	210.31
	214.00	203.00	210.91	206.09	209.19
闸室向高池 泄水	228.00	203.00	217.06	228.00	220.97
	226.00	203.00	215.94	226.00	219.53
	224.00	203.00	214.81	224.00	218.09
	222.00	203.00	213.69	222.00	216.66
	220.00	203.00	212.56	220.00	215.22
	218.00	203.00	211.44	218.00	213.78
	216.00	203.00	210.31	216.00	212.34
	214.00	203.00	209.19	214.00	210.91

续表1

过程	上游 水位/m	下游 水位/m	H_{pb}/m	H_{cb}/m	H_e/m
闸室向低池泄水	228.00	203.00	210.03	220.97	213.94
	226.00	203.00	209.47	219.53	213.06
	224.00	203.00	208.91	218.09	212.19
	222.00	203.00	208.34	216.66	211.31
	220.00	203.00	207.78	215.22	210.44
	218.00	203.00	207.22	213.78	209.56
	216.00	203.00	206.66	212.34	208.69
	214.00	203.00	206.09	210.91	207.81

注: H_{pb} 、 H_{cb} 、 H_e 分别为省水池初始水位、闸室初始水位、输水结束齐平水位。

3 输水系统设计布置

3.1 输水系统形式选择

对于省水运行方式,设计最大水头 25.0 m 条件下,根据水位分级与特征水位计算结果可知,闸室与省水池或上下游之间每级输水过程的初始工作水头均为 10.94 m,设计总输水时间为 16 min,其中闸室与上游或下游之间的输水时间以 6~7 min 为控制条件,按照 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[7]的输水系统类型选择公式,计算得出判别系数 m 为 1.82~2.11。对于非省水运行方式,最大运行水头为 11.0 m,设计输水时间为 8 min,计算得出判别系数 m 为 2.41。

根据输水系统选型判别系数计算结果,不论是高水头省水运行方式还是中低水头非省水运行方式,均应选择分散输水系统形式。结合闸室结构设计形式及水力指标,综合分析后选择闸底长廊道侧支孔输水系统形式。

3.2 输水系统布置

计算确定上、下闸首输水阀门处廊道断面尺寸为 2.0 m×3.0 m(宽×高),双边廊道断面总面积为 12.0 m²。闸室中部廊道两侧分别布置两支与省水池连接的输水廊道,为了节省输水时间,同时便于船闸建成后的运行管理与维护,闸室与省水池之间的输水廊道控制断面与闸首廊道取相同的尺寸,每个省水池 2 支输水廊道的控制断面总面积为 12.0 m²。

闸首两侧输水阀门后廊道进入闸首后汇合成 1 支廊道,布置于闸室底部。为了增大输水系统流量系数,将闸底廊道断面尺寸增大为 5.2 m×3.0 m(宽×高),断面面积为 15.6 m²。同时为了减小闸室底板厚度,采用侧支孔出水明沟消能方式。闸底廊道出水段每侧设 22 个出水孔,孔口尺寸为 0.40 m×0.90 m(宽×高),总面积为 15.84 m²。为了保证出水孔水流平顺并减小出水支孔的形状阻力,分析确定出水孔长度为 1.2 m,出水孔进、出口两端均三面修圆,修圆半径 0.25 m。相邻出水孔中心间距为 4.0 m,闸室出水段总长为 88.0 m,占闸室有效长度的 67.7%。

出水孔外侧沿闸室长度方向布置消能明沟,计算确定明沟宽度为 2.2 m,挡墙高度为 3.0 m。为使水流导向闸室中部,明沟上部按 1:1 坡度向闸室中心倾斜。

上闸首廊道进水口采用闸墙垂直多支孔布置,每侧廊道布置 3 个进水孔,计算确定单个进水孔尺寸为 3.0 m×3.0 m(宽×高),双边进水口总面积为 54.0 m²。进水口顶高程为 201.8 m,上游水位在 214.0~228.0 m 时,进水口顶部的淹没水深均满足规范要求。

考虑到本工程船闸下游连接中间渠道,为了减小因船闸泄水非恒定流引起的下游引航道及中间渠道水位波动,提出了出水口创新布置形式,即:下闸首左侧输水廊道出水口布置在下闸首,右侧输水廊道出水口布置在下游引航道内,两个出水口间距 60.0 m。出水口形式均为消能室顶支孔出水形式,消能室内设 2 道消力槛,调整出水孔及下游引航道内的出流分配和水流流态,并解决单边输水时出水孔均匀出流问题。

省水池廊道顶部出口断面尺寸为 4.0 m×2.0 m(长×宽),并以 1.0 m 半径向四周扩大为喇叭形出水口,与省水池底高程衔接。

输水系统特征断面面积见表 2,省水船闸输水系统整体布置见图 1。

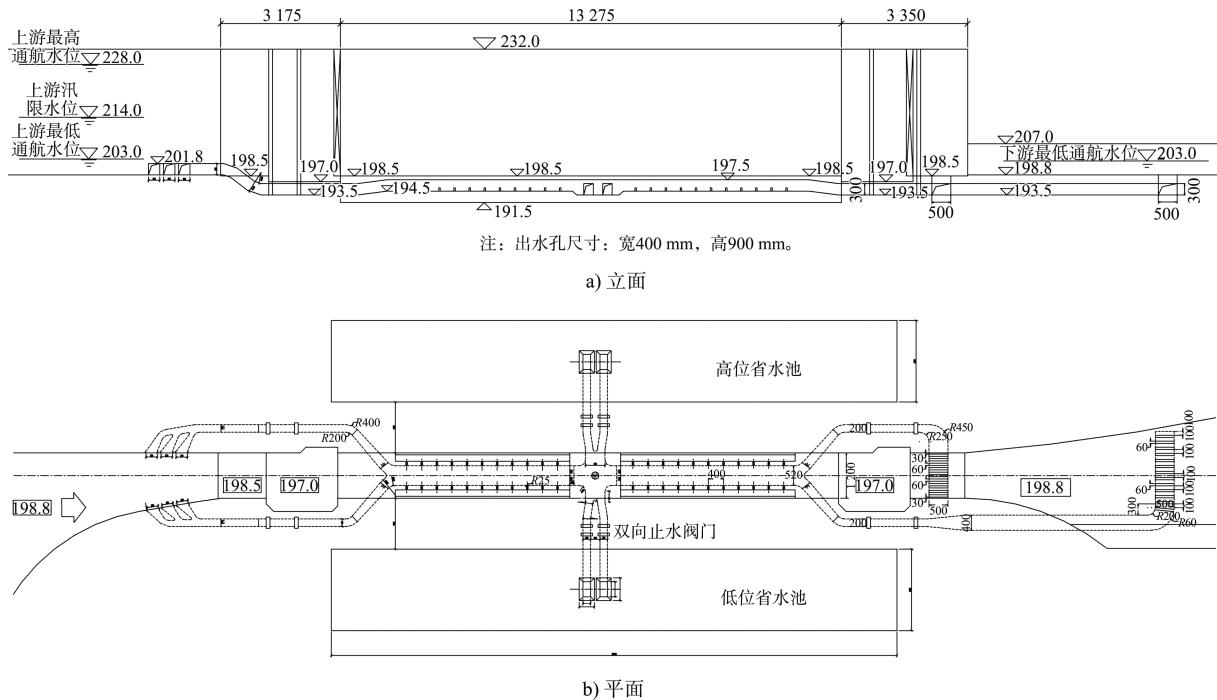


图1 省水船闸输水系统整体布置(尺寸: mm; 高程: m)

表2 输水系统特征断面面积及与阀门面积比

特征位置	面积/m ²	与阀门面积比
上游进水口	54.00	4.50
充水阀门	12.00	1.00
闸底廊道	15.60	1.30
闸室出水孔	15.84	1.32
省水池廊道	12.00	1.00
省水池出水口	48.00	4.00
泄水阀门	12.00	1.00
下游出水口	69.00	5.75

4 输水水力特性

4.1 物理模型

按重力相似准则建立省水船闸输水系统整体物理模型, 模型与原型之间的几何比尺为1:20。模型范围包括上、下游水库以及原体船闸闸室、上下闸首、全套输水系统、省水池和部分上、下

游引航道, 见图2。

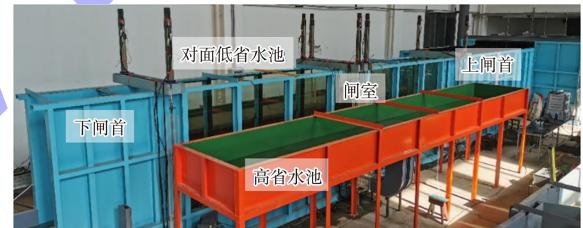


图2 省水船闸整体物理模型

4.2 输水水力特性

通过物理模型试验, 得到船闸不同运行工况下的输水水力特征值见表3。测量并计算得到闸室与上、下游之间的输水系统充、泄水流量系数分别为0.77、0.70, 闸室与省水池之间的充、泄水流量系数分别为0.80、0.72。试验结果表明, 输水系统的输水水力性能较好, 船闸采用省水运行时的理论省水率约为56.2%。

表3 船闸不同运行工况下的输水水力特征值

运行工况	$t_{v, \text{低}} / \text{min}$	$t_{v, \text{高}} / \text{min}$	$t_{v, \text{闸首}} / \text{min}$	T / min	$Q_{\max, \text{低}} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{\max, \text{高}} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{\max, \text{闸}} / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$u_{\max, \text{低}} / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$u_{\max, \text{高}} / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_{\max, \text{低}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{\max, \text{高}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{\max, \text{闸}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
203.0~228.0 m	1.5	1.5	2.0	14.01	116.02	117.70	111.72	3.87	3.92	3.72	9.67	9.81	9.31
省水方式充水	2.0	1.5	2.0	14.20	106.06	117.70	111.72	3.54	3.92	3.72	8.84	9.81	9.31
	2.5	1.5	2.0	14.39	97.07	117.70	111.72	3.24	3.92	3.72	8.09	9.81	9.31
	3.0	1.5	2.0	14.53	86.11	117.70	111.72	2.87	3.92	3.72	7.18	9.81	9.31

续表3

运行工况	$t_{v,\text{低}}/\text{min}$	$t_{v,\text{高}}/\text{min}$	$t_{v,\text{闸首}}/\text{min}$	T/min	$Q_{\max,\text{低}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{\max,\text{高}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{\max,\text{闸}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{\max,\text{低}}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$u_{\max,\text{高}}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$u_{\max,\text{闸}}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_{\max,\text{低}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{\max,\text{高}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{\max,\text{闸}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
203.0~228.0 m 省水方式泄水	1.5	1.5	2.0*	16.97	105.01	104.61	50.83	3.50	3.49	1.69	8.75	8.72	4.24
	2.0	1.5	2.0*	17.23	95.21	104.61	50.83	3.17	3.49	1.69	7.93	8.72	4.24
	2.5	1.5	2.0*	17.51	88.18	104.61	50.83	2.94	3.49	1.69	7.35	8.72	4.24
203.0~214.0 m 常规运行充水	3.0	1.5	2.0*	17.73	80.29	104.61	50.83	2.68	3.49	1.69	6.69	8.72	4.24
	-	-	2.0	5.57	-	-	111.75	-	-	3.73	-	-	9.31
203.0~214.0 m 常规运行泄水	-	-	3.0	6.03	-	-	97.96	-	-	3.27	-	-	8.16
	-	-	2.0*	8.67	-	-	50.85	-	-	1.70	-	-	4.24
	-	-	3.0*	11.95	-	-	37.89	-	-	1.26	-	-	3.16

注: $t_{v,\text{低}}$ 、 $t_{v,\text{高}}$ 、 $t_{v,\text{闸首}}$ 分别为低池、高池、闸首处的输水阀门开启时间; T 为闸室充水或泄水全过程的时间; $Q_{\max,\text{低}}$ 、 $Q_{\max,\text{高}}$ 、 $Q_{\max,\text{闸}}$ 分别为闸室与低池、高池、上游(下游)输水过程的最大流量; $u_{\max,\text{低}}$ 、 $u_{\max,\text{高}}$ 、 $u_{\max,\text{闸}}$ 分别为闸室与低池、高池、上游(下游)输水过程闸室水面最大上升速度; $v_{\max,\text{低}}$ 、 $v_{\max,\text{高}}$ 、 $v_{\max,\text{闸}}$ 分别为低池、高池、闸首输水阀门处的廊道断面最大流速; 2.0* 为以 $t_v = 2.0 \text{ min}$ 速率开至 $n = 0.4$ 开度、停 5.0 min 继续开至全开; 3.0* 为以 $t_v = 3.0 \text{ min}$ 速率开至 $n = 0.3$ 开度、停 8.0 min 继续开至全开。

因闸室与高池之间充、泄水时, 闸室内水深较大, 故试验中高池输水阀门采用了较快的开启速度 ($t_v = 1.5 \text{ min}$); 而闸室与低池之间充、泄水时, 闸室内水深较小, 故针对低池输水阀门 t_v 为 1.5~3.0 min 的开启时间范围均开展了试验研究。为便于运行管理, 闸首输水阀门与省水池输水阀门一致, 也采用较快的开启速度 ($t_v = 2.0 \text{ min}$)。其中, 下闸首泄水阀门采用间歇开启方式以降低泄水流量峰值, 进而在一定程度上减小中间渠道水位波动幅值。

根据模型试验结果, 推荐输水阀门开启方式为: 低池输水阀门 $t_{v,\text{低}} = 2.0 \text{ min}$, 高池输水阀门 $t_{v,\text{高}} = 1.5 \text{ min}$, 省水池阀门动水关阀 $t_{v,\text{关}} = 1.0 \text{ min}$, 开始关阀时的剩余水头 $h = 1.5 \text{ m}$; 上闸首充水 $t_{v,\text{上闸首}} = 2.0 \text{ min}$, 下闸首泄水 $t_{v,\text{下闸首}} = 2.0 \text{ min}$ 间歇(以 $t_v = 2.0 \text{ min}$ 速率开至开度 $n = 0.4$, 停 5.0 min 继续开至全开)。省水运行充、泄水过程的各阀门开度曲线见图 3。

上述阀门启闭方式下, 最大水头省水运行时的充、泄水平均时间为 15.7 min, 汛限特征水位组合常规运行时的充、泄水平均时间为 7.1 min, 满足设计要求; 各输水阀门段的断面流速小于 10.0 m/s, 充水时阀门段廊道最低压力为 2.50 m

水柱(约合 25 kPa), 泄水时输水阀门段廊道最低压力为 0.50 m 水柱(约合 5 kPa), 各项输水水力指标满足规范要求。

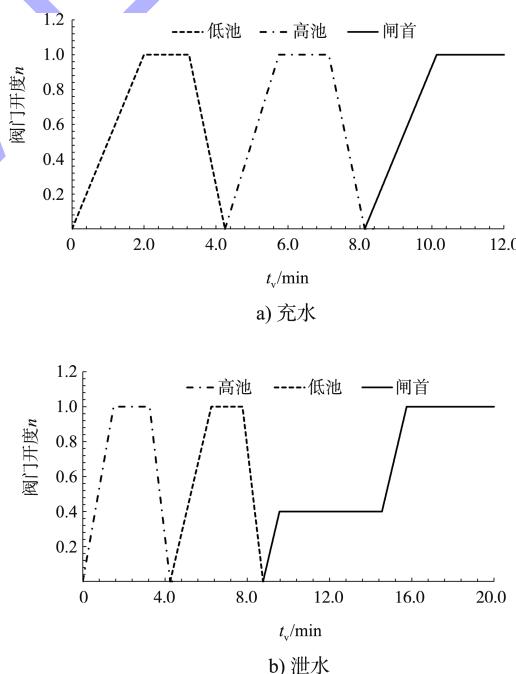


图 3 推荐方式下充、泄水阀门开度曲线

试验中观测发现, 船闸输水系统下游出水口创新布置对坦化泄水非恒定流引起的水位波动起到了一定作用。下游引航道水流流态如图 4 所示, 泄水时下游引航道内的水位波动较小, 廊道出水口水流沿横向分布较为均匀。



图4 下游引航道水流流态

5 闸室船舶停泊条件

模型试验中, 观测了闸室水流流态及船舶自由漂移特性, 发现闸室水面较为平稳, 出水水流基本均匀, 船舶无明显漂移现象, 说明输水系统出水孔及消能布置是合适的。

测量充水时 2×500 吨级船队和 1 000 吨级单船在闸室内的船舶缆绳受力特性, 其中包括单船停泊在闸室上部、中部和下部 3 个典型位置处的船舶系缆力指标, 以便全面反映闸室内不同位置的停泊条件。最大水头工况在推荐阀门开启方式下省水运行充水时的闸室船舶最大系统力见表 4。可以看出, 2×500 吨级船队的最大纵向系缆力为 16.64 kN, 最大横向系缆力为 5.41 kN, 分别为规范允许最大值的 66.6% 和 41.6%; 1 000 吨级船舶停在闸室不同位置所受的最大纵向系缆力为 15.1 kN, 最大横向系缆力为 4.93 kN, 分别为规范允许最大值的 47.2% 和 30.8%。船舶最大系缆力均小于规范允许值, 并有一定的富余量, 相反方向的系缆力峰值差别不大, 水流分布较为均匀。经模型试验验证, 闸室水流条件较好, 推荐的阀门开启方式合理。

表4 典型工况充水时船队及单船在闸室内的受力

船型	船舶 位置	纵向力/kN		艉横向力/kN		艉横向力/kN	
		向上游	向下游	向右	向左	向右	向左
2×500 吨级 船队	全闸室	-14.75	16.64	3.79	-5.41	5.26	-4.18
1 000 吨级 单船	闸室上部	-12.75	14.41	2.88	-4.31	3.12	-4.00
	闸室中部	-9.53	15.10	4.33	-4.93	3.70	-4.82
	闸室下部	-13.29	11.50	3.98	-2.75	2.53	-1.83

注: 表中数值正负用以示系缆力方向; 500 吨级船舶的纵向力允许值为 25 kN, 横向力允许值为 13 kN; 1 000 吨级船舶的纵向力允许值为 32 kN, 横向力允许值为 16 kN。

6 结语

1) 本文计算山区大水位变幅省水船闸的闸室与省水池特征水位, 确定了省水池高程; 提出省水船闸输水系统布置, 并提出适应中间渠道水流条件要求的下游出水口分散布置创新方案。

2) 本文建立比尺为 1:20 的省水船闸物理模型, 通过模型试验研究了省水船闸典型控制水位组合工况及不同运行方式下的输水水力特性, 输水廊道压力特性, 闸室船舶停泊条件及关键水力指标。推荐的各部位输水阀门开启方式为 $t_{v,\text{低}} = 2.0 \text{ min}$ 、 $t_{v,\text{高}} = 2.0 \text{ min}$ 、动水关阀时间 $t_{v,\text{关}} = 1.0 \text{ min}$, 关阀初始水头 $h = 1.5 \text{ m}$; $t_{v,\text{上闸首}} = 2.0 \text{ min}$ 、 $t_{v,\text{下闸首}} = 2.0 \text{ min}$ 间歇开启。

3) 研究结果表明, 船闸水位分级合理, 输水系统水力性能较好, 推荐阀门开启方式下的各项输水水力指标及水流条件满足船闸安全运行要求; 省水船闸及其输水系统方案可行, 可适应上游大水位变幅特点及下游中间渠道高标淮水流条件要求; 船闸省水运行时的理论省水率为 56.2%。

参考文献:

- [1] 刘本芹, 宣国祥. 桂林市桂江巴江口船闸改扩能工程省水船闸输水系统水力学模型试验研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.
- [2] 祝龙, 宣国祥. 清水江白市枢纽船闸关键技术试验研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.
- [3] 刘本芹, 李云, 胡亚安, 等. 高水头大尺度船闸省水布置与水力计算 [J]. 水运工程, 2016(12): 42-46.
- [4] 杨锦, 刘本芹, 汪磊, 等. 大水位变幅下省水船闸水位分级研究 [J]. 水运工程, 2021(11): 59-65.
- [5] 李中华, 许锋, 安建峰, 等. 单级省水船闸水级计算和影响因素探讨 [J]. 水运工程, 2020(11): 7-11, 33.
- [6] 董思远, 王乔, 张楠, 等. 多级船闸省水率计算方法 [J]. 中国水运, 2020(12): 87-89.
- [7] 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.

(本文编辑 王璁)