



中高水头船闸输水系统选型布置及试验研究

周 俊, 匡 涛, 王 能

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 以贵州旁海枢纽工程船闸为例, 根据国内已建船闸综合分析所得的输水系统选型指标, 利用灰色系统理论对船闸输水系统选型和布置进行验证, 并应用物理模型试验对船闸水力特性和阀门工作条件进行试验研究。通过试验测定闸室内停泊条件和阀门开启方式, 确定并优化了船闸结构和输水系统布置。结合近年来船闸输水系统设计、工程实际经验和成果, 为第二类分散输水系统和平板阀门在中高水头船闸工程的设计和应用提供参考。

关键词: 中高水头; 旁海枢纽; 输水系统选型; 物理模型; 平板阀门

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0121-07

Type selection and test research of filling and emptying system in medium and high head ship lock

ZHOU Jun, KUANG Tao, WANG Neng

(Hunan Province Traffic Planning, Survey and Design Institute, Changsha 410200, China)

Abstract: Taking the ship lock of the Panghai junction in Guizhou province as an example, this paper uses the gray system theory to verify the filling and emptying system selection and layout based on the comprehensive analysis of the built ship locks in China. The physical model test conducts an experimental study on the hydraulic characteristics of the ship lock and the valve operating conditions. The berthing conditions and valve opening methods in the lock room were tested and determined, and the lock structure and filling and emptying system layout were determined and optimized. Combining ship lock filling and emptying system design and engineering practical experience and results of recent years, we provide a reference for the design and application of the second type of decentralized filling and emptying system and flat valve in the middle and high head ship lock project.

Keywords: medium and high head; Panghai junction; type selection of filling and emptying system; physical model; flat valve

正确选择输水系统的形式并适宜布置, 是船闸工程设计的重要内容, 船闸输水系统不仅是船闸运行过程中使用最为频繁的工作系统之一, 而且其能否有效运作同船闸的通航安全、正常营运息息相关。近年来通航河流上改、扩建和新建的中、高水头船闸数量居多, 对该类型船闸输水系统的选型和布置进行研究是非常有意义的^[1]。

国内外专家学者针对船闸输水的特点进行了

一系列研究, 在工程水力学的基础上发展成船闸水力学这门学科。我国对分散式输水系统的研究及应用始于 20 世纪 70 年代, 并在 1987 年发布试行第一部船闸设计规范。随着我国葛洲坝 1、2 号船闸及五强溪等高水头船闸建成, 特别是三峡船闸的建成和运行, 为船闸建设积累了大量的工程实践经验, 目前我国船闸水力学研究已处于世界前列。

收稿日期: 2020-08-26

作者简介: 周俊(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道及枢纽设计。

各国和国际组织在船闸的选型和设计上根据不同水头工况采取了多种标准,但普遍存在选型保守、闸室停泊条件差和经济性不佳等方面的问题。文献[2]通过统计国内不同规模船闸输水系统选型指标,建立了输水系统选型模型,参照计算模型对船闸输水系统形式进行选取。与现行规范对比,该方法对船闸设计选型取得理想的研究成果。

1 选型原则及特点

1.1 选型原则和条件

合理的输水系统选型应包括以下几个方面:
1)船闸的灌、泄水时间须满足所在航道的运量要求;2)过闸船舶在闸室及引航道内具有良好的停泊条件和航行条件;3)工程造价以及船闸建成后的运行、维护费用比较理想。

根据我国已建船闸实际经验,中高水头船闸输水系统形式的选择一般根据水头和输水时间等要求并参考国内外船闸工程经验进行。 $15\text{ m}<H\leq 20\text{ m}$ 的中小型船闸和运输不繁忙的大型船闸,采用第一类分散输水系统,主要为闸墙长廊道侧支孔输水系统; $20\text{ m}<H\leq 25\text{ m}$ 时,考虑采用闸底长廊道侧支管输水系统或其他第二类分散输水系统。

1.2 闸墙长廊道输水系统特点

闸墙长廊道侧支孔输水系统是将廊道布置在闸室墙体内,并沿船闸长度方向在闸墙底布设支孔,灌水时水流分散进入闸室。其特点主要有:1)闸室内水流能量较集中输水系统有很大的减小,无需设置镇静段;2)水流是从闸墙的两侧进入闸室,充水时有明显的各支孔次第出水现象,水流的消能主要利用船底水体进行扩散消能;3)该形式基础开挖量少,较其他分散输水系统结构更为简单,施工难度也更低;4)缺点是适应性一般,因故障或检修工况下阀门单边运行时,出水一侧支孔水流将在闸室内

形成较大横向水面比降,闸室流态将影响船舶停泊安全^[3]。

1.3 闸底长廊道输水系统特点

闸底长廊道输水系统是在闸底布置输水主廊道,水流通过布置在底部长廊道上的支孔分散进(出)闸室,这种输水系统的优点为:1)因廊道布置在闸底,对船闸闸墙结构尺寸没有要求;2)灌、泄水时水流由闸室底部分散进(出)入闸室,水流消能条件较好,阀门单边或不同步开启工况时船舶停泊条件较好。

中高水头船闸设计过程中,输水系统选型及布置应综合考虑船闸规模和通过能力、项目选址和地质条件、合理的结构形式及工程造价等诸多因素,不能简单套用规范^[4]。近年来随着工艺技术的进步,第一类分散输水系统和平板阀门在20 m以上水头船闸的工程实际应用中也取得了良好的效果。

2 输水系统设计选型及布置

本文选用的案例为贵州旁海航电枢纽,项目位于清水江干流,考虑满足远期单向过坝运量需求,船闸有效尺度为120 m×12 m×3.0 m(长×宽×门槛水深),闸室输水时间要求不超过10~12 min。上游最高通航水位为565.0 m,下游最低通航水位为542.0 m,最大运行工况水头23.0 m。

2.1 输水系统选型

JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[5](简称《规范》)中输水系统类型的选择公式为:

$$m=\frac{T}{\sqrt{H}} \tag{1}$$

式中: T 为输水时间(min), $T=10\sim 12\text{ min}$; H 为水头(m), $H=23.0\text{ m}$ 。计算得 $m=2.09\sim 2.50$,根据船闸选址地质勘探情况和枢纽总体布置要求,选用闸墙长廊道输水系统^[6]。

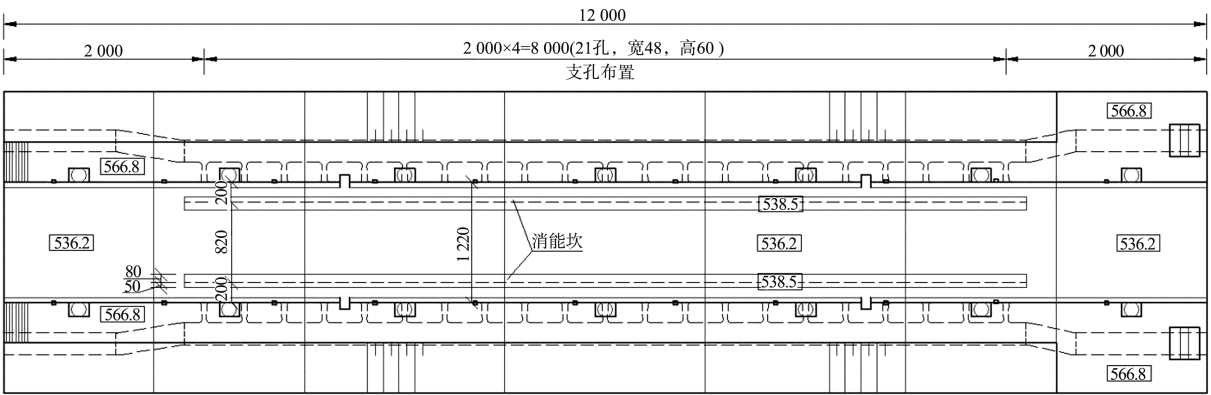
2.2 输水系统布置

经水力计算,确定输水阀门尺寸(宽×高)为

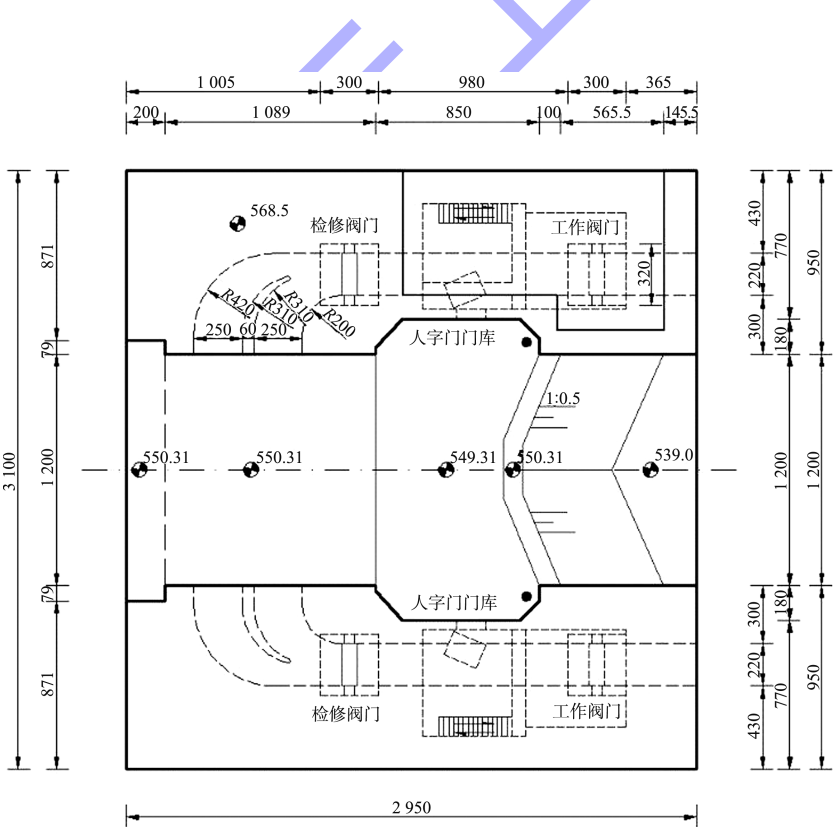
2.2 m×2.5 m, 双边输水阀门处廊道断面总面积为 11.0 m²; 闸墙主廊道断面尺寸(宽×高)为 2.2 m×2.8 m, 双边总断面面积为 12.32 m²; 闸墙每侧设 21 个短支孔, 孔口尺寸(宽×高)为 0.48 m×0.6 m; 排水孔按 4.0 m 间距布置, 出水段总长 80.0 m, 为闸室长度 2/3; 出水孔外均设一道

2.3 m 高消力槛。

上闸首导墙每侧设 2 支孔进水口。下闸首靠近河道一侧的廊道采用旁侧泄水, 廊道尺寸为原来的 1.5 倍; 另一支廊道出口宽度放大 2 倍与消能室相连, 消能室设顶部出水孔, 船闸输水系统平面布置见图 1。



a) 闸室输水系统



b) 上闸首输水系统(帷墙优化后)

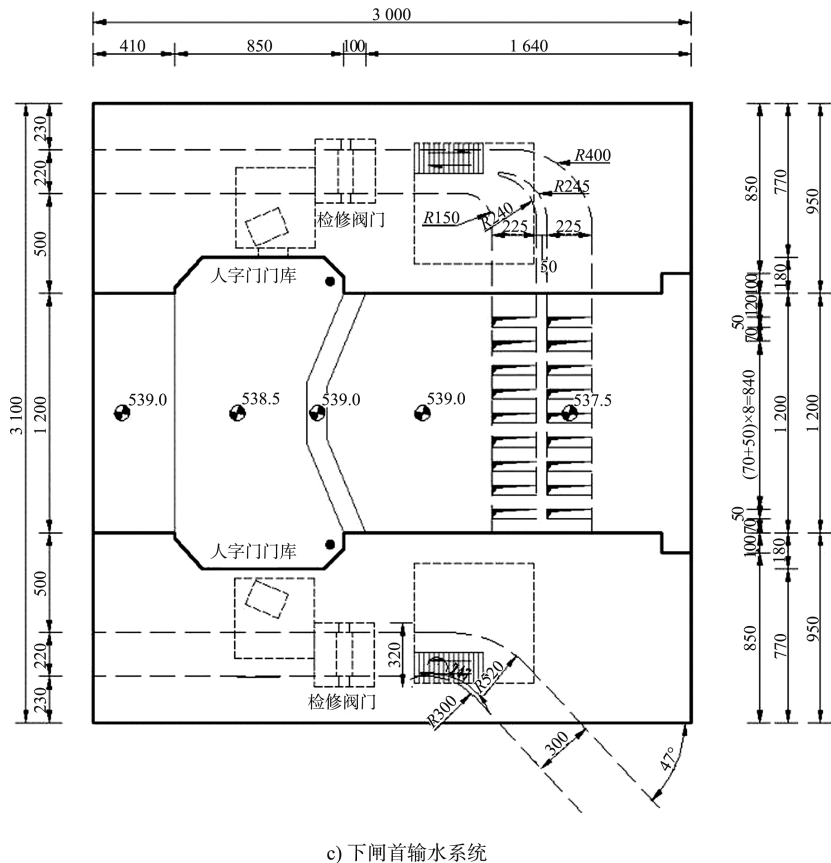


图 1 旁海船闸输水系统平面布置 (尺寸: cm; 高程: m)

2.3 灰色关联验证

由船闸输水系统能量方程:

$$E_{\max}=0.95\rho g\cdot\frac{9.81CH^2}{T\sqrt{K_v(2-K_v)}}\tag{2}$$

式中: K_v 为阀门相对开启时间, $K_v=t_v/T$, t_v 为阀门全开所需时间; C 为闸室水域面积(m^2)。

引入水平、纵向和横向单位面积 3 个无量纲变量参数

$$\begin{cases} m_H=\frac{CH^2}{TLB} \\ m_L=\frac{CH^2}{TLD} \\ m_c=\frac{CH^2}{TBD} \end{cases}\tag{3}$$

式中: m_H 、 m_L 、 m_c 分别代表船闸在水平、纵向、横向单位面积的能量; L 为闸室有效长度; D 为闸室水深; B 为闸室有效宽度。根据国内 73 座已建的闸墙长廊道和闸底长廊道两类输水系统船闸数据, 综合得出两类输水系统形式的 m 、 m_L 、

m_c , 均值见表 1, 利用灰色综合评价法对旁海船闸输水系统进行关联度计算, 充、泄水 10、12 min 时关联计算结果见表 2。

表 1 两类输水系统形式影响因素指标			
输水系统类型	m	m_L	m_c
第一类	2.80	100	870
第二类 a 型	2.54	209	2 093

表 2 与两类输水系统形式关联度				
评价方法	第一类		第二类 a 型	
	10 min	12 min	10 min	12 min
绝对关联	0.82	0.88	0.75	0.55
相对关联	0.74	0.84	0.91	0.78
综合关联	0.78	0.86	0.83	0.67

《规范》中根据 m 值进行输水系统形式的判别和选择的方法, 未考虑闸室的初始水深和闸室综合平面尺度等因素, 简单判别后所选用的输水系统形式的适应性及可靠性值得商榷。考虑输水系统水平、纵向和横向 3 个方向需消除的能量, 并引入对应的无量纲变量作为选型参考指标, 利用灰色系统理论进行关联度计算分析后, 得知旁海船闸采用的闸墙长廊道侧支孔输水系统与表中计

算推荐的结果一致, 可认为旁海船闸采用的闸墙长廊道输水系统是非常合理的。

3 试验

通过水工整体物理模型试验, 观测船闸输水

系统及结构布置方案效果、阀门不同开启方式的运行情况和船舶闸室内的停泊条件, 测定输水系统各项水力性能、参数, 试验数据及指标见表 3。通过对试验资料进行分析, 反复进行模型修改验证, 为设计提供技术参考。

表 3 水位组合为 542.0~565.0 m 时最大设计水头闸室输水水力特征值

充、泄水	方式	阀门开启时间 t_v/min	作用水头 H/m	闸室输水时间 T/min	最大流量 $Q_{\max}/(\text{m}^3\text{s}^{-1})$	惯性超高 (比降)/m	闸室水面最大速度 $U_{\max}/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	闸室水面平均速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	阀门断面最大流速 $i/(\text{m}^3\text{s}^{-1})$
充水	双边	4	23	9.77	143.19	0.20	5.28	2.35	16.40
		5	23	10.25	126.11	0.20	4.69	2.24	15.21
		6	23	10.71	121.79	0.20	4.51	2.15	15.98
	单边	5	23	17.73	87.06	—	3.30	1.30	18.01
		6	23	18.35	82.75	—	3.19	1.25	17.48
泄水	双边	3	23	9.47	126.27		4.58	2.43	15.66
		4	23	9.97	119.69	0.15	4.42	2.31	16.95
		5	23	10.46	112.41	0.15	4.18	2.20	16.06
	单边	4	23	18.30	68.48	—	2.48	1.26	15.91
		5	23	18.88	66.98	—	2.55	1.22	16.86

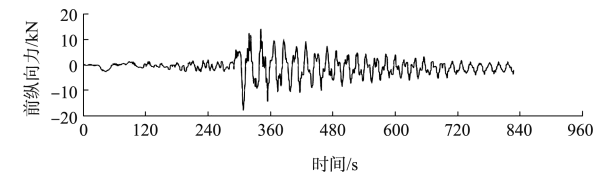
3.1 输水系统模型试验

3.1.1 输水系统水力特性试验

由表 3 可见, 当船闸灌、泄水时间控制在 12 min 以内时, 相应输水主廊道的最大平均流速为 9.89、9.12 m/s, 小于《规范》限定的 15 m/s, 认为输水系统各部分尺寸设计合理。

3.1.2 停泊条件

闸墙长廊道输水系统在故障或检修工况下单边运行时, 闸室内船舶停泊条件较差, 着重对该工况下水流条件进行观察分析。通过试验可知闸室每侧布置的消力坎获得了预期的效果, 闸室内无明显纵横水流, 水面较平稳, 紊动很小。试验过程中纵向系缆力有一突变现象(图 2), 这是因为上闸首人字门后的帷墙平台过宽, 水位上升过程中水域面积突然增大导致水面产生波动造成的。



注: 阀门单边开启, $t_v=6\text{ min}$ 。

图 2 500 t 单船停泊闸室中段系缆力过程线

通过调整, 将帷墙平台宽度减小为 1.0 m, 实测船舶停泊在闸室各位置的系缆力值明显改善, 充水阀门 $t_v=6\text{ min}$ 开启时, 500 t 船舶停泊在闸室中段的最大纵向系缆力由修改前的 17.77 kN 减小为修改后的 5.77 kN。考虑到船舶最大系缆力较规范有一定富余, 一并将闸室底高程抬高 0.3 m, 消力坎高度调整为 2.0 m(图 3)。结构优化后 500 t 设计船型停泊在闸室中段的最大系缆力见表 4, 优化后的系缆力均小于规范要求, 证明调整可行^[7]。

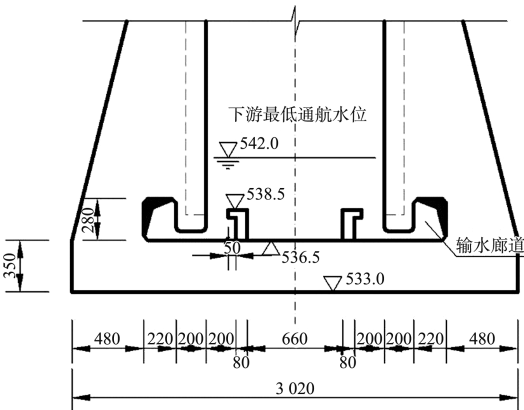


图 3 闸室输水系统布置 (尺寸: cm; 高程: m)

表 4 优化后灌水时船舶最大系缆力

停泊位置	开启方式	开启时间/min	纵向力/kN	前横向力/kN	后横向力/kN
闸室中段	双边	5	8.64	3.47	4.14
		6	5.93	2.74	3.75
	左单	5	9.92	6.85	8.64
		6	9.20	4.57	7.27

3.1.3 进、出水口水流条件

旁海船闸上闸首廊道进水口采用闸墙垂直2支孔布置，进水口顶高程 541.5 m，最大设计水头 23 m，在保证一定淹没水深条件下，进水口水流条件良好，水面平稳，试验未见漩涡及回流；为满足下游引航道水流条件，右侧廊道采用旁侧泄水形式，左侧廊道采用增加出口断面宽度与消能室连接，见图 1c)。消能室内布置底坎，保证单侧输水时出水支孔均匀出流的同时，能与下游引航道布置相适应，保证了水流在引航道内的分布基本均匀。

3.2 平板阀门试验

与反弧门相比，旁海船闸采用的平板阀门具有结构简单、检修方便等特点，因水位变幅条件和水力指标都达到了国内已建船闸平板阀门的前列，水力学是其设计中最为关键的技术难题，例如平面阀门启闭力过大、空化和振动问题都使其在高水头船闸中的应用受到限制。

在前人相关科研成果的基础上^[8-9]，本次试验通过采取主动防护与被动防护相结合的“阀门段突扩廊道体型+综合通气措施”新技术和优化措施，在合理的阀门段廊道埋深条件下，可有效改善阀门底缘空化条件，达到确保船闸安全高效运行的目的。

3.2.1 突扩廊道体型

充水阀门后廊道采用“顶部突扩+底部突扩”形式，底扩段的跌坎和升坎采用台阶形式以便于维护检修，阀门后廊道体型见图 4。在此廊道体型基础上研究阀门段水动力荷载特性，通过阀门试验评估该廊道体型优劣。

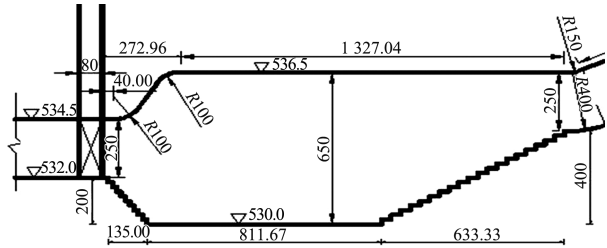


图 4 阀门后廊道突扩形式（尺寸：cm；高程：m）

阀门开启过程中，水流对廊道顶顶托作用明显，廊道顶增压效果显著，其压力变化特性主要受门后大尺度漩滚影响。在推荐的阀门开启速率情况下，廊道顶最低压力为 3.38 m 水头，位于距离阀门井的 25 m 处，最大压力脉动强度为 0.98 m 水柱，位于阀门井下游 7.50 m 漩滚中心处，其水流脉动正常；廊道低最低压力为 7.66 m 水头，位于跌坎底部后 1 m 处，最大脉动强度约为 1.22 m 水柱，发生在台阶跌坎下游 9.12 m，其水流脉动正常。该突扩廊道体型是合理有效的。

3.2.2 阀门门体及门槽优化

空化数为：

$$\sigma = \frac{P/\gamma + (P_a - P_v)/\gamma}{v^2/(2g)} \tag{4}$$

式中： P 为参考断面压力水头； γ 为系数； P_a 、 P_v 分别为大气压及水的饱和蒸汽压； v 为参考断面流速。定义 σ/σ_i 为相对空化数，以 σ_i 代表临界空化状态， $\sigma > \sigma_i$ 时，表明阀门段无空化； $\sigma \leq \sigma_i$ 时，阀门段存在空化。

经综合分析判断，发现原结构形式除门楣空化外，还存在底缘、跌坎、门槽漩涡、门槽出口等 4 类空化，且相对空化数均较小。通过改变阀门下缘形式及门槽尺寸，并采用门体内浇筑铁砂混凝土增加阀门自质量及刚度的措施，可达到改善空化的目的。优化后重新测定计算，底缘空化、跌坎空化、门槽漩涡空化有较大改善，门槽出口空化现象消失。充水阀门底缘相对空化数见表 5。

表 5 旁海船闸充水阀门相对空化数

部位	体型	相对空化数					
		$n=0.2$	$n=0.3$	$n=0.4$	$n=0.5$	$n=0.6$	$n=0.7$
阀门底缘	原体型	—	0.39	0.41	0.69	0.79	>1
	优化体型	0.43	0.46	0.59	0.87	0.95	>1
跌坎	原体型	—	0.50	0.49	0.79	0.84	>1
	优化体型	0.38	0.52	0.55	0.79	0.94	>1
门槽漩涡	原体型	—	0.76	0.77	>1	>1	>1
	优化体型	0.53	0.77	0.79	>1	>1	>1
门槽出口	原体型	—	0.60	0.59	0.76	0.86	>1
	优化体型	>1	>1	>1	>1	>1	>1

注： n 为阀门开度。

3.2.3 门楣自然通气保护及跌坎强迫通气保护

通过优化闸门门体及门槽结构后, 门槽出口空化现象已消失, 其它空化现象仍存在。根据模型试验结果, 底缘空化发生的开度范围为 $n=0.2\sim0.6$, 以 $n=0.2\sim0.4$ 开度相对较强, 噪声较大, $n\geq0.7$ 开度底缘无空化。跌坎空化的开度范围为 $n=0.2\sim0.6$, 随着开度增大, 溃灭区逐渐向下游扩展, 约在跌坎下游 3.3~8.1 m 区域(以阀门后跌坎垂直面为零点), 未达到升坎处; $n\geq0.7$ 开度跌坎无空化。门槽内部在 $n=0.2\sim0.4$ 开度存在间歇性的漩涡空化, 该空化表现为横轴漩涡, 在门槽进口约 1/5 宽度形成, 高度方向上偏于阀门底缘附近。

进行门楣自然通气(必备措施)和跌坎强迫通气(储备措施)的措施后, 采取不同开度及不同通气量的组合对阀门进行临界空化试验, 在门楣最大通气量 $0.085\text{ m}^3/\text{s}$ (自然通气)和跌坎最大通气量 $0.017\text{ m}^3/\text{s}$ (强迫通气)时, 各空化现象均被充分抑制^[10]。

4 结语

1)通过引入判别指标和输水系统物理模型试验, 证明旁海船闸输水系统的选型和布置是科学合理的, 本次研究对于设计工作中船闸的输水系统形式选用具有借鉴意义。

2)在 23 m 工作水头条件下, 充泄水 10~12 min 时, 旁海船闸采用闸墙长廊道输水系统进水和出水口水流条件、闸室停泊条件等水力特性指标, 均能满足规范要求。

3)中高水头船闸通过采用“底突扩+顶突扩”的阀门后廊道体型、对阀门门体及阀门门槽进行优化以及门楣自然通气和跌坎强迫通气等工程措施, 可以有效解决平面输水阀门空化难题, 同时确保该输水系统的可靠性及稳定性。

参考文献:

[1] 孙倩,陈亮,王召兵,等.船闸单侧闸墙廊道输水系统布置及试验研究[J].人民长江,2019,50(12):182-186,191.

[2] 李中华,宣国祥.基于多因素的船闸输水系统选型方法[J].水运工程,2020(10):1-6.

[3] 张星星,许光祥,陈明栋,等.船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水力学研究综述[J].水运工程,2018(12):110-118.

[4] 黄瑶,曹凤帅.船闸输水系统选择标准研究[J].中国水运(下半月),2019,19(5):114-116.

[5] 南京水利科学研究院.船闸输水系统设计规范:JTJ 30—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.

[6] 任启江,叶雅思.旁海枢纽工程船闸输水系统布置及试验研究[J].水运工程,2018(12):129-133.

[7] 徐新敏.清水江旁海航电枢纽工程船闸输水系统水力学模型试验[R].南京:南京水利科学研究院,2015.

[8] 王新,严秀俊,李媛.中高水头船闸平面阀门设计与工程实践[J].水运工程,2019(10):73-79.

[9] 严秀俊,胡亚安,王蛟,等.旁海船闸阀门水力特性与防空化技术研究[J].水运工程,2016(12):31-35.

[10] 南京水利科学研究院.清水江旁海航电枢纽船闸输水阀门常压及减压水动力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2015. (本文编辑 武亚庆)