

· 航道及通航建筑物 ·



键为船闸输水廊道体形比选试验研究*

吴礼国¹, 严秀俊², 李泳龙¹, 徐红¹, 陈林², 王敬鹏²

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

2. 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)

摘要: 阀门空化问题是高水头船闸设计中最为关键的技术难题。结合国内外船闸研究及运行经验, 在阀门埋深相同的前提下, 阀门段廊道体形是影响阀门段空化特性的主要因素, 亟需进行不同廊道体形的非恒定流特性研究。依托实际工程, 开展模型试验进行“底扩顶扩廊道体形+反弧门”与“平底顶渐扩廊道体形+反弧门”的对比研究, 通过阀门廊道段动水载荷特性及阀门启闭力特性等各项指标的综合对比得出, 前者更适合于高水头船闸, 但该廊道形式工程量较大, 体形复杂, 施工要求较高, 后期检修维护较困难。综合各种因素, 键为船闸选用“平底顶渐扩廊道体形+反弧门”方案。

关键词: 高水头船闸; 非恒定流常压试验; 底扩顶扩; 平底顶渐扩

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0080-06

Shape comparison and selection for water conveyance corridor of Qianwei ship lock

WU Li-guo¹, YAN Xiu-jun², LI Yong-long¹, XU Hong¹, CHEN Lin², WANG Jing-peng²

(1. Sichuan Communication Surveying and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Valve cavitation is the most important technical issue in the design of a high head ship lock. Domestic and foreign ship lock research and operation experience indicate that under the same buried depth of the valve, the shape of the corridor in the valve section is the main factor affecting the cavitation characteristics of the valve section, resulting in an urgent need to examine the unsteady flow characteristics under different corridor shapes. By investigating an actual project, this paper compares “the corridor shape of top and bottom expansion + the reversed tainter valve” and “the corridor shape of flat bottom and gradual top expansion + the reversed tainter valve” by a model test. A comprehensive comparison of various indicators, such as the hydro-dynamic load characteristics of the corridor in the valve section and the valve opening and closing force characteristics, shows that the former is more suitable for high head ship locks. Nevertheless, this corridor type has its own limitations, such as large engineering amount, complex shape, high construction requirements, and difficult maintenance. In view of various factors, the Qianwei ship lock adopts “the corridor shape of flat bottom and gradual top expansion + the reversed tainter valve” scheme.

Keywords: high head ship lock; unsteady flow atmospheric pressure test; top and bottom expansion; flat bottom and gradual top expansion

自葛洲坝船闸建设开始, 随着船闸水头的提高, 阀门工作条件对保障船闸正常运行愈来愈重

要, 由此开始进行阀门水力学专题研究。针对不断兴建的高水头船闸, 结合国内外船闸运行经验,

收稿日期: 2022-01-28

*基金项目: 国家重点研发计划子课题项目(2016YFC0402006/04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y121009/Y122009); 中国博士后科学基金项目(2021M701752)

作者简介: 吴礼国(1976—), 男, 正高级工程师, 从事水运工程设计与研究。

采取了多种措施抑制阀门空化,如快速开启、增大阀门处廊道淹没水深、优化阀门段廊道体形等,取得了显著效果。鉴于阀门段廊道体形是影响阀门段空化特性的主要因素,在我国高水头船闸建设中,水口等船闸采用了“廊道顶部突扩结合侧面突扩”的形式,沙溪口船闸采用了“底部突扩结合侧面突扩”的廊道形式;广西红水河上的大化、乐滩(原名恶滩)船闸,门后廊道体形为“平底平顶形式”,而三峡船闸中间级廊道采用“底扩结合顶渐扩”廊道形式。

对于船闸输水阀门水力学问题,一般可通过物理模型试验、数值模拟和原型观测等3种方式进行研究和验证。阀门水力学物理模型试验从最初的阀门恒定流常压水力学模型试验,经过近30多年的努力,发展到目前的非恒定流常压水力学模型试验^[1]。随着数值模拟技术的进步,数学模型在阀门水力学研究中逐渐得到广泛应用,特别是阀门段流场的计算在阀门段廊道体形的比选中作用愈来愈突出。在三峡船闸中间级阀门水力学^[2]研究中,对阀门后廊道顶扩和底扩体形,采用大涡模拟方法对门后非恒定流场进行精细计算,揭示了船闸非恒定流阀门段急变分离流复杂的流态特征。针对三峡船闸^[3]末级闸首超长泄水廊道输水阀门存在的特殊水力学问题,采取一维与二维数学模型相结合的方法计算各种条件下的阀门段流态及廊道水动力特性,揭示门后廊道明满流演变机理。在嘉陵江草街^[4]和乌江银盘船闸^[5]中,利用二维数值模型对阀门后突扩廊道体形进行优化研究,由于船闸水力学领域原型与模型存在明显的缩尺效应,原型观测和调试是对理论及模型试验研究的重要补充和验证。向祎^[6]对阀门后上下突扩体形廊道的掺气水流的水力特性进行了数值模拟。

我国对原型观测及调试十分重视,万安二线^[7-8]、葛洲坝1、2、3号^[9]、三峡船闸^[10]、长洲三四线船闸^[11]、大藤峡^[12]等船闸建成后均进行了原型观测及调试。通过原型观测和调试一方面综合论证船闸输水系统性能及闸、阀门工作条件;

另一方面,根据原型情况优化和调整船闸运行方式,及时解决调试中的多项关键技术难题,进一步提高了船闸的通过能力。胡亚安^[12]等对三峡船闸输水阀门的启闭力特性进行研究,认为启闭机容量和阀门自重可以满足动水开启和关闭的要求。

相关研究表明^[13-14],若采用平顶平底廊道体形且在满足输水时间前提下,这些船闸均将发生较强空化,为此,提出了不同形式的突扩方案,采用突扩体形,一方面可显著增加阀门后廊道水流压力,减小门后廊道壁面水流压力脉动,降低阀门临界空化数等,从而避免发生空化或减弱空化强度;另一方面,即使阀门底缘发生空化,而突扩体可形成超空化结构,将空化区限制在突扩体水流内部,减弱空泡溃灭时的冲击压力,对廊道边壁起到保护作用。由于原模缩尺效应,以及三维突扩体存在多处边界转折,阀门底缘及突扩体边界仍存在一定程度空化。另外,突扩廊道体形在平面上扩大和收缩,增大了施工难度。

严秀俊等^[15-16]已从阀门防空化的角度出发,采取门楣自然通气的措施很好地解决了所选廊道体形的安全性,本文依托犍为船闸的非恒定流常压模型试验,通过阀门廊道段动水载荷特性及阀门启闭力特性等各项指标的综合对比,进行“底扩顶扩廊道体形+反弧门”与“平底顶渐扩廊道体形+反弧门”的优选研究。

1 工程背景

岷江犍为航电枢纽工程是岷江高等级航道建设的重要节点性工程,船闸等级为Ⅲ级,建设规模为220 m×34 m×4.5 m(有效长度×有效宽度×门槛水深),可通航2×1 000 t级船队,单向年通航能力为1 474.67万t。

犍为船闸是目前我国采用闸墙长廊道闸底横支廊道输水系统规模最大、水力指标最高的船闸,最大工作水头达19.0 m,属中高水头大型船闸,相关水力指标较高,加之其上、下游水位变幅较大,阀门水力学问题是该船闸水力设计较为关键的技术难题之一。

船闸输水系统主廊道尺寸为 4.0 m×5.0 m，阀门处廊道尺寸为 4.0 m×4.2 m。阀门水力学常压模型试验第 1 阶段对适应较高水头的“顶部突扩+底部突扩”廊道体形进行了系统试验，见图

1a)。第 2 阶段采用“平底+顶部渐扩”的廊道形式，廊道顶部采用渐扩形式，渐扩比 1:10，廊道断面由 4.2 m 渐扩至 5.0 m，充水阀门下检修门井距离阀门井 23.9 m，阀门后廊道体形见图 1b)。

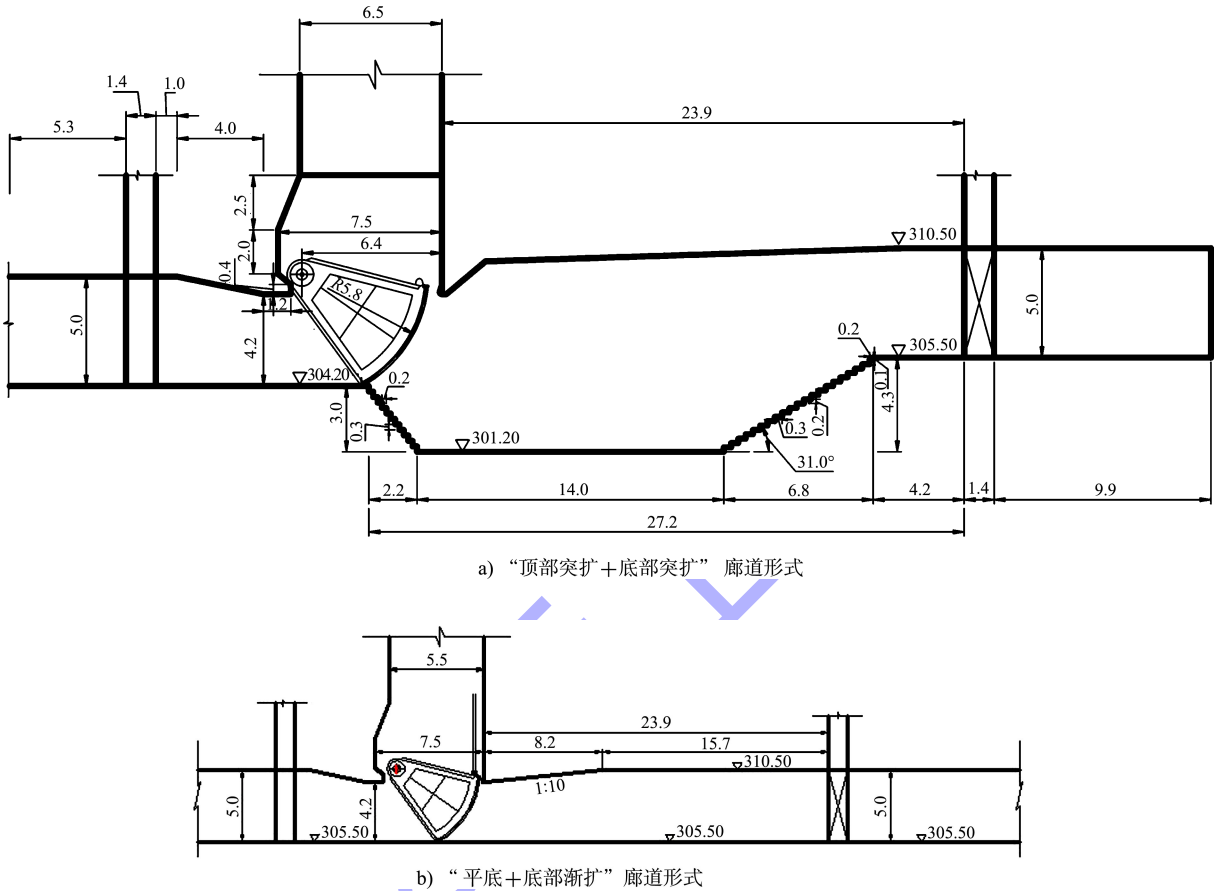


图 1 模型试验廊道形式 (单位: m)

2 模型与测点布置

利用充水阀门非恒定流常压模型，重点研究动水压力、启闭力特性，动水关闭工况下阀门段廊道水动力荷载，开启速率及作用水头对水动力

荷载及启闭力特性影响等问题，测点布置见图 2。廊道底布置 15 个脉动压力测点，廊道顶布置 10 个脉动压力测点，采用高精度拉压传感器测量启闭力。

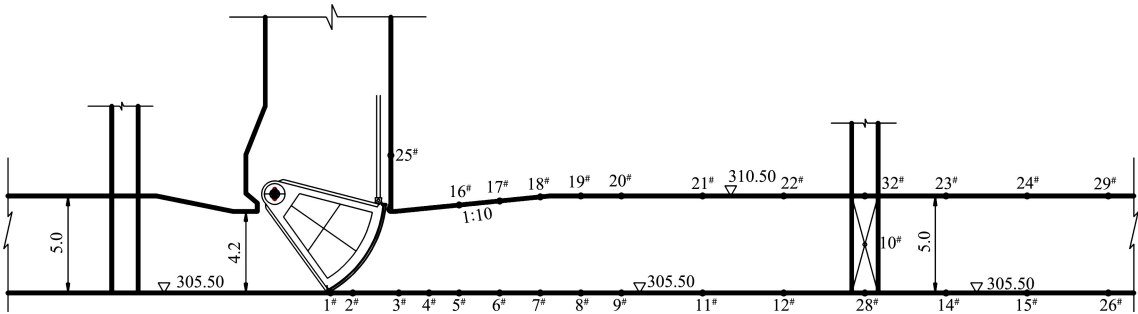


图 2 脉动压力测点布置 (单位: m)

3 试验结果

3.1 水动力特性

开度 $n=0.4$ 时不同廊道体形廊道顶时均压力分布对比见图 3, 底扩顶扩体形由于升坎出口抬升压力作用, 典型开度廊道顶最低压力水头比平底渐扩体形高 1.2 m 左右。 $n=0.7$ 时不同廊道体形廊道顶脉动压力对比见图 4, 底扩顶扩体形由于流态顺畅, 典型开度廊道顶对应测点脉动压力相对较小。

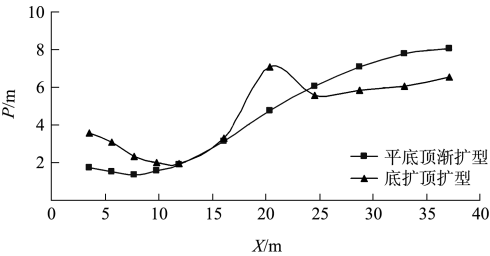


图 3 $n=0.4$ 不同廊道体形廊道顶时均压力水头分布

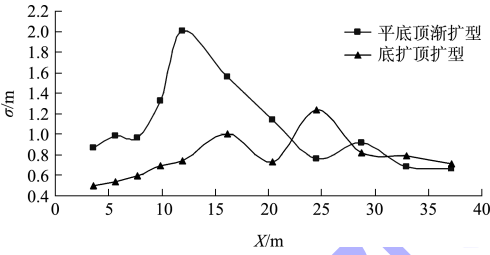


图 4 $n=0.7$ 不同廊道体形廊道顶脉动压力水头均方根值分布

$n=0.3$ 时不同廊道体形廊道底时均压力对比见图 5, 底扩顶扩体形由于升坎出口抬升压力作用, 典型开度廊道底对应测点最低压力水头比平底渐扩体形高 7.0 m 左右。 $n=0.6$ 时不同廊道体形廊道底脉动压力对比见图 6, 底扩顶扩体形由于流态顺畅, 剔除跌坎射流区, 廊道底最大脉动压力比平底渐扩体形低 0.8 m 左右。

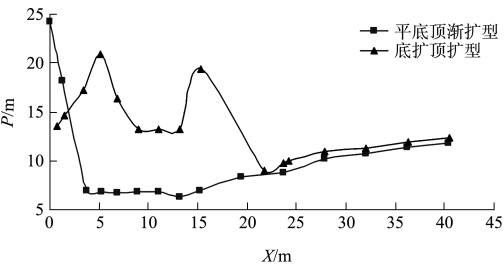


图 5 $n=0.3$ 不同廊道体形廊道底时均压力水头分布

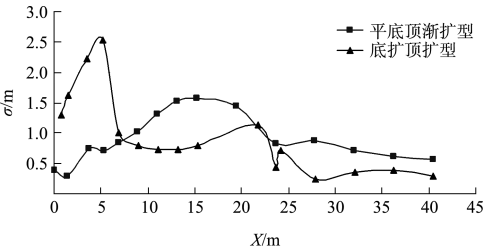


图 6 $n=0.6$ 不同廊道体形廊道底脉动压力水头均方根值分布

3.2 动水闭门阀门段廊道水动力荷载特性

从提高船闸安全运行的可靠性出发, 输水阀门应能在任意开度事故停机和紧急动水关闭, 这类工况下阀门及阀门段廊道所承受的水动力荷载是应予以关注的技术参数。阀门井水位 H_w 和门后压力的计算式为:

$$H_w = H_1 - \xi_1 \frac{v^2}{2g} - \frac{L'}{g} \frac{dv}{dt} \tag{1}$$

$$P_c/\gamma = H_T + \mu_n^2 H_n [\xi_2 - \alpha(2\sqrt{\xi'_{vm}} + \alpha)] + \frac{L''}{g} \frac{dv}{dt} \tag{2}$$

式中: H_2 为阀门井水位; H_1 为上游水位; ξ_1 、 ξ_2 分别为阀门前后输水系统阻力系数; v 为阀门处廊道断面平均流速; g 为重力加速度; dv/dt 为流速增率; P_c/γ 为阀门后收缩断面处廊道顶部的压力水头; H_T 为船闸上游水位与阀门后廊道顶部的差值; μ_n 、 H_n 、 ξ'_{vm} 分别为开度 n 时的流量系数、上下闸室水位差、阀门阻力系数; L' 、 L'' 分别为阀门前后廊道惯性换算长度; α 为阀门前后廊道扩大比。

阀门承受的作用水头为:

$$\Delta H = H_w - \frac{P_c}{\gamma} \tag{3}$$

由式(3)可知, 在高水头、大流量条件下, 阀门动水关闭时, 水流惯性作用 dv/dt 发生骤变, 廊道水流呈现负水击波特性的, 导致阀门上游廊道压力迅速上升, 而门后廊道压力下降, 阀门承受的作用水头增大, 阀门工作条件趋于恶化。阀门前后压力的升降程度取决于阀门开启和关闭速率 t_{v1} 、 t_{v2} , 阀门启闭间隔时段 Δt 和阀门关闭开度 n 。

定义 $K_f = \Delta H/H_0$ 为阀门水动力荷载系数, 其中 ΔH 为阀门承受的作用水头; H_0 为阀门初始作用水头。

不同廊道体形下门体动水荷载对比见图 7，显而易见，不同开启方式下，平底顶渐扩体形廊道的门体动水荷载都大于底扩顶扩体形。

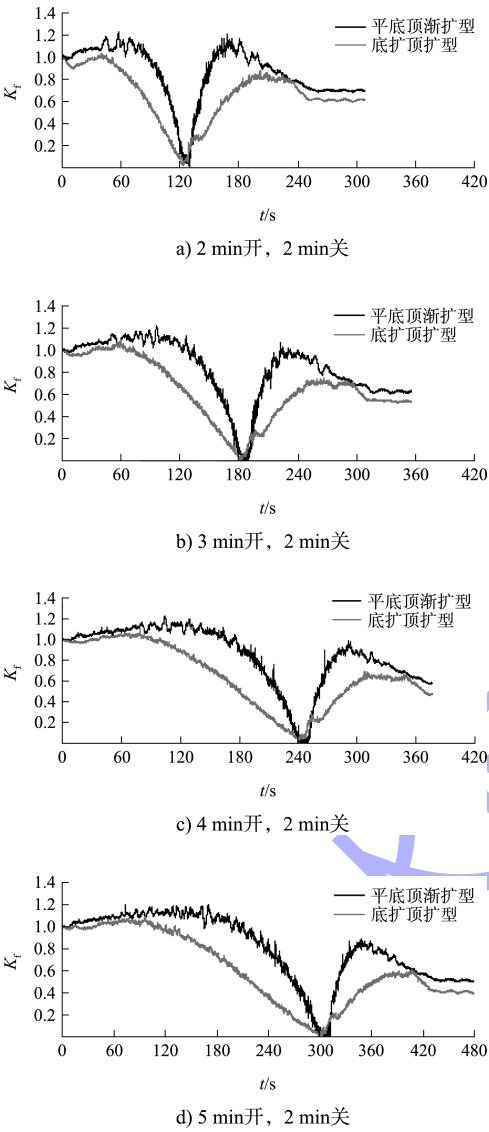


图 7 不同廊道体形下门体动水荷载

3.3 阀门启闭力特性

除空化特性、防空化措施及水动力荷载是船闸设计和建设中的关键技术难题外，船闸输水阀门启闭频繁，工作条件复杂，保证阀门系统的可靠性及启闭的灵活性也是设计人员极为重视的问题，而阀门启闭力直接关系到阀门结构和启闭机容量的设计。

图 8a) 为阀门以 $t_v = 240$ s 速率开启全开时，平底顶渐扩及底扩顶扩廊道体形的阀门净动水启门力过程线对比，2 种廊道体形的阀门最大净动水

启门力相当，但阀门最大净动水启门力发生的开度不同，底扩顶扩廊道体形最大净动水启门力发生在 $n=0.2\sim0.3$ ，平底顶渐扩廊道体形最大净动水启门力发生在 $n=0.5\sim0.6$ 。且如前文所述，平底顶渐扩廊道阀门后廊道顶压力脉动大于底扩顶扩廊道，其启门力脉动幅值也较大。

图 8b) 为阀门以 $t_v = 240$ s 速率开启全开，再以 $t_v = 180$ s 速率关门时，为平底顶渐扩及底扩顶扩廊道体形的阀门净动水闭门力过程线对比，2 种廊道体形的阀门最大净动水闭门力相当，底扩顶扩廊道体形最大净动水闭门力发生在 $n = 0.2\sim0.3$ ，平底顶渐扩廊道体形最大净动水闭门力发生在 $n=0.5\sim0.6$ 。

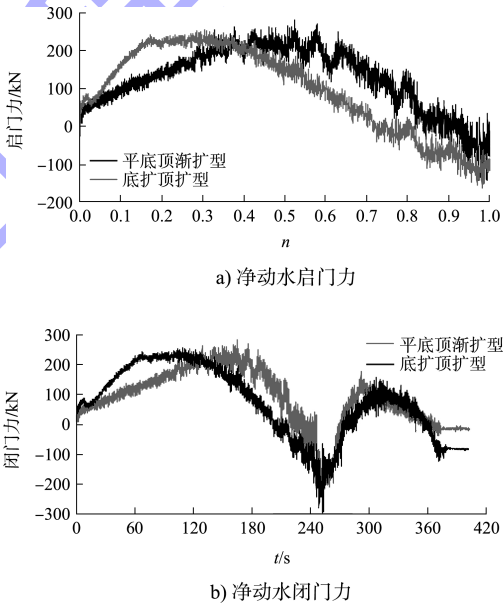


图 8 阀门净动水启闭力过程线

4 结论

- 1) 通过对阀门廊道段动水动力载荷特性及阀门启闭力特性等各项指标的分析，综合对比了底扩顶扩和平底顶渐扩 2 种廊道体形的不同特性。
- 2) 底扩顶扩由于升坎出口抬升压力作用，底扩顶扩体形典型开度下廊道顶、底的最低压力均比平底渐扩体形高；由于流态更顺畅，其在典型开度下廊道顶、底的脉动压力比平底渐扩体形也相对较小。
- 3) 对于高水头(20~40 m)的船闸，“底扩顶扩廊道体形+反弧门” 优于 “平底顶渐扩廊道体形+

反弧门”, 但该廊道形式工程量较大, 体形复杂, 对于施工要求较高, 后期检修维护也较困难。

4)综合各种因素, 犍为船闸选用“平底顶渐扩廊道体型+反弧门”方案。一般而言, 与“底扩顶扩廊道体型+反弧门”相比, “平底顶渐扩廊道体型+反弧门”阀门后水流流态不平顺, 压力脉动幅值较大, 导致阀门启闭力脉动较大, 对于阀门结构和启闭系统要求稍高。

参考文献:

[1] 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.

[2] 胡亚安, 张瑞凯. 三峡船闸阀门底扩与顶扩廊道水力特性综合研究[J]. 水科学进展, 1998(2): 164-169.

[3] 张瑞凯, 胡亚安, 须清华, 等. 三峡永久船闸阀门水动力学特性研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001.

[4] 王召兵, 周家俞, 缪吉伦. 草街船闸廊道顶掺气对提高廊道压力研究[J]. 中国水运(学术版), 2007(7): 70-71.

[5] 胡亚安, 严秀俊, 薛淑. 银盘船闸泄水阀门廊道体形优化及减压模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.

[6] 向祎. 船闸阀门突扩体廊道掺气水流数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.

[7] 郭超, 严秀俊, 胡宝瑶, 等. 万安二线船闸输水阀门段空

化特性及优化措施[J]. 水运工程, 2020(10): 12-17.

[8] 杜军, 罗少桢. 万安枢纽二线船闸输水系统阀门后廊道选型[J]. 水运工程, 2021(10): 276-280, 285.

[9] 胡亚安, 郑楚佩. 葛洲坝一号船闸输水阀门空化特性原型监测[J]. 水科学进展, 1994(3): 235-241.

[10] 张瑞凯, 李云, 胡亚安. 三峡永久船闸原型调试北线船闸水动力学关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.

[11] 胡亚安, 宣国祥, 严秀俊, 等. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程原型调试与水力学观测研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.

[12] 严秀俊, 李中华, 陈林, 等. 大藤峡水利枢纽工程船闸系统调试期水力学原型观测及成果分析研究(52 m 库水位通航)[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2021.

[13] 胡亚安, 严秀俊, 薛淑. 高水头船闸输水阀门启闭力特性研究[J]. 水运工程, 2021(2): 1-6.

[14] 胡亚安, 严秀俊, 王敬鹏. 岷江犍为航电枢纽工程船闸阀门水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.

[15] 严秀俊, 陈林, 王敬鹏, 等. 犍为船闸输水反弧门廊道非恒定流水力特性研究[J]. 水运工程, 2021(12): 21-27.

[16] 严秀俊, 胡亚安, 吴礼国, 等. 犍为船闸阀门防空化措施研究[J]. 水运工程, 2016(6): 125-129.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 14 页)

3)翼板参数对消波效果的影响体现在透射系数极小值对应周期, 翼板长度越长、角度越小, 透射系数极小值对应的波浪周期越长。适当调整截面参数可以使带翼板的浮式防波堤适应更多海浪环境, 增加更多应用场景。

参考文献:

[1] ABUL-AZM G A, GESRAHA M R. Approximation to the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves[J]. Ocean engineering, 2000, 27(4): 365-384.

[2] KOUTANDOS E, PRINOS P, GIRONELLA X. Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics[J]. Journal of hydraulic research, 2005, 43(2): 174-188.

[3] LOUKOGEORGAKI E, YAGCI O, KABDASLI S M. 3D experimental investigation of the structural response and

the effectiveness of a moored floating breakwater with flexibly connected modules[J]. Coastal engineering, 2014, 91: 164-180.

[4] CHRISTENSEN E D, BINGHAM H B, SKOU FRIIS A P, et al. An experimental and numerical study of floating breakwaters[J]. Coastal engineering, 2018, 137: 43-58.

[5] 陈力. 浮式防波堤的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[6] 侯勇, 孙大洋. 规则波作用下矩形浮式防波堤的消浪性能试验研究[J]. 水运工程, 2013(5): 41-44.

[7] 郑艳娜, 彭海婷, 陈昌平. 不规则波对方箱浮式防波堤作用的数值模拟[J]. 水运工程, 2015(7): 14-19.

[8] 沈雨生, 潘军宁, 周益人, 等. 双浮箱式浮式防波堤消浪性能试验研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(1): 47-54.

[9] 嵇春艳. 浮式防波堤水动力与消波性能分析理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

(本文编辑 武亚庆)