



旁海船闸阀门水力特性与防空化技术研究*

严秀俊¹, 胡亚安¹, 王 蛟^{1,2}, 李学义¹

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要: 旁海船闸输水阀门采用平板阀门形式, 其工作水头达 23.0 m, 阀门顶初始淹没水深仅 7.5 m, 阀门水力学问题是该船闸水力设计较为关键的技术难题。通过物理模型试验研究, 提出突扩廊道体型, 优化阀门门体结构和门槽体型, 探讨阀门段水力特性和空化特性。研究表明, 在优化阀门门体结构和门槽形式的基础上, 通过突扩廊道体型、门楣自然通气保护(必备措施)和跌坎强迫通气保护(储备措施)可有效解决该船闸平板阀门空化问题。

关键词: 平板阀门; 空蚀空化; 阀门结构; 物理模型

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0031-05

Hydraulic characteristics and cavitation defense technology on flat gate of Panghai ship lock

YAN Xiu-jun¹, HU Ya-an¹, WANG Jiao^{1,2}, LI Xue-yi¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China; 2. College of Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The gate type of Panghai ship lock is flat, and the working head is 23.0 m. The initial submerged depth of gallery roof is only 7.5 m, and the hydraulic problem on the flat gate is the key technical problem in hydraulic design. Based on physical model researches, we propose to expand the corridor, optimize the gate structure and corridor structure, and discuss the cavitation and hydraulic characteristics. Research shows that, cavitation problems could be solved on the basis of optimizing the gate structure and corridor structure, applying the techniques of extended corridor type, and take the necessary measure, natural aeration by lintel, and reserve measure, forced aeration by the drop floor.

Keywords: flat gate; cavitation; gate structure; physical model

国内外已建船闸运行经验表明, 高水头船闸在阀门开启过程中, 阀门底缘及下游剪切层、顶止水缝隙等部位较易发生空化, 输水阀门采用平板门时, 阀门门槽也容易产生空化。另外, 船闸输水阀门频繁操作, 工作条件复杂, 在非恒定高速水流条件下阀门的水动力学问题, 如阀门段廊道及门体结构承受的动水荷载脉动、阀门及启闭系统的流激振动等也较为突出。因此, 阀门工作

条件的好坏已成为衡量船闸设计成功与否的一个重要标志^[1-2]。

旁海航电枢纽是清水江梯级开发的第 1 级, 兼顾近期、中期和远期单向过坝运量需求, 确定船闸有效尺度为 120 m×12 m×3.0 m(长×宽×门槛水深), 闸室输水时间要求不超过 12 min, 远景通航 500 吨级船舶。上游最高通航水位 565.0 m, 下游最低通航水位 542.0 m, 最大工作水头 23.0 m。

收稿日期: 2016-09-19

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402001); 中央级公益性科研院所专项资金(Y115009)

作者简介: 严秀俊(1971—), 男, 教授级高级工程师, 从事船闸及升船机水动力学研究。

输水阀门采用平板门，输水阀门尺寸为 2.2 m × 2.5 m (宽 × 高)。阀门底高程 532.0 m，顶高程 534.5 m，最大水头时阀门顶初始淹没水深 7.5 m。旁海船闸平板阀门水头居国内外同类阀门前列，其阀门水力学问题是该船闸水力设计较为关键的技术难题。需通过相关的水力学物理模型试验，优化阀门段布置形式、提出阀门段动水荷载特性及减免空化的综合措施，确保船闸的安全高效运行^[3]。

1 廊道体型及流态

水力学物理模型试验包括阀门水力学非恒定流常压模型试验和恒定流减压模型试验，以充水阀门为研究对象，模型比尺 $\lambda_L = 12.5$ 。

模型试验推荐阀门后廊道采用“顶部突扩+底部突扩”形式，阀门后廊道体型见图 1。突扩体总长 15.8 m，顶扩 2.0 m，底扩 2.0 m。为了便于维护和检修，底扩段的跌坎和升坎均采用台阶形式。其中，跌坎总高度为 2.0 m，每一级台阶高 0.2 m、宽 0.15 m；升坎总高度为 4.0 m，升坎总长度为 6.33 m，升坎与水平成 31°，每一级台阶高 0.2 m、宽 0.33 m。底扩平底长度为 8.12 m。采用突扩体型，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，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^[4-5]。

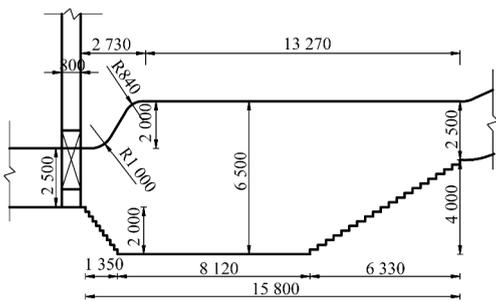


图 1 门后廊道突扩段 (单位: mm。下同)

阀门后廊道水流流态见图 2。该廊道体型门后水流流动形态在立面上可分为: 主流区; 门后底缘水流收缩和扩大形成的主回旋区; 主流上边界

次回旋区; 跌坎射流引起的次回旋区。由于门后廊道在平面上的面积没有变化, 水流在平面上无分离。底扩跌坎处增设台阶状跌坎, 不仅能减弱垂直跌坎下游次回旋区紊动强度, 亦便于检修。与多次曲线及斜坡升坎相比, 开门过程中, 台阶状升坎水流对廊道顶的顶托作用明显, 利于廊道顶压力的提高^[6-7]。

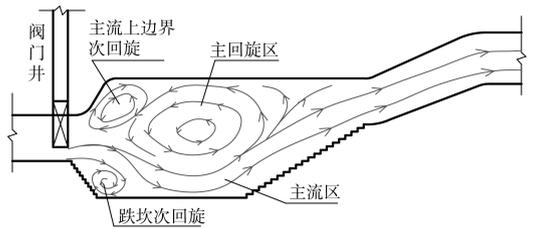
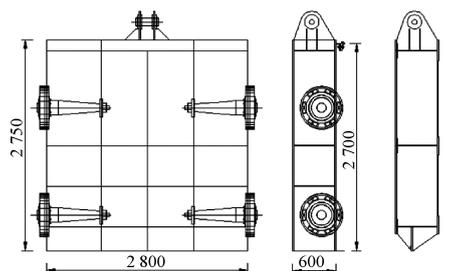


图 2 阀门段廊道水流流态

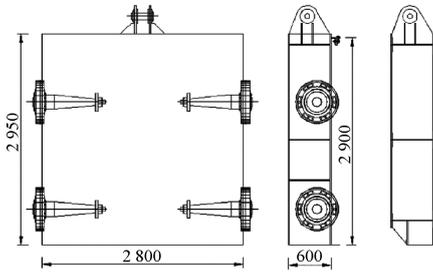
2 试验研究

2.1 阀门门体优化

输水阀门是船闸输水系统的咽喉, 其运行特性将直接影响过闸船舶安全和船闸运行效益。旁海船闸最大工作水头 23.0 m, 阀门顶初始淹没水深 7.5 m, 根据已建船闸运行经验, 该船闸阀门门楣缝隙段和底缘将存在较强空化, 而门楣自然通气是抑制阀门门楣缝隙及底缘空化的必选措施。旁海船闸原设计平板阀门体型如图 3a) 所示, 初步设计门高 2 750 mm 不能满足门楣通气体型的布置, 为此, 建议其阀门底缘至门顶止水高度调整为 2 900 mm, 门高增加到 2 950 mm。调整阀门下游面“梁格”布置为“全封闭”的铅直面布置, 以利于门楣自然通气的顺畅和通气量的稳定。建议优化门型见图 3b)。初步设计输水阀门质量 8 t (含拉杆质量), 建议增加输水阀门质量, 避免吊杆在动水关闭过程中受压。



a) 设计阀门



b) 建议阀门

图 3 阀门门型

2.2 水动力荷载

$t_v = 6 \text{ min}$ 非恒定流条件下各开度门后廊道顶部时均压力分布见图 4。廊道顶各测点压力受门后主回流区影响较大, 各开度压力分布反映了门后漩滚区的变化范围。 n 取 0.2~0.8 开度, 漩滚较强, 漩滚中心压力梯度较大, 且存在明显低压区。此后, 随开度的增大, 漩滚逐渐减弱, 漩滚中心压力增大, 压力梯度变小。距离阀门约 7.5 m (3 倍廊道高度) 处为主漩滚区中心, 此处的廊道顶压力最低。整个开门过程廊道顶最低时均压力约为 42.6 kPa, 发生在 $n = 0.2$ 开度。当 n 为 0.2~0.6 开度时, 在距离阀门约 15.0 m (约 6 倍廊道高度) 突扩廊道收缩段的末端, 廊道顶时均压力最大, 反映了主流对顶板的顶托作用。此后, 随阀门开度的加大, 顶托点向上游移动。

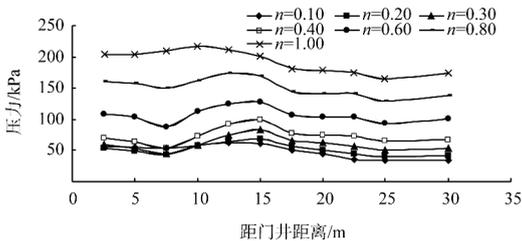


图 4 各开度廊道顶时均压力分布

$t_v = 6 \text{ min}$ 开启时门后廊道顶部压力脉动均方根分布见图 5。结合压力过程线分析可知, 在阀门开启后, 门后主回流区不断扩大和加强, $n = 0.5 \sim 0.9$ 开度门后主回流区脉动较强, 但最大压力脉动方根值未超过 9.8 kPa, 突扩体后压力脉动较小, “顶部突扩+底部突扩” 消能效果良好。

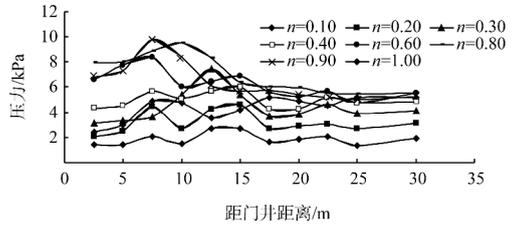


图 5 不同开度廊道顶压力脉动均方根值分布

阀门以不同速率开启时, 廊道顶部、底部最低时均压力见图 6。 $t_v = 4 \text{ min}$ 快速开启时, 与推荐的 $t_v = 6 \text{ min}$ 相比, 廊道顶压力下降 11.8 kPa, 廊道底压力下降 5.8 kPa 左右。随着开启速率的减慢, 廊道顶、廊道底压力有增大的趋势, 而慢速开启, 输水时间增大, 影响通航效率。从阀门水力学角度出发, 输水系统整体模型推荐的 $t_v = 6 \text{ min}$ 开启阀门也是合适的。

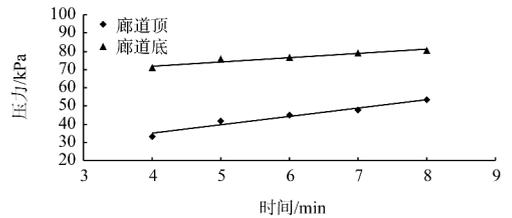
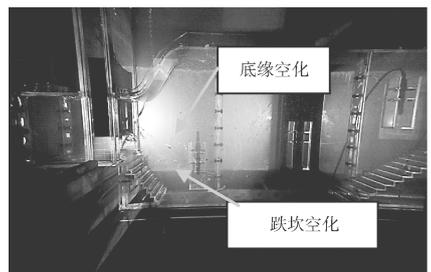


图 6 廊道顶底最低压力与开启速率的关系

2.3 防空化措施

阀门段空化形态见图 7。试验表明, 在未采取门楣自然通气的前提下, 旁海船闸充水阀门段存在 4 类空化: 底缘空化、跌坎空化、阀门门槽内漩涡空化及门槽出口空化。升坎未见空化。底缘空化被限制在突扩体水流内部。门槽空化为平板阀门所特有, 原门槽设计宽深比为 1.6:1, 宽深比较大, 门槽内容易形成稳定的漩涡。行进水流流经门槽下游侧棱时, 容易产生分离, 在脱流范围内出现压强降低现象, 易对门槽造成损害, 门槽空化见图 8。



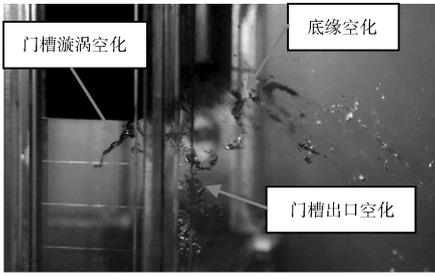


图7 原设计门体及门槽空化形态

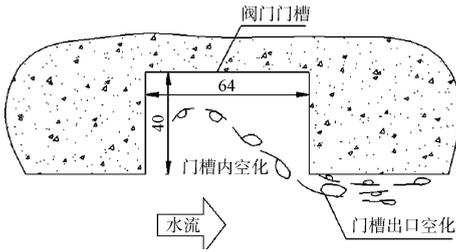


图8 门槽空化情况

模型推荐采用窄门槽以避免门槽空化，设计提供的优化后阀门及门槽分别见图9和10，重新加工阀门及门槽形式，再次进行空化特性试验。

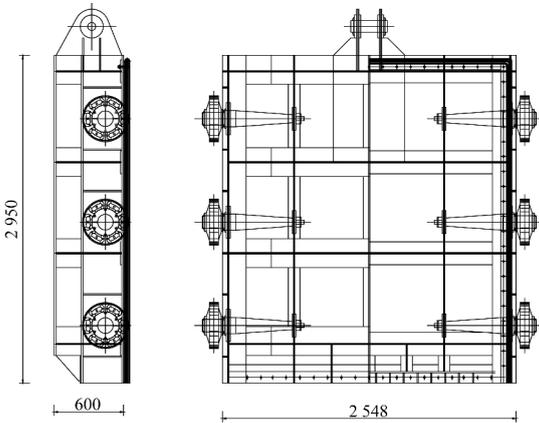


图9 优化后的阀门门型

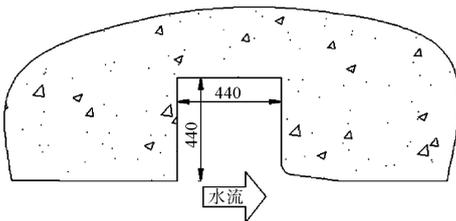


图10 优化后门槽

空化数是表征空化状态的特征参数，定义为：

$$\sigma = \frac{P/\gamma + (P_a - P_v)/\gamma}{v^2/2g} \quad (1)$$

式中： P/γ 为参考断面压力， 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。以 σ_i 表征水流处于临界空化状态， $\sigma > \sigma_i$ 时，表明阀门段无空化； $\sigma \leq \sigma_i$ 时，阀门段存在空化。定义 σ/σ_i 为相对空化数，表征空化的强弱，其值越小，表示空化越强。

由空化数定义可知，改变减压箱体真空度，可以提高或降低阀门空化数，从而可控制阀门空化状态。为此，通过目测、耳听及噪声监测仪器综合分析判断，测定了阀门门体及门槽优化前后各开度阀门临界空化数，并计算了相对空化数，阀门门体及门槽优化前后相对空化数(表1)。

表1 旁海船闸充水阀门门体及门槽优化前后相对空化数

部位	体型	阀门开度 n				
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
阀门底缘	原型型	0.39	0.41	0.69	0.79	>1
	优化体型	0.46	0.59	0.87	0.95	>1
跌坎	原型型	0.50	0.49	0.79	0.84	>1
	优化体型	0.52	0.55	0.79	0.94	>1
门槽漩涡	原型型	0.76	0.77	>1	>1	>1
	优化体型	0.77	0.79	>1	>1	>1
门槽出口	原型型	0.60	0.59	0.76	0.86	>1
	优化体型	>1	>1	>1	>1	>1

底缘、跌坎、门槽最小相对空化数从原型型的 0.39、0.49、0.76 分别提高到优化后的 0.46、0.55、0.77，门槽出口原来存在的较强空化完全消失，阀门门体和门槽优化效果显著。优化后门槽空化见图11，门槽空化为间歇性出现，空化尺度较小，强度也减弱。优化后阀门段空化形态见图12，底缘及跌坎空化强度减弱，但依然存在。

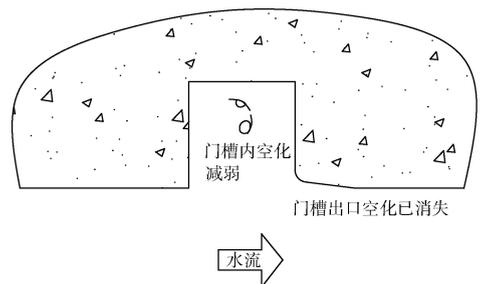
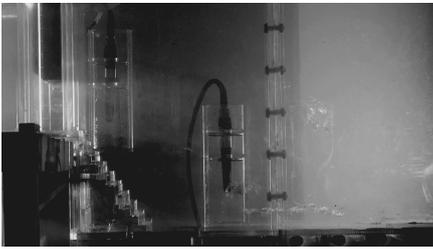


图11 优化后门槽空化情况

图 12 阀门段廊道底缘及跌坎空化形态 ($n=0.4$)

采用“顶部突扩+底部突扩”廊道形式, 并对阀门门体及门槽进行优化后, 尚存在的底缘及跌坎空化, 拟以“门楣自然通气(必备措施)和跌坎强迫通气(储备措施)”的工程措施解决。试验推荐了相应的门楣体型及通气管布置。

门楣与跌坎联合通气时, 廊道段流态见图 13。门楣通气保护了阀门面板及主流上边界, 跌坎通气保护了跌坎射流冲击区、廊道底板、升坎出口及其后主廊道。底缘空化相对较强的 $n=0.3$ 开度门楣通气与否噪声声压级对比见图 14, 门楣通气时噪声声压级比不通气时降低约 60 dB, 底缘空化得到充分抑制。跌坎通气与否噪声强度对比见图 15。

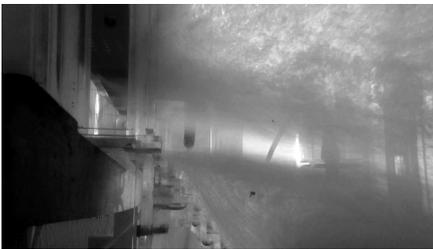
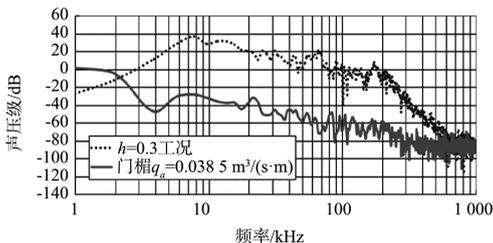
图 13 $n=0.4$ 开度门楣及跌坎通气廊道流态

图 14 1#水听器门楣通气与否噪声声压级对比

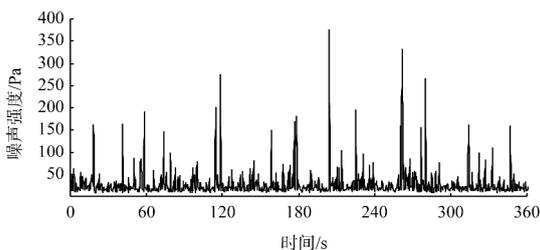
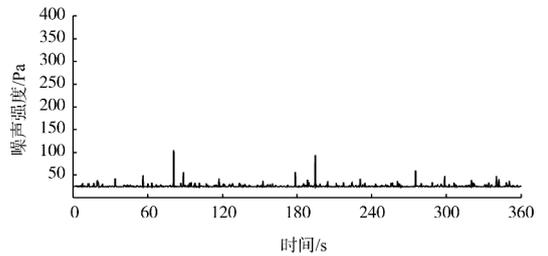
a) 跌坎不通气, $n=0.3$ b) 跌坎通气, $q_v=0.0385 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$

图 15 1#水听器跌坎通气与否噪声强度对比

试验表明, 极小的跌坎通气量即可完全抑制跌坎自身空化, 且对抑制阀门底缘空化效果也极为显著。

3 结语

1) 输水阀门后廊道采用突扩体型, 显著改善了水流流态, 主流对顶板的顶托明显, 增加廊道水流压力, 有利于抑制空化。同时, 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。

2) 优化阀门门槽为窄门槽, 并采用标准门槽出口形式, 可显著消减门槽内部漩涡及门槽出口空化。

3) 通过突扩廊道体型、门楣自然通气保护(必备措施)、跌坎强迫通气保护(储备措施)等技术措施可有效解决该船闸平板阀门空化问题。

参考文献:

- [1] 胡亚安, 刘本芹, 严秀俊, 等. 嘉陵江草街船闸施工阶段阀门水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007.
- [2] 胡亚安, 凌国增. 三峡船闸反弧形输水阀门水动力特性及防空蚀措施研究——“八五”国家科技攻关子题报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1995.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 胡亚安, 严秀俊, 薛淑. 银盘船闸泄水阀门廊道体型优化及减压模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [7] 胡亚安, 严秀俊, 曾晨军, 等. 北本水电站船闸输水阀门与阀门廊道段水动力特性研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)