

· 枢纽设计 ·



犍为船闸输水反弧门廊道 非恒定流水力特性研究^{*}

严秀俊¹, 陈林¹, 王敬鹏², 吴礼国³, 李泳龙³, 徐红³

- (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. 南水北调中线干线工程建设管理局河南分局, 河南郑州 450003;
 3. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川成都 610017)

摘要: 船闸输水阀门段动水荷载是高水头船闸设计中关键的技术难题。以犍为船闸输水反弧门“平底+顶部渐扩”的廊道非恒定流常压模型为依托, 重点研究阀门段动水压力特性、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的影响。综合分析阀门结构体系、门后动水荷载、启闭力特性、防空化效果等因素, 犍为船闸阀门不会发生有害的流激振动。

关键词: 平底+顶部渐扩; 水动力荷载; 开启速率; 作用水头; 启闭力; 犍为船闸

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)12-0021-07

Hydraulic characteristics of unsteady flow of reverse arc-gate corridor for water conveyance of Qianwei ship lock

YAN Xiu-jun¹, CHEN Lin¹, WANG Jing-peng², WU Li-guo³, LI Yong-long³, XU Hong³

(1.Key Laboratory of Navigation Structures, MOT, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2.Henan Branch of the Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Zhengzhou 450003, China;

3.Sichuan Communications Survey & Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: The dynamic water load in the discharge valve section of a ship lock is a key technical problem in the design of a high head ship lock. Based on the unsteady flow atmospheric pressure model test of the “flat bottom & expanding top” corridor of the back arc-gate of Qianwei ship lock, we emphatically study the characteristics of hydrodynamic pressure and hoisting force in valve section, hydro-dynamic load in the corridor of valve section under the condition of hydro-dynamic closing, the influence of opening rate and acting head on hydro-dynamic load and hoisting force. The results show that considering the structural system of valve, dynamic water load behind the door, characteristics of opening and closing force, air defense effect, the valve of Qianwei ship lock will not cause harmful flow-induced vibration.

Keywords: flat bottom & top spreading; hydro-dynamic load; opening rate; acting head; opening and closing force; Qianwei ship lock

船闸输水阀门不同于其他泄水建筑物的闸阀门, 其运转频繁, 承受不同水头荷载作用, 充泄水阀门启闭过程中的水流运动属于非恒定流范畴,

阀门承受各种复杂的水动力荷载作用, 并与水流相互影响, 阀门及启闭系统的流激振动问题较为突出。以阀门后底部突扩廊道^[1]为例, 在阀门开

收稿日期: 2021-05-28

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402006/04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(重大项目)(Y120011)

作者简介: 严秀俊(1971—), 男, 教授级高工, 从事船闸、升船机水动力学及水工水力学研究。

启过程中，门后存在多处较强的回流区及剪切面（涡面），随开度的变化，回流区及剪切面的强度、范围也随之变化，复杂的流态导致门后廊道动水荷载及其脉动较大，较易发生空化和诱发门体振动。李云等^[2]从输水系统布置、阀门水力学及引航道水力学方面对船闸水力学研究进行综述，介绍美国等先进国家的船闸建设经验和研究成果。陆漠芳^[3]主要介绍美国陆军工程师兵团在高水头船闸水力学设计方面的经验。李云等^[4]用所建立的船闸反弧门段的局部模型，给出恒定流条件下回流区长度的估算公式，比较恒定流与非恒定流门后流态的差异，并求出反弧门不同开度时的收缩系数。

为分析阀门段空化机理，凌国增等^[5]以葛洲坝1#船闸为研究对象，进行减压试验，发现阀门底缘是一较强的空化区，通过观察不同开度下空泡的产生、发展和溃灭过程，可划分为分离型空化与剪切型空化。刘平昌等^[6]从提高空化数的角度出发，研究减免阀门底缘空化的措施，并比较了各种改善措施的优劣。罗家麟等^[7]针对高水头船闸阀门空化问题，为提高门后压力，研究多种改善措施，诸如改变阀门开启方式、改变廊道体形等。严秀俊等^[8]依托实际工程开展阀门防空化措施研究。

阀门振动及启闭力的脉动与空化问题同样重要，郑楚佩等^[9]认为，输水阀门启闭力的脉动与阀门段空化问题是阀门运行中最难解决的问题，其强弱取决于流动的状态及水流的细部结构，并对启闭力的脉动特性进行研究。严秀俊等^[10]通过物理模型试验研究，提出突扩廊道体形，优化阀门门体结构和门槽体形，探讨阀门段水力特性和空化特性。严秀俊等^[11]通过长洲三线四线船闸的原型观测，检验模型研究提出的阀门抑制空化及抗振

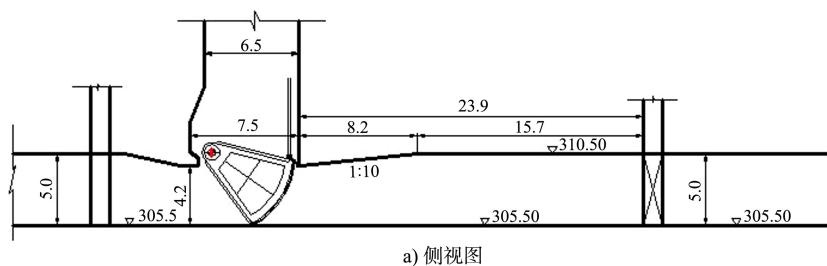
措施的效果，取得满意的调试成果。王召兵等^[12]结合水力学模型试验，阐述嘉陵江草街船闸阀门以不同速率开启的过程中阀门后廊道压力的变化情况，并重点研究阀门后廊道突扩体顶通气对减小廊道压力，防止廊道发生空蚀、空化作用。王晓刚等^[13]通过建立比尺为1:15的泄水阀门非恒定流常压模型，对6种动水关门事故工况条件下贵港船闸泄水阀门3种体形的动水启闭力特性进行研究，获得阀门底缘形式、阀门下游侧面板是否封闭对动水启闭力的影响规律。胡亚安等^[14]监测三峡船闸北4闸首输水阀门在紧急关闭时的工作特性，包括流量和门井水位变化、阀门空化、流激振动及启闭力特性，分析阀门在动水关阀时所承受的最大作用水头响应规律。胡亚安等^[15]通过三峡船闸阀门启闭力原型观测数据验证阀门启闭速率、阀后廊道体形、阀门作用水头对启闭力的影响，以及阀门门型、底缘形状、支臂包护方式等形状系数，研究阀门的形状阻力对阀门动水启闭力的影响。

本文以犍为船闸输水反弧门“平底+顶部渐扩”的廊道非恒定流常压试验模型为依托，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，综合分析评估廊道体形的合理性。

1 试验模型

1.1 模型布置

模型试验采用“平底+顶部渐扩”的廊道形式，阀门段廊道高度4.2 m，为避免廊道顶部集气，廊道顶部采用渐扩形式，渐扩比1:10，廊道断面渐扩至5.0 m，廊道体形见图1。



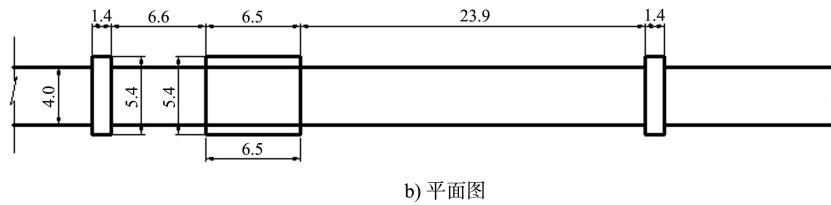


图 1 “平底+底部渐扩”廊道形式 (单位: m)

1.2 测点布置

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, 启闭力用高精度拉压传感器测量, 测点布置见图 2。

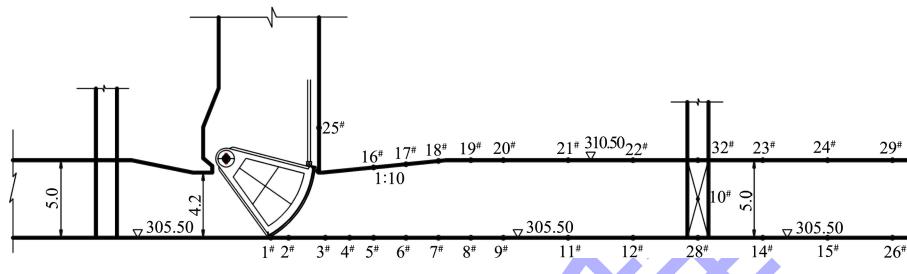


图 2 脉动压力测点布置

2 正常开启阀门时廊道非恒定流水动力荷载特性

2.1 廊道顶部压力特性

非恒定流条件下各开度门后廊道顶部时均压力分布见图 3。可以看出, 距阀门约 7.74 m (1.8 倍廊道高度) 处即主旋滚区中心的廊道顶压力最低, 整个开门过程廊道顶最低压力约为 1.22 m 水柱 ($n=0.5$) ; n 为 0.2~0.6 时, 漩滚较强, 漩滚中心的压力梯度较大, 压力也较低。开启时间 $t_v=4$ min 时门后廊道顶部脉动压力均方根值分布见图 4, 随着阀门开度的增大, 廊道顶最大脉动压力均方根值有向阀门移动的趋势, 距离阀门后 11.94 m 较大, 其最大脉动压力均方根值 σ 约为 2.01 m 水柱 ($n=0.7$), 阀门井下游 9 m 范围内, 脉动压力均方根值在 1.66 m 水柱以下。

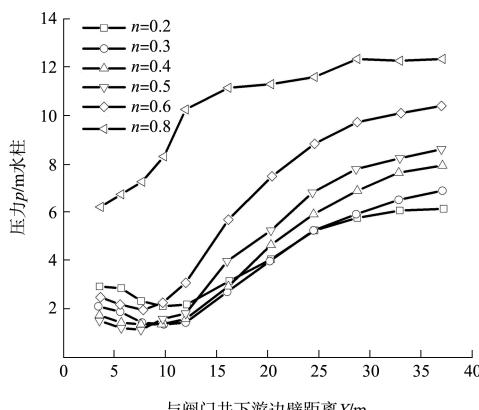


图 3 不同开度廊道顶压力分布

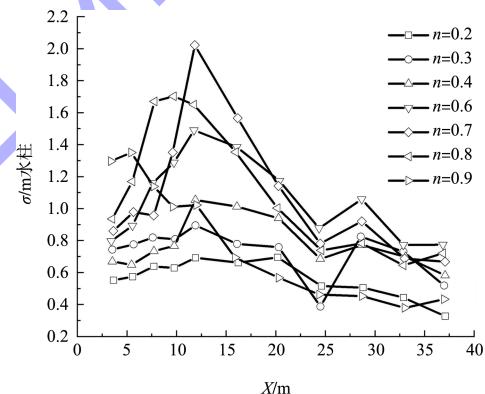


图 4 不同开度廊道顶压力脉动均方根值分布

2.2 廊道底板压力特性

非恒定流条件下, 典型开度门后廊道底板时均压力分布见图 5。可以看出, 开度 n 为 0.1~0.2、0.3~0.5、0.6~0.8、0.9~1.0 时, 廊道底板最低压力位于距阀门约 15.23 m (3.63 倍廊道高度)、13.13 m (3.13 倍)、8.93 m (2.13 倍廊道高度)、5.27 m (1.25 倍廊道高度) 处, 且随着阀门开度的增大, 廊道底最低压力有向阀门方向移动的趋势。

典型开度下廊道底板各点脉动压力均方根值对比见图 6。可以看出 n 为 0.1~0.3 时, 沿程脉动压力均方根值存在 2 个峰值区, 第 1 峰值位于射流水流冲击点, 最大脉动压力均方根值为 1.75 m 水柱, 发生在距离阀门底缘 1.32 m 左右的

2#测点，此时阀门开度 $n = 0.2$ ，第2峰值位于距离阀门底缘15.23 m左右的9#测点。整体上，阀门小开度时，孔口射流水流冲击点脉动较大，脉动压力均方根值以 $n = 0.2$ 时较大，而大开度时，孔口射流冲击脉动后移。

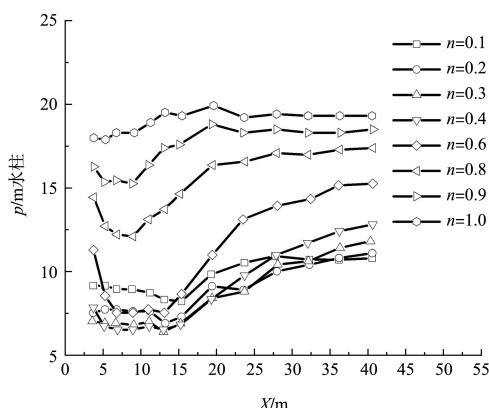


图 5 不同开度廊道底板时均压力分布

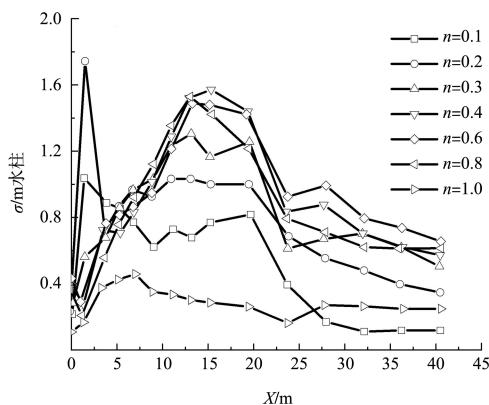
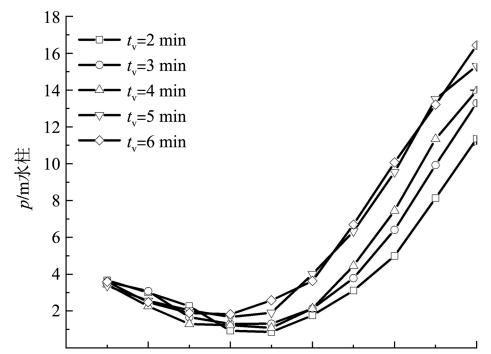


图 6 不同开度廊道底板脉动压力均方根值对比

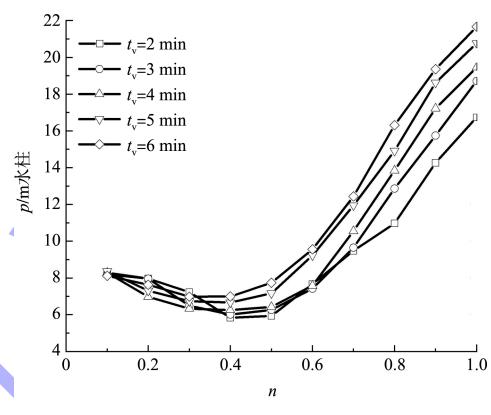
2.3 开启速率对廊道压力特性的影响

充水阀门以不同速率开启时，廊道顶部、底部典型测点时均压力对比见图7。阀门从全关位到全开位所用的时间 $t_v = 2, 3, 4, 5, 6 \text{ min}$ 时(间接代表开启速率)，廊道顶、廊道底压力在小开度低压区时压力基本一致，在大开度时，随开启速率的减小，廊道顶、廊道底压力逐渐增大。

不同开启速率下典型开度廊道顶、底测点脉动压力均方根值分布见图8。可以看出，开门速率越快，阀门同一开度廊道流量越大，流速越高，水流紊乱越剧烈，脉动压力均方根值随开门速率的加快有增大的趋势。

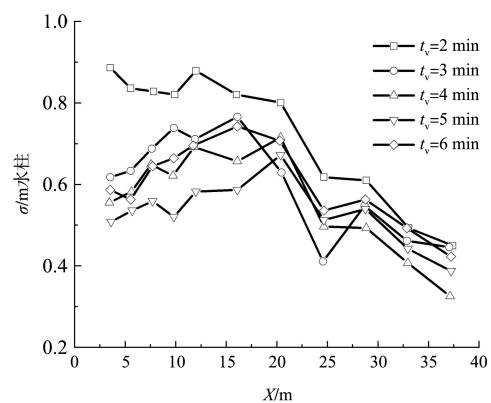


a) 18#测点

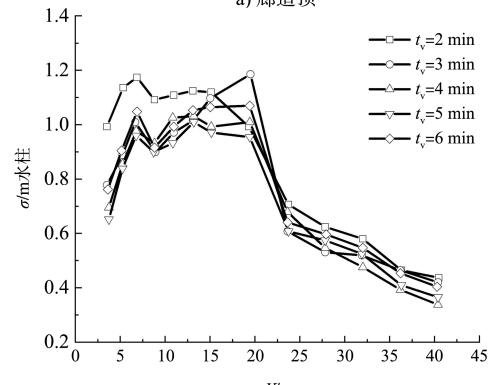


b) 8#测点

图 7 速率对廊道顶时均压力影响



a) 廊道顶



b) 廊道底

图 8 $n = 0.2$ 时速率对廊道顶和廊道底压力脉动影响

2.4 作用水头对阀门段水动力荷载的影响

保持下游水位不变, 研究不同初始作用水头对阀门段廊道水动力荷载特性影响。

阀门以 $t_v=4$ min 开启, 阀门段廊道顶典型开度($n=0.2$)时均压力分布见图 9。

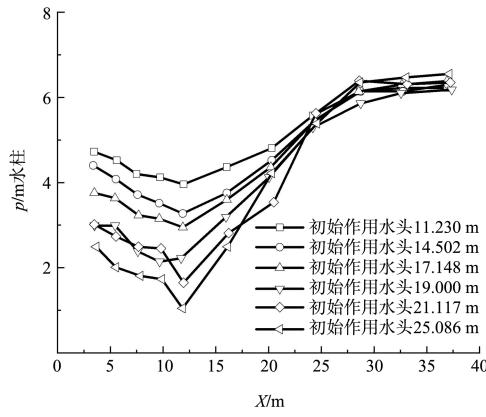


图 9 $t_v=4$ min、 $n=0.2$ 廊道顶时均压力曲线

不同初始作用水头下, 阀门段廊道顶时均压力分布规律相近。位于廊道顶部各测点压力受门后主回漩区影响较大, 压力分布反映了门后漩滚区的变化范围。漩滚中心(对应着压力最低点位置)位于工作门井下游 10~13 m 区域, 合 2.5~3.3 倍廊道高度; 门后漩滚对水流的影响范围可达工作门井以下 15~21 m 范围内, 为 3.8~5.3 倍阀门处廊道高度; 水流在位于工作门井后 24.5 m 的 32#测点趋于稳定。阀门段廊道顶压力随阀门作用水头的提高而降低, 检修门井后廊道顶压力随阀门作用水头的增大而增大, 符合规律。

阀门以 $t_v=4$ min 开启, 阀门段廊道顶典型开度($n=0.4$)脉动压力均方根值分布见图 10。阀门段廊道顶脉动压力均方根值分布规律相近, 廊道顶脉动压力均方根值随作用水头的提高而逐渐增加。

图 11 为 $t_v=4$ min 开启, 不同初始作用水头下典型开度($n=0.2$)阀门段廊道底时均压力分布, 随着水头的增加, 廊道底沿程压力分布规律相似。但不同区域压力大小的变化规律不尽相同, 处于

主流冲击区域的测点, 压力随着初始作用水头的增加而增加。处于水流主流区的测点, 随作用水头增大, 由于其主流流速增大, 因而其压力随着初始作用水头增加而减小。

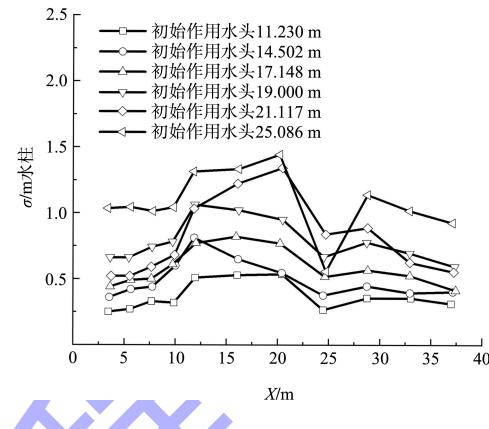
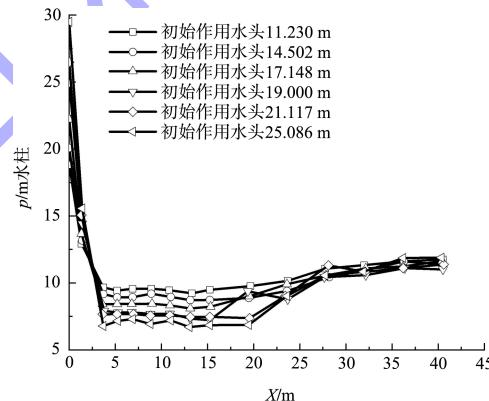


图 10 $n=0.4$ 廊道顶脉动压力均方根值曲线



a) 廊道底冲击点

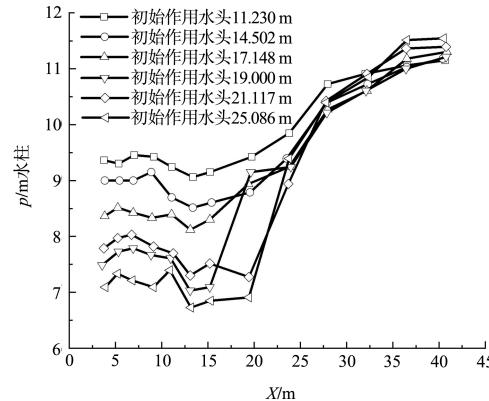


图 11 $n=0.2$ 廊道底冲击点和廊道底时均压力曲线

以 $t_v=4$ min 开启不同作用水头下典型开度阀门段廊道底脉动压力均方根值分布见图 12。虽然作用水头不同, 但沿程脉动压力均方根值分布相

似。廊道底脉动压力均方根值随作用水头的提高而逐渐增加。

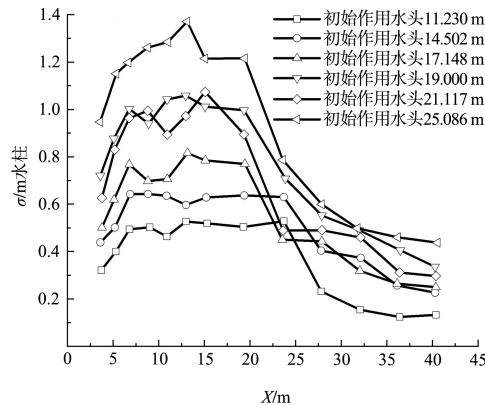


图 12 $n=0.2$ 廊道底脉动压力均方根值曲线

3 阀门启门力特性

3.1 启门力特性

3.1.1 正常开启

阀门以 $t_v = 4$ min 开启时, 动水启门力及静水启门力过程线见图 13a), 为排除原型和模型门重差异对动水启门力的影响, 通常以净动水启门力(动水启门力与静水启门力的差值)表征水流对阀门启闭系统的作用。阀门以 $t_v = 4$ min 开启时, 净动水启门力过程线见图 13b)。

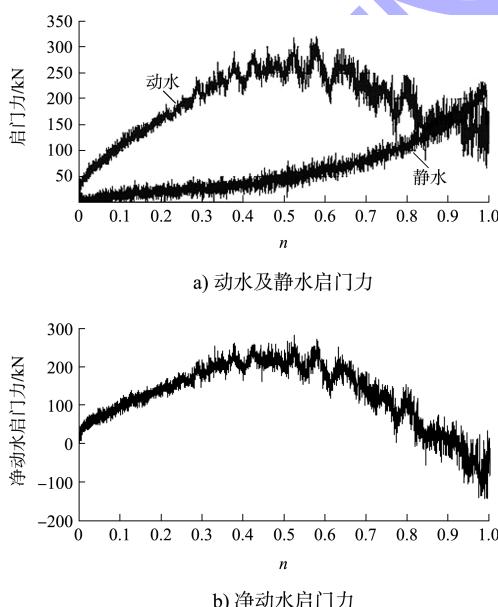


图 13 $t_v = 4$ min 启门力随开度的过程线

阀门开启过程中, 启门力呈先上升后下降的变化规律, 在阀门顶止水脱离门楣后, 动水启门力逐渐增加, 在 n 为 0.4~0.6 时, 启门力出现峰

值, 表现为来流对底缘的下吸力最大, 随后启门力逐渐下降。阀门以 $t_v = 4$ min 开启时, 最大净动水启门力为 226 kN。

3.1.2 开启速率对净动水启门力的影响

5 种开启速率下最大启门力与开启速率的关系见图 14。可以看出, 随开启速率的增大, 最大启门力有增大的趋势。

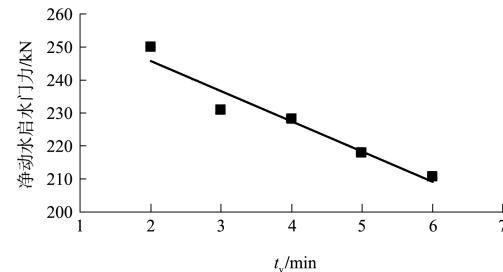


图 14 最大净动水启门力-开门速率关系

3.1.3 作用水头对净动水启门力的影响

不同初始作用下最大启门力与不同初始作用水头的关系见图 15。可以看出, 随着作用水头的增大, 最大启门力也增大。

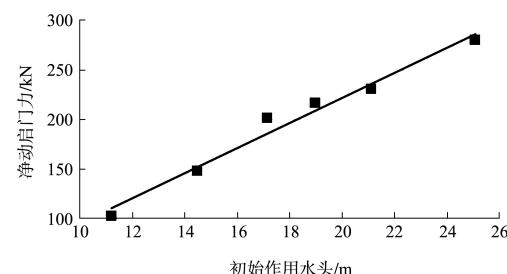


图 15 最大净动水启门力-初始作用水头关系

3.2 闭门力特性

阀门以 $t_v = 4$ min 开启至全开, 停机片刻后, 再以 $t_v' = 2$ min 关闭至全关位时, 动水启闭力及静水启闭力过程线见图 16a), 净动水启闭力过程线见图 16b)。闭门力均呈先下降、后上升、再下降的变化规律。关闭初期, 门井水位迅速上升导致上托力作用加强, 闭门力迅速下降直至形成低谷值。净动水闭门力最小值(峰值)约为 -200 kN(模型中是在静水中, 将启闭力传感器调零), 随着阀门的进一步关闭, 闭门力逐渐上升, 上托力作用逐渐减弱, 而主流对底缘的下吸力逐渐增强, 动水作用力逐渐由上托力变为下吸力起主导作用,

至 n 为 0.5~0.6 时闭门力出现峰值。

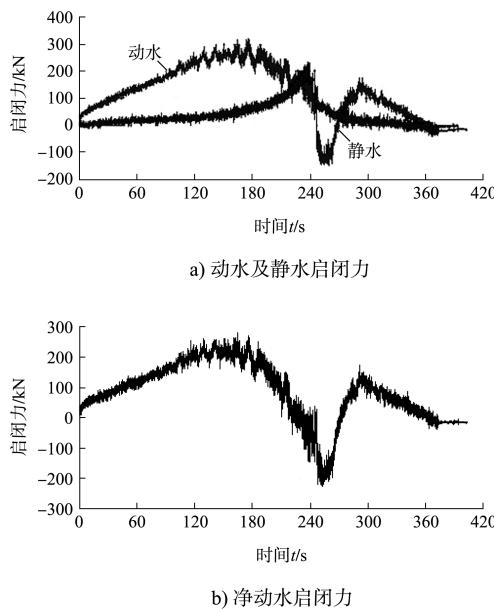


图 16 启闭力随时间的过程线

4 结论

1) 各种运行工况下, 廊道顶压力变化特性主要受门后大尺度漩滚影响。在 19.00 m 水头下, 当输水阀门以推荐的 $t_v = 4$ min 开启时, 距离阀门约 7.74 m(1.8 倍廊道高度)处即主漩滚区中心的廊道顶压力最低。整个开门过程廊道顶最低压力约为 1.22 m 水柱($n=0.5$)。 n 为 0.2~0.6 时, 漩滚较强, 漩滚中心压力梯度较大, 压力也较低。随着阀门开度的增大, 廊道顶最大脉动压力均方根值有向阀门移动的趋势, 以距离阀门后 11.94 m 的(20#测点)较大, 其最大脉动压力均方根值约为 2.01 m 水柱($n=0.7$)。阀门井下游 9 m 范围内, 脉动压力均方根值在 1.66 m 水柱以下, 门后输水廊道动水荷载在正常范围内。

2) $t_v = 4$ min 开至 $n = 1.0$, 阀门开启过程中, 最大动水荷载系数在 1.2 左右。动水关闭时最大水动力荷载系数出现在 n 为 0.3~0.5 开度关闭时, 此开度区间动水关闭时, 阀门承受的水动力荷载最大, 最大水动力荷载系数 1.32。阀门结构设计时应按相关规范选取。

3) $t_v = 4$ min 速率开启至全开, 停机片刻后, 再以 $t'_v = 2$ min 的速率关闭工况下, 最大净动水启

门力约为 226 kN, 出现在 $n=0.6$ 附近, 最小净动水闭门力为-200 kN(峰值), 出现在闭门初期。

4) 综合键为阀门结构体系、门后动水荷载、启闭力特性、防空化效果等因素, 结合大量原型观测成果, 认为键为船闸阀门不会发生有害的流激振动。

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] 李云, 胡亚安, 宣国祥. 通航船闸水力学研究进展[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1999(2): 232-239.
- [3] 陆谟芳. 美国高水头船闸的水力学设计[J]. 人民长江, 1986(3): 48-55.
- [4] 李云, 张瑞凯. 高水头船闸反弧门后水流流态和收缩系数研究[J]. 水利水运科学研究, 1996(2): 126-132.
- [5] 凌国增, 郑楚佩. 葛洲坝 1 号船闸反弧形输水阀门空穴流试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1988(2): 75-85.
- [6] 刘平昌, 王召兵, 向文英. 船闸输水阀门底缘空化改善措施研究[J]. 重庆交通大学学报, 2001(1): 110-113.
- [7] 罗家麟, 周华兴. 高水头船闸阀门空化改善措施的研究[J]. 重庆交通大学学报, 1997(2): 85-92.
- [8] 严秀俊, 胡亚安, 吴礼国, 等. 键为船闸阀门防空化措施研究[J]. 水运工程, 2016(6): 125-129.
- [9] 郑楚佩, 胡亚安. 水口船闸反弧门顶水封缝隙 1:1 切片模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1988.
- [10] 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.
- [11] 严秀俊, 胡亚安, 王新, 等. 长洲船闸阀门抗振及抑制空化措施研究[J]. 水运工程, 2016(7): 66-70.
- [12] 王召兵, 周家渝, 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.
- [13] 王晓刚, 胡亚安, 严秀俊, 等. 贵港二线船闸泄水阀门体型研究[J]. 水运工程, 2016(12): 51-58.
- [14] 胡亚安, 严秀俊, 薛淑. 三峡船闸紧急关阀工况输水阀门工作条件原型观测[J]. 水运工程, 2021(1): 1-5.
- [15] 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.