



贵港二线船闸泄水阀门体型研究*

王晓刚, 胡亚安, 严秀俊, 宣国祥

(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)

摘要: 贵港船闸是西江航运干线的咽喉, 航运地位十分重要。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 种体型的动水启闭力特性进行了系列研究, 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: 阀门下游侧面板不封闭将使下游河道水位的波动直接传播到阀门门井中, 导致阀门启闭力反复波动; 当阀门底缘朝下时, 底缘斜面压力小, 底缘受力主要表现为下吸力, 因此对应开门过程启门力大、闭门过程闭门力小; 阀门底缘朝上, 底缘斜面压力大, 底缘受力主要表现为上托力, 因此对应开门过程启门力小、闭门过程闭门力大, 采用底缘朝上型阀门时, 应考虑阀门配重。

关键词: 船闸; 泄水阀门; 模型试验; 净动水启闭力

中图分类号: TV135.4; U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0051-08

Body type of emptying valve at Guigang second-line ship lock

WANG Xiao-gang, HU Ya-an, YAN Xiu-jun, XUAN Guo-xiang

(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)

Abstract: Guigang ship lock for navigation of Xijiang river is very important, which locates in key position of the main navigation lines. A scaled model of emptying valve was established at Guigang second-line ship lock with length scale 1:15. The net opening and closing forces is systematically studied for three structural valves in six emergency valve closing situations. The influent of shapes of root edge of valve and face plate of valve on net opening and closing forces is obtained: 1) The fluctuation of water level in downstream river will induce fluctuation of net lifting forces of valve because the water can flow into and out the well of valve freely when downstream face plate of valve was opened. 2) The pressure of tilted panel of root edge is low and the suction force plays a main role at the root edge of valve when the tilted panel of root edge faces downstream. As a result, the net opening forces of valve with tilted panel of root edge facing downstream are bigger and net closing forces are smaller than those of valve with tilted panel of root edge facing upstream. 3) The pressure of tilted panel of root edge is high and the lifting force plays a main role at the root edge of valve when the tilted panel of root edge faces upstream. Consequently, the net opening forces of valve with tilted panel of root edge facing upstream are lower and net closing forces are higher than those of valve with tilted panel of root edge facing downstream. An extra weight for valve should be considered when a valve with tilted panel of root edge facing upstream was applied.

Keywords: ship lock; emptying valve; experiment; net opening and closing forces

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 中央级公益性科研院所专项资金 (Y115009)

作者简介: 王晓刚 (1980—), 男, 高级工程师, 从事工程水力学研究。

贵港航运枢纽是西江航运干线南宁至梧州段4个渠化梯级的第2个梯级,位于郁江中段贵港市上游约6.5 km处,上游距西津水电站约104.3 km,下游距桂平航运枢纽约110 km,是一座以通航为主兼顾发电的航运枢纽。贵港一线船闸(Ⅲ级船闸)于1998年1月竣工通航,整个枢纽于1999年竣工投入运行。贵港至梧州河段是广西水运最繁忙的河段,目前贵港经梧州至珠江三角洲的营运船舶占广西内河的80%以上,随着西部大开发和泛珠江经济圈经济合作的发展,近年来贵港市水运量增长速度较快,船舶大型化趋势明显。贵港一线船闸年设计通过能力现已处于饱和运行状态,压船候闸现象时有发生,2012年12月31日,国家发展与改革委员会批复建设贵港二线船闸工程。二线船闸正常蓄水位为43.10 m,最低通航水位29.0 m,最大水头为14.1 m^[1]。

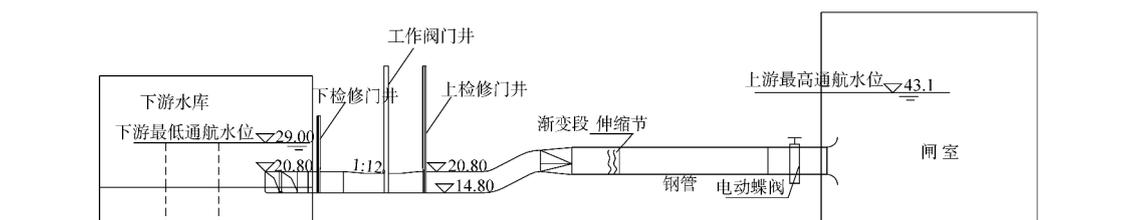
船闸输水阀门启闭频繁,工作条件复杂,防空化措施是船闸设计和建设中的关键技术难题,保证阀门系统的可靠性及启闭的灵活性也是设计人员极为重视的问题。水流对阀门的动水作用主要表现在以下两个方面:1)上游来流在门井区形成的漩滚对门体的上托力和阀门底缘处边界分离和贴附所导致的下吸力,这一因素既反映为门型对启闭力的影响,也表现了不同门体外形对漩滚水流的阻力作用,而下吸力则主要反映了底缘形式对启闭力的影响;2)阀门启闭过程中门井水位急剧下降(开启)和上升(关闭)的惯性对门体结构的冲击力以及门区流态特性的作用,反映为阀门启闭速率对启闭力的影响,它主要表现了启闭过程的非恒定流特性。闸门门体水动力荷载受闸门体型、作用水头、流速、启闭速度及通气和补气

等诸多因素的影响,变化非常复杂,目前还很难通过理论进行准确计算,一直是闸门水力设计及研究的重点和难点^[2-4]。本文拟通过物理模型试验,对贵港泄水阀门体型进行研究,分析不同底缘形式、阀门下游侧面是否封闭等工况下阀门净动水启闭力变化规律,获得贵港泄水阀门的优化体型。

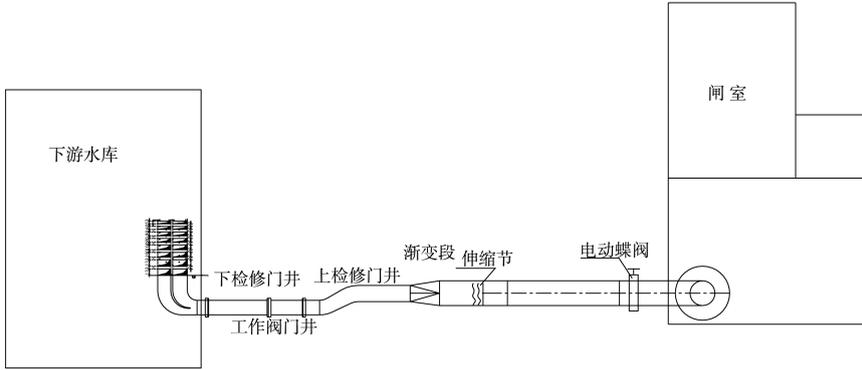
1 阀门段常压模型设计

通常,阀门水力学常压模型的比尺取为1:15~1:25,如葛洲坝、水口、五强溪、桥巩^[5]等船闸,近年来,随着阀门段防空化措施的不断丰富,特别是门楣及廊道顶通气措施的应用,为尽量保证掺气的相似性,模型比尺就不能太小,一般采用1:10~1:20,如三峡(1:10)^[6]、红水河大化、乐滩及嘉陵江草街(1:12)等船闸^[7-8],采用较大的比尺对于模拟阀门启闭力也非常有益。贵港船闸以泄水阀门为研究对象,结合贵港阀门特征,确定阀门水力学常压模型比尺 $\lambda_L = 15$ 。

贵港船闸阀门水力学常压模型由闸室、阀门试验工作段、下游水库、联接廊道及上下游调节阀组成,总体布置见图1。上游钢板水库取1/2闸室面积的换算值,下游水库设平水槽,以控制水位。为能准确反映来流条件及阀门段水流特性,自闸室出水段廊道(泄水时也为泄水廊道)到主廊道区域,模型满足阀门前廊道惯性换算长度相似要求。模型试验工作段与原型保持几何相似。试验工作段(包括阀门井和检修阀门井)全部采用有机玻璃材料制作,以便于观察水流流态。模型下游连接管路尺寸满足阀门后廊道惯性换算长度相似要求及几何尺寸相似。在上游连接管道中设有电动蝶阀以调节系统阻力。



a) 模型立面



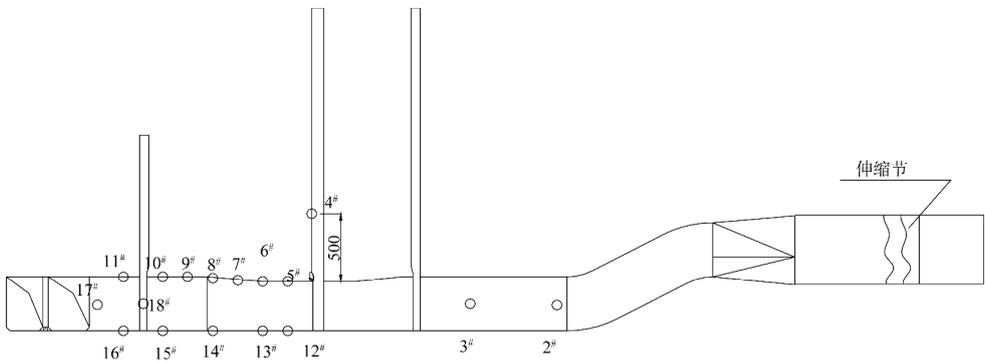
b) 模型平面

图 1 贵港船闸输水阀门常压水力学模型试验总体布置 (单位: m)

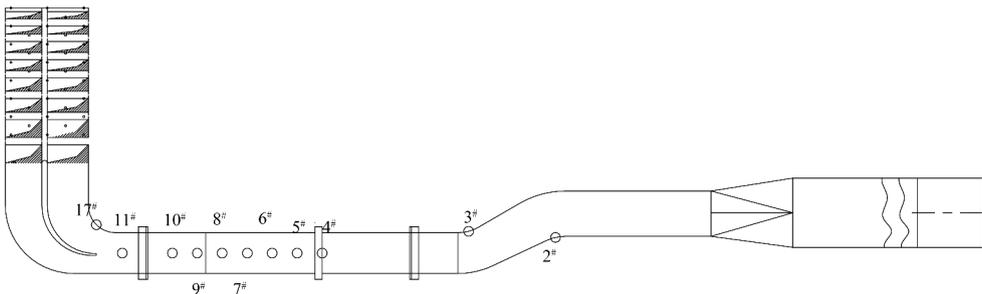
输水阀门采用可无级调速的步进电机驱动启闭机控制, 采用脉动压力传感器、拉压传感器等分别测量廊道非恒定流压力、启闭力特性, 闸室泄水特性曲线压力用电阻式点压力传感器测定, 采用由动态电阻应变放大器及 wavebook516E 采集系统组成的测量系统完成非恒定流信号的采集和分析处理。

为了便于在常压试验中测量压力分布及观测流

态, 在水平转弯段的凸面、阀门门井及阀门段廊道顶部、底部共布置了 15 只脉动压力传感器测量阀门段非恒定流动水荷载, 另外在闸室和下游水库各布置了 1 个水压力传感器, 以获得闸室及下游水库水位过程, 测点布置见图 2, 在吊杆上安装拉力传感器以测量阀门净动水启闭力(仅由水流引起的上托力或下吸力), 在阀门底缘安装 1 个水压力传感器, 辅助分析阀门净动水启闭力过程, 见图 3。



a) 立面



b) 平面

图 2 压力测点布置

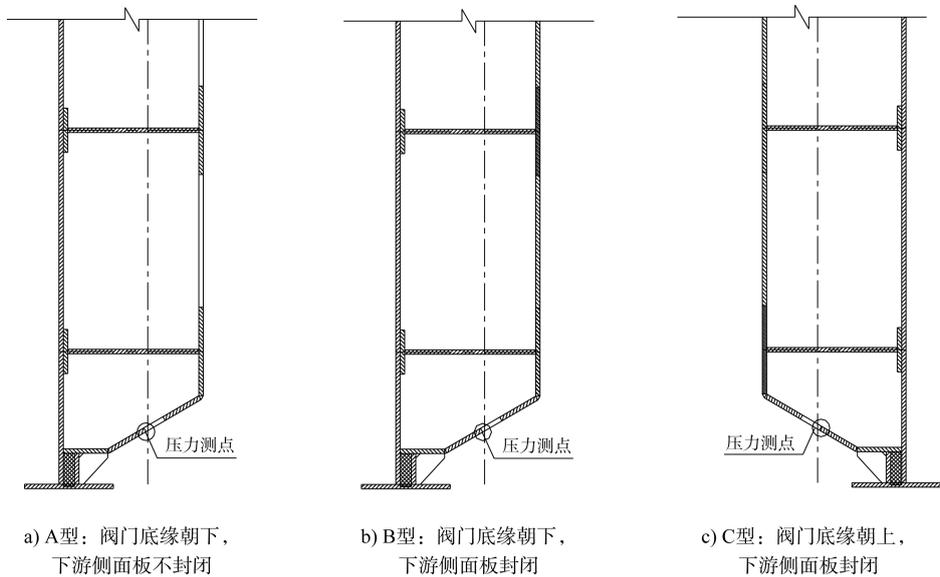


图3 3种阀门体型

贵港船闸阀门形式选用平板阀门，原型输水阀门质量 22 t，模型中门体自质量约为 6.5 kg。阀门启闭力大小是门体所受动水水流荷载的综合表现，直接关系到阀门结构和启闭机容量的设计。为排除原型和模型门质量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）表征水流对阀门及启闭系统的作用。启门力的峰值决定了启闭机的容量，而最小闭门力则关系到阀门能否依靠自重力正常关闭，以及启闭杆件是否受压，是决定阀门自质量的重要依据。依据规范，利用下式即可计算阀门启闭机动水启闭力，从而确定启闭机容量：

$$F_Q = n_T(T_{zd} + T_{zs}) + P_x + n'_c G + G_j + W_s \quad (1)$$

式中： F_Q 为动水启闭平面阀门的启闭力； n_T 为摩擦阻力安全系数，可取 1.2； T_{zd} 为支承摩阻力(kN)； T_{zs} 为止水摩阻力(kN)； P_x 为净动水启闭力，也称下吸力(kN)； n'_c 为计算启门力用的闸门自重力修正系数，可取 1.1； G 为闸门及吊杆自重力(kN)； G_j 为加重块重力(kN)； W_s 为作用在闸门上的水柱重力(kN)；利用下式可确定启闭机动水闭门力，从而确定阀门重力。

$$F_W = n_T(T_{zd} + T_{zs}) - n_c G + P_t - W_s \quad (2)$$

式中： F_W 为动水启闭平面阀门的闭门力； n_c 为计算闭门力用的闸门自重力修正系数，可取 0.9~1.0。

上述公式中，其他参数均可直接计算，但是净动水启闭力(上托力或下吸力)仅能通过试验获得，且该值与阀门体型、运行方式等均有很大关系。为了获得不同条件下贵港阀门动水启闭力特性，对阀门启闭最为关心的 6 种事故关门下(阀门先开启至 0.2 开度、0.3 开度、0.4 开度、0.6 开度、0.8 开度及全开位，停顿片刻后事故关门)，3 种不同体型阀门(图 3)受力特性进行试验研究。

2 阀门净动水启闭力特性试验

2.1 阀门体型对阀门净动水启闭力的影响

图 4 给出了上游水位 43.1 m、下游水位 29.0 m 时， $t_v = 7$ min 阀门开启速率(即阀门从零开度开至全开，总时长 7 min 对应的阀门开启速率，下同)下 3 种阀门体型的阀门净动水启闭力过程线(含模型换算到原型的滚动摩擦力)。由图 4 可见，不同的阀门体型将引起阀门净动水启闭力的巨大变化。

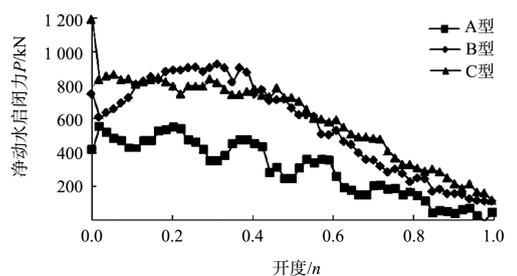


图4 阀门净动水启闭力 ($t_v = 7$ min)

2.1.1 A 型阀门净动水启闭力特性

阀门以 $t_v = 7 \text{ min}$ 速率开启到典型开度, 事故停机片刻后, 再以 $t'_v = 3 \text{ min}$ 的速率关闭时(即阀门从全开关门至零开度, 总闭门时间为 3 min 所对应的闭门速率, 下同), 动水启闭力过程线见图 5。开门初期, 净动水启门力即为整个启门过程的最大值, 约为 600 kN (由于阀门为平板门, 含模型换算到原型的滚动摩擦力, 模型中没有安装原型中的橡胶止水, 滑动摩擦力没有模拟)。

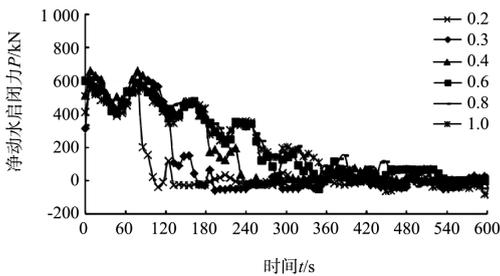


图 5 A 型阀门不同开度动水关闭净动水启闭力过程线

由于下游阀门面板不封闭, 水流从门体下游顺利进出工作阀门井, 阀门启闭过程中下游水位的上下波动会直接传导至工作门井内, 造成启闭力的来回震荡。关门初期, 门井水位迅速上升导致上托力作用加强, 闭门力迅速下降, 随着阀门的进一步关闭, 闭门力逐渐下降。在各种动水关闭工况, 最大净动水闭门力均在 -50 kN 以上。

2.1.2 B 型阀门净动水启闭力特性

B 型阀门以 $t_v = 7 \text{ min}$ 速率开启到典型开度, 事故停机片刻后, 再以 $t'_v = 3 \text{ min}$ 的速率关闭时, 动水启闭力过程线见图 6。由于底缘朝下, 受主流射流方向影响, 底缘下部为一低压区, 门后大漩滚区对门体影响大^[9-10], 下吸力显著, 同时由于阀门下游侧面板封闭, 门楣处间隙较小, 增大了水流对门体的吸力, B 型阀门开门初期净动水启门力即为最大值 $800 \sim 900 \text{ kN}$ (初始启动时启闭机瞬时启闭力达 1100 kN), 较 A 型阀门下游侧面板不封闭工况大 $100 \sim 200 \text{ kN}$, 随着开度的增大, 下吸力逐渐减小。阀门关闭初期, 门井水位迅速上升导致上托力作用加强, 闭门力迅速下降, 随着阀门的进一步关闭, 闭门力逐渐下降, 在各种动水关闭工况, 最小净动水闭门力均在 0 kN 以上。

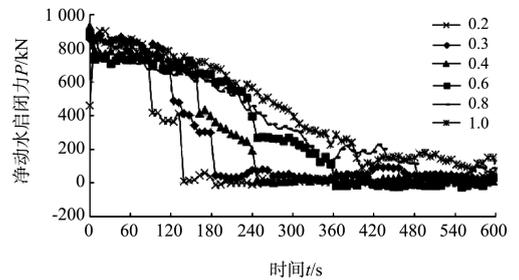


图 6 B 型阀门不同开度动水关闭净动水启闭力过程线

2.1.3 C 型阀门净动水启闭力特性

C 型阀门 $t_v = 7 \text{ min}$ 速率开启至全开, 事故停机片刻后, 再以 $t'_v = 3 \text{ min}$ 的速率关闭时, 动水启闭力过程线见图 7。阀门开启过程中, 启门力呈现先上升后下降的变化规律。阀门开启初期, 动水启门力逐渐增加, 最大净动水启门力(含模型换算到原型的滚动摩擦力)约为 900 kN (启闭机初始启动峰值约 850 kN), 出现在 $n = 0.2 \sim 0.4$ 开度附近, 表明该开度范围内, 来流对底缘的下吸力最大。

C 型阀门关闭初期, 门井水位迅速上升导致上托力作用加强, 闭门力迅速下降, 随着阀门的进一步关闭, 闭门力逐渐下降。在各种动水关闭工况, 最大净动水闭门力出现在 0.3 开度动水闭门工况, 净动水闭门力达到 -260 kN (表现为上托力), 在门体配重设计时应予考虑。

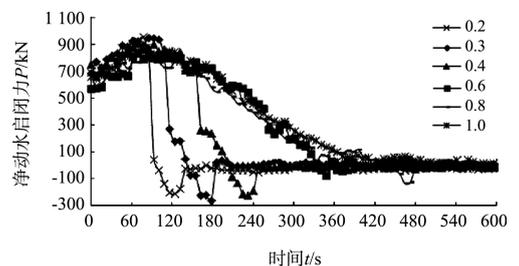


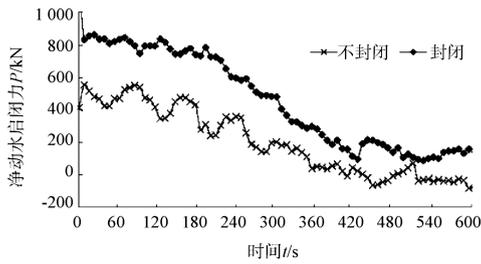
图 7 C 型阀门不同开度动水关闭净动水启闭力过程线

2.2 贵港阀门体型优选

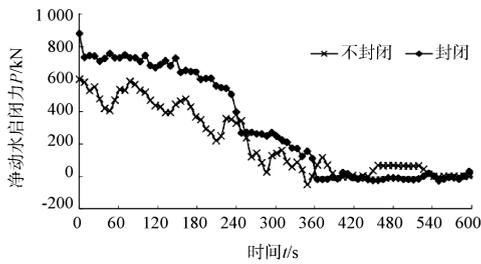
2.2.1 A 型、B 型阀门净动水启闭力特性对比

阀门以 $t_v = 7 \text{ min}$ 速率开启到典型开度, 事故停机片刻后, 再以 $t'_v = 3 \text{ min}$ 的速率关闭, A 型阀门与 B 型阀门净动水启闭力过程对比见图 8, 对比了 1.0 开度、 0.6 开度、 0.4 开度、 0.3 开度 4 个工况下净动水启闭力。由于阀门下游侧面板不封闭, 水流可以通过门楣位置自由进出, 门楣处压

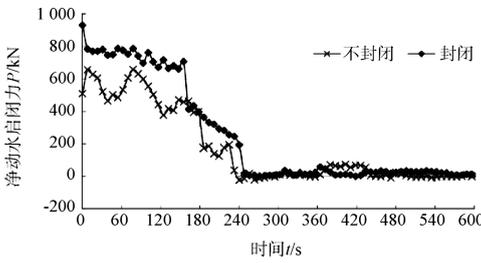
力增大,对门体吸附力减小,开门初期,A型阀门净动水启门力较B型阀门下游侧面板封闭工况小100~200 kN。由于下游阀门面板不封闭,水流从门体下游顺利进出工作阀门井,阀门启闭过程中下水位位的上下波动会直接传导至工作门井内,造成启闭力的来回震荡,对启闭机运行不利。另外,由于下游阀门面板不封闭,门楣位置间隙较大,门楣通气抑制空化的措施也将无法采用。



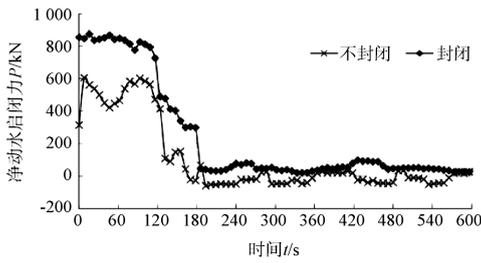
a) 1.0开度



b) 0.6开度



c) 0.4开度



d) 0.3开度

图8 阀门下游侧面板不封闭对净动水启闭力影响

A型阀门启闭力不断震荡的原因可以从门井内压力传感器(4#测点)的变化得到解释,面板封

闭前后阀门井水位过程线对比见图9。由图9可见,阀门下游侧面板不封闭时,阀门井内水位波动剧烈,而封闭后,阀门井内水位呈稳定下降趋势。可见,阀门井内水位的剧烈波动是造成启闭力来回震荡的主因,对阀门运行不利。

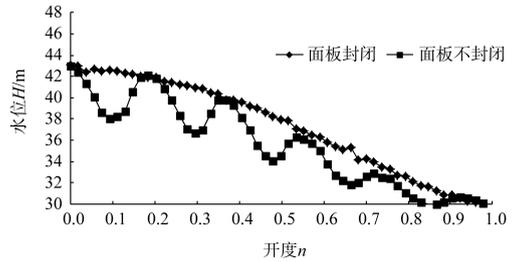
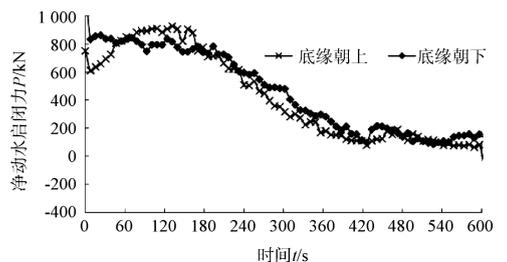


图9 面板封闭前后门井水位过程线对比

2.2.2 B型、C型阀门净动水启闭力特性对比

B型和C型阀门以 $t_v = 7 \text{ min}$ 速率开启到典型开度,事故停机片刻后,再以 $t'_v = 3 \text{ min}$ 的速率关闭,净动水启闭力过程线对比见图10,对比了1.0开度、0.6开度、0.4开度、0.3开度4个工况下净动水启闭力。底缘朝下时(B型),底缘斜面为背水面,底缘下方及后方水流为漩滚水流,压力以低压为主,对阀门的作用力主要表现为下吸力,且相比于底缘朝上(C型),开门前B型阀门底缘的静水压力较C型低14.1 m(阀门工作水头),因此,B型阀门开门初期净动水启门力跳至最大值800~900 kN(启闭机瞬时启闭力达1100 kN),随后净动水启门力逐渐下降;底缘朝上时(C型),底缘斜面为水流迎水面,以正压为主,因此,主要以上托力为主,开门初期,净动水启门力为600~700 kN,随着阀门的继续开启,受到门底缘高速水流的下吸力作用,净动水启门力增大至900 kN附近,随后逐渐下降。



a) 1.0开度

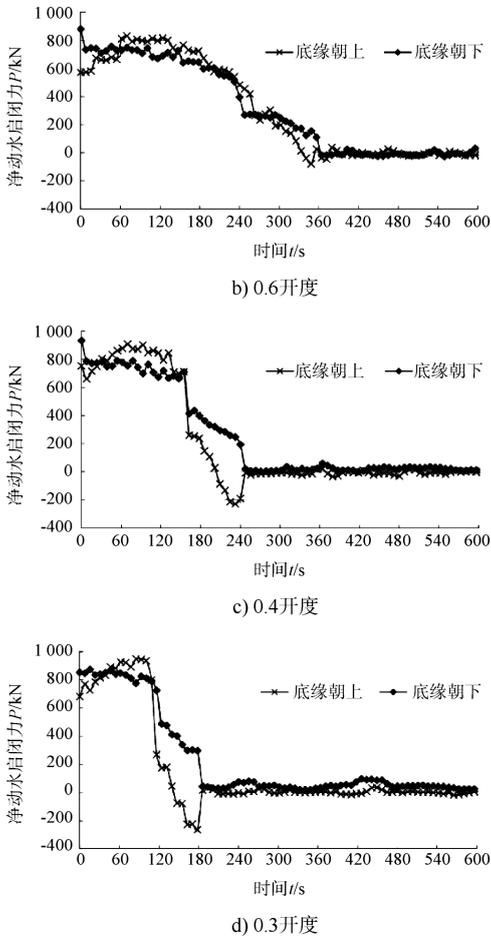


图 10 底缘朝向对净动水启闭力影响

B 型和 C 型阀门的这种净动水启闭力特征的差异主要源于阀门底缘的压力差异。图 11 为 $t_v=7$ min 速率开启到全开位置, 事故停机片刻后, 再以 $t'_v=3$ min 的速率关闭, 底缘压力测点的压力过程线 (测点位置见图 3)。在开门初期, 0.1 开度 (对应 42 s) ~ 0.2 开度 (对应 84 s), 底缘朝下工况, 底缘压力明显低于底缘朝上工况, 在 0.5 (对应 210 s) ~ 1.0 开度 (对应 420 s), 底缘处出现负压, 下吸力进一步增大, 因此, 底缘朝下的工况, 启门力较底缘朝上工况大。对于闭门力, 底缘朝上工况,

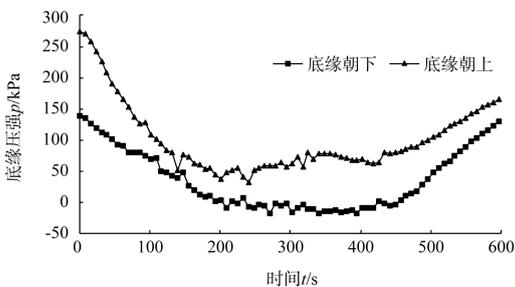


图 11 底缘压力过程线

底缘压力明显大于底缘朝上工况, 意味着水流对阀门的上托力大, 闭门力自然较大。

3 结论

1) 获得了 A 型阀门的净动水启闭力随阀门不同启闭方式的变化规律: 阀门下游侧面板不封闭体型 (A 型), 水流可从门体下游顺利进出工作阀门井, 阀门启闭过程中下游水位的上下波动会直接传导至工作门井内, 造成启闭力的来回震荡, 对启闭机运行不利, 不建议采用该型阀门。

2) 获得了 B 型、C 型阀门净动水启门力的变化规律: B 型阀门底缘朝下, 底缘斜面为背水面, 压力以低压为主, 对阀门的作用力主要表现为下吸力, 初始状态阀门底缘初始静水压力即低于 C 型阀门, 因此, B 型阀门开门初期净动水启门力迅速跳至最大值 800 ~ 900 kN (瞬时启闭力超过 1 100 kN), 随后随着阀门的继续开启, 净动水启门力逐渐下降; C 型阀门底缘朝上, 底缘斜面为迎水面, 以正压为主, 主要体现为上托力, 开门初期, 净动水启门力为 600 ~ 700 kN (瞬时启闭力约 850 kN), 随着阀门的继续开启, 受到门底缘高速水流的下吸力作用, 净动水启门力增大至 900 kN 附近, 随后逐渐下降。

3) 获得了 B 型、C 型阀门净动水闭门力的变化规律: B 型阀门关闭初期, 门井水位迅速上升导致上托力作用加强, 闭门力迅速下降, 随着阀门的进一步关闭, 闭门力逐渐下降, 在各种动水关闭工况, 最小净动水闭门力均在 0 kN 以上; C 型阀门关闭初期, 由于底缘受到主流的迎流顶托, 最大净动水闭门力出现在 0.3 开度动水闭门工况, 净动水闭门力达到 -260 kN (表现为上托力), 在门体配重设计时应予考虑。

4) 获得了平面阀门底缘朝向对净动水启闭力的影响规律: 底缘朝上, 净动水启门力先增大后减小, 最大净动水启门力出现在 $n=0.2 \sim 0.4$ 开度附近; 底缘朝下, 净动水启门力最大值出现在初始时刻, 且启闭机启动瞬时启闭力较底缘朝上工况大; 底缘朝上门型的净动水闭门力大于底缘朝下门型。综合比较, 推荐贵港阀门体型采用 C 型。

参考文献:

[1] 王晓刚, 胡亚安. 西江航运干线贵港航运枢纽二线船闸工程输水廊道阀门非恒定流常压模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013.

[2] 曹以南, 曾云军. 深孔链轮闸门在漫湾电站的应用[J]. 云南水力发电, 1995(4): 22-27.

[3] 龙朝晖. 溪洛渡水电站深孔事故闸门和工作闸门的设计[J]. 水电站设计, 2003, 19(1): 12-19.

[4] 夏念凌, 金泰来. 水工钢闸门设计[M]. 北京: 水利出版社, 1980

[5] 胡亚安, 左卫广, 严秀俊. 桥巩船闸阀门水力学试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.

[6] 张瑞凯, 胡亚安. 三峡船闸输水阀门水力学大比尺模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1997.

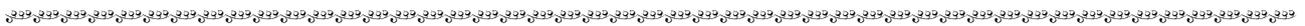
[7] 乔文荃, 严秀俊, 黄岳. 广西红水河大化水电站船闸整体水工模型报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001,

[8] 胡亚安. 西部超高水头枢纽通航建筑物关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007,

[9] 李云, 张瑞凯, 陈泰春. 突扩廊道体型减免高水头船闸输水阀门空化研究[J]. 水动力学研究与进展, 1997, 12(2): 245-249.

[10] 胡亚安, 张瑞凯. 三峡船闸底扩与顶扩体型水力特性综合研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 164-169.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 50 页)

[29] Deng J, Xu W L, Zhang J M, et al. A new type of plunge pool-multi-horizontal submerged jets[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(12): 2 128-2 141.

[30] Chen J G, Zhang J M, Xu W L, et al. Particle image velocimetry measurements of vortex structures in stilling basin of multihorizontal submerged jets [J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(4): 556-563.

[31] Chen J G, Zhang J M, Xu W L, et al. characteristics of the velocity distribution in a hydraulic jump stilling basin with five parallel offset jets in a twin-layer configuration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(2): 208-217.

[32] Stockstill R L, Neilson F M, Zitta V L. Hydraulic calculations for flow in lock manifolds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(117): 1 026-1 041.

[33] 杨朝东, 宣国祥, 张瑞凯. 船闸复杂分散输水系统输水数学模型研究[J]. 水利水运科学研究, 1997(3):

190-199.

[34] Stockstill R L, Berger R C. A three-dimensional numerical model for flow in a lock filling system [C]. USA: World Environmental and Water Resources Congress, 2009: 2 737-2 746.

[35] 黎贤访. 船闸分散输水系统闸室水动力学研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.

[36] 陈明, 梁应辰, 宣国祥, 等. 船闸输水过程三维水力特性动态仿真研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2013, 28(5): 557-566.

[37] 陈明. 船闸集中输水系统水力特性与闸室船舶系缆力数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.

[38] Chen M, Liang Y C, Xuan G X, et al. Optimum volume of grating energy dispersal chamber for a lock-head filling system[C]. USA: PIANC World Congress, 2014.

[39] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)