

• “高坝通航水力学研究”专栏(5) •



三峡船闸紧急关闭工况输水阀门 工作条件原型观测^{*}

胡亚安, 严秀俊, 薛淑

(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: 输水阀门是船闸输水系统的关键部位, 运行过程中受水动力荷载显著, 极易诱发空化、振动, 威胁阀门的安全运行。阀门在开启过程中遇紧急情况需动水关闭时, 廊道水流呈现负水击波特性, 门前压力迅速上升, 而门后压力陡降, 阀门工作条件恶化。通过现场原型观测, 监测了三峡船闸北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, 分析了阀门在动水关阀时所承受的最大作用水头响应规律。结果表明: 三峡船闸输水阀门在紧急关闭工况下, 工作条件安全可靠。

关键词: 三峡船闸; 阀门; 水动力学; 原型观测

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0001-05

Field-observation on filling and emptying valve of the Three Gorges ship lock in emergency case of closing valve under hydrodynamic load

HU Ya-an YAN Xiu-jun XUE Shu

Nanjing Hydraulic Research Institute Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology

Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: The valve is the key part of filling and emptying system of ship lock. It is significantly affected by hydrodynamic load during operation which can easily induce cavitation and vibration and threaten the safe operation of valve. When the filling and emptying valve in the emergency case of closing under hydrodynamic load the water flow in culvert presents negative water-hammer waves the pressure in front of the valve rises rapidly while the pressure behind the valve drops sharply and the working condition of the valve deteriorates. In this article through the field-observation the operation characteristics of the filling and emptying valve of the 4th gate on the north lane of the Three Gorges ship lock are monitored when it is closed in an emergency including the change of flow rate and water level of valve well characteristics of valve cavitation flow-induced vibration and hoisting capacity. The response regularity of the maximum acting head when valve in the emergency case of closing under hydrodynamic load is analyzed. The result shows that the filling and emptying valve of the Three Gorges ship lock is safe and reliable under the emergency case of closing.

Keywords: the Three Gorges ship lock; valve; hydrodynamics; field-observation

输水阀门是船闸输水系统的咽喉, 运转频繁, 在非恒定高速水流作用下, 承受各种复杂的水动力荷载, 极易发生空化、振动而危害阀门的安全

运行^[1-2]。

三峡双线连续五级船闸, 总水头 113.0 m, 中间级阀门工作水头达 45.2 m, 居世界之最, 阀门

工作性能直接关系船闸的安全与高效运行。文献[3-4]介绍了三峡船闸正常运行工况下中间级输水阀门工作特性,本文重点探讨了紧急关阀工况下阀门工作特性原型观测结果。

从提高船闸安全运行可靠性出发,输水阀门应能紧急动水关闭。三峡船闸实际运行中的动水关闭工况可分为两类,一类是输水末期,为控制闸室惯性超高(降)而提前关闭输水阀门;另一类是阀门开启过程,因种种原因实施紧急关闭。

船闸输水时,阀门井水位 H_w 和门后收缩断面压力 P_c 的计算公式为:

$$\begin{cases} H_w = H_1 - \xi_1 \cdot \frac{v^2}{2g} - \frac{L'}{gw} \cdot \frac{dQ}{dt} \\ \frac{P_c}{\rho g} = H_T' + \mu_n^2 H_n [\xi_2 - \alpha(2\sqrt{\xi_{vn}'} + \alpha)] + \frac{L''}{gw} \cdot \frac{dQ}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_w 、 H_1 、 H_T' 分别为门井水位、上闸室水位和下游水位; ξ_1 和 ξ_2 分别为阀门前和阀门后输水系统阻力系数; μ_n 和 H_n 分别为开度 n 时的流量系数和上、下闸室水位差; L' 、 L'' 分别为阀门前和阀门后廊道惯性换算长度; ξ_{vn}' 为开度 n 时的阀门阻力系数; Q 为输水流量; t 为时间; v 为收缩断面流速; w 为廊道断面积; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; α 为与阀门启闭速率有关的系数。

由式(1)可知,无论是哪一类动水关闭工况,在阀门动水关闭时, $\frac{dQ}{dt}$ 由开门过程中的正值骤变为负值或由全开后较小的负值变为较大的负值(亦即 $\frac{dQ}{dt} < 0$),廊道水流呈现负水击波特性,导致门井水位上升、门后压力下降。

对于第一类工况,动水关闭时阀门承受的作用水头只有6 m,水头较低,不足以产生有害水力现象;而第二类工况,阀门动水关闭时作用水头较大,水流惯性作用发生骤变,门前压力迅速上升,而门后压力陡降,阀门工作条件将趋于恶化。

1 动水关阀方式

北线船闸有水调试过程中,北4闸首先后出现了2种开启过程中高水头动水关阀的工况:

1)第1种动水关阀初始条件为:3、4闸室初始水位分别为128.00和82.92 m,初始作用水头45.08 m,阀门段廊道顶初始淹没水深26.17 m。输水阀门(阀门全开时间为128 s)开启81.6 s至 $n=0.64$ 开度(活塞杆行程3.2 m)时,由于上闸首人字门合拢信号丢失,阀门在停顿7 s后,现控程序实行紧急关阀,关阀历时(含下滑位时间)为90.4 s,关阀速度较快,相当于全关速率2 min。关阀时阀门工作水头为40.0 m。

2)第2种动水关阀初始条件为:3、4闸室初始水位分别为134.95和89.82 m,初始作用水头45.13 m,阀门段廊道顶初始淹没水深33.07 m。因水位计问题,输水阀门在开启92 s后集控程序实施紧急动水关阀,初始关阀开度 $n=0.86$,关阀时阀门工作水头为38.0 m。两次紧急关阀工况阀门行程与时间的关系见图1。

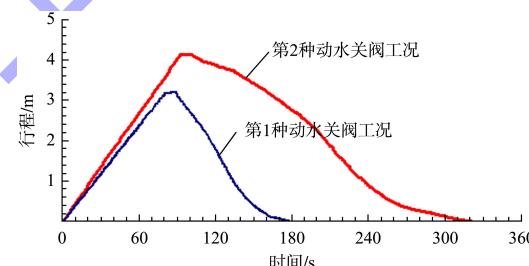


图1 紧急关阀阀门行程与时间的关系

本文的第2~4节主要介绍第1种紧急关阀工况观测成果。

2 输水流量及门井水位

现场观测的输水系统流量过程线见图2。阀门井水位过程线、下游检修门井水位过程线见图3、4。

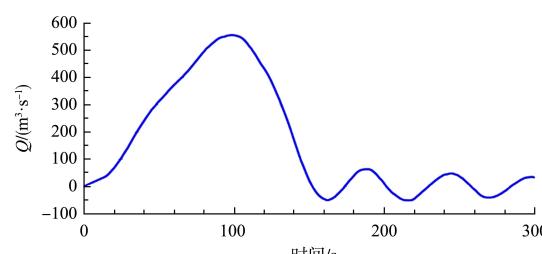


图2 输水系统流量过程线

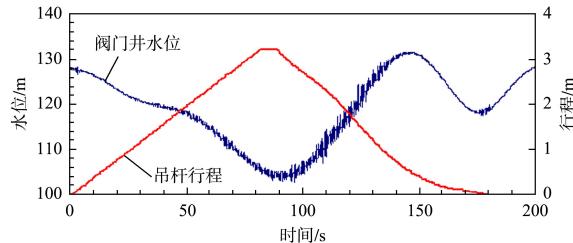


图3 阀门井水位变化过程线

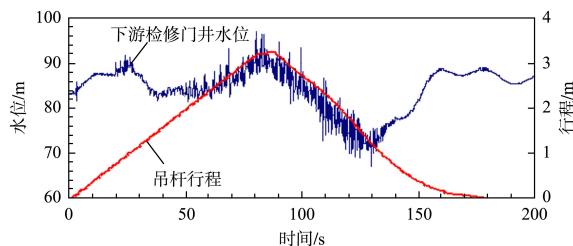


图4 下游检修门井水位变化过程线

观测结果表明, 动水关阀过程闸室水面流态较为平稳, 在关门末期, 闸室水位呈现波动状态, 最大波幅为 0.1 m。阀门关闭时刻, 输水系统流量约为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$, 阀门关闭初期, 水流惯性仍呈正向水击波特性, 输水系统流量仍在继续增加, 最大值为 $550 \text{ m}^3/\text{s}$, 发生在阀门关门后 13 s 左右, 随后, 输水流量逐渐减小, 水流惯性作用转变为负水击波特性。

关阀过程中, 阀门井水位迅速上涌, 最高水位可超过初始水位 3.5 m 左右; 下游检修门井水位急剧下降, 最低水位可降至初始水位以下 11.0 m, 但未出现负压, 仍有 15.0 m 水柱的正压。从图 3 可显见下滑位(阀门距全关位约 100 mm)的重要性, 在阀门关至下滑位时, 阀门井水位最高, 此后, 由于下滑位阶段关阀速度较慢, 仅 3.3 mm/s , 约为正常关闭速度 33 mm/s 的 $1/10$, 阀门井水位没有继续上升, 否则, 阀门涌高幅度更大。

3 阀门空化特性

图 5、6 给出了动水关阀工况门楣通气量与阀门段廊道噪声强度变化过程线。

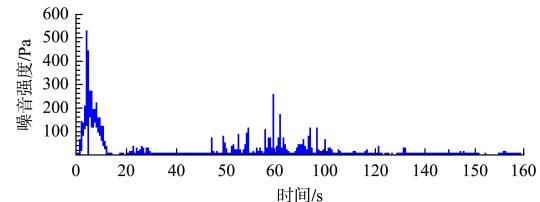


图5 廊道噪声强度过程线

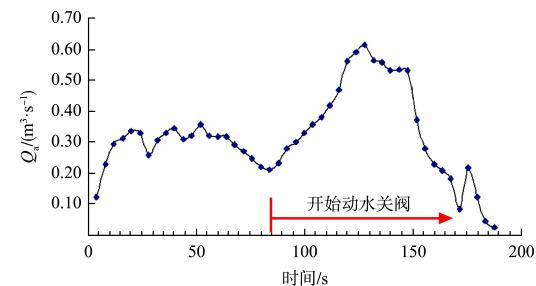


图6 门楣通气量变化过程线

门楣通气措施能较好地适应紧急关阀工况, 在关阀过程中, 由于门井水位上升、门后压力下降, 门楣作用水头增大, 导致门楣通气量显著增加, 在门后压力最低时, 通气量也达到最大, 其值可达 $0.60 \text{ m}^3/\text{s}$, 是正常开启过程的 2 倍左右, 对抑制阀门底缘空化非常有利。

噪声强度过程线显示, 紧急关阀工况阀门段廊道无明显空化, 仅在 $60\sim100$ s 时段阀门段有较弱空化, 而此时段门楣仍保持通气状态, 通气量超过 $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$, 可以有效抑制阀门底缘空化, 监测的空化噪声应为跌坎处发生的射流空化, 强度较弱。

4 阀门启闭力与流激振动特性

图 7、8 给出了动水关阀工况阀门启闭力和吊杆振动加速度变化过程线。如图所示, 动水关阀时门井水位迅速上涌, 水流对门体的上托力作用增强, 阀门能否依靠自重关闭从而避免杆件受压是确定关阀适用范围的重要依据。由图 7 可见, 在关阀之初, 启闭力下降, 出现低谷值, 但最小启闭力仍有 550 kN , 说明该关阀工况没有造成杆件出现受压状态, 并且还有较大的富余度。关阀过程中门体及吊杆振动有所增大, 但未出现较强

振动，关门过程振动量级约为开门过程的 2 倍，最大幅值约为 $0.2g$ 。

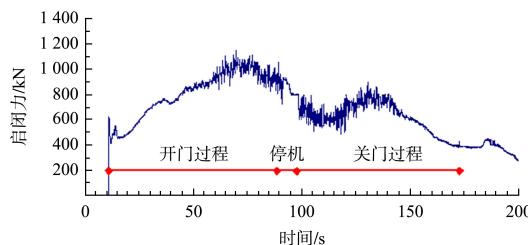


图 7 阀门启闭力变化过程线

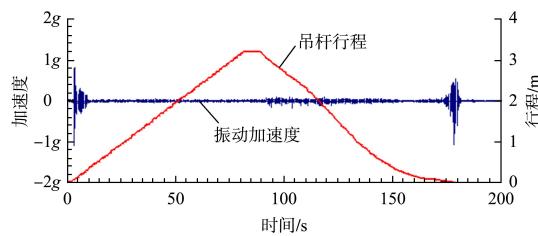


图 8 阀门吊杆振动加速度变化过程线

5 紧急关阀开度的影响

对于第 2 种动水关阀工况，初始关阀开度由第 1 种 $n = 0.64$ 增大到 $n = 0.86$ ，关阀时水头由 40.0 m 减小到 38.0 m ，而阀门处廊道初始淹没水深又较大，阀门工作条件相对较好。观测结果表明，在阀门开启 92 s 后紧急动水关阀瞬时，由于水流的惯性作用，输水系统流量继续增大，关阀 20 s 左右流量达到最大，约为 $680\text{ m}^3/\text{s}$ ，随后，流量开始减小。在 $n=0.86$ 开度紧急关阀，没有引起门井水位的急剧上涌，最高水位低于初始水位 8.0 m ，门后压力也未陡降，以阀门关至 $n=0.28$ 开度时门后压力最低，其值与初始水位接近。动水关闭过程，阀门段廊道无明显空化噪声，门体与吊杆受到门井水流的上涌作用，振动加速度约为开启过程的 2 倍。

开门与关门过程门楣通气量见图 9，值得关注的是，这种接近全开时的紧急关阀工况，在关阀过程中，当门后压力出现低谷区时，门楣处通气管又开始自然进气，在门后压力最低时，通气量达到最大，最大值约为 $0.27\text{ m}^3/\text{s}$ ，对抑制阀门底缘空化、改善阀门工作条件起到重要作用。

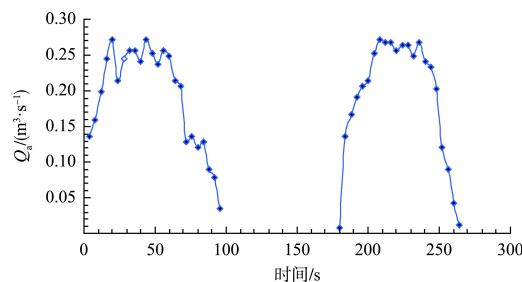


图 9 开、关门过程门楣通气量

6 紧急关阀工况阀门最大作用水头

阀门承受的作用水头 ΔH 定义为：

$$\Delta H = H_w - \frac{P_c}{\rho g} \quad (2)$$

分析式(1)、(2)可知，在阀门动水关闭时，廊道水流呈现负水击波特性，导致门井水位迅速上升，而门后压力陡降，阀门承受的作用水头增大，并可能超过初始水头。

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} 和 t_{v2} 、阀门启闭间隔时段 Δt 、阀门初始关闭开度 n 。定义 $K_f = \Delta H/H_0$ 为阀门水动力荷载系数， H_0 为阀门初始作用水头。在三峡船闸 1:10 阀门水力学模型试验中研究了各种因素对阀门水动力荷载系数的影响，见图 10。成果表明，开启速率相同时，闭门速率越快，或者间隔时段越短，则门井水位上升越高，而门后压力越低，阀门水动力荷载系数越大；当闭门速率和间隔时段相同时，随着开门速率的加快，门井水位和门后压力亦有上述相同的变化规律。最不利的工况并非阀门全开后立即关闭，而是出现在关阀开度 $n = 0.2 \sim 0.4$ 。阀门以 $t_{v1} = 1\text{ min}$ 、 $t_{v2} = 1\text{ min}$ 速率启闭时最高门井水位可达 80.2 m ，超过门井初始水位 9 m ，门后廊道顶最低时均压力比初始值下降 20 m 水柱，仅有 $4.0 \sim 6.0\text{ m}$ 水柱正压，检修门井处可能脱空，阀门承受的最大水动力荷载系数为 1.64。因此，设计中采用 1.8 的安全系数进行阀门结构设计是安全合理的。

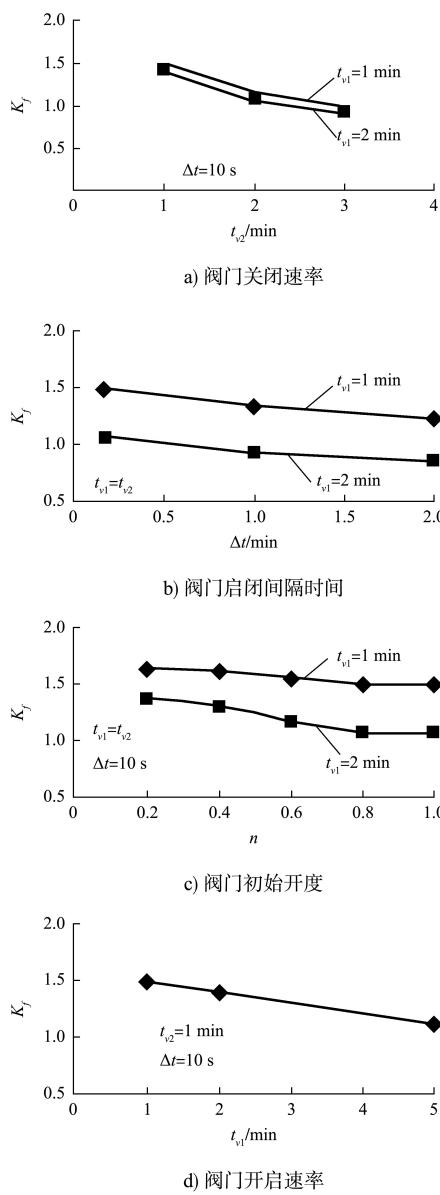


图 10 不同动水关闭工况下阀门水动力荷载系数

7 结语

1) 三峡船闸中间级闸首动水关阀, 即使在非

常不利的工况(关阀时工作水头达 40.0 m, 且关阀速率较快, 达 2 min, 远超过设定的 4 min), 阀门工作条件未见明显恶化。

2) 关阀过程中, 阀门井最高水位可超过初始水位 3.5 m 左右, 设置的下滑位起到了阻止门井水位继续涌高的作用; 下游检修门井水位急剧下降, 最低水位可降至初始水位以下 11.0 m; 启闭杆件保持拉力状态; 阀门段廊道空化较弱; 门体及吊杆未出现较强振动, 关门过程振动量级约为开门过程的 2 倍。门楣通气措施能较好地适应紧急关阀工况, 在关阀过程中, 门楣通气量显著增加, 最大通气量可达 0.60 m^3/s , 对改善阀门工作条件极为有利。

3) 在三峡船闸输水系统布置下, 各种动水关阀工况, 阀门承受的最大水动力荷载系数为 1.64, 设计采用 1.8 的安全系数进行阀门结构设计是安全合理的。

参考文献:

- [1] 胡亚安, 凌国增, 严秀俊. 三峡永久船闸阀门水动力学特性研究, “九五”国家科技攻关子项报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001.
- [2] 张瑞凯, 胡亚安, 李云, 等. 三峡永久船闸北线船闸水力学关键技术原型观测研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.
- [3] 胡亚安, 郑楚珮, 凌国增. 高水头船闸反弧形阀门门顶缝隙流特性及其应用[J]. 水利水运科学研究, 1995(4): 352-361.
- [4] 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(2): 3-5.

(本文编辑 武亚庆)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。