



长洲船闸阀门抗振及抑制空化措施研究

严秀俊, 胡亚安, 王新, 王蛟, 徐进超

(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,
水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要:长洲三线四线船闸采用特大型平面输水阀门, 阀门平面尺度4.6 m×6.0 m, 远超国内外水平, 空化和振动问题十分突出, 其阀门抗振动和防空化措施是该船闸群建设中的一项重大关键技术难题。通过原型观测, 检验了模型研究提出的阀门抑制空化及抗振措施效果, 取得了满意的调试成果。

关键词:特大型阀门; 阀门空化; 减振; 原型观测

中图分类号: U 641.3*3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0066-05

The vibration resisting and cavitation suppressing measure for the valve of Changzhou navigation lock

YAN Xiu-jun, HU Ya-an, WANG Xin, WANG Jiao, XU Jin-chao

(State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: No. 3 and No. 4 line ship locks at Changzhou adopt the oversize plane valves, with the dimension of 4.6 m×6.0 m, which is far above the level both at home and abroad with outstanding air-defense and anti-vibration performance which used to be a key technical problem of ship lock's construction. Through the prototype measurement, it verified the effect of vibration resisting and cavitation suppressing measure put forward in the model research, and obtained satisfactory commissioning results which can be referred for the similar projects.

Keywords: oversize valve; valve cavitation; vibration attenuation; prototype measurement

1 概述

输水阀门是船闸输水系统的咽喉, 控制输水系统的工作, 运行频繁。阀门在动水启闭过程中承受非常复杂的水动力荷载, 在非恒定高速水流作用下极易发生空化、振动, 导致阀门面板、门楣及门后廊道边壁空蚀破坏, 这不仅会增加船闸工程维护费, 还将延长大修周期, 增加停航检修时间, 直接影响航运效益^[1]。为降低输水阀门振动、空化带来的影响, 美国不论水头高低普遍采用抗振和空化性能较好的反向弧形阀门布置形式,

所提出的抗振动和防空化工程措施也是针对反向弧形阀门。而我国只有高水头船闸才采用反向弧形阀门布置形式, 中低水头船闸普遍采用的是造价较为低廉、维护比较方便的平面阀门, 相关管理单位也具有丰富的平面阀门运行和维护经验^[2]。国内外对于大型平面阀门在非恒定高速水流作用下的空化、振动问题研究, 特别是原型观测处于空白状态。

船闸输水具有非常显著的非恒定流特征(输水过程中流量由零增至最大再减少至零), 原型与

收稿日期: 2016-02-28

作者简介: 严秀俊(1971—), 男, 高级工程师, 从事船闸、升船机水动力学及水工水力学方面研究。

模型廊道水流由于雷诺数及廊道边壁糙率的不相似性,导致船闸水力学领域原型与模型存在明显的缩尺效应^[3]。国内外船闸原型流量系数一般大于模型 10%~20%,使得原型的水力现象较模型更为强烈,原型流量系数更大,输水时间更短,输水流量、水面紊动、输水末期的水面惯性超高(降)、阀门后负压、空化等均较模型增大或增强,虽然这种原、模之间的差别在模型试验中可根据已有经验及理论预测,但预测方法尚不完善,因此通过原型调试掌握实际情况与模型试验的差别,对船闸工程的安全运行至关重要^[4]。

国内外对船闸原型调试工作十分重视,国外船闸中,如美国老邦纳维尔船闸、约翰德船闸、冰港船闸、湾泉船闸及新威尔逊船闸等,通过调试改变阀门开启方式为间歇开启,优化了水流条件及阀门工作条件;对设有通气孔的船闸,通过原型调试设定通气孔尺寸;对分散输水系统船闸确定降低输水时惯性超高(降)阀门的运行方式等。国内的三峡船闸、葛洲坝船闸、大化船闸、乐滩船闸、桥巩船闸和草街船闸,通过原型调试一方面综合论证了船闸输水系统性能及闸阀门工作条件^[5];另一方面又根据原型情况,优化和调整船闸运行方式,提出了各项措施,及时解决了调试中的多项关键技术难题,创造了国内外罕见的奇迹^[6-8]。实践表明,凡通过认真原型调试的船闸,其船闸的性能可达较佳状态,过闸船舶及船闸设备的安全也能得到保证,船闸的航运效益十分显著^[9-11]。

长洲水利枢纽是一座以发电为主,兼有航运、充灌和养殖等综合利用效益的大型水利枢纽。坝址以上集雨面积为 30.86 万 km²,水库正常蓄水位 20.6 m,总库容 56 亿 m³。电站共安装 15 台单机容量为 42 MW 的灯泡贯流式水轮发电机组,总装机容量为 630 MW,年均发电量 30.143 亿 kW·h,是我国西江航运干线上的核心枢纽^[12]。新建的三线四线船闸工程位于枢纽右岸台地,最大设计通过船舶吨级为 3 000 吨级,为 I 级船闸。船闸运行最大水头为 17.28 m,设计有效尺度为 340.0 m×

34.0 m×5.8 m(长×宽×门槛水深)^[13]。由于长洲三线四线船闸是世界内河规模最大的单级船闸群,因此,在正式通航前,观测其输水系统水力特性、阀门振动、空化特性,通过原型调试和实船试验,及时解决船闸存在的技术问题,调整和优化船闸运行方式,对确保船闸运行安全及船舶安全快速过闸具有十分重要的意义。长洲船闸三线四线船闸原型观测调试工作分为无水系统联合调试、有水系统联合调试(含实船试验)两个阶段进行。本文主要通过原型观测,阐述模型研究提出的抑制阀门空化及抗振的措施效果^[14]。

2 阀门抑制空化及减振措施

长洲三线四线船闸的输水阀门均采用了结构简单、造价较低的平面输水阀门,共有 8 只输水阀门和 4 只连通廊道输水阀门,每只阀门尺寸达 4.6 m×6.0 m,承压面积是目前国内外平面阀门应用水头最高的桥巩船闸的 5 倍、是三峡船闸中间级闸首反弧门的 1.46 倍,远超国内外水平,其空化和振动问题十分突出,直接关系船闸的安全运行。因此特大型平面阀门抗振动和防空化措施是该船闸群建设中的一项重大关键技术难题,国内外无成熟的经验可供借鉴^[15]。

2.1 模型优化阀门结构

为提高阀门自振频率和满足门楣通气设计要求,在设计阶段,模型试验研究提出阀门下游面在原设计基础上增设厚度 10 mm 的面板,将下游面密闭。阀门整体刚度有所增大,这将引起结构的自振特性发生变化。模型优化前后的阀门前 7 阶动特性参数对比见表 1。

表 1 阀门优化前后动特性参数对比

阶数	修改前		修改后	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	19.23	3.92	60.79	4.07
2	74.44	2.79	91.10	3.64
3	92.04	2.47	117.18	3.69
4	113.20	2.65	130.37	4.13
5	126.96	3.27	168.94	4.65
6	153.15	3.73	212.00	3.62
7	184.94	3.51	246.67	3.71

注:各阶对应振型完全一致。

从表1可知,阀门下游面增设面板后,其基频显著增大,结构一阶频率由 19.23 Hz 增至 60.79 Hz,其他各阶频率也都有明显增加。而增设下游面板前后各阶对应的振型是完全相同的,未发生变化。可见,阀门设计修改后,其自振频率完全脱离了正常情况下水流脉动的高能区,明显提高了阀门的抗振性能。

2.2 原型阀门动特性

现场随机选取一个制造完成的工作阀门进行动特性试验,用行车将阀门吊起悬挂,阀门无约束,处于自由状态,见图1。工作阀门前5阶模态频率和阻尼比见表2。结果表明阀门前5阶自振频率在 63.54~255.72 Hz,远大于水流的脉动频率(约 10 Hz 以下),故阀门在动水启闭过程中,没有产生共振现象。对比表2数据可知,1~3阶自振频率与模型试验值接近,4阶、5阶自振频率更是高于模型试验值。原型观测表明,模型试验阶段提出的优化阀门结构、提高阀门自振频率的措施效果显著。



图1 工作阀门自振特性试验状态

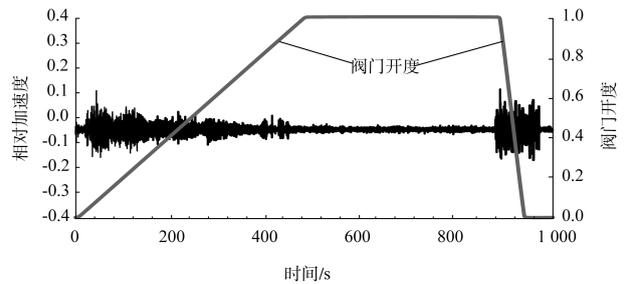
表2 观测阀门结构平均模态参数

序号	原型		模型优化后	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	63.54	2.55	60.79	4.07
2	92.68	2.24	91.10	3.64
3	130.19	4.60	117.18	3.69
4	197.20	3.44	130.37	4.13
5	255.72	2.80	168.94	4.65

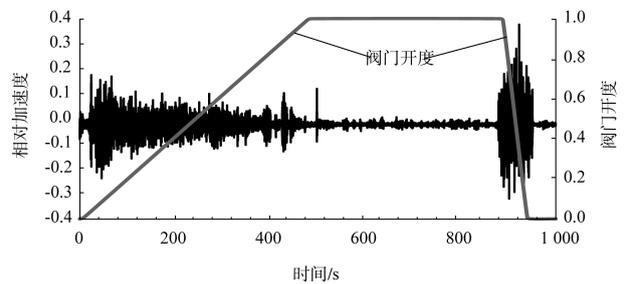
2.3 门楣通气减振

门楣通气措施系我国独创,是解决高水头船闸特别是已建工程阀门空化问题的一项非常有效的工程措施。该技术的核心是:利用门楣缝隙高速射流的特点,在缝隙有负压的地方设置通气管,实现自然通气。长洲船闸也采用了该方法来抑制阀门空化和减小阀门振动。

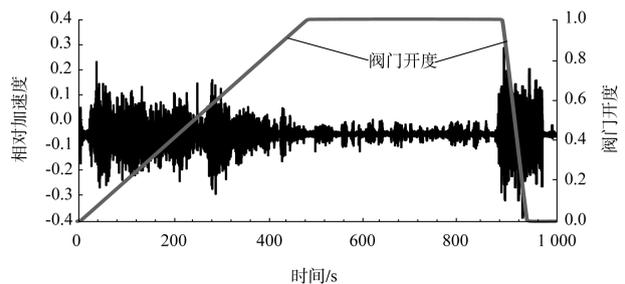
在三线船闸上闸首右侧阀门和下闸首右侧阀门的最上一节吊杆上安装了3向振动加速度传感器,监测阀门开启过程中的振动特性,充水阀门监测过程包括门楣通气孔封闭和正常工作两种情况,见图2~3及表3。



a) x方向



b) y方向



c) z方向

图2 门楣未通气时充水过程阀门振动特性

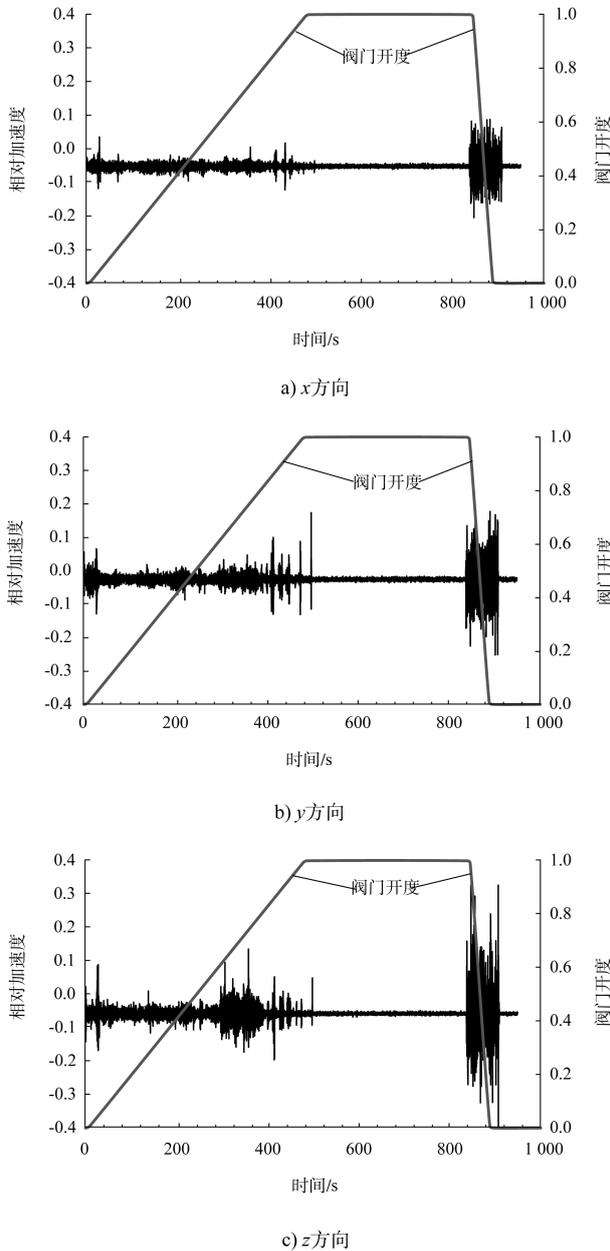


图3 门楣通气时充水过程阀门振动特性

表3 输水阀门振动最大绝对值

工况	通气孔正常运行			通气孔封闭		
	X	Y	Z	X	Y	Z
右上阀门开启	0.12g	0.17g	0.20g	0.16g	0.24g	0.29g
右上阀门关闭	0.20g	0.25g	0.44g	0.17g	0.37g	0.38g
右下阀门开启	0.16g	0.21g	0.14g	—	—	—
右下阀门关闭	1.83g	1.21g	0.95g	—	—	—

注：“—”代表未监测此项数据。

观测结果表明：

1) 门楣通气管封闭后，其振动加速度最大绝对值在 0.16g ~ 0.29g，门楣通气管正常运行时，阀门段在开启过程中的振动较小，其最大绝对值

约在 0.12g ~ 0.16g。验证了模型试验“门楣自然通气不仅能够抑制阀门段空化，也可降低阀门振动”的结论。

2) 阀门平水关闭过程中振动加速度最大绝对值在 0.17g ~ 1.83g，尤其是下闸首的工作阀门关闭过程，其振动加速度最大绝对值在 0.95g ~ 1.83g，远大于阀门开启过程中的振动加速度，其可能原因有：a) 阀门关闭速率较大，启闭系统惯性表现明显；b) 阀门在下落过程中，吊杆限位滑轮与壁面摩擦力过大导致，可在工作阀门检修期间对其进行进一步整定。

2.4 门楣通气抑制阀门空化

结合减压模型试验的成果，原型调试在上、下闸首的右侧输水阀门井和下检修门井各安装一只水听器，监测现有运行工况下阀门段的空化情况，并在闸顶的门楣通气管口监测充、泄水过程中的门楣通气管的进气风速。为检验门楣自然通气抑制阀门段空化的效果，对上右阀门自然通气孔封堵与否阀门段的空化进行对比监测，部分数据对比见图4。

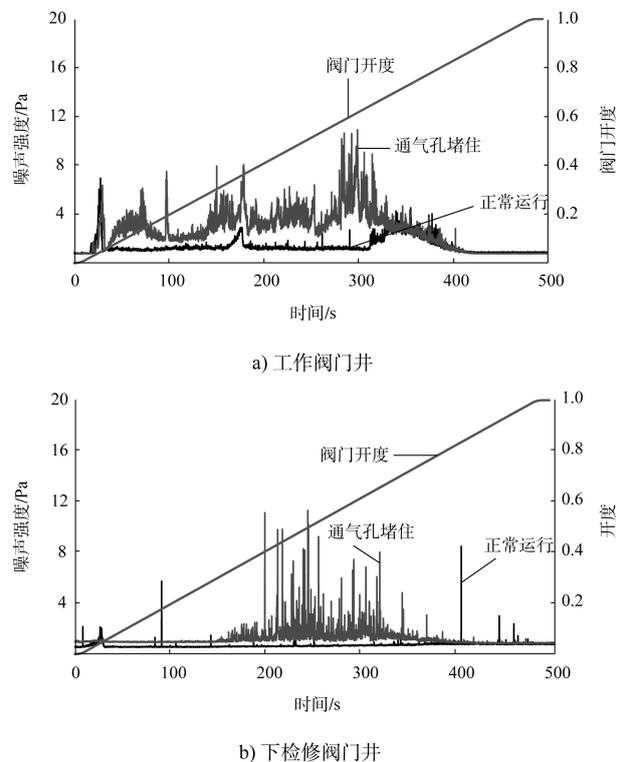


图4 上闸首双边开启充水工况阀门空化特性

由图4可知：

1) 门楣未通气。充水初期，在阀门开启 15 s

后, 阀门井布置的水听器监测到较大的脉冲信号, 为阀门顶止水脱离门楣初期止水头部空化及启闭系统克服阀门由静而动的冲击荷载所致。这种现象在其它高水头船闸中普遍存在, 也是不可避免的。阀门在 $n=0.82$ 开度之前, 阀门井布置的水听器都监测到较大的脉冲信号, 为阀门门楣及底缘空化共同所致, 以 $n=0.57\sim 0.65$ 较强烈。

2) 门楣通气。充水初期, 和封闭门楣自然通气管相似, 在阀门开启 15 s 后, 阀门井布置的水听器监测到较大的脉冲信号, 为阀门顶止水脱离门楣初期止水头部空化及启闭系统克服阀门由静而动的冲击荷载所致。在阀门开启约 30 s 后, 门楣通气管开始自然通气, 充水阀门左右侧阀门平均自然通气量均在 $0.03\text{ m}^3/\text{s}$ 。门楣在阀门 $n=0.58$ 之前都能自然通气, 在该开度之前, 阀门井监测到的空化噪声较小且平稳。阀门开至 $n=0.63$ 开度, 由于此时门楣不能自然通气, 阀门井监测到较明显的空化噪声, 判断为阀门底缘空化所致, 总体而言, 该空化噪声强度不大, 闸顶也未监测到声振现象, 此现象持续到阀门 $n=0.82$ 开度, 此后, 阀门后下游廊道压力提高, 底缘空化消失。

3) 门楣通气与否。充水阀门下检修阀门井布置的水听器监测的阀门空化噪声对比也表明, 门楣自然通气效果显著。

可见, 采用门楣自然通气措施能显著抑制阀门空化, 取得了满意的效果。

3 结语

1) 通过优化阀门结构, 增大了阀门的自振频率, 使得其自振频率完全脱离了正常情况下水流脉动的高能区, 明显提高了阀门的抗振性能。故阀门在动水启闭过程中, 没有产生共振现象。

2) 通过采用门楣自然通气措施, 门体振动有所减小, 廊道空化得到了明显抑制。

实践表明, 凡在设计阶段充分论证、且通航前又认真做过原型调试的高水头或者大型船闸, 其船闸的性能可以达到较佳的状态, 过闸船舶及船闸设备的安全也可以得到保证, 船闸的航运效

益十分显著。这些调试和检验都是在原型实际应用条件下进行的, 丰富的原型调试资料也为优化船闸性能创造了条件。同时, 在调试中科研人员的及时介入, 对于确保调试质量、缩短调试周期亦十分重要。

参考文献:

- [1] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范 [S].
- [2] JTJ 308—2003 船闸闸阀门设计规范 [S].
- [3] 须清华, 张瑞凯. 通航建筑物应用基础研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [4] JTJ 309—2005 船闸启闭机设计规范 [S].
- [5] 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.
- [6] 胡亚安, 李君, 李中华. 红水河乐滩船闸原型调试研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.
- [7] 胡亚安, 李君, 宗慕伟. 红水河大化船闸水力学原型调试研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.
- [8] 胡亚安, 宗慕伟, 刘猛, 等. 广西红水河百龙滩船闸水力学原型调试研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008.
- [9] 胡亚安, 严秀俊, 全强. 红水河桥巩水电站船闸水力学原型调试研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [10] 胡亚安, 张瑞凯, 严秀俊. 三峡枢纽 156 m 水位船闸四级运行方式原型调试研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.
- [11] 胡亚安, 严秀俊, 刘本芹. 三峡船闸 156 m 水位四级运行方式下 2 闸首和 6 闸首输水系统性能及阀门工作条件研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007.
- [12] 宣国祥, 李君. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程初步设计阶段输水系统布置及水力分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [13] 宣国祥, 李君. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程初步设计阶段船闸泄水对下游引航道和口门区的影响模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [14] 胡亚安, 严秀俊, 王新, 等. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程阀门水力学试验研究(第一阶段)[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [15] 胡亚安, 严秀俊, 薛淑. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程阀门水力学试验研究(第二阶段)[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.