

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.018

北疆大型水工平面闸门的振动测试

韩 璞¹, 薛惠芳^{1,2}, 何 青³

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009;
3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 针对北疆某大型水利工程中倒虹吸出口 2 个平面闸门的振动问题, 采用防水耐压防腐的三轴振动加速度传感器和 INV303 数据采集仪器, 构成多通道水下振动测试系统, 通过改变闸门的开度和流量, 对 A 线 1 号闸门进行各运行工况下的振动监测, 对 B 线 2 号闸门进行大流量下的振动监测. 测试结果表明, 2 个闸门、闸墩、闸房等重要部位的振动参数与闸门开度、流量变化关系密切, 闸门的微小振动长期持续存在, 1 号闸门的振动峰值对应的闸门开度为 0.220 m 和 0.310 m, 2 号闸门大流量下的振动峰值对应闸门开度 0.301 m, 闸房座板的振幅最大, 数据分析结果具有相当好的一致性, 振动测试系统正确可行.

关键词: 振动测试; 三轴加速度传感器; 水工闸门; 运行规范

中图分类号: TV663; O329 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)03-0332-06

北疆某大型水利枢纽位于沙漠地区, 其倒虹吸工程采用 A、B 2 条输水管道, 进水口与出水口高差超过 30 m, 通过出水口的闸门开度控制倒虹吸管道的引水流量. 在试通水期间, 位于倒虹吸出口的 2 个平面闸门均出现不同程度的振动. 由于闸墩是建在沙丘上的混凝土结构, 闸门的振动是否会激励闸墩产生振动, 从而导致闸墩结构失稳或变形, 是必须要考虑的工程运行安全问题. 另外, 闸门的长期振动也会导致闸门边缘上滚轮的紧固螺栓松动和闸门启闭机底座上的紧固螺栓松动等. 因此, 监测闸门和闸墩的振动、掌握启闭机底座下面的闸房座板的振动情况是十分必要的^[1].

为了适时调节闸门开度以确保下泄流量和倒虹吸处于正常状态, 工作闸门需长时间作局部开启运行, 而出口闸门的水力特性和振动诱发原因是极其复杂的流固耦合问题. 通过测试, 了解闸门在开启和关闭过程中不同运行工况下的振动特性, 从而制定科学合理的运行规范, 是保证闸门长期安全运行的必要措施. 此外, 闸门振动的现场实测与分析, 有助于分析研究振动的诱发原因和闸门流激振动的理论研究^[2].

本文针对试通水期间出现振动现象的两个闸门, 设计制作振动测试传感器以及振动测试系统, 结合水利枢纽的二次试通水运行调试, 对不同工况下的 2 个闸门及闸墩进行振动监测, 为制定闸门运行规范提供理论依据, 也为研究闸门流激振动机理储备试验数据.

1 闸门振动测试对象与系统

描述结构振动的 3 种基本参数是位移、速度和加速度, 它们都是时间的函数. 在本工程试验中, 振动信号的分析主要是时域分析, 运用测振传感器, 测得闸门结构的振动信号以位移、速度或加速度的单位指示出它们的峰值、峰-峰值、平均值等, 即能掌握闸门结构振动的位移幅值、振动烈度、振动趋势等. 但是, 水流激发的闸门振动是非常复杂的随机振动, 这些随机振动过程也并非毫无规律, 只要获得足够多、足够长的样本函数(即时间历程记录), 就可以求得其概率意义上的统计特征参数, 即统计规律^[3-6].

1.1 测试对象与测点布置

倒虹吸出口闸门振动特性测试主要是为了了解闸门、闸墩及闸房座板等结构在各种运行工况下发生振动的实际状况, 测试对象如图 1 所示, 包括 A 线 1 号闸门和 B 线 2 号闸门、1 号闸门左闸墩和 2 号闸门左闸墩.

收稿日期: 2010-06-09

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT0720)

作者简介: 韩璞(1959—)男, 河北平泉人, 教授, 主要从事智能仪器、电厂设备状态监测及智能控制理论研究. E-mail: hanpu102@263.net

(中墩)、中墩顶部以及 2 个闸房座板等。

为了准确全面地捕捉闸门重要结构在各个方向上的振动状况,同时考虑到闸门长期工作在水下以及测试元件安装维护等方面的具体情况,专门设计制作了耐高低温变化和耐压防水的三轴振动加速度传感器,用于测量顺水向、垂向及横向振动参数。传感器采用螺栓固定和防水结构,信号电缆采用水下专用的多芯屏蔽电缆^[7]。为了确保一次测试成功,在测试系统中采用传感器冗余配置,即在每个闸门上均设置 2 个传感器,以防止意外因素导致传感器损毁和失效,确保试验顺利进行。测点布置见图 1。

2 个闸房座板用于固定闸门的液压启闭机提升装置,选用 608A11 型 ICP 单轴压电加速度传感器,分别安装在 1 号闸房和 2 号闸房座板上,以测量通水期间闸座垂直方向的振动参数。

为方便描述,给三轴和单轴传感器定义坐标系,进行振动监测时,测点布置信息如表 1 所示。

1.2 测试与分析系统组成

闸门振动监测与分析系统如图 2 所示,采用 INV303 数据采集仪器,在通用微机中安装东方科卡和 DASP 大型软件,构成振动测试分析系统,该系统集多路并行无时差数据采集、信号处理、故障诊断等多功能于一体,采样频率范围为 0.001~20 kHz,超大容量连续不间断采集,采样过程随启随停,可以实现示波、采样、回放等流程,有效避免错误采样。

2 闸门振动测试内容与分析

在倒虹吸工程通水期间,对出口处 1 号和 2 号闸门、闸墩及闸顶和闸房座板等处的振动信号进行不定时采集分析,主要测试内容包括两个方面,即 A 线通水过程中对 1 号闸门各运行工况下的振动监测,在 B 线通水过程中对 2 号闸门大流量下的振动监测,这两方面的测试内容基本上包含了闸门的主要工作环境和状态,所得测试结果具有代表性。

2.1 1 号闸门各运行工况振动监测

本文中的闸门运行工况是指闸门不同的开度变化以及闸门前输水管线出口处的流量大小变化。闸门的开度变化是通过液压提升装置控制闸门提高和下压实现的,流量的大小变化取决于倒虹吸入口处水位的高低,由出口管线上安装的超声波流量计测得。

在 A 线输水过程中,多次改变闸门开度,整个振动监测过程持续长达 9 d,采集数据共 40 次,最短记录时长 5 s,而最长记录时长达 2335 s(约 39 min),重点是及时采集闸门在运行工况发生变化时刻的瞬时振动信号。

将 40 次试验的工况进行编号,其中试验序号 1~18 的工况是闸门开度 0.141 m,对应流量变化范围为 4.96~5.31 m³/s,由于测得的振动位移量较小,在此不予分析讨论。试验序号 19~40 的工况比较复杂,通过测试得到较大的振动位移量,相应的工况信息如表 2 所示。

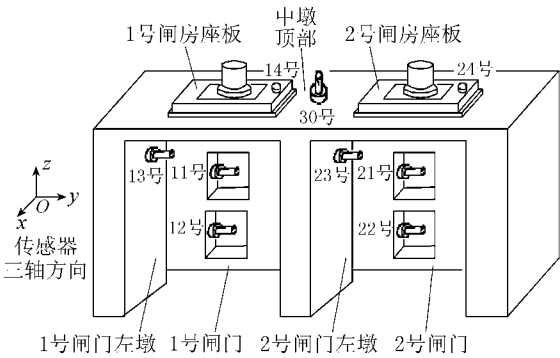


图 1 闸门振动测试对象及测点布置

Fig. 1 Object for vibration tests and layout of measuring points

表 1 闸门振动测点信息

Table 1 Information of measuring points for vibration tests on gates

传感器编号	测点位置	监测方向	传感器编号	测点位置	监测方向
11	1号闸门上部	x, y, z	21	2号闸门上部	x, y, z
12	1号闸门下部	x, y, z	22	2号闸门下部	x, y, z
13	1号闸门左墩	x, y, z	23	2号闸门左墩	x, y, z
14	1号闸房座板	z	24	2号闸房座板	z
30	中墩顶部	x, y, z			

注: x 为顺水向, y 为横向, z 为垂向。

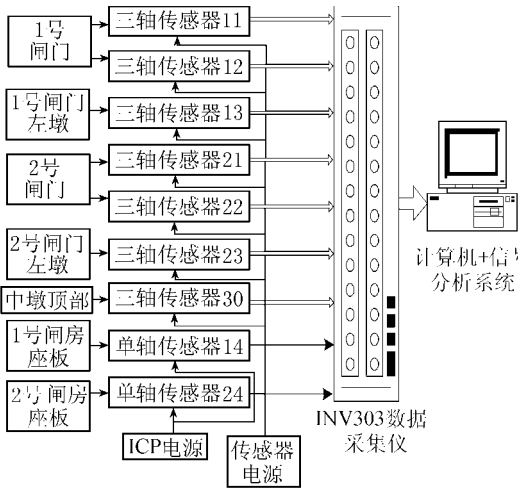


图 2 闸门振动监测与分析系统框图

Fig. 2 Framework of vibration test and analysis system for gates

将40种运行工况下测得的振动信号进行分析和处理,得到数据文件.用C++语言编写了数据后处理与分析程序,通过该程序可以对长数据进行分析.结合1号闸门的测点信息,得到该闸门在通水时各测点的振动趋势图如图3所示.通过振动趋势图可以获得闸门振动与运行工况之间的关系,其中,捕捉到振动峰值现象的试验序号为23和31,对应表1中的闸门开度0.220 m和0.310 m.

小开度下闸门系统的剧烈振动是由外部水流的干扰引起的,包括水流及波浪对闸门的冲击,水跃对闸门的脉动作用,以及在动水中启闭操作时复杂的脉动水压作用力的影响.闸门具有一定的自振频率,它是闸门结构本身的固有参数,决定于闸门结构刚度、质量

分布和材料性质等,而闸门振动的大小取决于闸门结构自振频率与激励频率的关系及结构的刚度.如果水流的脉动频率接近闸门的自振频率时,不管这种激励频率是外力固有的,还是由于闸门结构与水流发生耦合而次生的,都将导致闸门发生共振.如果振幅达到很大值,还将使闸门整体或局部发生强烈振动,在闸门结构内出现不平常的应力和应变,使闸门受到损害,这是该输水工程上不可忽视的一个重要问题^[18-12].

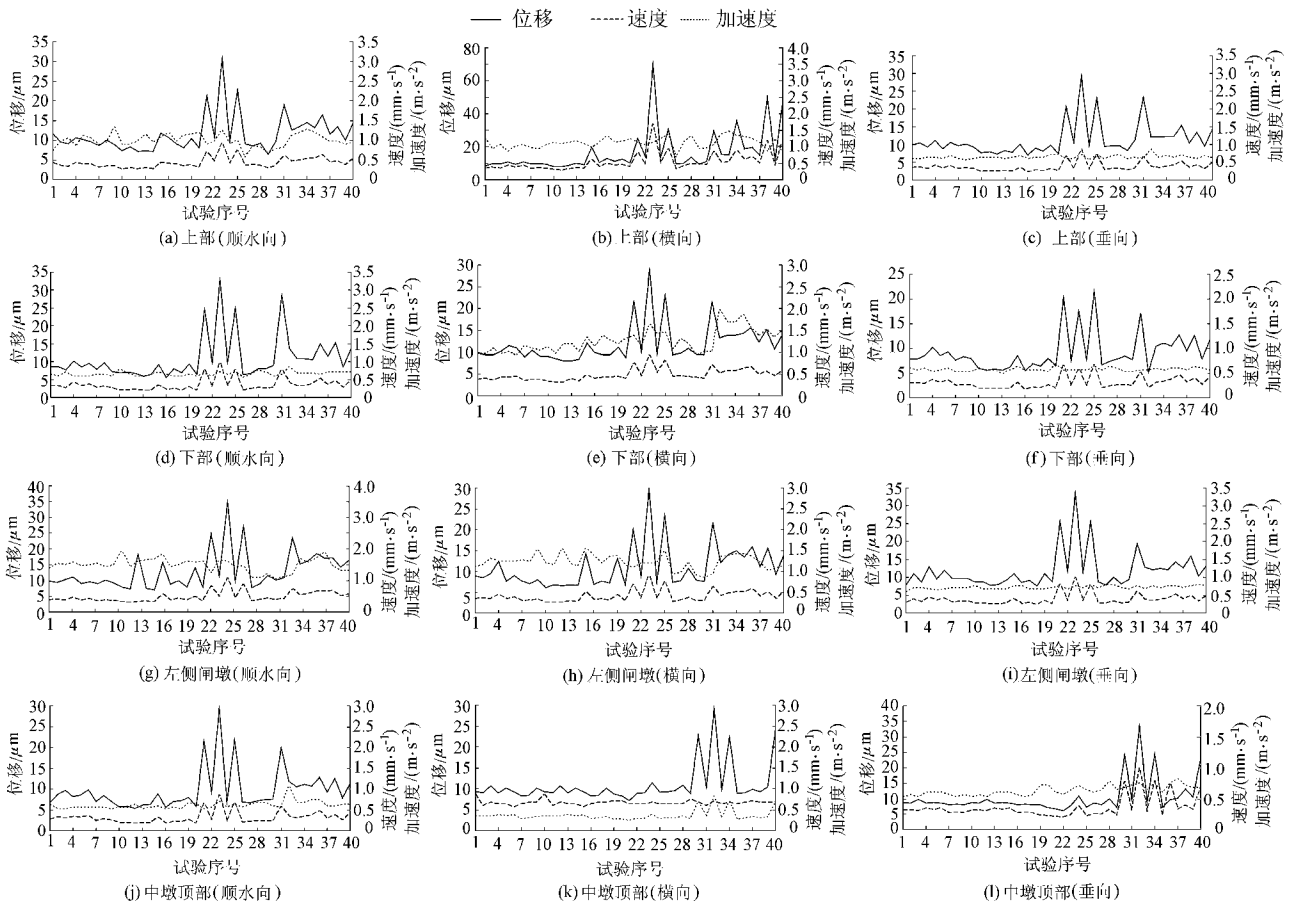


图3 1号闸门振动趋势

Fig. 3 Work conditions for gate No.2

2.2 2号闸门大流量振动监测

在B线输水过程中,调节闸门开度,并且改变倒虹吸入口流量,从10.20 m³/s到4.99 m³/s再到16.50 m³/s

表2 1号闸门工况信息

Table 2 Work conditions for gate No.1

试验 序号	闸门开度/m		动作时 流量/ (m³·s ⁻¹)	试验 序号	闸门开度/m		动作时 流量/ (m³·s ⁻¹)
	动作前	动作后			动作前	动作后	
19	0.159	0.180	5.31	33	0.330		10.35
20	0.180		6.50	34	0.330		9.50
21	0.180	0.200	6.50	34	0.330		9.50
22	0.200	0.220	7.58	35	0.330		10.36
23	0.220	0.240	7.61	36	0.330	0.285	10.40
24	0.240		7.80		0.330	0.320	10.40
25	0.260		8.71		0.320	0.311	10.64
26	0.260		8.70		0.311	0.301	10.13
27	0.260	0.280	8.50		0.301	0.292	10.30
28	0.280		9.38		0.292	0.285	10.26
29	0.280	0.300	9.10	37	0.285	0.267	9.86
30	0.300		9.60	38	0.267	0.259	9.74
31	0.310		9.53	39	0.259	0.290	10.10
32	0.310	0.330	9.53	40	0.290	0.330	10.76

的大流量 ,对 2 号闸门、左侧闸墩(中墩)和闸房座板等处的振动信号进行不定时采集分析 ,大流量测试过程持续时间近 100 min. 将 4 次试验的工况进行编号 ,相应的工况信息如表 3 所示.

将 4 种运行工况下测得的振动信号进行分析和处理 ,结合 2 号闸门的测点信息 ,得到该闸门在通水时各测点的振动数据 ,图 4 所示为各测点振动趋势图.比较图 3 和图 4 ,虽然 1 号闸门和 2 号闸门的结构形式、测点布置都一样 ,但是结合了 A、B 两条输水管线不同的试运行情况 ,比较全面地反映了闸门在不同流量、不同开度下的振动实况.

由测试系统可以直接得到典型测点的振动波形图(位移、速度和加速度) ,图 5 为加速度振动波形图.从图 5 和表 3 可以看出 ,2 号闸门在大流量试通水期间 ,由于工况改变引起振动加速度数值的突变 ,其时间段所对应的通水工况包含闸门开度 0.301 m. 图 5 与图 3、图 4 不同之处在于反应的是在时域内的大量连续的闸门振动数据信息 ,可用于进一步分析闸门的随机振动.

表 3 2 号闸门工况信息

Table 3 Work condition for gate No.2						
试验序号	采样时刻	闸门下压/mm	闸门开度/m		动作前流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	采样时长/s
			动作前	动作后		
1	11:55	220	0.340	0.120	10.20	2 162
		40	0.340	0.301	10.20	38
		40	0.301	0.260	9.18	34
		60	0.260	0.200	8.55	43
		40	0.200	0.160	7.36	34
		40	0.160	0.120	6.36	36
2	13:14		0.120		4.99	120
3	13:15	升高 480 后下压 200	0.120	0.400	5.09	840
		升高 280	0.120	0.400	5.09	101
		升高 200	0.400	0.600	10.51	74
		下压 200	0.600	0.400	16.50	103
4	13:33		0.400		12.55	60

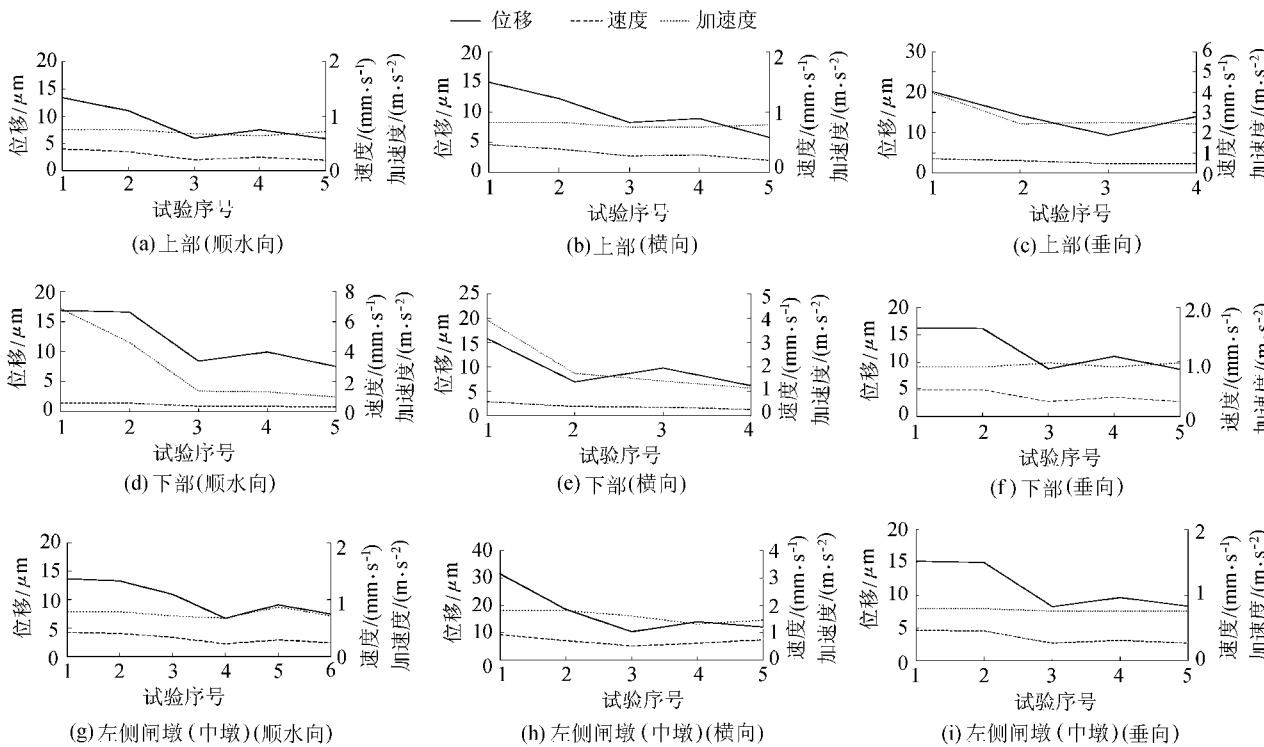


图 4 2 号闸门振动趋势
Fig. 4 Vibration trend curves for gate No.2

2.3 闸房座板振动测试

使用单轴加速度传感器 ,对 1 号闸房的座板在各运行工况下的垂向振动进行测试 ,对 2 号闸房的座板在大流量时的垂向振动进行测试 ,得到闸房座板振动趋势如图 6 所示 ,可以看出 ,与使用三轴加速度传感器对 1 号闸门和 2 号闸门的监测结果相比较 ,两者具有相当好的一致性 ,从而验证了测试系统的正确与合理性.

测试数据表明 ,闸门结构的振动是一种宽频瞬态激励振动 ,其中闸墩振动幅度小于闸门 ,闸房座板的振幅最大.闸门固有频率分布较广 ,因此容易激发出各阶固有频率振动 ,而闸墩的模态阻尼比较大 ,虽然在工况改变时 ,振动幅值会明显增大 ,但持续时间并不长 ,一般不会引起共振 ,所以是安全的.考虑到倒虹吸出口闸

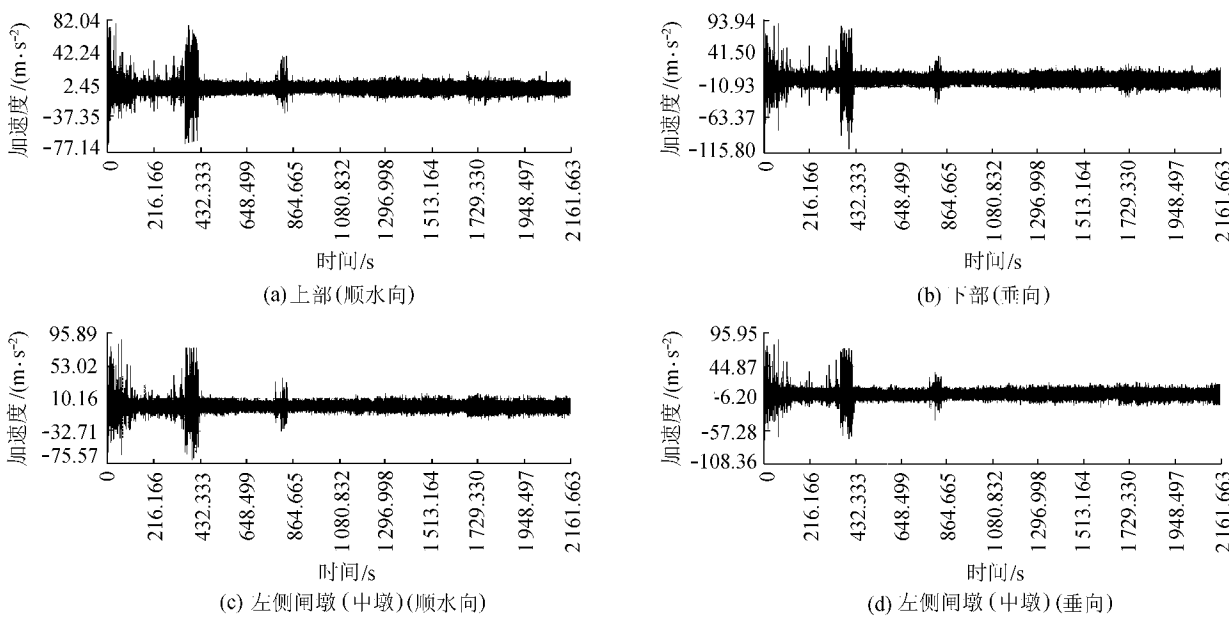


图5 2号闸门振动波形

Fig. 5 Vibration waveforms for gate No. 2

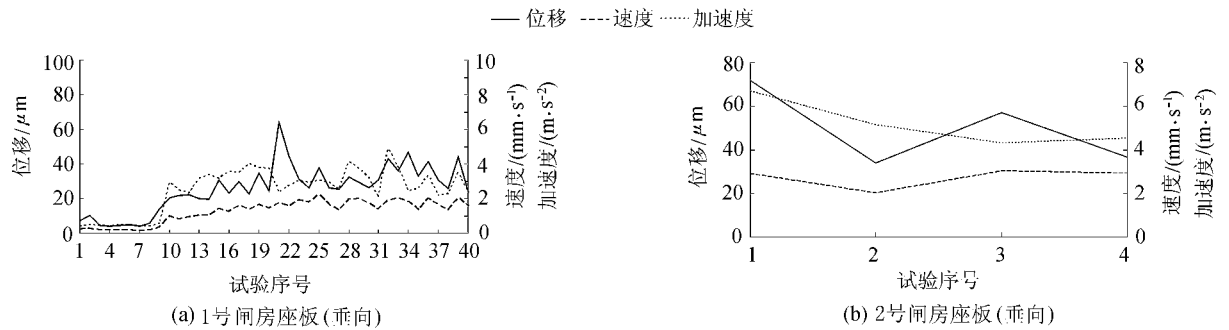


图6 闸房座板振动趋势

Fig. 6 Vibration trend curves for gate seats

门周边基础环境等因素,虽然瞬态激励产生的振动幅值并不十分大,也应在输水过程中严格监视振动情况,如能实现在线监测,将为闸门运行增加一道重要的安全保障。

3 结 语

通过对闸门结构系统在各种输水运行工况下振动响应的现场监测,进行了大量的振动数据采集记录和分析,得到了比较全面的闸门结构振动与各种工况之间的关系数据,发现多次振动都与工况瞬时变化密切相关,并且振动位移和加速度主要与闸门开度变化有关,因此,要制定合理的闸门运行规范,使之避开长期滞留在剧烈振动的开度,即0.220 m和0.310 m等。另外,从测试结果看,闸门的微小振动长期存在,可能造成闸门导轮螺栓松弛或脱落,因此,建议在停水期间定期检查维护。

由于本次测试项目多,测试通道多,波形记录时间长,所以获得了较为全面的实测数据资料,这有助于分析闸门结构系统的随机振动特性,如概率密度函数、概率分布函数、相关函数和功率谱密度函数等,并为研究水流脉动压力对闸门振动的影响作了较好的数据储备,对于进一步研究闸门的流激振动机制,该测试系统也是正确可行的。

参考文献:

[1] 潘锦江. 闸门振动问题探讨[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(6): 36-39. (PAN Jing-jiang. About gate vibration[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource 2001, 21(6): 36-39. (in Chinese))

[2] 严根华.水工闸门流激振动研究进展[J].水利水运工程学报 ,2006(1) :66-73.(YAN Gen-hua. Research development of flow-induced gate vibration[J].Hydro-Science and Engineering 2006(1) :66-73.(in Chinese))

[3] 刘礼华 欧珠光 陈五一.水工钢闸门检测理论与实践[M].武汉 :武汉大学出版社 2008 270-300.

[4] 刘习军 贾启芬.工程振动理论与测试技术[M].5 版.北京 :高等教育出版社 2004 315-350.

[5] 汤姆森 达利.振动理论及应用[M].北京 :清华大学出版社 2005 258-276.

[6] 闻邦春 刘树英 陈照波 等.振动机械理论及应用[M].北京 :高等教育出版社 2009 266-275.

[7] 何青 薛惠芳 张志.三轴加速度计在振动测试中的应用[J].仪器仪表学报 ,2007(4) :385-388.(HE Qing ,XUE Hui-fang ,ZHANG Zhi. Application of three-axis accelerometer to vibration measuremen[J].Chinese Journal of Science Instrument 2007(4) :385-388.(in Chinese))

[8] 古华 严根华.水工闸门流固耦合自振特性数值分析[J].振动、测试与诊断 ,2008 28(3) :242-246.(GU Hua ,YAN Gen-hua. Numerical analysis of natural vibration properties of hydraulic gate considering liquid-solid coupling[J].Journal of Vibration ,Measurement & Diagnosis 2008 28(3) :242-246.(in Chinese))

[9] 蒋寅军 宋一乐 王朝晖 等.乌江思林水电站溢流坝弧形工作闸门流激振动试验[J].武汉大学学报 :工学版 ,2010 43(4) :467-471.(JIANG Yin-jun ,SONG Yi-le ,Wang Zhao-hui. Experiment of fluid-induced vibration at spillway radial gate of Silin Hydropower Station at Wujiang River[J].Engineering Journal of Wuhan University 2010 43(4) :467-471.(in Chinese))

[10] 鲁小兵 万欣茹.汗华电站弧形闸门自振特性的研究[J].广东水利水电 ,2009(1) :53-55.(LU Xiao-bing ,WAN Xin-ru. Auto oscillation characteristics of radial gate of Hanhua Power Plan[J].Guangdong Water Resources and Hydropower ,2009(1) :53-55.(in Chinese))

[11] 李火坤.深孔平板工作闸门流激振动物模-数模预测[J].南昌大学学报 :工科版 ,2007 29(4) :395-400.(LI Huo-kun. Prediction of flow-induced vibration of deep plate gate using physical and numerical model[J].Journal of Nanchang University :Engineering & Technology 2007 29(4) :395-400.(in Chinese))

[12] 李火坤 练继建.水工弧形闸门流激振动特性物模-数模联合预测与安全分析[J].水力发电学报 2007 26(3) :69-76.(LI Huo-kun ,LIAN Ji-jian. Joint prediction and safety analysis of the flow-induced vibrationof hydraulic radial gate using physical and numerical mode[J].Journal of Hydroelectric Engineer 2007 26(3) :69-76.(in Chinese))

Vibration tests on large-scale hydraulic gate of northern Xinjiang Uygur Autonomous Region

HAN Pu¹ , XUE Hui-fang^{1 2} , HE Qing³

- (1. School of Control and Computer Engineering , North China Electric Power University , Beijing 102206 , China ;
- 2. School of Mechanical and Power Engineering , Nanjing University of Technology , Nanjing 210009 , China ;
- 3. School of Energy , Power and Mechanical Engineering , North China Electric Power University , Beijing 102206 , China)

Abstract : With regard to the vibration of two exit gates of the inverted siphon of a large-scale hydraulic project in northern Xinjiang Uygur Autonomous Region , a multi-channel underwater vibration test system was established by using the triaxial accelerometer specialized in waterproof , compression and anti-corrosion and the INV303 data acquisition instrument. Through adjusting the gate openings and discharges , the vibrations of gate No. 1 under various working conditions and of gate No. 2 under large discharges were monitored. The test results indicate that the vibrations of the gates , pier and gate room have close relation with gate openings and discharges. The tiny vibrations of the gates exist for long term. The peak values of the vibration for gate No. 1 correspond to the gate openings of 0.220 m and 0.310 m , and those for gate No. 2 under large discharges correspond to the gate openings of 0.310 m. The foundation plate has the largest amplitude of vibration. The analytic results are accordant , and the proposed vibration test system is correct and feasible.

Key words : vibration test ; triaxial accelerometer ; hydraulic gate ; operation standard