



# 船闸人字门日常运行状态监测技术研究

秦网根<sup>1,2</sup>, 方海东<sup>2</sup>, 江守燕<sup>3</sup>, 丁仁民<sup>4</sup>, 蔡素文<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏 南京 211100;  
3. 河海大学, 江苏 南京 210098; 4. 京杭运河江苏省交通运输厅苏北航务管理处, 江苏 淮安 223002)

**摘要:** 分析了人字门船闸闸、阀门的运营现状, 介绍人字门测试原理和测试方法。通过实例分析, 对人字门的测试方法进行探讨, 通过该振动测试方法为今后进一步弄清引起门体振动变化的原因提供依据, 以便采用有效的措施处理异常情况。

**关键词:** 人字门; 自振特性; 顶枢; 斜接柱; 频谱分析

中图分类号: U 641.6<sup>+1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0108-04

## Monitoring technology for operation status of lock's miter gate

QIN Wang-gen<sup>1,2</sup>, FANG Hai-dong<sup>2</sup>, JIANG Shou-yan<sup>3</sup>, DING Ren-min<sup>4</sup>, CAI Su-wen<sup>4</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Provincial Water Transport Research Center of Engineering Technology 211100, China;

3. Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Water Management Bureau of Great Canal in North Jiangsu Province, Huai'an 223002, China)

**Abstract:** This paper analyzes the operating status of lock's miter gates and valves, and introduces the test principle and test methods for miter gates. Based on case studies, this paper discusses the test methods of the miter gate to find out the reasons for the vibration changes of the door and adopts effective measures for the abnormal situation.

**Key words:** miter gate; self-vibration characteristics; top pivot; inclined column; spectral analysis

人字门、阀门运转件在长期运行过程中发生磨损或损坏, 致使结构振动特性发生显著改变, 当振动频率接近人字门自振频率时, 即当激励频率接近或等于自振频率时, 特别是水流脉动压力的主频接近于人字门某阶段固有频率成分时, 振动比较明显, 会引起人字门在短时间内的“拍振”、较长时间的稳态“共振”或动力失稳, 导致人字门破坏<sup>[1-4]</sup>。为此, 必须弄清闸、阀门振动的根源和振动对闸、阀门的影响。本文借助工程实例分析, 对人字门的测试方法进行探讨, 通过该振动测试方法为进一步弄清引起门体振动变化的原因提供依据。

## 1 振动测试理论<sup>[5-6]</sup>

### 1.1 动态特性参数测试的基本原理

由于激振源的位置、频率高低、能量大小、

激励方向等的不同, 以及闸、阀门质量、结构形状、材料性质和约束条件等不同原因, 在激振器的激励作用下闸、阀门的强迫振动响应是不同的。闸、阀门的振动响应大到淹没与其固有频率不同的振动波时, 才能使与其固有频率相同或相近的振动波显现出来。也就是说, 自然界中的一切弹性振动体系都相当于一个滤波体或滤波器, 都有一种滤频作用。固有频率作为人字门振动的内因, 是在不受外力作用下门体本身的固有参数, 决定于人字门的结构刚度、质量分布和材料性质。

### 1.2 结构的自振特性

结构的自振特性(频率和振型)是结构动力计算中的主要内容之一, 用于确定结构的固有频率和振型, 是分析结构动态响应和其他动力特性的基础。结构自振的动力方程为:

$$\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \times \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \times \mathbf{x} = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

收稿日期: 2013-09-27

作者简介: 秦网根(1983—), 男, 博士, 工程师, 从事结构检测、监测和评估。

式中:  $\mathbf{x}$ ,  $\dot{\mathbf{x}}$ ,  $\ddot{\mathbf{x}}$  分别是结构的结点位移、结点速度及结点加速度向量;  $\mathbf{M}$  是结构的质量矩阵;  $\mathbf{C}$  是整体阻尼矩阵;  $\mathbf{K}$  是整体刚度矩阵;  $\mathbf{F}(t)$  是结点荷载向量, 分别由各自的单位矩阵和向量构成。

式(1)中如  $\mathbf{F}(t)$  等于零, 便得到结构的自由振动方程。在研究结构自振特性时, 一般不考虑阻尼影响, 因为阻尼对结构的自振特性影响非常小。由此导出结构的无阻尼自由振动方程为:

$$\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \times \mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

假设在自由振动时, 各质点做简弦振动, 则各结点的位移可以表示为:

$$\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\delta}_0 \cos(\omega t) \quad (3)$$

式中:  $\boldsymbol{\delta}_0$  为结点振幅列阵, 即振型;  $\omega$  为与该振型对应的频率。

将式(3)代入式(2), 可导出广义特征方程:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \times \boldsymbol{\delta}_0 = 0 \quad (4)$$

结构在自由振动时, 各结点的振幅不全为零, 所以式(4)的系数行列式必须为零, 因此可导出求解结构自振频率的方程为:

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (5)$$

式(5)称为特征方程, 由于结构的劲度矩阵  $\mathbf{K}$  和质量矩阵  $\mathbf{M}$  都是  $n$  阶的方阵, 其中  $n$  等于自由度的数目, 所以式(5)是关于  $\omega^2$  的  $n$  次代数方程。由该方程求解出的  $n$  个特征值可按升序排列为:

$$0 \leq \omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \dots \leq \omega_n^2 \quad (6)$$

式中: 第  $i$  个特征值  $\omega_i^2$  的算术平方根  $\omega_i$  称为结构的第  $i$  阶频率。

### 1.3 结构-水体的动力相互作用

与船闸闸门开启在平流的环境中不一样, 阀门在提升的过程中受脉动水压力的作用, 会引起强迫振动(不一定共振), 阀门的各部分将产生动应力(惯性力)。在进行振动分析的过程中, 须考虑水体的影响, 由于结构的运动以及水体的质量、两端水位的落差和弹性的作用, 将引起阀门迎水面上水压力的变化, 这种变化的水压力即称为动水压力。在冲击力作用下, 结构的动力反应将发生显著变化, 无黏性水体作小振幅运动时, 动水

压力的变化服从拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \mathbf{F} = 0 \quad (6)$$

式中:  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子;  $\mathbf{F}$  为动水压力。

在水体的边界上, 或者压力  $\mathbf{F}$  是已知的(例如在水体表面为  $\mathbf{F} = 0$ ), 或者是水体和以某种规律运动的固体相接触(如在水与闸门的接触面上), 在后一种情况下, 边界条件为:

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{n}} = -\rho \frac{\partial^2 \delta_n}{\partial t^2} \quad (7)$$

式中:  $\delta_n$  是边界位移的法向分量;  $\rho$  是水体的密度;  $\mathbf{n}$  是接触面的法线, 其正方向指向水体外部。

根据上述动水压力方程和边界条件, 应用变分原理, 可以导出挡水面的有限单元方程式。库水对结构动力反应的影响可分为3个步骤:

1) 求挡水面上各点有单位水平加速度和垂直加速度时水体内部和挡水面上各点的动水压力, 这就是求所谓影响矩阵的问题。

2) 求挡水面上各点由于动水压力而有的附加质量矩阵。因为动水压力起着阻碍结构运动的作用, 挡水面的法向加速度愈大, 动水压力也愈大。与惯性力的作用相似, 根据求得的影响矩阵  $\mathbf{E}$ , 可以导出挡水面各结点的动水压力附加质量矩阵  $\boldsymbol{\delta}_n$ 。

3) 将动水压力附加质量矩阵  $\mathbf{M}_p$  加入质量矩阵  $\mathbf{M}$ , 得到考虑动水压力的基本方程:

$$\mathbf{K} \times \boldsymbol{\delta} + \mathbf{C} \times \dot{\boldsymbol{\delta}} + (\mathbf{M} + \mathbf{M}_p) \times \ddot{\boldsymbol{\delta}} = -(\mathbf{M} + \mathbf{M}_p) \times \ddot{\boldsymbol{\delta}} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 考虑水体与结构的共同作用时, 动力方程的形式不变, 只是在质量矩阵  $\mathbf{M}$  上附加了矩阵  $\mathbf{M}_p$ , 因此可采取无水时结构运动方程的求解方法求解结构的自振特性和动力反应等问题。

## 2 振动特性测试方法

### 2.1 固有特性测试

人字门门体本身的固有频率测试方法很多, 常用的有共振法、脉动法和锤击法。其中共振法用于人字门的动态检测较为麻烦, 在人字门固有特性测试中应用较少; 脉动法是一个单输入或多

输出体系,其输入不易测量,在人字门固有频率测试中也很少采用。锤击法测试闸门动态特性参数简便、可行,是目前闸门动态特性检测中比较理想的一种测试方法。该方法是通过一种脉冲锤敲击人字门的某一部位,从而获得一个频带较宽的冲击波。在冲击波的激励下,与人字门的固有频率相同或接近的冲击波响应信号就被凸显放大出来,而与人字门的固有频率不同或相差较大的冲击波响应信号就被掩盖了。所以人字门对冲击波的响应曲线的主频率便是人字门的一系列固有频率。要获得人字门的系列固有频率,还必须将人字门对冲击波的响应信号进行频谱分析,从而得到人字门频响函数图。

## 2.2 自振特性测试

人字门的自振频率测试,主要测试人字门门体的动力响应,研究门体振动特性的最基本参量。现场对人字门进行振动测试前,应在测点处清除表面杂物及定位处理,加速度传感器与测点位置粘贴牢固,并通过导线和相关仪器、计算机等相连接。试验采集器采用东华仪器厂5922智能信号采集处理分析仪,采样方式选取为自由连续采集,采用DASP软件分析系统对测试数据进行谱分析,根据自相关谱、互相关谱、各点相位及相干系数确定各阶频率。

在确定仪器情况良好时,先对人字门进行测试,激励门体一适当部位,使闸门获得一个频带较宽的冲击力,经电荷放大器将信号放大、检波、滤波后由信号采集、记录和储存,大体了解结构的整体频率范围。为有效防止高频混叠现象,还将采样前的信号限制在一定的频带范围内。因此,根据该人字门的结构特点,低通滤波器的截至频率设置为20 Hz。根据采样定理,为提高频率分辨率,采样频率设置为200 Hz,采样时域点数为1 024点。

## 3 工程实例分析

某船闸闸室尺度230 m×23 m×5 m,人字门门高10.6 m,单扇门叶宽度9.6 m,上游水位9.33 m,下游水位6.23 m,船闸自2003年投入使

用至2012年,开、放闸次已过10万次,通过船舶吨位过亿,由于船闸运转频繁,闸门在投入运营后的10 a间运转件就出现了磨损及老化,损害较严重,为弄清引起门体振动变化的原因,探讨一种闸门振动测试识别异常情况的方法,为以后能够采用该方法对异常情况进行预判,现场对人字门进行了模态测试分析。

### 3.1 测点布置

根据该船闸人字门外观调查,上游人字门运转件已出现明显劣化状况,针对该情况,振动试验在上游人字门设置8个测点(斜接柱2个、顶枢2个,人字门顶主横梁两侧各2个),每个测点布置1只竖向速度传感器和1只横向速度传感器,通过8个测点的传感器来分批采集激流作用下的脉动信号。对各测点进行传函分析和模态拟合得出该人字门的各阶振动频率和阻尼比,测点传感器布置如图1所示。



a)顶枢



b)斜接柱

图1 仪器布置

### 3.2 测试结果

人字门的自振频率是研究人字门振动特性的最基本参量。振动测试前首先对结构进行激励,

测试了人字门的固有频率,各测点的固有频率测试值见表1。

表1 结构测试的固有频率

位置	斜接柱横向	斜接柱竖向	顶枢横向	顶枢竖向	顶主横梁闸墙端横向	顶主横梁闸墙端竖向	顶主横梁端横向	顶主横梁端竖向
固有频率/Hz	11~15	3~6	4~7	5~9	4~7	3~6	15~18	4~7

对开门全过程状态自振特性进行测试,表2为门体振动测试结果,根据测试数值的大小确定

所测数值属于第几阶频率,第一阶频率最小,第二阶次之,第三阶最大。

表2 人字门自振特性测试结果

位置	第一阶		第二阶		第三阶	
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
斜接柱横向	13.42	2.66	24.48	2.04	41.72	1.38
斜接柱竖向	5.76	3.31	10.36	0.81	16.91	0.42
顶枢横向	6.74	1.88	12.60	2.36	18.74	0.39
顶枢竖向	7.72	4.13	10.65	1.23	14.75	2.28
顶主横梁闸墙端横向	6.45	1.46	9.48	3.64	18.08	3.14
顶主横梁闸墙端竖向	4.45	2.16	5.48	2.33	7.08	1.02
顶主横梁端横向	18.45	2.16	31.48	2.33	45.08	1.02
顶主横梁端竖向	6.45	2.16	9.48	2.33	18.08	1.02

由表2可知,在人字门开启过程中,在启闭力的作用下门体会产生惯性作用,在启闭的一瞬间,会出现激烈的振荡波形。从设置的8个测点(斜接柱横向和竖向2个、顶枢横向和竖向2个、人字门顶主横梁闸墙端横向和竖向2个、人字门顶主横梁端横向和竖向2个)测得的振动频率看,该船闸人字门在开启过程中的这些运转件的振动频率接近其固有频率,说明这些运转件在长期运行过程中发生损坏,需要进一步检修或更换。在船闸大修抽水进行闸门钢结构及闸门运转件的检测中发现,门体及运转件磨损严重,部分构件不少区域厚度已低于设计值,严重影响结构的运行安全。

### 4 结论

附加动应力作用对闸门的安全运行会构成一定的威胁,特别是运行多年的老旧闸门威胁更大。通过对人字门测试方法的探讨和在具体人字门工程中的应用,得出实测人字门振动特性分析结果与大修抽水后人字门情况反映基本一致的结论。

对闸门开门全过程状态进行测试分析的方法可用来进一步掌握闸门动力特性及其对闸门安全性的影响,为指导船闸的运行维护提供一种思路。

### 参考文献:

- [1] 陈五一, 欧珠光, 刘礼华. 水工钢闸门检测理论与实践[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [2] 沈波. 船闸撞击下人字闸门的动力反应分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [3] 潘锦江. 闸门振动问题探讨[J]. 水利水电科技进展, 2001(6): 36-39.
- [4] Naudascher E, Karlaruhe. Flow-Induced structural Vibrations[C]//IUTAM-IAHR Symposium. Berlin: Springer-Verlag, 1974: 28-32.
- [5] Schimmel M, Gallart J. The inverse S-transform in filters with time-frequency localization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11): 2 918-3 003.
- [6] 赵光恒. 结构动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

(本文编辑 武亚庆)