

水工闸门流激振动响应的一种计算方法

赵兰浩¹ 李同春¹ 汪 凌²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 安徽省水利水电勘测设计院, 安徽 合肥 230022)

摘要 将作用在闸门上的水动力荷载分解为闸门无振动时的水流脉动压力和由于闸门振动引起的附加扰动流场所产生的动水压力两部分. 用定义在频域上的相干函数来分析模型试验测得的脉动压力在各个节点之间的时空相关性, 同时考虑脉动压力在不同频率分量上相关程度的不同, 形成脉动水流的节点荷载, 然后据随机振动理论建立模型试验和数值计算相结合的水工闸门流激振动响应计算方法, 并以双口渡电站弧形闸门为例进行了算例分析. 计算结果表明, 该方法能够较好地满足工程分析的要求, 并可以应用于其他水工建筑物的流激振动响应分析.

关键词 水工闸门; 流激振动; 脉动压力; 响应

中图分类号: TV312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2005)04-0404-05

目前, 在进行闸门动力分析时, 通常的做法是通过有限元计算或利用试验模态分析技术求出闸门结构的自振频率, 再将结构自振频率与作用水流的脉动频率相比较, 从而定性判别闸门结构的安全性^[1]. 但这一方法不能定量给出脉动水流作用下闸门结构动力响应值. 进行水弹性模型试验是解决水工闸门振动问题最直接的方法, 但难以满足各种相似准则的要求.

在实际运行过程中, 不论闸门结构流激振动具有哪一种表现形式, 结构本身的动力特性是闸门振动的内在因素, 闸门过水时产生的作用在闸门上的随机脉动水流是闸门振动的外在因素. 因此, 本文将作用在闸门上的实际水动力荷载分解为两部分: 一是闸门没有振动时的水流脉动压力, 通过水力模型试验测定; 二是由于闸门振动引起的附加扰动流场所产生的动水压力, 通过运动方程中的附加质量阵来等效, 并假定附加扰动流场对脉动压力的影响很小且可以忽略不计^[2]. 这样只要求解考虑水体附加质量影响下, 闸门结构在脉动水流作用下的随机振动问题就可以了. 本文首先对由水力模型试验测得的作用在闸门结构上的水流脉动压力进行频谱分析, 然后用随机振动计算方法求解闸门的流激振动动力响应.

1 脉动水流节点荷载的谱特性和相关性分析

水力模型试验只能测得有限个测点上的点脉动压力随时间的变化, 采用有限元法进行闸门的随机振动响应分析, 必须首先对作用在闸门上的随机脉动荷载进行时间-空间相关性分析, 以解决把脉动压力随机场转换为节点的等效随机荷载的问题. 有些文献仅考虑脉动压力的点面转换系数而对脉动压力进行折减, 或在时域中定义相关系数, 计算时直接引用相关系数来估计频域中的结构响应. 前者的做法带有一定的经验性, 不能全面考虑各个节点之间脉动荷载的时空相关性, 而后者却隐含了这样一个假设, 即各个频率分量上荷载的相关程度均相同^[3]. 本文先定义频域上的相干函数, 然后用此函数分析脉动压力在各个节点之间的时空相关性. 分析时考虑了脉动荷载在不同频率分量上相关程度的差异. 同时, 在对脉动水流节点荷载的谱特性和相关性进行分析时假定 (a) 在闸门稳定在某一开度的情况下, 所测得的各测点水流脉动压力 $\{P_i\}$ 为平稳各态历经随机变量; (b) 以某一测点为中心的小块区域内脉动荷载具有相同的统计特性.

如图 1 所示, 节点 i 上的节点荷载可由绕此节点的小块面积上的荷载叠加得到, 即

$$F_i(t) = \sum_k \int_{A_i^k} P_{ik}(t) n_i^k dA_i^k$$

式中: $F_i(t)$ ——节点 i 上的荷载列阵; n_i^k ——面 A_i^k 的法线方向向量.

为方便起见,图 1 网格和测点布置得较为规则,实际计算时网格和测点均可根据需要任意布置.小块面积是依据将单元上脉动压力的贡献按面积平均分配到节点上的原则划分得到的.

节点荷载的相关矩阵为 $R_f(\tau) = E(F(t)F(t+\tau)^T)$. 作傅里叶变换可得节点 i, j 间的节点荷载功率谱矩阵

$$S_{ij}(\omega) = \sum_{k=1}^k \sum_{m=1}^m \left(\int_{A_i^k} S_{p_{ik}p_{jm}}(\omega) l_i^k (l_j^m)^T dA_i^k dA_j^m \right) \quad (1)$$

式中 l_i^k, l_j^m 分别为面 A_i^k, A_j^m 的法线方向向量.

面 A_i^k, A_j^m 上任意两点之间的脉动压力谱密度 $S_{p_{ik}p_{jm}}(\omega)$ 可用下述方法求得.

定义频域上的相干函数 $\gamma_{xy}(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{\sqrt{S_x(\omega)}\sqrt{S_y(\omega)}}$ 则

$$S_{p_{ik}p_{jm}}(\omega) = \sqrt{S_{p_{ik}}(\omega)}\sqrt{S_{p_{jm}}(\omega)}\gamma_{p_{ik}p_{jm}}(\omega) \quad (2)$$

$S_{p_{ik}}(\omega), S_{p_{jm}}(\omega)$ 是测点脉动压力功率谱,为已知值,因此所要求解的为某一频率分量 ω 处积分区域 dA_i^k, dA_j^m 内任意两点 i, j 之间的相干函数值.

假设相干函数为坐标的可分离函数,即 $\gamma_{ij} = \gamma_{ij}^x \gamma_{ij}^y \gamma_{ij}^z$. 为简单起见,这里仅推导 x 方向的相干函数表达式,并记 $\gamma_{ij}^x = A(\omega) - iB(\omega)$. x 方向任意两点 i, j 间的相干函数 $\gamma_{ij}^x(\omega)$ 可表示为距离的负指数衰减函数的形式^[4] $\gamma_{ij}^x = \exp(-K_{x1}|x_i - x_j|) \exp(-i\omega K_{x2}(x_i - x_j))$. 根据某些典型测点的实测数据,用最小二乘法等拟合出系数 K_{x1}, K_{x2} ,并用同样方法推导 y, z 方向的相干函数表达式,从而可得

$$\begin{aligned} \gamma_{ij} &= \gamma_{ij}^x \gamma_{ij}^y \gamma_{ij}^z = \exp(\tilde{A}) \exp(i\omega \tilde{B}) \\ \tilde{A} &= -(K_{x1}|x_i - x_j| + K_{y1}|y_i - y_j| + K_{z1}|z_i - z_j|) \\ \tilde{B} &= -(K_{x2}(x_i - x_j) + K_{y2}(y_i - y_j) + K_{z2}(z_i - z_j)) \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得到 $S_{p_{ik}p_{jm}}(\omega)$ 的表达式,再将 $S_{p_{ik}p_{jm}}(\omega)$ 的表达式代入式(1)即可得到 i, j 节点的脉动压力节点荷载功率谱矩阵.

由于时域中相关关系不大的两个随机过程可能包含一些在某些频率分量上相关关系很强的子向量,而这些子向量有可能恰恰是对结构振动起主要作用的分量^[5],所以,根据某些典型测点的实测数据来拟合系数 K_{i1}, K_{i2} ($i = x, y, z$) 需在每个频率分量上进行. 由此得出的系数 K_{i1}, K_{i2} 也是频域上的函数. 不同频率分量处所拟合出的系数值是不同的. 这样,在分析脉动压力的时空相关性时就可以较全面地考虑脉动压力在不同频率分量上相关程度不同这一实际情况.

2 随机振动分析方法

结构离散后的有限元动力分析方程为

$$K\delta + C\dot{\delta} + M\ddot{\delta} = F \quad (4)$$

式中 $\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}$ ——结构的节点位移、节点速度和节点加速度列阵; K, C, M, F ——结构的整体劲度矩阵、整体阻尼矩阵、整体质量矩阵和节点荷载列阵,其中 M 包含水体的附加质量矩阵 M_p . 将节点的动水压力作为荷载项代入常规有限元动力方程便可得到 M_p ,即 $M_p = G^T H^{-1} G$. 其中 $H^e = \int_{\Omega^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega_e, G_e =$

$$\left(\int_e N^T N ds \right)_e R_e, R_e = \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & \ddots & \\ & & R_{n_s} \end{bmatrix} \ddot{\delta}_e, n_s \text{ 为流体与固体接触面单元节点数, } R_i = \{l_i, m_i, n_i\} \text{ 为接触面的法}$$

向方向余弦.

由振型展开法,可把位移向量 δ 写成广义坐标的函数,即 $\delta = \varphi Y$. 将其代入方程(4),并左乘振型矩阵的转置矩阵 φ^T ,得

$$K^* \delta + C^* \dot{\delta} + M^* \ddot{\delta} = F^* \quad (5)$$

式中 K^*, C^*, M^* 分别为结构的广义劲度矩阵、广义阻尼矩阵和广义质量矩阵.

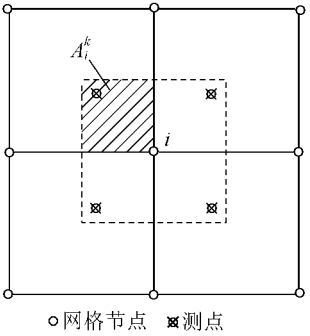


图 1 节点荷载合成示意图
Fig.1 Sketch of nodal load collection

当采用比例阻尼假定时,由正交性方程(5)解耦得

$$\ddot{Y}_j(t) + 2\xi_j\omega_j\dot{Y}_j(t) + \omega_j^2 Y_j(t) = \frac{F_j^*}{m_j^*} = f_j(t) \tag{6}$$

若记 $\bar{\varphi} = \left[\frac{\varphi_1}{M_1^*} \dots \frac{\varphi_p}{M_p^*} \right]$ 则有 $f(t) = \bar{\varphi}^T F(t)$. 广义力 $f(t)$ 的相关矩阵为

$$R_f(\tau) = E(f(t) f(t+\tau)^T) = \bar{\varphi}^T R_f(\tau) \bar{\varphi}$$

两端作傅里叶变换,得

$$S_f(\omega) = \bar{\varphi}^T S_f(\omega) \bar{\varphi} \tag{7}$$

广义坐标 $Y(t)$ 的相关矩阵

$$R_Y(\tau) = E(Y(t) Y(t+\tau)^T) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\theta_1) R_f(\tau + \theta_1 - \theta_2) H(\theta_2) d\theta_1 d\theta_2$$

进而可得

$$S_Y(\omega) = H(-\omega) S_f(\omega) H(\omega) \tag{8}$$

式中 $H(\omega) = \text{diag}[H_1(\omega) \dots H_p(\omega)]$ 为传递函数矩阵.

由式(7)(8)及 $\delta = \varphi Y$ 可得位移响应功率谱矩阵

$$S_\delta(\omega) = \varphi H(-\omega) \bar{\varphi}^T S_f(\omega) \bar{\varphi} H(\omega) \varphi^T \tag{9}$$

类似地,记 $S = DBT\varphi$, 其中 T 为转换矩阵,可得单元应力响应功率谱矩阵

$$S_\sigma(\omega) = SH(-\omega) \bar{\varphi}^T S_f(\omega) \bar{\varphi} H(\omega) S^T \tag{10}$$

分别对式(9)(10)在频域上进行积分,便可得到位移、应力响应的方差矩阵.

3 工程实例

福建古田双口渡电站坝顶布置有 3 孔弧形钢闸门,每孔闸门净宽 12 m、高度 12.5 m,闸门结构如图 2 所示. 闸门钢号为 Q235,门叶面板厚 10 mm,门叶次梁为 22b 工字钢,主梁和支臂采用焊接工字钢,主梁梁高 1 250 mm,翼缘宽 400 mm,板厚均为 20 mm. 支臂梁高 750 mm,翼缘宽 450 mm,翼缘板厚 25 mm,腹板厚 16 mm. 整体有限元网格如图 3 所示,共有 5 089 个单元、4 644 个节点. 其中水体部分采用空间 8 节点等参单元离散,闸门部分主要采用包含面内平面应力分量和卜小明等^[6]提出的弯曲应力

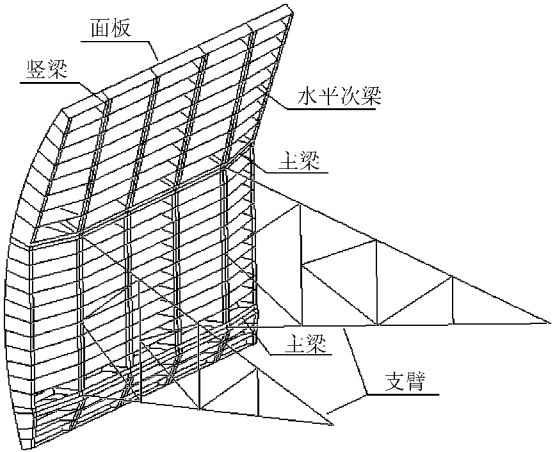


图 2 闸门结构示意图
Fig.2 Sketch of gate structure

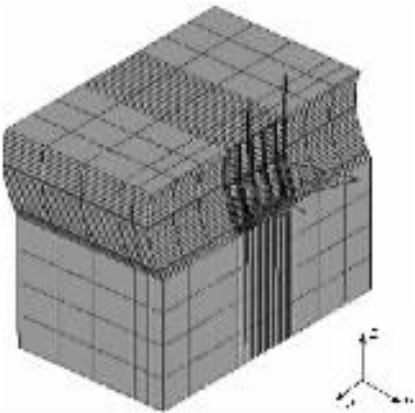


图 3 闸门有限元模型
Fig.3 FEM model of gate

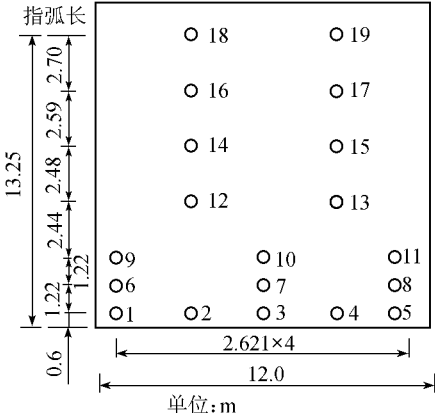


图 4 测点布置
Fig.4 Layout of measuring points

分量的任意四边形板单元,支臂用梁单元模拟.为了测量泄水时作用在闸门上的脉动压力,在面板上对称布置了 19 个测点,如图 4 所示.按照相似准则转换至原型的典型测点的脉动压力时域过程线如图 5(a)所示.相应的功率谱密度曲线如图 5(b)所示.

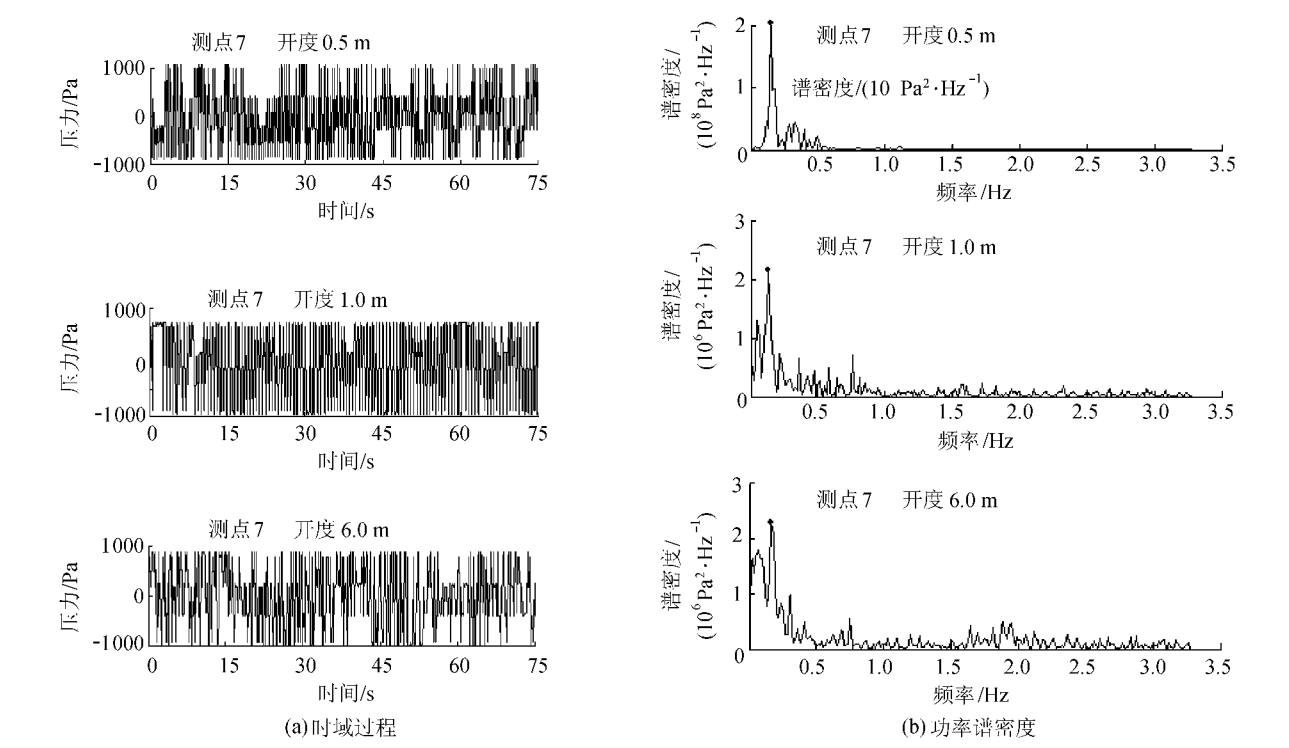


图 5 闸门水流脉动压力时域过程及功率谱密度
Fig.5 Time history of flow fluctuating pressure and power spectrum density of the gate

用上述方法对各种泄水工况下(闸门稳定在某一开度)该闸门的流激振动响应进行了计算分析,得出典型工况下(0.5 m, 1.0 m, 6.0 m 开度)的闸门动位移和动应力最大均方根值,见表 1 和表 2.几种开度工况下闸门结构 3 个方向位移中 x 向(垂直水流方向)位移响应最大,其最大均方根值达到 2.13 mm.闸门主梁上 x 方向动应力最大均方根值为 5.39 MPa,对应位置竖梁上 x 方向动应力最大均方根值为 2.79 MPa.总体来说,闸门结构在脉动水流作用下,动应力均方根值不大,但侧向动位移偏大,故应适当加强支臂的侧向刚度.

表 1 闸门位移响应最大均方根			
Table 1 Maximum root-mean-square value of dynamic displacement response of gate			
开度/ m	x 向位移/ mm	y 向位移/ mm	z 向位移/ mm
0.5	0.70	0.19	0.03
1.0	1.61	0.42	0.04
6.0	2.13	0.47	0.13

表 2 闸门应力响应最大均方根										
Table 2 Maximum root-mean-square value of dynamic stress response of gate										
开度/m	部件	平面应力			弯曲应力			总应力		
		σ_x /MPa	σ_y /MPa	τ_{xy} /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa	τ_{xy} /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa	τ_{xy} /MPa
0.5	面板	0.09	0.20	0.09	0.12	0.17	0.02	0.20	0.29	0.10
	主梁	0.14	0.51	0.28	1.76	0.35	0.20	1.80	0.65	0.33
	竖梁	0.37	0.75	0.66	1.14	0.80	0.28	1.50	1.32	0.74
1.0	面板	0.17	0.33	0.14	0.29	0.39	0.04	0.40	0.53	0.16
	主梁	0.18	0.63	0.34	4.07	0.80	0.37	4.12	1.00	0.62
	竖梁	0.61	1.70	1.49	2.64	1.85	0.64	3.09	2.49	1.67
6.0	面板	1.54	0.50	0.25	0.37	0.50	0.05	0.53	0.77	0.29
	主梁	0.20	0.58	0.36	5.29	1.03	0.53	5.39	1.43	0.88
	竖梁	0.65	2.30	2.09	3.45	2.41	0.83	3.91	3.02	2.33

4 结 语

本文提出了将模型试验和数值计算结合起来进行水工闸门流激振动响应计算的一种方法.通过频域上相干函数的定义以及每一个频率分量上相干函数的拟合,考虑了脉动压力的时空相关性及其不同频率分量上相关程度的不同,同时还以双口渡电站弧形闸门为例进行了算例分析.计算结果表明,本文方法能够较好地满足工程分析的要求,可以推广应用于溢流坝面、导墙、闸墩等受水流脉动荷载作用的其他水工建筑物.

参考文献:

- [1] 徐振东,杜丽惠,才君眉.平面闸门流固耦合自振特性研究[J].水力发电,2001(4):39—43.
- [2] 叶子青.弧形闸门流激振动研究[D].大连:大连理工大学,2002.
- [3] 王雨苗,路观平,张法宝.水流脉动压力的谱特性及相干尺度[J].合肥工业大学学报,1998,21(5):71—76.
- [4] 路观平.随机脉动水压力作用下的结构响应[J].水利学报,1993(12):70—75.
- [5] 杨翊仁,谭晓惠,马建中.核反应堆吊篮流致随机响应研究[J].固体力学学报,2002,23(2):243—247.
- [6] 卜小明,龙驭球.一种薄板弯曲问题的四边形位移单元[J].力学学报,1991,23(1):53—59.
- [7] 严根华.水动力荷载与闸门振动[J].水利水运工程学报,2001(2):10—15.

A computation method for flow-induced vibration response of gates

ZHAO Lan-hao¹, LI Tong-chun¹, WANG Ling²

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei 230022, China)

Abstract The pressures acting on the gate were divided into two parts: the fluctuating pressure of flow on the stationary gate and the hydrodynamic pressure due to gate vibration-induced additional disturbed flow. The temporal-spatial correlation of fluctuating pressures obtained by model experiments between different nodes was analyzed by the coherence function defined in frequency domain with consideration of different levels of correlation for different frequency components, and the nodal load of the fluctuating pressure could be obtained. Then, the computation method for flow-induced vibration response of gates with model experiment and numerical calculation combined together was developed based on the random vibration theory. As an example, the response of radial gate of Shuangkoudu hydropower station was analyzed. The result shows that the present method meets the requirement of engineering, and can be applied to flow-induced vibration analysis of other hydraulic structures.

Key words gate; flow-induced vibration; fluctuating pressure; response