

基于 HHT 的泄流结构损伤在线监测方法研究

练继建, 李成业, 刘昉, 马斌

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

[摘要] 结合 HHT 方法在描述信号瞬时特性和信号处理方面的独特优势, 提出了一种基于 HHT 的泄流结构损伤实时监测诊断方法。首先, 利用信号能量谱构造能量分布向量 η_i , 进而定义结构异常指标和预警指数, 最后通过计算相邻时间段内的异常指标, 实现结构损伤的在线监测。应用文中方法对一导墙结构进行数值仿真试验, 结果表明, 文章中定义的异常指标能够较准确地判断结构的损伤, 同时具有一定的抗噪能力。

[关键词] 泄流结构; HHT; 能量分布向量; 异常指标; 预警指数; 数值仿真

[中图分类号] TV65 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0038-07

1 前言

在水利工程中, 泄流结构的工作条件极其复杂, 由于水流的强烈紊动, 产生的脉动压力作用在结构物上, 极有可能造成结构物的强烈振动, 甚至导致结构的破坏。为此, 必须寻找有效的监测方法, 以快速、准确地发现泄流结构中存在的隐患, 有效预报其安全状况。现有的损伤检测方法大都事先假设已经获得了比较详尽、准确的有限元模型信息, 根据实测结构的模态参数进行损伤识别, 这往往会给实际问题的解决带来困难。基于信号处理技术的损伤识别是当前结构健康监测领域的一种新方法, 该方法直接对结构振动信号进行分析, 从中提取完备信息并以此对结构损伤进行识别, 具有较好的适用性和敏感性, 并有助于克服由噪声、模态参数识别精度、损伤指标敏感性等因素对损伤结果的影响。泄流结构损伤过程具有强随机性和耦合性特点, 加之环境背景噪声的干扰作用, 使得振动响应中往往含有非线性成分、奇异点及不规则的突变部分, 应用传统的基于傅立叶变换的信号处理方法存在一定的局限性。

1998 年, N. E. Huang 等人提出了 Hilbert - Huang 变换 (HHT)^[1,2], 该方法由经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 和希尔伯特变换 (Hilbert Transform, HT) 组成。通过经验模态分解方法对结构的振动响应信号进行预处理, 可以把非平稳的原始信号分解成一系列具有不同特征尺度的平稳信号, 把原信号的能量分配到各个固有模态函数分量上, 而且这种分解是自适应的, 因而更能反映损伤的本质信息。目前, HHT 法已被广泛应用于结构健康监测与损伤识别领域^[3-6]。

笔者等提出了一种基于 HHT 的泄流结构损伤在线监测方法, 利用信号能量谱构造能量分布向量, 进而定义结构异常指标, 通过计算相邻时间段内的异常指标, 实现结构损伤的在线监测和识别。

2 HHT 算法的基本原理

N. E. Huang 等人定义满足下面两个条件的函数为固有模态函数: a. 整个数据序列中, 极值点的数量与过零点数量相等或至多相差 1; b. 信号关于时间轴局部对称。

[收稿日期] 2011-09-25

[基金项目] 国家杰出青年基金(50725929); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队(IRT0851); 水利部公益性行业科研专项项目(200901081); 西部交通建设科技项目(2009328000084); 国家科技支撑项目(2008BAB29B04)

[作者简介] 练继建(1965—), 男, 福建建瓯市人, 天津大学教授、博士生导师, 主要从事水利水电工程安全与优化运行、海上新能源开发利用研究; E-mail: tju_luntan@126.com

实测泄流结构振动信号通常不满足 IMF 条件, N. E. Huang 等人提出经验模态分解法。对任意原始信号 $x(t)$, EMD 方法的计算过程是: 找出 $x(t)$ 所有的极大值点, 应用三次样条函数拟合成原始信号的上包络线; 找出 $x(t)$ 所有的极小值点, 应用三次样条函数拟合成原始信号的下包络线; 计算上下包络线的均值 $m_1(t)$, 将原始信号 $x(t)$ 减去 $m_1(t)$ 得到一个新的信号 $h_1(t)$ 。通常情况下, $h_1(t)$ 并不满足一个 IMF 分量的条件, 此时将 $h_1(t)$ 看成原信号, 重复上述步骤, 得到第 k 次筛选的数据 $h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t)$ 。此时需要有一个终止准则来判断 $h_{1k}(t)$ 是不是一个 IMF 分量, 否则过多地重复处理过程, 会导致 IMF 分量失去意义。这个准则可以用两个连续的处理结果之间的标准差 S_d 表示, 即:

$$S_d = \sum_{i=0}^T \frac{[h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)]^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \quad (1)$$

实践证明, 当 S_d 的值在 $0.2 \sim 0.3$ 时, 既能保证基本模态函数的线性和稳定性, 又能使其具有相应的物理意义。当 $h_{1k}(t)$ 满足 S_d 值的要求, 则 $h_{1k}(t)$ 为原信号的第一阶 IMF 分量, 记为 $c_1(t)$, 将原始信号 $x(t)$ 减去 $c_1(t)$, 重复上述过程, 直到最后一个残余信号 $r_n(t)$ 不可再分解为止。最后, 原始信号 $x(t)$ 可以表示成:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

文献[7]应用 EMD 算法分析爆破振动信号, 验证了该方法的完备性和正交性。应用 EMD 分解可得到信号 $x(t)$ 的多个 IMF 分量的组合, 对 $c_i(t)$ 作 Hilbert 变换:

$$\hat{c}_i(t) = H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \text{PV} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

式(3)中, PV 代表柯西主值 (cauchy principal value), 因此构造解析信号 $z(t)$:

$$z_i(t) = c_i(t) + j\hat{c}_i(t) = A_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (4)$$

式(4)中, $A_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + \hat{c}_i^2(t)}$ 为幅值函数;

$$\theta_i(t) = \arctan\left[\frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)}\right] \text{ 为相位函数。}$$

在相位函数 $\theta_i(t)$ 的基础上定义瞬时频率为:

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (5)$$

瞬时频率是时间 t 的函数, 它表示某一时刻信

号能量在频域分布的量度。

3 基于 HHT 的结构损伤在线监测指标

3.1 信号的能量分布向量

对原始信号的每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换后, 可得 Hilbert 谱的表达形式:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n A_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (6)$$

式(6)中, $i = 1, 2, \dots, n$ 表示 IMF 分量的个数, 省略了残余分量 $r_n(t)$; Re 表示取实部。如果 $H(\omega, t)$ 对时间积分, 就可以得到 Hilbert 边际谱:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (7)$$

边际谱表达了每个频率在全局上的幅度, 它代表了统计意义上的全部累加幅度。如果振幅的平方对时间积分, 就可以得到 Hilbert 能量谱:

$$E(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt \quad (8)$$

Hilbert 能量谱表达了每个频率在整个时间长度内所积累的能量, 将信号的频率区间 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 分成 n 个频带 ω_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 则各个频带上的能量可表示为 $E(\omega_i)$, 进而定义能量分布向量 η_i 为:

$$\eta_i = \frac{E(\omega_i)}{\sum_{i=1}^n E(\omega_i)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

3.2 结构损伤异常指标

结构发生损伤引起固有频率的变化, 其振动响应能量在频域以及各阶模态上的分布也会发生改变, 且改变量和损伤位置及程度有关。利用信号 Hilbert 能量谱构造结构能量分布向量 η_i , 再进一步用它来构造结构异常指数, 对损伤是否发生进行识别。设 η_i^u 、 η_i^d 分别为无损和未知情况下的结构能量分布向量, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。定义 η_i^u 和 η_i^d 的互相关系数为 $\Phi(\eta_i^u, \eta_i^d)$, 构造损伤指标 N_f [8]:

$$N_f = 1 - \Phi(\eta_i^u, \eta_i^d)^2 = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n \eta_i^u \cdot \eta_i^d\right]^2}{\sum_{i=1}^n (\eta_i^u)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\eta_i^d)^2} \quad (10)$$

当 N_f 等于 0 或者非常小, 表明响应中模态成分没有发生改变或仅发生微小变化, 无损发生; 当结构出现损伤, 能量在各阶模态上的分布会发生明显

改变,模态成分匹配度降低, N_f 将远大于0。

结构出现损伤,能量在频域上的分布必然发生变化,导致能量分布向量 η_i 峰值所对应的频率发生变化,构建损伤指标 R_f :

$$R_f = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left| \frac{\omega_j^u}{\omega_j^d} \right| - 1 \quad (11)$$

式(11)中, ω_j^u 、 ω_j^d 分别为无损伤和未知情况下结构能量分布向量各极值点所对应的频率; $j = 1, 2, 3, \dots, m$ 为 η_i 中极值点的个数。 $R_f = 0$ 表明能量在各频率上的集中程度没有发生改变,结构无损伤发生。当结构出现损伤,其能量分布向量峰值所对应的频率会有所降低,即 $\omega_j^d < \omega_j^u$, R_f 值将大于0。

4 水电站导墙结构在线监测数值仿真试验

文章以某工程导墙结构为例,导墙截面尺寸如图1所示。实际工程导墙顺水流方向每24 m设一条结构缝,因此取24 m长的导墙段建立有限元模型,模型中地基模拟深度为54 m,两侧宽度各取30 m,地基采用全约束,将与水流方向垂直的两个导墙面加上法向约束,沿高程自上而下依次布置1#~6#测点,有限元模型及测点布置如图2所示。混凝土材料密度取2400 kg/m³,动弹性模量取35 GPa,泊松比取0.167,在计算时将地基材料属性与导墙取为一致。

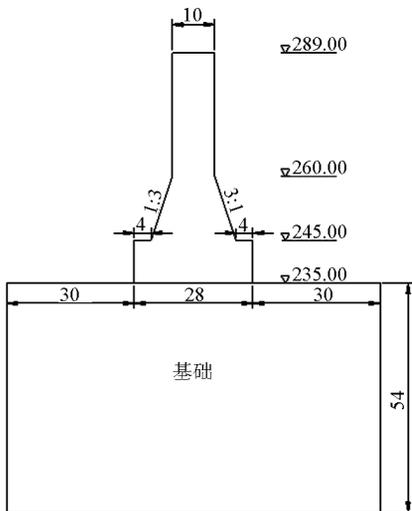


图1 导墙断面图(单位:m)

Fig. 1 The section of the guide wall(unit:m)

为验证指标 N_f 和 R_f 的稳定性,根据泄流结构激励形式的特点,设计激励位置相同但大小不同的白噪声点激励、激励位置和大小均不同的白噪声点激励以及激励位置和大小均不同的白噪声面激励三

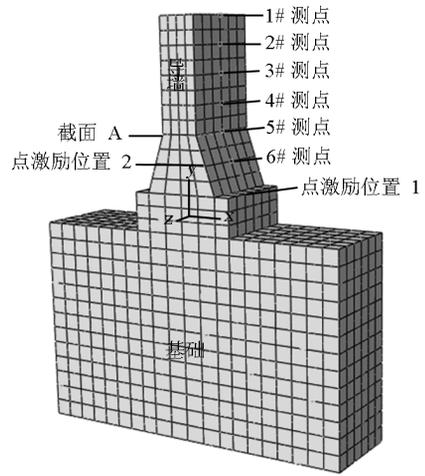


图2 导墙有限元模型及测点布置图

Fig. 2 The finite element model and measured points locations

种工况,如表1中工况1~工况3,激励值及其改变量均由模型试验^[9]确定。由模型试验和有限元计算结果可知,导墙在截面A、高程260 m处的动应力值最大,如图3所示,该处出现裂缝的可能性也最大,为验证指标 N_f 和 R_f 对不同损伤程度的敏感性,文章设计了截面A处、裂缝深度分别为导墙厚度1/8、1/4和1/2三种程度的损伤,见表1工况4~工况6。

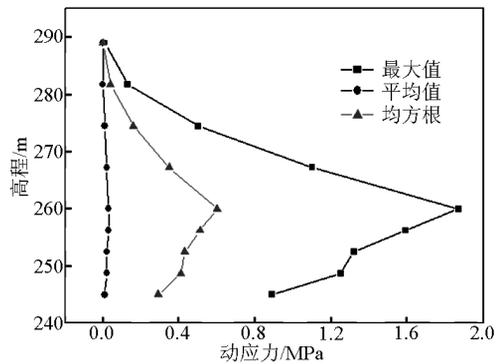


图3 模型试验最不利工况下导墙动应力

Fig. 3 Guide wall dynamic stress for the most unfavorable condition of test

表1 数值试验工况表

Table1 The conditions of numerical simulation test

工况	结构状态
1	结构无损伤,采样时间50 s,激励位置在1处,白噪声点激励, $t = 25$ s之后激励幅值加大,激励位置不变
2	结构无损伤,采样时间50 s,白噪声点激励,前25 s激励位置在1处, $t = 25$ s之后激励幅值加大,激励位置变为2处

工况	结构状态
3	结构无损伤,采样时间 50 s,白噪声激励,前 25 s 激励作用面为高程 274.5 m 以下至基础面, $t = 25$ s 之后激励作用面为高程 267.25 m 以下至基础面,激励幅值降低
4	采样时间 50 s,白噪声激励, $t = 25$ s 时结构截面 A 处出现裂缝损伤,裂缝深度为导墙厚度的 1/8
5	采样时间 50 s,白噪声激励, $t = 25$ s 时结构截面 A 处出现裂缝损伤,裂缝深度为导墙厚度的 1/4
6	采样时间 50 s,白噪声激励, $t = 25$ s 时结构截面 A 处出现裂缝损伤,裂缝深度为导墙厚度的 1/2

4.1 无损伤情况下各指标稳定性分析

对无损工况 1 ~ 工况 3 条件下各测点的位移响

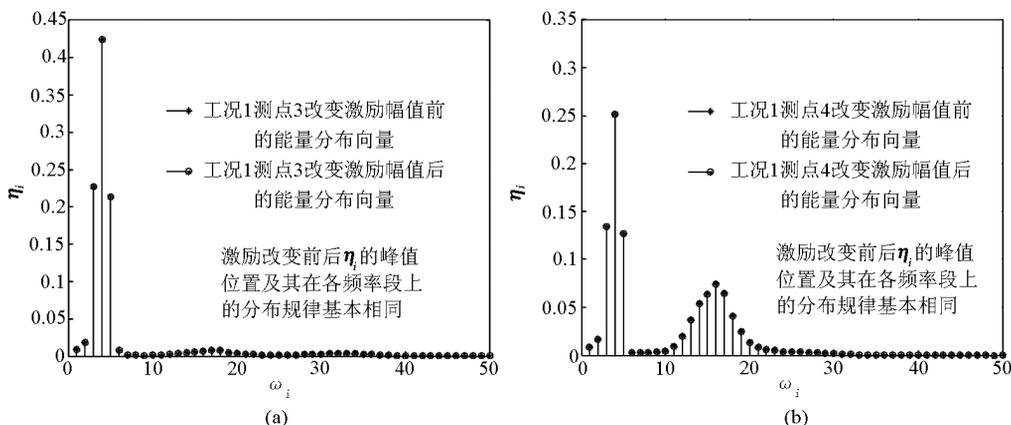


图 4 工况 1 改变激励前后 3#、4#测点的能量分布向量图

Fig. 4 Energy distribution vector of point 3#, 4# before and after excitation changed for condition 1

表 2 工况 1 ~ 工况 3 不同测点的 N_f 和 R_f 指标

Table 2 The N_f and R_f of every measured point from condition 1 to condition 3

测点位置	工况 1		工况 2		工况 3	
	N_f	R_f	N_f	R_f	N_f	R_f
1	2.19×10^{-8}	0	0.008 8	0	0.009 8	0
2	3.39×10^{-7}	0	2.05×10^{-4}	0	0.001 3	0
3	3.12×10^{-8}	0	0.068 6	0	6.66×10^{-4}	0
4	9.24×10^{-8}	0	0.061 6	0	0.005 6	0
5	3.13×10^{-8}	0	0.026 5	0	0.071 9	0
6	9.29×10^{-7}	0	0.038 5	0	0.089 2	0

从表 2 中可以看出,工况 1 条件下各测点的 N_f 值均接近于 0,而工况 2、工况 3 激励位置和大小都发生改变的情况下,各测点的 N_f 指标均有所增加,但从模型试验确定的最不利荷载条件下(工况 3),各测点指标 N_f 的最大值为 0.089 2,因此本例定义超过此最大值 10% 的数值作为损伤预警指数,即,当 $N_f > 0.1$ 时,即认为结构出现异常。与 N_f 值受激励位置和激励条件变化的影响不同,各工况下各测点信号的 R_f 指标均为 0,不因外界条件的变化而变

应进行 EMD 分解,应用式(6) ~ (8) 计算信号的能量谱,应用式(9)即可得到能量分布向量。通过计算分析,各工况下所有测点激励变化($t = 25$ s)前后 η_i 的峰值位置以及在各频率段上的分布规律基本相同,由于篇幅限制,文中仅列出 1 工况下 3#、4#测点激励变化前后的 η_i 分布图,如图 4 所示。根据式(10)可计算出各测点不同工况下的 N_f 值,见表 2。从各测点的能量谱图可以看出,信号能量主要在 0 ~ 25 Hz 范围内,找出 t 时刻前后能量分布向量 η_i 各峰值所对应的频率 ω_j^u 和 ω_j^d ,由式(11)计算出各测点不同工况下的 R_f 值,见表 2。

化,只与结构自身的特性相关,当 $R_f > 0$ 时,即认为结构出现异常。在实际泄流结构损伤监测过程中,可综合分析 N_f 和 R_f 两项指标值,作为判断结构出现损伤的依据。

4.2 泄流结构损伤的判定

4.2.1 在线监测信号 IMF 分量的奇异点和瞬时频率

文献[10]和文献[11]指出结构刚度发生突变,其振动响应 EMD 结果中的高阶固有模态函数在时域上将出现奇异点。泄流结构出现损伤必然导致刚度的降低,结构在线监测信号表现出一个小的不连续性,信号出现了奇异点,直接观察振动信号很难发现这一不连续点,而对结构响应进行 EMD 分解所得的高频 IMF 信号可以检测出该信号的奇异点及其发生的时刻。对 4、5、6 三个损伤工况下各测点响应进行 EMD 分解,分解结果的第一阶 IMF 分量在 25 s 时刻均出现了明显的突变,任取工况 4 和工况 6 测点 2 的响应进行分析,如图 5 所示,表明 $t = 25$ s 时刻结构刚度可能发生突变。

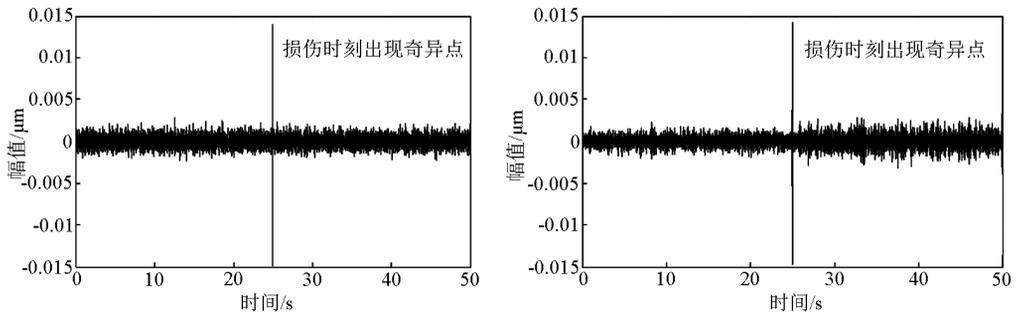


图5 工况4和工况6测点2响应EMD分解的第一阶IMF分量

Fig. 5 The first IMF component of point 2 for condition 4 and condition 6 respectively

外界载荷和工况的突然变化也会使EMD的分解结果出现奇异点,因此信号出现奇异点不足以判断结构出现损伤。信号IMF分量的瞬时频率是时间的函数,反映结构固有频率随时间的变化规律,对于健康的结构其瞬时频率是不变的,瞬时频率的衰减反映了结构已受到某种损伤。通过分析,损伤工

况下各测点IMF分量的瞬时频率在损伤前后均有一定的下降。任取工况6测点2分解后第四阶IMF分量的瞬时频率,如图6所示。从图6中可以看出,结构响应的瞬时频率在第25s时突然下降,瞬时频率的平均值也由4.12 Hz下降到2.77 Hz,这表明此刻结构发生某种突然的损伤。

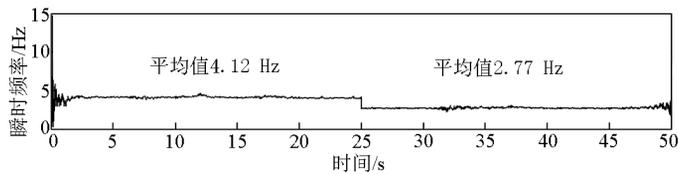


图6 工况6测点2响应EMD分解第四阶IMF分量的瞬时频率

Fig. 6 The instantaneous frequency of the fourth IMF component from point 2 for condition 6

4.2.2 异常指标对损伤的敏感性分析

计算工况4~工况6各测点的能量分布向量 η_i ,通过分析可知,各工况下所有测点损伤前后 η_i 值的峰值位置及其在各频率段上的分布均发生了明显变化。由于篇幅限制,文中仅列出5工况下3#、4#测点损伤前后的 η_i 分布图,如图7所示。

按照3.2节中的方法,分别计算工况4~工况6各测点的 N_f 和 R_f 指标,见表3。从表3可以看出,损伤特征指标 N_f 和 R_f 对各种不同损伤模式均较为敏感,可以判断结构损伤的发生。当结构损伤位置一定时,随着损伤程度的增加,各测点指标值相应变大,说明根据损伤指标值的大小可以定性地判断结构的损伤程度。但是相同工况下,各测点的指标值没有明显的规律性,根据能量定义的特征指标 N_f 和 R_f 无法判断损伤发生的位置,这是因为大型水工结构不同部位的振动情况复杂,对损伤的敏感程度也不相同。

表3 工况4~工况6不同测点的 N_f 和 R_f 指标

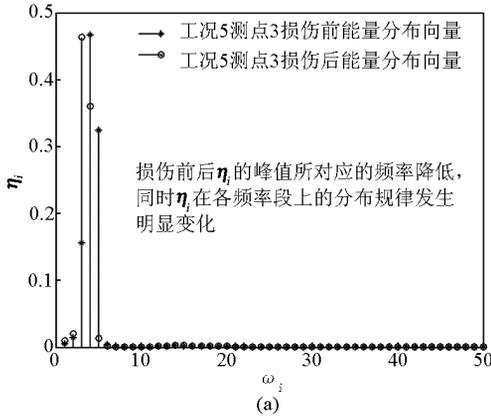
Table 3 The N_f and R_f of every measured point from condition 4 to condition 6

测点	工况4		工况5		工况6	
	N_f	R_f	N_f	R_f	N_f	R_f
1	0.221 6	0.033 3	0.711 9	0.200 0	0.989 1	0.571 4
2	0.151 4	0.033 3	0.581 6	0.202 4	0.989 4	0.571 4
3	0.300 0	0.039 8	0.805 1	0.202 4	0.996 8	0.571 4
4	0.154 4	0.039 8	0.377 4	0.150 9	0.976 2	0.420 2
5	0.111 2	0.133 3	0.198 4	0.152 5	0.707 7	0.576 9
6	0.040 7	0.150 8	0.172 2	0.134 9	0.407 6	0.396 5

4.3 指标抗噪性研究

信号采集过程中不可避免地受到噪声的影响,为了分析噪声对损伤指标的影响,文章在各工况下1#测点响应信号中分别加入标准差为10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%倍信号标准差的白噪声,定义为噪声水平1~8。EMD分解本身就是一个由高频到低频的滤波过程,由文献[12]可

知,白噪声 EMD 分解后能量主要集中在第一阶分量(约占 50%~70%),应用信号能量谱计算损伤指



标时,除去第一阶 IMF 分量以及最后几阶低频干扰分量,计算结果见表 4。

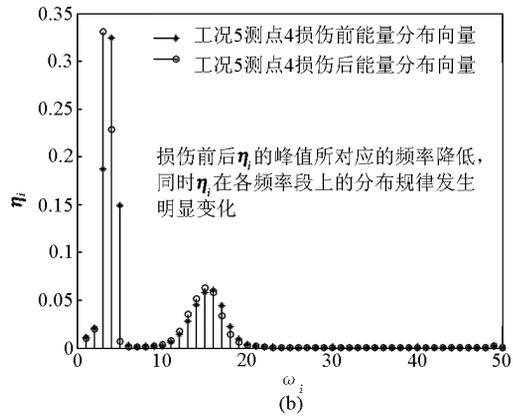


图 7 工况 5 损伤前后 3#、4#测点的能量分布向量图

Fig. 7 Energy distribution vector of point 3#,4# before and after damage appearance for condition 5

从表 4 可以看出,在各种噪声水平下,无损伤工况的 N_f 指标均小于预先设定的预警指数 0.1,与表 2 中不含噪声情况下的 N_f 值相比没有明显的规律性;而损伤工况下,随着噪声水平的不断提高,信号 N_f 指标逐渐减小,但减小的最大幅度(25.52%)

远低于噪声的增幅。信号各工况下的 R_f 指标受噪声的影响较小,基本与无噪情况下的计算结果相同。因此,在一定噪声水平的情况下,文中方法仍可以判断结构的损伤。

表 4 各工况 1#测点含噪信号的 N_f 和 R_f 指标

Table 4 The N_f and R_f of point 1# responses disturbed by different noise levels for every condition

噪声水平	无损伤工况						损伤工况					
	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4		工况 5		工况 6	
	N_f	R_f	N_f	R_f	N_f	R_f	N_f	R_f	N_f	R_f	N_f	R_f
1	0.006 7	0	0.006 8	0	0.006 0	0	0.201 6	0.033 3	0.698 1	0.202 4	0.984 0	0.535 7
2	0.021 3	0	0.007 6	0	0.015 2	0	0.195 1	0.033 3	0.662 8	0.202 4	0.965 6	0.576 9
3	0.055 0	0	0.009 4	0	0.024 4	0	0.192 8	0.033 3	0.645 4	0.202 4	0.956 3	0.535 7
4	0.016 5	0	0.012 4	0	0.003 5	0	0.186 9	0.033 3	0.599 1	0.202 4	0.925 8	0.576 9
5	0.017 3	0	0.029 6	0	0.001 5	0	0.182 6	0.033 3	0.580 1	0.202 4	0.910 2	0.535 7
6	0.008 1	0	0.057 6	0	0.017 1	0	0.176 5	0.033 3	0.564 8	0.166 7	0.854 2	0.538 5
7	0.083 9	0	0.065 1	0	0.091 6	0	0.178 7	0.033 3	0.553 2	0.166 7	0.882 5	0.576 9
8	0.005 9	0	0.069 8	0	0.040 7	0	0.169 6	0.033 3	0.530 2	0.202 4	0.831 0	0.576 9

基于 HHT 能量分布指标的泄流结构在线监测方法无需知道结构的模态参数等其他特征信息,也无需激励信息,只需对任一位置处响应进行监测即可实现,能够满足结构健康监测的动态、实时性要求。但对于损伤位置和损伤程度的进一步精确辨识,还需进一步研究。

发生损伤时其振动能量在频域和各阶模态上的分布也会随之改变的特点,定义结构异常指标 N_f 和 R_f ,通过计算相邻时间段内的异常指标,实现结构损伤在线监测。

5 结语

文章利用 HHT 法在描述信号瞬时特性和信号处理方面独特的优势,提出了一种基于 HHT 的泄流结构损伤在线监测方法。首先应用 HHT 法计算响应 Hilbert 能量谱,构造能量分布向量 η_i ,根据结构

应用文中方法对一导墙结构进行数值仿真试验,模拟了不同激励情况下的三种无损伤工况以及相同损伤位置不同损伤程度下的三种有损工况。分别进行了无损伤情况下各指标的稳定性分析、损伤情况下各指标的敏感性分析以及各工况下指标的抗噪性分析,结果表明,文中的异常指标能够较精确地判断结构的损伤,同时具有一定的抗噪能力,其中指标 R_f 的稳定性、敏感性以及抗噪性更为突出。但是

应用文中方法对损伤位置和损伤程度进行精确辨识,还需要进一步的深入研究。

参考文献

- [1] Huang N E, Shen Z. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A. 1998, 454:903 - 995.
- [2] Huang N E, Steven R L. A new view of nonlinear water waves; the Hilbert Spectrum [J]. Annual Review of Fluid Mesh, 1999, 31 (2):417 - 457.
- [3] Huang N E, Huang K. 基于希尔伯特 - 黄变换的铁路桥梁结构健康监测 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(1):1 - 7.
- [4] 舒忠平. 基于希尔伯特 - 黄变换的结构损伤检测方法研究 [D]. 西安:西北工业大学, 2006.
- [5] 石志晓, 李 昕, 周 晶. 损伤检测的经验模态分解法 [J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(3):401 - 404.
- [6] Qu W Z, Chen M X, Zeng Y L, et al. Structural damage detection using the Hilbert - Huang transforms method [C]// Li A, Sih G

- C, Nied H F, eds. Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure, Materials and Environment. Nanjing: Southeast University Press, 2007:293 - 298.
- [7] 张义平, 李夕兵, 左宇军, 等. 爆破振动信号的 HHT 分析与应用 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2008.
- [8] 李传习, 陈富强. 基于 HHT 的结构损伤特征量与异常诊断 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007, 4(3):29 - 33.
- [9] 练继建. 向家坝水电站消力池底板与导(隔)墙结构水弹性模型试验研究 [R]. 天津:天津大学水利水电工程系, 2010.
- [10] Xu Y L, Chen J. Structural damage detection using empirical mode decomposition: experimental investigation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(11):1279 - 1288.
- [11] Yang J N, Lei Y, Lin S, et al. Hilbert - Huang based approach for structural damage detection [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1):85 - 95.
- [12] Zhao Huawu, Norden E H. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. The Royal Society, Proceedings Royal Society of London, A (2004) 460:1597 - 1611.

Study on online monitoring method for flood discharge structure damage based on Hilbert-Huang Transform

Lian Jijian, Li Chengye, Liu Fang, Ma Bin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] In the long-term service period, many factors may lead to serious damages and deficiencies to the structure, such as complicated working conditions, inadequate investigation and design, poor management, aging of structure, etc. Therefore, it's very important to study the online monitoring method for flood discharge. According to the special advantages of HHT in instantaneous characteristics analysis and signal processing, an online monitoring method for flood discharge structure damage based on HHT is put forward in this paper. Firstly, after obtaining the HHT energy spectrum of measured responses, the energy distribution vector, defined as η_i , can be calculated. Then, because of the η_i differences between undamaged and damaged situations, we determine the structure anomaly indexes and the warning threshold. Finally, having been calculating the anomaly indexes of adjacent time periods, the damage online monitoring can be realized. The results from the numerical simulation test of a guide wall demonstrate that the anomaly indexes mentioned above can accurately identify the structure damage and have anti-noise ability to some degree. However, the further research for estimating the damage location and degree need to be developed in the next period.

[Key words] flood discharge structure; Hilbert-Huang Transform; the energy distribution vector; anomaly index; warning threshold; numerical simulation