

基于二次滤波的 HHT 渡槽模态参数辨识方法

张建伟, 江 琦, 曹克磊, 朱良欢

(华北水利水电大学水利学院, 郑州 450011)

摘 要: 针对大型渡槽安全运行评估问题, 提出一种环境激励下基于二次滤波的希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 模态参数辨识方法。采用小波阈值与经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 结合的二次滤波方法滤除运行环境中强噪声干扰, 凸显结构动力特性, 有效避免了模态混叠问题; 根据奇异熵增量理论确定系统阶数, 应用 HHT 方法辨识降噪后信号, 提高辨识准确性和精度。将该方法应用于景泰川二期三泵站输水 U 型渡槽, 辨识正常输水工况下结构前 5 阶模态参数, 建立该渡槽第一跨三维有限元模型, 并计算模型同工况下前 5 阶模态参数, 对比模态参数辨识结果与有限元仿真结果。对比结果表明: 2 种方法计算结果非常接近, 最大误差为 4.4%。说明基于二次滤波的 HHT 模态辨识方法能准确高效辨识强噪声背景下结构模态参数, 可将该方法推广到大型渡槽结构中, 为渡槽安全运行评估和健康在线监测提供新思路, 应用前景广阔。

关键词: 有限元方法; 农业工程; 供水; HHT; 二次滤波; 渡槽; 模态参数辨识

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.009

中图分类号: TV31; TB53

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0065-07

张建伟, 江 琦, 曹克磊, 朱良欢. 基于二次滤波的 HHT 渡槽模态参数辨识方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 65—71. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.009 http://www.tcsae.org

Zhang Jianwei, Jiang Qi, Cao Kelei, Zhu Lianghuan. HHT modal parameter identification for aqueduct based on secondary filtering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 65—71. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.009 http://www.tcsae.org

0 引 言

渡槽是跨越河流、道路、河谷的空间薄壳结构输水建筑物, 广泛应用于水利工程建设。实际运行中由于槽体与水体相互作用、地震冲击、强风以及超负荷输水、昼夜温差等因素导致渡槽结构出现不同程度的损伤^[1], 结构动力特性也会随之发生相应变化, 从而对渡槽结构安全运行和使用寿命产生重大影响。因此寻找一种高效快速的现代化模态辨识方法是解决这一问题的有效途径。

基于环境激励下结构工作模态参数辨识从 20 世纪 60 年代就已开始研究, 在近几年快速发展, 主要分频域、时频结合三大类方法, 相对于传统实验室模态辨识方法有许多优势^[2-4], 如环境激励下模态参数辨识更符合实际工况和边界条件, 能真实反映结构工作状态下结构特性, 且不需要原型试验、人工激励等。其中希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 是美籍华人黄鄂^[5]在 1998 年提出的一种分析非线性非平稳信号的自适应时频处理新方法, HHT 由经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 和希尔伯特变换 (Hilbert Transform, HT) 两部分组成。因其不需要“先验”知识,

且能根据信号自身特性自适应分解成一系列反应结构物理意义的本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 得到广泛应用。基于 HHT 的上述优点, 不少学者针对不同的研究对象进行了诸多研究, 如陈隽等^[6]对大型密频结构的阻尼进行了辨识, 梁建伟等^[7]对变压器结构的振动模态参数进行了辨识。虽然 HHT 方法在实际应用中可得到较高精度的结构参数, 但由于其理论的不完善, 实际计算过程中存在模态混叠、端点效应等缺陷, 因此, 诸多学者提出不同的改进措施来抑制 HHT 方法的不足, 如刘俊等^[8]采用改进 HHT 方法辨识一体化电液作动器模态参数, 秦世强等^[9]采用 EMD 和 SSI 结合的方法辨识大型桥梁模态参数, 韩建平等^[10]采用 HHT 与随机减量技术结合方法辨识钢筋混凝土结构模态参数。

渡槽作为输水建筑物, 结构振动响应受水流因素影响较大, 属于非平稳非线性低信噪比振动信号, 其有效信息往往被低频水流噪声所淹没。为得到渡槽结构振动特征, 提出基于二次滤波的 HHT 模态参数辨识方法, 该方法通过对流激振动数据进行预处理, 提取结构振动有效信息, 结合系统定阶, 根据现场实测振动数据辨识渡槽结构运行模态参数, 从而为渡槽结构安全运营和状态评估提供依据。

1 二次滤波理论

对于低信噪比信号, 小波阈值处理对白噪声有强抑制能力, 但却无法滤除低频水流噪声, EMD 分解得到一系列从高频到低频的表征结构物理意义的 IMF, 但由于

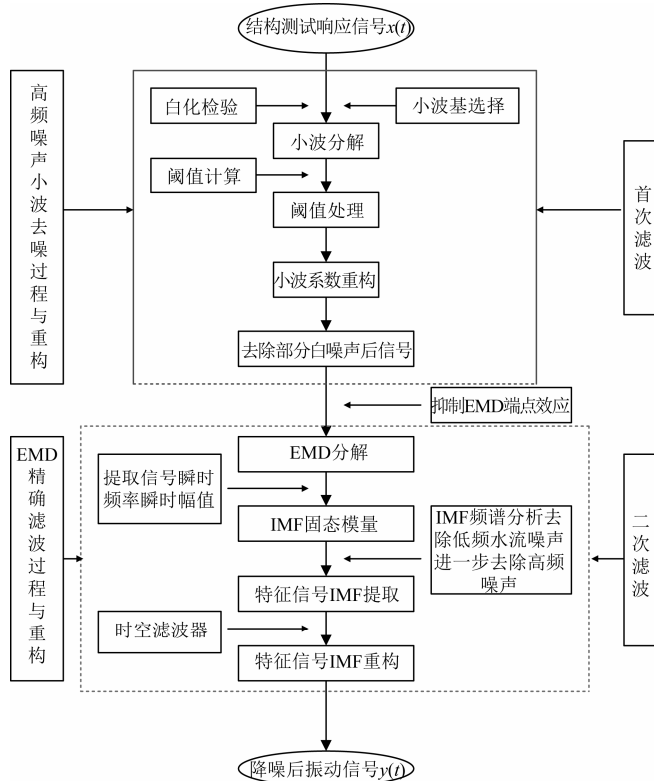
收稿日期: 2015-02-03 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51009066); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划 (2012GGJS-101); 河南省科技攻关 (142102310122、132102310320、142300410177) 资助。

作者简介: 张建伟, 男, 河南洛阳, 副教授, 博士, 主要从事水利水电工程的研究与教学工作。郑州 华北水利水电大学, 450011。

Email: zjwcivil@126.com

端点效应导致分解得到的 IMF 不能反映结构真实物理意义, 结合小波阈值降噪^[11-12]和 EMD 分解^[13-14]在信号处理中的优缺点, 采用小波阈值与 EMD 结合的二次滤波方法处理强噪声信号。利用小波阈值分离信号中的高频白噪声, 抑制 EMD 端点效应并为 EMD 做铺垫, 而 EMD 分解可进一步分离白噪声和低频水流噪声, 提高滤波降噪精度。此方法的本质在于对有效信息表现出传递特性和对噪声表现出抑制特性, 根据有效信息和噪声在小波分解尺度上、EMD 分解空间上的不同规律, 进行有效的信噪分离。二次滤波流程图如图 1 所示。



注: $x(t)$ 表示结构测试响应信号, $y(t)$ 表示结构降噪后信号, 下同。
Note: $x(t)$ denotes test response signal of structure, $y(t)$ denotes de-noised structure signal. The same as below.

图 1 二次滤波流程图

Fig.1 Flow chart of secondary filtering

2 环境激励模态辨识理论

2.1 自然激励技术 (natural excitation technique, NExT)

NExT 是由美国 Sandia 国家实验室结合时域模态分析方法而提出的^[15], 其基本原理如下。

自由度为 N 的线性系统在白噪声激励下, 对系统 k 点输入激励 $f_k(t)$ 时, 系统 i, j 两点间互相关函数 $R_{ijk}(\tau)$ 表达式为:

$$R_{ijk}(\tau) = \sum_{n=1}^{2N} b_{jn} \phi_n e^{\lambda_n \tau} \quad (1)$$

式中: b_{jn} 为仅同参考点 j 和模态阶次 n 有关的常数项, τ 为时间间隔。 ϕ_n 为第 i 测点的第 n 阶模态振型, λ_n 为系统的第 n 阶特征值。

当系统中 k 点受到单位脉冲激励时, 则 i 点的脉冲响

应 $h_{ik}(t)$ 为:

$$h_{ik}(t) = \sum_{n=1}^{2N} \phi_n a_{kn} e^{\lambda_n t} \quad (2)$$

式中: a_{kn} 为仅同激励点 k 有关的常数项; t 为时间间隔。

由式 (1) 和式 (2) 比较可知, 线性系统在白噪声激励下两点响应的互相关函数和脉冲响应函数的数学表达式是完全一致的, 在互相关函数中, 每个衰减的正弦函数都对应于某一阶结构模态, 具有相同的固有频率和阻尼比, 同时结构各测点的同阶模态振型乘以同一因子时, 并不改变模态振型的特征。因此可用互相关函数代替脉冲响应函数。

2.2 基于奇异熵理论的模式定阶

为探究信号阶次的变化规律, 采用奇异熵理论:

$$E_r = \sum_{m=1}^p \Delta E_m \quad (m \leq l) \quad (3)$$

式中: p 为奇异熵的阶次; ΔE_m 表示奇异熵在阶次 m 处的增量, ΔE_m 可由下式得到:

$$\Delta E_m = - \left(d_m / \sum_{p=1}^l d_p \right) \cdot \ln \left(d_m / \sum_{p=1}^l d_p \right) \quad (4)$$

式中: $\sigma_m = \ln \left(d_m / \sum_{p=1}^l d_p \right) (m \leq l)$, σ_m 组成的序列为矩阵

经奇异值分解得到的奇异谱。 d_m 为第 m 非负主对角元素, d_p 为从 $p=1$ 开始到 l 按降序排列的非负主对角元素。奇异谱反映各分量占总能量的相对关系。

由于同一脉冲响应信号无论受到噪声干扰的程度如何, 完整抽取其有效特征信息所需的奇异谱阶次是一定的, 即结构系统阶次一定, 所以可用奇异熵增量理论确定系统阶次, 详细理论论述见文献[16-17]。

2.3 HHT 模态参数辨识

HHT 模态参数辨识首先对根据 NExT 求出系统在白噪声激励下两点间响应互相关函数进行 EMD 分解, 响应信号选择受迫振动两较小的测点作为参考点。 EMD 分解后得到一系列高频到低频的 IMF 分量, 各阶 IMF 分量代表了每一阶自由衰减响应, 其函数表达式为:

$$x(t) = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} (x_0 \cos(\omega_d t + \phi_0)) \quad (5)$$

式中: A_0 是与荷载强度、结构质量和频率特性等有关的常数; ξ 表示相对阻尼系数; ω_0 为结构系统的无阻尼固有频率; x_0 为初始位移; $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ 为有阻尼固有频率; ϕ_0 为初始相位角。

对各阶自由衰减响应进行 Hilbert 变换, 得到解析信号为:

$$Z(t) = x(t) + jH(x(t)) = A(t)e^{-j\theta(t)} \quad (6)$$

式中: $j = \sqrt{-1}$ 为虚数, H 表示 Hilbert 变换; $A(t)$ 为幅值。

当系统的阻尼较小时, 式 (6) 中的幅值 $A(t)$ 和相位 $\theta(t)$ 可表示为:

$$A(t) = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} \quad (7)$$

$$\theta(t) = \omega_d t + \phi_0 \quad (8)$$

分别对幅值求自然对数和对相位函数求微分, 得:

$$\ln A(t) = -\xi\omega_0 t + \ln A_0 \quad (9)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_d \quad (10)$$

此时, 系统的固有频率 ω_0 和阻尼比 ξ 可以通过 $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1-\xi^2}$ 的关系求得。

3 基于二次滤波的 HHT 模态参数辨识

基于上述论述, 结合二次滤波强抗噪性优点, 提出基于二次滤波的 HHT 模态辨识方法, 该方法识别步骤如下。

1) 采用小波阈值与 EMD 结合的二次滤波方法对结构振动响应信号进行滤波, 得到近似真实结构信号的数据;

2) 以振动量较小的测点为参考点, 求同工况不同测点振动信号之间的互相关函数;

3) 利用脉冲响应函数构造 Hankel 矩阵并进行奇异值分解并计算分解后的奇异熵, 确定奇异谱的阶次 (即结构系统阶次), 剔除非模态项 (非共轭根) 和共轭项 (重复项), 获得结构实际阶次;

4) 对脉冲响应信号 EMD 分解得到结构各阶自由衰减响应分量, 进行 Hilbert 变换, 求出幅值相位时间函数, 得到各阶分量的固有频率;

5) 针对已确定的脉冲响应函数实际阶次, 结合模态置信度验证模态, 得到系统各阶模态参数。

基于二次滤波的 HHT 模态参数辨识算法流程如图 2 所示。

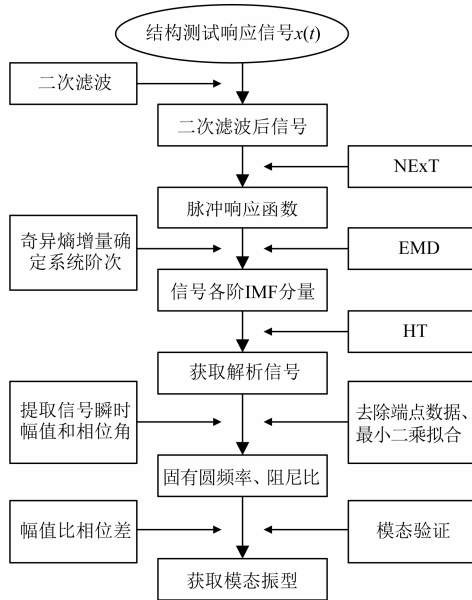


图 2 基于二次滤波的 HHT 模态辨识流程图

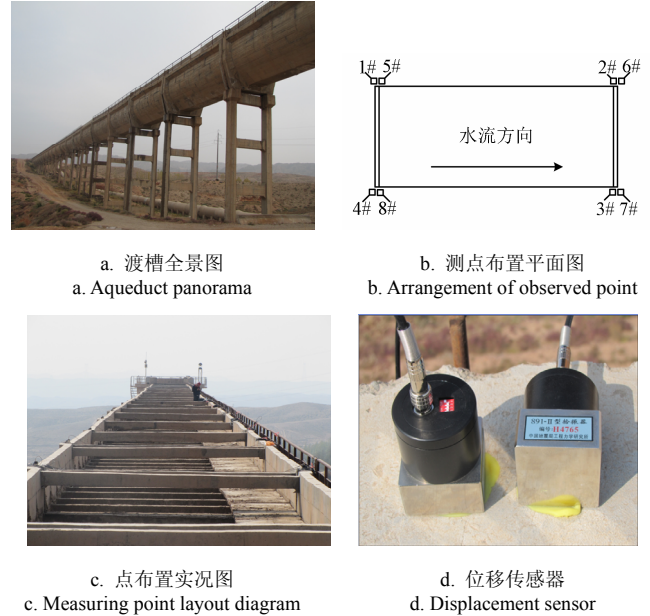
Fig.2 Flow chart of HHT used in model identification based on secondary filtering

4 工程实例应用

4.1 渡槽模态参数辨识

甘肃景泰川电力提灌工程 (以下简称景电工程) 是一项高扬程、大流量、多梯级电力提水灌溉工程。以二期三泵站输水渡槽工作模态辨识为研究内容, 选取与出

水塔相邻的第一跨渡槽为具体试验对象, 该渡槽为大型钢筋混凝土 U 型薄壁结构, 槽身纵向为单跨简支梁结构, 单跨长 12 m, 排架高度为 13.5 m。槽体混凝土采用 C40, 排架混凝土采用 C30, 排架基础混凝土采用 C25, 渡槽全景和测点布置如图 3 所示。



注: 1#-4# 为水平方向测点, 5#-8# 为竖直方向测点。
Note: 1#-4# are horizontal points, 5#-8# are vertical points.

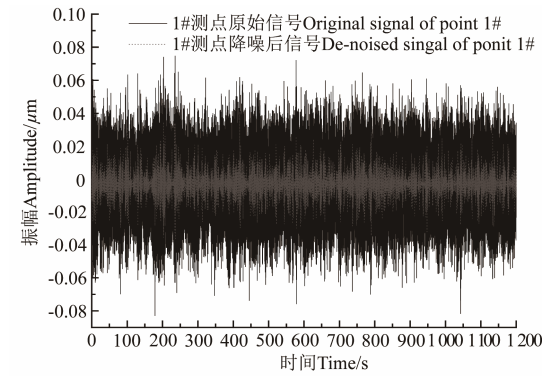
图 3 渡槽全景图和测点布置图

Fig.3 Aqueeduct panorama and survey points layout plan

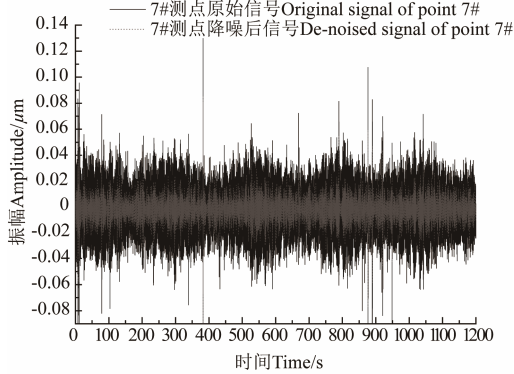
试验时采用耐冲击的 DP 型地震式低频振动传感器, 在一跨渡槽上布置 8 个动位移响应测点。依次为水平方向 1#、2#、3#、4#, 竖直方向为 5#、6#、7#、8# (如图 3b)。现场测试时渡槽处于正常输水工况, 采样频率为 50 Hz, 测试时间 1 200 s。选取 1#和 7#测点的实测响应信号数据进行模态分析。

采用小波阈值与 EMD 结合的二次滤波方法处理 1#测点实测数据, 滤除测试信号中的干扰强噪声, 降噪前后信号时程线如图 4a 所示。选择同工况下振动较小的 7#测点作为参考点, 对 7#测点进行同样降噪处理, 7#测点降噪前后时程线如图 4b 所示。利用 1#测点和 7#测点降噪后数据求出两点间互相关函数, 如图 4c 所示。根据 NExT 理论, 将互相关函数作为脉冲响应函数进行模态辨识。奇异熵增量理论对结构系统进行定阶, 奇异熵定阶结果如图 5 所示, 其系统奇异谱阶次为 10 阶时, 对应的奇异熵增量增长缓慢并逐渐趋于平稳。根据复模态理论, 剔除系统非模态项和共轭项, 最终系统模态阶次为 $[10/2]=5$ 阶。

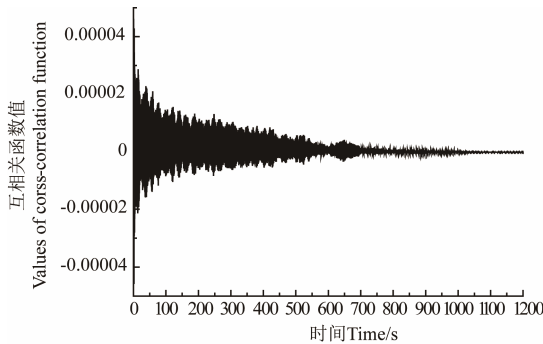
系统阶次确定后, 对脉冲响应函数进行 EMD 分解, 为保证所得包络的失真度达到最小, 提高分解质量, 剔除序列两端数据以控制端点效应。之后将各阶分量进行 Hilbert 变换, 求出相位函数曲线, 对中间部分数据用最小二乘拟合得出结构固有频率。限于篇幅, 本文仅给出前两阶模态相位函数曲线图 (见图 6), 频率辨识结果见表 1。



a. 1#测点降噪前后时程线对比图
a. Time history curve comparison of signal at point 1#



b. 7#测点降噪前后时程线对比图
b. Time history curve comparison of signal at point 7#



c. 1#和7#测点降噪后信号互相关函数图
c. Cross-correlation function of denoised signal between 1# and 7#
图 4 1#和7#数据处理结果曲线图

Fig.4 Processing result curves of 1# and 7# points

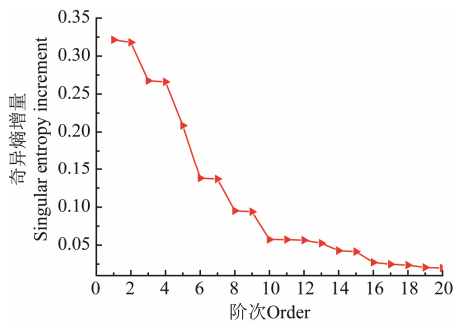
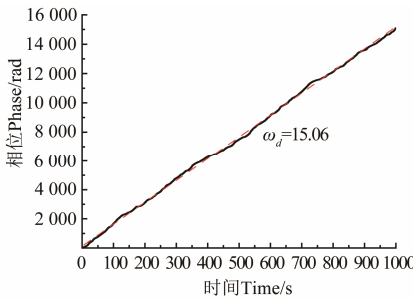
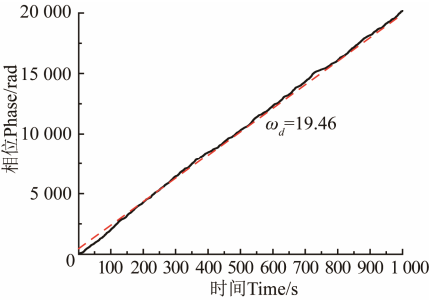


图 5 奇异熵增量谱

Fig.5 Singular entropy increment



a. 第1阶分量
a. First component



b. 第2阶分量
b. Second component

注: ω_d 表示结构有阻尼固有频率。实线为相位函数曲线, 虚线为拟合直线。
Note: ω_d denotes damped natural frequency of structure. Full line is curve of phase function, imaginary line is the fitting line.

图 6 相位函数曲线图及拟合直线

Fig.6 Curve of phase function and fitting line

表 1 HHT 方法模态辨识结果

Table 1 Result of modal identification by HHT

阶数 Order	1	2	3	4	5
频率 Frequency/Hz	2.398	3.100	4.328	10.262	12.930

4.2 渡槽结构有限元模型计算

渡槽在工作状态下的动力学问题实质是流固耦合 (fluid-solid interactions, FSI) 动力学问题, 其特点是水体与槽体相互作用。假定水体无粘、可压缩和小扰动, 水体表面运动为小波动, 固体为线弹性, 采用 FSI 系统的有限元理论建立槽体-水体-排架-基础-地基为一体的三维有限元动力模型^[18], 如图 7 所示。

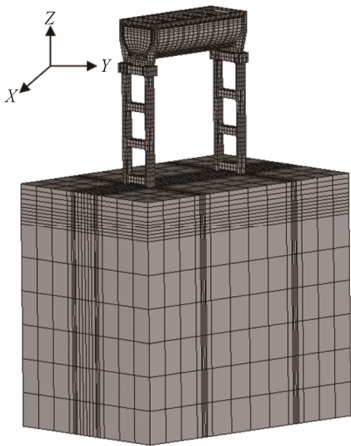
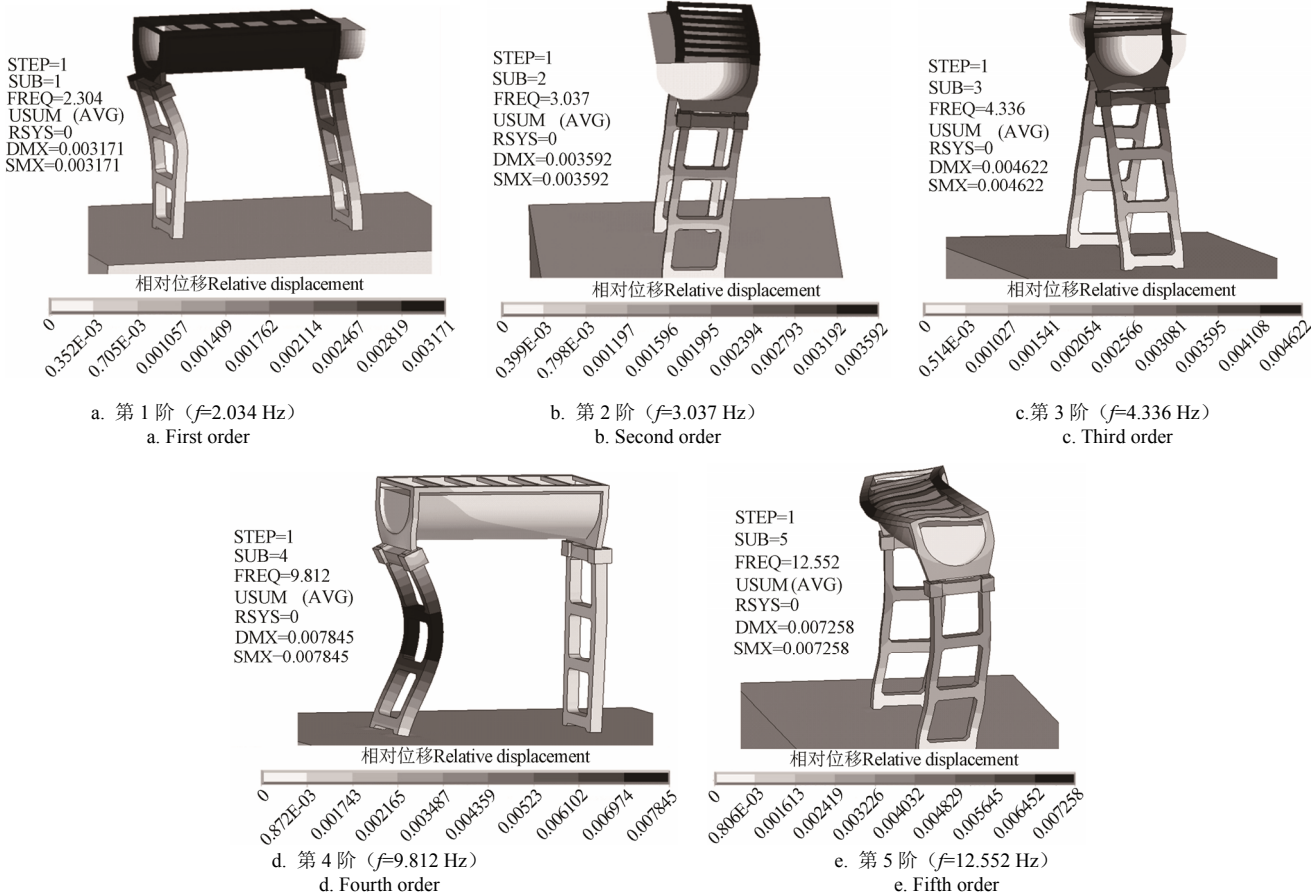


图 7 渡槽结构三维有限元模型

Fig.7 Three-dimensional finite element model of aqueduct

U 型渡槽动力系统中共有 14366 个单元，其中渡槽结构有 2952 个单元，水体单元有 2862 个单元。根据设

计与地勘资料，渡槽和地基材料参数如表 2 所示。前 5 阶振型如图 8 所示。



注：STEP 为荷载步，SUB 为振型图序列，FREQ 为频率，RSYS 为采用笛卡尔坐标系，DMX 为最大位移，SMX 为查看项解的最大值。
Note: STEP is load step; SUB is order of vibration shape diagram; FREQ is frequency; RSYS denotes cartesian coordinate system; DMX is the maximal displacement; SMX is the maximum solution value of item.

图 8 有限元模型识别结果
Fig.8 Identification results from finite element method

表 2 有限元建模材料参数
Table 2 Finite element modeling material parameters

结构类型 Structure type	槽体 Aqueduct body	排架 Bent	排架基础 Bent basis	地基 Foundation
混凝土型号 Concrete type	C40	C30	C25	----
密度 Density/(kg·m ⁻³)	2500	2500	2500	234
弹性模量 Elastic modulus/MPa	3.25×10 ⁴	3.0×10 ⁴	2.8×10 ⁴	0.7×10 ³
泊松比 Poisson ratio	0.167	0.167	0.167	0.237

4.3 模态辨识结果与有限元计算对比分析

为验证本文方法的可行性，将模态辨识结果与有限元计算结果进行对比，见表 3。

表 3 HHT 模态辨识结果与有限元计算结果对比
Table 3 Comparison of calculated results by HHT modal identification and finite element analysis

阶次 Order	频率 Frequency		误差 Error /%
	HHT Frequency/Hz	有限元分析 Finite element analysis/Hz	
1	2.398	2.304	3.9
2	3.100	3.037	2.1
3	4.328	4.336	0.2
4	10.262	9.812	4.4
5	12.930	12.552	3.0

由表 3 可知，HHT 模态参数辨识结果与有限元计算结果接近，最大误差为 4.4%，对低信噪比信号模态辨识结果比较理想，信号经二次滤波后强噪声基本被滤除，有效避免了后期 HHT 模态辨识中模态混叠现象。这表明：基于二次滤波的 HHT 模态参数辨识方法可准确辨识渡槽工作状态下模态参数，抗噪性强，提高结构振动参数辨识精度。

5 结 论

- 1) 环境激励下模态参数辨识是基于现代信息技术的高效辨识方法。辨识结果更符合实际工况和边界条件，不需要原型试验、人工激励等对大型结构难以实现的试验操作，更适合大型渡槽结构动力特性监测。
- 2) 以景电工程二期三泵站渡槽结构为研究对象，采用基于二次滤波的 HHT 模态参数辨识方法辨识正常输水工况下结构振动信息。模态辨识结果与有限元计算结果对比说明该方法能够准确辨识渡槽频率，抗噪能力强，辨识精度高，最大误差为 4.4%。
- 3) 将该方法推广至大型渡槽结构动力特性辨识中，为渡槽安全运行评估和健康在线监测提供基础和技术支持。

[参 考 文 献]

- [1] 陈武, 刘德仁, 董元宏, 等. 寒区封闭引水渡槽中水温变化预测分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 69—75.
Chen Wu, Xiu Deren, Dong Yuanhong, et al. Predication analysis on water temperature in closed aqueduct in cold regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 69—75. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘宇飞, 辛克贵, 樊健生, 等. 环境激励下结构模态参数识别方法综述[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 46—53.
Liu Yufei, Xin Kegui, Fan Jiansheng, et al. A review of structure modal identification methods through ambient excitation[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 46—53. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陆秋海, 李连友, 向律楷, 等. 非环境激励下结构工作模态参数识别法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(3): 389—393.
Lu Qiu hai, Li Lian you, Xiang Lü kai, et al. Operational modal parameter identification of structure for non-stationary ambient excitation[J]. Journal of Tsinghua University: Sci and Tech, 2013, 53(3): 389—393. (in Chinese with English abstract)
- [4] 续秀忠, 华宏星, 陈兆能. 基于环境激励的模态参数辨识方法综述[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 1—5.
- [5] Huang Ne, Shen Z, Long Sr, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(3): 903—995.
- [6] 陈隽, 徐幼麟, 李杰. Hilbert-huang 变换在密频结构阻尼识别中的应用[J]. 地震工程与工程学报, 2003, 23(4): 34—42.
Chen Jun, Xu Youlin, Li Jie. Hilbert-huang transform for damping ratio identification of structure with closely spaced modes of vibration[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 34—42. (in Chinese with English abstract)
- [7] 梁建伟, 穆广祺, 杜伟. 基于 HHT 谱与分形特征的变压器振动摩天识别方法[J]. 水电能源科学, 2014, 32(8): 173—177.
Liang Jianwei, Mu Guangqi, Du Wei. Transformer vibration pattern recognition method using HHT and fractal as discriminating features[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(8): 173—177. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘俊, 王占林, 付永领, 等. 基于改进 HHT 的一体化电液作动器故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1): 62—66.
Lin Jun, Wang Zhanlin, Fu Yongling, et al. Fault diagnosis of EHA-VPVM based on improved HHT[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(1): 62—66. (in Chinese with English abstract)
- [9] 秦世强, 蒲黔辉, 施洲. 环境激励下大型桥梁模态参数识别的一种方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 95—100.
Qin Shiqiang, Pu Qianhui, Shi Zhou. A method of modal parameter identification using ambient vibration measurements for a large-scale bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 95—100. (in Chinese with English abstract)
- [10] 韩建平, 李林, 王洪涛, 等. 基于 Hilbert-huang 变换和随机减量技术的模态参数辨识[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 72—77.
Han Jianping, Li Lin, Wang Hongtao, et al. Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and random decrement technique[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(1): 72—77. (in Chinese with English abstract)
- [11] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425—455.
- [12] 杨福增, 王峥, 杨青, 等. 基于小波变换的 wiener 滤波方法在农产品图像去噪中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 145—150.
Yang Fuzeng, Wang Zheng, Yang Qing et al. Application of wavelet transform-based wiener filtering method to denoise in agricultural product images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 145—150. (in Chinese with English abstract)
- [13] 白春华, 周宣赤, 林大超, 等. 消除 EMD 端点效应的 PSO-SVM 方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1298—1306.
Bai Chunhua, Zhou Xuanchi, Lin Dachao, et al. PSO-SVM method based on elimination of end effects in EMD[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 2013, 33(5): 1298—1306. (in Chinese with English abstract)
- [14] 许童羽, 朴在林, 陈春玲. 希尔伯特变换与小波去噪提高暂态电能质量扰动检测与定位精度[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 150—155.
Xu Tongyu, Piao Zailin, Chen Chunling. Improving detection and location accuracy for transient power quality disturbance based on HHT and wavelet denoising[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 150—155. (in Chinese with English abstract)
- [15] James G H, Carne T G, Lauffer J P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structure[J]. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1995, 10(4): 260—277.
- [16] 张建伟, 康迎宾, 张翌娜, 等. 基于泄流响应的高拱坝模态参数辨识与动态监测[J]. 振动与冲击, 2010, 29(9): 145—150.
Zhang Jianwei, Kang Yingbin, Zhang Yina, et al. Modal parameter identification and dynamic monitoring of high arch dam under vibration response induced by flow discharge[J].

- Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9): 146-150. (in Chinese with English abstract)
- [17] 练继建, 李火坤, 张建伟. 基于奇异熵定阶降噪的水工结构振动模态 ERA 识别方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2008, 38(9): 1398—1413.
- Lian Jijian, Li Huokun, Zhang Jianwei. ERA modal identification method of hydraulic structures based on singular entropy de-noising[J]. Science in China: Technological Sciences, 2008, 38(9): 1398 — 1413. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘云贺, 俞茂宏, 陈厚群. 流体固体动力耦合分析的有限元法[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 1—6.
- Liu Yunchao, Yu Maohong, Chen Hongqun. Finite element method for transient analysis of fluid-structure coupling problem[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 1—6. (in Chinese with English abstract)

HHT modal parameter identification for aqueduct based on secondary filtering

Zhang Jianwei, Jiang Qi, Cao Kelei, Zhu Lianghuan

(College of Water Conservancy, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of safe operation assessment for larger aqueduct structure, a valid Hilbert–Huang Transform (HHT) modal parameter identification method based on secondary filtering under ambient excitation was proposed. For the vibration signal of large aqueduct structure, high-frequency white noise and low-frequency noise are often mixed into structure vibration information, which belongs to non-stationary and nonlinear signal in low signal to noise ratio (SNR). Wavelet threshold method can partially filter out the high-frequency white noise, and Empirical Mode Decomposition (EMD) can be used to obtain a series of intrinsic mode functions from high frequency to low frequency. So the secondary filtering combined wavelet threshold and EMD was used to process vibration signal to achieve a higher precision and a better de-noising effect. High-frequency white noise and low-frequency water flow noise were filtered out firstly through the secondary filtering, highlighting the useful dominant dynamic characteristics of structure, which reduced the noise interference in a certain extent and avoided the phenomenon of modal frequency mixed effectively during the later modal identification. Then structure system order was determined by theory of singular entropy increment. Finally the modal parameter of large structure was identified through HHT in combination with natural excitation technique (NExT) to process the de-noised signals, which improved accuracy and precision of modal parameter identification. Taking U-shaped aqueduct of Jintai river pumping irrigation as the research object, we collected the vibration response data under normal working condition. We then used this proposed method to identify vibration response data to achieve the modal parameter of aqueduct structure. According to fluid-solid interactions theory, the three-dimensional finite element model of a cross U-shaped aqueduct structure was constructed through finite element model analysis to obtain the structure modal parameter under the same working condition. By comparing the modal parameter results from HHT modal parameter identification method with three-dimensional finite element analysis, the result showed that the error between two methods was very small. The study showed that HHT modal parameter identification based on the secondary filtering method can be used to obtain the dominant structure vibration information and to improve the de-noising precision, which decreased the strong noise disturbance and suppressed the modal frequency mixed phenomenon, and identified effectively structure modal parameter under strong noise background. Thus the method can be extended to larger aqueduct structures to improve the structure safe operation assessment. This proposed method provided a new aspect for safe operation and on-line monitoring of the aqueduct, and can be used effectively to solve the problem of structure modal parameter identification under ambient excitation, especially under the background with strong noise. Thus the method would have a broad prospect in engineering application.

Key words: finite element analysis; agricultural engineering; water supply; HHT; secondary filtering; aqueduct; modal parameter identification