

HHT 方法在结构模态参数识别中的应用*

陈 隽

徐幼麟

(同济大学建筑工程系 上海, 200092) (香港理工大学土木及结构工程系 香港)

摘 要 结合青马桥的实测动力响应记录, 研究 HHT 方法在结构模态参数识别中的应用。为讨论 HHT 方法处理非平稳数据的性能, 将 HHT 方法分别用于平稳及非平稳的实测记录以识别结构的频率和阻尼, 并与有限元分析及谱分析结果进行比较。对比表明 HHT 方法有很好的识别效果, 在处理非平稳性数据方面具有明显优势, 适用于土木工程结构的模态参数识别。

关键词: 参数识别; 数据处理; 非平稳过程; HHT

中图分类号: TU311.3, O327

Hilbert-Huang 变换(下称 HHT)是一种新近提出的数据处理方法, 由经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, 下称 EMD)方法及 Hilbert 变换(Hilbert transform, 下称 HT)两部分组成^[1], 其核心是 EMD 分解。EMD 方法依据数据本身的时间尺度特征来进行分解, 因此比傅立叶及小波等依赖于先验函数基的分解方法更适用于处理非平稳及非线性数据。此方法一经提出就在不同的工程领域中得到了迅速有效的应用。如 Yang 利用 HHT 方法研究了线性多自由度结构系统的模态参数识别问题^[2~3], 应用数值算例讨论了该方法的计算性能。文[4]应用 EMD 方法研究结构的损伤识别, 采用刚度的突然损失来模拟结构损伤, 并与小波分析结果进行了对比。结果表明 EMD 和小波均可以识别损伤发生的时刻, 而 EMD 方法的优势在于其良好的适用性能。本文利用青马桥的实测动力响应记录, 验证 HHT 模态识别方法的实用效果。

1 HHT 方法

1.1 EMD 方法

EMD 方法将待分解信号相邻峰值点间的时延定义为时间尺度, 据此将信号分解成包含不同时间尺度的若干固有振动模式函数(Intrinsic Mode Function, 下称 IMF)的和。分解过程通过一种称为筛选的计算步骤来实现。设 $x(t)$ 代表需要分解的信号。首先找出 $x(t)$ 上所有的极值点, 用三次样条曲线

连接各极大值点形成 $x(t)$ 的上包络线, 同样连接各极小值点形成下包络线, 确保 $x(t)$ 上的所有点在上下包络线之间。定义上下包络线之间的均值为 m_1 , $x(t)$ 与 m_1 的差定义为 $h_1^{(1)} = x(t) - m_1$ 。如果 $h_1^{(1)}$ 满足以下两个条件: (1) 整个时程内, 极值点个数与穿零点个数相等或最多差 1; (2) 在任一点处, 上下包络线的均值为零, 则为第一个 IMF。如果 $h_1^{(1)}$ 不满足上述条件, 则继续对 $h_1^{(1)}$ 重复上述重筛选过程。假定经过 k 次筛选后的结果 $h_k^{(k)}$ 满足 IMF 的定义, 则 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量为 $C_1 = h_k^{(k)}$ 。随后, 将 $x(t)$ 与 C_1 的差 $r(t) = x(t) - C_1$ 作为新的数据重复上述筛选过程, 可得第二个 IMF 分量 C_2 。当 IMF 分量 C_n 或余量 r_n 小于预先设定的值, 或者余量 r_n 已经成为单调函数时, 则整个筛选过程结束。经过上述步骤后, $x(t)$ 可分解为 n 个 IMF 分量及余量 r_n 的和

$$x(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

此外, 为避免分解结果中可能出现振动模式混合(即不同的时间尺度出现在同一个 IMF 分量中)的情况。可在 EMD 分解过程中指定每个 IMF 分量的时延或频率(时延的倒数), 以保证在分解得到的 IMF 中不包含有低于此设定频率值的信号, 从而消除混合现象。

1.2 结构模态参数识别

事实上, HHT 方法是通过 HT 变换来识别结构的模态参数。以承受冲击荷载的单自由度线性系统为例, 其位移响应为

* 香港理工大学研究基金资助项目(编号:1-ZE04&ASD-MUH: A230)
收稿日期: 2002-04-03; 修改稿收到日期: 2002-09-28

$$v(t) = A_0 e^{-\xi\omega_0 t} \cos(\omega_d t + \phi_0) \quad (2)$$

其中 ω_0 为圆频率, ω_d 为阻尼频率, ξ 是阻尼比。 A_0 为常数, 由冲击强度及结构质量、频率特性确定。与 $v(t)$ 对应的解析信号 $z(t)$ 为^[5]

$$z(t) = v(t) + i\tilde{v}(t) = A(t)e^{-i\theta(t)} \quad (3)$$

其中 $\tilde{v}(t)$ 为 $v(t)$ 的 HT 变换。对于一般工程结构, 此时式(3)中幅值 $A(t)$ 及相位 $\theta(t)$ 可进一步表示为^[2]

$$A(t) = A_0 e^{-\xi\omega_0 t} \quad \theta(t) = \omega_d t + \phi_0 \quad (4)$$

对式(4)中幅值 $A(t)$ 及相位函数 $\theta(t)$ 分别引入对数及微分算子, 可得

$$\ln A(t) = -\xi\omega_0 t + \ln A_0 \quad (5)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_d \quad (6)$$

显然, 阻尼频率 ω_d 可由式(4)中相位函数 $\theta(t)$ 对应直线方程的斜率求得。再求出直线方程(5)的斜率 $-\xi\omega_0$ 后, 则 ω_0 及阻尼比 ξ 可用 $\omega_d = \omega \sqrt{1-\xi^2}$ 的关系得到。应用上述关系可由实测结构动力响应来识别结构的动力特性参数。

对于环境激励如地脉动、脉动风等激励形式, 线性结构的动力响应经 EMD 分解后的 IMF 分量是结构的模态响应分量, 由自由振动响应及外荷载引起的强迫振动响应两部分构成^[3]。对这些模态响应用随机减量方法 (Random decrement technique, RDT) 可得到对应振型的自由衰减响应。对此自由衰减响应应用与单自由度系统参数识别相同的步骤便可求得系统各阶频率及阻尼比。此外, 由于信号幅值的变化会造成瞬时频率 $\omega(t)$ 在其平均值上下的波动, 即计算得到 $\theta(t)$ 和 $\ln A(t)$ 不是理想的直线, 因此 ω_d 和 $-\xi\omega_0$ 可通过对式(4)、式(5)中幅值、相位函数的直线方程进行最小二乘线性拟合得到。图 1 给出了整个识别过程的流程图。

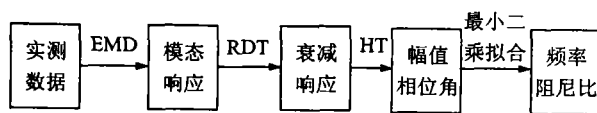


图 1 HHT 参数识别过程示意图

2 青马桥及其健康监测系统

青马桥是连接香港新机场的高速公路及铁路上的一座大型悬索桥, 主跨为 1377 m, 采用钢桁架双层桥面。有关青马桥建筑设计及分析的详细情况参见文[6]。考虑到香港是台风多发区, 青马桥在香港交通体系中又占据有非常重要的地位, 青马

桥上安置了一套风与结构健康监测系统 (WASHMS) 用于监测桥梁的健康情况。该系统包含有风速仪、温度测量装置、加速度计、应变片和位移计等多种测量装置。图 2 是风速仪 (以字母 W 开头命名) 及加速度计 (以字母 A 开头) 的安装示意图。其中, 风速仪的采样频率为 2.56 Hz, 加速度计为 25.6 Hz。1997 年 7 月, 强台风 Victor 袭击香港, 台风眼恰好经过青马桥。这期间, WASHMS 系统记录到了当日 17:00—24:00 间的风速信息及桥梁动力响应时程。本文采用跨中测点 ATTJD 的加速度响应记录结合 HHT 方法来识别桥梁的模态参数。

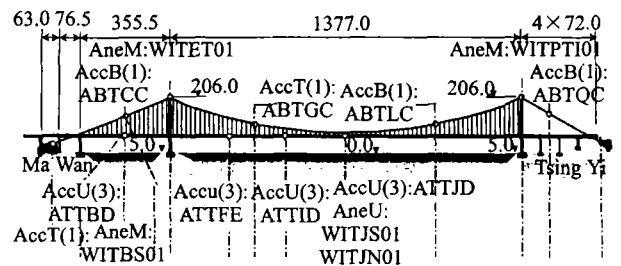


图 2 风速仪及加速度计安装位置示意图

3 参数识别结果及分析

为了解 HHT 方法处理非平稳响应信号的能力, 从测点 ATTJD 的 7 h 响应记录中找出两段具有相近最大幅值的响应, 长度均为 10 min。应用轮次法 (Run Test method) 检测两段信号的平稳性^[5], 发现在显著性水平为 5% 的条件下, 其中一段记录为平稳信号, 另一段为非平稳信号。图 3 与图 4 分别给出了两段信号的时程曲线及其功率谱。

对上述两段响应记录分别进行 EMD 分解, 由平稳响应记录共得 15 个 IMF 分量, 非平稳响应记录为 16 个 IMF 分量。图 5 为平稳响应记录 EMD 分解得到的前 10 个 IMF 分量, 剩余 5 个 IMF 分量的幅值与前 10 个 IMF 分量的幅值相差甚远, 分析中可不予以考虑。

由式(6)可以算得图 5 中各条 IMF 曲线的瞬时频率函数。计算结果表明, IMF 分量 C_1 到 C_4 的频率成分在 7~2.64 Hz 之间, 而第 5 个 IMF 分量的频率成分则低于 0.5 Hz。由于结构感兴趣的频率范围在 1 Hz 以下, 因此对 IMF 分量 $C_6 \sim C_{10}$ 应用随机减量技术可得到对应的自由衰减曲线, 随后由 HHT 方法识别出结构的频率及阻尼参数, 识别结果见表 1。表中同时对比给出了有限元分析及采用 FFT 得到的频率值与半功率带宽法识别得到的阻尼值^[6]。

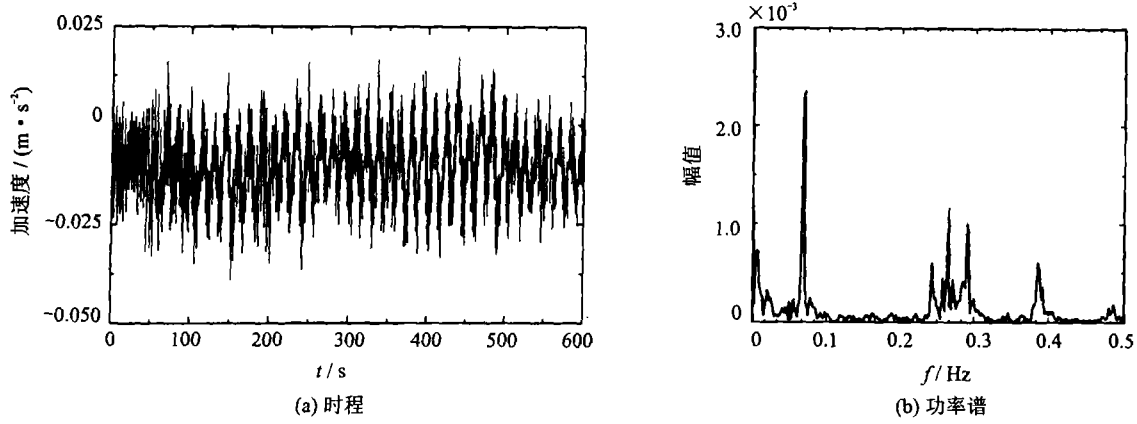


图3 平稳响应记录及其功率谱

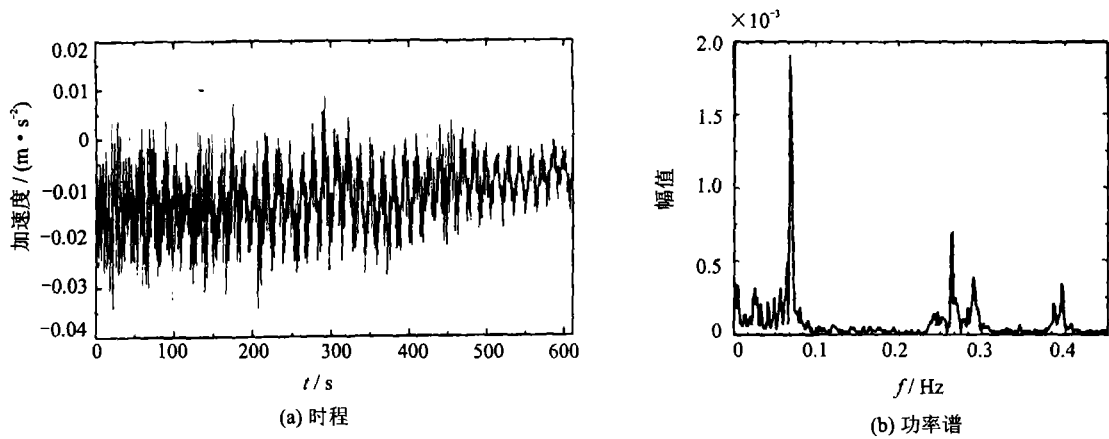


图4 非平稳响应记录及其功率谱

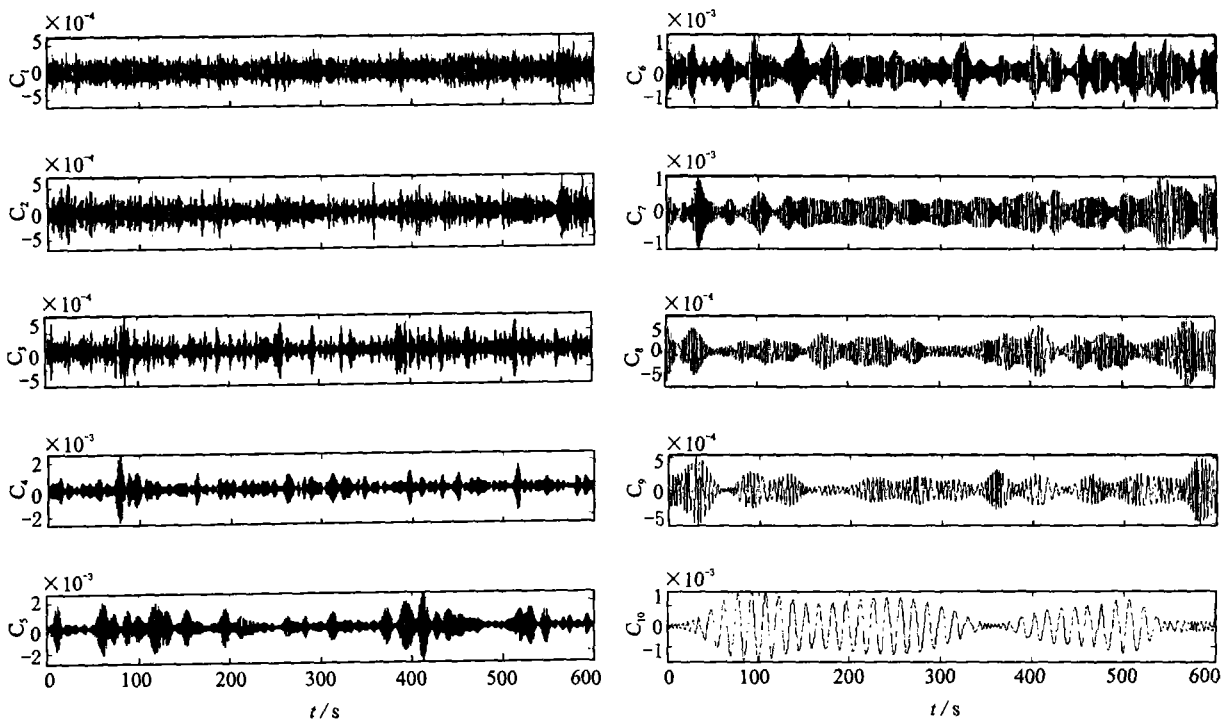


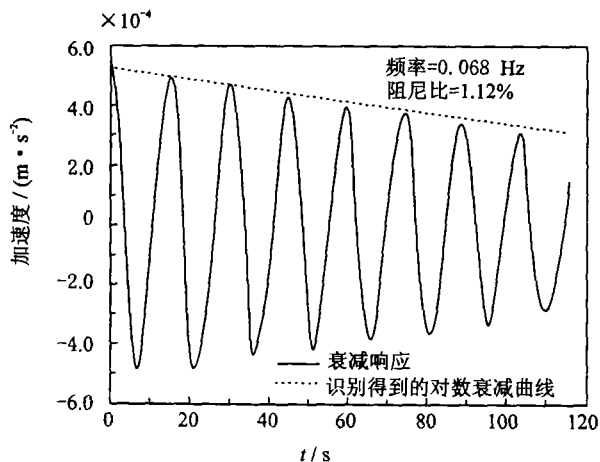
图5 平稳响应记录EMD分解的前10个IMF分量

表1 平稳响应记录的参数识别结果

振型编号 (侧向)	频率/Hz			阻尼比	
	有限元	FFT	HHT	半带宽法/%	HHT/(%)
1	0.068	0.067	0.067	2.03	1.19
2	0.158	—	—	—	—
3	0.232	0.245	0.225	0.56	0.56
4	0.285	0.292	0.270	0.22	0.69
5	0.333	0.347	0.332	0.19	0.22
6	0.396	0.391	0.409	0.22	0.26

从表1可见,HHT及FFT方法的频率识别结果基本相同,都非常接近有限元分析结果。对于振型2,由于测点ATTJD正好位于振型节点外,该阶振型未能识别出。阻尼识别结果,HHT方法的结果较半带宽法更接近于0.5%~1%的经验值。需要说明的是,这里识别的阻尼值为总阻尼,即包含了结构阻尼和气动阻尼两部分。

为进一步说明参数识别过程,图6示出了由平稳响应IMF分量 C_{10} 经RDT法得到的衰减曲线,其截取阈值取为原始信号标准差的1.2倍,衰减长度取为120s,平均次数为82次。图7(a)为衰减响应对应的相位角曲线,其最小二乘拟合直线的斜率 $\omega_d = 0.4263 \text{ rad/s}$,对应频率值为0.068 Hz。图7(b)是对应图6曲线的幅值函数,竖轴采用自然对数坐标。对幅值曲线进行线性拟合得斜率 $-\xi\omega_0 = -0.004$,进而可计算出 $\omega_0 = 0.067 \text{ Hz}$, $\xi = 1.19\%$ 。

图6 平稳响应IMF分量 C_{10} 的自由衰减响应曲线

对非平稳响应记录应用相同的计算步骤,发现其前6个IMF分量的频率成分在感兴趣的频率范围以外。因此可由IMF分量 $C_7 \sim C_{11}$ 识别结构的动力特性参数,识别结果见表2。

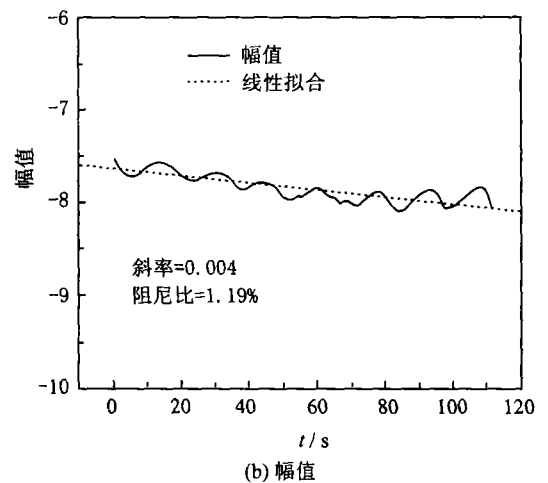
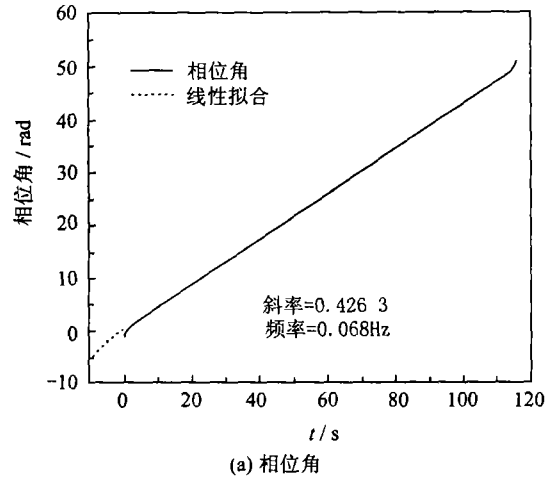


图7 对应于图6曲线的相位、幅值曲线及其线性拟合

表2 非平稳响应记录参数识别结果

振型编号 (侧向)	频率/Hz			阻尼比	
	有限元	FFT	HHT	半带宽法/%	HHT/%
1	0.068	0.068	0.068	4.89	1.12
2	0.158	—	—	—	—
3	0.232	0.252	0.231	1.93	0.53
4	0.285	0.295	0.274	0.36	0.51
5	0.333	0.347	0.320	0.45	0.17
6	0.396	0.389	0.375	0.47	0.17

从表2结果可见,与有限元分析结果相比,FFT与HHT的频率识别值均比较合理。与表1结果相比较,FFT方法对平稳及非平稳响应的频率识别结果没有显著差异。这是因为非平稳响应(图4a)的非平稳性主要是由于信号均方值的变化而非频率的变化引起的。

表2结果还表明,HHT方法与FFT方法对非平稳响应记录的阻尼识别结果有显著的差异。由于傅里叶分析是以信号平稳性假设为基本前提的,因此理论上不适用于包含有瞬态信号或时变信号的非平稳数据的处理。相比而言,HHT方法的识别结果较接近经验值。此外,FFT方法在低阶模态的阻尼值

明显高于HHT 方法的识别结果。考虑到低阶振型响应一般在结构总响应中占很大比重,因此若采用过高的阻尼估计值则会低估结构的响应,从而使设计偏于不安全。

同样,图8中给出由非平稳响应IMF分量 C_{11} 得到的对应于第1振型的自由衰减响应曲线,其中随机减量的计算参数与图6相同。图9(a)、(b)为衰减

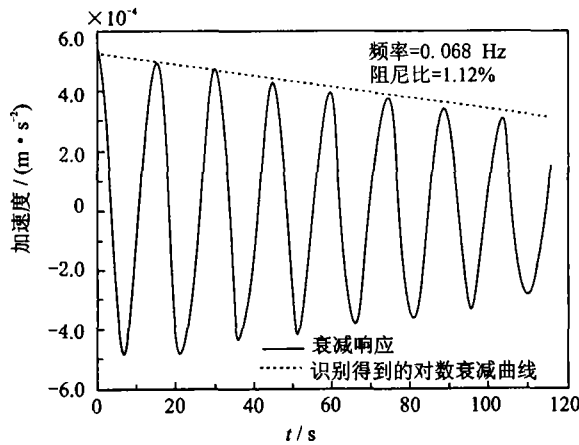
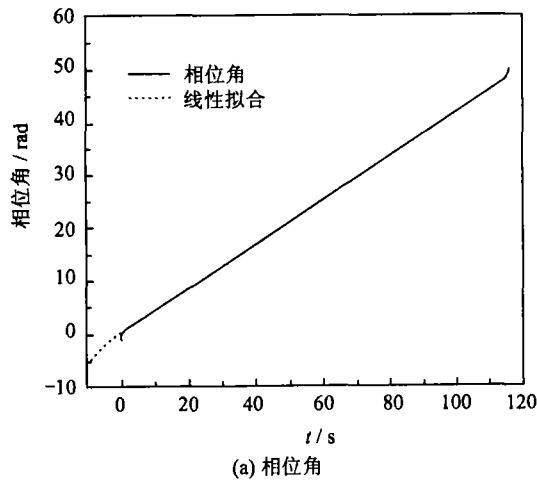
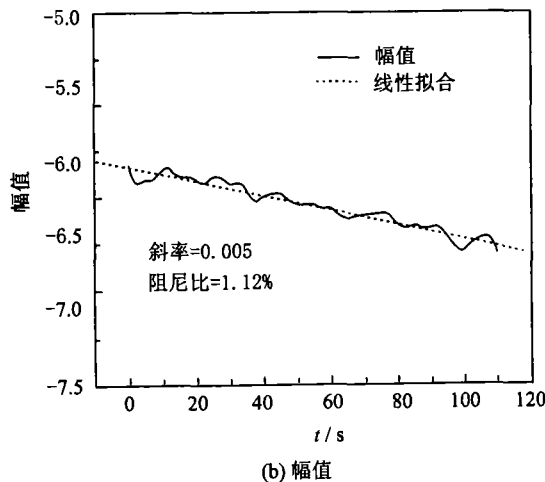


图8 非平稳响应IMF分量 C_{11} 的自由衰减响应曲线



(a) 相位角



(b) 幅值

图9 对应图8曲线的相位、幅值曲线及其线性拟合

响应对应的相位与幅值曲线及线性拟合结果。

将由平稳响应(图6)及非平稳响应(图8)得到的结构第一振型的自由衰减响应进行比较,如图10所示,可见两者几乎完全相同。说明结构在两段响应记录的区间内保持线性变化,只是由于激励特性的变化而引起响应特性的不同。因此,只要结构处于线性变化的范围,就可应用HHT方法来识别结构模态参数,无需要响应或激励为平稳过程。

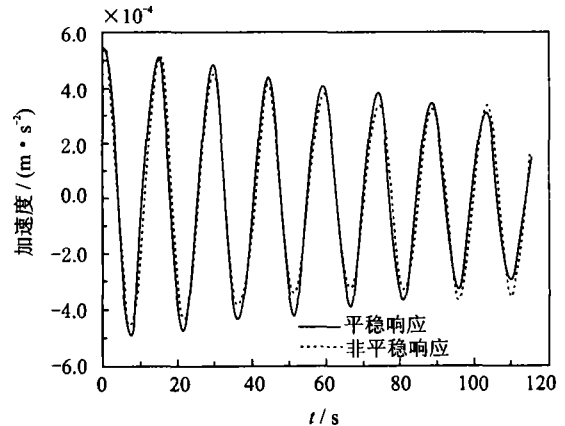


图10 一阶振型的自由衰减响应曲线

4 结 论

本文利用青马桥实测动力响应数据研究了HHT方法在结构模态参数识别中的应用,重点研究了HHT方法对于非平稳信号的处理能力。分析表明,无论对于平稳信号还是非平稳信号,HHT方法均可以得到稳定可靠的参数识别结果,较传统方法在处理非平稳信号上具有明显优势,是一种适合于大型结构模态参数识别的良好方法。

参 考 文 献

- 1 Huang N E, Shen Z, Long S. R., et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. Lond. A, 1998; 454: 903—995
- 2 Yang J N, Lei Y. Identification of natural frequencies and damping ratios of linear structures via Hilbert transform and empirical mode decomposition. Proc. of International Conference on Intelligent Systems and Control, IASTED/Acta press, Anaheim, CA, 1999; 310—315
- 3 Yang J N, Lei Y. Identification of tall building using noisy wind vibration data. Proc. of the International

- Conference on Advances in Structural Dynamics, Hong Kong, 2000; 2: 1093—1100
- 4 Vincent H T, Hu S L J, Hou Z. Damage detection using empirical mode decomposition method and a comparison with wavelet analysis. Proc. of the 2nd Int. Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, 1999; 891—900
- 5 Bendat J S, Piersol A G. Random data; analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons, NY. 1971
- 6 Xu Y L, Ko J M, Zhang W S. Vibration studies of Tsing Ma suspension bridge. J. of Bridge Eng., ASCE, 1997; 2 (4): 149—156

Application of HHT for Modal Parameter Identification to Civil Structures

Chen Jun

(Department of Building Engineering, Tongji University Shanghai, 200092)

Xu Youlin

(Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University Hong Kong)

Abstract The practical application of HHT method for modal parameter identification to civil structures is investigated in this paper, with emphasis on its ability for handling non-stationary measurement data. To this end, the acceleration response time histories of TsingMa Bridge during strong Typhoon Victor are analysed. Two 10-min long time-histories, one is stationary and the other non-stationary, are extracted from the measured records. From them the natural frequencies and modal damping ratios of the bridge are identified using HHT method in combination with random decrement technique. The identification results are compared with those provided by finite element analysis and the Fast Fourier Transform (FFT) method in conjunction with the bandwidth method. The results demonstrate that the HHT method is effective, robust and promising to structural parameter identification for large civil structures.

Key words: parameter identification; data processing; non-stationary process; HHT

第一作者 陈 隽 男, 博士, 讲师, 1972 年 4 月生。电话: (021) 65982896; E-mail: ly008854@mail2. online. sh. cn