

基于 EMD 和小波分析的建筑结构损伤检测探讨^{*}

李合龙

(中山大学 科学计算与计算机应用系, 广东 广州 510275)

摘 要: 采用经验模式分解(EMD)与小波分析相结合的方法探讨结构响应数据信号, 进行建筑结构损伤检测诊断。与直接对原信号进行小波变换相比较, 该方法能够更好地辨识出破损的时间局部特征信息。数值模拟和对建筑结构响应信号分析论证了该方法的有效性和实用性。

关键词: EMD; 连续小波变换; 损伤检测; 瞬时频率

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 06-0020-04

结构损伤被认为是影响建筑结构基础设施性能好坏的重要标志。近年来, 基于振动的结构破损辨识研究得到了不断的深入和拓展, 但这些研究的大多数都是假定系统在破损前后为线性的前提下, 通过比较系统在破损前后的系统特性来进行破损检测。为此 CASAS 等^[1] 根据损伤前后给定结构动力特性的各种变化, 利用有限元模型分析以较好地定位损伤位置。随后基于模型的损伤识别技术被 REN 等^[2] 提出以检测损伤的具体位置及其损伤程度。非破坏性损伤检测(NDD)技术^[3] 诸如超声波和涡流扫描、x—光检测等, 通过搜寻损伤元素为破损定位提供了选择, 这种方法明显是局部的检测方法; 另一方面通过结构动力特征的变化为结构损伤识别提供了一种全局方法以便去估计结构状态。因此基于动力学的破损识别方法^[2] 由于它们的基本作用而得到了广泛关注。

破损检测的另外一种途径是利用破损事件中大幅度振动信号特性, 此振动信号的一个突出优点是非结构因素的影响可能要比环境振动水平的影响小得多, 但是采用大幅度振动信号进行破损检测与定位也有不利的一面, 它必须考虑非线性特性的影响, 这样极大地限制了许多现有分析技术的应用。而为了增强结构健康监测系统的性能, 需要对所有分量诸如传感器、数据获取、分析和识别方法进行鉴定评估检查^[4], 而数据分析方法的好坏直接影响评估效果, 因此本文的研究主要集中在数据分析中。针对文[5]提出的一个4层建筑结构的破损检测模型, 结构的各阶频率是结构的固有参数, 而结构破损前的质量、初始刚度和系统频率如图1所

示, 并且结构的所有模态的阻尼为5%。假定结构在开始时受到 El Centro (1940) 地面基础运动激励, 在时间 $t=10\text{ s}$ 时第一层的刚度突然下降80%, 在系统破损后的频率分别为 5.47, 21.70, 38.83 和 48.83 Hz。从实验开始记录顶层的加速度响应作为输出。我们不能通过对加速度响应信号直接的视觉检查来检测损伤发生的具体时间位置, 而是对响应信号进行定量分析以确定它的固有特性。VINCENT 等^[6] 用经验模式分解方法分析基于结构响应数据的破损识别, 它是从分解出的前3层模态信号中, 直接通过观测各层模态信号的微小幅度变化来进行损伤预测和定位, 是一种比较粗糙的识别方法, 且如果分解信号存在模式混叠现象将会失去原有的检测效果; 随后 BERNAL D 等^[5] 根据非弹性特性和其它破损类型可能会影响大幅度的频率成分而提出了瞬时频率作为一种破损检测潜在能力的思想, 它是先对响应曲线进行 EMD 分解后得到一系列 IMF 分量, 然后计算第一个 IMF 分量的 Hilbert 变换, 以得到该 IMF 分量的解析信号以便用于瞬时频率分析, 通过研究相位角斜率的变化和瞬时频率的突然下降来定位损伤位置, 但是对该 IMF 分量的瞬时频率如何进行拟合不够明确, 因此会影响检测效果。

在本文中, 基于 EMD 和小波变换相结合的损伤识别技术被提出以预测结构损伤位置和损伤程度大小。首先利用 EMD 方法将非平稳结构响应信号分解为一系列具有不同特征尺度和局部频率特征的信号即 IMF 分量, 然后利用连续小波变换分析各 IMF 分量的局部特性, 从各分量小波系数的幅度显示出破损激烈大小的近似程度。

^{*} 收稿日期: 2005-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60475042)

作者简介: 李合龙(1977年生), 男, 博士生; E-mail: likanye@163.com

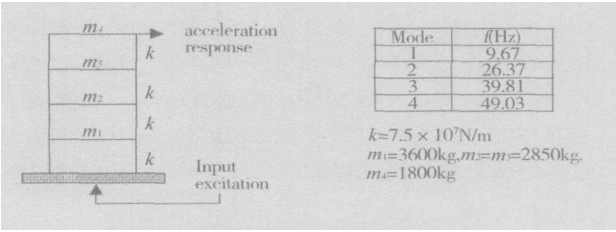


图 1 四层建筑结构模型

Fig 1 Structural model for numerical study

1 数据分析方法

在实际工程应用中，所分析研究的信号大多数是非平稳信号，而且包含了许多奇异点及不规则的突变部分，这些部分经常会含有比较重要的信息。传统的傅里叶变换是研究突变信号的主要工具，但傅里叶变换不能反映时间局部性，它只能确定一个函数奇异性的整体性质，难以确定奇异点在空间的位置及分布情况。随着小波理论的迅速发展，从时频方面对非平稳信号提供了良好的局部化分析手段并取得了良好的效果。小波变换突破了 Fourier 变换在时域中没有任何分辨力的限制，而且具有多分辨率分析的特点，在时频两域都具有表征信号局部特征的能力，是一种窗口大小固定不变但时间频率窗形状可以改变的时频局部化分析方法^[3,4,7]，很适合于探测正常信号中带有瞬间反常现象并展示其成分，被誉为分析信号的显微镜。由 Huang 及其合作者^[8]提出的一种新出现的数据分析技术——经验模式分解 (EMD) 方法被证明有许多成功的应用，它是传统的希尔伯特变换分析方法的改进，是从宽带非平稳时间序列中抽取不同特征尺度数据序列的强有力的工具，对各个不同的振动模式进行特征分析可以更准确有效地掌握原数据序列的特征信息。本文尝试结合小波变换与 EMD 两方面的优势进行建筑结构破损检测分析。

1.1 EMD 方法

以 EMD 和 Hilbert 变换为基础的信号处理方法被认为是近年来对傅里叶变换为基础的线性和稳态谱分析方法的一个重大突破，EMD 方法在时频分析中是局部的和自适应的，因此对稳态信号和非平稳信号都能进行分析。之所以对信号进行 EMD 分解，是由于具有物理意义的瞬时频率方法不能对任意信号都适用，它只能对单分量信号才有意义，而对于自然界和工程应用领域中获取的信号一般都不能满足单分量信号的要求，因此必须对信号进行 EMD 分解使之能够表示为许多单分量信号之和。与其它信号处理方法相比，EMD 正是引入了基于信号局部特性的 IMF 分量^[8]以获得具有物理意义的

瞬时频率。通过 EMD 分解，任何复杂信号都可以表示为有限个 IMF 之和：

f(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t)r_n(t) \tag{1}

其中，r_n 代表抽取了 n 个 IMF 分量后的余量。一般地，第一个 IMF 分量 c_1 包含信号的最细尺度或最短周期成分，r_n 是均值趋势或是个常数。对每个 IMF 进行 Hilbert 变换，求出瞬时频率得到 Hilbert 谱。记

x_i(t) = c_i(t) \tag{2}

x_i(t) 的 Hilbert 变换为：

y_i(t) = \frac{1}{\pi} V. P. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_i(w)}{t-w} dw \tag{3}

这里 V. P. 表示柯西主值，由 x_i(t) 和 y_i(t) 构成的复信号 z_i(t) 为

z_i(t) = x_i(t) + jy_i(t) = a_i(t)e^{j\theta_i(t)} \tag{4}

是解析函数，称为 x_i(t) 的解析信号。相应的振幅和频率为

a_i(t) = \sqrt{[x_i(t)]^2 + [y_i(t)]^2}

w_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \tag{5}

其中，\theta_i(t) = \arctan(\frac{y_i(t)}{x_i(t)}), 这里的振幅 a_i(t) 和 w_i(t) 频率都是时间的函数。振幅在频率—时间上的分布 H(w, t) 称为 Hilbert 谱，因能量可用振幅的平方表示，因此能量谱反映了在某个时间局部某种频率成分对信号的贡献。最后，原始数据序列可以表示为如下形式

X(t) = Re \sum_{i=1}^n a_i(t) \exp \int w_i(t) dt \tag{6}

1.2 连续小波变换

小波变换是信号处理中应用十分广泛的工具，它已成功应用于信噪分离与低信噪比信号中的弱信号提取，边界的处理与滤波以及在无损探伤中检测信号的奇异点等等。它能有效地从信号中提取信息，通过伸缩与平移等运算功能对信号进行多尺度分析。对一个给定的时变信号 f(t) 的连续小波变换被定义为

W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi(\frac{(t-b)}{a}) dt \tag{7}

其中，a 和 b 分别为尺度因子和平移因子，\Psi(t) 是母小波。小波变换具有独特的时频特性，且这个特性依赖于实数域上连续变化的 2 个尺度参数 a 和 b。采用不同的 a 值进行处理时，虽然各个小波的时频窗口中心频率和带宽都不一样，但中心频率

与带宽的比与中心频率的位置无关。从频率角度看，不同尺度的小波变换相当于一组匹配的滤波器，因此小波变换可以通过调整时频两域而放大时域或频域。

在实际信号处理中使用的是离散小波变换，将尺度因子进行二进离散（取 $a=2^j$ ， j 为整数，这样的小波变换被称为离散二进小波变换）。二进离散小波变换能通过以下计算

$$\begin{aligned} S_{2^j}f(n) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k S_{2^{j-1}}f(n - 2^{j-1}k) \\ W_{2^j}f(n) &= \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k S_{2^{j-1}}f(n - 2^{j-1}k) \end{aligned} \tag{8}$$

这里， S_{2^j} 是平滑算子， $S_{2^j}f(x) = f[\frac{1}{2^j}\varphi(\frac{x}{2^j})]$ 是 $f(x)$ 在尺度 2^j 上的近似信号； W_{2^j} 是二进小波变换算子， $W_{2^j}f(x) = f[\frac{1}{2^j}\Psi(\frac{x}{2^j})]$ 是 $f(x)$ 在尺度 2^j 上的细节信号， h_k 和 g_k 是相应的低通和高通滤波器。离散小波变换将信号分解为一系列近似分量和细节分量。从文[9]知道信号的奇异点可以从其小波变换的模极大值检测出来，小波变换的模极大值出现在信号有突变的地方。因此可以利用小波变换理论分析经 EMD 方法分解出来的各个 IMF 分量以进行破损检测。

2 数值模拟

为验证该方法的有效性，数值模拟实验对脉冲形成的调制信号进行分析，实验模拟数据为 $f(t) = \sin(3000)t * [\sin(200t) + y(t)] + v(t)$ (9) 其中， $y(t)$ 是中心位于 350，幅度为 3.5，脉宽为 1 的三角脉冲； $v(t)$ 是零均值高斯白噪声。

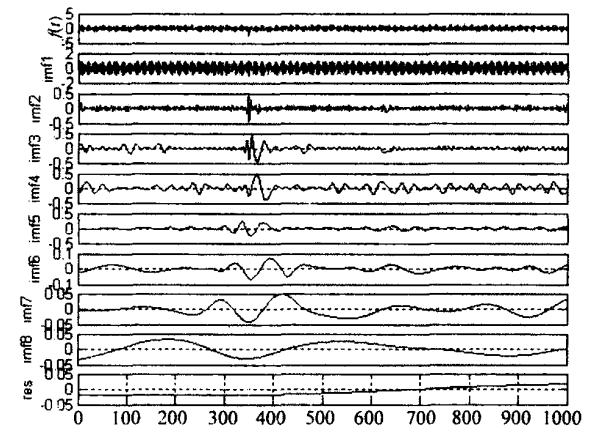


图 2 原信号 $f(t)$ 及其它的 IMF 分量

Fig 2 Original signal $f(t)$ and the IMF components

$f(t)$ 的时域波形如图 2 中的 $f(t)$ 所示，图中纵轴坐标为信号幅值。通过滤波 $f(t)$ 可得到如图 2

中的 8 个 IMF 分量，其中前 3 个 IMF 分量包含原信号的特征比较丰富，对前 3 个 IMF 分量及其原始信号分别进行 db5 小波变换，如图 3 所示。明显看出与直接的小波变换方法或是 EMD 方法相比，两者结合的方法更能清晰地地提取出信号的局部奇异性特征。

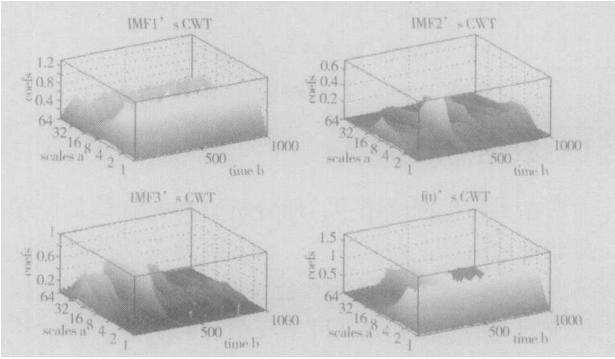


图 3 前 3 个 IMF 分量和原信号 $f(t)$ 的 db5 小波变换图形

Fig 3 The db5 wavelet transform of original signal and the former three IMFs

3 建筑结构破损检测实例

对图 1 中的 4 层建筑结构破损检测模型进行分析，我们首先采用 EMD 方法获得响应曲线的 7 个 IMF 分量，如图 4 所示。其中前 2 个 IMF 分量包含原信号的特征比较丰富，但是不能清晰地看到在时间 $t=10$ s 时的损伤和小幅度的变化。对此进一步对前 3 个 IMF 分量进行 db5 小波变换，与直接对原响应信号进行小波变换相比，更能清楚的看出损伤发生的位置细节和损伤剧烈程度。图 5 仅画出了第一个 IMF 与原始响应数据的小波变换的图形。从图中容易看出由 IMF 分量的小波变换系数图进行信号检测比直接对原信号小波变换进行检测的效果更明显，且与文[5]提出的方法相比，更能有效地确定损伤时刻和剧烈程度。

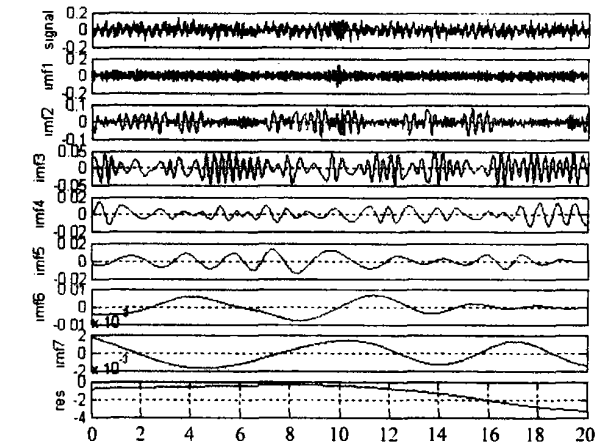


图 4 响应曲线信号和它的 IMF 分量

Fig 4 IMFs associated with response signal produced from the EMD

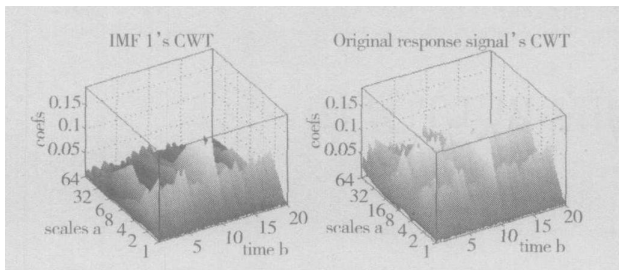


图 5 第一个 IMF 和原响应信号的 db5 小波变换图形

Fig. 5 The db5 wavelet transform of original response signal and the first IMF

4 结 论

本文初步探讨了利用 EMD 与小波相结合的方法作为结构破损检测的潜在能力, 利用 EMD 产生的 IMF 分量可以突出这些损伤位置的局部特征, 进而进行小波变换后能更好地检测出结构变化发生的更精细的破损时刻。但如何具体量化小波变换系数幅值与破损位置以及如何选择母小波以得到预期的效果还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] CASAS J R, APARICIO A C. Structural damage identification from dynamic test data[J] . J Struct Eng (India), 1994, 120 (8): 2437—2450.
- [2] REN W X, ROECK G D. Structural damage identification using modal data I: simulation verification[J] . Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(1): 87—95 .
- [3] STUBBS N, SIKORSKY C. A methodology to nondestructively evaluate the structural properties of bridges [C] // Proc IMAC17, the 17th Int Modal Analysis Conf., Kissimmee, Fla, 1999: 1260—1268.
- [4] HOUSNER G W. Structural control: past, present, and future [J] . Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, 123 (9): 897—971.
- [5] BERNAL D, GUNES B. An examination of instantaneous frequency as a damage detection tool[C] //14th Engineering Mechanics Conference, Austin, TX., 2000.
- [6] VINCENT H T, HU S J, HOU Z. Damage detection using empirical mode decomposition method and a comparison with wavelet analysis[C] //Structural Health Monitoring : Proc. 2nd Int. Workshop on Structural Health Monitoring, 1999: 891—900.
- [7] LEVENT E, MICHAEL J D. Motor bearing damage detection via wavelet analysis of the starting current transient[C] // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest Hungary May 21—23, 2001: 1797—1800.
- [8] HUANG N E, SHEN Z. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J] . Proc R soc Lond, 1998(454): 903—995.
- [9] OKAFOR A C, DUTTA A. Structural damage detection in beams by wavelet transforms [J] . Smart Mater, Struct, Printed in the UK, 2000(9): 906—917.
- [10] HUANG S J, LU C W. Enhancement of digital equivalent voltage flicker measurement via continuous wavelet transform [J] . IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 663—670.

Structural Damage Detection Based on EMD Method and Wavelet Analysis

LI He long

(Department of Scientific Computing and Computer Applications, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The use of empirical mode decomposition (EMD) method and wavelet analysis in combination is explored for the detection of changes in the structural response data from structural damage diagnosis. The combination of EMD method and continuous wavelet transform can be used to identify the time more clearly at which structural damage occurs than by using the wavelet transform method alone. The numerical simulation and the analysis of the response signal data from the shear building show that this method is effective and practical.

Key words: EMD; continuous wavelet transform; damage detection; instantaneous frequency