

文章编号: 1000-4750(2009)06-0199-06

基于渐近小波分析的随机激励下结构系统识别研究

*孙 智¹, 侯 伟¹, 张志成²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 香港科技大学土木工程系, 香港九龙)

摘 要: 提出了基于相关函数预估计和渐近小波分析的结构系统识别方法, 此方法可以从结构随机环境振动响应中识别出结构的模态参数和物理参数。证明了在广谱白噪声环境激励下, 结构随机振动相关响应的 Morlet 小波系数图的脊线值包含了解耦的结构模态信息, 可用于结构的模态参数识别。如果知道随机激励的功率谱强度, 还可以识别结构的质量、刚度和阻尼矩阵等物理参数。三层框架结构数值算例的结果表明上述方法可以准确地从结构随机振动响应信号中识别出结构参数。苏通大桥北索塔环境振动测试试验研究的结果表明此方法对于工程结构环境激励下的结构模态识别具有很好的效果。

关键词: 系统识别; 渐近小波分析; 相关响应; 随机振动; 模态分析

中图分类号: O324; TU311.3 **文献标识码:** O327

STRUCTURAL SYSTEM IDENTIFICATION UNDER RANDOM EXCITATION BASED ON ASYMPTOTIC WAVELET ANALYSIS

*SUN Zhi¹, HOU Wei¹, CHANG Chih-chen²

(1. State Key Laboratory on Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon Hong Kong)

Abstract: In this paper, a covariance-driven wavelet analysis technique is proposed for identifying the characteristics of linear structural systems from random vibration response measurements. Based on the asymptotic wavelet analysis theory, the paper proves that the ridges of Morlet wavelet coefficient magnitudes of structural covariance response under random excitations contain structural modal information and can be used to estimate structural modal parameters. In addition, if the spectral intensity of the random load is known, structural mass, stiffness and damping matrices can also be estimated. Results of a numerical study on a 3-storey frame show that the proposed technique can accurately estimate structural modal parameters and physical properties under random excitations. An experimental study on the north cable pylon of Sutong Bridge further verifies the accuracy and applicability of the proposed technique.

Key words: system identification; asymptotic wavelet analysis; covariance; random vibration; modal analysis

结构模态参数和物理参数的识别对于工程结构的动力分析、振动控制、健康监测和性能评估都有着重要的意义, 是近年来结构动力学研究领域的

热点之一。传统上我们采用傅里叶变换来识别结构模态参数。通过将原始信号和不同频率的简谐波进行卷积, 可以将采集到的时域信号转化到频域内,

收稿日期: 2008-02-28; 修改日期: 2008-10-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50508027); 国家自然科学基金重点项目(50538020); 国家科技部 863 项目(2006AA11Z109); 上海市科技启明星项目(06QA14051); 教育部新世纪人才支持计划(NCET070623)

作者简介: *孙 智(1977—), 男, 湖北人, 副教授, 博士, 从事结构监测评估、可持续桥梁等研究(E-mail: sunzhi1@mail.tongji.edu.cn);

侯 伟(1983—), 女, 湖北人, 硕士生, 从事桥梁结构实验模态分析等研究(E-mail: houwei59@163.com);

张志成(1961—), 男, 台港人, 教授, 博士, 从事结构动力学等研究(E-mail: cechang@ust.hk).

从而揭示信号中的频率成分。然而,傅里叶变换仅适用于稳态信号的分析。对于非稳态或瞬时信号,傅里叶变换无法捕捉信号的时频特性。时频信号分析技术,特别是小波分析技术,弥补了这一缺陷。Staszewski^[1]提出了运用小波变换从多自由度系统的自由衰减信号中估计系统阻尼比的方法。Ruzzene 等人^[2]运用小波变换方法估计多自由度系统的自振频率并通过对实测加速度响应信号的处理验证了方法的准确性。Piomo 等人^[3]发展了运用小波变换方法估计模态振型的方法并用模态质量指标评价了估计的可靠性。Kijewski 和 Kareem^[4]则讨论了小波变换模态识别方法在土木工程结构识别中需要解决的时频解析度问题。Chang 等人^[5]则采用混凝土梁振动测试试验验证了小波基模态参数识别技术的准确性和有效性。

虽然上述研究取得了不同程度的成功,但这些研究中结构所受激励要么可测要么可控。然而对大型工程结构而言,结构通常处于不可控制的随机环境中,结构所受的环境激励不但是随机的而且不可测量,这对结构的系统识别提出了严峻的挑战。本文提出了随机激励下基于相关响应估计的结构识别小波基分析方法,并采用三层框架结构数值算例和苏通大桥北索塔环境振动测试实验验证了方法的准确性。

1 理论推导

1.1 渐近小波分析

小波变换就是将一时域可积信号 $x(t)$ 转换到时间-尺度平面 (a, b) 上的一种线性变换方法。这一过程可表示如下:

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w^* \left(\frac{b-t}{a} \right) dt \quad (1)$$

式中: * 表示复共轭; a 是控制分析窗伸展的尺度参数; b 是定位小波函数的平移参数; 而母小波函数 $w(t)$ 是一快速衰减, 均值为零的波动函数。

一般而言, 任意实数域里的信号 $x(t)$ 能唯一地被表示为如下规范型:

$$x(t) = A(t) \cos(\phi(t)) \quad (2)$$

式中, 幅值和相位函数对 $(A(t), \phi(t))$ 被称为 $x(t)$ 的规范对。渐近信号指的就是幅值的相对变化速度远小于相位变化速度的一类信号, 它们满足:

$$\left| \frac{d\phi}{dt} \right| \gg \left| \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right| \quad (3)$$

对渐近信号来说, 式(1)中的小波变换系数 $W_x(a, b)$ 能根据稳态相位法由标量积近似求得^[6]。这就是渐近小波分析。

虽然母小波函数有很多种, 但并非都能用于渐近小波分析。在本文的研究工作中, 使用的是如下所示的 Morlet 母小波函数:

$$w(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (4)$$

式中: ω_0 是母小波函数的中心频率; e 为自然指数; i 为虚数单位。尺度参数和小波所处的圆频率有一一对应关系 $a = \omega_0 / \omega$ 。对于 Morlet 小波来说, 由渐近小波分析理论, 信号 $x(t)$ 的小波变换系数可近似为^[2]:

$$W_x(a, b) \cong \sqrt{a} A(b) e^{-(a\phi'(t) - \omega_0)^2} e^{i\phi(b)} \quad (5)$$

其中, 小波系数的模数 $|W_x(a, b)|$ 、相位角 $\angle W_x(a, b)$ 分别为:

$$|W_x(a, b)| = \sqrt{a} A(b) e^{-(a\phi'(t) - \omega_0)^2}, \quad \angle W_x(a, b) = \phi(b) \quad (6)$$

1.2 相关响应估计

假设一 n 自由度系统受到一零均值高斯白噪声激励 f 的作用, 系统的运动方程可表示为:

$$M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = Df \quad (7)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为结构质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; D 为激振点位置向量; $Z = [z_1 z_2 \cdots z_n]^T$ 为位移响应向量。假设系统为线性比例阻尼系统, 其位移响应向量根据模态叠加原理可表示为:

$$Z = \sum_{j=1}^n \Phi_j q_j \quad (8)$$

式中 Φ_j 和 q_j 分别为第 j 阶模态的振型向量和广义模态坐标。解耦后第 j 阶模态的运动方程可表示为:

$$\ddot{q}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = \frac{d_j}{m_j} f \quad (9)$$

式中: ω_j 、 ζ_j 和 m_j 分别为 j 阶自振频率、阻尼比和模态质量; j 阶模态参与系数 $d_j = \Phi_j^T D$ 。如果激振力 f 的功率谱强度为 S_0 , 则 q_j 的稳态自相关函数响应 R_j 可表示为:

$$R_j(t) = B_j e^{-\zeta_j \omega_j t} \cos(\bar{\omega}_j t - \theta_j) \quad (10)$$

$$B_j = \frac{\pi d_j^2 S_0}{2m_j^2 \zeta_j \omega_j^3 \sqrt{1 - \zeta_j^2}} \quad (11a)$$

$$\bar{\omega}_j = \omega_j \sqrt{1 - \zeta_j^2} \quad (11b)$$

$$\theta_j = \tan^{-1} \frac{\zeta_j}{\sqrt{1-\zeta_j^2}} \quad (11c)$$

式中： $\bar{\omega}_j$ 为 j 阶阻尼频率； θ_j 为 j 阶相位角。在小阻尼情况下，由于 $\bar{\omega}_j \gg \zeta_j \omega_j$ ，所以 R_j 满足式(3)所示渐近信号的条件。同样地，系统第 g 个与第 h 个自由度间的稳态互相关响应可近似表示如下：

$$R_{gh}(t) \cong \sum_{j=1}^n \varphi_j^g \varphi_j^h R_j(t) \quad (12)$$

式中 φ_j^g 及 φ_j^h 为结构 j 阶振型向量的第 g 个及第 h 个量值。此式忽略了不同模态间的交叉项。这种近似在结构两相邻模态满足不等式 $|\omega_i - \omega_j| \gg \max\{\zeta_i \omega_i, \zeta_j \omega_j\}$ ($i \neq j$) 时成立^[7]。

对于结构相关响应 R_{gh} 的估计，可采用多样本平均的方法，在结构随机振动响应信号满足遍历性的假设下也可采用单样本沿时间轴平均的方法。考虑到小波分析中存在的边界效应^[8]，本文在相关响应估计时，采用了如下边界延拓公式^[9]：

$$R_{gh}(i\Delta t) \cong \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_g(n; \Delta t, z_h[n; i\Delta t - \beta\tau]), \quad i = 0, 1, 2, \dots, (T + 2\beta\tau) / \Delta t \quad (13)$$

式中： N 为量测数据样本数； Δt 为采样时间增量； $\tau = \omega_0 / (\sqrt{2}\omega)$ 为圆频率 ω 处小波变换中受影响的信号时长； $\beta\tau$ 为边界延拓长度，本文中取 $\beta = 4$ 。

1.3 小波基系统识别

对式(12)两侧进行小波变换可得：

$$W_{R_{gh}}(a, t) = \sum_{j=1}^n \varphi_j^g \varphi_j^h W_{R_j}(a, t) \quad (14)$$

式中第 j 阶自相关响应的小波变换系数 W_{R_j} 可通过比较式(10)和式(2)并代入式(5)得到：

$$W_{R_j}(a, t) = \sqrt{a} B_j e^{-\zeta_j \omega_j t} e^{-(a\bar{\omega}_j - \omega_0)^2} e^{i(\bar{\omega}_j t - \theta_j)} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)并两边取幅值可得：

$$|W_{R_{gh}}(a, t)| = \sum_{j=1}^n |\varphi_j^g| |\varphi_j^h| \sqrt{a} B_j e^{-\zeta_j \omega_j t} e^{-(a\bar{\omega}_j - \omega_0)^2} \quad (16)$$

由式(16)可知，对于一具有 n 阶模态的结构系统来说，其相关响应的小波系数幅值在任意时刻沿尺度轴都会有 n 个局部峰值。这些局部峰值尺度或称为脊线尺度对于时不变系统来说为常数。由式(16)可知，系统第 j 阶阻尼频率和第 j 阶脊线尺度存在如下关系：

$$\bar{\omega}_j = \frac{\omega_0}{a_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

这样，当系统阻尼频率稀疏分布时，式(15)在 j 阶脊线尺度处的小波系数可近似表示为：

$$W_{R_{gh}}(a_j, t) \cong \varphi_j^g \varphi_j^h \sqrt{a_j} B_j e^{-\zeta_j \omega_j t} e^{i(\bar{\omega}_j t - \theta_j)} \quad (18)$$

基于式(18)，可得到如下两式：

$$-\zeta_j \omega_j \cong \frac{d}{dt} \ln |W_{R_{gh}}(a_j, t)| \quad (19)$$

$$\bar{\omega}_j = \omega_j \sqrt{1 - \zeta_j^2} \cong \frac{d}{dt} \angle W_{R_{gh}}(a_j, t) \quad (20)$$

利用这两个等式即可得到结构第 j 阶自振频率 ω_j 和阻尼比 ζ_j 。原则上，仅需估计一个测点处的结构自相关响应就可同时估计结构的 n 阶自振频率及阻尼比。对于振型向量的估计，则需要先同时估计参考测点处的自相关响应及其他测点与参考测点间的互相关响应。由式(18)不难看出，测点 h 和测点 g 处的结构第 j 阶模态振型比可由下式得到：

$$\frac{\varphi_j^h}{\varphi_j^g} \cong \frac{W_{R_{gh}}(a_j, t)}{W_{R_g}(a_j, t)} \quad (21)$$

如果随机激励的功率谱强度 S_0 也是已知的，还可以按照下面的方法估计结构的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵。首先将式(11a)代入式(18)并令 $t = 0$ ，结构的第 j 阶模态质量可由下式确定：

$$m_j = \sqrt{\frac{\sqrt{a_j} |\varphi_j^g| |\varphi_j^h| \pi d_j^2 S_0}{2 \zeta_j \omega_j^3 |W_{R_{gh}}(a_j, 0)| \sqrt{1 - \zeta_j^2}}} \quad (22)$$

则第 j 阶广义模态刚度系数 k_j 和模态阻尼 c_j 可由下式确定：

$$k_j = m_j \omega_j^2 \quad (23a)$$

$$c_j = 2 \zeta_j m_j \omega_j \quad (23b)$$

得到了结构广义模态物理参数及模态振型向量后，可容易地得到结构的刚度矩阵、质量矩阵及阻尼矩阵。由于结构稳态速度和加速度相关响应分别为结构稳态位移相关响应的二阶和四阶导数，因此对于速度和加速度量测值来说，进行类似分析也可获得结构模态参数和物理参数。

2 数值算例

为了验证上述结构识别算法的准确性和适用性，本文以图 1 所示三层剪力框架系统为算例进行下述研究。该框架系统的质量和刚度系数分别为： $m_1 = 1500\text{kg}$, $m_2 = m_3 = 2500\text{kg}$, $k_1 = 1960\text{kN/m}$, $k_2 = k_3 = 3920\text{kN/m}$ 。结构三阶频率数值解为 3.06Hz、励为作用在顶层的高斯白噪声随机激励，其功率谱强

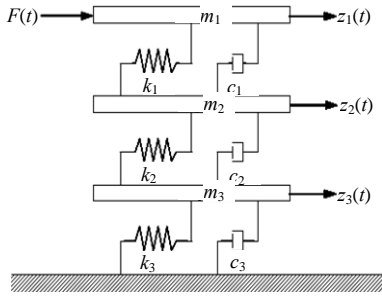


图 1 一三层剪力框架系统

Fig.1 A 3-storey shear-type frame system

度为 $90 \text{ kN}^2 \cdot \text{s}$ 。算例模拟了随机激励下该框架系统的加速度响应。

对于频率和阻尼比的识别，只需一个测点处的响应信号，本文选用了第二层的动力响应。图 2(a) 显示了采用 500 个长 12s 的时程样本估计所得的第二层加速度自相关响应 R_{22} 。对其进行傅里叶和小波变换，可得功率谱密度和小波功率量图(如图 2(b) 和图 2(c)所示)。功率谱密度图对应于系统三阶自振频率显示出三个峰值，而小波功率量图可观察到三条水平脊线。这三条脊线对应的尺度值分别为 13.12、5.76 和 3.85。由式(17)可估算，结构的三阶阻尼频率大致为 3.03Hz、6.91Hz 和 10.34Hz。需要

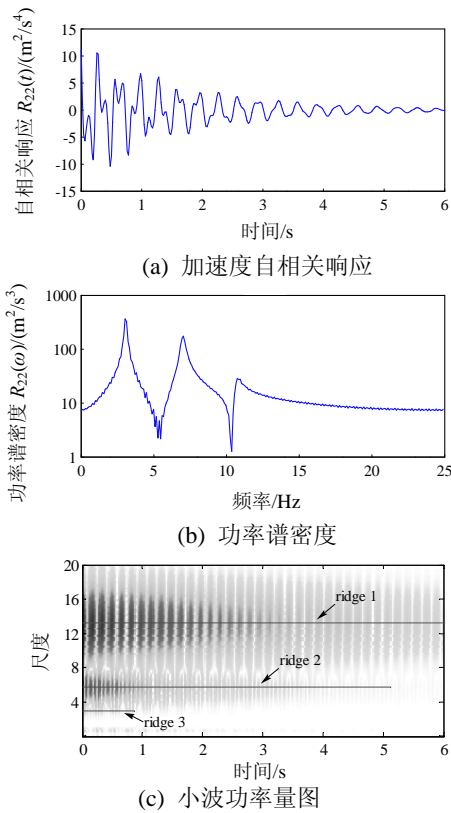


图 2 三层剪力框架系统第二层的加速度自相关响应及分析
Fig.2 The acceleration covariance response for the 3-storey shear type frame system

指出的是，为了避免小波分析中的边界效应，自相关响应估计时对信号进行了延拓处理^[9]。

得到脊线尺度值后，可提取出沿脊线尺度的小波系数。图 3(a)及图 3(b)所示为对应于系统一阶模态的小波系数幅值和相位角。另外，图 3 中还显示了相位角的最小二乘拟合线及小波系数幅值的衰减包络线。基于这两条直线的斜率，由式(19)和式(20)可知，结构基频为 3.06Hz，一阶阻尼比为 2.01%。采用同样的程序，可得结构二阶、三阶频率分别为 7.00Hz 和 10.64Hz，阻尼比分别为 2.00% 和 2.02%。相较于有限元数值解和设定值，这些估计值十分准确。对于振型的估计，需要知道所有测点自由度上的加速度响应。本研究中，设第二层为参考点，可算出结构第二层的自相关响应及各测点相对于此点的互相关响应。振型向量可由式(21)估计得到。如表 1 所示，振型的估计十分准确。在激振力的功率谱强度已知的前提下，本研究还依式(22)和式(23)识别了结构的质量矩阵、刚度矩阵及阻尼矩阵等物理参数(见表 1)。结果显示识别结果和设定值吻合准确。

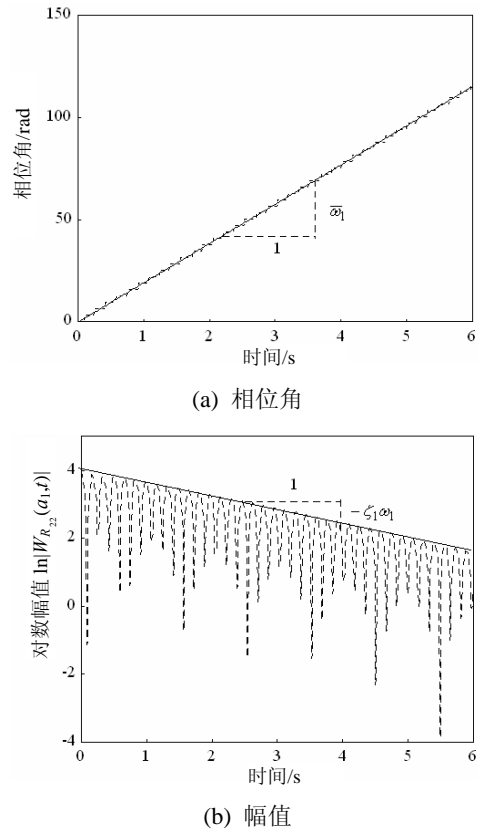


图 3 三层剪力框架系统的基频脊线尺度处的小波系数
Fig.3 Coefficients along the ridge corresponding to the fundamental mode of the 3-storey shear type frame system

表 1 三层剪力框架系统模态参数和物理参数估计

Table 1 Modal and physical parameters estimation for the 3-storey shear type frame

模态参数识别										
模态阶数	频率/Hz		阻尼比/(%)		振型向量					
	数值解	估计值	设定值	估计值	设定值		估计值			
1	3.06	3.06	2.00	2.01	[1.00	0.72	0.41]	[1.00	0.72	0.41]
2	7.00	7.00	2.00	2.00	[1.00	-0.48	-0.63]	[1.00	-0.48	-0.63]
3	10.66	10.64	2.00	2.02	[1.00	-2.44	2.82]	[1.00	-2.45	2.73]
物理参数识别										
质量/kg			刚度/(MN/m)			阻尼/(kN·s/m)				
设定值		估计值	设定值		估计值	设定值		估计值		
$\begin{bmatrix} 1500 & 0 & 0 \\ 0 & 2500 & 0 \\ 0 & 0 & 2500 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 1477 & 31 & 20 \\ 31 & 2422 & 1 \\ 20 & 1 & 2487 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.96 & -1.96 & 0 \\ -1.96 & 5.88 & -3.92 \\ 0 & -3.92 & 7.84 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 1.91 & -1.88 & 0 \\ -1.88 & 5.71 & -3.85 \\ 0 & -3.85 & 7.69 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.00 & -1.06 & -0.20 \\ -1.06 & 4.35 & -1.66 \\ -0.20 & -1.66 & 5.34 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 1.96 & -1.00 & -0.18 \\ -1.00 & 4.24 & -1.66 \\ -0.18 & -1.66 & 5.31 \end{bmatrix}$		

3 苏通大桥北塔环境振动测试研究

苏通大桥是一座连接江苏省南通市和苏州(常熟)市的跨长江大桥,其主桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,斜拉桥主孔跨度 1088m,主塔高度 306m(如图 4(a))。为了准确把握桥塔的动力特征,为结构动力分析和评估服务,本研究测试了建设中的苏通大桥北主塔在随机风场下的加速度响应,测试时沿塔高布置了 10 个顺桥向加速度仪,采样频率为 20Hz,测点布置如图 4(b)所示。

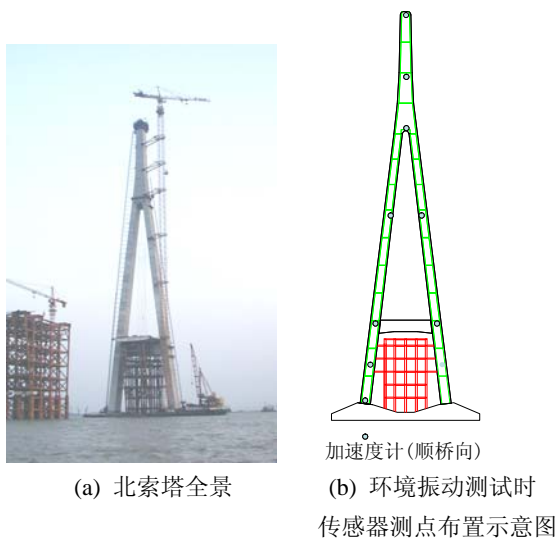


图 4 苏通大桥
Fig.4 Sutong bridge

分析中,对桥上顺桥向的十个加速度响应信号的自相关、互相关响应进行了小波变换。图 5 显示了塔顶测点处的加速度测试信号、自相关函数及小波尺度图。在小波尺度图中,出现了几块代表能量聚集的黑斑,最上方的黑斑黑度最大,且持续时间最长;下方的黑斑黑度较弱,且持续时间减短。这表明:信号的一阶模态能量最大,衰减最慢;高

阶模态能量较小,衰减也较快。分析中,选取了中心频率为 3Hz 的复 Morlet 母小波函数为分析核函数。

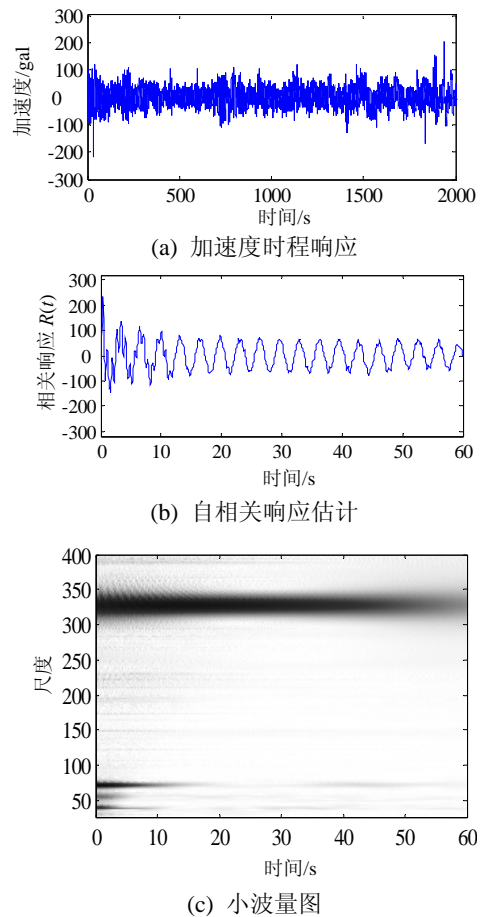


图 5 加速度测试信号及分析
Fig.5 Acceleration measurement and analysis

模态参数识别时,先抽出脊线尺度值,然后得到相应的相位角估计值和对数衰减包络线,最后算出结构频率和阻尼比(如表 2)。为了比较本文方法的实用性和准确性,本文以工程中常用的拾峰法为基准,比较了两种识别方法的识别结果(如表 2)。

表 2 可知：小波法对频率的估计与拾峰法对频率的估计吻合很好；小波法对阻尼比的估计与拾峰法对阻尼比的估计存在误差，而且它能估计出拾峰法没有估计出的第四阶模态阻尼值。振型估计时，塔最上方的测点被设为参考点，将其它测点与参

考点的互相关函数进行小波分析。表 2 显示了识别出的索塔前八阶振型。由表 2 中列出的模态置信指标(MAC 值^[10])可知，采用本文方法的识别结果与拾峰法的结果十分吻合。

表 2 环境振动测试中苏通大桥桥塔模态参数估计值

Table 2 Modal parameter estimation for the north cable pylon of Sutong Bridge under ambient excitation

模态阶数	频率/Hz		阻尼比/(%)		振型向量								MAC
	拾峰法	小波法	拾峰法	小波法	拾峰法				小波法				
1	0.156	0.156	2.20	2.06	[1.00 1.14 0.89 0.79 0.44 0.27 0.28 0.13 0.10]	[1.00 0.99 0.91 0.77 0.51 0.29 0.32 0.15 0.21]	0.99						
2	0.488	0.488	2.20	2.10	[1.00 1.24 1.48 1.22 1.22 0.96 0.96 0.48 0.48]	[1.01 1.22 1.43 1.21 1.21 0.99 0.99 0.50 0.50]	1.00						
3	0.674	0.674	2.60	2.20	[1.00 0.55 -0.17 -0.41 -0.59 -0.42 -0.58 -0.45 -0.31]	[1.00 0.55 -0.25 -0.47 -0.68 -0.47 -0.63 -0.46 -0.27]	0.99						
4	0.736	0.735	/	1.20	[1.00 0.46 -0.08 -0.11 -0.11 -0.14 -0.14 -0.07 -0.07]	[1.00 0.46 -0.08 -0.11 -0.11 -0.14 -0.14 -0.07 -0.07]	1.00						
5	0.868	0.869	1.10	1.92	[1.00 0.54 0.08 -0.02 -0.02 -0.12 -0.12 -0.06 -0.06]	[1.00 0.54 0.08 -0.02 -0.02 -0.13 -0.13 -0.07 -0.07]	1.00						
6	1.201	1.206	1.80	2.24	[1.00 -0.13 -1.50 3.13 -3.22 2.53 -2.41 1.56 -0.94]	[1.00 -0.10 -1.55 3.23 -3.03 2.94 -2.65 1.90 -0.87]	0.99						
7	1.445	1.449	2.10	2.00	[1.00 0.27 -0.48 0.20 0.20 0.89 0.89 0.44 0.44]	[1.00 0.24 -0.51 0.15 0.15 0.81 0.81 0.41 0.41]	1.00						
8	1.760	1.764	1.00	1.18	[1.00 -0.07 -0.62 -0.61 -0.47 0.10 0.48 0.52 0.32]	[1.00 -0.11 -0.65 -0.64 -0.51 0.18 0.49 0.58 0.34]	1.00						

4 结论

本文提出了稳态随机激励下基于相关响应估计的小波基线性结构系统识别方法。此方法先从结构的随机含噪振动响应中估算了结构的相关函数响应，然后利用连续 Morlet 小波变换的时频解耦功能，将此时域相关函数响应信号转化为小波功率量图。由渐近小波分析理论可知，其小波系数图的脊线值包含了解耦后的结构模态信息，可用于识别结构的模态频率和阻尼比。如果可以获取多测点的响应信号，还可利用它对系统的振型向量进行识别。此外，如果能知道随机激励的功率谱强度，还可据此估计出系统的广义模态质量系数、刚度系数并由此得到结构的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵等物理参数。

为了验证上述方法的准确性，本文在三层剪力框架系统上进行了数值算例研究。结果显示所提出的小波基识别方法可以准确估计系统的模态参数。苏通大桥北索塔环境振动测试试验的结果进一步验证了本文所推荐的方法对于环境激振下结构动力参数的识别是适用的：在不可控的随机激励场下，此方法能够通过分析结构响应信号识别出结构

的频率、阻尼比和振型等模态参数。对于索缆支承桥梁等大型工程结构来说，密集模态的存在极大地增加了模态解耦和模态识别的难度，将是下一步研究的重点。

参考文献：

- [1] Staszewski W J, Identification of damping in MDOF systems using time-scale decomposition [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 203(2): 283—305.
- [2] Ruzzene M, Fasana A, Garibaldi L, Piombo B. Natural frequencies and dampings identification using wavelet transform: application to real data [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11(2): 207—218.
- [3] Piombo B A D, Fasana A, Marchesiello S, Ruzzene M. Modeling and identification of the dynamic response of a supported bridge [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(1): 75—89.
- [4] Kijewski T, Kareem A. Wavelet transform for system identification in civil engineering [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003, 18: 339—355.
- [5] Chang C C, Sun Z, Li N. Identification of structural dynamic properties using wavelet transform [C]. Proceeding of the First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, 2003.

(参考文献[6]—[10]转第 225 页)

域总会先于其周围的三角形蜂窝而发生变形,更容易调动所有胞元发生整体变形。

(3) 在保证各蜂窝结构相对密度和加载速度不变的前提下,单位质量的 Kagome 蜂窝在压缩量一定条件下的能量吸收能力要强于三角形和六边形蜂窝。

本文对蜂窝材料的变形模式以及能量吸收特性的研究为蜂窝材料冲击动力学特性的微拓扑结构设计提供了参考,但关于微拓扑结构的优化设计与材料冲击动力学响应间的关系还有待于进一步深入展开。

参考文献:

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structure and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
 - [2] 卢天健, 何德坪, 陈常青, 赵长颖, 方岱宁, 王晓林. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 517—535.
Lu Tianjian, He Deping, Chen Changqing, Zhao Changying, Fang Daining, Wang Xiaolin. The multi-functionality of ultra-light porous metals and their applications [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 517—535. (in Chinese)
 - [3] Wang A J, McDowell D L. In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(2): 137—156.
 - [4] Hohe J, Becker W. Effective elastic properties of triangular grid structures [J]. Composite Structures, 1999, 45(2): 131—145.
 - [5] Hohe J, Beschorner C, Becker W. Effective elastic properties of hexagonal and quadrilateral grid structures [J]. Composite Structures, 1999, 46(1): 73—89.
 - [6] Zheng Z J, Yu J L, Li J R. Dynamic crushing of 2D cellular structures: A finite element study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1-4): 650—664.
 - [7] Papka S D, Kyriakides S. In-plane compressive response and crushing of honeycomb [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1994, 42(10): 1499—1532.
 - [8] Papka S D, Kyriakides S. In-plane crushing of a polycarbonate honeycomb [J]. International Journal Solids and Structure, 1998, 35(3-4): 239—267.
 - [9] Papka S D, Kyriakides S. Experiments and full-scale numerical simulations of in-plane crushing of a honeycomb [J]. Acta Mater, 1998, 46(8): 2765—2776.
 - [10] Ruan D, Lu G, Wang B, Yu T X. In-plane dynamic crushing of honeycombs—A finite element study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(2): 161—182.
 - [11] Li K, Gao X L, Wang J. Dynamic crushing behavior of honeycomb structures with irregular cell shapes and non-uniform cell wall thickness [J]. International Journal Solids and Structure, 2007, 44(14-15): 5003—5026.
 - [12] Liu Y, Zhang X C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 98—109.
-
- (上接第 204 页)
- [6] Delprat N, Escudie B, Guillemain P, Kronland-Martinet R, Tchamitchian P, Torresani B. Asymptotic wavelet and Gabor analysis: Extraction of instantaneous frequencies [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 644—664.
 - [7] 朱位秋. 随机振动[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Zhu Weiqiu. Random vibration [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
 - [8] 侯伟. 基于小波变换的桥梁模态识别方法研究 [D]. 上海同济大学, 2007.
Hou Wei. Bridge modal identification based on wavelet transform [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
 - [9] Sun Z, Chang C C. Structural degradation monitoring using covariance-based wavelet packet signature [J]. Structural Health Monitoring, 2003, 2(4): 309—326.
 - [10] Ting T, Chen T L C, Twomey W. Correlating mode shapes based on the modal assurance criterion [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1993; 14(4): 353—360.