

文章编号:1000-582X(2010)06-060-07

采用不同方法识别结构模态参数的比较

刘 会^{1,2}, 张亮亮¹, 杨转运², 刘保伟²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044; 2. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘 要:结构振动信号中混杂的噪声会影响模态参数的识别精度,并会引起虚假模态。通过一五自由度结构系统的数值仿真研究表明:直接识别法的精度低且应用范围有限,应用频域平均法可提高模态参数的识别精度,并且有利于识别出被噪声淹没的模态;修正的 LSCE 小波阈值滤波法有明显的去噪效果,其提高模态参数识别精度可达到或超过 3 次平均的效果且识别速度快。通过比较 3 种方法的结构模态识别结果,得到了修正的 LSCE 小波阈值滤波法节约试验成本,提高了识别速度和精度,具有明显的可适用性和推广性。

关键词:最小二乘指数法;小波滤波;含噪数据;模态参数识别

中图分类号:TU311

文献标志码:A

Comparative study on the identification of structural modal parameter using different methods

LIU Hui^{1,2}, ZHANG Liang-liang¹, YANG Zhuan-yun², LIU Bao-wei²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Sichuan College of Architecture Technology, Deyang 618000, Sichuan, P. R. China)

Abstract: Noise in the structural vibration signal affects the identification accuracy of the modal parameter and generates false mode. The direct identification method is with low-accuracy and limited in application scope, while the frequency domain average method could improve the identification accuracy of the modal parameter and be good at identifying the modes drown in noise. The improved LSCE wavelet threshold filtering method, is with remarkable de-noise effect, which can reach or even surpass the effect of three times averaging in identification accuracy, and with fast identification. By comparing three structural modal identification methods, it shows that the improved LSCE wavelet threshold filtering method can save test costs and improve the recognition speed and accuracy. The improved LSCE wavelet threshold filtering method shows obvious applicability and generalization.

Key words: LSCE; wavelet filtering; data containing noise; modal parameter recognition

振动模态分析是通过系统的激励和响应之一或全部来确定系统动态特性的方法,其核心是模态参数辨识。影响模态参数辨识精度的主要因素是噪声,并且噪声还会引起虚假模态(噪声模态)。ITD

和 Prony 法是从线性拟合的实现模态参数的识别^[1-2], Wang^[3]等提出基于快速独立分量分析技术,以模态响应之间的独立性构造目标函数,直接从结构自由响应或脉冲响应的数据矩阵中提取结构的振

收稿日期:2010-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778185);重庆大学“211 工程”三期建设项目(S-09105)

作者简介:刘会(1977-),女,重庆大学博士研究生,主要从事桥梁结构抖振研究,(E-mail)zhuanyun@gmail.com。

张亮亮(联系人),重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)zll200510@126.com。

型向量的 ICA 法。Doherty 和 anstey 提出了 O' Doherty-Anstey 公式^[4-5], Banik 和 Serguei 等在统计分析情况下将公式发展到连续波阻抗领域^[6]。由系统识别理论在给定拟合精度下引入 Pade 近似,将振动波指数函数模型转化为一有限阶数的 ARMA 或 MA 模型^[7-8]。Lazear 提出可利用振动波的累积量信息提取 MA 模型参数^[9]。目前还有几种识别方法,如功率谱峰值法、最小平方曲线拟合法、联合峰值法和互谱法等。采用运用系统参数辨识弯扭耦合振动模型模态,使用较多的是最小二乘法^[10],但最小乘法需要设定初始值,通过反复迭代来实现^[11]。中值滤波、均值滤波都是对采样序列进行处理得出的结果数据,为了得到准确结果需要较大样本量,采样时间较长;小波滤波是根据信号与噪声在小波域具有不同性态表现这一原理来实现的,即在小波域,随着尺度的增加,噪声小波系数的幅值会很快衰减为零,而真实信号系数的幅值基本保持不变,试图去除所有噪声而保留所有真实信号^[11-13]。把频域平均法和小波域阈值滤波法应用于混有噪声的结构振动信号模态参数识别中,通过对一五自由度系统的动力学仿真,修正了多参考点最小二乘指数(LSCE)小波阈值滤波法^[11],对比了直接识别法、频域平均法和修正后的 LSCE 小波阈值滤波法应用于模态参数识别中的效果。

1 模态参数识别的 LSCE 法

LSCE 法即最小二乘复指数法,是目前模态参数识别中常用的一种方法,被集成在许多通用模态分析软件中。该方法基本原理如下^[11]:

设与响应点 o 相对应的脉冲响应函数矩阵的第 o 行为

$$[h(n\Delta t)]_o = \sum_{r=1}^N (\psi_{or} e^{\lambda_r n\Delta t} L_r + \psi_{or}^* e^{\lambda_r^* n\Delta t} L_r^*), \text{ 或}$$

$$[h(n\Delta t)]_o = \sum_{r=1}^N (\psi_{or} z_r^n L_r + \psi_{or}^* z_r^{n*} L_r^*), \quad (1)$$

式中: $z_r = e^{\lambda_r \Delta t}$; L_r 称为模态参与因子; $z_r L_r$ 及 $z_r^* L_r^*$ 与响应点 o 无关,是下列 p 阶有限差分矩阵方程的一个解

$$z_r^n L_r \mathbf{I} + z_r^{n-1} L_r W_1 + z_r^{n-2} L_r W_2 + \dots + z_r^{n-p} L_r W_p = 0, \quad (2)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵, W_1, \dots, W_p 维数为 $N_i \times N_i$, N_i 为输入自由度数。设有 $2N_m$ 个特征解(或极点),则阶数 p 必须满足: $p \geq 2N_m / N_i$ 。

因为响应点 o 的脉冲响应是式(2)的特征解 $z_r L_r$ 或 $z_r^* L_r^*$ 的线形组合,所以也是式(2)的解,因

此有:

$$[h(n\Delta t)]_o \mathbf{I} + [h((n-1)\Delta t)]_o W_1 + \dots + [h((n-p)\Delta t)]_o W_p = 0. \quad (3)$$

对所有的响应点同时考虑方程式(3),就能够对矩阵系数 W_1, \dots, W_p 进行整体最小二乘估计。一旦知道了这些矩阵系数,式(2)就可重新写为一般特征值问题,从中可求出 pN_i 个特征值 z_r , 得到系统极点 λ_r 的估计以及模态向量的估计。

2 改善模态参数识别精度的方法

2.1 频域平均法

频域平均法可在时域中进行,也可在频域中进行,但时域中平均需要较复杂的设备来保证信号同步,所以在实际中较少采用。相比而言,频域平均则要容易的多,这是频域法的一大优点。利用频域平均法可有效抑制噪声的影响,使模态定阶问题更容易。

图 1 为响应信号受到噪声污染的频响函数估计模型,假设该系统的激励自由度为 L 个,响应自由度为 M 个,并设频响函数测量过程中重复了 m 次试验,于是有

$$[X^{(1)} \dots X^{(m)}] = H \cdot [F^{(1)} \dots F^{(m)}] + [N^{(1)} \dots N^{(m)}], \quad (4)$$

其中: N 是 $n(t)$ 傅氏变换; X 和 N 是 M 阶的列向量; F 是 L 阶的列向量。

把上式左右两边同时乘以 $[F^{(1)} \dots F^{(m)}]$ 的共轭转置得

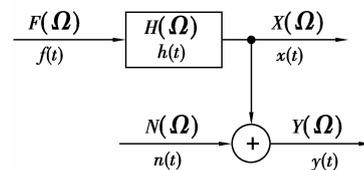


图 1 响应信号受到噪声污染的频响函数估计

$$\sum_{l=1}^m X^{(l)} \cdot F^{(l)H} = H \cdot \sum_{l=1}^m F^{(l)} \cdot F^{(l)H}$$

$$\Rightarrow S_{xf} = H \cdot S_{ff}, \quad (5)$$

上式中的 S_{xf} 和 S_{ff} 分别为输入输出互功率谱密度矩阵和输入功率谱密度矩阵;并且考虑了噪声 N 与输入 F 互不相关,也就是 $E(N \cdot F^H) = 0$;其中上标 H 表示取共轭转置。

对于单输入情况, q 点激励,考虑 p 点响应,则得到频响函数 H_{pq} 即:

$$H_{pq}(\Omega) = \frac{S_{x_p f_q}(\Omega)}{S_{f_q f_q}(\Omega)} = \frac{\sum_{l=1}^m X_p^{(l)}(\Omega) F_q^{(l)*}(\Omega)}{\sum_{l=1}^m F_q^{(l)}(\Omega) F_q^{(l)*}(\Omega)}, \quad (6)$$

式中, $S_{x_p f_q}(\Omega)$ 表示 p 点响应和 q 点激励的互谱, $S_{f_q f_q}(\Omega)$ 表示 q 点激励力自谱。

上面推导过程中假设了 m 次的重复试验, 因此 $H_{pq}(\Omega)$ 实际是 $S_{x_p f_q}(\Omega)$ 、 $S_{f_q f_q}(\Omega)$ 各自进行 m 次谱平均后的比值, 因此它是统计平均结果。由于噪声与响应、激励都无关, 当 m 足够大时, 频响函数的估计值将接近真实结果。这就是频域模态参数识别的频域平均法(实际利用经典谱估计的 Welch 频域平均法)。

2.2 修正的 LSCE 小波阈值滤波法

小波域阈值滤波有硬阈值滤波和软阈值滤波, 其基本思想都是去除小的系数, 对大的系数进行收缩或保留。

硬阈值的处理方式是对各尺度的小波变换系数作如下阈值处理^[7]:

$$w_l(j, n) = \begin{cases} 0, & |\omega(j, n)| \leq \tau_j \\ \omega(j, n), & \text{其它} \end{cases}, \quad (7)$$

式中, $\omega(j, n)$ 表示在 j 尺度下的第 n 个小波分解系数; τ_j 为 j 尺度下的阈值; $w_l(j, n)$ 为经过滤波算子后的系数, 把 $w_l(j, n)$ 经小波重构完成信号的滤波过程。

采用软阈值则作如下处理

$$w_l(j, n) = \begin{cases} 0, & |\omega(j, n)| \leq \tau_j \\ \text{sign}(\omega(j, n)) \cdot (|\omega(j, n)| - \tau_j), & \text{其它} \end{cases}, \quad (8)$$

其中 $\text{sign}(\dots)$ 表示符号函数。

上两式中阈值 $\tau_j = c \cdot \sigma_j$, 其中 σ_j 为 j 尺度下的噪声标准差; c 有以下几种取值方式

a) 对于高斯白噪声, 其值落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 的概率为 99.73% (其中 μ 为数学期望, σ 为标准差)。因此 c 取 3 与 4 之间某一值就可以滤去大部分的噪声;

b) Donoho 通用阈值法 $c = \sqrt{2 \cdot \ln(N)}$, N 为数据长度。

此外, 还有极大极小阈值法、Rigrsure 阈值法、启发式阈值法 (Heursure) 等, 可用于二进小波变换滤波^[4]。

关于 σ_j 的估计, 可利用小尺度上的小波变换系

数进行计算, 或是根据 Donoho 的噪声方差中值估计公式:

$$\hat{\sigma}_D = \frac{\text{Median}(|\omega(1)|)}{0.6745}, \quad (9)$$

此处 $\text{Median}(\dots)$ 表示取中值运算; $\omega(1)$ 为尺度 1 下的小波分解系数。

得到噪声方差的估计以后, 可进一步用于估计噪声在小波变换后各尺度上的方差 σ_j^2 , 可以证明

$$\sigma_j = \sigma \cdot h_0 \cdot h_1 \cdot \dots \cdot h_{j-2} \cdot g_{j-1}, \quad (10)$$

其中: h_j, g_j 分别为 j 尺度上的分解滤波器的低通滤波器系数和高通滤波器系数; \cdot 表示作卷积运算; \dots 表示 2-范数。母小波的选择对于识别精度起着至关重要的作用, 下面简述一下小波变换的母波基的选择的基本要求。

小波域滤波法的思想是将信号在相邻尺度上的小波变换系数直接相乘, 突变信号的小波分解系数在相乘后会得到增强, 而随机噪声信号分量的小波分解系数相乘后则变得更加微弱。利用阈值检验, 从噪声中检出重要的信号边缘, 并移去噪声, 再重构信号。上述小波域滤波方法具有直观、易实现并且有很好的鲁棒性。直接将信号小波变换值在几个尺度上进行相关运算, 可以相当准确地确定信号边缘或其他重要特征的位置。当某个局部存在信号边缘或其他重要特征时, 这种方法可以将背景噪声去除。直接将信号数据进行尺度空间相关, 将锐化和增强信号(或图像)的主要边缘, 同时噪声和小的边缘将被压缩, 利用相关特征将信号中的重要特征信息与噪声区分出来^[10-15]。

由小波变换的定义可知, 小波交换是将信号投影在小波族上, 小波系数的意义是原信号局部位置与小波基的相似程度, 小波系数的大小既与信号有关, 还与基本小波的选择有关。根据匹配滤波的性能特点, 母波基与结构动态信号发射波的相似程度直接影响信号处理的性能^[14-15]。

3 数值仿真

图 2 所示为一五层剪切结构模型, 各层参数如图中所注。设各物理参数取值为: $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 1 \text{ kg}$; $c_1 = c_2 = c_3 = c_5 = 2 \text{ Ns/m}$, $c_4 = 4 \text{ Ns/m}$; $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = 10\,000 \text{ N/m}$ 。

根据复模态理论, 计算得到此系统的模态阻尼固有频率及阻尼比, 如表 1 中所列。

表 1 五自由度系统的模态频率及阻尼比

阶数	阻尼固有频率 $\Omega_r / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	阻尼比 $\zeta_r / \%$
$r=1$	28.463	0.370 27
$r=2$	83.08	0.854 8
$r=3$	130.96	1.448 7
$r=4$	168.23	2.282 3
$r=5$	191.81	2.317 5

利用 Matlab 的 Simulink 仿真软件对图 2 所示的系统进行动力学仿真,并仿真锤击法信号作为系统的输入,得到系统的输出。由此输入、输出数据估计出系统频率响应函数,再转换为脉冲响应数据(傅立叶逆变换)后进行模态参数识别。仿真采样时长约 16 s,采样间隔 0.002 s。考虑响应信号的信噪比 SNR=8、10 和 12 三种情况。利用直接识别、频域平均法和修正的 LSCE 小波阈值滤波法进行模态参数识别,设定阶次为 30。

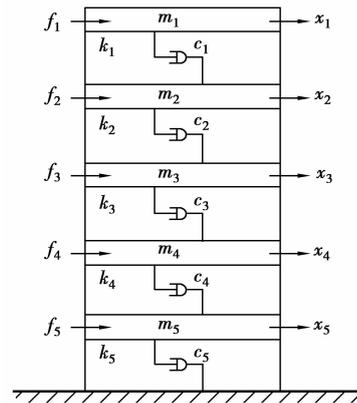


图 2 五层剪切结构模型

3.1 直接识别

表 2、表 3 给出了直接利用含噪声数据进行系统模态参数识别的结果,由表中可见:对 SNR=8 情况,第五阶模态未能识别出来;在已识别出的模态中,阻尼固有频率误差相对较小,而阻尼比结果存在较大误差,特别是低信噪比情况,并且阻尼比都是比实际偏大。

表 2 阻尼固有频率直接识别结果及误差 %

$\Omega_r / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	SNR=8	误差	SNR=10	误差	SNR=12	误差
$r=1$	28.677	0.752	28.486	0.083	28.519	0.196
$r=2$	83.007	-0.088	83.109	0.035	83.076	-0.005
$r=3$	130.840	-0.095	131.160	0.152	131.040	0.056
$r=4$	168.560	0.193	167.660	-0.341	168.050	-0.108
$r=5$	NaN	-	192.870	0.551	189.650	-1.124

表 3 模态阻尼比直接识别结果

$\zeta_r / \%$	真实结果	SNR=8	SNR=10	SNR=12
$r=1$	0.370 27	0.885	0.752	0.623
$r=2$	0.854 8	0.837	0.946	0.915
$r=3$	1.448 7	1.601	1.585	1.59
$r=4$	2.282 3	2.882	2.572	2.619
$r=5$	2.317 5	NaN	4.119	3.659

3.2 频域平均法

为了研究使用频域平均法提高模态参数识别精度,独立进行了 3 次重复数据生成,每次仿真激励力的幅值和冲击时间在一定范围内随机变化^[16]。利用式(6)进行频响函数估计,由频响函数的逆傅里叶变换得到脉冲响应函数后再进行多参考点复指数法模态参数整体估计,表 4、表 5 给出了结果。由表中

可见,进行了 3 次平均后,对 SNR=8 的信号,已识别出全部模态参数;3 种信号模态参数的识别精度也大大提高:阻尼固有频率最大误差不超过 0.5% (在直接识别时为 -1.1%);阻尼比精度提高更明显,最大阻尼比识别误差为 52.3%,只有直接识别时的约 1/3。

表 4 阻尼固有频率平均法识别结果及误差

$\Omega_r / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	SNR=8		SNR=10		SNR=12	
	SNR=8	误差	SNR=10	误差	SNR=12	误差
$r=1$	28.510	0.166	28.452	-0.039	28.477	0.048
$r=2$	83.095	0.018	83.061	-0.023	83.090	0.011
$r=3$	131.090	0.096	131.110	0.109	130.910	-0.045
$r=4$	168.390	0.092	168.490	0.151	168.260	0.014
$r=5$	192.460	0.340	191.870	0.032	190.920	-0.466

表 5 模态阻尼比频域平均法识别结果

$\zeta_r / \%$	真实结果	SNR=8	SNR=10	SNR=12
$r=1$	0.370 27	0.564	0.477	0.419
$r=2$	0.854 8	0.876	0.829	0.907
$r=3$	1.448 7	1.461	1.415	1.528
$r=4$	2.282 3	2.655	2.779	2.362
$r=5$	2.317 5	2.721	3.471	3.326

3.3 修正的 LSCE 小波阈值滤波法

利用 db4 小波对上面的 3 种含噪信号进行滤波处理,分解层次为 6。图 3 为信噪比为 8 时第 5 层位置处的响应信号滤波前、后的结果,经计算滤波后的信号信噪比为 20.898,比原始信号信噪比提高了 1 倍多,可见小波滤波对噪声确实有很强的抑制效果。

对滤波后的信号利用 LSCE 法进行模态参数识别,表 6、表 7 为识别的结果及误差。结果表明:信号全部模态被全部识别出来,且识别的精度得到一定程度的提高,特别是阻尼比的识别精度明显改善。总体来说精度达到或略超过 3 次平均的效果。

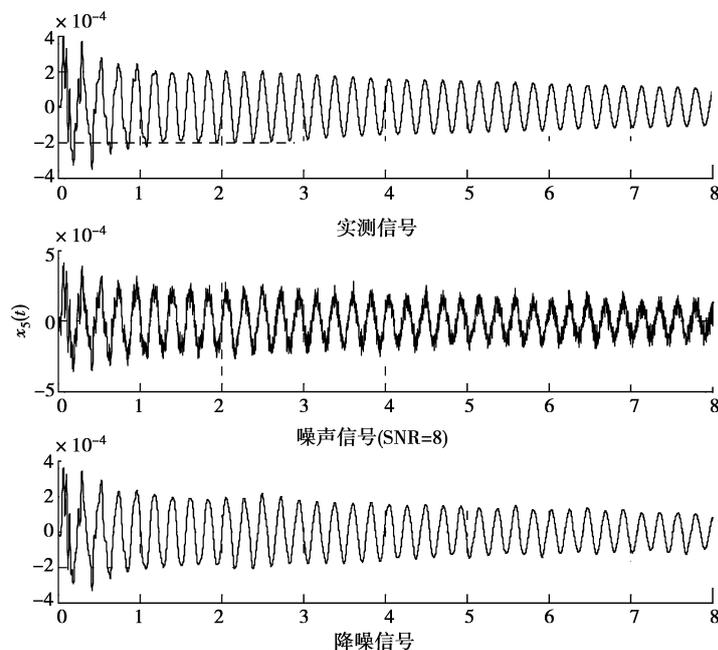
图 3 信噪比为 8 的 $x_5(t)$ 信号滤波结果

表6 滤波后五自由度系统的模态频率识别结果及误差

$\Omega_r / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	SNR=8		SNR=10		SNR=12	
	真实结果	误差	真实结果	误差	真实结果	误差
$r=1$	28.518	0.193	28.481	0.062	28.474	0.038
$r=2$	82.977	-0.124	83.137	0.068	83.087	0.008
$r=3$	130.930	-0.026	131.280	0.243	131.070	0.081
$r=4$	168.140	-0.054	167.550	-0.408	168.260	0.018
$r=5$	192.420	0.317	191.790	-0.008	189.850	-1.023

表7 滤波后五自由度系统的模态阻尼比识别结果

$\zeta_r / \%$	真实结果	SNR=8	SNR=10	SNR=12
$r=1$	0.370 27	0.394 68	0.347 11	0.466 39
$r=2$	0.854 8	0.936 47	0.883 42	0.889 33
$r=3$	1.448 7	1.677 7	1.516	1.694 1
$r=4$	2.282 3	2.461 8	2.521	2.593 7
$r=5$	2.317 5	4.233	3.293 7	3.477 6

4 结 语

通过以上比较频域平均法、修正的 LSCE 小波阈值滤波法和直接识别模态参数的仿真结果分析,有如下结论:

1) 含噪声数据的模态参数识别中,某些模态常会被噪声淹没而识别不出,但在被识别出的模态中,阻尼固有频率的结果精度相对较高,而阻尼比误差较大,且主要是比实际结果偏大;

2) 频域平均法较容易实现,且有利于找出被噪声淹没的模态,并且能有效提高含噪声数据的模态参数识别精度,特别是模态阻尼比的精度,但频域平均法需要较多的重复试验数据;

3) 通过结构振动测试实例证明,修正的 LSCE 小波阈值滤波法可有效提高原始测量信号的信噪比,有利于找出被噪声淹没的模态,并提高模态参数的识别精度,特别是模态阻尼比精度;修正的 LSCE 小波阈值滤波法只需要一次性试验数据样本,而频域平均法至少需要 3 次及以上的试验数据样本。所以修正的 LSCE 小波阈值滤波法在节约试验成本、识别速度、噪声抑制效果和精度等方面优于当前常用的频域平均法和直接识别法,具有模态识别的可适用性和推广性。

需要指出的是,要注意的是小波滤波与所选用的小波基有很大关系,对同一个数据选用不同的小波滤波结果可能相差甚远。因此针对不同的信号滤波需要预先进行检验,在几种小波基中选择最优者,以达到较好去噪效果。

参考文献:

- [1] KOH B H, DYKE S J. Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data[J]. Computers and Structures, 2007, 85(3/4):117-130.
- [2] GENTILE C, GALLINO N. Ambient vibration testing and structural evaluation of a historic suspension footbridge [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(5):965-988.
- [3] WANG B T, CHENG D K. Modal analysis of modal system by using free vibration response data only[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 311(3/5):737-755.
- [4] PETRIN F, GIULIANO F, BONTEMPI. Comparison of time domain techniques for the evaluation of the response and the stability in long span suspension bridges[J]. Computers and Structures, 2007, 85(11/14):1032-1048.
- [5] LI Z J, LI A G, HAN X L. Operational modal identification of suspension bridge based on structural health monitoring system [J]. Journal of southeast university(English edition), 2009, 25(1):104-107.
- [6] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise assisted data analysis method [J]. Advances in adaptive data analysis, 2009(1):1-41.
- [7] RUZZENE M, FASANA A, GARIBALDI L, et al. Natural frequency and damping identification using wavelet transform; application to real data [J]. Mechanical Systems and Signal Processing Journal, 1997(11):207-218.

- [8] WU J R, LI Q S. Structural parameter identification and damage detection for a steel structure using a two-stage finite element model updating method[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62:231-239.
- [9] WU Z, YU S S, ZHOU J L. An approach to image noise reduction based on multi-wavelet transform and multi-level threshold[J]. Engineering and Application of Computer, 2004, 13:14-15.
- [10] 陆冬, 汤宝平, 何启源, 等. 模态参数识别中频响函数估计的最小二乘优化[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(3):6-10.
LU DONG, TANG BAO-PING, HE QI-YUAN, et al. Least-square-based optimization of frequency response function estimation in modal parameters identification [J]. Journal of chongqing university: Natural science edition, 2007, 30(3):6-10.
- [11] 王卫华, 杨转运, 刘会. 利用 LSCE 方法识别桥梁气动导数研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(1):85-88.
WANG WEI-HUA, YANG ZHUAN-YUN, LIU HUI. Identification of aerodynamic derivatives for bridge sections by LSCE method [J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2009, 23(1):85-88.
- [12] 罗光坤, 张令弥. 基于 Morlet 小波变换的模态参数识别研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(7):135-138.
LUO GUANG-KUN, ZHANG LING-MI. Study on identification of modal parameters based on morlet wavelet transformation [J]. Journal of vibration and shock, 2007, 26(7):135-138.
- [13] SONG H Z, ZHONG L, HAN B. Structural damage detection by integrating independent component and support vector machine [J]. International Journal of Systems Science, 2006, 37(13):961-967.
- [14] 李富才, 何正嘉, 陈进. 小波域相关滤波法及其早期故障预示应用[J]. 振动工程学报, 2005, 18(2):145-148.
LI FU-CAI, HE ZHENG-JIA, CHEN JIN. Wavelet transform domain correlation filter and its application in incipient fault prognosis [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(2):145-148.
- [15] 潘泉, 张磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [16] 孙鑫晖, 张令弥, 王彤. 基于左矩阵分式模型的短记录数据模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12):15-18.
SUN XIN-HUI, ZHANG LING-MI, WANG TONG. Modal parameters identification of short data sequence based on left matrix fraction description [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12):15-18.

(编辑 陈移峰)

(上接第 48 页)

- [7] NARAYANASAMY R, PARTHASARATHI N L, SATHIYA N C, et al. A study on fracture behaviour of three different high strength low alloy steel sheets during formation with different strain ratios [J]. Materials and Design, 2008, 29(9):1868-1885.
- [8] TAKAHASHI M, UENISHI A, YOSHIDA H, et al. Advanced high strength steels for automobile body structures[J]. Materials Science Forum, 2007, 539/543(5):4386-4390.
- [9] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 中川威雄(日), 阿部邦雄(日). 板料冲压加工[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1982.
- [11] SUI F, MORON P, ICHCHOU M, et al. Dynamic analysis of an automobile floorpan using a hybrid approach of the finite element method and statistical energy analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, 222(D12):2435-2445.
- [12] 赵立红, 江树勇, 郑玉峰, 等. 柱面扁壳类覆盖件刚度的数值模拟研究[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(2):227-231.
ZHAO LI-HONG, JIANG SHU-YONG, ZHENG YU-FENG, et al. FEM numerical analysis on panel stiffness of cylindrical shallow shell of automotive body[J]. Journal of Material Science and Technology, 2009, 17(2):227-231.
- [13] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [14] 洪伟, 吴承祯. 试验设计与分析: 原理·操作·案例[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [15] LI S, CHEN H B, YUN J X, et al. Optimization for cyclosporine blood concentration prediction based on genetic algorithm-BP neural network [C]// 2nd International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, September 1-2, 2008, Jingzhou, Hubei, China. Yangtze University, Jingzhou, China: [s. n.], 2008:161-165.
- [16] HUANG Y S, LIN Y F, QIU Z L. Freight prediction model based on GABP neural network[C]// Proceedings of the 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design, October 17-18, 2008, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE, 2008:229-232.

(编辑 张小强)