

基于改进EMD的结构损伤特征量提取*

陈换过, 张磊涛, 李剑敏, 陈文华

(浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州, 310018)

摘要 提出了一种解决经验模式分解法(empirical mode decomposition, 简称EMD)端点效应的方法——端点筛选法。端点筛选法把以往一次性延拓或预测得到极值点、拟合包络线的过程替换为选点、拟合包络线、判别端点效应、再选点、再判断等多次循环筛选过程,并在此基础上提出了基于改进经验模式分解的损伤特征量提取方法。将基于改进EMD的损伤特征量提取方法应用于机翼盒段模型,提出了能反映复合材料机翼盒段损伤状况的损伤特征量——瞬时频率的相对变化量。随着损伤程度的逐渐增加,瞬时频率的相对变化量标准差越来越大。

关键词 特征量提取;经验模式分解;端点效应;复合材料

中图分类号 O329

引言

当结构出现损伤时,结构的状态会发生变化,这些变化通常可以从设备上测到的时间序列信号反映出来。损伤特征提取就是对时间序列进行处理,提取反映结构损伤信息的特征量。在结构损伤检测中,寻找敏感的结构损伤特征量是损伤检测方法和信号处理链中的关键环节,决定了损伤检测方法的成败。

1998年,Norden E. Huang等提出了希尔伯特黄变换^[1](Hilbert-Huang transform,简称HHT)。HHT分为经验模式分解和希尔伯特变换两部分。与传统方法不同,EMD能对非平稳信号进行平稳化处理,最终分解成为一系列具有不同特征时间尺度的固有模式函数(intrinsic mode function,简称IMF)之和。HHT方法在处理非平稳信号局部频率变换方面较小波变换等其他传统方法更具灵活性^[1]。在EMD过程中,拟合信号的上、下包络线时会出现严重的端点效应,这使分解结果产生严重失真。针对端点效应问题,国、内外学者提出了许多解决端点的方法。N. E. Huang等^[1]提出了特征波延拓法;赵进平等^[2]提出了镜像闭合延拓法;还有时间序列预测法^[3-4]和改变插值函数^[5-6]等。端点效应的根本问题在于信号端点处极值点的确定,任何强加和预测的极值点都难以使人信服^[7]。

笔者提出了一种新的EMD端点效应处理方法——端点筛选法^[8]。它在筛选IMF的过程中增加一

个端点效应判断和端点选择程序,通过合理设置候选端点个数和判断尺度,在信号端点的可能区域找到一对有效降低端点效应的端点,从而解决端点效应问题。以机翼盒段为研究对象,通过有限元软件ANSYS模拟计算机翼盒段在方波电信号激励下的振动响应信号,用端点筛选法和HHT对完好和损伤状态下的振动响应信号进行损伤特征量提取,找出盒段损伤程度与损伤特征量间的对应关系,为建立结构损伤特征量数据库提供理论基础。

1 EMD方法和端点效应

1.1 EMD方法

EMD是把信号上、下包络线的局部平均值等于零作为限制条件,进而提取IMF。IMF必须满足两个条件:a.在整个数据范围内,极值点和过零点的个数必须相等或者最多相差一个;b.在任何点处,所有极大值点和所有极小值点各自形成的包络线的均值始终为零。

通过经验模式分解法得到IMF的过程是一个筛选过程。假设原始信号为 x ,则EMD的整个过程为:

1) 找出信号 x 的所有局部极值,用适当的差值函数把极大值点拟合成上包络线 $x_{\max}(t)$,把极小值点拟合成下包络线 $x_{\min}(t)$ 。

2) 对上、下包络线上每个时刻的值取平均,得到瞬时平均值 m_1 ,有

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50805132);教育部博士点基金资助项目(编号:200803380001)

收稿日期:2010-09-19;修改稿收到日期:2010-12-16

$$m_1 = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2} \quad (1)$$

用 $x(t)$ 减去瞬时平均值 m_1 , 得到

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (2)$$

3) 如果 h_1 中极值点数目和过零点数目相等或只差一个, 且各瞬时平均值 $m(t)$ 都等于零, 那它就是一个 IMF。如果包络均值存在一些非对称波, 则 h_1 很可能不是 IMF。把 h_1 当作原序列, 重复以上步骤, 该筛选过程可以重复 k 次, 直到 h_{1k} 满足 IMF 的条件, 就得到了第 1 阶 IMF, 记作 C_1 。至此, 完成了提取第 1 阶 IMF 的全部过程。

4) 从原始信号中分离出分量 C_1 , 得

$$x(t) - C_1 = r_1(t) \quad (3)$$

把 $r_1(t)$ 作为一个新的信号, 按照以上步骤依次提取其第 n 阶 IMF $_n$ 。

5) 由于剩余分量已经变成了一个单调序列, EMD 分解过程停止。这样就把信号分解为 n 个经验模态函数和一个余项 r_n 之和, 该余项是原始信号的一个平均趋势或者是一个常量。如果把分解后的各分量合并起来, 得到

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i(t) + r_n \quad (4)$$

1.2 端点效应

在 EMD 方法中, 信号极值点拟合的上、下包络线可以包络信号的形状, 这种形状代表信号的低频分量, 可以依次提取出信号的高频分量。信号的端点往往不是极值点, 使得用插值函数拟合的包络线在端点处出现摆动, 这样就不能完好地反映信号的形状。如果各个 IMF 的端点摆幅变得很大, 会出现端点效应, 当筛选的次数很多时, 端点效应就会逐渐从两端“污染”到中间, 严重的端点效应会使 EMD 方法失去原来的物理意义。

端点效应是端点处极值点定位不准确导致端点处的包络线处理不好造成的。解决端点效应的关键是在信号两端找到合适的极值点, 使包络线完整地反映信号的低频分量。通过强加或者以一定的规则预测端点的方法具有很大的误差和不确定性, 不能一次性解决所有信号的端点效应问题; 因此, 笔者提出了一种 EMD 端点效应解决方法——端点筛选法^[9]。

2 端点筛选法

端点筛选法是在信号两端逐个筛选最合适的端点来拟合包络线。本研究方法在筛选 IMF 过程中,

把以往一次性延拓或预测得到极值点、拟合包络线的过程替换为选点, 拟合包络线、判别端点效应、再选点、再判断等多次循环筛选过程, 其过程如下:

1) EMD 过程中, 判断信号进入筛分程序之后, 以左端为例, 把左端分为上、下两端, 根据信号左端的特点预测信号端点上、下极值点的大致范围, 并划分出等数目的上、下候选端点。

2) 选择范围内某一个上端点和下端点, 结合其他极大值点和极小值点拟合出包络线, 得出准固有模式函数 $h_1 = x(t) - m_1$ 。

3) 得出 h_1 之后, 一方面把 h_1 自身的平均幅度 $|H_1|$ 分成 n (n 由人为设定) 等份, 即 $s_1 = |H_1|/n$, 把 s_1 作为判断尺度; 另一方面找出表征 h_1 左端端点效应程度的量, 记为 intv_1 。

4) 比较 intv_1 与判断尺度 s_1 的大小, 若 intv_1 大于 s_1 , 则说明 h_1 的端点效应严重, 程序回到第 2 步的选择端点阶段, 选择端点、拟合包络线、得出准固有模式函数、再次判断, ..., 直到 intv_1 小于 s_1 为止。

3 机翼盒段损伤特征量提取

3.1 基于改进 EMD 的损伤特征量提取

结构损伤会对结构刚度、阻尼及固有频率产生影响, 影响结构的动态响应信号。笔者用改进的 EMD 对结构动态响应信号进行处理, 寻找反映结构损伤情况的参数。由式(4)可知, EMD 将原始信号 $x(t)$ 分解为各阶 IMF 的和, 可认为原始信号由损伤引起的能量变化被分配到各阶 IMF 上, 利用 Hilbert 变换找出各阶 IMF 的频率-时间-幅度分布, 即幅度谱和瞬时频率谱。

采用瞬时频率作为损伤特征量检测信号的微小变化。定义矩阵 R 为瞬时频率的相对变化量矩阵

$$R = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \cdots & \Lambda_{1r} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \cdots & \Lambda_{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Lambda_{n1} & \Lambda_{n2} & \cdots & \Lambda_{nr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Lambda_{ij} = \left(1 - \frac{\text{IF}_{ij}^0}{\text{IF}_{ij}^0} \right) \times 100\% \quad (6)$$

其中: IF_{ij}^0 和 IF_{ij} 分别为完好和损伤结构的第 i 阶 IMF 在 j 时刻对应的瞬时频率; Λ_{ij} 为第 i 阶 j 时刻瞬时频率的相对变化量, 可以用它来衡量瞬时频率是增加还是减少。

设第 i 阶 IMF 瞬时频率相对变化量的标准差为

$$\text{SD}_i = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{j=1}^n (\Lambda_{i,j} - \bar{\Lambda}_i)^2} \quad (7)$$

其中: Δ_i 为瞬时频率在整个时间序列上的相对变化量; $\bar{\Delta}_i$ 为 Δ_i 的数学期望。

3.2 机翼盒段的损伤特征量提取

采用某战机机翼盒段作为研究对象,复合材料机翼盒段模型由上、下蒙皮、墙、前后梁、翼肋及长桁组成部。蒙皮和加强件都由T300/QY8911 复合材料加工而成,每层厚度为0.1mm,共10层,从根部到尖端斜削变化,在ANSYS 中用体单元Solid191 模拟,铺层角度为 $[-45/45/90/-90/-45]_s$,其他元件采用铝合金7057-T6,用Solid95 进行模拟。材料参数如表1所示,模型如图1所示。

表1 盒段模型的材料参数值

参数	数值
弹性模量 E_1^0/GPa	150
弹性模量 E_2^0/GPa	9.77
剪切模量 G_{12}^0/GPa	4.47
泊松比 μ_{21}^0	0.3
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600

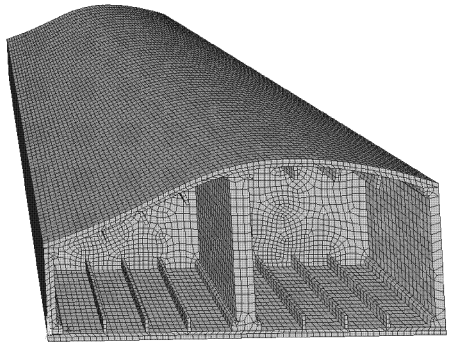


图1 机翼盒段有限元模型

对结构进行损伤检测,选用一种比较稳定且频率成分丰富的外激励信号,考虑到方波中包含的频率成分较多,这里采用方波信号对结构进行激励。将模型划分为42 183 个单元,在7 887 单元处粘贴压电片,如图2所示。把作动器和传感器分别粘贴在机翼

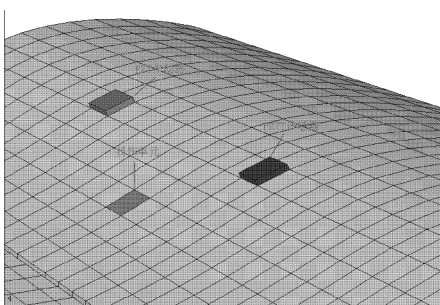


图2 压电片和损伤单元

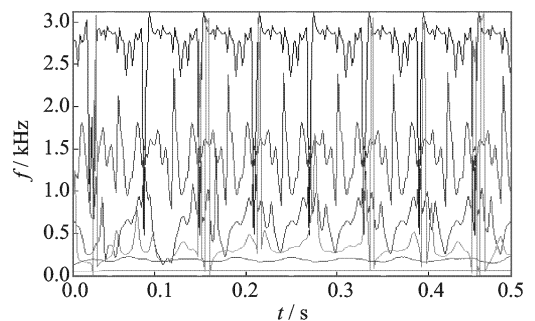
蒙皮表面的不同位置上,压电片的尺寸为 $25 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$,材料参数值见表2。设压电应变系数为 $d_{15} = 410 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, $d_{33} = 230 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, $d_{31} = -100 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ 。

表2 压电片的材料参数值

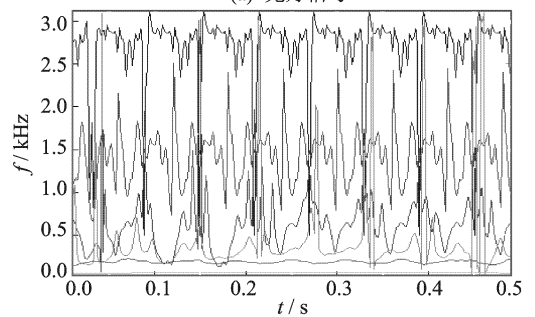
参数	数值
弹性模量 E_p/GPa	78
剪切模量 G_p/GPa	25
泊松比 μ_{21}^0	0.32

假定结构上蒙皮占总面积0.012%的4 058 处单元发生损伤,小损伤用刚度下降模拟,分别考虑损伤5%,7%,10%,13%,15%,17%,20%,23%和25%共9种情况。为获得结构动力学响应信号,给机翼施加幅值为10 V、周期为0.125s的方波激励信号。在ANSYS 中对机翼结构完好和损伤模型做瞬态分析,由传感器得到结构的动力学响应信号。利用改进的EMD方法对响应信号进行分解,并对各阶IMF 进行Hilbert 变换,得到希尔伯特频率-时间谱,即瞬时频率,如图3所示。可以看到,随着损伤程度的增加,瞬时频率作为损伤特征量其变化非常明显。

利用式(5)计算各种损伤情况下前2阶瞬时频率的相对变化量 $\Delta_i (i=1,6)$,可以发现,随着损伤程度的增加, Δ_i 都有显著的下降趋势且损伤越大,下降越明显,其中前两阶IMF 的瞬时频率变化非常明显。



(a) 完好信号



(b) 受损伤25%信号

图3 完好和受损伤25%信号的Hilbert 谱图

为综合考虑全部时间历程上的相对变化量,表3给出了式(7)中前两阶瞬时频率的相对变化量 Δ_1 和 Δ_2 在上述9种损伤下的标准差 $SD_i(i=1,2)$,如图4所示。可以看出,随着损伤程度由 d_1 逐渐增加到 d_9 , Δ_1 和 Δ_2 的标准差数值越来越大,这说明提取的损伤特征量对复杂结构小损伤非常敏感。

表3 各种损伤状况下 Δ_1 和 Δ_2 的标准差 SD_i %

i	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
1	4.76	5.56	7.30	7.57	7.60	7.65	7.71	9.08	9.11
2	0.23	0.38	0.62	0.82	0.96	1.08	1.28	1.49	1.64

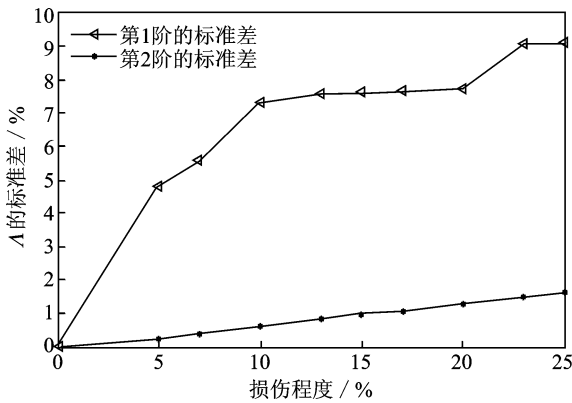


图4 Δ_1 和 Δ_2 的标准差

4 结束语

提出一种基于改进EMD的结构损伤特征量提取方法,将该方法应用于机翼盒段模型,提取出的损伤特征量对复杂结构小损伤非常敏感。

参 考 文 献

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998 (454): 903-995.
- [2] 黄大吉,赵进平,苏纪兰. 希尔伯特-黄变换的端点延拓[J]. 海洋学报,2003,25(1):1-11.
Huang Daji, Zhao Jinping, Su Jilan. Practical implementation of the Hilbert-Huang transform algorithm [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(1):1-11. (in Chinese)

- [3] 于德介,程军圣,杨宇. 一种基于SVM和EMD的齿轮故障诊断方法[J]. 机械工程学报,2005,41(1):140-144.
Yu Dejie, Cheng Junsheng, Yang Yu. Fault diagnosis approach for gears based on EMD and SVM [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1):140-144. (in Chinese)
- [4] 杨建文,贾民平. 希尔伯特-黄谱的端点效应分析及处理方法研究[J]. 振动工程学报,2006,19(2):283-288.
Yang Jianwen, Jia Minping. Study on processing method and analysis of end problem of Hilbert-Huang spectrum [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(2):283-288. (in Chinese)
- [5] Qin S R, Zhong Y M. A new envelope algorithm of Hilbert-Huang transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006 (20):1941-1952.
- [6] Wu Fangji, Qu Liangsheng. An improved method for restraining the end effect in empirical mode decomposition and its applications to the fault diagnosis of large rotating machinery [J]. Journal Sound and Vibration, 2008 (314):586-602.
- [7] 李兵,张培林,任国全,等. 运用EMD和GA-SVM的齿轮故障特征提取与选择[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 445-448.
Li Bing, Zhang Peilin, Ren Guoquan, et al. Gear fault diagnosis using empirical mode decomposition, genetic algorithm and support vector machine [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2009, 29(4): 445-448. (in Chinese)
- [8] 陈换过,张磊涛,李剑敏,等. 解决EMD端点效应问题的方法研究[J/OL]. [2009-12-04]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/200912-152>.



第一作者简介:陈换过,女,1977年8月生,副教授。主要研究方向为结构损伤检测、结构健康监控和结构动力学分析。曾发表《Early damage detection in composite wingbox structures using HHT and GA》(《International Journal of Structural Health Monitoring》2007, Vol. 6, No. 4)等论文。

E-mail: chen8025@126.com