

一种基于经验模式分解的结构损伤预警方法*

操礼林^{1,2}, 李爱群², 邓扬², 丁幼亮²

(1. 江苏大学土木工程系, 镇江, 212013) (2. 东南大学土木工程学院, 南京, 210096)

摘要 提出了一种基于经验模式分解的结构损伤预警方法。首先,将结构反应信号用经验模式分解方法分解成一系列固有模态函数;然后,利用固有模态函数在结构损伤前后的能量分布变化来表征结构因损伤引起的动力特性改变;最后,计算结构的损伤预警指标。应用该方法对健康监测 Benchmark 模型结构进行分析,采集模型在锤击激励下结构损伤前后的动力响应,计算了结构损伤预警参数及其损伤预警指标。试验数据分析表明,基于经验模式分解的结构损伤预警指标具有良好的损伤预警能力,能够准确地判断结构初期损伤的发生。

关键词 经验模式分解;固有模态函数;损伤预警;Benchmark 结构

中图分类号 TU311.4;TH113

引言

在实际工程中,损伤引起的结构固有动力特性变化十分微小,且又容易受到测试噪声的影响,不适于作为表征结构损伤状态的参数;因此,寻找具有良好损伤敏感性和噪声鲁棒性的结构动力特性指标,并在此基础上建立结构损伤预警与损伤识别方法是结构损伤诊断的重要研究方向^[1-2]。

HHT 技术是由 Norden E. Huang^[3]提出的一种数据处理方法,适合处理非线性、非平稳信号,由经验模式分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)及 Hilbert 变换两部分组成。EMD 方法的基本思想是将时间序列通过经验模式分解成有限个具有不同时间尺度的固有模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)之和。随着科技的不断发展,EMD 技术在结构模态参数识别以及损伤诊断领域得到了一定的应用^[4-7]。

笔者基于 EMD 将结构动力响应分解为不同时间尺度的频带分量,将结构响应信号在各个频带能量的分布变化与结构由于损伤引起的动力特性的变化联系起来,采用各个 IMF 特征分量的能量比作为结构损伤预警参数,提出了基于 EMD 的结构损伤预警指标。在此基础上开展了 Benchmark 结构损伤预警的试验研究,采集模型在环境激励下结构损伤

前后的动力响应,考察了基于 EMD 的结构损伤预警指标的实际预警效果。

1 基于 EMD 的损伤预警方法

1.1 EMD 的基本原理

经验模式分解方法将待分解信号相邻峰值点间的时延定义为信号的时间尺度,据此将信号分解成若干包含不同特征时间尺度的固有模态函数之和。通过分解得到了一系列包含从高到低不同频率成分的 IMF 分量。EMD 的具体步骤^[3]如下:

1) 找出信号 $x(t)$ 的所有极大点和极小点,用三次样条曲线分别拟合为原数据序列的上包络线 $U(t)$ 和下包络线 $L(t)$,上、下包络线的均值为平均包络线 $m_1(t)$,将原数据序列 $x(t)$ 减去 $m_1(t)$ 可得到一个去掉低频的新数据序列 $h_1(t)$,如果 $h_1(t)$ 满足下列两个条件:a. 整个信号持续时间内,极值点数目和过零点数目必须相等或至多相差一点;b. 在任意点,由局部极大点和极小点构成的两条包络线的平均值为零,则为第 1 个 IMF。如果 $h_1(t)$ 不满足上述条件,那么将 $h_1(t)$ 作为 $x(t)$, $h_1(t)$ 的平均包络线记为 $m_{11}(t)$,将 $h_1(t)$ 减去 $m_{11}(t)$,又可得一新数据序列 $h_{11}(t)$,重复以上筛分过程 m 次,直到所得的 $h_{1m}(t)$ 满足 IMF 所必须的条件,此时 $h_{1m}(t)$ 就是第 1 个 IMF,记为 $c_1(t)$,它表示信号数据中的最高频成分。

* 国家杰出青年基金资助项目(编号:50725828);国家自然科学基金资助项目(编号:50808041)

收稿日期:2011-05-29;修改稿收到日期:2011-07-28

2) 用 $x(t)$ 减去 $c_1(t)$ 得到一个去掉高频成分的新数据序列 $r_1(t)$, 将 $r_1(t)$ 看作是原数据序列, 重复步骤 1, 可得到一系列 $c_j(t)$ 和最后一个不可分解的序列 $r_n(t)$, 称为残余项, 它代表 $x(t)$ 的均值或趋势项。由此, 原数据序列 $x(t)$ 可表示为一组 IMF 分量和一个残余项的和

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

此外, 为了避免筛分过程中 IMF 存在不同模式混叠的现象, 可以在分解过程中人为地指定一个界限频率, 使得筛选得到的 IMF 中不包含低于此界限频率的成分^[8]。

从 EMD 的具体步骤可以看出, EMD 将信号分解为不同时间尺度的分量, 这是信号频带的一种从高到低的自动划分, 且随着信号的变化而变化。因此通过研究各个不同时间尺度的固有模态函数能量的变化, 就可以获取各个频带内所隐含的信号异常信息。

1.2 结构损伤预警方法

对于工程结构而言, 当结构系统的激励力一定时, 由于结构损伤所引起的结构动力特性的变化, 必然会引起结构响应 $x(t)$ 的变化, 从而引起结构动力响应 $x(t)$ 的能量在各个 IMF 分量中的重新分布。据此, 考察能量在各 IMF 分量中的分布就可以发现结构由于损伤而产生的动力特性的变化, 从而实现结构损伤预警的目的。基于以上分析, 笔者提出了一种基于 EMD 的结构损伤预警指标。损伤预警指标具体构建步骤如下:

1) 采用 EMD 将结构动力响应 $x(t)$ 分解为 n 个独立的 IMF 分量 $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$, 计算各个 IMF 分量的总能量 E_i

$$E_i = \int_{-\infty}^{\infty} |c_i(t)|^2 dt \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

2) 在确定了各个 IMF 的能量之后, 采用各个 IMF 分量的能量比 (energy ratio, 简称 ER) 作为结构损伤预警参数向量

$$ER_i = E_{in} / \sum_{i=1}^n E_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

通过能量比向量的变化 (energy ratio change, 简称 ERC) 作为结构损伤特征向量来判断结构的损伤情况

$$ERC_i = |ER_{hi} - ER_{di}| \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

其中: ERC_i 为第 i 个 IMF 分量的能量比变化; ER_{hi} 和 ER_{di} 分别为结构在健康和损伤状态下的第 i 个

IMF 能量比。

可见, 对于需要监测的结构在投入使用前有必要进行测试, 计算健康状态下的结构损伤预警参数 ER_{hi} , 以此作为结构损伤诊断的基础。

3) 在定义了结构损伤特征向量 **ERC** 的基础上, 笔者定义了基于 IMF 能量分布特征的结构损伤预警指标——能量比偏差 (energy ratio change deviation, 简称 ERCD)

$$ERCD = \sqrt{\sum_{i=1}^n ERCD_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (ERC_i - \overline{ERC_i})^2} \quad (5)$$

从上述基于 EMD 的结构损伤预警指标的构建步骤可以发现, 通过将结构响应信号在各个 IMF 分量上能量的重分布与结构由于损伤引起的动力特性的变化联系起来, 采用很少传感器的动力响应数据就可以捕捉到结构损伤的发生信息。下面将对由国际结构控制协会与美国土木工程学会提出的结构健康监测 Benchmark 模型的试验数据进行分析, 考察结构损伤预警参数 **ER** 及预警指标 ERCD 的损伤预警能力。

2 Benchmark 模型试验验证

2.1 Benchmark 模型试验

建立各种 Benchmark 标准验证模型, 为不同研究者研究同一科学问题提供统一和标准的研究平台, 成为土木工程研究领域内的一种有效方法和手段^[9-11]。结构健康监测的 Benchmark 问题研究分为两个阶段: 第 1 阶段是基于一个实际结构的有限元分析模型开展研究, 目标是如何生成结构健康监测研究所需要的数据 (该实际结构是加拿大哥伦比亚大学地震工程研究实验室的一个 4 层 2×2 跨、 $1/3$ 缩尺的钢框架模型, 如图 1 所示); 第 2 阶段的损伤试验分两次进行, 主要是通过移除支撑或松动连接螺栓来模拟结构的损伤, 获得不同结构损伤情况下的试验数据, 分析试验数据由网址 <http://cive.seas.wustl.edu/wusceel/asce.shm> 下载得到。

损伤预警试验研究采用 2002 年 8 月 4 日~8 月 7 日进行的 Benchmark 结构损伤试验锤击激励的数据。试验中测量了完好结构和 8 种损伤结构的激励和结构动力响应。表 1 列出了 Benchmark 结构的 9 种试验工况。试验时的激励形式有 3 种: a. 锤击激励; b. 采用激振器施加白噪声和正弦激励; c. 环境激励。不同的荷载激励采用不同的采样频率: 锤击激励采样频率为 1 000 Hz; 其他激励为 200 Hz。

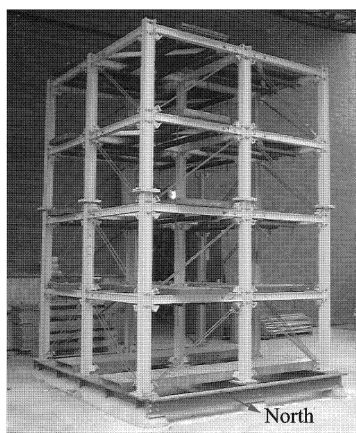


图1 Benchmark 钢框架试验模型

笔者采用锤击激励的试验数据进行了完好工况1和损伤工况4,5的结构损伤预警分析。从表1可知,工况4,5在8个损伤工况中损伤程度最小,通过对工况4,5的试验数据进行分析,可以较好地考察基于EMD的损伤预警指标的预警能力。

表1 Benchmark 结构的试验工况

试验工况	工况描述
1	完好结构
2	去除东面所有支撑
3	去除各层东南角一跨的支撑
4	去除第1层和第4层东南角一跨的支撑
5	去除第1层东南角一跨的支撑
6	去除东面所有支撑以及第2层北面支撑
7	去除所有支撑
8	工况7+放松各层东面北侧跨的梁两端螺栓
9	工况7+放松第1、第2层东面北侧跨的梁两端螺栓

2.2 试验数据的损伤预警分析

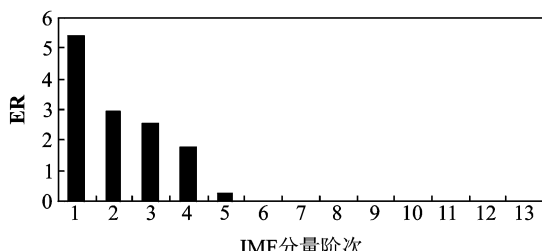
本节计算了工况1,4和5中传感器9和14的结构损伤预警参数 ER ,考察了 ER 的实际预警效果(所选取传感器的布置情况见表2)。笔者提出从两个方面考察预警参数 ER 的预警效果:a.一致性,即预警参数在锤击激励作用下的重复性,在两次激励作用下各IMF分量的能量比 ER 应基本接近;b.敏感性,即IMF分量的能量比 ER 的变化能够判断结构中微小损伤的发生。

限于篇幅,图2和图3仅给出了 y 向激励下完好工况1的9号传感器和损伤工况5的9号传感器的损伤预警参数向量 ER ,从每个传感器的数据中都抽取

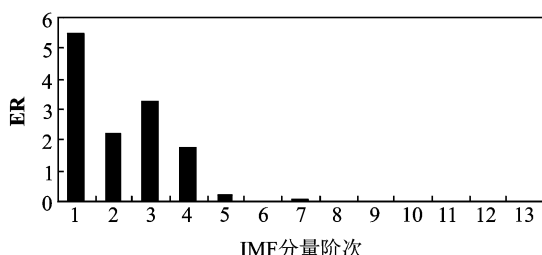
表2 选取的传感器的布置情况

传感器编号	传感器布置情况
9	第2层东侧测试 y 方向振动(南北向)
14	第4层中部测试 x 方向振动(东西向)

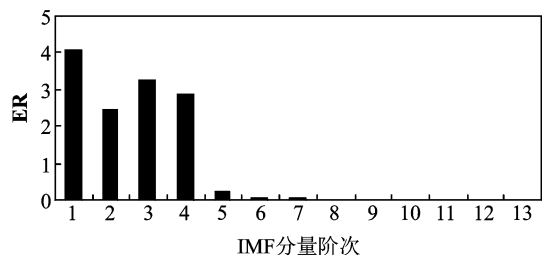
了两次锤击激励的结构响应样本进行计算。从损伤预警参数向量的分布情况可以看出,EMD分解后的结构动力响应的能量主要集中在少数高频的固有模态函数。图2和图3中两次锤击激励的 ER 的分布情况还表明, ER 对试验锤击激励具有良好的一致性,在两次锤击激励下 ER 基本接近。两次激励计算得到的预警参数向量样本并不完全一致,存在小幅变化,这表明锤击激励会对 ER 的计算值产生一定的影响。进一步对比图2、图3可以发现,损伤前后各个IMF分量的能量比 ER_i 都发生了较为明显的增大或减小的变化,说明损伤预警参数向量 ER 可以较好地发现试验模型所模拟的损伤程度最小的工况5,具有较强的损伤敏感性。



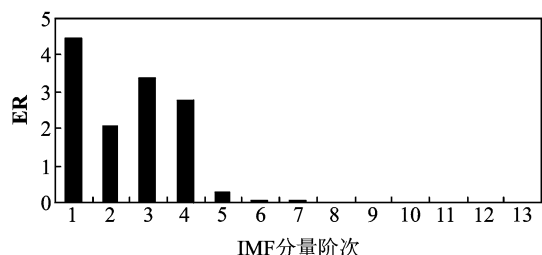
(a) 样本1



(b) 样本2

图2 y 向激励下完好工况1的9号传感器的损伤预警参数

(a) 样本1



(b) 样本2

图3 y 向激励下损伤工况5的9号传感器的损伤预警参数

2.3 讨论

在分析了预警参数 ER 的一致性与损伤敏感性的基础上,为了进一步考察锤击激励下基于 EMD 分解的损伤预警指标 ERCD 的损伤预警效果,首先采用以下步骤计算了表 3 中各个测试工况的损伤预警指标:a. 计算完好工况 1 在两次锤击激励下的损伤预警参数向量 ER 及其平均值,在此基础上计算两次激励的 ER 相对其平均值的损伤预警指标 ERCD;b. 分别计算损伤工况 4,5 在两次锤击激励下的 ER 及其平均值,在此基础上计算两次激励的 ER 及其平均值相对完好工况 1 的 ER 平均值的损伤预警指标 ERCD。

表 3 工况 1,4 和 5 的损伤预警指标 ERCD

工况	损伤指标	传感器 9		传感器 14	
		y 向激励	x 向激励	y 向激励	x 向激励
1	样本 1	0.453 2	0.246 3	0.165 3	0.062 2
	样本 2	0.453 2	0.246 3	0.165 3	0.062 2
	平均指标	——	——	——	——
4	样本 1	2.037 0	1.753 5	1.993 7	4.791 9
	样本 2	2.468 5	1.648 6	2.529 8	3.710 0
	平均指标	2.124 2	1.699 1	2.184 6	4.242 4
5	样本 1	1.343 2	1.207 8	1.457 1	1.089 5
	样本 2	1.606 1	0.574 9	1.139 0	1.110 2
	平均指标	1.461 7	0.881 8	1.152 0	1.099 8

2.3.1 指标的损伤预警适用性

结构固有动力特性(例如模态频率)对局部损伤的敏感性较弱,同时由于测试过程中还受到噪声的干扰,工程中结构的固有动力特性不适于作为结构损伤预警指标,因此有必要构建一种适用性更强的指标来达到结构损伤预警的目的。笔者对比分析了损伤预警指标 ERCD 与模态频率的损伤预警适用性。

表 4 给出了基于自然激励技术和特征系统实现算法识别得到的 Benchmark 试验模型的模态频率结果^[9],可以看出结构损伤对模态频率的影响较小,说明结构固有动力特性对结构局部损伤的敏感性较弱。从表 3 可以看出,只需比较损伤前后预警指标 ERCD 的变化即能够有效地判断损伤的发生。进一步观察表 3,以 14 号传感器受 x 向激励为例,预警指标由完好工况的 0.062 2 变化为工况 5 及工况 4 的 1.099 8 和 4.242 4,可知工况 4 的损伤程度要大于工况 5,这说明了预警指标 ERCD 不仅能够判断结构损伤的发生,同时还能够较为准确地表征结构的损伤程度。对比分析表明,损伤预警指标 ERCD 对损伤所引起的结构动力特性的细微变化具有“放大”的功能,相比模态频率具有更强的结构损伤预警的适用性。

表 4 锤击激励下 Benchmark 结构模态频率识别值 Hz

频率阶次	振型描述	完好	损伤	损伤	
		工况 1	工况 5	工况 4	相对变化/%
f_1	E-W	7.45	7.55	1.34	7.56
f_2	N-S	7.66	7.36	3.92	7.25
f_3	扭转	14.45	13.99	3.18	13.95
f_4	E-W	19.83	19.84	0.05	20.03
f_5	N-S	20.88	20.84	0.19	19.66
f_6	扭转	22.52	22.58	0.27	22.42

2.3.2 激励对预警效果的影响

观察表 3 所列的数值可以发现锤击激励对损伤预警指标 ERCD 存在一定的影响,同一传感器、同一工况的两次激励的损伤预警指标存在着一定的变化。例如传感器 9 的工况 5 的两次激励指标分别为 1.207 8 和 0.574 9,变化幅度偏大,但是仍然能够清晰地与工况 1 的指标 0.246 3 分离,并不妨碍预警指标 ERCD 对结构损伤是否发生进行判断。以上分析表明,激励会对损伤预警参数向量 ER 产生一定的影响,继而影响预警指标 ERCD 的实际预警效果。

2.3.3 传感器布设位置对预警效果的影响

以工况 4 为例,14 号传感器在 x 向激励下的预警效果要优于 y 向激励下的预警效果,这是因为 14 号传感器所记录的是模型的 x 向振动响应,因此相对 y 向激励而言,其在 x 向激励下所记录的结构动力响应要包含更为丰富的结构动力特性信息。但同时需要说明,9 号和 14 号传感器在 x 和 y 两个激励方向上都取得了较好的预警效果,这是因为 Benchmark 试验模型是一个三维空间框架模型,当框架模型受到某一方向激励时,在另一正交方向由于结构整体作用也会产生一定的振动,通过对这一正交方向的振动响应进行分析亦会取得较好的损伤预警效果。

因此,对于 Benchmark 框架结构而言,基于 EMD 的结构损伤预警指标对传感器布置具有较好的鲁棒性,结构三维空间整体作用使得传感器的布置可以不考虑激励方向亦有良好的预警效果。

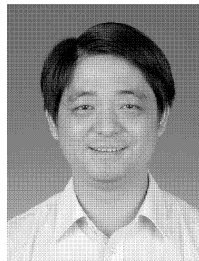
3 结束语

笔者基于 EMD 自适应地将结构动力响应分解为不同时间尺度的 IMF 分量,采用各个 IMF 特征分量的能量比作为结构损伤预警参数,在此基础上提出了一种基于 EMD 的结构损伤预警指标,开展了 Benchmark 结构损伤预警试验研究。Benchmark 模型的锤击激励试验数据较好地满足了基于 EMD 的

结构损伤预警方法研究的要求。试验数据分析表明：
a. 结构损伤预警参数ER在两次激励作用下具有良好的
一致性，相对模态频率，结构损伤预警指标ER-
CD具有更好的损伤预警适用性，可以准确地判断
结构早期损伤的发生；b. 预警指标ERCD不仅表征
了结构动力特性的变化，同时也要受到激励的影响，
从而对预警效果产生一定的影响；c. 由于试验模型
三维空间整体作用，使得损伤预警指标ERCD对传
感器布置具有良好的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 丁幼亮, 李爱群, 缪长青. 基于小波包能量谱的结构损伤预警方法研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8):42-48.
Ding Youliang, Li Aiqun, Miao Changqing. Investigation on the structural damage alaming method based on wavelet packet energy spectrum [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8):42-48. (in Chinese)
- [2] 何伟, 陈淮, 王博. 运用改进残余力向量法的结构损伤识别研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4):379-382.
He Wei, Chen Huai, Wang Bo. Structural damage identification by using improved residual force vector [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 379-382. (in Chinese)
- [3] 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 [J]. Proceedings of the Royal Society A, Lond, 1998, 454:903-995.
- [4] Chen J, Xu Y L, Zhang R C. Modal parameter identification of Tsing Ma suspension bridge under typhoon victor; EMD-HT method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(10): 805-827.
- [5] 王学敏, 黄方林, 刘建军. 大型桥梁模态参数识别的一种方法[J]. 工程力学, 2007, 24(2):110-114.
Wang Xuemin, Huang Fanglin, Liu Jianjun. A method of modal parameter identification for large bridges [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 110-114. (in Chinese)
- [6] 杨智春, 于哲峰, 孙浩. 一种基于经验模态分解的结构微小损伤检测方法 [J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(4):422-425.
Yang Zhichun, Yu Zhefeng, Sun Hao. A new time domain approach to detecting tiny damage of structure based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(4):422-425. (in Chinese)
- [7] Yang J N, Lei Y, Lin S, et al. Hilbert-Huang based approach for structural damage detection [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(1):85-95.
- [8] Yang J N, Lei Y, Lin S, et al. Identification of natural frequencies and dampings of in situ tall buildings using ambient wind vibration data [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(5):570-577.
- [9] 钱稼茹, 徐龙河, 纪晓东, 等. Benchmark 模型结构两阶段损伤诊断试验分析[J]. 工程力学, 2006, 23(9):89-92.
Qian Jiaru, Xu Longhe, Ji Xiaodong, et al. Experimental analysis of two-stage damage diagnosis on a Benchmark models structure [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9):89-92. (in Chinese)
- [10] Johnson E A, Lam H F, Katafygiotis L S, et al. Phase I IASC-ASCE structural health monitoring Benchmark problem using simulated data [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(1):3-15.
- [11] Sharifi A, Banan M R. Energy index method: technique for identification of structural damages [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2008, 134(6):1061-1064.



第一作者简介: 操礼林, 男, 1979年11月生, 博士生、讲师。主要研究方向为工程结构抗震、抗风与振动控制。曾发表《人群荷载下大型火车站房大跨楼盖振动舒适度控制研究》《土木工程学报》2010年第43卷增刊等论文。
E-mail: cll@ujs.edu.cn