

高军, 杜修力, 李立云, 2009. 刚度突变 MDOF 体系动力损伤识别. 4 (3): 321—327.

# 刚度突变 MDOF 体系动力损伤识别<sup>1</sup>

高 军 杜修力 李立云

(北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要** 在结构损伤识别中, 损伤发生的时间、损伤定位及损伤程度是三个核心问题。本文利用 HHT 方法结合经验遗传-单纯形算法分析刚度突变 MDOF 体系在地震波输入下结构的动力损伤识别问题, 并以刚度突变 4DOF 结构体系在 EL Centro 地震波输入下结构动力特性识别为例进行了讨论。通过 Fourier 变换得到了结构损伤后的自振频率, 利用 HHT 方法识别出结构损伤发生的时间, 在此基础上运用经验遗传-单纯形算法识别出结构损伤后的刚度, 从而确定了损伤的程度。

**关键词:** Fourier 变换 HHT 方法 经验遗传-单纯形算法 刚度突变 MDOF 体系 损伤识别

## 引言

结构损伤识别是通过对结构关键性能指标的测试和分析, 判断结构是否受到损伤(李明等, 2008)。在结构损伤识别中, 损伤发生的时间、损伤定位及损伤程度是三个核心的问题。动载作用下, 结构动力响应时程中蕴含了丰富的结构动力特性信息(如结构的固有频率、阻尼系数和振型等)。按照一定的方法将结构动力响应时程中与损伤相关的非平稳特性予以量化, 藉此可以获知损伤引起的结构自身特性变化方面的信息。迄今, 许多方法已被国内外学者用来进行结构损伤识别, 经验遗传-单纯形算法(姜丽萍, 2006)和 Hilbert-Huang 变换(HHT)(Huang 等, 1998; Yang 等, 2002)是其中的两种方法。经验遗传-单纯形算法是在经验遗传算法(杜修力等, 2006)寻优过程中, 引入局部搜索效率高的单纯形算法来加快全局寻优速度。该算法结合遗传算法、神经网络和单纯形算法的优点, 利用神经网络(BP 网络)预测每一代的适应度函数值作为指导搜索方向的依据, 从而大大减少正演计算次数并提高运行速度。在这种混合方法中, 经验遗传算法把握大局, 确保混合算法能够找到全局最优解, 单纯形法则能加快局部寻优过程, 又能在一定程度上解决遗传算法的早熟问题。基于此种方法, 姜丽萍和杜修力(2007)建立了结构物理参数的识别方法。Hilbert-Huang 变换(HHT)是一种全新的数据处理方法, 由经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法及 Hilbert 变换两部分组成, 其核心是 EMD 分解, 依据数据本身的时间尺度特征来进行分解, 比 Fourier 及小波变换更适用于处理非平稳和非线性数据。HHT 方法一经提出便被广泛应用于各个工程

<sup>1</sup> 基金项目 国家自然科学基金重点项目(50838001); 北京市教委科技创新平台(4700001401509)

[收稿日期] 2009-04-30

[作者简介] 高军, 女, 生于 1981 年。硕士。主要从事结构损伤识别领域的研究。E-mail: gaojunwxws@163.com

领域, 在土木工程结构的系统识别与损伤诊断方面也得到了一定的应用 (Huang 等, 1998; Yang 等, 2002), 同时何立志 (2006) 又将其应用于时变结构的损伤识别和损伤前后固有频率的确定。

经验遗传-单纯形算法用于识别结构的刚度及损伤发生的位置效果很好, 但是却很难识别损伤发生的时间, 而 HHT 能很好地识别结构损伤发生的时间。将这两种方法进行结合, 可以达到很好的效果。应用 HHT 结合经验遗传-单纯形算法, 本文建立了地震荷载作用下刚度突变 MDOF 体系动力损伤的识别方法。

## 1 经验遗传-单纯形算法

经验遗传-单纯形算法是一种全新的高效全局数值优化方法, 它包含了遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 和单纯形算法 (Simplex Method)。该算法针对经验遗传算法存在的早熟和进化缓慢的问题, 将单纯形算法引入以加速这种混合算法的局部寻优过程 (杜修力等, 2006)。其基本思想为: 如果优化问题共有  $M$  个待识别参数, 遗传算法的种群规模为  $N_p$ , 则混合算法的要求为  $N_p > M + 1$ 。当混合算法判断优化过程中出现早熟现象时, 程序会从规模为  $N_p$  的种群中随机抽取  $M + 1$  个个体作为单纯形法的开始, 单纯形在计算过程中有可能找到全局最优解或更优模型, 从而完成计算。然后把单纯形产生的新模型回代到遗传算法种群中, 并替换掉被单纯形随机抽取的模型, 继续遗传算法操作。如此交替使用遗传算法和单纯形, 直到找到全局最优解。在该混合算法中, 遗传算法的早熟判断标准为: 种群的最优个体的适应度连续几代不发生变化; 单纯形算法则以满足迭代收敛终止精度为迭代终止条件。

## 2 Hilbert-Huang 变换

Hilber-Huang 变换中的 EMD 分解是一种被称为筛分的过程, 对数据逐步进行分解, 最后得到一系列本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)。具体处理方法为: 给定实信号  $x(t)$ , 找出信号  $x(t)$  所有的极大值点, 用三次样条函数拟合出原始信号的上包络线; 同理, 找出信号所有极小值点拟合出下包络线。计算上、下包络线的均值  $m_1(t)$ , 将原信号  $x(t)$  减去  $m_1(t)$  后即可得到一个新的信号  $h_1(t)$ , 这个过程称为筛分。一般说来,  $h_1(t)$  不是一个 IMF 分量, IMF 分量必须满足下面两个条件: ①在整个信号长度上, 极值点和过零点的数目必须相等或者至多只相差一个; ②在任意时刻, 由极大值点定义的上包络线和由极小值点定义的下包络线的平均值为零, 即信号的上、下包络线关于时间轴对称。为此需要重复进行上述筛分过程  $k$  次, 直到  $h_1(t)$  符合 IMF 的定义要求, 这样就得到了第 1 个 IMF 分量  $c_1(t) = h_1(t)$ , 它代表信号  $x(t)$  中最高频率的分量。将  $c_1(t)$  从原始数列中分离出来:

$$x(t) - c_1(t) = r_1(t) \quad (1)$$

将余项  $r_1(t)$  作为原始信号重复上述步骤处理, 直到再也没有 IMF 分量筛分出来为止, 这样就可以从原始数据列中分离出  $n$  个 IMF 分量  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$  和一个残量  $r_n(t)$ , 即

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (2)$$

### 3 基本方法

#### 3.1 MDOF 结构体系的动力特性计算模型

结构的动力反应方程为:

$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + [K]U = P(t) \quad (3)$$

式中,  $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为质量、阻尼与刚度矩阵;  $U$ 为位移向量;  $\ddot{U}$ 为加速度向量;  $\dot{U}$ 为速度向量;  $P(t)$ 为激励荷载。

假定结构为线性弹性体系, 在振动过程中各自由度上的质量不变, 结构中某一质点的刚度  $k_i$  在某一时刻  $t_1$  由初始值  $k_1$  突变到  $k_2$ , 系统在地震荷载作用下的动力反应过程采用 Wilson- $\theta$  法, 结构反应过程中采用瑞利比例阻尼的假定, 即将多自由度体系方程中的粘性阻尼矩阵  $[C]$  写成质量阵  $[M]$  和刚度阵  $[K]$  的线性组合形式:

$$[C] = a[M] + b[K] \quad (4)$$

式中,  $a$  和  $b$  的取值由体系的第一、第二振型的频率  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  及阻尼比  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$  来确定:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{2\omega_1\omega_2(\zeta_1\omega_2 - \zeta_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \\ b &= \frac{2(\zeta_2\omega_2 - \zeta_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

#### 3.2 经验遗传-单纯形算法的目标函数

经验遗传-单纯形算法是一种优化算法, 需要通过设定一个目标函数来实现寻找最优值的目的。

设实测的前几阶固有频率为  $\tilde{\omega}_1$ ,  $\tilde{\omega}_2$ ,  $\dots$ ,  $\tilde{\omega}_m$ , 而通过优化算法计算得到的相应为  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\dots$ ,  $\omega_m$ 。其中  $m$  为测试的前几阶振型数。

目标函数定义为:

$$F = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\omega_i - \tilde{\omega}_i}{\omega_i} \right)^2 \quad (6)$$

#### 3.3 结合经验遗传-单纯形算法和 HHT 方法识别 MDOF 结构体系的具体方法

(1) 对结构某一质点输出的绝对加速度作 Fourier 变换, 得到其傅里叶频谱图, 由它可以确定结构损伤后的自振频率;

(2) 对该质点的输出绝对加速度作 HHT 变换, 由该加速度第一本征模态函数的瞬时频率可以确定损伤发生的时间 (张郁山, 2003);

(3) 由所识别到的结构自振频率和结构反应输出的振型向量, 利用经验遗传-单纯形算法来反演结构的刚度, 最后确定结构损伤的程度和位置。

### 4 算例分析

某四层钢筋混凝土结构, 结构的特性参数为: 第一至第四层质量:  $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 2760 \text{kg}$ ; 第一至第四层的刚度:  $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 2.485 \times 10^5 \text{N/m}$ ; 地震波采用 200gal 的 EL Centro 波, 步长为 0.02s, 时长为 40s, 在第 5s 时刻,  $k_1$  刚度变为:  $k'_1 = 0.5 \times k_1 = 1.243 \times 10^5 \text{N/m}$ 。200gal 的 EL Centro 波如图 1 所示, 图 2 为计算得到的四层结构质点的绝对加速度时程曲线。

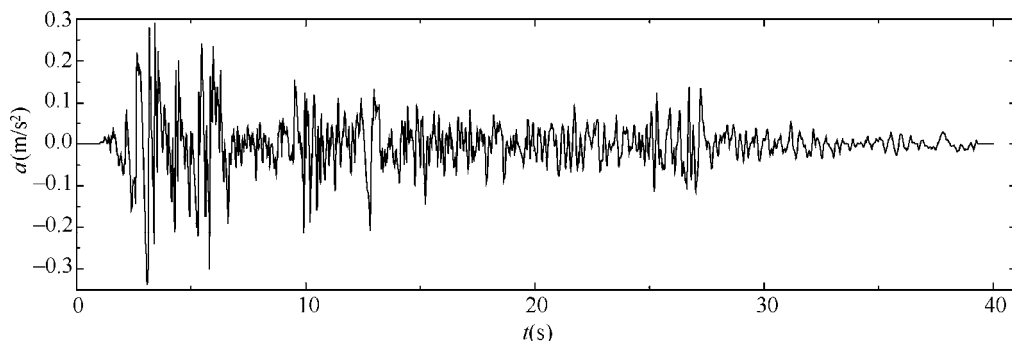


图 1 EL Centro 地震波

Fig.1 EL Centro seismic wave

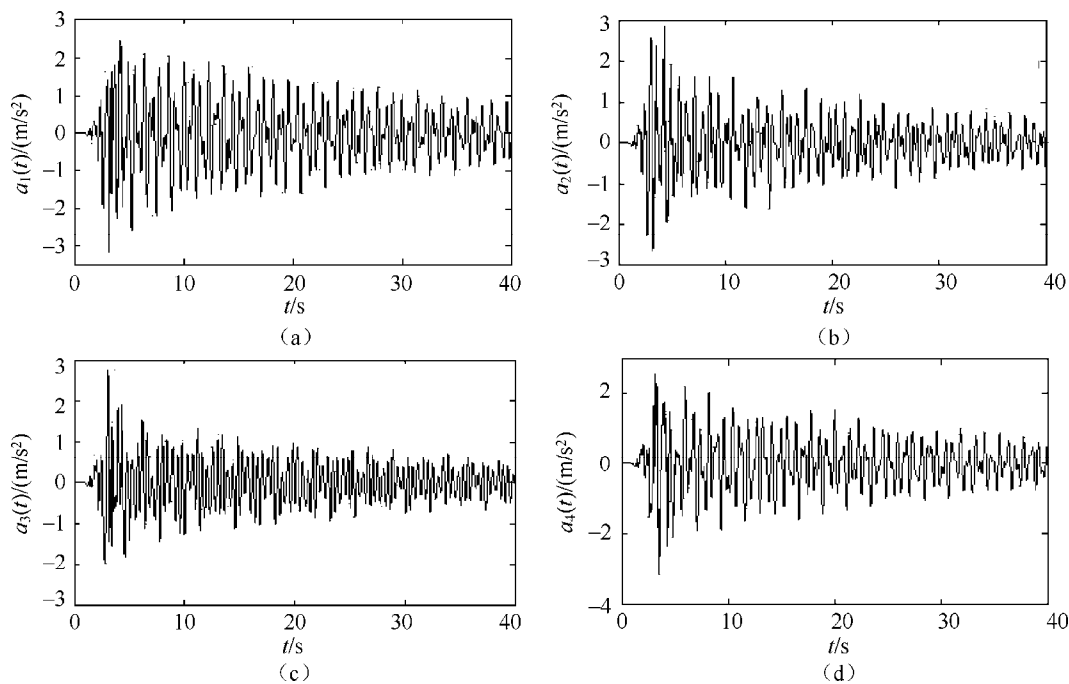


图 2 第一质点到第四质点的绝对加速度时程曲线

Fig.2 The absolute acceleration time-history curves from the first to the fourth particle

将计算所得的第一质点输出绝对加速度  $a_1(t)$  作为观测量, 其 Fourier 谱如图 3 所示。可以看到 4 个峰值, 这 4 个峰值与结构的 4 个自振频率相对应, 自振频率的识别值列于表 1。

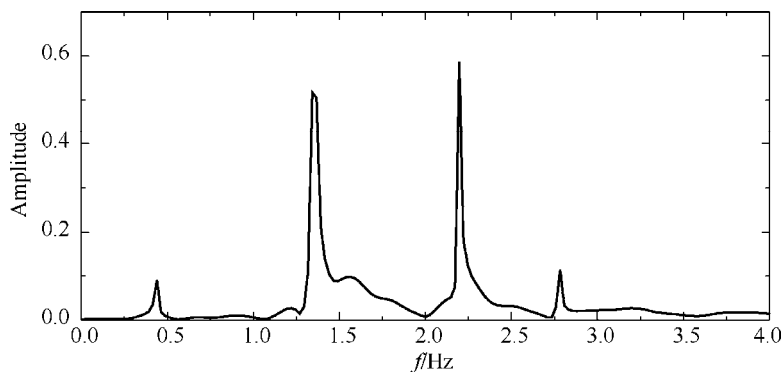
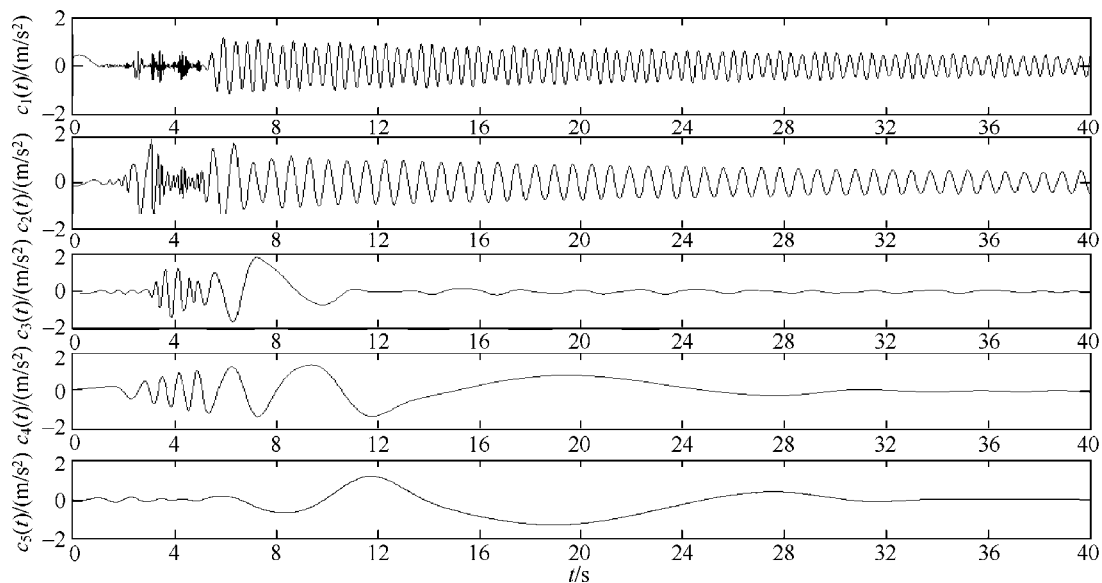
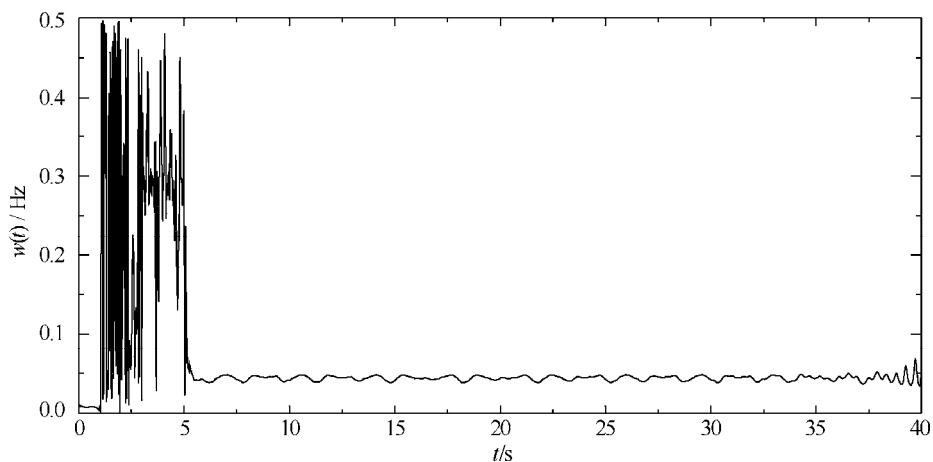
图 3  $a_1(t)$  的 Fourier 谱Fig.3 The Fourier Spectrum of  $a_1(t)$

表 1 刚度突变 4DOF 体系的固有频率识别结果

Table 1 The identification results inherent frequencies of stiffness mutation 4DOF system

固有频率真实值 $\omega$ (Hz)	固有频率识别值 $\omega'$ (Hz)	相对误差 (%)
0.436	0.439	6.88
1.357	1.355	0.15
2.214	2.214	0.00
2.809	2.808	0.04

对  $a_1(t)$  作半周期半对称延拓, EMD 分解后得到的前 4 个 IMF 分量如图 4 所示。第一个 IMF 分量为体系的稳态反应部分, 其它 IMF 分量为体系的瞬态反应部分。对  $c_1(t)$  作 Hilbert 变换得其瞬时频率如图 5 所示, 由图 5 可以清楚地看到结构稳态反应的瞬时频率在第 5s 时发生突变, 表示结构产生损伤, 故损伤发生时间得以确定。

图 4  $a_1(t)$  的前 5 个 IMF 分量Fig.4 The first five IMF of  $a_1(t)$ 图 5  $c_1(t)$  的瞬时频率Fig.5 Instantaneous frequency of  $c_1(t)$

结构损伤后的自振频率及损伤发生的时间确定后,利用经验遗传-单纯形算法来反演结构的刚度,该优化算法的辨识对象为每层的侧向刚度系数,对每个刚度,其取值范围确定为 $[1 \times 10^4, 2 \times 10^6]$ 。基本参数取值为:种群规模  $N_p=70$ ;遗传代数  $M=1000$ ;每个遗传代中被选择进行遗传操作的个体为 28;7 个选择和变异操作遗传算子数为 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4;不均匀变异系数  $b=2$ ;简单杂交系数  $\rho=10$ 。测试的终止条件:收敛精度为  $1.0E-8$ 。

辨识结果如表 2 所示,并与何立志(2006)所用的牛顿迭代法进行比较。

表 2 刚度突变 4DOF 体系刚度识别结果

Table 2 The identification results stiffness of stiffness mutation 4DOF system

质点真实刚度值 $k_i (\times 10^5 \text{N/m})$	经验遗传-单纯形算法刚度识别值 $k'_i (\times 10^5 \text{N/m})$		牛顿迭代法(何立志, 2006)刚度识别值 $k'_i (\times 10^5 \text{N/m})$			
	初值范围 $[1 \times 10^4, 2 \times 10^6]$	相对误差 (%)	迭代初值 $1 \times 10^5$	相对误差 (%)	迭代初值 $2 \times 10^5$	相对误差 (%)
1.243	1.227	1.3	1.227	1.3	1.380	11.0
2.485	2.486	0.04	2.486	0.04	2.002	19.4
2.485	2.487	0.08	2.487	0.08	2.051	17.5
2.485	2.490	0.20	2.490	0.20	3.332	34.1

从表 2 可以看到,虽然经验遗传-单纯形的初值选择范围为真实值的 10 倍,但其识别的刚度值与真实值很接近,误差很小,说明该算法的鲁棒性很好,识别结果受初值影响很小。而牛顿迭代法结果则受到初始值选择影响很大,若迭代初值选为  $1 \times 10^5$ ,那么算法的迭代最终结果很好;若迭代初值选为  $2 \times 10^5$ ,那么算法的最终迭代结果跟真实值相差很大。这说明牛顿迭代算法不稳定,结果精度受初值的选择影响很大。

## 5 结束语

本文给出了基于 HHT 方法和经验遗传-单纯形算法识别刚度突变 MDOF 体系在地震荷载作用下的结构动力特性方法,并以刚度突变 4DOF 结构体系为例进行分析,解决了损伤识别中三个核心问题:损伤发生的时间,损伤的位置及损伤的程度,同时进一步证明了经验遗传-单纯形算法的鲁棒性。

## 参考文献

- 杜修力, 韩玲, 姜丽萍, 2006. 一种高效的全局优化方法: 经验遗传算法. 北京工业大学学报, **32** (11): 992—995.
- 何立志, 2006. 希尔伯特-黄变换 (HHT) 及其在结构损伤识别中的应用. 北京工业大学, 硕士学位论文.
- 姜丽萍, 杜修力, 2007. 基于经验遗传-单纯形算法和结构模态参数识别结构物理参数的方法. 地震工程与工程振动, **27** (4): 116—121.
- 姜丽萍, 2006. 经验遗传-单纯形算法及其在结构损伤识别中的应用. 北京工业大学, 硕士学位论文.
- 李明, 郝健, 周桃玉, 2008. 土木工程健康监测研究进展. 交通科技, 6 期: 26—29.
- 张郁山, 2003. 希尔伯特-黄变换 (HHT) 与地震动时程的希尔伯特谱. 中国地震局地球物理研究所, 博士学位论文.

- Huang N.E., Shen Z., Long S.R. et al., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. Lond, **454**: 903—995.
- Yang J.N., Lin S.L., Pan S.W., 2002. Damage identification of structures using Hilbert-Huang spectral analysis. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, **2** (5): 1—8.

## The Dynamic Damage Identification of Stiffness Mutation MDOF System

Gao Jun, Du Xiuli and Li Liyun

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** The time of injury, damage location, and damage degree are the core factors of damage identification. In this paper, we conduct the comprehensive analysis of the Hilbert-Huang transform and Genetic-Simplex Algorithm in the dynamic damage identification of stiffness mutation MDOF system under the seismic loading, by taking a 4DOF system under the EL Centro seismic loading as an example. With the Fourier transform of the particle's absolute acceleration time-history curves, the system's inherent frequencies can be identified. The moment of stiffness mutation can be identified with Hilbert-Huang transform, and the particle's stiffness can be recognized with empirical Genetic-Simplex algorithm.

**Key words:** Fourier transform; HHT; Empirical genetic-simplex algorithm; Stiffness mutation MDOF system; Damage identification