

文章编号: 1000-4750(2013)10-0199-06

基于改进 EMD-ICA 的结构模态参数识别研究

付 春^{1,2}, 姜绍飞¹

(1. 福州大学土木工程学院, 福建, 福州 350108; 2. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁, 抚顺 113001)

摘 要: 该文针对频带滤波改进经典经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的模态分解能力不足时产生过多虚假模态的问题以及真正本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)的判定问题, 提出了将改进 EMD 与独立分量相结合的信号分析方法。该方法不需要人为预先设定阈值, 能够自动分离出真正的 IMF 分量, 消除改进 EMD 过程中产生的虚假模态, 保障 EMD 分解信号的有效性。然后利用随机减量技术获得各 IMF 的自由模态, 最后利希尔伯特变换和最小二乘拟合技术相结合的方法来识别出结构的频率和阻尼比, 并通过两个数值算例和一个七层钢框架的模态试验予以验证。研究结果表明: 该方法可有效解决改进 EMD 的缺陷, 并成功识别出结构的模态参数。

关键词: 改进 Hilbert-Huang 变换; 模态参数识别; 经验模态分解; 独立分量分析; 随机减量技术

中图分类号: TU317.5; TU311.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.07.0486

STUDY ON THE MODAL PARAMETER IDENTIFICATION BASED ON IMPROVED EMD AND INDEPENDENT COMPONENT ANALYSIS

FU Chun^{1,2}, JIANG Shao-fei¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China)

Abstract: Considering the problem of a false modal and the decision of a real IMF in an improved Empirical Mode Decomposition (EMD) by using frequency-band filters, a signal analysis method based on the combination of improved EMD and Independent Component Analysis (ICA) was proposed. This proposed method does not require setting a threshold in advance, and the real IMF component can be isolated automatically. This method also can eliminated the false modal components, which appeared in the process of an improved EMD, thusly it can make sure the validity of an EMD very well. Afterwards, the random decrement technique (RDT) is used to obtain free vibration modes of each IMF. Finally, Hilbert Transform (HT) and the least square fitting are employed to identify structural modal parameters from these free vibration modes. Finally, the presented method is used to identify modal parameters of two numerical examples and a seven-story steel frame. The results show that the proposed method can resolve the drawbacks of an improved EMD more effectively, and the modal parameters can be identified successfully.

Key words: improved Hilbert-Huang transform; modal parameter identification; empirical mode decomposition; independent component analysis; random decrement technique

EMD 方法自 1998 年正式提出以来, 在各领域已得到了广泛应用^[1-5], 但 EMD 方法存在模态混叠

现象, 这大大限制了它在实际中的应用。模态混叠现象的出现一方面和 EMD 本身的算法有关, 另一

收稿日期: 2012-07-04; 修改日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278127, 50878057); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ14B05)

通讯作者: 姜绍飞(1969—), 男, 山东青岛人, 特聘教授, 博士, 博导, 主要从事结构健康监测与组合结构研究(E-mail: cejsf@163.com).

作者简介: 付 春(1980—), 女, 黑龙江牡丹江人, 讲师, 博士生, 主要从事结构健康监测和损伤检测研究(E-mail: fuchun_521@163.com).

方面也受原始信号频率特征的影响。Huang 曾经提出了中断检测的方法来解决模态混叠的现象,即直接对结果进行观察,如果出现模态混叠则重新分解,这种方法需要人为后验判断。2009 年,Huang 本人的研究小组通过对 EMD 分解白噪声结果统计特性的大量研究,提出通过加噪声辅助分析的总体平均经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)方法^[6],该方法利用高斯白噪声具有频率均匀分布的统计特性,使加入高斯白噪声后的信号在不同尺度上具有连续性,从而有效地解决模式混叠问题。其他学者则提出各种改进 EMD 的方法^[7-10],其中作者提出了一种有效的改进 EMD 方法^[9],其原理为首先利用 FFT 粗略估计频率的大致范围,然后让信号通过指定频带的带通滤波器,利用 IMF 和原信号的相关系数来判定真正的 IMF 来解决模态混叠。但此种方法需要预先人为指定 IMF 判定的阈值,不能够实现 IMF 的自动识别。

近些年,盲源分离在各个领域得到了广泛的应用,其基本思想是将多个观测信号按照统计独立的原则通过优化算法分解为若干个独立成分,从而实现信号的增强和分析^[11-12]。ICA^[11-12](Independent Component Analysis)是盲信号处理的相对成熟的一种方法,主要针对混叠信号进行独立源信号的分离。考虑到任意观测信号经 EMD 分解为若干 IMF(Intrinsic Mode Function)和残余项后,理论上,每个 IMF 都是任意时刻的单一振荡模式,每个时刻都有单一瞬时频率,且各 IMF 分量之间是相互独立的^[10]。因此,可以将改进 EMD 分解以及 IMF 分量的确定与 ICA 中的 FastICA 算法结合起来,这样 EMD 中真正 IMF 的判别就转换成对固有模态混合信号的独立分量的求解过程,且 ICA 所得的分量就是真正的 IMFs。

FastICA 算法^[11-12]是盲信号处理常用的一种算法,它能消除各个输入量之间的互信息和信息冗余,分离出信息之间隐藏的相互独立的成分。由于 FastICA 算法运算过后所得到的输出量具有独立特性,所以输出得到的 IMF 分量也是独立的。基于此,本文研究提出了一种新的基于改进 EMD-ICA 的结构模态参数识别方法,来解决改进 EMD 过程中产生过多虚假模态以及真正 IMF 的判定问题,从而实现真正 IMF 的自动分离,并通过两个数值算例和实验室框架的模态试验验证了所提方法的有效性。

1 盲源分离算法

盲源分离问题就是要从观测信号中恢复出各源信号,即确定分离矩阵 $\mathbf{W}$,以获得源信号的合理估计:

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t) = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (1)$$

对于分离矩阵 $\mathbf{W}$ 及分离信号的求解方法,盲源分离领域目前已发展出两类算法:独立分量分析 ICA 和非线性主分量分析 Nonlinear-PCA。本文中采用基于负熵判据的 ICA 固定点算法。它属于批处理,但是它比纯粹的批处理甚至自适应处理具有更快的收敛速度,因此又被称为“快速 ICA 算法”(FastICA),具体推导过程可参考相关文献^[11-12],文中不再赘述,仅将算法实现步骤归纳如下:

- ① 对混合数据去均值,使其均值为零:

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x} - E(\mathbf{x}) \quad (2)$$

- ② 计算相关矩阵,并做奇异值分解:

$$\mathbf{R} = E(\tilde{\mathbf{x}} \cdot \tilde{\mathbf{x}}^T) = \mathbf{V} \times \mathbf{D} \times \mathbf{V} \quad (3)$$

- ③ 对 $\tilde{\mathbf{x}}$ 去白化得到不相关分量:

$$\mathbf{z} = \mathbf{Q}\mathbf{x} = \mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{V} \quad (4)$$

- ④ 选择初始分离矩阵 $\mathbf{W}$:

- ⑤ 迭代更新分离矩阵:

$$\mathbf{W}(n+1) = E\{\mathbf{z}\mathbf{G}(\mathbf{W}^T(n)\mathbf{z})\} - E\{g(\mathbf{W}^T(n)\mathbf{z})\}\mathbf{W}(n) \quad (5)$$

- ⑥ 分离矩阵标准:

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n+1) / \|\mathbf{W}(n+1)\| \quad (6)$$

- ⑦ 判断是否收敛,若不收敛,则返回步骤⑤。

得到分离矩阵之后,很容易求出源信号的估计为:

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t) = \mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (7)$$

若要估计 n 个独立分量,则需要运行 n 次上述基本 FastICA 算法,过程中每分离出一个独立分量,就要从观测信号中减去这一分量,如此重复,直至所有独立分量完全分离。

2 改进 EMD-ICA 方法

2.1 改进 EMD-ICA 方法原理

在经典 EMD 分解过程中易出现模态混叠现象,即:一个 IMF 中包含 2 个不同时间尺度的信号;或者单一时间尺度的信号被切割成两个 IMF。模态混叠的发生使得后续的 IMF 蕴含的物理意义被破坏。此外 IMF 判据的问题也是值得研究的内容,为

此,在本文的研究中,为了解决模态混叠问题,利用频带滤波来改进经典 EMD^[9],从而可以有效地抑制 EMD 分解过程中模态混叠的发生。但这同时会产生很多虚假模态,为此,本文引进盲源分离算法来获得真正的 IMF。基于 ICA 改进 EMD 算法的流程图如图 1 所示。

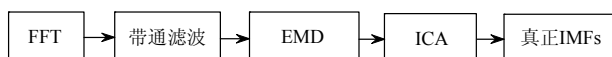


图 1 基于 ICA 的改进 EMD 算法流程图

Fig.1 The process schematic diagram of ICA-based improved EMD

假设经过改进 EMD 分解后各频带观测信号可以表示成各个固有模态函数之和,即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (8)$$

式中: $r(t)$ 为余量; $c_i(t)$ 为第 i 个 IMF。

再将分解的 IMF 表示成 n 维矩阵形式 $c(t)$:

$$c(t) = [c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)]^T \quad (9)$$

则 IMF 矩阵 $c(t)$ 就可作为盲源分离的输入矩阵,再利用 FastICA 算法估计源信号 $s(t)$,即真正的 IMF,进而利用随机减量技术和希尔伯特变换相结合的方法来识别出结构的频率和阻尼比。

2.2 改进 EMD-ICA 算法实现

综上所述,改进 EMD-ICA 算法的思想是:首先利用改进 EMD 分解观测信号 $x(t)$,得到各频段的 IMFs,然后应用 ICA 对各频段的 IMF 矩阵进行分离,从而得到真正的 IMFs。具体实现方法如下:

① 利用 FFT 粗略估计信号的频率范围,使信号通过不同频段的带通滤波,将宽频信号分解为若干窄带信号;

② 利用 EMD 分别对各窄带信号 $x(t)$ 进行分解,得到不同频段的 IMF 矩阵 $c(t)$;

③ 利用 ICA 分别对每个频段的 IMF 矩阵 $c(t)$ 进行分离,得到输出矩阵 S 即真正的 IMF。

至此,对应于各个频段的真正的 IMF 即被提取出来,随后就可以利用随机减量技术(RDT)从 IMF 中提取自由振动响应,进而运用希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)和最小二乘拟合技术识别出结构的模态参数,即频率和阻尼比。

3 方法验证

3.1 数值模拟

为了验证所提方法的有效性,以两个仿真信号

作为算例。

3.1.1 数值模拟 1

该仿真信号含有三种频率成分,分别为 10Hz、15Hz 和 18Hz, $y = \sin(20\pi t) + \sin(30\pi t) + \sin(36\pi t)$,采样频率取为 200Hz,采样时间为 0s~2.5s。对该仿真信号进行标准的 EMD 过程和改进 EMD-ICA 过程,得到的前三阶 IMFs 分别如图 2 和图 3 所示。在改进 EMD-ICA 过程中,首先利用 FFT 估计频率范围,可以得到 3 个峰值频率,并以此作为各频带滤波器的中心频率,然后让信号通过三个指定带宽的低通滤波器,利用 EMD 对各子频带信号进行分解,然后利用 FastICA 算法分离各子频带 EMD 分解得到的 IMFs,所得的三个 IMFs 如图 3 所示。

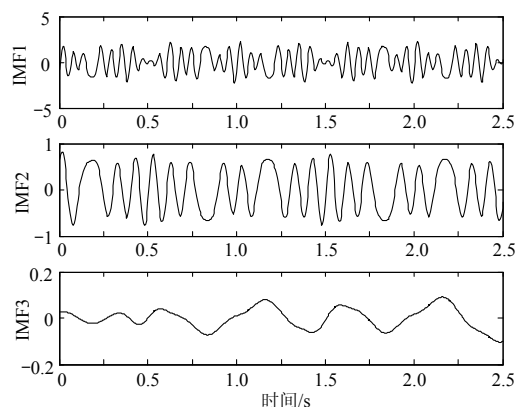


图 2 由标准 EMD 方法得到的前三阶 IMFs

Fig.2 Partial IMFs obtained using original EMD

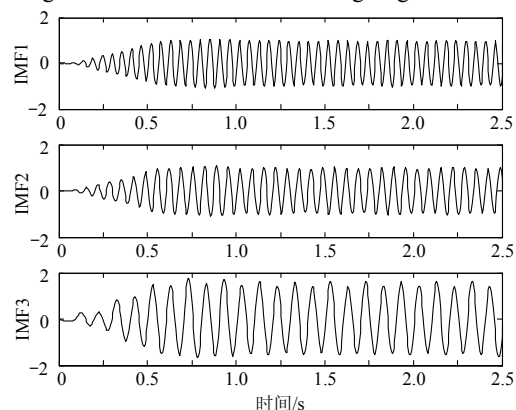


图 3 由改进 EMD-ICA 方法得到的前三阶 IMFs

Fig.3 Partial IMFs obtained using improved EMD-ICA

由图 2 可以看出 IMF1 和 IMF2 中存在着较为严重的模态混叠现象,而从图 3 可以看出改进 EMD-ICA 方法很好的改善了模态混叠的现象,基本明确地表示出了三个固有的频率成分。

3.1.2 数值模拟 2

模拟 1 有阻尼结构的位移响应如下所示:

$$x(t) = 5e^{-2.2t} \sin(78.5t + 0.46) + 20e^{-3.4t} \sin 500.5t + 20e^{-2.24t} \sin 1401.1t + 5e^{-3.84t} \sin(2745.6t + 0.1)$$

(10)

采样频率为 4096Hz, 采样点数为 8192, 对该模拟得到的位移响应信号进行 EMD 和改进 EMD-ICA 过程得到的 IMF 如图 4 和图 5 所示。在改进 EMD-ICA 处理过程中, 首先应用 FFT 估计频率范围, 由傅里叶频谱图可以确定出四个频率峰值, 进而确定出四个频率区间范围, 接着让信号通过指定频带的带通滤波后再进行 EMD 分解。然后, 利用文中所提方法对每个频段获得的 IMFs 以输入矩阵的形式采用 FastICA 算法进行盲源分离, 获得真正的 IMFs 如图 5 所示。最后运用 RDT 从 IMFs 中提取自由振动响应, 进而运用希尔伯特变换和最小二乘拟合技术识别出频率和阻尼比。所得结果见表 1。从图 4 和表 1 的识别结果可以看出对该模拟信号应用 EMD 存在模式混叠的问题, 模式频率不能完全被正确识别。所以这种情况适合使用改进的 EMD 过程对其进行处理, 由于信号要通过指定频带的带通滤波后再进行 EMD 分解, 这必然增加了

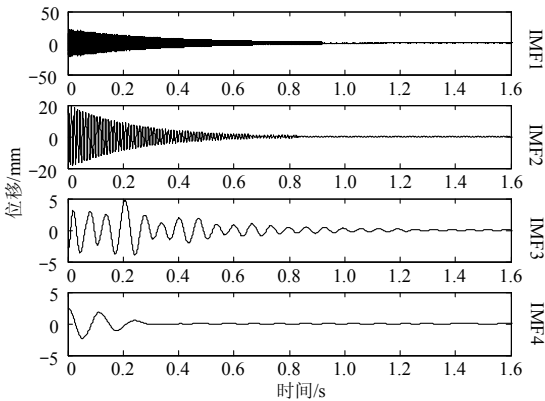


图 4 由 EMD 分解得到的前 4 个 IMF

Fig.4 Partial IMFs obtained using original EMD

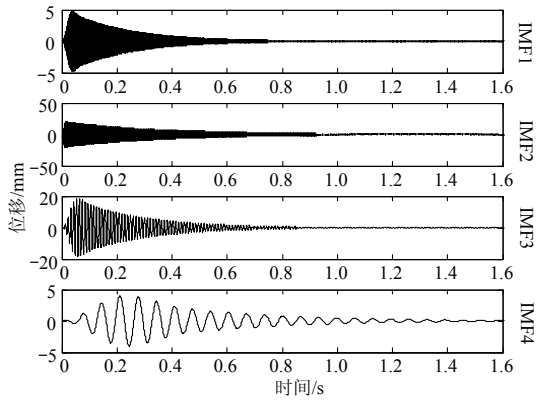


图 5 由改进 EMD-ICA 得到的 4 个 IMFs

Fig.5 Partial IMFs obtained using improved EMD-ICA

IMFs 的数量, 所以本文提出利用 FastICA 算法来自动识别真正的 IMFs, 比较图 4 和图 5 可以看出, 模式混叠的现象被有效的消除了。从表 1 的识别结果可以看出所提方法可以很好的识别出频率和阻尼比。

表 1 频率和阻尼比识别结果比较

Table 1 Comparison of identified frequency and damping ratio

模态	理论值		HHT 识别值		改进 EMD-ICA+HHT 识别值	
	f/Hz	阻尼比/(%)	f/Hz	阻尼比/(%)	f/Hz	阻尼比/(%)
1	12.5	2.80	—	—	13.25	2.153
2	79.7	0.68	81.4	0.581	79.92	0.673
3	223.1	0.16	227.5	0.140	222.63	0.162
4	437.2	0.14	—	—	436.03	0.141

3.2 实验室框架模态试验

3.2.1 模态试验概况

实验模型是一个 7 层、2 跨×1 跨的钢框架缩尺模型, 该模型平面尺寸为 0.4m×0.2m, 高 1.4125m。框架构件采用热轧 300W 级钢材 ($f_y=300\text{MPa}$)。梁截面尺寸 25mm×25mm×3mm(SHS), 柱截面尺寸 25mm×4.6mm。其截面性质如表 2 所示。在模型顶层中跨处进行激振, 同时在每层用加速度传感器来记录产生的响应, 采样频率 2000Hz。

表 2 结构构件特性

Table 2 Properties of structural members

参数	梁	柱
截面尺寸/mm	25×25×3(SHS)	25×4.6
截面面积 A/m^2	286×10^{-6}	115×10^{-6}
惯性矩 I/m^4	2.41×10^{-8}	7.78×10^{-10}
弹性模量 E/Pa	206×10^9	206×10^9
体密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7850	7850

3.2.2 模态参数识别结果

图 6 所示为一实测的结构加速度响应, 对其应用改进的 EMD 进行分析, 首先应用 FFT 估计频率范围, 由 FFT 频谱图可以获得 7 个峰值频率, 以这 7 个频率分别作为各频率带的中心频率, 然后让信号通过指定频带的带通滤波后再进行 EMD 分解, 以频带中心频率 122.9Hz 的子带信号为例, 该子带信号经过 EMD 分解后得到 10 个 IMF 和一个余项, 我们将前 6 个能量分布较大的 IMF 作为 FastICA 的输入矩阵, 经分析后可得到如图 7 所示的 IMF1 分量, 以此类推, 同理可得到其他各子频带的 IMFs, 最后运用 RDT 从 IMFs 中提取自由振动响应(如图 8 所示), 进而运用希尔伯特变换和最小二乘拟合技术识别出频率。所得结果见表 3 所示。为了更好地说

明本方法的有效性, 本文还用标准 HHT 对信号进行了分析, 其分解得到的 IMFs 如图 9 所示, 频率的识别结果见表 3 所示。

表 3 频率识别结果比较 /Hz
Table 3 Comparison of identified frequency

模态	1	2	3	4	5	6	7
理论值 ^[13]	11.7	35.2	58.6	80.1	99.6	113.3	123.0
HHT	13.35	8.96	35.56	58.30	99.48	76.92	293.22
改进 EMD-ICA	11.11	36.00	58.27	80.09	99.23	112.06	122.84

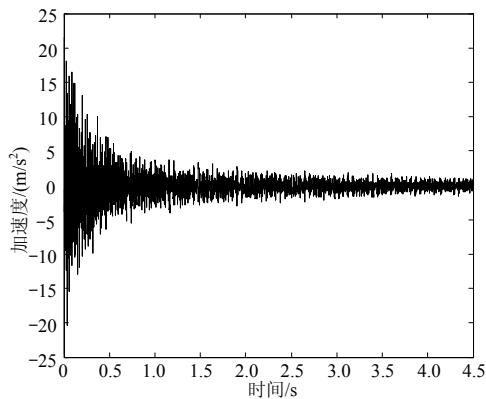


图 6 加速度信号时程记录

Fig.6 Time record of acceleration signal

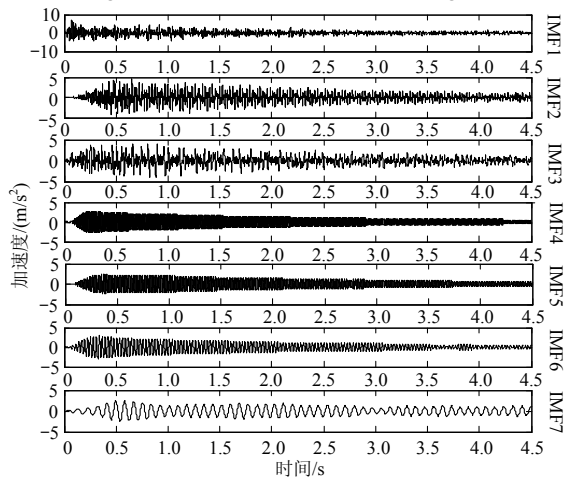
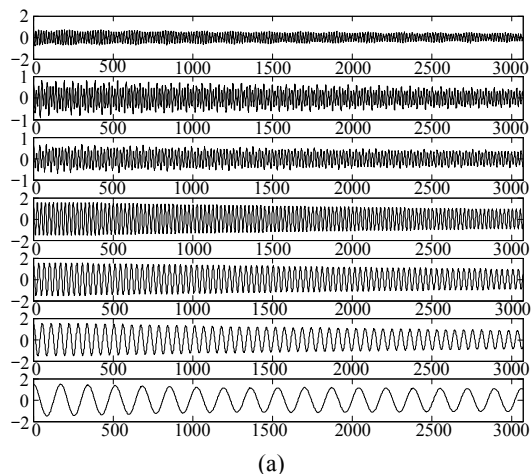
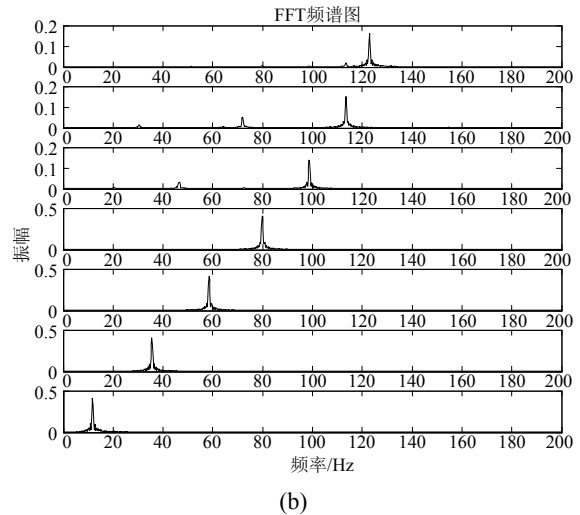


图 7 由改进 EMD-ICA 法得到的 IMFs

Fig.7 The IMFs obtained by improved EMD-ICA



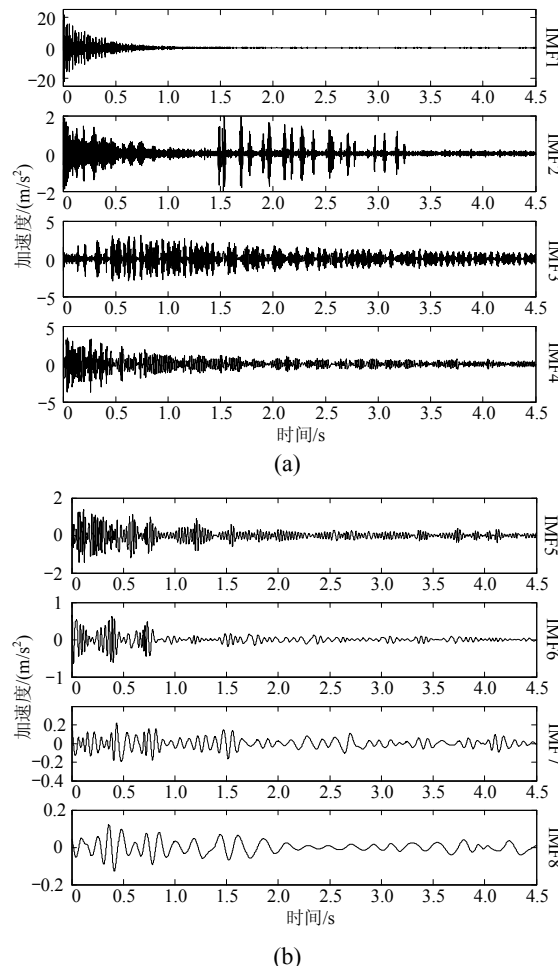
(a)



(b)

图 8 由 RDT 法得到的各 IMF 的自由衰减响应及其 FFT 频谱图

Fig.8 The free vibration response of every IMF by using RDT and the FFT frequency-spectrum diagram accordingly



(b)

图 9 由标准 EMD 法得到的前 8 阶 IMFs

Fig.9 Partial IMFs obtained using original EMD

从图 7 可以看出利用改进的 EMD 和 ICA 相结合得到的 IMFs 曲线呈自由衰减, 可以用常规的单模态识别技术进行模态参数识别。比较图 7 和图 9

以及从图 8 可以看出, 标准 EMD 方法分解得到的 IMFs 中存在着明显的模态混叠, 例如图 9 的 IMF7 在时间 1.5s 前后的频率明显不同, 而从图 7 的 IMF7 可以看出, 模态混叠的现象被消除了, 从图 7 和图 8 也可以看出改进 EMD-ICA 法不存在模态混叠和错分的问题, 很好的满足了单一组分的定义, 此外, 由于经过了 ICA 过程, 消除了虚假模态的影响, 使获得的 IMFs 即为所需要的 IMFs, 从而实现了 IMFs 的自动识别, 保证了 EMD 分解的有效性。从表 3 的识别结果可以看出, 改进 EMD-ICA 法进行模态参数识别取得了较好的效果, 明显优于 HHT 方法的识别结果, 从而更好地说明了该联合方法的有效性。

4 结论

本文针对频带滤波改进 EMD 过程中存在虚假模态的缺陷以及真正 IMF 的判定问题, 提出了一种新颖的改进 EMD 和 ICA 相结合的结构模态参数识别方法, 该法将 ICA 中的 FastICA 算法应用到改进 EMD 的过程中, 其特点是运算效率高, 不需要人为后验处理, 能够实现 IMF 的自动识别。

该方法的基本思想是利用经过改进 EMD 过程得到的 IMFs 及干扰可以认为是相互独立的, 把不该有的虚假模态看成是噪声, 从而巧妙地应用 ICA 来消除虚假模态, 自动识别出真正的 IMFs, 然后通过 RDT 将各 IMFs 转变成自由衰减的振动曲线, 最后利用 HT 和最小二乘拟合成功识别出结构的模态参数。通过数值算例及实验室一个七层框架的模态参数识别, 验证了该联合方法用于结构模态参数的识别是可行的, 并取得了理想的识别效果。

参考文献:

- [1] Xiaomin Zhao, Tejas H Patel, Ming J Zuo. Multivariate EMD and full spectrum based condition monitoring for rotating machinery [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 27: 712—728.
- [2] 胡劲松, 杨世锡, 任达千. 一种基于 EMD 的振动信号时频分析新方法研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 71—73, 154.
Hu Jingsong, Yang Shixi, Ren Daqian. Study on the method of EMD-based vibration signal time-frequency analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 71—73, 154. (in Chinese)
- [3] 董银峰, 李英民, 赖明. 基于 EMD 和 VARMA 模型的结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 141—147.
Dong Yinfeng, Li Yingmin, Lai Ming. EMD and VARMA models based structural damage detection [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(12): 141—147. (in Chinese)
- [4] Wang Tong, Zhang Mingcai, Yu Qihao, Zhang Huyuan. Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 83: 29—34.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417—457.
- [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] Yang W X. Interpretation of mechanical signals using an improved Hilbert-Huang transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22: 1061—1071.
- [8] Peng Z K, Tse W Peter, Chu F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286: 187—205.
- [9] 姜绍飞. 改进希-黄变换的结构响应分析方法[P]. 中国: ZL200610046897.7, 2009.
Jiang Shaofei. Analytical Method of Structural Responses based on Revised Hilbert-Huang Transform [P]. China: ZL200610046897.7, 2009. (in Chinese)
- [10] 黄天立, 邱发强, 楼梦麟. 基于改进 HHT 方法的密集模态结构参数识别[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7): 2054—2062.
Huang Tianli, Qiu Faqiang, Lou Menglin. Application of an improved HHT method for modal parameters identification of structures with closely spaced modes [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(7): 2054—2062. (in Chinese)
- [11] 余先川, 胡丹. 盲源分离理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 51—103.
Yu Xianchuan, Hu Dan. The theory and application of blind source separation [M]. Beijing: Science Press, 2011: 51—103. (in Chinese)
- [12] 李鸿燕, 王华奎. 独立分量分析在混叠通信信号分离中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 664—665.
Li Hongyan, Wang Huakui. Application of independent component analysis on overlapped communication signal separation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 664—665. (in Chinese)
- [13] 付春. 基于改进的 HHT 结构信号分析与损伤检测研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2006.
Fu Chun. Study of structural signal analysis and damage detection based on improved Hilbert-Huang transform [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2006. (in Chinese)