

利用 ICA 的局域波分解及其在机械故障诊断中应用

王凤利^{*1}, 李宏坤²

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 局域波分解算法的自身局限使得分解分量之间的正交性不能得到保证, 分解分量存在信息冗余, 从而影响了分解质量. 针对这个问题, 将独立分量分析(ICA)引入局域波分解过程中, 以消除分解分量的信息冗余, 使得局域波分解得到的基本模式分量之间相互正交独立, 改善局域波分解算法的局限性, 准确地进行局域波分解. 应用该方法对转子早期碰摩振动信号进行了分析, 并对分解得到的高频基本模式分量进行 Hilbert 包络解调分析, 准确提取了转子碰摩故障特征. 试验数据的分析结果证明了方法的准确性和有效性.

关键词: 局域波分解; 独立分量分析; Hilbert 变换; 故障诊断

中图分类号: TP306; TN911 **文献标志码:** A

0 引言

机械故障诊断中, 由于系统的非线性和运行工况的变化, 常常遇到诸如瞬变、幅度调制或频率调制等非平稳信号, 提取和分析这些时变特征对机械故障诊断意义重大. STFT、WVD、小波变换等方法在不同程度上对非平稳信号的时变特征进行了描述, 改进了傅里叶分析方法的不足, 但它们仍属于全域波变换的范畴, 不能从根本上获得非平稳信号的瞬态特征^[1,2].

局域波法是具有自适应特性的一种非平稳信号分析方法, 已应用于语音信号、地球物理、机械振动和结构分析等研究领域^[1,2]. 局域波法的关键在于局域波分解, 为了保证分解的严密性以及避免能量泄漏, 分解得到的基本模式分量(IMF)之间应满足正交性要求. 但由于分解算法的自身局限性, 分解能力受到一定程度的限制^[3]. IMF之间的正交性得不到充分保证, 致使出现分量冗余, 直接影响到局域波分解结果的准确性和有效性.

独立分量分析(ICA)是盲源分离的一种方法, 利用观测信号的高阶统计特征, 在不知道源信

号和传输通道参数的情况下, 针对混叠的观测信号进行独立源信号的分离, 使输出的信号分量之间彼此统计独立^[4], 可用于提取隐藏于观测信号中的独立信息, 是一种有效的冗余消除方法. 本文将 ICA 引入局域波分解, 以确保分解得到的 IMF 之间满足正交性, 消除冗余, 实现非平稳时变信号的准确分解.

1 局域波分解和 Hilbert 变换

局域波分解能够根据信号的局部时间特征尺度, 将复杂的非平稳信号按频率由高到低地自适应分解为有限个 IMF 之和^[1],

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

对每一个 IMF 进行 Hilbert 变换,

$$H[c_j(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

于是构成 $x(t)$ 解析形式, 可以表示为

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (3)$$

其中 $a_j(t)$ 为瞬时幅值,

$$a_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + H^2[c_j(t)]} \quad (4)$$

收稿日期: 2010-02-15; 修回日期: 2012-03-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805014).

作者简介: 王凤利^{*}(1970-), 男, 大连理工大学 2003 届博士, 副教授, E-mail: wangfl@dlmu.edu.cn.

瞬时频率表示为

$$f_j(t) = \frac{\omega_j(t)}{2\pi} \quad (5)$$

虽然局域波分解在实际信号分析中得到了广泛应用,但由于分解算法自身的局限性,分解能力受到了一定程度的限制,IMF之间的正交性得不到充分保证^[3],因而存在分量冗余,影响到分解结果的准确性和有效性。

2 独立分量分析(ICA)

独立分量分析(ICA)利用源信号之间统计独立的条件对混合的观测信号进行分离,从观测信号中恢复出未知的源信号,并且使得各信号之间尽可能独立。假设 n 个相互统计独立的源信号分别为 $s_1, s_2, \dots, s_n$; m 个传感器测试的信号分别为 $x_1, x_2, \dots, x_m$, 认为是 n 个源信号的线性瞬时组合, 即

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (6)$$

式中:源信号向量 $\mathbf{s} = (s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n)^T$; 观测信号向量 $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m)^T$; $\mathbf{A}$ 称为混合矩阵。 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{s}$ 为未知量, $\mathbf{x}$ 为已知量。

ICA的最终目的是寻找一个 $n \times m$ 阶的分离矩阵 $\mathbf{W}$, 使得观测信号经过变换后能够恢复出相互统计独立的潜在源信号, 即

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

式中: $\mathbf{y} = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n)^T$, 是分离的源信号向量。

ICA算法的本质是根据某一判据对观测信号进行优化计算,使得分离的源信号分量满足相互独立的要求,优化计算过程中的目标函数是ICA算法的核心。FastICA算法是基于负熵最大化的快速不动点ICA算法^[5,6],按一定次序把各个独立分量逐次地提取出来,每提取出一个独立分量之后,从原始数据中将该分量去除,再对余下的数据进行独立分量的提取。

对于一个随机信号 $\mathbf{y} = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n)^T$, 负熵定义为

$$J(\mathbf{y}) = H(\mathbf{y}_{\text{Gauss}}) - H(\mathbf{y}) \quad (8)$$

式中: $H(\mathbf{y})$ 为随机信号 $\mathbf{y}$ 的差熵; $\mathbf{y}_{\text{Gauss}}$ 为与随机信号 $\mathbf{y}$ 具有相同的协方差矩阵的高斯分布随机变量。

由于实际应用中负熵难于计算,通常利用一

近似公式对分离结果的非高斯性进行度量来监测分离结果的独立性,负熵近似计算为

$$J(\mathbf{y}) \approx c\{E[G(\mathbf{y})] - E[G(\mathbf{y}_{\text{Gauss}})]\}^2 \quad (9)$$

式中: $G(\cdot)$ 为任意非线性函数; $E(\cdot)$ 为数学期望运算; c 为常数。

3 利用ICA的局域波分解

局域波分析的关键在于局域波分解,受到分解算法的自身局限,局域波分解能力受到一定程度的限制,IMF之间的正交性得不到充分保证,因而存在分量冗余,无法正确表征信号中的实际成分。ICA算法利用观测信号的高阶统计特征进行源信号分离,这种高阶统计特征有利于表达信号载体的本质属性,可用于提取隐藏于观测信号中的独立信息,是一种有效的冗余消除方法。将ICA引入到局域波分解,提出了一种ICA和局域波分解相结合的分解算法(简称ICA-LWD),经过ICA分离,能消除各个输入量之间的信息冗余,经过ICA-LWD输出得到的IMF是独立的,保证了IMF之间的正交性,从而改善了局域波分解能力的局限性,得到的IMF能够完整地表达各个振荡模式的瞬变特性,从而实现了非平稳信号的有效分解。该方法主要由以下步骤构成:

(1)对测试信号 $\mathbf{X}$ 进行局域波分解,分解出一个基本模式分量 IMF1;

(2)将 IMF1 与 $\mathbf{X}$ 作为 FastICA 算法的输入,经 FastICA 运算后得到两个 ICA 分量 ICA1、ICA2。

(3)由于局域波分解是将信号按频率由高到低地进行的,从两个中选出频率高的作为 IMF1,另一个作为新的测试信号 $\mathbf{X}_1$ 。

(4)对信号 $\mathbf{X}_1$ 按步骤(1)~(3)进行相同处理,直到信号无法再分解,满足分解停止条件。将 IMF 以及剩余分量作为 ICA-LWD 的分解结果。

4 试验分析

碰摩是旋转机械转子系统中常见的一种故障现象。碰摩信号表现出典型的非平稳性、调制性和微弱性^[7]。在转子系统碰摩振动测试响应中,碰摩信号和噪声信号表现为频域的宽带性质,它们的频率互相重叠,加之碰摩早期由于碰摩信号微弱淹没在较强的背景信号和噪声之中,通常难以将

碰摩信号从振动测试响应中分离出来。

为了验证本文方法的有效性,在转子试验台上进行了早期碰摩振动响应的信号测试,用电涡流位移传感器测取转子在水平方向上的径向振动响应,采样频率为 2 560 Hz(分析频率为 1 000 Hz)。图 1 所示为转子在 2 820 r/min 工作转速下测取的早期碰摩振动响应的时域波形,从振动响应的时域波形观察不到碰摩故障特征。

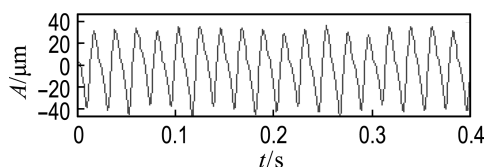


图 1 碰摩信号的时域波形

Fig. 1 Time domain waveform of rub-impact signal

对早期碰摩振动信号进行局域波分解,分解结果如图 2 所示。由于受到局域波分解能力的限制,直接进行局域波分解时产生了分量冗余,不能正确地进行信号分解,未能够将表征碰摩故障特征的信号分量分解出来。

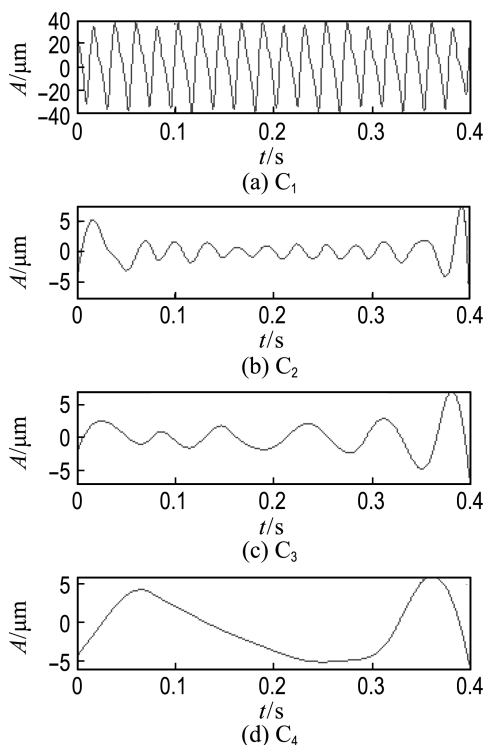


图 2 碰摩信号的局域波分解

Fig. 2 LWD of rub-impact signal

为了从振动响应中分离出碰摩冲击信号,应

用本文提出的方法进行分解。分解前将信号进行自适应提升小波消噪处理^[8],以减小噪声的干扰影响。然后针对消噪后的信号进行 ICA-LWD 分解,分解结果如图 3 所示,其中高频分量 C_1 具有明显的幅值调制特征,即为碰摩冲击信号。为了准确地得到冲击响应的周期,对 C_1 进行 Hilbert 包络解调分析,包络谱如图 4 所示,碰摩冲击产生的幅值调制频率为 47 Hz,与转子转动频率吻合,与转子发生碰摩时的故障特征一致。在早期碰摩振动响应的信号测试分析时测取了多组试验数据,多组试验数据的分析结果是一致的。

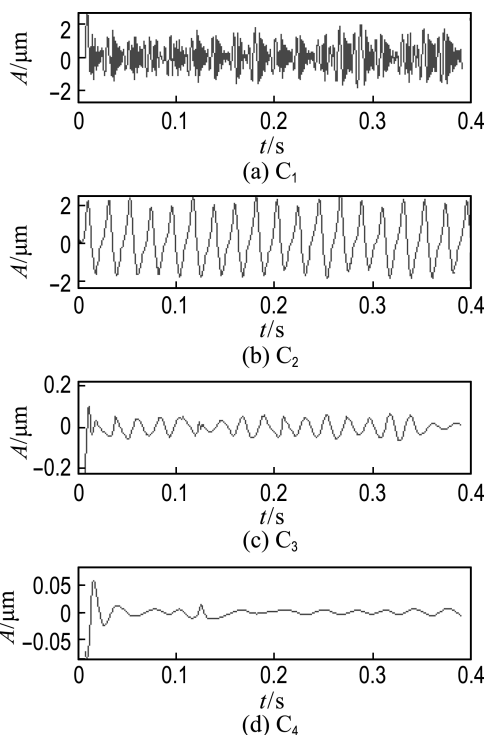


图 3 碰摩信号的 ICA-LWD 分解

Fig. 3 ICA-LWD of rub-impact signal

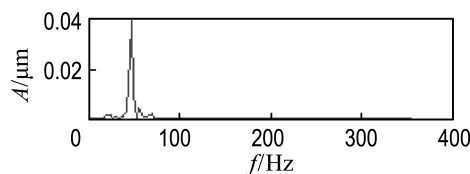


图 4 分量 C_1 的 Hilbert 包络谱分析

Fig. 4 Hilbert envelope analysis of the C_1

5 结 论

由于局域波分解算法的自身局限性,分解能力受到一定程度的限制,IMF 之间的正交性不能

充分保证,因而存在分量冗余,影响局域波分析的准确性和有效性. 将ICA引入局域波分解,ICA利用观测信号的高阶统计信息分离独立源信号,使分离后的源信号之间彼此统计独立,保证了IMF之间的正交性,消除了分量冗余,实现了非平稳信号的准确分解. 应用该方法对转子系统早期碰摩振动响应进行了分析,试验结果验证了方法的有效性,可望应用于工程实际.

参考文献:

- [1] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. **Proceedings of the Royal Society of London, Series A**, 1998, **454**:903-995.
- [2] 王凤利. 基于局域波法的转子系统非线性动态特性及应用研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2003.
WANG Feng-li. Research on nonlinear dynamic characteristics of rotor system based on local-wave method and its application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [3] Rato R T, Ortigueira M D, Batista A G. On the HHT, its problems, and some solutions [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2008, **22**(6):1374-1394.
- [4] Hyvarinen A, Oja E. Independent component analysis by general nonlinear Hebbian-like learning rules [J]. **Signal Processing**, 1998, **14**(3):301-313.
- [5] Hyvarinen A, Oja E. A fast fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. **Neural Computation**, 1997, **9**(7):1483-1492.
- [6] Hyvarinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. **IEEE Transactions on Neural Networks**, 1999, **8**(3): 622-634.
- [7] HU N Q, CHEN M, WEN X S. The application of stochastic resonance theory for early detecting rub-impact fault of rotor system [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2003, **17**(4):883-895.
- [8] 段晨东, 姜洪开, 何正嘉. 一种改进的第2代小波变换算法及应用[J]. 西安交通大学学报, 2004, **38**(1): 47-50.
DUAN Chen-dong, JIANG Hong-kai, HE Zheng-jia. Improved algorithm for second generation wavelet transform and its application [J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**, 2004, **38**(1): 47-50. (in Chinese)

Local wave decomposition using ICA and its application to fault diagnosis in machinery

WANG Feng-li^{*1}, LI Hong-kun²

(1. School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Due to its own implicit difficulties, the local wave decomposition (LWD) algorithm cannot guarantee the completeness and orthogonality of the components, and may produce redundant components and affect the accuracy of decomposition. In order to reduce the components redundancy in LWD, independent component analysis (ICA) is introduced into LWD, so that the components are orthogonal to each other and the components redundancy can be reduced. Finally, a much better decomposition performance can be obtained. It is employed to analyze the vibration signal of rotor system with early rub-impact for extracting the weak impulsive feature. The signal is decomposed into intrinsic mode functions accurately, then the high-frequency components are analyzed by Hilbert envelope demodulation. The modulating fault feature of vibration signal of a rotor system with rub-impact fault can be extracted exactly. Analytical results of experimental data show that the proposed method is accurate and efficient.

Key words: local wave decomposition; independent component analysis; Hilbert transform; fault diagnosis