

基于快速谱峭度图的 EEMD 内禀模态分量选取方法*

蒋超¹, 刘树林¹, 姜锐红¹, 王波^{1,2}

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海, 200072) (2. 滁州学院机械与汽车工程学院 滁州, 239000)

摘要 针对在总体平均经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition, 简称 EEMD)的多个内禀模态分量(intrinsic mode function, 简称 IMF)中, 如何选取出反应故障特征的敏感 IMF 的问题, 提出一种基于快速谱峭度图的敏感 IMF 选取方法。由 EEMD 分解获得的一组无模式混淆的 IMF, 计算原信号及各个 IMF 的快速谱峭度图, 选择每个快速谱峭度图中谱峭度最大值所处的频带作为参考频带, 比较各个 IMF 的参考频带与原信号谱峭度最大值所处频带之间的从属关系, 筛选出反应故障特征的敏感 IMF, 为后续故障诊断提供特征信息。将该方法应用于模拟仿真信号及滚动轴承滚动体故障信号, 验证了方法的有效性。

关键词 总体平均经验模式分解; 快速谱峭度图; 冲击信号; 故障诊断

中图分类号 TH911; TH165.3

引言

EEMD 作为一种改进的经验模式分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD)方法, 它一方面保持了 EMD 分解的优良特性, 即可根据信号特点自适应的将原信号分解为一系列 IMF, 另一方面又克服了 EMD 分解所存在的模式混淆问题, 因此被广泛应用于非线性、非平稳信号的机械故障诊断信号处理方法中。与此同时, 由于 EEMD 分解得到的 IMF 数量不可控, 故障特征往往仅包含于一个或部分 IMF 中, 而其他的 IMF 则大多可视为是噪声或干扰信号, 所以, 如何从 EEMD 分解的多个 IMF 中选取出反应故障特征的敏感 IMF 成为 EEMD 方法在故障诊断领域应用的重要问题。

有学者对上述问题进行了相关研究^[1-2]。其中, 苏文胜等^[3]联合考虑了各 IMF 与原信号的互相关系数和各 IMF 的峭度值两个参考系数作为敏感 IMF 取舍的判决依据。雷亚国^[4]提出一种利用故障状态信号与每个 IMF 的相关系数、正常状态信号与各个 IMF 的相关系数两组参考系数综合选择出敏感 IMF 的方法。鹏畅等^[5]运用基于距离的度量因子将故障特征最敏感的 IMF 选取出来。张志刚等^[6]采用灰色关联度与互信息方法相结合剔除 EMD 分解结果中的虚假分量。

笔者提出了一种基于快速谱峭度图的敏感 IMF 选取方法。首先, 分别计算原信号及各个 IMF 的快速谱峭度图, 获取每个快速谱峭度图中谱峭度最大值所处的频带范围作为各自信号的特征频带区间; 然后, 判断各个 IMF 谱峭度最大值所处的频带区间与原信号谱峭度最大值所处的频带区间两者之间的从属关系, 筛选出反应故障特征的敏感 IMF。因此, 该方法使用了谱峭度最大值所处的频带范围这一双值特征区间系数, 替代了谱峭度值、相关系数等一系列单值特征系数, 并将敏感 IMF 选取过程中依靠人工经验取舍单值特征系数的问题简化为双值特征区间之间的从属关系问题, 使敏感 IMF 选取方法更加易于实现。

1 基本理论

1.1 EEMD 算法

为了克服 EMD 分解所产生的模式混淆现象, Wu 等^[7]在 EMD 分解算法的基础上, 提出了一种利用高斯白噪声辅助的 EEMD 算法。它利用高斯白噪声所具有的频率均匀分布统计特性, 通过每次给 EMD 分解信号中加入均值为零且幅值有限的不同高斯白噪声, 使得信号在整个频带内的极值点间隔分布均匀, 解决了不均匀极值点间隔导致的极值点

* 国家自然科学基金资助项目(51175316); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20103108110006)
收稿日期: 2013-10-26; 修回日期: 2013-12-26

上、下包络线拟合误差较大的问题,并对多次 EMD 分解的 IMF 进行总体平均计算以抵消所添加的噪声,从而获得一组无模式混淆现象的 IMF。EEMD 分解算法的具体流程如下:

1) 初始化总体平均次数 M ,并将白噪声序列加入到分析信号中;

2) 对加入白噪声后的分析信号做 EMD 分解;

3) 重复 M 次步骤 1 和步骤 2,但每次添加幅值不同的白噪声序列;

4) 计算 M 次 EMD 分解所得到的相应 IMF 的总体平均,并将其平均值序列作为最终的 IMF,即

$$\bar{C}_j(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M C_{j,m}(t) \quad (m=1,2,\dots,M) \quad (1)$$

其中: $\bar{C}_j(t)$ 为相应 IMF 的总体平均; $C_{j,m}(t)$ 为 EMD 第 m 次分解中第 j 个 IMF。

1.2 谱峭度方法

峭度指标作为时域分析中的一种无量纲参数指标,对信号的瞬时特征非常敏感^[8]。随着频域分析理论和高阶谱理论的发展,谱峭度概念被 Dwyer^[9] 提出,其基本思想是计算频域内每条谱线的峭度值,这样,谱峭度既能检测瞬态信号,又能够准确定位瞬态信号在频域中所处的位置。Antoni^[10] 在谱峭度理论研究的基础上,给出了谱峭度的定义,并将谱峭度方法应用于机械故障诊断领域中。

假设信号 $X(t)$ 的激励响应为 $Y(t)$, 表示为

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2\pi ft} H(t, f) dX(t) \quad (2)$$

其中: $H(t, f)$ 为时变传递函数,解释 $Y(t)$ 在频率为 f 处的复包络。

基于四阶谱累积量的谱峭度可定义为

$$C_{4Y}(f) = S_{4Y} - 2S_{2Y}^2(f) \quad (3)$$

其中: $S_{2nY}(f)$ 为 $2n$ 阶瞬时矩。

$S_{2nY}(f)$ 定义为

$$S_{2nY}(f) = E\{|H(t, f)dX(t)|^{2n}\} / df \quad (4)$$

谱峭度可进一步定义为

$$K_Y(f) = S_{4Y}(f) / S_{2Y}^2(f) - 2 \quad (5)$$

为显著减少谱峭度计算时间,使其能快速、广泛地应用于工程实际,Antoni^[11] 进一步提出了基于塔式算法的快速谱峭度图计算方法。在快速谱峭度图中,横坐标代表频率 f ,纵坐标则表示分解的层级 K ,频率分辨率为 $\Delta f = 2^{-(K+1)}$,图像上的颜色深浅表示各个 f 和 Δf 下的谱峭度值。

1.3 基于快速谱峭度图的敏感 IMF 选取方法

在利用 EEMD 分解方法对机械设备故障状况

下的振动信号进行分析的过程中,对敏感 IMF 的选取方法研究已经达成两点共识:a. EEMD 分解生成的一系列 IMF 数量不可控;b. 振动信号故障特征往往仅包含于一个或部分 IMF,而其他的 IMF 则大多可视作噪声信号或干扰信号。所以,为了凸显故障特征信息在重构信号中的表现形式,选取合适的特征参考系数成为敏感 IMF 选取方法的重点。

基于快速谱峭度图的敏感 IMF 选取方法,使用谱峭度最大值所处的频带范围作为特征频带区间,因为该频带范围是一对双值特征区间系数,不同于单值特征参考系数,所以在筛选敏感 IMF 时,可将权衡取舍单值系数的问题简化为多组不同双值区间之间的从属关系问题,避免了因单值参考系数不易区分而造成敏感 IMF 选取困难。具体步骤如下:

1) 对原始信号做 EEMD 处理,得到一系列 IMF;

2) 利用快速谱峭度图原理,计算原信号及各个 IMF 的快速谱峭度图,获取相应的快速谱峭度图中谱峭度最大值所处的频带范围,并以该频带范围作为各个信号(包括原信号和多个 IMF 信号)的特征频带区间;

3) 判断每个 IMF 的谱峭度最大值所处的频带区间是否从属于原信号谱峭度最大值所处的频带区间,如果是则选为敏感 IMF,否则剔除之;

4) 在步骤 2 和 3 中,若峭度值最大谱所处频率范围是整个频带,则取谱峭度次大值所处的频带范围作为特征频带区间,这是为了从频带范围内挑选出相对于其他频带更具有信号代表性的特征频带区间范围;

5) 若敏感 IMF 为多个,则对敏感 IMF 进行叠加,从而组合成反应故障特征的重构信号。

2 仿真实验

笔者模拟机械故障振动的仿真信号,运用所提出的敏感 IMF 选取方法对敏感 IMF 进行筛选,并对敏感 IMF 选取的结果进行分析,验证所提出方法的有效性。模拟仿真信号使用文献[12]中的仿真模型,考虑到机械设备零部件发生故障时,振动信号多以冲击信号的形式存在,针对冲击信号的特征提取亦是故障诊断信号处理的关键。同时,不同零部件的旋转频率通过一高一低两个正弦信号模拟。随着机械设备故障程度的加剧,传感器采集的振动信号平均幅值势必会变大,可通过一个幅值逐渐增加的趋势项进行模拟。因此,仿真故障信号主要由冲击

成分、低频正弦成分、高频正弦成分、趋势项 4 种信号组合而成。

图 1 所示为仿真信号中的冲击成分、低频正弦成分、高频正弦成分、趋势项及上述 4 种信号的组合信号。运用 EEMD 分解对仿真信号进行处理,共分解得到 12 组消除了模式混淆问题的 IMF,如图 2 所示。在分解结果中: c_1 对应了原始信号冲击成分; c_5 对应了原始信号高频正弦成分; c_7 对应了原始信号低频正弦成分; c_{12} 对应了原始信号中的趋势项。

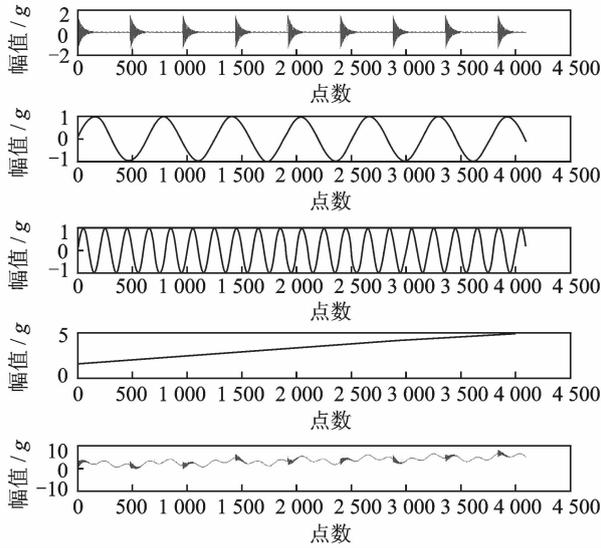


图 1 仿真故障信号及其组成

Fig. 1 The simulation signal and its components

根据所提出的敏感 IMF 选取方法,利用快速谱峭度图原理,计算原信号及各个 IMF 的快速谱峭度图。其中,图 3 为原信号的快速谱峭度图,谱峭度最大值所处的频带如箭头所指向的虚线框为(4 500, 5 250)Hz,并选该频带范围为仿真信号快速谱峭度图的特征频带区间。图 4~图 6 分别为 IMF_1 , IMF_2 , IMF_3 的快速谱峭度图,其中: IMF_1 谱峭度最大值所处的频带范围是(4 500, 5 250)Hz,该特征频带区间从属于仿真信号频带区间,故选取为敏感 IMF; IMF_2 谱峭度最大值所处的频带范围为整个频带,按照方法步骤 4 选取谱峭度次大值所处的(0, 1 500)Hz 频带范围作为特征频带区间,因该频带区间不从属于仿真信号的频带区间,故舍去 IMF_2 ;同理, IMF_3 谱峭度最大值所处的频带范围同样为整个频带,故选取谱峭度次大值所处的(0, 1 500)Hz 频带范围作为特征频带区间,且该频带区间亦不从属于仿真信号的频带区间,故舍去 IMF_3 ;如此对剩余 IMF 进行选取,最终选取 IMF_1 为敏感特征 IMF。

为验证敏感 IMF 选取方法的有效性,可将选取的敏感特征 IMF(IMF_1)与故障仿真信号中的冲击

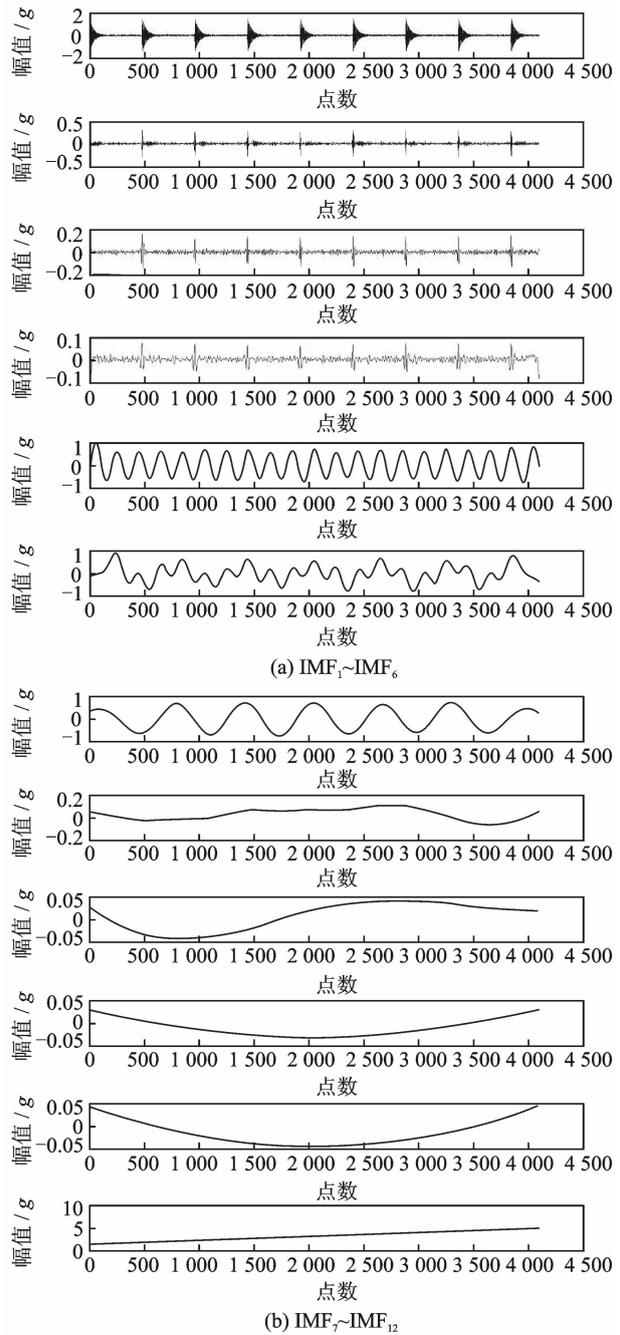


图 2 仿真信号 EEMD 分解得到的 12 个 IMF

Fig. 2 The decomposed IMF_s using EEMD

成分做差值计算,如图 7 所示。可以发现,除了在每个冲击信号开始时刻点处存在较大偏差外,整个冲击过程中偏差均为较小值,该结果既说明了 EEMD 分解方法在抽取处理冲击信号过程中的优越性,也说明了敏感 IMF 选取方法的有效性。

3 实例研究

为进一步分析所提出的敏感 IMF 选取方法的可行性,以美国 Case Western Reserve University

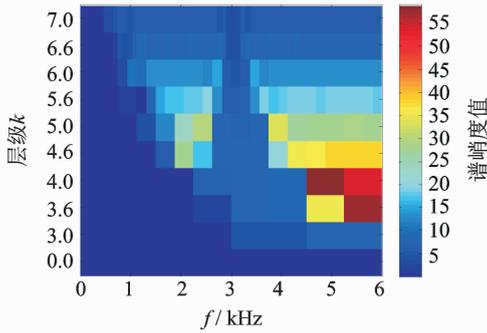


图 3 仿真信号的快速谱峭度图

Fig. 3 Fast kurtogram spectrum of the simulation signal

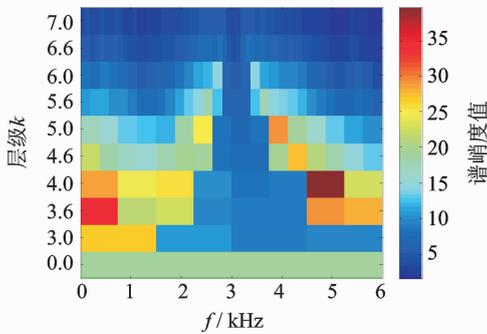


图 4 仿真信号 IMF₁ 的快速谱峭度图

Fig. 4 Fast kurtogram spectrum of IMF₁

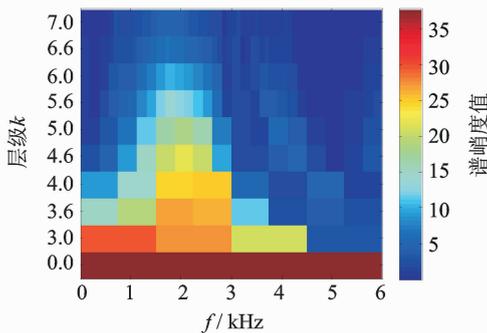


图 5 仿真信号 IMF₂ 的快速谱峭度图

Fig. 5 Fast kurtogram spectrum of IMF₂

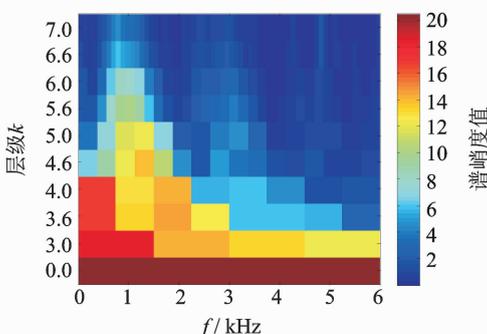


图 6 仿真信号 IMF₃ 的快速谱峭度图

Fig. 6 Fast kurtogram spectrum of IMF₃

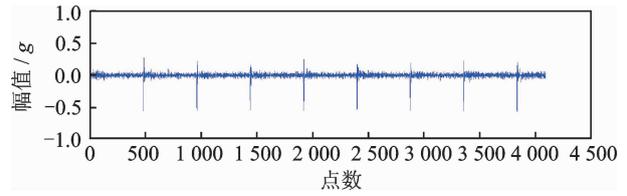


图 7 IMF₁ 与仿真信号冲击成分的偏差值

Fig. 7 The decomposition errors of IMF₁ and the impact components in simulation signal

轴承型号为 SKF6205, 轴承转速为 1 750 r/min, 采样频率为 12 kHz。理论计算得出的轴承滚动体故障特征频率为 137.48 Hz。

图 8 包括了轴承滚动体故障的时域图、频域图和包络谱图。其中: 时域图可以发现信号存在明显的周期性冲击现象; 信号频谱分布范围较宽, 故障特征频率微弱, 无法拾取出故障特征; 包络谱中滚动体故障特征频率明显, 但也出现了如点划线框所示的干扰项。

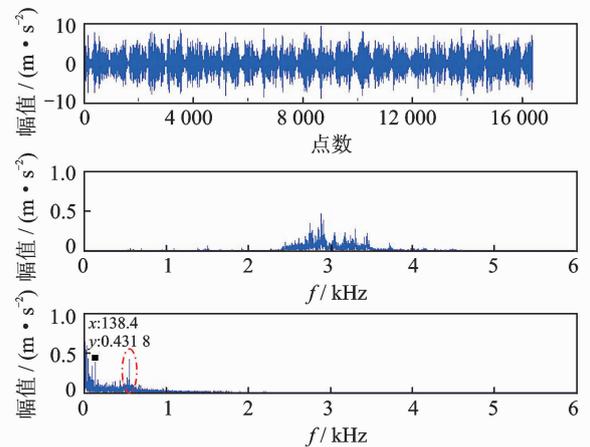


图 8 滚动体故障信号及其频谱图、包络谱图

Fig. 8 Fault signal of rolling element and its spectrum, envelope spectrum

对滚动轴承的滚动体故障信号做 EEMD 分解, 其中, EEMD 添加的白噪声幅值参数选取为原信号标准差的 0.2 倍, 整体平均次数 M 选为 100, 共可得到 15 个 IMF。以前 5 个 IMF 为例, 计算各个 IMF 的谱峭度值和各个 IMF 与原信号之间的互相关系数, 如表 1 所示, 原信号的峭度值为 3.596 9。从表 1 可以发现, 各个 IMF 的峭度值均为较大值, 特征参数分布没有明显的区分效果, 因此, 峭度值在该组实验数据分析中失去了参考价值。在各个 IMF 的互相关系数中, 不同 IMF 之间的互相关系数大小差异程度明显, 且 IMF₁ 与原信号之间的互相关系数远远大于其他 IMF。因此, IMF₁ 保留了更多的

电气工程实验室公开的滚动轴承滚动体故障数据为例, 对该方法进行实例研究。具体参数如下: 驱动端

原信号信息,选 IMF_1 为敏感 IMF。

表 1 前 5 个 IMF 的峭度值及其与原信号之间的互相关系数

Tab. 1 The first five cross-correlation coefficients between IMF and original signal and the IMF kurtosis

IMF 序列	峭度值	相关系数
1	3.532 7	0.940 6
2	3.693 1	0.062 7
3	3.988 5	0.043 4
4	4.401 4	0.032 9
5	3.758 9	0.017 5

采用所提出的敏感 IMF 选取方法,首先,计算原信号快速谱峭度图(见图 9),原信号快速谱峭度图中谱峭度最大值所处的频带范围如箭头所指向的虚线框,为(5 625,6 000)Hz,并将该频带范围选为滚动体故障信号的特征频带区间;然后,对故障信号 EEMD 分解后得到的 15 个 IMF 分别作快速谱峭度图,并从每个 IMF 的快速谱峭度图中找到谱峭度最大值所处的频带范围作为各个 IMF 的特征频带区间,如表 2 所示为前 5 个 IMF 快速谱峭度图中谱峭度最大值所处的特征频带区间参数,单位为 Hz;最后,将各个 IMF 的特征频带区间参数与原信号特征频带区间参数进行对比,可知仅有 IMF_3 的特征频带区间从属于原信号频带区间,故选 IMF_3 为敏感 IMF。

表 2 前 5 个 IMF 的快速谱峭度图中谱峭度最大值的频带区间

Tab. 2 The first five reference frequency band which determined by the maximum kurtosis in fast kurtogram

IMF 序列	特征频带区间
1	(0, 750)
2	(3 375, 3 750)
3	(5 625, 5 812.5)
4	(937.5, 1 031.25)
5	(3 750, 4 500)

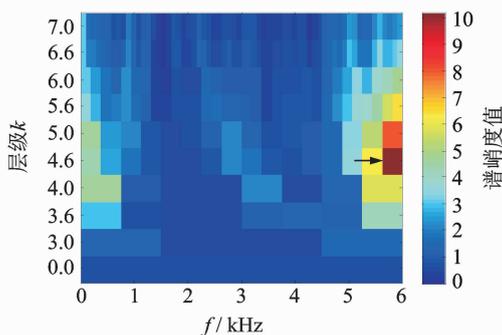


图 9 滚动体故障信号的快速谱峭度图

Fig. 9 Fast kurtogram spectrum of the fault signal

根据滚动轴承故障诊断的特点,利用包络分析对上述两种方法所选出的敏感 IMF 进行处理。图 10 为使用谱峭度和相关系数法选取的敏感 IMF(IMF_1)的包络谱,对比原信号包络谱,发现 IMF_1 与原信号的包络分析结果相类似,滚动体故障特征频率明显,亦出现了如点划线框所示的干扰项。图 11 为使用快速谱峭度图方法选取的敏感 IMF(IMF_3)的包络谱,发现滚动体故障特征频率明显,部分干扰项得到了抑制。

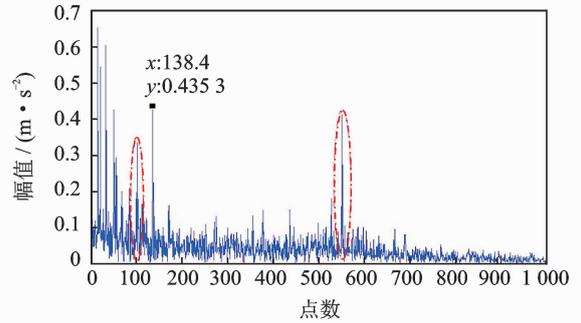


图 10 利用谱峭度和互相关系数方法选取的敏感 IMF 包络谱

Fig. 10 The envelope spectrum of sensitive IMF by using cross-correlation coefficients between IMF and original signal and the IMF kurtosis

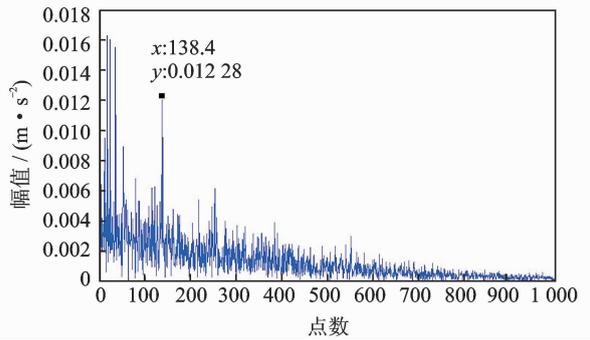


图 11 利用快速谱峭度图方法选取的敏感 IMF 包络谱

Fig. 11 The envelope spectrum of sensitive IMF by using fast kurtogram spectrum

对 3 组包络谱(原信号、 IMF_1 和 IMF_3)做进一步分析,发现它们均能识别出故障特征频率。可以假定冲击故障特征信息分布在整个频带内^[13],而 EEMD 是一种从高频到低频分解的处理过程,故 2 个 IMF 和原信号中均含有故障特征信息。2 个 IMF 的包络谱分析结果之间又有所不同,表明有的 IMF 相较于其他 IMF 可更明显地表达故障信息。该方法使用了谱峭度最大值所处的频带范围这一特征频带区间参数,将依靠人工经验的取舍单值参数问题简化为易于筛选的频带区间从属问题,克服了使用谱峭度、相关系数在内的单值特征参数可能出现的参考系数连续、不易区分而造成的敏感 IMF 选

取困难问题,使敏感 IMF 选取方法更明确。

4 结 论

1) 针对如何从 EEMD 分解的一系列 IMF 中选取敏感 IMF 的问题,提出了基于快速谱峭度图的敏感 IMF 选取方法。该方法利用谱峭度最大值所处的频带范围为特征频带区间,将依靠人工经验取舍单值参数问题简化为易于筛选的特征频带区间的从属问题,克服了单值特征参数可能出现的参考系数不易区分而造成的敏感 IMF 选取困难问题,使敏感 IMF 选取方法更易于实现。

2) 因 EEMD 分解能自适应的对非线性、非平稳信号进行分析处理,谱峭度方法特别适用于冲击信号的分析。快速谱峭度图方法可检测出最能体现故障信息的共振调制频带,因此,已有相关的将 EEMD 和谱峭度方法相结合的故障诊断方法研究。与其他研究不同的是,所提出的方法将快速谱峭度图运用到敏感 IMF 的选取问题上,以便对 EEMD 分解的多个 IMF 进行筛选,而非设计一套完整的故障诊断方案。

3) 除 EEMD 的敏感 IMF 选取外,该方法还可以推广至其他需要提取冲击信号特征的多分量选取方法中,如 EMD 和小波包分析等。

参 考 文 献

- [1] Pan Minchun, Tsao W. Using appropriate IMFs for envelope analysis in multiple fault diagnosis of ball bearings [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 69:114-124.
- [2] Lei Yaguo, He Zhengjia, Zi Yanyang. Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23:1327-1338.
- [3] 苏文胜,王奉涛,张志刚,等. EMD 降噪和谱峭度法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3):18-21.
Su Wensheng, Wang Fengtao, Zhang Zhigang, et al. Application of EMD denoising and spectral kurtosis in early fault diagnosis of rolling element bearing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 18-21. (in Chinese)
- [4] 雷亚国. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的机械故障诊断[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 71-77.
Lei Yaguo. Machinery fault diagnosis based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 71-77. (in Chinese)
- [5] 彭畅,柏林,谢小乐. 基于 EEMD、度量因子和快速谱

峭度图的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20):143-146.

Peng Chang, Bo Lin, Xie Xiaole. Fault diagnosis method of rolling element bearing based on EEMD, measure-factor and fast kurtogram[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20):143-146. (in Chinese)

- [6] 张志刚,石晓辉,施全,等. 基于改进 EMD 和谱峭度法滚动轴承故障特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3):478-482.
Zhang Zhigang, Shi Xiaohui, Shi Quan, et al. Rolling bearing element fault feature extraction based on improved EMD and spectral kurtosis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3): 478-482. (in Chinese)
- [7] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009(1):1-41.
- [8] 从飞云,陈进,董广明. 基于谱峭度和 AR 模型的滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 538-541.
Cong Feiyun, Chen Jin, Dong Guangming. Spectral kurtosis and AR model based method for fault diagnosis of rolling bearings[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4):538-541. (in Chinese)
- [9] Dwywe R F. Detection of non-Gaussian signals by frequency domain kurtosis estimation [C] // Acoustics, Speech and Signal Processing. Boston: IEEE International Conference on ICASSP, 1983: 607-610.
- [10] Antoni J. The spectral kurtosis; a useful tool for characterizing non-stationary signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20:282-307.
- [11] Antoni J. Fast computation of kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21:108-124.
- [12] Lei Yaguo, He Zhengjia, Zi Yanyang. EEMD method and WNN for fault diagnosis of locomotive roller bearings [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38:7334-7341.
- [13] Jiang Ruihong, Liu Shulin, Tang Youfu, et al. A novel method of fault diagnosis for rolling element bearings based on the accumulated envelope spectrum of the wavelet packed[J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 21(8): 1580-1593.



第一作者简介:蒋超,男,1987年10月生,博士研究生。主要研究方向为机械故障诊断的信号处理方法。
E-mail:jc31@163.com