

一种新的 IMF 判据及其在风力发电机 滚动轴承故障诊断中的应用*

郭艳平, 颜文俊

(浙江大学 电气学院, 杭州 310027)

摘要: 针对现有 EMD 中 IMF 判据必须指定经验值范围的缺点, 提出了一种基于峭度的 IMF 判据方法, 该方法不必设定经验值, 从而避免了由于经验取值的不同而造成分解结果的差异。仿真实验表明, 与现有方法相比, 该迭代次数判断方法能在保证计算速度的同时, 使所得 IMF 分量具有更加明确的物理意义, 能够很好地体现信号的非线性、非平稳特征, 实现了信号的正确分解。将该方法应用在风力发电机齿轮箱高速端轴承的故障诊断中, 准确诊断出了故障部位, 同时也验证了该方法在 EMD 过程中确定迭代次数的有效性和准确性。

关键词: 经验模态分解; 内禀模态函数判据; 峭度; 风力发电机; 滚动轴承; 故障诊断

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)09-3362-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.042

New IMF stop criterion and its application in fault diagnosis of wind turbine

GUO Yan-ping, YAN Wen-jun

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the disadvantage of existing IMF stop criterion, the paper proposed a new criterion. There was no need to set a experiential value, which was related to the number of sifting process. Comparing to other method, it is demonstrated that the IMF component obtained by the stop criterion based on kurtosis can reflect the characteristic of non-stationary and nonlinear. This IMF stop criterion was applied to the fault diagnosis of rolling bearing in wind turbine, the result show that this criterion is effective and veracity.

Key words: EMD; IMF stop criterion; kurtosis; wind turbine; rolling bearing; fault diagnosis

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)能将信号自适应地分解为若干个内禀模态函数(intrinsic mode function, IMF), 每个 IMF 都与一定的物理意义相对应。因此 EMD 非常适合用来处理非线性、非平稳过程, 目前已在海洋波动数据处理、地震信号分析和故障诊断^[1,2]以及电力系统^[3~5]等领域证明了其有效性。

EMD 方法是一个筛分过程, 需多次迭代后才能分解出一个 IMF, IMF 的定义要求其上下包络线平均值为零, 但在三次样条拟合过程中引入了干扰, 从实际信号中分解出的 IMF 的包络线平均值不可能为零, 迭代次数越多, 包络线的平均值越接近零; 如果迭代次数太多, 得到的 IMF 分量会是无物理意义的定长振幅调频波。因此在 EMD 过程中, 如何准确确定迭代次数成为一个关键问题。Huang 等人^[6]采用分解结果前后的标准差 SD 的取值来控制迭代次数, 其取值在 0.2~0.3 之间时较合理, 取值太小时, 计算量会大大增大, 分解得到的 IMF 将趋于定常幅值, 信号的非线性和非平稳特征也同时被淹没; 取值太大时, 分解结果很难满足 IMF 的定义。SD 的取值是建立在有限经验基础上的, 而且没有考虑到 IMF 的定义; 还有一种方法是在连续的 S 次分解中, 极值点和过零点个数都相等, 则分解过程结束^[7], S 的典型取值范围为 $3 \leq S \leq 5$ ^[8]。Rilling 等人^[9]将上下包络线之和与上下包络线之差的绝对比值 σ 用来

控制迭代次数, 其典型取值为 0.05。现有的确定迭代次数的方法都是基于某个经验值的基础上, 对 IMF 判据优化有一定的作用, 但随着经验值的不同, 使得迭代次数也不同, 得到的结果也有很大差异。

针对现有 IMF 判据的缺点, 本文提出了基于峭度的 IMF 判据方法, 该方法不必指定某一变量的经验值范围, 而是利用峭度对冲击成分敏感, 可反映幅值分布形状变化的特点, 避免了由于经验取值不同而造成结果差异的缺陷。

1 EMD 方法

EMD 方法可自适应地将信号分解为若干个 IMF 之和, 每一个 IMF 分量必须满足两个定义条件: a) 在整个数据段内, 极值点的个数和过零点的个数必须相等或相差不超过一个; b) 在任意时刻, 由局部极大值点形成的上包络线和由局部极小值点形成的下包络线的平均值为零。

每个 IMF 分量表征一种模态, 通过 EMD 方法对 $x(t)$ 提取 IMF 分量的分解步骤^[7]: a) 确定信号的所有局部极值点, 然后用三次样条线将所有的局部极大值点连接起来形成上包络线; b) 用三次样条线将所有的局部极小值点连接起来形成下包络线, 上下包络线包络所有的数据点; c) 上下包络线的平均值为 m_1 , 求 $x(t) - m_1 = h_1$, 如果 h_1 满足上述两个 IMF 的条件, 则 h_1

收稿日期: 2011-11-29; 修回日期: 2011-12-31 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2007AA05Z432926)

作者简介: 郭艳平(1983-), 女, 河北人, 博士研究生, 主要研究方向为风力发电机在线监测及故障诊断(guoyanping1983@163.com); 颜文俊(1965-), 男, 浙江人, 教授, 博导, 主要研究方向为优化控制、复杂系统建模与分析。

就是信号 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量; d) 如果 h_1 不满足上述两个 IMF 的条件, 就把 h_1 作为原始信号数据, 重复进行步骤 a) ~ c), 直到 h_{1k} 满足 IMF 条件, 令 $c_1 = h_{1k}$, 即 c_1 为第一个满足 IMF 条件的分量; e) 计算 $r_1 = x(t) - c_1$, 再将 r_1 视为原始信号重复步骤 a) ~ d), 得到信号 $x(t)$ 的第二个 IMF 分量 c_2 。依此类推, 直到 r_n 为一个单调函数为止, 循环结束, 得 $x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n$, 式中, r_n 为残余函数, 代表信号的平均趋势。

2 基于峭度的 IMF 判据

峭度 K 是反映信号分布特性的数值统计量, 是归一化的四阶中心矩。其表达式为

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right]^4 \quad (1)$$

其中: x_i 为信号值; $\bar{x}$ 为信号均值; N 为采样长度; σ 为标准差。

峭度是一个无量纲参数, 它对转速、载荷等不敏感, 而对信号中的冲击成分敏感, 如当滚动轴承在内环、外环或滚动体出现点蚀或剥落故障时, 相应的振动信号中的冲击脉冲增多, 幅值分布形状不断变化, 反映幅值分布情况的峭度值也随之变化。同理, 将峭度应用到 IMF 判据问题的处理中, 根据 IMF 的定义, 它是满足单分量信号物理解释的一类信号, IMF 具有相同的极值点和过零点数目, 其波形与一个标准正弦信号通过调幅和调频得到的信号相似。所以在 EMD 分解过程中, 如果迭代次数太少, 分解得到的 IMF 将很难满足定义条件; 但分解次数也不是越多越好, 当迭代次数太多时, 分解得到的 IMF 往往是一些没有物理意义的等幅波。随着分解次数的增大, 峭度值也在不断变化, EMD 方法从信号中分解出的具有物理意义的单分量模态较之前更准确; 当峭度值随分解次数的增大而趋于稳定时, 如果迭代次数继续增大, 分解结果可以满足 IMF 的定义条件, 但却给系统带来很大的负担, 以牺牲计算速度为代价, 却没有为结果做出相应的贡献。所以选择峭度值开始稳定时的迭代次数为最终次迭代较合适, 这样分解得到的 IMF 可满足定义条件, 是具有物理意义的相对准确的单模态分量, 同时又不会给系统带来额外的负担。

3 仿真实验

为了验证基于峭度的 IMF 判据的优越性和有效性, 特对仿真信号进行分析。

如图 1(a) 所示的仿真信号 $x(t)$, 其表达式^[10]为

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = 4 \sin(20\pi t) \sin\left(\frac{2\pi}{10}t\right) + \sin(10\pi t) \quad t \in [0, 1000] \quad (2)$$

采用 EMD 对信号进行分解时, 每进行一次迭代过程, 计算一次峭度值。峭度值随分解次数 N 的变化情况如图 1(b) 所示, 当分解次数 N 为 340 时, 分解出的 IMF1 的峭度值为 2.503, 在分解次数一直增大到 3 000 的过程中, 峭度值的变化很小; 当迭代次数为 340 时, 分解结果如图 1(c)(d) 所示, 分解出的第一个分量 IMF1 如图 1(c) 为单一的模式分量, 它已含有足够的频率和幅值调制信息, 此时若迭代次数再增大, 只是徒增计算量, 增加系统负担, 淹没信号的非平稳特征。为了验证这一点, 特别计算正交性指标 ORT 和 $\sum_{i=1}^{1000} |IMF1 - x_1(t)|$ 的值随分解次数增大的变化情况, 如图 1(e) 和 (f) 所示。当分解次数为 340 时, 正交性指标达到最小值 0.023 01, IMF1 与 $x(t)$ 之

的绝对差之和也达到了一个较小值, 这说明当迭代次数为 340 时, 分解出的 IMF1 分量与它的理论值 $x_1(t)$ 之间的误差最小, 即最接近理想数值, 如图 2 所示, 这两者的波形几乎重合。

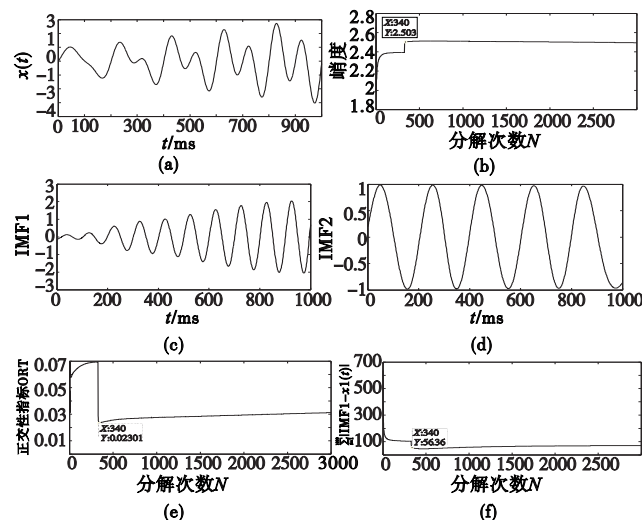


图1 仿真信号及其EMD分解结果(采用基于峭度的IMF判据方法)

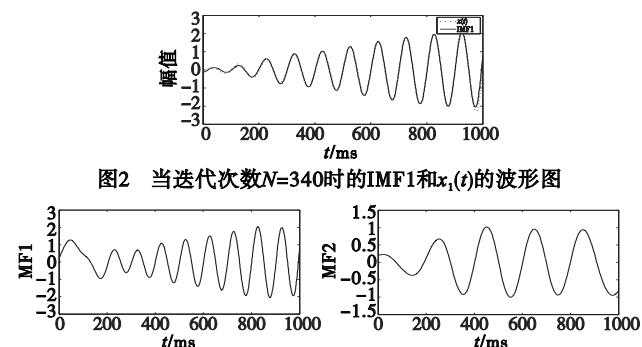


图2 当迭代次数 $N=340$ 时的IMF1和 $x_1(t)$ 的波形图

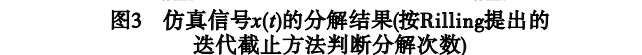


图3 仿真信号 $x(t)$ 的分解结果(按Rilling提出的迭代截止方法判断分解次数)

如果采用 Rilling 提出的 $\sigma(t)$ 的大小来确定迭代次数, 设定 $\sigma(t) < \theta_1 = 0.05$, 分解得到前两个分量 IMF1 和 IMF2 如图 3 所示。从图 3 中可见, IMF 分量的前部严重失真, 失去了原有的物理意义, 正交性指标为 0.06。由此可见, 采用基于峭度的 IMF 判据得到的迭代次数更准确, 所得结果更能满足正交性要求, 得到的 IMF 分量具有更明确的物理意义。

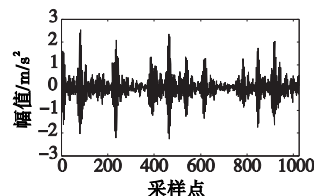


图4 有故障滚动轴承振动加速度信号

4 在风力发电机齿轮箱高速端轴承故障诊断中的应用

某风电场有一台 1.5 MW Vestas V66 风力发电机, 2011 年 3 月齿轮箱出现振动、噪声变大的不良状态。经查振动源在齿轮箱高速端输出轴, 布置在齿轮箱高速端轴承座水平方向的振动加速度传感器采集的信号时域波形如图 4 所示, 加速度传感器型号为 LC0108, 采样频率为 12 kHz, 有关的振动数据均来自笔者项目组人员开发完成的风力发电机组在线监测及故障诊断系统^[11], 高速端轴承型号为 NJ 2326 E, 其内环故障特征频率 $f_i = 8.3794f_n$; 外环故障特征频率 $f_o = 5.6522f_n$; 滚动体故障特征频率 $f_r = 4.9802f_n$ 。其中 f_n 为齿轮箱高速轴的旋转频率。

采用 EMD 方法对信号进行分解,得峭度随分解次数 N 的变化情况如图 5 所示,当分解次数为 59000 时,得到的第一个 IMF 分量如图 6 所示。在第一个 IMF 中包含了明显的调制特征,即故障信息,调制周期 $T = (539 - 463) \times 1 / (12 \times 10^3) = 76 / (12 \times 10^3)$,得频率 $f = 157.9$ Hz,对应轴承外环的故障特征频率 $f_o = 5.6522 f_n = 5.6522 \times \text{转速}(\text{rpm}) / 60 = 5.6522 \times 1676 / 60 = 157.9$ Hz,由此判断轴承外环可能有点蚀或剥落故障。服务人员于 2011 年 5 月更换了轴承,发现轴承外环严重剥落,剥落面积大约 $50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,且润滑油被金属颗粒污染严重,更换后的齿轮箱高速端振动值恢复正常值。由以上分析可见,所提出的基于峭度的 IMF 判据方法在风力发电机故障诊断中的应用效果很好,使迭代过程停止于峭度值稳定的开始端,可准确分解出单一的模态分量,这一模态所包含的调制频率对应为外环的故障特征频率,说明了基于峭度的 IMF 判据的有效性和准确性。

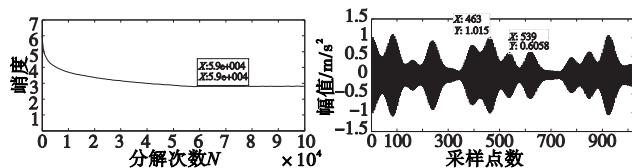


图5 峭度值随分解次数的变化情况

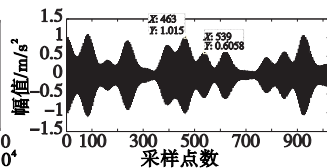


图6 风力发电机有故障轴承振动信号的第一个IMF分量

5 结束语

本文提出了基于峭度的 IMF 判据方法,根据峭度值的变化来确定迭代次数,经过仿真实验和实际信号的分析,验证了通过这种方法确定的 IMF 分量具有真实的物理意义,且符合正交性和完备性的要求,实现了信号的正确分解,对 EMD 方法的优化和应用很有意义。由于风力发电机组所处环境恶劣,风

况不稳定,所以采集的振动数据需进行一些预处理,可对此方面展开进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘青,张媛,王增平. 多分辨 HHT 在 STATCOM 并补线路故障位置识别中的应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):19-23.
- [2] 刘振兴,张文蓉. 基于 HHT 方法的异步电动机运行模式识别[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):55-57.
- [3] 贾嵘,王小宇,罗兴铸. 经验模态分解的改进及其在水轮发电机组振动信号分析中的应用[J]. 机械科学与技术,2007,26(5):626-630.
- [4] 陈志新,徐金梧,杨德斌,等. 基于经验模态分解的混沌噪声背景下弱信号检测与信号提取[J]. 机械科学与技术,2006,25(2):220-224.
- [5] 盖广洪. 基于经验模态分解的转子提东波德图绘制[J]. 机械科学与技术,2006,25(1):9-11.
- [6] HUANG N E, SHEN Zheng, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Science*, 1998, 454(1971):903-995.
- [7] HUANG N E, SHEN Zheng, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, 31:417-457.
- [8] HUANG N E, WU M-L C, LONG S R, *et al.* A confidence limit for the Empirical Mode Decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Science*, 2003, 459(2037):2317-2345.
- [9] RILLING G, FLANDRIN P, GONCALVES P. On empirical mode decomposition and its algorithms[C]//Proc of IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. 2003.
- [10] 于德介,程军圣,方宇. 机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M]. 北京:科学出版社,2006:50-51.
- [11] 郭艳平,颜文俊,包哲静. 风力发电机组在线故障预警与诊断一体化系统设计与应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):83-86.