

一种新的内禀模态函数判据^①

郭艳平¹, 邓志杰²

¹(中山火炬职业技术学院 电子工程系, 中山 528436)

²(兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 针对现有 EMD (Empirical Mode Decomposition) 分解过程中内禀模态函数判据必须确定某一经验值的缺点, 本文提出了一种基于信息熵的内禀模态函数判据, 该判据不必设定某一参数的经验值, 从而避免了由于经验取值不同造成分解结果有很大差异的缺陷。通过与现有方法的对比表明: 依此判据所得内禀模态函数更准确, 能够很好的体现信号的非线性、非平稳特征, 同时使分解结果具有更好的正交性。将此判据应用在风力发电机组齿轮箱高速端轴承的故障诊断中, 验证了依此判据所得分解结果更好的保留了冲击脉冲、幅值和频率调制等故障特征信息, 从而准确诊断出故障部位所在。

关键词: EMD; 内禀模态函数; 信息熵; 滚动轴承; 故障诊断

New Stop Criterion of Intrinsic Mode Function

GUO Yan-Ping¹, DENG Zhi-Jie²

¹(Department of Electronic Engineering, Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan 528436, China)

²(Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to solve the disadvantage that it needs to set an experiential value of existing stop criterion of Intrinsic Mode Function in EMD (Empirical Mode Decomposition) sifting process, the paper proposes a new criterion of Intrinsic Mode Function based on Shannon entropy. There is no need to set an experiential value of a parameter, which avoids the defects of differences in decomposition results caused by different experience value in sifting process. By comparing with other criterion, it demonstrates that the decomposition result are more accurate and have smaller index of orthogonality according to the proposed stop criterion, the IMFs can reflect the characteristic of non-stationary and nonlinear in signal. This stop criterion is applied to the fault diagnosis of rolling bearing in wind turbine. The result shows that this criterion can better retain the fault feature information such as the shock pulse, amplitude and frequency modulation, and diagnose the fault site accurately.

Key words: EMD; IMF stop criterion; Shannon entropy; rolling bearing; fault diagnosis

EMD 可自适应的将信号分解为若干个内禀模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF), 每个 IMF 对应一个特征时间尺度模态分量, EMD 已经被广泛应用于海洋波动数据处理、机械设备故障诊断^[1]、电力系统分析^[2]等研究领域。

目前, 影响 EMD 应用效果的主要问题包括内禀模态函数的判据问题^[3]、模态混淆^[4]、端点效应^[5]等。经过多次迭代分解出的 IMF 都具有一定的物理意义, 迭

代次数太少, 分解出的 IMF 分量不满足定义要求, 迭代次数太多, 得到的 IMF 为定常振幅的调频波, 失去了信号的物理意义, 因此分解出一个 IMF 需要的迭代次数如何确定? 即内禀模态函数的判据问题亟待解决。文献[6]采用迭代前后结果的标准差来确定迭代次数, 即通过确定阈值的经验值来控制迭代次数, 阈值经验取值对分解效果有很大的影响, 如果阈值太小, 分解所得 IMF 分量将趋于定常幅值, 难以反映频率调制特

① 基金项目:国家自然科学基金(61273168);中山市科技计划(2013A3FC0309)

收稿时间:2016-07-13;收到修改稿时间:2016-09-02 [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005711]

征;如果阈值太大,分解结果将很难满足 IMF 的定义条件.文献[7]是在持续的 N 次迭代中,当极值点和零交叉点的个数相同时,则迭代结束,这种方法的分解结果对 N 值的选择较关键,不同的 N 值会得到不同的分解结果.文献[8]用上下包络线之和与上下包络线之差的绝对比值 σ 来控制迭代次数,此比值基于某个经验值,经验取值对分解结果有很大的影响.现有内禀模态函数判据都依赖于某个经验值,经验值取值不同,迭代次数不同使得最终分解结果有很大差异.

针对现有内禀模态函数判据对某一经验值依赖性的缺点,本文提出了一种基于信息熵的内禀模态函数判据,该判据不必确定某一参数的经验值,而是利用信息熵可以判断信号无序性程度的特点,避免由于经验取值不同而造成结果差异的缺陷,并对仿真信号进行分析,通过与其它判据的对比表明了此判据的优越性和准确性,最后将此判据应用在风力发电机组齿轮箱高速端轴承故障诊断中,进一步证明了此判据的实用性和有效性.

1 内禀模态函数定义及EMD分解步骤

内禀模态函数是满足单分量信号物理解释的一类信号,每一个内禀模态函数必须满足以下条件:1)极值点的个数和过零点的个数之差为零或一;2)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.

采用 EMD 对信号 $x(t)$ 进行分解得若干内禀模态函数的步骤^[4]:

1) 确定信号的所有局部极值点,并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;

2) 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;

3) 求上、下包络线的平均值 m_1 , 并求 $x(t)-m_1=h_1$, 如果 h_1 满足上述内禀模态函数定义条件,则此迭代过程结束, h_1 就是信号 $x(t)$ 的第一个内禀模态函数;

4) 如果 h_1 不满足定义条件,就把 h_1 作为原始信号,重复进行步骤 1)-3),直到 h_{1k} 满足 IMF 的定义条件,则此次迭代过程结束,并令 $c_1=h_{1k}$,即 c_1 为第一个 IMF 分量;

5) 计算 $r_1=x(t)-c_1$,再将 r_1 视为原始信号重复步骤 1)-4),得到信号 $x(t)$ 的第二个 IMF 分量 c_2 ,以此类推,直到 r_n 为一个单调函数为止,分解过程结束.

2 基于信息熵的内禀模态函数判据

一个含有 N 个可能值的序列 $x(n)$,其取值概率依次为 p_1, p_2, \dots, p_n , 则其信息熵为: $H(t) = -\sum_{i=1}^N p_i \lg p_i$.

信息熵是用来描述系统不确定程度的物理量,信息熵值的大小可反映时频分布的聚集性,如果一个振动信号的信息熵值越小,说明其时频分布的聚集性越好;反之,信息熵值越大,时频分布的聚集性越差.

当齿轮箱中的滚动轴承发生故障时,其振动信号中会包含冲击脉冲成分,其频谱中会出现以滚动轴承内、外环的故障频率为中心频率,以滚动轴承通过频率为调制频率的幅值和频率调制信息,亦称为故障特征信息,对故障振动信号进行 EMD 分解,经过若干次的迭代过程可得数个内禀模态函数,如果内禀模态函数中包含的故障特征信息越多,该函数表现的越有序,时频分布的聚集性越好,信息熵值越小,反之,如果该函数中包含的故障特征信息越少,其时频分布聚集性越差,信息熵值越大,因此可以根据信息熵来作为内禀模态函数判据,即用信息熵值的大小来控制 EMD 分解过程中的迭代次数,来确保分解所得内禀模态函数含有较多的故障特征信息,从而为后续的故障位置、故障类型和故障程度的判断提供坚实的基础.

3 仿真实验

为了验证基于信息熵的内禀模态函数判据的优越性和有效性,特对仿真信号进行分析.

仿真信号 $x(t)$ 的表达式^[9]为:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = 4 \sin(25\pi t) \sin\left(\frac{4\pi}{10}t\right) + \sin(15\pi t), t \in [0, 1]$$

采用 EMD 对信号进行分解,每进行一次迭代,计算一次信息熵值.信息熵值随迭代次数 N 的变化趋势如图 1 所示,当迭代次数 N 为 321 时,分解出的第一个内禀模态函数的信息熵值达到最小值 6.4,当迭代次数为 321 次时得到的第一个和第二个内禀模态函数如图 2 所示,在迭代次数一直增大到 3000 的过程中,信息熵值逐步变大,信息熵值可以反映信号的无序性程度,信号越有序,熵值越小;信号越无序,熵值越大,当滚动轴承的某一部件出现故障点时,该故障点会随着轴承的旋转与其他部件发生周期性的撞击,在振动信号中出现周期性的脉冲冲击成分,在频域中表现为频率和幅值调制的故障特征.由图 1 可知,经过 321 次迭代得到的内禀模态函数 IMF1 最有序,它已含有足够的

频率和幅值调制等故障特征信息,若继续增加迭代次数,只是徒增计算量,淹没信号的非平稳特征,为了验证这一点,特计算正交性指标 $IO^{[4]}$ 随分解次数增大的变化情况,如图3所示,当迭代次数为321时,正交性指标达到较小值0.028,此时所得IMF1与它的理论值 $x_1(t)$ 之间的误差较小,如图4所示,这两者的波形几乎重合。

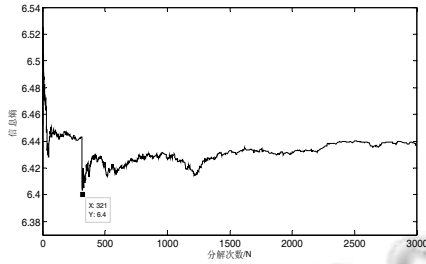


图1 信息熵值随分解次数变化情况

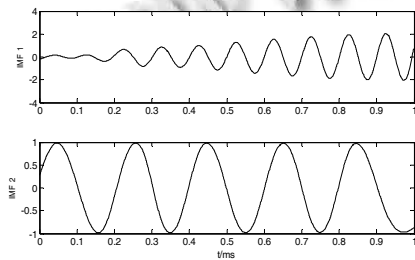


图2 迭代321次时所得内禀模态函数

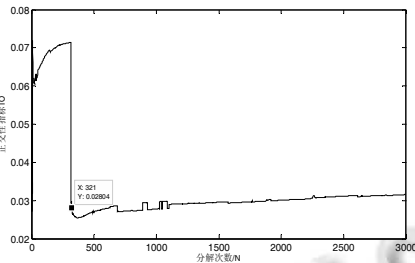


图3 正交性指标随分解次数的变化情况

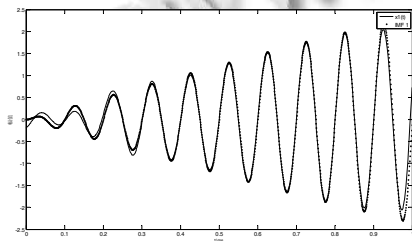


图4 迭代321次时第一个内禀模态函数和理想值波形

文献[8]提出采用 $\alpha(t)$ 的大小来确定迭代次数,设定 $\alpha(t) < \alpha_1 = 0.1$. 分解得到前两个内禀模态函数IMF1和

IMF2,分别如图5、图6所示,图中的 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 分别是IMF1和IMF2的理论值,从图中可见,两个内禀模态函数的前部严重失真,失去了原有的物理意义,正交性指标为0.047,通过对比可知,采用本文所提出判据不仅可得到更准确的内禀模态函数,还能更好的满足正交性要求。

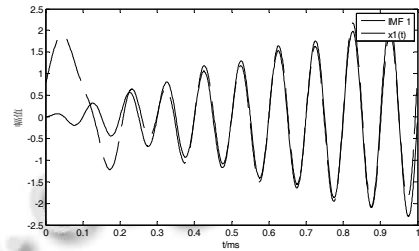


图5 IMF1及其理想值(按文献[8]提出的判据)

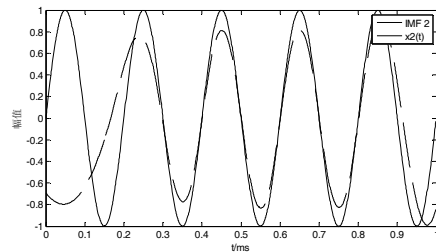


图6 IMF2及其理想值(按文献[8]提出的判据)

4 风力发电机组齿轮箱轴承故障诊断

一台1.5MW Vestas V66风力发电机组,2011年3月齿轮箱高速轴侧出现振动和噪声变大的不良状态.采用压电加速度传感器采集振动加速度信号,加速度传感器的采样频率为12kHz,振动数据均来自风力发电机组在线监测及故障诊断系统^[9],故障轴承内环故障特征频率 $f_i=8.3794f_n$; 外环故障特征频率 $f_o=5.6522f_n$; 滚动体故障特征频率 $f_r=4.9802f_n$; 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,信息熵随迭代次数N的变化情况如图7所示,当分解次数为24时,信息熵值达到最小值5.32,此时得到的第一个内禀模态函数IMF1如图8所示,在此函数中包含明显的频率和幅值调制特征,即故障信息,对此模态函数进行Hilbert包络解调分析,结果如图9所示,调制频率 $f=152.3\text{Hz}$,如果分解次数继续增大,假设增大到50000次,得到的内禀模态函数如图10所示,对比9和10图,在外环故障特征频率处的能量值随分解次数变小,且外环故障特征频率二倍频处的能量衰减很大,由对比可知,分解次数为24次时,可更好的保留调制

解调等故障信息,为故障部位的诊断提供了很好的基础.服务人员随后更换了轴承,发现轴承外环存在面积大约 50mm×5mm 的严重剥落点,且润滑油已被金属颗粒污染,由以上分析可知,本文所提出的基于信息熵的内禀模态函数判据可准确分解出具有物理意义的单一模态分量,分解过程可很好的保留冲击脉冲、幅值和频率调制等故障信息,从而准确诊断故障部位所在,同时也证明了此判据在风力发电机组齿轮箱故障诊断中的有效性和准确性.

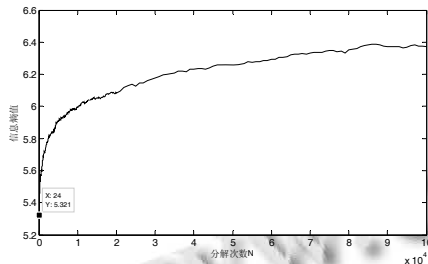


图7 信息熵值随分解次数的变化情况

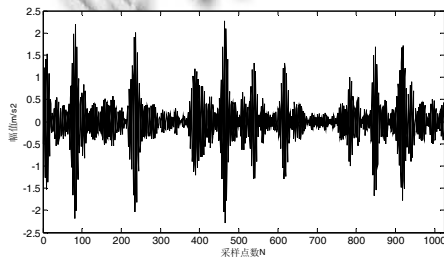


图8 故障轴承振动信号的第一个IMF分量

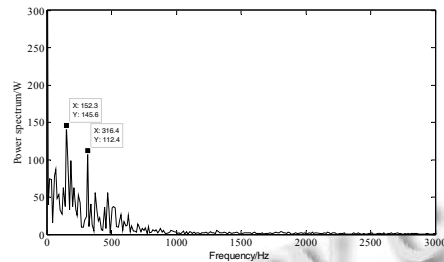


图9 第一个内禀模态函数的Hilbert包络解调谱(分解次数为24)

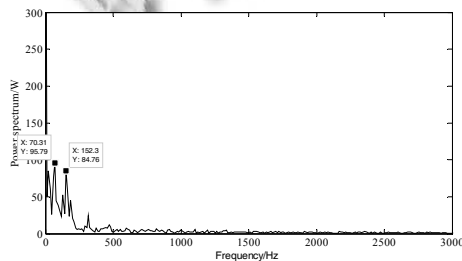


图10 第一个内禀模态函数的Hilbert包络解调谱(分解次数为50000)

5 结论

EMD 非常适合用来分析非线性、非平稳的信号,但是存在内禀模态函数判据依赖于某一经验值的缺点.本文提出基于信息熵的内禀模态函数判据,即用信息熵可反映信号无序性程度的特点,来避免由于经验取值不同而造成分解结果有很大差异的缺陷,将此判据与其他判据同时对仿真信号进行分解,证明了依此判据所得内禀模态函数更准确,并具有更好的正交性指标;通过对风力发电机组齿轮箱故障振动信号的分析,证明了此判据在 EMD 分解过程中可更好的保留冲击成分、幅值和频率调制等故障特征信息,从而为下一步的故障诊断提供了有效的保证.

参考文献

- 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.机械科学与技术,2007,26(5):626-630.
- 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.电力自动化设备,2010,30(11):19-23.
- Huang NE, et al. A confidence limit for the Empirical Mode Decomposition and Hilbert spectral analysis. Proc. of the Royal Society London A, 2003, 459(2037): 2317-2345.
- Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih EH, Zheng Q, Tung CC, Liu HH. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis. Proc. of the Royal Society London A, 1998, 454(1971): 903-995.
- Deng Y, Wang W, Qian C, et al. Boundary-processing-technique in EMD method and Hilbert transform. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(11): 954-960.
- Huang W, Shen Z, Huang NE, et al. Use of intrinsic modes in biology: Examples of indicial response of pulmonary blood pressure to +/- step hypoxia. Proc. of the National Academy of Sciences, 1998, 95(22): 12766-12771.
- Huang W, Shen Z, Huang NE, et al. Nonlinear indicial response of complex nonstationary oscillations as pulmonary hypertension responding to step hypoxia. Proc. of the National Academy of Sciences, 1999, 96(5): 1834-1839.
- Rilling G, Flandrin P, Gonçalves P. On empirical mode decomposition and its algorithms. IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP-03. Grado (I). June 2003.
- 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.电力系统自动化,2010,34(16):83-86.