

EMD 及其在声发射检测中的应用研究

阳能军, 汤伟, 龙宪海, 雷涛

(第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘要: 介绍了经验模式分解 (EMD) 的原理。在分析了 EMD 方法的优点和不足的基础上, 首次提出将该方法应用于声发射检测中。通过理论上的分析, 本文列举了 EMD 在声发射检测中的几种典型应用, 为将该方法应用于声发射领域提供了参考。

关键词: 经验模式分解 (EMD); 声发射检测; 故障诊断

EMD and Research Employed to Acoustic Emission Testing

Yang Nengjun, Tang Wei, Long Xianhai, Lei Tao

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025)

Abstract: The principle and current research of Empirical Mode Decomposition (EMD) have been introduced in this paper. Based on the advantages and shortages of EMD, it is the first time to use this method to Acoustic Emission Testing. By the theoretical analysis, this paper enumerates several kinds of typical application in Acoustic Emission Testing and provides to consult for applying this method to Acoustic Emission realm.

Key Word: Empirical Mode Decomposition (EMD); Acoustic Emission Testing; Fault Diagnosis

声发射 (AE) 是指材料或结构受内力或外力作用产生变形或断裂, 以弹性波的形式释放出应变能的一种物理现象。通过声发射技术, 从能量波中获得与物体特征改变对应的大量信号。对探测到的这种声发射信号进行分析处理后, 就能得到被探测材料或结构内声发射源的大量信息。然而, AE 源机制的多样性、声波传播途径的复杂性、AE 信号本身的突发性和不确定性以及干扰噪声的严重性等因素都使 AE 信号的处理和分析面临极其严重的挑战。从 AE 技术发展初期的参数分析方法, 到近十几年来基于模态声发射理论的波形分析技术, 人们一直在利用各种信号处理方法试图更好的分析声发射信号。

2 EMD 原理

1998 年, 美籍华人 Norden E. Huang 等人提出¹了一种新的信号分析方法——经验模式分解 (Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD) 方法^{[1][2]}。与传统的傅立叶变换、小波变换方法相比, EMD 方法具有直观性、直接性、后验性及自适应性, 其分解所用的基是基于原始信号的, 尤其适用于具有非线性和非平稳特性的声发射信号。EMD 方法与传统的数据处理方法完全不同, 它认为每组数据可以分解为有限个本征模态函数 (IMF) 之和, 分解出来的各个 IMF 分量突出了数据的局部特征, 对其分析可以更准确把握原数据的特征信息。对各个 IMF 分量进行 Hilbert 变换, 得到对应的 Hilbert

频谱图, 该图具有更强的频率分辨率。该方法主要分两个步骤:

(1) 对信号进行经验模式分解, 将信号分解成有限个本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, 简称 IMF)。若给定信号 $x(t)$, 则其 EMD 分解可写作以下形式:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N C_n(t) + r_N(t) \quad (1)$$

式中: $C_n(t)$ 是经过第 n 次分解得到的 IMF 分量, $r_N(t)$ 为分解后得到的残差。

(2) 对每个本征模态函数进行希尔伯特变换 (Hilbert Transformation, 简称 HT), 组成时频谱图进行分析, 因此该方法也称为希尔伯特黄变换 (Hilbert-Huang Transformation, 简称 HHT)。

3 EMD 的优越性及应用前景

基于 EMD 的时频分析方法, 被认为是近年来以傅立叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破。EMD 分析方法从根本上摆脱了傅立叶变换理论的束缚, 能很好地解释以往将瞬时频率定义为解析信号相位的导数时容易产生的一些所谓“悖论”, 更适合处理复杂的非平稳信号, 是一种更具适应性的时频局部化分析方法^[3]。EMD 方法引起了很多研究人员的关注, 并已在解决地球物理学、生物医学、机械工程等领域的实际问题中取得了一些成果^[4-6]。这种分析方法最大的优点在于提出了本征模态函数, 使得信号的瞬时频率具有了物理意义, 从而能得到信号完整的时频分布, 其主要优点体现在以下几个方面:

(1) EMD 方法的截止频率和带宽都随信号的

变化而变化, 可以看成是一个自适应的高通滤波器。

(2) EMD 方法不像小波分解那样需要预先选择基函数, 它依据信号本身的信息进行的分解, 在整个“筛分”过程中是直接的和自适应的。

(3) EMD 方法可以实现自适应的多分辨率分析。通过 EMD 方法将信号进行分解, 可以得到有限数目的 IMF 分量, 各个 IMF 分量包含了不同的特征时间尺度, 这样就可以使信号特征在不同的分辨率下显示出来。

(4) EMD 的分解结果是满足特定条件的 IMF 分量, 这些 IMF 分量可以是幅值或频率调制的, 可变的幅度与瞬时频率不但极大地改进了信号分解的效率, 而且使 EMD 方法可以非常适合处理非线性和非平稳信号。

同时, 该方法理论上还不是很成熟, 方法本身存在一定的缺陷。在使用中存在异常干扰和端点效应两个问题。针对这两个问题, 已经提出了许多较好的解决方法, 并得到了比较理想的效果。目前, 声发射信号较多的采用小波分析, 并取得了较好的效果。但通过对 EMD 方法优越性的分析发现, 这种优秀的时频分析方法很适合于声发射信号的处理, 相对于小波分析具有更好的自适应性。因此, 把 EMD 方法引入声发射故障诊断领域, 无论是独立使用还是结合其他方法使用, 都有较高的应用价值。

EMD 方法自推出以来在许多非线性研究领域得到了成功的应用。随着其理论的不完善, 可以预测, 在不远的将来该方法必将在更多的研究领域中发挥巨大的推进作用。

4 EMD 在声发射检测中的应用

EMD 在故障诊断领域得到了较好的应用, 但在声发射检测方面的文献却极为少见。在分析了 EMD 和声发射信号的特点之后, 下文提出了 EMD 在声发射检测上的一些典型应用。

4.1 基于 EMD 的去噪方法

Zhaohua wu 等人发现了白噪声在 EMD 算法下的统计特性, 提出: 所有的 IMF 均服从正态分布; 各个 IMF 的傅立叶谱是一致的, 在半对数尺度坐标下覆盖同一区域。同时 Wu 等人还得出 IMF 的能量密度和其对应的平均周期的乘积是一个常数, 即

$$E_n \overline{T}_n = c \text{const} \quad (2)$$

式中 $E_n = \frac{1}{N} \sum [c_n(i)^2]$, 表示第 n 个 IMF 即 c_n 的能量密度, N 为数据长度; $\overline{T}_n = N / N_{\max}$, 表示第 n 个 IMF 的平均周期, N_{\max} 为 c_n 中极大值的数

据数目。不失一般性的, 对于正态分布的白噪声序列可假设上式中的常数为 1, 则

$$\ln \overline{E}_n + \ln \overline{T}_n = 0 \quad (3)$$

其中 $\overline{E}_n = \lim E_n$ 。Wu 等在文献[7]中证明能量密度函数是 χ^2 分布的, 从而推导了能量的扩展函数。鉴于以上结果, Wu 等提出了一个方法检验淹没在未知噪声中的信号: 首先将含噪声的信号进行 EMD 分解得 IMF_s; 然后确定置信级, 根据扩展函数画出能量密度的扩展限; 最后将其与含噪声的信号的 IMF_s 的能量密度相比较, 超过或者低于扩展限的 IMF_s, 将被认为在此置信级下含有信号。经过这样的处理, 可以判定哪一个从含噪声的信号得到的 IMF 含有有用信息, 哪一个 IMF 为纯噪声不含信息, 从而达到去噪目的。

小波滤波的机理是基于信号与噪声的小波系数在尺度上的不同性质, 采用相应准则对含噪小波系数进行处理, 从而达到去噪目的。EMD 去噪原理则是从含噪声的信号中利用 EMD 方法逐级分解出含高频噪声的 IMF 分量, 剩余的信号即为去噪后的信号。EMD 是根据信号本身固有的特性自然地分解信号, 无需设置先验的分解函数基, 从而不受波形相似原则的影响, 因此它比小波方法更具有通用性和稳定性。

4.2 基于 EMD 的故障特征信息提取

EMD 在故障特征信息提取的常用方法有:

(1) 将原始信号进行 EMD 分解, 将得到的 IMF 分量进行组合或采用常用的信号分析方法, 提取故障特征。从经验模式分解方法可以看出, 越是早分解出来的本征模函数频率越高, 第一个分解出来的代表原信号的最高频率成份。若本征模态函数组去除了先分解出来的一个或几个 IMF, 把其余的 IMF 组合起来形成一个信号, 相当于原信号通过了一个自适应低通滤波器; 若本征模态函数组去除了最后一个或几个 IMF, 把其余的 IMF 组合起来, 相当于原信号通过了一个自适应高通滤波器; 若本征模态函数组去除了最先和最后的一个或几个 IMF, 把其余的 IMF 组合起来, 相当于原信号通过了一个自适应带通滤波器。当然, 为了各种分析的目的, 可把本征模态函数组的 IMF 进行任意组合, 以突出某种特征。另外, EMD 方法基于信号的局部特征时间尺度, 把信号分解成若干个本征模态函数(IMF)之和, 分解出的各个 IMF 分量突出了数据的局部特征, 对其分析可以更准确有效地把握原始数据的特征信息。最重要的是分解后的各个 IMF 分量是经过平稳化处理的, 对 IMF 分量采用信号分析方法比直接对原信号进行信号分析效果更明显。

(2)将原始信号进行 EMD 分解,将得到的 IMF 分量再进行 Hilbert 变换,得到 Hilbert 谱。Hilbert 谱能精确地描述信号的幅值在整个频率段上随频率和时间变化的规律,是信号能量的一种完整的时频分布。Hilbert-Huang 变换所得到的 Hilbert 谱与小波谱有相似的形式,但 Hilbert 谱的分辨率要远远高于小波谱,它能够准确地描述各频率成分的幅值。因此通过对 Hilbert 谱的分析就可以提出信号所包含的故障特征信息。

4.3 基于 EMD 的模式识别方法

神经网络是人工神经网络 (Artificial Neural Networks, 缩写为 ANN) 的简称,是二十世纪 80 年代中后期发展起来的人工智能领域的一个重要分支。通过神经网络学习一个时间序列模型的最简单方法就是将时间序列的延迟样本作为神经网络的输入样本。时间序列越复杂,则需要的过去信息就越多。经验模式分解不仅使原始信号中包含的信息通过各基本模式分量得以充分体现,而且还简化了系统间特征信息的干涉或耦合。对各基本模式分量分别进行神经网络学习时,不仅所需要的过去信息明显减少(相当于阶数减少),而且网络训练的迭代次数明显减少,大大简化了学习任务。

在模式识别中,神经网络具有较强的的自学习、非线性模式识别和联想能力并在故障诊断中得到了较为广泛的应用,但其本身有着一些无法克服的缺点:如神经网络中的结构选择和权重的初值设定需要借助于经验,网络训练速度慢、易陷入局部极小点、过学习等,因此制约了其在故障诊断中的应用。支持向量机(SVM)是一种新的通用的学习方法,实现的是如下的思想:它通过某种事先选择的非线性映射将输入向量 x 映射到一个高维特征空间 Z ,在这个空间中构造最优分类超平面。该算法有效地改善了传统分类方法的缺陷,如神经网络结构的选择、易陷入局部极小点、过学习问题等,具有非常优异的预测推广能力,在故障诊断中取得了优良的效果。



图 1 基于 EMD 的模式识别

在 EMD 的基础上模式识别,与神经网络类似,SVM 的模式识别方法是:首先对振动信号进行 EMD 分解得到若干个 IMF 分量,然后利用各种信

号分析方法提取故障特征信息,输入支持向量机进行模式识别,如图 1 所示。

5 结束语

EMD 作为一种优秀的时频处理方法,已经成功地应用在许多非线性研究领域。随着其理论的不成熟,其应用领域将越来越广泛。目前,很少有人将该方法应用于声发射信号处理中。本文介绍了 EMD 的基本原理,分析了该方法的优越性及存在不足,指出了该方法在声发射领域的应用前景。在广泛了解该方法在其他领域的应用的基础之上,对 EMD 在声发射检测中的应用做了理论上的探讨。限于篇幅,实验上的应用将在以后的文献中给出。可以预测,EMD 在声发射检测领域会有很好的应用前景,为更深入的探讨声发射机理和更精确的声发射故障诊断作出一定的贡献。

参考文献

- [1] Huang N E. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc Rsoc Lond A,1998(454): 903-995.
- [2] Huang N E, Shen Z. A new view of non-linear water waves: the Hilbert spectrum [J]. Annu Rev Fluid Mech,1999(31): 417-457.
- [3] N.E. Huang. HHT: a review of the methods and many applications for nonsteady and nonlinear data analysis. Laboratory for Hydrospheric Processes, NASA Goddard Flight Center, Greenbelt, MD 2007.
- [4] N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. Annual Review of Fluid Mechanics.1999,31: 417-457.
- [5] Zhihua Yang, Dongxu Qi, Lihua Yang. Signal period analysis based on Hilbert-Huang transform and its application to texture analysis. Third International Conference on Image and Graphics. Hong Kong: China. Dec. 2004: 430-433.
- [6] SHI Chun-xiang, LUO Qi-feng. Hilbert-Huang transform and wavelet analysis of time history signal. ACTA SEISMOLOGICA SINICA. 2003, 16(4): 422-429.
- [7] Wu Zhao-huan, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[C]/4th Int Workshop on Biosignal Interpretation, 2002, Como(I):123-126.

EMD及其在声发射检测中的应用研究

作者: [阳能军](#), [汤伟](#), [龙宪海](#), [雷涛](#)
作者单位: [第二炮兵工程学院, 西安 710025](#)

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [李力](#), [陈向前](#), [赵美云](#), [邓代军](#). [LI Li](#), [CHEN Xiang-Qian](#), [ZHAO Mei-Yun](#), [DENG Dai-Jun](#) [起重机梁活性缺陷的声发射信号特征 - 无损检测](#)2008, 30(6)

探讨起重机梁缺陷的声发射信号特征和发展规律. 采用模拟梁加载试验, 获得梁上人工裂纹萌发和扩展过程的声发射信号. 通过经验模式分解方法分析出不同载荷和裂纹扩展过程的声发射频率特征. 结果表明, 起重机梁活性缺陷声发射信号为突发性信号, 每一事件声发射所含频率成分复杂. 一般裂纹萌发时的声发射信号频率较低; 随着裂纹的发展, 频率逐渐增高, 缺陷频率范围约为25~160 kHz. 该研究为起重机械活性缺陷的声发射检测技术提供了理论基础.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_7023451.aspx

下载时间: 2010年5月31日