2015年10月

### 文章编号: 2095-4980(2015)05-0794-05

# 基于 EMD-WP 的高精确度特征提取方法

张 毅

(长治学院 电子信息与物理系, 山西 长治 046011)

摘 要:在图像、语音识别或故障诊断等领域,特征提取是关键技术。在研究了小波变换和 经验模态分解之后,深入分析了两者在特征提取上的优势和不足,提出了一种将两者优势有效结 合来提取特征信息的方法。该方法先将信号做经验模态分解(EMD)得到平稳化单模态分量,再对单 模态分量做小波包(WP)分析。最后,通过仿真和实例将本方法和已有文献中的方法进行对比,结 果表明该方法不仅具有较高的可行性,而且可以准确地提取特征信息。

关键词:希尔伯特-黄变换;小波包变换;故障提取;包络谱

中图分类号: TN911.72 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201505.0794

# High accuracy method of fault extraction based on EMD-WP

#### ZHANG Yi

(Electronic Information and Physics Department, Changzhi University, Changzhi Shanxi 046011, China)

**Abstract:** Feature extraction is the key technology in the field of image and voice recognition or fault diagnosis. Having deeply studied the advantages and disadvantages of the feature extraction based on the wavelet transform and Empirical Mode Decomposition(EMD), a method combining advantages of the two methods is proposed to extract the feature information. Firstly, the proposed method acquires stabilized single mode state components by EMD, and then Wavelet Packet(WP) analysis is performed to single mode state components. Finally, by comparing the method with other methods through simulation and example test, it is proved that the proposed method not only features higher feasibility, but also can extract fault information more accurately.

Key words: Hilbert-Huang Transform; wavelet packet transform; fault extraction; envelope spectrum

基于信号处理提取特征的一般思路是:原信号中包含有某种特征,通过一些信号处理方法,如傅里叶变换、 小波变换和经验模态分解(EMD)<sup>[1]</sup>等,使其特征突出,从而达到特征提取的目的。然而,一些信号中含有丰富的 频率分量,甚至是噪声分量,因此使用如上信号处理方法提取特征的效果有时不能令人满意,如 EMD。EMD 具 有获得低频信号和冲击信号的能力,但 EMD 至今仍存在边缘效应、筛分迭代停止标准和模态混叠三大问题,使 得希尔伯特谱和边际谱失去原有的物理意义,从而无法对复杂信号进行分离。鉴于这个思想,出现了不少关于包 络解调法的故障提取方法。

随着小波分析的优势逐渐被人们接受,出现了先将信号做小波分解,再对得到的系数做包络谱分析<sup>[2]</sup>的方法 来得到原信号的各频率段信息。然而,小波分解的是信号中的低频信息,不能对高频部分做进一步分析,而高频 信息的信号能够更好地刻画出时频局部化特性。一些学者使用 WP 提取故障信号<sup>[3]</sup>,虽然 WP 可以将信号精确划 分,但是该分解不是自适应的,特别是待分解信号是非平稳信号,这使得选取 WP 基非常困难,因此不少学者引 人可以实现自适应信号分解的 EMD,将结果做包络分析,见文献[4]。这种方法应用范围较广,但在处理某些信 号时这种方法处理的精确度不高。小波变换和希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)各有其优缺点, 学者们利用两者的结合来提取故障,不过这种结合大多是利用小波<sup>[5]</sup>、二代小波<sup>[6]</sup>或 WP 去噪对故障信号做预处 理,使信号分解精确度提高。然而,EMD 分解的过程本身决定了它具有一定的滤波特性,且这种特性是自适应 的,对于某种信号来说,分解层数越多,噪声的影响越小。

结合目前轴承特征提取方法,本文提出了一种 EMD 和 WP 结合的方法(称为 EMD-WP)。

#### 1 EMD-WP

#### 1.1 EMD 的自适应性

EMD 方法本质是对信号进行平稳化处理,将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解开来,即把信号在每一时刻所含有的频率成分从高到低地分解出来,这种自适应的分解会产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,即本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),每个 IMF 包含原信号的部分信息(其中低阶 IMF 中含原信号信息 最多),只是比原信号相对简单。这种自适应性主要体现在以下几方面:

1) 基函数产生的自适应性

EMD 方法在整个筛分过程中是直接的、自适应的,它不像小波变换那样需要预先选择基函数。在 EMD 中, 基函数由信号本身产生,不同的信号产生不同的基函数。因此,EMD 是依据信号本身的信息对信号进行分解的。

2) 自适应的滤波特性

经过"筛分"过程, EMD 将信号进行分解,得到一系列包含从高到低不同频率成分,且可以是不等带宽的 IMF 分量,这些频率成分和带宽随信号的变化而变化。因此,可以将 EMD 看成一组自适应的高通滤波器,它的 截止频率和带宽都随着信号的变化而变化。

3) 自适应的多分辨力

EMD 将信号分解得到有限个 IMF 分量,不同的 IMF 分量包含不同的特征时间尺度,这样就可以将信号特征 在不同的分辨力下显示出来,因此实现了自适应多分辨分析。

值得注意的是,到目前为止,对于 EMD 的研究还仅限于实验研究以及 EMD 的应用,这些实验和应用有助 于对 EMD 性质的理解,但还没有找到一个明确定义来解释这些现象<sup>[7]</sup>。

#### 1.2 WP 分析的频带细化

WP 是一种二叉树式的分解,如图 1 所示。正交分解 WP 分析 能够为信号提供一种更加精细的分析方法,它在全频带对信号进行 多层系的频带划分,不仅继承了小波变换所具有的良好时频局部优 点,还可继续对小波变换没有再分解的高频带做进一步分解,从而 提高了频率分辨力,因此 WP 具有更广泛的应用价值。可以说 WP 分解就是小波分解的拓展,是对小波子空间的精细分解。

#### 1.3 EMD-WP 方法的实现

利用 EMD 的多分辨分析特点,可以引出一种 EMD-WP 的分析方法,如图 2 所示:对分析信号做 EMD,之后对 IMF 做 WP 分析,便可获得低频带和 高频带完整的信息,进而增加原信号特征提取的精确 度。最后使用 Hilbert 变换提取 WP 系数的包络,并 求其功率谱。由于 EMD 是自适应分解,这也使得该 方法有更广的应用面,这里的自适应是指可以根据分







析信号自动地确定基函数或核函数。本方法的实质是将 WP 的多分辨分析扩展到 EMD 中。

#### 2 仿真实验

仿真信号由复杂的调频调幅信号组成,用这样的信号来模拟机械振动信号,表达式为:

$$s = s_1 + s_2 + n \tag{1}$$

式中:  $s_1 = (1 + 2\sin((2\pi \cdot 100t)))\sin((2\pi \cdot 3000t)); s_2 = (1 + \sin((2\pi \cdot 240t)))\sin((2\pi \cdot 3400t + 10\sin((2\pi \cdot 70t)))); n 是噪声水平为 0.5 的高斯白噪声。$ 

通过分析轴承故障的产生机理,再结合 s 的表达式可知,信号由 2 部分和构成:一部分是载波频率为 3 000 Hz, 通过 100 Hz 信号的调幅处理,这时可认为是由于轴承发生故障,工频被故障信号 100 Hz 调幅引起时域信号变化; 另一部分是载波频率为 3 400 Hz,先由 70 Hz 信号调频,再由 240 Hz 信号调幅,即故障频率是 240 Hz。噪声水 平为 0.5 时的时域图如图 3 所示,应用 EMD-MP 方法,先将此多频信号做 EMD 分解,得到 10 个 IMF 和 1 个 残余量,限于篇幅,这里只给出前5阶,如图4所示。用WP对IMF1做进一步分解,结果如图5所示。从WP分解结果可看出,在节点(3,3),(3,6)和(3,7)中有明显的调幅现象,故分析其包络谱。图6、图7和图8分别是上述节点的包络谱,在图6中有101.6Hz的调幅频率及其2倍频出现;图7中有调频频率70.31Hz,且含有238.3Hz的调幅频率及其2倍频出现;图8中出现了101.6Hz及其2倍频。



该试验表明 EMD-MP 方法在低噪声不做去噪处理的情况下,对复杂多频信号有良好的提取效果,即可以准确地提取出调幅和调频频率。



如果将噪声水平增大至 5,时域图如图 9 所示。这时利用二代小波做去噪处理,图 10 为二代小波去噪后再做 EMD-WP 分析后的包络谱,从图中可知,在(3,1)的包络谱中出现了 70 Hz 和 240 Hz 的调频和调幅频率,在(3,3),(3,7)的包络谱中有 100 Hz 及其 2 倍频。

# 3 实例

数据来源:美国凯斯西储大学网站数据,在无负载情况下, 轴承故障直径为 0.007 inch,转子速度是每分钟 1 797 转,采样频 率 f<sub>s</sub>为 12 kHz,经计算可得,内圈故障频率为 162.1 Hz,故障数 据的时域图如图 11 所示。 Fig.9 Time domain signal when the noise level is 5

图9噪声水平为5的时域信号

对此故障数据用 EMD-WP 方法分析,对节点(3,4)分析结果如

图 12 所示。可以看到 162.6 Hz 及其 2,3 倍频出现。与理论的故障频率 162.1 Hz 接近,故可以判断有内圈故障。

表 1 是文献[8-12]和本文方法对本数据进行处理得到故障频率的结果。





#### 4 结论

EMD-WP 本质是先利用能够自适应分解的 EMD 对信号做预处理,之后利用 WP 的精细划 分特性从平稳 IMF 中提取敏感特征参数的过程。 在仿真试验中,当噪声水平低时,本方法可以通 过第一阶 IMF 精确地提取调幅和调频信号的频 率;而当有用信号淹没在噪声下时,用二代小波 对信号做去噪处理,特征明显。在实例中,用 EMD-WP 对轴承内圈故障数据做分析,包络谱中



Table1 Methods comparison		
method	feature frequency/Hz	source
EMD envelope spectrum analysis	167.0	Ref.[8]
envelope signal envelope spectrum analysis	159.7	Ref.[9]
wavelet coefficient analysis	158.2	Ref.[10]
wavelet screening	148.0	Ref.[11]
wavelet denoising	160.0	Ref.[12]

清晰地出现了故障频率及其 2,3 倍频。通过对比文献中的几种方法证明了本文方法的高精确度。

#### 参考文献:

- HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998(454):903-995.
- [2] 张中民,卢文祥,杨叔子.基于小波系数包络谱的滚动轴承故障诊断[J].振动工程学报,1998,11(1):65-69. (ZHANG Zhongmin,LU Wenxiang,YANG Shuzi. Application of envelop spectrum of wavelet coefficients to fault diagnosis in roller bearing[J]. Journal of Vibration Engineering, 1998,11(1):65-69.)
- [3] 贾军峰,杨国安,李新华,等. 基于小波包和包络分析的滚动轴承故障自动诊断方法[J]. 石油矿场机械, 2006,35(5): 18-22. (JIA Junfeng,YANG Guoan,LI Xinhua, et al. Rolling bearings fault auto-diagnosis based on wavelet packet and envelope analysis[J]. Oil Field Equipment, 2006,35(5):18-22.)
- [4] 杨宇,于德介,程军圣. 基于经验模态分解的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国机械工程, 2004,15(10):908-911. (YANG Yu,YU Dejie,CHENG Junsheng. Roller bearing fault diagnosis method based on EMD[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(10):908-911.)
- [5] 徐仁林,安伟.小波降噪在信号基于 EMD 的 Hilbert 变换中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2008,6(3):74-77. (XU Renlin, AN Wei. Wavelet denoise application in the signal Hilbert transform based on EMD[J]. Noise and Vibration Control, 2008, 6(3):74-77.)

- [6] 曾峰,文成林. 用第二代小波去噪降低 EMD 边缘效应[J]. 应用科学学报, 2007,25(4):365-369. (ZENG Feng,WEN Chenglin. Reducing edge effect of EMD with second generation wavelet denoising[J]. Journal of Applied Science, 2007, 25(4):365-369.)
- [7] Flandrin P,Rilling G,Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2):112-114.
- [8] 高强,杜小山,范虹,等. 滚动轴承故障的 EMD 诊断方法研究[J]. 振动工程学报, 2007,20(1):15-18. (GAO Qiang,DU Xiaoshan,FAN Hong,et al. An empirical mode decomposition based method for rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007,20(1):15-18.)
- [9] 李扬,刘一民,郭庆军.小波包络分析在轴承故障诊断中的应用[J]. 计量与测试技术, 2008,35(11):12-15. (LI Yang, LIU Yimin,GUO Qingjun. Application of wavelet envelope analysis to rolling element bearing diagnosis[J]. Metrology & Measurement Technique, 2008,35(11):12-15.)
- [10] 赵美云,李力,陈保家. 滚动轴承故障声发射信号的小波包络谱分析[J]. 轴承, 2008(4):38-41. (ZHAO Meiyun,LI Li, CHEN Baojia. Wavelet envelope spectrum analysis on acoustic emission signals of rolling bearing fault[J]. Bearing, 2008 (4):38-41.)
- [11] 张璇,张进明. 基于小波包和 EMD 的滚动轴承故障诊断研究[J]. 微计算机信息, 2008,24(12-1):158-159. (ZHANG Xuan,ZHANG Jinming. Roller bearing fault diagnosis based on wavelet packet and EMD[J]. Control and Automation Publication Group, 2008,24(12-1):158-159.)
- [12] 赵协广,戴炬. 基于小波包的滚动轴承组合故障诊断[J]. 轴承, 2009(6):50-53. (ZHAO Xieguang, DAI Ju. Combination fault diagnosis method for rolling bearing based on wavelet packet[J]. Bearing, 2009(6):50-53.)

## 作者简介:



张 毅(1983-),男,山西省长治市人,硕士,讲师,研究方向为信号分析与处理.email:qqvirile@163.com.