

# 基于小波包变换的 EMD 算法 在超声信号处理中的应用

张永宏<sup>1</sup> 许学明<sup>1</sup>

## 摘要

提出基于小波包变换的 EMD 算法,并将其应用于超声回波信号去噪.对于采用 EMD 分解含高斯白噪声的超声缺陷信号存在模式混叠的问题,首先用小波包变换对信号作预处理,再对信号进行 EMD 分解,最后重构出有用的缺陷信号.实验结果表明:该方法不仅具有很好的消噪效果,而且重构的缺陷信号的波形失真度小,有利于对信号做进一步的定量分析.

## 关键词

经验模态分解;固有模式函数;小波包;超声信号消噪

中图分类号 TN911.7

文献标志码 A

## 0 引言

在实际的超声回波信号中,由于存在各种各样的噪声,导致缺陷信号被噪声信号污染而失去物理意义,从背景噪声中提取有用的缺陷信号十分困难.小波包由于其具有优良的正交性、完全性以及局部性的特点,而且能自适应地识别信号所包含的频率成分,所以适合于非线性信号去噪<sup>[1-4]</sup>.但是,其去噪的质量取决于最优小波包基以及阈值的选择,而针对不同信号选择合适的小波包基是一个难题<sup>[5-7]</sup>.

最近兴起的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)去噪方法,能够自适应地将信号从高频到低频按序分解成一组尺度不同的固有模式函数(Intrinsic Mode Function, IMF),避免了选择小波包的难题.根据信号本身的尺度特征,选择不同的 IMF 进行重构.该方法具有直观性、全面性以及局部性的特点,但是克服不了由噪声引起的模式混叠问题<sup>[8-9]</sup>.文献[10-11]提出了集合经验模态分解(EEMD)来解决这个问题,但是该方法存在人为规定迭代次数,在一定程度上破坏了 EMD 的自适应特性.为了解决上述问题,本文提出了一种基于小波包变换的 EMD 算法,将其应用于处理超声信号消噪,并通过实例验证其可行性.

## 1 经验模态分解算法

经验模态分解的过程述如下<sup>[12-15]</sup>.

给定原始信号  $x(t)$ ,对  $x(t)$  进行 3 次样条插值,算出包络均值  $m_1$ .用原始信号  $x(t)$  减去  $m_1$  可得到一个新的数据序列  $h_1$ ,即

$$x(t) - m_1 = h_1. \quad (1)$$

再对  $h_1$  重复上述过程,有

$$h_1 - m_{11} = h_{11}. \quad (2)$$

其中  $m_{11}$  为  $h_1$  的上下包络均值.重复以上过程  $k$  次,直到  $h_{1k}$  是一个固有模式函数为止,即

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}. \quad (3)$$

把第 1 个固有模式函数记为  $c_1$ ,即

$$c_1 = h_{1k}. \quad (4)$$

将  $c_1$  从原始序列中分离出来,得到残余项  $r_1$ ,即

收稿日期 2011-05-19

资助项目 江苏省“六大人才”高峰资助项目(JXQC-139-132);教育部留学回国人员启动基金(2010609)

作者简介

张永宏,男,博士,教授,主要研究模式识别与超声信号处理. bluestar.zhang@gmail.com

<sup>1</sup> 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京,210044

$$r_1 = x(t) - c_1. \quad (5)$$

之后,将残余项  $r_1$  作为新的序列,重复以上方法,得到新的残余项  $r_2$ ,即

$$r_2 = r_1 - c_2. \quad (6)$$

重复以上过程,直到残余项  $r_n$  变成一个单调函数.至此原始信号分解结束,得到

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n. \quad (7)$$

这样,原始信号就被分解成了  $n$  个固有模态函数和一个残余项.

从 EMD 分解过程可以看出,这  $n$  个固有模态函数是依次从高频到低频按序排列的.若将最先的几个 IMF 分量去除,重构其余分量,就相当于一个自适应低通滤波器.若去除最后几个 IMF 分量,将其余分量重构,就相当于一个自适应高通滤波器.若取中间几个 IMF 分量进行信号重构,就相当于一个自适应的带通滤波器.当然,也可以灵活地将各个 IMF 分量进行任意组合以达到特定的目的,这就是 EMD 去噪的基本原理.

理论上,EMD 方法将信号分解出的 IMF 分量具有完全性、自适应性以及正交性,因而可以达到很好的去噪效果,但是在处理实际问题的时候存在以下缺点:

- 1) 高频部分的第 1 个分量包含了广泛的频带范围,分解不彻底,从而让 EMD 分解失去物理意义;
- 2) 由于 EMD 样条插值算法的近似性以及 EMD 分解过程中的模态混叠引起的虚假分量的问题,也让 EMD 的去噪效果不理想.

## 2 基于小波包变换的 EMD 算法

Huang 等<sup>[11]</sup>的 EMD 分解在某些情况下,高频部分的第 1 个分量包含了广泛的频带范围,不满足 IMF 定义中单成分的要求.从 EMD 分解的定义也可以看出,并没有人为规定 IMF 分量的频宽,它的幅值和频率可以自适应地变动.为了解决这个问题,需要引入一种预处理方法.首先将信号分解成许多窄频带信号,然后对这些窄频带信号进行 EMD 分解,从而得到的 IMF 分量也应是窄频带的,最后再将 IMF 分量重构出有用的信号.本文通过大量实验对比得出,小波包作为预处理的效果是最好的.

小波包对信号的高、低频部分都进行分解.其原理为信号通过一系列的低、高通滤波器分别被分解成一个低频值和一个高频值.低频值以及高频值再分别被分解为第 2 层的低频值和高频值,然后再重

复这个过程.经过  $n$  层分解以后,信号将会被分解为  $2^n$  个窄频带信号<sup>[8]</sup>.

信号重构过程中,因为 EMD 分解存在虚假分量,怎样选取真实的 IMF 分量来重构出有用的信号也是一个重要问题,本文采用关系系数法.因为 IMF 分量满足信号分解的正交性,所以真实的 IMF 分量与原始信号之间相关性较好,而虚假分量则与原始信号相差甚大.因此,可以用原始信号以及各 IMF 分量的关系系数  $\mu$  作为一个标准来决定 IMF 分量的选取.计算出所有的关系系数  $\mu_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ,  $n$  是 IMF 分量的数目) 以后,将它们与一个硬阈值  $\lambda$  进行比较.如果  $\mu_i \geq \lambda$ , 则 IMF $i$  就是真实 IMF 分量,否则就视为虚假分量.这里,

$$\lambda = \max(\mu_i) / \eta, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

其中比例系数  $\eta > 1.0$ , 本文中设为 3.0, 关系系数  $\mu_i$  可由以下公式得到:

$$\mu_i = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} imf(i)s}{[\sum_{i=0}^{\infty} [imf(i)]^2 \sum s^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (9)$$

其中,  $s$  为原始时间序列,  $imf(i)$  为各个 IMF 分量的时间序列.

## 3 仿真信号分析

为了验证传统 EMD 分解容易产生模态混叠问题,本文选取信号  $x(t)$ :

$$x(t) = \sin(2\pi \times 5t) + \sin(2\pi \times 3.5t).$$

信号  $x(t)$  含有比较接近的 2 个频率.对信号直接进行 EMD 分解,这里给出了原始信号以及 IMF1 时频谱图和各自的 FFT(快速傅氏变换)谱图(图 1).

由原始信号与 IMF1 的谱图对比可知,IMF 分量并不是单一的成分,而是出现了新的成分,导致 IMF1 分量失去物理意义.该信号经小波包预处理后,再经过 EMD 分解可以很好地把原始信号的 2 个频率分解出来,如图 2 所示.

## 4 实验信号分析

取一组超声缺陷实验信号,给信号添加高斯白噪声(信噪比为 1),如图 3 所示.

对含噪超声缺陷信号进行 EMD 分解,由 EMD 分解结果可知(图 4),EMD 将高斯白噪声当作了有用信号分量.由此可见,当噪声与缺陷信号的频率处于某种程度的接近时,噪声信号与有用信号的高频部分就会发生模态混叠,EMD 并不能直接将缺陷信

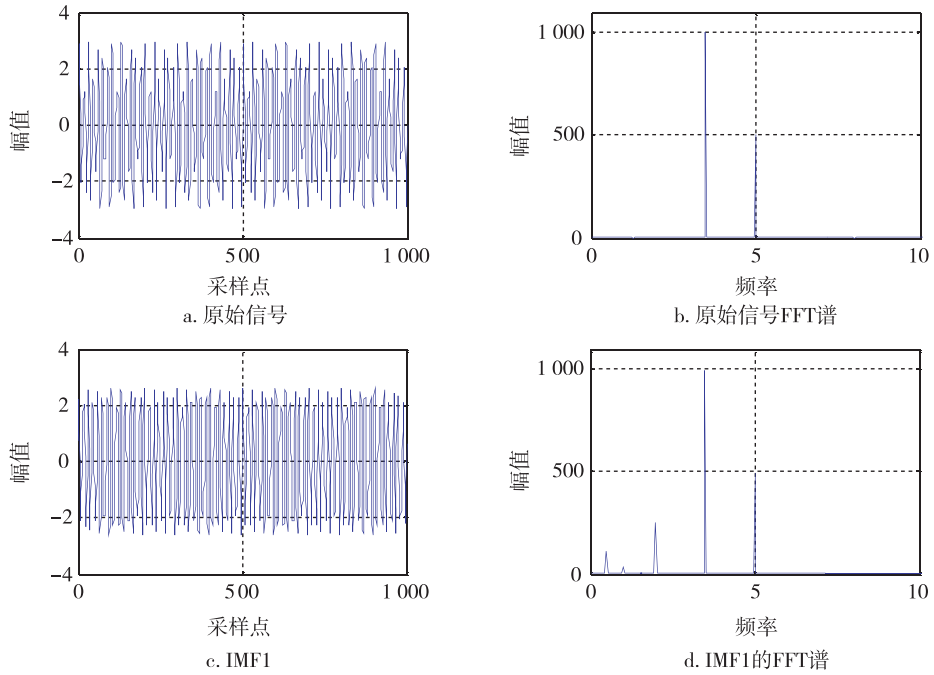


图 1 仿真信号的原始波形、IMF1 分量时频以及各自的 FFT 谱  
Fig. 1 Original signal, IMF1 component, and their FFTs respectively

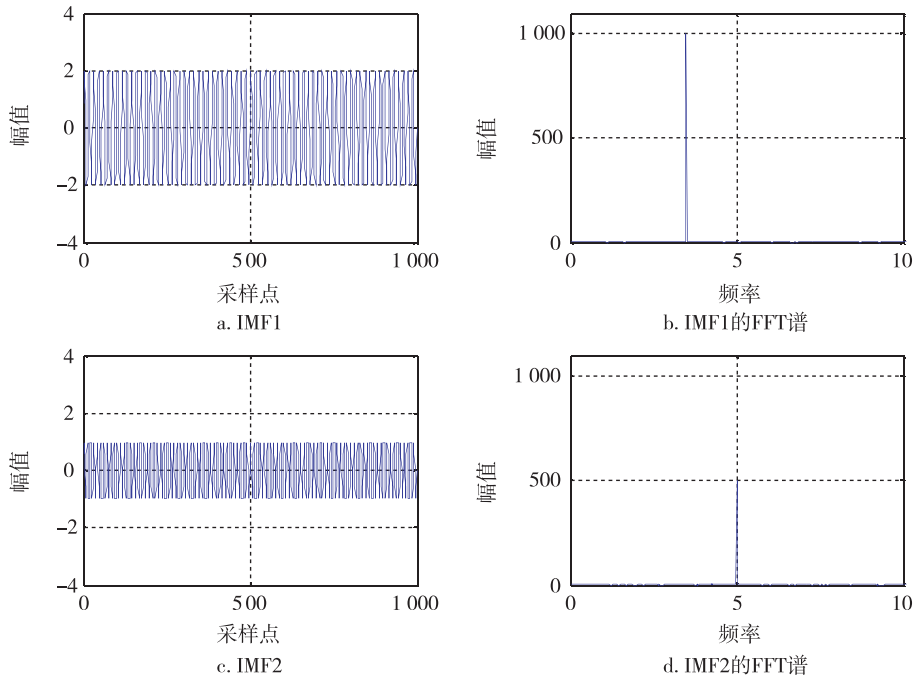


图 2 小波包预处理后的 EMD 分解的 IMF1、IMF2 时频以及各自的 FFT 谱  
Fig. 2 IMF1, IMF2 after EMD based on wavelet packet, and their FFTs, respectively

号跟噪声信号分开.

本文运用改进的 EMD 方法对图 3 含噪超声缺陷信号进行去噪. 首先对信号进行基于小波包变换的预处理, 将高频噪声与缺陷信号的高频部分分开,

再进行 EMD 分解, 得到 EMD 分解如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 高频噪声部分很好地被分离出来. 显然, IMF1 是白噪声, 被很好地提取出来. 根据计算出的关系系数表(表 1), 选取 IMF2、IMF3、IMF4 进行

表 1 各 IMF 分量关系系数

Table 1 Correlation coefficient of IMFs

IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
0.666 7	0.833 3	0.733 3	0.566 7	0.466 7	0.140 0	0.216 7	0.150 0

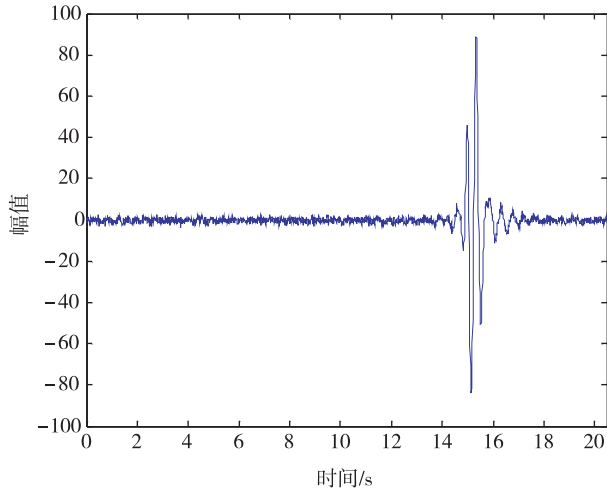


图 3 加噪超声缺陷信号

Fig. 3 Ultrasonic flaw signals added with Gauss white noise

重构,得到重构后的缺陷信号如图 6 所示.可以看出,重构后的超声回波信号线条很平滑,此方法的消噪效果十分明显.

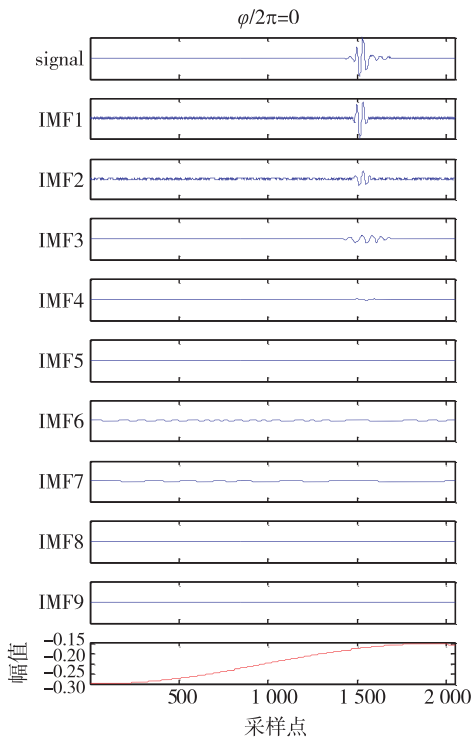


图 4 含噪信号的 EMD 分解

Fig. 4 EMD result of signal with Gauss white noise

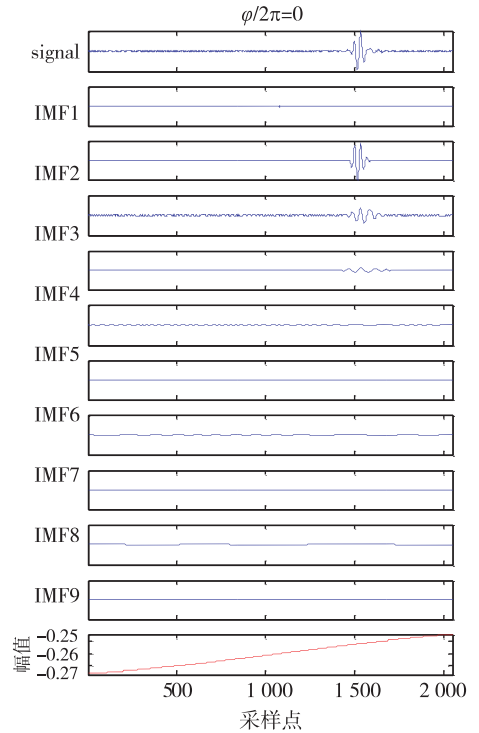


图 5 含噪信号改进的 EMD 分解

Fig. 5 Wavelet packet-based EMD result of signal with Gauss white noise

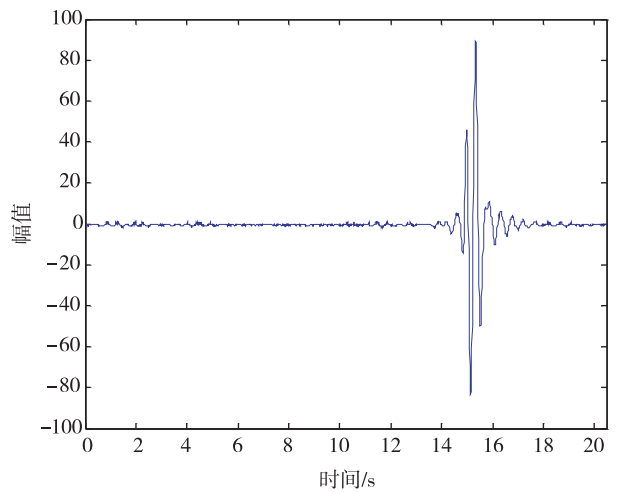


图 6 改进的 EMD 信号重构

Fig. 6 Reconstructed signal of IMFs

## 5 结论

本文在介绍 EMD 分解及其信号去噪基本原理的基础上,针对传统 EMD 分解容易引起模态混叠的缺陷,提出了基于小波包变换的 EMD 分解算法,实验结果表明该方法具有良好的消噪性能,并能够提取被背景噪声淹没的缺陷信号.但是,本文方法还存在处理信号过程中的能量泄漏问题. EMD 算法建立在大量经验分析的基础上,还没有建立起一套完备的理论体系,加之其本身存在的缺陷,特别是端点效应问题,到目前为止,还没有理想的解决办法.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] 王帅,陈鹏,刘美全,等. 基于小波包变换方法的超声回波信号去噪研究[J]. 国外电子测量技术,2010,29(8):27-29  
WANG Shuai, CHEN Peng, LIU Meiquan, et al. The research on the de-nosing of ultrasonic echo signal based on wavelet packet transform [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2010, 29(8):27-29
- [ 2 ] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 程正兴,译. 西安:西安交通大学出版社,1995  
Chui C K. An introduction to wavelets [ J ]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995
- [ 3 ] 杨世锡,胡劲松,吴昭同,等. 旋转机械振动信号基于 EMD 的希尔伯特变换和小波变换时频分析比较[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):102-107  
YANG Shixi, HU Jingsong, WU Zhaotong, et al. The comparison of vibration signals' time-frequency analysis between EMD-based HT and WT method in rotating machinery [ J ]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2003, 23(6):102-107
- [ 4 ] Cohen L. Time-frequency analysis [ M ]. New York: Prentice Hall, 1995
- [ 5 ] De Queiroz R L, Rao K R. Time-varying lapped transforms and wavelet packets [ J ]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12):3293-3305
- [ 6 ] Peng Z K, Chu F L, Tse P W. Detection of the rubbing-caused impacts for rotor-stator fault diagnosis using re-assigned scalogram [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(2):391-409
- [ 7 ] Yang B Z, Suh C S. Interpretation of crack-induced rotor non-linear response using instantaneous frequency [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(3):491-513
- [ 8 ] Shinde A, Hou Z. A wavelet packet based sifting process and its application for structural health monitoring [ J ]. Structural Health Monitoring, 2005, 4(2):153-170
- [ 9 ] Peng Z K, Tse P W, Chu F L. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(5):974-988
- [ 10 ] Wu Z H, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [ C ] // Royal Society of London Proceedings Series A, 2004, 460:1597-1611
- [ 11 ] Huang N E, Zheng S, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non linear and non-stastinary time series analysis [ C ] // Royal Society of London Proceedings Series A, 1998, 454:903-995
- [ 12 ] Flandrin P, Rilling G, Gonçalvès P. Empirical mode decomposition as a filter bank [ J ]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2):112-114
- [ 13 ] Ur Rehman N, Mandic D P. Empirical mode decomposition for trivariate signals [ J ]. IEEE Transactions on Signal Processing Letters, 2010, 58(3):1059-1068
- [ 14 ] Tanaks T, Mandic D P. Complex empirical mode decomposition [ J ]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 14(2):101-104
- [ 15 ] Wu Q, Liu Y B, Yan K G. A new approach to improved Hilbert-Huang transform [ J ]. The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, 6(2):5506-5510

## Application of wavelet packet-based EMD algorithm in ultrasonic echo signal de-noising

ZHANG Yonghong<sup>1</sup> XU Xueming<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Information and Cybernetics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** In this paper, an EMD (Empirical Mode Decomposition) algorithm based on wavelet packet transform is proposed and applied to ultrasonic echo signal de-noising. For the problem of mode mixing caused by the EMD decomposition of ultrasonic flaw signals with Gauss white noise, wavelet packet transform is applied to preprocess ultrasonic echo signal, and followed by EMD decomposition, finally the useful defect signal is reconstructed. The experimental results show that, this method has good de-noising effect with small waveform distortion of reconstruction defect signal. It is conducive to the further quantitative analysis of ultrasonic echo signal.

**Key words** empirical mode decomposition; intrinsic mode decomposition; wavelet packet; ultrasonic echo signal de-noising