

Electromagnetic ultrasonic diagnosis based on lifting wavelet packet and set empirical mode decomposition

Cao Jiangying

Yangzhou University, Yangzhou

Abstract: The electromagnetic acoustic detection features small echo signal and low signal-to-noise ratio. In order to effectively extract the implicit defect feature in unstable signal, the diagnosis method of ensemble empirical mode decomposition (EEMD) based on lifting wavelet packet is proposed. Firstly, the influence of high frequency noise on EEMD is removed by using lifting wavelet packet transform algorithm with improved threshold function and selecting optimal threshold; then, the de-noised signal is decomposed with EEMD, the echo signal is analyzed in time and frequency domains. The results show that the method of EEMD based on lifting wavelet packet can remove the noise of the echo signal effectively and extract the malfunction feature in the low SN R signal. This method provides reliable basis for defect diagnosis.

Key words: Electromagnetic acoustic; Lifting wavelet packet; Ensemble empirical mode decomposition (EEMD); Non-destructive inspection; Signal-to-noise ratio (SN R)

Received: 2020-02-29; Accepted: 2020-03-15; Published: 2020-03-17

基于提升小波包的集合经验模态分解方法的电磁超声诊断

曹江英

扬州大学, 扬州

邮箱: jyc.097@hotmail.com

摘要: 电磁超声检测的回波信号幅值小, 信噪比低。为有效提取非平稳信号中隐含的缺陷特征, 提出了基于提升小波包的集合经验模态分解 (EEMD) 诊断方法。首先应用改进阈值函数的提升小波包变换算法, 选取最优阈值方法去除高频噪声对 EEMD 的影响; 然后对降噪信号进行 EEMD 分解, 对回波信号进行时频分析与诊断。结果表明, 基于提升小波包的 EEMD 分析方法可有效去除回波信号噪声, 提取低信噪比信号的故障特征, 为缺陷诊断提供可靠依据。

关键词: 电磁超声; 提升小波包; 集合经验模态分解 (EEMD); 无损检测; 信噪比 (SNR)

收稿日期: 2020-02-29; 录用日期: 2020-03-15; 发表日期: 2020-03-17

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

电磁超声无损检测技术具有非接触性、不需耦合剂等优点，广泛用于无损检测领域。电磁超声换能器换能效率低、回波信号幅值小、噪声敏感度高、包含很多尖峰和突变，这往往导致有用信号被噪声和干扰淹没。集合经验模态分解技术（ensemble empirical mode decomposition, EEMD）应用于复杂非平稳信号的时频分析，可以自适应地选择基函数，有效得到回波信号的真实物理特性，摆脱了傅里叶分析的局限性。

2 提升小波包降噪

与小波变换相比，提升小波包变换具有自适应窄带滤波、完全重构性、运算时间短等优点，继承了经典小波多分辨率特性，更适用于对电磁超声检测信号的降噪处理。

应用提升小波包对信号去噪时，通常采用阈值函数去噪法。为克服硬阈值函数在阈值处不可导、减小软阈值函数的重构偏差，对小波函数进行了改进，提出了新型软阈值处理方法，公式如下：

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} \operatorname{sgn}(W_{j,k}) \times \left(|W_{j,k}| - \frac{\lambda}{M \frac{|W_{j,k}|-\lambda}{\lambda}} \right) & |W_{j-1,k}| \geq \lambda \\ 0 & |W_{j-1,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\hat{W}_{j,k}$ 为施加阈值后的小波系数； $W_{j,k}$ 为小波系数； $\operatorname{sgn}(\)$ 为符号函数； λ 为小波阈值； M 为任意正常数。

当 $W_{j,k}$ 趋近于阈值 λ 时， $\hat{W}_{j,k}$ 趋近于0，接近硬阈值函数；当 $W_{j,k} > \lambda$ 时， $\hat{W}_{j,k}$ 和 $W_{j,k}$ 的误差越来越小，使得信号的真实程度提高，接近软阈值函数。新的阈值函数连续可导，保持了软硬阈值函数的优点，克服了软硬阈值函数的缺点。 M 为正常数，不同的 M 值，去噪效果也不同。通过插值最优解算法可知，当 $M=1.25$ 时，新阈值函数的去噪效果最好。

常用的阈值选取规则有 Sqrtwolog 规则、Rigrsure 规则、Heursure 规则和 Minimax 规则 4 种。为了检测效果，采用 Matlab 自带的 Bump 信号作为原始信号，叠加随机白噪声，叠加后信噪比 $SNR=13.8856\text{dB}$ ，均方根值 $RMSE=0.9452$ 。同时应用硬、软阈值方法和改进的提升小波包算法 3 种方法进行降噪，从信噪比、均方根误差和峰值相对误差 (peak relative error, PRE) 等方面进行评价。3 种阈值方法去噪效果如表 1 所示。其中小波基为 db4，分解层数为 5。峰值相对误差定义为：

$$\gamma_{PRE} = \frac{|A_o - A_d|}{A_o} \times 100\% \quad (2)$$

式中： A_o 为标准信号峰值； A_d 为去噪信号峰值。

表 1 3 种阈值方法去噪效果

阈值选取规则	硬阈值法			软阈值法			改进方法		
	SNR	RMSE	PRE	SNR	RMSE	PRE	SNR	RMSE	PRE
Rigrsure 阈值	19.837 6	0.476 3	3.995 4	21.588 9	0.389 3	1.601 3	21.746 4	0.382 4	1.408 1
Heursure 阈值	20.804 0	0.426 1	4.130 7	20.361 4	0.448 5	0.147 5	20.427 3	0.405 1	2.467 4
Sqrtwolog 阈值	15.856 1	0.533 3	8.978 1	15.931 5	0.746 8	8.550 4	16.933 3	0.465 4	3.049 2
Minimax 阈值	19.589 8	0.490 1	5.350 5	18.404 4	0.562 0	3.613 0	19.950 6	0.415 5	1.633 3

从表 1 可以看出，和软硬阈值法相比，改进的阈值算法信噪比更大，峰值相对误差更小，说明新方法在有效地滤除噪声的同时，更多地保留了原信号的尖峰和突变等信息；应用改进去噪方法时，使用 Rigrsure 规则阈值降噪效果最优。Bump 信号去噪效果如图 1 所示。

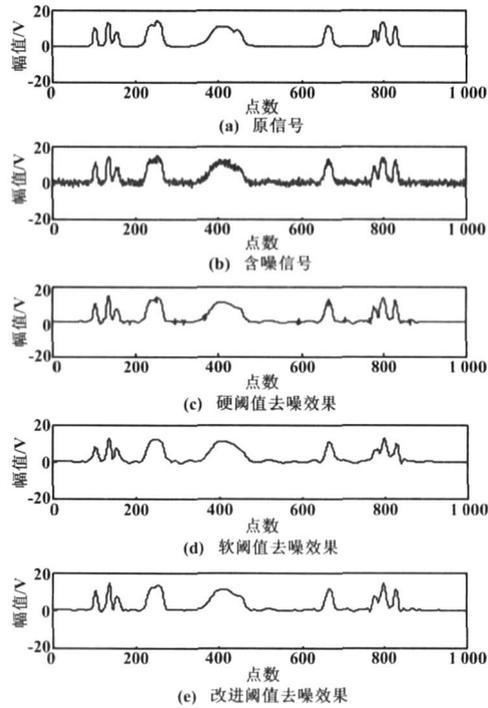


图 1 Bump 信号去噪效果

3 EEMD 分解方法

经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 是一种分析非稳定非线性数据的有效方法, 但是 EMD 存在频率混叠问题, 导致 EMD 分解失败。集合经验模态分解 (EEMD) 将噪声辅助分析应用于 EMD 中, 有效地解决了频率混叠问题。

在待测信号 $x(t)$ 中加入 N 次均值为 0、标准差为常数的高斯白噪声 $n(t)$, 得到的第 i 次加入白噪声后的信号为:

$$x_i(t) = x(t) + n_i(t) \quad (3)$$

对 $x_i(t)$ 进行 EMD 分解, 得到 K 个内禀模态函数 (IMF) 分量 $imf_{ij}(t)$ 和余量 $r_i(t)$, 即:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^k imf_{ij}(t) + r_i(t) \quad (4)$$

叠加运算 N 次后, 将对应的 IMF 进行平均运算, 消除多次高斯白噪声对 IMF 的影响, 得到 EEMD 分解的第 j 个 IMF 分量为:

$$imf_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k imf_{ij}(t) \quad (5)$$

对 IMF 做 Hilbert 变换, 可以得到 IMF 的时变频率和幅值。Hilbert 变换公式如式 (6) 所示:

$$H[imf_j(t)] = imf_j(t) * \frac{1}{\pi t} = P. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{imf_j(t-\tau)}{\pi\tau} d\tau \quad (6)$$

式中: $P.$ 为柯西主值积分。

$imf_j(t)$ 可表示为 $imf_j(t) = a_i(t) \cos[\varphi_i(t)]$, 其中 $a_i(t) = \sqrt{imf_i^2(t) + H^2[imf_i(t)]}$,

$\varphi_i(t) = a_i \tan\left\{\frac{H[imf_i(t)]}{imf_i(t)}\right\}$ 。 $imf_j(t)$ 的瞬时频率为:

$$f_j(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [\varphi_i(t)] \quad (7)$$

4 组合诊断方法

应用脉冲电磁超声检测系统对包含人工柱状缺陷的 45 号钢块进行检测。激发频率为 2MHz, 钢块尺寸为 500 mm × 100 mm × 30 mm, 1 ~ 4 号缺陷距离检测面 50 mm, 直径分别为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm。5 ~ 8 号缺陷为 $\phi=2$ mm 柱状缺陷, 分别距检测面 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm。采集 1 号缺陷信号 y , 选择 db4 小波基 5 层分解, 应用改进的提升小波包算法对 y 降噪, 阈值选择 Rigrsure 规则, 得到的降噪效果如图 2 所示。

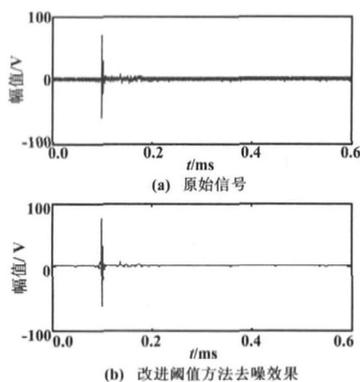


图 2 回波信号的降噪效果

截取去噪信号 $100 \sim 150 \mu\text{s}$ 能量最大的第一个回波周期，对信号进行 EEMD 分解，得到 7 个 IMF，忽略 $\text{IMF}_5 \sim \text{IMF}_7$ 和余量 r （与去噪信号相关系数小，包含多种低频干扰）， $\text{IMF}_1 \sim \text{IMF}_4$ 如图 3 所示。对各个 IMF 作瞬时包络和瞬时频率分析可以发现， IMF_1 包含激发信号的主要特征； IMF_2 包含了大部分的反射、折射等缺陷信息； IMF_3 包含部分底面回波信息。

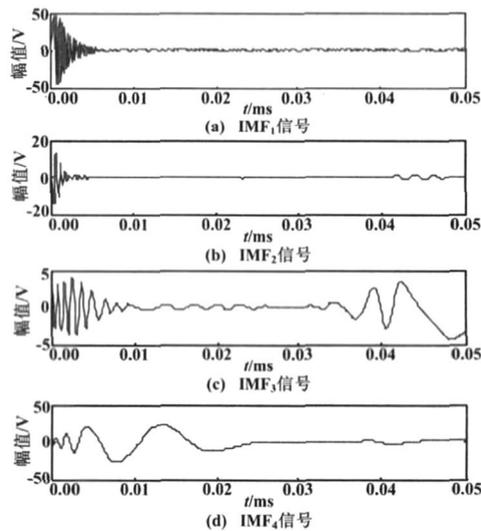


图 3 EEMD 分解得到的 $\text{IMF}_1 \sim \text{IMF}_4$

对 IMF_2 进行处理，得到瞬时幅值和瞬时频率特征，如图 4 所示。

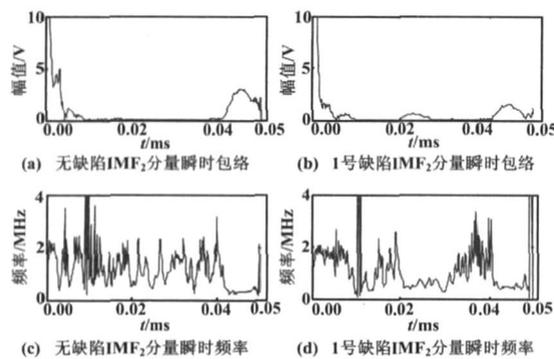


图 4 IMF_2 瞬时包络和瞬时频率曲线

从图 4 可以看出，激励信号的阻尼衰减时间约为 $10 \mu\text{s}$ ；在约 $40 \mu\text{s}$ 处， IMF_2 瞬时包络为底面回波包络；无缺陷底面回波峰值大于有缺陷底面回波峰值；

图4(b)中 $20\mu\text{s}$ 处瞬时包络为柱状缺陷特征,包络出现时间与理论值相符。此外,从图4(c)和图4(d)可以看到,激励频率基本保持在 2MHz 附近,缺陷包络和底面回波包络对应频率低于 1MHz 。频率的降低有可能是超声信号在反射、折射中发生了波模转换。

分别对钢板中不同缺陷处采集到的信号进行处理,得到各自 IMF_2 的瞬时频率幅值和瞬时频率特征,同时分别对1~4号缺陷回波峰值和5~8号缺陷回波时刻进行线性回归分析,结果如图5所示。从图5可以看出,缺陷最大瞬时幅值随缺陷孔径变大而逐渐变大;缺陷位置距离检测面的距离增大,对应的包络出现的时间相应增加。线性回归的斜率反映了缺陷特征随柱状缺陷直径和缺陷位置变化的变化规律。

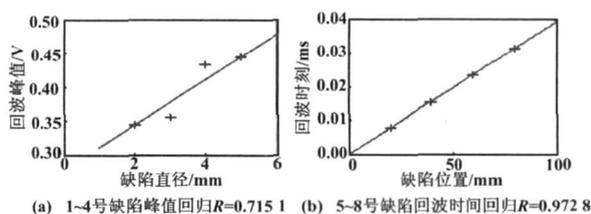


图5 缺陷特征线性回归

5 结束语

本文提出的基于提升小波包的集合经验模态分解(EEMD)新方法,有效地识别了缺陷信息,既解决了提升小波降噪后缺陷特征不明显的问题,又解决了EEMD不能有效分解高噪声信号的问题。采用基于提升小波包的EEMD方法对人工缺陷试样进行了试验,取得了较好的效果。该方法有效滤除了电磁超声回波信号噪声,提取了缺陷回波峰值特征和回波时间特征,在电磁超声无损检测缺陷识别中具有一定的研究意义,为缺陷信号的识别分类奠定了基础。

参考文献

- [1] 李振才. 电磁声(EMA)技术的发展与应[J]. 无损探伤, 2006, 30(6): 13-14.

-
- [2] 任晓可. 电磁超声技术在钢板缺陷检测中的研究 [D] . 天津: 天津大学, 2008.
- [3] Huang N E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J] . Proceedings of Royal Society A, 1998, 10 (454) : 903-905.