

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311061

基于经验与变分混合分解的超声回波信号噪声消除方法

王辰辰¹, 姚贞建², 杨梦冉², 冯玮¹

(1. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 北京 100095; 2. 武汉工程大学电气信息学院 武汉 430205)

摘要: 超声缺陷检测结果易受超声回波信号中复杂噪声的干扰, 为了提高超声缺陷检测的准确度, 提出一种基于混合分解的超声回波信号噪声消除方法。采用经验模态分解算法结合相关系数指标对超声回波信号进行预处理, 得到消除低频噪声分量的超声回波预处理信号。基于变分模态分解将该预处理信号分解为一系列窄带本征模态函数, 引入互信息指标估计变分模态分解的最优模态数量, 并根据窄带本征模态函数与预处理信号的相关系数提取有用的模态分量, 实现对超声回波信号去噪结果的重构。通过仿真和实测超声回波信号验证了本文方法的去噪性能, 并与现有方法进行了对比。结果表明, 本文方法可同时消除超声回波信号中的高频和低频噪声, 在不同信噪比条件下 EMD、VMD 和本文方法去噪结果的 SNR 均值分别为 10.01、9.48 和 16.09 dB, 验证了本文方法对于超声回波信号噪声消除的优越性。

关键词: 超声检测; 信号处理; 信号分解; 噪声消除

中图分类号: TB52 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2 460.4

Noise elimination method of ultrasonic echo signal based on empirical and variational hybrid decomposition

Wang Chenchen¹, Yao Zhenjian², Yang Mengran², Feng Wei¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: Ultrasonic defect detections are easily disturbed by complex noise in ultrasonic echo signals. To improve the accuracy of ultrasonic defect detection, an ultrasonic echo signal noise elimination method based on the hybrid decomposition is proposed. The fusion of empirical mode decomposition and correlation coefficient is used to preprocess the ultrasonic echo signal, and the preprocessing signal is obtained to eliminate the low-frequency noise components. Based on variational mode decomposition, the preprocessed signal is decomposed into several band-limited intrinsic mode functions (BLIMFs), and the mutual information is introduced to estimate the optimal mode number. The useful modes are extracted according to the correlation coefficient of the BLIMFs to the preprocessed signal, and the denoising results are reconstructed. The denoising performance of the proposed method is evaluated by simulation and measured ultrasonic echo signals. Compared with two existing methods, experimental results show that the proposed method can simultaneously eliminate high-frequency and low-frequency noises in ultrasonic echo signals. Under different SNR conditions, the mean SNR of the EMD, VMD and the proposed method are 10.01 dB, 9.48 dB, and 16.09 dB, respectively, which proves the superiority of the proposed method for noise elimination of the ultrasonic echo signals.

Keywords: ultrasonic detection; signal processing; signal decomposition; noise elimination

0 引言

超声检测技术广泛应用于航空航天、先进制造、医疗、石油化工等领域中的缺陷检测^[1-5]。超声检测过程中,采集的超声回波信号具有典型的非平稳、非线性特

征,且信号中包含大量被检测对象的缺陷信息。如何从超声回波信号中有效地提取缺陷信息,是超声检测可靠性的关键。然而,超声回波信号易受复杂噪声的干扰,会导致信号存在失真,进而降低超声检测的准确度^[6]。因此,如何实现对超声回波信号中复杂噪声的消除,是提高超声缺陷检测准确度的关键。

近年来,国内外学者针对超声回波信号去噪进行了大量探索和研究,提出的方法主要分为基于滤波器和基于信号分解的去噪方法。常用的滤波器包括如 IIR 滤波器、FIR 滤波器、维纳滤波器、椭圆滤波器等,其去噪性能的关键在于如何有效设置适用于超声回波信号的滤波器参数^[7]。而在超声缺陷检测中,超声回波信号中的噪声通常比较复杂,其频率难以准确表征,导致基于滤波器的去噪方法可靠性较差。基于信号分解的去噪方法被广泛应用于超声缺陷检测的信号处理领域,常用的信号分解方法包括小波分解、经验模态分解、变分模态分解等^[8-11]。小波分解根据经验设定分解层数和小波基函数,通过小波分解提取超声回波信号中的噪声成分,以实现信号去噪^[12-14]。但分解层数和小波基函数的设定问题,会导致其去噪过程适应性较差。经验模态分解方法将超声回波信号自适应地分解为一系列本征模态函数,并基于本征模态函数与超声回波信号的相关性指标实现信号去噪^[15-18]。该方法对超声回波信号中的低频分量具有很好的辨识效果,然而复杂噪声干扰下,超声回波信号易产生模态混叠问题。变分模态分解方法与经验模态分解方法的去噪过程相类似,该方法对超声回波信号中的高频分量具有很好的辨识效果,但难以有效提取低频噪声分量,且需要设计合理的算法,以估计最优模态数量^[19-20]。

本文试基于经验模态分解和变分模态分解的分解特点,提出一种基于混合分解的超声回波信号噪声消除方法。采用经验模态分解结合相关系数指标,来消除超声回波信号中的大量低频噪声分量,得到预处理信号;基于变分模态分解算法将预处理信号分解为一系列窄带本征模态函数,并提出基于信息熵的最优模态数量估计方法,最终实现超声回波信号中低频和高频噪声分量的有效消除。

1 信号分解算法

1.1 经验模态分解

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)将超声回波信号分解为不同频带的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF),每个 IMF 满足如下条件:1)极值点与过零点个数最多相差一个;2)上下包络线的均值为零^[15-16]。假设超声回波信号为 $x(t)$,对其进行 EMD 的具体过程如下:

1)提取 $x(t)$ 的极大值和极小值,采用 3 次样条曲线连接信号 $x(t)$ 的极大值和极小值,得到上包络线 $u(t)$ 和下包络线 $l(t)$;

2)计算上下包络线的均值 $m_1(t) = [u(t) + l(t)]/2$,定义 $h_1^{(1)}(t) = x(t) - m_1(t)$ 。若 $h_1^{(1)}(t)$ 满足 IMF 的两个条件,则 $h_1^{(1)}(t)$ 为 $x(t)$ 的 IMF 分量,否则令 $x(t) = h_1^{(1)}(t)$,重新提取 $x(t)$ 的极大和极小值,计算上下包络

线均值,重复 k 次,直到 $h_1^{(k)}(t)$ 满足 IMF 的两个条件,则第一个 IMF 为 $c_1(t) = h_1^{(k)}(t)$;

3)从原始信号 $x(t)$ 中减掉 $c_1(t)$,得到第一个残余分量为 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$,将 $r_1(t)$ 当作 $x(t)$,重复以上步骤 i 次,则第 i 个 IMF 被提取出来,表示为 $c_i(t) = r_{i-1}(t) - r_i(t)$, $i = 2, 3, \dots, m$;

4)继续执行上述分解过程,直到残余分量 $r_m(t)$ 为单调函数,或只有一个极值点,此时,从残余分量中无法再分解出更多的 IMF。最终, $x(t)$ 可表示为多个 IMF 和残余分量之和,即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^m c_i(t) + r_m(t) \quad (1)$$

式中: $c_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量; $r_m(t)$ 是残余分量; m 为 IMF 个数。

1.2 变分模态分解

变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)是一种具有准正交特性的信号分解方法,它基于维纳滤波、一维希尔伯特变换和外差法,实现信号特殊稀疏特性的提取^[19]。VMD 可将动态测量信号 $x(t)$ 分解为 K 个窄带 IMFs (band-limited IMFs, BLIMFs),表示为 $u_k(t)$,其中中心频率为 ω_k 。 $u_k(t)$ 和 ω_k 可通过求解以下变分问题得到,即:

$$\min_{\{u_k(t), \omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k(t) = x(t) \quad (3)$$

式中: $\delta(t)$ 为狄拉克函数;符号“ $*$ ”表示卷积算子。

在 VMD 中,采用了二次惩罚函数和拉格朗日算子求解上述约束的优化问题,并采用拉格朗日算子的交替方向法,计算得到 $u_k(t)$ 及其中心频率 ω_k , 如下:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

式中: α 为惩罚参数,通过添加正则项对约束条件进行惩罚,辅助变分问题求解,根据文献[21-22],取 $\alpha = 800$; λ 是拉格朗日算子,用于保证求解变分问题约束条件的严格性; n 表示迭代次数; $\hat{x}(\omega)$ 、 $\hat{u}_k(\omega)$ 和 $\hat{\lambda}(\omega)$ 分别为 $x(t)$ 、 $u_k(t)$ 和 $\lambda(t)$ 的傅里叶变换。

2 基于混合分解的超声回波信号去噪方法

在超声无损检测实验中,超声回波信号易受复杂噪声干扰而导致信号失真问题,降低了超声无损检测的准确度和可靠性。为解决这个问题,本文结合 EMD 和

VMD 在非平稳信号分解的特点,提出一种基于混合分解的超声回波信号噪声消除方法。该方法的详细去噪原理,包括如下 4 个步骤:

1) EMD 分解。采用 EMD 对离散超声回波信号 $x(n)$ 进行自适应分解,得到一组 IMF_s 分量;

2) 有用 IMF_s 提取。计算各 IMF 分量与 $x(n)$ 的相关系数 $r_1(m)$, ($m = 1, 2, \dots, M$), 其中 M 为 IMF_s 的数量, 并定义相关阈值 r_{limit} 为:

$$r_1(m) = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x}(n))(c_k(n) - \bar{c}_k(n))}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x}(n))^2 \sum_{n=1}^N (c_k(n) - \bar{c}_k(n))^2}} \quad (6)$$

$$r_{\text{limit}} = -\log[\xi c / (1 + \xi c)] \quad (7)$$

式中: ξ 为分辨系数; c 是常数。通常 $\xi = 0.5$, $c = 2.5$, 因此相关阈值 $r_{\text{limit}} = 0.588$ 。

当满足 $r_1(m) \geq r_{\text{limit}}$ ($m = 1, 2, \dots, M$) 时, 则对应的第 m 个 IMF 分量被定义为有用 IMF 分量, 否则为噪声 IMF 分量。将所有有用 IMF 分量相加得到预处理超声回波信号, 记为 $x_0(n)$;

3) VMD 最优模态数量估计。假设 VMD 的模态数量为 K , 在不同 K 值下对预处理信号 $x_0(n)$ 进行 VMD 分解, 每次分解得到一组 BLIMF_s 分量。计算 BLIMF_s 与 $x_0(n)$ 的相关系数 $r_2(k)$, ($q = 1, 2, \dots, K$)。将满足 $r_2(k) \geq r_{\text{limit}}$ ($k = 1, 2, \dots, K$) 的所有 BLIMF_s 分量相加, 得到去噪信号 $x_1(n)$, 计算 $x_1(n)$ 与 $x_0(n)$ 之间的互信息指标, 定义为:

$$MI[x_1, x_0] = H(x_1) + H(x_0) - H(x_1, x_0) \quad (8)$$

式中: $H(x_1)$ 、 $H(x_0)$ 和 $H(x_1, x_0)$ 分别为 $x_1(n)$ 与 $x_0(n)$ 的信息熵及其联合熵, 定义为:

$$\begin{cases} H(x_1) = -\sum_i p_{x_1}(x_{1i}) \log_2 p_{x_1}(x_{1i}) \\ H(x_0) = -\sum_j p_{x_0}(x_{0j}) \log_2 p_{x_0}(x_{0j}) \\ H(x_1, x_0) = -\sum_{i,j} p_{x_1 x_0}(x_{1i}, x_{0j}) \log_2 p_{x_1 x_0}(x_{1i}, x_{0j}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $p_{x_1}(x_{1i})$ 、 $p_{x_0}(x_{0j})$ 和 $p_{x_1 x_0}(x_{1i}, x_{0j})$ 分别为 $x_1(n)$ 与 $x_0(n)$ 的概率质量函数和联合概率质量函数。较大的 MI 说明, 更多的有用信号从 $x_0(n)$ 分配至 $x_1(n)$ 中。

当 MI 达到最大值时, 对应的 K 值即为预处理信号 $x_0(n)$ 的 VMD 分解过程的最优模态数量;

4) 去噪信号重构。在最优模态数量条件下 $x_0(n)$ 的 VMD 结果中, 将满足 $r_2(k) \geq r_{\text{limit}}$ ($k = 1, 2, \dots, K$) 的 BLIMF_s 之和作为超声回波信号的去噪结果。

3 超声回波信号去噪实验

3.1 仿真信号去噪

仿真测试用超声回波信号由 3 个叠加的高斯回波信号和噪声信号组成, 其中, 噪声信号由均值为 0、方差为 0.04 的高斯噪声和正弦信号 $0.03\sin(30\pi t)$ 叠加生成, 高斯回波信号为^[23]:

$$s_i(t) = \beta_i e^{-\alpha_i(t-\tau_i)^2} \cos[2\pi f_{ci}(t - \tau_i) + \varphi_i], i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

式中: 信号幅度 $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 0.7$ 和 $\beta_3 = 0.5$; 带宽因数 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 60$; 回波到达时间 $\tau_1 = 1$, $\tau_2 = 2$ 和 $\tau_3 = 3$; 中心频率 $f_{c1} = f_{c2} = f_{c3} = 15$; 相位 $\varphi_1 = 1.5$, $\varphi_2 = 3$ 和 $\varphi_3 = 4.5$ 。

信号采样频率为 2 000 Hz, 采样时间 4 s, 得到仿真无噪信号和含噪信号如图 1 所示。此时仿真含噪信号信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 为 9.25 dB, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.065 V。仿真超声回波信号的 EMD 结果如图 2 所示, 可以看到信号被自适应分解为 6 个 IMF 分量和一个残余分量 (Res.)。

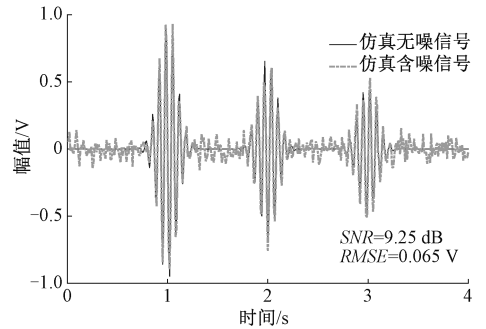
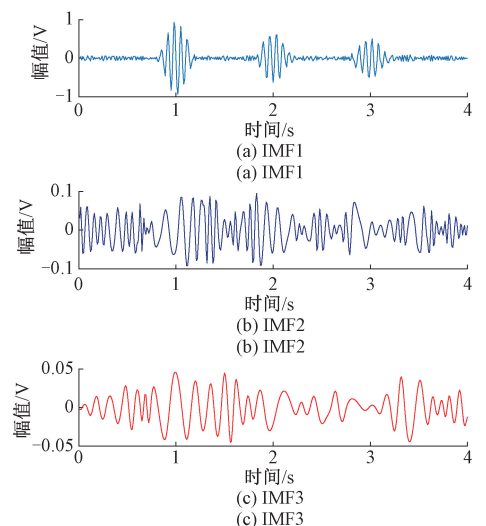


图 1 仿真超声回波信号

Fig. 1 The simulated ultrasonic echo signals



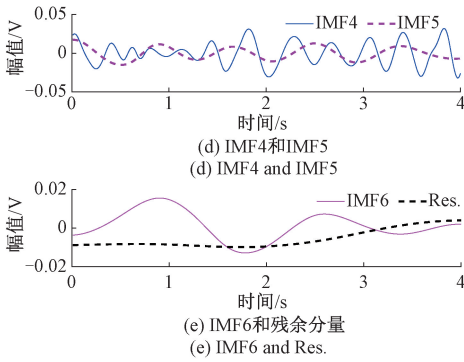


图2 EMD分解结果
Fig. 2 The EMD results

为了提取有用的 IMF 分量,分别计算各 IMF 与仿真超声回波信号之间的相关系数,得到的结果如表 1 所示。通过比较各 IMF 分量的相关系数与相关阈值 $r_{limit} = 0.588$ 的大小可知,只有 IMF1 中包含了大量的高斯回波信息,因此 IMF1 为有用分量,即预处理信号;而其余分量均为噪声分量,应予以剔除。

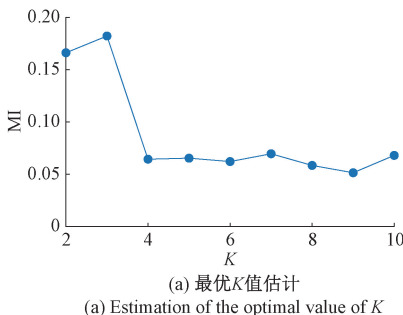
表 1 仿真信号 IMFs 相关系数

Table 1 Correlation coefficients of IMFs of the simulated signal

分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	残余分量
相关系数	0.97	0.14	0.05	0.06	0.03	0.01	0

令 VMD 模态数量 K 从 2 变化至 10,对预处理信号进行分解,并根据式(8)计算不同 K 值下的互信息指标,结果如图 3(a)所示,根据互信息最大准则可知,VMD 最优模态数量为 $K=3$ 。图 3(b)显示了当 $K=3$ 时预处理信号的 VMD 分解结果。

表 2 给出了 3 个 BLIMFs 与预处理信号的相关系数,可以看出 BLIMF1 和 BLIMF2 的相关系数比相关阈值大,因此将 BLIMF1 和 BLIMF2 相加,得到仿真超声回波信号的去噪结果,如图 4 所示。从图 4(a)中的去噪信号时域曲线可明显看出,在几乎不减小回波幅值情况下,本文方法可有效减小信号中的噪声;而从图 4(b)中的频谱曲



(a) 最优K值估计
(a) Estimation of the optimal value of K

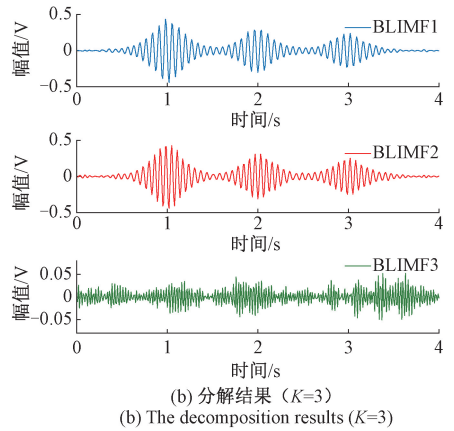


图3 VMD分解结果
Fig. 3 The VMD results

表 2 仿真信号 BLIMFs 相关系数

Table 2 Correlation coefficients of BLIMFs of the simulated signal

分量	BLIMF1	BLIMF2	BLIMF3
相关系数	0.73	0.76	0.15

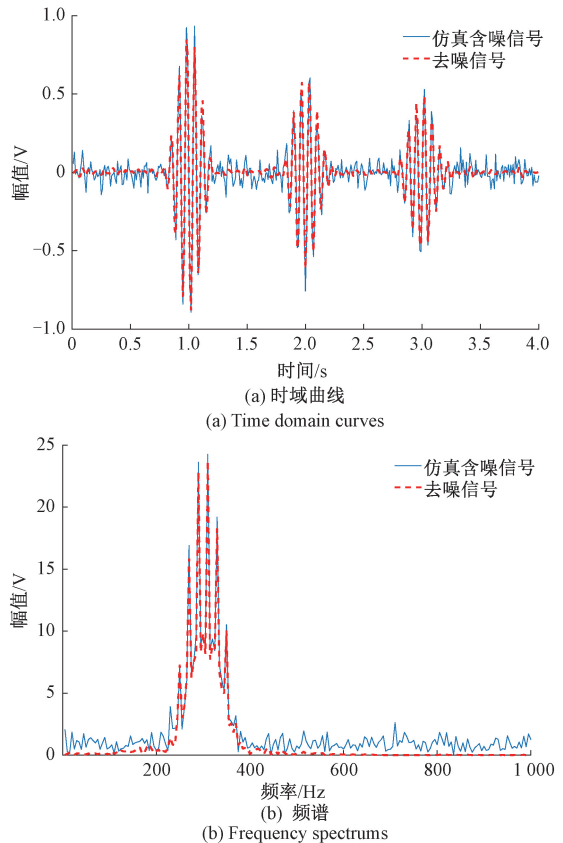


图4 仿真超声回波信号去噪结果

Fig. 4 Denoising result of the simulated ultrasonic echo signal

线也能看出, 高斯回波振荡频率幅值降低较小, 而其余频率处的幅值降低明显, 这就验证了本文方法用于超声回波信号去噪的可行性。

为验证本文方法用于超声回波信号噪声消除的优越性, 分别采用 EMD 和 VMD 对仿真超声回波信号进行去噪分析, 仿真含噪超声回波信号及 3 种方法去噪结果的时频图如图 5。

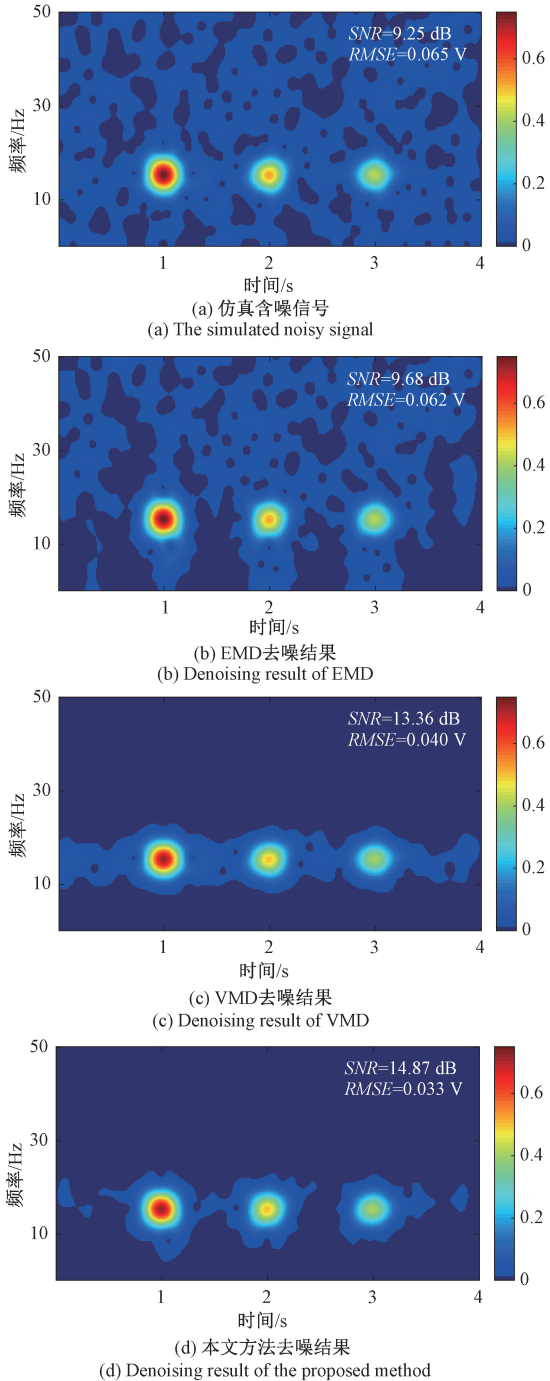


图 5 去噪结果时频图对比

Fig. 5 Comparison of time-frequency graph of the denoising results

从图 5(a) 可以看出, 仿真信号时频图中的 3 个亮点对应于 3 个回波, 其余部分显示在整个时间区间和频段内均包含大量噪声成分。经 EMD 去噪后的结果如图 5(b) 所示, 可以看到 EMD 可以消除大部分频率低于约 200 Hz 的噪声成分, 但对高频部分和 3 个高斯回波到达时刻的噪声成分去除效果较差; 而从图 5(c) 给出的去噪结果可看出, 针对仿真的超声回波信号, VMD 方法可以很好地消除高频噪声和部分低频噪声, 去噪效果优于 EMD, 但对于频率接近超声回波信号中心频率的噪声消除效果依然不尽理想; 对比而言, 本文方法综合了 EMD 和 VMD 的优点, 不仅可以有效消除高频噪声和低频噪声, 并且对频率接近中心频率处的噪声去除效果有大幅提升。

图 6 给出了仿真超声回波信号在不同 SNR 条件下 3 种方法去噪结果的量化对比, 可以看出, 当 SNR 较大时 (如实验 1、2 和 3), EMD 的去噪性能优于 VMD; 相反, 当超声回波信号的 SNR 较小时, EMD 去噪性能下降, VMD 的去噪效果优于 EMD。而本文方法去噪结果的 SNR 始终大于其它两种方法得到的值。在不同 SNR 条件下, EMD、VMD 和本文方法去噪结果的 SNR 平均值, 分别为 10.01、9.48 和 16.09 dB。此外, 本文方法去噪结果的 RMSE 始终小于其他两种方法的结果, 这就进一步说明了本文方法对超声回波信号噪声消除的鲁棒性强。

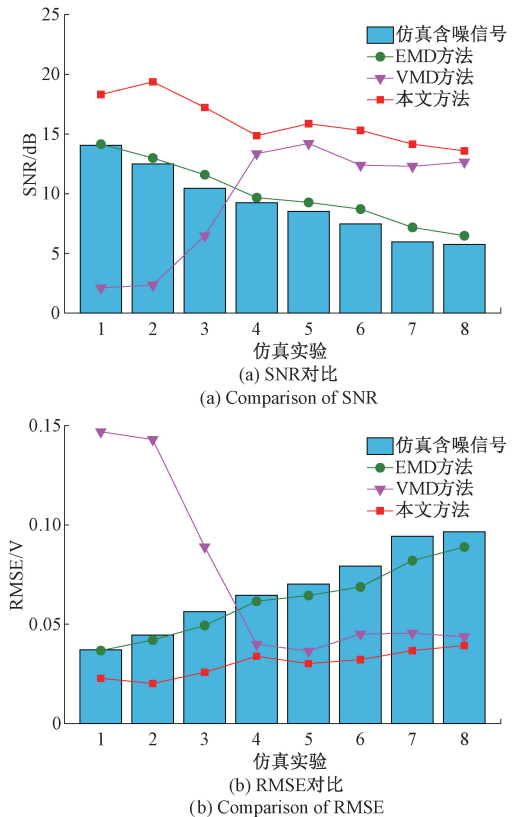


图 6 不同 SNR 条件下去噪结果对比

Fig. 6 Comparison of the denoising results under different SNR cases

3.2 实测信号去噪

为进一步验证本文方法对超声回波信号的去噪效果,采用 SIUI 超声探头检测标准试块,实测试验所用超声探头及标准试块如图 7。采集超声实测信号,采样频率为 200 MHz,截取的信号单个回波如图 8(a)中的黑色实线所示。分别采用 EMD、VMD 和本文方法对该信号进行去噪分析,其去噪信号的时域特性曲线及其频谱特性曲线,分别如图 8(a)和(b)所示。

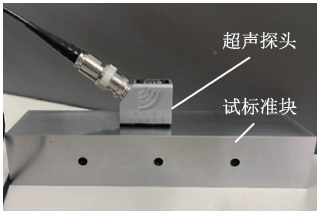
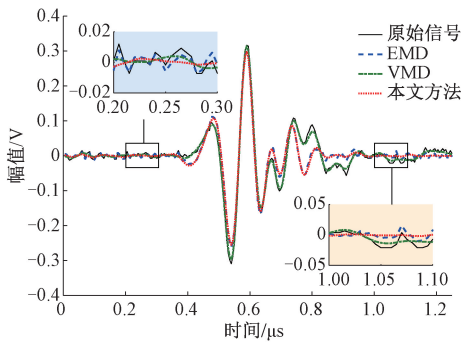
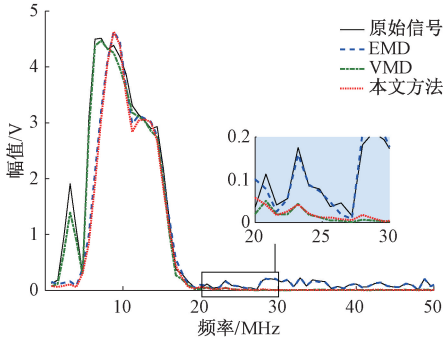


图 7 超声探头及标准试块

Fig. 7 Ultrasonic probe and standard test block



(a) 时域曲线
(a) Time domain curves



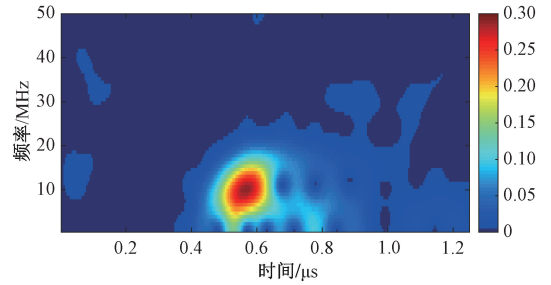
(b) 频谱
(b) Frequency spectrums

图 8 超声回波信号去噪结果对比

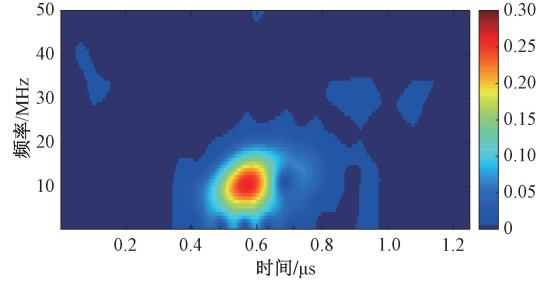
Fig. 8 Comparison of denoising results of the ultrasonic echo signal

从图 8 可以看出,3 种方法对超声回波信号的噪声均有消除效果,从频谱可直观看出,EMD 可有效消除超声回波信号中的低频噪声,但对频率高于 20 MHz 的噪声

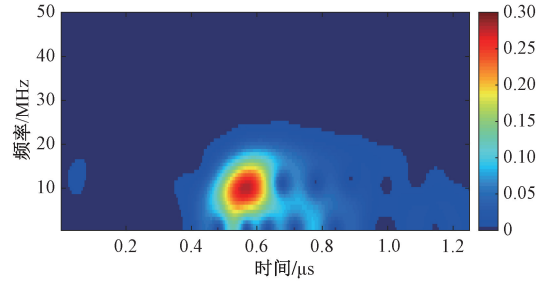
却无法消除;相反,VMD 只能消除高频噪声,而对低频噪声去除效果差。相比而言,本文方法对超声回波信号中的高频和低频噪声均具有去除效果,得到的去噪结果明显优于 EMD 和 VMD。此外,从图 9 的时频图也可以清晰地看出,本文方法的去噪效果优于其它两种方法,得到的时频图的幅值更集中于回波到达点,验证了本文方法具有良好的去噪性能。



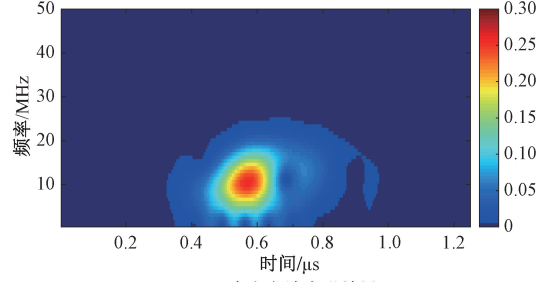
(a) 含噪信号
(a) The noisy signal



(b) EMD去噪结果
(b) Denoising result of EMD



(c) VMD去噪结果
(c) Denoising result of VMD



(d) 本文方法去噪结果
(d) Denoising result of the proposed method

图 9 超声回波信号去噪结果时频图对比

Fig. 9 Comparison of time-frequency graph of the ultrasonic echo signal denoising results

4 结 论

本文提出一种基于混合分解的超声回波信号噪声消除方法。该方法结合经验模态分解和变分模态分解对超声回波信号分解过程的优势,有效提升了信号分解方法用于超声回波信号噪声消除的性能。从仿真和实测超声回波信号噪声消除实验结果可见,混合分解方法结合对有用模态分量的可靠提取,可在保证去噪信号完整性前提下有效减小超声回波信号中复杂噪声成分的影响。对不同SNR的仿真超声回波信号,EMD、VMD和本文方法去噪结果的SNR平均值分别为10.01、9.48和16.09 dB,且本文方法去噪结果的RMSE始终小于其它两种方法,就验证了本文方法对超声回波信号噪声消除的可行性和鲁棒性。此外,实测超声回波信号的去噪结果表明,本文方法可同时消除低频和高频噪声,有效解决了信号分解方法难以有效同时提取高频和低频分量,进而导致超声回波信号宽频带噪声提取精度低的问题,为超声缺陷检测中对回波信号的可靠校正提供了一种方案。

参考文献

[1] 梁国安,姚叶子,郑凯,等. 基于超声相控阵的角焊缝缺陷信号重构方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 222-228.
LIANG G AN, YAO Y Z, ZHENG K, et al. Research on reconstruction method of fillet weld defect signal based on ultrasonic phased array [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(3): 222-228.

[2] 刘旭,夏金东,弓乐,等. 超声检测缺陷分类中信号处理方法的探讨[J]. 仪器仪表学报, 2002(6): 638-641.
LIU X, XIA J D, GONG L, et al. Comparing study on bpn with rbf and demodulated signal with radio-frequency signal for flaw classification in ultrasonic testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002(6): 638-641.

[3] LIU F F, LIU S P, ZHOU Z H G, et al. Detailed characterisation and evaluation of composite stiffener R-zones based on mono-pulse ultrasonic reflection behavior[J]. Ultrasonics, 2022, 124, 106732.

[4] 温银堂,杨若然,张玉燕. 新型陶瓷基复合材料粘接构件的脱粘超声检测信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 143-151.
WEN Y T, YANG R R, ZHANG Y Y. Debonding ultrasonic detection signal processing method of novel ceramic matrix composite material bonding member[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 143-151.

[5] 张伦,徐科军,穆立彬,等. 基于超声回波信号包络拟合的信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 194-201.
ZHANG L, XU K J, MU L B, et al. Signal processing method based on ultrasonic echo signal envelope fitting[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 194-201.

[6] 曹茂永,王霞,郁道银. 高噪声背景下超声信号数字处理技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2002(2): 200-202.
CAO M Y, WANG X, YU D Y. Research on digital processing technology of ultrasonic signal high-noise background [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002(2): 200-202.

[7] 沈希忠,叶秋泽. 基于维纳滤波的超声增强实现方法[J]. 数据采集与处理, 2018, 33(3): 455-460.
SHEN X ZH, YE Q Z. Implementation of ultrasonic enhancement based on wiener filtering [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2018, 33(3): 455-460.

[8] TARPARA E G, PATANKAR V H. Real time implementation of empirical mode decomposition algorithm for ultrasonic nondestructive testing applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89, 125118.

[9] LIU T, LI J, CAI X F, et al. A time-frequency analysis algorithm for ultrasonic waves generating from a debonding defect by using empirical wavelet transform[J]. Applied Acoustics, 2018, 131: 16-27.

[10] 赵斯琪,李松松,栾明慧,等. 基于集合经验模态分解的超声检测信号处理[J]. 无损检测, 2021, 43(5): 16-24.
ZHAO S Q, LI S S, LUAN M H, et al. Ultrasonic testing signal processing based on EEMD [J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(5): 16-24.

[11] ZHAO SH J, ZHOU J J, LIU Y, et al. Application of adaptive filtering based on variational mode decomposition for high-temperature electromagnetic acoustic transducer denoising[J]. Sensors, 2022, 22, 7042: 1-16.

[12] 岳玉国. 基于小波分解的舰船钛合金超声检测信号去噪算法[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(3A): 19-21.
YUE Y G. Wavelet decomposition based denoising algorithm for ultrasonic inspection signal of titanium alloy in ships [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(3A): 19-21.

[13] 周知进,文泽军,卜英勇. 小波降噪在超声回波信号处理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 237-241.

- ZHOU ZH J, WEN Z J, BU Y Y. Application study of wavelet analysis on ultrasonic echo wave noise reduction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30 (2): 237-241.
- [14] 张曼, 王明泉, 杨顺民, 等. 基于小波分析的锂电池空耦超声信号降噪研究[J]. 测试技术学报, 2020, 34 (4): 304-310.
- ZHANG M, WANG M Q, YANG SH M, et al. Research on noise reduction of air-coupled ultrasonic signal of lithium battery based on wavelet analysis[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34 (4): 304-310.
- [15] FENG W, ZHOU X J, ZENG X, et al. Ultrasonic flaw echo enhancement based on empirical mode decomposition[J]. Sensors, 2019, 19, 236: 1-13.
- [16] 常晓丽, 朱岩, 柴艳丽, 等. 基于 EMD 的微裂缝超声回波信号去噪算法[J]. 测试技术学报, 2018, 32 (4): 307-311.
- CHANG X L, ZHU Y, CHAI Y L, et al. Micro-crack ultrasonic echo signal denoising algorithm based on EMD[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32 (4): 307-311.
- [17] 杜必强, 孙立江. 基于 EMD 和小波熵阈值算法的超声回波信号降噪[J]. 中国测试, 2017, 43 (1): 101-105.
- DU B Q, SUN L J. Noise reduction in ultrasonic echo signal based on EMD and wavelet entropy threshold algorithm [J]. China Measurement & Test, 2017, 43 (1): 101-105.
- [18] 张坤硕, 齐华, 任安虎, 等. 超声信号的改进 EMD 阈值方法降噪研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36 (11): 15-20.
- ZHANG K SH, QI H, REN AN H, et al. Study on noise reduction of ultrasonic signals by improved EMD threshold method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36 (11): 15-20.
- [19] 王大为, 王召巴, 李鹏, 等. 基于变分模态分解的超声检测信号降噪研究[J]. 中国测试, 2019, 45 (12): 106-111.
- WANG D W, WANG ZH B, LI P, et al. Study on ultrasonic detection signal denoising based on variational mode decomposition [J]. China Measurement & Test, 2019, 45 (12): 106-111.
- [20] 俞燕萍, 罗鹏斌, 杨先明, 等. 基于 VMD 的相控阵超声信号降噪方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (7): 261-266.
- YU Y P, LUO P B, YANG X M, et al. Research on noise reduction method of phased array ultrasonic signal based on VMD[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30 (7): 261-266.
- [21] DRAGOMIRETETSIIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62 (3): 531-544.
- [22] YAO ZH J, LIU X J, YANG W J, et al. A coarse-to-fine denoising method for dynamic calibration signals of pressure sensor based on adaptive mode decompositions [J]. Measurement, 2020, 163, 107935.
- [23] 曹弘毅. 碳纤维复合材料超声相控阵无损检测技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- CAO H Y. Research on phased array ultrasonic non-destructive testing technique of carbon fiber reinforced plastic[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

作者简介



王辰辰, 2013年毕业于青岛大学获得学士学位, 2016年毕业于北京长城计量测试技术研究所获得硕士学位, 现为北京长城计量测试技术研究所工程师, 主要研究方向为声学计量测试、声学信号分析等。

E-mail: wlztianya@163.com.

Wang Chenchen received his B.Sc. degree from Qingdao University in 2013, and received his M.Sc. degree from Changcheng Institute of Metrology & Measurement in 2016. He is currently an engineer at Changcheng Institute of Metrology & Measurement. His main research interests include acoustic measurement test, acoustic signal analysis, et al.



姚贞建(通信作者), 2013年于燕山大学获得学士学位, 2018年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生导师, 主要研究方向为动态压力测试计量、超声检测技术与信号处理。

E-mail: yao_buaa@126.com

Yao Zhenjian (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Yanshan University in 2013, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2018. He is currently a postgraduate advisor at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include dynamic pressure measurement, ultrasonic detection technology and signal processing.