

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2412662

噪声频谱混叠干扰下超声检测信号高质量提取方法

王辰辰¹, 杨梦冉², 姚贞建²

(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:为解决超声检测中噪声频谱混叠导致检测精度低的问题,提出一种数据-模型联合驱动的超声检测信号高质量提取方法。结合经验模态分解和分量聚类指标实现超声检测信号预处理,减小噪声对检测信号提取的影响;基于高斯回波模型,结合时频变换、频谱高斯拟合和人工蜂群算法对预处理信号的模型参数进行准确估计;根据模型参数对信号进行重构,实现超声检测信号高质量提取。仿真结果表明,本文方法可高质量提取信噪比(SNR)低至4.56 dB的超声检测信号,提取信号信噪比均值提升至28.71 dB,提取效果显著优于现有常用方法,如经验模态分解(SNR=9.82 dB)和变分模态分解(SNR=11.07 dB)。此外,超声检测实验证明了本文方法可实现噪声频谱混叠下超声检测信号的高质量提取。

关键词: 超声检测; 频谱混叠; 噪声消除; 时频变换; 模型辨识

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

High quality extraction method of ultrasonic detection signals under noise spectrum aliasing interference

Wang Chenchen¹, Yang Mengran², Yao Zhenjian²

(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: To address the issue of low testing accuracy caused by noise spectrum aliasing in ultrasonic testing, a data-model-driven method for high-quality extraction of ultrasonic detection signals is proposed. This approach combines empirical mode decomposition (EMD) with a component clustering index to pre-process the ultrasonic signal, reducing the impact of noise on signal extraction. Using the Gaussian echo model, time-frequency transformation, spectral Gaussian fitting, and the artificial bee swarm algorithm, the model parameters of the pre-processed signals are accurately estimated. The Gaussian echo model is then reconstructed to achieve high-quality signal extraction. Simulation results demonstrate that this method can extract ultrasonic signals with an SNR as low as 4.56 dB, improving the mean SNR of the extracted signals to 28.71 dB—significantly outperforming common methods such as EMD (SNR = 9.82 dB) and variational mode decomposition (SNR = 11.07 dB). Furthermore, ultrasonic testing experiments confirm the method's ability to extract high-quality signals even under noise spectrum aliasing interference.

Keywords: ultrasonic detection; spectrum aliasing; noise elimination; time-frequency transformation; model identification

0 引言

超声检测技术具有灵敏度高、穿透性强、对被测工件和人体无害等优点,广泛应用于工业、材料工程、食品工程、生物医学领域中的缺陷检测、位置测量、病理诊断等^[1-5]。然而超声检测过程易受仪器噪声、材料非线性特性及复杂环境等干扰,超声回波信号中通常夹杂大量宽

频带复杂噪声,并且超声波在材料中的衰减、散射等导致回波信号幅值小,导致检测结果存在准确性差的问题^[6-8]。因此,如何实现噪声频谱混叠干扰下超声缺陷检测信号高质量提取,是提高超声检测结果准确性的关键。

目前,常用超声检测信号提取方法主要有频谱分析法和信号分解法^[9]。频谱分析法以傅里叶变换为基础,根据检测信号频谱,设置截止频率分离噪声成分,实现超声检测信号提取。Zhu等^[10]提出基于正则化傅里叶变换

的超声检测信号提取方法,相比于带通滤波法不仅提升了处理速度而且提高了超声检测信号信噪比,但由于傅里叶变换属于全局变换,导致提取信号的完整性难以保证。信号分解法是通过将超声检测信号分解为一系列不同频率特性的模态分量,通过聚类指标筛选有用分量进行信号重构,实现检测信号提取。常用的信号分解方法包括小波变换、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)等。Yang等^[11]利用小波变换对超声缺陷检测信号进行信号提取,超声检测信号信噪比提升6 dB;张坤硕等^[12]提出一种改进的经验模态分解阈值超声检测信号提取方法,超声检测信号的信噪比、光滑度两个方面均有所提高;俞燕萍等^[13]构建基于参数优化的变分模态分解算法,超声检测信号提取结果具有较好的保真度。相比于频谱分析法,信号分解法能够更加完整地保留超声检测信号的局部特征信息,提高超声检测信号的信噪比和光滑度。然而,由于信号分解法存在泛化性差、参数设置依赖先验知识、易产生模态混叠和端点效应等缺点,尤其是对存在噪声频谱混叠的超声检测信号进行信号提取时,存在严重信号失真现象,无法满足各领域高精度超声检测需求^[14-15]。

针对上述问题,本文提出一种数据-模型联合驱动的超声检测信号高质量提取方法。以超声缺陷检测信号为基础,结合基于自适应分解的信号预处理算法和多参数回波模型辨识技术,实现超声检测信号高质量提取。该方法可有效消除宽频带噪声的影响,解决超声检测信号提取中的噪声频谱混叠问题,显著提高超声检测信号的信噪比。

1 超声回波模型

高斯回波模型是一种在信号处理和统计学中常用的数学模型,广泛应用于雷达、超声、地震信号分析等领域。该模型假设采集到的信号是由多个高斯调制的回波信号的叠加,并且每个回波信号由其振幅、回波到达时间、相位等参数综合表征。

在实际检测过程中,系统接收到的超声检测信号是由超声换能器中心频率调制的高斯包络脉冲,可用高斯回波模型^[3]表示为:

$$s(\theta, t) = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos[2\pi f_c(t - \tau) + \varphi] \quad (1)$$

式中: $\theta = [\beta, \alpha, \tau, f_c, \varphi]$ 表示超声检测信号的特征参数向量;带宽因子 α 表征信号带宽和回波持续时间;回波到达时间 τ 取决于超声波反射位置、传播路径和介质中的声速;中心频率 f_c 取决于超声换能器中心频率;幅度系数 β 和相位 φ 反映待测试件的特性阻抗以及超声传播过程的衰减。

在实际超声检测条件中,超声回波信号不可避免受噪声干扰,因此实际超声回波信号表示为:

$$y(t) = s(\theta, t) + n(t) \quad (2)$$

式中: $n(t)$ 为噪声分量。

2 噪声频谱混叠干扰下超声检测信号高质量提取方法

在超声无损检测中,采集的检测信号具有非平稳、非线性特性,其特征信息易被复杂宽频带噪声干扰,导致检测信号失真^[16]。传统信号提取方法无法有效分离频谱混叠干扰下的宽频噪声,存在超声检测信号提取质量差、提取结果信噪比低等问题。

针对该问题,本文提出基于数据-模型联合驱动的超声检测信号提取方法,通过超声检测信号预处理结合超声回波模型参数辨识,实现噪声频谱混叠干扰下超声检测信号高质量提取,总体流程如图1所示。

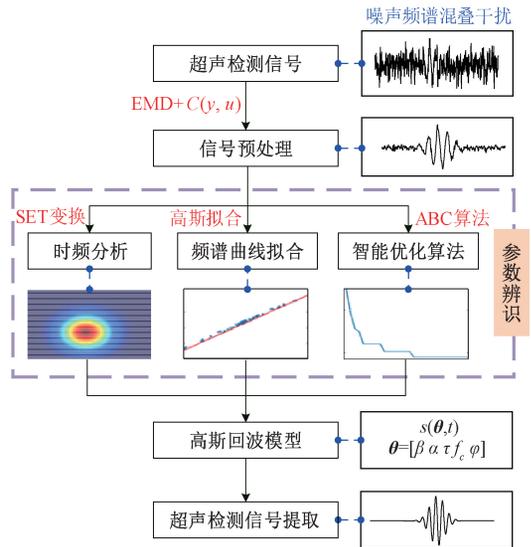


图1 噪声频谱混叠干扰下超声检测信号提取方法
Fig. 1 Ultrasonic detection signal extraction method under noise spectrum aliasing interference

2.1 超声检测信号预处理

为了减小宽频噪声对超声回波模型参数估计的影响,本文采用EMD对超声检测信号进行预处理,步骤如下。

1) 超声检测信号分解。采用EMD将超声检测信号 $y(t)$ 自适应分解为 m 个本征模态分量 $u(t)$ 和 1 个残余分量 Res , 表示为:

$$y(t) = \sum_{k=1}^m u_k(t) + Res \quad (3)$$

2) 本征模态分量聚类。不同本征模态分量 $u(t)$ 中

包含了超声检测信号的不同频率特征信息,可靠的 $u(t)$ 聚类是提升超声检测信号提取质量的关键^[17]。本文通过挖掘 $u(t)$ 与 $y(t)$ 统计特性的差异,构造基于相关系数的本征模态分量聚类指标,定义为:

$$C_k(y, u_k) = \frac{\sum [y(t) - \bar{y}(t)] \cdot [u_k(t) - \bar{u}_k(t)]}{\sqrt{\sum [y(t) - \bar{y}(t)]^2 \sum [u_k(t) - \bar{u}_k(t)]^2}} \quad (4)$$

式中: $\bar{y}(t)$ 、 $\bar{u}_k(t)$ 分别为 $y(t)$ 、 $u_k(t)$ 的均值。

计算 $u_k(t)$ 与 $y(t)$ 的相关系数 C_k , 当 C_k 取最大值时,则分量 $u_k(t)$ 为有用模态分量,其余分量为噪声模态分量,予以剔除。由于受宽频噪声频谱混叠影响,部分有用回波成分被分解到与有用模态分量相邻的噪声分量中。为了保证超声检测信号提取结果的完整性,本文实验保留有用模态分量 $u_k(t)$ 及其后一个分量 $u_{k+1}(t)$, 减小频谱混叠引起的有用成分缺失问题对超声检测信号提取结果完整性的影响。

2.2 基于时频变换的回波到达时间估计

回波到达时间 τ 是超声检测中确定超声反射位置信息的关键参数。目前常采用希尔伯特变换确定信号包络,并根据包络峰值实现回波到达时间估计。但在宽频噪声干扰下,预处理信号仍然存在一定的幅值畸变问题,希尔伯特变换无法估计信号的真实包络曲线,导致回波到达时间的估计误差大^[18]。本文提出一种基于时频变换的回波到达时间高精度估计策略,步骤如下。

1) 基于短时傅里叶变换 (short-time Fourier transform, STFT), 计算超声检测预处理信号 $x(t)$ 的时频谱 $G(t, \omega)$ 为:

$$G(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) \cdot x(u) \cdot e^{-i\omega u} du \quad (5)$$

式中: t 为时间序列; u 为时间变量; ω 为 STFT 下的角频率; $g(u-t)$ 为可滑动时间窗函数。

设 $x(t) = A \cdot e^{i\omega_0 t}$ 是频率为 ω_0 的谐波信号, A 为振幅。根据帕塞瓦尔定理可将式(5)转换为:

$$G_e(t, \omega) = A \cdot \hat{g}(\omega - \omega_0) \cdot e^{i\omega_0 t} \quad (6)$$

式中: $\hat{g}(\omega - \omega_0)$ 为窗函数 $g(u-t)$ 的傅里叶变换。

2) 求 $G_e(t, \omega)$ 一阶偏导数, 得到 STFT 频谱相位信息瞬时频率为:

$$\omega_0(t, \omega) = -i \frac{\partial_t G_e(t, \omega)}{G_e(t, \omega)} \quad (7)$$

式中: $\partial_t G_e(t, \omega)$ 为 $G_e(t, \omega)$ 对变量 t 的一阶偏导数。

3) 实际检测中, 超声检测信号存在噪声, 并且随机噪声会影响最终时频分析结果, 导致鲁棒性差。为提高时频分析结果的鲁棒性, 在式(7)的基础上添加 delta 函数^[16], 得到时频结果为:

$$T_e(t, \omega) = G_e(t, \omega) \delta[\omega - \omega_0(t, \omega)] \quad (8)$$

式中: $\delta[\omega - \omega_0(t, \omega)]$ 为同步提取算子。

对 $x(t)$ 进行上述变换, 得到时频谱。搜索时频谱中最大幅值对应坐标, 记作点 $M(x_m, y_m, z_m)$ 。点 M 横坐标 x_m 即为超声回波到达时间 τ 。

2.3 基于频谱高斯拟合的中心频率估计

中心频率 f_c 是超声检测信号中能量最大值对应的频率, 通常根据超声检测信号频谱最大值对应的频率即可准确估计中心频率^[15]。但在实际应用中, 超声检测信号传播过程中会受到散射、衰减以及环境噪声等因素的影响, 导致采集的信号出现失真问题, 造成频谱最大值对应频率存在偏移现象。针对这一问题, 本文提出一种结合频谱高斯拟合的中心频率估计方法。

1) 对超声检测预处理信号 $x(t)$ 进行傅里叶变换, 得到频谱信号 $F(\omega)$;

2) 采用高斯拟合方法对 $F(\omega)$ 进行拟合, 得到频谱拟合信号 $F_1(\omega)$;

3) 搜索 $F_1(\omega)$ 幅值最大点坐标 $R(r_x, r_y)$, 横坐标 r_x 即为估计的中心频率 f_c 。

2.4 基于智能算法的幅度系数、带宽因子和相位联合估计

幅度系数 β 、带宽因子 α 和相位 φ 是超声检测回波模型中的3个重要参数, 其中 β 一般通过回波信号包络最大幅值估计得到; α 根据其回波信号能量 E_s 和 β 的关系进行确定, 如下式^[16]:

$$E_s = \frac{\beta^2}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}} \quad (9)$$

φ 无法直接通过信号进行辨识, 传统方法通常采取将超声检测信号和其他4个参数代入式(1)进行估计。然而在实际检测中, 宽频噪声会影响超声检测信号包络的提取准确性, 降低 β 、 α 和 φ 估计精度。为解决该问题, 提出基于人工蜂群 (artificial bee colony algorithm, ABC) 算法的三参数联合估计方法, 将超声模型参数辨识问题转换为目标函数优化问题^[19]。

采用最小二乘法构建目标函数为:

$$\varepsilon(\boldsymbol{\sigma}^{(k)}) = \sum_{i=1}^N [x(t) - S(\boldsymbol{\sigma}^{(k)})]^2 \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma} = [\alpha, \beta, \varphi]$ 为参数向量; $x(t)$ 为超声检测预处理信号; $S(\boldsymbol{\sigma}^{(k)})$ 为算法迭代第 k 次 $\boldsymbol{\sigma}$ 对应的函数值。当 $\varepsilon(\boldsymbol{\sigma}^{(k)})$ 达到最小值时, 对应的参数向量 $\boldsymbol{\sigma}^{(k)} = [\alpha^{(k)}, \beta^{(k)}, \varphi^{(k)}]$ 即为 α 、 β 和 φ 的估计结果。

采用 ABC 算法对目标函数进行优化。

1) $\boldsymbol{\sigma} = [\alpha, \beta, \varphi]$ 参数初始化。根据式(11), 随机产生初始向量解 $X_{id}(i = 1, 2, \dots, ST)$, ST 为向量解个数, U_d 和 L_d 为搜索参数向量解的上限和下限, d 为解的维度。

$$X_{id} = L_d + \text{rand}(0, 1)(U_d - L_d) \quad (11)$$

2) 向量解邻域搜索。根据式(12), 随机搜索一个新

向量解 $M_{id}(j \neq i), \zeta$ 是区间 $[-1, 1]$ 内随机数。

$$M_{id} = X_{id} + \zeta(X_{id} - X_{jd}) \quad (12)$$

通过式 (13) 分别计算新向量解和旧向量解的适应度值 fit_i 。

$$fit_i = \begin{cases} 1/(1+f_i), & f_i \geq 0 \\ 1 + \text{abs}(f_i), & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: f_i 是目标函数输出值。

当新向量解 $M_i = [M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{id}]$ 的适应度满足 $fit_i > X_i$ 时,保留 M_i ,反之保留 X_i 。

3) 通过式 (14) 计算每个向量解对应概率 P_i , ABC 算法根据 P_i 的大小选择对应的向量解,并对该向量解邻域进行搜索产生新向量解,计算新向量解的适应度,判断是否更新当前向量解。

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{ST} fit_i} \quad (14)$$

4) 重复步骤 1)~3), 直至产生满足终止条件的最优向量解或到达最大迭代次数,算法结束。输出向量 $\sigma_1 = [\alpha_1, \beta_1, \varphi_1]$ 即为幅度系数、带宽因子和相位参数的估计结果。

综上,通过时频变换、频谱高斯拟合和 ABC 算法得到超声回波信号参数向量 $\theta_1 = [\beta_1, \alpha_1, \tau_1, f_c, \varphi_1]$ 的估计结果,将 θ_1 代入式 (1) 构建超声检测信号的高斯回波模型,实现超声检测信号高质量提取。

3 实验验证与结果分析

3.1 仿真实验

为验证本文方法对噪声频谱混叠干扰下超声检测信号提取的有效性,采用仿真超声检测信号进行测识。仿真信号由理想高斯回波信号和宽频噪声组成,理想高斯回波信号由式 (1) 生成,其参数向量为 $\theta = [\beta = 0.6, \alpha = 30, \tau = 1.8, f_c = 5, \varphi = 1.5]$; 宽频噪声由均值为 0、方差为 0.1 的高斯白噪声模拟。采样频率为 100 MHz,采样时间为 4 μs ,仿真信号如图 2 所示。

基于 EMD,仿真超声检测信号被分解为 5 个 $u(t)$ 和 1 个残余分量 Res ,如图 3 所示,各分量对应频谱如图 4 所示。

为验证本征模态分量聚类方法的合理性,对模态分量的选取进行讨论。根据式 (4) 计算仿真超声检测信号与 $u(t)$ 分量的相关系数,如图 5 所示。 u_2 相关系数最大,作为有用分量。 u_4, u_5 和 Res 的相关系数远小于 u_1, u_2, u_3 的相关系数,判定为噪声分量予以剔除。根据图 4 中 u_2 的频谱可知,仿真超声检测信号的中心频率约为 5 MHz。 u_3 在 5 MHz 处存在尖峰,因此作为有用分量

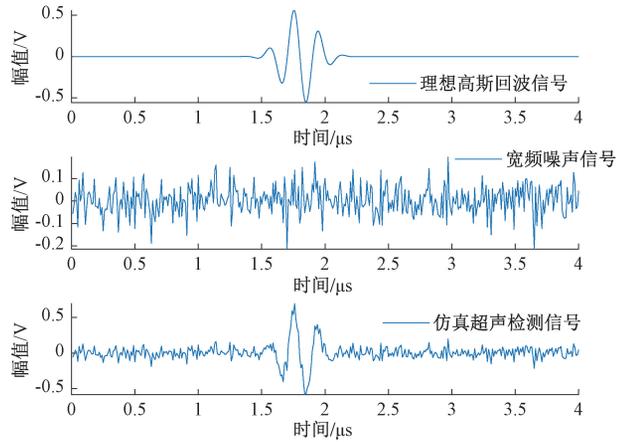


图 2 仿真超声检测信号

Fig. 2 The simulated ultrasonic detection signal

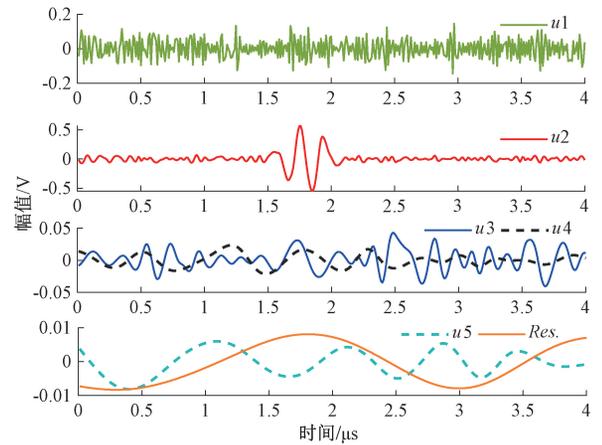


图 3 EMD 分解结果

Fig. 3 The EMD results

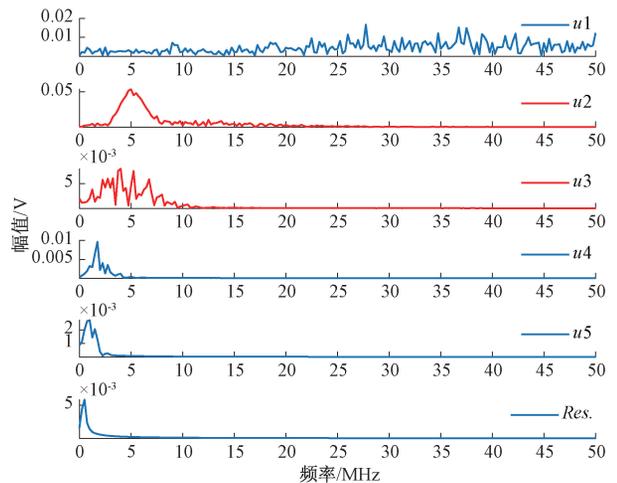


图 4 EMD 分解结果频域

Fig. 4 Frequency spectrum of the EMD results

保留。而 u_1 频谱能量主要集中在 20~50 MHz,因此可判定 u_1 为宽频噪声分量。综上可知, u_2 和 u_3 为有用分量,其和即为超声检测预处理信号。

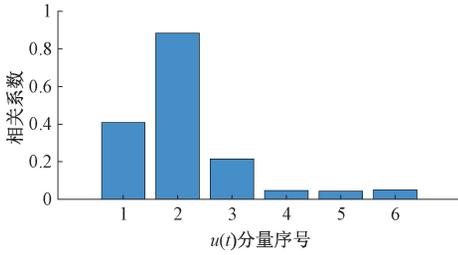


图5 相关系数

Fig. 5 The values of correlation coefficient

对预处理信号进行同步提取变换,得到时频图如图6所示。根据时频图中最大幅值点,其坐标为 $M(1.8, 5.1, 0.3846)$,得到回波到达时间估计结果为 $\tau = 1.8 \mu\text{s}$ 。此外,对预处理信号进行傅里叶变换,得到频谱曲线如图7所示,采用高斯拟合方法对频谱曲线进行拟合,根据拟合曲线最大值点的横坐标 r_x 得到超声检测信号中心频率的估计结果为 $f_c = 5.0 \text{ MHz}$ 。

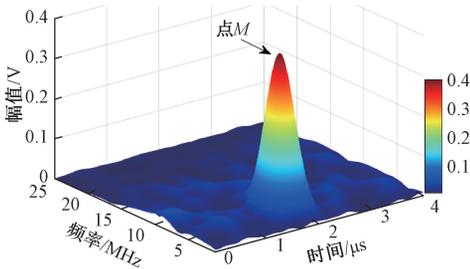


图6 预处理信号时频

Fig. 6 Time-frequency diagram of the preprocessed signal

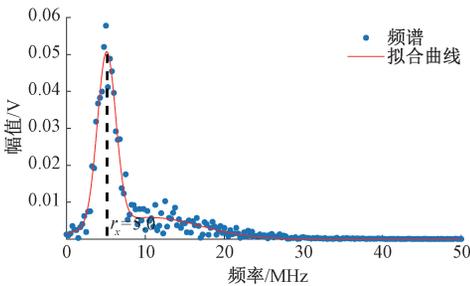


图7 预处理信号频谱及其拟合曲线

Fig. 7 Frequency spectrum and the fitting curve of the preprocessed signal

对于幅度系数 β 、带宽因子 α 和相位 φ ,采用 ABC 算法对其进行寻优。其中引领蜂数量和最大迭代次数分别为 60 和 500, β 、 α 和 φ 搜索范围分别为 0~2 V、0~50 MHz 和 0~ 2π 。目标函数适应度曲线如图8所示,可以

看出当算法迭代到第 331 次时,适应度达到最小值,此时三参数估计结果分别为 $\beta = 0.5872 \text{ V}$ 、 $\alpha = 29.3357 \text{ MHz}$ 和 $\varphi = 1.4832 \text{ rad}$ 。

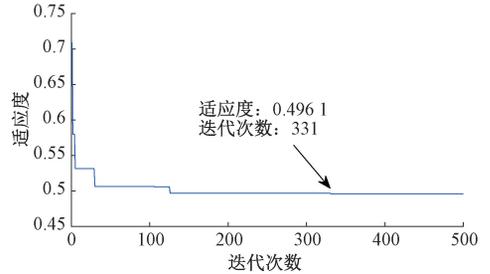
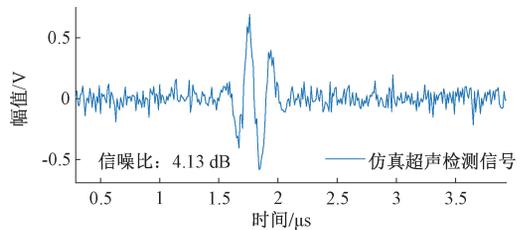


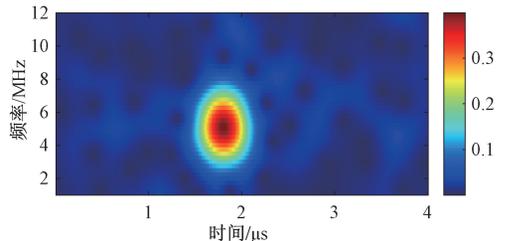
图8 适应度曲线

Fig. 8 The fitness curve

根据估计所得 5 个超声回波特征参数构建超声回波模型,仿真结果如图9所示。超声检测信号提取结果如图9(c)所示,仿真超声检测信号及其提取结果的信噪比分别为 4.13 和 32.29 dB,经本文方法处理后信号信噪比提升 28.16 dB。从图9(a)、(c)可以看出,仿真超声检测信号中的宽频噪声被有效消除。此外,对比仿真超声检测信号和提取结果时频图(图9(b)、(d)),可以直观看到在保持高斯回波的前提下,宽频带区域的噪声成分得到了显著抑制,验证了本文方法对于噪声频谱混杂干扰下超声检测信号提取的优异性能。

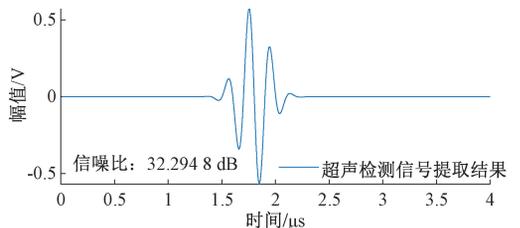


(a) 仿真超声检测信号
(a) The simulated ultrasonic detection signal

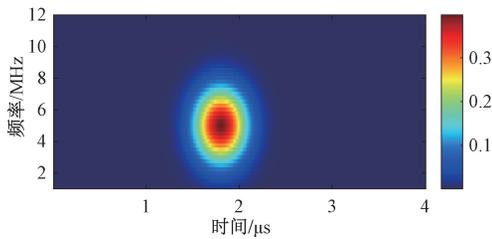


(b) 仿真超声检测信号时频

(b) Time-frequency diagram of the simulated ultrasonic detection signal



(c) 超声检测信号提取结果
(c) Extraction result of the ultrasonic detection signal

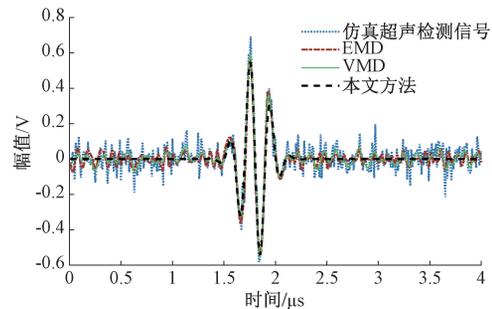


(d) 超声检测信号提取结果时频
(d) Time-frequency diagram of the Extraction result of the ultrasonic detection signal

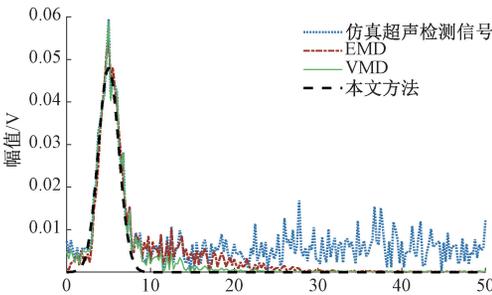
图 9 仿真超声检测信号与提取结果对比

Fig. 9 Comparison between simulated ultrasonic detection signal and extraction result

为证明本文方法对噪声频谱混叠干扰下超声检测信号提取的优越性,分别采用 EMD、VMD 和本文方法对仿真超声检测信号进行处理,提取结果及其频谱如图 10 所示。从图 10(a)可看出,3 种方法对噪声频谱混叠干扰下的超声检测信号均有一定恢复效果,但 EMD 和 VMD 得到的提取信号中仍然残留大量宽频噪声。相比之下,本文方法能更有效抑制宽频噪声,从严重畸变信号中准确提取超声检测信号。



(a) 时域信号
(a) Time-domain signal



(b) 频谱
(b) Frequency spectrum

图 10 超声检测信号提取结果对比

Fig. 10 Comparison of ultrasonic signal extraction results

此外,从图 10(b)也可以看出,EMD 能较好地消除 3.5 MHz 以下的低频段噪声,但对 8 MHz 以上高频段噪声消除效果较差。而 VMD 对 8 MHz 以上高频段噪声消

除性能优于 EMD,但对低频段噪声的抑制作用基本失效。本文方法从数据-模型联合驱动角度,通过辨识超声检测信号特征参数构建超声回波模型重构信号,实现超声检测信号提取,不仅能够有效去除高、低频段噪声,而且对中心频率(5 MHz)处存在频谱混叠的噪声分量去除效果也有大幅度提升,实现了超声检测信号的高质量提取。

为进一步验证本文方法对噪声频谱混叠干扰下超声检测信号提取的鲁棒性,采用上述 3 种方法对 6 组仿真信号进行处理,提取结果的信噪比如图 11 所示。其中 6 组实验中仿真超声检测信号的平均信噪比为 4.56 dB, EMD、VMD 和本文方法提取结果的平均信噪比分别为 9.82、11.07 和 28.71 dB。本文方法超声检测信号提取结果的信噪比均 > 25 dB,平均信噪比相比于 EMD 和 VMD 提升了 18.89 和 17.64 dB,说明本文方法对于噪声频谱混叠干扰下超声检测信号提取的高鲁棒性。

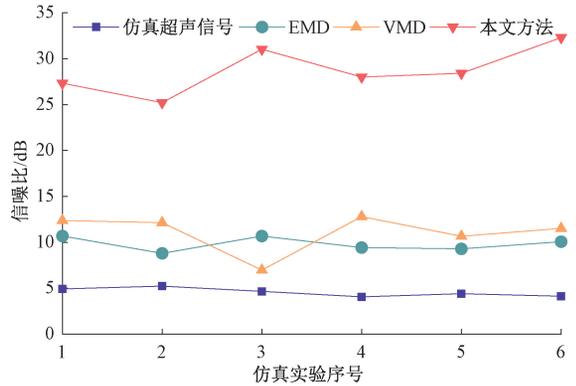


图 11 多次仿真实验对比

Fig. 11 Comparison of multiple simulation experiments

3.2 实测实验

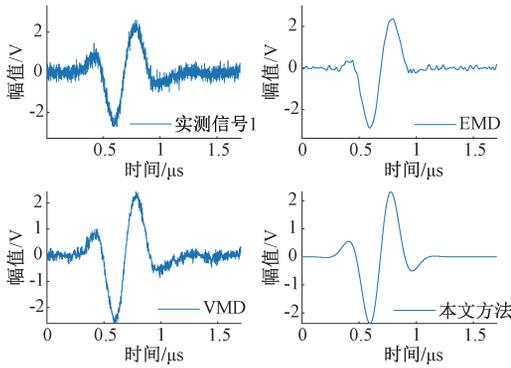
采用超声检测系统检测金属试块内部缺陷,对提出的超声检测信号高质量提取方法性能进行测试。如图 12 所示,检测系统由 Olympus 5077PR 脉冲收发仪、Olympus V106 接触式超声探头、泰克 MDO4054C 示波器以及 DB-P 金属试块组成,超声检测数据采集频率设置为 1 GHz。



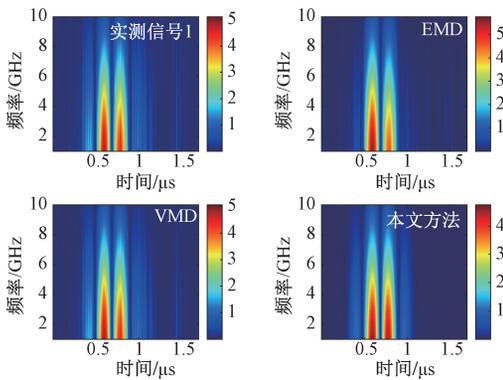
图 12 超声检测系统

Fig. 12 Ultrasonic detection system

实验采集的超声检测信号以及 EMD、VMD 和本文方法的提取结果如图 13(a) 所示,可以看出,针对受宽频噪声干扰的超声检测信号,EMD 提取效果优于 VMD,但处理后的信号中仍然残留部分噪声。而本文方法能够在保证高效滤除全频段噪声的情况下,准确地从超声检测信号中提取有用回波成分,保证了超声检测信号的完整性,信号提取效果明显优于现有方法。



(a) Time domain results of the ultrasonic detection signal



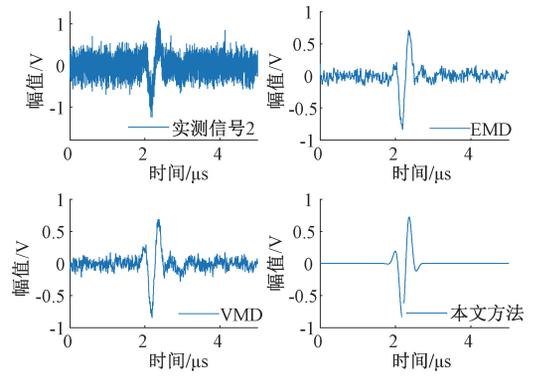
(b) Time-frequency diagram of the ultrasonic detection signal

图 13 实测超声检测信号提取结果
Fig. 13 Ultrasonic detection signal extraction results

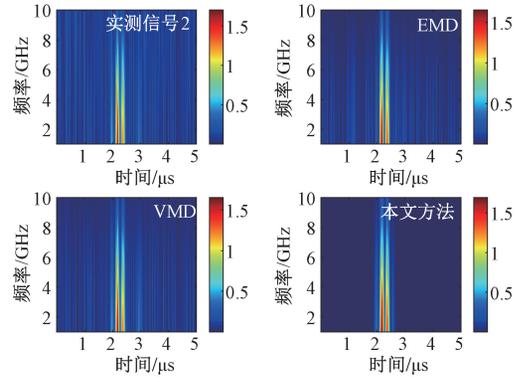
从图 13(b) 可以看到,EMD 可以较好地减小宽频噪声的干扰,但由于频率混叠问题,在分量选取时出现部分回波成分丢失问题,尤其在 0.4 和 $1 \mu\text{s}$ 附近的回波分量被完全消除,导致超声检测信号提取结果失真。相反,VMD 可以保证信号的完整性,但大量的宽频噪声成分仍然残留在提取结果中,导致超声检测信号提取质量差。本文方法以超声检测信号为基础,通过引入超声回波模型辨识,可以在保证信号完整性的前提下,很好地消除宽频噪声的干扰,最大程度还原实测回波信号中的特征信息,实现了超声检测信号高质量提取。

此外,为验证本文方法在强噪声条件下对超声检测信号的提取性能,在采集的回波信号中添加白噪声,得到超声检测信号及 3 种方法的提取结果如图 14 所示。与

图 13 结果对比可知,当超声检测信号中的噪声幅值增大时,EMD 和 VMD 的提取效果明显减弱,大量宽频噪声无法消除,原因在于基于信号分解的超声检测信号提取方法非常依赖噪声和回波信号的频率特性,当两者频带存在混叠时,该类方法无法同时实现噪声准确消除和保持提取信号完整性。从时域曲线及时频图可看出,本文方法对不同强度宽频噪声干扰下的超声检测信号均具有高质量提取效果,进一步证明本文方法的性能和鲁棒性。



(a) Time domain results of the ultrasonic detection signal



(b) Time-frequency diagram of the ultrasonic detection signal

图 14 强噪声条件下超声检测信号提取结果
Fig. 14 Ultrasonic detection signal extraction results under strong noise condition

4 结 论

为实现噪声频谱混叠干扰下超声检测信号准确提取,本文将超声回波模型辨识思想应用到信号提取中,提出一种基于数据-模型联合驱动的超声检测信号高质量提取方法。区别于依据超声回波信号和噪声信号的频率分布特性实现超声检测信号提取的信号分解方法,该方法建立超声检测信号的高斯回波模型,基于模型参数高精度估计,实现超声检测信号的高质量提取。仿真和实测实验结果可知,本文方法能有效克服信号分解方法因频率混叠引起的失真问题,对全频段强噪声均具有很好

的抑制效果。EMD、VMD 和本文方法提取超声检测信号的信噪比均值分别为 9.82、11.07 和 28.71 dB,证明了本文方法对于噪声频谱混叠干扰下超声检测信号提取的优越性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 王辰辰,姚贞建,杨梦冉,等. 基于经验与变分混合分解的超声回波信号噪声消除方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 197-204.
WANG CH CH, YAO ZH J, YANG M R, et al. Noise elimination method of ultrasonic echo signal based on empirical and variational hybrid decomposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 197-204.
- [2] CHANG M J, LU ZH K, HUANG Q H, et al. Parameter estimation for ultrasonic echo signals through improved matching pursuit and flower pollination algorithms [J]. Measurement, 2022, 194: 111010.
- [3] 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.
- [4] 苏映新. 基于优化匹配追踪稀疏分解的微弱超声回波提取[J]. 声学技术, 2023, 42(5): 616-620.
SU Y X. Weak ultrasonic echo extraction based on optimized matching pursuit sparse decomposition [J]. Technical Acoustics, 2023, 42(5): 616-620.
- [5] 杨梦冉,姚贞建,王辰辰,等. 金属齿轮内部缺陷超声检测信号去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9):234-243.
YANG M R, YAO ZH J, WANG CH CH, et al. Ultrasonic detection signal denoising method for internal defects of metal gear[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(9):234-243.
- [6] JIAO Y K, LI ZH W, ZHU J CH, et al. ABIDE: A novel scheme for ultrasonic echo estimation by com-bining CEEMD-SSWT method with EM algorithm [J]. Sustainability, 2022, 14(4): 1960.
- [7] 王大为,王召巴,陈友兴,等. 基于双高斯衰减模型的超声回波处理方法[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 168-176.
WANG D W, WANG ZH B, CHEN Y X, et al. Ultrasonic echo processing method based on dual-Gaussian attenuation model [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 168-176.
- [8] 韩晓东,李光亚,胡雅妮,等. 基于一维 CNN 的时域超声信号识别技术研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(12): 20-25.
HAN X D, LI G Y, HU Y N, et al. Research on time-domain ultrasonic signal recognition technology based on one-dimensional CNN [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(12): 20-25.
- [9] 聂昕,郭志福,何智成,等. 基于盲反卷积和参数化模型的超声参数估计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2611-2616.
NIE X, GUO ZH F, HE ZH CH, et al. Parameters estimation of ultrasonic echo signal based on blind deconvolution and parameterized model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2611-2616.
- [10] ZHU W J, XU Z SH, XIANG Y X, et al. Nonlinear ultrasonic detection of partially closed cracks in metal plates using static component of lamb waves[J]. NDT & E International, 2021, 124: 102538.
- [11] YANG Y, LI S S, LI CH, et al. Research on ultrasonic signal processing algorithm based on CEEMDAN joint wavelet packet thresholding [J]. Measurement, 2022, 201: 111751.
- [12] 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.
- [13] 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 and Control, 2022, 30(7): 261-266.
- [14] 颜江涛,赵纪元,訾艳阳,等. 激光超声信号变分模态分解与裂纹定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 223-230.
YAN J T, ZHAO J Y, ZI Y Y, et al. Variational mode

- decomposition of laser ultrasonic signal and crack quantitative detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 223-230.
- [15] 李可, 王翀, 明雪飞, 等. 基于改进多路径匹配追踪的芯片超声信号去噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 93-100.
- LI K, WANG CH, MING X F, et al. Denoising method of chip ultrasonic detection signals based on the improved multipath matching pursuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 93-100.
- [16] 任晓寰, 冯海泓, 杨震亚. 超声回波参数估计的初值选取方法[J]. 声学学报, 2020, 45(5): 728-738.
- REN X H, FENG H H, YANG ZH Y, Selection of initial values for ultrasonic echo parameter estimation [J]. Acta Acustica, 2020, 45(5): 728-738.
- [17] 吕丽, 姚贞建, 杨梦冉, 等. 欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度高精度测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 68-78.
- LYU L, YAO ZH J, YANG M R, et al. High-precision measurement method for near-surface defect depth of metal components under sub-Nyquist sampling conditions [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 68-78.
- [18] YU G, YU M J, XU CH Y. Synchro-extracting transform [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8042-8054.
- [19] 卢东哲, 王文华, 李昕, 等. 基于人工蜂群算法的海上风机 TMD 振动控制研究 [J]. 大连理工大学学报,

2022, 62(4): 433-440.

LU D ZH, WANG W H, LI X, et al. Research on TMD vibration control in offshore wind turbine based on artificial bee colony algorithm [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(4): 433-440.

作者简介



王辰辰(通信作者), 2013 年于青岛大学获得学士学位, 2016 年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高级工程师, 主要研究方向为声学计量测试、声学信号分析等。

E-mail: wltianya@163.com

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



杨梦冉, 2021 年于河南工程学院获得学士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生, 主要研究方向为超声检测技术与信号处理。

E-mail: ymr210727@163.com

Yang Mengran received his B. Sc. degree from Henan University of Engineering in 2021, He is currently a M. Sc. candidate at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include ultrasonic detection technology and signal processing.