

基于经验模态分解和 S 变换的缺陷超声回波检测方法

曾祥 周晓军 杨辰龙 陈越超

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 为对金属材料超声无损探伤中的微小缺陷回波进行检测,建立了金属材料背散射信号模型,讨论了调幅回波模型的中心频率估计的无偏性,并提出基于经验模态分解(EMD)和 S 变换的缺陷回波检测方法。首先对原始信号作 EMD,通过时间尺度滤波重构信号,实现初步去噪;为抑制 EMD 去噪后信号的信噪混叠现象,执行基于 S 变换和最大类间方差法去噪算法,进行二次去噪,得到信噪比较高但缺陷回波幅值衰减较大的信号。最后采用二次 S 变换修正二次去噪中因 S 变换导致的缺陷回波幅值降低量。对仿真信号和实际棒材检测信号的处理结果证明了该方法在去除噪声和缺陷回波检测方面的有效性。

关键词: 金属缺陷; 超声探伤; 回波检测; 经验模态分解; S 变换

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0414-07

Ultrasonic Defect Echoes Identification Based on Empirical Mode Decomposition and S-transform

Zeng Xiang Zhou Xiaojun Yang Chenlong Chen Yuechao

(The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to detect the minor defect echoes from noisy ultrasonic signals in non-destructive testing of metallic materials, a backscattering signal model of metallic materials was established. The unbiasedness of estimation of amplitude-modulated echo's center frequency was discussed; and the defect echoes identification method based on empirical mode decomposition (EMD) and S-transform was proposed. In the first stage, the EMD was performed on the original signal and these IMFs with high frequency were removed, which realized a low-pass filter. Then a denoising method based on S-transform and OTSU was used for noise suppression of the reconstructed signal to eliminate the aliasing between useful signal and noise, yielding high SNR signal with relatively large amplitude attenuation. Finally, the S-transform was performed again on the resulting signal to mitigate the amplitudes attenuation caused by OTSU-based time-frequency spectrum denoising by means of multiplying a so-called amplitude-gain-factor. With the above operations, the echoes became clear and their amplitudes were kept well. The processing result of simulation signals showed that the method can enhance signal significantly and highlight the defect echoes submerged by severe noise. And the processing results of experimental signals also showed the effectiveness of the method in noise suppression and defect identification.

Key words: metallic defect; ultrasonic NDT; echoes detection; empirical mode decomposition; S-transform

引言

超声波无损检测是评价材料性能的重要方

式^[1],然而在应用超声对金属材料进行微小缺陷检测时,很多场合下缺陷回波幅值较小。受材料的晶粒散射回波和噪声影响,缺陷回波检测困难。为此,

国内外学者对金属材料的缺陷回波检测进行了大量研究,建立了超声信号的检测模型^[2-5],并提出了小波变换^[4,6]、盲源分离^[7]等去噪方法^[8]。

经验模态分解(EMD)具有自适应分解能力,在非平稳信号分析中应用广泛。时间尺度滤波是 EMD 去噪的一种经典实现方式,通过选择不同的固有模态函数(IMF)进行重构,可以实现低通、高通、带通滤波。文献[9]应用 EMD 对超声 TOFD 信号进行了识别;文献[10]将 EEMD 应用于粗晶奥氏体不锈钢的缺陷检测;文献[11]应用 EMD 对混凝土超声探伤回波进行了检测。然而,由于噪声被分解到各个 IMF 中,且 EMD 算法不具有间歇特性,使得分解得到的 IMF 不可避免地存在信噪混叠,需要对重构后的信号作进一步处理。文献[12]研究了基于 EMD 时间尺度滤波的激光超声去噪,提出基于峰度检验的时域加窗算法,实现了噪声与信号的解混叠。文献[13]受小波阈值去噪启发,提出了 EMD 间隔阈值去噪法,能够有效去除 IMF 中的噪声成分。

S 变换是具有多分辨率特性,能够保持原信号相位信息的时频分析方法。文献[14]将 S 变换和时频滤波技术应用于复合材料超声回波信号降噪,文献[15]应用 S 变换对厚截面复合材料局域孔隙进行了检测,均取得了较好的效果。

本文在对金属材料超声回波信号组成加以分析的基础上,对调幅回波中心频率(CF)在时频域的无偏性进行研究,并应用 EMD 处理原始信号,根据 IMF 的频谱作低通滤波,实现信号的初步去噪;对初步去噪的信号应用 S 变换(ST)和最大类间方差法(OTSU),减弱信噪混叠,以获得高信噪比的增强信号;针对增强信号的幅值降低现象,采用基于二次 ST 的幅值增益系数估计方法,以实现抑制回波幅值降低的目的。

1 超声背散射信号分析

1.1 背散射信号组成

超声背散射信号由缺陷回波和晶粒散射形成的结构噪声、非声学噪声组成。

单个缺陷回波 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = \beta a(t - \tau) \cos(2\pi f_c(t - \tau) + \varphi) \quad (1)$$

式中 β ——幅值 τ ——到达时间

$a(t)$ ——单位峰值的包络函数

f_c ——中心频率 φ ——初相位

考虑实际的缺陷回波包络可能不对称(通常为上升沿陡峭而下降沿平缓),引入调幅回波模型(Amplitude-modulated echo model, AMEM)^[16], 取

$$a(t - \tau) = e^{-\alpha(1 - r \tanh m(t - \tau))(t - \tau)^2} \quad (2)$$

式中 α ——带宽因子

r ——不对称因子, $-1 < r < 1$

m ——双曲正切函数阶次

近似认为入射声波为高斯回波,则结构噪声可以表示为^[5]

$$u(t) = \exp(-\gamma t) \sum_{k=1}^K \sigma_k e^{j2\pi(t-t_k)f_{c0}} \quad (3)$$

式中 γ ——材料衰减系数

K ——散射回波个数

σ_k ——第 k 次的反射系数

t_k ——第 k 次的反射延时

f_{c0} ——探头中心频率

非声学噪声 $n(t)$ 通常可以简化为方差 σ^2 的高斯白噪声。

综上,含 N 个缺陷回波的背散射信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = u(t) + n(t) + \sum_{i=1}^N s_i(t) \quad (4)$$

为描述简洁,将 $s_i(t)$ 的参数向量记作 λ_i , 这里 $\lambda_i = (\beta_i, \alpha_i, r_i, m_i, \tau_i, f_{ci}, \varphi_i)$ 。

1.2 缺陷回波 CF 估计

信噪比较低时,采用傅里叶变换(FT)估计 CF 通常偏差较大,此时可以采用噪声能量更分散的时频分析。考虑短时傅里叶变换(STFT),给定窗函数 $g(t)$, 单个缺陷回波 $s(t)$ 的 STFT 为

$$G(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(u) g(u - t) e^{-j2\pi fu} du = e^{j(-2\pi f_c t + \varphi)} \int_{-\infty}^{+\infty} a(u - \tau) g(u - t) e^{j2\pi u(f_c - f)} du \quad (5)$$

记“ $|z|$ ”为复数 z 的模,“ $|A|$ ”为复数矩阵 A 中所有元素取幅值构成的幅值矩阵。研究 $|G|$ 的极值分布,通常需要计算式(5)的积分,通过 $|G|$ 的偏导数确定^[17-18]。由于包络函数的复杂性,该方法实现困难。考虑到积分收敛时,对实函数 $x(t) > 0$ 和 y , 有

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} x e^{y t} dt \right| \leq \int_{-\infty}^{+\infty} x dt \quad (6)$$

当 y 与 t 无关时取等号;那么

$$|G(t, f)| \leq \int_{-\infty}^{+\infty} a(u - \tau) g(u - t) du = G(t) \quad (7)$$

在 $f = f_c$ 时取等号。即 $|G|$ 取极值时的频率即为中心频率 CF(无偏估计),且与其他参数无关。若 $g(t) \equiv 1$, 此时为 FT。因此通常是对缺陷回波 CF 的估计,当信噪比较高时,可直接应用 FT;反之,则可应用 STFT。

对含 N (N 未知)重缺陷回波的 $x(t)$, 建立 CF 的集合 $\{f_c\}$, 并将集合初始化为空集。对 $x(t)$ 作

STFT 得到时频谱幅值矩阵 $|G|$ 。检测 $|G|$ 的极值, 从大到小依次记为 P_1, P_2, \dots, P_m , 相应的 CF 记作 f_1, f_2, \dots, f_m , m 为极值个数。给定回波 CF 的上限频率 f_{ucf} 和极值比阈值 μ 。 P_i ($i = 2, 3, \dots, m$) 若满足 $P_i \geq \mu P_1$, 且 f_i 不超过 f_{ucf} , 则将 f_i 加入 $\{f_c\}$ 。最终得到所有候选缺陷回波的 CF 估计集合 $\{f_c\}$ 。

2 基于 EMD 和 ST 的去噪方法

2.1 基于 EMD 的高频成分去除

对原始信号 $x(t)$, 经 EMD 得到 M 个 IMF 和残量 $r(t)$, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^M F_i(t) + r(t) \quad (8)$$

但是 EMD 容易出现模态混叠现象。为抑制模态混叠, 可以使用集合经验模态分解 (EEMD) 对信号作分解。

金属材料中衰减较小, N 个缺陷回波的 CF 彼此接近。记 $\{f_c\}$ 中的最高频率为 f_0 。根据 EMD 的二进滤波特点, 频谱能量将逐渐向低频率段集中。缺陷回波的瞬时频率恒定等于 CF, 因此从低阶 IMF 开始作 FT, 直到某个 IMF 的能量集中频率接近 f_0 , 选择该 IMF 和更高阶的 IMF 进行重构, 即可去除高频噪声成分, 实现低通滤波。

2.2 基于 ST 的信噪混叠抑制

EMD 重构得到的信号通常存在信噪混叠, 需要进一步去除噪声提取缺陷回波。这里使用 S 变换进行处理。

对于给定的信号 $x_0(t)$, 其 S 变换^[19]为

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_0(\tau) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{j\beta(\tau-t)^2}{2}} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (9)$$

时频谱幅值矩阵 S 可以视作一帧像素灰度值可为任意非负值的灰度图像, 从而应用数字图像分割技术进行处理。设定分析频率上限 f_{uth} , 选择 S 中的低频区作为感兴趣区域 (Region of interests, ROI) 分析, 高频区元素均取作零。采用 OTSU 法^[20]处理 ROI 取得最优阈值 T , 类别数通常取 2 (此时为单阈值); 在存在大量低频噪声的情况下, 可以采用多阈值, 类别数取到 3、4, 最终 T 取多阈值中的最大值。为尽量减轻去噪后重构信号幅值的降低程度, 这里采用硬阈值处理。记 S 阈值化得到 S_1 , 可表示为

$$S_1(t, f) = \begin{cases} S(t, f) & (|S(t, f)| \geq T, f \leq f_{\text{uth}}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (10)$$

$|S_1|$ 可能仍含有少量幅值较高的噪声, 若直接重构, 信号将出现小幅的噪声回波。缺陷回波在 $|S_1|$

中表现为面积较大、峰值较大的区域, 噪声相反。设 $|S_1|$ 中峰值最大 (如 1.2 节所述 P_1) 区域的最大面积为 A_1 。给定峰值面积比阈值 $T_{\text{PA}} (0 < T_{\text{PA}} \leq 1)$, 对第 i 个区域若其面积 A_i 和峰值 P_i 满足比值条件: $P_i A_i / (P_1 A_1) < T_{\text{PA}}$, 则该区域为噪声, 将该区域内的点幅值设为零。

对 S_1 作 S 逆变换, 得到的信号 $x_1(t)$ 通常具有很高的信噪比, 回波位置显著。但由于 S_1 去除了 $|S|$ 的小幅值元素和高频区域, 通常会导致缺陷回波的峰值出现较大降低, 这在实际超声无损检测中是要避免的。此时需要修正峰值的降低量。

S 变换为线性变换, 若 $x(t) \leftrightarrow |S|$, 那么 $px(t) \leftrightarrow p|S|$ 。基于此对 $x_1(t)$ 作 S 变换, 得到 S_2 。 $|S_1|$ 的单个缺陷回波在时频域上只占有一个局部区域 Ω , Ω 内元素的数值较大; 而 $|S_2|$ 的单个缺陷回波理论上将“布满”整个时频域, Ω 内元素的数值相对 $|S_1|$ 较小。对第 i 个缺陷回波, 定义回波幅值增益系数 p_i 为局部区域 Ω_i 内 $|S_1|$ 所有元素和 $|S_2|$ 所有元素求和后的比值, 即

$$p_i = \frac{\sum_{(t^*, f^*) \in \Omega_i} |S_1(t^*, f^*)|}{\sum_{(t^*, f^*) \in \Omega_i} |S_2(t^*, f^*)|} \quad (11)$$

显然 $p_i > 1$ 。将 $x_1(t)$ 划分为 N 个含单个缺陷回波子信号, 依次记作 $x_{11}(t), x_{12}(t), \dots, x_{1N}(t)$, 那么进行幅值修正后的缺陷回波信号 $x_2(t)$ 为

$$x_2(t) = \sum_{i=1}^N p_i x_{1i}(t) \quad (12)$$

这里对二次 ST 的峰值修正能力作简单讨论。已知 $p_i > 1$; 记某个真实缺陷回波峰值为 h_0 , $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 的峰值为 h_1, h_2 , 且 $h_1 = h_0 + \Delta h_1$ 。由于一次 ST 去除了 $|S|$ 的小幅值元素, Δh_1 通常为负数, 少数情形下为接近于零的正数; $x_1(t)$ 经 EMD 去噪, SNR 较高, p_i 值有限。由此: $\Delta h_1 < 0$ 且 $|\Delta h_1|$ 较大时, h_2 能够减小峰值降低; $|\Delta h_1|$ 较小时, h_2 和 h_1 接近。即实现了峰值的修正。文中的多次仿真结果均验证了这一结果。

2.3 基于 EMD-ST 的回波检测方法

从原始含噪信号 $x(t)$ 中检测缺陷回波的流程为:

- (1) 对 $x(t)$ 作 STFT, 粗略估计多个缺陷回波的中心频率集合 $\{f_c\}$ 。
- (2) 对 $x(t)$ 作 EMD 或 EEMD, 得到 M 个 IMF。
- (3) 从低阶 IMF 开始作 FT, 根据频谱能量确定重构起点 k , 利用第 $k, k+1, \dots, M$ 阶 IMF 重构, 得到 $x_0(t)$ 。
- (4) 对重构信号作一次 ST 去噪, 得到 $x_1(t)$; 对

$x_1(t)$ 作二次 ST, 计算幅值增益系数 p_1, p_2, \dots, p_N , 得到幅值修正后的缺陷回波信号 $x_2(t)$ 。

本文方法需要选择多个阈值, 包括流程 (1) 中回波 CF 的上限频率 f_{uCF} 和极值比阈值 μ , 流程 (4) 中的峰值面积比阈值 T_{PA} 。 f_{uCF} 通常可以取探头中心频率的 2 倍。对于 μ 和 T_{PA} , 若已知仅有 1 个缺陷回波则均取为 1; 多缺陷回波时, 通常只关注幅值较大的少数几个缺陷回波, 因此 μ 和 T_{PA} 也应该取较大值。

3 仿真与实验

3.1 仿真信号去噪效果评价

信噪比 (SNR) R_{SNR} 和均方差 (MSE) r_{MSE} 是信号整体去噪效果评价的常用指标。对单个缺陷回波, 互相关系数 (COR) ρ 被用来衡量去噪后回波的失真程度。显然, 二次 ST 得到的 $x_2(t)$ 和一次 ST 得到的 $x_1(t)$ 满足 ρ 相等。

为衡量去噪算法的峰值保持能力, 引入峰值偏离百分比 (Percentage of peak value deviation, PPVD)

$$\delta = \frac{A_d - A_s}{A_s} \times 100\% \quad (13)$$

式中 A_s, A_d ——缺陷回波包络的理论峰值、去噪后的缺陷回波包络峰值

R_{SNR} 和 ρ 越大, r_{MSE}, δ 的绝对值越小, 去噪效果越好。

对含 N 个缺陷回波的信号, COR、PPVD 分别可以用序列 $\{\rho\}$ 和 $\{\delta\}$ 表示。至此得到了 4 个去噪效果评价指标: 反映全局性能的 SNR、MSE 和反映局部性能的 COR、PPVD。

3.2 仿真缺陷回波检测

仿真信号参数选择为: 缺陷回波个数 $N = 3$, $\lambda_1 = (1.0, 35, 0.5, 10, 0.8, 10.0, 0)$, $\lambda_2 = (0.9, 30, 0.2, 12, 2.0, 7.5, 0)$, $\lambda_3 = (0.8, 35, 0, 10, 3.2, 7.5, 0)$ 构造 $s(t)$ 。散射回波个数 K 为 2 000, σ_k, t_k 分别服从高斯分布和均匀分布, 构造 $u(t)$ 。再添加高斯白噪声 $n(t)$ 得到原始含噪信号 $x(t)$ 。仿真信号的采样频率取作 $f_s = 150$ MHz, 采样长度为 600。仿真结果如图 1 所示。图 1 中, 由于重构起点为 IMF3, 为显示简洁, 只显示前 3 阶 IMF 及其归一化频谱。

从图 1 可见, 原始信号 $x(t)$ 信噪比很低, 缺陷回波被淹没 (图 1a)。 $x(t)$ 经 STFT 后可以检测到 3 个缺陷回波, 3 个回波的最高 CF 约为 10 MHz (图 1b)。 $x(t)$ 经 EMD 得到 IMF (图 1c), 对 IMF 作 FT (图 1d), 从频谱中可见应该从第 3 阶 IMF

(图 1c) 开始进行重构, 得到的 $x_0(t)$ (图 1e) 高频噪声得到了消除, 但在时域存在较严重的信噪混叠现象, 而经 ST 到时频域信噪分离程度提高 (图 1f); $x_0(t)$ 经过一次 ST 去噪 (图 1f) 得到的 $x_1(t)$ (图 1e), 噪声基本被消除, 回波显著, 但是缺陷回波的幅值也发生了较大程度的降低; 对 $x_1(t)$ 作 ST (图 1f), 经过幅值修正后, 得到的 $x_2(t)$ (图 1e) 幅值降低程度得到了缓解。

仿真信号的去噪效果评价如表 1 所示。

从表 1 可见, 对原信号 $x(t)$, 在 EMD 去噪和一次 ST 去噪的过程中, 信噪比和互相关系数的提升量、均方差和幅值偏差百分比的下降量较大, 说明 EMD 和一次 ST 能够在很大程度上去除噪声; 并且一次 ST 后互相关系数比较大 (超过 0.9), 说明去噪后的回波失真较小。但一次 ST 同时导致了缺陷回波峰值的明显降低。经过二次 ST, 信噪比和均方差变化很小, 互相关系数不变, 但是使回波的峰值降低得到了一定程度的修正。

改变仿真信号中噪声的强度, 得到原信号 $x(t)$ 信噪比 R_{SNR} 为 $-5.06, -2.05, 0.04, 1.87, 5.02$ dB。去噪效果评价见图 2。考虑到 $x(t)$ 在低信噪比时 (R_{SNR} 为 -5.06 dB) 的峰值偏离百分比的绝对值过大 (可达到或超过 100, 参考表 1), 为显示明晰, 图 2d 中未给出 $x(t)$ 的峰值偏离百分比评价。

从图 2 可以得到和图 1 相类似的结论, 即 EMD 和一次 ST 均能显著提高信噪比和相关系数, 降低均方差; 二次 ST 通常能够减小峰值偏离程度。由图 2a、2b 可见, 当 $x(t)$ 信噪比达到一定程度时 (0 dB 及以上), 使用一次 ST 去噪后的信号 $x_1(t)$ 的信噪比不受 $x(t)$ 的信噪比增大的影响, 基本保持不变。这是因为在这类情形下, 通常 $x(t)$ 经 EMD 去噪后的信号 $x_0(t)$ 信噪比相对较高, 噪声含量较少。

3.3 实际缺陷回波检测

将上述方法应用于实际超声检测信号的缺陷回波检测。

试块为如图 3 所示的 20 号钢棒材试块, 依次钻有 3 个直径为 0.8、1.2、2.0 mm 的平底孔。这里选取 1.2 mm 孔作为代表进行检测, 超声探头中心频率为 7.5 MHz, 信号采样频率为 100 MHz。最终处理结果如图 4。

实验表明, 本文方法对实际超声检测信号中的缺陷回波检测也是有效的。原始采集信号 $x_{\text{daq}}(t)$ 和背散射数据 (图 4a) 受到了严重的噪声污染, 但本文方法依然能够较好地抑制 EMD 重构信号 (图 4b) 的信噪混叠, 消除噪声, 准确检测缺陷回波。

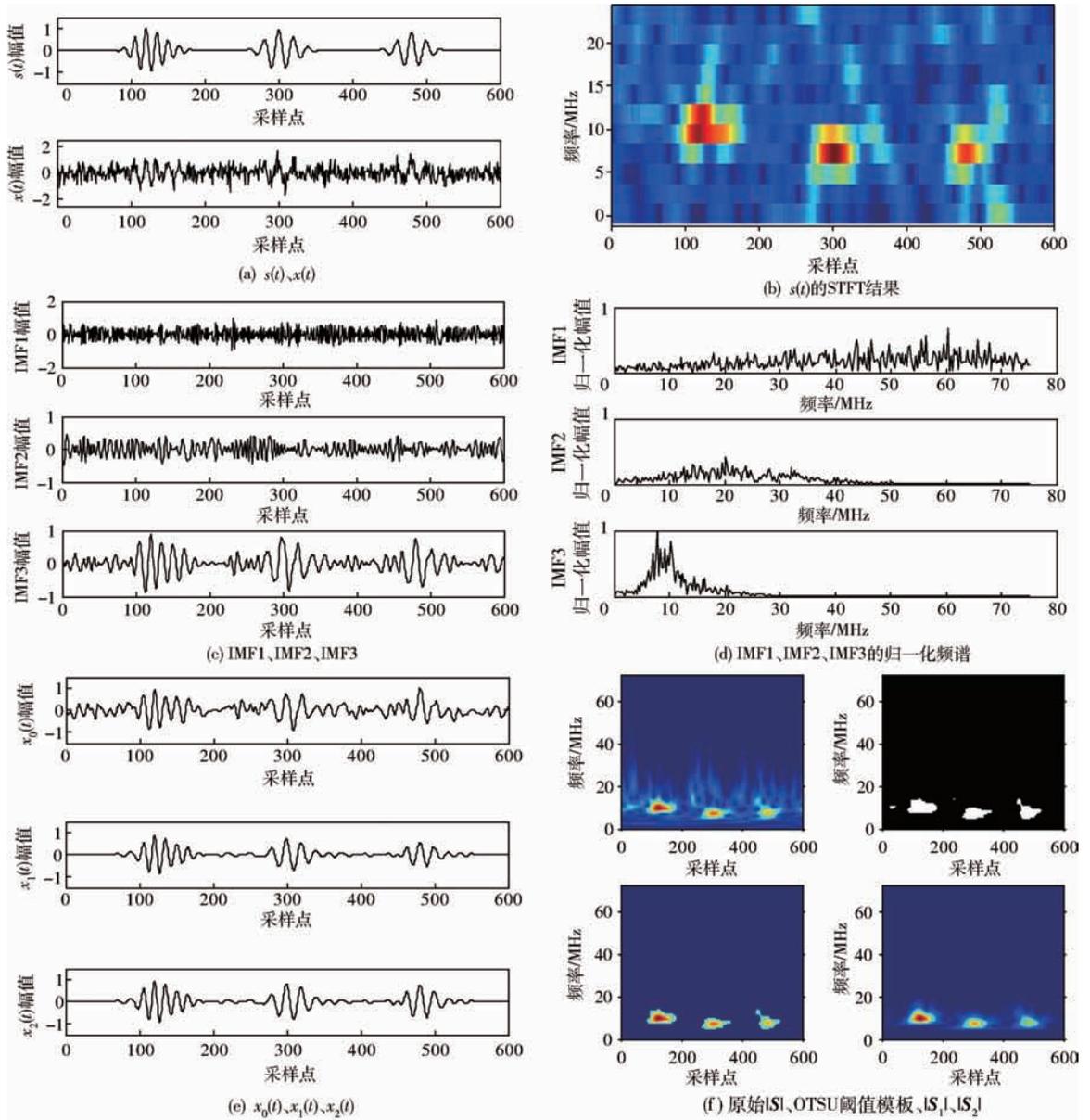


图1 仿真信号去噪结果

Fig. 1 Denoising results of simulation signal

表1 仿真信号去噪结果评价

Tab. 1 Evaluation of simulation signal denoising results

| 指标 | ORIG | EMD | EMD + ST | EMD + 2ST |
|----------------------------|----------|------------|------------|------------|
| | $(x(t))$ | $(x_0(t))$ | $(x_1(t))$ | $(x_2(t))$ |
| R_{SNR}/dB | -4.05 | 2.91 | 9.67 | 10.35 |
| r_{MSE} | 0.42 | 0.19 | 0.09 | 0.08 |
| ρ_1 | 0.64 | 0.89 | 0.98 | 0.98 |
| ρ_2 | 0.55 | 0.81 | 0.92 | 0.92 |
| ρ_3 | 0.52 | 0.80 | 0.95 | 0.95 |
| δ_1 | 41.11 | -7.16 | -11.29 | -4.80 |
| δ_2 | 97.29 | 12.00 | -19.72 | -7.33 |
| δ_3 | 83.72 | 27.19 | -29.19 | -4.66 |

4 结论

(1) 建立金属材料背散射信号模型, 针对当前基于时频分析的参数估计方法主要针对高斯回波模型, 需要直接计算出时频变换的积分表达式的困难, 对调幅回波模型中心频率的无偏估计进行了研究。

(2) 以 S 变换和数字图像处理技术为基础, 提出了对 EMD 重构信号执行 S 变换去噪的方法, 抑制 EMD 时间尺度滤波中存在的信噪混叠。结果表明数字图像处理技术应用于时频图去噪能获得良好效果。

(3) 针对 S 变换去噪容易造成缺陷回波峰值降

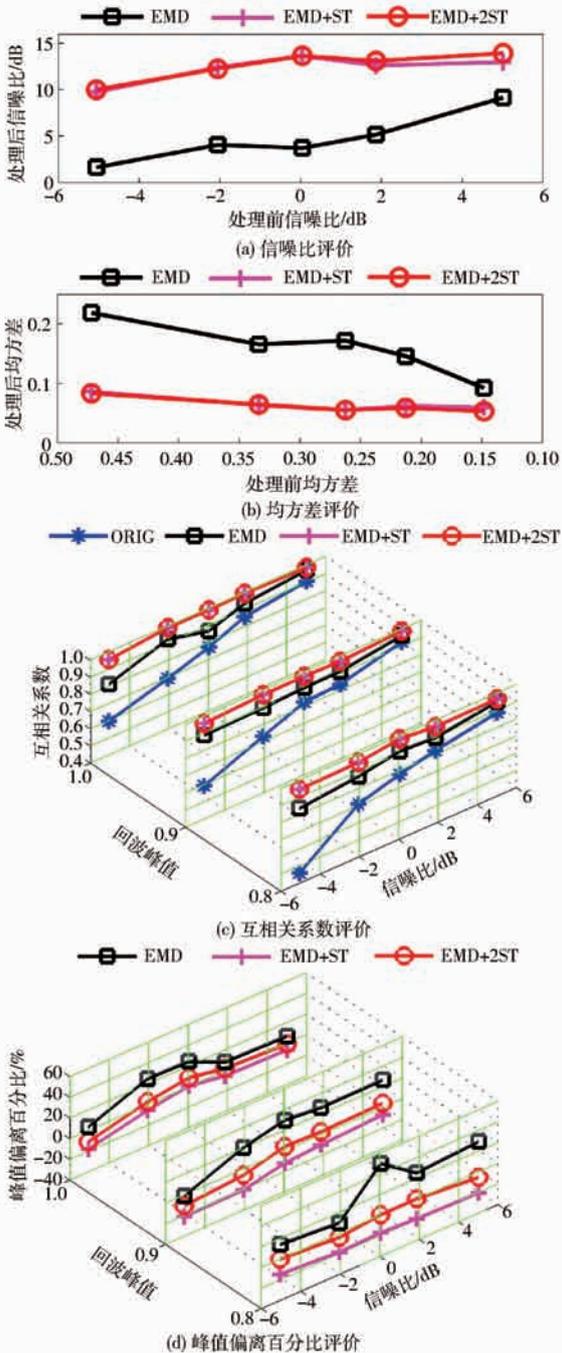


图 2 不同信噪比信号的去噪效果评价

Fig. 2 Evaluation of denoising results of signals with various SNR

低的不足,提出基于二次 S 变换的峰值降低量修正方法。

(4)对本文方法进行了不同信噪比下的多次仿真研究,应用信噪比和均方差作为全局评价指标,互



图 3 钢棒材试块

Fig. 3 Steel bar specimen

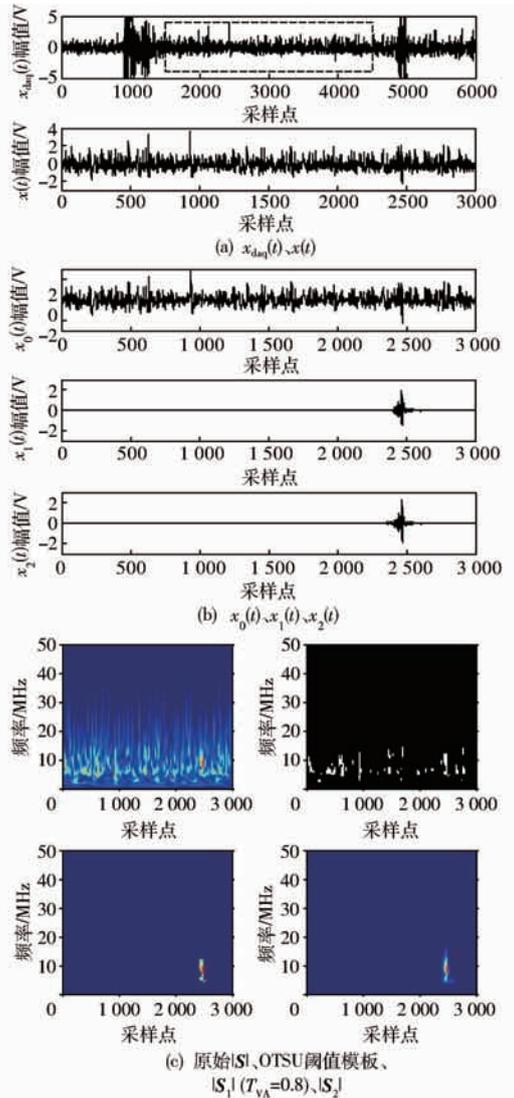


图 4 棒材超声信号缺陷回波检测结果

Fig. 4 Defect echo detection results of ultrasonic signal of bar specimen

相关系数和峰值偏离百分比作为局部评价指标,定量分析了本文方法的性能,并通过实验进行了验证。

参 考 文 献

1 张杨,周晓军,杨辰龙,等. 基于声束追踪的变厚度曲面工件超声探头位姿规划[J]. 农业机械学报,2012,43(9):230-234,225.
 ZHANG Yang, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Ultrasonic probe position and orientation planning for curved components with variable thickness based on ultrasonic beam analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):230-234,225. (in Chinese)

- 2 DEMIRLI R, SANIIE J. Model-based estimation of ultrasonic echoes Part I: analysis and algorithms [J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001, 48(3): 787 – 802.
- 3 HOSEINI M R, WANG X D, ZUO M J. Estimating ultrasonic time of flight using envelope and quasi maximum likelihood method for damage detection and assessment [J]. *Measurement*, 2012, 45(8): 2072 – 2080.
- 4 杨辰龙, 陈越超, 叶钱, 等. 金属材料小缺陷超声反射信号建模及识别 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2635 – 2644.
YANG Chenlong, CHEN Yuechao, YE Qian, et al. Ultrasonic echo signal modeling and identification for minor defects in metallic materials [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2635 – 2644. (in Chinese)
- 5 SANIIE J, WANG T, BILGUTAY N M. Statistical evaluation of backscattered ultrasonic grain signals [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 84(1): 400 – 408.
- 6 刘守山, 周晓军, 李凌, 等. 铝合金锻件超声信号的自适应小波压缩方法 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(2): 159 – 162.
LIU Shoushan, ZHOU Xiaojun, LI Ling, et al. Ultrasonic signal compression based on adaptive wavelet thresholding [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(2): 159 – 162. (in Chinese)
- 7 LIU Q K, QUE P W, GUO H W, et al. Noise cancellation of ultrasonic NDE signals using blind source separation [J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, 42(1): 63 – 68.
- 8 ZHANG G M, HARVEY D M. Contemporary ultrasonic signal processing approaches for nondestructive evaluation of multilayered structures [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2012, 27(1): 1 – 27.
- 9 张琦, 阙沛文, 雷华明. 一种新的超声无损检测回波信号的识别方法 [J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(12): 2081 – 2084.
ZHANG Qi, QUE Peiwen, LEI Huaming. A new identification method of ultrasonic NDT echo signals [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(12): 2081 – 2084. (in Chinese)
- 10 SHARMA G K, KUMAR A, JAYAKUMAR T, et al. Ensemble empirical mode decomposition based methodology for ultrasonic testing of coarse grain austenitic stainless steels [J]. *Ultrasonics*, 2015, 57: 167 – 178.
- 11 HADDAD S, BOUHADJERA A, GRIMES M, et al. A New ultrasonic signal processing scheme for detecting echoes of different spectral characteristics in concrete using empirical mode decomposition [J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, 47(9): 642 – 649.
- 12 罗玉昆, 罗诗途, 罗飞路, 等. 激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 479 – 487.
LUO Yukun, LUO Shitu, LUO Feilu, et al. Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 479 – 487. (in Chinese)
- 13 KOPSINIS Y, MCLAUGHLIN S. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(4): 1351 – 1362.
- 14 王振生, 王峰林, 王长龙. 基于 S 变换的复合材料超声回波信号降噪 [J]. *仪表技术与传感器*, 2014(3): 104 – 106.
WANG Zhensheng, WANG Fenglin, WANG Changlong. De-noising of S-transform on ultrasonic echo signal of metal matrix composites [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(3): 104 – 106. (in Chinese)
- 15 陈越超, 周晓军, 杨辰龙, 等. 厚截面复合材料局域孔隙超声检测方法 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 372 – 378.
CHEN Yuechao, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Study of ultrasonic testing method for localized void defect identification in thick section composites [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 372 – 378. (in Chinese)
- 16 DEMIRLI R, SANIIE J. Asymmetric Gaussian chirplet model and parameter estimation for generalized echo representation [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351: 907 – 921.
- 17 LU Y F, DEMIRLI R, CARDOSO G, et al. A successive parameter estimation algorithm for chirplet signal decomposition [J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2006, 53(11): 2121 – 2131.
- 18 LU Z K, YANG C, QIN D H. Estimating the parameters of ultrasonic echo signal in the Gabor transform domain and its resolution analysis [J]. *Signal Processing*, 2016, 120: 607 – 619.
- 19 STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Process*, 1996, 44(4): 998 – 1001.
- 20 OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62 – 66.