

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407222

欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度 高精度测量方法

吕丽 姚贞建 杨梦冉 赵宇星

(武汉工程大学电气信息学院 武汉 430205)

摘要:针对欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度测量时,缺陷回波与表面回波重叠,导致缺陷深度测量不准确的问题,提出一种基于超声回波信号重采样和时频变换的金属构件近表面缺陷深度高精度测量方法。采用变分模态分解将超声回波信号分解为一系列窄带模态分量,根据相关系数实现有用模态分量聚类,得到预处理信号;对预处理信号进行三次样条插值处理,实现欠采样回波信号数据扩充,得到重构信号;基于同步提取变换得到重构信号的时频谱及其幅值分布曲线,并根据超声单收发原理,实现金属构件近表面缺陷深度高精度测量。实验结果表明,本文方法可实现欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度的准确测量,测量相对误差为2.161%,明显优于包络法和时频变换法,其测量相对误差分别为3.570%和13.182%。此外,分析了欠采样率、信号噪声和缺陷位置对近表面缺陷深度测量精度的影响,结果一致表明本文方法在不同采样率、不同噪声和不同缺陷深度情况下对近表面缺陷深度测量,比传统方法均具有更好的准确性和鲁棒性。

关键词: 超声检测;近表面缺陷;欠采样;时频变换;信号处理

中图分类号: TN06

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 410.99

High-precision measurement method for near-surface defect depth of metal components under sub-Nyquist sampling conditions

Lyu Li Yao Zhenjian Yang Mengran Zhao Yuxing

(School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: In order to solve the problem that the defect echo overlaps with the surface echo when measuring the defect depth near the surface of metal components under sub-Nyquist sampling condition which leads to inaccurate depth measurement, a high-precision measurement method for the near-surface defect depth of metal components based on ultrasonic echo resampling and time-frequency transformation is proposed. The ultrasonic echo signal is decomposed into a series of narrowband mode components by variational mode decomposition, and the useful mode components are clustered based on the correlation coefficient to obtain the preprocessed signal. The preprocessed signal is then processed by cubic spline interpolation to realize the data expansion of the sub-Nyquist sampling echo signal and obtain the reconstructed signal. Based on the synchro extracting transform, the time-frequency spectrum and amplitude distribution curve of the reconstructed signal are obtained. According to the principle of ultrasonic single transceiver, the high-precision depth measurement of the near-surface defect of metal components is finally realized. The experimental results show that the proposed method can accurately measure the near-surface defect depth of the metal component under the condition of sub-Nyquist sampling condition, and the measurement relative error is 2.161%, which is obviously less than that of the envelope method and the time-frequency transform method, whose relative error are 3.570% and 13.182%, respectively. Furthermore, the effects of the sub-Nyquist sampling rate, the signal noise and the defect location on the measurement accuracy of the near-surface defect depth are investigated. The results consistently demonstrate that the proposed method has better accuracy and robustness than the traditional methods for the near-surface defect depth measurement under different sampling rates, different noise and different defect depths.

Keywords: ultrasonic testing; near-surface defect; sub-Nyquist sampling; time-frequency transform; signal processing

0 引言

超声缺陷检测技术广泛应用于航空航天、工业制造、电力、车辆工程等领域金属构件内部缺陷检测^[1-4]。金属构件的质量与工业生产安全密切相关,利用超声缺陷检测技术实现其内部缺陷深度的高精度测量,是保证工业生产安全稳定运行的关键。然而,当金属构件的内部缺陷靠近其表面时,超声脉冲的缺陷回波和表面回波会发生重叠,导致缺陷深度难以准确估计,影响金属构件质量的评估。因此研究基于超声检测技术的金属构件近表面缺陷深度高精度测量方法,对于提高工业生产安全至关重要^[5-7]。

近年来,国内外学者针对近表面缺陷深度测量方法进行了大量探索和研究,主要方法有包络法和时频变换法。包络法以 Hilbert 变换为基础,根据回波信号包络线峰值估计出缺陷信号回波到时,进而实现近表面缺陷深度测量。如王宪等^[8]采用 Hilbert 包络法获取超声信号上包络线,能够以包络线波峰特征来区分各个界面波信号,可实现超声缺陷信号回波到时的估计;曹弘毅^[9]利用超声信号包络获取超声回波到达时间,具有计算简单性、鲁棒性好和计算效率高等优势,是用于计算回波信号到达时间的常用方法,超声信号包络的峰值时间即为回波信号的到达时间,求得缺陷回波信号的回波到时,实现了近表面缺陷深度的有效测量。

包络法实现近表面缺陷深度估计的过程简单便捷,但易受噪声干扰,导致测量误差通常较大。时频变换法根据超声回波信号的频谱,反映其在时间和频率的能量强度,能从多个角度显示信号的细节变化,突出细微缺陷特征,方便更好地求取缺陷深度。如杨萌萌等^[10]提出了一种 Hilbert 时频谱实现轴承内圈近表面缺陷识别方法,解决了轴承微小缺陷淹没在表面回波而存在的检测盲区

问题;Zhu 等^[11]采用小波变换时频分析对激光超声信号进行处理,得到材料内部缺陷特征的有效提取,在低信噪比条件下,处理效果较好。然而时频变换法的检测精度在很大程度上取决于信号的采样频率,导致该方法对于欠采样条件下的近表面缺陷深度测量误差较大。Li 等^[12]提出了自适应形态滤波和稀疏最小熵反卷积方法实现欠采样条件下金属缺陷尺寸和位置识别,该方法具有较好的收敛性,检测精度较高,但处理时间较长;Zhang 等^[13]提出了稀疏信号表示算法和过完备字典的新方法,在缺陷检测、噪声抑制等方面都优于传统信号处理,但其检测结果受字典参数设置的影响,导致实用性较差。

本文提出了一种欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度高精度测量方法。该方法结合变分模态分解、三次样条插值和同步提取变换算法,可以实现强噪声干扰和欠采样条件下的金属构件近表面缺陷深度高精度测量。分析研究了信号采样率、噪声强度和缺陷深度对测量方法的性能影响。

1 超声脉冲反射法缺陷测量原理

超声脉冲反射法是金属内部缺陷测量最常用的方式之一,其检测原理为:单收发超声探头向金属构件中发射超声波,超声波在传播过程中遇缺陷界面形成反射回波,探头接收反射回波,反射回波信号对应于超声波传播时间,检测时根据缺陷信号的回波到达时间确定金属内部缺陷的深度^[14]。

当缺陷位于金属构件近表面位置时,如图 1 所示,缺陷界面的反射回波和金属构件表面反射回波在时域中存在重叠,无法准确估计缺陷回波到达时间,导致缺陷深度测量误差较大。因此,如何准确估计近表面缺陷回波到达时间,是提高近表面缺陷深度检测精度的关键。

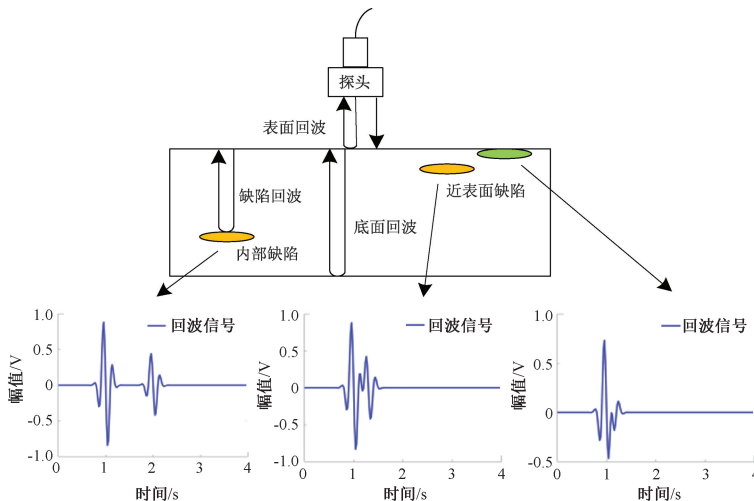


图 1 超声脉冲反射法检测原理

Fig. 1 Detection principle of the ultrasonic pulse reflection method

2 欠采样条件下近表面缺陷深度测量方法

在超声缺陷检测中,通常会因为采样率不足,导致超声回波信号失真^[15],并且缺陷检测信号采集过程中受到材料内部复杂特性、电磁干扰、环境噪声等因素影响,使得超声回波信号中掺杂大量复杂噪声,影响缺陷深度测量结果^[16]。本文结合信号分解、插值和时频变换技术,提出一种欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度高精度测量方法,具体过程如下:

为了减小复杂噪声对金属构件近表面缺陷深度测量精度的影响,首先采用变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 对采集的超声回波信号 $s(t)$ 进行分解^[17],得到一系列窄带模态分量 (band-limited intrinsic mode functions, BLIMFs),表示为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \quad (1)$$

式中: $c_i(t)$ 为第 i 阶 BLIMF。

计算 BLIMFs 与 $s(t)$ 的相关系数,定义为^[9]:

$$R(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} \quad (2)$$

式中: $\text{Cov}(X, Y)$ 表示信号 X 和 Y 的协方差, $\sigma(X)$ 和 $\sigma(Y)$ 分别为信号 X 和 Y 的标准差。相关系数表示两个信号之间的相关程度,相关系数绝对值接近于 1 表示相关性越强,反之则表示相关性越弱^[9]。当 BLIMF 与 $s(t)$ 相关系数大于某一阈值时,则该 BLIMF 判定为有用模态分量;否则为噪声分量。将所有筛选出的有用模态分量进行叠加,即可得到超声回波预处理信号。

针对超声回波预处理信号存在的欠采样问题,本文采用三次样条插值算法对欠采样信号进行重构^[18]。通过在超声回波预处理信号任意两个相邻点之间构建三次平滑连续函数,增加信号采样点,提高欠采样信号质量,进而提升金属构件近表面缺陷深度测量精度。

为准确估计金属构件近表面缺陷回波到达时间,采用同步提取变换 (synchroextracting transform, SET) 对插值重构信号进行时频变换处理^[19-20],得到时频谱,基于时频谱中最大幅值对应频率下的幅值分布曲线峰值,估计表面回波和缺陷回波时间差,并根据超声波在金属构件中传播速度,实现近表面缺陷深度测量^[21]。基于 SET 的插值重构信号时频谱计算原理如下:

对插值重构信号进行短时傅里叶变换:

$$F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t)f(u)e^{-j\omega u} du \quad (3)$$

式中: $f(u)$ 为插值重构信号, $g(u-t)$ 为可移动的窗函数。

设 $Ae^{-j\omega_0 t}$ 是频率为 ω_0 的谐波信号,根据帕塞瓦尔定理,将式(3)改写为:

$$F_c(t, \omega) = A\hat{g}(\omega - \omega_0)e^{j\omega_0 t} \quad (4)$$

式中: A 为振幅; $\hat{g}(\omega - \omega_0)$ 为 $g(u-t)$ 的傅里叶变换。

对式(4)两边关于时间 t 求一阶偏导数,得到短时傅里叶变换频谱的相位信息瞬时频率为:

$$\omega_0(t, \omega) = -\frac{\partial_t F_c(t, \omega)}{F_c(t, \omega)} \quad (5)$$

由此得到插值重构信号 $f(u)$ 的 SET 时频谱为:

$$\text{SET}(t, \omega) = F_c(t, \omega)\delta[\omega - \omega_0(t, \omega)] \quad (6)$$

式中: $\delta(\omega - \omega_0(t - \omega)) = \begin{cases} 1, \omega = \omega_0 \\ 0, \omega \neq \omega_0 \end{cases}$ 为 SEO 算子。

根据超声脉冲反射法超声换能器的单收发原理,基于金属表面回波和缺陷回波到达时间差 Δt 和超声波在金属中的传播速度 v ,确定金属构件近表面缺陷深度 s ,计算公式为^[22]:

$$s = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \Delta t \quad (7)$$

3 超声缺陷深度测量仿真实验

在近表面缺陷测量的仿真实验中,仅考虑金属表面和缺陷界面的超声回波。仿真超声回波信号由高斯回波信号和噪声信号组成,高斯回波信号模型为^[9]:

$$y = \beta e^{-\alpha(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \varphi) \quad (8)$$

式中: $\theta = [\alpha, f_c, \tau, \beta, \varphi]$ 为特征参数: α 是带宽因数, f_c 是中心频率, τ 是回波到达时间, β 是信号幅度, φ 是信号相位。

为了仿真得到欠采样条件,回波信号采样率设为 50 Hz,信号长度为 4 s,金属表面回波和近表面缺陷回波的特征参数分别为 $\theta_1 = [60, 100 \text{ Hz}, 1.0 \text{ s}, 1.0, 1.5]$ 和 $\theta_2 = [60, 100 \text{ Hz}, 1.5 \text{ s}, 0.5, 1.5]$ 。

在回波信号中加入均值为 0,标准差为 0.12 的高斯白噪声,得到最终的仿真信号 $s(t)$,如图 2 所示。

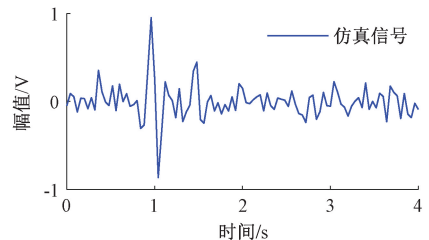


图 2 仿真信号

Fig. 2 The simulated signal

对仿真信号进行 VMD 分解,得到 6 个频率从低到高的窄带分量,如图 3 所示。各个分量与仿真信号的相关系数如图 4 所示,设定相关系数阈值为 0.4^[9]。可以得

到包含大部分有用信息的分量为 BLIMF3 和 BLIMF4, 叠加后得到预处理重构信号, 如图 5 所示。

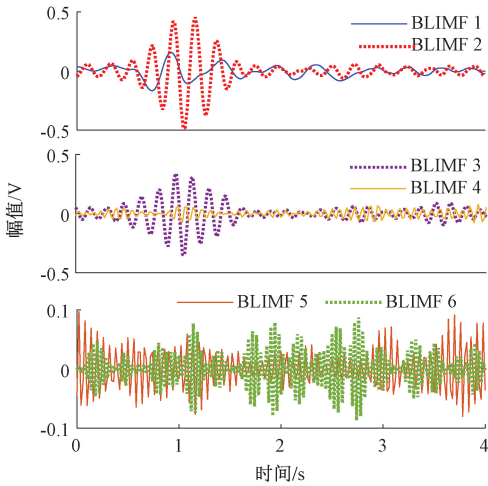


图 3 仿真信号 VMD 结果

Fig. 3 VMD results of the simulated signal

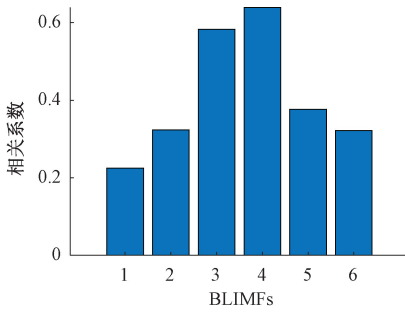


图 4 BLIMFs 与仿真信号的相关系数

Fig. 4 The correlation coefficients between the BLIMFs and the simulated signal

对重构信号进行三次样条插值, 得到的插值信号如图 6 所示。采用 SET 计算插值信号的时频谱, 并提取时频谱最大值对应频率下的幅值曲线, 如图 7 所示, 根据幅值曲线的两个相邻最大值, 计算表面回波和缺陷回波的时间差为 0.49 s, 测量绝对误差为 0.01 s。

为验证本文方法对于欠采样条件下近表面缺陷检测的优越性, 在相同条件下采用包络法和时频变换法估计缺陷回波到达时间, 实验结果如图 8 和 9 所示。为了减小单次实验的偶然性, 仿真了 10 次实验进行测量结果对比分析。

表 1 和 2 对比了缺陷回波到达时间分别为 0.5 和 0.3 s 结果的测量绝对误差。可以看出, 本文方法在估计缺陷回波到时为 0.5 和 0.3 s 的近表面缺陷回波到达时间时的误差均小于其他两种方法。在缺陷回波到时为 0.5 s 时, 测量绝对误差均值为 0.011 s, 其值大约分别为包络法和时频变换法的 1/5 和 1/3; 在缺陷回波到时为

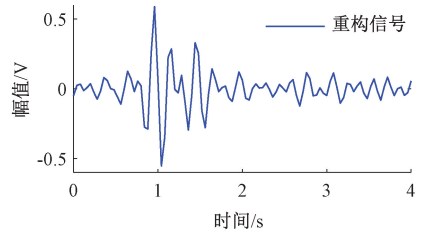


图 5 重构信号

Fig. 5 The reconstructed signal

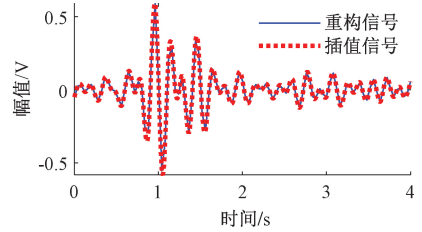


图 6 插值信号

Fig. 6 The interpolation signal

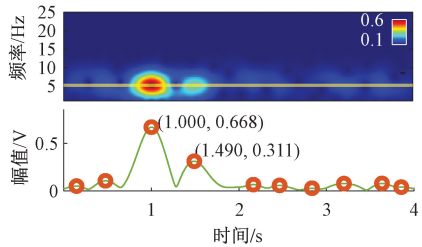


图 7 本文方法

Fig. 7 The proposed method

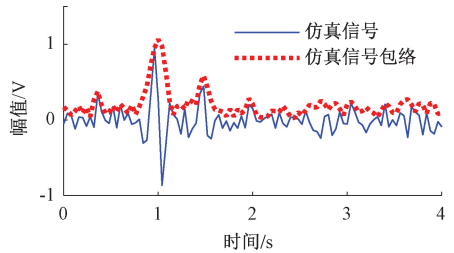


图 8 包络法

Fig. 8 The envelope method

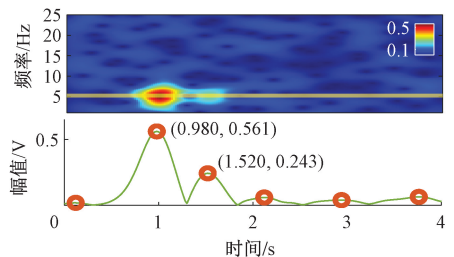


图 9 时频变换法

Fig. 9 The time-frequency transform method

0.3 s 时,包络法和时频变换法测量误差接近,本文方法对于该近表面缺陷回波到时的测量误差为现有方法的

1/2。验证了本文方法用于欠采样条件下超声缺陷信号深度测量的优越性。

表 1 缺陷回波到时为 0.5 s 时的测量绝对误差

Table 1 Measurement absolute error for the arrival time of the defect echo is 0.5 s (s)

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值
包络法	0.100	0.060	0.080	0.020	0.040	0.020	0.020	0.100	0.040	0.060	0.054
时频变换法	0.040	0.040	0.020	0.040	0.020	0.080	0	0.020	0.020	0.020	0.030
本文方法	0.010	0.030	0.020	0	0	0.005	0.005	0.015	0.010	0.015	0.011

表 2 缺陷回波到时为 0.3 s 时的测量绝对误差

Table 2 Measurement absolute error for the arrival time of the defect echo is 0.3 s (s)

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值
包络法	0.040	0.040	0.040	0.120	0.020	0	0.060	0.020	0.020	0.060	0.042
时频变换法	0.040	0.020	0.040	0.060	0.040	0.060	0.060	0.040	0.060	0.040	0.040
本文方法	0.010	0.005	0.02	0.040	0.025	0.025	0.035	0.020	0.020	0.030	0.023

4 近表面缺陷深度测量影响分析

4.1 采样率对测量结果的影响

为了验证本文方法在不同欠采样条件下估计金属构

件近表面缺陷深度的有效性,仿真不同采样率的超声缺陷信号进行分析验证,近表面缺陷回波到时为 0.5 s,高斯噪声标准差为 0.12,采样率分别设置为 15、25、50、70 Hz,实验结果如图 10~13 所示,缺陷回波到时测量绝对误差如表 3 所示。

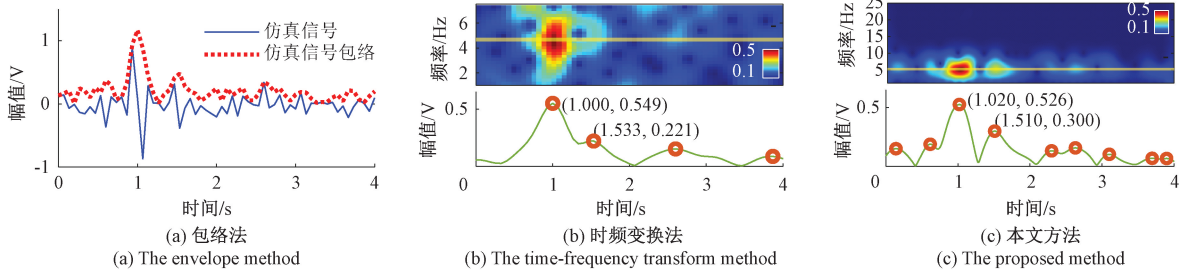


图 10 采样率为 15 Hz

Fig. 10 The sampling rate is 15 Hz

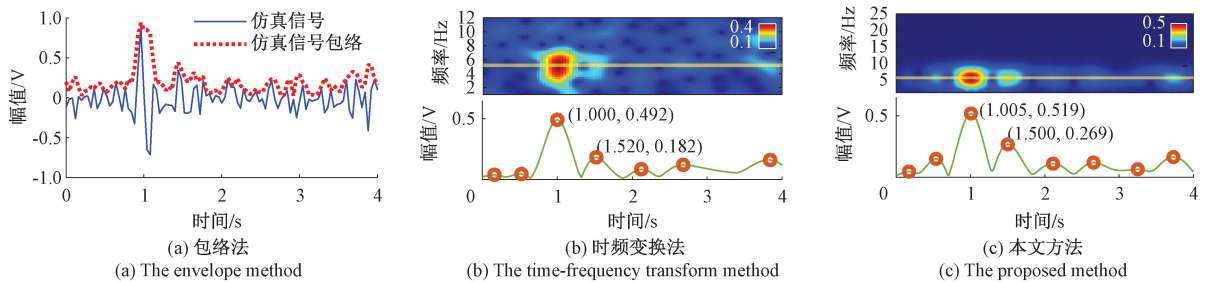


图 11 采样率为 25 Hz

Fig. 11 The sampling rate is 25 Hz

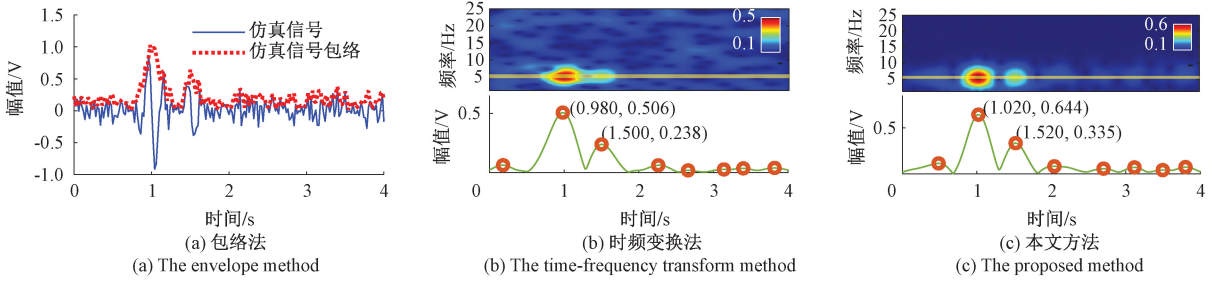


图 12 采样率为 50 Hz

Fig. 12 The sampling rate is 50 Hz

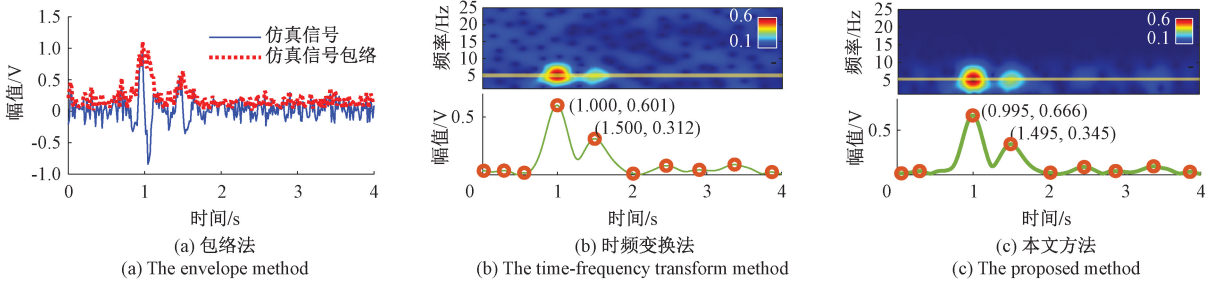


图 13 采样率为 70 Hz

Fig. 13 The sampling rate is 70 Hz

表 3 不同采样率下的缺陷回波到时测量绝对误差

Table 3 Measurement absolute error of the arrival time of the defect echo at different sampling rates (s)

采样率	15 Hz	25 Hz	50 Hz	70 Hz	均值
包络法	0.033	0.020	0.020	0.030	0.026
时频变换法	0.033	0.020	0.020	0	0.018
本文方法	0.010	0.005	0	0	0.004

从表 3 可以看出,本文方法得到的缺陷回波到时测量误差均小于其他两种方法。当采样率为 15 和 25 Hz 时,测量绝对误差小于 0.01 s;采样率为 50 和 70 Hz 时,测量绝对误差为 0。根据不同采样率下缺陷回波到时测量绝对误差均值结果,可以说明本文方法在欠采样条件下对近表面缺陷检测效果最好。

4.2 噪声对测量结果的影响

为了验证本文方法测量金属构件近表面缺陷深度时的抗噪能力,仿真五组不同强度噪声的超声缺陷信号,近表面缺陷回波到时间为 0.5 s,高斯噪声标准差分别为 0.05, 0.08, 0.15, 0.20, 0.30,实验结果如图 14~18 所示,缺陷回波到时测量绝对误差如表 4 所示。

表 4 不同噪声下缺陷回波到时测量绝对误差

Table 4 Measurement absolute error of the arrival time of the defect echo at different noise conditions (s)

噪声标准差	0.05	0.08	0.15	0.20	0.30
包络法	0.040	0.040	0.140	0	1.860
时频变换法	0	0.020	0.020	0.100	1.980
本文方法	0.005	0.010	0.005	0.005	0.005

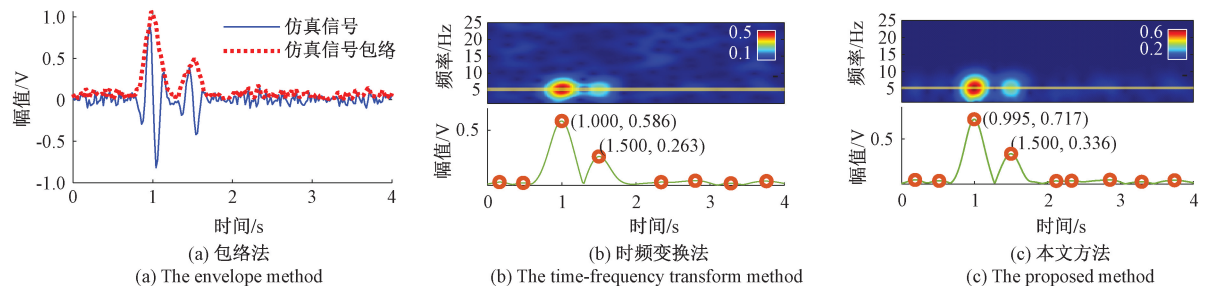


图 14 标准差为 0.05 的噪声

Fig. 14 Noise with a standard deviation of 0.05

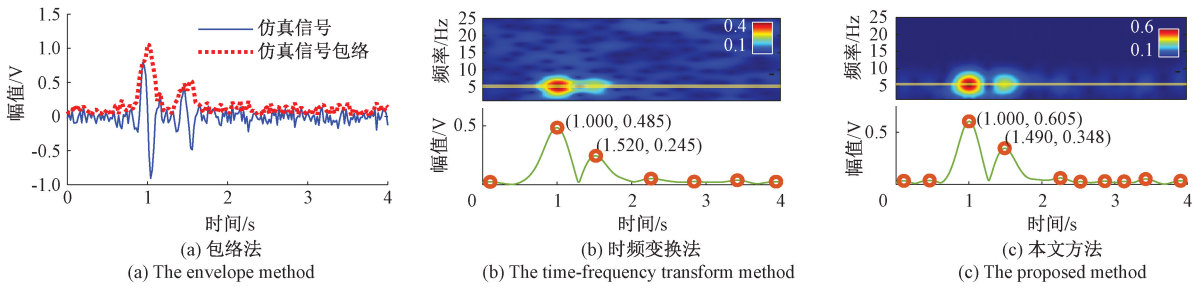


图 15 标准差为 0.08 的噪声

Fig. 15 Noise with a standard deviation of 0.08

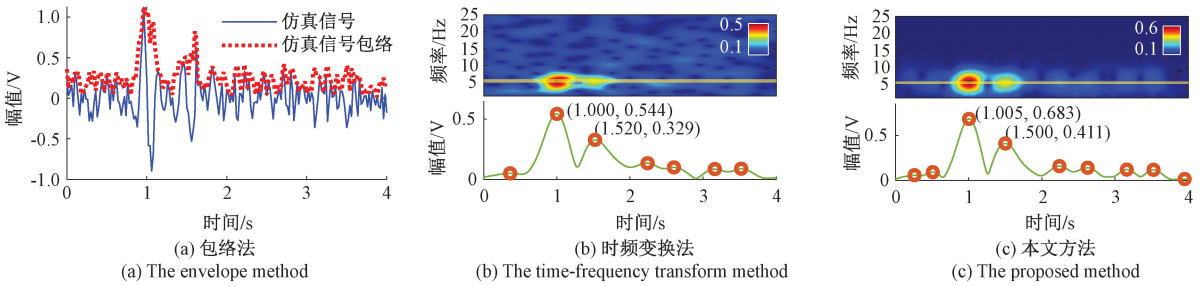


图 16 标准差为 0.15 的噪声

Fig. 16 Noise with a standard deviation of 0.15

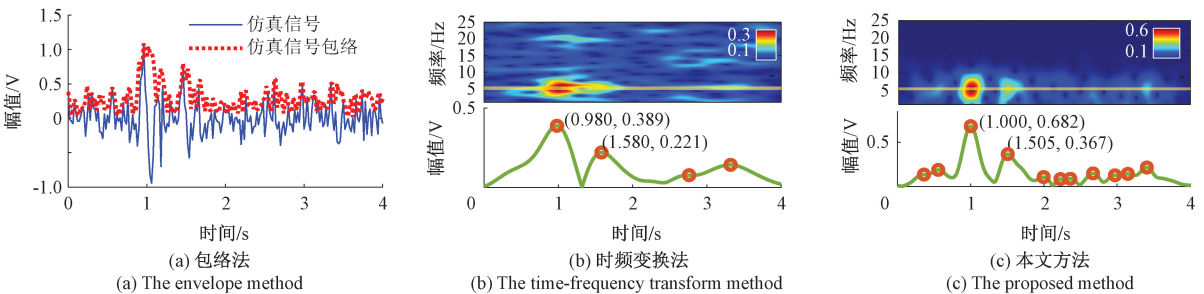


图 17 标准差为 0.2 的噪声

Fig. 17 Noise with a standard deviation of 0.2

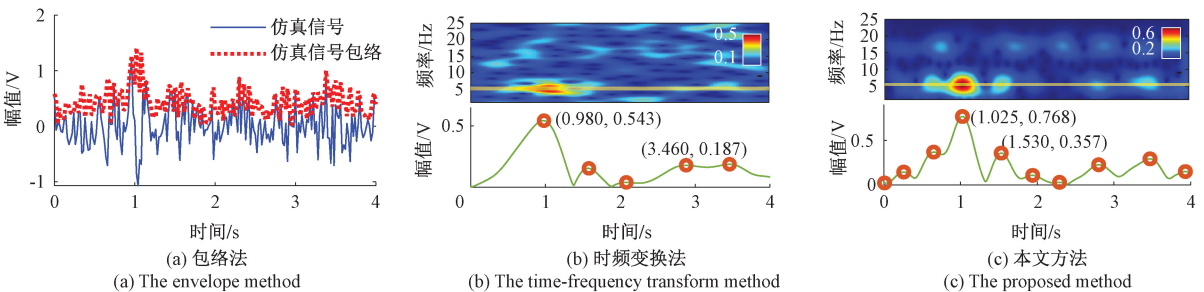


图 18 标准差为 0.3 的噪声

Fig. 18 Noise with a standard deviation of 0.3

从表 4 可以看出,本文方法的缺陷回波到时的测量误差在大部分情况下小于其他方法,其中噪声标准差为

0.05 和 0.08 时,本文方法和时频变换法缺陷深度测量精度较高,包络法误差偏大。当噪声标准差取 0.15、0.2 和

0.3 时,其他两种方法的估计误差明显增大,而本文方法的估计误差仍然可以保持在 0.005 s,证明了本文方法抗噪声能力最强。

4.3 近表面缺陷深度对测量结果的影响

为了分析本文方法对近表面缺陷深度测量的适用范

围性,仿真不同深度的近表面缺陷,采样率为 70 Hz,高斯噪声标准差为 0.12,缺陷回波到时分别为 0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2 和 0.1 s。因实验数据太多,只展示 0.8、0.5 和 0.2 s 时的结果,如图 19~21 所示,缺陷回波到时测量绝对误差如表 5 所示。

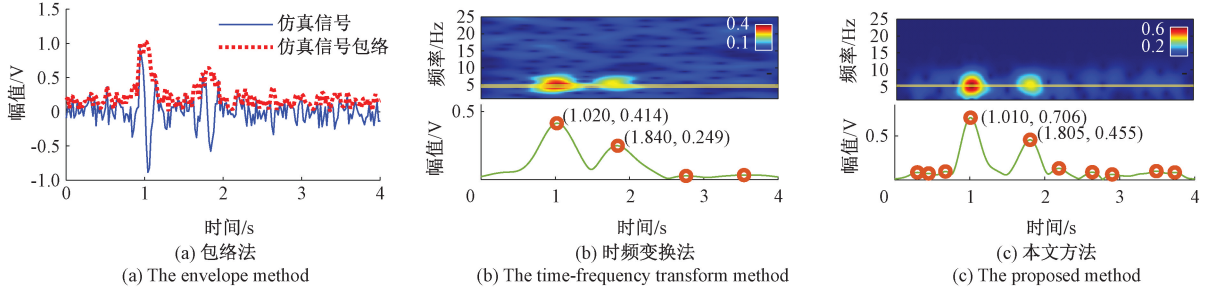


图 19 缺陷回波到时为 0.8 s

Fig. 19 The arrival time of the defect echo is 0.8 s

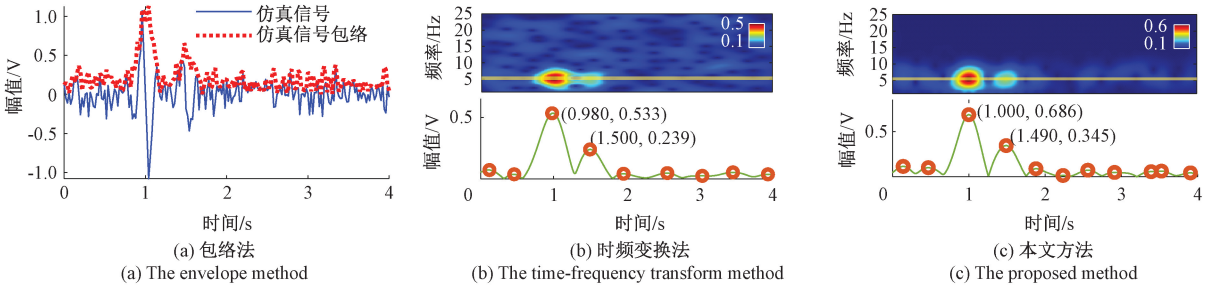


图 20 缺陷回波到时为 0.5 s

Fig. 20 The arrival time of the defect echo is 0.5 s

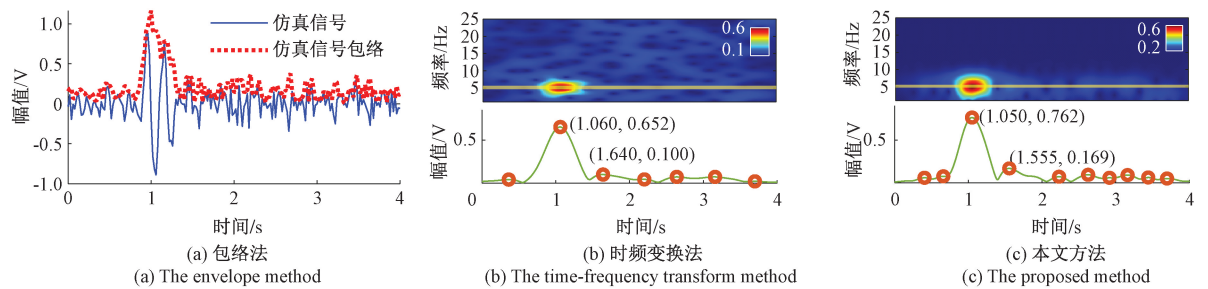


图 21 缺陷回波到时为 0.2 s

Fig. 21 The arrival time of the defect echo is 0.2 s

表 5 不同缺陷回波到时下的缺陷回波到时测量绝对误差

Table 5 Measurement absolute error of the arrival time of the defect echo at different defect echoes arrive (s)

缺陷回波到时	非近表面					近表面		
	0.8 s	0.7 s	0.6 s	0.5 s	0.4 s	0.3 s	0.2 s	0.1 s
包络法	0	0.020	0.020	0.060	0.020	0.020	1.480	0.960
时频变换法	0.020	0.020	0	0.020	0.020	0.020	0.380	2.020
本文方法	0.005	0	0.005	0.010	0	0.005	0.305	0.285

从表 5 可以看出,在不同缺陷深度下,本文方法测量精度明显高于包络法和时频变换法,其中缺陷回波到时

为非近表面时,缺陷回波与表面回波无重叠,3 种方法测量误差均小于 0.02 s,本文方法的最大测量误差为

0.005 s;当缺陷处于近表面区域时,尤其在 0.2 和 0.1 s 两种情况下,缺陷回波和表面回波基本完全重叠,可以看到包络法和时频变换法的测量误差明显变大,测量结果失效。而本文方法在这种情况下虽然误差也增大到 0.3 s 左右,但测量效果始终优于其他两种方法。由此可以看出,本文方法测量近表面缺陷深度范围适用性更强,精度更高。

5 实验研究

为验证本文方法在欠采样条件下对金属近表面缺陷深度测量的实际效果,开展了超声缺陷实测实验。超声测量装置由脉冲收发仪、接触式探头、示波器和标准金属构件组成,如图 22 所示。通过脉冲收发仪发射超声波,信号采样频率为 20 MHz,金属构件中声速为 5 742 m/s,缺陷深度真值为 13.7 mm,超声缺陷检测信号如图 23 所示,可以看到缺陷回波与表面回波重叠。

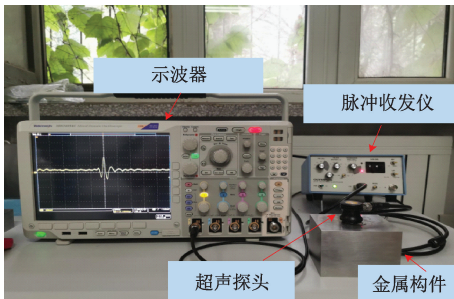


图 22 超声信号测量装置

Fig. 22 The ultrasonic signal measurement device

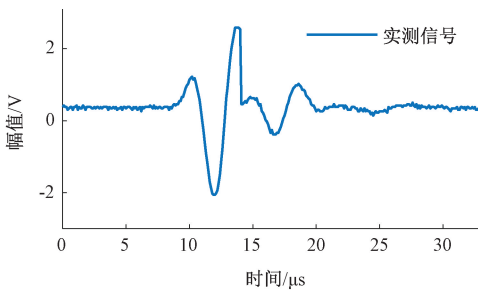
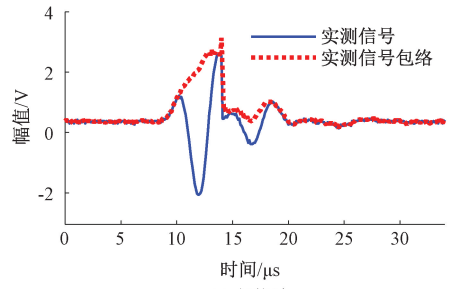


图 23 超声缺陷检测信号

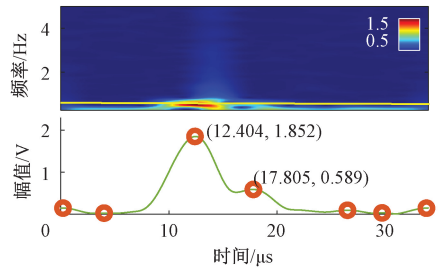
Fig. 23 The ultrasonic defect detection signal

采用包络法、时频变换法和本文方法对实测超声缺陷回波信号进行处理,结果如图 24 所示。根据式(7),包络法和时频变换法对于近表面缺陷深度测量结果分别为 13.211 和 15.506 mm,测量相对误差分别为 3.570%和 13.182%,说明在该实验中包络法比时频变换法测量效果好。本文方法通过引入信号分解和插值处理,有效提高了金属构件近表面缺陷深度测量精度。需要指出的是

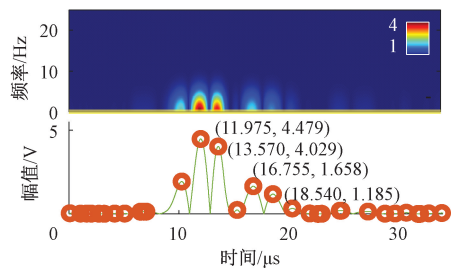
本文方法在使用 SET 时,在近表面回波和缺陷回波中出现两个高聚焦能量图,在时域曲线中表现为两个近表面回波和两个缺陷回波,此时应根据两个波的均值来估计缺陷回波到达时间,避免单一取值带来的误差。本文方法计算近表面回波和缺陷回波到达时间分别为 12.772 5 和 17.647 5 μs,根据式(7),计算近表面缺陷深度为 13.996 mm,测量相对误差为 2.161%,优于包络法和时频变换法。



(a) The envelope method



(b) The time-frequency transform method



(c) 本文方法

(c) The proposed method

图 24 缺陷深度测量结果

Fig. 24 Defect depth measurement results

6 结论

为实现欠采样条件下超声信号近表面缺陷深度测量,基于高斯回波理论模型,本文结合变分模态分解、信号插值和同步提取变换算法,提出了一种欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度的高精度测量方法。仿真实验和实测实验结果表明,本文方法相较于传统方法,如包络法和时频变换法,在不同采样率、不同噪声和不同缺陷深

度情况下对近表面缺陷深度测量均具有更好的准确性和鲁棒性,能够有效抑制噪声的干扰,最大程度保留超声波信号的缺陷深度特征信息,实现了欠采样条件下金属构件近表面缺陷深度的准确测量。

参考文献

- [1] 张凯胜, 孙慧霖, 王欢. 航空轴承套圈超声检测的表面盲区[J]. 轴承, 2023(11): 61-66.
ZHANG K SH, SUN H L, WANG H. Surface blind spot in ultrasonic testing of aviation bearing rings [J]. Bearing, 2023(11): 61-66.
- [2] 刘昭亮, 惠节. 基于激光超声技术的船用耐腐蚀材料内部缺陷检测方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(21): 51-54.
LIU ZH L, HUI J. Internal defect detection method of marine corrosion resistant materials based on laser ultrasonic technology[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(21): 51-54.
- [3] 赵帅杰. 电磁超声高温检测信号降噪方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
ZHAO SH J. Study on denoising method of electromagnetic ultrasonic high temperature detection signal[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [4] 闫涛, 戴志强, 陈洁, 等. 相控阵超声检测在冶金车辆车轴检测中的应用[J]. 物理测试, 2023, 41(5): 15-20.
YAN T, DAI ZH Q, CHEN J, et al. Application of phased array ultrasonic testing in metallurgical vehicle axle detection [J]. Physics Examination and Testing, 2023, 41(5): 15-20.
- [5] 肖会芳, 徐金梧, 何飞, 等. 金属内部裂纹的超声衰减特性与近表面缺陷识别[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(6): 838-844.
XIAO H F, XU J W, HE F, et al. Ultrasonic attenuation characteristics of metal materials with cracks and identification of subsurface flaws [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(6): 838-844.
- [6] 罗朝莉, 朱冰, 王波, 等. 铝板表面裂纹的激光超声检测与信号处理研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 41-52.
LUO CH L, ZHU B, WANG B et al. Research on laser ultrasonic testing and signal processing of surface cracks in aluminum plate [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (10): 41-52.
- [7] 刘文芳, 韩军, 刘艳锋, 等. 基于机器学习的金属近表面缺陷超声检测方法[J]. 中国测试, 2022, 48(1): 46-52.
LIU W F, HAN J, LIU Y F, et al. Research on ultrasonic detection method of metal near-surface defect based on machine learning [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1): 46-52.
- [8] 王宪, 罗彬杰, 蒋音盈. 基于包络和极值约束的超声混叠信号稀疏分解[J]. 上海第二工业大学学报, 2023, 40(4): 351-358.
WANG X, LUO B J, JIANG Y Y. Sparse decomposition of ultrasonic mixed signals based on envelope and extreme constraints [J]. Journal of Shanghai Polytechnic University, 2023, 40(4): 351-358.
- [9] 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.
- [10] 杨萌萌, 何慈武, 龙晋桓, 等. Hilbert 时频谱在轴承内圈近表面缺陷识别中的应用[J]. 热加工工艺, 2023, 52(12): 160-166.
YANG M M, HE C W, LONG J H, et al. Recognition of near-surface defects in bearing inner ring based on Hilbert spectrum [J]. Hot Working Technology, 2023, 52(12): 160-166.
- [11] ZHU Z, SUI H, YU L, et al. Effective defect features extraction for laser ultrasonic signal processing by using time-frequency analysis [J]. IEEE Access, 2019, 7: 128706-128713.
- [12] LI M, LI X, GAO C, et al. Acoustic microscopy signal processing method for detecting near-surface defects in metal materials [J]. Ndt & E International, 2019, 103: 130-144.
- [13] ZHANG G M, ZHANG C Z, HARVEY D M. Sparse signal representation and its applications in ultrasonic NDE [J]. Ultrasonics, 2012, 52(3): 351-363.
- [14] 张睿哲, 周恺, 蔡瀛森, 等. 基于脉冲反射法的耐张线夹压接质量超声检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 153-156, 171.
ZHANG R ZH, ZHOU K, CAI Y M, et al. Research of ultrasonic detection technology for tensioning clamp crimping quality based on pulse reflection method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 153-156, 171.
- [15] 贺王鹏, 陈彬强, 李阳, 等. 高速切削欠采样动态信号的压缩感知恢复方法[J]. 西安电子科技大学学

- 报, 2022, 49(4): 82-89.
- HE W P, CHEN B Q, LI Y, et al. Compressed sensing of subsampled dynamic signals during high-speed machining [J]. Journal of Xidian University, 2022, 49(4): 82-89.
- [16] 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.
- [17] 唐蕾, 黄天立, 万熹. 基于变分模态分解和同步提取变换识别时变结构瞬时频率[J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 197-205.
- TANG L, HUANG T L, WAN X. Instantaneous frequency identification of time-varying structures using variational mode decomposition and synchro extracting transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 197-205.
- [18] 杨荣芳, 马瑞琪, 张光磊. 基于改进三次样条插值的探空资料质控研究[J]. 热带气象学报, 2023, 39(2): 183-192.
- YANG R F, MA R Q, ZHANG G L. Quality control of radiosonde data based on improved cubic spline interpolation[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2023, 39(2): 183-192.
- [19] YU G, YU M, XU C. Synchro extracting transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8042-8054.
- [20] 钟芳桃, 石文泽, 卢超, 等. 基于同步提取变换的钢轨踏面裂纹电磁超声表面 SH 波 B 扫成像检测研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(6): 96-105.
- ZHONG F T, SHI W Z, LU CH, et al. Study on B-scan imaging detection of rail tread crack with surface SH wave EMAT based on synchro extracting transform[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(6): 96-105.
- [21] LIN Y, CHEN S, ZHANG G, et al. High-resolution time-frequency analysis based on a synchro extracting adaptive S-transform and its application[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2022, 19(5): 1124-1133.
- [22] 黎敏, 宋亚男, 周通, 等. 基于数学形态学的超声信号盲区内缺陷特征提取方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 16-22.
- LI M, SONG Y N, ZHOU T, et al. Defect feature extraction in ultrasonic blind zone based on mathematical morphology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 16-22.

作者简介



吕丽, 2021 年于湖北科技学院获得学士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生, 主要方向为近表面超声缺陷检测。

E-mail: lvi5500@163.com

Lyu Li received her B. S. degree from Hubei University of Science and Technology in 2021. Now she is a M. Sc. candidate at Wuhan Institute of Technology. Her main research interest includes near-surface ultrasonic defect detection.



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, 现为武汉工程大学副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为动态压力计量、声学计量、超声检测技术。

E-mail: yao_buaa@126.com

Yao Zhenjian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2013, and the Ph. D. degree from Beihang University in 2018, respectively. Now he is an associate professor in Wuhan Institute of Technology. His main research interests include dynamic pressure metrology, acoustic metrology and ultrasonic detection technology.