

基于改进 EMD 的电磁超声检测数据处理技术

李蓉雪¹,杨理践¹,高松巍¹,刘屹然²,张佳¹,邢燕好¹,耿浩¹

(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院,沈阳 110870;
2. 国家石油天然气管网集团有限公司油气调控中心,北京 100028)

摘要:为提高电磁超声检测信号的精确度,提出了一种基于改进 EMD(经验模式分解)的数据处理方法。针对 IMFs(本征模态函数)筛选中容易丢失高频有用信息的问题,建立了一个基于欧式距离的 IMFs 分量筛选准则,并结合小波阈值滤波方法以实现噪声去除和微小有用信号的有效提取。为验证该算法的有效性,对厚度为 10,15 mm 的铝板进行了测厚试验,采用改进 EMD 算法对检测到的数据进行处理并提取峰值点位置,通过相邻峰值点的时间差计算厚度值,进行多组试验并计算误差。试验结果表明,提出的方法能够提高电磁超声检测的精度,同时提高了回波信号的信噪比,对于 10 mm 厚的铝板最小误差为 0.1%,对于 15 mm 的铝板最小误差为 0.3%。

关键词: 电磁超声;经验模式分解;欧式距离

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2022)06-0001-05

Data processing technology of electromagnetic ultrasonic testing based on improved EMD

LI Rongxue¹, YANG Lijian¹, GAO Songwei¹, LIU Yiran², ZHANG Jia¹, XING Yanhao¹, GENG Hao¹

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. Oil & Gas Control Center of State Oil & Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of electromagnetic ultrasonic testing signal, a data processing method based on improved EMD was proposed. Aiming at the problem of losing high-frequency useful information in IMFs screening, an Euclidean distance based IMFs component screening criterion was established, and wavelet threshold filtering method was combined to achieve noise removal and effective extraction of small useful signals. In order to verify the effectiveness of the algorithm, thickness measurement experiments were carried out on 10 mm and 15 mm aluminum plates. The detected data were processed by using the improved EMD algorithm and the peak position was extracted. The thickness value was calculated by the time difference between adjacent peak points. Multiple groups of experiments were carried out and the error was calculated. The experimental results show that the proposed method can improve the accuracy of electromagnetic ultrasonic testing, and improve the signal-to-noise ratio of echo signal. The minimum error can reach 0.1% for 10 mm aluminum plate and 0.3% for 15 mm aluminum plate.

Key words: electromagnetic ultrasonic; empirical mode decomposition; euclidean distance

电磁超声检测技术是在传统超声检测技术的基

础上发展起来的一种新型超声检测技术,具有无需耦合剂、检测方式灵活、耐高温等优点,从而成为了无损检测领域的研究热点^[1]。电磁超声无损检测过程中,回波信号携带了与被检工件有关的丰富信息,但受检测环境复杂,扫查振动、电子设备干扰等因素影响,回波信号往往掺杂着大量噪声,噪声的干扰使得有用信号及细节特征提取时常存在漏检和误检问题,因此需要对检测到的回波信号进行分析处理,以

收稿日期:2021-12-15
基金项目:国家自然科学基金项目(62101356);辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJKZ0134)
作者简介:李蓉雪(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为超声检测技术及相关理论
通信作者:李蓉雪,lrx97@163.com

提高检测精度^[2]。

经验模式分解(EMD)是一种自适应的信号时频处理方法,其分解得到的本征模态函数(IMF)能在不同的时间尺度上体现原始信号的局部特征,通过筛选和重构表征主要信息的 IMF,以达到信号滤波的目的^[3]。目前 EMD 广泛用于信号的降噪和识别上,ZHANG Q 等^[4]通过计算各阶 IMF 的能量大小来判别噪声信号和有用信号,根据最大能量出现的位置确定选取的重构分量,达到了超声信号消噪的目的。KONG T 等^[5]通过误差分析选取最佳 IMF 和次最佳 IMF 重构信号,提高了信号的信噪比,实现了对球形缺陷的识别。刘东瀛等^[6]通过计算各阶 IMF 与原信号的相关系数筛选重构 IMF 分量,实现了对不同种类噪声污染的碰摩声发射信号的去噪处理。然而,这些单纯 IMF 的筛选原则容易在滤除高频分量的同时丢失部分有用信息,增加后续计算的误差,从而影响检测精度。

文章以电磁超声检测信号为研究对象,提出了一种基于改进 EMD 的数据处理方法,利用原始信号经 EMD 分解后的各阶 IMF 与原始信号的欧式距离作为 IMF 筛选依据,并结合小波阈值滤波方法实现噪声去除和微小缺陷信号的有效提取。笔者对不同厚度的铝板进行测厚试验,并与真实厚度进行比较。试验结果表明,提出的算法能够在保留细节特征的前提下去除噪声,提高厚度检测的精度。

1 电磁超声检测基本原理

电磁超声检测(EMAT)主是通过电磁能、机械能、声能之间的不断转化来进行检测的。检测系统主要组成部分有永磁铁、激励线圈和被测试件等。EMAT 原理如图 1 所示。

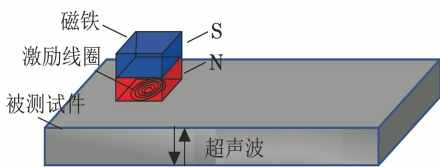


图 1 EMAT 原理示意

EMAT 的工作过程为:将通有高频交变电流的激励线圈放置于试件表面附近。由于磁感应现象,线圈附近会产生与被测试件平行的涡流场,涡流在外界磁铁的强磁场作用下产生机械力。试件质点受力产生机械振动,同时振动的能量以波的形式沿管道厚度方向进行传播。转换关系可由麦克斯韦方程组^[7]表示为

$$\begin{cases} \nabla \times H = J_c \\ B_s = \mu H \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B_s}{\partial t} \\ J_E = \gamma E \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为哈密算子; H 为交变磁场强度; B_s 为交变磁感应强度; J_c 为激励电流密度; μ 为相对磁导率; γ 为电导率; E 为涡流电场强度; J_E 为涡流电流密度。

2 超声信号处理算法

2.1 EMD 基本原理

EMD 能够依据信号的特点自适应地将一个复杂信号分解为一系列 IMF 分量,每个 IMF 都应满足以下条件^[8]:①整个时间序列的极值的个数和穿过零点的个数必须不大于 1;②任何一点的最大值包络线和最小值包络线的平均值为 0。

EMD 的具体分解步骤如下。

(1) 确定信号 $x(t)$ 的局部极大值和极小值点,利用三次样条函数形成信号极值的上下包络线,计算其均值 $m(t)$,求出 $h(t) = x(t) - m(t)$ 。

(2) 以 $h(t)$ 为源信号,重复(1)步骤直到满足 IMF 条件,假设第 k 次满足条件,得到

$$h_k(t) = h_{(k-1)}(t) - m_k(t) \quad (2)$$

式中: t 为信号各时刻。

此时,第一个 IMF 分量 $c_1(t) = h_k(t)$ 。

(3) 用 $r_i(t) = x(t) - c_1(t)$ 代替 $x(t)$ 重复步骤(1)~(2),当 $r_n(t)$ 成为一个单调函数,不能再从中抽取满足 IMF 条件的分量时,分解结束,最终可得

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (3)$$

式中: n 为 IMF 序列总数。

2.2 IMF 筛选原则及信号分析

EMD 分解得到的 IMF 分量一般是按照频率从高到低排序的,对于超声检测信号来说,有用信号主要集中在低频 IMF 分量,其他高频 IMF 分量主要由噪声组成^[9]。通过筛选和重构有用的 IMF 分量能够实现对信号的消噪和特征凸显。

由于噪声与噪声之间互无相关性,而各个特征信号之间具有较强的相关性,因此可以通过度量各 IMF 分量与原始信号之间的相关程度来判断各 IMF 中有用信号的含量。文章采用欧式距离度量各 IMF(此处记为 I_i)与原始信号的相似程度,其计算公式为

$$D(i) = \text{dist}(I_i, x(t)) = \sqrt{\sum_{t=1}^T (x(t) - I_{it})^2} \quad (4)$$

式中: $D(i)$ 为各序列欧式距离; $x(t)$ 为原始信号, I_{it} 为各 IMF 序列; i 为 IMF 分量序列数, t 为时刻, T 为总采样时间。

根据式(4)可知,应用欧式距离度量两个样本的相似程度时,数值越小,距离越近,相似度越大;而数值越大,距离越大,相似程度也越小。因此有用信号相似度最大的点为 $D(i)$ 的最小值点。

为分析 IMF 分量对信号特征的表现情况,选用一段实际检测到的超声回波信号进行分析,实际检测到的超声回波信号如图 2 所示。对其经过 EMD 处理,得到 8 个 IMF 分量(记为 $I_1 \sim I_8$)及一个残余分量,EMD 分解结果如图 3 所示。

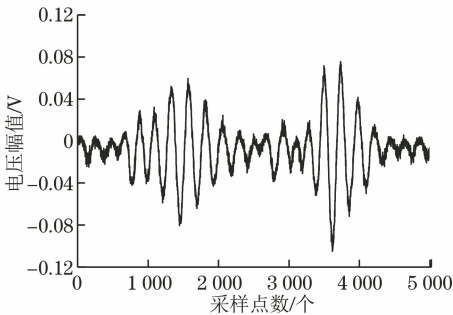


图 2 实际检测到的超声回波信号

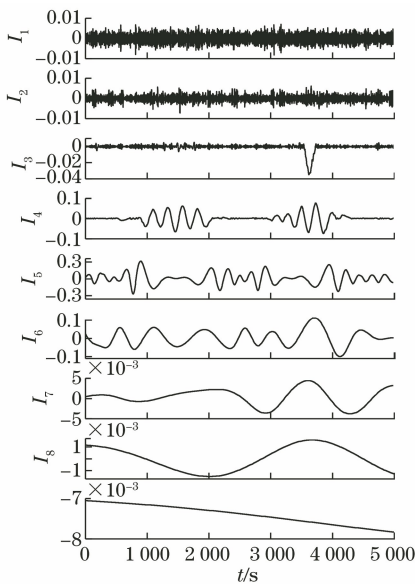


图 3 EMD 分解结果

从信号的各阶 IMF 分量可以看出,分解出的模态函数 I_1 、 I_2 均是噪声, I_3 含有微弱的有用信号。计算各 IMF 的能量,并采用距离度量计算其与原信号的相似度曲线,其分析结果如图 4、5 所示。

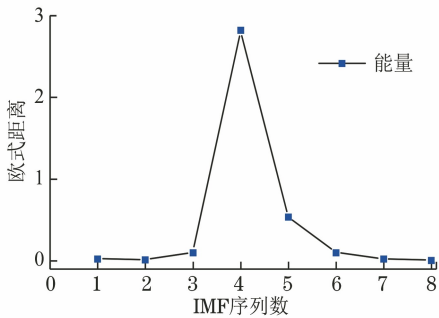


图 4 IMF 序列的能量曲线

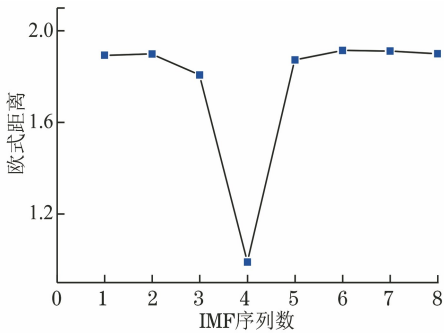
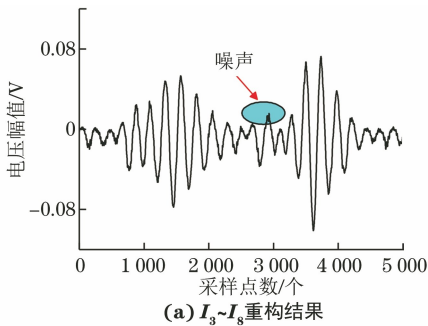
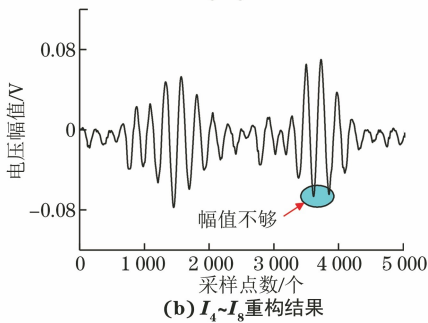


图 5 IMF 序列与原始信号相似度曲线

由图 4、5 可以看出,距离度量和能量分布中 I_4 与原始缺陷信号的相似度最大,能量计算中 I_5 能量值次大,距离度量中 I_3 与原始信号的相似度次大。由于 I_3 由大量噪声信息及微弱有用信息组成,能量幅值偏小,按照以往的能量筛选原则很容易将 I_3 当作噪声滤除,丢失其中含有的部分有用信息。笔者分别对 $I_3 \sim I_8$ 及 $I_4 \sim I_8$ 进行重构,得到的重构信号如图 6 所示。



(a) $I_3 \sim I_8$ 重构结果



(b) $I_4 \sim I_8$ 重构结果

图 6 部分 IMF 分量的重构信号

从图 6(a)中可以看出,相较于图 2 中的原始信号,若保留 I_3 分量将引入不必要的噪声;若在重构中剔除 I_3 分量,将导致采样点数在 3 600 左右的幅值大小信息丢失[见图 6(b)]。信息的丢失将导致波包峰值点位置差异,容易引起检测误差。

为解决 IMF_s 筛选中丢失有用信息的问题,文章提出以下基于欧式距离的 IMF_s 筛选准则,即

$$s = \begin{cases} \sum_{i=i_{smax}}^{i_{max}} I_i + \sum_{i=i_{max}}^I I_i & i_{smax} < i_{max} \\ \sum_{i=i_{max}}^I I_i & i_{smax} > i_{max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: s 为重构后的信号, I 为分解的 IMF 总个数,下标 i 为表示分量的序列号, i_{max} 为关联度最大的 IMF 序列号, i_{smax} 为相似度次大的 IMF 序列号; I_i 为处理过后的 IMF 分量。

如果相似度次大的序列号在相似度最大的序列号前面,则说明相似度最大 IMF 分量前面的 IMF 中存在微弱的有用信号,不能直接舍去,需要再次处理后重构,如果相似度次大的序列号在相似度最大的序列号后面,则说明相似度最大的 IMF 前面的 IMF 分量均是噪声,可以直接舍去。

2.3 改进的 EMD 算法

根据上述的分析,含有微弱高频信号的 IMF 分量需要进行再次处理,文章选用小波阈值函数进行二次处理。由于含有微弱高频有用信号的 IMF 中噪声占主体,振荡较大,且噪声方差较小,因此选用平滑性较好的软阈值函数对其进行消噪处理。通过计算分析,最终选用紧支性较好的 db8 小波,分解层数为 10 层,并选择能够实现最优预测变量阈值的 heursure 阈值法则实现特征提取^[10]。改进的 EMD 算法处理最终效果如图 7 所示。

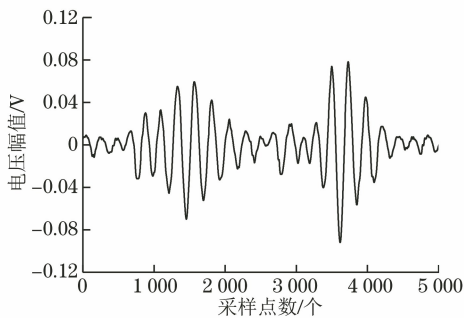


图 7 改进的 EMD 算法处理最终效果

由图 7 可以看出,二次处理后的重构信号很好地保留了有用信号的幅值,且滤除了大部分的噪声,

处理效果良好。

因此,改进 EMD 方法的具体过程如下。

(1) 将原始信号进行 EMD 分解,得到各阶 IMF 分量。

(2) 采用基于欧式距离的筛选准则对 IMF 分量进行择选,判断其是否需要进行再次处理,如需处理则进行小波软阈值处理,小波变换参数选择为:小波基为 db8;计算 1~20 层小波分解系数的信噪比,选择信噪比最大的层数作为分解层数;阈值法则为 heursure 型阈值。

(3) 重构处理好的信号,得到最终的消噪信号。

3 试验与结果分析

3.1 试验平台

为定量分析所提算法的处理能力,对厚度为 10 mm 和厚度为 15 mm 的铝板进行测厚试验。试验采用收发一体检测方式,试验系统包括 RITEC-5000 型检测装置、双工器模块、阻抗匹配模块、用于显示和采集回波信息的示波器、由单极性磁铁及螺旋型线圈组成的换能器等,试验系统框图如图 8 所示。

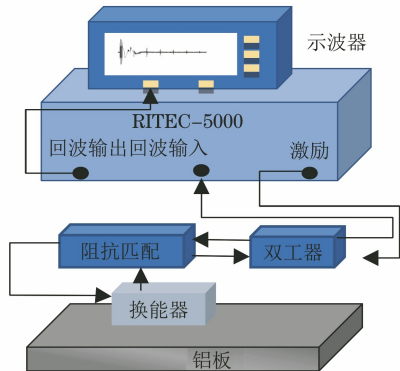


图 8 试验系统框图

试验中,设置激励信号频率为 2 MHz,电压幅值为 300 V,螺旋线圈的有效参数为:长 40 mm;宽 40 mm;线宽为 0.3 mm;线间距为 0.1 mm。通过示波器采集回波信号数据,将采集到的数据采用文章提出的改进 EMD 算法进行处理,提取处理后数据的峰值点,通过遍历各峰值点,确定回波信号的峰值点信息,将相邻回波峰值点对应的时间差记为 Δt ,利用声程公式计算得出被测铝板厚度,即

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (6)$$

式中: d 为铝板的厚度; c 为被测铝板中的横波声速,该试验中取 $3\,080\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

为评价该算法的处理能力,将处理后计算得到

的厚度值与由所采集原始信号计算出的厚度值进行比较,分别得出各自计算值与真实厚度值的相对误差

$$E_r = \frac{|d - d'|}{d} \times 100\%$$
 (7)

式中: E_r 为相对误差; d 为被测铝板真实厚度; d' 为根据式(6)计算的厚度。

3.2 检测数据分析

3.2.1 10 mm 厚铝板的数据分析

10 mm 铝板测厚原始数据及通过改进 EMD 算法处理后的回波信号如图 9 所示。

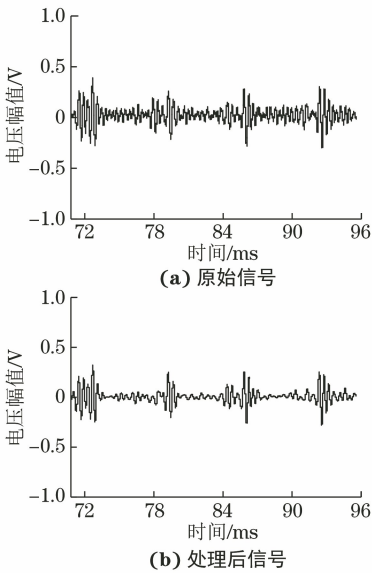


图 9 10 mm 厚铝板的回波信号

从图 9 中可以看出,经改进 EMD 算法处理后的数据滤除了大部分噪声并保留了幅值信息。笔者对同一块铝板进行多组试验,根据式(6),(7),由原始信号和处理后信号计算所得厚度值和误差,结果如表 1 所示。

表 1 不同处理方式对 10 mm 厚铝板的测量结果

试验 次数	原始信号处理			改进 EMD 处理		
	$\Delta t/\mu s$	d/mm	误差/%	$\Delta t/\mu s$	d/mm	误差/%
1	6.76	10.410	4.1	6.54	10.072	0.7
2	6.63	10.210	2.1	6.50	10.010	0.1
3	6.66	10.256	2.56	6.56	10.102	1.02

3.2.2 15 mm 厚铝板的数据分析

15 mm 厚铝板原始测厚数据及通过改进 EMD 算法处理后的回波信号如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,提出的算法能够较好地保存回波信号的峰值点位置且滤除多余噪声。笔者对同一块铝板进行多组试验,根据式(6),(7),由原始信号和处理后信号计算所得厚度值和误差,结果如

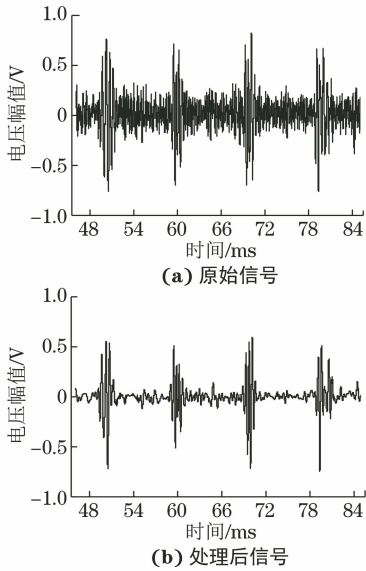


图 10 15 mm 厚铝板的回波信号

表 2 所示。

表 2 不同处理方式对 15 mm 厚铝板的测量结果

试验 次数	原始信号处理			改进 EMD 处理		
	$\Delta t/\mu s$	d/mm	误差/%	$\Delta t/\mu s$	d/mm	误差/%
1	9.830	15.138	0.92	9.77	15.05	0.30
2	9.965	15.346	2.33	9.70	14.94	0.40
3	9.395	14.469	3.54	9.62	14.80	1.33

4 结语

(1) 文章提出了一种改进 EMD 算法,即通过理论及信号分析提出基于欧式距离的 IMF_s 筛选原则,并结合小波软阈值算法对数据进行滤波处理。分析结果表明,改进 EMD 算法处理后的信号相较于原始根据能量计算重构的信号,能够在保持较好消噪能力下实现对峰值点的准确显示。

(2) 对不同厚度的铝板进行测厚试验,结果表明,所提算法能够提高厚度检测精度,并提升信号的信噪比,对于 10 mm 厚的铝板,测厚最小误差为 0.1%,对于 15 mm 厚铝板,测厚最小误差为 0.3%。

参考文献:

[1] 杨理践,张佳,邢燕好,等. 一种管道中 T(0,1)模态单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(2): 98-106.

[2] SI D, GAO B, GUO W, et al. Variational mode decomposition linked wavelet method for EMAT denoise with large lift-off effect [J]. NDT & E International, 2019, 107: 102149.

(下转第 31 页)

[12] 孙凯华,沈中华,李远林,等. 材料内部缺陷的激光超声反射横波双阴影检测方法[J]. 中国激光,2018,45(7):0710001.

[13] 李俊燕,沈中华,倪晓武,等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J]. 中国激光,2018,45(9):0904003.

[14] 季宏丽,张超,裘进浩. 激光超声技术在复合材料检测中的应用[J]. 航空制造技术,2017(15): 16-22.

[15] 孙广开,曲道明,周正干. 机器人辅助激光超声检测系统及参量匹配方法[J]. 仪器仪表学报,2017,38(8): 1961-1969.

[16] 李圣贤,朱永凯,王海涛,等. 复合材料分层缺陷的激光超声检测[J]. 无损检测,2019,41(5):1-5,78.

[17] PANTANO A, CERNIGLIA D. Simulation of laser-generated ultrasonic wave propagation in solid media and air with application to NDE[J]. Applied Physics A,2009,98(2):327-336.

[18] CERNIGLIA D, MONTINARO N, NIGRELLI V. Detection of disbonds in multi-layer structures by laser-based ultrasonic technique[J]. The Journal of Adhesion,2008,84(10):811-829.

[19] BUSTAMANTE L, JEYAPRAKASH N, YANG C H, et al. Nondestructive characterization of mechanical properties on metallic and polymer plates using hybrid laser-air coupled ultrasonic techniques [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112 (5/6): 1767-1785.

[20] BUSTAMANTE L, JEYAPRAKASH N, YANG C H. Hybrid laser and air-coupled ultrasonic defect detection of aluminium and CFRP plates by means of Lamb mode[J]. Results in Physics,2020,19:103438.

[21] KENDERIAN S, DJORDJEVIC B B, CERNIGLIA D, et al. Dynamic railroad inspection using the laser-air hybrid ultrasonic technique [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,2006, 48(6):336-341.

[22] 马健,赵扬,周凤艳,等. 离焦量对激光超声测厚的影响[J]. 激光技术,2015,39(3):349-352.

[24] 张瀚升,杜春晖,李国才,等. 面向固体发动机动态燃速测试的碳纤维复合材料超声衰减特性[J]. 测试技术学报,2020,34(2):141-146.

[25] 曹弘毅,马蒙源,丁国强,等. 复合材料层压板分层缺陷超声相控阵检测与评估[J]. 材料工程,2021,49(2):149-157.

[26] 刘旭,吴俊伟,何勇,等. 基于空耦换能器的碳纤维增强环氧树脂编织复合材料激光超声检测技术[J]. 复合材料学报,2021,38(9):2822-2831.



(上接第 5 页)

[3] 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.

[4] ZHANG Q, QUE P W, LIU Q K, et al. Application of empirical mode decomposition to ultrasonic signal [C]//IEEE Ultrasonics Symposium. Rotterdam, Netherlands, IEEE:2005.

[5] KONG T, XU C G, ZHOU S Y. A time-frequency method for ultrasonic flaw inspection based on HHT [C]//2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing. Yantai, China, IEEE: 2010.

[6] 刘东瀛,邓艾东,刘振元,等. 基于 EMD 与相关系数原理的故障声发射信号降噪研究[J]. 振动与冲击, 2017,36(19):71-77.

[7] SUN H Y, HUANG S L, WANG Q, et al. Orthogonal optimal design method for point-focusing EMAT considering focal area dimensions [J]. Sensors and Actuators A:Physical,2020,312:112109.

[8] 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.

[9] LU Y F, SANIIE J. A comparative study of singular spectrum analysis and empirical mode decomposition for ultrasonic NDE [C]//2016 IEEE International Ultrasonics Symposium. Tours, France, IEEE: 2016.

[10] 阮星翔,汪磊,向登峰. 电磁超声检测信号小波去噪研究[J]. 仪表技术,2019(4):13-15,20.