

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20191031.003

基于经验模态分解和相关系数对玻璃纤维增强聚合物复合材料板的损伤识别及扫查成像

万陶磊¹, 常俊杰^{*1,2,3}, 曾雪峰¹, 李媛媛¹(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 浙江清华长三角研究院, 嘉兴 314000;
3. 日本探头株式会社, 横滨 232-0033)

摘要: 针对外界环境噪声等因素造成损伤因子不敏感, 导致复合材料损伤识别困难和成像误差大等问题, 提出了一种基于经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD) 和相关系数的损伤因子。用空气耦合探头采集损伤前后的 Lamb 波信号进行 EMD 分解获取多个本征模态分量 (Intrinsic mode function, IMF)。根据相关系数获取与信号相关性最大的 IMF 分量, 并定义其能量值的相对变化为损伤因子。在模拟噪声环境前后, 分别对玻璃纤维增强聚合物复合材料 (GFRP) 板中的分层缺陷进行识别和扫查成像, 验证了该损伤因子的有效性。结果表明: 信号经过 EMD 分解后, 与其相关性最大的 IMF 分量对损伤最敏感, 能够定义为识别损伤的损伤因子。将该损伤因子结合概率成像方法进行空耦 Lamb 波扫查, 不仅能够有效对复合材料中的缺陷进行成像, 而且在模拟强噪声环境中具有良好的抗噪性。

关键词: 复合材料; 损伤因子; 经验模态分解 (EMD); 相关系数; Lamb 波; 抗噪

中图分类号: TB559 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)08-1921-11

Damage identification and scanning imaging of glass fiber reinforced polymer composite plates based on empirical mode decomposition and correlation coefficient

WAN Taolei¹, CHANG Junjie^{*1,2,3}, ZENG Xuefeng¹, LI Yuanyuan¹(1. Key Lab of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Zhejiang 314000, China;
3. Japan Probe CO. LTD., Yokohama 232-0033, Japan)

Abstract: Aiming at the problem that the influence of environmental noise and insensitive damage factor make damage identification difficult and imaging error large for composite plate, a damage factor based on empirical mode decomposition(EMD) and correlation coefficient was proposed. The air-couple probe was used to obtain Lamb wave signal before and after the damage, and a group of intrinsic mode function (IMF) components of signal was obtained by EMD. According to the correlation coefficient, the IMF component which has the greatest correlation with the signal was obtained, and the relative change of its energy value was defined as the damage factor. The validity of the proposed algorithm was assessed by identifying damage and scanning imaging at composite plate. The results show that after EMD, the IMF component with the greatest correlation with the original signal is most sensitive to damage, and can be used as a damage factor to identify damage. Combining this damage factor with probability imaging algorithm for the air-coupled Lamb wave scanning can not only effectively image the defect in compos-

收稿日期: 2019-09-05; 录用日期: 2019-10-18; 网络首发时间: 2019-10-31 13:53:52

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191031.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (11464030)

通信作者: 常俊杰, 博士, 副教授, 研究方向为超声无损检测的应用技术及检测设备的研发 E-mail: junjiechang@hotmail.com

引用格式: 万陶磊, 常俊杰, 曾雪峰, 等. 基于经验模态分解和相关系数对玻璃纤维增强聚合物复合材料板的损伤识别及扫查成像 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1921-1931.

WAN Taolei, CHANG Junjie, ZENG Xuefeng, et al. Damage identification and scanning imaging of glass fiber reinforced polymer composite plates based on empirical mode decomposition and correlation coefficient[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(8): 1921-1931(in Chinese).

ite plate, but also has good noise resistance in simulated strong noise environment.

Keywords: composite; damage factor; empirical mode decomposition(EMD); correlation coefficient; Lamb wave; anti-noise ability

玻璃纤维增强聚合物复合材料 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) 由于其抗疲劳性好、比强度高和密度低等优点被广泛应用于航空航天和风力发电等重要领域^[1-3]。然而在生产制作复合材料的过程中容易产生分层和夹杂等缺陷^[4]。为了预防材料中各类损伤带来的安全隐患，对复合材料进行快速有效的质量检测具有非常重要的意义^[5-6]。

Lamb 波由于其衰减小、传播距离远和检测灵敏度高等优点，结合非接触式空气耦合超声技术^[7-9]，能够满足实际检测要求，已经被广泛应用于复合材料等板状结构的检测中。目前，概率损伤成像方法^[10-11]由于无需知道 Lamb 波的具体声速，成像结果能够直观地反映损伤位置，已经被许多研究人员应用^[12]。概率损伤原理主要通过定义接收信号的某个物理量值与参考量值的相对变化为损伤因子，然后将其与无损伤信号的损伤因子进行比较来判断损伤的有无，进而对损伤进行成像。因此选取能够有效表征信号差异的损伤因子对损伤的识别和成像具有关键性的作用。

近年来，许多学者选取不同的损伤因子进行了成像研究。如 Chang 等^[13]采用短时傅里叶变换，以信号的包络能量定义损伤因子进行损伤识别成像。刘彬等^[11]使用互相关损伤因子和频谱幅度差损伤因子来识别损伤。刘国强等^[12]使用基于 Hilbert 变换的损伤因子来识别损伤。但当外界环境的影响，如噪声等因素的存在会对损伤因子的提取及结果的准确性产生影响。苏晨辉等^[14]采用基于计盒维数的损伤因子在模拟噪声环境中对损伤进行了识别及成像，避免了对信号去噪的过程，且取得了一定的效果。但该损伤因子的对比度较低，结果的准确性受到影响。

经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD)^[15-18] 可对非平稳信号进行平稳处理，是一种无需先验知识的自适应时频分析方法^[19]。可将信号从高频到低频依次分解为若干个本征模态分量 (Intrinsic mode function, IMF) 和一个残差信号，实现对信号的细分，从而将对损伤最敏感的频段信号分解出来构造能够有效识别损伤的损伤因子。本文提出了一种基于 EMD 和相关系数的损伤因子，对 GFRP 中的损伤进行识别。并结合空气耦

合 Lamb 波概率成像方法在模拟噪声环境前后，分别对损伤进行了成像定位和定量研究，最后对结果进行了对比。

1 基于 EMD 和相关系数的损伤识别

1.1 EMD 的基本原理

EMD 的本质是将信号 $x(t)$ 进行平稳处理，将被分解信号的相邻峰值点间的时延定义为时间尺度，并让信号进行筛选分解^[19]。从而得到一系列包含不同时间尺度的平稳信号 $d_i(t)(i=1,2,3,\dots,n)$ 和残差信号 $r(t)$ 。分解结果如下式所示：

$$x(t) = \sum_{i=1}^n d_i(t) + r(t) \quad (1)$$

式中： $d_i(t)$ 表示不同阶数的 IMF 分量，它们同时满足两个标准：(1) 在整个数据域内，极值点个数和零点个数必须相等或其差值不能大于 1；(2) 最大包络与最小包络的平均值在每个数据点处都为零； i 表示 IMF 分量的阶数。这些平稳 IMF 分量按照分解顺序分别反映频率由高到低的振动模态，剩余的残差信号则反映原信号总体趋势。

1.2 损伤识别步骤

将损伤前后信号与参考未损伤信号分别进行 EMD 分解，并获取其 IMF 分量。

根据相关系数分别选择与损伤前后信号和参考信号相关性最大的 IMF 分量，相关系数的计算方法如下式：

$$r = \frac{\sum_{t=0}^T x(t)d_i(t)}{\sqrt{\sum_{t=0}^T x^2(t) \sum_{t=0}^T d_i^2(t)}} \quad (2)$$

式中： t 为信号的采样时间； $x(t)$ 为原始未分解信号。

分别计算与损伤前后信号和参考信号相关性最大的 IMF 分量能量值：

$$E_i = \sum_{t=0}^T |d_i(t)|^2 dt \quad (3)$$

式中， E_i 为与信号相关性最大的 IMF 分量能量值。

分别求出损伤前后信号与参考信号相关性最大的 IMF 分量的能量差值，进行对比后确定损伤的存在：

$$H_i = |E_{ai} - E_{bi}| \quad (4)$$

式中： H_i 为 IMF 的能量差值； E_{ai} 为参考信号的最大相关 IMF 能量值； E_{bi} 为接收信号的最大相关 IMF 分量能量值。

2 实验验证

2.1 实验平台的搭建

实验系统采用的是日本探头株式会社生产的 NAUT-21 空气耦合超声检测系统。其中包括信号发射接收器、空气耦合超声探头、扫查架、前置信号放大器、计算机和 GFRP 板。检测系统简图如图 1 所示。

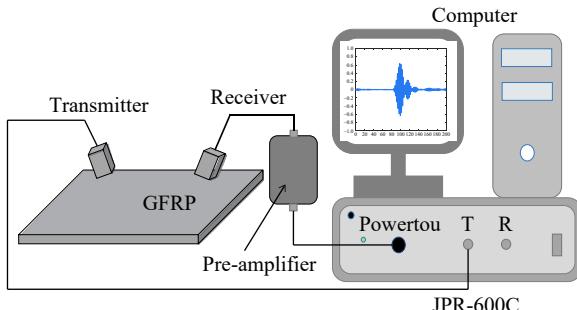


图 1 空气耦合超声检测实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air-coupled ultrasonic experimental system

实验材料为 GFRP，型号为 F.JN-2-25/QW200B，尺寸为 $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm} \times 4.1 \text{ mm}$ ，铺层顺序为 $[0/45/90/-45]_5$ 。在复合材料板内埋设了一块直径为 35 mm 的圆形聚四氟乙烯薄膜来模拟分层缺陷。

2.2 损伤检测实验

有研究^[20-23]表明，A0 模态 Lamb 波更适合检测复合材料板中的损伤。且 A0 模态 Lamb 波离面位移更大，更适合空耦超声探头接收板中泄漏的 Lamb 波，因此选择激励 A0 模态 Lamb 波进行实验。实验时使用中心频率为 400 kHz 、晶片尺寸为 $14 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的空耦超声探头。图 2 为空耦探头入射角度频散曲线。可知，激励 A0 模态 Lamb 波需要调整的探头入射角约为 13° 。为了保证接收探头能够充分接收复合材料板中的泄漏 Lamb 波，接收探头的角度也应该与发射探头的角度保持一致。

实验时，使用 JPR-600C 信号发射接收器施加电压为 300 V 、中心频率为 400 kHz 和周期数为 7 的矩形脉冲波作为激励信号。

分别采集有、无损伤信号，并进行 EMD 分解。无损伤信号的前四阶 IMF 分量及其对应频谱分布如图 3 和图 4 所示。可知，随着 IMF 分量阶数的

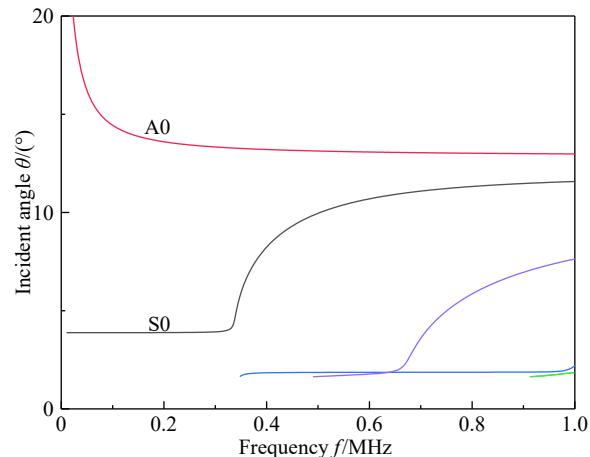


图 2 空气耦合超声探头入射角度频散曲线

Fig. 2 Air-coupled ultrasonic probe incidence angle dispersion curves

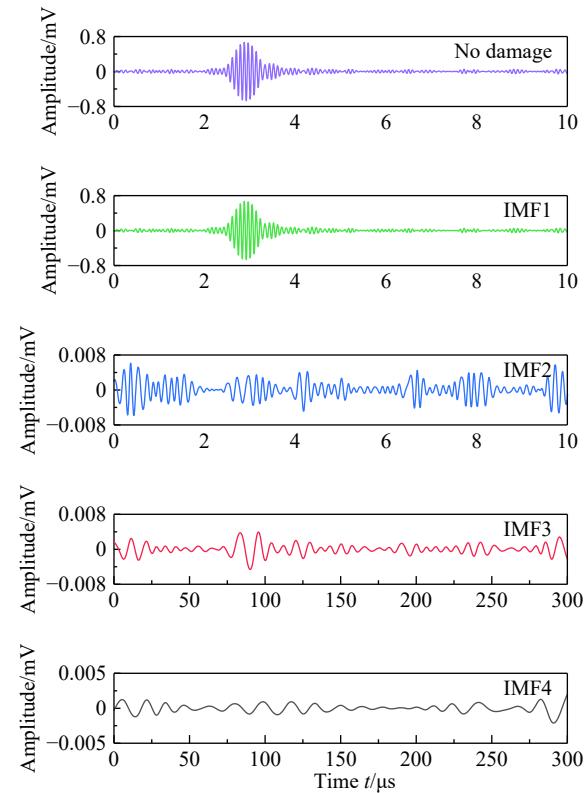


图 3 无损伤信号的前四阶本征模态 (IMF) 分量

Fig. 3 Intrinsic mode function(IMF) components of the first four orders of no damage signal

增加，其中心频率逐渐向低频移动。这表明 EMD 分解能够将原始信号进行高频和低频的分离^[19]。

根据式 (2) 计算出损伤前、后信号所有 IMF 分量与原信号的相关系数，其结果如图 5 所示。然后根据式 (3) 和式 (4) 计算出损伤前、后信号的各阶 IMF 分量与参考信号对应的 IMF 分量能量差值，结果如图 6 所示。

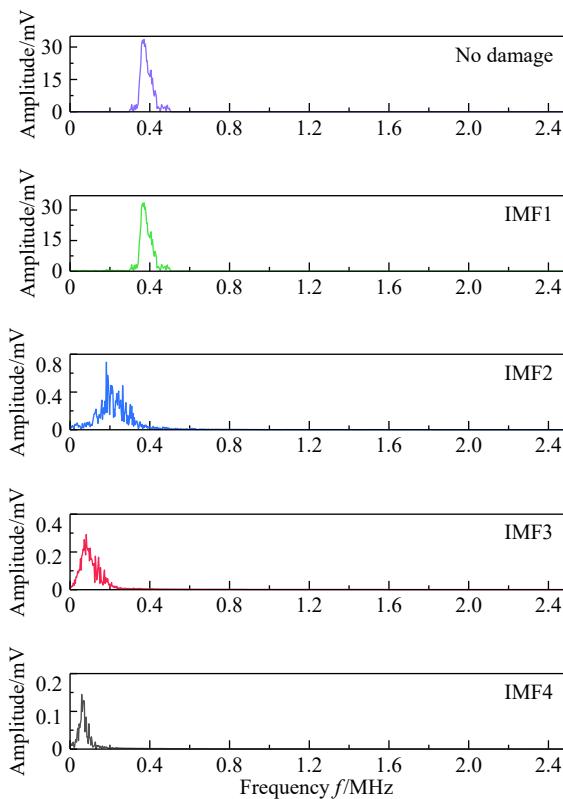


图 4 无损伤信号的前四阶 IMF 分量频谱

Fig. 4 Spectra of IMF components of the first four orders of no damage signal

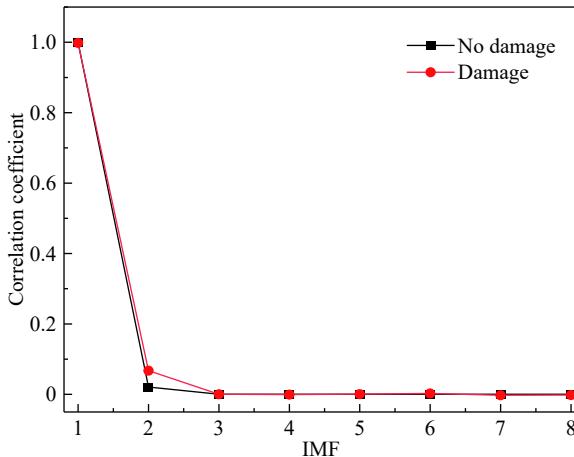


图 5 IMF 分量与原始信号的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient between IMF components and original signal

从图 5 可知, 损伤前、后信号的 IMF1 分量都与原信号的相关性最大, 其他高阶分量与原信号的相关性较低。从图 6 可知, 损伤后信号与参考信号的 IMF1 能量差值明显比其他高阶 IMF 分量的能量差值大。损伤前信号与参考信号的 IMF1 能量差值和其他高阶 IMF 分量对应的能量差值都

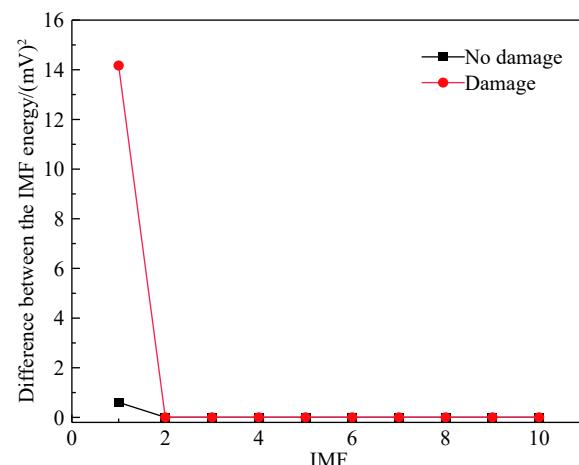


图 6 损伤前后信号的各阶 IMF 能量差

Fig. 6 All IMF components energy differences of signals before and after damage

比较小, 区分度不大。这说明低阶 IMF1 分量的能量值能够识别损伤的有无。由于其他高阶 IMF 分量的能量差值已看不出变化趋势, 无法对损伤进行识别, 因此这也说明了信号的高频区间对损伤较敏感。综上, 根据相关系数可以将原信号中对损伤最敏感的 IMF1 分量筛选出来, 作为识别损伤的指标。

3 空气耦合 Lamb 波扫查成像

3.1 成像原理

为了对缺陷进行二维显示, 使用基于 EMD 和 IMF 能量的损伤因子 (Energy damage index, IEDI) 对缺陷进行空耦 Lamb 波概率损伤成像。成像时将空气耦合超声探头沿着两个正交的方向对缺陷进行扫查, 来重构缺陷的轮廓。以 x 方向为 0° 方向, y 方向为 90° 方向, 使用计算机控制探头沿着两个正交的方向以步进为 1 mm 进行扫查, 每个方向扫查 170 mm, 得到一个尺寸为 170 mm \times 170 mm 的扫查区域。以扫查区域为基准建立坐标系, 分层缺陷中心坐标为 (92, 98)。

针对空气耦合超声探头, 对椭圆成像理论修改后进行成像。假设探头在每个扫查方向上以一定步进移动探头采集 N 个信号, 则每个扫查方向上有 N 个激励-传感路径, 每个扫查方向上像素点的最终概率损伤值为 N 个能量损伤因子的椭圆影响区域叠加而得到。对于特定扫查方向, 其像素点的概率损伤值为

$$P_j(x, y) = \sum_{i=1}^N I_{\text{IEDI}(i)} \cdot w_i[R_i(x, y)] \quad (5)$$

式中： j 为扫查方向，在此 $j=0^\circ, 90^\circ$ ； $P_j(x,y)$ 表示探头在 j 方向扫查后获得的概率损伤值； $I_{\text{IEDI}(i)}$ 为第 i 条路径的能量损伤因子； $w_i[R_i(x,y)]$ 为第 i 条路径的损伤权重分布函数； $R_i(x,y)$ 为像素点 (x,y) 距离发射、接收探头的相对距离：

$$R_i(x,y) = \frac{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} + \sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}}{\sqrt{(x_j-x_k)^2 + (y_j-y_k)^2}} \quad (6)$$

式中： (x_j, y_j) 为发射探头的坐标； (x_k, y_k) 为接收探头的坐标。相对距离 $R_i(x,y)$ 为像素点 (x,y) 到发射探头中心位置 (x_j, y_j) 的距离和到接收探头中心位置 (x_k, y_k) 之间的距离之和与发射、接收探头之间的距离比值。

定义损伤权重分布 $w_i[R_i(x,y)]$ 为一假定的线性衰减椭圆分布函数，表达式如下：

$$w_i[R_i(x,y)] = \begin{cases} \frac{C - R_i(x,y)}{C - 1}, & R_i(x,y) \leq C \\ 0, & R_i(x,y) > C \\ 0, & R_i(x,y) \leq A \end{cases} \quad (7)$$

$$C = \frac{a}{c} \quad (8)$$

$$b^2 = a^2 - c^2 \quad (9)$$

式中： C 为控制椭圆影响区域的参数； a 为椭圆长半轴； b 为椭圆短半轴； c 为椭圆焦距长度的一半； A 为空耦探头的非影响区域。[图 7](#) 为椭圆分布概率损伤示意图。可见，在椭圆中假定两个空耦探头为椭圆的焦点，则探头之间的距离为焦距 $2c$ ，像素点 (x,y) 到两个探头之间的距离和为定值 $2a$ 。由于空耦超声探头的尺寸为 14 mm， b 取 14。

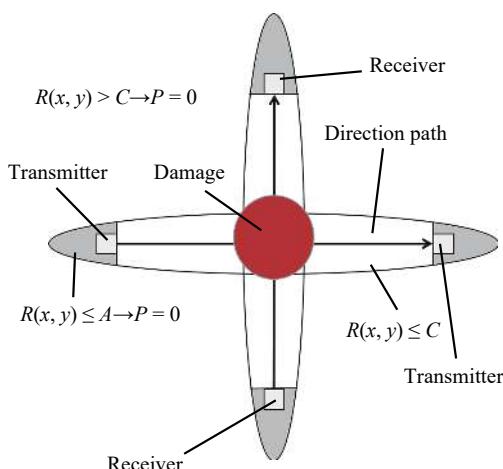


图 7 椭圆分布概率损伤示意图

Fig. 7 Elliptic distribution probability damage diagram

探头之间的距离为 170 mm， c 取 85，根据式 (8) 可知， C 取 1.01。

根据概率损伤原理，分别得到两个扫查方向上的各个像素点的概率损伤值后，将 2 个方向上的概率损伤值采用相乘的方式进行数据融合，来实现缺陷的重构并提高成像对比度：

$$P(x,y) = P_{0^\circ}(x,y) \times P_{90^\circ}(x,y) \quad (10)$$

式中： $P_{0^\circ}(x,y)$ 为沿 0° 方向进行扫查后像素点 (x,y) 的概率损伤值； $P_{90^\circ}(x,y)$ 为沿 90° 方向进行扫查后像素点 (x,y) 的概率损伤值。

3.2 损伤因子的定义

由于信号经过 EMD 分解后，其 IMF1 分量的能量值能够对损伤进行识别，因此以 IMF1 分量能量的相对变化为损伤因子对损伤进行识别，损伤因子的定义为设无损伤参考信号的 IMF1 能量值为 B_0 ，扫查信号 IMF1 能量值为 B ，则定义扫查信号的损伤因子 D_{IEDI} 为

$$D_{\text{IEDI}} = 1 - \frac{\min(B_0, B)}{\max(B_0, B)} \quad (11)$$

3.3 基于 IEDI 的损伤成像结果

使用自动扫查装置，控制空耦探头沿着 GFRP 板进行扫查采集数据后，根据式 (11) 计算出每个信号的损伤因子，可得到在两个正交方向上，损伤因子随扫查距离的关系，如 [图 8](#) 所示。可知，该损伤因子的对比度较高，随着探头扫查距离的增大，探头在无缺陷区域扫查时，损伤因子较小。当探头扫查到缺陷时，损伤因子增大。这表明空

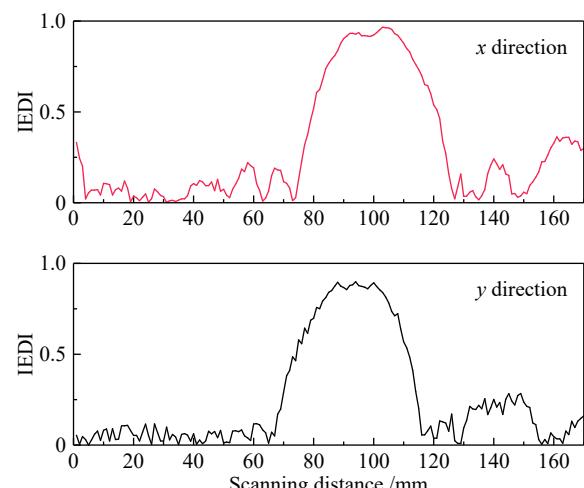


图 8 GFRP 本征模态能量损伤因子 (IEDI) 与扫查距离的关系

Fig. 8 Relationship between intrinsic mode function energy damage index (IEDI) and scanning distance of GFRP

耦 Lamb 波具有指向性，且 IEDI 损伤因子能识别出损伤。

将损伤因子代入概率损伤算法进行成像，并与空耦聚焦探头 C 扫成像结果进行对比，其结果如图 9 所示。在成像图中，颜色较深的红色区域为缺陷区域。其尺寸和形状与空耦 C 扫查成像结果相比都较吻合。这说明基于 IEDI 损伤因子的概率成像结果，能够直观地定位到缺陷位置，并得到分层缺陷的基本轮廓。

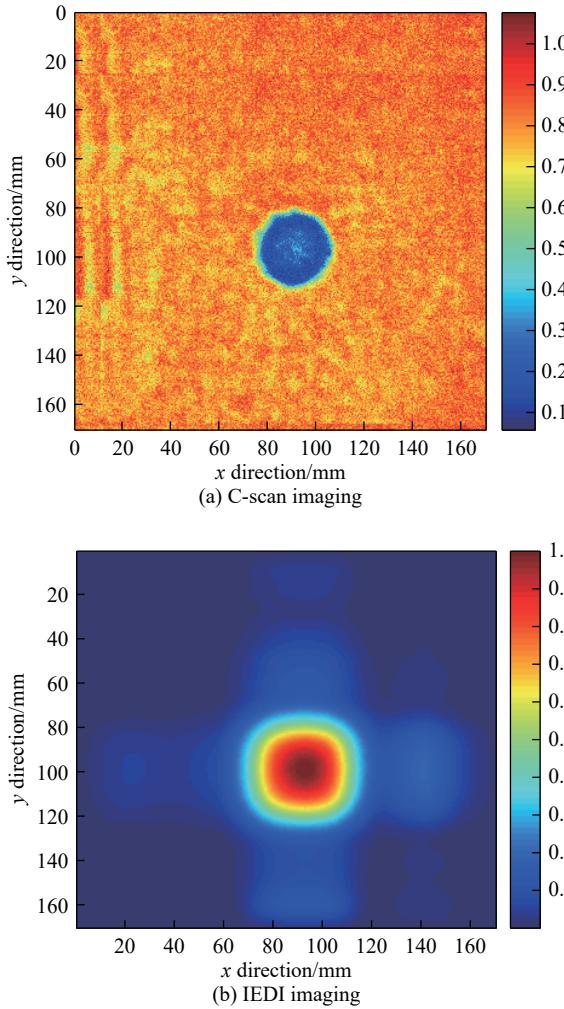


图 9 GFRP 空耦 C 扫查成像与 IEDI 成像

Fig. 9 Air-coupled C-scan imaging and IEDI imaging of GFRP

3.4 基于 IEDI 在噪声环境中的损伤成像

实际上，对复合材料进行检测时都是在自然环境下进行的，这就难以避免会受到环境中噪声的影响。由于噪声对损伤因子的提取会造成影响，因此损伤因子的抗噪声能力对缺陷的识别和成像都存在非常大的影响。提出的损伤因子必须具有一定的抗噪声能力才能为实际检测提供参考。

为了模拟噪声环境，在信号中分别添加信噪比为 9 dB、5 dB、1 dB 和 0.1 dB 的白噪声。添加白噪声后，有、无损伤的信号如图 10 所示。

分别对添加不同信噪比噪声的信号进行 EMD 分解，为了提取对损伤最敏感的 IMF 分量，分别计算了信号与其 IMF 分量的相关系数。其 IMF 分量与原信号的相关系数结果如图 11 所示。可知，当添加信噪比为 9 dB 的弱噪声时，损伤前、后信号的 IMF1 分量与原信号的相关性最大。当分别添加信噪比为 5 dB、1 dB 和 0.1 dB 的白噪声时，其 IMF2 分量与原信号的相关性最大。计算损伤前、后添加不同等级白噪声信号与参考信号对应

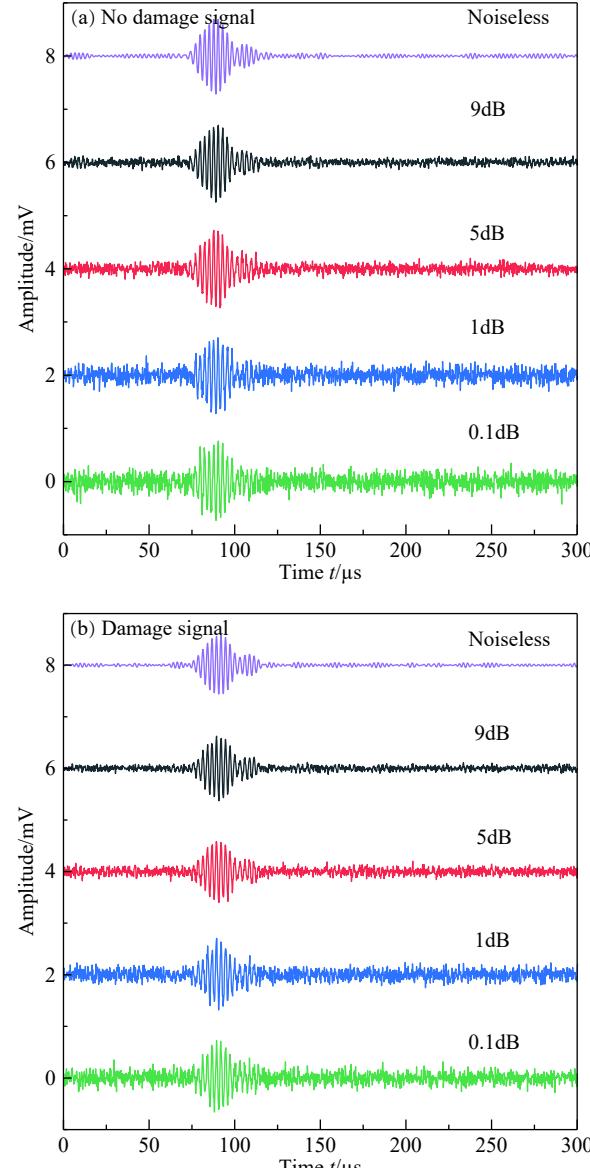


图 10 添加噪声信号后 GFRP 有无损伤信号

Fig. 10 No damage and damage signal with adding noise signal of GFRP

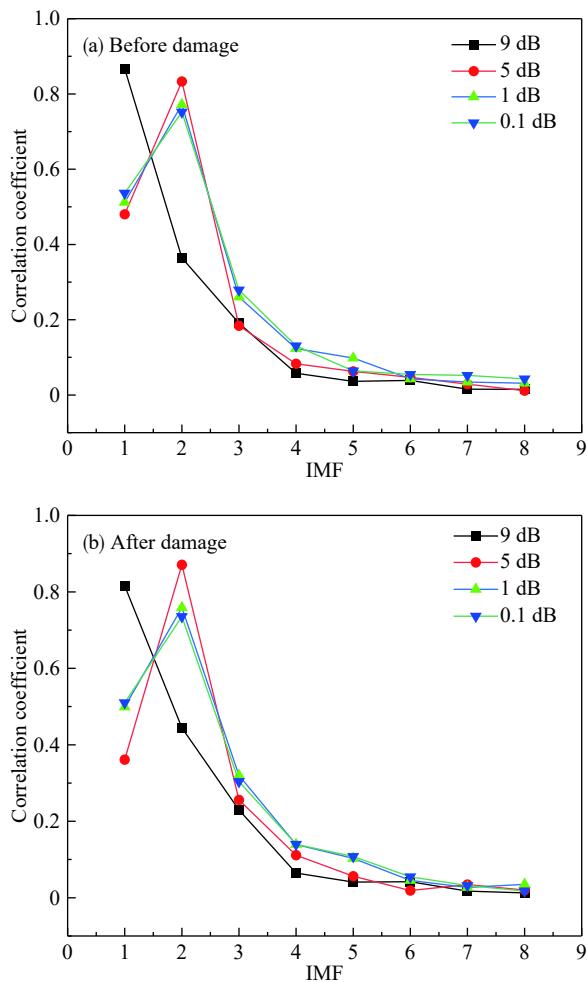


图 11 GFRP 噪声信号与其 IMF 分量的相关系数

Fig. 11 Correlation coefficients between noise signals with their IMF components of GFRP

的 IMF 分量能量差，其结果如图 12 所示。可知，当添加噪声后，损伤后信号与参考信号的前二阶 IMF 能量差值明显比损伤前信号与参考信号的前二阶 IMF 能量差值大。其中，当添加信噪比为 9 dB 的弱噪声时，损伤后信号 IMF1 分量的能量差值最大。当添加信噪比分别为 5 dB、1 dB 和 0.1 dB 的白噪声时，损伤后信号 IMF2 分量的能量差值最大。这与图 11 所示的相关系数变化规律相同。这是由于 EMD 分解能将信号的低频和高频分离，而白噪声信号为高频信号，因此当添加信噪比小于 9 dB、噪声等级逐渐增大的信号经过 EMD 分解后，其 IMF1 分量大部分为与原信号相关性更小的噪声能量，而 IMF2 才是与信号相关性最高、对损伤最敏感的分量信号，因此信号损伤前后其 IMF2 的能量差值更大。

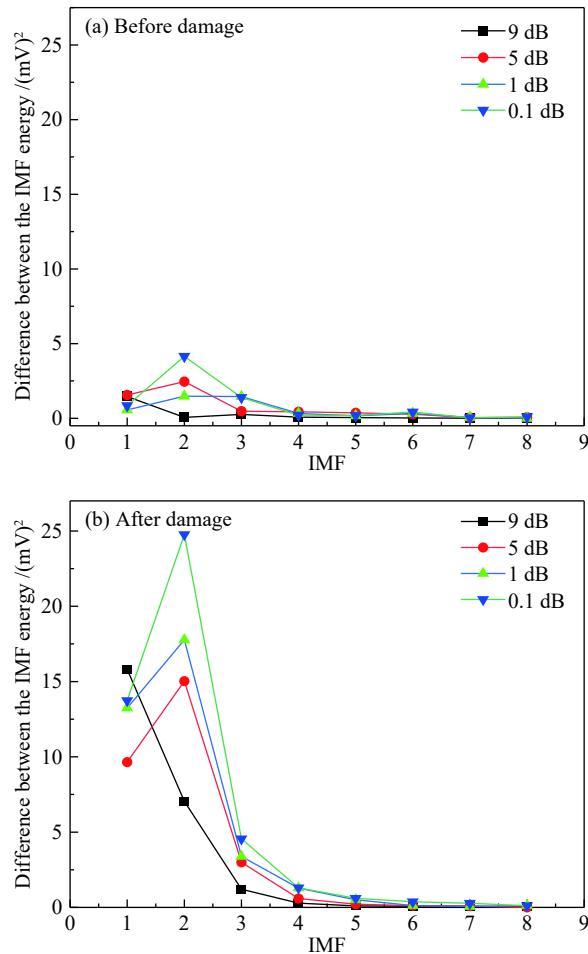


图 12 GFRP 损伤前后噪声信号与参考信号 IMF 分量的能量差异

Fig. 12 Energy differences of IMF components of noise signal and reference signal before and after damage of GFRP

综上，在不同强度的噪声环境下，根据相关系数最大原则，可以自适应的选取出信号中对损伤最敏感的 IMF 分量。

最后，计算出添加不同信噪比白噪声后扫查信号的损伤因子，并使用概率损伤算法进行成像，结果如图 13 所示。表 1 为不同损伤因子的对比结果。可知，虽然在信号中添加了不同信噪比的白噪声，但是基于 IEDI 的成像结果仍然能够直观的定位到缺陷位置，并得到分层缺陷的基本轮廓。与未添加白噪声的成像结果对比可知，添加不同信噪比白噪声后的成像结果仅仅是图中的浅色虚假斑块产生变化，深色区域的缺陷部分并无明显变化。

3.5 不同损伤因子的成像结果对比

为了比较该损伤因子的抗噪声能力，使用文献 [14] 中基于计盒维数损伤因子 (Box counting

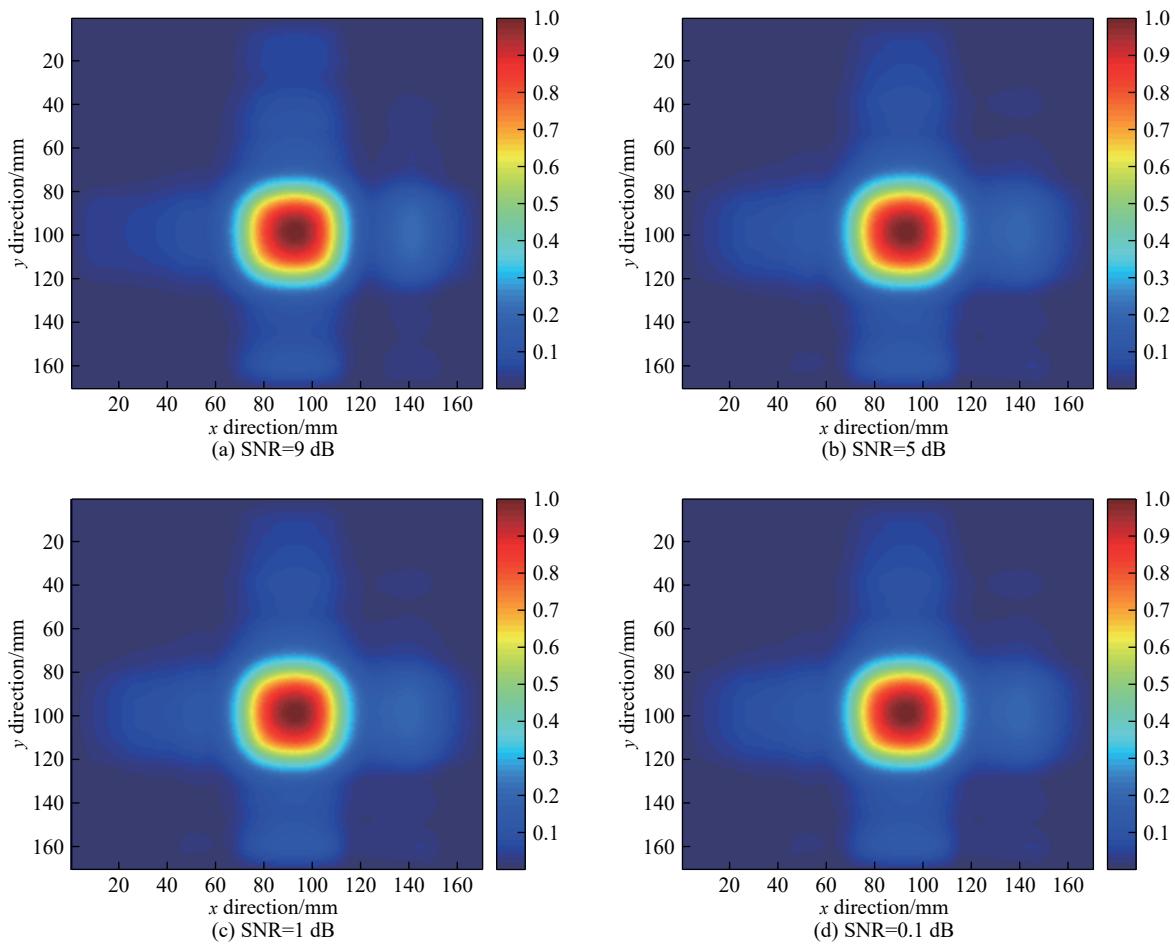


图 13 基于 IEDI 在不同等级噪声下 GFRP 的损伤成像

Fig. 13 Damage imaging based on IEDI under different levels of noise of GFRP

表 1 GFRP 不同损伤因子的对比结果

Table 1 Comparison results of different damage factors of GFRP

Noise level	Box counting-dimension		BDI	IMF energy		IEDI
	No damage	Damage		No damage	Damage	
No noise	1.14	1.53	0.057	25.85	2.62	0.90
9 dB	1.55	1.60	0.03	19.55	1.15	0.94
5 dB	1.58	1.63	0.03	21.39	1.09	0.94
1 dB	1.62	1.66	0.02	19.61	1.52	0.92
0.1 dB	1.63	1.66	0.01	15.77	1.92	0.87

dimension damage index, BDI) 在噪声环境中的成像结果与本文方法 (IEDI) 的成像结果进行对比。

图 14 为 BDI 在不同等级噪声下的损伤成像。可知, 随着噪声强度的增大, 基于 BDI 值成像图中的虚假斑块和干扰噪声逐渐增多。缺陷轮廓和尺寸也逐渐发生改变, 这与该损伤因子的对比度较小有关。

由于概率损伤成像是以颜色最深的像素点位置来对损伤进行定位, 因此分别对比添加白噪声

前、后最大像素点坐标来讨论损伤因子的抗噪性, 结果如表 2 所示。定位误差为实际缺陷坐标点位置与成像后坐标点位置的距离。

为了对使用不同损伤因子进行成像后的结果进行定量分析, 采用 6 dB 法对添加噪声前、后缺陷在 x 和 y 方向上的尺寸变化进行对比。通过将能量损伤因子的最大值下降一半并采用插值处理的方法分别估计损伤在两个方向上的尺寸, 结果如表 3 所示。误差为同方向上实际成像尺寸与预

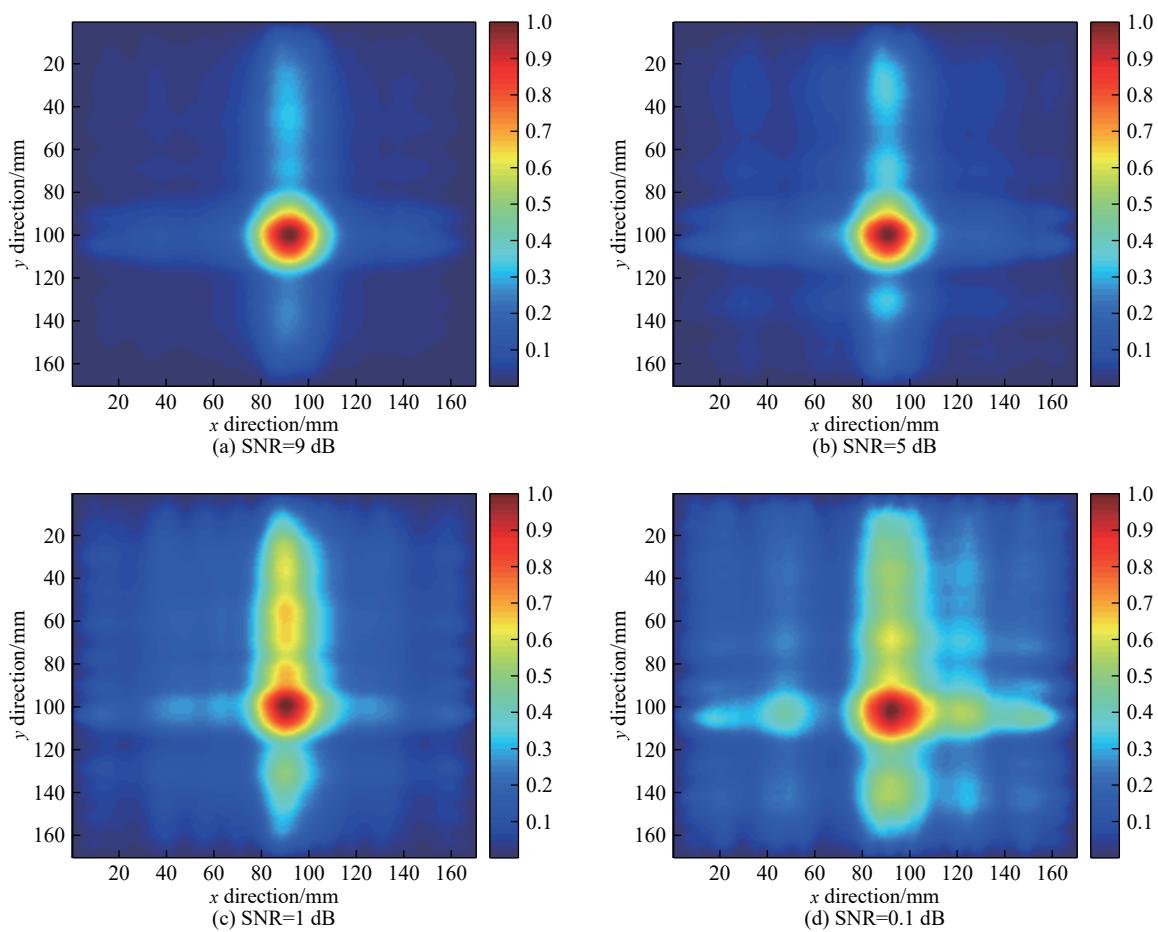


图 14 基于计盒维数损伤因子(BDI)在不同等级噪声下的损伤成像

Fig. 14 Damage imaging based on box-counting dimension damage index(BDI) under different levels of noise

表 2 GFRP 成像定位结果
Table 2 Imaging location results of GFRP

Noise level	Actual position (x,y)	IEDI position (x,y)	Error/mm	BDI position (x,y)	Error/mm
No noise	(92,98)	(92,99)	1.00	(92,100)	2.00
9 dB	(92,98)	(93,98)	1.00	(92,100)	2.00
5 dB	(92,98)	(93,98)	1.00	(91,100)	2.23
1 dB	(92,98)	(93,99)	1.41	(90,100)	2.82
0.1 dB	(92,98)	(93,99)	1.41	(90,101)	3.60

表 3 GFRP 不同损伤因子成像后在 x 和 y 方向上的定量结果
Table 3 Imaging results of different damage factors in the x and y directions of GFRP

Noise level	Autal size		IEDI size		Error/mm		BDI size		Error /mm	
	x/mm	y/mm	x/mm	y/mm	x/mm	y/mm	x/mm	y/mm	x/mm	y/mm
No noise	35.00	35.00	38.40	37.20	3.40	2.20	30.20	31.50	4.80	3.50
9 dB	35.00	35.00	38.70	39.70	3.70	4.70	27.90	29.60	7.10	5.40
5 dB	35.00	35.00	39.10	39.90	4.10	4.90	27.70	30.40	7.30	4.60
1 dB	35.00	35.00	38.90	40.30	3.90	5.30	30.00	98.20	5.00	63.20
0.1 dB	35.00	35.00	38.20	38.40	3.20	3.40	52.60	98.80	17.60	63.80

设缺陷的尺寸差值。

从表2可知，在添加噪声后基于 IEDI 和 BDI 的定位误差虽然都在增大，但都在可接受误差范围之内，且前者误差小于后者。由表3可知，基于 IEDI 的成像结果随着噪声强度的增大，在x和y方向的长度误差变化都较平稳，且在可接受范围之内。基于 BDI 的成像结果随着噪声强度的增大，其定量误差逐渐增大，在添加信噪比为1 dB 和 0.1 dB 的强噪声情况下，误差已在可接受范围之外。总之，损伤因子 IEDI 的对比度更高，抗噪声能力更强，成像质量更好，在对复合材料进行损伤识别和成像时具有较大的应用潜力。

4 结论

提出了一种基于经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD) 和相关系数的损伤因子，并在模拟噪声环境前后分别对玻璃纤维增强聚合物复合材料 (GFRP) 板中的分层缺陷进行了识别和扫描成像。

(1) 信号经过 EMD 分解后，与原信号相关系数最大的本征模态分量 (Intrinsic mode function, IMF) 对损伤最敏感，能够定义为识别损伤的损伤因子。并且在损伤前后的对比度高于计盒维数损伤因子 (Box counting dimension damage index, BDI)。

(2) 在模拟噪声环境中，基于本征模态能量损伤因子 (Intrinsic mode function energy damage index, IEDI) 和基于 BDI 的成像定位结果误差都在可接受范围之内，其中 IEDI 定位误差小于 BDI。随着噪声强度的增大，BDI 的成像定量误差逐渐增大。当添加信噪比为 1 dB 和 0.1 dB 的白噪声时，其成像定量误差在可接受范围之外。而 IEDI 的定量误差最大仅为 5.30 mm，在可接受范围之内。所提的 IEDI 损伤因子具有较好的抗噪声能力，可应用于对复合材料的损伤识别及成像。

参考文献：

- [1] FENG P, WANG J, WANG Y, et al. Effects of corrosive environments on properties of pultruded GFRP plates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 67: 427-433.
- [2] OPRISAN G, TARANU N, MUNTEANU V, et al. Application of modern polymer composite materials in industrial construction[J]. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy Constructions Architecture*, 2010, 3(3): 1-20.
- [3] 代礼葵, 孙耀宁, 王国建. 玻璃纤维/环氧乙烯基酯树脂复合材料环境综合因素下的冲蚀行为及机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(9): 2059-2066.
- [4] DAI Likui, SUN Yaoning, WANG Guojian. Erosion behavior and mechanism of glass fiber/epoxy vinylester composites under multiple environmental[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(9): 2059-2066(in Chinese).
- [5] 刘增华, 樊军伟, 何存富, 等. 基于概率损伤算法的复合材料板空气耦合Lamb波扫描成像[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 227-235.
- [6] LIU Zenghua, FAN Junwei, HE Cunfu, et al. Scanning imaging of composite plate using air-coupled Lamb waves based on probabilistic damage algorithm[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2015, 32(1): 227-235(in Chinese).
- [7] 张倩昀, 张华, 赵银燕. 复合材料冲击损伤监测的概率成像方法[J]. 应用声学, 2016, 35(5): 426-430.
- [8] ZHANG Qianyun, ZHANG Hua, ZHAO Yinyan. A probability imaging method of composite impact damage monitoring[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 35(5): 426-430(in Chinese).
- [9] 刘小峰, 夏宇峰, 蔡雨洋. 基于关联维数的超声Lamb波损伤成像[J]. 电压与声光, 2018, 40(1): 115-118.
- [10] LIU Xiaofeng, XIA Yufeng, CAI Yuyang. Ultrasonic lamb wave damage imaging based on correlation dimension[J]. *Piezo Electrics and Acousto Optics*, 2018, 40(1): 115-118(in Chinese).
- [11] CHANG Junjie, LU Chao, KAWASHIMA. Nondestructive material evaluation and testing based on noncontact air-coupled ultrasonics[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2015, 33(7): 532-536, 542(in Chinese).
- [12] 常俊杰, 卢超, 川嶋紘一郎. 非接触空气耦合超声波的材料无损评价与检测[J]. 浙江理工大学学报, 2015, 33(7): 532-536, 542.
- [13] CHANG Junjie, LU Chao, KAWASHIMA. Nondestructive material evaluation and testing based on noncontact air-coupled ultrasonics[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2015, 33(7): 532-536, 542(in Chinese).
- [14] 常俊杰, 杨凯, 李光亚, 等. 空耦超声波技术用于锂离子电池缺陷检测[J]. 电池, 2017, 47(5): 315-317.
- [15] CHANG Junjie, YANG Kai, LI Guangya, et al. Application of air-coupled ultrasonic technology in Li-ion battery defect detection[J]. *Battery Bimonthly*, 2017, 47(5): 315-317(in Chinese).
- [16] 常俊杰, 李媛媛, 胡宸, 等. 钢轨踏面的空气耦合超声检测方法[J]. 应用声学, 2019(3): 1-6.
- [17] CHANG Junjie, LI Yuanyuan, HU Chen, et al. Air coupled ultrasonic testing method for rail tread[J]. *Applied Acoustics*, 2019(3): 1-6(in Chinese).
- [18] 刘国强, 肖迎春, 张华, 等. 复合材料加筋壁板损伤识别的概率成像方法[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 311-319.
- [19] LIU Guoqiang, XIAO Yingchun, ZHANG Hua, et al. Probability based diagnostic imaging for damage identification of stiffened composite panel[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(2): 311-319(in Chinese).
- [20] 刘彬, 邱雷, 袁慎芳, 等. 复合材料T型接头损伤监测的概率成像方法[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3): 519-524, 593-594.
- [21] LIU Bin, QIU Lei, YUAN Shenfang, et al. Probabilistic ima-

- ging method of composite T-joint damage monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement, Diagnosis, 2015, 35(3): 519-524,593-594(in Chinese).
- [12] 刘国强,孙侠生,肖迎春,等.基于Lamb波和Hilbert变换的复合材料T型加筋损伤监测[J].复合材料学报,2014,31(3): 818-823.
- LIU Guoqiang, SUN Xiasheng, XIAO Yingchun, et al. Damage monitoring of composite T-joint using Lamb wave and Hilbert transform[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 818-823(in Chinese).
- [13] IHN J B, CHANG F K. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built in piezoelectric sensor/actuator netork: I. Diagnostics[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(3): 609-620.
- [14] 苏晨辉,姜明顺,梁建英,等.强噪声下碳纤维增强树脂复合材料结构Lamb波层析损伤成像方法[J].复合材料学报,2020, 37(4): 886-895.
- SU Chenghui, JIANG Mingshun, LIANG Jianying, et al. Lamb wave tomography damage imaging of composite structures in strong noise environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(4): 886-895(in Chinese).
- [15] QIAO Nan, WANG Lihui, LIU Qingya, et al. Multi-scale eigenvalues empirical mode decomposition for geomagnetic signal filtering[J]. Measurement, 2019, 146: 885-891.
- [16] 池永为,杨世锡,焦卫东,等.基于EMD-DCS的滚动轴承故障特征识别方法[J].振动与冲击,2020,39(9): 9-16.
- CHI Yongwei, YANG Shixi, JIAO Weidong, et al. EMD-DCS based pseudo-fault feature identification method for rolling bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(9): 9-16(in Chinese).
- [17] 陈闯,俞鹏,王银辉.基于马氏距离累积量和EMD的结构损伤识别两步法[J].振动与冲击,2019,38(13): 142-150.
- CHEN Chuang, YU Peng, WANG Yinhui. A two-step method for structural damage identification based on Mahalanobis distance accumulation and EMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 142-150(in Chinese).
- [18] 余腾,胡伍生,吴杰,等.基于小波阈值去噪与EMD分解方法提取润扬大桥振动信息[J].振动与冲击,2019,38(12): 264-270.
- YU Teng, HU Wusheng, WU Jie, et al. Extraction of Runyang bridge vibration information based on a fusion method of wavelet threshold denoising and EMD decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(12): 264-270(in Chinese).
- [19] 李秋锋,黄攀,施倩,等.基于经验模态分解去噪的粗晶材料超声检测[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(3): 566-573.
- LI Qiufeng, HUANG Pan, SHI Qian, et al. Ultrasonic testing of coarse grained materials based on EMD denoising method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(3): 566-573(in Chinese).
- [20] IMIELINSKA K, CASTAINGS M, WOJTYRA R, et al. Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: Glass, carbon and Kevlar/epoxy composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157-158: 513-522.
- [21] CASTAINGS M, CAWLEY P. The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 100(5): 3070-3077.
- [22] CASTAINGS M, HOSTEN B. Lamb and SH waves generated and detected by air coupled ultrasonic transducers in composite material plates[J]. NDT & E International, 2001, 34(4): 249-258.
- [23] 何存富,刘岳鹏,刘增华.空气耦合Lamb波在单晶硅中的传播特性和缺陷检测研究[J].机械工程学报,2015,51(12): 1-7.
- HE Cunfu, LIU Yuepeng, LIU Zenghua. Air-coupled Lamb waves propagation characteristics and defect detection in monocrystalline silicon[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 1-7(in Chinese).