

## 基于小波包能量比变化率偏差的复合材料层板空气耦合超声概率损伤成像

肖佳辰 卢超 林俊明 陈果

### Air coupled ultrasonic probabilistic damage imaging of composite laminates based on wavelet packet energy relative variation deviation

XIAO Jiachen, LU Chao, LIN Junming, CHEN Guo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201109.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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

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

复合材料学报. 2020, 37(8): 1921–1931 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191031.003>

#### 复合材料加筋壁板损伤识别的概率成像方法

Probability-based diagnostic imaging for damage identification of stiffened composite panel

复合材料学报. 2018, 35(2): 311–319 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170505.001>

#### 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

Lamb wave tomography damage imaging of carbon fiber reinforced polymer composite structures in strong noise environment

复合材料学报. 2020, 37(4): 886–895 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190628.004>

#### 基于压缩感知的复合材料板Lamb波场重构及损伤成像

Lamb wavefield reconstruction and damage imaging of composite plate based on compressed sensing

复合材料学报. 2021, 38(4): 1155–1166 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200722.004>

#### 基于阵列传感器的复合材料结构损伤MUSIC成像方法

A damage imaging method based on MUSIC algorithm of linear sensor array for composite structure

复合材料学报. 2017, 34(2): 456–462 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160616.003>

#### 考虑材料各向异性的纤维增强聚合物基复合材料板损伤Lamb波检测和定位

Detection and location of damage in fiber reinforced plastics plates by Lamb wave considering material anisotropy

复合材料学报. 2019, 36(2): 389–399 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180502.007>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

# 基于小波包能量比变化率偏差的复合材料层板空气耦合超声概率损伤成像



分享本文

肖佳辰<sup>1,2</sup>, 卢超<sup>\*1</sup>, 林俊明<sup>1</sup>, 陈果<sup>1</sup>

(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. 上饶师范学院 物理与电子信息学院, 上饶 334001)

**摘要:** 传统椭圆概率损伤成像使用信号幅值差或能量差作为特征参量, 对损伤识别不够敏感且抗噪性能较差。为提高损伤识别的敏感程度, 提出采用小波包能量比变化率偏差 (Energy relative variation deviation, ERVD) 作为损伤因子。选取合适的探头入射倾斜角度, 使用空气耦合超声探头在复合材料层板中激励单一的 Lamb 波模态, 对采集的扫查信号进行小波包分解, 根据结构损伤前后的信号特征变化选取特征频带, 计算损伤指数进行椭圆概率损伤成像, 并模拟不同噪声环境对比不同损伤因子的成像效果差异。实验结果表明, 选取小波包能量比变化率偏差作为损伤因子, 具有较强的损伤识别敏感性和抗噪性能。使用此损伤因子进行空气耦合超声概率损伤成像, 可提高复合材料损伤的定位和成像效果。

**关键词:** 空气耦合超声; 复合材料; Lamb 波; 小波包分解; 损伤因子; 概率损伤成像

**中图分类号:** TB33; TB559 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)08-2635-11

## Air coupled ultrasonic probabilistic damage imaging of composite laminates based on wavelet packet energy relative variation deviation

XIAO Jiachen<sup>1,2</sup>, LU Chao<sup>\*1</sup>, LIN Junming<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. School of Physics and Electronics Information, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China)

**Abstract:** Traditional elliptical probabilistic damage imaging uses signal amplitude difference or energy difference as characteristic parameters, which is not sensitive enough to damage identification and has poor noise resistance. In order to improve the sensitivity of damage recognition, it was proposed to use the energy relative variation deviation (ERVD) of wavelet packet as the damage factor. A single Lamb wave mode was excited by an air coupled ultrasonic probe in the composite laminate with an appropriate incidence angle of the probe. Wavelet packet decomposition was used to decompose the collected scanning signal. According to the change of signal characteristics before and after structural damage, a specific frequency band was selected. The calculated damage index was used for elliptical probability damage imaging, and the imaging effects of different damage factors were compared by simulating different environmental noise environments. The experimental results show that the wavelet packet energy ratio deviation as the damage factor has strong sensitivity to damage recognition sensitivity and noise resistance. Using this damage factor for air coupled ultrasound probabilistic damage imaging can improve the location and imaging effect of composite material damage.

**Keywords:** air coupled ultrasonic; composite; Lamb wave; wavelet packet decomposition; damage factor; probabilistic damage imaging

收稿日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-10-26; 网络首发时间: 2020-11-09 16:42:39

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201109.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (11374134; 51705231); 江西省自然科学基金 (20192ACBL20052); 江西省科技厅科技计划 (20192BCD40028); 无损检测技术教育部重点实验室开放基金 (EW201980446)

通信作者: 卢超, 博士, 教授, 研究方向为超声检测及仪器 E-mail: [luchaoniat@163.com](mailto:luchaoniat@163.com)

引用格式: 肖佳辰, 卢超, 林俊明, 等. 基于小波包能量比变化率偏差的复合材料层板空气耦合超声概率损伤成像 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2635-2645.

XIAO Jiachen, LU Chao, LIN Junming, et al. Air coupled ultrasonic probabilistic damage imaging of composite laminates based on wavelet packet energy relative variation deviation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2635-2645(in Chinese).

碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fibre reinforced plastics, CFRP) 具有质量轻、比强度高、可大面积成型等优点, 在工程领域得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。CFRP 层板由于制造工艺和外界撞击等不可控因素, 会在结构内部形成损伤, 直接影响到结构的完整性和可靠性。为保证复合材料层板的完整性和可靠性, 需对复合材料进行高效、可靠的无损检测<sup>[4-5]</sup>。

使用超声 C 扫描对 CFRP 层板结构进行逐点扫描检测时, 可获得较准确的检测结果, 但检测效率较低。超声 Lamb 波具有传播距离远、检测速度快等特点, 在复合材料无损检测中得到广泛应用。使用接触式 Lamb 波对结构进行无损检测时, 耦合状况和人为因素都会对检测结果产生影响。空气耦合超声 Lamb 波因其具有非接触、检测效率高等优点, 且在复合材料中易激励出单一模态的 Lamb 波, 近年来被广泛应用于复合材料结构的检测<sup>[6-11]</sup>。

空气耦合超声 Lamb 波损伤成像技术主要基于结构损伤前后特征参量的改变, 通过定义损伤指标并结合概率损伤等图像增强技术, 可实现损伤信息的有效表征<sup>[12-15]</sup>。在进行概率损伤成像时, 选取不同的损伤指标作为特征参量, 会对损伤的识别灵敏度和定位精度产生较大影响。因此, 选取敏感度较高的损伤指标, 对复合材料概率损伤成像具有重要意义。

目前, 已有许多研究人员使用不同的损伤指标实现复合材料概率损伤成像。严宏等<sup>[16]</sup>使用信号能量特征差异系数作为损伤指标, 结合概率统计方法实现了复合材料板结构的损伤识别。张倩昀等<sup>[17]</sup>使用能量损伤因子作为特征参量, 实现了复合材料冲击损伤的有效监测。苏晨辉等<sup>[18]</sup>基于计盒维数的 Lamb 波层析成像方法, 验证了不同噪声条件下该方法对复合材料结构定位成像的有效性, 但在环境噪声较强时定位误差变大。万陶磊等<sup>[19]</sup>采用 EMD 分解的方法, 采用 IMF 分量的能量变化定义损伤因子, 模拟了不同噪声环境下的复合材料损伤的成像, 该方法的不足是损伤成像结果不够直观, 仍需使用 6 dB 法对损伤的精确尺寸进行计算。提取有效的特征参量, 在噪声环境下实现损伤的准确成像定位, 对 CFRP 层板的实际工程检测具有较高价值。

小波包分解可以在将信号特征保留的前提下无泄漏、均匀地分解到不同频段, 通过对频段信

息的有效提取, 可以降低噪声对有效信号的影响<sup>[20]</sup>。本文基于小波包分解和概率损伤成像方法, 提出基于小波包能量比变化率偏差作为损伤因子的复合材料空气耦合 Lamb 波定位成像方法。首先, 使用小波包分解对检测信号进行分解, 通过分析特征频带信息, 选取合适的频段作为分析对象; 然后, 建立敏感的损伤因子, 实现对损伤的准确识别; 最后, 结合概率损伤成像方法对 CFRP 层板损伤进行定位成像, 分析不同损伤因子的敏感性和抗噪性能。

## 1 基于小波包分解的损伤识别

### 1.1 小波包分解理论

小波包能够根据信号的特征自适应的分解为相应频带, 每一层分解信号都包含特定的频段信息, 从而实现信号的多频率分析。当结构产生损伤时, 小波包能量对信号变化较敏感, 分解后的各频段能量也会发生变化, 通过分析特征频带的能量变化可实现对结构损伤的有效识别<sup>[21]</sup>。图 1 为信号经三层小波包分解示意图。

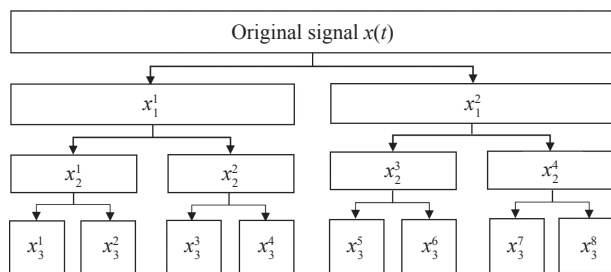


图 1 三层小波包分解示意图

Fig. 1 Diagram of three level wavelet packet decomposition

对于给定的时域信号  $x(t)$ , 经  $j$  层小波包分解后可以写为

$$x(t) = \sum_{n=1}^{2^j} x_j^n(t) \quad (1)$$

则信号  $x(t)$  的总能量为

$$E = \sum_{n=1}^{2^j} E_j^n \quad (2)$$

其中:

$$E_j^n = \int_{-\infty}^{\infty} [x_j^n(t)]^2 dt \quad (3)$$

式中,  $E_j^n$  为经  $j$  层小波包分解后第  $n$  个频带的能量。

### 1.2 损伤识别特征参量

在进行结构健康监测时, 常使用监测信号的

特征变化识别结构的健康状况。在超声检测过程中，声波遇到损伤时会产生反射、散射等现象，表现为接收信号幅值变化和能量衰减，因此经常使用信号的时域、频域幅值差或能量差作为特征参量。但在进行复合材料扫查成像时，由于扫查过程中遇到损伤时信号幅值及能量变化缓慢，变化范围大，对损伤的敏感性和抗噪能力较差，无法获得较精确的损伤成像结果。近年来，研究人员开始使用小波包能量谱的变化情况来实现结构损伤的判别，但其主要应用于土木、桥梁结构的损伤识别<sup>[22-23]</sup>。

为获得良好的成像效果，实现对损伤位置的精确识别，本文引入小波包能量比变化率偏差  $S_{\text{ERVD}}$  作为损伤指标：

$$S_{\text{ERVD}} = \sqrt{\sum_{n=1}^m (S_{\text{ERV}_n} - S_{\overline{\text{ERV}}})^2} \tag{4}$$

式中： $m$  为特征频带的数量； $S_{\text{ERV}_n}$  为第  $n$  个频带小波包能量比相对变化量 (Energy relative variation, ERV)； $S_{\overline{\text{ERV}}}$  为  $\text{ERV}_n$  的平均值。 $S_{\text{ERV}_n}$  计算如下：

$$S_{\text{ERV}_n} = \left| \frac{E_n^{\text{UD}2^j}}{\sum_{n=1}^{2^j} E_n} - \frac{E_n^{\text{DM}2^j}}{\sum_{n=1}^{2^j} E_n} \right| \tag{5}$$

式中， $E_n^{\text{UD}}$  和  $E_n^{\text{DM}}$  分别为经  $j$  层小波包分解后，健康状况下和结构损伤后第  $n$  个频带的能量分量。研究表明，结构损伤前后， $S_{\text{ERVD}}$  可对其结构状况变化进行有效识别<sup>[24]</sup>。由式 (5) 可知， $S_{\text{ERVD}}$  反映了信号特征频带的能量比变化率偏差，相比于直接比较信号能量差异，可以凸显结构能量变化的动态特性，同时可以减小噪声的影响，因此使用  $S_{\text{ERVD}}$  对损伤进行识别时具有较强的灵敏度。

2 空气耦合 Lamb 波概率损伤成像原理

使用空气耦合超声进行概率损伤成像时，采用椭圆概率损伤成像方法，图 2 为椭圆概率损伤成像算法示意图。空气耦合超声探头进行扫查成像时，将监测区域划分为多个均匀像素点，假设在各扫查方向上移动探头过程中采集  $N$  个信号，即各扫查方向上有  $N$  条激励-接收路径，则监测区域上各像素点  $(x,y)$  的概率损伤值  $P(x,y)$  为

$$P(x,y) = \sum_{i=1}^N S_i \cdot w_i [R_i(x,y)] \tag{6}$$

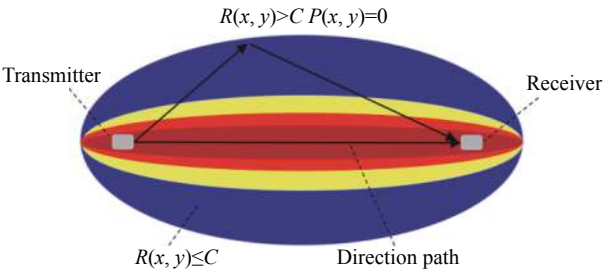


图 2 概率损伤成像算法示意图

Fig. 2 Diagram of probability damage imaging algorithm

其中，

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

式中： $S_i$  为第  $i$  条路径所对应的损伤因子； $w_i [R_i(x,y)]$  为第  $i$  条路径下各损伤因子的加权分布函数； $C$  为尺寸参数，其值为椭圆离心率的倒数。相对距离  $R_i(x,y)$  为第  $i$  条路径下像素点  $(x,y)$  到发射探头  $(x_i,y_i)$  和接收探头  $(x_j,y_j)$  距离之和与两探头间距离的比值。 $R_i(x,y)$  可表示为

$$R_i(x,y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{\sqrt{(x_j-x_i)^2 + (y_j-y_i)^2}} \tag{8}$$

本文使用空气耦合超声在 CFRP 层板两个正交方向 ( $0^\circ$ 、 $90^\circ$ ) 进行扫查，以实现 CFRP 层板的快速检测。得到各扫查方向的概率损伤分布值后，为获得更高的成像对比度，使用数据融合的方式对  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向的概率损伤值进行全乘处理，即对监测区域每个离散像素点  $(x,y)$ ，将不同方向上的损伤指数直接进行相乘运算，以得到融合后成像区域内的像素点  $P(i,j)$ ：

$$P(i,j) = P_0(x,y) * P_{90}(x,y) \tag{9}$$

式中： $P_0(x,y)$  为  $0^\circ$  方向上各像素点的概率损伤值； $P_{90}(x,y)$  为  $90^\circ$  方向上各像素点的概率损伤值。经全乘处理后，监测区域概率损伤值较大的区域就会凸显出来，从而实现 CFRP 层板损伤位置和大小表征。

3 空气耦合超声 CFRP 层板概率损伤成像

3.1 检测参数选取

使用超声 Lamb 波进行复合材料检测时，选取单一的检测模态将有利于损伤的判别。在空气耦合超声激励 Lamb 波传播过程中， $A_0$  模态能量较强且离面位移较大，选取  $A_0$  模态可对复合材料

层板损伤进行有效检测。

使用 Disperse 软件制作厚度为 4 mm 的 CFRP 复合材料层板入射角频散曲线, 如图 3 所示。可知, 在进行 CFRP 层板空气耦合超声检测时, 需将空气耦合超声发射探头和接收探头倾斜角均调整为 13°, 以激励和接收 A0 模式 Lamb 波。

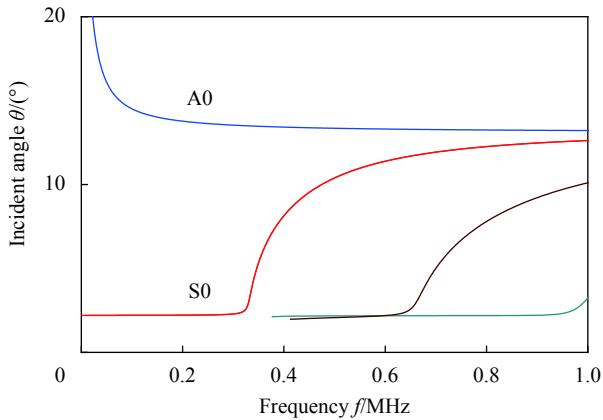


图 3 厚度为 4 mm 的碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 复合材料层板空气耦合超声入射角度频散曲线  
Fig. 3 Dispersion curve of air coupled ultrasonic incidence angle of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) composite laminate with 4 mm thickness

使用日本探头株式会社研制的空气耦合超声检测系统作为实验平台, 检测系统由 JPR-600C 信号发射接收器、空气耦合超声探头、机械扫查装置和 CFRP 层板等构成, 图 4 为空气耦合超声检测系统示意图。实验使用的 CFRP 层板尺寸为 290 mm×190 mm×4 mm, 铺层顺序为[(0/45/90/-45)]<sub>3S</sub>, 在 CFRP 层板中间加工尺寸为 10 mm×10 mm 的正方形槽型缺陷, 以模拟复合材料损伤。

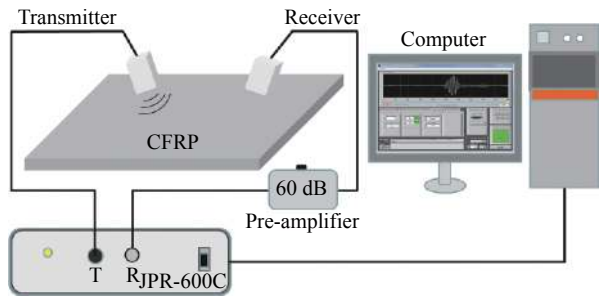


图 4 空气耦合超声检测系统示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of air-coupled ultrasonic testing system

为验证能在 CFRP 层板中激励单一的 A0 模式 Lamb 波作为检测模式, 选取晶片尺寸 14 mm×20 mm、中心频率为 0.4 MHz 的空气耦合超声探头采用一发一收的检测方式, 将发射和接收探头

倾斜角均调整为 13°, 以 0.5 mm 为间隔改变发射和接收探头的探头间距, 共采集 180 组信号。对信号进行二维傅里叶变换, 以得到实测信号的二维傅里叶变换结果图, 如图 5 所示。可知, 实测信号与理论计算结果基本一致, 即在此倾斜角下可在 CFRP 层板中激励单一的 A0 模式 Lamb 波。

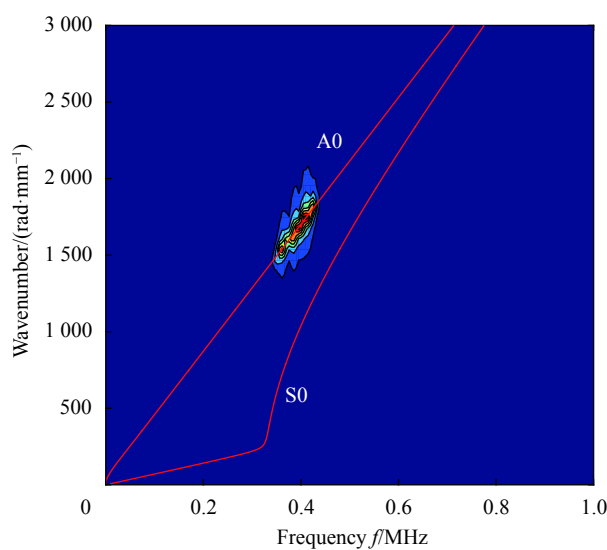


图 5 CFRP 层板二维傅里叶变换结果与理论结果对比  
Fig. 5 Comparison of two dimensional Fourier transform results with theoretical results of CFRP composite laminate

分别采集 CFRP 层板健康和损伤时的检测信号, 图 6 为不同健康状况下的时域信号。可知, CFRP 层板损伤后, 信号时域的幅值明显下降。选用 Daubechies3(db3) 小波对 CFRP 层板有、无损伤的检测信号进行三层小波包分解, 对分解后的信号计算各频带能量, 损伤前后信号各频带能量如表 1 所示。同时, 计算各分解信号及其频谱图如图 7 所示。由各频段信号能量分布可知, 结构损伤前后, 第三层分解信号中的前 3 个频带包含了信号 99% 以上的能量且能量比变化相对较大,

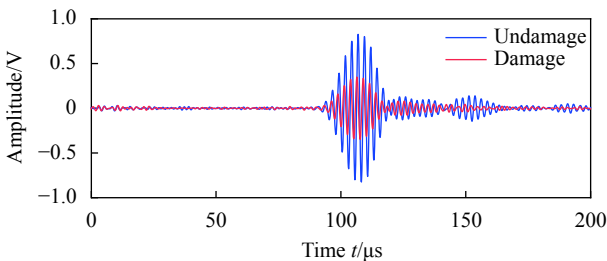


图 6 CFRP 层板 A0 模式兰姆波无损信号和损伤信号时域图  
Fig. 6 Time domain diagram of A0 mode Lamb wave undamaged signal and damage signal of CFRP composite laminate

表 1 CFRP 层板损伤前后各频段信号能量  
Table 1 Signal energy of each frequency band before and after damage of CFRP composite laminate

| Sub band | Energy before damage/V <sup>2</sup> | Energy after damage/V <sup>2</sup> | Energy ratio change/% |
|----------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| $x_3^1$  | 39.0691                             | 6.9306                             | 0.2203                |
| $x_3^2$  | 3.5042                              | 0.6390                             | 0.2091                |
| $x_3^3$  | 0.0809                              | 0.0149                             | 0.0065                |
| $x_3^4$  | 0.0080                              | 0.0017                             | 0.0036                |
| $x_3^5$  | 0.0014                              | $2.832\times10^{-4}$               | 0.0003                |
| $x_3^6$  | $1.640\times10^{-4}$                | $5.287\times10^{-5}$               | $3.123\times10^{-4}$  |
| $x_3^7$  | $2.311\times10^{-5}$                | $2.352\times10^{-5}$               | $2.559\times10^{-4}$  |
| $x_3^8$  | $2.333\times10^{-5}$                | $2.366\times10^{-5}$               | $2.572\times10^{-4}$  |

而其他频带能量和能量比变化均较小。由频谱图可知，CFRP 层板损伤前后的检测信号经三层小波包分解后，前 3 个频带包含了主要频率成分 0.4 MHz，其他频带则包含噪声等其他频段的信息，即小波包分解可实现不同频段信息的分离。

综合考虑频域信息和能量分布，选取经三层小波包分解后，检测信号的前 3 个频带  $x_3^1$ 、 $x_3^2$ 、 $x_3^3$  作为特征参量进行分析。

3.2 损伤因子定义

由 3.1 节可知，检测信号经三层小波包分解后，前 3 个频带包含了信号主要的频率和能量信息，故定义损伤因子  $S_{\text{ERVDI}}$  (Energy relative variation deviation damage index) 作为复合材料概率损伤成像的特征参量：

$$S_{\text{ERVDI}} = \sqrt{\sum_{n=1}^m (\text{ERV}_n - \overline{\text{ERV}})^2}$$

(10)

式中， $\text{ERV}_n$  为空耦探头采集的检测信号经三层小波包分解后，前 3 个特征频带  $x_3^1$ 、 $x_3^2$ 、 $x_3^3$  的能量比相对变化量，即  $m$  取 3。

3.3 基于  $S_{\text{ERVDI}}$  的空气耦合超声概率成像

使用机械扫查装置控制空气耦合超声探头，分别在 CFRP 层板的  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向以 0.5 mm 步进扫查，扫查范围为 60 mm×60 mm。以扫查区域为基准，缺陷中心坐标为 (32, 32)，根据式 (10) 计算出扫查范围内各位置损伤因子，损伤因子在各扫查方向上随距离的变化趋势如图 8 所示。可知，随着扫查位置接近损伤中心区域，损伤因子  $S_{\text{ERVDI}}$  的值逐渐增大，而无损伤区域则相对平缓。由表 1 可知，尽管在 CFRP 层板损伤前后，特征

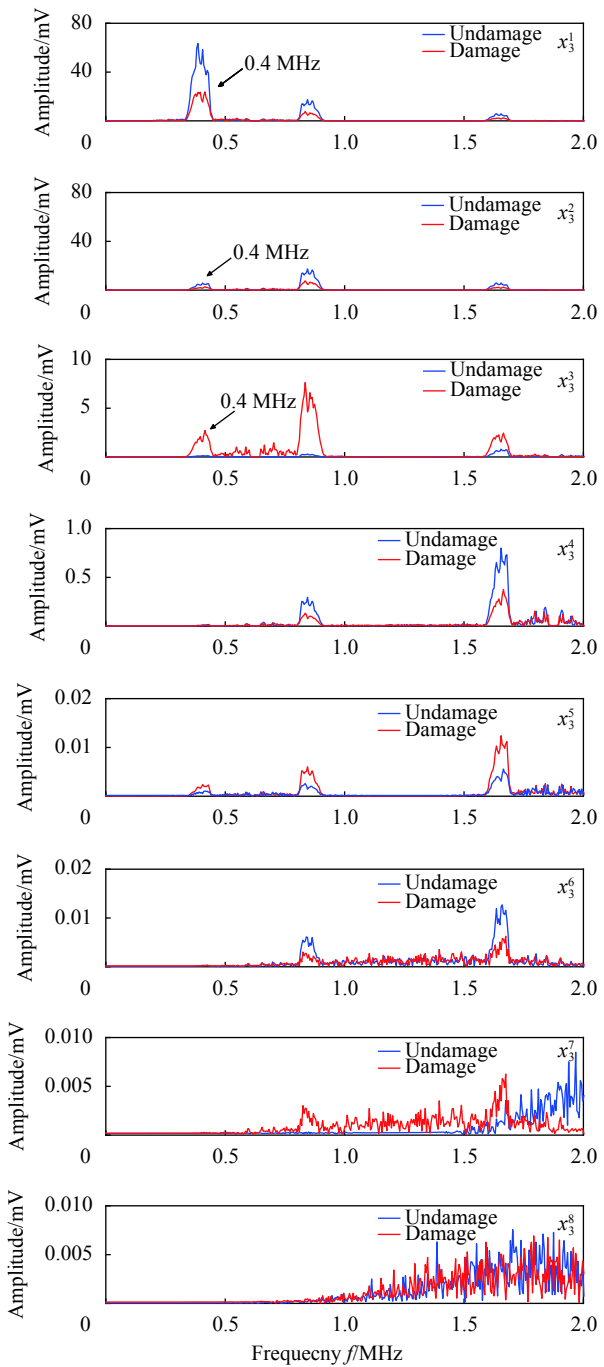


图 7 CFRP 层板小波包分解后各频段频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of each frequency band after wavelet packet decomposition of CFRP composite laminate

频带的能量比相比于能量变化较小，但计算出的损伤因子对损伤较敏感。这是由于仅采用参考信号和损伤信号对比时，无法体现检测信号整体的能量比变化趋势，经  $S_{\text{ERVDI}}$  对采集的扫查信号计算能量比变化偏差后，在健康与损伤区域损伤因子差别较大，即使用  $S_{\text{ERVDI}}$  能够对损伤区域进行有效识别。

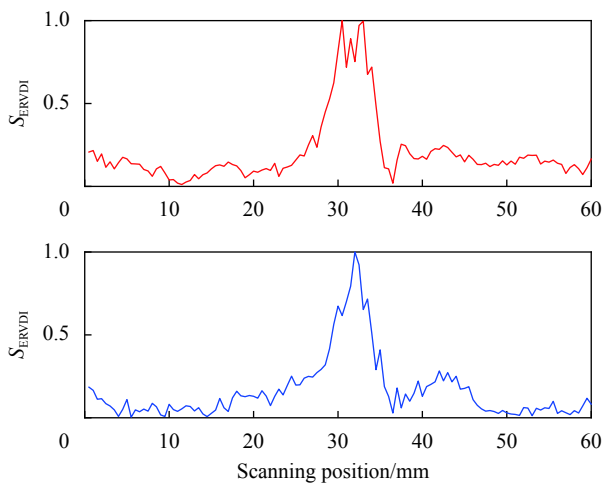


图8 CFRP层板能量比变化率偏差损伤因子 ( $S_{\text{ERVDI}}$ ) 随扫描位置变化关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of energy relative variation deviation damage index ( $S_{\text{ERVDI}}$ ) with scanning position of CFRP composite laminate

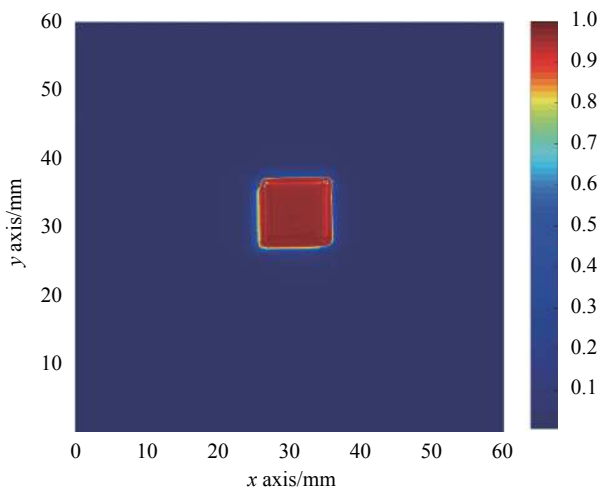
为获得精确的损伤成像尺寸，使用聚焦探头对 CFRP 层板进行超声 C 扫描成像，扫描范围为 60 mm×60 mm，图 9(a) 为超声 C 扫描结果。经超声 C 扫描得到的损伤尺寸为 11 mm×11 mm，通过此方法可获得较准确的缺陷形状和尺寸。

图 9(b) 为使用  $S_{\text{ERVDI}}$  作为损伤因子进行概率损伤扫描成像结果。与超声 C 扫描结果相比，基于  $S_{\text{ERVDI}}$  得到的概率成像在 0° 方向和 90° 方向的尺寸分别为 10.6 mm 和 10.1 mm，即采用本文定义的损伤因子  $S_{\text{ERVDI}}$  进行概率成像，能够得到损伤的位置和基本轮廓，虽然成像效果不如超声 C 扫描，但可以提高 CFRP 层板的检测效率，具有一定的工程应用价值。

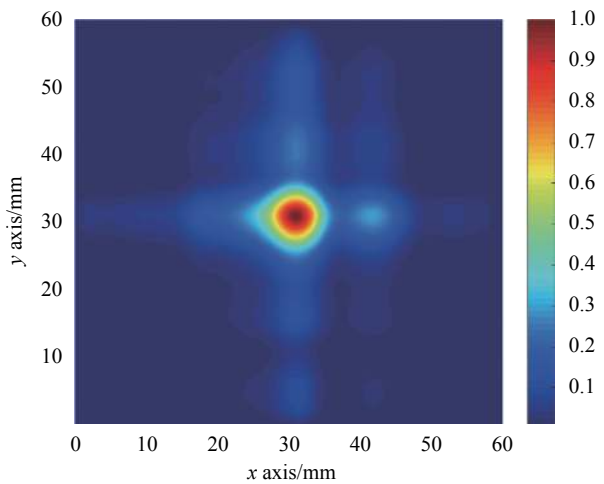
3.4 不同噪声环境下成像效果对比

在实际检测过程中，环境噪声往往会对 CFRP 层板的成像效果产生较大影响。因此，除考虑损伤因子的成像精度外，还需评价其抗噪性能，以提高其实际工程应用价值。

为确定采用的  $S_{\text{ERVDI}}$  损伤因子在不同噪声环境下的抗噪能力，对损伤和无损伤信号添加信噪比分别为 0.1 dB、1 dB、3 dB、6 dB 的白噪声以模拟强噪声、弱噪声和普通噪声环境，添加噪声后的信号如图 10 所示。可知，在强噪声 (0.1 dB) 环境下，信号的信噪比较差，在此环境下直接使用幅值或能量变化进行成像，较难获得良好的成像质量和定位精度。使用  $S_{\text{ERVDI}}$  作为损伤因子并在不同噪声下进行概率损伤成像，阈值下的成像结



(a) Ultrasonic C-scan imaging



(b) Energy relative variation deviation damage index imaging

图9 CFRP层板超声 C 扫描与能量比变化率偏差损伤因子  $S_{\text{ERVDI}}$  成像结果对比

Fig. 9 Comparison of ultrasound C-scan and energy ratio change rate deviation damage factor  $S_{\text{ERVDI}}$  imaging results of CFRP composite laminate

果如图 11 所示。

可知，在外界噪声干扰的情况下，使用  $S_{\text{ERVDI}}$  进行概率成像依然能获得良好的成像结果。可以直观看出，损伤的位置和轮廓变化较小，仅无损伤区域亮斑变化明显，与未添加噪声的成像效果接近。这是由于使用  $S_{\text{ERVDI}}$  计算损伤因子，进行小波包分解和特征频段选取时，已经将噪声和其他干扰频段去除，结合计算特征频段的能量比变化率偏差，能够准确识别损伤并获得良好的成像质量。

3.5 不同损伤因子概率损伤成像效果对比

为对比不同损伤因子的成像效果和抗噪能力，使用本文的  $S_{\text{ERVDI}}$  与文献 [19] 基于经验模态分解-

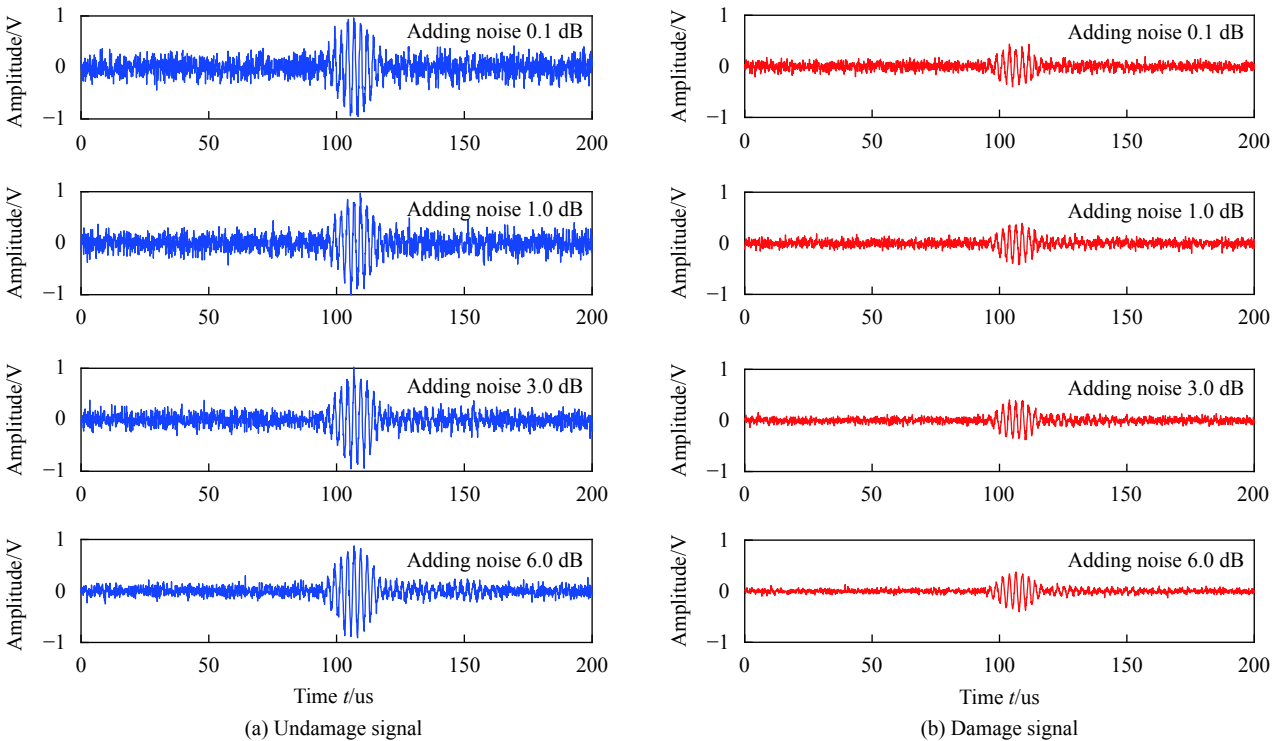


图 10 CFRP 层板有、无损信号加噪声响应信号

Fig. 10 Damage and Undamage signal adding noise response signal of CFRP composite laminate

相关系数所定义的损伤因子 (Intrinsic mode function energy damage index, IEDI) 的成像效果和抗噪性能进行对比。

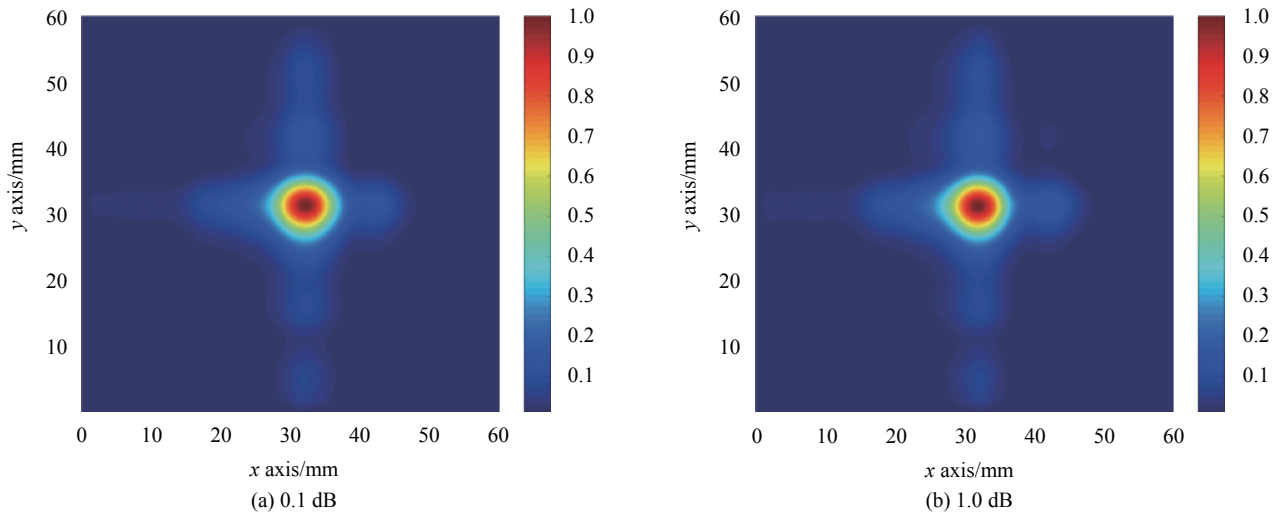
图 12 为 IEDI 在正交方向上随距离变化的关系。可知，采用 IEDI 作为损伤因子时，当探头扫描到损伤位置时，IEDI 幅值变化较明显。但由于选取信号的能量差为特征参量，IEDI 在扫描过程中变化较慢且范围大，因此成像得到的损伤区域将会远大于实际区域。图 13 为使用 IEDI 在不同

噪声环境下的成像结果。可以看出，不同噪声环境下使用 IEDI 进行成像时，噪声对损伤区域外的亮斑影响不大，但损伤区域范围变化较明显。

为对比两种损伤因子的定位能力，分别计算不同噪声环境下各损伤因子的定位结果，结果如表 2 所示。为评估定位的效果，引入绝对误差  $\varepsilon$  进行表征：

$$\varepsilon = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

(11)



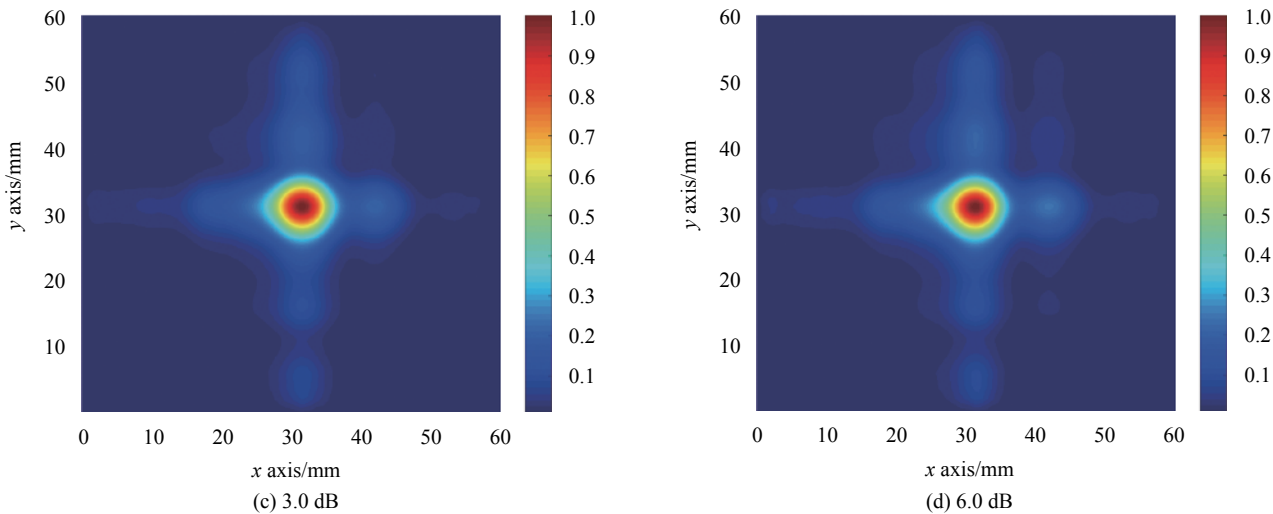


图 11 CFRP 层板  $S_{\text{ERVDI}}$  在不同环境噪声下的损伤成像

Fig. 11 Damage imaging of  $S_{\text{ERVDI}}$  of CFRP composite laminate under different environmental noises

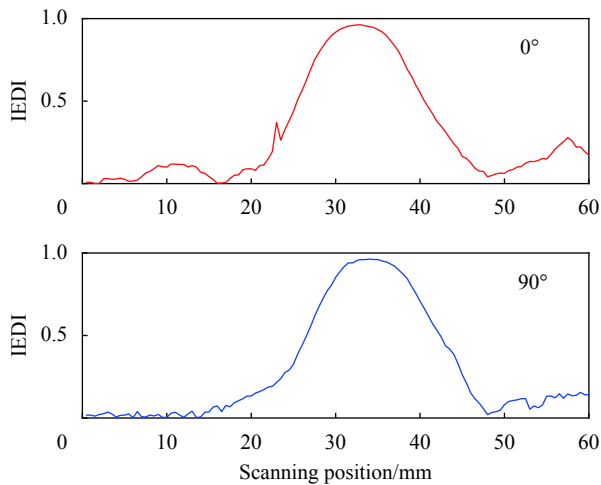


图 12 CFRP 层板基于经验模态分解-相关系数所定义的损伤因子 (IEDI) 随扫描位置变化关系曲线

Fig. 12 Relationship curves of intrinsic mode function energy damage index (IEDI) with scanning position of CFRP composite laminate

式中:  $(x_1, y_1)$  为损伤实际坐标;  $(x_2, y_2)$  为损伤因子成像定位坐标。

可知, 在不同强度的噪声环境下,  $S_{\text{ERVDI}}$  和 IEDI 均有良好的定位效果。尽管随着噪声等级增加, 损伤位置会发生改变, 但变化相对较小, 误差均可以满足实际工程应用。

为量化不同损伤因子在不同环境噪声下的定量效果, 对添加噪声前后各损伤因子成像得到的损伤尺寸进行对比。由于 IEDI 随扫描位置变化缓慢, 计算尺寸时需要使用 6 dB 法进行估计。 $S_{\text{ERVDI}}$  对缺陷较敏感, 成像结果图中能量较强区域即可

认为存在损伤, 定量对比如表 3 所示。

由表 3 可知, 当噪声环境增强后, IEDI 和  $S_{\text{ERVDI}}$  都具有较好的定量能力, 尽管  $S_{\text{ERVDI}}$  定量更准确, 但两者的误差均在接受范围之内。相比于 IEDI,  $S_{\text{ERVDI}}$  因其具有敏感的损伤识别能力, 可以得到相对准确的缺陷轮廓, 而 IEDI 得到的缺陷轮廓较大, 结果不够直观, 且在噪声环境下损伤轮廓和尺寸都改变较明显。

噪声环境影响下, 采用损伤因子成像时都会受到不同程度的影响, 但由于  $S_{\text{ERVDI}}$  对损伤的敏感性, 计算出的损伤因子波动区域不大, 定量时损伤范围变化较小, 因此得到的成像效果更良好。

综上, 使用  $S_{\text{ERVDI}}$  作为损伤因子进行概率损伤成像可以获得与实际缺陷较接近的成像效果, 且具有较强的抗噪能力, 在实际工程应用时可以获得较直观的定位成像结果, 具有较强的实用价值和意义。

#### 4 结论

(1) 采用小波包能量比变化率偏差定义的损伤因子  $S_{\text{ERVDI}}$  作为表征损伤的特征参量, 选取小波包分解后前 3 个频带进行复合材料损伤成像时, 可以获得较准确的损伤位置和成像效果。

(2)  $S_{\text{ERVDI}}$  作为损伤因子在不同噪声环境下均具有良好的成像效果, 对 10 mm 的损伤定位误差最大为 0.7 mm, 而最大定量误差仅为 0.6 mm, 其定位和定量能力可以满足实际工程应用, 能对复合材料损伤位置和大小进行较准确的表征。

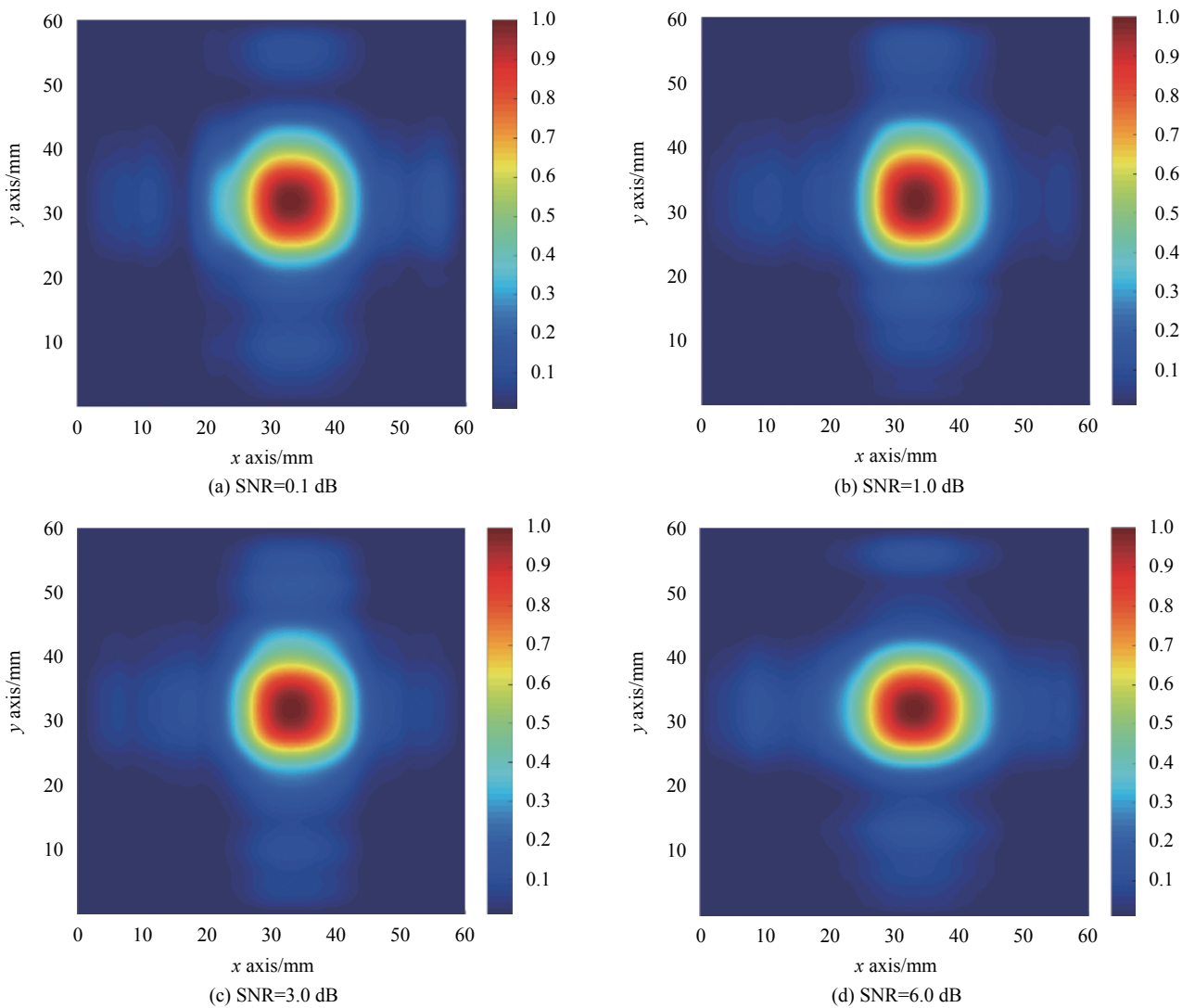


图 13 CFRP 层板 IEDI 在不同环境噪声下的损伤成像

Fig. 13 Damage imaging of IEDI of CFRP composite laminate under different environmental noises

表 2 CFRP 层板不同损伤因子定位结果对比

| Noise level | Actual position | ERVDI position | Absolute error/mm | IEDI position | Absolute error/mm |
|-------------|-----------------|----------------|-------------------|---------------|-------------------|
|             | (x,y)           | (x,y)          |                   | (x,y)         |                   |
| No noise    | (32,32)         | (31.5,32)      | 0.5               | (33,32)       | 1                 |
| 6 dB        | (32,32)         | (31.5,32)      | 0.5               | (33,32)       | 1                 |
| 3 dB        | (32,32)         | (32,31.5)      | 0.5               | (32.5,32)     | 0.5               |
| 1 dB        | (32,32)         | (32,31.5)      | 0.5               | (33.5,32)     | 1.5               |
| 0.1 dB      | (32,32)         | (32.5,31.5)    | 0.7               | (33,32)       | 1                 |

表 3 CFRP 层板不同损伤因子定量结果对比

| Noise level | Actual size |      | ERVDI size |      | Error/mm |      | IEDI position |      | Error/mm |      |
|-------------|-------------|------|------------|------|----------|------|---------------|------|----------|------|
|             | x/mm        | y/mm | x/mm       | y/mm | x/mm     | y/mm | x/mm          | y/mm | x/mm     | y/mm |
| No noise    | 10          | 10   | 10.6       | 10.1 | 0.6      | 0.1  | 15            | 16   | 5        | 6    |
| 6 dB        | 10          | 10   | 10.6       | 10.1 | 0.6      | 0.1  | 15            | 15.5 | 5        | 5.5  |
| 3 dB        | 10          | 10   | 10.6       | 10.1 | 0.6      | 0.1  | 15.5          | 15.5 | 5.5      | 5.5  |
| 1 dB        | 10          | 10   | 10.6       | 10.1 | 0.6      | 0.1  | 15            | 16.5 | 5        | 6.5  |
| 0.1 dB      | 10          | 10   | 10.6       | 10.6 | 0.6      | 0.6  | 15.5          | 16.5 | 5.5      | 6.5  |

## 参考文献:

- [1] 刘松平, 刘菲菲, 史俊伟, 等. 复合材料冲击损伤高分辨率超声成像检测与损伤行为分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 16-23.  
LIU Songping, LIU Feifei, SHI Junwei, et al. High resolution ultrasonic imaging evaluation and behavior analysis of impact damages in composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 16-23(in Chinese).
- [2] LAU Kintak, YUAN Libo, ZHOU Limin, et al. Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensor[J]. Composites Structures, 2001, 51(1): 9-20.
- [3] HUA Jiadong, LIN Jing, ZENG Liang. High-resolution damage detection based on local signal difference co-efficient model[J]. Structural Health Monitoring, 2015, 14(1): 20-34.
- [4] SURIANI M J, ALI A, SAPUAN S M, et al. Non-destructive techniques (NDT) in composite materials[J]. Key Engineering Materials, 2011, 462-463: 918-924.
- [5] GUO Weichao, ZHAO Huaishan, GAO Xinqin, et al. An efficient representative for object recognition in structural health monitoring[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 3239-3250.
- [6] LIU Zenghua, YU Hongtao, FAN Junwei, et al. Baseline-free delamination inspection in composite plates by synthesizing non-contact air-coupled Lamb wave scan method and virtual time reversal algorithm[J]. Smart Materials and Structures. 2015, 24(4): 045014.
- [7] 李骥, 李力, 邓勇刚, 等. 空气耦合超声换能器的频域声场研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 10-16.  
LI Ji, LI Li, DENG Yonggang, et al. Study on acoustic field of air-coupled ultrasonic transducer in frequency domain[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 10-16(in Chinese).
- [8] 饶璐雅, 陈果, 卢超, 等. 碳纤维复合材料层板冲击损伤的空气耦合兰姆波成像检测[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(5): 69-74.  
RAO Luya, CHEN Guo, LU Chao, et al. Imaging of CFRP plate impact damage using air-coupled lamb waves[J]. Aerospace Materials and Technology, 2017, 47(5): 69-74(in Chinese).
- [9] KAZY S R, MAZEIKA L, ZUKAUSKAS E. Investigation of accurate imaging of the defects in composite materials using ultrasonic air-coupled technique[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2011, 41(1-3): 105-116.
- [10] 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.  
CHANG Junjie, LU Chao, KAWASHIMA Kouitirou. 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).
- [11] 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.  
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 Materialiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 227-235(in Chinese).
- [12] KABBAN C M S, GREENWELL B M, DESIMIO M P, et al. The probability of detection for structural health monitoring systems: Repeated measures data[J]. Structural Health Monitoring, 2015, 14(3): 252-264.
- [13] WU Zhanjun, LIU Kehai, WANG Yishou, et al. Valiation and evaluation of damage identification using probability-based diagnostic imaging on a stiffened composite panel[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(16): 2181-2195.
- [14] 张海燕, 刘镇清, 吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中Lamb波传播特性研究中的应用[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 111-116.  
ZHANG Haiyan, LIU Zhenqing, LV Donghui. Global matrix and its application to study on Lamb wave propagation in layered anisotropic composite plates[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 111-116(in Chinese).
- [15] 刘镇清, 他得安. 用二维傅里叶变换识别兰姆波模式的研究[J]. 声学技术, 2000, 19(4): 212-214, 219.  
LIU Zhenqing, TA Dean. Mode identify of Lamb wave by means of 2D-FFT[J]. Technical Acoustics, 2000, 19(4): 212-214, 219(in Chinese).
- [16] 严宏, 周丽. 基于损伤存在概率成像方法的复合材料结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2012, 31(13): 76-80.  
YAN Hong, ZHOU Li. Damage identification of composite structures based on reconstruction algorithm for probabilistic inspection of damage[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(13): 76-80(in Chinese).
- [17] 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.  
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).
- [18] 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 Chenhui, JIANG Mingshun, LIANG Jianying, et al. Lamb wave tomography damage imaging of composite struc-

tures in strong noise environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(4): 886-895(in Chinese).

[19] 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 correlateion coefficient[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1921-1931(in Chinese).

[20] 任宜春, 张杰峰, 刘哲峰. 钢筋混凝土梁损伤的小波包识别方法[J]. *振动. 测试与诊断*, 2011, 31(5): 605-609, 665.

REN Yichun, ZHANG Jiefeng, LIU Zhefeng. Damage identification of reinforced concrete beam based on wavelet packet[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(5): 605-609, 665(in Chinese).

[21] 丁幼亮, 李爱群. 基于振动测试与小波包分析的结构损伤预警[J]. *力学学报*, 2006(5): 639-644.

DING Youliang, LI Aiqun. Structural damage early warning based on vibration testing and wavelet packet analysis[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006(5): 639-644(in Chinese).

[22] 张凯南, 张立茂, 吴贤国, 等. 基于小波包能量谱的地铁隧道健康监测预警[J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(12): 130-135.

ZHANG Kainan, ZHANG Limao, WU Xianguo, et al. Subway tunnel health alarming and warning method based on wavelet packet energy spectrum[J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(12): 130-135(in Chinese).

[23] HU Keting, LIU Zhigang, LIN Shuangshuang. Wavelet entropy-based traction inverter open switch fault diagnosis in high-speed railways[J]. *Entropy*, 2016, 18(3): 78.

[24] 王鑫, 孟昭博, 梁志闯. 基于小波包能量谱的西安钟楼木结构的损伤识别[J]. *应用力学学报*, 2020, 37(3): 1245-1252, 1403-1404.

WANG Xin, MENG Zhaobo, LIANG Zhichuang. Damaged identification of Xi'an bell tower wood structures based on wavelet packet energy spectrum[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(3): 1245-1252, 1403-1404(in Chinese).