

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413528

航空复合材料板非接触空气耦合超声导波 多损伤快速成像方法^{*}

刘 远, 彭炜亮, 卢 超, 王杰林, 郭双林

(南昌航空大学仪器科学与光电工程学院 南昌 330063)

摘 要:航空复合材料作为飞机轻量化的关键技术,在航空领域应用十分广泛。然而,在大型化、复杂化、智能化发展新形势下,复合材料非接触多损伤快速检测技术亟需突破。基于此,提出了基于希尔伯特边际谱和空气耦合超声导波复合路径交叉成像的复合材料多损伤快速成像方法。首先,通过数值模拟分析复合材料板中导波的传播特性,确定超声探头最佳入射角度以及复合材料板中导波的传播模式;其次,为解决多损伤成像易出现伪像的问题,利用空气耦合超声导波进行双正交方向扫描,采集导波沿复合材料纤维铺层方向 0° 、 45° 、 90° 及 135° 传播时的信号;接着,利用完全集成经验模式分解与自适应噪声算法并结合能量熵对原始信号的本征模式函数进行优选,以提取主要的信号分量,降低噪声的影响,然后,利用希尔伯特边际谱计算优选后信号的能量,确定损伤因子;最后,将损伤因子数组扩充为矩阵,并按正交角度分为两组,组内损伤因子矩阵相加,再组间相乘得到最终损伤图像。试验结果表明,单一损伤最大定位误差为 2.3 mm,多损伤定位误差为 12.5 mm,同时相较于逐点 C 扫描效率提高 168.9%。所提方法能够有效提升大尺寸试样的检测效率和多损伤定位精度。

关键词: 复合材料;非接触空气耦合;超声导波检测;多损伤快速检测;损伤概率成像

中图分类号: TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Multi-damage rapid imaging method of non-contact air-coupled ultrasonic guided wave for aircraft composite plates

Liu Yuan, Peng Weiliang, Lu Chao, Wang Jieli, Guo Shuanglin

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Aviation composite materials, as the key technology of aircraft lightweighting, are widely used in the field of aviation. However, under the new situation of large-scale, complex and intelligent development, there is an urgent need for breakthroughs in non-contact multi-damage rapid detection technology for composite materials. Based on this, this paper proposes a fast multi-damage imaging method for composite materials based on Hilbert marginal spectrum and air-coupled ultrasonic guided wave composite path cross-imaging. First, the propagation characteristics of the guided waves in the composite plate are analyzed through numerical simulation to determine the optimal incidence angle of the ultrasonic probe and the propagation modes of the guided waves in the composite plate; second, in order to solve the problem of artifacts that may easily appear in the multi-damage imaging, the air-coupled ultrasonic guided waves are used for scanning in double orthogonal directions, and the signals of the guided waves are captured when they propagate along the direction of composite fiber layups at 0° , 45° , 90° and 135° ; Then, the fully integrated empirical mode decomposition and adaptive noise algorithm combined with energy entropy are used to optimize the eigenmode function of the original signal in order to extract the main signal components and reduce the influence of noise, and then the Hilbert marginal spectrum is used to compute the energy of the optimized signal and determine the damage factor; finally, the array of the damage factor is expanded into a matrix and divided into two groups according to the orthogonal angle, and the matrix of the damage factor within a group the damage factor array is expanded into a matrix and divided into two groups according to the orthogonal angle, and the damage factor matrices within the groups are added together

收稿日期: 2024-11-22 Received Date: 2024-11-22

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (52365013, 52305580)、江西省自然科学基金 (20232BAB204058, 20224BAB214052)、江西省重点研发计划 (20212BBE51006) 项目资助

and then multiplied between the groups to obtain the final damage image. The experimental results show that the maximum localization error of single damage is 2.3 mm, and the localization error of multi-damage is 12.5 mm, and the efficiency of C-scanning is improved by 168.9% compared with point-by-point C-scanning. The method proposed in this paper can effectively improve the inspection efficiency and multi-damage localization accuracy of large-size specimens.

Keywords: composite material; non-contact air coupling; ultrasonic guided wave detection; multi-damage rapid detection; damage probability imaging

0 引 言

复合材料因其轻量化、高比强度、耐高温、耐腐蚀及优良的设计灵活性等优势,广泛应用于飞机机身、高速列车、风电叶片和压力容器等多个领域^[1]。然而,由于复杂制备过程中的不确定性以及极端的服役环境下遭受到的外部冲击或疲劳载荷,均不可避免地导致复合材料出现分层、孔隙、纤维断裂、和纤维屈曲和疲劳裂纹等缺陷^[2-4]。其中分层缺陷是最为常见的损伤之一^[5],分层缺陷往往会降低复合材料结构的抗压强度、刚度和阻尼性能,进而导致灾难性事故。因此,开展复合材料结构的健康监测和损伤检测技术研究显得尤为重要。

超声检测按照检测方式的不同可分为,接触式超声检测和非接触式超声检测。接触式超声检测往往需要超声探头与工件直接接触,为达到更好的检测效果,耦合剂的使用是必不可少的。但随着新型复合材料的出现及复合材料应用范围的拓展,很多情况下要求复合材料构件不能接触液体耦合剂,耦合剂的使用可能会使试样受潮或变污,且有可能渗入损伤处,严重影响构件的力学性能^[6]。非接触式超声检测能避免耦合剂的使用,其代表技术为激光超声和空气耦合超声。其中,激光超声通过材料吸收激光并将光能转化为热能,热能在结构场中又引起结构的体应变,进而产生超声波^[7]。然而,激光超声高能光束可能在复合材料表面造成不可逆的微小损伤^[8]。而空气耦合超声无需耦合剂、无接触和无二次污染等优点,在复合材料的检测中具有显著的优势。魏东等^[9]采用改进的非线性调频脉冲压缩方法提高空气耦合超声检测的信噪比,实验表明该方法能够有效提高复合材料超声 C 扫描成像质量。李博俊等^[10]为实现复合材料在役单侧检测,采用斜入射横波反射法对复合材料的脱粘缺陷进行 C 扫描成像,试验表明该方式能有效检测出缺陷与传统透射法结果一致。郭灿志等^[11]构建了一种多自由度柔性化的双机械手空气耦合超声检测系统,并对木材直板以及复合材料曲面构件进行了扫查,实验结果表明,该系统对不同形状的缺陷具有较强的复形能力。这些研究无一例外都展现出了空气耦合超声在检测复合材料损伤时的独特优势,但常规方式在检测速度上仍存在一定的局限性,如 C 扫描法的扫描范围和扫描精度与扫描时间成反比。

超声导波作为一种弹性波,具有传播距离长、振幅损失小和损伤灵敏度高等特点。利用空气耦合换能器来激发超声导波能够很好的结合两者的优势。Castaings 等^[12]将空气耦合超声换能器放置在复合材料板的同一侧,激发和接收的不同传播方向的 Lamb 波并与数值模型计算结果进行比较,结果表明空气耦合换能器能够有效激发 A_0 模态的 Lamb 波。Liu 等^[13]利用空气耦合超声换能器在碳纤维复合材料板中激发出 A_0 模态 Lamb 波,通过接收分层缺陷两端的反射波来计算时间差,能够有效确定分层损伤的大小和位置。王丙泉等^[14]为实现大部件复合材料的原位应力测量,提出基于 Lamb 波的复合材料板空气耦合超声应力方法,实验结果表明该方法在测量精度和测量重复性等方面具有显著优势。这些研究都验证了超声导波在检测复合材料缺陷方面的有效性。但通过超声导波信号来识别缺陷,难以对缺陷的大小和形状有一个直观且全面的了解。

导波损伤成像通过各类算法,能够将损伤的大小和形状通过二维图像进行直观呈现。对于复合材料的损伤成像方法主要有:层析成像^[15]、逆时偏移成像^[16]和概率成像^[17]等。其中,概率成像方法因在成像过程中无需导波在结构中的模态和群速度的空间分布等先验知识,具有计算效率高,能够有效识别复合材料结构上的各类损伤的优点而被广泛使用^[18]。Su 等^[19]提出一种基于希尔伯特能谱和 Lamb 波层析成像的损伤定位成像方法,分别通过仿真和实验实现了对复合材料损伤的定位成像。刘稳等^[20]提出一种适用于多层结构的损伤存在概率成像方法并结合虚拟时间反转技术,对多层异质金属粘接结构的内表面缺陷进行无基准的检测和精准定位成像,定位误差仅为 2.74 mm。王丹宏等^[21]提出基于 Lamb 波能量和飞行时间的损伤概率成像算法,实验结果表明,相较于基于能量损伤因子和互相关损伤因子的损伤概率成像算法,所提出的方法能够直观反映碳纤维复合材料缺陷情况,并且识别效果更优,成像误差显著减小。

使用导波对复合材料进行缺陷检测时,多数研究主要集中于损伤的定位^[22-24],损伤的定量^[25-27]和损伤的分类^[28-30]等方向上。但上述研究中大多仅以单一缺陷作为研究对象,忽略了在实际应用中复合材料多损

伤判定问题也是较为普遍的。因此,快速准确地实现多损伤定位仍是复合材料缺陷检测中需要解决的问题。综上所述,分别针对不同尺寸的单一分层缺陷和多损伤分层缺陷进行非接触快速损伤定位,提出一种基于希尔伯特边际谱和完全集成经验模态分解与自适应噪声算法 (complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)^[31]的导波复合交叉路径成像方法。通过 CEEMDAN 对超声导波信号进行分解和分量能量熵选取来降低噪声干扰,同时采用希尔伯特边际谱来表征复合材料损伤前后的信号能量差异,计算损伤指数。最后,实现对复合材料分层缺陷的快速多损伤定位成像。

表 1 复合材料板参数
Table 1 Composite plate parameters

E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
128	8.2	8.2	4.7	4.7	3.44	0.27	0.27	0.2	1 560

超声沿不同纤维铺层方向传播时的频散曲线如图 1 所示,从中可以看出超声频率在 0~300 kHz 范围内时复合材料板中导波存在 3 种基本模态,分别为对称型 S_0 和 S_1 、反对称性型 A_0 。此外,考虑到材料性能和制造工艺的限制,典型的空气耦合超声换能器的中心频率一般为 100、200、400、600 kHz 和 1 MHz,同时随着中心频率的增加,信号能量的衰减也愈加明显^[33]。因此,选取中心频率为 200 kHz 的空气耦合超声换能器来激发和接收导波,其激

1 复合材料超声导波传播特性

1.1 复合材料超声导波频散特性

在实际检测中,为了减少 Lamb 波频散带来的干扰,需要选择特定的激励频率和超声波入射角度。通过数值模拟计算软件 Dispersion Calculator 2^[32]可以确定导波模态对应的探头最佳入射角和激励频率。复合材料板共 16 层,碳纤维铺层顺序为 $[45,-45,0,90]_{2s}$ (下标“2”表示重复括号内的铺层,“s”表示对称),单层厚度为 0.15 mm,全板厚度为 2.4 mm。复合材料板性能参数如表 1 所示。表 1 中 $E_1\sim E_3$ 表示弹性模量; G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 表示剪切模量, ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 表示泊松比。

励信号为经汉宁窗调制的五周期数的正弦脉冲信号。在激励频率为 200 kHz 时,结构中主要存在 A_0 、 S_0 和 S_1 这 3 种模态。超声导波沿 0°碳纤维铺层方向传播时各模态位移波结构如图 2 所示,可以发现, A_0 模态的离面位移分量远大于其他两种模态,即 A_0 模态下会在垂直于板面上方产生较大的振动位移,因此 A_0 模态的导波从介质泄漏到空气中的振动更为明显,更易于被空气耦合换能器所接收。因此,主要使用空气耦合换能器激发和接收导波的 A_0 模态实现复合材料的损伤检测。

1.2 最佳入射角度

复合材料板中的导波模态通常是由频厚积和超声换能器的入射角度所决定。为激发出所需的 A_0 模态,需要通过 Snell 定律来确定超声换能器的最佳入射角度,计算公式如式(1)所示。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{C_{air}}{C_p}\right) \tag{1}$$

式中: C_{air} 表示为超声波在空气中的传播速度; C_p 表示为对应模态导波的相速度。

复合材料板中导波各模态的入射角与频率的关系如图 3 所示,可以发现,由于复合材料板的各向异性,不同复合材料板的方向会改变最佳入射角的大小。在 200 kHz 频率下,超声导波沿 0°、45°、90°和 135°碳纤维铺层方向的最佳入射角分别为 14.7°、14.0°、14.8°和 14.8°,不同方向下的最佳入射角度相差较小,且为简化检测步骤,统一选取 14.0°作为不同方向下的最佳入射角度。

以超声导波沿 0°碳纤维铺层方向下的信号为例,对复合材料板进行导波信号采集以验证实验中的模态是否与计算结果相一致。如图 4 所示为探头距离 10 和 15 cm

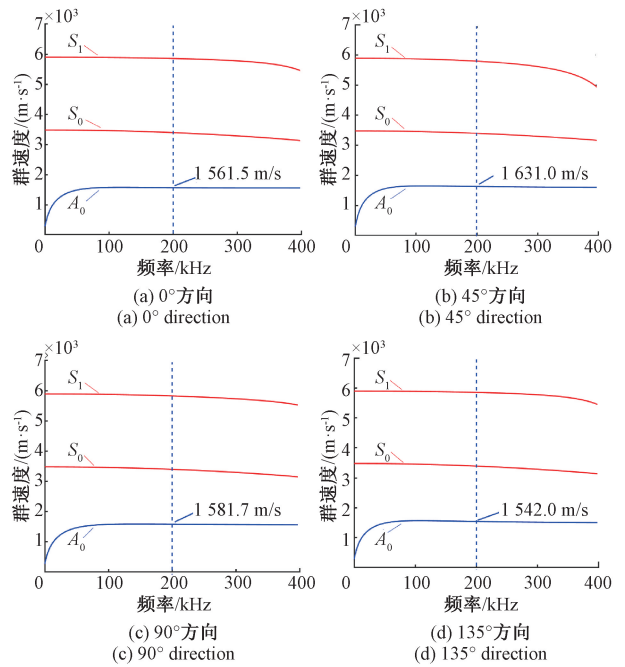


图 1 复合材料频散曲线

Fig. 1 Dispersion curve of composite material

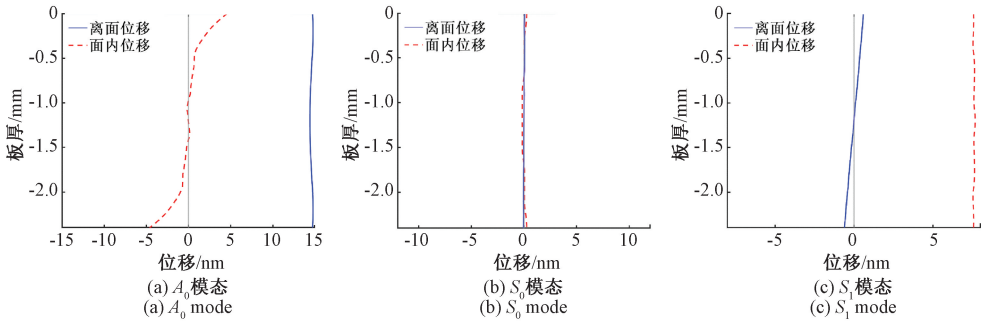


图2 各模态位移波结构

Fig. 2 Schematic diagram of displacement wave structure of each mode

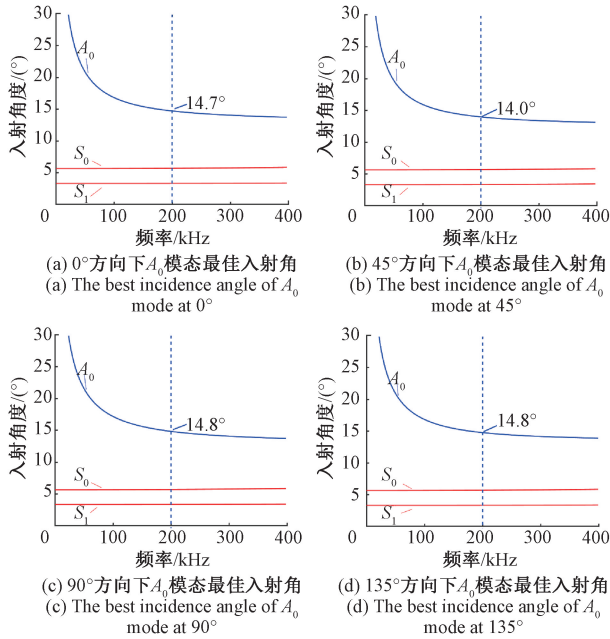
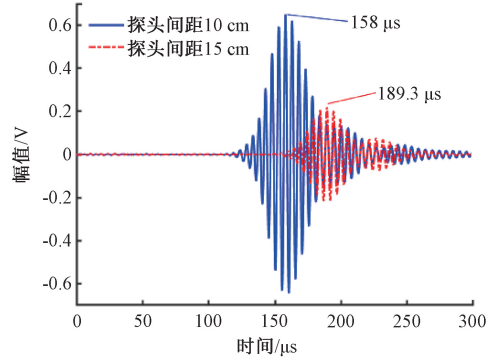
图3 A_0 模态最佳入射角Fig. 3 The best incidence angle of A_0 mode

图4 不同探头间距的接收信号

Fig. 4 Received signals at varying probe spacings

EMD 算法在处理实际信号时常常面临模态混叠、端点效应等问题,影响了分解的准确性和稳定性。为了克服这些缺点 Torres 等^[31]提出了 CEEMDAN,在 EMD 的基础上引入了自适应噪声和完全集合的概念。通过向原始信号中添加不同尺度的白噪声,然后对每个噪声信号进行 EMD 分解,最后将得到的模态函数进行集合平均,从而得到最终的 IMF 分量。这种方法不仅可以有效地抑制模态混叠现象,还能提高分解的稳定性和准确性。CEEMDAN 分解的具体过程^[35]为:

将高斯白噪声序列合并到原始信号中,得到待处理的信号。

$$s_i(t) = s(t) + \varepsilon n_i(t) \quad (2)$$

式中: $s_i(t)$ 为待处理的信号; $s(t)$ 为原始信号; ε 为信噪比控制系数; $n_i(t)$ 为若干组独立同分布的白噪声序列; $i=1, 2, \dots, N$ 。

对每个含噪信号 $s_i(t)$ 分别进行 EMD 分解,如式(3)所示,并将所有含噪信号的首个 IMF 求平均,得到第一阶 IMF1 分量,如式(4)所示。

$$IMF1_i(t) = EMD(s_i(t)) \quad (3)$$

$$IMF1(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IMF1_i(t) \quad (4)$$

时的导波信号,以两个信号波形中峰值时间来计算两个信号的时间差(分别为 158 和 189.3 μs)。两者相差 5 cm,时间差为 31.3 μs ,计算速度为 1 597.4 m/s。所得速度与频散曲线中的速度 1 561.5 m/s 接近,数值计算和实验结果相吻合。

2 超声导波复合交叉路径成像检测方法

2.1 希尔伯特边际谱计算

希尔伯特黄变换一般有两部分组成,分别为经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特变换。首先利用 EMD 将信号分解为若干个本征模态函数(intrinsic mode functions, IMF),然后对 IMF 分量进行希尔伯特变换,得到希尔伯特边际谱^[34]。然而,传统的

从原始信号 $s(t)$ 中减去第一阶 IMF1 分量,得到第 1 阶段($j=1$)的残余分量,如式(5)所示。

$$r_{j=1}(t) = s(t) - \text{IMF1}(t) \quad (5)$$

将白噪声序列添加到第 1 阶段残余分量中,如式(6)所示。

$$R_1^i(t) = r_1(t) + \varepsilon n_i(t) \quad (6)$$

将新得到的信号进行 EMD 分解,得到每组新信号的首个 IMF 分量,记为 IMF2_i,将其求平均得到第二阶 IMF2 分量,如式(7)所示。

$$\text{IMF2}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{IMF2}_i(t) \quad (7)$$

然后得到第 2 阶段的残余分量,如式(8)所示。

$$r_{j=2}(t) = r_1(t) - \text{IMF2}(t) \quad (8)$$

重复以上步骤,直到第 k 阶的残余分量不能再被分解,此时原始信号如式(9)所示。

$$s(t) = \sum_{j=1}^k \text{IMF}_j(t) + r_k(t) \quad (9)$$

对分解出来的 IMF 分量分别计算其能量熵值,计算公式如式(10)所示。

$$H(s(t)) = - \sum_{j=1}^k p(\text{IMF}_j) \ln[p(\text{IMF}_j)] \quad (10)$$

式中: $p(x)$ 为概率密度函数,即每个分量的能量占总能量的比例。

将各分量计算出来的能量熵值进行排序,选取能量熵值大小排序前 5 的分量进行后续的希尔伯特边际谱运算^[36],具体步骤为:

经过上述步骤后,得到原始信号 $s(t)$ 的 5 个 IMF 分量,记为 $c_i(t)$, $i=1,2,3,4,5$ 。对于每个 IMF 分量,定义其希尔伯特变换如式(11)所示。

$$y_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (11)$$

组合 $y_i(t)$ 和 $c_i(t)$, 构建解析信号 $z_i(t)$, 如式(12)所示。

$$z_i(t) = c_i(t) + jy_i(t) = A_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (12)$$

式中: $A_i(t)$ 为瞬时幅值; $\theta_i(t)$ 为瞬时相位,分别如式(13)和(14)所示。

$$A_i(t) = \sqrt{c_i(t)^2 + y_i(t)^2} \quad (13)$$

$$\theta_i(t) = \arctan\left(\frac{y_i(t)}{c_i(t)}\right) \quad (14)$$

同时,按照式(15)所示定义瞬时频率 $\omega_i(t)$ 。

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (15)$$

将各 IMF 的瞬时振幅视作在 $(t, \omega_i(t))$ 处的幅值,即可构建希尔伯特时频分布 $H(t, \omega)$, 如式(16)所示。

$$H(t, \omega) = \sum_{i=1}^5 A_i(t) \delta(\omega - \omega_i(t)) \quad (16)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 表示狄拉克函数。

将时频分布在时间轴上积分即得到希尔伯特边际谱,如式(17)所示。

$$h(\omega) = \int_0^T H(t, \omega) dt \quad (17)$$

2.2 损伤指数和双边缘优化

结合上述希尔伯特边际谱的计算,本研究对损伤指数(damage index, DI)进行定义,如式(18)所示。

$$DI = \left| 1 - \left(\frac{\min(E_r, E)}{\max(E_r, E)} \right)^2 \right| \quad (18)$$

式中: E_r 为扫描路径中边际谱积分最大值与最小值的平均值, E 为每个扫描路径中边际谱积分。相较于传统的损伤指数计算方式,其通过平方来扩大有损伤和无损伤之间的差距,同时,通过计算整体的最大值和最小值的平均数,避免了人为选取阈值的不确定性。

当扫描路径位于损伤边缘时,扫描路径两侧的能量分布不服从正态分布^[37]。如果不区分损伤区域的内外,使用一致的正态分布函数进行处理,这将会导致缺陷边缘成像质量差,缺陷边缘范围扩大等影响成像质量的结果。采用双概率分布函数^[38]对损伤信号边缘进行优化收窄。

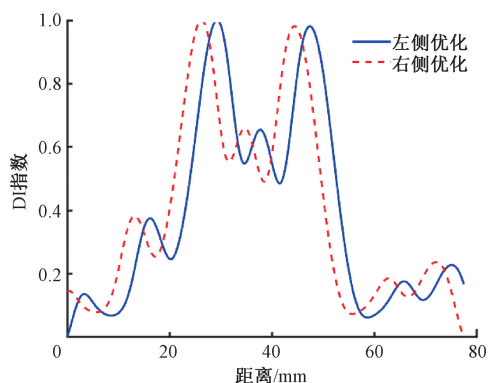
概率分布函数 $P(d)$ 如式(19)所示。

$$P(d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(d-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & d \leq \frac{D}{2}, \mu \neq 0 \\ 0, & d > \frac{D}{2} \end{cases} \quad (19)$$

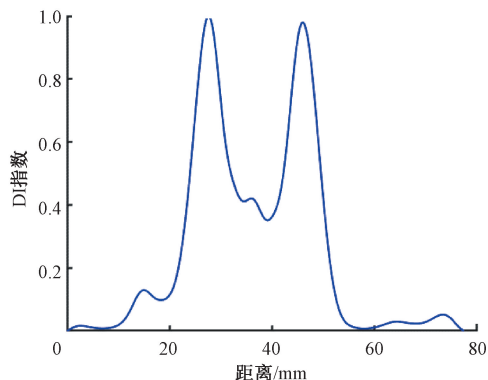
式中: d 为扫描路径到扫描区域中心线的距离; σ 用于控制损伤概率的离散程度; μ 为正态分布的中心位置; D 为超声换能器直径。选取 $\sigma=2.4$ 和 $\mu=\pm 2$ 来控制概率分布函数的偏移量,其中 $\mu=2$ 时用于优化左侧边缘,通过概率分布函数从左至右以步长为 1 与损伤指数曲线进行卷积来对左侧边缘进行收窄, $\mu=-2$ 时用于优化右侧边缘,整个步骤则是从右至左的。再将两组概率损伤指数相乘即可加强两条曲线相重合的区域,抑制其余区域,如图 5 所示。

2.3 多损伤复合交叉路径成像方法

单交叉扫描方式是在两个垂直方向进行导波信号采集后,将路径中的信号损伤指数分布线性叠加起来,以此估计扫描范围内的损伤情况,扫描方式如图 6(a) 所示。这种扫描方式相较于一般的多探头阵列成像或椭圆成像等方法,具有扫描速度快,缺陷成像清晰等优势。但当扫描区域内存在多个缺陷时,单交叉扫描方式可能会产生伪像。如图 6(b) 所示,实际缺陷为图 6 中①和②的区域,采用单交叉扫描方式后,会在①~④这 4 个区域均产生信号损伤指数的极大值,而被判断为存在 4 个缺陷。



(a) 单侧边缘优化
(a) One-sided edge optimization



(b) 双侧边缘优化
(b) Bilateral edge optimization

图5 边缘优化的损伤指数曲线

Fig. 5 Damage index curve of edge optimization

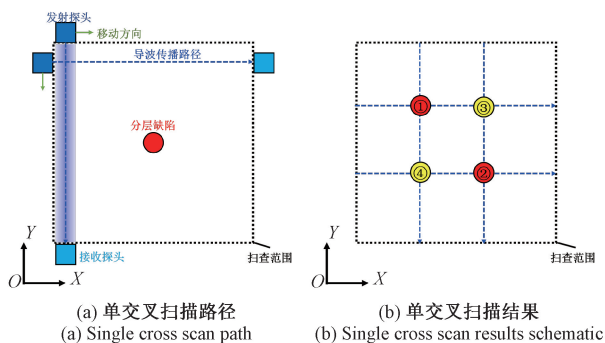


图6 单交叉扫描方式

Fig. 6 Single cross scan mode

为了改进单交叉扫描方式的缺点,本研究采用的方式为复合交叉路径成像,即在原有基础上增添一组正交扫描路径,如图7所示。新路径能够补充真实缺陷的信息,在后续的成像过程中能够提高缺陷的损伤指数,降低伪缺陷的损伤指数比重,从而抑制伪像的产生。

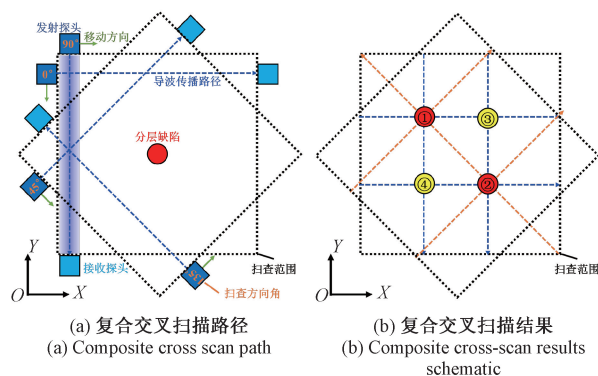


图7 复合交叉扫描方式

Fig. 7 Composite cross scan mode

同时,在传统损伤指数线性叠加的基础上,提出复合交叉路径成像方法,如式(20)所示。将各扫描角度的损伤指数曲线按行扩充为矩阵,并将相互垂直的损伤指数矩阵两两相加,再对相加后的损伤指数矩阵相乘,得到最终的成像矩阵。其优势在于垂直角度下的损伤指数矩阵先相加能够提高损伤区域内的损伤指数值,而后将两个相加后的矩阵进行相乘,能够进一步增大真实缺陷与伪缺陷之间的损伤指数差距,有效抑制伪像的产生,提高检测准确率。

$$\mathbf{M} = (\mathbf{M}_0 + \mathbf{M}_{90}) \times (\mathbf{M}_{45} + \mathbf{M}_{135}) \quad (20)$$

式中: $\mathbf{M}$ 代表损伤指数分布矩阵融合后的损伤成像矩阵; $\mathbf{M}_0$, $\mathbf{M}_{45}$, $\mathbf{M}_{90}$ 和 $\mathbf{M}_{135}$ 分别代表超声导波沿 0° 、 45° 、 90° 和 135° 碳纤维铺层方向传播的损伤指数分布矩阵。

3 实验与结果

3.1 实验样本和仪器

采用的实验样本为T700碳纤维复合材料板,其参数如表1所示。复合材料板共16层,碳纤维铺层顺序为 $[45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 90^\circ]_{2s}$,单层厚度为0.15 mm,全板厚度为2.4 mm。在复合材料板铺设预浸料过程中,在第4和第5层之间,预埋了单层厚度为0.05 mm的双层特氟龙薄膜,用来模拟分层缺陷。图8(a)中复合材料板尺寸为 $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$,板内存在3个分层缺陷,其直径分别为 $\phi 15 \text{ mm}$ 、 $\phi 10 \text{ mm}$ 和 $\phi 5 \text{ mm}$,将3个分层缺陷分区域进行检测,用于模拟单损伤试件。图8(b)中复合材料板尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$,板内存在两个分层缺陷,其直径分别为 $\phi 10 \text{ mm}$ 和 $\phi 5 \text{ mm}$,检测区域包含这两个分层缺陷,用于模拟多损伤试件。

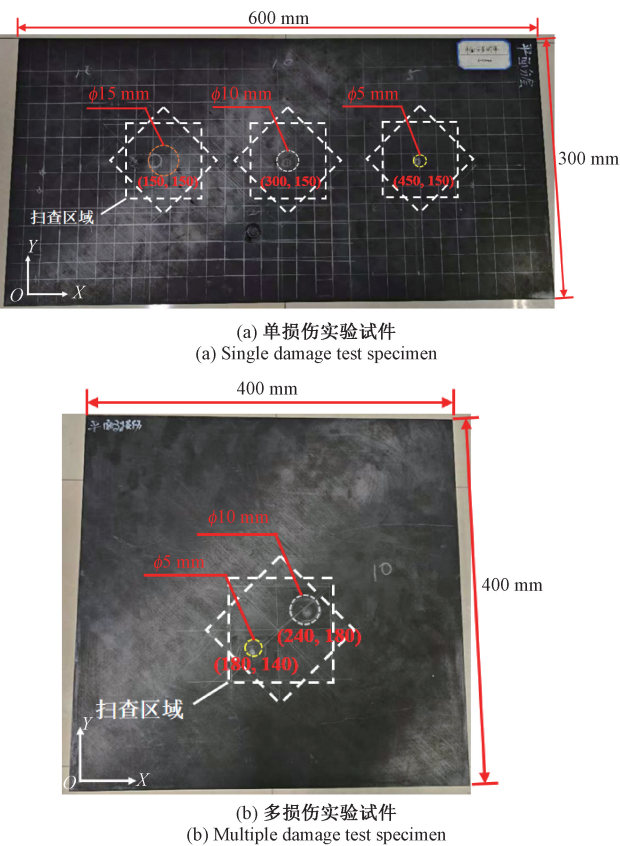


图 8 复合材料板结构
Fig. 8 Composite plate structure

实验设备为日本探头株式会社 (Japan Probe Co., Ltd.) 生产的高灵敏度非接触式空气耦合超声波检测系统,型号 NAUT21-I,软件基于 LabVIEW 开发。由控制软件、信号发生器 JPR600C、信号采集器、前置放大器、上位机和二维扫描架构成的扫描系统,如图 9 所示。

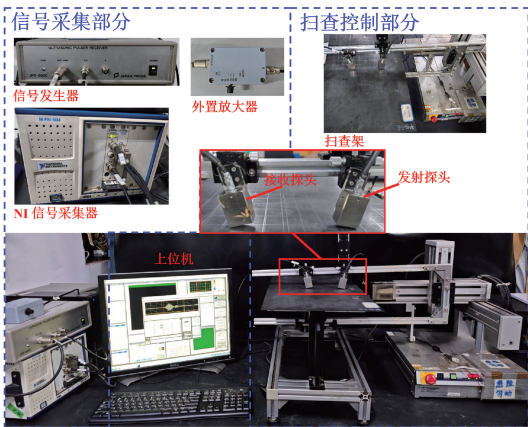


图 9 实验仪器
Fig. 9 Laboratory instrument

3.2 单一损伤和多损伤定位实验及分析

按照第 3 节所述内容,实验过程具体说明为:首先,采集复合材料板各纤维铺层方向的导波信号数据。在扫描的过程中,无损伤区域内的导波幅值的变化相对稳定,而不同尺寸损伤区域内信号幅值的变化却存在着差异,具体表现为 D1 和 D3 缺陷的导波信号在损伤边缘时信号幅值下降,而损伤中心时信号幅值上升,如图 10 所示。

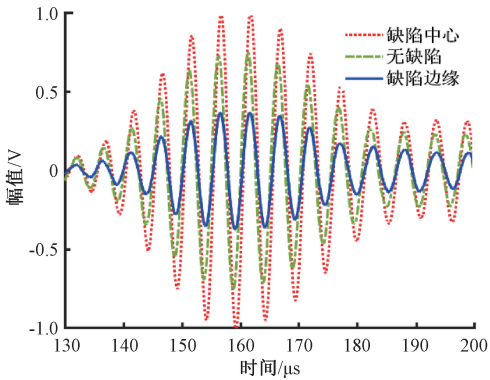


图 10 不同缺陷位置的导波信号
Fig. 10 Guided wave signals for defects at different locations

D2 缺陷的导波信号则在损伤边缘和损伤中心时均表现为信号幅值下降。不同缺陷尺寸的导波信号幅值变化不一致,分析其原因可能为试样制备工艺所导致的,经过基体材料浸润碳纤维的过程,模拟缺陷的特氟龙材料可能会与碳纤维复合材料融为一体,并因为其对超声的衰减比碳纤维材料小,造成损伤信号幅值增大。同时,由于缺陷的尺寸的原因,大尺寸 D1 缺陷中心信号幅值高于无损伤信号,而小尺寸 D3 缺陷中心信号幅值与无损伤信号相当,这为损伤的损伤指数计算带来一定的问题,后续也将通过峰值调整方式对此问题进行解决。

随后对采集到的信号进行 CEEMDAN 分解,如图 11(a)所示为 D1 无损伤区域下的信号分解,为滤除信号中噪声的干扰,对分解出来的 9 个 IMF 分量分别计算能量熵值,如图 11(b)所示,选取能量熵值大小排序前 5 的分量进行后续希尔伯特边际谱的计算。

对选取的各 IMF 分量求取瞬时频率与振幅,再将各分量进行合成,得到希尔伯特谱,边际谱则是在其基础上对时间的积分,不同位置下的导波信号边际谱如图 12 所示。

对各个导波信号的希尔伯特边际谱进行积分,以此计算各扫描路径上导波信号的损伤因子,并采用双概率分布函数对损伤边缘进行优化,如图 13 所示,展示了超声导波在 0°碳纤维铺层方向传播下 3 个不同尺寸损伤的损伤指数曲线,及其优化后的曲线。

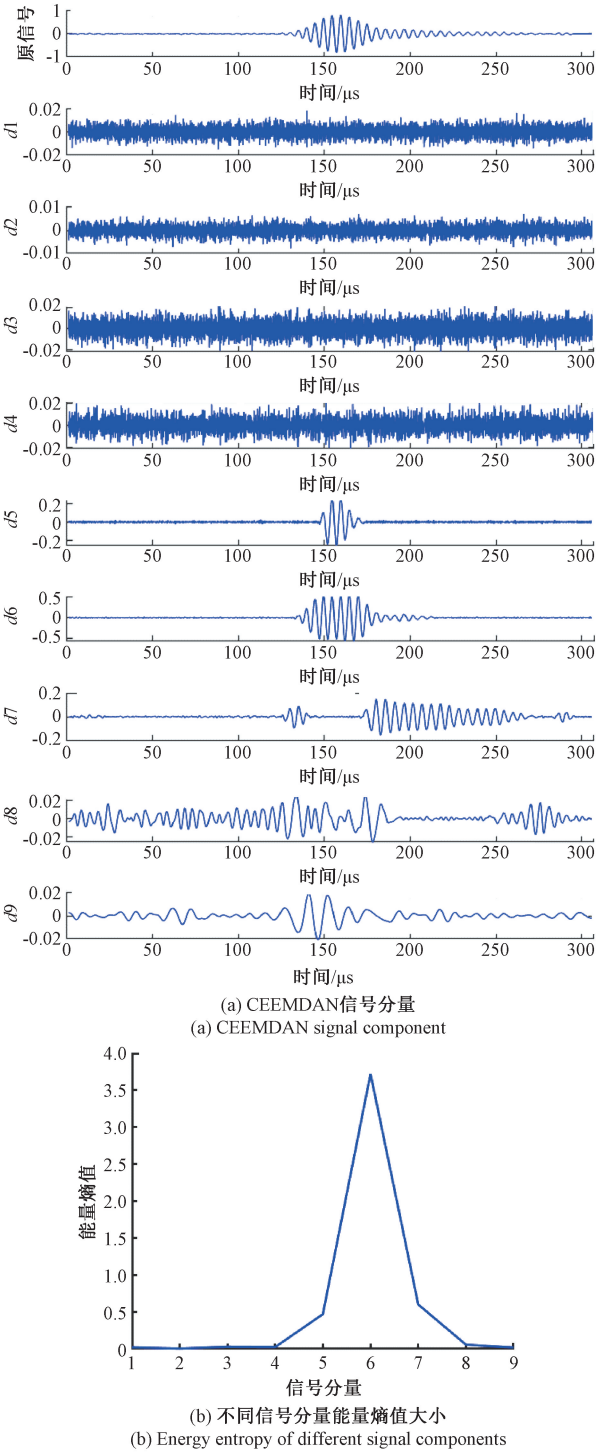


图 11 导波信号分解及信号分量排序

Fig. 11 Guided wave signal decomposition and signal component ordering

相较于原始曲线,优化后的曲线的损伤边界得以收缩,使得损伤区域的边界更精确,并且无损伤区域下的曲线大小得到了抑制,扩大了有无损伤区域之间的对比度,提高了最终成像的质量。

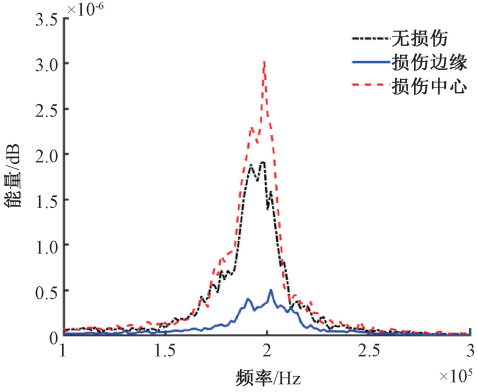


图 12 不同信号的希尔伯特边际谱

Fig. 12 Hilbert marginal spectrum for different signals

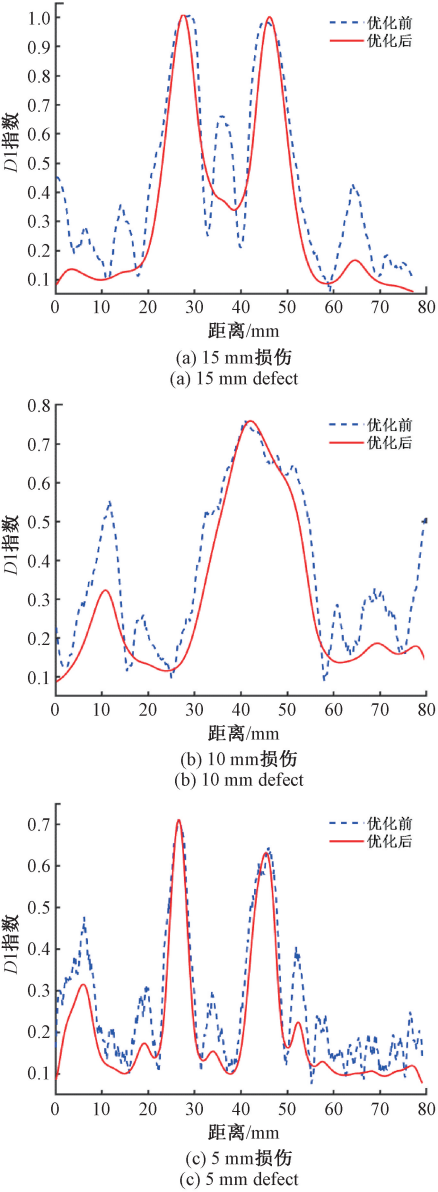


图 13 损伤指数曲线

Fig. 13 Damage index curve

由于损伤制备带来的影响,导致在扫描不同缺陷的过程中,导波信号的变化趋势并不一致。在成像中会导致 $D1$ 和 $D3$ 缺陷的边缘为高亮区域,而缺陷中心区域为暗淡区域, $D2$ 缺陷则与之相反。为保持成像结果的一致性,同时为更准确定位出缺陷中心。对各缺陷的损伤指数进行峰值调整,即确定不同扫描方向下损伤因子曲线中极大值点之间相对位置距离,如果在 3 个及以上扫描方向中,其相对距离差距 <3 mm,就以两点之间的线段为对称线,翻转损伤因子曲线在此对称线以下的部分,得到调整后的损伤指数曲线,如图 14 所示,同时为了确保损伤因子曲线的大小保持一致,将调整后的曲线等比例缩小到原始高度。此方法考虑到缺陷在不同扫描方向下的尺寸是固定的,所以不同方向下的损伤指数曲线的波峰距离同样也是固定的,而在多损伤情形下,不同的扫描方向会改变缺陷之间的相对位置,这样能够很好区分出多损伤,有效解决试样制备所带来的问题。

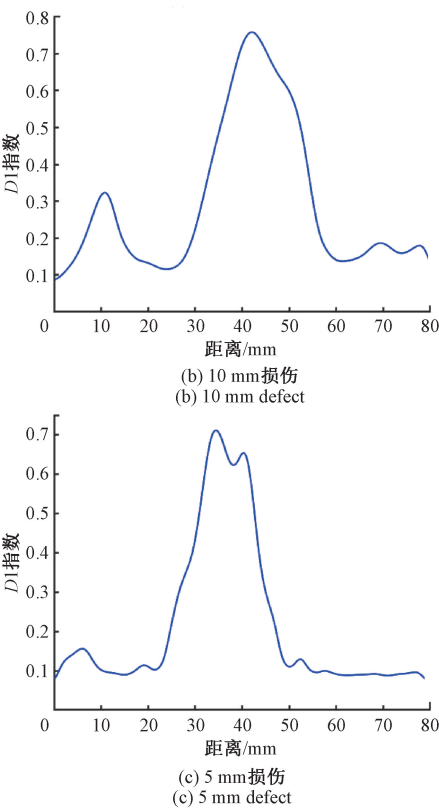
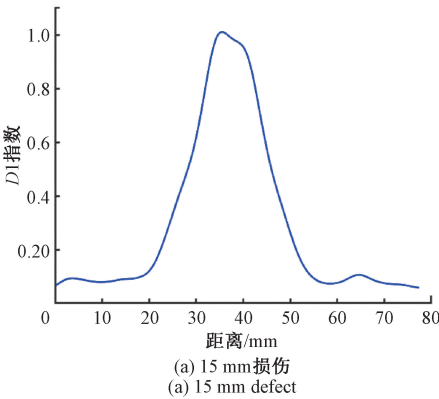


图 14 峰值调整后损伤指数曲线
Fig. 14 Peak adjusted damage index curve

在对各扫描方向下的损伤指数曲线进行峰值调整后,得到最终的损伤成像,如图 15 所示。从图 16 中的 C 扫描成像图可以观察到 $D2$ 缺陷所在区域的成像结果与 $D1$ 和 $D3$ 缺陷所在区域的成像结果存在差异,与前文中所描述的现象相一致。

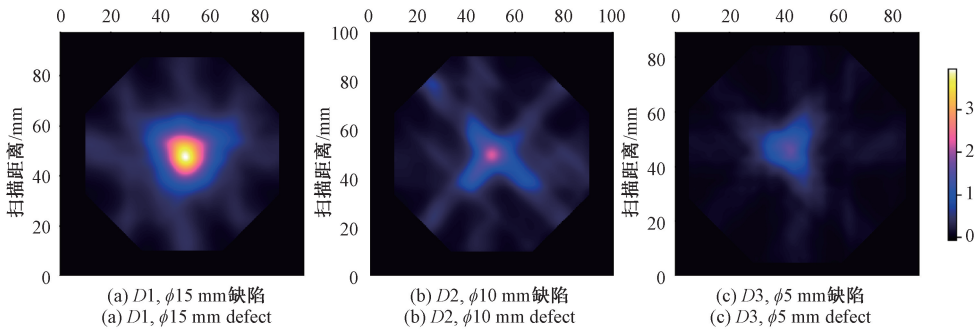


图 15 损伤成像
Fig. 15 Damage image

以 $D1$ 、 $D2$ 和 $D3$ 损伤图像矩阵中最大值作为定位损伤位置的依据,其最大值依次为 3.96、2.23 和 1.65,损伤实际位置则是扫描区域的中心位置,得到的损伤定位结果如表 2 所示。

在对单一损伤的定位基础上,同样对多损伤试样进行了超声导波信号的采集,并采用复合交叉路径成像方法对多损伤区域进行检测,成像结果如图 17 所示。对多损伤进行定位,结果如表 3 所示。

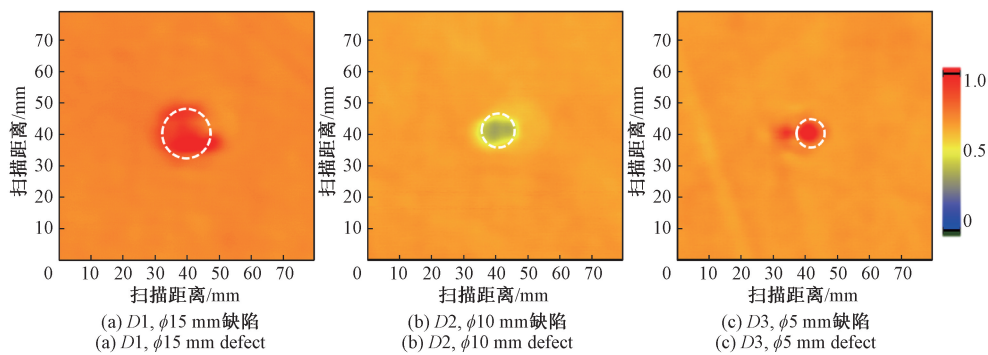


图 16 超声透射 C 扫描成像图

Fig. 16 Ultrasonic transmission C-scan imaging

表 2 单一损伤定位对比

Table 2 Single damage location comparison (mm)

损伤编号, 直径	实际位置	成像位置	定位偏差
D1, 15	(48.5, 48.5)	(49.8, 49.6)	(+1.3, +1.1)
D2, 10	(50.0, 50.0)	(49.5, 51.0)	(-0.5, +1)
D3, 5	(44.5, 44.5)	(42.2, 43.1)	(-2.3, -1.4)

同时,在对各损伤进行扫描过程中统计 C 扫描方式和复合交叉路径扫描方式的时长,通过计算整体的单位时间内扫描区域面积的大小来判断扫描方式效率的快慢,如表 4 所示。

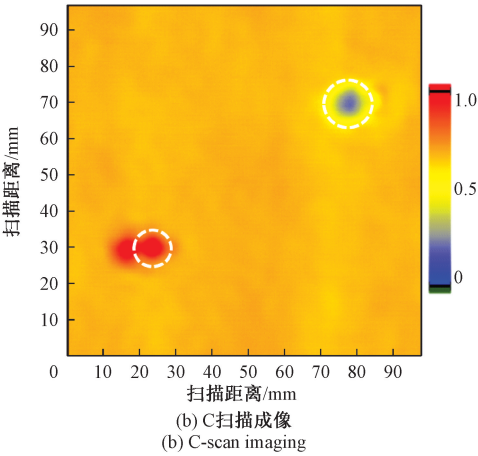
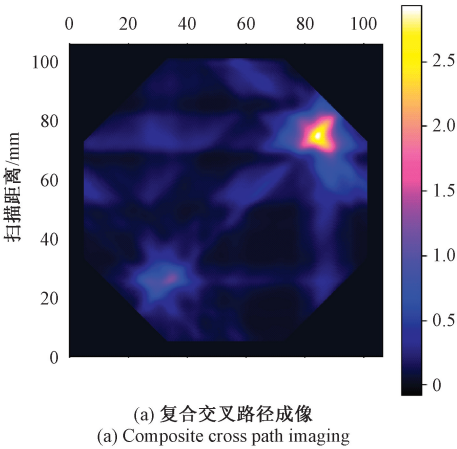


图 17 多损伤成像

Fig. 17 Imaging of multiple damages

表 3 多损伤定位对比

Table 3 Comparison of multiple damage localization (mm)

损伤编号, 直径	实际位置	成像位置	定位偏差
D1, 10	(82.0, 70.0)	(84.2, 74.8)	(+2.2, +4.8)
D2, 5	(22.0, 30.0)	(34.5, 26.1)	(+12.5, -3.9)

表 4 不同扫描方式效率对比

Table 4 Comparison of scanning mode efficiency

损伤试样	损伤编号, 直径/mm	扫描区域/mm	C 扫描时间	C 扫描单位时间扫描面积/(mm ² ·s ⁻¹)	复合交叉路径成像方式扫描时间	复合交叉路径成像方式单位时间扫描面积/(mm ² ·s ⁻¹)	单位时间扫描面积效率提升/%
单一损伤试样	D1, 15	97×97	1:31'35"	1.723	35'08"	4.634	168.9
	D2, 10	100×100	1:36'57"		36'10"		
	D3, 5	89×89	1:16'52"		32'30"		
多损伤试样	D1, 10、D2, 5	110×110	1:56'01"		38'02"		

从表4中可以看出,单一损伤最大定位误差为2.3 mm,多损伤最大定位误差为12.5 mm,同时整体的扫描效率提升168.9%。实验结果表明此方法能够很好的提高检测效率的同时对损伤进行精确定位。

4 结 论

本研究提出了一种基于希尔伯特能谱和损伤概率成像的复合材料板分层损伤成像方法,能够对于多损伤进行快速成像定位。得到如下结论:引入希尔伯特边际谱用于表征复合材料板损伤前后导波信号的能量差异,同时在对信号进行分解的过程中以能量熵的大小为指标对噪声信号进行滤除,减少了干扰;采用了自定义的损伤指数,消除了传统计算方式中人为选取阈值的不确定性,进一步增大有无损信号之间的差距,同时能够保留不同损伤原始信号之间大小比例关系,为后续成像对比带来便利;采用复合交叉路径成像方法,对于传统的单交叉路径,其增加了两个正交方向的扫描路径,在多损伤情况下能够消除伪像,减少误判;针对实际检测中损伤中心和边缘信号的差异,采用峰值调整方法和双边缘优化方法,提高了损伤成像中损伤中心和边缘的精度。综上所述,本研究提出的方法可以有效解决复合材料板分层损伤定位的相关问题,在复合材料损伤评估中的具有很大潜力。下一步工作中将聚焦于损伤的定量和损伤形状的识别等问题。

参考文献

- [1] TENG F Y, WEI J T, LYU SH SH, et al. Damage localization in carbon fiber composite plate combining ultrasonic guided wave instantaneous energy characteristics and probabilistic imaging method[J]. Measurement, 2023, 221:113443.
- [2] 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 ultrasonic phased array nondestructive testing of carbon fiber composites[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [3] 丁凯旋,陈冀景,皮一涵,等. 基于非接触光声成像的碳纤维增强复合材料冲击损伤检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4):37-45.
DING K X, CHEN J J, PI Y H, et al. Detection method for impact damage of carbon fiber reinforced composites based on non-contact photoacoustic imaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 37-45.
- [4] STAWIARSKI A. The nondestructive evaluation of the GFRP composite plate with an elliptical hole under fatigue loading conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 112:31-43.
- [5] ISLAM A S, CRAIG K C. Damage detection in composite structures using piezoelectric materials (and neural net)[J]. Smart Materials and Structures, 1994, 3(3): 318-328.
- [6] 王洪博. 复合材料构件的超声无损检测关键技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
WANG H B. Research on key technologies of ultrasonic nondestructive testing of composite components [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [7] 刘辉. 基于激光超声的金属构件裂纹定量表征技术研究[D]. 太原:中北大学, 2021.
LIU H. Quantitative characterization of cracks in metal components based on laser ultrasound [D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [8] 冯沐祺,徐启明,战宇,等. 基于激光超声的轨道钢表面裂纹双侧扫描检测[J]. 中国激光, 2024, 51(14): 142-151.
FENG M Q, XU Q M, ZHAN Y, et al. Two-side scanning detection of rail steel surface cracks based on laser ultrasound[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(14):142-151.
- [9] 魏东,周正干. 改进的非线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16):8-13.
WEI D, ZHOU ZH G. Application of improved nonlinear frequency-modulated pulse compression method in air-coupled ultrasonic detection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16):8-13.
- [10] 李博俊,李剑,艾春安,等. 空气耦合超声斜入射法检测固体火箭发动机脱粘缺陷及成像技术研究[J]. 中国测试, 2023, 49(7):139-147.
LI B J, LI J, AI CH AN, et al. Research on the detection of debonding defects and imaging technology of solid rocket motors by air-coupled ultrasonic oblique incidence method[J]. China Test, 2023, 49(7):139-147.
- [11] 郭灿志,潘琛,孙万,等. 木材缺陷双机械手空气耦合超声检测方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(22): 64-68.
GUO C ZH, PAN CH, SUN W, et al. Air-coupled ultrasonic detection method for wood defects by dual mechanical hands[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(22): 64-68.
- [12] 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.
- [13] LIU Z H, YU H T, HE C F, et al. Delamination

- detection in composite beams using pure Lamb mode generated by air-coupled ultrasonic transducer [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(5):541-550.
- [14] 王丙泉,赵勃. 复合材料板的空耦超声 Lamb 波原位应力测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8): 100-108.
- WANG B Q, ZHAO B. In-situ stress measurement method of Lamb waves of composite plate based on coupled ultrasonic technique [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8):100-108.
- [15] 陈彦华,兰从庆,许克克. 反射式超声计算机层析成像算法研究[J]. *声学学报*, 1992(4):301-307.
- CHEN Y H, LAN C Q, XU K K. Research on reflection ultrasonic computer tomography algorithm [J]. *Acta Acoustica Sinica*, 1992(4):301-307.
- [16] WANG L, YUAN F G. Damage identification in a composite plate using preattack reverse-time migration technique [J]. *Structural Health Monitoring*, 2005, 4(3):195-211.
- [17] LIU Z H, ZHANG X W, DONG T C, et al. Delamination detection in composite plates by synthesizing time-reversed Lamb waves and a modified damage imaging algorithm based on RAPID[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(5): 1-17.
- [18] 杨红娟,杨正岩,杨雷,等. 碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(8):4295-4317.
- YANG H J, YANG ZH Y, YANG L, et al. Research progress of ultrasonic damage detection and imaging methods for carbon fiber composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(8):4295-4317.
- [19] SU CH H, JIANG M SH, LIANG J Y, et al. Damage identification in composites based on Hilbert energy spectrum and Lamb wave tomography algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23):11562-11572.
- [20] 刘稳,刘立帅,项延训,等. 基于超声导波虚拟时间反转的多层异质金属粘接结构损伤定位[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(6):111-119.
- LIU W, LIU L SH, XIANG Y X, et al. Damage localization of multi-layer heterogeneous metal bonding structures based on ultrasonic guided wave virtual time reversal[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(6):111-119.
- [21] 王丹宏,叶波,段启明,等. 基于 Lamb 波能量和飞行时间的碳纤维复合材料疲劳损伤成像[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(4):205-213.
- WANG D H, YE B, DUAN Q M, et al. Fatigue damage imaging of carbon fiber composites based on Lamb wave energy and flight time[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(4):205-213.
- [22] WU ZH J, LIU K H, WANG Y SH, et al. Validation 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.
- [23] ZUO H, YANG ZH B, XU C B, et al. Damage identification for plate-like structures using ultrasonic guided wave based on improved MUSIC method [J]. *Composite Structures*, 2018, 203(11):164-171.
- [24] 许国琛,陈振华,李承庚,等. CFRP 层板低能冲击损伤的非线性兰姆波特征成像[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(10):40-47.
- XU G CH, CHEN ZH H, LI CH G, et al. Nonlinear lambert signature imaging of low energy impact damage of CFRP laminates [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(10):40-47.
- [25] WANG B, SHI W, ZHAO B, et al. A modal decomposition imaging algorithm for ultrasonic detection of delamination defects in carbon fiber composite plates using air-coupled Lamb waves[J]. *Measurement*, 2022, 195:111165.
- [26] LUO K, LIU Y J, LIANG W, et al. Rapid damage reconstruction imaging of composite plates using non-contact air-coupled Lamb waves[J]. *NDT & E International*, 2024, 143:103047.
- [27] WU D SH, YANG ZH B, RUAN Y, et al. Non-contact air-coupled transducers Lamb wave signal multipath effect and blind separation for different modes using PZT as receiver [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(10):424-434.
- [28] 武静,饶子玉,沈宇驰,等. 利用分形维数和 BP 神经网络实现超声导波缺陷分类的实验研究[J]. *机械强度*, 2024, 46(2):328-338.
- WU J, RAO Z Y, SHEN Y CH, et al. Experimental study on ultrasonic guided wave defect classification using fractal dimension and BP neural network[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46(2):328-338.
- [29] 李树清. 基于机器学习的超声导波钢轨缺陷检测[D]. 上海:上海应用技术大学, 2022.
- LI SH Q. Ultrasonic guided wave rail defect detection based on machine learning [D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Technology, 2022.
- [30] 吕瑞宏,赵晗,赵柏山,等. 基于主成分 SVM 的防腐

- 层缺陷分类识别算法研究[J]. 微处理机, 2020, 41(5):43-49.
- LYU R H, ZHAO H, ZHAO B SH, et al. Research on defect classification and recognition algorithm of anticorrosive layer based on principal component SVM[J]. Microprocessor, 2020, 41(5):43-49.
- [31] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]. 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2011:4144-4147.
- [32] HUBER A. Numerical modeling of guided waves in anisotropic composites with application to air-coupled ultrasonic inspection [D]. Augsburg: University of Augsburg, 2020:1-20.
- [33] WANG B Q, SHI W J, ZHAO B, et al. In-situ stress measurement method for CFRP plates based on the Lyapunov exponent of air-coupled ultrasonic Lamb waves[J]. Non-destructive Testing & Evaluation International, 2024, 143:103022.
- [34] MOKHTARI S A, SABZEHPARVAR M. Application of Hilbert-Huang transform with improved ensemble empirical mode decomposition in nonlinear flight dynamic mode characteristics estimation[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2019, 14(1):4042016.
- [35] 张利军. 基于深度迁移学习的复杂工况往复压缩机故障诊断方法研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2023.
- ZHANG L J. Research on fault diagnosis method of reciprocating compressor under complex working conditions based on deep transfer learning[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [36] 孙浩, 曹生慧, 吴红刚, 等. 基于希尔伯特边际谱理论的含隧道滑坡震动破坏模式研究——以隧道正交下穿主滑方向滑体为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S1):257-270.
- SUN H, CAO SH H, WU H G, et al. Research on the vibration failure mode of landslide with tunnel based on Hilbert marginal spectrum theory: A case study of a tunnel crossing the main sliding direction [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2019, 43(S1):257-270.
- [37] ZHANG H, LIU Y ZH, RUI X B, et al. Boundary-enhanced reconstruction algorithm for probabilistic inspection of composite plate defects with air-coupled Lamb waves[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(3):035019.
- [38] 刘余佳. 基于 Lamb 波的复合材料空气耦合超声检测系统研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023.
- LIU Y J. Research on air-coupled ultrasonic detection system of composite materials based on Lamb wave[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

作者简介



刘远, 2014 年和 2017 年于华东交通大学获得学士学位和硕士学位, 2021 年于华南理工大学获得博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为超声导波检测及成像、非接触超声检测。

E-mail: yuanliu@nchu.edu.cn

Liu Yuan received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from East China Jiaotong University in 2014 and 2017, and his Ph. D. degree from South China University of Technology in 2021. Now he is a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interests are ultrasonic guided wave detection and imaging, and non-contact ultrasonic detection.



卢超(通信作者), 1995 年于江西师范大学获学士学位, 1998 年于中国科技大学获得硕士学位, 2009 年于中国铁道科学研究院获得博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为声学检测。

E-mail: lurchao@163.com

Lu Chao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 1995, his M. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1998, and his Ph. D. degree from China Academy of Railway Sciences in 2009. Now he is a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interest is acoustic detection.