

# 基于压电传感器的复合材料冲击损伤定位监测研究



王霞光, 杨宇, 刘国强, 王莉, 任一鹏, 黎玮

中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065

**摘要:** 冲击损伤影响着复合材料的结构安全, 因此开展基于复合材料的冲击损伤定位监测研究有着重要意义。本文将压电传感器监测技术用于复合材料损伤监测。利用基于信号包络的能量损伤指数算法结合损伤概率成像进行损伤定位技术, 开展复合材料加筋板冲击试验的损伤定位研究。研究表明, 能量损伤指数结合损伤概率成像方法对复合材料加筋板冲击位置的定位误差小于20mm, 满足实际工程需求。

**关键词:** 压电传感器; 复合材料; 冲击定位; 损伤概率成像; 健康监测

中图分类号: V25

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.11.009

复合材料结构以承载能力强、重量轻、成形加工容易等特点在飞机中得到广泛应用。然而复合材料结构在服役过程中的各类冲击事件可能导致基体开裂、纤维断裂、分层、脱黏<sup>[1]</sup>等损伤, 相比于金属结构的损伤, 复合材料的损伤更具有隐蔽性, 难以被及时发现。这些损伤会降低结构的承载能力, 严重影响飞机结构安全。及时获知损伤位置, 避免因飞机复合材料结构未知损伤造成的结构性能下降甚至完全失效, 对飞机的正常服役和运行有着极其重要的意义。

基于压电传感器的结构健康监测是获得损伤位置信息的有效方法。该方法是以锆钛酸铅(PZT)压电传感器作为传感装置, 通过在结构中激励和接收兰姆(Lamb)波评估结构健康状态的过程。压电传感器已被广泛用于结构健康监测<sup>[2-7]</sup>。

基于压电传感器的损伤定位是指利用压电传感器阵列测量Lamb波, 通过波信号损伤特征提取, 结合损伤定位方法进行损伤位置判定的过程。目前国内外已发展出多种损伤定位方法, 根据定位原理不同, 常见的损伤定位方法有延迟累加(累乘法)、稀疏重建定位法、基于机器学习的神经网络算法等。其中, 延迟累加(累乘法)是利用多条扫查路径损伤信号的传播时间和传播速度信息计算损伤点到各个传感器的距离, 最终解算出损伤点的实际位置, 该方法需要精

确地获得Lamb波的传播速度和传播时间等参数信息<sup>[8]</sup>, 当监测复合材料结构时, 其纤维铺层方式引起的各向异性严重影响波速计算, 此外复合材料结构中常见的筋条、复杂边界等因素会使得Lamb波损伤信号中混叠反射、散射等成分, 使波的传播时间难以准确计算; 稀疏重建定位法是将检测区域网格化, 利用损伤模型结合信号扫查路径构建每个网格的损伤信号, 将损伤信号提取形成稀疏重建问题的“损伤字典库”, 再利用实际测量的损伤信号进行系数匹配重建, 获取损伤所在网格位置, 该方法需要提前构建损伤模型数据库<sup>[9-10]</sup>, 需要提前预知监测结构的损伤信号模式, 这在工程中较为困难; 神经网络算法是利用神经网络模型进行多个不同损伤位置的样本训练学习<sup>[11-12]</sup>, 通过训练的模型对新的损伤位置进行判定, 需要大量的损伤数据样本作为模型训练的输入, 损伤样本的引入将使得复材结构失去承载能力。

相比之下, 以损伤概率成像为基础的损伤定位方法无须波速、传播时间等准确的Lamb波信号特征, 也无须损伤模式和损伤样本等先决条件, 因此, 基于损伤概率成像的复合材料损伤定位方法更具有便捷性和实用性, 也更适用于复合材料结构损伤的定位评估。

本文将压电传感器监测引入复合材料加筋壁板冲击试

收稿日期: 2024-04-10; 退修日期: 2024-06-25; 录用日期: 2024-08-28

基金项目: 航空科学基金(20230046023002)

引用格式: Wang Xianguang, Yang Yu, Liu Guoqiang, et al. Research on location and monitoring of impact damage in composite materials based on piezoelectric sensors[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(11): 70-75. 王霞光, 杨宇, 刘国强, 等. 基于压电传感器的复合材料冲击损伤定位监测研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(11): 70-75.

验,通过压电传感器的信号特征结合损伤概率成像技术研究冲击损伤的定位评估方法。

## 1 基于压电传感器的复合材料冲击损伤定位监测方法

### 1.1 Lamb波损伤指数

基于压电传感器的复合材料损伤监测方法分为主动式和被动式。本文研究的为主动式监测,即以某个压电传感器作为激励源,在结构中激发Lamb波,由其他压电传感器接收信号,根据Lamb波信号的前后变化特点进行损伤评估。激励信号采用汉明(Hanning)加窗后的五波峰正弦信号,其波形如图1所示。

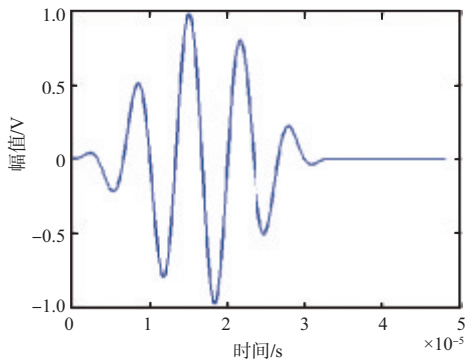


图1 五波峰激励信号

Fig.1 Five peak actuation signal

传感器激发的Lamb波在复合材料结构的传播过程中,遇到结构损伤时,通常会在损伤位置产生散射信号,两次Lamb波信号的差异反映出该段时间内结构损伤状态变化情况。在理想情况下,Lamb波信号的差异可以以幅值、传播时间、频率和相位等作为参数进行分析,但在复合材料结构损伤监测中,因Lamb波信号通常夹杂了大量边界反射、散射等成分,严重影响了幅值、传播时间、频率和相位等相关参数,使得信号分析较为困难,相比之下,从能量角度通过Lamb波信号进行处理,得到损伤指数来表征结构损伤有更高准确性和可靠性,因此本文将利用损伤指数对结构损伤进行表征,损伤指数定义见式(1)

$$DI = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (B-D)^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} B^2 dt} \quad (1)$$

式中, $B$ 和 $D$ 分别为基准信号和当前信号, $t_1$ 和 $t_2$ 为Lamb波起始时间和截止时间。因频散效应导致波形发生模式转换,通常会导致接收到的信号发生严重畸变,从而导致波形

复杂且难以直接分析。

为了降低信号的分析难度,提高信号辨识度,本文将提取信号的包络线替代原始信号进行分析,包络线的提取通过式(2)实现

$$z(t) = \sqrt{[x(t)]^2 + H[x(t)]^2} \quad (2)$$

式中, $x(t)$ 为实测信号, $H[x(t)]$ 为 $x(t)$ 的希尔伯特变换,其计算方法见式(3)

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3)$$

### 1.2 损伤概率成像定位方法

损伤概率成像定位算法是近些年发展的直接定位方法,通过计算损伤前后的扫查路径损伤指数以及与距离相关的权重系数获得损伤位置图,不需要测量波速及传播时间,也不需要前期损伤样本数据作为参考,更具有直接性,本文将以损伤概率成像定位算法研究展开冲击损伤监测研究。

损伤概率成像定位算法的基本思想是将监测区域进行均匀划分。各扫查路径的损伤指数对每个网格的像素均有一定影响概率,且影响程度随着信号传播距离的大小而减弱。因而在一条路径上以激励和接收传感器为焦点的椭圆上,损伤影响概率是相同的。对所有Lamb波激励-传感扫查路径进行损伤因子像素叠加,像素最大的点即为最可能的损伤点。对于共含有 $N$ 条激励-传感路径的监测区域,在监测区域建立平面坐标系,对每个像素点都赋予坐标,则对于像素点 $(x,y)$ 的损伤存在概率为

$$P(x,y) = \sum_{i=1}^N DI_i W_i [R_i(x,y)] \quad (4)$$

$$R_i(x,y) = \frac{D_{a,i}(x,y) + D_{s,i}(x,y)}{D_i} - 1 \quad (5)$$

$$W_i [R_i(x,y)] = \begin{cases} 1 - \frac{R_i(x,y)}{\beta}, & R_i(x,y) < \beta \\ 0, & R_i(x,y) \geq \beta \end{cases} \quad (6)$$

式中, $R_i(x,y)$ 为相对距离, $W_i [R_i(x,y)]$ 为权重系数, $D_i$ 是第 $i$ 条路径激励器与传感器之间的距离, $D_{a,i}(x,y)$ 、 $D_{s,i}(x,y)$ 分别为像素点 $(x,y)$ 到第 $i$ 条路径激励器 $a$ 和传感器 $s$ 之间的距离,如图2所示。损伤概率成像方法的定位精度依赖于权重分布函数的选择,式(6)所确定的权重函数与相对距离 $R_i$ 呈线性衰减的椭圆分布, $\beta$ 为权重参数,根据文献[13],本文中 $\beta$ 取值为0.5。

本文将在复合材料加筋壁板中开展落锤冲击试验,以落锤冲击引入损伤。通过压电信号的损伤指数结合损伤概

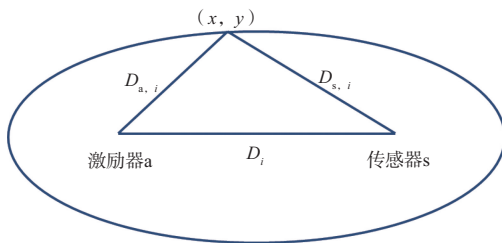


图2 相对距离示意图  
Fig.2 Diagram of relative distance

率算法进行复合材料结构的冲击损伤定位监测研究。

## 2 复合材料加筋板冲击试验

本文通过复合材料加筋板的冲击试验展开损伤定位监测研究。试验件为 T300 复合材料加筋板, 壁板尺寸为  $560\text{mm}\times 360\text{mm}\times 3\text{mm}$ , 壁板两端各设有  $80\text{mm}$  宽的夹持段, 夹持段不含筋条。中间  $400\text{mm}$  一段为加筋区域, 其上共布置三条 T 形加强筋, 加筋区尺寸如图 3 所示。

在复合材料加筋板上考核区域共对称布置 12 个压电传感器, 编号为 1~12, 如图 4 所示。其中沿 T 形加筋方向(横向)传感器间距为  $120\text{mm}$ , 跨筋方向(纵向)传感器间距为  $100\text{mm}$ 。

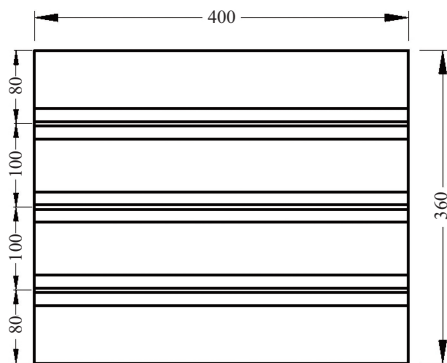


图3 复合材料加筋板尺寸(单位:mm)  
Fig.3 Dimension of reinforced composite plates(unit:mm)

采集设备为南京航空航天大学研制的多通道压电扫查系统。将纵横相邻的 4 个传感器组成一个矩形监测区域, 则共有 6 个监测区域。每个监测区域设置 6 个监测路径, 整个监测网络共设置 36 条扫查路径, 扫查路径配置见表 1, 表中扫查路径“1-2”表示 1 号传感器激励, 2 号传感器接收。各路径激励频率为  $110\sim 130\text{kHz}$ 。

冲击加载采用落锤式冲击装置, 冲击前调整落锤的高度和重量, 使落锤后的冲击能量控制在  $25\text{J}$  左右, 冲击试验

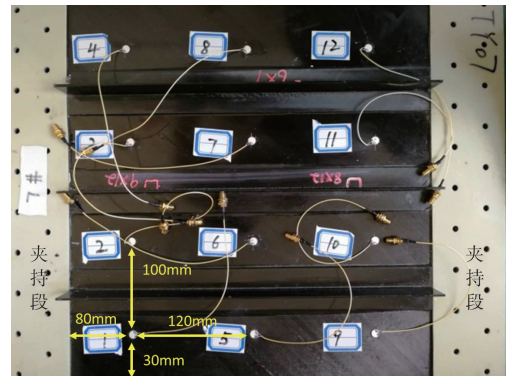


图4 压电传感器布置图  
Fig.4 Layout of pzt sensors

表1 扫查路径配置

Table 1 Configuration of scan path

监测区域	扫查路径
1	1-2, 1-5, 1-6, 2-5, 2-6, 5-6,
2	2-3, 2-6, 2-7, 3-6, 3-7, 6-7
3	3-4, 3-7, 3-8, 4-7, 4-8, 7-8
4	5-6, 5-9, 5-10, 6-9, 6-10, 9-10
5	6-7, 6-10, 6-11, 7-10, 7-11, 10-11
6	7-8, 7-11, 7-12, 8-11, 8-12, 11-12

装置如图 5 所示, 冲击装置底部装有测速装置, 根据落锤通过底部的速度可以计算出实际作用于复合材料板的真实冲击能量。试验开始时采集一组压电信号作为基准信号, 每次冲击后, 采集压电信号作为损伤信号。

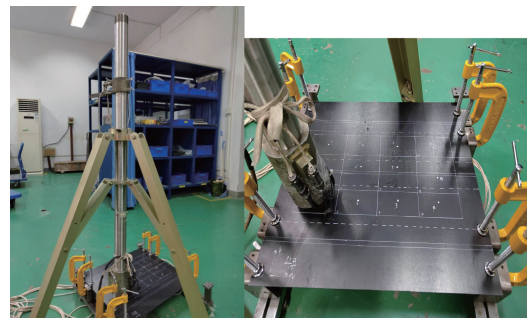


图5 冲击试验装置  
Fig.5 Device of impact test

第一次冲击在传感器 1、2、5、6 所围的矩形区域进行, 冲击能量为  $24.7\text{J}$ , 冲击前后, 测量的压电 Lamb 波信号发生了明显变化, 图 6 为路径 1-6 的时域波形图。由图 6 可以看出,  $0.4\sim 1\text{ms}$  之间的波为 5 波峰直达波, 冲击前直达波后, 直达波发生了明显的差异, 冲击后的直达波前半段 ( $0.7\text{ms}$  前) 与冲击前信号波形几乎一致, 但过了  $0.7\text{ms}$  后, 冲击后的波



形出现了幅值衰减,1ms后,波形出现了明显的幅值和相位差异。这说明在直达波传播过程中,受到冲击点的影响,复合材料壁板出现了一定程度的损伤现象,并且可以推断出,损伤位置在传感器1-6的连线处不远。

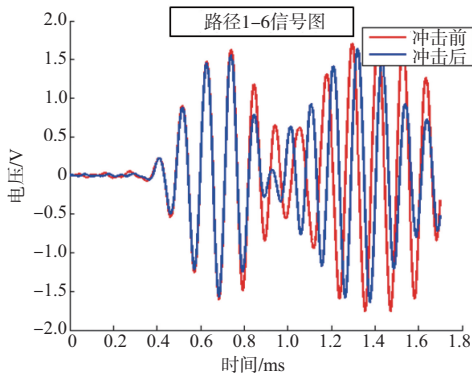


图6 扫描路径1-6信号图  
Fig.6 Signal diagram of sensor path 1-6

为了充分对比传感器所围矩形区域内的各条路径信号差异程度,对各条路径做损伤指数计算,图7为损伤指数柱状图。由图7可知,最大损伤指数出现在路径1-6,最大指数值为0.054,其余路径损伤指数相差不大,最小损伤指数出现在路径5-6,最小指数值为0.021。相比较而言,损伤最可能出现在路径1-6连线附近。

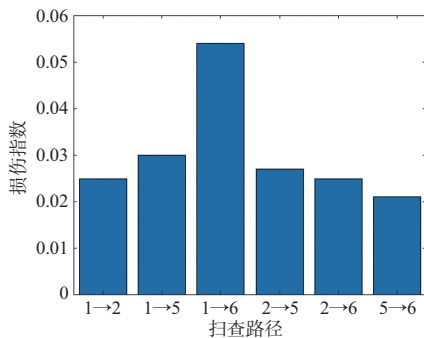


图7 损伤指数柱状图  
Fig.7 Bar chart of damage index

采用损伤概率成像方法对冲击区域进行损伤定位,定位结果如图8所示,图中绿色圆圈和蓝色十字分别代表实际冲击位置和损伤监测定位出的冲击位置。成像结果以归一化像素呈现,深红色区域像素值高,表示最可能的损伤区域。可以看出,基于损伤概率成像定位的损伤位置与实际冲击点位置较为接近,误差小于16mm。

本文试验共进行了5次冲击,其他4个区域进行冲击的

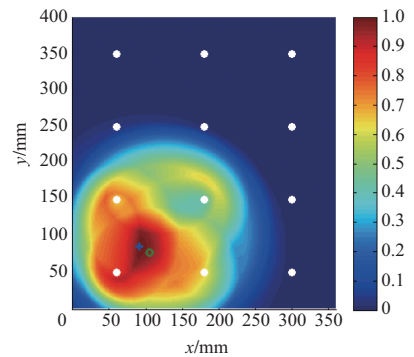


图8 冲击点1损伤定位结果图( $e=15.9531\text{mm}$ )

Fig.8 Damage location results of impact point 1( $e=15.9531\text{mm}$ )

损伤概率成像定位结果如图9~图12所示。可以看出,4次冲击的损伤定位结果与实际冲击位置比较接近,红色区域明显集中于实际冲击位置。

表2所列为5次冲击的损伤结果。可以看出,5次冲击后均出现了分层损伤现象,最大分层面积为 $243\text{mm}^2$ ;最小分层面积为 $135\text{mm}^2$ 。5次损伤定位结果可知,定位结果误差均小于20mm,最大误差为17.7mm,出现在冲击点2;最小定位误差为12.3mm,出现冲击点3。

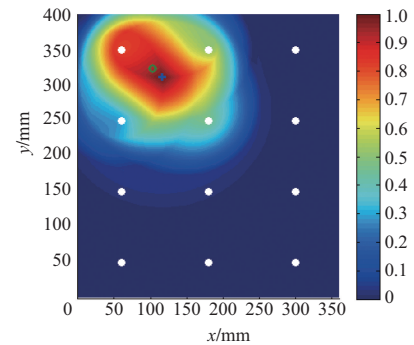


图9 冲击点2损伤定位结果图( $e=17.6777\text{mm}$ )

Fig.9 Damage location results of impact point 2( $e=17.6777\text{mm}$ )

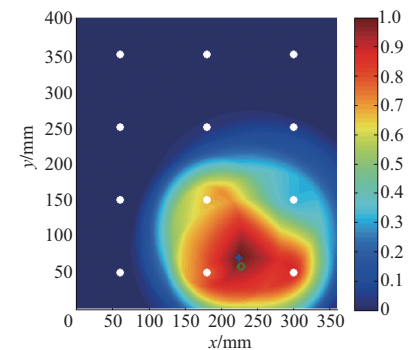


图10 冲击点3损伤定位结果图( $e=12.3491\text{mm}$ )

Fig.10 Damage location results of impact point 3( $e=12.3491\text{mm}$ )



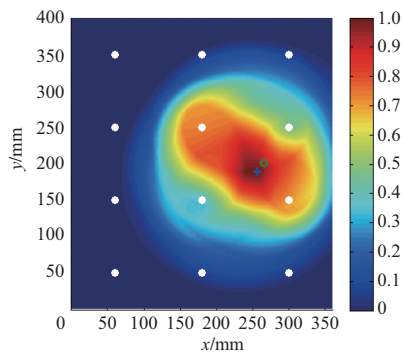
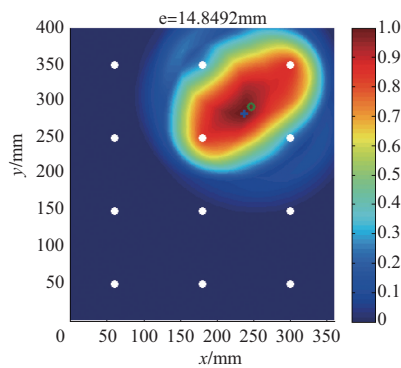
图11 冲击点4损伤定位结果图( $e=14.9164\text{mm}$ )Fig.11 Damage location results of impact point 4( $e=14.9164\text{mm}$ )图12 冲击点5损伤定位结果图( $e=14.8492\text{mm}$ )Fig.12 Damage location results of impact point 5( $e=14.8492\text{mm}$ )

表2 冲击损伤结果

Table 2 Impact damage result table

冲击点	冲击能量/J	分层面积/ $\text{mm}^2$	定位误差/mm
1	24.7	189	15.9
2	25.6	178	17.7
3	24.7	135	12.3
4	24.1	196	14.9
5	23.9	243	14.8

鉴于复合材料的各向异性和加筋等结构影响,冲击分层区域的中心点并不总在实际冲击位置,而可能呈现一定的偏移,在此意义上,损伤定位误差是满足工程需要的。

复合材料加筋板冲击试验结果表明,基于压电传感器的健康监测可以有效应用于复合材料冲击损伤定位中,定位结果误差小于20mm。

### 3 结论

本文讨论了基于压电传感器的结构健康监测的优势,并通过损伤指数以及损伤概率成像定位算法描述了基于压电传感器的监测在复合材料冲击损伤定位中的具体方法,

最后通过复合材料加筋板进行冲击试验的损伤定位验证。可以得到以下结论:

(1)基于压电传感器的结构健康监测可以有效应用于复合材料冲击损伤定位监测。

(2)基于损伤概率成像定位方法结合能量损伤指数在复合材料加筋板冲击试验中定位误差小于20mm。

(3)本文方法可以用到复合材料工程结构的损伤监测中,实现服役结构的监测。

AST

### 参考文献

- [1] 赵奕斌. 复合材料结构损伤修理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.  
Zhao Yibin. Structural damage repair of composite materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [2] Kessler S, Spearing S, Soutis C. Damage detection in composite materials using lamb wave methods[J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11: 269-278.
- [3] Qing Xinlin, Chan Hianleng, Beard S. et al. An active diagnostic system for structural health monitoring of rocket engines [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17: 619-628.
- [4] Ihn J, Chang F K. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: diagnostics [J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13 (3): 609-620.
- [5] Giurgiutiu V, Zagral A, Bao J J. Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2002, 1(1):41-61.
- [6] 李嘉欣, 吕帅帅, 杨宇, 等. 基于导波和知识迁移的结构损伤识别方法研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(5):54-60.  
Li Jiaxin, Lyu Shuaishuai, Yang Yu, et al. Research on structural damage identification method based on guided waves and knowledge transfer [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (5): 54-60. (in Chinese)
- [7] 安雨晴, 杨宇, 王莉. 一种基于广义回归神经网络的裂纹扩展定量监测模型[J]. 航空科学技术, 2023, 34(3):40-48.  
An Yuqing, Yang Yu, Wang Li. A quantitative monitoring model for crack propagation based on generalized regression neural network [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34 (3): 40-48. (in Chinese)

- [8] 邱雷. 基于压电阵列的飞机结构监测与管理系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
Qiu Lei. Research on aircraft structure monitoring and management system based on piezoelectric array [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [9] 申传俊, 王悦民, 周方俊, 等. 基于匹配追踪的导波检测信号缺陷识别方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(1):4.  
Shen Chuanjun, Wang Yuemin, Zhou Fangjun, et al. Method for identifying defects in guided wave detection signals based on matching tracking [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40 (1): 4. (in Chinese)
- [10] 冯勇明. 基于Lamb波的航空复合材料板结构损伤识别技术方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
Feng Yongming. Research on damage identification technology for aerospace composite plate structures based on lamb waves [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [11] 万小朋, 王军强, 赵美英. 基于模态频率和神经网络的结构损伤检测[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(2):4.  
Wan Xiaopeng, Wang Junqiang, Zhao Meiyong. Structural damage detection based on modal frequency and neural networks [J]. Journal of Northwest Polytechnical University, 2003, 21 (2): 4. (in Chinese)
- [12] 张宇, 闫云聚, 余龙, 等. 阵列宽带Lamb波在结构损伤检测中的应用[J]. 航空学报, 2014, 35(3):780-787.  
Zhang Yu, Yan Yunju, Yu Long, et al. Application of array broadband lamb waves in structural damage detection [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35 (3): 780-787. (in Chinese)
- [13] 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):9.  
Liu Guoqiang, Xiao Yingchun, Zhang Hua, et al. Probability imaging method for damage identification of reinforced composite wall panels [J]. Journal of Composite Materials, 2018, 35(2): 9. (in Chinese)

## Research on Location and Monitoring of Impact Damage in Composite Materials Based on Piezoelectric Sensors

Wang Xianguang, Yang Yu, Liu Guoqiang, Wang Li, Ren Yipeng, Li Wei

*National Key Laboratory of Strength and Structure Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China*

**Abstract:** Impact damage affects the structural safety of composite materials, therefore conducting research on impact damage localization and monitoring based on composite materials is of great significance. This paper applies piezoelectric sensor technology for composite material damage monitoring. Using the energy damage index algorithm based on signal envelope combined with damage probability imaging for damage localization technology, research on damage localization in composite reinforced plate impact tests is carried out. The research results indicate that the energy damage index combined with damage probability imaging method has a positioning error of less than 20mm for the impact position of composite reinforced plates, which meets practical engineering requirements.

**Key Words:** piezoelectric sensor; composite materials; impact positioning; damage probability imaging; structure health monitoring

**Received:** 2024-04-10; **Revised:** 2024-06-25; **Accepted:** 2024-08-28

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China(20230046023002)