

# 基于小波包变换及相关系数法的复合材料层合板 冲击位置识别研究

郭松<sup>1</sup>, 何顶顶<sup>2</sup>

(1. 上海航天技术研究院, 上海 201109; 2. 东南大学 空天机械动力研究所, 南京 210096)

**摘要:** 复合材料较为广泛应用于航空、航天等工程领域, 但对冲击载荷十分敏感。因此, 对复合材料结构承受的冲击载荷进行在线监测以及冲击位置的实时识别具有重要意义。文章以复合材料层合板为研究对象, 基于两个冲击位置的距离越靠近则接收到信号幅频特性相似度越高的特点, 采用 FBG 光纤光栅传感器, 通过小波包变换的方法来提取能量特征向量, 同时结合相关系数法来实现复合材料层合板的冲击位置识别。在 480 mm×480 mm 的复合材料层合板上开展冲击实验, 8 次实验皆完成了冲击位置识别, 其中 7 个点距离误差为 0 mm, 实现精准识别, 另一个点误差在 6% 以内。

**关键词:** 复合材料结构; 冲击位置识别; 小波包变换; 相关系数法; FBG 光纤光栅

中图分类号: TN818

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2017)05-0464-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2017.05.002

## The impact location identification of composite laminate based on wavelet packet transform and correlation coefficient method

GUO Song<sup>1</sup>, HE Dingding<sup>2</sup>

(1. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

2. Institute of Aerospace Machinery and Dynamics, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Composite materials are widely used in aviation, aerospace and other engineering fields. However, composite materials are very sensitive to the impact load. In order to improve the accuracy of the impact localization identification in composite structures in real-time, it is necessary to carry out the online structural health monitoring for the impact load on composite structures. In this paper, for the composite laminate, based on the fact that the closer the two impact positions, the higher the similarity of the received signal's amplitude-frequency characteristics. The method of the wavelet packet transform is used to extract the energy feature vector through the Fiber Bragg Grating (FBG) sensor. The correlation coefficient method is used for the impact localization identification of the composite laminate. Eight impact location identification experiments are carried out for the 480 mm×480 mm composite laminate. The localization error is zero for seven of them; and the percentage error is not more than 6% for the other one.

**Key words:** composite material structures; impact location identification; wavelet packet transform; correlation coefficient method; Fiber Bragg Grating (FBG)

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“热声振多场耦合环境结构全频段响应预示方法研究”(编号: 11572086)

**引用格式:** 郭松, 何顶顶. 基于小波包变换及相关系数法的复合材料层合板冲击位置识别研究[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(5): 464-470

GUO S, HE D D. The impact localization identification of composite laminate based on wavelet packet transform and correlation coefficient method[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(5): 464-470

## 0 引言

复合材料具有质量密度小、比强度高、比刚度大、易设计等特点,广泛应用于航空、航天等工程领域<sup>[1]</sup>。然而,复合材料抗冲击能力较差,内部易产生不可见的损伤,导致其结构承载能力下降,结构强度及稳定性严重退化<sup>[2-4]</sup>。因此,开展复合材料冲击载荷的在线实时监测研究十分必要。

目前有关冲击定位的研究方法主要分为声发射分析和逆问题分析两大类<sup>[5-6]</sup>。声发射分析方法在各向同性材料的冲击定位研究中具有较高的精度。Kundu 等人<sup>[7]</sup>在复合材料板上粘贴 3 个传感器,利用这 3 个传感器接收信号的时延和各个方向上的传播速度来实现冲击定位。Park 等<sup>[8]</sup>通过复合材料板上 4 个传感器所测得的冲击信号时延,之后再通过建立神经网络来实现冲击点的定位。文献<sup>[9-11]</sup>在以上基础上进一步改进,通过 MUSIC 算法估计出冲击方向,并采用小波变换的方法提取出特定频率的 Lamb 波,得到波信号的到达时刻,最终通过速度、时间、距离这三者之间的关系求解出冲击点的距离。需要说明的是,复合材料结构的各向异性、应力波的反射和散射以及噪声等影响,给准确确定波速以及波到达的时间带来了困难,从而难以实现精确的冲击定位。

逆问题分析方法主要通过对冲击响应反演运算来定位冲击位置。随着传感器技术以及高精度测试仪器的快速发展,这种方法得到了更为广泛的发展与应用。由于冲击响应具有激发响应时间短和频响宽的特点,使得其识别更加困难。同时,反问题求解具有较多未知参数,计算任务繁杂,难以实现定位的实时性。

随着技术的不断发展,近几年又出现了一个新的研究方向,即基于应力波信号特征以实现冲击定位的研究。Shrestha 等<sup>[12]</sup>收集各点的冲击信号,然后将其规格化之后建立起数据库,再分别采用相关系数法和均方根法实现冲击定位;芦吉云等<sup>[13]</sup>通过小波包<sup>[14-15]</sup>提取关键频率段的特征值,提出将第六阶小波包能量值作为冲击定位的特征向量,最终实现复合材料的冲击定位;路士增等<sup>[16]</sup>通过傅里叶变换的方法,提取出冲击信号的幅频特性作为信号特征,再进行数据匹配,最终实现低速冲击定位。

针对复合材料的冲击定位研究,王利恒<sup>[17]</sup>设计了 14 个等级的冲击能量及对应的冲击损伤,其中最小能量的冲击没有造成损伤,最大能量的冲击造成复合材料板的穿透损伤。杨斌等<sup>[18]</sup>利用低速冲击试验结合 Abaqus/Explicit 有限元仿真重点考察了混杂纤维增强 PCBT 复合材料层合板的低速冲击性能。顾国庆等<sup>[19]</sup>通过对低速冲击的层合板进行目视检测获得了冲击后的若干损伤特征,然后利用数字散斑干涉测量技术(DSPI)对受到低速冲击的层合板在热载下进行内部低速冲击损伤检测。

在以往的应力波信号特征研究以及复合材料层合板冲击定位研究基础上,本文以玻璃纤维增强复合材料层合板为对象,提出了利用小波包变换和相关系数法相结合的算法实现冲击位置识别的方法,即通过小波包提取能量特征向量,并建立特征向量数据库,再使用相关系数法进行数据匹配,最终实现冲击位置的识别。

## 1 基本理论

### 1.1 FBG 传感器工作原理

FBG 传感器如图 1 所示。其原理为当光通过光纤光栅时,符合特定波长的光会被反射回来,其余光将会透射过光纤光栅,由此可确定光纤光栅的中心波长。



图 1 FBG 光纤光栅传感器  
Fig. 1 Fiber Bragg Grating (FBG) sensor

FBG 传感器对温度和应变敏感,当温度或应变变化时,将导致传感器中的栅距和折射率随之改变。利用这些变化之间的规律,可以实现测量的目的。

每个 FBG 反射光的中心波长为

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (1)$$

式中:  $n$  是光纤光栅的有效折射率;  $\Lambda$  是光栅周期。

虽然 FBG 传感器对温度和应变敏感,但由于本实验都是在温度变化很小的室内进行,可以忽略温度的影响<sup>[20]</sup>,故只考虑应变对 FBG 的影响。若仅对光纤施加轴向应力,则光纤将产生轴向应变。

对式(1)两边微分, 得到

$$d\lambda = 2\lambda dn + 2ndA, \quad (2)$$

将式(2)除以式(1)得

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dn}{n} + \frac{dA}{A}. \quad (3)$$

线弹性范围内有:  $dA/A = \varepsilon$ ,  $\varepsilon$ 为光纤的轴向应变。有效折射率的变化可以由弹性系数定义为

$$\Delta\left(\frac{1}{n}\right)_i^2 = \sum_{j=1}^6 P_{ij} \varepsilon_j. \quad (4)$$

应变张量矩阵  $\varepsilon_j$  和弹性矩阵  $P_{ij}$  分别表示为:

$$\varepsilon_j = [-v\varepsilon_z \quad -v\varepsilon_z \quad \varepsilon_z \quad 0 \quad 0 \quad 0]; \quad (5)$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

式中:  $P_{11}$ 、 $P_{12}$  分别是由纵向应变导致的纵向和横向折射率变化;  $v$  是纤芯材料的泊松比, 对各向同性材料来说,  $P_{44} = v(P_{11} - P_{12})/2$ 。不考虑波导效应, 即不考虑光纤径向变形对折射率的影响, 只考虑光纤的轴向变形时, 则折射率变化为

$$\frac{dn}{n} = -\frac{n^2}{2} [P_{12} - v(P_{11} + P_{12})] \varepsilon. \quad (7)$$

令  $P = n^2 [P_{12} - v(P_{11} + P_{12})]/2$ , 可得

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = (1 - P) \varepsilon. \quad (8)$$

式(8)为光纤光栅轴向应变下所得发射光中心波长变化的数学表达式, 可以看出, 当光纤光栅的材料一旦确定以后, 光纤光栅对应变的传感特性系数基本上是一个确定的量, 这就从理论上保证了光纤光栅作为应变传感器有很好的线性输出。令  $\alpha = \lambda(1 - P)$ , 可得

$$\Delta\lambda = (1 - P) \lambda \varepsilon = \alpha \varepsilon, \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  是光纤光栅传感器的灵敏度, 对于本研究所涉及的中心波长在 1510~1590 nm 的光纤光栅传感器而言,  $\alpha$  约为 1.2 pm/ $\mu\varepsilon$ 。

实验过程中, 用锤敲击复合材料板以产生应力波; 当应力波在板上传播时, 就会在板上产生应变。粘贴在复合材料板上的光纤光栅传感器因应变变形而导致反射波的波长发生改变, 反射回来的信号

再由 SM130 光纤光栅传感解调仪解调出来, 这样 FBG 传感器就完成了对冲击信号的测量。

## 1.2 小波包特征向量的提取

Daubechies 小波具有紧支集的正交性和双正交性<sup>[21]</sup>, 而且具有随阶数递增的消失矩数目和绝对的规则性, 可以实现快速算法和完全重构。Daubechies 小波族可以比较灵活地权衡增加支集长度带来的边界问题, 因此本研究所采用的是 Daubechies 小波族的小波系列。

小波包分解又称为小波包或子代树及最佳子代树结构。其概念是用分析树来表示小波包, 即利用多次叠代的小波转换分析输入信号的细节部分。如图 2 所示: 树图中的每个小波包分别代表信号在各个频率段的成分。对原始信号  $S$  进行一层小波分解得到低频成分  $A1$  和 高频成分  $D1$ 。再向下分解得到信号  $S$  的二层分解信号成分  $AA2$ 、 $DA2$ 、 $AD2$ 、 $DD2$ 。根据向下分解的层数依次类推各层的小波包。

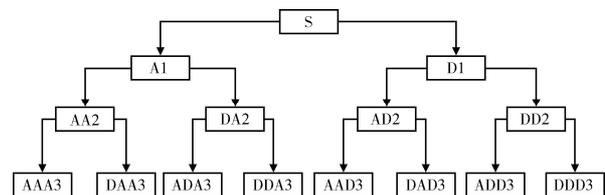


图2 小波包树图

Fig. 2 Wavelet packet tree

小波包分解是将上层信号的频段平均分解到下一层的两个信号, 若上一层信号代表 250~500 Hz 的信号, 则向下一层分解得到的两个小波包分别代表的是 250~375 Hz 和 375~500 Hz 的频段成分。

## 1.3 相似性算法

相似性的算法主要分为两大类: 距离测度法和相似性函数法<sup>[12]</sup>。

目前常用的几种距离测度法包括: Minkowsky 距离 (明氏距离) 法; Euclidean 距离 (欧氏距离) 法; Manhattan 距离法, 实质是明氏距离法中的一种特殊情况; Jffreys & Matusita 距离法; Mahalanobis 距离 (马氏距离) 法; Camberra 距离法 (包含 Lance 距离法、Williams 距离法) 等。在上述方法中, Minkowsky 距离法是距离的通用表达形式, Euclidean 距离法和 Manhattan 距离法是距离的特殊

表达形式。以应用最多最广泛的 Euclidean 距离法为例, 其相似度测量公式如式(10)所示, 若 $(x, y)$ 都是二维向量, 则相似度为平面距离; 若 $(x_i, y_i)$ 都是三维向量, 则相似度为空间距离。距离越近 (即 $d(x, y)$ 越小), 则代表两向量越相似, 即

$$d(x, y) = \left( \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

相似性函数是根据向量中元素的不同, 用函数的方法来表征两向量相似的程度, 可以分为二元向量的相似性函数和一般向量的相似性函数。本文考虑的是基于一般向量的相似性函数, 成熟的方法有夹角余弦法、广义 Dice 系数法、相关系数法等。为了使小波包能量特征向量在距离越近的点相似性越明显, 选择相似性函数法中的相关系数法作为小波包能量特征向量相似性匹配的算法, 即若相似度越大, 则冲击位置越接近。相关系数是多元统计学中用来衡量两组变量之间线性密切程度的无量纲指标, 表示为

$$\text{sim}(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{cov}(x, x) \cdot \text{cov}(y, y)}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right)}} \quad (11)$$

式中:  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  是  $x$ 、 $y$  向量的算数平均值,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$ ;  $n$  是向量  $x$ 、 $y$  的维度。从式(11)可以看出, 相关系数是中心化的夹角余弦, 性质与夹角余弦相似。

## 2 实验系统

### 2.1 复合材料层合板

实验的对象是 1 块四边固支的正方形玻璃纤维增强复合材料层合板, 其边长为 620 mm, 板厚为 2 mm。用铝合金的边框将层合板固定, 在板的背面粘贴 9 个 FBG 传感器, 如图 3 所示。FBG 传感器的布置如图 4 所示, 其位置用粗黑线表示。FBG 传感器编号由坐标表示分别为:  $(-137.5, 137.5)$ 、 $(0, 137.5)$ 、 $(137.5, 137.5)$ 、 $(-137.5, 0)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(137.5, 0)$ 、

$(-137.5, -137.5)$ 、 $(0, -137.5)$ 、 $(137.5, -137.5)$ , 单位 mm。在板的中间划分了  $13 \times 13 = 169$  个样本点, 每两个相邻样本点之间的距离为 40 mm, 用于冲击位置识别的实验区是中间的  $480 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$  的区域。进行样本点编号时, 以左下角为原点, 按照从左向右、从下到上的顺序编号, 如:  $(-200 \text{ mm}, 160 \text{ mm})$  位置处的点的编号为(2, 3)。

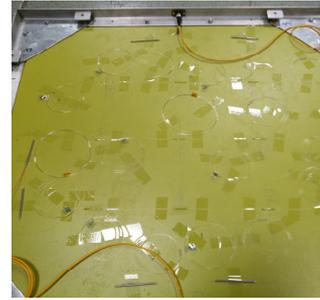


图3 复合材料板后面粘贴的传感器  
Fig. 3 Composite plate pasted with sensors

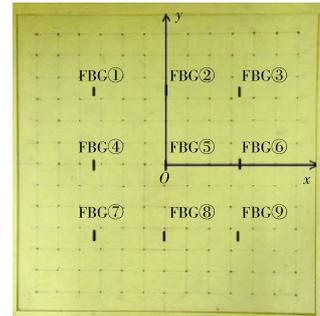


图4 FBG 传感器布置  
Fig. 4 Arrangement of the FBG sensors

### 2.2 冲击数据采集

冲击位置识别的实验系统由冲击锤、计算机和光纤光栅解调仪组成。实验时, 用冲击锤冲击板面, 传感器采集冲击波信号; 然后由解调仪将采集信号转化为数字信号, 保存至计算机; 最后运用 MATLAB 软件对数据进行分析 and 处理。

## 3 冲击位置识别实验

### 3.1 能量特征向量数据库的建立

用手动锤和自动锤依次冲击复合材料层合板上的各个样本点, 并同时采集各点冲击信号, 信号接收的时间大致相同, 每个点采集两组数据, 并建立数据库。之后通过小波包变换提取每个样本点冲击信号的能量特征向量。每次冲击, 9 个 FBG 光纤光栅传感器同时采集冲击信号, 对于所有传感器采集到的信号采用 Daubechies-10 小波进行 6 层小波

包的分解。考虑到信号能量主要集中在低频处且在 0Hz 频率附近存在低频干扰,选用去掉第 1 个小波包的前 15 个小波包的能量特征向量表征该传感器接收信号的幅频特性,则每次冲击的能量特征向量可通过 9 个传感器接收信号的能量特征向量依传感器编号首尾相连的方式构成,即为 $[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{135}]'$ 。另外一组数据也进行同样的小波包变换提取能量特征值,再将 2 组数据中两两对应位置处的元素求平均值,以该平均向量表示某样本点冲击的能量特征向量,并存入数据库,以用于与需要定位的冲击点做相似性匹配。对于 169 个样本点,最终得到 169 个特征向量的矩阵,即 $[t_1, t_2, \dots, t_{169}]$ ,其中 $t_i=[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{135}]'_i$ 。

### 3.2 用相似度匹配以实现冲击位置识别

对样本点的冲击信号采用与 3.1 节中相同的方法得到该点冲击的能量特征向量: $t_0=[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{135}]'_0$ 。最后将  $t_0$  分别和数据库中的 169 个能量特征向量用相关系数法计算相似度,得到该样本点和其他样本点的相似度 $[\text{sim}_{1-0}, \text{sim}_{2-0}, \dots, \text{sim}_{135-0}]$ ,其中  $\text{sim}_{i-0}$  可表示为

$$\text{sim}_{i-0} = \frac{\text{cov}(t_i, t_0)}{[\text{cov}(t_i, t_i) \cdot \text{cov}(t_0, t_0)]^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

最大的相似度值所对应的样本点即为识别的冲击位置。

### 3.3 实验结果

分别采用自动锤和手动锤完成了对复合材料层合板的冲击定位实验,为了体现实验的随机性,随机选取板上的 8 个点进行定位实验。同时,为了验证自动锤和手动锤定位结果的差异性,两组试验均针对这 8 个点进行实验。在数据处理时,还需要定义距离误差  $s$  和误差百分比  $p$ , 即:

$$s = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}; \quad (13)$$

$$p = \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{480\sqrt{2}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $x, y$  表示定位计算所给出的位置点坐标; $x_0, y_0$  表示实际冲击的位置点坐标; $p$  是相对于最大误差的百分比。

#### 3.3.1 自动锤冲击定位

用自动锤分别对编号为(0, 9)、(1, 6)、(3, 5)、(5, 6)、(6, 6)、(9, 3)、(11, 3)和(12, 11)这 8 个点进行冲击,且自动锤每次产生的冲击能量一致。定位结果如表 1 所示。

研究表明,对(0, 9)、(1, 6)、(5, 6)、(6, 6)、(9, 3)、(11, 3)和(12, 11)这 7 个点实现了精确定位,距离误差和误差百分比均为 0。对(3, 5)位置处的冲击,算法定位到其相邻(4, 5)位置处,存在定位偏差,距离误差为 40 mm,误差百分比为 5.89%。(3, 5)点的定位结果如图 5 所示。

表 1 自动锤定位结果  
Table 1 Localization results of the automatic hammer

实际坐标/mm	定位坐标/mm	距离误差/mm	百分比误差/%
(0, 9)	(0, 9)	0	0
(1, 6)	(1, 6)	0	0
(3, 5)	(4, 5)	40	5.89%
(5, 6)	(5, 6)	0	0
(6, 6)	(6, 6)	0	0
(9, 3)	(9, 3)	0	0
(11, 3)	(11, 3)	0	0
(12, 11)	(12, 11)	0	0

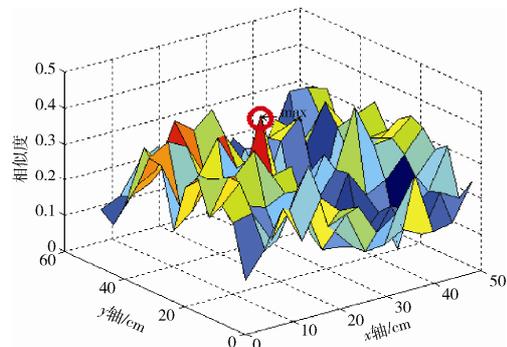


图 5 自动锤(3, 5)点的定位结果

Fig. 5 The localization results of point (3, 5) for the automatic hammer

#### 3.3.2 手动锤的冲击定位

用手动锤分别对上述的 8 个点进行冲击,而手动锤每次产生的冲击力度是不一致的。其数据处理过程与自动锤的相同,定位结果如表 2 所示,其中 7 个位置处实现了精确定位。对(9, 3)位置处的冲击,算法定位到相邻的(10, 3)位置处,距离误差为 40 mm,误差百分比为 5.89%。(9, 3)点的定位结果如图 6 所示。

表2 手动锤定位结果

Table 2 Localization results of the manual hammer

实际坐标/mm	定位坐标/mm	距离误差/mm	误差百分比/%
(0, 9)	(0, 9)	0	0
(1, 6)	(1, 6)	0	0
(3, 5)	(3, 5)	0	0
(5, 6)	(5, 6)	0	0
(6, 6)	(6, 6)	0	0
(9, 3)	(10, 3)	40	5.89
(11, 3)	(11, 3)	0	0
(12, 11)	(12, 11)	0	0

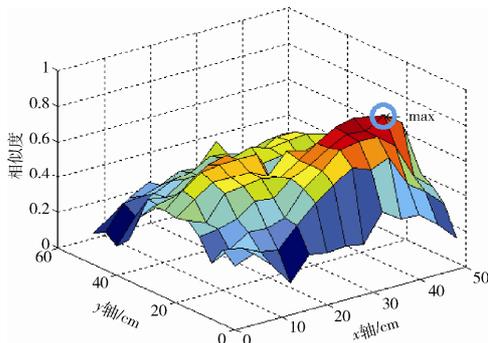


图6 手动锤(9,3)点的定位结果

Fig. 6 The localization results of (9, 3) point for the manual hammer

### 3.3.3 小结

综上所述,通过对比分析以上8个位置处的两种锤击方式的定位实验结果,可以发现,锤击方式对位置识别结果没有太大的影响。最大距离误差均为40 mm,最大百分比误差均为5.89%。由于每次冲击的能量大小、方向以及接触时间的不同导致接收信号的能量特征向量存在差异,进而产生定位误差;但该因素的影响小于不同位置处能量特征向量的差异性,因此均能定位到准确位置或与准确位置相邻的位置,误差在可接受范围内。

## 4 结束语

文章基于小波包变换的方法并结合相关系数法提出了一种实现复合材料层合板冲击位置识别的方法,即根据两冲击位置越近则接收到信号幅频特性相似度越高的特点,分别开展了自动锤与手动锤不同冲击方式的定位识别研究,并结合选取样本点的随机性,对480 mm×480 mm复合材料层合板上的8个样本点进行冲击实验,得到的定位误差相对较小,一定程度上可认为能够精准地实现冲击位置识别。该方法较为简便,有一定的应用推广价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 唐见茂. 航空航天复合材料发展现状及前景[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 352-359  
TANG J M. Current status and trends of advanced composites in aerospace[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 352-359
- [2] TSUDA H, LEE J R. Strain and damage monitoring of CFRP in impact loading using a fiber Bragg grating sensor system[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(7): 1353-1361
- [3] 沈真, 杨胜春, 陈普会. 复合材料抗冲击性能和结构压缩设计许用值[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 561-566  
SHEN Z, YANG S C, CHEN P H. Behaviors of composite materials to withstand impact and structural compressive design allowableness[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 561-566
- [4] CHAMBERS A R, MOWLEM M C, DOKOS L. Evaluating impact damage in CFRP using optical fibre sensors[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(6): 1235-1242
- [5] 周洁敏. 子波分析和 ART 神经网络在复合材料板冲击中的应用[J]. 航空学报, 2001, 22(1): 94-96  
ZHOU J M. Application of wavelet analysis and art neural networks in smashing location detection of composite material structure[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2001, 22(1): 94-96
- [6] 林智育, 许希武. 复合材料层板低速冲击后剩余压缩强度[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 140-146  
LIN Z Y, XU X W. Residual compressive strength of composite laminates after low-velocity impact[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 140-146
- [7] KUNDU T, DAS S, MARTIN S A, et al. Locating point of impact in anisotropic fiber reinforced composite plates[J]. Ultrasonics, 2008, 48(3): 193-201
- [8] PARK C Y, KIM J H, JUN S M, et al. Localizations and force reconstruction of low-velocity impact in a composite panel using optical fiber sensors[J]. Advanced Composite Materials, 2012, 21(5/6): 357-369
- [9] 苏永振, 袁慎芳, 王瑜. 基于多重信号分类算法的复合材料冲击定位[J]. 复合材料学报, 2010, 27(3): 105-110  
SU Y Z, YUAN S F, WANG Y. Impact localization in composite using multiple signal classification method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(3): 105-110
- [10] 钟永腾, 袁慎芳, 邱雷. 基于梅花阵列的复合材料全方位冲击定位方法[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1369-1374  
ZHONG Y T, YUAN S F, QIU L. Omni-directional

- impact localization method on composite structure using plum blossom array[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(5): 1369-1374
- [11] 徐颖娣, 袁慎芳, 彭鸽. 二维结构损伤的主动 Lamb 波定位技术研究[J]. *航空学报*, 2004, 25(5): 476-479  
XU Y D, YUAN S F, PENG G. Study on two-dimensional damage location in structure based on active Lamb wave detection technique[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2004, 25(5): 476-479
- [12] SHRESTHA P, KIM J H, PARK Y, et al. Impact localization on composite wing using 1D array FBG sensor and RMS/correlation based reference database algorithm[J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 159-169
- [13] 芦吉云, 王帮峰, 梁大开. 基于小波包特征提取及支持向量回归机的光纤布拉格光栅冲击定位系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 712-718  
LU J Y, WANG B F, LIANG D K. Identification of impact location by using FBG based on wavelet packet feature extraction and SVR[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 712-718
- [14] 王彦, 梁大开, 周兵. 光纤光栅型智能结构损伤识别的小波包分析[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1731-1737  
WANG Y, LIANG D K, ZHOU B. Damage diagnosis for optical fiber grating smart structure based on wavelet packet analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1731-1737
- [15] 凌同华, 廖艳程, 张胜. 冲击荷载下岩石声发射信号能量特征的小波包分析[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(10): 127-130  
LING T H, LIAO Y C, ZHANG S. Application of wavelet packet method in frequency band energy distribution of rock acoustic emission signals under impact loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(10): 127-130
- [16] 路士增, 姜明顺, 隋青美. 基于数据模板匹配算法的 FBG 冲击定位系统[J]. *光电子激光*, 2014(2): 305-310  
LU S Z, JIANG M S, SUI Q M, et al. An impact location method using FBG sensing based on data template matching algorithm[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014(2): 305-310
- [17] 王利恒. 基于应变信号的复合材料层合板低速冲击损伤识别研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(2): 230-236  
WANG L H. Low velocity impact damage identification of composite laminate using dynamic strain signals[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(2): 230-236
- [18] 杨斌, 章继峰, 周利民. 玻璃纤维-碳纤维混杂增强 PCBT 复合材料层合板的制备及低速冲击性能[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(2): 435-443  
YANG B, ZHANG J F, ZHOU L M. Preparation and low-velocity impact properties of glass fiber-carbon fiber hybrid reinforced PCBT composite laminate[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(2): 435-443
- [19] 顾国庆, 王开福. 复合材料层合板低速冲击损伤激光散斑干涉无损检测研究[J]. *应用激光*, 2012, 32(6): 527-531  
GU G Q, WANG K F. NDT of low-velocity impact damages in composite laminates using speckle interferometry[J]. *Applied Laser*, 2012, 32(6): 527-531
- [20] 刘凤超, 冯进良, 王洋, 等. 基于桥梁结构的 FBG 传感器温度与应变交叉敏感问题的研究[J]. *光学仪器*, 2017, 39(1): 26-30  
LIU F C, FENG J L, WANG Y, et al. Sensitivity of temperature and strain of bridge structure of FBG sensor[J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(1): 26-30
- [21] 张宇, 刘雨东, 计钊. 向量相似度测度方法[J]. *声学技术*, 2009, 28(4): 532-536  
ZHANG Y, LIU Y D, JI Z. Vector similarity measurement method[J]. *Technical Acoustics*, 2009, 28(4): 532-536

(编辑: 肖福根)