

# 光纤光栅传感网络的冲击定位方法<sup>\*</sup>

曹亮<sup>1</sup>, 王景霖<sup>1</sup>, 何召华<sup>1</sup>, 梁大开<sup>2</sup>, 单添敏<sup>1</sup>, 林泽力<sup>1</sup>

(1. 上海航空测控技术研究所故障诊断与健康管理工作室航空科技重点实验室 上海, 201601)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

**摘要** 针对航空航天层合板结构冲击与振动监测的需求, 提出一种基于小波包分解方法和分布式光纤光栅传感网络的板状结构低速冲击辨识方法。根据四边固支板结构的承载形式与光纤光栅传感器的感知特性, 设计合理的传感器网络布局, 再利用快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, 简称 FFT)与小波包分解对光纤光栅传感网络监测到的冲击响应信号进行时频域分析, 获取能表征冲击特性的时域特征分解信号。在此基础上, 分别计算出每一个特征分解信号与其对应的时域原始信号之间的互相关系数, 并将其做为相似度分配权值, 分解出所有样本冲击点对应冲击响应信号的特征分解信号, 构建样本信息库。利用 Hausdorff 距离计算测试信号与样本信息库各个信号之间的相似度, 并根据相似度来确定冲击点的位置坐标。研究表明, 该方法能够实现对航空航天层合板结构低速冲击位置的辨识。

**关键词** 光纤光栅传感网络; 层合板; 小波包分解; 冲击定位

**中图分类号** TH741; TP311.1; TP212.14

## 引言

现代航空业的快速发展, 对航空航天飞行器结构的性能提出了更高要求, 其主要体现在针对结构材料性能的提高, 如要求更高的结构强度、刚度以及抗腐蚀能力和抗电磁干扰能力。层合板由于具有高比强度、良好的抗疲劳性、耐腐蚀性以及绝缘、热导率低等优点<sup>[1]</sup>, 在航空航天领域得到了快速发展和广泛应用。然而层合板结构在制作和使用过程中易受环境因素以及材料属性变化的影响, 尤其是在层合板结构使用过程中受到振动冲击作用产生隐蔽性的损伤<sup>[2]</sup>, 造成层间脱层、纤维断裂以及内部产生裂纹等现象。隐形损伤在一定程度上降低了层合板的使用可靠性, 并造成不可估量的安全隐患。因此, 对层合板结构的冲击定位问题的研究是非常必要的。

光纤光栅传感器具有芯径细、质量轻、柔韧性好的优点, 适合于与柔性充气结构一体化集成, 同时又耐腐蚀, 抗电磁干扰能力强<sup>[3-4]</sup>, 因此, 在基于光纤光栅传感器的复合材料冲击定位研究领域也得到了应用。Kuang 等<sup>[5]</sup>将光纤光栅传感器埋入先进航空复合材料中用于监测其性能及损伤状态, 当栅区处

在非均匀应变场或者受到局部不对称加载状态下, 光纤光栅传感器的光谱分裂成对个波峰, 因此, 可根据此原理研究加载事件过程中的应变异常现象。杨智春等<sup>[6]</sup>利用小波系数差的模实现了对复合材料悬臂梁的损伤定位。陆观<sup>[7]</sup>利用分布式光纤光栅传感网络监测板状复合材料的冲击状态, 并利用黄氏变换以及自回归模型系数来实现对冲击响应信号的特征提取, 并通过马氏距离的相似度判别来实现冲击位置的辨识。

笔者在对光纤光栅传感特性以及网络优化布局研究的基础上, 利用分布式光纤光栅传感网络实现对板状复合材料结构的冲击位置辨识。

## 1 冲击定位原理

### 1.1 光纤光栅传感原理

光纤布拉格光栅作为一种反射型光纤传感器, 仅反射特定波长附近的窄带光波。当宽带光源输入光纤光栅传感器栅区, 特定波长的光波满足了栅区反射条件, 并发生反射, 如图 1 所示。当光栅栅区不

<sup>\*</sup> 航空基金资助项目(2014ZD33001)

收稿日期: 2015-12-03; 修回日期: 2016-03-04

受力时,其传感原理<sup>[8]</sup>为

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

其中: $\lambda$  为光纤光栅反射光谱中心波长; $n$  为纤芯有效折射率; $\Lambda$  为光栅周期。

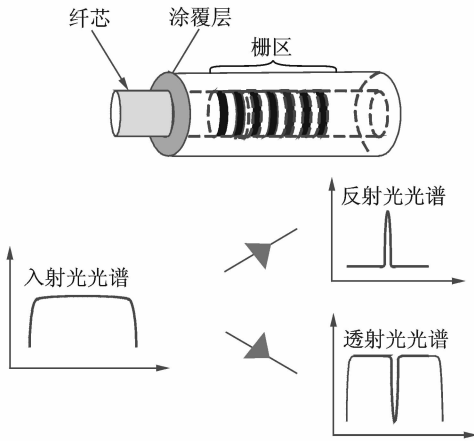


图 1 光纤光栅传感器原理

Fig. 1 The principle of fiber grating sensor

由式(1)有

$$\Delta\lambda = 2\Lambda\Delta n + 2n\Delta\Lambda \quad (2)$$

当光纤布拉格传感器受到应变场和温度场变化影响时,反射光谱中心波长  $\lambda$  会发生偏移。光栅在只受应力的作用时,光栅栅区周期、有效折射率与栅区所受动态应变关系<sup>[8]</sup>为

$$\begin{cases} \Delta\Lambda/\Lambda = \epsilon \\ \Delta n = (1 - P_e)\lambda\epsilon \end{cases} \quad (3)$$

光栅在仅受温度场作用时,其有效折射率及应变同温度  $T$  之间关系如下

$$\begin{cases} \partial n/n\partial T = \alpha \\ \partial\epsilon/\partial T = \xi \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\epsilon$  为光栅栅区应变; $P_e$  为光弹系数(纤芯材质确定时为常数); $\alpha$  为热膨胀系数; $\xi$  为热光系数; $\Delta T$  为环境温度变化量。

根据式(2)、式(3)和式(4),可得中心波长偏移量  $\Delta\lambda$  与动态应变  $\epsilon$  及温度变化量  $\Delta T$  之间的关系<sup>[9]</sup>为

$$\Delta\lambda = \lambda[(1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (5)$$

由式(5)可知,栅区应变及温度对栅区中心波长偏移量  $\Delta\lambda$  的影响可进行叠加,因此应变对栅区中心波长的影响与温度变化对栅区中心波长的影响是相互独立的。

### 1.2 小波包分解

函数  $\psi(x)$  的傅里叶变换  $\psi(\omega)$  满足容许性条

件<sup>[10]</sup>

$$C_\psi = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (6)$$

该函可作为一个基本小波母函数,通过变化小波母函数的尺度因子,可在时域尺度上进行伸缩和平移。时域尺度上平移伸缩后的函数为  $\phi_{(m,n)}(x)$ ,其变换因子为  $m$ ,平移因子为  $n$ ,则有<sup>[7]</sup>

$$\varphi_{(m,n)}(x) = m^{-\frac{1}{2}} \varphi\left[\frac{x-n}{m}\right] \quad (m \geq 0, n \in \mathbb{R}) \quad (7)$$

小波包与小波分析相同,也是由一系列线性组合的小波函数  $\varphi^i(x)$  组成,即

$$\varphi_{j,k}^i(x) = 2^{j/2} \varphi^i(2^j x - k) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

其中: $i, j, k$  分别为频率因子、尺度因子和平移因子。

小波包在使用过程同样表现出正交性、时频性等性质,与相应的小波函数相似。

由于复合材料板具有各向异性的特质,造成冲击响应信号频率成分复杂,因此需要分析不同频率成分与冲击位置之间的对应关系,以表征冲击响应信号的特征。小波包分解方法具有不同尺度的小波母函数,能够根据信号特征频率选择相应的频带,提高时频分辨率<sup>[11]</sup>。小波包分解对各层各阶信号的频段划分公式为

$$(n-1) \frac{f_s}{2^{(i+1)}} \sim n \frac{f_s}{2^{(i+1)}} \quad (9)$$

其中: $n$  为层数; $i$  为阶数; $f_s$  为采样频率。

因此,可以根据固有频段范围来计算小波包分解所需要的层数和阶数。

### 1.3 向量相关性评定

每一个光纤光栅传感器监测到的冲击响应信号经小波包分解后能得到特征分解信号,将特征分解信号与其对应的原始信号之间的互相关系数作为对应传感信号之间  $H$  距离值的分配权重系数,记为  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 。互相关系数的求解过程如下:已知两向量  $\mathbf{a}$  和  $\mathbf{b}$ ,把  $\mathbf{a}$  向量作为行向量, $\mathbf{b}$  向量作为列向量,则向量  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$  之间的互相关系数<sup>[12]</sup>为

$$\alpha = \frac{\sum \mathbf{a}\mathbf{b} - \frac{1}{n} \sum \mathbf{a} \sum \mathbf{b}}{\sqrt{\left[\sum \mathbf{a}^2 - \frac{1}{n} (\sum \mathbf{a})^2\right] \left[\sum \mathbf{b}^2 - \frac{1}{n} (\sum \mathbf{b})^2\right]}} \quad (10)$$

### 1.4 Hausdorff 距离

Hausdorff 距离是描述两组点集之间相似度的

一种量。它是两种点集之间的一种定义形式:假设有两组集合  $A = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ ,  $B = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ , 则两集合之间的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)] \quad (11)$$

其中:  $h(A, B), h(B, A)$  为

$$\begin{cases} h(A, B) = \max_{x \in A} \{ \min_{y \in B} \|x - y\| \} \\ h(B, A) = \max_{y \in B} \{ \min_{x \in A} \|y - x\| \} \end{cases} \quad (12)$$

$h(A, B)$  指每个点  $a_i$  到距离此点最近的  $B$  集合中的点  $b_j$  之间的距离  $\|a_i - b_j\|$  进行排序, 取其最大值作为  $h(A, B)$  的值, 同理  $h(B, A)$ 。

$H(A, B)$  取  $h(A, B), h(B, A)$  中的较大值, 度量两个点集之间的最大不匹配程度。

## 2 冲击实验系统

图 2 所示为冲击实验系统实物图。基于分布式光纤光栅传感网络的冲击定位系统分为传感系统、数据采集与传输系统及数据处理和评估系统。其中: 传感系统由级联而成的光纤光栅传感网络组成, 监测板面的冲击状态; 数据采集与传输系统由计算机和光纤光栅解调仪组成, 用以采集和保存冲击响应信号; 评估系统为相关定位程序, 用以实现对冲击位置的辨识。

层合板板面有效面积为  $540 \text{ mm} \times 540 \text{ mm}$ 。为方便确定冲击点位置以及精确加载, 取板面中心位置、大小为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的区域作为冲击监测区域, 并划分成规则的 11 行、11 列共计 121 个点的网络, 网格划分形式如图 3 所示。

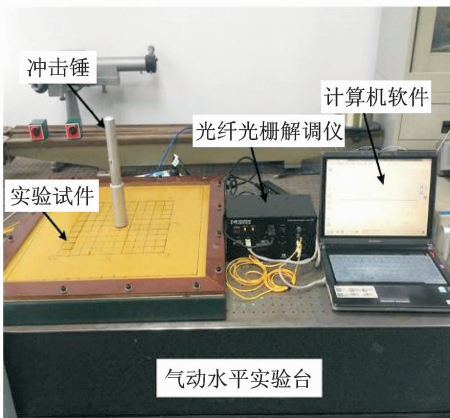


图 2 冲击实验系统

Fig. 2 The diagram of impact test system

在冲击监测区域的四周布置由 4 个光纤光栅传感器 (fiber bragg grating, 简称 FBG) 组成的光纤光

栅传感网络, 各传感器的分布位置、中心波长以及分布形式如表 1 和图 3 所示。

表 1 FBG 传感器中心波长与位置

Tab. 1 The center wavelength and position of the sensors

传感器	中心波长/nm	位置坐标/mm
FBG <sub>1</sub>	1 529. 947	(150, -150)
FBG <sub>2</sub>	1 533. 193	(150, 150)
FBG <sub>3</sub>	1 537. 031	(-150, 150)
FBG <sub>4</sub>	1 549. 123	(-150, -150)

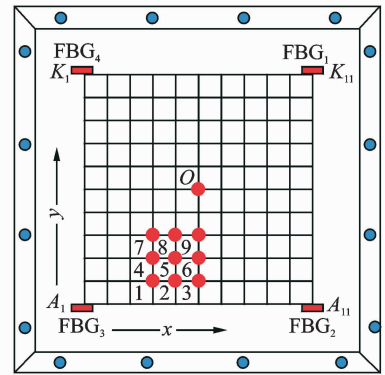


图 3 板面网络划分形式及传感器布局图

Fig. 3 The diagram of plank's network and sensors' location

## 3 冲击实验结果与分析

利用上述冲击实验系统, 监测层合板面冲击状态, 并实现冲击载荷的定位辨识。

### 3.1 频谱分析

对板面中心位置施加冲击载荷, 研究光纤光栅传感网络中各传感器所监测到的冲击响应信号。如图 3 所示, 采集并处理冲击点  $O(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$  处相应的冲击信号。图 4 所示为  $O$  点的冲击响应信号时频域分析图, 由上到下分别为光纤光栅传感器 FBG<sub>1</sub>, FBG<sub>2</sub>, FBG<sub>3</sub> 与 FBG<sub>4</sub> 对应的时频图谱。

图 4(a) 为施加冲击载荷状态下不同传感器监测到的时域响应信号。冲击点距离各传感器的传感距离相同, 但其相应的中心波长偏移量不同, 均不超过  $200 \text{ pm}$ , 持续时间不超过  $0.3 \text{ s}$ 。同时冲击中心位置里各个固支边较远, 固支边对其影响较小, 因此各传感器监测的波长偏移不会出现较大的波动。波长偏移量对应关系为:  $\Delta\lambda_{\text{FBG}_3} > \Delta\lambda_{\text{FBG}_4} > \Delta\lambda_{\text{FBG}_2} > \Delta\lambda_{\text{FBG}_1}$ , 这是因为树脂复合材料在材料性能上表现

为各向异性,因此也造成排布方向相同的传感器的中心波长偏移量不相同。图 4(b)为冲击响应传感信号的傅里叶变换频谱图,从图中可以看出,冲击响应信号中的敏感频率为 70,110,150 和 200 Hz,其中以 70 Hz 左右的频段范围为主,且幅值最大。因此,可断定该层合板冲击响应信号的特征频率为 70 Hz。

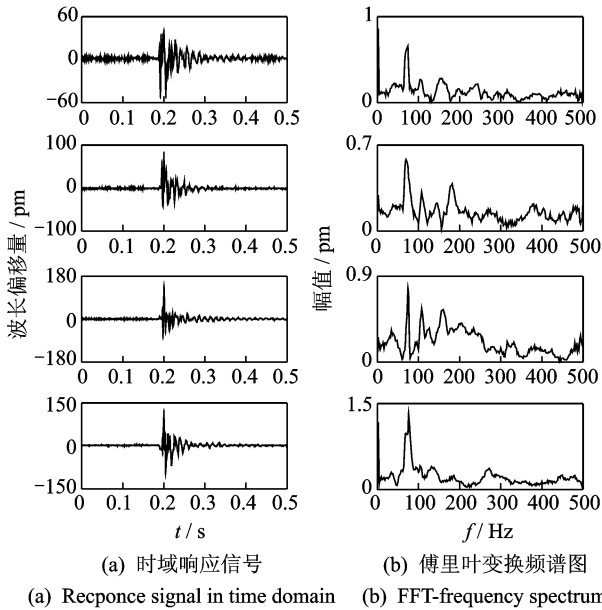


图 4 传感网络冲击响应信号时频图

Fig. 4 The frequency diagram to the impulse response signal of sensor network

### 3.2 小波包分解及互相关系数的计算

根据确定的冲击响应信号特征频率,对上述冲击响应信号进行小波包分解处理,如图 5 所示。其中图 5(a)为冲击过程中 4 个 FBG 传感器监测到的原始信号,图 5(b)为对该信号监测到的原始信号进行小波包分解,获取包含特征频率的特征分解信号。

对小波包分解获得的特征分解信号进行频谱分析,如图 6 所示。其特征频段范围为 45~85 Hz,其中最大频谱值为 70 Hz 左右,与小波包分析所得结果基本一致。

### 3.3 数据库建立及信息比对

如图 7 所示,选取图中标记数码的 9 个冲击点为样本点,按照标记数码的大小顺序依次对上述样本点进行等能量冲击,记录并保存所有样本点的冲击响应信号  $S$ ,获取各冲击响应信号对应的特征分解信号  $s$ ,并计算其相应的互相关系数。

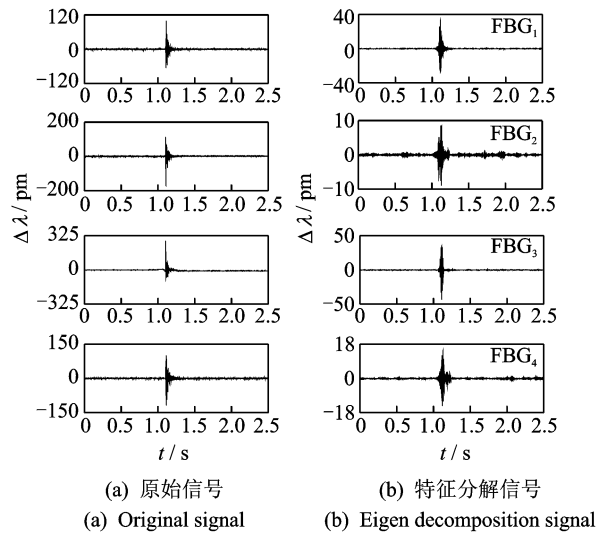


图 5 冲击响应信号对应的小波包分解信号

Fig. 5 The wavelet packet decomposition signal of the shock response signal

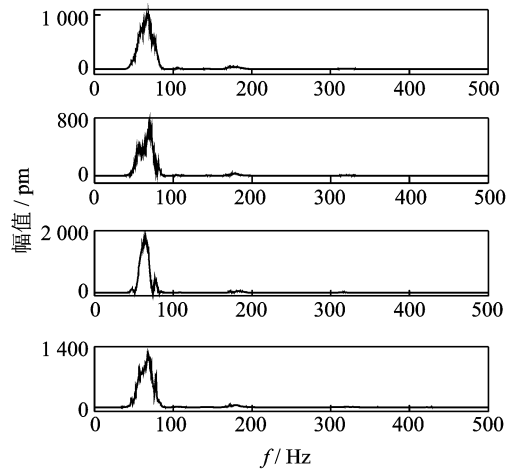


图 6 小波包分解信号频谱图

Fig. 6 Frequency spectrum of the wavelet packet decomposition signal

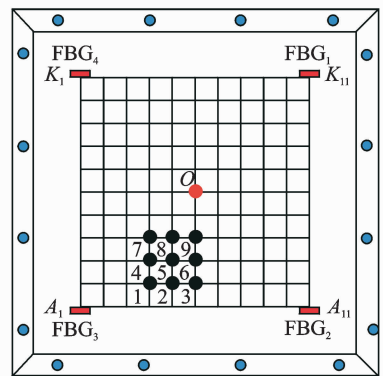


图 7 样本点位置示意图

Fig. 7 Sketch diagram of sample points

每一个冲击点对应 4 个冲击响应信号(光纤光栅传感网络包含 4 个 FBG 传感器),每一个冲击响应信号对应一个特征分解信号  $s_i$ ,因此,每个冲击点对应 4 个特征分解信号  $s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}$  和  $s_{i4}$ 。将此 4 个特征分解信号按传感器排列顺序组建一个二维矩阵,则 9 个样本点对应 9 个二维矩阵,这些二维矩阵共同构成了样本点的特征信息数据库。

随机冲击 9 个样本点中的任意一个点,并得到冲击实验信号  $S'$ (包含 4 个冲击实验信号)。对该信号进行小波包分解提取特征分解信号  $s'_1, s'_2, s'_3$  和

$s'_4$ ,按传感器排列顺序建立测试信号特征信息矩阵  $M'_i = [s'_1 \ s'_2 \ s'_3 \ s'_4]$ 。将该矩阵与特征信息库中的矩阵逐个比对,对应传感器的特征信号之间求取  $H$  距离( $H_{i1}, H_{i2}, H_{i3}, H_{i4}$ ),并计算两信号之间的互相关系数( $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \alpha_{i3}, \alpha_{i4}$ ),则该测试点与样本点之间的综合  $H$  距离为

$$H_i = \alpha_{i1} H_{i1} + \alpha_{i2} H_{i2} + \alpha_{i3} H_{i3} + \alpha_{i4} H_{i4} \quad (13)$$

根据分析,分别对上述 9 个样本点冲击一次,获取 9 组测试信号,按照信号分析流程分别求取 9 个测试点与样本库中特征信息库矩阵之间的综合  $H$  距离值,其结果如图 8 所示。

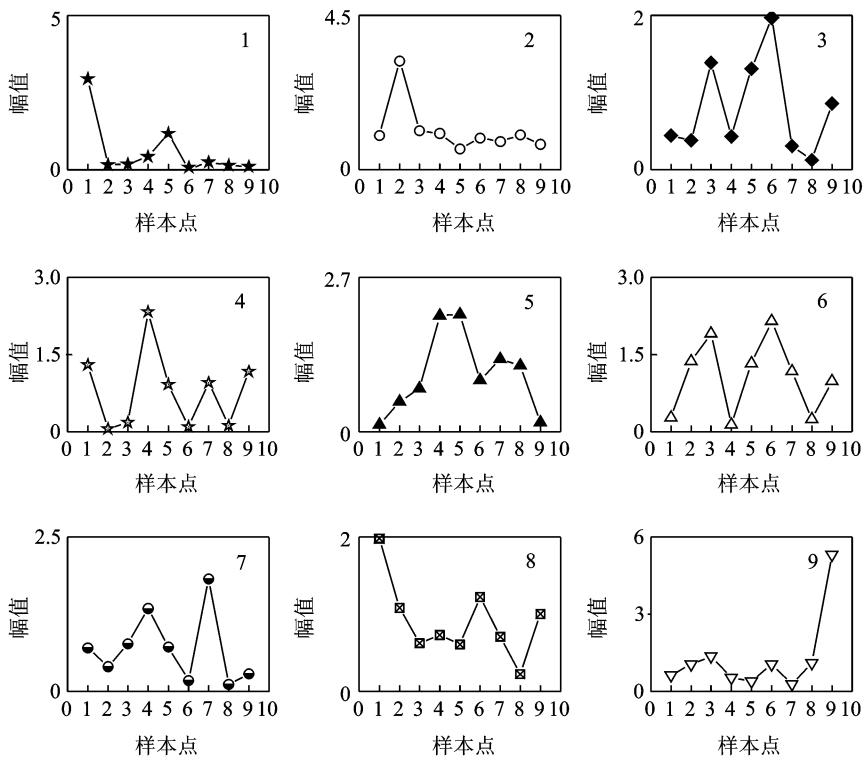


图 8 测试点综合  $H$  距离值分布图

Fig. 8 The distribution of  $H$  distance to the sample points

由图 8 可知,仅有 3 号、8 号测试点未能准确判别出结果,其他测试点均能实现定位辨识。

## 4 结 论

1) 结合光纤光栅传感器的传感特性,优化 FBG 传感器的布局,以实现对板面监测范围的最大化。

2) 利用小波包对信号处理过程中体现出的自适应性,提高了对信号时频域分析的能力,并获取了

能表征信号特征的时频域信息。

3) 采用集合之间相似度比对的方法,并利用 Hausdorff 距离作为衡量集合之间相似度的指标,提高其辨识能力。

## 参 考 文 献

[1] 陈浩然,刘远东. 动荷载作用下含损伤复合材料层合板承载能力[J]. 复合材料学报,2004,21(3):115-119.

Chen Haoran, Liu Yuandong. Loaded capability of de-

- laminated composite plates under dynamic loading[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(3): 115-119. (in Chinese)
- [2] 陆观,梁大开,曾捷,等. 基于光纤光栅传感器的复合材料层合板冲击能量研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(6): 261-264.  
Lu Guan, Liang Dakai, Zeng Jie, et al. Impact energy on composite material layer based on grating sensors [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(6): 261-264. (in Chinese)
- [3] 贾子光,任亮,李宏男,等. 应用光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1298-1303.  
Jia Ziguang, Ren Liang, Li Hongnan, et al. Application of fiber bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1298-1303. (in Chinese)
- [4] 王义平,唐剑,尹国路,等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(5): 809-819.  
Wang Yiping, Tang Jian, Yin Guolu, et al. The fabrication method and sensing application of fiber grating [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(5): 809-819. (in Chinese)
- [5] Kuanga K S C, Kenny R, Whelan M P, et al. Embedded fiber Bragg grating sensors in advanced composite materials[J]. *Composites Science and Technology*, 2001(61): 1379-1387.
- [6] 杨智春,党晓娟,王乐,等. 复合材料结构损伤联合定位法试验研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(2): 115-118.  
Yang Zhichun, Dang Xiaojuan, Wang Le, et al. Experimental investigation on a combined damage localization method for composite beams and plates [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(2): 115-118. (in Chinese)
- [7] 陆观. 光纤 Bragg 光栅在智能材料结构健康监测中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- [8] 张威,梁大开,芦吉云,等. 光纤光栅传感系统信号解调技术的研究[J]. *压电与声光*, 2008, 30(6): 677-679.  
Zhang Wei, Liang Dakai, Lu Jiyun, et al. Research on demodulating technique for fiber grating sensor system [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, 30(6): 677-679. (in Chinese)
- [9] Zubia J, Mateo J, Losada M A, et al. Optical fiber sensors for structural health monitoring in airplanes [C] // 15th International Conference on Transparent Optical Networks. Poland; *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2013.
- [10] 汪富泉,李厚强. 小波理论与分形[J]. *物理*, 1994, 23(9): 539-543.  
Wang Fuquan, Li Houqiang. Wavelet and fractal theory [J]. *Physics*, 1994, 23(9): 539-543. (in Chinese)
- [11] 刘守山,杨辰龙,李凌,等. 基于自适应小波阈值的超声信号消噪[J]. *浙江大学学报*, 2007, 41(9): 1557-1560.  
Liu Shoushan, Yang Chenlong, Li Ling, et al. Adaptive wavelet thresholding based ultrasonic signal denoising [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 41(9): 1557-1560. (in Chinese)
- [12] 王正林,龚纯,何倩. 精通 Matlab 科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 54-55.



**第一作者简介:**曹亮,男,1989年10月生,助理工程师。主要研究方向为航空结构的健康管理与故障诊断、数据分析等。曾发表《加载条件下光纤光栅传感器温度影响特性》(《江苏航空》2015年第1期)等论文。

E-mail:hdcaoliang@163.com

