

# 加筋复合材料板分布式光纤冲击判位

宋昊<sup>1</sup>, 曾捷<sup>2</sup>, 王文娟<sup>1</sup>, 薛景锋<sup>1</sup>, 曹亮<sup>2</sup>, 梁大开<sup>2</sup>

(1. 北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术国防科技重点实验室, 北京 100095;

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, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对加筋复合材料板结构冲击损伤监测需求, 提出一种基于分布式光纤光栅传感网络的冲击载荷快速判位方法。通过优化分布式光纤冲击监测网络布局, 采用小波包分解方法得到冲击响应信号特征, 构建了基于特定阶数能量谱幅值比的样本响应矩阵。借助 BP 神经网络实现对加筋类航空板结构的快速冲击判位。

**关键词:**加筋复合材料板; 冲击; 光纤光栅传感器; 小波包分解; 神经网络

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A

## Study of Impact Monitoring on Stiffened Composite Panel by Using Distributed Optical Fiber Grating Sensing Network

SONG Hao<sup>1</sup>, ZENG Jie<sup>2</sup>, WANG Wenjuan<sup>1</sup>, XUE Jingfeng<sup>1</sup>, CAO Liang<sup>2</sup>, LIANG Dakai<sup>2</sup>

(1. National Key Lab. of Metrology and Calibration Technology, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the demand of the impact monitoring on stiffened composite panel, a fast impact load detection method based on distributed optical fiber grating sensing network is proposed. Optimization allocation of the FBG sensor is realized, different rank energy distributing trend of impact response signals are obtained by using the wavelet packet, the sample response matrix is constructed based on the ratio of the the amplitude ratio of the specific energy spectrum. Based on the above research, the impact detection of stiffened composite panel can be realized by BP neural network.

**Key words:** stiffened composite panel; impact; optic fiber grating sensor; wavelet packet analysis; neural network

### 0 引言

复合材料具有比强度高、比重小和比模量大等独特优点<sup>[1]</sup>, 因而被广泛用于航空航天、特种舰船、风力发电等领域。但是由于其结构和部件在制造、维修和使用过程中不可避免会受到振动与冲击载荷作用, 易在材料内部造成损伤<sup>[2]</sup>。对于高速、中速和低速 3 种常见冲击类型, 低速冲击对材料性能影响最大。这种损伤形式将破坏复合材料结构件的可靠性, 使其弯曲刚度、弯曲强度和压缩强度等均出现大幅度下降, 显著降低复合材料使用寿命<sup>[3]</sup>。因此, 研究复合材料低速冲击问题, 对于保障航空结构服役

安全与提升结构健康监测水平具有重要意义。

目前冲击监测常用研究方法如基于压电传感器的时差识别法<sup>[4]</sup>, 具有较高判位精度, 但由于压电传感阵列易受到电磁干扰, 且系统信号传输线缆布局复杂, 使其应用领域受到一定限制。光纤光栅传感器由于具有芯径细, 质量轻, 柔韧性好, 耐腐蚀, 抗电磁干扰, 适于与被测结构一体化集成等独特优点<sup>[5]</sup>, 使其在结构健康监测领域的研究与应用越来越受到关注。2010 年, 美国国家宇航局(NASA)采用分布式光纤传感技术实现对改进型扑食者 B 无人机飞行器翼表应变信息的实时监测。2005 年, 日本航空宇宙研究所 Takeda 等将光纤布喇格光栅传感器埋

收稿日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275239); 中国博士后科学基金资助项目(20090461116); 航空科学基金资助项目(20125652055); 江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究基金资助项目(BY2014003-01); 航空科学基金资助项目(20152852036); CAST 基金、上海航天科技创新基金资助项目(SAST2015062)

作者简介: 宋昊(1981-), 男, 内蒙古赤峰市人, 高级工程师, 硕士, 主要从事光纤传感技术的研究。

入复合材料机翼结构组成传感器网络,完成对机翼疲劳、冲击损伤的监测<sup>[6]</sup>。

由于目前光纤光栅解调频率相对较低,不能像压电传感阵列一样精确获取冲击应力波到达时间<sup>[7]</sup>,因此无法利用时差法实现对冲击位置的准确辨识。但与时域信息不同,光纤光栅冲击响应信号频域分量中包含有相对丰富的位置特征信息。

基于上述分析,本文提出一种基于分布式光纤光栅传感网络的加筋复合材料板结构冲击监测方法。通过构建能够表征不同冲击位置信息的频域特征响应矩阵,采用神经网络训练方法,实现对加筋板结构冲击载荷的快速定位。

## 1 冲击判位原理

### 1.1 光纤光栅传感器动态冲击监测原理

光纤布喇格光栅作为一种反射型光纤传感器,仅反射某个特定波长附近的窄带光波。当光栅栅区不受力时,则有<sup>[8]</sup>

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

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

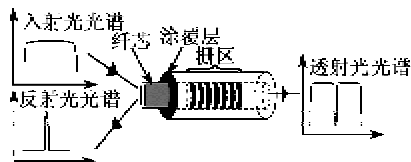


图1 光纤光栅传感器原理

当光纤布喇格传感器受到应变和温度变化影响时,反射光谱中心波长会随之发生偏移。光栅只受应力的作用时,光栅栅区周期、有效折射率与栅区所受动态应变关系为<sup>[8]</sup>

$$\Delta\lambda/\lambda = \epsilon \quad (2)$$

$$\Delta n = (1 - P_e)\lambda\epsilon \quad (3)$$

光栅仅受温度场作用时,其有效折射率及应变与温度  $T$  之间关系为

$$\frac{\partial n}{n \cdot \partial T} = \alpha \quad (4)$$

$$\partial\epsilon/\partial T = \xi \quad (5)$$

式中: $\epsilon$ 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。根据式(2)~(5)可得中心波长偏移量( $\Delta\lambda$ )与动态应变  $\epsilon$  和环境温度变化量  $\Delta T$  之间关系<sup>[9]</sup>为

$$\Delta\lambda = \lambda[(1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (6)$$

此外,在温度补偿方面,由于复合材料板受低速

冲击的响应信号持续时间较短,在此过程中光纤光栅中心波长偏移量主要由冲击载荷形成的应力波所致,而结构温度处于缓变变化过程,其对光纤光栅中心波长偏移量的影响可忽略不计。因此文中选择冲击前后光纤光栅中心波长偏移量  $\Delta\lambda$  作为反映结构响应特征的基本参量,从而能够消除环境温度变化对冲击判位效果的影响。

研究中复合材料板结构受到低速冲击将引起板面局部变形,使得分布于试件加筋面的光纤光栅传感器中心波长随板面应变变化而发生偏移。根据式(6)可知,由于环境温度对中心波长偏移量的影响被消除, $\Delta\lambda$  主要与光纤光栅传感器因冲击载荷引起的应变呈对应关系。

### 1.2 基于小波包分解的冲击响应特征信号提取方法

由于复合材料板为各向异性,其冲击振动响应信号频率成分丰富,因此需要从不同尺度分析获取能够表征冲击位置信息的特征参量。小波包分解方法具有自适应性,能够根据信号特征选择相应的频带,提高时频分辨率<sup>[10-11]</sup>。小波包分解对各层各阶信号的频段划分为

$$(N-1) \cdot \frac{f_s}{2^{i-1}} \sim N \cdot \frac{f_s}{2^{i+1}} \quad (7)$$

式中: $N$ 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。

假设对某信号进行  $m$  层分解,可得到第  $m$  层从低频到高频共  $2^m$  个不同频段范围的特征信号。然后对小波包分解特征信号系数进行重构,即可得到每个参数的重构系数  $S$ 。再利用重构系数计算各频段信号的总能量,则可构成小波包能量谱:

$$E_{m,p} = \int |S_{m,p}|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{p,k}|^2 \quad (8)$$

式中  $x_{p,k}$  ( $p$  为信号阶数,  $k$  为采样点数) 为重构特征信号系数  $S_{m,p}$  散点的幅值。因此,根据式(7)、(8)即可计算出冲击响应信号不同阶数能量谱幅值分布信息。

### 1.3 基于 BP 神经网络的冲击判位辨识方法

为实现对冲击位置的精确辨识,本文选取与载荷属性相关联的特定阶数能量谱幅值比  $T_i$  作为特征指标,用以描述该区各传感器监测信号能量所占总能量的比重。该指标能间接表征冲击点位置与所

处监测子区域内各光纤传感器的关联程度。

$$T_i = \frac{A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_l} \quad i=1,2,\dots,l \quad (9)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  个传感器对应的能量比重;  $A_i$  为第  $i$  个传感器所监测信号的特定阶数能量谱幅值。用于反映某个特定冲击点位置信息的能量幅值比向量  $X_j$  为

$$X_j = [T_{j1}, T_{j2}, \dots, T_{jn}] \quad j=1,2,\dots,l \quad (10)$$

式中:  $l$  为冲击点个数;  $n$  为传感器数量。将所有点的特征向量组合成表征不同冲击点信息的样本响应矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{l1} & T_{l2} & \dots & T_{ln} \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据神经网络拓扑结构构建规则,建立具有 3 层感知器模型拓扑结构的 BP 神经网络。再将由式 (11) 计算所得特征矩阵代入 BP 神经网络中进行训练,即可得到冲击辨识回归模型。

## 2 冲击监测实验系统

四边固支加筋复合材料板结构尺寸及板面网格划分,如图 2 所示。其中加筋板结构背面有 4 根 T 型加强筋,将整个板面划分为 3 个子监测区域。研究中将板面划分为若干  $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  单元网格,有效监测面积为  $450 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$ 。实验中,利用冲击锤对网格点进行冲击(保证每次冲击能量保持一致),模拟低速冲击过程。这里仅选取网格结点作为冲击对象,避免冲击点落入网格的空白区域而造成冲击数据的不准确。

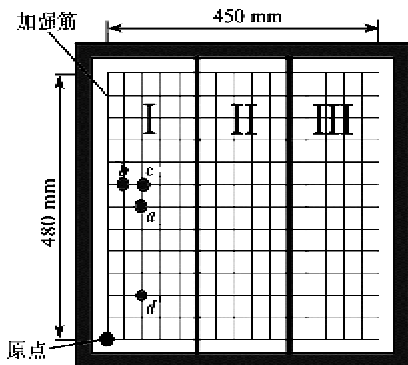


图 2 板面网格框图

加筋复合材料板分布式光纤冲击监测系统,如图 3 所示。该系统主要包括光纤光栅传感器 (FBG)、光纤光栅解调仪及计算机。光纤光栅解调

仪能够对 FBG 监测到的冲击响应信号进行实时解调。计算机可及时保存传感器响应数据并进行数值分析,如图 4 所示。

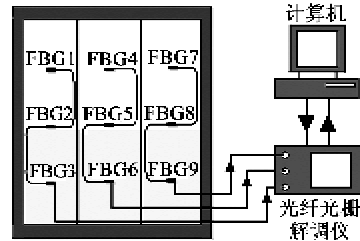


图 3 冲击监测实验系统框图

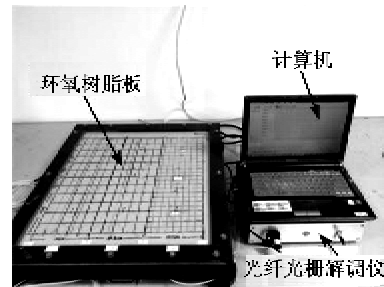


图 4 冲击实验系统实物图

在传感器优化布局方面,由于 FBG 传感器应变敏感特性具有显著方向性。当加载点与传感器连线和光纤轴向之间夹角(定义为冲击夹角)逐渐增大,相同载荷引起的  $\Delta\lambda$  也相应变大,即 FBG 传感器来自不同方向的载荷作用表现出不同的应变响应特性。根据以上分析,沿垂直于加强筋的方向布置 FBG 传感器,能最大区域的监测板面状态。

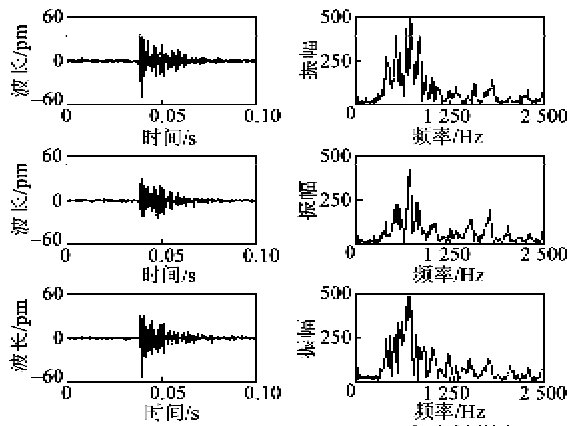
表 1 光纤传感器位置分布

FBG1/mm	FBG4/mm	FBG7/mm
(75,400)	(225,400)	(375,400)
FBG2/mm	FBG5/mm	FBG8/mm
(75,240)	(225,240)	(375,240)
FBG3/mm	FBG6/mm	FBG9/mm
(75,80)	(225,80)	(375,80)

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 冲击响应信号分析与特征提取

首先,需要研究同一传感器对于不同位置冲击载荷作用的响应特性。依次对图 2 中不同位置冲击点  $a(60 \text{ mm}, 240 \text{ mm})$ 、 $b(30 \text{ mm}, 280 \text{ mm})$  和  $c(60 \text{ mm}, 280 \text{ mm})$  施加冲击载荷,传感器 FBG2 所监测到的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  点冲击响应信号时频图,如图 5 所示。由于仅凭冲击响应时域信号幅值、持续时间,无法准确判别冲击点的位置信息,因此还需要对各传感器响应信号频谱特征加以研究。



(a) 3个冲击点对应的时域波形图 (b) 相应频谱图  
图5 不同冲击点a、b、c对应的传感器FBG2

响应信号时频图

从时域角度分析,各信号持续时间均小于50 ms。冲击点c与FBG之间冲击夹角大于冲击点b对应的冲击夹角,根据FBG方向敏感特性可知,c点冲击引起的光栅栅区变化幅度要大于b点的影响。同时,由于冲击点a刚好位于光纤光栅粘贴位置附近,使得a点冲击引起的光栅栅区变化幅度要大于c点的影响。试验所得各冲击点对应的FBG2中心波长偏移量最大峰值依次为 $\Delta\lambda_a > \Delta\lambda_c > \Delta\lambda_b$ ,这与理论分析结果一致。

从频域角度分析,图5(b)所示加筋复合材料板前几阶固有频率能量主要集中在400~2 000 Hz。在此频段内,冲击点b与FBG2之间冲击夹角较小,使得其对应的FBG2响应频谱整体幅值相对较小;而冲击点a对应的FBG2响应频谱整体幅值相对较大,这是由于其恰好处于FBG2粘贴位置附近所致。

其次,需要研究同一冲击载荷对应的不同位置FBG时频域响应特性。对于位于I区的冲击点d(60 mm,80 mm)施加冲击载荷,根据小波包能量理论对以上传感器所监测得冲击响应信号进行能量谱分析。根据板结构固有频段范围,由式(9)可确定冲击响应信号的小波包分解层数为5,如图6所示。

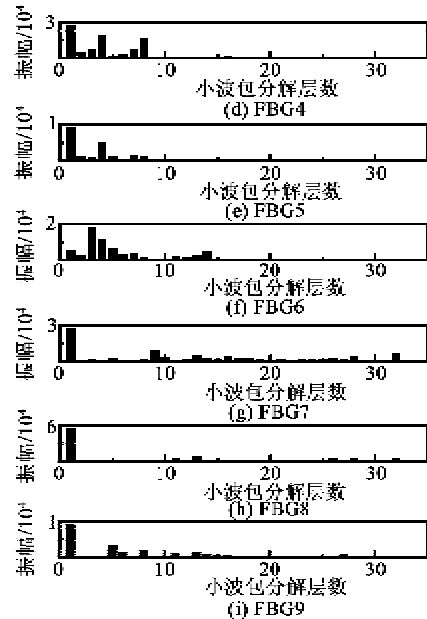
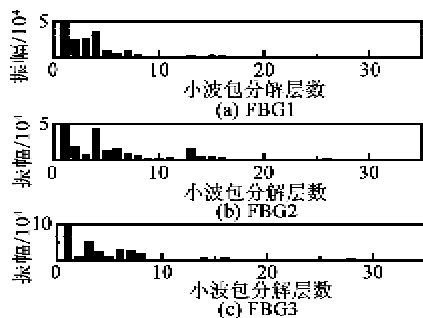
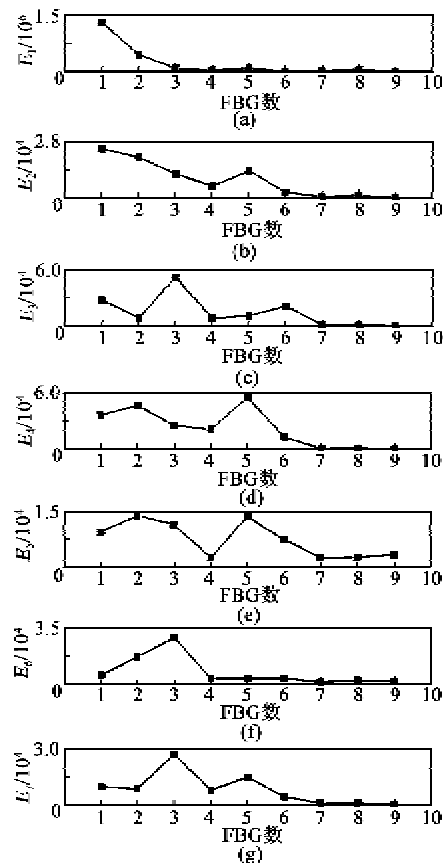


图6 冲击点d对应的不同位置传感器小波包分解信号

为消除传感器分布位置对测量结果的影响,需要对同一冲击点,不同传感器监测的冲击响应信号的小波包能量谱变化进行分析。从图6可看出小波包能量主要集中在前8阶,其中不同传感器对应的同一阶能量趋势变化如图7所示。



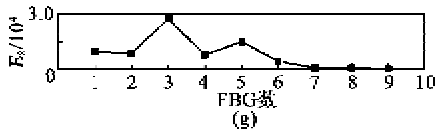


图 7 不同编号光纤 FBG 传感器对应各阶能量分布趋势图

由于冲击点  $d$  位于区域 I 中,且在传感器 FBG3 附近,因此 FBG3 所监测的与冲击位置相关的特定阶数能量应为各传感器中的最大值,符合上述规律的能量阶数为  $E_3$ 、 $E_6$ 、 $E_7$  和  $E_8$ 。另一方面,冲击点  $d$  与区域 I 中各光纤光栅传感器的距离关系为  $l_{d1} > l_{d2} > l_{d3}$ 。因此,FBG1、FBG2 和 FBG3 对应的与传感位置相关联的能量排布应为增长趋势,  $E_6$ 、 $E_8$  两阶能量符合增长趋势,与传感位置相关联。此外,区域 II 中 3 个传感器对应的  $E_8$  阶能量趋势为  $E_{8\_FBG6} < E_{8\_FBG5} < E_{8\_FBG4}$ ,而冲击点  $d$  距离传感器 FBG6 最近,因此  $E_8$  与冲击位置及传感器的布局并无明显关系。

基于上述分析,选择第 5 层小波包分解信号的第六阶能量值  $E_6$  作为评估冲击点与传感器位置关系的特征指标参量。

### 3.2 冲击位置辨识

选取区域 I 为对象,将该区域中所属传感器 FBG1、FBG2、FBG3 对应的频域响应信号第 6 阶幅值分量作为冲击点的特征参量。在此基础上,根据式(8)、(9)可得到各点对应的冲击特征向量,并构建特征信息向量矩阵,如表 2 所示。

表 2 不同冲击位置对应的传感器特征向量矩阵

序号	$T_1$	$T_2$	$T_3$	坐标/mm
1	0.087 0	0.661 0	0.251 0	(30,0)
2	0.022 9	0.328 6	0.648 4	(60,0)
3	0.083 4	0.350 2	0.566 4	(90,0)
4	0.103 8	0.490 0	0.406 2	(30,40)
5	0.121 5	0.498 4	0.380 1	(60,40)
6	0.044 4	0.344 6	0.610 9	(90,40)
∴	∴	∴	∴	∴

将表 2 中的冲击特征向量作为 BP 神经网络训练样本集,  $X=[T_1, T_2, T_3]$  作为输入向量元素,将  $T_1$  代入输入层第一个神经元,  $T_2$  代入第二个神经元,  $T_3$  代入第三个神经元,冲击点位置坐标  $P=[x, y]$  作为输出向量元素。通过神经网络训练得到特征信息与冲击点位置之间相对关系的非线性回归模型,从而为随机冲击点载荷位置辨识提供依据。

通过选取等间隔单元网格节点作为冲击点,可相对均匀的取得板面各个监测区域内的冲击载荷坐

标。将其代入神经网络训练能更好实现对测试点位置坐标的精确辨识。表 3 为板结构冲击判位结果。

表 3 板结构冲击判位结果

序号	实际坐标/cm	判位坐标/cm	误差距离/cm
1	(3,4)	(5.1,3.5)	2.16
2	(9,16)	(10.5,14.3)	2.29
3	(18,8)	(20.56,6.3)	3.07
4	(21,24)	(17.8,26.3)	3.95
5	(27,32)	(25.9,27.2)	4.92
6	(9,40)	(10.8,42.1)	2.77

冲击实验结果对比如图 8 所示,且从表 3 中可看出大部分测试点误差均集中在 5 cm 内,神经网络辨识结果基本符合要求。此外,当冲击点靠近加强筋时辨识误差将会增大,尤其是加强筋附近的冲击点定位精度降低,这是由于加强筋对冲击响应信号传播产生干扰所致。值得指出的是,通过进一步细分单元网格作为冲击响应训练样本,还能够继续提高载荷定位精度。

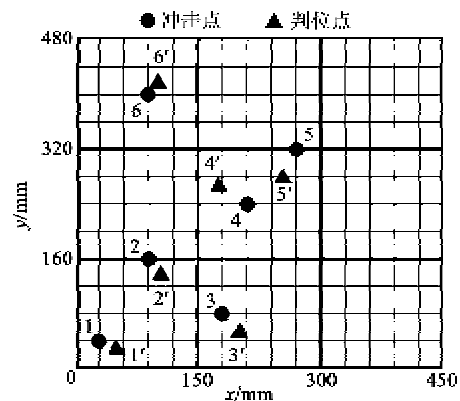


图 8 冲击实验结果对比图

## 4 结论

本文提出了一种基于小波包能量幅值比分析与 BP 神经网络的加筋复合材料板状结构光纤冲击载荷快速定位方法。该方法具有如下特点:

- 1) 在特征信号提取与选择方面,采用小波包分解技术提取冲击响应信号特征参量,选取不同阶数能量幅值作为表征冲击位置的状态信息。
- 2) 在判位模式辨识法方面,采用不同位置光纤光栅传感器响应信号的能量幅值比进行神经网络训练,得到传感器响应信号与冲击点位置的非线性映射关系,具有较高辨识精度。
- 3) 在光纤传感器网络布局优化方面,根据加筋结构特点将板面划分为若干监测区域,并依据传感器应变敏感特性,确定传感数量位置与布局方向。

4) 在传感器温度补偿方面,选择冲击前后光纤光栅中心波长偏移量作为反映结构响应特征的基本参量,有助于消除环境温度变化对冲击判位效果的影响。

#### 参考文献:

- [1] 廖美东. 复合材料应用的现状和趋势[J]. 材料工程, 1993, 6(6): 44-45.  
LIAO Meidong. The present situation and trend of the application of composite materials[J]. Materials Engineering, 1993, 6(6): 44-45.
- [2] 朱炜焱, 许希武. 复合材料层合板低速冲击损伤的有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 201-207.  
ZHU Weiyao, XU Xiwu. Finite element simulation of low velocity impact damage on composite laminates [J]. Journal of Composite Materials, 2010, 27(6): 201-207.
- [3] FUTATSUMORI S, KOHMURA A. Evaluation of electromagnetic field characteristics inside carbon fiber reinforced plastic structure using reverberation chamber method[J]. Proceedings of the 43rd European Microwave Conference, 2013, 10(6/10): 1275-1278.
- [4] 智浩, 文祥荣, 缪龙秀, 等. 动态载荷的频域识别方法[J]. 北方交通大学学报, 2000, 24(4): 5-10.  
ZHI Hao, WEN Xiangrong, MIAO Longxiu, et al. Dynamic loading identification in frequency domain[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2000, 24(4): 5-10.
- [5] 余永龙, 谭华耀. 有源波、空分复用光纤光栅传感网络[J]. 中国激光, 2002, 29(2): 131-134.  
YU Yonglong, TAN Huayao. Active spatial/wavelength-division multiplexed fiber bragg grating sensor system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(2): 131-134.
- [6] TAKEDA S, MINAKUCHI S, OKABE Y, et al. Delamination monitoring of laminate composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors[J]. Composites Part A, 2005, 36(7): 903-908.
- [7] 周晚林, 王鑫伟, 胡自力. 压电智能结构冲击定位方法的实验研究[J]. 力学与实践, 2003, 25(6): 37-40.  
ZHOU Wanlin, WANG Xinwei, HU Zili. Experimental study of impact location method for piezoelectric smart structure[J]. Mechanics and Practice, 2003, 25(6): 37-40.
- [8] 张伟, 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 & Acoustooptics, 2008, 30(6): 677-679.
- [9] ZUBIA J, MATEO J, LOSADA M A, et al. Optical fiber sensors for structural health monitoring in air-planes[J]. Icton, 2013, 6(23/27): 1-4.
- [10] 万彦辉, 秦永元. 小波分析在陀螺信号滤波中的研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(4): 455-457.  
WAN Yanhui, QIN Yongyuan. Application of wavelet analysis in gyro signal filtering[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(4): 455-457.
- [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, 4(9): 1557-1560.  
LIU Shoushan, YANG Chenlong, LI Ling, et al. Adaptive wavelet thresholding based ultrasonic signal denoising[J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 4(9): 1557-1560.
- [12] WERNER J, PLOOG K, QUEISSER H J. Interface-state measurements at schottky contacts: a new admittance technique[J]. Phys Rev Lett, 1986, 57: 1080.
- [13] WERNER J, LEVI A F J, TUNG R T, et al. Origin of the excess capacitance at intimate schottky contacts [J]. Phys Rev Lett, 1988, 60: 53.
- [14] ALIVOV Y I, KALININA E V, CHERENKOV A E, et al. Fabrication and characterization of n-ZnO/p-Al-GaN heterojunction light-emitting diodes on 6H-SiC substrates[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(23): 4719-4721.
- [15] SZU S P, LIN C Y. AC impedance studies of copper doped silica glass[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 82(2): 295-300.
- [16] DEULING H. Interface states in Si/SiO<sub>2</sub> interfaces[J]. Solid State Electronics, 1972, 15(5): 559-571.
- [17] SHOCKLEY W, READ JR W T. Statistics of the recombinations of holes and electrons[J]. Physical Review, 1952, 87(5): 835-571.
- [18] NICOLLIAN E H, BREWS J R. MOS (Metal Oxide Semiconductor) physics and technology [M]. New York: Wiley-Interscience, 1982(1): 920-923.
- [19] O'CONNOR E, MONAGHAN S, LONG R D, et al. Temperature and frequency dependent electrical characterization of HfO<sub>2</sub>/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As interfaces using capacitance-voltage and conductance methods[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(10): 102902-102902-3.
- [20] THOAN N H, KEUNEN K, AFANAS'EV V V, et al. Interface state energy distribution and Pb defects at Si(110)/SiO<sub>2</sub> interfaces: Comparison to (111) and (100) silicon orientations [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109: 013710.

(上接第 1046 页)