

文章编号 1004-924X(2012)04-0712-07

## 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

芦吉云<sup>1\*</sup>, 王帮峰<sup>1</sup>, 梁大开<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**以光纤布拉格光栅(FBG)为传感网络,构建了复合材料冲击载荷实时在线监测系统,研究了基于小波包特征提取及支持向量回归机的光纤-碳纤维复合材料结构冲击定位方法。针对同一冲击点,分析不同传感信号,获得了冲击响应信号小波包能量谱,分析结果表明小波包能量谱中特定阶数对冲击敏感。改变冲击点位置研究小波包能量谱与冲击位置之间的关系,提出将第6阶小波包能量值作为冲击定位的特征向量。采用支持向量回归机建立样本数据的回归模型,预测冲击载荷位置,并对支持向量机的相关调整参数进行了优化。实验表明,支持向量机的网络测试误差为4.81%。研究结果可为碳纤维复合材料(CFRP)层状结构的冲击性能评估提供可行的实验方法。

**关键词:**光纤光栅传感器;复合材料构件;冲击载荷定位;小波包能量谱;支持向量回归机;

**中图分类号:**TN253;V251.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0712

## Identification of impact location by using FBG based on wavelet packet feature extraction and SVR

LU Ji-yun<sup>1\*</sup>, WANG Bang-feng<sup>1</sup>, LIANG Da-kai<sup>2</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

\* Corresponding author, E-mail: lujiyun@nuaa.edu.cn

**Abstract:** A real-time monitoring system of composite impact loads was constructed by a Fiber Bragg Grating(FBG) sensor network, and the wavelet packet feature extraction and a Support Vector Regression(SVR) were used to identify the impact location. For the impact response signals at the same position measured by different FBG sensors, the wavelet packet energy spectrum analysis shows that some specifically frequency bands of sensor signals are sensitive to the impact. The relation between impact location and wavelet energy was studied and the sixth decomposition level wavelet packet energy was chosen as the characteristic vector of the impact location. The SVR whose tuning parameters have been optimized was used to establish the sample regression model and predict the impact location. The result shows that network testing error of the SVR is 4.81%. The research provides a practical reference for the impact performance evaluation of the structures from carbon fiber reinforced plastics.

收稿日期:2011-10-18;修订日期:2011-12-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075207);江苏省博士后基金资助项目(No. 1001014C);中国博士后基金资助项目(No. 20110491414);南京航空航天大学引进人才基金资助项目(No. YAH10013)

**Key words:** Fiber Bragg Grating (FBG) sensor; composite component; impact load position; wavelet packet energy spectrum; Support Vector Regression (SVR)

## 1 引言

碳纤维复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) 具有重量轻、强度高、耐腐蚀、加工成型方便及弹性优良等特点,已广泛应用于航空航天领域<sup>[1]</sup>。飞行器在制造、维修和运输过程中易受到意外物体的冲击,尤其是低速冲击,冲击作用会使飞行器复合材料层合板内部的力学性能严重退化,使结构的机械强度和承载能力大幅下降。多项研究和实验观测表明,冲击点背面损伤强度低于冲击点处的损伤强度,低速冲击极易造成飞行器结构的目不可检损伤,严重威胁结构的安全<sup>[2]</sup>。多数情况下,冲击损伤监测需要首先对冲击位置进行识别,故研究一种实时、在线的冲击载荷自检测方法对于大型飞行器结构尤为重要。

针对复合材料冲击载荷监测,国内外研究人员建立了冲击过程中层合板的应变和应力分布数学模型和冲击损伤模型如准静力模型、Hertz 模型、接触-冲击模型,研究了冲击对复合材料力学性能的影响,得到了复合材料在不同冲击载荷下的损伤机理<sup>[3-5]</sup>。通常采用无损监测方法如射线法、超声波、渗透、涡流、压电传感器及 C 扫描等判断损伤位置,进而用多重信号分类算法、子波分析和自适应共振理论 (ART) 神经网络等<sup>[6-7]</sup>对冲击载荷的大小和位置进行判定,取得了良好的预测效果。但由于复合材料本身的密度分布、界面分离、夹杂、树脂固化不良等因素的影响,常用的无损检测方法在判断冲击位置时存在一定误差,更重要的是无法实现冲击的实时在线监测<sup>[8]</sup>。为实现复合材料飞行器结构的冲击载荷自检测,本文采用光纤布拉格光栅传感器 (Fiber Bragg Grating, FBG) 网络对低速冲击的位置进行实时主动监测。FBG 对应变、压力敏感,是性能优良的传感元件,多个 FBG 传感器复用可构成分布式光纤传感网络。FBG 传感器体积小、径细,外形犹如一根光纤,将其粘贴与复合材料结构表面不影响材料结构本身的力学性能,与电量型传感器相比,具有抗电磁干扰的优良特性,适合应用于航空航天领域<sup>[9-10]</sup>。提出的方法采用小波包分析方

法提取冲击响应不同频段内的信号能量特征指标,将小波包能量谱中关键频率段对应的能量值作为样本,利用支持向量回归机 (Support Vector Regression, SVR) 对有限样本数据建立回归模型,实现了复合材料试件的冲击载荷定位。本文的研究结果将为 CFRP 层状结构的冲击性能评估提供一个切实可行的实验方法。

## 2 冲击定位算法理论

### 2.1 小波包能量谱特征提取

小波包分析可对信号的低频和高频部分进行分解,根据被分析信号的特征自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高时频分辨率,更有效地反映信号的时频特征<sup>[11]</sup>。

Daubechies (Db) 小波具有紧支撑的正交性和双正交性,且具有随阶数递增的消失矩数目和绝对的规则性,可实现快速算法和完全重构。Db 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,故本模型选用 Db 小波族中的小波系列。通过 Db4、Db6 与 Db8 小波分解结果对比,发现 Db4 小波包在重构信号效果、能量集中度方面优于 Db6 与 Db8 小波,因此本文采用 Db4 小波作为冲击响应信号的小波函数。首先对采集到的结构振动信号进行小波包分解,在实验中选择 5 层小波包分解,可得到第 5 层从低频到高频共 32 个频率成分的信号特征;然后,对小波包分解系数重构,根据各频带范围的信号,对第 5 层所有结点分析,可得每个结点的重构系数  $S_{i,j}$  ( $i=5, j=1, 2, 3, 4, \dots, 32$ );随之计算各频带信号的总能量,则构成小波包能量谱:

$$E_{5,j} = \int |S_{5,j}|^2 dt. \quad (1)$$

### 2.2 支持向量回归机

支持向量机是通过非线性变换将输入空间变换到高维特征空间,在高维特征空间利用线性函数  $f(x) = \omega \cdot \phi(x) + b$  实现数据的拟合。根据结构风险最小化原则,线性函数中的参数可以通过最小化如下目标函数得到。

$$R(\omega) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l |y_i - f(x_i)| + C \|\omega\|^2, \quad (2)$$

其中  $C$  为泛化常数, 代价函数  $|\cdot|_\epsilon$  为 Vapnik  $\epsilon$  不敏感损失函数, 通过引入两组非负的松弛变量  $\{\xi_i\}_{i=1}^l$  和  $\{\xi_i^*\}_{i=1}^l$ , 式(2)的最优化问题可转化为约束最小化的形式

$$\frac{1}{2} \|\omega\|^2 + c \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (\xi + \xi^*), \quad (3)$$

且满足如下不等式约束条件:

$$\begin{cases} y_i - \omega \cdot \phi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i \\ \omega \cdot \phi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

通常将式(3)转换成对偶形式进行求解, 对偶形式可根据目标函数和约束条件建立 Lagrange 函数

$$L = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + c \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^l (\eta_i \xi_i + \eta_i^* \xi_i^* - \sum_{i=1}^l a_i (\epsilon + \xi_i - y_i + \omega \cdot \phi(x_i) + b) - \sum_{i=1}^l a_i^* (\epsilon + \xi_i^* - y_i - \omega \cdot \phi(x_i) + b)), \quad (5)$$

对 Lagrange 函数  $L$  分别求  $\omega, b, \xi_i$  及  $\xi_i^*$  的偏导得到回归对偶问题的优化目标函数。

$$W(a_i, a_i^*) = \sum_{i=1}^l y_i (a_i - a_i^*) - \epsilon \sum_{i=1}^l (a_i + a_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (a_i - a_i^*) (a_j - a_j^*) \times (\phi(x_i) \cdot \phi(x_j)), \quad (6)$$

式(6)最大化, 得

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) (\phi(x_i) \cdot \phi(x)) + b. \quad (7)$$

根据 Mercer 定理定义内积核

$$K(x_i, x) = \phi(x_i) \cdot \phi(x), \quad (8)$$

可得支持向量机回归模型为

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) K(x_i, x) + b. \quad (9)$$

其中, 核函数可以有多种选择, 目前常用的主要有线性核函数, 多项式核函数及径向基函数(Radial Basis Function, RBF)等<sup>[12]</sup>。

### 3 实验研究

#### 3.1 冲击监测系统

CFRP 试件材料为 T300/QY8911, 厚度为 0.22 cm, 采用四边固支方式, 其有效面积为 54 cm × 54 cm, 在试件表面粘贴 8 个 FBG 传感器,

分为 4 路接入传感器坐标, 如图 1 所示。

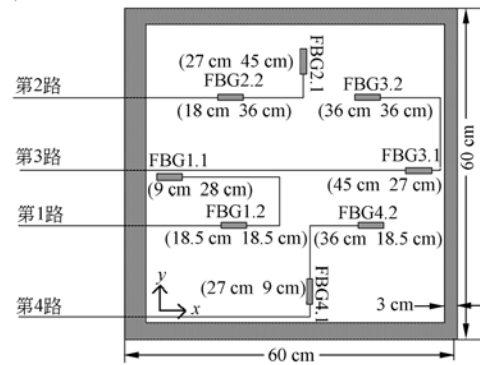


图 1 碳纤维板结构试件图

Fig. 1 CFRP structure specimen

通过摆锤冲击法对试件的不同位置进行冲击, 摆锤的直径为 2 cm, 质量为 5.03 g, 当摆长为 90 cm, 角度控制为 60° 时, 对应的能量为 22.182 mJ (0.094 m/s)。利用 FBG 传感器监测结构的冲击响应, 传感器分 4 路接入扫描频率为 1 kHz 的光纤光栅解调仪 SM130, 光纤光栅解调仪实时监测 FBG 中心波长的变化量, 其中 FBG1.1、FBG1.2……FBG4.1、FBG4.2 对应的中心波长分别为 1 527.078, 1 549.693, 1 527.084, 1 550.366, 1 527.106, 1 550.352, 1 527.147 与 1 549.693 nm, 基于 FBG 的低速冲击载荷监测系统如图 2 所示。

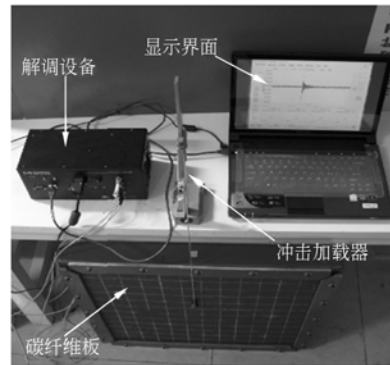


图 2 基于 FBG 冲击监测系统

Fig. 2 Impact monitoring system based on FBG

#### 3.2 冲击响应信号特征提取

将碳纤维板划分为 11 行 11 列, 长、宽均为 4.5 cm 的单元格, 以任意冲击点 (13.5 cm, 18 cm) 为例, 8 个 FBG 传感器监测的冲击响应信号如图 3 所示。对采集到的传感信号进行 5 层小波分解, 1 至 32 个结点的能量如图 4 所示。

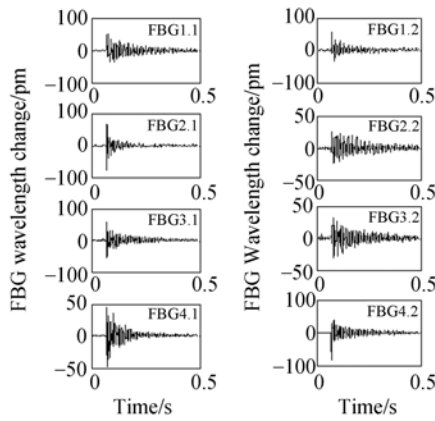


图 3 FBG 监测的冲击响应信号

Fig. 3 Impact response signals monitored by FBG

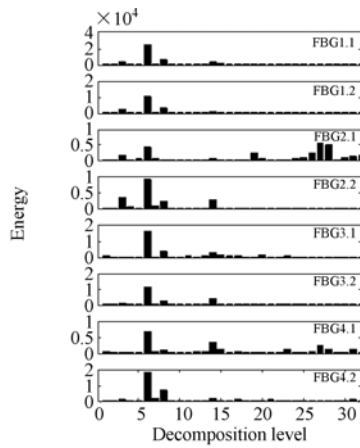


图 4 冲击响应信号的小波包能量谱

Fig. 4 Wavelet packet energy spectra of impact response signals

图 4 为同一冲击点,不同传感器监测的信号,与其他传感信号相比 FBG2.1、FBG4.1 信号在高阶(大于 20 阶)小波包能量较大,出现这一情况的原因在于传感器排布方式的不同。对小波包能量谱中的前 20 阶能量进行分析,各传感信号的第 6 阶能量最大,其他第 3,8 及 14 阶能量变化明显,表明小波包能量谱中这几阶能量可能对冲击敏感。将小波包能量谱中第 3,6,8 及 14 阶能量分别记为  $E_3, E_6, E_8$  与  $E_{14}$ 。为消除传感器性能差异、粘胶等因素对测量结果的影响,对不同冲击点,相同传感器监测的冲击响应信号小波包能量谱变化进行分析。以 FBG3.2(横向排布),FBG4.1(纵向排布)为例,冲击点由第 3 列第 1 行移至第 6 行过程中,传感器与冲击点位置如图 5 所示。FBG 监测信号的小波包能量谱中  $E_3, E_6,$

$E_8$  与  $E_{14}$  变化趋势见图 6,其中(a)、(b)分别为 FBG3.2,FBG4.1 的监测结果。

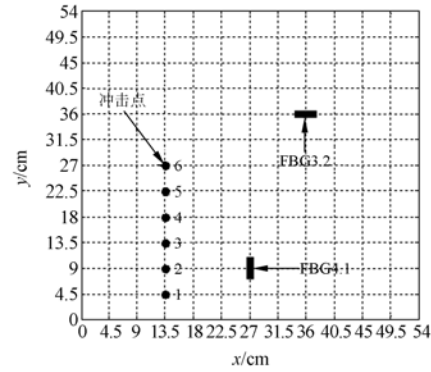
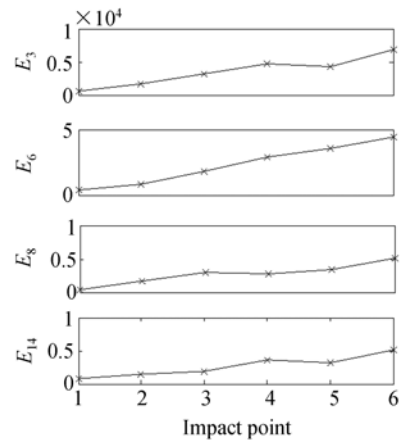
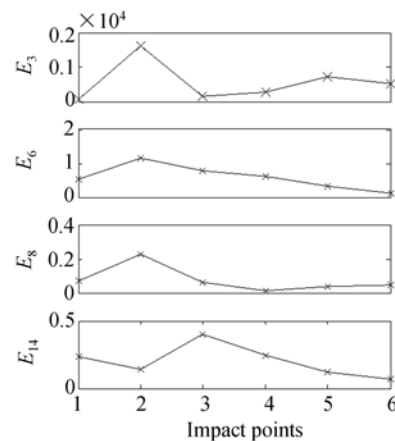


图 5 传感器与冲击点位置

Fig. 5 Locations of FBG and impact point



(a)FBG3.2



(b)FBG4.1

图 6 不同冲击点对应的  $E_3, E_6, E_8$  与  $E_{14}$  变化趋势

Fig. 6 Variation of  $E_3, E_6, E_8$  and  $E_{14}$  at different impact points

由图 6(a)可见,冲击不同点  $E_6$  变化量远大于  $E_3, E_8$  与  $E_{14}$  的变化量,且随冲击点与传感器之间距离的减小,角度的增加,  $E_6$  逐渐增大;在冲击点 5 处,  $E_3$  与  $E_{14}$  减小;冲击点 4 处  $E_8$  减小,因此  $E_3, E_8$  及  $E_{14}$  与冲击点位置相关不大。图 6(b)显示在冲击距 FBG4.1 最近的点 2 处,  $E_6$  最大,且随冲击点与传感器之间距离的增加、角度的减小,  $E_6$  逐渐减小;冲击点 1、3 与传感器之间的距离和角度相差不大,但由于冲击点 1 距固支框较近,故冲击点 1 处  $E_6$  略小于冲击点 3 对应的  $E_6$  值。 $E_3, E_8$  及  $E_{14}$  变化与冲击位置的改变无明显关系。因此,无论横向还是纵向排布的传感器均

可用  $E_6$  作为冲击响应信号的特征值。

### 3.3 冲击载荷定位

冲击 11 行 11 列各点,共产生 121 样本,选取其中 100 个样本做训练样本,其余 21 个为测试样本。定义样本的输入  $\mathbf{P}$  为 8 个传感器的特征向量,对特征向量进行归一化,期望输出  $\mathbf{T}$  为横坐标值、纵坐标值,表 1 为测试样本。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} E_{\text{FBG1.1}}(6) & E_{\text{FBG1.2}}(6) & E_{\text{FBG2.1}}(6) & E_{\text{FBG2.2}}(6) & E_{\text{FBG3.1}}(6) & E_{\text{FBG3.2}}(6) & E_{\text{FBG4.1}}(6) & E_{\text{FBG4.2}}(6) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = [\mathbf{X} \quad \mathbf{Y}]$$

表 1 测试样本(归一化后的能量值)

| 冲击点位置/cm    | $E_{\text{FBG1.1}}$ | $E_{\text{FBG1.2}}$ | $E_{\text{FBG2.1}}$ | $E_{\text{FBG2.2}}$ | $E_{\text{FBG3.1}}$ | $E_{\text{FBG3.2}}$ | $E_{\text{FBG4.1}}$ | $E_{\text{FBG4.2}}$ |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| (31.5,40.5) | 0.004 773           | 0.001 97            | 0.007 348           | 0.001 769           | 0.003 076           | 0.001 83            | 0.007 083           | 0.002 786           |
| (27,9)      | 0.001 142           | 0.001 196           | 0.003 48            | 0.000 464           | 0.000 931           | 0.000 402           | 0.002 583           | 0.001 017           |
| (13.5,22.5) | 0.030 341           | 0.010 179           | 0.001 313           | 0.010 995           | 0.017 017           | 0.013 818           | 0.001 805           | 0.018 222           |
| .....       | .....               | .....               | .....               | .....               | .....               | .....               | .....               | .....               |
| (27,27)     | 0.001 473           | 0.000 318           | 0.000 066           | 0.000 475           | 0.000 952           | 0.000 207           | 0.000 385           | 0.000 637           |
| (4.5,36)    | 0.011 398           | 0.004 31            | 0.000 858           | 0.004 815           | 0.007 227           | 0.005 230           | 0.002 219           | 0.007 597           |
| (49.5,40.5) | 0.010 198           | 0.002 751           | 0.000 768           | 0.002 799           | 0.005 064           | 0.003 696           | 0.001 876           | 0.004 982           |

将训练样本输入至 SVR 进行训练,为实现非线性映射,核函数可选 RBF 核函数与多项式核函数,相比于多项式核函数 RBF 具有可调参数少,可调参数优化模型简单、预测精度高等优点,本文选用了 RBF 核函数。RBF 可调参数分别是核宽度  $\gamma$  与惩罚系数  $c$ ,本文采用十倍交叉验证对  $\gamma$  与  $c$  优化选择,对横坐标位置训练时,最优  $(\gamma, c) = (28.423, 0.352)$ ;对纵坐标训练时  $(\gamma, c) = (14.963, 0.759)$ 。建立支持向量回归机模型,将测试样本输入预测冲击点的位置如图 7 所示。

由图 7 可见,在(31.5,9)冲击点载荷识别误差最小为 0.901 cm,在冲击点(27,40.5)时,识别结果较差,误差为 3.357 cm。由于 CFRP 为对称结构,选择的预测样本基本包括了 CFRP 试件第 1 行至第 11 行的关键点,得到的结果具有一定的参考价值。建立以下的函数,用于表示测试误差:

$$E(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^p \sqrt{(x_i - \bar{x}_i)^2 + (y_i - \bar{y}_i)^2}}{\sum_{i=1}^p \sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad (10)$$

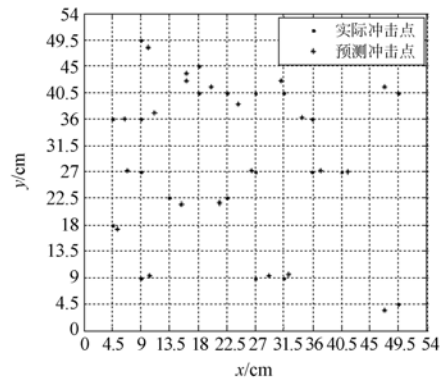


图 7 冲击载荷位置识别

Fig. 7 Impact position identification

其中,  $p=21$  为数据个数,  $x_i, y_i$  为加载点位置预测值,  $\bar{x}_i, \bar{y}_i$  为加载点位置实际值。  $|x_i - \bar{x}_i| (i=1, 2, \dots, 21), |y_i - \bar{y}_i| (i=1, 2, \dots, 21)$  分别为横坐标、纵坐标预测结果的绝对误差。通过计算得 SVR 的网络测试误差为  $E(x, y) = 4.81\%$ 。

## 4 结 论

对于大型飞行器结构,传统的无损检测方法

难以实现载荷的实时、在线监测,本文采用 FBG 构建低速冲击载荷自诊断系统。通过小波包分析方法对传感器采集的冲击响应信号进行特征提取,分析各频率段信号的能量与冲击位置之间的关系,提出将第 6 阶小波包能量值作为特征向量。由于在工程应用中无法进行多次冲击实验,所以

本文采用专门针对小样本数据的支持向量机对冲击位置进行预测,并对相关调整参数进行了优化,实现了 CFRP 试件的冲击载荷定位。实验结果证明,该方法能够有效判定冲击载荷的位置,网络测试误差为 4.81%,可满足实际工程要求。后续的研究工作将考虑采用 FBG 预测冲击能量。

#### 参考文献:

- [1] 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: 1353-1352.
- [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 W Y, XU X W. Finite element simulation of low velocity impact damage on composite laminates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(6): 201-207. (in Chinese)
- [3] LAURSEN T A, SIMO J C. A continuum-based finite element formulation for the implicit solution of multibody, large deformation frictional contact problems [J]. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 1993, 36(20): 3451-3485.
- [4] 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 ZH Y, XU X W. Residual compressive strength of composite laminates after low velocity impact [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(1): 140-146. (in Chinese)
- [5] 段世慧, 叶天麒. 一种通用的冲击分析模型及低速冲击响应计算[J]. *航空学报*, 2002, 23(2): 158-161.
- DUAN SH H, YE T Q. General impact analysis model and low velocity impact response algorithm [J]. *Acta Aeronautica et AST Ronautica Sinica*, 2002, 23(2): 158-161. (in Chinese)
- [6] 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.
- SHU Y ZH, YUAN SH F, WANG Y. Impact localization in composite using multiple signal classification method [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(3): 105-110. (in Chinese)
- [7] 周杰敏. 子波分析和 ART 神经网络在复合材料板冲击定位中的应用[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 AST Ronautica Sinica*, 2001, 22(1): 94-96. (in Chinese)
- [8] 陈先有, 曹金华, 黄俊波. 航空用复合材料结构件无损检测技术分析[J]. *国防技术基础*, 2007, 7(8): 11-14.
- CHEN X Y, CAO J H, HUANG J B. NDT technology of composite structure for aviation [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2007, 7(8): 11-14. (in Chinese)
- [9] CHAMBERS A R, MOWLEM M C, DOKOS L. Evaluating impact damage in CFRP using fibre optic sensors [J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67: 1235-1241.
- [10] LEE J R, TSUDA H, TOYAMA N. Impact wave and damage detections using a strain-free fiber Bragg grating ultrasonic receiver [J]. *NDT & E International*, 2007, 40: 85-93.
- [11] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1731-1737. (in Chinese)
- [12] 张学工. 统计学习理论的本质[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 96-116.
- ZHANG X G. *Statistical Learning Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 96-116. (in Chinese)

## 作者简介:



芦吉云(1980—),女,山西朔州人,博士,讲师,2002年于吉林大学获得学士学位,2009年于南京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为飞行器结构健康监测与飞行数据处理等。E-mail:lujiyun@nuaa.edu.cn



梁大开(1956—),男,江苏南京人,博士,教授,博士生导师,1996年于南京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为智能材料与结构中的光纤传感器及 SPR 传感器的应用。E-mail:liangdk@nuaa.edu.cn



王帮峰(1970—),男,博士,甘肃兰州人,教授,博士生导师,1999年于东北大学获得博士学位,主要研究方向为主动流场控制,信号处理以及结构健康监测等。E-mail:bfwang@nuaa.edu.cn

## ● 下期预告

## 基于大视场目标定位的复眼系统标定

郭方,王克逸,闫佩正,吴青林

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

为完成一种新型的大视场复眼定位系统,着重探讨了该系统的结构特点、定位数学模型、三维目标阵列产生过程、标定方法和定位特点。首先,对复眼结构和系统装置进行了简要介绍。随后建立了目标定位和多通道同时标定的数学模型。接着,通过引入分光器,调整目标平面水平移动轴和目标平面的垂直性以及目标平面和复眼平面之间的平行性。然后,使用消逝点、目标共像点的方法求得初始点和初始距离后,得到目标平面上每一点的空间三维坐标。最后,求出目标阵列与对应通道的入射角度,提取出对应的目标像点重心,然后建立各通道入射角度和像点重心之间的对应关系。实验结果显示,初步标定后的系统能对最大横向 $110^\circ$ 、纵向 $90^\circ$ 视场范围内的目标进行定位,距离定位精度在 $2\%$ 以内。此方案基本能满足复眼成像非线性标定的要求,具有一定的操作灵活性。