

# 基于小波变换和支持向量多分类机的 光纤布拉格光栅低速冲击定位系统

路士增 姜明顺\* 隋青美 赛耀樟 曹玉强 张法业 贾磊

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要** 利用光纤布拉格光栅(FBG)构建传感器网络,结合小波变换、频谱分析和支持向量机分类算法,对碳纤维复合材料板低速冲击区域定位进行了研究。根据划分区域进行冲击试验,探索冲击区域与信号特征之间的关系。在对低速冲击信号进行小波变换去除基线干扰的基础上,采用傅里叶变换提出提取冲击信号幅频特性作为信号特征进行低速冲击区域定位识别的方法,将提取的信号幅频特性作输入、冲击区域类别作输出构建支持向量多分类机实现低速冲击区域定位识别。实验结果表明:在 500 mm×500 mm×2 mm 的碳纤维复合材料板上对 36 个测试样本进行低速冲击区域定位识别,实现 33 个低速冲击区域准确定位,正确率达 90%以上,低速冲击定位系统的区域识别精度为 40 mm×40 mm,且每个区域定位时间小于 1011 ms。研究结果为碳纤维复合材料板的低速冲击区域定位检测提供了一种科学可靠的方法。

**关键词** 光栅;低速冲击区域定位;支持向量多分类机;碳纤维复合材料;小波变换;信号特征提取

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0305006

## Identification of Impact Location by Using Fiber Bragg Grating Based on Wavelet Transform and Support Vector Classifiers

Lu Shizeng Jiang Mingshun Sui Qingmei Sai Yaozhang Cao Yuqiang Zhang Faye Jia Lei

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract** The identification system of impact location is constructed by a fiber Bragg grating (FBG) sensor network, and the wavelet transform, the frequency spectral analysis and support vector classifiers algorithm are used to identify the impact location. According to the impact test on the division area, the relationship between the impact area and signal characteristics is explored. On the basis of using wavelet transform to remove the low velocity impact signal baseline interference, the identification method of low velocity impact area location based on signal amplitude frequency characteristics is proposed. Support vector classifiers machine whose input is signal amplitude frequency characteristics and output is impact area to realize the identification of low velocity impact area location is built. The result shows that for 36 impact area on the 500 mm×500 mm×2 mm carbon fiber reinforced plastics plate under test, 33 impact area is accurate identification, regional location accuracy is above 90%, regional location accuracy is 40 mm×40 mm and each area identification time is less than 1011 ms. The research results provide a scientific and reliable method for the identification of the carbon fiber composite material plate location.

**Key words** gratings; identification of low velocity impact area; support vector classifiers machine; carbon fiber reinforced plastics; wavelet transform; signal characteristic extraction

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 070.4790; 040.1880

## 1 引言

碳纤维复合材料(CFRP)以其轻质高强等优点被越来越广泛地应用于航空航天领域,但碳纤维复

合材料树脂基体和增强纤维的脆性,使其对冲击特别敏感,即使是低速冲击也会对 CFRP 造成不可视损伤(如内部分层损伤)<sup>[1]</sup>。不可视损伤易引起

收稿日期: 2013-09-29; 收到修改稿日期: 2013-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61174018)、山东省自然科学基金(ZR2011FQ025)、中国博士后基金(20110491620)、山东省博士后创新项目专项基金(201103024)

作者简介: 路士增(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术和信号处理等方面的研究。E-mail: luzs1986@126.com

导师简介: 贾磊(1959—),男,博士,教授,主要从事光纤传感技术和信号处理等方面的研究。E-mail: jialei@sdu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: sdujiangmingshun@163.com

CFRP 结构力学性能退化,威胁 CFRP 结构安全,造成灾难性后果。因此,准确实现 CFRP 低速冲击定位,对于 CFRP 结构的安全尤为重要。

国内外学者对低速冲击定位做了大量研究。Kirky 等<sup>[2]</sup>在 CFRP 板安装 3 个光纤布拉格光栅传感器监测低速冲击产生的 Lamb 波,根据 Lamb 波到达不同传感器的时差采用三角形定位方式进行了研究;Frieden 等<sup>[3]</sup>利用 Lamb 波到达不同光纤布拉格光栅传感器的时差采用四边形定位方式进行了研究;Hajzargerbashi 等<sup>[4]</sup>利用 Lamb 波在 CFRP 板中传播的方向和时差建立了最优目标函数;Meo 等<sup>[5]</sup>基于小波分析技术对复合材料板冲击定位进行了研究;刘建等<sup>[6]</sup>利用应变花原理提出相对幅值法,并对铝板的冲击定位进行了研究;梁栋等<sup>[7]</sup>采用多主体协作冲击定位方法对铝板结构进行了定位研究;Lu 等<sup>[8-9]</sup>采用支持向量回归机对 CFRP 板结构低速冲击进行了研究。但由于在 CFRP 板结构中传播的 Lamb 波存在频散现象(即传播波速随着频率和传播方向的不同而不同)和时差定位算法中时差判断存在误差的问题,直接降低了基于 Lamb 波

和时差定位算法的定位精度。因此,本文基于低速冲击引起 CFRP 板结构应变实现区域定位,消弱了 CFRP 板各向异性影响,采用具有体积小、本征抗电磁干扰等优点的光纤布拉格光栅<sup>[10]</sup>(FBG)作为传感器构建传感网络,针对实测低速冲击信号存在的基线干扰问题,通过引入在信号滤波和基线校正取得良好应用效果的小波变换<sup>[11-13]</sup>予以解决,并构建了支持向量多分类机,实现了低速冲击区域定位。

## 2 冲击定位算法

### 2.1 基于小波变换的冲击信号特征提取

CFRP 板低速冲击区域定位实验中,由于 FBG 传感器波长漂移和外界环境干扰等因素,易使 FBG 传感器监测的低速冲击信号中含有基线干扰。图 1(a)为低速冲击原始信号波形图,可以看出其含有基线 1531.832 nm,且其幅频特性中含有的低频直流分量幅值 3064 远大于其余频率的幅值,降低了频谱分析的精度,如图 1(b)所示。因此,为提高冲击定位精度,必须消除基线干扰的影响。

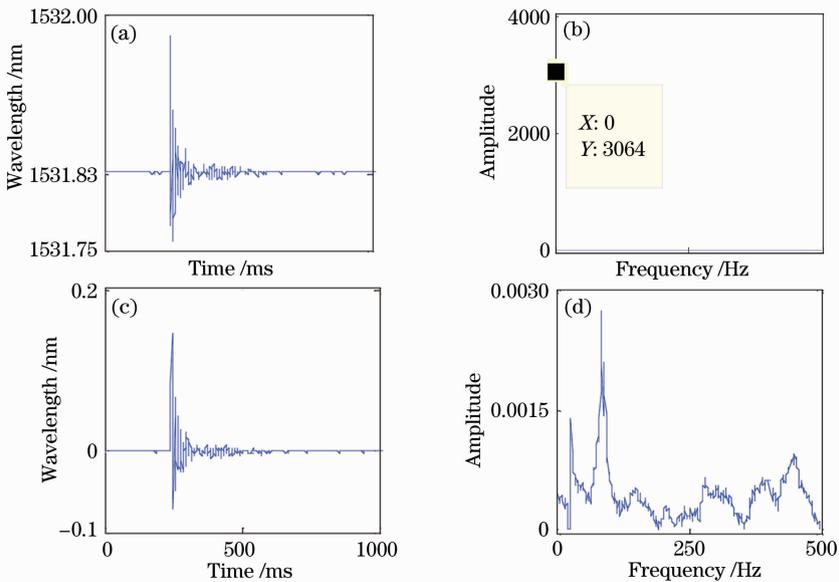


图 1 基线干扰去除前后的低速冲击信号及幅频特性对比图

Fig. 1 Comparison of low speed impact signal before and after removing baseline interference and amplitude frequency characteristics

本文选用小波变换的方法去除基线干扰。定义  $f(t) \in L^2(R)$ ,  $L^2(R)$  表示平方可积的实数空间,即能量有限的信号空间, $R$  代表实数。选取小波函数  $\psi(t)$ , 则其连续小波变换为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

式中  $a$  为伸缩因子,  $b$  为平移因子,  $\psi^*$  表示小波函数

的共轭。在计算机应用中,必须将连续小波离散化,因此引入

$$a = a_0^j, \quad b = ka_0^j b_0, \quad (2)$$

式中  $k, j$  为整数,  $a_0$  为大于 1 的固定伸缩步长。可离散化小波变换的系数为

$$W_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \int_R f(t) \psi^* (a_0^{-j} t - kb_0) dt. \quad (3)$$

进一步得重构公式为

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} W_{j,k} a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0), \quad (4)$$

式中  $C$  为与信号无关的常数。

根据小波变换原理去除基线干扰流程如图 2 所示。首先将低速冲击原始信号进行小波分解,得到高频细节系数和低频逼近系数,由于基线干扰存在于低

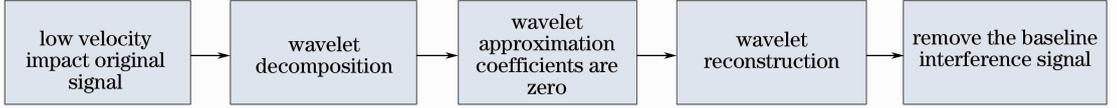


图 2 小波变换去除基线干扰流程图

Fig. 2 Flowchart using wavelet transform to remove signal baseline interference

## 2.2 C-SVC 多分类算法

支持向量分类算法(C-SVC),通过引入非线性映射函数将原始模式空间映射到更高维的特征空间,然后在高维空间建立最优超平面,将高维空间中的线性问题与低维空间中的非线性问题相对应,实现原始模式空间的分类。其两分类算法如下:已知训练集  $T = \{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\} \in (X, Y)^l$ , 其中  $x_i \in X = \mathbf{R}^n$ ,  $y_i \in \{1, -1\}$ ,  $i = 1, \dots, l$ , 则可以选取核函数  $K(x_i, x_j)$  和惩罚参数  $\beta$  构造最优化问题,即

$$\min_a \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l y_i y_j a_i a_j K(x_i \cdot x_j) - \sum_{j=1}^l a_j,$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^l y_i a_i = 0, 0 \leq a_i \leq \beta, i = 1, \dots, l, \quad (5)$$

式中 s. t. 代表优化约束条件。常用的核函数  $K(x_i, x_j)$  主要有多项式函数、径向基(RBF)函数等,选择 RBF 函数

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

式中  $\sigma$  代表核宽,  $\|\cdot\|$  代表欧式范数。求解(6)式得最优解

$$\mathbf{a}^* = (a_1^*, \dots, a_l^*)^T, \quad (7)$$

选  $\mathbf{a}^*$  的一个小于  $\beta$  的正分量  $a_i^*$ , 并计算

$$b^* = y_j - \sum_{i=1}^l y_i a_i^* K(x_i, x_j), \quad (8)$$

求得决策函数

$$f(x) = \text{sgn}\left[\sum_{i=1}^l y_i a_i^* K(x_i, x) + b^*\right]. \quad (9)$$

上述算法解决了两分类问题。以 C-SVC 两分类算法为基础,实现 C-SVC 多分类识别算法<sup>[14]</sup>。即将数据集分为  $k$  类,则可以构建  $k$  个 C-SVC 两分类器,并定义属于第  $i$  个 C-SVC 两分类器的类别,输出为 +1,不属于第  $i$  个分类器的类别为负类,输出

频段的小波系数中,因此去除低频逼近系数仅保留高频细节系数,然后进行小波重构得到去除基线干扰的低速冲击信号。

采用小波变换对图 1(a)原始数据去除基线干扰,所得图 1(c)中基线已为 0,其幅频特性含有的基线干扰分量也已去除,如图 1(d)所示,且可以看出此次低速冲击激励出 CFRP 板 29.3 Hz 和 86.9 Hz 的固有频率。

为 -1。当进行多分类识别时,将样本数据输入  $k$  个 C-SVC 两分类器,若第  $i$  个分类器的输出为 1,则判定该分类器对应的类别为待识别类别。

## 2.3 光纤光栅低速冲击区域定位算法

基于上述分析,基于 C-SVC 多分类机的光纤光栅低速冲击区域定位算法如下:

在碳纤维复合材料板上划分  $p$  个正方形区域作为待识别定位区域,若将每一个正方形区域作为一类的类别,则可以构建 C-SVC  $p$  分类机,并标记  $p$  个类别为  $S = \{1, 2, 3, \dots, p\}$ , 这样就将低速区域定位问题转换为 C-SVC  $p$  分类的问题。定义样本数据为  $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, p\}$ , 其中  $y_i \in S$ 。  $x_i$  表示  $n$  个 FBG 传感器监测的低速冲击信号特征,  $x_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}\}$ , 单个 FBG 传感器监测的低速冲击信号特征为  $A_m = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ , FBG 传感器监测的低速冲击信号特征提取为低速冲击信号的幅频特性,  $a_k$  为低速冲击信号幅频特性的幅值。则可以将  $n$  个 FBG 传感器监测的低速冲击信号特征作输入,低速冲击区域作输出构建由  $p$  个 C-SVC 两分类器组成的 C-SVC  $p$  分类机。以此为基础完成基于 C-SVC 多分类机的光纤光栅低速冲击区域定位识别的训练和测试。

训练算法流程如下:

- 1) 提取 FBG 监测的信号幅频特性作为训练样本特征  $x_i$ , 同时指定对应低速冲击区域类别  $y_i$ ;
- 2)  $i=0$ , C-SVC  $p$  分类机训练开始;
- 3) 定义属于第  $i$  个分类器的低速冲击区域类别为 +1, 不属于第  $i$  个分类器的低速冲击区域类别为 -1;
- 4) 训练第  $i$  个分类器;
- 5) 若  $i < p$ ,  $i++$ , 返回步骤 3);
- 6) 完成 C-SVC  $p$  分类机训练。

测试算法流程如下：

- 1) 提取待识别低速冲击区域的 FBG 监测的信号幅频特性作为测试样本特征；
- 2) 代入 C-SVC  $p$  分类机进行识别；
- 3) 检查所有分类器输出，若第  $i$  个分类器的输出为 +1，则判定该分类器对应的 CFRP 板区域类别为待识别低速冲击区域，实现低速冲击区域定位。

### 3 低速冲击定位系统搭建

#### 3.1 FBG 应变原理

FBG 传感基本原理为

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (10)$$

式中  $\lambda$  为反射波波长,  $n$  为光纤光栅有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期。FBG 同时对温度和应变敏感。仅考虑应变对 FBG 的影响, 根据(10)式推导出 FBG 波长变化与应变关系

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e) \cdot \epsilon, \quad (11)$$

式中  $P_e$  为有效弹光函数,  $\epsilon$  为应变。(11)式表明, FBG 波长变化与应变之间呈线性关系。当 CFRP 板遭受低速冲击产生应力变化时, 粘贴于 CFRP 板的 FBG 波长会产生变化。

#### 3.2 低速冲击定位系统搭建

光纤光栅低速冲击定位系统主要由光纤光栅解调仪、碳纤维复合材料板、4 个 FBG 传感器和计算机组成。光纤光栅解调仪选用美国 MOI 公司的 SM130, 它可以对 4 个通道上的所有传感器以 1 kHz 的扫描频率同时扫描, 分辨率小于 1 pm。系统框图和实物图分别如图 3 和图 4 所示。

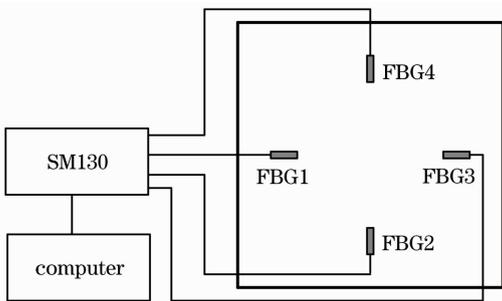


图 3 光纤光栅低速冲击定位系统框图

Fig. 3 System diagram of identification of low velocity impact location by using FBG

选用 500 mm×500 mm×2 mm 的 CFRP 板 4 边固支于实验台。在 CFRP 板 4 边贴有 4 个 FBG 传感器, 中心波长及粘贴位置见表 1。在碳纤维复合材料板上划分 36 个 40 mm×40 mm 的正方形区

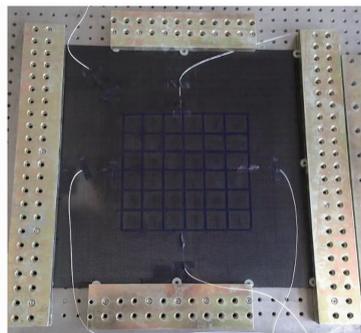


图 4 光纤光栅低速冲击定位实物图

Fig. 4 Object of identification of low velocity impact location by using FBG

域作为待识别低速冲击区域, 并将每一个正方形区域作为一类的类别, 标记为  $S = \{1, 2, 3, \dots, 36\}$ , 这样就将低速区域定位问题转换为 C-SVC 多分类的问题, 可以构建 C-SVC 多分类机予以解决。低速冲击区域划分如图 5 所示。采用重量为 26 g 的钢球作为低速冲击装置, 以自由落体的方式进行垂直冲击, 冲击高度为 250 mm, 对应的低速冲击能量为 0.065 J, 冲击速度为 2.24 m/s。

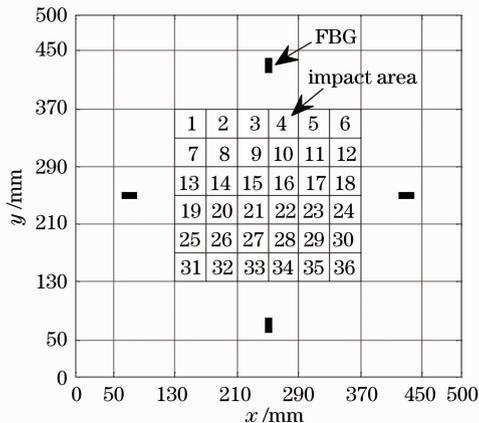


图 5 碳纤维复合材料低速冲击区域示意图

Fig. 5 Low velocity impact position diagram of CFRP

表 1 FBG 传感器波长及粘贴位置

Table 1 Wavelength of FBG sensor and paste position

Sensor	Wavelength /nm	Location /(mm, mm)
FBG1	1531.832	70,250
FBG2	1535.763	250,70
FBG3	1539.957	420,250
FBG4	1565.190	250,420

### 4 低速冲击定位实验及结果分析

#### 4.1 冲击信号特征提取

用钢球依次低速冲击图 5 所示的 CFRP 板上标号为 9、11、21、23 的正方形区域, 以 FBG1 传感器监

测的低速冲击信号为例研究低速冲击位置与信号特征之间的关系。以 FBG1 传感器监测区域 9 产生的低速冲击信号为例,进行小波变换,去除基线干扰。选择具有正交性和信号局部特性描述能力较强的优点的 Daubechies(DB)系列小波族 DB4 小波作为低速冲击信号处理的小波函数。去除基线干扰主要是将小波逼近系数置零,对细节系数则不做处理,经反复实验验证选取分解尺度为 8。

对图 6(a)含有基线 1531.832 nm 的原始冲击信号进行小波变换提取低频逼近系数和高频细节系数,图 7 为提取的逼近系数  $c_{a8}$ 、图 8 为提取的细节系数,图 8(a)~(h) 分别表示细节系数  $c_{d8}$ 、 $c_{d7}$ 、 $c_{d6}$ 、 $c_{d5}$ 、 $c_{d4}$ 、 $c_{d3}$ 、 $c_{d2}$ 、 $c_{d1}$ 。将逼近系数置零并进行信号重构得到的冲击信号[见图 6(b)]的基线干扰已经去除。

采用同样方法去除 FBG1 传感器监测的上述 4 个位置的低速冲击信号基线干扰。对去除基线干扰的低速冲击信号进行傅里叶变换,提取信号幅频特征。为能直观清晰地观察信号幅频特性与低速冲击区域的关系,将低速冲击不同区域产生的信号幅频特性在同一坐标系下绘出,如图 9 所示。图 9(a)代表 FBG1 监测区域 9 的信号幅频特性、图 9(b)代表区域 11 的信号幅频特性、图 9(c)代表区域 21 的信号幅频特性、图 9(d)代表区域 23 的信号幅频特性。图 9 灰度条表示不同的频率幅值对应不同颜色。分析图 9 发现冲击 CFRP 板不同区域,FBG1 传感器所监测到的 CFRP 板固有频率存在差异。表现为相同固有频率下其幅值不同,如 4 个低速冲击区域

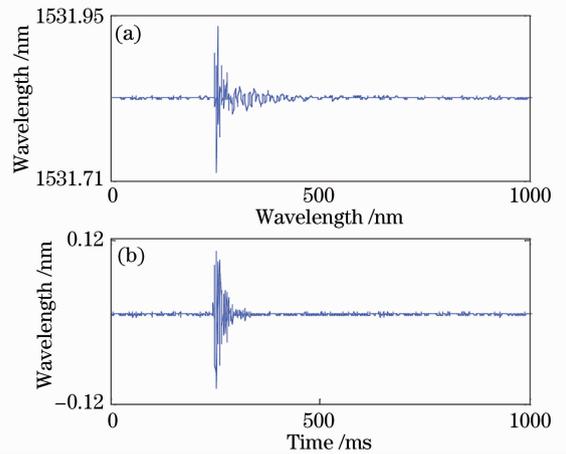


图 6 FBG1 监测的区域 9 的冲击信号波形图  
Fig. 6 Impact signal waveforms based on FBG1 monitoring at area 9

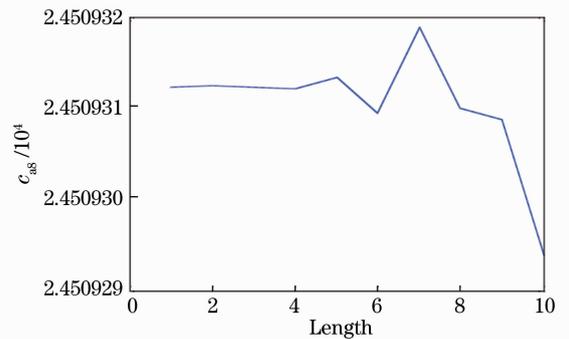


图 7 小波逼近系数图

监测到 CFRP 板 91 Hz 固有频率的幅值依次为 0.00105、0.00208、0.00124、0.00229,再如低速冲击

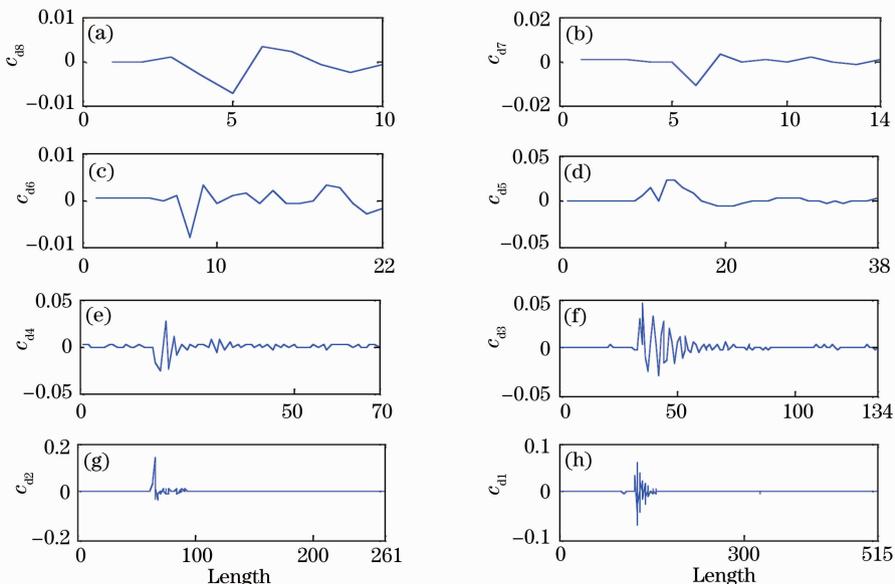


图 8 小波细节系数图

Fig. 8 Wavelet detail coefficients

区域 9 激励出的 CFRP 板 290 Hz 固有频率幅值为 0.00123 明显大于该频率下区域 23 监测到的 0.00013 幅值,说明 FBG 传感器所监测 CFRP 板固有频率幅值与低速冲击区域有关。因此提取低速冲击信号幅频特性作为冲击信号特征可以用来进行低速冲击区域的定位。

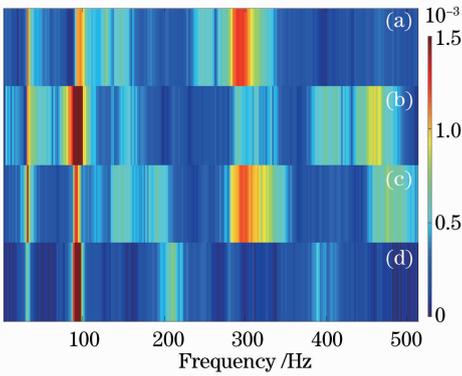


图 9 FBG1 监测的区域 9、11、21、23 的冲击信号幅频特性对比图

Fig. 9 Impact signal amplitude frequency characteristic contrast based on FBG1 monitoring at area 9, 11, 21, 23

#### 4.2 冲击区域定位识别

采用 C-SVC 多分类器进行光纤光栅低速冲击区域定位实验包含 C-SVC 多分类器训练和测试两部分,训练的目的在于建立 C-SVC 多分类器模型,测试的目的是检验 C-SVC 多分类器模型的正确性。

首先依次低速冲击图 5 所示 CFRP 板上划定的 36 个冲击区域各 3 次,共产生 3 组低速冲击区域模式数据做训练样本,建立 C-SVC 多分类器模型。其中,选取 FBG 传感器监测的幅频特性作为 C-SVC 多分类器的输入,低速冲击区域模式作输出。惩罚参数和核宽直接影响着 C-SVC 多分类器性能,采用

交叉验证方法进行选取惩罚参数为 0.25,核宽为 0.0625。采用选取好的惩罚参数和核宽采用 C-SVC 多分类器对 3 组训练样本进行训练,训练样本的低速冲击区域识别结果如图 10 所示。图 10 曲线 a 为第一组训练样本的训练效果,曲线 b 为第二组训练样本的训练效果,曲线 c 为第三组训练样本的训练效果,由图 10 可以看出,C-SVC 分类器对 3 组训练样本均实现了正确的低速冲击区域识别。

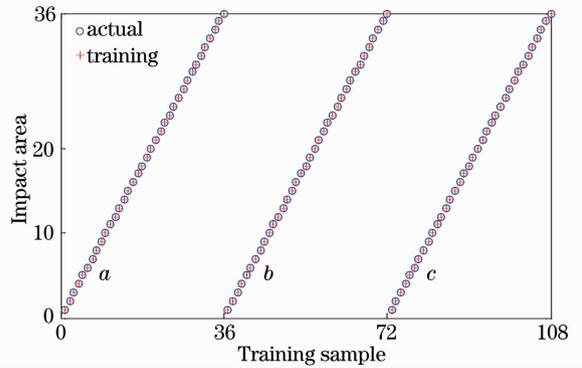


图 10 训练样本的低速冲击区域识别结果图

Fig. 10 Identification results of low velocity impact area based on training sample

建立 C-SVC 多分类器模型之后,再依次低速冲击图 5 所示 CFRP 板上划定的 36 个冲击区域各 1 次,产生 1 组低速冲击区域模式数据做测试样本,对建立的 C-SVC 多分类器模型进行验证。该算法采用 VC++ 6.0 编程软件实现,实验计算机为 Pentium(R) Dual-Core CPU E6700 处理器和 2G 内存。将测试样本代入 C-SVC 分类器模型进行低速冲击区域识别,识别结果如图 11 所示。低速冲击定位识别时间如表 2 所示。

表 2 低速冲击定位识别时间

Table 2 Identification time of low velocity impact area location

Impact area	Identify time /ms						
1	1004	2	1006	3	1009	4	1007
5	1004	6	1007	7	1006	8	1007
9	1006	10	1011	11	1007	12	1005
13	1007	14	1006	15	1005	16	1004
17	1006	18	1006	19	1006	20	1007
21	1010	22	1008	23	1008	24	1006
25	1005	26	1005	27	1007	28	1006
29	1006	30	1007	31	1006	32	1006
33	1006	34	1005	35	1008	36	1005

图 11 表明,对测试的 36 个低速冲击区域,基于 C-SVC 多分类器的低速冲击区域识别算法实现 33 个低速冲击区域准确定位,正确率在 90% 以上。分

析区域定位错误的 3 个低速冲击区域,发现基于 C-SVC 多分类器的低速冲击区域识别算法将其定位于实际冲击区域相邻的区域内(如将实际冲击区域

为区域 9 错误定位于冲击区域 10), 属于实际应用可接受范围内。同时表 2 表明, 对测试的 36 个低速冲击区域, 均在低于 1011 ms 的时间内做出准确定位识别, 可满足实际应用需要。因此, 实验表明基于 C-SVC 多分类器的光纤光栅低速冲击区域定位系统具有可行性, 低速冲击定位系统的区域识别精度为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。

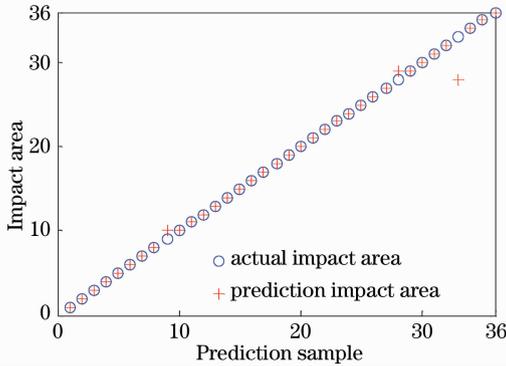


图 11 测试样本的低速冲击区域识别结果图

Fig. 11 Identification results of low velocity impact area based on prediction sample

## 5 结 论

针对碳纤维复合材料的低速冲击位置识别问题, 提出了基于小波变换和支持向量分类机的光纤光栅冲击区域定位方法。通过小波变换去除低速冲击信号基线干扰, 采用傅里叶变换提取信号幅频特性作为支持向量分类机输入, 低速冲击区域作为支持向量分类机输出, 构建基于支持向量分类机的光纤光栅低速冲击区域定位系统, 并进行了实验研究。实验结果表明: 基于小波变换和支持向量分类机的光纤光栅冲击区域定位系统对 36 个测试样本进行低速冲击区域定位识别, 实现 33 个低速冲击区域准确定位, 正确率在 90% 以上, 低速冲击定位系统的区域识别精度为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ , 且每个区域定位时间小于 1011 ms。因此利用光纤光栅传感网络, 结合支持向量分类机算法实现碳纤维复合材料的低速冲击区域识别具有可行性。

## 参 考 文 献

1 Su Yongzhen. Research on Low Velocity Impact Health Monitoring Methods for Aeronautical Materials Structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

苏永振. 航空材料结构低速冲击健康监测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

2 E Kirkby, R de Oliveira, V Michaud, *et al.*. Impact localization with FBG for a self-healing carbon fiber composite structure[J]. Composite Structures, 2011, 94(1): 8-14.

3 Jeannot Frieden, Joel Cugnoni, John Botsis, *et al.*. Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors-part 1: impact detection and localization[J]. Composite Structures, 2012, 94(2): 438-445.

4 Talieh Hajzargerbashi, Tribikram Kundu, Scott Bland. An improved algorithm for detecting point of impact in anisotropic inhomogeneous plates [J]. Ultrasonics, 2011, 51(3): 317-324.

5 M Meo, G Zumpano, M Piggott, *et al.*. Impact identification on a sandwich plate from wave propagation responses[J]. Composite Structures, 2005, 71(3-4): 302-306.

6 Liu Jian, Qiu Jinhao, Chang Weijie, *et al.*. Location of impact load using rectangular piezoelectric sensors [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3): 257-259. 刘建, 袁进浩, 常伟杰, 等. 运用矩形压电片的冲击载荷定位新方法[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(3): 257-259.

7 Liang Dong, Yuan Shenfang, Sun Hongbing. Precise impact positioning method based on aerospace structure multi-agent coordination[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(2): 191-197. 梁栋, 袁慎芳, 孙红兵. 一种高精度航空结构多主体协作冲击定位方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(2): 191-197.

8 Lu Jiyun, Wang Bangfeng, Liang Dakai. Wavelet packet energy characterization of low velocity impacts and load localization by optical fiber Bragg grating sensor technique[J]. Appl Opt, 2013, 52(11): 2346-2352.

9 Lu Jiyun, Wang Bangfeng, Liang Dakai. Identification of impact location by using FBG based on wavelet packet feature extraction and SVR[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 712-714. 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(2): 712-714.

10 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, *et al.*. Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305005. 李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤光栅水听器研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305005.

11 Fang Yonghua, Kong Chao, Lan Tiange, *et al.*. Denoising and baseline correction of spectrum by wavelet transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 1088-1092. 方勇华, 孔超, 兰天鸽, 等. 应用小波变换实现光谱的噪声去除和基线校正[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1088-1092.

12 Zhu Jigui, Chen Hao, Xue Bin. Wavelet optimization method of laser displacement sensor based on position sensitive detector[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308003. 郝继贵, 陈浩, 薛彬. 基于位置敏感探测器的激光位移传感器小波优化方法[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308003.

13 Liu Lei, Yu Miao, Yang Ruijuan, *et al.*. Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0605005. 刘磊, 于淼, 杨瑞娟, 等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605005.

14 Ruan Hua, Dai Liankui. Support vector machine classification and regression based hybrid modeling method and its application in Raman spectral analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(11): 2440-2446. 阮华, 戴连奎. 支持向量机分类与回归联合建模方法及其在拉曼光谱分析中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11): 2440-2446.