

文章编号 1004-924X(2014)11-2894-08

基于光纤光栅传感器的复合材料损伤识别系统

路士增¹, 林兰波², 姜明顺^{1*}, 贾磊^{1*}, 隋青美¹, 赛耀樟¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东省产品质量检验研究院, 山东 济南 250102)

摘要:利用光纤布拉格光栅(FBG)构建了传感器网络;结合小波分解与重构算法、频谱分析和支持向量多分类机算法研究了碳纤维复合材料板损伤的模式识别算法。首先,对带有不同损伤模式的复合材料结构进行冲击试验,探索损伤模式与信号特征之间的关系。然后,对信号进行小波分解与重构去除基线干扰;采用傅里叶变换频谱分析提取信号幅频特性,构建了复合材料结构损伤模式识别方法。最后,将提取的信号幅频特性作输入,复合材料结构损伤模式作输出,利用支持向量多分类机,实现了复合材料结构损伤模式识别。在 500 mm×500 mm×2 mm 的碳纤维复合材料板中心,选定 200 mm×200 mm 的实验区域,对 30 组测试样本进行了损伤模式识别。实验结果表明:29 组损伤模式得到了准确识别,正确率为 96.7%。研究结果为碳纤维复合材料板的损伤模式识别提供了一种可靠的方法。

关键词:光纤传感器;光纤布拉格光栅;复合材料;结构损伤;模式识别;支持向量机;小波分析

中图分类号:TN253;V257 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.2894

Identification system of composite material damage based on FBG sensor

LU Shi-zeng¹, LIN Lan-bo², JIANG Ming-shun^{1*}, JIA Lei^{1*}, SUI Qing-mei¹, SAI Yao-zhang¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Institute of Product Quality Inspection, Jinan 250102, China)

* Corresponding author, E-mail: sdujiangming@163.com; jialei@sdu.edu.cn

Abstract: A sensing network was constructed by a Fiber Bragg Grating (FBG) sensor, and a mode identification algorithm for the damage of carbon composite materials was researched by combining the wavelet decomposition and reconstruction, frequency spectrum analysis and support vector classifier algorithm. Firstly, according to the impact test on a composite material structure with different damage modes, the relationship between damage modes and signal characteristics was explored. Then, the wavelet decomposition and reconstruction were used to remove the signal baseline interference, and the identification method of damage mode for composite materials was constructed based on extracting signal amplitude frequency characteristic by Fourier transform analysis. Finally, the extracted signal amplitude frequency characteristic was used as an input and the damage mode as an output, the damage modes of composite materials were identified based on support vector classifiers. An experimental area with 200 mm×200 mm was selected in a 500 mm×500 mm×2 mm

收稿日期:2013-12-24;修订日期:2014-02-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61174018);山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2011FQ025);中国博士后基金资助项目(No. 20110491620);山东省博士后创新专项基金资助项目(No. 201103024)

carbon fiber reinforced plastic plate center. The 30 damage modes are tested, and the result shows that 29 damage modes are identified accurately with identification accuracy of 96.7%. The research provides a reliable method for the identification of damage modes of composite materials.

Key words: fiber sensor; fiber Bragg grating; composite material; structural damage; pattern recognition; Support Vector Classifier(SVC); wavelet analysis

1 引言

碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)因具有质量轻、强度高优点而被越来越多地应用于航空领域^[1]。由于航空环境恶劣,CFRP结构的任何细微损伤都可能导致灾难性事故;CFRP的早期损伤一般出现在材料内部,易被人们忽视,而当损伤发现时,CFRP多已被破坏到无法使用的程度。因此,人们非常重视航空领域应用的CFRP结构的健康状态,希望能借助在CFRP结构上安装传感器构建传感器网络,通过分析在线监测数据来识别CFRP结构的健康状态。所以,CFRP结构损伤的在线识别是保障其结构安全的重要组成部分。

国内外学者对复合材料损伤模式识别做了大量研究。Qi^[2]基于小波分析技术对复合材料断裂过程中产生的断裂信号进行特征提取,实现了复合材料结构失效模式的识别。Loutas^[3]等人基于小波分析技术提取带中心孔损伤的复合材料结构损伤的信号特征,实现了复合材料结构损伤的状态监测。陈换过^[4]等人采用提升小波包分解、多传感器特征融合和神经网络模式分类结合的损伤诊断方法,对复合材料结构损伤监测进行了研究。在上述研究中,人们多采用压电式传感器,但航空应用上要求传感器及其解调设备的质量轻、体积小且监测时不能破坏材料结构,这些特殊要求限制了压电式传感器的应用。近年来兴起的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有尺寸小、重量轻、带宽宽、灵敏度高、抗电磁干扰和耐腐蚀能力强及可通过复用构成传感网等优点,已开始应用在结构损伤识别等方面^[5-8]。Takeda^[9]等人在复合材料板中埋入小直径FBG传感器,用以监测落锤冲击试验中4个不同冲击能量强度作用于复合材料板所产生的损伤状态。实验结果表明,使用小直径FBG传感器能有效监测复合材料的分层损伤。Frieden^[10]等人在复合

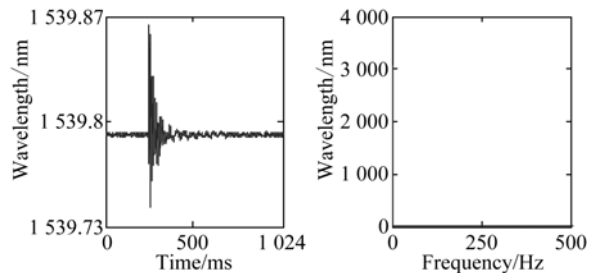
材料板上粘贴FBG传感器,通过监测复合材料结构固有频率的变化来进行其结构的损伤监测。梁大开^[11]等人基于FBG传感器,并结合复合材料损伤失效判据研究了复合材料板冲击能量的等级判定。上述研究在基于FBG传感器的复合材料损伤模式识别方面取得了初步进展。

本文基于FBG传感器构建了传感网络,通过在线监测CFRP结构的应变变化,提取信号特征以实现复合材料的损伤识别。针对监测信号存在的基线干扰问题,引入了在基线校正中取得良好应用效果的小波分解与重构算法^[12-13]。针对复合材料损伤模式的识别问题,采用具有良好模式识别效果的支持向量多分类机(Support Vector Classifier, SVC)^[14]予以解决。最后构建了基于SVC的复合材料损伤模式识别实验系统。本研究为复合材料损伤识别提供了一种可靠的方法。

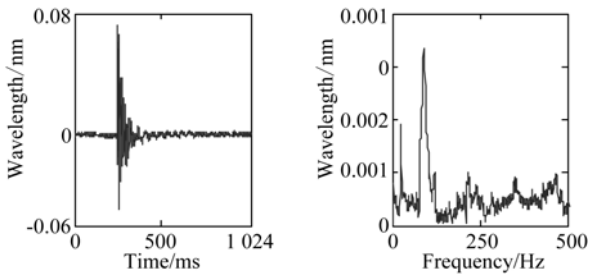
2 损伤模式识别算法

2.1 基于小波分解与重构算法的信号特征提取

在CFRP结构损伤模式识别的实验中,波长漂移和外界环境干扰等因素易使FBG传感器监测信号中含有基线干扰,如图1(a)所示,基线波长为1 539.790 nm。基线干扰导致信号幅频特性含有低频直流分量,且幅值远大于其余频率幅值,如图1(b)所示,因此必须消除基线干扰。



(a) 原始信号 (b) 原始信号幅频特性
(a) Original signal (b) Amplitude frequency characteristics of original signal



(c) 去除基线干扰信号 (d) 去除基线干扰的信号幅频特性
(c) Signal after removing baseline (d) Amplitude frequency characteristics of signal after removing baseline

图 1 基线干扰去除前后的信号及幅频特性对比图

Fig. 1 Signals before and after removing baseline interference and comparison of their amplitude frequency characteristics

冲击信号是典型的非平稳信号,基线干扰主要存在于其低频部分。去除基线干扰的方法主要有曲线拟合法和小波变换法。曲线拟合法通过在原始信号中减去采用多项式拟合出的基线漂移来去除基线干扰,其效果与信号长度有关,并且该方法基于信号时域进行分析,难以区分信号的低频和低频部分,容易丢失信号中的有用信息。而小波变换基于信号时频域进行分析,具有良好的时频局部性、选基灵活性和去相关性。它可以对信号进行多分辨率分解,通过将含有基线干扰的信号的低频部分置零来去除基线干扰,不会造成有用信息的丢失。因此,本文选用小波分解与重构算法去除基线干扰。Mallat 提出了小波分解与重构的快速算法^[15],算法定义 f_k 是信号 $f(t)$ 的离散采样数据,且 $f_k = c_{0,k}$,则 $f(t)$ 的正交小波变换分解公式为:

$$\begin{cases} c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} h_{n-2k} \\ d_{j,k} = \sum_n d_{j-1,n} g_{n-2k} \end{cases}, (k = 0, 1, 2, \dots, n-1), \quad (1)$$

其中: $c_{j,k}$ 为尺度函数,主要产生信号的低频部分; $d_{j,k}$ 为小波系数,主要产生信号的高频部分; h, g 为一对正交镜像滤波器组, j 为分解层数, n 为离散采样点。

小波重构是小波分解的逆运算,重构公式为:

$$c_{j-1,n} = \sum_n c_{j,n} h_{k-2n} + \sum_n d_{j,n} g_{k-2n}. \quad (2)$$

由于基线干扰主要存在于信号的低频部分,因此将低频系数置零以去除基线干扰。首先对原始信号进行小波分解得到低频系数和高频系数,然后将低频系数置零,最后进行小波重构去除基线干扰。

采用小波分解与重构算法对图 1(a) 信号去除基线干扰,结果如图 1(c) 所示。由图可知,基线已为 0,且其幅频特性(图 1(d))含有的低频直流分量也已去除。由图 1(d) 可以看出,FBG 传感器监测信号含有 25 Hz 和 90 Hz 的频率。

2.2 ν -SVC 多分类算法

CFRP 结构的损伤识别问题本质上属于模式识别问题。用于损伤模式识别的方法主要基于统计模式识别,如神经网络等,其适用条件是数据样本数目要足够大。然而,航空结构损伤数据难以大量获取,且不可逆,属于小样本模式识别问题,因此传统的模式识别方法不再有效。而 SVC 以统计学习理论为基础,基于结构风险最小化,具有良好的小样本和非线性模式识别性能,并在非平稳信号模式识别中得到了初步应用。因此,本文采用 SVC 法进行研究。Schölkopf^[16] 提出 ν -SVC 实现分类,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 $x_i \in X = \mathbb{R}^n$, $y_i \in \{1, -1\}$, $i = 1, \dots, l$, 选取核函数 $K(x_i, x_j)$ 和参数 ν 构造最优化问题:

$$\begin{aligned} \min_a \quad & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l y_i y_j a_i a_j K(x_i, x_j), \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^l y_i a_i = 0, \\ & 0 \leq a_i \leq \frac{1}{l}, i = 1, \dots, l, \sum_{i=1}^l a_i \geq \nu. \end{aligned} \quad (3)$$

选择径向基函数(Radical Basis Function, RBF)作为核函数 $K(x_i, x_j)$, 有:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left[-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

式中: σ 代表核宽。求式(3)得最优解:

$$a^* = (a_1^*, \dots, a_l^*)^T. \quad (5)$$

进一步选取 $j \in S_+ = \{i | a_i^* \in [0, \frac{1}{l}]\}$, $y_i = 1$,

$k \in S_- = \{i | a_i^* \in [0, \frac{1}{l}]\}$, $y_i = -1$, 并计算:

$$b^* = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l a_i^* y_i (K(x_i, x_j) + K(x_i, x_k)). \quad (6)$$

求得决策函数:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^l y_i a_i^* K(x_i, x) + b^*\right). \quad (7)$$

上述算法解决了两分类问题。以 ν -SVC 两分类算法为基础,实现 ν -SVC 多分类识别算法。将数据集分为 p 类,则可以构建 p 个 ν -SVC 两分类器,并定义属于第 i 个 ν -SVC 两分类器的类别为正类,输出为 +1;不属于第 i 个分类器的类别为负类,输出为 -1。当进行多分类识别时,将样本数据输入 p 个 ν -SVC 两分类器,若第 i 个分类器输出为 1,则判定该分类器对应类别为待识别类别。

2.3 基于 ν -SVC 多分类机的 CFRP 损伤识别算法

由上述分析可知,基于 ν -SVC 多分类机的 CFRP 损伤模式识别算法如下:若将复合材料结构的每一种损伤模式视为一类的类别,则可以构建 ν -SVC 多分类机,并标记 p 种损伤模式类别为 $S = \{1, 2, 3, \dots, p\}$,这样就将复合材料的损伤模式识别问题转换为 ν -SVC 多分类机分类的问题。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 传感器的监测信号特征, $x_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}\}$,单个 FBG 传感器的监测信号特征为 $A_{in} = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ 。提取信号幅频特性为 FBG 传感器的监测信号特征, a_k 为信号幅频特性的幅值。将 n 个 FBG 传感器监测信号特征作为输入,复合材料结构损伤模式作为输出构建由 p 个 ν -SVC 两分类器组成的 ν -SVC 多分类机,并以此为基础完成了基于 ν -SVC 多分类机的 CFRP 结构损伤模式识别的训练和测试。

训练算法流程如下:

(1)提取 FBG 监测信号的幅频特性作为训练样本特征 x_i ,指定对应的复合材料结构损伤的模式类别为 y_i ;

(2) $i=0$, ν -SVC 多分类机训练开始;

(3)定义属于第 i 个分类器的复合材料结构损伤模式类别为 +1,不属于第 i 个分类器的复合材料结构损伤模式类别为 -1;

(4)训练第 i 个分类器;

(5)若 $i < p$, $i++$,返回第三步;

(6)完成 ν -SVC 多分类机训练。

测试算法流程如下:

(1)提取 FBG 监测的待识别复合材料结构损伤模式信号的幅频特性作为测试样本特征;

(2)代入训练好的 ν -SVC 多分类机进行识别;

(3)检查所有分类器输出,若第 i 个分类器输

出为 1,则判定该分类器对应的复合材料结构损伤类别为待识别损伤模式,从而实现复合材料的结构损伤识别。

3 损伤模式识别系统搭建

3.1 FBG 应变原理

FBG 传感的基本原理为:

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (8)$$

式中: λ 为反射波波长, n 为光纤光栅的有效折射率, Λ 为光栅周期。仅考虑应变对 FBG 的影响,根据式(8)推导出 FBG 波长变化与应变的关系:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (9)$$

式中: P_e 为有效弹光函数, ϵ 为应变。式(9)表明, FBG 波长变化与应变之间存在线性关系。当 CFRP 结构板遭受低速冲击产生应力变化时,粘贴于复合材料结构的 FBG 波长会产生变化,从而实现复合材料结构应变变化的在线监测。

3.2 损伤识别系统

基于 FBG 传感器的复合材料结构损伤识别系统主要由光纤光栅解调仪、CFRP 板、FBG 传感器和计算机组成,如图 2 所示。光纤光栅解调仪选用美国 MOI 公司的 SM130,其扫描频率为 1 kHz。选用 500 mm × 500 mm × 2 mm 的 CFRP 板四边固支于实验台。在复合材料板四边贴有 4 个 FBG 传感器,中心波长及粘贴位置见表 1 和图 2。在 CFRP 材料板中间选定 200 mm × 200 mm 区域作为实验区域,在实验区域选定如图 2 所示的 9 个位置点中除位置 5 之外的其余 8 个位置点作为冲击激励点。激励方式采用质量为 25 g 的钢球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 0.06 J。

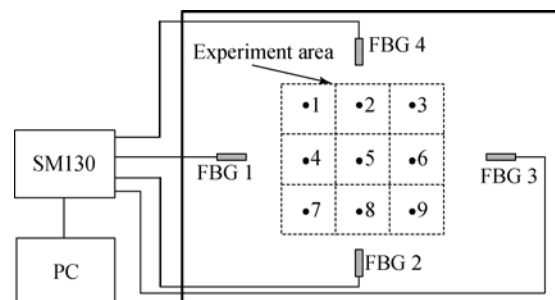


图 2 基于光纤光栅传感器的复合材料损伤识别系统框图

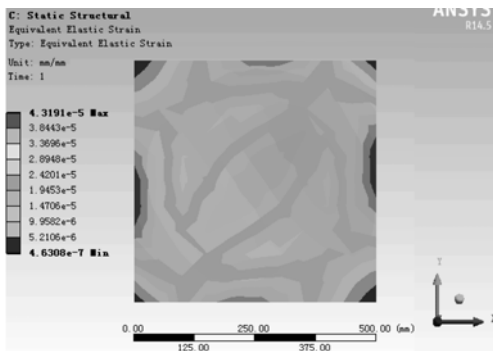
Fig. 2 Identification system of CFRP damage by using FBG sensors

表 1 FBG 传感器波长及粘贴位置

Tab.1 Wavelengths of FBG sensors and their pasting positions

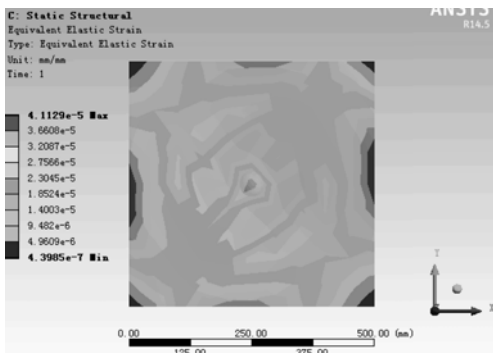
Sensor	Wavelength/nm	Location/(mm,mm)
FBG1	1 531.832	70,250
FBG2	1 535.763	250,70
FBG3	1 539.957	420,250
FBG4	1 565.190	250,420

局部重物加载可引起 CFRP 结构应力的变化,进而影响其力学特性,是仿真分析和实验测试中常用的损伤模拟方式,因此,本实验通过在复合材料板中心位置粘贴不同质量的钢球来模拟不同的损伤程度。在 ANSYS workbench 14.5 有限元仿真平台建立复合材料模型,对该模型施加 10 N 的静态力,得到中心位置(图 2 中位置 5)粘贴 500 g 钢球前后的结构应变分布,分别如图 3(a)和 3(b)所示。由图可以看出,粘贴钢球之后,CFRP 结构应变发生了变化。



(a) 粘贴 500 g 钢球前的结构应变分布

(a) Strain distribution before pasting 500 g steel ball



(b) 粘贴 500 g 钢球后的结构应变分布

(b) Strain distribution after pasting 500 g steel ball

图 3 复合材料结构应变分布图

Fig. 3 Strain distributions of CFRP

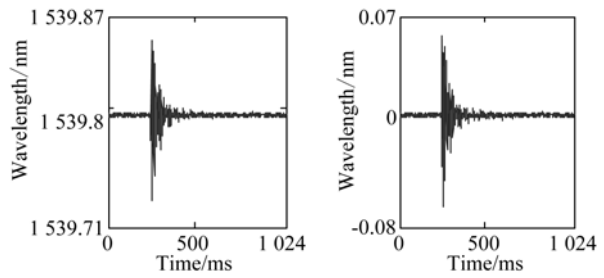
通过在模拟损伤位置点粘贴 100,200,500 g 钢球模拟复合材料结构不同的损伤模式。首先标

记不粘贴钢球的模式为复合材料结构的健康模式 1,然后分别粘贴 100,200,500 g 钢球模拟复合材料结构的 3 种损伤模式,标记为损伤模式 2,3,4。

4 复合材料损伤识别实验及结果分析

4.1 损伤信号特征提取

首先对中心位置没有粘贴钢球的 CFRP 板位置 1 进行冲击并采用 FBG 传感器监测冲击信号,然后依次对粘贴 100,200,500 g 钢球的复合材料板位置 1 进行冲击并通过 FBG 传感器监测冲击信号。以 FBG3 传感器监测信号为例研究信号特征与复合材料损伤模式之间的关系。对 FBG3 传感器监测的带有模拟损伤模式 4 的 CFRP 板冲击信号进行小波分解与重构,去除基线干扰。选取小波基函数为 DB4 小波,分解尺度为 8,对图 4(a)含有基线 1 539.793 nm 的原始信号进行小波分解并提取低频系数,图 5 为提取的低频系数 c_8 ,将 c_8 置零并进行信号重构,得到的信号(图 4(b))的基线干扰已经去除。



(a) 含有基线干扰的信号

(b) 去除基线干扰的信号

(a) Signal with baseline

(b) Signal without baseline

图 4 FBG3 监测冲击复合材料损伤模式 4 在位置点 1 的信号图
Fig. 4 Impact signals at position 1 using FBG3 monitoring on CFRP impacted with damage pattern 4

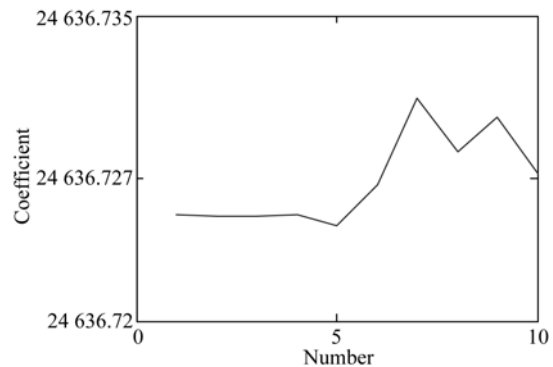


图 5 低频系数图

Fig. 5 Scale coefficients

采用同样方法去除 FBG3 传感器监测的另外 3 种损伤模式信号的基线干扰,结果如图 6 所示。图 6(a)、(b)、(c)、(d)分别为 FBG3 传感器监测的健康模式 1 和损伤模式 2,3,4 的信号。观察图 6 很难从时域信号分辨出信号是否携带损伤信息,因此要对时域信号进行傅里叶变换得到频域信号,再进行频域分析。

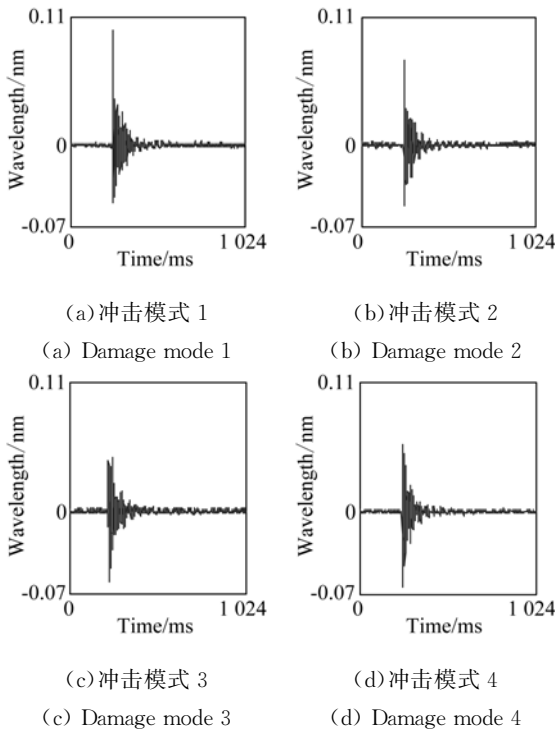


图 6 FBG3 监测冲击模式 1,2,3,4 在位置点 1 的时域对比图
Fig. 6 Contrast of time-domine signals among damage modes 1,2,3,4 based on FBG3 monitoring

对图 6 时域信号进行傅里叶变换,提取信号幅频特征,如图 7 所示。图 7 中,模式(a)、(b)、(c)、(d)分别代表 FBG3 传感器监测的健康模式 1 和损伤模式 2,3,4 的信号幅频特性。分析图 7 发现,在不同的复合材料损伤模式下,监测信号的幅频特性存在差异,如 FBG3 传感器监测健康模式 1 的信号中 90 Hz 频率的幅值为 0.002 067 nm,而损伤模式 2,3,4 的信号中 90 Hz 频率的幅值依次为 0.002 153,0.001 662 和 0.001 843 nm;再如健康模式 1 的信号中 68 Hz 频率的幅值为 0.000 144 nm,明显小于该频率下损伤模式 4 的信号幅值 0.001 121 nm,由此说明 FBG 传感器监测信号的幅频特性与复合材料的损伤模式有关,

因此本文提取信号的幅频特性作为信号特征来进行复合材料损伤模式的识别。

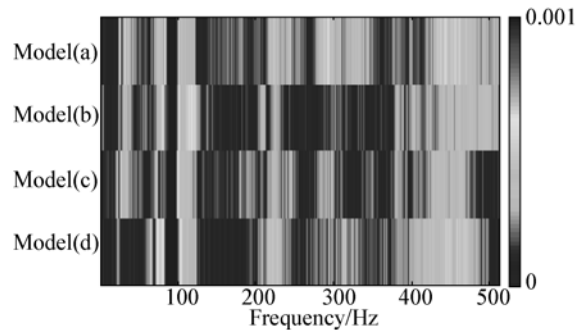


图 7 FBG3 监测冲击模式 1,2,3,4 位置点 1 频域对比图
Fig. 7 Contrast of frequency-domine signal amplitudes among damage modes 1,2,3,4 based on FBG3 monitoring

4.2 损伤模式识别

采用 ν -SVC 多分类器进行基于光纤光栅传感器的复合材料损伤模式识别,该实验分 ν -SVC 多分类器训练和测试两部分。训练的目的在于建立 ν -SVC 多分类器模型,测试的目的是检验 ν -SVC 多分类器模型的可靠性。

首先分别对标记为健康模式 1 和损伤模式 2,3,4 的 CFRP 板的冲击激励点进行冲击实验,共产生 32 组数据作训练样本。选取 FBG 传感器监测信号的幅频特性作为输入,复合材料损伤模式作为输出,建立 ν -SVC 多分类器模型。经实验反复验证,选取模型参数 ν 为 0.5, σ 为 0.002。基于 32 组训练样本的复合材料损伤模式识别结果如图 8 所示。图 8 表明, ν -SVC 分类器对 32 组训练样本均实现了正确的损伤模式识别。

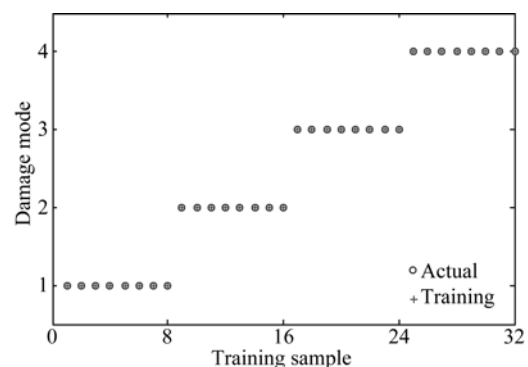


图 8 训练样本的复合材料结构损伤模式识别结果图
Fig. 8 Identification results of CFRP damage modes on training samples

然后分别对标记为健康模式 1 和损伤模式 2,3,4 的 CFRP 板的实验区域进行任意 30 次冲击实验,产生 30 组数据作测试样本,用以验证 ν -SVC 多分类器模型的可靠性。将测试样本代入 ν -SVC 分类器模型进行复合材料损伤模式识别,识别结果如图 9 所示。

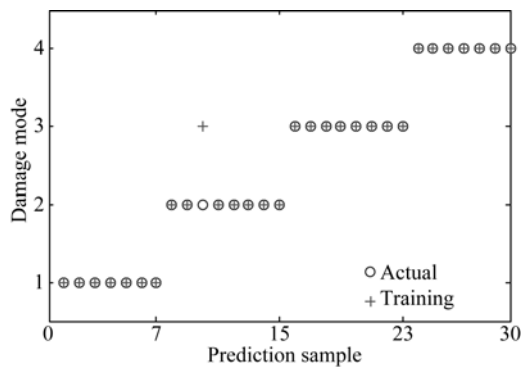


图 9 测试样本的复合材料结构损伤模式识别结果图
Fig. 9 Identification results of CFRP damage modes on prediction samples

图 9 表明, ν -SVC 分类器完成了 29 组测试样本损伤模式的准确识别,正确率为 96.7%,具

有较高的准确性。由此表明,采用 ν -SVC 多分类器进行基于 FBG 传感器的复合材料损伤模式识别具有可行性。

5 结 论

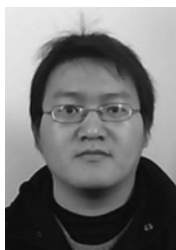
本文针对复合材料结构损伤模式的识别问题,提出了基于 FBG 传感器和支持向量多分类机的复合材料损伤模式识别方法。通过小波分解与重构算法去除信号基线干扰,采用傅里叶变换提取信号幅频特性作为支持向量多分类机的输入,复合材料损伤模式作为支持向量多分类机的输出,构建了 ν -SVC 多分类器模型,然后搭建了 CFRP 结构损伤模式识别系统并进行了实验研究。实验结果表明,基于 FBG 传感器和支持向量多分类机的 CFRP 损伤模式识别系统对 30 组测试样本实现了 29 组损伤模式的准确识别,正确率为 96.7%。因此利用光纤光栅传感网络,结合支持向量多分类机算法来实现复合材料结构损伤的模式识别具有可行性。

参考文献:

- [1] 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用 [J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.
LI W, GUO Q F. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 201-212. (in Chinese)
- [2] QI G. Wavelet-based AE characterization of composite materials [J]. *NDT&E International*, 2000, 33: 133-144.
- [3] LOUTAS T H, KOSTOPOULOS V, RAMIREZ-JIMENEZ C, et al.. Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms [J]. *Composite Science and Technology*, 2006, 66: 1366-1375.
- [4] 陈换过, 江金寿, 李剑敏, 等. 基于提升小波包和神经网络的结构损伤检测 [J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 116-121.
CHEN H G, JIANG J SH, LI J M, et al.. Damage detection of wing-box based on lifting wavelet packet transform and neural network [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(1): 116-121. (in Chinese)
- [5] 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.
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]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 712-714. (in Chinese)
- [6] 罗裴, 田建伟, 王立新, 等. 基于光纤光栅和小波包分析的结构损伤探测 [J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(1): 97-101.
LUO P, TIAN J W, WANG L X, et al.. Structural damage detection based on fiber Bragg grating and wavelet packet analysis [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(1): 97-101. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
- XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- [9] TAKEDA S, MINAKUCHI S, OKABE Y, *et al.*. Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors [J]. *Composites; Part A*, 2005, 36: 903-908.
- [10] JEANNO F, JOEL C, JOHN B, *et al.*. Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors-part II: damage identification [J]. *Composite Structures*, 2012, 94:593-600.
- [11] 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.
- LU G. *Research on the health monitoring of smart material structure using fiber Bragg grating* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [12] 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.
- FANG Y H, KONG CH, LAN T G, *et al.*. Denoising and baseline correction of spectrum by wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1088-1092 (in Chinese)
- [13] 刘磊, 于森, 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): 0605005-1-5.
- LIU L, YU M, YANG R J, *et al.*. Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6):0605005-1-5. (in Chinese)
- [14] 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.
- RUAN H, DAI L K. 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. (in Chinese)
- [15] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7):674-693.
- [16] SCHÖLKOPF B, SMOLA A, WILLIAMSON R C, *et al.*. New support vector algorithms [J]. *Neural Computation*, 2000, 12(5): 1207-1245.

作者简介:



路士增(1986—),男,山东聊城人,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: lusz1986@126.com

通讯作者:



姜明(1981—),男,山东泰安人,博士,副教授,主要从事光电子技术和光纤传感技术方面的研究。E-mail: sdujiangming@163.com

通讯作者:



贾磊(1959—),男,山东济南人,博士,教授,博士生导师,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