

基于偏斜度、陡峭度特征的光纤布拉格光栅 冲击载荷定位

喻俊松, 梁大开

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 针对复合材料结构上低速冲击载荷位置识别问题,通过构建分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感网络,分析了光纤布拉格光栅传感器感知的冲击响应信号时间序列的偏斜度、陡峭度与到传感器之间距离的关系。通过不同位置传感器感知的冲击响应信号的偏斜度和陡峭度对冲击载荷所在的区域和到各个传感器之间的距离进行了辨识,采用加权质心定位算法实现了冲击载荷位置的坐标定位。实验结果表明:在碳纤维复合材料板上 240 mm×240 mm 的监测区域内随机选取 16 个测试样本点进行低速冲击定位识别,实现了所有冲击实验点的区域辨识,坐标定位的平均误差为 20.7 mm。研究结果为碳纤维复合材料板的低速冲击定位提供了一种可靠的方法。

关键词 传感器; 碳纤维复合材料; 低速冲击定位; 光纤布拉格光栅; 偏斜度; 陡峭度; 加权质心定位算法

中图分类号 TP212.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328019

Impact Load Localization by Using Fiber Bragg Gratings Based on Characteristics of Skewness and Kurtosis

Yu Junsong, Liang Dakai

State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In order to solve the problem of low speed impact load location recognition on composite structures, the relationship of skewness, kurtosis of the impulse response signal time series sensed by fiber Bragg grating (FBG) sensors and the distance from sensors to the load is analyzed by constructing a distributed FBG sensing network. The location of impact load and the distance to each sensor are identified by the skewness and kurtosis of impulse response signals perceived by different position sensors. The weighted centroid localization algorithm is used to locate the impact load location. The experiment results show 16 test samples are randomly selected from the monitoring area of 240 mm×240 mm on the carbon fiber reinforced plastics board for low-speed impact positioning and recognition. The identifications of all impact test points are achieved. The average error of coordinate positioning is 20.7 mm. The research results provide a reliable method for the location identification of low speed impact on carbon fiber reinforced plastics structures.

Key words sensors; carbon fiber reinforced plastics; low speed impact localization; fiber Bragg grating; skewness; kurtosis; weighted centroid localization algorithm

OCIS codes 280.4788; 280.5475

1 引 言

碳纤维复合材料(CFRP)相比于传统材料具有强度高、质量轻、易于整体成型等优点,因而被广泛应用于航空航天领域^[1]。当飞行器结构受到冰雹、

飞鸟、掉落零件残骸等的撞击时,结构造成的损伤难以检测且可能会对飞行器的安全带来灾难性后果^[2]。因此为了保证飞行器的正常运行,碳纤维复合材料结构上的低速冲击定位十分重要^[3-6]。

2007 年日本 Tsuda^[7]将光纤布拉格光栅(FBG)

收稿日期: 2017-10-24; **收到修改稿日期:** 2017-11-13

作者简介: 喻俊松(1991—),男,博士研究生,主要从事光纤结构健康监测方面的研究。E-mail: 18070283782@163.com

导师简介: 梁大开(1956—),男,博士,教授,主要从事光纤结构健康监测等方面的研究。E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn
(通信联系人)

应用于碳纤维复合材料板上的冲击定位,实验结果表明,相比于传统压电陶瓷(PZT)传感器,光纤传感器以其体积小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、多参量监测等优点而更适合用于复合材料损伤检测^[7-10]。

目前国内外冲击载荷监测研究中,基于时差法的三角定位法是最为广泛使用的冲击定位方法,但时差法需要较高的数据采样频率^[11-12]。Kim等^[13]通过计算冲击响应信号与样本信号间的交叉关联度以实现冲击点定位,Jang等^[14]通过采集大量冲击点响应信号样本训练神经网络和支持向量回归机建立了冲击响应信号和冲击点位置的非线性关系,将待测冲击点响应信号输入训练模型实现冲击点定位^[14-15],但此类方法工作量大,且需要定期重新标定,工程实用性不强。

本文搭建了多边固支复合材料板上冲击载荷定位系统,提出一种基于冲击响应信号偏斜度、陡峭度特征和加权质心定位算法的碳纤维复合材料板结构分布式光纤冲击定位方法,该方法使用较少先验样本点,适用于低采样频率光纤光栅监测系统。

2 冲击定位算法

2.1 基于偏斜度、陡峭度特征提取原理

偏斜度和陡峭度分别是描述样本序列分布形态对称性和陡缓程度的统计量,是一种快速、有效的判断样本序列分布是否服从正态分布的检验方法。其中偏斜度用来描述样本序列以统计均值为中心的分布对称性。负偏斜度系数说明样本序列在平均值左侧分布得更为广泛。正偏斜度系数说明样本序列在平均值右侧有更广泛的分布。偏斜度系数为零则说明样本序列服从高斯分布或其他对称分布。陡峭度系数用来描述样本序列相对于正态分布平坦度的统计量。高陡峭度系数表明样本序列在平均值附近分布陡峭。低陡峭度系数表明样本序列在平均值附近分布平坦。陡峭度系数为3则说明样本序列与正态分布具有相同的平坦度。样本序列 X 的偏斜度 S 和陡峭度 K 的计算公式^[16]为:

$$S = E \left[\left(\frac{X - E(X)}{D(X)} \right)^3 \right] = \frac{E[X - E(X)]^3}{[D(X)]^{3/2}}, \quad (1)$$

$$K = E \left[\left(\frac{X - E(X)}{D(X)} \right)^4 \right] = \frac{E[X - E(X)]^4}{[D(X)]^2}, \quad (2)$$

式中 $E(X)$ 和 $D(X)$ 分别为样本序列的期望和方差。

2.2 加权质心定位算法

加权质心定位算法广泛应用于无线传感器网络中信号接收节点的定位。在无线传感器网络中,信

号的反射、多径传播、天线增益等问题都会对信号的强度产生显著的损耗,因此可以根据接收信号强度指示(RSSI)计算出信号在传播过程中的损耗,并利用理论和经验模型将传输损耗转化为距离,最后确定节点的位置。

将加权质心定位算法应用于复合材料板上的冲击定位,根据冲击点所在三角形子区域三个顶点处的光纤光栅传感器 FBGA、FBGB、FBGC 测得的冲击载荷到各自传感器的距离和三个光纤光栅传感器所在位置的坐标,计算得到冲击载荷位置的坐标,计算公式为:

$$x = x_A \frac{1/d_A}{1/d_A + 1/d_B + 1/d_C} + x_B \frac{1/d_B}{1/d_A + 1/d_B + 1/d_C} + x_C \frac{1/d_C}{1/d_A + 1/d_B + 1/d_C}, \quad (3)$$

$$y = y_A \frac{1/d_A}{1/d_A + 1/d_B + 1/d_C} + y_B \frac{1/d_B}{1/d_A + 1/d_B + 1/d_C} + y_C \frac{1/d_C}{1/d_A + 1/d_B + 1/d_C}, \quad (4)$$

式中 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 、 (x_C, y_C) 分别为冲击点所在三角形子区域三个顶点处光纤光栅传感 FBGA、FBGB、FBGC 的坐标, d_A 、 d_B 、 d_C 分别为传感器 FBGA、FBGB、FBGC 测得的冲击载荷到传感器的距离。

2.3 冲击载荷定位算法

根据上述分析,基于偏斜度、陡峭度特征和加权质心定位算法的光纤光栅低速冲击定位算法可表述为:

步骤1:构建分布式光纤布拉格光栅传感器网络,沿对角线将正方形监测区域平均划分为4个三角形子区域,并按顺时针方向依次标记为区域I、区域II、区域III、区域IV,光纤光栅传感器排布及区域划分方法如图1所示。

步骤2:计算各传感器感知到的待测冲击点响应信号的偏斜度 S_i 与陡峭度 K_i ($i=1,2,\dots,6$);并根据正方形监测区域4个角上传感器测得的冲击响应信号的偏斜度 S_i 与陡峭度 K_i ($i=1,2,3,4$) 的大小判断冲击点所在区域。

1)如果 S_4 与 S_1 的值在 S_i ($i=1,2,3,4$) 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点

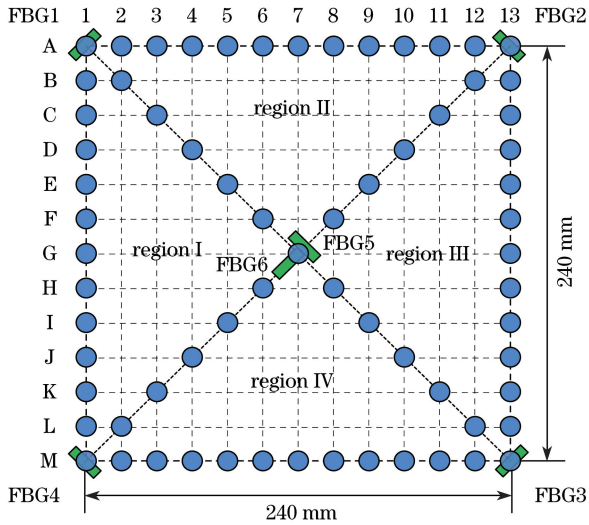


图 1 区域划分与样本冲击点选取示意图

Fig. 1 Schematic diagram of region division and impact sample point selection

位于区域 I；如果 K_4 与 K_1 的值在 $K_i (i=1,2,3,4)$ 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点位于区域 I；

2)如果 S_1 与 S_2 的值在 $S_i (i=1,2,3,4)$ 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点位于区域 II；如果 K_1 与 K_2 的值在 $K_i (i=1,2,3,4)$ 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点位于区域 II；

3)如果 S_2 与 S_3 的值在 $S_i (i=1,2,3,4)$ 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点位于区域 III；如果 K_2 与 K_3 的值在 $K_i (i=1,2,3,4)$ 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点位于区域 III；

4)如果 S_3 与 S_4 的值在 $S_i (i=1,2,3,4)$ 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点位于区域 IV；如果 K_3 与 K_4 的值在 $K_i (i=1,2,3,4)$ 中较大,则根据冲击响应信号的偏斜度系数认为冲击点位于区域 IV。

步骤 3:在正方形监测区域内,采用冲击锤在各三角形子区域的边界上加载均匀分布的冲击点作为样本冲击点,记录样本点所在边两端的两个光纤布拉格光栅传感器 FBGS 和 FBGE 感知到的冲击响应信号的偏斜度系数和陡峭度系数,分别记作 S_s^n 、 S_e^n 、 K_s^n 、 K_e^n , $n=1,2,3,\dots$ 为样本点编号。样本点的选取情况如图 1 所示。

步骤 4:记录各样本冲击点所在边的起点传感器探测到的冲击响应信号的偏斜度与其所在边起点和终点传感器探测到的冲击响应信号的偏斜度之和

的比值,记为 $x_{ske}^n = \frac{S_s^n}{S_s^n + S_e^n}$;记录样本冲击点所在边的起点传感器探测到的冲击响应信号的陡峭度与其所在边起点和终点传感器探测到的冲击响应信号的

陡峭度之和的比值,记为 $x_{kur}^n = \frac{K_s^n}{K_s^n + K_e^n}$ 。

步骤 5:采用数据拟合的方法分别建立各三角形子区域边界上样本冲击点到所在边起点传感器距离 y^n 与该冲击点对应的 x_{ske}^n 和 x_{kur}^n 值之间的关系。拟合函数为:

$$f(x) = ae^{-2x} + be^{-x} + c. \quad (5)$$

步骤 6:计算待测冲击点的 x_{ske} 与 x_{kur} 值,并分别代入步骤 2 中,由待测冲击点响应信号偏斜度系数和陡峭度系数确定的冲击点所在三角形子区域的三条边界上冲击点位置与 x_{ske}^n 和 x_{kur}^n 值之间的拟合关系式,即可分别得到由偏斜度系数、陡峭度系数估计出的待测冲击点到三角形子区域各顶点处光纤光栅传感器的距离值 r_{ske}^A 、 r_{ske}^B 、 r_{ske}^C 、 r_{kur}^A 、 r_{kur}^B 、 r_{kur}^C 。

步骤 7:采用加权质心定位算法分别计算由偏斜系数和陡峭系数确定的待测冲击点坐标,计算公式为:

$$x_{ske} = x_A \frac{1/r_{ske}^A}{1/r_{ske}^A + 1/r_{ske}^B + 1/r_{ske}^C} + x_B \frac{1/r_{ske}^B}{1/r_{ske}^A + 1/r_{ske}^B + 1/r_{ske}^C} + x_C \frac{1/r_{ske}^C}{1/r_{ske}^A + 1/r_{ske}^B + 1/r_{ske}^C}, \quad (6)$$

$$y_{ske} = y_A \frac{1/r_{ske}^A}{1/r_{ske}^A + 1/r_{ske}^B + 1/r_{ske}^C} + y_B \frac{1/r_{ske}^B}{1/r_{ske}^A + 1/r_{ske}^B + 1/r_{ske}^C} + y_C \frac{1/r_{ske}^C}{1/r_{ske}^A + 1/r_{ske}^B + 1/r_{ske}^C}, \quad (7)$$

$$x_{kur} = x_A \frac{1/r_{kur}^A}{1/r_{kur}^A + 1/r_{kur}^B + 1/r_{kur}^C} + x_B \frac{1/r_{kur}^B}{1/r_{kur}^A + 1/r_{kur}^B + 1/r_{kur}^C} + x_C \frac{1/r_{kur}^C}{1/r_{kur}^A + 1/r_{kur}^B + 1/r_{kur}^C}, \quad (8)$$

$$y_{kur} = y_A \frac{1/r_{kur}^A}{1/r_{kur}^A + 1/r_{kur}^B + 1/r_{kur}^C} + y_B \frac{1/r_{kur}^B}{1/r_{kur}^A + 1/r_{kur}^B + 1/r_{kur}^C} + y_C \frac{1/r_{kur}^C}{1/r_{kur}^A + 1/r_{kur}^B + 1/r_{kur}^C}. \quad (9)$$

步骤 8: 记录 $r_{ske}^A, r_{ske}^B, r_{ske}^C$ 中的最小值记为 r_{ske}^{min} , 记录 $r_{kur}^A, r_{kur}^B, r_{kur}^C$ 中的最小值记为 r_{kur}^{min} 。可将由偏斜度系数和陡峭度系数确定的待测冲击点坐标加权相加得到冲击载荷点的坐标位置:

$$x = x_{ske} \frac{1/r_{ske}^{min}}{1/r_{ske}^{min} + 1/r_{kur}^{min}} + x_{kur} \frac{1/r_{kur}^{min}}{1/r_{ske}^{min} + 1/r_{kur}^{min}}, \quad (10)$$

$$y = y_{ske} \frac{1/r_{ske}^{min}}{1/r_{ske}^{min} + 1/r_{kur}^{min}} + y_{kur} \frac{1/r_{kur}^{min}}{1/r_{ske}^{min} + 1/r_{kur}^{min}}。 \quad (11)$$

冲击载荷定位算法流程图见图 2。

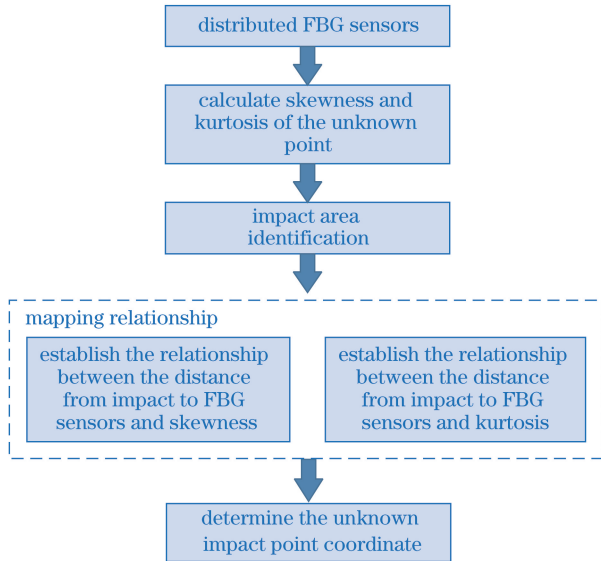


图 2 基于偏斜度、陡峭度特征的冲击载荷定位算法流程图
Fig. 2 Flow chart for impact load localization algorithm based on the characteristics of skewness and kurtosis

3 实验系统

3.1 光纤布拉格光栅应变传感原理

满足光纤布拉格光栅相位匹配条件的反射波长为^[17]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Delta, \quad (12)$$

式中 λ_B 为光纤布拉格光栅的反射波长, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Δ 为光栅周期。在温度和应变的作用下, n_{eff} 和 Δ 由于受到热光效应、弹光效应和热膨胀效应的影响导致光纤光栅的反射波长发生漂移^[18]。在本低速冲击定位研究实验中, 仅考虑应变对光纤布拉格光栅的影响, 根据光纤布拉格光栅传感基本原理可推导出光纤布拉格光栅波长变化与应变的关系为:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (13)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 为光纤布拉格光栅的反射波长的变化量, $\Delta\epsilon$ 为应变变化量, P_e 为有效弹光系数。(13)式表明, 可以通过监测粘贴于碳纤维复合材料板上的光纤布拉格光栅传感器反射波长的变化获得冲击响应信号。

3.2 低速冲击定位系统搭建

搭建了如图 3 所示的基于光纤布拉格光栅传感器的复合材料板结构上低速冲击定位监测系统。该系统主要由多边固支复合材料板、光纤布拉格光栅传感器、光纤光栅解调仪和计算机组成。光纤光栅解调仪选用美国 MOI 公司的 SM130, 其采样频率可以达到 2 kHz 且分辨率小于 1 pm。

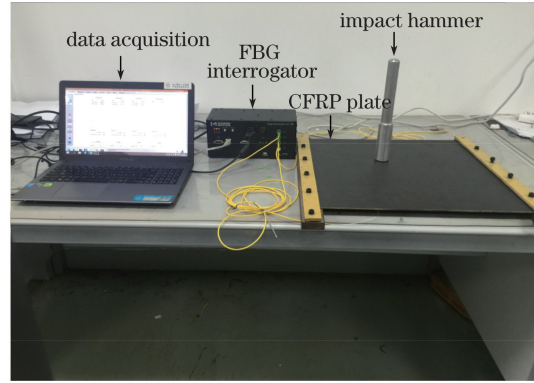


图 3 冲击监测系统实物图

Fig. 3 Physical map of impact monitoring system

冲击载荷实验加载在一块尺寸为 400 mm × 400 mm × 3 mm 的准各向同性复合材料板试件上, 选取碳纤维复合材料板正面中心 240 mm × 240 mm 大小的正方形区域作为冲击载荷监测区域, 将 6 个长度为 3 mm、反射率为 70% 的光纤布拉格光栅传感器以 ±45° 贴于复合材料板背面, 传感器排布和冲击监测系统组成如图 4 所示, 各光纤光栅传感器位置及中心波长如表 1 所示。

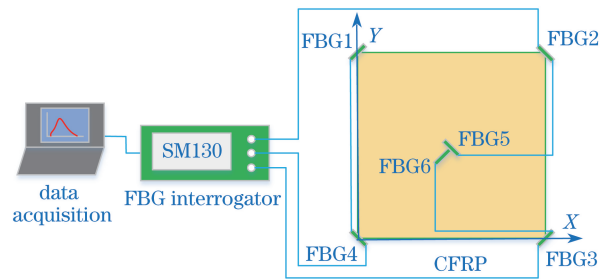


图 4 冲击监测系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of impact monitoring system

表 1 光纤光栅传感器中心波长与位置

Table 1 Central wavelength and location of FBG sensors

Sensor	Wavelength /nm	Location /mm
FBG1	1531.93	(0, 240)
FBG2	1537.15	(240, 240)
FBG3	1546.87	(240, 0)
FBG4	1557.25	(0, 0)
FBG5	1551.97	(120, 120)
FBG6	1541.96	(120, 120)

本实验设定正方形监测区域左下角顶点为坐标系原点,将冲击载荷监测区域划分为 13 行、13 列共计 169 个网格点的网络,其中每个正方形网格的尺寸为 20 mm×20 mm。将冲击载荷监测区域按照第 2 节所提算法平均分为 4 个三角形子区域,并沿顺时针方向分别记为区域 I、区域 II、区域 III、区域 IV,如图 1 所示。采用冲击锤对碳纤维复合材料板上监测区域内所有网格点进行冲击,用以研究不同位置低速冲击点响应信号,冲击锤冲击能量的大小有 1、2、3 J 三种设置,本实验采用冲击能量大小为 1 J 的冲击锤模拟低速冲击过程。

4 实验结果与讨论

4.1 冲击响应信号的偏斜度、陡峭度特征

碳纤维复合材料板上同一传感器监测到的不同位置处冲击点响应信号如图 5 所示,可以发现随着冲击点到传感器的距离的增大,传感器监测到的冲击响应信号的振动幅度逐渐减小,这主要是由于随着冲击响应信号传播路径的增长,受到材料特性、信号的多径传播等因素的综合影响,冲击响应信号的强度越来越弱。而偏斜度系数和陡峭度系数均从统

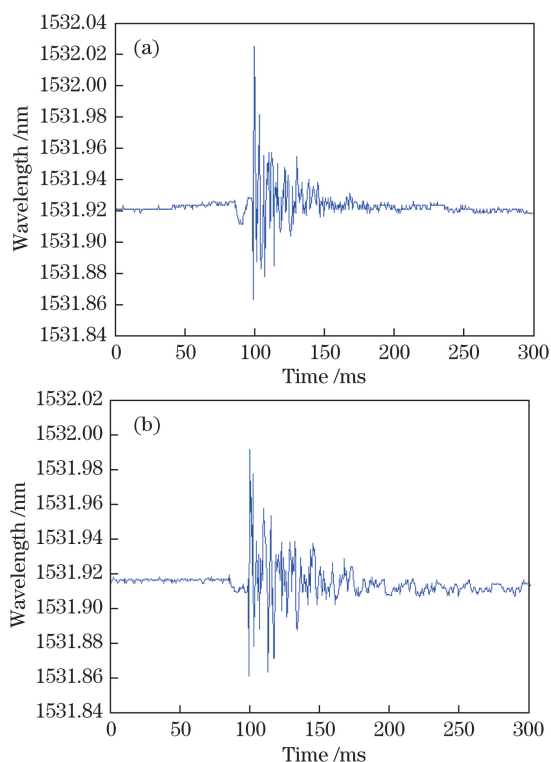


图 5 距离光纤布拉格光栅传感器不同距离的冲击点响应信号。(a) 60 mm; (b) 120 mm

Fig. 5 Response signal of impact point with different distances from the monitoring FBG sensor. (a) 60 mm; (b) 120 mm

计学的角度,分析了冲击响应信号序列的数值分布形状。其中,为了更好地利用偏斜度系数分析不同位置处冲击点的响应信号,保证各冲击点响应信号的偏斜度均为正数,本实验对冲击响应信号 X_{ori} 进行了预处理,得到待分析的冲击响应信号 $X_{pre} = |X_{ori} - \overline{X_{ori}}|$ 。预处理后的到光纤光栅传感器不同距离处的冲击点响应信号如图 6 所示。

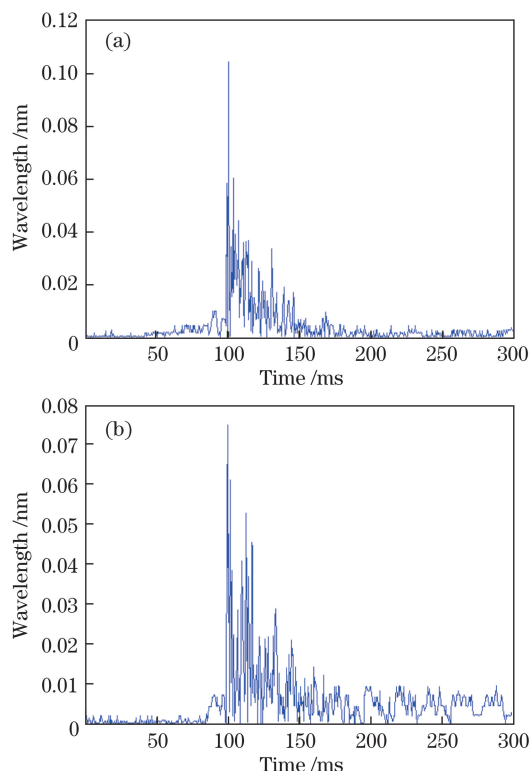


图 6 预处理后距离光纤布拉格光栅传感器不同距离的冲击点响应信号。(a) 60 mm; (b) 120 mm

Fig. 6 Preprocessed response signal of impact point with different distances from the monitoring FBG sensor.

(a) 60 mm; (b) 120 mm

为了分析碳纤维复合材料板上不同位置处冲击点响应信号的偏斜度系数、陡峭度系数与冲击点到监测传感器距离之间的关系,分别计算并记录了碳纤维复合材料板上从各个方向到监测传感器拥有不同距离的冲击响应信号的偏斜度和陡峭度。如图 7、图 8 所示,以 FBG1 为例,可以发现不论从哪个方向来看,随着冲击点到监测光纤光栅传感器的距离越来越远,光纤光栅传感器探测到的冲击响应信号的偏斜度和陡峭度均随之下降。因此可以通过分析不同传感器监测到的冲击响应信号的偏斜度、陡峭度特征与传感器之间距离的关系确定冲击点的位置。

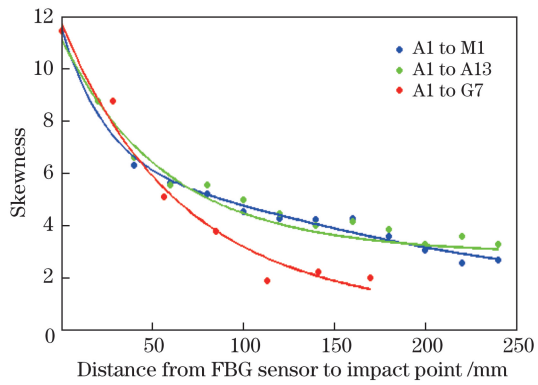


图 7 冲击点到光纤光栅的距离与偏斜度间关系

Fig. 7 Relationship between the distance from impact point to FBG and skewness

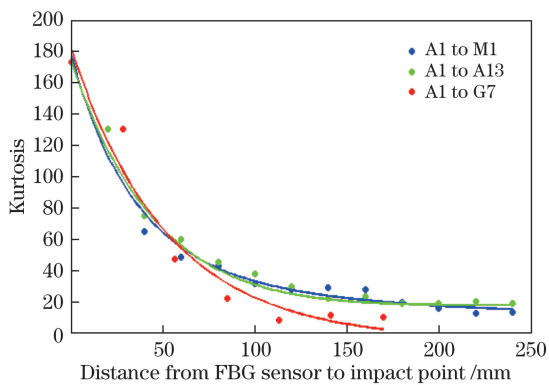


图 8 冲击点到光纤光栅的距离与陡峭度间关系

Fig. 8 Relationship between the distance from impact point to FBG and kurtosis

4.2 冲击载荷定位结果

在各区域中任选 4 个待测冲击点, 共计 16 个待测冲击点, 按照第 2 节描述的冲击载荷定位方法首先对冲击载荷进行区域定位。分别计算由位于正方形监测区域 4 个顶点处的光纤光栅传感器测得的每个待测冲击点响应信号的偏斜度系数和陡峭度系数, 并找到具有最大偏斜度系数和陡峭度系数的响应信号所对应的光纤光栅传感器, 这两个传感器所在的区域即认为是待测点所在的区域。综合利用冲击响应信号的偏斜度特征和陡峭度特征判断得到的冲击载荷区域定位结果如表 2 所示, 将区域定位结果和冲击点实际所在区域对比可以发现, 这 16 个冲击载荷点的区域定位结果均正确。

按照第 2 节描述的冲击载荷精确定位方法对上述选取的 16 个冲击载荷点进行精确定位, 得到基于偏斜度、陡峭度特征冲击定位结果如表 2 所示。精确定位结果与待测冲击点实际坐标对比如图 9 所示。根据表 2 可知, 冲击定位的平均误差为 20.7 mm, 误差较大的点为 B10 和 H11, 其主要原因是由于此两点靠近冲击载荷监测区域的边界, 冲击响应信号受固支边影响较大, 造成较大误差。另外, 由于光纤光栅解调仪的采样频率较低, 该冲击定位系统存在一定系统误差, 因此有望通过提高光纤光栅解调仪采样频率来提高冲击定位精度。

表 2 冲击定位结果

Table 2 Impact positioning results

Random impact point	Area			Coordinate /mm			
	Actual area	Area by kurtosis	Area by skewness	Actual coordinate	Coordinate by skewness	Coordinate by kurtosis	Localized coordinate
D3	I	I	I	(40,180)	(62.7,159.4)	(77.3,190)	(66.4,173.6)
G4	I	I	I	(60,120)	(35.6,109.6)	(57.2,152.7)	(48,134.4)
H2	I	I	I	(20,100)	(37.5,113)	(34.2,91.6)	(35,96.6)
J2	I	I	I	(20,60)	(22.2,76.5)	(22.7,76.4)	(22.4,76.4)
B10	II	II	II	(180,220)	(132.2,204.4)	(153.9,231.2)	(148.4,220)
D8	II	II	II	(140,180)	(124.7,195)	(117.6,184.3)	(121.1,189.7)
D5	II	II	II	(80,180)	(104.5,166.7)	(87.7,161.5)	(96.9,164.3)
F6	II	II	II	(100,140)	(117.8,169)	(115.2,134.9)	(115.8,142.6)
E12	III	III	III	(220,160)	(224.4,145.3)	(221.2,141)	(227.4,143)
G10	III	III	III	(180,120)	(195.4,115.2)	(199.4,113.5)	(197.6,114.3)
I9	III	III	III	(160,80)	(168.7,103.8)	(141,85.5)	(153.6,93.9)
H11	III	III	III	(200,100)	(203.3,125)	(228.2,141.7)	(217.1,134.3)
J7	IV	IV	IV	(120,60)	(105.7,56.9)	(109.5,82)	(108.4,74.5)
K5	IV	IV	IV	(80,40)	(100.5,42.2)	(85,45.8)	(91.9,44.2)
L2	IV	IV	IV	(20,20)	(70.1,35.6)	(36.4,19.3)	(46.1,24)
L10	IV	IV	IV	(180,20)	(157,33.7)	(183.8,24.3)	(172.9,27.8)
Average error		Correct	Correct		26.6	22.2	20.7
Maximum error		Correct	Correct		52.5	50.3	38.3

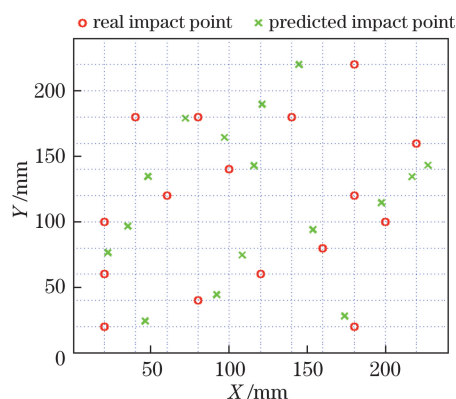


图 9 坐标预测结果

Fig. 9 Coordinate prediction results

5 结 论

针对复合材料板上的低速冲击定位问题,提出了一种基于偏斜度、陡峭度特征和加权质心定位算法的分布式光纤光栅冲击载荷定位方法。该方法包括区域定位和精确定位两个环节,区域定位部分寻找距离冲击点较近的三个光纤光栅传感器,精确定位部分根据距离冲击点较近的传感器探测到的响应信号的偏斜度和陡峭度估计冲击点的距离,并采用加权质心定位算法对冲击点进行定位。实验结果表明,该方法在光纤光栅解调仪采样频率较低、冲击载荷样本点设置较少的情况下,为复合材料板上冲击载荷定位提供了一种计算速度较快、工程实用性较强、定位精度令人满意的方法。本研究具有以下特点:

1) 根据碳纤维复合材料板上不同位置冲击点响应信号的特点,提出使用偏斜度系数和陡峭度系数作为冲击响应信号的特征量,并以此对冲击载荷进行区域定位和距离估计;

2) 利用冲击载荷所在区域光纤光栅传感器估计得到的距离值,采用加权质心定位算法,对冲击载荷进行精确定位;

3) 通过偏斜度系数估计得到的距离各光纤光栅传感器的最小值,通过陡峭度系数估计得到的距离各光纤光栅传感器的最小值,将两者根据偏斜度系数和陡峭度系数计算得到的冲击点位置加权融合,得到冲击点的最终坐标,结果表明:通过加权融合后的冲击载荷定位平均误差为 20.7 mm,较单独基于偏斜度系数或陡峭度系数的冲击载荷定位精度有所提升。

参 考 文 献

[1] Li W, Guo Q F. Application of carbon fiber composites

to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212.

李威, 郭权峰. 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.

- [2] Baker A, Dutton S, Kelly D. Composite materials for aircraft structures[M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [3] Farrar C R, Worden K. An introduction to structural health monitoring[J]. Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2007, 365(1851): 303-315.
- [4] Lu S Z, Jiang M S, Sui Q M, *et al.* Identification of impact location by using fiber Bragg grating based on wavelet transform and support vector classifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0305006. 路士增, 姜明顺, 隋青美, 等. 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[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305006.
- [5] Lu J Y, Wang B F, Liang D K, *et al.* Identification of impact location by using FBG based on wavelet packet feature extraction and SVR[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 712-718. 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(4): 712-718.
- [6] Majewska K, Opoka S, Kudela P, *et al.* Novel FBG rosette for determining impact location in thin plate-like structure[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 628(1): 012118.
- [7] Tsuda H. Ultrasound and damage detection in CFRP using fiber Bragg grating sensors[J]. Composite Science & Technology, 2006, 66(5): 676-683.
- [8] Measures R M. Structural monitoring with fiber optic technology[M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- [9] Liu Y C, Fang J, Xu C, *et al.* The feasibility study of gold-plated fiber Bragg grating sensor for in situ detection of lithium ion batteries[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040602. 刘延超, 方进, 徐翀, 等. 光纤 Bragg 光栅传感器在锂离子电池原位检测中的可行性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040602.
- [10] Su H, Wang J, Liu L L, *et al.* Optical fiber grating temperature and axial tension sensing system based on swept source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040601. 苏红, 王健, 刘岚岚, 等. 基于扫频光源的光纤光栅温度和轴向拉力传感系统[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040601.
- [11] Fu T, Liu Y J, Lau K T, *et al.* Impact source identification in a carbon reinforced polymer plate by using embedded fiber optical acoustic emission

- sensors[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 66(4): 420-429.
- [12] Sai Y Z, Jiang M S, Sui Q M, *et al.* FBG sensor array-based-low speed impact localization system on composite plate[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 63(5): 462-467.
- [13] Kim J H, Kim Y Y, Park Y, *et al.* Low-velocity impact localization in a stiffened composite panel using a normalized cross-correlation method[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(4): 1-12.
- [14] Jang B W, Park S O, Lee Y G, *et al.* Detection of impact damage in composite structures using high speed FBG interrogator[J]. *Advanced Composite Materials*, 2012, 21(1): 29-44.
- [15] Jang B W, Lee Y G, Kim J H, *et al.* Real-time impact identification algorithm for composite structures using fiber Bragg grating sensors[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2012, 19(7): 580-591.
- [16] Kvam P H, Vidakovic B. *Nonparametric statistics with application to science and engineering*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- [17] Tian S Z, Cao C C, Wang D P. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0114001. 田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0114001.
- [18] Wang Y, Zhao K, Liu J P. Optical fiber Bragg grating temperature monitoring based on volume phase grating dispersion demodulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101202. 王彦, 赵凯, 刘加萍. 基于体相位光栅色散解调的布拉格光纤光栅温度监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101202.