

基于关联维数的光纤布拉格光栅的冲击定位

熊稚莉 梁大开 李彤韡 史璐 贾鸿宇

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 针对板结构低速冲击定位需求,通过构建分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感网络,并以光纤光栅传感器感知的冲击响应信号时间序列的关联维数作为冲击特征量,研究了关联维数与冲击点和传感器之间距离的分布规律。基于此分布规律,对冲击载荷位置进行了区域辨识,采用三圆取交的冲击定位算法实现了对冲击载荷位置的坐标定位。对机翼盒段结构划分区域,根据算法特点优化传感器排布,搭建冲击载荷监测实验系统,并进行低速冲击载荷实验。实验结果表明,在 30 cm×30 cm 的机翼盒段板结构上随机选取 10 个测试点进行低速冲击定位识别,实现了所有冲击实验点区域辨识,其正确率高达 100%,坐标定位的平均误差为 3.5 cm。该方法利用了 6 个光纤布拉格光栅传感器能够有效地实现对冲击载荷位置辨识,对实现分形维数与冲击监测技术相结合具有一定意义。

关键词 测量; 低速冲击定位; 光纤布拉格光栅; 关联维数; 板结构

中图分类号 TP212.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0804001

Impact Localization by Using Fiber Bragg Grating Sensors Based on Correlation Dimension

Xiong Zhili Liang Dakai Li Tongwei Shi Lu Jia Hongyu

State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Aiming at the requirement of low speed impact localization, a fiber Bragg grating (FBG) sensor network is constructed. Distribution of the correlation dimension as well as the distance between the impact point and the sensor are studied, taken the correlation dimension with the impact response signal time series as an impact characteristic. Based on this distribution, the impact load position is regionally identified; the coordinated localization conducted by tri-circle model is achieved. The wing box structure is divided into several areas, where the configuration of FBG sensors is optimized according to the algorithm characteristics. As a result, the impact monitoring system is built and the low speed impact test is carried on. The result shows that the ten testing random impact points on the 30 cm×30 cm wing box plate structure are all identified correctly with an average error of 3.5 cm. The impact load position identification using six FBG sensors is effectively realized in this method, providing a reference for combination of fractal theory with impact monitoring technology.

Key words measurement; impact localization with low speed; fiber Bragg grating; correlation dimension; plate structure

OCIS codes 120.1880; 060.2370; 060.3735; 070.2025

1 引言

飞行器结构受到低速冲击时,往往使结构基体发生横向裂纹和分层损伤,其中局部失效与整体失效的组

收稿日期: 2016-03-10; 收到修改稿日期: 2016-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51275239)、博士点专项科研基金(20123218110003)

作者简介: 熊稚莉(1993—),女,硕士研究生,主要从事光纤结构健康监测方面的研究。E-mail: lillianxiong@163.com

导师简介: 梁大开(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤结构健康监测方面的研究。

E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn(通信联系人)

合是其最主要的破坏形式。与高速冲击的穿透损伤相比,低速冲击对结构承载能力的影响更为严重。因此及时准确地判别低速冲击的位置,评估可能造成的损伤情况越来越受到人们的关注^[1-4]。

目前常用的冲击载荷定位技术如人工智能方法需要事先采集大量样本数据,由于实际的机械结构形式具有离散性与复杂性,采集大量的先验数据不仅耗时,还易造成结构先期损伤,故该方法在工程上具有局限性。而时差定位法无需先验知识,只需提取冲击应力波到达的时差即可反推出冲击的位置,目前已有不少学者采用基于时差法的压电定位系统取得较好的定位结果^[5-6]。

在实际工程应用中,需要对大型结构的冲击损伤区域进行快速识别,但是对损伤的精确位置并无太高的要求,因而非大量先验知识且监测系统相对轻便简单的方法更具有实际工程应用意义。光纤传感器具有芯径细、柔韧性好、抗电磁干扰、灵敏度高和适合长期监测等优点^[7-8],2007年日本-Tsuda等将光纤光栅应用于碳纤维复合(CFRP)材料的板结构冲击监测,实验结果显示,与传统压电陶瓷(PZT)传感器进行对比,光纤布拉格光栅(FBG)更适合用于对复合材料的损伤检测^[9]。本文提出了一种基于关联维数的板结构分布式光纤冲击定位方法,该方法适用于对先验知识无需过多要求的低速冲击载荷定位。

2 基于关联维数冲击载荷定位原理

2.1 冲击载荷关联维数特征提取原理

2.1.1 关联维数的定义与 G-P 计算方法

关联维数这一概念来自于分形理论,分形维数是一个能定量描述自相似性特性的参数,在众多学科中,绝大多数的分形研究都是通过分形维数作为信号的特征信息进行提取^[10]。关联维数的研究对象是由非线性系统产生的不光滑和不可微的几何形体,所反映的是事物本身固有的结构特征。1983年,Grassberge等根据嵌入理论相空间思想,提出了从时间序列直接计算关联维数的算法,即 G-P 算法^[11]。该算法计算过程包括以下 4 个步骤:

步骤 1. 相空间重构。设光纤布拉格光栅传感器对冲击响应信号是长度为 N 的时间序列 $[x_1, x_2, \dots, x_N]$,适当选取一个时间延迟因子 τ ,将其构造成长度为 N_m ,维数为 m 的相空间,可表示为

$$\begin{pmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(N_m) \\ x(1+\tau) & x(2+\tau) & \dots & x(N_m+\tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x[1+(m-2)\times\tau] & x[2+(m-2)\times\tau] & \dots & x[N_m+(m-2)\tau] \\ x[1+(m-1)\times\tau] & x[2+(m-1)\times\tau] & \dots & x[N_m+(m-1)\times\tau] \end{pmatrix} \quad (1)$$

步骤 2. 计算重构后的相空间中各向量间的欧氏距离。 m 维相空间的所有相点记作 X_i ,且 $X_i = \{x(i), x(i+\tau), \dots, x[i+(m-1)\times\tau]\}$,其中 $i=1, 2, \dots, N_m$ 。任意一对相点之间的欧氏距离表示为

$$r_{ij} = |X_i - X_j| = \left[\sum_{t=0}^{m-1} (x_{i+t\tau} - x_{j+t\tau})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

步骤 3. 计算相关函数。给定一个临界距离 r ,计算欧氏距离(2)式中有多少个元素小于 r ,并把距离小于 r 的元素的个数占总元素个数的比例记为 $C(r, m)$,则有

$$C(r, m) = \frac{1}{N_m(N_m - 1)} \sum_{i,j=1}^{N_m} \theta(r - r_{ij}), \quad (3)$$

式中 $i \neq j$, θ 为 Heaviside 函数: $\begin{cases} \theta(z) = 0, z < 0 \\ \theta(z) = 1, z > 0 \end{cases}$

步骤 4. 求关联维数。选取适当的临界距离 r ,在所计算的相关函数无标度区内满足

$$D = \frac{\ln C(r, m)}{\ln r}, \quad (4)$$

式中 D 即为关联维数。

2.1.2 关联维数与冲击位置关系

光纤光栅传感器波长漂移和外界环境干扰等因素的影响,容易使得 FBG 传感器监测的低速冲击信号含

有直流基线干扰^[1],为此,使用小波变换方法去除直流(DC)基线干扰提取冲击信号^[12]。FBG 传感器对冲击点的原始响应信号和去除直流基线干扰后响应信号的幅频特性曲线如图 1 所示。从图 1(d)中可知,信号的响应频率主要在 0~150 Hz 低频区内,但各频率段均有响应,组分复杂,甚至呈连续的谱分布,这主要是由于外界环境、材料特性和冲击响应频率多样等因素综合影响的结果。冲击响应信号具有一定的复杂性,难以从时域或频域中直接提取有用的特征信息来表征冲击点位置信息,而分形理论在冲击响应信号上具有一定的自相似性。分形维数是自相似性的具体表现形式,因此本文采用时域信号的分形关联维数作为冲击载荷响应信号的特征量进行以下研究。

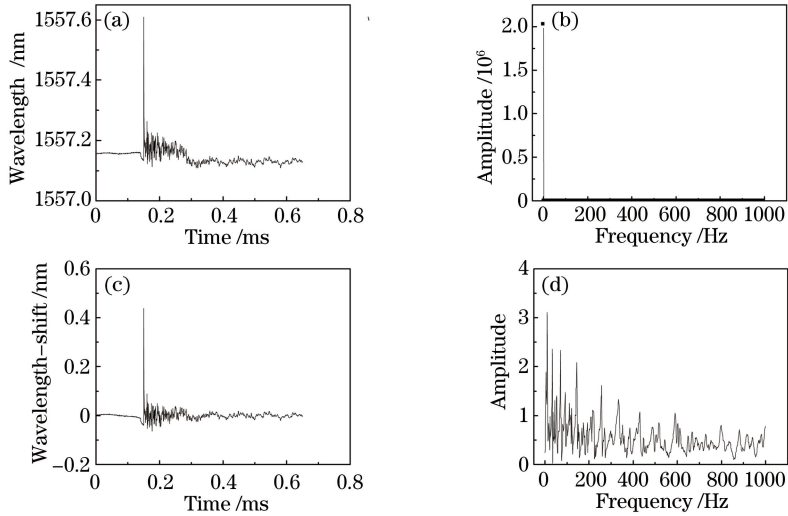


图 1 (a) 原始冲击响应信号时域特性图; (b) 原始冲击响应信号幅频特性图; (c) 去除直流基线干扰后响应信号的时域特性图; (d) 去除直流基线干扰后响应信号的幅频特性图

Fig. 1 (a) Time domain characteristic of original impact signal; (b) amplitude frequency characteristic of original impact signal; (c) time domain characteristic of impact signal after removing DC component; (d) amplitude frequency characteristic of impact signal after removing DC component

为了初步探索关联维数和传感器冲击位置之间的关系,选取冲击点的位置如图 2 所示。在每个传感器呈相同夹角的方向上等距离间隔由近及远选取 8 个冲击点,这些冲击点覆盖整个监测区域,为了消除偶然性因素影响,这些冲击点在水平方向和竖直方向各有分布,计算各传感器对其相应冲击点响应信号的关联维数值。计算所得的关联维数值与距离关系如图 3 所示,可以看出,对每个传感器而言,随着冲击点到传感器距离增加,该传感器对冲击点响应信号的关联维数值呈增加趋势。

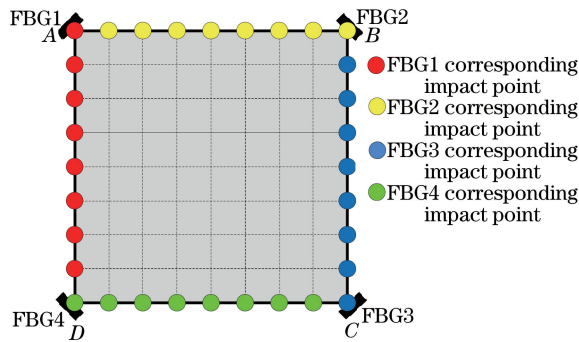


图 2 冲击点选取示意图

Fig. 2 Impact points selection schemes

为了探索不同传感器对同一冲击点响应的关联维数值,选取传感器 FBG1~FBG4 所在位置处的点 A~D 作为冲击点,各传感器对冲击点 A~D 响应信号的关联维数值如图 4 所示。从图 4 可知,当冲击点与传感器位置重合时,即距离最小时,关联维数值也最小,且距离远的传感器响应信号的关联维数值明显更大。

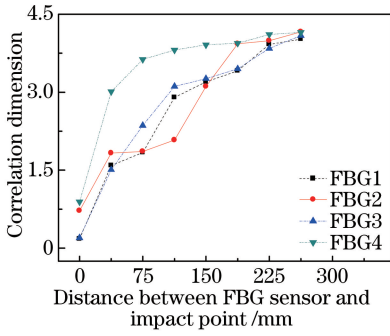


图 3 冲击点到传感器距离与关联维数关系图

Fig. 3 Relationship between distance of impact points to FBG sensors and correlation dimension

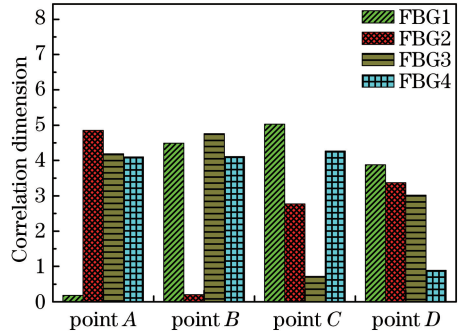


图 4 不同传感器对同一冲击点响应的关联维数值

Fig. 4 Correlation dimension of different sensors on same impact points

2.2 冲击载荷定位原理

本文提出将关联维数用作时域内描述光纤光栅波长偏移量的特征指标,为冲击载荷定位提供方法,算法流程见图 5。

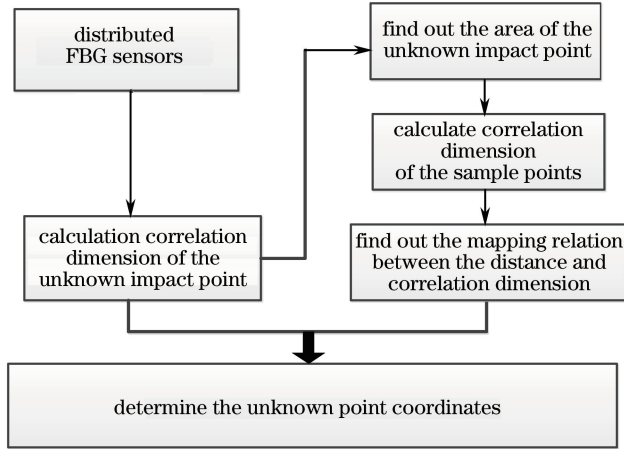


图 5 基于关联维数的冲击载荷定位算法流程图

Fig. 5 Flow diagram of algorithm for impact localization base on correlation dimension

根据图 5,利用分布式光纤布拉格光栅进行载荷定位,分为 6 个具体步骤,其中前 3 个步骤是对冲击载荷区域的辨识,第 4 个步骤是冲击载荷的精确定位。

步骤 1. 分布式光纤布拉格光栅传感器布局。图 6 所示,沿对角线将监测区域划分为 4 个小区域,按顺时针命名为区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV;

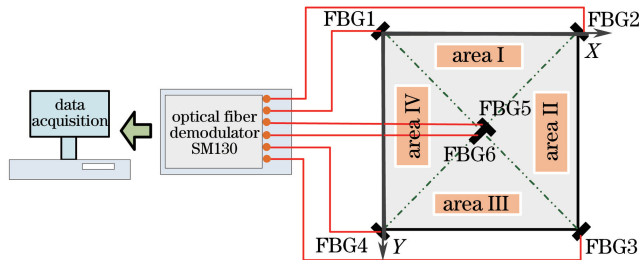


图 6 光纤排布示意图

Fig. 6 Position schematic of FBG sensors

步骤 2. 计算各传感器对待测冲击点响应信号的关联维数 D_{Fn} , 其中 $n=1, 2, \dots, 6$;

步骤 3. 区域 4 个顶点上的 FBG 传感器用于区域定位。根据步骤 2 所计算的各关联维数值 D_{Fn} , 找出关联维数值最小对应的 2 个传感器所在区域,即待测点所在的区域。判断准则如表 1 所示。

表 1 区域定位判断准则

Table 1 Area localization judgment criteria

Minimum	D_{F1}	D_{F2}	D_{F2}	D_{F3}	D_{F3}	D_{F4}	D_{F1}	D_{F4}
Area location	Area I		Area II		Area III		Area IV	

在步骤 3 所确定的区域中选取样本点,采用冲击锤对样本点依次进行冲击加载,记录样本点所在边长上的 2 个光纤布拉格光栅传感器在此冲击下的冲击响应信号,并计算关联维数值,分别记作 L_n^i ,其中 $i=1,2,3,4,5,6$ 为传感器的编号; $n=1,2,3,\dots,n$ 表示第 n 次冲击。

步骤 4. 具体如下:

步骤 4.1. 选取监测区域的一条边长,以顺时针方向将边长两 endpoint 处的光纤布拉格传感器作为起点(记作 S)和终点(记作 E);

步骤 4.2. 令 $x = \frac{L_n^S}{L_n^S + L_n^E}$ 为自变量(L_n^S 和 L_n^E 分别为在第 n 次冲击下,起点 S 处和终点 E 处的光纤布拉格光栅传感器响应信号),令该次冲击下样本点与起点 S 之间的距离作为因变量 y ,因此各样本观测点数据可分别记作: $x_1, y_1; x_2, y_2; \dots, x_p, y_p; \dots$,其中 $p=1,2,\dots,n$,用函数可表示为

$$y = f(x) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m f_m(x). \quad (5)$$

可将 $f(x)$ 表示为 $\{1, \exp(-x), \exp(-2x)\}$ 的线性组合;

步骤 4.3. 将观测样本点数据 (x_p, y_p) 代入(5)式,利用最小二乘法拟合参数可以得到

$$f_1(x) = a_0 + a_1 \exp(-x) + a_2 \exp(-2x). \quad (6)$$

步骤 4.4. 重复步骤 4.1~4.3,可得到不同起点下,样本点与起点光纤布拉格光栅传感器的距离和关联维数之间的对应函数关系为

$$f_2(x) = b_0 + b_1 \exp(-x) + b_2 \exp(-2x), \quad (7)$$

$$f_3(x) = c_0 + c_1 \exp(-x) + c_2 \exp(-2x). \quad (8)$$

步骤 5. 令 $x = \frac{D_{Fs}}{D_{Fs} + D_{Fe}}$, s 为起点光纤布拉格光栅传感器编号, e 为终点光纤布拉格光栅传感器编号,代入所得到的相应函数(6)~(8)式中,即可得到待测点与不同起点的距离值 r_1, r_2, r_3 。

步骤 6. 主圆取交法确定待测点的具体坐标,具体过程如下:

步骤 6.1. 以待测点关联维数最小的传感器位置为圆心,步骤 5 算得的相应距离值 $r_i (i=1, 2, 3)$ 为半径作主圆,再分别以区域另外两个顶点作为圆心,计算的相应距离值 $r_j (j=1, 2, 3, j \neq i)$ 作为半径作圆,记作次圆;根据这 2 个次圆与主圆的交集确定待测点的具体坐标。

1) 若交集非空:

对 2 个次圆与主圆的所有交点中,剔除与所定位区域不符合的解,剩下有效解的横坐标取算术平均值,作为待测点的横坐标 X ;对有效解纵坐标取算术平均值,作为待测点的纵坐标 Y 。

2) 若交集为空:

步骤 6.1.1. 计算各传感器权重值 q_i ,计算公式为 $q_i = \frac{\sum D}{D_i}$,将各权重值 q_i 进行归一化得到参考权重值 $Q_i (0 \leq Q_i \leq 1)$ 。

步骤 6.1.2. 计算所作的三圆与区域边界的交点,位于中心的 2 个传感器值计算与其粘贴方向垂直边的交点,记作 (x_{FBG_i}, y_{FBG_i}) ,其中 $i=5$ 或 6;剩下位于区域顶点处的 2 个传感器所作的圆对应交点分别有两个,记作 $(x_{FBG_j}^n, y_{FBG_j}^n)$,其中 $j=1, 2$ 或 2, 3 或 3, 4 或 1, 4, $n=1, 2$ 。

步骤 6.1.3. 待测点具体坐标确定

$$X = \frac{\sum Q_i \times x_{FBG_i} + \sum Q_j \times x_{FBG_j}^n}{\sum Q_i + 2 \sum Q_j}, Y = \frac{\sum Q_i \times y_{FBG_i} + \sum Q_j \times y_{FBG_j}^n}{\sum Q_i + 2 \sum Q_j}.$$

3 实验系统

实验中以机翼盒段板结构为冲击载荷监测对象,搭建了如图 7 所示的冲击监测实验系统。该实验系统由 FBG 传感器、冲击锤、机翼盒段铝合金板结构、光纤光栅解调仪以及计算机等几部分组成。试件采用四边固支方式对板结构进行固支,在铝合金板正面选取 300 mm×300 mm 大小的监测区域,将 6 个光纤光栅传感器贴于机翼盒段铝合金板结构背面。各传感器的位置与中心波长如表 2 所示。实验中设定正方形监测区域的左上角顶点为坐标系原点,根据实验分析精度的需要,将其划分为 9 行×9 列共计 81 个网格点的网格,其中每个网格几何尺寸为 37.5 mm×37.5 mm。

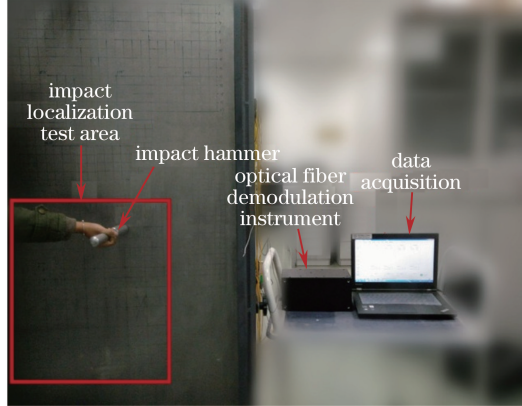


图 7 冲击监测系统实物图

Fig. 7 Impact monitoring system

表 2 传感器波长与位置

Table 2 Wavelengths and positions of FBG sensors

Sensor	Wavelength /nm	Localized coordinate /mm
FBG1	1557.15	(0, 0)
FBG2	1527.04	(300, 0)
FBG3	1541.56	(300, 300)
FBG4	1551.48	(0, 300)
FBG5	1547.03	(150, 150)
FBG6	1556.97	(150, 150)

根据第 2 节所提出的算法特点,将整个区域划分为区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV。在实验中,为方便对冲击试验点进行定位评估,采用冲击锤对试件所有网格点进行冲击加载,用以模拟低速冲击过程的发生,其加载工作原理为通过释放弹簧压力从而产生冲击力,其冲击能量分为 1,2,3 J 三个阶层,实验冲击能量均为 1 J,以保证每次冲击能量一致。仅选取机翼盒段铝合金板结构外表面的 81 个网格结点作为冲击加载对象,这样可以避免由于冲击加载点落入空白区域而导致的冲击响应信号分析的不一致,为方便描述各加载点,将其命名如图 8 所示。

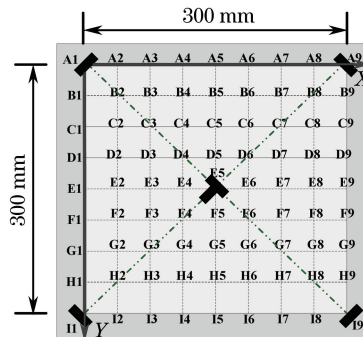


图 8 冲击加载点示意图

Fig. 8 Schematic of impact loading points

4 实验及结果分析

4.1 冲击载荷区域辨识结果

在各区域中任选若干待测点共 10 个,按照第 2 节中所述的区域定位方法,对每个待测点的 6 个 FBG 冲击信号计算关联维数值,找出最小的 2 个关联维数值所对应的传感器,这 2 个传感器所在的区域即为待测点的区域。区域定位结果如表 3,可以对比图 9 的实际情况与表 3 的区域定位结果,这 10 个测试点均预测正确。

表 3 区域定位结果

Table 3 Area localization results

Random impact point	B7	C2	C4	C8	D5
Minimum correlation dimension	$D_{F1} D_{F2}$	$D_{F1} D_{F4}$	$D_{F1} D_{F2}$	$D_{F2} D_{F3}$	$D_{F1} D_{F2}$
Actual result	Area I	Area IV	Area I	Area II	Area I
Localization result	Area I	Area IV	Area I	Area II	Area I
Random impact point	E3	E6	F3	F5	G1
Minimum correlation dimension	$D_{F1} D_{F4}$	$D_{F2} D_{F3}$	$D_{F1} D_{F4}$	$D_{F3} D_{F4}$	$D_{F1} D_{F4}$
Actual result	Area IV	Area II	Area IV	Area III	Area IV
Localization result	Area IV	Area II	Area IV	Area III	Area IV

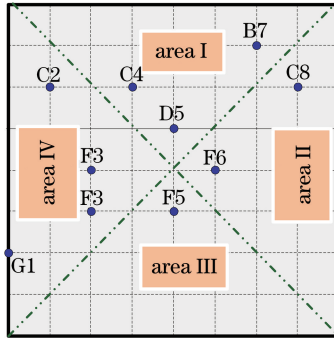


图 9 选取待测点及其所在区域

Fig. 9 Impact points to be measured and located positions

4.2 冲击载荷精确坐标定位结果

按照第 2 节所述的精确定位方法,对上述所选取的随机 10 个冲击点进行精确定位,得到冲击定位结果如表 4 所示,实验结果对比图如图 10 所示。

表 4 冲击定位结果

Table 4 Impact localization results

Random impact point	Actual coordinate /cm	Localized coordinate /cm	Absolute error /cm
B7	(22.5, 3.75)	(20.59, 5.39)	2.51
C4	(11.25, 7.5)	(14.14, 9.56)	3.51
D5	(15, 11.25)	(14.75, 10.47)	0.81
F5	(7.5, 26.25)	(12.58, 23.43)	5.81
E3	(7.5, 15)	(4.66, 14.33)	2.91
C2	(3.75, 7.5)	(5.93, 9.72)	3.11
G1	(0, 22.5)	(3.15, 16.87)	6.45
F3	(7.5, 18.75)	(6.93, 12.85)	5.92
C8	(26.25, 7.5)	(28.42, 8.59)	2.42
E6	(18.75, 15)	(19.47, 16.41)	1.58

冲击定位结果如表 4 所示,从表所示的冲击定位结果可知,平均误差为 3.5 cm,并且大部分误差在 5 cm 之内。误差较大的点是 G1 和 F3,分析主要原因是由于此两点靠近铝板下边界,冲击时冲击力锤传力不均,容易造成较大误差。另外,所使用的解调仪的采样频率较低,只有 2 kHz,这使得所采集的时间序列的点不能真切反映实际情况,使得关联维数值的计算存在系统误差,有望在实验上采用高采样频率的解调仪来提高定位精度,减小相对误差。

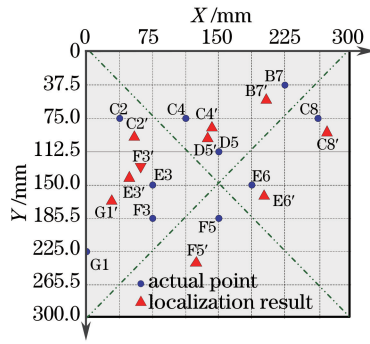


图 10 冲击结果对比图

Fig. 10 Comparison diagram of impact localization results

5 结 论

提出一种基于关联维数的板结构分布式光纤冲击定位方法,并利用传感器布局结合传感器冲击响应信号的关联维数实现对冲击载荷的区域辨识,在此基础上,采用三圆取交的定位算法实现了冲击点的精确坐标定位。研究表明,本方法无需大量先验数据,可准确实现结构的快速区域定位,并且给出冲击载荷较为准确的位置,满足实际工程的便捷性要求。该方法遵循工程实际应用中“先快速准确地判定损伤区域,再找到损伤具体位置”的思想,若选用采样频率更高的光纤解调仪或在后期与无损检测方法相结合,将能得到更准确的冲击定位结果。本方法具有以下特点:

- 1) 根据光纤光栅传感器对冲击载荷响应关联维数值与位置存在的相关性,将整个结构划分为 4 个区域,定位时选择最优的传感器,对光纤传感器网络布局进行优化。
- 2) 针对冲击信号所呈现信号的复杂性,提出了将关联维数作为冲击响应信号的特征参量并以此来表征冲击点位置信息。
- 3) 在冲击载荷定位算法方面,利用各光纤光栅传感器响应信号的关联维数值,选取最优传感器确定监测区域,再利用三圆模型结合参考权重,对冲击载荷的位置实现了较精准的坐标定位。

参 考 文 献

- 1 Lu Shizeng, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.* Identification of impact location by using fiber Bragg grating based on wavelet transform and support vector classifiers[J]. Chinese J 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.
- 2 Lu Jiyun, Wang Bangfeng, Liang Dakai, *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, 等. 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.
- 3 Majewska K, Opoka S, Kudela P, *et al.* Novel FBG rosette for determining impact location in thin plate-like structure [C]. Journal of Physics: Conference Series. 2015, 628(1): 012118.
- 4 Zeng Tian, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.* Research on self-healing method of multi-agent collaboration optic sensor network based on optical switch and graph theory[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1206002.
曾 田, 梁大开, 曾 捷, 等. 基于光开关和图论的多主体协作光纤传感网络自修复方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1206002.
- 5 Kirkby E, Oliveira R D, Michaud V, *et al.* Impact localisation with FBG for a self-healing carbon fibre composite structure[J]. Composite Structures, 2011, 94(1): 8-14.
- 6 Su Yongzhen, Yuan Shenfang, Zhang Bingliang, *et al.* Impact localization for composite based on acoustic emission and neural networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 56-58.
苏永振, 袁慎芳, 张炳良, 等. 基于声发射和神经网络的复合材料冲击定位[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 56-58.
- 7 Liu Deming, Sun Qizhen, Distributed optical fiber sensing technology and its application[J]. Laser and Optoelectronics

Progress, 2009, 46(11): 29-33.

刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.

- 8 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Wang Chang, *et al.* Experimental research of thermal effect in FBGs fabrication[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120602.

宋志强, 祁海峰, 王 昌, 等. 光纤布拉格光栅制作中热效应影响的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120602.

- 9 Tsuda H. Ultrasound and damage detection in CFRP using fiber Bragg grating sensors[J]. Composites Science & Technology, 2006, 66(5): 676-683.

10 Hao Yan. Research on fractal dimension characteristics and methodology of fractal fault diagnosis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

郝 研. 分形维数特性分析及故障诊断分形方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

- 11 Jiang Wanlu, Chen Dongning, Yao Chengyu. Correlation dimension analytical method and its application in fault diagnosis of hydraulic pump[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004, 3(1): 62-65.

姜万录, 陈东宁, 姚成玉. 关联维数分析方法及其在液压泵故障诊断中的应用[J]. 传感技术学报, 2004, 3(1): 62-65.

- 12 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.