

# 模态特征匹配的冲击定位方法\*

刘 环<sup>1</sup>, 王景霖<sup>2</sup>, 洪 流<sup>1</sup>, 丁洋洋<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学机电工程学院 武汉, 430070)

(2. 上海航空测控技术研究所故障诊断与健康管理工作室 上海, 201601)

**摘要** 针对冲击载荷的定位问题,提出了一种基于模态特征匹配的冲击定位方法。首先,推导了模态常数与结构所受冲击位置的映射关系,设计了一套基于光纤光栅传感的冲击定位实验系统,在该系统冲击定位实验测试前的离线阶段,通过实验模态分析方法得到结构上潜在受冲击位置的模态常数,并以这些模态常数组成的特征向量为基础构造了样本数据库;其次,在冲击定位的实验测试过程中,采用正交多项式拟合方法提取测试信号中的模态常数,并与数据库进行相似度匹配实现定位冲击位置;最后,在铝板结构的12个预设冲击位置分别进行了低采样率下的冲击定位实验,定位出10个位置。实验结果证明了所提出的冲击定位方法在低采样率下的可行性及光纤光栅传感系统在冲击定位领域的应用前景。

**关键词** 冲击定位;模态常数;光纤光栅;余弦相似度;低采样率

**中图分类号** TH11;TP74

## 0 引言

冲击载荷的定位是结构健康监测中最基本的问题<sup>[1]</sup>。日常生活中,结构承受着各种冲击载荷导致材料性能弱化的风险。为保证结构的完整性和安全性,在冲击事件发生时及时监测并定位冲击位置具有重要意义。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, 简称FBG)具有结构简单、灵敏度高及速度快的特性,且能在绝大部分应用场景保持良好的稳定性和耐久性,在冲击定位的在线监测中具有广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。

冲击载荷的定位方法中,基于多个传感器间响应信号时间延迟的定位方法是一种经典的冲击定位方法。Lee等<sup>[3]</sup>通过测量水平布置在目标下方的2组等边三角形声学传感器冲击波的到达时间延迟(time difference of arrival, 简称TDOA),来确定目标上的声打击坐标。Chen等<sup>[4]</sup>通过布置在金属板4个侧边中点的FBG传感器采集应力波信号,计算每个独立信号的TDOA,结合双曲线定位模型确定冲击位置。Qiu等<sup>[5]</sup>采用多时间序列分析结合相似性度量的模态识别方法,实现了对钢板表面的随机冲击力的快速定位。部分研究人员通过提取响应信号的

特征识别冲击位置。曹亮等<sup>[6]</sup>针对层合板提出了一种基于小波包分解方法和分布式FBG传感网络的冲击定位方法,利用时频域信息的特征分解信号,并计算特征间的相似度实现冲击定位。赵发刚等<sup>[7]</sup>针对复合材料蜂窝板构建了FBG传感系统,经过小波分解得到响应的能量谱,以对冲击敏感的阶次能量谱作为特征向量,并通过比较特征向量幅值实现冲击定位。近年来,人工神经网络(artificial neural network, 简称ANN)逐渐应用于冲击定位领域。文献[8-9]分别提出基于径向基函数ANN与基于ANN和贝叶斯概率框架的力识别方法,通过ANN迭代学习得到力与响应之间的映射关系,从而识别力的大小和位置。

在冲击定位的研究中,工业现场常用的FBG解调系统采样频率较低(通常在2 kHz左右),会影响冲击定位算法的有效性与准确性。针对此问题,笔者提出一种基于模态特征匹配的冲击定位方法,结合FBG传感网络建立冲击定位系统。该系统能够在单激励位置的情况下,利用频率通常在1 kHz以下的结构低阶模态的特征,实现结构低采样率下的在线冲击定位。

\* 国家自然科学基金资助项目(51605349);湖北省自然科学基金资助项目(2025AFC005);航空科学基金资助项目(20173365001)

收稿日期:2023-11-23;修回日期:2024-02-28

## 1 冲击定位方法

基于模态特征定位冲击位置的原理是利用模态常数与冲击位置之间的映射关系,建立特征向量数据库。通过测试信号中模态特征与数据库的相似度匹配,实现定位冲击位置。冲击定位流程如图1所示。

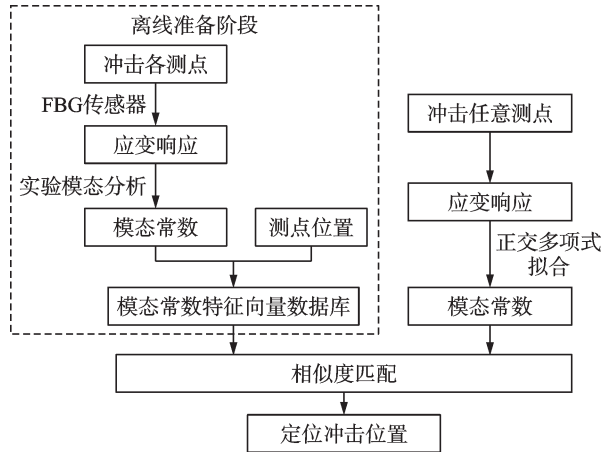


图1 冲击定位流程

Fig.1 The process of impact positioning

### 1.1 冲击定位原理

以 $N$ 自由度线性定常系统为例,其运动微分方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

其中: $M$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $X$ 为位移响应矩阵; $F$ 为激励力矩阵。

对式(1)进行频域变换,可得

$$(K - \omega^2 M + j\omega C)X(\omega) = F(\omega) \quad (2)$$

将式(2)中物理坐标下的响应转换为模态坐标下的响应,其表达式为

$$X(\omega) = \Phi Q \quad (3)$$

其中: $\Phi$ 为模态矩阵,反映了系统各阶模态的振型形状; $Q$ 为模态坐标矩阵,反映了各阶模态对响应的贡献量,其与激励的频率结构有关。

根据振动理论,线性时不变系统的任一点响应均可表示为各阶模态响应的线性组合。在有限测点的情况下,对于第 $r$ 阶响应,式(3)的展开式可表示为

$$x_l(\omega) = \varphi_{l1}q_1(\omega) + \varphi_{l2}q_2(\omega) + \cdots + \varphi_{ln}q_n(\omega) = \sum_{r=1}^N \varphi_{lr}q_r(\omega) \quad (4)$$

其中: $\varphi_{lr}$ 为第 $l$ 个测点、第 $r$ 阶模态的振型系数; $q_r$ 为

第 $r$ 阶模态坐标。

将式(3)、(4)代入式(2),可得

$$(K_r - \omega^2 M_r + j\omega C_r)q_r = F_r \quad (5)$$

其中: $K_r$ 为模态刚度, $K_r = \psi_r^T K \psi_r$ ;  $M_r$ 为模态质量, $M_r = \psi_r^T M \psi_r$ ;  $C_r$ 为模态阻尼, $C_r = \psi_r^T C \psi_r$ ;  $F_r$ 为模态力, $F_r = \psi_r^T F$ ;  $\psi_r$ 为第 $r$ 阶模态振型向量,向量中元素由第 $r$ 阶模态振型系数组成,  $\psi_r = (\varphi_{1r}, \varphi_{2r}, \cdots, \varphi_{nr})$ ,下标数字 $(1, 2, \cdots, n)$ 为激励点编号,其数值与激励点位置有关。

设激励力作用于 $p$ 点,对于第 $r$ 阶模态,由式(4)、(5)可得

$$x_l(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{lr}\varphi_{pr}f_p(\omega)}{M_r(\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega)} = \sum_{r=1}^N \frac{A_{lp}f_p(\omega)}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega} = \sum_{r=1}^N \frac{A_{lp}^*}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega} \quad (6)$$

其中: $A_{lp}$ 为模态常数, $A_{lp} = \frac{\varphi_{lr}\varphi_{pr}}{M_r}$ ;  $A_{lp}^*$ 为未修正的

模态常数, $A_{lp}^* = \frac{\varphi_{lr}\varphi_{pr}}{M_r}f_p(\omega)$ ;  $\omega_r$ 为第 $r$ 阶模态固有

频率, $\omega_r^2 = \frac{K_r}{M_r}$ ;  $\xi_r$ 为第 $r$ 阶模态的阻尼比, $\xi_r =$

$$\frac{C_r}{2M_r\omega_r}。$$

对同一结构而言,各阶模态质量 $M_r$ 为定值,故模态常数 $A_{lp}$ 只与测点模态振型系数 $\varphi_{lr}$ 和激励点模态振型系数 $\varphi_{pr}$ 有关。因此,当控制测点 $l$ 不变时,测点模态振型系数 $\varphi_{lr}$ 为定值,模态常数 $A_{lp}$ 就只与激励点模态振型系数 $\varphi_{pr}$ 有关,即只与激励点位置 $p$ 有关。当激励力为冲击力时, $f_p(\omega) = c$ , $c$ 为常数,此时 $A_{lp}^* = cA_{lp}$ ,模态常数 $A_{lp}$ 与未修正的模态常数 $A_{lp}^*$ 同样能够建立与激励点 $p$ 之间的映射关系。因此,可以通过响应信号的模态常数定位冲击位置。

### 1.2 光纤布拉格光栅传感原理

FBG传感器能够反射特定波长的光波信号,而其他波长信号基本不被反射。光纤布拉格光栅传感原理如图2所示。

当FBG受到温度或应力应变变化时,栅距和折射率会发生变化,能够被反射的光波长也随之发生变化。FBG反射光波长的表达式为

$$\lambda = 2n_{\text{neff}}(T, \epsilon)\Lambda(T, \epsilon) \quad (7)$$

其中: $\lambda$ 为反射光的波长; $n_{\text{neff}}$ 为有效折射率; $\Lambda$ 为栅距; $T$ 为温度; $\epsilon$ 为应变。

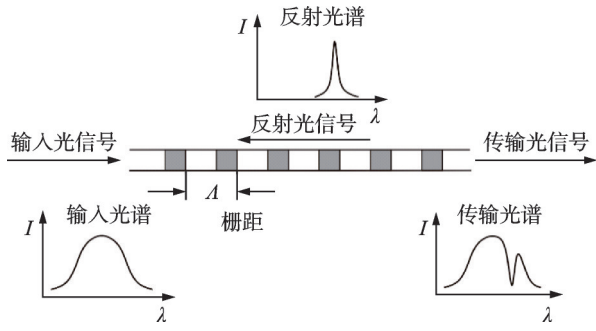


图2 光纤布拉格光栅传感原理

Fig.2 Fiber Bragg grating sensing principle

在本研究中,因为实验温度  $T$  只有缓慢微小的变化,故只考虑反射波长与应变的关系。反射光波长变化量  $\Delta\lambda$  与应变  $\epsilon$  的关系式为

$$\Delta\lambda = (1 - P_e) \lambda_0 \epsilon = \alpha_\epsilon \epsilon \quad (8)$$

其中:  $P_e$  为弹光系数,  $P_e = \frac{\Delta n_{\text{neff}}}{n_{\text{neff}}}$ ;  $\lambda_0$  为初始状态下 FBG 的中心波长;  $\alpha_\epsilon$  为 FBG 传感器的灵敏度。

本研究中所使用的 FBG 中心波长在 1 530~1 560 nm 之间,  $\alpha_\epsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

由式(8)可知,当结构体受到冲击时,由于应力应变发生变化,FBG 反射光波长也发生变化,通过解调仪捕捉 FBG 波长的变化值可以确定测点的应变值。

将式(6)中位移响应转换为应变响应,对轴向方向求导可得应变响应方程,即

$$\epsilon_i(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{lr}^* \varphi_{pr}^* f_p(\omega)}{M_r(\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r \omega_r \omega)} = \sum_{r=1}^N \frac{A_{lps} f_p(\omega)}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r \omega_r \omega} \quad (9)$$

其中:  $\varphi^*$  为应变模态振型系数;  $A_{lps}$  为应变模态的模态常数。

同样地,当激励力为冲击力时,可通过模态常数  $A_{lps}$  与激励点应变模态振型系数  $\varphi_{pr}^*$  之间的映射关系,即与激励点位置  $p$  的映射关系来定位冲击位置。

### 1.3 基于正交多项式拟合的模态常数提取方法

模态常数  $A_{lp}$  可用来定位冲击点,但在从式(9)中提取模态常数之前,还要求得各阶模态的固有频率  $\omega_r$  与阻尼比  $\xi_r$ 。本研究采用正交多项式拟合的方法求取模态参数,该方法主要包括频响函数的有理分式多项式方法和 Forsythe 复正交多项式拟合方法两部分<sup>[10]</sup>。

对式(1)左右两边进行拉氏变换,可得

$$Z(s) = Ms^2 + Cs + K \quad (10)$$

其中:  $Z(s)$  为阻抗矩阵,  $Z(s) = \frac{F(s)}{X(s)}$ 。

传递函数矩阵  $H(s)$  可表示为

$$H(s) = [Z(s)]^{-1} = \frac{\text{adj}[Z(s)]}{\det[Z(s)]} \quad (11)$$

其中:  $\text{adj}[Z(s)]$  为阻抗矩阵  $Z(s)$  的伴随矩阵;  $\det[Z(s)]$  为阻抗矩阵  $Z(s)$  的行列式。

对于  $N$  自由度系统,阻抗矩阵  $Z(s)$  的阶次为  $N \times N$ , 则其伴随矩阵和行列式的阶次分别为  $2N$  和  $2N-2$ 。因此,传递函数第  $l$  行、第  $p$  列的元素为

$$H_{lp}(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_m s^m}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n} = \frac{\sum_{k=0}^m c_k p_k(s)}{\sum_{k=0}^n d_k q_k(s)} \quad (12)$$

其中:  $m = 2N - 2$ ;  $n = 2N$ ;  $c_k$  为分子多项式系数,  $c_k = \frac{a_k}{b_n}$ ;  $d_k$  为分母多项式系数,  $d_k = \frac{b_k}{b_n}$ ;  $p_k$  为分子多项式,  $p_k(s) = s^k$ ;  $q_k$  为分母多项式,  $q_k(s) = s^k$ 。

对式(12)进行频域变换  $s = j\omega$ , 则可进一步表示为

$$H_{lp}(j\omega) = \frac{\sum_{k=0}^m c_k p_k(j\omega)}{\sum_{k=0}^n d_k q_k(j\omega)} \quad (13)$$

设被拟合的频率点数为  $L$ , 频响函数的实验值以  $\tilde{H}(j\omega_i)$  表示,  $i = -L, -L+1, \dots, L$ , 引入理论模型值与实验值之间的误差  $\tilde{e}_i$ ,  $\tilde{e}_i = H_{lp}(j\omega_i) - \tilde{H}_{lp}(j\omega_i)$ , 为使得其对分子、分母系数  $c_k$ 、 $d_k$  线性化, 进行变换后的误差  $e_i$  可表示为

$$e_i = \tilde{e}_i \sum_{k=0}^n d_k q_k(j\omega_i) = \sum_{k=0}^m c_k p_k(j\omega_i) - \tilde{H}(j\omega_i) \left[ \sum_{k=0}^{n-1} d_k q_k(j\omega_i) + q_n(j\omega_i) \right] \quad (14)$$

定义总方差  $J$  为

$$J = \sum_{i=-L}^L e_i^* e_i = E^H E \quad (15)$$

其中: “H” 表示共轭转置。

误差向量矩阵  $E$  可表示为

$$E = PC - QD - W \quad (16)$$

其中:  $P$  为分子多项式矩阵;  $C$  为分子多项式系数矩阵;  $Q$  为分母多项式矩阵;  $D$  为分母多项式系数矩阵;  $W$  为余项,  $W = \tilde{H}(j\omega)q_n(j\omega)$ 。

为求得总方差  $J$  的极小值, 对矩阵  $C$ 、 $D$  求偏导  $\frac{\partial J}{\partial C} = 0$  和  $\frac{\partial J}{\partial D} = 0$ , 由式(15)、(16)可得

$$\begin{bmatrix} Y & X \\ X^T & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ F \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中:  $X = -\text{Re}(P^H Q)$ ;  $Y = \frac{1}{2}(P^H P + P^T P^*)$ ;  $Z = \frac{1}{2}(Q^H Q + Q^T Q^*)$ ;  $G = \text{Re}(P^H W)$ ;  $F = \text{Re}(Q^H W)$ ; “ $T$ ”表示矩阵转置; “ $*$ ”表示伴随矩阵;  $\text{Re}$  表示复数矩阵的实部。

若  $P$  与  $Q$  满足正交条件, 则  $Y$  与  $Z$  为单位矩阵, 式(17)可表示为

$$\begin{bmatrix} I_1 & X \\ X^T & I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ F \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(18)可求得分子、分母系数矩阵  $C$  和  $D$ , 进而求得系统响应的模态参数。

本研究采用 Forsythe 复正交多项式拟合方法提取系统响应的模态参数, 其递推关系为

$$\begin{cases} \bar{p}_0(j\omega) = 1 \\ \bar{p}_1(j\omega) = j\omega - u_1 \\ \bar{p}_2(j\omega) = (j\omega - u_2)\bar{p}_1(j\omega) - V_1\bar{p}_0(j\omega) \\ \vdots \\ \bar{p}_k(j\omega) = (j\omega - u_k)\bar{p}_{k-1}(j\omega) - V_{k-1}\bar{p}_{k-2}(j\omega) \end{cases} \quad (19)$$

其中:  $u_k = \sum_{i=-L}^L |j\omega_i| \bar{p}_{k-1}(j\omega_i)^2 \rho_i^2 / D_{ek-1}$ ;  $V_{k-1} = -D_{ek-1} / D_{ek-2}$ ;  $D_{ek} = \sum_{i=-L}^L |\bar{p}_k(j\omega_i)|^2 \rho_i^2$ ;  $\rho_i$  为加权因子。

对于分母多项式  $q_k(j\omega)$  与分子多项式  $\bar{p}_k(j\omega)$ ,  $\rho_i$  分别取  $\rho_i^2 = |\tilde{H}(j\omega_i)|^2$  和  $\rho_i^2 = 1$ 。对正交多项式  $p_k(j\omega)$  进行正则化, 即

$$p_k(j\omega) = \frac{\bar{p}_k(j\omega)}{\left[ \sum_{i=-L}^L |\bar{p}_k(j\omega_i)|^2 \rho_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{\bar{p}_k(j\omega)}{D_{ek}^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

令  $\bar{p}_k(j\omega) = j^k \bar{R}_k(\omega)$ ,  $\bar{R}_k(\omega)$  为实数, 由式(19)、(20)可得

$$\begin{cases} \bar{R}_k(\omega) = \omega R_{k-1}(\omega) + V_{k-1} R_{k-2}(\omega) \\ V_{k-1} = -D_{ek-1} / D_{ek-2} \\ D_{ek} = 2 \sum_{i=1}^L \bar{R}_k(\omega_i) \rho_i^2 \end{cases} \quad (k=0, 1, \dots) \quad (21)$$

经计算得到  $\bar{R}_k(\omega)$  后, 即可计算正则化后的  $R_k(\omega)$ , 再根据  $p_k(j\omega) = j^k R_k(\omega)$  进一步计算  $p_k(j\omega)$ 。同理, 可按同样步骤求得  $q_k(j\omega)$ 。

将式(18)展开, 即

$$\begin{cases} (I - X^T X) D = F - X^T G \\ C = G - X D \end{cases} \quad (22)$$

其中:  $X = -\text{Re}(P^H Q) = -2\text{Re}(P^{+H} Q^+)$ ;  $G = \text{Re}(P^H W) = 2\text{Re}(P^{+H} W^+)$ ; “ $+$ ”表示矩阵的广义逆。

根据式(22)求得正则化后的多项式系数矩阵  $C$  和  $D$  后, 可进一步求得分子和分母多项式, 即

$$\begin{cases} c_k p_k(j\omega) = \frac{c_k}{(D_{ek})^{\frac{1}{2}}} \bar{p}_k(j\omega) \\ d_k q_k(j\omega) = \frac{d_k}{(D_{ek})^{\frac{1}{2}}} \bar{q}_k(j\omega) \end{cases} \quad (23)$$

当分子、分母多项式系数已知后, 令分母多项式为 0, 所求  $s$  值即为极点值, 由极点值可进一步求得各阶固有频率  $\omega_r$  和阻尼比  $\xi_r$ 。

$p$  点激励、 $l$  点响应的传递函数  $H_{lp}(s)$  可表示为

$$H_{lp}(s) = \sum_{r=1}^N \left( \frac{A_{lpr}}{s - s_r} + \frac{A_{lpr}^*}{s - s_r^*} \right) \quad (24)$$

其中:  $A_{lpr}$  为  $H_{lp}(s)$  在极点  $s_r$  处的留数。

模态常数的计算公式为

$$A_{lpr} = 2\text{Re}(A_{lpr})\text{Re}(s_r) + \text{Im}(A_{lpr})\text{Im}(s_r) + |s_r| 2\text{Re}(A_{lpr}) \quad (25)$$

## 2 实验介绍与模态常数库的建立

### 2.1 实验台介绍

为验证所提出的冲击定位方法的可行性, 在金属铝板结构上开展了实验研究。实验台如图3所示。其中, 矩形板长为 600 mm, 宽为 200 mm, 厚为 3 mm, 材料为铝合金, 密度为 2 770 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 68.9 GPa, 泊松比为 0.33。实验中将板面均分为 12 个尺寸为 100 mm×100 mm 的区域, 为规避模态节点对实验的影响, 采用多传感器的策略, 在板面布设了 10 个 FBG 传感器测点。图 4 为区域划分及 FBG 布设示意图。

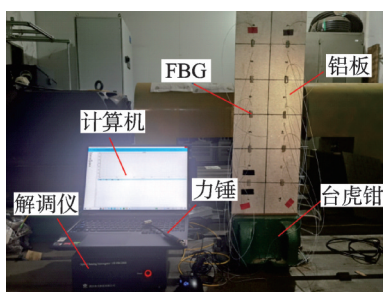


图3 冲击定位实验台

Fig.3 Impact positioning test bench

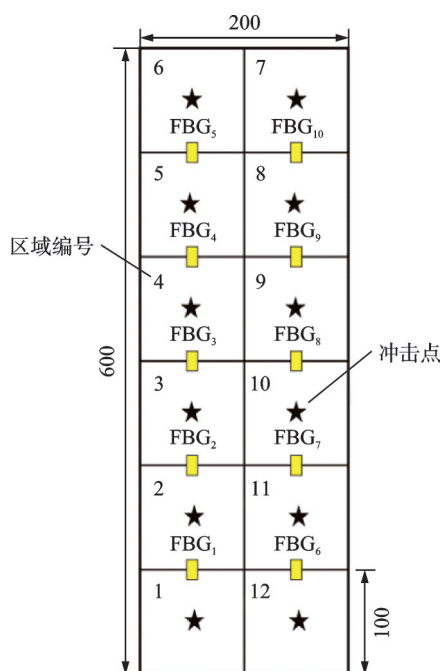


图4 区域划分及FBG布设示意图(单位:mm)

Fig.4 Schematic diagram of zoning and FBG layout (unit:mm)

## 2.2 冲击响应数据测量

设置解调仪采样频率为 2 kHz,使用力锤分别冲击板面上“★”符号所示的 12 个位置,采集对应位置的冲击响应数据。以区域 1 受冲击时 FBG<sub>1</sub>采集到的时域响应为例,冲击响应时域图如图 5 所示。

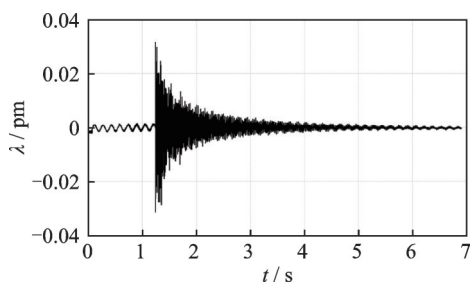


图5 冲击响应时域图

Fig.5 Time-domain plot of shock response

## 2.3 模态常数特征数据库的建立

由模态常数与测点位置和冲击位置之间的关系可知,当测点位置不变时,模态常数与冲击点位置存在映射关系。因此,本实验在建立样本数据库的过程中,采用相同的 FBG 传感器采集 12 个区域受冲击后的响应数据,并通过实验模态分析得到各自对应的固有频率,分别为 6.33、40.50、113.82 和 224.15 Hz 的前 4 阶模态的模态常数,结合冲击点位置坐标,建立图 6 所示的模态常数特征数据库。其中:横坐标为模态阶次;纵坐标为范数归一化后的模态常数的模。

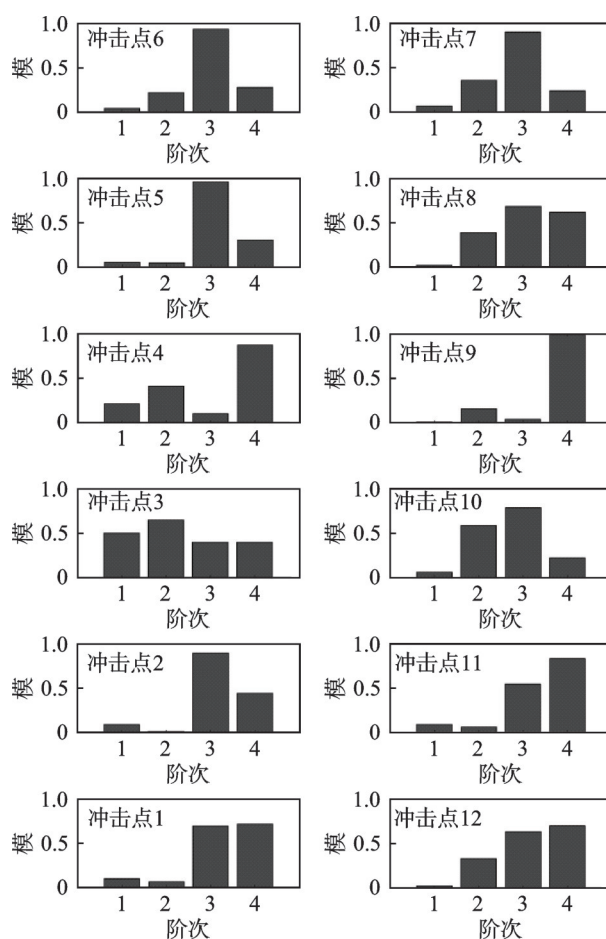


图6 模态常数特征数据库

Fig.6 Modal constant feature database

## 3 冲击定位实验

选用与 2.3 节相同的 FBG 传感器采集数据,分别对 12 个冲击点各冲击 1 次,分析得到响应信号中的前 4 阶模态常数。冲击实验模态常数特征如图 7 所示。

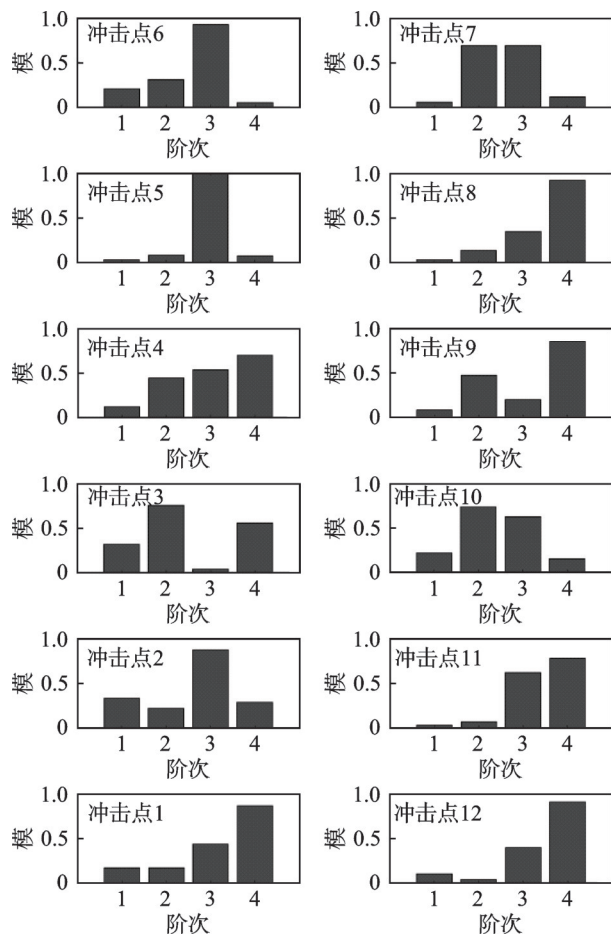


图7 冲击实验模态常数特征  
Fig.7 Impact experimental modal constant feature

3.1 模态常数特征向量匹配结果

本研究采用相似度匹配的方法,将对应于每个冲击点的前4阶模态常数组成一个模态常数特征向量,比较冲击实验得到的模态常数特征向量与数据库中特征向量间的余弦相似度进行相似度匹配。余弦相似度的计算公式为

$$\cos(\theta)=\frac{A_{lp_{exp}}A_{lp_k}}{\|A_{lp_{exp}}\|\|A_{lp_k}\|} \quad (26)$$

其中: $A_{lp_{exp}}$ 为冲击实验得到的模态常数特征向量; $A_{lp_k}$ 为模态常数库中的特征向量。

当2个向量间的余弦相似度越接近1,认为2个向量的相似度越高,则数据库中特征向量所代表的位置越有可能是冲击位置。对12个位置进行冲击实验,其特征向量匹配结果如图8所示。其中,冲击实验所得到的模态常数特征向量与数据库中各个冲击点的模态常数特征向量间的余弦相似度越接近1,在图中显示的颜色就越深。

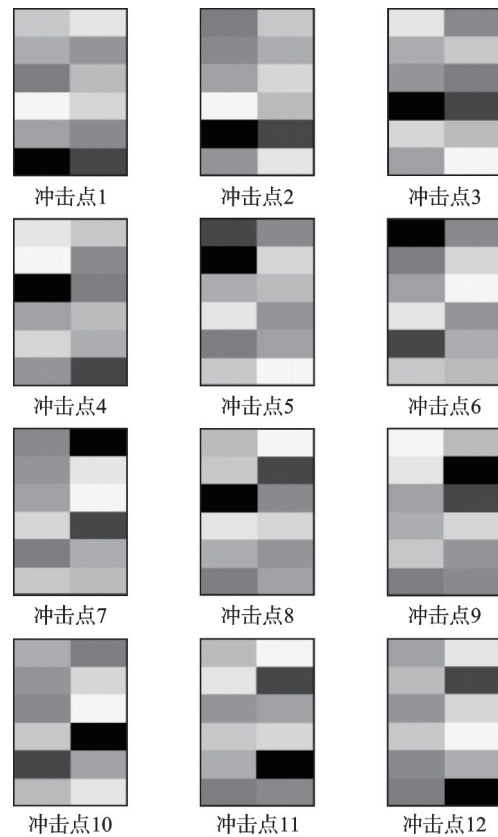


图8 特征向量匹配结果  
Fig.8 Feature vector matching results

3.2 实验结果分析

在600 mm×200 mm×3 mm的铝板上进行冲击定位实验,在12个样本位置中有10个位置定位准确,而位置8和位置9的冲击定位结果显示在邻近的位置4和位置8。比较这2次冲击的余弦相似度的数值可知,冲击点8与位置4和位置8的相似度值分别为0.841和0.833,冲击点9与位置8和位置9的相似度值分别为0.898和0.855,都十分接近。造成不同位置的匹配数值相近的原因有:①实验结构本身存在一定的对称性,提高参与计算的模态阶数或增加用来定位的FBG传感器能够在一定程度上解决此问题;②噪声信号的影响使得正交多项式拟合的模态参数出现了一定的误差。

4 结 论

- 1) 结合光纤光栅可分布式测量的特性,设计了光纤光栅传感网络,可对板面冲击响应信号进行监测。
- 2) 基于模态特征匹配的冲击定位算法能够在

较低的采样频率下,利用低阶模态的模态特征,在单激励位置的情况下,实现在线定位冲击位置。

3) 所提算法利用模态常数与冲击位置之间的映射关系,结合余弦相似度匹配的方法,提高了对冲击位置的定位精度。

### 参 考 文 献

- [1] QIU B B, ZHANG M, XIE Y G, et al. Localisation of unknown impact loads on a steel plate using a pattern recognition method combined with the similarity metric via structural stress responses in the time domain[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 128: 429-445.
  - [2] ZHU L Q, SUN G K, BAO W M, et al. Structural deformation monitoring of flight vehicles based on optical fiber sensing technology: a review and future perspectives[J]. Engineering, 2022, 16: 39-55.
  - [3] LEE H S, WON J S, PARK K S, et al. Acoustic target impact point identification system[C]//2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Hangzhou, China: IEEE, 2017: 1071-1075.
  - [4] CHEN Y, JIANG T, CHEN Y W, et al. Multi-source impact position identification method for metal plates based on fiber bragg grating[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(1): 851-857.
  - [5] QIU B B, ZHANG M, LI X, et al. Unknown impact force localisation and reconstruction in experimental plate structure using time-series analysis and pattern recognition[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 166: 105231.
  - [6] 曹亮, 王景霖, 何召华, 等. 光纤光栅传感网络的冲击定位方法[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 456-461.
- CAO Liang, WANG Jinglin, HE Zhaohua, et al. Research on impact location by using fiber bragg grating sensor network[J]. Journal of Vibration, Measurement

& Diagnosis, 2017, 37(3): 456-461.(in Chinese)

- [7] 赵发刚, 周春华, 梁大开, 等. 卫星典型复合材料蜂窝结构板的冲击定位方法[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6): 1204-1209.
- ZHAO Fagang, ZHOU Chunhua, LIANG Dakai, et al. Impact and locating method research on satellite's typical composite honeycomb structure panel[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(6): 1204-1209.(in Chinese)
- [8] WANG L, LIU Y R, GU K X, et al. A radial basis function artificial neural network (RBF ANN) based method for uncertain distributed force reconstruction considering signal noises and material dispersion[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 364: 112954.
  - [9] LIU Y R, WANG L, GU K X, et al. Artificial neural network (ANN) -bayesian probability framework (BPF) based method of dynamic force reconstruction under multi-source uncertainties[J]. Knowledge-based Systems, 2022, 237: 107796.
  - [10] RICHARDSON M H, FORMENTI D L. Global curve fitting of frequency response measurements using the rational fraction polynomial method[C]//Proceeding of 3rd IMAC Conference. Orlando, FL: IMAC, 1985: 390-397.



**第一作者简介:**刘环,男,1999年10月生,硕士。主要研究方向为机械振动信号分析与健康状态监测。

E-mail:Lh83350521@outlook.com

**通信作者简介:**洪流,男,1986年9月生,博士、副教授。主要研究方向为机械振动信号分析与健康状态监测、先进传感、机械结构设计与振动控制。

E-mail:hongliu@whut.edu.cn