

基于频谱压缩感知和核极限学习机的柔性复合材料结构冲击定位



喻俊松^{1,2}, 刘君¹, 彭子鹏¹, 干灵辉¹, 万生鹏^{1,2}

1. 南昌航空大学 江西省光电信息科学与技术重点实验室, 江西 南昌 330063

2. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

摘要: 柔性复合材料以其质量轻、收展重复性好、收展原理简单等优点, 广泛应用于航空航天器结构中, 这些结构在服役过程中随时可能遭受冲击载荷作用而产生损伤。针对柔性复合材料结构上冲击载荷定位问题, 本文搭建一种基于光纤光栅的冲击监测系统, 分析柔性复合材料结构冲击响应信号时频域特征, 利用频谱信号的稀疏性和压缩感知具有在远低于奈奎斯特采样率条件下重构信号的特性, 提出一种基于频谱压缩感知和核极限学习机的柔性复合材料结构冲击定位方法。对柔性复合材料冲击响应信号频谱进行稀疏表示及压缩测量, 将冲击响应信号频谱压缩降维所得观测矢量作为特征量, 采用减法平均算法优化核极限学习机实现柔性复合材料上冲击载荷位置辨识。在柔性复合材料结构上 200mm×400mm 的监测区域内随机选取 15 个测试样本点进行冲击定位, 试验结果表明, 平均定位误差为 18.83mm, 为柔性复合材料结构的冲击定位提供了一种可靠的方法。

关键词: 冲击定位; 柔性复合材料结构; 光纤光栅; 压缩感知; 核极限学习机

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.05.006

随着科技的进步, 现代工业制造技术和材料科学极大地推动了航空航天领域的发展, 提升了飞行器的机动性、生存能力和可靠性等关键性能指标。同时, 结构的复杂性及其使用材料成本不断上升, 使得飞行器造价提高; 服役时间不断延长, 结构遭受多种载荷而产生损伤的风险也随之上升^[1-3]。柔性复合材料以其质量轻、伸展性好、耐腐蚀等优点在空间可展索网天线支撑肋、太阳能帆板等航空航天结构获得广泛应用。但其对冲击载荷敏感性高, 遭受外部冲击载荷后易产生损伤和变形, 影响结构的功能和安全性。因此, 柔性复合材料结构冲击监测对于结构的及时维护和灾难事件的预防十分关键^[4-6]。

光纤布拉格光栅 (FBG) 以其具有耐腐蚀、抗电磁干扰和对监测结构干扰最小的优点, 在航空航天^[7]、铁路轨道^[8]、医疗设备^[9] 等结构健康监测领域得到了重视和应用, 尤其光纤布拉格光栅在航空航天领域的应用包括飞机翼

面变形监测、机身结构应力分析以及发动机叶片振动监测等^[10-14]。近年来, 学者们广泛探索了复合材料结构的冲击定位技术, 并取得了重大进展^[15]。Du Liangya 等^[16] 提出一种基于混合相关插值的冲击定位方法, 该方法通过比较参考点和碰撞点的相似性来实现复合材料结构碰撞的定位。Liu Qi 等^[17] 提出了一种冲击定位方法, 该方法利用小波包分解从冲击信号中提取特征, 随后通过搜索算法最小化捕获信号与参考信号数据库之间的差异来识别冲击位置。然而, 依赖于比较信号差异的方法对信号干扰的抵抗能力有限。此外, 基于冲击信号到达时间的定位方法也常用于冲击定位。张阳等^[18] 对比分析了时间反转聚焦、误差函数和互相关函数三种基于时差法的冲击定位算法精度。杨雷等^[19] 采用复 Morlet 小波变换提取冲击响应信号特定中心频率的窄带 Lamb 波信号模的峰值作为信号的到达时刻, 构建基于波达时间差的误差函数并计算监测区域内各

收稿日期: 2024-11-17; 退修日期: 2025-01-22; 录用日期: 2025-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(62105139); 航空科学基金(2022Z057056003)

引用格式: Yu Junsong, Liu Jun, Peng Zipeng, et al. Impact localization of flexible composite material structure based on spectrum compression sensing and kernel extreme learning machine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(5): 51-58. 喻俊松, 刘君, 彭子鹏, 等. 基于频谱压缩感知和核极限学习机的柔性复合材料结构冲击定位[J]. 航空科学技术, 2025, 36(5): 51-58.

点为冲击源的概率值,将概率值作为像素值对结构进行概率成像冲击定位。但这些方法需要高速FBG解调系统来捕获信号到达不同传感器的时间差,且获取的信号到达时差精度取决于所采用信号端点检测的方法。另外,机器学习也被广泛应用于冲击定位。张永^[20]提出采用冲击响应信号多域特征组成新的多维度的数据集,基于多域指标融合的双层支持向量回归机实现低速冲击定位。刘琦^[21]利用统计方法、傅里叶变换和短时傅里叶变换从冲击响应信号中提取信号时频域特征,并提出了一种基于多域特征和蝙蝠算法优化v-SVR模型的复合板低速冲击定位方法。基于机器学习的碰撞定位方法的性能取决于提取的特征数据的大小和表征碰撞信号特征的能力。因此,采用一种能以较小数据量包含冲击响应信号尽可能完整特征信息的特征量提取方法至关重要。

本文通过搭建基于光纤光栅的柔性复合材料结构冲击监测系统,研究柔性复合材料结构冲击响应信号的时频域特性。对柔性复合材料结构冲击响应信号频谱进行稀疏表示,并采用压缩感知方法对冲击响应信号频谱进行压缩降维,分析不同压缩比下信号重构性能。最后将冲击响应信号频谱压缩降维所得观测矢量作为特征量,通过核极限学习机冲击辨识模型实现柔性复合材料结构上冲击载荷定位。

1 基本理论

1.1 压缩感知理论

压缩感知(CS)利用信号的稀疏性或在某个变换域上具有稀疏性,通过一个与变换基不相关的观测矩阵对信号进行降维,然后在无须满足奈奎斯特采样定理的条件下通过求解非凸优化问题重构原始信号^[22]。压缩感知理论广泛地应用于传感通信、医疗、机械故障诊断等领域^[23-25]。

以长度为 N 的一维离散时域信号 $\mathbf{x}(n), n \in [1, 2, \dots, N]$ 为例, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$,信号矢量 \mathbf{x} 可以表示为

$$\mathbf{a} = \Psi \mathbf{x} \quad (1)$$

式中, \mathbf{a} 为信号矢量 \mathbf{x} 在稀疏基矩阵 Ψ 下的稀疏化矢量表示, \mathbf{a} 中非零元素的个数最多为 $K \ll n$,称矢量信号 \mathbf{x} 为 K -稀疏信号。稀疏性是应用压缩感知理论的前提。

当信号具备稀疏性时,可对信号进行测量采样,使用观测矩阵 $\Phi \in \mathbf{R}^{m \times n}, m < n$ 对原始信号进行观测,即将原始信号 \mathbf{x} 投影到观测矩阵 Φ 上,得到观测矢量 $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$ 为

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{a} \quad (2)$$

式中,测量矩阵 Φ 满足约束等距性条件,可通过求解寻找能

够满足式(2)的 \mathbf{a} ,将原始信号近似地重构出来。则式(2)的求解转化为L1范数优化问题^[26]

$$\min \|\hat{\mathbf{a}}\|_1 \text{ s.t. } \mathbf{y} = \Phi \Psi \hat{\mathbf{a}} \quad (3)$$

式中, $\hat{\mathbf{a}}$ 为 K -稀疏化矢量表示的估计,求解式(3)主要有基于L1范数正则化算法、匹配追踪算法、正交匹配追踪算法等。

1.2 核极限学习机

核极限学习机(KELM)作为一种单隐藏层前馈神经网络算法,具有训练速度快、泛化能力强等特点^[27],因此,被广泛应用于风功率预测^[28]、故障检测^[29]和复合材料结构损伤^[30]等领域。但输入层的权重矩阵和隐含层的阈值矩阵的随机性会影响模型的稳定性。核极限学习机(KELM)是一种基于ELM的改进算法,通过引入核函数,将数据从原始矢量空间映射到更高维的特征空间进行计算。此方法在保留ELM的优点的同时,计算每个样本与所有样本之间的相似度,不再受限于隐含层节点的数量,从而提升了模型的稳定性和泛化能力。KELM算法原理如下,假设有 M 个训练样本,其数据集为 $\{\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i\}_{i=1}^M$,其中 $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]^T \in \mathbf{R}^m$ 表示输入矢量, $\mathbf{o}_i = [o_{i1}, o_{i2}, \dots, o_{im}]^T \in \mathbf{R}^m$ 表示为对应的期望输出矢量。若ELM模型有 Y 个隐藏节点,且无残差存在,则存在权值矢量 \mathbf{w}_j 使得

$$\sum_{i=1}^Y \beta_j g(\mathbf{x}_i) = \sum_{i=1}^Y \beta_j g(\mathbf{w}_j \mathbf{x}_i + b_j) = \mathbf{o}_j \quad (4)$$

式中, $j = 1, \dots, M$; $g(\cdot)$ 为激励函数; $\mathbf{w}_j = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jm}]^T$ 为第 Y 个隐藏节点和输入节点之间的权值矢量; $\beta_j = [\beta_{j1}, \beta_{j2}, \dots, \beta_{jm}]^T$ 表示第 j 个隐藏节点和输出节点之间的权值; b_j 为第 j 个隐藏节点的阈值,即

$$\mathbf{H} \beta = \mathbf{T} \quad (5)$$

式中, β 为输出层权重矩阵, \mathbf{H} 为隐藏层矢量矩阵

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} g(\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_1 + b_1) & \cdots & g(\mathbf{w}_Y \mathbf{x}_1 + b_Y) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(\mathbf{w}_1 \mathbf{x}_M + b_1) & \cdots & g(\mathbf{w}_Y \mathbf{x}_M + b_Y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

加入正则化参数 C ,求解出最小二乘参数解

$$\beta^* = \mathbf{H}^+ \mathbf{T} = \mathbf{H}^T \left(\frac{I}{C} + \mathbf{H} \mathbf{H}^T \right)^{-1} \mathbf{T} \quad (7)$$

式中, \mathbf{H}^+ 为矩阵 \mathbf{H} 的Moore-Penrose广义逆变换。极限学习机的输出函数为

$$f(\mathbf{x}) = h(\mathbf{x}) \mathbf{H}^T \left(\frac{I}{C} + \mathbf{H} \mathbf{H}^T \right)^{-1} \mathbf{T} \quad (8)$$

式中, $h(\mathbf{x})$ 函数为极限学习机中的特征映射函数, C 为正则化系数,核矩阵表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Omega} = \mathbf{H}\mathbf{H}^T \\ \boldsymbol{\Omega}_{(i,j)} = h(\mathbf{x}_i)h(\mathbf{x}_j) = K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $K(\cdot)$ 定义成核函数。本文选用 RBF 函数作为核函数, 其表达式为

$$K_{\text{RBF}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2\delta^2}\right) \quad (10)$$

式中, δ 为核参数, 可以得出核极限学习机的输出为

$$f(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_N) \end{bmatrix} \left(\frac{I}{C} + \boldsymbol{\Omega}\right)^{-1} \mathbf{T} \quad (11)$$

2 冲击试验系统

柔性复合材料结构冲击试验系统由光纤光栅传感器、冲击锤、柔性复合材料试验件、光纤光栅解调仪及计算机组成, 使用 G 型夹对试验件进行固定。为了避免冲击响应信号受到固定边界的影响, 在柔性复合材料试件正面中心区域选取 $400\text{mm} \times 200\text{mm}$ 大小的监测区域, 使用环氧树脂胶将 4 支光纤光栅传感器以 45° 方向面向冲击监测区域粘贴于柔性材料试件表面。将各光纤光栅传感器依次命名为 FBG1、FBG2、FBG3、FBG4, 采用光纤跳线将各光纤光栅串行连接。光纤光栅的中心波长依次为 1534.92nm 、 1553.34nm 、 1559.40nm 和 1556.25nm 。光纤光栅解调仪采用 SENTEA 公司的 DM8125, 采样频率为 3kHz , 波长灵敏度为 1pm 。柔性复合材料试验件及冲击监测系统如图 1(a) 和图 1(b) 所示。

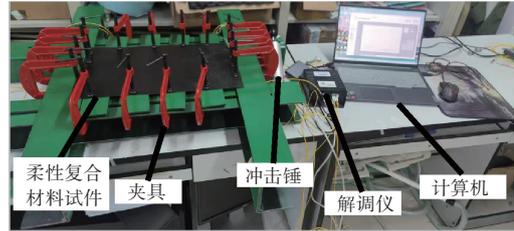
选取柔性复合材料结构待监测区域左下角作为坐标原点 O , 定义水平向右为 X 轴方向, 垂直向上为 Y 轴方向。将冲击监测区域划分为 9 行、17 列共计 153 个网格点的网格, 其中每个网格几何尺寸为 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$, 传感器及各网格节点排布与命名如图 1(c) 所示。使用弹簧冲击锤在柔性复合材料试验件表面各网格节点施加冲击载荷, 冲击能量设置为 1J , 每个网格节点冲击三次, 共获得 459 个样本冲击点, 使用光纤光栅解调仪和计算机采集每次冲击载荷下各光纤光栅传感器中心波长变化数据。

3 冲击信号稀疏化处理

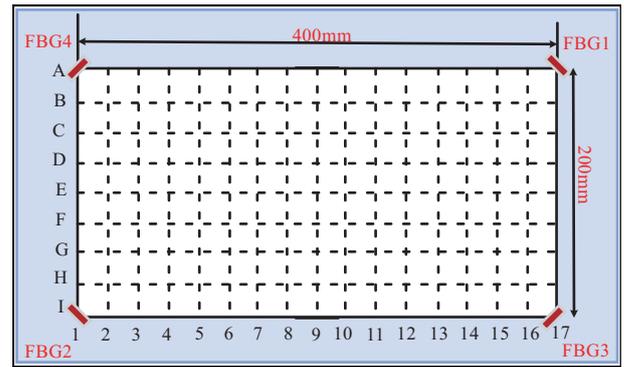
对柔性复合材料受到冲击载荷后光纤光栅的冲击响应信号进行采集并分析, 以冲击点 D3 (50mm , 250mm) 为例, 施加冲击载荷后 FBG1 的时域信号及频谱如图 2 所示。在冲击载荷下柔性复合材料结构上光纤光栅中心波长发生大幅度往复变化, 且振动幅度随时间逐渐衰减。冲击响应信



(a) 柔性复合材料试验件



(b) 柔性复合材料冲击监测系统



(c) 冲击监测区域及光纤光栅传感器布局

图 1 柔性复合材料结构冲击试验系统图

Fig.1 Diagram of impact testing system for flexible composite structure

号频谱能量主要集中在 $0\sim 150\text{Hz}$ 的低频窄带部分, 其余较宽频带范围内能量普遍较低。这是由于柔性复合材料结构受冲击载荷后产生大幅度低频往复变形及小幅度高频振动。因此, 本文为了保留冲击响应信号主要频谱特征并对信号频谱进行稀疏化处理, 实现信号频谱压缩降维, 将频谱中能量较低部分置零。即对频谱上各频率能量幅度由大到小排序, 保留累积贡献率超过信号全部能量占比阈值 η 以上的频谱部分, 其余置零, 本文依据经验设置 η 为 92% , 冲击响应信号频谱稀疏化表示如图 3 所示。

正交匹配追踪算法通过最小二乘法进行迭代逐渐逼近最优解, 具有算法简单、收敛速度快等优点。因此, 本文采用正交匹配追踪算法实现稀疏信号的重构, 算法基本步骤如下:

(1) 初始化残差矩阵, 设置初始残差 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$, 基矢量集合 $\boldsymbol{\Omega} = \emptyset$

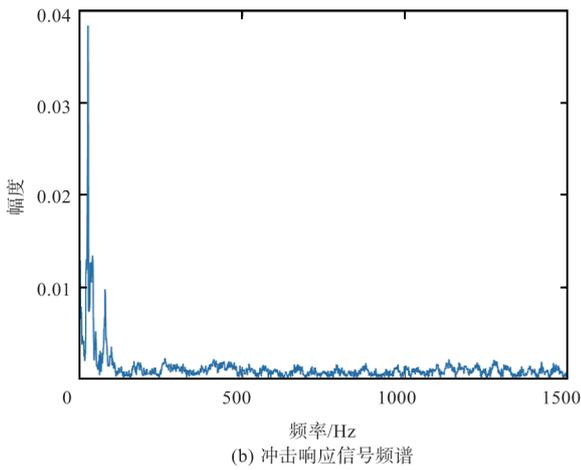
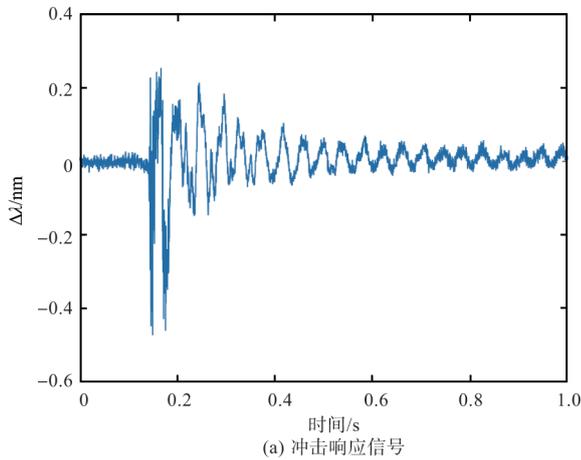


图2 冲击点D3载荷下FBG1响应信号及频谱

Fig.2 Impact signal and frequency spectrum of impact point D3 detected by FBG1

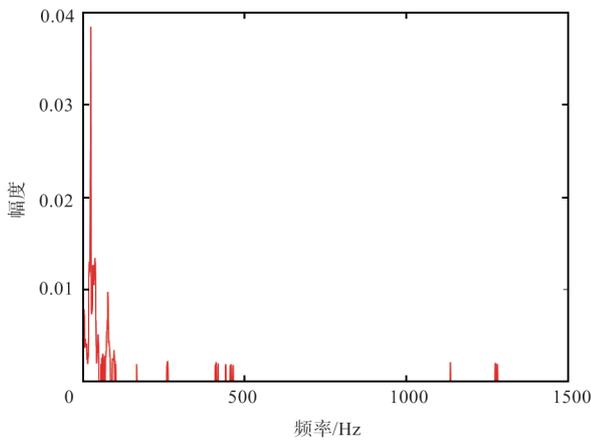


图3 冲击响应信号频谱稀疏化表示

Fig.3 Sparse representation of impact signal spectrum

(2) 计算并寻找基矢量矩阵 Ψ 中与当前残差 r_k 内积最大的基矢量 ϕ_j 及其索引

$$j = \arg \max_{i=1}^M |\langle \phi_i, r_k \rangle| \quad (12)$$

(3) 将最优基矢量 ϕ_j 加入基矢量集合 Ω 中。

(4) 在基矢量集合 Ω 中, 利用最小二乘法求解最优系数 θ_k

$$\theta_k = \arg \min_{\theta} \|y - \Psi_{\Omega} \theta\|_2^2 \quad (13)$$

式中, θ_k 为从基矢量矩阵 Ψ 中基矢量集合 Ω 对应的列矢量组成的矩阵。

(5) 利用当前基矢量集合 Ω 和系数 θ_k 更新残差 $r_{k+1} = y - \Psi_{\Omega} \theta_k$ 。

压缩降维后信号的维数与原始信号维数之比为信号压缩比, 压缩比过大则数据压缩效果不显著, 压缩比过小则重构信号与原始信号相比残差较大。因此, 选择合适的压缩比十分重要, 不同压缩比下信号的重构残差如图4所示。

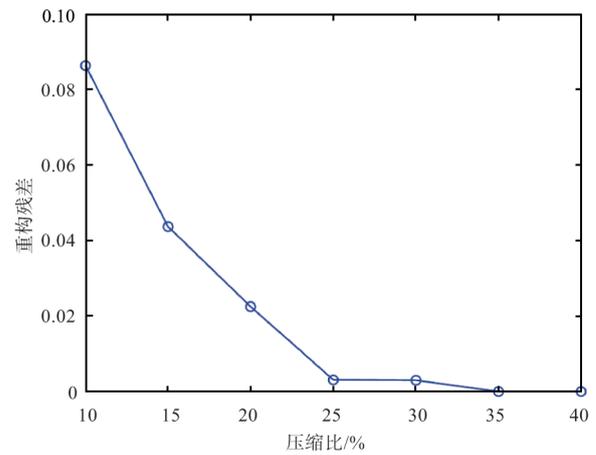


图4 不同压缩比下压缩感知重构信号残差

Fig.4 Residual error of compressed sensing reconstruction signal under different compression ratios

通过分析对比不同压缩比下重构信号与原始信号的残差可以发现, 当压缩比小于25%时, 信号重构残差随压缩比的下降迅速降低, 当压缩比大于25%时, 信号重构残差接近零并随压缩比的下降缓慢缩小。因此, 本文将信号压缩比设置为25%, 冲击响应信号频谱重构信号如图5所示, 重构信号能够较好地还原保留原始信号频谱特征。

4 定位结果与讨论

在冲击监测区域9行17列上每个节点冲击三次, 共获得459个样本冲击点。其中为了验证定位算法的可靠性和准确性, 随机选择15个样本作为测试样本, 其余444个样本作为训练样本。将训练样本4个光纤光栅传感器的

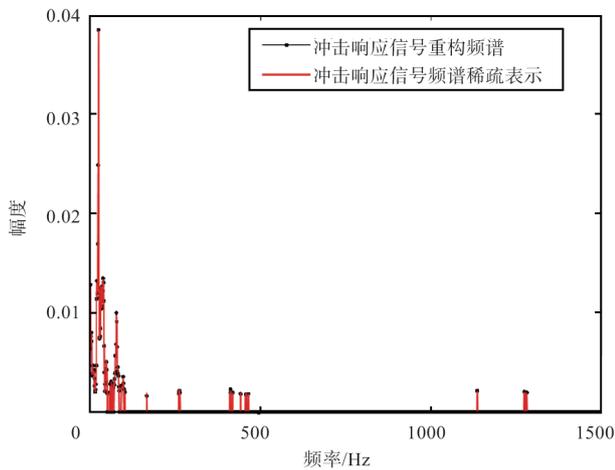


图5 冲击响应信号频谱稀疏表示及重构信号

Fig.5 Sparse representation and reconstruction of impact signal frequency spectrum

响应信号频谱压缩感知后获得的观测矢量合并后作为特征矢量并进行归一化处理,各样本点的横坐标和纵坐标作为期望输出。将训练样本输入核极限学习机进行训练并采用减法平均算法对正则化系数及核参数进行优化,分别建立冲击点横、纵坐标辨识模型,随后将测试冲击点分别代入横纵坐标辨识模型进行冲击点位置辨识。测试冲击点的定位结果如图6所示,各测试冲击点的实际坐标及预测坐标列见表1。

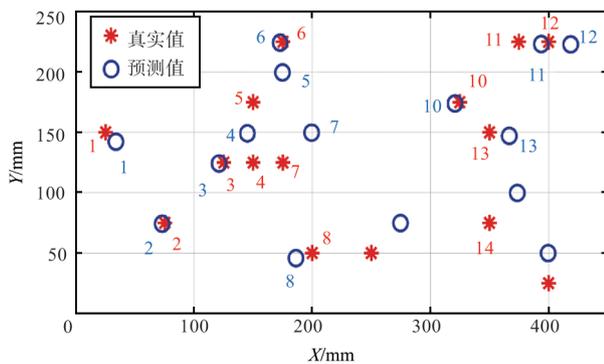


图6 冲击定位结果

Fig.6 Impact localization results

通过观察定位结果可知,基于核极限学习机的冲击定位平均误差为18.83mm,最大误差为35mm。其中5号、7号、9号、14号测试冲击点误差较大,这可能是由于它们位于冲击监测区域中心附近,距离固定边较远,远离固定边区域受到冲击载荷后柔性复合材料结构会发生较大幅度往复变形振动,影响定位的准确性。

表1 冲击定位结果

Table 1 Impact localization results

冲击点	实际坐标/mm	预测坐标/mm	误差/mm
1	(25, 150)	(33.72, 142.29)	11.64
2	(75, 75)	(72.85, 74.21)	2.29
3	(125, 125)	(121.00, 124.22)	4.08
4	(150, 125)	(145.03, 149.19)	24.70
5	(150, 175)	(174.74, 199.75)	35.00
6	(175, 225)	(172.75, 224.50)	2.30
7	(175, 125)	(199.47, 149.76)	34.82
8	(200, 50)	(186.19, 45.66)	14.48
9	(250, 50)	(274.68, 74.76)	34.95
10	(325, 175)	(320.86, 173.98)	4.26
11	(375, 225)	(393.92, 223.34)	18.99
12	(400, 225)	(418.82, 223.08)	18.92
13	(350, 150)	(366.81, 147.09)	17.06
14	(350, 75)	(373.61, 99.78)	34.23
15	(400, 25)	(399.74, 49.75)	24.76

5 结论

针对柔性复合材料结构遭受冲击载荷后易产生损伤和大幅度往复变形难以辨识冲击点位置问题,本文搭建了基于光纤光栅的柔性复合材料结构冲击监测系统。分析了柔性复合材料结构冲击响应信号时域及频域特点,使用压缩感知方法对冲击响应信号频谱进行压缩降维,并采用极限学习机对柔性复合材料结构上冲击位置进行辨识,提出了一种基于压缩感知和核极限学习机的柔性复合材料结构冲击定位方法。通过研究,得出以下结论点:

(1) 根据柔性复合材料结构上不同位置冲击点响应信号频谱特点,对冲击响应信号频谱进行稀疏化表示,并利用压缩感知具有在远低于奈奎斯特采样率条件下重构信号的特性,采用压缩感知方法对冲击响应信号频谱进行压缩降维。

(2) 对比分析不同压缩比下信号频谱重构性能,选择合适压缩比下冲击响应信号频谱压缩降维所得观测矢量作为特征量高效表征柔性复合材料上不同位置冲击点信号频谱特征。

(3) 提出一种基于压缩感知和核极限学习机的柔性复合材料结构冲击定位方法。通过减法平均算法优化核极限学习机实现柔性复合材料上冲击载荷位置辨识。试验结果表明,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,为柔性复合材料结构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。

参考文献

- [1] 淳道勇, 付善龙, 刘鑫. 国产 T800 级碳纤维/聚酰亚胺复合材料耐环境性能研究[J]. 失效分析与预防, 2023, 18(6):380-386.
Chun Daoyong, Fu Shanlong, Liu Xin. The environmental resistance of domestic carbon fiber polyimide composite materials[J]. Failure Analysis and Prevention, 2023, 18(6):380-386. (in Chinese)
- [2] 冯翌浩, 王云英, 陈新文, 等. 纤维增强树脂基复合材料湿热老化行为的研究进展[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 41-52.
Feng Yihao, Wang Yunying, Chen Xinwen, et al. Research progress on hygrothermal aging behavior of fiber reinforced resin matrix composites[J]. Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences), 2022, 36(1): 41-52. (in Chinese)
- [3] 张浩驰, 张星一, 崔赟, 等. 基于数据驱动的航空装备生产系统 PHM 方法与应用系统设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11): 81-86.
Zhang Haochi, Zhang Xingyi, Cui Yun, et al. Data driven PHM method and application system design of aviation equipment production system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11): 81-86. (in Chinese)
- [4] Brown E L. Integrated strain actuation in aircraft with highly flexible composite wings[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [5] 李冰. 多轴向经编柔性复合材料低速冲击性[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
Li Bing. Subject to low velocity impact performance of multi-axial warp-knitted flexible composites[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023. (in Chinese)
- [6] 王霞光, 杨宇, 刘国强, 等. 基于压电传感器的复合材料冲击损伤定位监测研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(11): 70-75.
Wang Xiaguang, Yang Yu, Liu Guoqiang, et al. Research on location and monitoring of impact damage in composite materials based on piezoelectric sensors[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(11): 70-75. (in Chinese)
- [7] 刘佳伟, 朱永凯, 徐铭, 等. 基于光纤布拉格光栅的飞机装配应变检测[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 38-44.
Liu Jiawei, Zhu Yongkai, Xu Ming, et al. Aircraft assembly strain detection based on fiber bragg grating[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(6): 38-44. (in Chinese)
- [8] 杨洋, 王文成, 高攀, 等. 动态轨道称重光纤布拉格光栅压力传感器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 301-308.
Yang Yang, Wang Wencheng, Gao Pan, et al. Design of fiber bragg grating pressure sensor for dynamic track weighing[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 301-308. (in Chinese)
- [9] 张治胜, 万生鹏, 吕纬龙, 等. 基于光纤光栅的呼吸测量及分类研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 338-343.
Zhang Zhisheng, Wan Shengpeng, Lyu Weilong, et al. Research on respiratory measurement and classification based on fiber bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11): 338-343. (in Chinese)
- [10] Smith G, Jones R, Williams T. Fiber bragg grating sensors for aircraft wing deformation monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(12): 125023.
- [11] 王文娟, 薛景锋, 张梦杰, 等. 基于光纤传感的结构变形实时监测技术研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 97-104.
Wang Wenjuan, Xue Jingfeng, Zhang Mengjie, et al. Research on real-time monitoring technology of structural deformation based on optical fiber sensing [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 97-104. (in Chinese)
- [12] Lee H, Kim J, Park S. Structural health monitoring of composite aircraft structures using fiber bragg grating sensors [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2021, 34(5): 04021057.
- [13] Mieloszyk M. Fatigue crack propagation monitoring using fibre bragg grating sensors[J]. Vibration, 2021, 4(3): 700-721.
- [14] Johnson D, Brown E, Wilson R. Temperature and stress monitoring in aircraft structures using fiber bragg grating sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 328: 113045.
- [15] 崔俊国, 张庆雪, 刘琦, 等. 模拟海洋环境干扰下复合板低速冲击定位实验[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(7): 16-20.
Cui Junguo, Zhang Qingxue, Liu Qi, et al. Low velocity impact localization experiment of composite plate under simulated marine environment interference[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(7): 16-20. (in Chinese)
- [16] Du Liangya, Jiang Wensong, Luo Zai, et al. Multi FBG sensor-based impact localization with a hybrid correlation interpolation method[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(7): 075002.

- [17] Liu Qi, Wang Fengde, Liu Mengxue, et al. A two-step localization method using wavelet packet energy characteristics for low-velocity impacts on composite plate structures[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 188: 110061.
- [18] 张阳, 杨宇, 齐舸, 等. 复合材料加筋结构冲击定位算法有效性分析[J]. *航空工程进展*, 2023, 14(4): 110-115.
Zhang Yang, Yang Yu, Qi Ge, et al. Effectiveness analysis of impact location algorithm for composite reinforced structures [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(4): 110-115. (in Chinese)
- [19] 杨雷, 邓德双, 田广, 等. 基于误差函数的复材加筋板概率成像冲击定位[J]. *振动、测试与诊断*, 2024(1): 88-93+199.
Yang Lei, Deng Deshuang, Tian Guang, et al. Probabilistic imaging impact localization on composite stiffened plate based on error function[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2024 (1): 88-93+199. (in Chinese)
- [20] 张永. 基于机器学习的复合材料层合板低速冲击定位研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
Zhang Yong. Low-velocity impact localization of composite laminates based on machine learning[D]. Xi'an: Xidian University, 2023. (in Chinese)
- [21] 刘琦. 光纤光栅低频采样板结构低速冲击定位人工智能方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
Liu Qi. Research on artificial intelligence methods for locating low velocity impacts on plate structures using fiber bragg grating sensors at a low sampling frequency[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021. (in Chinese)
- [22] Breiding P, Gesmundo F, Michałek M, et al. Algebraic compressed sensing[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2023, 65: 374-406.
- [23] Kováč O, Kromka J, Šaliga J, et al. Multiwavelet-based ECG compressed sensing[J]. *Measurement*, 2023, 220: 113393.
- [24] 田斌, 赵晨, 李俊, 等. 基于小波变换和压缩感知的工频磁异常信号降噪方法[J]. *探测与控制学报*, 2024, 46(3): 94-99+104.
Tian Bin, Zhao Chen, Li Jun, et al. Power frequency magnetic anomaly signals denoising method based on wavelet transform and compressive sensing[J]. *Journal of Detection & Control*, 2024, 46(3): 94-99+104. (in Chinese)
- [25] 叶鹏迪, 杨晓明, 杨阔, 等. 基于压缩感知的车地传输数据压缩算法研究[J]. *铁道机车车辆*, 2024, 44(1): 8-15.
Ye Pengdi, Yang Xiaoming, Yang Kuo, et al. Research on vehicle ground transmission data compression algorithm based on compressed sensing[J]. *Railway Locomotive*, 2024, 44(1): 8-15. (in Chinese)
- [26] 张笑华, 肖兴勇, 方圣恩. 面向桥梁结构健康监测的压缩感知动力响应信号重构[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(3): 699-706.
Zhang Xiaohua, Xiao Xingyong, Fang Sheng'en. Dynamic response reconstruction for bridge structural health monitoring based on compressed sensing[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(3): 699-706. (in Chinese)
- [27] 宋永献, 王祥祥, 李媛媛, 等. 基于核极限学习机的下肢关节力矩预测方法[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(11): 4599-4606.
Song Yongxian, Wang Xiangxiang, Li Yuanyuan, et al. Lower limb joint moment prediction method based on kernel limit learning machine[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(11): 4599-4606. (in Chinese)
- [28] 朱昶胜, 赵奎鹏. 改进灰狼算法的核极限学习机的风功率预测[J]. *计算机应用与软件*, 2022, 39(5): 291-298.
Zhu Changsheng, Zhao Kuipeng. Wind power prediction of kernel extreme learning machine based on improved grey wolf algorithm[J]. *Computer Applications and Software*, 2022, 39 (5): 291-298. (in Chinese)
- [29] 王士彬, 李多, 赵娜, 等. 基于改进北方苍鹰算法优化混合核极限学习机的变压器故障诊断方法[J]. *湖南电力*, 2023, 43 (4): 125-132.
Wang Shibin, Li Duo, Zhao Na, et al. Transformer fault diagnosis method of optimized hybrid kernel extreme learning machine based on improved northern goshawk algorithm[J]. *Hunan Electric Power*, 2023, 43(4): 125-132. (in Chinese)
- [30] 崔建国, 张善好, 于明月, 等. 基于增量型极限学习机的飞机复合材料结构损伤识别[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(4): 191-196.
Cui Jianguo, Zhang Shanbao, Yu Mingyue, et al. Aircraft composite structure damage identification based on incremental extreme learning machine[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(4): 191-196. (in Chinese)

Impact localization of Flexible Composite Material Structure Based on Spectrum Compression Sensing and Kernel Extreme Learning Machine

Yu Junsong^{1,2}, Liu Jun¹, Peng Zipeng¹, Gan Linhui¹, Wan Shengpeng^{1,2}

1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

2. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: Flexible composite materials structures, owing to their advantages such as light weight, good repeatability of deployment and retraction, and simple principles of deployment and retraction, are widely applied in aerospace vehicle structures. These structures may suffer from impact loads and thus generate damages during their service. In order to address the issue of impact localization on flexible composite structures, an impact monitoring system based on fiber bragg gratings was constructed. The time and frequency domain characteristics of the impact signals is analyzed, taking advantage of the sparsity of spectral signals and compressive sensing to reconstruct signals under conditions far below the Nyquist sampling rate, an impact localization method for flexible composite material structures based on frequency spectral compressed sensing and kernel extreme learning machine (KELM) is proposed. This study focuses on the sparse representation and compressed measurement of the frequency spectrum for the impact response signals of flexible composite materials. The observation vector, obtained by compressing and reducing the dimensionality of the impact response signal spectrum, is used as a feature. A subtraction-average-based optimizer (SABO) is employed to optimize the kernel extreme learning machine (KELM) for identifying the location of impact loads on flexible composite materials. Fifteen test sample points are randomly selected within a 200mm x 400mm monitoring area on the flexible composite material structure for impact localization. Experimental results show that the average localization error is 18.83mm, providing a reliable method for impact localization on flexible composite structures.

Key Words: impact localization; flexible composite structure; fiber bragg gratings; compression sensing; kernel extreme learning machine

Received: 2024-11-17; **Revised:** 2025-01-22; **Accepted:** 2025-03-21

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62105139); Aeronautical Science Foundation of China (2022Z057056003)