

# 基于经验模态分解的冲击载荷高效识别方法

刘玲 杨晓明 张力

(荆楚理工学院 智能制造学院, 荆门 448000)

**摘要:** 针对传统冲击载荷识别方法所需传感器数量多、采样频率高以及识别精度低等问题,提出了一种基于经验模态分解技术的冲击载荷识别新方法。利用经验模态分解技术分解了完整的冲击响应,并获取了模态加速度响应,通过度量模态加速度响应中未校正振型向量和振型矩阵列向量的共线性即可快速实现冲击定位。根据定位结果,构建了优化目标函数,采用高斯基函数对冲击载荷时间历程进行了拟合,并利用二维梯度下降法快速求解了最优拟合参数。在尺寸为600 mm×200 mm×3 mm的悬臂板上进行的试验表明,在仅使用一个加速度计的前提下,36次冲击定位测试的成功率为91.67%,并且重构结果的峰值相对误差和相对误差指标分别低于10%和40%。

**关键词:** 冲击载荷识别; 经验模态分解; 模态加速度响应; 未校正振型向量; 基函数拟合

**中图分类号:** TB123; O327 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.08.010

## 0 引言

在运行或维护阶段,飞机复合机翼、卫星太阳能蜂窝面板以及风力发电机叶片等结构易受外部碎片撞击或工具跌落冲击,导致结构的功能性和完整性被破坏,严重威胁运行安全<sup>[1]</sup>。以往冲击损伤检测大多依靠人工目视以及超声检测等地面无损检测手段完成。然而,由于结构功能和复杂程度日益增加,冲击事件引发的结构基体损伤通常难以用肉眼直接观察。超声和红外热成像检测虽能探测肉眼无法观察的内部损伤,但在面对大型结构时,实施过程耗时耗力,且成本高昂<sup>[2]</sup>。因此,为了提高冲击事件的监测效率及降低监测成本,在结构上安装传感器并通过结构振动响应(如应变、加速度、位移等)间接识别冲击事件已成为当前主流的监测方法<sup>[3]</sup>。

由结构振动响应间接识别冲击事件属于结构动力学第2类反问题,其识别结果与使用的方法密切相关。赵刚等<sup>[4]</sup>提出了一种使用电阻应变片和改进三角测量法的低能冲击定位新方法,能够使定位误差小于10 cm。赵发刚等<sup>[5]</sup>基于光纤光栅传感网络和小波包分解获取了蜂窝板潜在冲击位置的能谱特征,并基于此特征实现了蜂窝板的全场冲击定位。BOUKRIA等<sup>[6]</sup>利用Tikhonov正则化方法识别了作用于圆形钢板的冲击载荷,其中L曲线法用于选择最优正则化参数。

QIU等<sup>[7]</sup>首先通过模式识别方法定位冲击事件,然后使用Tikhonov正则化方法重构了冲击载荷的时间历程。乔百杰等<sup>[8-9]</sup>利用冲击载荷的时空稀疏性,提出了冲击载荷稀疏识别方法。

尽管对冲击载荷识别方法的研究已经取得很大的进展,但仍有不足。例如,三角测量法要求传感网络捕获弹性波的首达时间,采样频率极高,显著增加了数据采集和处理设备的运行负担<sup>[10]</sup>;利用正则化方法识别冲击载荷通常需提前建立所有潜在冲击位置与测点的传递函数矩阵,导致求解模型维度巨大,计算耗时。LI等<sup>[11]</sup>提出了一种两步迭代算法,以较小的模型维度实现任意位置载荷的定位和辨识,但正则化方法通常需在最优正则化参数的设定下才能获取最优解,当冲击响应信号变化时,需反复选择最优正则化参数。此外,为了改善反问题的不稳定性,采用正则化方法也需布置多个测点<sup>[12]</sup>。

针对上述不足,提出了一种基于经验模态分解的冲击载荷识别新方法。首先,利用经验模态分解技术将未知冲击加速度响应信号分解为多个模态加速度响应;然后,通过度量低阶模态加速度响应中未校正振型向量与振型矩阵列向量的共线性即可实现冲击定位;最后,使用高斯基函数拟合冲击载荷的时间历程,并通过二维梯度下降法快速优化目标函数并获取最优基函数参数。在悬臂板上进行试验验证,结果表

收稿日期: 2024-12-19 修回日期: 2025-02-24

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2025AFC005); 荆门市重大科技创新计划项目(2024ZDYF004); 荆门市科技计划项目(2024YDKY233); 2024年荆楚理工学院博士启动金项目(YY202444)

作者简介: 刘玲,女,1989年生,湖北钟祥人,硕士研究生,讲师; 主要研究方向为机械强度与有限元分析; E-mail:liuling@jcut.edu.cn。

张力(通信作者),男,1995年生,湖北沙洋人,博士研究生,讲师; 主要研究方向为结构动载荷识别、结构健康监测; E-mail:zhangli@jcut.edu.cn。

引用格式: 刘玲,杨晓明,张力. 基于经验模态分解的冲击载荷高效识别方法[J]. 机械强度,2025,47(8):82-90。

LIU Ling, YANG Xiaoming, ZHANG Li. Efficient impact load identification method using empirical mode decomposition[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(8): 82-90.

明,所提出的方法仅需单个加速度计的测量数据即可精准、高效识别冲击载荷。

## 1 基本理论

### 1.1 冲击响应前向传递模型

考虑一个线弹性结构,假设其除边界外的任意位置 $q$ 受横向冲击载荷 $f(t)=f_q g(t)$ 作用,在零初始条件下,测点 $p$ 的位移响应可由模态叠加原理<sup>[13]</sup>表示为

$$x_{p,q}(t) = \sum_{r=1}^n f_q \phi_r(p) \phi_r(q) [g(t) \otimes h_r(t)] \quad (1)$$

式中, $n$ 为模态截断数; $f_q$ 为冲击载荷的幅值; $\phi_r(p)$ 和 $\phi_r(q)$ 分别为测点 $p$ 和冲击载荷作用点 $q$ 的第 $r$ 阶质量归一化振型; $g(t)$ 为单位冲击载荷的时间历程(其最大值被设置为1); $\otimes$ 表示卷积运算; $h_r(t)$ 为第 $r$ 阶位移脉冲响应函数,其表达式为

$$h_r(t) = \frac{1}{\omega_{d,r}} e^{-\zeta_r \omega_r t} \sin \omega_{d,r} t, t \geq 0 \quad (2)$$

式中, $\zeta_r$ 、 $\omega_r$ 分别为第 $r$ 阶模态阻尼比和第 $r$ 阶固有频率; $\omega_{d,r}$ 为结构的第 $r$ 阶有阻尼固有频率,且有 $\omega_{d,r} = \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}$ 。

对式(1)关于时间 $t$ 进行两次求导,可得结构在冲击载荷作用下的加速度响应,为

$$a_{p,q}(t) = \sum_{r=1}^n f_q \phi_r(p) \phi_r(q) [g(t) \otimes \ddot{h}_r(t)] \quad (3)$$

式中, $\ddot{h}_r(t)$ 为第 $r$ 阶加速度脉冲响应函数,其表达式为

$$\ddot{h}_r(t) = \delta(t) + \frac{1}{\omega_{d,r}} e^{-\zeta_r \omega_r t} [(2\zeta_r^2 \omega_r^2 - \omega_r^2) \sin \omega_{d,r} t - 2\zeta_r \omega_r \omega_{d,r} \cos \omega_{d,r} t]。$$

### 1.2 经验模态分解

经验模态分解是根据自适应筛选过程,将信号分解为有限数量的具有多尺度振荡模式的固有模态函数和具有单调趋势的残差<sup>[14]</sup>。利用经验模态分解,测量的完整冲击加速度响应 $a_{p,q}(t)$ 可以表示为 $m$ 个本征模态函数(模态加速度)和残差项 $r(t)$ 的总和,即

$$a_{p,q}(t) = \sum_{r=1}^m a_{p,q,r}(t) + r(t) \quad (4)$$

式中, $a_{p,q,r}(t)$ 为第 $r$ 阶本征模态函数或第 $r$ 阶模态加速度响应,其表达式为

$$a_{p,q,r}(t) = f_q \phi_r(p) \phi_r(q) [g(t) \otimes \ddot{h}_r(t)] \quad (5)$$

为降低模型的复杂程度并提高冲击定位的效率,冲击载荷的时间历程在低频段可由幅值为 $f_q$ 的理想冲击函数近似表示,即 $f(t) = f_q \delta(t - t_0)$ ,其中 $t_0$ 表示冲击事件发生的时间瞬间。因此,式(5)中的低频分量可表示为

$$a_{p,q,r}^{\text{low}}(t) = f_q \phi_r(p) \phi_r(q) \ddot{h}_r(t - t_0) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),分离模态加速度响应中的低

频和高分量,式(4)可进一步表示为

$$a_{p,q}(t) = \sum_{r=1}^N a_{p,q,r}(t) + \sum_{r=N+1}^{m-N} a_{p,q,r}(t) + r(t) = a_{p,q}^{\text{low}}(t) + a_{p,q}^{\text{high}}(t) + r(t) \quad (7)$$

式中, $m$ 为分解的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)的总数; $N$ 为低阶模态响应的个数。

由于实测的加速度响应信号中含有噪声,从原始加速度响应信号提取的各阶模态加速度响应中可能包含多个频率成分,因此无法精确地表征结构真实的模态加速度响应。为了获得准确的模态加速度响应,可使用带通滤波器对模态加速度响应信号进行滤波,从而确保每阶模态加速度响应信号的主频率为对应阶次的结构固有频率<sup>[15]</sup>。

## 2 冲击载荷识别方法

### 2.1 冲击定位

在式(6)中,结构固有频率、模态阻尼比以及测点的振型可通过试验模态分析或有限元分析获取。根据阈值法,冲击事件发生的时间瞬间 $t_0$ 可设置为加速度响应绝对值第一次达到最大绝对值5%的瞬间,即 $t_0 = \text{argmin} |a(t_i)| > 0.05 \times \max |a(t_i)|$ 。因此,未知冲击加速度响应的低频分量中仅含有冲击载荷幅值和冲击位置的振型两个未知参数。将模态加速度响应按照固有频率由低到高排列,其低频分量可进一步描述为

$$\begin{cases} a_{p,q}^{\text{low}}(t) = \sum_{r=1}^N a_{p,q,r}(t) = \ddot{\mathbf{L}}(t) \mathbf{r}(q) \\ \mathbf{r}(q) = f_q [\phi_1(q) \quad \phi_2(q) \quad \cdots \quad \phi_N(q)]^T \\ \ddot{\mathbf{L}}(t) = [\ddot{\mathbf{L}}_1(t) \quad \ddot{\mathbf{L}}_2(t) \quad \cdots \quad \ddot{\mathbf{L}}_N(t)] = \\ [\phi_1(q) \ddot{h}_1(t) \quad \phi_2(q) \ddot{h}_2(t) \quad \cdots \quad \phi_N(q) \ddot{h}_N(t)] \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\ddot{\mathbf{L}}(t)$ 为一个与测点振型和系统模态参数有关的时间函数; $\mathbf{r}(q)$ 为未校正振型向量。

由式(8)可知,向量 $\mathbf{r}(q)$ 由冲击载荷幅值与冲击载荷作用位置振型向量的乘积表示,由于结构各个潜在冲击位置存在差异性,当选择合适的参数 $N$ 时,向量 $\mathbf{r}(q)$ 的方向唯一。

考虑到加速度测量数据为离散数据,令采样点的个数为 $n_s$ ,采样间隔为 $\Delta t$ ,则 $\mathbf{r}(q)$ 的表达式可根据式(6)和式(8)推导为

$$\begin{cases} \mathbf{r}(q) = \begin{bmatrix} \frac{\|\mathbf{a}_{p,q,1}\|_2}{\|\ddot{\mathbf{L}}_1\|_2} \Lambda(\theta_1) & \frac{\|\mathbf{a}_{p,q,2}\|_2}{\|\ddot{\mathbf{L}}_2\|_2} \Lambda(\theta_2) & \cdots & \frac{\|\mathbf{a}_{p,q,N}\|_2}{\|\ddot{\mathbf{L}}_N\|_2} \Lambda(\theta_N) \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{a}_{p,q,r}(t) = [a_{p,q,r}(0) \quad a_{p,q,r}(\Delta t) \quad \cdots \quad a_{p,q,r}[(n_s - 1)t]]^T \\ \ddot{\mathbf{L}}_r(t) = [\ddot{\mathbf{L}}_r(0) \quad \ddot{\mathbf{L}}_r(\Delta t) \quad \cdots \quad \ddot{\mathbf{L}}_r[(n_s - 1)t]]^T \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\theta_r$ 为向量的夹角; $\Lambda(\theta_r)$ 为符号判定函数,其表达式为

$$\Lambda(\theta_r) = \begin{cases} 1, 0 \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{2} \\ -1, \frac{\pi}{2} < \theta_r \leq \pi \end{cases} \quad (10)$$

令结构上所有潜在冲击位置的前  $N$  阶振型构成的振型矩阵为  $\Phi$  (其可由有限元分析或试验模态分析获取)

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1(q_1) & \phi_1(q_2) & \cdots & \phi_1(q_m) \\ \phi_2(q_1) & \phi_2(q_2) & \cdots & \phi_2(q_m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_N(q_1) & \phi_N(q_2) & \cdots & \phi_N(q_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(q_1) & \phi(q_2) & \cdots & \phi(q_m) & \cdots & \phi(q_m) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $M$  为潜在冲击点的数量。

对比式(9)和式(11)可知,理想情况下,当未知冲击载荷作用在位置  $q_m$  时,未校正振型向量  $r(q)$  与振型矩阵  $\Phi$  的第  $m$  列共线。因此,冲击载荷定位问题可以被转换成搜索未校正振型向量与振型矩阵列向量共线性的问题。由于建模误差和测量噪声的存在,  $r(q)$  与  $\Phi$  的第  $m$  列不可能完全共线,因此可认为共线性最大的列所在的位置为未知冲击载荷的作用位置。此外,由于结构振型存在对称性,为确保冲击定位不定位到结构对称点,振型矩阵  $\Phi$  应满足列满秩条件,这也是选择参数  $N$  的基本原则。

## 2.2 冲击载荷时间历程重构

根据冲击载荷的时间分布特征,其时间历程可由如下高斯函数近似拟合为

$$f_q(t) \approx \hat{f}_q g(t) = \hat{f}_q e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

式中,  $\mu$ 、 $\sigma$  分别为高斯函数最大值对应的时间坐标和高斯函数的方差。冲击载荷的幅值可在冲击载荷位置确定后估算为

$$\hat{f}_q = \frac{r(q)\Phi(q_m)}{\|\Phi(q_m)\|_2^2} \quad (13)$$

当冲击载荷幅值被确定,冲击载荷时间历程重构的问题便转化成了以下求解高斯基函数  $g(t)$  最优参数  $\mu$  和  $\sigma$  的优化问题。

$$\begin{cases} \text{Find } \mu, \sigma \min_{\tau, \sigma} \Gamma(\mu, \sigma) = \|\mathbf{x}_{p,q} - \bar{\mathbf{x}}_{p,q}(\mu, \sigma)\|_2^2 = \\ \sum_{n_i} \|x_{p,q}(t_i) - \bar{x}_{p,q}(t_i, \mu, \sigma)\|_2^2 \\ \text{s. t. } \bar{\mathbf{x}}_{p,q}(t_i, \mu, \sigma) = \hat{f}_q \Delta t \sum_{j=1}^{n_i} \phi_r(p) \phi_r(q_m) \ddot{h}_r[(i-j)\Delta t] g(i\Delta t, \mu, \sigma) \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\Gamma(\mu, \sigma)$  为损失函数,表示实测加速度响应与计算得到的加速度响应之间的累计最小二乘误差;  $\mathbf{x}_{p,q}$  和  $\bar{\mathbf{x}}_{p,q}$  分别为实测的加速度响应序列和由式(3)计算得到的加速度响应序列;  $x_{p,q}(t_i)$  和  $\bar{x}_{p,q}(t_i)$  分别为实测的加速度响应序列和计算的加速度响应序列

的第  $i$  个采样点。

根据冲击载荷时间历程的分布特征,本文将  $\sigma$  的取值范围设置为  $0 \sim 1 \times 10^{-3}$ , 初始值设定为  $5 \times 10^{-4}$ , 取值间隔设置为  $1 \times 10^{-5}$ 。变量  $\tau$  的取值范围被限制为  $[t_0, t_c]$ , 初始值设定为  $(t_0 + t_c)/2$ , 并以  $\Delta t$  为间隔进行离散化。其中,  $t_c$  表示  $\mathbf{x}_{p,q}$  绝对值最大值对应的时间。为了减少计算成本,采用二维梯度下降法来求解式(14)所表述的优化问题。由于高斯基函数的可微性,损失函数  $\Gamma(\mu, \sigma)$  迭代步  $\tilde{i}$  下的梯度可以根据以下等式求解

$$\nabla_w \Gamma(\mathbf{w}_i) = \begin{bmatrix} 2[\bar{\mathbf{x}}_{p,q}(\mathbf{w}_i) - \mathbf{x}_{p,q}]^T \cdot \nabla_{\tau} \mathbf{x}_{p,q}(\mu_i) \\ 2[\bar{\mathbf{x}}_{p,q}(\mathbf{w}_i) - \mathbf{x}_{p,q}]^T \cdot \nabla_{\sigma} \mathbf{x}_{p,q}(\sigma_i) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{w} = [\tau, \sigma]^T$ 。下一次迭代更新的参数可表示为

$$\mathbf{w}_{i+1} = \mathbf{w}_i - \gamma \nabla_w \Gamma(\mathbf{w}_i) \quad (16)$$

式中,  $\gamma$  为梯度下降的步长,其取值设置为 0.01。此外,停止迭代的阈值设为  $1 \times 10^{-6}$ 。

## 2.3 实施流程

上述冲击载荷识别方法的总体流程如图1所示。由图1可知,所述方法包含3个具体实施步骤:结构模态参数获取、冲击载荷定位以及冲击载荷时间历程重构。其中,步骤1在离线准备阶段实施,用于获取结构的模态参数和振型矩阵。步骤2和步骤3属于在线实施步骤。当未知冲击载荷作用在结构上时,数据采集系统记录下加速度计测量的冲击响应信号;随后,利用经验模态分解技术将加速度响应信号分解成多个模态加速度响应,并利用式(6)和式(10)计算得到向量  $r(q)$ ,通过度量  $r(q)$  与振型矩阵  $\Phi$  列向量的余弦相似度即可获取未知冲击载荷的作用位置信息;最后,根据定位结果计算未知冲击载荷的幅值并将其代入式(14)建立优化目标函数,利用梯度下降法迭代获取最优基函数参数,将最优参数代入式(12)即可获取冲击载荷的时间历程。

## 3 试验验证

悬臂板是工程中广泛应用的结构,飞机复合机翼、卫星太阳能蜂窝面板以及风力发电机叶片等结构在一定条件下都可简化为悬臂板结构。因此,为了验证所提冲击载荷识别方法在实际结构上的有效性,将一个尺寸为  $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的铝合金悬臂板作为测试对象,并进行了一系列试验分析。悬臂板物理参数如表1所示,试验装置如图2所示。

由图2可知,悬臂板表面被划分为12个正方形区域,并且每个区域的中心被假设为潜在的冲击载荷作用点,为了清楚区分各个潜在冲击点,所有点被按照1~12的顺序进行了编号[图2(a)]。在本试验中,冲击载荷通过型号为 INV9311 的力锤对板表面实施敲击产

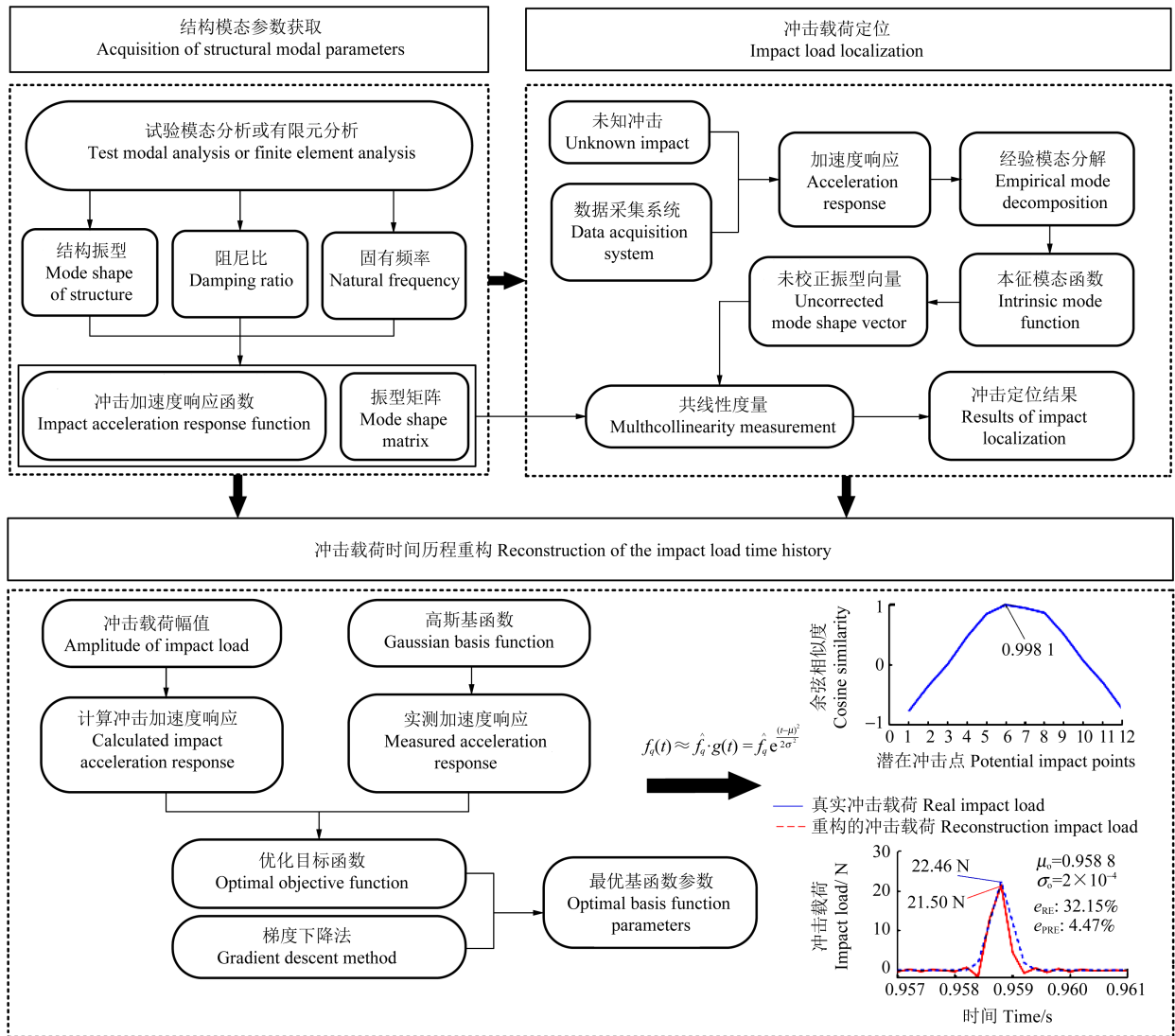


图 1 利用模态加速度响应的冲击载荷识别方法整体流程图

Fig. 1 Overall flow chart of impact load identification method using modal acceleration response

表 1 悬臂板的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of cantilever plate

参数 Parameter	值 Value
长度 Length /mm	600
宽度 Width /mm	200
厚度 Thickness /mm	3
弹性模量 Elastic modulus /GPa	70
泊松比 Poisson ratio	0.3
密度 Density /(kg/m <sup>3</sup> )	2 700

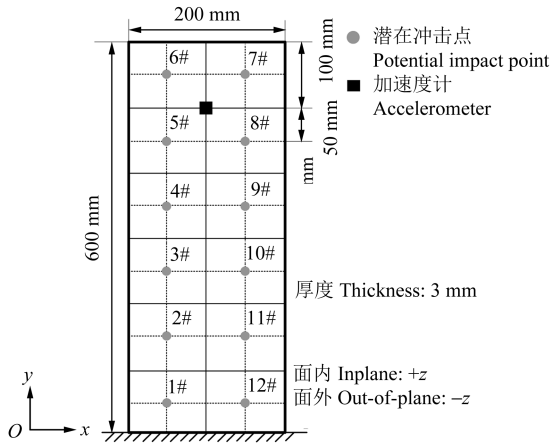
生。力锤前端配备了灵敏度为 10 mV/N 的力传感器,用于精确测量冲击载荷的时间历程数据。悬臂板的横向振动加速度信号由型号为 PCB365A03 的压电加速度计进行采集,加速度计的灵敏度为 10 mV/g。冲击载荷信号与加速度信号通过 NI Compact-DAQ 数据采集系统进行同步采集,采样频率设定为 5 kHz。所有数据的后续处理及未知冲击载荷的识别分析在一台配备 i7-8550U 处理器、8GB 内存的笔记本电脑上完成。

### 3.1 悬臂板冲击载荷定位

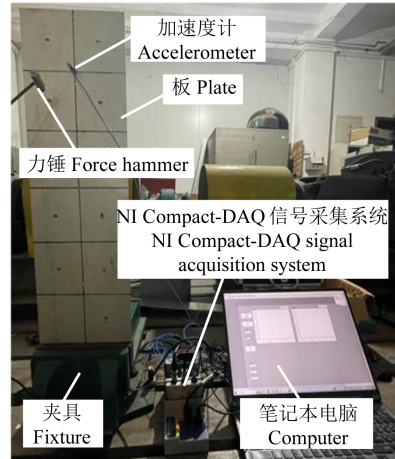
为确定悬臂板的模态参数,首先对悬臂板进行了试验模态分析,振型、固有频率、模态阻尼比如图 3 所示。根据模态分析结果,结合振型矩阵  $\Phi$  的列满秩条件,确定了  $N$  的取值范围为  $N \geq 4$ ,即利用经验模态分解获取板的前 4 阶模态加速度响应即可实现该板的冲击载荷定位。

使用尼龙锤头敲击了板上 12 个潜在冲击点,得到了 12 组加速度响应。图 4 所示为在悬臂板上 6# 点受到垂直于板表面的冲击载荷作用时,测点的加速度响应。

根据图 1 所示的冲击载荷定位步骤,采用经验模态分解法对加速度信号进行处理,成功提取了板的前 4 阶模态加速度响应信号。对每个信号进行带通滤波后,其频率主成分均与板的固有频率相对应。由经验模态分解提取的前 4 阶模态加速度如图 5 所示。由图 5 可知,分解得到的各阶模态加速度响应在时间坐标上的分布规律与式(6)所描述的关系一致。



(a) 潜在冲击点的分布  
(a) Distribution of potential impact points



(b) 试验装置实物图  
(b) Physical diagram of test setup

图2 悬臂板试验装置

Fig. 2 Test setup of the cantilever plate

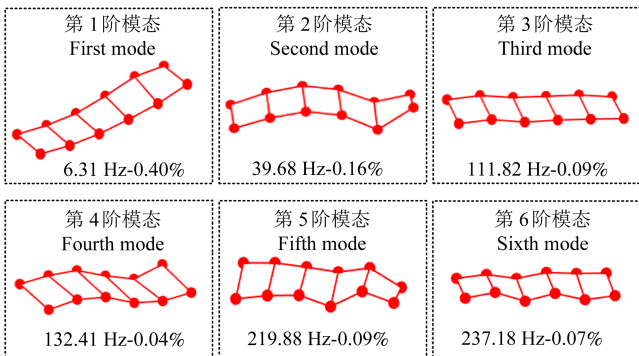


图3 悬臂板模态测试结果

Fig. 3 Modal test results of the cantilever plate

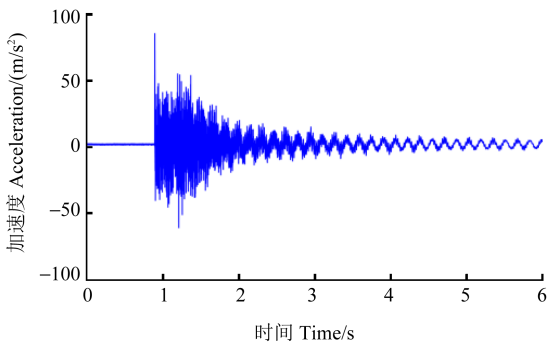


图4 6#点受冲击载荷作用时的加速度响应

Fig. 4 Acceleration response of point 6# under impact load

根据模态分析结果,计算得到了模态加速度脉冲响应函数,通过将模态加速度脉冲响应函数以及测点的振型代入式(8),得到了向量 $\ddot{L}_r(t)$ 。进而,根据式(9)计算得到未校正振型向量 $r(q)$ 。最后,通过计算向量 $r(q)$ 与振型矩阵 $\Phi$ 列向量的共线性,得到了冲击载荷定位结果,如图6所示。由图6可知,未校正振型向量 $r(q)$ 与振型矩阵 $\Phi$ 的第6列余弦相似度最大,表明冲击位置被精准定位到。此外,观察图6可得,余弦相似度的值在坐标轴上呈近似对称分布,这是因为板

的振型存在对称性。在实际工程应用中,为了进一步提高冲击载荷定位结果的准确性,可适当增加模态加速度响应的阶数。

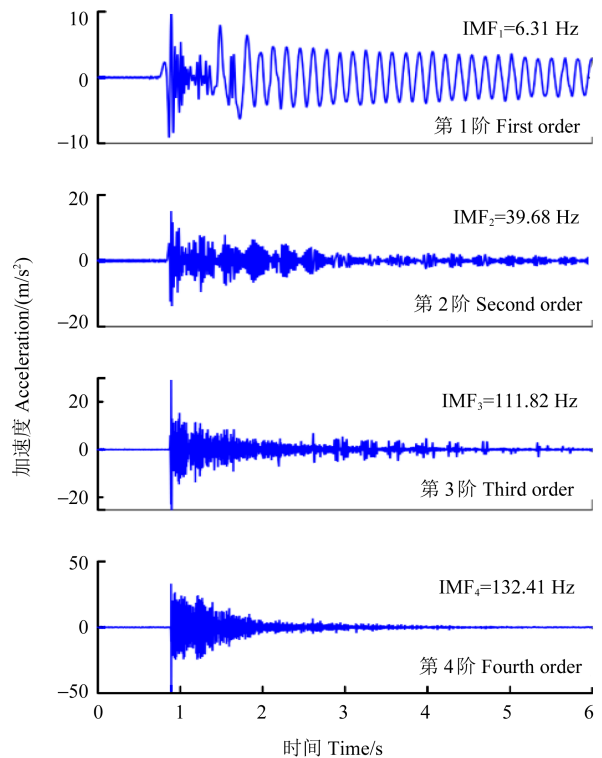


图5 板的模态加速度响应

Fig. 5 Modal acceleration responses of the plate

图7所示为板上剩余11个潜在冲击点的冲击定位结果。由图7可知,真实冲击载荷作用位置均与余弦相似度最大值对应的横坐标取值相符,表明所有的冲击载荷均被准确定位到。此外,悬臂板上12个潜在冲击点冲击定位的平均耗时约为0.8 s,表明所提冲击载荷定位方法具有很高的计算效率。

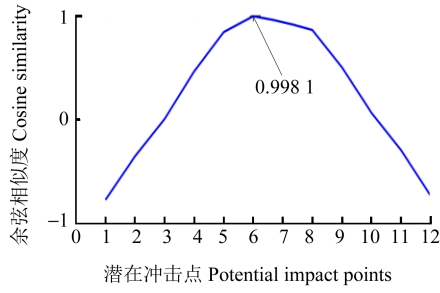
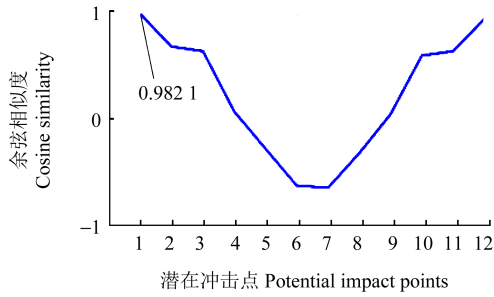
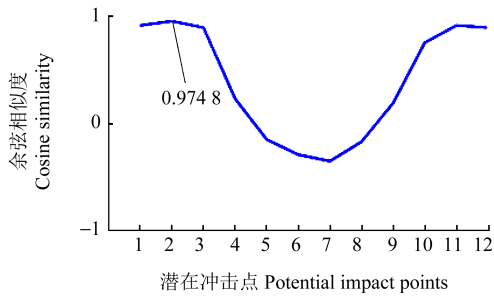


图 6 6#点冲击载荷定位结果

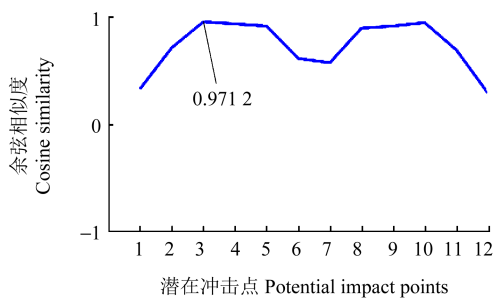
Fig. 6 Impact localization result of point 6#



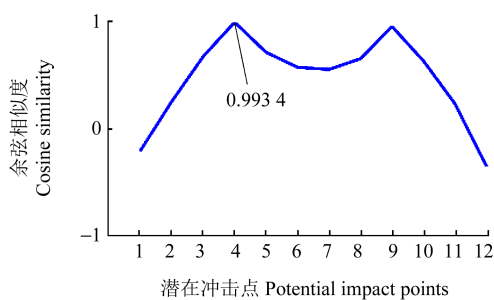
(a) 1#点冲击载荷定位结果  
(a) Impact localization result of point 1#



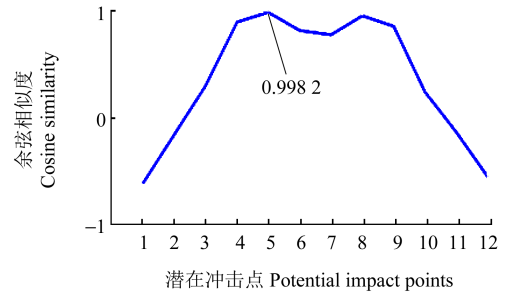
(b) 2#冲击载荷定位结果  
(b) Impact localization result of point 2#



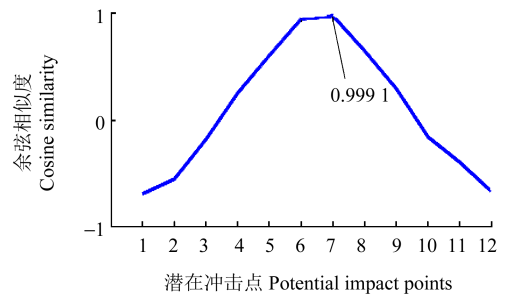
(c) 3#点冲击载荷定位结果  
(c) Impact localization result of point 3#



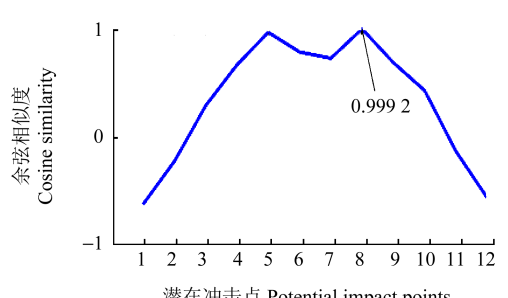
(d) 4#点冲击载荷定位结果  
(d) Impact localization result of point 4#



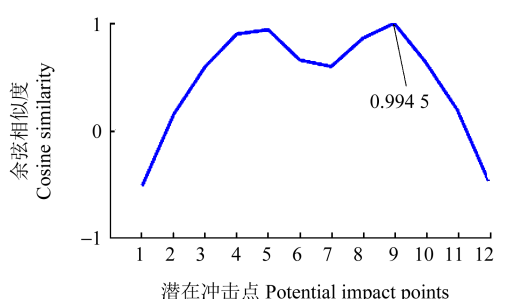
(e) 5#点冲击载荷定位结果  
(e) Impact localization result of point 5#



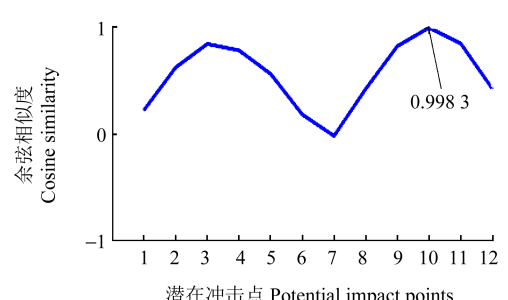
(f) 7#点冲击载荷定位结果  
(f) Impact localization result of point 7#



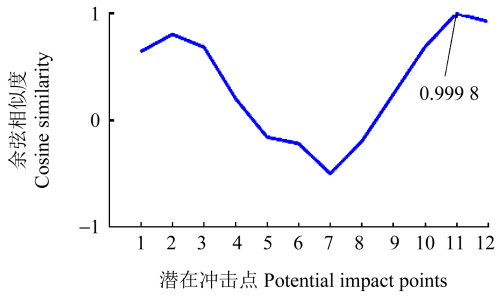
(g) 8#点冲击载荷定位结果  
(g) Impact localization result of point 8#



(h) 9#点冲击载荷定位结果  
(h) Impact localization result of point 9#

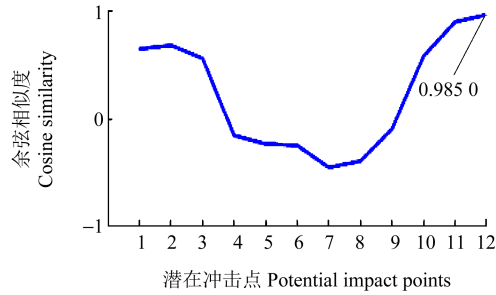


(i) 10#点冲击载荷定位结果  
(i) Impact localization result of point 10#



(j) 11#点冲击荷载定位结果

(j) Impact localization result of point 11#



(k) 12#点冲击荷载定位结果

(k) Impact localization result of point 12#

图7 悬臂板剩余11个潜在冲击位置的冲击荷载定位结果

Fig. 7 Impact load localization results for 11 remaining potential impact positions of cantilever plate

为了进一步验证所提方法在不同锤头激励下定位冲击源的有效性,还使用橡胶锤头和铝合金锤头敲击了悬臂板,并进行了冲击定位测试,冲击定位结果如表2所示。由表2可知,当锤头材质更坚硬时,冲击定位成功率更高。这是因为坚硬锤头产生冲击力的持续时间更短,其与理想脉冲更为接近。

表2 不同锤头类型下的冲击定位结果

Tab. 2 Impact localization results under different hammer types

锤头类型 Hammer type	成功定位数/总数 Successful locations/Total	成功率 Success rate/%
铝合金 Aluminum alloy	12/12	100
尼龙 Nylon	12/12	100
橡胶 Rubber	9/12	75

### 3.2 悬臂板冲击荷载时间历程重构

当未知冲击荷载定位完成后,还需根据定位结果将冲击荷载的时间历程进行重构。为了衡量重构效果,选用了峰值相对误差  $e_{PRE}$  以及相对误差  $e_{RE}$  两种评价指标<sup>[16]</sup>,可表示为

$$\begin{cases} e_{PRE} = \frac{|\max(f_q) - \hat{f}_q|}{\max(f_q)} \times 100\% \\ e_{RE} = \frac{\|f_q - \hat{f}_q\|_2}{\|f_q\|_2} \times 100\% \end{cases} \quad (17)$$

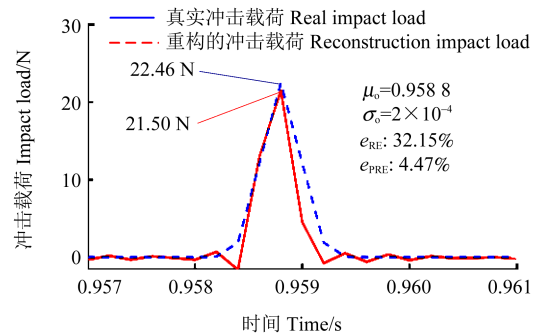
由式(17)可知,指标  $e_{PRE}$  则侧重于评估重构的冲击荷载峰值与真实冲击荷载峰值的差异,而指标  $e_{RE}$  侧重于评估重构的冲击荷载与真实冲击荷载整体的差异。

为了降低模态截断误差,本研究在重构过程中将模态截断数设置为6。根据冲击荷载定位结果,利用式(13)计算得到了冲击荷载的幅值。通过将幅值以及板的前6阶加速度脉冲响应函数代入式(14),得到了冲击荷载时间历程重构的优化目标函数。随后,使用二维梯度下降法求解最优拟合参数,重构了作用在12个潜在冲击点的冲击荷载。表3所示为冲击荷载时间历程重构的结果,其中包括冲击荷载的幅值、最优参数、 $e_{PRE}$  指标以及  $e_{RE}$  指标。由表3可知,所有重构的冲击荷载与真实冲击荷载的  $e_{PRE}$  指标均小于10%,并且  $e_{RE}$  指标也小于40%,表明所提冲击荷载重构方法具有良好的精度。图8所示为作用在2、5、9和12号点的冲击荷载的时间历程及对应的重构结果。由图8可知,重构的冲击荷载与真实冲击荷载的曲线几乎重合,表明了重构结果的准确性。

表3 悬臂板冲击荷载时间历程重构结果

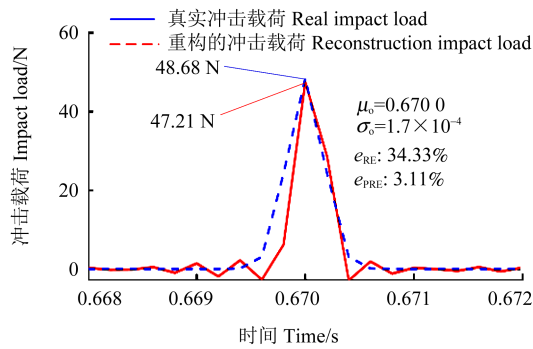
Tab. 3 Reconstruction results of impact load time history for cantilever plate

冲击点 序号 Impact point No.	冲击荷载幅值 Impact load amplitude/N		最优拟合参数 Optimal fitting parameters		$e_{PRE}/\%$	$e_{RE}/\%$
	真实值 True value	重构值 Reconstruction value	$\mu_0$	$\sigma_0/10^{-4}$		
1#	35.12	32.45	0.813 4	1.5	7.60	39.67
2#	21.50	22.46	0.958 8	2.0	4.47	32.15
3#	41.30	38.43	0.924 6	1.6	6.95	31.54
4#	25.87	27.14	0.864 4	1.8	4.91	28.73
5#	47.21	48.68	0.670 0	1.7	3.11	34.33
6#	35.92	37.21	0.872 0	1.8	3.59	37.18
7#	43.67	41.52	0.876 4	1.9	4.92	31.91
8#	28.13	30.10	0.944 0	1.7	7.00	29.43
9#	38.22	40.01	1.005 6	1.6	4.68	38.62
10#	32.51	34.66	0.784 2	1.9	6.61	37.12
11#	40.36	42.05	0.915 4	1.7	4.19	35.31
12#	42.66	43.97	0.739 8	1.8	3.07	36.12



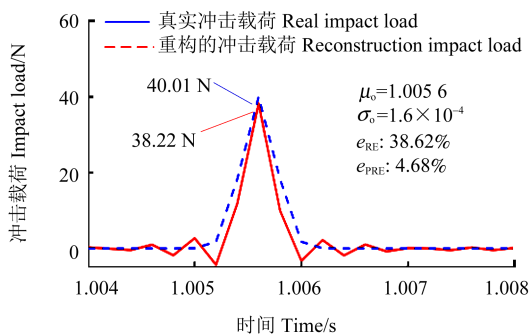
(a) 2#点冲击荷载时间历程重构结果

(a) Result of time history reconstruction of impact load applied at point 2#



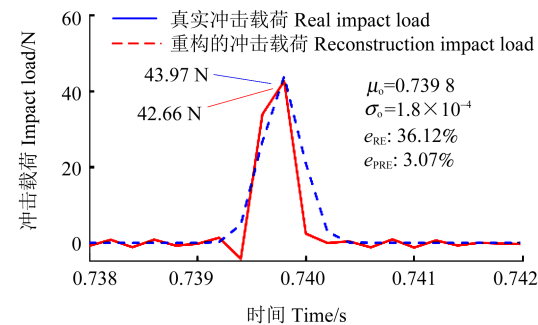
(b) 5#点冲击载荷时间历程重构结果

(b) Result of time history reconstruction of impact load applied at point 5#



(c) 9#点冲击载荷时间历程重构结果

(c) Result of time history reconstruction of impact load applied at point 9#



(d) 12#点冲击载荷时间历程重构结果

(d) Result of time history reconstruction of impact load applied at point 12#

图 8 冲击载荷时间历程重构结果

Fig. 8 Reconstruction results of impact load time history

## 4 结论

基于以上的理论分析和试验验证,得到如下主要结论:

1) 为了降低传感器布线的复杂度和数据采集系统的采样成本,提出了一种基于经验模态分解技术的冲击载荷识别新方法。该方法仅需单个加速度计即可实施。

2) 在总体尺寸为 600 mm×200 mm×3 mm 的铝合金悬臂板结构上验证了所提出方法的有效性,36 次冲击定位测试的成功率为 91.67%。

3) 采用高斯函数近似拟合冲击载荷的时间历程,重构结果的  $e_{PRE}$  指标和  $e_{RE}$  指标分别小于 10% 和 40%,表明重构结果十分精准。

## 参考文献 (References)

- [1] XIAO D, SHARIF-KHODAEI Z, ALIABADI M H. Impact force identification for composite structures using adaptive wavelet-regularised deconvolution[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2024, 220: 111608.
- [2] 刘以龙, 刘杰, 刘江南. 基于子结构分析的动态载荷和模型参数复合反演研究[J]. 机械强度, 2013, 35(5): 553-558.  
LIU Yilong, LIU Jie, LIU Jiannan. Research on composite inversion of dynamic loads and structural parameters based on substructure analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35 (5): 553-558. (In Chinese)
- [3] 裘著有, 闫云聚, 常晓通. 基于遗传算法的动态载荷识别优化方法[J]. 机械强度, 2015, 37(4): 593-597.  
XI Zhuyou, YAN Yunju, CHANG Xiaotong. Optimization method of dynamic load identification based on genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(4): 593-597. (In Chinese)
- [4] 赵刚, 李书欣, 刘立胜, 等. 应变片在复合材料低能量冲击定位中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3): 526-530.  
ZHAO Gang, LI Shuxin, LIU Lisheng, et al. Low energy impact localization of composite materials based on resistance strain gauge [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(3): 526-530. (In Chinese)
- [5] 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)
- [6] BOUKRIA Z, PERROTIN P, BENNANI A, et al. Experimental impact force location and identification using inverse problems: application for a circular plate[J]. International Journal of Mechanics, 2011, 5(1): 48-55.
- [7] 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.
- [8] 乔百杰, 陈雪峰, 刘金鑫, 等. 机械结构冲击载荷稀疏识别方法研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 81-89.  
QIAO Baijie, CHEN Xuefeng, LIU Jinxin, et al. Sparse identification of impact force acting on mechanical structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 81-89. (In Chinese)
- [9] LIU J J, QIAO B J, WANG Y N, et al. Group sparsity extension of Non-convex sparse regularization via convex optimization for impact force identification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 201: 110661.

- [10] GOUTAUDIER D, GENDRE D, KEHR-CANDILLE V, et al. Long-range impact localization with a frequency domain triangulation technique: application to a large aircraft composite panel[J]. *Composite Structures*, 2020, 238: 111973.
- [11] LI Q F, LU Q H. Force localization and reconstruction using a two-step iterative approach[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, 24(17): 3830-3841.
- [12] LIU R X, DOBRIBAN E, HOU Z C, et al. Dynamic load identification for mechanical systems: a review[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, 29(2): 831-863.
- [13] 蔡芳盛, 严刚, 曾捷, 等. 基于非负贝叶斯正则化的冲击载荷光纤识别法[J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(3): 427-434.  
CAI Fangsheng, YAN Gang, ZENG Jie, et al. An optical fiber technique of impact load identification method based on non-negative Bayesian regularization[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(3): 427-434. (In Chinese)
- [14] LI C, WANG X L, TAO Z Y, et al. Extraction of time varying information from noisy signals: an approach based on the empirical mode decomposition[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(3): 812-820.
- [15] YANG J S, FU Z Y, ZOU Y F, et al. A response reconstruction method based on empirical mode decomposition and modal synthesis method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 184: 109716.
- [16] 邱雨晴, 王磊, 王晓宇, 等. 基于改进函数拟合法的冲击载荷识别研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(3): 157-166.  
QIU Yuqing, WANG Lei, WANG Xiaoyu, et al. Research on impact force reconstruction based on improved function fitting method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(3): 157-166. (In Chinese)

## Efficient impact load identification method using empirical mode decomposition

LIU Ling YANG Xiaoming ZHANG Li

(College of Intelligent Manufacturing, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of traditional impact load identification methods, such as the requirement for a large number of sensors, high sampling frequency, and low identification accuracy, a new impact load identification method based on empirical mode decomposition (EMD) technology was proposed. The EMD technology was used to decompose the complete impact response to obtain the modal acceleration response. The impact location was quickly realized by measuring the collinearity between the uncorrected mode shape vector and the column vector of the mode shape matrix in the modal acceleration response. According to the positioning results, an optimization objective function was constructed. The time history of the impact load was fitted by using the Gaussian basis function, and the optimal fitting parameters were quickly solved by using the two-dimensional gradient descent method. Tests conducted on a cantilever plate with dimensions of 600 mm×200 mm×3 mm show that with only one accelerometer, the success rate of 36 impact positioning tests is 91.67%. The peak relative error and relative error index of the reconstruction results are less than 10% and 40%, respectively.

**Key words:** Impact load identification; Empirical mode decomposition; Modal acceleration response; Uncorrected mode vector; Basis function fitting

Corresponding author: ZHANG Li, E-mail: zhangli@jcut.edu.cn

Fund: Natural Science Foundation of Hubei Province (2025AFC005); Jingmen Major Science and Technology Innovation Plan Project (2024ZDYF004); Jingmen Science and Technology Plan Project (2024YDKY233); Jingchu University of Technology Doctoral Startup Fund Project (YY202444)

Received: 2024-12-19 Revised: 2025-02-24