

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210249

基于压电纤维传感器应力波方向检测的 结构冲击定位研究*

蒋 帅^{1,2}, 沈意平^{1,3}, 王送来¹, 支余林¹, 宾光富¹

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭 411201; 2. 湖南铁道职业技术学院智能制造学院 株洲 412001; 3. 株洲国创轨道科技有限公司湖南省轨道交通装备智能感知与运维工程技术研究中心 株洲 412001)

摘要:冲击定位监测是飞行器结构健康监测的重要研究课题。基于应力波方向检测的冲击定位方法可有效克服传统的到达时间方法依赖波速的应用局限性,适合飞行器复杂结构的冲击定位监测。本文分析了压电纤维对冲击应力波的响应特性,针对板结构冲击应力波信号具有宽频、频散与多模态成分混叠等特征,采用 Shannon 复数小波变换提取应力波能量峰值窄带信号,通过仿真与实验研究表明低速冲击板中产生的应力波主能量成分为 A_0 模式 Lamb 波;基于压电纤维对 Lamb 波的方向响应特性,优化制备了 45°“应变花”结构的压电纤维传感器,以能量峰值窄带 Lamb 波传播方向表征应力波传播方向,提出了基于压电纤维传感器应力波方向检测的冲击定位方法。实验结果表明提出的基于压电纤维传感器应力波方向检测的冲击定位方法准确有效,平均距离定位误差为 17.2 mm。研究成果提供一种应力波方向传感器及不依赖应力波波速的结构冲击定位方法,具有一定的理论研究意义和工程应用价值。

关键词: 压电纤维;应力波;方向感知;冲击定位;窄带信号提取

中图分类号: TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 4020

Research on structural impact source location based on sensing of stress wave direction by the piezoelectric fiber sensor

Jiang Shuai^{1,2}, Shen Yiping^{1,3}, Wang Songlai¹, Zhi Yulin¹, Bin Guangfu¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Intelligent Manufacturing, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China; 3. Zhuzhou National Innovation Railway Technology Co., Ltd., Hunan Engineering Technology Research Center of Intelligent Sensing and Maintenance for Railway Transportation Equipment, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Impact source location is an important research topic in the field of aircraft structural health monitoring. The impact location method based on stress wave direction perception can effectively overcome the application limitations of time difference of arrival location method which depends on wave velocity, which is suitable for impact location monitoring of aircraft's complex structures. In this article, the response characteristics of piezoelectric fibers to impact stress waves are analyzed. Aiming at the characteristics of impact stress wave signal for plate structures, such as broad frequency, dispersion and multi-modal components, the Shannon complex wavelet transform is used to extract the narrowband signal of the peak value of the stress wave energy. Combined with simulation analysis and experiments, it shows that the main energy component of the stress wave generated in the low-speed impact plate is A_0 mode Lamb wave. Based on the directional response characteristics of piezoelectric fiber to Lamb wave, the piezoelectric fiber sensor with 45° “strain rosette” structure is optimized and prepared. The propagation direction of the stress wave is represented by the propagation direction of narrowband Lamb wave with peak energy, an impact source location method based on the sensing of the stress wave direction by piezoelectric fiber sensor is proposed. Experimental results show that the proposed impact source location method based on the sensing of the stress wave direction by

收稿日期: 2022-08-02 Received Date: 2022-08-02

* 基金项目: 国家自然科学基金(52275107)、湖南创新型省份建设专项经费(2020RC3049)、湖南省自然科学基金(2020JJ6029, 2021JJ60007, 2022JJ30260)、湖南省教育厅重点项目(21A0310)资助

piezoelectric fiber sensor is accurate and effective, and the average distance location error is 17.2 mm. The research results provide a stress wave direction sensor and a structural impact location method that is independently from the stress wave velocity, which has certain theoretical research significance and engineering application value.

Keywords: piezoelectric fiber; stress wave; direction detection; impact source location; narrowband signal extraction

0 引言

飞行器机身、机翼等板类结构在服役过程中不可避免地受到冰雹、飞鸟、维修工具等外来物低能量冲击,低能量冲击使结构产生目不可检的损伤,给结构服役安全性带来隐患^[1]。例如冰雹冲击速度约为 30 m/s,冲击能量仅为 4~10 J^[2]。低能量冲击将引起飞行器板类结构产生 Lamb 波传播,如板面法向冲击易激励产生反对称模态 Lamb 波,切向冲击易激励产生对称模态 Lamb 波^[3]。由于 Lamb 波具有衰减小、传播距离远等优点,基于 Lamb 波的冲击监测方法受到广泛关注。

基于 Lamb 波的冲击定位方法主要采用到达时间方法^[4-5],如双曲线定位、四点圆弧定位、三角定位等方法。工程实际中飞行器结构复杂,波速难以准确获知,加之导波固有的多模态和频散特性,给到达时间方法带来困难^[6]。基于 Lamb 波方向检测的冲击定位方法不依赖波速,相比到达时间方法更为简单和准确,更适合于复杂结构的冲击监测。理论上利用两个不同位置的方向传感器获得两个 Lamb 波传播方向的交点即为冲击位置^[7]。目前,Lamb 波方向传感器主要有光纤光栅^[8]和压电元件。光纤传感器适用于分布式大面积结构检测,但易受温度与环境干扰且需要昂贵的解调设备。压电元件具有高压电性、高机电耦合系数、宽频响,应用广泛。Yin 等^[9]和赵竹君等^[10]采用圆形压电片布置形成“Z”形与“梅花”阵列,通过提取损伤散射信号的到达时间的差值来计算 Lamb 波传播方向。刘建等^[11]采用矩形压电片布置成 60°的应变花结构,采用相对幅值法进行了板内应力波方向检测。传统的压电片为锆钛酸铅陶瓷,质地脆、硬度大,难以满足飞行器曲面结构共形监测。文献[12-13]利用三片具有各向异性的压电纤维复合材料(macro fiber composite, MFC)组成 120°应变花结构,采用快速傅里叶变换提取断铅信号中波长等于 MFC 长度的窄带分量幅值,用于主应变方向计算并进行波源定位。文献[14-15]则利用含金属芯压电纤维(metal-core piezoelectric fiber, MPF)组成 60°应变花结构,采用 Morlet 小波变换提取特定频率下的小波系数表征幅值,用于落球冲击定位成像研究。MFC 是将矩形纤维排列固化在聚合物中,其正交异性对导波方向敏感,但 MFC 制备工艺复杂,价格昂贵,且横向尺寸较大,耦合效应造成方向传感能力较差。

MPF 采用径向 d_{31} 压电效应,具有良好的方向感知能力,但其制备困难,难以获得成品。

本课题组前期研究了细长压电纤维对 Lamb 波良好的方向传感能力,提出具有柔性的压电纤维传感器,并研究了压电纤维布置结构形式对主动激励 Lamb 波方向识别精度的影响,应用于结构损伤定位^[16-17]。本文重点研究压电纤维对低速冲击应力波响应特性,结合 Shannon 小波变换的窄带信号提取方法,分析冲击宽频信号中主能量窄带 Lamb 波模式,以冲击应力波中能量峰值频率的窄带 Lamb 波方向表征应力波传播方向,提出一种基于压电纤维传感器应力波方向检测的结构冲击定位方法,为压电纤维传感器应用于结构冲击监测提供理论和方法支撑。

1 压电纤维传感器的应力波方向传感原理与定位算法

1.1 压电纤维对应力波传感响应特性

压电纤维用作应力波传感元件时,主要利用材料的压电效应。压电纤维粘结在厚度为 $2h$ 的板结构表面,其应力波感知模型如图 1 所示。由于压电纤维的长径比大且半径小,故可忽略其径向应力的影响。因此,根据压电方程,压电纤维两电极的响应电压表示为:

$$V = \frac{E_s d_{33}}{e_{33}} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \varepsilon_{xx} dX \quad (1)$$

式中: l 为压电纤维的长度, E_s 为压电材料的弹性模量, d_{33} 为压电常数, e_{33} 为介电常数, ε_{xx} 为应力波沿纤维长度方向的应变分量。

小频厚积板结构内,低能量冲击主要激起板内 Lamb 波,其中反对称模态成分能量较大^[3]。课题组通过理论与实验研究了单压电纤维对反对称模态 Lamb 波电压响应特性,其电压响应输出表达式为^[16]:

$$V = \frac{E_s d_{33} \lambda_a}{\pi e_{33}} u(L) \cos \gamma \sin \left(\frac{\pi l \cos \gamma}{\lambda_a} \right) \bar{\varepsilon}_{x'x'} \quad (2)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_{x'x'}$ 为板表面应变 $\varepsilon_{x'x'}$ 的幅值, $u(L)$ 是 Lamb 关于传播距离 L 的衰减系数, λ_a 为波长, γ 为应力波方向与纤维长度方向夹角。

式(2)表明压电纤维对应力波的响应电压是关于方向 γ 的方向特性函数,且当压电纤维长度 l 为半波长 $\lambda_a/2$ 的奇数倍时,压电纤维电压响应最大。表明压电纤维具有应力波方向感知特性,且纤维长度与被测波长存

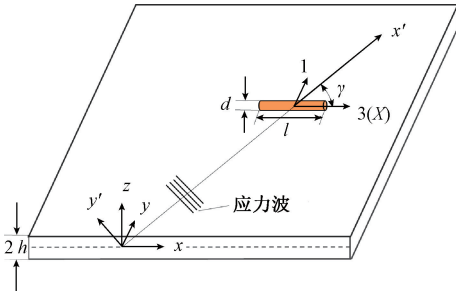


图 1 压电纤维的应力波感知模型

Fig. 1 Stress wave sensing model of piezoelectric fiber

在调谐规律。可以采用压电纤维“应变花”结构传感器来检测冲击应力波方向。

冲击应力波信号成分多样、频带宽,以及导波的固有频散与多模态,使得不同频率、不同的谐波成分相互重叠,很难提取波包的准确到达时间,给基于到达时差的定位方法带来不可忽略的误差。在各向同性板中应力波中各谐波成分传播方向均与主应变方向一致,本文从冲击应力波信号中提取主能量窄带成分,以窄带信号方向表征应力波传播方向。

连续复数小波变换具有高时频分辨率特性,可以有效地提取宽频信号中主能量的信号成分^[18]。Gabor 小波、Morlet 小波、Shannon 小波常用于宽频信号分解与去噪,其中 Shannon 小波在时域和频域同时具有良好的局部分析特性,能实现中心频率与带宽可控的窄带信号提取,具有计算量小且计算精度较高等优点,更适合冲击宽频信号处理^[19-20]。Shannon 连续复数小波变换是分析信号 $f(t)$ 与 Shannon 复数小波函数 $\psi_{\text{shan}}(t)$ 的内积,表达式为:

$$\text{WT}_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}_{\text{shan}}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

$$\psi_{\text{shan}}(t) = \sqrt{f_b} \text{sinc}(f_b t) e^{2i\pi f_c t} \quad (4)$$

式中: a 为小波尺度因子, b 为时间因子, $\bar{\psi}_{\text{shan}}$ 表示函数 ψ_{shan} 复共轭, f_b 与 f_c 为母小波频带宽度与中心频率, sinc 函数表达式为:

$$\text{sinc}(t) = \begin{cases} 1, & t = 0 \\ \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}, & t \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

采用 Shannon 复数小波变换提取的能量峰值频率 ω_c 、带宽 ω_b 的窄带信号频域可以表示式为:

$$\Psi_{\text{shan}-a,b}(\omega) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\pi a}{\omega_b}} e^{-i\omega b}, & \frac{\omega_c}{a} - \frac{\omega_b}{2a} \leq \omega < \frac{\omega_c}{a} + \frac{\omega_b}{2a} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

因此,压电纤维对 Lamb 波窄带电压响应输出时域表达式为:

$$U(t) = \int_{\omega_c/a - \omega_b/2a}^{\omega_c/a + \omega_b/2a} \frac{E_s d_{33} \lambda_a}{\pi e_{33}} u(L) T(\gamma) \cdot$$

$$\bar{\varepsilon}_{x'x'} \psi_{\text{shan}}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (7)$$

$$T(\gamma) = \cos \gamma \sin(\pi l \cos \gamma / \lambda_a) \quad (8)$$

式(7)与(8)表明压电纤维对 Lamb 波窄带成分具有方向传感响应特性。

由于 Lamb 波存在频散,信号处理中采用 Hilbert 变换提取压电纤维输出电压的包络峰值表征压电纤维响应电压,表达式为:

$$\tilde{U} = |U(t) + iH[U(t)]|_{\text{peak}} \quad (9)$$

式中: $H[U(t)]$ 为 $U(t)$ 的 Hilbert 变换。

1.2 基于压电纤维传感器的冲击定位算法

根据压电纤维对 Lamb 波传感的方向响应特性,可以利用 3 根“应变花”结构的压电纤维传感器来检测应力波传感方向,如图 2 所示。每根压电纤维响应电压输出可以表示为:

$$\tilde{U}_{i\text{max}} = \tilde{U}_{\text{max}} \cos(\gamma - \theta_i) \sin\left(\frac{\pi l \cos(\gamma - \theta_i)}{\lambda_a}\right)$$

$$i = 0, 1, 2 \quad (10)$$

式中: \tilde{U}_{max} 为压电纤维与应力波方向平行时的电压响应最大幅值。由于冲击位置与载荷的随机性, \tilde{U}_{max} 很难直接获得,采用将 3 根压电纤维实际的电压响应和值为基准,归一化每根压电纤维的响应幅值,则应力波方向函数可以表示为:

$$T_i = \frac{3\tilde{U}_{i\text{max}}}{\sum_{i=1}^3 \tilde{U}_{i\text{max}}} = \frac{3\cos(\gamma + \theta_i) \sin(\pi l \cos(\gamma + \theta_i) / \lambda_a)}{\sum_{i=1}^3 \cos(\gamma + \theta_i) \sin(\pi l \cos(\gamma + \theta_i) / \lambda_a)} \quad (11)$$

通过理论与实验的 3 根压电纤维响应信号归一化幅值的最小误差值来估计冲击应力波传播方向 γ , 目标函数定义为:

$$\min e(\hat{\gamma}) = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (T_i - T_i(\hat{\gamma}))^2} \quad (12)$$

式中: $\hat{\gamma}$ 为应力波传播方向 γ 理论估计值,取误差函数 $e(\hat{\gamma})$ 最小值对应的角度为结果值。

通过不与冲击波源共线的两个压电纤维传感器 R_1 、 R_2 ,可以确定两个不同的冲击应力波方向,两个方位的交点即为冲击波源,如图 2 所示。冲击波源 $I(x, y)$ 计算表达式为:

$$\begin{cases} x = \frac{y_2 - y_1 + x_1 \tan \gamma_1 - x_2 \tan \gamma_2}{\tan \gamma_1 - \tan \gamma_2} \\ y = \frac{y_2 \tan \gamma_1 - y_1 \tan \gamma_2 + (x_1 - x_2) \tan \gamma_1 \tan \gamma_2}{\tan \gamma_1 - \tan \gamma_2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 分别为压电纤维“应变花”传感器 R_1 、 R_2 的布置坐标, γ_1 、 γ_2 为传感器检测的应力波传播方向。

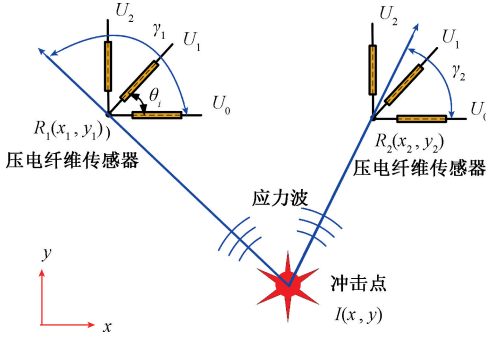


图2 冲击定位原理

Fig. 2 Location principle of impact source

2 压电纤维“应变花”传感器的制备

本课题组前期研究了压电纤维对 Lamb 波传感的方向响应特性,并讨论了不同“应变花”结构布置形式对 Lamb 波方向识别精度的影响,研究发现 45° “应变花”结构传感器在数 kHz 频带范围内具有更高的方向识别精度,更适合板结构低速冲击监测^[21]。本文根据压电纤维长度与波长调谐规律进一步优化了 45° “应变花”结构压电纤维传感器(简称:压电纤维传感器)制备工艺,详述如下。

选用 Smart Material 公司的 $\Phi 0.8$ mm 压电纤维棒,截取纤维长度为主能量窄带波半波长的奇数倍,例如低速冲击激励的应力波主能量成分为中心频率 20 kHz 的 A_0 模态 Lamb 波,其半波长为 13 mm,本文优选纤维长度为 13 mm。压电纤维采用自制的压电纤维极化夹具进行油浴极化,如图 3(a),极化电压 1 kV/mm,极化方向沿压电纤维长度方向,极化后采用 ZJ-6A 型准静态测量仪检测压电纤维压电常数 d_{33} ,用于后续 3 根压电纤维传感响应信号标定。选用集成印刷电路的柔性聚酰亚胺作为传感器基板,聚酰亚胺基板厚度为 0.1 mm,印刷电路厚为 $35 \mu\text{m}$ 。3 根压电纤维两端面涂刷导电银胶,按 45° 直角形结构布置在柔性电路上,即分别与 AB、CD 和 EF 三级电极相连,同时引出导线用于压电传感信号输出。传感器整体采用有机硅树脂进行封装,研制的压电纤维传感器整体尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,如图 3(b)所示。压电纤维固化在柔性基板与有机硅树脂之间,能够一定程度避免因外界冲击或振动而造成纤维断裂失效。压电纤维传感器制备工艺简单,尺寸小,具有较好的柔性,适用于曲面结构表面。

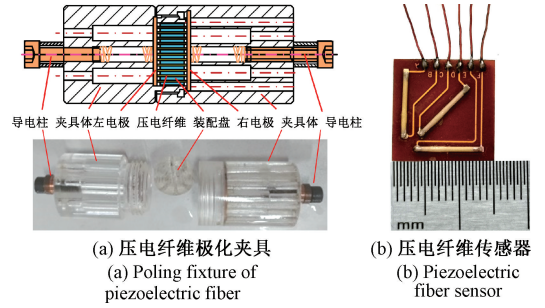


图3 压电纤维传感器及极化夹具

Fig. 3 Piezoelectric fiber sensor and poling fixture

3 仿真分析与实验研究

3.1 板结构低速冲击应力波模式分析

本文采用有限元仿真与实验相结合的方法,研究板结构冲击产生应力波信号特性。采用 ANSYS 有限元分析软件开展铝板冲击应力波产生和传播特性仿真分析,结合硬质小球冲击铝板实验验证低速冲击应力波主能量窄带模式。基于 ANSYS 采用 Shell181 与 C3D8I 三维实体单元建立铝板和冲击小球有限元模型,铝板采用四周固定支承边界条件。铝板和冲击小球冲击接触设置自动面对面接触,冲击速度为 30 m/s。铝板密度为 2730 kg/m^3 ,泊松比为 0.33,弹性模量为 68.9 GPa。聚甲醛小球密度为 1.41 kg/m^3 ,泊松比为 0.39,弹性模量为 2.83 GPa。为了保证铝板冲击产生应力波和传播分析结果的准确性,有限元分析模型单元网格应小于最大频率对应波长的 $1/10$,积分步长必须小于最大频率导波对应周期的 $1/20$ 。因此,铝板网格尺寸设置为 1 mm,网格总数约为 157 万,积分时间步长为 150 ns,计算时长为 3 ms。通过仿真计算,图 4 所示为 0.16 ms 时刻铝板冲击板表面应力波云图,可以看出,各向同性铝板中冲击激起的应力波主应变方向均指向冲击点。

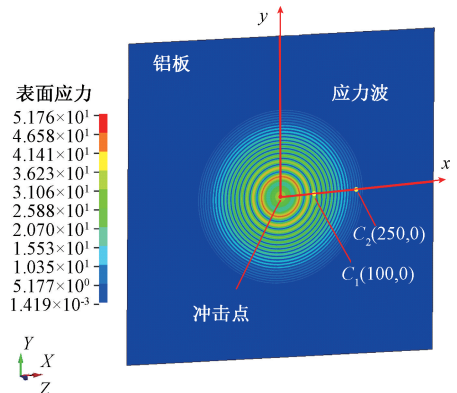


图4 冲击产生的应力波及传播仿真

Fig. 4 Simulation of generation and propagation of impact stress wave

如图 4,以铝板上表面正中心为原点,定义坐标(0,100)与(0,250)处 C_1 、 C_2 点为信号采集点,分析冲击产生应力波信号特性。 C_1 和 C_2 冲击响应的应力信号如图 5(a)和(b)所示,采用傅里叶变换对应力波信号进行频域分析,频域特征如图 5(c)和(d)所示。由图 5 可以看出,小球低速冲击产生应力波信号频带较宽,分布范围为 0~200 kHz,能量峰值出现在 20 kHz 附近; C_1 和 C_2 位置的波形有所不同,这是由于应力波在传播过程中的衰减,以及导波频散、多模态成分相互混叠造成,波包到达时间难以准确获知。

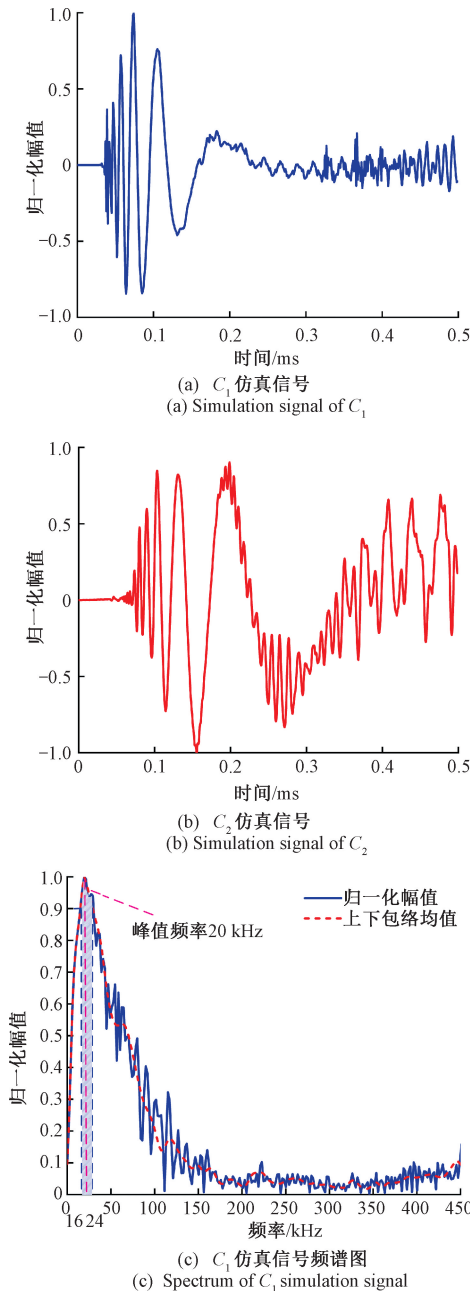


图 5 铝板冲击仿真信号

Fig. 5 Simulation signal of aluminum plate impact

冲击铝板产生应力波信号验证实验方案如图 6 所示。实验采用直径 0.8 mm,长度 13 mm 的压电纤维作为传感器,长度方向与 x 轴平行,粘接在板的 C_1 和 C_2 位置。冲击小球以 30 m/s 速度冲击板中心 O 点,设置采样频率 1 MHz,通过 NI USB-6366 数据采集卡采集 C_1 与 C_2 响应电压信号。

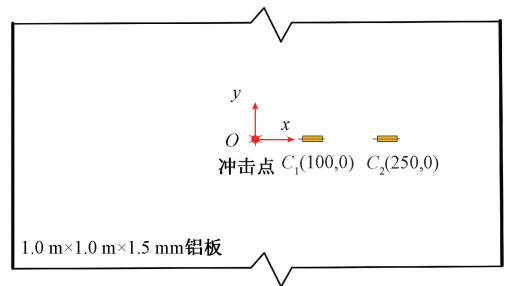
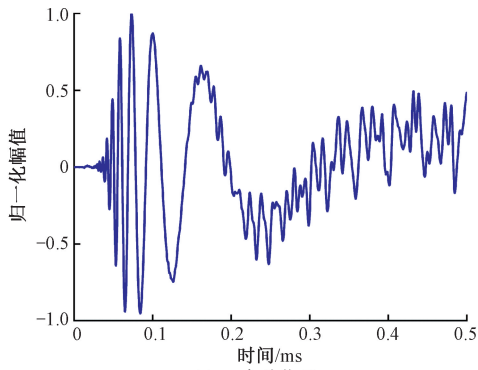


图 6 铝板冲击实验

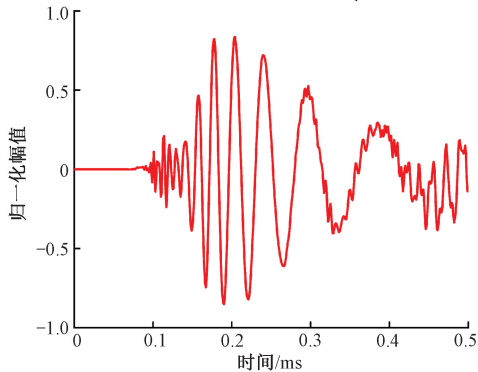
Fig. 6 Impact test of aluminum plate

C_1 和 C_2 处压电纤维的响应电压信号如图 7(a)和(b)所示,其频域分析如图 7(c)和(d)所示。由图 7 可以看出, C_1 实验信号与仿真信号波形基本一致。实验信号与仿真信号频率带宽基本吻合,能量峰值频率也在 20 kHz 附近;实验信号相比仿真信号高频段的响应较小, C_1 和 C_2 波形相差较大,这是由于仿真信号中没有考虑压电纤维对 Lamb 波的频响及与波长调谐特性。

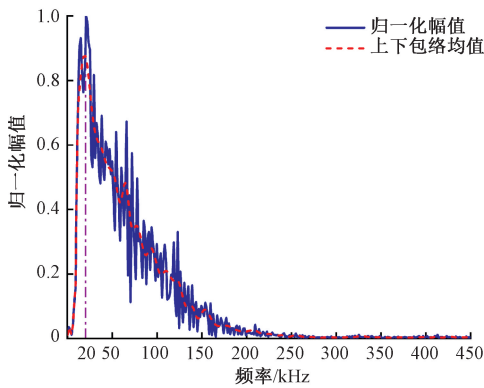
根据 Lamb 波频散方程^[22],计算 1.5 mm 铝板的频散曲线如图 8 所示,在频率低于 500 kHz 阶段,板内 Lamb 波只存在 S_0 与 A_0 低阶模态。对 C_1 和 C_2 冲击应力波信号进行时频分析,并将 S_0 与 A_0 模态 Lamb 波理论到达时间进行叠加,如图 9 所示。从图 9 可以看出,主能量频率成分与 A_0 模态 Lamb 波达到时间非常吻合,验证了冲击信号中 A_0 模态 Lamb 波能量更高。可以从冲击应力波信号



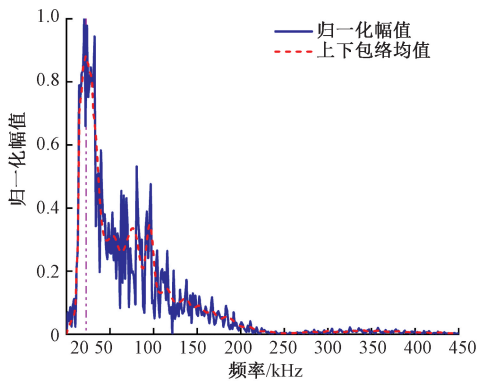
(a) Experimental signal of C_1



(b) Experimental signal of C_2



(c) Spectrum of C_1 experimental signal



(d) Spectrum of C_2 experimental signal

图7 压电纤维响应的实验信号

Fig. 7 Experimental signal of aluminum plate impact

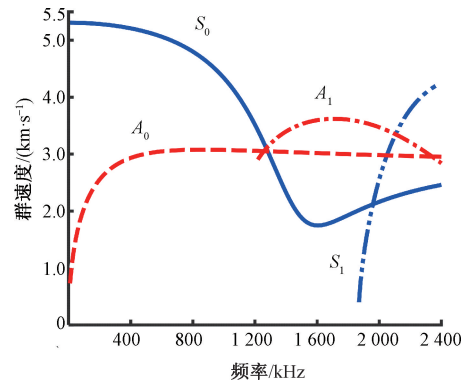
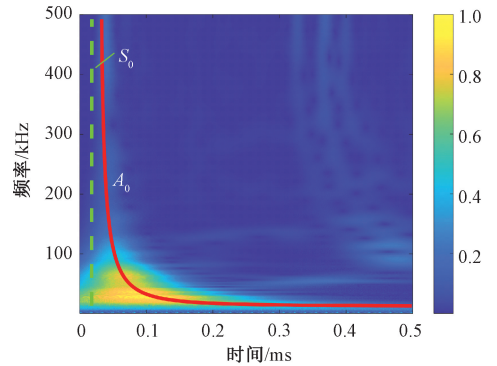
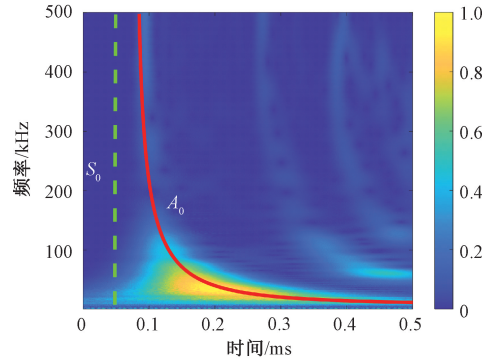


图8 1.5 mm 铝板中的 Lamb 波群速度曲线

Fig. 8 Group velocity curve of 1.5 mm aluminum plate



(a) Time-frequency analysis of C_1



(b) Time-frequency analysis of C_2

图9 冲击应力波信号的时频分析

Fig. 9 Time-frequency analysis of impact stress wave signal

中提取主能量频带 Lamb 窄带成分作为应力波方向分析信号。窄带 Lamb 信号能有效滤除的噪音成分干扰,减小宽频导波频散效应^[23]。

本文采用 Shannon 连续小波变换来提取能量峰值频率的窄带信号。分析板结构低速冲击的有限元仿真与实验信号频域,如图 5(c) 冲击应力波能量峰值频率在 20 kHz,选取峰值附近 10% 的能量带宽,定义其带宽为 8 kHz。 C_1 仿真和实验信号的小波变换结果如图 10 和 11 所示。

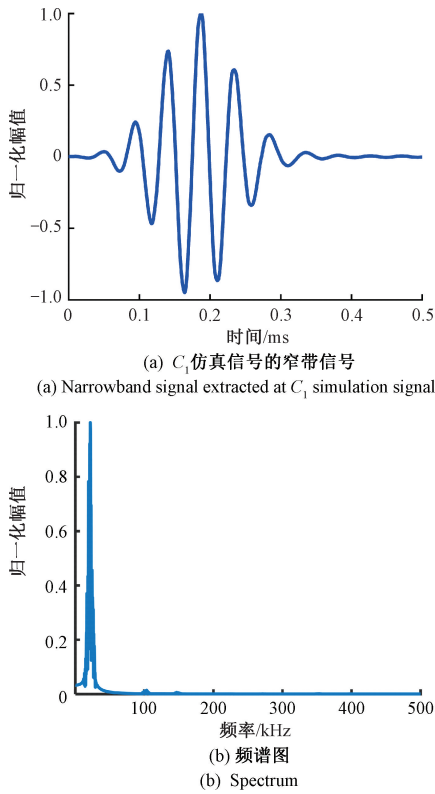


图 10 C_1 仿真的窄带信号及频谱图

Fig. 10 Narrowband signal and spectrum of C_1 simulation signal

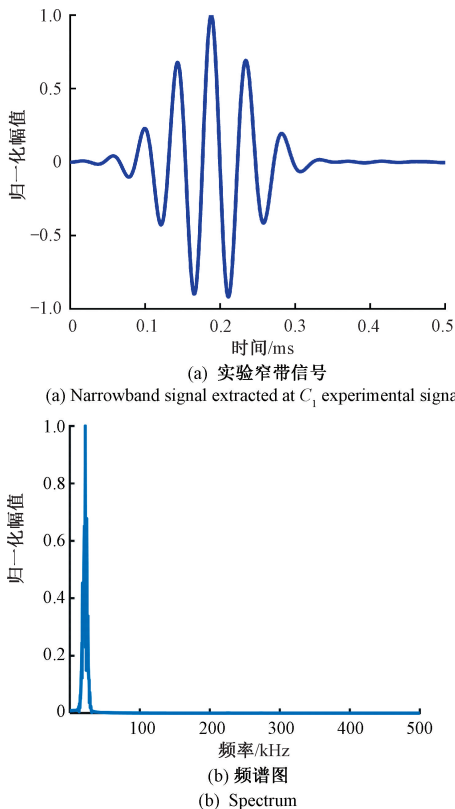


图 11 C_1 实验的窄带信号及频谱图

Fig. 11 Narrowband signal and spectrum of C_1 experiment signal

采用 Hilbert 变换并提取其包络峰值对应到达时间, 可以计算窄带分量波包的波速。提取 C_1 和 C_2 应力波仿真信号的窄带波包及其包络线, 如图 12 所示, 得到中心频率 20 kHz 的窄带波包到达 C_1 、 C_2 的时间差为 $\Delta t = t_2 - t_1$ 为 147 μs , 计算得中心频率为 20 kHz 的窄带波包传播速度为 1 020 m/s。

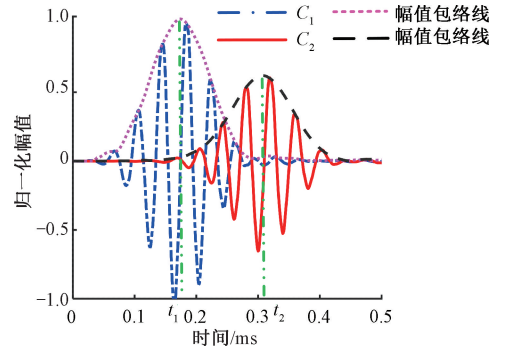


图 12 C_1 与 C_2 仿真信号的窄带信号及包络幅值
Fig. 12 Narrowband signal and envelope amplitude extracted at C_1 and C_2 simulation signals

同理分析冲击实验数据, 提取 C_1 与 C_2 实验信号能量峰值窄带信号包络峰值的到达时间差为 155 ms。考虑传感器安装误差, $\overline{C_1 C_2}$ 实际距离 157 mm, 计算得到中心频率 20 kHz 窄带信号传播速度为 1 016 m/s。仿真分析与实验结果表明, 低速冲击宽频信号中提取的 20 kHz 窄带波速与铝板 A_0 模态 Lamb 理论波速 1 026 m/s 吻合, 说明该窄带波包为 A_0 模态。

有限元仿真分析与实验结果表明板结构低能量冲击诱发的应力波主能量成分是 A_0 模态 Lamb 波, 这与 Olsson 理论的板结构响应模型一致, 说明基于 Shannon 复数小波变换的冲击信号主能量窄带信号提取方法有效性。

3.2 冲击定位实验研究

研究中采用硬质小球冲击铝板开展实验。实验铝板结构选用 6062 铝板, 冲击物为聚甲醛小球。冲击实验系统如图 13 所示, 包括实验板、冲击小球发射用的气枪, 弹丸测速仪、传感器及信号采集系统等。实验板尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×1.5 mm, 采用四周固定支撑。冲击弹丸为直径 7 mm 的聚甲醛小球。气枪垂直铝板射击小球, 采用光幕测速仪记录小球冲击速度。信号采集系统由计算机、LabView 程序与 8 通道的 NI USB-6366 数据采集卡组成。

冲击定位实验中冲击小球以 30 m/s 速度定点冲击铝板, 实验方案如图 14 所示。2 个 45° 压电纤维传感器 R_1 、 R_2 分别粘结于铝板表面, 为了避免检测盲区, 冲击点 I_1 不与 $R_1 R_2$ 共线。 R_1 、 R_2 坐标分别为 (300, 300) 与

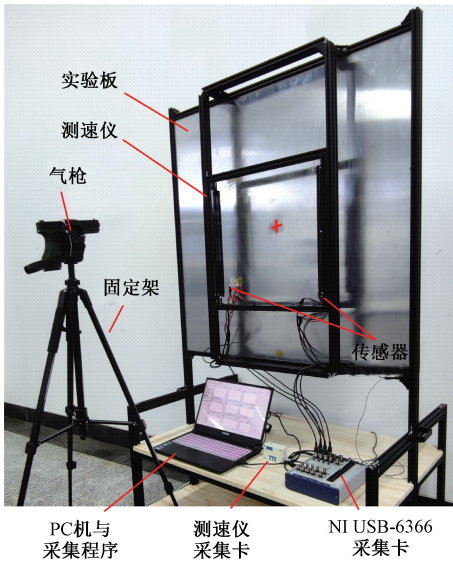


图 13 冲击实验系统

Fig. 13 Impact test system

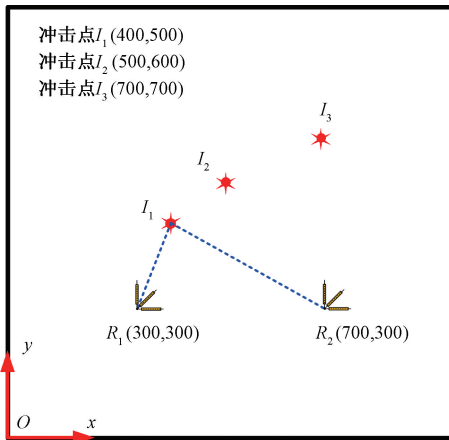
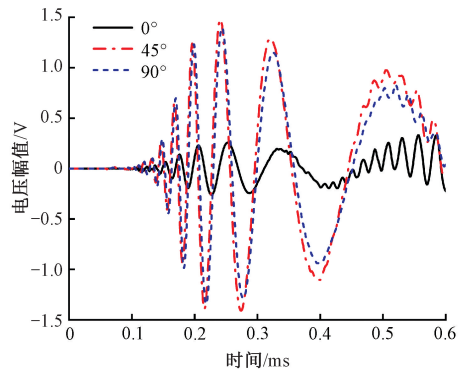


图 14 冲击定位实验

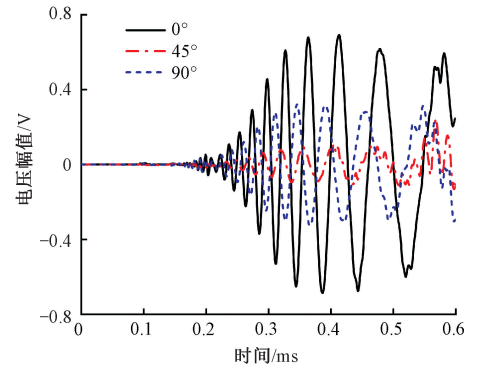
Fig. 14 Impact source location experiment

(700, 300), 三次冲击位置分别在 $I_1(400, 500)$ 、 $I_2(500, 600)$ 、 $I_3(700, 700)$ 。采样频率为 1 MHz, R_1 、 R_2 压电纤维传感器中 0° 、 45° 、 90° 三根纤维响应电压输出分别标记为 U_0 、 U_1 、 U_2 。

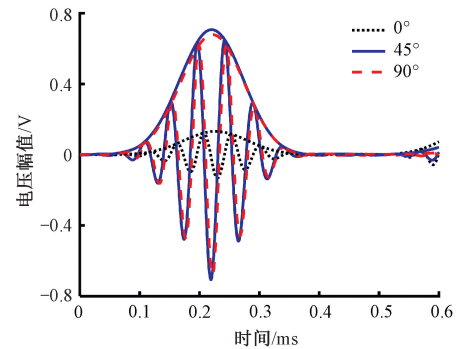
以冲击点 I_1 实验为例分析实验结果, R_1 、 R_2 传感器的电压响应信号如图 15(a)和(b)所示,可以看出 3 根纤维信号到达时间基本一致,幅值差异明显,体现了压电纤维对应力波方向响应特性。对 R_1 、 R_2 信号进行频谱分析,能量峰值频率亦出现在 16~24 kHz 带宽中。基于文中提出的窄带信号提取方法,设置中心频率 f_c 为 20 kHz,带宽 f_b 为 8 kHz,分别提取应力波传播路径 I_1-R_1 、 I_1-R_2 的压电纤维传感器窄带信号及其包络幅值,如图 15(c)和(d)所示。通过信号处理与分析得到: R_1 传



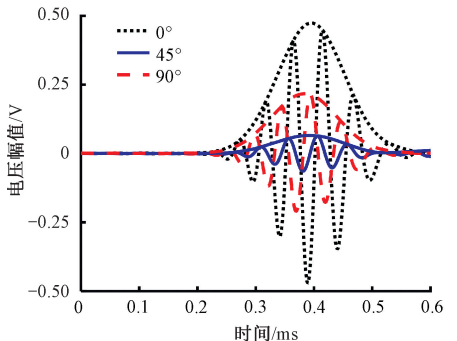
(a) I_1-R_1 路径实验信号
(a) Experimental signal of I_1-R_1 path



(b) I_1-R_2 路径实验信号
(b) Experimental signal of I_1-R_2 path



(c) I_1-R_1 路径窄带信号
(c) Narrowband signal of I_1-R_1 path



(d) I_1-R_2 路径窄带信号
(d) Narrowband signal of I_1-R_2 path

图 15 I_1-S_i 路径实验信号及提取的窄带信号

Fig. 15 Experimental signal and extracted narrowband signal of I_1-R_i

感器中三根压电纤维响应电压分别为: $U_{0\max}=0.1321\text{ V}$ 、 $U_{1\max}=0.7076\text{ V}$ 、 $U_{2\max}=0.6787\text{ V}$ 。 R_2 传感器中压电纤维响应电压为: $U_{0\max}=0.4736\text{ V}$ 、 $U_{1\max}=0.0655\text{ V}$ 、 $U_{2\max}=0.2172\text{ V}$ 。通过式(11)与(12), R_1 与 R_2 检测的应力波方向分别为 67.3° 与 147.7° ,代入式(13)确定冲击点 I_1 坐标(384,500)。

I_1 、 I_2 、 I_3 点冲击实验定位识别结果与误差,见表1。从

表1中可以看出冲击定位结果与真实冲击位置基本一致,平均定位距离误差17.2 mm。对比已有文献中:矩形压电片平均定位误差36 mm^[11]、MFC平均定位误差52.5 mm^[12]、MPF平均定位误差17.5 mm^[15],表明压电纤维传感元件对冲击波源定位精度优于MFC与矩形压电片,与MPF定位精度相当。说明本文提出基于压电纤维传感器应力波方向检测的结构冲击定位的有效性性与准确性。

表1 冲击定位实验结果

Table 1 Experimental results of impact source location

冲击源 序号	R_1 实际角 度/ $^\circ$	R_1 识别角度 / $^\circ$	R_2 实际角度 / $^\circ$	R_2 识别角度 / $^\circ$	冲击源实际 位置/mm	冲击源识别 位置/mm	距离误差 /mm	坐标相对误差 /%
I_1	63.4	67.2	146.3	147.9	(400,500)	(384,500)	16.0	(4.00,0.004)
I_2	56.3	58.5	123.7	123.1	(500,600)	(493,616)	17.4	(1.40,2.70)
I_3	45.0	46.1	90.0	89.6	(700,700)	(703,718)	18.3	(0.43,2.50)

4 结 论

本文基于压电纤维对应力波方向响应特性,提出一种基于压电纤维传感器应力波方向检测的结构冲击定位方法。理论分析了压电纤维对冲击应力波响应特性,结合时频分析与Shannon小波变换有效地提取冲击应力波能量峰值窄带成分,通过仿真与实验研究证明板结构低速冲击诱发应力波能量峰值窄带成分是 A_0 模态Lamb波。根据压电纤维长度与检测波长调谐规律,优化制备了45°“应变花”压电纤维传感器。通过两个压电纤维传感器,开展铝板冲击定位验证实验。研究表明基于压电纤维传感器应力波方向检测的冲击定位方法准确有效,定位精度与MPF相当,优于MFC与矩形压电片。压电纤维传感器工艺简单、尺寸小、轻质,相比于制备困难的MPF,更适合飞行器曲面结构冲击监测。研究成果能够为板结构冲击定位提供不依赖波速先验知识的识别方法,具有一定的理论研究意义和工程应用价值。

参考文献

[1] 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 B J, CHEN X F, LIU J X, et al. Sparse identification of impact force acting on mechanical structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 81-89.

[2] SALAMONE S, BARTOLI I, DI LEO P, et al. High-velocity impact location on aircraft panels using macro-fiber composite piezoelectric rosettes [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(9): 887-896.
[3] XU B, YUAN S, WANG M, et al. Determining impact induced damage by lamb wave mode extracted by EMD method[J]. Measurement, 2015, 65: 120-128.
[4] DE MARCHI L, TESTONI N, MARZANI A. Spiral-shaped piezoelectric sensors for Lamb waves direction of arrival (DoA) estimation [J]. Smart Materials Structures, 2018, 27(4): 045016.
[5] 鲍娇,邱雷,袁慎芳. 飞行器结构健康监测中压电-导波成像技术的发展与挑战[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 15-33.
BAO Q, QIU L, YUAN SH F. Development and challenges of PZT-Guided wave based imaging technique in aircraft structural health monitoring [J]. Aeronautical Science & technology, 2020, 31(3): 15-33.
[6] GRIGG S, PULLIN R, FEATHERSTON C A. Acoustic emission source location in complex aircraft structures using three closely spaced sensors [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 164: 108256.

- [7] GIURGIUTIU V. SHM of aerospace composites-challenges and opportunities [C]. CAMX Conference Proceedings, Dallas, TX, 2015.
- [8] BETZ D C, THURSBY G, CULSHAW B, et al. Lamb wave detection and source location using fiber Bragg gratin rosettes[J]. Proc. of SPIE, 2003: 117-128.
- [9] YIN S, CUI Z, KUNDU T. Acoustic source localization in anisotropic plates with “Z” shaped sensor clusters[J]. Ultrasonics, 2018, 84: 34-37.
- [10] 赵竹君,李成,侯玉亮,等. 基于 PZT 结 Lamb 波方向算法的损伤定位方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2019, 39 (2): 340-345,445-446.
- ZHAO ZH J, LI CH, HOU Y L, et al. Damage location detection method based on Lamb wave direction algorithm and piezoelectric knot [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39 (2): 340- 345, 445-446.
- [11] 刘建,裘进浩,常伟杰,等. 运用矩形压电片的冲击载荷定位新方法[J]. 振动. 测试与诊断, 2010, 30 (3): 257-259,338.
- LIU J, QIU J H, CHANG W J, et al. Location of impact load using rectangular piezoelectric sensors[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30 (3): 257-259,338.
- [12] MATT H M, SCALEA F L D. Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16 (4): 1489-1499.
- [13] KIJANKA P , MANOHAR A , DI SCALEA F L , et al. Damage location by ultrasonic Lamb waves and piezoelectric rosettes[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 26 (12): 1477-1490.
- [14] WANG H, QIU J, JI H, et al. Identification of multi-impact locations using metal-core piezoelectric fiber rosettes[C]. Structural Health Monitoring 2015, 2015.
- [15] LIU J, QIU J, CHANG W, et al. Metal core piezoelectric ceramic fiber rosettes for acousto-ultrasonic source localization in plate structures[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33: 865-873.
- [16] WANG S, WU W, SHEN Y, et al. Lamb wave directional sensing with piezoelectric fiber rosette in structure health monitoring [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-12.
- [17] 沈意平,唐斌龙,王送来,等. 压电纤维布置结构对 Lamb 波方向识别的影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (1): 154-161.
- SHEN Y P, TAN B L, WANG S L, et al. Study on the influence of piezoelectric fiber configurations on Lamb wave direction identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 (1): 154-161.
- [18] KESSLER S S. Piezoelectric-based in-situ damage detection of composite materials for structural health monitoring systems[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [19] QIU L, LIU B, YUAN S, et al. A spatial filter and two linear PZT arrays based composite structure imaging method [J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17 (3): 1218-1231.
- [20] 邱雷,袁慎芳,苏永振,等. 基于 Shannon 复数小波和时间反转聚焦的复合材料结构多源冲击成像定位方法[J]. 航空学报, 2010, 31 (12): 2417-2424.
- QIU L, YUAN SH F, SU Y ZH, et al. Multiple impact source imaging and localization on composite structure based on shannon complex wavelet and time reversal focusing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31 (12): 2417-2424.
- [21] JIANG S, SHEN Y, WANG S, et al. The effect of piezoelectric fiber rosette configurations on lamb wave direction detection for damage localization[J]. Journal of Sensors, 2021: 9918049.
- [22] EBRAHIMINEJAD A, MARDANSHAH A, KAZEMIRAD S. Nondestructive evaluation of coated structures using Lamb wave propagation[J]. Applied Acoustics, 2022:185.
- [23] 刘增华,穆云龙,宋国荣,等. 复合材料板 Chirp 激励的 Lamb 波成像技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2015,

36 (9): 1961-1971.

LIU Z H, MU Y L, SONG G R, et al. Research on Lamb wave imaging technique for composite plate based on chirp excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (9): 1961-1971.

作者简介



蒋帅, 2009年于天津职业技术师范大学获得学士学位, 2012年于昆明理工大学获得硕士学位, 现于湖南科技大学攻读博士学位, 主要研究方向为新型压电传感技术、结构健康监测。

E-mail: jiangshuai@mail.hnust.edu.cn

Jiang Shuai received his B. Sc. degree from Tianjin University of Technology and Education in 2009, and received his M. Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2012. He is currently a Ph. D. candidate at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include piezoelectric sensing technology, and structure health

monitoring.



沈意平 (通信作者), 2003年于湖南科技大学获得学士学位, 2006年于湖南科技大学获得硕士学位, 2014年于华中科技大学获得博士学位, 现为湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型压电传感技术、结构健康监测。

E-mail: yiping1011@163.com

Shen Yiping (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2003, received her M. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2006, and received her Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2014. She is currently a professor at Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology. Her main research interests include piezoelectric sensing technology, and structure health monitoring.