

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905682

压电纤维布置结构对 Lamb 波方向识别的影响研究^{*}

沈意平¹, 唐斌龙¹, 王送来², 阳雪兵³, 吴万荣²

(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. 中南大学机电工程学院 长沙 410083;
3. 湘电风能有限公司 湘潭 411000)

摘要:由于压电纤维对 Lamb 波具有良好的方向传感特性,采用类似“应变花”的压电纤维传感器能够实现 Lamb 波方向检测。针对常见的 45°直角形、135°直角形、60°三角形和 120°三角形等 4 种结构形式,开展理论、仿真和实验研究不同压电纤维传感器布置结构对 Lamb 波方向识别精度的影响。根据压电方程和 Lamb 波传播衰减特性,理论推导了窄带激励下压电纤维对 A_0 模式 Lamb 波的传感响应方程,定义基于 3 根压电纤维响应幅值的误差函数来估计 Lamb 波方向;利用 ANSYS 软件开展压电耦合仿真分析获得不同压电纤维传感器的响应信号,并开展了相应的实验测试,采用匹配追踪算法进行信号分解并提取其响应幅值;根据误差函数和响应信号对 Lamb 波方向进行识别,对比并讨论了仿真和实验误差产生的原因。分析结果表明:4 种压电纤维布置结构的识别误差取决于压电纤维长度与布置角度、激励频率、实验压电纤维的粘接等情况;从总体误差大小来看,135°直角形结构方案最优,误差小于 4%;60°三角形略优于 45°直角形结构,误差小于 8%;由于 120°三角形结构整体尺寸较大,其识别误差最大,这将为压电纤维传感器结构设计提供了一定的理论依据。

关键词: 压电纤维传感器;Lamb 波传播方向;布置结构;压电耦合;误差来源

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Study on the influence of piezoelectric fiber configurations on Lamb wave direction identification

Shen Yiping¹, Tang Binlong¹, Wang Songlai², Yang Xuebing³, Wu Wanrong²

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Xiangtan Electric Manufacturing Group, Xiangtan 411000, China)

Abstract: Due to the good direction sensing characteristic of piezoelectric fiber to Lamb wave, the piezoelectric fiber sensor, which is similar to the strain rosette, is adopted to achieve the detection of the Lamb wave propagation direction. Aiming at commonly used 4 structure configurations of 45°-rectangular, 135°-rectangular, 60°-delta and 120°-delta, the theoretical, simulation and experiment studies are conducted to find out the influences of various piezoelectric fiber sensor configurations on the identification accuracy of Lamb wave propagation direction in this paper. According to the piezoelectric equation and attenuation characteristic of Lamb wave propagation, the sensing response equation of piezoelectric fiber to A_0 mode Lamb wave under narrowband excitation is theoretically derived. The error function of the response amplitudes of three piezoelectric fibers is defined and used to estimate the Lamb wave propagation direction. The ANSYS software was adopted to conduct the piezoelectric coupling simulation analysis and obtain the response signals of different piezoelectric fiber sensors, and corresponding experiment tests were carried out. The matching pursuit algorithm was applied to perform the signal decomposition and extract the response amplitudes. The Lamb wave propagation directions were identified according to the error function and the response signals. The simulation and experiment results are compared, the causes of simulation and experiment errors are discussed. The analysis results show that the identification errors of the Lamb wave direction detection for four different configurations of the piezoelectric fiber depend on the length of the piezoelectric fiber, configuration angle, excitation frequency, the adhesion condition

收稿日期:2019-10-05 Received Date:2019-10-05

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51805161)、湖南省重点研发计划(2018GK2044)、湖南省教育厅科学研究项目优秀青年项目(18B567)资助

of the piezoelectric fiber, and etc. In terms of overall error, the 135°-rectangular configuration is the best, the error is less than 4%; the 60°-delta configuration is slightly better than the 45°-rectangular configuration, its error is less than 8%; due to the large size, the 120°-delta configuration presents the largest error. This study could provide a theoretical basis for piezoelectric fiber sensor structure design.

Keywords: piezoelectric fiber sensor; Lamb wave propagation direction; configuration; piezoelectric coupling; error source

0 引 言

Lamb 波具有传播距离远、对缺陷敏感等优势,广泛应用于大面积板类结构健康监测^[1-4]。目前基于 Lamb 波的结构健康监测方法大多基于飞行时间,然而工程实际结构复杂,波速往往难以准确获知,给基于 Lamb 波到达时间的结构健康监测方法带来挑战。根据波传播理论,各向同性材料板中 Lamb 波传播方向与主应变方向相同。理论上,采用 2 个具有良好主应变方向检测能力的方向传感器,获得的 Lamb 波传播方向的相交点即为损伤位置^[5-8]。因此,基于 Lamb 波方向特征的损伤识别方法更为简单和准确,可以适用于结构复杂、波速未知情况下结构的损伤检测。

目前 Lamb 波方向传感器多采用类似“应变花”结构,其基本传感元件包括光纤光栅^[9]和各类压电元件两大类。压电元件包括新型宏压电纤维复合材料(macro-fiber composites, MFC)^[10-11]、含金属芯的压电纤维(metal-core piezoelectric fibers, MPF)^[12-13],以及传统的矩形压电片^[14]和压电纤维^[7]。MFC 价格昂贵且其横向尺寸较大,将引起较大主应变方向测量误差;MPF 制备很困难,难以获得成品;传统的矩形压电片横向尺寸也很大,主应变方向计算复杂。压电纤维价格便宜、尺寸细长,具有良好的单方向传感特性。本课题组前期通过仿真和实验验证了压电纤维对 Lamb 波良好的方向响应特性,并将其布置成 45°直角形应变花结构用于 Lamb 波方向检测^[15]。Yin 等^[16]和赵竹君等^[17]提出采用 3 个圆形压电片布置形成 PZT 簇,通过提取散射信号的到达时间的差值来计算 Lamb 波传播方向。上述研究中“应变花”结构主要采用 120°和 60°三角形以及 45°直角形布置,着重研究其检测 Lamb 波方向并进行冲击定位的有效性和准确性,尚未深入研究不同布置结构对 Lamb 波方向识别结果的影响。

本文针对“应变花”常见的 45°直角形、135°直角形、60°三角形及 120°三角形等 4 种结构形式,通过理论、仿真和实验研究不同压电纤维布置结构形式对 Lamb 波传播方向识别精度的影响。根据压电方程和 Lamb 波传播衰减特性,理论推导窄带激励下压电纤维对 Lamb 波的传感响应方程,采用 3 根压电纤维平均幅值之和进行归一化,通过定义 3 根纤维的误差函数来进行主应变方向估计。开展压电耦合仿真分析和实验测试获得不同压电

纤维布置结构下的 Lamb 波响应信号,通过匹配追踪算法进行信号分解并提取其平均幅值。本文计算了仿真和实验信号估计的主应变方向角度,对比并讨论了 4 种压电纤维布置结构对方向识别精度的影响,从而为压电纤维传感器设计提供了一定的理论依据。

1 Lamb 波传播方向的识别方法

1.1 压电纤维对 Lamb 波传感响应

由于 A_0 模式 Lamb 波的波长短,对结构细微损伤敏感性高,常应用于板结构损伤检测。本文主要采用 A_0 模式 Lamb 波进行研究。单根压电纤维理论建模采用局部圆柱坐标系,如图 1(a)所示,极化方向为压电纤维长度 X 方向。假设压电纤维良好地粘结在厚度为 $2h$ 的板的上表面,如图 1(b)所示,全局坐标系的原点在位于板结构的中平面上,定义 Lamb 波传播方向与压电纤维长度方向的夹角为 θ 。根据压电方程,压电纤维两电极的平均电荷计算式为^[18]:

$$Q = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} E d_{33} \varepsilon_{xx} \pi r_s^2 dX / l = E d_{33} \pi r_s^2 / l \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \varepsilon_{xx} dX \quad (1)$$

式中: E 为压电材料的弹性模量; d_{33} 为压电常数; ε_{xx} 为沿纤维长度方向的应变分量; r_s 和 l 为压电纤维半径和长度。

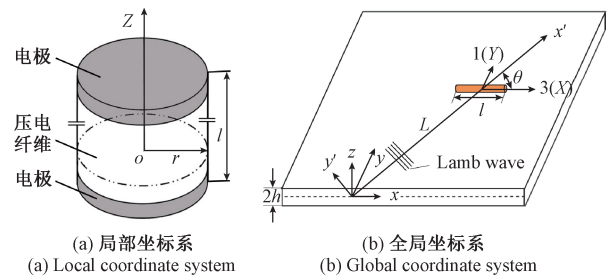


图 1 坐标系

Fig.1 The coordinate systems

将压电纤维视为电容器,其电容量为:

$$C_p = e_{33} \pi r^2 / l \quad (2)$$

式中: e_{33} 为压电纤维的介电常数。

根据式(1)和(2),压电纤维响应电压计算式为:

$$V = Q / C_p = E d_{33} / e_{33} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \varepsilon_{xx} dX \quad (3)$$

考虑到 Lamb 波传播过程的材料内阻衰减和几何衰

减, A_0 模式 Lamb 波在板内引起的位移可写为^[10]:

$$u'_x = Bk \sqrt{\frac{r_a}{x'}} \left(\frac{\sinh az}{\cosh ah} - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \cdot \frac{\sinh bz}{\cosh bh} \right) \times e^{-k_d(x'-r_a) + i(kx' - \omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (4)$$

式中: B 为任意常数; r_a 为激励压电片半径; k_d 材料内阻衰减系数, 参数 a 和 b 表达式如式(5) 所示。

$$a = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_L^2}}, \quad b = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_T^2}}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

式中: k 和 λ 分别为波数和波长; ω 为角频率; c_L 和 c_T 分别为纵波和横波波速。

Lamb 波 A_0 模态在板表面 h 处的应变 $\varepsilon_{y'y'} = 0$, $\varepsilon_{x'x'}$ 可以写为:

$$\varepsilon_{x'x'} \Big|_{z=h} = \frac{\partial u'_x}{\partial x'} \Big|_{z=h} =$$

$$ik^2 B \sqrt{\frac{r_a}{x'}} \left(\tanh ah - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \tanh bh \right) \times e^{-k_d(x'-r_a) + i(kx' - \omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (6)$$

将平面应变 $\varepsilon_{x'x'}$ 分解至压电纤维局部坐标, 其表达式为:

$$\varepsilon_{33} = \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{x'x'} \cos^2 \theta \quad (7)$$

将式(6)代入式(3), 考虑到坐标变换式 $x' = x \cos \theta + y \sin \theta$ 和 $e^{ia} - e^{-ia} = 2i \sin a$, 计算得到压电纤维电压响应为^[10, 19]:

$$V = i \bar{V} e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2} - kL)} \quad (8)$$

其中, 响应幅值 $\bar{V}$ 为:

$$\bar{V} = N k E d_{33} \cos \theta \sin \left(\frac{lk \cos \theta}{2} \right) \Big|_{e_{33}} \quad (9)$$

其中, 系数 N 的表达式为:

$$N = 2B \left(\tanh ah - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \tanh bh \right) \quad (10)$$

结合式(6)和 $k = 2\pi/\lambda$, 式(9)可写为:

$$\bar{V} = \frac{E d_{33} \lambda}{\pi e_{33}} \sqrt{\frac{r_p}{L}} e^{-k_d L} S(\theta) \times \bar{\varepsilon}_{x'x'} \quad (11)$$

$$S(\theta) = \cos \theta \sin \left(\frac{\pi l \cos \theta}{\lambda} \right) \quad (12)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_{x'x'}$ 是板表面应变 $\varepsilon_{x'x'}$ 的幅值。

式(11) 是 A_0 模态谐波激励的响应电压幅值, 实际应用中通常采用汉宁窗调制的窄带激励信号。

$$A(t) = A_a [H(t) - H(t - 2\pi n/\omega_c)] \times \sin(\omega_c t) (1 - \cos(\omega_c t/n)) \quad (13)$$

式中: A_a 为激励幅值; n 为激励的周期数; ω_c 为窄带激励中心频率。

激励信号的频域表达式为^[20]:

$$A(\omega) = \frac{A_a n \pi}{\omega_c} \left| \operatorname{sinc} \left(\frac{n \pi}{\omega_c} (\omega + \omega_c) \right) - \right.$$

$$\left. \operatorname{sinc} \left(\frac{n \pi}{\omega_c} (\omega - \omega_c) \right) + 0.5 \operatorname{sinc} \left(\frac{n \pi}{\omega_c} \left(\omega - \frac{n+1}{n} \omega_c \right) \right) - 0.5 \operatorname{sinc} \left(\frac{n \pi}{\omega_c} \left(\omega + \frac{n+1}{n} \omega_c \right) \right) + 0.5 \operatorname{sinc} \left(\frac{n \pi}{\omega_c} \left(\omega - \frac{n-1}{n} \omega_c \right) \right) - 0.5 \operatorname{sinc} \left(\frac{n \pi}{\omega_c} \left(\omega + \frac{n-1}{n} \omega_c \right) \right) \right| \quad (14)$$

窄带激励下压电纤维的输出电压的时域表达式为激励信号与简谐激励响应信号频域相乘的逆傅里叶变换, 表达式可写为^[19-20]:

$$U(t) = \int_{\omega_c - 2\omega/n}^{\omega_c + 2\omega/n} \frac{E d_{33} \lambda}{\pi e_{33}} \sqrt{\frac{r_p}{L}} e^{-k_d L} S(\theta) \bar{\varepsilon}_{x'x'} A(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (15)$$

式(15)表明压电纤维电压响应依赖于 Lamb 波方向角度 θ , 其良好的单方向敏感性使得可以采用“应变花”结构来检测 Lamb 波传播方向。MFC 和矩形压电片由于横向尺寸较大, 其方向敏感性往往需要分解到长度和宽度两个方向, 与压电纤维的对比详见文献[15]。由于 Lamb 波具有频散特性, 本文通过 Hilbert 变换提取压电纤维电压输出的信号包络, 利用包络峰值来表征压电纤维响应电压^[21]。

$$\bar{U} = |U(t) + iH[U(t)]|_{\text{peak}} \quad (16)$$

式中: $H[U(t)]$ 为 $U(t)$ 的 Hilbert 变换。

1.2 压电纤维传感器估计 Lamb 波方向的计算方法

“应变花”结构形式主要有 45° 直角形、135° 直角形、60° 三角形及 120° 三角形 4 种形式, 相应地, 本文研究的 4 种压电纤维布置结构如图 2 所示。

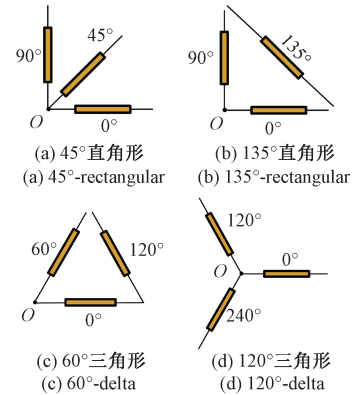


图2 压电纤维 4 种不同布局结构

Fig.2 Four different configurations of the piezoelectric fiber

以 45° 直角形布置结构为例, 如图 3 所示, 由式(15) 和(16)可知, 3 根压电纤维电压输出可以写为:

$$\bar{U}_{i \max} = \bar{U}_{\max} \cos(\theta - \alpha_i) \sin \left(\frac{\pi l \cos(\theta - \alpha_i)}{\lambda} \right) \quad (17)$$

式中: $\bar{U}_{\max}$ 是压电纤维与 Lamb 波传播方向平行时的电压响应幅值; α_i 为 3 根压电纤维相对于第 1 根压电纤维的布置角度,规定逆时针为正。

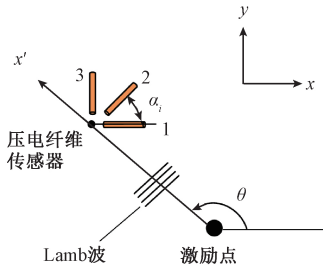


图 3 Lamb 波传播的主应变方向

Fig.3 The principal strain direction of Lamb wave propagation

采用 3 根压电纤维响应幅值的和值进行每根压电纤维响应的归一化:

$$T_i = \frac{3\bar{U}_{imax}}{\sum_{i=1}^3 \bar{U}_{imax}} \tag{18}$$

进一步地,式(18)可写为:

$$T_i = \frac{3\cos(\theta - \alpha_i)\sin(\pi l\cos(\theta - \alpha_i)/\lambda)}{\sum_{i=1}^3 \cos(\theta - \alpha_i)\sin(\pi l\cos(\theta - \alpha_i)/\lambda)} \tag{19}$$

Lamb 波传播方向通过理论与实验压电纤维响应归一化幅值误差来进行估计,定义误差函数为^[15]:

$$e(\hat{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (T_i - T_i(\hat{\theta}_i))^2} \tag{20}$$

式中: $\hat{\theta}$ 为方向角度 θ 的估计值。

由于不可避免的测试误差,估计角度与实际角度的误差值很难等于 0,因此取误差函数式(20)最小值对应的角度为 θ 估计值。文献[13]中,将 MPF 方向性用 $S(\theta) \approx \cos^2\theta$ 近似表示,应用于 60°三角形结构时,将 3 根压电纤维电压响应之和假设为常数,并应用于归一化 3 根 MPF 的电压响应。本文没有将压电纤维方向性做近似处理,可以应用于压电纤维不同布置结构方案。文献[10]中MFC 采用 120°三角形结构,由于其横向尺寸较大,主应变计算公式需要考虑横向灵敏度影响,计算公式复杂。相应的方法对比详见文献[15]。

2 实验研究与仿真分析

2.1 实验测试系统

实验研究采用尺寸为 1 m×1 m×1.5 mm 的 6061 铝板作为基板。激励波为汉宁窗调制的 5 个周期正弦窄带信号。激励压电片来自 Piezo 公司,直径为 12.7 mm。压电纤维来自 Smart Material 公司,高压极化后压电常数

$d_{33} = 370 \text{ pC/N}$ 。LabView 编程发生窄带激励波信号,经功率放大器 EPA-10 进行电压放大后驱动压电片,压电纤维信号由 NI USB-6366 数据采集卡进行采集,采样频率为 2 MHz,实验测试系统组成如图 4 所示。4 种不同压电纤维结构的传感器与激励压电片成 32°方向上,其基准点到压电片中心的距离为 300 mm。

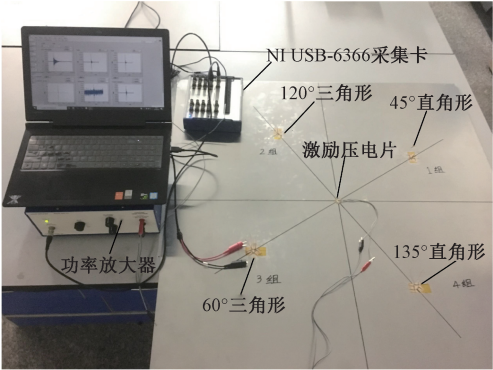


图 4 实验测试系统

Fig.4 Experiment test system

2.2 压电耦合分析建模

采用有限元软件 ANSYS 开展了压电耦合分析。采用 Shell 181 和 Solid 5 分别建立铝板和压电纤维的有限元模型。铝板密度 $\rho_A = 2\,730 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\nu = 0.33$,弹性模量 $E = 68.9 \text{ GPa}$ 。压电片和压电纤维材料分别为 PZT8 和 PZT5,主要性能参数如表 1 所示。为了保证 Lamb 波传播特性分析结果的准确性,单元网格尺寸小于激励频率最大时对应波长的 1/10。因此,有限元模型网格尺寸设为 1 mm,模型单元总数为 103.3 万个,其中壳单元 101.6 万个,体单元 1.4 万个。

表 1 压电片和压电纤维性能参数

Table 1 Performance parameters of piezoelectric disc and piezoelectric fiber

参数名称	类型	
	压电片	压电纤维
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 600	7 850
相对介电常数 $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	900	1 850
压电应变常数/($\text{C}\cdot\text{N}^{-1}$)	225×10^{-12}	440×10^{-12}
压电应变常数/($\text{C}\cdot\text{N}^{-1}$)	97×10^{-12}	185×10^{-12}
弹性柔顺常数/($\text{m}\cdot\text{N}^{-1}$)	11.20×10^{-12}	18.50×10^{-12}
弹性柔顺常数/($\text{m}\cdot\text{N}^{-1}$)	13.36×10^{-12}	20.70×10^{-12}
平面机械耦合常数 k_p	0.6	0.62
纵向机械耦合系数 k_{33}	0.7	0.72

仿真时,铝板为自由状,压电片和压电纤维通过节点

耦合方式来模拟其与铝板的黏接。压电片上下表面和压电纤维两端面为两电极,通过节点电压自由度耦合形成等势面,如图5所示。将压电片与铝板接触的表面设为零势面,上表面施加激励电压信号。ANSYS 瞬态动力学分析积分步长必须小于激励频率最大时对应周期的1/20,因此时间步长设为0.8 ms。图6所示为20 kHz 激励频率下45°直角形布置结构中0°纤维的响应信号。从图6中可以看出,压电耦合仿真分析得到的响应信号与实验信号波包位置基本一致,但幅值存在一定差异,主要是由于实验信号存在噪声干扰,后续需要通过信号分析来获取其实际的响应波形。

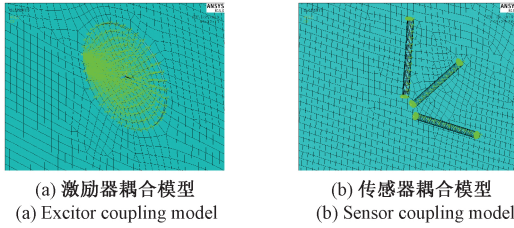


图5 仿真耦合模型
Fig.5 Simulation coupling models

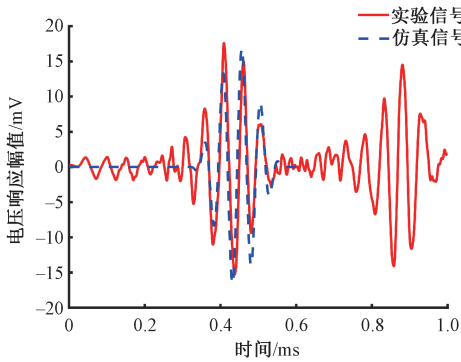


图6 仿真和实验信号对比

Fig.6 Comparisons between simulation and experiment signals

2.3 基于匹配追踪的信号分析方法

目前 Lamb 波信号分析方法主要有傅里叶变换、小波变换和匹配追踪算法等方法^[22-24]。匹配追踪法是近年来研究较多的方法,基本原理是利于冗余字典中原子函数的线性组合重构信号。匹配追踪法算法具有时频分辨率高、对噪声不敏感、无干扰项等优点。具体分析流程如下。

1) 构建词字典 D 。

$$D = \{g_{\Omega_i}, i = 1, 2, 3, \dots, R\} \quad (21)$$

式中: g_{Ω_i} 为第 i 组参数 Ω_i 决定的原子函数。

2) 寻找最佳匹配原子。假定采集信号为 d , 令 $d = R^k d$, k 从 0 开始, 信号 d 与字典 D 中原子函数 g_{Ω_i} 依次作

内积运算,最佳匹配原子的条件是:

$$g_{\Omega}^V = \arg \max_{g_{\Omega} \in D} |\langle R^k d, g_{\Omega} \rangle| \quad (22)$$

3) 计算最佳匹配原子对应的幅值 a_k 。

$$a_k = \frac{\langle R^k d, g_{\Omega}^V \rangle}{\langle g_{\Omega}^V, g_{\Omega}^V \rangle} \quad (23)$$

4) 计算信号残差。

$$R^{k+1} d = R^k d - a_k g_{\Omega}^V \quad (24)$$

5) 迭代重复步骤 2) 和 3), 当 $R^{k+1} d$ 足够小时迭代停止。至此,原信号可以写为:

$$d = \sum_{i=0}^k a_i g_{\Omega_i}^V + R^{k+1} d \quad (25)$$

为了提高匹配追踪算法的效率和精度,字典库 D 原子的选择异常重要。考虑到本文实验研究采用的激励信号是汉宁窗调制的五周正弦信号,根据式(4)和(15),压电纤维电压输出响应可以视为激励信号发生时移、相移且幅值衰减产生的信号^[25]。因此,本文采用的原子函数为^[22]:

$$g_{\Omega}(t) = [H(t - \tau) - H(t - \tau - 2\pi n / \omega_c)] \times \sin(\omega_c(t - \tau) + \varphi)(1 - \cos(\omega_c(t - \tau) / n)) \quad (26)$$

式中: τ 为延迟时间; φ 为相位。

本文利用遗传优化算法进行最佳匹配原子选择,开发相应的 MATLAB 程序进行实验信号分析。图7所示为60 kHz 激励频率下0°压电纤维检测原始信号及其前6次匹配追踪算法分解信号。

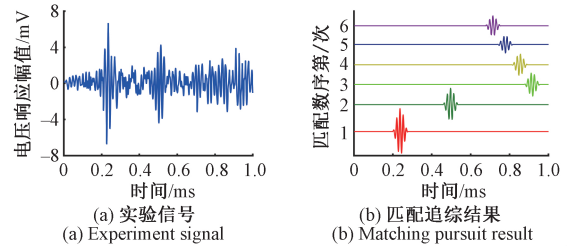


图7 0°纤维的响应实验信号和匹配追踪结果

Fig.7 0° fiber response experiment signal and matching pursuit result

3 Lamb 波方向识别结果与误差分析

本文开展了不同激励频率下压电纤维传感器 Lamb 波传播方向识别的实验和仿真研究,激励频率分别为20、40 和 60 kHz。实验和仿真信号得到4 种不同压电纤维结构的识别结果如表2 所示。

1) 从仿真分析结果可知,不同激励频率下4 种压电纤维布置结果的误差大小不尽相同。20 kHz 激励频率下45°和135°直角形结构误差最小,40 kHz 时60°三角形结构误差最小,60 kHz 时135°直角形结构误差最小,后2

种激励频率下 120°三角形的误差最大。总体而言,随着激励频率增大,4 种结构的误差均增大。

表 2 Lamb 波传播方向识别结果及误差
Table 2 Lamb wave propagation direction recognition result and error

频率 /kHz	结果	45°直角形		135°直角形		60°三角形		120°三角形	
		结果 /(°)	误差 /%	结果 /(°)	误差 /%	结果 /(°)	误差 /%	结果 /(°)	误差 /%
20	仿真	32.3	0.8	32.0	-0.2	30.2	-5.6	33.3	3.9
40		33.3	3.9	33.1	3.3	32.6	1.8	36.4	13.8
60		30.3	-5.5	32.3	0.8	34.8	7.8	36.8	15.0
20	实验	37.8	18.1	32.4	1.3	33.7	5.2	42.4	32.5
40		36.2	13.1	31.4	-1.9	33.1	3.3	42.9	33.9
60		34.0	6.3	30.0	-6.3	34.6	8.1	41.9	30.8

2) 从仿真分析结果误差大小来看,不同激励频率下,135°直角形结构的识别结果误差较小,均低于 4%;120°三角形结构的识别误差最大,达到 15%;45°直角形结构的识别误差略优于 60°三角形结构,两者误差均小于 8%。

3) 从实验分析结果可知,135°直角形结构的识别误差最小,60°三角形结构与之相当,均小于 8%;45°直角形结构的识别误差较大,均大于 10%;120°三角形结构的识别误差最大,达到 30%。实验结果相比仿真结果的误差翻倍,且 45°直角形结构的误差变大,原因在于实验测试中压电纤维采用手工黏贴,其电压响应受到黏接质量影响较大,再加上外界噪声干扰使得实验测试信号存在较大误差。

4) 仿真分析结果误差产生的原因在于,理论计算公式(17)中忽略了压电纤维的长度,以第 1 根压电纤维中点为参考点,第 2 和第 3 根压电纤维对应的 L 和 θ 与参考点相同,如图 8 所示。实际情况中,压电纤维本身长度为 10 mm,不同布置结构中第 2 和第 3 根压电纤维存在不同程度的误差 ΔL_i 和 $\Delta \theta_i$,这是仿真识别结果误差产生的主要原因。

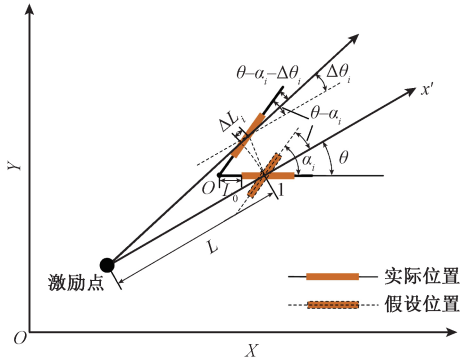


图 8 理论和实际布局 L 和 θ

Fig.8 L and θ for theoretical and practical layout

4 种压电纤维布置结构中,以第 1 根压电纤维布置方向为基准,第 2 和第 3 根压电纤维距离 L 和角度 θ 存在的误差 ΔL_i 和 $\Delta \theta_i$ 随着 Lamb 波传播方向不同而变化。不同 Lamb 波方向下,这 2 根压电纤维 ΔL_i 和 $\Delta \theta_i$ 和值的均值如图 9 和 10 所示。

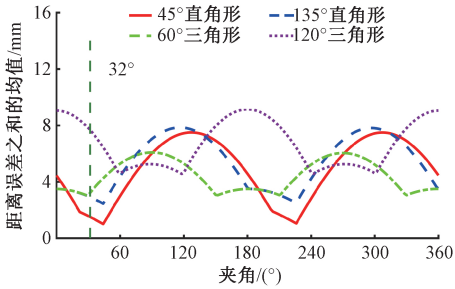


图 9 距离误差之和的均值

Fig.9 The mean value of the sum of the distance errors

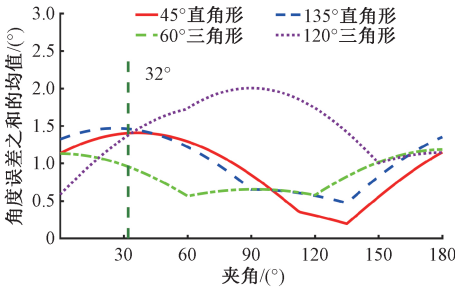


图 10 角度误差之和的均值

Fig.10 The mean value of the sum of the angular errors

1) 当 Lamb 波方向为 32°时,距离误差大小排列顺序为 45°直角形<135°直角形=60°三角形<120°三角形;角度误差 60°三角形误差最小,其余 3 种布置结构相当。这些误差与激励波长最终决定了 4 种压电纤维布置结果的识别精度。

2) 从不同 Lamb 波方向来看,由于 120°三角形布置结构整体尺寸较大,距离与角度误差 ΔL_i 和 $\Delta \theta_i$ 波动范围最大,因此造成的 Lamb 波方向识别误差最大。这与表 2 中实验与仿真结果误差情况一致。

3) 结合表 2 仿真和实验分析结果误差,可以得出 135°直角形结构方案最优,仿真与实验误差大多小于 4%;60°三角形略优于 45°直角形结构,误差大多小于 8%;120°三角形结构的识别误差最大。

4 结 论

本文基于压电纤维良好方向响应特性,将其制作成 4 种不同布置形式的“应变花”结构,通过仿真和实验研究了不同压电纤维布置结构对 Lamb 方向识别结果误差

的影响,分析了 4 种不同布置结构仿真和实验结果误差的产生原因;考虑压电纤维自身长度影响,给出了不同布置结构中压电纤维距离 L 和角度 θ 的误差曲线。分析结果表明:4 种压电纤维布置结构的 Lamb 波方向识别误差取决于压电纤维长度与布置角度、激励波波长、实验压电纤维的黏接层等情况;从总体误差大小来看,135°直角形结构方案最优,误差小于 4%;60°三角形略优于 45°直角形结构,误差小于 8%;120°三角形结构的识别误差最大。因此,实际应用时可优化选择 135°直角形布置结构形式,后续将进一步应用于结构损伤检测。

参考文献

- [1] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (8): 1713-1735.
HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1713-1735.
- [2] 陈雪峰,杨志勃,田绍华,等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望[J]. 振动. 测试与诊断, 2018, 38 (1): 1-10,202.
CHEN X F, YANG ZH B, TIAN SH H, et al. A review of the damage detection and health monitoring for composite structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38 (1): 1-10,202.
- [3] KUDELA P, RADZIENSKI M, OSTACHOWICZ W, et al. Structural health monitoring system based on a concept of Lamb wave focusing by the piezoelectric array[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108(8): 21-32.
- [4] 焦敬品,李勇强,杜礼,等. 板结构裂纹兰姆波阵列复合成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (3): 593-601.
JIAO J P, LI Y Q, DU L, et al. Study on the compound imaging method for crack detection in plate structure using array of Lamb wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (3): 593-601.
- [5] STEPINSKI T, MAŁA K M, MARTOWICZ A. Interdigital lamb wave transducers for applications in structural health monitoring[J]. NDT & E International, 2017, 86(3): 199-210.
- [6] KUNDU T, NAKATANI H, TAKEDA N. Acoustic source localization in anisotropic plates[J]. Ultrasonics, 2012, 52 (6): 740-746.
- [7] LIN X J, CHEN G L, LI J N, et al. Investigation of acoustic emission source localization performance on the plate structure using piezoelectric fiber composites [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 282 (15): 9-16.
- [8] GIURGIUTIU V. SHM of aerospace composites-challenges and opportunities [C]. CAMX Conference Proceedings, 2015:1-17.
- [9] BETZ D C, THURSBY G, CULSHAW B, et al. Lamb wave detection and source location using fiber Bragg gratin rosettes [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5050(7): 117-128.
- [10] MATT H M, DI SCALEA F L. Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16 (4): 1489.
- [11] 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.
- [12] 刘建,裘进浩,常伟杰,等. 基于含金属芯压电纤维与 Lamb 波的一维结构损伤定位研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30 (4): 16-20.
LIU J, QIU J H, CHANG W J, et al. Damage localization based on metal-core piezoelectric ceramic fiber and Lamb wave [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (4): 16-20.
- [13] ZHANG CH, QIU J H, JI H L, et al. An imaging method for impact localization using metal-core piezoelectric fiber rosettes [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26 (16): 2205-2215.
- [14] 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.
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.
- [15] WANG S L, WU W R, SHEN Y P, et al. Lamb wave directional sensing with piezoelectric fiber rosette in structure health monitoring [J]. Shock and Vibration, 2019, doi:10.1155/2019/6189290.
- [16] YIN SH X, CUI ZH W, KUNDU T. Acoustic source localization in anisotropic plates with “Z” shaped sensor

- clusters[J]. *Ultrasonics*, 2018, 84(10): 34-37.
- [17] 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.
- [18] SIROHI J, CHOPRA I. Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 11(4): 246-257.
- [19] LANZA DI SCALEA F, MATT H, BARTOLI I. The response of rectangular piezoelectric sensors to rayleigh and Lamb ultrasonic waves [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121(1): 175-187.
- [20] RAGHAVAN A, CESNIK C E S. Modeling of piezoelectric-based Lamb wave generation and sensing for structural health monitoring [J]. *Smart Structures and Materials*, 2004, 5391(7): 419-430.
- [21] 刘国强, 孙侠生, 肖迎春, 等. 基于 Lamb 波和 Hilbert 变换的复合材料 T 型加筋损伤监测[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 818-823.
- LIU G Q, SUN X SH, XIAO Y CH, et al. Damage monitoring of composite T-joint using Lamb wave and Hilbert transform [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 818-823.
- [22] XU C B, YANG ZH B, TIAN SH H, et al. Lamb wave inspection for composite laminates using a combined method of sparse reconstruction and delay-and-sum [J]. *Composite Structures*, 2019, 223(1): 110973.
- [23] 冯勇明, 周丽, 李真. 基于匹配追踪的蜂窝夹层复合材料损伤检测[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(4): 836-843.
- FENG Y M, ZHOU L, LI ZH. Research on honeycomb sandwich composite structure damage detection based on matching pursuit method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 836-843.
- [24] 沈跃, 丁灵卫, 吴翊轩, 等. 回溯自适应匹配追踪电能质量信号重构方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(5): 731-738.
- SHEN Y, DING L W, WU H X, et al. Power quality signal reconstruction of backtracking-based self-adaptivematching pursuit method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(5): 731-738.
- [25] 蔡建, 石立华, 卿新林, 等. 基于非频散信号构建的 Lamb 波高分辨率损伤成像方法[J]. *航空学报*, 2013, 34(8): 1815-1823.
- CAI J, SHI L H, QING X L, et al. Lamb wave high-resolution damage imaging method based on non-dispersive signal construction [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(8): 1815-1823.

作者简介



沈意平, 分别在 2003 年和 2006 年于湖南科技大学获得学士学位和硕士学位, 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 received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hunan University of Science and Technology in 2003 and 2006, received her Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2014, respectively. Now, she is a professor and Ph. D. supervisor in Hunan University of Science and Technology. Her main research interests include new piezoelectric sensing technology and structure health monitoring.