

基于压电纤维传感器的 Lamb 波传播方向识别^{*}

王送来¹, 吴万荣¹, 沈意平², 李 卉², 李鸿光²

(1. 中南大学机电工程学院 长沙, 410083)

(2. 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)

摘要 利用压电纤维对 Lamb 波传感的良好方向性, 将 3 根压电纤维按 0° , 45° 和 90° 布置并固化在聚合物基体中, 制成压电纤维传感器用于检测 Lamb 波传播方向。理论推导了窄带激励下压电纤维对 Lamb 波的方向传感响应特性, 通过压电耦合仿真分析和实验测试研究了不同频率下压电纤维的方向传感特性, 提出了一种基于误差函数的主应变方向估计方法, 分析对比了直角三角形 (0° , 45° , 90°)、Y 形 (0° , 120° , 240°) 和等边三角形 (0° , 60° , 120°) 3 种压电纤维布置方案下主应变方向识别结果。研究结果表明, 压电纤维传感器具有良好的 Lamb 波传播方向检测性能, 可为无需 Lamb 波波速的缺陷识别方法提供传感技术支持。

关键词 压电纤维传感器; Lamb 波; 主应变方向; 布置方案; 压电耦合

中图分类号 TH878

引 言

Lamb 波具有传播距离远和对缺陷的高敏感性等优点, 广泛应用于工程板类结构的缺陷检测^[1-4]。目前, Lamb 波缺陷识别方法大都基于到达时间, 由于 Lamb 波复杂的频散特性, 当应用在工程实际复杂几何形状板类结构时, 波速将发生变化, 给基于 Lamb 波到达时间的缺陷识别方法带来挑战。根据波传播理论, 各向同性材料中 Lamb 波传播方向与主应变方向一致, 各向异性材料中两者方向虽然不一致, 但存在特定的映射关系^[5-6]。因此, 采用具有良好方向性的应力波传感器能够极大地简化缺陷识别方法, 克服 Lamb 波频散特性引起波速变化带来的缺陷定位误差^[2, 7-9]。

Lin 等^[9]提出一种单方向排列的压电纤维传感器, 将其用作声发射传感器进行传感特性研究。借鉴应变花原理, 文献^[10]采用 3 片宏压电复合材料 (macro fiber composite, 简称 MFC) 组成 Y 形 120° 分布的花形组合结构, 利用 d_{31} 和 d_{32} 压电效应进行主应变方向测量, 进而采用两组花形组合结构进行铝板和复合材料板的冲击载荷定位。由于 MFC 尺寸大, 当其大于波长时会产生较大误差, 同时受横向

效应影响, 使其单方向敏感性较差。文献^[6, 11]利用含金属芯的压电纤维 (metal-cores piezoelectric ceramic fibers, 简称 MPF) 的径向 d_{31} 压电效应, 制成等边三角形分布的应变传感器。MPF 径向尺寸小, 可以克服横向效应, 但其制备复杂, 目前尚未得到广泛应用。文献^[12-13]研究了矩形压电片的方向性传感特性。Kijanka 等^[14]应用 MFC 花形组合结构的方向性进行损伤缺陷定位研究。

笔者将 3 根压电纤维按 0° , 45° 和 90° 直角三角形布置并固化在聚合物基体中, 制成了具有一定柔韧性的压电纤维传感器。理论推导窄带激励下压电纤维对 Lamb 波的传感响应方向, 通过压电耦合仿真分析和实验, 研究了不同频率下压电纤维的方向传感特性, 基于误差函数的主应变方向估计方法, 并分析对比了不同压电纤维布置方案对主应变方向识别结果的准确性。

1 压电纤维对 Lamb 波传感的响应特性

图 1 所示的坐标系统包括单根压电纤维理论建模采用的局部圆柱坐标系和全局坐标。如图 1(a) 所示, 定义 Z 为压电纤维长度方向的极化方向。假定压电纤维与板结构表面结合良好, 定义其长度方

^{*} 湖南省重点研发计划资助项目 (2018GK2044); 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ4084)
收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2019-06-10

向与 Lamb 波传播方向所成角度为 θ , 如图 1(b) 所示。由于压电纤维径向尺寸小, 故响应电压仅需要考虑其长度方向的应变分量。根据压电方程, 压电纤维两电极响应电压计算式^[15-16]可写为

$$V = \frac{Ed_{33}}{e_{33}} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \epsilon_{ZZ} dZ \quad (1)$$

其中: E 为压电纤维材料的弹性模量; d_{33} 为压电常数; ϵ_{ZZ} 为沿纤维长度方向的应变分量; r 和 l 分别为压电纤维半径和长度。

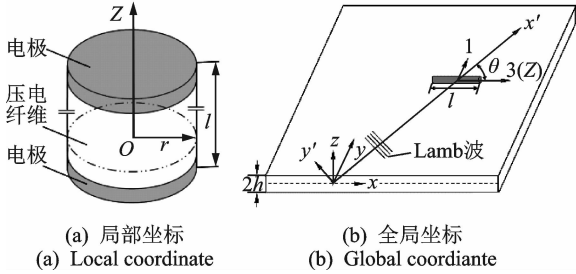


图 1 坐标系

Fig. 1 Local and global coordinate systems

Lamb 波的 A_0 模态由于波长短, 对结构细微损伤敏感性高, 被广泛应用于板结构缺陷检测。在板厚为 $2h$ 的各向同性板中, Lamb 波 A_0 模态沿 x' 传播, 板内点的位移^[10]为

$$u_{x'} = Bk \left(\frac{\sinh az}{\cosh ah} - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \frac{\sinh bz}{\cosh bh} \right) e^{i(kx' - \omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (2)$$

其中: B 为任意常数。

参数 a 和 b 的表达式为

$$a = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_L^2}} \quad (3a)$$

$$b = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_T^2}} \quad (3b)$$

其中: k 为波数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ 为波长; 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 $\epsilon_{y'y'} = 0$, $\epsilon_{x'x'}$ 可以写为

$$\epsilon_{x'x'} \Big|_{z=h} = \frac{\partial u_{x'}}{\partial x'} \Big|_{z=h} = ik^2 B \left(\tanh ah - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \tanh bh \right) e^{i(kx' - \omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (4)$$

根据压电纤维长度方向与波传播方向 x' 的夹角 θ , 平面应变 $\epsilon_{x'x'}$ 被分解到压电纤维局部坐标, 可写为

$$\epsilon_{ZZ} = \epsilon_{x'x'} \cos^2 \theta \quad (5)$$

将式(5)代入式(1), 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^[10, 13]为

$$V = i \bar{V} e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (6)$$

电压幅值为

$$\bar{V} = \frac{NkEd_{33}}{e_{33}} \cos \theta \sin \left(\frac{lk \cos \theta}{2} \right) \quad (7)$$

常数 N 为

$$N = 2B \left(\tanh ah - \frac{2ab}{k^2 + b^2} \tanh bh \right) \quad (8)$$

根据式(6), 考虑 $k = 2\pi/\lambda$, 式(7)可写为

$$\bar{V} = S \bar{\epsilon}_{x'x'} = \frac{Ed_{33}\lambda}{\pi e_{33}} \cos \theta \sin \left(\frac{\pi l \cos \theta}{\lambda} \right) \bar{\epsilon}_{x'x'} \quad (9)$$

$$S = \frac{Ed_{33}\lambda}{\pi e_{33}} \cos \theta \sin \left(\frac{\pi l \cos \theta}{\lambda} \right) \quad (10)$$

其中: $\bar{\epsilon}_{x'x'}$ 为板表面应变 $\epsilon_{x'x'}$ 的幅值。

式(9)为 A_0 模态谐波激励的响应电压幅值。然而, 在实际应用中往往采用汉宁窗调制的窄带激励。对于线性系统, 窄带激励下压电纤维频域电压幅值可由谐波激励响应幅值与激励信号频域电压幅值相乘得到。窄带激励的频域响应幅值^[13]可写为

$$A(\omega) = A_e \left[\frac{\sin n\pi \left(\frac{\omega}{\omega_c} + 1 \right)}{\omega + \omega_c} - \frac{\sin n\pi \left(\frac{\omega}{\omega_c} - 1 \right)}{\omega - \omega_c} \right] \quad (11)$$

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

窄带激励下的压电纤维频域电压幅值 $\bar{U}(\omega)$ 可以写为

$$\begin{aligned} \bar{U}(\omega) &= S(\omega) A(\omega) = \\ &= A_e \left[\frac{\sin n\pi \left(\frac{\omega}{\omega_c} + 1 \right)}{\omega + \omega_c} - \frac{\sin n\pi \left(\frac{\omega}{\omega_c} - 1 \right)}{\omega - \omega_c} \right] \times \\ &= \frac{Ed_{33}\lambda}{\pi e_{33}} \cos \theta \sin \left(\frac{\pi l \cos \theta}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

可见, 压电纤维电压响应与频率 ω_c 、角度 θ 、纤维长度 l 和激励波波数 k 相关。考虑 $\lim_{\omega \rightarrow \omega_c} \sin n\pi (\omega/\omega_c - 1) / (\omega - \omega_c) = n\pi/\omega_c$, 此时压电纤维电压响应幅值为最大值

$$\bar{U}_{\max} = A_e \frac{nEd_{33}\lambda^2}{2\pi e_{33}} \cos \theta \sin \left(\frac{\pi l \cos \theta}{\lambda} \right) \quad (13)$$

由于存在 $\sin(l\pi/\lambda)$, 当压电纤维长度 l 为 A_0 半波长 $\lambda/2$ 的奇数倍时, 压电纤维电压响应最大; 当 l 为 A_0 波长 λ 整数倍时, 压电纤维电压响应为 0。该结论与文献[13, 17]的波长调谐规律一致。

相同激励作用下, 压电纤维电压响应由角度 θ 决定, 其方向响应特性为

$$f(\theta) = \cos\theta \sin\left(\pi \frac{l \cos\theta}{\lambda}\right) \quad (14)$$

当压电纤维与 Lamb 波传播方向平行时,其方向性响应为

$$f(\theta)_{\theta=0} = \sin\left(\frac{\pi l}{\lambda}\right) \quad (15)$$

压电纤维的方向响应方程与 MPF 相同,其单方向敏感性均优于 MFC,这主要是由于 MFC 横向尺寸较大^[6, 10, 13],其方向性包含长度和宽度两部分方向的敏感性。

2 Lamb 波传播方向的识别方法

利用 Smart Material 公司直径为 0.8mm 的压电纤维,截断长为 10mm 的小段进行高压极化,将其按 0°,45°和 90°布置并固化在聚合物基体中,制成如图 2 所示的具有一定柔韧性的压电纤维传感器,该传感器具有尺寸小、制作简单和成本低等优点。

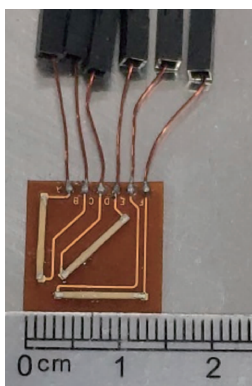


图2 压电纤维传感器

Fig. 2 Piezoelectric fiber sensor

根据应变花计算公式,文献[10,18]根据传感元件测得的应变值进行 Lamb 波传播方向识别。笔者将该方法延伸应用于不同布置角度的压电纤维传感器。

根据式(13)可知,3根压电纤维电压输出幅值的最大值为

$$\bar{U}_{i\max} = \bar{U}_{\max} \cos(\theta + \alpha_i) \sin\left(\frac{\pi l \cos(\theta + \alpha_i)}{\lambda}\right) \quad (16)$$

其中: \bar{U}_{\max} 为压电纤维与 Lamb 波传播方向平行时的最大幅值; α_i ($i=1,2,3$)分别为 0°,45°,90°。

文献[6]将 MPF 方向性用 $f(\theta) \approx \cos^2\theta$ 近似表示,根据式(16)可知,当 $\theta=120^\circ$ 时,3根 MPF 的电压响应和值为常数,并用于归一化 3根 MPF 的电压响应。一般情况下,将 3根压电纤维电压响应和

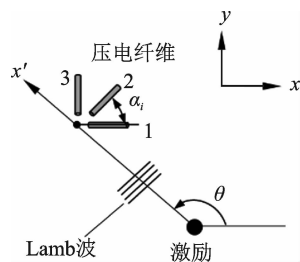


图3 Lamb 波传播的主应变方向

Fig. 3 The principal strain direction of Lamb wave

值用于归一化单根纤维的电压响应幅值

$$T_i = \frac{3\bar{U}_{i\max}}{\sum_{i=1}^3 \bar{U}_{i\max}} = \frac{3\cos(\theta + \alpha_i) \sin\left(\frac{\pi l \cos(\theta + \alpha_i)}{\lambda}\right)}{\sum_{i=1}^3 \cos(\theta + \alpha_i) \sin\left(\frac{\pi l \cos(\theta + \alpha_i)}{\lambda}\right)} \quad (17)$$

Lamb 波传播方向 θ 通过理论与实验压电纤维响应归一化幅值误差进行估计,定义误差函数为

$$e(\hat{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (T_i - T_i(\hat{\theta}))^2} \quad (18)$$

其中: $\hat{\theta}$ 为方向角度 θ 的理论估计值。

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,因此取误差函数最小值对应的角度为 θ 估计值。该方法没有将压电纤维方向性进行近似简化处理,相比文献[6]更有一般性,可应用于花形组合中各元件不同布局角度情况。

3 实验与仿真分析

3.1 压电纤维方向传感特性

实验采用 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.5\text{mm}$ 的铝板作为基板,铝板边界自由。根据式(14)可知,压电纤维电压响应具有 90°对称性,故实验角度范围为 0°~90°。以压电纤维中点为圆心,在半径为 200mm 的 1/4 圆弧上每隔 15°粘贴一块激励压电片,如图 4 所示。

激励压电片来自 Piezo 公司,直径为 12.7mm,压电纤维来自 Smart Material 公司,高压极化后压电常数 d_{33} 为 370pC/N。实验测试系统如图 5 所示,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,压电纤维传感的应力波由 NI PXIe-6361 数据采集卡采集。

压电纤维检测信号如图 6 所示。压电纤维响应电压信号微弱,噪声大。实验测试时采用均值平滑滤波方法来提高信号信噪比,图 6(a)为当激励频率为 80kHz 时,0°压电纤维 100 次平均后采集得到的

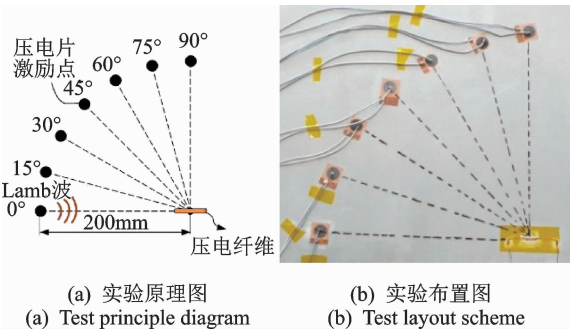


图 4 压电纤维方向传感特性实验

Fig. 4 The directivity test of piezoelectric fiber

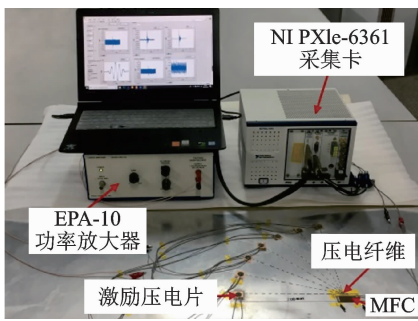


图 5 实验测试系统

Fig. 5 Experimental test setup

信号。如图 6(b)所示,采用连续小波变换(continuous wavelet transform,简称 CWT)进行信号分析,提取中心频率对应直达 A_0 波包的最大系数,将其用于表征压电纤维电压响应的最大幅值。

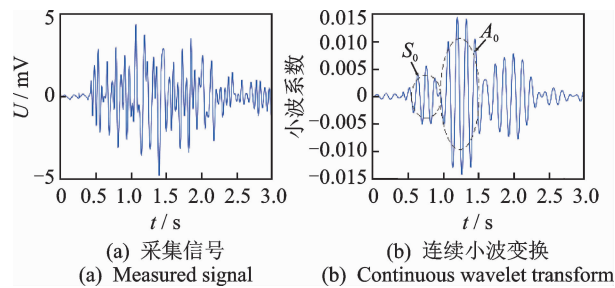
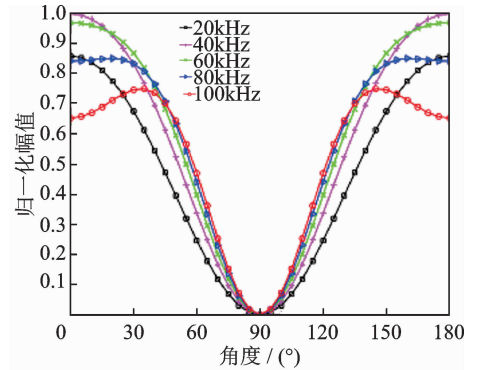


图 6 压电纤维检测信号

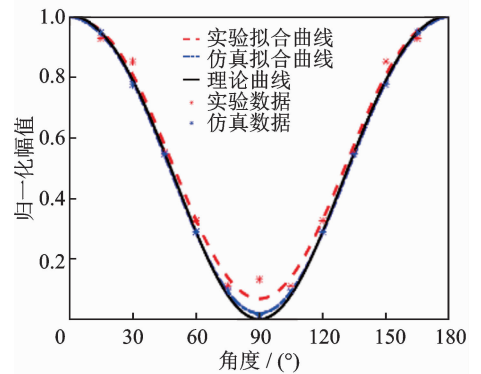
Fig. 6 Measured signal of piezoelectric fiber

根据式(14),压电纤维方向性传感响应曲线如图 7 所示。可以看出,压电纤维具有良好的方向传感特性。当激励中心频率低于 80kHz 时,压电纤维信号幅值与角度 ($0^\circ \sim 90^\circ$) 具有单调递减的关系;当激励中心频率高于 80kHz 时,压电纤维长度与波长相当,波长调谐作用明显。

为了验证实验结果的准确性,在有限元软件 ANSYS 中开展了压电纤维的压电耦合分析。采用



(a) 理论
(a) Theoretical



(b) 仿真与实验
(b) Experiment and simulation

图 7 压电纤维的方向性传感响应曲线

Fig. 7 Directivity curve of piezoelectric fiber

Shell 181 和 Solid 5 建立了实验铝板和压电纤维的压电耦合分析有限元模型。铝板密度为 2730 kg/m^3 ,弹性模量为 $6.89 \times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比为 0.33。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 $1/10$ ^[19], 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 $1/20$ 。ANSYS 模型网格尺寸为 1mm,压电耦合分析模型单元总数为 1.03×10^5 。激励压电片和压电纤维密度分别为 7600 和 7850 kg/m^3 。激励压电片和压电纤维相关压电参数为

$$e^a = \begin{bmatrix} 900.43 & 0 & 0 \\ 0 & 900.43 & 0 \\ 0 & 0 & 600.28 \end{bmatrix} \quad (19a)$$

$$s^a = \begin{bmatrix} 11.20 & -3.53 & -4.71 & 0 & 0 & 0 \\ -3.53 & 11.20 & -4.71 & 0 & 0 & 0 \\ -4.71 & -4.71 & 13.36 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 29.41 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 31.95 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 31.95 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \quad (19b)$$

$$d^a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 329.07 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 329.07 & 0 & 0 \\ -97.37 & -97.37 & 225.71 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \quad (19c)$$

其中： e^a, s^a, d^a 分别为激励压电片的相对介电常数、柔顺系数和压电应变常数矩阵。

$$\epsilon^S = \begin{bmatrix} 1850 & 0 & 0 \\ 0 & 1184 & 0 \\ 0 & 0 & 1184 \end{bmatrix} \quad (20a)$$

$$s^E = \begin{bmatrix} 20.70 & -7.62 & -6.62 & 0 & 0 & 0 \\ -7.62 & 18.50 & -7.62 & 0 & 0 & 0 \\ -6.62 & -7.62 & 18.50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 56.65 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 54.65 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 56.65 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \quad (20b)$$

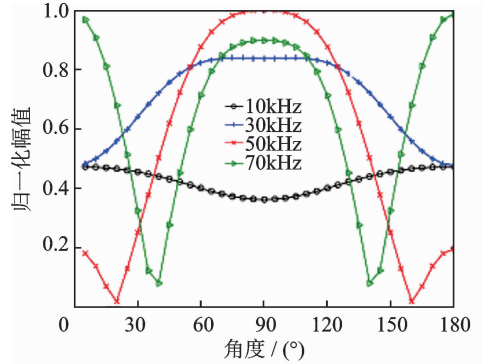
$$d^S = \begin{bmatrix} 440 & -185 & -185 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 560 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 560 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12} \quad (20c)$$

其中： ϵ^S, s^E, d^S 分别为压电纤维的相对介电常数、柔顺系数和压电应变常数矩阵。

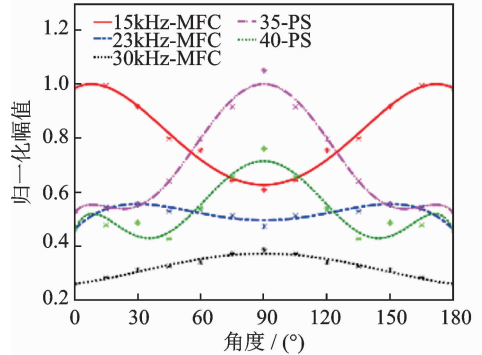
图 7(b) 为 20kHz 激励频率下压电纤维的仿真和实验方向性曲线。可以看出, 实验测试得到的方向性响应曲线与理论曲线基本一致。当角度 θ 为 0° 时, 压电纤维响应电压最大, 随着角度逐渐增加到 90° , 电压响应逐渐减小, 90° 时电压响应接近为 0。这说明压电纤维对 Lamb 波传感具有良好的单方向敏感性, 可以用于检测 Lamb 波传播方向。

根据文献 [10, 13] 中 MFC 和矩形压电片对 Lamb 波的传感响应特性, 笔者开展了相应的理论与实验对比研究。MFC 采用 Smart Material 公司的 M2814-P2, 尺寸为 $28\text{mm} \times 14\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ 。矩形压电片尺寸为 $20\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ 。MFC 和矩形压电片理论和实验方向性曲线如图 8 所示。考虑到波长的调谐作用, 即波长等于 MFC 长度尺寸时, 对应的频率为 23kHz, 选择 15, 23 和 30kHz 3 种激励频率进行 MFC 方向的传感特性研究, 矩形压电片 (piezoelectric sheet, 简称 PS) 选择 35 和 40kHz 2 种激励频率进行方向传感特性研究, 如图 8(b) 所示。从图 8 可以看出, MFC 的方向性较为复杂, 当 $\lambda \leq l$ 时, MFC 电压响应随着角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增大, MFC 电压响应逐渐减小; 当 $\lambda > l$ 时,

MFC 电压响应随着角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增大而增大; 矩形压电片与 MFC 的方向性均包含长度和宽度方向部分, 区别仅在于 MFC 为各向异性材料。通过对比可知, 压电纤维方向传感特性优于 MFC 和矩形压电片。



(a) MFC理论曲线
(a) Theoretical directivity of MFC



(b) MFC和矩形压电片实验曲线
(b) MFC and piezoelectric sheet experimental directivity

图 8 MFC 和矩形压电片理论和实验方向性曲线

Fig. 8 Theoretical and experimental directivity of MFC and piezoelectric sheet

3.2 压电纤维频率响应特性

由式(13)可知, 压电纤维频响特性与角度 θ 和激励波长相关。实验测试不同激励频率下 0° 和 30° 压电纤维电压响应, 得到的归一化灵敏度曲线如图 9 所示。可以看出, 理论与实验获得的压电纤维

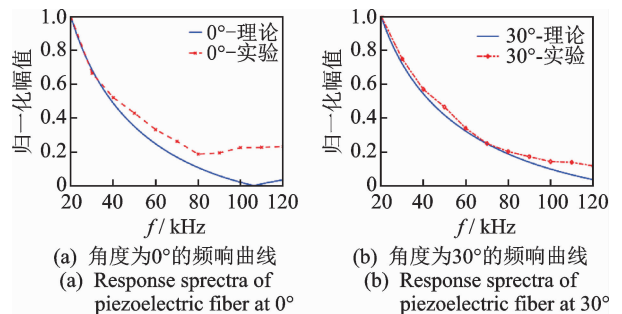


图 9 压电纤维理论与实验频响曲线

Fig. 9 Theoretical and experimental frequency response curves of piezoelectric fibers

灵敏度响应曲线基本一致。当激励频率越低时,压电纤维电压响应越大;当激励频率为 126kHz 时, Lamb 波长为 10mm,此时 $\lambda = l$,压电纤维电压响应为 0。相比文献[10]中 MFC 灵敏度曲线,由于 MFC 尺寸较大,激励频率为 20kHz 时, Lamb 波长等于 MFC 长度,其电压响应为 0。这说明压电纤维比 MFC 具有更好的灵敏度响应特性。

3.3 主应变方向识别结果与分析

为了研究压电纤维不同布置方案对主应变方向识别结果的影响,开展了如图 10 所示的直角三角形(0°,45°和 90°)、Y 形(0°,120°和 240°)和等边三角形(0°,60°和 120°) 3 种压电纤维布置方案的主应变方向识别研究。3 组压电纤维传感器与 Lamb 波传播方向夹角为 32°,激励波中心频率分别为 20,40 和 60kHz。根据 Lamb 波传播方向的估计方法,图 11 为激励频率为 60kHz 时直角三角形(0°,45°和 90°)布置方案下 Lamb 波传播方向的误差估计曲线。最小误差对应的估计角度为 31.4°,非常接近理论值 32°,说明压电纤维传感器检测 Lamb 波传播方向的准确性。3 种压电纤维布置方案下仿真和实验得到的 Lamb 波传播方向角度估计结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,3 种压电纤维布置方案仿真和实验估计的主应变方向基本与实际值 32°相近,直角三角形布置方案的仿真结果相对误差最小;3 种

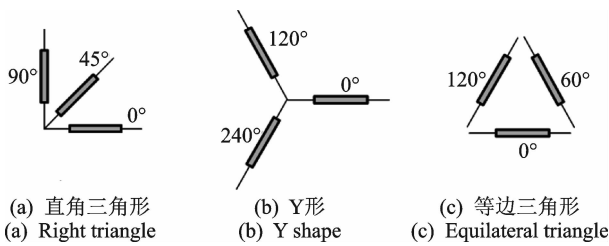


图 10 压电纤维布置方案

Fig. 10 Piezoelectric fiber configurations

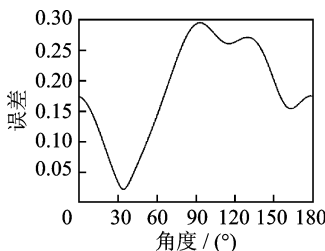


图 11 60kHz 下直角三角形(0°,45°和 90°)布置方案的误差曲线

Fig. 11 Error curve of right triangle configuration (0°,45° and 90°) under 60KHz

表 1 Lamb 波传播方向角度估计结果

Tab. 1 Lamb wave propagation direction estimation results (°)

布置方案	类型	激励波中心频率		
		20kHz	40kHz	60kHz
直角三角形	仿真	32.3	33.2	31.4
	实验	37.9	36.0	34.8
Y 形	仿真	34.1	37.8	37.7
	实验	43.0	43.2	42.3
等边三角形	仿真	33.7	36.4	41.9
	实验	31.1	33.8	42.8

方案下实验测试结果误差均较大,其中 Y 形布置方案的误差最大。3 种压电纤维布置方案的误差原因需进一步深入研究,后续将从压电纤维布置位置与尺寸、微弱信号的噪声抑制与信号处理方法等方面提高检测结果的准确性。研究结果说明,该压电纤维传感器能够应用于 Lamb 波传播方向检测,还可用于进行缺陷定位识别。

4 结束语

提出了一种具有良好方向性的压电纤维传感器,研究了单根压电纤维对 Lamb 波传感的方向性及压电纤维传感器检测主应变方向的性能。通过理论、仿真和实验研究表明,相比 MFC 和矩形压电片,压电纤维具有良好的单方向传感特性,研制的压电纤维传感器能够准确检测主应变方向,可用于 Lamb 波传播方向识别。后续将研究压电纤维布置位置与尺寸、微弱信号的噪声抑制与信号处理方法,提高 Lamb 波传播方向的检测精度;应用压电纤维传感器进行缺陷检测与识别,提出基于主应变方向的 Lamb 波缺陷识别新方法。

参 考 文 献

[1] SU Z, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: a review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295 (3): 753-780.

[2] GIURGIUTIU V. SHM of aerospace composites-challenges and opportunities[C]//CAMX Conference Proceedings. Dallas, TX, USA:[s. n.], 2015.

[3] BHUIYAN Y, LIN B, GIURGIUTIU V. Characterization of piezoelectric wafer active sensor for acoustic emission sensing[J]. Ultrasonics, 2019, 92: 35-49.

[4] KUDELA P, RADZIENSKI M, OSTACHOWICZ

- W. Impact induced damage assessment by means of Lamb wave image processing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 102: 23-36.
- [5] ZHAO J, JI H, QIU J. Modeling of Lamb waves in composites using new third-order plate theories[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(4): 045017.
- [6] ZHANG C, QIU J, JI H, 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.
- [7] STEPINSKI T, МАЙКА М, MARTOWICZ A. Interdigital lamb wave transducers for applications in structural health monitoring[J]. *NDT & E International*, 2017, 86: 199-210.
- [8] KUNDU T, NAKATANI H, TAKEDA N. Acoustic source localization in anisotropic plates[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52 (6): 740-746.
- [9] LIN X, CHEN G, LI J, 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: 9-16.
- [10] MATT H M, DISCALEA F L. Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16 (4): 1489.
- [11] 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 Jian, QIU Jinhao, CHANG Weijie, 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. (in Chinese)
- [12] 陈西府, 刘建, 周海, 等. 矩形压电片对 Lamb 波传感的方向性研究[J]. *测控技术*, 2012, 31 (9): 107-109.
CHEN Xifu, LIU Jian, ZHOU Hai, et al. Study on directivity of rectangular piezoelectric sensors sensing Lamb waves[J]. *Measurement & Control Technology*, 2012, 31 (9): 107-109. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] KIJANKA P, MANOHAR A, LANZA DI SCALEA F, et al. Damage location by ultrasonic Lamb waves and piezoelectric rosettes [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26 (12): 1477-1490.
- [15] SIROHI J, CHOPRA I. Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 11 (4): 246-257.
- [16] 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 Yiping, TANG Binlong, WANG Songlai, 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. (in Chinese)
- [17] GIURGIUTIU V. Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, 16 (4): 291-305.
- [18] BETZ D C, THURSBY G, CULSHAW B, et al. Lamb wave detection and source location using fiber Bragg gratin rosettes[J]. *Processing of SPIE*, 2003, 5050: 117-128.
- [19] MACE B R, MANCONI E. Modelling wave propagation in two-dimensional structures using finite element analysis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 318 (4): 884-902.



第一作者简介:王送来,男,1979年5月生,博士生。主要研究方向为智能材料与结构、无损检测。

E-mail: qingfeng0259@163.com

通信作者简介:沈意平,女,1981年6月生,博士、教授。主要研究方向为智能材料与结构、无损检测、风电技术与装备等。

E-mail: yiping1011@163.com

