

文章编号: 1001-4888(2020)04-0547-10

基于同心压电传感器的单模态 Lamb 波信号提取方法^{*}

郑跃滨, 周凯, 雷振坤, 武湛君

(工业装备结构分析国家重点实验室, 大连理工大学 工程力学系, 大连 116024)

摘要: Lamb 波具有传播范围远、对小损伤敏感等优点, 适用于飞机机翼、壁板等大面积结构的损伤检测, 然而 Lamb 波的频散和多模态特性使得单模态难以识别和解析信号。本文提出一种适用于板壳结构损伤检测的单模态提取方法, 设计并使用一种同心压电传感器, 根据所激励各模态的幅值比来分解信号并补偿时间差, 从而提取出单一模态的信号。通过仿真分析和铝板实验验证, 结果显示本方法能够有效提取单一 A_0 模态信号, 并在实验中成功识别了隐藏的裂纹损伤反射回波信号, 使信号相对于传统方法变得更易解释和分析。

关键词: 损伤检测; Lamb 波; 同心传感器; 信号提取; 单模态信号

中图分类号: O348.1; O346.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-19-223

0 引言

板壳结构在工程领域应用广泛, 在外界复杂载荷和环境作用下, 结构易出现不易察觉的损伤, 因此发展相关的损伤检测评价方法一直备受关注。Lamb 波具备传播范围远、对小损伤敏感等优点, 在机翼、压力容器等薄壁板壳结构的损伤检测/监测方面有着巨大优势和潜力^[1-5]。Lamb 波有压电陶瓷、电磁超声、激光测振等多种激励/接收方式, 其中锆钛酸铅压电陶瓷器(PZT)由于其易集成、成本低、功耗小等特点成为近年来的研究热点^[6]。然而, 在实际检测过程中, Lamb 波固有的频散和多模态特性使其传播复杂, 其中频散特性会拉长时域信号, 导致信噪比降低; 而多模态特点又使有用信号特征难以被正确解读和提取, 影响了损伤检测效果, 限制了 Lamb 波在工程中的应用。

针对 Lamb 波的上述频散和多模态特性, 国内外许多学者开展了深入研究并提出了多种模态分离或单模态提取方法。Wooh 等^[7]通过控制传感器阵列间距并使用时间延迟方式实现了单一模态激励, 但传感器阵列对多通道采集系统和时延剖面的精准控制上要求较高。基于模拟与解析混合的界面剪应力优化方法, Moghadam 等^[8]设计了一种多单元压电传感器, 从而有选择地增强某一模态。Zhou 等^[9]模拟频散传播信号后再通过相关分析实现了单一模态信号重构。Santoni 等^[10]和 Salas 等^[11]通过激励频率调谐、选择 PZT 尺寸来实现某特定模态激励, 但要求所需模态在当前激励频率下的幅值占主导地位, 或保证 PZT 的共振方向尺寸为所需模态波长的一半。Su 等^[12]在试件上下表面对应位置粘贴 PZT, 根据模态偏振特性来增强所需模态, 并抑制多余模态。然而, PZT 粘贴位置偏差、传感器或胶层不一致都会导致模态分离困难, 特别是对多数真实结构例如飞机机翼、储油罐底板等不易实现 PZT 的

^{*} 收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-01-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0702800), 国家自然科学基金(11772081, 11972016)资助

通讯作者: 雷振坤(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事实验力学研究。Email: leizk@dlut.edu.cn

武湛君(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构健康监测研究。Email: wuzjx@dlut.edu.cn

上下表面对应粘贴。

在介绍 Lamb 波传播模型的基础上,本文提出了一种单模态 Lamb 波的信号提取方法,通过设计并使用一种同心压电传感器(后文统称为同心 PZT),实现同一波程上多组 Lamb 波信号的激励/接收。再根据信号中 S_0 和 A_0 模态的幅值比例差异提取出单一 A_0 模态的 Lamb 波信号,最后分别通过铝板 Lamb 波仿真分析、无损伤铝板检测实验和预制损伤的铝板检测实验验证了上述方法的可行性。

1 基本原理

1.1 Lamb 波传播模型

Lamb 是一种在薄板中沿着自由边界传播的弹性波,其频散方程可表示为^[13]

$$\frac{\tan(k_s h)}{\tan(k_l h)} = - \left[\frac{4k_l^2 k_l k_s}{(k^2 - k_s^2)^2} \right]^{\pm 1} \quad (1)$$

$$k_l^2 = \left(\frac{\omega}{c_l} \right)^2 - k^2, \quad k_s^2 = \left(\frac{\omega}{c_s} \right)^2 - k^2 \quad (2)$$

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

式中, ρ 为板密度; h 为板厚一半; λ 和 μ 为拉梅常量; 上标 + 和 - 分别表示对称模态和反对称模态; ω 和 k 分别是角频率和波数。

由于上述频散方程很难求得解析解,因此通常使用数值方法求解频散曲线。例如,图 1 为 2024 铝板上的 Lamb 波的群速度频散曲线,可见在板中传播有多种 Lamb 波模态,若频率范围在 A_1 模态的截止频率之前,也至少有 S_0 和 A_0 两种模态。需要说明的是,本文研究范围限定于 A_1 模态的截止频率之前。根据频散曲线,3mm 厚的 2024 铝板上 A_1 模态截止频率约为 520kHz。

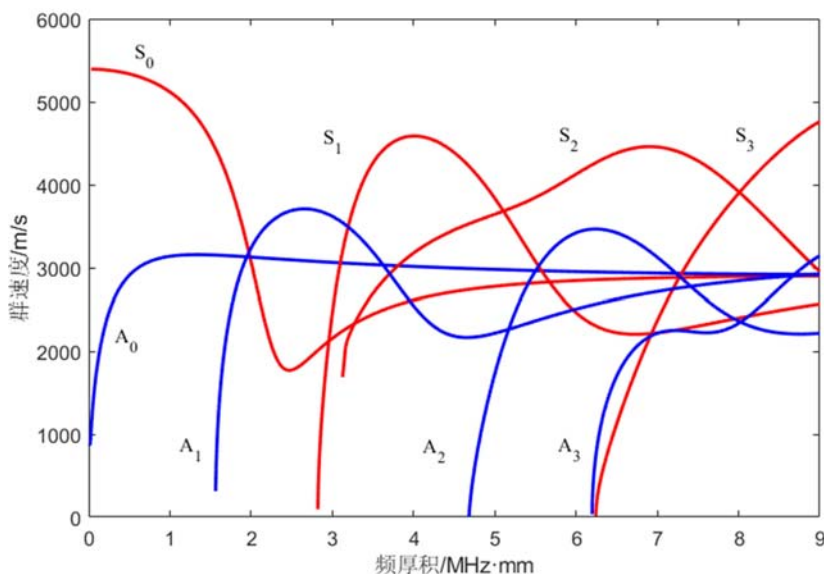


图 1 2024 铝板上的 Lamb 波群速度频散曲线

Fig. 1 Group velocity dispersion curves of Lamb waves in 2024 aluminum plate

通常选择经汉宁窗调制的正弦窄带信号作为 Lamb 波的激励信号,如图 2(a)所示,其对应的频域信号存在一个激励中心频率且有一定带宽,如图 2(b)。因此,对于经过汉宁窗(中心频率为 f_c 、周期为 N)调制的正弦信号来说,其频带宽度可表示为^[14]

$$f_{\min} = \left(1 - \frac{K}{N}\right) f_c \quad (4)$$

$$f_{\max} = \left(1 + \frac{K}{N}\right) f_c \quad (5)$$

式中,常数 K 取决于所采用信号带宽; $f_{\min}$ 为频带范围最小值; $f_{\max}$ 为频带范围最大值。以上述信号为

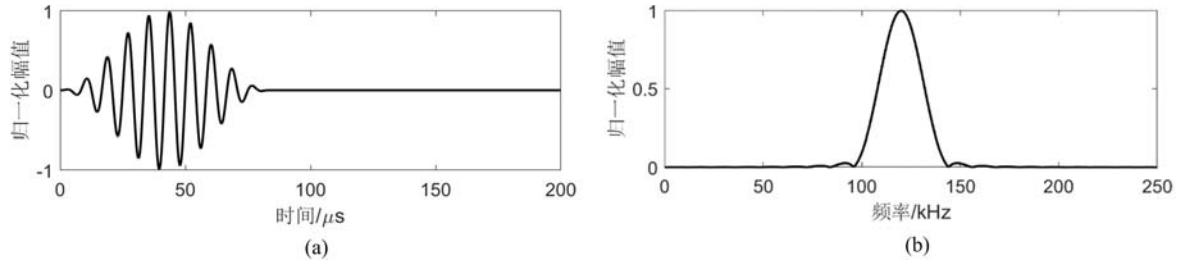


图2 120kHz、10周期汉宁窗调制的正弦信号：(a) 时域信号；(b) 频域信号

Fig. 2 Sinusoidal signal of 120kHz, 10 cycles modulated by Hanning window:

(a) time domain signal; (b) frequency domain signal

例,根据式(4)和式(5)得到图2(b)所示信号的带宽范围为96~144kHz。由于频散特性,频带内各频率的Lamb波群速度通常存在一定差异。根据所计算频散曲线, A_0 模态在传播时中心频率120kHz的群速度为2.749mm/ μ s,频带内带宽的群速度范围为2.595~2.770mm/ μ s。假定Lamb波的传播距离为 d ,则传播所需时间为

$$t_{\min} = d/v_{\max} \quad (6)$$

$$t_{\max} = d/v_{\min} + N/f_c \quad (7)$$

式中, $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 分别为中心频率 f_c 、频带范围 $f_{\min} \sim f_{\max}$ 内的群速度最大值和最小值。

Lamb波的传播可分为激励、传播和接收三个过程^[15, 16],最后传感器接收到的响应幅值与传播距离 d ,激励传感器尺寸 g ,接收传感器尺寸 r 相关,可简化为

$$V(t) = V_S^g(k_S) V_S^r(k_S) \frac{e^{i(k_S - \alpha t)}}{\sqrt{d}} + V_A^g(k_A) V_A^r(k_A) \frac{e^{i(k_A - \alpha t)}}{\sqrt{d}} \quad (8)$$

式中,下标S和A分别代表对称模态和反对称模态; t 为时间; k 为波数。当传播距离 d 相同时,Lamb波信号中 S_0 模态和 A_0 模态的幅值仅与 g 和 r 相关。又由于 S_0 模态和 A_0 模态的波数 k 不同,所以这两种模态振幅随PZT激励/传感尺寸变化的速率不同^[10, 17]。利用这个特点,本文设计了一种新型的PZT传感器,能够在同一条传播路径 d 下得到多组信号,而多组信号的幅值大小只与激励传感器尺寸 g 和接收传感器尺寸 r 有关,从而可以利用多组信号中 S_0 模态和 A_0 模态幅值比的不同来实现单一 A_0 模态信号的提取。

1.2 单模态信号提取方法

如1.1节所述,要在同一条Lamb波传播的路径上获得多组信号,可通过同心PZT来实现。当传播距离 d 远大于传感器尺寸 r 时(如 $d > 10r$),同心PZT可近似认为激励/传感点在同一位置点。为方便阐述,下面均以圆形同心PZT为例(不限于圆形,也可以用方形、矩形等其他形状)。如图3所示,同心PZT由同心的圆环和圆盘构成,每部分可单独或同时进行Lamb波的激励和传感。同心PZT有三种工作形式:(1)圆环和圆盘相连通、同时激励/接收,记作#1;(2)圆环单独激励/接收,记作#2;(3)圆盘单独激励/接收,记作#3。以同心PZT用作激励传感器为例,以上三种激励形式可近似认为具有相同激励点位置,信号传播路径 d 也可认为是相同的。根据式(8)可知,若两组信号的传播距离 d 和接收传感器尺寸 r 都相同时,各模态信号的幅值仅与激励传感器尺寸 g 相关。因此,选择不同的激励形式#1、#2和#3时,最终采集到的时域信号中各模态信号的波程一致,波形相同,仅幅值不同。最后,由这同一波程上多组Lamb波信号的 S_0 和 A_0 模态的幅值比例差异可以提取出单一 A_0 模态的Lamb波信号。本文中所使用同心PZT的尺寸如图3所示,圆盘直径为8mm,圆环加圆盘整体直径为16mm。

在三种激励形式中任选其中两种即可以提取单一 A_0 模态,下面便以激励形式#1和#2为例来阐述实现过程。根据1.1节中Lamb波传播理论,#1与#2分别激励时,各模态信号可表示为

$$V_1(t_1) = m_1 S_0(t_1) + n_1 A_0(t_1) \quad (9)$$

$$V_2(t_2) = m_2 S_0(t_2) + n_2 A_0(t_2) \quad (10)$$

式中, m 和 n 分别为 S_0 模态幅值和 A_0 模态幅值;下标1代表#1激励方式;下标2代表#2激励方式。

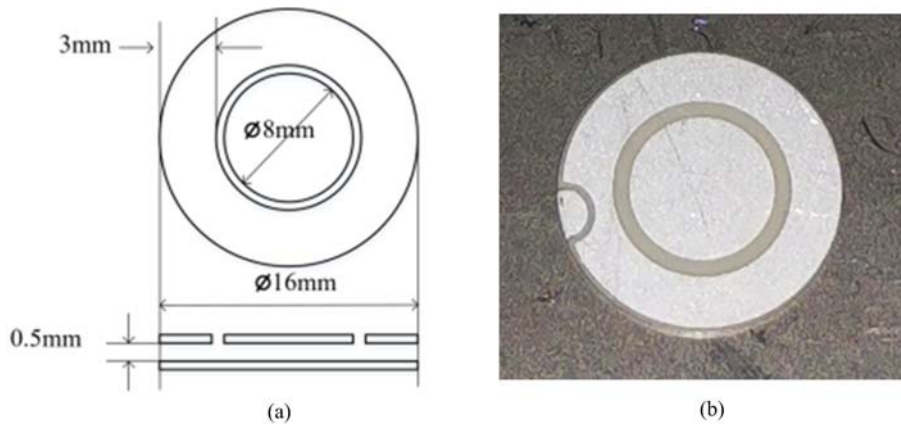


图 3 (a)外环内圆的同心 PZT 设计示意图与(b)实物照片

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the designed concentric PZT transducer;

outer ring and inner circular and (b) PZT photo

由 1.1 节, 可认为 $t_1 = t_2 = t$, 后续省略 t 。根据频散曲线, A_1 模态截止频率之前的 S_0 模态波速比 A_0 模态更快, 因此 S_0 模态会先于 A_0 模态到达接收传感器, 此时可以分别计算出 #1 和 #2 原始信号中 S_0 模态的直达波振幅, 并记为幅值 m_1 和 m_2 。随后, 可以将式(9)和式(10)中 S_0 幅值调至某常数 α , 即

$$\frac{\alpha}{m_1} V_1 = \alpha(S_0 + \frac{n_1}{m_1} A_0) \quad (11)$$

$$\frac{\alpha}{m_2} V_2 = \alpha(S_0 + \frac{n_2}{m_2} A_0) \quad (12)$$

式(11)与式(12)相减得到差信号 V' , 即所要提取的单一 A_0 模态信号, 写为

$$V' = \alpha(\frac{V_1}{m_1} - \frac{V_2}{m_2}) = \alpha(\frac{n_1}{m_1} - \frac{n_2}{m_2}) A_0 = \beta A_0 \quad (13)$$

式中, β 为提取的 A_0 模态信号幅值。注意这里需要满足 $n_1 m_2 \neq n_2 m_1$, 即 #1 与 #2 原始信号中 S_0 与 A_0 幅值之比不同。

本节第一段中将同心 PZT 看作具有近似相同的激励点, 实际上根据传感器的集中力载荷激励模型^[15], 传感器激励时载荷分布集中在传感器边缘处, 因此不同激励形式的激励点位置会有微小的差异, 最终导致 Lamb 波到达接收传感器时有一个时间差 Δt 。为补偿时间差, 后续计算须根据实际采集信号的到达时间对信号做平移补偿, 从而保证式(9)和式(10)中 $t_1 = t_2 = t$ 。

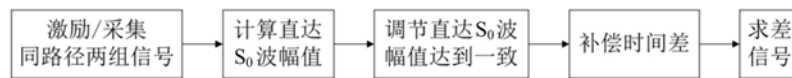


图 4 单模态信号提取流程

Fig. 4 The workflow of extracting the single mode signal

总结单模态信号提取流程如图 4 所示, 首先使用同心传感器在三种激励形式中任选其中两种, 获得同路径的两组信号, 计算这两组信号中直达 S_0 波的幅值, 再调节两个幅值使二者达到一致, 随后通过信号平移补偿 S_0 波的到达时间差, 最后对两组信号作差, 所得差信号即为提取的单模态 A_0 信号。下面将分别通过仿真模拟和实验对本文提出的单一模态提取方法进行分析, 并评估本方法的有效性。

2 方法验证

2.1 铝板 Lamb 波仿真

为验证本文所提方法, 采用 ABAQUS 软件对 Lamb 波在不同激励形式下的传播过程进行了有限元数值模拟。在 ABAQUS 中建立二维铝板的仿真模型, 铝板长为 1500mm, 厚度为 4mm, 如图 5 所示。根据集中力载荷激励模型, 分别模拟传感器 #1 和 #3 两种激励形式。另外, 在试样上下表面设置接收点, 反相接收得到单一 A_0 模态^[12], 可与本方法所提取单一 A_0 模态做对比。激励点坐标分别为(-208,

2)、(-204,2)、(-196,2)和(-192,2),接收点坐标分别为(100,2)和(100,-2)。仿真中采用线弹性材料本构关系,材料参数设置如下:密度 $\rho=2700\text{kg/m}^3$,弹性模量 $E=72\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.33$ 。依次选择 50kHz、150kHz、250kHz 的正弦信号(5 周期汉宁窗调制)作为激励信号。模拟时设置网格大小为 0.1mm,计算时间步长为 $0.08\mu\text{s}$ 。在后续 3.1 节中将给出有限元仿真的结果和相关分析。

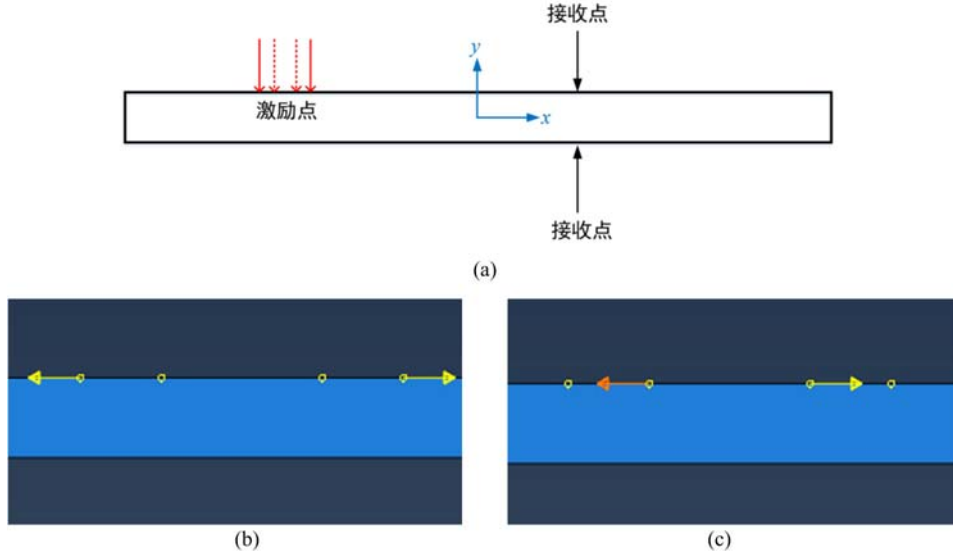


图5 Lamb波传播有限元模型:(a)有限元模型示意图;(b)激励形式#1;(c)激励形式#3

Fig. 5 Finite element model of Lamb wave propagation: (a) schematic of the finite element model; (b) excitation form #1; (c) excitation form #3

2.2 实验过程

在如图6所示3mm厚的2024铝板上进行实验。铝板表面粘贴同心PZT和圆形PZT,二者相距300mm,它们距离上边界335mm,下边界500mm,另两个边界较远。实验中采用10周期的汉宁窗调制的正弦信号,扫描频率为50~250kHz,步长为10kHz。数采仪器使用本课题组研发的超声导波设备,采样率12MHz/s。

实验流程如下:

(1) 在铝板无损伤情况下,分别使用同心PZT的#1和#2激励,圆形PZT接收,结果见3.2节无损伤铝板检测实验;

(2) 在同心PZT外侧距离100mm处,人为制造20mm长的贯通裂纹损伤;

(3) 再次使用同心PZT的#1和#2激励,圆形PZT接收,结果见3.3节预制损伤的铝板检测实验。

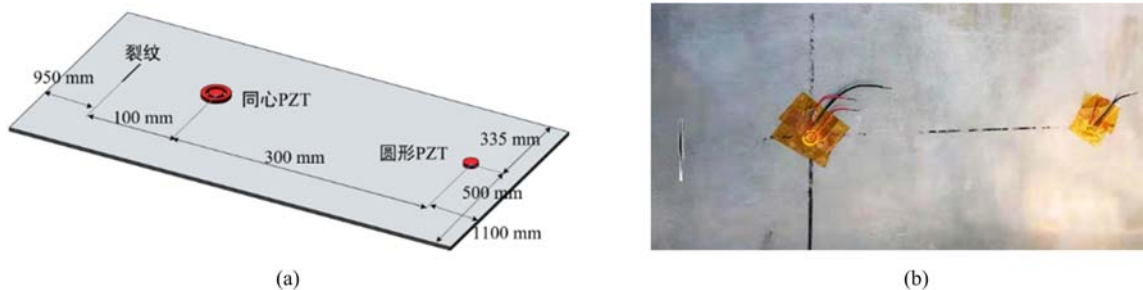


图6 (a)实验设置示意图和(b)实验照片

Fig. 6 (a) Schematic diagram of experimental setup and (b) experiment photo

3 结果与讨论

3.1 铝板 Lamb 波仿真分析

激励频率为 50kHz 时的仿真结果如图 7 所示,激励形式 #1 仿真信号(点划线)直达 S_0 模态的幅值为 0.4362,而激励形式 #3 信号(实线)直达 S_0 模态的幅值为 0.8469。由式(11)和式(12)调节幅值直至二者所包含直达 S_0 模态的幅值相同。而由于二者 S_0 与 A_0 幅值之比不同,根据式(13)调节完幅值的两个信号作差,残余的差信号为单一 A_0 模态信号(已归一化),如图 8 所示。此时,对比归一化的反相接收信号(虚线),二者吻合良好,表明本方法可有效提取单一 A_0 模态信号。

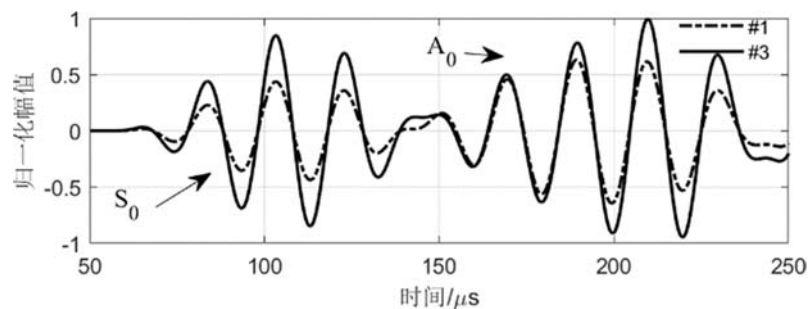


图 7 仿真信号(50kHz),接收点位置(100,1.5)

Fig. 7 Simulation signals (50kHz), receiving position (100,1.5)

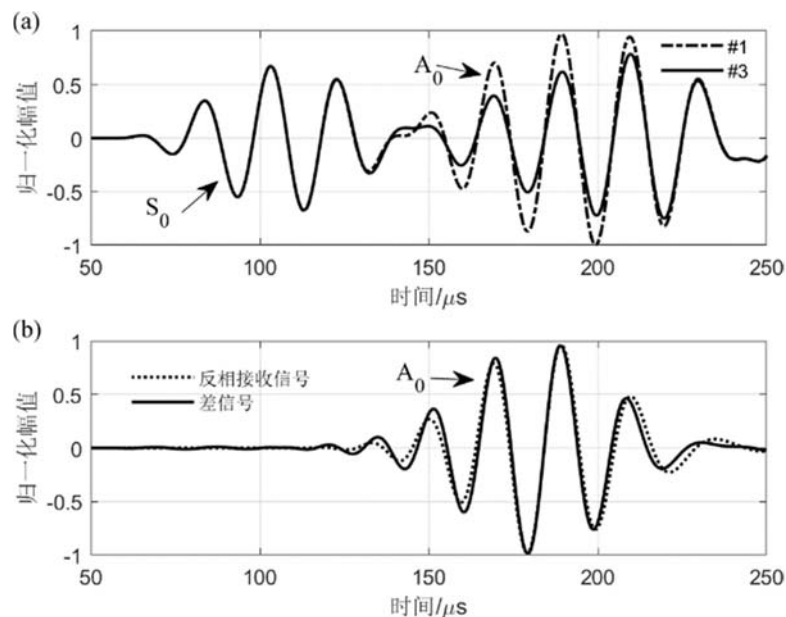


图 8 对图 7 中信号提取单模态:(a)对仿真信号 #1 和 #3 分别进行幅值调节;(b)差信号与反相接收的仿真信号

Fig. 8 Extracting the single mode signal in Fig. 7: (a) adjusting the amplitudes of simulation signals of #1 and #3, respectively; (b) different signal and the out-phase of simulation signal

激励形式 #1 和 #3 的 50kHz 仿真信号中直达 S_0 波没有时间差,然而 150kHz 和 250kHz 的直达 S_0 波有明显的时间差,分别为 $0.08\mu\text{s}$ 和 $0.88\mu\text{s}$ 。通过计算 #1 和 #3 中直达 S_0 波的相关性,对信号做平移,补偿 S_0 波到达接收传感器的时间差,能够保证最大限度地抑制 S_0 ,保留 A_0 模态。后续实验中也得到了相似的结果。

3.2 无损铝检测实验

在无裂纹损伤情况下,激励频率为 120kHz 时不同激励形式所得信号如图 9 所示。#1 和 #2 都包含了 S_0 和 A_0 模态,根据频散曲线和波的到达时间,信号中依次应该为直达 S_0 、上边界反射 S_0 、直达 A_0 、下边界反射 S_0 和上边界反射 A_0 。然而,由于直达 S_0 与直达 A_0 ,边界反射 S_0 与直达 A_0 分别在时

域范围都有一定程度的重叠,使信号难以直观分析与解释。

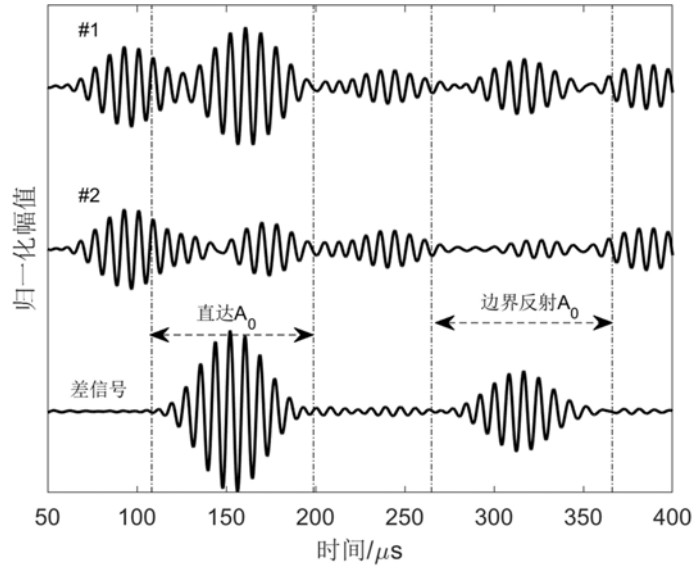


图9 无损伤时的实验结果(120kHz): #1代表激励形式#1所得信号;
#2代表激励形式#2所得信号;差信号代表单模态提取信号

Fig. 9 Experiment results without damages (120kHz): #1 represents the signal collected in excitation mode #1; #2 represents the signal collected in excitation mode #2; the subtracted signal represents the extracted single mode signal

根据图4流程提取单一 A_0 模态信号,设常数 $\alpha=0.5$,得到差信号。由式(6)和式(7)可计算得到,直达 A_0 的时域范围在 $108.3\sim 198.9\mu s$,上边界反射 A_0 模态的时域范围在 $265.0\sim 366.2\mu s$,与图中差信号的两个波包的时域范围均吻合,可判断为直达 A_0 和上边界反射 A_0 。相比直达 A_0 和边界反射 A_0 的振幅, S_0 模态的振幅减弱至几乎可忽略不计。差信号清晰地显示出两个波包,即直达 A_0 和上边界反射 A_0 ,可认为成功提取了单一 A_0 模态信号。

为评估提取单一 A_0 模态的效果,引入 A_0 模态的能量比值(Ratio of Energy, RoE),计算公式为

$$\text{RoE} = \frac{\text{eng}_{A_0}}{\text{eng}_{S_0} + \text{eng}_{A_0}} \times 100\% \quad (14)$$

$$\text{eng}_* = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} V_*^2(t) dt \quad (15)$$

式中“*”代表 A_0 模态或 S_0 模态; $t_{\min}$ 和 $t_{\max}$ 分别代表时间窗的起止点,可根据式(6)和式(7)分别计算得到。通过计算RoE能够获得直达 A_0 在信号中所占的能量比值,RoE越大,则直达 A_0 占比越大,意味着所提取 A_0 模态的效果越好。

无损状态下,根据式(6)和式(7)得到直达 S_0 和直达 A_0 ,再由式(14)和式(15)计算分别得到原始信号、单 A_0 模态提取、经时间平移补偿后的 A_0 模态提取三种情况的RoE结果,如图10所示。由图可知,经过单模态提取后 A_0 波的RoE远大于原始信号中 A_0 模态的RoE,而经时间平移补偿后 A_0 波的RoE又明显大于未补偿的 A_0 波RoE。其中,在激励频率小于170kHz的情况下,经时间平移补偿后 A_0 波的RoE大于90%,说明 A_0 在整体信号中占比远大于 S_0 。因此本文中所用方法可在较低频时有效抑制 S_0 波,从而提取较纯净的单一 A_0 模态信号。

3.3 预制损伤的铝板检测实验

根据节2.2所述,对无损伤铝板预制贯通裂纹后再次进行损伤检测。激励频率120kHz的实验结果如图11所示。同样地,#1和#2都包含了 S_0 和 A_0 模态,根据频散曲线和波的到达时间,信号中依次应该为直达 S_0 、损伤反射 S_0 、上边界反射 S_0 、直达 A_0 、损伤反射 A_0 、下边界反射 S_0 和上边界反射 A_0 。然而,从时域上来看,直达 S_0 与直达 A_0 、损伤反射 S_0 与直达 A_0 、上边界反射 S_0 与直达 A_0 、下边界反射 S_0 与损伤反射 A_0 在时域范围都有一定重叠,此时的信号相比无裂纹损伤情况下更加难以分析。

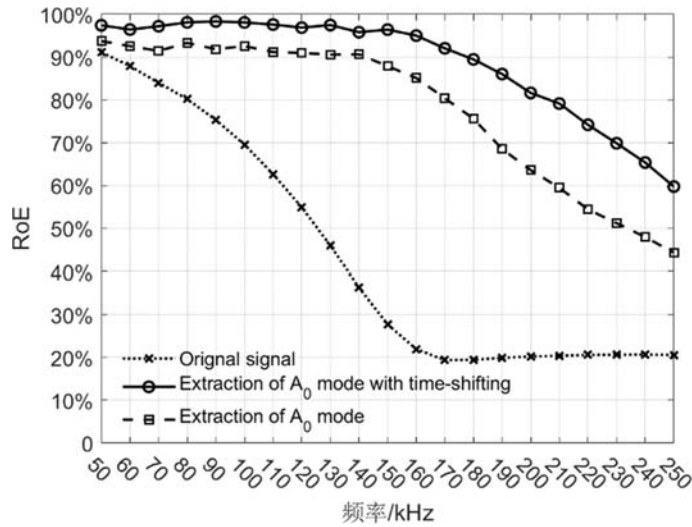


图 10 RoE 计算结果

Fig. 10 Results of RoE

同样地,根据图 4 流程提取单一 A_0 模态信号,设常数 $\alpha=0.5$,得到差信号。根据惠更斯原理,损伤可被视为二次散射源。Lamb 波被同心 PZT 激励出来后,在铝板中传播,至损伤处发生散射,散射波最后由圆形 PZT 接收,传播距离总共为 500mm,根据式(6)和式(7)计算可知该损伤的散射波时域范围应在 $180.5 \sim 276.0 \mu\text{s}$ 之间,与图 11 差信号第二个波包的时域范围吻合,因此判断差信号第二个波包即为损伤散射 A_0 波。同样地,计算直达 A_0 和上边界反射 A_0 的时域范围,与图中差信号的第一个和第三个波包的时域范围均吻合,可判断这两个波包分别为直达 A_0 和上边界反射 A_0 。差信号的 S_0 模态振幅减弱至几乎可忽略不计,因此可认为成功提取了单一 A_0 模态信号。

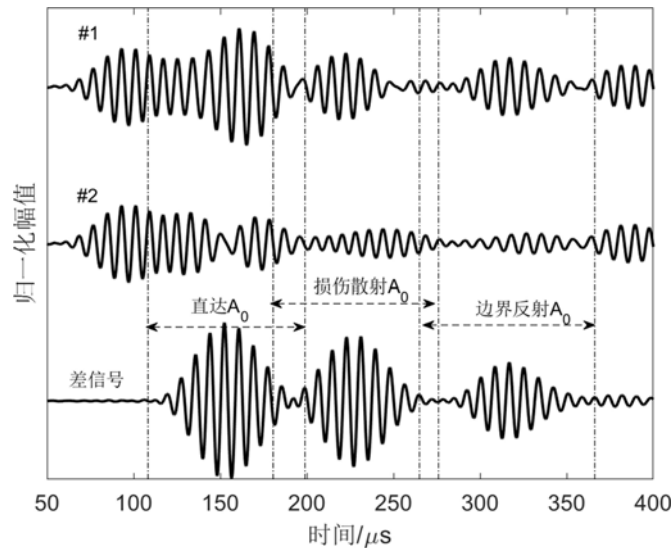


图 11 预置损伤时的实验结果(120kHz): #1 代表激励形式 #1 所得信号;

#2 代表激励形式 #2 所得信号;差信号代表单模态提取信号

Fig. 11 Experiment results with a preset damage (120kHz): #1 represents the signal collected in excitation mode #1; #2 represents the signal collected in excitation mode #2; the subtracted signal represents the extracted single mode signal

在损伤未知时,相比于多模态信号,所提取单一模态信号中清晰的损伤散射 A_0 波可进一步用于损伤识别和定位,并且无需基准信号。基准信号是在无损伤状态下预先采集的信号,而在未知缺陷状态下所采信号则被称为当前信号。如果结构中出现损伤,基准信号与当前信号便会发生变化,变化程度与损伤严重程度相关。将两种状态下信号直接相减所得的差异信号视为损伤散射信号,基于 Lamb 波的损

伤检测方法通常依赖于这样的损伤散射信号。然而,当环境条件发生变化,例如基准信号与当前信号温度不匹配时,差异信号既包含了损伤散射信号,同时也包含了温差带来的相位或幅值差异。并且当温度变化剧烈时,后者对差异信号的影响更甚于前者,进而影响损伤检测效果,严重时甚至会引起错报误报。现阶段针对 Lamb 波在工程应用中面临的环境变化问题,通常分为两个研究方向:一是环境补偿,即补偿环境变化对基准信号和当前信号的影响,保证差异信号主要与损伤相关^[18];二是发展无基准信号的损伤检测方法,即无需采集基准信号,通过某些技术手段如时间反转法^[5]直接得到损伤散射信号。使用无基准检测方法的难点在于 Lamb 波传播时至少有两种模态,模态间的叠加使信号趋于复杂。如果对多模态信号直接分析,如图 11 中 #1 和 #2,两种模态的直达波与损伤散射波、损伤散射波与边界反射波等在时域范围相互叠加,此时易对损伤反射 A_0 到达时间的提取形成干扰。相比于多模态的 #1 和 #2,所提取的单模态信号可以清晰分辨出三个较完整的波包。当损伤未知,且传感器布设位置和结构几何尺寸已知时,根据式(6)和式(7)可计算得到直达 A_0 波和边界反射 A_0 波的时域范围,进而通过限定时间窗的方法,容易去掉差信号中直达 A_0 波和边界反射 A_0 波,此时差信号可见幅值明显的损伤散射 A_0 波,提取其到达时间便可用于进一步的损伤定位。而无损伤情况下,如图 9 中差信号所示,用同样方法加窗去掉直达 A_0 波和边界反射 A_0 波后,并无明显的损伤散射 A_0 波。因此,采用本文方法能够简化信号的复杂程度,能清晰分辨出损伤散射波,而原始的多模态信号很难达到如此效果。更进一步,将由损伤散射波的到达时间及波速所确定的传播距离看作定长,则损伤在以此激励—接收传感器为焦点的椭圆上。如果在结构上预先布设了传感器网络,可以通过多对激励—接收传感器计算多个椭圆的相交位置,从而确定损伤位置。此处讨论了本文所提单模态信号提取方法应用于未知铝板裂纹缺陷的情形,以此为基础,后续研究工作中可以发展出用于实际工程结构的损伤检测策略及定位算法。

4 结论

本文提出了一种利用同心 PZT 激励 Lamb 波、提取单一 A_0 模态信号的方法。同心 PZT 由外圆环与内圆盘 PZT 组成,通过激励同心 PZT 的不同部分,在同一波程上采集多组 Lamb 波信号,再依据不同的 S_0 和 A_0 模态幅值比例处理信号,补偿时间差后实现单一 A_0 模态信号的提取。在铝板 Lamb 波仿真分析、无损伤铝板检测实验中均成功提取了单一 A_0 模态信号,验证了本方法的有效性。采用本文方法,可以在激励频率小于 170kHz 时有效消除 S_0 波,使得 A_0 模态信号在整体信号中的能量占比大于 90%,从而提取出较纯净的单一 A_0 模态信号。在预制损伤的铝板检测实验中,原始信号中多个模态相互叠加,导致损伤散射波隐藏其中难以分辨,而经过单模态提取后的信号便可清晰分辨出损伤散射波。本文方法主要优点在于无需特定的传感器布设或传感器尺寸,也无需进行精确的理论计算,更易于工程上的实现。下一步工作将着力于把单模态信号提取方法应用至实际工程结构的无基准损伤检测研究。

参考文献:

- [1] Wu Z, Liu K, Wang Y, et al. Validation and evaluation of damage identification using probability-based diagnostic imaging on a stiffened composite panel[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(16): 2181—2195.
- [2] Zheng Y B, Liu K H, Wu Z J, et al. Lamb waves and electro-mechanical impedance based damage detection using a mobile PZT transducer set[J]. *Ultrasonics*, 2019, 92:13—20.
- [3] 王奕首, 卿新林. 复合材料连接结构健康监测技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2016, 1:7—22 (WANG Yishou, QING Xinlin. Progress on study of structural health monitoring technology for composite joints[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2016, 1:7—22 (in Chinese))
- [4] Gao D, Wu Z, Yang L, et al. Structural health monitoring for long-term aircraft storage tanks under cryogenic temperature[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92:881—891.
- [5] 刘增华, 徐庆龙, 董拓灿, 等. 基于时间反转法的 Lamb 波检测技术的研究进展[J]. *实验力学*, 2015, 30(2):131—141 (LIU Zenghua, XU Qinglong, DONG Tuocan, et al. Progress of Lamb wave detection technology based on time reversal method[J]. *Journal of Experimental Mechanicals*, 2015, 30(2):131—141 (in Chinese))

- [6] Gao D, Wu Z, Yang L, et al. Integrated impedance and Lamb wave-based structural health monitoring strategy for long-term cycle-loaded composite structure[J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(4):763—776.
- [7] Wooh S-C, Shi Y. Synthetic phase tuning of guided waves[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001, 48(1):209—223.
- [8] Moghadam P Y, Quaegebeur N, Masson P. Design and optimization of a multi-element piezoelectric transducer for mode-selective generation of guided waves[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(7):75037—75048.
- [9] Zhou K, Zheng Y B, Zhang J Q, et al. A reconstruction-based mode separation method of Lamb wave for damage detection in plate structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(3):35033—35042.
- [10] Santoni G B, Yu L, Xu B, et al. Lamb wave-mode tuning of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2007, 129(6):752—762.
- [11] Salas K I, Cesnik C E S. Design and characterization of a variable-length piezocomposite transducer for structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(3):349—360.
- [12] Su Z, Ye L. Selective generation of Lamb wave modes and their propagation characteristics in defective composite laminates[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2004, 218(2):95—110.
- [13] Rose J L. *Ultrasonic waves in solid media*[M]. Cambridge University Press, 2004.
- [14] Wilcox P D, Lowe M J S, Cawley P. Mode and transducer selection for long range lamb wave inspection[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2001, 12(8):553—565.
- [15] Raghavan A, Cesnik C E. Finite-dimensional piezoelectric transducer modeling for guided wave based structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(6):1448—1461.
- [16] Zhou K, Xu X S, Zhao Z, et al. Excitation of plane Lamb wave in plate-like structures under applied surface loading[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2):25011—25020.
- [17] Yeum C M, Sohn H, Ihn J B. Lamb wave mode decomposition using concentric ring and circular piezoelectric transducers[J]. *Wave Motion*, 2011, 48(4):358—370.
- [18] Wang Y, Gao L, Yuan S, et al. An adaptive filter-based temperature compensation technique for structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(17):2187—2198.

Single mode signal extraction method of Lamb wave using a concentric PZT transducer

ZHENG Yue-bin, ZHOU Kai, LEI Zhen-kun, WU Zhan-jun

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Lamb waves-based damage detection method is able to identify defects effectively for large area structures such as airplane wings and panels with the advantages of large area scanning and good sensitivity to minute defects. However, due to the dispersive and multimodal natures of Lamb waves, it is difficult to interpret and analyze the single mode signals, resulting in negative effect on damage detection. To solve this problem, a single mode signal extraction method of Lamb waves for damage detection is proposed in this paper. A concentric PZT transducer is designed and applied. The single mode signals can be extracted based on the time-shift compensation and the amplitude ratio of multi-mode signals excited by the concentric PZT. Through numerical simulation and experimental tests performed on an aluminum plate, the results validate the effectiveness of the proposed technique. The hidden scatter defect signals are also successfully extracted in experimental tests. This technique has the potential to expand the envelope of data analysis beyond the conventional limitations.

Keywords: damage detection; Lamb waves; concentric PZT transducer; signal extraction; single mode signal