

文章编号:1004-2474(2017)06-0912-05

压电阵列 Lamb 波损伤监测信号一致性补偿方法

王 强, 仲鹏达, 潘蕊怡, 汪 颖

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘要: Lamb 波结构损伤监测是结构健康监测领域的研究热点之一。针对基于压电阵列的 Lamb 波损伤监测研究中因传感器性能差异引起的信号偏差问题, 通过分析 Lamb 波信号的激励、传播和传感过程, 利用压电阵列中等距离传播通道直达波传递函数相同的特点, 提出了窄带激励下的压电传感器机电耦合系数归一化补偿, 实现对结构响应信号的一致性补偿。实验验证表明, 该方法能在一定程度上抑制因压电传感器性能差异引起的信号偏差, 提高了监测结果的准确性。

关键词: Lamb 波; 损伤监测; 压电阵列; 补偿

中图分类号: TN384; TP212.9; TB551 **文献标识码:** A

Signal Consistency Compensation Method for PZT Array and Lamb Wave Based Damage Monitoring

WANG Qiang, ZHONG Pengda, PAN Ruiyi, WANG Ying

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The Lamb wave based damage monitoring technique was one of the research focuses in structural health monitoring (SHM). In the light of the problem of signal difference caused by sensor performance deviation in PZT array and Lamb wave based damage monitoring, the actuation, propagation and sensing processes of the Lamb wave were analysed. According to the characteristic that the propagation channels with the same distances have the same direct wave transfer functions, a new PZT sensor electromechanical coupling coefficient compensation method was proposed for consistency compensation of the structural response signals. The experimental validation indicated that the new method could suppress the signal deviation caused by the difference of the performance of the piezoelectric sensor to a certain and improve the accuracy of the monitoring results.

Key words: Lamb wave; damage monitoring; PZT array; compensation

0 引言

Lamb 波由于传播距离远、对微小损伤敏感等优点, 近年来已成为结构健康监测领域的研究热点之一, 被用于结构损伤的在线监测和诊断^[1-3]。在现有的研究中, 出于对功能、体积、功耗、质量等因素的考虑, 大量的研究均利用压电材料正、反压电效应, 采用压电陶瓷片作为激励器和传感器, 激励和传感 Lamb 波; 同时, 引入传感阵列技术实现对结构的大面积覆盖和损伤监测^[4]。然而, 由于压电陶瓷片加工过程和安装工艺的差异性, 采用压电传感阵列过程中, 各传感器最终表现出来的性能会有所差异, 直

接反映在信号能量上的不一致, 而信号能量将直接反映结构损伤的程度、范围等信息, 因此, 传感器性能差异将会直接影响损伤的定位误差和损伤评估。本文从基于压电传感器的 Lamb 波激励与传感基本模型出发, 利用传感阵列中激励/传感通道的相互对称性, 研究多传感器的性能一致性补偿方法, 并进行了实验验证。

1 基于压电传感器的 Lamb 波激励与传感

1.1 Lamb 波简述

Lamb 波是在自由边界薄板结构中传播的一种导波, 具有多模特性和频散特性。板中的 Lamb 波

收稿日期: 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(61533010); 中国博士后基金资助项目(2015M570401); 南京邮电大学先进技术研究院开放基金资助项目(XJKY15005); 南京邮电大学科研基金资助项目(NY215093、NY217070)

作者简介: 王强(1980-), 男, 江苏句容人, 副教授, 博士, 主要从事 Lamb 波结构健康监测、计算机测控系统等方面的研究。E-mail: wangqiang@njupt.edu.cn.

可用 Rayleigh-Lamb 波方程来描述^[1]:

$$\frac{\tan \beta d}{\tan \alpha d} = - \left[\frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \right]^{\pm 1} \quad (1)$$

其中

$$\alpha^2 = (\omega^2/c_1^2) - k^2 \quad (2)$$

$$\beta^2 = (\omega^2/c_2^2) - k^2 \quad (3)$$

式中: d 为 1/2 板厚度; ω 为频率;上标正号对应于对称模式 S,负号对应于反对称模式 A; c_1 为横波波速; c_2 为纵波波速; $k = \omega/c_3$ 为波数, c_3 为 Lamb 波的相速度。

通过求解式(1)可得 Lamb 波的频散曲线^[5-6]。典型的铝板结构频散曲线如图 1 所示。由图可见,Lamb 波的传播过程复杂:同一频率下,有多种模式存在,同时,各模式 Lamb 波信号传播的群速度与相速度随着频厚积的变化而改变。因此,为了降低频散和多模效应带来的信号复杂性,绝大多数研究中均采用窄带激励信号,以激发出单一模式为主的 Lamb 波信号^[1]。

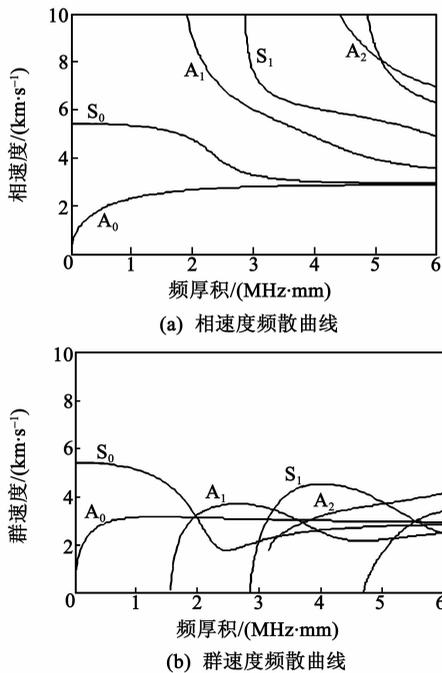


图 1 铝板结构中 Lamb 波传播频散曲线

1.2 基于压电传感器的 Lamb 波激励与传感过程

由于对方向不敏感,目前一般采用圆形压电片作为 Lamb 波信号激励器与传感器。在 Lamb 波激励和传感过程中,压电片与结构之间通过胶耦合层产生的应力而相互关联,应力大小由压电陶瓷和结构的各自变形情况决定^[7]。Lamb 波的激励、传播与传感过程如图 2 所示,经功率放大后的激励信号 $I(\omega)$ 加载到激励压电片上,借助于压电片的逆压电

效应将信号变化转化为机械振动,并通过耦合胶层传递到结构中,从而激发出 Lamb 波信号;Lamb 波传播引起的结构表面形变,通过耦合胶层传递并转化为对传感压电片的剪应力,进而通过正压电效应转化为电信号输出 $U_s(\omega)$ 。上述过程可用下式描述^[7-9]:

$$U_s(\omega) = K_s(\omega)E_s(\omega) = K_s(\omega)I(\omega)K_A(\omega)G(r,\omega) \quad (4)$$

式中: $K_s(\omega)$ 、 $K_A(\omega)$ 为激励器和传感器的机电耦合系数(反映了压电应变常数和胶层剪应力作用效果); $E_s(\omega)$ 为传感器位置的结构表面应变; $G(r,\omega)$ 为结构中 Lamb 波传播传递函数(与结构特性、信号频率及传播距离相关)。

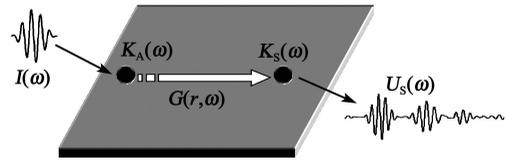


图 2 Lamb 波激励、传播与传感示意图

根据上述模型分析可知,在相同的激励信号、结构及传播距离条件下(即传递函数相同),不同激励-传感通道下的 Lamb 波响应信号的差异将主要取决于激励器和传感器的机电耦合系数。同时,根据图 2 所示模型以及声波传播互易性原理,对于同一个压电片而言,其在激励和传感过程中的机电耦合系数相同,即 $K_s(\omega) = K_A(\omega)$,因此,对于任意压电片,其机电耦合系数可以统一表示为 K 。

由于受到加工工艺、安装工艺、结构表面差异等因素的影响,实际使用中的压电激励器和传感器必然存在性能差异,例如胶层性能参数和厚度的差异将直接改变剪应力的传递效果和大小^[7],进而影响机电耦合系数,造成各传感器信号的幅值差异,最终影响损伤评估的准确性和精度。因此,提高各传感器之间的性能一致性十分重要。

2 压电传感阵列中的传感器性能一致性补偿原理

根据前文分析,当结构和传播距离确定时,传感器性能的差异将主要取决于机电耦合系数。对于单个激励器-传感器对组成的信号传播通道而言,分别求解激励器和传感器的机电耦合系数很难。目前,在大多数的 Lamb 波结构损伤监测研究中均采用传感器阵列法,即在结构表面按照一定的规则安装多个压电激励器/传感器,两两组合组成多条监测通道,对于含有 N 个压电片的压电阵列,得到的 Lamb

波信号可表示为

$$U = I(\omega) \cdot K^T K G \quad (5)$$

其中

$$U = \begin{bmatrix} \times & U_1^2(\omega) & \cdots & U_1^{N-1}(\omega) & U_1^N(\omega) \\ U_2^1(\omega) & \times & \cdots & U_2^{N-1}(\omega) & U_2^N(\omega) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ U_{N-1}^1(\omega) & U_{N-1}^2(\omega) & \cdots & \times & U_{N-1}^N(\omega) \\ U_N^1(\omega) & U_N^2(\omega) & \cdots & U_N^{N-1}(\omega) & \times \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad \cdots \quad K_N] \quad (7)$$

$$G = \begin{bmatrix} \times & G_1^2(\omega) & \cdots & G_1^{N-1}(\omega) & G_1^N(\omega) \\ G_2^1(\omega) & \times & \cdots & G_2^{N-1}(\omega) & G_2^N(\omega) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ G_{N-1}^1(\omega) & G_{N-1}^2(\omega) & \cdots & \times & G_{N-1}^N(\omega) \\ G_N^1(\omega) & G_N^2(\omega) & \cdots & G_N^{N-1}(\omega) & \times \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $U_j^i(\omega)$ 为第 i 个压电片作为激励、第 j 个压电片作为传感组成的监测通道下得到的 Lamb 波信号，且 $i \neq j$ ； $K_i(\omega)$ 和 $K_j(\omega)$ 分别为第 i, j 个压电片的机电耦合系数； $G_j^i(r, \omega)$ 为该通道传递函数。

对于规则布置的压电传感器网络来说，式(5)~(8)所述信号中将存在多组传播路径等效相同的监测通道(即传递函数 G 相同)，传播过程中信号幅值、相位等参数的变化也相同；同时，当选择窄带激励时，信号频率 ω 确定，此时各参数的频率相关性也随之成为定值，故机电耦合系数参数也为定值。鉴于 Lamb 波响应信号的相位信息与传感器/激励器机电耦合系数之间不存在明显相关性，因此，仅采用信号直达波能量作为考察参数时，这些通道下的 Lamb 波响应信号直达波幅值差异仅取决于各自通道中激励器和传感器的机电耦合系数差异，通过直达波幅值逆推得到各压电传感器机电耦合系数的差异，进而得到各传感器性能归一化补偿系数。

以含有 N 个压电片的等间隔线性压电阵列为例进行具体分析，如图 3 所示，阵列单元压电片两两组成的监测通道中具有多个等效通道组，在仅考虑直达波信号的情况下，各等效通道组内所有通道的 $G(r, \omega)$ 相同。对于具有相同阵列单元间隔 p 的监测通道组合 ($p=1, 2, 3, \dots, N-2$)，其信号幅度 $|U^p|$ 表达式可简述为

$$|U^p| = |I(\omega)| \cdot |G^p| \cdot |K^p| \quad (9)$$

式中 $|G^p|$ 、 $|K^p|$ 分别为对应的 Lamb 波传播传递函数幅值项和激励器与传感器机电耦合数乘积。对于

满足式(9)的响应信号 $U_j^i(\omega)$ ，其激励器和传感器编号有如下关系：

$$\begin{cases} i = p + 1, p + 2, \dots, N \\ j = i - p \end{cases} \quad (10)$$

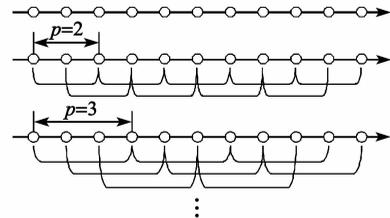


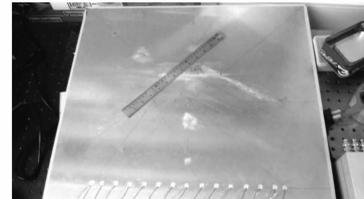
图 3 等间隔线性压电阵列示意图

对于不同的 p 值，可联列出多个矩阵方程，借助这些矩阵方程，可获得压电阵列中各压电片机电耦合系数相对比值。设定压电阵列中的某个压电片机电耦合系数归一化补偿系数为 1，通过方程求解即可得到其余全部压电片的补偿系数矩阵 K_C 。

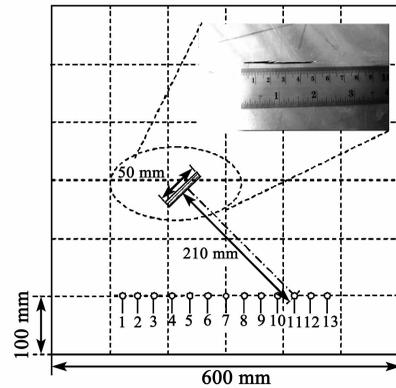
3 实验验证

3.1 实验条件

对上述方法进行了实验验证，实验试件采用 T6061 铝板，其尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ，如图 4 所示。在结构上安装了 13 片压电传感器，以垂直中心线为对称轴、间隔 30 mm 线性排列，线阵距离边界 100 mm 。缺陷采用切割机在板结构中切出长 50 mm 的细缝，模拟裂纹损伤，缺陷中垂线与线阵的夹角为 135° ，中垂线到第 11 个压电片的距离为 210 mm 。实验设备采用了实验室自主开发的多



(a) 实验试件



(b) 压电线阵

图 4 实验试件及压电线阵

通道 Lamb 波结构损伤扫查系统^[10-11],可外接 32 个压电传感器组成的阵列,信号发生器采样频率最高为 100 MS/s,数据采集采样频率上限为 60 MS/s。激励信号采用如图 5 所示的窄带调制正弦信号,选择中心频率为 200 kHz,此时,激发出的 Lamb 波信号以 S_0 模式为主。

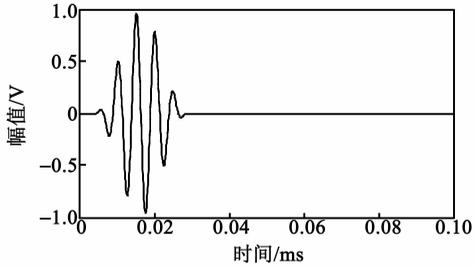


图 5 激励信号波形

3.2 实验数据分析

根据前述方法,选取满足等间距传播路径下的结构 Lamb 波响应信号进行分析。图 6 为压电阵列中间隔 3 个阵元(即 90 mm)的同组 10 个结构响应信号波形图。从信号情况来看,由于传播距离相等,其传递函数也基本相同,所以,各信号的直达波信号相位差很小。然而,受自身性能差异性、安装工艺等因素的影响,信号幅值存在一定的差异性,直达波峰值的区间为 $[1.924 \text{ V}, 2.399 \text{ V}]$,最大变化率达到了 20%。

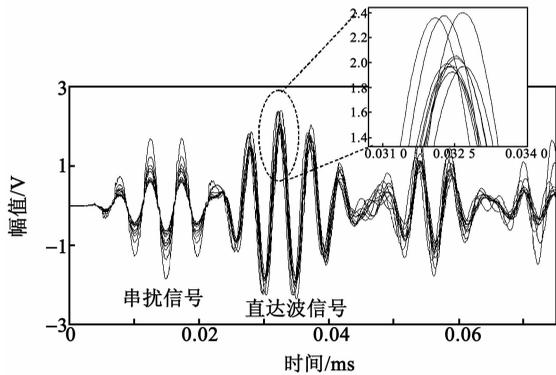


图 6 压电线阵间距为 3 个阵元的典型 Lamb 波结构响应信号

利用式(9)求解各压电传感器的机电耦合系数归一化补偿系数矩阵。由于式(9)所述方程数为 $[N(N-1)/2]-1$,而需要确定的解为 N ,因此,方程存在冗余。此外,测量过程中必会存在测量误差,因而求解方程过程中会存在一定的偏差。忽略这些误差和偏差得到的一组归一化补偿系数如图 7 所示,其中以中心压电片(7# 压电阵元)为归一化基准 1。从求解情况来看,少量压电传感器的机电耦合系数存在较大的偏差,性能补偿十分必要。

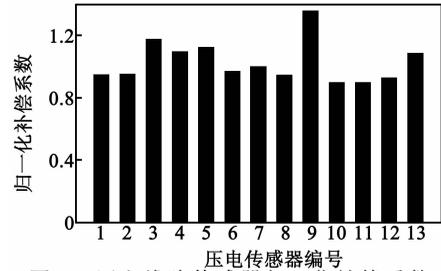


图 7 压电线阵传感器归一化补偿系数

采用所得归一化补偿系数矩阵对原信号进行补偿,以图 6 所示信号为例,得到典型补偿信号如图 8 所示。从补偿结果来看,各信号直达波峰值之间的偏差被补偿和压缩,峰值区间为 $[1.975 \text{ V}, 2.254 \text{ V}]$,最大变化率降到了 12.3%。

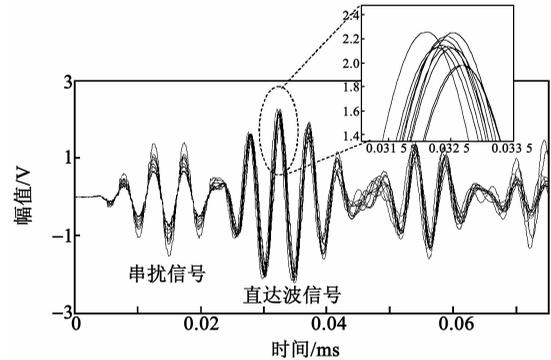
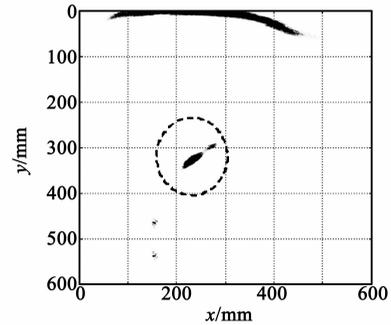
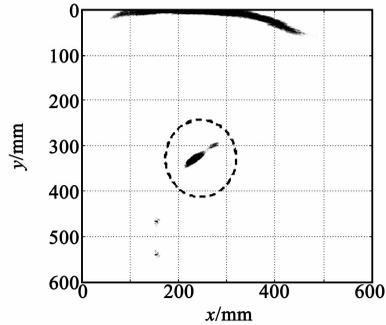


图 8 补偿后的典型 Lamb 波结构响应信号

分别采用补偿前、后的 Lamb 波结构响应信号对缺陷情况进行损伤成像^[12-13],得到的成像结果如图 9 所示。对比图 4 所示的真实缺陷位置和长度,



(a) 原信号损伤成像结果



(b) 补偿后信号损伤成像结果

图 9 传感器性能补偿前后损伤成像结果对比

由于部分信号的能量出现较大的偏差,造成损伤成像过程中各部分出现能量分布不均,从而引起偏差,如图9(a)所示。在一定程度上,通过对上述成像过程中出现的能量分布进行补偿,进而可得到较准确的成像结果,如图9(b)所示。

4 结束语

本文对 Lamb 波结构损伤监测研究中的压电阵列传感器性能差异补偿方法进行了研究。分析了窄带激励下,由于传感器性能偏差、安装工艺偏差等引起的压电传感器机电耦合系数差异,对 Lamb 波激励和传感的影响。利用压电阵列中等距离激励-传感组合具有相同的传递函数这一特点,求解压电传感器机电耦合系数性能差异补偿。实验研究表明,该方法在一定程度上能补偿因传感器性能偏差引起的信号幅值差异、能量不均衡,提高了对缺陷监测的准确性。

参考文献:

- [1] SU Zhongqing, YE Lin, LU Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295: 753-780.
- [2] DE MARCHI L, MARZANI A, MOLL J, et al. A pulse coding and decoding strategy to perform Lamb wave inspections using simultaneously multiple actuators[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 91:111-121
- [3] ZENG Liang, LIN Jing, BAO Jingjing. Spatial resolution improvement for Lamb wave-based damage detection using frequency dependency compensation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 394(4):130-145
- [4] QIU Lei, LIU Bin, YUAN Shenfang, et al. A scanning spatial wavenumber filter and PZT 2-D cruciform array based on-line damage imaging method of composite structure[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2016, 248:62-72.
- [5] 张燕,龚立娇. Lamb 波频散特性的数值仿真研究[J]. *压电与声光*, 2014, 36(5):701-704.
ZHANG Yan, GONG Lijiao. Numerical simulation study on Lamb wave dispersion curves[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(5):701-704.
- [6] 张维刚,戴美泽,郭世行,等. 兰姆波频散方程的理论求解及实验研究[J]. *声学技术*, 2016, 35(5): 403-407.
ZHANG Weigang, DAI Meize, GUO Shixing, et al. Numerical calculation of the Lamb wave dispersion equation by Newton-Raphson method[J]. *Technical Acoustics*, 2016, 35(5): 403-407.
- [7] 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: 291-305.
- [8] CAI Jian, YUAN Shenfang, QING Xinlin, et al. Linearly dispersive signal construction of Lamb waves with measured relative wavenumber curves[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 221:41-52.
- [9] WANG Qiang, YUAN Shenfang, SU Zhongqing. On time reversal-based signal enhancement for active Lamb wave-based damage identification [J]. *Smart Structures and Systems*, 2015, 15(6): 1463-1479.
- [10] 王强,苏众庆,王晶,等. 主动 Lamb 波结构健康监测集成化系统研究[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(4):1-7.
WANG Qiang, SU Zhongqing, WANG Jing, et al. Research on integrated active Lamb wave based structural health monitoring system[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2013, 33(4):1-7.
- [11] WANG Qiang, SU Zhongqing, CHENG Li. An in-situ structural health diagnosis technique and its realization via a modularized system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(4): 873-887.
- [12] ZENG Liang, ZHAO Ming, LIN Jing, et al. Waveform separation and image fusion for Lamb waves inspection resolution improvement[J]. *NDT & E International*, 2016, 79:17-29.
- [13] 尹本进,李友荣,鲁光涛. 基于 Lamb 波混合成像算法的薄板结构损伤定位[J]. *武汉科技大学学报*, 2017, 40(2): 132-137.
YIN Benjin, LI Yourong, LU Guangtao. Damage location for thin plate structures using hybrid imaging algorithm based on Lamb waves[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2017, 40(2): 132-137.