文章编号:1004-2474(2017)01-0110-03

基于双压电晶圆的 Lamb 波单模式提取方法

张 华,刘国强,李 明,张 杰

(中国飞机强度研究所,陕西西安 710000)

摘 要:基于压电传感器和兰姆(Lamb)波的主动诊断技术是一种有效的复合材料结构健康监测方法。Lamb 波传播特性复杂,频散现象和模态混叠导致接收信号的单一模式难以分辨。该文提出了一种采用双压电晶圆来提 取 Lamb 波中单一模式信号方法,它可以有效地解决由于多模式所引起信号混叠。由于该方法是从传感器自身物 理特性出发,不依赖具体结构或者传感器布置特性,所以该方法具有更好的工程适应性。碳纤维复合材料平板中 的单模式 Lamb 波提取实验,验证了方法有效性。

关键词:结构健康监测;兰姆(Lamb)波;双晶圆压电元件;单模提取 中图分类号:TN384;TB302.5 **文献标识码:**A

Lamb Wave Single Pattern Extraction Method Based on The Double Piezoelectric Wafer

ZHANG Hua, LIU Guoqiang, LI Ming, ZHANG Jie

(Avic Aircaft Strength Research Institute, Xi'an 610054, China)

Abstract: The active diagnoses technology based on the Lamb wave and piezoelectric sensor is an effective method for the composite structural health monitoring. The characteristics of the Lamb wave propagation is complex. And it is difficult to distinguish the different modal separately for the frequency dispersion and modal aliasing. This paper proposes a method of using the double piezoelectric wafer to extract the single modal Lamb wave. It can effectively solve the signal aliasing caused by modal mixing. Because this method is based on the physical properties of the sensors and does not depend on the specific structure or sensors layout features, so this method has better adaptability to the project. The validity of the proposed method has been verified by the experiment of extraction single mode of the Lamb wave in the carbon fiber composite plate.

Key words: structural health monitoring; Lamb wave; double circular piezoelectric; single modal extraction

0 引言

结构健康监测技术利用集成在结构中的先进传 感器网络,在线实时地获取与结构健康状况相关的信 息。基于压电兰姆(Lamb)波的健康监测方法具有对 结构中裂纹、分层等小损伤敏感,可监测区域大的优 势被认为是较有效的损伤监测方法^[1-5]。Lamb 波是 在板壳类结构中传播的一种超声导波。Lamb 波在结 构中传播时根据介质质点的运动形态可分为对称和 反对称模式。对称模式又进一步分为 S₀,S₁,...,S_n 等不同阶的模式,反对称模式同样可分为 A₀,A₁,..., A_n等不同阶的模式。即使在中低频状态下,也至少 存在 S₀ 和 A₀ 两种模式。然而在工程应用中 Lamb 波的损伤监测方法,由于多模式混叠及物理边界反射 的影响,通常难以获取准确的损伤信息。目前采用的 模式抑制方法主要有传感器优化布置^[6-7]、调节激励 频率^[8•9]、双面激励^[10]。传感器优化布置法利用各模 式的 Lamb 波的波速差,通过调节激励-传感元件间的 间距,从而使各模式波包区分,这种方法不能从根本 上解决多模式混叠,尤其结构较小,或结构中存在加 筋、孔洞等复杂结构时,该方法不再适用;调节激励频 率法只能选取特定频率,实际使用中不便进行频率调 节,而在结构频率特性不确定的情况下,往往需要进 行频率扫查研究;双面激励法对于两个传感器的选型 及粘贴的对称性要求高,实际操作存在困难。

目前,还没有可以有效抑制 Lamb 波多模式的 工程实用方法。而在工程实际监测中,由于结构复 杂性远高于简单的标准试验件从而导致对于实际结 构的监测存在信号难分析、难处理的问题,因此,对 于 Lamb 波模式简化存在需求。本文通过采用多级 式压电传感器方案,可有效抑制 Lamb 波的多模式 特性,同时其抑制效果不受传感器以外因素影响,具

收稿日期:2016-02-26

基金项目:中航工业集团创新基金资助项目(2013F62348R)

作者简介:张华(1988-),男,江苏南通人,硕士生,主要从事压电结构健康监测研究。

第1期

有一定的工程适用性。

1 双晶圆法 Lamb 波单模式提取原理

由于 S₀ 和 A₀ 模式的幅值与激励元件和传感元 件的尺寸相关,同时与其耗散系数相关 $(1/\sqrt{r_s})$,即

$$V(t) = C^{S_0}(t, r_s) S^{S_0}(a, c) + C^{A_0}(t, r_s) S^{A_0}(a, c)$$
(1)

$$C^{S_{0}} = -i \frac{2 \sqrt{2\pi\tau_{0}} Ehg_{31}}{\mu \sqrt{\xi^{S_{0}}} r_{s}} \cdot \frac{N_{S}(\xi^{S_{0}})}{D'_{S}(\xi^{S_{0}})} e^{i(\omega - \frac{\pi}{4} + \xi^{S_{0}} r_{s})}$$
(2)

$$S^{S_0}(a,c) = \frac{a}{c} J_1(\xi^{S_0} a) J_1(\xi^{S_0} c)$$
(3)

式中:a, c 分别为激励压电片和传感压电片的直径; t 为信号传播时间; r_s 为激励接收传感器距离; C^{A_0} 为仅与 t 和 r_s 相关的常数项 S^{A_0} 为与传感器尺寸相 关的项,由于原理一样可与 C^{S_0} 及 S^{S_0} 表示成相似的 形式; τ_0 为剪切应力幅值; $E \land h$ 分别为弹性模量和 结构厚度; g_{31} 为压电介电常数; ε 为对应频率下的波 数; J_1 ()为一阶贝塞尔方程。因 S₀ 和 A₀ 有不同的 波数,则在激励传感元件尺寸相同的情况下,两者的 幅值大小存在差异。因此,可以利用双压电晶圆传 感器来进行模式筛选。

图 1 为双压电晶圆传感器的设计方案。通过在 压电陶瓷材料镀层上划分出两个区域,即为图 2 中所 示的内圆和外环,分别对图 2 中的压电传感元件的内 圆和外环施加相同的激励信号。根据式(1)~(3)可



图 2 双圆传感器激励传感方式

得不同幅值比的 S_o和 A_o模式的 Lamb 波信号,即 SigAb和 Sigab。再通过设置内圆和外环不同的增益 作为权值,可以提取对应单模式 Lamb 波信号。

2 实验结果与讨论

图 3 为实验件中典型压电传感器布置示意图。 由于 Lamb 波信号中的 S₀ 模式的波速大于 A₀ 模式 信号的波速,信号中只能分辨 S₀ 模式信号的直达波 包部分,而 A₀ 模式信号的波包易和 S₀ 模式的边界 反射信号相混叠,从而导致 A₀ 模式的信号无法单 独区分出来。由路径 1 所采集到的信号(见图 4)可 看出内圆和外环所采集到的信号,仅能得到 S₀ 模式 的直达波信号,而 A₀ 模式信号由于与 S₀ 模式的边 界反射信号存在信号混叠,因此难以区分。而 S₀ 和 A₀ 信号对于不同损伤类型的敏感度不同,因此两种 模式的信号对于损伤识别同样重要。





采用双压电晶圆激励方案,结合之前所述 Lamb 波响应信号幅值计算方法,通过调整内圆 S。 模式的幅值至外环 S。模式的幅值(见图 5),然后再 通过两者相减可以极大程度上的削弱 Lamb 波传感 信号中的 S。模式的分量,从而得出只含有 A。模式 的 Lamb 信号分量,如图 6 所示。





通过对比图 4 和图 6 可知,其 S。模式可得到 明显抑制,从而获得 A。模式占据主导的信号。通 过模拟损伤形式,对于模拟损伤分别位于路径 1、 2、3 时的信号进行研究,图 7 分别为模拟损伤位于 路径 1 即 1-2 通道和路径 2 即 1-3 通道和路径 3 即 1-4 通道时,单模式 Lamb 波的损伤散射信号所对 应的 A。模式的信号幅值图。由于 S。模式信号得 到了抑制,信号中的幅值变化主要由 A。单一模式 的幅值变化引起,因此,信号在时域上更易区分, 波包信息更明显,不再受到多模式混叠而导致损 伤信息识别困难的影响。从而可以快速识别出损 伤所在的路径。



图 7 单模式信号模拟损伤监测

3 结论

 1)通过将传统压电元件重新设计成包含内圆 和外环的双压电晶圆传感器,可以获得两组包含 S。
 和 A。模式信号,且两组信号具有不同幅值比。

2)根据两组信号的不同幅值比特性,通过设置 一个权值系数,使两个信号的 S。幅值相等,再相减, 可以获得单模式的 Lamb 波信号。

3)由于本文所提出的单模式 Lamb 波提取方法,与结构本身属性无关,因此具有更广泛适用性。

参考文献:

- [1] 王强,袁慎芳,田峰,等.采用聚焦 Lamb 波方法的板结 构螺钉松动监测[J]. 压电与声光,2012,34(1):73-75.
 WANG Qiang,YUAN Shenfang,TIAN Feng, et al. Study on structural bolt debonding monitoring based on focused Lamb wave[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2012,34(1):73-75.
- [2] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展及应用[J]. 计算机测量与控制,2008,16(5):591-594.
- [3] 李爱军,章为国,谭键.飞行器健康管理技术综述[J]. 电光与控制,2007,14(3):79-83.
- [4] 张宝珍.预测与健康管理技术的发展及应用[J].测控 技术,2008,27(2):5-7.
- [5] 常琦,袁慎芳.国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展及应用[J].计算机测量与控制,2008,16(5):591-594.
- [6] 彭鸽,袁慎芳. 主动 Lamb 波监测技术中的传感元件优 化布置研究[J]. 航空学报,2006,27(5):957-962. PENG Ge, YUAN Shenfang. Optimization for collocation of sensors in active Lamb wave-based monitoring[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica,2006,27(5):957-962.
- [7] 王强,袁慎芳. 无参考主动 Lamb 波结构损伤时反成像监测方法[J]. 航空学报,2010,31(1):178-183.
 WANG Qiang, YUAN Shenfang. No baseline time reversal imaging method for active Lamb wave structural damage monitoring[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica,2010,42(1):62-67.
- [8] 张海燕,曹亚萍.于建波,等.采用单个压电传感器的单模式兰姆波激发频率的选择[J].物理学报,2011,60 (11):113301-1-9.
 ZHANG Haiyan,CAO Yaping,YU Jianbo, et al. Actu-

ating frequency selection of single mode Lamb waves using single piezoelectric transducer[J]. Acta Physica Sinica.2011.60(11):113301-1-9.

- [9] 庄杰,林宇,黄炜,等.基于 Lamb 波群速度的铝合金疲 劳损伤检测[J]. 压电与声光,2014,36(4):648-653. ZHUANG Jie, LIN Yu, HUANG Wei, et al. Fatiguedamage detection for aluminum material based on Lamb wave group velocity[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2014,36(4):648-653.
- [10] 蔡建,袁慎芳,张逍越,等. Lamb 波双面激励方法及其 在近邻损伤监测中的应用[J]. 南京航空航天大学学 报,2010,42(1):62-67.

CAI Jian, YUAN Shenfang, ZHANG Xiaoyue, et al. Lamb wave double side excitation and its application inadjacent damage monitoring[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1):62-67.