文章编号:1004-2474(2017)01-0097-04

基于压电阵列的无波速主动损伤监测方法研究

惠德畅,王 强,王培伦

(南京邮电大学自动化学院,江苏南京 210046)

摘 要:主动技术在结构健康监测研究中有着不可替代的作用。文章研究了基于压电传感阵列的无波速主动结构健康监测方法,给出了单像素点的损伤概率计算方法及在不计算 Lamb 波波速的情况下对结构进行主动损伤成像、定位的方法。通过实验,对比了利用波速标定值的传统方法和无波速监测方法的成像定位效果,发现了无波速主动监测方法能有效提高定位精度,提升成像效果,为基于压电阵列的结构健康监测技术提供了一种新的工业应用方法。
关键词:压电阵列;主动结构健康监测技术;损伤概率;无波速;损伤成像定位

中图分类号:TN384 文献标识码:A

Study on Active Damage Imaging Monitoring Method With No Wave Velocity Based on Piezoelectric Array

HUI Dechang, WANG Qiang, WANG Peilun

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China) **Abstract:** The active method has an irreplaceable role in the structural health monitoring research. The article studied the active structural health monitoring method with no wave velocity based on the piezoelectric array. The damage probability calculation method of single pixel dot was given. The active structural damage imaging and locating method without calculating the Lamb wave velocity was also given. Through comparing the conventional method result which uses the experimental calibration velocity with the new method with no wave velocity, it is found that the active monitoring method with no wave velocity can improve the location accuracy and imaging result effectively. The method provides a new industrial application way for structural health monitoring technology based on the piezoelectric array.

Key words: piezoelectric array; active structural health monitoring technology; damage probability; no wave velocity; damage locating and imaging

0 引言

近年来,结构健康监测技术作为智能材料结构 研究的重要组成部分,得到了国内、外学者的重视和 研究。结构健康监测技术能够对结构中出现的损伤 进行实时在线监测,对损伤的类型、大小、位置等信 息进行计算,并给出结构可靠性评估,为结构健康控 制提供有效信息。从监测方式上可将结构健康监测 技术分为主动及被动两种方法。其中,主动方法借 助预埋的激励器对结构进行激励,通过分析响应信 号来获得结构状态信息,对一些固有的细微损伤如 裂纹、脱层等较敏感^[1-2]。

主动方法中,求解结构中传导的 Lamb 波波速 是较重要的部分。Lamb 波是多模式的复合波,在 一般的金属平板结构中,由于金属材料各向同性, Lamb 波在其内部传导时的群速度和相速度能通过 公式求得^[3]。但在复合材料结构中,其各向异性导致 Lamb 波的群速度和相速度很难通过公式求解, 而实验标定的 Lamb 波波速误差也较大,对定位结 果和成像效果的影响较大。

本文研究了一种基于压电阵列的无波速主动结构健康监测技术,给出了结构表面像素化的原理,并 通过赋予每个像素点与真实损伤的对比度,实现在 无波速情况下对结构进行主动定位、成像。通过实 验,验证了基于压电矩阵的主动技术能够在不计算 Lamb 波群速度和相速度的前提下,有效地对结构 进行损伤定位及成像。

1 理论研究

具有正、逆压电效应的压电材料为结构健康监测技术提供了一种低成本、高效率的激励器与传感 器解决方案。利用逆压电效应可以使压电材料成为

收稿日期:2016-04-19

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(61533010);中国博士后基金资助项目(2015M570401);南京邮电大学科研基金资助项目(NY251093) 作者简介:惠德畅(1989-),男,江苏无锡人,硕士生,主要从事风机叶片复合材料结构健康监测技术方面的研究。通信作者:王强(1980-),男, 江苏句容人,副教授,博士,主要从事结构健康监测、先进传感技术及测试信号处理方面的研究。E-mail:wangqiang@njupt.edu.cn。

激励器,向结构中进行窄带激励信号的激发;利用正 压电效应可以使压电材料成为传感器,接收结构的 响应信号^[4]。本文使用压电陶瓷(PZT)锆钛酸铅制 成压电传感器,在不同时段复用为传感器或激励器, 从而进行接收信号或激励。将压电传感器按照一定 的几何排布进行设置,能够得到几何位置恒定的压 电传感阵列,进而为结构健康监测技术提供高效的 监测基础^[5-6]。

传统的主动技术包括基于路径的方法和基于散 射信号的方法等^[7-10],各方法都需要求解 Lamb 波 的波速。一般的金属材料由于其弹性模量恒定,所 以其频散曲线可以求得。但在复合材料中,如增强 型玻璃纤维结构,由于其各项异性,Lamb 波在各个 方向和距离上的频散效应不同,很难通过公式求解 其波速。即使是实验标定的波速,由于不同方向的 波速不同,也会对定位成像产生误差。

本文将结构进行像素化,对每一个像素点求解其 物理位置和真实损伤信息之间的对比度,即像素点为 损伤的概率,并将损伤概率赋予每一个像素点。通过 计算所有像素点的概率值并设置阈值,可以发现损伤 概率较大的像素点,即认为其为定位和成像的位置。

1.1 结构像素化及监测原理

基于压电损伤矩阵的结构健康监测原理为:将 结构划分若干个相同大小的小块,称为像素块,这个 过程称为像素化,将每个像素块的物理位置信息与 真实损伤的信号对比,得出像素点的损伤概率。对 于整个结构表面来说,单像素点的损伤概率越大,则 越可能为损伤。损伤概率最大的像素点即认为是损 伤定位点。对所有像素点的损伤概率值进行成像, 并通过设置阈值,能够得到结构损伤的成像效果图。

设表面宽为 X,长为 Y 的长矩形结构,将结构 表面均匀等分为若干个正矩形块,认为每一个小块 为一个像素点。像素点边长 *l* 取决于结构健康监测 要求的精度单位值。像素化示意图如图 1 所示。



则结构中的像素点数量为 *m*×*n*。每一个像素点都 与损伤位置有差异,认为其与损伤位置的差异为损 伤概率。设 *m*×*n* 阶矩阵,矩阵中第*i*行*j*列的元素 值——对应于结构中相应像素点的损伤概率,像素 点坐标即为(*i*,*j*),即能得到主动方法的成像矩阵。 主动技术成像矩阵为

 $A_{nm} = [\alpha_{ij}]$ $i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,n$ (2) 式中 α_{ij} 为主动方法结构像素点损伤概率。

1.2 无波速主动监测技术

主动监测技术一般要求获知 Lamb 波在结构中 传导的相速度和群速度,然而大多数复合材料为各 向异性材料,通过理论推导其波速较难。在短距内 Lamb 波波速衰减可忽略且认为各个方向的波速基 本恒定相同。以压电损伤矩阵为基础,提出基于无 波速的主动监测技术,以避免求解波速带来的误差。 由于要在无波速的情况下进行计算,所以要充分利 用波速恒定,则距离比约等于时间比。单像素点的 损伤概率为

$$\alpha_{ij} = \sum_{a=1, a \neq z}^{k} \sum_{b \neq a, b \neq z}^{k} \chi_{ab} \frac{\left| \frac{t_a - t_z}{t_b - t_z} - \frac{S_{ij}^z + S_{ij}^a}{S_{ij}^z + S_{ij}^b} \right|}{\frac{t_a - t_z}{t_b - t_z}} \quad (3)$$

式中:k 为传感器数量; t_a 、 t_b 为第a、b 个传感器接收 到的 Lamb 波到达时间; t_z 为第z 号传感器复用为 激励器时的信号激励时间;S 为像素点到传感器之 间的距离; χ_{ab} 为两个传感器到像素点的距离权值。 由于式(3)中 α 值越小则表征与真实信号的差距越 小,所以对矩阵 A 作标准化处理,则有

$$\mathbf{A}_{mm}^{*} = \frac{\max(\mathbf{A}_{mm}) - \alpha_{ij}}{\max(\mathbf{A}_{mm}) - \min(\mathbf{A}_{mm})}$$
(4)

式中 max 与 min 表征矩阵中最大、最小的元素值。 式(4)得到新矩阵 A*,其中元素的值则为单像素点 的损伤概率,越靠近于 1 则损伤概率越大。从式 (3)、(4)可看到,单像素点的损伤概率主要来自于真 实信号中蕴含的时间信息比与单像素点到传感器距 离信息比的比值。这样可以在无波速的情况下,对 损伤矩阵进行判断,找到损伤概率较大的像素点群, 认为像素点群组成了损伤区域。

2 验证实验结果与讨论

2.1 实验对象及实验步骤

选用厚 3 mm 的增强玻璃纤维复合材料薄板作 为实验对象,在其上粘贴 4 枚压电传感器形成基本 压电阵列。基本示意图如图 2 所示。



像素点大小为 1 mm×1 mm,按照矩阵特性以 4 号压电传感器为原点,4 号到 1 号方向为 x 轴正方 向,到 3 号方向为 y 轴正方向建立坐标系,如图 2 所 示。像素块为 1 mm×1 mm 的正矩形。

对压电传感器进行窄带激励信号激励,激励信号的中心频率为 60 kHz,利用 NI-USB6366 作为数据采集设备,采样率 1 MHz,对其余 3 个压电传感器进行数据采集,并进行信号调理,滤波带宽 1~200 kHz。

对于真实采集信号,通过计算其峰值到达时间 来计算 Lamb 波到达的时间。实验步骤包括:

1) 先在不粘贴损伤的前提下,激励1号压电 片,采集其余3枚传感器的数据,进行信号调理并存 储,称为无损基准信号。

2) 在结构待监测表面粘贴模拟损伤,再次激励
1 号压电片,记录剩余传感器信号,称为有损信号。

3) 将无损基准信号与有损信号相减,得到损伤 散射信号,并计算散射信号的 Lamb 波到达时间。

4)利用无损基准信号的 Lamb 波到达时间,标 定结构各个方向上的 Lamb 波波速,并利用传统方 法进行成像定位。

5)利用本文无波速方法进行成像与定位,并将 本文方法的成像定位结果和传统利用波速的成像定 位结果相对比。

2.2 实验结果及对比

对1号压电片进行激励,得到无损基准信号(见 图 3(a)),在结构表面粘贴模拟损伤,坐标为(125, 187),得到有损信号(见图 3(b)),将有损与无损基 准信号相减得到散射信号,如图 3(c)所示。





图 3 无损基准信号、有损信号和损伤散射信号

通过多次测量无损基准信号,根据激励器和传 感器的几何距离关系,可以通过实验标定,计算得到 各方向上多次 Lamb 波平均波速为1543 m/s。按 照传统方法,代入实验标定 Lamb 波波速,得到的成 像效果如图4所示。



图 4 实验标定 Lamb 波波速的传统方法成像效果 利用同一数据,根据式(3)、(4)使用无波速方法 对数据进行成像,令距离权值为平均权值。成像效





图 5 无波速方法成像效果图

基于实验标定 Lamb 波波速的主动成像定位方 法的定位点和基于无波速的主动方法定位点对比如 表1所示。其中模拟损伤中心点为(125,187)。

表1 两种方法的定位点对比

方法	有波速	无波速
定位点/mm	(117,224)	(122,212)
x 轴差/mm	8	3
y 轴差/mm	37	25
总偏差/mm	37.9	25.2

图 4(b)、图 5(b)中的一个像素的大小为1 mm× 1 mm。实验证明,无波速法不仅能提高损伤的定位 精度,且使成像结果的几何外形更接近于真实损伤 区域的几何外形。基于损伤矩阵的主动结构健康监 测技术提供了一种能够在复合材料前提下,不利用 Lamb 波波速进行结构健康监测的技术,成像效果 和定位精度得到提升。

3 结束语

本文研究了基于压电矩阵的主动无波速结构健 康监测技术,给出了结构像素化的方法,并给出了在 不计算 Lamb 波波速的前提下,利用主动技术对结 构进行监测的方法。实验显示了这种方法能够有效 地监测主动信息,在无波速的情况下对损伤进行监 测,并提高定位精度和成像效果。

参考文献:

- [1] XU Hanhui, XU Chunguang, ZHANG Yuntao, et al. Ultrasonic transducer array tomography for detecting defect of metal plate based on Hilbert transformation[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011, 20(4):514-519.
- [2] PARK S, YUN C B, ROH Y, et al. PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(4): 957-966.
- [3] 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. Fatigue damage detection for aluminum material based on lamb wave group velocity[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2014,36(4): 648-653.
- [4] 王强,袁慎芳.主动 Lamb 波结构健康监测中信号增强 与损伤成像方法[J].航空学报,2008,29(4):1061-1067.
 WANG Qiang, YUAN Shenfang. Amplifying signal and imaging damage method for active lamb wave structure health monitoring [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2008, 29(4): 1061-1067.
- [5] 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):71-77.

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):71-77.

- [6] 邱雷,袁慎芳,王强.基于 Lamb 波主动结构健康监测 系统的研制[J].压电与声光,2009,31(5):763-766.
 QIU Lei, YUAN Shenfang, WANG Qiang. Development of lamb wave based active structural health monitoring system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2009, 31(5):763-766.
- [7] 刘增华,樊军伟,何存富,等. 基于概率损伤算法的复合 材料板空气耦合 Lamb 波扫描成像[J]. 复合材料学 报,2015,32(1):227-235.
 LIU Zenghua,FAN Junwei,HE Cunfu, et al. Scanning imaging of composite plate using air-coupled Lamb waves based on probabilistic damage algorithm[J]. Ac-
- [8] 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(3/5):753-780.

ta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1):227-235.

- [9] WANG Q, YUAN S. Baseline-free imaging method based on new PZT sensor arrangements[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2009, 20(14):1663-1673.
- [10] GIURGIUTIU V, LIN B, SANTONI-BOTTAI G, et al. Space application of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2011, 22 (12):1359-1370.