

基于超声兰姆波的诊断图像方法研究

周超, 岳夏, 张春良

(广州大学机械与电气工程学院, 广东广州 510006)

摘要:基于兰姆波的诊断图像法直观地展现了结构的健康状况。该文通过损伤参数(位置、形状、方向、严重程度)与兰姆波信号特征(飞行时间, 信号强度)的联系, 研究开发了一种新颖的诊断图像法, 并基于传感器网络对结构健康状况进行监测。采用有限元仿真与实验研究两种手段对有裂纹的铝板进行诊断。其成像结果具有较高的精度, 证明了本方法的可行性。

关键词:超声兰姆波; 压电陶瓷; 无损检测; 诊断图像法; 结构健康监测

中图分类号: TM282; TH165.3 **文献标识码:** A

Study on the Diagnostic Imaging Technique Based on Ultrasonic Lamb-wave

ZHOU Chao, YUE Xia, ZHANG Chunliang

(School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The diagnostic imaging technique based on ultrasonic Lamb wave can show visually the healthy status of the structure. In this study, a novel diagnostic imaging technique was developed based on the correlation between damage parameters (location, shape, orientation and severity) and Lamb waves signal features (time-of-flight, signal intensity). The structural health was monitored with the assistance of an active sensor network. Both FE simulation and experimental study were conducted to examine a through-thickness crack in an aluminium plate. The diagnostic results have shown high accuracy, which demonstrated the effectiveness of the proposed method.

Key words: ultrasonic Lamb waves; PZT; nondestructive evaluation; diagnostic imaging; structural health monitoring

0 引言

与传统的无损检测方法不同, 基于智能材料的结构健康监测技术, 将微小的传感器(压电材料, 光纤)安装于大型结构中, 自动、实时地进行监测。F. K. Chang 等将压电陶瓷晶片安装于飞行器结构中, 用于激发和采集超声波信号, 从而实现结构缺陷的在线诊断^[1]。V. Giurgiutiu 教授率先建立理论模型, 对压电晶片所激发的超声兰姆波进行模态调谐^[2]。H. Sohn 等开发了基于超声导波的压电晶片-激光扫描综合成像系统对大型飞行器结构进行诊断^[3]。J. E. Michaels 教授则致力于基于超声兰姆波的诊断成像方法研究^[4]。苏众庆教授阐述了基于超声兰姆波的在线诊断技术^[5]。袁慎芳等长期从事航空航天飞行器的实时诊断技术研究, 在基于压电材料及光纤材料的智能监测技术方面作出了重要

贡献^[6-10]。

综合国内、外研究现状, 经过学者们多年来的共同努力, 基于智能材料的结构缺陷在线诊断方法日趋完善, 但是也存在一些不足。如传统的结构健康监测技术是一种定性的监测, 不足以满足工程实际需求。本文开发了一种基于图像的结构缺陷在线监测技术, 定量地评估结构的健康状况, 包括损伤位置、损伤严重程度等。

1 检测原理

在线定量评估大型结构关键部件的健康状况(包括有无损伤、损伤位置、损伤严重程度)具有重要的意义。解决该问题的关键在于建立一系列损伤参数(损伤位置、损伤严重程度等)与超声波关键信号特征(飞行时间、信号相关性、信号畸变程度、信号能量衰减等)的定量关系。

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 广东高校优秀青年创新人才培养计划基金资助项目(2013LYM_0068); 国家自然科学基金资助项目(51305086, 51275099)

作者简介: 周超(1982-), 男, 四川人, 讲师, 博士, 主要从事智能材料, 超声检测的研究。

1.1 损伤位置与飞行时间

如图1所示,一般考虑任意一对传感器 S_i-S_j , S_i 作为信号发生器, S_j 作为信号接收器(基于正、逆压电效应,每个压电晶片传感器既可用于信号发生器,也可用作信号接收器)。以 S_i 为原点,建立局部坐标系。 S_j 的坐标为 (x_j, y_j) ,损伤的坐标为 (x_D, y_D) 。假设超声波的声速恒为 v ,可得

$$\left(\frac{L_{S_i-D}}{v} + \frac{L_{D-S_j}}{v}\right) - \frac{L_{S_i-S_j}}{v} = \Delta t_{i,j} \quad (1)$$

其中,

$$L_{S_i-D} = \sqrt{x_D^2 + y_D^2} \quad (2)$$

$$L_{D-S_j} = \sqrt{(x_D - x_j)^2 + (y_D - y_j)^2} \quad (3)$$

$$L_{S_i-S_j} = \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \quad (4)$$

式中 $\Delta t_{i,j}$ 为 S_i 激发的超声波经过损伤散射后到达 S_j 所用时间,与 S_i 激发的超声波直接到达 S_j 所用时间的的时间差。求解式(1)可得,类似于椭圆的根轨迹,进而预估损伤的位置。

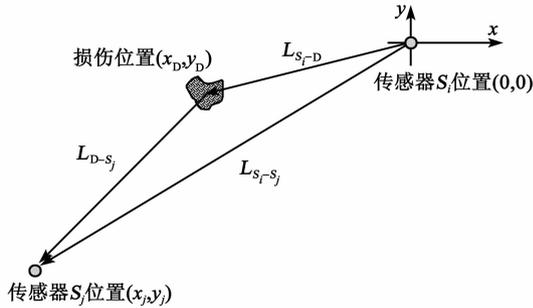


图1 结构损伤与传感器之间的几何关系

将待检测结构离散为 $K \times L$ 个节点,每个节点对应一个像素值,指示结构出现损伤的概率。如果节点恰好位于式(1)所对应的根轨迹上,那么该位置具有较高的损伤概率;如果节点远离根轨迹,则出现损伤的概率极小。本文采用累计分布函数来量化各节点出现损伤的概率:

$$F(z) = \int_{-\infty}^z f(z_{ij}) \cdot dz_{ij} \quad (5)$$

式中: $f(z_{ij}) = \frac{1}{\sigma_{ij} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{z_{ij}^2}{2\sigma_{ij}^2}\right]$ 为高斯分布函数,表征了传感路径 A_i-S_i 所感知的节点 (x_m, y_n) 出现损伤的概率密度,其中 σ_{ij} 为标准差; $z_{ij} = \|\chi_i - \mu_{ij}\|$,其中 χ_i 为节点 (x_m, y_n) 所对应的位置矢量, μ_{ij} 为根轨迹上与节点 (x_m, y_n) 距离最近位置的位置矢量。因此,已知节点 $I(x_m, y_n)$ 与根轨迹的距离 z_{ij} ,该节点由传感路径 A_i-S_i 所感知的损伤系数为

$$I(x_m, y_n) = 1 - [F(z_{ij}) - F(-z_{ij})] \quad (6)$$

式(6)所对应的损伤系数基于飞行时间得到,可用来确定损伤位置。但损伤程度、大小、形状等与飞行时间的关系不明显,而与回波的能量密切相关,因此对式(6)进行修正可得第一类损伤系数为:

$$I(x_m, y_n)' = \frac{I(x_m, y_n) \times \Xi}{\Xi_{\max}} \quad (7)$$

式中: $\Xi = \xi \times \sqrt{t_{arr}}$, ξ 为损伤散射波信号的能量, $\sqrt{t_{arr}}$ 用于补偿波信号随传播路径而产生的能量衰减,其中 t_{arr} 为损伤散射波到达的时间; $I(x_m, y_n)'$ 为修正后的损伤系数(第一类损伤系数); Ξ_{\max} 为采集到的损伤散射波的最大能量值。

1.2 损伤严重程度与信号相关性

健康监测过程通常是一个前、后比较的过程,即结构健康状况与结构出现损伤状况下的对比。

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)(y_i - \mu_Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_Y)^2}} \quad (8)$$

式中: ρ_{XY} 为波信号 X 和 Y 的相关系数; μ_X 和 μ_Y 为 X 和 Y 的数学期望。

如式(8)所示,比较结构健康状况与结构出现损伤状况下分别采集到的特征信号,计算 ρ_{XY} 。 ρ_{XY} 越大,说明当前结构状况越接近健康;反之, ρ_{XY} 越小,结构出现损伤的概率越大。由此,得到第二类损伤系数:

$$I(x_m, y_n)'' = (1 - \rho_{XY}) \left[\frac{\zeta - R_{ij}(x, y)}{\zeta - 1} \right] \quad (9)$$

式中 ζ 为参数,用于调整感知区域。

$$R_{ij}(x, y) = \begin{cases} r_{ij}(x, y) & r_{ij}(x, y) < \zeta \\ \zeta & r_{ij}(x, y) \geq \zeta \end{cases} \quad (10)$$

$r_{ij}(x, y)$ 为节点 (x_m, y_n) 到传感器 (x_i, y_i) 的距离与节点 (x_m, y_n) 到传感器 (x_j, y_j) 的距离之和,与传感器 (x_i, y_i) 到传感器 (x_j, y_j) 的距离之比,即

$$r_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{\sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2}} \quad (11)$$

综上所述,基于式(7)、式(9)可对结构健康状况进行在线监测,并以图像的形式体现出来。

2 数值模拟

如图2所示,构建一个尺寸为 $600 \text{ mm} \times$

600 mm×1.5 mm 的铝板作为数值仿真模型。假设在铝板中随机位置出现了一个长 16 mm, 宽 0.64 mm 的裂纹, 采用 16 个直径为 $\varnothing 5$ mm 的圆形 PZT 传感器对铝板进行实时监测。PZT 传感器尺寸微小, 可以永久的粘贴于结构表面或植入结构中, 适合在线的监测。

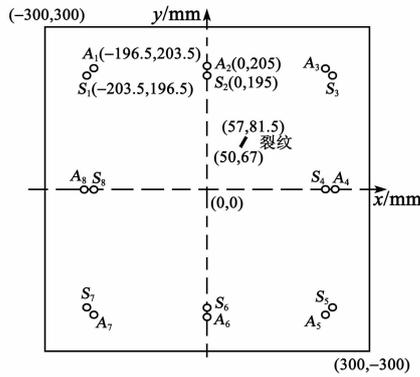


图 2 样品尺寸及传感器位置

用三维 8 节点实体单元划分网格。裂纹用去除材料的方法模拟。采用中心频率为 450 kHz 的汉宁窗调制的 5 周正弦短波作为激励信号。本文采用对裂纹较敏感的 A_0 模态(波长较短)进行监测。为了更好地激励出 A_0 模态, 铅垂方向的振动(z 轴)施加于 PZT 模型上、下表面的每一个节点上, 如图 3 所示。采用有限元软件 ABAQUS®/EXPLICIT 进行动态仿真, 用以模拟兰姆波的波动特性。为了保证模拟精度, 单元尺寸被限定为 0.6 mm, 从而保证 1 个波长至少包括 10 个单元。

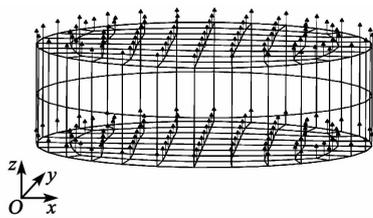


图 3 PZT 有限元模型

3 实验验证

采用的实验装置如图 4 所示。将压电陶瓷晶片(PZT)传感器网络安装于待检测结构中, 作为结构的一部分实时感知结构健康状况。通过信号发生器(Agilent® E1441)和信号放大器(PiezoSys® EPA-104)激发每一个压电陶瓷晶片传感器单元, 产生超声波对待测结构进行在线扫描; 通过数字示波器(HP™-54810A), 采集到含有结构健康状况特征的

原始信号; 通过离散小波变换(DWT)对原始信号进行降噪处理, 提取信号关键特征; 基于第一、二类损伤系数得到表征结构健康状态的源图像; 最后, 将源图像进行数据融合, 得到最终的诊断图像。

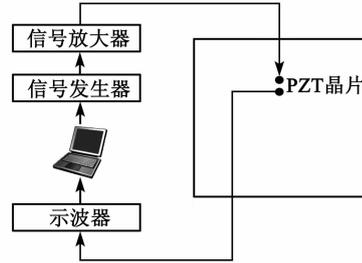


图 4 实验装置示意图

为了进行对比, 实验样品与数值模拟保持一致, 如图 5 所示。铝板尺寸 600 mm×600 mm×1.5 mm。16 个圆形压电陶瓷晶片粘贴于铝板表面。压电陶瓷晶片(PZT)直径 $\varnothing 5$ mm, 厚 0.5 mm, 具体坐标见图 2。

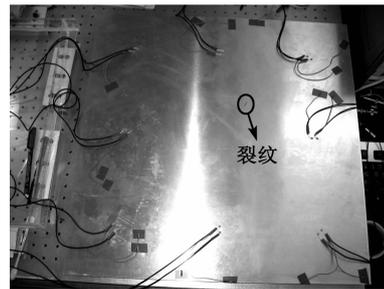
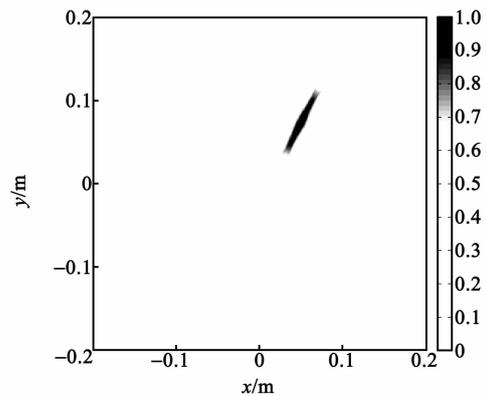
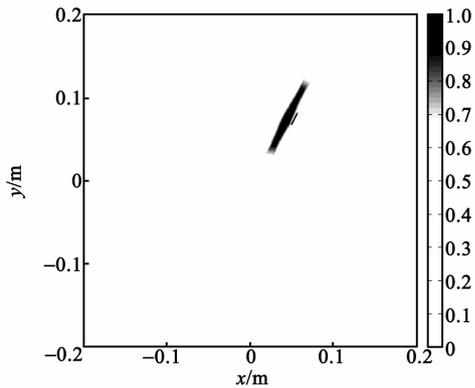


图 5 实验样品

最终的诊断图像如图 6 所示。由图可见, 仿真与实验吻合较好, 证明了本文开发的诊断图像法的可行性。图中, 裂纹位置、方向、形状都可以精确地识别。但裂纹大小偏差较大, 需要进一步改进算法来增加监测精度。



(a) 有限元仿真所得结果



(b) 实验所得结果

图6 诊断图像

4 结束语

本文针对飞机、火车等大型结构,研究了一种基于超声兰姆波以及压电陶瓷传感器网络的在线监测技术。本文基于超声兰姆波信号特征与损伤参数(损伤位置与飞行时间、损伤严重程度与信号相关性)的定量关系,基于诊断图像的方法,定量地评估结构缺陷。通过有限元仿真及实验验证了所研究方法的可行性。

参考文献:

- [1] CHANG F K. Built-in damage diagnosis for composite structures[C]//Whistler, Canada; in Proceedings of 10th International Conference on Composite Materials, 1995.
 - [2] GIURGIUTIU V, BAO J. Embedded-ultrasonics structural radar for in situ structural health monitoring of thin-wall structures[J]. Structural Health Monitoring-an International Journal, 2004, 3:121-140.
 - [3] SOHN H, DUTTA D, YANG J Y, et al. Swenson, delamination detection in composites through guided wave field image processing[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71:1250-1256.
 - [4] MICHAELS J E, MICHAELS T E. Guided wave signal processing and image fusion for in situ damage localization in plates[J]. Wave Motion, 2007, 44:482-492.
 - [5] SU Z, YE L. Identification of damage using lamb waves: from fundamentals to applications[M]. London: Springer-Verlag GmbH & Co., 2009.
 - [6] 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.
 - [7] 邱雷, 袁慎芳. 集成压电健康监测扫查系统的研制及其应用[J]. 压电与声光, 2008, 30(1):39-41. QIU Lei, YUAN Shenfang. Research and application of integrated health monitoring[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2008, 30(1):39-41.
 - [8] 王强, 袁慎芳, 陈小惠, 等. 主动 Lamb 波合成波阵面损伤成像监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2468-2474.
 - [9] 王强, 王晶. 基于压电元件的 Lamb 波模式调制方法[J]. 信息化研究, 2011, 37(5):12-15.
 - [10] YUAN S, LIANG D, SHI L, et al. Recent progress on distributed structural health monitoring research at NUAA[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2008, 19(3):373-386.
-
- (上接第 872 页)
- [4] HUMBERTO C, JAUME E, JOSEP M, et al. Localized and distributed mass detectors with high sensitivity based on thin-film bulk acoustic resonators[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(3):33507-33507.
 - [5] 高杨, 何婉婧, 李君儒, 等. 膜片上薄膜体声波谐振器型微加速度计[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(6): 262-269. GAO Yang, HE Wanjing, LI Junru, et al. Micro-accelerometer with film bulk acoustic resonator on diaphragm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(6):262-269.
 - [6] NAGARAJU M B, LINGLEY A R, SRIDHARAN S, et al. A $0.8 \text{ mm}^3 \pm 0.68 \text{ psi}$ single-chip wireless pressure sensor for TPMS applications[C]//San Francisco, CA: Solid-State Circuits Conference-(ISSCC), 2015 IEEE International, 2015:1-3.
 - [7] ZHANG H, KIM E S. Micromachined acoustic resonant mass sensor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(4):699-706.
 - [8] LAKIN K M, KLINE G R, MCCARRON K T. High-Q microwave acoustic resonators and filters[J]. Microwave Theory and Technique, 1993, 41(12):2139-2146.
 - [9] 周斌. 体硅背刻蚀型 L 波段 FBAR 滤波器设计[D]. 绵阳:西南科技大学, 2014.
 - [10] 李丽, 郑升灵, 王胜福, 等. 高性能 AlN 薄膜体声波谐振器的研究[J]. 半导体技术, 2013, 38(6):448-452. LI Li, ZHENG Shengling, WANG Shengfu, et al. Study on high performance AlN film bulk acoustic resonator [J]. Semiconductor Device, 2013, 38(6): 448-452.