

基于 Lamb 的金属薄板损伤主动监测技术研究

解维华, 汤 珺, 张博明, 杜善义

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 开发了一个主动嵌入式多激励健康监测系统, 介绍了利用 Lamb 波进行损伤监测的原理和流程, 测试了试验用铝板的群速度频散曲线。分别利用不同的压电陶瓷 (PZT) 片作为激励端和响应端, 进行了不同传播路径的试验测试, 对损伤前后的不同传播路径的测试波形进行分析处理和比较, 找到了反映损伤前后波形变化的规律。利用散射波能量与基准能量的比值定义了损伤率的概念, 以孔洞损伤为例计算了损伤对不同传播路径损伤率的数值影响, 结果表明该特征值可用于实现对损伤位置的判断。

关键词: 压电陶瓷传感器; Lamb 波; 主动健康监测; 损伤率

中图分类号: TB121 **文献标识码:** A

Technical Research on Active Detection and Monitoring of Damage in Metallic Plate Based on Lamb Wave

XIE Wei-hua, TANG Jun, ZHANG Bo-ming, DU Shan-yi

(Center for Composite Material, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A built-in active multiple-actuator structure health monitoring system was developed, and the flow chart and the principle of damage detection using lamb wave was introduced. The frequency dispersion of the testing aluminum plate was measured, and the measurements on some diagnose paths were completed using different PZT as actuators and sensors. The response data of damaged and undamaged were analyzed and compared, the rule of the wave pattern change was found. The damage index was defined as the ratio of scatter energy to baseline energy, the influence of hole on damage index of different diagnose path were given, and the results showed that this feature could be used to identify the location of the damage.

Key words: PZT sensor; Lamb wave; active health monitoring; damage index

在无损检测研究中 Lamb 波法一直是研究的热点。Lamb 波是一种超声波, 也称板波^[1], 它只在两个自由表面的介质(平板)中产生, 其波长与板厚相当。Lamb 波的传播距离远, 在监测大面积结构时, 如在机翼和机身上有着广阔的应用前景, 可用来监测各种损伤。与穿透法、涡流、X 射线等方法相比, 该法的一个显著特点是波信号的产生和收集很容易地通过集成在结构上的传感器和制动器完成^[2], 这一特点使其在航空、航天结构的损伤检测和监测上具有很大优势。近年来, Lamb 波法在此方面的研究取得了一些进展, 南航的彭鸽和袁慎芳^[3]等人利用时间差对板结构的损伤进行椭圆定位, 但对损伤的位置有要求。邓明晰^[4,6]利用 Lamb 波的二次谐波分析了层状固体结构的表面性质, 但过程较复杂。王军和王寅观^[7]理论推导了金属薄板中 Lamb 波波速与静应力的关系。Jeong-Beom Ihn 和 Fu-Kuo Chang^[8,9]采用压电陶瓷(PZT)片对金属结构的裂纹和分层进行了研究。本文将 Lamb 波理论分析与主动监测技术相结合, 利用嵌入式的 PZT 片

产生 Lamb 波, 进行了主动信号监测试验研究, 测试了试验用铝板的群速度频散曲线, 利用不同传播路径上的散射信号的损伤率进行了损伤定位研究。

1 主动健康监测系统

结构健康监测主要包括传感技术、激励信号、信号处理技术、识别与诊断以及集成技术^[3]五个方面的内容。主动监测系统的基本思想是采用驱动器在结构表面激发主动监测信号, 与此同时传感器在同一表面的其他一个或多个地方接收结构响应信号, 根据对响应信号的分析, 完成对结构健康状态的监测。主动健康监测技术的关键是对监测到的主动信号的分析, 因此, 在主动监测中应充分利用主动激励信号可控制的特点, 通过控制激励信号, 将注意力倾注于受结构健康状况影响最为敏感的群速度、相速度和散射波等参数上, 可减少对其他信号的分析。

PZT 传感器因具有压电效应, 既能作为制动器, 又能作为接收器, 且灵敏度高, 响应速度快, 适合做高频激励, 因此被越来越多的应用于结构健康监

收稿日期: 2007-01-22

基金项目: 国家“八六三”基金项目资助(2006AA702404)

作者简介: 解维华(1978-)男, 黑龙江省明水县人, 讲师, 博士生, 主要从事热防护系统的分析评价、健康监测的研究。

测。本试验中所用 PZT 片厚度为 0.254 mm, 直径为 ≈ 6 mm, 材料选用 PZT-45, 沿厚度方向极化, 驱动电压为 200 V/mm, 最大可承受 80 V 电压, 能满足试验要求。

2 主动多激励损伤定位方法

本文试验用的试件为 500 mm \times 500 mm \times 1 mm 的铝板, 使用的压电元件是直径 ≈ 6 mm、厚为 0.25 mm 的 PZT 片。利用环氧树脂与铝板表面实现粘贴, 可集成到要监测的结构中, 而不会对监测对象造成任何损伤。在实际的健康监测系统应用中, 一般 PZT 片的间距都大于 76 mm, 若各个 PZT 间的距离太近, 将会导致产生驱动器到传感器的电干扰效应。经试验测试发现, 当压电片间距太大时, 会造成响应信号的大幅衰减和信噪比的降低, 研究中压电片间距取为 152 mm。4 个 PZT 片排列成 152 mm \times 152 mm 的阵列, 铝板试件及 PZT 布局如图 1 所示。本文以孔洞损伤为例进行研究, 照片中的黑色圆孔 (≈ 7 mm) 是人为制作的孔洞损伤。

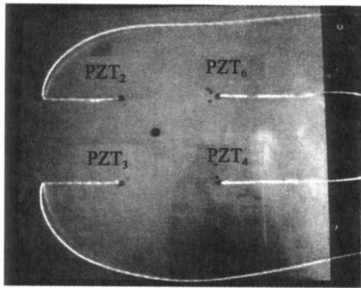


图 1 有损伤铝板试件及损伤的位置

2.1 激励信号的选择

本文研究中采用的激励信号是经过调和的正弦波, 如图 2 所示。此脉冲波形具有支持频域分析和时域分析的优点, 故使用者可通过控制输入频率, 减少散射的影响, 从而得到较好的时域内的解, 其激励波形的数学表达式为^[8]

$$V_{in}(t) = 40[H(t) - H(t - 5/f_c)] \cdot (1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{5}) \sin 2\pi f_c t \quad (1)$$

式中 f_c 为中心频率; $H(t)$ 为海维塞德阶跃函数。

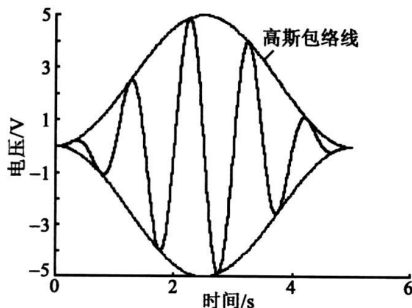


图 2 诊断信号的驱动激励波形

对于检测损伤的激励信号, 电压为 80~240 V, 频率为 30 kHz~1 MHz 时, 压电陶瓷的激励效果和响应信号较理想。研究中选用 Agilent 33120A 型函数/任意波形发生器来产生激励信号波形, 信号发生器输出的电压范围为 -20~+20 V。为了得到高频、高电压的激励信号, 需将信号发生器产生的信号进行放大处理, 普通的放大电路难满足要求, 所以, 设计能用于驱动 PZT 的高电压、高频率放大电路成为实际应用中的难点。

2.2 损伤监测的设计流程

在监测过程中首先用主动多激励结构健康监测系统向 PZT 激励传感器发射 ± 80 V 的 5 个波峰窄带信号, 使激励 PZT 产生振动, 这个振动与激励信号的电压频率相同, 与激励电压的幅值成正比, 产生的机械波经铝板传播到 PZT 响应端, 响应端接收到机械振动, 并把该信号又转换为电压信号, 信号经放大电路后用本系统采集单元把响应信号记录下来。

损伤监测的基本思路是通过对比分析损伤信号与未损伤信号的不同, 并根据某些特征值的分析完成健康状态的判断。损伤监测的设计流程如图 3 所示。通过内嵌的传感器测量初始值作为基准, 代表结构初始状态; 经信号处理后, 测量基准的群速, 选择时域的 S_0 模式, 这些信息提供给损伤识别流程。损伤后传感器测量到的信号与损伤前的基准信号相减, 可得到信号的改变, 根据初始选择的 S_0 模式能估计损伤率 (D_1)。检测流程中的实线部分反复运行, 从而实现结构的实时健康监测。

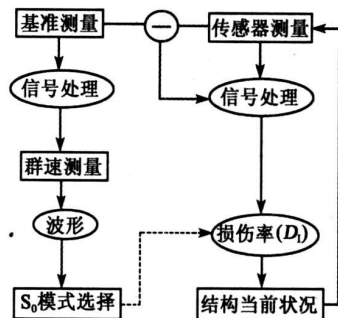


图 3 损伤监测的设计流程

2.3 群速度的测量和 S_0 模式的求取

不同的频率厚度值对应着不同数量的传播模式。在 Lamb 波的实际应用中, 为了简化分析, 通常要令频率厚度的乘积值保持在 A_1 模式的定点频率以下, 如此就仅有一个基本的对称模式 (S_0) 和一个基本的反对称模式 (A_0)。 A_0 在复合材料损伤检测中普遍应用, 因为它对分层很敏感, S_0 用来检测金属结构表面的裂纹扩展和孔的损伤。

因群速度的变化与波的频散、结构的损伤密切

相关, 是信号处理的关键因素, 它可揭示波在结构中传播的模式, 故在损伤检测过程中必须先求取无损伤和有损伤时响应信号的群速度。时间信号包含许多波峰和波谷, 第一个到达的包络线的唯一波峰定义了传播时间的参考点; 而第一个到达的波包的传播时间, 可通过激励信号的波峰和到达响应端的第一个包络线波峰时间差获得, 对应的群速度可由传播距离和时间计算得到。试验中测量了铝板样件损伤前后的群速度频散曲线, 如图 4 所示。由图可知, 孔洞式的损伤形式对于 S_0 模式的频散曲线影响显著; 从图 4 可确定对孔洞损伤敏感的中心频率为 175~ 400 kHz, 最佳的驱动频率会得到最好的求解结果或最大的信噪比。

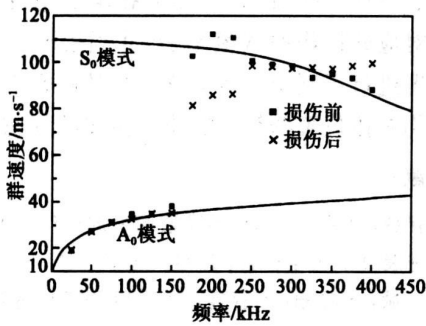


图 4 实际测量的损伤前后群速度散曲线

2.4 散射波的求取

Lamb 波的频散与结构损伤有关, 且最低阶的对称模式对金属板的损伤较敏感。散射波是损伤后和损伤前的信号的差, 由于它包含损伤信息, 所以利用监测数据分离出 Lamb 波的散射信号是损伤监测的重点。

散射信号的产生如图 5 所示。用 PZT₂ 作激励源产生激励信号, 中心频率取 250 kHz, PZT₃ 接收响应信号。

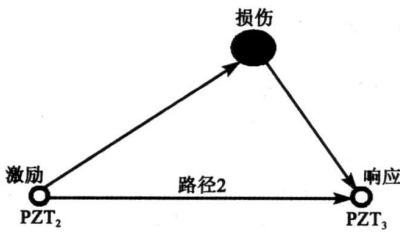


图 5 含损伤铝板中诊断波的传播

图 6 为损伤前后的响应信号。表面看损伤前后的响应信号无差异, 但实际上由于结构状况的改变, 导致信号 B 比信号 A 多出损伤导致的信号成分, 两者相减可得出此信号的差异。本文将差信号理解为从激励源经损伤散射后到达接收处的信号成分^[10], 即图 6 中的 B-A 路线的信号, 可把它看成从损伤处散射出来的信号, 它与沿路径 2 传播路径的信号叠加共同构成了接收到的响应信号。

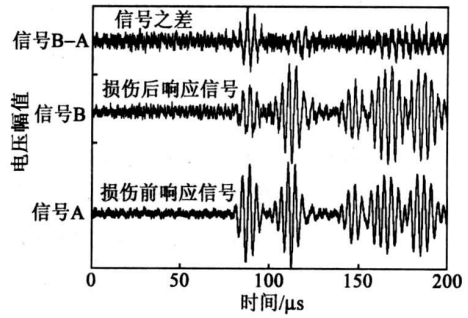


图 6 路径 2 上的散射曲线的求取

试验中对 6 条传播路径(见图 7)都进行了散射信号的求取, 以便进行相互比较。利用数学应用软件 MATLAB 进行平滑处理后的响应信号如图 8 所示。在图 8 中除了可见明显的散射信号, 还可见传播路径 5、6 接收到的响应信号明显滞后于前 4 条传播路径, 其原因是这两条路径的传播距离长于前 4 条, 所以信号到达传感器的时间比前 4 条路径长。

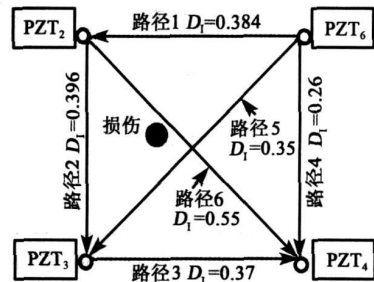


图 7 不同传播路径响应测试对应关系

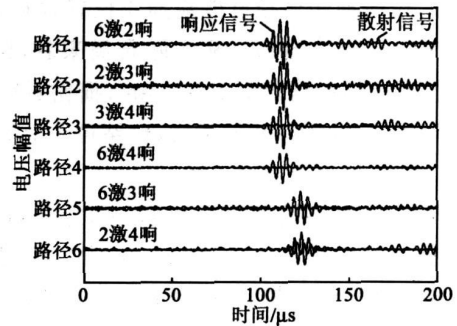


图 8 不同传播路径散射波比较

从图 8 的路径 6 可看出, 由于它是从 PZT₂ 传播到 PZT₄, 经历的时间比前 4 条路径长, 延迟时间的增加使散射信号和原波形有叠加的现象, 与前 5 条路径相比, 散射波幅值明显增大。主要原因在于路径 6 与损伤位置很接近, 导致经过损伤散射后的响应信号与直线传播的响应信号非常接近, 即两者之间的时间延迟很小, 进而产生波形的相互叠加, 这一现象符合 Lamb 波传播理论。

2.5 D_r 的求取

为了更加直观的判定损伤的位置, 本文中引入 D_r ^[8] 的概念, 其定义为包含在 S_0 模式中的散射能量和基准能量之比。在给定的频率下, 在 S_0 的

时间窗内对散射光谱密度进行积分可得此比值,即

$$D_1 = \left(\frac{\int_{t_i}^f |S_{sc}(\omega_0, t)|^2 dt / \int_{t_i}^f |S_b(\omega_0, t)|^2 dt}{a} \right)^a \quad (2)$$

式中 S_{sc} 为散射信号随时间变化的振幅; S_b 为基准信号随时间变化的振幅; ω_0 为所选择的驱动频率,它通常作为能给出最高信噪比的驱动频率; t_i 和 t_f 分别为基本对称模式在时域的上下边界; a ($0 < a \leq 1$) 为增益系数。实际试验分析认为: 当 $D_1 < 0.2$ 时, 无损伤; 当 $0.2 \leq D_1 < 0.5$ 时, 有较小的损伤或传感器路径离损伤点较近; 当 $D_1 \geq 0.5$ 时, 有严重损伤, 传感器路径离损伤点较近。用多个传感器数据同时采集和分析, 求出 D_1 较高的路径, 就能进行损伤的定位。各条路径下 D_1 的结果如表 1 所示, 其中距离(S) 损伤位置与传播路径的垂直距离。

表 1 损伤率的计算

路径	S/mm	D_1
1	63.5	0.384
2	50.8	0.396
3	90.6	0.370
4	101.6	0.260
5	45.5	0.350
6	10.0	0.550

从传播路径上看, 路径 5 和 6 的传播距离 S 相同, 所以对路径 5、6 的 D_1 值进行比较, D_1 值最高的是路径 6, 说明损伤路径可能离损伤位置很近, 损伤超过 0.5 属于严重损伤。从实际布局来看, 路径 6 损伤位置距离损伤路径只有 10 mm, 损伤对信号传播的影响较大, 故散射波能量大, 比路径 5 上的能量大得多, 因此 D_1 也比路径 5 大。

路径 1~4 的传播距离 S 相同, 所以对路径 1~4 的 D_1 值进行比较, D_1 最高的是路径 2, 说明损伤路径可能离损伤位置较近, 损伤超过 0.2 属轻度损伤。从实际布局来看, 路径 2 与其他三条路径相比, 与损伤之间的距离最短, 为 50.8 mm, 导致损伤对路径 2 上传播的信号影响较大, 所以散射波能量大。由于 4 条路径离损伤都较远, 其各条损伤路径的散射能量的变化值不大, 各条路径的 D_1 变化不大。

如图 7 所示, 由于路径 6 的 D_1 值大于路径 5, 路径 2 的 D_1 值大于路径 4 及路径 1 的 D_1 值大于路径 3, 那么可轻易判断出损伤必然位于图中所示的阴影区域, 跟实际出现损伤的位置吻合。所以利用 D_1 能反应损伤值大小, 根据 D_1 判断损伤离传播路径的方案是可行的。

3 结束语

本文开发了一个主动的结构健康监测系统, 对于金属铝板的孔洞损伤进行了试验测试分析。介绍了利用 Lamb 波进行损伤监测的原理和流程, 测试试验用铝板的群速度频散曲线, 试验表明, Lamb 波的 S_0 模式对于铝板的孔洞损伤变化敏感, 对于给定的 500 mm × 500 mm × 1 mm 铝板采用中心频率 250 kHz 的激励获得的响应结果最优。分别利用不同的 PZT 片作为激励端和响应端, 进行了不同传播路径的试验测试, 对损伤前后的不同传播路径的测试波形进行了分析处理和比较, 找到反映损伤前后波形变化的规律。利用散射波能量与基准能量的比值定义了损伤率的概念, 计算了孔洞损伤对不同传播路径对应的损伤率数值影响, 并利用该特征值对损伤位置进行了判断。本文进一步的研究工作将致力于损伤具体位置的精确定位及更多的损伤形式。

参考文献:

- [1] 杨智春, 于哲峰. 结构健康监测中的损伤检测技术研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(2): 215-223.
- [2] 吴 斌, 郑璟瑜, 何存富, 等采用 PZT 传感器激励和接收超声导波[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(1): 1-4.
- [3] 彭 鸽, 袁慎芳, 徐颖娣. 基于主动 Lamb 波和小波变换的二维结构损伤定位研究[J]. 振动工程学报. 2004, 17(4): 490-493.
- [4] 邓明晰. 层状固体结构表面性质的非线性兰姆波定征方法[J]. 航空学报, 2006, 27(4): 713-719.
- [5] 邓明晰. 分层结构中兰姆波二次谐波发生的模式展开分析[J]. 声学学报, 2005, 30(2): 132-142.
- [6] 邓明晰. 一种定征固体板表面性质的兰姆波方法[J]. 应用声学, 2006, 25(2): 109-115.
- [7] 王 军, 王寅观. 金属薄板中 Lamb 波波速与静应力关系的理论研究[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 527-531.
- [8] IHN J B, CHANG F K. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. diagnostics[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(3): 609-620.
- [9] IHN J B, CHANG F K. Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: II. Validation using riveted joints and repair patches[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(3): 621-630.
- [10] ROH Y B. Built-in diagnostics for identifying an anomaly in plates using wave scattering[D]. USA: Stanford University, 1998.