

基于关联维数的超声 Lamb 波损伤成像

刘小峰,夏宇峰,蔡雨洋

(重庆大学 机械工程学院,重庆 400044)

摘要:研究了混沌分形理论的一种特征参数——关联维数的定义计算及参数选择。提出了一种基于关联维数的板状复合材料超声兰姆(Lamb)波损伤检测方法。通过计算采集健康与无损信号的关联维数,对比其数据差异,作为一种损伤指标,用于概率成像算法的损伤位置定位成像。利用有限元分析进行模拟实验研究,结果表明,提出的算法能准确对复合材料脱层缺陷进行定位成像。

关键词:复合材料;关联维数;兰姆(Lamb)波;概率成像算法;有限元分析

中图分类号:TM282;TB559

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.027

Ultrasonic Lamb Wave Damage Imaging Based on Correlation Dimension

LIU Xiaofeng, XIA Yufeng, CAI Yuyang

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The correlation dimension is a kind of characteristic parameter of the chaotic system, the definition, parameter selection and calculation of the correlation dimension was researched in this paper. An ultrasonic Lamb wave damage detection method for the plate composite material based on the correlation dimension was proposed. By calculating the correlation dimensions of collecting the healthy and lossless signals, and comparing the difference between them, the data difference is used as a damage index for the damage location imaging of the probabilistic imaging algorithm. The finite element analysis is used to simulate the experiment, and the experiment investigation shows that the proposed probabilistic algorithm can accurately locate the delamination defects of composite materials.

Key words: composite material; correlation dimension; Lamb wave; probabilistic imaging algorithm; finite element analysis

0 引言

复合材料具有高强度、耐腐蚀疲劳等特性,成型工艺简单,但在制造和使用过程中易出现缺陷损伤的情况。复合材料目前已广泛应用于航天、国防等重要领域,由于其安全可靠性的需求,如何快速检测出复合材料内的损伤很重要。

兰姆(Lamb)波是一种在板状介质结构中传播的波。由于复合材料层数多变,层与层之间的方向也不同,而 Lamb 波对板材内部结构损伤很敏感,因此,利用其传播过程中携带的损伤信息进行复合材料板材的结构检测变得非常适用^[1-3]。

由于复合材料脱层损伤信号是一种典型的非线性信号,使分形理论有效应用于损伤提取。Lamb

波在损伤传播过程中产生非线性信息可以体现在信号分形维数上的变化,可以利用分形理论中的关联维数提取损伤指标 DI,从而进行定位成像^[4]。

1 基于关联维数的损伤指标

1.1 关联维数

分形理论是目前活跃的新学科,可以用来分析传统物理学中认为无序的事物。计算分形维数的方法主要有豪斯多夫维数、盒计维数、谱维数及关联维数等^[5]。

本文采用 G-P 算法计算 Lamb 波信号关联维数,从而提取所需损伤信息。

对于观察到的一个时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 另选适当的时间延迟 τ 和嵌入维度 m , 重新排列序

收稿日期:2017-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475052);中央高校基本科研专项基金资助项目(106112016CDJZR115502)

作者简介:刘小峰(1980-),女,湖北人,教授,博士,主要从事设备状态监测与故障诊断的研究。通信作者:蔡雨洋(1991-),男,四川成都人,硕士生,主要从事超声导波无损检测的研究。E-mail:312159548@qq.com。

列构成一个 m 维的相空间。相空间的列向量为

$$\mathbf{X}_i = [x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_i + (m-1)\tau]^T \quad (1)$$

式中 $i=1, 2, 3, \dots, N, N=n-(m-1)\tau, n$ 为原时间序列点数。本文采用自相关函数法确定 τ 。

定义关联函数

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=j} H(r - \|x_i - x_j\|) \quad (2)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为两点的欧几里得距离; H 为 Heaviside 函数, 即

$$H(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

关联函数 $C(r)$ 描述了相空间中距离小于 r 的点所占的比值, 可以展现相空间中点的分散程度。定义关联维数 D_2 为

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r} \quad (4)$$

通过绘出 $\ln C(r)$ 相对于 $\ln r$ 的双对数曲线, 在所绘曲线的无标度区域内近似直线部分斜率作为关联维数 D_2 [6-8]。

1.2 损伤指标

对于同一组压电陶瓷传感器所接收的 Lamb 信号, 对比传感器所在健康信道和有损信道上信号的关联维数有差别, 可以通过这种变化来进行损伤识别定位。当损伤位置距离该组信号通道较远时, 则

两组信号相似度高, 分形维数变化极小; 当损伤距离该组信号通道较近时, 损伤导致的波包重叠、模式转换等会使两组信号分形维数变化较大。因此, 可以定义评估损伤指标 DI [9] 为

$$DI = 1 - \frac{\min(D_2, D'_2)}{\max(D_2, D'_2)} \quad (5)$$

式中: D_2 为健康信号关联维数; D'_2 为该信道有损信号的关联维数。

2 成像技术

本文的损伤概率成像原理是由 Hay TR、Royer RL 等提出的概率算法。图 1 为由 M 个传感器组成的损伤成像系统, 对整个检测区域网内每个点的损伤概率进行线性叠加, 从而进行损伤定位 [10-11]。对于成像网络内坐标为 (x, y) 的点, 其成像概率为

$$P(x, y) = \left(\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M P_{ij}(x, y) \right)^\alpha = \left(\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M DI^2 \left(\frac{\beta - R_{ij}(x, y)}{\beta - 1} \right) \right) \quad (6)$$

式中 $\alpha=2, \beta=1.007$ 分别为对比增强因子和损伤区域缩放因子, $\beta - R_{ij}(x, y) / \beta - 1$ 为概率损伤成像中衰弱分布函数。

$$R_{ij}(x, y) = \begin{cases} RD_{ij}(x, y) & RD_{ij}(x, y) < \beta \\ \beta & RD_{ij}(x, y) > \beta \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$RD_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \quad (8)$$

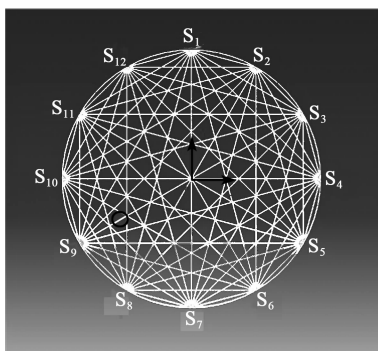


图1 圆形传感器 S 阵列与信号通道

3 仿真实验

本文采用 abaqus 仿真软件进行复合材料层合板脱层缺陷的有限元仿真, 图 2 为 9 层复合材料层合板模型, 于 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的板材上设置 12 个激发与输出点, $(-30, -17)$ 处 4、5 层复合板间有

一处半径约为 2.5 mm 的圆形脱层缺陷。

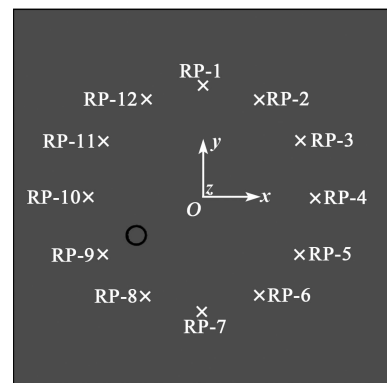


图2 圆形传感器 RP 阵列与缺陷位置

图 3、4 分别为编号 3-12 的健康信号通道及编号 3-9 的有损信号通道采集的 Lamb 波信号。用眼观察可以发现, 有损信道上信号差别很大, 健康信道上信号机会无差别。

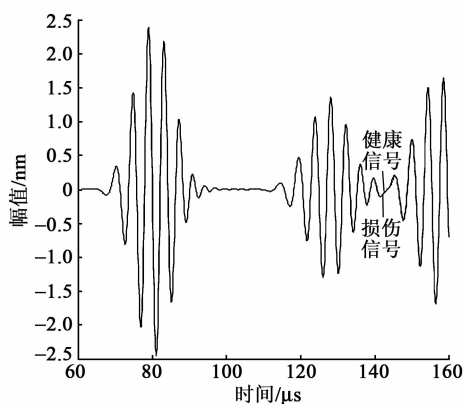


图 3 3-12 信道采集的两种传感器信号

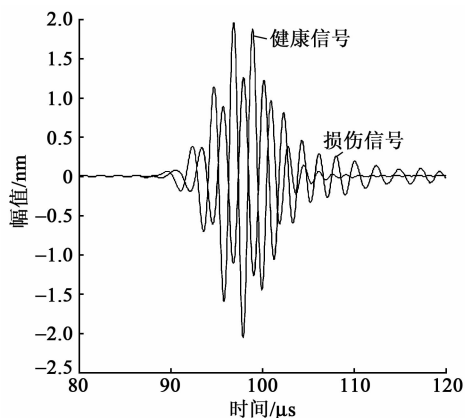
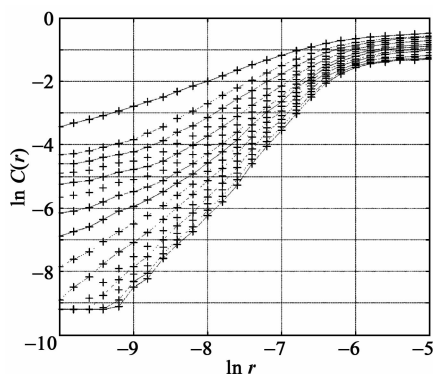
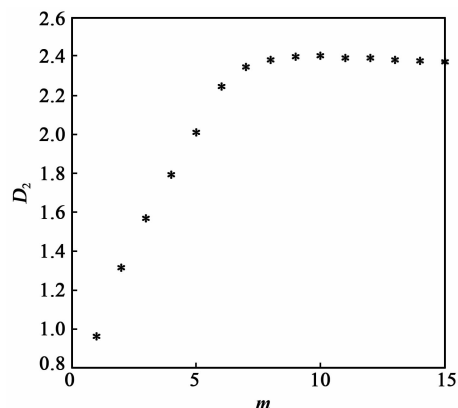


图 4 3-9 信道采集的两种传感器信号

以图 4 中传感器编号 3-9 通道中损伤信号为例,求关联维数。 τ 可由自相关函数法求得,选择自相关函数 $R(\tau)$ 下降到初值的 $1-1/e$ (e 为自然对数)时的 τ 作为延迟时间,其中

$$R(\tau) = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} \left(\frac{X_i - \bar{x}}{s} \right) \cdot \left(\frac{X_{i+\tau} - \bar{x}}{s} \right) \quad (9)$$

式中 s 为标准差,计算后取 $\tau=8$ 。图 5 为 $\ln C(r)$ - $\ln r$ 双对数曲线。如图 6 所示,随着嵌入维度 m 的增加, $\ln C(r)$ - $\ln r$ 双对数曲线中无标度区域斜率趋近于稳定,从而估算所需关联维数 D_2 [12-13]。

图 5 $\ln C(r)$ - $\ln r$ 双对数曲线图 6 不同嵌入维度 m 下的关联维数 D_2

将求得各通道信号关联维数转换该通道的损伤指数进行概率成像,图 7 为损伤成像图。由图可知,概率算法成像后的损伤位置与真实位置基本重合。

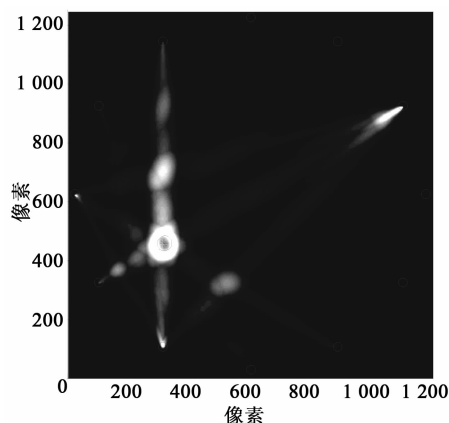


图 7 损伤成像图

4 结束语

针对板状复合材料损伤检测,本文提出了一种基于关联维数作为损伤指数 DI 的成像算法。通过对比同一信号通道上健康信号与有损信号的关联维数差异,作为损伤指标,继而作为一项成像指标进行概率成像算法,对复合材料进行损伤定位。

对复合材料层合板模型进行有限元模拟后分析信号并成像,得出的损伤位置与设置损伤位置基本一致,表明该损伤识别算法简单准确,高效。

参考文献:

- [1] 张华,刘国强,李明,等. 基于双压电晶圆的 Lamb 波单模式提取方法[J]. 压电与声光,2017,39(1):110-112. ZHANG Hua, LIU Guoqiang, Li Ming, et al. Lamb wave single pattern extraction method based on the double piezoelectric wafer [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017,39(1):110-112.
- [2] 张移山,王遵,王智. 基于 Lamb 波的修补后损伤结构

- 健康监测方法的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2015(12):1971-1974.
- ZHANG Yishan, WANG Zun, WANG Zhi. Experimental research on health monitoring of cracked structure repaired by composite patch using Lamb waves [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015(12):1971-1974.
- [3] 李红, 赵振宇, 王庆丰, 等. 基于 Lamb 波的船用复合材料板损伤检测试验研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016(6):542-546.
- LI Hong, ZHAO Zhenyu, WANG Qingfeng, et al. Test research of Lamb waves detection damage in composite material [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, (6):542-546.
- [4] 郝研. 分形维数特性分析及故障诊断分形方法研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [5] 郝研, 王太勇, 万剑, 等. 分形盒维数抗噪研究及其在故障诊断中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2011(3):540-545.
- HAO Yan, WANG Taiyong, WAN Jian, et al. Research on fractal box dimension anti-noise performance and its application in fault diagnosis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011(3):540-545.
- [6] 付强, 李晨溪, 张朝曦. 关于 G-P 算法计算混沌关联维的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014(3):275-282.
- FU Qiang, LI Chenxi, ZHANG Zhaoxi. G-P algorithm for evaluating the correlation dimension in chaos [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014(3):275-282.
- [7] 张小明, 刘建敏, 乔新勇, 等. 时间序列关联维数快速算法及实现[J]. 装甲兵工程学院学报, 2007(6):58-61.
- ZHANG Xiaoming, LIU Jianmin, QIAO Xinyong, et al. Fast algorithm for calculating the correlation dimension of time series [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2007(6):58-61.
- [8] 王基, 杨爱波, 刘树勇, 等. 改进的时间序列关联维数快速算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012(10):101-104.
- WANG Ji, YANG Aibo, LIU Shuyong, et al. Improved fast algorithm to calculate correlation dimension of time series [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012(10):101-104.
- [9] 孙虎. 航空结构中 Lamb 波传播的谱有限元模拟及损伤识别技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [10] 王强, 严夏君, 陈小惠, 等. 无基准 Lamb 波时间反转损伤概率成像监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2013(7):149-155.
- WANG Qiang, YAN Xiajun, CHEN Xiaohui, et al. Baseline free Lamb wave damage probability imaging monitoring method based on time reversal theory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013(7):149-155.
- [11] RAHIM G. Lamb 波诊断概率成像技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
- [12] 王成栋, 凌丹, 苗强. 分形无标度区的一种自动识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2012(6):9-12.
- WANG Chengdong, LING Dan, MIAO Qiang. Automatic identification method of fractal scaling region [J]. Computer Engineering and Applications, 2012(6):9-12.
- [13] 贾子文. 机械振动故障诊断中分形维数算法的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.

欢迎订阅《压电与声光》杂志