

◇ 研究报告 ◇

复合材料冲击损伤监测的概率成像方法*

张倩昀^{1†} 张 华² 赵银燕¹

(1 西安航空学院 西安 710077)

(2 中国飞机强度研究所 西安 710065)

摘要 复合材料在制造、使用和维修过程中不可避免的受外来意外物体的低速冲击,造成结构的损伤。材料本身存在各向异性、纤维铺层方向误差等复杂结构特性,导致延迟-累加损伤成像方法难以实现冲击损伤的准确检测。针对这一问题,本文采用了一种与信号传播速度无关的损伤概率成像方法,该方法利用能量损伤因子,将各路径周围的像素点以椭圆分布的形式对损伤进行概率化表述,然后对各路径损伤因子进行合成成像,实现了复合材料冲击损伤的准确监测。实验结果表明,利用能量损伤因子可以监测复合材料冲击损伤,利用损伤概率成像方法可以实现冲击损伤位置的判别。

关键词 复合材料,冲击,概率成像,损伤因子

中图分类号: O426.2, O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2016)05-0426-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.05.007

A probability imaging method of composite impact damage monitoring

ZHANG Qianyun¹ ZHANG Hua² ZHAO Yinyan¹

(1 Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

(2 Aircraft Strength Research Institution of China, Xi'an 710065, China)

Abstract Composite materials have usually been impact with foreign objects in low-speed accidentally in the manufacture, use and maintenance procedure, resulting in structural damage. However, it is difficult to achieve accurately monitor impact damage with the delay-cumulative damage imaging method because of its complex structures. In this paper, the probability imaging method independent of the signal propagation velocity is adopted by using the energy damage index (EDI). First, the pixel around the each path which is in the form of an elliptical distribution is characterized by the probability of the quantization. Then, elliptical effective areas of all channel's EDI are synthesized and imaged. The results show that impact damage can be monitored by using the EDI, and damage location can be implemented with the probability imaging method.

Key words Composites, Impact, Probability imaging, Damage index

2016-01-06 收稿; 2016-06-27 定稿

*航空科学基金项目 (201509T7001)

作者简介: 张倩昀 (1988-), 女, 江西宜春人, 硕士, 助教, 研究方向: 结构健康监测。

† 通讯作者 E-mail: jinganqy1988@126.com

1 引言

具有减轻机体重量,提高结构品质的复合材料已经成为航空领域中的重要材料,并且得到广泛的应用。但撞击、维修等外部事件是引起复合材料内部损伤的主要因素,主要分为高速冲击和低速冲击两种。高速冲击会使结构产生明显的局部集中破坏与失效,检测人员可以通过肉眼观察到这些损伤。低速冲击对结构产生破坏形式较多,容易使结构内部产生分层等损伤,但检测人员无法用肉眼观察到^[1]。因此,研究复合材料冲击损伤的健康监测方法,对于复合材料结构的安全运行具有非常重要的意义。

针对复合材料结构的损伤监测方法,近年来出现了兰姆波的损伤诊断方法,相对于传统的超声波检测方法,具有快速、高效、灵敏度高等优点^[2-4],实现了对损伤成像和定位的结构健康监测^[5-6]。主要提出了延迟-累加损伤成像方法^[7-8]、超声相控阵成像方法^[9-10]、时间反转聚焦方法^[11-12]、椭圆轨迹概率法^[13-14],但这些方法需要通过精确的信号传播速度才能实现对损伤的成像。北京工业大学刘增华教授^[15-16]利用空气耦合式压电传感器对于复合材料中的模拟分层损伤进行了概率成像方法研究,提高了定位精度和重构质量;利用单模态Lamb波激励方式实现了对板中缺陷的二维成像定位,提高了缺陷的识别能力和定位精度。本文给出了与信号传播速度无关的损伤概率成像方法,结合对冲击损伤敏感的能量损伤因子作为特征参数,对复合材料结构真实冲击损伤进行监测和定位。

2 冲击损伤概率成像方法理论

2.1 损伤概率成像方法

采用损伤概率成像方法对复合材料结构中的损伤进行识别。把传感器网络的监测区域划分为像素点的集合,对于特定路径而言,其周围每个点受损伤的影响程度与它到激励元件和传感元件的距离之和相关,进而以椭圆分布的形式将该路径周围点进行概率化表示。进而合成各条路径损伤因子形成的椭圆影响区域并成像,根据图像中损伤概率最大区域确定损伤可能存在的位置^[17]。

假设传感器网络的监测区域中有 N 条激励-传

感通道,则每一个像素点存在损伤概率的估计为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N P_{ij}(x, y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N DI_{ij} \left[\frac{B - R_{ij}(x, y)}{B - 1} \right], \quad (1)$$

其中, $R_{ij}(x, y)$ 为成像点 (x, y) 到 i 激励、 j 传感压电传感器的距离之和与激励-传感直达路径距离的比值,它表示该像素点到激励-传感直达路径的远近

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

DI_{ij} 为第 i 个压电传感器、第 j 个压电传感器构成的激励-传感通道的损伤因子,它表示监测信号与健康基准信号之间的差异程度。本文采用在结构出现损伤后的能量值与损伤前的能量值变化率作为损伤因子,即能量损伤因子 EDI (Energy damage index); B 为尺寸参数,它控制着激励-传感直达路径上损伤因子影响区域的大小, $B > 1$ 。 B 值越小,则每条激励-传感通道的影响区域越狭长。通过粘贴螺栓来模拟损伤,结果显示 B 值在 1.04 附近,故实验中 B 选取为 1.04。

若 $R_{ij}(x, y) \geq B$, 像素点 (x, y) 在激励-传感通道影响区域的边界上或边界外,则 $P_{ij} = 0$; 若 $R_{ij}(x, y) < B$, 像素点 (x, y) 在激励-传感通道影响区域的边界内。当 $R = 1$ 时,像素点 (x, y) 正好处在通道的直达路径上,此时 $P_{ij} = DI_{ij}$; 当 $1 < R < B$ 时,像素点 (x, y) 处在通道影响区域内非直达路径的椭圆上,此时 $P_{ij} < 1$ 。当 $R \rightarrow B$ 时,像素点 (x, y) 接近通道的非影响区域,此时 $P_{ij} \rightarrow 0$ 。某一点的 P_{ij} 越大,则表示该点存在的损伤概率也越大。如图 1 所示。

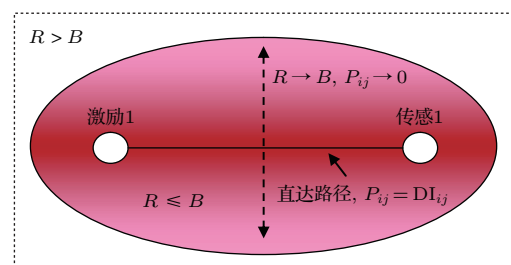


图1 损伤概率成像方法示意图

Fig. 1 Diagram of probability imaging algorithm

2.2 能量损伤因子

通过实验发现,冲击损伤会对直达波信号的能量产生影响,故本文采用一种与能量变化有关的损伤因子^[18]。通过选取对损伤敏感的直达波信号,并将此信号因损伤引起的能量变化与损伤前此信号能量之比作为损伤因子。

假设在损伤前,采集到兰姆波为健康状态响应信号为 $H(t)$,发生损伤后采集到兰姆波为损伤状态响应信号为 $D(t)$ 。则能量损伤因子DI定义为

$$DI = \left\{ \sum_{t=t_1}^{t_2} [D(t) - H(t)]^2 \right\} \left(\sum_{t=t_1}^{t_2} H^2(t) \right)^{-1}, \quad (2)$$

式(2)中, t_1 、 t_2 分别为直达波信号起始时间、终止时间。

3 实验研究

针对碳纤维复合材料盒段结构,使用美国Axcellent公司的压电多通道结构健康监测系统,其具有高频率范围、高功率输出、高采样率的特点,其最高采样率为48 MHz/s。

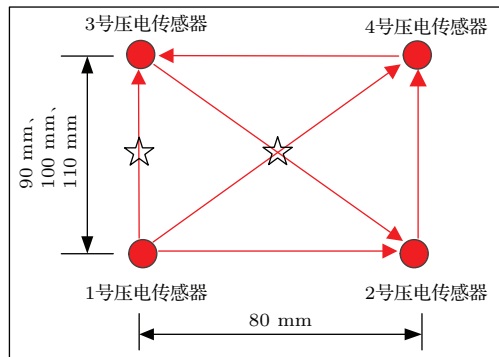


图2 压电元件布置示意图

Fig. 2 Schematic arrangement of the piezoelectric element

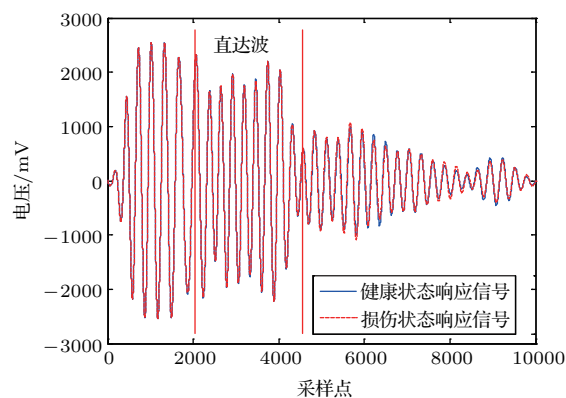
在复合材料盒段结构中,选择8个典型区域进行监测,分别是A1-A8。每个冲击损伤区域采用4个压电传感器监测。每个监测区域,传感器编号顺序按照从下到上,从左到右,依次定义1号、2号、3号、4号压电传感器。每个区域中的传感器组成长方形阵列,构成6个激励传感路径。实验所研究的盒段结构其墙与墙之间的间隔为90 mm,100 mm,110 mm,在布置传感器时为了避免由于兰姆波信号经过墙结构时而导致的衰减,根据盒段结构形式的特点,传感器网络布置分为80 mm×90 mm,

80 mm×100 mm,80 mm×110 mm三种情况。实验中,1号与2号压电传感器间距为80 mm,1号与3号压电传感器间距分为90 mm、100 mm、110 mm。8个区域的冲击位置均位于正中心,其中A3、A4区域还增加了边界冲击实验。图2中圆表示元件布置位置,星号表示冲击位置。

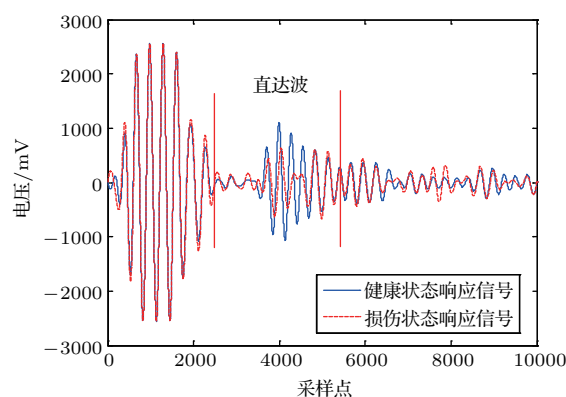
4 实验结果及分析

冲击激励信号选用中心频率为150 kHz的正弦调制五波峰信号。信号采样频率为48 MHz,信号采样长度为10000个数据点。首先在结构处于健康状态时,采集6个激励传感路径上的数据作为健康信号。其次,在损伤监测区域内,施加10 J的冲击能量,采集6个激励传感路径上的数据作为损伤信号。

图3给出了1-2,1-3激励-传感通道在结构受到边界冲击损伤前后获取的响应信号的对比情况。当损伤出现在边界时,激励-传感通道1-2的健康信



(a) 激励-传感通道1-2响应信号对比



(b) 激励-传感通道1-3响应信号对比

图3 1-2,1-3通道健康状态与损伤状态的响应信号变化

Fig. 3 The change between the health signal and the damage signal of path 1-2, 1-3

号和损伤信号幅值始终保持一致,而激励-传感通道1-3的健康信号和损伤信号幅值直达波出现了较大的幅值变化,通过对基准信号与损伤信号的能量分析,得到1-2通道能量损伤因子 $DI = 3.8223 \times 10^{-4}$; 1-3通道能量损伤因子 $DI = 0.6178$ 。通过对比得出1-3通道的能量损伤因子要远远大于1-2通道的能量损伤因子。1-3通道的能量损伤因子大,说明损伤前后该通道存在信号能量衰减,即存在损伤。而1-2通道能量损伤因子很小,即不存在损伤。相同的分析方法可以对其他激励-传感通道的损伤程度进行分析。

在复合材料盒段结构的典型区域,布置了压电传感器分布间距有 $80 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$, $80 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, $80 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 的三种情况,通过能量损伤因子计算和概率成像方法,这三种分布下的冲击成像定位结果如图4(a)~4(c)所示。同时,本文还对

边界上的冲击进行成像定位,如图4(d)所示。

如图4所示,图像中像素值较大且集中区域为损伤成像定位点,绿色小圆圈代表实际冲击损伤的位置。从图4中可以看出,损伤成像定位点几乎与实际冲击位置重合。实验验证了冲击损伤成像定位方法在碳纤维复合材料盒段上对单个冲击的定位误差小于 2 cm 。这一误差水平与目前损伤成像定位误差水平相当^[12]。

5 结论

- (1) 基于压电传感器和兰姆波的概率成像方法能够实现对复合材料冲击损伤的结构健康监测。
- (2) 在不需要信号传播速度的情况下,结合能量损伤因子,使得损伤概率成像方法能够实现对复合材料冲击损伤位置的判定。

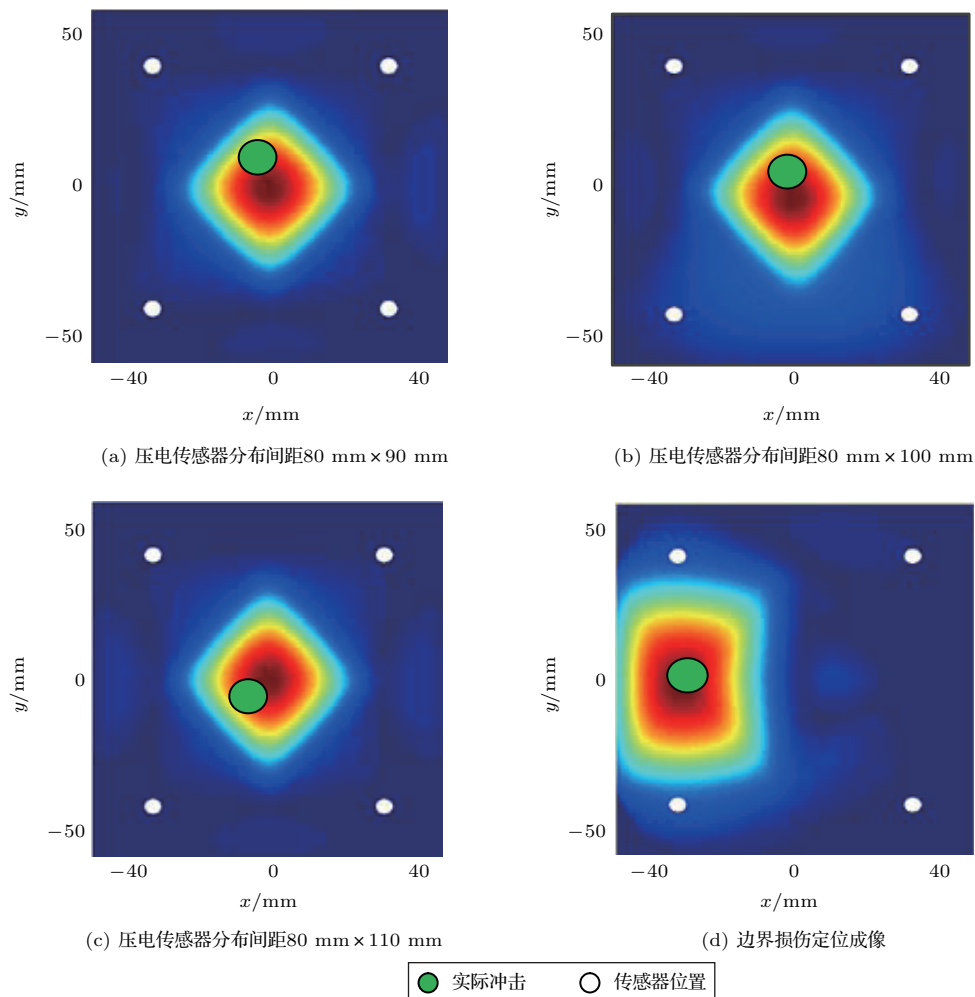


图4 监测区域冲击损伤的成像定位结果示意图

Fig. 4 Schematic of the impact damage localization image in the monitoring areas

(3) 在后续研究中,可以考虑在同一区域中多个冲击损伤的成像方法开展研究。

(4) 概率成像定位精度受到不同因素的影响,后续将系统研究不同因素如传感器布设尺寸、传感器布设形状、相对结构的传感器布设位置等对概率成像定位精度的影响。

参 考 文 献

- [1] STASZEWSKI W J, BOLLER C, TOMLINSON G R. Health monitoring of aerospace structure: Smart sensor technologies and signal processing[M]. US: Wiley, 2004.
- [2] 张正罡, 刘丹, 他得安. 多通道超声兰姆波检测板状结构中的裂纹[J]. 应用声学, 2015, 34(3): 189-194.
ZHANG Zhenggang, LIU Dan, TA Dean. Detection of crack in plate structure using multi-channel ultrasonic Lamb waves[J]. J. Appl. Acoust., 2015, 34(3): 189-194.
- [3] 罗宏建, 周重回, 王炯耿, 等. 铝制焊接容器超声导波成像检测[J]. 应用声学, 2014, 33(6): 520-527.
LUO Hongjian, ZHOU Chonghui, WANG Jionggeng, et al. Ultrasonic guided waves imaging testing on aluminum welded shell[J]. J. Appl. Acoust., 2014, 33(6): 520-527.
- [4] 陈军, 李志浩, 林莉, 等. 铝板中 Lamb 波检测的实验研究[J]. 应用声学, 2011, 30(2): 98-104.
CHEN Jun, LI Zhihao, LIN Li, et al. Experiment investigations of Lamb waves in an aluminum plate[J]. J. Appl. Acoust., 2011, 30(2): 98-104.
- [5] GIURGIUTIU V. Structural health monitoring: With piezoelectric wafer active sensors[M]. US: Academic Press, 2008.
- [6] STEPINSKI T, UHL T, STASZEWSKI W. Advanced structural damage detection: From theory to engineering applications[M]. US: Wiley, 2013.
- [7] LHN J, CHANG F. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures[J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7(1): 5-15.
- [8] HALL J, MICHAELS J. Computational efficiency of ultrasonic guided wave imaging algorithms[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(1): 244-248.
- [9] HOLMES C, DRINKWATER W, WILCOX D, et al. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2008, 48(6-7): 636-642.
- [10] 孙亚杰, 袁慎芳, 邱雷, 等. 基于 Lamb 波相控阵和图像增强方法的损伤监测[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1325-1330.
SUN Yajie, YUAN Shenfang, QIU Lei, et al. Structural health monitoring based on Lamb wave phased array and image enhancement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(7): 1325-1330.
- [11] WANG C H, ROSE J T, CHANG F K. A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(2): 415-423.
- [12] CAI J, SHI L H, YUAN S F, et al. High spatial resolution imaging for structural health monitoring based on virtual time reversal[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(5): 1-11.
- [13] 张海燕, 毛成涛, 于建波, 等. 概率损伤成像在兰姆波结构健康监测中的应用[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(3): 158-166.
ZHANG Haiyan, MAO Chengtao, YU Jianbo, et al. Application of probability damage imaging in Lamb wave structural health monitoring[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 158-166.
- [14] 张海燕, 马世伟, 冯国瑞, 等. 兰姆波结构健康监测中的概率损伤成像[J]. 声学学报, 2012, 37(4): 401-407.
ZHANG Haiyan, MA Shiwei, FENG Guorui, et al. Probability damage imaging in Lamb wave structural health monitoring[J]. Acta Acustica, 2012, 37(4): 401-407.
- [15] 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]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 227-235.
- [16] 刘增华, 徐营赞, 何存富, 等. 板状结构中基于 Lamb 波单模态的缺陷成像试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 232-238.
LIU Zenghua, XU Yingzan, HE Cunfu, et al. Experiment study on defect imaging based on single lamb wave mode in plate-like structures[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 232-238.
- [17] ZHOU C, SU Z Q, CHENG L. Quantitative evaluation of orientation-specific damage using elastic waves and probability-based diagnostic imaging[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2135-2156.
- [18] 刘国强, 肖迎春, 李明, 等. 复合材料胶接损伤的指数监测方法[J]. 航空学报, 2012, 33(7): 1275-1280.
LIU Guoqiang, XIAO Yingchun, LI Ming, et al. An index method of monitoring composite debonding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(7): 1275-1280.