

应变片在复合材料低能量冲击定位中的应用*

赵刚^{1,2,3}, 李书欣^{1,3}, 刘立胜³, 李昆^{1,2}

(1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室 武汉, 430070)

(2. 南昌航空大学数学与信息科学学院 南昌, 330063) (3. 武汉理工大学理学院 武汉, 430070)

摘要 针对应用在航空结构中的碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced plastics, 简称 CFRP)的冲击与振动检测的需求,提出了利用电阻式应变片实现冲击定位的方法。通过应变片获取动态应变信号,运用小波变换提取信号的波达时间,采用 Mindlin 板理论计算波速,最后使用笔者提出的定位算法计算冲击源的位置。在一个尺寸为 400mm×400mm×2mm 的 CFRP 层合板样板上进行实验,结果显示误差小于 10mm,证明所提出的方法可用于碳纤维增强树脂基复合材料层合板的冲击定位,为航空结构的结构健康监测提供了一定的依据。

关键词 低能量冲击; 电阻式应变片; 小波变换; 定位; 碳纤维增强树脂基复合材料
中图分类号 TH145.9; TB332

引言

碳纤维增强复合材料具有比强度高、比刚度高、低质量等优良的物理性能,在汽车、航空航天等领域得到越来越广泛的应用。但在其制造、服役过程中,不可避免地会受到一些冲击,特别是低速冲击,例如跌落的工具、物体的碰撞等,类似的低速冲击由于质量不够大及速度较慢,都属于低能量冲击。低速冲击会出现不可见的损伤,如分层、基体开裂等^[1],这些损伤在复合材料结构中会留下巨大的隐患。

低速冲击引发的损伤主要隐含在层合板内部,不能通过可视化的探测方法探测到。开发冲击健康监测技术,提高先进复合材料结构易受冲击的在线诊断是非常必要的。近些年来,大量学者对复合材料结构的无损检测做了很多研究工作。目前,冲击监测技术的方法主要是基于时差定位技术算法,通过适当的距离角度和波达时间来实现损伤定位,如基于三角测量技术的定位方法^[2]。另外也有一些在时差定位技术基础上发展起来的技术,如 Lamb 波方法^[3-6]、神经网络^[7]、粒子种群^[8]及遗传算法^[9]等。针对碳纤维增强复合材料层合板的低速冲击的研究表明,实现定位必须先获取冲击信号,获取冲击信号的传感器有布拉格光纤光栅传感器(fiber Bragg

grating, 简称 FBG)、压电传感器(piezoelectric sensors, 简称 PZT)、聚偏二氟乙烯膜压电传感器(polyvinylidene fluoride, 简称 PVDF)、加速度计、声发射、磁传感器和激光干涉仪等。目前主要通过 PZT 或 FBG^[10-12]实现。

针对复合材料结构的冲击定位问题,笔者结合时差定位技术,提出了一种新的定位方法。首先,采用电阻式应变片来获取低速冲击引起的应变信号;其次,用改进了的定位算法预测冲击位置。电阻式应变片是一种廉价的、常见的传感器,它可以把应变信号转换成电信号。电阻式应变片能在恶劣环境下工作,对工作环境要求不高,且能低频响应应变信号。

1 低能量冲击定位原理

1.1 群速度

由弹性波理论可知,对于各向同性材料,应变波在平板结构中的传播只存在两种形式,即横波(剪切波)和纵波。但在薄板介质中,当冲击发生时,由冲击产生的波传播到薄板的上下界面时,会发生波形的变化,传播路径会发生改变,不同模式的波会混合在一起传播,形成板波或称为 Lamb 波。板波与薄

* 国家自然科学基金资助项目(11302168);航空科学基金资助项目(20152365002);江西省教育厅科学技术研究资助项目(GJJ160711)

收稿日期:2017-06-09;修回日期:2017-08-31

板的厚度、频率和波数等多种因素有关,其传播特性非常复杂,无法用简单的数学关系式表示。

当冲击发生时,在平板上引起的应变波会以横向速度和纵向速度传播,但要衡量波的传播速度时,往往用它们的综合速度,即群速度来描述。群速度可以根据 Mindlin 板理论来计算^[13]。假设复合材料层合板的厚度为 h ,全局坐标系统的原点位于中间平面, z 轴垂直于中面,板中间平面建立 x 轴和 y 轴。在对称准各向同性的情况下,材料的频散关系满足以下方程

$$(D_{11}k^2 + A_{55} - I\omega^2)(D_{66}k^2 + A_{44} - I\omega^2) \cdot (A_{55}k^2 - \rho^* \omega^2) - (D_{16}k^2)^2 (A_{55}k^2 - \rho^* \omega^2) - (A_{55}k)^2 (D_{66}k^2 + A_{44} - I\omega^2) = 0 \quad (1)$$

$$(D_{22}k^2 + A_{44} - I\omega^2)(D_{66}k^2 + A_{55} - I\omega^2) \cdot (A_{44}k^2 - \rho^* \omega^2) - (D_{16}k^2)^2 (A_{44}k^2 - \rho^* \omega^2) - (A_{44}k)^2 (D_{66}k^2 + A_{55} - I\omega^2) = 0 \quad (2)$$

其中: $(\rho^*, I) = \int_{z=-h/2}^{z=h/2} \rho(1, z^2) dz$; k, ρ 和 ω 分别为波数、材料密度和角频率; D_{ij} 为弯曲刚度($i, j = 1, 2, 6$); $A_{ij} = \kappa_i \kappa_j \int_{z=-h/2}^{z=h/2} (\bar{Q}_{ij})_r dz$, \bar{Q}_{ij} 为横向剪切刚度($i, j = 4, 5$), κ_i 为剪切修正因子,由三维弹性理论有 $\kappa_i^2 = 5/6$,下标 r 表示第 r 层层合板。

波数是与角频率相关的函数,当频率接近零时,趋向于零的根是唯一正确的根,通过求解波数和角频率,可得到应变波的理论群速度,群速度可由函数关系 $c_g = d\omega / dk$ 表示。

1.2 定位算法

基于传统的三角测量定位技术的研究较多,其基本原理是在平面监控区域内放置 3 个传感器,当冲击源位于三角形区域内部时,冲击源与 3 个传感器构成 4 个三角形,然后根据距离、角度、波沿不同方向上的传播速度和时间之间的关系建立复杂的非线性方程组,再用各种不同的方法求解这个非线性方程组。三角测量定位算法的优点是所用的传感器较少,但其复杂的非线性方程组的求解比较麻烦,容易出现异常值,求解方法不好时会出现较大的误差。基于上述原因,笔者提出了一个改进的定位算法。

在板平面上用 4 个电阻式应变片组成一个监控区域,选取其中 1 个作为触发传感器,记为 S_1 ,其余的分别标记为 S_i ($i = 2, 3, 4$),如图 1 所示。冲击源到传感器 S_i 和 S_1 之间的波达时间差为 Δt_i ,冲击源的位置可由下列非线性方程组求出

$$\frac{L_{S_i-1m}}{V_{S_i}} - \frac{L_{S_1-1m}}{V_{S_1}} = Vt_i \quad (3)$$

其中: V_{S_1} 为由冲击点到触发传感器的群速度; V_{S_i} 为冲击源到传感器 S_i 的群速度。

设冲击源的坐标为 (x, y) ,应变片传感器 S_i 的坐标为 (x_i, y_i) ,则有

$$\begin{cases} L_{S_1-1m} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ L_{S_i-1m} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中: L_{S_1-1m} 为冲击源到触发应变片的距离; L_{S_i-1m} 为冲击源到应变片 S_i 的距离。

对各向同性材料,各个方向上群速度相等。冲击源位于以 4 个应变片为圆心,以波的群速度乘以波达时间作为半径的四圆弧的交点^[14]。对于各向异性复合材料,由于各向异性复合材料层合板的阻尼及波的频散特性,冲击源到各个传感器的速度各不相同,计算起来会比较繁琐。具体做法是可以根据 Mindlin 板理论求出群速度,然后根据小波变换计算出波达时间差,最后根据由式(3)和式(4)所构成的非线性方程组进行计算。

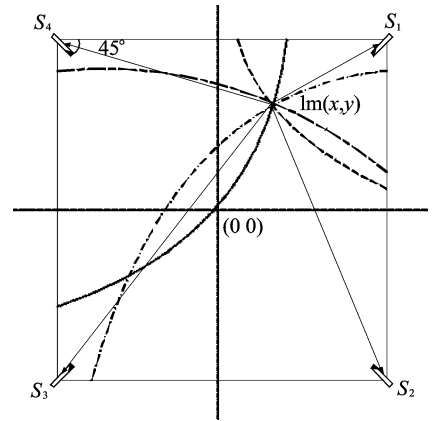


图 1 冲击定位原理图

Fig. 1 Schematic diagram of impact location

2 实验验证

2.1 原材料及试样制备

本实验用的碳纤维增强树脂基复合材料单层板物理属性见表 1,样板由 16 层单层板铺设而成,铺层顺序为 $[0/45/90/-45/0/90/-45/0]_s$,厚度为 2 mm。为了限制制作过程中引起的热残余应力,选用殷钢作为模具^[15],用真空袋进行密封,抽真空预压后放入热压罐,参照设定程序进行固化。罐内温度以 $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率从室温升高至 $80\text{ }^\circ\text{C}$,保温 30 min,然后继续以 $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升高至 $120\text{ }^\circ\text{C}$,保温 90 min,并以 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降低至

50 °C。待冷却后,取出样板。裁剪尺寸为400 mm×400 mm 的样板用来做冲击实验,样板上钻有4×2个螺栓孔,实验时用型号为 M8 的螺栓固定在钢支撑上。

表 1 单向碳纤维层合板材料属性

Tab. 1 Material properties of unidirectional CFRP laminates

材料属性	数值
E_{11}/GPa	121
E_{22}/GPa	8.6
G_{12}/GPa	5.9
G_{23}/GPa	4.3
ν_{12}	0.31
h/mm	0.125
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 520

实验中所使用的应变片的电阻为 120Ω ,其中4个电阻应变片粘贴在试样上,沿角度方向均为 45° 。4个应变片通过动态应变仪分别对应连着示波器的1,2,3和4采集通道。以实验样板为坐标中心,建立直角坐标系,传感器在试样上的位置如图2所示。

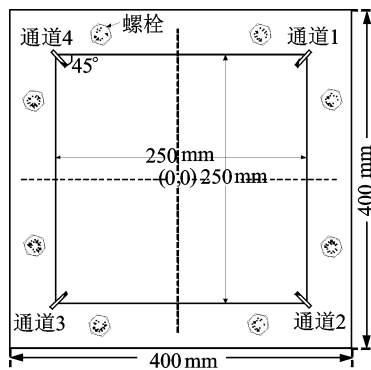


图 2 样板示意图

Fig. 2 Schematic diagram of specimen

2.2 实验仪器设备

对试样的冲击实验包括冲击装置和数据采集装置两部分,如图3所示。数据采集装置由信号放大器 SDY2107 超动态应变仪和 LeCroy WaveRunner 6100A 示波器组成,示波器的4个通道分别采集4个应变片传感器信号。冲击装置中的连接臂杆端部长为755mm,质量为72g,冲击头的质量为205g。冲击头前端为半球形,直径为3.5mm,冲击头位置可在冲击臂有效长度内进行调节。本实验的冲击实际高度为25cm,冲击能量约为0.5J。



图 3 冲击设备

Fig. 3 Impact equipment

3 实验结果

3.1 波达时间

根据奈奎斯特采样定理,以采样频率1 MHz/s进行采样,从中获取到10 000个数据。在冲击点(100mm,50mm),示波器4个通道采集的数据信号如图4所示。从图中可以清晰地看到信号的变化,由于碳纤维增强层合板阻尼的存在,应变波传播能量衰减明显,呈指数衰减。通道1作为信号采集触

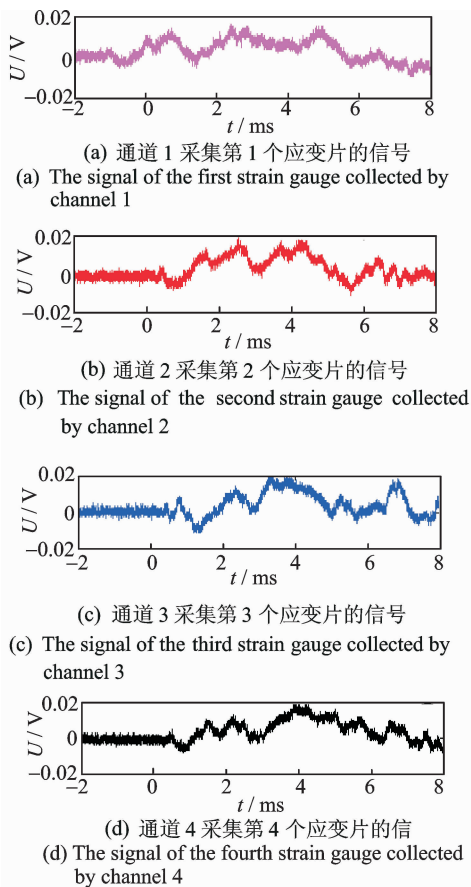


图 4 示波器采集的信号图

Fig. 4 Signal chart acquired by oscilloscope

发通道,其余3个通道首次采集到信号在时间上有较明显的延迟。

通过小波变换获取波达时间,计算第1个应变片传感器和其他3个应变片传感器的时间差 Δt_i ($i=2,3,4$)。

3.2 结果讨论

实验使用的试样为准各向同性,又由于实验所用样板较小,冲击点到各传感器的距离较短,因此可以认为各个传感器方向的群速度相等,由Mindlin板理论计算出群速度。选择位于传感器组成的三角形内的测量点,根据文献[2]所介绍的三角测量技术,计算结果如表2所示。

表2 测量位置与实际位置比较(三角测量定位技术)

Tab. 2 Comparison of measured position to actual position (the triangulation technique)

序号	实际位置/mm		测量位置/mm		绝对误差/mm	
	x	y	x	y	x	y
1	100	100	106.35	107.69	6.35	7.69
2	50	100	40.03	85.82	9.97	14.18
3	100	50	115.09	60.55	15.09	10.55
4	50	50	53.93	43.80	3.93	6.20
5	50	-50	42.20	-41.38	7.80	8.62
6	100	-50	114.73	-59.50	14.73	9.50
7	50	-100	38.90	-83.36	11.10	16.64
8	100	-100	95.03	-92.45	4.97	7.55

根据笔者所提出的定位算法,可得到实验结果如表3所示。

表3 测量位置与实际位置比较

Tab. 3 Comparison of measured position to actual position

序号	实际位置/mm		测量位置/mm		绝对误差/mm	
	x	y	x	y	x	y
1	100	100	95.18	102.53	4.82	2.53
2	50	100	51.77	108.35	1.77	8.35
3	100	50	105.61	56.47	5.61	6.47
4	50	50	48.60	54.33	1.40	4.33
5	50	-50	47.24	-49.04	2.76	0.96
6	100	-50	109.20	-52.56	9.20	2.56
7	50	-100	53.83	-92.66	3.83	7.34
8	100	-100	97.48	-101.90	2.52	1.90

对比表2和表3可知,三角测量定位技术所计算的结果误差明显大于笔者所提出的定位算法的结果。其主要原因是三角测量定位技术的计算结果由3个非线性方程组成的方程组来确定,而这个非线性方程组在求解过程中容易出现较大的误差。

由表3可以看出,最大绝对误差为9.2mm,误差结果比较分散,没有规律,即使是对称位置上的两个点的误差也相差较大。从实验过程来看,可确定引起误差的原因主要有:a.冲击过程是手动完成的,容易出现偏差;b.对于准各向异性层合板,假定各个方向上的群速度相等,而实际上由于阻尼和波频散特性,各个方向上的群速度是不相同的c.在群速度的计算过程中,由于需要进行迭代运算,因此也会出现一定的舍入误差。

4 结束语

提出了一种新的定位方法,通过使用电阻式应变片与定位算法预测低能量冲击源位置。将4个电阻式应变片粘贴在碳纤维增强层合板上,用来获取由简易冲击装置进行低速冲击引起的应变信号,应变信号经超动态应变仪放大后由示波器采集。小波变换用来获取不同应变片传感器之间的时间差,群速度通过Mindlin板理论计算,最后,用笔者所提出的定位算法计算冲击源坐标。实验在准各向同性碳纤维增强层合板上进行,实验样板尺寸为400mm×400mm×2mm,实验结果显示定位坐标误差小于10mm,证明所提的方法能应用于碳纤维增强复合材料层合板低速冲击定位。

参 考 文 献

- [1] Frieden J, Cugnoni J, Botsis J, et al. Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors — part II: damage identification[J]. Composite Structures, 2012, 94(2): 593-600.
- [2] Salehian A. Identifying the location of a sudden damage in composite laminates using wavelet approach [D]. MSc Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2003.
- [3] 王国锋, 李富才, 刘志强, 等. 超声导波在圆管结构损伤定位中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3): 440-448.
Wang Guofeng, Li Fucui, Liu Zhiqiang, et al. Research on ultrasonic guided wave-based damage localization for pipeline structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 440-448. (in Chinese)
- [4] Ochöa P, Infante V, Silva J M, et al. Detection of multiple low-energy impact damage in composite plates using Lamb wave techniques[J]. Composites Part B

- Engineering, 2015, 80:291-298.
- [5] Toyama N, Takatsubo J. Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates[J]. Composites Science & Technology, 2004, 64 (9):1293-1300.
- [6] Toyama N, Noda J, Okabe T. Quantitative damage detection in cross-ply laminates using Lamb wave method[J]. Composites Science & Technology, 2003, 63(10):1473-1479.
- [7] Leclerc J R, Worden K, Staszewski W J, et al. Impact detection in an aircraft composite panel—a neural-network approach[J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 299(3):672-682.
- [8] Sai Yaozhang, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, et al. Composite plate low energy impact localization system based on FBG sensing network and hybrid algorithm [J]. Optical Fiber Technology, 2015, 24:84-88.
- [9] Worden K, Staszewski W J. Impact location and quantification on a composite panel using neural networks and a genetic algorithm[J]. Strain, 2000, 36(2):61-68
- [10] Jang B W, Kim C G. Impact localization on a composite stiffened panel using reference signals with efficient training process[J]. Composites Part B Engineering, 2016, 94:271-285.
- [11] 赵发刚, 周春华, 梁大开, 等. 卫星典型复合材料蜂窝结构板的冲击定位方法[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6):1204-1209.
Zhao Fagang, Zhou Chunhua, Liang Dakai, et al. Impact and locating method research on satellite's typical composite honeycomb structure panel[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(6): 1204-1209. (in Chinese)
- [12] 曹亮, 王景霖, 何召华, 等. 光纤光栅传感网络的冲击定位方法[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(3):456-461.
- Cao Liang, Wang Jinglin, He Zhaohua, et al. Research on impact location by using fiber bragg grating sensor network[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3):456-461. (in Chinese)
- [13] Jeong H, Jang Y S. Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates [J]. Composite Structures, 2000, 49 (4):443-450.
- [14] Su Zhongqing, Ye Lin, Lu Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures; a review[J]. Journal of Sound & Vibration, 2006, 295 (3-5): 753-780.
- [15] Hu Haixiao, Li Shuxin, Wang Jihui, et al. FBG-based real-time evaluation of transverse cracking incross-ply laminates[J]. Composite Structures, 2016, 138: 151-160.



第一作者简介:赵刚,男,1976年2月生,讲师、博士生。主要研究方向为复合材料结构及应用。曾发表《Localization of impact on composite plates based on integrated wavelet transform and hybrid minimization algorithm》(《Composite Structures》) 2017, Vol. 176)等论文。
E-mail: zhaogang0209@163.com

通信作者简介:李书欣,男,1958年4月生,教授、博士生导师。主要研究方向为先进航空工程材料、先进航空结构工程、工程材料与结构检测试验。
E-mail: Lishuxin@whut.edu.cn