

文章编号: 1000-6893(2004)05-0476-04

二维结构损伤的主动 Lamb 波定位技术研究

徐颖娣, 袁慎芳, 彭 鸽

(南京航空航天大学 智能材料与结构研究所, 江苏 南京 210016)

Study on Two-dimensional Damage Location in Structure Based on Active Lamb Wave Detection Technique

XU Ying-di, YUAN Shen-fang, PENG Ge

(Research Institute of Smart Material and Structure, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 将 Lamb 波主动监测技术应用于复合材料损伤检测中,对二维结构损伤进行定位研究。利用压电陶瓷片作为驱动器和传感器,对结构损伤前后的传感信号做信号差,采用 3 种常用的信号时间延迟估计方法,比较这 3 种方法计算差信号和健康信号的时间延迟的损伤定位效果,其中定位方法采用了椭圆技术。详细介绍了这 3 种时间延迟估计方法的原理以及损伤定位结果的分析。实验结果表明在信号的信噪比较小的情况下,采用小波变换法能更准确地识别出复合材料冲击损伤的位置。实验数据验证了该方法的有效性。

关键词: 损伤定位; Lamb 波主动监测技术; 时间延迟; 小波变换; 椭圆技术

中图分类号: V214.8 **文献标识码:** A

Abstract: This study adopts active Lamb Wave detection technique to damage detection in composite materials, using ellipse technique in order to localize the two-dimensional damage in structure. Three methods are applied to compute the time delay between differential signal and health signal. Experiments results are conducted to demonstrate that wavelet transformation analysis has an advantage over the others for the precise damage location when Signal-to-Noise is little.

Key words: damage localization; active Lamb wave detection; time delay; wavelet transformation; ellipse technique

Lamb 波主动监测技术是近年来新兴的结构健康监测技术,由 20 世纪初 H. Lamb 先生研究无限大板中正弦波问题而得名。20 世纪 80~90 年代初期,人们开始将 Lamb 波技术应用于复合材料的损伤检测。美国航天局(NASA)的 Sarsvanos 等人从理论上及实验上证实了利用 Lamb 波检测复合材料梁结构的分层损伤^[1]。英国国防与评估研究机构的 Percival 和 Birt 则研究利用两种基本的 Lamb 波传播模式检测材料损伤^[2]。目前应用 Lamb 波技术进行损伤监测最出色的研究工作来自于 Imperial College 的两个独立研究小组。Cawley 的小组已研究了方向性 Lamb 波激发的优化,开发了用于激励和检测 Lamb 波的 PVDF 传感器,可实时监测金属材料的损伤^[3],Soutis 的小组则致力于传感器的布置和信号的处理^[4]。传统的利用 Lamb 波技术进行损伤检测的研究中,损伤通常在驱动器和传感器之间的直线上,只能进行一维结构的损伤定位^[5]。而本研究采用 Lamb 波主动监测技术,在 3 个压电片构成的监测阵列中,选取两

对压电片,每对压电片一个做驱动器另一个做传感器,可对二维结构损伤进行定位。

1 损伤定位系统原理

(1) 基于 Lamb 波的结构主动监测技术 主动监测方法的基本思想是:采用驱动器在复合材料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,并对信号进行分析,据此对结构中的损伤进行监测。Lamb 波是在板中传播的一种弹性波,它在不同的厚度及不同激发频率下会产生不同的传播模式,利用它对缺陷的反射,就可确定缺陷的大致位置。

(2) 损伤定位方法

信号传播路径的分析 为了确定损伤位置,首先要分析信号在结构中的传播路径。驱动器引出的激励信号在材料中传播,有多种不同的路径可以到达传感器。损伤定位研究只对经过损伤反射到达传感器的路径感兴趣,那些到达传感器而没有经过损伤反射影响的波包没有携带有用的信息,可以作为公有信息通过传感器在损伤前后接收到的信号相减而除掉^[6]。因此对材料损伤

收稿日期:2003-09-08; 修订日期:2004-04-12

基金项目:国家自然科学基金(90305005);国防预研项目(402030202)的资助课题

前后的传感信号做代数差,可认为差信号是由损伤引起的,它的传播路径可解释为驱动器引出的激励信号,经损伤折射后直接到达传感器,如图 1 所示。

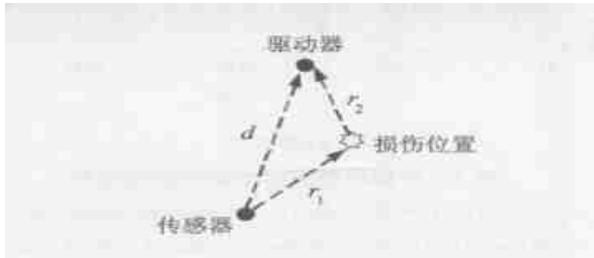


图 1 信号传播路径

Fig.1 The propagation path of signal

椭圆技术定位 在本研究中,采用椭圆技术来确定损伤位置。如果把驱动器和传感器看作是椭圆的两个焦点,则以此两个焦点可画出一个椭圆。显然仅有一个椭圆是不能确定损伤位置的,为此可选取另一组压电片,可画出第二个椭圆,两个椭圆的交点即为损伤位置。椭圆方程为(见图 2)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

此方法的局限性为如果 $b > a$ 则可能画出一个或 2 个椭圆。如果损伤比较靠近 3 个压电片构成的三角形的边缘,或者是比较靠近其中任意一个压电片,都可导致出现此方法的局限性。因为这里所做的是实验研究,为了提高损伤定位的精度,所以实验中模拟损伤时应尽量避免此类情况的发生。

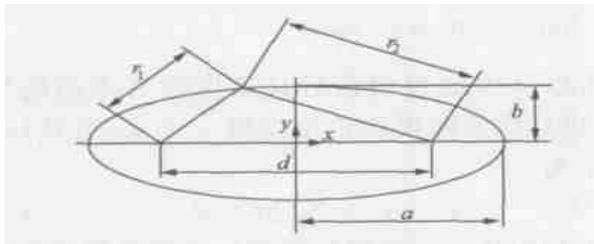


图 2 椭圆示意图

Fig.2 Ellipse technique diagram

2 时间延迟估计

(1) 时间延迟的含义 时间延迟估计在损伤定位研究中占有很重要的地位。本研究中的时间延迟的含义为:在材料健康状态时健康传感信号到达传感器的时刻为 t_1 ,损伤传感信号和健康传感信号之间的差信号到达传感器的时刻为 t_2 ,则时间延迟 t 可表示为

$$t = t_2 - t_1 \tag{1}$$

根据图 1,时间延迟 t 理论表达式为

$$\frac{r_1}{v_0} + \frac{r_2}{v_1} - \frac{d}{v_0} = t \tag{2}$$

其中: d 为驱动器和传感器之间的距离; r_1 为驱动器到损伤的距离; r_2 为损伤到传感器的距离; v_0 是信号在经过损伤前健康模式的传播速度; v_1 是信号经过损伤后的损伤模式的传播速度。

(2) 时间延迟估计方法 时间延迟估计方法的研究是很多相关领域的专家学者们关心的热点课题,发表了许多研究报告,提出了多种时间延迟估计的方法。在本研究中采用了以下 3 种时间延迟估计方法。

阈值法 在本研究中选取信号的最大峰值为阈值,即峰值所应的时间为信号的到达时间。具有同时计时起点的两传感器所接收到信号的时间差即为两信号间的时间延迟。

互相关函数法 计算两列信号的互相关函数,并且计算出对应于最相似时所对应的时间,即互相关函数的峰值点所对应的时间,即为时间延迟。

小波变换计算时间延迟 对任意平方可积信号 $f(t)$,其连续小波变换定义为:

$$W_{T,f}(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \left[\frac{t-b}{a} \right] dt, \quad a > 0$$

本研究采用 Gabor 函数作为分析小波,因为它能提供最佳的时频分辨率^[7]。Gabor 函数表达式为

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(\omega/\omega_0)^2}{2} t^2 + i\omega_0 t\right] dt \tag{3}$$

它的傅立叶变换为

$$\hat{g}(\omega) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{4\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(\omega/\omega_0)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] dt \tag{4}$$

因此 Gabor 小波变换代表 $f(t)$ 在 $t = b$ 和 $\omega = \omega_0/a$ 左右的时频成分。实验中令 $\omega_0 = 2\pi$ 则 $1/a$ 等于中心频率 $f = \omega_0/2$ 。

考虑沿 x 方向传播,相同单位幅度、角频率略有不同的两个谐波构成的发散波

$$u(x,t) = e^{-i(k_1x - \omega_1 t)} + e^{-i(k_2x - \omega_2 t)} \tag{5}$$

使用 Gabor 小波对 $u(x,t)$ 做小波变换得

$$(W_u)(x,a,b) = \sqrt{a} \left\{ e^{-i(k_1x - \omega_1 b)} \hat{g}(a\omega_1) + e^{-i(k_2x - \omega_2 b)} \hat{g}(a\omega_2) \right\}$$

如果 ω 足够小,得到 Gabor 小波变换 (W_u) 的模:

$$| (W_u)(x, a, b) | \sqrt{ab} / \wedge_g(aw_c) / [1 + \cos(2 kx - 2 wb)]^{1/2}$$

该结果表明:Gabor 小波变换的模在 (a, b) 平面域上的峰值对应着频率为 $W_c = W_0/a(f=1/a)$ 时的群速度 c_g 的到达时刻。

根据以上结论,两列信号的时间延迟为 t 二者 Gabor 小波变换的最大峰值所对应的时间的差。

3 实验研究

(1) 监测系统实现 本研究所建立的监测系统如图 3 所示,基本结构为玻璃纤维-环氧树脂复合材料板,表层埋有压电陶瓷片作为传感器和驱动器。系统主要由 Agilent 33120A 任意波形发射器(激励信号发生器)、YE5850 电荷放大器和多通道声发射系统 DiSP(采用其中的一个软件做数据采集系统)所组成。



图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental system

(2) 信号采集与处理 实验得到的一组激励信号、传感信号及差信号如图 4、图 5 所示,健康信号和差信号的互相关函数和小波变换分别如图 6、图 7 所示。

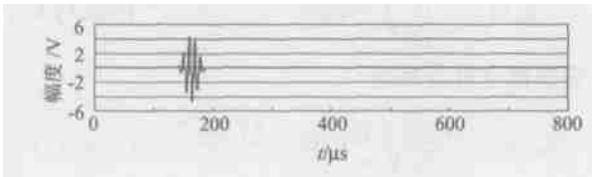
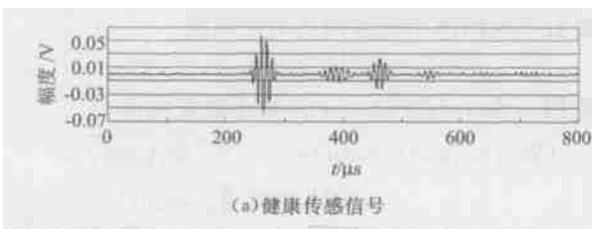


图 4 激励信号的时域波形

Fig. 4 Actuator signal in the time domain

(3) 构建椭圆各参数的确定 实验得到的损伤前后信号的传播速度如表 1 所示。由表 1 可知,损伤前后信号的传播速度 v_0 与 v_1 近似相等,



(a)健康传感信号

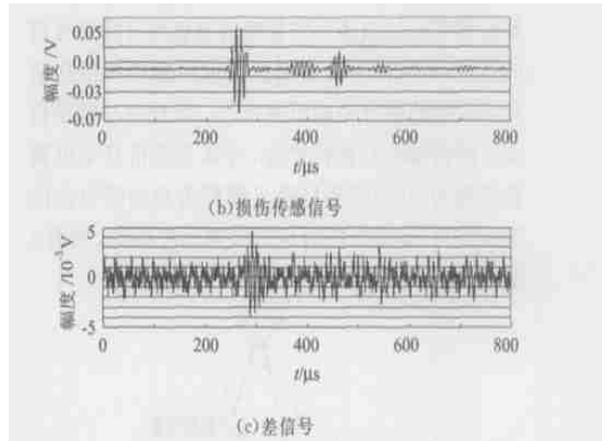


图 5 结构损伤前后采集到健康信号

Fig. 5 Received health signal (a), damage signal (b) and the differential signal between damage signal and health signal (c)

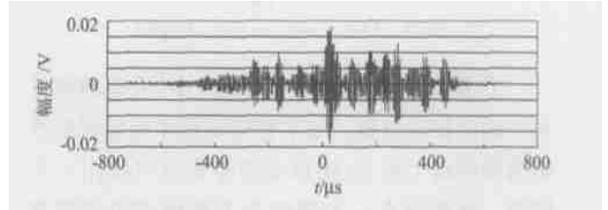


图 6 健康信号和差信号的互相关函数

Fig. 6 The cross correlation function between health signal and differential signal

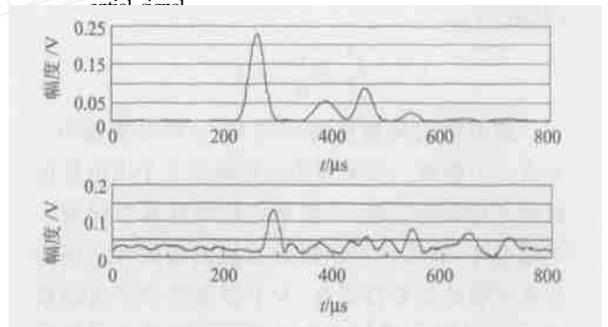


图 7 健康信号和差信号的小波变换

Fig. 7 The respective wavelet transformations of health signal and differential signal

所以可以认为经过损伤后其速度没有本质的变化,在以后的实际损伤定位中取 $v_1 = v_0$,公式(2)可表示为

$$r_1 + r_2 = v_0 t + d \tag{8}$$

因此构建一个椭圆仅需要知道驱动器和传感器之间的距离,时间延迟 t ,传播速度 v_0 。

表 1 比较 v_0 与 v_1

Table 1 Compare v_0 with v_1

实验编号	d /m	r_1 /m	r_2 /m	t /μs	v_0 /(m·s ⁻¹)	v_1 /(m·s ⁻¹)
a	0.253	0.1335	0.13	2.7	3044.5	3098.8
b	0.254	0.1335	0.2555	42.2	3124.2	3163.3
c	0.2545	0.1335	0.1835	22.6	3201.3	3038.2
d	0.2565	0.13	0.1835	18.4	3194.3	3163.7

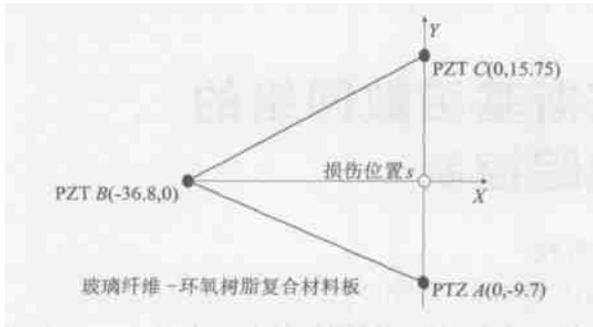


图 8 实验试件

Fig. 8 Experimental arrangement

(4) 损伤定位 实验试件如图 8 所示, A, B, C 为 3 个压电片; S 为实际损伤位置。取两条路径 AB 和 CB 路径, 分别采集损伤前后的激励和传感信号; 求出各个路径上的信号的传播速度及时间延迟(表 2), 根据公式(8), 两组压电片画出的两个椭圆的交点即为损伤位置。两个椭圆的交点可能不止有一个, 但是实验中的损伤在 3 个压电片构成的三角形的范围内, 并且远离压电片及任两个压电片的连线, 所以实验结果舍去椭圆交点中在此条件范围以外的解。3 种方法损伤定位结果如表 3 所示。

表 2 材料健康状态各段路径激励和传感信号的时间延迟
Table 2 The time delay between actuator signal and sensor signal on each route

实验编号	1	2	3	4	5	平均值	
小波变换	t_{AB} (μs)	100.1	103.5	102.0	97.9	102.2	101.14
	t_{CB} (μs)	110.9	112.6	112.1	112.5	111.5	111.92
互相关函数	t_{AB} (μs)	101.6	98.2	102.2	103.6	100.4	101.2
	t_{CB} (μs)	110.2	112.3	111.4	111.6	111.0	111.3
阈值法	t_{AB} (μs)	100.2	103.6	102.3	98.3	101.6	101.2
	t_{CB} (μs)	110.2	112.1	111.5	111.5	110.9	111.24

注: 参数 t_{XY} 表示信号在 XY 路径上的传播时间

(5) 定位结果分析 由表 3 看出, 小波变换计算时间延迟的损伤定位效果优于其他两种方法。究其原因, 信号的信噪比在确定时间延迟时起重要作用。在材料健康情况下, 激励信号和传感信号幅度较大, 因此 3 种方法计算二者之间的时间延迟是大致相同的(见表 2)。由于实验得到的差信号幅值却很小, 信号很微弱, 信噪比较小,

表 3 3 种方法的损伤定位结果

Table 3 Damage location results by three methods

	小波分析法	互相关函数法	阈值法
损伤定位 / cm	(6.210, 0.230)	(7.2038, 5.1900)	(7.029, 7.620)
实际位置 / cm	(5.2000, -1.2000)		
误差 / cm	1.7500	6.7100	9.0076

注: 表中误差项为所求损伤位置与实际损伤位置之间的距离。

使得用阈值法和互相关函数法估计时间延迟的精度大大降低, 从而影响了定位精度。

参 考 文 献

- [1] Saravanas D A, Heyliger P R. Coupled layerwise analysis of composite beams with embedded piezoelectric sensors and actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995, 6: 350 - 362.
- [2] Percival W J, Birt E A. A study of lamb wave propagation in carbon fibre composites [J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 1997, 39: 728 - 735.
- [3] Monkhouse R S C, Wilcox P W, et al. The rapid monitoring of structures using interdigital lamb wave transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2000, 9: 304 - 309.
- [4] Valdez S H D, Soutis C. [A]. Proceedings of the european conference on composite materials[C], 2000.
- [5] Kehlenbach M. Smart nondestructive evaluation for Health monitoring of structure and biological systems[J]. 2002, 4702:
- [6] Chui C K. An introduction to wavelets[M]. San Diego: Academic Press, 1992.

作者简介:



徐颖娣 (1978-) 女, 山东潍坊人, 南京航空航天大学硕士研究生, 主要从事计算机测控方面的研究工作, E-mail: yingdi-xu@163.com

袁慎芳 (1968-) 女, 江苏南京人, 南京航空航天大学航空科技智能材料与结构重点实验室副主任, 教授, 博士生导师, 主要从事智能材料结构、信号信息处理等方面的研究工作。E-mail: ysf@nraa.edu.cn



彭 鸽 (1980-) 男, 江西萍乡人, 南京航空航天大学博士研究生, 主要从事结构健康检测方面的研究工作, E-mail: pengge01@hotmail.com

(责任编辑: 李铁柏)