

基于Lamb波和匹配追踪方法的结构损伤定位

冯勇明 周丽 李真

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要:提出一种基于Lamb波和字典库为Chirplet原子的匹配追踪方法的板结构损伤定位方法。首先针对Lamb波监测的特点,提出了匹配追踪方法的快速实现方案,将信号分解为多个Chirplet原子的线性组合;然后建立了Lamb的弥散效应与Chirplet原子的调频斜率之间的关系,表明Chirplet原子能准确地匹配失真变形的窄带脉冲信号,并能识别Lamb波的模态;根据损伤前与损伤后的信号差,提出了一种可以分辨多损伤散射信号的损伤定位方法。最后通过数值仿真、各向同性板结构实验和蜂窝夹层复合材料结构实验,验证了该方法的可行性和有效性。

关键词:结构健康监测;Lamb波;匹配追踪方法;Chirplet原子;损伤定位

中图分类号:TP206

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)02-0184-07

Structure Damage Localization Based on Lamb Waves and Matching Pursuits

Feng Yongming, Zhou Li, Li Zhen

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,
Nanjing, 210016, China)

Abstract: A damage localization method for plate structure is developed based on Lamb waves and matching pursuit method with Chirplet dictionary. Firstly, a signal processing method is developed using matching pursuits. It can decompose Lamb signals into a linear expansion of several Chirplet atoms with a fast operation speed; Secondly, the relationship between Lamb wave's dispersion and Chirplet's chirp rate is developed. It shows that the Chirplet atom can match the dispersion pulse accurately, and it can be used to identify the modes of Lamb waves; Thirdly, a method for damage localization is developed based on the difference between the raw signals and the damaged signals. It can distinguish the overlapped signals reflected from several damages. The effectiveness and accuracy are verified by simulation, experiments of isotropic plate structure and honeycomb sandwich of carbon fiber composite structure.

Key words: structure health monitoring; Lamb waves; matching pursuit method; Chirplet atom; damage localization

结构健康监测系统(Structure health monitoring system, SHMS)可以近乎实时地反映出飞行器结构的状况,降低结构维护费用,提高安全性,延长其使用寿命以及预测结构失效,越来越引起人们的重视。基于导波的健康监测方法被认为是

很有前景的主动监测方法^[1-2],通过监测损伤对导波传播的影响得出损伤相关信息,可以对杆、梁、板、壳等常见结构进行大范围、长距离的监测。板结构监测中,最常用的应力波为Lamb波,而Lamb波信号具有弥散效应和复杂的模态转换现象,对监测

基金项目:国家自然科学基金(10572058)资助项目;航空基金(2008ZA52012)资助项目;江苏省研究生培养创新工程(CX09B-070Z)资助项目。

收稿日期:2010-08-31;**修订日期:**2010-11-30

通讯作者:周丽,女,教授,博士生导师,1963年4月生,E-mail: lzhou@nuaa.edu.cn。

信号的解析分析比较困难。由于弥散效应存在, Lamb波在传播过程中会出现失真变形,幅值变小,时域上被拉长,使信号的信噪比和时域分辨率变差,并且随传播距离的增加而加剧。不同模态Lamb波传播的群速度不同,复杂的模态转换现象使损伤位置的确定更加困难。

在监测中通常将监测信号减去损伤前信号得到损伤的散射信号,而散射信号的幅值很小,受噪声的影响大,需要识别散射信号的模态,非常有必要研究先进的信号处理方法来分析监测信号。近年来许多学者采用短时傅里叶变换(Short time Fourier transform, STFT)、小波变换(Wavelet transform, WT)、希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)等时频分析方法对监测信号进行分析^[3-5],并取得了一系列成果,但这些方法的时频分辨率都不理想,并且未考虑弥散效应对信号的影响。Ruiz-Reyes等人^[6]使用匹配追踪方法来提取强噪声环境中的损伤散射信号。Hong等人^[7]将匹配追踪方法运用于应力波信号的处理中,但他们假设应力波信号是单模态的、非弥散的。Ajay等人^[8]将基于Chirplet原子的匹配追踪方法应用于应力波信号的处理中,考虑了弥散效应,但该方法并未精确建立弥散效应与Chirplet原子的调频斜率之间的关系,计算结果精度不高。

本文使用Chirplet原子匹配弥散的窄带脉冲信号,并采用自适应信号处理方法——匹配追踪方法对监测信号进行分解,提取信号到达时间、弥散值等信息来识别Lamb波的模态并定位损伤。首先提出了匹配追踪方法的快速实现方案,然后证明Chirplet原子能准确匹配失真变形的窄带脉冲信号,最后提出可以分辨重叠反射信号的损伤定位方法。仿真和实验结果表明了该方法的可行性和有效性。

1 匹配追踪方法

匹配追踪(Matching pursuits, MP)方法是Mallat和Zhang在1993年提出的一种自适应信号处理方法^[9],该方法将待分析信号重复迭代投影到庞大的波形字典库中,并从字典库中选择最适合匹配某段待分析信号的波形。与其他时频分析方法相比,MP方法具有时频分辨率高、对噪声不敏感、无干扰项、计算速度快等优点。信号 $f(t)$ 属于Hilbert空间 $L^2(R)$,MP方法经过多次迭代将信号 $f(t)$ 分解为多个时频原子的线性组合,令 $R^0 f = f$,以第 m 次分解为例加以说明:

(1)从字典库 D 中选择最佳原子 g_γ

$$g_{\gamma_m} = \arg \max_{g_\gamma \in D} |\langle R^{m-1} f, g_\gamma \rangle| \quad (1)$$

(2)经过步骤(1)后,信号的残值为

$$R^m f = R^{m-1} f - \langle R^{m-1} f, g_{\gamma_m} \rangle g_{\gamma_m} \quad (2)$$

迭代过程通过迭代次数或信号残值控制。经过 M 次迭代分解后,信号 $f(t)$ 分解为

$$f = \sum_{m=0}^{M-1} \langle f, g_{\gamma_m} \rangle g_{\gamma_m}(t) + R^M f \quad (3)$$

在分解过程中 $R^m f$ 与 g_{γ_m} 是正交的,整个分解满足能量守恒定律。

本文中MP方法选用由Chirplet原子 $g_\gamma(t)$ 组成的字典库

$$g_\gamma(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) * \exp\left[i\left(\omega_0(t-u) + \frac{c}{2}(t-u)^2\right)\right] \quad (4)$$

其中: $g(t) = 2^{1/4} e^{-\pi t^2}$; $\|g_\gamma(t)\| = 1$; 索引 $\gamma = (s, u, \omega_0, c)$; s 为尺度; u 为时间中心; ω_0 为角频率中心; c 为调频斜率。该原子的角频率 $\omega(t) = \omega_0 + c(t-u)$,它随时间变化。

在主动Lamb波监测方法下,激励信号选用窄带波信号,它具有确定的角频率 ω_0 和尺度 s ,针对这一特性在使用MP方法处理监测信号时可以做一些简化。MP方法的索引中有4个参数, s 和 ω 事先确定,由于弥散效应,尺度 s 应乘以系数 k ,只需确定 u 与 c 。MP方法可以通过以下两个步骤反复迭代实现:

(1)令Chirplet原子 $g_\gamma(t)$ 中调频斜率 $c_0 = 0$,此时Chirplet原子等效为Gabor原子,应用MP方法求得最佳原子,得到时间 u_0 、幅值 A_0 与相位 ϕ_0 的初值。

(2)以时间 u_0 和调频斜率 $c_0 = 0$ 作为初值,采用非线性最小二乘法^[10]求出时间 u_1 和调频斜率 c_1 的精确值

$$(u_1, c_1) = \underset{\substack{u_1 \in [0, N-1] \\ c_1 \in [-\pi, \pi]}}{\operatorname{argmin}} |R^{m-1} f - A_0 g_{\gamma_0 m}| \quad (5)$$

由此确定索引 γ ,再通过内积运算得到幅值 A_1 以及相位 ϕ_1 的精确值。迭代反复进行,直到一定迭代次数或信号残值的范数到达某一阈值,即可完成对监测信号的分解,并从中提取信号到达时间、调频斜率等信息。根据索引 γ_1 以及幅值 A_1 、相位 ϕ_1 等信息可以重构监测信号。

2 弥散脉冲信号的Chirplet原子匹配

由弥散效应影响,窄带脉冲信号在传播时会出

现失真变形,使信号的幅值和波形发生变化,本节将研究 Chirplet 原子匹配失真变形的窄带脉冲信号的可行性。激励信号为高斯窗调制的窄带波信号,表达式如下

$$g_{(s,\omega_0)}(t) = 2^{1/4} e^{-\pi(t/s)^2} e^{j\omega_0 t} \quad (6)$$

式中 $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为激励信号的中心频率。激励信号在频域中表示为

$$G_{(s,\omega_0)}(\omega) = 2^{1/4} \exp\left(-\frac{[s(\omega - \omega_0)]^2}{4\pi}\right) \quad (7)$$

激励信号沿波导传播时间 u 后,它的傅里叶变换 $G_{(u,s,\omega_0)}(\omega)$ 可以表示为

$$G_{(u,s,\omega_0)}(\omega) = G_{(s,\omega_0)}(\omega) \cdot e^{-j\omega u} \quad (8)$$

u 表示脉冲信号在时域中的位置。当应力波的弥散效应存在时,激励脉冲 $G_{(u,s,\omega_0,D(\omega))}(\omega)$ 的傅里叶变换表示为

$$G_{(u,s,\omega_0,D(\omega))}(\omega) = G_{(u,s,\omega_0)}(\omega) \cdot e^{-jD(\omega)u} = G_{(s,\omega_0)}(\omega) \cdot e^{j\Phi(\omega)} \quad (9)$$

式中: $D(\omega)$ 表示弥散效应的影响,相位 $\Phi(\omega) = -(D(\omega) + \omega u)$ 。受弥散效应影响的时域信号波形可以通过对 $G(\omega)$ 作逆傅里叶变换得到。

信号到达时间 $\tau(\omega)$ 可由相位对频率的导数求出

$$\tau(\omega) = -d\Phi(\omega)/d\omega = dD(\omega)/d\omega + u \quad (10)$$

$\tau(\omega)$ 的准确性取决于函数 $D(\omega)$ 的准确近似。

激励信号为窄带波信号,在很窄的频带内群速度与频率的关系可以近似为一次函数(图1), $\tau(\omega)$ 可作如下近似

$$\tau(\omega) \cong d(\omega - \omega_0) + u \quad (11)$$

式中 d 定义为弥散值,表征弥散效应,与式(10)相比较,函数 $D(\omega)$ 可作如下近似

$$dD(\omega)/d\omega \cong d(\omega - \omega_0) \quad (12)$$

Chirplet 原子 $g_\gamma(t)$ 的傅里叶变换 $G_{(s,u,\omega,c)}(\omega)$ 与 $G_{(s,\omega_0)}(\omega)$ 相比,相位改变量为

$$\Phi(\omega) = -\frac{cs^4(\omega - \omega_0)^2}{(8\pi^2 + 2c^2s^4)} - \omega u \quad (13)$$

$\tau(\omega)$ 表示为

$$\tau(\omega) = -d\Phi(\omega)/d\omega = \frac{cs^4}{(4\pi^2 + c^2s^4)}(\omega - \omega_0) + u \quad (14)$$

弥散值可以表示为

$$d = cs^4/(4\pi^2 + c^2s^4) \quad (15)$$

由 d 值可以得到 $D(\omega)$, 得出弥散效应对信号波形的影响,即表明了 Chirplet 原子能准确地匹配受弥

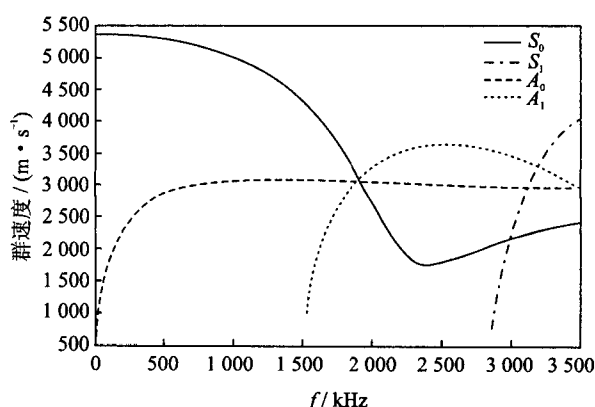


图1 铝板中 Lamb 波低阶模式的群速度-频率曲线

散效应影响的窄带脉冲信号。

3 损伤定位方法

将 Lamb 波应用于板结构的损伤监测中,首先需要研究 Lamb 波的传播特性。Lamb 波是自由边界条件的薄板结构中膨胀波和等容积波耦合而成的一种应力波,它有对称模态(S 波)和反对称模态(A 波)两种模式。在各向同性板中,Lamb 波的波动特性可由弹性动力学中的 Rayleigh-Lamb 方程确定^[11],Lamb 波具有弥散效应,各个模态的相速度和群速度均随频率变化而改变。图1为厚度为 1 mm 的铝板中低阶模态 Lamb 波的群速度——频率曲线,其中 S_0 和 S_1 为两个低阶对称模态, A_0 和 A_1 为两个低阶反对称模态。

驱动器产生激励信号在结构中引入 Lamb 波,Lamb 波在传播中会受损伤的影响,由传感器感应包含损伤信息的 Lamb 波信号,通过损伤前与损伤后的信号差得出损伤信息。本文假设损伤为点散射源,应力波在传播中遇到损伤时,会在各个方向上产生散射波^[12]。激励器和传感器位于同一位置,在一定激励条件下,驱动器会激励产生 S_0 模态的 Lamb 波,当 S_0 模态的 Lamb 波遇到损伤时会发生模态转换,散射产生 S_0 模态和 A_0 模态的 Lamb 波,散射波的到达传感器的时间为 t_0 ,再根据各模态 Lamb 波的群速度,可以求出相应模态散射波对应损伤的径向距离 x_{S_0} , x_{A_0}

$$x_{S_0} = \frac{(t_0 - t_e/2) \cdot C_{gS_0}(\omega_0)}{2} \quad (16a)$$

$$x_{A_0} = \frac{(t_0 - t_e/2) \cdot C_{gS_0}(\omega_0) \cdot C_{gA_0}(\omega_0)}{(C_{gS_0}(\omega_0) + C_{gA_0}(\omega_0))} \quad (16b)$$

式中: t_e 为激励信号的时间长度; $C_g(\omega_0)$ 为角频率 ω_0 对应 Lamb 波模态的群速度,群速度可以通过弹

性动力学方法精确地求出。

散射信号到达时间 t_0 对应两个损伤位置 x_{S_0} , x_{A_0} , 需要识别 Lamb 波的模态, 再根据对应模态 Lamb 波的群速度, 才能得到损伤的径向距离, 为此需要计算出 S_0 模态和 A_0 模态波对应的弥散值 d_{S_0} , d_{A_0} 。 $\tau(\omega)$ 可以通过距离 x_{S_0} 与群速度的比值求出

$$\tau(\omega) = x_{S_0}/C_g(\omega)$$

(17)

结合式(11), 可以得到 S_0 模态对应的弥散值 d_{S_0}

$$d_{S_0} = (x_{S_0}/C_g(\omega) - u_0)/(\omega - \omega_0)$$

(18)

式中 $u_0 = x_{S_0}/C_g(\omega_0)$ 。 同样可以得到 A_0 模态对应的弥散值 d_{A_0} 。 将监测信号的弥散值 d_{mp} 与 d_{S_0} , d_{A_0} 相比较, 能确定信号的模态, 进而得到损伤的位置。

4 数值仿真验证

为验证本文提出方法的有效性, 建立带损伤铝板的二维有限元模型。 模型如图 2(a) 所示, 尺寸为 $80\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$, 在距离压电片 12 cm 和 21.5 cm 处分别布置两个缺口用来模拟损伤, 缺口的尺寸为 $0.025\text{ cm} \times 0.05\text{ cm}$ 。 压电片通过边缘产生的剪切力激励产生应力波, 在仿真时采用两对剪切力模拟激励源。 激励信号采用高斯窗调制的窄带波信号

$$g(t) = 2^{1/4} e^{-\pi(t/s)^2} \cos(2\pi f_0 t)$$

(19)

尺度 $s = 6 \times 10^{-6}$, 激励频率 $f_0 = 250\text{ kHz}$ 。

仿真结果为损伤前与损伤后压电片位置处的应变之差, 如图 2(b) 中实线所示, 图中只截取了激励信号之后的仿真结果, 为验证 MP 方法的抗噪声能力, 在仿真结果中添加了高斯白噪声。 图中第 1 个脉冲是第 1 个缺口反射的 S_0 模态 Lamb 波, 第 2 个脉冲包含 2 个反射信号, 分别是第 1 个缺口反射的 A_0 模态的波和第 2 个缺口反射的 S_0 模态的波, 第 3 个脉冲是从第 2 个缺口反射的 A_0 模态的波。

MP 方法对仿真结果进行分解重构后的信号如图 2(b) 中虚线所示, 重构信号与仿真几乎重合, 表明 Chirplet 原子能很好地匹配弥散脉冲。 MP 方法得到的时频能量分布如图 2(c) 所示, 只需要 4 个 Chirplet 原子即能得到信号的时频能量分布图, 并

能分辨中间两个重叠的反射信号。 图 2(d) 是信号的小波尺度谱, 它不能分辨重叠在一起的反射信号。 表 1 为 MP 方法提取的信号到达时间、调频斜率、弥

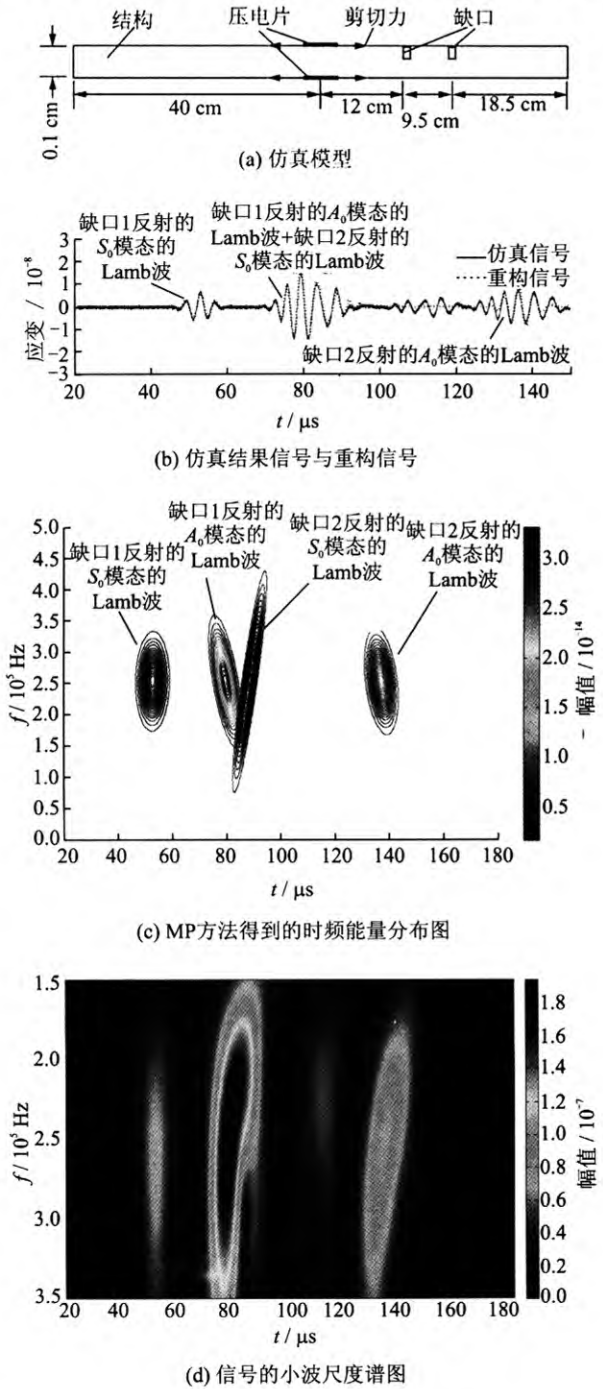


图2 仿真模型以及仿真结果分析

表1 仿真分析结果列表

原子数	$t_0/\mu\text{s}$	$c/(10^{11}\text{ Hz}\cdot\text{s}^{-1})$	$d/10^{-11}$	能量/ 10^{-15}	$d_{A_0}/10^{-11}$	$d_{S_0}/10^{-11}$	模态	实际损伤距离/cm	计算损伤距离/cm	误差/%
1	71.6	-0.69	-0.64	2.98	-1.53	0.03	A_0	12	11.99	0.08
2	128.8	-0.29	-0.42	1.63	-2.74	0.054	A_0	21.5	21.57	0.33
3	44.8	0.03	0.04	1.00	-0.95	0.019	S_0	12	11.96	0.33
4	80.4	1.57	0.51	0.94	-1.71	0.034	S_0	21.5	21.46	0.19

散值、信号能量等信息,将弥散值 d 与 d_{A_0} , d_{S_0} 值相比较,很明显得出 S_0 模态Lamb波的弥散值为正值, A_0 模态Lamb波的弥散值为负值,进而通过各模态Lamb波的群速度与反射信号的到达时间得出损伤的距离。损伤定位的最大误差只有0.33%,表明MP方法定位损伤有较高的精度。

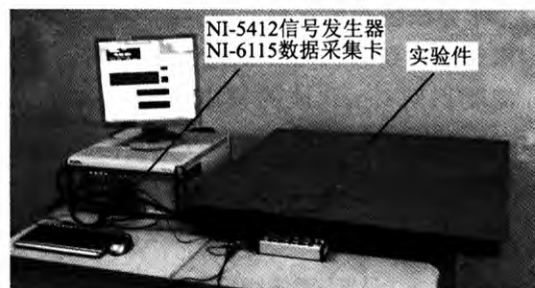
5 实验验证

5.1 各向同性材料板结构的损伤定位研究

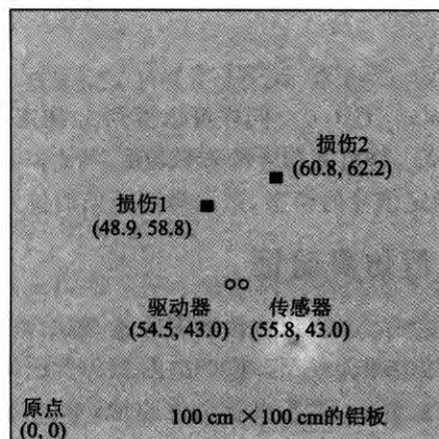
本节将通过实验方法验证本文提出方法的有效性,为此建立了一套实验装置,包括NI-5412任意波形发生器和NI-6115多功能数据采集卡,分别用于信号的激励与采集,实验过程通过LabVIEW软件编写的VI程序控制。实验试件为各向同性的铝板,尺寸为100 cm×100 cm,厚度为0.1 cm。在铝板上粘贴一对压电陶瓷片,分别用于Lamb波信号的激励与感应,实验装置照片如图3(a)所示,实验件示意图如图3(b)所示。激励信号采用高斯窗调制的窄带波信号,中心频率为200 kHz。通过在铝板上粘贴直径为1 cm的螺栓来模拟损伤,分别在距离传感器17和20 cm处布置两个损伤,通过分析损伤前与损伤后信号之差获取损伤的相关信息。

损伤前后信号之差如图3(c)中实线所示,只截取了激励信号之后的实验结果信号,脉冲信号由两个损伤的散射信号叠加而成。MP方法的重构信号如图3(c)中虚线所示,重构信号与实验信号较为吻合。MP方法分析得到的时频能量分布图如图3(d)所示,能清晰地分辨出两个损伤的反射信号,这是小波变换等分析方法所做不到的。表2为实验分析结果列表,损伤定位的误差分别为0.95%,4.65%,表明MP方法可以较为准确地定位损伤,并能对重叠的脉冲信号进行分析。

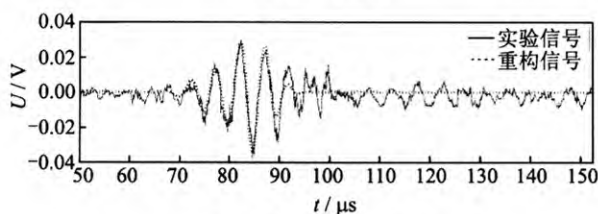
上述定位方法确定了损伤的径向距离,损伤位于径向距离确定的圆周上,要得到损伤位置需要布置3对压电片得到3个圆周,损伤位于3个圆周的交点上。



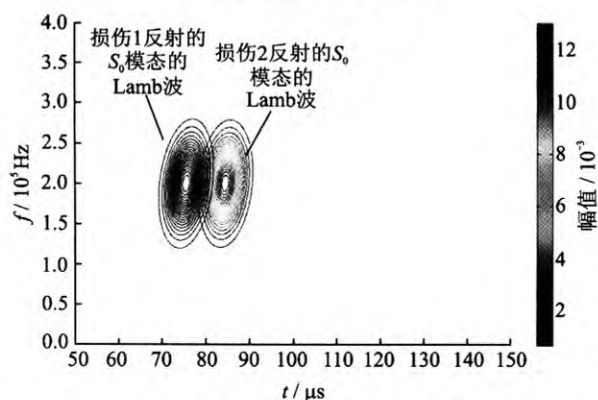
(a) 实验测量装置和实验件



(b) 实验件示意图



(c) 实验信号与重构信号



(d) MP方法得到的时频能量分布图

图3 实验装置及结果分析

表2 实验分析结果列表

原子数	$t_0/\mu\text{s}$	$c/(10^{10}\text{ Hz}\cdot\text{s}^{-1})$	$d/10^{-11}$	能量/ 10^{-7}	$d_{A_0}/10^{-11}$	$d_{S_0}/10^{-11}$	模态	实际损伤距离/cm	计算损伤距离/cm	误差/%
1	75.6	1.66	0.24	0.61	-2.36	0.025	S_0	20	20.19	0.95
2	66.6	2.74	0.26	0.19	-2.08	0.022	S_0	17	17.79	4.65

5.2 蜂窝夹层复合材料结构冲击损伤定位研究

蜂窝夹层复合材料结构是一种轻质、高强、各向异性的复合材料结构,但其承受冲击载荷的能力较弱,本节首次采用基于应力波和MP方法的损伤监测方法定位蜂窝夹层复合材料结构中的冲击损伤。实验件为某型飞机的垂尾舵面,该结构由两块蜂窝夹层碳纤维复合材料板和铝合金夹头组成,实验装置以及实验件如图4所示。实验中采用一个经过校准的落锤装置对结构进行冲击,冲击能量为10 J。为监测冲击损伤,在结构上布置了16 cm×20 cm的压电片阵列,如图5所示,同时建立了以传感器1为坐标原点O,1-2为x轴,1-4为y轴的坐标系。



图4 实验测量装置和实验件

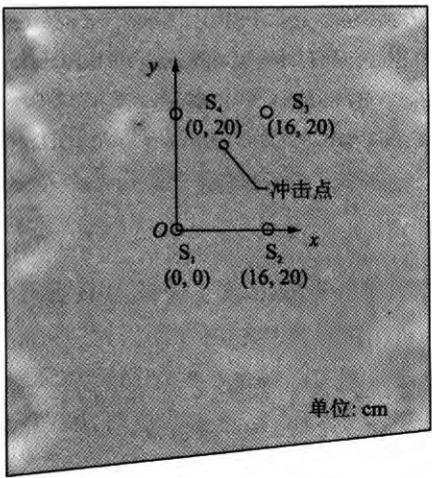


图5 实验件示意图

本监测方法需要已知应力波的传播速度,实验件结构比较复杂,而且碳纤维复合材料板的铺层未知,不能通过理论建模的方法得到波速,为此通过实验方法实测应力波在各个方向上的传播速度,然后取波速的平均值,实验测得频率为150 kHz时,应力波在各个方向上传播的平均速度为

5 400 m/s。

应力波在遇到冲击损伤后会产生散射应力波,可以通过冲击前后信号之差得到损伤的散射应力波信号,然后通过MP方法提取散射信号到达时间等损伤的特征信息,再根据椭圆定位方法定位损伤^[13]。根据椭圆的定义,损伤位于一个以激励器和传感器为焦点的椭圆圆周之上,通过两个椭圆的交点即可获取损伤位置。

压电片 S_4 作为激励传感器,其余压电片感应应力波信号。图6为冲击前后压电片 S_3 感应到的信号,图7为冲击前后感应信号之差,使用MP分析信号提取散射信号到达时间等损伤信息。信号传播时间等于信号到达时间减去激励信号时间,在路径4-3上,信号传播时间为37.2 μ s,在路径4-1上,信号传播时间为43.0 μ s,再根据波速确定信号传播距离,得到两个椭圆的长轴,进而求出两椭圆交点坐标为(5.5, 14.1) cm,与损伤实际位置坐标(7.6, 14.6) cm的误差为2.2 cm。

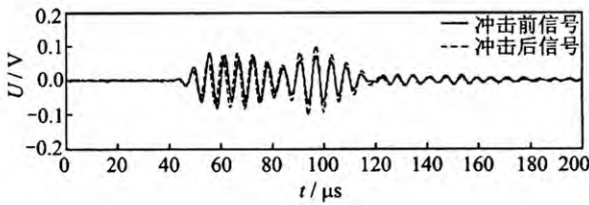


图6 冲击前后压电片 S_3 感应到的信号

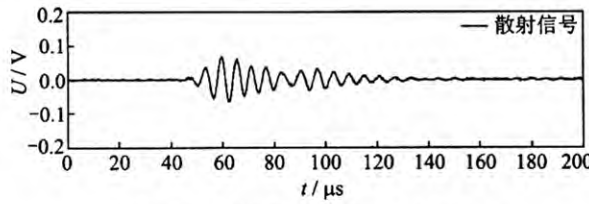


图7 冲击前后压电片 S_3 的信号之差

6 结 论

本文提出了一种基于Lamb波和字典库为Chirplet原子的匹配追踪方法的结构损伤定位方法。文中匹配追踪方法的实现方案可以快速地将监测信号分解为多个Chirplet原子的线性组合,提取信号到达时间、弥散值等信息,并通过弥散值识别Lamb波的模态。与小波变换、HHT变换等方法相比,本文提出的基于匹配追踪方法的损伤定位方法可以分辨从多个损伤反射的重叠的脉冲信号,数值仿真和实验结果验证了本文方法的可行性和有效性:

(1)数值仿真结果表明匹配追踪方法能有效地

识别 S_0 模态与 A_0 模态的Lamb波,分辨重叠在一起的多个损伤的反射信号,损伤定位误差为0.33%。

(2)各向同性铝板实验表明匹配追踪方法识别Lamb波模态以及分辨重叠的多损伤散射信号的有效性,损伤定位误差为4.65%,比仿真误差大,这是由于定位计算需要应力波到达的速度和时间信息,匹配追踪算法可以精确提取时间信息,而实验中应力波的速度比仿真受环境因素影响大。

(3)蜂窝夹层复合材料结构实验表明匹配追踪方法与椭圆定位法相结合可以较为准确地定位蜂窝夹层复合材料结构中冲击损伤的位置。

参考文献:

- [1] Ihn J B, Chang F K. Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures[J]. *Structural Health Monitoring*, 2008, 7(1):5-19.
- [2] 严刚,周丽. 应用遗传算法和散射Lamb波的板结构损伤识别[J]. *振动工程学报*, 2007, 20(3):291-296.
- [3] Hong J C, Sun K H, Kim Y Y. Dispersion-based short-time Fourier transform applied to dispersive wave analysis [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 117(5):2949-2960.
- [4] Deng X M, Wang Q, Giurgiutiu V. Structural health monitoring using active sensors and wavelet transforms [C]//*Proceedings of the SPIE, Smart Structures and Integrated Systems*. Newport Beach, USA: SPIE, 1999: 363-370.
- [5] Quek S T, Tua P S, Wang Q. Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert-Huang transform of real signals [J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, 12(3):447-460.
- [6] Ruiz-Reyes N, Vera-Candeas P, Curpian-Alonso J, et al. Matching pursuit-based approach for ultrasonic flaw detection [J]. *Signal Processing*, 2006, 86(5):962-970.
- [7] Hong J C, Sun K H, Kim Y Y. The matching pursuit approach based on the modulated Gaussian pulse for efficient guided wave inspection[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(4):548-560.
- [8] Ajay R, Carlos E S C. Guided-wave signal processing using Chirplet matching pursuits and mode correlation for structural health monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2):355-366.
- [9] Mallat S G, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions On Signal Processing*, 1993, 41(12):3397-3415.
- [10] Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1963, 11(2):431-441.
- [11] 杨桂通,张善元. 弹性动力学[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.
- [12] 鲍亦兴,毛昭宙. 弹性波的衍射与动应力集中[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [13] Kehlenbach M, Das S. Identifying damage in plates by analyzing Lamb wave propagation characteristics [C]//*Proceedings of SPIE, Smart Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Structural and Biological Systems*. San Diego, CA, USA: SPIE, 2002:364-375.