

# 基于多频率数据融合的 Lamb 波损伤定位研究

杨晓华<sup>1</sup>, 刘学君<sup>1</sup>, 马广婷<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院青岛校区航空机械系, 山东青岛 266041; 2. 91899 部队, 辽宁葫芦岛 125001)

**摘要:** 确定损伤位置是结构健康监测中的重要环节, 而时间延迟是确定损伤位置的关键问题。针对 Lamb 波的频散效应对定位精度的影响, 提出了一种基于 Morlet 小波时频分析和多频率数据融合的损伤定位方法, 首先采用小波分析的手段, 提取多组特定频率下的信号, 实现多频率成分下波达时刻的准确判定, 进而采用加权平均处理的方法获得损伤位置到两换能器的距离之和, 最后基于椭圆定位法确定了损伤的位置。试验结果表明, 该方法能够有效减少 Lamb 波频散效应的影响, 相较于时域峰值包络的方法, 可有效提高定位的精度, 同时增强了系统抗干扰的能力。

**关键词:** Lamb 波; Morlet 小波; 椭圆定位法; 数据融合; 时间延迟

中图分类号: V214.8 TB332

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-02-0133-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.007

## Research on multi-frequency data fusion based Lamb wave damage localization

YANG Xiao-hua<sup>1</sup>, LIU Xue-jun<sup>1</sup>, MA Guang-ting<sup>2</sup>

(1. Department of Aviation Mechanism, Qingdao Branch, Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, Shandong, China;

2. Unit 91899 of PLA, Huludao 125001, Liaoning, China)

**Abstract:** Determination of damage location is an important part of structural health monitoring, and time delay is the key parameter to determine the damage location. A damage localization method based on Morlet wavelet transform and data fusion is put forward to reduce the influence of Lamb wave dispersion on the localization accuracy. Travel time information at several special frequencies is extracted, so the signal arrival time is determined. The distance of damage to sensors is obtained based on weighted processing. Damage localization is determined based on ellipse localization method. Simulation results show that the method can reduce the influence of dispersion effect, improve the accuracy of localization and enhance the system anti-interference ability.

**Key words:** Lamb waves; Morlet wavelet; ellipse localization method; data fusion; time delay

## 0 引言

近年来, 基于导波的飞机结构健康监测技术引起了研究人员的广泛关注。Lamb 波是在板类结构中传播的导波, 可以由压电换能器、磁致伸缩换能器等激发和感知, 具有易激发、传播距离远及监测范围大等特点, 是对薄板类结构如飞机蒙皮等进行在线监测的有效手段。结构健康监测的主要任务有: 判断是否存在损伤、定位损伤的位置、评估损伤的类型及程度、分析预测结构寿命及评估结构安全性等, 而定位损伤的位置是结构健康监测中的重要环节<sup>[1-5]</sup>。

针对损伤定位的 Lamb 波检测, 研究人员展开了大量的研究<sup>[6-11]</sup>, 目前常采取的简便且行之有效的方法是椭圆定位法。而椭圆定位法实施的关键在于确定时间延迟  $\Delta t$ 。常用的时间延迟  $\Delta t$  的确定方法有: (1) 时域信号包络法<sup>[7]</sup>。选取 Lamb 波的某个特定模态, 对接收信号进行时域分析, 令该模态的信号包络线的最大值所对应的时间为信号到达时间。取健康信号和差信号的第一波包最大值所对应的时间, 并做差处理, 可得时间延迟  $\Delta t$ ; (2) 互相关函数法<sup>[7]</sup>。计算健康信号和差信号的互相关函数, 取其两信号最相似处的信号所对应的时间, 即为互相关函数的峰值点。此峰值点所对应的时间, 即为波达时间; (3) 时频分析法<sup>[8,12]</sup>。分别对健康信号和差信号进行时频分析, 提取激励信号中心频率下的时域信号, 通过比较信号差异, 确定时间延迟<sup>[12]</sup>。

彭鸽等<sup>[12]</sup>利用信号传播时间(Time of flight, Tof), 对健康信号与含损伤信号的差信号进行分析, 采用椭圆定位法进行了损伤定位研究; LU Y 等<sup>[13]</sup>

收稿日期: 2016-05-20; 修回日期: 2016-08-13

基金项目: 总装预研项目(143092015)

作者简介: 杨晓华(1964—), 男, 江苏启东人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为飞机结构寿命评定。

通讯作者: 刘学君, E-mail: liuxuejun\_2007@163.com

采用时域信号包络法, 确定了时间延迟, 采用椭圆定位法初步确定损伤位置, 进而采用全加的数据融合方法对多传感路径进行综合定位, 并成像处理。上述方法均是基于对信号时域波形的分析, 但由于 Lamb 波的频散特性, 即不同频率下的 Lamb 波群速度不同, 可能会导致信号时域波包的变形, 造成时间延迟的计算不准确, 进而导致定位失准。为消除频散效应的影响, 严宏等<sup>[14]</sup>基于小波分析及概率统计理论, 利用健康信号与差信号的能量差作为损伤指标, 提出了一种损伤存在概率成像算法。基于时频变换的方法对换能器接收的信号进行处理, 可有效消除 Lamb 波的频散影响, 进而获得较为准确的时间延迟, 最终可提高定位精度。

本文采用 Morlet 小波分别对健康信号和损伤信号进行时频分析, 通过提取激励信号中心频率和其附近频率的时域信号, 确定多个频率下的时间延迟, 结合对应频率下的相速度, 确定板中离散点到换能器对的距离之和, 对多个频率下的距离之和进行加权处理, 进而采用椭圆定位法确定损伤位置。

### 1 Lamb 波传播理论

Lamb 波是板状结构中产生的平面应变波, 且在板的上、下表面应力为零, 可划分为对称模式和反对称模式。Lamb 波的群速度及相速度可根据 Rayleigh-Lamb 波方程得到<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{对称模式} \quad (1)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad \text{反对称模式} \quad (2)$$

其中,  $k = \frac{\omega}{c_T}$ ,  $p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$ ,  $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $c_T$  为横波速度,  $c_L$  为纵波速度,  $h$  为板厚的一半。

相速度  $c_p$  与波长  $\lambda$  的关系及群速度  $c_g$  与相速度  $c_p$  的关系如式(3)、(4)所示<sup>[1]</sup>:

$$c_p = (\omega/2\pi)\lambda \quad (3)$$

$$c_g = c_p^2 \left[ c_p - (f \cdot d) \frac{dc_p}{d(f \cdot d)} \right]^{-1} \quad (4)$$

其中,  $d=2h$  为板厚。

针对 LY12CZ 铝合金材料, 其弹性模量为 73 MPa, 泊松比为 0.33, 密度为 2 780 kg/m<sup>3</sup>, 横波波速为 3 142 m/s, 纵波波速为 6 237 m/s, 采用二分法, 通过 MATLAB 编程对频散曲线进行了数值求解, 群速度和相速度频散曲线如图 1 和图 2 所示。

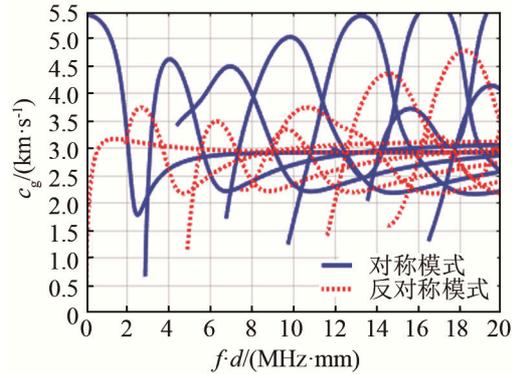


图 1 群速度频散曲线  
Fig.1 Dispersion curve of group speed

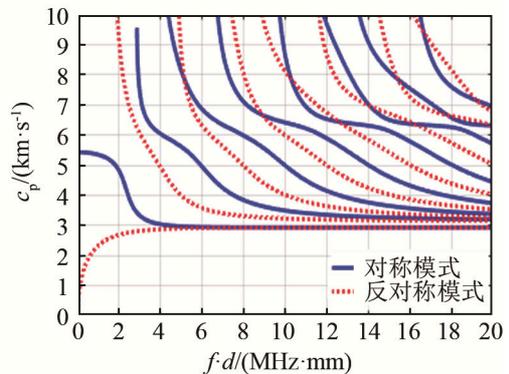


图 2 相速度频散曲线  
Fig.2 Dispersion curve of phase speed

### 2 椭圆定位法

椭圆定位法是目前基于参考信号的主动监测方法中常用的定位方法。如图 3 所示, 其主要思路是: (1) 采集健康信号。在板健康状态下, 采用发射换能器 A 在板的表面激发 Lamb 波信号, 换能器 B 接收到信号为健康信号 Sig1; (2) 采集监测信号。C 为损伤区域, 发射换能器 A 激发 Lamb 波信号后, 换能器 B 接受到的信号为由两部分组成, 一部分为由换能器 A 直达换能器 B 的信号 Sig2, 另一部分为由换能器 A 经由损伤 C 到达换能器 B 的损伤散

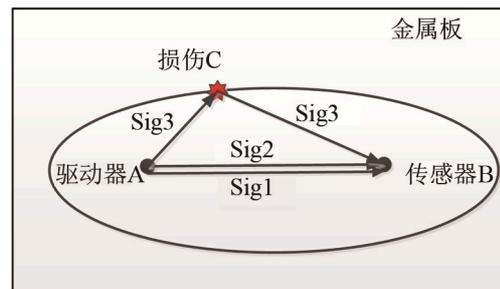


图 3 椭圆定位法示意图  
Fig.3 The schematic of Ellipse localization method

射信号 Sig3; (3) 确定损伤散射信号。由惠更斯原理有 Sig1=Sig2, 将两次测量得到的 Sig1 和 Sig2+Sig3 信号进行做差处理, 即可得到损伤散射信号 Sig3=Sig2+Sig3-Sig1; (4) 确定时间延迟。由 Sig1 可确定信号由换能器 A 到达换能器 B 的时间  $t_1$ , 根据散射信号 Sig3 可确定信号由换能器 A 经由损伤 C 到达换能器 B 的时间  $t_2$ , 则时间延迟即可定义为  $\Delta t=t_2-t_1$ 。(5) 确定损伤位置。由几何关系可知,

$$L=AC+CB=\Delta t \cdot c_g+AB \quad (5)$$

式中:  $L$  是损伤到两换能器的距离之和。损伤必然发生在以两换能器为焦点, 且到达两焦点距离之和为  $c_g$  的椭圆上。因一对换能器只能确定一个椭圆, 无法实现损伤定位, 故采用三个以上的换能器进行定位, 多个椭圆的交点即为损伤位置。

### 3 基于 Morlet 小波时频分析及数据融合的椭圆定位法

#### 3.1 基于 Morlet 小波变换的时间延迟确定方法

目前常用的时频分析方法有短时傅里叶变换 (Short-Time Fourier Transform, STFT)、Wigner-Ville 分布和小波变换等。短时傅里叶变换是采用固定的窗函数, 窗函数一旦确定, 则时频变换的分辨率就已确定, 且不能兼顾时间和频率的分辨率, 仅适合于缓变信号的分析; Wigner-Ville 分布相较 STFT, 具有较好的分辨率, 但当信号含有多个成分时, 会存在交叉干扰项, 引入虚假的能量分布; 小波变换则是基于 STFT 发展起来的, 其采用了小波基函数, 可以通过伸缩和平移运算对信号进行多尺度细化, 可提供一个随频率变化的“时间-频率”窗口, 是进行信号时频分析的理想手段。所以本文采用小波变换作为对换能器采集信号进行时频分析的工具。

对于任意信号  $x(t) \in L^2(\mathbf{R})$ , 其连续小波变换可表示为<sup>[15]</sup>:

$$WT_x(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{R}$  为实数集合;  $a$ 、 $b$  分别代表尺度因子和时移;  $\psi(t)$  称为母小波。

本文采用 Morlet 函数作为分析小波, 其表达式为<sup>[15]</sup>:

$$\psi(t)=e^{-t^2/2}e^{i\omega_0 t} \quad (7)$$

式中:  $\omega_0$  为基小波的中心频率;  $t$  为时间。它的傅里叶变化是<sup>[15]</sup>:

$$\Psi(\omega)=\sqrt{2\pi}e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \quad (8)$$

通过 Morlet 小波变换可得到信号幅值随时间

和频率的变化关系。由于文中采用的频率无法满足因材料的非线性引起的二次谐波的条件, 故可认为 Lamb 波在板中传播时, 仅存在激励信号的频率成分<sup>[16]</sup>。则考虑提取激励信号频率  $f_0$  及其附近的多组频率所对应的时域信号, 取特定频率时域信号中第一个波峰值为信号传播时间, 通过比较健康信号及差信号的信号传播时间, 即可确定对应频率下的时间延迟, 如图 4 所示。结合前文计算得到的频散曲线, 可计算得到 240 kHz 频率下的 Lamb 波相速度  $c_p$ , 根据信号传播时间及相速度可计算出损伤到两换能器的距离之和  $L_i$ 。

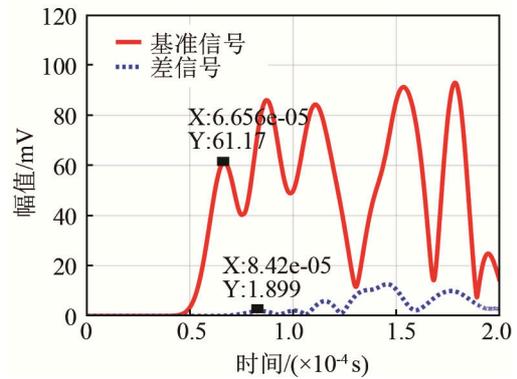


图 4 240 kHz 频率下的时域信号  
Fig.4 Time-domain signal at 240 kHz

#### 3.2 损伤位置的数据融合方法

为提高稀疏传感阵列定位系统的鲁棒性, 考虑提取多频率下的时域信号, 可提高单对换能器的定位准确性以及应对不良因素干扰的能力。在采用上文方法确定了多个  $L_i$  后, 需对多个  $L_i$  进行数据融合, 以便获得更加合理可靠的损伤到达两换能器的距离之和  $L$ 。

本文采用加权平均法作为数据融合的工具, 则有<sup>[17]</sup>:

$$L=\sum_{i=1}^m W_i L_i \quad (9)$$

其中,  $W_i$  为权重值;  $m$  为融合频率的个数。

因本文采用的激励信号是汉宁窗调制的 5 个周期正弦信号:

$$x(t)=A\left(H(t)-H\left(t-\frac{n}{f_c}\right)\right)\sin(2\pi f_c t)\left(1-\cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right)\right) \quad (10)$$

其中,  $n=5$ ;  $H(t)$  为 Heaviside 阶梯函数;  $f_c=250$  kHz 为中心频率。

激励信号时域和频域图如图 5 所示, 可见信号在中心频率  $f_c$  附近能量最高, 往两侧逐渐递减。上文在确定时间延迟时, 主要判定的依据是信号的峰

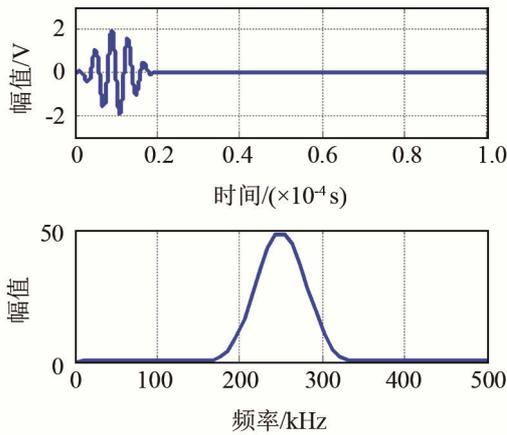


图 5 激励信号的时域及频域图  
Fig.5 Excitation signal in time domain and frequency domain

值能量所对应的时间,故可认为由此得到  $L_i$  的权重值也依从上述规律。

为对权重值进行量化处理,首先要确定激励信号的带宽,通过对信号的功率谱进行估计,取 3 dB 带宽作为激励信号的带宽(用  $Band$  表示),如图 6 所示。设中心频率  $f_c$  所对应的权值为 1,以其幅值的三角关系,则  $L_i$  所对应的权重  $w_i$  可由式(11)得到:

$$w_i = \frac{Band - 2|f_c - f_i|}{Band} \quad (11)$$

对权值进行归一化处理,得到归一化的权值:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (12)$$

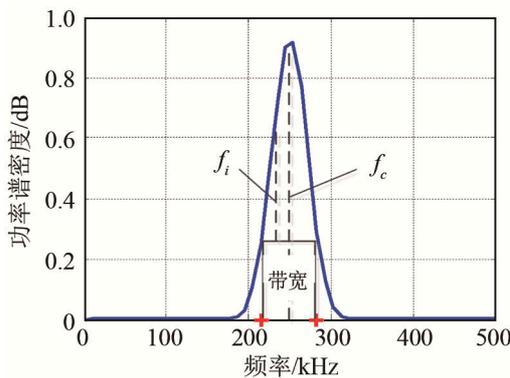


图 6 权重确定示意图  
Fig.6 Schematic diagram of weight determination

得到权值之后,即可依据公式(9),对所获得的多频率下的损伤到两换能器的距离  $L_i$  进行融合计算,得到可靠性较高的损伤到该组换能器的距离和  $L$ ,并以此法获得其他组的定位信息,进而采用椭圆定位法,即可确定损伤的位置。

### 4 试验验证

采用尺寸为  $700 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的 LY12CZ 铝合金薄板为试验对象。通过查材料手册得到该平板的材料参数,并通过计算得到其横波及纵波速度,见表 1。试验件示意图见图 7。以板的中心位置为零点,横向为  $x$  轴,纵向为  $y$  轴,分别在坐标值为  $(-150, 80)$ 、 $(150, 80)$ 、 $(150, -80)$  和  $(-150, -80)$  位置处粘贴 PZT 压电片,其中坐标单位为  $\text{mm}$ ,并进行编号。在板  $(-50, 40)$  位置处,设置直径为  $5 \text{ mm}$  的穿孔,作为损伤状态。分别在板健康和损伤状态下进行试验监测。采用 NI 数字采集设备 (Pxi-5105 示波器卡、Pix-5412 采集卡), HSA 4052 功率放大器,试验设备如图 8 所示。激励信号为中心频率  $250 \text{ kHz}$  的汉宁窗调制的 5 周期正弦信号。信号采集频率为  $1 \text{ MHz}$ ,信号采集点数为  $10\ 000$ 。

表 1 材料参数及纵横波速  
Table 1 Material parameters, shear speed and longitudinal speed

弹性模量 $E/\text{GPa}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	泊松比 $M$	横波波速 $c_T/(\text{m}/\text{s})$	纵波波速 $c_L/(\text{m}/\text{s})$
73	2 780	0.33	3 142	6 237

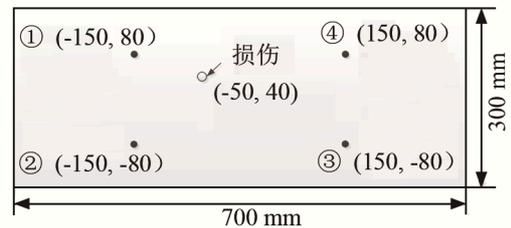


图 7 试验件示意图  
Fig.7 The schematic of specimen

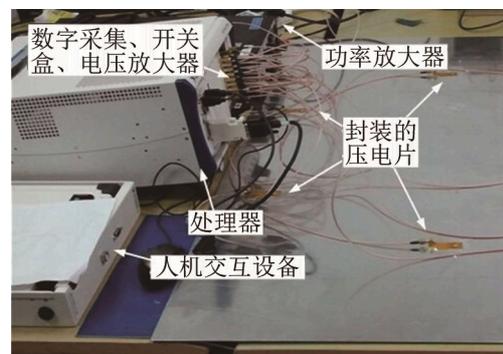


图 8 试验设备  
Fig.8 Test equipment

为验证本文方法的优越性,分别由换能器 1 和 2 激励,其他换能器接收,分别在健康和损伤状态下获得 12 组信号,采用信号时域包络法确定时间

延迟。以传播路径 1-3 为例，对信号进行滤波处理以减少噪声影响，得到的健康信号、损伤信号和差信号及其信号包络图如图 9 所示。

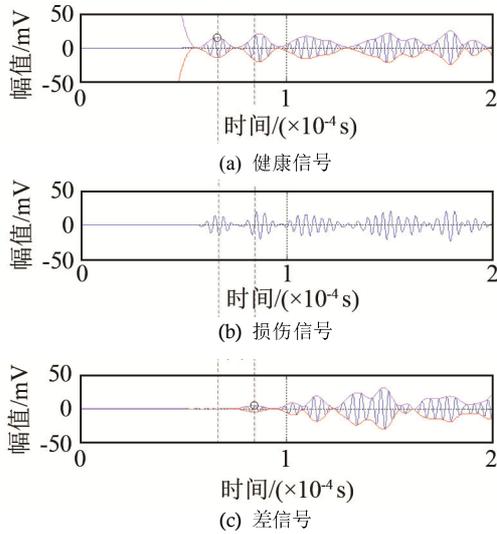


图 9 路径 1-3 所测得的健康信号、损伤信号、计算得到的差信号及其信号包络

Fig.9 Health signal, damage signal, difference signal and signal envelope from 1-3 path

结合图 7 可知， $t_1$  是信号由驱动器 1 激励直达换能器 3 的信号传播时间， $t_2$  是信号由驱动器 1 激励经由损伤到达换能器 3 的信号传播时间。时间延迟即为： $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

以此法获得了 6 条传播路径的时间延迟  $\Delta t_i$  (见表 2)。因激励信号的中心频率为 250 kHz，故可根据前文计算得到的频散曲线，得到频厚积  $fd=750$  kHz·mm 时，仅存在  $A_0$  和  $S_0$  模态，其中对应  $S_0$  的相速度为  $c_p^{250} = 5\,288$  m/s，以此可以计算得到损伤到换能器对的距离之和  $L$ 。根据椭圆定位法，结合三组传感路径，确定损伤的位置，成像后，进行阈值化处理，最终确定损伤位置为  $(-38.9, 46.0)$ ，误差为 12.62 mm，如图 10 所示。

下面采用 Morlet 小波变换和多频率数据融合的方法对损伤进行椭圆定位。激励信号的中心频率

表 2 基于信号包络阈值法确定时间延迟  
Table 2 Determination of time delay based on signal envelope threshold method in time domain

路径	健康波达时间/s	差波达时间/s	时延/s	$L$ /mm
1-2	$3.68 \times 10^{-5}$	$6.09 \times 10^{-5}$	$2.42 \times 10^{-5}$	117.193
1-3	$7.46 \times 10^{-5}$	$7.53 \times 10^{-5}$	$6.80 \times 10^{-7}$	3.596
1-4	$6.68 \times 10^{-5}$	$6.98 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-6}$	15.864
2-1	$3.68 \times 10^{-5}$	$6.09 \times 10^{-5}$	$2.42 \times 10^{-5}$	127.769
2-3	$6.68 \times 10^{-5}$	$8.47 \times 10^{-5}$	$1.79 \times 10^{-5}$	94.766
2-4	$7.46 \times 10^{-5}$	$7.91 \times 10^{-5}$	$4.44 \times 10^{-6}$	23.480

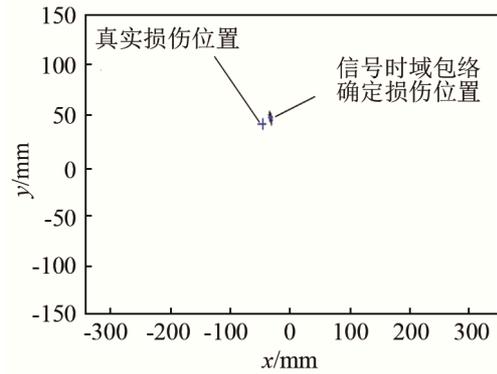


图 10 基于时域信号包络阈值法的损伤定位

Fig.10 Damage localization based on signal envelope threshold method in time domain

为 250 kHz，-3 dB 带宽为 70 kHz，取 230、240、250、260 和 270 kHz 共 5 组频率作为需要提取的频率。根据公式(12)确定了这 5 组频率下损伤到换能器对的距离之和  $L$  的权重，同时根据频散曲线得到了这 5 组频率下对应的相速度，见表 3。

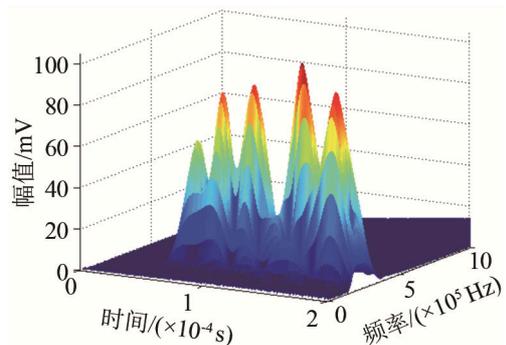
表 3 多频率下的相速度、权重值及时间延迟

Table 3 Phase speeds, weight values and time delays at special frequencies

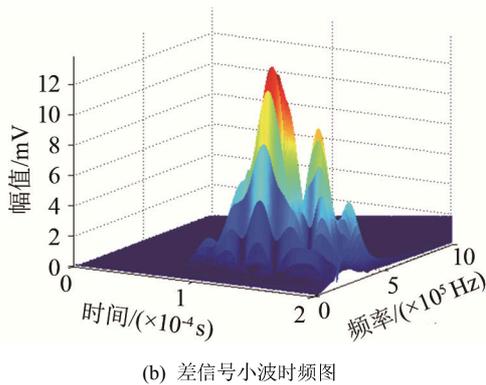
频率/kHz	相速度/(m/s)	权重	时延/s
230	5 312	0.131	$1.808 \times 10^{-5}$
240	5 300	0.217	$1.740 \times 10^{-5}$
250	5 288	0.304	$1.732 \times 10^{-5}$
260	5 275	0.217	$1.752 \times 10^{-5}$
270	5 262	0.131	$1.804 \times 10^{-5}$

以换能器路径 2-3 为例，首先分别对健康信号和差信号进行 Morlet 小波变换，得到信号的时频图 (见图 11)，继而分别提取上述 5 组频率下的时域信号(250 kHz 下的时域图见图 12)，确定了时间延迟 (见表 3)，结合权重值，最终确定损伤到换能器 2 和 3 的距离之和。

基于本文所提方法，对多条传感路径进行分析，采用多频率下时域信号确定时间延迟，见表 4。以此并进行加权平均处理，最终获得多个  $L$ 。采用



(a) 健康信号小波时频图



(b) 差信号小波时频图

图 11 小波时频图

Fig.11 Wavelet time-frequency distribution

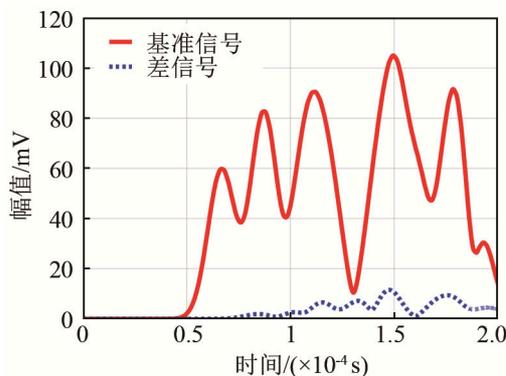


图 12 250 kHz 下时域信号图

Fig.12 Time-domain signal at 250 kHz

表 4 基于小波变换和多频率融合方法获得的路径数据

Table 4 Route data based on Morlet wavelet and multi-frequency data fusion

路径	1-2	1-3	1-4	2-1	2-3	2-4
L/mm	120.522	5.095	10.573	120.522	92.922	18.581

椭圆定位法进行损伤定位, 并成像, 经阈值化处理, 最终确定损伤位置为(-43.8, 43.2), 误差为 6.98 mm, 如图 13 所示。

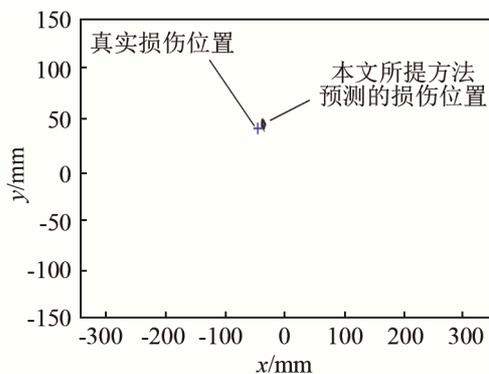


图 13 基于 Morlet 小波变换和多频率数据融合的损伤椭圆定位

Fig.13 Ellipse localization of damage based on Morlet wavelet and multi-frequency data fusion

## 5 结 论

本文针对 Lamb 波的频散特性对时间延迟确定的影响, 提出了基于小波分析多频率数据融合的椭圆损伤定位方法。该方法基于 Morlet 小波分析提取了多频率下信号随时间的变化信息, 获得了多频率下的时间延迟数据, 根据时间延迟数据, 对损伤到两换能器的距离之和进行了数据融合, 进而基于椭圆定位法进行了损伤定位。通过试验验证, 对本文所提方法与常用的信号时域包络法进行了比较。结果表明, 该方法可有效避免因 Lamb 波频散效应引起的时域包络法定位不准的现象, 相较信号时域包络法有较好的定位精度, 融合了多频率下的传感数据, 提高了定位系统的鲁棒性, 可减少因系统或人为因素造成的误差。

### 参 考 文 献

- [1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
YUAN Shenfang. Structural health monitoring[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
- [2] 王强, 袁慎芳, 陈小惠, 等. 主动 Lamb 波合成波阵面损伤成像监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2468-2474.  
WANG Qiang, YUAN Shenfang, CHEN Xiaohui, et al. Active Lamb wave synthetic wave front damage imaging monitoring method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(11): 2468-2474.
- [3] 王建强, 余龙, 张宇, 等. 基于最大相似性的 Lamb 波损伤信号分解及试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 200-204.  
WANG Jianqiang, YU Long, ZHANG Yu, et al. Damage signal decomposition of Lamb wave and tests based on similarity[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24): 200-204.
- [4] Alessandro Perelli, Luca De Marchi, Alessandro Marzani, et al. Frequency warped cross-wavelet multi-resolution analysis of guided waves for impact localization[J]. Signal Processing, 2014, 96(5): 51-56.
- [5] Ben B S, Ben B A, Vikram K A, et al. Damage identification in composite materials using ultrasonic based Lamb wave method[J]. Measurement, 2013, 46(2): 904-912.
- [6] 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, XUE Yingzan, HE Cunfu. experimental study on defect imaging based on single Lamb wave mode in plate-like structures[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 232-238.
- [7] 徐颖娣, 袁慎芳, 彭鹤. 二维结构损伤的主动 Lamb 波定位技术研究[J]. 航空学报, 2004, 25(5): 446-479.  
XU Yingdi, YUAN Shenfang, PENG Ge. Study on two-dimensional damage location in structure based on active Lamb wave detection technique[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2004, 25(5): 446-479.
- [8] 于勇凌, 张海燕, 冯国瑞, 等. 兰姆波检测信号的匹配追踪时频分析[J]. 声学学报, 2013, 38(5): 576-582.  
YU Yongling, ZHANG Haiyan, FENG Guorui, et al. Matching pursuit time-frequency analysis of Lamb wave detection signals[J]. Acta Acustica, 2013, 38(5): 576-582.

- [9] Fenza A D, Sorrentino A, Vitiello P. Application of Artificial Neural Networks and Probability Ellipse methods for damage detection using Lamb waves[J]. Composite Structures, 2015, 133: 390-403.
- [10] Pai P F, Deng H, Sundaresan M J. Time- frequency characterization of Lamb waves for material evaluation and damage inspection of plates[J]. Mechanical Systems and Signal Processing(S 0888-3270), 2015, 62-63: 183-206.
- [11] GE Luyao, WANG Xinwei, JIN Chunhua. Numerical modeling of PZT-induced Lamb wave-based crack detection in plate-like structures[J]. Wave Motion(S 0165-2125), 2014, 51(6): 867-885.
- [12] 彭鹤, 袁慎芳, 徐颖娣. 基于主动 Lamb 波和小波变换的二维结构损伤定位研究[J]. 振动工程学报, 2004, 17(4): 488-493.  
PENG Ge, YUAN Shenfang, XU Yingdi. Damage location of two-dimensional structure based on wavelet transform and active monitoring technology of lamb waves[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(4): 488-493.
- [13] LU Y, YE L, WANG D, et al. Conjunctive and compromised data fusion schemes for identification of multiple notches in an aluminium plate using Lamb wave signals[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control(S 0885-3010), 2010, 57(9): 2005-2016.
- [14] 严宏, 周丽. 基于损伤存在概率成像方法的复合材料结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2012, 31(13): 76-80.  
YAN Hong, ZHOU Li. Damage identification of composite structures based on reconstruction algorithm for probabilistic inspection of damage[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(13): 76-80.
- [15] Boggess Albert, Narcowich Francis J. 小波与傅里叶分析基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.  
Boggess Albert, Narcowich Francis J. Wavelets with Fourier analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [16] 邓明晰, Price D C, Scott D A. 兰姆波非线性效应的实验观察[J]. 声学学报, 2005, 31(1): 1-7.  
DENG Mingxi, D.C.Price, D.A.Scott. experimental observation of nonlinear effects of Lamb waves[J]. Acta Acustica, 2005, 31(1): 1-7.
- [17] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 1-12.  
LIU Tongming, XIA Zuxun, XIE Hongcheng. Data fusion technology and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.

## 中国科学院声学研究所东海研究站“把声音带回家”系列科普活动走进上海科技馆

由共青团上海市科学技术工作委员会、共青团上海科技馆委员会共同发起的公益志愿服务活动——“弘扬中华传统美德，共筑科创志愿联盟”暨“科普梦·志愿行”科普活动在上海科技馆举办，中国科学院声学研究所东海研究站(简称东海站)等 10 余家沪上科研院所共同走进上海科技馆，普及高精尖的科学知识。

油和水两种本不相溶的液体，若混合在一起，并在超声波的作用下就形成了混合均匀的乳状液，冷水在超声波的作用下雾气腾腾，这些奇异的现象引来了小朋友们的围观；耳朵中的精细结构逐一分解，吸引了众多小朋友及家长好奇的目光，纷纷询问听觉形成原理，有的小朋友还亲自动手拼装。

这热闹的场景便是东海站“把声音带回家”系列科普活动走进上海科技馆的活动现场。东海站以超声清洗、超声乳化、超声雾化等一个个神奇的实验与广大市民游客进行了互动，同时结合“保护听力·从我做起”科普小讲台活动为大家讲解了耳朵的秘密，活动吸引了千名公众参与，人气十足。

2017 年，东海站将充分利用志愿者们的科学传播精神，积极策划、参与各级公益性科普活动，为上海市科创中心建设作出科研院所应有的贡献，做好科学传播的每一项工作，不忘初心，继续前进。



志愿者演示超声乳化实验



志愿者讲解耳朵结构及听觉形成过程