

基于信号相似度小波重构与时差的胶合木表面声发射源定位

李晓崧,邓婷婷,王明华,李明*

(西南林业大学 机械与交通学院,云南 昆明 650224)

摘要:针对声发射(acoustic emission,AE)信号在胶合木表面各向异性传播时的 AE 源定位问题,提出一种基于信号相似度小波重构与时差的表面 AE 源定位算法。首先,依据 ASTM-E976 标准通过铅芯折断在试件表面产生 AE 源,并采用 NI 高速采集设备构建基于 LabVIEW 的 3 通道 AE 信号采集平台,采样频率设定为 500 kHz。其次,设计一种基于信号相似度的自适应小波重构算法,对原始信号进行降噪并重构 AE 信号波形。最后,依据试验结果拟合得到 AE 信号在胶合木表面 360°范围内的传播速度公式,结合 AE 信号的传播规律设计 AE 源定位算法,并产生 AE 源以测试定位效果。结果表明,2 组胶合木表面的 AE 源定位误差分别为 5.2%、5.3%,基于信号相似度小波重构与时差的胶合木表面 AE 源定位算法能够有效地确定声发射源的位置。

关键词:声发射;胶合木;小波分析;时差

中图分类号:S781.38 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)02-0202-06

Localization of Acoustic Emission Sources on Glulam Surface Based on Signal Similarity Wavelet Reconstruction

LI Xiao-song,DENG Ting-ting,WANG Ming-hua,LI Ming*

(College of Mechanical and Manufacturing Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: Aiming at the issue of AE source localization when acoustic emission (AE) signals propagate anisotropically on the surface of glulam, a surface AE source localization algorithm based on signal similarity wavelet reconstruction and time difference was proposed. Firstly, according to the ASTM-E976 standard, the AE source was generated on the surface of the test piece by breaking the lead core, and the NI high-speed acquisition equipment was used to build a 3-channel AE signal acquisition platform based on LabVIEW, and the sampling frequency was set to 500 kHz. Secondly, an adaptive wavelet reconstruction algorithm based on signal similarity was designed to reduce the noise of the original signal and reconstruct the AE signal waveform. Finally, according to the test results, the AE signal propagation speed formula in the range of 360° of the glulam surface was fitted, and the AE source positioning algorithm was designed in conjunction with the propagation law of the AE signal, and the AE source was generated to test the positioning effect. The test results showed that the AE source localization errors of the two groups of glulam surfaces were 5.2% and 5.3%, respectively. The AE source localization algorithm based on signal similarity wavelet reconstruction and time difference can effectively determine the location of the acoustic emission source.

Key words: acoustic emission; glulam; wavelet analysis; time difference

木材作为一种天然有机高分子材料已经广泛用于生产、建筑和生活当中。但在使用过程中,若不及

收稿日期:2020-05-02 修回日期:2020-05-13
基金项目:国家自然科学基金项目(31760182,31100424)。
作者简介:李晓崧,硕士在读。研究方向:木材无损检测。E-mail:w605035677@163.com
*通信作者:李明,教授,博士。研究方向:智能控制与智能优化算法、声发射无损检测、电液控制。E-mail:swfu_lm@swfu.edu.cn

时发现木材本身存在的缺陷、损伤并采取处理措施,将威胁人们的生命财产安全。AET 技术作为一种主动的动态无损检测技术已广泛运用于岩石、金属、复合材料以及天然有机高分子材料的缺陷与损伤监测、定位。其主要原理是通过对材料损伤或形变过程中产生的 AE 信号源位置进行定位,进而确定损伤和形变的位置^[1-2]。目前常用的 AE 源定位方法是时差定位法(time difference of arrival, TDOA),通过信号在各传感器间的传播时差确定 AE 源的位置^[3]。在金属、岩石、复合高分子材料以及木材的 AE 源定位中,常用的时差估计法有阈值法、峰值分析法、自适应延时估计以及信号互相关分析法^[4-8]。在估计时差时须对原始 AE 信号进行降噪处理以提升估算时差的准确性,常用的降噪方法是小波分析法^[9-13]。J. K. Kim 等^[14]用铝合金板和碳纤维增强塑料板为试验材料,发现了声源的传播方向在 0°~90°变化时到达传感器的时间存在差异。鞠双等^[15]以马尾松胶合木为试验材料,得到了马尾松胶合木表面声发射信号各向异性传播规律。袁梅等^[16]对飞行器中的复合材料结构的动态缺陷进行了监测,设计了一种基于经验小波分析和广义互相关分析的时差定位法,并以 T800 型碳纤维复合材料板为试验材料验证了该算法的有效性和实用性。现有的研究对胶合木表面 AE 源定位具有一定的参考意义。

为研究木材表面 AE 源定位算法,本研究以橡木(quercus)胶合木为试验对象,采用基于信号相似度的自适应小波重构法对原始 AE 信号进行降噪处理并重构 AE 波形,利用信号互相关分析法计算信号到达 2 个传感器的时差。结合胶合木表面 360°范围内的速度传播公式以及时差定位法确定木材表面 AE 信号源位置,依据 ASTM-E976 标准采用铅芯折断的方式在胶合木表面产生 AE 信号源并进行定位,测试算法的定位效果。

1 材料与 方法

1.1 试验材料

本研究以橡木胶合木板为试验材料,试件规格为 500 mm×500 mm×10 mm(长×宽×高),由一条规格为 500 mm×100 mm×10 mm(长×宽×高)和 2 条规格为 500 mm×200 mm×10 mm(长×宽×高)的木板通过植物树脂胶拼接,国际 E0 级环保等级。为保证原始 AE 信号的采集质量,基于 NI USB-6366 高速采集卡和自编 LabVIEW 采集程序自行搭建 3 通道 AE 信号采集系统,NI 高速采集卡最高采样率可设为 2 MHz。传感器型号为 SR150,带宽 20~250 kHz,前置放大器增益为 40 dB。现有研究表明,木材

表面声发射信号频率主要集中在 50~200 kHz 范围内^[17]。根据香浓采样定理将每个通道的采样率设置为 500 kHz,幅值信号的范围是-5~5 V。

1.2 试验方法

本研究设计的定位算法主要是针对单一 AE 源进行定位,故采用铅芯折断的方式产生单个 AE 源进行定位。在试验过程中为保证 AE 源的一致性,根据美国材料与试验协会制定的 ASTM-E976 标准进行折铅试验。具体做法是将一个长 40 mm,直径 0.5 mm 的铅与木材表面成 30°角放置并在距接触点 2.5 mm 处折断。

为减少胶合木板胶层对定位精度的影响,本研究设计了 2 组试验进行比对,分别用 a、b 表示。图 1 为胶合木表面 AE 源定位示意图,a 组试验如图 1 中 a 部分所示,3 个 AE 传感器分别置于等边直角三角形的 3 个顶点,以等边直角三角形斜边的中点为原点,2 条直角边的中线分别为 x 轴和 y 轴建立直角坐标系,同时 x 轴方向与胶合木板顺纹理方向平行。传感器 $S_1 \sim S_3$ 的坐标分别是 $(-l, -l)$ 、 $(-l, l)$ 和 $(l, -l)$,其中 $l=20$ cm。信号源 AE_1 的坐标为 $(-b, -b)$,其中 $b=10$ cm。 C_1 、 C_2 2 条虚线表示胶合木板胶接处的胶层,在胶合木板表面产生 AE 源并进行定位,验证算法的定位效果。 b 试验如图 1 中 b 部分所示,用与 a 组试验相同的方式建立直角坐标系,为减少传感器 S_1 和 S_2 之间的胶层数量,调整了传感器 $S_1 \sim S_3$ 之间的间距,传感器 $S_1 \sim S_3$ 坐标分别为 $(-l, -l)$ 、 $(-l, l)$ 和 $(l, -l)$,其中 $l=15$ cm。信号源 AE_1 的坐标为 $(-b, -b)$,其中 $b=10$ cm。在胶合木板表面产生 AE 源并进行定位,验证算法的定位效果。

本研究设置了 c 组试验研究橡木胶合木表面 360°范围内的速度传播规律,如图 1 中 c 部分所示,以方形试件中心点为原点,胶合木木纹顺纹理方向为 X 轴方向建立直角坐标系,在原点产生 AE 源。以 X 轴方向为起始,沿顺时针方向间隔 15°测量 1 次 AE 信号在胶合木表面的传播速度,其中传感器 S_1 与 AE 的间距为 3 cm,传感器 S_2 与 AE 源的间距为 23 cm。为减少随机性的影响,均进行 10 次独立试验。

1.3 AE 信号的小波重构以及信号互相关分析

本研究采用的 SR150N 声发射传感器,其带宽为 22~220 kHz,故 5 层小波分解能够覆盖 AE 信号所有的频率变化范围。本研究所采用基于 Matlab 编写的小波分解、重构程序,相关程序来源于课题组,已经在相关文献中应用^[6-7]。本试验设计了一种基于信号相似度的自适应小波重构算法,优化了小波重构的过程。

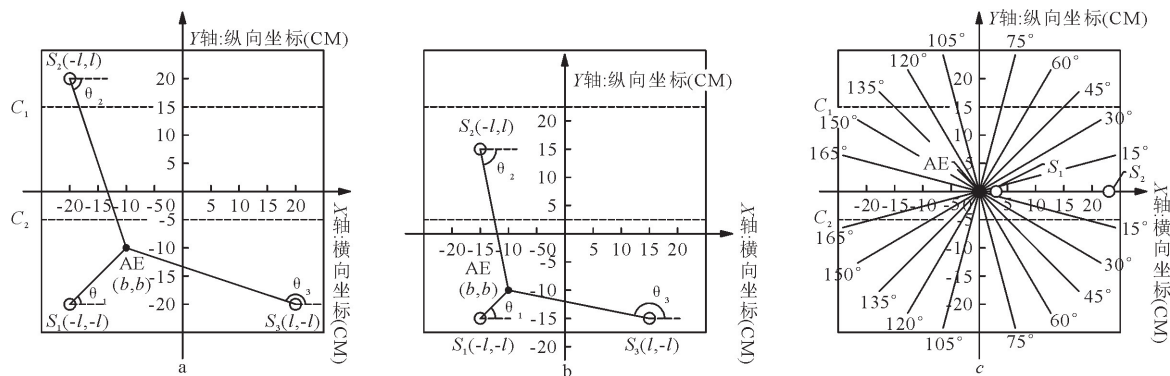


图 1 胶合木表面 AE 源定位以及传播规律研究示意

Fig. 1 Schematic diagram of AE source location and propagation rule research on glulam surface

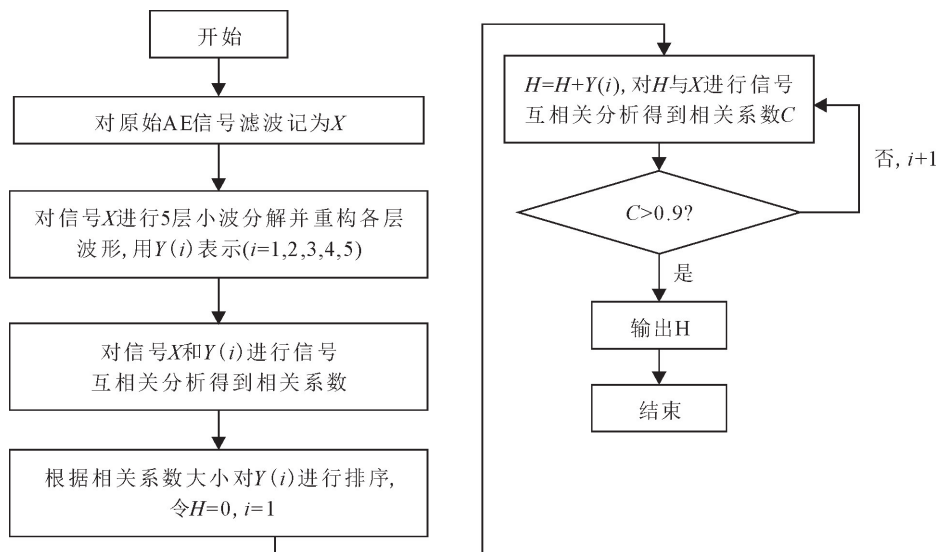


图 2 自适应小波重构程序流程

Fig. 2 Flow chart of adaptive wavelet reconstruction program

如图 2 所示,首先对原始 AE 信号进行滤波。然后,为提高小波分析的频域局部化能力,选择具有较高消失矩阶数的 *daubechies* 小波(*db10*)为基函数对滤波后的 AE 信号进行 5 层小波分解。最后根

据信号相关性原理,对小波分解后的细节信号进行自适应重构,为保证重构后的 AE 信号与滤波后的 AE 信号相关系数 >0.9 ,在重构时设置相关系数为 0.9。

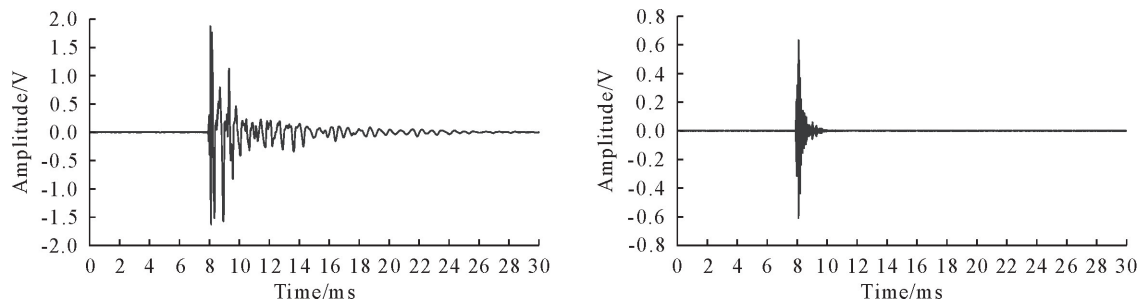


图 3 原始 AE 信号与小波重构后 AE 信号波形

Fig. 3 Original AE signal and AE signal waveform after wavelet reconstruction

本研究选取 1 组试验中传感器 S_2 采集到的 AE 信号说明小波重构的效果,图 3 中左半部分是原始 AE 信号的波形图,右半部分是经基于信号相似度小波重构后的波形图。

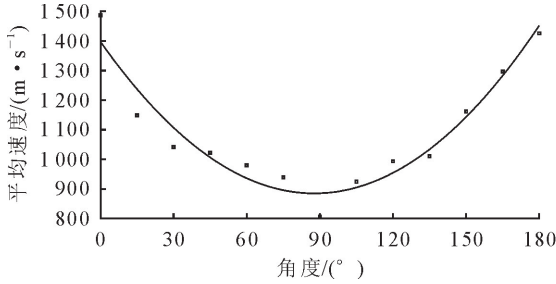
差,本研究采用基于信号相似度的自适应小波重构法处理原始 AE 信号,降低噪声信号对估算时差的影响,并采用信号相关性分析法计算计算 AE 信号到达各传感器的差,以提高估算时差的准确性,具体的计算过程如下:

为了确定 AE 信号到达 2 个固定传感器的时

信号相关分析法是假设在 x 处有 AE 信号源, AE 信号到达 2 个传感器的时差为 Δt , 利用信号相关分析方法确定传播时差 Δt 。互相关函数描述两个信号的相似程度, 信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数定义为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t+\tau) dt \quad (1)$$

由信号互相关函数的定义可知, 若当 $\tau = \tau_0$ 时, 信号互相关函数的绝对值 $|R_{xy}(\tau_0)|$ 取得最大值, 则当信号 $y(t)$ 沿时间轴平移 τ_0 个单位后, 与信号 $x(t)$ 最相似。在此基础上, 根据公式 $\Delta t = \frac{F_s}{\tau_0}$ 计算得



到信号到达 2 个传感器的时差, 其中, F_s 为采样率。

1.4 AE 源的面定位算法

由于木材属于各向异性材料, 为研究胶合木板表面 AE 源平面定位算法, 需要对 AE 信号在胶合木板表面 360° 范围内的传播规律进行研究, 拟合出胶合木板表面 360° 范围内的传播速度公式。本研究根据公式 $v = \frac{x}{t}$ 计算 AE 信号在胶合木表面的传播速度。式中, x 为 c 组试验中传感器 S_1 和 S_2 之间的间距, 即 $x = 20$ cm, t 为信号在到达 2 个传感器的传播时差, 使用信号互相关法估算。

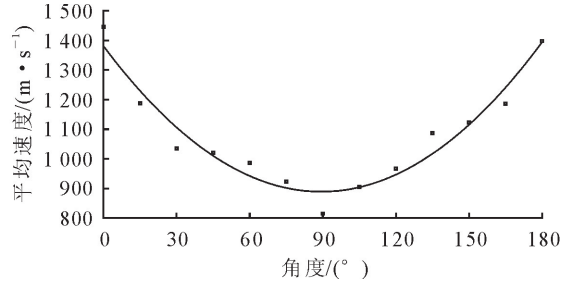


图 4 AE 信号在试件表面的速度拟合曲线

Fig. 4 Variation of the propagation speed of AE signal within 360° on oak plywood

图 4 显示了从 c 组试验中得到的 AE 信号在橡木胶合木板表面 360° 范围内速度变化的拟合曲线, 左、右 2 部分分别描述 AE 信号在橡木胶合木板上的传播速度以胶合木板顺纹理方向为起始沿逆、顺时针方向 180° 范围内变化的规律。由图 4 所示的速度变化曲线得到 AE 信号在橡木胶合木板表面 360° 范围内的传播速度公式。

$$v_a = 0.068 \times \theta_s^2 - 12 \times \theta_s + 1400 \quad (2)$$

$$v_b = 0.063 \times \theta_n^2 - 11 \times \theta_n + 1400 \quad (3)$$

式中, θ_s 、 θ_n 分别表示 AE 信号的速度方向在逆、顺时针方向与橡木胶合木板顺纹理方向形成的夹角, θ_s 、 $\theta_n \in [0, 180^\circ]$ 。式(2)、式(3)中的系数 0.068、0.063 和 12、11 为无量纲系数, 其单位分别为 m/π^2 和 m/π 。

如图 1 所示, 在胶合木表面产生 AE 源, 设 AE 源的坐标为 (x_0, y_0) , 橡木胶合木板顺纹理方向与 AE 信号到达传感器 S_i ($i=1, 2, 3$) 的速度方向形成的夹角为 θ_i ($i=1, 2, 3$), θ_i 可以用 AE 源和传感器 S_i 的坐标表示为:

$$\theta_1 = \pi - \arctan\left(\frac{y_0 + l}{x_0 + l}\right) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{y_0 + l}{x_0 - l}\right) \quad (5)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{y_0 - l}{x_0 + l}\right) \quad (6)$$

其中, 因为 a、b 2 组试验中传感器的坐标不同, l 分别为 20 cm 和 15 cm。

将式(4)代入式(2)可以得到 v_2 :

$$v_2 = 0.068 \times \theta_2^2 - 12 \times \theta_2 + 1400 \quad (7)$$

将式(5)、式(6)代入式(3)可以得到 v_1 、 v_3 :

$$v_1 = 0.063 \times \theta_1^2 - 11 \times \theta_1 + 1400 \quad (8)$$

$$v_3 = 0.063 \times \theta_3^2 - 11 \times \theta_3 + 1400 \quad (9)$$

其中, $v_1 \sim v_3$ 分别表示 AE 信号到达传感器 $S_1 \sim S_3$ 的传播速度。

AE 信号到达各传感器的时间由公式 $t = \frac{x}{v}$ 计算得到:

$$t_1 = \frac{\sqrt{(x_0 + l)^2 + (y_0 + l)^2}}{v_1} \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{(x_0 + l)^2 + (y_0 - l)^2}}{v_2} \quad (11)$$

$$t_3 = \frac{\sqrt{(x_0 - l)^2 + (y_0 + l)^2}}{v_3} \quad (12)$$

信号到达 2 个传感器的时差可以表示为:

$$t_{21} = t_2 - t_1 = \frac{\sqrt{(x_0 + l)^2 + (y_0 - l)^2}}{v_2} - \frac{\sqrt{(x_0 + l)^2 + (y_0 + l)^2}}{v_1} \quad (13)$$

$$t_{31}=t_3-t_1=\frac{\sqrt{(x_0-l)^2+(y_0+l)^2}}{v_3}-\frac{\sqrt{(x_0+l)^2+(y_0+l)^2}}{v_1}\tag{14}$$

式中, t_{21} 、 t_{31} 分别为信号达到传感器 S_1 和 S_2 的时差和信号到达传感器 S_1 和 S_3 的时差, t_{21} 、 t_{31} 根据信号互相关原理和传感器 $S_1\sim S_3$ 采集到的 AE 信号估算得到。

根据使用信号互相关分析法计算得到的信号到达各传感器的时差 t_{21} 、 t_{31} ,使用 MATLAB 中的 solve 功能求解由式(13)、式(14)构成的二元多次非线性方程组,即得到胶合木表面 AE 源的坐标(x_0 , y_0)。

2 结果与分析

为确定 AE 信号源在橡木胶合木表面的位置,使用基于信号相似度的小波重构法对原始 AE 信号进行降噪处理并重构 AE 波形,利用信号互相关分析法计算信号到达各传感器的时差。根据 AE 信号在胶合木表面 360°范围内的传播速度公式和信号到达各传感器的时差确定 AE 源的位置。为避免随机性的影响,橡木胶合木表面 AE 源定位进行了 10 次独立试验。

表 1、表 2 分别列出了在进行 AE 源定位时所用到的时差以及定位结果。其中, t_{21} 、 t_{31} 和 t'_{21} 、 t'_{31} 分别表示了 a、b 2 组试验中 AE 信号到达传感器 S_1 和 S_2 、 S_1 和 S_3 的时差, (x_0 , y_0), (x'_0 , y'_0) 为定位结果, δ_1 、 δ_2 为定位误差。定位误差由式(15)计算得到:

$$\delta=\frac{D}{L}\times100\%\tag{15}$$

式中, D 为绝对误差,是定位结果坐标与实际 AE 源坐标之间的距离, L 为传感器 S_1 和 S_2 或 S_1 和 S_3 之间的距离, $L=400$ mm。

表 1 中, t_{21} 、 t'_{21} 的标准差分别是 21.2 μ s 和 10.1 μ s,比较 t_{21} 、 t'_{21} 的标准差可以得知, t_{21} 的标准差约为 t'_{21} 的 2 倍。如图 1 所示,a 组试验中,AE 信号到达传感器 S_1 、 S_3 并未通过胶层,到达传感器 S_2 通过了 2 层胶层,b 组试验中,AE 信号到达传感器 S_1 、 S_3 并未通过胶层,到达传感器 S_2 通过了 1 层胶层。这说明橡木胶合木板内的胶层对使用信号互相关分析确定信号到达传感器的时差造成了影响,进而对 AE 源定位精度造成影响。从表 2 得知, a、b 2 组试验中 AE 源定位误差 δ_1 、 δ_2 的均值分别为 5.2%、5.3%, δ_1 、 δ_2 在数值上大致相等。这是由于胶层造成的影响已经体现在拟合得到的胶合木表

面 360°范围内的传播速公式之中,在使用胶合木表面 360°范围内的速度传播公式和时差进行 AE 源定位时,可以减小胶层对定位精度的影响。但如何完全排除胶层的影响,还需要进一步的研究。

从表 2 可知,胶合木表面 AE 源定位精度相对较高。造成木材表面 AE 源面定位误差的主要原因是:AE 源在胶合木上传播时存在边界反射波,边界反射波与 AE 信号特征相似,对使用信号互相关分析法计算得到的信号到达各传感器的时差造成影响,进而影响定位精度。AE 信号在胶合木板表面 360°范围内的传播速度公式通过拟合得到,并不是完全准确,也会对定位精度造成影响。胶合木板内存在的胶层会对计算信号到达 2 个传感器的时差造成影响,进而影响定位精度。

表 1 AE 信号到达传感器的时差

Table 1 Time difference of AE signal reaching each sensor

序号	$t_{21}(\mu\text{s})$	$t_{31}(\mu\text{s})$	$t'_{21}(\mu\text{s})$	$t'_{31}(\mu\text{s})$
1	208.1	160.0	256.0	144.0
2	208.1	160.0	258.1	146.2
3	210.0	160.0	258.1	146.2
4	264.5	140.2	238.3	124.0
5	264.5	140.2	257.9	146.1
6	208.0	160.0	256.3	124.3
7	238.4	164.3	236.1	124.0
8	238.4	164.3	238.3	124.0
9	240.0	144.0	260.0	144.0
10	240.0	144.0	236.1	124.0

表 2 AE 源定位结果

Table 2 AE source location results

序号	$(x_0,y_0)(\text{mm})$	δ_1	$(x'_0,y'_0)(\text{mm})$	δ_2
1	(-116.5,-82.6)	6.0%	(-104.9,-115.6)	5.4%
2	(-116.5,-82.6)	6.0%	(-106.3,-116.3)	5.8%
3	(-116.9,-83.9)	5.8%	(-106.3,-116.3)	5.8%
4	(-105.5,-121.1)	5.5%	(-90.6,-109.5)	4.4%
5	(-105.5,-121.1)	5.5%	(-106.3,-116.3)	5.8%
6	(-116.5,-82.6)	6.0%	(-88.6,-119.7)	7.5%
7	(-122.9,-100.5)	5.7%	(-90.9,-108.4)	4.1%
8	(-122.9,-100.5)	5.7%	(-90.6,-109.5)	4.4%
9	(-109.8,-106.9)	3.0%	(-104.4,-117.9)	6.1%
10	(-109.8,-106.9)	3.0%	(-90.9,-108.4)	4.1%

3 结论与讨论

受胶合木多孔性、黏弹性、胶层以及边界反射波等因素影响,计算得到的 AE 信号到达各传感器时差的准确性将直接影响胶合木板表面 AE 源定位精度。为此,本研究利用基于信号相似度的自适应小波重构算法对原始 AE 信号进行降噪并重构 AE 波形,使用信号互相关分析法计算 AE 信号到达各传

传感器的时差。根据橡木胶合木表面 360°范围内的传播速度公式设计基于时差的定位算法,在试件表面产生 AE 源进行定位。试验结果表明,a、b 2 组试验中,橡木胶合木表面的 AE 源定位误差分别为 5.2%、5.3%,基于信号相似度自适应小波重构法的胶合木表面 AE 源定位算法能够有效的确定声发射源的位置。

在未来将对橡木胶合木板 360°范围内的 AE 信号能量衰减规律进行研究,确定 AE 信号能量衰减和距离的关系,减少 AE 源的定位范围,在此基础上结合橡木胶合木板表面 360°范围内的传播速度公式和 AE 源定位算法,提升定位精度。

参考文献:

[1] SATOUR A,MONTRESOR S,BENTAHAR M,*et al.* Acoustic emission signal denoising to improve damage analysis in glass fibre-reinforced composites[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*,2014,29(1):1-15.

[2] ZHAO J H,SHI Y K,SHAN N,*et al.* Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement[J]. *Optics & Laser Technology*,2008, 40(6): 874-880.

[3] DIRK A,ALEX C,STEVE W,*et al.* Acoustic emission source location on large plate-like structures using a local triangular sensor array[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 30(7):91-102.

[4] 金中薇,姜明顺,隋青美,等. 基于广义互相关时延估计算法的声发射定位技术[J]. *传感技术学报*,2013,26(11):1513-1518.

JIN Z W,JIANG M S,SUI Q M,*et al.* Acoustic emission localization technique based on generalized cross-correlation time difference estimation algorithm[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*,2013,26(11):1513-1518. (in Chinese)

[5] PEARSON M R,EATON M,FEATHERSTON C,*et al.* Improved acoustic emission source location during fatigue and impact events in metallic and composite structures[J]. *Structural Health Monitoring*,2017,16(4):382-399.

[6] 申珂楠,赵海龙,丁馨增,等. 基于 LabVIEW 的木材声发射信号采集与小波析取[J]. *中南林业科技大学学报*,2015,35(4): 125-129.

SHEN K N,ZHAO H L,DING X Z,*et al.* Wood acoustic emission signal acquisition and wavelet extraction based on LabVIEW[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*,2015,35(4):125-129. (in Chinese)

[7] 申珂楠,丁馨曾,李明,等. 木材表面声发射信号源的三角形定位方法[J]. *东北林业大学学报*,2015,43(4):77-81,112.

SHEN K N,DING X Z,LI M,*et al.* Acoustic emission signal source localization in wood surface with triangle positioning method[J]. *Journal of Northeast Forestry University*,2015,43

(4):77-81,112. (in Chinese)

[8] 王宗炼,任会兰,宁建国. 基于小波变换降噪的声发射源定位方法[J]. *振动与冲击*,2018,37(04):226-232,248.

[9] 鞠双,李新慈,罗廷芳,等. 应用小波分析法对马尾松胶合木表面声发射信号特征检测[J]. *东北林业大学学报*,2018,46(8): 84-90.

JU S,LI X C,LU T F,*et al.* Characteristics of acoustic emission signals on the surface of masson pine glulam with wavelet analysis method[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018,46(8):84-90. (in Chinese)

[10] 李新慈,鞠双,罗廷芳,等. 马尾松胶合木胶层对声发射信号传播特性的影响[J]. *西北林学院学报*,2019,34(3):185-190, 239.

LI X C,JU S,LUO T F,*et al.* Influence of Adhesive layer at masson pine glulam on acoustic emission signal propagation characteristics[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019,34(3):185-190,239. (in Chinese)

[11] 董红平,李明. 基于瞬时频率的木材声发射事件辨识与损伤监测[J]. *西北林学院学报*,2020,35(2):229-234.

DONG H P,LI M. Wood acoustic emission event Identification based on instantaneous frequency and damage monitor [J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2020,35(2): 229-234. (in Chinese)

[12] FARIDEH E,SEYED-KAMALEDIN S,JOSE A M,*et al.* Automatic sleep staging using empirical mode decomposition, discrete wavelet transform, time-domain, and nonlinear dynamics features of heart rate variability signals[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*,2013,112(1).

[13] 张新,郑燕萍,Antoine AUGÉIX,等. 基于小波包分解与机器学习的汽车调光电机异响识别[J]. *森林工程*,2019,35(1): 59-63.

[14] KIM J K,KWON O Y,KANG Y K. A practical method of acoustic emission source location in anisotropic composite laminates [J]. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*,2003,23(3):237- 245.

[15] 鞠双,李新慈,罗廷芳,李明. 马尾松胶合木表面声发射信号各向异性传播规律[J]. *林业工程学报*,2019,4(2):48-53.

JU S,LI X C,LUO T F,LI M. Anisotropic propagation of acoustic emission signal on surface of *Pinus massoniana* Lamb [J]. *Glulam*,2019,4(2):48-53. (in Chinese)

[16] 袁梅,商富凯,董韶鹏. 基于经验小波变换的复合材料板声发射源定位[J]. *北京航空航天大学学报*,2018,44(7):1395-1401.

YUAN M,SHANG F K,DONG S P. Acoustic emission source localization of composite plate based on empirical wavelet transform[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2018,44(7):1395-1401. (in Chinese)

[17] 申珂楠,赵海龙,丁馨曾,李明. 木材损伤断裂过程声发射信号小波析取[J]. *河南科技大学学报:自然科学版*,2015,36(3): 33-37,6.