

## 基于单通道 AE 盲源分离的结构损伤定位\*

何鹏举<sup>1,2</sup>, 王博成<sup>2</sup>, 刘欣<sup>1</sup>, 刘应礼<sup>3</sup>

(1. 西安欧亚学院信息工程学院 西安, 710065)

(2. 西北工业大学自动化学院 西安, 710129)

(3. 西安鼎正测控科技有限公司 西安, 710399)

**摘要** 声发射(acoustic emission, 简称 AE)能够实现复杂板状结构损伤定位,但多数 AE 检测定位方法仅针对单 AE 源的情况,而实际中复杂板状结构产生损伤时会伴随多个 AE 卷积混合信号。为了解决工程中多 AE 源定位的问题,提出一种单通道 AE 盲分离-模态提取定位方法。首先,对采集的 AE 信号进行信号降噪,使用单通道盲源分离算法分离出无回波成分的 AE 信号,将多源定位转为多个单源定位问题;其次,通过提取单频模态,求取声波传播速度,估计到达时间差来进行疲劳裂纹损伤定位;最后,经过计算机仿真实验和钢箱梁桥断铅半实物仿真实验,验证了方法的准确性和有效性,并通过载荷破坏 AE 检测实验验证了方法的实用性。结果表明,所提方法能够应用于复杂板状结构多 AE 源定位问题,为实际工程应用提供了可靠的依据及参考价值。

**关键词** 板状结构体;声发射;多源定位;AE 盲分离-模态提取

**中图分类号** TH17;TP277

### 引言

复杂板状结构是工程中应用较多的结构件,常因疲劳裂纹损伤导致整个构件失效,需要对其进行实时监测。常用的超声探头发射超声波是一种主动检测方式<sup>[1]</sup>,而 AE 检测技术是一种灵敏度高且对动态缺陷敏感的新型动态无损检测技术<sup>[2]</sup>,能够检测到结构体在晶体结构发生变化或产生疲劳损伤时的瞬态弹性波,进而实现实时监测。

国内外学者对板状结构 AE 源定位方法进行了大量研究。Ebrahimkhanlou 等<sup>[3]</sup>提出了基于边缘反射的兰姆波 AE 信号定位方法。Cuadra 等<sup>[4]</sup>提出了一种基于数据驱动的 AE 源建模方法,建立了 AE 产生和相关瞬态弹性波传播的数据驱动有限元模型。文献[5]引入堆叠自编码器于卷积神经网络,解决了金属板的铆钉连接处声源定位问题。深度学习利用混响模式以及 AE 波形的多模态和色散特性来确定其源位置。Mostafapour 等<sup>[6]</sup>利用基于互相关的 Cohen 类时频分析方法计算时延,设计时差与相关频率的分析函数,求得的互时频谱(cross-time frequency spectrum, 简称 CTFS)最大峰值所对应时间即为所求时间差。何田等<sup>[7]</sup>利用均匀线阵延时-叠加波

束形成法,提出了一种小区域布置少量传感器实现板状结构声波定位的方法,但受反射波影响比较严重。文献[8-9]考虑 AE 传播过程中路径的复杂性以及反射等问题,运用 Delta T 方法解决 AE 源的定位问题,用断铅代替 AE 源,使用差值求源点坐标和图像处理方法求得 AE 源坐标。李晶等<sup>[10]</sup>提出了一种近场多重相干信号子空间聚焦的定位算法,用以解决固体宽带多声源问题,但由于波达方向估计(direction of arrival, 简称 DOA)阵元间距与波长关系的限制,其聚焦频率仅能选择 37.5 kHz。王少锋等<sup>[11]</sup>针对薄板结构频散现象,提出使用 Morlet 小波变换提取单频模态,以避免频散现象导致的波速不定问题,此方法最大定位误差仅为 5%,但仍未考虑多源定位问题。

笔者提出了解决 AE 多源定位问题的方法,并将其应用于复杂板状结构钢箱梁桥上的疲劳裂纹定位。首先,将传感器采集的 AE 多源信号降噪后进行单通道盲源分离,使多源定位转为多个单源定位问题;其次,对分离得到的单个 AE 信号提取单频模态,并估计到达时间差,进行 AE 源定位;最后,通过等比例钢箱梁桥进行了半实物仿真及工程实验验证。

\* 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设资助项目(2022KXJ-056);数字孪生与声学感知科研资助项目(2021XJTD06)

收稿日期:2022-10-18;修回日期:2023-01-01

# 1 问题及解决方法

复杂板状结构相互作用或产生损伤时在某一时刻产生多个 AE 信号,由于信号产生时间以及传播路径的差异,传感器观测信号为多个 AE 信号的卷积混合并叠加了环境噪声,单个传感器观测信号可用单通道卷积混合模型表示。

假设存在  $R$  个相互独立的信号源,经过不同路径传播到同一传感器,则传感器观测信号  $x(t)$  与  $K$  时刻的  $R$  个声源相关,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^R \sum_{\tau=0}^{K-1} a_i(\tau) s_i(t + \tau) + \epsilon(t) \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 为传感器观测得到的卷积混合信号; $a_i(\tau)$ 为第  $i$  个 AE 源信号与 AE 传感器之间的 FIR 滤波器信号; $s_i(t + \tau)$ 为第  $i$  个信号经过不同路径传播的时间延迟; $\epsilon(t)$ 为噪声; $K$ 为滤波器阶数; $R$ 为信号源个数。

损伤源产生的 AE 信号属于宽频随机信号,其在板状结构中的传播存在频散特性及多模态,不同模态与频率对应的声速不同,而声速将直接影响源定位的准确性<sup>[12]</sup>。此外,由于损伤声源的产生在空间与时间上具有随机性,因此声源到达传感器的传播路径各不相同,不同传感器接收到的同一声源信号幅值、频率成分也不同,增加了时延估计的难度,影响了定位的准确性。

因此,对于板状结构多 AE 源定位需要解决以下问题:①信号降噪;②由观测信号得到的卷积混合信号分离损伤源信号;③信号单频模态成分提取;④单频模态信号传播速度的确定;⑤单源定位。

# 2 多源声发射定位

## 2.1 信号降噪

传感器采集的 AE 信号含有回波以及大量随机噪声与脉冲噪声,因此需要先进行降噪处理。AE 信号具有非线性特点,中值滤波作为一种非线性滤波器能有效抑制脉冲干扰,但对于随机噪声抑制较差。奇异值分解(singular value decomposition,简称 SVD)滤波对随机信号具有较好的抑制效果,二者相结合可消除脉冲噪声与随机噪声。

传感器采集到的 AE 信号由首波与回波组成,首波传播路径短于回波,因此首波先于回波到达,可以使用自适应滤波器将首波作为期望对信号传播路径进行自适应,从而达到消除回波的目的。由于金

属结构中裂纹产生的 AE 信号频率低于 400 kHz,且本研究使用的传感器工作频率范围为 60 kHz~400 kHz,因此需要消除传感器工作带宽以外的信号成分,以及经过上述降噪后残留的噪声。

小波包分解对信号频带进行多层次划分,对信号低频及中高频部分都进行了分解,无冗余也无疏漏<sup>[13]</sup>,适合分析由中、高频信息构成的 AE 信号。小波包分解公式为

$$\begin{cases} s_k^{j+1,2n} = \sum_l h_{2l-k} d_l^{j,n} \\ s_k^{j+1,2n+1} = \sum_l g_{2l-k} d_l^{j,n} \end{cases} \quad (2)$$

重构公式为

$$s_i^{j,n} = \sum_k h_{l-2k} s_k^{j+1,2n} + \sum_k g_{l-2k} s_k^{j+1,2n+1} \quad (3)$$

其中: $h, g$ 分别为低通与高通滤波器系数; $s_k^{j+1,2n}$ 为  $j+1$  层小波包分解得到的第  $n$  个分解序列。

对信号进行 3 层小波分解,3 层小波包分解树结构图如图 1 所示。

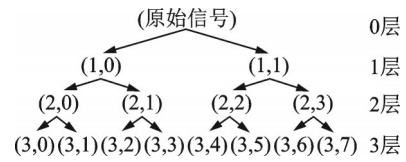


图 1 3 层小波包分解树结构图

Fig.1 Structure diagram of wavelet packet decomposition tree

原始信号每经过一层时间序列,个数增加 1 倍,相应的频率带宽也越窄。由于声发射信号主要信息存在于低于 400 kHz 的子频带中,通过每个频带能量占比对分解的子频带进行筛选,保留包含最有效信息的频带,丢弃噪声成分频带。

信号降噪步骤如下:

- 1) 对传感器观测信号进行中值与奇异值分解滤波,去除脉冲噪声与随机噪声;
- 2) 利用自适应滤波器消除部分回波;
- 3) 利用小波包分解去噪,保留传感器工作频率内的信号成分。

## 2.2 单通道盲源分离

单通道盲源分离算法先将单通道卷积混合信号通过经验模态分解(empirical mode decomposition,简称 EMD)映射为多通道,再采用主成分分析(principal component analysis,简称 PCA)方法估计出信号源个数,并重构单路观测信号,最后通过单通道非负矩阵分解解卷积(nonnegative matrix factorization

deconvolution, 简称 NMFD)盲分离方法分离出各源信号<sup>[14]</sup>。算法流程如下:

- 1) 确定观测信号  $x(t)$  的所有极值;
- 2) 通过 3 次样条函数拟合出信号的上包络  $x_u(t)$  和下包络  $x_l(t)$ , 并计算包络平均值  $m_1(t)$ ;
- 3) 提取余量  $h_1^l(t) = x(t) - m(t)$ ;
- 4) 令  $x(t) = h_1^l(t)$ , 并重复上述过程, 直至第  $k$  次余量满足本征模态函数 (intrinsic mode function, 简称 IMF) 的要求, 得到第 1 个  $\text{IMF}_{c_1}(t) = h_1^k(t)$ ;
- 5) 令  $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ , 对  $r_1(t)$  执行步骤 1~4, 得到第 2 个  $\text{IMF}_{c_2}(t)$ ;
- 6) 如此反复进行, 直到第  $n$  阶  $\text{IMF}_{c_n}(t)$  或其余量  $r_n(t)$  小于预设值, 分解得到一组 IMF 分量,  $\mathbf{X}_{\text{imf}}(t) = (c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t), r_n(t))^T$ ;
- 7) 利用 PCA 方法估计观测信号中包含的独立信号源个数  $r$ ;
- 8) 重构单路观测信号, 并对重构信号做短时傅里叶变换, 将其转换至时频域;
- 9) 采用 NMFD 算法对时频信号进行分解, 得到信号的时频谱;
- 10) 对得到的分离信号时频谱进行短时傅里叶逆变换, 得到各路源信号。

经过单通道盲源分离, 即可将多源声发射定位问题转换成单源声发射定位题。

### 2.3 单频模态成分提取

复杂板状结构存在频散现象与多模态, 不同模态及其频率下的波传播速度不同, 因此需要提取单频模态下的声波进行分析, 以确定到达时间进行声源定位。Morlet 函数具有正交性, Morlet 小波能同时在时频域内刻画信号局部特性, 并且具有良好的时频分辨率, 适合对突发型 AE 信号的单个模态成分进行提取<sup>[11]</sup>。Morlet 母小波定义为

$$\Psi_w(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp(2\pi f_c j t - \frac{t^2}{f_b}) \quad (4)$$

其中:  $f_b, f_c$  分别为无量纲带宽参数与中心频率。

输入信号  $s(t)$  的连续小波变换 (continuous wavelet transform, 简称 CWT) 为

$$C_w(f, t_w) = \frac{1}{\sqrt{s_w(f)}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \Psi_w^* \left( \frac{t-t_w}{s_w(f)} \right) dt \quad (5)$$

其中:  $s_w(f)$  为无量纲尺度参数;  $t_w$  为时移因子;  $\Psi_w^*$  为复 Morlet 母小波  $\Psi_w$  的复共轭。

$$s_w(f) = f_c f_s / f \quad (6)$$

其中:  $f_s$  为输入信号  $s(t)$  的采样率。

CWT 实部可视为高斯带通滤波器, 其中心频率和标准偏差分别为  $f$  与  $f/(2\pi f_c \sqrt{f_b})$ , 其滤波信号为

$$r(f, t) = \text{Re}(C_w(f, t_w)) \quad (7)$$

将 AE 信号进行连续小波变换, 选择中心频率取其变换实部, 此时得到的信号即为单频成分。

### 2.4 到达时间差定位原理

到达时间差 (time difference of arrival, 简称 TDOA) 是通过测量信号到达不同检测点传感器的时间差, 来对发射信号的发射源进行定位的技术<sup>[15]</sup>。与其他定位算法相比, TDOA 具有系统复杂度低、定位精度高、传感器摆放位置灵活以及不存在相位模糊等优点。

#### 2.4.1 到达时间估计

赤池信息准则 (Akaike information criterion, 简称 AIC)<sup>[16]</sup> 将采集来的 AE 信号看作两个时间序列, 即 AE 信号序列及噪声序列。使用 AR 模型对两序列进行拟合, 寻找两序列的最佳分割点, 该分割点即为 AE 信号到达时刻。相比于目前广泛使用的阈值法, 其无需人为指定阈值和评估背景噪声, 因而到达时间估计更为准确客观。

对于采集的 AE 信号  $s_n = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ , 分别使用 AR 模型进行拟合, 即

$$s_t = \sum_{r=1}^R b_r^j s_{t-r} + e_j \quad (8)$$

其中:  $b_r^j$  为不同时段 (噪声与 AE 信号) AR 模型系数;  $R$  为 AR 模型阶数;  $e_j$  为预测误差。

假设上述两序列分割点为  $M$ , 则采集的 AE 信号可分为  $[R+1, M]$  和  $[M+1, N-R]$ , 两序列似然函数为

$$L(s, M, R, \Theta_j) = \prod_{j=1}^2 \left( \frac{1}{\delta_j^2 2\pi} \right)^{n_j} \exp \left[ -\frac{1}{2\delta_j^2} \sum_{i=l_j}^{u_j} (s_i - \sum_{r=1}^R b_r^j s_{i-r}) \right] \quad (9)$$

其中:  $\Theta_j = \Theta(b_1^j, b_2^j, \dots, b_R^j, \delta_j^2)$ , 为  $[R+1, M]$  和  $[M+1, N-R]$  参数;  $l_1 = R+1$ ;  $l_2 = M+1$ ;  $u_1 = M$ ;  $u_2 = N-R$ ;  $n_1 = M-R$ ;  $n_2 = N-R-M$ 。

对似然函数  $L$  取对数并对模型参数求偏导, 得到模型参数最大似然估计为

$$\partial \lg(L(s, M, R, \Theta_j)) / \partial \Theta_j = 0 \quad (10)$$

求解式 (10) 可得预测误差方差为

$$\delta_j^2 = \frac{1}{n_j} \sum_{i=l_j}^{u_j} (s_i - \sum_{r=1}^R b_r^j s_{i-r})^2 \quad (11)$$

将对数似然函数最大值作为关于  $M$  的函数, 则

$$-2\lg(L(s, M, R, \Theta_1, \Theta_2)) = (M - R) \lg \delta_1^2 + (N - R - M) \lg \delta_2^2 + 2R \quad (12)$$

当  $M$  为上述两序列分割点时,  $[R + 1, M]$  所对应的序列均为采集信号的背景噪声,  $[M + 1, N - R]$  所对应的序列为 AE 信号。使用 AR 模型分别对两个序列进行最佳拟合, 所预测的方差最小, 对应的 AIC 值也最小, 此时  $M$  即为 AE 信号的到达时刻。

### 2.4.2 二维定位

由于 AE 信号频率成分达到数百千赫兹, 导致采样频率至少高于 1 M/s, 尽可能使用较少的传感器实现声源定位, 对于工程应用意义重大。一维定位指在一维坐标中确定声发射源定位的方法, 是声源定位中最简单的方法, 至少需要 2 个传感器。基于 3 个传感器进行二维定位, 其原理如图 2 所示。

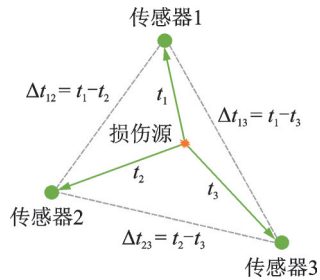


图2 二维定位原理

Fig.2 Schematic of two-dimensional positioning

声源坐标可由双曲线方程求得, 即

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_1)^2 - (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 - (y - y_2)^2} = v\Delta t_{12} \\ \sqrt{(x - x_1)^2 - (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 - (y - y_3)^2} = v\Delta t_{13} \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $v$  为 AE 信号传播速度;  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  分别为传感器 1, 2, 3 的坐标;  $(x, y)$  为声发射源坐标;  $\Delta t_{12}, \Delta t_{13}$  分别为传感器 1 与 2、传感器 1 与 3 之间的时间差。

### 2.5 基于单通道盲源分离的多源声发射定位

笔者提出基于单通道盲源分离-模态提取定位方法, 其算法流程如下:

- 1) 输入采集到的信号;
- 2) 估计 EMD-PCA 源个数;
- 3) 如果 EMD-PCA 源个数等于 1, 跳转到步骤 5;
- 4) 采用 NMFD 实现单通道盲源分离;
- 5) 通过连续小波变换提取单频模态;

- 6) 运用 TDOA 估计到达时间;
- 7) 信号原位置估计;
- 8) 返回信号源个数和位置。

## 3 实验与结果

### 3.1 双源定位有限元仿真实验

使用 ANSYS workbench 18.2 有限元仿真软件, 对长度为 500 mm、厚度为 4 mm 的钢板进行 Lamb 波传播数值模拟。材料的弹性模量为 204 GPa, 泊松比为 0.284, 密度为 7 860 kg/m<sup>3</sup>。激励信号分别采用中心频率为 100 kHz 与 200 kHz 汉宁窗调制的 5 周期正弦波信号, 信号采样频率为 10 M/s。

有限元仿真模型如图 3 所示。通道 1, 2 分别位于 150 mm 与 350 mm 处, 激励 1 位于 235 mm 与 265 mm 处, 激励 2 位于 205 mm 处与 235 mm 处。采用四方形网格进行划分, 网格尺寸与求解步长计算式为

$$l = \lambda_{\min} / 12 \quad (14)$$

$$\Delta t = 1 / 20f_{\max} \quad (15)$$

通过计算, 确定网格尺寸为 1 mm, 求解步数为 5 000, 求解步长为 100 ns。

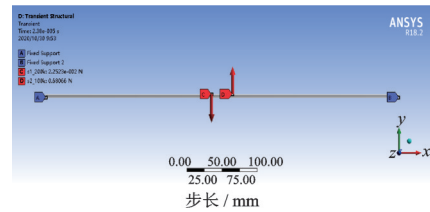


图3 有限元仿真模型

Fig.3 Finite element simulation

通道 1 观测信号分离结果如图 4 所示。将点数为 5 000 的通道 1 观测信号添加 20 dB 的高斯白噪声, 如图 4(a) 所示。由于每一通道都被视为单通道盲源分离问题, 这里以通道 1 为例, 使用单通道卷积盲源分离算法对观测信号进行分离, 其中 IMF<sub>s</sub> 分量如图 4(b) 所示。方差累积贡献率阈值为 95%, 由图 4(c) 可知信号源个数估计为 2。通道 1 分离结果如图 4(d) 所示。计算分离信号 AIC 值, AIC 取最小值所对应时刻即为信号到达时刻, 如图 4(e, f) 所示。以通道 1 为参考, 信号 1、信号 2 到达时间差分别为 5.7 μs 与 -5.6 μs。

使用 Lamb 波理论绘制群速度频散曲线<sup>[17]</sup>, 4 mm 钢板群速度频散曲线如图 5 所示。由图可知, 信号 1, 2 对应和对称模态群速度分别为 5 204 m/s

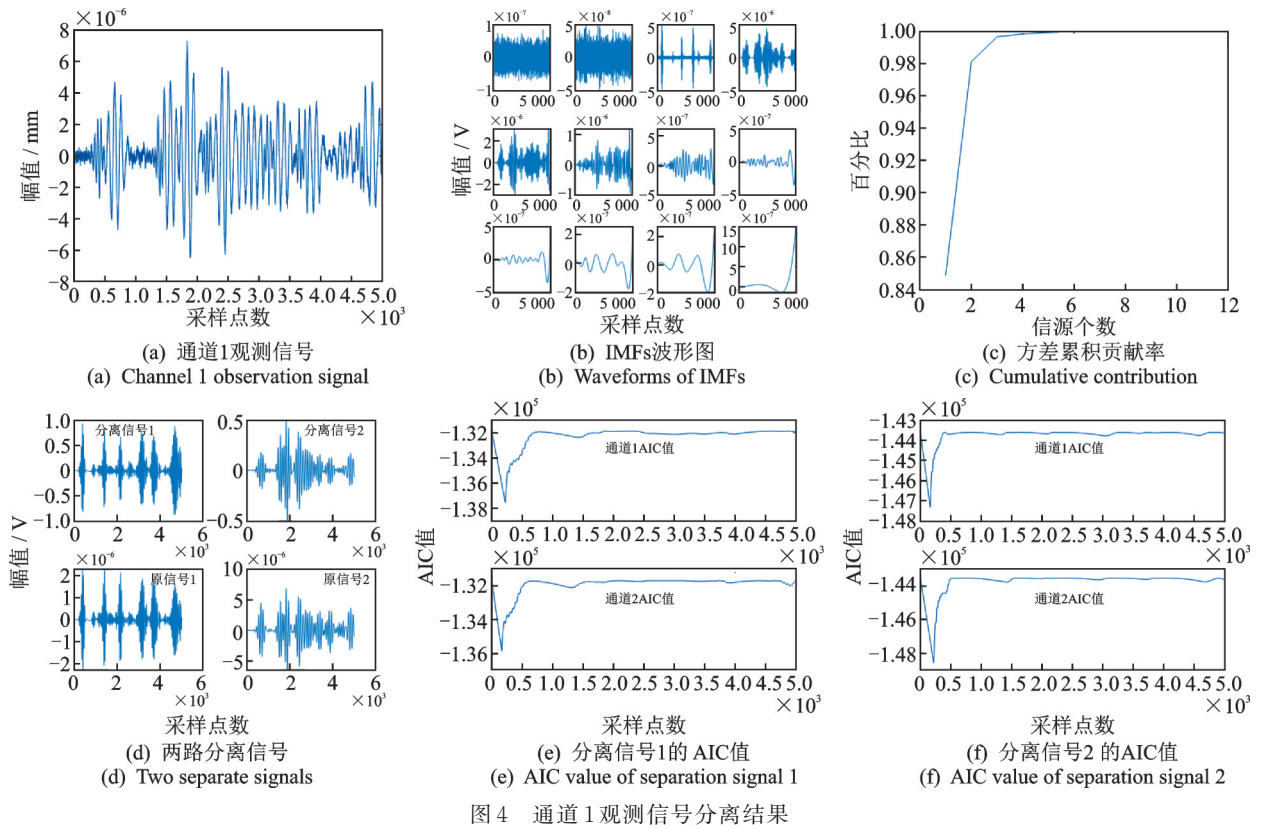


图4 通道1观测信号分离结果

Fig.4 The result of observation signal separation of channel 1

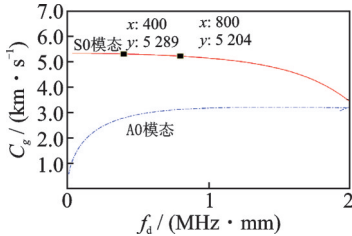


图5 4 mm 钢板群速度频散曲线

Fig.5 4 mm steel plate group velocity dispersion curve

与 5 289 m/s。

计算激励 1 和激励 2 对应的坐标,定位结果如表 1 所示。其中,测量距离和实际距离指与通道 1 的距离。由表 1 可知,笔者提出的方法能够实现薄板结构中单频信号的双 AE 源精确定位,仿真结果误

表 1 定位结果

Tab.1 Positioning results

组号	测量距离/mm	实际距离/mm	误差/%
1	85	85.16	0.19
	115	114.81	0.17
2	85	85.16	0.19
	115	115.07	0.06
3	55	55.24	0.44
	85	85.07	0.08
4	55	54.98	0.04
	85	85.07	0.08

差均在 0.5% 以内。

### 3.2 钢箱梁断铅半实物仿真实验

采用 Nielsen-Hsu 断铅法模拟疲劳裂纹信号。钢箱梁材质为 Q345R 号钢,钢板厚度为 10 mm,长、宽、高分别为 5, 1.5 和 0.3 m,与实物按照 1:30 比例缩小。AE 信号采用北京软岛时代公司 DS5-16 全信息 AE 信号分析仪进行采集分析,频带范围为 50 kHz~400 kHz,中心频率为 150 kHz,采样频率为 3 MHz,放大器增益为 40 dB,全信息采集记录完整波形。AE 断铅实验系统如图 6 所示。传感器布置与断铅位置如图 7 所示,选择十字型阵列中的阵元 4, 7, 13 构成直角三角形阵列。

以阵元 4 为参考阵元,阵元间距为 5 cm。使用 0.5 mm 铅芯在 A(5 cm, 20 cm)处进行断铅,使用

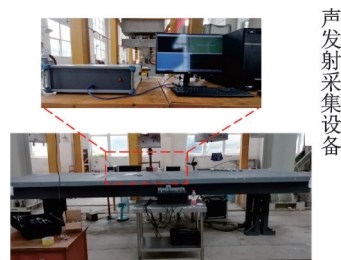


图6 AE断铅实验系统

Fig.6 AE lead break experiment system

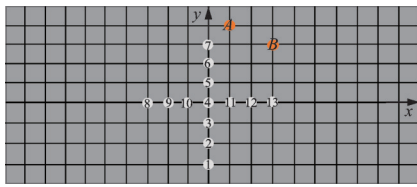


图7 传感器布置与断铅位置

Fig.7 Sensor layout and lead break position

0.7 mm 铅芯在B(15 cm, 15 cm)处进行断铅。通道4盲分离信号如图8所示。

对分离信号1,2进行小波分析,两路分离信号的时频图、连续小波变换波形图及AIC值如图9所示。分离信号1,2的S0模态以172 kHz为中心,因

此对通道4分离得到的两断铅信号以172 kHz为中心频率进行Morlet连续小波变换,得到单个模态信号,再进行到达时间估计。通道7与通道13的到达时间差如表2所示。

表2 通道7与通道13的到达时间差

Tab.2 Arrival time difference between channels 7 and channels 13

断铅信号	通道7时延 (采样点数)	通道13时延 (采样点数)	通道7时差/ $\mu\text{s}$	通道13时差/ $\mu\text{s}$
1	-43	-41	-14.33	-13.67
2	-98	14	32.67	4.67

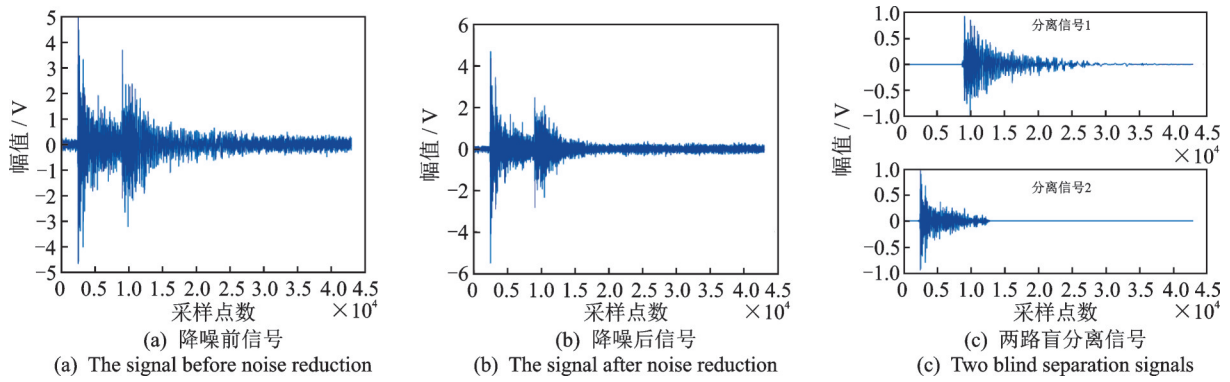


图8 通道4盲分离信号

Fig.8 Blind separation of signals in channel 4

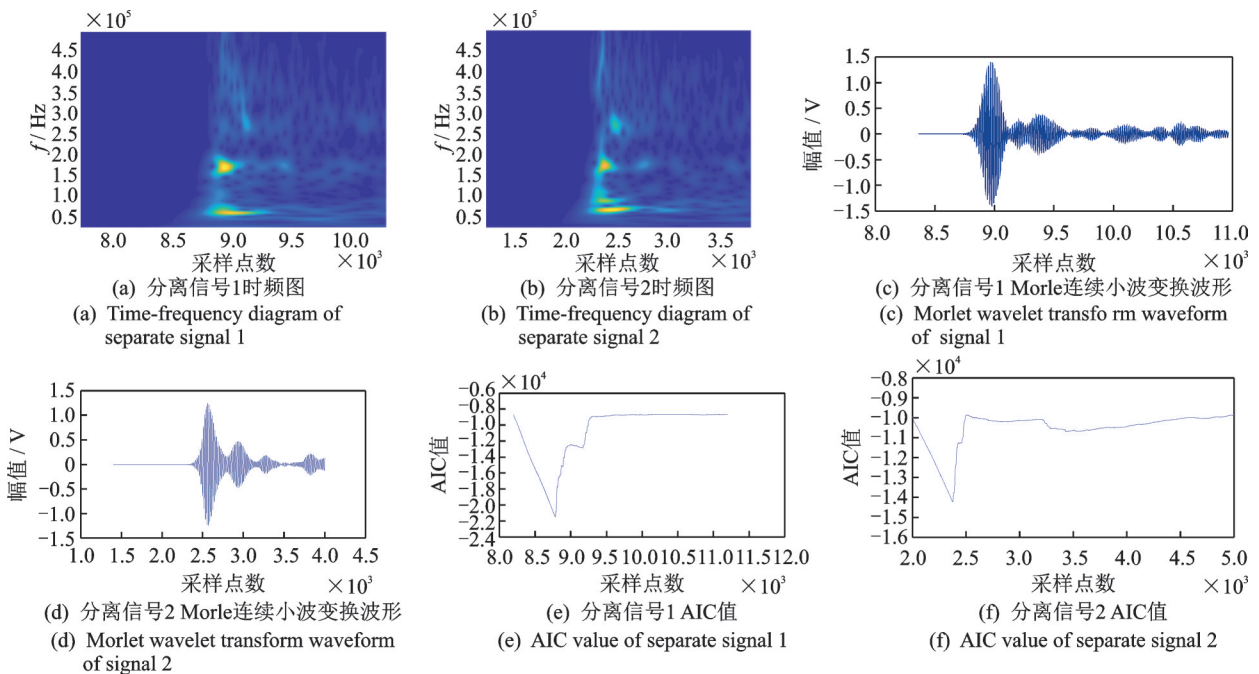


图9 两路分离信号的时频图、连续小波变换波形及AIC值

Fig.9 Time frequency diagram, continuous wavelet transform waveform, and AIC value of two separated signals

已知到达时间差,可确定Q345R号钢群速度频散曲线频率为172 kHz,对称模态声速为4 271 m/s。计算得到双源断铅定位结果,如表3所示。

由表可知,定位误差在10%以内,验证了本研究算法在复杂结构体钢箱梁桥中多声源定位的有效性。

表3 双源断铅定位结果

Tab.3 Dual-source lead break localization results

断铅信号	定位坐标/cm		误差/%	
	x轴	y轴	x轴	y轴
1	14.32	14.60	4.53	2.67
2	4.52	20.91	9.60	4.55

3.3 钢箱梁载荷 AE 检测工程验证实验

采用三通道电液伺服拟静力实验加载系统,传感器分布与载荷作用位置示意图如图10所示。右下角顺时针依次为1~7号传感器,左上角顺时针依次为9~15号传感器,间距为10 cm。以板面右下角端点为坐标原点建立坐标系,试样与传感器之间用硅脂耦合。传感器坐标如表4所示。

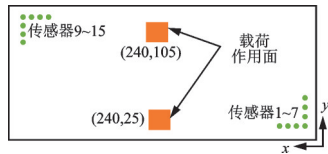


图10 传感器分布与载荷作用位置示意图

Fig.10 Schematic diagram of sensors and loading position

表4 传感器坐标

Tab.4 Sensors coordinates

传感器编号	x/cm	y/cm	传感器编号	x/cm	y/cm
1	15	45	9	485	95
2	15	35	10	485	105
3	15	25	11	485	115
4	15	15	12	485	125
5	25	15	13	475	125
6	35	15	14	465	125
7	45	15	15	455	125

载荷加载方式如下:对试样预加载1 kN,载荷加载速度为500 N/s,每增加10 kN保载20 s,当载荷达到901 kN时停止加载,直至没有AE信号出现,停止实验并卸载,时间总历程为3 600 s。载荷加载过程钢箱梁依次发生弹性形变、塑性形变、裂纹萌生与扩展。钢箱梁载荷加载及损伤结果见图11。

选取7,9,15号3个传感器构成声源定位阵列,

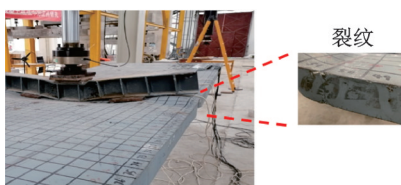


图11 钢箱梁载荷加载及损伤结果

Fig.11 Damage result of steel box girder after loading

以7号传感器为参考。选取第2 616 s塑性形变阶段信号进行声源定位,得到塑形阶段声源定位结果如表5所示。

表5 塑形阶段声源定位结果

Tab.5 Positioning results of sound source in shaping stage

分离信号	x轴定位坐标/cm	y轴定位坐标/cm
1	245.17	28.65
2	239.56	18.29
3	260.03	44.90

同理,对2 512~2 616 s采集得到的信号依次进行盲源分离,再对分离得到的713个源信号进行声源定位。损伤AE源定位图如图12所示。由图可知,塑性形变阶段声源位于垫片附近,裂纹产生于与载荷作用面同一横轴坐标位置的两侧边界处,与图11的实测结果一致,表明本研究所提算法可以实现塑性形变声源与疲劳裂纹声源的精确定位。

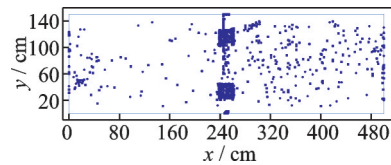


图12 损伤AE源定位图

Fig.12 Location map of damaged AE source

3.4 实验结果分析及讨论

实验结果表明,有限元仿真定位最大误差为0.44%,复杂板状结构体钢箱梁断铅实验声源定位误差在10%以内,验证了所提算法的准确性。钢箱梁荷载实验进一步验证了多声源定位算法实现板状结构体损伤源定位的有效性与实用性。

4 结 论

1) 针对板状结构体中疲劳裂纹损伤等多AE源定位问题,给出了一种多AE源处理方法。利用单通道卷积盲源分离算法、Morlet连续小波变换以及TDOA定位方法等,实现了卷积混合信号的分离、单频模态信号提取、到达时间估计和损伤源定位。通过有限元仿真、断铅实验及工程实验,验证了提出方法的有效性与实用性。

2) 本研究提出的针对复杂板状结构多AE源定位问题的方法,能够有效应用于实际工程中,提出的盲分离-模态提取定位方法对多AE源损伤定位具有实际参考价值,但进行单频模态提取时还需人工选定中心频率。

## 参 考 文 献

- [1] WANG B C, HE P J, KANG Y N, et al. Ultrasonic testing of carbon fiber-reinforced polymer composites [J]. *Journal of Sensors*, 2022, 2022: 5462237.
- [2] 童国伟,周循道,黄林轶,等. 声发射检测信号分析及源定位方法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(5): 96-100. TONG Guowei, ZHOU Xundao, HUANG Linyi, et al. Acoustic emission signal analysis and source localization method research [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(5): 96-100.(in Chinese)
- [3] EBRAHIMKHANLOU A, SALAMONE S. Acoustic emission source localization in thin metallic plates: a single-sensor approach based on multimodal edge reflections[J]. *Ultrasonics*, 2017, 78: 134-145.
- [4] CUADRA J, VANNIAMPARAMBIL P A, SER-VANSKY D, et al. Acoustic emission source modeling using a data-driven approach[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 341: 222-236.
- [5] EBRAHIMKHANLOU A, SALAMONE S. Single-sensor acoustic emission source localization in plate structures using deep learning[J]. *Aerospace*, 2018, 5(2): 50.
- [6] MOSTAFAPOUR A, DAVOODI S, GHAREAGH-AJI M. Acoustic emission source location in plates using wavelet analysis and cross time frequency spectrum [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(8): 2055-2062.
- [7] 何田,肖登红,刘献栋,等. 基于近场波束形成法的声发射源定位研究[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(2): 199-205. HE Tian, XIAO Denghong, LIU Xiandong, et al. Research of acoustic emission source location based on near-field beamforming [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(2): 199-205.(in Chinese)
- [8] 严丹丹,苟林,岳林. 基于AIC信息准则的Delta T声发射源定位方法[J]. *机械制造与自动化*, 2020, 49(1): 188-191. YAN Dandan, GOU Lin, YUE Lin. Delta T acoustic emission source localization method based on akaike information criterion [J]. *Machine Building & Automation*, 2020, 49(1): 188-191.(in Chinese)
- [9] 刘增华,彭秋玲,李欣,等. 基于时间差映射方法的钢板声发射源定位[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(2): 475-485. LIU Zenghua, PENG Qiuling, LI Xin, et al. Acoustic emission source localization in steel plate based on time difference mapping method[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(2): 475-485.(in Chinese)
- [10] 李晶,邓艾东,杨勇,等. 近场子空间聚焦的碰摩故障声发射定位方法[J]. *声学学报*, 2017, 42(6): 703-712. LI Jing, DENG Aidong, YANG Yong, et al. Near field signal-subspace focusing model for rub-impact fault localization using acoustic emission data[J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(6): 703-712.(in Chinese)
- [11] 王少锋,刘朋真,王道瑞,等. 基于Morlet小波与模态分析的突发型声发射源定位研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(8): 1215-1219. WANG Shaofeng, LIU Pengzhen, WANG Daorui, et al. Study on the location of sudden acoustic emission sources based on Morlet wavelet and modal analysis[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(8): 1215-1219.(in Chinese)
- [12] 魏鑫成,黄丽霞,戴雪梅,等. 钛合金板裂纹损伤声发射源的信号特征分析[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(1): 1-6, 15. WEI Xincheng, HUANG Lixia, DAI Xuemei, et al. Signal characteristic analysis of acoustic emission source for crack damage of Titanium alloy plate [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2021, 40(1): 1-6, 15. (in Chinese)
- [13] 郝德琛,李华玲,黄晋英. 小波包分解和改进ResNet行星齿轮箱故障诊断方法[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(8): 116-119, 123. HAO Dechen, LI Hualing, HUANG Jinying. WPD and improved ResNet method for planetary gearbox fault diagnosis [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(8): 116-119, 123.(in Chinese)
- [14] 何鹏举,刘刚易,折廷廷. 单通道AE信号盲分离的飞机构件监测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 34-42. HE Pengju, LIU Gangyi, SHE Tingting. Research on monitoring of aircraft structural components based on blind separation of single channel AE signal [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 34-42. (in Chinese)
- [15] ZHOU Z, RUI Y, CAI X, et al. Constrained total least squares method using TDOA measurements for jointly estimating acoustic emission source and wave velocity [J]. *Measurement*, 2021, 182: 109758.
- [16] AKAIKE H. Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average processes [J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1974, 26(1): 363-387.
- [17] 秦鹏. Lamb波频散曲线快速计算与绘制[J]. *太原科技大学学报*, 2017, 38(4): 260-264. QIN Peng. Fast calculation and drawing of Lamb wave dispersion curves [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2017, 38(4): 260-264.(in Chinese)



**第一作者简介:**何鹏举,男,1961年10月生,博士、教授、硕士生导师。主要研究方向为声发射检测、网络化测控技术及信号处理。

E-mail: pengjuhe@163.com