

# 基于 AIC 信息准则的 Delta T 声发射源定位方法

严丹丹, 苟林, 岳林

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**疲劳断裂是金属结构中的主要失效形式,而金属结构中的早期疲劳断裂信号通常难以检测。TOA 方法是常用的声发射定位源方法,但是声波传播过程中波速变换和路径的复杂性对其结果影响很大。运用 Delta T 声发射源定位方法,用断铅实验模拟声发射源,用 AIC 信息准则对到达时间进行优化,通过使用差值求源点坐标和图像处理的方法,求得声发射源坐标。通过在平板上的实验,比较两种源定位方法在不同结构中的定位结果,分析定位误差,结果表明图像处理方法更为优秀。

**关键词:**声发射;源定位;AIC 信息准则

**中图分类号:**TB302.5 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)01-0188-04

## Delta T Acoustic Emission Source Localization Method Based on Akaike Information Criterion

YAN Dandan, GOU Lin, YUE Lin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210001, China)

**Abstract:** Fatigue fracture is the main failure mode in metal structures, it is difficult to detect early fatigue fracture signals in metal structures. The TOA method is an acoustic emission localization method commonly used, but the complexity of the wave velocity transformation and path in the acoustic wave propagation has a great influence on the result. This paper uses the Delta T acoustic emission source localization method to simulate the acoustic emission source by pencil lead breaking experiment, optimize the arrival time according to the AIC information criterion and find the source point coordinates by using the difference and image processing method. It also makes the experiments on the plates, compares the positioning results of two source positioning methods and analyzes the positioning errors. It comes to the conclusion that the image processing method is more excellent.

**Keywords:** acoustic emission; source localization; Akaike information criterion

## 0 引言

在结构的失效模式中,疲劳断裂是一种主要的失效类型。疲劳断裂是指由于各种原因,在循环载荷的作用下金属结构的疲劳强度降低,最终导致结构失效,而金属结构中的早期疲劳断裂信号通常难以检测。声发射(acoustic emission, AE)技术作为一项动态无损检测技术,能够有效检测材料中发生损伤(如裂纹扩展、纤维断裂)所发出的瞬时弹性波,以此预报可能发生的缺陷和故障的位置<sup>[1]</sup>。声发射是指受外力、内力或温度影响的材料或结构的局部区域发生塑性变形或裂纹产生时,引起能量释放和产生的瞬态弹性波。这些波可以使用压电传感器在结构的表面检测到,并可以用来检测裂纹。

传统的声发射源定位技术称之为 TOA 技术,该方法通过对源到传感器的所有路径上的恒定波速度进行假设,以及确定源到传感器传播路径进行检测,来计算出损伤源所在位置<sup>[2-3]</sup>。但是在实际应用中,由于复杂结构厚度不同,材料不同,结构中弹性波速度几乎不同,因此,采用 TOA 方法进行源位置计算将产生较大的误差。

为了克服复杂结构中源位置定位的困难,本文采用一

种新的 Delta T 方法<sup>[4]</sup>。与 Delta T 相比,其优势在于不需要考虑复杂结构中由于材料不同导致的波速不同。在 Delta T 方法实验中,将通过断铅实验<sup>[5-7]</sup>模拟声发射源。

本文将简单介绍 Delta T 方法如何获得声发射源,并采用 AIC 信息准则对所测得的到达时间进行优化。通过差值求源点法和图像处理的方法求声发射源,对两种方法所得的源位置坐标进行比较,判别其优劣。

## 1 源定位方法

### 1.1 TOA 方法

TOA 方法是一种常用的用于声发射源定位的方法。在这种方法中需要知道每个传感器所测得的 AE 信号的到达时间。如图 1 所示,已知 2 个传感器之间的距离是  $D$ ,由传感器 1、传感器 2 可测得 AE 源所发出信号的到达时间,可求得其到达时间差  $\Delta T$ 。此时需要假定结构中波的传播速度  $V$ ,由此可求得 AE 源距离 2 个传感器之间的距离差:

$$\Delta d = R - r = \Delta T \cdot V \quad (1)$$

由 2 个传感器可得 AE 源在如图 1 所示的一条线上,因此,需要至少 3 个传感器,组成 3 个传感器对,由所得的

双曲线相交可得源位置。

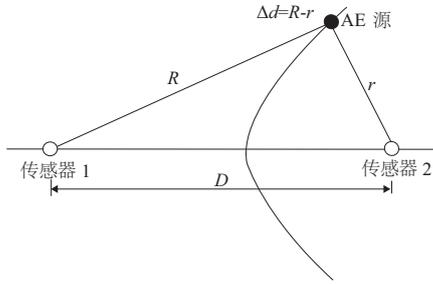


图 1 TOA 源定位方法

### 1.2 Delta T 方法

Delta T 方法是一种新型的声发射源定位方法。其定位方法分为以下几个步骤:

1) 确定实验区域:确定定位区域 Delta T 方法可用于局部定位。通过自由选定所测结构的部分区域,可对其进行网格划分后进行实验。

2) 构造网格:一旦确定了位置区域,就应在该区域构建电网。理论上,网络的分辨率越高,Delta T 方法的定位精度就越高,但是更高的网格分辨率会导致耗时更多。

3) 人工断铅以获得到达时间数据:断铅在网格中的节点处进行,以提供到达每个传感器的时间,不需要源的发生时间。每个节点处断铅 6 次,对所有采集到的到达时间进行 AIC 变化,去除误差比较大的数据,剩余数据进行平均。如果需要,可以在复杂区域中增加网格密度,缺少的数据点可以从周围区域中的节点插值。

4) 绘制 Delta T 图:在每个节点断铅后且在 AIC 变换后,获得相对每个传感器的优化到达时间,再计算时间差 ΔT(4 个传感器的阵列具有 6 个传感器对 1-2、1-3、1-4、2-3、2-4、3-4)。每个节点处的到达时间差 ΔT 平均值存储在每个传感器对的映射网格中,所得到的图可视为常数 ΔT 的轮廓线。每对传感器有一个 ΔT 值,在同一对传感器中每个点的 ΔT 值不同,就每对传感器的 ΔT 值建立一个模型,则一共有 6 个模型图。

5) 确定位置:获得实际 AE 数据,每个传感器对计算实际 AE 事件的 ΔT 值。可以在每个传感器对的网格图上识别与真实 AE 事件等效的恒定 ΔT 线。通过覆盖所得到的轮廓,可以找到指示源的收敛点。理论上,所有线将在一个位置相交。4 个传感器、6 组传感器对就会有 6 条线汇聚到一点。由于实际测量存在误差,所以并不会所有线都交于一点,但最终 6 条线会收敛于一点。

## 2 AIC 信息准则优化到达时间

### 2.1 AIC 信息准则

AIC (akaike information criterion) 信息准则即是衡量统计模型拟合优良性的一种标准。它建立在熵的概念基础上,可以权衡所估计模型的复杂度和此模型拟合数据的优良性<sup>[6]</sup>。在一般的情况下,AIC 可以表示为

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \tag{2}$$

其中  $k$  是统计模型中参数的数量, $L$  是估计模型似然函数的最大值。通常,具有最小 AIC 值的模型被认为是竞争模

型中最合适的模型。

### 2.2 AIC 优化到达时间

将声发射信号分为起始时间之前和之后的,是两个不同的平稳时间序列,将其整体时间序列表示为  $n$ ,将这  $n$  个点时间序列分为 mode1 和 mode2 两部分,其被分别定义具有最大似然估计的前一部分(从第 1 点到第  $k$  点)和后一部分(从  $k + 1$  到第  $n$  点),如图 2 所示。

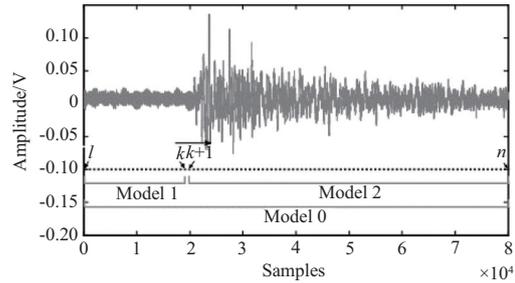


图 2 分离 AE 信号时间序列方法的图示

根据公式

$$AIC(k_w) = k_w \log(\text{var}(R_w(1, k_w))) + (n_w - k_w) \log(\text{var}(R_w(1 + k_w, n_w))) \tag{3}$$

对声发射信号进行处理,该 AIC 方程的全局最小值定义了 AE 信号的第一个 P 波起始时间,如图 3 所示。对采集得到的采样数据进行 AIC 处理,其 AIC 曲线的最小值则为对原始到达时间的修正数据。

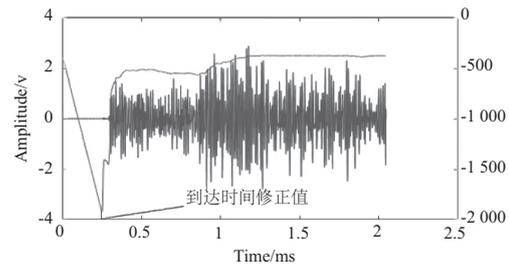


图 3 AIC 值仅用于表示信号的选定部分的开始时间

## 3 实验和结果

### 3.1 简单平板实验

使用 500 mm×500 mm×5 mm 的简单平板结构钢板,以板中间 350 mm×250 mm 区域作为实验区域,网格划分以及传感器位置如图 4 所示。

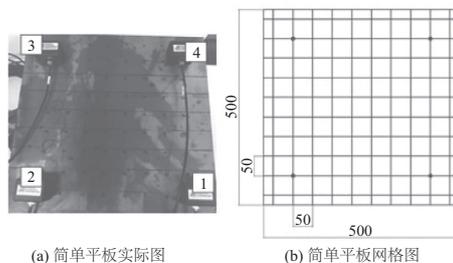


图 4 Delta 源定位方法实验简单平板

对所划分的网格一一进行断铅实验,每个传感器都能得到一系列相应的到达时间。根据上述所描述的 Delta T 实验步骤分别绘制 6 个传感器对的 Delta T 图和 AIC Delta T 图,如图 5 所示。

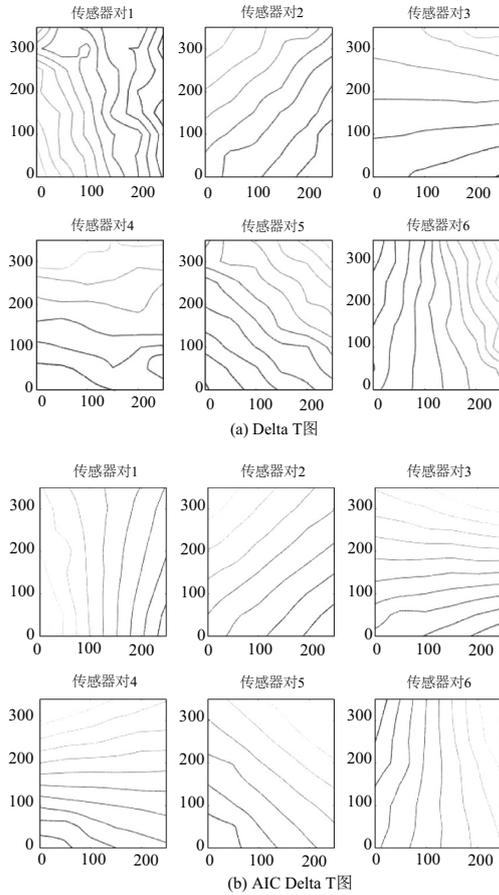


图 5 Delta T 和 AIC Delta T 图对比

由图 5 可知,一块简单平板的 Delta T 图,传感器对的模型应为双曲线,但是由于噪声及实验仪器的干扰,采集卡所获得的到达时间存在误差。由于这些到达时间所得到的 Delta T 图存在较大错误,经过 AIC 方法对到达时间进行优化,对得到的 AIC Delta T 图进行了较大的修正。再由所得到的 Delta T 图对 3 个点进行模拟实验,判断其准确性。模拟实验的 3 个点精确坐标为 (125, 275), (25, 225), (225, 225)。其测量结果如图 6 所示。图 7 为两种方法的定位结果的误差对比。

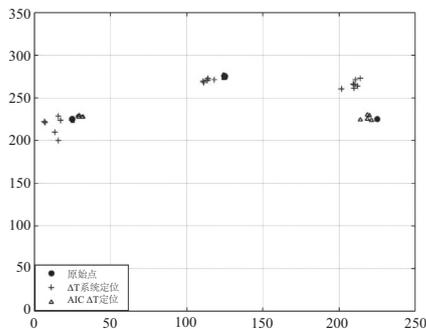


图 6 Delta T 方法与 AIC Delta T 方法定位结果

从图 7 可以看出,Delta T 的误差明显高于 AIC Delta T 方法所得到的结果。通过计算这些结果可得,其中 Delta T 方法的最大误差为 48.8 mm,最小误差为 7.8 mm,平均误差为 25.26m。AIC Delta T 方法的最大误差为 11.0 mm,最小误差为 0 mm,平均误差为 4.22 mm。很明显,AIC Delta T 法对普通 Delta T 方法有很大的改进,同时提高了实验过程中的容错率。

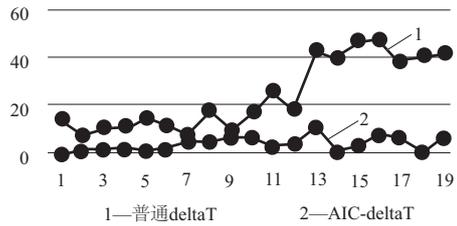


图 7 简单平板上 Delta T 图和 AIC Delta T 图定位结果误差对比

### 3.2 复杂平板实验

使用 500 mm×500 mm×5 mm 的简单平板结构钢板,网格划分以及传感器位置如图 8 所示。

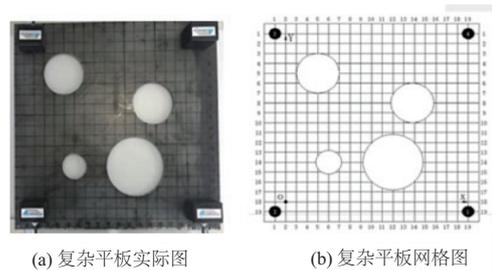


图 8 复杂平板 Delta 源定位方法实验

根据 DeltaT 方法对复杂平板中 (150, 375)、(100, 275)、(375, 175)、(120, 50)、(225, 25) 5 个点进行实验验证,得到的结果如图 9 所示。图 10 为两种定位结果的误差对比。

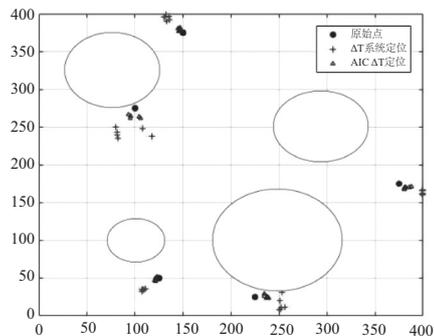


图 9 复杂平板上 Delta T 方法与 AIC Delta T 方法定位结果

从图 10 可以看出,Delta T 的误差明显高于 AIC Delta T 方法所得到的结果。通过计算这些结果可得,其中 Delta T 方法的最大误差为 43.7 mm,平均误差为 27.9 mm, AIC Delta T 方法的最大误差为 14.2 mm,平均误差为 8.74 mm。很明显,AIC Delta T 法对普通 Delta T 方法有很

大的改进,同时提高实验过程中的容错率。

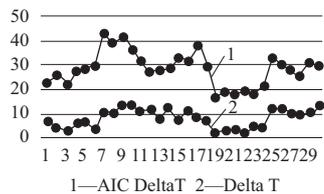


图 10 复杂平板上 Delta T 图和 AIC Delta T 图定位结果误差对比

### 3.3 图像处理

通过 AIC  $\Delta T$  值可得到 6 个模型图,将测试点所测得的 4 个传感器到达时间进行 AIC 变换后,可得到 4 个传感器得到修正后的到达时间,进行两两相减后可得到 6 个  $\Delta T$  值,分别带入 6 个模型图,6 组传感器对就会有 6 条线汇聚到一点。但由于实际测量存在误差,所以并不会所有线都交于一点,如图 11 所示。

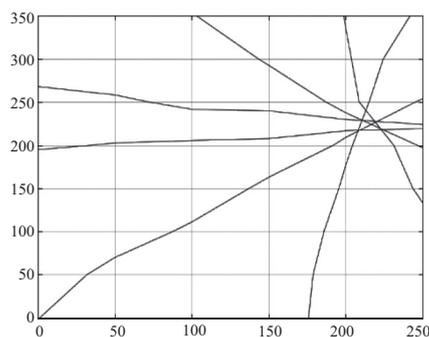


图 11 典型的  $\Delta T$  源定位图

为求取图 11 中 6 条线交点的最优解,先采用的是差值求平均值,即对所得的 6 条曲线进行线性插值,分别求出每两条曲线的交点,对所得的交点坐标进行平均,所得的坐标即为源坐标值。

另一种方法则是在得到该图片后,去掉坐标将其转化为灰度图,并将该灰度图进行二值化处理。对结果进行中值滤波,将 4 个角进行假值覆盖,即将 4 个角的 RGB 调为 (255,255,255),寻找图像中的种子图,并返回这些种子点坐标  $x, y$  的均值。根据等比例变换,将该像素图中的  $x, y$  值转化为坐标轴中相对应的坐标。

基于 AIC 方法优化到达时间后,用两种方法对上述 3 个点进行计算,所得的源坐标如图 12 所示。

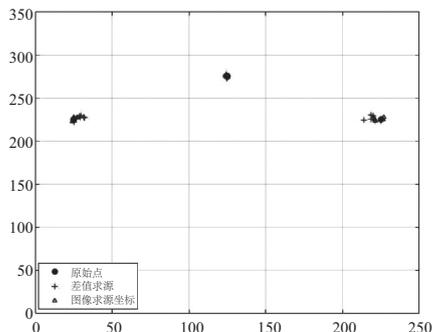


图 12 差值求解和图像求解结果

图 13 为两种求解法定位误差对比。从图 13 可以看出,图像求源法的最大误差为 5.25 mm,平均误差为 2.01 mm;差值求源法的最大误差为 11.00 mm,平均误差为 4.22 mm。同时图像求源在求得源坐标的过程中更为简便快速,适用于在网格数量更为密集,即分辨率更高的结构中。

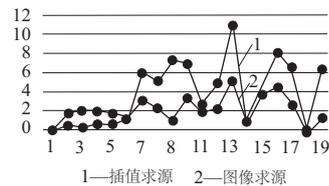


图 13 差值求解和图像求解定位误差对比

## 4 结语

声发射 (AE) 技术是一种新型的动态无损检测技术,具有广阔的应用前景。相较于传统且局限性较大的 TOA 方法,本文采用新的 Delta T AE 源定位方法来判断疲劳断裂早期源位置,并对作为 Delta T 方法重要参数的到达时间,采用 AIC 信息准则进行优化。通过两种方法对源位置计算结果的对比,得出结论如下:

- 1) 对于简单平板结构,采用 AIC 信息准则对到达时间进行优化后的 Delta T 方法源位置平均误差优于普通的 Delta T 方法,提高了容错率。
- 2) 对于复杂平板结构,采用 AIC 信息准则对到达时间进行优化后的 Delta T 方法源位置平均误差明显优于普通的 Delta T 方法。
- 3) Delta T 方法在进行源定位的计算过程中,图像求解与差值求解所得精度相差不大,但图像求解更为简便,更加适用于数据量大的计算。

### 参考文献:

- [1] 沈功田. 中国无损检测与评价技术的进展[J]. 无损检测, 2008, 30(11): 2-6.
- [2] AL JUMAILI, SAFAA Kh. Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique [J]. Mechanical Systems & Signal Processings, 2016(72/73): 513-524.
- [3] BAXTER M G, PULLIN R, HOLFORD K M, et al. Delta T source location for acoustic emission[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(3): 1512-1520.
- [4] HSU N N. Characterization and calibration of acoustic emission sensors[J]. Mater. Eval., 1981, 39: 60-68.
- [5] ASTM A. Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response [C] // American Society for Testing and Materials, 1994.
- [6] CARPINTERI A, XU J, LACIDOGNA G, et al. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(4): 529-537.
- [7] CARPINTERI A, XU J, LACIDOGNA G, et al. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(4): 529-537.