



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110376290 A  
(43)申请公布日 2019.10.25

(21)申请号 201910656557.3

(22)申请日 2019.07.19

(71)申请人 中南大学

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

(72)发明人 周子龙 芮艺超 周静 杜雪明  
臧海智 林成龙

(74)专利代理机构 长沙市融智专利事务所(普通合伙) 43114

代理人 杨萍

(51)Int.Cl.

G01N 29/14(2006.01)

G01N 29/44(2006.01)

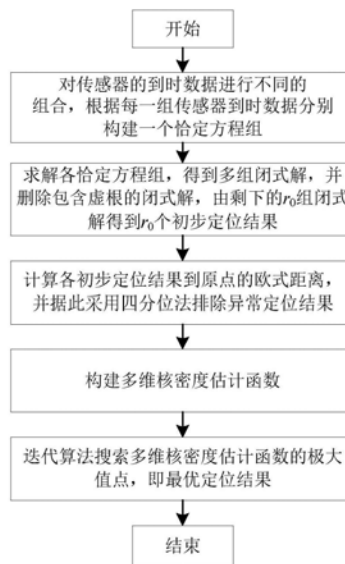
权利要求书2页 说明书10页 附图1页

(54)发明名称

基于多维核密度估计的声发射源定位方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于多维核密度估计的声发射源定位方法。首先,对声发射传感器的到时数据进行组合,得到多组到时数据;根据不同的到时数据组合构建相应的恰定方程组。求解各方程组,得到多组闭式解,筛除包含虚根的闭式解,可得到 $r_0$ 个初步定位结果。其次,排除初步定位结果中的异常定位结果,最终得到 $r$ 个初步定位结果。再次,利用 $r$ 个初步定位结果构建声发射源坐标  $\theta$  的多维核密度估计函数  $\hat{f}_H(\theta)$ 。最后,求多维核密度估计函数  $\hat{f}_H(\theta)$  的极大值点,该极大值点即为最优的声发射源定位结果。本发明方法定位精度高。



1. 一种基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1、对声发射检测系统中各声发射传感器的到时数据进行组合,得到多组到时数据;基于多组到时数据,求得多个初步定位结果;

步骤2、利用得到的多个初步定位结果,构建声发射源坐标 $\theta$ 的多维核密度估计函数 $\hat{f}_H(\theta)$ ;

步骤3、求多维核密度估计函数 $\hat{f}_H(\theta)$ 的极大值点,该极大值点即为最优的声发射源定位结果。

2. 根据权利要求1所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,所述步骤1中,根据每一组到时数据构建一个恰定方程组,恰定方程组中的未知数为声发射源的坐标、声发射信号传播介质的平均波速及声发射信号的触发时刻;分别求解各恰定方程组,得到多组闭式解,筛除包含虚根的闭式解,由剩下的 $r_0$ 组闭式解得到 $r_0$ 个初步定位结果。

3. 根据权利要求2所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,所述步骤1中,每组到时数据包括5个声发射传感器的到时数据;根据一组到时数据构建的恰定方程组为:

$$\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} = v(t_i - t), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

其中,  $(X, Y, Z)$  为声发射源的坐标,  $v$  为声发射信号传播介质的平均波速,  $t$  为声发射信号的触发时刻,  $v$  和  $t$  为未知数, 其余为已知;  $t_i$  为该组到时数据中的第  $i$  个到时数据,  $(x_i, y_i, z_i)$  为  $t_i$  对应的声发射传感器  $S_i$  的坐标。

4. 根据权利要求2所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,排除  $r_0$  个初步定位结果中的异常定位结果,最终得到  $r$  个初步定位结果。

5. 根据权利要求4所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,排除异常定位结果的方法为:首先对  $r_0$  个初步定位结果中的每一个初步定位结果,分别计算其到原点的欧氏距离;然后基于计算出的欧式距离,结合四分位法排除  $r_0$  个初步定位结果中的异常定位结果,最终得到  $r$  个初步定位结果。

6. 根据权利要求5所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,第  $j$  个初步定位结果到原点的欧氏距离为:

$$s_j = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}$$

其中,  $(X_j, Y_j, Z_j)$  为第  $j$  个初步定位结果,  $j = 1, 2, \dots, r_0$ 。

7. 根据权利要求6所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,基于计算出的欧式距离,结合四分位法排除  $r_0$  个初步定位结果中的异常定位结果具体为:若  $s_j > q_3 + 1.5(q_3 - q_1)$  或  $s_j < q_1 - 1.5(q_3 - q_1)$ , 则认为第  $j$  个初步定位结果为异常定位结果,予以排除;其中  $q_1$  为  $r_0$  个初步定位结果到原点的欧氏距离的第一四分位数,  $q_3$  为  $r_0$  个初步定位结果到原点的欧氏距离的第三四分位数。

8. 根据权利要求1所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法,其特征在于,所述步骤2中,多维核密度估计函数  $\hat{f}_H(\theta)$  具体表达形式如下:

$$\hat{f}(\theta) = \frac{1}{rh_1h_2h_3} \sum_{j=1}^r \prod_{d=1}^3 k\left(\frac{\theta_d - \theta_{j,d}}{h_d}\right)$$

其中,  $\theta = (X, Y, Z)$  为声发射源坐标;  $\theta_1, \theta_2$  和  $\theta_3$  分别表示  $X, Y$  和  $Z$ ;  $\theta_{j,1}, \theta_{j,2}$  和  $\theta_{j,3}$  分别表示  $X_j, Y_j$  和  $Z_j$ ;  $(X_j, Y_j, Z_j)$  为第  $j$  个初步定位结果,  $j=1, 2, \dots, r$ ,  $r$  为步骤 1 最终得到的初步定位结果的个数;  $d=1, 2, 3$  为变量  $\theta$  中的元素位置索引;  $k(\cdot)$  为核函数。

9. 根据权利要求 8 所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法, 其特征在于, 所述核函数采用标准正态分布的概率密度函数, 其表达式为:

$$k(\Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\Theta^2}$$

其中  $h_d$  为带宽, 具体表达形式为:

$$h_d = \sigma_d \left(\frac{4}{5r}\right)^{\frac{1}{7}}, \quad d=1, 2, 3$$

其中  $\sigma_d$  为尺度参数, 具体表达形式为:

$$\sigma_d = \frac{1}{0.6745} \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r [\theta_{j,d} - \text{med}(\theta_{j,d})]^2}, \quad d=1, 2, 3$$

其中  $\text{med}(\cdot)$  表示求取中位数。

10. 根据权利要求 8 所述的基于多维核密度估计的声发射源定位方法, 其特征在于, 所述步骤 3 中, 以多维核密度估计函数  $\hat{f}(\theta)$  为目标函数, 采用迭代方法搜索目标函数的极大值, 在搜索过程中, 将步骤 3 得到的  $r$  个初步定位结果的平均值当作初始的声发射源坐标  $(X, Y, Z)$ , 不断地修正  $(X, Y, Z)$  以找到最优的声发射源坐标, 当满足迭代终止条件时终止迭代, 最后一次修正的结果即为最优的声发射源坐标。

## 基于多维核密度估计的声发射源定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉一种基于多维核密度估计的声发射源定位方法。

### 技术背景

[0002] 声发射定位技术广泛应用于结构完整性监测,材料损伤机理研究、矿山风险预警等领域。但是由于复杂的实验条件以及嘈杂的施工环境,声发射检测(定位)过程中声发射传感器探测到的包含到时信息的声发射波形时常受到干扰信号的影响从而产生异常到时。此外,人为到时拾取的主观性,以及现存到时拾取算法的局限性,也使得获取的到时数据时常夹杂有异常数据。而且这些异常数据将会严重影响定位结果的准确性。为此,申请号为CN201510973875.4的发明专利提出了一种用于均匀速度场的信号源定位方法,该方法在异常值个数很少时可以得到较为理想的定位结果,但是当异常值个数较多时该方法定位失效的概率将大大增加。申请号为CN201610571666.1的发明专利提出了基于最小距离的微震或声发射异常到时数据识别方法,该方法在假设只有一个异常值存在的情况下,可以较好的确定异常到时数据。但是,现实工程环境下,是否包含异常值以及异常值的个数往往都是不能预先确定的。申请号为CN201610571029.4的发明专利进一步提出了一种微震或声发射异常到时的确定方法,使用Logistic概率分布确定异常值,该方法进一步提高了确定异常到时数据的准确性,但是该方法中初步定位结果的获取采用的是共轭梯度法或麦夸特法(迭代方法),这将大大降低计算的效率。此外,异常到时数据的判据难以准确的获取,以及由于环境噪音、异常到时的数量和大小的不同,使得初步定位结果的数据难以服从某一特定的分布,因此该方法对初步定位结果各个参数服从Logistic分布的假设并不合理,致使异常值的确定仍然存在较大的误差,进而影响后续声发射源坐标的计算精度。因此,对于包含异常到时数据的声发射源定位问题,仍然急需进一步的研究。

### 发明内容

[0003] 本发明所解决的技术问题是,针对现有声发射定位技术易受到异常到时数据影响的问题,提出一种基于多维核密度估计的声发射源定位方法,该方法易于实现、定位精度高。

[0004] 本发明所提供的技术方案为:

[0005] 一种基于多维核密度估计的声发射源定位方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤1、对声发射检测系统中各声发射传感器的到时数据进行组合,得到多组到时数据;基于多组到时数据,求得多个初步定位结果;

[0007] 步骤2、利用得到的多个初步定位结果,构建声发射源坐标 $\theta$ 的多维核密度估计函数 $\hat{f}_H(\theta)$ ;

[0008] 步骤3、求多维核密度估计函数 $\hat{f}_H(\theta)$ 的极大值点,该极大值点即为最优的声发射源定位结果。

[0009] 所述步骤1中,基于多组到时数据,求得多个初步定位结果的方法可以采用现有技术中公开的方法,如申请号为CN201610571666.1的发明专利中公开的解析定位算法或数值定位方法(该方法每次选用6个到时数获得一个定位结果),或CN201610571029.4的发明专利中公开的共轭梯度法或麦夸特法。

[0010] 进一步地,所述步骤1中,为减少计算量,提高计算效率,本发明还提供了一种获取初步定位结果的方法,即根据每一组到时数据构建一个恰定方程组,恰定方程组中的未知数为声发射源的坐标(X,Y,Z)、声发射信号传播介质的平均波速v及声发射信号的触发时刻t;分别求解各恰定方程组,得到多组闭式解,筛除包含虚根的闭式解,由剩下的r<sub>0</sub>组闭式解得到声发射源的r<sub>0</sub>个初步定位结果。

[0011] 进一步地,所述步骤1中,每组到时数据包括5个声发射传感器的到时数据;根据一组到时数据构建的恰定方程组为:

$$[0012] \quad \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} = v(t_i - t), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

[0013] 其中,(X,Y,Z)为声发射源的坐标,v为声发射信号传播介质的平均波速,t为声发射信号的触发时刻,v和t为未知数,其余为已知;t<sub>i</sub>为该组到时数据中的第i个到时数据,(x<sub>i</sub>,y<sub>i</sub>,z<sub>i</sub>)为t<sub>i</sub>对应的声发射传感器S<sub>i</sub>的坐标。

[0014] 进一步地,恰定方程组的闭式解为:

$$[0015] \quad \begin{cases} X = \frac{m_1 + n_1 \omega}{p} \\ Y = -\frac{m_2 + n_2 \omega}{p} \\ Z = \frac{m_3 + n_3 \omega}{p} \\ v = \sqrt{\omega} \end{cases}$$

[0016] 其中,

$$[0017] \quad p = a_3 b_4 c_5 - a_3 b_5 c_4 - a_4 b_3 c_5 + a_4 b_5 c_3 + a_5 b_3 c_4 - a_5 b_4 c_3$$

$$[0018] \quad \begin{cases} m_1 = b_3 c_4 e_5 - b_3 c_5 e_4 - b_4 c_3 e_5 + b_4 c_5 e_3 + b_5 c_3 e_4 - b_5 c_4 e_3 \\ m_2 = a_3 c_4 e_5 - a_3 c_5 e_4 - a_4 c_3 e_5 + a_4 c_5 e_3 + a_5 c_3 e_4 - a_5 c_4 e_3 \\ m_3 = a_3 b_4 e_5 - a_3 b_5 e_4 - a_4 b_3 e_5 + a_4 b_5 e_3 + a_5 b_3 e_4 - a_5 b_4 e_3 \end{cases}$$

$$[0019] \quad \begin{cases} n_1 = b_3 c_4 d_5 - b_3 c_5 d_4 - b_4 c_3 d_5 + b_4 c_5 d_3 + b_5 c_3 d_4 - b_5 c_4 d_3 \\ n_2 = a_3 c_4 d_5 - a_3 c_5 d_4 - a_4 c_3 d_5 + a_4 c_5 d_3 + a_5 c_3 d_4 - a_5 c_4 d_3 \\ n_3 = a_3 b_4 d_5 - a_3 b_5 d_4 - a_4 b_3 d_5 + a_4 b_5 d_3 + a_5 b_3 d_4 - a_5 b_4 d_3 \end{cases}$$

$$[0020] \quad \begin{cases} a_i = 2 \left( \frac{x_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{x_{2,1}}{t_{2,1}} \right) \\ b_i = 2 \left( \frac{y_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{y_{2,1}}{t_{2,1}} \right) \\ c_i = 2 \left( \frac{z_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{z_{2,1}}{t_{2,1}} \right), \quad i = 3, 4, 5, \\ d_i = -(t_{i,1} - t_{2,1}) \\ e_i = \frac{L_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{L_{2,1}}{t_{2,1}} \end{cases}, \quad \begin{cases} x_{i,1} = x_i - x_1 \\ y_{i,1} = y_i - y_1 \\ z_{i,1} = z_i - z_1 \\ t_{i,1} = t_i - t_1 \\ L_{i,1} = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \end{cases}, \quad i = 2, 3, 4, 5$$

[0021] 此外,未知参数 $\omega$ 可通过求解下列一元三次方程得到:

$$[0022] \quad A\omega^3 + B\omega^2 + C\omega + D = 0$$

[0023] 其中,A,B,C和D都为常数,他们的表达式为:

$$[0024] \quad A = -4 \frac{n_1^2}{p^2} - 4 \frac{n_2^2}{p^2} - 4 \frac{n_3^2}{p^2}$$

$$[0025] \quad B = Q_1^2 + 8 \frac{n_1}{p} \left( x_1 - \frac{m_1}{p} \right) - 8 \frac{n_2}{p} \left( y_1 + \frac{m_2}{p} \right) + 8 \frac{n_3}{p} \left( z_1 - \frac{m_3}{p} \right)$$

$$[0026] \quad C = -4 \left( x_1 - \frac{m_1}{p} \right)^2 - 4 \left( y_1 + \frac{m_2}{p} \right)^2 - 4 \left( z_1 - \frac{m_3}{p} \right)^2 - 2 \frac{Q_1 Q_2}{t_{2,1}}$$

$$[0027] \quad D = \frac{Q_2^2}{t_{2,1}^2}$$

[0028] 并且,

$$[0029] \quad Q_1 = t_{2,1} + \frac{2}{t_{2,1}} \left( \frac{n_1 x_{2,1}}{p} - \frac{n_2 y_{2,1}}{p} + \frac{n_3 z_{2,1}}{p} \right)$$

$$[0030] \quad Q_2 = L_{2,1} - 2 \frac{m_1 x_{2,1}}{p} + 2 \frac{m_2 y_{2,1}}{p} - \frac{2m_3 z_{2,1}}{p}$$

[0031] 其中, $m_i$  ( $i=1, 2, 3$ )、 $n_i$  ( $i=1, 2, 3$ )、 $w$ 、 $p$ 、 $a_i$  ( $i=3, 4, 5$ )、 $b_i$  ( $i=3, 4, 5$ )、 $c_i$  ( $i=3, 4, 5$ )、 $d_i$  ( $i=3, 4, 5$ )、 $e_i$  ( $i=3, 4, 5$ )、 $x_{i,1}$  ( $i=2, 3, 4, 5$ )、 $y_{i,1}$  ( $i=2, 3, 4, 5$ )、 $z_{i,1}$  ( $i=2, 3, 4, 5$ )、 $t_{i,1}$  ( $i=2, 3, 4, 5$ )、 $L_{i,1}$  ( $i=2, 3, 4, 5$ )、A、B、C、D、 $Q_1$ 、 $Q_2$ 均为中间变量。本发明不对声发射信号的触发时刻 $t$ 进行求解。

[0032] 进一步地,所述步骤3中,首先对步骤2得到每一个初步定位结果,分别计算其到原点的欧氏距离;然后基于计算出的欧式距离,结合四分位法排除 $r_0$ 个初步定位结果中的异常定位结果,最终得到 $r$ 个初步定位结果。

[0033] 进一步地,排除 $r_0$ 个初步定位结果中的异常定位结果,最终得到 $r$ 个初步定位结果。

[0034] 进一步地,排除异常定位结果的方法为:首先对 $r_0$ 个初步定位结果中的每一个初

步定位结果,分别计算其到原点的欧氏距离;然后基于计算出的欧式距离,结合四分位法排除 $r_0$ 个初步定位结果中的异常定位结果,最终得到 $r$ 个初步定位结果。

[0035] 进一步地,第 $j$ 个初步定位结果到原点的欧氏距离为:

$$[0036] \quad s_j = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}$$

[0037] 其中,  $(X_j, Y_j, Z_j)$  为第 $j$ 个初步定位结果,  $j=1, 2, \dots, r_0$ 。

[0038] 进一步地,基于计算出的欧式距离,结合四分位法排除 $r_0$ 个初步定位结果中的异常定位结果具体为:若 $s_j > q_3 + 1.5(q_3 - q_1)$  或  $s_j < q_1 - 1.5(q_3 - q_1)$ , 则认为第 $j$ 个初步定位结果为异常定位结果,予以排除;其中 $q_1$ 为 $r_0$ 个初步定位结果到原点的欧氏距离的第一四分位数, $q_3$ 为 $r_0$ 个初步定位结果到原点的欧氏距离的第三四分位数, $j=1, 2, \dots, r_0$ 。现有的四分位数位置确定方法有几种,本发明可采用其中任意一种四分位数位置确定方法。

[0039] 进一步地,所述步骤2中,声发射源坐标 $\theta$ 的多维(多元)核密度估计函数 $\hat{f}_H(\theta)$ 具体表达形式如下:

$$[0040] \quad \hat{f}(\theta) = \frac{1}{rh_1h_2h_3} \sum_{j=1}^r \prod_{d=1}^3 k\left(\frac{\theta_d - \theta_{j,d}}{h_d}\right)$$

[0041] 其中,  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3) = (X, Y, Z)$  是概率密度函数 $f(\theta)$ 的多元随机矢量,即声发射源坐标; $\theta_1, \theta_2$ 和 $\theta_3$ 分别表示 $X, Y$ 和 $Z$ ;  $\theta_{j,1}, \theta_{j,2}$ 和 $\theta_{j,3}$ 分别表示 $X_j, Y_j$ 和 $Z_j$ ;  $(\theta_{j,1}, \theta_{j,2}, \theta_{j,3}) = (X_j, Y_j, Z_j)$  是概率密度函数 $f(\theta)$ 的第 $j$ 个多元随机样本,即第 $j$ 个初步定位结果,  $j=1, 2, \dots, r$ ,  $r$ 为步骤1最终得到的初步定位结果的个数; $d=1, 2, 3$ 为为变量 $\theta$ 中的元素位置索引; $k(\cdot)$ 为核函数。

[0042] 进一步地,所述核函数采用标准正态分布的概率密度函数(在多维核密度估计中核函数取标准正态分布的概率密度函数,即进行正态信息扩散),其表达式为:

$$[0043] \quad k(\Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\Theta^2}$$

[0044] 其中 $h_d$ 为带宽,具体表达形式为:

$$[0045] \quad h_d = \sigma_d \left(\frac{4}{5r}\right)^{\frac{1}{7}}, \quad d=1, 2, 3$$

[0046] 其中 $\sigma_d$ 为尺度参数,具体表达形式为:

$$[0047] \quad \sigma_d = \frac{1}{0.6745} \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r [\theta_{j,d} - \text{med}(\theta_{j,d})]^2}, \quad d=1, 2, 3$$

[0048] 其中 $\text{med}(\cdot)$ 表示求取中位数。

[0049] 进一步地,所述步骤3中,以多维核密度估计函数 $\hat{f}_H(\theta)$ 为目标函数,采用迭代方法搜索目标函数的极大值,在搜索过程中,将步骤3得到的 $r$ 个初步定位结果的平均值当作初始的声发射源坐标 $(X, Y, Z)$ ,不断地修正 $(X, Y, Z)$ 以找到最优的声发射源坐标,当满足迭代终止条件时终止迭代,最后一次修正的结果即为最优的声发射源坐标。

[0050] 进一步地,所述迭代终止条件为:当相邻两次迭代计算得到的目标函数值的变化

量小于预设值,X、Y和Z修正的步长都小于预设值或者迭代次数超过预设值。

[0051] 有益效果:

[0052] 1) 本发明给出了恰定方程组下声发射源参数的闭式解,该方法不对触发时刻进行反演,每次使用五个到时数据进行定位,比传统方法少一个,减少了计算量,且每次定位的精度都能得到保证;

[0053] 2) 本发明通过四分位法排除初步定位结果中的异常定位结果,可以使得多维概率核密度函数的拟合更优,避免了过拟合现象;

[0054] 3) 本发明采用多维核密度估计没有利用初步定位结果数据分布的先验知识,也无需对数据分布进行任何附加的假定,而是从初步定位结果的数据本身出发,获得了更加准确的密度估计,避免了假设分布不合理造成的误差。该方法从非参估计的统计学角度保证了所得定位结果的准确性和鲁棒性,因此即使在严重到时拾取误差存在下,仍能取得较为理想的定位结果;

[0055] 4) 本发明采用了多维核密度估计模型,考虑了声发射参数X、Y和Z之间的相关性,准确性更高;

[0056] 5) 该方法将偏差不大的多个初步定位结果的平均值当作迭代初值,并采用迭代方法对多维核密度函数的极大值进行搜索,可以在避免搜索陷入局部最优的同时提高函数极值搜索的效率;

[0057] 6) 本发明方法与传统方法相比,稳定性非常显著,更加适用于现实的工程实践问题,较好的解决了声发射定位领域中到时数据包含异常值所导致的定位结果不稳定、定位精度低的技术问题。

## 附图说明

[0058] 图1是本发明实施例所述方法步骤流程图。

[0059] 图2为本发明实施例所述方法与其它方法定位结果对比图。

[0060] 具体实施方法

[0061] 预设一个声发射源坐标为S(110,160,180),该声源被坐标为A(0,0,0),B(300,0,0),C(300,300,0),D(0,300,0),E(0,0,300),F(300,0,300),G(300,300,300),H(0,300,300),I(300,150,150)的9个声发射传感器所包围。单位均为mm。波速未知。本次试验通过模拟的方法产生一组到时数据,在得到的到时数据中添加方差为 $0.2\mu\text{s}$ 的误差来模拟环境噪声对定位的影响,此外随机对一个到时数据添加 $\pm 5\mu\text{s}$ 的大误差,来模拟异常值的干扰。通过上述随机过程产生的一组到时数据为:38.38,42.90,40.89,50.75,53.10,53.13,55.27,59.41,61.55,单位 $\mu\text{s}$ 。

[0062] 以本例对本方法进行详细说明。为便于清楚说明问题,分为以下五个步骤阐述本发明的具体实施方法:

[0063] (1) 恰定方程组的闭式解:

[0064] 本例总共有9个到时数据,每次选择5个到时数据可构成一个恰定方程组,通过不同组合可以得到 $C_9^5 = 126$ 个恰定方程组,然后对每个恰定方程组分别求解,可以得到多组闭式解,排除存在虚根的闭式解,由剩下的 $r_0$ ( $r_0=83$ )组闭式解得到声发射源的 $r_0$ ( $r_0=83$ )个初步定位结果,如表1所示。本例仅展示选择到时数据为38.38,42.90,40.89,50.75和59.41



(单位 $\mu\text{s}$ )的构建的一个恰定方程组的闭式解的计算过程,过程如下

[0065] 首先由公式

$$[0066] \begin{cases} x_{i,1} = x_i - x_1 \\ y_{i,1} = y_i - y_1 \\ z_{i,1} = z_i - z_1 \\ t_{i,1} = t_i - t_1 \\ L_{i,1} = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \end{cases}, \quad i = 2, 3, 4, 5$$

[0067] 计算得到

$$[0068] \begin{cases} x_{2,1} = -0.3 \\ y_{2,1} = -0.15 \\ z_{2,1} = 0.15 \\ t_{2,1} = 2.51 \times 10^{-6} \\ L_{2,1} = -0.045 \end{cases}, \begin{cases} x_{3,1} = -0.3 \\ y_{3,1} = -0.15 \\ z_{3,1} = 0.15 \\ t_{3,1} = 2.51 \times 10^{-6} \\ L_{3,1} = -0.045 \end{cases}, \begin{cases} x_{4,1} = -0.3 \\ y_{4,1} = 0.15 \\ z_{4,1} = -0.15 \\ t_{4,1} = 12.38 \times 10^{-6} \\ L_{4,1} = -0.045 \end{cases}, \begin{cases} x_{5,1} = 0 \\ y_{5,1} = 0.15 \\ z_{5,1} = -0.15 \\ t_{5,1} = 21.03 \times 10^{-6} \\ L_{5,1} = 0.045 \end{cases}$$

[0069] 其次由公式

$$[0070] \begin{cases} a_i = 2 \left( \frac{x_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{x_{2,1}}{t_{2,1}} \right) \\ b_i = 2 \left( \frac{y_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{y_{2,1}}{t_{2,1}} \right) \\ c_i = 2 \left( \frac{z_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{z_{2,1}}{t_{2,1}} \right) \\ d_i = -(t_{i,1} - t_{2,1}) \\ e_i = \frac{L_{i,1}}{t_{i,1}} - \frac{L_{2,1}}{t_{2,1}} \end{cases}, \quad i = 3, 4, 5$$

[0071] 计算得到

$$[0072] \begin{cases} a_3 = -1.06 \times 10^5 \\ b_3 = -1.86 \times 10^5 \\ c_3 = 5.32 \times 10^4 \\ d_3 = 2.02 \times 10^{-6} \\ e_3 = -2.79 \times 10^4 \end{cases}, \begin{cases} a_4 = 8.41 \times 10^4 \\ b_4 = -4.20 \times 10^4 \\ c_4 = -9.05 \times 10^4 \\ d_4 = -7.85 \times 10^{-6} \\ e_4 = -1.35 \times 10^4 \end{cases}, \begin{cases} a_5 = 1.33 \times 10^5 \\ b_5 = -0.52 \times 10^5 \\ c_5 = -8.05 \times 10^4 \\ d_5 = -1.65 \times 10^{-5} \\ e_5 = -0.78 \times 10^4 \end{cases}$$

[0073] 进而可以计算出

$$[0074] p = a_3 b_4 c_5 - a_3 b_5 c_4 - a_4 b_3 c_5 + a_4 b_5 c_3 + a_5 b_3 c_4 - a_5 b_4 c_3 = 1.18 \times 10^{15}$$

$$[0075] \begin{cases} m_1 = b_3 c_4 e_5 - b_3 c_5 e_4 - b_4 c_3 e_5 + b_4 c_5 e_3 + b_5 c_3 e_4 - b_5 c_4 e_3 = 1.29 \times 10^{14} \\ m_2 = a_3 c_4 e_5 - a_3 c_5 e_4 - a_4 c_3 e_5 + a_4 c_5 e_3 + a_5 c_3 e_4 - a_5 c_4 e_3 = -1.65 \times 10^{14} \\ m_3 = a_3 b_4 e_5 - a_3 b_5 e_4 - a_4 b_3 e_5 + a_4 b_5 e_3 + a_5 b_3 e_4 - a_5 b_4 e_3 = 2.19 \times 10^{14} \end{cases}$$

$$[0076] \begin{cases} n_1 = b_3c_4d_5 - b_3c_5d_4 - b_4c_3d_5 + b_4c_5d_3 + b_5c_3d_4 - b_5c_4d_3 = -1.78 \times 10^5 \\ n_2 = a_3c_4d_5 - a_3c_5d_4 - a_4c_3d_5 + a_4c_5d_3 + a_5c_3d_4 - a_5c_4d_3 = -6.27 \times 10^4 \\ n_3 = a_3b_4d_5 - a_3b_5d_4 - a_4b_3d_5 + a_4b_5d_3 + a_5b_3d_4 - a_5b_4d_3 = -9.25 \times 10^4 \end{cases}$$

[0077] 此外,未知参数  $\omega$  可通过求解下列一元三次方程求得

$$[0078] A \omega^3 + B \omega^2 + C \omega + D = 0$$

[0079] 其中,系数A,B,C和D的具体表达式分别为

$$[0080] A = -4 \frac{n_1^2}{p^2} - 4 \frac{n_2^2}{p^2} - 4 \frac{n_3^2}{p^2} = -1.28 \times 10^{-19}$$

$$[0081] B = Q_1^2 + 8 \frac{n_1}{p} \left( x_1 - \frac{m_1}{p} \right) - 8 \frac{n_2}{p} \left( y_1 + \frac{m_2}{p} \right) + 8 \frac{n_3}{p} \left( z_1 - \frac{m_3}{p} \right) = 3.22 \times 10^{-10}$$

$$[0082] C = -4 \left( x_1 - \frac{m_1}{p} \right)^2 - 4 \left( y_1 + \frac{m_2}{p} \right)^2 - 4 \left( z_1 - \frac{m_3}{p} \right)^2 - 2 \frac{Q_1 Q_2}{t_{2,1}} = -2.79 \times 10^{-1}$$

$$[0083] D = \frac{Q_2^2}{t_{2,1}^2} = 7.81 \times 10^6$$

[0084] 并且,

$$[0085] Q_1 = t_{2,1} + \frac{2}{t_{2,1}} \left( \frac{n_1 x_{2,1}}{p} - \frac{n_2 y_{2,1}}{p} + \frac{n_3 z_{2,1}}{p} \right) = 2.29 \times 10^{-5}$$

$$[0086] Q_2 = L_{2,1} - 2 \frac{m_1 x_{2,1}}{p} + 2 \frac{m_2 y_{2,1}}{p} - \frac{2 m_3 z_{2,1}}{p} = 12.65 \times 10^{-3}$$

[0087] 经计算得到,排除虚根得到  $\omega$  的唯一实数解为  $2.90 \times 10^7$ 。

[0088] 最后由该恰定方程组可以求出声发射源的一个初步定位结果(声发射源坐标)为:

$$[0089] \begin{cases} X = \frac{m_1 + n_1 \omega}{p} = 105.28 \times 10^{-3} \\ Y = -\frac{m_2 + n_2 \omega}{p} = 142.16 \times 10^{-3} \\ Z = \frac{m_3 + n_3 \omega}{p} = 184.29 \times 10^{-3} \end{cases}$$

[0090] 表1:83组筛选后的定位结果

[0091]

序号 $j$	$X_j(\text{mm})$	$Y_j(\text{mm})$	$Z_j(\text{mm})$	$s_j$	序号 $j$	$X_j(\text{mm})$	$Y_j(\text{mm})$	$Z_j(\text{mm})$	$s_j$
1	104.86	142.26	183.77	254.96	43	104.91	162.06	203.38	280.41 排除
2	99.24	143.67	177.09	248.69 排除	44	92.99	159.44	178.62	256.85

[0092]

3	105.29	142.16	184.29	255.45		45	93.36	159.38	179.39	257.49	
4	99.50	143.60	177.39	248.98	排除	46	92.39	160.34	178.40	257.04	
5	110.01	143.08	196.76	267.00		47	92.99	160.42	179.59	258.14	
6	103.96	144.22	188.36	259.01		48	110.85	160.00	179.00	264.44	
7	119.96	141.25	210.81	280.68	排除	49	110.42	159.95	179.48	264.56	
8	110.35	143.02	197.24	267.46		50	110.73	160.03	179.56	264.79	
9	104.49	142.20	182.86	254.12		51	110.30	159.98	180.04	264.90	
10	109.80	143.05	196.23	266.50		52	134.93	153.95	72.39	217.13	排除
11	92.99	142.93	162.14	235.30	排除	53	110.73	159.56	179.10	264.19	
12	98.94	143.63	176.37	248.04	排除	54	109.98	159.48	179.93	264.39	
13	109.98	159.90	179.97	264.68		55	111.03	160.58	178.87	264.78	
14	110.19	159.97	180.16	264.93		56	110.73	160.67	180.20	265.60	
15	110.53	160.08	180.46	265.35		57	111.18	159.57	179.11	264.39	
16	110.26	159.99	180.22	265.02		58	110.43	159.48	179.94	264.59	
17	109.85	159.47	180.07	264.43		59	110.42	160.58	178.86	264.51	
18	109.80	159.30	180.10	264.33		60	110.12	160.66	180.17	265.33	
19	110.73	160.78	180.31	265.76		61	95.91	141.02	190.24	255.50	
20	112.31	163.14	180.76	268.15		62	90.40	142.74	181.67	248.09	排除
21	110.70	160.67	180.34	265.69		63	105.31	142.41	202.12	268.74	
22	109.98	159.44	180.44	264.71		64	101.08	162.34	186.40	267.05	
23	109.98	161.17	178.71	264.59		65	106.35	160.88	182.60	265.59	
24	110.36	160.41	179.93	265.12		66	104.30	161.57	184.43	266.45	
25	110.26	160.14	180.07	265.00		67	109.26	160.22	180.83	265.16	
26	110.25	160.62	179.59	264.97		68	127.96	155.77	168.24	262.57	
27	109.51	159.55	179.06	263.65		69	100.98	161.89	186.47	266.79	
28	109.80	159.48	179.92	264.31		70	108.77	159.76	180.85	264.69	
29	109.80	160.57	178.84	264.24		71	101.33	163.46	186.21	267.70	
30	110.61	160.66	180.19	265.55		72	109.96	160.89	180.82	265.84	
31	99.13	158.76	191.99	268.12		73	98.63	162.56	188.61	267.82	

[0093]

32	99.27	158.82	192.25	268.40		74	106.34	160.42	183.09	265.63
33	105.40	161.38	203.62	280.38	排除	75	106.37	161.71	181.76	265.52
34	105.14	161.27	203.12	279.85	排除	76	112.85	159.90	178.08	264.60
35	99.27	158.36	191.78	267.79		77	150.18	149.96	149.89	259.83
36	105.28	141.02	183.15	254.00		78	126.71	156.10	180.03	269.87
37	101.85	150.94	188.09	261.80		79	150.25	149.96	149.89	259.87
38	99.24	142.78	176.20	247.56	排除	80	128.18	155.71	166.03	261.23
39	105.41	162.12	204.37	281.36	排除	81	128.14	155.72	166.42	261.47
40	99.43	158.33	192.12	268.07		82	150.15	149.96	149.89	259.81
41	110.56	142.29	197.00	266.98		83	150.16	149.96	149.88	259.81
42	93.00	178.37	197.45	281.87	排除					

[0094] (2) 声发射源到原点的欧氏距离的计算

[0095] 根据公式

[0096] 
$$s_j = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}$$

[0097] 计算第j个初步定位结果到原点的欧式距离 $s_j$ ,具体计算结果如表1所示。

[0098] (3) 四分位法排除异常组别

[0099] 四分位法排除初步定位结果中异常定位结果的具体公式为:

[0100] 
$$\begin{cases} \text{排除, if } s_j > q_3 + 1.5(q_3 - q_1) \parallel s_j < q_1 - 1.5(q_3 - q_1) \\ \text{保留, else} \end{cases}, j = 1, 2, \dots, r_0$$

[0101] 其中 $q_1$ 为数据的第一四分位数, $q_3$ 为数据的第三四分位数。

[0102] 根据四分位法计算 $r_0$  ( $r_0=83$ ) 个初步定位结果到原点的欧式距离的第一四分位数和第三四分位数,他们分别为 $q_1=260.21 \times 10^3$ , $q_3=266.49 \times 10^3$ 。由此可得异常组别的判据为:

[0103] 
$$\begin{cases} \text{排除, if } s_j > 275.91 \times 10^3 \parallel s_j < 250.79 \times 10^3 \\ \text{保留, else} \end{cases}, j = 1, 2, \dots, r_0$$

[0104] 根据此判据排除了13组存在异常的组别,剩余 $r$  ( $r=70$ ) 个初步定位结果,具体结果如表1所示。

[0105] (4) 尺度参数的计算

[0106] 尺度参数 $\sigma_d$ 的具体表达形式为:

[0107] 
$$\sigma_d = \frac{1}{0.6745} \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r [\theta_{i,d} - med(\theta_{i,d})]^2}, d = 1, 2, 3$$

[0108] 其中 $r=70$ ,经计算可得:

[0109]  $\sigma_1=1.78 \times 10^{-3}, \sigma_2=1.49 \times 10^{-3}, \sigma_3=2.09 \times 10^{-3}$ 。

[0110] (5) 带宽矩阵的计算

[0111] 带宽矩阵H为对角矩阵,  $H^{1/2}$ 的主对角线的矢量元素可表示为:

$$[0112] \quad h_d = \sigma_d \left( \frac{4}{5r} \right)^{\frac{1}{7}}, \quad d=1,2,3$$

[0113] 根据步骤(4)计算出的正态尺度参数 $\sigma_d$ ,可以得到 $h_d$ 的各个元素分别为:

$$[0114] \quad h_1=9.39 \times 10^{-4}, h_2=7.86 \times 10^{-4}, h_3=11.04 \times 10^{-4}$$

[0115] (6) 构建多维核密度估计函数

[0116] 多维核密度估计函数 $\hat{f}_H(\theta)$ 为:

$$[0117] \quad \hat{f}(\theta) = \frac{1}{rh_1h_2h_3} \sum_{j=1}^r \prod_{d=1}^3 k\left(\frac{\theta_d - \theta_{j,d}}{h_d}\right)$$

[0118] 其中,核函数 $k(\cdot)$ 采用标准正态分布的概率密度函数,其表达式为:

$$[0119] \quad k(\Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\Theta^2}$$

[0120] 最终可以求得多维核密度估计函数的表达式为:

$$[0121] \quad \hat{f}_H(\theta) = 1.75 \times 10^7 \times \sum_{i=1}^r e^{-\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\theta_1 - \theta_{i1}}{9.39 \times 10^{-4}} \right)^2 + \left( \frac{\theta_2 - \theta_{i2}}{7.86 \times 10^{-4}} \right)^2 + \left( \frac{\theta_3 - \theta_{i3}}{11.04 \times 10^{-4}} \right)^2 \right]}$$

[0122] (7) 最优定位结果的计算

[0123] 采用迭代方法搜索多维核密度估计函数的极大值,在迭代搜索过程中,选择70组初始定位结果的平均值(110.38, 156.52, 180.68)(单位:mm)作为初始的声发射源坐标(X, Y, Z),不断的修正(X, Y, Z)以找到最优解,在搜索初期由于初始值与真实值偏差较大,因此X、Y和Z修正的步长较大;随着不断逼近真实值,X、Y和Z修正的步长就会越来越小,当相邻两次迭代计算得到的目标函数值的变化量小于 $10^{-6}$ ,或者声发射源坐标X、Y和Z修正的步长都小于 $10^{-6}$ m,或者迭代次数超过25次时,迭代终止。最后一次修正的结果(110.29 160.09 179.89)(单位:mm)即为最优的声发射源坐标,其与真实坐标S(110, 160, 180)(单位:mm)吻合较好,定位精度较高。

[0124] 本发明具有以下三点优势,(1)给出了恰定方程组下声发射源坐标的闭式解,定位时每次可以使用最少的到时数据,且无需对触发时刻进行反演,提高了计算效率。(2)采用多维核密度估计模型,考虑了参数之间的相关性优势;(3)采用无参估计,无需数据的先验知识,无需假设数据的先验分布,适用性更广,会更加准确。

[0125] 将本发明公开的新定位方法(New)分别与两步加权最小二乘法(2WLS),非迭代未知波速体系声发射源解析定位方法(NIUW),以及综合解析法(CAS)进行对比,定位结果如图2所示。由图可知本发明方法与传统方法相比具有更高的定位精度,可以较好的解决了声发射定位中到时拾取误差过大导致的定位结果不稳定、定位精度低的问题。

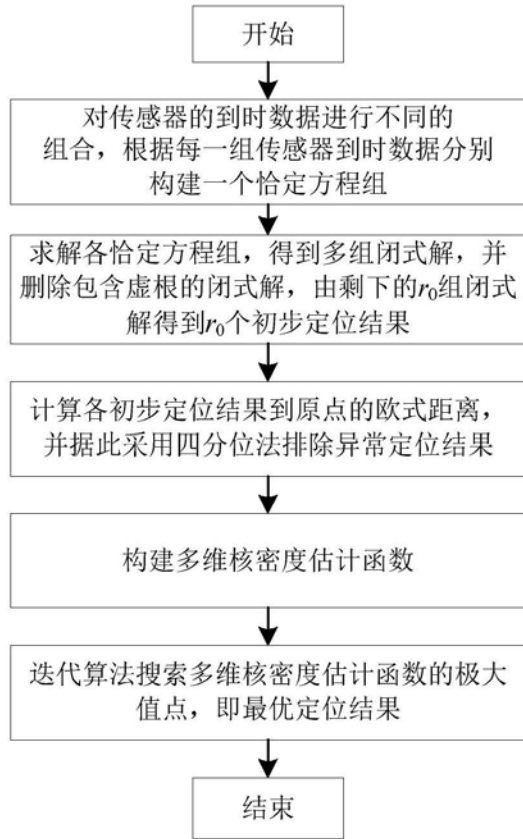


图1

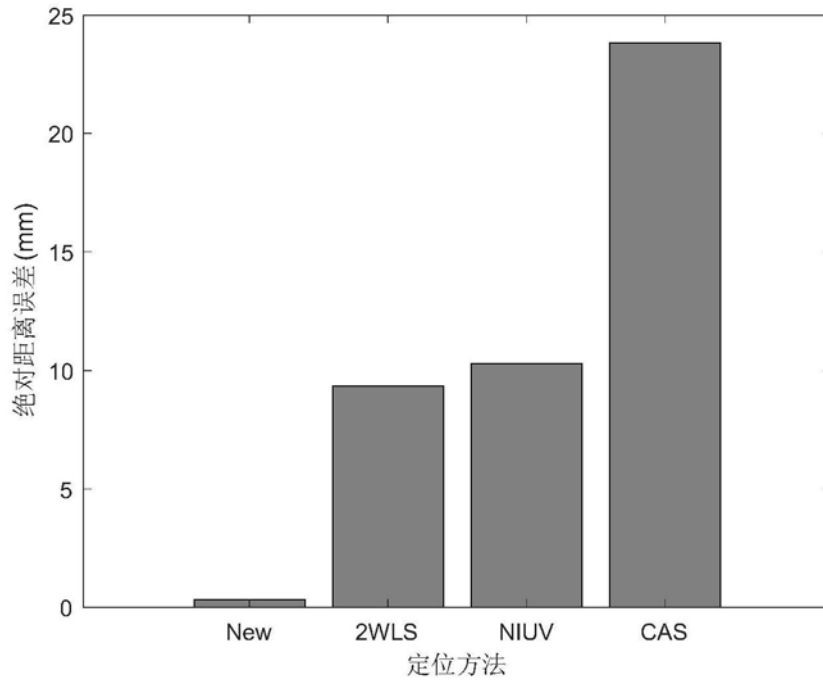


图2