

引用格式: 常亚琼, 徐晓萌, 赵文文, 等. 基于 Chan 与 Geiger 混合算法的声发射源定位方法[J]. 声学技术, 2020, 39(5): 632-637. [CHANG Yaqiong, XU Xiaomeng, ZHAO Wenwen, et al. Acoustic emission source location method with Chan and Geiger hybrid algorithm[J]. Technical Acoustics, 39(5): 632-637.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.05.018

基于 Chan 与 Geiger 混合算法的声发射源定位方法

常亚琼¹, 徐晓萌¹, 赵文文², 王智文³, 吕 辰¹

(1. 中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江杭州 310018; 2. 中国计量大学现代科技学院, 浙江杭州 310018;
3. 浙江省应急管理科学研究院, 浙江杭州 310012)

摘要: Geiger 定位算法是一种广泛应用的岩石损伤声发射源定位方法, 但该算法受初始值影响较大, 直接影响了算法的应用效果。文章充分挖掘 Chan 算法的特性, 提出了一种混合 Chan 与 Geiger 算法的优化算法, 利用 Chan 算法对损伤声源进行初始定位, 再融合 Geiger 算法进行迭代解算。通过数值计算和断铅实验对所提出的混合算法进行理论分析和实验验证, 结果表明: 该混合算法简便、易行、结果可靠, 能够有效提升声发射源定位算法的收敛速度和定位精度; 在传感器数量较少时, 该混合算法具有较强的适应性; 在布设 4 个单维传感器的条件下, Chan 与 Geiger 混合算法较最小二乘法与 Geiger 混合算法, 定位结果更加精确, 且迭代次数更少, 能有效提高计算效率。该研究对于提高岩石、混凝土材料的损伤定位和健康监测的测算精度以及工作效率具有一定的促进意义。

关键词: 声发射; 损伤定位; Geiger-Chan 混合算法; 断铅实验; 最小二乘法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-05-0632-06

Acoustic emission source location method with Chan and Geiger hybrid algorithm

CHANG Yaqiong¹, XU Xiaomeng¹, ZHAO Wenwen², WANG Zhiwen³, LYU Chen¹

(1. College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

2. College of Modern Science and Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

3. Zhejiang Academy of Emergency Management Sciences, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Geiger algorithm is a widely used method for locating acoustic emission sources of rock damage. However, the algorithm is greatly affected by the initial value, which directly affects the application effect of this algorithm. In this paper, by fully exploring the characteristics of the Chan algorithm, an optimization algorithm that combines the Chan and Geiger algorithms is proposed. The Chan algorithm is used to give an initial positioning result of the damage source, and the Geiger algorithm is then used to conduct iterative calculation. The theoretical analysis and experimental verification of the proposed hybrid algorithm are carried out through numerical calculations and lead-breaking experiments. The results show that: the proposed hybrid algorithm is simple, easy to implement, and reliable, and it can effectively improve the convergence speed and positioning accuracy of the source localization algorithm; when the number of sensors is small, the hybrid algorithm still has strong adaptability; with the deployment of four single-dimension sensors, the Chan and Geiger hybrid algorithm is more accurate than the least square method and Geiger hybrid algorithm in positioning results; moreover, the number of iterations is less, which indicates the improvement of the calculation efficiency. The study has certain promotion significance to improve the calculation accuracy and work efficiency of the damage location and health monitoring of rock and concrete materials.

Key words: acoustic emission; damage positioning; Geiger-Chan hybrid algorithm; lead-breaking experiment; least square method

0 引言

岩石内部微裂纹的萌生、发展是造成其失稳破

坏的直接原因, 也是大型基础工程发生安全事故的重要原因。声发射技术能够实时监测岩石、混凝土等脆性材料的健康状态, 还能通过声源定位技术反映材料内部裂纹发生、发展、贯通和破坏的完整过程。声发射损伤源的精确定位是研究岩石破坏过程和破坏机理的关键环节, 因而, 科学、合理地选用定位算法对于有效利用和发挥声发射技术的优势具有重要意义。

目前, 常规的声发射源定位算法包括: 时差定

收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51804287)资助项目。

作者简介: 常亚琼(1994—), 女, 河南巩义人, 硕士研究生, 研究方向为声发射技术。

通讯作者: 赵文文, E-mail: zhaowwsafety@cjlu.edu.cn

位法、最小二乘法、单纯形定位法、Geiger 定位法等^[1-4]。这些算法均能满足基本的定位需求，但面对当前日益复杂化的工程应用也暴露出了一些不足，如：时差定位法对波速依赖性较高，杆、板、壳等复杂结构的多模态及频散特性对其定位精度影响较大；最小二乘法在定位解算时一般会产生偏差；单纯形定位法迭代过程较为繁琐；Geiger 算法的定位精度取决于初始定位的准确程度。近年来，多算法相结合的定位应用可以有效结合各算法的优势，弥补短板，规避一些敏感因素，因此，引起了较多的关注和研究。

刘培涛等^[5]采用最小绝对偏差法弥补了最小二乘法在误差为非正态分布时的适用性，当数据中存在个别误差较大的离群点时，该方法的定位结果得到一定程度的提高；黄晓红等^[6-7]提出基于多次互相关求解平均值快速进入 Geiger 算法收敛范围的方法，减少迭代次数，使得定位精度整体上得到了提升；康玉梅等^[8]针对三维定位中初始值的选取对定位精度的影响，提出将最小二乘法与 Geiger 算法结合对声源进行定位，该算法能有效解决的初始值问题，提高收敛速度；刘建坡等^[9]就单纯形算法和 Geiger 算法进行对比，指出声发射事件较少时，单纯形算法较 Geiger 算法定位精确度高；刘建坡等^[10]采用单纯形定位算法对岩石破裂过程中的声发射时空演化规律进行了研究；杨道学等^[11]考虑岩石中波速的不确定性，提出基于粒子群优化的未知波速声发射定位算法，该算法较传统已知波速算法定位，精确度得到一定程度的提高。另外，部分学者还尝试优化信号处理方法以提升定位精度，如王宗炼等^[12]采用阈值法确定不同传感器接收的到达时间来提高定位精确度；焦敬品等^[13]利用 Gabor 小波变换在时频空间内确定特定频率和模态下传感器接收的到达时间和波速；袁梅等^[14]探究了小波变换的广义互相关时差定位算法；金中薇等^[15]基于广义互相关时延估计算法对声发射源进行定位；单亚峰等^[16]对非线性、高维的声发射事件数据，提出利用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的支持向量(support Vector Machines, SVM)理论对声发射事件进行预测。

以上分析表明，多算法的融合应用具有提高收敛速度和定位精度的作用，但仍存在理论和操作方面的不足，仍需要通过信号处理技术等手段辅助提升定位精度。基于此，本文提出一种 Chan 与 Geiger 混合算法对岩石的声发射源进行定位，以提升声发射源定位的精度和效率。研究对于提高岩石、混凝土材料的损伤定位、健康监测的测算精度和工作效

率具有一定的促进意义。

1 算法原理

1.1 岩石破坏声发射定位原理

岩石破裂过程声发射源的定位，主要通过岩石表面安装相应传感器，以获取到达时间和声速进行数据解算。就理论而言，通常至少需要 4 个一维传感器记录信息方可计算出声源的三维坐标。

设岩石内部破裂点的坐标为 (X, Y, Z) ，第 i 个传感器监测位置为 (x_i, y_i, z_i) ，声源到达第 i 个传感器的时间为 t_i ，岩石中的声速为 c ，则声源到传感器的距离为

$$\sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} = ct_i \quad (1)$$

直接将声发射仪测得的数据使用时差定位法进行解算，但得到的声源三维坐标误差通常较大。因而，一般将时差定位法得到的声源位置作为 Geiger 算法的初始值进行计算，以便减小误差。尽管如此，仍无法保证初始值的精确程度，当初始值与实际值偏差较大时，Geiger 算法收敛速度较慢，所以初始值的选取至关重要。

1.2 Chan 算法

在单次声发射事件过程中，可以得到 n 组声源到传感器的到达时间，将声源位置设为 (X, Y, Z) ，第 i 个传感器的位置为 (x_i, y_i, z_i) ，根据声源到传感器的到达时间和声速可以得到声源与传感器之间的距离方程：

$$R_i^2 = (x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2 = K_i - 2x_i X - 2y_i Y - 2z_i Z + R = (ct_i)^2 \quad (2)$$

其中： $K_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ ， $i=1, 2, 3, \dots, n$ ； $R = X^2 + Y^2 + Z^2$ 。

令 $\mathbf{Z}_a = [\mathbf{Z}_p^T \ R]^T$ 为未知向量，其中 $\mathbf{Z}_p = [X \ Y \ Z]^T$ ，根据式(2)建立以 \mathbf{Z}_a 为变量的线性方程：

$$h = G_a \mathbf{Z}_a \quad (3)$$

$$\text{式中：} h = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_1^2 - K_1 \\ R_2^2 - K_2 \\ \vdots \\ R_n^2 - K_n \end{bmatrix}, \quad G_a = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{bmatrix}.$$

在实际测量中，每个传感器与声源之间的距离可以计算得出，当误差较小时，可以构造协方差矩阵 Φ ：

$$\Phi = \mathbf{B}^T \mathbf{B} \quad (4)$$

式中： $\mathbf{B} = \text{diag}[R_1 \ R_2 \ \dots \ R_n]$ 。依据加权最小二乘法原理，可得：

$$\mathbf{Z}_a = (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\varphi}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\varphi}^{-1} \mathbf{h} \quad (5)$$

其中, \mathbf{Z}_a 为第一次估计值, 设定 $\mathbf{Z}_{a,i}$ 为 \mathbf{Z}_a 的第 i 个分量, 利用 \mathbf{Z}_a 重新构造 \mathbf{B}_1 矩阵进而得到新的协方差矩阵 $\boldsymbol{\varphi}_1$:

$$\mathbf{B}_1 = \text{diag}[\mathbf{Z}_{a,1} - x_1 \quad \mathbf{Z}_{a,2} - y_1 \quad \mathbf{Z}_{a,3} - z_1 \quad \mathbf{Z}_{a,4}] \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_1 = 4\mathbf{B}_1^T \mathbf{B}_1 \quad (7)$$

根据加权最小二乘法原理得第 2 次的估计值:

$$\mathbf{Z}'_a = (\mathbf{G}'_a{}^T \boldsymbol{\varphi}_1^{-1} \mathbf{G}'_a)^{-1} \mathbf{G}'_a{}^T \boldsymbol{\varphi}_1^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (8)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Z}'_a = \begin{bmatrix} (X-x_1)^2 \\ (Y-y_1)^2 \\ (Z-z_1)^2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}'_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{h}_1 = \begin{bmatrix} (\mathbf{Z}_{a,1} - x_1)^2 \\ (\mathbf{Z}_{a,2} - y_1)^2 \\ (\mathbf{Z}_{a,3} - z_1)^2 \\ \mathbf{Z}_{a,4}^2 \end{bmatrix}.$$

最终声源定位结果为

$$[X \ Y \ Z]^T = \pm \sqrt{\mathbf{Z}'_a} [x_1 \ y_1 \ z_1]^T \quad (9)$$

1.3 Geiger 算法

Geiger 算法的定位原理是通过一个给定的初始点多次迭代逐渐逼近声源实际位置, 本文的混合算法中, 初始点为式(9)得出的定位坐标, 在此基础上使用式(10)作为迭代方程, 进行定位解算。

$$v(t-t_i) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (10)$$

式中: (x, y, z) 为人为设定的声源坐标初始值; t 为事件发生时刻; t_i 代表第 i 个传感器接收到的时间。

对于纵波(简称 P 波)到达每个传感器的时间 t_{0i} , 其一阶泰勒展开式为

$$t_{0i} = t_{ci} + \frac{\partial t_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t_i}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial t_i}{\partial t} \Delta t \quad (11)$$

式中: t_{ci} 为计算得出的 P 波到达第 i 个传感器时间,

且 $\frac{\partial t_i}{\partial x} = \frac{(x_i - x)}{vR}$, $\frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{(y_i - y)}{vR}$, $\frac{\partial t_i}{\partial z} = \frac{(z_i - z)}{vR}$, $\frac{\partial t_i}{\partial t} = 1$,

$$R = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}.$$

对 n 个传感器, 由 $\mathbf{A} \Delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{B}$ 矩阵方程式表示, 其中:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x} & \frac{\partial t_1}{\partial y} & \frac{\partial t_1}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x} & \frac{\partial t_2}{\partial y} & \frac{\partial t_2}{\partial z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x} & \frac{\partial t_n}{\partial y} & \frac{\partial t_n}{\partial z} & 1 \end{pmatrix}, \quad \Delta \boldsymbol{\theta} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} t_{01} - t_{c1} \\ t_{02} - t_{c2} \\ \vdots \\ t_{0n} - t_{cn} \end{pmatrix}.$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \Delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (12)$$

$$\Delta \boldsymbol{\theta} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (13)$$

式(9)得到的声源点坐标用 $\boldsymbol{\theta}$ 表示, 且作为 Geiger 算法的初始点坐标, $\Delta \boldsymbol{\theta}$ 表示定位坐标与实际值的偏差, 随后, 将 $(\boldsymbol{\theta} + \Delta \boldsymbol{\theta})$ 作为新的声源点继续代入式(1)~(13), 进行迭代, 直至满足相关要求。

2 仿真计算及结果分析

为对所提出的混合算法进行验证, 使用 Matlab 软件进行建模分析和数值仿真。假定模拟试样的尺寸为 $0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$, 分别安装 3、4、8 个传感器进行定位, 传感器安装位置如表 1 所示, 其中 4 个传感器的布置方式和模拟声源点位置如图 1 所示。图 1 中, 设 O 点为三维坐标原点, 传感器直径设为 0.022 m , 声发射事件发生时间点为第 60 s, 发射源位置坐标为 $(0.070 \ 0, 0.070 \ 0, 0.020 \ 0)$ 。

表 1 各个传感器的位置坐标
Table 1 Position coordinates of each sensor

传感器数量	传感器序号	坐标/m
3	1	(0.000 0, 0.075 0, 0.075 0)
	2	(0.150 0, 0.075 0, 0.075 0)
	3	(0.075 0, 0.075 0, 0.150 0)
4	1	(0.031 0, 0.000 0, 0.011 0)
	2	(0.099 0, 0.000 0, 0.137 0)
	3	(0.099 0, 0.150 0, 0.011 0)
	4	(0.031 0, 0.150 0, 0.137 0)
8	1	(0.075 0, 0.000 0, 0.050 0)
	2	(0.075 0, 0.000 0, 0.100 0)
	3	(0.150 0, 0.075 0, 0.050 0)
	4	(0.150 0, 0.075 0, 0.100 0)
	5	(0.075 0, 0.150 0, 0.050 0)
	6	(0.075 0, 0.150 0, 0.100 0)
	7	(0.000 0, 0.075 0, 0.050 0)
	8	(0.000 0, 0.075 0, 0.100 0)

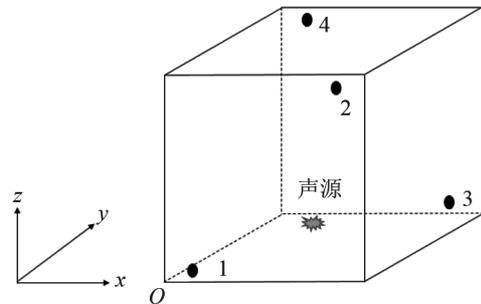


图 1 传感器布置方式及模拟声源位置
Fig.1 Sensor layout and simulated sound source location

假设混凝土内部颗粒均匀分布, 根据已知声源、传感器位置和波速大小, 即可得出一组理论到

达时间，作为定位解算的基础数据。为对定位结果进行多次验证，同时考虑岩石材料的非均质性和各向异性，因而传感器记录的声源到传感器的到达时间存在误差，所以在理论到达时间的基础上加入了 3 组随机误差，转化为含有随机误差的到达时间，具体见于表 2。

对表 2 中含有随机误差的 3 组到达时间运用最小二乘法与 Geiger 混合算法和 Chan 与 Geiger 混合算法对模拟声源位置进行定位。在这两种混合算法的基础上，在迭代 100 次的范围内，从中得到最小距离误差、定位结果及迭代次数，具体结果如表 3 所示。

由表 3 可知，基于 Chan 与 Geiger 混合算法的岩石声发射源定位结果较最小二乘法与 Geiger 混合算法定位结果更精确，且迭代次数较少。当传感器数量为 3 个时，Chan 与 Geiger 混合算法的迭代次数较最小二乘法与 Geiger 混合算法少，且两者之间距离误差相近；当传感器数量为 4 个和 8 个时，Chan 与 Geiger 混合算法较最小二乘法与 Geiger 混合算法，定位结果更精确，且两者迭代次数相同(8 个传感器时，运用最小二乘法与 Geiger 混合算法中的第 3 组数据除外)。在传感器数量大于等于 4 个时，Chan 与 Geiger 混合算法的定位结果更加准

确。根据表 3 中的 15 组数据发现，不管传感器的数量多少，测量的时间都存在误差且对定位结果影响较大，所以提高定位精确度可以从测量仪器和定位方法这两方面进行研究。

表 2 模拟声源到时理论数据和含随机误差的声源到时
Table 2 Theoretical arrival time data of simulated sound source and the arrival time with random errors

传感器数量	传感器序号	理论距离 D_1/m	理论时间 T/s	含误差到达时间 T_1/ms	含误差到达时间 T_2/ms	含误差到达时间 T_3/ms
3	1	0.089 2	0.019 21	0.023 40	0.021 51	0.020 89
	2	0.097 2	0.020 94	0.024 30	0.022 06	0.022 54
	3	0.130 2	0.028 05	0.034 86	0.034 72	0.032 28
4	1	0.080 6	0.017 37	0.021 92	0.022 33	0.026 78
	2	0.139 4	0.030 03	0.036 52	0.035 00	0.032 05
	3	0.085 6	0.018 44	0.022 27	0.020 66	0.026 55
	4	0.147 0	0.031 67	0.035 06	0.032 77	0.040 70
8	1	0.076 3	0.016 44	0.019 37	0.021 21	0.022 48
	2	0.106 4	0.022 93	0.030 18	0.030 83	0.025 97
	3	0.085 6	0.018 44	0.025 13	0.021 87	0.027 12
	4	0.113 2	0.024 40	0.030 70	0.028 28	0.029 88
	5	0.085 6	0.0184 4	0.026 45	0.020 62	0.023 04
	6	0.113 2	0.024 40	0.033 47	0.033 87	0.027 70
	7	0.076 3	0.016 44	0.025 66	0.020 68	0.018 50
	8	0.106 4	0.022 93	0.026 15	0.239 4	0.026 53

表 3 两种不同算法的定位结果比较
Table 3 Comparison between the positioning results of two different algorithms

传感器数量	算法	声源坐标/m	组数	声速/ ($m \cdot s^{-1}$)	迭代次数	定位坐标/m	距离误差/m
3	最小二乘法与 Geiger 混合算法	(0.070 0, 0.070 0, 0.020 0)	1	4 641.3	42	(0.073 1, 0.104 0, 0.023 9)	0.034 3
			2		1	(0.070 5, 0.012 4, 0.076 7)	0.100 0
			3		71	(0.069 6, 0.091 1, 0.074 8)	0.058 7
	Chan 与 Geiger 混合算法	(0.070 0, 0.070 0, 0.020 0)	1	4 641.3	30	(0.074 9, 0.096 2, 0.045 2)	0.036 7
			2		1	(0.069 2, 0.012 2, 0.076 6)	0.099 8
			3		50	(0.072 7, 0.088 4, 0.073 7)	0.056 9
4	最小二乘法与 Geiger 混合算法	(0.070 0, 0.070 0, 0.020 0)	1	4 641.3	1	(0.071 3, 0.069 9, 0.048 3)	0.028 3
			2		1	(0.067 1, 0.067 1, 0.051 2)	0.031 5
			3		1	(0.049 5, 0.078 1, 0.051 1)	0.038 1
	Chan 与 Geiger 混合算法	(0.070 0, 0.070 0, 0.020 0)	1	4 641.3	1	(0.070 2, 0.069 7, 0.012 0)	0.008 0
			2		1	(0.070 2, 0.070 7, 0.013 4)	0.006 7
			3		1	(0.071 0, 0.068 9, 0.015 9)	0.004 3
8	最小二乘法与 Geiger 混合	(0.070 0, 0.070 0, 0.020 0)	1	4 641.3	1	(0.074 1, 0.083 8, 0.067 3)	0.049 5
			2		1	(0.079 2, 0.073 2, 0.101 2)	0.081 8
			3		2	(0.094 3, 0.070 8, 0.045 3)	0.035 1
	Chan 与 Geiger 混合算法	(0.070 0, 0.070 0, 0.020 0)	1	4 641.3	1	(0.066 2, 0.065 1, 0.002 7)	0.018 4
			2		1	(0.069 6, 0.070 8, 0.037 9)	0.017 9
			3		1	(0.063 5, 0.068 8, 0.006 1)	0.015 4

3 实验验证

本次实验采用的是 PAC 公司的 Micro-II 型声发射检测仪。实验工况与仿真计算的设定均保持一致。测试使用 R6 α 型传感器(谐振频率为 50 kHz),前置放大器增益为 40 dB,采样频率为 1 MHz,门槛值设为 30 dB。实验待测样品为混凝土材料,尺寸大小为 0.15 m \times 0.15 m \times 0.15 m;传感器与样品表面通过凡士林充分耦合;混凝土样品与地面之间放置软泡沫,以避免无关声音和振动源的干扰。

实验按照“对角式”布局在混凝土表面布设了 4 个传感器(见图 2),各传感器具体位置见表 4。为有效规避声速对实验结果的影响,采用文献[17]中的相关方法,借助声发射仪对混凝土样品进行声速测定,多次测量后求得平均声速为 4 641.3 m \cdot s $^{-1}$ 。随后,使用“断铅法”进行测试,以断铅事件作为单次声发射事件,记录声源到达各传感器的到达时间。断铅处坐标点为(0.032 0, 0.080 0, 0.150 0),各到达时间如表 4 所示。运用混合算法在迭代 100 次范围内,得到最小距离误差、定位结果及迭代次数,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,在预设测试条件下,Chan 与 Geiger 混合算法较最小二乘法与 Geiger 混合算法声发射源定位结果更加准确,有效降低了距离误差,实验精度提高了约 69.5%。由此可见,实验结果与数值仿真结果具有较好的一致性,表明所提出的混合算法具有良好的适用性,特别在传感器数量较少情况下,Chan 与 Geiger 混合算法依然能够提供较高的定位精度和计算效率。



图 2 定位实验中的传感器布置方式
Fig.2 Sensor arrangement in positioning experiment

表 4 传感器的位置坐标及到达时间

传感器序号	位置/m	到达时间/ms
1	(0.031 0, 0.000 0, 0.011 0)	0.034 2
2	(0.099 0, 0.000 0, 0.137 0)	0.028 2
3	(0.099 0, 0.150 0, 0.011 0)	0.043 0
4	(0.031 0, 0.150 0, 0.137 0)	0.013 7

表 5 断铅试验中两种不同算法的声发射定位结果
Table 5 Acoustic emission positioning results of two different algorithms in the lead-breaking experiment

算法种类	断铅位置/ m	声速/ (m \cdot s $^{-1}$)	迭代 次数	定位结果/ m	距离误 差/m
最小二乘法与 Geiger 混合算法	(0.032 0, 0.080 0, 0.150 0)	4 641.3	1	(0.110 6, 0.099 9, 0.382 7)	0.246 0
Chan 与 Geiger 混合算法	(0.032 0, 0.080 0, 0.150 0)	4 641.3	1	(0.105 9, 0.080 7, 0.136 4)	0.075 1

4 结论

本文在系统调研岩石声发射声源定位方法的基础上,深入探讨了 Chan 算法和 Geiger 算法的工作原理,并提出一种基于 Chan 与 Geiger 混合算法的声源定位方法。在此基础上,对所给算法进行了数值仿真和实验验证,结果表明,在单一仿真声源和断铅实验条件下,Chan 与 Geiger 混合算法与其他算法相比具有迭代次数少、计算精度高等特点,特别是在传感器数量较少的情况下,依然保持较高的适用性。算法的提出能够有效改善原 Geiger 算法对初始值的依赖性较高而影响定位结果的不足,对于提升声发射源定位效果进而解释岩石、混凝土材料的破坏机理具有促进意义。

参 考 文 献

- [1] 张勋,熊庆国,蒋贤成. 矿山安全声发射实时监测系统的设计与实现[J]. 金属矿山, 2015(7): 119-122.
ZHANG Xun, XIONG Qingguo, JIANG Xiancheng. Design and Implementation of Acoustic Emission Real-time Monitoring System for the Mine Safety[J]. Metal Mine, 2015(7): 119-122.
- [2] 褚亮,任会兰,龙波,等. 陶瓷材料破坏过程中的声发射源定位方法[J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1828-1835.
CHU Liang, REN Huilan, LONG Bo, et al. Location of Acoustic Emission of Ceramics Fracturing[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(11): 1828-1835.
- [3] 王秀彦,郭文鑫,吴斌,等. 线性神经网络及模态声发射在时差定位中的应用[J]. 声学技术, 2010, 29(6): 569-572.
WANG Xiuyan, GUO Wenxin, WU Bin, et al. Linear neural network and modal acoustic emission in TDOA location[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(6): 569-572.
- [4] 邱兆云,潘一山,罗浩,等. 有效围压对煤体破裂声发射信号影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(4): 47-53.
QIU Zhaoyun, PAN Yishan, LUO Hao, et al. Study on influence of effective confining pressure on acoustic emission signal in coal fracture[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(4): 47-53.
- [5] 刘培洵,刘力强,黄元敏,等. 声发射定位的稳健算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2760-2764.
LIU Peixun, LIU Liqiang, HUANG Yuanmin, et al. Robust arithmetic for acoustic emission location[J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2760-2764.
- [6] 黄晓红, 孙国庆, 张凯月, 等. 基于多次互相关和 Geiger 算法的声发射源定位研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, **36**(7): 77-81.
HUANG Xiaohong, SUN Guoqing, ZHANG Kaiyue, et al. Research on source location of acoustic emission based on multiple cross correlation and Geiger algorithm[J]. Mining Research and Development, 2016, **36**(7): 77-81.
- [7] 黄晓红, 孙国庆, 张凯月. 全相位与 Geiger 算法的岩石声发射源定位方法[J]. 传感技术学报, 2016, **29**(11): 1705-1710.
HUANG Xiaohong, SUN Guoqing, ZHANG Kaiyue. Rock acoustic emission source localization method based on all phase and geiger algorithm[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, **29**(11): 1705-1710.
- [8] 康玉梅, 刘建坡, 李海滨, 等. 一类基于最小二乘法的声发射源组合定位算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, **31**(11): 1648-1651, 1656.
KANG Yumei, LIU Jianpo, LI Haibin, et al. An AE source location combination algorithm based on least square method[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2010, **31**(11): 1648-1651, 1656.
- [9] 刘建坡, 王洪勇, 杨宇江, 等. 不同岩石声发射定位算法及其实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, **30**(8): 1193-1196.
LIU Jianpo, WANG Hongyong, YANG Yujiang, et al. Experimental study on different rock locating algorithms with acoustic emission[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2009, **30**(8): 1193-1196.
- [10] 刘建坡, 徐世达, 李元辉, 等. 预制孔岩石破坏过程中的声发射时空演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(12): 2538-2547.
LIU Jianpo, XU Shida, LI Yuanhui, et al. Studies of ae time-space evolution characteristics during failure process of rock specimens with prefabricated holes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(12): 2538-2547.
- [11] 杨道学, 赵奎, 曾鹏, 等. 基于粒子群优化算法的未知波速声发射定位数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, **40**(S1): 494-502.
YANG Daoxue, ZHAO Kui, CENG Peng, et al. Numerical simulation of unknown wave velocity acoustic emission localization based on particle swarm optimization algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 494-502.
- [12] 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**(4): 226-232.
WANG Zonglian, REN Huilan, NING Jianguo. Acoustic emission source location based on wavelet transform de-noising[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, **37**(4): 226-232.
- [13] 焦敬品, 何存富, 吴斌, 等. 基于模态分析和小波变换的声发射源定位新算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(5): 482-485.
JIAO Jingpin, HE Cunfu, WU Bin, et al. A new acoustic emission source location technique based on wavelet transform and mode analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, **26**(5): 482-485.
- [14] 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 Mei, SHANG Fukai, DONG Shaopeng. Acoustic emission source location for composite plate based on empirical wavelet transform[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, **44**(7): 1395-1401.
- [15] 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 Zhongwei, JIANG Mingshun, SUI Qingmei, 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.
- [16] 单亚锋, 孙朋, 徐耀松, 等. 基于 PSO-SVM 的煤岩声发射源定位预测[J]. 传感技术学报, 2013, **26**(3): 402-406.
DAN Yafeng, SUN Peng, XU Yaosong, et al. Based on the PSO-SVM location prediction of coal rock acoustic emission source[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, **26**(3): 402-406.
- [17] 张维刚, 李凯丽, 肉孜麦麦提, 等. 金属薄板中导波的模态识别和波速测定[J]. 声学技术, 2015, **34**(4): 322-326.
ZHANG Weigang, LI Kaili, ROU Zimaimaiti, et al. Mode identification of guided wave and velocity measurement on a thin metal plate[J]. Technical Acoustics, 2015, **34**(4): 322-326.