

文章编号: 1001-4888(2024)02-0223-14

基于改进鲸鱼算法的声发射定位方法*

代树红¹, 郑昊¹, 柳凯², 张战军¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 阜新矿业(集团)有限责任公司 恒大煤矿, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为提高声发射源定位精度, 提出了一种改进鲸鱼算法, 并基于该算法生成了一种新的声发射源定位方法。该方法根据不同通道间的时间差建立基于最小二乘法原理的目标函数, 通过改进鲸鱼算法的搜索机制求解目标函数, 实现对声发射源的定位。为准确评估改进鲸鱼算法的定位精度, 开展了煤岩断铅实验和三点弯曲加载条件下 I 型断裂实验, 对比分析改进鲸鱼算法、鲸鱼优化算法、Geiger 算法和最小二乘法等 4 种定位算法的定位结果。结果表明: 改进鲸鱼算法相较其他定位算法具有更高的定位精度, 且累计有效声发射事件更集中于真实断裂过程区; 改进鲸鱼算法的各阶段声发射源定位结果与数字图像相关方法 (Digital Image Correlation, DIC) 观测结果具有一致性, 能够有效地反映试件内部裂纹萌生、扩展的动态演化过程。

关键词: 声发射; 定位算法; 鲸鱼优化算法; 断铅实验; I 型断裂实验

中图分类号: O348.8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-090

0 引言

煤岩材料是典型的非均匀材料, 内部包含微裂纹、孔洞、节理裂纹等多种缺陷^[1], 这些缺陷会因应力作用而逐渐扩展并连接成裂隙, 裂隙进一步扩展从而导致煤岩的破裂。声发射 (Acoustic Emission, AE) 技术可以实时监测煤岩内部微小破裂的产生与扩展, 并实现对破裂源的定位, 因此提高声发射源定位精度对研究煤岩破坏机理具有重要意义。

近年来, 大量学者对声发射源定位技术开展了分析研究, 康玉梅等^[2]将最小二乘法与 Geiger 算法组合, 通过数值仿真证明了该组合算法能够有效地提升算法收敛速度以及定位精度; 黄晓红等^[3]利用小波分解和全相位频谱分析, 结合相位差法获得精准时延, 实现了精确声发射定位; 常亚琼等^[4]提出一种 Chan 与 Geiger 混合优化算法, 相比最小二乘法与 Geiger 混合算法定位结果更加准确; 王宗炼等^[5]采用小波变换对声发射信号进行降噪处理, 再利用 Geiger 算法进行定位, 从而有效地提升了定位精度; 童国炜等^[6]在 Geiger 算法基础上, 融合牛顿梯度法和同伦算法形成了一种新的声发射源定位方法, 该方法能够有效地发挥 Geiger 算法迭代收敛的优势, 使定位精度显著提高; 赵兴东等^[7]采用 Geiger 算法对单轴压缩加载条件下不同预制裂纹岩样进行定位, 结果表明声发射事件的定位能很好地反映岩样内部裂纹扩展位置。但是, 上述常见的定位算法中, 最小二乘法不一定能取得最优解, Geiger 法和单纯形法等迭代算法若初值选择不当, 则会有定位效果不佳甚至定位错误等问题^[8], 因此都存在一定的局限性。随着依托于计算机技术的智能优化算法的发展, 将智能算法与声发射技术相结合, 可以极大地提升声发射定位的精度。吕进国等^[9]将模拟退火算法与单纯形法结合, 有效地提高了算法定位精度和收敛速度; 陈

* 收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U183920051); 辽宁省高等学校创新人才项目 (LR2019031); 辽宁省教育厅基础项目 (LJ2019JL006)

通信作者: 代树红 (1978-), 男, 教授, 博士生导师。主要从事实验力学及活动构造方面的研究工作。Email: dsh3000@126.com

炳瑞等^[10]利用粒子群算法,通过微震源定位分层方法,建立微震源位置和速度模型,有效地提高了微震定位精度;王剑锋等^[11]采用引力搜索法对微震源进行定位,并与粒子群算法和单纯形法定位结果进行比较,发现引力搜索法收敛效率以及定位精度更高;黄逸群等^[12]基于遗传算法,提出了一种用于估计混凝土声发射定位误差的定量估算模型,并通过数值分析验证了该算法模型的可靠性;李元辉等^[13]开发出一种基于粒子群算法的声发射源定位方法,该方法无需测试波速,也能实现较高精度的定位。近年来,越来越多的智能算法被开发出来,其中鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)具有易于实现、适用性强等优点,能够应用于各类优化问题^[14],在函数优化方面已被证明具有明显优于粒子群算法、引力搜索法和遗传算法的求解精度和收敛速度^[15]。

目前鲸鱼优化算法尚未应用于声发射技术领域,因此本文提出一种改进的鲸鱼算法(Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA),并基于该算法生成了一种新的声发射源定位方法。通过在煤岩试件上进行的一系列实验,对该方法的定位精度进行验证,并与WOA算法、Geiger算法、最小二乘法的定位效果进行比较,从而证明了IWOA算法在声发射源定位方面的可行性和有效性。

1 基于改进鲸鱼算法的声发射源定位方法

1.1 鲸鱼优化算法

MIRJALILI等^[16]于2016年提出了鲸鱼优化算法。该算法假设种群数量为 N ,搜索空间的维数为 k ,第 n 只鲸鱼个体在 k 维空间中的坐标表示为 $\mathbf{X}_n = (X_n^1, X_n^2, \dots, X_n^k)$, $n=1, 2, \dots, N$,种群中的每一头鲸鱼都代表着一个优化问题的可能解。WOA算法按照包围猎物、气泡网攻击、随机搜索3种优化机制,利用最初的一组随机可能解来确定全局最优解。

WOA算法原理如下:

(1) 包围猎物

假设目前最优鲸鱼位置为猎物位置,鲸鱼种群将按式(1)向最优鲸鱼个体靠拢。

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (2)$$

式中: t 为当前迭代次数; $\mathbf{X}^*(t)$ 为当前最优解的坐标向量; $\mathbf{X}(t)$ 为其他鲸鱼个体的坐标向量; \mathbf{D} 为鲸鱼个体和最优解之间的步长; \mathbf{A} 与 \mathbf{C} 为向量系数,用于控制鲸鱼的游走方式,由式(3)、式(4)确定:

$$\mathbf{A} = 2a\mathbf{r}_1 - \mathbf{a} \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = 2\mathbf{r}_2 \quad (4)$$

$$a = 2(1 - t/T_{\max}) \quad (5)$$

式中: r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机数; a 为收敛因子,随 t 的增大从2线性递减至0; T_{\max} 为最大迭代次数。

(2) 气泡网攻击

气泡网攻击是鲸鱼独特的觅食方式,WOA算法使用以下2种机制来模拟该行为。

收缩包围机制:算法在迭代过程中,系数 \mathbf{A} 是一个随机数,取值为 $[-a, a]$, a 的值随 t 的增大而减小,使得鲸鱼不断更新位置并接近猎物,直至完成包围。

螺旋更新位置机制:算法采用螺旋位置更新的方式,来更新鲸鱼个体的位置(式(6)):

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = |\mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (7)$$

式中: b 为常数,用于控制螺旋形状的大小; l 是一个随机数,取值为 $[-1, 1]$ 。

在模拟鲸鱼气泡网攻击时,采用收缩包围和螺旋更新位置2种机制的概率相同,利用随机数对2种机制进行选择,数学模型见式(8):

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}, & P < 0.5 \\ \mathbf{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(t), & P \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: P 是一个 $[0, 1]$ 间的随机数。

(3) 随机搜索

当系数 $|A| \geq 1$ 时, WOA 算法会进行随机搜索, 此时鲸鱼种群会根据周围个体的位置进行随机位置更新, 目的是增加搜索范围, 以保持种群的多样性, 数学模型见式(9)、式(10):

$$X(t+1) = X_{rand}(t) - A \cdot D \quad (9)$$

$$D = |C \cdot X_{rand}(t) - X(t)| \quad (10)$$

式中, X_{rand} 表示随机选取的鲸鱼个体的坐标向量。

1.2 改进的鲸鱼算法

由于鲸鱼优化算法可控参数较少, 因此一方面具有简单易用和适用范围广等优点, 但另一方面也具有收敛速度慢和收敛精度低等不足。为克服这些缺点, 本文采用非线性收敛因子代替原本的线性收敛因子, 增强算法的收敛精度; 并引入自适应权重来协调算法的全局搜索能力与局部开发能力; 在一次循环结束后对鲸鱼个体进行随机差分策略, 避免算法陷入局部最优。改进算法如下:

(1) 修改收敛因子 a , 见式(11):

$$a = 2 \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{T_{max}} \right)^{1-0.5 \sin^2 \left(\frac{\pi}{T_{max}} \right)} \right] \quad (11)$$

式中: t 是当前迭代次数; T_{max} 是最大迭代次数。

WOA 算法的全局探索能力主要受参数 A 的影响, 而影响 A 的参数是收敛因子 a 。原始 WOA 算法中 a 为线性收敛, 改进后使 a 随迭代次数的增加呈现出前期快速衰减、后期缓慢衰减的特点, 使算法在前期能够快速地收敛到最优解的搜索范围, 并在后期逐步缩小搜索范围, 从而显著提升算法前期收敛速度及后期局部收敛精度。

(2) 引入粒子群算法的自适应权重, 每只鲸鱼个体都要经过包围猎物、气泡网攻击、随机搜索阶段, 每个阶段对鲸鱼个体位置更新乘以权重值 ω , 根据迭代次数 t 构建的自适应惯性权重值见式(12):

$$\omega(t) = \left[1 - \sqrt{\frac{t}{T_{max}}} \right] e^{(-0.8 \frac{t}{T_{max}})} \quad (12)$$

由式(12)可见, 在前期全局搜索阶段权重值较大, 则调整位置更新的步长值较大, 算法的全局搜索能力得到增强, 而到了后期局部搜索阶段, 权重值越来越小并接近于零, 则算法的局部搜索能力不断增强。

引入权重值 ω 后的位置更新公式为

$$X(t+1) = \omega \cdot X^*(t) - A \cdot D \quad (13)$$

$$X(t+1) = \omega \cdot D \cdot e^{i\theta} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t) \quad (14)$$

$$X(t+1) = \omega \cdot X_{rand}(t) - A \cdot D \quad (15)$$

(3) 引入随机差分变异策略, 在迭代过程中将最优鲸鱼个体与种群中随机选择的鲸鱼个体进行差分操作, 避免算法陷入局部最优, 如式(16)所示:

$$X(t+1) = r_1 \cdot [X^* - X(t)] + r_2 \cdot (X_{rand} - X(t)) \quad (16)$$

1.3 目标函数

根据时差法原理构建目标函数, 通过 IWOA 算法的搜索机制求解该目标函数, 实现对声发射源的定位, 目标函数如下:

假设 AE 信号在试件内部传播速度为 v , (x_0, y_0, z_0) 为 AE 震源位置坐标, 共有 n 个传感器, 第 1 个传感器的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 该传感器到 AE 震源位置的最短距离 d_1 为

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (17)$$

则震源信号到达该传感器的最短传播时间 T_1 为

$$T_1 = t_1 - t_0 = d_1/v \quad (18)$$

式中: t_0 是震源发生的时间; t_1 为第 1 个传感器接收到信号的时间。

同理, 假设第 $i, j (i \neq j \neq 1)$ 个传感器的坐标分别为 $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j)$, 接收到震源信号的时间分别为 t_i, t_j , 则传感器 i, j 距离震源的最短距离 d_i, d_j 分别为

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (19)$$

$$d_j = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2} \quad (20)$$

震源信号到达传感器 i, j 的最短传播时间 T_i 和 T_j 为

$$T_i = t_i - t_0 = d_i/v \quad (21)$$

$$T_j = t_j - t_0 = d_j/v \quad (22)$$

将式(21)和式(22)分别与式(18)做差可得不同传感器之间收到信号的时延 t_{i1} 和 t_{j1} :

$$t_{i1} = t_i - t_1 = (d_i - d_1)/v \quad (23)$$

$$t_{j1} = t_j - t_1 = (d_j - d_1)/v \quad (24)$$

将式(23)与式(24)对比可得

$$\frac{t_{i1}}{t_{j1}} = \frac{d_i - d_1}{d_j - d_1} \quad (25)$$

利用最小二乘法拟合式(25)得目标函数为

$$f_{\min} = \sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^n \sqrt{\left[\frac{t_{i1}}{t_{j1}} - \frac{d_i - d_1}{d_j - d_1} \right]^2} \quad (26)$$

1.4 基于改进鲸鱼算法的声发射源定位方法

声发射源定位方法采用改进鲸鱼算法为寻优算法,以目标函数为寻优标准,从而实现对声发射源的定位,方法具体步骤如下:

步骤1:设置算法初始参数(搜索空间范围、最大迭代次数 T_{\max} 以及目标函数等),并在搜索空间内随机生成数量为 N 的鲸鱼种群。

步骤2:计算每一只鲸鱼个体的适应度值,记录最优个体的坐标向量和对应的适应度值。

步骤3:按式(11)更新 a 的值,按式(12)更新 ω ,产生一个 $[0, 1]$ 之间的随机数 p 。

步骤4:如果 $p < 0.5$, 且 $|A| < 1$ 时,按式(13)来更新个体位置;如果 $p < 0.5$, 且 $|A| \geq 1$ 时,按式(14)更新个体位置。

步骤5:如果 $p \geq 0.5$,按式(15)更新个体位置。

步骤6:再次计算种群中每个个体的适应度值,按式(16)对鲸鱼个体进行随机差分,并令 $t = t + 1$ 。

步骤7:判断 t 是否达到 T_{\max} ,是则退出循环,并输出全局最优解,否则返回步骤2继续循环。

2 声发射定位效果分析

为准确评估改进鲸鱼算法的定位精度,利用煤岩试件进行了断铅实验和 I 型断裂实验,对声发射信号进行采集、降噪、到时提取,根据不同传感器之间的时间差进行定位,并对定位结果进行分析。

2.1 实验系统

实验系统如图1所示。煤岩试件如图2所示,试件尺寸为 $30\text{mm} \times 220\text{mm} \times 50\text{mm}$,在试件中部预制一条长度为 10mm 的缺口,缺口与加载方向处于同一直线上。使用白喷漆将试件表面喷涂为白色并随机喷涂黑色斑点制作人工表面散斑场,选取该散斑场为 CCD 相机图像采集面,采用 Basler acA 1600-20gm CCD 相机观测试件表面散斑场,采集速率为每秒 15 帧,物面分辨率为 $0.0565\text{mm}/\text{pixel}$ 。实验采用电子万能试验机进行位移控制方式加载,加载速率为 $0.04\text{mm}/\text{min}$,通过北京软岛 DS5-16B 全信息声发射信号分析仪进行声发射信号采集,前置放大器增益值设为 40dB ,采样频率为 3MHz ,阈值值设为 100mV ,布置 10 个声发射探头在试件表面,坐标见表1,表面散斑场与探头布设位置如图3所示。实验测得煤岩试件的 P 波波速为 $1600\text{m}/\text{s}$ 。

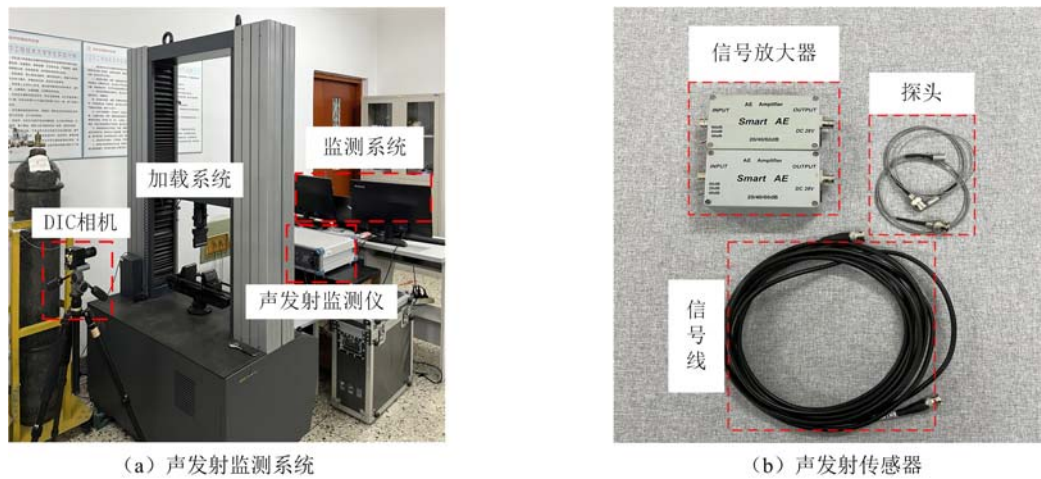


图 1 声发射实验系统

Fig. 1 Acoustic emission experimental system

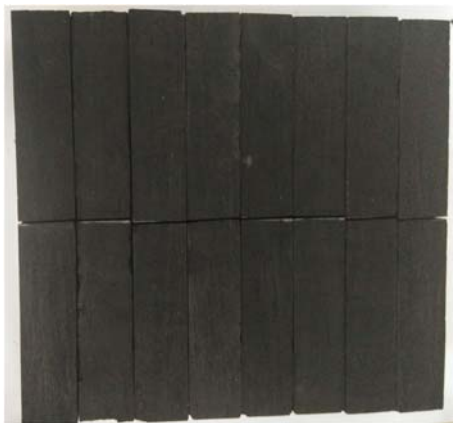


图 2 实验煤样

Fig. 2 Test coal sample

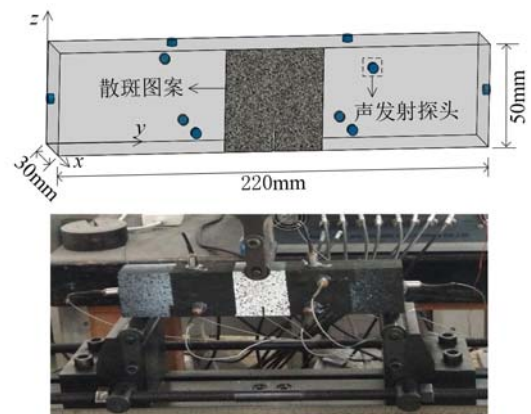


图 3 声发射传感器布置

Fig. 3 Acoustic emission sensor placement

表 1 声发射传感器坐标

Tab. 1 Acoustic emission sensor coordinates

传感器编号	x 坐标/mm	y 坐标/mm	z 坐标/mm
S1	30	150	40
S2	30	70	10
S3	30	160	10
S4	15	0	25
S5	15	220	25
S6	0	60	40
S7	0	70	10
S8	0	160	10
S9	15	70	50
S10	15	160	50

2.2 精度分析

为验证改进鲸鱼算法对于煤岩试件破裂产生声发射事件的定位精度,分别采用 IWOA 算法、WOA 算法、Geiger 算法和最小二乘法(Least Squares Method, LS)对断铅信号进行定位。断铅实验中的 7 个断铅点位置见表 2。

表 2 断铅位置坐标

Tab. 2 Coordinates of broken pencil-lead coordinates

断铅点编号	x 坐标/mm	y 坐标/mm	z 坐标/mm
P1	15	110	50
P2	30	110	30
P3	30	130	10
P4	0	110	25
P5	0	130	10
P6	0	90	40
P7	0	140	40

在采集 AE 信号时,通常会受到大量随机噪声的干扰,直接对原始信号进行到时提取会产生较大误差,为保证分析结果的准确性,必须要对其进行降噪处理^[17]。因此使用 sym8 小波基对原始信号进行多层次小波分解,保留其低频成分,对高频成分进行阈值设置处理,再进行信号重构,重构后的信号可被认为是降噪后的真实 AE 信号,图 4 为断铅信号 P4 第 1 通道原始信号图与小波降噪处理后的信号图。

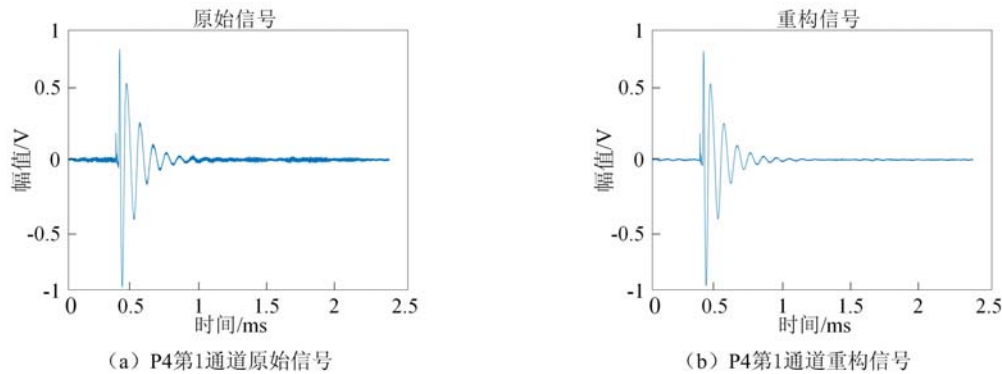


图 4 声发射信号降噪

Fig. 4 Noise reduction of acoustic emission signals

本文采用 STA/LTA 算法进行 AE 信号 P 波初至时刻拾取^[18]。STA 主要反映声发射信号能量水平的平均值,LTA 主要反映噪声信号能量水平的平均值,threshold 为两者的比值,STA 会比 LTA 先到达 AE 信号,因此两者比值会发生突变,突变值在某一时刻高于设置的阈值时,即可判定该时刻为 P 波到达时间。STA/LTA 算法的计算过程如式(27)~(29)所示:

$$\text{STA}(i) = \frac{1}{ds} \sum_i^{ds} X(i) \quad (27)$$

$$\text{LTA}(i) = \frac{1}{cs} \sum_i^{cs} X(i) \quad (28)$$

$$\text{threshold} = \frac{\text{STA}(i)}{\text{LTA}(i)} \quad (29)$$

式中:ds 为短时窗的长度;cs 为长时窗的长度;STA 为短时窗的均值;LTA 为长时窗的均值;X(i) 为声发射数据。

以断铅信号 P1 与 P3 为例,利用 sym8 小波基对声发射信号进行分解和重构后再利用 STA/LTA 算法进行 P 波到时拾取,拾取结果如图 5 与图 6 所示,对拾取的到时进行计算,求得断铅 P1 信号第 1 和

第 2 通道的时间差 t_{21} 为 $15.7\mu\text{s}$, 断铅 P3 信号第 1 和第 10 通道时间差 t_{101} 为 $13.0\mu\text{s}$ 。同理求得其他断铅信号 P 波到时时间差, 见表 3。

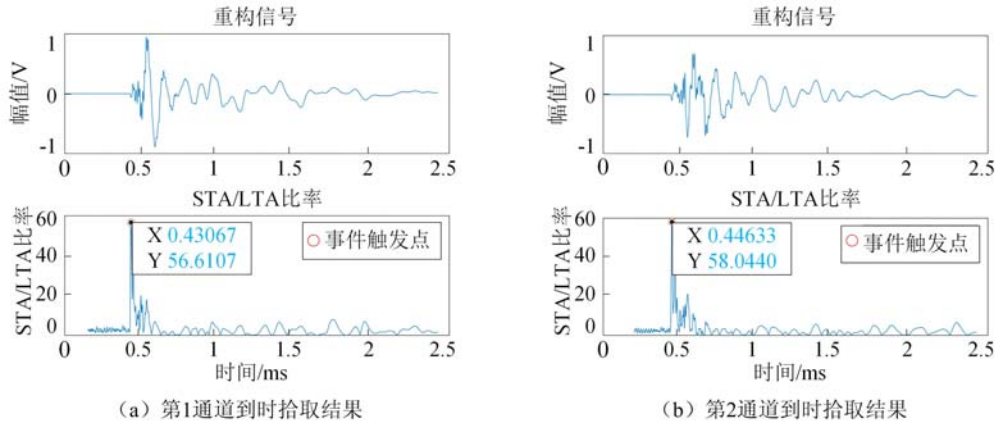


图 5 P1 信号波形和到时提取

Fig. 5 P1 signal waveform and arrival time extraction

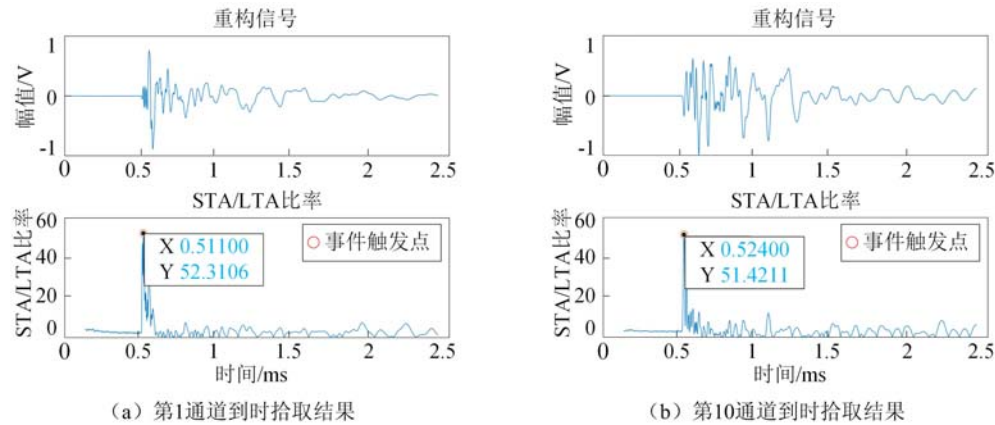


图 6 P3 信号波形和到时提取

Fig. 6 P3 signal waveform and arrival time extraction

表 3 P 波到时时间差

Tab. 3 The arrival time difference of P wave

断铅点编号	坐标/mm	到时时间差/ μs								
		t_{21}	t_{31}	t_{41}	t_{51}	t_{61}	t_{71}	t_{81}	t_{91}	t_{101}
P1	(15,110,50)	15.7	32.6	59.6	49.0	14.6	18.6	13.3	4.0	3.6
P2	(30,110,30)	6.3	25.6	66.3	70.3	19.6	9.3	26.1	12.6	22.0
P3	(30,130,10)	52.0	-3.7	143.0	46.3	74.3	57.3	12.3	56.7	13.0
P4	(0,110,25)	2.1	-0.3	38.7	42.7	-3.6	-5.3	-3.6	-4.0	-7.6
P5	(0,130,10)	19.8	-4.5	80.3	33.7	25.6	6.6	-23.4	12.6	1.3
P6	(0,90,40)	-86.7	32.5	-54.6	53.0	-90.0	-99.7	-6.6	-117.6	-29.6
P7	(0,140,40)	67.6	5.3	91.3	47.3	52.9	27.0	2.0	51.9	-10.7

根据式(19)与式(23)可以求得 7 个断铅信号各通道相对于通道 1 的理论时间差, 见表 4。舍去误差较大的断铅点 P6, P 波到时时间差与理论时间差之间的平均绝对误差为 $10.38\mu\text{s}$ 。P 波到时时间差与理论时间差的绝对误差值如图 7 所示。

表 4 理论到时时间差
Tab. 4 Theoretical time difference

断铅点编号	坐标/mm	理论时差/ μs								
		T_{21}	T_{31}	T_{41}	T_{51}	T_{61}	T_{71}	T_{81}	T_{91}	T_{101}
P1	(15,110,50)	9.2	13.7	43.1	43.1	5.8	9.2	13.7	-2.4	3.8
P2	(30,110,30)	2.2	7.9	43.7	43.7	11.2	7.9	12.8	3.7	9.2
P3	(30,130,10)	15.0	-3.8	59.8	35.3	28.6	19.4	4.0	23.5	10.1
P4	(0,110,25)	0	5.0	36.8	36.8	0	-5.9	0	-1.7	3.5
P5	(0,130,10)	12.6	-2.8	53.0	28.5	18.3	8.2	-10.6	16.7	3.3
P6	(0,90,40)	-12.6	9.2	15.9	40.2	-23.2	-19.4	5.8	-25.1	3.3
P7	(0,140,40)	31.4	9.6	68.7	32.0	30.2	27.8	2.8	25.4	-2.9

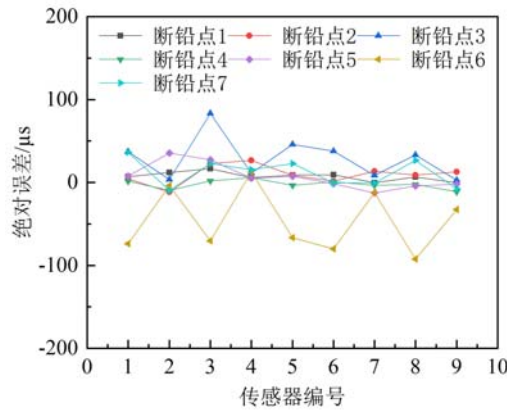


图 7 各时间差的绝对误差比较

Fig. 7 The absolute error comparison of each time difference

基于表 3 中断铅信号各通道与第 1 通道之间的时间差,使用改进鲸鱼算法(IWOA)、鲸鱼优化算法(WOA)、Geiger 算法和最小二乘法(LS)对声发射破裂源位置进行定位。4 种算法的定位结果和误差分析见表 5 与表 6。

表 5 不同算法定位结果
Tab. 5 The location results of each algorithm

编号	定位结果/mm			
	IWOA	WOA	Geiger	LS
P1	(14.64,112.25,49.84)	(15.27,112.76,49.82)	(19.32,115.27,46.92)	(20.30,118.27,54.01)
P2	(28.91,117.64,34.07)	(27.20,117.21,34.42)	(40.32,121.40,34.65)	(39.23,128.86,36.11)
P3	(29.98,137.27,8.46)	(29.69,137.13,8.50)	(23.47,121.46,14.49)	(25.25,121.85,11.98)
P4	(1.17,112.68,24.11)	(2.32,112.47,23.26)	(5.11,118.65,27.17)	(5.47,98.87,30.45)
P5	(0.34,129.10,12.40)	(0.42,128.78,12.05)	(-4.32,139.18,11.86)	(-7.03,144.69,13.63)
P6	(2.70,86.97,35.89)	(2.89,85.26,36.56)	(6.78,81.83,36.89)	(10.15,83.48,14.14)
P7	(1.19,142.05,45.29)	(1.76,143.36,44.86)	(-4.25,123.58,38.50)	(1.20,131.39,34.78)

表 6 不同算法的定位误差分析
Tab. 6 The location error analysis of each algorithm

编号	误差/mm				IWOA 相对提高精度/%			
	IWOA	WOA	Geiger	LS	WOA	Geiger	LS	
P1	0.92	1.07	4.19	5.86	14.01	78.04	84.30	
P2	4.27	4.81	8.79	11.40	11.23	51.42	62.54	
P3	2.94	2.98	6.52	4.96	1.34	54.91	40.73	
P4	1.58	2.25	5.31	7.35	29.78	70.24	78.50	
P5	1.21	1.23	5.12	8.45	1.63	76.37	85.68	
P6	3.28	3.69	6.02	10.27	11.11	45.52	68.06	
P7	2.84	3.42	7.39	5.01	16.96	61.57	43.31	
均差	2.43	2.78	6.19	7.61	12.59	60.74	68.07	

由表 6 可知, IWOA 算法对 7 个声发射事件的定位均取得了较为理想的结果。4 种算法的定位平均绝对误差分别为 2.43mm、2.78mm、6.19mm、7.61mm, IWOA 算法相较于其他 3 种算法定位平均绝对误差分别提高了 12.59%、60.74%、68.07%。图 8 为 4 种算法定位结果的平均绝对误差, 由图可以直观地看出 IWOA 算法的定位精度高于其他 3 种算法, 表明改进鲸鱼算法能够有效地进行声发射源定位。

2.3 煤岩 I 型裂纹扩展定位分析

煤岩 I 型断裂实验时间-荷载曲线如图 9 所示, 根据该曲线的特点选取 7 个时刻进行标识, 标识点 O~F 的时间分别为 $t_0=0s$ 、 $t_A=282s$ 、 $t_B=671s$ 、 $t_C=984s$ 、 $t_D=1086s$ 、 $t_E=1174s$ 、 $t_F=1399s$ 。参照 O 时刻的散斑图像, 计算其他标识时刻的变形场结果。如图 10 所示, 矩形框线表示 20mm×30mm 大小的裂纹分析区域。

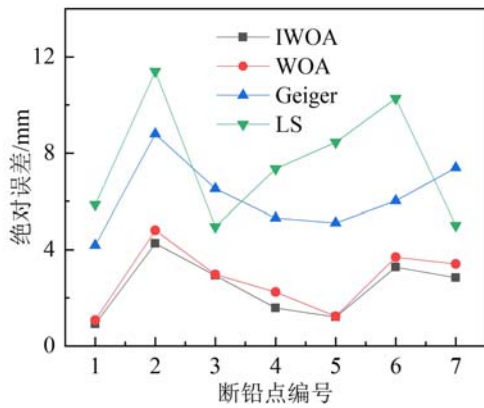


图 8 各算法定位绝对误差比较
Fig. 8 The absolute location error comparison of each algorithm

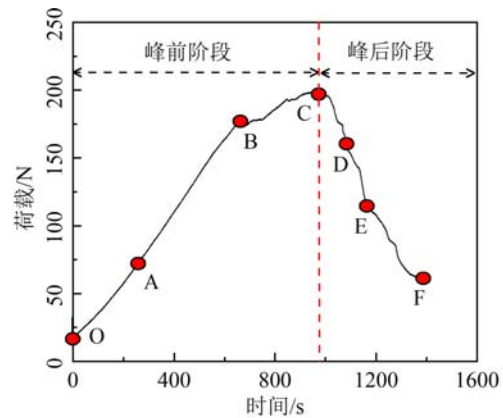


图 9 煤岩荷载-时间关系曲线
Fig. 9 Load-time relation curve of coal rock

利用数字图像相关方法能够获取断裂区域在不同时间点的水平方向位移场云图, 这些云图记录了裂纹的演化过程^[19], 图 11 为标识点 A~F 的水平方向位移场云图。如图 11(a)、(b)所示, 该阶段为断裂成核阶段, 此时煤岩试件缺口上端呈现小幅度变形和破裂, 裂纹呈 I 型拉张扩展趋势; 如图 11(b)、(c)所示, 该阶段处于裂纹稳定扩展阶段, 此时, 裂纹尖端区域随着水平方向的扩展位移增大, 在裂纹尖端区域形成断裂; 如图 11(c)~(f)所示, 该阶段处于裂纹失稳扩展阶段, 此时 I 型裂纹在荷载峰值后快速失稳扩展, 底部裂尖快速向上扩张, 最终导致试件断裂。

采用 4 种算法对 7 个标识点所处不同阶段的声发射源进行定位, 根据结果对比分析不同算法的定

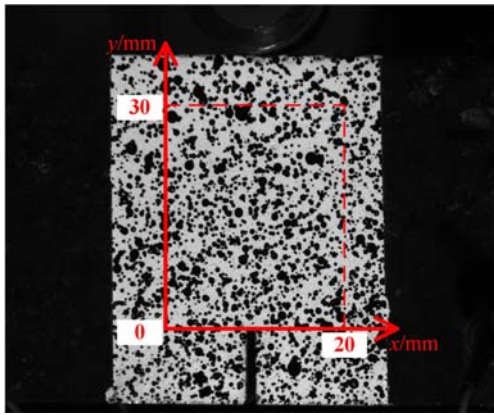


图 10 散斑图像和裂纹分析区域

Fig. 10 Speckle image and the analysis area around crack

位效果,4 种算法在各阶段的定位事件分布如图 12、图 13、图 14 和图 15 所示。

如图 12、图 13、图 14 和图 15 所示,IWOA 算法和 WOA 算法的累计定位事件都集中在断裂过程区附近,且各阶段事件分布与数字图像相关方法(Digital Image Correlation,DIC)观测结果相符,能够有效反映试件裂纹萌生、扩展的动态演化过程。煤岩试样最终破坏形态如图 16 所示。对比分析图 12~15,IWOA 算法和 WOA 算法的累计定位事件都集中在断裂过程区附近,且各阶段事件分布与数字图像相关方法观测结果相符,能够有效反映试件裂纹萌生、扩展的动态演化过程。而最小二乘法

和 Geiger 算法定位效果与前两者有较大的差距,且最小二乘法定位误差较大。

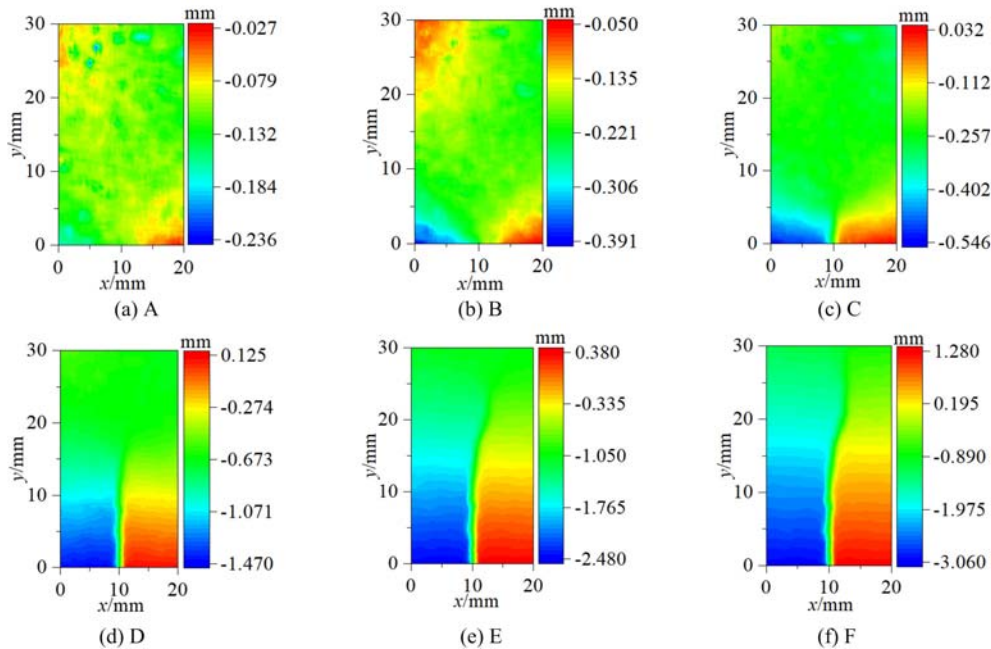


图 11 裂纹区域不同临界时刻水平方向位移场云图

Fig. 11 Nephogram of horizontal displacement fields at different critical moments in crack region

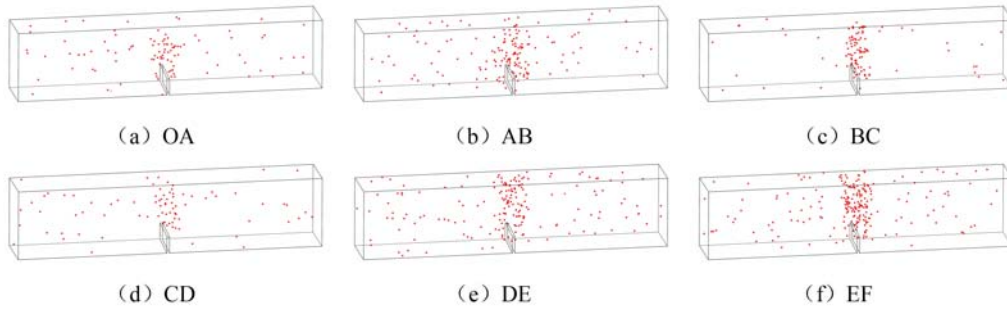


图 12 LS 法各阶段的声发射定位事件分布图

Fig. 12 Event distribution map of acoustic emission location at each stage of LS method

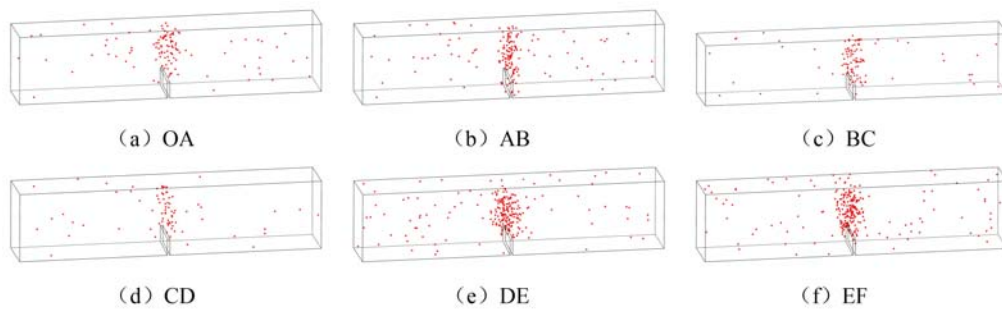


图 13 Geiger 算法各阶段的声发射定位事件分布图

Fig. 13 Event distribution map of acoustic emission location at each stage of Geiger algorithm

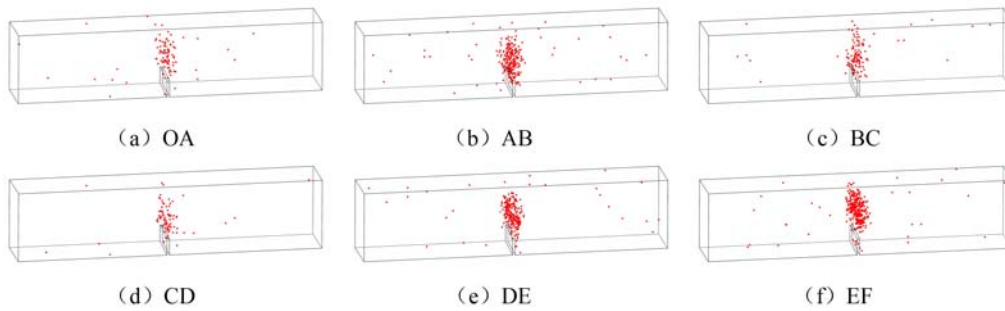


图 14 WOA 算法各阶段的声发射定位事件分布图

Fig. 14 Event distribution map of acoustic emission location at each stage of WOA

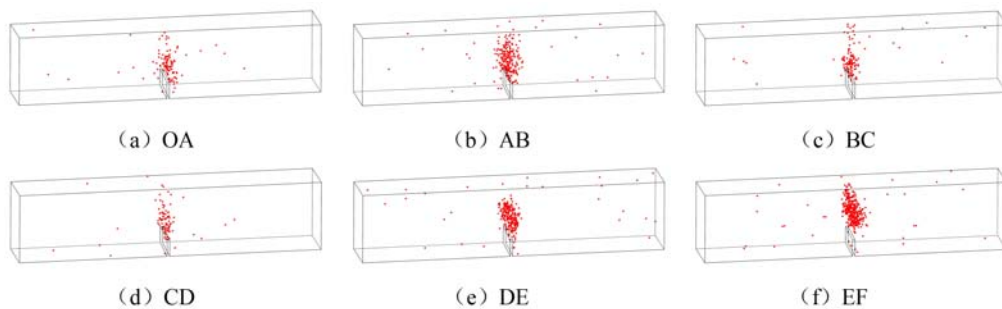


图 15 IWOA 算法各阶段的声发射定位事件分布图

Fig. 15 Event distribution map of acoustic emission location at each stage of IWOA

IWOA 算法定位到 1532 个有效声发射事件,比 Geiger 算法和 LS 法分别多 278、362 个。IWOA 算法定位在断裂过程区的有效声发射事件有 1438 个,比 WOA 算法多 84 个,比 Geiger 算法和 LS 法分别多 498、731 个。定位结果表明,在相同条件下 IWOA 算法能够比 Geiger 算法以及 LS 法定位到更多有效事件。

AE 事件在断裂过程区的集中度可以由 CR(Concentration Ratio)值来表示,根据图 10 所划分的分析区域,分别计算 4 种算法的 CR 值。



图 16 煤岩最终破坏形态

Fig. 16 The final failure pattern of coal rock

$$CR = \frac{n}{N} \tag{30}$$

式中： n 为断裂过程区定位点数； N 为全局定位点数。

如图 17 所示，IWOA 算法的平均定位集中度相比 WOA 算法、Geiger 算法和 LS 法分别提高了 6.46%、20.44%、35.49%，可见 IWOA 算法的定位事件更集中于真实断裂过程区。

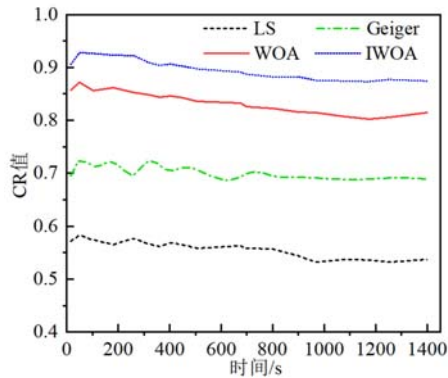


图 17 算法集中度比较

Fig. 17 Comparison of algorithm concentration

生成了一种新的声发射源定位方法。

(2) 对比分析 IWOA 算法、WOA 算法、Geiger 算法和 LS 法等 4 种定位算法的定位精度，发现基于改进鲸鱼算法的声发射源定位方法具有更高的定位精度。

(3) 改进鲸鱼算法的声发射源定位方法的累计有效声发射事件更集中于真实煤岩 I 型裂纹断裂过程区，且各阶段的定位结果与 DIC 观测结果具有一致性，因此能够有效地反映试件内部裂纹萌生、扩展的动态演化过程。

参考文献：

- [1] 许海亮, 任合欢, 宋义敏. 红砂岩单轴压缩条件下震源时空演化特征及破裂机制实验研究[J]. 实验力学, 2022, 37(1):63-76 (XU Hailiang, REN Hehuan, SONG Yimin. Experimental study on the characteristics of the temporal and spatial evolution of the source and the rupture mechanism of red sandstone under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(1):63-76 (in Chinese))
- [2] 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 (in Chinese))
- [3] 黄晓红, 张艳博, 田宝柱, 等. 基于相位差时延估计法的岩石声发射源定位研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2):381-386, 522 (HUANG Xiaohong, ZHANG Yanbo, TIAN Baozhu, et al. Time delay estimation and acoustic emission source location of rock based on phase difference[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2):381-386, 522 (in Chinese))
- [4] 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, 2020, 39(5):632-637 (in Chinese))
- [5] 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, 248 (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, 248 (in Chinese))
- [6] 童国伟, 徐华伟, 黄林轶, 等. 基于声发射定位算法的故障检测技术研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(5):997-1001, 1039 (TONG Guowei, XU Huawei, HUANG Linyi, et al. Fault detection monitoring with acoustic emission location method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5):997-1001, 1039 (in Chinese))
- [7] 赵兴东, 刘建坡, 李元辉, 等. 岩石声发射定位技术及其实验验证[J]. 岩土工程学报, 2008(10):1472-1476

通过对 4 种算法的声发射定位结果和集中度进行对比，发现 IWOA 算法与 WOA 算法、Geiger 算法和 LS 法相比能取得更好的定位结果，定位误差在合理范围之内，是一种稳定、有效的声发射定位方法。

3 结论

(1) 针对鲸鱼优化算法的不足，提出了一种使用非线性收敛因子、自适应权重调整鲸鱼位置更新和对最优个体进行随机差分的改进鲸鱼算法，该算法有效地提升了前期收敛速度与后期搜索精度，增强了算法局部最优规避能力，并基于改进鲸鱼算法

- (ZHAO Xingdong, LIU Jianpo, LI Yuanhui, et al. Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(10):1472—1476 (in Chinese))
- [8] 林峰, 李庶林, 薛云亮, 等. 基于不同初值的微震源定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5):996—1002 (LIN Feng, LI Shulin, XUE Yunliang, et al. Microseismic sources location methods based on different initial values[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5):996—1002 (in Chinese))
- [9] 吕进国, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 基于稳健模拟退火-单纯形混合算法的微震定位研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2195—2203 (LÜ Jinguo, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, et al. Study of microseismic positioning based on steady simulated annealing-simplex hybrid algorithm [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2195—2203 (in Chinese))
- [10] 陈炳瑞, 冯夏庭, 李庶林, 等. 基于粒子群算法的岩体微震源分层定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4):740—749 (CHEN Bingrui, FENG Xiating, LI Shulin, et al. Microseism source location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4):740—749 (in Chinese))
- [11] 王剑锋, 李天斌, 马春驰, 等. 基于引力搜索法的隧道围岩微震定位研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11):4421—4428, 4476 (WANG Jianfeng, LI Tianbin, MA Chunchi, et al. Gravitational search algorithm based microseismic positioning in tunnel surrounding rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11):4421—4428, 4476 (in Chinese))
- [12] 黄逸群, 孙岳阳, 王洋, 等. 混凝土声发射信号源定位精度的细观模型计算分析[J]. 应用声学, 2022, 41(6): 982—989 (HUANG Yiqun, SUN Yueyang, WANG Yang, et al. Analysis of the acoustic emission source positioning accuracy based on concrete mesostructure model[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(6):982—989 (in Chinese))
- [13] 李元辉, 陈治洋, 徐世达. 波速赋值范围对 PSO 定位算法精度的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(4):561—566 (LI Yuanhui, CHEN Zhiyang, XU Shida. Influence of wave velocity range on accuracy of PSO location algorithm[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(4): 561—566 (in Chinese))
- [14] 张永, 陈锋. 一种改进的鲸鱼优化算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(3):208—213, 219 (ZHANG Yong, CHEN Feng. A modified whale optimization algorithm[J]. Computer Engineering, 2018, 44(3):208—213, 219 (in Chinese))
- [15] 龙文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 求解大规模优化问题的改进鲸鱼优化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(11):2983—2994 (LONG Wen, CAI Shaohong, JIAO Jianjun, et al. Improved whale optimization algorithm for large scale optimization problems[J]. System Engineering Theory and Practice, 2017, 37(11):2983—2994 (in Chinese))
- [16] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95(5):51—67.
- [17] 刘东瀛, 邓艾东, 刘振元, 等. 基于 EMD 与相关系数原理的故障声发射信号降噪研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(19):71—77 (LIU Dongying, DENG Aidong, LIU Zhenyuan, et al. De-noising method for fault acoustic emission signals based on the EMD and correlation coefficient[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(19): 71—77 (in Chinese))
- [18] 赵扬锋, 王进铭, 潘一山, 等. 基于质量寻优与归一化 STA/LTA 方法的微震 P 波到时拾取技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8):1610—1625 (ZHAO Yangfeng, WANG Jinming, PAN Yishan, et al. Study on determining arrival times of microseismic P-wave based on quality optimization and normalized STA/LTA method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8):1610—1625 (in Chinese))
- [19] 代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 基于数字散斑相关方法测定 I 型裂纹应力强度因子[J]. 实验力学, 2013, 28(2): 269—276 (DAI Shuhong, MA Shengli, PAN Yishan, et al. Determination of mode I stress intensity factors by digital speckle correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):269—276 (in Chinese))

Acoustic emission localization method based on improved whale optimization algorithm

DAI Shuhong¹, ZHENG Hao¹, LIU Kai², ZHANG Zhanjun¹

(1. School of Engineering and Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Hengda Coal Mine of Fuxin Mining (Group) Co., Ltd., Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of AE source location, an improved whale optimization algorithm was proposed, and a method of AE event locating method was generated based on this algorithm. According to the time difference between different channels, an objective function based on the least square method was established. The objective function was solved by the search mechanism of improved whale optimization algorithm, then the AE events location results were obtained. In order to accurately evaluate the positioning accuracy of the improved whale optimization algorithm, the coal rock pencil-lead breaking experiment and mode I fracture experiment under three-point bending condition were carried out for verification. The positioning results of the improved whale optimization algorithm, whale optimization algorithm, Geiger algorithm, and least square method were compared and analyzed. The results show that the improved whale optimization algorithm has higher positioning accuracy than other algorithms, and the cumulative effective AE events are more concentrated in the real fracture process area; the results of AE event location at each stage of the improved whale optimization algorithm are consistent with the results obtained by digital image correlation method. It can effectively reflect the dynamic evolution process of crack initiation and propagation in coal rock specimen.

Keywords: acoustic emission; localization algorithm; whale optimization algorithm; pencil-lead breaking experiment; mode I fracture experiment