

# 微震源定位的两步反演方法研究

李绍红, 吴礼舟, 杨 戒, 王少阳

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 微震源定位是微震监测技术的核心。微震源定位问题中的已知参数几乎都存在误差, 现有微震源定位算法通常通过最小化所有检波器的到时(差)值函数, 但得到的定位结果往往会偏离震源实际位置。针对现有微震源定位算法的不足, 提出一种由两步反演构成的微震源定位新方法; 在新方法中, 一次反演识别异常检波器, 二次反演实现震源空间坐标的精确搜索。基于均匀速度假设, 分别建立 3 参数、4 参数和 5 参数的反演模型。应用多目标遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm - II, 简称 NSGA - II)实现一次反演, 为实现震源的精确搜索和减少计算时间, 二次反演建议采用单目标优化算法实现。将提出的方法用于某矿井工程震源定位实例中, 计算结果表明: 提出方法能够有效的识别异常检波器, 定位结果也较未剔除异常检波器时有了大幅度提升, 且相对而言, 4 参数反演模型的定位结果优于 5 参数模型。该文方法可作为微震源定位的一种参考。

**关键词:** 采矿工程; 微震源定位; 反演模型; 速度模型; 多目标优化; 组合方法

**中图分类号:** TD 32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2017)07 - 1710 - 08

## A two-step inversion method for micro-seismic source location

LI Shaohong, WU Lizhou, YANG Jie, WANG Shaoyang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Micro-seismic source location is crucial for the micro-seismic monitoring technology. The existing algorithms usually minimize the function of time arrival values(time difference) from all detectors to obtain the location of micro-seismic source. The positioning results deviate usually from the actual locations of the sources because all the known micro-seismic parameters have errors. To overcome the shortcomings of the present algorithm, a two-step inversion method for the micro-seismic source location is thus proposed. The first inversion is to identify the abnormal detector, and the second inversion is to search the exact location from the space coordinates of sources. The 3 - parameter, 4 - parameter and 5 - parameter inversion models on the assumption of uniform velocity are established and compared. A multi-objective genetic algorithm(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm - II, NSGA - II) is used for the first inversion. A single objective optimization algorithm is suggested in the second inversion in order to achieve the accurate source searching and to reduce the computing time. The results from a case study indicate that the proposed method can effectively identify the abnormal detectors and the positioning is greatly improved compared with the results with the abnormal geophone. The 4-parameter inversion model is better than the 5-parameter inversion model.

**收稿日期:** 2016 - 11 - 27; **修回日期:** 2017 - 03 - 13

**基金项目:** 国家重点基础研究计划(973)项目(2013CB733202); 国家自然科学基金面上项目(41672282); 四川省青年科技创新研究团队(2015TD0030) Supported by the National Basic Research Program(973 Plan)(Grant No. 2013CB733202), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41672282) and Sichuan Province Youth Science and Technology Innovation Research Team(Grant No. 2015TD0030)

**作者简介:** 李绍红(1993 - ), 男, 2016 年毕业于重庆三峡学院土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: lishaohong16@126.com。通讯作者: 吴礼舟(1975 - ), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: wulizhou07@cdut.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1515

**Key words:** mining engineering; micro-seismic source location; inversion method; velocity model; multi-objective optimization; combination method

## 1 引言

微震监测技术已在矿山、岩爆、地下工程等多领域得到了应用，并被认为是一种较位移监测技术和应力监测技术更具潜在应用价值的新型监测技术<sup>[1-3]</sup>。微震监测技术包括微震监测方案的设计、信号的准确识别以及震源定位等，而震源定位是其中的核心部分<sup>[4]</sup>。有效合理的微震源定位算法对于在实际工程中推广微震监测技术有着重要的意义。

微震源定位有着悠久的历史，国内外学者对该问题展开了广泛研究，提出了多种定位算法。早期的经典算法主要包括 L. Geiger<sup>[5]</sup>提出的经典算法、联合反演算法(JED)<sup>[6]</sup>以及相对定位算法(ATD)<sup>[7]</sup>等。近年来，一些新的定位算法相继被提出，如 X. B. Li 等<sup>[8-9]</sup>先后针对二维情形和三维情形提出了相应的无需预先测速的微震定位方法，该方法的最大特点在于不需要事先给定速度参量；李 健等<sup>[10]</sup>基于单一速度模型，通过数学变换消除速度参量，并通过单纯形法搜索微震震源坐标，与董陇军等<sup>[9]</sup>的方法相比，该方法优势在于完全舍去了速度参量；陈炳瑞等<sup>[11]</sup>根据相邻两检波器之间的到时差关系，应用粒子群算法直接反演震源坐标；李 楠等<sup>[4]</sup>针对将 L2 范数作为反演目标函数对于偏差点过于敏感的不足，建议将 L1 范数作为微震定位反演的目标函数；戴 峰等<sup>[12]</sup>则发展了一种三阶段微震定位算法，并通过遗传算法反演了微震震源坐标。上述新方法的提出，丰富了震源定位的研究成果，具有一定的应用价值。然而，当有异常检波器存在即已知参数中有异常数据时，上述方法则往往会产生较大误差。

微震源定位结果的准确性取决于定位算法和已知参数的误差大小<sup>[13]</sup>。微震定位中的已知参数几乎都是带有误差甚至是异常数据，当有异常数据存在时，定位准确性将会受到极大影响。因此，要实现微震震源的准确定位，必须识别并剔除已知参数中的异常样本。李 楠等<sup>[4]</sup>发展了一种基于到时差值的异常样本识别方法，有效提高了震源定位的精度。然而其要求预先给定波速等参数，波速测量不可避免的产生误差，降低了微震源定位精度。

针对微震定位研究中存在的上述不足，本文试

图发展一种无需测速且带有异常数据识别功能的微震定位算法。假定多数检波器的参数足够准确，建立微震反演的多目标函数，应用多目标遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm - II, NSGA - II)<sup>[15-16]</sup>对各个目标函数进行反演，根据反演结果识别出异常样本和大误差样本。将剔除异常样本后的数据进行二次反演，以期达到精确搜索震源坐标的目的。

## 2 微震源定位的数学模型及反演解

### 2.1 微震源定位原理及其数学模型

如图 1 所示，点  $O$  为震源位置，A-J 为检波器，由于 S 波识别难度大于 P 波，故实际工程中常使用 P 波定位。而震源产生的 P 波信号向各个方向传播，类似于一种球面推进，实际中 P 波传播速度并非各向同性的，但为了数学描述和求解方便，通常假设 P 波传播速度在各个方向相同<sup>[8-11]</sup>。微震定位即是通过检波器空间坐标和接收到 P 波的时刻来反演点  $O$ 。

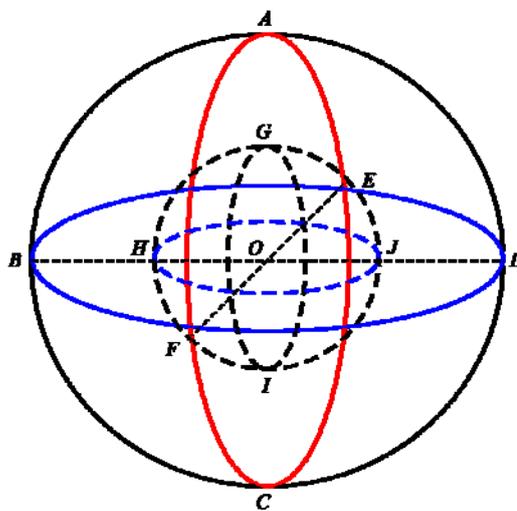


图 1 微震源定位示意图

Fig.1 The sketch of micro-seismic source location

设检波器  $i(i = 1, 2, \dots, n)$  的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ，P 波传播速度为  $v_p$ ， $t_i$  为检波器  $i$  的观测到时， $t_0$  为发震时刻， $(x_0, y_0, z_0)$  为震源坐标。显然，有如下关系式成立：

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = v_p(t_i - t_0) \quad (1)$$

式(1)即为微震源定位的数学模型。

### 2.2 微震源坐标的反演解

在实际应用中，由于检波器的布置方式以及观测到时可能存在的误差，使得求解式(1)的解析解存在诸多偏差。为了有效的实现微震定位，一个有效的方法是采用优化方法来进行反演，如在微震定位中广泛应用的单纯形法等。在应用优化算法分析微震定位问题时，通常将目标函数设置为到时或到时差的形式。将 P 波传播速度视为未知量(即预先未测速度)，则可写出 2 种方式的目标函数。

到时模型的目标函数<sup>[9]</sup>为

$$\min \text{fun} = \sum_{i=1}^n \left[ t_i - \frac{\sqrt{(x_i - x'_0)^2 + (y_i - y'_0)^2 + (z_i - z'_0)^2}}{v'_p} - t'_0 \right]^2 \quad (2)$$

由式(2)可知，反演未知量有 5 个，即反演所得震源位置  $(x'_0, y'_0, z'_0)$ 、P 波传播速度  $v'_p$ 、发震时间  $t'_0$ 。

到时差模型的目标函数为<sup>[11]</sup>

$$\min \text{fun} = \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ t_{i+1} - t_i - \left[ \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x'_0)^2 + (y_{i+1} - y'_0)^2 + (z_{i+1} - z'_0)^2}}{v'_p} - \frac{\sqrt{(x_i - x'_0)^2 + (y_i - y'_0)^2 + (z_i - z'_0)^2}}{v'_p} \right] \right\}^2 \quad (3)$$

由式(3)可知，反演的变量为 4 个，即反演所得震源位置  $(x'_0, y'_0, z'_0)$ 、P 波传播速度  $v'_p$ 。

通过优化方法求解式(2)或(3)的最小值作为微震源的反演解。然而，当检波器观测到时导致误差时，由式(2)或(3)定位具有较大的误差。李楠等<sup>[14]</sup>提出了一种根据到时差值识别微震监测异常信号的方法，使定位误差得到了有效的控制。但该方法需要已知 P 波和 S 波的速度，由于测速误差的存在，制约了该方法在实际中的应用。为此，下文将探讨一种新的微震源定位方法。

## 3 一种新的微震源定位方法

当检波器的观测到时误差较大时，式(2)或(3)的最小值受到异常检波器的影响，计算所得定位结果往往偏离实际震源位置较大。对于一微震监测系统而言，通常需要系统中多数检波器正常工作(小误差)，才能实现震源的准确定位。鉴于此，设多数检波器满足小误差条件，若将式(2)或(3)分解开来，由单目标反演问题化为多目标反演问题，理论上，多目标反演误差较大的检波器即是接收到异常信号的

检波器。根据反演结果，剔除异常信号，再进行第二次反演，则能获取更高精度的反演解。基于以上思路，本节给出一种新的微震定位方法。

### 3.1 具有 5 个未知参数的反演模型

为与式(2)或(3)相统一，目标函数也取为到时或到时差的形式，并将 P 波传播速度视为未知量。则具有 5 个反演参数的多目标定位模型为

$$\min \begin{cases} \text{fun}(1) = \left( t_1 - \frac{\sqrt{(x_1 - x'_0)^2 + (y_1 - y'_0)^2 + (z_1 - z'_0)^2}}{v'_p} - t'_0 \right)^2 \\ \text{fun}(2) = \left( t_2 - \frac{\sqrt{(x_2 - x'_0)^2 + (y_2 - y'_0)^2 + (z_2 - z'_0)^2}}{v'_p} - t'_0 \right)^2 \\ \vdots \\ \text{fun}(n) = \left( t_n - \frac{\sqrt{(x_n - x'_0)^2 + (y_n - y'_0)^2 + (z_n - z'_0)^2}}{v'_p} - t'_0 \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)各个目标函数反演结果，剔除误差较大的检波器。在式(4)中，5 个未知参数  $((x'_0, y'_0, z'_0), v'_p, t'_0)$  通过反演获取。该方法将波速直接作为反演量，可在一定程度上降低由于速度模型所造成的误差。将该模型称之为 5 参数反演模型。

### 3.2 具有 4 个未知参数的反演模型

与上文类似，具有 4 个反演参数的反演形式为  $\min \text{fun}(k) =$

$$\left\{ t_i - t_j - \left[ \frac{\sqrt{(x_i - x'_0)^2 + (y_i - y'_0)^2 + (z_i - z'_0)^2}}{v'_p} - \frac{\sqrt{(x_j - x'_0)^2 + (y_j - y'_0)^2 + (z_j - z'_0)^2}}{v'_p} \right] \right\}^2 \quad (5)$$

式中： $k = C_n^2$ ，即在  $n$  个检波器中取 2 个检波器的组合数； $i = 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, i-1$ 。在式(5)中，发震时间  $t'_0$  已被消除，降低了反演计算量。此时只具有 4 个未知参数  $((x'_0, y'_0, z'_0), v'_p)$ 。将该模型称之为 4 参数反演模型。

### 3.3 具有 3 个未知参数的反演模型

若已知某两检波器精度足够高，为叙述方便，记两检波器分别为 1 和 2。显然有如下关系成立：

$$\sqrt{(x_2 - x'_0)^2 + (y_2 - y'_0)^2 + (z_2 - z'_0)^2} - \sqrt{(x_1 - x'_0)^2 + (y_1 - y'_0)^2 + (z_1 - z'_0)^2} = v'_p(t_2 - t_1) \quad (6)$$

通过式(6)可以求解出 P 波传播速度，再根据式(5)反演震源位置。与式(5)相比，该反演方法不需要将速度加入一起反演，只有 3 个反演参数  $(x'_0, y'_0, z'_0)$ ，

通过对震源的迭代，自适应调整速度的值。将该模型称之为 3 参数反演模型。

由式(6)可知：P 波传播速度的准确求解依赖于选择的检波器坐标以及相应的观测到时。相比而言，检波器坐标造成的误差可预先控制而忽略；而观测到时造成的误差则不可忽略。在实际应用中，为保证两检波器精度足够高，需有效区别微震信号和爆破等其他事件产生的干扰信号并提高信号到时拾取准确度，这可通过分析特征参数建立识别模型，通过已有的时域和频域方法来获取微震初至到时<sup>[17-18]</sup>。

### 3.4 多目标定位模型的求解

式(4)~(6)的求解需要借助于多目标优化算法，相对于单目标优化而言，多目标优化问题不具有单一解的特点。多目标优化问题相应的求解结果以 Pareto 解集(在多目标优化问题中，Pareto 解的意义为不存在使一个目标更好、其他目标不劣的解，即使得所有目标函数最优的解)表示<sup>[19]</sup>。本文借助于 NSGA-II 算法获取。NSGA-II 算法是基于 Pareto 解集的一种多目标遗传算法，已被证明是在多目标优化领域应用最为广泛且最为有效的进化算法之一，已在众多工程领域得到了广泛应用。关于 NSGA-II 的详细介绍，可参照 K. Deb 等<sup>[15, 19]</sup>的研究，本文不再给出。

根据多目标优化理论<sup>[15]</sup>，应用 NSGA-II 算法对式(4)~(6)分别求解，可得到各自的 Pareto 解集。由于在多目标优化中，Pareto 解集无法直接应用于实际，需从该集合中选择一个 Pareto 解用来识别异常检波器。从解集中选择 Pareto 解的方法较多，本文取 Pareto 解集之中目标函数误差之和最小的解作为目标函数的最终解<sup>[16]</sup>。需要说明的是，5 参数反演模型可反演出五个参数，而 4 参数和 3 参数模型都不能直接确定发震时间  $t'_0$  (对于波速，4 参数模型直接反演得出；3 参数模型通过式(6)计算得到)，但考虑到工程微震定位最主要的是给出震源坐标，故可不求出  $t'_0$ <sup>[10, 14, 17]</sup>；事实上，求得震源坐标之后， $t'_0$  可由式(1)直接获取，即可完成全部参数的求解。设反演误差较大的检波器即是异常检波器，根据反演结果，剔除异常检波器，称此过程为一次反演；待剔除异常检波器后，将剩余的检波器相关数据进行第二次反演，此过程称为二次反演。考虑到多目标优化计算量大于单目标优化，在二次反演中，可直接采用单目标优化算法进行，如单纯形法、Powell 法、进化算法等。一次反演目标在于识别异常检波器，二次反演则给出定位结果。在一次反演中，将

最终解代入各个目标函数并对其进行排序，根据事先给定的规则按目标函数值从大到小确定异常检波器。由式(3)~(5)可见，定位模型中都需要借助于检波器到时，通过删除异常检波器，可在一定程度上降低由到时误差所导致的整体误差。另外，由于具有 3 个未知参数的定位模型需要事先已知两个高精度检波器，这需要根据实际情形确定。因篇幅原因，故在下文的算例中不对这种定位方法进行专门讨论，只在文中给出该种定位思路。图 2 为本文提出的定位方法的流程图。

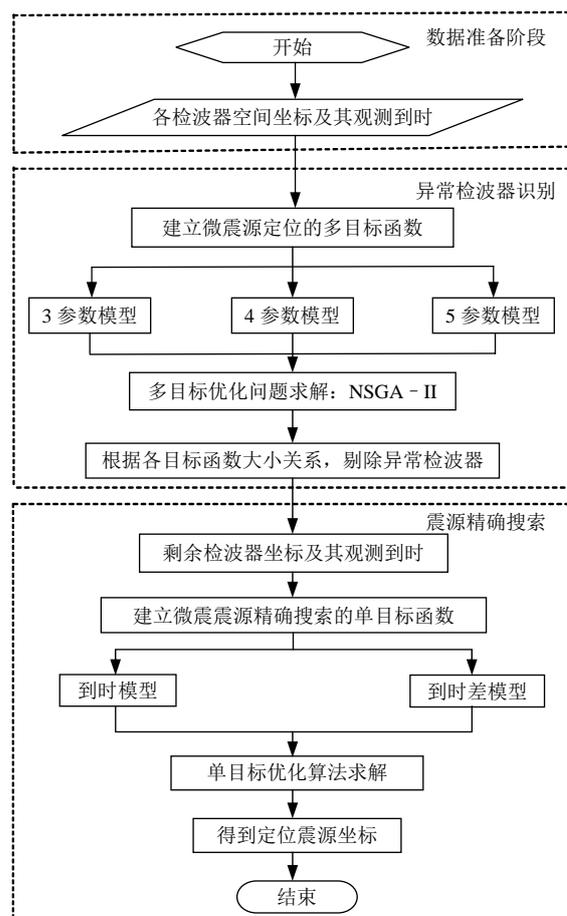


图 2 微震源定位算法流程图

Fig.2 Flow chart of the location algorithm of micro-seismic sources

## 4 工程验证

为验证本文提出的定位方法的有效性，应用李楠等<sup>[14, 20]</sup>中的某开采矿井工程试验数据进行验证。该矿共安装了 16 个微震检波器，编号为  $T_1 \sim T_{16}$ ，各检波器的空间坐标和观测到时等详细数据见李楠等<sup>[14]</sup>的研究成果。

应用本文提出的方法进行震源的反演，基于

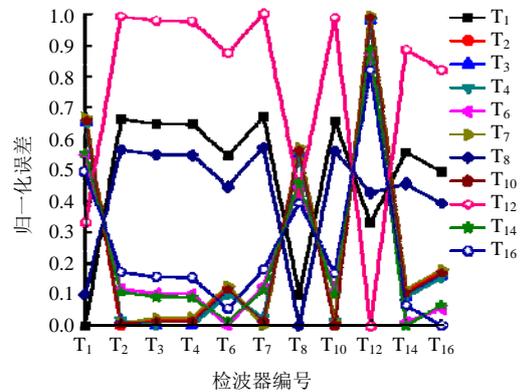
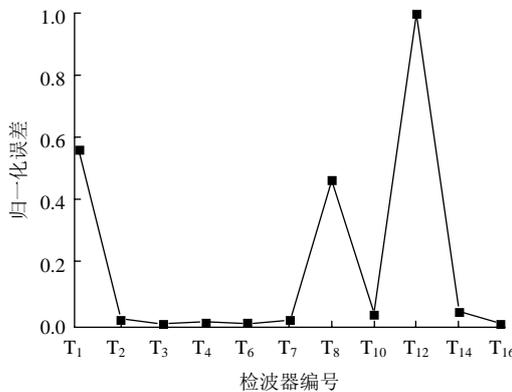
MATLAB 软件, 编制了相应的反演程序。为便于区分, 下文中将 5 参数反演模型称为算法 1(一次反演和二次反演过程都采用 5 参数反演模型, 下同), 将 4 参数反演模型称为算法 2(一次反演和二次反演过程都采用 4 参数反演模型, 下同)。根据本文方法流程, 首先需要进行一次反演剔除异常检波器, 基于 NSGA - II 算法, 应用算法 1 和 2 识别 5 次事件的异常检波器, 并与李楠等提出的方法(本文记为到时差值法, 下同)作对比。而对于剔除异常检波器, 理论上可通过以下 3 种方法实现: (1) 通过直观观察误差图形, 剔除误差明显大于多数检波器的个别样本, 该方法虽然直观, 但难以自动化实现; (2) 给定一误差阈值, 剔除大于该阈值的样本, 但由于不同的微震源定位差异较大, 很难找到一个合适的阈值; (3) 对误差大小进行排序, 剔除误差大的部分样本, 该方法能够自动化实现, 故本文选择该方法来识别异常检波器。具体的规则如下: 若只有 9 个(含)以下检波器接收到震源信号, 则剔除 2 个检波器; 若有 9 个以上 13 个(含)以下检波器接收到震源信号, 则剔除 3 个检波器; 若有 14 个(含)以上检波器接收到信号, 则剔除 4 个检波器。必须说明的是, 该规则是可改变的, 但需保证剔除异常检波器后该震源至少还有 5 个检波器<sup>[9-11]</sup>, 这是由解的稳定性所决定的, 检波器个数过少, 在数学上得不到唯一

震源解。按照该规则, 通过 NSGA - II 算法, 应用算法 1 和算法 2 识别 5 次事件的异常检波器识别结果见表 1。限于篇幅, 这里只详细给出事件 3 的一次反演过程。基于算法 1, 事件 3 的一次反演仅需要应用 NSGA - II 算法求解式(4), 然后剔除误差较大的检波器即可, 式(4)各目标函数误差见图 3(c)左边分图(为便于直观观察, 将所有目标函数误差归一化, 即无量纲化, 下同)。由图 3(c)左边分图可知, 检波器  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{12}$  应属于异常检波器, 应予以剔除; 基于算法 2, 为识别出异常检波器, 应对所有检波器根据到时差模型进行两两比较。由于有 10 个检波器接收到事件 3 的信号, 故共有  $C_{10}^2 = 45$  个目标函数。这里为了便于统计分析, 将以上结果表述为  $10 \times 10$  的矩阵形式, 如表 2 所示, 相应的误差图见图 3(c)右边分图。由表 2 可见, 检波器  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{12}$  的平均误差较其余检波器较大, 故应予以剔除。图 3 表

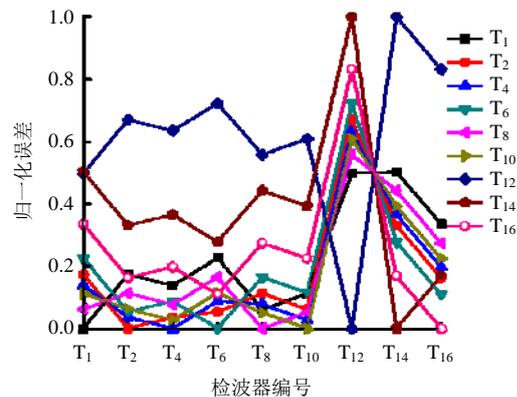
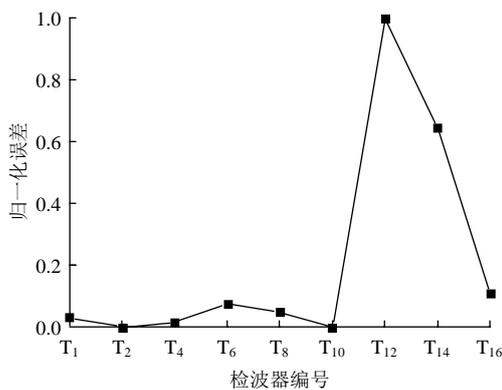
表 1 异常检波器

Table 1 The anomaly detector

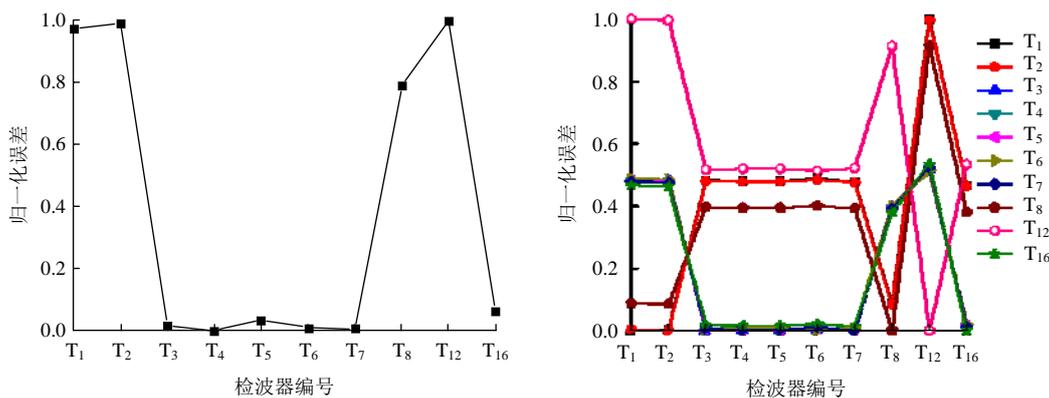
事件号	算法 1	算法 2	到时差值法 <sup>[14]</sup>
1	$T_1, T_8, T_{12}$	$T_1, T_8, T_{12}$	$T_1, T_8$
2	$T_{12}, T_{14}$	$T_{12}, T_{14}$	$T_{14}$
3	$T_1, T_2, T_{12}$	$T_1, T_2, T_{12}$	$T_1, T_2, T_{12}$
4	$T_3, T_8, T_9, T_{16}$	$T_3, T_8, T_9, T_{16}$	$T_1, T_3, T_8, T_9$
5	$T_{12}, T_{14}, T_{15}$	$T_{12}, T_{14}, T_{15}$	$T_{14}, T_{15}$



(a) 事件 1



(b) 事件 2



(c) 事件 3

图 3 一次反演误差

Fig.3 The errors of the first step inversion

表 2 误差分析表

Table 2 The error analysis

检波器编号	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>16</sub>
T <sub>1</sub>	0.000	0.003	0.483	0.481	0.481	0.487	0.479	0.087	1.000	0.466
T <sub>2</sub>	0.003	0.000	0.481	0.478	0.478	0.485	0.476	0.084	0.997	0.463
T <sub>3</sub>	0.483	0.481	0.000	0.003	0.003	0.004	0.005	0.397	0.517	0.017
T <sub>4</sub>	0.481	0.478	0.003	0.000	0.000	0.007	0.002	0.394	0.519	0.015
T <sub>5</sub>	0.481	0.478	0.003	0.000	0.000	0.007	0.002	0.394	0.519	0.015
T <sub>6</sub>	0.487	0.485	0.004	0.007	0.007	0.000	0.009	0.400	0.513	0.021
T <sub>7</sub>	0.479	0.476	0.005	0.002	0.002	0.009	0.000	0.392	0.521	0.012
T <sub>8</sub>	0.087	0.084	0.397	0.394	0.394	0.400	0.392	0.000	0.913	0.379
T <sub>12</sub>	1.000	0.997	0.517	0.519	0.519	0.513	0.521	0.913	0.000	0.534
T <sub>16</sub>	0.466	0.463	0.017	0.015	0.015	0.021	0.012	0.379	0.534	0.000
平均误差	0.397	0.394	0.191	0.190	0.190	0.193	0.190	0.344	0.603	0.192

表 3 定位结果

Table 3 The results of the micro-seismic source location

事件号	单纯形法 <sup>[14]</sup>				到时差值法 <sup>[14]</sup>				算法 1				算法 2			
	x/m	y/m	z/m	d/m	x/m	y/m	z/m	d/m	x/m	y/m	z/m	d/m	x/m	y/m	z/m	d/m
1	-	-	-	-	5 442.8	3 016.9	-6.6	16.1	5 457.8	3 032.9	-6.8	24.4	5 478.0	3 000.0	-9.0	16.5
2	6 313.3	3 089.8	-308.6	886.0	5 497.2	2 976.3	-12.2	11.2	5 503.3	2 970.3	-12.5	19.0	5 497.0	2 977.1	-11.8	10.8
3	4 578.9	2 625.4	-140.7	510.9	4 200.6	2 963.6	-47.5	9.7	4 230.9	2 965.8	-43.0	21.9	4 200.0	2 974.4	-49.0	12.6
4	4 704.7	5 790.5	-5 009.6	5 835.9	4 812.0	2 566.8	-133.4	18.7	4 813.2	2 560.0	-129.1	23.6	4 810.8	2 570.2	-132.3	19.0
5	4 671.9	2 654.8	154.9	377.1	4 484.8	2 506.4	-135.3	10.8	4 479.6	2 499.2	-130.1	20.9	4 480.7	2 505.7	-137.7	12.4

注：“-”表示定位失败。

示按照两种不同算法得到前 3 次事件的一次反演过程的误差分析图。

由表 1 可见，算法 1 和 2 识别出的异常检波器结果一致。一般而言，算法 1 和 2 识别出的异常检波器是一致的，因为 2 种算法皆基于微震源定位的基本原理，由式(1)所获取。若出现冲突情况，可取两者的并集视为最终的异常检波器。本文方法与到

时差值识别方法相比，在多数情形下，后者识别出的异常检波器包含在前者之中，总体情况较为吻合，这表明了本文方法的正确性。

将识别出的异常检波器从定位模型中剔除，进行二次反演，在此处，选择了具有良好全局寻优功能的遗传算法，最终得到定位结果见表 3。为了便于对比，同时给出了单纯形法<sup>[14]</sup>以及到时差值识别

方法的定位结果,以定位震源与实际震源的空间距离  $d$  作为算法优劣的评判标准。由表 3 可见,本文提出的方法(算法 1 和 2)都较单纯形法具有较高的定位精度,总体而言,算法 2 的定位精度高于算法 1,且算法 2 的总体精度较到时差值识别方法相近。

## 5 讨 论

微震定位问题中包含多种类型的误差,包括检波器空间坐标误差、波速的各向异性所导致的误差、观测到时误差等等。谢兴楠等<sup>[13]</sup>将以上误差总结为“统一定位误差”,并且认为到时误差是最能体现微震定位误差的参量。与之类似,很多学者也是通过最小化到时(或到时差)来反演微震发生位置<sup>[8-11, 21]</sup>。然而,当有异常检波器时,单纯的最小化到时或到时差得到的结果往往偏离实际较大。鉴于此,笔者将微震定位问题归纳为“如何用错误(或误差)的数据根据理想模型求解问题”。显然,错误数据即是明显的异常样本,应予剔除;而误差较大数据也应剔除,以保证定位结果的精确性。本文提出定位方法的一次反演过程则是用来剔除错误或大误差数据,其基本假设在于认为大多数检波器的观测数据是准确的或小误差。事实上,若多数检波器存在较大误差,几乎任何方法都是难以准确获取定位结果的。二次反演则相当于起到一个“精确搜索”的作用。需要指出的是,若检波器个数过少(小于 5 个),是很难得出准确的定位结果的,即方程个数小于未知量个数,在数学上得不出唯一解。因此,一次反演过程应保证剔除异常检波器后仍然存在不少于 5 个检波器。然而,受其他诸多误差的影响,本文方法与实际仍然存在一定的误差,最为典型的是波速的各向异性所导致的误差。对于现阶段来说,已有的多方向速度模型实际上仍然难以反映真实的波速特征,导致虽然增加了工作量,但并未提高反演精度,这主要是由于岩体节理裂隙所导致<sup>[10]</sup>。因此,就现阶段来说,单一速度模型仍然具有较大的应用价值。如何更好地处理微震定位的波速问题,将是笔者下一步的探讨工作。

## 6 结 论

通过分析微震定位原理和数学模型,提出了一种包含两步反演过程的微震源定位算法。获得结论如下:

(1) 假定多数检波器误差足够小,通过多目标优化算法对各个检波器的进行反演,剔除异常检波器。通过与到时差值法对比,表明该方法是有效的。相对于到时差值法,该方法具有无需预先测定 P 波和 S 波速度的优点。

(2) 提出了由两步反演构成的微震震源定位方法,一次反演剔除异常检波器;二次反演精确搜索震源。同时,建立了 3 参数、4 参数、5 参数的反演数学模型。

(3) 提出的 4 参数和 5 参数定位模型应用于开采矿井工程,结果表明该方法是有效的,且 4 参数反演模型结果精度高于 5 参数反演模型。

### 参考文献(References):

- [1] 徐奴文,李 韬,戴 峰,等. 基于离散元模拟和微震监测的地下厂房围岩稳定性研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2016, 48(5): 1-8.(XU Nuwen, LI Tao, DAI Feng, et al. Stability analysis on surrounding rock mass in underground caverns based on discrete element simulation and microseismic monitoring[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science, 2016, 48(5): 1-8.(in Chinese))
- [2] XU N W, LI T B, DAI F, et al. Microseismic monitoring and stability evaluation for the large scale underground caverns at the Houziyan hydropower station in Southwest China[J]. Engineering Geology, 2015, 188: 48-67.
- [3] 马天辉,唐春安,唐烈先,等. 基于微震监测技术的岩爆预测机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 470-483.(MA Tianhui, TANG Chun'an, TANG Liexian, et al. Mechanism of rock burst forecasting based on micro-seismic monitoring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 470-483. (in Chinese))
- [4] 李 楠,王恩元,孙珍玉,等. 基于 L1 范数统计的单纯形微震震源定位方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2 431-2 438.(LI Nan, WANG Enyuan, SUN Zhenyu, et al. Simplex microseismic source location method based on L1 norm statistical standard[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2 431-2 438.(in Chinese))
- [5] GEIGER L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. Bulletin of St.Louis University, 1912, (8): 60-71.
- [6] DOUGLAS A. Joint epicenter determination[J]. Nature, 1976, 215: 45-48.
- [7] SPENCE W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences[J]. Bulletin of the Seismological Society of

- American, 1980, 70(1): 171 - 183.
- [8] LI X B, DONG L J. Comparison of two methods in acoustic emission source location using four sensors without measuring sonic speed[J]. *Sensor Letters*, 2011, 9(5): 1 501 - 1 505.
- [9] 董陇军, 李夕兵, 唐礼忠, 等. 无需预先测速的微震震源定位的数学形式及震源参数确定[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2 057 - 2 067.(DONG Longjun, LI Xibing, TANG Lizhong, et al. Mathematical functions and parameters for microseismic source location without pre-measuring speed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(10): 2 057 - 2 067.(in Chinese))
- [10] 李 健, 高永涛, 谢玉玲, 等. 基于无需测速的单纯形法微地震定位改进研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1 336 - 1 346.(LI Jian, GAO Yongtao, XIE Yuling, et al. Improvement of microseism locating based on simplex method without velocity measuring[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1 336 - 1 346.(in Chinese))
- [11] 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. Microseismic sources location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 740 - 749.(in Chinese))
- [12] 戴 峰, 郭 亮, 徐奴文, 等. 基于异向波速模型的微震定位改进[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(9): 3 291 - 3 301.(DAI Feng, GUO Liang, XU Nuwen, et al. Improvement of microseismic location based on an anisotropic velocity model[J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2016, 59(9): 3 291 - 3 301.(in Chinese))
- [13] 谢兴楠, 叶根喜, 柳建新. 矿山尺度下微震定位精度及稳定性控制初探[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(5): 899 - 904.(XIE Xingnan, YE Genxi, LIU Jianxin. On control of accuracy and stability of microseismic location in a mining scale[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(5): 899 - 904.(in Chinese))
- [14] 李 楠, 王恩元, GE Maochen, 等. 基于到时差值的微震波异常信号识别方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1 654 - 1 661.(LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen, et al. A method for identifying outlier signals for microseismic event based on arrival time difference[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1 654 - 1 661.(in Chinese))
- [15] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182 - 197.
- [16] 程绪超, 陈新宇, 郭 平. 基于改进 Elman 网络模型的软件可靠性预测[J]. *通信学报*, 2011, 32(4): 86 - 93.(CHENG Xuchao, CHEN Xinyu, GUO Ping. Software reliability prediction with an improved Elman network model[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(4): 86 - 93.(in Chinese))
- [17] 董陇军, 孙道元, 李夕兵, 等. 微震与爆破事件统计识别方法及工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1 423 - 1 433.(DONG Longjun, SUN Daoyuan, LI Xibing, et al. A statistical method to identify blasts and microseismic events and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1 423 - 1 433.(in Chinese))
- [18] 胡静云, 李庶林. 矿震 P 波到时拾取优化与降低震源定位误差应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1 940 - 1 946.(HU Jingyun, LI Shulin. Optimization of picking mine microseismic P-wave arrival time and its application in reducing error of source locating[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1 940 - 1 946.(in Chinese))
- [19] 公茂果, 焦李成, 杨咚咚, 等. 进化多目标优化算法研究[J]. *软件学报*, 2009, 20(2): 271 - 289.(GONG Maoguo, JIAO Licheng, YANG Dongdong, et al. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithm[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(2): 271 - 289.(in Chinese))
- [20] 李 楠. 微震震源定位的关键因素作用机制及可靠性研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.(LI Nan. Research on mechanisms of key factors and reliability for microseismic source location[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.(in Chinese))
- [21] 高永涛, 吴庆良, 吴顺川, 等. 基于误差最小原理的微震震源参数反演[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2015, 46(8): 3 054 - 3 060.(GAO Yongtao, WU Qingliang, WU Shunchuan, et al. Source parameters inversion based on minimum error principle[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2015, 46(8): 3 054 - 3 060.(in Chinese))