

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0196-07

基于聚类分析的微震定位二次优化研究

朱权洁¹, 姜福兴¹, 缪华祥¹, 武颖奎^{1,2}, 刘晓辉¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京安科兴业科技有限公司, 北京 100083)

摘要 为了提高微震定位的精度, 利用 MATLAB 软件及其工具箱编制相关分析、处理程序, 进行了关于微震定位结果的二次优化研究。利用传统数学方法, 将微震定位问题简化为求解线性方程组, 建立基于多传感器的四四组合定位模型, 四四一组求解其定位结果; 并采用 k -means 聚类方法对组合定位结果进行优化处理, 减小定位结果的奇异性。设定核心簇和外围簇 2 类, 引入聚心曲线拐点及噪声偏移距离概念, 建立聚类继续与否的判定准则。通过某矿现场验证表明, 优化后的结果与真实震源误差为(1.8, 2.83, 11.6), 空间距离约为 12.08 m。该方法算法简单, 操作方便, 且精度较之单一定位方法有所提高, 基本满足现场需求。

关键词 微震定位; 四四组合定位; 二次优化; 聚类分析

中图分类号 TD 235

文献标志码 A

Quadratic optimization of mining microseismic source positioning based on cluster analysis

ZHU Quanjie¹, JIANG Fuxing¹, MIAO Huaxiang¹, WU Yingkui^{1,2}, LIU Xiaohui¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Anke Technology Co Ltd, Beijing 100083, China)

Abstract In order to improve the precision of the microseismic location, the quadratic optimization of mining microseismic source location has been researched through using MATLAB software and its toolbox in this paper. First, the microseismic location problem is boiled down to solving linear equations using traditional mathematics method and a Four-Four combined positioning model is set based on a multiple sensors; second, the k -means clustering method is applied to optimize the positioning results. Two classes—core cluster and peripheral cluster are set to processing those data. When it meets the principle of heart knee point and noise migration distance, the circular will stop and the final result will be solved. The result of field test shows that the optimized results are in close proximity to the real source; the distance between those is about 12.08 m (x : 1.8 m, y : 2.83 m, z : 11.6 m). This method is simple and easy to operate, and the precision has been improved compared with the single positioning method.

Key words microseismic location; Four-Four method; quadratic optimization; cluster analysis

微震监测技术是基于地球物理学、计算机技术等交叉学科发展起来的新技术, 近年来已广泛应用于矿山安全、岩土工程以及水利水电等领域和行业。作为一种先进的、行之有效的小范围(相对地震

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金项目(51174016, 51274022, 51204010)

作者简介: 朱权洁(1984-), 男, 湖北省武汉市人, 博士研究生, 从事微震监测、矿山压力及岩层控制方面的研究。

E-mail: youyicun2008@gmail.com

Tel: 13718459909

监测)监测手段,定位功能是微震技术的显著特点,该功能为岩体破裂区域的确定、矿山动力灾害活动规律的判断以及矿山安全的预测预报提供了依据。

随着微震技术的不断推广和应用,微震定位精度的提高已迫在眉睫。

1 微震定位优化原理及其实现

1.1 微震定位方法综述

微震定位是微震技术研究中最经典、最基本的问题之一,对于研究诸如物探、矿业安全以及地质概况等学科和领域的问题有重要意义。微震震源求解问题的实质是,已知各监测台站的空间坐标,根据各台站拾取到的岩石破裂波形(到时、振幅),确定震源的空间坐标、发震时间以及能量等属性。

现行的微震定位方法多引自地震学,其中 Geiger 的经典线性地震定位方法应用尤为广泛。早期的微震定位算法包括 Geiger 的经典方法以及在此基础上建立的各种线性方法——联合定位法、相对定位法和双重残差法等^[1-4]。但实际上这些定位方法多采用恒定的定位模型,即固定测区和检波器的位置,对测区的地质条件、采矿工艺以及检波器布置方式等有着较强依赖性,且各方法各有所长。

笔者所在课题组研究成果表明,针对矿山小范围监测区域,采用“移动式”传感器布置方式能获得更为合理的微震监测效果^[5-7]。因此,针对移动式区域监测的需求,需要另辟蹊径,以解决客观因素带来的影响。

现场实践表明^[8-9],硬件、监测区域以及传感器布置等因素会引起定位结果的异常或突变,使定位结果偏离真实震源:1) 检波器的性能不满足一致性;2) 单道波形的干扰,或坏道自带的干扰;3) 传播介质的不连续性(介质突变);4) 传感器的布置,以及震源点与检波器的夹角;5) 震源的位置,属于外场点还是内场点。

为了减小上述因素所带来的误差,提高微震定位精度,本文从概率论角度出发,对定位结果进行优化处理,提出一种基于四四组合定位法的微震定位结果二次优化方法。

1.2 四四组合定位法

四四定位法求解震源是一种简单的线性求解方法,该方法通过线性方程组得出震源的空间坐标 (x_0, y_0, z_0) 及发震时间 t_0 这4个未知数^[6]。因此,理论上,其求解过程可直接演化为4个方程组联立求解4个未知数。

实际监测过程中,由于传播介质、波速以及硬件等因素的影响,微震波的初至到时会因此发生改变,从而带来定位误差。因此,在原有单一四四定位方法基础之上进行改进,提出“四四组合定位法”,即将所有检波器及其到时加入计算样本集之中,以4个样本为一组,循环计算求解,得出所有定位结果。

一般而言,这比单一的“四四”定位结果更接近真实震源,在数学形式上则表现为方程个数增加,定位结果的信息量增大,从而引起定位精确的提高。其实质则是通过对监测范围内读数的随机扰动,求取一系列定位结果,弥补单一组合定位的误差放大,进一步提高定位精度。

通过四四一组进行定位,其不同组合得到的结果并不完全相同,不同组合计算结果离散性大^[7-10],而且存在病态方程^[11],得出的定位结果可能远远偏离真实震源。

1.3 优化定位流程

目前,矿山微震监测可分为集中式布置(区域监测)、分布式布置(全矿监测)及混合式布置3种模式。一般而言,1套微震系统标配12~24个拾震传感器。

当监测区域内有微震事件发生时,能够触发多个传感器的采集,通过这些采集的信号可以求解多个定位结果。理论上讲,每个定位结果均能满足线性方程组,但这些定位结果分布真实震源四周,并不完全一致,甚至存在奇异值、错误值。因此,在进行初次组合定位后,需要对这些结果进行二次的定位优化处理,以剔除外围的噪声数据,其流程图如图1所示。

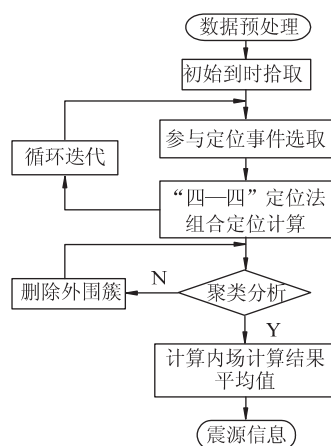


图1 微震定位优化流程图

Fig.1 Microseismic position flow chart

首先,对采集的数据进行预处理操作,去趋势

项、滤波消噪,将采集到的各通道波形进行排序(以到时先后);每组选取四个通道的波形,四四组合进行定位计算;后对所有定位结果进行聚类分析。经过多次聚类剔除外围散点后,以最终聚心作为震源。并计算震源能量、发震时间等属性。

2 数据的预处理与组合定位

2.1 有效数据的选择与预处理

为了更准确地拾取到微震波的初始到时,有效地将信号从噪声中分离出来,获得信噪比高的信号。首先对原始波形进行预处理,包括消除趋势项、平滑处理(消噪和滤波)等操作。

此外,有效通道的选择决定最终定位结果的精确。因此,在定位计算前,应首先剔除干扰波形,保留有效波形,并考虑监测台站的布置以及运算速度等因素,最终确立参与定位的通道^[12]。有效通道选择的原则主要包括以下几种:

- 1) 波形起跳清晰,初始到时点易拾取。
- 2) 应遵循“到时-振幅”、“到时差-距离差”间的关系。
- 3) 优先选择到时小、距离震源近的通道。

2.2 四四组合定位计算

组合定位结果的数量取决于监测台站的数量,其计算结果总数 N 可利用下式求取:

$$N = C_m^n = C_m^4 \quad (1)$$

式中:参与计算的公式为 4 组, $n=4$; m 为参与计算的台站数量。

假设有震源 O ,与第 i 个检波器的走时关系为:

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - v(t_i - t_0) = 0 \quad (2)$$

式中: x_i, y_i, z_i 为微震监测台站的空间坐标, m ; t_i 为监测到微震信号的 P 波到达时间, ms ; i 为检波器对应编号; x_0, y_0, z_0, t_0 分别为震源 O 的空间坐标和发震时间。

定位计算即是求取震源 $O(x_0, y_0, z_0)$ 的值,检波器的坐标值已知,其到时可拾取。因此,求取震源 O 的信息转化为求取目标函数 f 的最小值:

$$f(x, y, z, t) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} - v(t - t_0) \quad (3)$$

应用 MATLAB 编程实现上述组合定位方法,式(3)中方程组为非线性解,通过 fsolve 模型迭代计算,求取较高精度的近似解。其原理为将现有解方程组问题转化为最小二乘问题,通过预留的最优化工具箱选项,调用合理的优化函数,求取最优解。

3 二次定位优化处理

3.1 定位结果聚类分析

通过校验炮反演证明,定位结果在震源点周围密集分布,外围散点较为离散、星布四周。可以看出,最终定位结果准确与否与组合定位结果的离散程度相关,离散度越小,其定位结果越接近真实震源坐标,反之,误差越大。对此,通常采用求取定位解平均值的方法,以减小因数据离散带来的影响,但平均值的求取只是将误差分担给每一个样本,而无法消除异常数据带来的影响。

k -means 算法由 J.B.MacQueen 于 1967 年提出,是目前应用极为广泛的一种聚类算法。目前,该方法在地震及矿业领域已有大量研究^[13-15]。

3.2 k -means 聚类模型

假定数据集 X 包含 k 个聚类子集, X 的样本用 x_1, x_2, \dots, x_i 来表达, x_i 的属性描述为 $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 。参与计算的样本属性为震源函数的基本参数 (x, y, z, t) 。 k -means 聚类方法对四四组合定位结果进行聚类分析时,需进行以下几个步骤:

1) 初始化类。将微震事件“四四组合定位”的结果作为聚类对象,聚类要素为时空域内的震源信息,如式(4)所示。

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

式中: x_i 表示序号为 i 的微震定位结果样本, i 为定位结果的序号; n 为微震定位结果样本总数。

震源的属性信息为定位结果的 (x, y, z, t) 属性值,因此, $l=4$,即 $(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4})$ 分别表示其空间坐标及发震时间。考虑到聚类结果主要是剔除外围离散点,因此,聚类 k 的取值为 2,即 2 个簇,分别为外围散点簇和内场簇。

2) 计算相似度。即是计算各定位结果样本之间的距离。样本 x_i 和 x_j 之间的相似度用二者间的距离 $d(x_i, x_j)$ 来表示,即以 $d(x_i, x_j)$ 度量两震源间亲疏程度。本文采用欧氏距离来进行描述,其公式如下:

$$d(x_i, x_j) = \left[\sum_{l=1}^3 (x_{il} - x_{jl})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

3) 评价聚类性能。采用误差平方和准则函数评价聚类性能,误差平方和准则函数公式定义为:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in X_i} \|p - m_i\|^2 \quad (6)$$

式中: E 为所有样本对象的均方差之和; p 为样本对象所在空间中的一个点; m_i 为第 i 个聚类子集的聚类中心。

3.3 聚类优化计算

在实际优化过程中，需根据样本聚类结果调整聚类的次数和下一步的聚类样本数。对于偏差较大的噪声样本，首次聚类后即可剔除，然后利用新的数据集 X' 参与聚类，通过逐次的剔除外围数据，聚类中心将逼近真实值。其流程如图 2 所示。

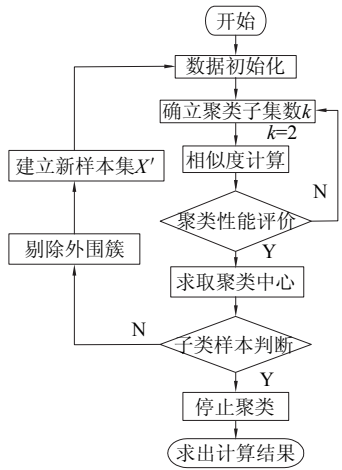


图 2 聚类分析优化流程图
Fig.2 Optimization flow chart of cluster analysis

4 工程实例应用

以河北某矿为例，对四四组合定位优化法进行测试研究。该矿于 2011 年安装由北京科技大学自主研发的 BMS 微震监测系统，对该矿的某回采工作面进行实时动态监测。该工作面共安装 6 组 12 个拾震检波器，分别布置于风巷与运巷内，现场布置图如图 3 所示，具体参数参见表 1。

2011 年 10 月 8 日 15:09:24，在距运输巷 43.5 m 处放炮，用以校验该区域波速。微震监测系统的 1，2，3，4，10，11 和 12 通道清晰采集到该次爆破事件。对采集到的波形进行归一化处理，波形图如图 4 所示。

上述通道拾取的到时及振幅如表 2 所示。

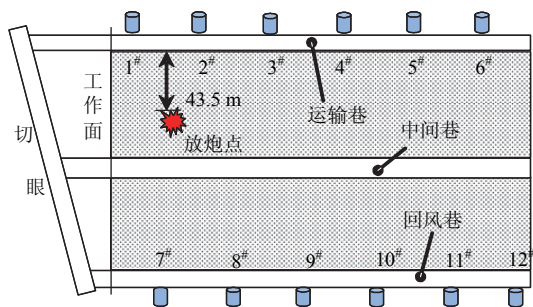


图 3 检波器及标定炮位置平面示意图
Fig.3 Schematic plan of sensors and blasting position

表 1 现场检波器布置参数
Table 1 Sensors layout parameters

测点	检波器坐标/m			测点位置	距切眼距离/m
	X轴	Y轴	Z轴		
1 [#]	55 438.82	28 389.3	-191.490	运输巷	42.1
2 [#]	55 446.95	28 360.04	-184.306	运输巷	72.5
3 [#]	55 454.68	28 333.56	-178.669	运输巷	100.1
4 [#]	55 463.56	28 303.22	-174.108	运输巷	131.7
10 [#]	55 598.85	28 301.87	-172.128	回风巷	149.6
11 [#]	55 607.09	28 272.79	-166.429	回风巷	179.8
12 [#]	55 616.86	28 244.66	-160.446	回风巷	209.6

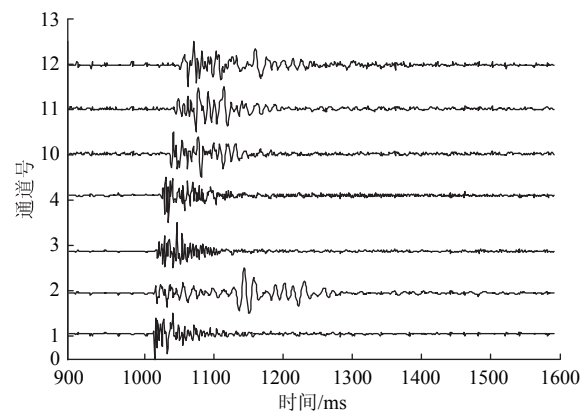


图 4 BMS 微震系统采集到的有效波形图
Fig.4 Effective waveform collected by BMS

表 2 各波形的到时与最大振幅统计
Table 2 First arrival and maximum amplitude

编号	通道号	到时/ms	振幅/mV	编号	通道号	到时/ms	振幅/mV
1	1	1 010	722.788	5	10	1 033	49.327
2	2	1 009	731.420	6	11	1 040	40.308
3	3	1 014	272.997	7	12	1 045	28.596
4	4	1 019	167.660				

4.1 初次定位计算

利用编制好的 MATLAB 四四组合定位程序，对上述数据进行计算，所得到的定位结果如表 3 中所示。7 个有效通道，共有 35 种组合定位结果。由表中数据可以看出，利用传统求解方法计算，定位结果存在奇异值解，与其他数据结果相比，偏移较大，如表中编号为 1，17，20，23，40 等的结果；甚至出现错误的情况，如编号 1，8，17，18 等的初至到时为负值。可以看出，四四线性方程组求解得出的结果确实存在离散性，在无法准确选取参与计算通道的前提下，可能会得到较为离散甚至错误的奇异结果。

表 3 四四组合定位结果
Table 3 Position results by Four-Four method

编号	定位结果				四四组合	编号	定位结果				四四组合
	X 轴/m	Y 轴/m	Z 轴/m	到时/ms			X 轴/m	Y 轴/m	Z 轴/m	到时/ms	
01	-3 363.11	12 8055.18	87 264.3	-38 198.67	2,3,6,7	19	55 198.122	28 746.939	320.052	825.692	3,4,6,7
02	55 484.64	28 379.061	-261.861	985.137	1,2,4,7	20	-17 961.19	44 8793.71	263 165.113	-134 526.1	1,5,6,7
03	55 474.109	28 374.87	-266.784	985.192	1,2,3,6	21	55 489.311	28 382.786	-191.993	995.884	2,4,5,6
04	55 489.865	28 405.197	-152.123	990.051	1,2,5,6	22	55 489.652	28 382.471	-188.358	996.121	1,4,5,6
05	55 373.775	28 353.224	-244.071	983.388	1,2,3,4	23	49 183.753	41 733.583	7607.4	-3 506.292	4,5,6,7
06	55 460.723	28 426.058	-74.171	976.248	1,3,5,7	24	55 484.628	28 379.054	-261.893	987.132	1,3,4,7
07	55 474.429	28 374.987	-266.077	987.331	1,3,4,6	25	55 478.279	28 376.481	-265.06	985.173	1,2,3,5
08	51 808.516	32 425.996	-8774.78	-1 741.365	2,3,4,5	26	55 462.735	28 421.465	-77.974	977.809	3,4,5,7
09	55 494.377	28 365.541	-194.198	999.44	3,4,5,6	27	51 894.754	31 897.324	-7 708.24	-1 434.406	2,3,4,7
10	55 475.895	28 414.731	-266.698	981.148	2,3,5,6	28	55 384.087	28 460.266	33.895	944.447	1,3,6,7
11	55 373.189	28 489.654	64.785	933.531	1,4,6,7	29	53 823.213	30 793.19	2 280.317	-24.785	2,4,6,7
12	55 461.294	28 422.372	-77.520	975.355	1,2,5,7	30	55 464.369	28 420.929	-83.948	976.925	1,2,4,5
13	55 456.798	28 419.47	-81.436	976.778	1,2,4,6	31	55 478.432	28 376.536	-264.609	987.262	1,3,4,5
14	55 295.951	28 621.026	-711.028	844.959	2,3,5,7	32	55 460.86	28 425.176	-74.966	976.512	1,4,5,7
15	55 484.657	28 379.064	-261.814	985.146	1,2,3,7	33	55 410.576	28 526.479	0.334	941.093	2,4,5,7
16	55 393.353	28 435.033	6.482	951.727	1,2,6,7	34	48 032.957	49 019.368	11 486.223	-5 709.544	2,5,6,7
17	49 795.88	41 587.589	8311.719	-3 506.895	3,5,6,7	35	55 490.462	28 396.416	-163.961	994.062	1,3,5,6
18	51 792.226	31 869.255	-7658.67	-1 431.38	2,3,4,6						

4.2 聚类参数确立

对已有微震数据样本进行聚类操作，共进行了 10 次聚类分析。聚类中心点与震源的距离关系如图 5 所示。随着聚类次数的增加，聚类分析的中心点越接近真实震源值，并在第 8 次时达到最小，后上下浮动较小，处于平稳状态。

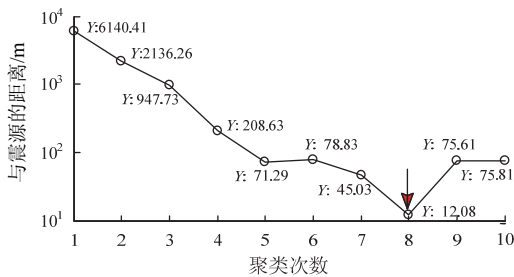


图 5 聚类次数与震源精度关系图

Fig.5 Relationship about cluster times and position accuracy

根据上述聚类结果表明，在聚类初期，由于样本较为离散，外围噪声点偏离较远，首先被剔除；随着异常样本的剔除，新的样本集重新参与聚类；聚类中心逐步逼近真实震源点。随着数据集的不断缩小，数据点越来越积聚于真实震源点四周，但当聚集到一定程度，数据集样本的个体对聚类中心将产生较大影响，聚类结果将过多倚重于聚类子集内

的样本。聚类次数的增加并不能造成定位精度的逐步提高。

基于此，引入噪声偏移距 Δd_s 和核心簇距 Δd_c 。噪声偏移距 Δd_s 是指聚心与即将删除的外围点之间的空间距离。 Δd_c 为前后两次聚类核心簇的聚心之间的距离。其公式如下所示：

$$\Delta d_s = |m_0 - p_j| \tag{7}$$

$$\Delta d_c = |m'_i - m'_{i-1}| \tag{8}$$

式中： m_0 为该次聚类所得到的样本集聚类中心； p_j 为外围簇的任一样本； Δd_s 为两者间的空间距离，该距离用于约束外围离散数据。

Δd_s 和 Δd_c 取决于噪声点与核心簇聚心的距离，在聚类优化初期，外围簇样本影响较大，样本数量不断减少，向核心簇聚集， Δd_s 呈锐减趋势，核心簇距 Δd_c 随外围簇样本的减少上下波动，减小速度小于 Δd_s ；随着聚类优化的深入，样本逐步逼近真实值，样本越来越集中，此时聚类结果受外围簇整体影响较大，单个外围离散样本对核心簇聚心影响不大，此时呈现 Δd_c 减幅比 Δd_s 大。

聚类的最优结果应在逼近真实值的同时，防止内部的离散化。如图 6 所示，在 $i=8, 9$ 时， Δd_c 和 Δd_s 进入临界状态； $i=10$ 时，核心簇与外围簇已出

现内部离散化。

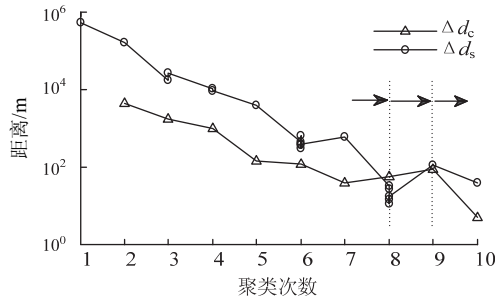


图 6 聚类参数的确立
Fig.6 Parameters of the cluster analysis

为了确立聚类停止的临界参数，引入聚心曲线拐点函数。所谓聚心曲线拐点，即是聚类中心与后一次和前一次聚类中心差值之比。其计算模型为：

$$\eta_i = \frac{|m'_{i+1} - m'_i|}{|m'_i - m'_{i-1}|} \tag{9}$$

式中： m'_i 为第*i*次聚类所得到的微震样本聚类中心； η_i 为前后两次聚类中心距离差值之比。

当样本的聚心拐点 $\eta > 1$ 时，表明样本后一次聚类的结果较之前一次有较大变化，此时的外围噪声数据对此次聚类影响较大，应停止聚类；当聚心拐点 $\eta \leq 1$ 时，表明聚类中心逐渐逼近，参与计算样本集应在剔除外围数据后，重新组合参与聚类。

综上所述，结合两因素，聚类分析过程应在 Δd_c 和 Δd_s 的拟合曲线交点处停止，考虑到 η 的影响，应取交点的邻近聚心曲线拐点处作为聚类优化停止处。上述数据计算可得，聚心曲线拐点为 $\eta_7=0.23$ ， $\eta_8=1.67$ ，因此，选择第 8 次聚类为最终结果。

4.3 定位结果对比

基于上述数据，在聚类到第 8 次后，剩余的定位结果空间展示如图 7 所示，图中距离单位为 m。

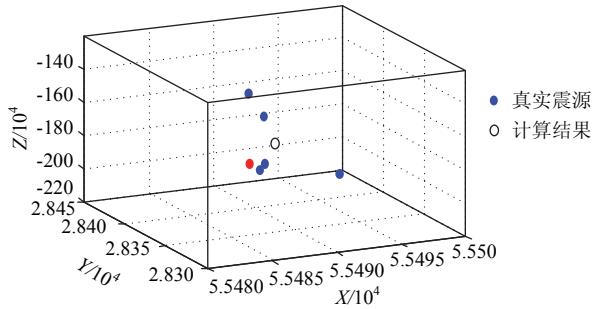


图 7 聚类优化后核心簇结果展示
Fig.7 Kernel cluster result display

对比最终聚类结果与真实震源坐标，见表 4。该放炮事件位于监测工作面煤体内，能量为 1 967.53 J，

震级为 1.07，中心频率为 269.53 Hz。震源坐标误差为(1.8，2.83，11.6)，误差距离约为 12.08 m，基本满足矿山现场要求。

表 4 最终定位结果对比
Table 4 The comparison of the calculation results

项目	震源坐标/m			备注
	X轴	Y轴	Z轴	
真实值	55 488.93	28 389.31	-189.73	
计算值	55 490.73	28 386.48	-178.13	
误差	1.80	2.83	11.60	12.08

由于监测区域埋深较浅，且采用充填回采，矿山压力显现不明显。随着工作面的不断推进，前方超前支承压力集聚升高，在高应力条件下，产生了部分岩体破裂事件。微震监测系统准确地采集到这些事件。利用编制的自动定位软件，对 2011 年 10 月 6 日至 2012 年 1 月 6 日期间数据进行了定位分析，共分析得到 48 个有效微震事件。这些事件主要分布于工作面前方 50 m 范围内，震级大小分布于 0.41~1.42，震源能量范围为 112.10~9 282.0 J，主频在 65~150 Hz 之间。

5 结 论

1) 四四组合定位法，将微震定位求解问题简化为求解四元一次线性方程组。通过四四联立，求解一系列定位结果。其实质是，通过概率论方法，减小数据集中单个奇异值引起的定位偏差。该算法简单、方便、高效，对于矿山微震实时监测过程中的自动定位具有重要意义。

2) 对经典 *k*-means 聚类算法进行改进，用于四四组合定位结果的二次优化。通过设立外围簇和核心簇，不停逐级迭代、重新聚类，有效地减小了噪声结果的影响，使核心簇的聚心结果逼近真实值，定位精度得以提高。

3) 噪声偏移距、核心距和聚心曲线拐点概念的引入，确立了聚类优化的参数。有效保证了聚类优化进程，使聚类结果不至于离散，保证微震定位结果的精度达到最优化。

4) 微震定位精度的提高不仅仅注重于首次定位结果，对于定位后的二次优化处理，仍有待挖掘。可以从数据处理角度，通过后期的优化处理，使精度进一步提高。

参考文献：

[1] 田玥，陈晓非．地震定位研究综述[J]．地球物理学进展，2002，17(1)：147-155．

- TIAN Yue, CHEN Xiaofei. Review of seismic location study[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1): 147-155.
- [2] PRUGGER A F, GENDZWILL D J. Microearthquake location: A nonlinear approach that makes use of a simplex stepping procedure[J]. Bull Seism Soc Am, 1988, 78(2): 799-815.
- [3] PAVLIS G, BOOKER J R. Progressive multiple event location (PMLE)[J]. Bull Seism Soc Am, 1983, 73(6): 1753-1777.
- [4] THURBER C H. Nonlinear earthquake location : theory and examples[J]. Bull Seism Soc Am, 1985, 75(3): 779-790.
- [5] 叶根喜, 姜福兴, 郭延华, 等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1053-1058.
- YE Genxi, JIANG Fuxing, GUO Yanhua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1053-1058.
- [6] 李会义, 姜福兴, 杨淑华. 基于 Matlab 的岩层微地震破裂定位求解及其应用[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 154-158.
- LI Huiyi, JIANG Fuxing, YANG Shuhua. Research and application of microseismic monitoring location of strata fracturing based on Matlab[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 154-158.
- [7] 王进强, 姜福兴, 吕文生, 等. 地震波传播速度原位试验及计算[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2059-2063.
- WANG Jinqiang, JIANG Fuxing, LV Wensheng, et al. Microseismic wave propagation velocity insitu experiment and calculation[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2059-2063.
- [8] 潘一山, 赵扬锋, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1002-1011.
- PAN Yishan, ZHAO Yangfeng, GUAN Fuhai, et al. Study of rockburst monitoring and orientation system and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1002-1011.
- [9] 唐礼忠, 杨承祥, 潘长良. 大规模深井开采微震监测系统站网布置优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2036-2042.
- TANG Lizhong, YANG Chengxiang, PAN Changliang. Optimization of microseismic monitoring network for large-scale deep well mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2036-2042.
- [10] 巩思园, 窦林名, 曹安业, 等. 煤矿微震监测台网优化布设研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 457-465.
- GONG Siyuan, DOU Linming, CAO Anye, et al. Study of optimal configuration of seismological observation network for coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 457-465.
- [11] 逢焕东, 姜福兴, 张兴民. 微地震的线性方程定位求解及其病态处理[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1): 60-62.
- PANG Huandong, JIANG Fuxing, ZHANG Xingmin. Study on nonhomogeneous material' s AE by image processing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Sup 1): 60-62.
- [12] 朱权洁, 姜福兴, 王存文, 等. 微震波自动拾取与多通道联合定位优化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 397-403.
- ZHU Quanjie, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. Automated microseismic event arrival picking and multi-channel recognition and location[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 397-403.
- [13] 杨培杰, 印兴耀, 张广智. 模糊 C 均值地震属性聚类分析[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 322-324, 347.
- YANG Peijie, YIN Xingyao, ZHANG Guangzhi. Cluster analysis of seismic attributes by fuzzy C-mean algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(3): 322-324, 347.
- [14] ANDRZEJ LESNIAK, ZBINIEW ISAKOW. Space-time clustering of seismic event and hazard assessment in the Zabrze-Bielszowice coal mine, Poland[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 918-928.
- [15] 吴爱祥, 武力聪, 刘晓辉, 等. 矿山微地震活动时空分布[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(6): 609-613.
- WU Aixiang, WU Licong, LIU Xiaohui, et al. Space-time distribution of microseismic activities in mines[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(6): 609-613.