

DOI: 10.11779/CJGE201704016

基于高密度台阵的小尺度区域微震定位研究

贾宝新^{1, 2}, 贾志波¹, 赵培¹, 陈扬¹

(1. 辽宁工程技术大学土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100000)

摘要: 准确的震源定位是微震研究的基础。针对微震定位误差较大的情况, 探究了台阵密度同定位误差之间的联系。通过建立了立体监测体系模型, 以到时差为变量建立目标方程, 采用粒子群算法进行定位求解, 研究了定位方法、波速误差和震源位置对定位的影响; 根据现场试验, 分析了台阵密度对定位的影响。研究发现, 波速误差对定位误差有着极大影响, 且定位波速过小带来的误差更大; 台站包络范围内的定位效果好于外部, 波速误差越大, 效果越明显。台阵密度对定位的影响体现在两方面: 第一, 台站阵面数量, 定位精度从高到低依次是多阵面, 近震源单阵面, 远震源单阵面; 第二, 台站的数量, 采用多阵面定位时, 震源定位误差同台站数量呈负指数相关。研究成果可以为矿山微震监测和中小尺度微震的研究提供一定的参考作用。

关键词: 小尺度区域; 微震定位; 台站数量; 波速误差, 震源位置

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)04-0705-08

作者简介: 贾宝新(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿山灾害力学等方面的研究工作。E-mail: jbx_811010@126.com。

Microseism location in local scale region based on high-density array

JIA Bao-xin^{1, 2}, JIA Zhi-bo¹, ZHAO Pei¹, CHEN Yang¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Institute of Geology, China Earthquake

Administration, Beijing 100000, China)

Abstract: Accurate source location is the basis of most micro seismic studies. Because of large location error, the relationship between station density and location error is analyzed. A 3-D monitoring system model is established, and the target equation is set up by using the time difference. The influences of location method, velocity error and source position on source location are studied by using the PSO algorithm. It is found that the wave velocity error has a great influence on the location error, and the error caused by low velocity is higher. The location in station envelope is better than that in the external. The higher the velocity error, the more obvious the effect. The station density has a significant effect on the source location which is mainly reflected in two aspects: the first is the number of station plane, the location accuracy from high to low followed by the arrays of multiple plane, single plane near source, single plane far from source; the other is the number of sensors, and the number of the whole monitoring system has a close relationship with the station number. It is shown that there is a negative exponential relationship between the location error and the station number. The results of this study can provide some reference for the researches on mine seismic monitoring and local scale earthquakes.

Key words: local scale region; microseism location; station number; velocity error; source position

0 引言

微震监测已成为各类矿山进行灾害防治和研究的主要技术之一^[1], 自南非首次在国内金矿开展矿震监测以来, 并随着矿山进入深采阶段, 各国纷纷开展微震监测的研究工作。自1986年中国首次在门头沟煤矿开展矿山微震监测以来, 国内学者基于微震监测进行了大量的研究并取得了丰硕的成果^[2-10]。但是, 以上研究成果大部分都是建立在准确的震源定位上, 目前微震定位精度普遍在十几米甚至几十米, 学者们对于如何提高震源定位精度进行了很多研究。巩思园

等^[11-13]从台网布设和定位通道选取上入手, 形成了台网布置优化和评价系统及最优通道个数的确定原则。董陇军等^[14]采用无需测速的定位拟合方法来消除速度给不准对定位的影响。胡静云等^[15]利用小波离散信号去噪方法对低信噪比的信号进行去噪后再拾取到时, 使得定位误差大大减小。波速模型是影响定位的一大关键因素, 窦林名等^[16]构建异向波速模型以适应

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB226803); 辽宁省自然科学基金项目(201602351); 地震动力学国家重点实验室开放基金项目(LED2015B01)

收稿日期: 2016-01-08

煤矿层状赋存的特点, Adam 等^[17]、贾宝新^[18]借助大量监测数据建立三维波速结构模型, 这两种方法同统一简化波速模型相比定位精度都不同程度上有所提高。综上所述, 学者们对如何提高微震定位精度进行了大量有益的研究, 但试验多为千米尺度, 不够全面。本文在前人的基础上, 依托阜新新民金矿试验在百米尺度研究台站数量同定位精度之间的关系, 从而为微震监测的研究提供理论与技术参考依据。

1 震源定位方法

1.1 目标方程

对于微震定位的实现首先需要解决定位的目标方程的建立。目前国内学者基于微震监测和定位进行了大量的研究并取得了丰硕的成果。其主要有两种, 一为已知波速的定位方程, 二为未知波速下的目标方程。

(1) 已知波速的定位数学公式

由于地震波中 P 波在介质中传播速度最快, 初至时间易于识别, 所以目前微震定位中都采用 P 波到时进行震源定位。假设岩体是均质的(即统一简化波速模型), P 波传播速度为已知量 v , 所求震源参数(震源位置、发震时刻)为 (x_0, y_0, z_0, t_0) , 因此需要至少 4 个监测台站布置在不同地点进行定位工作, 各台站的记录参数(台站位置、P 波到时)为 (x_i, y_i, z_i, t_i) , $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ 。

有两点间距离可得震源到各台站的距离 l_i 为

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

由 P 波走时计算公式和震源发震时刻可得各个台站理论计算到时为

$$t'_i = \frac{l_i}{v} + t_0 \quad (2)$$

两个不同位置的台站 i 和 j 的理论到时之差为

$$\Delta t'_{ij} = t'_i - t'_j = \frac{l_i - l_j}{v} \quad (3)$$

实测的到时差为

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad (4)$$

由 n 台台站组成的监测系统中共有 C_n^2 组独立的到时差, 每组理论到时差和实测到时差之间总有一定的偏离, 偏离程度越小说明震源定位结果越接近真实值, 故可以使用到时差作为目标函数进行震源参数的求解, 即

$$f = \min \sum_{i=1}^n \left(\Delta \hat{t}_{ij} - \Delta t_{ij} \right)^2 = \min \sum_{i=1}^n \left(t_i - t_j - \frac{l_i - l_j}{v} \right)^2 \quad (5)$$

式(5)中共有 3 个未知参数, 不需要求解震源发震时刻, 这不仅加快了优化计算的收敛速度, 同时降

低变量维度也提高了计算结果的精度。但作为三维定位, 仍需要至少 4 台台站。相对于以到时为变量的目标函数, 以到时差为变量的目标方程变量少、算法收敛速度快, 具有更好的定位精度^[14]。

(2) 未知波速的定位数学公式

前述定位中使用的已知波速在定位中简单实用, 但一个不可避免的问题就是由于地质结构的复杂使得通过试验测得的波速很难适应所有区域, 在仍采用统一简化波速模型的前提下, 可以通过将 P 波波速 v 作为未知量进行求解, 这样的波速总能很好的适应每一次定位计算。

当未知波速进行定位时, 式中的未知量则增加。因此为了使算法更加稳定、加快收敛速度, 此时宜采用到时差法进行计算, 对于波速 v 的值域需加以约束。目标函数也可采用 1-范数表示, 即

$$f = \min \left\| \Delta \hat{t}_{ij} - \Delta t_{ij} \right\| = \min \left\| t_i - t_j - \frac{l_i - l_j}{v} \right\| \quad (6)$$

将式(6)中的到时差改为距离差, 即

$$f = \min \left\| (t_i - t_j)v - (l_i - l_j) \right\| \quad (7)$$



图 1 现场监测

Fig. 1 Field monitoring

1.2 求解算法

粒子群算法是一种新兴的进化算法, 该方法搜索过程中粒子根据自己的飞行历程和群体之间信息的传

递不断调整搜索的方向和速度, 该搜索过程主要是依靠粒子间的相互作用和相互影响完成的, 具有实现容易、收敛快、精度高的特点^[19]。同时, “粒子群”在解空间的自由飞行能够很好地解决最终解是局部最优解的问题。粒子*i*的速度与位置的更新公式分别为

$$V_{id} = wV_{id} + c_1r_1(P_{id} - X_{id}) + c_2r_2(P_{gd} - X_{id}), \quad (8)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id}. \quad (9)$$

式中 w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为取值在 [2, 4] 之间的随机整数, 称为学习因子或加速因子; r_1 和 r_2 为介于 [0, 1] 之间的随机数, 分别称为最大惯性权重和最小惯性权重; $d = 1, 2, 3 \dots, D$, D 表示解向量的维数; V_{id} , X_{id} , P_{id} 和 P_{gd} 分别为迄今为止粒子 i 在第 d 维空间的飞行速度、位置以及搜索到的最优解和整个粒子群搜索到的最优解。

2 信号监测

微震监测已成为全国各类矿山进行动力灾害治理的有效方法之一, 但定位精度始终是一个亟待解决的难题。高密度台站监测被认为是一个行之有效的解决方法, 但目前鲜有在矿山开展高密度监测研究。为了研究高密度台站与定位效果之间的联系, 本文选择在矿区开展小尺度区域微震监测试验。建立百米尺度的矿山地震试验场, 进行高密度台站微震监测试验研究, 能够为矿震研究提供理论基础。

2.1 试验区域概况

本文选定在阜新某金矿进行小尺度区域微震监测试验。矿区地理坐标为: 东经 $121^{\circ}43'04'' \sim 121^{\circ}43'06''$, 北纬 $41^{\circ}53'03'' \sim 41^{\circ}53'04''$ 。矿区地表土质为亚黏土, 矿区内的岩石主要包括黑云斜长糜棱岩和长英质糜棱岩, 岩质坚硬且完整性很好。矿山采用竖井和斜井联合开拓, 单罐笼配平衡锤提升。目前矿山开拓有 4 个中段, 即 223 m 中段、180 m 中段、140 m 中段及 100 m 中段, 其中 223 m 中段已经采空予以废弃。根据矿山生产现状及矿体的赋存条件, 采场采用自上而下水平分层采矿法, 目前矿山矿体采用地下开采, 在充分利用原有开拓系统的基础上, 采用竖井-盲斜井联合开拓, 地表至 180 m 平面采用竖井运输, 180 m 平面至 140 m 平面和 180 m 平面至 100 m 平面通过斜井进行运输。试验段选在 140 m 平面, 180 m 平面和 100 m

平面。

2.2 监测仪器

试验仪器包括无分向传感器、电缆、构造物理变形场 12 通道数据集线器和 48 通道数据记录器。本试验所用传感器采用无分向设置, 传感器具有很高的灵敏度, 能够有效地对微震波进行接收, 不同于传统的三分向传感器, 传感器通过传输电缆同集线器相连, 集线器和记录器通过专用数据线连接。传感器和电缆连接部分以及传感器内部都进行了注胶进行防水处理, 数据采集频率通过记录器进行控制, 其数采频率可分别设置为: 24, 48, 97, 195, 390, 781, 1562, 3125, 6250, 12500, 25000, 50000, 100000 Hz。本试验在记录微爆破信号时, 采样频率取为 25 kHz。

2.3 台阵布设

传感器布设位置主要在 3 个平面和两条斜井上, 分布区域竖向尺寸为 80 m, 水平方向的尺寸在 100~200 m 之间。整个台阵共由 33 个传感器组成, 传感器的空间布置如图 2 所示。

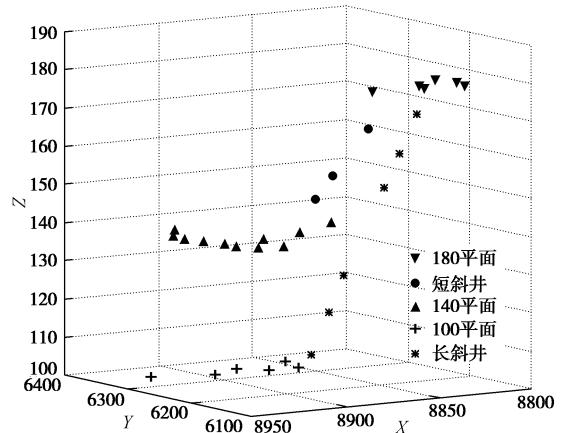


图 2 传感器空间布置图

Fig. 2 Spatial layout of sensors

2.4 微爆破震源

本试验共进行了 3 次微爆破试验, 爆破位置分别选择在三作业个平面。为准确采集震源发震时刻, 采用在震源附近设有一监测台站的方法。分别计算其他监测台站与该台站的到时差, 即为震源信号到检测台站的走时。震源坐标和起爆用药量见表 1, 记录的信号波形图也如表中所示。

表 1 微爆破震源信息

Table 1 Micro blasting sources

震源编号	位置	数量	用药量/g	坐标值/m			信号波形示例
				X	Y	Z	
1	180 m 平面	1	300	8882.635	6127.475	181.028	
2	140 m 平面	1	300	8917.753	6171.168	139.620	
3	100 m 平面	1	400	8870.609	6316.663	100.096	

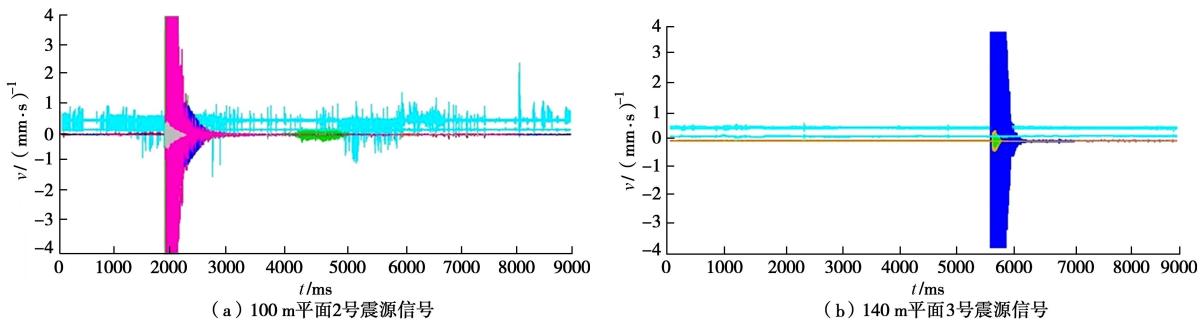


图 3 微爆破信号

Fig. 3 Signals of micro blasting

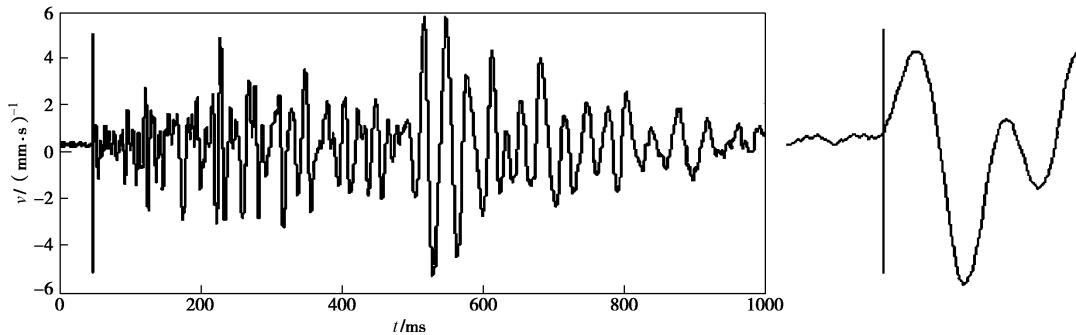


图 4 信号到时拾取

Fig. 4 Onset time picking of signals

检测结果显示在 3 次爆破中, 只有 140 m 平面的 2 号爆破和 100 m 平面的 3 号爆破接收效果较好, 而 180 平面 1 号震源信号接受质量和台站有效接受数量十分不理想, 予以舍弃。分析其原因可能是震源位置偏远, 药量小, 且附近运输巷道密集, 影响了震源到各传感器的信号传播。图 3 为第二次和第三次为爆破后各台站接收信号。

2.5 到时拾取

由于地震波中 P 波在介质中传播速度最快, 初至时间易于识别, 所以目前微震定位中都采用 P 波到时进行震源定位。考虑到到时拾取的精度对定位的影响, 首先对各台站采集的震源信号进行小波包去噪, 并在去噪的基础上手动拾取到时。图 4 为信号到时拾取。各台站坐标限于篇幅不再描述。

3 震源定位误差分析

3.1 模型建立

假定微震监测区域为一边长为 1000 m 的立方体区域, 分别在区域的 8 个顶点位置布置上传感器, 坐标(单位均为 m)分别是 A(0, 0, 0), B(1000, 0, 0), C(1000, 1000, 0), D(0, 1000, 0), E(0, 0, 1000), F(1000, 0, 1000), G(1000, 1000, 1000), H(0, 1000, 1000), 为方便探究不同因素对定位误差的影响, 简化理论模型中波在介质中传播的等效波速 $V = 5600 \text{ m/s}$, 监测区域中心点 O 坐标为

(500, 500, 500)。分别研究震源位置在区域内和区域外的定位求解效果, 再给出震源坐标和波速后, 首先假定 0 时刻激发震源求解出震源到各传感器的到时作为真值, 然后利用到时再行定位计算, 震源点 1~11 的坐标依次为 (500, 500, 500), (400, 400, 400), …, (-500, -500, -500)。震源点 1~6 位于监测区域包络线内, 即 AG 连线上, 震源点 7~11 位于监测区域包络线外, 即 AG 延长线上。各震源点至全部传感器的到时采用四舍五入以 0.1 ms 为最小单位来模拟到时拾取带来的误差。模型见图 5。

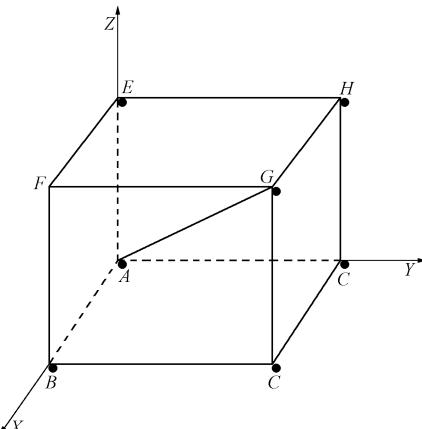


图 5 监测区域模型

Fig. 5 Model of monitoring region

3.2 震源定位影响因素分析

通过 MATLAB PSO 工具箱进行定位求解, PSO

参数设置: 学习因子 $c_1 = c_2 = 2$, 惯性权重 $r_1 = 0.9$, $r_2 = 0.4$, 群体例子数设为 20, $w = 1$, 结束条件为最大迭代次数为 20000 或 $\varepsilon = 1 \times 10^{-25}$ 。在已知波速 $V = 5600$ m/s 的情况下, $D=3$, 采用未知波速进行定位求解时 $D=4$ 。

(1) 定位方法对定位的影响

为探究不同定位方法为定位误差的影响, 本文通过离子群算法对已知波速和未知波速两种目标函数进行定位。定位结果误差如图 6 所示。

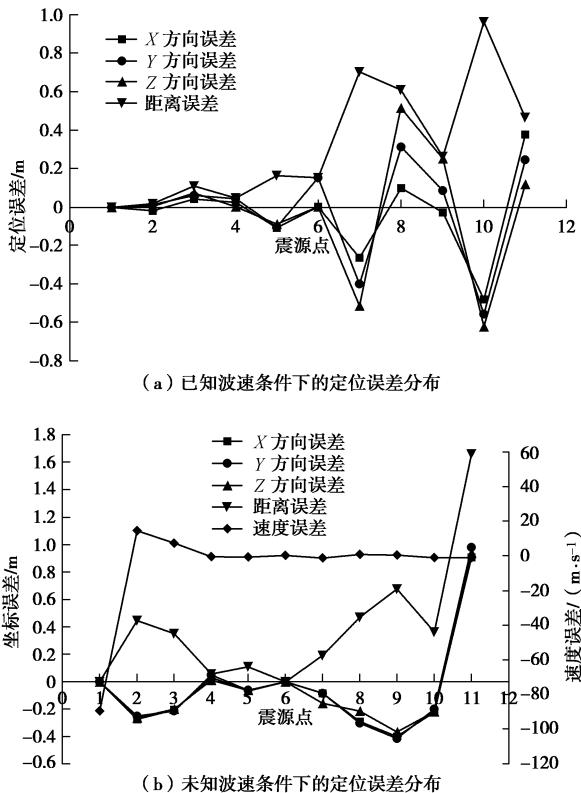


图 6 定位误差分布

Fig. 6 Distribution of location error

从图 6 (a) 中可以发现, 在已知波速的情况下, 随着震源点位置远离监测台站包络线的中心, x , y , z 3 个方向的误差均呈现增大的趋势。采用未知波速进行定位时, 各震源点的定位误差随着距离监测台站中心点越来越远, 误差呈现跳跃性变化, 定位误差在区域内数值较小, 在区域外随距离的增大误差增大趋势明显, 大于采用已知波速的定位误差。由图 6 (b) 可知, 未知波速求得波速与已知波速定位误差相差较大, 不能反映真实地质波速情况。在不考虑波速误差的情况下, 两种定位方法对定位误差的影响不很明显, 只是定位误差的变化趋势有所不同。

(2) 波速误差对定位的影响

由于采用已知波速模型进行定位时, 给定的波速与实际波速存在差异, 因此以 $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$

的误差对原始波速 $V = 5600$ m/s 进行扰动并以其作为波速真值, 当扰动误差大于 0 时表示实际波速小于 V , 反之则表示实际波速大于 V , 然后计算到时并同 $V = 5600$ m/s 一起作为定位计算的初始值, 验证波速给不准对定位的影响, 各震源点在不同波速误差扰动下的定位距离误差如图 7 所示。

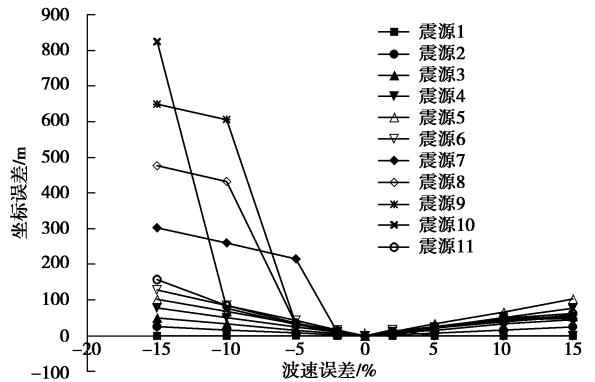


图 7 不同波速误差下的震源定位距离误差分布

Fig. 7 Distribution of location distance error under different wave velocity errors

通过图 7 可以发现, 采用已知波速进行定位时, 波速误差对定位结果影响很大。当实际波速小于定位用波速时, 各震源点的定位误差随着波速误差的增大呈直线增长。当实际波速大于定位用波速时, 区域内各震源点的定位误差随着波速误差的增大呈直线增长, 区域外各震源点的定位误差明显大于区域内的且随着波速误差的增大近似呈指数增长。总的来说, 定位波速过小带来的误差更大一些, 对定位影响更大。

(3) 震源位置对定位的影响

从图 8 中可以明显的看出监测区域内和区域外各震源点的定位误差有着明显差异。当实际波速大于定位波速, 扰动值小于 -5% 时, 在区域内定位误差随着距中心点的距离的增大而直线增加, 从震源点 6 即内外区域分界点处误差变化速率突然变大, 随后又突然变小, 随着扰动值的减小其变小的位置也越来越远, 误差变化速率并最终趋于平稳; 当实际波速小于定位波速时, 扰动值大于 5% 时, 在区域内部定位误差随着距中心点的距离的增大而先增加后减小, 从分界点开始又随着距离的增大而逐渐增大; 扰动值为 $\pm 2\%$ 时, 定位误差很小, 在区域内呈直线缓慢增大, 在区域外误差较稳定。这说明震源位置对定位的影响受波速误差的干扰, 当波速存在过大误差时, 根据图 8 可将定位误差的变化从区域中心点分为 3 个区域: 近距增大区域、突变区域和远距增大区域, 定位误差的变化趋势在突变区域发生改变, 突变区域的范围和变化特性取决于波速误差。

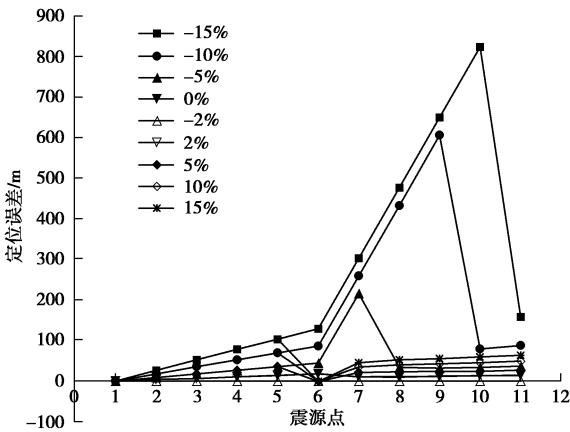


图 8 不同位置的震源定位误差分布

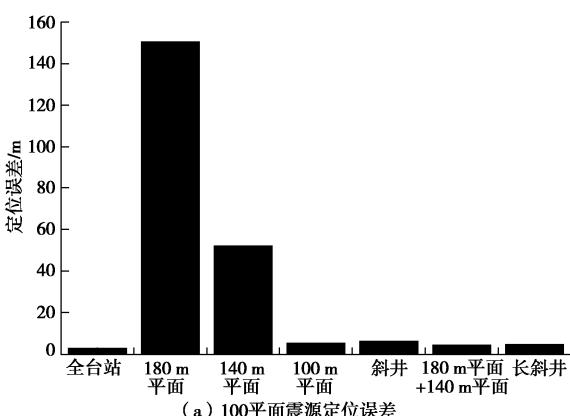
Fig. 8 Distribution of location distance error at different positions

3.3 微爆破震源定位分析

利用粒子群算法对现场进行的微爆破进行震源定位。定位参数为：定位区域坐标 $X=[8800, 9000]$, $Y=[6100, 6400]$, $Z=[95, 185]$, 定位采用全部有效到时。通过室内超声波测试得到试验区域岩石试件的 P 波波速为 6357 m/s, 为避免波速误差影响定位效果, 微爆破震源定位采用未知波速进行定位。

(1) 台面数量对定位的影响

为了分析高密度台阵进行微震监测的定位效果, 分别采用不同台面即依次采用 180 平面、140 平面、100 平面、斜井(长、短斜井一起)传感器以及部分平面传感器联合来进行定位, 定位采用未知波速定位以获得更好地定位结果, 定位结果如图 9 所示: 从图 6 可以发现, 在采用单一台站平面进行定位时, 仅当震源位于监测平面上或附近时才会较准确地实现震源的定位, 远离震源的监测平面单一定位的误差极大, 尤其是竖向定位误差, 如采用 140 平面的传感器对 100 平面进行定位时, 其竖向误差竟达到了 51 m, 而两个平面之间的竖向距离也仅 40 m。采用两监测平面进行定位时, 定位效果明显优于单一平面, 但仍低于采用全部传感器进行定位, 说明传感器“阵面”的增加能够很大程度上减小定位误差, 对微震定位有着积极促进作用。



(a) 100 平面震源定位误差

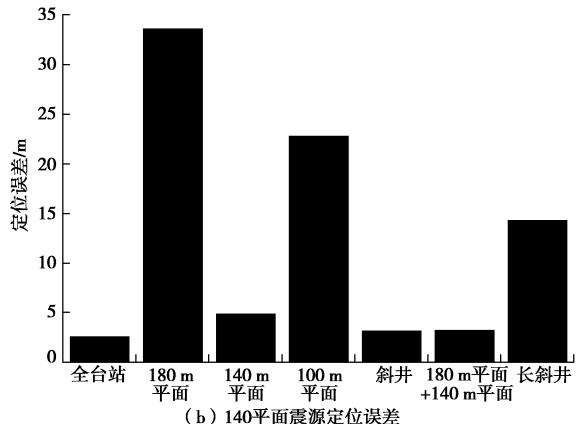


图 9 定位误差同传感器位置的关系

Fig. 9 Relationship between location error and position of sensors

(2) 台站数量对定位的影响

为了验证监测台阵密度对定位效果的影响, 并避免采用单一平面进行定位, 从台阵中所有传感器选择 4 个传感器并逐次叠加其他位置的传感器联合对 140 平面微爆破选择不同数量的传感器进行未知波速定位, 每次选择 3 组数据进行定位取平均值, 得到的定位结果误差如图 10 所示。通过图 10 (a) 可以看出, 传感器的数量对提高震源定位精度有着积极作用, 随着传感器数量的增加, 定位误差越来越小。对定位误差进行求导, 得到误差变化趋势曲线, 如图 10 (b) 所示, 可以看出当传感器数量在 4~14 时, 定位误差随着传感器数量的增加明显减小, 之后导数数值变化平缓但仍然小于 0, 说明传感器数量的增加能够改善定位效果, 从而证明了高密度台阵对控制微震监测精度是有利的, 采用全台阵的震源定位误差约为 2.6 m。通过对图中定位误差数据的拟合, 得到定位误差 ΔL 和传感器数量 n 之间的数学关系式如式 (10) 所示, 校正决定系数 Adj. R-Square=0.98972, 说明拟合结果非常真实, 通过式 (10) 可以发现两者之间呈指数关系。

$$\overline{\Delta L} = 251.999 \cdot e^{-\frac{n}{2.343}} + 3.166 \quad (10)$$

以上计算中, 采用全台阵定位反演得到的 140 平面和 100 平面 P 波波速分别为 5898, 5903 m/s, 同室内试验测得的结果相差较大; 另外同模型分析的结果相比, 实际监测的定位误差较大, 这都与地质结构的复杂性有关。事实上岩体中裂隙、节理、断层等各种不连续面的位置、尺寸及走向都影响着波在介质中的传播, 并且定位需要的到时是从在噪声环境中记录的波形中通过震相识别得到的, 不可避免的存在有误差。高密度台阵微震监测, 一方面能够扩大到时数据数量, 减少到时误差影响的突出性; 另一方面, 高密度台站尤其是采用三维布设时, 不同程度减少了震源到各个

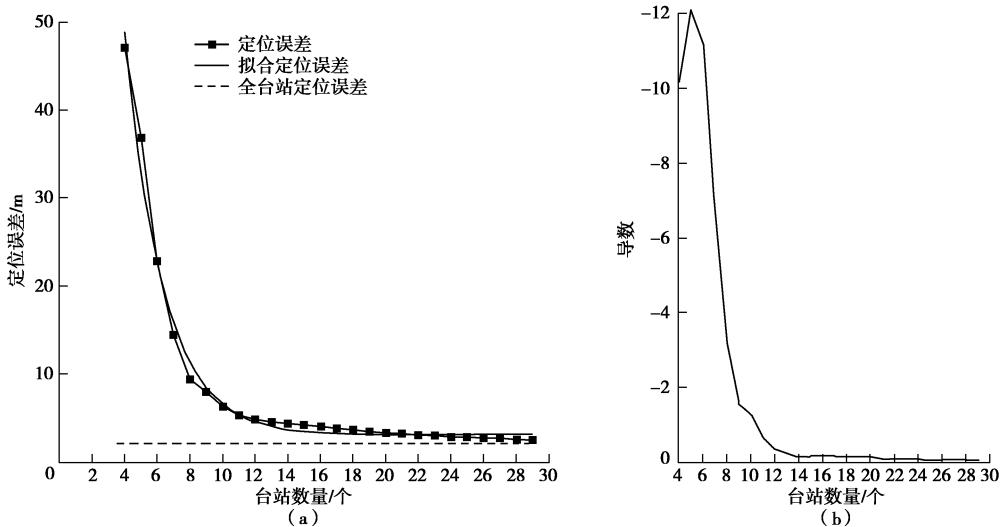


图 10 定位误差同台站数量的关系

Fig. 10 Relationship between location error and number of sensors

传感器的走时路程, 降低了岩体不均匀性带来的走时数据在空间和时间上与理论计算的差别, 综上两点使得高密度台站有效提高了微震监测的定位效果。

4 结 论

震源空间位置是微震监测技术研究的重要参数, 采用到时差作为目标函数, 利用 PSO 算法研究了定位方法, 震源位置和波速误差, 台站密度对定位误差的影响。

(1) 通过理论建模, 对定位误差研究发现, 在台站包络区域内的震源点, 采用已知波速定位的定位效果更好。在台站包络区域外二者差距不太。震源位置对定位有影响, 在监测台站包络区域内的震源的定位精度要好于区域外的。

(2) 以 $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$ 的误差对原始波速 $V = 5600 \text{ m/s}$ 进行扰动并以其作为波速真值, 从结果知当采用已知波速的方法时, 目标函数含波速, 当定位波速过大时, 定位误差会随着波速误差的增大而呈直线增长; 当定位波速过小时, 定位误差会随着波速误差的增大而呈指数增长, 误差更大。当波速误差较大时, 定位误差随着震源点远离监测区域中心会先增大后变小, 最终随距离而缓慢增大。

(3) 通过阜新新民金矿高密度台站现场试验, 传感器的密度对震源定位有着显著的影响, 这主要体现在两个方面。第一, 传感器台面的数量, 仅在单一平面上布置传感器难以实现对震源的有效定位, 采用多平面布置传感器能够保证震源的准确定位; 第二是传感器的数量, 整个监测体系传感器的数量同定位效果有着密切联系, 随着传感器数量的增多, 震源定位误差呈指数减小。因此, 在微震监测中进行高密度台站布设是有利且必要的。

本文的定位是基于统一简化波速模型进行的, 尚存在着一些不足, 未来的研究应该建立在三维波速结构上, 对提高震源定位精度进行深入研究。进行三维波速结构的反演, 不仅能够为矿山微震监测研究开拓一条新的道路, 也能够研究单一构造类型对地震波传播的影响, 从而填补地震研究在天然尺度、区域尺度上的空白。

参考文献:

- [1] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213. (JIANG Yao-dong, PAN Yi-shan, JIANG Fu-xing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205–213. (in Chinese))
- [2] 姜福兴, 尹永明, 朱权洁, 等. 基于微震监测的千米深井厚煤层综放面支架围岩关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 167–174. (JIANG Fu-xing, YIN Yong-ming, ZHU Quan-jie, et al. Relationship between support and surrounding rock of fully mechanized caving face in thick coal seam of kilometer deep mine based on microseismic monitoring technology[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(2): 167–174. (in Chinese))
- [3] 尹永明, 姜福兴, 谢广祥, 等. 基于微震和应力动态监测的煤岩破坏与瓦斯涌出关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 2: 325–330. (YIN Yong-ming, JIANG Fu-xing, XIE Guang-xiang, et al. Relation between coal-rock failure and methane emission based on microseismic and dynamic stress monitoring[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 2: 325–330. (in Chinese))
- [4] 窦林名, 何江, 巩思园, 等. 采空区突水动力灾害的微震

- 监测案例研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012(1): 20 - 25. (DOU Lin-ming, HE Jiang, GONG Si-yuan, et al. A case study of micro-seismic monitoring: goaf water-inrush dynamic hazards[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012(1): 20 - 25. (in Chinese))
- [5] 徐学锋, 窦林名, 曹安业, 等. 覆岩结构对冲击矿压的影响及其微震监测[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 11 - 15. (XU Xue-feng, DOU Lin-ming, CAO An-ye, et al. Effect of overlying strata structure son rock burst and micro:seismic monitoring analysis[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 11 - 15. (in Chinese))
- [6] 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 Si-yuan, DOU Lin-ming, CAO An-ye, et al. Study of optimal con-figuration of seismological observation network for coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 457 - 465. (in Chinese))
- [7] 朱小景, 潘一山, 唐治, 等. 基于剪切梁的地垒断层型矿震解析分析[J]. 力学与实践, 2015(2): 182 - 188, 213. (ZHU Xiao-jing, PIAN Yi-shan, TANG Zhi, et al. Horst fault rockburst analysis based on shear beam theory[J]. Mechanics in Engineering, 2015(2): 182 - 188, 213. (in Chinese))
- [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 Yi-shan, ZHAO Yang-feng, GUAN Fu-hai, et al. Study on rockburst monitoring and orientation system and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1002 - 1011. (in Chinese))
- [9] 于丽艳. 木城涧煤矿矿震监测震源定位与震级研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011. (YU Li-yan. Study of rock burst monitoring and orientation and magnitude of Mu chengjian colliery[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011. (in Chinese))
- [10] 贾宝新, 赵培, 姜明, 等. 冲击地压物理监测矿震台站优化布置及其应用[C]// 中国岩石力学与工程学会、中国煤炭学会. 煤矿冲击地压防治的创新与实践——全国防治煤矿冲击地压高端论坛论文汇编. 北京, 2013. (JIA Bao-xin, ZHAO pei, JIANG Ming, et al. Optimization arrangement of mine earthquake stations for physical monitoring of rock burst and its application[C]// Innovation and practice of coal mine rock burst prevention——Compilation of the National Forum on the prevention and control of coal mine rockburst. Beijing, 2013. (in Chinese))
- [11] 巩思园, 窦林名, 马小平, 等. 提高煤矿微震定位精度的最优通道个数的选取[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2017 - 2021. (GONG Si-yuan, DOU Lin-ming, MA Xiao-ping, et al. Study on the construction and solution technique of anisotropic velocity model in the location of coal mine tremor[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 35(12): 2017 - 2021. (in Chinese))
- [12] 贾宝新, 李国臻. 矿山地震监测台站的空间分布研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2045 - 2048. (JIA Bao-xin, LI Guo-zhen. The research and application for spatial distribution of mines seismic monitoring stations[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2045 - 2048. (in Chinese))
- [13] 董陆军, 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): 2057 - 2067. (DONG Long-jun, LI Xi-bing, TANG Li-zhong, 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): 2057 - 2067. (in Chinese))
- [14] 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): 1940 - 1946. (HU Jing-yun, LI Shu-lin. Study on the application of the P wave to the optimization of the seismic wave and the reduction of the source loca-tion error[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1940 - 1946. (in Chinese))
- [15] 巩思园, 窦林名, 马小平, 等. 煤矿矿震定位中异向波速模型的构建与求解[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1757 - 1763. (GONG Si-yuan, DOU Lin-ming, MA Xiao-ping, et al. Study on the construction and solution technique of anisotropic velocity model in the location of coal mine tremor[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 1757 - 1763. (in Chinese))
- [16] ADAM L, PETER S. Improvements in seismic event locations in a deep western U.S. coal mine using tomographic velocity models and an evolutionary search algorithm[J]. Mining Science & Technology, 2009, 19(5): 599 - 603.
- [17] 贾宝新, 赵培, 姜明, 等. 非均匀介质条件下矿震震波三维传播模型构建及其应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 364 - 370. (JIA Bao-xin, ZHAO Pei, JIANG Ming, et al. Three-dimensional propagation model building in heterogeneous medium of mine earthquake shock wave and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 364 - 370. (in Chinese))
- [18] 徐鹤鸣. 多目标粒子群优化算法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. (XU He-ming. Research on multiob jective particle swarm optimization algorithms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese))