

DOI: 10.11779/CJGE201708007

基于 VFOM 的矿山微震震源定位及近震震级标定

王泽伟^{1, 2}, 李夕兵^{1, 2}, 尚雪义^{1, 2}, 董陇军^{1, 2}, 刘 栋^{1, 2}, 周勇勇^{1, 2}

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学深部金属矿产开发与灾害控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 矿山微震事件震源位置和近震震级是矿震最基本的参数, 其准确计算对矿震事件分析与信息挖掘具有重要作用。介绍了一种有别于传统定位思路的定位方法—虚拟场优化法 (virtual field optimization method, VFOM), 并给出了以台站计算震级偏差最小为目标的近震震级公式回归方法。将 VFOM 和近震震级参数回归方法用于开阳磷矿用沙坝矿区 401 个微震事件的震源定位和近震震级公式的重新标定。结果表明, 定位结果可靠, 重新标定震级公式得到的震级台站偏差相比于现有公式有明显的减小。此外, 采用标定震级公式计算的震级分布观察到了明显的双峰分布现象, 表明用沙坝矿的微震数据可能由两种成因的事件构成。实例表明, 不同地区的近震震级计算公式必须根据实测数据重新标定, 否则将可能丢失一些重要的震级分布特征。

关键词: 矿山; 微震; 震源定位; 近震震级; 虚拟场优化法; 起算函数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)08-1408-08

作者简介: 王泽伟(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事矿山微震和天然地震成像方面的研究工作。E-mail: wangzw.csu@gmail.com。

VFOM-based source location and local magnitude calibration for micro-seismic events in mine

WANG Ze-wei^{1, 2}, LI Xi-bing^{1, 2}, SHANG Xue-yi^{1, 2}, DONG Long-jun^{1, 2}, LIU Dong^{1, 2}, ZHOU Yong-yong^{1, 2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Key Laboratory of Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: As the most basic source parameters, locations and local magnitudes of micro-earthquakes are of importance to the analysis and interpretation of micro-seismic data so that their accuracies are crucial. This study introduces a source location method called the virtual field optimization method (VFOM) and provides a parameter regression method which minimizes the station variance for an optimal local magnitude formula. The occurrence sources of a data set consisting of 401 events from the Yongshaba deposit of Kaiyang Mine are located using the VFOM, and an optimal local magnitude formula is regressed using the suggested method in this study. The results show that the locations are reliable and the station variances are significantly reduced. In addition, the bimodal characteristic is observed from the magnitude distribution obtained by the derived formula, indicating two different causes of the micro-seismic data. This study also demonstrates that the local magnitude formula should be regressed using the measured data for a new area, otherwise the magnitude distribution may lose some important characteristics.

Key words: mine; micro-seism; source location; local magnitude; virtual field optimization method; calibration function

0 引 言

微震监测作为一种被动监测技术, 能够对地下结构的微地震活动进行长期监测和短期预报, 已经被国内外金属和非金属矿山广泛采用^[1-3]。一方面, 矿山微地震活动主要由开采活动直接造成的高应力岩石突然破裂失稳, 或间接造成的区域应力重分布所引发^[4], 另一方面, 地震波在传播过程中受到岩体介质的影响^[5], 因此微震监测系统观测到的数据不仅能够反映人类开采活动的情况, 还携带了地下岩体介质的信息。从大

量的微震监测数据中反演震源参数是挖掘地震波潜在信息和揭示地下结构变化的重要一步。刘晓辉等^[6]利用累积视体积和能量指数来研究岩爆前兆。赵毅鑫等^[7]利用事件频次、能量、微震信号 b 值及主频等参数表征冲击地压前兆特征。在众多震源参数中, 震源位置和近震震级是最重要的两个参数, 因为它们反映了地

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272304, 11472311, 51504288);
湖南省研究生科研创新项目 (CX2015B052)
收稿日期: 2016-06-30

震活动的空间分布和强烈程度^[5], 在各项研究中扮演重要的角色。例如, 刘希强等^[8]利用震级与能量衰减因子的关系区分矿震与天然地震, 李治平等^[9]回归了震级的极值分布模式, 为月最大震级的概率预测提供思路, 成云海等^[10]通过微震事件的空间分布发现关键层的破裂是矿震的主要因素。由此可见, 准确可靠的震源定位与合适的近震震级计算是实现微震数据解释的关键技术。

常用的震源定位方法大多从 Geiger 法发展而来, 这类方法的思路是利用射线走时模型, 建立理论到与观测到时的残差函数, 并在空间中搜索最佳坐标以使残差函数最小^[11-16]。例如 Waldhauser 等^[11]于 2000 年提出了双重残差定位法, 其利用相近事件同时反演, 消除了路径差异造成的误差, Aki 等^[12-13]分别利用近震和远震数据联合反演震源参数和台站下岩体的速度参数, 由此开辟了地震成像领域。在矿山微震领域, 董陇军等的无需测速法^[14]将速度看作未知数, 免去了测定速度的过程, 李健等^[15]将单纯形法与无需测速法相结合, 提高了求解精度, 李楠等^[16]基于 L1 范数统计和单纯形法解决求解系统发散、定位精度低和定位受微震台网影响大等问题。

在天然地震领域, 国家标准^[17]规定了近震震级计算公式, 然而该近震震级仅适合于长周期的天然地震波标定, 并不适合短周期矿震信号^[17]。已有研究表明, 矿震在震级较大时能量衰减速度要明显大于天然地震^[8], 因此实际上对矿震震级的衰减补偿应当高于天然地震。震级计算公式中一项主要组成部分为起算函数。起算函数也称为量规函数, 它对地震波在传播中引起的幅值衰减进行补偿^[18]。不同的近震震级计算公式主要差别为起算函数的差异^[17-19]。尽管目前国内已经有研究涉及到矿震近震震级的计算^[20], 然而这些研究几乎都采用前人研究的公式或其他地区的起算函数, 很少根据实际数据回归得到适合当地的计算公式。

本文引入了一种新的微震震源定位方法, 该方法能消除大拾取误差对定位的影响。同时本文推导了台站偏差最小的近震震级回归方法, 并根据实测数据回归了得到适合开阳磷矿用沙坝矿区的近震震级公式, 为矿山微震震级标定提供了新的思路。

1 VFOM 法微震震源定位理论

震源位置作为最基本的震源参数之一, 在各个地震学参数包括近震震级的计算中起到至关重要的作用。尽管寻求残差最小的方法发展至今已经趋于成熟, 但其在矿山微震震级计算中仍存在一定的问題。这类方法对拾取误差较为敏感, 尤其是对拾取错误引起的

大拾取误差^[21], 这是因为所有的拾取到时 (包括错误的拾取) 都参与到目标函数中^[22]。不幸的是, 在矿山微震中大拾取误差是广泛存在并且很难避免的。一方面微震信号往往夹杂着大量噪声, 从而影响拾取质量, 另一方面现场实际中产生的大量微震数据量难以完全采用人工识别提高拾取精度^[23]。Li 等^[23]在 2016 年提出了一种完全有别于残差函数的目标函数用于震源位置的反演, 这个目标函数被称为整体相近场 (total closeness field, TCF), 相应的定位方法被称为虚拟场优化法 (virtual field optimization method, VFOM)。VFOM 的主要公式见式 (1) ~ (5)^[23], 其思路^[23]是利用式 (1) 所示的传感器到时方程差来建立局部坐标系中的双曲面方程式 (2), 利用空间中点离式 (2) 的远近建立局部坐标系中的相近场方程式 (3), 再利用坐标转换关系式 (4) 将局部坐标系中各个相近场在全局坐标系中叠加为整体相近场式 (5), 最后利用局部优化算法求解式 (5) 的最优解, 即为震源位置。VFOM 的详细算法及其实现步骤见文献^[23]。VFOM 法的优点主要为: ①利用相近场的构造巧妙地消除了大拾取误差对目标函数的影响; ②构造的目标函数在整个空间中是连续光滑的, 非常适合于各种现成的需要导数或者无需导数的局部优化算法求解。目前, 该方法已经嵌入到开阳磷矿 IMS 微震监测系统中, 并在实际应用中取得了很好的效果。

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2} = v(t_j - t_i), \quad (1)$$

$$-\frac{X^2}{b_{ij}^2} - \frac{Y^2}{b_{ij}^2} + \frac{Z^2}{a_{ij}^2} = 1, \quad (2)$$

$$f_{ij}(X, Y, Z) = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{\sigma}\right), \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = R_{ij}^{-1} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \frac{x_i + x_j}{2} \\ \frac{y_i + y_j}{2} \\ \frac{z_i + z_j}{2} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{TCF}(x, y, z) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} f_{ij}(x, y, z). \quad (5)$$

式 (1) ~ (5) 中, x, y, z 和 X, Y, Z 分别为全局坐标系和局部坐标系中的点坐标, x_i, y_i, z_i 和 x_j, y_j, z_j 分别代表第 i 个和第 j 传感器坐标, t_i 和 t_j 代表第 i 个和第 j 传感器的到时, v 代表地震波的传播速度, σ 为控制相近函数形状的常数, R_{ij} 为局部坐标系转换为整体坐标系的旋转矩阵, n 为该事件触发的传感器数量, $f_{ij}(X, Y, Z)$ 和 $f_{ij}(x, y, z)$ 分别为局部坐标系和全局坐

标系中的相近函数, $TCF(x, y, z)$ 为整体相近函数,

$$a_{ij} = \frac{1}{2}v(t_j - t_i), \quad b_{ij}^2 = c_{ij}^2 - a_{ij}^2, \\ c_{ij} = \frac{1}{2}\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \\ d_{ij} = \left| a_{ij} \sqrt{\frac{X^2}{b_{ij}^2} + \frac{Y^2}{b_{ij}^2} + 1} - Z \right|.$$

2 近震震级参数标定方法

2.1 近震震级公式

近震震级也叫地方性震级, 是里克特根据古登堡 (Beno Gutenberg) 与和达清夫于 1935 年提出的, 其几乎是迄今为止应用最广泛的震级标度。近震震级基于以下现象: 对于不同大小的地震, 在不同震中距台站测得的最大地动位移的对数与震中距的曲线近似, 并且接近平行^[20]。近震震级的公式可以直接通过振幅对数与震中距的关系曲线或利用数学回归方法进行标定, 震级级数越大代表地震能量越大。最常用的近震震级形式如下所示^[17-19]:

$$M_L = \lg A_\mu + R(\Delta), \quad (6)$$

式中, A_μ 为两个水平分量最大地动位移的算数平均值 (μm), $R(\Delta)$ 为起算函数, Δ 为震中距 (km), 即震源到传感器的水平分量。

式 (6) 表明矿山微震近震震级与天然地震近震震级存在一定差异: ① 矿山震源与传感器在 3 个方向的距离接近, 采用震中距作为自变量忽略了竖直方向对距离的作用; ② 矿山微震系统中大量存在的单向传感器使得 A_μ 的确定存在困难。为了解决这些问题, 本文采用式 (7) 所示的近震震级计算公式。注意到, 式 (7) 同样适用于测定天然地震的三向台站, 这是由于天然地震震中距远远大于震源深度, 式 (7) 将退化为式 (6)。

$$M_L = \lg A + R(D), \quad (7)$$

式中, A 为 3 个水平分量最大位移的算数平均值 (μm), $R(D)$ 为起算函数, D 为震源与传感器的空间距离 (km)。

2.2 最大位移的确定

矿山微震监测系统中经常采用速度传感器, 相应地, 测得的地震波为速度时间序列。本文采用梯形积分方法由速度序列 $\{v_n\}$ 获得位移序列 $\{u_n\}$ 。然而, 实际情况中实测的速度序列经常存在基线漂移现象, 导致直接采用梯形积分方法获得的位移序列存在斜线漂移现象, 影响最大位移的提取。因此, 本文采用下面 4 步骤克服这个问题:

(1) 将 $\{v_n\}$ 进行水平基线校正得到 $\{v'_n\}$, 具体为将 $\{v_n\}$ 中的每一项减去 $\{v_n\}$ 中起震前的平均值。

(2) 将 $\{v'_n\}$ 进行梯形积分, 得到位移序列 $\{u'_n\}$, 利用递归的梯形积分公式, 即 $u'_1 = 0$, $u'_i = u'_{i-1} + \frac{1}{2f_s}(v_i + v_{i-1})$, f_s 为信号采样频率。

(3) 将 $\{u'_n\}$ 进行倾斜校正, 得到位移序列 $\{u_n\}$, 具体做法为将 $\{u'_n\}$ 中每一项减去第一项和最后一项的连线, 即 $u_i = u'_i - \frac{i-1}{n-1}(u'_n - u'_1)$ 。

(4) 搜索 $\{u_n\}$ 的绝对值最大值, 即该方向的最大位移。

利用加速度传感器获得最大位移的方法可以参考文献[24]。

2.3 起算函数标定

在天然地震领域, 起算函数在 5 km 以下为一常数^[20], 若将此起算函数直接应用于矿山微震领域将失去其衰减补偿的意义。李学政等^[18]等通过理论计算和爆炸地震波实际测量两种方法, 确定了近场 0~5 km 范围内的震级起算函数, 该起算函数被应用于木城涧矿区微震系统中^[20]。起算函数的作用为对地震波在传播中引起的幅值衰减进行补偿, 它使同一事件在不同距离上计算的地震震级相同^[18]。因此, 直接采用现有的起算函数可能达不到衰减补偿的效果。本文参考李学政等^[18]和严尊国等^[19]起算函数的形式, 利用实际测得的微震数据回归适合本地区的起算函数。

本文待回归的起算函数形式如下式所示:

$$R(D) = \alpha \lg D + \beta D + k, \quad (8)$$

式中, D 为震源与传感器的空间距离, α 和 β 为待回归参数, k 为调整参数。令每个传感器计算的震级与该事件的平均震级相等, 可以得到

$$m_{Lij} = m_i, \quad (9)$$

式中, m_{Lij} 为 i 事件中第 j 传感器计算的近震震级, m_i 为 i 事件的各个传感器计算的震级平均值。将式 (7) 代入式 (9), 可以得到

$$(\lg d_{ij} - f_i)\alpha + (d_{ij} - g_{ij})\beta + \lg a_{ij} - h_i = 0, \quad (10)$$

式中, d_{ij} 为 i 事件与第 j 传感器的空间距离, a_{ij} 为 i 事件中第 j 传感器测得的最大位移, $f_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \lg d_{ij}$, $g_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}$, $h_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \lg a_{ij}$, n_i 为 i 事件触发的传感器数量。式 (10) 可以进一步写为

$$Px = q, \quad (11)$$

式中, P 为式 (10) 中 α 和 β 的系数矩阵, $x = \{\alpha, \beta\}$, q 为式 (10) 中的常数项矩阵。式 (11) 的最小二乘解为 $x = (P^T P)^{-1} P^T q$ 。

3 开阳磷矿微震监测应用

3.1 矿区工程概况及微震系统

贵州省开阳磷矿用沙坝矿区位于贵州省贵阳市东北方向, 东经 106.81° , 北纬 27.08° 。矿区内矿体呈稳定的层状, 形态简单且厚度稳定, 沿走向和倾向连续性较好, 产状变化不大, 倾角 $10^{\circ} \sim 55^{\circ}$, 已探明储量 4000 多万吨^[25]。用沙坝矿区已经查明的大小断层达 20 条之多, 且其采用多阶段大规模同时回采的方式, 导致矿山局部区域应力集中, 可能引发岩爆、岩层大面积失稳、采空区塌陷等安全问题^[26]。

2013 年—2014 年, 中南大学与贵州省开阳磷矿合作在用沙坝矿区建立了一套矿山微震监测系统, 用于矿区范围内微地震活动的长期监测。该系统监测阵列由 28 个传感器组成, 其中包含 26 个单向传感器和 2 个三向传感器。传感器自振频率为 14 Hz, 设置采样频率 6000 Hz, 可接受频率范围为 6~2000 Hz, 最小振幅为 10^{-9} m/s 的信号。这些传感器安装在深孔径为 76~80 mm 的钻孔中, 孔深 9~15 m, 并用灌浆固定。利用电缆、光纤将传感器、数据采集仪和主机站等单元相连, 并实现信号传输。微震传感器的布设位置和矿区地貌如图 1 所示。

3.2 VFOM 定位

本文利用开阳微震监测系统的实测数据进行了震源定位和近震震级参数的标定, 采用的数据集为 2014

年 1 月 1 日—1 月 30 日测得的 401 个微震事件。为了保证数据质量, 该数据集中事件触发的传感器数量均超过 8 个。利用前文所述的 VFOM 进行定位, 采用的局部优化算法为共轭梯度法。为了避免陷入局部解, 随机改变初始值 50 次, 并取这 50 次搜索的最大值作为最终结果。结果显示, 401 个事件的定位震源在图 1 范围之内的事件达到 383 个, 定位成功率达到 95.5%。在相同的搜索次数下和搜索算法条件下, 采用双差二范数形式的目标函数的定位成功率仅为 68.6%。

3.3 近震震级起算函数参数标定

利用前文所描述的回归标定方法, 并采用 VFOM 的定位结果, 得到 α 和 β 的值分别为 1.059 和 1.189。标定的起算函数见图 2 所示。与本文标定的起算函数一起显示于图 2 中的是严尊国等^[18]和李学政等^[19]的起算函数。严尊国等的起算函数利用天然地震回归得到, 采用的地震震中距达到数十至数百千米, 东部地区 α 和 β 的值分别为 1.241 和 -0.0025, 西部地区 α 和 β 的值分别为 1.167 和 0; 而李学政等的起算函数利用理论计算和爆炸地震波共同确定, 采用的地震震中距在 5 km 以内, 其表达方法以表格的形式给出, 见文献^[19]。从图 2 中可以看到, 本文的起算函数在震源距小于 700 m 时接近于严尊国等的起算函数, 震源距在 700 m 以

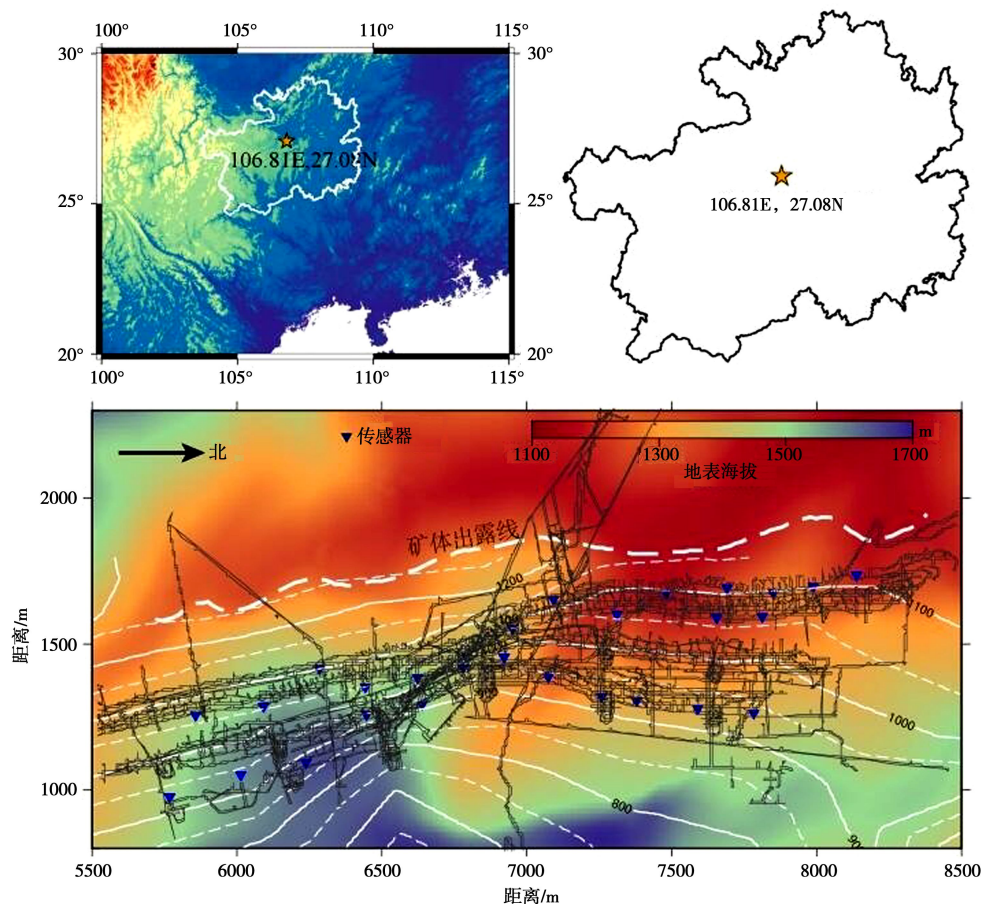


图 1 开阳磷矿用沙坝矿区微震监测系统

Fig. 1 Schematic diagram of micro-seismic monitoring system in Yongshaba deposit of Kaiyang Mine

上时, 本文标定的起算函数的补偿震级明显要比其他3个起算函数高, 这与文献[8]的研究结论相吻合。另外, 虽然中国地震震级国家标准^[17]定义了地方震级的起算函数, 但是标准中同样规定了不可用于与规定中的指定地震波周期相差较大的周期进行计算, 而矿山微震的地震波周期远远小于规定中的周期, 因此本文没有考虑标准里的起算函数。

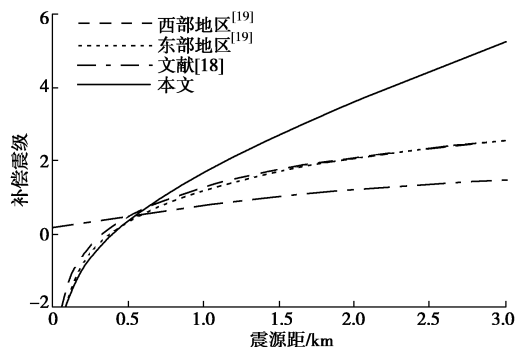


图2 本文起算函数与前人研究的比较

Fig. 2 Comparison between calibration functions in this study and those in former studies

3.4 开阳磷矿微震近震震级计算

分别采用本文标定的起算函数和严尊国等^[19]以及李学政等^[18]的起算函数对开阳磷矿的数据集进行近震震级计算, 各种起算函数的台站震级标准差见图3, 最终得到的震级比较见图4。从图3中可以看到, 采用本文的起算函数得到的台站标准差明显小于其他3个起算函数: 本文的各个传感器计算的401个事件的累计标准差只有255.0级, 平均为0.635级, 而严尊国等的两个起算函数分别为294.5和304.1级, 平均分别为0.734和0.758级, 李学政等的起算函数达到了479.2级, 平均为1.195级。这说明采用本文标定的起算函数计算的台站偏差较小, 比另外两个起算函数更适合于开阳磷矿的微震数据。图4展示的震级计算结果表明, 采用本文标定的起算函数计算的震级较为符合严尊国等的起算函数对应的震级。总体来说,

当震级较小时各种起算函数的震级吻合较好, 而在震级较大时, 采用本文标定的震级较其他几种方法大。图5给出了采用本文标定震级的事件的空间分布, 该空间分布特征与采矿工程的布置具有很好的一致性, 呈现两端密集, 中间较为分散的特点。另外, 从微震事件和矿区内断层的分布来看, F310和F313断层附近微震活动比较活跃, 其中F310断层也是矿区内影响最大的断层之一。微震事件的分布与矿区内断层和采矿工程的分布的相关性可以用来监测矿区稳定性, 为安全生产提供实时监控作用。

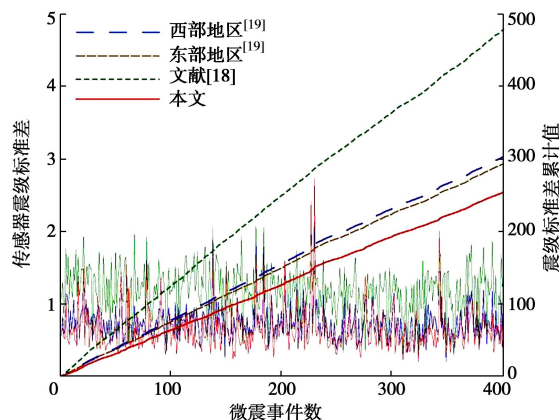


图3 各种起算函数的计算震级的台站标准差比较

Fig. 3 Comparison of station standard variations of local magnitudes calculated by different calibration functions

3.5 震级双峰特征

矿震的一种被普遍接受的分类方法是将矿震分为两类, 一类是与开采活动直接相关, 由高应力岩石突然破裂失稳造成的较小震级矿震, 另一类是与开采活动间接相关, 由较大尺度采掘空间或整个矿区尺度引起的区域应力重分布所致的较大震级矿震^[4]。这两种不同成因的矿震可能是造成矿震双峰分布特征的重要原因。矿震分布的双峰现象已经被大量文献所报道^[27-29], 在本文的震级计算中同样观测到了这个现象。图6表示了利用不同的起算函数得到的震级分布

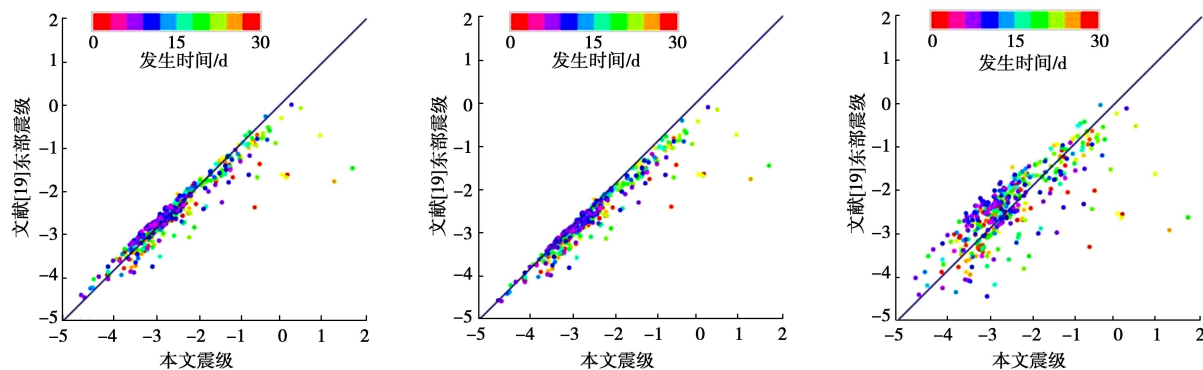
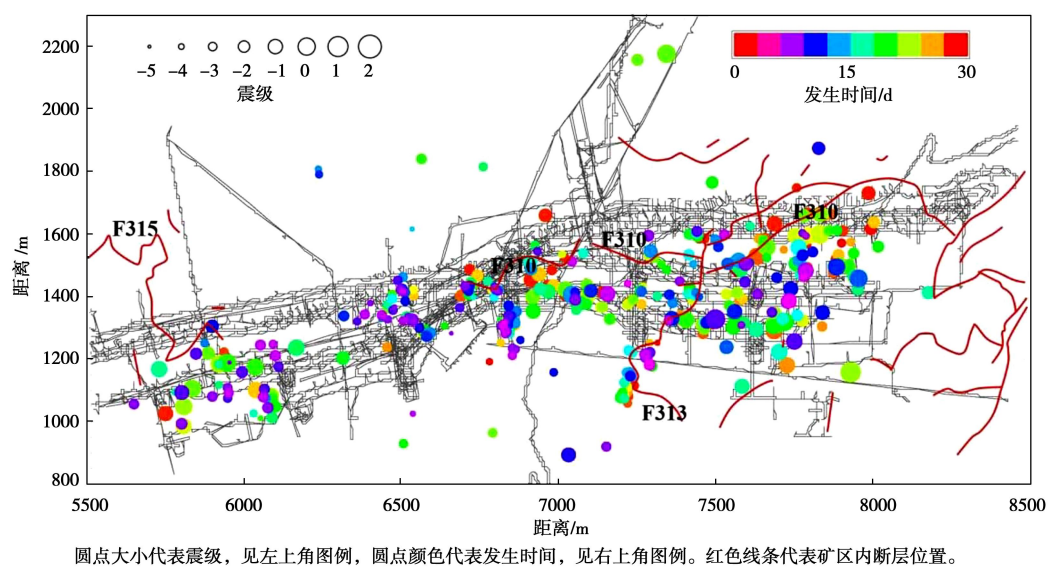


图4 各种起算函数与本文起算函数的计算震级比较

Fig. 4 Comparison of local magnitudes calculated by calibration functions obtained by this study and former studies



圆点大小代表震级, 见左上角图例, 圆点颜色代表发生时间, 见右上角图例。红色线条代表矿区断层位置。
图 5 本文标定震级的矿震事件的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mine earthquakes with local magnitudes

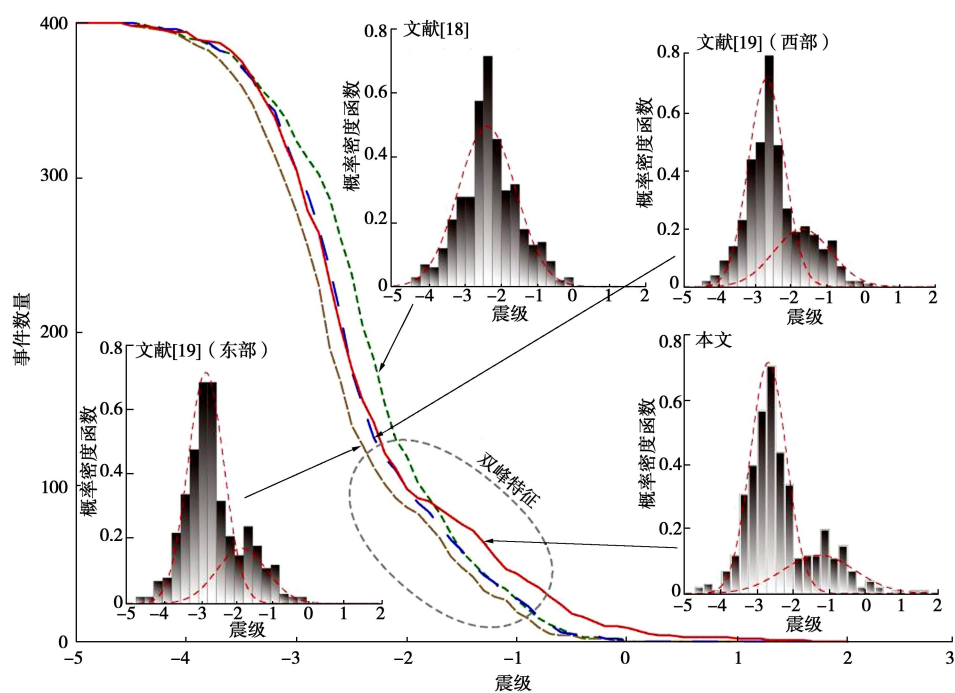


图 6 不同起算函数得到的大于某个震级的累积事件数量曲线及相应的震级分布特征

Fig. 6 Accumulated distribution characteristics of local magnitudes obtained by different calibration functions

和各种计算方法得到的大于某个震级的累积事件数量曲线。从图中可以看到, 利用本文起算函数得到的震级可以更清晰地观测到双峰分布现象, 而采用其他几个起算函数得到的震级双峰现象不明显。这个结果可以用图 2 所示的起算函数的特点得到解释: 利用实际数据标定的起算函数在震源距大的台站处给予较大的震级补偿, 这使得较大能量的矿震事件计算的震级较大, 从而使第二类矿震事件凸显出来, 展现出明显的双峰分布现象。震级分布结果的比较同样说明, 近震震级必须要采用实测数据进行参数标定后才能用于该地区的近震震级计算, 采用现成的震级计算公式将可

能失去震源分布的一些重要特征, 比如双峰分布。

4 结 论

本文将 VFOM 定位法用于开阳磷矿用沙坝矿区微震监测, 并对近震震级公式的参数进行了重新标定。本文的方法能够有效地提高矿山微震系统的基本震源参数 (包括位置和震级) 的精度, 改善微震监测系统的性能, 对矿山微震资料的正确解释提供了前提条件。主要结论如下:

(1) VFOM 法定位结果稳定性高, 适合于数据中含有大拾取误差的矿震事件的定位和随后的参数计

算。

(2) 进行了参数重标定的近震震级公式在震源距较小时接近于已有的震级公式, 在震源距较大时标定的起算函数给予较大的震级补偿。震级计算结果表明, 重新标定的震级计算公式得到的台站偏差明显减小。

(3) 利用本文重新标定的近震震级公式计算的震级分布观测到了较为明显的双峰分布模式, 证实了矿震数据可能由两种不同成因的矿震事件构成。

(4) 近震震级必须要采用具有统计意义数量(长期观测数据)的实测数据进行参数标定后才能用于该地区的近震震级计算, 采用现成的震级计算公式将可能掩盖震源分布的一些重要特征。

参考文献:

- [1] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2048 - 2053. (LI Shu-lin, YIN Xian-gang, ZHENG Wen-da. Research of multichannel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead—zinc mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2048 - 2053. (in Chinese))
- [2] 唐礼忠, 杨承佯, 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 Li-zhong, YANG Cheng-xiang, PAN Chang-liang. Optimization of microseismic monitoring network for large-scale deep well mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2036 - 2042. (in Chinese))
- [3] 尚雪义, 李夕兵, 彭康, 等. 基于 EMD_SVD 的矿山微震与爆破信号特征提取及分类方法[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1849 - 1858. (SHANG Xue-yi, LI Xi-bing, PENG Kang, et al. Feature extraction and classification of mine microseism and blast based on EMD_SVD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(10): 1849 - 1858. (in Chinese))
- [4] 李铁, 蔡美峰, 蔡明. 采矿诱发地震分类的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 3679 - 3686. (LI Tie, CAI Mei-feng, CAI Ming. A discussion on the classification of mining-induced seismicity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3679 - 3686. (in Chinese))
- [5] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 49 - 51. (LI Xi-bing. Rock dynamics fundamentals and applications[M]. Beijing: Science Press, 2014: 49 - 51. (in Chinese))
- [6] 刘晓辉, 吴爱祥, 王春来, 等. 某深井矿山岩爆预测模式研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, **29**(1): 78 - 83. (LIU Xiao-hui, WU Ai-xiang, WANG Chun-lai, et al. Study on rock burst forecasting prediction in a deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, **29**(1): 78 - 83. (in Chinese))
- [7] 赵毅鑫, 姜耀东, 王涛, 等. “两硬”条件下冲击地压微震信号特征及前兆识别[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(12): 1960 - 1966. (ZHAO Yi-xin, JIANG Yao-dong, WANG Tao, et al. Features of microseismic events and precursors of rock burst in underground coal mining with hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(12): 1960 - 1966. (in Chinese))
- [8] 刘希强, 杜贻合, 徐波, 等. 区域矿震与地震的定量识别方法及其应用[J]. 中国地震, 2005, **21**(1): 50 - 60. (LIU Xi-qiang, DU Yi-he, XU Bo, et al. The mode identification method and its application to regional mine and nature earthquakes[J]. Earthquake Research in China, 2005, **21**(1): 50 - 60. (in Chinese))
- [9] 李治平, 王建宙, 蔡美峰, 等. 矿山地震震级的极值分布[J]. 北京科技大学学报, 2002, **24**(3): 235 - 238. (LI Zhi-ping, WANG Jian-zhou, CAI Mei-feng, et al. Magnitude extreme distribution of mining tremor[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, **24**(3): 235 - 238. (in Chinese))
- [10] 成云海, 姜福兴, 程久龙, 等. 关键层运动诱发矿震的微震探测初步研究[J]. 煤炭学报, 2006, **31**(3): 273 - 277. (CHENG Yun-hai, JIANG Fu-xing, CHEN Jiu-long, et al. The primary study on microseismic locating and monitoring technology of shock bump caused by key stratum movement[J]. Journal of China Coal Society, 2006, **31**(3): 273 - 277. (in Chinese))
- [11] WALDHAUSER F, ELLSWORTH W, et al. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, **90**(6): 1353 - 1368.
- [12] AKI K, LEE W H K. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1 a homogeneous initial model[J]. Journal of Geophysical Research, 1976, **81**(23): 4381 - 4399.
- [13] AKI K, CHRISTOFFERSSON A, HUSEBYE E S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012, **29**(6): 148 - 151.

- [14] 董隴军, 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))
- [15] 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): 1336 - 1346. (LI Jian, GAO Yong-tao, XIE Yu-ling, et al. Improvement of microseism locating based on simplex method without velocity measuring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1336 - 1346. (in Chinese))
- [16] 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): 2431 - 2438. (LI Nan, WANG En-yuan, SUN Zhen-yu, et al. Simplex microseismic source location method based on L1 norm statistical standard[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(12): 2431 - 2438. (in Chinese))
- [17] GB17740—1999 地震震级的规定[S]. 1999. (GB17740—1999 General rulers for earthquake magnitude[S]. 1999. (in Chinese))
- [18] 李学政, 王海军, 雷 军. 近场震级起算函数确定与爆炸余震震级计算[J]. 中国地震, 2003, **19**(2): 117 - 124. (LI Xue-zheng, WANG Hai-jun, LEI Jun. The calculation of calibration function and explosive aftershocks at the near field[J]. Earthquake Research in China, 2003, **19**(2): 117 - 124. (in Chinese))
- [19] 严尊国, 李普丽, 薛军蓉. 中国近震震级量规函数研究[J]. 中国地震, 1992, **8**(4): 76 - 91. (YAN Zun-guo, LI Pu-li, XUE Jun-rong. Research on calibration functions for earthquakes in China[J]. Earthquake Research in China, 1992, **8**(4): 76 - 91. (in Chinese))
- [20] 贾宝新. 矿震监测的理论与应用研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013. (JIA Bao-xin. Theory and application research of mine earthquake monitoring[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013. (in Chinese))
- [21] GE M. Comparison of least squares and absolute value methods in Ae/MS source location: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997, **34**(3/4): 93.e1 - 93.e7.
- [22] DREW J, WHITE R S, TILMANN F, et al. Coalescence microseismic mapping[J]. Geophysical Journal International, 2013, **195**(3): 1773 - 1785.
- [23] LI X B, WANG Z W, DONG L J. Locating single-point sources from arrival times containing large picking errors (LPEs): the virtual field optimization method (VFOM)[J]. Scientific Reports, 2016, **6**(19205): 1 - 12
- [24] 山长仑, 张 玲, 李永红, 等. 对数字地震记录用速度与位移测定近震震级的讨论[J]. 华北地震科学, 2001, **19**(4): 65 - 72. (SHAN Chang-lun, ZHANG Ling, LI Yong-hong, et al. Discussion about determining local earthquake magnitude with displacement and velocity obtained from digital records[J]. North China Earthquake Science, 2001, **19**(4): 65 - 72. (in Chinese))
- [25] 张楚旋, 李夕兵, 董隴军, 等. 微震监测传感器布设方案评价模型及应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, **37**(4): 594 - 608. (ZHANG Chu-xuan, LI Xi-bing, DONG Long-jun, et al. Evaluation model of microseismic monitoring sensor layout scheme and its application[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, **37**(4): 594 - 608. (in Chinese))
- [26] 赵国彦, 邓青林, 马 举. 基于 FSWT 时频分析的矿山微震信号分析与识别[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(2): 306 - 312. (ZHAO Guo-yan, DENG Qing-lin, MA Ju. Analysis and recognition of mine microseismic signals based on FSWT time-frequency analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(2): 306 - 312. (in Chinese))
- [27] KIJKO A, DRZEZLA B, STANKIEWICZ T. Bimodal character of the distribution of extreme seismic events in Polish mines[J]. Acta Geophysica Polonica, 1987, **35**: 157 - 166.
- [28] HOLUB K. Changes in the frequency-energy distribution of seismic events during mining in the Ostrava-Karviná coal field[J]. Studia Geophysica Et Geodaetica, 1999, **43**(2): 147 - 162.
- [29] ZIELKE O, ARROWSMITH J R. Depth variation of coseismic stress drop explains bimodal earthquake magnitude-frequency distribution[J]. Geophysical Research Letters, 2008, **35**(24): 101 - 106.