

影响微震震源定位精度的主要因素分析

董陇军, 李夕兵, 唐礼忠

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 微震震源坐标是微震监测最基本和最重要的参数之一, 定位精度的高低直接影响着微震分析的结果。研究分析了微震震源定位精度的影响因素, 台站误差, 速度误差及由优化算法带来的误差。采用优化算法确定震源的坐标及震源事件的发生时间时, 不同算法求解的源坐标值相差很大, 为此, 如何选取合理的优化算法意义重大。将麦夸特法(LM)、简面体爬山法(SM)、准牛顿法(QN)、最大继承法(MIO)、自组织群移法(SOMA)、麦夸特法与全局优化算法(LM-GO)、简面体爬山法与全局优化算法(SM-GO)、准牛顿法与全局优化算法(QN-GO)、最大继承法与全局优化算法(MIO-GO)应用到震源定位中, 分析不同算法对震源定位精度的影响。研究发现单纯使用MIO、QN、LM很容易陷入局部最优值, 选用时应慎重, 联合使用全局最优算法可以显著提高定位精度。SOMA、SM-GO、MIO-GO、LM-GO计算结果较为稳定, 定位精度高, 建议在声发射源与震源定位时优先选用。

关键词 微震与声发射监测; 震源定位; 台站误差; 波速; 优化算法

中图分类号 TU45, TD324.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.003

Main Influencing Factors for the Accuracy of Microseismic Source Location

DONG Longjun, LI Xibing, TANG Lizhong

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The microseismic source location is one of the most important and foundational parameters in seismic analysis. The positioning accuracy directly affects the results of the microseismic results. The influencing factors for the accuracy of the microseismic source location, including the station error, the velocity error and the error caused by the optimization algorithm, are analyzed and discussed. The source location and the number of source events are determined by an optimization algorithm, and the source coordinates vary greatly with the use of different algorithms. It is important to select a reasonable optimization algorithm with a high accuracy. The famous optimization algorithms, such as the Levenberg-Marquardt Method (LM), the Simplex Method (SM), the Quasi-Newton Method (QN), the Max Inherit Optimization (MIO), the Self-Organizing Migrating Algorithms (SOMA), as well as the Global Optimization (GO) coupled with MIO, QN, MIO and LM, were used to locate and compare the seismic source coordinates. Results show that it is easy to be trapped into a local optimum value using MIO, QN and LM alone. Therefore, the selection of MIO, QN and LM should be careful. The joint use of the global optimal algorithm combined with MIO, QN and LM can significantly improve the positioning accuracy. The SOMA, SM coupled with GO, the MIO coupled with GO and the LM coupled with GO, which are more stable with a high positioning accuracy, should be the recommended methods to locate the seismic or acoustic emission source coordinates.

Keywords microseismic and acoustic emission source; seismic source location; trigger time errors; wave velocity; optimization algorithms

0 引言

地震波及震源定位理论的研究已有 100 余年的历史, 到目前为止该理论已被广泛应用于地震、矿山开采、石油开采、天然气开发、页岩气开发、隧道工程等领域。图 1 总结了自然界与工程技术领域各类震源事件分类^[1-3]。本文主要结合人为

事件诱发的矿山地震震源定位展开讨论, 其震源事件的定位原理是相同的。

随着深部矿产资源的采掘和地下空间的开发利用, 地下工程不断走向深部, 特别是金属矿山工程, 采深极大、岩爆事故剧增, 鉴于此, 研究矿山岩爆的监测技术尤为重要。同地震

收稿日期: 2013-03-14; 修回日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872218, 50934006); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732004); 教育部学术新人奖项目(105501010); 《科技导报》“博士生创新研究”计划(kjdb201001-7); 湖南省博士生科研创新项目(CX2011B118)

作者简介: 董陇军, 博士研究生, 研究方向为采矿与岩土工程灾害控制、微震与声发射监测, 电子信箱: csudlj@163.com, longjundong@uwa.edu.au

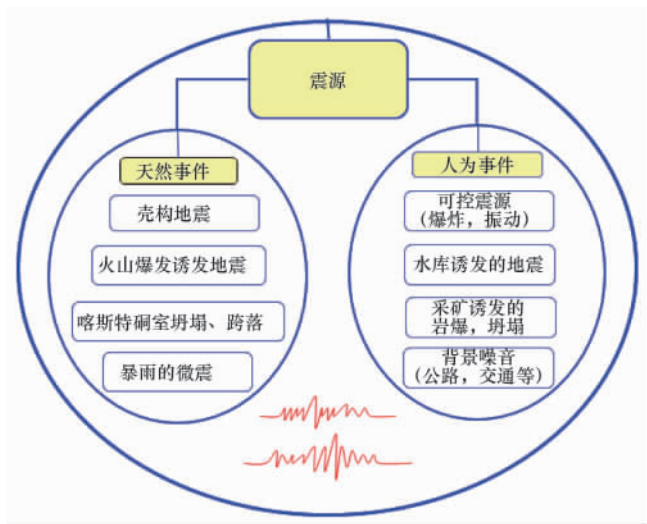


图 1 引发地震波的各类事件分类示意图

Fig. 1 Classifications of different seismic event source

问题一样,岩爆时空预测的时间预测很难实现,但空间预测则是完全可以的,有效预测岩爆灾害可能发生的位置是保证深部岩土工程安全的最为重要的途径之一。基于地球物理学发展起来的微震技术可以有效监测岩石微破裂发生的位置,近年来,已经广泛地应用于矿山安全、水电地下工程监测等。微震监测技术作为一种先进的和行之有效的地压监测手段,在国外深井矿山和高地应力矿山的地压安全监测中得到广泛应用,已成为深部地压研究和地压管理的一个基本手段^[2]。利用微震监测系统,在发生微震活动的矿体内布设传感器可探测微破裂所发射出的地震波,并确定发生地震波的位置,还可给出地震活动性的强弱和频率;通过微震监测获得的微破裂分布位置,判断潜在的矿山动力灾害活动规律,根据矿山动力灾害活动规律实现预报预警。在国外,微震监测技术的发展已使矿山微破裂的监测从“难以实现的奢望”转变为采矿安全管理的一个有机组成部分,如南非、美国、加拿大、日本和澳大利亚等国在矿山、隧道、地下油气料储存洞室和热干岩发电等方面均大量应用,取得了较好的研究成果^[3-18]。近年来,微震监测技术在国内也开始逐渐使用。1986年门头沟煤矿曾采用波兰 Sylok 微震监测系统对采煤区的微地震进行监测研究,这是中国首次开展矿上多通道微震监测技术研究^[20];1990年兴隆庄煤矿采用澳大利亚地震监测系统进行监测^[14];2004年凡口铅锌矿引进加拿大 ESG 监测设备建立了微震监测系统^[14];2005年铜陵冬瓜山铜矿也建立了一套微震监测系统,用于对该矿深部采区地压的监测^[15];2009年6月徐奴文等^[17]在锦屏水电站边坡建成了用于岩质边坡的微震监测系统。2012年贵州开阳磷矿用沙坝矿开始构建微震监测系统,旨在监测矿山多中段开采时潜在的危害。

微震震源位置坐标是微震监测中最关键和最基本的参数之一^[19-23]。明确影响定位精度的因素对于研究提高定位精度的途径意义重大,学者们已在该方面做了很多的努力^[24-29]。董陇

军等^[26]提出无需预先测速的微震源定位方法,研究速度对声发射源定位精度的影响,给出了高精度定位的方法及改进建议,这一研究成果得到 2013 年国际 Eri-Award 奖委员会的提名。由此可见该领域是国际微震研究的热点领域,也是微震技术应用于资源开发领域的技术瓶颈。本文试图通过分析微震震源定位精度的影响因素,在总结已取得研究成果的基础上,重点讨论迭代优化算法对微震震源定位精度的影响,试图找到和给出提高震源定位精度的途径和建议。

1 影响微震震源定位精度的主要因素

当前,微震监测技术已被广泛应用,广大科研工作者也取得了很多成果,然而,微震监测定位方法却存在 3 个方面的缺陷:台站误差,即首波到达时间的拾取误差和台站位置测量误差;波速造成的误差;迭代拟合算法造成的误差。将总误差用 $e_{Er}(v_0, \Delta t)$ 表示,台站误差用 $e_{Sen}(\Delta t, l)$ 表示,波速造成的误差用 $e_v(v_0, \Delta t)$ 表示,拟合算法造成的误差用 $e_{fit}(v_0, \Delta t)$ 表示。其中 Δt 为两个传感器记录时间的差, l 为台站坐标测量误差, v_0 为预先估算、测量或反演的速度值。则总误差可表示为

$$e_{Er}(\Delta t) = f(e_{Sen}, e_v, e_{fit}) \quad (1)$$

1.1 台站误差

台站误差由首波到达时间的拾取误差和台站坐标测量误差引起。台站坐标的测量和首波到时取决于当前的技术水平。首波拾取时间的获得目前采用的方法有优化相关法、能量比较法、分形维检测法及自回归方法等,关于台站误差本文不作详细讨论。

1.2 预先估计或反演速度造成的误差

由于 P 波在地震波中传播速度最快,而且初至时间易于识别,所以一般情况下宜采用 P 波定位。采用此法定位时,假设岩层是均匀速度模型, P 波传播速度为已知,同时要在至少 4 个以上不同地点布设监测台站。假定震源到各台站间的岩层均匀(即均匀速度模型),则 P 波的传播速度 c_{con} 为定值。震源坐标为 (x_0, y_0, z_0) ; $T_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个监测台站,各台站坐标是 $(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, n)$; $l_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为各台站至震源的距离; $t_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是 P 波到达各台站的时刻, t_0 为震源产生的时刻。董陇军等^[26]总结了目前广泛使用的定位方法,将其分为 STT (Speed and Trigger Times) 和 STD (Speed and Time Difference)。

1.2.1 STT 法

设 \bar{t} 为 P 波到达各台站的平均时刻, \bar{l} 为各台站至震源的平均距离,则

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{c_{con}} + t_0 \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_{con}} + t_0 = \frac{\bar{l}}{c_{con}} + t_0 \quad (2)$$

其中,

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (3)$$

构建最小二乘函数



$$\min f_k = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \quad (4)$$

式(4)则是一个非线性拟合问题,求其最小二乘解即可得到震源位置 (x_0, y_0, z_0) 、震源产生时刻 t_0 的解,将此法称为 STT 法。

1.2.2 STD 法

设第 k 个传感器到时有

$$t_k = t_0 + \frac{\sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2}}{c_{con}} \quad (5)$$

两个不同的传感器 i 和 j 的到时之差为

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j = \frac{L_i - L_j}{c_{con}} \quad (6)$$

其中, $L_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$

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

对于每一组观测值 $(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}; x_{jk}, y_{jk}, z_{jk})$, 式(7)可确定一个回归值,即

$$\Delta \hat{t}_{ij} = t_i - t_j = \frac{L_i - L_j}{c_{con}} \quad (7)$$

回归值 $\Delta \hat{t}_{ij}$ 与实测值 Δt_{ij} 之差描述回归值与实测值的偏离程度。对于 $(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}; x_{jk}, y_{jk}, z_{jk})$, Δt_{ij} 与 $\Delta \hat{t}_{ij}$ 的偏离越小,则认为直线和所有的实验点的拟合度越好。全部观察值 Δt_{ij} 与拟合值 $\Delta \hat{t}_{ij}$ 的偏离平方和可描述全部观察值与拟合值的偏离程度,即

$$Q(x_0, y_0, z_0) = \sum_{i,j=1}^n \left(\Delta \hat{t}_{ij} - \frac{L_i - L_j}{c_{con}} \right)^2 \quad (8)$$

则 (x_0, y_0, z_0) 应使得 $Q(x_0, y_0, z_0)$ 达到最小,即

$$Q(x_0, y_0, z_0) = \sum_{i,j=1}^n \left(\Delta \hat{t}_{ij} - \frac{L_i - L_j}{c_{con}} \right)^2 = \min \quad (9)$$

将该方法称为 STD 法,有 3 个未知数,但作为三维定位,仍至少需 4 个传感器。

以上两种方法的缺陷在于需要预先测定或估算波速,因此会造成以下两方面的误差。

(1) 时间上。由于定位中采用的速度是在发生微震时刻之前确定和反演的速度,事实上因采矿活动的进行岩体中的应力和速度是不断变化的,在不同时刻点岩体中的速度值可能不同。

(2) 空间上。预先通过爆破确定速度的方法会对定位造成一定的误差,因为爆破试验中波的传播路径和微震事件的传播路径可能不同,则所得到的平均速度也大为不同。

图 2 为上述两因素对定位精度影响的示意图。震源 A 与各传感器之间的路径用 A_1, A_2, A_3 与 A_4 表示,将这 4 条路径的平均速度记为 v_A ;震源 B 与各传感器之间的路径用 B_1, B_2, B_3 与 B_4 表示,将这 4 条路径的平均速度记为 v_B 。

从时间上说,不同时刻点的 v_A 不等于 v_B ;从空间上说,因传播路径不同, v_A 亦不等于 v_B 。

文献[26]-[28]提出的无需预先测波速的实时定位方法从根本上解决了(1)和(2)因素对定位精度的影响,不仅无需预

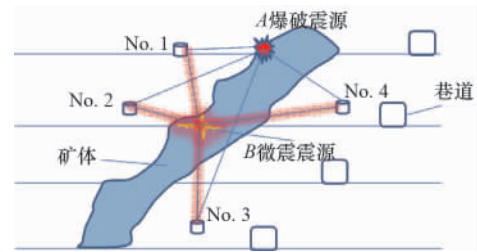


图 2 不同路径、不同时刻点微震源定位示意图
Fig. 2 Seismic source location of different routes and different time

先测量波速,而且可实现实时定位。

1.3 反演迭代算法带来的误差

反演迭代算法通常会带来误差,而且不同迭代算法对初值要求不同,在迭代过程中很容易造成局部最优而不是全局最优,造成严重的定位误差。如图 3 所示,如果将计算初值用 θ_0 表示,设定的迭代值用 $\phi(\theta_0)$ 表示,在拟合迭代过程中会有很多局部最小点出现,如 θ_1 和 θ_2 ;如果在局部最小时结束计算,由于没有找到全局最优值点往往会造成很大的定位误差。

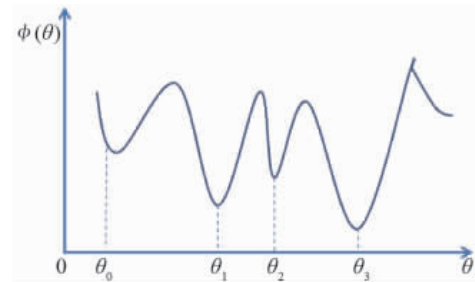


图 3 局部最优与全局最优示意图
Fig. 3 Schematic diagram of local and global optimizations

2 不同优化算法对定位精度的影响

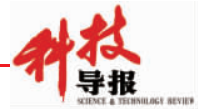
2.1 定位求解算法

采用传统的时差定位 STD 法进行探讨,见式(9),可以通过传感器坐标及传感器的到时差反演与迭代求得震源坐标。在微震震源定位中常用的拟合优化算法有^[26-34]:(1) 麦夸特法 (Levenberg-Marquardt, LM);(2) 简面体爬山法 (Simplex Method, SM);(3) 准牛顿法 (Quasi-Newton Method, QN);(4) 最大继承法 (Max Inherit Optimization, MIO);(5) 自组织群移法 (Self-Organizing Migrating Algorithms, SOMA);(6) 全局优化算法 (LM-Global Optimization-GO, LM-GO)。

为消除单一方法,如麦夸特法、简面体爬山法、准牛顿法可能存在局部最优解的情况,本研究将全局优化算法与以上方法相结合进行计算,计算在 Matlab 和 1stOPT 软件上进行。

2.2 爆破定位实验

以冬瓜山铜矿为背景,采用爆破定位实验数据进行反演



计算,分析各种计算方法的差异及对定位精度的影响。表1和表2分别为爆破实验位置及装药量、传感器位置坐标及各

微震事件触发传感器到时。表2中“-”表示传感器没有接受到信号或者接收到的是噪音。

表1 爆破实验位置及装药量

Table 1 Blast test locations and the powder volume

事件	时间	地点	实际坐标/m			药量/kg
			x	y	z	
1	08-30 10:57	-760m 水平 56-4# 采场巷道	84528.4	22556.2	-753.2	2.25
2	09-08 10:41	-820m 水平 56-6# 采场巷道	84479.0	22570.0	-814.4	2.40
3	09-09 13:03	-790m 水平 56-14# 采场巷道	84359.0	22673.0	-795.5	2.40

表2 传感器位置坐标及各微震事件触发传感器到时

Table 2 Sensor coordinates and time triggered by sensors

传感器编号	坐标/m			触发传感器时刻/s		
	x	y	z	事件 1	事件 2	事件 3
Site1	84345.73	22474.0	-678.01	31.214136	0.563835	45.267930
Site2	84157.08	22717.2	-737.28	—	—	45.264930
Site3	84256.71	22587.9	-682.8	31.225969	0.574668	45.258260
Site4	84493.74	22395.4	-653.02	31.210303	0.567501	—
Site5	84299.94	22861.7	-764.74	—	—	45.261180
Site6	84377.81	22755.5	-722.01	31.222942	0.566903	45.248010
Site7	84487.86	22612.0	-704.33	31.195608	0.547570	45.258680
Site8	84580.14	22489.6	-693.73	31.196942	0.556570	—
Site9	84591.12	22453.2	-862.58	31.206442	0.556775	—
Site10	84349.47	22271.4	-862.79	—	—	—
Site11	84429.88	22332.3	-863.16	31.226608	0.573108	—
Site12	84509.80	22391.8	-862.91	31.213275	0.561441	—
Site13	84076.11	22705.4	-862.89	—	—	45.280310
Site14	84182.39	22775.1	-862.38	—	—	45.268640
Site15	84259.16	22840.2	-862.04	—	—	45.267140
Site16	84307.19	22943.1	-860.87	—	—	45.279640

注:触发传感器时刻单位为s,文献[26]表4中的单位误写为ms。

Notes: Unit of trigger time is s, and the unit ms in the table 4 of reference [26] is incorrect.

2.3 不同优化方法的定位结果与分析

根据STD法的拟合公式,分别用麦夸特法、简面体爬山法、准牛顿法、最大继承法、自组织群移法、麦夸特法与全局优化算法、简面体爬山法与全局优化算法(SM-GO)、准牛顿法

与全局优化算法(QN-GO)、最大继承法与全局优化算法(MIO-GO)求解震源坐标。

将事件1、2、3的计算结果分别列入表3~表5,表6为各种方法的定位误差比较。

表3 事件1定位结果

Table 3 Location results of event No. 1

编号	迭代方法	迭代次数	迭代时间(mm:ss.z)	相关系数	均方差	计算描述	计算结果/m		
							x	y	z
1	LM	8	00:00:100	0.77	0.0390	收敛	1.71	0.21	2.61
2	SM	1364	00:01:568	0.99	0.0011	收敛	84522.93	22544.34	-747.52
3	QN	4	00:00:109	0.77	0.0382	收敛	0.10	1.98	3.02
4	MIO	253	00:01:280	0.72	0.0163	收敛	430079786760.24	-9.00	0.06
5	SOMA	389	00:02:447	0.99	0.0011	收敛	84522.92	22544.34	-747.54
6	LM-GO	343	01:12:747	0.98	0.0016	收敛	84511.30	22538.29	-753.85
7	SM-GO	462	00:04:523	0.99	0.0011	收敛	84522.93	22544.34	-747.52
8	QN-GO	464	01:01:820	0.98	0.0076	收敛	84509.14	22537.17	-755.03
9	MIO-GO	92	00:06:239	0.99	0.0011	收敛	84522.93	22544.34	-747.52

注:SM的计算结果为第3次计算的结果,第1次和第2次定位错误。

Notes: Results for SM are the third calculated results, the first and second ones are failure.



表 4 事件 2 定位结果

Table 4 Location results of event No. 2

编号	迭代方法	迭代次数	迭代时间(mm:ss.z)	相关系数	均方差	计算描述	计算结果/m		
							x	y	z
1	LM	9	00:00:126	0.79	0.0399	收敛	0.07	0.47	1.00
2	SM	1487	00:01:669	0.99	0.0013	收敛	84486.86	22570.88	-806.79
3	QN	5	00:00:276	0.79	0.0338	收敛	0.39	4.13	0.75
4	MIO	768	00:01:204	0.15	0.0202	收敛	9729.92	28628532260737.90	-0.25
5	SOMA	368	00:01:856	0.99	0.0013	收敛	84486.87	22570.88	-806.80
6	LM-GO	542	00:39:711	0.98	0.0028	收敛	84470.71	22563.61	-815.04
7	SM-GO	469	00:04:100	0.99	0.0013	收敛	84486.86	22570.88	-806.79
8	QN-GO	360	00:17:526	0.78	0.0087	收敛	2791666.11	1334900.82	1501054.19
9	MIO-GO	54	00:05:605	0.99	0.0013	收敛	84486.86	22570.88	-806.79

表 5 事件 3 定位结果

Table 5 Location results of event No. 3

编号	迭代方法	迭代次数	迭代时间(mm:ss.z)	相关系数	均方差	计算结束描述	迭代结果/m		
							x	y	z
1	LM	14	00:00:341	0.72	0.0279	收敛	22471.68	9054632.31	11715472.69
2	SM	1620	00:11:475	0.90	0.0139	收敛	84349.84	22679.69	-819.00
3	QN	18	00:00:393	0.71	0.0236	收敛	-117535.03	487846.47	923298.03
4	MIO	368	00:01:856	0.99	0.0013	收敛	84486.87	22570.88	-806.80
5	SOMA	324	00:23:112	0.90	0.0139	收敛	84349.84	22679.69	-819.00
6	LM-GO	21	00:23:788	0.90	0.0139	收敛	84349.84	22679.69	-819.00
7	SM-GO	49	01:01:738	0.90	0.0139	收敛	84349.84	22679.69	-819.00
8	QN-GO	629	00:46:122	0.90	0.0139	收敛	84349.84	22679.69	-819.00
9	MIO-GO	64	01:16:782	0.90	0.0139	收敛	84349.84	22679.69	-819.00

表 6 不同方法定位误差

Table 6 Location errors of various methods

方法	事件 1				事件 2				事件 3			
	坐标误差/m			绝对距离误差/m	坐标误差/m			绝对距离误差/m	坐标误差/m			绝对距离误差/m
	x	y	z		x	y	z		x	y	z	
SOMA	-5.48	-11.86	5.66	14.23	7.87	0.88	7.60	10.97	-9.16	6.69	-23.5	26.09
SM	-5.47	-11.86	5.68	14.24	7.86	0.88	7.61	10.97	-9.16	6.69	-23.5	26.09
SM-GO	-5.47	-11.86	5.68	14.24	7.86	0.88	7.61	10.97	-9.16	6.69	-23.5	26.09
MIO-GO	-5.47	-11.86	5.68	14.24	7.86	0.88	7.61	10.97	-9.16	6.69	-23.5	26.09
GO	-17.10	-17.91	-0.65	24.77	-8.29	-6.39	-0.64	10.48	-9.16	6.69	-23.5	26.09
LM-GO	-19.26	-19.03	-1.83	27.13	2.70×10 ⁶	1.31×10 ⁶	1501869	3362541	-9.16	6.69	-23.5	26.09
QN-GO	-84526.7	-22556	755.81	87487.7	-84478.9	-22569.5	815.4	87445.63	-61887.3	9031959	11716268	14793615
LM	-84528.3	-22554.2	756.22	4.00	-84478.6	-22565.9	815.15	87444.37	-201894	465173.5	924093.5	1054086
QN	4.3×10 ¹¹	-22565.2	753.26	87488.8	-74749.1	2.86×10 ¹³	814.15	2.86×10 ¹³	127.87	-102.12	-11.3	164.03

从表 6 可以看出, SOMA 方法的定位精度最高, 结合表 4~表 6 可以看出, SOMA 方法计算时间适中, 处于最大与最小时间的中间位置, 其结算结果也比较稳定, 3 个事件的定位精度分别为 14.23, 10.97, 26.09m, 可以满足实际工程的定位需求。

图 4 为不同方法定位绝对距离误差的结果比较。由图 4 可以看出, SOMA、SM、SM-GO、MIO-GO、LM-GO 方法的定位精

度较高, 说明这几种方法较不容易陷入局部最优值, 特别是 SOMA、SM-GO、MIO-GO、LM-GO 计算结果较为稳定, 建议在声发射源与震源定位时优先选用。SM 计算结果优于 MIO、QN 和 LM 的计算结果, 在本文算例中 SM 对于事件 1 计算较不稳定, 第 1、第 2 次计算结果明显错误, 即返回的是局部最优解, 建议常规使用时慎重。研究发现单纯使用 MIO、QN、LM 很

容易陷入局部最优值,从图4可以看出计算误差均很大,其结果在实际工程中几乎没有意义,然而加入全局优化算法后,计算结果明显提高且较为稳定,说明在微震震源定位中,加入全局最优算法可以显著提高定位精度。

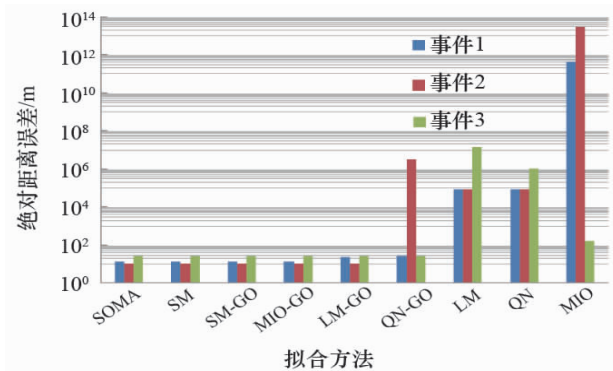


图4 不同方法定位结果

Fig. 4 Charts of location results using different methods

3 结论

影响微震震源定位精度的因素有台站误差,测量波速引起的误差和迭代方法因陷入局部最小值时造成的误差。本文分析了速度测量偏差引起定位误差,采用无需预先测速的微震震源定位方法可以消除速度测量偏差造成的定位误差,显著提高定位精度,实现实时定位。

为寻找合理可靠的定位优化算法,将麦夸特法、简面体爬山法、准牛顿法、最大继承法、自组织群移法、麦夸特法与全局优化算法、简面体爬山法与全局优化算法、准牛顿法与全局优化算法、最大继承法与全局优化算法应用到震源定位中,分析不同算法对震源定位精度的影响。不同拟合优化算法的比较表明,SOMA求解最为稳定,SM、SM-GO、MIO-GO、LM-GO方法的定位精度较高,且这几种方法较不容易陷入局部最优值,特别值得指出的是,SOMA、SM-GO、MIO-GO、LM-GO计算结果较为稳定,建议在声发射源与震源定位时优先选用。SM计算结果优于MIO、QN和LM的计算结果。研究发现,单纯使用MIO、QN、LM很容易陷入局部最优值,联合全局优化算法后,计算结果明显提高,且计算结果较为稳定。为此,建议在微震震源定位中,优先使用SOMA定位,采用其他方法定位时,应考虑加入全局最优算法以提高定位精度和算法的鲁棒性。

致谢: 感谢国家留学基金委的资助,感谢澳大利亚岩土工程中心(Australian Centre for Geomechanics)Yves Potvin教授和Johan Wesselo博士的支持和帮助。

参考文献 (References)

[1] Dong L J, Li X B. Three-dimensional analytical solution of acoustic emission or microseismic source location under cube monitoring network

[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12): 3087-3094.

[2] Bomann P. New manual of seismological observatory practice[M]. Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences, 2002.

[3] Lasocki S, Orlecka-Sikora B. Seismic hazard assessment under complex source size distribution of mining-induced seismicity[J]. Tectonophysics, 2008, 456(1-2): 28-37.

[4] Abdul-Wahed M K, Al-Heib M, Senfaute G. Mining induced seismicity: Seismic measurement using multiplet[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 66(1-2): 137-147.

[5] Driad-Lebeau L, Lahaiea F, Al-Heiba M. Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1-2): 66-78.

[6] Mansurov V A. Prediction of rockbursts by analysis of induced seismicity data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6): 893-901.

[7] Lesniak A, Isakow Z. Space-time clustering of seismic events and hazard assessment in the Zabrze-Bielszowice coal mine, Poland [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5): 918-928.

[8] Cook N G W, Hoek E, Pretorius J P G. Rock mechanics applied to rockbursts [J]. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 1966, 66: 436-528.

[9] van Aswegang G. Routine seismic hazard assessment in some South African mines [C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Nedlands: Australian Centre for Geomechanics, 2005: 435-444.

[10] Ge M C, Hardy H R, Wang H L, et al. Development of a simple mechanical impact system as a non-explosive seismic source [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(1): 137-142.

[11] Senatoski P. Apparent stress scaling for tectonic and induced seismicity: Model and observations[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2008, 167(1-2): 98-109.

[12] Amidzic D. Energy-moment relation and its application[C]// Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Nedlands: Australian Centre for Geomechanics, 2005: 509-513.

[13] Funk C, van Aswegan G, Brown B. Visualisation of seismicity [C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: Balkema A A, 1997: 81-87.

[14] 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 Shulin, Yin Xiangang, Zheng Wenda, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2048-2053.

[15] 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2036-2042.

[16] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 基于微震监测及应力场分析的冲击地压预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 4745-4749. Zhao Xingdong, Tang Chun'an, Li Yuanhui, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 4745-4749.

[17] 徐奴文, 唐春安, 沙椿, 等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 915-935. Xu Nuwen, Tang Chun'an, Sha Chun, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 915-935.

[18] McCreary R, McCaughey J, Potvin Y, et al. Results from microseismic monitoring: conventional instrumentation, and tomography surveys in the

- creation and thinning of a burst-prone sill pillar [J]. Pure and Applied Geophysics, 1992, 139(3-4): 349-373.
- [19] Milev A M, Spottiswoode S M, Rorke A J, et al. Seismic monitoring of a simulated rock burst on a wall of an underground tunnel [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001, 101(5): 253-260.
- [20] Theodre I U, Tifu C I. Recent advances in seismic monitoring technology at Canadian mines [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 45(4): 225-237.
- [21] Hirata A, Kameoka Y, Hirano T. Safety management based on detection of possible rock bursts by AE monitoring during tunnel excavation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(6): 563-576.
- [22] Yang C X, Luo Z Q, Hu G B, et al. Application of a microseismic monitoring system in deep mining [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 14(1): 6-8.
- [23] Wang H L, Ge M C. Acoustic emission/microseismic source location analysis for a limestone mine exhibiting high horizontal stresses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 720-728.
- [24] Ge M C. Efficient mine microseismic monitoring [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1-2): 44-56.
- [25] 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): 2025-2029.
- [26] 董晓军, 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): 2058-2067.
Dong Longjun, Li Xibing, Tang Lizhong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2058-2067.
- [27] 董晓军, 李夕兵, 宫凤强. 一种基于解析求解的声发射源或微震源定位方法: 中国, 201110273728.8[P]. 2012-05-02.
Dong Longjun, Li Xibing, Gong Fengqiang. An analytical location method for acoustic emission and microseismic sources: China, 201110273728.8[P]. 2012-05-02.
- [28] 李夕兵, 董晓军, 宫凤强, 等. 一种微震源或声发射源的定位方法: 中国, 201010602487.2[P]. 2011-07-20.
Li Xibing, Dong Longjun, Gong Fengqiang, et al. A location method for acoustic emission and microseismic sources: China, 201010602487.2[P]. 2011-07-20.
- [29] Nocedal J, Wright S J. Numerical optimization [M]. Berlin: Springer, 1999.
- [30] Maros I, Mitra G. Simplex algorithms [M]//Beasley J E. Advances in linear and integer programming. USA: Oxford University Press, 1996: 1-46.
- [31] Deep K, Dipti. A self-organizing migrating genetic algorithm for constrained optimization [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 198(1): 237-250.
- [32] Horst R, Tuy H. Global optimization: Deterministic approaches [M]. Berlin: Springer, 1996.
- [33] Horst R, Pardalos P M, Thoai N V. Introduction to global optimization [M]. 2nd ed. Holland: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [34] 程先云, 张伟, 胡淑彦, 等. 优化·拟合·建模: 1stOpt 应用详解 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012.
Cheng Xianyun, Zhang Wei, Hu Shuyan, et al. Optimization · Fitting · Modeling: Detailed analysis for 1stOpt applications [M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2012.

(责任编辑 王媛媛)

·学术动态·



中国科协 2012 年度事业发展统计公报: 科普活动

2012年, 各级科协及两级学会全年举办科普宣讲活动 25 万多次, 受众人数近 2 亿人次; 播放科技广播及影视节目近 14 万小时; 举办实用技术培训 24 万多次, 3640 万人次接受培训; 推广新技术新品种 52678 项; 参加各类科普活动的科技人员 374 万人次。

各类科普活动覆盖村 446353 个。其中, 科普日进村 91080 个, 科技周进村 102407 个, 日常科普活动进村 252866 个。

各类科普活动覆盖社区 231781 个。其中, 科普日进社区 31328 个, 科技周进社区 53961 个, 日常科普活动进社区 146492 个。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/14908615.html>。