

# 基于不同初值的微震源定位方法

林 峰, 李庶林, 薛云亮, 徐宏斌

(厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 分析微震源定位方法中的线性定位方法和 Geiger 定位方法以及各自特点, 并提出线性定位方法和 Geiger 定位方法相结合的联合定位方法。以柿竹园全数字多通道微震监测系统为背景, 通过进行人工定点爆破试验, 分别采用线性定位方法、常规 Geiger 定位方法及联合定位方法对震源进行定位。通过与实际爆破坐标进行对比分析得出, 联合定位方法解决线性定位求解精度低的问题; 同时优化常规 Geiger 定位方法初值选择, 提高迭代求解效率, 避免当 Geiger 定位方法求解出现奇异矩阵时, 迭代初值不准确造成定位误差较大甚至无法定位等问题。

**关键词:** 采矿工程; Geiger 定位方法; 线性定位; 初值; 微震

**中图分类号:** TD 76

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)05 - 0996 - 07

## MICROSEISMIC SOURCES LOCATION METHODS BASED ON DIFFERENT INITIAL VALUES

LIN Feng, LI Shulin, XUE Yunliang, XU Hongbin

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** The characteristics of the linear location and the Geiger's location method are analyzed; and a new location method by combining the two location methods is given. With the multi-channel digital microseismic monitoring system in Shizhuyuan mine, the blasting with three location methods is proposed; and the results by making a blasting test at the assigned location are compared. Some conclusions are drawn as follows: the combination of the linear location and the Geiger's location method can solve the problem of low accuracy for the linear location; and the choice of initial value for the conventional Geiger's location method can be optimized. In addition, the efficiency of the iterative solution can be improved; and the singular result with an inaccurate initial location value when singular matrix happens in the locating process with the Geiger's method can be achieved.

**Key words:** mining engineering; Geiger's location method; linear location; initial values; microseismicity

## 1 引言

微震技术已经广泛地应用于矿山安全、水电地下工程监测, 是地下工程安全监测的重要技术手段之一。自 21 世纪以来, 多通道全数字微震监测技术开始在矿山地压、地下石油液化气存储库的安全

监测中得到了应用, 并逐年增多<sup>[1~5]</sup>。微震震源空间位置是微震监测技术研究的重要参数, 对微震震源定位方法以及提高微震源定位精度的研究, 一直是微震监测技术研究的重要内容之一。震源定位方法很多, 到目前为止有十余种之多, 这些方法包括几何方法、物理方法与数学方法等。震源定位方法在国内外都有大量研究, 田 玥和陈晓非<sup>[6]</sup>搜集

**收稿日期:** 2009 - 09 - 29; **修回日期:** 2010 - 01 - 20

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(10572122); 国家重大基础研究发展计划(863)项目(2006AA06Z117)

**作者简介:** 林 峰(1984 -), 男, 2007 年毕业于厦门大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事声发射及微震监测技术方面的研究工作。E-mail: shulin.li@163.com

了近些年较为常用的定位方法; 王焕义<sup>[7]</sup>针对矿山微震定位精度进行了一系列的探讨; 邴绍丹和潘一山<sup>[8]</sup>对定位技术与应用做了初步的研究; 李文军和陈棋福<sup>[9]</sup>应用震源扫描算法(SSA)对微震进行定位; 陈炳瑞等<sup>[10]</sup>应用粒子群算法提高定位精度; 经典的 Geiger 定位方法<sup>[11]</sup>是通过迭代计算使时间残值最小化。在此基础上, R. Buland 等<sup>[12~14]</sup>进行修改, 使其能更好适应地震定位, 并发展基于经典的最小二乘法定位计算。A. Tatantola 和 B. Valette<sup>[15]</sup>提出了 Bayesian 定位方法的严格公式和解。W. Spence<sup>[16]</sup>针对(时差定位)ATD 定位技术模型的不确定导致走时异常进行一系列的研究。基于 N. Rabinowitz 和 O. Kulhánek<sup>[17]</sup>的研究, 单纯形法无需计算走时导数, 在定位程序中受到广泛应用。R. S. Crosson<sup>[18]</sup>应用联合测定方法(SSH)对局部事件进行了定位研究。

在实际现场应用中, Geiger 定位方法是最为常用的方法之一, 其通过各个传感器获得的波形到时时差进行定位; 但同时也存在迭代初值选择不合适而造成求解效率低、定位准确性差甚至无法定位等问题。

本文正是探讨了线性定位及 Geiger 定位方法各自方法的特点, 指出 Geiger 定位方法中初值选择对迭代结果的影响, 并重点讨论了线性定位方法与 Geiger 定位方法相互结合的联合定位方法。说明了联合定位方法通过更优的迭代初值提高了迭代求解效率, 避免了由于迭代初值不佳而造成定位误差大甚至无法定位等问题。

## 2 微震定位方法

### 2.1 线性定位方法

线性定位方法实际上是针对微震参数数据未知量建立相应数量的线性方程组基础上进行数学求解的。因此线性定位方法求解快速便捷, 无需进行反复的迭代计算。

通常线性定位方法是建立在单一速度模型基础上的。利用斜直线来表示未知的震源  $\mathbf{h}(x_0, y_0, z_0)$  到传感器  $(x_i, y_i, z_i)(i=1, 2, \dots, n)$  之间距离来计算地震走时  $T(\mathbf{h})$ , 则有

$$T(\mathbf{h}) = \frac{[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2]^{1/2}}{v} \quad (1)$$

式中:  $v$  为整个区域的恒定波速。

式(1)经过线性化相减消去  $x^2, y^2, z^2$  之后,

震源参数  $\boldsymbol{\theta} = \{t_0, x_0, y_0, z_0\}$  是以下一组  $n-1$  个线性方程的最小二乘解, 即

$$A\boldsymbol{\theta} = \mathbf{r} \quad (2)$$

其中,

$$\{A_{ij}\} = \begin{cases} 2(t_{i+1} - t_i)v^2 & (j=1) \\ 2(x_{i+1} - x_i) & (j=2) \\ 2(y_{i+1} - y_i) & (j=3) \\ 2(z_{i+1} - z_i) & (j=4) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{r} = \{(x_{i+1}^2 - x_i^2) + (y_{i+1}^2 - y_i^2) + (z_{i+1}^2 - z_i^2) + (t_{i+1}^2 - t_i^2)v^2\} \quad (i=1 \sim 4) \quad (4)$$

式中:  $i$  为传感器编号。

在这种情况下至少需要 5 个传感器参与定位 ( $n=5$ ) 能求解出震源参数  $\boldsymbol{\theta} = \{t_0, x_0, y_0, z_0\}$  的值。线性定位方法也存在不足之处, 在获得数据准确性较高的情况下是一种可靠的定位方法; 但在实际工程应用中, 由于数据存在误差造成求解精度不高, 无法达到工程需求。

### 2.2 Geiger 定位方法

Geiger 定位方法是一种经典的定位方法, 在实际现场定位中应用广泛, 效果较好。其同时根据多个传感器数据到时时差, 选取一个合适的迭代初值, 通过求导获得修正量不断迭代修正, 使得间残值函数趋于最小化, 取得最优定位解。

可以用公式表达, 引入矢量标准观测时间  $\mathbf{t}$ , 震源坐标  $\mathbf{h}$ , 震源参数  $\boldsymbol{\theta}$ , 震源到传感器计算走时  $T(\mathbf{h})$  如下:

$$\mathbf{t} = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{h} = \{x_0, y_0, z_0\}^T \quad (6)$$

$$T(\mathbf{h}) = \{T_1(\mathbf{h}), T_2(\mathbf{h}), \dots, T_n(\mathbf{h})\}^T \quad (7)$$

给出  $n$  个观测到时时  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 找到初始时刻  $t_0$  和笛卡尔坐标系中的震源参数  $\boldsymbol{\theta}$ , 有时间残值  $r_i$  的平方和:

$$\Phi(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{r}^T \mathbf{r} \quad (8)$$

其中,

$$\mathbf{r} = \mathbf{t} - t_0 \mathbf{I} - T(\mathbf{h}) \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为一个  $n$  维列矢量。

一般说来式(9)为一个超静定问题 ( $n \geq 4$ )。

Geiger 定位方法是高斯 - 牛顿最小拟合函数的一个应用。假设所找的震源参数近似值已知, 并标记为

$$\theta^* = \{t_0^*, x_0^*, y_0^*, z_0^*\}^T \quad (10)$$

对走时  $T_i$  应用一阶泰勒展开, 观测到时  $t_i$  由下式近似表示:

$$t_i = t_0^* + \delta t_0 + T_i(\mathbf{h}^*) + \frac{\partial T_i}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial T_i}{\partial y_0} \delta y_0 + \frac{\partial T_i}{\partial z_0} \delta z_0 \quad (11)$$

即

$$\left. \begin{aligned} r_i &= \delta t_0 + \frac{\partial T_i}{\partial x_0} \delta x_0 + \frac{\partial T_i}{\partial y_0} \delta y_0 + \frac{\partial T_i}{\partial z_0} \delta z_0 \\ r_i &= t_i - t_0^* - T_i(\mathbf{h}^*) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)用矩阵形式可表示为

$$\left. \begin{aligned} A \delta \theta &= r \\ \delta \theta &= \{\delta t_0, \delta x_0, \delta y_0, \delta z_0\}^T \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:  $\delta \theta$  为震源参数修正量;  $A$  为  $n \times 4$  阶的偏微分矩阵, 且有

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \partial T_1 / \partial x_0 & \partial T_1 / \partial y_0 & \partial T_1 / \partial z_0 \\ 1 & \partial T_2 / \partial x_0 & \partial T_2 / \partial y_0 & \partial T_2 / \partial z_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \partial T_n / \partial x_0 & \partial T_n / \partial y_0 & \partial T_n / \partial z_0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)偏微分在开始点  $\mathbf{h}^*$  求值为

$$\frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{x_i - x}{vR}, \quad \frac{\partial T_i}{\partial y} = \frac{y_i - y}{vR}, \quad \frac{\partial T_i}{\partial z} = \frac{z_i - z}{vR} \quad (15)$$

式中:  $v$  为 P 波速度,  $R$  为震源到传感器直线距离。

由式(13)可知:

$$\left. \begin{aligned} A^T A \delta \theta &= A^T r \\ \delta \theta &= (A^T A)^{-1} A^T r \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

可以看出, 当  $A^T A$  接近奇异时, 校正值  $\delta \theta$  摆动, 变化较大, 可能导致迭代过程的失稳和发散, 出现定位精度较差甚至无法定位等, 此时应选择足够接近真实值的迭代初值才能保证迭代初值  $\theta^*$  收敛于时间残值函数  $I(\Phi)$  全局最小值, 求得定位解, 如图 1 所示。

上述分析看出, Geiger 定位方法至关重要一点是迭代初值的选择, 合适的迭代初值才能迭代出全局最小值。在实际定位过程中, 通常采用第一触发传感器为迭代, 当  $A^T A$  接近奇异时或实际震源位置距传感器较远时常出现无法定位求解, 求解效率低等问题。

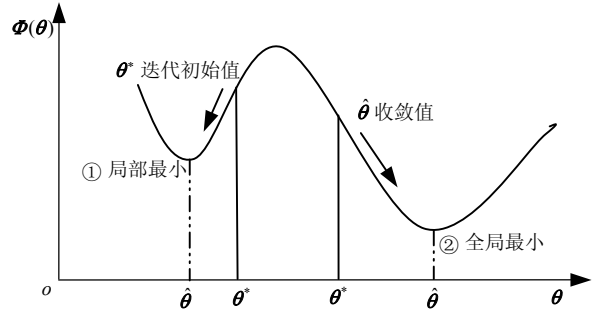


图 1  $\Phi(\theta)$  的曲线图

Fig.1 The curve of function  $\Phi(\theta)$

### 3 定位实例

#### 3.1 背景介绍

柿竹园多金属矿<sup>[19]</sup>采用分段凿岩阶段矿房法开采以来, 因种种原因井下的采空区(矿房)未能进行回填处理, 留下占矿段约 60%的矿柱矿量和约  $300 \times 10^4 \text{ m}^3$  的巨大采空区群, 在从西北角往东南角的矿柱回采过程中, 应力集中和采矿地压活动导致应力重分布产生较高的应力场, 出现了较多的岩爆和微震现象。

为了监测在开采过程中的微震事件, 于 2008 年 11 月 10 日安装一套加拿大 ESG 公司的微震监测系统。该微震系统监测大致  $600 \text{ m} \times 600 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  体积范围内的矿体, 采用国内现在通道数最多的 30 通道单轴加速度型传感器, 可实现数据快速传输、分析以及保存, 事件自动定位及震源参数分析等, 如图 2 所示。

按照研究确定对震源定位误差不大于 10 m 的技术指标要求。通过数值模拟优化后确定 30 个传感器分别布置在 514, 558 和 630 m 分段采区。其中 514 和 558 m 分段各 12 个; 630 m 分段 6 个。30 个传感器覆盖的监测范围可达  $600 \text{ m} \times 600 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ , 图 3 为郴州柿竹园矿传感器布置图。

#### 3.2 爆破试验

2008 年 11 月 11 日进行人工爆破定位测试, 人



(a) 地面控制系统



(b) 井下数据采集系统

图 2 地面处理系统和井下数据采集系统

Fig.2 Surface controlling system and under shaft data acquisition system

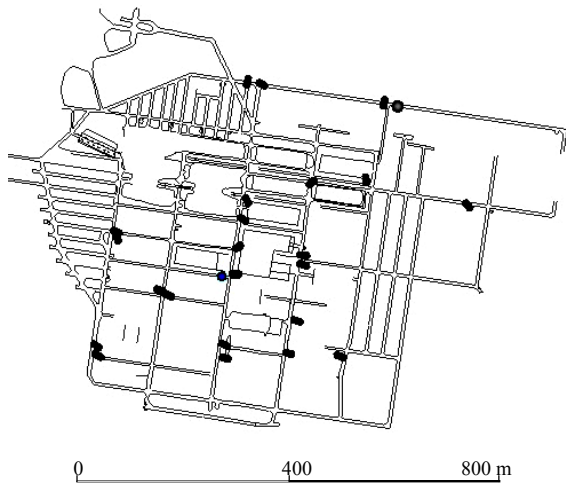


图 3 郴州柿竹园矿传感器布置图

Fig.3 Layout of sensor distribution of Shizhuyuan mine in Chenzhou City

工震源点选在 558 m 中段, P3 巷与 C6 巷交界处; 测量人员现场测定并记录爆破坐标, 10: 27 爆破, 地表监测人员准时在系统获取爆破定位点, 共计 8 个传感器获取爆破波形, 爆破测试波形图如图 4 所示。

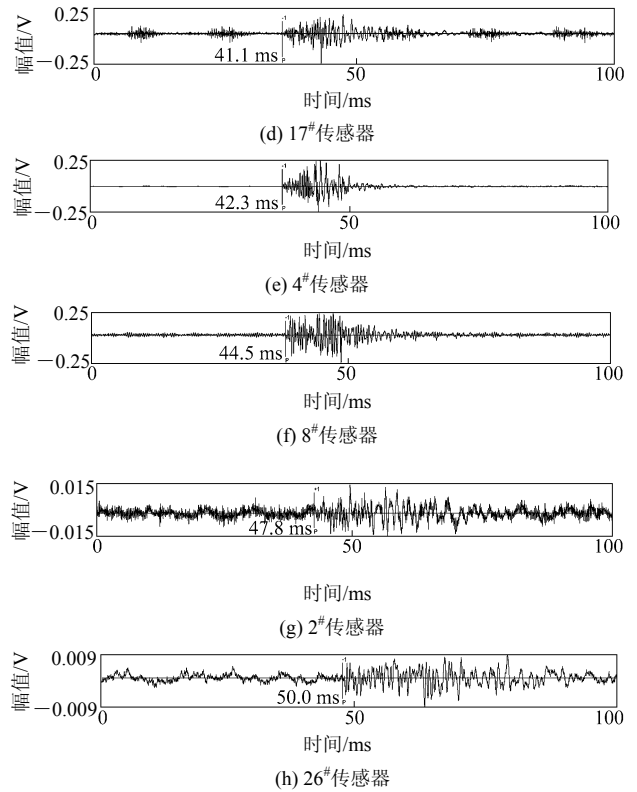
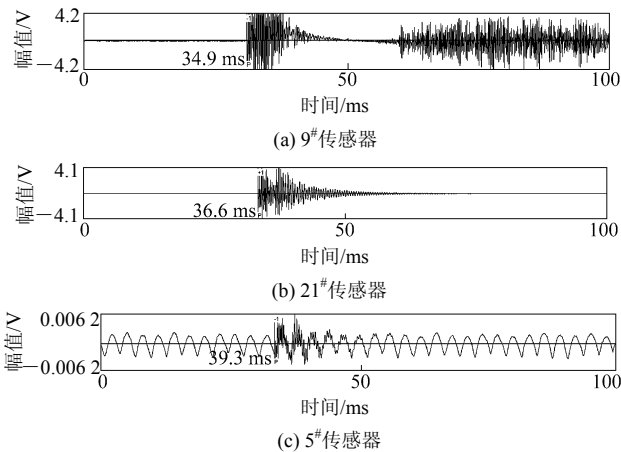


图 4 爆破测试波形图

Fig.4 Figures of wave forms in blast test

根据图 4 的波形提取了传感器坐标及 P 波观测到时的数据用于定位分析, 如表 1 所示。

表 1 8 个传感器的观测到时  
Table 1 Observed times of 8 sensors

传感器编号	X/m	Y/m	高程 Z/m	观测到时 /ms
9 <sup>#</sup>	8 761.00	6 614.00	+522.00	34.900
21 <sup>#</sup>	8 737.00	6 609.00	+565.00	36.600
5 <sup>#</sup>	8 666.00	6 600.00	+520.00	39.300
17 <sup>#</sup>	8 668.00	6 599.00	+565.00	41.100
4 <sup>#</sup>	8 641.00	6 515.00	+520.00	42.300
8 <sup>#</sup>	8 691.00	6 684.00	+520.00	44.500
2 <sup>#</sup>	8 721.00	6 449.00	+520.00	47.800
26 <sup>#</sup>	8 702.00	6 604.00	+647.00	50.000

## 4 定位分析

### 4.1 线性定位

线性定位方程需要 5 个传感器参与定位, 选取前 5 个触发的传感器参与定位。首个触发 9<sup>#</sup>传感器为参考传感器, 编号为第 0 传感器, 后续编号分别为第 1 传感器(21<sup>#</sup>传感器)、第 2 传感器(5<sup>#</sup>传感

器)、第3传感器(17<sup>#</sup>传感器)及第4传感器(4<sup>#</sup>传感器)。表2为根据图4参与定位传感器坐标参数和对爆破事件P波的观测到时。

表2 前5个传感器坐标与观测到时  
Table 2 Observed times of the top 5 sensors

传感器编号	与第0传感器(9 <sup>#</sup> 传感器)时间差/ms
第0传感器(9 <sup>#</sup> 传感器)	0.000
第1传感器(21 <sup>#</sup> 传感器)	2.300
第2传感器(5 <sup>#</sup> 传感器)	4.400
第3传感器(17 <sup>#</sup> 传感器)	6.200
第4传感器(4 <sup>#</sup> 传感器)	7.400

将表2数据代入到式(2),直接求解方程组可得出震源坐标,与真实震源坐标比较见表3。

表3 求解坐标值  
Table 3 Coordinates of solution m

方法	X	Y	高程 Z	误差
线性方程定位解	8 794.50	6 544.50	+495.70	68.88
真实爆破坐标解	8 732.70	6 570.60	+511.30	0.00

真实爆破坐标解对比,线性定位方法与实际震源误差接近70m,已经远远超出工程实际精度的要求。

#### 4.2 联合定位方法及常规 Geiger 定位方法

Geiger 定位方法中关键的一步是初值的选择,上述的 Geiger 定位方法推导过程已经说明如果初值不合理,可能导致迭代过程的发散,甚至无法求得全局最小值以致影响震源定位;只有当选择合理的初值足够接近真实解时,才能保证迭代收敛,并通过迭代能找到时间残值的全局最小值。

联合定位方法就是首先应用线性定位方法进行初步定位,再以线性定位解作为 Geiger 定位方法的迭代初值进行求解定位。

常规 Geiger 定位方法采用迭代初值有很多种,一般第一触发传感器坐标值,下述根据人工爆破测试数据,分别采用联合定位方法及以第一传感器坐标为迭代初值的常规 Geiger 定位方法,进行迭代定位和比较分析。迭代初值如表4所示。

表4 Geiger 定位方法的迭代初值  
Table 4 Initial values with Geiger's method m

方法	X	Y	高程 Z
线性方程定位解	8 794.50	6 544.50	+495.7
第1触发传感器(9 <sup>#</sup> )	8 761.00	6 614.00	+522.0

系统波形采集时间窗口为200ms,精确到0.01ms。分别选取上述2种初值,进行迭代计算。2种方法迭代过程以及相应误差见表5。

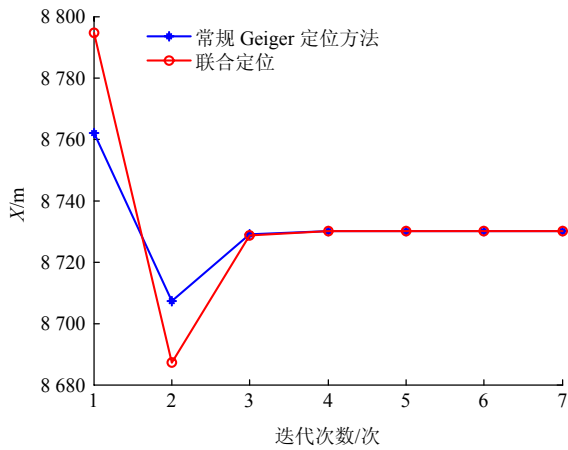
由表5可以看出,2种初值情况下迭代过程收敛速度很快,基本在7次以内其解就趋于一个稳定值,修正量趋向于0,误差也逐步缩小并稳定于某个定值,各坐标及高程误差迭代变化见图5;误差迭代变化图见图6。

图5,6均表明,2种定位方法都可以收敛于一个稳定值;联合定位方法经过5次迭代,坐标修正量趋于0,求解的震源坐标达到稳定值;而常规 Geiger 定位方法需要7次迭代后,其修正量趋于0,求解震源坐标达到稳定值。同时,比较2种定位方法定位误差收敛速度可知,联合定位方法定位误差收敛速度快于常规 Geiger 定位方法,表明了联合定位方法求解效率更高。

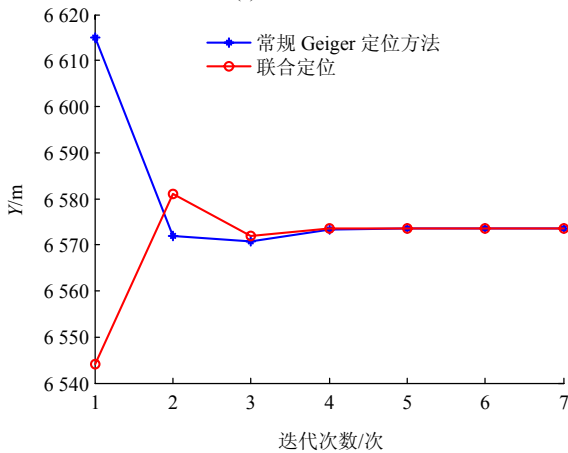
表5 2种方法迭代过程以及相应误差

Table 5 Process of the iteration and relative errors with two methods

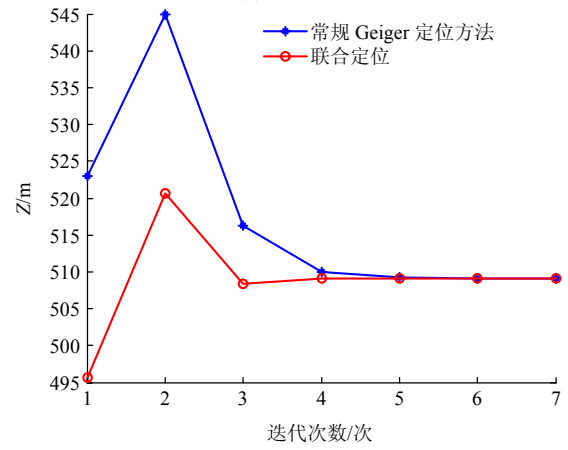
迭代次数/次	常规 Geiger 定位方法								联合定位方法							
	X/m		Y/m		高程 Z/m		定位误差/m	X/m		Y/m		高程 Z/m		定位误差/m		
	初始值	X方向误差	初始值	Y方向误差	初始值	高程误差		初始值	X方向误差	初始值	Y方向误差	初始值	高程误差			
1	8 762.00	-54.86	6 615.00	-43.18	+523.00	+21.87	32.89	8 794.50	-107.18	6 544.50	+36.48	+495.68	+24.99	23.19		
2	8 707.14	+21.75	6 571.82	-1.11	+544.87	-28.53	18.29	8 687.32	+41.41	6 580.98	-8.96	+520.67	-12.35	23.77		
3	8 728.89	+1.18	6 570.71	+2.61	+516.34	-6.32	6.571	8 728.73	+1.42	6 572.02	+1.54	+508.32	+0.75	6.160		
4	8 730.07	+0.08	6 573.32	+0.24	+510.02	-0.78	6.004	8 730.15	+0.01	6 573.56	+0.05	+509.07	+0.07	5.997		
5	8 730.15	+0.01	6 573.59	+0.02	+509.24	-0.09	5.997	8 730.16	-0.00	6 573.61	+0.00	+509.14	+0.00	5.997		
6	8 730.16	+0.00	6 573.61	-0.00	+509.15	-0.01	5.997	8 730.16	+0.00	6 573.61	-0.00	+509.14	-0.00	5.997		
7	8 730.16	-0.00	6 573.61	+0.00	+509.14	-0.00	5.997	8 730.16	-0.00	6 573.61	+0.00	+509.14	+0.00	5.997		



(a) X向迭代变化图



(b) Y向迭代变化图



(c) Z向迭代变化图

图 5 各坐标及高程误差迭代变化

Fig.5 Iteration variations of X, Y and Z directions

与采用第一传感器坐标为迭代初值常规 Geiger 定位方法相比, 以线性方程定位解为迭代初值的联合定位方法能更快收敛于稳定值, 迭代收敛更为快速。因此, 线性定位解为更优的迭代初值, 采用该初值能确保时间残值函数  $\phi(\theta)$  能迭代收敛于全局最小值, 保证其求解精度; 另一方面还能减少迭代次数, 提高求解效率。

### 4.3 各方法真实值比较分析

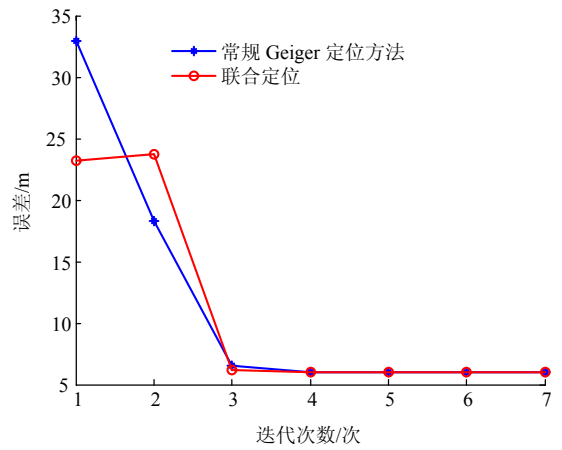


图 6 误差迭代变化图

Fig.6 Iteration variation of error

表 6 是线性方程定位方法、常规 Geiger 定位方法及联合定位方法的定位结果与真实值的比较。常规 Geiger 定位方法及联合定位方法定位精度(误差为 4.49 m)远高于线性定位精度(误差为 68.88 m), 主要原因有 Geiger 定位方法可使更多的传感器参与定位, 弱化了个别传感器数据误差, 越多传感器可获越多定位信息, 避免出现定位结果精度较差甚至严重偏离等结果。而线性方程定位解误差较大, 主要由于其参与定位传感器数量较少, 仅有 5 个传感器参与定位, 当某个传感器到时误差较大时, 严重影响其求解结果准确性。

表 6 各种定位方法结果比较

Table 6 Comparison between results of locations with various methods

方法	X/m	Y/m	高程 Z/m	定位误差 /m	迭代次数 /次
线性方程定解	8 794.50	6 544.50	+495.68	68.88	-
常规 Geiger 定位解	8 730.16	6 573.61	+509.14	4.49	7
联合定位解	8 730.16	6 573.61	+509.14	4.49	5
真实爆破坐标解	8 732.70	6 570.60	+511.30	0.00	-

联合定位方法及常规 Geiger 定位方法在爆破定位中求解结果一致。2 种求解迭代过程都收敛于同一坐标值, 但对比两者迭代效率, 联合定位方法(迭代 5 次)比常规 Geiger 定位(迭代 7 次)高。分析比较图 5, 6 可知, 在每一步的坐标及误差迭代修正过程中, 联合定位方法基本上都优于常规 Geiger 定位, 这是更优迭代初值的体现。当实际震源距传感器较远, 或当修正向量接近  $A^T A$  时, 常规方法较难选择迭代初值时; 联合定位方法能够提供更接近真实解的迭代初值, 提高求解效率, 避免了由于迭代初值

误差较大而造成时间残值函数  $\Phi(\theta)$  无法收敛与全局最小值及定位误差大甚至无法定位等问题。

## 5 结 论

(1) 线性定位方法计算快速方便, 无需进行迭代, 只需求解一组线性方程组。在获得数据准确性较高的情况下是一种可靠的定位方法, 但当获取数据存在误差时, 对其求解结果精度影响较大, 甚至出现不合理的解, 但其可以作为需要迭代的定位方法如 Geiger 定位方法的初始值。

(2) Geiger 定位方法通过迭代寻找时间残值全局最小值, 求得定位误差最小的定位坐标, 其定位精度可满足工程实际需求。通常情况下越多传感器参与定位其定位效果越好, 因其可以削弱个别传感器的到时误差。但当  $A^T A$  接近奇异时, 或震源远离传感器时, 迭代初值选择不佳也会影响定位精度甚至无法定位。

(3) 联合定位方法将线性定位方法与 Geiger 定位方法结合应用, 通过先对微震事件进行线性定位, 再以线性定位坐标作为 Geiger 定位方法迭代初值进一步求解定位坐标。这样就可以避免线性定位不准确, 又可以为 Geiger 定位方法提供足够接近真实解的迭代初值。避免了由于迭代初值误差较大而造成时间残值函数  $\Phi(\theta)$  无法收敛于全局最小值或定位误差大甚至无法定位等问题。

**致谢** 本文在成文过程中得到加拿大 ESG 公司工程师 I. Leslie 的帮助, 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献(References):

- [1] LI S, ZHENG W, TRIFU C I, et al. Implementation of multi-channel microseismic monitoring system at Fankou lead-zinc mine[C]// Potvin Y, HUDYMA M ed. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mining. Perth: [s.n.], 2005: 613 - 616.
- [2] 李庶林. 试论微震监测技术在地下工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 67 - 72.(LI Shulin. Discussion on microseismic monitoring technology and its applications to underground projects[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 67 - 72.(in Chinese))
- [3] 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): 2 048 - 2 053.(LI Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, et al. Research on multichannel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 048 - 2 053.(in Chinese))
- [4] 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): 2 036 - 2 042.(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): 2 036 - 2 042.(in Chinese))
- [5] 姜福兴, XUN L. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147 - 149.(JIANG Fuxing, XUN L. Application of microseismic monitoring technology to strata fracturing in underground coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 147 - 149.(in Chinese))
- [6] 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.(in Chinese))
- [7] 王焕义. 岩体微震事件的精确定位研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(3): 5 - 8.(WANG Huanyi. Study of precise localization of microseismic events in a rock mass[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(3): 5 - 8.(in Chinese))
- [8] 邴绍丹, 潘一山. 矿山微震定位方法及应用研究[J]. 煤矿开采, 2007, 12(5): 1 - 4.(BING Shaodan, PAN Yishan. Microseismic orientation method for mine and its application[J]. Coal Mining Technology, 2007, 12(5): 1 - 4.(in Chinese))
- [9] 李文军, 陈棋福. 用震源扫描算法(SSA)进行微震的定位[J]. 地震, 2006, 26(3): 107 - 115.(LI Wenjun, CHEN Qifu. Microseismic location by means of source-scanning algorithm[J]. Earthquake, 2006, 26(3): 107 - 115.(in Chinese))
- [10] 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 Rock Mechanics and of Engineering, 2009, 28(4): 740 - 749.(in Chinese))
- [11] GEIGER L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. Bulletin of Saint Louis University, 1912, 8: 60 - 71.
- [12] BULAND R. The mechanics of locating earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(1): 173 - 187.
- [13] GIBOWICZ S J, KIJKO A. An introduction to mining seismology[M]. San Diego: Academic Press Inc., 1994.
- [14] RABINOWITZ N. Microearthquake location by means of nonlinear simplex procedure[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(1): 380 - 384.
- [15] TARANTOLA A, VALETTE B. Inverse problems = quest for information[J]. Journal of Geophysics, 1982, 50(3): 159 - 170.
- [16] SPENCE W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1980, 70(1): 171 - 183.
- [17] RABINOWITZ N, KULHÁNEK O. Application of a nonlinear algorithm to teleseismic locations using P-wave readings from the Swedish seismographic network[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1988, 50(2): 111 - 115.
- [18] CROSSON R S. Crustal structure modeling of earthquake data 1. simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters[J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 96(B17): 6 403 - 6 414.
- [19] 袁节平. 柿竹园矿的采矿地压及其防治[J]. 矿业研究与开发, 1997, 17(4): 26 - 29.(YUAN Jieping. Mining-induced ground pressure and its prevention in Shizhuyuan mine[J]. Mining Research and Development, 1997, 17(4): 26 - 29.(in Chinese))