

李学政、王敏超、雷军, 2012, 近场地震权重定位方法研究, 中国地震, 28(3), 313 ~ 319。

# 近场地震权重定位方法研究

李学政<sup>1)</sup> 王敏超<sup>1)</sup> 雷军<sup>2)</sup>

1) 西北核技术研究所, 西安市 69 信箱 11 分箱 710024

2) 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

**摘要** 通过轴对称映射, 计算震中距定位权重, 建立了权重定位方法。该方法充分考虑了台网中震中距长短不同的台站对定位贡献差异, 计算的事件位置精度明显提高。该方法对台站或观测点的数量没有限制, 对台网布局并不过于苛刻。特别是台网布局不合理时, 盖革二乘与虚波速度法往往无法给出可靠的定位数据, 而权重定位方法能够给出较好的结果。

**关键词:** 近场地震 台网布局 权重 地震定位

[文章编号] 1001-4683(2012)03-0313-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

小震定位是地震学中的问题之一。地震定位的精度主要依赖于地壳速度模型、台网布局、走时和定位方法等 (Bolt, 1960; 赵仲和, 1983; 李学政等, 1999; Li et al, 2001), 其中台网布局尤为重要。由于小地震的危害程度有限, 故相关研究尚未受到足够重视。然而, 水库蓄水诱发地震和矿山地震等, 虽亦有一些震级较大的地震, 但更多的是一些小震级事件。特别是高能地下爆炸的余震, 大多数事件为小震级甚至负级地震事件 (Hamilton et al, 1972; 李学政等, 2003)。这些小震级地震有时也造成一定破坏, 因此对小地震事件参数的测定正在逐渐引起关注。对于弱小地震事件, 台网中只有少数台站有记录, 精度难以提高。为此, 本文提出一种权重定位方法, 即首先采用方位角方法进行事件定位, 然后, 根据台站权重进行加权计算, 确定小震事件的位置。以低当量地下爆炸试验为例, 阐述方法原理和定位效果。

## 1 近场定位方法

### 1.1 定位原理

Geiger (1910) 提出了一种地震定位方法。其原理是假定地壳速度模型后, 预先给定一个震源初始值, 计算地震波到达各台站的走时和实测走时的残差, 不断改变这个假定震源位置参数, 在给定的残差标准下, 使残差最小, 从而给出震源位置。残差计算式为

$$\text{Min}\varphi = \sum_{i=1}^n W_i [t_i - T_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)]^2 \quad (1)$$

[收稿日期] 2011-06-19

[项目类别] 军控核查技术项目 (513310102) 资助

[作者简介] 李学政, 男, 1958 年生, 西北核技术研究所副研究员。主要从事信号处理等研究。

E-mail: lixuezheng01@yahoo.com.cn

式中,  $W_i$  是为台站的权重因子,  $t_i$  为观测走时,  $T_i$  为计算走时,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  为假定的参数 (如地震事件的坐标和发震时间等),  $\varphi$  为残差平方和,  $\text{Min}\varphi$  为  $\varphi$  的最小值。目前众多不同的地震定位方法, 实质上都没有脱离 Geiger 原理, 但因采用了不同的算法, 定位结果之间存在一定差异。

### 1.2 权重定位

权重定位原理为: 首先采用方位角方法, 由单台计算震中, 进而对各台站计算结果加权确定事件的位置。

方位角法是经典的单台定位方法, 其原理就是利用纵波初动振幅求出震中方位角, 在已知纵横波速度的条件下, 根据 S-P 波走时差, 计算出震中距, 然后确定震中位置 (傅淑芳等, 1982)。

理论研究表明, 对于相同的方位角, 台站震中距越长, 震中误差越大。因此, 对台网中多个台站定位数据进行加权处理, 可获得相对合理的结果。本文在此提出震中加权处理方法, 主要原则是震中距短的台站权重较大, 震中距长的台站权重较小。

权重设计与计算。假定震中距权重是一个震中距的单调减函数, 且全部台站的权重值之和为 1, 即

$$\sum_{i=1}^n f(x_i) = 1 \tag{2}$$

$$f(x_i) > f(x_{i+1}) \quad x_{i+1} > x_i \tag{3}$$

为简化计算, 对函数进行映射变换, 将单调减函数  $f(x_i)$  变换为单调增函数  $f(x_i')$ 。假设有震中距  $x$ , 包括  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$  变量, 以直线  $X = x_n$  为轴, 将  $x$  变换为  $x'$  包括  $x_{n-1}', \dots, x_2', x_1'$ , 震中权重函数如图 1 所示。则震中距权重  $f(x_i)$  为

$$f(x_i) = \frac{x_i'}{\sum_{i=1}^n x_i'} \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^n f(x_i') = \sum_{i=1}^n f(x_i) \tag{5}$$

式中:  $x_i' = x_n + \alpha(x_n - x_i)$ ;  $\alpha$  为缩放因子,  $\sum_{i=1}^n f(x_i)$  为震中权重和。

缩放因子  $\alpha$  大小决定了变换后震中距之间的相对长度, 当  $\alpha$  为 1 时, 台站之间的相对距离没有改变, 当  $\alpha < 1$  时, 台站之间的相对距离被压缩, 当  $\alpha > 1$  时, 台站之间的相对距离被放大, 进而改变了震中距权重值。通常计算  $\alpha$  值为 1。

对于一个未知地震事件, 通过方位角法计算出事件震中为  $M_i(x_i, y_i)$ , 根据式 (4), 计算各台站的权值, 然后对各台站的数据进行加权, 于是, 震中  $M(x, y)$  为

$$M(x, y) = \sum_{i=1}^n f(x_i) M_i(x_i, y_i) \tag{6}$$

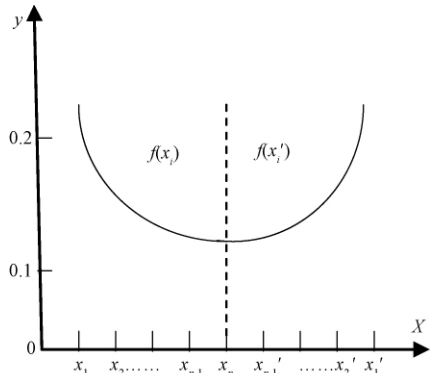


图 1 震中距权重函数图

(6) 式即为权重定位算式。

## 2 爆炸地震测量

为了确定权重定位的有效性,首先采用公斤级当量爆炸作为爆炸源,产生小地震,并进行测量和参数测定。

观测仪器为 LE-3Dlite 速度地震计,速度频响在  $1 \sim 80\text{Hz}$  范围内为平直线,速度换能灵敏度为  $400\text{V/m/s}$ ,地震计噪声较低,小于  $3 \text{ nm/s}$ ,EDAS 为 24 位数据采集器,野外数据采集时,其采样率为  $2\text{ms}$ 。

野外试验区属丘陵地貌,工作区域内,地形有一定起伏,但相对高差不大,一般为数十米,最大相对高差为 100 余米。出露的是第四纪黄土层,土层具有粘土结构及块状构造。在数平方千米的工作区内,在爆心距  $0.15 \sim 2.30\text{km}$  的不同距离上,布置了十几个地震观测点,测点与爆炸源呈半包围形式。

通过编号为 B1 至 B8 的低当量系列化爆地震测量,获得了大量的近场小当量爆炸地震数据,大多数观测记录数据呈现的波形完整、初动比较清楚。场地 P 波速度约为  $1.96\text{km/s}$ ,S 波速度约为  $0.76\text{km/s}$ 。

## 3 近场化爆地震权重定位

### 3.1 爆炸地震波形参数

根据前面介绍的方法,首先对 P 波到达时间前后取一段波形,计算射线任意时刻的方位角和合成矢量,在初动最大幅值处,对应的角度为该事件的方位角,进而计算事件的位置。图 2(a) ~ (c) 是 B2 某测点 E-W、N-S 和 U-D 分向初始波形,波形信噪比较大,P 波初动清楚。图 2 中 (d) ~ (f) 为事件台站方位角的正切值、事件出射角的正切值和台站波形的空间矢量幅值图。图 2 中 g 标志线是读取方位角的位置。

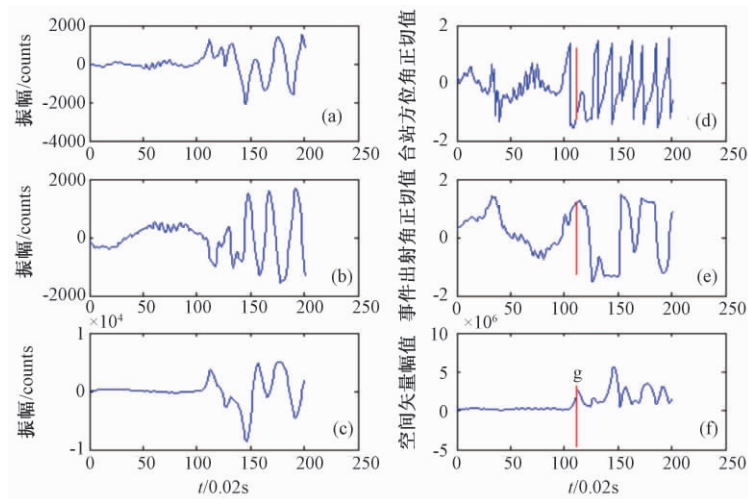


图 2 P 波初始波形与方位角正切值

对代号为 B1 和 B2 的 2 次爆炸地震数据进行了处理,首先进行了方位角计算。计算发现,3 个分量初动波形均清晰时才能得出比较可靠结果,否则方位角偏差较大,甚至达数十度。对于信噪比较高且初动清楚的波形,计算方位角和实际方位角仍存在一定偏差,计算震中距偏差约为 20%,平均方位角误差为  $9.86^\circ$ ,平均震中距偏差约为 15% (见表 1)。如果有震中距较短的台站或检测点,台网加权定位结果精度将大幅度提高。

表 1 爆炸 B1 和 B2 部分观测点实际与计算方位角表

爆炸代号	测点编号	实际方位角 ( $^\circ$ )	计算方位角 ( $^\circ$ )	方位角偏差 ( $^\circ$ )	实际距离 (km)	计算距离 (km)	距离偏差 (%)
B1	B202	293.67	308.97	15.30	0.291	0.252	13.4
	B203	281.92	298.25	16.33	0.614	0.661	7.65
	B204	294.97	288.41	-6.56	1.338	1.462	9.27
	B291	351.49	358.74	7.25	1.042	1.232	18.23
B2	B803	270.51	280.99	10.48	0.626	0.660	5.43
	B811	258.58	243.21	15.37	0.741	0.906	22.27
	B809	348.81	342.56	-6.25	0.927	1.109	19.63
	B810	147.36	148.69	1.33	1.428	1.769	23.88

### 3.2 权重定位

根据前面方位角定位原理,利用单台资料,计算震中位置。根据震中距计算权重值,其缩放因子  $\alpha$  取值为 1,对所有台站的测定数据进行加权,计算出爆炸地震的位置。同时,采用平均值法,计算出爆炸事件的位置参数,如表 2 所示。

表 2 不同数目台站权重定位参数表

爆炸代号	台站数目	经向差 (km)		纬向差 (km)		震中差 (km)		残差	
		均值*	权重#	均值*	权重#	均值*	权重#	均值*	权重#
B1	1	0.070	0.071	0.041	0.041	0.081	0.081	0.124	0.124
	2	0.023	0.034	0.103	0.088	0.105	0.094	0.125	0.117
	3	-0.040	0.017	0.033	0.050	0.052	0.053	0.121	0.115
	4	-0.058	-0.037	0.086	0.090	0.104	0.098	0.116	0.110
B2	1	-0.026	-0.026	0.078	0.078	0.082	0.082	0.327	0.327
	2	-0.054	-0.050	-0.092	-0.071	0.106	0.088	0.309	0.306
	3	-0.087	-0.080	-0.012	-0.014	0.088	0.081	0.292	0.295
	4	-0.028	-0.041	-0.086	-0.067	0.090	0.078	0.247	0.248

注:“均值\*”指多个台站方位角定位结果的平均;“权重#”指多个台站方位角权重定位结果

以编号 B3 爆炸为例,若取 2 个观测台站,加权震中偏差为 88m,平均法的震中偏差为 106m (3 (b))。而取 4 个观测台站时,加权的震中偏差为 78m,如图 3 (a),平均值法的震中偏差为 90m,如图 3 (b) 所示。

由表 2 可知,平均方位角法震中分向偏差在 20 ~ 100m 范围内,震中偏差在 50 ~ 110m 之间。权重定位的震中分向偏差在 10 ~ 90m 范围内,震中距偏差在 50 ~ 100m 之间。上述数据表明,权重定位精度明显高于平均方位角定位结果。其走时残差在 0.11 ~ 0.31 之间。统计上,权重定位方法走时残差较小。

### 3.3 盖革二乘与虚波速度法定位

地震定位精度与台网布局有关,根据实际观测台网,在台网中选择不同位置测点,构成

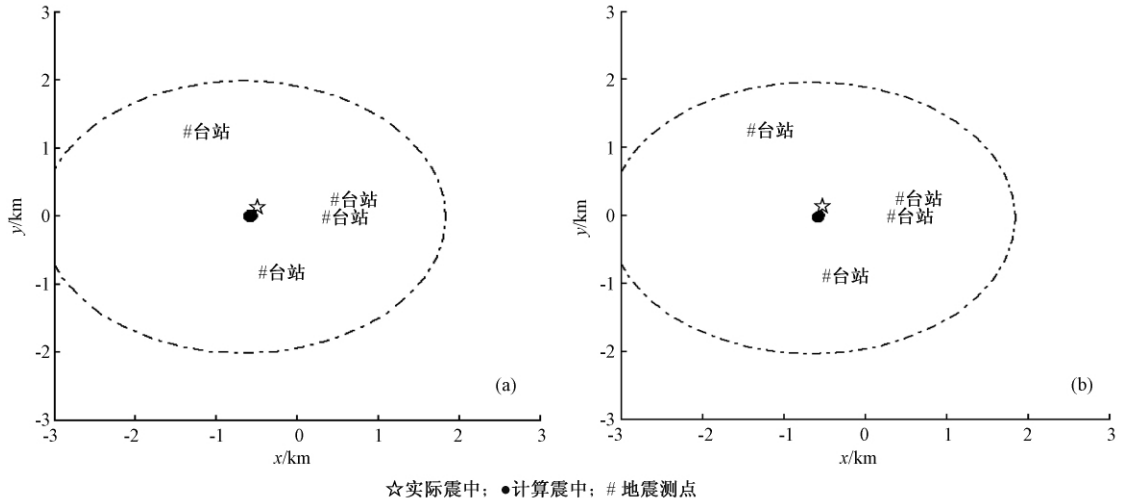


图3 B3爆炸权重及均值地震定位图

线形、单象限形和过半包围形布局。简化盖革算法采用最小二乘,简称盖革二乘(中国科学院地球物理研究所,1977)。同时,采用虚波速度方法实施地震定位(傅淑芳等,1982),确定不同测点布局定位精度和它们之间的差异。

作为应用实例,使用盖革二乘定位方法对3次爆炸进行了处理。B1爆炸,台网布局线形、单象限形(张角小于 $90^\circ$ )和过半包围形,其震中偏差分别是508、301和30m。B2爆炸,台网布局线形、单象限形和过半包围形,其震中偏差分别是29m、940m和16m。B3爆炸,台网布局线形、单象限形和过半包围形,其震中偏差分别是24m、9m和18m。由于布局不合理,有时震中偏差很大,达数千米,对于虚波速度定位,同样具有类似特征(详见表3)。由此可知,台站分布的张角对定位影响很大。上述数据表明,台网线形布局定位偏差较大,单象限布局定位偏差次之,过半包围形定位偏差较小。图4(a)为针对B1爆炸的盖革二乘法定位图,图4(b)为虚波速度定位图。

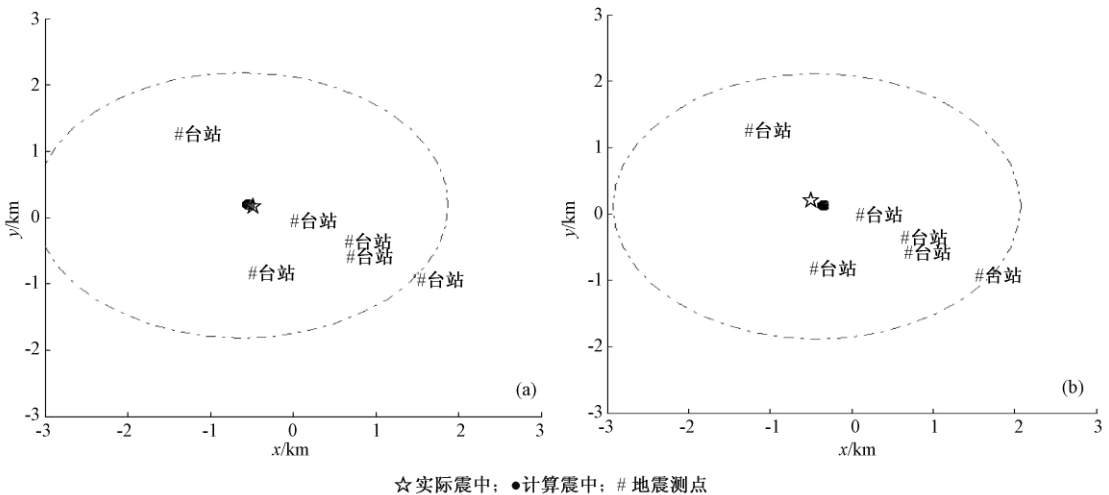


图4 B1爆炸地震定位图

### 3.4 定位结果分析

权重定位方法从理论上考虑了方位角法不同震中距上的定位精度会不同。基于震中距短定位偏差较小和震中距长定位偏差较大的原则进行加权计算,充分体现不同震中距结果对定位的贡献。权重定位方法的主要优点在于对测点布局不是过于严格,对台网数量没有要求。这对于台网中观测站较少,或者尽管台站不少,但台网布局不合理时,更显示出优势。该方法的定位计算建立在相对时间基上,对时间基没有要求,即便计时器有一定误差,对定位结果也不构成影响。

当观测台网布局合理时,盖革二乘法能够给出良好的定位数据,但是当台网布局不甚合理时,特别是台站张角为锐角,盖革二乘法与虚波速度定位法给出的定位结果往往存在很大误差,甚至无法给出定位数据。而权重定位可以解决这一问题,给出较好定位结果。在近场或地方震区域内,该定位方法是有效的。因该方法是建立在单台定位基础上,故大幅度提高定位精度受到限制。

表3 不同爆炸台站定位结果对比表

编号	测点数目	台站布局	经向差(km)		纬向差(km)		震中差(km)		残差	
			盖革二乘	虚波速度	盖革二乘	虚波速度	盖革二乘	虚波速度	盖革二乘	虚波速度
B1	5	线形	0.315	0.116	0.399	-0.130	0.508	0.177	0.18	0.31
	5	<90°	0.235	-1.190	-0.190	2.690	0.301	3.320	1.14	2.23
	6	220°	-0.030	0.168	0.002	-0.070	0.030	0.182	0.17	0.27
B2	5	线形	0.179	-0.460	0.229	-0.660	0.290	0.805	0.16	0.43
	5	<90°	-0.550	0.469	0.762	-0.640	0.940	0.794	0.45	0.60
	6	220°	-0.016	0.090	0.003	0.009	0.016	0.091	0.16	0.33
B3	6	线形	-0.020	0.244	0.001	0.045	0.024	0.248	0.20	0.42
	6	<90°	0.008	-0.070	0.004	-0.040	0.009	0.081	0.19	0.40
	7	220°	-0.010	0.077	0.014	-0.160	0.018	0.180	0.20	0.40

## 4 结论

地震台网中台站震中距长短对定位精度的贡献是不同的,基于震中距长权重小和震中距短权重大的原则,通过轴对称映射,提出了震中距权重映射算法。

权重定位方法充分考虑了台网中震中距长短差异台站对定位的贡献差异,使定位数据更加合理。同时,该定位方法对台站或观测点的数量没有限制,对台网布局并不过于苛刻。

当观测台网布局合理时,盖革二乘与虚波速度法能够给出良好的定位数据,但是当台网布局不甚合理,特别是台网张角为锐角时,盖革二乘与虚波速度法往往无法给出合理的事件位置,而权重定位法能够给出较好的定位结果。

## 参考文献

- 傅淑芳、刘宝诚、李文艺,1982,地震学教程,北京:地震出版社。  
 中国科学院地球物理研究所,1977,近震分析,北京:地震出版社。  
 李学政、何永锋、雷军等,1999,神经网络方法在爆炸地震震中定位方面的应用,地震地质,21(1),77~82。  
 李学政、王海军、雷军,2003,近场震级起算函数确定与爆炸余震震级计算,中国地震,19(2),117~124。  
 赵仲和,1983,多重模型地震定位程序及其在北京台网的应用,地震学报,5(2),242~254。  
 Bolt B A,1960,The revision of earthquake epicenter, focal depths, and origin times a high-speed computer, Geophys J,3,433~

440.

Geiger L, 1910, Probability methods for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, Bull Stlouis Univ, **8**, 60 ~ 71.

Hamilton R M, Smith B E, Fischer F G, 1972, Earthquakes caused by underground nuclear explosions on Pahute Mesa, Nevada test site, BSSA, **62** (5), 1319 ~ 1341.

Li X Z, Lei J, 2001, Study on the method of optional location on explosion events at near-source site, Acta Seismologica, **23** (3), 326 ~ 333.

## Study on the seismic weighted location at near-field

*Li Xuezheng*<sup>1)</sup> *Wang Minchao*<sup>1)</sup> *Lei Jun*<sup>2)</sup>

1) Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

2) Beijing University, Beijing 100871, China

**Abstract** Epicenter distance-weighting is calculated through the use of axis-symmetry image, and a location method of weighting-azimuth is established. This method takes into full account different contributions of various epicenter distances to seismic locations. Precision calculated by the weighted method is distinctly improved compared with other methods. This method does not have a limit on station numbers, and the requirement for the layout of the seismologic observation network is low. In the case of the unreasonable layout of seismic network when Geiger method and virtual wave method of velocity fail to provide reliable data, weighting-azimuth method can give better location results.

**Key words:** Earthquake at near-field    Layout of seismic network    Weight seismic location