

DOI: 10.11779/CJGE201502003

二层水平介质球面波正反演联用与震源定位

张向东, 王 帅, 贾宝新

(辽宁工程技术大学土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 二层水平介质中原几何平均震源定位方法, 无法直接确定震源的水平坐标, 推广至任意水平层状介质时, 包含震源深度的定位参数难以确定和修正, 且难以确定震源所在层。根据将水平和铅垂坐标分离、并去根号的走时方程, 反演出发震时刻, 并合理修正, 根据水平层状体系中球面波波阵面的正演方法, 得到含震源空间坐标的非线性方程组, 求解可得震源的水平坐标和铅垂坐标。各种定位条件下的定位计算表明, 正反演联合运用法的水平和铅垂坐标误差的较大值, 均不大于几何平均法的震源深度计算误差, 且正反演联用法比几何平均法更适合于深震源定位。对参数敏感性的分析表明, 发震时刻对定位参数不敏感, 震源位置误差对波速、波速比的敏感性介于几何平均法和经典线性法之间。正反演联用法不能改进几何平均法不适应较大水平垂直距离比和较大、较小埋深比的缺点, 仍建议在地(矿)震易发区布置台站, 并与经典线性法结合使用。正反演联用法不需要确定和修正含震源深度的定位参数, 且便于逐层排除和确定震源所在层, 因此将比几何平均法更适合于任意水平层状介质中的震源定位。

关键词: 震源定位; 二层介质; 球面波; 正反演; 任意层介质

中图分类号: TU435; P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)02-0225-10

作者简介: 张向东(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研。E-mail: jwd101@126.com。

Positioning of seismic sources combined with forward and inversion of spherical wave in double-layer horizontal media

ZHANG Xiang-dong, WANG Shuai, JIA Bao-xin

(College of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The positioning method of geometric average in double-layer horizontal media is unable to determine the horizontal coordinates of seismic sources directly. When it is extended to multilayer medium, the positioning parameters containing depth are difficult to be determined and corrected, and it is difficult to determine the layer where the sources are located. Using the travel time equation by which the depth and horizontal coordinates are separated and the square root is removed, the time when the earthquake happens is obtained through inversion and corrected reasonably. According to the forward modeling method for wave front of spherical wave in double-layer horizontal media, nonlinear equations containing space coordinates of the sources are got, and the depth and horizontal coordinates are yielded by solving the nonlinear equations. The calculated results of positioning under a variety of conditions show that the larger values of positioning error of depth and horizontal coordinates derived by the positioning model combined with forward and inversion are all not greater than those by the geometric average method, and the new positioning method is more suitable than the geometric average method for positioning of deep seismic sources. The sensitivity analysis of parameters shows that the origin time of earthquakes is not sensitive to the positioning parameters, and the sensitivity of the focal position error to wave velocity and wave velocity ratio is between the geometric average method and classical linear method. But the proposed model cannot improve the defect of the geometric average method. When the ratio of horizontal to vertical distance between stations and sources is large, the positioning accuracy is poor. There is also no advantages when the ratio of distances from the interface of sources and stations is too large or too small. So stations in the area where earthquakes are easily prone to happen are suggested to be arranged and the classic linear positioning methods are employed. There is no need to determine or correct the positioning parameters containing depth for the positioning model combined with forward and inversion. It is easy to eliminate or identify which layer the seismic sources are located in. Accordingly, the proposed model is more suitable than the geometric average method for positioning of seismic sources in multilayer horizontal media.

Key words: positioning of seismic source; double-layer medium; spherical wave; forward and inversion; multilayer medium

基金项目: 国家自然科学基金委员会-神华集团有限公司煤炭联合基金项目(51174268); 辽宁省自然科学基金项目(201202095)
收稿日期: 2014-03-01

0 引言

目前矿(地)震震源定位广泛采用的方法是线性定位方法和格革(Geiger)法等^[1-5], 现有方法均假设介质为均匀介质, 与成层分布的地下岩体或煤矿采区有较大差距, 因此现有方法的误差来源主要是模型误差, 而非台站监测数据失真或随机错误等观测误差。因此为了提高震源定位精度, 不应局限于研究容错能力更强的算法, 更应建立合理考虑介质复杂性的分层介质中的定位模型。本文中称基于均匀介质的线性定位法为“经典线性法”。

文献[6]中, 依据工程中广泛采用的折射点近似确定方法^[7-8]和惠更斯原理中等时线概念^[9], 推导出跟号并分离变量的走时方程, 采用特殊台站分布方案, 使得走时方程可解。所得到的震源深度计算结果较经典线性方法有显著提高, 二层介质中的定位模型在分层介质震源定位中效果良好。在修正定位结果的关键步骤中, 文献[6]中采用了取几何平均数的方法, 因此本文称该文提出的二层介质中的定位方法为“几何平均法”。

但几何平均法仍然存在问题。首先, 该方法的主干体系中, 不包括水平坐标 (x_0, y_0) 的确定, 为了确定水平坐标, 需根据震源深度和发震时刻采用其它数值计算方法, 大大增加了算法的复杂度。其次, 由于折射点的近似确定方法, 导致求解线性方程组后的震源深度的计算结果偏差很大, 采用的解决方法是取几何平均数修正, 这在二层介质中的震源定位中是有效的, 但当考虑任意层介质时, 这种简单的处理方法无法取得良好的效果, 因为层数越多, 折射点偏差导致的计算结果偏差越大、越复杂。最后, 在处理任意层介质的震源定位问题时, 需要排除和确定震源的所在层, 用前文所述的定位方案难以解决。

因此, 基于文献[6]中提出的几何平均法, 拟研究新的定位方案, 使其能够解决上述三点难题。本文提出的定位方法结合了发震时刻的反演和波阵面的正演, 因此本文称该方法为“正反演联用法”。

为了减小难度、增强可实现性, 并便于对比正反演联用法和几何平均法的效果, 仍重点在二层水平介质中研究正反演联用法, 摸索新定位方法的要点、积累经验, 为在任意层介质中的运用做好铺垫。

1 正反演联用法的提出

根据文献[6]中式(9), 二层介质P波波速分别为 v_1, v_2 , 台站坐标 $P(x_1, y_1, h_1, t_1)$ 与震源坐标 $Q(x_0, y_0, h_0, t_0)$ 的关系方程, 即走时方程为

$$b + a \cdot MN^2 = v_2^2 \cdot (t_1 - t_0)^2, \quad (1)$$

式中, 参数含义见文献[6]中式(9)。

原几何平均法中通过特殊的台站分布方案, 将走时方程(1)简化为线性方程组, 求解出与震源深度有关的参数 a 和发震时刻 t_0 。由于折射点的近似确定方法, 求解出的参数 a 和发震时刻 t_0 严重偏离真值, 因此几何平均法利用上下两条等时线 AC, BD 分别计算出对应的 a_1, a_2 , 采用取几何平均数的方法得到与真值最接近的 h_0 。其实在几何平均法中, 得到参数 a 和发震时刻 t_0 后, 可以得到新的线性方程组, 进而得到水平坐标 (x_0, y_0) , 但偏离真值非常严重且无法修正, 因此没有实用意义。对于多层介质, 即使参数 a 也难以修正。

因此新思路是, 消去受折射点位置影响较大的参数 a , 而保留发震时刻 t_0 , 并尽可能修正 t_0 使其接近真值, 由此便得到各个台站的走时。这时, 根据震波传播路径的可逆性, 假设监测台站为震源, 利用层状介质中球面波正演方法, 得到历经该台站实际走时后的层状介质中波前分布, 则实际震波传播射线必为波前上各点至监测台站射线路径中的一条, 波前曲线即震源的可能位置。在三维空间中, 震源位置坐标包含 (x_0, y_0, h_0) 3个变量, 因此确定震源位置需要3个走时方程, 对应3个不共线的台站。联立该3个台站的波前分布方程, 即可求解出震源位置坐标 (x_0, y_0, h_0) 。

该方法的准确性依赖于发震时刻 t_0 计算的准确性, 除此之外与折射点位置的近似确定无关, 通过正演方法得到联立方程等过程均是精确的。

2 正反演联合定位方案

2.1 规则观测系统下的发震时刻

(1) 发震时刻的反演与修正

已知同一直线上等间距分布的3个台站的时空参数 (x_1, y_1, h_1, t_1) 、 (x_2, y_2, h_2, t_2) 、 (x_3, y_3, h_3, t_3) , 根据文献[6]中的式(16)、(17), 得到文献[6]中线性方程组(18), 求解所得 a 值偏差很大, 因此, 考虑消去 a 值, 只保留发震时刻 t_0 , 前述文献[6]中式(16)除以式(17), 得到 t_0 的表达式:

$$t_0 = \frac{P[(t_6^2 - t_5^2) - (t_5^2 - t_4^2)] - [(t_3^2 - t_2^2) - (t_2^2 - t_1^2)]}{2P[(t_6 - t_5) - (t_5 - t_4)] - 2[(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)]}, \quad (2)$$

$$\text{式中, } P = \frac{(x_3^2 - x_2^2) - (x_2^2 - x_1^2) + (y_3^2 - y_2^2) - (y_2^2 - y_1^2)}{(x_6^2 - x_5^2) - (x_5^2 - x_4^2) + (y_6^2 - y_5^2) - (y_5^2 - y_4^2)},$$

其中, 具体参数含义见文献[6]中式(16)、(17)。

式(2)所得到的 t_0 , 在通常情况下是与真值有差

异的, 这是把非线性问题简化为线性问题导致的, 应采取合理的修正。在得到震源位置参数之前, 已知的是台站距介质分界面距离 h_1 和二层介质的波速。试算中发现, 在某次定位中, 发震时刻 t_0 计算值与真值的偏差, 与台站距介质分界面距离的实数幂呈正相关, 也与波速比的实数幂呈正相关。通过多元函数的非线性最小二乘拟合, 得到发震时刻 t_0 的计算偏差的表达式为

$$\Delta t = -2.56 \times 10^{-4} \cdot h_1^{0.8915} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1.3334} \quad (3)$$

修正后的发震时刻为 $T_0 = t_0 + \Delta t$ 。式中, h_1 表示台站距介质分界面距离, v_1, v_2 分别表示二层介质的波速, $t_0, \Delta t, T_0$ 分别表示发震时刻 t_0 的计算值、拟合修正值和最终值。

(2) 发震时刻的最优化

为了单独考察参数 h_1 和 v_2/v_1 的拟合效果与敏感性, 并且为了第 3 节算例的计算方便, 将式 (3) 拆分为两个, 即

$$\Delta t = -6.79559 \times 10^{-4} \cdot h_1^{0.8986} \quad , \quad (4)$$

$$\Delta t = -0.1478 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1.2527} \quad (5)$$

表 1, 2 的发震时刻计算值利用式 (2) 计算, 发震时刻的拟合修正值利用式 (4)、(5) 计算。从图 1, 2 可以看出, 计算值与修正值均近似与 $h_1, v_2/v_1$ 呈正相关。

表 1 $v_2/v_1=2$ 时不同 h_1 下 t_0 计算值与修正值

Table 1 Calculated and corrected values of t_0 under different h_1
when $v_2/v_1=2$

h_1/m	v_2/v_1	t_0 计算值/s	拟合修正值/s
500	2	0.208945	0.180929
1000	2	0.366400	0.337298
1500	2	0.495565	0.485566
2000	2	0.618480	0.628807
2500	2	0.736090	0.768423
3000	2	0.871521	0.905216
4000	2	1.208896	1.172254

表 2 $h_1=1000$ 时不同 v_2/v_1 下 t_0 计算值与修正值

Table 2 Calculated and corrected values of t_0 under different v_2/v_1
when $h_1=1000$

h_1/m	v_2/v_1	t_0 计算值/s	拟合修正值/s
1000	1.142857	0.033692	0.174685
1000	1.333333	0.115832	0.211896
1000	1.600000	0.214570	0.266266
1000	2.000000	0.366400	0.352143
1000	2.666667	0.568700	0.504934
1000	4.000000	0.949431	0.839132
1000	8.000000	1.964074	1.999591

通过试算发现, 虽然每次不同条件的定位计算, 式 (3) ~ (5) 的系数不同, 但不同定位条件的修正公式的形式相同。且根据 2.1 节及式 (3) ~ (5) 的

推导过程, 发震时刻 t_0 的计算和修正均与震源参数 (x_0, y_0, h_0) 无关。因此方法具有一般性。

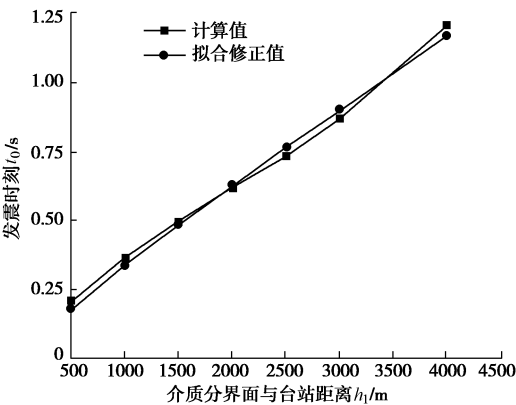


图 1 $v_2/v_1=2$ 时不同 h_1 下 t_0 计算值与修正值

Fig. 1 Calculated and corrected values of t_0 under different h_1 when $v_2/v_1=2$

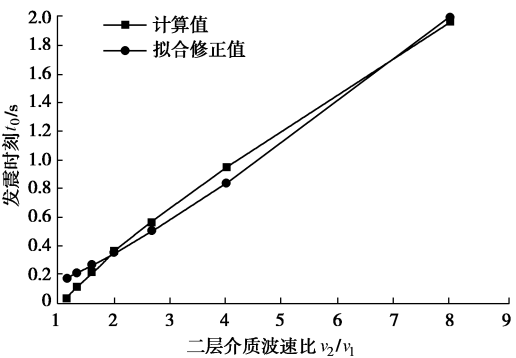


图 2 $h_1=1000$ 时不同 v_2/v_1 下 t_0 计算值与修正值

Fig. 2 Calculated and corrected values of t_0 under different v_2/v_1 when $h_1=1000$

另外, 修正式 (3) ~ (5) 中只考虑了 t_0 计算值与 $h_1, v_2/v_1$ 的关系, 所以其适用范围有限制, 具体限制条件是震源与台站的水平、竖直距离比不应过大, 且震源到介质分界面距离、台站到介质分界面距离不应相差过大, 满足这种定位条件的实例, 进行发震时刻修正的效果较好。

(3) 参数敏感性分析

分别令图 2 中的 $h_1=1000$ m, 图 1 中的 $v_1=2000$ m/s 增加或减小 5%, 10%, 15%, 20%, 其余参数不变, 考察 t_0 计算值、修正值以及最终值的变化, 如图 3, 4 所示, 可见 t_0 最终值也就是发震时刻相对于参数并不敏感, 算法稳定性良好。

(4) 定位参数的幂指数值的最优化

综合考察拟合效果与参数敏感性, $h_1, v_2/v_1$ 幂指数值的最佳值不是 1, 理由如下所述:

取图 1, 2 各个 $h_1, v_2/v_1$ 对应的计算值与修正值之残差的平方和, 作为拟合质量的表征。分别测试 $h_1, v_2/v_1$ 取不同的幂指数值时, 残差平方和的取值变化,

如图 5 所示。

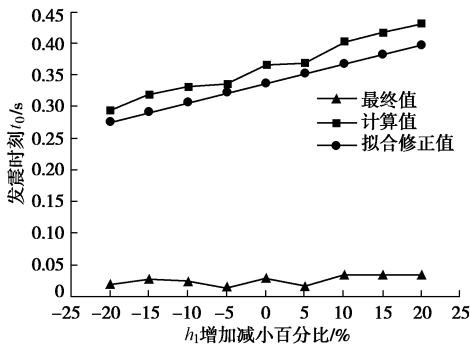


图 3 发震时刻 t_0 对于 h_1 的敏感性

Fig. 3 Sensitivity of origin time t_0 of earthquake to h_1

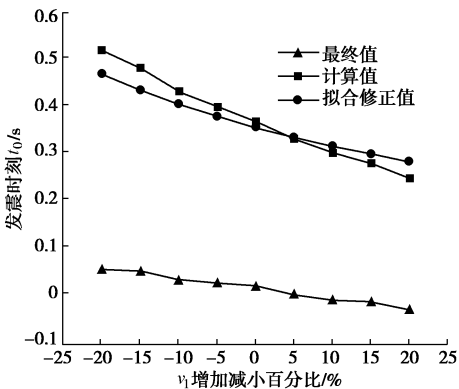


图 4 发震时刻 t_0 对于波速 v_1 的敏感性

Fig. 4 Sensitivity of origin time t_0 of earthquake to v_1

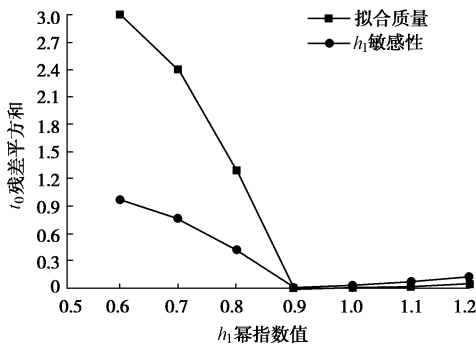


图 5 拟合质量与参数敏感性随 h_1 幂指数值变化

Fig. 5 Variation of fitting quality and parameter sensitivity with index value of h_1

再取图 3,4 中各个百分比下发震时刻最终值的平方和, 作为参数敏感性强弱的表征。并且同样取不同的幂指数值重复上述过程。得到不同幂指数值下, t_0 相对于 h_1 , v_2/v_1 的参数敏感性表征。如图 6 所示。

由图 6 可见, 拟合质量与参数敏感性随 h_1 , v_2/v_1 的幂指数值的变化规律基本一致, 最优的幂指数值并不取 1。且拟合质量最优的幂指数值与参数敏感性最弱的幂指数值非常接近, 可近似认为相同。获取最优幂指数值可采用最小二乘法。

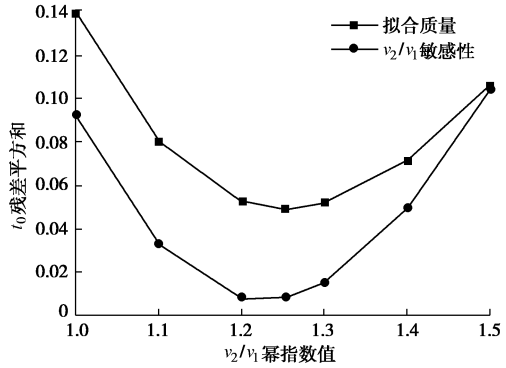


图 6 拟合质量与参数敏感性随 v_2/v_1 幂指数值变化

Fig. 6 Variation of fitting quality and parameter sensitivity with index value of v_2/v_1

2.2 关于不规则观测系统的论述

2.1 节中规则观测系统中发震时刻的确定, 采用先计算发震时刻计算值, 再根据曲线拟合法修正的思路。而发震时刻的计算值, 依赖于文献[6]中的走时方程式 (9), 该走时方程的降维与降幂, 依赖于观测系统的选择, 具体要求是水平直线上等间距分布的 3 个台站, 对于一般的不规则观测系统, 不能将该走时方程降维、降幂, 所以无法得到发震时刻的计算值。且对于不规则观测系统, 即使能得到发震时刻计算值, 曲线拟合修正公式的形式和系数获取也将非常困难, 有待进一步专门探索。

2.3 二层介质球面波正演与震源坐标

(1) 二维平面内二层介质球面波正演公式

其中图 7 中各变量含义见下文中公式变量含义说明。

先考察二维情形, 根据几何关系易得: $\cos \theta = \frac{h_1}{R}$, 或 $R = v_1 T_1 = \frac{h_1}{\cos \theta}$ 。式中, T_1 表示台站 1 发出震波在介质 1 中扩散时长为 T_1 , R 表示经过 T_1 时间波阵面在介质 1 中的扩散半径为 $R = v_1 T_1$, θ 表示波阵面在介质分界面上的交线, 与震源的成角。

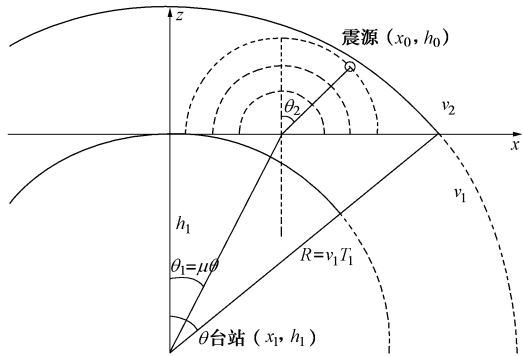


图 7 二层水平介质中球面波的正演

Fig. 7 Forward modeling of spherical wave in double-layer horizontal media

根据波的折射定律, 有 $\frac{v_2}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{\sin(\mu\theta)}$ 。式中, μ 为参数, 与折射点的位置一一对应, θ_1 表示台站发出震波的入射角, $\theta_2 = \mu\theta$ 表震波折射角。则

$$\sin \theta_2 = \frac{v_2}{v_1} \sin(\mu\theta), \text{ 所以 } \cos \theta_2 = \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \sin^2(\mu\theta)}。$$

对球面波在二层介质中的传播过程进行正演, 得到在第二层介质中的波阵面方程为

$$x_0 = x_1 + \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{h_1}{\cos \theta} - \frac{h_1}{\cos(\mu\theta)} \right) \sin \theta_2 + h_1 \tan(\mu\theta) \\ = x_1 + \frac{v_2^2}{v_1} T_1 \sin \mu\theta + \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) h_1 \tan(\mu\theta), \quad (6)$$

$$h_0 = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{h_1}{\cos \theta} - \frac{h_1}{\cos(\mu\theta)} \right) \cos \theta_2 \\ = \left(v_2 T_1 - \frac{v_2}{v_1} \frac{h_1}{\cos(\mu\theta)} \right) \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \sin^2(\mu\theta)}, \quad (7)$$

式中, (x_0, h_0) 表示震源坐标, (x_1, h_1) 表示台站坐标。

当已知发震时刻 T_0 时, θ 值已知, 除参数 μ 外, 其它变量也为已知, 则式 (6)、(7) 是以 μ 为参数的参数方程, 表示球面波在分层介质中波阵面的几何形状。该参数方程是由一个台站的震波走时正演而来, 波前分布即为震源的可能位置。如果再得到另一个台站的震波走时, 采用相同的方法正演, 则可得到另一个代表震源可能位置的波前分布。这样两个波前曲线的交点, 一定是震源位置, 在代数意义上就是两个台站对应参数方程的公共解。当已知两个台站的参数方程时, 包含两个未知参数 μ_1, μ_2 , 由 x, h 坐标分别相等恰好构建两个线性独立等式方程, 即可解出参数 μ_1, μ_2 , 从而得到震源的空间位置。

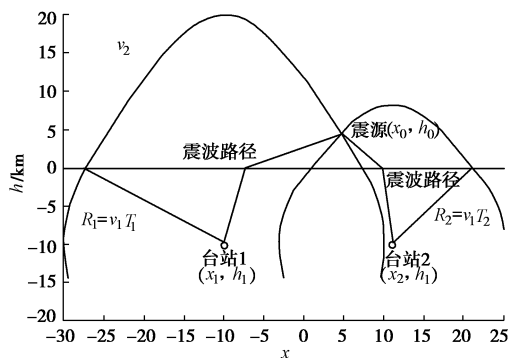


图8 二层水平介质中球面波波阵面与二维震源定位

Fig. 8 Spherical wave front and positioning of two-dimensional wave source in double-layer horizontal media

图8中 (x_0, h_0) 表示震源坐标, (x_1, h_1) 表示台站1坐标, (x_2, h_1) 表示台站2坐标, T_1 表示台站1发出

震波在介质1中扩散时长, R_1 表示经过 T_1 时间波阵面在介质1中的扩散半径为 $R_1 = v_1 T_1$, R_2 表示经过 T_2 时间波阵面在介质1中的扩散半径为 $R_2 = v_1 T_2$ 。

(2) 三维空间中二层介质球面波正演公式

实际震源的空间位置、台站空间分布均是三维的, 因此震源的可能位置为一曲面, 参数方程需增加一个参数, 确定未知参数时也需要多一个不共线台站。

如果用 φ 表示震源水平位置参数, 具体意义为震波传播路径所在的竖直平面与 x 轴夹角, 对于台站1, 可建立三维空间中震源可能位置曲面的参数方程为

$$x_0 = x_1 + \left[\frac{v_2}{v_1} \left(\frac{h_1}{\cos \theta} - \frac{h_1}{\cos(\mu\theta)} \right) \sin \theta_2 + h_1 \tan(\mu\theta) \right] \cos \varphi \\ = x_1 + \left[\frac{v_2^2}{v_1} T_1 \sin \mu\theta + \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) h_1 \tan(\mu\theta) \right] \cos \varphi, \quad (8)$$

$$y_0 = y_1 + \left[\frac{v_2}{v_1} \left(\frac{h_1}{\cos \theta} - \frac{h_1}{\cos(\mu\theta)} \right) \sin \theta_2 + h_1 \tan(\mu\theta) \right] \sin \varphi \\ = y_1 + \left[\frac{v_2^2}{v_1} T_1 \sin \mu\theta + \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) h_1 \tan(\mu\theta) \right] \sin \varphi, \quad (9)$$

$$h_0 = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{h_1}{\cos \theta} - \frac{h_1}{\cos(\mu\theta)} \right) \cos \theta_2 \\ = \left(v_2 T_1 - \frac{v_2}{v_1} \frac{h_1}{\cos(\mu\theta)} \right) \sqrt{1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \sin^2(\mu\theta)}, \quad (10)$$

式中, (x_0, y_0, h_0) 表示震源坐标, (x_1, y_1, h_1) 表示台站1坐标。

当已知3个台站的参数方程时, 包含6个未知参数 $\mu_1, \varphi_1, \mu_2, \varphi_2, \mu_3, \varphi_3$ 。其中 μ_1, φ_1 表示台站1位置参数, μ_2, φ_2 表示台站2位置参数, μ_3, φ_3 表示台站3位置参数。由2个台站的 x, y, h 坐标分别相等能构建3个线性独立的等式方程, 3个台站恰好构建6个线性独立的等式方程, 即可解出全部6个参数, 从而得到震源的空间位置。

3 算 例

某地震震源深度3000 m, 震源距地表的岩土结构主要为两层, 下层为花岗岩, 厚度2000 m, 波速4000 m/s, 上覆层为泥岩, 厚度1000 m, 波速2000 m/s。震源水平坐标为 $x_0=200$ m, $y_0=400$ m。发震时刻 $t=0$ s。

布置监测台站6处, 位于同一水平面, 与震源铅垂距离均为3000 m, 分别位于两条不共线、不平行直线 l_1, l_2 上, 每条直线上3台, 且间距相等。

各台站监测到时利用双层介质折射点精确计算方

法——常量法确定折射点^[10-12]。定位参数见表 3。

表 3 定位条件及台站参数

Table 3 Positioning conditions and parameters of stations				
台站号	x 坐标/m	y 坐标/m	位置	监测到时
1	200	4000	直线 l_1 上	1.480890
2	1640	2560	直线 l_1 上	1.281039
3	3080	1120	直线 l_1 上	1.352158
4	1000	1200	直线 l_2 上	1.061414
5	2400	2600	直线 l_2 上	1.380468
6	3800	4000	直线 l_2 上	1.810243

根据式 (2)，计算得 $P=1.44$ ， $t_0=0.3664$ 。根据式 (4)，计算得 $\Delta t=-0.352143$ 。因此，修正后的发震时刻 $T_0=t_0+\Delta t=0.3664-0.3522=0.0142$ 。

球面波的正演与震源空间坐标的确定需选用 3 个不共线的台站，因此选取台站 1、台站 3 和台站 6，

$\cos \theta_1=\frac{h_1}{v_1 T_1}=0.3409$ ，计算得 $\theta_1=1.22292$ 。同理：
 $\theta_2=1.1878$ ， $\theta_3=1.28868$ ，代入参数方程式 (8)~(10) 中可得：

$$\left. \begin{aligned} x_{01} &= 200 + [11733.5 \sin(1.22292\mu_1) - 3000 \tan(1.22292\mu_1)] \cos \varphi_1, \\ y_{01} &= 4000 + [11733.5 \sin(1.22292\mu_1) - 3000 \tan(1.22292\mu_1)] \sin \varphi_1, \\ h_{01} &= \left[\left(5866.76 - \frac{2000}{\cos(1.22292\mu_1)} \right) \cdot \sqrt{1 - 4 \sin^2(1.22292\mu_1)} \right]; \end{aligned} \right\} \quad (11a)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{02} &= 3080 + [10703.7 \sin(1.1878\mu_2) - 3000 \tan(1.1878\mu_2)] \cos \varphi_2, \\ y_{02} &= 1120 + [10703.7 \sin(1.1878\mu_2) - 3000 \tan(1.1878\mu_2)] \sin \varphi_2, \\ h_{02} &= \left[\left(5351.83 - \frac{2000}{\cos(1.1878\mu_2)} \right) \cdot \sqrt{1 - 4 \sin^2(1.1878\mu_2)} \right]; \end{aligned} \right\} \quad (11b)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{03} &= 3800 + [14368.3 \sin(1.28868\mu_3) - 3000 \tan(1.28868\mu_3)] \cos \varphi_3, \\ y_{03} &= 4000 + [14368.3 \sin(1.28868\mu_3) - 3000 \tan(1.28868\mu_3)] \sin \varphi_3, \\ h_{03} &= \left[\left(7184.17 - \frac{2000}{\cos(1.28868\mu_3)} \right) \cdot \sqrt{1 - 4 \sin^2(1.28868\mu_3)} \right]; \end{aligned} \right\} \quad (11c)$$

$$\text{令} \begin{cases} x_{01} = x_{02} \\ y_{01} = y_{02} \\ h_{01} = h_{02} \end{cases}, \begin{cases} x_{01} = x_{03} \\ y_{01} = y_{03} \\ h_{01} = h_{03} \end{cases}, \text{可得 6 个非线性方程,}$$

组成非线性方程组，含 6 个位置参数，求解该非线性方程组即得震源的空间坐标。

利用数学软件 Matlab 中的 fsolve 函数，取初值为 $(\mu_1, \varphi_1, \mu_2, \varphi_2, \mu_3, \varphi_3) = (0.2, -2, 0.2, -2, 0.2, -2)$ ，迭代求解得到参数为 $(\mu_1, \varphi_1, \mu_2, \varphi_2, \mu_3, \varphi_3) = (0.3573, -1.5639, 0.3416, -2.9064, 0.3703, -2.3578)$ 代入 3 个参

$$\text{数方程中, 得到: } \begin{cases} x_{01} = 224.58 \\ y_{01} = 435.907 \\ h_{01} = 1949.06 \end{cases}, \begin{cases} x_{02} = 224.761 \\ y_{02} = 435.807 \\ h_{02} = 1949.05 \end{cases},$$

$$\begin{cases} x_{03} = 224.729 \\ y_{03} = 436.191 \\ h_{03} = 1949.51 \end{cases}, \text{实际震源坐标为 } \begin{cases} x_0 = 200 \\ y_0 = 400 \\ h_0 = 2000 \end{cases}.$$

4 误差随速度变化的敏感性测试

图 9 为定位误差随介质速度变化的敏感性，使泥岩速度发生 1%~5% 的扰动，走时数据和其他定位参数维持原值不变。从图 9 可以看出，几何平均法的误差对速度扰动的敏感性最低，其次是正反演联用法，敏感性最高的是经典线性法。从定位误差的取值分析，3 种方法对速度变化的敏感性都不高，且都呈线性，都能保证工程上所需要的稳定性。

图 10 为定位误差相对介质波速比的敏感性，波速比分别取 $v_1/v_2=0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875$ ，走时数据和其他定位参数维持原值不变，考察定位误差的变化。图 10 反映的敏感性大小对比与图 9 基本一致。不同之处在于，对于正反演联用法，随着波速比的减小，定位误差增长较快，随着波速比的增加，定位误差增长放缓。从定位误差的取值分析，当波速比过大或过小时，3 种方法中定位误差对速度比的敏感性总体上都很高。

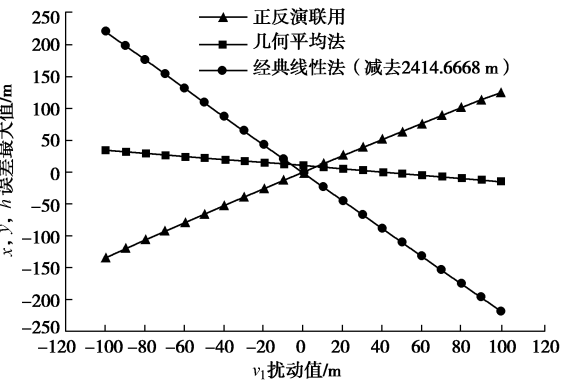


图 9 定位误差对于波速 v_1 敏感性

Fig. 9 Sensitivity of positioning error to wave velocity v_1

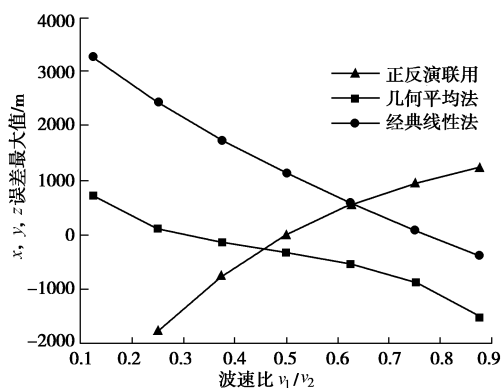
图10 定位误差对于波速比 v_1/v_2 敏感性

Fig. 10 Sensitivity of positioning error to wave velocity ratio v_1/v_2

波速比发生较明显的变化时, 说明波速发生了较大改变, 所以图10可以看成是图9反映规律的扩展, 因此, 综合图9, 10的规律, 当波速变化较小, 波速比取值范围适宜时, 正反演联用法的误差敏感性并无劣势。因此从误差敏感性角度分析, 正反演联用法的稳定性较几何平均法差, 但相差并不明显, 且优于经典线性法。

5 不同定位参数下定位精度分析

由图11可以看出, 正反演联用定位方法所得到的震源 x, y, h 坐标精度远远高于经典线性定位方法, 3方向的定位误差与几何平均定位方法的震源深度误差基本相当。而几何平均法的主干计算体系中无法得到震源的水平坐标, 需借助额外的数值计算方法, 这一点较正反演联用方法劣势明显。

由图12可以看出, 在不同等距台站距离下, 正反演联用法的3个方向定位精度, 均能达到几何平均定位法的震源深度的精度水平。定位精度远高于经典线性定位方法, 且精度规律与几何平均法一致: 等距距离过小时, 监测到时区分不明显, 使定位误差增大; 等距距离过大时, 水平竖直距离比增大, 根据后文分析, 将看到此时定位精度明显变差。

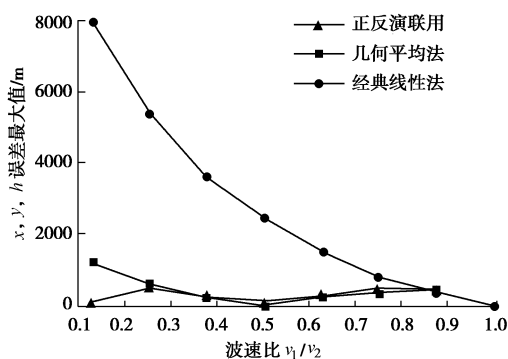


图11 不同波速比下3种定位方法误差对比

Fig. 11 Comparison of positioning errors among three methods under different wave velocity ratios

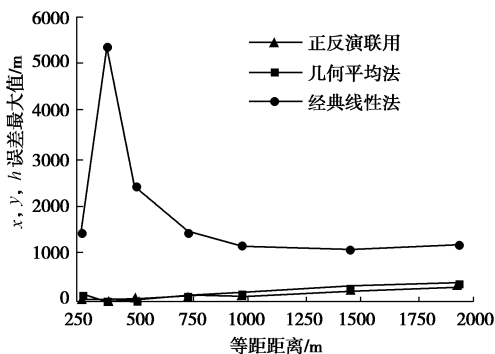


图12 不同台站间距下3种定位方法误差对比

Fig. 12 Comparison of positioning errors among three methods under different station distances

根据定位计算过程, 正反演联用法的震源深度定位精度很好, 即使台站距震源水平距离很大时, 误差也远远小于几何平均法和经典线性法, 但当台站距震源水平距离增大时, 正反演联用法的水平坐标定位误差明显变大。根据图13, 综合考虑 x, y, h 3个方向的定位误差时, 当水平竖直距离比增大时, 正反演联用法和几何平均法一样, 定位精度变差, 所以仍应在矿(地)震易发区布置监测台站。

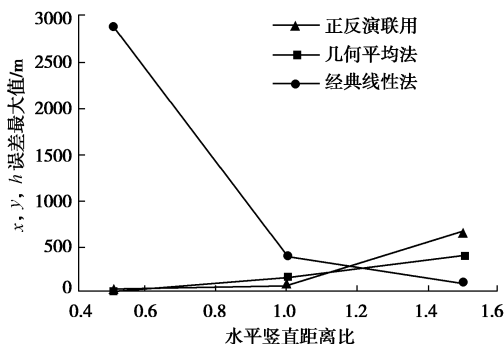


图13 不同水平竖直距离比下3种定位方法误差对比

Fig. 13 Comparison of positioning errors among three methods under different horizontal and vertical distance ratios

根据图14, 正反演联用法的定位精度远高于经典线性法, 且误差不随埋深增加、在不同埋深范围内定位精度高而稳定。相比几何平均法, 正反演联用法不但相对误差随着埋深增加而减小, 绝对误差也不随埋深增加而增长, 这一点较几何平均法优势明显。因此, 正反演联用法比几何平均法更加适合于深震源定位。

根据图15, 当台站与分界面距离、震源与分界面距离相差太大时, 正反演联用法与几何平均法一样, 与经典线性法相比均不具优势。原因在于, 当埋深比相差较大时, 介质的分层特性大大削弱, 埋深比越大, 介质越趋近于均匀介质, 因此经典线性法的计算结果

越好。因此，根据不同岩土体分布情况和实际工程的要求，建议将经典线性法和正反演联用法或几何平均法结合使用。

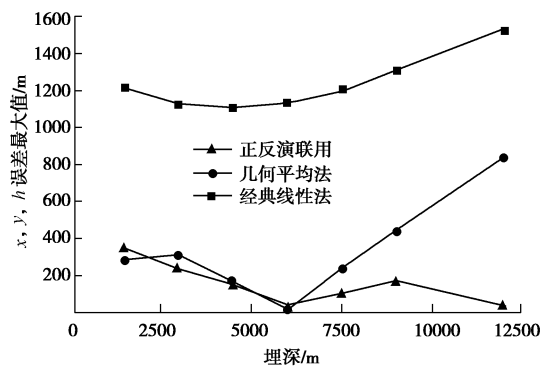


图 14 不同埋深下 3 种定位方法误差对比

Fig. 14 Comparison of positioning errors among three methods under different depths

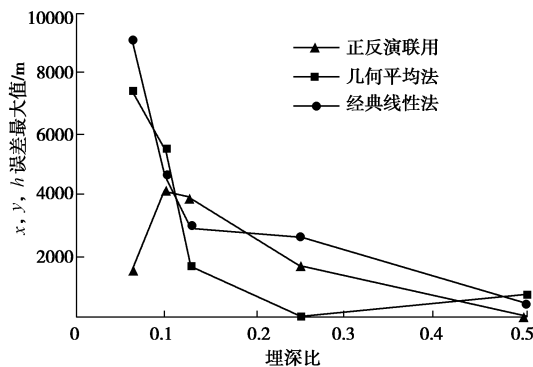


图 15 不同埋深比下 3 种定位方法误差对比

Fig. 15 Comparison of positioning errors among three methods under different buried depth ratios

6 木城涧矿区的微震监测应用^[13-15]

木城涧矿区的监测定位在选址时考虑到了需已知被监测矿区的地质条件。木城涧煤矿位于北京市门头沟区。煤系岩性分为上下两段：下段赋存主要煤层，煤岩层厚 400 m，纵波波速 2250 m/s；上段于门头沟区无可采煤层，岩层厚 600 m，纵波波速为 4500 m/s。采用辽宁工程技术大学冲击地压研究院研发的矿山微震监测定位系统进行监测，监测精度为 1 ms。为研究方便，把位于海拔 820 m 主井口附近的地面台站称为 1 号台站组；把海拔同为 820 m 远离井口的地面台站称为 2 号台站组。两个台站组分布在约 3×10 km 范围内，能记录全矿内里氏-1~3 级的微震信号。测试震源坐标为 $x=-13475$ m， $y=4420814$ m，震源海拔 -180 m，发震时刻 2010 年 6 月 6 日 14 时 20 分 11.000 秒（表 4，5）。

表 4 定位条件及台站参数

Table 4 Positioning conditions and parameters of stations

台站	x 坐标/m	y 坐标/m	监测到时	组别
1	-15875	4420814	2010-06-06 14:20:11.706	1
2	-16875	4421814	2010-06-06 14:20:11.953	1
3	-17875	4422814	2010-06-06 14:20:12.236	1
4	-16255	4421910	2010-06-06 14:20:11.832	2
5	-18255	4422910	2010-06-06 14:20:12.318	2
6	-20255	4423910	2010-06-06 14:20:12.823	2

修正后的发震时刻为 2010 年 6 月 6 日 14 时 20 分 11.067 秒，取发震时刻 $t_0=0.067$ 。

球面波的正演与震源空间坐标的确定需选用 3 个不共线的台站，因此选取台站 1、台站 3 和台站 6， $\cos\theta_1=0.20875$ ，计算得 $\theta_1=1.3605$ 。同理： $\theta_2=1.456447$ ， $\theta_3=1.49481$ 。

代入参数方程式（8）~（10）中可得 6 个非线性方程，组成非线性方程组，含 6 个位置参数，求解该非线性方程组即得震源的空间坐标。

利用数学软件 Matlab 中的 fsolve 函数，取初值为 $(\mu_1, \varphi_1, \mu_2, \varphi_2, \mu_3, \varphi_3)=(0.9, 3, 0.9, 3, 0.9, 3)$ ，迭代求解得到参数为 $(\mu_1, \varphi_1, \mu_2, \varphi_2, \mu_3, \varphi_3)=(0.94328, 3.14159, 0.98524, 2.71497, 0.99379, 2.71323)$ ，代入 3 个参数方程中，得到：
$$\begin{cases} x_{01} = -13664 \\ y_{01} = 4420814, \\ h_{01} = 332.599 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{02} = -13692 \\ y_{02} = 4420913, \\ h_{02} = 359.609 \end{cases}, \begin{cases} x_{03} = -13675 \\ y_{03} = 4420905. \\ h_{03} = 372.02 \end{cases}$$

表 5 不同算法下微震测试结果

Table 5 Seismic test results of different methods

算法	发震时刻	最大定位误差/m
正反演联用	2010-06-06	216
	14:20:11.067	
几何平均	2010-06-06	274
	14:20:12.450	
经典线性	2010-06-06	1124
	14:20:23.000	

7 在任意层数介质中应用的初探

当介质为任意层状水平介质时，本文采取的正反演联合应用法，不需要确定参数 a 的复杂表达式和取值，还特别适用于排除和确定震源所在层。

举例说明：对于多层水平层状介质，易确定震源是否在第一层，假设震源不在第一层，根据发震时刻

可正演台站发出的震波在第二层介质中的波阵面, 由此可建立非线性方程组, 通过求解非线性方程组可得到可能的震源深度 h_0 , 如果 h_0 小于第二层层厚 H_2 , 则可确定震源位于第二层。反之, 如果 h_0 大于第二层层厚 H_2 , 则可确定震源位于更深的介质层中, 再对台站发出的震波在第三层介质中的波阵面进行正演, 如此逐层考察和排除, 即可在任意水平层状介质中确定震源的所在层。

8 结 论

为改进现有的基于均匀介质的震源定位模型, 针对二层水平介质中几何平均定位法存在的问题, 提出了正反演联用法, 新方法联合运用了二层水平介质中球面波正反演方法, 取得了良好效果, 结论如下:

(1) 正反演联合运用定位方法不但能够确定震源深度, 而且能准确计算震源水平坐标, 较二层介质中的几何平均法优势明显。

(2) 发震时刻的反演及最优化过程表明, 发震时刻对介质层厚和波速不敏感, 且存在不等于 1 的最优的参数幂指数值。

(3) 波阵面正演计算震源位置参数的过程表明, 正反演联用法对速度、速度比的敏感性介于几何平均法和经典线性法之间。

(4) 同时考虑正反演联用法水平、竖直坐标定位偏差, 各种定位条件下, 定位精度都不低于几何平均法。

(5) 在埋深较大的深震源定位中, 正反演联用法的相对误差与绝对误差均不随埋深增长, 比几何平均法更适合于日益普遍的矿山深部开采与深震源定位。

(6) 正反演联用法不能改进几何平均法不适应较大水平竖直距离比和较大、较小埋深比的缺点, 建议在地(矿)震易发区布置台站, 并根据实际工程的要求, 与经典线性法或几何平均法结合使用。

参考文献:

- [1] 朱权洁, 姜福兴, 尹永明, 等. 基于小波分形特征与模式识别的矿山微震波形识别研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 2036 - 2042. (ZHU Quan-jie, JIANG Fu-xing, YIN Yong-ming, et al. Classification of mine microseismic events based on wavelet-fractal method and pattern recognition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 2036 - 2042. (in Chinese))
- [2] 彭府华, 李庶林, 程建勇, 等. 中尺度复杂岩体应力波传播特性的微震试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 312 - 319. (PENG Fu-hua, LI Shu-lin, CHENG Jian-yong, et al. Experimental study on characteristics of stress wave propagation in the mesoscale and complex rock mass by microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 312 - 319. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 林 峰, 李庶林, 薛云亮, 等. 基于不同初值的微震源定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 996 - 1002. (LIN Feng, LI Shu-lin, XUE Yun-liang, et al. Microseismic sources location methods based on different initial values[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(5): 996 - 1002. (in Chinese))
- [5] 张伯军. 弹性动力学简明教程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011: 170 - 174. (ZHANG Bo-jun. A concise course of elastic dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 170 - 174. (in Chinese))
- [6] 张向东, 王 帅, 赵 彪, 等. 二层水平介质中震源的精确定位[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(6): 1044 - 1050. (ZHANG Xiang-dong, WANG Shuai, ZHAO Biao, et al. Precise positioning in double-layer horizontal media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1044 - 1050. (in Chinese))
- [7] 黄 琼, 陈 洁, 孟升卫, 等. 一种快速超宽带穿墙雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2009, **31**(8): 2001 - 2005. (HUANG Qiong, CHEN Jie, MENG Sheng-wei, et al. A fast imaging algorithm for UWB Through-Wall radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, **31**(8): 2001 - 2005. (in Chinese))
- [8] 金 添, 周智敏, 常文革. 基于两层均匀媒质的 GPEN SAR 地下目标成像方法及其性能分析[J]. 信号处理, 2006, **22**(2): 238 - 243. (JIN Tian, ZHOU Zhi-min, CHANG Wen-ge. GPEN SAR underground targets imaging formation in two-layer homogeneous media environment and its performance analysis[J]. Signal Processing, 2006, **22**(2): 238 - 243. (in Chinese))
- [9] 赵近芳. 大学物理学(上)[M]. 2 版. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 183 - 184. (ZHAO Jin-fang. University physics(Vol 1)[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006: 183 - 184. (in Chinese))

- [10] 张明新, 王光力, 吴仁彪. 探地雷达成像中多层介质分界面折射点确定[J]. 中国民航学院学报, 2002, 20(6): 20 - 24. (ZHANG Ming-xin, WANG Guang-li, WU Ren-biao. Determination of refraction points between the interfaces of multiple media in GPR[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2002, 20(6): 20 - 24. (in Chinese))
- [11] 田 玥, 陈晓非. 水平层状介质中的快速两点间射线追踪方法[J]. 地震学报, 2005, 27(2): 147 - 154. (TIAN Yue, CHEN Xiao-fei. A rapid and accurate two-point ray tracing method in horizontally layered velocity model[J]. ACTA Seismologica Sinica, 2005, 27(2): 147 - 154. (in Chinese))
- [12] 韩志勇, 陈 佳. 一种有效确定多层介质分界面折射点位置的方法[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 50 - 53, 56. (HAN Zhi-yong, CHEN Jia. An efficient method of refraction points determination between the interfaces of Multi-media[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition), 2010, 34(1): 50 - 53, 56. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 潘一山, 贾宝新, 王 帅, 等. 矿震震波传播规律的三维模型及其应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1810 - 1814. (PAN Yi-shan, JIA Bao-xin, WANG Shuai, et al. Three-dimension of model and its application mines seismic wave propagation[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1810 - 1814. (in Chinese))
- [15] 贾宝新, 赵 培, 姜 明, 等. 非均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))

2015 年度黄文熙讲座学术报告会将于 4 月 11 日在南京举行

2015 年度黄文熙讲座学术报告会将于 2015 年 4 月 11 日(星期六)在南京水利科学研究院水文水资源大楼 12 楼综合会议厅举行。2015 年黄文熙讲座主讲人分别为: 南京水利科学研究院陈生水教授级高工, 讲座题目为“土石坝试验新技术研究与应用”; 北京航空航天大学姚仰平教授, 讲座题目为“UH 模型系列研究”。讲座文稿已分别刊登在《岩土工程学报》2015 年第 1 期和第 2 期的黄文熙讲座栏目。4 月 12 日上午举行《岩

土工程学报》编委会主任兼主编沈珠江院士铜像揭幕仪式和《岩土工程学报》编委会全体会议, 请《岩土工程学报》第十一届编委会全体编委出席活动。黄文熙讲座学术报告会期间, 还将邀请有关学者专家做学术报告。热烈欢迎全国岩土工程界的专家学者及各有关单位的代表参会。有关本次学术报告会的报到及住宿等具体事项请关注本刊网站(www.cgejournal.com)发布的通知。

(本刊编辑部)