测震定位中模型影响的数值实验

王 周 元 (国家地震局兰州地震研究所)

商 要

本文介绍了定位模型偏差对震源测定的影响的数值实验,结果表明:定位模型的偏差主要影响对浅源地震的深度的测定,对地壳下部地震深度的测定一般影响不大;如果定位模型比实际地壳结构简单,所测定的震源深度往往比实际深度偏大,反之定位的深度一般都偏浅;地壳总厚度的偏差使定位深度产生系统差,偏差和系统差基本一致;同一模型测定的深度值之间具有相对准确的定性意义,可以互相比较,不同模型测定的深度结果一般无此关系。文章最后对实验结果作了简要讨论。

除了台网布局及时间服务精度外,地壳模型也是影响测震定位结果的重要因素[1],因而要得到准确可靠的定位结果应当选用接近实际的模型,也需要考虑模型偏差的影响情况及怎样选择模型两个问题,数值实验是解决问题的重要方法之一。本文主要介绍针对浅源近段、地方震所进行的定位模型偏差对震源深度测定之影响的数值实验结果。

一、实验及其结果

选定甘肃东部陇西附近和西部临泽附近某点作为假想震中,选用甘肃地区的单层²²和四层²³地壳模型,计算了包围半包围震中的两种台网布局(图1)内,震源深度区间为0~51公里,间隔1公里的四组共200多个地震到达各台初至纵横波理论到时(精确到0.1秒,实际精度达0.05秒),然后再用不同的模型定位(图2)。图2中I和VI号模型为实验模型,I~I号模型的地壳厚度都在51.5~52.0公里之间, 图、区号模型²⁴的地壳厚度偏差分别达17和-7公里。

实验中使用的定位程序是自编的"用于分层地壳模型的机算定位程序",用该程测定了 计肃及邻近地区近万个地震,效果尚好,自1985年起作为测震分析常规处理的工作程序。

测定结果表明,用不同模型计算得到的震中位置,发震时刻都很精确,模型偏差主要影响震源深度的结果。

下图3给出了各种模型测定的震源深度结果日;同实验给定的实际深度日。的关系。为方便计

-11

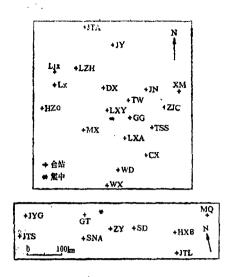


图1 实验使用的两种台站布局

Fig. 1 Two distributions of seismic station used in experiments

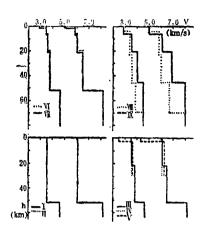


图2 实验中使用的各种地壳模型

Fig. 2 Various crustal models used in this paper

下面把各种震源深度H。用单层和四层模型正演的各台到时所作的实验分别称作 实验A 和实验B;图 3 a表明单层模型实验曲线一般都可分为三段;第一段自H。= O开始,H,基本保持常数,或者随H。的增加而缓慢变化;第二段自某一深度H。= H。开始,H,随H。星趋势性增加,这种增加基本上是单调的,而且H,与H。之差越来越小;第三段自一定深度H。= H。开始,H, \approx H。。 从图 3 a中还可以明显看出:自H。开始几乎所有H,都小于H。; H。和 H。的变化近乎同步,其值随定位模型各异(表 1)。由此可以认为:

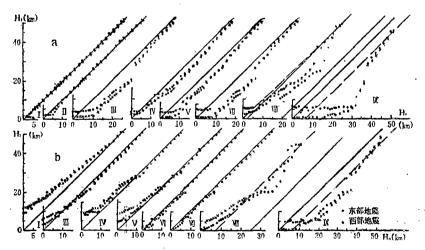


图 3 不同模型定位的震源深度H₁同真值H₀的关系 a. 单层模型试验A b. 四层模型实验B

Fig. 3 The focu depths H₁ determined versus true ones H₀ for different crustal models used in location

(1)由于定位模型偏差的存在,使H。<H。尤其是H。<H.时的震源深度的测值不准

确。但在H₀>H₂以后,同一模型测定的震源深度值具有近于直线上升的特点,因而尽管测定值本身并不一定都准确,但测定值H₁之间却具有相对准确的意义,因而可以互相比较。

(2)测定深部地震的震源位置受模型的影响不大,而且台站布局的影响也不太明显; 浅部震源深度的测定值不仅同定位模型有关,也同台站布局有较大关系。

				_		衣!	
模 型	I		H I	V V	VI.	VII	K
Ha (Km) 1	~4	8~12 1	0~11 7	~ 8 8	~9 6	24~32
Нь (Кш	4	~ в в	38 4	6 46	38	38	~48 40~44

四层模型实验结果见图 3 b, 从图 3 b中不难看出同上面不同的几点:

- (1)大多数曲线的H.都等于零(表2),即测定值H.随H。的增加而增加,呈直线上升的趋势一开始就表现出来了,因而根据同一定位模型得到的震源深度值几乎都是相对准确的。
 - (2)在H₁≈H₀之前,即在浅部H₀<H₀时,H₁>H₀也成立。
- (3)本实验中多数定位模型的H。都比单层模型实验中小,说明本实验中能定准 深源位置的深度范围比单层模型大,仅在浅部小范围内震源深度定得不准。

							12. 4
模 型	I	H	N	V	N.	VI	X
H _a (Km)	0	0	5~8	0	0	0	7 ~13
Нь (Кт)	42	7~9	26	16	1~6	42~50	34~40

单层模型实验中的定位模型都比实验模型复杂,四层模型实验中的定位模型大多比实验模型简单,由此可以认为:

- (1)模型偏差对震源深度测定的影响在浅层最突出,因而测定地壳浅部的震源要用更接近实际的定位模型。
- (2)用比实际复杂的定位模型测得的震源深度一般偏浅,用比实际简单的定位模型测得的震源通常都偏深。

二、结果的理论解释及其实用意义

综上所述,在地震定位中浅部震源深度受影响最大,其主要原因可能取决于通常所用的 线性迭代定位方法

(1)

式中、 $X = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta T_0)$, T 为待求的震源参数修正量, $T = (\delta T_1, \delta T_2, \dots, \delta T_m) T$, $\delta T_i = T_i^{\text{观测}} - T_i^{\text{观池}}$ 为走时残差 矢量。

A为n×4阶Jacobi矩阵, n为观测点数, 其中

$$a_{i_4} = \frac{\partial T_i}{\partial T_0} \equiv 1.0$$

$$a_{i_8} = \frac{\partial T_i}{\partial Z} = \pm \frac{\sin \theta i}{V_0 1}$$
(2)

式中直达波取 "+"号, 绕射波和反射波取 "-"号, θ i 是传播到各台的地震波射线的离源角, 以水平界面为准, V_* l为震源所在层波速。

单层模型中 $Z \rightarrow 0$ 时, $Ai_s \rightarrow 0$,这样矩阵A中第三、四两列元素非常 接 近 线性相关,其最小本征值 $\lambda_{min} \rightarrow 0$,所以 ΔZ 不稳定,很容易受到影响而定不准。 $C.H.Thurber企图用非线性迭代定位克服这一困难[5],实际上是把<math>ai_s \rightarrow 0$ 改为 $ai_s \rightarrow 1.0$ 或某一常数,仍难以凑效。作者认为,用以下两条途径可以较好地增大 λ_{min} 值:

(1)对ai,归一化,增大各值间的差别,求出 ΔZ 后再还原:

$$d = \int_{i=1}^{n} a_{i} \frac{s}{s}/n$$

$$a_{i,3}' = a_{i,3}/d$$

$$\Delta Z = \Delta Z'/d$$
(3)

(2)用多层模型定位,这时到达各台的初至波或为直达波($a_i,>0$),或为 绕射层 源之下各层位的地震波($a_i,<0$),各种波离源角正弦值也有明显差别。

限定型地震的定位主要是调整震源深度, 使各台接收到的初至地震波走时在总体上符合 得最好, 即是各种路径地震波走时对震源深度影响的综合平衡过程。

多层模型中不同距离上初至波的时距方程各不相同, 近距离上一般为

$$t = \sum_{1}^{nl-1} \frac{Hi}{Visin\theta i} + \frac{h}{Vnlsin\theta nl}$$

$$= \frac{\sqrt{\Delta^2 + Z^2}}{\overline{V}}$$

$$\Delta = \sum_{1}^{nl-1} HiCtg\theta i + hCtg\theta nl$$

$$\frac{V_i}{Vnl} = \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta nl}$$

$$h = Z - \sum_{1}^{nl-1} H_i$$
(4)

在一定距离上初至波是绕射震源下各层界面的地震波, 其时距方程为:

$$t = A - Bh + \frac{\Delta}{VK}$$

$$= \tau_{K} + \frac{\Delta}{VK}$$

$$A = \sum_{1}^{k-1} H_{i} (m \sqrt{\frac{1}{V_{i}^{2}} - \frac{1}{V_{K}^{2}}} - nB)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{V_{n_{i}^{2}}} - \frac{1}{V_{K}^{2}}}$$

$$m, n = \begin{cases} 2, & 0 & i \ge n1 \\ 1, & 1 & i < n1 \end{cases}$$
(5)

式中nl为震源所在层号, K为绕射波到达最下层的层号, θi意义同前。

单层模型中仅两种初至波,其直达波时距方程为:

$$t_{c} = \frac{\sqrt{\Delta^{2} + Z^{2}}}{Vc}$$

$$= \frac{\Delta}{Vc} + \delta \qquad (\Delta \gg Z)$$
(6)

绕射波时距方程为:

$$t = (2 H - Z) \sqrt{\frac{1}{V_c^2} - \frac{1}{V_c^2}} + \frac{\Delta}{V_n}$$
 (7)

$$=\tau_{\mathbf{a}} + \frac{\Delta}{\mathbf{V}\mathbf{n}} \tag{7}$$

(4)式中平均速度V同震中距 Δ 和震源深度Z都有关,图4给出了W号模型的 $V\sim\Delta$,Z关系。图 4 表明,V随Z的变化比随 Δ 的变化更明显,在层界面附近变化最清楚,尤其在速度差较大的地壳上下界面附近, $Z \leq 20$ 公里时,V < Vc。据此可以大致分析不同震中距的台站记录的各种路径初至波对不同深度的震源测定的影响。

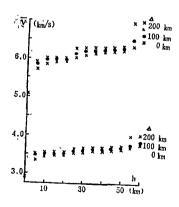


图 4 模型 WI 的 V — Δ, h 关系 Fig. 4 Average velocity V versus Δ, h for model WI

分析实验A中模型 V II 的定位情况可知:对于浅源地震,V < Vc、t > tc。由(4)式可见,减小Z和增大V都可使t向tc靠近,但图 4 表明实际上仅增加Z即可,就是说对于近台直达波的走时在"调整平衡"过程中倾向于增大Z,中距离台站记录的绕射地壳中上部 层界面的地震波,达到的最低层速度 $V_K < Vc$, $\tau_K > \delta$,即t > tc,由(5)式可见,减小Z可使 t 接近

 t c,就是说这些绕射波走时在"调整平衡"过程中倾向于减小Z,远距离台站记录到 绕射地 壳下部各界面的初至地震波,其速度 $V_{\kappa} > V_{c}$, t和 t_{c} 的大小随 Δ 而异,这 部 分 绕 射波走时 对 Z 的 影响不大。震源加深时近台直达波 V渐近于 V_{c} ,其走时使 Z 增大的作用减 弱,其 它台 记录的初至波走时的作用则无倾向性变化。这样各种距离台站记到不同路径初至地震波的走时在"调整平衡"中力图使总的走时残差最小,综合作用的结果,再考虑到不同深度上记录 各种路径初至波距离的展布范围 (3),可解释实验结果。同理可知,用实验 B 中 I 号模型 定位 时,几乎所有深度上大多数台站记录到的各种路径初至波走时都倾向于增大 Z,所以 得到与实验 A 相反的 结果。

应当指出不同距离上台站分布不均及上地幔速度差对实验结果有一些影响,但曲线的基本形态无大的变化。但是当地壳厚度差较大时,τ。之差明显加大,固而要引起Z的 系统变化,各层厚及速度偏差也可引起曲线局部变化。

本实验结果的实用意义在于:

- (1)目前的定位模型总不免带有近似性和大面积平均性,因而比真实模型简单,可见实验B的结果更有实际意义。这样文献[1]中给出的甘肃地区震源深度的分布特性:如地震多集中在0~15公里范围内,呈层状分布,大量小震集中在地表附近的薄层内等等就比较可信。
- (2)上述实验结果表明,地壳下部的分层可粗略些,而地壳上部则应分得细致一些为好,这主要是因为浅部中小地震较多,另外地区差明显並且穿透这部分地壳的初至波路径较短。
- (3)如果了解了地壳厚度在各分区的偏差,这样可用平均模型定位的深度结果加上地壳厚度的偏差得到更为可信的各分区的震源位置。
 - (4)测震定位中必须选择尽量接近当地实际又便于定位的地壳模型。

三、定位模型的选择

通过对人工爆破资料定位选择模型方法及近震深度震相到时差sPn—Pn确定震源深度对比法1)的分析研究,根据大量地震、爆破的定位结果的统计对比,作者提出了一种选择定位模型的简便可靠的方法1),该方法兼顾了上述两种方法的优点,最大限度的避免了它们的缺点,实用可行。

这里利用文献 1)提出的方法,分析了实验结果中各模型定位的震源位置误差椭球体积 δ V, 走时残差均方根 σ 和发震时刻的测定误差 δ T。,图 5 给出了对实验B的统计结果。由图 5 可见:

- (1) δV 、 $\sigma \pi \delta T_0$ 值分布曲线同图 3 b中深度曲线贴近直线 $H_1 = H_0$ 的十分一致,因后者是定位模型贴近直实结构程度的反映,故有可能用这些参量的分布情况来判明定位模型与实际地壳结构的符合程度。
- (2)实验用初至地震波的"观测到时"精度达0.05秒,比目前普遍使用的人工读图的 实际精度约高一个数量级,这一变化使误差椭球体积的大小相应降低了2~3个数量级,均

¹⁾王周元,甘肃地区测震定位中地壳模型的选择,1985.

方根走时残差减小约一个量级,发震时刻误差减小到原来的%~½,这样图 5 中 δ V 分布 能把仅有微小差别的模型加以区别。图 5 还表明,观测精度提高以后, σ 也有可能作为选 择模型的指标,可见要区分细微差异的地壳结构,提高观测精度也至关重要。

δ V 的统计分布可作为模型选择的可靠方法和指标, 其原因可能是在限定情况下震源测

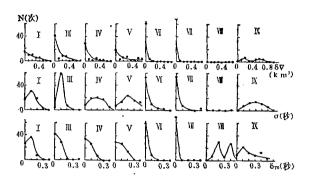


图 5 实验B中各定位模型的δ V、σ、δ To 的统计分布 Fig. 5 The statistic distribution of the δv, σ and δ To for several crustal models in experiment B

定误差主要是深度误差,因而其中 δz 起了主要作用。定位模型在分层及速度 等 参数 上同真模型的差异使各种初至波交接距离发生较大变化,于是交接距离附近台站记录的初至地震波的走时产生明显偏差,这种差主要受震源深度的影响,可见定位模型越接近实际,其测定的深度就越准,走时残差也越小。而计算误差实际表明定位中"调整平衡"综合过程里震源坐标能收缩到的最小区段,误差椭球体积则代表了这种收缩空间的大小,所以上述分析表明模型越贴近真实结构,不仅震源坐标接近实际,计算中可收缩的空间范围 也 越小, δV 及 σ 分布和 H_1 — H_0 分布就越一致。

对于在甘肃地区适于测震定位的 7 个模型 (图 2 所示的除 \mathbb{I} 、 \mathbb{V} 号 以 外 的 模型),用 1984年10月~1985年10月记录的120个限定性天然地震定位, δ \mathbb{V} 的统计分布表 明 模 型型 \mathbb{V} 最好。

(本文1986年3月7日收到)

参考 文献

- [1]王周元,甘肃地区的震源深度分布,西北地震学报, Voi. 8, № 3, 1986.
- [2]张诚等, 甘肃及邻近地区的地壳厚度, 西北地震学报, Vol. 1, №2, 1979.
- 〔8〕王周元, 甘肃地区的分层地壳结构, 西北地震学报, Vol. 6, № 3, 1984.
- 〔4〕冯锐等,利用地震面波研究中国地壳结构,地震学报,Vol. 3, № 4, 1981.
- [5] Thurer, C.H., Nonlinear earthquake location, theory and examples, B.S.S.A., Vol.75, № 3, 1985.

THE NUMERICAL EXPERIMENTS ABOUT EFFECTS OF THE DEVIATION OF CRUSTAL MODEL USED IN LOCATION

Wang Zhouyuan

(Seismogosical Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau, China)

` Abstract

It is presented that the numerical experiments about effect of the deviation of crustal model used in location on determining focus. Which results show that, the model errors affect mainly the depths determination of shallower earthquakes in upper crust, whereas their effect on events in lower crust is few. The shocks determined will be deeper than that of actual ones when model used in location is simpler than that of true structure, on the contrary, the real depths will be deeper than that located. The deviation of total crust thickness will make focu depths calculated a system error which is in close proximity to the thickness deviation. Depths determined with a common model contain the relative accuraty, otherwise they is imcomparable. Finally, the experiment results is discussed briefly.