

多重模型地震定位程序及其在北京台网的应用*

赵仲和

(国家地震局地球物理研究所)

摘要

利用 W. H. K. Lee、G. Nelson、P. Ward 和本文作者新发展的区域台网地震定位程序 HYPO81 对北京台网 1979 年 1 月 1 日至 1980 年 6 月 30 日记录的地震作了重新定位处理,并与原台网测定结果进行了比较。新定位程序的特点是:(1)各台站可设定自己的分层速度模型且允许存在低速层;(2)对数据作了多种加权;(3)迭代求解条件方程时采用奇异值分解最小二乘法;(4)对定位结果给出多方面质量评价;(5)可使用多种震相到时数据。

为了反映北京地区速度结构的横向差异,对西北部山区、东南部平原和中间过渡区分别使用不同的水平分层模型。定位时使用了直达波 \bar{P} 、 \bar{S} 及绕射波 P_n 。根据 HYPO81 程序中给定的定位质量标准,大部分地震属于 C 类和 D 类,说明加密台网和提高到时读数精度是十分必要的。

一、引言

区域地震台网的主要任务之一是测定地震震源位置(这里指空间座标和发震时刻)和震级。而精确可靠的震源位置和震级数据是地震学和地球内部物理学研究的重要基础数据,又是多种有希望的地震预报方法的基础数据。因此,不断增强地震台网的地震定位能力是提高地震研究水平的重要环节之一。

北京台网自 1966 年建立以来,观测能力不断增强。手工定位方法和工具有了很大改进与提高并开始使用计算机定位^[1,2]。为了适应深入研究北京周围地区地震活动及其地壳与上地幔介质状态的需要,有必要进一步提高北京台网定位能力。为此,需在以下几方面加强工作:(1)增加台站数目,改善台站布局,开展合理台站布局的研究;(2)改进记录与读图技术,提高震相判读可靠性与到时读数精度;(3)采用更符合实际情况的速度结构模型,尤其要考虑速度结构的横向差异;(4)注意发展与使用先进的计算机定位方法。

W. H. K. Lee 和 J. Lahr 在 J. Eaton 的 HYPOLAYEA^[3] 程序基础上于七十年代初期完成了 HYPO71 地震定位程序,并于 1975 年发表了修正的 HYPO71^[4]。该程序在世界上不少地区得到推广使用。此后,一些研究者又根据各自的特殊需要编制了一些不同的地震定位程序,它们各有长处。与此同时,应用数学和地震学本身的发展又为研制

* 1981 年 5 月 23 日收到。

新的地震定位程序创造了条件。于是, 1978 年以来, W. H. K. Lee 及其同事们着手改造 HYPO71, 形成 HYPO78、79、80、直至 81。本文作者参加了 HYPO80 和 HYPO81 的研制工作。HYPO81 全部完成后将有三种文本, 分别适用于微处理机、中小型计算机和大型计算机。三种文本的基本功能相同, 但较大计算机使用的程序有较多的任选功能。目前, 适用于小型计算机的文本 HYPO81A^[5] 已经完成。作者又根据北京台网的实际情况和需要, 对程序进行了若干修改, 暂称此文本为 HYPO81BJ, 以便与将来最后定稿的各个文本相区别。

HYPO81 保留了 HYPO71 的优点, 同时又引入了一些新的特点。例如, 在应用盖革法时, HYPO71 将条件方程组化成正规方程组, 然后降维, 再用多重按步回归法求解, 而 HYPO81 则先将条件方程组降维, 不化成正规方程组, 直接用奇异值分解最小二乘法求解条件方程组; 在给数据加权时, HYPO81 以残差绝对值按顺序排列的中间值为标准进行双平方加权, 用以取代 HYPO71 中的杰弗瑞斯权; 在 HYPO81 中的分层地壳模型允许包含低速层, 允许不同台站使用不同的速度模型; HYPO81 与 HYPO71 的程序结构也有所不同, 比较起来新程序更便于修改、增删和调试。

利用 HYPO81BJ, 采取分区分层速度模型, 对 1979 年和 1980 年上半年北京台网记录地震作了重新定位处理。本文以下各部分将概述 HYPO81 的原理、结构及特点, 并对北京台网数据处理结果加以讨论。感兴趣的读者还可参阅文献[5]和[6]中有关章节。作者希望通过本文向我国地震工作者介绍 HYPO81, 并通过大家的实践进一步修改它, 使之更趋完善。

二、HYPO81BJ 概述

(一) 理论

1. 基本方程 对于区域台网, 可以采用直角坐标系, 以台网内某一点(例如某台站)为坐标原点, x 轴正向指东, y 轴正向指北, z 轴正向向下。

设震源位置为 (x, y, z) , 第 i 个震相到时数据相应的台站位置为 (x_i, y_i, z_i) , 观测到时为 t_i , 实际走时记为 T_i 。走时 T_i 决定于震相种类、速度结构、台站位置和震源位置。通常, 走时 T_i 是震源位置的非线性函数。

对 T_i 在 (x, y, z) 点附近作泰勒展开, 略去高阶项, 则有

$$T'_i \doteq T_i + \frac{\partial T_i}{\partial x} (x' - x) + \frac{\partial T_i}{\partial y} (y' - y) + \frac{\partial T_i}{\partial z} (z' - z) \quad (1)$$

这里 (x', y', z') 是 (x, y, z) 附近一点, T'_i 是相应于 (x', y', z') 点的走时。如果以 (x', y', z') 为初始点, 定义走时残差

$$R_i = T_i - T'_i$$

利用(1)式, 得到

$$R_i = \frac{\partial T_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial T_i}{\partial z} \Delta z \quad (2)$$

而

$$\left. \begin{aligned} x &= x' + \Delta x \\ y &= y' + \Delta y \\ z &= z' + \Delta z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

设发震时刻的初始试验值为 $0'$, 真实值为 0 , 令

$$\Delta t = 0 - 0' \quad (4)$$

其观测到时

$$t_i = 0 + T_i \quad (5)$$

计算到时

$$t'_i = 0' + T'_i \quad (6)$$

由此得到到时残差

$$e_i = t_i - t'_i = \Delta t + \frac{\partial T_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial T_i}{\partial z} \Delta z \quad (7)$$

设观测到时总加权为 W_i , 则(7)式变成

$$\begin{aligned} W_i e_i &= W_i \Delta t + W_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Delta x + W_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Delta y \\ &\quad + W_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \Delta z \end{aligned} \quad (8)$$

这就是关于 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t$ 的条件方程组, $i = 1, 2, \dots, m$, m 为观测震相到时数据的个数.

对(8)式可做如下降维处理:

$$\begin{aligned} W_i(e_i - \bar{e}) &= W_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} - \overline{\frac{\partial T}{\partial x}} \right) \Delta x \\ &\quad + \left(\frac{\partial T_i}{\partial y} - \overline{\frac{\partial T}{\partial y}} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial T_i}{\partial z} - \overline{\frac{\partial T}{\partial z}} \right) \Delta z \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta t = \bar{e} - \overline{\frac{\partial T}{\partial x}} \Delta x - \overline{\frac{\partial T}{\partial y}} \Delta y - \overline{\frac{\partial T}{\partial z}} \Delta z, \quad (10)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \bar{e} &= \frac{\sum_{i=1}^m W_i e_i}{\sum_{i=1}^m W_i} \\ \overline{\frac{\partial T}{\partial u}} &= \frac{\sum_{i=1}^m W_i \frac{\partial T_i}{\partial u}}{\sum_{i=1}^m W_i}, \quad u = x, y, z \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

方程组(9)可写成矩阵形式

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (12)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} W_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) & W_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial y} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) & W_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial z} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) \\ W_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) & W_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial y} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) & W_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial z} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ W_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) & W_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial y} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) & W_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial z} - \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{X} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$$

$$\mathbf{B} = (W_1(e_1 - \bar{e}), W_2(e_2 - \bar{e}), W_3(e_3 - \bar{e}), \dots, W_m(e_m - \bar{e}))^T$$

这里上标 T 代表转置。

2. 求解方法 方程组(12)为线性方程组。当 $m > n$ 时(本问题中 $n = 3$)，可用最小二乘法求解。由于台站分布在地面或接近地面的井中，不可能在空间上有效包围震源，因此在许多情况下方程组(12)近于奇异，即所谓方程组处于“病态”。为尽量克服这一困难，在 HYPO81 中采用奇异值分解最小二乘法求解。其中所使用的奇异值分解程序是根据文献[7]提供的程序由 W. H. K. Lee 等改写的。

对方程组(12)的系数矩阵 $\mathbf{A}_{m \times n}$ 作奇异值分解：

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (14)$$

式中 \mathbf{U} 为 $m \times n$ 矩阵，其列向量是 $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$ 的相应于 n 个最大本征值的正交归一本征矢量； \mathbf{V} 为 $n \times n$ 矩阵，列向量是 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的正交归一本征矢量。矩阵 \mathbf{S} 由下式给出：

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & & 0 \\ & \sigma_2 & \\ 0 & & \ddots \\ & & & \sigma_n \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中 $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的本征值的非负平方根，且有 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$ 。

矩阵 \mathbf{A} 的广义逆矩阵

$$\mathbf{A}^+ = \mathbf{V} \mathbf{S}^+ \mathbf{U}^T \quad (16)$$

式中

$$\mathbf{S}^+ = \begin{pmatrix} \sigma_1^+ & & 0 \\ & \sigma_2^+ & \\ 0 & & \ddots \\ & & & \sigma_n^+ \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\sigma_i^+ = \begin{cases} 1/\sigma_i & \text{当 } \sigma_i \geq r_e \sigma_1 \\ 0 & \text{当 } \sigma_i < r_e \sigma_1 \end{cases}$$

r_e 为数据的相对误差。(这里假定数据的相对误差大于计算机的机器舍入误差造成的影响。否则 r_e 应由计算机的计算精度确定。)如果 $\sigma_r \geq r_e \sigma_1$ 而 $\sigma_{r+1} < r_e \sigma_1$ 则称 r 为 \mathbf{A} 的有效秩。

方程(12)的最小二乘解

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}^+ \mathbf{B} \quad (18)$$

$\hat{\mathbf{X}}$ 的协方差矩阵

$$\mathbf{C} = \mathbf{V}(\mathbf{S}')^2 \mathbf{V}^T \quad (19)$$

分辨矩阵

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} \mathbf{I}_r \mathbf{V}^T \quad (20)$$

式中

$$\mathbf{I}_r = \begin{pmatrix} \delta_1 & & 0 \\ & \delta_r & \\ 0 & & \delta_n \end{pmatrix}, \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & \text{当 } i \leq r \\ 0 & \text{当 } i > r \end{cases}$$

求得 \mathbf{X} 的估计值 $\hat{\mathbf{X}}$, 即震源位置校正量 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 之后, 可利用(10)式求出发震时刻校正量 Δt . 由此得到

$$\begin{aligned} x &= x' + \Delta x \\ y &= y' + \Delta y \\ z &= z' + \Delta z \\ O &= O' + \Delta t. \end{aligned}$$

由于走时为震源位置的非线性函数, 这样得到的 x, y, z, O 并不一定是真正震源位置, 在正常情况下只是比初始试验震源位置 (x', y', z', O') 接近真值一步而已. 因此, 在实际运算中以新位置作为初值, 重复求解方程(12), 经过数次迭代直到满足一定终止条件为止. 最后得到的 x, y, z , 和 O 即为震源位置的估计值.

3. 误差估计 原始方程为非线性方程, 尚无适当方法估计解的误差. 但在真值附近可以用线性方程近似表示原非线性方程, 故可用真值附近的线性方程组来估计解的误差.

| *HYPO81主程序* |

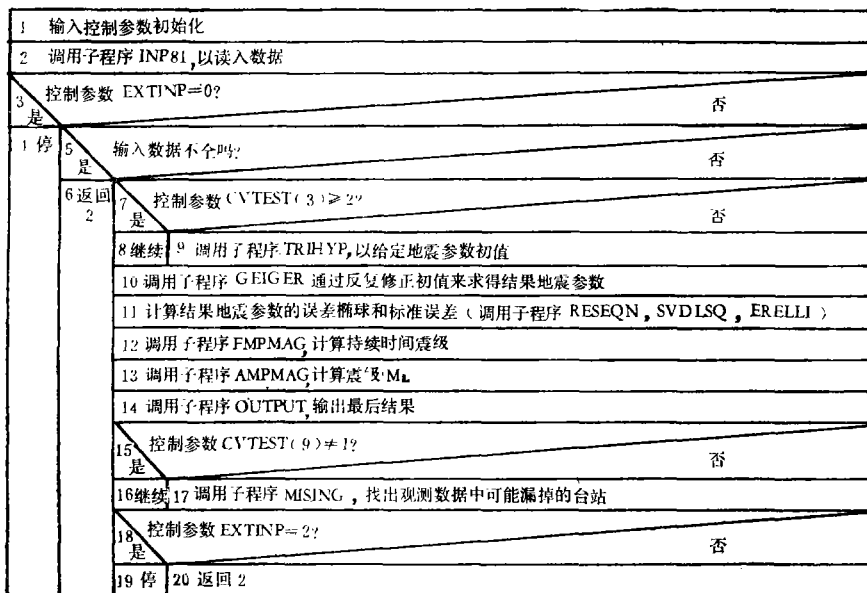


图 1 HYPO81BJ 主程序流程

然而,如果所得结果与真值相差甚大,则所作误差估计失去意义。

HYPO81 中在估计结果误差时设定相对误差 r_e 足够大,借以保证分辨矩阵为单位矩阵或十分接近于单位矩阵。在此条件下给出震中位置误差和震源深度误差分别为

$$\left. \begin{aligned} ERH &= e_r(e_x^2 + e_y^2)^{\frac{1}{2}} \\ ERZ &= e_r e_z \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中 e_r 为残差标准差, e_x, e_y, e_z 为协方差矩阵 C (见(19)式)的三个对角元素的平方根。

需要指出的是,当只有四个数据时,残差的标准差会等于零,因而 ERH 和 ERZ 会等于零。但这并不意味着所得结果完全与真值相同。可见,如果仅仅把解的估计误差或者残差的标准差作为质量评价标准是不全面的。

(二) 程序总体结构

图 1 绘出主程序流程,图 2 列出主程序与各子程序之间的调用关系。各子程序的功能见附录 1。

利用 HYPO81BJ 可以一次处理多个地震,地震数目不限,最后以输入数据终止来控制程序运行结束。

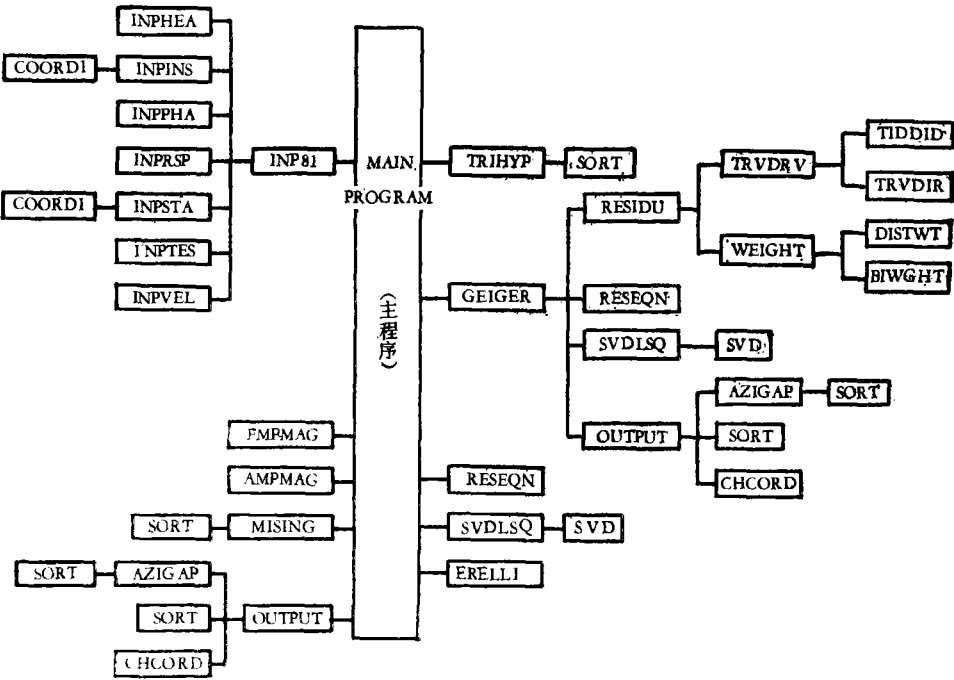


图 2 HYPO81BJ 主程序与各子程序之间的调用关系

(三) 速度模型

每个台站可指定一个水平分层模型。目前使用的程序文本中容许最多有九个不同的模型。每个模型中最多容许有 10 层(包括下部均匀无限半空间),要求给定每层中 P 波速度及层顶深度。使用的走时计算方法允许在模型中存在低速层。为利用 S 波到时,还要给出全区平均 P 波与 S 波速度比。程序不难扩充到使用更多的模型,每个模型有更多层,也不难扩充为每台设定各自的波速比或者每台指定各自的 S 波速度结构。但是否要这样

做还取决于对本地区速度结构了解的详细程度以及所用计算机的运算能力。

(四) 数据加权

为合理使用到时数据,程序中使用以下四种加权。

1. 震相清晰度加权 由地震图分析人员给出,共分五级,相应加权为

$$WC_i = 1 - C/4, \quad C = 0, 1, 2, 3, \text{ 和 } 4 \quad (22)$$

C 为初动清晰度指标。

2. 台站加权 根据台站工作状态,指定参加运算台站加权 $WS_i = 1$, 不参加运算台站 $WS_i = 0$ 。

3. 震中距加权 远台数据的误差往往大于近台,故使用如下分段线性加权公式

$$WD_i = \begin{cases} 1 & \text{当 } \Delta_i \leq X_n \\ \frac{X_f - \Delta_i}{X_f - X_n} & \text{当 } X_n < \Delta_i < X_f \\ 0 & \text{当 } \Delta_i \geq X_f \end{cases} \quad (23)$$

式中 Δ_i 为第 i 个震相数据相应台站的震中距, X_n 和 X_f 是给定的控制参数, $X_n < X_f$ 。

4. 残差加权 通常认为在本次迭代中残差较大的到时在下次迭代中应给予较小的权,而且对残差大于某一标准的数据应予舍弃。首先想到的基本标准是残差的均方根,但这只有当残差服从高斯分布时才合理。到时数据中除了含有随机误差,还会有由于震相判读错误甚至数据打入错误造成的误差,它们会对残差均方根值带来很大影响。因此,在 HYPO81 中不用残差均方根而用残差绝对值按大小排队后居于中间之值作为基本标准(设残差绝对值总个数为 n , 当按其大小排队后,若 n 为奇数则取第 $\left(\frac{n+1}{2}\right)$ 个值, 若 n 为偶数则取第 $\frac{n}{2}$ 和第 $\left(\frac{n}{2} + 1\right)$ 个值的平均值)。与残差均方根相比,中间值较少受个别较大残差的影响。使用的残差加权公式是所谓“双平方加权”。在 HYPO81BJ 文本中使用的具体公式是

$$WB_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } |e_i| \geq C_b \cdot MAD \\ \left[1 - \left(\frac{|e_i| - MAD}{(C_b - 1)MAD}\right)^2\right]^2 & \text{如果 } C_b \cdot MAD > |e_i| > MAD \\ 1 & \text{如果 } |e_i| < MAD \end{cases} \quad (24)$$

式中 C_b 为给定控制参数 ($C_b > 1$), MAD 是残差绝对值的中间值, $|e_i|$ 是到时残差 e_i 的绝对值。

(五) 输出结果

在给出发震时刻、震中经纬度、震源深度以及由最大振幅或持续时间计算出的震级的同时,还给出以下信息以说明结果的可信程度:

1. 与台站分布有关的量: 使用到时数据数目 NO ; 最近台的震中距 $DMIN$; 相邻台站相对于震中的最大张角 GAP ; 以及基于这些量得出的台站分布质量评价 QD 。 QD 分为 A, B, C, 和 D 四级。

2. 描述结果误差的量: 加权残差均方根值 RMS , 它说明数据的内符合程度; 震中位置标准差 ERH ; 震源深度标准差 ERZ ; 以及基于这些量得出的震源位置测定质量评价

- QS 。 QS 也分为 A, B, C, 和 D 四级。
3. 对计算结果质量的综合评价 Q 。 附录 2 列出了 QD 、 QS 及 Q 的分级标准。
4. 在震相数据表中列出各台到时、计算走时、残差、加权、数据重要性指标、震中距、方位角、以及离源角等数据。 最后两项数据可用于绘制初动符号分布等面积投影图。

三、HYPO81BJ 在北京台网的应用

(一) 北京地区的速度模型

目前北京台网常规定位仍使用 J-B 走时表。 这里试图采用一组新的速度结构模型，它在一定程度上反映了北京地区速度结构的横向差异。

北京地区的上部构造与深部构造都有明显的横向差异。 我们将北京地区划分成三部分，记为 I, II, 和 III 区。 这三区的地貌特征是： I 区为西北部山区， III 区为东南部平原区，而 II 区为平原山区间的过渡区。 其地质特征是： 在 III 区的结晶基底埋藏深度可达 3 至 5 公里，而在 I 区有大片结晶基底出露地表（据张步春、蔡文伯^[8]）。 利用北京台网记录地方震与近震数据通过联合测定方法得到这三个区的 P 波速度结构及全区平均 P 波、 S 波速度比 V_P/V_S ，同时得出各台站的走时校正值，从而形成了一个新的速度结构模型

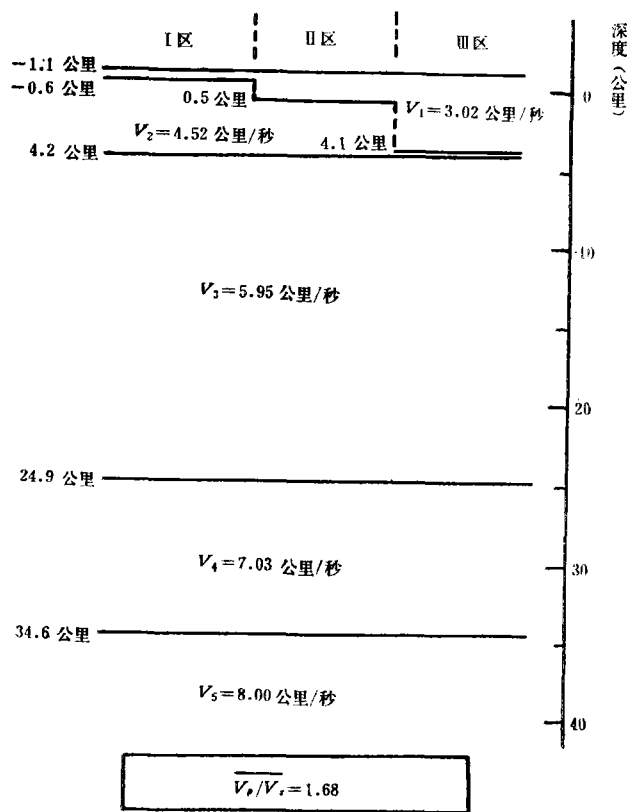


图 3 北京地区多重速度模型 MDBJ81
 V_1 至 V_5 为各层中的 P 波速度(据文献[10])

MDBJ81^[10]. 图 3 给出该模型中的 P 波速度、各层深度及 V_P/V_S .

(二) 震相数据

所用震相到时数据取自国家地震局地球物理研究所地震值班室 1979 年和 1980 年上半年的《北京地震台网地震观测报告》(以下简称《观测报告》). 由于报告中未直接给出震相清晰度指标 C , 在处理过程中做如下约定(见表 1).

表 1 震相清晰度指标 C 的约定值

C	P 波 标 志	S 波 标 志
0	“ ” 或给出初动方向	
1	无 标 志	“i”
2	“e”	无标志
3	数据在括号内	“e” 或数据在括号内

考虑到 S 波到时可靠性一般低于 P 波, 故 S 波到时加权小于同样标志的 P 波到时加权.

(三) 结果分析

对 1979 年及 1980 年上半年北京台网记录的 294 个地震进行重新定位. 现对定位结果讨论如下:

1. 定位质量 用 HYPO81 规定的质量标准, 所定地震的质量评价统计结果列于表 2. 造成多数地震属于 C 类甚至 D 类的原因首先是台站数目不够, 因而对一些地震定位时, 有数据台站分布不好. 在许多情况下, 台站相对于震中的最大张角 (GAP) 大于 180 度. 尽管震中位于整个台网内部, 但就实际使用台站而言, 多数地震却处于“台网外部”. 这说明目前的北京台网尚不能适应微震 ($1 \leq M_L \leq 3$) 观测的要求. 其次, 震相到时读数精度还有待提高. 特别是由于 S 波到时与 P 波到时同时使用会大大改善台网定位能力, 在设法提高 i 到时读数精度的同时提高 S 震相判读可靠性及精度也是十分必要的.

表 2 地震质量综合评价统计

定位质量 Q	$M_L \geq 2$ 地震 (1979)		$M_L < 2$ 地震 (1979)		1980 上半年地震		“数据不足” 地震(*)		总 计	
	数目	百分比	数目	百分比	数目	百分比	数 目	百分比	数 目	百分比
A	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
B	11	16%	24	23%	16	24%	2	4%	53	18%
C	28	41%	59	57%	26	39%	46	82%	159	54%
D	30	43%	20	19%	24	36%	8	14%	82	28%
总计	69		103		66		56		294	

(*) 指震相数据总数不大于 6 且 P 到时数据少于 3 个的地震.

2. 与《观测报告》结果比较 ①震中位置: 用 HYPO81BJ 重定震中位置与《观测报告》结果相差几公里到十几公里不等. 图 4 绘出 1980 年上半年定位结果比较. 图中的断

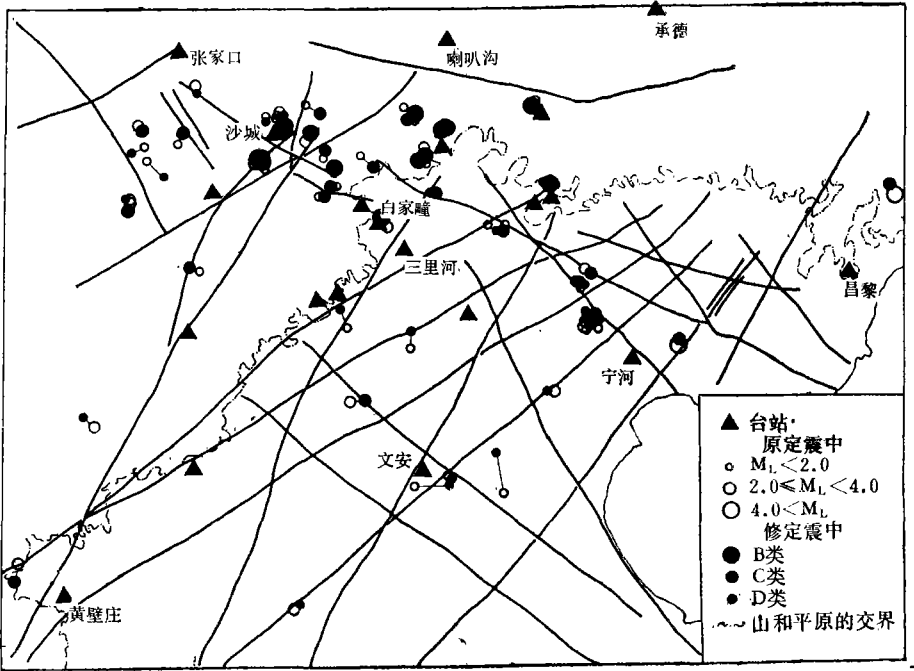


图 4 定位结果比较。
数据取自《北京台网地震观测报告》1980 年 1 月至 6 月，共 66 个地震。
断层线系根据文献[9]重绘。

层线是根据文献 [9] 重新绘制的。为清楚起见，一些非主要断层线没有画上。1980 年上半年的《观测报告》结果多数是用定位程序 LOC768-A^[2] 计算的，使用 J-B 走时表。从图 4 可见，由于测定的震中位置不同，会把同一地震与不同的断层联系起来，从而会对区域地震活动与断层活动的关系作出不同的结论。这也说明了精确测定震源位置的必要性。

②震源深度：虽然用 HYPO81BJ 定出的地震都给出了震源深度，但由于台站分布的限制，部分深度测定结果的标准误差相当大，表明这些地震的深度不足以由所用数据来测定。还有些地震的深度是固定于初始值的。对于综合质量评价为 B 类的地震，深度测定误差一般不超过 5 公里。在 53 个 B 类地震中有 31 个由《观测报告》给出手工测定深度。HYPO81BJ 测定深度与手工测定深度差的平均值为 0.1 公里，标准偏差 4.1 公里。

定位结果不同的主要原因可以归结为：

- 1) 读数误差及台站分布的影响在两个处理结果中都是起作用的。不过，在用 HYPO81BJ 定位时使用了多种加权且舍弃了个别残差特大的数据，以期合理地使用数据。
- 2) 在定位方法上，手工定位及使用 LOC768-A 定位时都是固定深度定震中的。如果所固定深度与真值相差较大则震中位置会受到影响。HYPO81BJ 中在判定台站分布满足深度测定条件后同时调整震中位置和震源深度，当可避免这一缺陷。
- 3) 原定目录使用 J-B 速度模型，而 HYPO81BJ 中试用了北京地区分块分层速度模型并对不同震相加了不同的台站走时校正值。新模型是否完全合理，还有待进一步验证。

另外, HYPO81BJ 中考虑了台站高程的影响。北京台网最高台(涿鹿)与最低台(白家疃井下仪)高程差 1.4 公里。

四、小 结

综上所述, HYPO81 定位程序保持了 HYPO71 的优点并吸取了其他定位程序的长处,在速度模型、加权、迭代、质量评价、以及震相的使用等方面都做了适当处理。除定位外, HYPO81 还可测定振幅震级和持续时间震级。

由于全部程序是用标准 FORTRAN-IV 语言写成,程序中的速度模型参数及其他控制参数也不难调整,所以不难用于处理其他区域台网或临时台网的记录到时数据。希望我国现有的区域地震台网在有条件的时候都来试用一下 HYPO81, 通过实践加以改进,最后形成适合于我国各台网实际需要的先进的地震定位程序。

* * *

HYPO81A 定位程序是在 W. H. K. Lee 博士主持下完成的。本文是作者在美国地质调查局(门罗帕克)期间完成的。整个工作得到 W. H. K. Lee 博士的大力支持与热诚帮助。作者愿借此机会向 Lee 博士表示诚挚的谢意。文中使用的原始数据是国家地震局地球物理研究所四室提供的。谨向四室全体同事表示衷心感谢。

附录 1

HYPO81BJ 子程序功能

1. MAIN: 控制数据处理流程
2. AMPMAG: 用最大振幅与周期计算震级
3. AZIGAP: 计算台站方位角及相邻台站相对震中最大张角
4. BIWGH1: 根据到时残差确定双平方加权
5. CHCORD: 变直角座标为经纬度
6. COORD1: 变经纬度为直角座标
7. DISTWT: 计算震中距加权
8. ERELI: 计算误差椭圆
9. FMPMAG: 用信号持续时间计算震级
10. GEIGER: 用盖革法调整震源参数
11. INP81: 控制输入数据流程
12. INPHEA: 输入表头信息
13. INPINS: 输入指示信息
14. INPPHA: 输入震相到时数据
15. INPRSP: 输入仪器频率响应特性
16. INPSTA: 输入台站座标及有关信息
17. INPTES: 输入控制变量
18. INPVEL: 输入速度模型
19. MISING: 找出可能有助于改进定位的遗漏台站
20. OUTPUT: 输出中间结果及最后结果
21. RESEQN: 建立残差方程组

- 22. RESIDU：计算台站残差及其加权均方根
- 23. SORT：将数据按大小顺序排队
- 24. SVDLSQ：用奇异值分解法计算方程 $AX = B$ 的最小二乘解
- 25. SVD：对矩阵作奇异值分解
- 26. TIDDD：计算走时用的辅助程序
- 27. TRIHYP：确定震源参数初始值
- 28. TRVDRV：用分层速度模型计算走时及其空间导数，计算离源角与方位角
- 29. TRVDIR：计算直达波走时
- 30. WEIGHT：计算数据加权

附录 2

HYP081 定位结果质量评价标准

1. 定位质量统计评价标准 QS

QS	RMS (秒) (加权残差均方根)	ERH (公里) (震中标准误差)	ERZ (公里) (震源深度标准误差)
A	<0.15	≤ 1.0	≤ 2.0
B	<0.30	≤ 2.5	≤ 5.0
C	<0.50	≤ 5.0	
D	其他情况		

2. 台站分布质量评价标准 QD

QD	NO (使用数据总数)	GAP (度) (相邻台站对震中最大张角)	$DMIN$ (公里) (近台震中距)
A	≥ 6	≤ 90	\leq 深度或 5
B	≥ 6	≤ 135	≤ 2 倍深度或 10
C	≥ 6	$\leq 180^\circ$	≤ 50
D	其他情况		

3. 定位结果质量综合评价 Q

Q 取 QS 和 QD 的平均值。如 QS 与 QD 相同，则 Q 取同值；若 QS 与 QD 差一级，则 Q 取较低者；若差二级则取中间级；差三级则取 Q 等于 C 。

参 考 文 献

[1] 国家地震局地球物理研究所，近震分析，地震出版社，1978

[2] 唐国兴，用计算机确定地震参数的一个通用方法，地震学报，1，2，1979

[3] J. P. Eaton, HYPOLAYR, a computer program for determining hypocenters of local earthquakes in an earth consisting of flat layers over a half space, USGS Open-file Report, 1969.

[4] W. H. K. Lee, and J. C. Lahr, HYP071 (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. USGS Open-file Report, 75—311, 1975.

[5] W. H. K. Lee, G. Nelson, P. L. Ward, and Z. H. Zhao, Users manual for HYP081A: A program to determine hypocenter and magnitude of local earthquakes using minicomputers. In preparation.

[6] W. H. K. Lee, and S. W. Stewart, Principles and applications of microearthquake networks, Adv. Geophys. Suppl. 2, Academic Press, New York, 1981.

[7] G. E. Forsythe, M. A. Malcolm, and C. B. Moler, "Computer Methods for Mathematical Computations," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1977.

[8] 张步春、蔡文伯，华北断块区构造单元的划分及其边界问题，华北断块区的形成与发展，科学出版社，1980

- [9] 李建华、陈上福,京津唐张地区断裂构造与地震活动性的分析,华北断块区的形成与发展,科学出版社,1980.
[10] 赵仲和,北京地区地震参数与速度结构的联合测定,地球物理学报,26, 2, 1983.

AN EARTHQUAKE LOCATION PROGRAM WITH MULTIPLE VELOCITY MODEL AND ITS APPLICATION IN THE BEIJING SEISMIC NETWORK

ZHAO ZHONGHE

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

Abstract

With a new earthquake location program HYPO81, developed by W. H. K. Lee, G. Nelson, P. Ward, and the author, the earthquakes recorded by the Beijing Seismic Network from Jan. 1, 1979 through June 30, 1980 are relocated and the results are compared with the earlier reported ones. The features of the new location program can be summarized as: (1) different multi-layered velocity models can be used for different group of stations and low velocity layers are allowed to be included in the models; (2) several kinds of weightings are used; (3) single value decomposition technique is used in the least-squares iterations; (4) the quality of the results is evaluated in several ways; and (5) different kinds of phase data can be used.

In order to reflect the lateral variation of the velocity structure in Beijing area, three different multilayered velocity models are used for the northwestern mountain area, the southeastern plain, and the area between them, respectively. In locating the earthquakes, direct P, refrected P, and direct S arrival data are used. According to the quality criteria in HYPO81, over three quarters of the events relocated fall into the catagories of quality C and D, indicating the necessity of increasing stations in the network and improving the accuracy of the phase data.

更 正

本刊第5卷第1期的国内刊号应为2—312, 国外刊号为Q148.