

# 用计算机确定地震参数的一个通用方法\*

唐 国 兴

(复 旦 大 学)

## 摘 要

本文叙述了在走时表已知的情况下,根据单一或几种震相确定地震参数的一般方法。我们把问题归结为求某个准则函数的极小值,并提出在计算机上用一种有效的直接搜索法——鲍威尔(Powell)搜索法求解。使用该方法对迭代的初值的要求可以比较低,一般只要选到时最小的台站的位置作为初始起点。对来自单一震相,二种震相或不明震相的初动的到时数据的参数测定问题作了详细的说明,并列出了几个数值结果。本文还大致说明了在几个台网记录到的100多个地方震和近震的计算情况。

## 一、引 言

关于地震的时间和空间参数的测定,已有一些经典的方法。由于电子计算机的发展,目前已广泛使用计算机来代替人工,快速测定地震参数。针对各种地震台网的具体目的和条件,有一些有效的测定方法<sup>[1-3]</sup>。在文献[4]中,关于这方面已有详细的叙述。但是,目前的许多算法中,尚存在着这样一些问题:

(1) 由于地震参数的测定,一般归结为求一个多元函数的极值问题,所以不少算法都要求选取一个好的初始值,才能使迭代过程收敛。但是,地震发生后,要立即确定这个初始值是困难的。

(2) 目前的算法中,一般要求计算有关函数的一阶甚至二阶导数,但是在走时表是以表格形式给出的情况下,这种导数的计算不但麻烦,而且误差较大。

(3) 在大地震发生后,由于记录仪器动态范围的限制,有时只能认出震相不明的初动。此外,在用计算机对地震事件的自动检测中,往往也只能检测出初动到时,但是,对于一个口径比较大的地震台网来说,很可能不同台站的初动是属于不同震相的(例如有的是 $\bar{P}$ ,有的是 $P_n$ ),这时常规的办法就无法处理。

基于上述情况,本文提出一种通用的地震参数测定方法,它基本上是为地震台网的自动快速测报服务的。这一方法的特点是:对计算初值的要求比较低,一般只要用到时最小的台站的位置作为计算初值。它能用计算机自动检测到的各台站的初动到时来确定地震参数。本文考虑的算法要求给出走时表,计算的精度随着走时表精度的提高而提高。另外要指出的是,在计算过程中只需要知道准则函数的值而不需计算其导数。

\* 1978年8月25日收到。

## 二、一般考虑

设一个地震台网共有  $m$  个记录台站, 它们的地理位置已知为  $(\phi_i, \lambda_i) i = 1, \dots, m$ . 其中  $\phi_i$  是第  $i$  个台站的纬度,  $\lambda_i$  是第  $i$  个台站的经度. 一个地震事件发生后, 如果第  $i$  个台站记录到的第  $j$  种震相的到时为  $t_{ij} (j = 1, \dots, L)$ . 其中  $L$  是考虑的震相个数. 如果地震发生的时间为  $o$ , 纬度为  $\phi$ , 经度为  $\lambda$ , 深度为  $h$ , 则在不考虑地球扁率的情况下, 第  $i$  个台站的震中距  $\Delta_i$  为

$$\Delta_i = \Delta_i(\phi, \lambda) = \arccos[A_i(B_i + C_i) + D_i], \quad (1)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A_i &= \cos \phi_i \cos \phi \\ B_i &= \cos \lambda_i \cos \lambda \\ C_i &= \sin \lambda_i \sin \lambda \\ D_i &= \sin \phi_i \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

因此,  $\Delta_i$  是  $\phi$  和  $\lambda$  的已知函数. 如果第  $j$  种震相当深度为  $h$ , 震中距为  $\Delta$  的走时为  $T_j(\Delta, h)$ , 则

$$\varepsilon_{ij} = t_{ij} - o - T_j(\Delta_i, h) \quad (3)$$

便是第  $j$  种震相到达第  $i$  个台站的时间的观测值和理论值之差, 它由多种因素造成, 其中包括观测误差, 走时表误差, 地震的非点源性质造成的误差等. 我们采用误差平方和准则建立准则函数

$$Q_s(o, \phi, \lambda, h) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L \varepsilon_{ij}^2 \quad (4)$$

从此, 参数测定的问题就归结为求此准则函数的极小值问题.

根据公式 (3)、(4) 可知:

$$Q_s(o, \phi, \lambda, h) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L [t_{ij} - o - T_j(\Delta_i, h)]^2 \quad (5)$$

是含有 4 个自变量的函数, 传统方法是把  $\varepsilon_{ij}(o, \phi, \lambda, h) = t_{ij} - o - T_j(\Delta_i, h)$  作泰勒展开到一次项, 从而把公式 (5) 化成一个二次型函数, 然后迭代求解. 这时碰到的一个问题是初值的选取. 实践表明, 当初值选取不当时, 这种方法就不收敛于要求的值. 因此, 我们进而考虑用直接搜索法求解. 由于在  $Q_s(o, \phi, \lambda, h)$  中, 深度对函数值的影响是比较小的, 特别对于远一点的地震更是如此, 如果把它同其它自变量同等对待, 就会发生麻烦, 这在采用牛顿方法求解时, 相当于被求逆的矩阵接近奇异. 另外, 一般走时表对深度的取值是比较少的, 因此, 在我们的计算中, 分别对  $h_K = K \cdot H, K = 0, 1, 2, \dots$ , 求准则函数

$$Q_s^{(K)}(o, \phi, \lambda) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L [t_{ij} - o - T_j(\Delta_i, h_K)]^2 \quad (6)$$

的极小值, 然后再进行比较.

由于使  $Q_s^{(K)}(o, \phi, \lambda)$  达到极小的  $o$  应满足条件

$$\frac{\partial Q_s^{(K)}(o, \phi, \lambda)}{\partial o} = 0 \quad (7)$$

即

$$-2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L [t_{ij} - o - T_i(\Delta_i, h_K)] = 0$$

由此解得

$$o = \bar{t} - \bar{T}^{(K)} \quad (8)$$

其中

$$\bar{t} = \frac{1}{mL} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L t_{ij} \quad (9)$$

$$\bar{T}^{(K)}(\phi, \lambda) = \frac{1}{mL} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L T_i(\Delta_i, h_K) \quad (10)$$

若把式(8)代入式(6)得:

$$Q_s^{(K)}(\phi, \lambda) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^L [t_{ij} - \bar{t} - (T_i(\Delta_i, h_K) - \bar{T}^{(K)})]^2 \quad (11)$$

这样,我们就把求式(6)中使  $Q_s^{(K)}(o, \phi, \lambda)$  的极小值的问题化简为求使式(11)中的  $Q_s^{(K)}(\phi, \lambda)$  的极小值和根据式(8)求  $o$  的问题.

下面考虑几种常见的情况:

(1) 当只利用单一震相,例如  $\bar{P}$  或  $P$  时的情况. 此时设各台到时为  $t_{pi}(i=1, \dots, m)$ , 深度为  $h_K$  时的走时函数设为  $T_P(\Delta, h_K)$ , 则式(11)可变为

$$Q_s^{(K)}(\phi, \lambda) = \sum_{i=1}^m [t_{pi} - \bar{t} - (T_P(\Delta_i, h_K) - \bar{T}_P^{(K)})]^2 \quad (12)$$

其中

$$\bar{t} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{pi}$$

$$\bar{T}_P^{(K)}(\phi, \lambda) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_P(\Delta_i, h_K). \quad (13)$$

(2) 当至少有一个台观测到二种震相到时的情况. 设有  $m'$  个台(不妨假定是  $i=1, 2, \dots, m'$  这几个台)获得比较清楚的二种震相,而第一种震相(比如  $P$ )有  $m$  个台获得到时数据. 则  $m \geq m' \geq 1$ . 如果二种震相的到时数据为  $t_{pi}, t_{si}(i=1, \dots, m')$ , 深度为  $h_K$  的二种震相的走时表为  $T_P(\Delta, h_K)$  和  $T_S(\Delta, h_K)$ , 若令到时差为

$$t_i = t_{si} - t_{pi} \quad (14)$$

$S-P$  走时表为

$$T_{SP}(\Delta, h_K) = T_S(\Delta, h_K) - T_P(\Delta, h_K) \quad (15)$$

根据式(8)–(10)我们有

$$\begin{aligned} o &= \frac{1}{2m'} \sum_{i=1}^{m'} (t_{pi} + t_{si}) - \frac{1}{2m'} \sum_{i=1}^{m'} (T_P(\Delta_i, h_K) + T_S(\Delta_i, h_K)) \\ &= \frac{1}{m'} \sum_{i=1}^{m'} t_{pi} + \frac{1}{2m'} \sum_{i=1}^{m'} (t_{si} - t_{pi}) - \frac{1}{m'} \sum_{i=1}^{m'} T_P(\Delta_i, h_K) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2m'} \sum_{i=1}^{m'} (T_S(\Delta_i, h_K) - T_P(\Delta_i, h_K)) \\
 & = \frac{1}{m'} \sum_{i=1}^{m'} (t_{Pi} - T_P(\Delta_i, h_K)) + \frac{1}{2m'} \sum_{i=1}^{m'} (t_i - T_{SP}(\Delta_i, h_K))
 \end{aligned}$$

像通常使用走时表时一样,若  $t_i = T_{SP}(\Delta_i, h_K)$ , 即由  $t_i$  求出震中距  $\Delta_i$ , 然后再求出  $T_P(\Delta_i, h_K)$ , 则发震时刻就是

$$o^* = \frac{1}{m'} \sum_{i=1}^{m'} (t_{Pi} - T_P(\Delta_i, h_K)) \quad (16)$$

在实际计算时,由于走时函数都是以表格形式给出的,所以,我们采用下面的线性内插公式来求  $T_P(\Delta_i, h_K)$ .

若走时表中震中距的间隔为  $\delta$ , 则先找一个  $l$ , 使

$$T_{SP}(l\delta, h_K) \leq t_i \leq T_{SP}((l+1)\delta, h_K)$$

然后令

$$T_P(\Delta_i, h_K) = T_P(l\delta, h_K) + \frac{T_P((l+1)\delta, h_K) - T_P(l\delta, h_K)}{T_{SP}((l+1)\delta, h_K) - T_{SP}(l\delta, h_K)} \cdot (t_i - T_{SP}(l\delta, h_K)) \quad (17)$$

当发震时刻求出后,我们再利用  $m$  个台的第一个震相的到时,把  $t_{Pi}(i=1, \dots, m)$  和  $o^*$  代入式(6)得准则函数

$$Q_S^{(K)}(\phi, \lambda) = \sum_{i=1}^m (t_{Pi} - o^* - T_P(\Delta_i, h_K))^2 \quad (18)$$

这一准则函数同式(12)是完全类似的.

(3) 当观测到的是初动到时  $t_{Hi}(i=1, \dots, m)$  而不明其震相时的情况.

由于

$$t_H = \min_{1 \leq j \leq L} t_{Hj} \quad (19)$$

所以,我们把式(3)改变一下变成

$$\varepsilon_i = \min_{1 \leq j \leq L} t_{Hj} - o - \min_{1 \leq j \leq L} T_j(\Delta_i, h_K) = t_H - o - T_f(\Delta_i, h_K) \quad (20)$$

其中

$$T_f(\Delta_i, h_K) = \min_{1 \leq j \leq L} T_j(\Delta_i, h_K) \quad (21)$$

可称为初动走时,一般初动震相不外乎是  $\bar{P}$ ,  $P_n$  或  $P$  等,所以,使用时取

$$T_f(\Delta_i, h_K) = \min(T_{\bar{P}}(\Delta_i, h_K), T_{P_n}(\Delta_i, h_K), T_P(\Delta_i, h_K)) \quad (22)$$

根据这样的考虑,我们可把问题归结为求准则函数

$$Q_S^{(K)}(\phi, \lambda) = \sum_{i=1}^m (t_{Hi} - \bar{i} - (T_f(\Delta_i, h_K) - \bar{T}_i))^2 \quad (23)$$

的极小值问题.

### 三、求准则函数极小值的鲍威尔搜索法

上面,我们把地震参数测定的问题化为对某一深度  $h = h_K$ , 求  $\phi^*$ ,  $\lambda^*$ ,  $o^*$  使

$$Q_s^{(K)}(\phi^*, \lambda^*) = \min_{\phi, \lambda} Q_s^{(K)}(\phi, \lambda) \quad (24)$$

$$o^* = \bar{i} - \bar{T}^{(K)}(\phi^*, \lambda^*) \quad (25)$$

的问题。这里,关键的是求一个准则函数的极小值问题。为此,可以有许多方法,我们曾对十多种算法进行了试验比较,其中包括牛顿法、梯度下降法及它们的改进或混合方法,还有一些直接搜索方法。如果采用牛顿法的话,在真值附近收敛性很好,但有一个初值选取的问题;若采用梯度下降法的话,收敛较慢;而它们的共同缺点是要计算一阶或二阶导数。在不用计算导数的许多直接搜索方法中,我们认为鲍威尔<sup>[5]</sup>的方法是比较好的,这种方法实际上是一种共轭梯度法,而我们知道在求解二次型的极值问题(或相应的求解线性

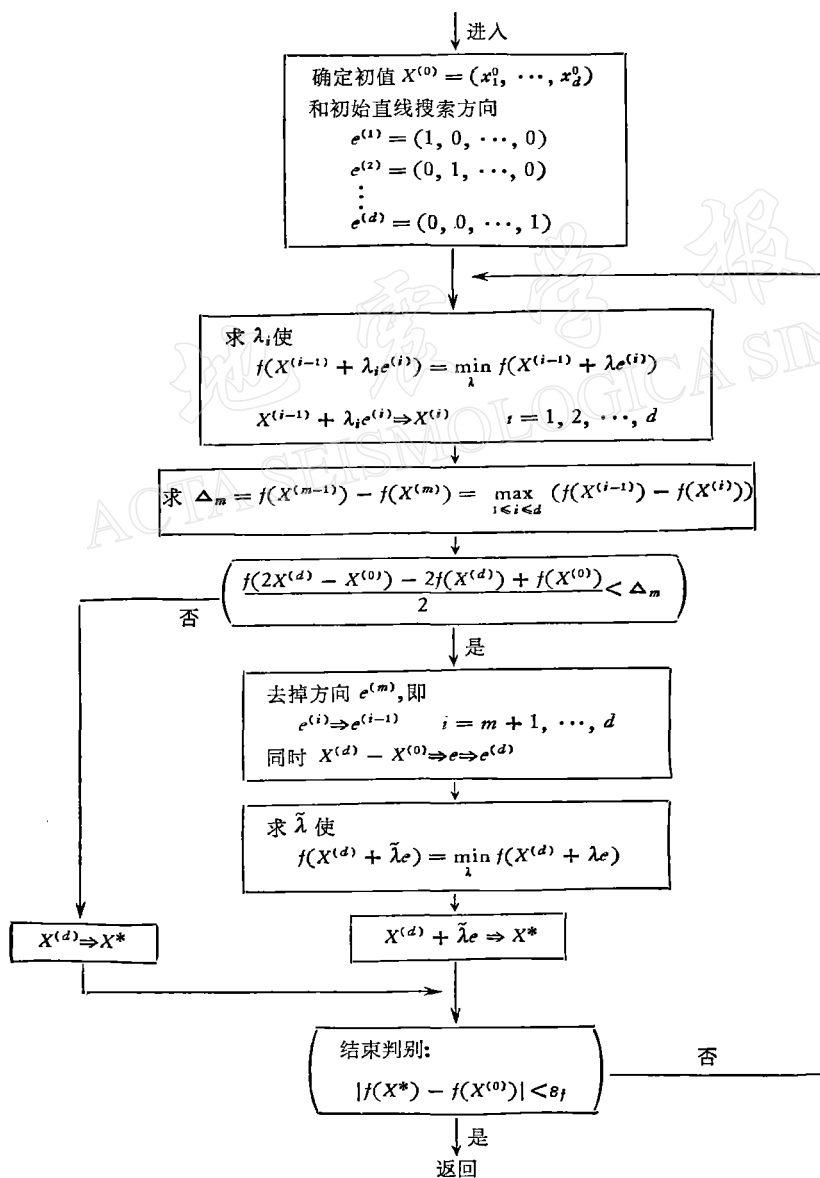


图1 鲍威尔迭代框图

代数方程组)时,共轭梯度法是一种非常有效的方法<sup>[6]</sup>. 在使用时,我们注意到了<sup>[7]</sup>对该方法的一个简化.

现在一般地考虑求一个连续函数  $f(X)$  的极小值问题. 设  $X = (x_1, \dots, x_d)$  是  $d$  维空间的点,亦可理解为一个向量,我们希望求  $X^* = (x_1^*, \dots, x_d^*)$ , 使  $f(X^*) = \min_X f(X)$ . 要是  $f(X)$  只有一个极小值的话,则求  $X^*$  的鲍威尔方法可用框图(图 1)表达. 这是一种迭代算法,对二维情况的迭代过程,可参看图 2.

在框图中,有几点要说明一下:

(1) 初始直线搜索方向  $e^{(1)}, \dots, e^{(d)}$  可以是任意选取的独立方向,一般取为坐标轴方向.

(2) 求  $\min_{\lambda} f(X^{(i-1)} + \lambda e^{(i)})$  的过程称为从  $X^{(i-1)}$  出发沿着方向  $e^{(i)}$  的直线搜索. 由于此时  $X^{(i-1)}$  和  $e^{(i)}$  是确定的,所以  $f(X^{(i-1)} + \lambda e^{(i)})$  只是  $\lambda$  的函数,记为  $\rho(\lambda)$  ( $-\infty < \lambda < \infty$ ). 求使  $\rho(\lambda)$  得到极小  $\lambda$  的方法是: 先选取适当的步长  $r$ , 比较  $\rho(r)$  和  $\rho(0)$  的大小,若  $\rho(r) > \rho(0)$ , 这表明极小值在  $-e^{(i)}$  方向上,因此用  $-e^{(i)}$  代替原来的  $e^{(i)}$ . 然后,对  $K = 0, 1, 2, \dots$  求  $\rho(Kr)$  的值,直到找到一个  $K$ ,使

$$\begin{aligned} \rho((K-1)r) &> \rho(Kr) \\ \rho((K+1)r) &> \rho(Kr) \end{aligned} \quad (26)$$

为止. 这时表明,  $\rho(\lambda)$  的极小值点位于  $(K-1)r$  和  $(K+1)r$  之间. 然后,用通过点  $A:((K-1)r, \rho((K-1)r))$ ,  $B:(Kr, \rho(Kr))$ ,  $C:((K+1)r, \rho((K+1)r))$  的抛物线

$$g(\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 \quad (27)$$

的极小值点作为  $\rho(\lambda)$  的极小值点.

由于  $g(\lambda)$  通过  $A, B, C$  三点,因此

$$\begin{aligned} \rho_{-1} &= \rho((K-1)r) = a_0 + a_1(K-1)r + a_2((K-1)r)^2 \\ \rho_0 &= \rho(Kr) = a_0 + a_1Kr + a_2(Kr)^2 \\ \rho_1 &= \rho((K+1)r) = a_0 + a_1(K+1)r + a_2((K+1)r)^2 \end{aligned} \quad (28)$$

由此可解得  $a_0, a_1, a_2$ . 因此  $g(\lambda)$  的极小值点为

$$\lambda = -\frac{a_1}{2a_2} = Kr - \frac{\rho_1 - \rho_{-1}}{2(\rho_1 - 2\rho_0 + \rho_{-1})} r \quad (29)$$

(3) 直线搜索的步长  $r$  的选取同具体问题中自变量的度量单位有关. 一般说来,如果  $p = (p_1, \dots, p_d)$  是一个搜索方向,则可取  $r = E \cdot (p_1^2 + \dots + p_d^2)^{-\frac{1}{2}}$  作为步长,在我们的计算中,自变量的单位是弧度,因此我们取  $E = 10^{-3}$ , 这样的步长相当于地面距离

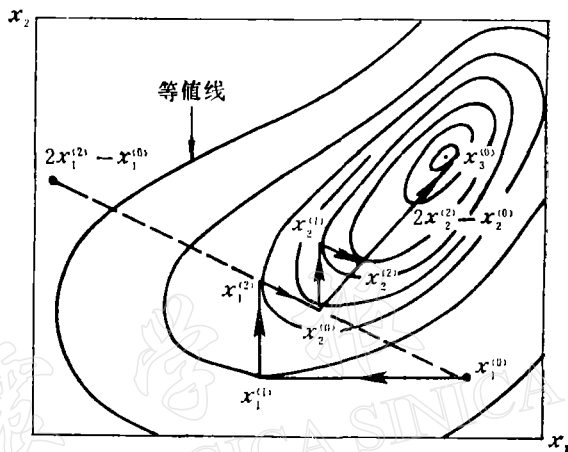


图 2 鲍威尔搜索路线(下脚标为迭代次数)

5 公里左右,对于较远的地震,甚至可取  $E = 10^{-2}$  或更大一些。

另外,如果在直线搜索中,一开始有  $\rho(r) > \rho(0)$ , 同时  $\rho(-r) > \rho(0)$ , 这表明在搜索方向上的极小值点就在  $\lambda = 0$  附近,这时我们可以把步长  $r$  缩小一半,这一手续反复进行直到  $\rho(r) > \rho(0) > \rho(-r)$  或者  $\rho(-r) < \rho(0) < \rho(r)$  为止。

(4) 结束判别还可以采用欧氏距离  $\|X^* - X^{(0)}\| = \left( \sum_{i=1}^d (x_i^* - x_i^{(0)})^2 \right)^{\frac{1}{2}} < \varepsilon_x$  或

$$\max_{1 \leq i \leq d} |x_i^* - x_i^{(0)}| < \varepsilon_x$$

等。在我们的计算中,由于  $f(X)$  的单位是秒<sup>2</sup>, 所以我们取  $\varepsilon_f = 10^{-2} - 10^{-3}$ ;  $X$  的单位是弧度,因此,我们取  $\varepsilon_x = 10^{-3} - 10^{-4}$ 。

## 四、应用实例

在这一节里,我们说明在三种不同的情况下,应用上述方法的过程和一些结果,这些例子只是从我们计算过的地震中挑选出来用以说明问题的一些典型例子。

**例 1** 1977 年 11 月上海台网记录到的一个地震,  $\bar{P}$  震相的到时数据列于表 1, 这是一个台网内的地震,我们对  $h_K = K \times 10$  公里,采用准则函数

$$Q_s^{(K)}(\phi, \lambda) = \sum_{i=1}^9 (t_{Pi} - \bar{t} - (T_P(\Delta_i, h_K) - \bar{T}_P))^2$$

进行计算,其中  $K = 0, 1, 2$ 。在对每一深度进行迭代计算时,总是取到时最小的台站的位置作为迭代初值,每一深度的迭代过程可以用表 2 来说明。

表 1 上海台网记录到的一个地震 (1977 年 11 月)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
台 站	秦皇山	余 山	天平山	上 戏	杭 州	新安江	南 通	无 锡	溧 阳
$t_{P^*}$	25 $\pm$ 6	30 $\pm$ 9	37 $\pm$ 7	34 $\pm$ 1	33 $\pm$ 5	48 $\pm$ 7	47 $\pm$ 2	43 $\pm$ 5	48 $\pm$ 1

\* 均省略写时分值 02<sup>h</sup> 38<sup>m</sup>

从表 2 可以看到,对于不同的深度,得到的  $\phi, \lambda, o$  不一样,选择哪一组比较好,我们可以用均方根残差

$$\sigma^{(K)} = \sqrt{Q_s^{(K)}(\phi^*, \lambda^*) / (m - l)} \quad (30)$$

的大小来进行比较。当发震时刻已知时,取  $l = 2$ ; 当发震时刻未知时,取  $l = 3$ 。从统计上看,  $m - l$  是估计量  $\sigma^{(K)2}$  的自由度。如果比较  $h_K = 0, 10, 20$  公里的  $\sigma^{(K)}$  的值,我们发现取  $h = 20$  公里时比取  $h = 0, 10$  公里要合理些,再考虑其他震相资料结果,我们取  $h = 20$  公里的计算结果比较好,这时,  $o^* = 15^\circ.7$ ,  $\phi^* = 30^\circ 15'$ ,  $\lambda = 121^\circ 12'$ ,  $h = 20$  公里就作为参数测定结果。这一结果分析人员认为是可靠的。

**例 2** 1976 年 7 月 28 日,唐山地震  $M_s = 7.8$ , 北京台网各台站的记录初动震相不明,根据震中距的大小,有些台的初动可能是  $\bar{P}$ , 有些台的初动可能是  $P_n$ 。现把 19 个台站的初动记录列于表 3 中,在此我们故意去掉离唐山较近的东边的昌黎台记录,这样,19

个台都位于唐山的西侧,其中最近的台为平谷,离震中 100 多公里。对于这种情况,我们取准则函数为

$$Q_s^{(K)}(\phi, \lambda) = \sum_{i=1}^{19} (t_{Hi} - \bar{t} - (T_i(\Delta_i, h_K) - \bar{T}_i))^2$$

其中  $T_i(\Delta, h)$  是初动走时,由公式 (22) 决定。我们仍把到时最小的台的位置作为初值, 其为  $\phi_0 = 40^{\circ}07'$ ,  $\lambda_0 = 117^{\circ}08'$ , 分别对  $h_K = 0, 10, 20$  公里进行计算,各经过 4 次迭代后就得到结果 (表 4)。

表 2 不同深度迭代情况

深度 迭代次数	0KM				10KM				20 KM			
	方 向	$Q_s^{(0)}$	迭代终点		方 向	$Q_s^{(1)}$	迭代终点		方 向	$Q_s^{(2)}$	迭代终点	
			$\phi$	$\lambda$			$\phi$	$\lambda$			$\phi$	$\lambda$
0	—	436.73	30°48′	121°16′	—	411.19	30°48′	121°16′	—	261.02	30°48′	121°16′
1	* $\phi^{(1)}$	17.60			* $\phi^{(1)}$	16.04			* $\phi^{(1)}$	3.52		
	$\phi^{(2)}$	15.55			$\phi^{(2)}$	14.08			$\phi^{(2)}$	3.11		
	$S^{(1)}$	14.50	30°12′	121°13′	$S^{(1)}$	13.09	30°12′	121°13′	$S^{(1)}$	3.09	30°14′	121°15′
2	* $\phi^{(2)}$	13.16			* $\phi^{(2)}$	11.80			* $\phi^{(2)}$	2.92		
	$S^{(1)}$	13.06			$S^{(1)}$	10.98			$S^{(1)}$	2.82		
	$S^{(2)}$	10.04	30°18′	121°03′	$S^{(2)}$	8.99	30°19′	121°04′	$S^{(2)}$	2.71	30°16′	121°12′
3	$S^{(1)}$	10.01			$S^{(1)}$	8.98			$S^{(1)}$	2.67		
	$S^{(2)}$	10.00			$S^{(2)}$	8.98			$S^{(2)}$	2.67		
	$S^{(3)}$	10.00	30°18′	121°03′	$S^{(3)}$	8.98	30°18′	121°04′	$S^{(3)}$	2.67	30°15′	121°12′
$\sigma = \bar{t}_p - \bar{T}_p$	14:9				14:7				15:7			
$\sigma^{(K)}$	1.29				1.22				0.66			

\* 在下次迭代时被取代的方向

表 3 唐山地震北京台网初动记录 (1976 年 7 月 28 日)

No.	台 站	初动到时 $t_1$	No.	台 站	初动到时 $t_2$
1	喇叭沟	43 <sup>m</sup> 24:4	11	涿 鹿	43 <sup>m</sup> 32:8
2	太师屯	17:6	12	南山村	12:4
3	沙 城	30:4	13	上房山	23:1
4	平 谷*	12:2	14	文 安	19:1
5	马道峪	20:0	15	黄壁庄	43:4
6	白家疃	21:1	16	涞 源	32:8
7	龙泉寺	22:0	17	张家口	38:5
8	周口店	22:2	18	承 德	21:1
9	桐 柏	14:1	19	三里河	19:6
10	完 县	32:4			

\* 最近的台

根据表 4 的结果,若用残差均方根值作为标准的话,深度应取 15 公里左右,此时  $\phi = 39^{\circ}24'$ ,  $\lambda = 118^{\circ}07'$ 。



表 4 唐山地震迭代计算结果

鲍威尔 迭代结果				人工测定
$h$	0 公里	10 公里	20 公里	20 公里左右
$\phi$	$39^{\circ}22'$	$39^{\circ}25'$	$39^{\circ}24'$	$39^{\circ}23'$
$\lambda$	$118^{\circ}14'$	$118^{\circ}06'$	$118^{\circ}08'$	$118^{\circ}10'$
$\sigma^{(K)}$	0.554	0.461	0.475	

由于记录台站较多,在复旦大学 719 计算机上,对深度  $h = 0$  公里时,迭代计算的时间大约需要 40 秒,对其余深度,因可选上一深度的计算结果作初值,所以计算时间要少得多.一般如果只有 5—6 个台的记录的话,深度为 0 公里的迭代约经 5—7 秒即能打印结果.

**例 3** 1975 年 2 月 25 日海城地震,  $M_L = 4.6$ , 手工测定  $\phi = 04^{\text{h}}51^{\text{m}}59^{\text{s}}$ ,  $\phi = 40^{\circ}44'$ ,  $\lambda = 122^{\circ}37'$ ,  $h = 14$  公里. 我们采用北京台网的记录如表 5 所示,这是一个位于台网外的近震,最近的台站平谷,震中距在 470 公里左右.

表 5 海城地震各台震相到时 (1975 年 2 月 25 日)

No.	台 站	$t_P$	$t_S$
1	沙 城	$04^{\text{h}} 53^{\text{m}} 30.6$	$04^{\text{h}} 54^{\text{m}} 42.0$
2	平 谷	$9.6$	$7.0$
3	马 道 峪	$17.0$	
4	龙 泉 寺	$24.0$	$31.0$
5	周 口 店	$27.0$	

对  $h = 0$  公里的计算情况如下:

由于有三个台站记录到  $\bar{P}$  和  $\bar{S}$  的到时,所以我们先根据公式 (16)、(17) 计算发震时刻  $\phi^* = 04^{\text{h}}51^{\text{m}}42^{\text{s}}$  (对应于深度为 0 公里的走时表),之后把

$$Q_S^{(0)}(\phi, \lambda) = \sum_{i=1}^3 (t_{P_i} - \phi^* - T_P(\Delta_i, 0))^2$$

作为准则函数. 迭代初始值选为  $\phi_0 = 40^{\circ}07'$ ,  $\lambda_0 = 117^{\circ}08'$ , 它在到时最小的台站(平谷台)附近. 以此为起点用鲍威尔方法迭代求解,这时迭代过程可以用表 6 来说明.

从初值开始,向极小值搜索的路线示于图 3.

使用本方法,我们已对 100 多个地震和人工爆破的数据进行了计算,其中大部分数据来自北京台网,少数是上海、沈阳、兰州台网的,计算情况可归纳如下:

(1) 对台网内的地震,只要数据可靠,均能得到满意的结果,对于不可靠的数据,根据残差

$$e_i = t_i - \bar{t} - (T(\Delta_i, h_K) - \bar{T})$$

的大小可以进行查对,一般来说,  $m$  比较大时,可根据

$$|e_i| > 2\sigma^{(K)} \quad (31)$$

来判别数据是否可靠,从而可进行校核或剔除. 当然公式 (31) 的标准还有待研究.

(2) 对于台网以外的地震,一般来说,测定精度不如网内;而且,在 500 公里以外,需

表 6 海城地震迭代计算过程

迭代次数		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
方 向		—	$*e^{(1)}$ $e^{(2)}$ $S^{(1)}$	$*e^{(2)}$ $S^{(1)}$ $S^{(2)}$	$*S^{(1)}$ $S^{(2)}$ $S^{(3)}$	$*S^{(2)}$ $S^{(3)}$ $S^{(4)}$	$*S^{(3)}$ $S^{(4)}$ $S^{(5)}$	$*S^{(4)}$ $S^{(5)}$ $S^{(6)}$	$*S^{(5)}$ $S^{(6)}$ $S^{(7)}$	$*S^{(6)}$ $S^{(7)}$ $S^{(8)}$	$*S^{(7)}$ $S^{(8)}$ $S^{(9)}$
直线搜索 索终点	$Q_S^{(0)}$	36526.01	385.90 342.77 317.90	299.31 285.54 217.36	193.46 177.75 125.38	114.33 105.66 51.93	47.63 44.01 22.05	20.04 18.49 8.81	8.10 7.47 4.10	3.95 3.82 3.47	3.46 3.46 3.46
本次迭 代终点	$\phi$	40°07′	35°19′	35°40′	36°27′	37°38′	38°40′	39°35′	40°07′	40°33′	40°37′
	$\lambda$	117°08′	117°50′	119°21′	120°45′	121°54′	122°30′	122°45′	122°49′	122°47′	122°47′

\* 是本次迭代时下降最多的方向,在下次迭代时将被取代

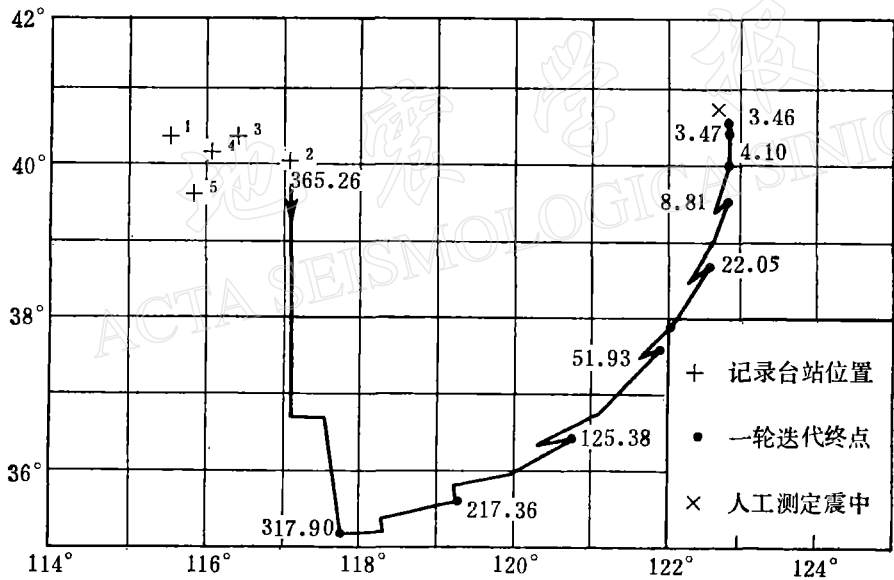


图 3 海城地震准则函数最小值搜索路线

要用两种震相,以提高参数测定精度。

(3) 不收敛的现象是极个别的,可能同台网的布局有关,待研究(如台站分布近乎一直线时就不好)。

还有一点要说明的是,我们采用的走时表是 J-B 表,对有些地区并不适用,所以,如果各台网有比较精确的走时表的话,测定精度还可提高。

目前,上海地震办公室张关生、乐美琪同志利用上述方法已编制了 DJS-131 计算机的地震参数测定程序,并已用于地震事件自动检测后的速报。

国家地震局地球物理研究所张少泉等同志对此工作给予巨大的支持。李贤平同志提供了鲍威尔迭代的程序。在此对他们表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] W. H. K. Lee and J. C. Lahr, A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes (HYPO71), *U.S.G.S.*, Open report 1972.
- [2] E. A. Flin, Local earthquake with an electronic computer, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **50**, 3, 467—470, 1960.
- [3] V. I. Keilis-Borok. et. al., Computer determination of earthquake epicenters, *Computational Seismology*, 13—15 (Translated from Russian), 1972.
- [4] 国家地震局地球物理研究所, 近震分析, 地震出版社, 1978.
- [5] M. J. Powell, An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, *Computer J.* **7**, 2, 155—162, 1964.
- [6] A. Ralston, H. S. Wilf, *Mathematical methods for digital computers*, 95—111, 1960.
- [7] 吴 方, 关于 Powell 方法的一个注, *数学学报*, **20**, 1, 14—15, 1977.

## A GENERAL METHOD FOR DETERMINATION OF EARTHQUAKE PARAMETERS BY COMPUTER

Tang Guo-xing

(Fudan University, Shanghai)

### Abstract

In this paper, a general method has been developed for determining earthquake parameters on basis of one or several phases of recorded waves when the travel time tables are given. The problem is reduced to minimizing some criterion function. On the computer an efficient and direct searching technique, the Powell method is proposed. This technique allows the requirements to the starting value to be less critical. Generally, the location of a station with the least arrival is selected as a start. From the arrival data of a single phase, two phases and the first motion of unknown phases, the determinations of parameters of earthquakes are illustrated and some numerical examples given. Computations for more than 100 local and near earthquakes recorded by certain seismic station networks are described.