

重庆地区地震定位方法综述

肖家强 易 江 陈 凯

重庆市地震局 重庆 401147

摘 要: 地震定位是地震学研究中的基本问题, 提高地震定位的精度对地震事件及地质构造的研究具有非常重要的意义。本文介绍了重庆地区常用的地震定位方法和相关的研究进展。

关键词: 地震定位; 双差定位; 地震精度

重庆市是中国四大直辖市之一, 地理位置坐落于大陆的西南地区, 西边紧接四川盆地, 区内有长江与嘉陵江两条河流相交。辖区内地质构造情况相对多样化, 多数地区均有断裂带发育, 断裂构造与褶皱构造在地表上共同发育, 褶皱构造的呈现特点主要是隔挡式, 地质形态上向斜部分相对宽缓、背斜部分则相对高陡。属于该地区的地槽褶皱系统由长江准地台和一级构造单元中的秦岭单元所封闭。四川盆地西南部东西地壳差异较大, 而重庆地区刚好位于这一边缘过渡带中。区内地台和地槽褶皱存在于上扬子台和北大山等二级构造单元中。该区毗邻南北地震带中部, 区内的地震构造按其走向特征可以分三类: 北东向断裂分布, 包括华蓥山断裂、彭水断裂、七曜山-金佛山及其附属断裂方斗山等, 北西西向断裂分布包括城口深断裂及其伴生小断裂, 南北向断裂分布主要为长寿-遵义断裂等。总体上, 震中及周边区域的褶皱轴向及断层朝向多数为北东方向, 少数为北北东方向、北西西方向, 基底断层的存在对于区域地震活动有着重要的作用和深远的影响。

纵观历史地震资料, 沿构造单元边界和背斜褶皱底部的断裂带是该区域内中强地震多发区域。作为近代历史上震级最大、破坏性最强的黔江小南海 6 级地震(1856) 不仅阻塞河流形成了小南海堰塞湖, 还揭开了近代重庆地区地震相对活跃期。近代历史上发生了 M5 级以上地震达到 8 次, 渝北统景(1989) 在短时间内曾发生 5.4、5.2 级地震, 直接经济损失 1.5 亿元。2017 年重庆武隆地区发生了 5.0 级地震, 造成的经济损失多达四千万, 为近几年来重庆地区震级最大的地震事件。三峡水库蓄水造成的水体的渗透可能对老断层复活产生影响, 从而产生诱发地震。重庆市地震形势较为特殊, 归咎于其独特的城市建筑风格, 城市内人口众多, 建筑物依山而伴高低起伏较为密集, 被归于地震灾害危害较大的城市。国务院在 1996 年将重庆列为重点地震监测和防御城市。重庆区域近现代中强地震活动始于上世纪 80 年代末期。受区域地质构造影响, 地震震源深度通常较浅, 震感较为明显, 造成了相对较大的经济损失。总结重庆地区地震活动的特点和提高地震定位的精度对重庆地区的地震预报及地方的防震减灾事业具有重大的科学指导意义。

自古以来地震定位一直是地球科学研究的重要分支。在早期的地震事件定位方法中主要利用作图来进行地震的定位与分析。线性的地震定位方法上个世纪 90 年代以后才逐渐兴起。1912 年 Geiger 提出了经典定位方法, 标志着线性

定位方法的起源。

1 经典(Geiger) 方法

假设地震波实际到时在不同的台站分别为 t_1, t_2, \dots, t_n , 在进行震源参数 (x_0, y_0, z_0) 和发震时间 t_0 的求解时, 需要令目标函数

$$\phi(t_0, x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (1)$$

取极小值。 r_i^2 为地震的到时残差。 T_i 为第 i 个台站接收到地震波的理论时间。

使目标函数取极小值时方能得到解析解, 即 $\nabla_{\theta} \phi(\theta) = 0$,

其中 $\theta = (t_0, x_0, y_0, z_0)^T$, $\nabla_{\theta} = \left(\frac{\partial}{\partial t_0}, \frac{\partial}{\partial x_0}, \frac{\partial}{\partial y_0}, \frac{\partial}{\partial z_0} \right)^T$

令

$$g(\theta) = \nabla_{\theta} \phi(\theta) \quad (2)$$

在真实解 θ^* 附近的任意试解 θ^* 的纠偏矢量 $\delta\theta$ 满足:

$$g(\theta^*) + [\nabla_{\theta} g(\theta^*)]^T \delta\theta = 0 \quad (3)$$

为了避免不同台站到数据精度不一致这一问题对研究结果产生较大的不利影响, 可以通过权重系数来进行区分。通过引入结合了权重系数的目标函数就可以降低不利情况的影响。在特点条件下迭代求解至循环结束, 目标函数 ϕ , 近似于零, θ 解就是所求解。

2 多事件定位法

为了提升地震定位的精度, 道格拉斯(1967) 提出了引入台站修正项的新定位方法(JED), 该方法在反演过程中将台站修正项和震源参数相互结合。后来, 杜威(1972) 在此基础上发展出了 JHD 定位方法, 该方法可以更准确的获取地震事件的震源深度。实际的地下介质结构往往比较复杂, 利用单一结构模型进行替代就会产生一定的偏差, 多事件定位法的出现不仅降低了该偏差, 在定位运算速度方面也得到了显著提升。其基本原理如下:

假设有 m 个地震事件, n 个观测台站。单一速度模型替代过程中产生的偏差可以通过在不同台站 j 引入相应的台站修正项 S_j 来进行补偿。即对地震事件 i 和测震台站 j ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 有如下等式:

$$t_{ij} = t_{0i} + T_j(h_j) + s_j \quad (4)$$

式中 t_{ij} 为实际地震波的到达时间, $T_j(h_j)$ 为地震波从震中到测点的理论走时, $h_i = (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})^T$ 。确定起始点 θ^* 和 s_j^* ($j=1, \dots, n$) 在(6)上执行一阶 Taylor 展开, 化简即为到达时间的残差:

$$r_{ij} = t_{ij} - t_{0i}^* - T_j(h_j^*) - s_j^* = \delta t_{0i} + \frac{\partial T_j}{\partial x_0} \delta x_{0j} + \frac{\partial T_j}{\partial y_0} \delta y_{0j} + \frac{\partial T_j}{\partial z_0} \delta z_{0j} + \delta s_j \quad (5)$$

设 σ_{ij}^2 是 r_{ij} 的方差, 加权可得 $w_{ij} = \frac{1}{\sigma_{ij}^2}$ 。对所有观测台站和地震事件上做上式运算, 并进行联合反演, 从而得到 n 个观测台站的修正值以及 m 个地震事件的震源参数。

Spence 基于 JED 方法的理论基础提出了主要事件联合定位法。选择的主事件的震源位置参数通常要求相对比较准确, 主事件附近的其他震群事件的震源位置参数可以通过主事件之间的相对空间距离来计算得到。从相邻震源到同一台站的近似相同传播路径可以减少地下介质传播过程中的偏差, 对地震定位的准确性和精度有良好的改善作用。

3 双差定位法

Waldhauser 和 Ellsworth(2000) 共同提出了双差地震定位法, 该方法利用相邻地震的相对到时差来进行定位, 不在局限于某一地震事件, 对于相对距离跨度更大的地震簇集有着良好的适用性。其基本原理如下:

震源 i 和台站 j 间地震波观测到时 T 可以用慢度沿着射线路径积分的形式表述:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \quad (6)$$

式中 τ^i 表示第 i 个地震的发震时刻, T_k^i 是第 i 个地震到第 k 个台站的实际到时, u 为慢度。线性化方法则采用截断的 Taylor 展开来进行, 就可以得到相应的 i 地震事件到台站 k 的实际观测到达时间和理论计算到达时间之间的差值:

$$r_k^i = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u ds \quad (7)$$

其中 Δx_l^i ($l=1, 2, 3$) 表征震源参数在空间位置中的扰动, δu 表征地震波传播路径上慢度的扰动项, $\Delta \tau^i$ 表征地震事件 i 发震时刻的扰动项。因此, 同一个观测台站 k 地震 i 与地震 j 的走时残差之差为:

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \delta u ds - \left(\sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j + \Delta \tau^j + \int_j^k \delta u ds \right) \quad (8)$$

上式中 $r_k^i - r_k^j$ 即所谓的双差, 表示的是不同地震事件理论到时残差与观测到时残差之差, 可以表述为如下形式:

$$r_k^i - r_k^j = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{cal} \quad (9)$$

通常通过波形互相关技术获得实际观测到的时间差 $(T_k^i - T_k^j)^{obs}$, 且数据质量准确性更好。如果没有波形数据, 则可以利用震相观测报告中的绝对到时数据计算得到。如果两个地震相邻, 那么相同地震台接收到的射线路径在震源区域以外的传播空间中基本相同。在反演中使用到时差数据, 能够有效地避免速度误差在震源区以外相同射线路径上造成的不良影响, 从而提高地震定位的精度。

4 Hypo2000 定位方法

通过对 Geiger 法的改进, Klein(1978) 提出了绝对地震定位方法 hypo2000。利用初始速度模型下地震波的传播到时和传播时间来计算地震的震源位置参数, 再结合地震波的最大体波振幅来计算地震的震级, 其基本原理如下:

将通过初始速度模型计算得到的理论到时 T_k 与在地震台站观测到的实际到时 t_k 作差就可以得到残差 r_k 的表达式为:

$$r_k = T_k - t_k \quad (10)$$

对其做泰勒展开, 当 r_k 很小时, 上式中的二次以上的偏导项可以忽略, 得到:

$$r_k = dt + \frac{\partial t_k}{\partial x} dx + \frac{\partial t_k}{\partial y} dy + \frac{\partial t_k}{\partial z} dz + e_k \quad (11)$$

距离地震发生较近的多个观测台站都会记录到该地震的波形, 当台站个数比所需进行求解的震源位置参数的个数多时, 利用最小二乘法就可以求的约束性解。令 $\frac{\partial t_k}{\partial x} = a_k$, $\frac{\partial t_k}{\partial y} = b_k$, $\frac{\partial t_k}{\partial z} = c_k$, 如果有 n 个地震台站, 使 e_k 取得最小值应当具备以下条件:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n a_k^2 dx + \sum_{k=1}^n a_k b_k dy + \sum_{k=1}^n a_k c_k dz + \sum_{k=1}^n a_k dt = \sum_{k=1}^n a_k r_k \\ \sum_{k=1}^n a_k b_k dx + \sum_{k=1}^n b_k^2 dy + \sum_{k=1}^n b_k c_k dz + \sum_{k=1}^n b_k dt = \sum_{k=1}^n b_k r_k \\ \sum_{k=1}^n a_k c_k dx + \sum_{k=1}^n b_k c_k dy + \sum_{k=1}^n c_k^2 dz + \sum_{k=1}^n c_k dt = \sum_{k=1}^n c_k r_k \\ \sum_{k=1}^n a_k dx + \sum_{k=1}^n b_k dy + \sum_{k=1}^n c_k dz + \sum_{k=1}^n dt = \sum_{k=1}^n r_k \end{cases} \quad (12)$$

震源位置参数、时间的变化值 dx, dy, dz, dt 可以通过上述公式进行求解, 将所得到的变化值代入到初始震源参数和时间参数中, 可得经历一轮迭代后的修正震源坐标 $(x_0 + dx, y_0 + dy, z_0 + dz)$ 和修正时间参数 $t + dt$ 。将修正后的数值再次代入上式进行反复修正, 直到震源的参数修正值小于给定的时间误差及位置误差时停止迭代, 就可以得到的该地震发生的地理位置参数和时间参数。

5 结语

重庆市数字测震台网经中国地震局“十五”项目建设完成, 日常的资料分析通过 MSDP 软件中自带的地震定位方法 (单纯型、自适应、HypoSAT、LocSAT、Hypo2000 等) 实现, 速度模型使用的是重庆地区速度模型。Hypo2000 地震定位法可以将研究区域进行分割, 在不同的区块中选择适合该区域的速度结构模型, 采用多重速度模型可以在一定程度上减少单一模型带来的误差。大量的研究表明该方法对于观测组网内的地震定位具有较高的精度。双差定位通过利用地震事件的相对走时差数据来消除震源区外部的地下速度结构带来的误差, 其对震源区以外的速度结构的准确度依赖性较低, 结合绝对走时数据来进行震源参数反演, 提升了反演结果的精确度。随着工业活动诱发地震现象的频发, 大量微震的出现对地震定位的精度提出了更高的要求。在地震频发区域进行大范围地震观测台阵的布设及微震地震震相的识别都是目前地震定位研究的重要方向。随着科学技术的不断发展, 地震定位方法的准确性和多样性都将不断提高。

参考文献:

- [1] 陈凯, 孙国栋, 易江, 李光科. 重庆及邻区地震精定位及活动性分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(05): 8-20.
 - [2] 陈凯, 曹坤剑, 易江. 重庆地震台 BBVS-120 与 KS-2000 型地震计系统性能对比分析[J]. 高原地震, 2018, 30(01): 34-39.
 - [3] 汪建, 董建辉, 何秋典. 三峡地区水库诱发地震精定位方法对比研究[J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(03): 62-69.
- 作者简介: 肖家强 (1992—), 男, 云南楚雄人, 助理工程师, 毕业于防灾科技学院, 主要从事地震监测工作。