# 三维分块倾斜界面的反演及其应用

## 赖晓玲 郑需要 张先康

(国家地震局地球物理勘探中心,郑州 450003)

摘要 介绍了利用反射波走时反演介质层速度和包含直立断层的三维界面的计 算方法,对各层界面利用多价倾斜或平界面方程来描述,给出了数值计算实例,结果 表明,反演解与真模型很接近,说明计算方法是有效的,利用该方法处理了唐山地震 区的 PmP 反射波资料,获得了该区域莫霍界面的三维分块形态. 唐山附近莫霍界面 错断与该区域 1976 年唐山地震及一系列余震的发生有密切的联系。

主题词: 莫霍间断面 地震波反射法 三维模型 分块倾斜界面 唐山地震区

引言 1

利用地震反射波走时资料反演界面形态和介质的速度是地球物理研究领域的重要课题之 一,近年来,这方面的研究已取得了较大进展<sup>[],[],[],[]</sup>.

当界面是三维情况时描述方式主要分为网格化和函数两类. 网格化模型在三维射线追踪 时比较麻烦,对某些不太复杂的三维界面利用函数来描述是一种有效的处理手段,Kanasewich 及 Chiu (1985)<sup>[4]</sup> 研究了利用平界面及倾斜界面的模型,反演地下包含直立断层的三维界面的 方法, 笔者认真研究了这种方法, 给出了程序设计时需注意的一些问题和解决办法, 编写了计 算程序,并将它应用于唐山地震区的 PmP 波走时资料的处理,获得了该区域莫霍界面的三维 构造形态.

### 2 正问题

假设介质为多层三维任意倾斜界面,每层由数个直立断层块组成,各块边界可以是任意四 边形或三角形,并且在各层内速度是均匀的.则反射波射线在各层中的路径为直线.对于固定 的源~接收点的两点射线追踪问题,可以通过 Chander (1977)<sup>[5]</sup> 提出的一种简单实用的方法 来求解,即求解一组非线性方程组.

界面方程定义为如下形式:

 $a_i x_i + b_i v_i + c_i z_i + d_i = 0$  i = 1, 2, ..., L(1)这里 a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>, c<sub>i</sub> 是方向余弦, d<sub>i</sub> 是深度, L 是界面层数. 沿射线路径反射波的走时可表示为:

$$t = \sum_{i=1}^{n} \left[ (X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2 + (Z_i - Z_{i-1})^2 \right]^{1/2} / v_i$$
(2)

式中n是射线段数, v;是各层的速度值.

<sup>\*</sup> 地震科学联合基金资助项目. 本文 1996 年 5 月 23 日收到.

第一作者简介:赖晓玲,女,39岁,高级工程师,从事地球物理反演问题研究及程序编写工作.

正问题的目标是求得射线与各层界面的交点坐标. 根据 Fermat 的最小时间原理, 当 *t* 不 变时, 同时求解(2n-2)个方程. 按照 Chander 的方法, 这些方程是:

$$\frac{\partial t}{\partial X_{i}} = [X_{i} - X_{i-1} - \frac{a_{i}}{c_{i}}(Z_{i} - Z_{i-1})] / v_{i}[(X_{i} - X_{i-1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i-1})^{2} + (Y_{i} - X_{i+1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i-1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i-1})^{2}]^{1/2} + [X_{i} - X_{i+1} - \frac{a_{i}}{c_{i}}(Z_{i} - Z_{i+1})] / v_{i+1}[(X_{i} - X_{i+1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i+1})^{2} + (Z_{i} - Z_{i+1})^{2}]^{1/2} = 0 \quad i = 1, \dots, n - 1$$

$$\frac{\partial t}{\partial Y_{i}} = [Y_{i} - Y_{i-1} - \frac{b_{i}}{c_{i}}(Z_{i} - Z_{i-1})] / v_{i}[(X_{i} - X_{i-1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i-1})^{2} + (Y_{i} - Z_{i-1})^{2}]^{1/2} + [Y_{i} - Y_{i+1} - \frac{b_{i}}{c_{i}}(Z_{i} - Z_{i+1})] / v_{i+1}[(X_{i} - X_{i+1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i+1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i+1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i+1})^{2} + (Y_{i} - Y_{i+1})^{2} + (Z_{i} - Z_{i+1})^{2}]^{1/2} = 0 \quad i \not\equiv 1, \dots, n - 1$$
(3)

程序中选择了阻尼最小二乘法求解方程组(3). 计算过程中所用的偏微商矩阵,采用了解 析式,正问题的初值由程序自动产生.

本文假设模型每层中的界面由数块组成,也就是说,每层有数个界面方程.这时射线追踪 程序可以设计为每层只有一个或两个(射线透射层)界面方程的情况,并将多层多块分为多次 追踪来进行.另外每一次追踪完成后要判断求出的这组交点坐标是否均在相应块的边界内,如 果是,这组交点值就是"真交点",否则改变模型块号重新对该条射线进行追踪.具体来说,对于 一层由数块组成的模型或几层模型但只有目标层有数块这两种情况可以归为一类.进行射线 追踪时将上层模型不变,对目标层依次按1,2,...,n块顺序进行追踪.这样每条射线最多做 n 次追踪即可找到"真交点".如果追踪 n 次该射线仍然没有"真交点",对这样的射线要作出标 记.对多层均为数块的情况,可以采用定向搜索,即在源~接收点之间有关的一些块内轮流进 行射线追踪,这样比对全部块进行搜索花费的时间少.

## 3 反问题

走时是界面系数和层速度的非线性函数,可以近似用一阶泰勒级数展开,形成一组关于观测走时的线性方程组.

$$T_{i} \stackrel{\curvearrowleft}{=} t_{i}(\mathbf{X}^{0}) + \sum_{j=1}^{p} \partial t_{i} / \partial X_{j} \mid x = x_{0}(X_{j} - X_{j}^{0})$$

$$\tag{4}$$

这里  $T_i$  是观测走时,  $X^0$  是初始模型参数,  $t_i(X^0)$  是由初始模型计算的走时.

$$X = \begin{bmatrix} X_A \\ X_V \end{bmatrix}$$

X<sub>A</sub> 为界面系数矩阵,由各层数块界面方程组成;X<sub>V</sub> 为层速度矩阵.

r s

考虑到反问题非线性较强的情况,采用了变阻尼的最小二乘法求解.阻尼最小二乘迭代过 程可以表示为<sup>[6]</sup>.

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{K}+1} = \boldsymbol{X}_{\mathrm{K}} - (DF(\boldsymbol{X}_{\mathrm{K}})^{\mathrm{T}} DF(\boldsymbol{X}_{\mathrm{K}}) + \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{K}} I)^{-1} DF(\boldsymbol{X}_{\mathrm{K}})^{\mathrm{T}} F(\boldsymbol{X}_{\mathrm{K}})$$
(5)

式中 DF(X<sub>K</sub>)为第 K 次迭代, 走时对各模型参数的一阶偏微商矩阵. 该矩阵元素的解析计算 是不难推导的.

阻尼最小二乘法是"最陡下降法"和"经典最小二乘法"的混合,它兼备了两者各自的某些 性质,在保证收敛的同时,可以改善计算速度.具体实现在程序中阻尼因子 "是可变的,计算开 始初始模型往往不能给得很好,使得目标函数较大,改善收敛性是主要矛盾.因此,开始时µ可 以给得较大,以后在迭代的每一步中,将µ乘以一个小于1的数,逐渐减小µ值,以增大收敛速 度.另外,为了控制各个反演参数的修改量,对于每个反演参数可以给出不同的初始阻尼值,也 可以在迭代中按不同的比例减小各反演参数的阻尼值.

对上述方法编写了相应的计算程序,其流程如图 1a 所示.





# 4 数值计算实例

为了检验计算方法和程序,本文给出一个数值计算实例.图 1b 是反演用的观测系统,在 300×300 km<sup>2</sup> 的正方形区域里,布设有一个等腰三角形测网.在三角形的三个顶点和正方形 的中点布设4 个炮点,沿三角形的三条边布设27 个台站.对于在三角形顶点的 s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub> 和 s<sub>3</sub> 三个 炮点,相应三角形的对边上的9 个台站接收信号;对于正方形中心的 s<sub>4</sub> 炮点,由与它有连线的 10 个台站接收信号,这样共计有 37 条射线参加反演.在 s<sub>4</sub> 的两侧有两条虚线,表示目标界面 两条直立断层在地面的投影线.1,2 和 3 为目标界面反演分块编号.数值模拟所用走时由三维 射线追踪产生.

假设模型为两层情况.在10 km 深度是第一层界面,第二层界面最小深度为40 km,由三 块倾斜断层块组成,近似于"阶梯"状.两层速度分别为4.0 km/s和5.0 km/s(图2a).我们的 目的是反演这二层界面,假定速度是已知的.对于第一层界面用6 km 深度作为初始值,对于 第二层界面用35 km 深度作为初始值(图2b),经过用上述阻尼最小二乘法进行18次迭代计 算,收敛到真模型.图3是s1炮点的走时图,横坐标与观测系统的x坐标一致,纵坐标为走时 T.由图可见,反演计算走时很接近真走时,其它三炮结果类似.在计算中,对于第一层和第二 层界面其初始阻尼系数均取3.0,然后在各次迭代中将阻尼系数按0.7的比例缩小.

# 5 唐山地震区莫霍界面的分块反演和解释

用上述方法和程序处理了国家地震局地球物理勘探中心 1988 年在唐山-滦县地震区,进行人工地震测深时所记录的 PmP 波资料.



图 2 反演用的 真模型和初始模型 Fig. 2 True model and Initial model for inversion.

观测系统如图 4 所示. 在工作区布设了 10 个炮点, 台站分布在约 40×30 km<sup>2</sup> 的区域内. 作者选择 Sp01, 02, 03 和 06 四炮资料用于反演. 这四炮资料的炮检距大约为 70~120 km, 均 记录到非常清晰的 PmP 波组.

首先利用一层平界面的模型计算出四炮共 290条射线的反射点,这些反射点大约分布在 50× 80 km<sup>2</sup> 的区域,将这个区域作为反演的区域.图 5 为反演区地质构造和反演分块示意图,该区域浅层 构造为北东走向,主要分布有唐山断裂和丰台-野 鸡坨断裂,1976年的唐山大地震及一系列余震就 发生在该区域内.块1呈三角形,块2和块3呈四 边形,块1与块2的边界位于唐山断裂①附近.块2 与块3的边界位于丰台-野鸡坨断裂附近.深部模 型的分块参考了浅层地质构造特点和文献[3]和 [7]的结果.

图 6 为莫霍界面的反演结果.从图中可见,在



该区域中部莫霍界面出现北东向的隆起,表现为对应于块2的莫霍界面埋深较浅,对应块1和块3的莫霍界面埋深较深,并且在块1与块2的边界处两界面埋深相差近2km.在块2与块3的边界处,两界面埋深相差不大,最小相差不到0.5km.在各块内莫霍界面呈沿北东方向逐渐变浅的趋势.相对于块1的莫霍界面深度为33.95~34.55km,相对于块2的莫霍界面的深度为31.35~32.77km,相对于块3的莫霍界面的深度为32.49~33.04km.对照地质构造(图5)可以认为,莫霍界面沿唐山断裂①发生断错,断距大约2km,沿丰台-野鸡坨断裂莫霍界面也发生断错,断距相对较小,在反演区的西侧断距不到0.5km.莫霍面隆起区位于唐山断裂①与丰台-野鸡坨断裂之间.本文反演得出的莫霍面形态,与文献[8]和[9]得到的该区域莫霍界面的形态一致,表明在唐山附近莫霍界面出现明显错动.此外,唐山大震及其余震也呈北东向

展布,沿着唐山断裂①和②形成了北东向的地震活动带.关于唐山地震活动带的形成原因及过 程是比较复杂的,它与多种因素有关<sup>10</sup>.但综合各种资料分析表明,沿唐山断裂深部莫霍界面 的错动与该区地震活动带的形成是密切相关的.



图 4 唐山和滦县地震区三维地震透射观测系统示意图 Fig. 4 Observing system of three dimensional refraction in Tangshan and Luanxian earth quake area.



速度和界面可以同时修改,但对多层情况计算结果的精度要受到一定影响.对于参加反演的所 有断层块必须保证每块都有一定的射线到达,反演解才能收敛到真模型.

任何方法都是在应用中得到改进和完善的.实测资料通常包含速度和界面两组非均匀信息的组合.对炮点和接收点都在反演区内的情况,可以将各层间的速度与界面一样分块,然后同时反演各块速度和界面.

唐山地震区莫霍界面的分块反演结果表明,该区域莫霍界面出现北东向隆起.该隆起位于 丰台-野鸡坨断裂与唐山断裂①之间,其深度大约为 31.35~32.77 km.唐山断裂①对该区域 莫霍界面的形态变化有较大的影响.

王夫运等同志对本文提出有益的意见,作者在此表示感谢.

#### 参考文献

- 1 Williamson P R. Tomographic inversion in reflection seismology. Geophys J Int, 1990, (100): 255 ~ 274.
- 2 Farra V and Madarige K. No-linear reflection tomography. Geophys J, 1987, (95): 135~147.
- 3 赖晓玲,张先康,杨健.二维反射地震成象——界面与速度的联合反演.华北地震科学,1994,12(4):9~17.
- 4 Kanasewich E R and Chiu S K L. Least-squares inversion of spatial seismic refraction data. Bull Seis Soc Am, 1985, (75): 865 ~880.
- 5 Chander R.On tracing seismic rays with specified end points in layers of constant velocity and plane interfaces. Geophys Prosp. 1977, (25): 120 ~ 124.
- 6 王德人.非线性方程组解法与最优化方法.北京:人民教育出版社,1979.
- 7 刘昌铨, 喜世旭. 唐山地区地壳上地幔结构特征. 地震学报, 1986, 8(4): 341~353.
- 8 曾融生,陆涵行,丁志峰.从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因.地球物理学报,1988,31(4):383~398.
- 9 曾融生, 张少泉, 周海南, 何正勤. 唐山地震的地壳结构及大陆地震成因的探讨. 地震学报, 1985, 7(2): 125~142.
- 10 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组.一九七六年唐山地震.北京:地震出版社,1982.

#### INVERSION AND APPLICATION OF THREE DIMENSIONAL DIP INTERFACE IN BLOCK

LAI Xiaoling ZHENG Xuyao ZHANG Xiankang (Geophysical Prospecting Center, SSB, Zhengzhou 450003)

#### Abstract

A calculating method for inversing body wave velocities and three-dimensional structure of interfaces by using reflected wave travel time is presented. A fast 3-D ray tracing algorithm by Chander and a damped least-squares technique are used to solve forward and inversion problems respectively. The result shows that the solutions of inversion are close quite to the true model. A 3-D M oho interface structure in Tangshan earthquake region is constructed using P<sub>m</sub>P reflected wave data. The faults of Moho interface in Tangshan area and its vicinity are relative to the Tangshan main earthquakes and a series of aftershocks in 1976.

Key words: Moho discontinuity, Seismic wave reflection method, Three-dimensional model, Tangshan earthquake area, Dip interfaces in block