

文章编号:1673-8926(2008)03-0079-04

## 层析静校正技术在柴北缘地区的应用

吴杰, 苏勤, 王建华

(中国石油勘探开发研究院西北分院)

**摘要:**柴北缘地区地震勘探多在山地、山前带、戈壁、沙漠等低速带变化大的复杂地区进行,静校正问题成为制约勘探成效的瓶颈。绿山层析静校正是一种非线性反演技术,利用地震波初至时间和射线路径反演出近地表速度模型,然后求取静校正值,从而消除静校正影响,提高地震剖面的分辨率。该方法应用于柴北缘地区,提高了静校正计算的精度,较好地解决了该区的静校正问题。

**关键词:**静校正;层析;近地表速度模型;低速带;初至时间

**中图分类号:**P631.4

**文献标识码:**A

### Application of tomographic static correction in northern margin of Qaidam Basin

WU Jie, SU Qin, WANG Jian-hua

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest (NWGI), PetroChina, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** Since seismic exploration in the northern margin of Qaidam Basin is mainly carried out in mountainous region, foothill belt, gobi and desert, where the variation of low velocity layer is rapid, so static correction has become a bottleneck restricting the effect of exploration. Tomographic static correction technology of Greenmountain is a non-linear inversion method, which inverses the near surface velocity structure by means of first break time and ray path gained by ray-tracing method, calculates the statics, eliminates the effect of static correction and improves the resolution of seismic section. The application in the northern margin of Qaidam Basin shows that this method improves the statics precision and resolves the statics problem successfully.

**Key words:** static correction; tomography; near surface velocity model; low velocity layer; first break time

### 0 引言

随着柴北缘地区地震勘探的逐步深入,目前的勘探多集中在山地、山前带、戈壁、沙漠等低速带变化大的地区,而静校正问题严重制约着这类地区的勘探成效。常规的静校正方法存在各种局限性:小折射法低速带调查由于排列的长度有限,观测到的是偏移距较小的初至折射波,难以全面反映低速带底界的形态,对地形起伏剧烈以及表层速度变化

较大的地区并不适用;微测井方法能够较准确地确定测点处表层速度随深度变化的规律,但对于低速带厚度较大(超过100m)和速度变化较大的工区,必须加密测点,成本太高;折射静校正方法由于水平层状介质的假设,目前仅适用于地表起伏不大、表层速度横向均匀性较好、有明显折射界面存在且该界面比较平缓的地区。此外,许多基于浅层折射和统计分析的静校正方法,如交互迭代静校正、多域迭代静校正、模拟退火静校正等,多依赖于野外静校

收稿日期:2008-02-28;修回日期:2008-03-30

作者简介:吴杰,1983年生,男,硕士,2007年毕业于中国石油大学(北京),目前主要从事地震数据处理的研究工作。地址:(730020)甘肃省兰州市城关区雁儿湾路535号。电话:(0931)8686063。E-mail:wxbwujie@163.com

正的精度,也存在局限性。柴北缘地区大多不具备这些条件,多数区域地表起伏剧烈,山体陡峭,老地层出露,标志岩层变化剧烈,折射层不稳定,表层的低降速层厚度和速度横向变化剧烈,静校正问题严重<sup>[1,2]</sup>。

层析静校正是一种非线性反演技术,它利用地震记录的初至波时间,运用射线追踪方法反演地表及近地表不同介质的速度模型,以获得地震观测点处地表及近地表的速度和深度信息,建立相应的表层结构模型,在此基础上分别求取激发点和接收点的静校正值,从而消除静校正影响,提高地震反射波分辨率。该方法具有以下特点:①无需分辨初至波的类型(直达波、反射波、折射波或哪一层的折射波),初至信息更加丰富;②反演模型无需层状介质的假设,更加符合低速带速度并非严格成层的实际情况;③射线追踪的地震波传播路径与实际相符;④可反演出更加可靠、精细的近地表速度模型,进而确定可靠的低速带底界高程,适合于解决低速带厚度和速度变化剧烈地区各种波长的静校正问题。笔者采用绿山层析静校正方法解决柴北缘地区静校正问题,取得了比较好的效果。在计算过程中,利用绿山折射静校正的近地表速度模型建立初始速度模型并进行层析反演,使迭代过程快速收敛,减少了迭代次数,提高了静校正的精度,缩短了计算时间<sup>[3-9]</sup>。

## 1 方法原理

层析成像的基本原理是任何一个观测数据都可被表示成穿过成像区域的射线路径的线积分。在地震勘探中,积分路径是地震射线,观测数据是地震记录中的初至波旅行时,故弹性波观测旅行时 $t$ 可用沿弹性波射线的线积分表示

$$t(r_s, r_g) = \int_{R(r_s, r_g, v)} \frac{1}{v(r)} dl \quad (1)$$

式中: $v(r)$ 为弹性波传播速度, m/s;  $r_s, r_g$ 为炮点、检波点坐标, m;  $t(r_s, r_g)$ 为旅行时, s;  $R(r_s, r_g, v)$ 为射线路径。由于根据旅行时射线积分反演介质速度是一个非线性问题,理论上可以用 Radon 逆变换来直接求解,但在地面地震勘探中,因观测角度有限,无法提供 Radon 逆变换算子所需要全部数据,因此,只能采用正演的方法来解决反问题。解决这类非线性

问题的常规办法是采取局部线性化,得到一个高阶线性方程组,然后迭代求解方程组,从而获得速度模型。

假设要反演的速度 $v(r)$ 是在某个已知的背景速度 $v_0(r)$ 上加一个扰动量 $\Delta v$ ,即

$$\Delta v = v(r) - v_0(r) \quad (2)$$

速度扰动引起的时差 $\Delta t(r_s, r_g)$ 为

$$\begin{aligned} \Delta t(r_s, r_g) &= \int_R v(r)^{-1} dl - \int_{R'} v_0(r)^{-1} dl \\ &= - \int_{R'} \Delta v [v_0(r)v(r)]^{-1} dl + \int_R v(r)^{-1} dl - \\ &\quad \int_{R'} v(r)^{-1} dl \end{aligned} \quad (3)$$

当 $v_0 \gg \Delta v$ 时

$$\begin{aligned} \int_{R'} \Delta v [v_0(r)v(r)]^{-1} dl &= \int_{R'} v_0^{-2} \Delta v (1 + \frac{\Delta v}{v_0})^{-1} dl \\ &= \int_{R'} v_0^{-2} \Delta v [1 + (-\frac{\Delta v}{v_0}) + \\ &\quad (-\frac{\Delta v}{v_0})^2 + \dots] dl \\ &= \int_{R'} v_0^{-2} \Delta v dl \end{aligned} \quad (4)$$

更进一步,可以把路径 $R'$ 看作路径 $R$ 的变分,则式(3)最后2项积分可定义为一个泛函增量,即

$$Q[P(r_s, r_g)] = \int_{P(r_s, r_g)} v(r)^{-1} dl \quad (5)$$

式中: $Q[P(r_s, r_g)]$ 为泛函增量, $P(r_s, r_g)$ 表示震源 $r_s$ 到接收点 $r_g$ 之间的任意一条曲线。由费马原理可知 $P(r_s, r_g) = R[r_s, r_g, v(r)]$ 时,泛函 $Q(R)$ 取得极小值。因此, $R$ 是泛函 $Q$ 的极值曲线。由于泛函在极值曲线上的一次变化为0,即 $\delta(R) = 0$ ,因此泛函在 $R$ 处的增量为

$$\begin{aligned} \Delta Q(R) &= \int_R v(r)^{-1} dl - \int_{R+\Delta R} v(r)^{-1} dl \\ &= -\delta Q(R) + o(\max \|\delta R\|) \end{aligned} \quad (6)$$

当 $\Delta v \ll v_0$ 时,  $\max \|\delta R\|$ 很小,可以将其忽略。综合式(4)和式(6),则式(3)变为

$$\Delta t(r_s, r_g) \approx - \int_{R'} v_0^{-2} \Delta v dl \quad (7)$$

由式(7)可见,积分曲线与被积函数无关,而完

全由炮点、检波点和背景速度、 $v_0(r)$ 确定。所以,用 $\Delta t(r_s, r_g)$ 反演 $\Delta v(r)$ 是一个线性层析问题。也就是说,一个非线性问题用一系列的线性过程去逼近。这样,既可以处理线性问题,也可以处理非线性问题<sup>[10~13]</sup>。

对于一组射线则得到一个线性方程组,即

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{V}=\Delta\mathbf{T} \quad (8)$$

然后用迭代逼近的方法求解。式中: $\Delta\mathbf{T}=[\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_m]^T$ ,为 $m$ 维初至波初至时间与模型正演初至波走时的差值列向量; $\Delta\mathbf{V}=[\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3, \dots, \Delta v_n]^T$ ,为 $n$ 维模型参数修改量列向量; $\mathbf{A}$ 为 $m \times n$ 维的与射线路径及模型参数有关的矩阵,也称为微分系数矩阵。迭代反演就是求解式(8)。在每次迭代中,先计算非线性的正演问题,求得 $\Delta\mathbf{T}$ , $\mathbf{A}$ ,然后求解这个线性方程组,得到 $\Delta\mathbf{V}$ ,如此反复迭代,当满足精度要求时,停止迭代,得到近地表速度模型。

## 2 层析静校正的影响因素

在层析静校正过程中,以下几个因素对静校正的精度和求解速度有较大的影响。

### 2.1 初至拾取

错误的观测系统使炮检关系与实际不符,导致计算结果错误,因此,在拾取之前要严格检查观测系统中的错误,并予以修改或者删除相应的炮或道。在层析计算过程中,初至拾取的精度对层析静校正结果影响较大,因此初至拾取必须在交互拾取的状态下进行,边拾取,边分析,边认识,边解释,务必保证精度,同时注意尽量拾取所有道的初至,以便对反演有充分的约束,从而保证反演的稳定性,提高反演的精度。

### 2.2 网格单元大小

网格单元的大小决定了层析反演的速度和精度。网格单元划分过大,计算快但反演结果的精度会降低;网格单元过小,虽然有可能提高反演结果的精度,但由于反演中待求速度的数量增加,会使反演计算不稳定且计算速度变慢。网格单元的大小取决于介质的复杂程度,其横向距离一般选取一倍道间距,而纵向距离要视层析反演区域内低、降速层的深度及横向分布而定。沙漠等低降速层较厚的区域一般选择10 m为宜,而盆地边缘的戈壁区以及山前带一般选择5 m左右较合适,这样既提高了层析反演的速度,又能保证反演结果的精度。

### 2.3 初始模型

尽管现在的层析算法对于初始模型的依赖大大减小,而且有多种初始模型可选。但如果初始模型与实际速度模型相差太大,则反演收敛速度变慢,迭代次数增加,甚至不收敛,这将直接导致生产时间延长,使三维层析静校正无法在短时间内完成。由于折射静校正模型已经接近真实近地表模型,如果使用该模型作为初始模型,将加快收敛速度,减少迭代次数,反演结果也将更接近真实近地表模型,有助于提高精度。笔者经过多次试验证明,使用绿山折射静校正模型作为初始速度模型,可以大大加快收敛速度,提高效率 and 精度。

## 3 应用实例及分析

柴北缘某测线所在地区地表起伏不大,但低速带速度和厚度横向变化很大,静校正问题突出。这一点在折射静校正的速度模型(图1a)上可以看到:测线左端低速带厚度很大、速度变化剧烈;而测线

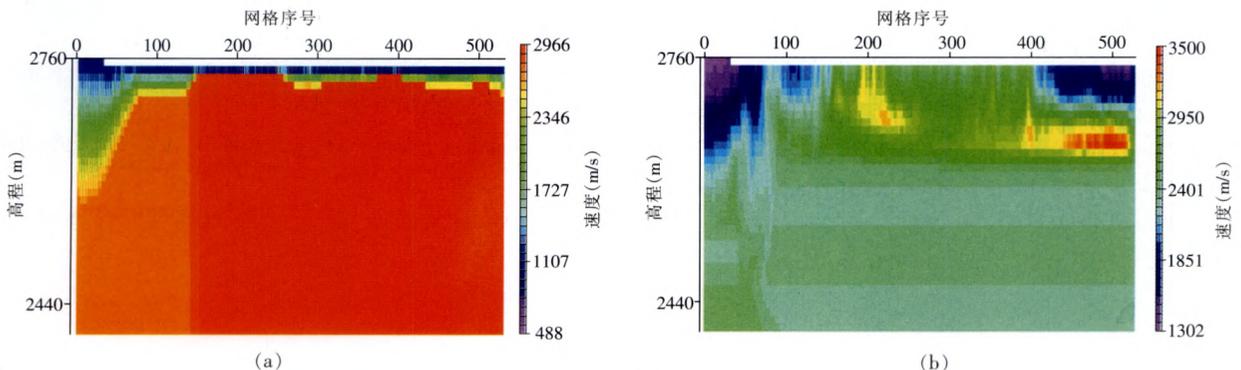


图1 速度模型

Fig. 1 The velocity models by refraction static correction and tomographic static correction

(a) 折射静校正;(b) 层析静校正

中部低速带很薄,甚至有老地层出露;测线右端低速带纵向变化很大。然而折射静校正的叠加剖面(图2a)并不理想,存在长波长问题,说明折射静校正的近地表速度模型不够精细,需要利用层析静校正反演近地表速度模型。在以往的反演中,多采用梯度速度模型或者层状速度模型作为初始模型,但存在收敛速度慢(迭代多达十几次)、精度不够高的

问题。在本次处理中,利用折射静校正的模型作为初始模型,进行层析反演,经过9次迭代,就得到工区较为精细的近地表速度模型(图1b),效率得到提高。图2b是层析静校正的叠加剖面,从剖面上可以看到,层析静校正较好地解决了长波长问题,使同相轴连续性增强,地质现象更加清楚,信噪比明显提高。

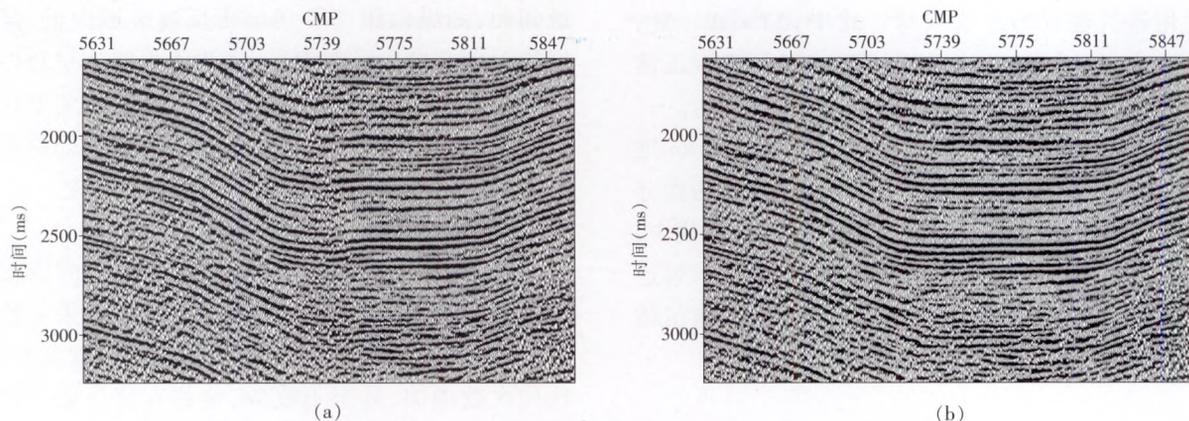


图2 叠加剖面

Fig. 2 The stack sections by refraction static correction and tomographic static correction

(a) 折射静校正; (b) 层析静校正

## 4 结 论

柴北缘地区静校正处理研究表明:在低降速速度和厚度横向变化剧烈的地区,用层析静校正可以较好地解决静校正问题,在实际资料处理中采用折射静校正的速度模型作为初始模型可以加快迭代收敛速度,减少迭代次数,缩短计算时间。

### 参考文献:

- [1] 何光明,贺振华,黄德济,等.几种静校正方法的比较研究[J].物探化探计算技术,2006,28(4):310-314.
- [2] 林伯香,孙晶梅,徐颖,等.几种常用静校正方法的讨论[J].石油物探,2006,45(4):367-372.
- [3] 赵峰,郑鸿明,郭洪宪,等.层析反演静校正技术及应用效果分析[J].新疆石油地质,2002,23(5):397-399.
- [4] 刘振宽,吴永刚,刘英杰.近地表层地震层析成像[J].石油地球物理勘探,1994,29(3):294-301.
- [5] 李录明,罗省贤,赵波.初至波表层模型层析反演[J].石油地球物理勘探,2000,35(5):559-564.
- [6] 李福中,刑国栋,白旭明,等.初至波层析反演静校正方法研究[J].石油地球物理勘探,2000,35(6):710-718.
- [7] 张建中.近地表介质初至波层析成像[J].厦门大学学报(自然科学版),2004,43(1):63-66.
- [8] 吴文熙,梁春燕.初至波表层模型层析反演静校正应用[J].中国石油勘探,2007,12(3):48-51.
- [9] 于常青,杨午阳,杨文采.关于油气地震勘探的基础研究问题[J].岩性油气藏,2007,19(2):117-120.
- [10] 杨文采,李幼铭.应用地震层析成像[M].北京:地质出版社,1993:11-46.
- [11] 吴律.层析基础及其在井间地震中的应用[M].北京:石油工业出版社,1997:48-72.
- [12] 苟量.中国西部复杂山地山前带地震勘探应用技术研究[D].成都:成都理工大学,2005.
- [13] 朱龙生.多方位角逆VSP层析成像[D].西安:长安大学,2003.

(编辑 于惠宇)