

文章编号: 1001-1986(2009)06-0067-04

# 一种快速建立层析反演初始模型的方法

李 宇<sup>1</sup>, 杨德义<sup>2</sup>, 闫 培<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 太原理工大学矿业工程学院, 山西 太原 030024; 3. 厦门地震勘测研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 建立近地表层析反演模型时, 通常利用射线追踪方法来计算模型初至旅行时, 再与观测的初至实际旅行时进行比较, 反复修改模型直到计算值与观测值的误差达到最小。因此, 初始模型建立的质量直接影响到层析反演的精度、收敛速度和迭代次数。通过模拟近地表模型, 利用时间项反演方法快速建立初始模型, 提高了层析反演的精度, 加快了收敛速度, 减少了迭代次数。

**关键词:** 时间项反演; 层析反演; 近地表; 初始模型

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2009.06.016

## A method of creating quickly an initial model in tomography inversion

LI Yu<sup>1</sup>, YANG Deyi<sup>2</sup>, YAN Pei<sup>3</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, CUMT, Beijing 100083, China;

2. The Institute of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Xiamen Research Centre of Seismologic Surveying, Fujian, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Generally, tomography inversion generating a near surface model involves the creation of an initial model, and then iteratively tracing rays through the model, comparing the calculated travel time to the observed travel time, modifying the model, and repeating the process until the difference between calculated and observed times is minimized. Therefore, quality of an initial model will affect precision of inversion, velocity of convergence and number of iterations directly. In the paper, a near surface model is simulated, and then one initial model is created quickly by time-term inversion method for tomography inversion. At last, through analyzing the tomography inverting model, precision of inversion is improved, velocity of convergence is accelerated and number of iterations is decreased.

**Key words:** time-term inversion; tomography inversion; near surface; initial model

层析反演能较好地解决速度横向变化问题, 因而在反演近地表结构中得到广泛运用。层析反演同其他反演方法相比, 能建立高精度的近地表模型, 因此, 能取得好的静校正效果。通常层析反演是利用射线追踪来计算模型的初至旅行时, 再与观测记录的初至旅行时进行比较、摄动, 最后得到满足精度的近地表模型。

进行层析反演时, 首先需要建立一个初始模型, 并尽量向实际的近地表模型靠近。如果初始模型不合适, 不仅收敛速度慢, 而且迭代次数多, 同时收敛结果有可能与实际模型相差甚远。因此, 层析反演初始模型的建立就显得很重要。一般情况下, 用小折射、微测井和 VSP 数据建立初始模型, 无疑是一个方便快捷的方法。但在近地表复杂地区误差较大, 甚至在一些地震区无低速带调查资料可用。

在层析反演初始模型如何建立的问题上, 陈国金等提出了由直达波初至旅行时自动获取初始模型的方法<sup>[1]</sup>; 左海等利用折射静校正方法(EGRM)求取初始模型<sup>[2]</sup>; 段新标等提出了生成模型网格结点初始模型的方法<sup>[3]</sup>, 这些方法的提出丰富了层析反演初始模型的建立方法。本文运用时间项反演方法快速建立初始模型, 并对层析反演的精度、收敛速度和迭代次数进行了分析。

### 1 时间项反演原理

时间项反演是一种利用观测的初至旅行时反演近地表模型的反演方法。其原理是利用线性最小二乘法进行曲面拟合, 这就要求建立的拟合函数在结点处满足与观测数据的偏差的平方和最小。图 1 是理想模型, 其中假设地面与折射界面都为水平层面,

收稿日期: 2008-12-09

作者简介: 李 宇(1983—), 男, 湖北孝感人, 博士研究生, 主要从事煤田地震勘探研究。

则初至旅行时方程为：

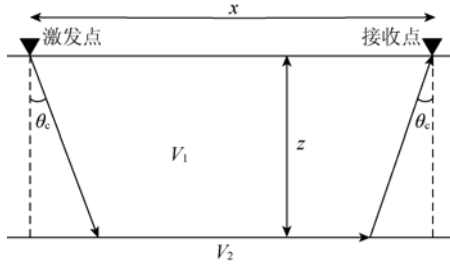


图 1 理想模型

Fig. 1 Ideal model

$$t = 2z \frac{\cos \theta_c}{V_1} + \frac{x}{V_2}, \quad (1)$$

式中  $t$  为旅行时； $z$  为折射界面深度； $V_1$  为第一层速度； $V_2$  为第二层速度； $\theta_c$  为临界角； $x$  为炮检距。

定义慢度  $S = \frac{1}{V}$ ，则式(1)变为：

$$t = 2zS_1 \cos \theta_c + xS_2. \quad (2)$$

定义常数  $c = S_1 \cos \theta_c$ ，则式(2)变为：

$$t = 2cz + xS_2, \quad (3)$$

式(3)中有  $z$  和  $S_2$  未知。

图 1 理想模型在实际中是很少存在的，而常见的是地表和折射层均不水平的情况，如图 2 所示。

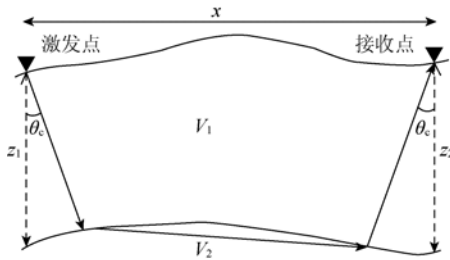


图 2 一般模型

Fig. 2 Common model

在图 2 中，激发点和接收点处折射界面的深度不相等，分别为  $z_1$ 、 $z_2$ ，则式(3)变为：

$$t = cz_1 + cz_2 + xS_2. \quad (4)$$

运用归纳法推广到所有炮检对时，则式(4)变为：

$$t_j = \sum_{k=1}^n c_{jk} z_k + x_j S_2. \quad (5)$$

式中  $j$  为炮检对； $k$  为接收点。

式(5)写成矩阵表达形式为：

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1n} & x_1 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2n} & x_2 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \cdots & c_{3n} & x_3 \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & \cdots & c_{4n} & x_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \cdots & c_{mn} & x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_n \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $m$  为旅行时数目； $n$  为接收点数目。

解式(6)即可求得  $z_1$ 、 $z_2$ 、...、 $z_n$  和  $S_2$ ，此即为时间项反演。

从时间项反演方法的原理看，此方法无需解释时距曲线，同时避免了地表和折射层起伏不平对折射波解释和参数提取的影响。

## 2 模型模拟分析

### 2.1 模型的建立

建立 3 层近地表模型，如图 3 所示。沿测线方向地表高程逐渐增加，高程相差 20 m；第一层速度为 300 m/s，沿测线方向厚度由 10 m 变薄为 3 m；第二层速度为 1 000 m/s，沿测线方向厚度逐渐增加，厚度相差 17 m；第三层速度为 2 000 m/s，厚度基本稳定。在 120 m 的测线长度上，对称布置 5 炮，炮点距为 28.75 m，炮点坐标分别为 2.50 m、31.25 m、60.00 m、88.75 m、117.50 m；接收道数为 25，道距为 5 m。

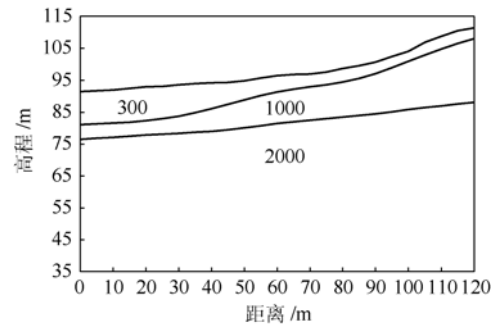


图 3 近地表模型

Fig. 3 Near surface model

### 2.2 时间项反演

进行射线追踪，得到初至旅行时，如图 4 所示。初至旅行时确定后，运用时间项反演模型反演<sup>[4]</sup>：

- 对初至旅行时进行观察、对比分析，初步判断层数；
- 运用旅行时差值曲线方法<sup>[5]</sup>确定层数(图 5)；
- 对各层旅行时进行拾取；
- 反演近地表模型。

通过对初至旅行的观察、对比分析，SP1 旅行时的 3 号点和 SP2 旅行时的 1、4 号点是各自的拐点(旅行时斜率突变点即为拐点)，可以初步判断层数为 2 层，再运用旅行时差值曲线方法进一步确定层数。旅行时差值曲线方法的基本原理是：在相同方向上，来自同一层的不同旅行时的差值曲线应该近似平直，差值曲线的拐点，对应于旅行时的拐点。在图 5 中，曲线 ABCDE 是 SP1 和 SP2 两相邻旅行时的旅行时差值曲线，分析得到：DE 是水平直线，D 点对应的 2 号点是 SP2 旅行时的一个拐点，则 1、2 号两个拐点把 SP2 旅行时分 3 层。对于 SP1 旅行时，ABCD 是曲线，可以确定 SP1 旅行时只有一

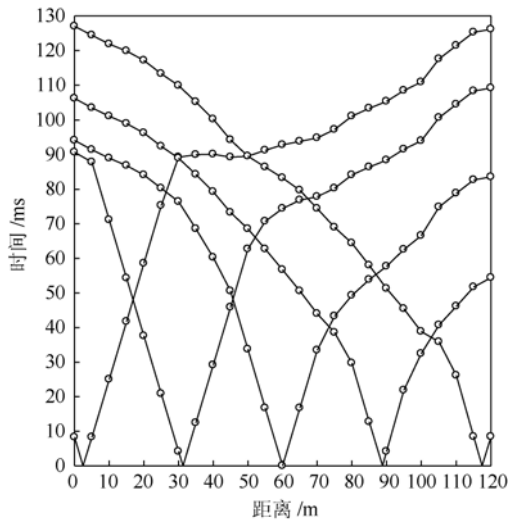


图 4 初至旅行时

Fig. 4 First break travel time

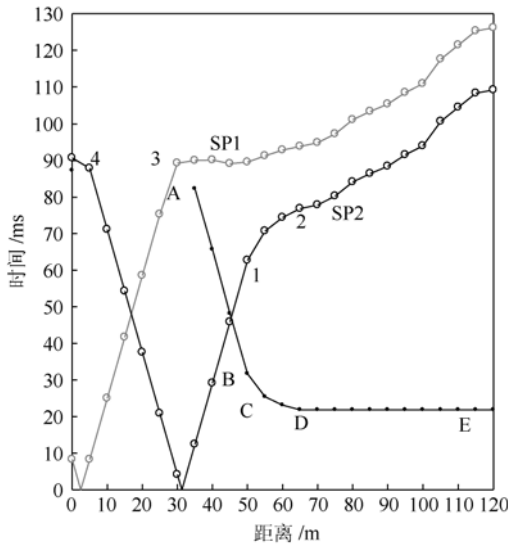


图 5 旅行时差值曲线

Fig. 5 Difference curve of first break travel time

个拐点,再与其它旅行时斜率对比,可以确定第二层的旅行时淹没在第三层中,3号点是 SP1 旅行时的第一层和第三层的分界点。

如图 6 所示,在确定层数为 3 层后,对余下旅行时进行分层拾取。图中,圆圈点代表第一层旅行时;实心点代表第二层旅行时;三角点代表第三层旅行时。在 3 层旅行时拾取完毕后,进行时间项反演,均方根误差  $RMSE=2.74$  ms,反演模型如图 7 所示。

在此,  $RMSE$  是指旅行时的计算值与观测值的误差,  $RMSE$  越小,表明旅行时的计算值与观测值越接近。均方根误差  $RMSE$  公式为:

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{pq} \sum_{x=1}^p \sum_{y=1}^q [C_{xy} - O_{xy}]^2 \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

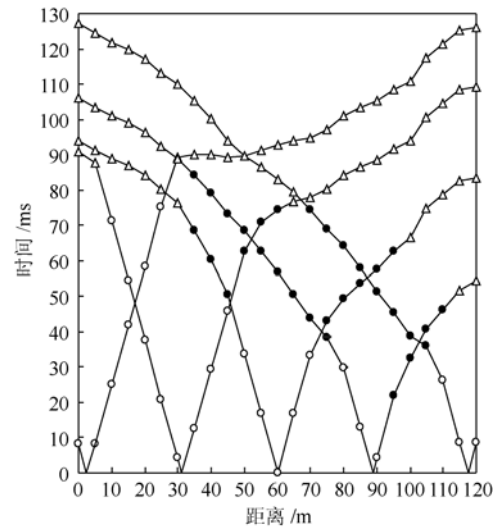


图 6 设定为三层的初至旅行时

Fig. 6 First break travel time of three layers

式中  $C_{xy}$  为第  $x$  炮的第  $y$  个接收点的旅行时的计算值;  $O_{xy}$  为第  $x$  炮的第  $y$  个接收点的旅行时的观测值;  $p$  为炮点数;  $q$  为接收点数。

### 2.3 初始模型与层析反演

对图 7 时间项反演模型离散化,设置网格横向长度为 5 m,层数为 10 层,第 10 层界面高程为 50~70 m,层析反演初始模型如图 8 所示。反演参数设置为:网格节点个数为 3 个,最小速度为 200 m/s,最大速度为 3 000 m/s。迭代次数( $I$ )与  $RMSE$  关系见表 1,反演模型如图 9 所示。

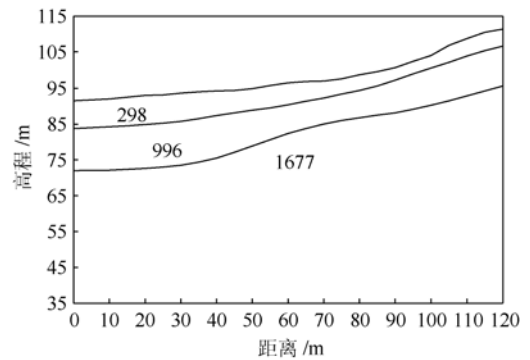


图 7 时间项反演的模型

Fig. 7 Model of time-term inversion

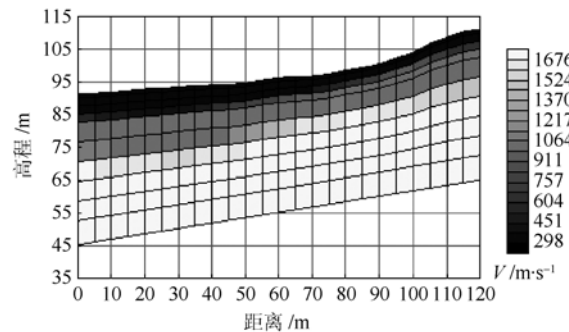


图 8 层析初始模型

Fig. 8 Initial model of tomography inversion

表 1 迭代次数与  $RMSE$  关系表  
Table1 Relation of iteration number and  $RMSE$

ms

迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$RMSE$	3.06	2.37	2.04	1.85	1.68	1.54	1.43	1.34	1.27	1.21	1.15	1.11	1.07
迭代次数	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$RMSE$	1.03	1.00	0.97	0.94	0.92	0.89	0.87	0.85	0.82	0.81	0.79	0.77	0.76
迭代次数	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
$RMSE$	0.74	0.73	0.72	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62
迭代次数	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	...	100
$RMSE$	0.61	0.61	0.60	0.60	0.59	0.59	0.58	0.58	0.58	0.57	0.57	...	0.51

表 2 静校正量表  
Table 2 Statics

坐 标/m	静校正量/ms			坐 标/m	静校正量/ms		
	原始模型	层析反演模型	差值		原始模型	层析反演模型	差值
0	52.54	50.60	-1.94	65	41.47	41.44	-0.03
5	52.57	50.33	-2.24	70	40.26	41.03	0.77
10	52.85	50.24	-2.61	75	40.47	41.18	0.71
15	53.62	50.34	-3.28	80	41.99	41.67	-0.32
20	53.76	50.10	-3.66	85	42.09	41.78	-0.30
25	52.82	49.28	-3.54	90	41.91	42.06	0.15
30	52.39	48.46	-3.93	95	43.00	43.16	0.16
35	50.78	47.10	-3.68	100	43.27	44.51	1.24
40	48.68	45.59	-3.09	105	47.91	47.18	-0.73
45	45.54	43.83	-1.71	110	49.54	48.76	-0.77
50	43.59	42.76	-0.83	115	51.30	50.11	-1.19
55	43.15	42.38	-0.77	120	50.10	50.56	0.46
60	42.48	41.96	-0.52	$RMSE$		2.01	

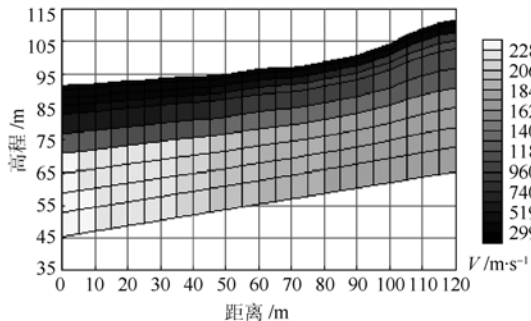


图 9 层析反演模型( $I=100$ )

Fig. 9 Model of tomography inversion ( $I=100$ )

## 2.4 反演效果分析

从表 1 可以看出，反演收敛速度很快。 $I=15$ ， $RMSE=1.00$  ms； $I=100$ ，迭代收敛， $RMSE=0.51$  ms，此时旅行时的计算值与观测值最接近。选取高程 50m 作为静校正基准面，静校正量见表 2。

从表 2 可以看出，静校正量最大误差只有 3.93 ms，最小误差仅为 0.03 ms，静校正量  $RMSE$  为 2.01 ms，因此可知，层析反演模型精度很高。

## 3 结 论

a. 时间项反演不需要进行额外工作，其利用的

初至旅行时正是层析反演最基础的数据；

b. 时间项反演是一种简单、快速的近地表模型反演方法；

c. 时间项反演方法为层析反演建立初始模型，能提高层析反演的精度，加快收敛速度，减少迭代次数。

d. 时间项反演方法为层析反演建立初始模型是可行的。

## 参考文献

- [1] 陈国金, 高志凌, 吴永栓. 井间地震层析成像中自动生成初始速度模型的方法研究[J]. 石油物探, 2005, 44(4): 339-343.
- [2] 左海, 宋小平, 魏庚雨. 折射和层析静校正量计算方法的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(增刊): 35-39.
- [3] 段新标, 金维. 井间地震层析成像初始速度模型[J]. 地球物理学进展, 2007, 12(6): 831-1835.
- [4] 李宇. 走时层析法建立近地表模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
- [5] 李宇, 杨德义, 邓辉, 等. 旅行时差值曲线方法在时间项反演中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(2): 46-49.