

利用上行波进行 VSP 数据旅行时反演

朱 键，王永昌

(西安交通大学理学院，陕西 西安 710049)

[摘 要] 利用双层剥层法同时对层速度和界面形态参数进行反演，并采用最小二乘法迭代求解。为了消除局部极值的影响，减少病态方程的产生，利用了 Monte Carlo 方法调整参数初始值。通过改变参数单位以均衡微分系数矩阵元素等措施，使这种反演方法具有较快的速度和较好的稳定性。对井底以上地层和井底以下地层均适用。

[关键词] 旅行时；反演；微分系数矩阵；局部极值；模型参数

[中图分类号] P631.4 [文献标识码] A [文章编号] 1007-9955(1999)03-0044-05

[第一作者简介] 朱键(1974-),男,在读硕士生,主要以应用物理学为研究方向。

VSP 数据旅行时反演方法的研究前人已做过大量工作，研究的成果已在生产实践中得到广泛应用。进一步改善旅行时反演实用效果的方向之一是同时反演层速度和界面形态两类参数。特别是对于井底下地层，由于缺少井的约束，只能利用上行波，反演存在一定困难。为了消除局部极值的影响，减少病态方程的产生，笔者采用了 Monte Carlo 方法调整参数初始值。利用双层剥层法同时对层速度和界面形态参数进行反演，利用最小二乘法迭代求解。通过改变参数单位以均衡微分系数矩阵元素等措施，使这种反演方法具有较快的速度和较好的稳定性。该法对井底以上、以下地层均适用。

1 方法原理

笔者研究对象为层状均匀介质模型，层界面平直，可以倾斜，可用线性函数表示。给出的或已知的数据是 VSP 记录或下行初至波和 VSP 上行波波至时间，被反演的参数包括，各层的界面斜率 a ，界面和井交点的纵坐标 b 和层速度 v 。这些反演参数可用向量形式表示为：

$$M = (m_1, m_2 \cdots m_n) = (a_1, b_1, v_1, \cdots, a_k, b_k, v_k)$$

其中， n 为被反演参数个数， k 为被反演层数。笔者采用双层剥层法，每次反演两层，所以， $n=6, k=2$ 。

设 (x_i, z_i) ， $i=1, n_y$ 为射线和各界面交点的坐标，则可用模型参数射线追踪得到的旅行时 t^m 和实际资料提取的旅行时 t^r 之差按最小平方形式构成目标函数，即：

$$\varphi(M) = \sum_{i=1}^{n_y} f_i^2(M) = \sum_{i=1}^{n_y} (t_i^r - t_i^m)^2$$
$$t_i^m = \sum_{i=1}^{n_y} \left(\frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{v_i} \right)$$

我们要使目标函数为极小，即用最小二乘法解最优化问题。因为目标函数为非线性，故将其在 M^0 处泰勒展开，取线性项：

$$f(M) = f(M^0) + A(M - M^0)$$

其中， A 为微分系数矩阵，

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1^m}{\partial m_1} & \cdots & \frac{\partial t_1^m}{\partial m_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial t_{n_y}^m}{\partial m_1} & \cdots & \frac{\partial t_{n_y}^m}{\partial m_n} \end{bmatrix}$$

由极值必要条件，

$$\frac{\partial \varphi}{\partial M} = 2 \sum_{i=1}^{n_y} (t_i^r - t_i^m) \frac{\partial t_i^m}{\partial M} = 0$$

可得方程，

$$A^T A \Delta M + A^T \Delta T = 0$$

其中, $M = (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6) = (a_1, b_1, v_1, a_2, b_2, v_2)$, 令 p, q 为检波器序号, $k, k+1$ 为反演层序号, 则有

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_p^m}{\partial a_k} & \frac{\partial t_p^m}{\partial b_k} & \frac{\partial t_p^m}{\partial v_k} & \frac{\partial t_p^m}{\partial a_{k+1}} & \frac{\partial t_p^m}{\partial b_{k+1}} & \frac{\partial t_p^m}{\partial v_{k+1}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_q^m}{\partial a_k} & \frac{\partial t_q^m}{\partial b_k} & \frac{\partial t_q^m}{\partial v_k} & \frac{\partial t_q^m}{\partial a_{k+1}} & \frac{\partial t_q^m}{\partial b_{k+1}} & \frac{\partial t_q^m}{\partial v_{k+1}} \end{bmatrix}$$

矩阵元素取值对于井底以上或以下, 反射或透射可以分 4 种情况, 这里给出井底以下反射的几个偏导数公式

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_i}{\partial a_k} &= \frac{(z_{k+1} - z_k) x_{k+1}}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2 v_k}} - \\ &\quad \frac{(z_{k+2} - z_{k+1}) x_{k+1}}{\sqrt{(x_{k+2} - x_{k+1})^2 + (z_{k+2} - z_{k+1})^2 v_k}} \\ \frac{\partial t_i}{\partial b_k} &= \frac{(z_{k+1} - z_k)}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2 v_k}} - \\ &\quad \frac{(z_{k+2} - z_{k+1})}{\sqrt{(x_{k+2} - x_{k+1})^2 + (z_{k+2} - z_{k+1})^2 v_k}} \\ \frac{\partial t_i}{\partial v_k} &= \frac{-\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2}}{v_k^2} - \\ &\quad \frac{-\sqrt{(x_{k+2} - x_{k+1})^2 + (z_{k+2} - z_{k+1})^2}}{v_k^2} \end{aligned}$$

其余 3 种情况, 即井底以上透射, 井底以上反射, 井底以下透射, 其公式与此类似。用奇异值分解法解:

$$A^T A \Delta M + A^T \Delta T = 0$$

得
$$\Delta M = (A^T A)^{-1} A^T \Delta T$$

则地层参数的近似值为 $M_1 = M^0 + \Delta M$ 。若尚未满足精度要求, 则用 M_1 代替 M^0 重复前面的步骤。直到目标函数精度要求为止。

2 实现

2.1 用双层剥层法对井上层下层参数进行反演

当地层层数较多时, 需反演的参数也随之增加。若同时对各层所有参数进行反演, 必然会使方程的微分系数矩阵维数变得很大, 给求解带来困难。若用剥层法, 每次反演一层, 虽能较快收敛, 但目标函数仅受到一层界面的约束, 即仅有的反射层的约束, 易产生多解性。尤其对于薄层的情况, 携带界面信息的旅行时函数太少, 也会给反演带来困难。为了

解决这个问题, 我们每次反演两层, 有效地降低了微分系数矩阵维数, 且每次反演的两层中有一层参数的初始值是前一次的反演结果。这样既可以有一组较好的初始值, 以提高收敛速度, 又能避免多解性的困扰, 克服薄层情况。

对于井底以上层的情况, 做循环, 每次反演两层, 依次为一二层, 二三层……, 用输入参数做初始值, 调用射线追踪子程序, 求得该两层中各检波器得到的一次反射波旅行时及反射波与各层交点坐标。然后调用反演子程序, 用最小二乘法得到两层界面 6 个参数的增量。修正界面参数, 并用新的模型参数重新进行射线追踪, 反复迭代, 直到旅行时误差达到精度要求, 此时的模型参数即为反演结果。对于井底以下层, 方法类似, 只是每次反演两层, 依次为井上最后一层和井下第一层, 井下一二层, 二三层……直到井下最后两层。研究表明, 这种方法获得了较好的效果。

2.2 通过改变参量单位均衡雅可比矩阵元素值

解方程是反演的关键, 其成功与否取决于微分系数矩阵的性态。当矩阵元素的数量级差别较大时, 求解往往失败, 而通过均衡矩阵元素, 可改进矩阵的性态, 使方程的求解稳定且收敛。例如, 对于一个两层模型, 若距离单位取 m, 速度单位取: m/s。则反演时, 取雅可比矩阵中任一行元素:

$$\begin{aligned} &-1.610 \ E-6 \quad -1.282 \ E-8 \quad 1.462 \ E-9 \\ &-1.111 \ E-6 \quad -2.578 \ E-8 \quad 9.300 \ E-10 \end{aligned}$$

其数量级相差 10^4 以上。经第一轮反演, 参数增量 ΔM 为:

$$\begin{aligned} &0.435 \ 3 \ D+2 \quad -0.160 \ D+5 \quad -0.178 \ 3 \ D+6 \\ &0.217 \ 3 \ D+2 \quad -0.535 \ D+4 \quad 0.123 \ D+5 \end{aligned}$$

该方向并非目标函数减小的方向, 进一步观察表明, 迭代不收敛, 反演失败。

如果改变距离单位为: hm, 速度单位为: hm/s, 则反演时, 取雅可比矩阵中任一行元素:

$$\begin{aligned} &1.578 \ E-2 \quad 1.187 \ E-2 \quad -1.402 \ E-3 \\ &1.830 \ E-2 \quad 2.906 \ E-2 \quad -1.021 \ E-3 \end{aligned}$$

其数量级相差 10。经第一轮反演, 参数增量 ΔM 为:

$$\begin{aligned} &0.722 \ D-1 \quad -0.673 \ D-2 \quad -0.130 \ D+1 \\ &-0.412 \ D-2 \quad 0.370 \ D-1 \quad -0.199 \ D+1 \end{aligned}$$

该方向为目标函数减少的方向, 进一步观察表明, 方程的解稳定且收敛, 经 19 次迭代, 目标函数减少到精度要求, 反演成功。

2.3 用 Monte Carlo 方法对模型进行随机扰动

模型初始值的给定非常重要,关系到反演的速度与成败。一般模型初始值是通过 VSP 资料进行预处理得到的,是对真实值的估计,具有一定可信度,但又存在误差。当初始值处于目标函数局部极值附近时,就有可能使迭代陷入局部极值,而无法逼近最小值,或者,当初始值偏差较大时,迭代有可能不收敛,使解方程失败。在这些情况下,我们通过在一定范围内给模型初始值一个随机扰动,对其进行调整,从而使反演具有跳出局部极值的能力,或在迭代发散时,回到一个新的初值,重新开始反演。具体步骤如下:

- (1) 根据 VSP 资料预处理得到的模型初始值确定各参数值的先验范围。
- 界面与井交点纵坐标: $(b-\Delta b, b+\Delta b)$ 其中, b 为预处理得到的界面与井交点纵坐标, Δb 为 0.5 倍或 1 倍检波器间隔。
- 层速度 V_{\min}, V_{\max} 分别为预处理得到的各层速度的最大值和最小值。

- 界面斜率 k_{\min}, k_{\max} 分别为预处理得到的各层界面斜率的最大值和最小值。
- (2) 在给定的先验范围内,按一定概率密度随机生成模型初始值。
- (3) 进行迭代反演,若发现迭代发散或收敛到局部极值,则舍弃原有模型初始值,回到(2),重新随机生成模型初始值进行迭代反演。
- (4) 重复上面的步骤,直到反演成功。
- 实践结果表明,这种随机调整模型初始值的方法是非常必要的。

3 实例及讨论

利用以上所述方法对一个 9 层模型进行反演,其中井上 6 层,井下 3 层。模型参数距离单位 hm ,速度单位为 m/s ,时间单位为 s ;震源坐标 $(2.10,0)$,第一个检波器坐标 $(0,0.50)$,检波器间隔 (0.08) ,检波器总数 (64) ,各层的倾角,界面与井交点的纵坐标

表 1 9 层模型反演结果

层号	界面斜率				层速度			
	理论值	初始值	反演值	误差%	理论值	初始值	反演值	误差%
井上 1	0.083 75	0.000 00	0.083 70	0.06	28.14	40.00	28.136	0.02
井上 2	0.000 00	0.000 00	0.000 02	/	38.12	40.00	38.121	0.00
井上 3	0.000 00	0.000 00	0.000 02	/	41.23	40.00	41.224	0.01
井上 4	0.016 25	0.000 00	0.016 32	0.42	48.00	50.00	48.002	0.00
井上 5	0.055 00	0.000 00	0.056 55	1.19	64.13	60.00	64.178	0.07
井上 6	0.083 75	0.000 00	0.083 61	0.16	60.15	60.00	60.146	0.01
井下 1	0.083 75	0.000 00	0.081 88	2.23	56.50	60.00	57.121	1.10
井下 2	0.000 00	0.000 00	0.002 51	/	65.00	70.00	64.052	1.46
井下 3	0.055 00	0.000 00	0.041 33	24.86	70.00	75.00	88.920	27.03

层号	界面深度				迭代次数	反演两层时间/s	每次迭代时间/s	总时间/s
	理论值	初始值	反演值	误差/%				
井上 1	0.940 75	1.000 00	0.940 35	0.043	井上 12	20	3	0.2
井上 2	1.521 00	1.500 00	1.520 92	0.005	井上 23	10	3	0.3
井上 3	2.236 00	2.200 00	2.235 97	0.001	井上 34	32	26	0.8
井上 4	3.067 25	3.000 00	3.067 15	0.003	井上 45	18	9	0.5
井上 5	3.479 00	3.500 00	3.479 18	0.005	井上 56	11	10	0.9
井上 6	4.010 75	4.000 00	4.010 88	0.003	井上 6	8	15	1.9
井下 1	4.785 75	4.800 00	4.796 13	0.217	井下 1			
井下 2	5.844 00	5.800 00	5.835 52	0.145	井下 12	6	20	3.3
井下 3	6.544 00	6.500 00	6.671 29	1.950	井下 23	15	23	1.5

和层速度见表 1 中的理论值。界面形态及速度的反演效果见图 1。从表 1 反演结果上看,这种方法能够以较高的精度,较快的速度,较少的迭代次数对井上,井下各层进行反演。最后一层的误差比较大,是因为它仅作为反射层被反演了一次,约束条件不够,受到了多解性的影响。

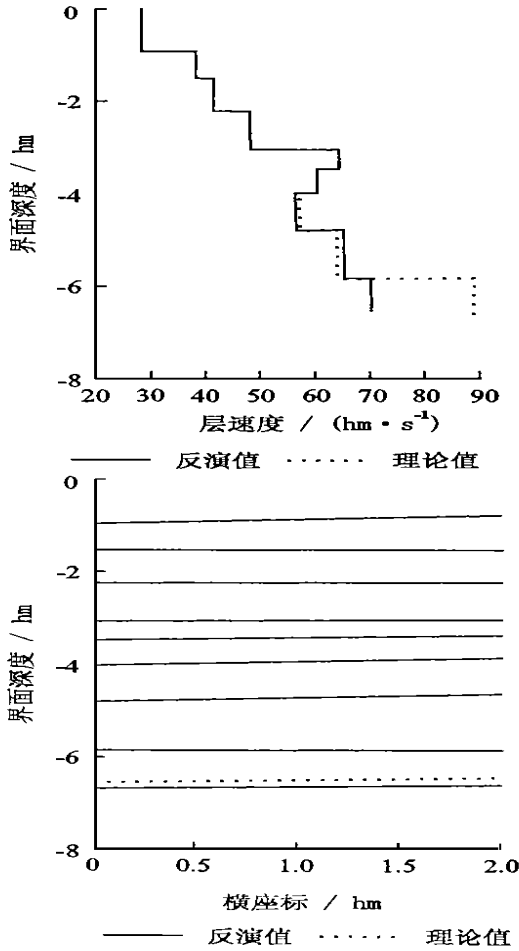


图 1 界面形态及速度反演效果图

下面讨论总层数,旅行时误差对反演的影响。

总层数的影响:由于采用双层剥层法,无论总层数是多少,每次都只反演两层,6 个参数,用最小二乘法迭代求解时所建立的方程组规模也基本不变,所以总层数对反演的误差精度,迭代次数不应有大的影响。但从表 1 中可以发现随着反演层深度的增加,反演精度有所降低,迭代次数有所增加,这是由于误差积累造成的。另外,还可以发现,随着反演层序号的增加,每次迭代所用的时间明显增加,这是由于地震波所走的路径变长了,每次迭代时,进行射线追踪所需的时间增加了。

旅行时误差的影响:旅行时是从 VSP 资料中拾取的,与期望值之间总存在一定误差,下面我们使旅

行时数据产生不同大小的随机误差,研究误差大小对反演结果的影响可分两种情况讨论:

(1) 使所有检波器得到的旅行时均产生一定误差 ΔE , 观察不同大小的误差对层深度,层速度反演结果的影响(图 2)。

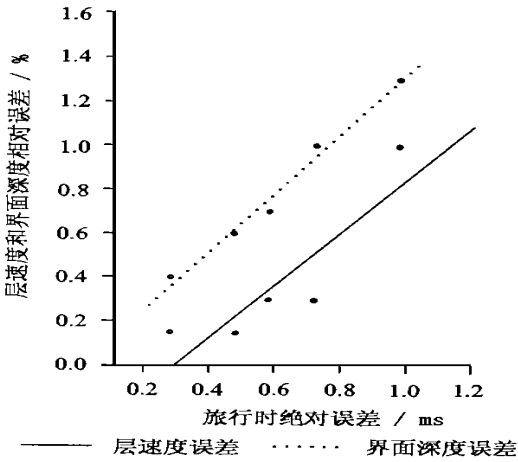


图 2 系统误差对反演的影响

(2) 使某一个检波器(这里选第 20 个检波器)得到的旅行时产生一定误差 ΔE , 观察不同大小误差对层深度、层速度反演结果的影响(图 3)。

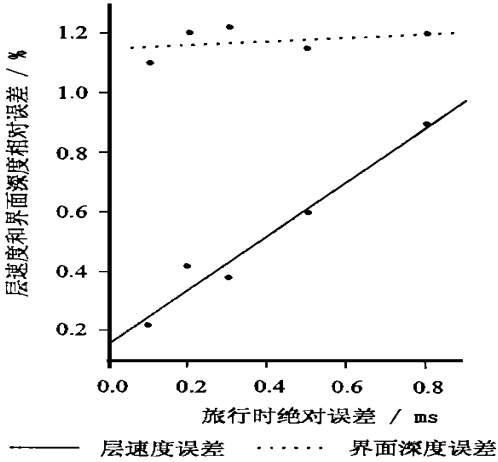


图 3 个别误差对反演的影响

对比图 2,图 3 发现,普遍误差和个别误差都会影响反演精度,随着旅行时误差的增加,反演结果的误差也增加。且个别误差影响大于普遍误差的影响。但由于每层中检波器得到的旅行时随检波器深度呈线性变化,所以通过线性回归可消除个别误差。

4 结论

利用上行波对 VSP 数据进行旅行时反演的方

法。它不仅能对层速度进行反演,而且能同时反演层界面的倾角和深度。由于这种方法只需要上行波数据,所以对于井底以下层也适用。文中注意到影响反演质量的主要因素在于局部极值的存在和病态方程的出现等,相应采用了 Monte Carlo 方法调整参数初始值,通过改变参数单位以均衡微分系数矩阵元素等措施,使目标函数能够稳定的收敛到极值。为了提高反演速度,采用了双层剥层法,在保证足够的旅行时信息及不产生多解性的前提下,最大限度的减少了反演的参数。从在微机上的实践结果看,这种方法是可行的。

[参 考 文 献]

- [1] 朱光明·垂直地震剖面方法[M]·北京:石油工业出版社,1988.
- [2] 朱光明,胡建平·零偏移距 VSP 射线追踪模型[J]·石油物探,1985(4):32—41.
- [3] 周熙襄,钟本善·用旅行时反演确定层速度的横向变化[J]·石油地球物理勘探,1992,27(1):59—73.
- [4] 陈明逵,凌永祥·计算方法教程[M]·西安:西安交通大学出版社,1992.
- [5] 南京大学数学系计算数学专业编·最优化方法[M]·北京:科学出版社,1978.

TRAVEL TIME INVERSION OF VSP USING UPWARD WAVE

ZHU Jian , WANG Yong-chang

(Science College , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 , China)

[Abstract] In this paper, we use the double layer stripped method to perform the simultaneous inversion of velocity and interface shape parameters, using the least - square algorithm to solve the iterative equation. In order to avoid the infection of local extremum and to reduce the morbid equation, we use the Monte Carlo algorithm to adjust the initial model and get the equalization of Jacobi matrix elements by changing the parameter units. So the inversion process has good stability and high speed. This method will be used to invert the layers above the well bottom as well the layers below the well bottom.

[Key words] travel time; inversion; differential coefficient matrix; local extremum; model parameter

(上接第 43 页)

VSPCDP IMAGING SIMULTANEOUSLY OF REFLECTED AND REFRACTED WAVES

WANG Yu-gui , ZHU Guang-ming

(Applied Geophysical Institute , Xi'an Engineering University , Xi'an 710054 , China)

[Abstract] VSPCDP stacking is one of the important VSP data processings. The previous imaging method dealt with only reflected wave. However, refracted wave often becomes first break for both the large offset data and the shallow data, pseudo events are often formed in reflected wave imaging. In this paper, the authors introduce VSPCDP simultaneous imaging with both reflected and refracted waves. It has been confirmed by numerical modeling that imaging strategy is very effective for either the VSP data of large offset or the VSP data of large velocity gradient, while wrong image is often produced by reflected wave VSPCDP stacking method.

[Key words] VSPCDP stacking; ray tracing; reflected wave; refracted wave