

起伏地表下合成震源记录剩余偏移速度分析

王昌龙^{*1,2}, 张叔伦¹

(1. 大连理工大学 应用数学系, 辽宁 大连 116024;

2. 中国石油集团东方地球物理公司 物探技术研究中心, 河北 涿州 072751)

摘要: 提出一种起伏地表下新的剩余偏移速度分析方法. 应用控制照明技术, 克服了由于在起伏地表上合成的震源波场不是平面波震源波场而不能应用剩余速度校正公式的障碍, 使得射线参数在偏移和速度分析过程中保持一致, 且避免了因横向变速而导致的平面波震源波场在传播过程中的畸变. 利用改进的合成震源记录叠前深度偏移, 直接从起伏地表延拓波场和成像, 偏移前无需对地震数据做静校正或重定基准面. 合成数据试算表明该方法是有效和实用的.

关键词: 起伏地表; 合成震源记录; 剩余偏移速度分析; 控制照明

中图分类号: P631.443 **文献标志码:** A

0 引言

速度-深度模型的精确性是成像质量的关键. 在勘探地球物理发展的历史中, 精确有效地确定速度-深度模型始终是一个非常活跃的课题. 自20世纪80年代中期以来, 各种偏移速度分析方法相继被提出. 例如, Yilmaz等^[1]提出的速度分析方法, 其偏移是在空间-波数域中进行的, 不能横向变速; Yahya^[2]分别推导出不同的分析函数来描述真实速度与共成像点道集(CIG)中偏移距之间的关系. 他们的工作都基于小倾角、小偏移距以及常速的假设之下, 而且都在偏移距-深度域中, 采用剥层的方法来推导层速度. 由于叠前深度偏移比较费时, 这些方法很难在生产中被广泛应用. Jiao等^[3]提出一种平面波域剩余偏移速度分析方法, 在克希霍夫叠前深度偏移之后对共成像点道集内所有反射层从上到下进行剩余速度校正, 这样在每一次速度修正迭代中只做一次偏移, 因而大大减少了计算量. 但是在做偏移之前需要把空间-时间($x-t$)域的炮集数据通过 $\tau-p$ 变换转到平面波域.

合成震源记录叠前深度偏移是基于波动方程的波场延拓类偏移方法. 在做速度分析时采用该

方法可以避免上文所提到的在偏移之前必须进行 $\tau-p$ 变换, 从而减小了计算量. 偏移采用平面波震源, 与剩余偏移速度分析中速度校正公式的基本假设一致, 可以消除因算法不一致而导致的人为误差. 偏移后的数据在深度-射线参数($z-p$)域, 可直接抽取共成像点道集, 进行速度分析.

波场延拓类偏移方法是在平表面情况下导出的. 对于在起伏面上采集的地震数据, 通常的做法是使用静校正或波动方程重定基准面的方法, 将起伏表面转换到平表面上, 然后再做偏移. 1991年, Reshef^[4]提出了一种从起伏面上偏移的递归波场延拓方法. 该方法在偏移前不需要对地震数据做静校正或重定基准面, 对于起伏面的不规则程度以及地下构造的复杂程度没有任何限制. 本文将这种方法推广应用到合成震源记录叠前深度偏移, 并与控制照明^[5]相结合应用于剩余速度分析, 把基于平地表的速度校正公式推广应用到起伏地表的情况.

1 方法原理

合成震源记录叠前深度偏移的方法原理见文献^[5]. 下面详细阐述在起伏地表条件下如何进行合成震源记录剩余偏移速度分析.

收稿日期: 2007-03-14; 修回日期: 2009-01-20.

作者简介: 王昌龙^{*}(1977-), 男, 博士; 张叔伦(1941-), 男, 教授, 博士生导师.

上行波方程是合成震源记录偏移波场延拓的基本方程. 在直角坐标系下, 频率-空间域的上行波方程为

$$\frac{\partial p(x, z, \omega)}{\partial z} = i \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} p(x, z, \omega) \quad (1)$$

其中 $p(x, z, \omega)$ 表示横向位置 x 、深度位置 z 处, 角频率为 ω 的上行波波场; $i = \sqrt{-1}$; v 为波的传播速度. 假设合成震源记录中只包含上行波, 由于地震波场满足叠加原理, 在起伏地表条件下, 设起伏地表可表示为

$$z = f(x), \quad x \in [0, x_{\max}]$$

令 $z_1 = \min f(x)$, $z_2 = \max f(x)$, 当 $z \in [z_1, z_2]$ 时, 上行波波场可表示为

$$p(x, z, \omega) = \bar{p}(x, z, \omega) + \check{p}(x, z, \omega) \quad (2)$$

其中 \bar{p} 为起伏地表上的合成震源记录波场, \check{p} 为从上层延拓下来的波场. 上行波方程是拟微分算子, 一般要用其有角度限制的近似方程代替, 设上行波的向下延拓算子为 ω_{\downarrow} , 则有

$$\check{p}(x, z, \omega) = \omega_{\downarrow} [p(x, z - \Delta z, \omega)] \quad (3)$$

其中 Δz 表示延拓步长.

把式(1)等号的右边加上负号, 即为下行波方程. 对于下行波, 有类似的结果, 当 $z \in [z_1, z_2]$ 时, (x, z) 处角频率为 ω 的下行波波场 $s(x, z, \omega)$ 可表示为

$$s(x, z, \omega) = \bar{s}(x, z, \omega) + \check{s}(x, z, \omega) \quad (4)$$

其中 \bar{s} 是该处的合成震源波场, \check{s} 是从上层延拓下来的波场:

$$\check{s}(x, z, \omega) = \omega_{\downarrow} [s(x, z - \Delta z, \omega)] \quad (5)$$

其中 ω_{\downarrow} 表示下行波的向下延拓算子, ω_{\downarrow} 和 ω_{\uparrow} 互为逆算子.

依据式(2)和(4), 从起伏面上直接做合成震源记录叠前深度偏移时, 计算网格 (x, z) 应该包含起伏面, 对高于起伏面最高点的空间位置, 令波场值为零. 当延拓到起伏面时, 加入相应位置的震源波场和合成震源记录. 当延拓到起伏面以下时, 起伏面不再影响下行波和上行波的波场延拓.

剩余偏移速度分析校正公式的基本假设是波前面为平面波. 在起伏地表条件下, 地面合成的震源波场不是平面波震源波场, 另外由于横向变速, 平面波震源波场在波场外推过程中也会发生畸变, 使得波前面不再是平面波. 为了解决这一问题, 本文在合成震源记录叠前深度偏移中引入控制照明技术. 控制照明技术是把平面波震源波场设定在地下所需深度位置 z_n , 表示为 $s_0(x, z_n, \omega)$,

z_n 应大于 z_2 . 然后将这一波场向上延拓到地表得到合成震源并进而计算出合成震源记录, 设为 $\bar{s}(x, z = f(x), \omega)$ 和 $\bar{p}(x, z = f(x), \omega)$. 由于上、下行波算子互为逆算子, 当把地表的合成震源再向下延拓到 z_n 时, 显然得到的仍为平面波波场 $s_0(x, z_n, \omega)$. 这样再对 z_n 下的地层进行速度分析时, 满足剩余偏移速度分析校正公式的假设条件, 并且可以有效避免平面波的波前畸变, 使剩余速度校正更加准确.

叠前深度偏移之后, 数据被转换到深度-射线参数 $(z-p)$ 域, 可以直接抽取共成像点道集. 如果用正确的速度做偏移, 则共成像点道集中的同相轴应该被拉平; 如果偏移速度不准, 同相轴上就会显示出深度剩余(当偏移速度小于正确速度时, 同相轴向上弯曲; 反之, 同相轴向下弯曲). 通过对共成像点道集进行分析, 可以求出深度剩余量. 对于 n 层介质, 剩余偏移速度分析校正公式可表示为^[3]

$$z_{\text{res}}(p) = \sum_{j=1}^n \Delta z_j^m(p) \left\{ \frac{[(u_j^m)^2 - p^2]^{1/2}}{(u_j^2 - p^2)^{1/2}} - 1 \right\} \quad (6)$$

其中下标 j 代表层位序号, Δz_j^m 为第 j 层的厚度, u_j 和 u_j^m 分别为第 j 层的真实慢度和偏移所用的试验慢度, p 为射线参数. 而真实深度 z 可由下式^[3]得到:

$$z = z^m(p) + z_{\text{res}}(p) \quad (7)$$

其中 z^m 为用试验速度得到的偏移深度.

2 实现步骤

(1) 确定包含起伏面的计算网格, 根据 Dix 公式给定初始速度-深度模型.

(2) 给定位于起伏面以下的控制照明深度, 该深度随迭代次数的增加而增加.

(3) 执行带控制照明的合成震源记录叠前深度偏移. 在起伏面的最低点以上, 每一个延拓步都判断是否存在合成震源和合成震源记录. 如果存在, 根据式(2)和(4), 就在延拓到该层的下行波和上行波波场中增加这些合成波场.

(4) 选择并抽取共成像点道集.

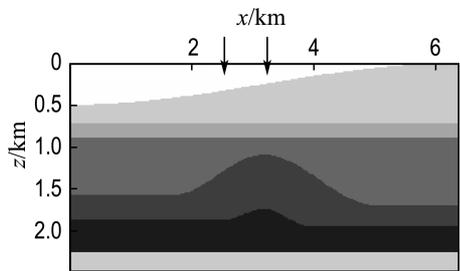
(5) 对所抽取的共成像点道集进行剩余速度校正并从剩余偏移速度谱上选择层速度和层厚度.

(6) 对所得到的速度-深度值进行样条插值, 得到新的速度-深度模型.

(7) 用新的速度-深度模型代替初始模型,重复过程(2)~(6),直到得到满意的结果.

3 模型试算

图1为产生合成记录的带起伏地表的5层模型速度场,起伏面高程曲线如图2所示,起伏面下第1层到第5层的速度分别为2.2、2.7、3.6、4.2和5.0 km/s.炮记录由伪谱法产生,共计256炮,炮间距25 m,时间采样间隔4 ms.速度分析所用的初始速度-深度模型为 $v=1.8$ km/s 的常数速度场.图3和4分别为第1次和第2次迭代后得到的模型.图5和6分别为不同位置处共成像点道集的变化图.3次偏移控制照明深度分别为0.5、1.0和2.0 km.可以看出,经过两次迭代后,所得模型与真实模型之间已经没有太大区别,共成像点道集中的同相轴也均已被拉平,验证了本文所提方法的有效性,而且计算效率也比较高.图7所示为CIG130在两种不同情况下的偏移效果对比.它们使用相同的速度-深度模型(图4),图7(a)为控制照明深度为2.0 km的偏移结果,图7(b)为不使用控制照明的偏移结果,从这两幅图对比可以看出,由于控制照明消除了平面波的波前畸变,共成像点道集中的同相轴更容易被拉平.



左侧箭头:CIG 100 的位置 ($x=2.50$ km), 右侧箭头:CIG 130 的位置 ($x=3.25$ km)

图1 带起伏地表的5层模型速度场

Fig.1 Velocity field of five layers model with irregular surface

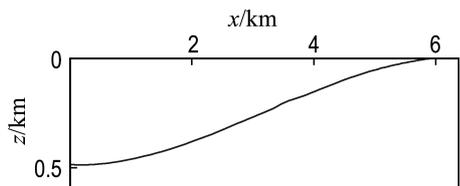


图2 计算网格(x, z)中的起伏面高程曲线图

Fig.2 Elevation graph of irregular surface in computing grid (x, z)

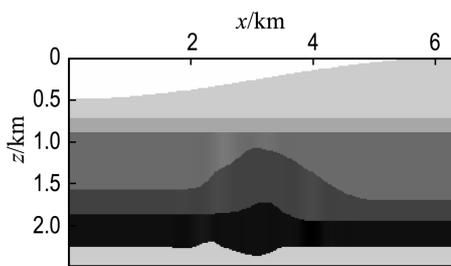


图3 第1次迭代后的速度-深度模型

Fig.3 Velocity-depth model after the first iteration

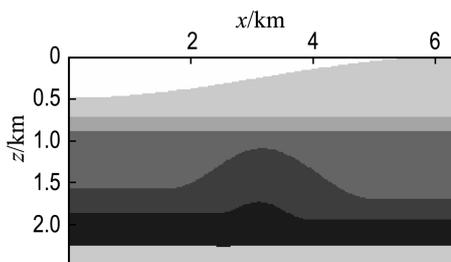
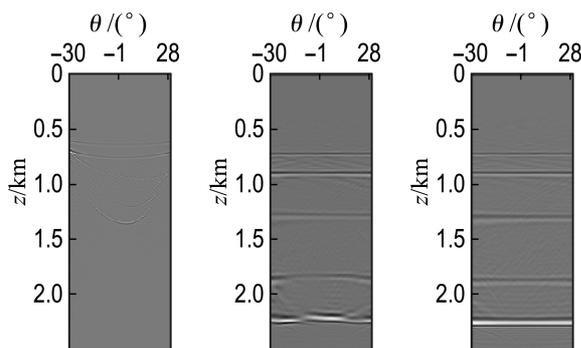


图4 第2次迭代后的速度-深度模型

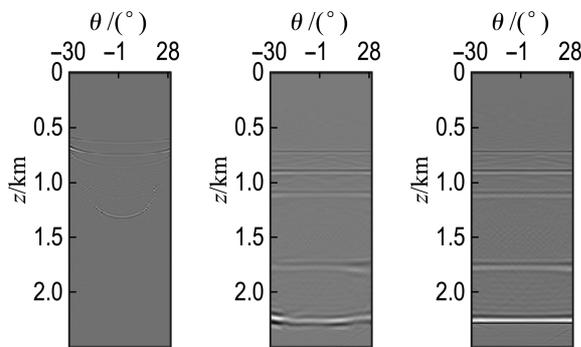
Fig.4 Velocity-depth model after the second iteration



(a) 初始模型 (b) 第1次迭代后的模型 (c) 第2次迭代后的模型

图5 $x=2.50$ km 处的共成像点道集 100

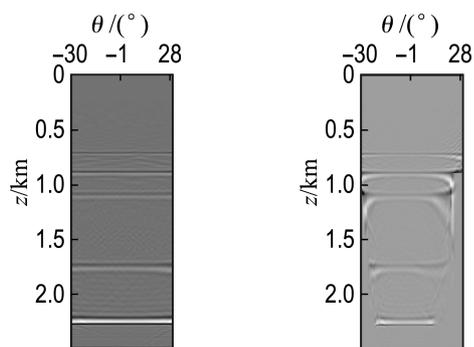
Fig.5 CIG100 located at $x=2.50$ km



(a) 初始模型 (b) 第1次迭代后的模型 (c) 第2次迭代后的模型

图6 $x=3.25$ km 处的共成像点道集 130

Fig.6 CIG130 located at $x=3.25$ km



(a) 控制照明深度 2.0 km (b) 无控制照明

图 7 $x=3.25$ km 处的 CIG130 在两种不同情况下的偏移效果对比图

Fig. 7 Comparison of migration results in two different conditions for CIG130 located at $x=3.25$ km

4 结 论

理论分析和试算表明,利用合成震源记录叠前深度偏移,直接从起伏表面进行波场延拓和偏移,无需做 τ - p 变换,偏移后在 z - p 域直接生成共成像点道集,方法简单、自然、效率高;偏移中控制照明技术的应用,克服了由于起伏地表上合成

的震源波场不是平面波震源波场而不能应用速度校正公式的障碍,且可以避免平面波波前因横向变速发生畸变,使得偏移和速度分析过程中的射线参数保持一致,从而减小了速度分析的误差.本文提出的方法是一种有效简洁实用的起伏地表条件下剩余偏移速度分析方法.

参考文献:

- [1] YILMAZ O, CHAMBERS R. Migration velocity analysis by wave-field extrapolation [J]. *Geophysics*, 1984, **49**(10):1664-1674
- [2] YAHYA K A. Velocity analysis by iterative profile migration [J]. *Geophysics*, 1989, **54**(6):718-729
- [3] JIAO J, STOFFA P L, SEN M K, *et al.* Residual migration-velocity analysis in the plane-wave domain [J]. *Geophysics*, 2002, **67**(4):1258-1269
- [4] RESHEF M. Depth migration from irregular surfaces with depth extrapolation methods [J]. *Geophysics*, 1991, **56**(1):119-122
- [5] RIETVELD W E A, BERKHOUT A J. Prestack depth migration by means of controlled illumination [J]. *Geophysics*, 1994, **59**(5):801-809

Synthetic source record residual migration velocity analysis with irregular surface

WANG Chang-long^{*1,2}, ZHANG Shu-lun¹

(1. Department of Applied Mathematics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. R & D Center, BGP CNPC, Zhuozhou 072751, China)

Abstract: A new residual migration velocity analysis (RMVA) method with irregular surface is proposed. Using the controlled illumination technique, the difficulty that the velocity correction formulae can not be used because the source wave field synthesized at the irregular surface is not the plane wave source wave field, is overcome which keeps the consistent ray parameters in both migration and velocity analysis, and the severe distortion of the plane wave source wave field caused by the lateral velocity variation during extrapolation is avoided. The improved synthetic source record prestack depth migration (PSDM) method is used to extrapolate wave field and image the data directly from the irregular surface without any datuming or elevation static corrections before applying the migration. The results of synthetic data test demonstrate that the method is valid and practical.

Key words: irregular surface; synthetic source record; residual migration velocity analysis; controlled illumination