

文章编号: 1000-2634(2008)01-0043-04

# 非零偏移距 DSR 叠前深度偏移\*

刘文革<sup>1</sup>, 贺振华<sup>1,2</sup>, 黄德济<sup>1</sup>, 杜增利<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学信息工程学院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059)

**摘要:** 提出了非零偏移距域双平方根算子的叠前深度偏移法, 该方法根据不同速度模型, 通过精确正演模型数据, 利用双平方根方程进行偏移, 实现了偏移成像和动力学特性研究。研究认为: 采用中点-半偏移距域的双平方根算子的叠前深度偏移方法, 能够适应横向速度变化, 具有精度高、无频散、背景噪声弱、耗时短等优点。对岩性油气藏勘探有重要意义。

**关键词:** 波动方程; 叠前深度偏移; 数值模拟; 非零偏移距; 双平方根算子

**中图分类号:** TE132; P315.3

**文献标识码:** A

## 引言

在实际地震资料处理中, 偏移归位是精确成像的关键环节。近年来虽然出现了众多高精度叠后偏移成像方法, 但都无法避免水平叠加引起的误差, 当地层倾角较大或速度横向变化剧烈时, 会造成共中心点道集非同相叠加, 影响偏移成像效果。目前理想的解决方案是对地震资料直接进行叠前偏移。

1978年 Stolt 最先提出  $f-k$  域波动方程叠前偏移方法, 其基本思想是在频率-波数域一次性完成地震资料的动校正、叠加和归位<sup>[1-4]</sup>, 在波场外推时采用单平方根算子, 偏移之前震源需要预先设定。1979年 Yilmaz 提出双平方根算子的扩展相移叠前偏移方法, 在共中心点道集上将不同偏移距的地震道同时向下延拓<sup>[5-7]</sup>。1996年 Popovici 给出中点-半偏移距域的基于分步傅立叶的 DSR 叠前深度偏移公式, 进而将叠前深度偏移方法推广应用于不同复杂构造、速度横向变化的情形<sup>[8-12]</sup>。2003年王华忠、程玖兵等在国内首先利用稳相法实现基于双平方根方程的共方位角叠前深度偏移<sup>[13]</sup>。2007年陈金波等人提出对积分方程核函数进行分离变量把非线性系统转化为线性系统, 间接求解双平方根方程波场延拓算子<sup>[14]</sup>。虽然基于波动理论的叠前偏移成像方法正受到重视, 但目前的研究仍处于偏移算

法的试验阶段, 对其适用范围及处理效果仍缺乏全面认识。本文基于双平方根算子的叠前深度偏移理论分析, 通过正演与偏移的有机结合, 实现偏移成像和动力学特征分析研究。

## 1 波场传播理论

### 1.1 叠前偏移成像原理

假定激发点  $S$  和检波点  $G$  位于一条直测线上,  $S$  和  $G$  的坐标分别为  $(x_s, z_s)$ 、 $(x_g, z_g)$ 。如果将  $S$  和  $G$  布放在地表, 令  $z_s = z_g = 0$ ,  $S$  和  $G$  间距离为  $2h$  (炮检距), 此时设两者的中点 (多次覆盖的共中心点) 为  $M$ , 其坐标为  $(x_m, 0)$ , 于是有

$$x_m = \frac{1}{2}(x_s + x_g), h = \frac{1}{2}(x_g - x_s) \quad (1)$$

将地面接收到的波场记录表示为  $\Psi(x_s, x_g, z, t)$ , 记录也可用共中心点  $M$  的水平坐标  $x_m$  及半炮检距  $h$  来表示, 记为  $P(x_m, h, z, t)$ 。

设想将检波点  $G$  向下延拓至反射点  $R$ , 再用互换原理将位于  $R$  处的  $G$  点交换到地面  $S$  处, 将  $S$  交换到  $R$ , 然后将  $G$  第二次从地面延拓到  $R$ , 则此时  $S$ 、 $G$  共同位于  $R$  点,  $S$  至  $G$  之间的炮检距  $2h = 0$ , 地震波由  $S$  传至  $G$  的时间也为 0, 因此对于多次覆盖地震资料而言, 地下反射点位于  $h = 0$  和  $t = 0$  的地方 (图

\* 收稿日期: 2007-06-28

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20040616001)。

作者简介: 刘文革(1972-), 男(汉族), 新疆石河子人, 博士研究生, 主要从事地震正、反演方法研究及地震资料处理。

1)。图中,  $z_1, z_2, \dots, z_n$  为新的观测位置所在深度, 波传播时间和炮检距随炮检点深度下延而逐渐减小。

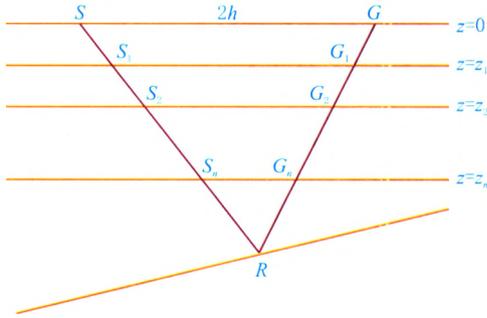


图1 测线下延示意图

$$\frac{\partial \bar{\Psi}(k_s, k_c, z, \omega)}{\partial z} = i \frac{\omega}{v(z)} \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{v(z)k_c}{\omega}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{v(z)k_s}{\omega}\right)^2} \right] \bar{\Psi}(k_s, k_c, z, \omega) \quad (3)$$

其中,  $k_s$ —波场在炮点坐标方向的波数;  $k_c$ —波场在检波点坐标方向的波数;  $\omega$ —时间频率。

$$\frac{\partial P(m, h, z, t)}{\partial z} = \left[ \sqrt{\frac{1}{v^2(z)} - \frac{1}{4} \left(\frac{dt}{dm} + \frac{dt}{dh}\right)^2} + \sqrt{\frac{1}{v^2(z)} - \frac{1}{4} \left(\frac{dt}{dm} - \frac{dt}{dh}\right)^2} \right] \frac{\partial P(m, h, z, t)}{\partial t} \quad (4)$$

频率 - 波数域波场值  $\bar{P}(k_m, k_h, z, \omega)$  所满足的双平方根方程为

$$\frac{\partial \bar{P}(k_m, k_h, z, \omega)}{\partial z} = ik_z \bar{P}(k_m, k_h, z, \omega) = i \left[ \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2(z)} - \left(\frac{k_m + k_h}{2}\right)^2} + \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2(z)} - \left(\frac{k_m - k_h}{2}\right)^2} \right] \bar{P}(k_m, k_h, z, \omega) \quad (5)$$

式中,  $k_m$ —波场在中点坐标方向的波数;  
 $k_h$ —波场在半偏移距方向的波数;

$k_z$ —垂向波数。

从而得到延拓层内波场外推成像公式

$$P(k_m, h = 0, z + \Delta z, t = 0) = \int d\omega \int dk_h e^{ik_z} \bar{P}(k_m, k_h, z, \omega) \quad (6)$$

式中

$$\bar{P}(k_m, k_h, z, \omega) = \int dt e^{-i\omega t} \int dm e^{-imk_m} \int dh e^{-ikh} P(m, h, z, t)$$

式(6)为不考虑速度横向变化的叠前时间偏移波场

$$\begin{aligned} S(x_s, z) &= \frac{1}{v(x_s, z)} = \frac{1}{v(z)} + \Delta S(x_s, z) = S_0(z) + \Delta S(x_s, z) \\ S(x_c, z) &= \frac{1}{v(x_c, z)} = \frac{1}{v(z)} + \Delta S(x_c, z) = S_0(z) + \Delta S(x_c, z) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $S(x_s, z), S(x_c, z)$ —炮点、检波点所在位置处的慢度,  $S_0(z)$ —背景慢度。

### 1.2 波场延拓

将地面波场记录向下延拓时(设炮点、检波点延拓相同的深度  $z = z_s = z_c$ ), 假设速度在延拓层内无横向变化并为常数  $v(z)$ , 对炮 - 检波点域记录  $\Psi(x_s, x_c, z, t)$  而言, 波场延拓的双平方根方程为

$$\frac{\partial \Psi(x_s, x_c, z, t)}{\partial z} = \left[ \sqrt{\frac{1}{v^2(z)} - \left(\frac{dt}{dx_c}\right)^2} + \sqrt{\frac{1}{v^2(z)} - \left(\frac{dt}{dx_s}\right)^2} \right] \frac{\partial \Psi(x_s, x_c, z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

在频率 - 波数域, 波场值  $\bar{\Psi}(k_s, k_c, z, \omega)$  满足的双平方根方程转化为

若将波场转换到 midpoint - 半偏移距域, 并设  $x_M = m$ , 由转换关系式(1)可得

延拓成像公式。

在速度横向变化情况下, 可在每一外推层内将炮点与检波点位置处的慢度(速度的倒数)场分解为慢度的背景分量和扰动分量, 背景慢度取为每一外推层慢度的平均值。

将式(7)代入式(5)中, 将根式用泰勒级数展开并舍弃二阶以上的项, 得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{P}(k_m, k_h, z, \omega)}{\partial z} &= ik_{z0} \bar{P}(k_m, k_h, z, \omega) + \\ & i \frac{k_0}{k_{zS}} FT_{mh} \left[ \omega \Delta S(x_s, z) P(m, h, z, \omega) \right] + i \frac{k_0}{k_{zC}} FT_{mh} \left[ \omega \Delta S(x_c, z) P(m, h, z, \omega) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $k_{z0} = k_{zS} + k_{zC}; k_0 = \omega S_0(z);$

$$k_{zs} = \sqrt{\omega^2 S^2(x_s, z) - \frac{(k_m - k_h)^2}{4}};$$

$$k_{zc} = \sqrt{\omega^2 S^2(x_c, z) - \frac{(k_m + k_h)^2}{4}};$$

$FT_{mh}$ —对波场函数中点半偏移距坐标进行傅

$$\frac{\partial \tilde{P}(m, h, z, \omega)}{\partial z} = i\omega [\Delta S(x_s, z) + \Delta S(x_c, z)] \tilde{P}(m, h, z, \omega) \tag{9}$$

式中,  $\tilde{P}(m, h, z, \omega)$ —频率 - 空间域波场值。

## 2 模型试算

为了验证 DSR 叠前深度偏移方法的正确性和可行性,先设计一简单速度模型(如图 2),在正演单炮记录的基础上完成 DSR 叠前时间偏移及叠前深度偏移的数值模拟试验。

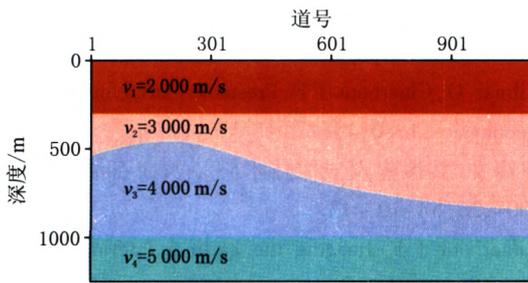


图 2 速度模型

模型参数:

模型纵、横向采样点数为  $1\ 100 \times 250$ ;空间采样间隔为横向 10 m、纵向 5 m;时间采样间隔为 2 ms,记录长度为 1 024 ms。

观测系统参数:

实际数值模拟地震记录 700 炮,测线站号间距 10 m,起始炮点站号 100,炮点间距 10 m,每炮 160 道,道间距 10 m,排列方式为单边接收,最小炮间距为 100 m,覆盖次数为 80。

采用单程波频率 - 空间双域深度偏移延拓算子数值模拟每个震源处非零炮检距地震记录,能够最大程度地模拟实际波场特征,模拟过程中忽略了对直达波、多次波的考虑,但这并不影响研究结果的实用性,因为在实际资料的前期处理中,常切除直达波并对多次波进行压制(图 3)。叠前时间偏移结果(图 3b)表明,模型底部的水平层因上覆地层存在速度的横向变化而在深度偏移剖面上表现为弯曲的反射同相轴,形成假构造,同时在剖面中下部两同相轴都出现了定位误差;叠前深度偏移结果(图 3c)有效地消除了假构

立叶变换。

上式为广义屏法在中点 - 半偏移距域中的波场外推公式。当地震波与垂向夹角较小时,  $k_0/k_{zs} \approx 1$ 、 $k_0/k_{zc} \approx 1$  成立,则简化为分步傅立叶叠前深度偏移波场外推公式,由横向变速引起的时间差校正方程为

造现象,构造形态与模型完全一致。另外叠前偏移结果的波场动力学特征分析表明,倾斜地层上倾处下部地层的同相轴上部旁瓣能量减弱,而在下倾处出现转换,上部旁瓣能量增强而下部旁瓣能量减弱,并在倾斜地层下倾处同相轴能量也出现减弱,产生该现象的主要原因是由于上覆地层的起伏和速度横向变化造成下部观测覆盖次数分布不均匀而引起的。

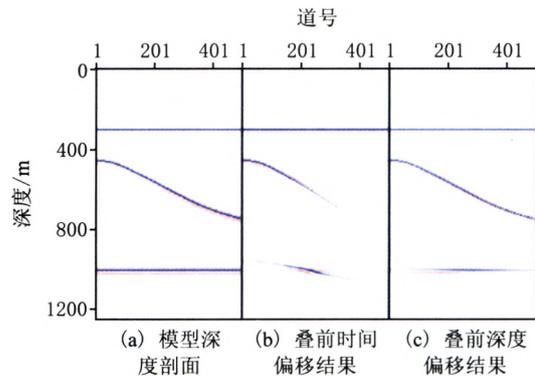


图 3 深度剖面对比

为了进一步验证 DSR 叠前深度偏移方法的有效性,对 SEG 提供的盐丘模型(图 4)进行了数值模拟试验。

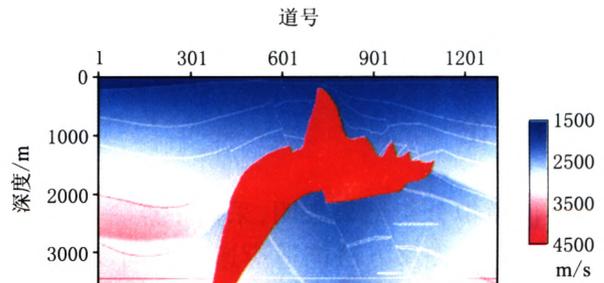


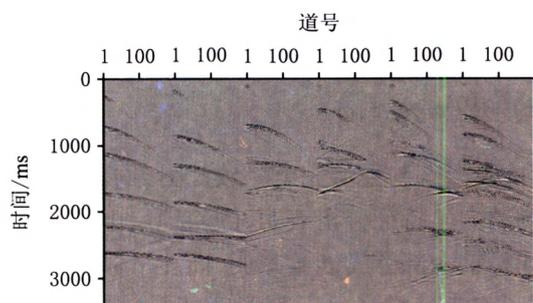
图 4 盐丘速度模型

模型纵、横向采样点数为  $1\ 290 \times 300$ ;空间采样间隔为横向 12.5 m、纵向 12.5 m;时间采样间隔为 4 ms,记录长度为 4 096 ms。

观测系统参数:

数值模拟共 600 炮(图 5),测线站号间距

12.5 m,起始炮点站号 1,炮点间距 25 m,每炮 160 道,道间距 12.5 m,排列方式为单边接收,最小炮间距为 50 m,覆盖次数为 40。



(所选炮点站号起始为 1,炮间站号间隔 200)

图 5 盐丘模型数值模拟单炮

叠前深度偏移结果(图 6)表明,模型中盐丘两侧构造平缓区域,强、弱反射同相轴成像清楚;盐丘顶界面及浅层倾角大的断层成像效果理想,与速度模型界面基本一致;盐丘右半部对其下部深层反射同相轴影响微弱,成像结果还是能清楚地反映出构造特征,盐丘左半部由于埋藏深且存在陡倾角,对底界及下部深层反射影响强烈,致使成像结果较为模糊,主要原因是由观测方式和偏移距不足造成的。

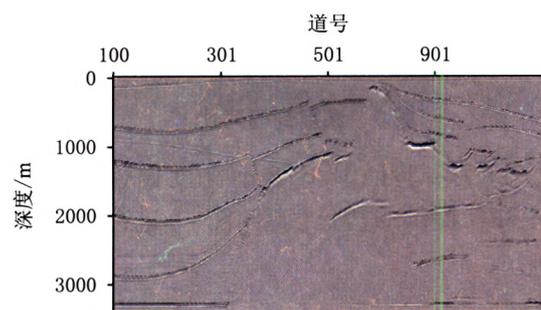


图 6 盐丘模型叠前深度偏移结果

### 3 结 论

数值模拟分析结果表明,采用中点-半偏移距 DSR 叠前深度偏移方法能适应速度横向变化,且具有精度高、无频散、背景噪声弱等优点。数值模拟及偏移计算均已在微机上实现,相对叠前时间偏移计算耗时并没出现几何倍数增长,实用性强。另外,偏

移结果动力学特征的研究,对于岩性油气藏勘探中地质现象的解释与认识有非常重要的意义。根据不同的速度模型,通过精确正演生成模拟测线数据体,再利用双平方根方程叠前深度偏移算法进行偏移,此流程自成系统且便于偏移成像和动力学特征研究,在实际应用中可对地震勘探区域的采集方案及最终的处理成果进行预先的可行性评估,达到精确勘探的目的,因此具有较大的实用推广价值。

### 参考文献:

- [1] 贺振华. 反射地震资料偏移处理与反演方法[M]. 四川 重庆:重庆大学出版社,1989.
- [2] Stolt R H. Migration by fourier transform[J]. Geophysics, 1978,43(1):23-48.
- [3] 贺振华, Lai J, Gardner G H F. 多次覆盖地震资料的叠前偏移[J]. 石油地球物理勘探, 1986,21(1):11-21.
- [4] Gazdag J. Wave equation migration with the phase-dhifit method[J]. Geophysics, 1978,43(7):1342-1351.
- [5] Yilmaz O, Claerbout J F. Prestack partial migration[J]. Geophysics, 1980,45(12):1753-1779.
- [6] 王锡文. 共聚焦成像技术[J]. 西南石油学院学报, 2004,26(5):10-13.
- [7] Claerbout J F. Imaging the earth's interior[M]. Cal, USA:Blackwell Scientific Publications Inc, 1985.
- [8] Tariq A. Prestack phase-shift migration of separate offsets [J]. Geophysics, 2000,65(4):1179-1194.
- [9] 鲁红英. 基于模型正演的叠前深度偏移[J]. 天然气工业, 2006,26(6):52-54.
- [10] Popovici A M. Prestack migration by split-step DSR [J]. Geophysics, 1996,61(5):1412-1416.
- [11] Stoffa P L, Fokkema J T. Split-step fourier migration [J]. Geophysics, 1990,55(4):410-421.
- [12] 程玖兵. 山前带地震数据的波动方程叠前深度偏移方法[J]. 天然气工业, 2007,27(2):38-39.
- [13] 王华忠,程玖兵,马在田. 中点-偏移距道集二维波动方程叠前深度偏移. 反射地震学论文集[M]. 上海:同济大学出版社,2000.
- [14] CHEN Jing-bo, LIU Hong, ZHANG Zhi-fu. A separable-kernal decomposition method for approximating the DSR continuation operator[J]. Geophysics, 2007,72(1):25.

(编辑:朱和平 助理编辑:吴文刚)