文章编号:1673-5005(2008)06-0062-04

在频率波数域实现三维叠前深度偏移

鸿, 何潮观, 全兆岐 粱

(中国石油大学 计算机与通信工程学院、山东 东营 257061)

摘要:叠前深度偏移是理想的改善复杂地区和强横向速度变化的地震资料成像技术,对于复杂变速介质成像,常用 的时间域成像方法已不能满足实际需要,必须借助于深度域成像方法,特别是三维地震叠前深度偏移方法。推导了 三维叠前深度波场延拓算子公式,指出其实质含义,并通过模型测试进行了验证,介绍了一种三维叠前深度偏移的 实现方法,最后进行了偏移算子的误差分析。理论分析与实例计算表明,该计算方法是合理和有效的。 关键词:地震资料处理;三维叠前深度偏移;外推算子;误差分析 中图分类号:TE 19

文献标识码:A

Realization of 3D prestack depth migration in frequency-wavenumber domain

LIANG Hong, HE Chao-guan, TONG Zhao-gi

(College of Computer and Communication Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract : Prestack depth migration is an imaging technique of seismic data which can adapt to lateral velocity variation in complex districts. For complex variable velocity mediums, time domain imaging method can not satisfy actual requirements, and prestack depth migration must be used. The calculation procedure for continuation operator of 3D prestack depth migration was derived and its actual meaning was given, which were also proven by model test. The implementing method of 3D prestack depth migration was introduced. Lastly, migration operator's error was analyzed. The theory analysis and illustration calculation results verify rationality and validity of this method.

Key words: seismic data processing; 3D prestack depth migration; extrapolation operator; error analysis

随着勘探程度的深入,复杂构造油气藏和隐蔽 性油气藏成为石油勘探的主要目标,基于波动方程 的叠前深度偏移能够适应速度场的强横向变化,对 复杂构造具有较好的成像效果。以往的偏移大多在 时间域进行,将偏移后的时间剖面根据垂直速度函 数转换成深度剖面。如果速度在横向上稍微有变 化,射线路径的弯曲就会产生很多复杂问题。随着 计算机发展水平的不断提高,叠前深度偏移开始应 用到石油勘探中,并逐渐成为复杂地质构造成像的 最有效手段。笔者推导三维叠前深度波场延拓算子 公式,分析三维叠前深度偏移的实现方法。

1 三维叠前深度偏移研究现状

三维叠前深度偏移是对三维地震资料在深度域

直接进行的偏移成像处理,该方法基于比较精确的 波动方程算法,利用定向叠前深度偏移技术结合三 维层析成像技术,直接在深度域对速度模型、深度模 型进行迭代修正,得到较精确的层速度模型,适应陡 倾角构造和速度场横向变化的区域,最大限度地保 留了原始资料有效信息,使地震资料上各种有效反 射在深度域准确成像[14]。三维叠前深度偏移技术 目前已成为地震资料处理中的一项关键技术,其偏 移方法的选择将直接决定偏移效率及成像精度。从 三维叠前深度偏移的实现过程来考虑,首选方法应 满足如下条件:①解决横向变速条件下倾斜同相轴 的偏移归位问题;②适应三维非规则观测;③所选方 法应能成为一种速度估算工具,它能按所选的线方 向和点位置进行速度估算,而不必对全三维数据体

收稿日期:2008-09-03

基金项目:中国石油天然气集团公司中青年创新基金(07E1024)

作者简介:梁鸿(1964-),男(汉族),四川隆昌人,副教授,博士研究生,主要研究领域为网格计算、计算机网络和地震资料处理。

进行偏移成像[58]。

一般情况下,要求算子能适应陡倾角反射的成 ·像及较为剧烈的横向速度变化,同时还要具有较高 的计算效率。波场外推算子的研究伴随着偏移成像 理论发展的全过程。Claerbout^[9]提出浮动坐标系下 的有限差分偏移方法;Stolt^[10]提出了常速介质中的 F-K 域偏移方法,改进的 StoltF-K 偏移方法也仅适 应较为缓慢的横向变速: Gazdag^[11]提出适应速度随 深度变化的相移法偏移,随后的相移加内插法[12] 虽 然可以适应速度横向变化,但没有严格的理论基础: Stofa^[13]提出的分步 Fourier 方法是在频率波数域和 频率空间域中交替进行的,在频率波数域中用相移 法处理背景介质中波的传播问题,在频率空间域中 用一个简单的时移来校正由于速度横向变化引起的 时差; Ristow 等^[14]提出了 Fourier 有限差分法. 它在 分步 Fourier 方法的基础上增加一个有限差分补偿 项,这样就可以提高偏移算子在复杂介质中的成像 精度;马在田^[15]提出了一种高阶方程的降阶算法; 程玖兵等[1]提出了频空域的有限差分叠前深度偏 移算法:Wu^[16]和 Huang^[17]分别讨论了波的广义屏 传播理论和广义屏方法在偏移成像中的应用,仅从 计算的角度看,广义屏传播算子与 Fourier 有限差分 传播算子本质上是相同的,其差别在于两者对高波 数成分的处理;陈生昌等^[2]提出了基于拟线性 Born 近似的叠前深度偏移方法:丁伟等[18] 提出了基于 Born/Rytov 近似的联合叠前深度偏移方法,设法解 决速度变化问题。

波场外推方法的突出优点是计算效率高且倾角 限制弱,在频率波数域实现三维叠前深度偏移,可适 应速度横向变化剧烈的情况。

2 波场延拓过程的理论推导

地面上的波场函数可以看成由无数个不同频 率、不同振幅的正、余弦函数叠加而成,即

$$u(x, y, z = 0, h = h_0) = \iint F(\omega, K_x, K_y) d\omega dK_x dK_y.$$
(1)

式中, ω 为圆频率;x,y,z为波动的空间坐标; K_x,K_y 为空间方向波数; $F(\omega,K_x,K_y)$ 为波场u的三维谱;h为炮检距。

波场延拓是对三维谱 $F(\omega, K_x, K_y)$ 进行相位移动的过程,证明如下:

三维波动方程为
$$\partial^2 \mu \quad \partial^2 \mu \quad \partial^2 \mu \quad 1 \quad \partial^2 \mu$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$
 (2)

式中,V为三维速度场。将式(2)相对于x,y和t作三 维傅里叶变换,并进行算子分解得到

$$\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}+\mathrm{i}K_{z}\right)\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}-\mathrm{i}K_{z}\right)F(\omega_{i},K_{xi},K_{yi})=0,\qquad(3)$$

$$K_{x}^{2} + K_{y}^{2} + K_{z}^{2} = \frac{\omega^{2}}{V^{2}}, \qquad (4)$$

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}z} = \pm \mathrm{i}K_zF = \pm \mathrm{i}\sqrt{\frac{\omega^2}{V^2} - K_x^2 - K_y^2}F,\qquad(5)$$

将式(5) 改写为

$$\frac{\mathrm{d}F}{F} = \pm \mathrm{i} \sqrt{\frac{\omega^2}{V^2} - K_x^2 - K_y^2} \,\mathrm{d}z,\qquad(6)$$

对式(6) 取积分,得

$$\int_{z}^{z+\Delta x} \frac{\mathrm{d}F}{F} = \pm \mathrm{i} \sqrt{\frac{\omega^2}{V^2} - K_x^2 - K_y^2} \cdot \int_{z}^{z+\Delta x} \mathrm{d}z, \qquad (7)$$

积分结果为

$$F(\omega_i, K_{xi}, K_{yi}) \Big|_{z=z_0+\Delta z} = F(\omega_i, K_{xi}, K_{yi}) \Big|_{z=z_0} e^{\pm i\theta}.$$
(8)

其中

$$\theta = \sqrt{\frac{\omega^2}{V^2} - K_x^2 - K_y^2} \Delta z.$$
 (9)

令 $F_{z} = F(\omega_{i}, K_{xi}, K_{yi}) |_{z=z_{0}+\Delta z}, F_{z_{0}} = F(\omega_{i}, K_{xi}, K_{yi}) |_{z=z_{0}}, 则式(8) 改写为$

$$F_z = F_{z_0} e^{\pm i\theta}. \tag{10}$$

式(10)说明了波场延拓的过程就是相位移的过程。 为了保证延拓过程的稳定,取

$$\frac{\omega^2}{V^2} > (K_x^2 + K_y^2) . \tag{11}$$

3 模型的测试

将某油田现场获得的三维数据体(图1)用一个 零相位子波脉冲来替代:

 $W_{t} = a[f_{2}e^{\omega_{1}^{2}(t-t_{0})^{2}} - f_{1}e^{\omega_{1}^{2}(t-t_{0})^{2}}]/(f_{2} - f_{1}).$ (12) 式中,*a* 为振幅; *f*₁, *f*₂ 分别为低、高截频率; *t*₀ 为子波 对称中心点所在位置。

利用波场延拓过程的理论实现偏移,进行波场 正演,采用变速速度场将零相位子波反演成单炮记 录绕射模型(图1),再用同一个速度场,通过波场正 演,将单炮记录绕射模型偏移归位,可以看到波场得 到了很好的聚焦(图2)。这说明本方法在实际应用 中获得的偏移成果是可信的。



图 1 正演模拟单炮记录 Fig.1 Forward modeling single shot record



图 2 叠前深度偏移结果 Fig. 2 Results of the prestack depth migration

4 叠前深度偏移的实现

4.1 原 理

地面上接收到的波场函数 $u(x,y,z = 0,h = h_0)$ 是地震上行波波场,此波场向下延拓的过程就 是上行波波场反向外推的过程。式(10) 中相移角正 负号的物理意义就是波场外推的方向。当外推方向 由浅到深进行时,称为反向外推,相移角取负号;反 之取正号。

叠前深度偏移的过程就是地面波场向下延拓复 原(重建)的过程,因此就是上行波波场反向外推的 过程:

 $F_z = F_{z_0} e^{-i\theta}.$ (13)

式(9),(11),(13) 实现了三维谱中的每个分量从 深度 z_a 到深度 z 的偏移。

设 V₀ 为三维速度场 V(x,y,z,h = h₀)的背景场 分量,则有

 $V(x,y,z,h = h_0) = \overline{V}(x,y,z,h = h_0) + V_0.$ (14) 式中, $\overline{V}(x,y,z,h = h_0)$ 为三维速度场的扰动场分量。

当 F_{z} 通过两次傅里叶反变换成为一维谱 $f_{\omega}(\omega, x, y, z, h = h_{0})$ 时,应进行扰动场相移校正:

$$f_{v} = f_{vi} \mathrm{e}^{\mathrm{i}\theta_{1}}, \qquad (15)$$

$$\theta_1 = \frac{\omega}{\tilde{v}} \Delta z. \tag{16}$$

再对一维谱f_a作一次傅里叶反变换,就得到深度z处的波场函数:

$$u(x,y,z = 0, h = h_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{v(w)} dw.$$
 (17)

将深度 z 处的波场替代深度 z₀ 处的波场,继续 进行上行波波场向下延拓偏移的过程,即

$$u(x,y,z_0,h = h_0) \leftarrow u(x,y,z_i,h = h_0)$$
, (18)

$$u(x,y,z_{0},h = h_{0}) \xrightarrow{} \overline{\omega} \pi (x,y,z_{i+1},h = h_{0}),$$

$$i = 1,2,3,\cdots,n\Delta z.$$
(19)

式中,Δz为地震记录的采样间隔;n为采样点数。采 用式(17)~(19)迭代n次,就获得了与原始波场具 有相同采样点数的叠前深度偏移波场。

4.2 处理流程

叠前三维深度偏移处理遵循如下流程:数据预 处理→速度交互建立动校正速度场→做多参数速 度分析,求取第一次逐道逐点动校速度场→按炮检 距做多参数速度分析→做多参数速度分析,求取逐 道逐点第一次偏移速度→第一次三维叠前时间偏 移→做多参数速度分析,求取第二次逐道逐点偏移 速度和叠加速度→剩余时间偏移→做第三次多参 数速度分析→做第二次剩余时间偏移和叠加→做 三维叠前深度偏移→显示结果。其中使用多参数速 度分析可有效解决速度横向变化大的问题。

实际应用表明,对于3.0 km 以下的各种复杂地 质体,用该方法均能得到正确的三维空间偏移相位, 并能叠加成像。图 3 反映的是某油田用本算法获得 的一条三维叠前深度偏移剖面,在3.6 km 处的潜山 构造得到了清晰的成像显示。



4.3 误差分析

实际速度为 V, 而第一次相移偏移时采用的速 度为背景速度 V₀,则相移式(9)可以改写为

$$\tilde{\theta} = \sqrt{\frac{\omega^2}{V_0^2} + \left(\frac{\omega^2}{V^2} - \frac{\omega^2}{V_0^2}\right) - (K_x^2 + K_y^2)} \Delta z \approx \sqrt{\frac{\omega^2}{V_0^2} - (K_x^2 + K_y^2) + \left(\frac{\omega}{V} - \frac{\omega}{V_0}\right)^2} \Delta z \approx \left[\sqrt{\frac{\omega^2}{V_0^2} - (K_x^2 + K_y^2) + \left(\frac{\omega}{V} - \frac{\omega}{V_0}\right)^2} \Delta z.$$
(20)

$$\diamondsuit K_{T}^{2} = K_{x}^{2} + K_{y}^{2}, K_{z}^{2} = \frac{\omega^{2}}{V^{2}}, P = \frac{V_{0}}{V}, \text{ R is if x}(11),$$

有 $\frac{K_T}{K_L}$ < 1。令 $\alpha = \frac{K_T}{K_L}$, α 的物理意义就是地下反射层的倾角。则式(20) 演变为

$$\tilde{\theta} = K_z \left[\sqrt{\frac{1}{P^2} - \alpha^2} + \frac{1}{P} (P - 1) \right] \Delta z, \quad (21)$$

相移角θ的相对误差为

$$E_{r}^{'} = \frac{1}{\cos \alpha} \Big[\sqrt{\frac{1}{P^{2}} - \alpha^{2}} + \frac{1}{P} (P - 1) - \cos \alpha \Big]. \quad (22)$$

式(22) 表明,由于背景速度与现实速度的不一 致而引起的偏移相移角 θ 的误差,随着反射层倾角 的增大而增加。假定地层最大倾角为 55°,背景速度 与实际速度相差 10%,则偏移相移角的最大误差为 10% 左右,如果加上式(15) 与式(16) 的扰动场的 相移校正,误差将大大缩小。

对某油田的实际资料进行处理,并将处理结果 和 10 口井的实际资料进行了对比。结果表明,深度 最大误差为48 m,最小误差为7 m,10 口井的统计误 差为 1.4%,效果较为理想。

参考文献:

- 程玖兵,王华忠,马在田,等. 双平方根方程三维叠前深 度偏移[J]. 地球物理学报,2003,46(5):676-683.
 CHENG Jiu-bing, WANG Hua-zhong, MA Zai-tian, et al. DSR one-way wave equation prestack migration [J]. Chinese Journal of Geophysics,2003,46(5):676-683.
- [2] RISTOW D, RUHL T. Fourier finite-difference migration[J]. Geophysics, 1994,59(12):1882-1893.
- [3] STOFA P L. Split-step Fourier migration [J]. Geophysics, 1990,55(2):410-421.
- [4] 陈生昌,马在田. 波动方程的高阶广义屏叠前深度偏移
 [J]. 地球物理学报,2006,49(5):1445-1451.
 CHEN Sheng-chang, MA Zai-tian. High order generalized screen propagator for wave equation prestack depth migration
 [J]. Chinese Journal of Geophysics,2006,49(5):1445-1451.
- [5] REN Wen-fu, ZHANG Jian-wei, LIU Jiang-ping. 3-D prestack depth migration for variable velocity media and its application[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10):41-43.
- [6] 田文辉,李振春,张辉,等. 起伏地表条件下的波场上延

法叠前深度偏移[J].中国石油大学学报:自然科学版, 2006,30(5):19-22.

TIAN Wen-hui, LI Zhen-chun, ZHANG Hui, et al. Wavefield upward continuation pre-stack depth migration based on irregular topography[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006,30(5):19-22.

- [7] 程玖兵. 频率-空间域有限差分法叠前深度偏移[J]. 地 球物理学报, 2001,44(3):389-395.
 CHEN Jiu-bing. Pre-stack depth migration with finitedifference method in frequency-space domain[J]. Chinese Journal of Geophysics,2001,44(3):389-395.
- [8] 壬红旗,鲁烈琴,刘文卿,等. 三维叠前深度偏移技术在复 杂地区的应用[J]. 新疆石油地质,2004,25(5):498-499.
 WANG Hong-qi, LU Lie-qin, LIU Wen-qing, et al. Application of 3D prestack depth migration in complex area[J].
 Xinjiang Petroleum Geology,2004,25(5):498-499.
- [9] CLAERBOUT J F. Toward a unified theory of reflector mapping[J]. Geophysics, 1971,36(3):467-481.
- [10] STOLT R H. Migration by Fourier transform [J]. Geophysics, 1978, 43(1):23-48.
- [11] GAZDAG J. Wave equation with phase-shift method[J]. Geophysics, 1978, 43(7):1342-1351.
- [12] GAZDAG J, SGUAZZERO P. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation [J]. Geophysics, 1984, 49(2):124-131.
- [13] STOFA P L. Split-step Fourier migration [J]. Geophysics, 1990, 55(4):410-421.
- [14] RISTOW D, RUHL T. Fourier finite-difference migration[J]. Geophysics, 1994, 59(12):1882-1893.
- [15] 马在田. 高阶方程偏移的分裂算法[J]. 地球物理学报, 1983,26(4):127-130.
 MA Zai-tian. A splitting-up method for solution of higherorder migration equation by finite-difference scheme[J]. Chinese Journal of Geophysics,1983,26(4):127-130.
- [16] WU R S. Synthetic seismograms in heterogeneous media by one-return approximation [J]. Pure and Applied Geophysics, 1996, 148(1/2):155-173.
- [17] HUANG L J, FEHLER M C, WU R S. Extended local born Fourier migration method [J]. Geophysics, 1999, 64 (5):1524-1534.
- [18] 丁伟,李振春,刘玉莲. 基于 Born/Rytov 近似的联合叠 前深度偏移方法[J]. 石油物探,2003,42(1):29-34. DING Wei, LI Zhen-chun, LIU Yu-lian. The prestack depth migration method based on Born/ Rytov approximations[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2003,42 (1):29-34.

(编辑 刘为清)