

文章编号:1671-5888(2003)04-0555-04

变参考慢度 Born 近似傅氏偏移

杜正聪, 贺振华, 王志, 黄德济

(成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:针对常规 Born 近似傅氏偏移方法对于剧烈横向变速介质不能精确成像的状况而提出了变参考慢度 Born 近似傅氏偏移, 理论上解决了任意速度变化地质模型的偏移成像问题。此外, 为进一步提高复杂地层的成像精度和波场延拓算子的稳定性, 对散射波场的计算公式作了改进。将改进的方法运用于盐丘模型的正演和偏移试验, 并与常规 Born 近似偏移方法相比, 可明显看出变参考慢度 Born 近似傅氏偏移方法在效果上要优于后者, 其处理速度横向变化的能力大大增强。

关键词: 偏移; Born 近似; 散射波场; 速度横向变化; 波场延拓; Green 函数; 变参考慢度
中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A

0 引言

Huang L J 等人把 Born 线性近似应用于波场递归外推过程中的散射波场计算, 提出了“扩展的局部 Born Fourier 偏移方法(ELBF)”^[1]。这种方法虽然在本质上与 Split-step Fourier 法^[2]很相似, 但由于在波场递归外推过程中引用 Born 近似计算速度扰动引起的散射波场, 不但考虑了速度扰动引起的相位变化, 而且兼顾了速度扰动引起的振幅变化, 因此从理论上讲, 它比 Split-step Fourier 法更合理、更精确。然而, 在 Huang L J 等提出的 ELBF 偏移方法中, 所用的速度扰动引起的散射波场相位计算公式对强横向变化的速度模型可能会出现不稳定性问题, 难以得到正确的偏移结果。陈生昌等利用稳定的 Born 近似散射波场相位计算公式, 推导出稳定的散射波场计算公式^[3]。该公式能有效地避免基于 ELBF 偏移方法在强横向变化的速度模型中可能遇到的不稳定性问题。但由于稳定近似成立的条件所限对于剧烈横向变化的速度模型仍难以得到精确的偏移结果。

本文针对上述情况将多参考慢度引入到 ELBF 偏移方法中, 进一步提出了参考慢度随延拓频率 ω 而变化的变参考慢度 Born 近似傅氏偏移方法。这样从理论上就解决了任意速度变化模型 Born 近似

傅氏偏移方法的稳定性和正确偏移成像问题。此外, 为进一步提高复杂地层的成像精度, 还对散射波场的计算公式作了改进。

将本文导出的变参考慢度 Born 近似傅氏偏移方法(VRSELBF)应用于复杂盐丘模型的正演和偏移, 并与常规的 ELBF 偏移结果进行比较, 可明显看出本文提出的 VRSELBF 偏移方法在效果上要优于后者, 其处理速度横向变化的能力大大增强。

1 方法原理

1.1 改进的波场延拓算子

在已知地质模型速度场 $v(x, y, z)$ 和参考速度场 $v_0(z)$ (通常取为 $v(x, y, z)$ 的平均值)的前提下, 由给定深度 z_1 上频率域的波场 $p(x, y, z_1; \omega)$, 求深度 $z_1 + \Delta z$ 上的波场 $p(x, y, z_1 + \Delta z; \omega)$ 的公式为^[1,2]

$$p(x, y, z_1 + \Delta z; \omega) = p_0(x, y, z_1 + \Delta z; \omega) + p_1(x, y, z_1 + \Delta z; \omega), \quad (1)$$

式中 $p_0(x, y, z_1 + \Delta z; \omega)$ 和 $p_1(x, y, z_1 + \Delta z; \omega)$ 分别由式(2)和(3)给出。

$$p_0(x, y, z_1 + \Delta z; \omega) \approx F_{z_1+1, z_1}^{-1} \{ \alpha e^{ik_z(z_1+\Delta z)} F_{z_1, y} \times [(\exp(i\omega \frac{v_0(z_1)}{2} z(x, y, z) \Delta z) - 1) P(x, y, z_1, \omega)] \}, \quad (2)$$

$$p_1(x, y, z_1 + \Delta z; \omega) =$$

收稿日期:2002-11-23

基金项目:国家 973 项目资助(G1999043311)

作者简介:杜正聪(1975-),男,四川西充人,博士研究生,主要从事地震波场数值模拟方面的研究。

$$F_{k_x, k_y}^{-1} \{ e^{i\epsilon(x,y,z)} F_{x,y} [P(x,y,z; \omega)] \}. \quad (3)$$

这里 $F_{x,y}$ 表示 x, y 方向上的 Fourier 正变换; F_{k_x, k_y}^{-1} 表示 x, y 方向上的 Fourier 反变换; $k_z(z) = \sqrt{\frac{\omega^2}{v_0^2(z)} - k_x^2 - k_y^2}$ 为垂向波数; $\epsilon(x,y,z) = \left[\frac{1}{v^2(x,y,z)} - \frac{1}{v_0^2(z)} \right]$ 为慢度平方差; $\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2(z)}{\omega^2} (k_x^2 - k_y^2)}}$, 其三阶 Padé 展开为 $\alpha \approx \frac{8-4x}{8-8x+x^2}$, 其中 $x = \frac{v_0^2(z)}{\omega^2} (k_x^2 - k_y^2)$.

1.2 变参考慢度

局部 Born 近似只对小的慢度扰动有效。当水平慢度扰动过大或频率过高时,公式(2)稳定近似的前提条件——近似公式 $e^\epsilon \approx 1 + \epsilon$ 不成立,因此也就不能得到正确的偏移结果。为了使局部 Born 近似能适用于横向速度剧烈变化的介质,将多参考慢度^[4](MRS)引入到 ELBF 偏移方法中。即在每一延拓步长内的不同区域选用不同的参考慢度以保证 Born 近似波场延拓算子中慢度的变化足够小,于是散射波场的计算式(2)变为式(4):

$$P_i^j(x,y,z + \Delta z; \omega) \approx F_{k_x, k_y}^{-1} \{ \alpha^j e^{i\epsilon(x,y,z)} \times F_{x,y} [(\exp(i\omega \frac{v_0^j(z)}{2} \delta(M(x,y,z) - S_0^j(z))) e^{i\epsilon(x,y,z)} \Delta z) - 1) P(x,y,z; \omega)] \}. \quad (4)$$

式中 $M(x,y,z)$ 是空间位置和参考慢度之间的映射函数;上标 j 是在每个延拓步长内不同区域的参考慢度的标号; $v_0^j(z)$ 为延拓层内第 j 区域的参考速度通常取为 $v^j(x,y,z)$ 的平均值; ω 代表地震信号的频率; Δz 为延拓步长; $S_0^j(z)$ 为参考慢度即 $v_0^j(z)$ 的倒数; $\delta(\cdot)$ 函数的作用是当 $M(x,y,z) = S_0^j(z)$ 时其值为 1, 否则为 0。同理式(3)和式(1)应改写为

$$P_0^j(x,y,z + \Delta z; \omega) \approx F_{k_x, k_y}^{-1} \{ e^{i\epsilon(x,y,z)} \times F_{x,y} [\delta(M(x,y,z) - S_0^j(z)) P(x,y,z; \omega)] \}, \quad (5)$$

$$P(x,y,z + \Delta z; \omega) = \sum_j P_0^j(x,y,z + \Delta z; \omega) + P_1^j(x,y,z + \Delta z; \omega). \quad (6)$$

在(4)、(5)两式中,内部的傅氏变换只在每一深度步长内进行。为减少偏移过程中的假频可在频率域中使用巴特沃斯滤波器,并在边界上使用了 Hanning

窗衰减^[5,6]。根据公式 $e^\epsilon \approx 1 + \epsilon$ 近似成立的条件可得出公式(4)稳定有效成立的条件是

$$| \omega \frac{v_0^j(z)}{2} \delta(M(x,y,z)) - S_0^j(z) | \max(e^{i\epsilon(x,y,z)}) \Delta z < \beta. \quad (7)$$

式中: $\max(e^{i\epsilon(x,y,z)})$ 为延拓层内第 j 区间的最大慢度扰动。为了把用 $(e^\epsilon - 1)$ 近似 ϵ 所带来的相对误差限制在 0.5%~1.0% 的范围内,根据一阶马克劳林展式的误差计算式 $\epsilon = \frac{\epsilon^2}{2!}$ 可计算出式(7)中 β 的取值范围为 0.1~0.15。因为对于确定的地震信号 ω 的取值范围是确定的,不能随意减小;延拓步长 Δz 过小会引起计算量的急剧增大, Δz 不宜过大或过小;因此对于横向变速激烈的复杂介质要使(7)式成立势必要选多个参考慢度,其运算效率是相当低的。为此我们引入了随频率 ω 而变化的参考慢度选择法即变参考慢度。在具体偏移实现时将频率作为最外层循环,在对不同的频率成分进行波场延拓时选用不同的参考慢度数,对于低频率成分的波场进行延拓时,可以少选几个参考慢度,适当增大 $e^{i\epsilon(x,y,z)}$ 仍能保证成像精度并可提高运算效率。其实现流程如图 1 所示。

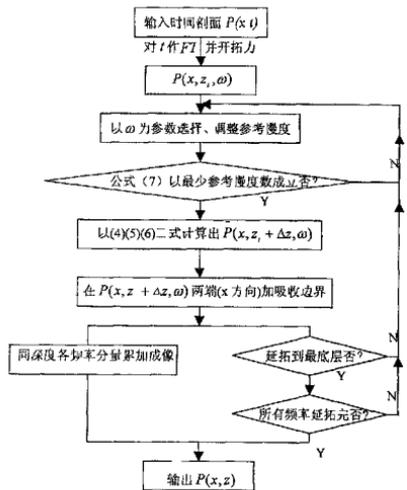


图 1 变参考慢度 Born 近似傅氏偏移流程图

Fig. 1 Variational reference slowness born approximation fourier migration flow chart

2 数值试验

为验证本文所提出方法的正确性及其偏移效果, 利用了 SEG/EAGE 3-D 盐丘模型的二维切片来进行检验。图 2 为盐丘速度模型, 其中的深色区域代表盐丘体, 盐丘周围有着很强的横向速度变化。特别对于断层面的成像变参考慢度法明显优于常规方法, 首先用有限差分法对图 2 所给模型

进行正演模拟^[7], 再分别用常规 Born 近似偏移方法和本文所提出的偏移方法对正演记录作偏移, 偏移结果分别如图 3 和图 4 所示。

比较图 3 和图 4, 可以看出本文方法对盐丘模型的偏移结果从整体上要好于常规 Born 近似偏移方法。特别对于断层面的成像变参考慢度法明显优于常规方法, 且计算效率还有所提高。

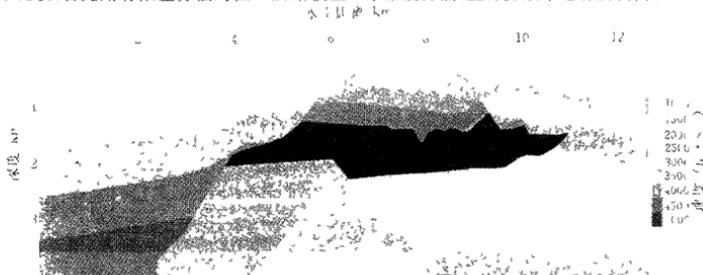


图 2 SEG/EAGE 3-D 盐丘模型 2-D 切片(深色区为盐丘体)

Fig. 2 A 2-D slice of the SEG/EAGE 3-D salt model(the dark black region is a salt body)

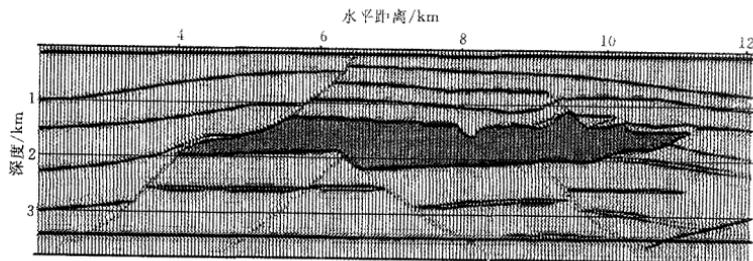


图 3 常规 Born 近似傅氏偏移结果

Fig. 3 Result of conventional Born approximation Fourier migration

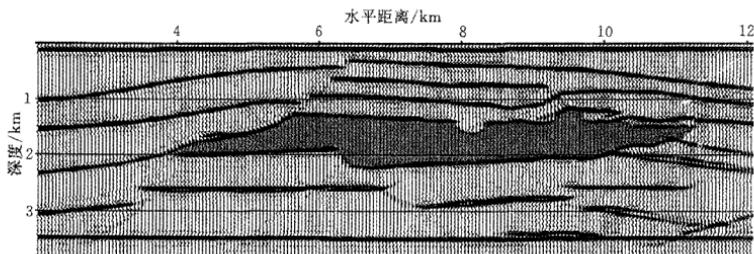


图 4 变参考慢度 Born 近似傅氏偏移结果

Fig. 4 Result of variational reference slownesses Born approximation Fourier migration

3 结论

本文提出的变参考慢度 Born 近似偏移方法在稳定性和成像精度上都优于常规 Born 近似偏移方法,计算效率也有所提高,适用于速度横向剧烈变化的介质。从盐丘模型的偏移结果可以看出本文导出的偏移方法有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] Huang L J, Fehler Mc, Wu R S. Extended local born fourier migration method [J]. *Geophysics*, 1999, **64**: 1 524-1 534.
- [2] Stoffa P L, Fokkema J T, De Luna Freire R M, et al. Split-step fourier migration [J]. *Geophysics*, 1990, **55**: 410-421.
- [3] 陈生昌,曹景忠,马在田. 稳定的 Born 近似叠前深度偏移方法 [J]. *石油地球物理勘探*, 2001, **36**(3): 291-296.
Chen Shengchang, Cao Jingzhong, Ma Zaitian. Stable pre-stack depth migration method with Born approximation [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001, **36**(3): 291-296.
- [4] Kessinger W. Extended split-step Fourier migration [J]. *62nd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Extended Abstracts*, 1992, 917-920.
- [5] 贺振华,王才经,李建朝,等. 反射地震资料偏移处理与反演方法 [M]. 重庆:重庆大学出版社,1989.
He Zhenhua, Wang Caijing, Li Jianchao, et al. *Reflection seismic data migration processing and inversion method* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989.
- [6] 贺振华,黄德齐,胡光岷,等. 复杂油气藏地震波场特征方法理论及应用 [M]. 成都:四川科学技术出版社,1999.
He Zhenhua, Huang Deqi, Hu Guangmin, et al. *Seismic response characterization on complex oil and gas reservoir and its application* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1999.
- [7] 郑海山. 有限差分偏移截断误差及其传递因子相角分析 [J]. *长春科技大学学报*, 2000, **30**(3): 275-280.
Zheng Haishan. Analysis of the cut-error and the phase angle of error transfer function in the finite difference migration [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2000, **30**(3): 275-280.

VARIATIONAL REFERENCE SLOWNESS BORN APPROXIMATION FOURIER MIGRATION

Du Zheng-cong, HE Zhen-hua, WANG Zhi, HUANG De-ji

(College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Due to situation that conventional Born approximation Fourier migration method can not image accurately the media with acute lateral variation of velocity, this paper puts forward variational reference slowness Born approximation Fourier migration method. It can theoretically solve the migration image problem of arbitrary velocity change model. In addition, in order to raise the image accuracy of complex layer and the stability of wavefield extrapolation formula, the scattered wavefield formula is improved. After applying this method to the forward modeling and migration of salt dome model, a better result than the conventional Born approximation migration method can be got. The ability of dealing with lateral velocity variation is greatly increased.

Key words: migration; Born approximation; scattered wavefield; lateral variation of velocity; wavefield extrapolation; Green function; variational reference slowness