

叠前深度偏移述评

罗银河,刘江平,俞国柱

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院 湖北 武汉 430074)

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,笔者就 4 种典型叠前深度偏移方法的理论基础与技术特点,存在的问题及国内外最新进展进行了讨论。

关键词:叠前深度偏移,复杂地区,横向,成像技术

中图分类号:P631.4 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2004)06-0540-06

地震成像的目的是使反射波或绕射波回返到产生它的地下位置上去,使地下界面真实地归位,提高地震记录的横向分辨率。这一点,主要由偏移技术来实现。为了适应复杂的地质情况,人们不断修改理论模型,发展了一系列的改进办法,如 DMO 技术、叠前部分偏移、叠前(后)深度偏移以及其它各种改进的偏移成像技术来得到更好的地下成像,以求不断逼近地下真实情况。

Judson 等人于 1978 年开创了 DMO 校正的先例,利用 DMO 技术消除时距曲线中地层倾角因素的影响^[1]。但当地下界面有倾角或横向速度变化时,地下反射点分散,且共中心点不等于反射点。叠后偏移一般假设输入是自激自收剖面,在水平叠加之后进行。如果地层倾角比较小,在未偏移剖面上不同倾角的同相轴不会相互干涉,这种假设可以得到较理想的结果;但如果倾角偏大,由于 CDP 叠加已经失真,地下介质的复杂性被掩盖。所以,地球物理学界又发展了叠前偏移。通过对未叠加地震记录的偏移,然后再叠加,达到更精确成像的目的。

以往的偏移大多在时间域进行,通常可以简单地将偏移后的时间剖面根据垂直速度函数转换成深度剖面。但是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,深度偏移的目的就在于解决这种变化所带来的问题。20 世纪 80 年代地震界意识到地震数据应该拿到采样的波场中考虑,并建立起叠前深度偏移的理论及算法的基本思路框架。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和学术研究中,并逐渐成为复杂地质构造成像的最有效手段。目前,叠

前深度偏移方法主要有 Kirchhoff 积分法(单程)波动方程有限差分(FD)法、相移(PS)法及逆时法等。

深度域成像新技术能够大幅度地改善复杂速度分布地区的地震波成像质量。但深度偏移成像存在着致命的“速度难题”,即在成像过程中需要有一个充分精确的速度模型。为了得到“满意”的速度场,不同的偏移速度方法被提出来,其中包括迭代剖面偏移法、聚焦分析法、叠加能量分析法、和叠前深度偏移方法及全局寻优的遗传算法。这些方法在一定程度上能够建造比较可靠的速度模型,但在地质条件复杂的情况下,这些方法得到的速度场可靠性、准确性都不好。从而导致深度偏移成像的精确度也不高。

针对叠前深度偏移的“速度”模型难精确建立、计算成本高的缺点, Gelchinsky 于 1988 年提出“多聚焦时差理论”,并在此基础上于 1999 年提出多聚焦成像技术(multifocusing method,以下简称 MF)^[2,3];与此同时, Berkhout 于 1992 年提出“面积炮记录理论”,并于 1997 年提出共聚焦点成像技术^[4]。MF 技术是一组以巨模型-独立成像为特征的地震成像方法。该方法用聚焦参数的最优化过程代替了传统偏移方法中的速度模型修正,极大避免了“速度难题”。但 MF 技术主要以射线理论为基础,不能进行叠后的属性分析和油藏描述。共聚焦点成像技术(common focus point,以下简称 CFP)包括发射聚焦和检波聚焦 2 个算子,它将震源或检波器排列的响应进行特殊的时延叠加,用算子更新代替传统上对速度场的直接更新,最后能从经过正确更新的聚焦算子反演出地下速度场。但 CFP 技术需要先验的构造信息,在算子更新的过程中需要人工干预。

笔者将对 Kirchhoff 积分法、波动方程有限差分法、MF 法及 CFP 法的基本原理及方法特点进行描述,并就存在的问题及最新进展进行分析和讨论。

1 Kirchhoff 积分法

Kirchhoff 积分法是以 Hagedoorn“绕射最大凸度曲线”的概念为基础建立起来的叠前深度偏移方法^[5],它符合 Snell 定律,遵从波的绕射、反射和折射定律。Schneider、Berryhill 等人都曾提出基于常速拟层状介质假设的 Kirchhoff 偏移方法^[6],即采用均匀介质中的格林函数,采用递归的办法逐层进行偏移。Keho 等人认为,上述偏移方式不能很好地满足于叠前偏移的需要,因此,他们提出 1 种基于傍轴射线追踪技术的非递归 Kirchhoff 叠前偏移方法^[7],这就是目前大多数基于 Kirchhoff 积分的叠前偏移的算法原型。该方法将地表的地震记录直接延拓至成像点,其核心是复杂介质中的旅行时计算。

为了得到绕射叠加偏移剖面,需要计算出剖面上每个点的绕射曲线。将未偏移剖面中绕射曲线上的每个点的数据都加在一起就得到了在偏移剖面上这个点的值,如果这个点是真正的绕射曲线的顶点,则相加的结果就是与这个点有关的真正能量,如果此处只存在噪音,沿着绕射曲线的正负值基本抵消,则相加得到的结果就很小。实际上绕射叠加偏移将未偏移剖面上的每一小段都认为是绕射的一部分,即将反射层认为是一序列距离很近的绕射点的叠加。采用 Kirchhoff 积分法需要考虑 2 个问题:一是在沿绕射累加之前应该如何消除倾斜和扩散对振幅的影响,二是“偏移孔径”问题。

根据地层倾斜因子可以得到能量的传播方向与垂直方向的夹角,对于二维问题,扩散因子是 $1/r^2$,对于三维偏移,扩散因子是 $1/r^3$ 。为了实现 Kirchhoff 积分法保幅偏移成像,董臣强等人采用考虑传播效应的 Kirchhoff 积分法叠前深度偏移成像公式^[8]

$$R(x, x_s) = \int_{\Sigma} \mathbf{n} \cdot \nabla \tau(x, x_s) A(x_r, x, x_s) \frac{\partial [u(x_r, \tau_s(x, x_s) + \tau_r(x, x_r), x_s)]}{\partial t} dx_r, \quad (1)$$

式中, $R(x, x_s)$ 是反射系数; \mathbf{n} 是记录面 Σ 的外法线方向向量; x, x_s, x_r 分别代表成像点、震源点和接收点; τ_s, τ_r 分别表示震源点到成像点和成像点到接收点的旅行时; $A(x_r, x, x_s)$ 是几何扩散因子(即振幅加权因子); $u[x_r, \tau_s(x, x_s) + \tau_r(x, x_r), x_s]$ 是记录波场。目前常用射线追踪和直接解程函方程来计算

三维旅行时,其精度能满足大多数情况下的实际要求,但当地下存在复杂地质构造时,会遇到入射角的微小变化导致最终结果很大变化,由于阴影区和焦散区存在而引起大小不一的空白区和多值区,以及速度变化剧烈而无法得到正确射线路径等诸多问题。董臣强等人借助迎风有限差分三维旅行时计算方法则有效地解决了这些问题,提高了计算结果的精度和计算方法的稳定性。

偏移孔径要定义的问题是绕射双曲线积分应该延伸多远,通常,绕射双曲线的减弱与偏移孔径成反比,孔径宽度较小可以有效消除陡倾角的同相轴,所以可以把孔径宽度当作倾角滤波器。这里需要考虑信噪比与分辨率的问题。很明显因为随着深度的增加,绕射波越来越平坦,其偏移孔径也随着深度的增加而变大,但是如果孔径过宽就会将水平噪声偏移成同相轴,其横向的分辨率也会降低。Sergey 等人提出最小方差 Kirchhoff 偏移^[9],实现了 Kirchhoff 叠前深度偏移过程中的分辨率的估算。其基本思路是:采用线性非约束最优化方法(如动态梯度法、Paige 的 LSOR 法),得到 Kirchhoff 偏移的正反演初始模型,并在迭代过程中获得分辨率的值。这为解决由于偏移孔径过大导致信噪比与分辨率降低的问题提供了有效的途径:即 Kirchhoff 积分法在偏移的过程中,对偏移孔径进行适时的监控,并修改偏移孔径。当然在具体的操作过程中还存在信噪比和分辨率目标函数的建立、偏移孔径修改量等诸多值得探讨的问题。

2 波动方程有限差分法

波动方程有限差分法基于 20 世纪 70 年代初 Claerbout 教授首先提出的使用有限差分法解单程波动方程的近似式^[10],它利用波场连续性的特征,假设波场满足拉普拉斯方程 $\nabla^2 \phi = 0$,通过将标量方程分解为上、下行波方程,经算子展开后对上、下行波方程作不同程度的近似,然后利用有限差分方法解近似方程,对地震波进行向下延拓成像。在地下速度模型已知的前提下,波动方程叠前深度偏移在某种程度上可视为地震波在地下传播过程的计算机逆模拟,用地面观测的地震数据重建地震波在地下传播过程中的波场。目前分步傅氏方法、傅氏有限差分法、广义屏方法和频率-空间域的有限差分法都是共炮道集非常有效的叠前深度偏移方法。

从 Stolt 引进的傅氏变换法出发^[11],则二维标量方程为:从二维的声波方程出发

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{v} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}, \quad (2)$$

如果令 $t' = jvt$,并假设是简谐波,则变量方程可写为

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{1}{v} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t'^2} = 0 = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial t'^2}, \quad (3)$$

即将波动方程写成拉普拉斯方程的形式,地表的波场已知($z=0$) ,应用波动方程有限差分法进行叠前深度偏移,关键问题是如何将波场向下延拓,确定当检波器在任意深度时的观测结果。向下延拓需要逐步进行,延拓步长的选择是关键,关系计算成本和偏移精度。如果步长过大,会导致偏移不足,反射波同相轴会扭曲与频散,如果步长过小,则会增加计算成本。

有限差分法虽然能较好地适应地下速度横向变化,既可以在时间-空间域进行,又可以在频率-空间域实施,但由于其运算方面的效率问题,使之在目前大数据量的 3-D 叠前深度偏移的应用上还存在一些困难。近年来,波动方程叠前深度偏移不同的改进及其变种方法被提出来。其中,基于 Born 近似的叠前深度偏移和基于波动方程的广义屏叠前深度偏移成像等方法正逐步进入实用化阶段。

Huang 把线性 Born 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 傅氏偏移方法^[12]。这种方法在波场递归外推过程中利用 Born 近似计算速度扰动引起的散射波场,不仅考虑了速度扰动引起的相位变化,而且还包含了速度扰动引起的振幅变化。但没有考虑到由于强横向变化的速度模型导致的不稳定性问题,在复杂地区 Born 傅氏偏移无法得到正确的偏移结果。陈生昌等人提出了基于拟线性 Born 近似的叠前深度偏移方法^[13],该方法使用了一个更加稳定的散射场计算公式,在解决波场外推过程中的奇异性问题时,提出使用 Pade 展开代替 Taylor 展开,扩大了基于拟线性 Born 近似偏移方法的应用范围,进一步提高偏移波场外推中散射波场的计算精度和保证偏移结果的稳定性。

Moshertff 等人提出了 1 种共照射角成像条件^[14]。这种成像条件是从延拓波场中,抽取零时刻而且炮检距射线参数为某一常数(共照射角)的波场值作为成像结果,对不同的照射角进行成像就可以得到共照射角道集,相当于同一地面点的 τ - p 域偏移结果。这一成像条件可用于炮检距域的平面波偏移和共方位角偏移。由于照射角和炮检距的内在联系,共照射角道集为 AVO 分析、偏移速度建模等提供了有力工具。金胜汶等人在此基础上提出一种基于共照射角成像条件的炮检距域的广义屏偏移算法^[15]。该

方法根据广义屏算子理论,并结合共照射角成像条件,对于正确的偏移速度,能够给出充分校平的共成像点道集。该方法不仅有相移法和裂步傅里叶法效率高的优点,而且能够适应于强横向变速介质。但该方法要真正达到实用化的程度,其计算速度还有待进一步提高,计算成本还需要大幅度降低。

3 MF 成像技术

MF 技术是一种基于“多聚焦时差理论”的成像技术。MF 技术基于广义的射线理论,借助 Hubral Peter 著名的 2 个基本波前面(normal 波和 normal incidence point 波)的概念^[16],导出时间双曲线方程及时差方程。MF 法属于一组方法,而这一组方法以巨模型-独立成像法为特征,包括共反射面法^[17,18]以及光学叠加。

研究表明,在复杂地表的情况下, MF 成像技术能够提供更加丰富的地质信息,另外 MF 成像不受 CMP 形状的影响。这一优良特性对于储层描述、烃类指示等来说尤其重要。正是由于 MF 方法在处理复杂问题时拥有卓越的功能,现在国际地球物理学界对 MF 成像技术引起了广泛关注并开始进行大量的研究工作,其中 Gelchinsky 工作组和 Hubral 工作组对多聚焦成像的理论和应用做了诸多工作并取得了某些突破性进展。我国对 MF 成像技术的研究起步较晚,2002 年 8 月 14 日 Hubral 到张家界做了一个题为“CRS 在 MF 方法中的地位”的报告,引起了我国地球物理学界的高度关注并开始了初步的理论研究工作。MF 方法最大的特点就是用算子的修正过程代替了传统偏移方法中的速度模型修正。图 1 为其操作流程。

多聚焦时差校正可以应用于炮点和检波器在中心点(在测线上用来得到 z_0 剖面的点)附近的任何记录道。因此,在叠合道集中多聚焦时差校正可以用于一序列的反射记录中而不降低记录的空间分辨率。MF 成像是参数驱动的偏移过程。在更新步骤中修改的是聚焦参数,而不是速度模型(即使后者可能更有效)。且该更新过程不依赖于参数化的速度模型。任何未知的传播因素对于旅行时的影响(射线弯曲、各向异性等)都被自动计算在内。在偏移之后,全局的参数化反演可以将算子旅行时转化为速度模型。

现在人们普遍应用 Nelder 和 Mead 提出的“FPS 灵活多面体搜索”方法搜索 β 、 R_{NIP} 、 R_N 参数^[19]。由于它是一种线性搜索方法,而 β 、 R_{NIP} 和 R_N 三者之间并不存在简单的线性关系,因此在进行搜索之前,首先要将非线性问题线性化,也就是说,首先要将问题

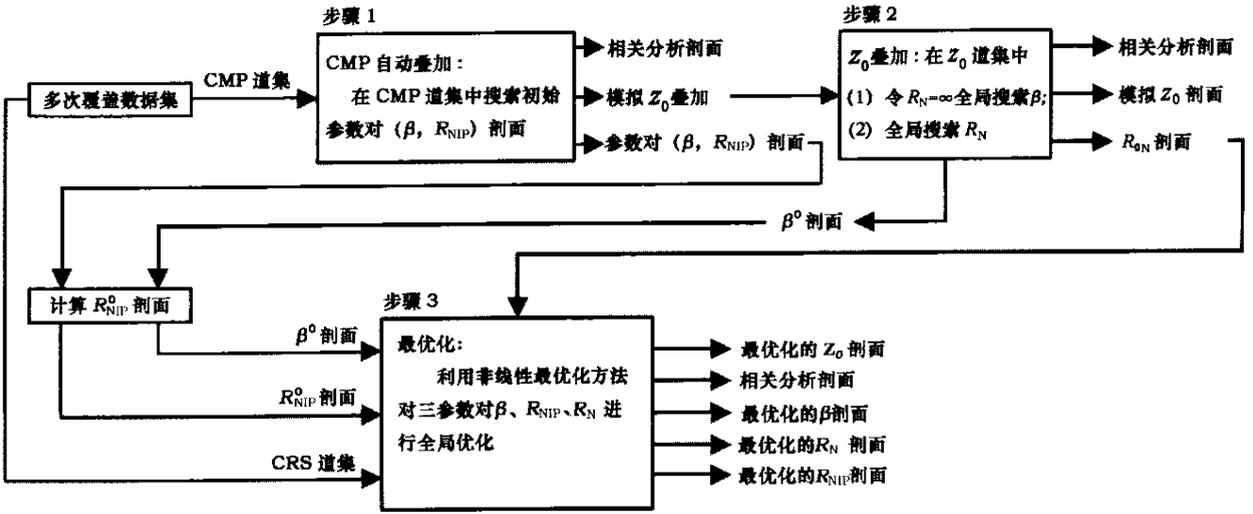


图 1 多聚焦成像最优化搜索流程

转化为适合于“FPS 灵活多面体搜索”的形式。对于地表不很复杂的情况,这种搜索方法能够很好地满足实际应用,但是如果遇到非常复杂的地表难题时,它就容易陷入局部极值,搜索不到全局极值,因此,寻找适合于问题本身的搜索方法,是 MF 未来可能的发展方向之一。将时间双曲线方程进行几阶 Taylor 展开,是 MF 未来可能发展的另一个方向。实验证明:中心点的高程越接近实际的目标界面,聚焦参数就越稳定。从这一点来考虑,应用滑动基准面最适合。但是,应用滑动基准面将影响到整个最优化问题中目标函数的构建问题,如何构建适合于多参数全局搜索问题的目标函数将是 MF 未来可能发展的再一个方向。

4 CFP 成像技术

CFP 技术成像借助于著名的“聚焦”概念(而不是“波场延拓”)来实现。所谓“聚焦”,就是将震源(或检波器)排列的响应进行特殊的时延叠加,以得到我们想要的地质体介质反射率等情况。与以往的各种成像技术不同的是,CFP 技术既可以应用于时间偏移也可以应用于深度偏移。

CFP 技术的优越性来源于它优良的方法原理:它没有实际地质模型进行假设或简化,从而能充分利用没有经过修饰的真实数据;而且它用聚焦算子的更新代替了传统的速度更新,而最终这种特殊的算子又恰恰能反演出速度模型。

1985 年, Berkhout 指出,地震测量的任何几何配置都可以利用所谓的“数据矩阵”来表示。图 2 所示的 WRW 模型,显示了一次传播和反射的过程(“+”指下行波场;“-”指上行波场)。

$$P(z_0) = D^{-1}(z_0) \sum_m [W^{-1}(z_0, z_m) R(z_m) W^{-1}(z_m, z_0)] S^+(z_0) \quad (4)$$

转换矩阵

$$X(z_0, z_0) = \sum_m [W^{-1}(z_0, z_m) X(z_m) W^{-1}(z_m, z_0)] \quad (5)$$

震源矩阵 $S^+(z_0)$ 的每一列表示 1 个震源(或排列)在地表 z_0 处的下行波场;数据矩阵 $P(z_0)$ 中相应的列则代表在检波器排列处测得的上行波场;接收器矩阵 $D^{-1}(z_0)$ 的每一行代表 1 个接收器位置(或排列)的算子;转换矩阵 $X(z_0, z_0)$ 的 1 个元素代表 1 个独立检波元素的上行波场(与 1 个独立震源点相关)。 W^+ 的列和 W^- 的行分别定义了上行波场和下行波场的 1 次传播算子。 R 定义了 z 深度处入射波场的反射算子。

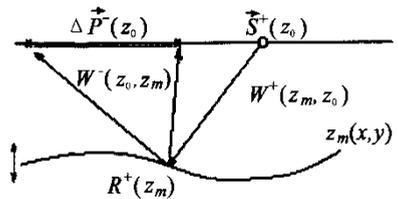


图 2 WRW 模型

CFP 技术成像分为 2 步,第一步聚焦(在检波处聚焦),选择适当的综合算子,将 z_0 处的检波器排列 $D(z_0)$ 进行综合,得到深度为 z_m 、水平位置为 x_i 的最优化的检波器响应;第二步聚焦(在激发处聚焦):选择适当的综合算子,将 z_0 处的聚焦震源排列进行综合,得到 z_m 深度、 x_j 位置的“聚焦震源”。计算的过程中有 2 个关键点:一是将逆时聚焦算子的每一

道与相应的 CFP 道进行互相关,得到“时偏差异模板”(DTS 模板),再是在 DTS 模板中的相应的时偏差异去更新聚焦算子的每一道。

CFP 成像技术将叠前偏移与速度分析独立开来,用算子更新代替传统上对速度场的直接更新,最后能从经过正确更新的聚焦算子反演出地下速度场。该技术在精确成像的同时极大避免了“速度难题”。在处理复杂的近地表难题、消除表面相关的和内部的多次波、多分量偏移、地下盐丘时延、地震监测成像等方面都有着独到的效果,有着广阔的发展空间。但该方法计算效率比较低,只适合对某特定层位进行成像,不适合全剖面偏移成像,而且对先验的构造信息依赖性强,DTS 模板选择的过程中需要人工干预。

5 讨论

5.1 四种偏移方法的成像特点

叠前深度偏移是一种对复杂地质构造成像的重要而有效的方法,每一种偏移方法都涉及到对参数的近似和局限性^[20],会在不同的方面影响地震资料的不同特征,因此在实际应用中,选择偏移方法既要考虑方法的适应范围,又要顾及数据本身的特点和地质构造的复杂性^[21],下面对 4 种偏移方法的成像特点进行总结。

(1) Kirchhoff 积分法:该方法的主要优点在于计算效率高,便于目标处理,对陡倾角地层较为适应,并允许根据地层倾角和相干性进行加权与道切除,是石油界主流的偏移方法,但它不是保幅的偏移成像方法,不利于叠后的属性分析和油藏描述,通常不能适应强横向速度变化。

(2) 波动方程有限差分法:该方法利用有限差分方法解近似方程,对地震波向下延拓成像,成像过程中具有在低信噪比的地方比较有效、偏移结果噪声小、适应强横向速度变化等优点,但其偏移的地层倾角最大为 60°,且各级近似方程都有倾角限制,计算效率低。

(3) MF 方法:该方法最大的特点就是用算子的修正过程代替了传统偏移方法中的速度模型修正,极大地避免了速度难题,在处理复杂问题时有着卓越的功能^[22];由于该方法处于初步研究阶段,理论还有待进一步完善。另外,基于射线理论的多聚焦方法,不利于叠后的岩性分析。

(4) CFP 方法:成像借助于著名的“聚焦”概念(而不是“波场延拓”)来实现,将震源(或检波器)排列的响应进行特殊的时延叠加。CFP 技术的优越性来源于它优良的方法原理:它没有实际地质模型进行假设或简化,从而能充分利用没有经过修饰的真实数据,而且它

用聚焦算子的更新代替了传统的速度更新,但该方法计算效率比较低,只适合对某特定层位进行成像,不适合全剖面偏移成像,而且对先验的构造信息依赖性强,DTS 模板选择的过程中需要人工干预。

5.2 叠前深度偏移的发展方向

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,随着不同叠前深度方法的发展和完善,勘探精度不断提高,叠前深度偏移将在油气勘探中发挥越来越重要的作用^[23]。笔者认为,叠前深度偏移在以下几个方面将有着广阔的发展空间。

(1) 建立正确的速度模型是叠前深度偏移质量的重要保证。如何克服深度偏移成像中存在的致命“速度难题”是该方法能否进一步很好地应用到复杂构造地区的关键因素之一。近年来,一种叠前深度偏移的双平方根(double-square-root,简称 DSR)方程法被提出来,DSR 将速度模型分为依赖性速度模型和独立性速度模型,前者与 DMO 紧密相关,后者独立于地质构造的几何形状^[24]。显然这种方法为有效解决“速度难题”提供了新的方案。其技术难点在于如何将独立性速度模型的指导作用适时地应用到依赖性速度模型的更新上。现在这方面的研究取得了某些进展。

(2) 从方法理论入手,深入研究各种偏移方法的适应范围和成像特征。地震波传播算子的计算速度和精度是制约叠前深度偏移特别是制约三维叠前深度偏移的关键因素。偏移过程中既要涉及到对参数的近似以保证计算的速度,更要运用合适的理论和偏移方法以保证结果的精度。针对不同的实际勘探要求和地质构造背景选择合理精确的偏移方法。目前,对于二维的情况,其理论方法和成像特征已经有了比较系统的研究,但三维的情况还需要深入、细致的探讨。

(3) 继续推进和发展基于惠更斯原理的“波场综合”技术。“波场综合”技术更有效、更好地成像,并能提供诸如“依赖角度的反射系数”等多的界面信息。在运用叠前深度偏移技术的过程中,结合“波场综合”技术,从地震波的属性分析、AVO 在横向和垂向的响应、能量吸收分析、地震子波分析等方面入手,充分挖掘地震数据的有效信息,从而对油气进行更加合理、准确的评价。

(4) 采用多方法综合的思想,利用各种方法的成像特点,进行叠前深度偏移。MF 成像技术采用聚焦参数的最优化过程代替了传统偏移方法中的速度模型修正,极大避免了“速度难题”,因此,其它成像方法(如 Kirchhoff 积分法,波动方程有限差分法)可以结合 MF 技术,更加准确地建立速度模型;同

时,在 CFP 技术成像过程中,可以参考 MF 技术提供的 z_0 剖面(自激自收剖面);同时,在叠前深度偏移过程中,我们不但要考虑 P-P 波的情况,同时也要考虑 P-SV 波的情况。当然,这里存在一个计算成本的问题,一般在构造非常复杂、一种成像方法不能或者难以解决的情况下,可以采用多方法综合的技术。

参考文献:

- [1] Judson D R ,Lin J ,Schultz P S ,et al. Depth migration after stack [J]. *Geophysics* ,1980 ,45 :204 - 12.
- [2] Gelchinsky B. Common Reflecting Element (CRE) method [J]. *Explor Geophysics* ,1988 ,19 :71 - 75.
- [3] Gelchinsky B ,Berkovitch A ,Keydar S. Multifocusing homeomorphic imaging [J]. *Journal of Applied Geophysics* ,1999 :229 - 260.
- [4] Berkhout A J. Pushing the limits of seismic imaging ,Part I Prestack migration in terms of double dynamic focusing [J]. *Geophysics* ,1997 ,62 (3) :937 - 969.
- [5] Hagedoorn J G. A process of seismic reflection interpretation [J]. *Geophysical Prospecting* ,1954 (2) :85 - 127.
- [6] Schneider W A. Integral formulation for migration in two and three dimensions [J]. *Geophysics* ,1978 ,43 :49 - 76.
- [7] Keho TH ,Beydoun W B. Paraxial ray Kirchhoff migration [J]. *Geophysics* ,1988 ,53 :1540 - 1546.
- [8] 董臣强 ,谭友明 ,张明振 ,等. Kirchhoff 积分法叠前深度偏移技术在孤岛地区的应用 [J]. *石油地球物理勘探* ,2002 ,37 (2) :180 - 184.
- [9] Sergey Formes ,Berry man G. Iterative resolution estimation in least squares Kirchhoff migration [J]. *Geophysical Prospecting* ,2002 ,50 :577 - 588.
- [10] Claerbout J F. *Imaging the earth's interior* [M]. Blackwell :Scientific publications ,1985.
- [11] Stolt R H. Migration by Fourier transform [J]. *Geophysics* ,1978 ,43 :23 - 48.
- [12] Huang L J ,Fehler Mc ,Wu R S. Extend local Born Fourier migration method [J]. *Geophysics* ,1999 ,64 :1524 - 1534.
- [13] 陈生昌 ,曹景忠 ,马在田. 基于拟线性 Born 近似的叠前深度偏移方法 [J]. *地球物理学报* ,2001 ,44 :710 - 710.
- [14] Mosher C C ,Foster D J. Common angle imaging conditions for prestack depth migration [A]. 70th Internat Mtg , Soc Explo Geophys Expanded Abstracts [C]. 2000 :830 - 833.
- [15] 金胜汶 ,许士勇 ,吴如山. 基于波动方程的广义屏叠前深度偏移 [J]. *地球物理学报* ,2002 ,45 (5) :684 - 690.
- [16] Cruz , J C R ,Peter H ,Tygel M ,et al. Common reflecting element (CRE) method revisited [J]. *Geophysics* ,2000 ,65 (3) :979 - 993.
- [17] Jürgen M ,Jäger R ,Müller T ,et al. Common-reflection-surface stack—a real data example [J]. *Journal of Applied Geophysics* ,1999 ,42 (3 - 4) :301 - 318.
- [18] Jäger R ,Jürgen M ,German H ,et al. Common reflection surface stack :Image and attributes [J]. *Geophysics* ,2001 ,66 :97 - 109.
- [19] Nelder J ,Mead R A. Simplex method for function minimization [J]. *Comp J* ,1965 , (7) :308 - 313.
- [20] 谢里夫 R E ,吉尔达特 L P. *勘探地震学* [M]. 北京 :石油工业出版社 ,1999.
- [21] 张钊 ,李幼铭 ,刘洪. 几类叠前深度偏移方法的研究现状 [J]. *地球物理学进展* ,2000 ,15 (2) :30 - 40.
- [22] Gurevich B ,Keydar S ,Landa E . Multifocusing over an irregular topography [J]. *Geophysics* ,2002 ,67 (6) :39 - 43.
- [23] 俞国柱 ,姚姚 ,周冰 ,等. 共聚焦点 (CFP) 成像技术述评 [J]. *石油地球物理勘探* ,2002 ,37 (4) :412 - 422.
- [24] Chauris H ,Noble M ,Lambare G ,et al. Migration velocity analysis from locally coherent events in 2 - D laterally heterogeneous media [J]. *Geophysics* ,2002 ,67 (4) :1202 - 1224.
- [25] 陈树文 ,刘洪 ,李幼铭. 三维叠前深度偏移的准三维算法研究 [J]. *地球物理学进展* ,2001 ,16 (4) :23 - 28.
- [27] Bleistein N ,Cohen J ,Jaramill H. True - amplitude transformation to zero offset of data from curved reflectors [J]. *Geophysics* ,1999 ,64 (1) :112 - 129.
- [27] Ron S ,Wang Y H. Velocity analysis after migration [J]. *Geophysical prospecting* ,2002 ,50 :539 - 545.
- [28] Ji Jun. Controlled illumination by wavefront synthesis [R]. SEP report ,1993 ,79 :129 - 143.

A REVIEW ON THE PRESTACK DEPTH MIGRATION

LUO Yin-he ,LIU Jiang-ping ,YU Guo-zhu

(*Institute of Geophysics and Geomatics China University of Geosciences , Wuhan 430074 ,China*)

Abstract : The prestack depth migration is an ideal technique for improving seismic imaging of complex areas and drastic horizontal velocity changes. The basic theory and technical characteristics of four fundamental prestack-depth-imaging methods are described in this paper. The problems and the newest advances both in China and abroad are also discussed. It is hoped that this study can help us find the key problems and seek suitable imaging techniques for areas of complex geological conditions.

Key words : development of prestack depth migration ; seismic imaging of complex areas ; horizontal velocity

作者简介:罗银河(1978 -)男,汉族,湖北赤壁人,2003年毕业于中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,获硕士学位,同年留校任教,主要从事地震勘探资料处理、解释反演等方面的教学和研究工作。