

文章编号: 1001-1986(2010)06-0062-04

基于单程波动方程平面波叠前深度偏移

薛 花¹, 张恩嘉^{1,3}, 赵宪生¹, 施泽进²

- (1. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 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. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司, 四川 成都 610213)

摘要: 阐述了平面波的特点; 分析了 Fourier 变换下球面波的平面波分解; 阐述了炮道集下波场局部分解与成像。通过 Marmousi 模型的试算结果, 验证了该成像方法可提高计算效率。另一方面表明, 射线参数的范围和间隔是影响平面波成像质量的主要因素; 不同角度入射的平面波对最终成像结果的贡献是不同的。

关键词: 平面波; 平面波分解; 球面波; 射线参数; 叠前深度偏移

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.06.013

Plane wave pre-stack depth migration based on wave equation

XUE Hua¹, ZHANG EnJia^{1,3}, ZHAO XianSheng¹, SHI Zejin²

(1. Key Lab of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Geophysical Prospecting Company of CNPC Chuanqing Drill and Exploration Engineering Co. Ltd, Chengdu 610213, China)

Abstract: The characteristics of plane wave are described. Plane wave decomposition of spherical wave under the transformation of Fourier is analyzed. Local decomposition and imaging of plane wave under shot gather are described. Finally, from the result of pilot calculation of the Marmousi model, we can test that the methods of local plane wave pre-stack depth migration imaging based on the wave equation can improve the computational efficiency, the range and spacing of ray parameters are the main factors for plane wave imaging quality, plane wave of different angles of incidence can make different contribution to the final imaging result.

Key words: plane wave; surface wave decomposition; spherical wave; ray parameter; pre-stack depth migration

波动方程叠前深度偏移^[1], 是复杂构造成像的有效工具, 同时也是速度分析的工具。波动方程叠前深度偏移理论上比较完善, 没有高频近似, 其波场外推算子、偏移成像算法以及偏移速度分析等模型均出自于微分概念, 有利于目标区的细微观变化的成像, 从而适应岩性解释的需求。但此种方法的计算量相对较大, 对观测系统变化适应性较差。

在地震勘探中平面波具有抗干扰性强, 突出有效波, 改善大倾角和深层反射, 全局方向性等优点。近些年, 运用平面波进行偏移, 旨在减少计算量和提高计算效率的波动方程叠前深度偏移方法纷纷出现。如 Berkhout^[2]提出的面炮合成偏移方法, Mosher 等^[3]提出了应用 Radon 变换的偏移距方法等。Berkhout 的偏移方法和 Mosher 等的偏移方法不仅有很高的计算效率, 而且对观测系统变化适应性较好。陈生

昌等^[4]已从理论上验证了 Berkhout 的方法和 Mosher 等的方法在本质上是一致的, 都是首先把叠前道集数据合成平面波道集数据, 然后进行偏移。

平面波偏移是精确叠前成像的一种方法, 是将地震测线上一个单炮记录的球面波分解成一系列具有不同射线传播参数的平面波, 再通过平面波波场延拓实现叠前偏移成像。针对特定地下目标体成像质量受诸多因素影响的问题, 在平面波偏移的基础上, 笔者基于波场的局部平面波分解, 应用相关成像条件实现平面波成像。

1 Fourier 变换下球面波的平面波分解

野外实际地震记录通常近似地为点震源激发的球面波, 而目前大多数各种优化反演方法却都是建立在平面波假设基础上, 所以, 将球面波记录分解

收稿日期: 2010-03-01

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国石油化工股份有限公司联合基金资助项目(40739903)

作者简介: 薛 花(1985—), 女, 湖北荆门人, 硕士研究生, 从事波动方程偏移成像方面的研究。

为平面波记录来进行分析处理有实际意义。当球面波传播半径很大时, 可将球面波的波前近似看成平面波。

根据球面波的通解可见^[5], 球面简谐波的数学表示为 $\frac{\exp(-ikR)}{R}$ (k 是传播矢量或波矢, 其模为波数, 波矢的方向与波的传播方向一致), 这里暂时略去 $\exp(i\omega t)$, 因为它在整个运动过程中可视为一个常量。选择震源在坐标原点, 便有 $R = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$ 。研究 $x_3=0$ 平面上的球面波场, 这时的 $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ 。(r 为径向距离)把这个波场对变量 k_{x1} 和 k_{x2} 进行二维傅氏变换并用极坐标代替直角坐标可得:

$$\frac{\exp(-ikr)}{r} = \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[i(k_{x1}x_1 + k_{x2}x_2)]}{\sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{x2}^2}} dk_{x1} dk_{x2}。 (1)$$

式(1)根据空间连续性很容易推广到三维情况, 可以把在 $x_3=0$ 平面上的波场延拓到 $x_3>0$ 和 $x_3<0$ 的空间, 这时每个傅里叶分量都对应着空间中的一个平面波,

$$k_{x3} = \sqrt{k^2 - k_{x1}^2 - k_{x2}^2}。 (2)$$

由此得到三维方程

$$\frac{\exp(-ikR)}{R} = \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[i(k_{x1}x_1 + k_{x2}x_2 + k_{x3}x_3)] \frac{dk_{x1} dk_{x2}}{k_{x3}}。 (3)$$

能进行这种延拓的前提条件是, 式(3)的右端被积函数满足波动方程。所以, 能给出 $x_3=0$ 处波场的正确值, 式(3)即为球面波分解为平面波的公式(被积式中的指数式是传播方向由波矢分量 k_x, k_y, k_z 所给定的平面波, x_1, x_2, x_3 分别为位移分量)。

把式(3)的坐标改变为球坐标, 把对 k_x 和 k_y 的积分换成对角度 θ 和 ψ_1 的积分, 这些角度直接表示每一个平面波的传播方向, 有

$$k_x = k \sin \theta \cos \psi_1,$$

$$k_y = k \sin \theta \sin \psi_1,$$

$$k_z = k \cos \theta。$$

这里 ψ_1 的积分限是从 0 到 2π ; 而对于 θ 则不再限于实数值。这是因为: $k_x = k_y = 0$ 时, $k_z = k$, $\cos \theta = \frac{k_z}{k} = 1$,

所以 $\theta = 0^\circ$; k_x 或 $k_y \rightarrow \pm\infty$ 时, $k_z = i\infty$, $\cos \theta = i\infty$,

$$\theta = \frac{\pi}{2} - i\infty。$$

根据式(2)有, $2kdk = 2k_z dk_z$, $\frac{dk}{dk_z} = \frac{k_z}{k}$, 而直角坐标

与球坐标的关系是 $dk_x dk_y dk_z = k^2 \sin \theta d\theta d\psi_1 dk$,

因而求得 $\frac{dk_x dk_y}{k_z} = k \sin \theta d\theta d\psi_1$, 式(3)可写成

$$\frac{\exp(-ikR)}{R} = \frac{ik}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \exp[i(k_{x1}x_1 + k_{y1}x_2 + k_{z1}x_3)] \sin \theta d\theta d\psi_1 + \frac{ik}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \int_0^{2\pi} \exp[i(k_{x1}x_1 + k_{y1}x_2 + k_{z1}x_3)] \sin \theta d\theta d\psi_1 (4)$$

式(4)右端第一项表示具有不同传播方向的普通平面波的叠加, 而右端第二项对应着复数 θ 值的平面波(即不均匀平面波)的叠加, 因此, 一个球面波可以分解为普通平面波和不均匀平面波的叠加。但

不均匀波只在 xy 平面中传播, 因为 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 。球面波分解为平面波的公式中, 必须包含有不均匀波, 因为这样才能保证 $R=0$ 处的奇异性: 在 $x=y=z=0$ 处, 无数个这种波的叠加给出波场的无穷值, 这对点源是正确的; 在源点以外给出有界的解。

2 炮道集下波场局部分解与成像

在深度 z 处的二维频率域波场 $u(x, z, \omega)$, 对波场每延拓一步, 空间域的波场就进行一次重构, 在深度 $z + \Delta z$ 上,

$$u(x, z + \Delta z, \omega) = \sum_j e^{i\bar{\xi}_j x} \sum_n g(x - \bar{x}_n) \hat{u}_z(\bar{x}_n, \bar{\xi}_j, \omega)。 (5)$$

式中 $\hat{u}_z(\bar{x}_n, \bar{\xi}_j, \omega)$ 为波场 $u(x, z, \omega)$ 的窗口 Fourier 框架展开, 也称为窗口平面波场; $\bar{x}_n$ 为窗口的中心位置; $\bar{\xi}_j$ 为局部波数; ω 为圆频率; $g(x - \bar{x}_n)$ 为高斯窗口函数。即: 任意空间位置的波场, 均由不同窗口中不同局部波数的所有窗口平面波贡献的叠加而构成。为了体现不同方向的局部性波场特征, 如果把所有窗口中具有同一局部波数的窗口平面波叠加在一起, 就得到经过部分重构后的局部相位-空间混合域的波场:

$$u(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_j, \omega) = e^{i\bar{\xi}_j x} \sum_n g(x - \bar{x}_n) \hat{u}_z(\bar{x}_n, \bar{\xi}_j, \omega)。 (6)$$

$u(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_j, \omega)$ 就为一个局部平面波。

应用相关成像条件, 引入对应于源场和反射场的局部平面波 $u^S(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_j, \omega)$ 和 $u^R(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_p, \omega)$, 最终可以得到完整的像

$$I(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_j, \bar{\xi}_p) = \sum_{\omega} u^S(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_j, \omega) u^{R*}(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_p, \omega), (7)$$

式中 $*$ 表示共轭。局部平面波的总成像条件是

$$I(x, z + \Delta z) = \sum_J \sum_P LI(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_j, \bar{\xi}_p, \omega)。 (8)$$

这里 $LI(x, z + \Delta z, \bar{\xi}_j, \bar{\xi}_p, \omega)$ 为局部平面波成像矩阵, 是用局部波数域的局部平面波来进行描述的。局部

平面波成像矩阵,量度了不同局部入射和出射方向对应的入射波场和出射波场对于总成像结果的贡献,它可以在完全的叠前偏移中计算,也可以在面向目标的部分源偏移中计算。

3 射线参数 p 的个数和采样间隔的确定

炮集平面波射线参数 $p = \frac{\sin \alpha}{v}$, 式中 α 为平面波的出射角; v 为近地表速度。射线参数 p 的个数和采样间隔直接关系到平面波偏移计算量的大小和成像的质量。将球面波数据分解为平面波数据会遇到假频问题。ZHANG Yu 等^[6-8]通过计算射线参数 p 的最小个数,使得平面波偏移不产生假频,从而保证成像质量。计算公式为:

$$N_p \geq \frac{N_s \Delta x_s f (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)}{v}, \quad (9)$$

式中 N_p 为射线参数 p 的个数; N_s 为共检波点道集中的炮点个数; Δx_s 为炮点间隔; f 为频率,且 $f = \frac{\omega}{2\pi}$; $\alpha_2 \sim \alpha_1$ 为平面波在地表的出射角范围。由 $\omega p = k_s$, 得

$$\Delta p = \frac{\Delta k_s}{\omega} = \frac{2\pi}{N_s \Delta x_s}, \quad (10)$$

式中 Δp 为射线参数 p 的采样间隔。

从不等式(9)可以看出, N_p 与 f 成线性关系; 缩小出射角的范围可以降低计算量。

4 数值试算

为了验证提出的基于单程波动方程平面波叠前深度偏移成像方法的正确性和有效性,采用国际著名的 Marmousi 模型数据作为数值试算例子。Marmousi 模型构造复杂,存在剧烈的横向变速,是检验叠前深度偏移方法的通用模型。在波场外推过程中采用的是能适应剧烈横向变速情况的傅里叶有限差分法(FFD)。下面给出了不同射线参数情况下平面波的偏移成像结果(p 为负值时相当于线源以最左端炮点为基点开始激发,平面波右下入射的情况, p 为正值时相反,以右端炮点为基点开始激发,左下入射的情况)。图 1 是 Marmousi 模型速度场,共有 240 个炮集,每炮 96 道,炮间距 25 m,道间距 25 m,采样率 4 ms,目标体是 2 500 m 深度下背斜构造中的低速楔形圈闭体。平面波角度范围 $-20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$, 算得需要偏移的 p 剖面个数为 80。

采用不同射线参数对地表平面波进行成像试验,不同的射线参数代表平面波入射的角度不同。图 2 至图 5 分别是射线参数 $p=0, -100, 100, -200$ 地

面合成平面波的偏移成像结果。为得到地下构造清晰的成像效果,现将一定范围内的不同射线参数平面波偏移结果进行叠加,图 6 为 $[-200, 200]$ 范围,间隔 1° 得到的平面波偏移叠加结果。从平面波偏移结果来看,入射的角度大小和范围是影响成像质量的主要因素,不同角度入射的平面波对最终成像结果的贡献大小是不同的。因此,可以有针对性地选择射线参数进行平面波成像。从图 2 至图 5 的偏移结果还可以看出,平面波具有很好的方向性,入射角度范围的增加会降低计算效率。从图 6 的偏移结果看到,平面波偏移剖面同向轴连续性好,没有抖动,浅层断层面成像清晰,深部的成像分明, Marmousi 模型的目标体深部圈闭体得到了较好的成像效果,进一步表明基于单程波动方程平面波叠前深度偏移成像方法的正确性和有效性。

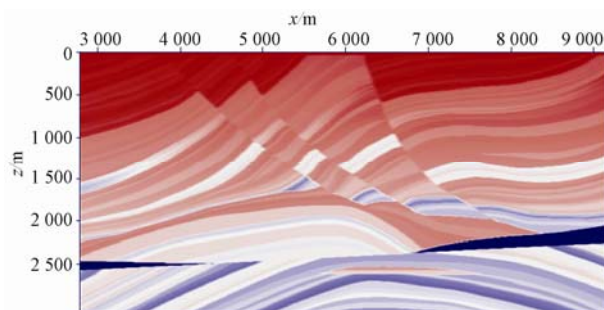


图 1 Marmousi 模型速度场

Fig. 1 Velocity field of Marmousi model

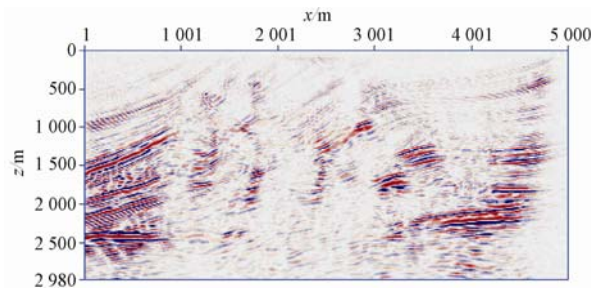


图 2 共炮点道集倾斜叠加 $p=0$ 时偏移结果

Fig. 2 Slant stack migration of common-shot gathers at $p=0$

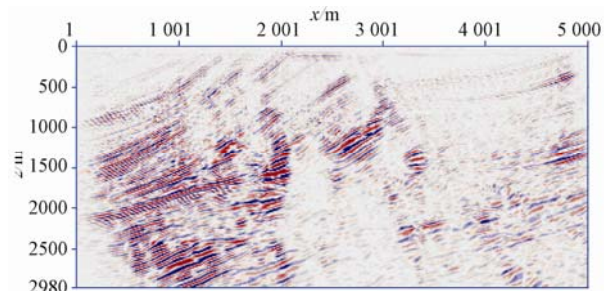


图 3 共炮点道集倾斜叠加 $p=-100$ 时偏移结果

Fig. 3 Slant stack migration of common-shot gathers at $p=-100$

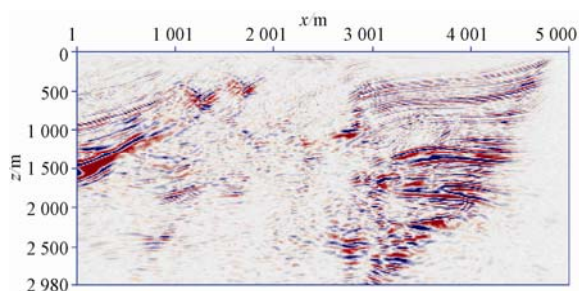


图 4 共炮点道集倾斜叠加 $p=100$ 时偏移结果

Fig. 4 Slant stack migration of common-shot gathers at $p=100$

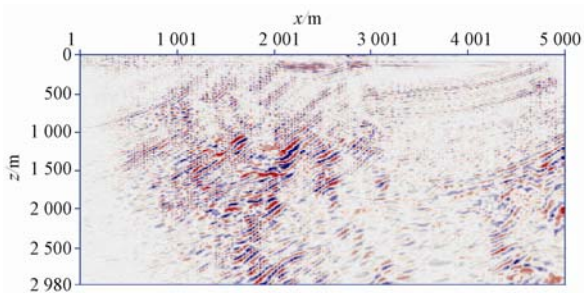


图 5 共炮点道集倾斜叠加 $p=-200$ 时偏移结果

Fig. 5 Slant stack migration of common-shot gathers at $p=-200$

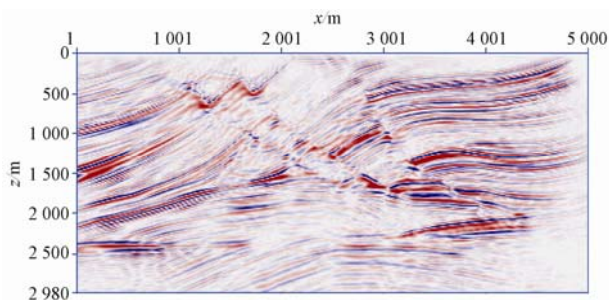


图 6 共炮点道集倾斜叠加 $p=[-200, 200]$ 时偏移结果

Fig. 6 Slant stack migration of common-shot gathers at p from -200 to 200

5 结 论

平面波偏移成像技术是提高波动方程叠前偏移效率的有效方法, 同常规的积分法比较, 具有较高

的成像质量。本文提出的基于单程波动方程平面波叠前深度偏移方法能显著提高计算效率, 通过对射线参数进行有针对性地选择以期达到最佳成像效果。该方法进一步深入可以应用于具有不同结构特征的特殊目标成像以及地震照明分析。

参考文献

- [1] 熊羣. 21 世纪初中期油气地球物理技术展望[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 300-304.
- [2] BERKOUT A J. Areal shot record technology [J]. Journal of Seismic Exploration, 1992, 1(2): 251-264.
- [3] MOSHER C C, FOSTER D J, HASSANZADEH S. Common angle imaging with offset plane waves[J]. Expanded Abstract of 67th Annual Internat SEG Mtg, 1997: 1379-1382.
- [4] 陈生昌, 曹景忠, 马在田. 叠前地震数据的平面波偏移法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 821-826.
- [5] 何樵登. 地震波理论[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 28-37.
- [6] ZHANG Yu, SUN J, NOTFORS C, et al. Delayed-shot 3D depth migration[J]. Geophysics, 2005, 70(5): E21-E28.
- [7] ETGEN J T. How many angles do we really need for delayed-shot migration[J]. Expanded Abstracts of 75th Annual Internat SEG Mtg, 2005: 1985-1989.
- [8] ZHANG Yu, SUN J, GRAY S, et al. Sampling issues in delayed-shot migration and Plane-wave migration[J]. Expanded Abstracts of 68th EAGE Annual Conference and Exhibition, 2006: G12.
- [9] 伊问, M. 层状介质中的弹性波[M]. 刘光鼎, 译. 北京: 地质出版社, 1966.
- [10] 陈生昌, 马在田, WU RU SHAN. 地震波传播路径追踪的波动方程方法[J]. 计算物理, 2008, 25(2): 186-190.
- [11] 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.
- [12] 崔兴福, 刘卫东, 刘桂宝, 等. 平面波偏移、分角度成像与 AVA 道集生成[J]. 石油物探, 2007, 46(6): 615-620.
- [13] 冯伟. 单向传播子的局部平面波分解以及在定向照明分析和目标特征成像中的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 171-178.

《煤田地质与勘探》杂志全文信息网上免费获取

为了更好地服务于广大作者和读者,《煤田地质与勘探》杂志从 2010 年 11 月起开通网上全文信息免费阅读和下载(PDF 格式)功能, 以期进一步提升期刊的影响力和传播面。

读者可登录本刊网站(网址: <http://mtdz.journalserv.com/>), 点击过刊目录, 选择并打开需要阅览文章, 浏览或下载全文请点击页面下方的 Download 即可。

欢迎广大读者登陆本刊网站。