

天然气勘探

# 波动方程叠前偏移在碳酸盐岩成像中的应用研究

王小卫<sup>1,2</sup>, 姚姚<sup>1</sup>, 刘文卿<sup>2</sup>, 王艳香<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430047;

2. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**叠前偏移是解决强横向变速情况下复杂构造成像的一种有效手段,在碳酸盐岩成像处理研究中,利用波动方程叠前偏移较叠后偏移能获得分辨率高、保幅性好的偏移成果,孔洞能得到很好的刻画,串珠聚焦程度好,归位更加合理,能真实反映地下的构造形态,提高碳酸盐岩岩溶地形的地震预测成功率。对时间偏移和深度偏移在理论方法、适用性和处理剖面效果方面进行了分析对比,在地下构造复杂或横向速度变化较大时,叠前深度偏移能获得更好的效果。速度建模是影响叠前偏移成像技术的核心问题之一,获得准确的层速度是叠前深度偏移成功的关键。

**关键词:**波动方程;碳酸盐岩;叠前时间偏移;叠前深度偏移;速度建模

**中图分类号:**TE132.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1672-1926(2011)05-0874-04

**引用格式:**王小卫,姚姚,刘文卿,等.波动方程叠前偏移在碳酸盐岩成像中的应用研究[J].天然气地球科学,2011,22(5):874-877.

## 0 引言

碳酸盐岩油气藏在油气勘探开发领域具有举足轻重的地位,缝洞型储层作为碳酸盐岩储层的一种重要类型,已成为研究热点,根据地震偏移剖面上的“串珠状”反射来识别溶蚀缝洞是有效手段之一。钻探表明,叠后时间偏移上“串珠状”反射特征可信度较低,无法精确刻画缝洞、裂缝。主要原因是叠后偏移不能对绕射点准确归位,对“串珠状”反射不能聚焦,可能会将一些小的断裂聚焦成一些假的“串珠状”反射。而三维叠前偏移技术能够克服常规叠后时间偏移技术基于共中心点叠加的固有缺陷,实现共反射点叠加,绕射点归位更准确,使“串珠状”反射能量更集中、特征更清楚,能进一步提高碳酸盐岩岩溶储层的地震预测成功率。

波动方程叠前偏移方法<sup>[1]</sup>分时间域和深度域2类。与积分法相比,波动方程叠前偏移算法不做积分求和,而是用描述波在介质中的传播过程的算子作波场外推,更适用于以保幅为目的的地震成像。当横向速度变化剧烈,深层有小地质目标时,上覆地

层横向速度较小的变化会导致深层的地质目标空间位置的漂移,进而可能影响钻探。基于波场延拓的波动方程叠前深度偏移是处理复杂地质构造成像的有效工具,深度偏移是基于横向变速的真实地质深度模型发展而来的<sup>[2-3]</sup>,它从根本上解决了射线多路径问题,并具有较好的保幅特性<sup>[3-5]</sup>。

## 1 波动方程偏移原理

在偏移过程中,成像和波场延拓是2个主要部分<sup>[6]</sup>。本文采用频率-空间域有限差分法波动方程叠前深度偏移方法。该方法不仅能使地下反射点准确归位成像,而且还能保持反射波的振幅特征及相位关系,在信噪比、分辨率等方面都优于绕射法<sup>[6]</sup>。在偏移过程中,上行、下行波分别基于各自的单程波方程进行延拓,并通过2个延拓波场的互相关系来提取成像值<sup>[6]</sup>成像。

三维声波方程如下:

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

式(1)中: $v = v(x, y, z)$ 为介质速度。频率-空间域

波场延拓法利用下面公式求解上述方程。

为了解决横向变速问题,对正向传播的下行波进行浮动坐标变换:

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t - \int \frac{dz}{c} \end{cases} \quad (2)$$

新坐标系中下行波方程为:

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

式(3)中: $c=c(z)$ 为参考速度; $u$ 为浮动坐标系下波场的时间—空间域表示形式。在频率—波数域,方程式(3)变为:

$$\begin{aligned} & -(k_x^2 + k_y^2)\bar{u} - \frac{2}{c}i\omega \frac{\partial \bar{u}}{\partial z'} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z'^2} - \\ & \frac{\omega^2}{c^2}\bar{u} + \frac{\omega^2}{v^2}\bar{u} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中: $\omega$ 为圆频率; $\bar{u}$ 为浮动坐标系下波场的频率—波数域形式。简化式(4)得:

$$\left(\frac{\partial}{\partial z'} - \frac{i\omega}{c}\right)^2 \bar{u} = -\left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 - k_y^2\right)\bar{u} \quad (5)$$

由式(5)得:

$$\frac{\partial}{\partial z'} - \frac{i\omega}{v} = \frac{\partial}{\partial z} \quad (6)$$

其表示坐标变换前后的算子关系。因此,下行波正向延拓方程可表示为:

$$\left(\frac{\partial}{\partial z'} - \frac{i\omega}{c}\right)\bar{u} = i\left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 - k_y^2\right)^{\frac{1}{2}}\bar{u} \quad (7)$$

为使方程式(7)适应深度成像,特将其做如下变换:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z'} &= -\frac{i\omega}{v}\bar{u} + \frac{i\omega}{c}\bar{u} + i\left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 - k_y^2\right)^{\frac{1}{2}}\bar{u} \\ &+ \frac{i\omega}{v}\bar{u} \end{aligned} \quad (8)$$

对式(8)进行分解得到:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z'} = i\left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 - k_y^2\right)^{\frac{1}{2}}\bar{u} + \frac{i\omega}{v}\bar{u} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z'} = -i\omega\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{c}\right)\bar{u} \quad (10)$$

式(9)为绕射项方程,可使绕射波收敛;式(10)为折射项方程,其作用是校正由于横向变速引起的时差。

表1列出了时间偏移和深度偏移在算法精度、横向速度变化适应性等方面的差别。

表 1 时间偏移和深度偏移特征对比

特征	时间偏移	深度偏移
公式的应用	只用绕射项	同时利用绕射项和折射项
横向速度变化与速度模型	不变或中、弱变, RMS 速度,单斜或水平层状模型	速度强变化,层速度、速度深度模型
射线是否折射	否	是
垂线标度	时间	深度或时间深度

2 深度域偏移速度建模方法

地震速度建模是一个多信息综合分析的过程,目前最有效的手段是采用均方根速度转换方法估算层速度与相干反演相结合的方式 进行层速度建模。通过叠前时间偏移迭代后,均方根速度模型比较准确,在一定程度上符合地质变化规律。因此,对于水平层状或单倾的介质,均方根速度模型转换的方法能得到较好的初始模型,并通过层析成像模型优化能得到精确的速度模型。对于地层倾角变化较大、速度不均一的断块,简单的速度转换方法不能合理地描述速度结构,采用多井相干反演法反演速度从根本上解决了这个问题。采用多井约束地震速度建模技术,用井间区域数据(井速度)约束反演地震速度能反映速度纵、横向合理的变化趋势,完成高精度的地下宏观层速度建模<sup>[7-8]</sup>。对于断块复杂、低信噪比地震资料通常采用相干反演法与均方根速度转换法联合建立层速度模型,相互验证速度的合理性,使速度建模精度更高(图1)。

为保证从浅层到中、深层都能获得准确的层速度,应采取逐层模型优化迭代处理技术,最有效的检验模型准确性方法之一就是利用目标线叠前深度偏移,用偏移后的CRP成像道集的延迟时借助层析成像方法优化速度模型。因此,采用克希霍夫叠前深度偏移方法建立精确速度模型,最终采用波动方程叠前深度偏移方法进行最终深度域偏移成像。

3 成像效果分析

为得到更好的缝洞成像效果,我们通过2种途径来解决,第一种途径是对现有的克希霍夫法在旅行时计算和偏移方法方面进行改进,采用波前重建的旅行时计算,其中考虑了多个射线,相对保幅处理和基于模型的孔径定义等;第二种途径是采用叠前波动方程偏移方法成像。缝洞会引起绕射地震波场,绕射和反射地震波场有明显的运动学特征差异。对于绕射波而言,如果采用共中心点叠加方法,会使

绕射波能量发散,难以精确刻画溶洞地质体,而叠前成像技术能使溶洞体绕射波获得较好的归位,有利于精细刻画溶洞地质体,如图 2 为实际地震资料叠

后时间偏移(a) 和叠前时间偏移剖面(b) 溶洞成像效果对比,可以看出,叠前时间偏移剖面上可以更清楚地获得溶洞地质体所引起的串珠状反射。

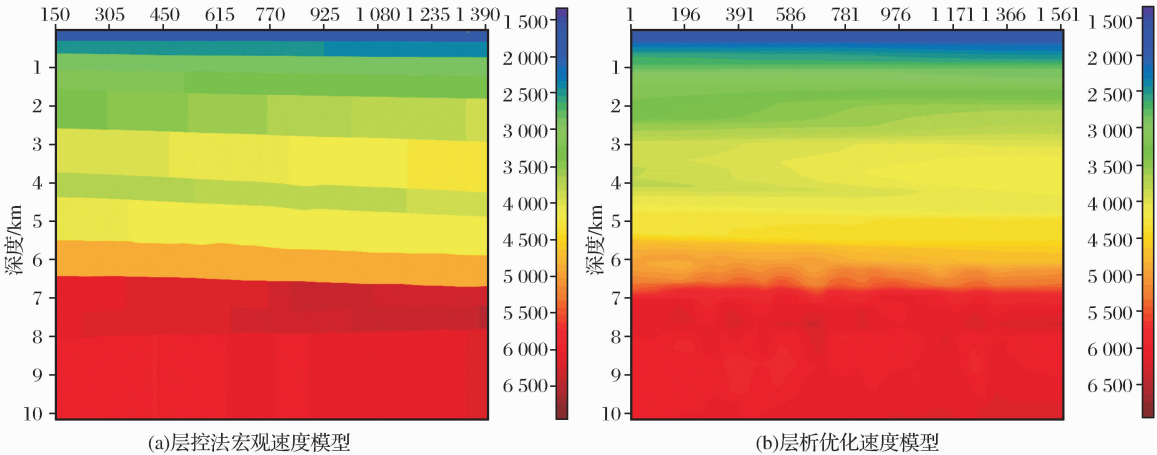


图 1 层控法宏观速度模型(a)与层析优化速度模型对比(b)

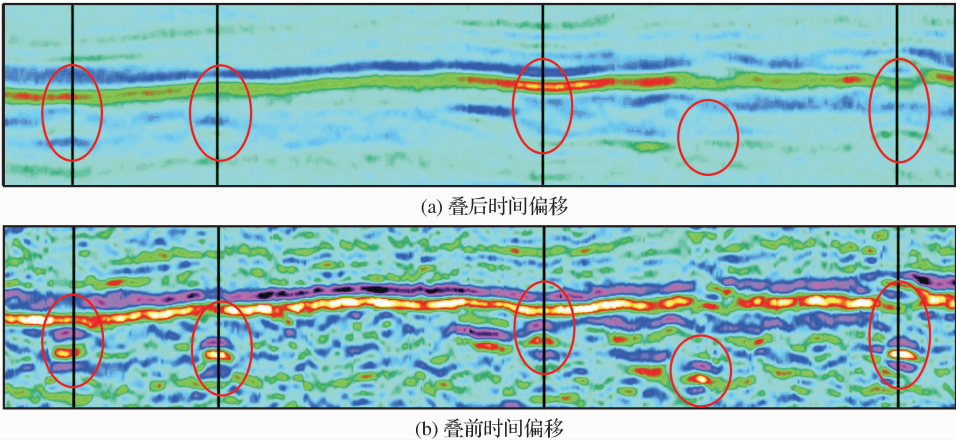


图 2 叠后时间偏移(a)和叠前时间偏移(b)剖面对比

从图 2 可看出:叠后时间偏移无法使缝洞等碳酸盐岩地质体成像,或孔洞归位的横向误差大,对裂缝的探测能力也不够,而且叠后偏移保真度和分辨率低,难以捕捉断裂、缝洞等目标。叠前时间偏移方法能实现串珠状反射成像,且具有较高保真度,弯曲射线在道集内沿非零炮检距的轨迹将能量聚焦在地

下共成像点的位置,使倾斜同相轴及非零偏移道的能量正确聚焦归位,反映地下地层的真实现象,对串珠进行清楚的刻画。对于深度域成像而言(图 3),当横向速度变化剧烈,深层地质目标随上覆地层横向速度的变化产生空间位置的漂移,基于波场延拓的波动方程叠前深度偏移方法不仅能处理复杂地质

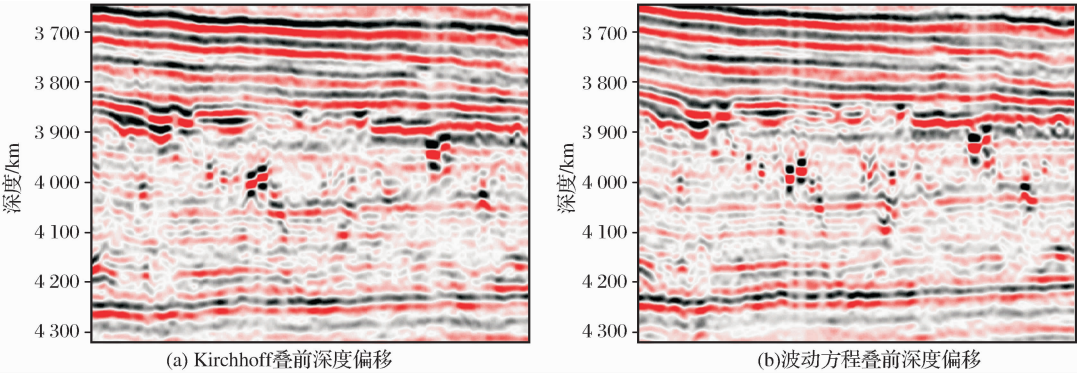


图 3 Kirchhoff 叠前深度偏移与波动方程叠前深度偏移对比

构造成像中的射线多路径问题,使缝洞等目标精确成像,同时能准确解决缝洞的空间位移问题,有较好的保幅性。

从图3 Kirchhoff 积分法与波动方程叠前深度偏移的研究对比结果中可以看出波动方程叠前深度偏移断点归位准确,消除了上覆地层速度异常对下覆地层的影响,得到地下准确的构造形态,串珠聚焦程度好,归位更加合理,边界更加收敛。

## 4 结论

叠前深度偏移考虑了折射效应,在地下构造复杂或者横向速度变化较大时,成像位置更加准确。在碳酸盐岩地震成像研究中,以往深度域成像技术是以克希霍夫算法为主,该方法的优势在于能计算最快的波至时间,但存在多路径的问题,对非均质性很强的碳酸盐岩缝洞成像聚焦效果不能达到最佳。因此,采用波动方程叠前偏移技术使特殊地质体成像及聚焦效果更好,归位更加合理,能真实反映地下的构造形态,准确刻画孔洞的位置,较克希霍夫偏移能获得分辨率高、保幅性更好的成像结果,能有效提高碳酸盐岩岩溶储层的地震预测成功率。波动方程偏移方法具有较好的保真度,频率、振幅等特征保持较好,在复杂构造成像及岩性油气藏勘探中优势明显,该方法已成为碳酸盐岩缝洞性储层成像研究的新方向。

## 参考文献(References):

- [1] Öz Yilmaz. Seismic Data Analysis[M]. USA: Society of Exploration Geophysicists, 2001.
- [2] Su Qin, He Zhenhua, Tian Yancan, *et al.* Piedmont with a com-

plex structure in the pre-stack depth migration imaging method and its application[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 571-575. [苏勤, 贺振华, 田彦灿, 等. 山前带复杂构造成像中叠前深度偏移方法研究及应用[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 571-575.]

- [3] Wang Xishuang, Liang Qi, Xu Ling, *et al.* Application and progress of prestack depth migration technology[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(6): 727-732. [王喜双, 梁奇, 徐凌, 等. 叠前深度偏移技术应用与进展[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 727-732.]
- [4] He Ying, Wang Huazhong, Ma Zaitian, *et al.* Wave equation prestack depth imaging in complex terrain conditions[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2002, 25(3): 13-19. [何英, 王华忠, 马在田, 等. 复杂地形条件下波动方程叠前深度成像[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 25(3): 13-19.]
- [5] Zhang Jianwei, Lu Lieqin, Qiang Fangqing, *et al.* Contiguous two-dimensional pre-stack depth migration processing and image modeling techniques[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(3): 203-206. [张建伟, 鲁烈琴, 强芳青, 等. 二维叠前深度偏移连片处理及成像建模技术[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 203-206.]
- [6] Ma Shufang, Li Zhenchun. Review of wave equation prestack depth migration methods[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(3): 153-160. [马淑芳, 李振春. 波动方程叠前深度偏移方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(3): 153-160.]
- [7] Ma Zaitian. Seismic Migration Imaging[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. [马在田. 地震偏移成像[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.]
- [8] Zhang Tieqiang, Wang Zhenghe. The application of pre-stack depth migration on complicated Structures' imaging[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(4): 281-284. [张铁强, 王正和. 叠前深度偏移在复杂构造模型成像中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(4): 281-284.]

## Application of Wave Equation Prestack Migration in Carbonate Imaging

WANG Xiao-wei<sup>1,2</sup>, YAO Yao<sup>1</sup>, LIU Wen-qing<sup>2</sup>, WANG Yan-xiang<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Northwest Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Prestack migration has been an effectively method in some areas with complicated structure and dramatic lateral variation in velocity. In comparison with the wave equation pre-stack migration method to post migration method, the pre-stack migration method in seismic imagery processing of fracture-cave in carbonate rock has ability to obtain high resolution and amplitude-preserved migration results, finely portray the fracture-cave, and highly draw a string of beads. The migration results can reflect real structure underground and enhance the success rate of seismic prediction in carbonate karst area. We compare the pre-stack time migration method with the pre-stack depth migration method in theory, applicability and processing seismic section, and find out that the pre-stack depth migration method can obtain the profitable result in some areas with complicated structure and dramatic lateral variation in velocity. Velocity modeling is an important technique in wave equation pre-stack depth migration, so an accurate interval velocity is a key for wave equation pre-stack depth migration.

**Key words:** Wave equation; Carbonate; Prestack time migration; Prestack depth migration; Velocity modeling.