

# VSP 逆时偏移及其存储策略研究

王维红\*<sup>①</sup> 郭雪豹<sup>①</sup> 石颖<sup>①②</sup> 刘诗竹<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>东北石油大学地球科学学院,黑龙江大庆 163318; <sup>②</sup>黑龙江省普通高校科技创新团队“断层变形、封闭性及与流体运移”,黑龙江大庆 163318)

王维红,郭雪豹,石颖,刘诗竹. VSP 逆时偏移及其存储策略研究. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 77-83.

**摘要** 在逆时偏移算法中,应用常规的随机边界方法虽可节约存储空间,但浅层常伴有随机噪声。应用 PML 边界方法虽可改善上述状况,却又面临地震波场存储的压力。为此,本文采用优化系数的高阶有限差分方法实现 VSP 数据逆时深度偏移,采用拉普拉斯去噪方法压制低频噪声,并兼顾考虑精度和存储,在 PML 边界震源波场正传过程中保存部分波场,进而利用保存的信息与检波点波场同步反传,不仅可有效地节约存储空间,也确保了替代波场信息的可靠性。断层模型测试表明,本文方法能够以低存储实现高精度的 VSP 逆时偏移,相比于地面地震偏移,断层成像更清晰、准确。

**关键词** VSP 逆时偏移 随机边界 PML 边界

**中图分类号**: P631 **文献标识码**: A **doi**: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.01.013

## 1 引言

由于受地震资料采集方式及数据成像方法本身的限制,往往导致应用常规地面地震数据成像方法难以清晰刻画地层内部复杂构造。而 VSP 采用地面放炮、井中接收的采集方式,与地面地震波场相比,VSP 波场信息丰富,地震波衰减及受干扰程度小,分辨率更高<sup>[1]</sup>。基于双程波动方程的叠前逆时深度偏移方法不受地层倾角限制,能够适应介质速度的横向剧烈变化,在理论上可对地震波场中各个方向传播的波(反射波、棱柱波、回转波、绕射波等)进行成像,被认为是最为精确的地震成像方法。逆时偏移方法于 20 世纪 80 年代初由三位学者相继提出<sup>[2~4]</sup>,随后,Loewenthal 等<sup>[5]</sup>将该方法应用于空间一频率域波场计算。Levin<sup>[6]</sup>进一步概括了该方法的基本原理及实现方法。尽管受计算设备条件的限制,在近 20 多年的时间里,该方法发展缓慢,但是有关 VSP 逆时偏移的理论研究一直未中断<sup>[7~9]</sup>。近年来,随着计算机硬件技术的快速发展,逆时偏移再次成为偏移方法的焦点而备受关注<sup>[10~14]</sup>。将

VSP 与逆时偏移相结合,对 VSP 采集的丰富波场进行逆时偏移,就可以对地下构造清晰成像。相较于地面地震资料逆时偏移,其在井周围局部区域及深部一些大倾角构造更具优势,有助于构造和岩性精细分析。

随着 GPU 和 FPGA 等硬件技术的迅速发展,逆时偏移的计算成本问题得到了有效的解决,但方法对计算存储的巨大需求依然面临严峻挑战。Clapp<sup>[15]</sup>为克服存储的限制,在逆时偏移过程中采用随机边界,以牺牲计算量为代价实现波场逆推;刘红伟等<sup>[16]</sup>采用随机边界以计算换存储,并通过 GPU/CPU 协同并行的方式节省了两者之间的数据通讯,计算速度获得显著提升。但由于随机边界方法本身的局限性,会使最后的偏移结果在经过去噪处理后依然存在一些噪声,浅层尤为严重,偏移结果不甚理想。Berenger<sup>[17]</sup>依据电磁波传播理论提出的 PML 边界在理论上可以吸收不同方向不同频率的反射波,取得了较好的效果。尽管应用 PML 边界可以解决这个问题,但却无法通过波场逆推来节约存储,也就是说要使用 PML 边界就需要保存每一时刻的波场信息,存储量巨大。为了以较低的存

\* 黑龙江省大庆市东北石油大学地球科学学院,163318。Email:wwhsy@sina.com

本文于 2013 年 11 月 6 日收到,最终修改稿于 2014 年 12 月 2 日收到。

本研究受国家“863”计划项目(2012AA061202)和国家自然科学基金项目(41474118)联合资助。

储在逆时偏移中应用 PML 边界,本文通过在震源波场正向传播过程中保存部分位置处每一时刻的波场信息<sup>[18]</sup>,并利用这些记录的波场信息实现波场逆推。

本文采用优化系数的高阶有限差分方法模拟波场传播<sup>[19,20]</sup>,使得在同样的差分阶数下,能够有效地减弱频散,实现更高精度的数值模拟;为兼顾存储和成像精度等因素,采用保存部分波场信息的 PML 边界方法;最后对成像结果采用拉普拉斯去噪方法压制低频噪声。断层模型测试说明,本文方法能够以低存储实现高精度的 VSP 逆时深度偏移。

## 2 逆时偏移的基本原理

逆时偏移过程主要包括震源波场的正向传播和检波点波场的反向传播。在进行震源波场正向传播过程中,为减弱边界反射的影响,需要添加边界条件;然后将每一时刻的正传波场存储起来,在检波点波场反向传播过程中取对应时刻的正传波场进行互相关成像,并对得到的剖面进行去噪处理,从而得到

最后的偏移结果。本文采用计算简单、精度高的优化系数高阶有限差分方法。

### 2.1 高阶有限差分方法

二维均匀介质中的声波方程为

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

式中:  $P$  为波场值;  $v$  为介质速度。

时间二阶、空间  $2L$  阶精度的声波方程有限差分格式<sup>[21]</sup>为

$$P_{i,j}^{n+1} = 2P_{i,j}^n - P_{i,j}^{n-1} + \frac{v^2 \Delta t^2}{\Delta x^2} \sum_{l=1}^L a_l [P_{i+l,j}^n + P_{i-l,j}^n - 2P_{i,j}^n] + \frac{v^2 \Delta t^2}{\Delta z^2} \sum_{l=1}^L a_l [P_{i,j+l}^n + P_{i,j-l}^n - 2P_{i,j}^n] \quad (2)$$

式中:  $\Delta x$ 、 $\Delta z$  分别为  $x$ 、 $z$  方向的网格间距;  $\Delta t$  为时间步长;  $i$ 、 $j$  分别为  $x$ 、 $z$  方向网格点序号;  $n$  为时间采样序号;  $a_l$  为有限差分系数。

本文采用时间 2 阶、空间 16 阶的差分格式。为进一步提高计算精度采用优化系数(表 1)的高阶有限差分方法<sup>[22]</sup>。

表 1 优化的有限差分系数

系数	4 阶	6 阶	8 阶	10 阶	12 阶	14 阶	16 阶
$a_0$	-2.55567466	2.81952122	2.97399944	3.05450492	3.12108522	3.16275980	3.18543410
$a_1$	1.37106192	1.57500756	1.70507669	1.77642739	1.83730507	1.87636137	1.89789462
$a_2$	0.09322459	0.18267338	0.25861812	0.30779013	0.35408741	0.38612121	0.40456799
$a_3$		0.01742643	0.04577745	0.07115999	0.09988277	0.12263042	0.13676734
$a_4$			0.00523630	0.01422784	0.02817135	0.04190565	0.05150324
$a_5$				0.00168305	0.00653900	0.01330243	0.01893502
$a_6$					0.00092547	0.00344731	0.00619345
$a_7$						0.00055985	0.00159455
$a_8$							0.00020980

### 2.2 边界条件

#### 2.2.1 随机边界条件

随机边界条件目的是消除人工边界、自由边界产生的边界反射。随机边界条件并没有对波场外推算子做出任何改变,仅是在偏移速度场外增加随机速度层,形成随机速度模型。

构造的随机边界函数<sup>[15]</sup>

$$V(x, z) = v(x, z) - r \times d \quad (3)$$

式中:  $V(x, z)$  为边界点的随机速度函数;  $v(x, z)$  为边界点的原始速度函数;  $r$  是随机数;  $d$  为相应随机速度点与内层边界的空间距离。随机函数的随机

性与该点和有效区域的距离成正比。由于边界没有对波场进行吸收,因此可以将正演最后得到的波场重新逆推回去。

#### 2.2.2 PML 边界条件

二维声波方程的时间域 PML 控制方程<sup>[23~25]</sup>为

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + 2d(x, z) \frac{\partial P}{\partial t} + d^2(x, z) P = v^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中  $d(x, z)$  为吸收衰减因子。本文采用余弦型吸收衰减因子<sup>[26]</sup>,即

$$b_i = B \left[ 1 - \cos \frac{\pi(P_{ML} - i)}{2P_{ML}} \right] \quad (5)$$

其中:  $b_i$  为沿  $x$  或  $z$  方向的衰减系数;  $P_{ML}$  为边界所占的网格点数;  $B$  为衰减幅度;  $i$  表示模型边界的外边框到模型有效区域边界的网格点号。PML 边界构造如图 1 所示。

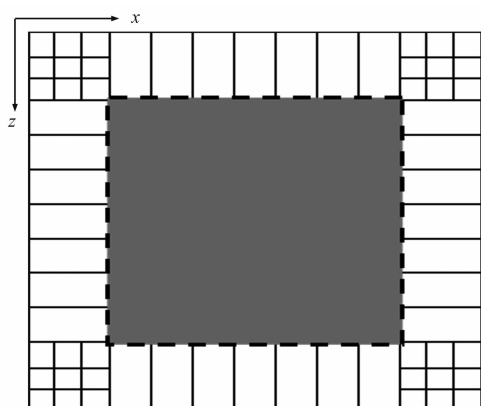


图 1 PML 边界构造

本文所采用的 PML 边界实施方案如下:

将图 1 看作某一时刻的波场,其中内部灰色部分代表有效区域,虚线表示有效区域和 PML 边界的分界线,虚线和外边界之间的部分是 PML 边界的分布。传统逆时偏移中应用 PML 边界需要保存每一时刻的波场信息,而本文所采用的方法<sup>[23]</sup>仅需要在灰色有效区域内临近黑色虚线的位置记录偏移震源波场正传过程中每一时刻的波场信息。而后采用类似随机边界的方法,同时逆推震源波场和检波点波场,与应用随机边界的方法不同之处在于震源波场逆推过程中,会将之前震源波场正传过程中保存的波场信息置于相应位置,用来校正逆推的震源波场。当在偏移过程中使用 PML 边界时,需要保存的波场信息大小为  $N_x \times N_z \times N_t$  ( $N_x$  和  $N_z$  分别为模型的横向、纵向样点数,  $N_t$  为时间样点数),而本文所采用的 PML 边界,仅需要  $(2 \times N_x + 2 \times N_z) \times N_t$ ,在保留原有精度的同时将显著减少波场的存储需求。

### 2.3 成像条件与噪声压制

#### 2.3.1 互相关成像条件

本文采用互相关成像条件<sup>[27]</sup>,可写作

$$I(x, z) = \sum S(x, z, t) \cdot R(x, z, t) \quad (6)$$

其中  $S$  和  $R$  为相应的震源波场及检波点波场。

互相关成像条件应用在震源波场和检波点波场

同步反传的每一时刻当中,是所有时间切片上成像值的累加,从而充分利用了全部的波场信息,不仅可对同一点多次成像,而且可以在一定程度上压制成像噪声。

#### 2.3.2 拉普拉斯去噪

拉普拉斯算子波数域可表示为

$$\text{FFT}[\nabla^2] \rightarrow -(k_x^2 + k_z^2) = -|\mathbf{k}_1|^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{k}_1|^2 &= |\mathbf{k}_R|^2 + |\mathbf{k}_S|^2 - 2|\mathbf{k}_R||\mathbf{k}_S|\cos(\pi - 2\theta) \\ &= \frac{4\omega^2}{v^2} \cos^2 \theta \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{k}_1$ 、 $\mathbf{k}_R$ 、 $\mathbf{k}_S$  分别为成像域波数矢量、检波点波场波数矢量、震源波场波数矢量;  $\theta$  为入射角。

由上式可以看出,拉普拉斯去噪相当于对成像体进行角度域滤波,对大角度噪声压制最好。拉普拉斯去噪为成像后去噪,与其他成像条件相比其形式简单、易于操作,并且效果明显<sup>[16,28,29]</sup>。对成像结果进行低频噪声压制后,就完成了 VSP 逆时偏移的成像处理,进而得到成像数据体,为后续地震解释和综合地质研究提供资料基础。

## 3 模型试算

为测试本文方法的有效性,设计如图 2 所示的断层模型,其纵向、横向网格点数均为 400,空间网格尺寸为  $5\text{m} \times 5\text{m}$ 。首先采用地面放炮井中接收的观测方式。震源从地表左端 50m 开始,向右每隔 50m 放一炮,共 39 炮。将模型的左、右边界设为 1 号井和 2 号井,井中每隔 5m 放置一个检波器,各设置 400 个检波器。震源采用主频为 40Hz 处雷克子波,时间步长为 0.4ms,时间采样点数为 5000。

为了对比 VSP 与地面地震逆时偏移成像结果

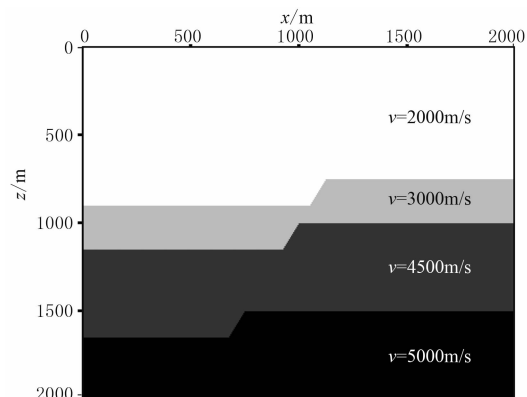


图 2 断层模型

之间的差异,本文也对断层模型进行地面资料的逆时偏移。与 VSP 逆时偏移不同,地面地震逆时偏移算法是将检波器放置于地表,从左侧起向右依次放置 400 个检波器,检波器间距为 5m,其余参数均与 VSP 逆时偏移的相同。

1 号井、2 号井接收到第一炮的 VSP 模拟记录,如图 3a 和图 3b 所示。常规地面地震观测系统正演

的第一炮记录如图 3c 所示(第一炮的炮点位于地表左端 50m 处)。

图 4 是第一炮正演不同时刻波场快照,也就是应用 PML 边界要保存的部分波场信息,图 5 是对记录的正传波场信息逆推所得相应时刻的波场快照。图 6 为第一炮 1200ms 逆推波场与正向波场的波形对比,二者基本相同,说明了本文方法的有效性。

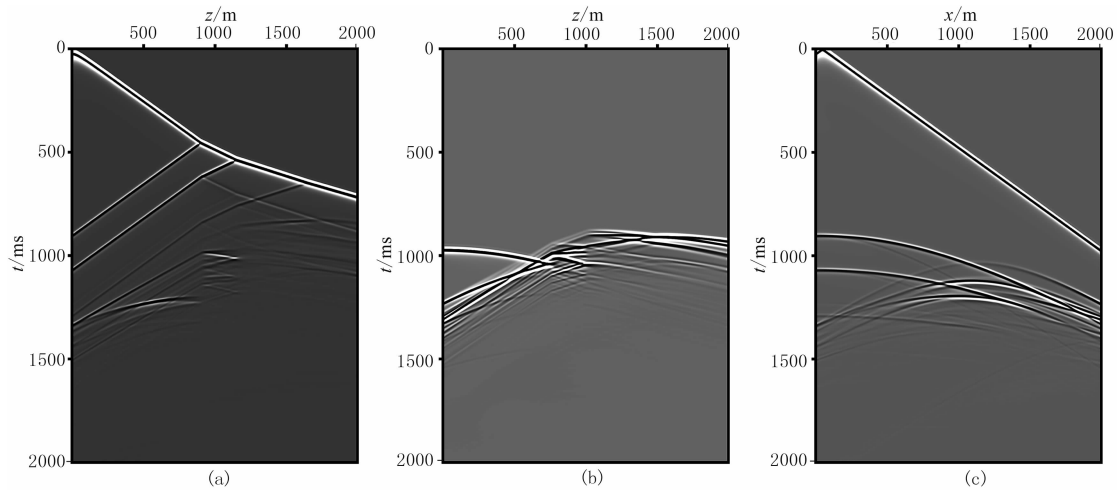


图 3 炮集记录

(a)1 号井 VSP; (b)2 号井 VSP; (c)地面地震

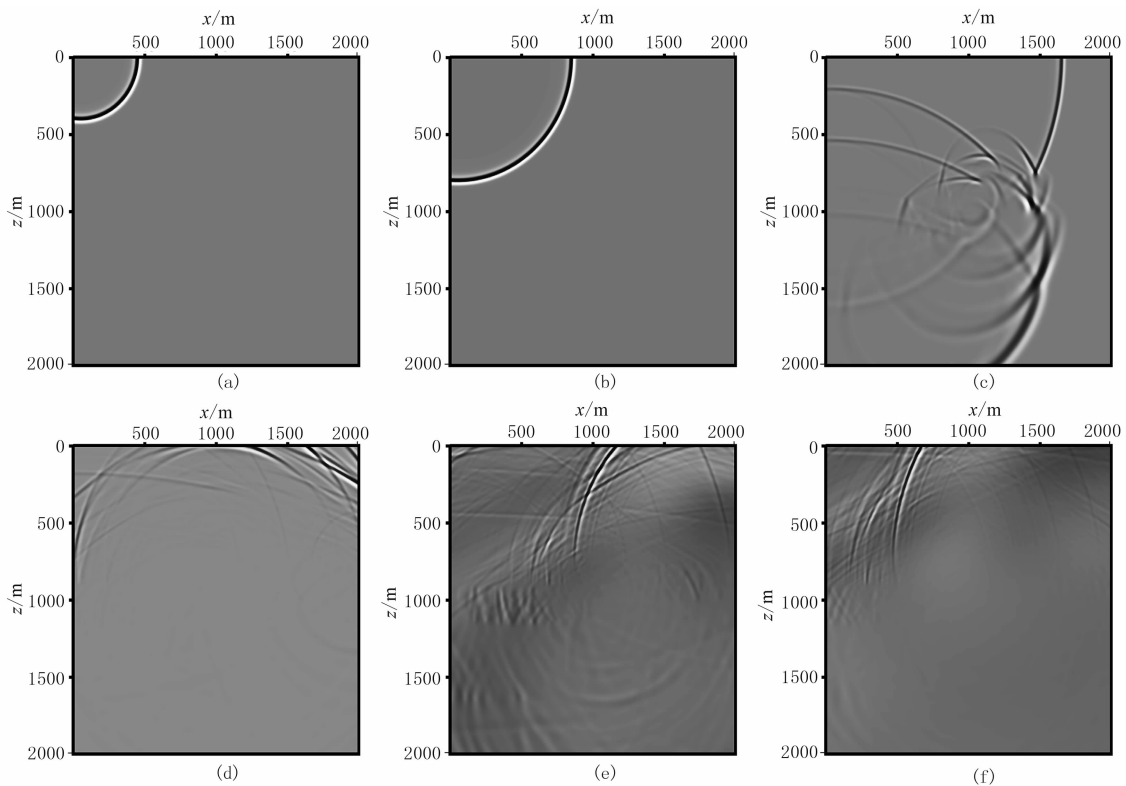


图 4 PML 边界保存全波场时不同时刻波场快照

(a)200ms; (b)400ms; (c)800ms; (d)1200ms; (e)1600ms; (f)1800ms

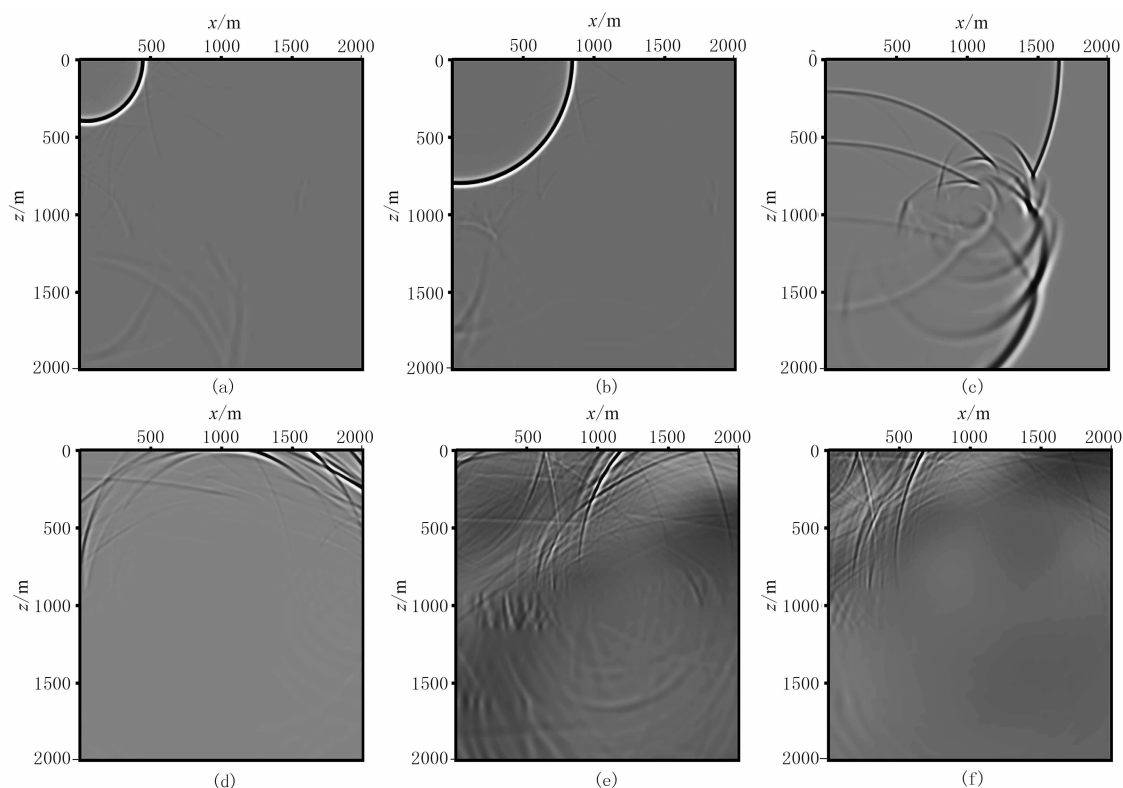


图 5 PML 边界保存部分波场信息所逆推对应时刻波场快照

(a)200ms; (b)400ms; (c)800ms; (d)1200ms; (e)1600ms; (f)1800ms

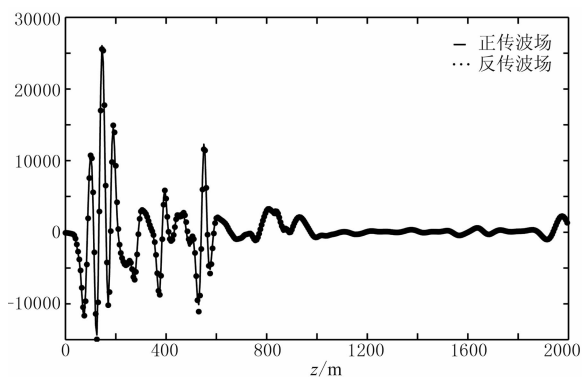


图 6 在 1200ms 和水平距离为 295m 处的正传、反传波场对比

图 7a 为在 VSP 偏移过程中采用随机边界偏移后经拉普拉斯去噪后的结果,图 7b 是 VSP 偏移时采用 PML 边界保存每一时刻波场的偏移结果,图 7c 是 VSP 偏移中采用保存部分波场信息进行逆推偏移出的结果,图 7d 是地面地震偏移时采用 PML 边界保存每一时刻波场的偏移结果。

对比图 7b 和图 7d(白色箭头所标出的位置)可以看出,VSP 偏移在井周围成像精度明显优于地面地震。在深部断层位置处,地面地震偏移成像结果中断面几乎没有成像,而在 VSP 偏移结果中,

则可较为清晰的看出断面所在的位置。由此可以看出,VSP 逆时偏移较地面地震逆时偏移在对井周围及地层深部成像时,都有着较大的优势。

对比图 7a、图 7b(白色实线圈出的部分)可以看出,图 7a 存在明显的噪声,而采用 PML 边界的图 7b 在此处则比较清晰,说明随机边界固然解决了波场存储问题,但由于方法本身的限制,不可避免地引进了噪声。而采用 PML 边界,边界反射会被吸收衰减掉,故能够在该处清晰成像。

图 7c 为采用保存部分波场信息逆推偏移结果,对比图 7b 和图 7c,偏移结果保留了 PML 边界在浅部清晰成像的效果,虽然较随机边界多了一些存储量,但其成像效果明显优于随机边界,而且方法本身所占用的存储量仅是原来应用 PML 边界保存全部波场时的百分之一。相较于其成像效果,这些存储量是可以接受的。

## 4 结论

本文采用基于双程波方程的逆时偏移方法对 VSP 地震资料成像,与常规的射线法和单程波方法

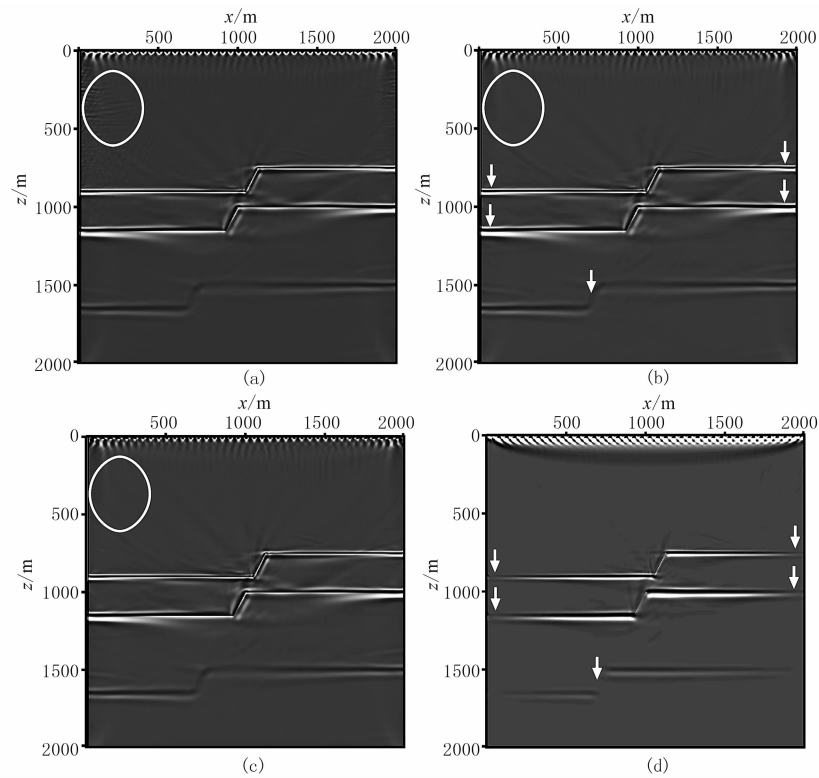


图 7 断层模型的成像结果

(a) VSP 资料随机边界逆时偏移; (b) VSP 资料 PML 边界保存全部波场逆时偏移;  
(c) VSP 资料 PML 边界保存部分波场逆时偏移; (d) 地面地震逆时偏移

不同,在很大程度上提高了成像精度。文中采用优化的有限差分系数计算地震波场传播,在差分阶数相同的情况下,相比于常规的差分系数,精度更高。相比于地面地震逆时偏移,VSP 逆时偏移在井周围的局部区域及地层深部成像方面优势明显。同时,对 VSP 逆时偏移计算的边界问题进行了深入研究,随机边界虽可节约存储,但其成像效果受到影响,浅层出现明显噪声,而采用改进的 PML 边界,可在保留 PML 边界优势的前提下减少大量存储。模型数据测试表明,本文方法逆推的波场与实际正传波场基本相同,基本不影响精度。

#### 参考文献

- [ 1 ] 孙赞东. 三维三分量 VSP 方法原理及应用. 北京:石油工业出版社,2011,1-4.
- [ 2 ] Whitmore N D. Iterative depth migration by backward time propagation. SEG Technical Program Expanded Abstracts,1983,2:382-385.
- [ 3 ] Baysal E,Kosloff D D and Sherwood J W C. Reverse time migration. Geophysics,1983,48(11):1514-1524.
- [ 4 ] McMechan G A. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values. Geophysical Prospecting,1983,31(3):412-420.
- [ 5 ] Loewenthal D,Mufti I R. Reverse-time migration in spatial frequency domain. Geophysics,1983,48(5):627-635.
- [ 6 ] Levin S A. Principles of reverse time migration. Geophysics,1984,49(5):581-583.
- [ 7 ] 朱金明,严俊华. VSP 逆时偏移处理. 石油地球物理勘探,1991,26(5):564-570.  
Zhu Jinming,Yan Junhua. VSP reverse-time migration. OGP,1991,26(5):564-570.
- [ 8 ] 朱金明,董敏煜,李承楚. VSP 的双程无反射波动方程逆时偏移. 石油地球物理勘探,1989,24(3):256-270.  
Zhu Jinming,Dong Minyu,Li Chengchu. VSP reverse-time migration using two-way nonreflection wave equation. OGP,1989,24(3):256-270.
- [ 9 ] 侯安宁,何樵登. VSP 数据的逆时偏移. 长春地质学院学报,1990,20(2):227-233.  
Hou Anning,He Qiaodeng. Reverse-time migration of vertical seismic profiling data. Journal of Changchun University of Earth Science,1990,20(2):227-233.
- [ 10 ] Mulder W,Plessix R. One-way and two-way wave equation migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts,2003,22:881-884.
- [ 11 ] Bednar J B,Stein J,Yoon K et al. An up and down talk in the two-way walk. SEG Technical Program Expanded Abstracts,2003,22:877-880.



- [12] Bednar J B, Stein J, Yoon K et al. One-way versus two-way wave equation imaging. Is two-way worth it? 65th EAGE Annual Conference and Exhibition, 2003, B11.
- [13] Yoon K, Marfurt K J, Starr W. Challenges in reverse-time migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23:1057-1060.
- [14] 李振春, 朱绪峰, 韩文功. 真振幅偏移方法综述. 勘探地球物理进展, 2008, 41(1):10-15.  
Li Zhenchun, Zhu Xufeng, Han Wengong. Review of true-amplitude migration methods. Progress in Exploration Geophysics, 2008, 41(1):10-15.
- [15] Clapp R G. Reverse time migration with random boundaries. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28:2809-2813.
- [16] 刘红伟, 刘洪, 邹振等. 地震叠前逆时偏移中的去噪与存储. 地球物理学报, 2010, 53(9):2171-2180.  
Liu Hongwei, Liu Hong, Zou Zhen et al. The problems of denoise and storage in seismic reverse time migration. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(9):2171-2180.
- [17] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetics waves. Journal of Computation Physics, 1994, 114:185-200.
- [18] 胡昊, 刘伊克, 常旭等. 逆时偏移计算中的边界处理分析及应用. 地球物理学报, 2013, 56(6):2033-2042.  
Hu Hao, Liu Yike, Chang Xu et al. Analysis and application of boundary treatment for the computation of reverse-time migration. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6):2033-2042.
- [19] 孙成禹, 丁玉才. 波动方程有限差分双变网格算法的精度分析. 石油地球物理勘探, 2012, 47(4):545-551.  
Sun Chengyu, Ding Yucui. Accuracy analysis of wave equation finite difference with dual-variable grid algorithm. OGP, 2012, 47(4):545-551.
- [20] 孙成禹, 肖云飞, 印兴耀等. 黏弹介质波动方程有限差分分解的稳定性研究. 地震学报, 2010, 32(2):147-156.  
Sun Chengyu, Xiao Yunfei, Yin Xingyao et al. Study on the stability of finite difference solution of visco-elastic wave equations. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(2):147-156.
- [21] 刘洋, 李承楚, 牟永光. 任意偶数阶精度的有限差分数值模拟方法. 石油地球物理勘探, 1998, 33(1):1-10.  
Liu Yang, Li Chengchu, Mou Yongguang. Finite-difference numerical modeling of any even-order accuracy. OGP, 1998, 33(1):1-10.
- [22] Zhang Jinhai, Yao Zhenxing. Optimized finite-difference operator for broadband seismic wave modeling. Geophysics, 2013, 78(1):1-6.
- [23] 郭念民, 吴国忱. 基于PML边界的变网格高阶有限差分声波方程逆时偏移. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2):256-265.  
Guo Nianmin, Wu Guochen. High-order finite difference method in reverse-time migration with variable grids based on PML boundary condition. OGP, 2012, 47(2):256-265.
- [24] 王守东. 声波方程完全匹配层吸收边界. 石油地球物理勘探, 2003, 38(1):31-34.  
Wang Shoudong. Absorbing boundary condition for acoustic wave equation by perfectly matched layer. OGP, 2003, 38(1):31-34.
- [25] 王永刚, 邢文军, 谢万学等. 完全匹配层吸收边界条件的研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(1):19-24.  
Wang Yonggang, Xing Wenjun, Xie Wanxue et al. Study of absorbing boundary condition by perfectly matched layer. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2007, 31(1):19-24.
- [26] 陈可洋. 完全匹配层吸收边界条件研究. 石油物探, 2010, 49(5):472-477.  
Chen Keyang. Study on perfectly matched layer absorbing boundary condition. GPP, 2010, 49(5):472-477.
- [27] 薛东川. 几种叠前逆时偏移成像条件的比较. 石油地球物理勘探, 2013, 48(2):222-227.  
Xue Dongchuan. Imaging condition comparison of pre-stack inverse time migration. OGP, 2013, 48(2):222-227.
- [28] Zhang Y, Sun J. Practical issues in reverse time migration: true amplitude gathers, noise removal and harmonic source encoding. First Break, 2009, 26(1):29-35.
- [29] 陈可洋. 基于拉普拉斯算子的叠前逆时噪声压制方法. 岩性油气藏, 2011, 23(5):87-95.  
Chen Keyang. Pre-stack reverse-time noise suppressing method based on Laplacian operator. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(5):87-95.

(本文编辑:宜明理)

## 作者简介



王维红 副教授, 1975年生; 1999年毕业于大庆石油学院应用地球物理专业, 获学士学位; 2002年毕业于大庆石油学院地球探测与信息技术专业, 获硕士学位; 2006年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所, 获博士学位; 现在东北石油大学地球科学学院从事地震成像与资料处理方面的教学与科研工作。