

Seismic Wave Pre-Stack Reverse-Time Migration

—Model Analysis and Application

Keyang Chen¹, Na Li¹, Cong Wang², Fei Li², Chongyang Yang¹

¹PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing

²College of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing

Email: keyangchen@163.com

Received: Apr. 8th, 2014; revised: May 10th, 2014; accepted: May 20th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

According to the algorithmic difference between the seismic wave reverse-time migration technology and the conventional Kirchhoff integral method's depth migration and one-way wave depth migration technology, we carry out several analyses of key problem on specific aspects of the reverse-time migration method. The paper starts from the theoretical model's impulse response, and finds out the origin mechanisms of the low-frequency reverse-time noise, effectively weakening the low-frequency noise by using correlative reverse-time imaging condition with up/down going wave-field separation processing. The low-frequency reverse-time noise is eliminated afterward with relatively horizontal-amplitude preserved Laplacian operator based on diffusion filter, and this method's processing effect is better than that of conventional high-pass filter method. What's more, 1D reverse-time migration is carried out using different order acoustic wave equations together with 1D Kirchhoff depth migration. The computational results show that perfect application results are achieved in the reverse-time migration processing of practical land's seismic data by considering the above factors.

Keywords

Seismic Wave Equation, Reverse-Time Migration, Cause Analysis, Waveform Difference, Noise Suppression

地震波叠前逆时偏移

一 模型分析与应用

陈可洋¹, 李娜¹, 王聪², 李飞², 杨重洋¹

¹中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆

²东北石油大学地球科学学院, 大庆

Email: keyangchen@163.com

收稿日期: 2014年4月8日; 修回日期: 2014年5月10日; 录用日期: 2014年5月20日

摘要

根据地震波逆时偏移技术与常规克希霍夫和单程波深度成像技术的算法差异, 开展了针对逆时偏移方法关键技术的若干问题分析。从理论模型的脉冲响应出发, 理清了低频背景逆时噪声的成因机理, 采用上下行波波场分离相关逆时成像条件实现有效压制; 采用基于扩散滤波的拉普拉斯算子实现了低频背景逆时噪声的横向相对保幅压制处理, 其效果要优于常规的高通滤波方法; 对比分析了不同阶数声波方程1D逆时偏移处理的成像波形差异以及与克希霍夫结果的差异。计算结果表明, 综合考虑逆时噪声和波形差异成因及其对应的解决方法, 在实际陆地地震资料逆时偏移中取得了较好的应用效果。

关键词

地震波动方程, 逆时偏移, 成因分析, 波形差异, 噪声压制

1. 引言

逆时偏移技术是当前实现复杂构造高精度地震波偏移成像的重要技术之一。该技术采用双程地震波动方程, 不需要对偏移算子进行上、下行波的波场分离处理, 因此对地震波动方程的近似较少, 适合于任意陡倾角、速度在横纵向变化较为剧烈情况的成像问题, 能够解决单程地震波动方程偏移方法受倾角限制的缺陷和克希霍夫叠前深度偏移方法的多值走时问题[1]。此外, 地震波逆时偏移方法可以对多次波、回转反射波等通常认为是干扰波类型复杂波场进行准确成像, 而克希霍夫深度偏移方法和单程波偏移方法均将多次波等波场当作一次反射波进行处理, 这必然引入较大的误差。上述诸多优点正是当前地震波叠前逆时成像技术受到地球物理学界的高度重视并广泛推广应用的原因。随着计算机技术的快速发展, 特别是基于 CPU/GPU 高性能集群并行计算技术和大容量磁盘的快速存储技术的出现, 较大程度地改善了逆时偏移技术工业化应用的现状[2]。

目前对地震波叠前逆时成像技术中的相关问题已开展了诸多研究, 特别是如何提高逆时成像精度方面引起地球物理学界的广泛重视, 这些研究成果主要包括叠前高保真预处理[3]-[5](刘红伟等, 2010; 王童奎等, 2012)、复杂构造层析反演和全波形反演等速度建模方法[6]-[8](杨仁虎等, 2010; Song 等, 2011)、逆时成像条件的改进[9]-[11](Yoon 等, 2006; Antoine 等, 2006; Liu 等, 2007; 康玮等, 2012)、逆时偏移后数据体的补偿和去噪处理[12]-[19](Zhang 等, 2009; 陈可洋, 2011; 陈康等, 2012)等。在前人研究和实践的基础上, 笔者针对逆时偏移技术中的若干问题进行了深入分析研究, 以期提高对逆时成像技术的认识, 并为实际地震资料的逆时偏移处理提供理论方法和应用依据。

2. 逆时偏移基本原理

这里以二维地震波动方程为例[13]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_0^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中, u 为质点震动位移, v_0 为地震波速度。

地震波逆时偏移主要包含震源波场正向传播(式(2))、检波点波场逆时延拓(式(3))、炮检点波场互相关逆时成像($I = \int_t u_s \cdot u_r$, 下表 s 代表震源波场, r 代表检波点波场)三个关键步骤, 该技术的技术流程框图

如图 1 所示, 第 2~第 5 小节对这些关键技术作逐一分析和论证。

我们对式(1)进行时域 2 阶、空域 $2N$ 阶精度规则网格有限差分离散, 得到震源波场正向传播离散方程:

$$u_{m,n}^{k+1} = 2u_{m,n}^k - u_{m,n}^{k-1} + \frac{v_0^2 \Delta t^2}{\Delta h^2} \left[\sum_{i=1}^N a_i (u_{m+1,n}^k + u_{m-1,n}^k + u_{m,n+1}^k + u_{m,n-1}^k - 4u_{m,n}^k) \right] \quad (2)$$

检波点波场逆时延拓离散方程:

$$u_{m,n}^{k-1} = 2u_{m,n}^k - u_{m,n}^{k+1} + \frac{v_0^2 \Delta t^2}{\Delta h^2} \left[\sum_{i=1}^N a_i (u_{m+1,n}^k + u_{m-1,n}^k + u_{m,n+1}^k + u_{m,n-1}^k - 4u_{m,n}^k) \right] \quad (3)$$

式中, a_i 为高阶中心差分系数, N 为空间差分阶数, m 和 n 分别为 x 方向和 z 方向的空间采样点位置, k 代表时间 t 的采样点位置, $\Delta h = \Delta x = \Delta z$ 代表空间步长, Δt 代表时间步长。从式(2)和式(3)可知, 震源波场正向传播和检波点波场逆时延拓具有相似的离散计算公式, 仅波场的延拓方向相反。在人工截断边界处, 我们采用完全匹配层吸收边界条件[15] [16], 以消除或削弱计算边界处的虚假反射波。

3. 低频噪声成因分析

低频、强能量的背景噪声是逆时偏移方法特有的成像特征, 它的存在较大程度地影响了逆时成像剖面的信噪比和分辨率。低频噪声是逆时偏移在波场延拓和成像计算过程中产生的, 通常归结为由内反射引起, 但对具体的内反射形成机理目前仍不清晰, 我们对比开展了深入研究分析。

图 2 为地震波逆时偏移成像过程分解示意图。常规相关法逆时成像条件可以表述为 $I_1 = \textcircled{1} \cdot \textcircled{3} + \textcircled{1} \cdot \textcircled{4} + \textcircled{2} \cdot \textcircled{3} + \textcircled{2} \cdot \textcircled{4}$, 其中 \cdot 代表互相关运算, $\textcircled{1}$ 代表下行震源波场, $\textcircled{2}$ 代表上行反射震源波场, $\textcircled{3}$ 代

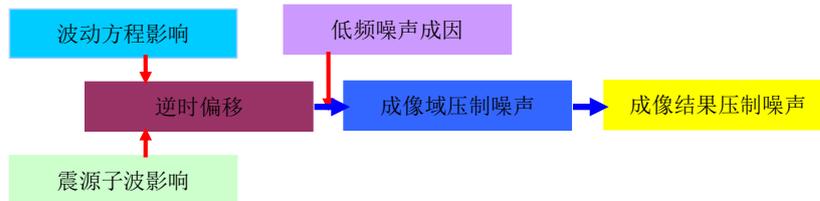


Figure 1. Flow map of reverse-time migration technology

图 1. 逆时偏移技术的流程框图

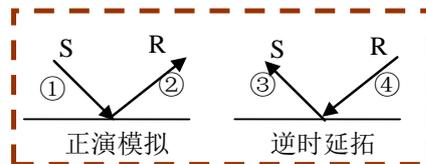


Figure 2. Imaging process decomposition schematic diagram of the reverse-time migration

图 2. 逆时偏移中正演模拟和逆时延拓分解图

表上行反射逆时延拓波场，④代表下行逆时延拓波场。由于地震成像是基于时间一致性，即在成像点位置震源波场和检波点逆时延拓波场同时到达，成像能量聚焦最强，而其他非成像位置的成像能量较弱。分析图 2 可知，当震源模拟和逆时延拓部分中的波场传播方向相同时，如①和④、②和③，沿着这些传播路径进行了成像，并非基于时间一致性原理，因此这些成像能量形成了低频背景噪声；而在逆时成像过程中采用上下行波分离相关逆时成像条件，其成像公式可表述为 $I_2 = \textcircled{1} \cdot \textcircled{3} + \textcircled{2} \cdot \textcircled{4}$ ，可以有效消除同方向传播波场参与成像计算的问题。

图 3(a)为常规有偏移距相关法逆时偏移脉冲响应图，其中 S^1 和 R^1 分别为震源 S 和检波点 R 位置在速度分界面上的投影。为了便于说明低频背景噪声在逆时成像域的波场响应特征，在图 3(a)中增加了 4 条椭圆曲线。分析可知，梅红色曲线①为以震源 S 和检波点 R 位置为焦点的椭圆曲线，蓝色曲线②为以震源投影 S^1 和检波点 R 位置为焦点的椭圆曲线，金色曲线③为以震源 S 和检波点投影 R^1 位置为焦点的椭圆曲线，黑色曲线④为以震源投影 S^1 和检波点投影 R^1 位置为焦点的椭圆曲线。其中椭圆曲线①是真正实现地层成像的全孔径逆时偏移脉冲响应波场，而其他的椭圆曲线②~④均是对低频背景噪声贡献的波场，它们是相同方向的传播波场沿着传播路径进行相关运算形成。图 3(b)为应用上下行波分离相关逆时成像条件后的脉冲响应，其中椭圆曲线②和③已被有效削弱，而椭圆曲线④上的波场能量仍未能实现有效压制。图 4(a)为常规相关逆时成像条件的 TTI 介质逆时偏移结果，图 4(b)为应用上下行波波场分离相关逆时成像条件的 TTI 介质逆时偏移结果。对比可知，图 4(b)中的低频噪声较图 4(a)有了较大程度的压制，但压制不完全，主要原因是上下行波波场分离相关逆时成像条件只适合于水平界面，对于地层界面倾斜情况并不适用，因此该分离成像条件仍有待于进一步的研究，以适应任意倾斜界面情况。

4. 相对保幅的低频噪声压制方法

低频噪声的压制方法目前主要有拉普拉斯去噪方法和高通滤波方法，其中高通滤波方法最为常用。笔者采用基于热传导方程扩散滤波的拉普拉斯去噪方法，该方法是上世纪 90 年代初兴起的一种数字图像增强技术，在自然科学界的多个领域内得到了广泛应用，其低频噪声压制机理来源于物理中的热扩散现

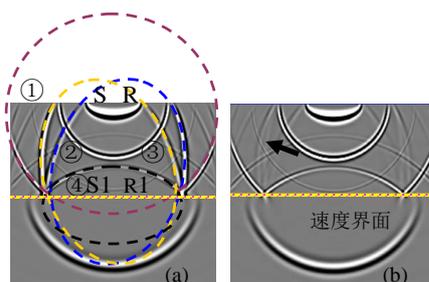


Figure 3. Offset reverse-time migration impulse response with difference reverse-time imaging condition
图 3. 不同逆时成像条件有偏移距逆时偏移脉冲响应

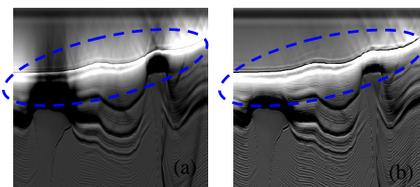


Figure 4. TTI medium reverse-time migration sections with difference reverse-time imaging condition
图 4. 不同成像条件的 TTI 介质逆时偏移剖面

象, 将输入待处理的地震数据作为初始条件, 通过求解关于时间的偏微分方程得到预定扩散时间和扩散系数滤波后的低频噪声数据, 滤波处理后的残差数据即为最终逆时偏移低频噪声压制结果。

图 5(a)为某地区含低频噪声逆时偏移剖面, 图 5(b1)和图 5(b2)分别为基于热传导方程扩散滤波的拉普拉斯去噪方法压制后的剖面及其压制掉的低频噪声, 图 5(b3)为图 5(b1)对应的深度域频谱。图 5(c1)和图 5(c2)分别为高通滤波处理后的剖面及其压制掉的低频噪声, 图 5(c3)为图 5(c1)对应的深度域频谱。由于高通滤波方法是逐道处理的, 其处理剖面存在横向能量过度不自然问题(图 5 蓝色和红色椭圆), 这正是带通滤波方法模糊陡倾角成像波场的主要原因, 而文中采用的扩散滤波拉普拉斯去噪方法则是全局去噪方法, 因此能够克服上述问题, 且去噪后的地震剖面横向能量过渡自然, 有效信号的相对保真性和保幅性更好。同时去噪后剖面的频带更宽, 频谱能量分布更加均匀。

5. 波动方程类型的影响

常用的地震波动方程包括两种类型, 一种是一阶声波方程, 另一种是二阶声波方程。通常一阶声波方程可较为方便地引入高阶交错网格有限差分技术和 PML 吸收边界条件, 而二阶声波方程采用高阶中心网格有限差分法和旁轴近似吸收边界条件。为了比较这两种类型波动方程对逆时偏移结果的影响, 并消除了数值频散和吸收边界等问题对计算结果的影响, 笔者对此进行了相应的数值试验。

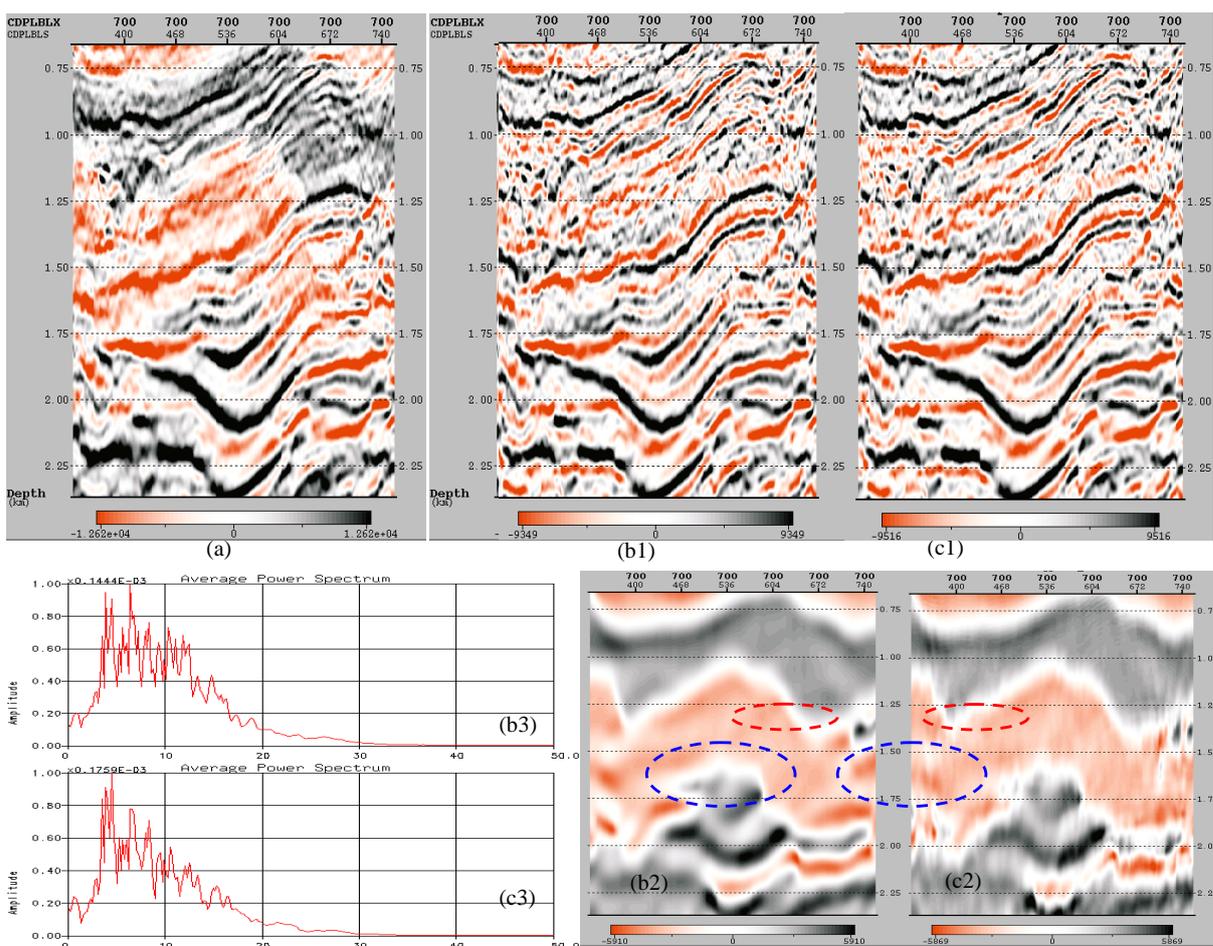


Figure 5. The application with different low frequency noise suppressing methods and their spectrums and residual noises
图 5. 不同低频噪声压制方法应用效果及其去除的低频噪声

这里采用同样的 1D 合成数据(四层介质,并在 * 位置进行激发和接收)和震源子波进行 1D 逆时偏移处理。图 6(a)为采用 1 阶声波方程的 1D 逆时偏移结果,图 6(b)为采用 2 阶声波方程的 1D 逆时偏移结果。对比可知,采用不同类型的波动方程,两者计算结果的波形特征差异较大,其中在采用一阶声波方程的逆时偏移同相轴对应更多相位,由此可见,波动方程类型对逆时偏移结果存在一定的影响。此外,理论分析还表明,零交叉点位置均对应着速度分界面(图 6(b)黑色箭头)。

6. 正演子波的影响

由于逆时偏移中的正演模拟部分可以人为给定震源子波,这是与克希霍夫积分法显著不同的特征之一。笔者为此进行了正演子波波形对逆时偏移结果的影响分析。

这里也采用相似的 1D 合成数据(四层介质,并在 * 位置进行激发和接收)进行不同深度域偏移方法偏移处理。图 7(a)为 1D 克希霍夫深度偏移结果,图 7(b)为 1D 逆时偏移结果。对比可知,这两种方法的在速度分界面位置成像均准确,其中克希霍夫深度偏移结果中的同相轴波形特征与合成数据相一致(图 7(a)右上角波形),而与逆时偏移结果中的同相轴波形特征正好相反。将震源子波的波形作反转(等同于将震源子波进行 180° 相位旋转),此时逆时偏移结果(图 7(c))与克希霍夫深度偏移结果(图 7(a))的波形特征相一致,且低频能量极性也正好反转。

为了进一步说明正演子波对逆时成像结果的影响,这里以 2D 合成数据为例,该数据由一阶声波方程合成。图 8(a)为克希霍夫深度偏移剖面,图 8(b)为二阶声波方程逆时偏移处理剖面。对比可知,这两种偏移结果的波组特征差异较大,其中逆时偏移结果中的同相轴对应多个相位,这是由震源子波引起,且

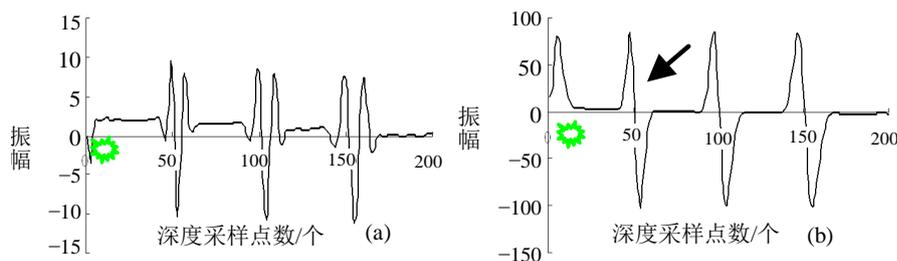


Figure 6. 1D reverse-time migration results with different acoustic wave equation types

图 6. 不同类型声波方程一维逆时偏移结果

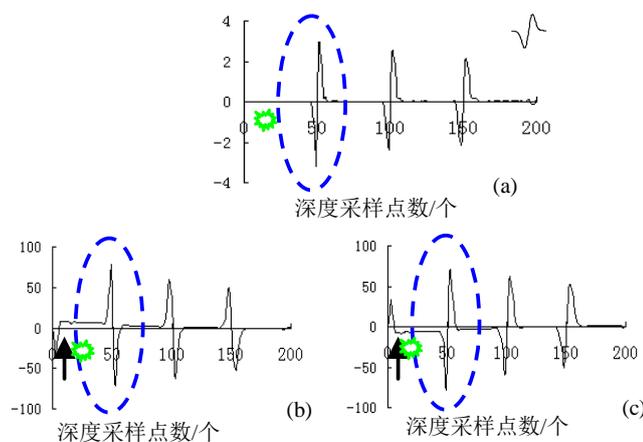


Figure 7. 1D migration results with different imaging methods

图 7. 两种深度域成像方法的 1D 偏移结果

这种差异对后续的地震解释和合成记录对比等均造成较大的影响。为此，笔者从合成记录的直达波中提取子波(图 8(c)右上角波形)，作为逆时偏移的震源子波再进行逆时偏移处理。图 8(c)为经过震源子波校正后的逆时偏移剖面，与图 8(a)对比可知，此时逆时偏移结果的波组特征与克希霍夫积分法相接近。由此可见，震源子波波形对逆时偏移结果存在一定的影响。

7. 应用效果分析

以某地区三维实际地震资料为例，其叠前数据已经过一系列保幅高保真地震资料处理，同时解释层位构建构造模型并采用层析速度反演最终得到了较为准确的深度域层速度模型。在相同偏移频率等参数、叠前地震数据和速度模型情况下，分别采用了克希霍夫积分法叠前深度偏移和逆时偏移这两种成像方法进行成像效果的对比分析。

图 9(a)和图 10(a)分别为克希霍夫积分法叠前深度偏移结果的水平切片和成像剖面，图 9(b)和图 10(b)分别为采用 Ormsby 子波作为震源子波时的逆时偏移结果的水平切片和成像剖面(已经基于扩散滤波的拉

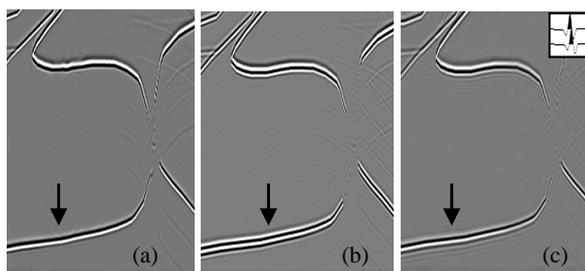


Figure 8. 2D migration sections with different imaging methods
图 8. 两种深度域成像方法的 2D 偏移结果

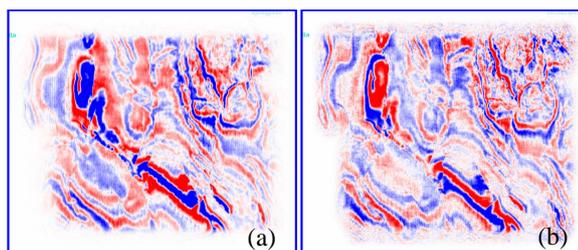


Figure 9. Horizontal slice with different imaging methods
图 9. 两种深度域成像方法实际资料水平切片

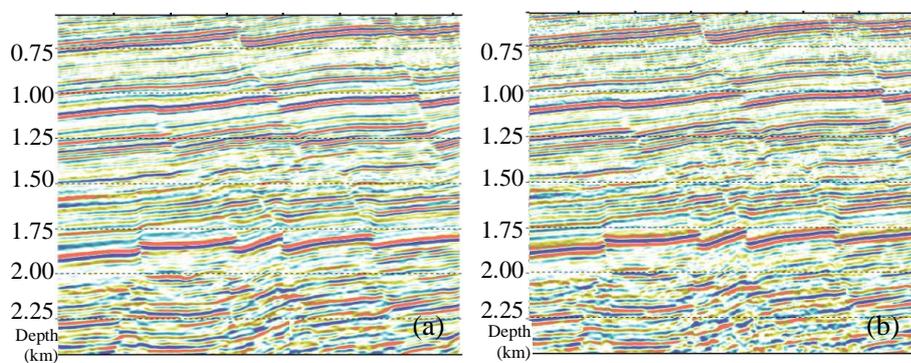


Figure 10. Sections with different imaging methods
图 10. 两种深度域成像方法实际资料偏移剖面

普斯算子去噪处理)。其中图 9(b)未经极性反转处理,图 10(b)已作极性反转处理。分析图 9(a)和图 9(b)可知,这两种成像方法在水平切片上存在近似 180 度相位旋转关系,这与正演子波的影响部分的分析结论相一致。对比图 10(a)和图 10(b)可知,逆时偏移方法与克希霍夫积分法均实现了地层界面的准确成像,波组特征和地层层次清晰,且逆时偏移在断层刻画等方面要优于克希霍夫积分法,层间信息更加丰富,同时这两种成像方法的差异还表现在横向波组能量的强弱变化关系上。综上可知,逆时偏移技术在陆地资料中浅层成像中取得了较好的应用效果。

8. 结论

本文对叠前逆时成像技术中的若干问题进行了详细分析。基于这些分析结果,在实际地震资料逆时偏移中取得了较好的应用效果。

1) 低频噪声是由相同方向传播的波场沿着传播路径进行成像形成的,常规相关法逆时成像条件在逆时成像域表现为以震源和检波点及它们在速度分界面的投影为焦点的 4 条椭圆型响应曲线,其中的 3 条椭圆曲线形成低频噪声的主因,而采用上下行波波场分离的相关逆时成像条件可以有效削弱其中的 2 条椭圆曲线,但该成像条件不适合于倾斜界面情况,因此仍有待进一步研究。

2) 基于扩散滤波的拉普拉斯算子低频噪声压制方法可以有效恢复地层细节,具有更好的相对保幅性,其效果要优于常规的高通滤波方法。

3) 采用不同类型的波动方程进行逆时偏移,其成像结果的波形特征差异较大。与此同时,震源子波是引起克希霍夫深度偏移和逆时偏移这两种成像方法波组特征差异的原因之一。通过合理选取震源子波和波动方程类型是降低这种波组特征差异的有效办法。

参考文献 (References)

- [1] 陈可洋 (2009) 高阶弹性波波动方程正演模拟及逆时偏移成像研究. 硕士论文, 大庆石油学院, 大庆.
- [2] 陈可洋 (2010) 地震波逆时偏移方法研究综述. *勘探地球物理进展*, **3**, 153-159.
- [3] 刘红伟, 李博, 刘洪, 等 (2010) 地震叠前逆时偏移高阶有限差分算法及 GPU 实现. *地球物理学报*, **7**, 1725-1733.
- [4] Yoon, K. and Marfurt K.J. (2006) Reverse-time migration using the Poynting vector. *Exploration Geophysics*, **1**, 102-107.
- [5] Guitton, A., Kaelin, B. and Biondi, B. (2006) Least-square attenuation of reverse-time-migration artifacts. *Geophysics*, **72**, S19-S23.
- [6] Liu, F.Q., Zhang, G., Morton, S.A., et al. (2007) Reverse-time migration using one way wavefield imaging condition. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **26**, 2170-2174.
- [7] Zhang, Y. and James, S. (2009) Practical issues of reverse time migration: True amplitude gathers, noise removal and harmonic source encoding. *First Break*, **26**, 29-35
- [8] 刘红伟, 刘洪, 邹振 (2010) 地震叠前逆时偏移中的去噪与存储. *地球物理学报*, **9**, 2171-2180.
- [9] 杨仁虎, 常旭, 刘伊克 (2010) 叠前逆时偏移影响因素分析. *地球物理学报*, **8**, 1902-1913.
- [10] 陈可洋 (2011) 基于拉普拉斯算子的叠前逆时噪声压制方法. *岩性油气藏*, **5**, 87-95.
- [11] 康玮, 程玖兵 (2012) 叠前逆时偏移假象去除方法. *地球物理学进展*, **3**, 1163-1172.
- [12] 陈康, 吴国忱 (2012) 逆时偏移拉普拉斯算子滤波改进算法. *石油地球物理勘探*, **2**, 249-255.
- [13] 陈可洋 (2009) 标量声波波动方程高阶交错网格有限差分法. *中国海上油气*, **4**, 232-236.
- [14] 陈可洋 (2010) 地震波数值模拟中差分近似的各向异性分析. *石油物探*, **1**, 19-22.
- [15] 陈可洋 (2010) 完全匹配层吸收边界条件研究. *石油物探*, **5**, 472-477.
- [16] 陈可洋 (2010) 边界吸收中镶边法的评价. *中国科学院研究生院学报*, **2**, 170-175.
- [17] 陈可洋 (2011) 网格剖分及其精度和计算量分析. *内陆地震*, **1**, 12-20.

- [18] 陈可洋 (2011) 数值模拟的尺度调节机理. *内陆地震*, **4**, 321-328.
- [19] Song, J.Y., Zheng, X.D., Qin, Z., et al. (2011) Multi-scale seismic full waveform inversion in the frequency-domain with a multi-grid method. *Applied Geophysics*, **4**, 303-310.