

doi: 10.11720/wtyht.2019.1292

宋宗平, 陈可洋, 杨微, 等. 地震波逆时偏移中两种成像条件应用效果对比[J]. 物探与化探, 2019, 43(3): 618-625. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1292>

Song Z P, Chen K Y, Yang W, et al. Comparison of the application effect of two imaging conditions in seismic wave reverse time migration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 618-625. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1292>

地震波逆时偏移中两种成像条件应用效果对比

宋宗平¹, 陈可洋², 杨微³, 李来林², 吴清岭², 范兴才²

(1. 中国石油大庆油田有限责任公司 勘探事业部, 黑龙江 大庆 163453; 2. 中国石油大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712; 3. 中国石油大庆油田有限责任公司 第六采油厂, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 成像条件是实现在地震波场准确成像的关键环节, 而优化逆时成像条件在改善逆时成像应用效果中的作用尤为明显。为此, 从零井源距和非零井源距脉冲响应出发, 系统对比了常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件的逆时偏移脉冲响应波场差异, 分析了逆时偏移低波数噪声的成因机理及波场规律, 同时以复杂断陷理论模型和 SZ 工区实际三维地震资料为例, 系统对比了两种逆时成像条件的成像应用效果。研究表明, 采用基于行波分离法逆时成像条件的成像结果能够有效衰减逆时偏移低波数背景噪声, 恢复掩盖在这种背景噪声之下的有效地震成像信息, 地层细节刻画更加清晰, 这可为当前复杂波场和复杂构造高精度地震成像提供方法指导。

关键词: 逆时偏移; 成像条件; 脉冲响应; 理论模型; 实际资料; 低波数噪声

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)03-0618-08

0 引言

地震波逆时成像技术是当前高精度复杂波场复杂构造成像的关键技术之一, 其具体成像过程包括震源波场的正向传播和检波点波场的逆时延拓, 这两个步骤完全可以借鉴地震波正演模拟相关数值理论算法, 能够保证逆时偏移计算过程稳定和满足计算精确等的要求。与地震波正演模拟差异之处在于, 逆时成像技术需要在地下任意成像空间位置应用逆时成像条件实现地震波场的准确归位^[1-4], 与其他深度域地震成像技术不同, 其具有以下诸多优点^[5-9]: ①采用全地震波动方程实现全波场成像, 因此对波动方程的近似最少; ②能够解决多次波等多路径、多值走时等的复杂波场成像问题; ③适合于速度较为剧烈变化和陡倾角等的复杂构造成像问题。

随着近些年 GPU 高性能计算技术和大容量并行存储技术等飞速发展^[10], 有效缓解了海量存储和巨大计算量的技术瓶颈, 推进了实际地震资料逆

时成像技术的工业化应用进程, 并取得了丰富的理论成果和应用成果^[11-18], 包括适合逆时偏移的叠前保真地震资料处理、高精度速度建模(如层析速度建模、全波形反演建模等)、高精度逆时成像技术(如基于声学介质、各向异性/各向同性弹性介质等^[19])等。逆时成像技术的算法精度得益于地震波动力学相关数值计算方法的创新研究, 如地震波动方程的近似离散化问题^[11](如有限差分法、有限元法、伪谱法等)、人为截断边界的边界吸收问题^[20-23](如完全匹配层吸收边界、阻尼吸收边界等)、计算稳定性问题、数值频散压制问题等, 也得益于基于逆时成像技术特点的相关技术创新研究, 例如逆时成像条件的改进与优化问题^[24-26](如相关法成像条件、震源归一化成像套件、时空移成像条件等)、逆时背景噪声压制问题^[27-30](如拉普拉斯去噪、波场分离成像条件等)。因此, 逆时成像技术已在滨里海、墨西哥湾、北海等地区的盐下或盐丘侧翼等海洋地震资料的应用中取得了重大突破, 同时在高陡构造成像、复杂山前带成像、起伏地表成像、碳酸盐岩

收稿日期: 2018-07-27; 修回日期: 2019-04-25

基金项目: 中国石油天然气股份公司重大科技专项“大庆油田原油 4000 万吨持续稳产关键技术研究”(2011E-1203)

作者简介: 宋宗平(1963-), 男, 汉族, 博士, 高级工程师, 主要从事地震勘探技术研究。Email: songzongping@petrochina.com.cn

缝洞成像等陆地地震资料应用中也已取得了较为丰富的研究成果^[31-34]。

在前人研究的基础上,从脉冲响应、理论模型和实际资料三个方面出发,系统对比了常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件这两种逆时成像条件的波场特征差异及应用效果,其结果可为复杂油气勘探目标高精度地震成像提供理论指导和技术支撑。

1 基本原理

以各向同性介质地震波动方程为例进行逆时偏移研究,其公式如下:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = V^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right\}, \quad (1)$$

式(1)中: P 代表地震波场; V 代表地球介质速度; t 代表时间; x, y, z 代表空间坐标。

逆时成像技术包含震源波场正向传播、检波点波场逆时延拓、应用成像条件共3个步骤,其中前两者的公式依次为:

$$P^{n+1} = 2P^n - P^{n-1} + Q + f_{\text{source}}(x_0, y_0, z_0, t), \quad (2)$$

$$P^{n-1} = 2P^n - P^{n+1} + Q + f_{\text{record}}(x_1, y_1, z_1, t)。 \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: x_0, y_0, z_0 代表某一震源的空间坐标; x_1, y_1, z_1 代表某一检波器的空间坐标; t 代表时间; $n=0, 1, 2, \dots, N$; N 代表总接收道长的总采样点个数; P^{n+1}, P^n, P^{n-1} 分别为下一时刻、当前时刻和上一时刻的波场值; f_{source} 代表震源波场函数; f_{record} 代表检波器接收的地震记录。笔者采用时间2阶、空间16阶精度的有限差分方法对式(1)进行数值离散化,人工截断边界处采用10个网格点的完全匹配层(PML)吸收边界条件,可确保逆时偏移处理具有较高的数值精度和可靠性^[10]。

逆时成像条件是实现在地震波场准确成像的关键环节,工业界普遍采用常规相关法逆时成像条件,对于任意一炮数据的逆时成像条件计算公式如下:

$$\text{Image1} = \int_i P_s \cdot P_r = \left\langle \int_i P_{s,\text{up}} \cdot P_{r,\text{up}} + \int_i P_{s,\text{up}} \cdot P_{r,\text{down}} + \int_i P_{s,\text{down}} \cdot P_{r,\text{up}} + \int_i P_{s,\text{down}} \cdot P_{r,\text{down}} \right\rangle, \quad (4)$$

式(4)中, P_s 和 P_r 分别代表炮点波场和检波点波场,下标up和down分别代表上行波和下行波这两种波场。分析式(4)可知,常规的震源波场和检波点波场的互相关计算可以进一步分解为炮点波场(上行波和下行波)和检波点波场(上行波和下行波)的两两互相关计算,共由4个部分波场相关成

像组成。为了在成像过程中压制低波数逆时偏移背景噪声,引入基于行波分离法逆时成像条件^[26-27],对于任意一炮数据的逆时成像条件计算公式如下:

$$\text{Image2} = \int_i P_{s,\text{up}} \cdot P_{r,\text{up}} + \int_i P_{s,\text{down}} \cdot P_{r,\text{down}}。 \quad (5)$$

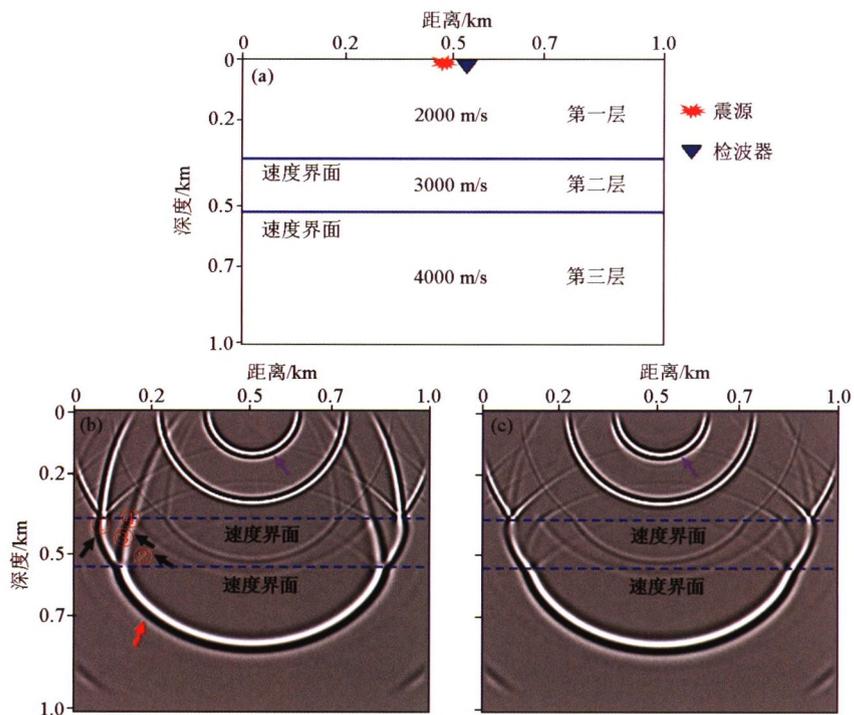
分析式(5)可知,基于行波分离法逆时成像条件只保留了式(4)中的2项,模型研究表明,不同传播方向的震源波场和检波点波场的互相关计算是形成逆时偏移低波数背景噪声的主要成因,相同传播方向的震源波场和检波点波场的互相关计算能够有效提高成像精度和信噪比。因此,笔者采用脉冲响应、理论模型和实际地震资料,系统对比了常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件的逆时偏移应用效果。

2 脉冲响应研究

脉冲响应是验证地震成像准确性的一种有效方法,也是指导实际地震资料逆时偏移处理的一种重要手段^[32]。这里以三层各向同性层状介质速度模型为例,对比了常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件的脉冲响应。

模型尺寸为1 km×1 km,空间步长为5 m×5 m,第一层速度为2 000 m/s,第二层速度为3 000 m/s,第三层速度为4 000 m/s。零偏移距逆时偏移脉冲响应情况,在模型地表中间位置布置1个震源和1个检波器,如图1a所示;有偏移距逆时偏移脉冲响应情况,震源和检波器均布置于地表位置,炮检点间距为300 m,如图2a所示。震源采用峰值频率为40 Hz的雷克子波,检波点波场采用含5个不同幅值和相位的褶积记录。

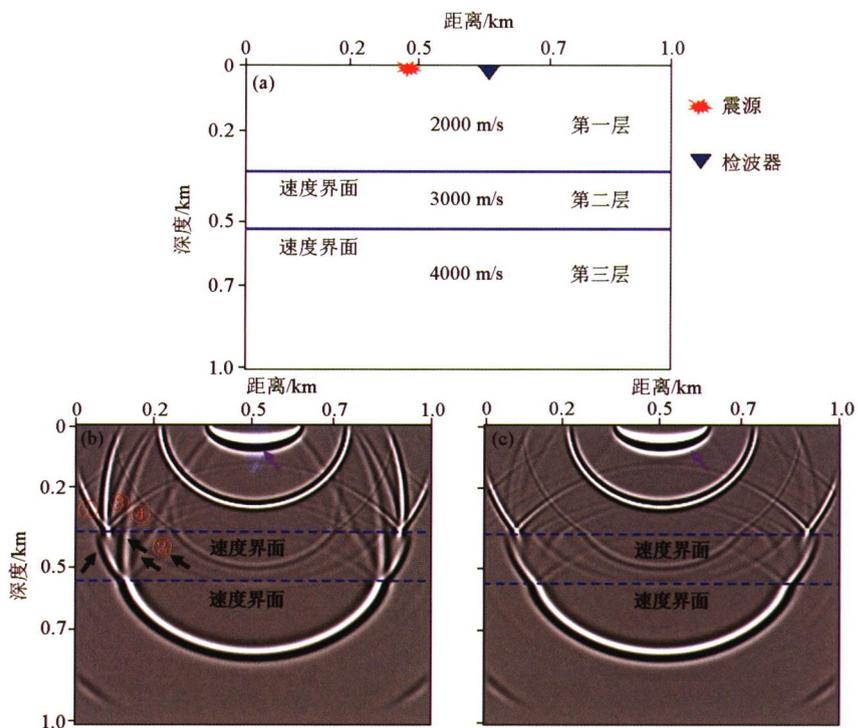
在第一层介质中,零偏移距逆时偏移脉冲响应波场呈圆形(图1b和图1c中紫色箭头所示),有偏移距逆时偏移脉冲响应波场呈椭圆形(图2b和图2c中紫色箭头所示)。随着脉冲响应与层状介质速度界面的相互作用(反射和透射等),速度大的一侧,脉冲响应波场传播的更远,同时有偏移距逆时偏移脉冲响应在速度界面上方形形成4条脉冲响应曲线(图2b中黑色箭头所示),而零偏移距逆时偏移脉冲响应是有偏移距逆时偏移脉冲响应的特例,即震源和检波点位置重叠,其在速度界面上方形形成3条脉冲响应曲线(图1b中黑色箭头所示)。根据逆时偏移脉冲响应机理^[32],图2b中的4条脉冲响应曲线分别为:由以震源位置和检波点位置为焦点的脉冲响应椭圆曲线(①);以震源位置在速度界面的投



a—层状介质模型零偏移距观测系统;b—采用常规逆时成像条件对应的脉冲响应;c—采用基于行波分离法逆时成像条件对应的脉冲响应
 a—Zero offset survey with layered medium model;b—Impulse response with conventional reverse-time;c—Impulse response with reverse-time migration condition based on one-way wave separation

图 1 2 种逆时成像条件零偏移距脉冲响应对比

Fig.1 Comparison of zero offset reverse-time migration impulses between two different imaging conditions



a—层状介质模型有偏移距观测系统;b—采用常规逆时成像条件对应的脉冲响应;c—采用基于行波分离法逆时成像条件对应的脉冲响应
 a—Zero offset survey with layered medium model;b—Impulse response with conventional reverse-time;c—Impulse response with reverse-time migration condition based on one-way wave separation

图 2 2 种逆时成像条件有偏移距逆时偏移脉冲响应对比

Fig.2 Comparison of offset reverse-time migration impulse between two different imaging conditions

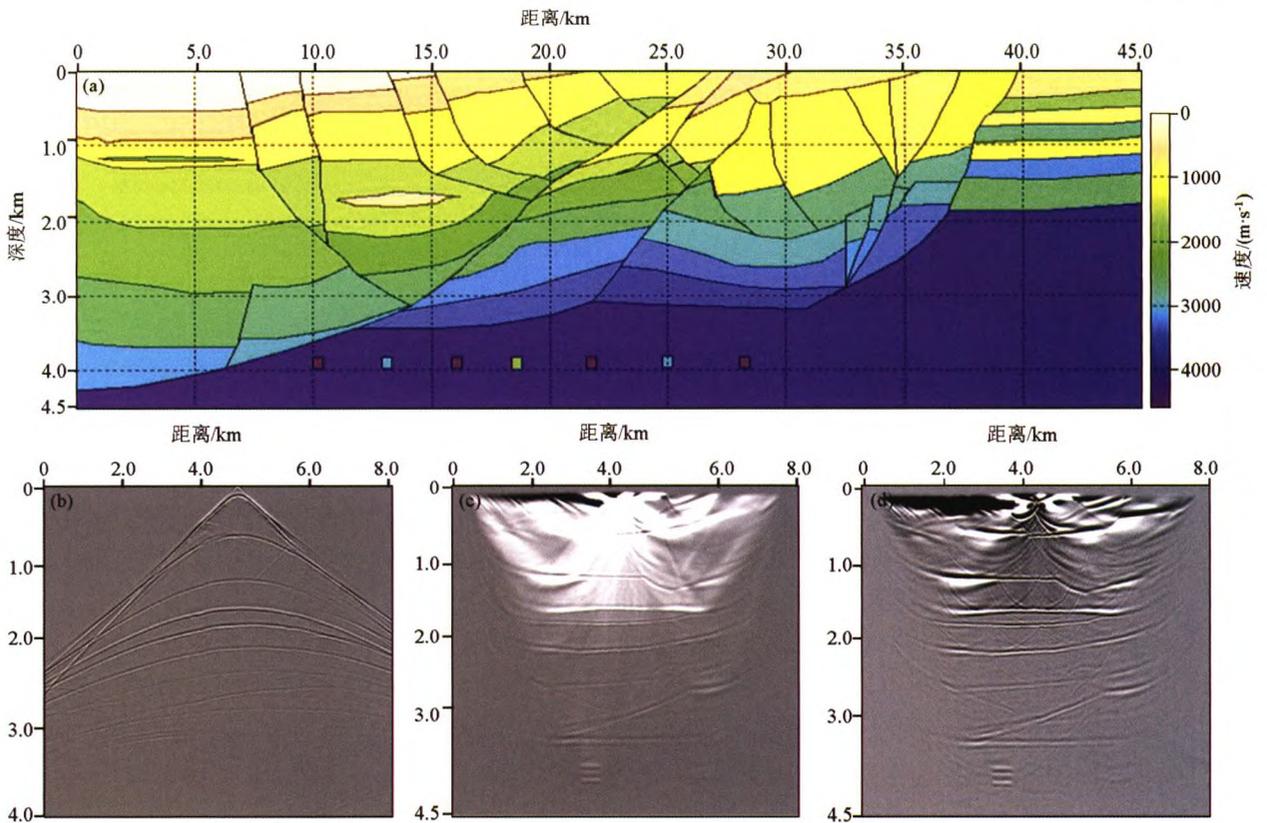
影和检波点位置在速度界面的投影为焦点的脉冲响应椭圆曲线(②);以检波点位置在速度界面的投影和震源位置为焦点的脉冲响应椭圆曲线(③);以震源位置在速度界面的投影和检波点位置为焦点的脉冲响应椭圆曲线(④)。其中曲线①和②代表式(5)对应的逆时成像脉冲响应曲线,是同方向震源波场和检波点波场的互相关计算结果,曲线③和④是不同方向震源波场和检波点波场的互相关计算结果,且在零偏移距逆时偏移脉冲响应情况两条曲线重叠,因此是形成逆时偏移低波数背景噪声的主要贡献波场。对比图 1b、1c 和图 2b、2c 可知,应用基于行波分离法逆时成像条件后,曲线③和④对应的脉冲响应波场得到了明显压制。对于任一炮地震数据的逆时偏移结果,是由 N 个检波点波场与 1 个震源波场组成的 N 个有偏移距脉冲响应波场叠加而成,因此通过这种叠加处理能够进一步提高逆时偏移结果的成像精度和信噪比。分析还可知,逆时偏移脉冲响应中无明显数值频散现象,人工截断边界处边界反射能量较弱,由此表明,笔者采用的逆时偏移算法具有较高数值计算精度,成像结果可靠,可以满足

实际地震资料高精度逆时成像的应用需求。

3 理论模型研究

为了验证第 1 小节逆时偏移脉冲响应分析得出的结论,这里参考大庆探区某地区复杂断陷盆地特点建立了理论模型(图 3a)。模型总大小为 $45 \text{ km} \times 4.5 \text{ km}$,空间步长为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,模型最小速度为 1700 m/s ,最大速度为 5100 m/s ,采用峰值频率为 30 Hz 的雷克子波进行正演模拟和逆时成像,数据采样率为 1 ms ,接收道长为 4 s 。采用双边观测方式,共 371 炮,每炮 801 道接收,最小偏移距为 0 km ,最大偏移距为 4 km 。对采集的单炮记录分别应用常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件进行应用效果对比分析。

图 3b 为图 3a 震源位置处激发的波动方程正演模拟记录。分析可知,单炮记录无明显的数值频散现象,同时边界反射能量较弱,由此表明文中采用的高阶有限差分算法及 PML 边界条件具有较高的数值模拟精度。图 3c 和图 3d 分别为应用常规相关法



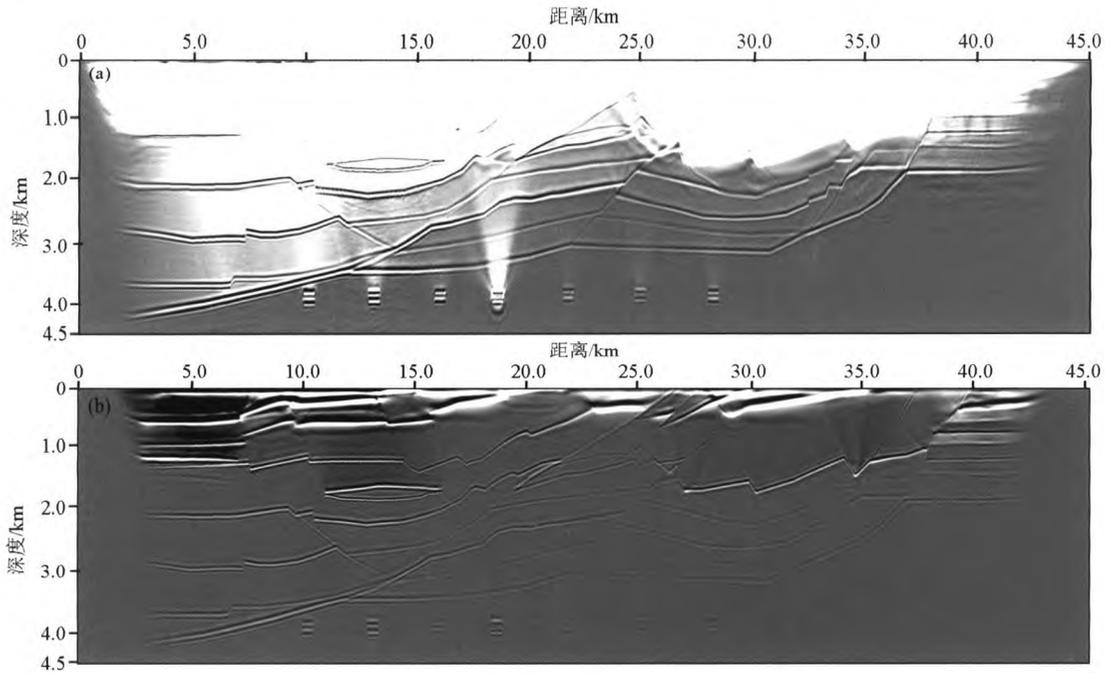
a—复杂构造速度模型;b—正演模拟单炮记录;c—常规逆时成像条件单炮偏移结果;d—基于行波分离法逆时成像条件单炮偏移结果
a—Complex velocity model;b—Forward simulation shot gather record;c—Migration result of one shot gather with conventional reverse-time imaging condition;d—Migration result of one shot gather with reverse-time imaging condition based on one-way wave separation scheme

图 3 不同逆时成像条件理论模型单炮逆时偏移结果

Fig.3 One shot theoretical model reverse-time migration result with different imaging condition

逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件后的理论模型单炮逆时偏移结果,图 4a 和图 4b 分别为应用常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件后的理论模型逆时偏移叠加结果。对比可知,应用常规逆时成像条件的成像结果存在较强能量的低波数背景噪声,几乎掩盖了有效反射地层信息,地层越浅,背景噪声越强,同时背景噪声从浅层到深层逐渐减弱,具有一定的成层性,即波阻抗越大,其上方的低波数背景噪声能量就越强,反之亦

然。而应用基于行波分离法逆时成像条件后的成像结果中,这种背景噪声得到了有效衰减,恢复出了掩盖在强能量背景噪声之下的有效反射信号,地层接触关系清晰准确,具有更高的信噪比和成像精度。通过分析还可知,这种逆时偏移背景噪声的成因与第 1 小节逆时偏移脉冲响应分析中削弱的 2 条脉冲响应椭圆曲线有密切相关性,由此表明基于行波分离法逆时成像条件具有更高的成像精度和信噪比。



a—常规逆时成像条件偏移叠加结果;b—基于行波分离法逆时成像条件偏移叠加结果

a—Migration result with conventional reverse-time imaging condition;b—Migration result with reverse-time imaging condition based on one-way wave separation scheme

图 4 不同逆时成像条件理论模型逆时偏移叠加结果

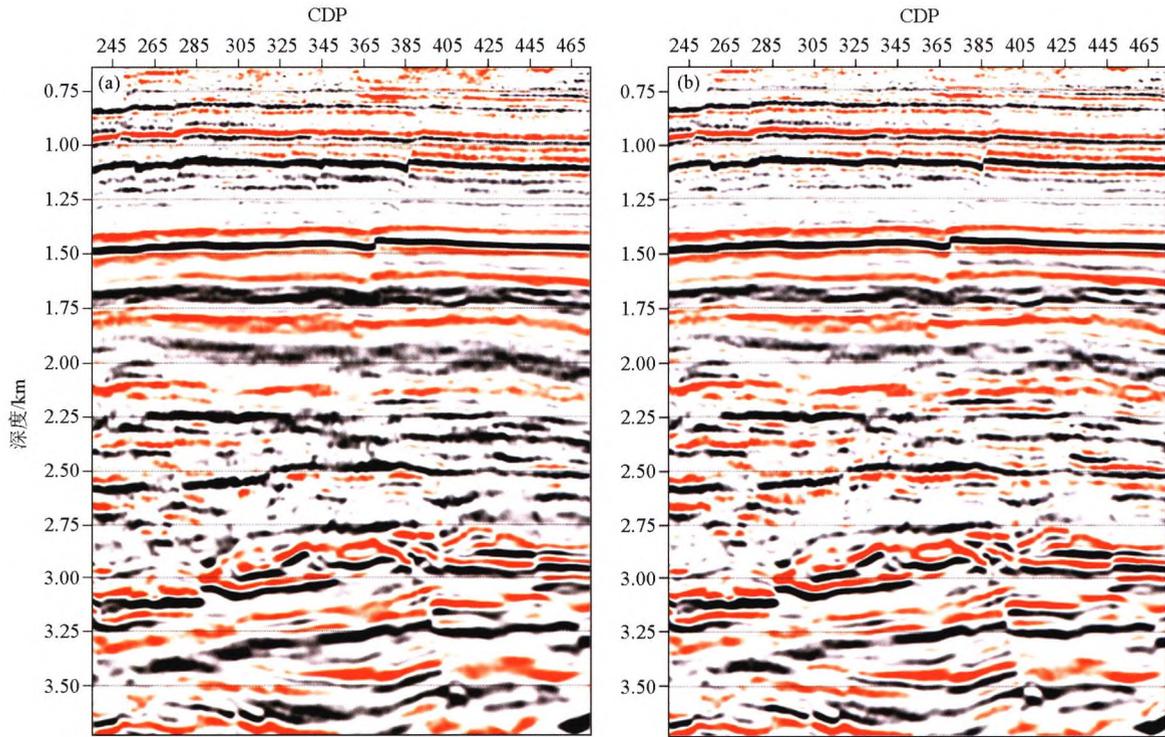
Fig.4 Theoretical model reverse-time migration result with different imaging condition

4 实际工区应用

以松辽盆地 SZ 工区为例,其近地表条件较为简单,高分辨率、高精度地震成像是该区处理的难点。该工区采用基于构造约束的网格层析速度建模方法建立深度域速度模型,同时采用适合逆时偏移的地震资料预处理技术得到高保真的共炮点道集。该工区成像面元为 25 m×25 m,深度域速度模型中最小速度为 1 851 m/s,最大速度为 6 534 m/s,根据数值频散关系^[7]和输入数据频谱分析,优选逆时偏移最大偏移频率为 66 Hz,分别应用常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件进行高精度逆时成像处理,并应用 CPU/GPU 协同高性能集群并

行计算技术加速逆时偏移处理^[10],缩短处理周期。

图 5a 和图 5b 分别为实际地震资料应用常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件后的逆时偏移叠加结果(在相同数值范围显示对比,仅成像条件的差异)。分析图 5a 可知,由于逆时偏移低波数背景噪声的存在,地层细节成像不清楚,掩盖了有效的地层反射信号,而应用基于行波分离法逆时成像条件后(图 5b),成像结果中的地层细节刻画更加清楚、能量一致性更好,同时波数谱中低波数能量得到了有效压制,波数谱带宽得到展宽,由此验证了基于行波分离法逆时成像条件具有更高的成像精度,能够在逆时成像过程中有效压制低波数背景噪声,恢复有效地震反射细节,提高成像分辨率和信噪比。



a—常规逆时成像条件偏移叠加结果;b—基于行波分离法逆时成像条件偏移叠加结果

a—Migration result with conventional reverse-time;b—Migration result with reverse-time imaging condition based on one-way wave separation scheme

图5 松辽盆地SZ工区不同逆时成像条件实际资料逆时偏移结果对比

Fig.5 Practical data reverse-time migration result with different imaging condition in SZ area of Songliao Basin

5 结论

文中从成像机理、脉冲响应、理论模型和实际地震资料4个方面系统对比了常规相关法逆时成像条件和基于行波分离法逆时成像条件这2种逆时成像条件及其应用效果,得出如下结论:

1)在均匀层状介质中,零偏移距和有偏移距脉冲响应波场分别呈现圆形和椭圆形,且只形成1条脉冲响应曲线,曲线的焦点为其震源位置和检波点位置;

2)在速度差异界面上方,有偏移距逆时偏移脉冲响应共形成4条脉冲响应曲线,曲线的焦点为其震源位置和检波点位置及其在速度界面的投影。其中零偏移距逆时偏移脉冲响应是其在震源和检波点位置重叠时的特例,使得有2条脉冲响应曲线相互重叠,只形成3条脉冲响应曲线。

3)不同传播方向的震源波场和检波点波场的互相关计算是形成逆时偏移低波数背景噪声的主要成因,基于行波分离法逆时成像条件将其进行了有效压制,通过保留相同传播方向的震源波场和检波点波场的互相关计算显著提高成像结果的精度和信

噪比。

4)低波数背景噪声具有浅层能量强、深层能量弱,同时存在一定的成层性,地层界面的波阻抗差异越大,其上方的低波数背景噪声能量就越强,掩盖了有效地震反射信息,反之亦然,复杂构造理论模型及SZ地区实际地震资料逆时成像应用效果验证了该结论。

参考文献 (References):

[1] 陈可洋.高阶弹性波波动方程正演模拟及逆时偏移成像研究[D].大庆:大庆石油学院,2009.
Chen K Y.High-order elastic wave equation forward modeling and reverse-time migration [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2009.

[2] Claerbout J F.Imaging the Earth's Interior[D].Palo Alto:Blackwell Scientific Publications Inc.,1985.

[3] Baysal E, Kosloff D D, Sherwood J W C.Reverse time migration [J].Geophysics,1983,48(11):1514-1524.

[4] 陈可洋.基于高阶有限差分的波动方程叠前逆时偏移方法[J].石油物探,2009,48(5):475-478.
Chen K Y.Wave equation pre-stack reverse-time migration scheme based on high-order finite-difference[J].Geophysical Prospecting For Petroleum,2009,48(5):475-478.

[5] Liu G, Liu Y, Li R, et al.3D seismic reverse time migration on

- GPGPU[J].Computers & Geosciences,2013a,59:17-23.
- [6] 康玮,程玖兵.叠前逆时偏移假象去除方法[J].地球物理学进展,2012,27(3):1163-1172.
- Kang W, Cheng J B. Methods of suppressing artifacts in prestack reverse time migration [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1163-1172.
- [7] Chen K. Anisotropic analysis of difference approximation in seismic wave numerical modeling [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2010, 49(1): 19-22.
- [8] 杨仁虎,常旭,刘伊克.叠前逆时偏移影响因素分析[J].地球物理学报,2010,53(8):1902-1913.
- Yang R H, Chang X, Liu Y K. The influence factors analyses of imaging precision in pre-stack reverse time migration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(8): 1902-1913.
- [9] Chang W, McMechan G A. 3D acoustic prestack reverse-time migration [J]. Geophysical Prospecting, 1990, 38(7): 737-756.
- [10] 陈可洋.逆时成像技术在大庆探区复杂构造成像中的应用[J].岩性油气藏,2017,29(6):91-100.
- Chen K Y. Reverse-time migration technology for complex structure imaging of Daqing exploration area [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(6): 91-100.
- [11] Wang Y, Liang W, Nashed Z, et al. Seismic modeling by optimizing regularized staggered-grid finite-difference operators using a time-space-domain dispersion-relationship preserving method [J]. Geophysics, 2014, 79: T277-T285.
- [12] Zhang H, Zhang Y. Reverse time migration in 3D heterogeneous TTI media [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2008: 2196-2200.
- [13] Zhao Y, Liu Y, Ren Z. Visco acoustic prestack reverse time migration based on the optimal time-space domain high-order finite difference method [J]. Applied Geophysics, 2014, 11(1): 50-62.
- [14] Xu S, Zhang Y, Tang B. 3D angle gathers from reverse time migration [J]. Geophysics, 2011, 76(2): S77-S92.
- [15] 王保利,高静怀,陈文超,等.逆时偏移中用 Poynting 矢量高效地提取角道集[J].地球物理学报,2013,56(1):262-268.
- Wang B L, Gao J H, Chen W C, et al. Extracting efficiently angle gathers using Poynting vector during reverse time migration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 262-268.
- [16] Zhang J, Yao Z. Optimized finite difference operator for broadband seismic wave modeling [J]. Geophysics, 2013, 78: A13-A18.
- [17] 许璐,孟小红,刘国峰.逆时偏移去噪方法研究进展[J].地球物理学进展,2012,27(4):1548-1556.
- Xu L, Meng X H, Liu G F. Reverse time migration and removing artifacts [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1548-1556.
- [18] 陈可洋.松辽盆地地震资料小面元叠前插值逆时偏移处理[J].油气藏评价与开发,2015,5(4):12-16.
- Chen K Y. Seismic data small bin pre-stack reverse-time migration processing in Songliao Basin [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(4): 12-16.
- [19] Chen K, Chen S, Li L, et al. Numerical experiments on the elastic wave united pre-stack reverse-time migration [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(1): 8-16.
- [20] Chen K. Study on perfectly matched layer absorbing boundary condition [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(5): 472-477.
- [21] Chen K. Evaluation on the bordering method of the absorbing boundary condition [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2010, 27(2): 170-175.
- [22] Wang B, Chen J, Chen W. Efficient boundary storage strategies for seismic reverse time migration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(7): 2412-2421.
- [23] Chen K, Fan X, Wu Q, et al. Improvement of reverse-time migration precision with seismic wave pre-stack interpolation processing and application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(4): 409-416.
- [24] 王娟,李振春,陶丽.逆时偏移成像条件研究[J].地球物理学进展,2012,27(3):1173-1182.
- Wang J, Li Z C, Tao L. The research on imaging condition of reverse time migration [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1173-1182.
- [25] Chen K. Time-limited time-shift correlation pre-stack reverse-time image condition and its application [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2010, 50(1): 22-26.
- [26] 陈可洋.基于波场分离和角度域衰减的地震波叠前逆时成像条件[J].计算物理,2016,33(2):205-211.
- Chen K Y. Seismic wave pre-stack reverse-time migration imaging condition based on one-way wave field separation and angle domain attenuation [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2016, 33(2): 205-211.
- [27] 徐兴荣,王西文,王宇超,等.基于波场分离理论的逆时偏移成像条件研究及应用[J].地球物理学进展,2012,27(5):2084-2090.
- Xu X R, Wang X W, Wang Y C, et al. Study and application of imaging condition for reverse-time migration based on wave-fields separation [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 2084-2090.
- [28] 陈康,吴国忱.逆时偏移拉普拉斯算子滤波改进算法[J].石油地球物理勘探,2012,47(2):249-255.
- Chen K, Wu G C. An improved filter algorithm based on Laplace operator in reverse-time migration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(2): 249-255.
- [29] 丁亮,刘洋.逆时偏移成像技术研究进展[J].地球物理学进展,2011,26(3):1085-1100.
- Ding L, Liu Y. Progress in reverse time migration imaging [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(5): 1085-1100.
- [30] Di Bartolo L, Dors C, Mansur W J. A new family of finite-difference schemes to solve the heterogeneous acoustic wave equation [J]. Geophysics, 2012, 77: T187-T199.
- [31] Liu S, Wang H, Chen S, et al. Implementation strategy of 3D reverse time migration on GPU/CPU clusters [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013b, 56(10): 3487-3496.
- [32] Chen K, Wu Q, Fan X, et al. Study on seismic wave pre-stack reverse-time migration's impulse response and its application [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2013, 52(2): 163-170.
- [33] Symes W W. Reverse time migration with optimal check pointing [J]. Geophysics, 2007, 72: SM213-SM221.
- [34] 陈可洋.地震波逆时偏移方法研究综述[J].勘探地球物理进

展,2010,33(3):153-159.

[J].Progress in Exploration Geophysics,2010,33(3):153-159.

Chen K Y.Reviews on seismic wave reverse-time migration methods

Comparison of the application effect of two imaging conditions in seismic wave reverse time migration

SONG Zong-Ping¹, CHEN Ke-Yang², YANG Wei³, LI Lai-Lin², WU Qing-Ling², FAN Xing-Cai²

(1.PetroChina Exploration Business Department of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163453, China; 2.PetroChina Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163712, China; 3.No. 6 Oil Production Company of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163712, China)

Abstract: Imaging condition is the key to realizing accurate imaging of seismic wave field, and optimizing reverse-time imaging condition is especially important in improving the application of reverse-time migration method. For this reason, based on the impulse response of zero offset and non-zero offset, this paper compares the reverse-time imaging condition based on one-way wave separation with conventional reverse-time imaging condition in detail. On the basis of the complex theory model and the real 3D seismic data of SZ working area, the imaging effects of two kinds of reverse-time imaging conditions are compared. The results show that the imaging results of the reverse-time imaging condition based on one-way wave separation can effectively attenuate the low wave number background noise, restore the effective seismic imaging information concealed under this background noise, and the stratigraphic details are characterized more clearly. These results can provide guidance for the high precision seismic imaging of complex wave fields and complex structures.

Key words: reverse-time migration; imaging condition; impulse response; model study; seismic data; low wave number noise

(本文编辑:叶佩)