

基于高斯束偏移的倾角域绕射波分离方法研究

孔 雪¹, 李振春², 李 翠³, 刘 丹¹, 李 萧¹, 杨建磊¹

(1. 中国石油大学胜利学院油气工程学院, 山东东营 257061; 2. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580;
3. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院随钻测控技术研究所, 山东东营 257000)

摘要:断层、缝洞体等非均质体在地震响应中主要表现为绕射波,但常规资料处理后的绕射波常被一次反射能量淹没,因此单独分离并研究这类绕射波在某种程度上可以提高非均质体识别的准确性。倾角域道集上的绕射波拟线性而反射波拟抛物线的形态差异为波场分离提供依据。利用高斯束偏移抽道集方法提取倾角域道集,并设计基于相似谱分析的波场分离方法实现倾角域道集中的绕射波分离。模型试算结果表明:运用相似谱分析方法进行波场分离后的倾角域道集中,反射能量得到压制,绕射能量得到较好保留。将波场分离后的绕射波场进行叠加成像,结合常规的全波场成像结果进行对比分析,可提高绕射目标构造的识别度。

关键词:高斯束偏移; 倾角域道集; 绕射波分离; 相似谱分析

中图分类号:P 631.4 **文献标志码:**A

引用格式:孔雪,李振春,李翠,等. 基于高斯束偏移的倾角域绕射波分离方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):49-55.

KONG Xue, LI Zhenchun, LI Cui, et al. Diffraction separation in dip-angle domain based on Gaussian beam migration[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(1):49-55.

Diffraction separation in dip-angle domain based on Gaussian beam migration

KONG Xue¹, LI Zhenchun², LI Cui³, LIU Dan¹, LI Xiao¹, YANG Jianlei¹

(1. College of Petroleum Engineering in Shengli College China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. Drilling Technology Research Institute of Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying 257000, China)

Abstract: Heterogeneous objects such as faults and fracture-cave cubes cause diffractions in seismic records. After conventional seismic processing, diffractions are usually buried in one-way reflections. Separating diffractions can improve the interpretation accuracy of heterogeneous objects. Common imaging gathers (CIGs) in dip-angle domain can be used to separate wavefield, because diffractions are quasi-linear and reflections are quasi-parabolic in the CIGs. We use Gaussian beam migration to gather dip-angle domain CIGs, and separate diffraction based on semblance analysis. Model tests show that semblance analysis suppresses reflections but preserves diffractions in dip-angle domain CIGs after wavefield separation. Diffraction imaging results together with full wave imaging can thus enhance interpretation accuracy.

Keywords: Gaussian beam migration; dip-angle domain common imaging gather; diffraction separation; semblance analysis

地下介质的信息可以通过地震响应来预测,其中,断层、河道、盐丘边界及碳酸盐岩缝洞储集体等小尺度构造通常产生绕射波^[1-4]。一方面,以一次反射波为主要研究对象的传统地震处理技术常常将来

自平缓反射层以外的绕射波等信息视为干扰噪音滤除;另一方面,即使在偏移过程中能够将绕射波收敛归位,也会因为其弱能量特性在成像剖面上被反射能量淹没,使小尺度绕射目标体的成像分辨率较低。

收稿日期:2014-12-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41104069);国家“973”课题(2011CB202402)

作者简介:孔雪(1985-),女,工程师,博士,研究方向为复杂介质成像和绕射目标成像。E-mail: kongx126@126.com。

在此背景下,分离并单独成像绕射波的方法研究应运而生。依据绕射波与反射波在同一道集中的不同形态特点,国内外学者提出了相对应的绕射波分离方法:Khaidukov等^[5-6]利用聚焦-反聚焦方法实现绕射炮记录的提取;Taner等^[7-9]分别应用平面波解构造滤波(PWD)技术实现平面波域绕射波分离。根据倾角域道集上反射波拟双曲、绕射波拟线性的明显差异,Landa等^[10-13]分别利用平面波解构造滤波、相似度顶点去除、混合Radon变换等方法实现了倾角域绕射能量与反射能量的分离,Bai等^[14]将该方法扩展到三维。实现倾角域绕射波分离主要分为两步:①倾角域道集提取;②绕射波场分离。目前常用Kirchhoff偏移抽取倾角域道集^[9],该抽道集方法存在Kirchhoff偏移固有的射线焦散、阴影区以及不能对多波至成像等问题^[11],从而导致在复杂构造区提取的倾角域道集资料品质较差。对于绕射波场分离,目前主要采用压制反射能量从而间接分离出绕射能量的思路,因此在反射能量稳相点附近存在一定的绕射能量损失^[12]。为此,笔者采用高斯束偏移提取倾角域道集^[9],克服常规Kirchhoff偏移抽道集存在的问题,并保留积分法偏移对陡倾角地层的成像能力^[15-17],以提高倾角域道集的准确性,为绕射波场分离提供高质量的输入道集;然后,设计基于相似谱分析的滤波器实现倾角域道集的绕射波场分离;最后,将分离后的绕射波场倾角域道集进行叠加得到绕射波成像剖面。

1 方法原理

1.1 倾角域共成像点道集波场分析

关于倾角域共成像点道集的绕射和反射波场特征差异,Landa等^[10]已做了详细的特征分析。为便于对比分析,假设介质为常速,并采用正确的偏移速度进行2D叠后偏移。

考虑地层倾角为 α_0 、深度表达式为 $z(x) = z_0 + x \tan \alpha_0$ 的倾斜反射层,反射界面像点位置:

$$z(x, \alpha) = \frac{(z_0 \cos \alpha_0 + x \sin \alpha_0) \cos \alpha}{1 - \sin \alpha_0 \sin \alpha} \quad (1)$$

式中, α 为倾角; x 为成像点的水平坐标。

考虑坐标为 (x_0, z_0) 的绕射体对应的倾角域共成像点(CIG)道集成像响应情况,推导出绕射体像点位置:

$$z(x, \alpha) = \frac{(x - x_0) \sin \alpha + D}{\cos \alpha} \quad (2)$$

其中

$$D = \sqrt{z_0^2 \cos^2 \alpha + (x - x_0)^2}.$$

将固定地表坐标位置 x 得到的倾角域成像能量分布剖面称之为倾角域共成像点道集,简称倾角域道集。为描述倾角域道集曲线特点,给出如图1所示理论模型,该模型包含一个水平反射界面、一个倾斜反射界面和一个绕射体。根据公式(1)和(2)绘制出距离绕射体水平距离分别为0、-300和300 m位置处的倾角域道集理论示意图(图2),其中,绕射点的响应用虚线表示,反射界面响应用实线表示。从图中可以看出,在倾角域道集中绕射体的成像响应曲线整体表现为线性性质,并且随着道集位置与绕射体的水平距离变化而改变:在绕射点位置处的绕射成像响应表现为水平线性性质,远离绕射点位置记录到的成像响应为倾斜拟线性同相轴,其倾斜度与偏离绕射点的横向距离成正比;然而,对于反射界面来说,不管界面是否倾斜,在倾角域道集中的响应曲线都表现为开口向上的拟抛物线“凹”字形,稳相顶点位置(即拟抛物线顶点位置)的角度指示地层倾角信息。由此可知,在倾角域道集上绕射与反射响应能量曲线存在明显的几何形态差异,可以利用这种差异将绕射同相轴单独分离并进行叠加成像,即可得到绕射体的高分辨率成像结果。

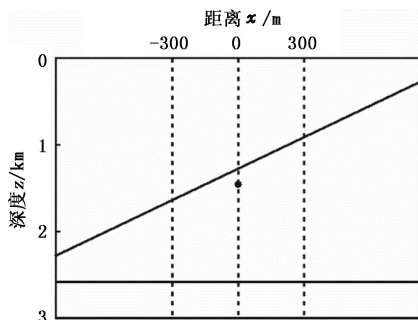


图1 包含两个反射界面和一个绕射点的理论模型

Fig. 1 Theoretical model with two plane reflectors and a diffractor

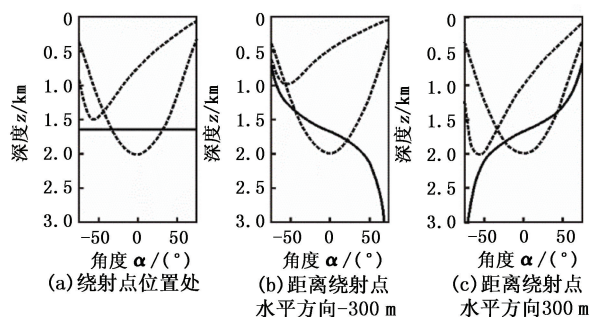


图2 倾角域道集示意图

Fig. 2 Sketch map of dip-angle gather

1.2 基于高斯束偏移的倾角域抽道集

共炮域高斯束偏移提取倾角域道集的基本过程可以概括为以下3个主要步骤^[9]:①震源波场的高斯波束分解;②炮记录的加窗局部平面波波场分解;③将震源波场和炮集记录波场分别利用高斯波束延拓,应用成像条件提取倾角域道集。

考虑二维标量各向同性介质,假设震源为 $\mathbf{X}_s = (x_s, 0)$, 检波点为 $\mathbf{X}_r = (x_r, 0)$, 地下介质成像点为 $\mathbf{X} = (x, z)$ 。

1.2.1 震源波场的高斯波束分解

震源波场由震源点到计算点的格林函数表示,高斯束偏移中震源波场的高斯波束表示形式为

$$\begin{cases} G(\mathbf{X}_s, \mathbf{X}; \omega) = \frac{i}{4\pi} \int \frac{dp_x}{p_z} U_{GB}(\mathbf{X}_s, \mathbf{X}; p, \omega), \\ U_{GB}(\mathbf{X}_s, \mathbf{X}; p, \omega) = \sqrt{\frac{V(s)Q(s_0)}{V(s_0)Q(s)}} \exp\left[i\omega\tau(s) + \frac{i\omega}{2} \frac{P(s)}{Q(s)} n^2\right]. \end{cases} \quad (3)$$

式中, $V(s)$ 为当前计算点 s 弧长位置处的层速度, s 为震源点到射线当前计算点的参考弧长; p_x 和 p_z 分别为中心射线初始慢度 p 的水平和垂直分量, $P(s)$ 和 $Q(s)$ 为 s 位置处的动力学射线追踪参数, $\tau(s)$ 为 s 位置处的走时, $U_{GB}(\mathbf{X}_s, \mathbf{X}; p, \omega)$ 为二维高斯波束, 表示波动方程在中心射线附近的高频渐近解。

1.2.2 炮记录的波场分解

将炮记录高斯波束分解并进行局部倾斜叠加, 得到分解后的炮记录平面波分解式:

$$\begin{cases} u(\mathbf{X}, \mathbf{X}_s, \omega) \approx -\frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left(\frac{\omega_r \Delta L}{w_0}\right)^2 \sum_L \iint dp_{Lx} U_{GB}^*(\mathbf{X}, L, p_{Lx}, \omega) D_s(L, p_{Lx}, \omega), \\ D_s(L, p_{Lx}, \omega) = \left|\frac{\omega}{\omega_r}\right|^{3/2} \int dx_r u(\mathbf{X}_r, \mathbf{X}_s, \omega) \times \\ \exp\left[i\omega p_{Lx}(x_r - L) - \left|\frac{\omega}{\omega_r}\right| \frac{(x_r - L)^2}{2w_0^2}\right]. \end{cases} \quad (4)$$

式中, L 为波束中心位置; w_0 为高斯波束的初始宽度; ΔL 为束中心间距; ω_r 为参考频率; $D_s(L, p_{Lx}, \omega)$ 为合成的局部平面波分量; p_{Lx} 和 p_{Lz} 分别为波束中心慢度的水平和垂直分量; $u(\mathbf{X}_r, \mathbf{X}_s, \omega)$ 为高斯窗内的地震记录波场。

1.2.3 倾角域共成像点道集提取

应用成像条件对高斯波束延拓后的震源波场和炮记录进行成像, Gray^[18] 给出了互相关成像条件的二维共炮点道集高斯束偏移公式:

$$I(\mathbf{X}, \mathbf{X}_s) = \frac{\Delta L \omega_r}{4\pi^2 w_0} \sum_L \int d\omega \sqrt{i\omega} \int dp_{mx} \times \frac{A_s^* A_L^*}{\sqrt{T^{*''}(p_{hx}^0)}} \exp[-i\omega(T_s^* + T_L^*)] D_s(L, p_{Lx}^0, \omega). \quad (5)$$

式中, $I(\mathbf{X}, \mathbf{X}_s)$ 为成像点 $\mathbf{X} = (x, z)$ 所对应震源点 $\mathbf{X}_s = (x_s, 0)$ 的单炮偏移成像值; $T = T_s + T_L$ 为成像点 $\mathbf{X}$ 处总的复值走时; T_s, A_s 分别为成像点处对应震源高斯波束的走时和振幅; T_L, A_L 分别为成像点处对应波束中心高斯波束的走时和振幅; p_{sx} 为炮点处初始慢度的水平分量; $T^{*''}(p_{hx}^0)$ 为走时 T 的二阶导数; p_{hx}^0, p_{Lx}^0 分别为成像点处走时 T 虚部最小的炮检距、波束中心射线参数的水平分量; p_{mx}, p_{hx} 为中点和炮检距射线参数的水平分量。

由于高斯束偏移过程中包含了由射线参数表示的传播角度信息, 可以直接用此信息将成像值投影到倾角域。根据网格点和束中心位置的实值走时计算出粗网格点的高斯束传播角度, 然后将其进行插值得到成像点的高斯束传播角度 β , 再利用成像点位置处震源和接收点高斯束的传播角度可推导出该成像点位置处的局部倾角信息 α :

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\beta_s + \beta_r - \pi}{2}, & \beta_r > 0, \\ \frac{\beta_s + \beta_r + \pi}{2}, & \beta_r \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

式中, β_s 和 β_r 分别为延拓到成像点位置处的震源和接收波场高斯束传播方向与 z 轴正方向的夹角。

已知成像值对应的倾角和成像深度, 可得到任意共成像点的倾角域道集。

1.3 基于相似谱分析的绕射波分离方法

在倾角域道集中, 沿倾角方向叠加该道集可得到相应计算点位置处的地震成像值, 也就是说不同地质体的成像值是由倾角域道集上对应的部分同相轴贡献得到。根据“凹”字形反射同相轴容易识别的优势, 设计了基于相似谱分析的反射能量压制滤波器实现绕射和反射能量的分离: 通过求取与反射波同相轴的相似系数最大值识别反射顶点; 再利用理论曲线(式(1))拾取该反射顶点位置处的反射同相轴, 进一步压制反射能量, 从而实现绕射能量分离。

具体实现步骤为:

①相似谱的求取。给定倾角域道集, 假设任意的深度-倾角点都存在反射界面, 那么在倾角域道集的每一位置都存在满足式(1)条件的反射同相

轴。同一反射同相轴不同倾角处的信号应具有相关性,因此若该点存在真实的反射同相轴,则其信号的相似度应该比较高;若该点并不是真正的反射界面,则由式(1)求得的曲线上信号的相关程度较低,此时得到的信号相似度会比较小。

根据真实反射同相轴相关度高、假反射同相轴相似度低的特点,通过假设任意位置均存在反射来求取反射同相轴的相关系数,从而得到整个倾角域道集的相似谱,则相似谱上相关系数较高的位置可看作是反射同相轴顶点的位置。

根据式(1)得到反射同相轴之后,以计算点为中心选取适当的时窗范围,反射同相轴相关系数的计算公式如下:

$$R(\alpha,z)=\frac{\sum_{\beta=1,M}\frac{\sum_{s=1,N}x(\beta,s)x(\beta_0,s)}{\sqrt{\sum_{s=1,N}x^2(\beta,s)x^2(\beta_0,s)}}}{M} \quad (7)$$

式中, α 和 z 分别为当前计算点的倾角和深度; M 和 N 分别为当前时窗内倾角和深度的采样点总数; $\beta=(1,M)$ 为时窗内横向倾角的编号, $\beta_0=\frac{1+M}{2}$ 为该时窗内计算点倾角 α 的样点号; s 为时窗内纵向采样深度的编号, $s=\frac{1+N}{2}$ 为该时窗内计算点深度 z 的样点号。

②反射同相轴的顶点识别。综上分析可知,若此深度处存在反射界面,在倾角域道集中成像响应为“凹”字形的反射同相轴,同相轴的形态满足式(1)。由此得到两点认识:第一点,反射同相轴顶点的位置对应该深度处反射界面的地层倾角;第二点,根据第①步获得的倾角域相似谱由于时窗的选取满

足式(1),相似谱的最大相似系数所对应的倾角应为反射同相轴顶点位置所对应的倾角,即地层倾角。确定了地层倾角的同时,识别出反射同相轴的顶点位置。通过对倾角域相似谱数据扫描,可得到每一深度位置的最大相似系数所对应的倾角,若同一深度位置存在多个相似系数极值对应不同倾角,则根据上下相邻地层产状一般不会发生剧烈变化的原则,拾取地层倾角,从而得到反射同相轴的顶点信息。

③绕射波分离。采用在倾角域道集上进行反射能量压制间接提取绕射波的方法实现绕射波分离。根据第②步确定的反射顶点位置带入式(1)确定反射同相轴的形态,选取合适的时窗压制顶点附近的反射能量。压制反射顶点能量后的倾角域道集被视为主要包含绕射能量的倾角域道集,剩余反射能量在叠加成像时相互抵消,对绕射波成像影响较小。

2 数值模型试算

本文中截取部分 Sigsbee2a 模型进行测试,截取部分的速度场如图 3(a)所示。采用高斯束偏移抽道集提取倾角域道集。首先,进行道集分析;然后,进行绕射波场分离与成像,从而验证本文方法的有效性。

从图 3(a)所示的 Sigsbee2a 模型的左侧部分中可以看出,该模型中(5.18 km)、深层(7.62 km)各包含一组点绕射体,其地震响应中应包含有丰富的绕射信息;高速盐体顶部既产生反射波又能产生大量的绕射波;模型中存在的断层也会产生绕射能量。然而从叠加剖面(图 3(b))上仅能观察到部分双曲绕射响应,因此在叠加剖面上难实现较彻底的绕射波分离。

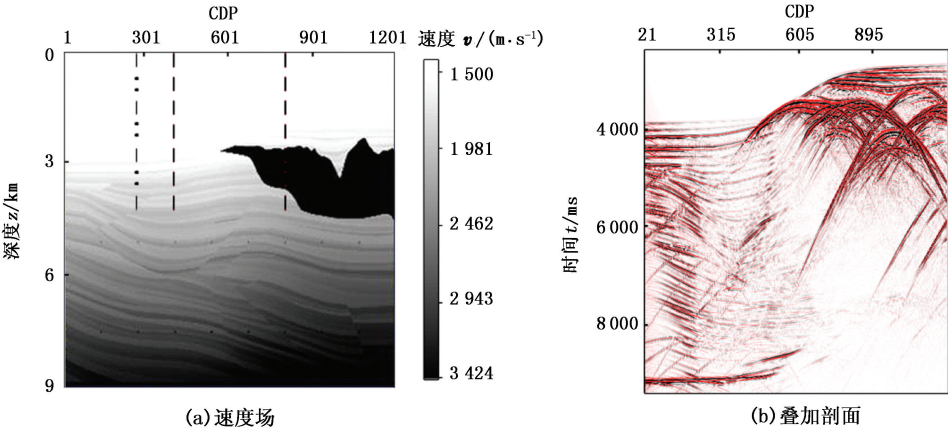


图 3 Sigsbee2a 模型速度场及叠加剖面

Fig. 3 Velocity and stack section of Sigsbee2a model

2.1 倾角域道集对比

图 4 给出了基于高斯束偏移抽取的两组点绕射

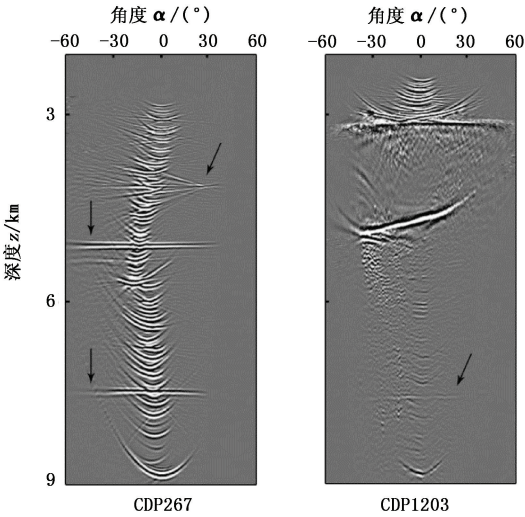


图 4 倾角域道集

Fig. 4 Dip-angle domain gathers

体位置处(CDP267 和 1203)的倾角域道集。可清晰地观察到:简单构造区(CDP267),在倾角域道集中断层(深度 4.48 km 倾斜箭头所指示)和点绕射体(深度分别为 5.18 km 和 7.62 km,垂直箭头所指示)位置处的成像能量为线性绕射同相轴,而平滑连续地层的成像能量为“凹”型反射同相轴,符合前

述理论分析的结果;复杂构造区(CDP1203),复杂构造区域的中上层存在与围岩速度差异巨大的高速盐体(围岩速度约为 1 828 m/s、高速盐体速度为 4 511 m/s),若用常规积分法偏移抽取道集,固有的射线焦散及高速盐下阴影区等问题可能会导致在该速度剧烈变化构造区提取的角道集质量显著下降,在绕射点位置处较难识别有效同相轴,利用高斯束偏移提取的角道集可以看出,在中、深层两个绕射体位置处仍能得到拉平的同相轴信息,验证了高斯束偏移对射线焦散和阴影区的处理能力。可见,采用高斯束偏移抽道集可获取高品质的倾角域道集。

2.2 绕射波场分离与成像

图 5 所示为绕射波的分离过程:通过相似谱分析(图 5(b))较好地估计出反射顶点的位置,然后根据反射顶点位置沿公式(1)所述的反射曲线形态进行反射能量压制,如图 5(c)所示。经波场分离之后,顶点位置处对最终叠加成像有很大贡献的强反射能量得到了压制,同时绕射能量得到较好保留,虽然在波场分离之后仍保留有少量的倾斜反射同相轴,但由于倾角域道集叠加时剩余反射能量的非同相性,在最终成像时相互抵消,对绕射目标成像剖面的影响较小。

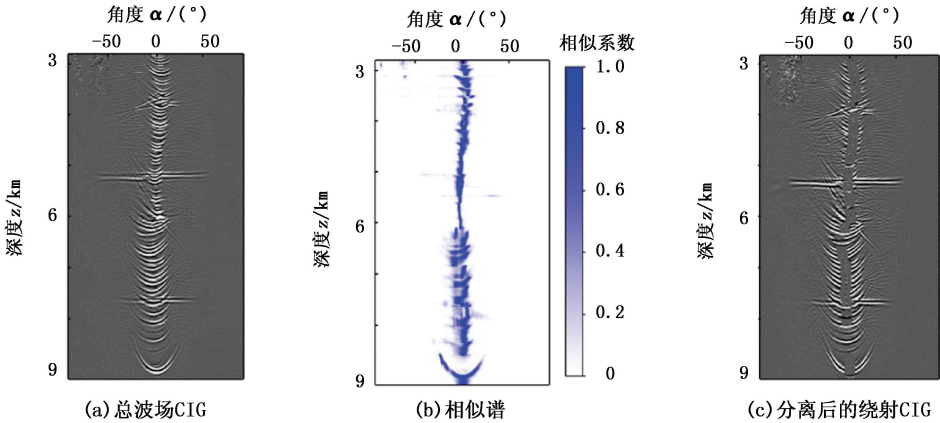


图 5 倾角域道集波场分离过程

Fig. 5 Wavefield separation in dip-angle domain

利用波场分离前后的倾角域道集逐道叠加,分别得到全波场成像和绕射波成像结果,如图 6 所示。从图中可以看出:在全波场成像中,断层、点绕射体等的绕射成像能量被来自连续地层的反射能量掩盖,几乎很难识别 CDP 25 ~ 500、深度 3.048 ~ 5.18 km 之间的几个断层的准确位置,深度 5.18 km 位置处的一组点绕射体刻画得也不清晰;在绕射波成像

剖面上,虽然残留有部分的反射能量(由于波场分离不彻底造成的图 5(c)剩余反射能量),但较全波场成像结果来说,仍能比较清晰地刻画 3.048 ~ 6.096 km 之间的几条断裂带位置,突显 5.18 km 和 7.62 km 深度的两组点绕射体,盐丘的边界形态也得到较好的保留。绕射波成像与全波场成像结果结合提高绕射目标体的定位准确性。

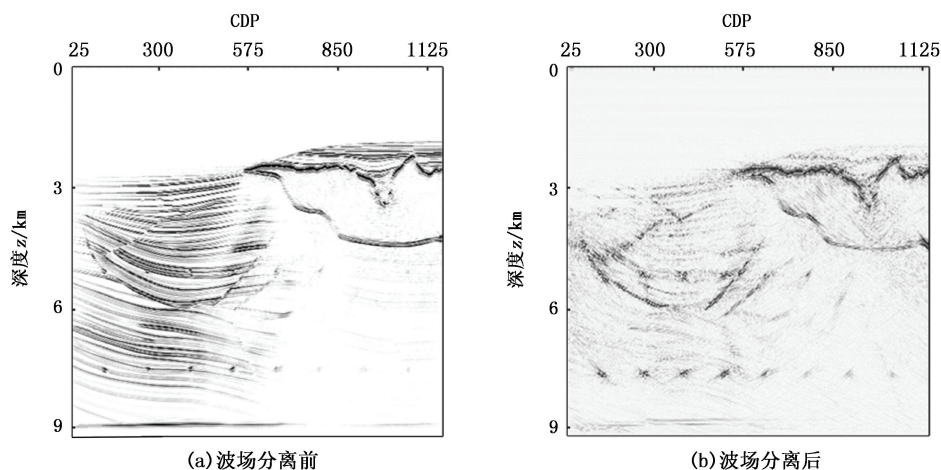


图6 绕射波场分离前后的成像结果对比

Fig. 6 Image comparison before and after wavefield separation

3 结 论

(1) 高斯束偏移克服常规积分偏移存在的射线焦散和阴影区等问题, 提高对复杂构造区的成像能力, 改善了高速盐下区域的成像效果, 并且高斯束偏移具有积分法偏移计算效率高, 对陡倾角及回转波成像无限制等优势, 因此高斯束偏移提取倾角域角道集一定程度上提高了复杂探区的成像精度。

(2) 根据倾角域道集中反射成“凹”字形、绕射成拟线性形态的同相轴差异, 设计了基于相似谱分析的绕射波分离方法, 有效地实现绕射波与反射波的分离, 从而最终实现绕射波的单独成像, 提高了断层以及小尺度绕射体等地质体的识别能力, 对碳酸盐岩缝洞储集体的精细探测具有一定的指导意义。

(3) 绕射波分离方法处于起步阶段, 在低信噪比、弱绕射能量下的绕射波识别、分离精度等方面存在一定不足, 有待进一步研究与探索。

参考文献:

- [1] BERKOVITCH A, BELFER I, HASSIN Y, et al. Diffraction imaging by multi-focusing [J]. *Geophysics*, 2009, 74(6): 75-81.
- [2] 撒利明, 姚逢昌, 狄帮让, 等. 缝洞型储层地震识别理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [3] BANSAL R, IMHOF M G. Diffraction enhancement in prestack seismic data[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 73-79.
- [4] 郭振波, 田坤, 李振春, 等. 利用非线性最优化方法构建近似常 Q 黏弹模型[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(2): 52-58.
- GUO Zhenbo, TIAN Kun, LI Zhenchun, et al. Constructing nearly constant- Q visco-elastic model using the non-linear optimization method[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(2): 52-58.
- [5] KHAIDUKOV V, LANDA E, MOSER T J. Diffraction imaging by focusing-defocusing: an outlook on seismic super resolution[J]. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1478-1490.
- [6] MOSER T, HOWARD B C. Diffraction imaging in depth[J]. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56(5): 627-641.
- [7] TANER M T, FOMEL S, LANDA E. Separation and imaging of seismic diffractions using plane-wave decomposition: proceedings of SEG Conference[C]. New Orleans, USA: Society of Economic Geologists, c2006.
- [8] 孔雪, 李振春, 黄建平, 等. 基于平面波记录的绕射目标成像方法研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(4): 674-681.
- KONG Xue, LI Zhenchun, HUANG Jianping, et al. Diffraction objective imaging based on plane wave record[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(4): 674-681.
- [9] 孔雪. 非均质条件下绕射目标成像方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2012.
- KONG Xue. Study on diffracting objective imaging methods in heterogeneous media[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2012.
- [10] LANDA E, FOMEL S, RESHEF M. Separation imaging and velocity analysis of seismic diffractions using migrated dip-angle gathers: proceedings of SEG Conference[C]. Las Vegas, USA: Society of Economic Geologists, c2008.
- [11] KLOKOV A, BAINA R, LANDA E, et al. Diffraction imaging for fracture detection: synthetic case study: pro-

- ceedings of SEG Conference[C]. Denver, USA: Society of Economic Geologists, c2008.
- [12] KLOKOV A, BAINA R, LANDA E. Separation and imaging of seismic diffractions in dip angle domain: proceedings of EAGE Conference[C]. Barcelona, Spain; European Association of Geoscientists & Engineers, c2010.
- [13] ALEXANDER K, SERGEY F. Separation and imaging of seismic diffractions using migrated dip-angle gathers [J]. Geophysics, 2012, 77(6): S131-S143.
- [14] BAI Y, SUN Z, CHEN L, et al. Seismic diffraction separation in 2D and 3D space: proceedings of EAGE Conference[C]. Vienna, Austria; European Association of Geoscientists & Engineers, c2011.
- [15] HILL N R. Prestack Gaussian-beam depth migration [J]. Geophysics, 2001, 66(4): 1240-1250.
- [16] HALE D. Migration by the Kirchhoff, slant stack, and Gaussian beam methods: CWP research reports [R/OL]. Golden: Center for wave Phenomena, 1993 [2013-10-15]. <http://timna.mines.edu/researchpublications/CWPresearchreports.html#cwp100>.
- [17] 李振春, 岳玉波, 郭朝斌, 等. 高斯波束共角度保幅深度偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 360-365.
LI Zhenchun, YUE Yubo, GUO Chaobin, et al. Gaussian beam common angle preserved-amplitude migration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 360-365.
- [18] GRAY S H, BLEISTEIN N. True-amplitude Gaussian-beam migration [J]. Geophysics, 2009, 74(2): S11-S23.

(编辑 修荣荣)