

文章编号: 0253-2697(2014)05-901-07 DOI: 10. 7623/syxb201405009

# 基于绕射波的储层预测方法及其应用

赵惊涛 李 明 张 研

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

**摘要:**碳酸盐岩缝洞、孔洞型油气藏在石油勘探中占有很大比重,其中储层预测是难题。反射波勘探时由于假设反射界面为光滑且无限大平面,因此受到纵向、横向分辨率限制,不能有效识别碳酸盐岩缝洞、孔洞型油气藏等该类地质体。基于绕射波的储层预测方法可从地震数据中去除反射波后,只利用地震波场中的绕射信息进行分析。绕射波利用的难点在于绕射波为弱信号,掩盖在强反射背景下,因此,需要去除反射能量以突显绕射信息。基于反射波与绕射波的相关性差异,给出了一种绕射波分离方法。该方法结合平面波破坏滤波与中值滤波,利用正则化反演迭代算法求取反射波平滑倾角场,同时沿着估计出的倾角进行中值滤波,进而计算出波形、振幅稳定的反射数据,最后由地震数据减去预测出的反射波,实现绕射波提取。数值模型及实际应用效果表明,该方法能够有效提取层间岩溶、溶洞、孔洞等地质信息,对碳酸盐岩缝洞型油气藏研究具有重要意义。

**关键词:**绕射波分离;绕射波提取;平面波破坏滤波器;中值滤波;储层预测

中图分类号:P631.445

文献标识码:A

## Development and application of an effective method for reservoir prediction based on seismic diffraction

Zhao Jingtao Li Ming Zhang Yan

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Carbonate fractured and cavernous reservoirs account for a large proportion in petroleum exploration, for which reservoir prediction is a tough issue. As seismic reflection method assumes the reflection interface to be an infinite smooth plane, its application is restricted by the horizontal and vertical resolutions, which cannot detect geological bodies such as carbonate fractured and cavernous reservoirs. The seismic diffraction method for reservoir prediction only analyzes diffraction information in the seismic wave field after the removal of reflected waves from seismic data. The difficulty in using diffraction is related to the weak signal of diffracted waves which can be masked in the context of strong reflection. Thus, it is required to remove the reflected energy for highlighting the diffraction information. Based on the correlation difference between reflection and diffraction, this study presents a diffraction separation method via a combination of plane-wave destruction filter and medium filter. The proposed method adopts the regularization inversion algorithm to obtain the smooth dip angle field of reflection, and then implements medium filter along the estimated dip angle to calculate the reflection data with stable wavelet and constant amplitude. Finally, diffraction extraction is accomplished by subtracting the predicted reflected waves from the seismic data. Numerical simulation and practical application demonstrate that the diffraction-based method can effectively extract geological information of interlayer karsts, caves, and vugs, showing a good perspective for studying carbonate fractured and cavernous reservoirs.

**Key words:** diffraction separation; diffraction extraction; plane wave destruction filter; medium filter; reservoir prediction

在油气资源勘探中,对散射体的准确定位(小断层、缝洞、裂缝等)是一项极其重要的工作,尤其是在油气藏开发中,串珠、溶洞、孔洞等研究工作与井位部署紧密相关<sup>[1]</sup>。从地震波场角度讲,绕射波为复杂构造的信息载体,能够用于高分辨率探测,是检测小尺度地质异常体的一个重要研究方向。需要指出的是,关于绕射现象的定义有多种看法,通常所说的绕射波是指与反射界面边界、反射系数突变以及多个交叉反射界面等构造有关的绕射现象。

20世纪50年代,人们已经开始利用绕射波来检测小断层、断点<sup>[2-5]</sup>,之后又开展了很多关于绕射波的物理模型<sup>[6-10]</sup>和数值计算<sup>[11-18]</sup>的研究工作。Hubral<sup>[19]</sup>求解出了二维模型情况下不同倾角的层状匀速介质中点绕射定位问题,通过拾取叠加剖面上绕射走来确定绕射点的深度。Harlan<sup>[20]</sup>提出应用Harlan变换方法分离信号与噪声。Landa<sup>[21]</sup>提出了共偏移距剖面绕射波识别方法,该方法利用绕射波运动学与动力学特征,通过绕射波相位校正和层分布统计准则,定义了绕射

基金项目:中国地质调查局项目“塔里木盆地深层油气远景区定位研究”、中国博士后科学基金第56批面上项目(2014M561001)资助。

第一作者及通信作者:赵惊涛,男,1982年9月生,2007年获中国地质大学(北京)学士学位,2013年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国石油勘探开发研究院工程师,主要从事复杂储层地震方法预测方面的研究工作。Email:diffzjt@petrochina.com.cn

波自动识别算法,用于判别绕射和估计散射体相关参数。与 Landa 处理绕射波的做法相似,Kanasewich<sup>[22]</sup>提出了共断层点(CFP)绕射波成像方法,用于解释断层边界及波阻抗突变点。此后,Landa<sup>[23]</sup>又提出了一种利用绕射波前曲率半径与近地表速度参数,对绕射走时曲线进行局部相位校正的方法,用于增强共绕射点剖面上绕射点位置处的绕射信号,并将这种技术应用于局部异常体四维地震监测。Goldin<sup>[24]</sup>利用高斯束外推波场,从地震数据中分离出绕射弱信息,建议有选择地成像,以突出特定出射角的逆散射波场。Khaidukov<sup>[25]</sup>在绕射波成像研究方面做出了重要的工作,认为常规的提高叠后地震分辨率方法是图像驱动型的,对假构造不敏感,倡导利用绕射研究地质不连续性构造,如断层、透镜体、小尺度散射体等。他提出的绕射成像方法是数据驱动型的,具有超高分辨率。基于反射波与绕射波运动学差异特征,他利用聚焦-反聚焦思想实现了反射波去除与绕射波成像。Bansal 和 Imhof<sup>[26]</sup>研究了现有地震处理流程中的各种模块,用于去除反射波,加强绕射信号。Taner<sup>[27]</sup>基于平面波模拟原理,通过平面波破坏滤波器压制镜面反射波,实现了镜面反射波与绕射波的分离,得到了只包含绕射波的地震数据。Fomel<sup>[28]</sup>探讨了一种用于绕射分离与绕射波速度分析的方法,该方法将叠加或零偏移数据作为输入,以分离出的聚焦绕射波成像剖面作为最终输出结果。在绕射波速度分析研究上,他提出了绕射同相轴聚焦偏移速度分析准则,不同于常规地震成像中反射同相轴拉平准则。受到聚焦-反聚焦绕射成像方法启发,Moser<sup>[29]</sup>提出了深度域绕射成像方法,通过切除聚焦于深度成像数据中的反射能量,实现绕射成像。基于偏移倾角域绕射与反射几何形态差异,Landa<sup>[30]</sup>提出了一种新的绕射分离与绕射速度分析方法,利用局部倾角滤波在偏移倾角域中实现绕射与反射分离,然后分别成像。基于绕射相干求和原理,Berkovitch<sup>[31]</sup>提出了多聚焦绕射成像方法,该方法利用全新的局部时间校正公式参数化绕射走时曲线,实现绕射同相轴相干叠加,聚焦绕射能量于绕射点,而将反射能量分散在一定区域,从而分离出绕射与反射。利用局部成像矩阵中绕射与反射的分布特征差异,Zhu<sup>[32]</sup>提出了叠前偏移局部成像矩阵绕射成像方法。Gelius<sup>[33]</sup>在共反射面元叠加(CRS)基础上,给出了一种窗口导向的多信号分类(MUSIC)方法,用于成像绕射波。

地震波传播规律研究指出<sup>[34,35]</sup>,绕射波能量弱、衰减快,在反射波强能量背景下,绕射波难于突显,因此必需去除反射波,这也是绕射波应用的关键问题之一。目前,国内外反射波去除方法,主要依据反射波与

绕射波走时差异。但绕射点位置反射波与绕射波相切,仅根据走时很难保证绕射能量;且叠前数据中绕射能量分布范围广,波场干涉严重,分离难度大。在地下介质缓慢变化情况下,该类数据中绕射波为双曲线,分离较为容易;但当介质速度强烈变化时,绕射波形态复杂,不能很好分离。因此,需要研究一种能够同时考虑走时与振幅的绕射波分离方法。笔者给出一种绕射波提取方法,该方法在原理上能够更好保留绕射能量,解决复杂波场绕射波分离问题。

## 1 原理

由于在成像数据中,反射波空间相关性强,符合线性预测特征;而绕射波相邻道相关性差,不可预测。因此,通过减去预测出的反射数据,就可以分离出绕射波场。

### 1.1 平面波破坏滤波与反射倾角估计

平面波破坏滤波由 Claerbout<sup>[36]</sup>提出,它以平面波的形式分解地震数据,能够描述反射信息。通常,利用局部平面波微分方程定义平面波破坏滤波器,如下所示<sup>[37]</sup>:

$$\frac{\partial P(t, x)}{\partial x} + \sigma \frac{\partial P(t, x)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中: $P(t, x)$ 表示地震波场, $t$ 为地震波场到达时间, $s$ ; $x$ 为横向坐标; $\sigma$ 为局部倾角,可随时间和空间变化。微分方程式解的一般形式可表示为:

$$P(t, x) = f(t - \sigma x) \quad (2)$$

式(2)为平面波数学表达形式,其中 $f(x)$ 为波形函数。若倾角 $\sigma$ 与时间无关,可将公式转换到频率域,形式如下:

$$\frac{d\hat{P}(\omega, x)}{dx} - i\omega\sigma\hat{P}(\omega, x) = 0 \quad (3)$$

式中: $\hat{P}(\omega, x)$ 为频率域波场表达式; $\omega$ 为角频率,Hz;频率域局部平面波微分方程解的形式可表示为:

$$\hat{P}(\omega, x) = \hat{P}(0)e^{i\omega\sigma x} \quad (4)$$

其中, $\hat{P}(0)$ 为初始横向坐标处地震波场傅里叶表达式,式指数中的复数项表示时移。

利用 $Z$ 变换,则式滤波形式可表示为:

$$\hat{P}_{x+1}(Z_i) = \hat{P}_x(Z_i) \frac{B(Z_i)}{B(1/Z_i)} \quad (5)$$

其中, $\hat{P}_x(Z_i)$ 为相应地震道的 $Z$ 变换形式, $B(Z_i)/B(1/Z_i)$ 为全通数字滤波器,需要逼近时移项 $e^{i\omega\sigma}$ 。

对时移算子 $e^{i\omega\sigma}$ ,在 $\omega = 0$ 附近,进行泰勒级数展开,得出:

$$e^{i\omega\sigma} \approx 1 + i\omega\sigma - \frac{\sigma^2\omega^2}{2} - i\frac{\sigma^3\omega^3}{6} + O(\omega^4) \quad (6)$$

同样对 $Z$ 域全通滤波算子泰勒展开,可得:

$$\frac{B(Z_i)}{B(1/Z_i)} = \frac{b_{-1}Z_i^{-1} + b_0 + b_1Z_i}{b_1Z_i^{-1} + b_0 + b_{-1}Z_i} = \frac{b_{-1}e^{-i\omega} + b_0 + b_1e^{i\omega}}{b_1e^{-i\omega} + b_0 + b_{-1}e^{i\omega}} \approx 1 - \frac{2i(b_{-1} - b_1)\omega - \frac{2(b_{-1} - b_1)^2}{(b_1 + b_0 + b_{-1})^2}\omega^2 + \frac{i(b_{-1} - b_1)[b_0^2 - b_0(b_{-1} + b_1) + 4(b_{-1}^2 - 4b_{-1}b_1 + b_1^2)]}{3(b_1 + b_0 + b_{-1})^3}\omega^3}{(7)}$$

式中:  $b_i, i = -1, 0, 1$  表示滤波器设计系数, 为保证时移算子  $e^{i\omega}$  与 Z 域全通滤波算子预测一致性, 对比式 (6) 与式 (7) 中  $\omega$  项系数, 得出:

$$\sigma = \frac{-2(b_{-1} - b_1)}{b_1 + b_0 + b_{-1}} \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{4(b_{-1} - b_1)^2}{(b_1 + b_0 + b_{-1})^2} \quad (9)$$

$$\sigma^3 = \frac{2(b_1 - b_{-1})[b_0^2 - b_0(b_{-1} + b_1) + 4(b_{-1}^2 - 4b_{-1}b_1 + b_1^2)]}{(b_1 + b_0 + b_{-1})^3} \quad (10)$$

由于式 (9) 可以直接由式 (8) 平方得到, 因此不能唯一确定  $\omega$  系数, 这里引入约束项:

$$B_3(1) = b_{-1} + b_0 + b_1 = 1 \quad (11)$$

进而可求得:

$$b_{-1} = \frac{(1 - \sigma)(2 - \sigma)}{12} \quad (12)$$

$$b_0 = \frac{(2 + \sigma)(2 - \sigma)}{6} \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{(1 + \sigma)(2 + \sigma)}{12} \quad (14)$$

这样, 就可以得出三点中心滤波器  $B_3(Z_i)$  形式如下:

$$B_3(Z_i) = \frac{(1 - \sigma)(2 - \sigma)}{12}Z_i^{-1} + \frac{(2 + \sigma)(2 - \sigma)}{6} + \frac{(1 + \sigma)(2 + \sigma)}{12}Z_i \quad (15)$$

对于二维情况, 式 (5) 可用预测误差滤波器表示:

$$A(Z_i, Z_r) = 1 - Z_r \frac{B(Z_i)}{B(1/Z_i)} \quad (16)$$

其中,  $Z_r$  为横向  $x$  方向 Z 变换, 对于多个平面波预测问题, 同样需要联立几个形如式 (16) 的滤波器。

为避免除法运算, 将式 (16) 两侧同乘以  $B(1/Z_i)$ , 可得出如下形式:

$$C(Z_i, Z_r) = A(Z_i, Z_r)B(1/Z_i) = B(1/Z_i) - Z_r B(Z_i) \quad (17)$$

在倾角已知的情况下, 设算子  $C(\sigma)$  为二维滤波器式 (17) 与地震数据的褶积形式, 则有:

$$C(\sigma)d \approx 0 \quad (18)$$

式中:  $d$  为向量矩阵, 表示地震观测数据。由于矩阵算子  $C(\sigma)$  包含倾角信息, 因此可以通过对式 (18) 左边的项进行最小二乘, 求得倾角信息。由式 (15) 可知, 该过程为非线性优化问题。对大规模地震问题而言, 最为实用的方法是高斯-牛顿线性迭代法, 其求解过程如下:

$$C'(\sigma_0)\Delta\sigma d + C(\sigma_0)d \approx 0 \quad (19)$$

其中,  $C'(\sigma_0)$  为滤波器算子  $C(\sigma)$  对  $\Delta\sigma$  的微分形式。求解式 (19) 就可以得到  $\Delta\sigma$  更新量, 通过迭代就可以得出倾角信息。

### 1.2 中值滤波与绕射信息提取方法

反射信息具有连续性及波形、振幅稳定特征, 空间相关性强。由平面波破坏滤波器确定反射信息倾角之后, 沿着估计出的倾角进行中值滤波, 可实现反射信息的预测, 原理如下:

(1) 由于反射信息横向波形变化很小, 振幅稳定, 因此, 当中值滤波窗口完全位于反射同相轴上时, 反射信息可完全被预测出来, 如图 1 所示。

(2) 当中值滤波窗口一端位于反射轴上, 一端位于绕射成像干涉带内时。由于绕射能量在绕射点附近振幅变化很快, 且为非线性特征。因此, 经中值滤波后, 该绕射信息难以预测。越接近绕射点, 无法预测的绕射残留能量越多。

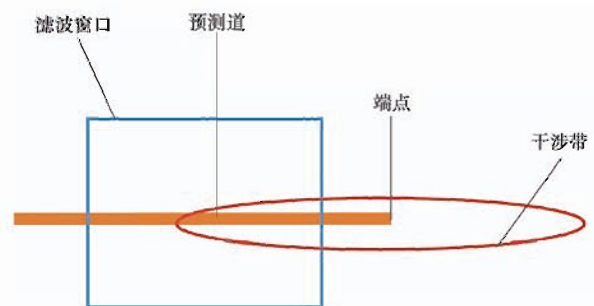


图 1 中值滤波与反射信息预测示意

Fig. 1 Schematic diagram of medium filter and reflection prediction

由上述分析得出, 沿着估计出的倾角进行中值滤波, 可以实现反射信息预测。而绕射信息由于振幅、波形变化强, 不能被预测。据此得出成像数据绕射信息提取方法: 首先对成像数据进行倾角扫描, 确定反射同相轴倾角; 其次沿着估计的倾角进行中值滤波实现反射信息预测; 最后由成像数据减去预测出的反射数据, 以提取绕射信息。该方法利用反射信息相关性特性, 通过高阶项对反射信息进行预测, 进而通过减去的方法提取出空间相关性差的绕射信息。利用该方法能够分离出与反射同相轴间断、反射系数突变、小尺度散射点等小尺度不连续性地质信息。



## 2 数值模型算例

### 2.1 小断层-散射点数值模型

利用 Kirchhoff 算法合成地震记录,子波类型为雷克子波,主频 20 Hz。为说明绕射信息具有高分辨率携带能力,模型中水平反射界面上设计了微小抖动,同时存在不同尺度的垂直断层。

图 2 为零偏移距地震合成记录,垂直断层上、下两盘都存在绕射波,水平反射界面微小抖动处也有不同尺度散射波。图 3 为反射波与绕射波成像结果,由于反射波能量远高于绕射波,因此成像剖面主要反映了大尺度地质信息,而对于小尺度断层、散射点等信息难于识别。利用此反射信息预测方法,得出的结果如图 4 所示。由反射与绕射成像结果(图 3)减去预测出的反射信息(图 4),提取出绕射信息,如图 5 所示。

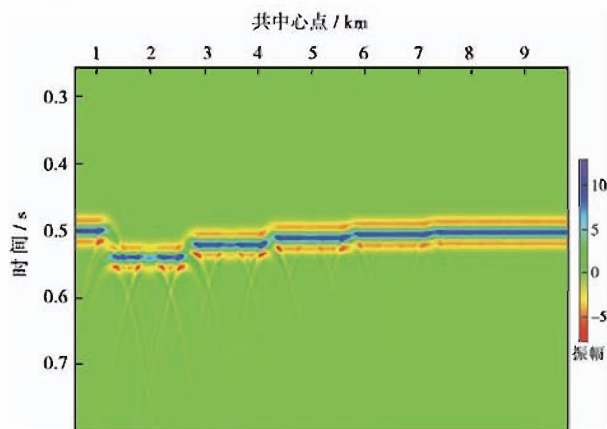


图 2 零偏移距地震合成记录

Fig. 2 Synthetic zero-offset seismic record

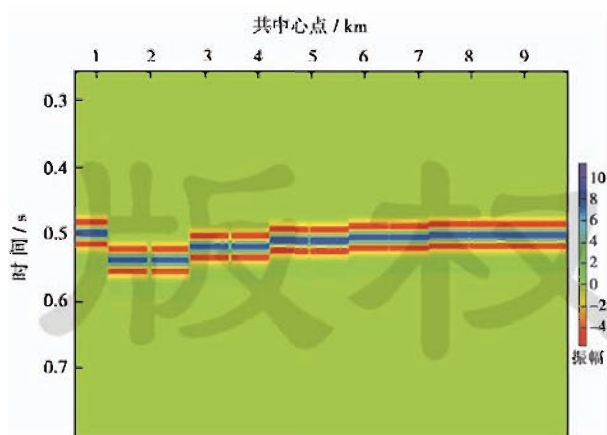


图 3 反射波与绕射成像结果

Fig. 3 Imaging result of reflections and diffractions

在油气田勘探与开发过程中,地质人员需要根据不同类型的地震波解决不同尺度的地质问题。反射波能量强,在刻画地质构造宏观展布上具有优势,而绕射信息则主要反映小尺度细节特征(图 5)。数值模型测

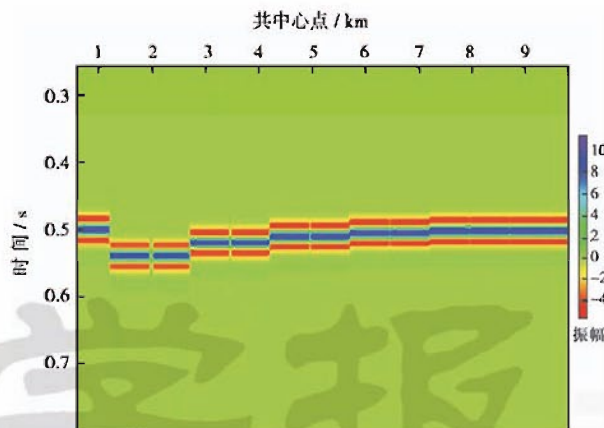


图 4 预测出的反射波

Fig. 4 Predicted reflected waves

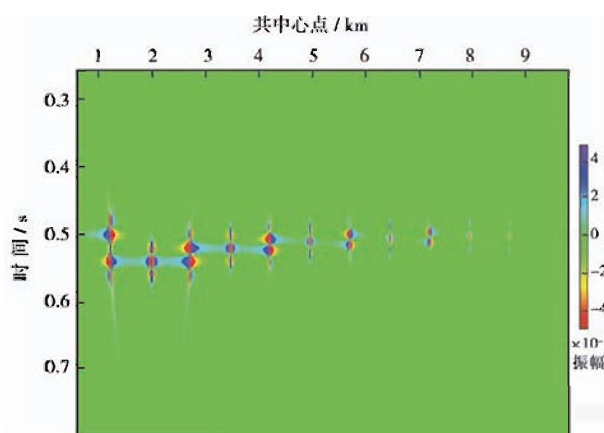


图 5 提取出的绕射信息

Fig. 5 Extracted diffraction information

试表明,该方法能很好预测出反射信息、达到绕射信息提取的目的。

### 2.2 实际资料应用

塔里木盆地塔北地区奥陶系碳酸盐岩油藏是与古风化壳相关的大型岩溶裂缝-孔洞油藏,并且在空间分布上,由多期缝洞单元叠合而成。大型洞穴及溶蚀孔洞是奥陶系碳酸盐岩的主要储集空间类型,储集类型复杂多样,以裂缝、溶洞为主。油气受裂缝和古岩溶缝洞体控制,储层纵横向非均质性强,其地震响应特征为绕射波。该类型地质条件有利于地震绕射波提取工作的开展。

绕射波为弱信息,通常淹没在强能量反射波背景下,经过绕射波与反射波分离后,高分辨率绕射信息才能突显。对比图 6 与图 7,可以看出绕射波剖面能更好反映溶洞发育情况,如图中蓝色圆框所示。另一方面,顺层发育的岩溶体,由于其空间尺度有限,因此不能形成反射波,表现为绕射波。在提取的绕射波剖面中,黄色与红色之间区域可以很好反应岩溶体发育。同样对比图 8 与图 9,可以看出绕射波在溶洞刻画上的优



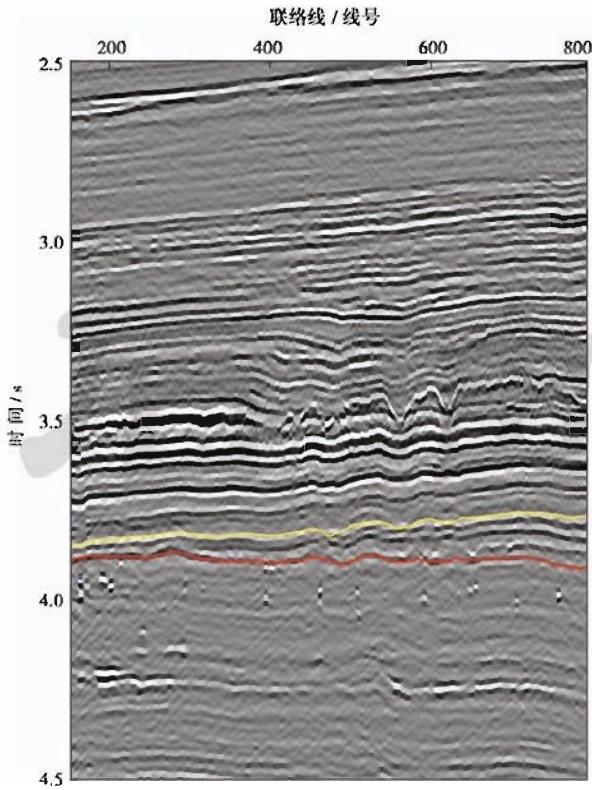


图 6 主测线方向常规反射波成像剖面

Fig. 6 Conventional reflection imaging section in inline direction

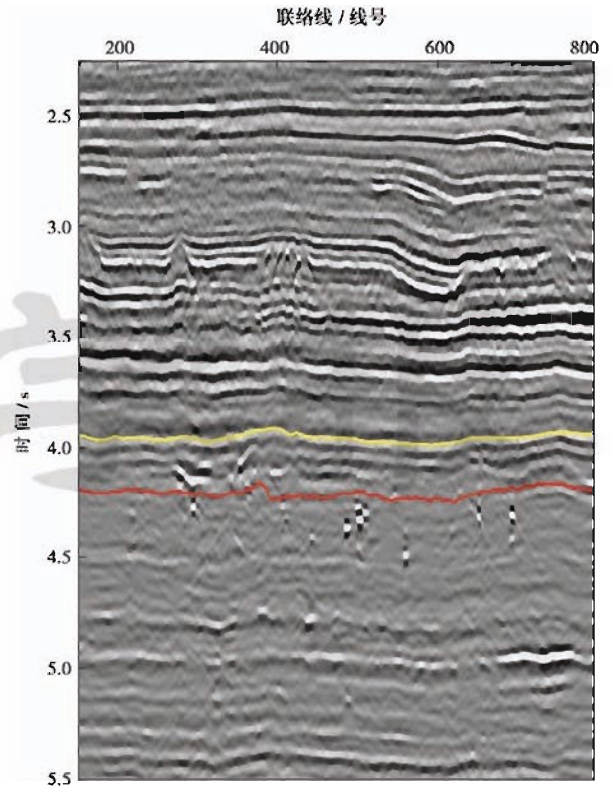


图 8 联络线方向常规反射波成像剖面

Fig. 8 Conventional reflection imaging section in cross line direction

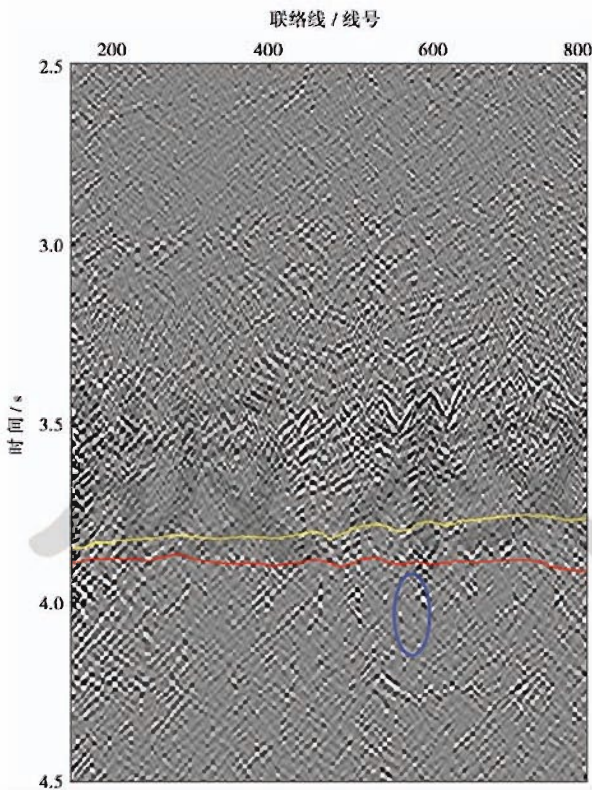


图 7 主测线方向绕射波信息剖面

Fig. 7 Diffraction information section in inline direction

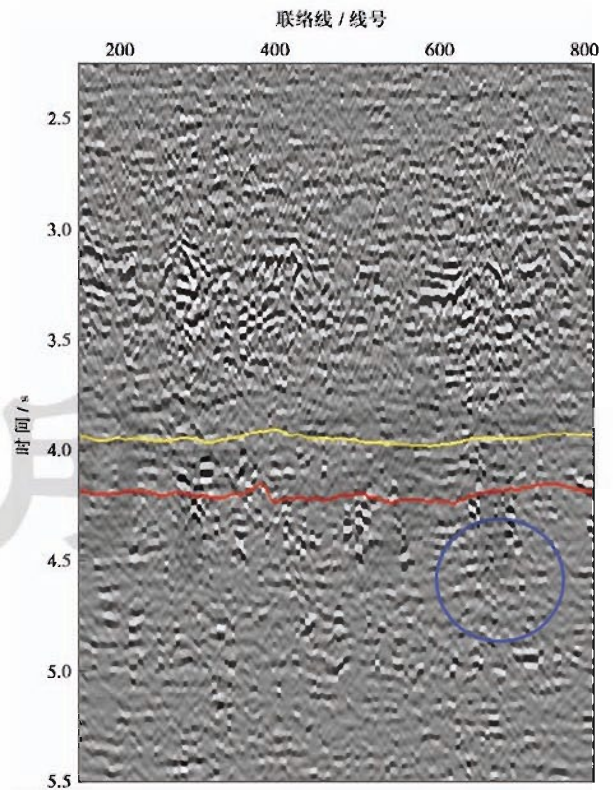


图 9 联络线方向绕射波信息剖面

Fig. 9 Diffraction information section in cross line direction



势,并且能够很好反映 3.5 ms 处,风化壳破碎情况。

相干体技术是通过地震道相似性分析,将三维地震振幅数据转换为相似系数数据体,以突出断层、裂缝、特殊岩性等因素所引起的不相关现象。图 10(a)中主要断层清晰可见,并且地下河道特征明显,但不能很好预测岩溶发育带,因此,相干分析技术只起宏观指导作用。而这些细节特征在绕射波上反映明显,如图 10(b)中红色色标指出的区域具有顺层岩溶特征,

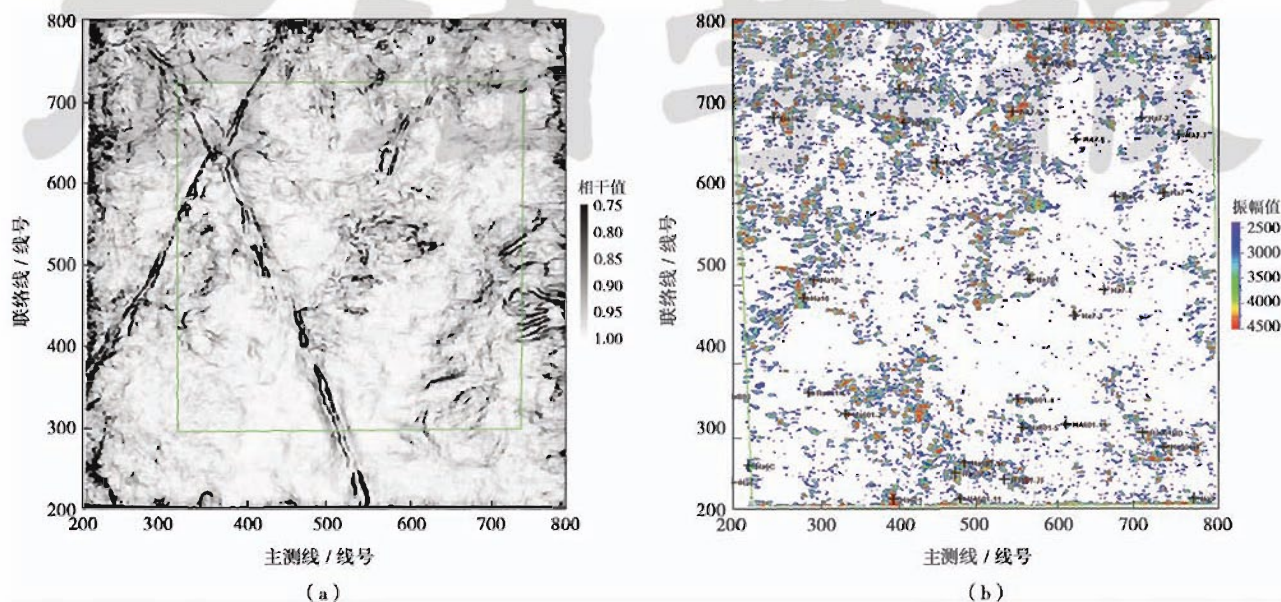


图 10 绕射波与反射波沿层属性对比

Fig. 10 Attributes extracted along the layer of the red line

实际资料应用效果表明,绕射信息携带高分辨率地质信息,能够突出断点、小断层、溶洞等不连续体,而这些细节信息在常规处理剖面中难于识别。与常规剖面相比,绕射成像剖面连续差,更多地反映细节信息,在实际应用中可将反射信息与绕射信息结合使用。

### 3 认识与结论

(1) 结合平面波破坏滤波与中值滤波,给出了一种反射波预测方法。该方法通过正则化迭代反演算法求取反射同相轴倾角,然后沿着估计出的倾角进行中值滤波,估计出反射波。

(2) 常规成像结果中的反射信息在宏观构造展示上具有优势,而绕射信息主要反映小尺度地质体信息,综合利用反射信息与绕射信息,能够提供更全面的地质信息。

(3) 该绕射波提取方法易与常规地震处理流程接轨,具有很好的应用前景。绕射波在不连续、非均质等特性研究上具有更好的显示度,能够预测储层中的小尺度地质体,为碳酸盐岩缝洞、孔洞等研究提供更多的参考信息。

并且该异常体在整体趋势上沿断层分布,符合地质规律。另外,绕射波预测出的岩溶分布图与高产井具有很好的吻合关系。

通过对比绕射波与反射波成像结果,可以看出,绕射信息能够反映小尺度的断裂、裂缝、非均质岩溶特征。在反射波控制宏观格局前提下,提取的绕射波可以作为一种辅助资料,帮助地质人员研究小尺度地质异常体。

(4) 绕射波能量弱,反映的地质体尺度较小,不可避免与噪声混叠在一起,判别绕射波信息真实性,需要结合其他地球物理资料综合分析。

### 参考文献

- [1] 任芳祥,孙岩,朴永红,等.地震技术在油田开发中的应用相关问题探讨[J].地球物理学进展,2010,25(1):4-8.  
Ren Fangxiang, Sun Yan, Piao Yonghong, et al. Discussion on application of seismic technology to oilfield development[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(1): 4-8.
- [2] Rieber F. Visual presentation of elastic wave patterns under various structural conditions[J]. Geophysics, 1936, 1(2): 196-218.
- [3] Rieber F. Complex reflection patterns and their geologic sources[J]. Geophysics, 1937, 2(2): 132-169.
- [4] Dix C H. Seismic prospecting for oil[M]. New York: Harper Publishing, 1952.
- [5] Krey T. The significance of diffraction in the investigation of faults[J]. Geophysics, 1952, 17(4): 843-858.
- [6] Friedlander F G. Diffraction of sound pulses[J]. Proceeding of Royal Society of London, 1946, 186(A): 322-367.
- [7] Angona F A. Two-dimensional modeling and its application to seismic problems[J]. Geophysics, 1960, 25(2): 468-482.

- [8] Harper D R. Observed reflection and diffraction wavelet complexes in two-dimensional seismic model studies [J]. *Geophysics*, 1965, 30(1): 72-86.
- [9] Kovalevsky G L. Kinematic and some dynamic features of diffracted seismic waves[J]. *Geology and Geophysics*, 1971, 7: 101-110.
- [10] Landa E, Maximov A. Testing of algorithm for low-amplitude fault detection[J]. *Geology and Geophysics*, 1980, 12: 108-113.
- [11] Trorey A W. A simple theory for seismic diffraction[J]. *Geophysics*, 1970, 35(5): 762-784.
- [12] Hilterman F J. Three-dimension seismic modeling[J]. *Geophysics*, 1970, 35(6): 1020-1037.
- [13] Hilterman F J. Amplitudes of seismic waves—a quick look[J]. *Geophysics*, 1975, 40(5): 745-762.
- [14] Trorey A W. Diffraction theory for arbitrary source-receiver location[J]. *Geophysics*, 1977, 42(6): 1177-1182.
- [15] Berryhill J R. Diffraction response for non-zero separation of source and receiver[J]. *Geophysics*, 1977, 42(6): 1158-1176.
- [16] Derogowski S M, Brown S M. A theory of acoustic diffractors applied to 2-D models[J]. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31(2): 293-333.
- [17] Data S, Bhowmick A N. Seismic model studies on diffraction of waves by edges of varying radius of curvatures and depth[J]. *Geophysical Prospecting*, 1974, 22(3): 534-543.
- [18] Hanyga A et al. A Hamiltonian approach to asymptotic seismic reflection and diffraction modeling[J]. *Geophysical Prospecting*, 2001, 49(2): 213-227.
- [19] Hubral P. Locating a diffractor below plane layers of constant interval velocity and varying dip [J]. *Geophysical Prospecting*, 1975, 23(2): 313-322.
- [20] Harlan W S, Claerbout J F, Rocca F. Signal/noise separation and velocity estimation[J]. *Geophysics*, 1984, 49(11): 1869-1880.
- [21] Landa E, Shtivelman V, Gelchinsky B. A method for detection of diffracted waves on common-offset sections [J]. *Geophysical Prospecting*, 1987, 35(4): 359-373.
- [22] Kanasewich E, Phadke S M. Imaging discontinuities on seismic sections[J]. *Geophysics*, 1988, 53(3): 334-345.
- [23] Landa E, Keydar S. Seismic monitoring of diffraction images for detection of local heterogeneities[J]. *Geophysics*, 1998, 63(3): 1093-1110.
- [24] Goldin S V, Khaidukov V G, Kostin V I, et al. Separation of reflected and diffracted objects by means of Gaussian beams decomposition[C] // Bermudez A, Gomez D, Hazard C, Eds, Proceedings of 5th International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation; SIAM-INRIA, Philadelphia; SIAM, 2000, 964-968.
- [25] Khaidukov V, Landa E, Moser T J. Diffraction imaging by focusing-defocusing; an outlook on seismic superresolution[J]. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1478-1490.
- [26] Bansal R, Inhof M G. Diffraction enhancement in prestack seismic data[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 73-79.
- [27] Taner M T, Fomel S, Landa E. Prestack separation of seismic diffractions using plane-wave decomposition[C] // 76th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geoph. SEG, Expanded Abstracts, 2006; 2401-2404.
- [28] Fomel S, Landa E, Taner M T. Poststack velocity analysis by separation and imaging of seismic diffractions[J]. *Geophysics*, 2007, 76(6): U89-U94.
- [29] Moser T J, Howard C B. Diffraction imaging in depth[J]. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56(5): 627-641.
- [30] Landa E, Fomel S. Separation, imaging, and velocity analysis of seismic diffractions using migrated dip-angle gathers. SEG, Expanded Abstracts, 2008, 2176-2180.
- [31] Berkovitch A, Belfer L, Hassin Y, et al. Diffraction imaging by multifocusing[J]. *Geophysics*, 2009, 74(6): WCA75-WCA81.
- [32] Zhu X S, Wu R S. Imaging diffraction points using the local image matrices generated in prestack migration [J]. *Geophysics*, 2009, 75(1): S1-S9.
- [33] Gørelis J J, Tygel M, Takahata A K, et al. High-resolution imaging of diffractions; a window-steered MUSIC approach [J]. *Geophysics*, 2013, 78(5): S255-S264.
- [34] 陆基孟. 地震勘探原理(下)[M]. 北京: 石油大学出版社, 2006. Lu Jimeng. Principles of seismic exploration (Volume Two)[M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2006.
- [35] Klem-Musatov K. Theory of seismic diffraction[M]. SEG, 2006.
- [36] Claerbout J F. Earth soundings analysis; Processing versus inversion[M]. Boston: Blackwell Scientific Publications, Inc.
- [37] Fomel S. Application of plane-wave destruction filters [J]. *Geophysics*, 2002, 67(6): 1946-1960.