

吴小羊,刘天佑,魏 伟等. 二维菲涅耳带共反射面元叠加方法研究. 地球物理学报, 2008, 51(6):1892~1898

Wu X Y, Liu T Y, Wei W, et al. Two dimensional common reflection surface stack based on the Fresnel zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6):1892~1898

## 二维菲涅耳带共反射面元叠加方法研究

吴小羊<sup>1</sup>,刘天佑<sup>1</sup>,魏 伟<sup>1</sup>,王德志<sup>1,2</sup>,梁运基<sup>1,2</sup>

1 中国地质大学地球物理与空间信息学院,武汉 430074

2 中石化河南石油勘探局地质调查处,河南南阳 473132

**摘 要** 大量研究证明 CRS 叠加能提高地震勘探的信噪比,但是能否提高分辨率的关键在于如何确定 CRS 叠加孔径. 本文详细探讨了地震波反射过程中菲涅耳带的特征,认为起伏地形下菲涅耳带可以采用椭圆予以近似,在此基础上提出了一种通过菲涅耳带来确定 CRS 叠加孔径的方法,并应用于泌阳凹陷陡坡带的地震剖面. 结果表明,由于菲涅耳带确定的叠加范围使地震信号的能量达到最佳,相对于 CMP 叠加,菲涅耳带 CRS 叠加同时提高了地震资料的信噪比和分辨率,特别显示了中深部较弱的地震信息,而常规的 CRS 叠加则只在于提高资料的信噪比和改善浅部的地震信息.

**关键词** 菲涅耳带, CRS 叠加, 叠加孔径, 分辨率, 泌阳凹陷

文章编号 0001-5733(2008)06-1892-07

中图分类号 P631

收稿日期 2007-03-13, 2008-07-23 收修定稿

### Two dimensional common reflection surface stack based on the Fresnel zone

WU Xiao-Yang<sup>1</sup>, LIU Tian-You<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, WANG De-Zhi<sup>1,2</sup>, LIANG Yun-Ji<sup>1,2</sup>

1 *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

2 *Geologic Survey Division of Nanyang Oilfield, SINOPEC, Henan Nanyang 473132, China*

**Abstract** The Common Reflection Surface (CRS) stack can improve signal-to-noise ratio of seismic exploration. However, the key issue to improve the resolution is how to set CRS stack aperture. In this paper, we discuss the characteristics of Fresnel zone during the reflection of seismic waves and suggest that the Fresnel zone at the condition of undulate layers can be approximated with ellipses. Then we bring forward a method to determine the aperture size of CRS stack based on Fresnel zone and use it to deal with seismic profile of the steep slope of Miyang Depression. The results show that Fresnel zone based CRS stack improves both the signal-to-noise ratio and resolution because the stacking scope determined by Fresnel zone maximizes the energy of seismic signals. Particularly, weak seismic information in deep zone is preserved and displayed, while the normal CRS stack can only improve the signal-to-noise ratio and the shallow seismic information.

**Keywords** Fresnel zone, CRS stack, Stacking aperture, Resolution, Miyang depression

## 1 引言

复杂地质构造的准确成像是目前地震勘探面临的关键问题之一。从 20 世纪 80 年代开始,陆续出现了一系列以复杂非均匀介质为模型的超道集叠加成像技术。其中,共反射面元(CRS)叠加被认为是最好的生成零炮检距剖面的方式。CRS 叠加利用邻近多个反射点组成的共反射面信息进行动校正与叠加,可大幅度提高地震资料信噪比和分辨率,提供更精确的速度模型以及其他地下界面参数等。

1988 年, Gelchinsky 等<sup>[1]</sup>提出了同胚(HI)成像技术,该技术用到了 Hubral<sup>[2]</sup>提出的 NIP(Normal Instance Point)波和 N(Normal)波等虚拟波的概念,引起了 Hubral 的注意,从而为 CRS 叠加成像的诞生提供了契机。在 Gelchinsky 的启发下, Hubral 等提出和发展了共反射面元(CRS)叠加方法,从理论上将共反射点叠加扩展到共反射面元叠加。

Bortfeld 等<sup>[3,4]</sup>基于旁轴射线理论,用射线传播矩阵,推导三维非均匀层状介质内两点之间的射线以及该射线邻域之间的走时计算关系式,然后借助两种特征波——N 波和 NIP 波,导出抛物型和双曲型的 CRS 时距关系近似表达式。Höcht 等<sup>[5]</sup>则从共反射点(CRP)时距关系出发,从 CRP 轨迹扩展到 CRS 叠加面。Mann<sup>[6]</sup>首次将 CRS 叠加应用于实际二维地震资料的处理,并得到了很好的效果。Jäger<sup>[7]</sup>将 CRS 叠加用于合成二维地震记录的处理过程中,详细分析了 CRS 的实现机制以及如何避免 CRS 的 3 个叠加参数搜索过程陷入局部极值点。三维 CRS 叠加则以确定 8 个波场属性参数的类似的寻优过程合成三维最优叠加算子<sup>[8]</sup>。Duvencek 研究了如何利用 CRS 参数得到宏观速度模型<sup>[9]</sup>。杨锴<sup>[10~12]</sup>、王华忠<sup>[13]</sup>提出了倾角分解共反射面元叠加方法;韩立国<sup>[14]</sup>舍弃了  $R_{\text{NIP}}$  参数,直接利用速度与另两个 CRS 参数进行 CRS 叠加,并尝试利用 CRS 参数重建宏观速度模型;李振春等<sup>[15,16]</sup>则将 CRS 叠加方法应用于 Marmousi 模型的处理中,提出了一种利用 CRS 叠加参数逐层反演地震波层速度的方法。

常规 CRS 叠加的叠加孔径的确定存在着很多人造因素,虽然可以提高地震资料的信噪比,但不能明显的提高地震勘探的分辨率,如何在 CRS 叠加面上确定叠加孔径是 CRS 叠加提高分辨率的关键。

本文详细分析了地震波反射过程中菲涅耳带的特征,并实现了一种根据菲涅耳带确定 CRS 叠加孔径的方法。

## 2 确定 CRS 叠加孔径的方法原理

CRS 叠加时距曲线的双曲型近似表达式为<sup>[5]</sup>

$$t^2(x_m, h) = \left[ t_0 + \frac{2\sin\alpha}{v_0}(x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2\alpha}{v_0} \left[ \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}} \right], \quad (1)$$

式中,  $t$  为反射时间,  $t_0$  为零偏移距走时,  $x_0$  为零偏移距炮点接收点中点位置,  $x_m$  为炮点接收点中点,  $h$  为半偏移距,  $v_0$  是在坐标  $x_0$  点处的地表地震波速度。3 个未知参数为零炮检距射线的出射角  $\alpha$ 、N 波和 NIP 波出射到地表的波前曲率半径  $R_N$  和  $R_{\text{NIP}}$ 。

广义绕射理论认为,地面某点观测到的能量是地下界面上每个绕射源对它的贡献,而每个绕射源的贡献大小并不一样,能量主要来自于菲涅耳带所限定的区域。CRS 叠加之所以能够优于以往任何一种叠加方法,在于它能够近似利用菲涅耳带内的信号叠加来模拟零偏移距剖面。因此如何确定菲涅耳带的范围,使地面观测到的能量最大化是 CRS 叠加显示其优越性的关键问题。实现 CRS 叠加需要了解表层速度  $v_0$  和 3 个参数  $\alpha, R_{\text{NIP}}, R_N$  的分布情况,然后,  $(x_m, h, t)$  域内的 CRS 叠加面即可由(1)式求出。由于 3 个 CRS 叠加参数完全描述出射波前,即 CRS 参数能决定地震波在介质中传播的物理过程,因此我们可以利用 3 个参数确定 CRS 叠加孔径。

### 2.1 菲涅耳带的确定

如图 1 所示,对于水平反射界面,在零炮检距下,到达  $M$  点最快的是来自  $O$  点的自激自收绕射子波,  $O$  点两侧的绕射波到达的时间要依次晚一些,离开  $O$  点一定距离产生的绕射波到达  $O$  点的时差达到半个周期时,就不能起到相互加强的作用。把以  $O$  点为圆心,  $OC$  为半径的圆面定义为  $M$  点产生的波在界面上的菲涅耳带,这个范围的地质体在地震时间剖面上是无法分辨的。如果用地震子波的波长  $\lambda$  表示菲涅耳带的大小,则菲涅耳带半径可以写成:

$$\begin{aligned} OC &= \sqrt{\left(h + \frac{1}{4}\lambda\right)^2 - h^2} \\ &= \sqrt{\frac{h\lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{16}} \approx \sqrt{0.5h\lambda}. \end{aligned} \quad (2)$$

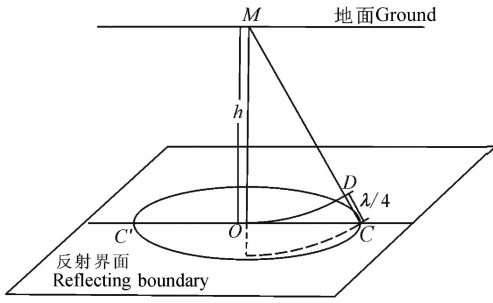


图 1 零炮检距菲涅耳带示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Fresnel zone when the offset is zero

在非零炮检距下,如图 2 所示水平反射界面,设 S 为入射点, G 为接收点,炮检距为 2x,入射角为  $\theta$ . 菲涅耳带的边界就是界面上满足这样条件的绕射点的集合:来自该绕射点 C 的绕射波满足  $CS + CG - 2OS = \lambda/2$ ,设点  $S^*$  为点 S 关于界面的对称点,即:

$$S^*C + CG = S^*G + \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

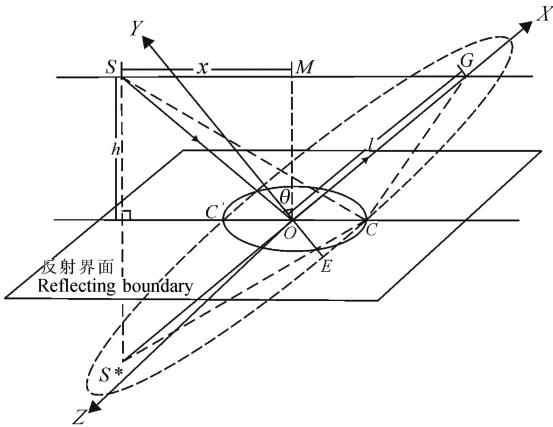


图 2 水平界面非零炮检距菲涅耳带

Fig. 2 Schematic diagram of Fresnel zone when offset is non-zero and the interface is level

由式(3)可知,菲涅耳带的边界点 C 到点  $S^*$  和点 G 的距离之和为  $S^*G + \lambda/2$ . 由平面解析几何理论可知,在三维空间满足上述条件的点的轨迹为一椭球面. 该椭球面的参数如下:

半焦距:  $OG = l = h / \cos\theta$ ,

长半轴:  $a = \frac{S^*C + CG}{2} = l + \lambda/4$ ,

短半轴:  $b = c = \sqrt{GE^2 - OG^2}$   
 $= \sqrt{\lambda l/2 + \lambda^2/16}$ .

在图 2 所示的 OXYZ 坐标系下,椭球面方程为

$$\frac{x^2}{(l + \frac{\lambda}{4})^2} + \frac{y^2 + z^2}{\frac{\lambda l}{2} + \frac{\lambda^2}{16}} = 1. \quad (4)$$

菲涅耳带的边界点就是该椭圆与界面的交点. 显然它是一个以反射点 O 为中心的椭圆,根据反射界面方程,我们可以求得该椭圆方程. 同理可得倾斜界面菲涅耳带如图 3 所示.

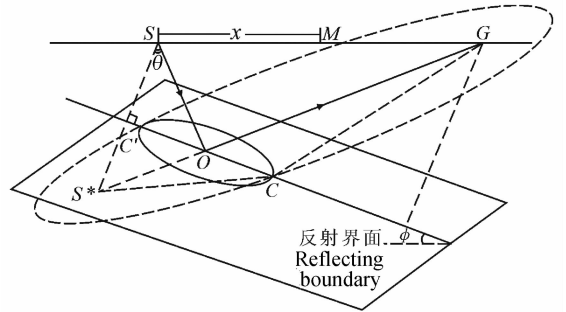


图 3 倾斜界面非零炮检距菲涅耳带

Fig. 3 Schematic diagram of Fresnel zone when offset is non-zero and the interface is slant

通过以上分析,我们得出:在非零炮检距,菲涅耳带呈椭圆分布. 因此,CRS 叠加过程中菲涅耳带的确定可以采用椭圆予以近似,但是在界面起伏的情况下,采用椭圆叠加孔径近似时,还应予以补偿,以得到更高精度的叠加范围.

对于起伏界面,由于在检波器处的波场受中心射线附近区域的影响,因此射线不再被认为是数学上的射线,而认为是沿着从震源到接收点地震波能量的高频部分的轨迹. 在目标反射体上菲涅耳带的范围受到走时差的限制,反射射线  $SO_RG$  与绕射射线( $SO_1G$  与  $SO_2G$ )的不同路径及其传播走时差可以确定菲涅耳带的大小,即反射波与绕射波的走时差不超过子波周期的一半  $T/2$ <sup>[17]</sup> (图 4).

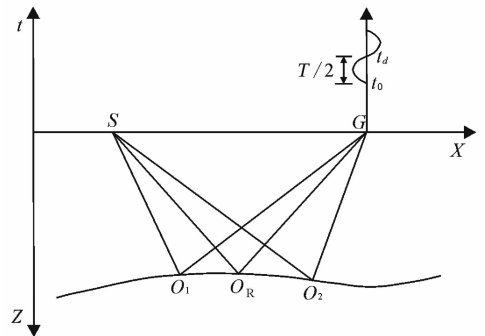


图 4 采用反射波与绕射波的走时差确定起伏界面菲涅耳带的范围,据 Vieth, 2001<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Using travel time difference between reflected wave and diffracted wave to determine Fresnel zone when the interface is undulate, according to Vieth, 2001<sup>[18]</sup>

$$|t(S,G) - t(\bar{O},S) - t(\bar{O},G)| \leq \frac{T}{2}, \quad (5)$$

$\bar{O}$  表示  $O_1$  或  $O_2$ , 通过求解(5)式可得到  $O_1$  和  $O_2$  的坐标, 从而确定菲涅耳带的范围。

$$\frac{T}{2} = |t_{\text{hyp},d} - t_{\text{hyp}}| = \left| \sqrt{\left[ t_0 + \frac{2}{v_0} (x - x_0) \sin \alpha \right]^2 + \frac{2}{v_0} t_0 \cos^2 \alpha \frac{(x - x_0)^2}{R_{\text{NIP}}}} - \sqrt{\left[ t_0 + \frac{2}{v_0} (x - x_0) \sin \alpha \right]^2 + \frac{2}{v_0} t_0 \cos^2 \alpha \frac{(x - x_0)^2}{R_N}} \right|. \quad (6)$$

当子波周期  $T$  给定以后, 上式可以给出零偏移距情况下的  $x$  范围的数值解. 在非零偏移距情况下, 无法利用上述公式求出  $x$  范围, 但是由前面对水平地层和倾斜地层的菲涅耳带范围的讨论, 我们知道  $x$  范围是随着偏移距的增加而减小的. 可以将  $x$  的范围看作一个椭圆(图5), 将椭圆短半轴取在共中心点轴方向, 经试验, 将长半轴长度取为短半轴长度的 1.5~2.5 倍效果最佳. 假设各参数取值如下:  $R_{\text{NIP}} = 3 \text{ km}$ ,  $R_N = \infty$ ,  $v_0 = 2.5 \text{ km/s}$ ,  $T = 0.04 \text{ s}$ . 利用双曲线型 CRS 公式得到近似菲涅耳带, 与精确菲涅耳带进行对比, 两者的比值如图 6 所示。

分析图 6 可知: 零偏移距时近似解与精确解相同; 非零偏移距时近似解与精确解的偏差随着偏移距的增大而加大, 随着地层倾角的增加而加大, 且近似值总小于精确值(比值小于 1). 因此, 有必要对近似菲涅耳带进行补偿, 以得到更精确的范围. 考虑到在单层界面情况下 NMO 速度近似等于层速度除以  $\cos \varphi$  ( $\varphi$  为地层倾角), 故将菲涅耳带范围作类似处理, 即将其除以  $\cos \varphi$  作为最终的叠加范围值, 具体实现步骤为:

(1) 使用速度分析得到的速度代替式(6)的地表层速度;

(2) 假设地层界面水平, 即令  $R_N$  为  $\infty$ , 不考虑式(6)中  $R_N$  项影响, 得到:

$$\frac{T}{2} = \left| \sqrt{\left[ t_0 + \frac{2}{v_{\text{NMO}}} (x - x_0) \sin \alpha \right]^2 + \frac{2}{v_{\text{NMO}}} t_0 \cos^2 \alpha \frac{(x - x_0)^2}{R_{\text{NIP}}}} - \left| t_0 + \frac{2}{v_{\text{NMO}}} (x - x_0) \sin \alpha \right| \right|; \quad (7)$$

(3) 对于给定的子波周期  $T$ , 用式(7)计算零偏移距情况下的  $x$  范围的数值解, 确定零偏移距时菲涅耳带范围;

(4) 将零偏移距时菲涅耳带范围除以地层倾角的余弦  $\cos \varphi$  作为补偿的叠加范围;

## 2.2 CRS 叠加孔径的确定

根据双曲线近似式即方程(1)计算菲涅耳带范围, 在零偏( $h=0$ )情况下, 绕射波和反射波走时差公式如下<sup>[18]</sup>:

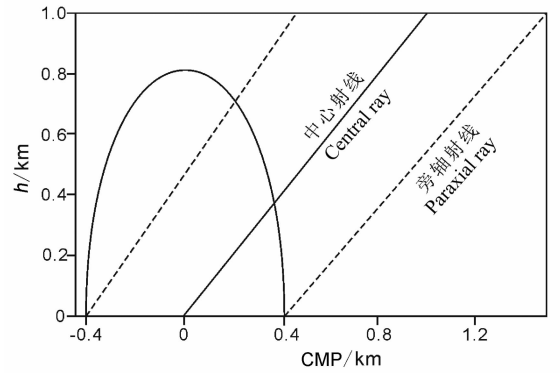


图 5 CRS 叠加椭圆叠加孔径

Fig. 5 The elliptical stacking aperture of CRS stack

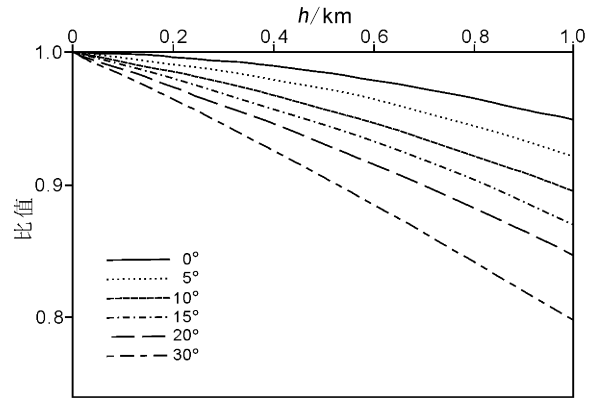


图 6 不同倾角下近似菲涅耳带与精确值的比值

Fig. 6 The ratios between approximate Fresnel zone and the accurate Fresnel zone

(5) 根据椭圆叠加孔径近似计算出非零偏移距时菲涅耳带大小。

以上方法适当地补偿了菲涅耳带范围, 并且使之略大于精确菲涅耳带叠加范围(如图 7 所示), 从而保证该范围能够有效覆盖所有有用信号。

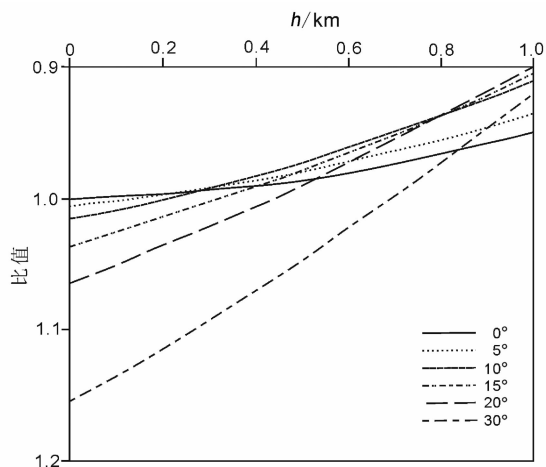


图 7 补偿后近似菲涅耳带与精确值比值  
Fig. 7 The ratios between compensated approximate Fresnel zone and the accurate Fresnel zone

### 3 应用实例

以泌阳凹陷南部陡坡带的一段二维地震剖面为例,经过预处理后分别进行 CMP 叠加、CRS 叠加和菲涅耳带 CRS 叠加.可以看出:

(1)在 CRS 叠加剖面上,随机噪声和多次波干扰得到了大幅度压制,信噪比明显提高;在 CMP 叠加剖面上不清晰的或者淹没于噪声中的同相轴在 CRS 叠加剖面中均有不同程度的改善.

(2)对比图 9 和图 10,菲涅耳带 CRS 叠加相对于 CRS 叠加的优势主要体现在:菲涅耳带 CRS 叠加实现了较高信噪比与较高分辨率的结合,而不仅仅是提高信噪比.值得注意的是中深层大部分反射

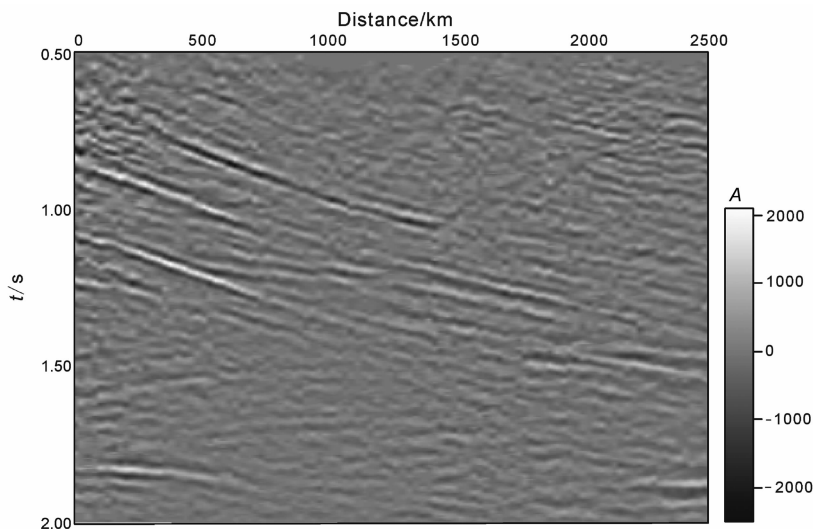


图 8 CMP 叠加剖面  
Fig. 8 The section of CMP stack

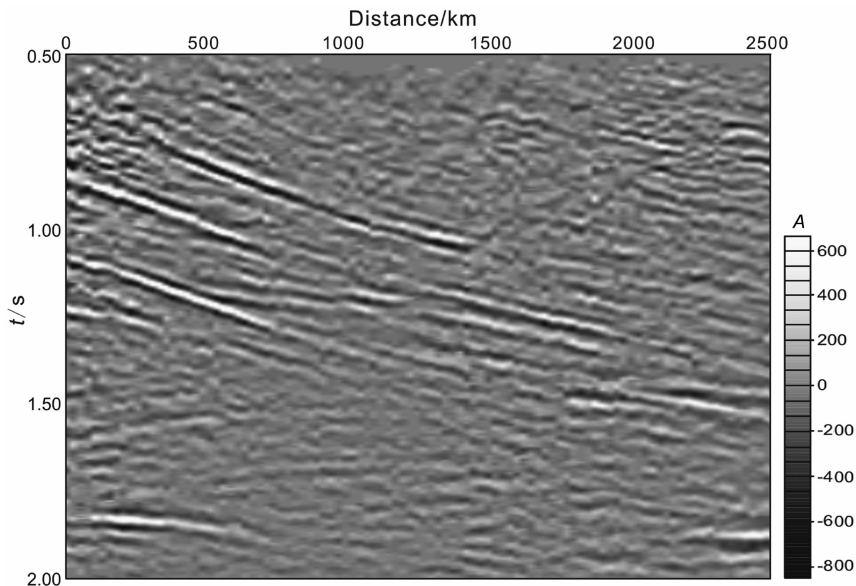


图 9 CRS 叠加剖面  
Fig. 9 The section of normal CRS stack

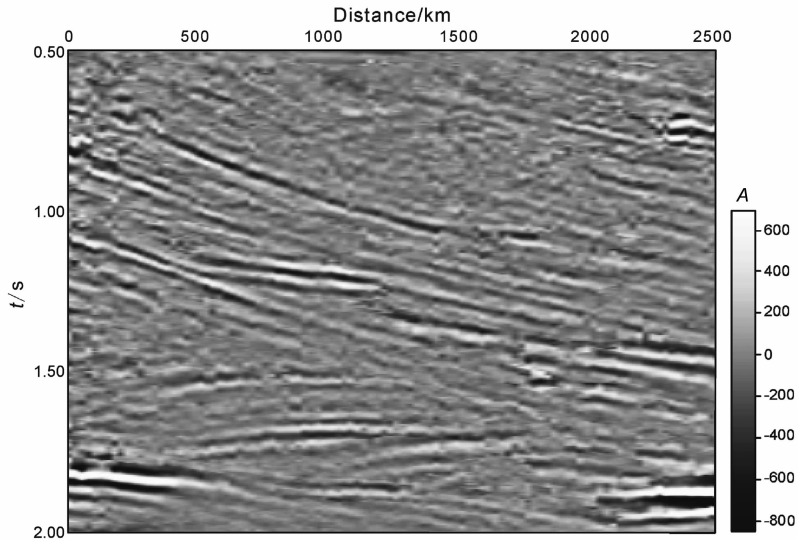


图 10 菲涅耳带 CRS 叠加剖面

Fig. 10 The section of CRS stack based on Fresnel zone

信息在菲涅耳带 CRS 叠加剖面中才能有效的识别,而在 CRS 叠加剖面上并无明显的显示。

(3)菲涅耳带 CRS 叠加剖面浅层的噪声高于 CRS 叠加的结果,致使浅部同相轴比 CRS 叠加剖面上的略微模糊了一些,这是因为菲涅耳带 CRS 叠加孔径比 CRS 叠加范围小,不过正是菲涅耳带叠加孔径的限制使得叠加剖面在提高信噪比和分辨率上达到了综合最优。

## 4 结 论

CRS 叠加是一种独立于宏观速度模型的超道集叠加方法,它可以比较准确地实现对复杂构造的成像。无论是 CRS 叠加还是菲涅耳带 CRS 叠加,效果都要明显优于常规叠加方法。而菲涅耳带 CRS 叠加的关键在于比较准确的确定叠加孔径。在地震资料处理中分辨率与信噪比是一对相互制约的矛盾,常规 CRS 叠加方法是通过人为的改变参与叠加的道集数来实现的,本文首先分析了地震反射过程中菲涅耳带的特征,采用椭圆近似模拟菲涅耳带的范围,并对其范围以予补偿,实现了一种近似确定 CRS 叠加孔径的方法,实际应用效果表明,该方法能够实现对菲涅耳带内的有效信号的叠加,尤其是中深部较弱的地震信号得到了有效的保存和显示,使信噪比和分辨率达到了综合最优,从而更好的模拟零偏移距剖面,对今后的复杂构造和深层构造地震勘探具有一定的指导意义。

## 参考文献(References)

- [ 1 ] Gelchinsky B. Common Reflecting Element (CRE) method explore. *Geophysics*, 1988, **19**(2): 71~75
- [ 2 ] Hubral P. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 1983, **48**(8):1052~1062
- [ 3 ] Bortfeld R. Geometrical ray theory: Rays and traveltimes in seismic systems ( second-order approximations of the traveltimes). *Geophysics*, 1989,**54**(3): 342~349
- [ 4 ] Schleicher J, Tygel M, Hubral P. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media *Geophys. Prosp.*, 1993, **41**(4): 495~514
- [ 5 ] Höcht G, de Bazelaire E, Majer P, et al. Seismics and optics: Hyperbolae and curvatures. *J. Appl. Geophys.*, 1999, **42**(3-4): 261~281
- [ 6 ] Mann J, Jäger R, Muller T. et al. Common-reflection-surface stack—a real data example. *J. Appl. Geophys.*, 1999, **42**(3-4): 301~318
- [ 7 ] Jäger R, Mann J, Höcht G, et al. Common-reflection-surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 2001, **66**(1): 97~109
- [ 8 ] Höcht G. The CRS Stack for 3D Media. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2001
- [ 9 ] Duvencq E. Velocity model estimation with data-derived wavefront attributes. *Geophysics*, 2004, **69**(1): 265~274
- [10] 杨 锴, 王华忠, 马在田. 共反射面元叠加的应用实践. *地球物理学报*, 2004, **47**(2):327~331  
Yang K, Wang H Z, Ma Z T. The practice on Common Reflection Surface stack. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(2):327~331
- [11] 杨 锴, 许士勇, 王华忠等. 倾角分解共反射面元叠加方法. *地球物理学报*, 2005, **48**(5):1148~1155

- Yang K, Xu S Y, Wang H Z, et al. A method of dip decomposition common reflection surface stack. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(5):1148~1155
- [12] 杨 锴, 马在田. 输出道方式的共反射面元叠加方法 I——理论. *地球物理学报*, 2006, **49** (2): 546~553
- Yang K, Ma Z T. Common reflection surface stack by an output imaging scheme. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2):546~553
- [13] 王华忠, 杨 锴, 马在田. 共反射面元叠加的应用理论——从共反射点到共反射面元. *地球物理学报*, 2004, **47**(1):137~142
- Wang H Z, Yang K, Ma Z T. An applied theory on common reflection surface stack —from common reflection point to common reflection surface. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(1) : 137~142
- [14] 韩立国, 孙建国, 何樵登等. 共反射面与共中心点联合叠加成像. *石油物探*, 2003, **42**(1):25~28
- Han L G, Sun J G, He Q D, et al. Imaging by joint CRS and CMP stacking. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2003, **42**(1):25~28
- [15] 李振春, 孙小东, 刘 洪. 复杂地表条件下共反射面元(CRS)叠加方法研究. *地球物理学报*, 2006, **49** (6):1794~1801
- Li Z C, Sun X D, Liu H. Common reflection surface stack for rugged surface topography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(6) :1794~1801
- [16] 李振春, 姚云霞, 马在田等. 共反射面道集偏移速度建模. *地震学报*, 2003, **25**(4):406~414
- Li Z C, Yao Y X, Ma Z T, et al. Migration velocity modeling based on common reflection surface gather. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(4):406~414
- [17] Kravtsov Yu, Orlov A, Yu I. Boundaries of geometrical optics applicability and related problems. *Radio Science*, 1980, **16**(6):975~978
- [18] Vieth K U. Kinematic wavefield attributes in seismic imaging. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2001
- [19] 孙成禹. 非零炮检距非涅耳带研究. *石油大学学报(自然科学版)*, 2005, **29**(1):26~29
- Sun C Y. Study of non-zero off set Fresnel zone. *Journal of the University of Petroleum China* (in Chinese), 2005, **29** (1):26~29
- [20] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探. 北京:石油工业出版社, 1993
- Yu S P. High-resolution Seismic Prospecting(in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1993
- [21] 陆基孟. 地震勘探原理. 东营:石油大学出版社, 2001
- Lu J M. The Principle of Seismic Prospecting(in Chinese). Dongying: China University of Petroleum Press, 2001
- [22] 裴江云, 刘 洪, 李幼铭等. 共反射面弧叠加方法在火山岩成像中的应用. *地球物理学报*, 2004, **47** (1):106~111
- Pei J Y, Liu H, Li Y M, et al. Application of seismic data common reflection arc stack method in imaging of igneous rocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47** (1): 106~111

(本文编辑 汪海英)