

[引著格式] 潘兰, 贺剑波. 共偏移反射面元叠加 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (9+10): 14~21.

共偏移反射面元叠加

潘兰 (中石化华东分公司勘探开发研究院, 江苏 南京 210000)

贺剑波 (江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210000)

[摘要] 传统的共反射面元 (CRS) 叠加都是基于共中心点 (CMP) 道集做的, 只能得到地下构造没有准确归位的叠加剖面。考虑将 CRS 方法的优势扩展到成像域, 即基于共散射点 (CSP) 道集进行 CRS 叠加, 该方法的第一步就是获得高信噪比的 CSP 道集。针对传统的 CSP 映射方法存在映射噪声、映射效率等问题, 提出了一种新的 CSP 道集映射方法, 然后对 CSP 道集进行偏移成像, 称作共偏移反射面元 (CMRE) 叠加。由于考虑了相邻的 CSP 道集, 增加了叠加道数, 能够得到一个高质量的偏移剖面。模型数据和实际资料的结果证明了该方法的准确性和有效性。

[关键词] 共反射面元叠加; 共散射点道集; 信噪比; 映射方法; 共偏移反射面元叠加; 偏移剖面

[中图分类号] P631.44 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 09+10-0014-08

从 Hubral 等^[1]提出共反射面元 (CRS) 叠加方法以来, CRS 叠加就被认为是最好的生成零炮检距剖面的方式, 国内外众多地球物理工作者对其进行了深入研究。Bortfeld 等^[2]基于旁轴射线理论, 利用射线传播矩阵, 推导出了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 2 种特征波 (Normal 波 (N 波), Normal Incidence Point 波 (NIP 波)) 和泰勒展开公式, 导出了抛物型和双曲型的 CRS 时距关系近似表达式; Mann J. 等^[3]首次将 CRS 叠加方法应用于实际二维地震资料的处理, 并得到高质量的叠加剖面; Jager R.^[4]将 CRS 叠加用于合成二维地震记录的处理过程中, 并详细分析了 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; Bergler S. 等^[5]将有限偏移距共反射面元叠加方法应用于地下盐丘成像, 取得了不错的效果; 杨锴等^[6]提出了倾角分解 CRS 叠加方法, 解决了 CRS 应用中出现的有效反射信号损失、运动学特征失真问题; 杨锴等^[7]提出输出道方式的共反射面元叠加方法, 得到的叠加剖面信噪比更高; Garabito G.^[8]提出了 CRS 束叠前深度偏移, 该方法考虑了旁轴射线对中心射线的贡献, 提高了偏移精度; Fomel S.^[9]提出非双曲 CRS 叠加方法, 进一步提高了时距曲面公式的精度。上述学者的研究使得 CRS 方法近年来无论在理论算法还是实际应用上都得到了较大的发展, 使其在计算精度和效率上得到了显著提高。

但是, 基于共中心点 (CMP) 道集的 CRS 方法最终得到的还是构造没有正确归位的叠加剖面, 这给剖面解释工作带来了较大的干扰。为此, 笔者考虑能否在成像域基于共散射点 (CSP) 道集利用 CRS 方法得到更高质量的偏移剖面。该方法的第一步是获得 CSP 道集。Bancroft J. C. 等^[10]提出了等效偏移距 CSP 道集映射方法, 其产生的 CSP 道集具有更高的覆盖次数和更大的覆盖范围, 能够很大程度地提高叠前数据的质量。此后国内外很多学者^[11~16]对该方法进行了改进, 并将其成功运用于低信噪比资料的速度分析与成像中。但是, 该方法在实际资料的应用中仍存在以下几个问题:

1) 在提取某个散射点道集时, 附近的散射点能量也会映射过来, 很难判断某个同相轴是否属于该散射点。由实际资料某 CMP 处等效 CSP 道集 (图 1) 可以看出, 除了散射波较为发育外, 还存在很强的散射噪声, 很难判断同相轴是否是该散射点的散射波。

[收稿日期] 2015-03-14

[作者简介] 潘兰 (1989-), 女, 助理工程师, 主要从事地震资料处理解释工作, 948187261@qq.com。

2) 在构建某个 CSP 道集时, 所有的原始道集都做映射, 内存要求高, 计算量大。

3) 在映射时利用的是零偏移距算子处的均方根速度, 没有考虑速度的横向扰动。

因此, 笔者基于 Kirchhoff 绕射叠加原理, 提出了一种新的 CSP 道集的映射方法。该方法基于参数化的双平方根方程, 利用共偏移距顶点时间直接生成 CSP 道集, 减少了计算量, 而且在每个偏移距处重新搜索速度以确定最佳拟合曲线, 减小了速度横向扰动的影响。获得 CSP 道集后, 可以对其进行自适应共反射面元叠加成像, 该方法最大的优势是不需要初始速度模型。

1 理论与方法

1.1 CSP 道集映射方法

共散射点映射类似于时间偏移, 只是它在偏移距方向不做叠加^[17]。为了简单起见, 首先考虑二维情况。某个散射点的时距曲线可以用双平方根方程表示, 它在中心点-偏移距-时间空间中呈金字塔分布 (图 2 (a))。

$$t = \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{(m-h)^2}{v_{mig}^2}} + \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{(m+h)^2}{v_{mig}^2}} \tag{1}$$

式中: t 是散射点旅行时, s; t_0 是成像时间, s; m 是中心点距离, m; h 是半炮检距, m; v_{mig} 是偏移速度, m/s。

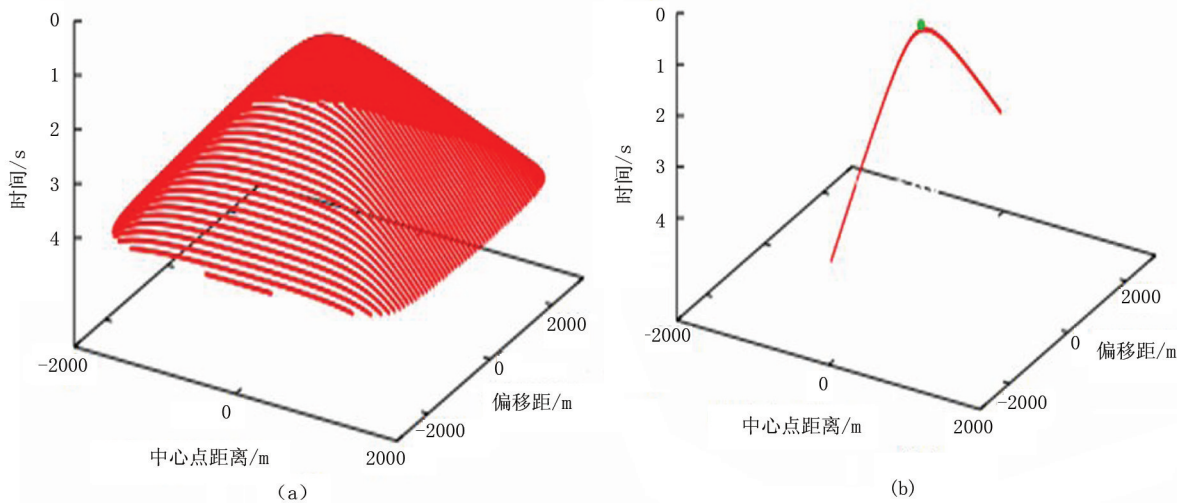


图 2 单个散射点的时空域响应曲线 (a) 及共散射点道集 (b)

CSP 道集的映射过程可以看做是沿着中心点-偏移距-时间空间中绕射曲线将绕射能量叠加起来。该条双曲路径也就是时间偏移算子中的共偏移距的顶点, 可以表示为:

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{mig}^2}} \tag{2}$$

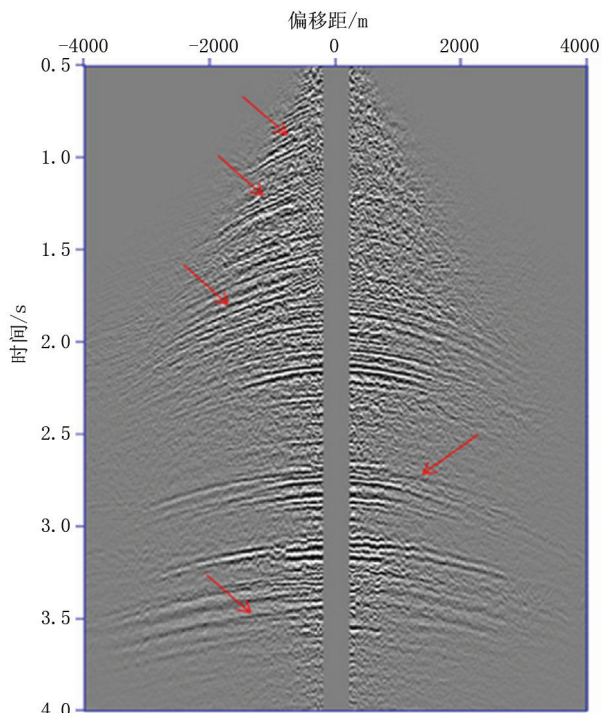


图 1 实际资料某等效 CSP 道集

对式 (1) 进行变形、简化可得:

$$t = \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{m^2 - 2mh + h^2}{v_{\text{mig}}^2}} + \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{m^2 + 2mh + h^2}{v_{\text{mig}}^2}} \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\frac{1}{4} \left(t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{\text{mig}}^2} \right) + \frac{m(m-2h)}{v_{\text{mig}}^2}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{\text{mig}}^2} \right) + \frac{m(m+2h)}{v_{\text{mig}}^2}} \quad (4)$$

将共偏移距顶点的时间 t_{apex} (图 2 (b) 中绿色圆点) 代入双平方根方程 (4) 可以得到:

$$t = \sqrt{\frac{t_{\text{apex}}^2}{4} + \frac{m(m-2h)}{v_{\text{mig}}^2}} + \sqrt{\frac{t_{\text{apex}}^2}{4} + \frac{m(m+2h)}{v_{\text{mig}}^2}} \quad (5)$$

式 (5) 即为新的 CSP 道集映射算子。

1.2 共偏移反射面元叠加

由于 CSP 道集是部分偏移距数据, 它们需要被叠加到零偏移距, 需要一个叠加算子。一般地, 叠加算子依赖于一个单参数, 如传统的 NMO (normal moveout, 正常时差) 叠加, 或多个参数, 如 CRS 叠加。Bortfeld 等^[2] 基于旁轴射线理论, 用射线传播矩阵, 推导出了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 2 种特征波 (N 波, NIP 波) 和泰勒展开公式, 导出了双曲型的 CRS 时距关系近似表达式:

$$t^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2 \sin \alpha (x_m - x_0)}{v_0} \right]^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \alpha}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}} \right] \quad (6)$$

式中: x_0 为零偏移距炮点接收点中点位置, m ; x_m 为炮检中心点, m ; v_0 是在 x_0 点处的地表地震波速度, m/s ; a 为零炮检距射线的出射角, ($^\circ$); R_{NIP} 、 R_N 分别为 NIP 波和 N 波出射到地表的波前曲率半径, m ^[18~20]。

其中, a 、 R_{NIP} 、 R_N 为 3 个叠加参数。

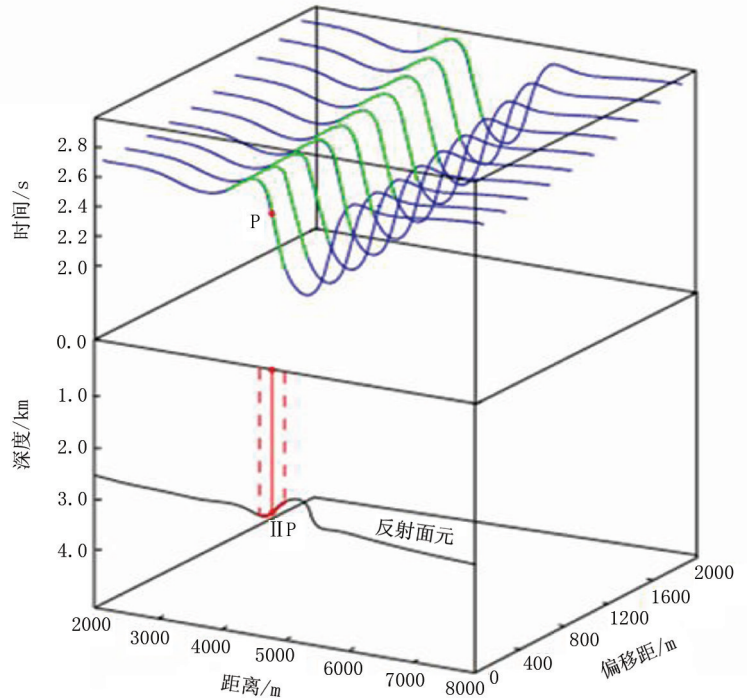
类似于 CRS 方法, 笔者将时间偏移反射时间进行泰勒展开, 保留二阶导数, 然后平方。但是, 并不是在法向射线附近, 而是在成像射线附近展开。成像射线在成像入射点处与界面相垂直。而且, 考虑成像入射点处的一个联系的反射面元, 称作共偏移反射面元 (CMRE) (图 3)。新的算子近似地表达了整个偏移反射面元的时间响应, 在零偏移距处聚焦^[21~23]。

利用成像点的坐标, 偏移反射面元的旅行时响应可以表示为:

$$T^M(x, h_s)^2 = (T_0^M + 2p^M x^T)^2 + 2T_0^M x^T M_{xx}^M x \quad (7)$$

式中: x 是到目标 CSP 点处的中心点位移, m ; h_s 是半偏移距, m ; T_0^M 是沿着中心成像射线从参考点到成像点的双程旅行时, s ; T^M 是偏移反射面元的旅行时, s ; p^M 是反射界面的倾角, ($^\circ$); x^T 是 x 的转置矩阵; M_{xx}^M 是反射面元的曲率, m 。

一阶导数 $\partial T^M / \partial x_i$ 与时间偏移反射面的倾角有关。相对于中心点位移的二阶导数与时间偏移反



注: 图中蓝线代表固定偏移距的时间偏移反射旅行时; 绿线表示成像入射点 (IIP) 的共偏移反射面元的时间响应曲线。

图 3 二维情况下时间-中心点-偏移距空间中的 CMRE 叠加算子

射面元的曲率有关，相对于偏移距的二阶导数与成像射线的曲率有关。

替换掉式 (7) 中的导数，即：

$$p^M = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial T^M}{\partial x_i} \right) \tag{8}$$

$$M_{xx}^M = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 T^M}{\partial x_i \partial x_j} \right) \tag{9}$$

$$M_{h_s h_s}^M = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 T^M}{\partial (h_s)_i \partial (h_s)_j} \right) \tag{10}$$

得到：

$$T^M(x, h_s)^2 = (T_0^M + 2p^M x^T)^2 + 2T_0^M(x^T M_{xx}^M x + h_s M_{h_s h_s}^M h_s) \tag{11}$$

式中： $M_{h_s h_s}^M$ 是成像射线的曲率，m。

式 (11) 的方程形式看起来与传统的 CRS 算子一样^[24,25]，然而 CMRE 叠加参数是基于模型的，而 CRS 参数与近地表有关，采用分步搜索的方式确定其最优解^[26~29]。

2 模型验证

首先用“SMAART JV”协会 2001 年发布的 Sigsbee2A 模型数据来验证上述方法的正确性。该模型炮间距 45.72m，每炮 348 道接收，道间距 22.86m，CMP 间距 11.43m，最大覆盖次数 87，采样间隔 8ms，采样长度 12s。选取 CMP 100 到 1050 的 951 个 CMP 进行测试，该部分左侧散射点、散射波及断层发育，右侧盐丘发育，速度变化剧烈，速度范围 4920~14200ft/s，很适合用于散射波方法测试 (图 4)。

在 CMP 道集 (图 5 (a)) 中，由于散射能量 (如图 5 (a) 中红色箭头所示) 存在，道集上反射波、散射波发育，导致道集分辨率较低；而在 CSP 道集 (图 5 (b)) 中，绕射波得到收敛，反射同相轴的分辨率得到提高，散射波得到正确归位，同相轴清晰连续。

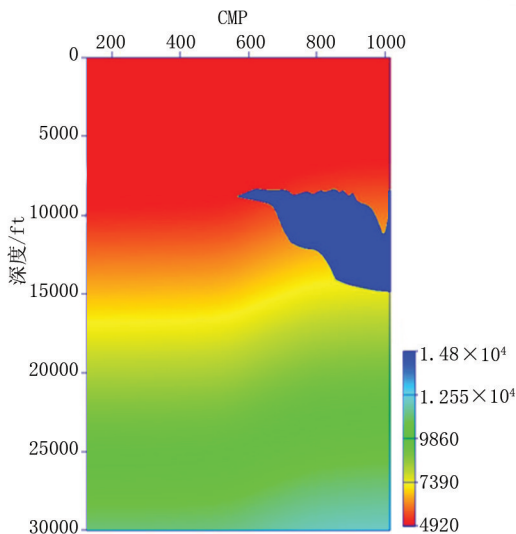


图 4 速度模型

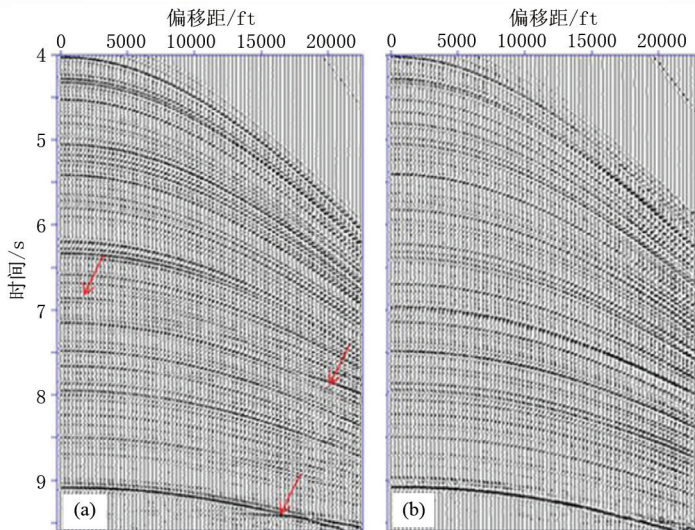


图 5 CMP 道集 (CMP=337) (a) 及 CSP 道集 (b)

为了验证该方法的抗噪性，对数据加入 $s_n = 40$ 的随机噪声。这样，在原始 CMP 道集 (图 6 (a)) 中，同相轴已经模糊不清，只有能量最强的同相轴能够识别，在速度谱 (图 6 (b)) 上出现了很多干扰，存在很多异常能量团；但在提取的 CSP 道集 (图 7 (a)) 中，信噪比提高，同相轴清晰可见，速度谱 (图 7 (b)) 能量团聚焦明显。

对比 kirchhoff 偏移剖面 (图 8 (a)) 和 CMRE 偏移剖面 (图 8 (b)) 可以看到，CMRE 剖面除了

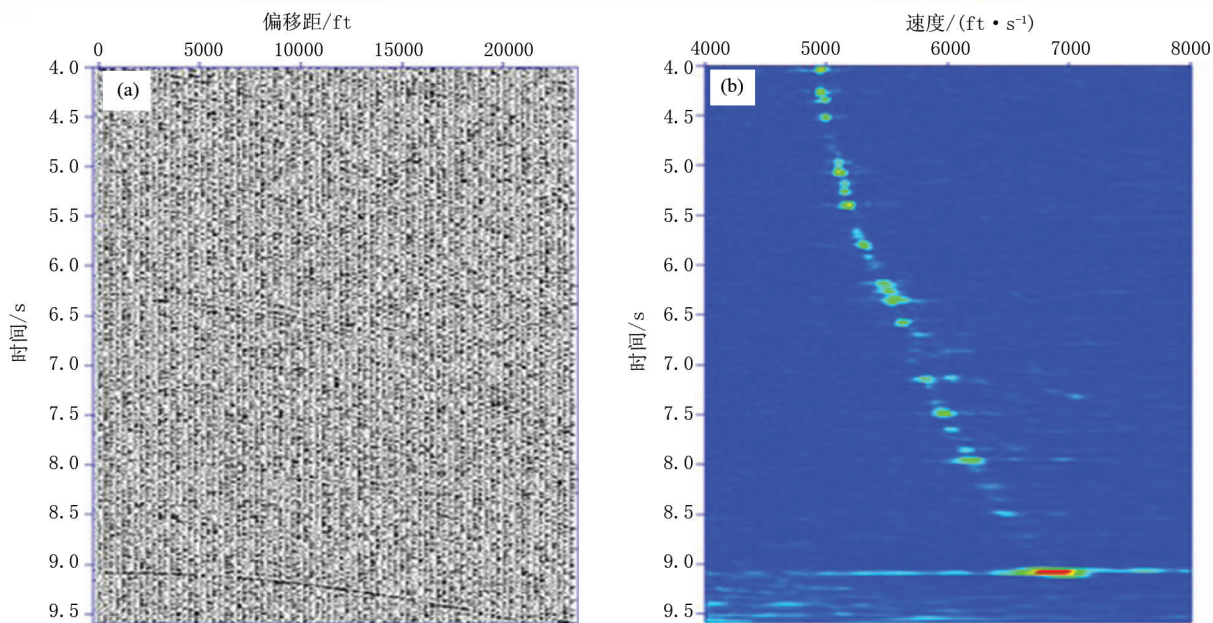


图6 CMP道集 (CMP=337) (a) 及其速度谱 (b)

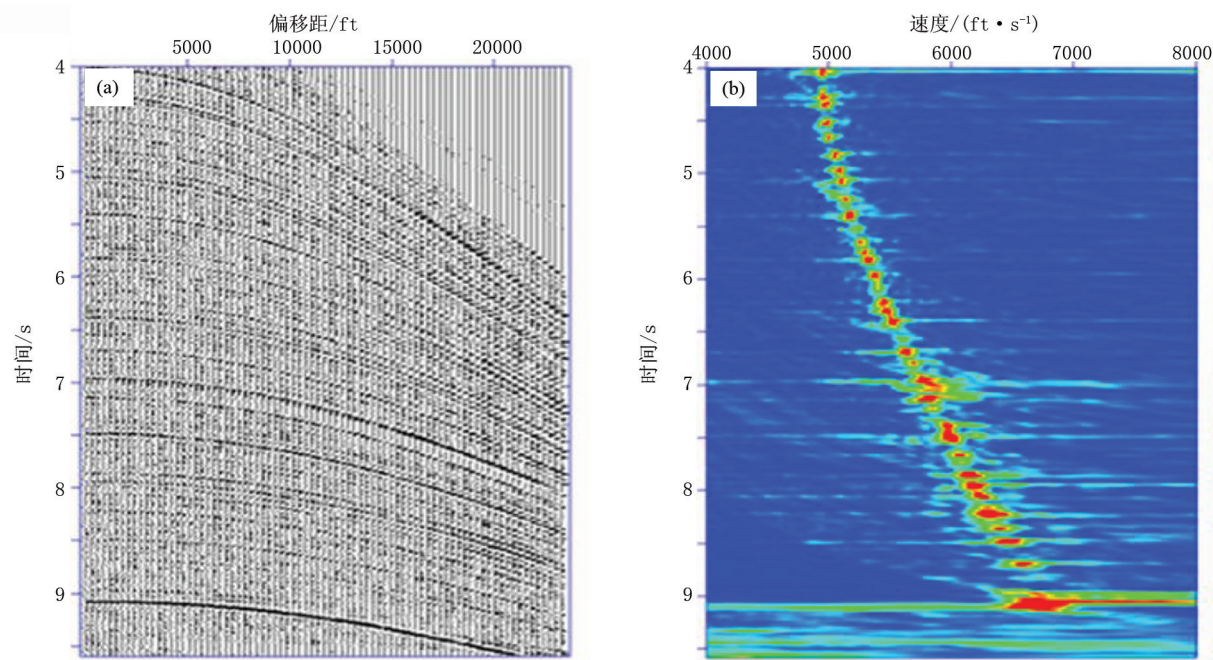


图7 CSP道集 (CMP=337) (a) 及其速度谱 (b)

在信噪比上有较大提升外,构造也更加连续,邻近的同相轴、断层边界、盐丘边界等构造细节刻画更加清晰(红色图形内);但是黑色椭圆框内处理后的构造缺失了,这是因为在利用自动搜索方法搜寻三参数时,其对弱同相轴的检测能力有限。因此,寻求更加优越的三参数求取方法是十分必要的,这也是下一步需要改进的方向。

3 实际资料测试

选取陆上某个探区的三维资料进行方法测试。该探区以山地为主,地表切割剧烈,地表接收条件差

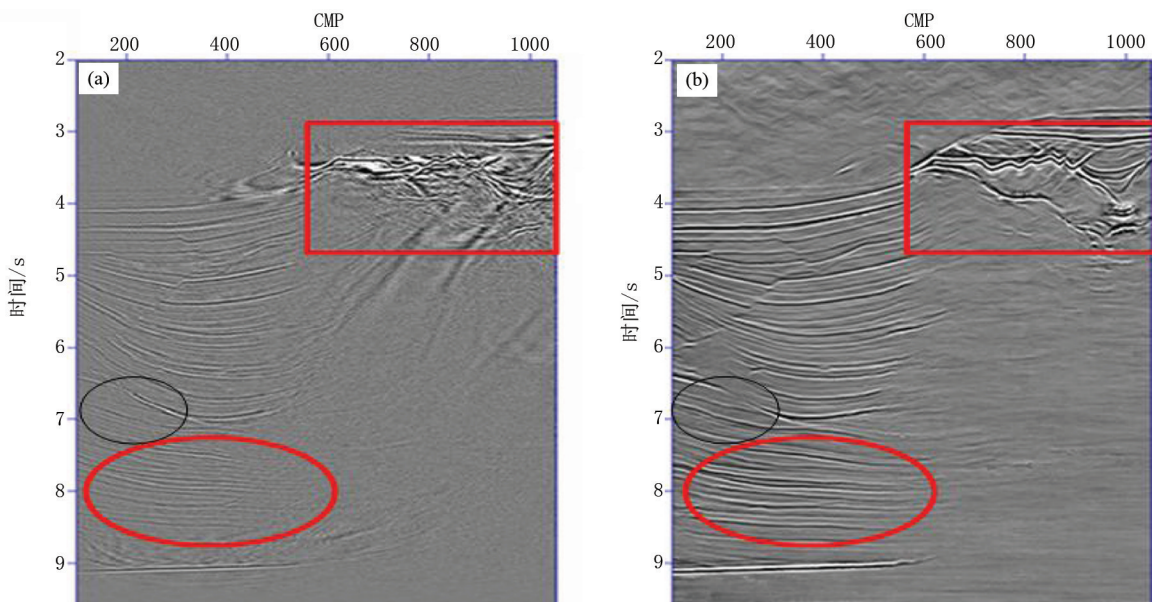


图 8 kirchhoff 偏移剖面 (a) 及 CMRE 偏移剖面 (b)

异较大，速度横向变化大，深部地质条件复杂，存在高陡构造、逆掩推覆带等多种复杂构造，地震资料信噪比较低，常规的速度分析难度很大。选取其中一条测线进行速度分析，该条测线 CMP 范围为 500~1465，CMP 间距为 25m，采样点数为 3000，采样率为 2ms。

受构造复杂、野外采集等因素的影响，原始道集 (图 9 (a)) 信噪比较低，同相轴无法连续追踪；而 CSP 道集 (图 9 (b)) 信噪比明显提高，同相轴清晰可见。道集质量的改善也使得速度谱 (图 10 (b)) 能量团更加收敛，异常能量团减少，这给速度拾取工作带来了很大好处。

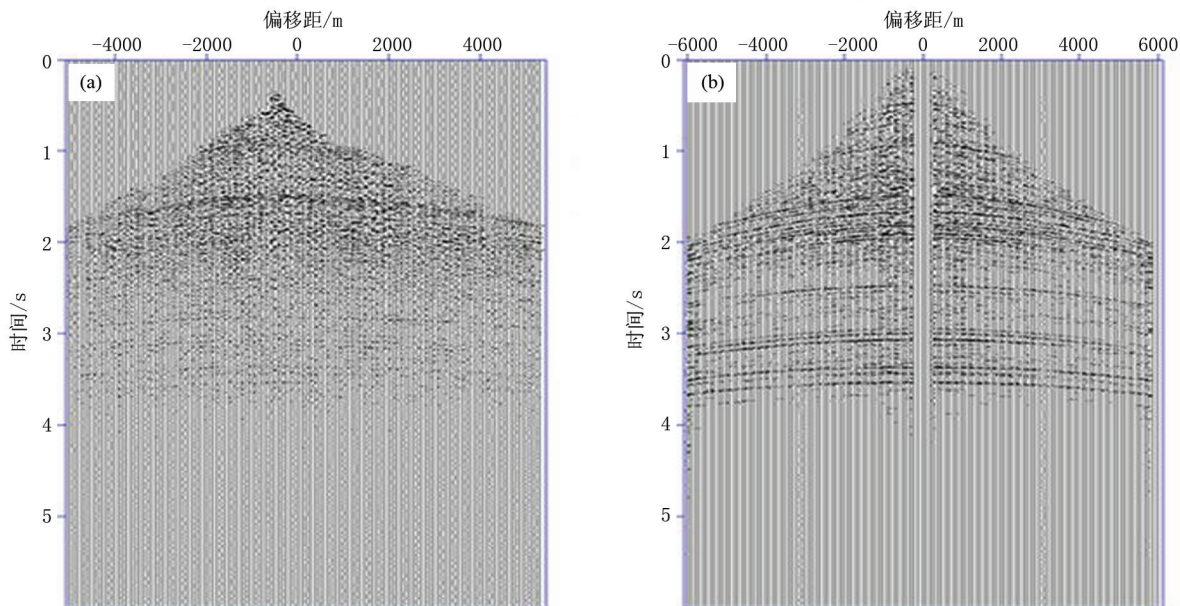


图 9 CMP 道集 (CMP=700) (a) 及 CSP 道集 (b)

在不需要速度模型的情况下，可以对 CSP 道集进行 CMRE 偏移 (图 11 (b))，与 Kirchhoff 偏移 (图 11 (a)) 相比，其信噪比更高，构造细节刻画更加清晰；但是也需要指出，CMRE 偏移剖面存在构造缺失的情况，主要是因为三参数搜索过程对弱同相轴的检测能力有限，这是下一步需要改进的地方。

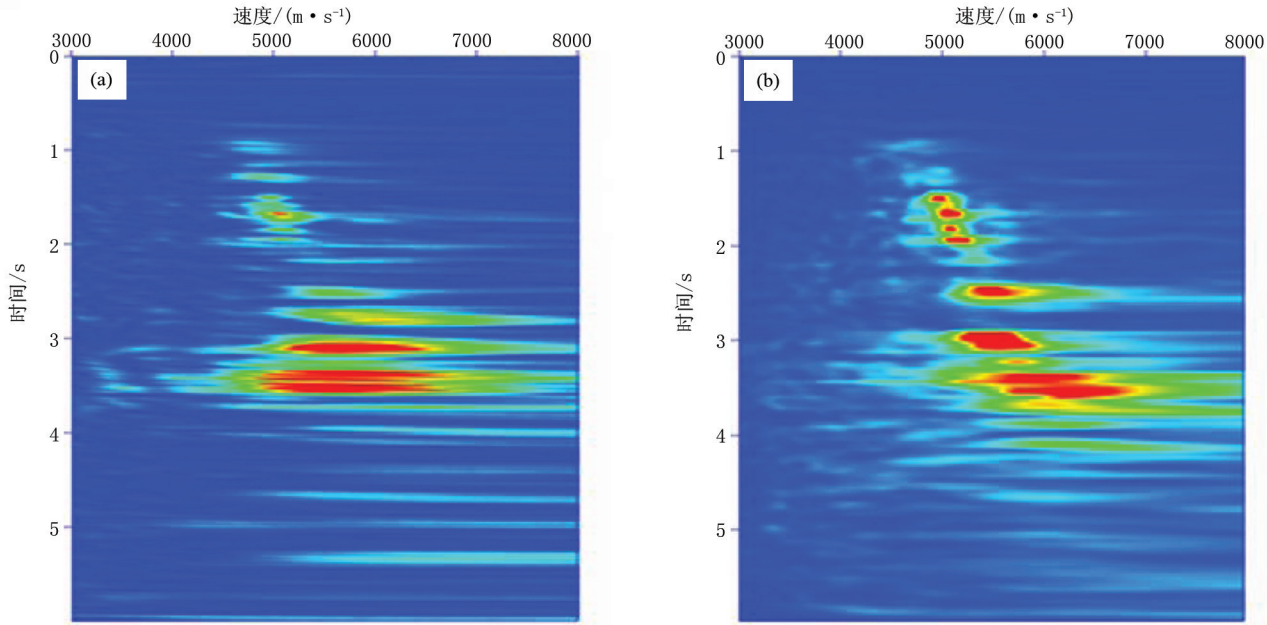


图 10 基于 CMP 道集 (CMP=700) (a) 及 CSP 道集 (b) 的速度谱

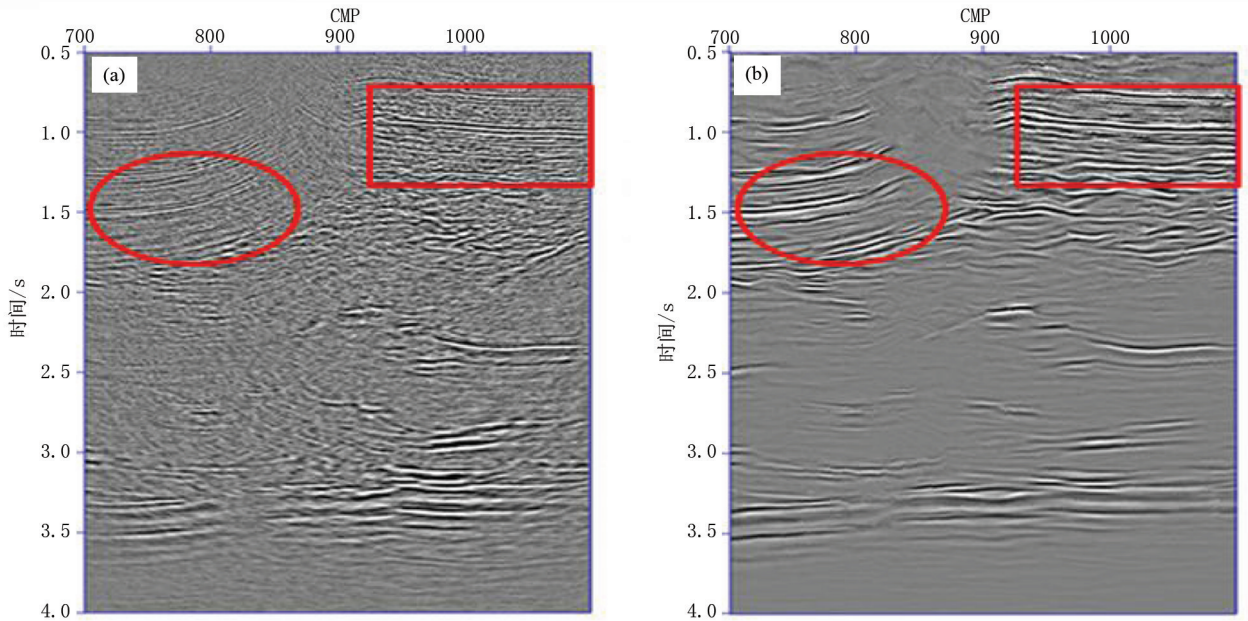


图 11 Kirchhoff 偏移剖面 (a) 及 CMRES 偏移剖面 (b)

4 结论

针对传统的共散射点道集映射方法存在的问题,笔者基于共偏移距克希霍夫绕射偏移的观点,提出了一种新的共散射点道集映射方法,获得的 CSP 道集可以用来做速度建模、成像射线层析、去除多次波等。

由于 CSP 道集是部分偏移数据,需要一个叠加算子对其进行成像。笔者基于 CRS 的思想,得到了共偏移反射面元叠加算子,并将其用于 CSP 道集的成像中。通过模型验证和实际资料应用得到以下认识:

- 1) 新的 CSP 道集映射方法直接将共偏移距叠加振幅放到共偏移距顶点上,能够控制参与叠加的道集数量,节省了存储空间,提高了计算效率。
- 2) CSP 道集将孔径内的散射能量叠加起来并沿着时间-中心点-偏移距空间中的一个双曲线轨迹重

新分配。该道集具有更高的覆盖次数和更大的偏移距范围, 而且它的形成对速度的依赖程度较低。

3) 基于 CRS 的思想, 将共偏移反射面元叠加算子用于 CSP 道集的偏移成像中, 由于考虑了相邻的 CSP 道集, 增加了叠加的道数, 能够得到一个高质量的偏移剖面, 而且该方法不需要初始的速度模型。

[参考文献]

- [1] Hubral P. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth [J]. *Geophysics*, 1983, 48 (8): 1052~1062.
- [2] Bortfeld R. Geometrical ray theory: Rays and traveltimes in seismic systems (second-order approximations of the traveltimes) [J]. *Geophysics*, 1989, 54 (3): 342~349.
- [3] Mann J, Jager R, Muller T. Common reflection surface stack—a real data example [J]. *Appl Geophys*, 1999, 42 (3-4): 301~318.
- [4] Jager R, Mann J, Hocht G, et al. Common reflection surface stack: Image and attributes [J]. *Geophysics*, 2001, 66 (1): 97~109.
- [5] Bergler S, Mann J, Hocht G, et al. The finite-offset CRS stack: An alternative stacking tool for subsalt imaging [J]. *Geophysical Prospecting*, 2002, 31 (3): 865~901.
- [6] 杨锴, 许士勇, 王华忠, 等. 倾角分解共反射面元叠加方法 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48 (5): 1148~1155.
- [7] 杨锴, 马在田, 罗卫东. 输出道方式的共反射面元叠加方法 II——实践 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49 (3): 895~902.
- [8] Garabito G, Ferreira C A S, Cruz J C R. CRS-beam PSDM: Kirchhoff-beam prestack depth migration using the CRS operator [Z]. Annual Report of WIT, 2010.
- [9] Fomel S, Kazinnik R. Non-hyperbolic common reflection surface [J]. *Geophysical Prospecting*, 2012, 46 (5): 1365~2478.
- [10] Bancroft J C, Geiger H D. Equivalent offsets and CRP gathers for pre-stack migration [C]. 64th Ann Internat, Soc Expl Geophys, Expanded Abstracts, 1994: 672~675.
- [11] 勾丽敏, 刘学伟, 刘西宁, 等. 散射波速度分析方法在南华北盆地破碎地层发育区的应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47 (6): 873~881.
- [12] 李振春, 郭朝斌, 张凯, 等. 论碳酸盐岩探区时间域速度分析 [J]. *地球物理学进展*, 2011, 26 (2): 549~556.
- [13] 秦宁, 李振春, 等. 叠前多级优化联合偏移速度建模 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 28 (1): 320~327.
- [14] 王勇, 朱亚平, 杨慧珠. 共散射点成像及其在低信噪比三维地震数据处理中的应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2000, 33 (1): 20~26.
- [15] 王伟, 尹军杰, 刘学伟, 等. 等效偏移距方法及应用 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50 (6): 1823~1830.
- [16] 尹军杰. 低信噪比地震数据散射波成像方法及应用 [J]. *煤炭学报*, 2010, 12 (12): 2064~2067.
- [17] 张凯. 叠前偏移速度分析方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [18] Dell S, Gajewski D. Common scatter mapping [Z]. Annual WIT Report, 2009; 40~54.
- [19] Baykulov M, Gajewski D. Partial 3D CRS stack [Z]. Annual Report of WIT, 2009.
- [20] Schleicher J, Tygel M, Hubral P. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media [J]. *Geophys Prosp*, 1993, 41 (4): 495~514.
- [21] Hocht G, de Bazelaire E, Majer P, et al. Seismic and optics: hyperbolae and curvatures [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1999, 42 (3-4): 261~281.
- [22] Dell S, Gajewski D. Prestack time migration by common migrated reflector element stacking [J]. *Geophysics*, 2012, 77 (3): 73~82.
- [23] Dell S, Gajewski D. Diffraction imaging based on common-reflection-surface-attributes [Z]. SEG, 2011: 3866~3870.
- [24] Endrias G. A new approach to post-stack-diffraction-separation [Z]. SEG, 2011: 3861~3865.
- [25] Hertweck T. CRS-based seismic imaging workflow—theory and synthetic data example [Z]. Annual WIT report, 2003; 140~149.
- [26] Santos L T, Schleicher J, Costa J C, et al. Fast estimation of CRS Parameters using local slopes [Z]. Annual Report of WIT, 2008.
- [27] Santos L T, Schleicher J, Costa J C, et al. Fast estimation of CRS parameters using local slopes in inhomogeneous media [Z]. Annual Report of WIT, 2010.
- [28] Dümmling S, Gajewski D. Geological constraints in the CRS parameter search [Z]. Annual Report of WIT, 2009.
- [29] Asgedom E G, Tygel M, Gelius L J. Higher resolution determination of zero offset common reflection surface (CRS) stack [Z]. Annual Report of WIT, 2010.

[引著格式] 郭得海, 李谋杰. 三维多属性体显示融合技术在储层地震预测中的应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (9+10): 22~25.

三维多属性体显示融合技术在储层地震预测中的应用

郭得海, 李谋杰 (油气资源与勘探技术教育部重点实验室 (长江大学)
长江大学地物物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100)

[摘要] 目前地震属性技术已经成为地质目标预测和评价的主要地球物理手段之一, 但由于地震属性种类繁多, 且具有不同的固有物理意义和地质表述方式, 如何优选地震属性和多属性降维使得属性技术更具有针对性是必须考虑的问题。三维多属性体的显示融合技术是一种属性优化和降维的有效选择, 主要包括基于颜色基本特性和颜色基本模型 2 种类型, 根据这 2 种类型可构成多属性体交汇融合显示、透明度控制显示融合、RGB 基本构成模式融合等多种方式。该技术在河道、火山岩、岩溶风化壳等主要类型储层预测中的应用表明, 三维多属性体显示融合技术应用效果良好, 融合成果地质信息丰富, 能够有效地刻画储层空间分布形态和趋势, 有利于进一步的目标部署分析。

[关键词] 地震属性体; 多属性融合; 多颜色复合显示; 储层预测

[中图分类号] P631.44

[文献标志码] A

[文章编号] 1000-9752 (2015) 09+10-0022-04

地震属性分析在储层预测和油藏描述中应用非常广泛, 是获取储层平面或立体分布特征的重要手段^[1~4]。针对不同类型的勘探目标, 可以选用有效的地震属性去进行定性或定量预测。随着三维地震勘探的深入和三维可视化技术的发展, 地震属性的计算和解释分析方式也逐渐发生了改变^[5]。地震属性的三维体计算由于可以避免人为因素 (如层位追踪质量、沿层时窗大小的影响) 而成为属性计算选择的主要方式, 相干体属性、曲率体属性等均是采用体计算方式获取^[6]。随着属性计算方法的发展, 地震属性的种类也不断增多, 而且每一种地震属性都具有其固有的物理意义和地质应用方式。在应用地震属性技术去描述地质目标时, 都面临着如何优选和多属性降维的问题^[7,8]。除了采用各种数学手段实现多属性降维外, 三维多属性体显示融合技术也是一种有效的选择。通过透明度控制混合、RGB (R 代表红色, G 代表绿色, B 代表蓝色) 颜色混合等体显示混合方式将多个地震属性体融合成一个色彩体, 可以同时从不同角度综合刻画地质目标, 突出目标空间形态。笔者就三维多属性体显示融合技术展开探讨, 并将该技术应用到河道、火成岩、风化壳等多类储层的地震预测中, 表明其应用的可行性和有效性。

1 三维多属性体显示融合技术

多属性体的显示融合并不是样点处不同种类属性值之间的简单数值加减运算, 而是利用颜色的基本视觉特性或者基本模型实现样点处属性的叠加显示。颜色具有色调、饱和度、明暗度等基本视觉特性, 同时又具有 RGB、CMY (C 代表青色、M 代表品红色、Y 代表黄色, 3 种基色合成色彩体)、HSV (H 表示色调、S 表示饱和度、V 表示透明度, 3 种方式合成色彩体) 等基本模型^[9], 综合应用颜色的基本特性或基本模型就可以实现多属性体的融合显示。

1.1 基于颜色特性的融合

颜色同时具有色调 (Hue)、饱和度 (Saturation) 和明暗度 (Lightness) 等 3 个基本视觉特性^[10],

[收稿日期] 2014-11-10

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金项目 (41402113)。

[作者简介] 郭得海 (1980-), 男, 工程师, 现主要从事地震地质综合研究、软件技术服务工作; 通信作者: 李谋杰, 18535216@qq.com。