

基于广义 Radon 变换的共反射面元叠加方法

杨锴¹ 罗卫东²

(1. 海洋地质国家重点实验室·同济大学海洋与地球科学学院地球物理系 2. 四川石油管理局物探公司)

杨锴等. 基于广义 Radon 变换的共反射面元叠加方法. 天然气工业, 2006, 26(6): 50-51.

摘要 传统共反射面元(CRS)叠加方法是通过数据驱动的策略,在超共中心点道集(或称为 CRS 道集)内通过相关分析搜索得到初始属性参数组,然后对这组参数进行优化处理实现得到实现的。但是上述实现策略导致了传统方法中计算效率比较低的问题。基于共偏移距剖面,并结合广义 Radon 变换与倾角分解共反射点(CRP)叠加方法,得到了一种实用的基于广义 Radon 变换的共反射面元(GRT)CRS 叠加实现方法。基于理论数据的测试表明,GRTCRS 方法有效地提高了 CRS 叠加的计算效率和计算精度,在理论数据上的试验证实了该方法的有效性。

关键词 地震反射 叠加(地震) 变换(数学) 偏移距 方法

一、传统共反射面元叠加实现策略

共反射面元叠加是一种能够对反射界面局部形状进行最优照明的零偏移距剖面成像方法^[1]。在二维情况下,这 3 种参数分别是地下的一个反射弧段 C_R 的零偏移距射线出射到地表 X_0 时的出射角 α 和两种特征波(Normal 波和 NIP 波),这两种波出射到 X_0 的波前曲率半径分别为 R_n 和 R_{nip} 。如何快速有效地确定这 3 个属性参数是实现 CRS 叠加的关键。传统的 CRS 叠加思路采用数据驱动方案实现 CRS 叠加^[2]。由于 CRS 叠加集中了尽可能多的有效能量,可以得到信噪比明显高于 DMO 叠加剖面的 CRS 叠加剖面,但是也造成了传统策略的计算效率较低,其计算量甚至超过了克希霍夫叠前深度偏移;其次,数据驱动的策略导致了“倾角歧视现象”,这种现象使得叠加剖面的运动学特征失真进而危及叠后偏移的质量。为此杨锴^[3]提出了倾角分解 CRS 叠加方法解决倾角歧视现象,但是倾角分解 CRS 方法同时也使得其计算量变为传统 CRS 叠加方法的 n 倍(n 为倾角分解的个数),导致计算量进一步上升。

图 1 显示了 CRS 叠加面在时间—空间—半偏移距域内的分布情况,该面通过公式(1)计算得到:

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

仔细观察图 1 可以看出,在一个共偏移距剖面内,可以认为“CRS 叠加=邻域叠加+单偏移距 MZO”。在传统 CRS 叠加中邻域叠加是通过 R_n 的计算得到体现的,但是对 R_n 的扫描寻优也正是传

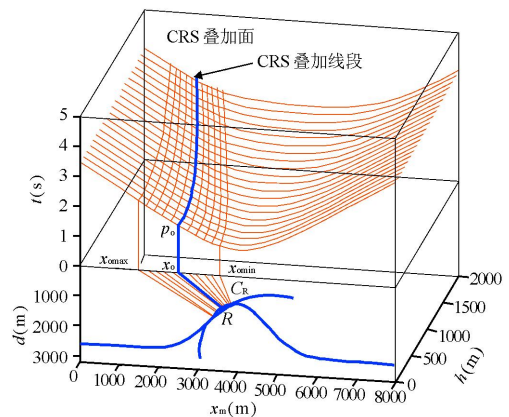


图 1 CRS 叠加面

统方法中计算量最大的一部分。统计表明:此项工作占到了全部计算量的 70%,如果能将 R_n 的计算进行简化,计算效率无疑将得到提高。如将式(1)中的半偏移距(h)置为 2000 m 就可以得到 4000 m 偏移距剖面上的 CRS 时距曲线,然后扰动 R_n 就可以计算出适应于 4000 m 偏移距反射时距曲线的一族积分路径(见图 2),其中必定有一条路径能够最佳地拟合实际反射时距曲线,通过该路径积分就可以实现恰当的邻域叠加。这样做避开了在 CRS 道集内扫

描 R_n 的繁杂计算,对共偏移距剖面内的每一点都重复上述操作就可以方便地完成邻域叠加。

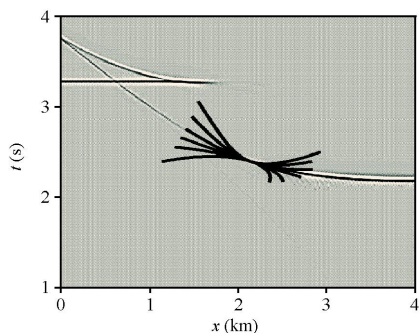


图2 通过广义 Radon 变换实现邻域叠加面

二、基于广义 Radon 变换的叠加

沿着一族曲线进行积分叠加恰恰符合广义 Radon 变换的定义。经典的 Radon 变换一般指某函数 $f(x, y)$ 沿直线 L 的积分,一般写为:

$$[Rf](\xi, \theta) = p(\xi, \theta) = \int_L f[x(\xi, \theta), y(\xi, \theta)] dl \quad (2)$$

其中: $x = \xi \cos \theta - \eta \sin \theta$
 $y = \xi \sin \theta + \eta \cos \theta$
 $\theta = \arctan(y/x)$

在此基础上将积分路径从直线 L 推广到曲线就是广义 Radon 变换。根据 Beylkin^[4], 广义 Radon 变换可以写为:

$$[R_\sigma f](\xi, \theta) = \int_{L_{\xi, \theta}} f(x, y) d\sigma \quad (3)$$

式中: $[R_\sigma f]$ 为沿着曲线 $L_{\xi, \theta}$ 的广义 Radon 变换; $L_{\xi, \theta}$ 为积分路径, 这里的积分路径就是图 2 中所示的二维曲线族。

在通过广义 Radon 变换完成邻域叠加之后仅是完成了 CRS 叠加的第一步, 还需通过某种 MZO 方式完成 CRS 叠加的第二步。为了消除可能产生的倾角歧视现象, 这里参考文献[3]提出用倾角分解 CRP 叠加完成 MZO, 即先设出射角 α 为常数, 然后搜索 NIP 波曲率半径 R_{np} , 计算出相应的 CRP 叠加剖面, 然后做相应的倾角滤波保留当前的倾角。对所有可能的角度做上述处理并叠加, 就完成了倾角分解 CRP 叠加即 MZO 叠加。

GRTCRS 叠加方法的实质是在共偏移距剖面内, 首先通过广义 Radon 变换完成邻域叠加, 再通过倾角分解 CRP 叠加完成 MZO, 以两步法的方式实现 CRS 叠加。王华忠^[5]论证了在推导 CRS 时距关

系式(1)的过程中, 先后经过了几何光学近似和泰勒展开后的二阶截断近似因而在大偏移距存在误差, 而直接基于“广义 Radon 变换+CRP 叠加”完成 CRS 叠加则要精确很多。同时倾角分解方案的引入则解决了倾角歧视现象, 确保了该算法的实用性。事实上, 在算法的第二步中现有的各种快速 MZO 算法都可以应用到这里, 将使得 GRTCRS 方法的计算效率进一步得到提高。

三、数值应用结果

图 3-a 显示了一个基于盐丘模型正演得到的 4000 m 偏移距剖面, 剖面横向长度为 8000 m, 记录长度为 4 s。图 3-b 显示了通过广义 Radon 变换完成了邻域叠加之后的 4000 m 偏移距剖面, 可以看出其连续性好于原始 4000 m 偏移距剖面, 体现了邻域叠加的特点。图 3-c 显示的零偏移距剖面是在图 3-b 的基础上进行倾角分解 CRP 叠加得到的结果。

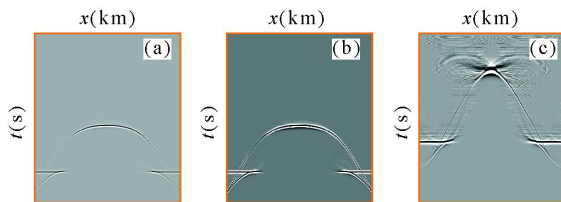


图3 各类偏移距剖面

四、结论

笔者所提出的在共偏移距剖面上的 GRTCRS 叠加方法, 与传统 CRS 叠加方法相比, 是将 CRS 叠加分解为“邻域叠加+MZO”。通过对共偏移距剖面内的 CRS 时距曲线族进行路径积分完成邻域叠加, 从而避免了传统方法中对 Normal 波曲率半径 R_n 的扫描寻优, 而这一部分恰恰是传统方法中最为耗时的一部分, 然后采用倾角分解 CRP 叠加的 MZO 方式完成最终 CRS 叠加。事实上在第二步(MZO)中, 可以应用现有的各种快速 MZO 算法实现最终的零偏移距剖面成像, 这意味着将有效地提高计算效率。从该方法中还可以得到这样的启示: 即如果恰当的邻域叠加是有意义的, 那么共偏移距剖面上的广义 Radon 变换甚至可以认为是在应用任何一种成像方法之前的常规处理手段。

参 考 文 献

- [1] HUBRAL P, HOCHT G, JAEGER R. Seismic illumination [J]. The Leading Edge, 1999(11): 1268-1271.
- [2] 杨锴, 王华忠, 马在田. 共反射面元叠加的应用实践 [J].

- 地球物理学报,2004,47(2):327-331.
- [3] 杨锴,许士勇,王华忠,等.倾角分解共反射面元方法[J].地球物理学报,2005,48(5):1148-1155.
- [4] BEYLKIN G. Imaging of discontinuities in the inverse scattering problems by inversion of a caused generalized Radon transform [J]. J Math Physics, 1985(26):99-108.
- [5] 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[J].地球物理学报,2004,47(1):137-142.

(收稿日期 2006-02-06 编辑 韩晓渝)