

灵活多面体搜索算法在多聚焦成像技术中应用

罗银河¹ Jürgen Mann² 董桥梁³

(1. 中国地质大学·武汉 2. University of Karlsruhe, Geophysical Institute, Karlsruhe, Germany

3. 中国石化中原油田物探研究院)

罗银河等. 灵活多面体搜索算法在多聚焦成像技术中应用. 天然气工业, 2004; 24(11): 38~41

摘要 在现代地震数据处理中, 叠加是改善资料质量最重要的一步。在叠加过程中, 时差校正就成为了至关重要的算子。为了得到高质量的叠加剖面, 精确的时差校正公式就显得尤为重要。多聚焦技术利用波场综合的聚焦参数的更新代替了传统的速度更新, 从而实现了多聚焦叠加并生成拟自激自收剖面。多聚焦时差校正公式在独立于地质构造模型和采集系统的情况下推导出来, 其核心是选择合适的最优化方法。近年来, 灵活多面体搜索技术(FPS)被应用到多聚焦参数最优化中, 虽然是比较稳健的搜索方法, 但将其应用到多聚焦技术最优化问题中去, 还需要进行相应的改进。基于此, 文章将多聚焦参数对转换到多面体空间并线性化使之适应数值计算, 并提出了初始值的获取方法以及算法终止的判别标准。实测数据的叠加结果表明: FPS很好地实现了多聚焦参数的最优化, 较好地实现了共中心点(CMP)的“同相叠加”。

关键词 时差校正 聚焦 多面体 参数 地震数据

一、前言

现代地震数据的采集受野外采集参数的影响, 共中心点(CMP)叠加是最广泛使用的地震数据处理技术, 利用 CMP 记录的冗余度, 叠加能显著地压制不相干噪音, 应用一次波速度函数在叠前作动校正, 从而提高信噪比^[1]。然而常规动校正基于水平层状介质, 在严重的复杂构造区不能满足双曲线动态时差的假设, 且在叠加的过程中存在致命的“速度难题”——在叠加过程中速度场需要不断迭代、修改直到得到“满意”的速度场。在地质条件地表地貌复杂的情况下, 这样得到的速度场可靠性、准确性都不好, 从而导致叠加剖面的精确度也不高^[2~4]。

为了解决这个问题, 不同的方法被提出来, 包括波动方程拉平和直接从不规则表面进行叠前偏移叠加。然而, 这些方法计算成本昂贵并且需要速度—深度模型的先验信息^[5~8]。针对常规方法“速度”模型难精确建立、叠加剖面精度低的缺点, Gelchinsky 于 1988 年提出“多聚焦时差理论”^[9], 并在此基础上于 1999 年提出多聚焦(MF)成像技术^[10, 11]。

多聚焦成像技术具有众多的优越性, 选择合适

的全局优化搜索方法是多聚焦成像技术的关键之一^[13~14]。近年来, 一种基于多面体算子的优化方法——灵活多面体搜索技术(FPS)开始被应用到多聚焦参数最优化中并取得了明显效果。

二、基本原理

多聚焦(MF)成像技术基于 Hubral 两个波前面的理论和广义的射线理论, MF 方法属于一组方法, 而这一组方法以巨模型——独立成像法为特征, 该方法的特点是用算子的修正过程代替了传统偏移方法中的速度模型修正。文献^[15]认为: 多聚焦算子的计算代表了三个参数对全局优化的过程, 经过 CMP 自动叠加、以及 ZO 叠加, 我们可以得到 β^0 、 R_{NIP}^0 和 R_N^0 。在大多数情况下, 这些初始值已经非常接近真值, 在相关分析过程中已经接近最大相关值, 利用它们也可以得到比较满意的叠加剖面。但是, 它们的精度可以通过一个全局优化的过程来提高。而参数对 β^0 、 R_{NIP}^0 和 R_N^0 则是进行全局优化的初始值。

FPS 是一种基于多面体算子的优化方法。对于一个标量方程 $f(X)$ (X 是个 $n \geq 2$ 维的向量), 这种

作者简介: 罗银河, 1978 年生; 2003 年毕业于中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 获硕士学位; 主要从事地震勘探资料处理、解释反演等方面的教学和研究工作。地址: (430074) 湖北省武汉市中国地质大学地球物理与空间信息学院。电话: (027) 62164905。E-mail: lyh_geop@126.com

方法首先由维参数空间生成一个有 $n+1$ 个顶点的多面体,这种方法仅依赖于目标函数 $f(X)$,从初始的参数对形成的多面体开始,在 n 维空间里搜索潜在解。对于二维的地震数据,多聚焦技术的参数 $n=3$, β 、 R_{NIP} 、 R_N 则是初始值,其搜索的目标是求得目标函数的全局最大值。下面我们重点介绍 FPS 搜索算法以及将改进的 FPS 应用于多聚焦参数优化的执行过程。

1. FPS 灵活多面体搜索算法

FPS 方法有许多变种,其执行方式和应用效果也各不相同,这里我们以 Himmelblau 描述的方法为起点,介绍 FPS 求取最小值的算法。FPS 算法基于四个基本的多面体算子:映射、扩展、紧缩和缩小。

这个过程开始于初始的多面体,而初始的多面体则给定了搜索的空间。显然,在 FPS 中至少有六种变换:映射、映射和扩展、紧缩、映射和紧缩、缩小以及映射和缩小,其中,映射使得目标函数的潜在解存在于多面体中;而扩展增强了潜在解的范围,减缓了搜索速度,而紧缩与扩展恰好相反;如果搜索的值已经非常接近最小值,则缩小将加速解的收敛。图 1 很好地说明了这六种变换的具体含义。

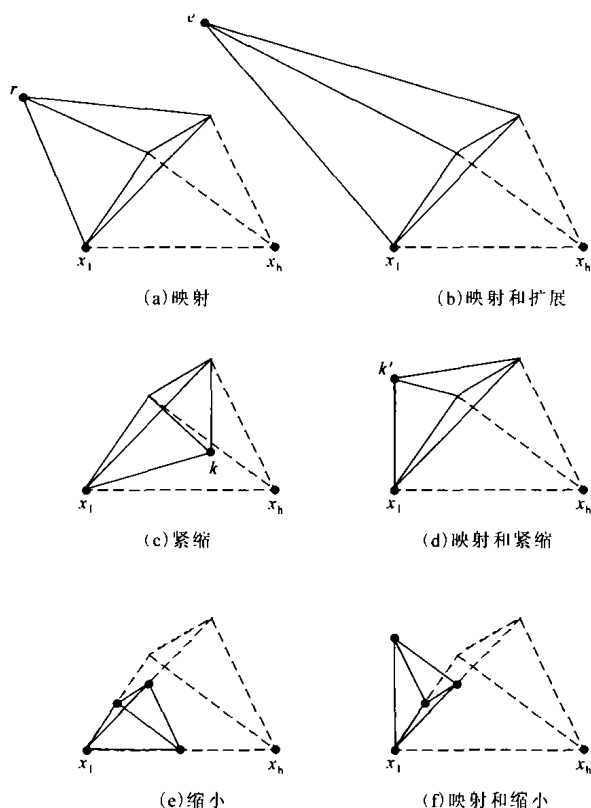


图1 三参数的 FPS 六种可能变换示意图

2. 改进的 FPS 搜索算法在多聚焦技术中的应用
虽然 FPS 已经是比较稳健的搜索方法,但将其

应用到多聚焦技术最优化问题中去,还需要进行相应的改进。多聚焦技术中,地震剖面上的每一个采样点都有参数对 R_{NIP} 、 R_N 和 β ,因此,我们必须注意:①将参数对转换到多面体空间并线性化使之适应数值计算;②如何得到多面体的初始值;③终止 FPS 的判别标准。

在 FPS 中,需要定义目标函数。多聚焦成像技术采用 CMS 相关分析法 (Taner, Koehler, 1969; Neidell, Taner, 1971):

$$S = \frac{\sum_{j=k(i)-w/2}^{k(i)+w/2} \left(\sum_{i=1}^M f_{i,j(i)} \right)^2}{M \sum_{j=k(i)-w/2}^{k(i)+w/2} \sum_{i=1}^M f_{i,j(i)}^2} \quad 0 \leq S \leq 1 \quad (1)$$

式中: i 是参与计算的道,共 M 道; $k(i)$ 是要求计算的采样点号;而 w 是为了计算 $k(i)$ 点参与相关分析的总点数; $f_{i,j(i)}$ 则是参与计算道集中第 i 道第 $j(i)$ 个采样点的地震信号。

文献[15]讨论了多聚焦参数最优化的目标函数是三参数的完全非线性函数,特别是 R_N 的值浮动太大,搜索时容易导致浮点溢出等数值计算问题。考虑到 β 在 3 个参数中比较容易控制,而且其搜索的范围比较稳定: $-\frac{\pi}{2} < \beta < \frac{\pi}{2}$,这为实现数值计算提供了方便。

为了解决这些问题,我们将 R_{NIP} 和 R_N 按 $(R_{NIP}, 1/R_N)$ 映射到一个半径为 R_s 的球面上去,这样半径 R_{NIP} 和曲率 $1/R_N$ 通过映射在计算过程中达到了稳定化。另外,由于给定了一个球面半径 R_s ,这就使得参数空间更加线性化,增强了搜索算法的可操作性。

定义:

$$\alpha = \arctan \frac{R_s}{R_N} \quad (2)$$

实践证明: R_s 的数量级在 100 m 比较稳定。FPS 需要有一个初始的多面体,并在此基础上进行搜索。为了节省计算成本,同时也要达到搜索的最佳值,Jager(1999)提出了一个初始的参数空间:

$$\begin{aligned} x_1^{(0)} &= \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \\ R_{NIP} \end{bmatrix} & x_2^{(0)} &= \begin{bmatrix} \beta - \delta_1 \\ \alpha - \delta_2 \\ R_{NIP} \delta_3 \end{bmatrix} \\ x_3^{(0)} &= \begin{bmatrix} \beta + \delta_1 \\ \alpha - \delta_2 \\ R_{NIP} \end{bmatrix} & x_4^{(0)} &= \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \alpha + \delta_2 \\ R_{NIP} / \delta_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:因子 δ_1 和 δ_2 的值为 6; δ_3 是 R_{NIP} 的变化因子,取值为 1.05。

研究表明,一个 n 维问题, FPS 搜索方法一般要经过 $20n$ 次迭代就可以搜索到满意的结果,在多聚焦技术中($n=3$),则经过 60 次迭代就收敛了。搜索终止的判别函数强烈依赖于目标函数,在多聚焦技术中,目标函数随着自激自剖面位置改变而发生数量级上的变化,从而导致判别函数难以确定。另外,在多聚焦技术中,随着 FPS 搜索代数的增加, R_{NIP} 和曲率 $1/R_N$ 的值变化范围很大,符合条件参与相关分析的道数就会减少,相关分析值反而增大,这就导致 FPS 陷入局部极值,为此,我们将参与计算的道数也设定在判别函数中,即第 k 代参与计算的道数 $n_T^{(k)}$ 不能小于初始道数 $n_0^{(k)}$ 的 90%, 并且定义 $k_{max}=2$, 只有 $k > k_{max}$ 的顶点, $x_i^{(k)}$ 表示第 k 代多面体的第 i 个顶点($i=1, \dots, n+1$), 对应的目标函数值为 $f(x_i^{(k)})$ 。这样,判别函数为:

$$\frac{1}{|f(c^{(k)})|} \sqrt{\frac{1}{n+1} [f(x_i^{(k)}) - f(c^{(k)})]^2} \leq \epsilon \cdots \vee \cdots k > k_{max} \cdots \vee \cdots \frac{n_T^{(k)}}{n_T^{(0)}} < 0.9 \quad (4)$$

三、实例研究

为了验证 FPS 在多聚焦成像技术中的应用效果以及方法理论在解决复杂问题的卓越能力,我们对某地区实际资料进行了计算,并利用多聚焦成像技术进行了时差校正和叠加。该地区地貌地表、地质构造复杂,工区最大高程差近 1 km。充分考虑工区

的采集条件,做好叠加速度分析和静校正;主要目的层为飞仙关组($T=2.5 \sim 3.5$ s),处理的重点是保证飞仙关组内有高信噪比、高分辨率的资料,以利于对构造及储层的变化进行解释和了解储层的纵横向变化规律。我们利用常规速度分析以及多聚焦技术对该工区进行了资料处理。

本工区地貌地表、地质构造复杂,常规数据处理过程中高程静校正、叠加速度场的建立以及剩余静校正每个环节都需要严格的质量监控,即便如此,最后的综合效果也不一定理想。多聚焦时差校正则把三者自动计算在多聚焦参数中,其时差校正公式是在独立于地质构造模型和采集系统的情况下推导出来的,它没有将实际地质模型进行假设或简化,从而能充分利用没有经过修饰的真实数据。利用多聚焦技术进行时差校正,必须先获得多聚焦参数的初始值,这里我们采用文献[15]介绍的 CMP 自动叠加、以及 ZO 叠加获得初始值 β^0 、 R_{NIP}^0 、 R_N^0 , 利用式(3)得到初始参数空间,然后灵活多面体算子对聚焦参数进行全局优化求取最优参数对 β 、 R_{NIP} 、 R_N 。由于多聚焦时差校正公式仅是最优参数对的函数^[10,11], 这样我们就获得了正常时差。需要说明的是:由于时差校正公式是独立于地质构造和采集系统推导出来,因此多聚焦正常时差校正量包括野外高程静校正量、正常时差校正量以及剩余静校正量。多聚焦时差校正后,就可以进行 CMP 叠加并生成自激自剖面。图2是该工区常规叠加剖面和多聚焦叠加剖

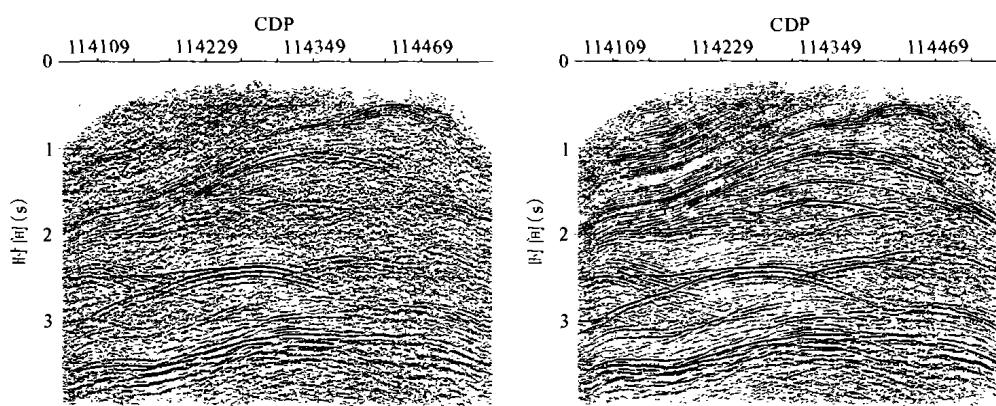


图2 某工区常规叠加剖面和多聚焦叠加剖面对比图

面对比图。

由图2可以看出:多聚焦叠加剖面较常规叠加剖面,浅层资料的分辨率和信噪比得到了合理匹配,深层资料的连续性加强,整个剖面的频率变化合理;主要目的层飞仙关组内资料的信噪比和分辨率得到

明显改善,层间反射点以及绕射点进一步清晰。该工区地貌地表和地质构造复杂,由于许多地震处理算法都是假定数据在水平地表得到的条件下设计的,当数据在不规则地形中采集到时,高程静校正经常在动校正之前用来把数据校到水平面上。然而,

在静校正处理中射线路径假设是垂直的;在复杂构造和大的高程变化地区,高程校正不精确,当炮检偏移距很大时,高程校正甚至会导致重大的误差,从而导致常规叠加剖面同相轴的连续性不好以及资料的信噪比不高,而多聚焦时差校正公式是在独立于地质构造模型和采集系统的情况下推导出来的,利用灵活多面体全局优化多聚焦参数,应用多聚焦时差校正公式则较好地使 CMP 能量得到聚焦,加强了同相轴的连续性,在保证资料分辨率的基础上,有效提高了资料的信噪比。

四、结 论

通过以上分析和研究,得出以下结论。

(1)多聚焦成像技术利用波场综合的聚焦参数的更新代替了传统的速度更新,灵活多面体对聚焦参数进行全局优化获得最优参数对,从而实现多聚焦叠加并生成拟自激自收剖面。

(2)灵活多面体搜索是一种基于多面体算子的优化方法。将其应用到多聚焦技术最优化问题中去,我们进行了相应的改进:将参数对转换到多面体空间并线性化使之适应数值计算;重构多面体的初始值;优化终止 FPS 的判别标准。实际资料的处理结果表明:改进的灵活多面体应用于多聚焦参数最优化是有效的。

(3)多聚焦时差校正公式独立于地质构造和采集系统,能充分利用没有经过修饰的真实数据,通过灵活多面体进行全局聚焦参数优化。实际资料的处理结果表明:较常规处理方法,多聚焦成像技术较好地实现了 CMP“同相叠加”,能量得到了很好地聚焦,剖面的信噪比和分辨率得到了合理匹配;主要目的层飞仙关组内资料的信噪比和分辨率得到明显改善。多聚焦成像技术在处理复杂问题时显示出了较好的稳定性。

参 考 文 献

- [美]Yilmaz 著,黄绪德等译.地震数据处理.北京:石油工业出版社,1994
- Boris Gurevich, Shemer Keydar, Evgeny Landa. Multifocusing over an irregular topography. *Geophysics*, 2002; 67:639—643
- Berkhout A J. Pushing the limits of seismic imaging, part I: prestack migration in terms of double dynamic focusing. *Geophysics*, 1997; 62(3):937—953
- Jun Ji. Controlled illumination by wavefront synthesis. SEP Report, 1993; 79:129—143
- Berryhill J R. Wave equation datuming before stack. *Geophysics*, 1984; 65:2064—2067
- Shtivelman, Canning. Datum correction by wave equation extrapolations. *Geophysics*, 48:1051—1062
- Fowler P, Schroeder S. An accurate and efficient hybrid method for poststack topographic datuming. 70 th Ann Intern Mtg Soc Exp Geophys, Expanded Abstracts, 2000: 2036—2039
- Wiggins J W. Kirchhoff integral extrapolation and migration of nonplanar data. *Geophysics*, 1984; 49:1239—1248
- Gelchinsky B. Common reflecting element (CRE) method explore. *Geophysics*, 1988; 19:71—75
- Gelchinsky, Alexander Berkovitch, Shmariahu Keydar. Multifocusing homeomorphic imaging part 1: basic concepts and formulas. *Journal of Applied Geophysics*, 1999: 229—242
- Gelchinsky, Alexander Berkovitch, Shmariahu Keydar. Multifocusing homeomorphic imaging part 2: multifold data set and multifocusing. *Journal of Applied Geophysics*, 1999: 243—260
- Zhang Y, Bergler S, Hubral P. Common-reflection-surface (CRS) stack for common offset. *Geophysical Prospecting*, 2001; 49(6):709—718
- Rainer Jager, Jurgen Mann, German Hocht, Peter Hubral. Common reflection surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 2000; 66:97—109
- Landa Evgeny, Gurevich Boris, Keydar Shemer, Trachtman Pinchas. Application of multifocusing method for subsurface imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 1999; 42(3—4):283—300
- 罗银河. 多聚焦 (MF) 成像技术综述. *地球物理学进展*, 2003; 68(4):635—642
- 蒋晓光, 李雅彬, 杨智仁. 川东高陡构造的深度偏移研究. *天然气工业*, 2003; (6):73—77
- 谢芳, 李志荣, 肖富森. 四川盆地东北部飞仙关组鲕滩储层地震预测技术. *天然气工业*, 2004; (1):34—37
- 马在田等编著. 计算地球物理学概论. 上海: 同济大学出版社, 1997
- 张建伟, 强芳青, 贺振华. 三维叠前深度偏移技术在复杂断裂区的应用. *天然气工业*, 2004; (3):52—57

(收稿日期 2004-07-21 编辑 韩晓渝)