

三维共散射点道集叠前时间偏移速度分析

张凯* 李振春 周卿

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

张凯,李振春,周卿. 三维共散射点道集叠前时间偏移速度分析. 石油地球物理勘探,2013,48(4):531~535

摘要 基于共散射点(CSP)道集的叠前时间偏移速度分析方法的理论基础是散射理论和 Kirchhoff 积分偏移方法。等价炮检距为研究叠前地震偏移和速度估计方法提供了新的思路。本文首先阐述了二维情况下单平方根旅行时方程的推导,以及共散射点道集的提取与构建,总结了共散射点道集的优势;在此基础上研究了三维情况下共散射点道集映射原理、构建方法及速度分析方法。实际三维资料的试算表明,共散射点道集对应的速度谱和叠前时间偏移剖面的精度高于常规 CMP 道集对应的速度谱和叠前时间偏移剖面。

关键词 共散射点道集 等价炮检距 速度分析 叠前时间偏移 散射理论

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

速度分析是叠前地震数据处理流程中的重要环节,速度场的精度将直接影响成像的精度。叠前处理流程中的常规速度分析的前提是假设介质为水平层状,推导出双曲时差公式。若地层倾斜,会使共中心点(CMP)道集产生反射点弥散问题,造成叠加速度场与倾角的相关性,为此地球物理学家们提出了倾角时差校正(DMO)方法^[1~3],试图通过对动校正之后的 CMP 道集或 DMO 后的道集进行速度分析消除地层的倾角影响。实际应用表明,此法仍会受到倾斜反射层的影响,DMO 校正方法只能部分解决此问题,于是叠前偏移成为必然选择。

叠前深度偏移是对复杂构造成像的最佳方法^[4,5]。但是叠前深度偏移对速度十分敏感,如果速度不准确,很难得到很好的叠前深度偏移结果。由于叠前时间偏移比叠前深度偏移的计算效率高,对速度的依赖性相对较弱,因此无论对复杂构造成像还是对速度分析来说,叠前时间偏移都十分有效。叠前时间偏移可以降低速度估计中的倾角偏差,并将估计的速度与偏移后的位置相对应^[6,7],因此

叠前时间偏移速度分析的研究很有实际意义。

Bancroft 等^[8]提出了共散射点道集叠前时间偏移速度分析方法,该方法基于散射理论,很好地解决了倾斜地层成像时的反射点弥散问题,并且得到较为精确的均方根速度场;张凯等^[7,9]提出了高精度共散射点(CSP)叠前时间偏移速度分析方法。这种基于散射理论的偏移与速度分析方法更适用于断点、断块等发育的复杂地下构造。等价炮检距偏移本质上仍然是 Kirchhoff 型的偏移方法,却比常规 Kirchhoff 叠前时间偏移方法的计算效率高得多,而且最突出的优势在于能够产生覆盖次数高、炮检距范围更大的共散射点道集,进而改善速度谱的聚焦程度与速度估计的精度。如何在三维地震资料中发挥该方法的优势是本文的研究重点。本文首先阐述二维共散射点道集构建原理及提取方法。

2 共散射点道集的映射与道集的特点

2.1 二维共散射点道集的提取

等价炮检距偏移的理论基础是 Kirchhoff 积分射线偏移理论。该理论认为地下介质由散射点组成,地面记录是所有到达地面的散射能量的叠加。

* 山东省青岛市中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,266580。Email:zhksam@163.com

本文于2012年8月27日收到,最终修改稿于2013年4月26日收到。

本研究受国家自然科学基金项目(41204086)、中国石油大学自主创新科研计划资助项目(13CX02041A)和教育部博士点基金项目(20110133120001)联合资助。

Kirchhoff 积分叠前时间偏移的本质是把所有来自于同一散射点的能量加权叠加作为该散射点的像^[10,11]。图 1 是散射点成像的几何关系图,假设均匀介质的速度为 v ,从震源点 S 到散射点 P 再传播到接收点 R 的地震波双平方根方程旅行时为^[10]

$$t = t_S + t_R = \sqrt{\left(\frac{\tau}{2}\right)^2 + \frac{(x+h)^2}{v^2}} + \sqrt{\left(\frac{\tau}{2}\right)^2 + \frac{(x-h)^2}{v^2}} \quad (1)$$

式中: x 是炮点与检波点的中心点(MP)到散射点的横向距离; h 是半炮检距; τ 是散射点 P 处的双程垂直旅行时或称作偏移时间。在速度变化比较平缓的介质中,上述旅行时关系近似成立,其中的常速度 v 由均方根速度 v_{RMS} 代替。

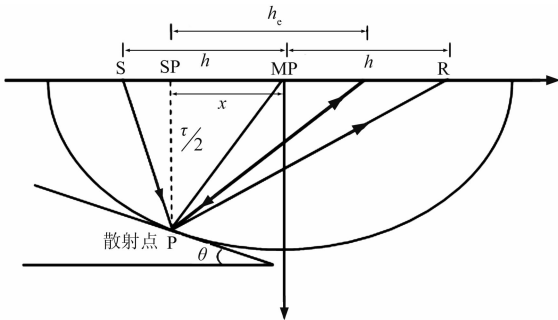


图 1 二维共散射点成像的几何关系

将地层倾角 θ 代入 NMO 时距方程,得

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{4h^2 \cos^2 \theta}{v^2}} \quad (2)$$

式中 t_0 为自激自收旅行时。式(2)可用倾角修正的正常时差校正(NMO)时间 t_n 表示为^[1]

$$\begin{cases} t \equiv \sqrt{t_n^2 + \frac{4h^2}{v^2}} \\ t_n = \sqrt{t_0^2 - \frac{4h^2 \sin^2 \theta}{v^2}} \end{cases} \quad (3)$$

其中第二个方程描述了倾角时差校正时距关系。由式(3)第一个方程可得

$$t_n^2 = t^2 - \frac{4h^2}{v^2} \quad (4)$$

从几何地震学的观点来看,均匀介质中地震道某一时刻的反射信号可以用震源和接收点为焦点的椭圆时距方程描述,即

$$\frac{x^2}{\left(\frac{1}{2}vt\right)^2} + \frac{\tau^2}{t_n^2} = 1 \quad (5)$$

式(5)也称为叠前时间偏移的脉冲响应方程^[5]。由式(4)和式(5)可得

$$t^2 = \tau^2 + \frac{4x^2}{v^2} + \frac{4h^2}{v^2} \left(1 - \frac{4x^2}{v^2 t^2}\right) \quad (6)$$

定义等价炮检距 h_e 为

$$h_e = \sqrt{x^2 + h^2 - \left(\frac{2xh}{vt}\right)^2} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)得到单平方根形式的散射点时距关系^[7],即

$$t = \sqrt{\tau^2 + \frac{4h_e^2}{v^2}} = 2\sqrt{\left(\frac{\tau}{2}\right)^2 + \frac{h_e^2}{v^2}} \quad (8)$$

式(8)表明,叠前旅行时数据映射关系在无任何假设的情况下可由双平方根简化成单平方根方程,从而简化了计算。从单平方根旅行时公式(式(8))可知,与某一散射点有关的散射能量呈双曲线分布。根据上述时距关系可以将叠前地震数据映射到一种新的叠前偏移道集,即共散射点道集上,映射变换过程不改变旅行时。对叠前数据每个样点重复映射叠加过程,就生成了与空间位置相对应的共散射点道集。

2.2 共散射点道集的优点

等价炮检距偏移以散射理论的 Kirchhoff 积分为基础,得到的共散射点道集时距关系满足双曲线关系式。与常规 CMP 道集相比,共散射点道集具有以下优点。

(1)共散射点道集描述的是地下散射点与地面炮检距的时距关系,每个双曲型的同相轴对应于同一散射点,道集不受地层倾角影响,不存在地层倾角对 CMP 道集的反射点弥散问题。

(2)某一散射点对应的共散射点道集可由偏移孔径(半径为 R 的半圆)内所有中心点对应的 CMP 道集映射得到。如图 2 所示,灰色方格区域的 CMP 道集与半圆内的 CSP 道集相比,CSP 道集的炮检距范围更大(可以覆盖整个偏移孔径)。等价炮检距 h_e 的间隔和范围可以人为给定,可以得到比 CMP 道集炮检距范围大且道间距间隔小的数据,大炮检距数据有利于速度谱的能量聚焦。

(3)共散射点道集的映射过程中有数据叠加的过程,可以实现数据的自动插值,提高了数据的反假频效果和数据的信噪比。因此,基于共散射点道集的叠前时间偏移与速度分析方法可以适用于非规则观测系统和稀疏采样的数据。

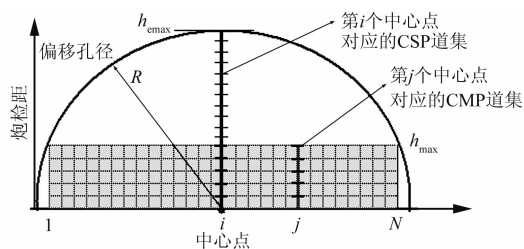


图 2 二维 CMP 道集和 CSP 道集的覆盖范围图 (引自文献[7])

2.3 三维共散射点道集的构建

前面介绍了二维高精度共散射点道集的构建与道集的特点,这是三维共散射点道集映射的理论基础。图 3 是三维观测系统炮检点和散射点的空间关系图。对于三维观测系统假定在不同方位角射线旅行时是独立的,圆 C_S 上的任何炮点和圆 C_R 上的任何接收点到散射点再到接收点和炮点的旅行时相同。如果炮点到散射点的径向距离为 d_S ,接收点到散射点的径向距离为 d_R 时,三维运动学特征就可以用二维等效。此时引入变量 \hat{x} 和 \hat{h} ,其表达式为

$$\hat{x} = \frac{d_S + d_R}{2} \quad (9)$$

$$\hat{h} = \frac{|d_S - d_R|}{2} \quad (10)$$

根据新的时距关系,将式(7)改写为

$$h_e = \sqrt{\hat{x}^2 + \hat{h}^2 - \left(\frac{2\hat{x}\hat{h}}{vt}\right)^2} \quad (11)$$

对于三维数据,利用此式即可进行共散射点道集映射,得到三维共散射点道集。

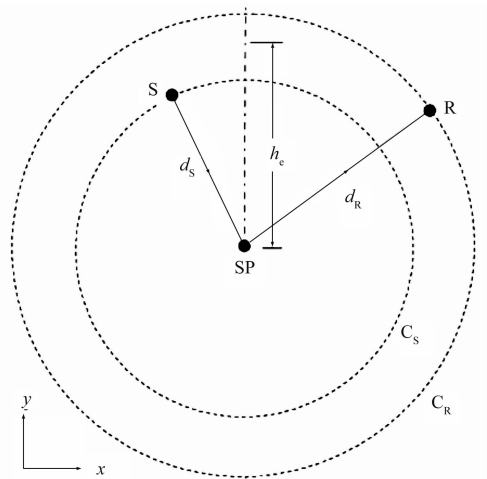


图 3 三维观测系统散射点和炮检点平面示意图 (引自文献[8])

3 叠前时间偏移与速度分析的实现

由叠前数据映射得到的共散射点道集是叠前部分偏移的结果。以共散射点道集为基础,由正常时差校正(NMO)与叠加处理就可得到该散射点的像,所有共散射点的像构成了叠前时间偏移结果。以常规速度分析方法为基础,基于共散射点道集的叠前时间偏移由以下三步实现:①根据等价炮检距映射关系由叠前二维或三维数据映射得到控制点处的共散射点道集;②对共散射点道集进行 NMO 校正;③将校正后的道集按散射点道集沿炮检距叠加为一道,得到叠前时间偏移结果。

基于共散射点道集的速度分析需要迭代更新过程:先利用初始速度(如常规叠加速度)生成若干个散射点的共散射点道集,再基于这些道集通过交互速度分析得到控制点间隔较大的均方根速度场;接着以新的速度重新生成新的共散射点道集,再进行交互速度分析。开始时可选择较少的散射点(控制点间隔较大)进行速度交互拾取,随着迭代次数增多,速度精度的提高,可以逐步加密分析的散射点(控制点间隔较小)。如此多次迭代,可以分析得到较合理的均方根速度场。应用新的速度场一方面可以提高共散射点道集的成像精度,另一方面还可为叠前深度偏移提供比较可靠的初始速度场。对于三维数据处理,拾取速度时需要沿着两个方向(纵横测线方向)分别重复以上流程,以提高速度分析的精度。

4 模型数据试算

为检验上述算法的正确性,本文先采用模型数据对算法进行验证。该模型数据绕射较为发育,应用常规叠前时间偏移无法使这些绕射波完全收敛。图 4 为二维模型基于共散射点道集的叠前偏移及速度分析结果,由图中可见:在 CDP945 处对应的 CSP 道集及速度谱中(图 4b)速度谱能量团更加聚焦,更加有利于速度谱的拾取、速度分析精度的提高;与基于 CMP 道集常规叠前时间偏移剖面(图 4c)比较,可见基于共散射点道集动校后的叠加剖面(图 4d)绕射波得到了较好的收敛,对复杂地下陡倾构造成像精度较高。

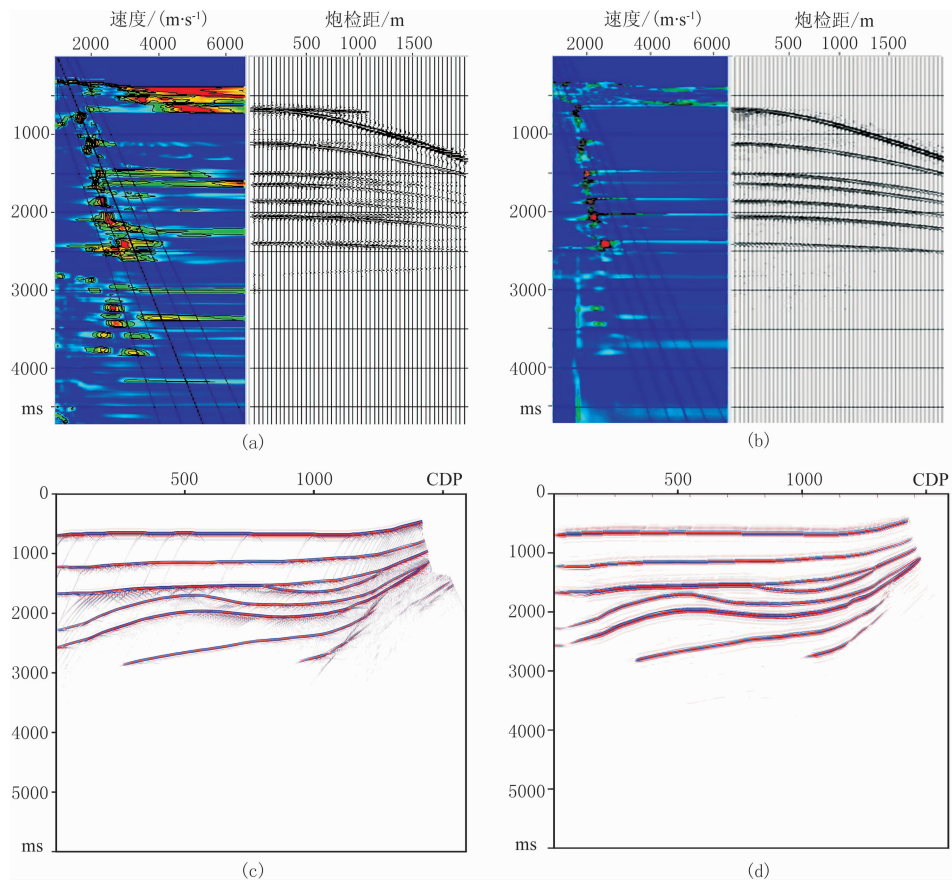


图 4 二维模型数据叠前时间偏移及速度分析结果

(a) CDP945 处对应的 CMP 道集(右)及速度谱(左); (b) CDP945 处对应的 CSP 道集(右)及速度谱(左); (c) 基于 CMP 道集的常规叠前时间偏移剖面; (d) 基于 CSP 道集的叠前时间偏移剖面

5 实际资料处理

为验证三维处理流程的适用性,本文选取中国东部 A 探区三维实际资料进行试算,该地区储层为海相碳酸盐岩潜山油气藏,呈高陡构造,速度横向变化较为剧烈,应用常规叠加速度分析很难得到较为准确的时间域速度场。图 5 为三维实际资料 cross-line981 线叠前时间偏移及速度分析结果,由图中可以看到: CMP 道集数据较为稀疏,同相轴连续性很差(图 5a),经过共散射点道集映射后,同相轴连续性得到了提高,有利于拾取速度(图 5b),且速度谱的能量团的聚焦程度明显得到改善,尤其在 3000~4000ms 的目的层范围内,能量团更加集中和收敛;常规叠前时间偏移同相轴并未完全收敛(图 5c),经过共散射点道集映射后,提高了道集和对应速度谱的质量,因此偏移后的同相轴更加连续,成像效果明显改善(图 5d),证明了方法的有效性。

6 结论

本文在前人研究的基础上推导了二维等价炮检距单平方根旅行时方程及构建共散射点道集的方法,总结了共散射点道集叠前时间偏移速度分析方法的优点,并将此方法推广到三维地震资料。通过对实际资料的试算获得了以下结论:

(1) 共散射点道集增加了数据的覆盖次数,提高了信噪比,映射中消除了空间假频,适用于稀疏采样的不规则数据;

(2) 构建三维地震资料共散射点道集是有效的,并且共散射点道集对应的速度谱比常规方法能量团更加聚焦,叠前时间偏移成像精度更高;

(3) 对于复杂构造高精度地震勘探来说叠前时间偏移及速度分析方法仍是一种有效的处理方法。为了满足高精度地震勘探的要求,方法在各向异性等复杂情况下的适用性还需要进一步研究。

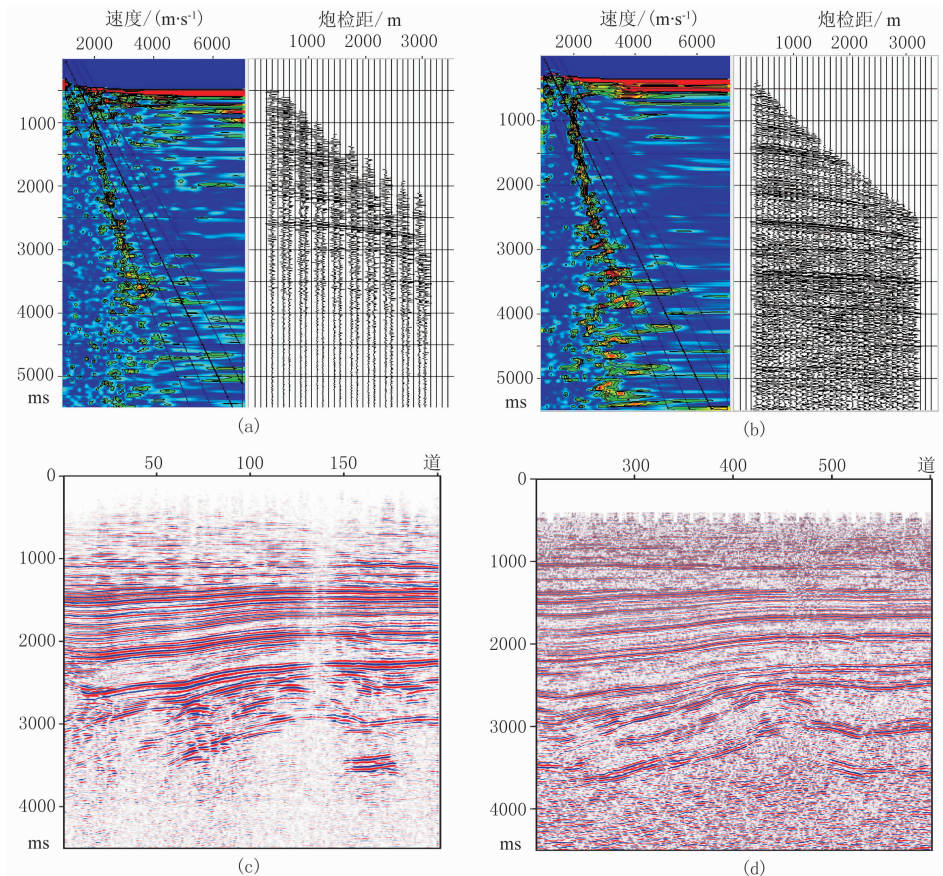


图 5 三维实际资料 crossline981 线叠前时间偏移及速度分析结果

(a)CMP 道集(右)及速度谱(左);(b)CSP 道集(右)及速度谱(左);(c)基于 CMP 道集的常规叠前时间偏移剖面;(d)基于 CSP 道集的叠前时间偏移剖面

参考文献

- [1] Hale D. Dip moveout by Fourier transform. *Geophysics*, 1984, 49(6): 741~757
- [2] Deregowski S M. What is DMO. *First Break*, 1986, 5(7): 7~24
- [3] 王华忠, 徐蔚亚, 徐兆涛等. DMO 和叠前时间偏移的共同起点. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(3): 224~229
Wang Huazhong, Xu Weiya, Xu Zhaotao et al. The same start of DMO and prestack time migration. *OGP*, 2002, 37(3): 224~229
- [4] Mayne W H. Common reflection point horizontal data stacking techniques. *Geophysics*, 1962, 27(7): 927~938
- [5] 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, 65~80
- [6] Fowler J F. A comparative overview of prestack time migration methods. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1997, 16: 1571~1574
- [7] Zhang Kai, Cheng Jiubing and Ma Zaitian. Pre-stack time migration and velocity analysis methods with common scatter-point gathers. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2006, 3(3): 283~289
- [8] Bancroft J C, Geiger H D and Margrave G F. The equivalent offset method of prestack time migration. *Geophysics*, 1998, 63(6): 2042~2053
- [9] 张凯. 叠前偏移速度分析方法研究[博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2008, 22~30
- [10] Schleicher J, Tygel M and Hubral P. 3-D true-amplitude finite offset migration. *Geophysics*, 1993, 58(8): 1112~1126
- [11] Lumley D E, Clearbout J F, Bevc D. Anti-aliased Kirchhoff 3-D migration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1999, 18: 1282~1285

(本文编辑: 金文昱)