

文章编号:1673-5005(2010)02-0038-05

起伏地表条件下波动方程法共聚焦点成像技术

徐秀刚¹, 李振春¹, 叶月明¹, 鲍敬伟²

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:为解决起伏地表条件下的偏移成像,引入了共聚焦点成像技术。采用合成聚焦算子和面炮合成的共聚焦点方法和波场逐步累加的直接下延法对起伏地表条件下的模型资料 and 实际资料进行偏移成像研究。结果表明:该方法克服了起伏地表的影响,直接实现了基于起伏地表的叠前深度成像;采用波场延拓的方法实现了起伏地表条件下的单点聚焦成像和多点聚焦成像;在一定程度上解决了起伏地表的静校正问题,并且计算效率得到提高,在选取较少聚焦点的情况下,就可以达到和共炮偏移一样的成像效果。

关键词:起伏地表;共聚焦点成像;合成聚焦算子;共聚焦点道集;叠前深度偏移

中图分类号:P 631.443 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.007

Wave equation common focus-point migration based on irregular surface

XU Xiu-gang¹, LI Zhen-chun¹, YE Yue-ming¹, BAO Jing-wei²

(1. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the migration of the irregular surface, common focus-point imaging technique was used. The migrations of the model and actual data based on irregular surface were studied using two methods. One is the common focus-point method based on the synthesis focusing operator and the theory of synthesis areal source, the other is the wave field downward continuation based on accumulating step by step. The results show that this method overcomes the influence of the irregular surface and directly achieves the pre-stack depth migration. The migrations of the single focus-point and many focus-points were realized by the wave field continuation method. The static correction problem of the irregular surface was solved at a certain extent, and the calculation efficiency was improved. The migration result can be gotten which is similar to the common shot-records gather migration result choosing a few of the focusing points.

Key words: irregular surface; common focus-point imaging technique; synthesis focusing operator; common-focus-point gather; pre-stack depth migration

地表地形起伏和近地表层速度的横向变化会对表层以下的反射波传播时间产生影响,从而严重影响反射波成像。为消除起伏地表变化剧烈对地下构造成像的影响,Reshet^[1]提出了一种逐步累加的方法;Beasley和Lynn提出了“零速层”的概念来解决起伏地表的问题,不过在起伏较大的情况下该方法计算不稳定,效果较差;Yang应用基于波动方程深

度外推算子直接下延法很好地消除了起伏地表的影响^[2];Berkhout提出采用共聚焦点成像(CFP)技术实现起伏地表的基准面重建,进而实现偏移成像^[3-8]。基于前人的研究成果,笔者采用合成聚焦算子和面炮合成的共聚焦点方法,借助波场逐步累加的直接下延法,对起伏地表条件下的模型资料 and 实际资料进行偏移成像研究。

收稿日期:2009-10-12

基金项目:国家“863”专题(2006AA06Z206);国家“973”计划项目(2007CB209605);中国石油大学(华东)研究生创新基金项目(B2009-12)

作者简介:徐秀刚(1982-),男(汉族),山东青岛人,博士研究生,主要从事地震资料成像、共聚焦点(CFP)技术的偏移成像、速度分析和CFP-AVP分析方法研究。

1 基本原理

1.1 逐步累加波场直接下延法

逐步累加波场直接下延法的具体做法是将基准面定在地震测线所在区域地形的最高点或最高点之上某一高度的水平面上,在基准面与观测界面之间填充任意速度,从基准面开始以零波场开始向下延拓,在每一个深度步长上将所截得地形面上的波场值加到延拓的波场中,在波场逐步累加的过程中消除起伏地表的影响^[9]。

1.2 CFP 偏移成像

CFP 偏移技术利用了 Berkhout 提出的基于波动理论的 WRW 模型来实现偏移成像^[10],该模型将反射地震记录表示为

$$\Delta P_j(z_r, z_s) = D_j(z_r, z_s) \Delta X(z_r, z_s) S_j^+(z_s). \quad (1)$$

其中

$$\Delta X(z_r, z_s) = \sum_m W(z_r, z_m) R(z_m, z_m) W(z_m, z_s). \quad (2)$$

式中, $\Delta P_j(z_r, z_s)$ 为地震数据矩阵,代表反射地震记录; $D_j(z_r, z_s)$ 为检波矩阵,代表检波器接收算子; $\Delta X(z_r, z_s)$ 为传递矩阵,代表传播算子; $S_j^+(z_s)$ 为震源矩阵; $W(z_r, z_m)$ 为上行传播算子; $W(z_m, z_s)$ 为下行传播算子; $R(z_m, z_m)$ 为反射系数矩阵,代表反射算子; z_m 表示地下任意点的深度; z_r 表示震源深度; z_s 表示检波点深度。式(1)和(2)表征的 WRW 模型将一些波场传播的细节隐含其中,并且考虑了采集效应和反演的影响。

1.3 基于共聚焦道集的延拓成像

将基于共炮集的偏移算法引入到 CFP 技术中。首先基于 CFP 技术实现第一步聚焦,生成共聚焦点(CFP)道集,该道集中的一道由共接收点道集中的所有炮集加权求和得到。构建地下点 (x_j, z_f) 处的波前 $P_j^-(z_r, z_f)$,此时 CFP 道集表示为

$$P_j^-(z_r, z_f) = \Delta P(z_r, z_s) F_j(z_s, z_f). \quad (3)$$

式中, $F_j(z_s, z_f)$ 是合成聚焦算子,包含了振幅和相位的信息。

第一步聚焦完成后,采用震源组合原理,根据面炮合成的理论来生成聚焦震源矩阵。将 z_f 处的震源点排列 $S(z_s)$ 进行合成,得到深度 z_f 、水平位置 x_j 处的聚焦震源为

$$S_j^+(z_s, z_f) = S(z_s) F_j(z_s, z_f). \quad (4)$$

将共聚焦道集和聚焦震源采用相关成像原理,获得频率域的反射系数为

$$\hat{R}_{ij}(z_m, z_m) = \frac{\sum_w P_{ij}^-(z_m, z_f) [S_j^+(z_m, z_f)]^*}{\sum_w |S_j^+(z_m, z_f)|^2}. \quad (5)$$

其中 i 沿着 z_m 方向变化,当 $z = z_f$ 时, j 为聚焦点。从两步聚焦的概念来看,公式(5)包含了对聚焦点有贡献的所有炮记录震源信息,这是和基于炮集的叠前偏移的不同之处^[11]。

1.4 共聚焦点成像步骤

(1) 对于单个聚焦点来说,生成合成聚焦算子的关键是旅行时的计算。考虑到起伏地表的高程,并保证旅行时计算的精度和计算效率,采用基于矩形网格的有限差分法。

(2) 基于合成的聚焦算子,根据面炮合成理论,实现检波聚焦,生成聚焦点处的共聚焦点道集(CFP道集)。

(3) 基于逐步累加波场直接下延法,消除起伏地表的影响,基于傅里叶有限差分延拓方法实现单个聚焦点处的成像。

(4) 每层选取聚焦点,采用逐层成像的方法得到最终的成像结果。

2 模型试算

某一起伏地表模型的试算结果见图1。图2是选取的聚焦点在横向 CDP = 434,纵向深度 600 m 处单点的基于起伏地表的合成聚焦算子和该点处的共聚焦点道集。可以看出,由于起伏地表的影响,合成聚焦算子的形状已经不符合双曲规律。

选取不同层位上的 40 个点,首先求出每个聚焦点的合成聚焦算子,然后对每个点都做基于波动方程的共聚焦点成像,最后将所有的成像结果叠加得到偏移剖面(图3)。对比可以看出图3(a)和图3(b)都可以在总体上对起伏地表模型的浅、中、深层构造进行成像,而它们的计算量只是总计算量的 1/2。由于图3(a)是在浅层选取的聚焦点,所以浅层的平层和中层的小断层成像效果要好于图3(b),而图3(b)在深层断层的成像效果要好于图3(a)。

图4(a)是选取了 40 个聚焦点,将它们进行基于波动方程法的共聚焦点成像得到的最终的结果,它的计算量相当于 40 炮的偏移计算量。图4(b)是 80 炮的波动方程傅里叶有限差分法(FFD法)偏移的结果。对比可以看出,两者对于该模型的起伏地表和主要构造都得到了较好的成像,而且在精度损失不大的情况下,基于波动方程的共聚焦点成像技术计算效率比炮域的叠前深度偏移方法提高了两倍。

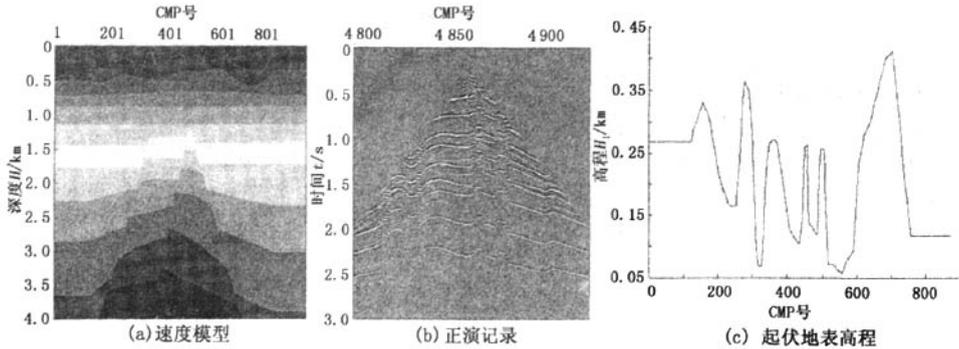


图1 某一起伏地表模型的速度模型和炮记录

Fig.1 Velocity model and shot record of one irregular surface

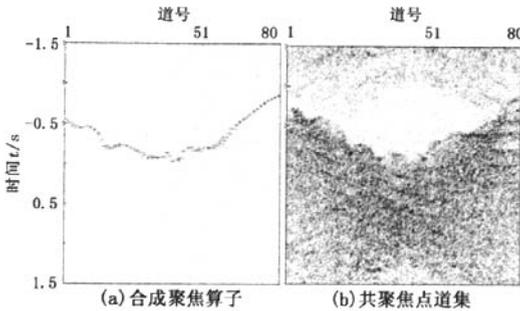


图2 单个聚焦点的合成聚焦算子和共聚焦点道集

Fig.2 Synthesis focusing operator and common focus point gather of single focus point

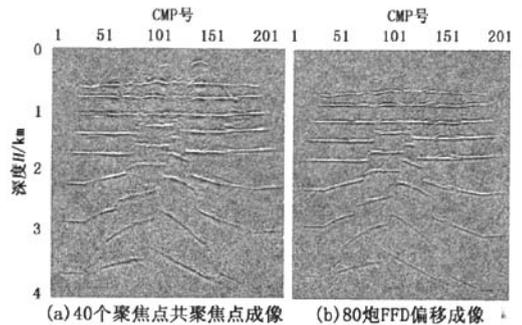


图4 波动方程法共聚焦点成像和共炮域叠前偏移结果对比

Fig.4 Contrast of wave equation CFP migration result and common shot migration result

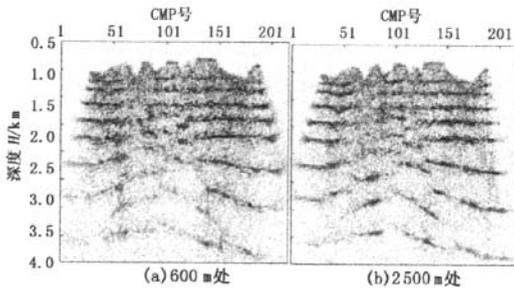


图3 不同深度处40个聚焦点共聚焦点偏移结果
Fig.3 CFP migration result of 40 focus points at different depth

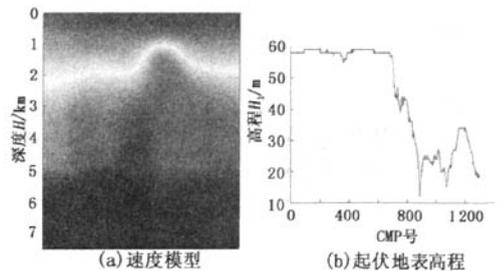


图5 实际资料的速度模型

Fig.5 Velocity model of real data

3 实际资料的试处理

模型试算已验证了该方法的正确性和有效性,再通过对某探区的实际资料试算来验证该方法的适用性。图5(a)给出了该探区偏移速度场,该实际记录最大接收道数为320道,记录道长6s,道距为50m,时间采样为4ms,总炮数为329炮。图5(b)是起伏地表的形态,其中0m对应的位置为定义的基准面,该地区的最大高程为58m。

图6是选取40个聚焦点对局部构造聚焦成像的结果。可以看出,该方法很好地消除了起伏地表的影响,对于构造得到了较好的成像。图7(a)是选取的160个聚焦点的共聚焦点成像的结果,图7(b)是基于波动方法的FFD法320炮成像的结果。对比可以看出,本文中提出的方法对于起伏地表和主要构造都得到了较好的成像,但是信噪比比后者稍差,在精度损失不大的情况下,该方法计算效率比炮域的叠前深度偏移方法提高了两倍。

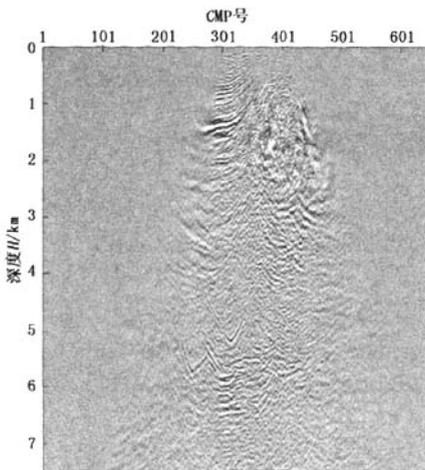


图6 40个聚焦点共聚焦点偏移的结果
Fig.6 Common focus-point migration result
used 40 focus points

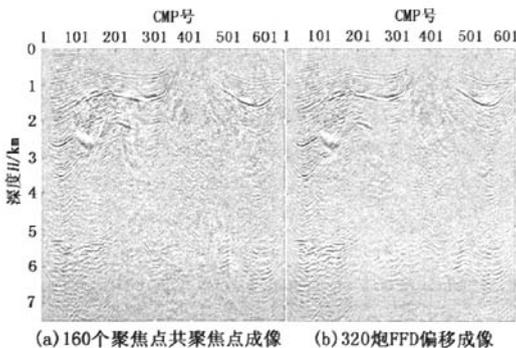


图7 波动方程法共聚焦点成像和共炮域
叠前偏移结果对比

Fig.7 Contrast of wave equation CFP migration result
and common shot migration result

4 结论

(1) 基于波场逐步累加的直接下延法是解决起伏地表条件下成像的有利手段,基于波动方程的共聚焦点成像技术克服了起伏地表的影响,可以直接实现基于起伏地表的叠前深度成像。

(2) 生成起伏地表条件下的合成聚焦算子,通过合成算子使得能量在聚焦点及其附近聚焦。采用波场延拓的方法实现单点聚焦成像和多点聚焦成像,能够较好地实现起伏地表的构造成像。

(3) 起伏地表条件下波动方程共聚焦点成像技术可以选择较少的聚焦点,在精度损失不大的情况下达到和常规炮偏移相当的成像效果,提高了计算效率。

(4) 该方法的不足之处是要求观测系统是规则的,特别是炮间距是固定的,这也是以后需要改进之处。

参考文献:

- [1] RESHEF M. Depth migration from irregular surfaces with the depth extrapolation methods [J]. *Geophysics*, 1991, 56(1):119-122.
- [2] 刘定进,印兴耀,陆树勤,等. 波动方程保幅叠前深度偏移与 AVO 响应[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2009, 33(4):45-51.
LIU Ding-jin, YIN Xing-yao, LU Shu-qin, et al. Wave equation preserved-amplitude prestack depth migration and AVO response [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(4):45-51.
- [3] RIETVELD W E A, BERKHOUT A J, WAPENAAR. Optimum seismic illumination of hydrocarbon re-servoirs [J]. *Geophysics*, 1992, 57(10):1334-1345.
- [4] RIETVELD W E A, BERKHOUT A J. Prestack depth migration by means of controlled illumination [J]. *Geophysics*, 1994, 59(5):801-809.
- [5] 李振春,张建磊,王延光,等. 基于共聚焦点道集的叠前深度偏移及其应用[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2003, 27(4):27-31.
LI Zhen-chun, ZHANG Jian-lei, WANG Yan-guang, et al. Prestack depth migration based on common focus point gather and its application [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2003, 27(4):27-31.
- [6] 辛可锋,王华忠,马在田,等. CFP 道集交互速度分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(4):386-390.
XIN Ke-feng, WANG Hua-zhong, MA Zai-tian, et al. Interactive velocity analysis on CFP gathers [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2005, 40(4):386-390.
- [7] 李振春,安琪,马光凯,等. 基于共聚焦点技术的起伏地表基准面重建 [J]. *勘探地球物理进展*, 2007, 30(5):373-376.
LI Zhen-chun, AN Qi, MA Guang-kai, et al. CFP-based redatuming from irregular topography [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2007, 30(5):373-376.
- [8] 徐秀刚,李振春,吕彬. 基于波动方程的共聚焦点成像技术 [J]. *石油物探*, 2007, 46(4):329-334.
XU Xiu-gang, LI Zhen-chun, LÜ Bin. Common focus-point imaging based on wave equation [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2007, 46(4):329-334.
- [9] RISTOW D, RUTH T. Fourier finite-difference migration [J]. *Geophysics*, 1994, 59(12):1882-1893.

- [10] THORBECKE J, BERKHOUT A J. Recursive prestack depth migration using CFP gathers [J]. *Geophysics*, 2006, 71(6):273-283.
- [11] 李振春, 杨敬磊. 平滑算子在地震叠前深度域成像中的应用[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(6):47-50.
- LI Zhen-chun, YANG Jing-lei. Application of smoothing operator in seismic prestack depth imaging [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(6):47-50.
- (编辑 徐会永)
-
- (上接第37页)
- [20] 龚再升, 蔡东升, 张功成. 郟庐断裂对渤海海域东部油气成藏的控制作用[J]. *石油学报*, 2007, 28(4):1-10.
- GONG Zai-sheng, CAI Dong-sheng, ZHANG Gong-cheng. Dominating action of Tanlu fault on hydrocarbon accumulation in eastern Bohai Sea area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4):1-10.
- [21] 吴国璋, 朱伟林, 黄正吉, 等. 湖相沉积浮游藻类及有机质类型与烃源研究[J]. *同济大学学报*, 1998, 26(2):176-179.
- WU Guo-xuan, ZHU Wei-lin, HUANG Zheng-ji, et al. Research on phytoplankton and organic matter in the lacustrine sediments and hydrocarbon source conditions [J]. *Journal of Tongji University*, 1998, 26(2):176-179.
- [22] 刘传联, 徐金鲤. 生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1):144-150.
- LIU Chuan-lian, XU Jin-li. Estimation method on productivity of oil-producing lake and a case study [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1):144-150.
- [23] 米立军, 毕力刚, 龚胜利, 等. 渤海新近纪古湖发育的直接证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4):37-42.
- MI Li-jun, BI Li-gang, GONG Sheng-li, et al. Direct evidence for development or Bohai paleolake during the Neocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(4):37-42.
- [24] 金强. 有效烃源岩的重要性及其研究[J]. *油气地质与采收率*, 2001, 8(1):1-4.
- JIN Qiang. Importance and research about effective hydrocarbon source rocks [J]. *Oil & Gas Recovery Technology*, 2001, 8(1):1-4.
- [25] 金强, 朱光有, 王娟. 威化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(4):19-23.
- JIN Qiang, ZHU Guang-you, WANG Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(4):19-23.
- [26] 王敏芳, 焦养全, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复——以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(6):719-722.
- WANG Min-fang, JIAO Yang-quan, WANG Zheng-hai, et al. Recovery Paleosalinity in sedimentary environment—an example of mudstone in Shuixigou group, southwestern margin of Turpan-Hami Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(6):719-722.
- [27] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 海相地层无机参数与烃源岩发育环境的相关研究——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(4):411-421.
- TENG Ge-er, LIU Wen-hui, XU Yong-chang, et al. Study on relation between inorganic parameters in marine deposits and developmental environment of hydrocarbon source rocks; taking Ordos Basin as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(4):411-421.
- [28] 赵澄林, 陈纯芳, 季汉成, 等. 渤海湾早第三纪油区岩相古地理及储层[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 56-67.
- [29] 徐长贵, 许效松, 丘东洲, 等. 辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析[J]. *古地理学报*, 2005, 7(4):449-459.
- XU Chang-gui, XU Xiao-song, QIU Dong-zhou, et al. Structural and sequence stratigraphic frameworks and palaeogeography of the Paleogene in central-southern Liaoxi sag, Liaodongwan Bay area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(4):449-459.
- [30] 张林晔, 刘庆, 张春荣. 东营凹陷成烃与成藏关系研究[M]. 北京: 地质出版社, 2005:16-34.
- (编辑 徐会永)