

文章编号:0253-9985(2008)05-0676-07

复杂地表复杂地下地区地震成像技术研究

杨勤勇,方伍宝

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 南京石油物探研究所,江苏 南京 210014)

摘要:针对我国南方复杂地表和复杂地下地区的地震勘探难点,开展了偏移成像技术研究。首先对偏移算法进行了论述,推导出叠前时间偏移中的旅行时计算方法和加权因子计算方法,提出了非对称旅行时计算思想,使起伏地表直接 Kirchhoff 叠前时间偏移技术能够适应速度的较强横向变化;然后讨论了全速度模型建立技术(浅中深层速度融合技术),给出了起伏地表条件下综合建立速度模型的实现流程;最后给出了起伏地表叠前深度偏移的 Fourier 有限差分延拓算子,实现了起伏地表的叠前深度偏移。利用合成地震数据和实际数据验证了方法的有效性和实用性。

关键词:波动方程;叠前时间偏移;叠前深度偏移;全速度模型;复杂地区

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

A Study on seismic imaging techniques in complex surface and subsurface areas

Yang Qinyong, Fang Wubao

(Research Unit of Geophysical Prospecting, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract: Aiming at seismic survey difficulties in complex surface and subsurface areas of South China, seismic migration and imaging techniques are studied. First, migration algorithms are discussed and the methods to calculate travel-time and weighting factor are derived for pre-stack time migration, presenting an idea of calculating asymmetrical travel-time, which can allow Kirchhoff pre-stack time migration directly from rugged topography to match higher lateral changes of velocity. Second, a technique to build an overall velocity model (a technique to integrate shallow, middle and deep velocity into a model) is discussed, resulting in a workflow to build a comprehensive velocity model under a condition of rugged topography. Finally, the continuation operator of Fourier finite difference has been developed for the pre-stack depth migration directly from rugged topography. All the proposed methods have been verified with synthetic and real seismic data.

Key words: wave equation; pre-stack time migration; pre-stack depth migration; overall velocity model; complex area

在复杂地表和复杂地下地区,利用常规地震资料处理方法和思路很难获得地下构造的精确成像^[1]。常规地震成像方法的前提是地震道炮点和检波点的高程相同。在常规数据处理中,通过采用浮动基准面校正和水平基准面校正方法,将非平面地震道校正为平面地震道。在地形平缓的地

区,近地表速度比地下速度慢很多,且射线路径出射角较小,采用上述校正方法比较合适。但在复杂地表和复杂地下地区,近地表速度和地下速度相差大,且射线路径出射角较大,因此,简单的校正可能会扭曲波场,降低地震成像的质量,此时常规处理不能产生正确的成像。为此,人们开展了

收稿日期:2008-06-13。

第一作者简介:杨勤勇(1964—),男,高级工程师,地震勘探。

基金项目:中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目(970211)。

折射静校正、层析静校正和波动方程基准面延拓等处理方法的研究,成像效果有所提高^[2-5],但这也很难“根治”由复杂地表和复杂地下引起的成像问题。

从起伏地表直接进行叠前时间偏移是复杂地表和复杂地下地区获得精确成像的有效途径之一。该技术始于20世纪90年代中期,Raiaskaran^[6](1995)利用初至层析成像估算近地表速度,采用相干反演、聚焦分析和反射层析等手段建立深层速度模型,应用双程波有限差分逆时偏移方法实现起伏地表的偏移成像;Geiger^[7](1996)提出了散射点等效偏移距叠前偏移方法;Margrave^[8](2000)提出了基于PSPI的非稳相移算法;Mi^[9](2001)采用改进的PSPI方法实现了起伏地表情况下的叠前深度偏移;Gurevich^[10](2002)将双聚集成像技术应用于非规则地形的陆地地震资料处理中;Jager^[11](2003)应用真振幅Kirchhoff偏移技术,通过偏移加权来考虑地形变化的影响。

笔者研究了叠前时间偏移中旅行时的计算方

检波点同时位于绕射点 x_0 正上方的双程旅行时。地震波从炮点到绕射点再到接收点的旅行时间为 $T_D(x_0, t_0, h)$,那么,Kirchhoff偏移公式为

$$R(x_0, t_0, h) = \int_{\Omega} W(x, t, h) D_t^{-\frac{1}{2}} U(x, t, h) \Big|_{t=T_D(x_0, t_0, h)} \quad (1)$$

式中: $W(x, t, h)$ 为振幅加权函数; $D_t^{-\frac{1}{2}}$ 表示Hilbert变换的时间负半导数。对于一个水平反射层,常速度模型下观测到的反射时距曲线为双曲线,即

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}} \quad (2)$$

式中: $t_0 = \frac{2d}{v}$; t_x 为反射旅行时间,s; x 为炮检点之间的偏移量,m; t_0 为中点的自激自收反射时间,s; d 为反射层的深度,m; v 为速度,m/s。

在水平地表情况下,由均方根速度根据(1)式和(2)式进行叠前时间偏移。在起伏地表条件下,

地震偏移成像方法主要分为Kirchhoff积分法和波动方程延拓法(也叫微分法)两大类。Kirchhoff积分法的优点是计算效率高,容易实现目标区的偏移,对野外观测系统的适应性强,比较适合直接从起伏地表对地下进行偏移成像。

实现Kirchhoff叠前时间偏移的基本原理是:根据反射点的绕射时距曲线,在成像空间进行加权叠加。设地表记录到的地震数据为 $U(t, x, h)$,它与双程旅行时间 t 、炮点与检波点中点 x 和半偏移距 h 有关。设在 (x_0, t_0) 处存在一绕射点,与其对应的偏移成像数据为 $R(x_0, t_0, h)$, t_0 为炮点和

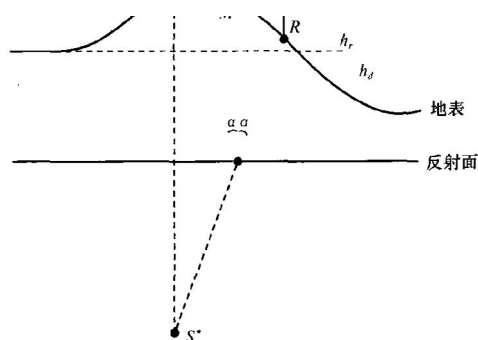


图1 起伏地表的旅行时计算原理
Fig.1 Travel-time calculation principles of vugged topography

$$T(t_0, x, h) = \left[\left(\frac{\Delta h(sm)}{v_{near}} + \frac{t_0}{2} \right)^2 + \left(\frac{x - x_0 - h}{v} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[\left(\frac{\Delta h(rm)}{v_{near}} + \frac{t_0}{2} \right)^2 + \left(\frac{x - x_0 + h}{v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $\Delta h(sm) = h_s - h_m$; $\Delta h(rm) = h_r - h_m$; v_{near} 为近地表速度, s; v 为均方根速度, s。

通常情况下, 叠前时间偏移的旅行时计算只与成像点的速度有关, 旅行时相对成像点是对称的, 不能解决速度横向变化的问题, 当介质复杂时偏移成像的精度不高。基于小偏移距范围用均方根速度(RMS)计算旅行时较为准确这一原理, 我们把偏移距 x 分成 n 等分, 在每等分 dx 内所引起的旅行时不再用统一的 RMS 速度, 而是沿横向每个 dx 采用不同的均方根速度, 这样, 速度的横向变化就反映在均方根速度上了。改进的非对称旅行时计算公式为

$$t_x = \sqrt{t_0^2 + \left(\frac{dx}{v_1} + \frac{dx}{v_2} + \dots \right)^2} \quad (4)$$

式中: $v_1, v_2, \dots$ 为对应于不同 dx 处的均方根速度; dx 为 x 的 n 等分之一。图2为改进的非对称旅行时计算、常规旅行时的计算和旅行时理论值对比图, 可以看出, 在速度横向变化情况下, 改进后的旅行时与理论值拟合得更好。

1.2 波动方程叠前深度偏移

Kirchhoff 积分法也有一些缺陷, 在介质复杂

的条件下偏移成像的精度不高。波动方程延拓法的优点是适应复杂介质的能力强, 偏移成像的精度高。我们采用基于单程波波动方程的炮域叠前深度偏移技术。依据地震波的可叠加性原理, 即

$$Q(x, z, y, \omega) = Q_0(x, z, y, \omega) + Q'(x, z, y, \omega) \quad (5)$$

式中: $Q(x, z, y, \omega)$ 为起伏地表 (x, y, z) 处的叠加波场[代表 $U(x, z, y, \omega)$ 或 $D(x, z, y, \omega)$]; $Q_0(x, z, y, \omega)$ 为记录波场; $Q'(x, z, y, \omega)$ 为延拓波场; x, y, z 分别为 x, y, z 方向坐标; ω 为频率, Hz。

在计算延拓波场时, 利用波场延拓公式和叠加原理, 经过波数域和空间域两次计算实现一个横向非均匀层的波场深度延拓, 即

$$U^1(x, y, z + \Delta z, \omega) = U(x, z, y, \omega) e^{-ik_z \Delta z} \quad (6)$$

$$U(x, y, z + \Delta z, \omega) = U^1(x, z + \Delta z, \omega) + U_{IN}(x, z, y, \omega + \Delta z, \omega) \quad (7)$$

然后利用公式

$$R(x, y, z) = \int P_U(x, z, y, \omega) P_D^*(x, z, y, \omega) d\omega \quad (8)$$

对上、下行波进行运算, 实现成像, 即基于入射波的到达时间与反射波的产生时间相同的原则进行成像。

实现了适应起伏地表的 Fourier 有限差分(FFD)波场延拓算子^[13]。以三维声波方程为例。由波动方程

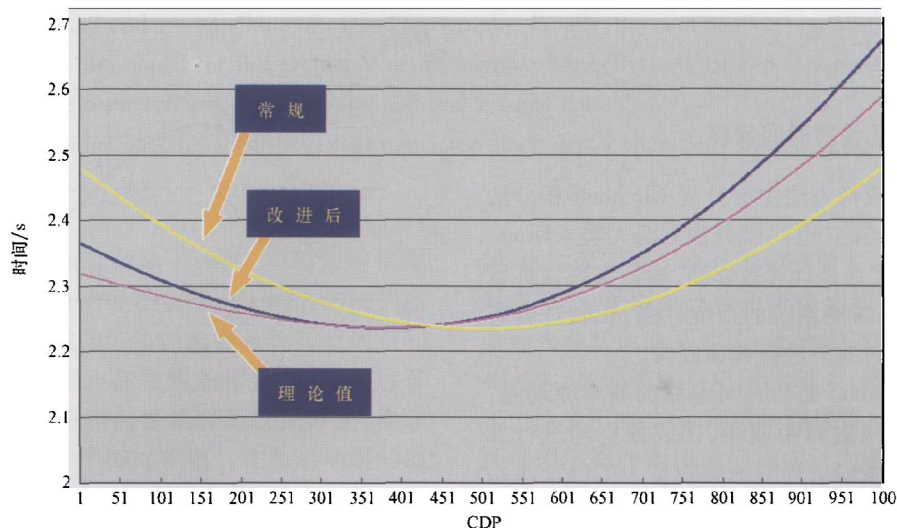


图2 不同旅行时计算方法结果的对比分析

Fig. 2 Comparison of results from different travel-time calculation methods

$$\frac{1}{v^2(x,y,z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (9)$$

导出上、下行波波场的单程波方程。其在频率空间域的表现形式为

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \pm ik_z P \quad (10)$$

其中

$$k_z = \frac{i\omega}{v} \sqrt{1 - \frac{v^2(k_x^2 + k_y^2)}{\omega^2}} \quad (11)$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 3 个方向的波数; 正号表示上行波, 负号表示下行波。引进参考速度场 v_0 , 那么由 v_0 与 v 的不同引起的 k_z 的差异为

$$e = \frac{\omega}{v} \sqrt{1 - \frac{v^2(k_x^2 + k_y^2)}{\omega^2}} - \frac{\omega}{v_0} \sqrt{1 - \frac{v^2(k_x^2 + k_y^2)}{\omega^2}} \quad (12)$$

对(12)式中的 2 个平方根算子分别作 Taylor 展开, 得到

$$k_z = k_{z0} + e = k_{z0} + \omega \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right) + \omega \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{1}{2} \right) \left[v \left(\frac{k_x + k_y}{\omega v} \right)^{2n} - v_0 \left(\frac{k_x + k_y}{\omega v_0} \right)^{2n} \right] \quad (13)$$

(13)式即为(FFD)波场延拓算子, 随着 n 的增大, 算子的精度不断提高。

2 速度模型的建立

地震波速度模型的精度直接影响偏移成像结果的质量和可信度, 尤其是叠前偏移, 故地震波速度分析与速度模型建立是地震成像工作中的重中之重。速度模型建立的过程主要包括初始速度模型建立和速度模型修正优化。初始速度模型建立的方法通常是, 首先用解释的层位和断层信息进行构造建模; 然后用 Dix 公式转换和相干层速度反演等方法确定相应层位的初始层速度值; 最后用钻井、测井曲线和地质等综合信息进行标定。初始速度模型的精度不仅影响着速度模型修正的迭代次数, 而且还影响速度模型修正结果的正确性。

建立起伏地表速度模型方法的主要特点在于: 速度分析基于的是弯曲地表, 所建立的速度模型也是基于弯曲地表, 这样信息更多一些, 结果更可靠一些。我们采用层析反演方法得到近地表速

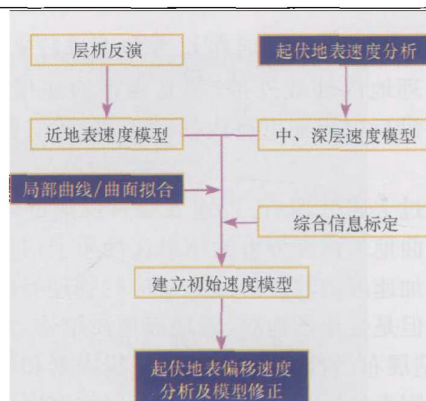


图3 全速度建模流程

Fig. 3 A workflow of overall velocity modelling

度模型; 利用起伏地表速度分析方法分析中、深层地层的速度; 在已知地球物理和地质信息标定的基础上, 通过全速度模型融合技术建立用于直接偏移成像的初始全速度模型; 利用直接叠前偏移的共成像道集进行全速度模型修正^[14-18]。模型建立的流程如图3所示。

层析反演方法的基础资料是初至波到达时, 它基于原始地表, 因而得到的近地表速度模型是始于地表, 止于地下某一深度。基于起伏地表进行速度分析时, 尽管地表高差大, 但如果地表相对光滑, 相邻桩号之间的高程没有或较少地出现突变现象, 就可以直接基于地表进行速度分析和成像。如果地表局部变化剧烈, 出现陡坎或两侧桩号比中间桩号的高程高(或低)数米或数十米以上, 高程曲线局部出现显著的锯齿状, 在此种情况下进行速度分析, 高程的高频变化分量必将影响速度谱的聚焦。为此, 对剧烈起伏地表进行了适度平滑, 前提是尽量不改变地表形态, 小幅度地消除地表高程的局部锯齿状, 然后在该相对平滑的曲面上进行速度分析和成像。

起伏地表速度分析结果是弯曲地表时间域均方根速度的函数, 层析反演结果是近地表层速度模型。建立常规均方根速度模型时, 速度分析是在水平面上进行的, 建立的速度模型与 $t_0 = 0$ 对应的物理界面是水平的。基于起伏地表速度分析建立均方根速度模型时, 速度分析是在曲面上进行的, $t_0 = 0$ 对应的物理界面是弯曲的真实地表或接近真实地表的弯曲光滑曲面, 因此首先要把近地表的深度域层速度模型转化为时间域的均方根速度模型, 并将其与基于起伏地表速度分析结

果的 T_0 时间统一;然后在 t_0 方向上进行光滑,并进行合理地内插或外推,建立完整的速度函数;最后再沿反射界面进行内插和光滑,建立整个速度模型。

经过上述处理后,近地表层析反演的结果和基于弯曲地表速度分析的结果在性质上均为时间域的叠加速度函数,与 $t_0 = 0$ 对应的物理界面是统一的。但是受地形地貌、近地表地质结构、地下层位、构造展布、岩性和物性以及采集因素和信噪比等多种因素的影响,浅层与中、深层的速度函数在时间轴上可能重合(图4a),也可能不重合(图4b)。此时要分析浅层与中、深层的均方根速度函

数在时间方向上的重叠关系,然后通过反距离加权函数计算浅层与中、深层结合部位的速度函数 $v_M(t)$,并对函数进行局部光滑,完成浅、中、深层全速度模型的建立。

3 方法试验

3.1 模型数据

采用国际标准的 SEG 起伏地表模型数据 (Amoco 和 BP 公司设计的加拿大起伏地表逆掩断层模型)对方法进行了验证。共有 277 炮数据,每炮 480 道,道距 15 m,中间激发,记录长度为 8 s,采样率为 4 ms,偏移距为 3 600 ~ 15 ~ 3 600 m,地形最大高差为 1 237 m,速度范围为 3 600 ~ 6 000 m/s。模型(图5,长 24.93 km,深 10 km)的主要特征为地表起伏大,逆掩断层发育,存在负向构造(CDP600—CDP800,CDP1100—CDP1300),速度横向变化很大,我国南方山区的特征与其类似。

分别利用 Kirchhoff 叠前时间偏移方法和波动方程叠前深度偏移方法对模型数据进行了偏移成像。图6为基于理论速度的起伏地表叠前时间偏移剖面,模型的主要构造特征得到了反映,但断点不清晰,负向构造也不太清楚。图7为起伏地表

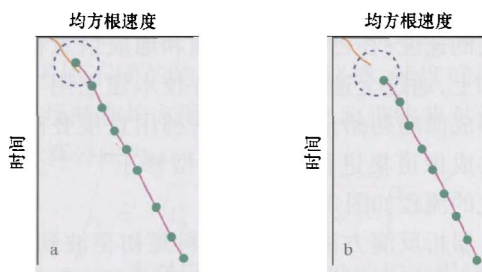


图4 浅、中、深层速度分布示意图

Fig. 4 Velocity distribution in shallow, middle and deep depths

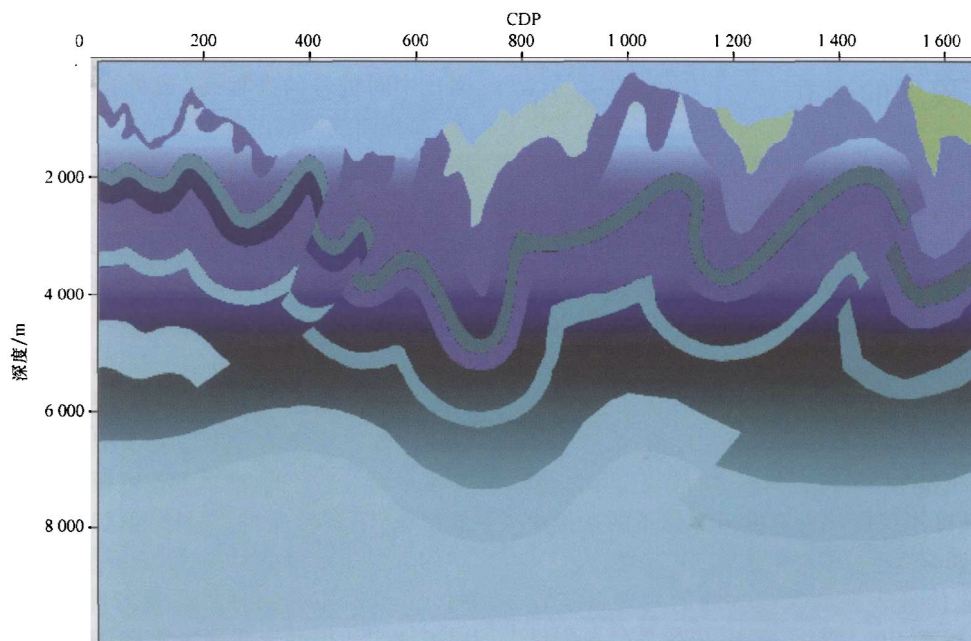


图5 起伏地表逆掩断层模型

Fig. 5 An overthrust model in vugged topography

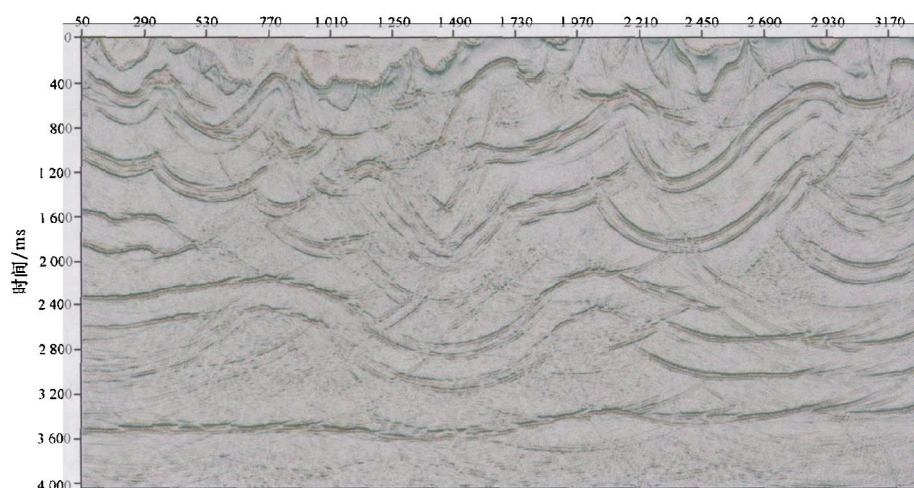


图6 起伏地表逆掩断层模型的直接 Kirchhoff 叠前时间偏移剖面

Fig. 6 A direct Kirchhoff pre-stack time migration profile for the overtrust model in vugged topography

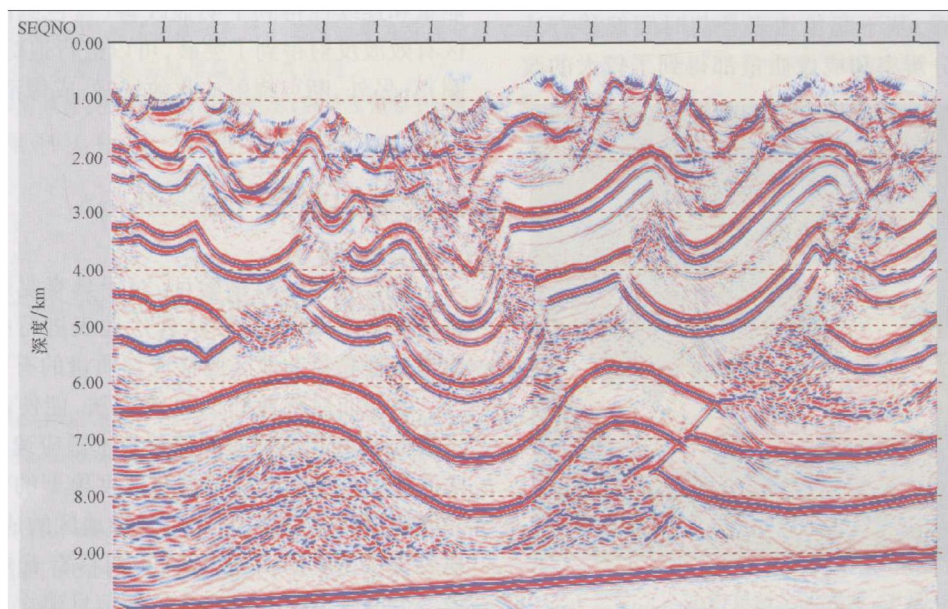


图7 起伏地表逆掩断层模型的直接波动方程叠前深度偏移剖面

Fig. 7 A pre-stack depth migration profile of direct wave equation for the overtrust model in vugged topography

直接叠前深度偏移剖面,剖面的信噪比高,各反射层的成像深度和形态以及断层的成像位置与理论模型完全一致。

3.2 实际数据

研究区为南方灰岩出露区,地表为中深切割的山地地貌,相对高差 700 ~ 1 200 m,属高、陡、险的大山区。

1) 剧烈起伏的地表(容易形成侧面波和地表

散射)和较大倾角的出露地层,使得波场十分复杂。

2) 大面积出露的灰岩在南方温暖潮湿气候的影响下发生化学风化,孔洞缝十分发育,地表的非均质性强,地震波的能量衰减严重,散射严重,内幕反射很弱。

3) 灰岩区岩石坚硬,由破碎岩石引起的塑性形变消耗了大量的激发能量,使激发能量转化为有效弹性波的能量比砂泥岩低。

4) 出露地表的灰岩与下伏砂泥岩之间形成

了强阻抗界面,对地震波产生屏蔽作用,再加上断裂带的吸收作用,使得透射能量大量减少,反射能量变弱。

5) 地下地质构造复杂,形成了多种类型的波,使得深部地震波场十分复杂。

受这些因素的综合影响,灰岩区地震资料品质极差,给地震成像带来困难。

对研究区的三维数据进行了基于起伏地表的速度分析,建立了相应的速度模型,进行了基于起伏地表的叠前时间偏移处理。图8是全速度模型三维显示图。

图9是用某商业软件前期处理的剖面,图左上角上的红色实线为剖面位置,浅蓝色实线以北为灰岩出露区。图10是对应的用基于起伏地表叠前时间偏移方法处理的剖面。从3个不同位置的成像剖面来看,基于起伏地表叠前时间偏移方法使剖面整体分辨率和成像质量都得到了较大的改

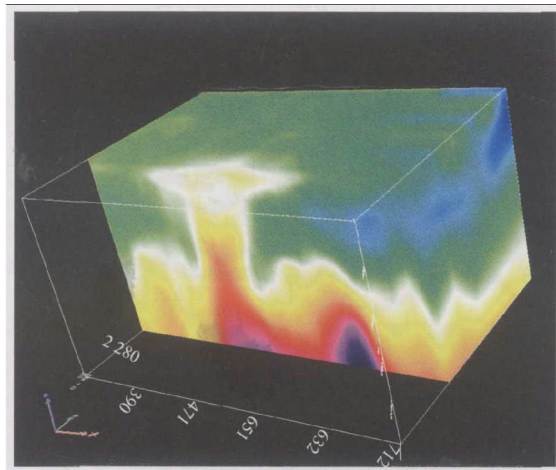


图8 研究区全速度模型

Fig. 8 An overall velocity model for the study area

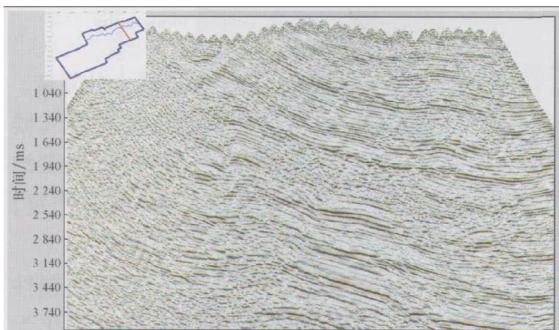


图9 某商业软件前期处理的剖面

Fig. 9 A profile processed before by a commercial software

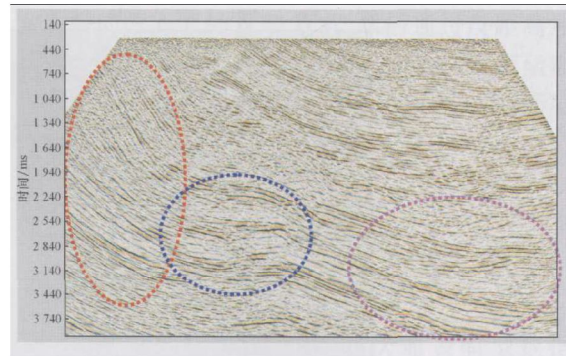


图10 基于起伏地表叠前时间偏移的剖面

Fig. 10 A profile based on pre-stack time migration of rugged topography

善。对比分析可知:砂岩区的成像效果得到了进一步提高(粉色圆圈);灰岩与砂岩过渡区的反射能量和连续性得到了明显改善(蓝色圆圈);灰岩区有效波反射得到了突破,可以进行追踪(红色圆圈)。另外,断点绕射波收敛较好,成像清晰,易于识别。

4 结束语

模型和实际数据验证,对于具有复杂地表和复杂地下的地区,直接从起伏地表进行叠前偏移成像是提高复杂地区偏移成像质量的有效途径之一。采用非对称旅行时计算方法,能使起伏地表直接 Kirchhoff 叠前时间偏移技术适应速度的较强横向变化。叠前时间偏移对速度模型的要求不象深度偏移那样苛刻,因此对复杂地区的成像,起伏地表直接 Kirchhoff 叠前时间偏移有着更大的优势。全速度建模方法综合各种信息建立偏移速度模型,提高了模型的精度,可以对地下复杂介质更好地成像。

参考文献

- 1 杨勤勇. 油气地球物理技术发展新动向[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(2): 77~84
- 2 王世青, 孟小红, 王双喜, 等. 兴安岭山地低信噪比地震资料处理技术分析[J]. 石油物探, 2007, 46(2): 187~192
- 3 王克斌, 赵灵芝, 张旭民. 折射静校正苏里格气田三维处理中的应用[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 248~251
- 4 林伯香, 肖万富, 李博. 层析静校正黄土塬弯宽线资料处理中的应用[J]. 石油物探, 2007, 46(4): 417~420

(下转第689页)

并在须二段测试获得工业气流,有3口高产井(X851, X856, X2井)平均日产气稳定在 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上。

与国内外致密砂岩气藏相比,川西上三叠统须家河组储层致密化程度更高,气藏的非均质性更强,对有效储层预测和裂缝检测的精度要求更高。三维三分量地震勘探为川西深层裂缝性气藏预测提供了丰富的信息,特别在各向异性 and 横波分裂预测裂缝方面取得了比常规纵波勘探更丰富的成果。在单纯利用地震属性预测大尺度断裂和裂缝发育带的基础上,利用速度方位各向异性和横波分裂预测了小尺度裂缝网络系统,提高了裂缝预测的精度。但在速度方位各向异性裂缝预测纵向分辨率提高以及横波分裂目的层以上地层各向异性层剥离精度方面仍然有很多研究工作值得深入开展,亟待更好地解决。

参 考 文 献

- 郭正吾. 四川盆地西部致密碎屑岩含气领域勘探理论与实践[A]. 见:杨克明,徐进,编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术[C]. 北京:地质出版社,2004. 17~21
- 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):786~793
- 叶军. 川西坳陷天然气富集规律[A]. 见:杨克明,徐进,编. 天然气成藏理论与勘探开发方法技术[C]. 北京:地质出版社,2004. 85~90
- 叶军,陈昭国. 川西新场大型气田地质特征与预测关键技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(3):384~391
- 张守仁,万天丰,陈建平. 川西坳陷孝泉-新场地区须家河组二段-四段构造应力场模拟及裂缝发育带预测[J]. 石油与天然气地质,2004,25(1):70~74
- 甘其刚,高志平. 宽方位AVA裂缝检测技术应用研究[J]. 天然气工业,2005,25(5):42~43
- Corrigan D, Withers R, Darnall J, et al. Fracture mapping from azimuthal velocity analysis using 3D surface seismic data[Z]. 66th Internat A & G, Soc Explor Geophys(Expanded Abstracts), 1996. 1 834~1 837
- Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media[J]. Wave Motion, 1981, 3:343~391
- Crampin S, Lovell J H. A decade of shear-wave splitting in the Earth's crust; what does it mean? What use can we make of it? And what should we do next? [J]. Geophys J Internat, 1991, 107:387~407
- Gaiser J E. 3-D converted shear wave rotation with layer stripping [P]. US:5 610 875, 1997
- 江凡,杨锴,程玖兵. 复杂地表有限差分波动方程向上基准面校正[J]. 石油物探,2006,45(1):15~20
- Rajasekaran S, McMechan G A. Prestack processing of land data with complex topography[J]. Geophysics, 1995, 60(6):1 875~1 886
- Geiger H D, Bancroft J C. Equivalent offset prestack migration for rugged topography[Z]. Expanded Abstracts 66th Annual Internat SEG Mtg, 1996. 447~450
- Margrave G, Yao Z. Downward extrapolation from topography with a laterally variable depth step[Z]. Expanded Abstracts of 70th Annual Internat SEG Mtg, 2000. 481~484
- Mi Y, Margrave G. Prestack depth imaging from topography with a Fourier method[Z]. Expanded Abstracts of 71th Annual Internat SEG Mtg, 2001. 1 045~1 048
- Gurevich B, Keydar S, Landa E. Multifocusing imaging over an irregular topography[J]. Geophysics, 2002, 67(2):639~643
- Jaeger C, Hertweck T, Spinner M. True-amplitude Kirchhoff migration from topography[Z]. Expanded Abstracts of 73th Annual Internat SEG Mtg, 2003. 909~912
- Ristow D, Ruhl T. Fourier finite-difference migration[J]. Geophysics, 1994, 59(12):1 882~1 893
- Liu Jiangping, Xia Jianghai, Chen Chao. Combining elevation and NMO corrections to shallow seismic reflection data on rugged topography[Z]. SEG Expanded Abstracts, 2003. 1 259~1 262
- 方伍宝,孙建国. 复杂条件下的深度成像技术[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):816~822
- 孙成龙,方伍宝,孔祥宁,等. 深度-射线域偏移速度分析[J]. 石油物探,2005,44(5):461~464
- 李振春,姚云霞,马在田,等. 波动方程法共成像点道集偏移速度建模[J]. 地球物理学报,2003,46(1):86~93
- 闫相宾,管路平,王世星. 塔里木盆地碳酸盐岩缝洞系统的地震响应特征及预测[J]. 石油与天然气地质,2007,28(6):828~835
- 黄绪宝,顾汉明. 塔河油田南部缝洞储层的正演模拟及地震波场特征[J]. 石油与天然气地质,2007,28(6):836~840

(编辑 李 军)

(编辑 高 岩)

(上接第682页)