

Application Effect of Low Amplitude Structural Imaging Strategy in Hongqi Area of Tarim Basin

Yu Fu^{1,2} Liao Yuan² Guangwei Xiao² Guosen Ji² Youbin He²

1. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

2. Korla Branch, GRI, BGP Inc, CNPC, Korla, Xinjiang, 841001, China

Abstract

The low amplitude structures and fault block traps of Neogene and Paleogene oil-bearing series in Hongqi 3D area of Tarim Basin are developed, and the resource potential is large. However, the structural implementation accuracy of post stack and pre stack migration data obtained from previously collected 3D seismic data processing is low, which is quite different from the actual drilling. Based on this, the prestack depth migration processing test is carried out in this area. It is known that the accuracy of shallow surface velocity model has a great impact on the overall migration imaging results; the 5D regularization technology makes up for the defect of sparse collected data and improves the signal-to-noise ratio of data; at the same time, due to the sudden change of velocity in the underground, the overly smooth velocity model is abandoned and a more refined grid is used to represent the velocity model; in order to ensure the stability of the inversion process and the accuracy of the overall velocity model, multi-scale grid tomography inversion is used to describe the velocity model more reasonably. Finally, the effect is better than that of early processing, the well seismic data are more consistent, and the details of low amplitude structure can be reflected.

Keywords

low amplitude structural; 5D regularization; shallow velocity model; multi-scale tomography

低幅度构造成像策略在塔里木盆地红旗地区的应用效果

付瑜^{1,2} 袁燎² 肖光伟² 纪国森² 何友彬²

1. 西安石油大学, 中国·陕西 西安 710000

2. 中国石油集团东方地球物理公司研究院库尔勒分院, 中国·新疆 库尔勒 841000

摘要

塔里木盆地红旗三维区新近系、古近系两套含油层系的低幅度构造、断块圈闭发育, 资源潜力大, 但据以前采集的三维地震数据处理得到的叠后、叠前偏移资料构造落实精度低, 与实钻相差较大。基于此, 在该区开展了叠前深度偏移处理试验, 得知浅表层速度模型的准确性对整体偏移成像结果影响大; 通过五维规则化技术弥补了采集数据稀疏的缺陷, 提高了资料信噪比; 同时, 由于地下存在速度突变, 弃用过于平滑的速度模型, 采用更为精细的网格表征速度模型; 为确保反演过程的稳定性以及整体速度模型的精度, 使用了多尺度网格层析反演, 更合理地对速度模型进行精细刻画。最终, 得到了优于早期处理的效果, 井震资料更加一致, 低幅度构造的细节得以体现。

关键词

低幅度构造; 五维规则化; 表层速度模型; 多尺度网格层析

1 引言

红旗地区位于塔里木盆地塔北隆起轮台断隆西端, 行政隶属于中国新疆维吾尔自治区沙雅县境内, 东邻东河塘油田。由于该工区构造幅度较小, 往往只有数米^[1], 是较为典型的低幅度构造, 因此对成像精度的要求高^[2]。该区现有数据采集时间为1995年, 受当时采集技术水平影响, 原设计方案中道间距50m, 接收线间距400m, 炮间距400m, 接

收炮线距100m, 由此得到的面元尺寸较大, 实际采集时炮检距分布不均匀, 近炮检距数据缺失严重, 导致浅层叠加速度谱能量不聚焦, 采集数据整体信噪比较低^[3]。在当时数据处理过程中, 使用了常规处理技术, 偏移速度模型选用人工拾取的速度^[4]。基于该速度模型, 预测构造位置比最终实钻结果超高逾10m, 较大的相对误差导致无法对低幅度构造进行准确成像。

精确落实构造的重点在于提高速度模型的精度^[5]。早期并未对数据进行针对性处理, 导致浅层信噪比较低。五维(炮检点坐标加炮检距和方位角)规则化技术可依据当前的

【作者简介】付瑜(1986-), 女, 中国辽宁开原人, 本科, 工程师, 从事地震资料处理研究。

稀疏数据,在多域进行插值,对缺失地震道数据进行重构^[6],从而强化浅层速度谱中能量聚焦,同时提高信噪比。

该地区地表情况较为复杂,早期处理中使用野外静校正获得的静校正量准确度相对较低。使用准确的浅表层速度模型进行静校正量计算能提高静校正的精度,进而提高成像质量。浅表层速度模型的误差会累积到深层,必然对深部成像造成影响。使用初至波层析方法进行反演,可得到更准确的浅表层速度模型。

反演深部速度时,使用的网格尺寸过大会导致反演结果精度较低,不能反映地下速度的突变;而使用精细网格层析,由于射线密度较低,会出现某些网格没有射线穿过或只有少量射线穿过的情形,这些网格无法被修正。为此,在将拾取的叠加速度作为较准确初始速度模型的基础上,使用网格的多尺度策略,先使用大网格进行初步反演,再进一步使用精细网格做细节刻画,最终得到能够反映低幅度构造的偏移剖面。

论文针对红旗地区成像难点进行研究,结合前人的经验以及对该地区的认识,最终得出适用于该区低幅度构造造成像处理方法。

2 速度模型精度提高策略

2.1 多维规则化技术

工区数据采集于1995年,受制于当时的采集技术水平,其测线密度及覆盖次数均较低。图1左图红色点代表炮点位置,蓝色点代表检波点位置。可见,炮点分布得不均匀性尤为严重。由于近炮检距数据缺失较严重,在叠加剖面上浅层成像质量差,在叠加速度谱上浅层能量团不清晰、聚焦性差,基于数据驱动的浅层速度模型精度低。

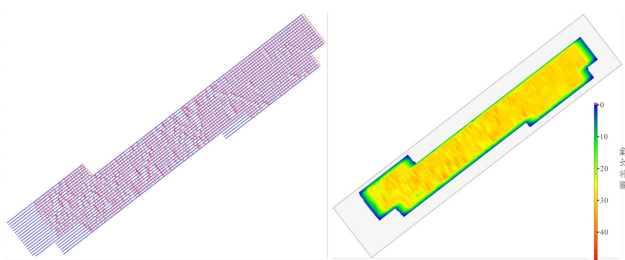


图1 红旗地区观测系统(左)及覆盖次数(右)

分析现有数据,在空间数据缺失位置以多维插值方式对数据做插值重构,从而弥补空间数据的缺失;依据多维插值原理,可对该区缺失炮点位置进行数据插值,以弥补采集的不足。

2.2 浅表层速度模型反演

红旗地区地表卫片如图2所示。红色实线内为大致的工区范围,黄色圆点为已有钻井位置。该地区地势起伏较大,西北低,东南高,局部起伏相对剧烈,地表速度结构较为复杂。

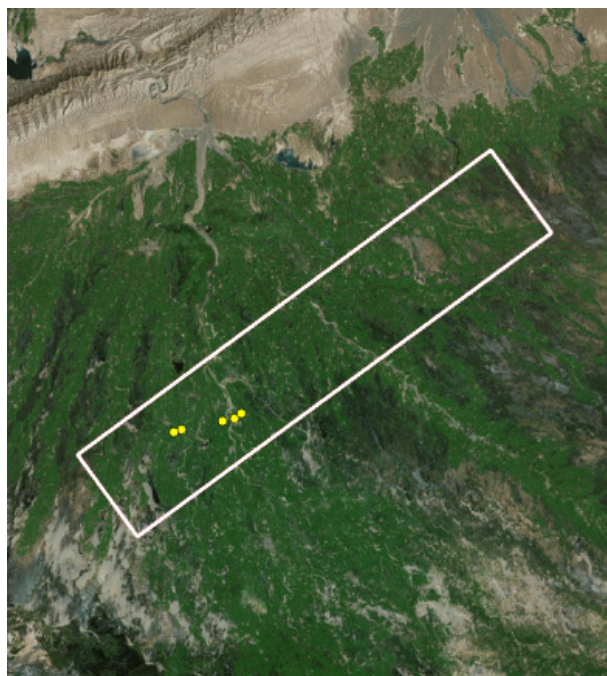


图2 红旗地区地表卫片图

浅表层速度模型既影响静校正量的计算,又影响整体深度偏移的精度。在地表情况复杂的红旗地区,野外静校正难以取得满意效果,需要利用浅层速度模型计算静校正量;同时,叠前深度偏移对速度场较为敏感,浅层速度误差会传递至深层,对整体速度产生影响,速度模型误差会使偏移成像出现假象(见图3)。

图3(c)是在准确模型图3(a)下得到的偏移结果。为了验证浅表层速度对深层的影响,将存在误差的浅表层速度模型嵌入初始模型的浅层部分。在反演时,从地表进行计算,但不对浅表层速度进行修正。图3(b)是在不准确的浅表层速度模型下反演得到的速度模型,由于浅层速度误差不断传递,导致深层速度模型呈现较大误差;图3(d)是利用反演速度模型得到的深度偏移剖面,在最终偏移剖面上可看出地下构造发生畸变,产生了假象。

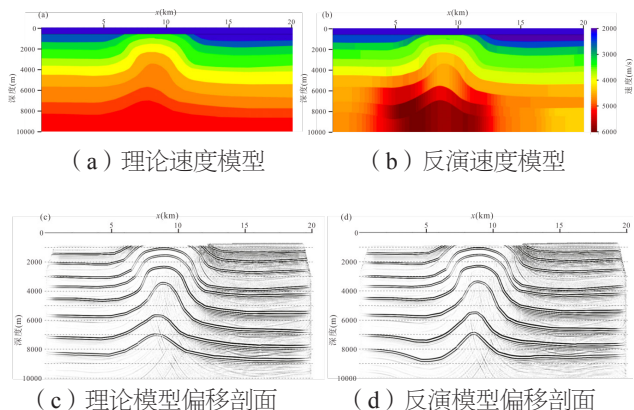


图3 模型速度及偏移剖面

浅层由叠加速度转化的速度模型不能满足深度偏移速

度模型的精度。在地震数据中,初至波是从炮点出发,在近地表传播,最先到达接收点的地震波,包括了直达波、回折波、临界折射波等。相比反射波,初至波往往能量强,信噪比高,易于识别。初至波在近地表传播过程中携带大量近地表速度信息,因此利用初至波层析可有效解决复杂近地表速度建模问题。同时,初至波反演不需考虑地下反射层,认为近地表是连续介质,这就降低了对初始速度模型的要求。因此,初至波层析法更适用于浅表层速度建模。

2.3 多尺度网格层析

常规速度扫描方法难以建立精确的速度模型,反射波层析成像可克服这一缺陷。反射波层析成像利用携带深层速度信息的反射波反演速度模型,当地震波在炮点激发后,从炮点沿射线路径传播至接收点的走势可表示为:

$$t = \int_l \frac{1}{v(x)} ds$$

式中, t 是射线从炮点传播至检波点的走时; l 是射线路径; $v(x)$ 表示在 x 点位置处的速度; ds 是沿射线路径的位移增量。

若将模型离散化,则射线走时可表示为:

$$t = \sum_{l=1}^n \frac{s_l}{v(l)}$$

式中, n 为离散网格数量; s_l 表示在第 l 个模型网格中射线传播的距离; $v(l)$ 表示第 l 个速度网格的速度值。

反演过程中,可令模型计算走时与实际观测走时误差达到最小来迭代更新速度模型。目标函数的最小二乘形式可表示为:

$$o(m) = (t_{\text{cal}} - t_{\text{real}})^T (t_{\text{cal}} - t_{\text{real}})$$

式中, t_{cal} 是根据速度模型正演得到的计算走时; t_{real} 是观测数据; T 为矩阵转置符号。

由此,层析反演方程可表示为:

$$G\Delta m = \Delta t$$

式中, G 为灵敏度矩阵,其元素为模型网格中射线所经路径; Δm 为模型变化量矩阵,即每个网格的速度变化量; Δt 为计算走时与实际走时的差矩阵。

该方程组的未知量是离散网格的数量,方程的个数是射线的条数,因此当射线分布不均匀时,若方程组的未知数个数较多,则会导致反演的稳定性较差。由于地下真实速度存在较剧烈的变化,如果离散网格数量较少,则整体速度场表示的较为平滑,无法体现出速度的细节变化。

为了保证整体反演的稳定性,并在此基础上提高反演速度模型精度,论文使用了多尺度网格层析策略。在迭代反演过程中,先使用较大网格参数;当反演结果收敛后,将整体速度模型进行网格剖分,缩小网格尺寸;同时将剖分后的模型作为初始速度模型,在反演中加入平滑约束项,在原有目标函数基础上,加入后一次与前一次模型变化量最小的条件,则新目标函数为:

$$o(m) = (t_{\text{cal}} - t_{\text{real}})^T (t_{\text{cal}} - t_{\text{real}}) + \mu(m - m_0)^T (m - m_0)$$

式中, μ 为约束项的权重系数,调节反演过程中模型与平滑项所占比重; m 为当前模型; m_0 为当前迭代过程的初始速度模型。

新反演方程为:

$$\begin{pmatrix} G\Delta t \\ \mu(m - m_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta t \\ 0 \end{pmatrix}$$

当网格重新剖分后,有前一次的速度模型作为约束,可确保其收敛到一个可靠位置。

3 低幅度构造成像应用实例

结合上述分析,在红旗地区地震资料重新处理过程中融入以上技术。

五维规则化插值既可在炮检域进行,也可在OVT(Offset Vector Tile)域进行。该工区内炮点分布规律性很差,如果在炮域内进行插值,对于部分区域炮点十分稀疏,插值所使用的点离插值位置较远,其地震道数据与插值位置的相关性差,不能合理地恢复插值位置的地震道信息。而在OVT域,可利用炮检距及方位角信息重构地震道数据,选取更靠近重构地震道位置的相邻地震道,能更好地恢复重构地震道信息。

因为观测系统覆盖次数的不均匀主要是由炮点引起的,为了弥补整体覆盖次数较低的缺陷,论文采用对炮线进行插值加密方式。由于OVT域数据量非常大,因此当在OVT域补全缺失地震道数据后,在炮域对炮线进行加密。

从图4所示的五维规则化处理效果对比叠加剖面可见:浅层(方框内)缺失数据得到弥补;箭头所指位置处同相轴连续性有显著改善;数据整体信噪比得到提高。

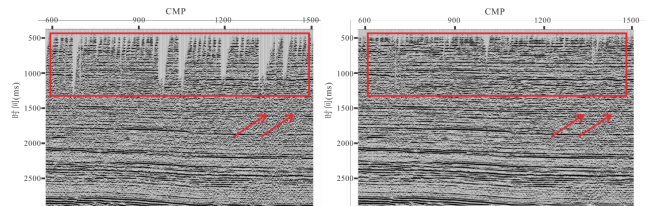


图4 五维规则化处理前(左)、后(右)浅表层叠加剖面对比

再分析五维规则化处理后叠加速度谱(见图5)特征。从五维规则化前叠加速度谱(图5左)看到,由于近炮检距道缺失导致浅层覆盖次数低,能量难以聚焦;观察五维规则化后叠加速度谱(图5右),可见因弥补了近炮检距缺失地震道,其浅层能量团更为清晰,据此可获得更准确的浅表层初始速度模型。因此,五维规则化处理使原本散乱的浅层能量团的聚焦性得到明显提升。在获得浅表层初始速度场后,进行初至波层析反演,以获取更准确的浅表层最终速度模型。

从反演的低降速带厚度和平均速度平面图（见图6）可见，其异常条带与图2显示的可能低速位置有一定的相似性。由于古河道内部泥沙淤积，左图中蓝色方框内低降速带厚度比周围高，右图中蓝色方框内平均速度比周围低，与古河道特征相吻合，说明反演的地表模型可基本反映该区近地表以及古河道引起的浅层速度变化。

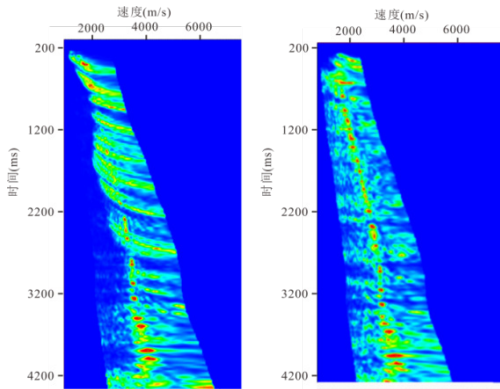


图5 五维规则化前（左）、后（右）叠加速度谱

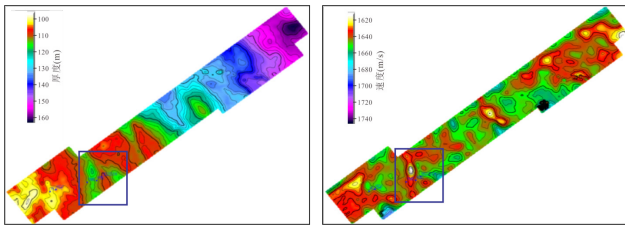


图6 低降速带厚度（左）及平均速度（右）平面图

使用初至波层析反演的表层速度模型计算静校正量，并对数据进行静校正；再将其结果与野外静校正进行对比。图7左图是使用野外静校正的共炮检距域显示，其初至起伏较大；右图是为应用层析反演得到的近地表速度模型计算的静校正量，其初至较平滑，效果优于野外静校正。可见，准确的浅层速度模型能够更好地解决静校正问题，同时也可说明初至波层析成像得到的浅表层速度模型较为准确。将反演得到的浅表层速度模型嵌入后续反演过程中初始速度模型中，并以此为约束可提高后续反演的精度。

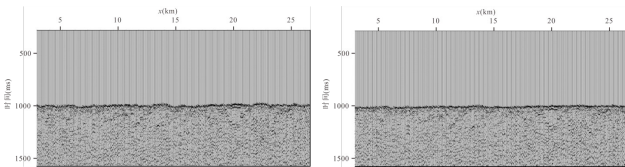


图7 共炮检距域野外静校正（左）及初至层析静校正（右）

以初至波层析反演得到的浅表层速度模型替换叠加速度场中的浅表层速度，将此作为初始模型，并在反演时加入约束，使用多尺度层控网格层析方式，对地下速度模型进行反演。选取距离实钻井最近的测线，最终反演速度模型切片如图8所示。可见，速度场细节部分充分显现，中深部异常

体得到较准确描述，与实钻数据对比，速度场的变化是相符的。

图8中蓝色倒三角为实钻位置，实线为测井区域，在速度切片中沿井位置提取速度参数，反演速度与井速度曲线如图9所示。

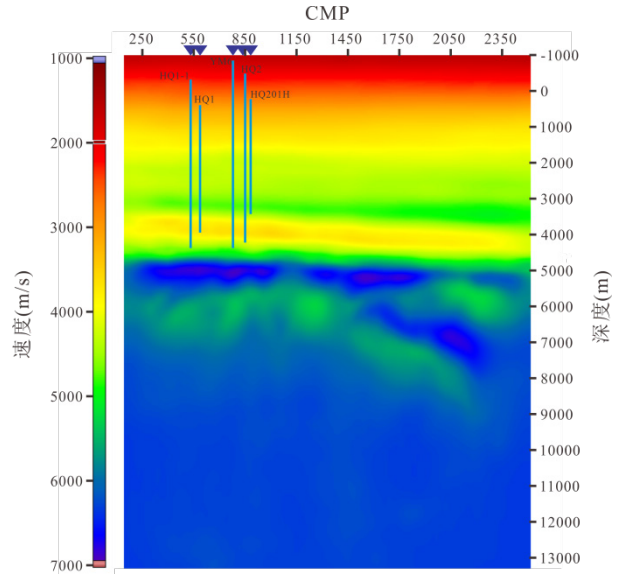


图8 多尺度层控网格层析反演速度场

图9中蓝线为实钻井测井速度曲线，绿线为反演的速度曲线，去除部分测井曲线的异常部分，速度曲线与实钻井测井曲线基本吻合，表明反演的速度场与地下真实情况较为接近，在此速度场下得到的偏移结果理论上是合理的。

图10所示的最终偏移剖面信噪比较高，在局部放大图（见图10右）中清晰可见低幅度构造细节，实际钻井构造位置与剖面中的构造位置误差不足5m，满足对低幅度构造解释的精度要求。

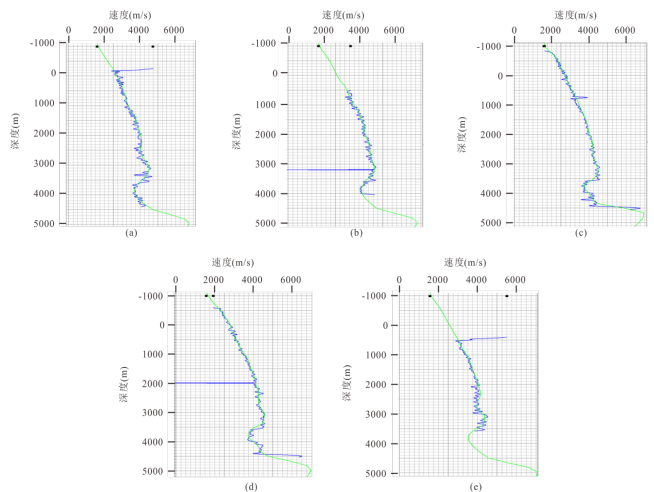


图9 速度模型与测井曲线对比图

注：（a）~（e）依次对应井1~井5；蓝线为实钻井测井速度曲线，绿线为反演的速度曲线。

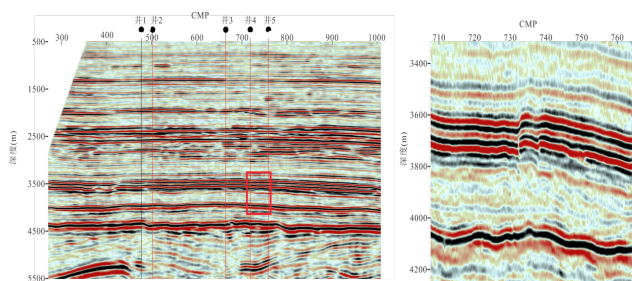


图 10 井 1~ 井 5 连井深度偏移剖面（左）及其局部放大显示（右）

4 结语

针对红旗地区的低幅度构造，论文通过五维规则化技术弥补了近炮检距数据的缺失，提高整体叠加数据信噪比，并提高了数据驱动的速度模型精度，为后续的层析反演提供了合理的初始速度模型。使用初至波层析反演，解决了浅表层速度模型精确构建问题，通过合理的浅表层速度模型，更好地解决了红旗地区的静校正问题。同时，将浅表层速度模型嵌入整体速度模型，提高了整体速度模型中浅表层速度的

准确度，降低了浅表层速度误差对深部速度的影响，进而保证了深部速度场的正确性。此外，使用多尺度层控网格层析反演技术，将速度网格由大到小逐步反演精细的深层速度模型，得到了合理的深度偏移速度场，提高了整体的成像精度，清晰地刻画了该区低幅度构造细节特征。

参考文献

- [1] 方光建,曾永军,孔令洪.南美前陆盆地斜坡带低幅度构造的识别方法[J].石油地球物理勘探,2010,45(增刊1):134-136.
- [2] 白晓寅,黄玉,陈永波,等.低幅度构造—岩性油气藏识别技术[J].石油地球物理勘探,2012,47(2):291-297.
- [3] 漆立新.一种提高低幅度构造分析的方法——以塔里木盆地SDQ为例[J].工程地球物理学报,2005,2(3):228-231.
- [4] 梁顺军,肖宇.库车坳陷西秋构造带盐下低幅度构造圈闭研究及勘探思路[J].中国石油勘探,2012,17(1):19-24.
- [5] 管文胜,段文胜,查明,等.利用基于模型的层析速度反演进行低幅度构造成像[J].石油地球物理勘探,2017,52(1):107-113.
- [6] 詹仕凡,陈茂山,李磊,等.OVT域宽方位叠前地震属性分析方法[J].石油地球物理勘探,2015,50(5):956-966.