

# 井间地震技术在永新地区的应用

左建军<sup>1,2</sup>, 林松辉<sup>2</sup>, 孔庆丰<sup>2</sup>, 魏国华<sup>2</sup>, 魏洪泉<sup>2</sup>, 李九生<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257022)

**摘要:** 根据永新地区的测井资料和地质特点, 设计了有利于该地区井间反射波成像的观测系统。采用最小平方共轭梯度法进行速度层析反演, 得到井间反射波成像的速度模型, 利用 VSP-CDP 成像与克希霍夫偏移相结合的方法对井间地震上行反射波进行精细成像。井间反射波成像剖面反映了丰富的层间信息, 解决了该对井间存在的油水关系矛盾。

**关键词:** 井间地震; 观测系统; 层析成像; VSP-CDP 成像; 克希霍夫偏移

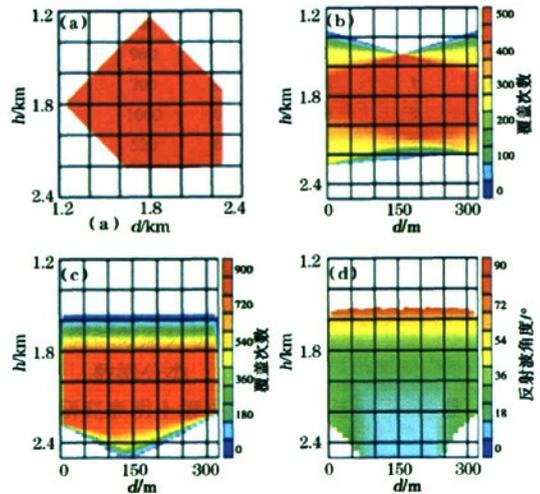
**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2009)05-0557-05

中国东部在经历了 40 多年的勘探开发后, 老油气田的剩余油气资源开发难度日益增大。东部的几百个老油田均已进入高含水甚至特高含水阶段, 采收率远低于国外平均水平。努力提高采收率, 挖潜增产, 稳定东部老油田的产量, 对于促进我国社会与经济的发展, 具有深远的战略意义。

永新区块为古近系中深层三角洲—湖泊相沉积, 代表着中国东部主体油藏类型。为了寻找剩余油、解决开发问题, 胜利油田于 2007 年 12 月至 2008 年 1 月在永新地区采集了 3 对井间地震资料, 对井间地震资料解决实际开发问题的能力进行了研究和探索。

## 1 观测系统设计

永新井间地震观测系统设计<sup>[1-2]</sup>借鉴了垦 71 地区野外资料采集的经验和不足, 并结合正演模拟处理得到的认识, 在设计上进行了优化改进。正演模拟资料处理表明, 利用 45° 以下的小角度反射进行叠加, 其成像剖面频率更高; 垦 71 地区 J41-108 的井间地震数据存在很多小角度反射, 45° 以下仍有较好反射, 说明野外资料采集可以设计更小的人射角来得到小角度反射, 改善最终的成像剖面质量。通过这些认识, 在永新观测系统设计作出 3 点改进: ①针对不同井距设计了更小的人射角度, 人射角度最小为 20°; ②减小了超过临界角的广角反射, 最大入射角度为 75°; ③提高了直达波射线密度和反射波覆盖次数, 目的层段满覆盖且均匀。图 1 为永新



a—观测系统; b—直达波射线密度; c—反射波覆盖次数; d—上行反射波角度

图 1 井间地震观测系统设计

井间地震永 3-147—永 3-检 1 井组的观测系统。

## 2 关键处理技术

永新井间地震数据局部层段原始资料品质偏低, 给资料处理工作带来了一定难度: 浅层初至波难以识别和拾取完整, 去噪难度增大, 工作量成倍增加。为了保证分辨率, 需要提高信噪比, 更要注意保真度, 在资料处理<sup>[3-7]</sup>过程中采取如下应对措施: ①反复拾取初至, 精心构建速度模型; ②认真做好波场分离; ③优选角度进行成像。处理流程图 2。

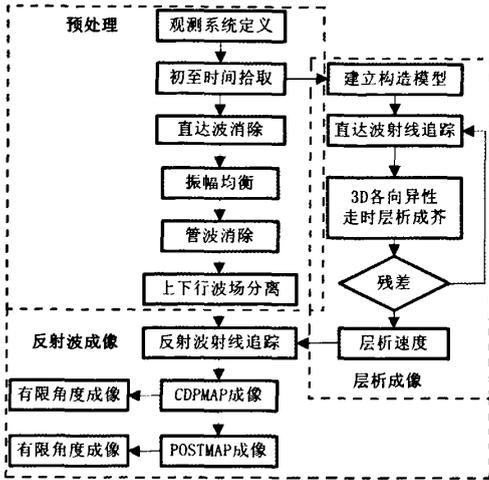


图2 井间地震处理流程

### 2.1 原始资料分析

数据信噪比较低,管波能量较强,浅层资料局部能量偏弱且初至不够连续,中层与深层资料有效信号比较丰富、直达波能量较强且较连续(图3)。有效信号的频宽约为150~800 Hz,主频约为300 Hz。

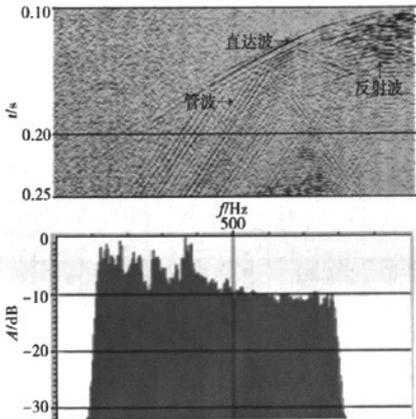


图3 共接收点道集(上)及频谱分析(下)

### 2.2 层析成像

井间地震层析成像是利用井间地震波穿过地层岩石等介质时在时间、振幅、波形等物理量的变化,通过反演得到地层内部物性参数分布,从而揭示其地质构造、岩性分布或矿藏形态的一种方法。在油气田勘探与开发阶段,井间地震层析成像是用来研究井间地层中各种有意义的非均匀性,如油气边界、蒸汽前缘、含油气砂体横向变化等现象。另外,为反射波成像提供可靠的速度模型。

笔者根据测井解释成果划分地层,建立初始构造模型,这样就使层析成像的结果更加符合实际地质构造情况。图4是永新井间地震直达波层析反演

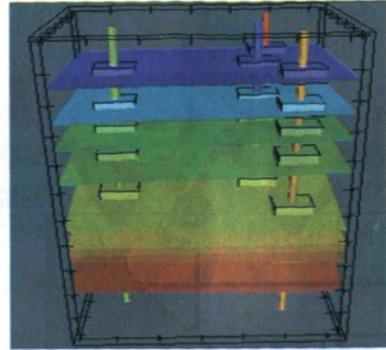


图4 结构模型

所用的初始构造模型。

采用最小平方共轭梯度法进行速度层析反演<sup>[8-10]</sup>;可以通过射线片段的传播角度引入各向异性,从而获得更合理的图像;利用解 Chebyshev 多项式的因子来计算旅行时的残差,改善反演条件;采取某些正则化方法以避免在射线覆盖不足的区域的速度畸变;使用一种连续性策略可以明显减少数据的匹配误差。与上述数据拾取有关的是,在层析反演时,尽量不用接近水平方向的那些射线的旅行时。

这种速度层析反演的一个显著特点是充分利用反射波成像的结果来修改初始模型,以使层析结果更接近实际情况,从而不断提高层析反演的精度。而趋于正确的速度模型又为改善反射波成像质量提供了最有效的基础。这种直达波与反射波反复迭代、相互利用、相互验证的方法贯穿于资料处理的全过程。

在实际层析成像时,利用均方根时差来判断算法收敛程度,即均方根残差小于一个采样间隔,即0.5 ms。此外,通过层析结果与井旁声波测井速度的趋势进行比较,当层析速度与声波速度吻合较好时,层析成像效果为最佳,即得到了分辨率较高的层析反演成果。图5是一对井的层析反演剖面,与井

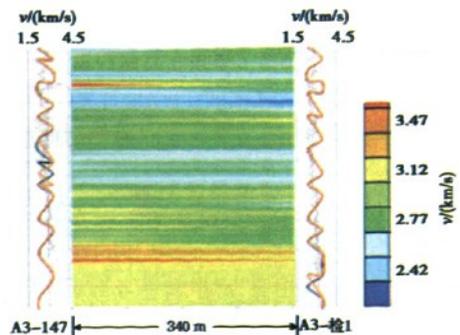


图5 层析速度

旁声波速度曲线吻合较好,残差达到 0.1 ms,其 6 次迭代的均方根误差分别为 0.711 53、0.480 26、0.270 69、0.156 56、0.109 09、0.085 11 ms。

### 2.3 反射波成像

井间地震反射波成像利用上行反射波进行成像<sup>[11-12]</sup>。波场分离是井间地震反射波资料处理的一个重要环节,就是要从井间地震波场中提取出反射波信息。在原始道集上消除直达波、管波,再利用

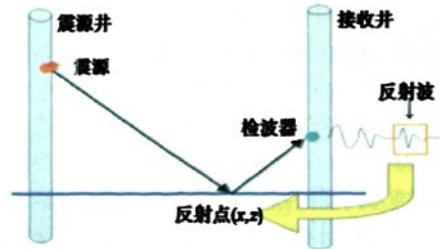


图 7 CDP-MAP 变换原理

上下行反射波的视速度相反的特点,进行上下行反射波场的分离。图 6 是原始道集与上行波波场效果对比,可以看出上、下行波波场分离效果较好。

井间地震反射波成像是在垂直地震剖面(VSP)的基础上由 VSP-CDP 技术发展而来,称为 CDP-MAP 法。这种方法相当于一种坐标变换(图 7),它将每个记录道集中的每个记录时间的样值从深度-时间( $z,t$ )域变换到偏移距-反射点深度域( $x,y$ )或偏移距-双程垂直走时域( $x,t$ )。

在( $x,t$ )域将资料按一定时间间隔将其分成很多小块,通常  $t$  方向的采样间隔  $\Delta t$ , $x$  方向的间隔  $\Delta x$  的大小可根据具体要求选择,如果( $z,t$ )空间样点转换之后落在某一结点(也称 CDP 点)附近,则此样点属于此 CDP 点,如若干样点转换以后都落在该点附近,则它们一起组成共反射点样集。样集内的所有样值叠加以后形成一个样值,形成了该点的 CDP 叠加结果,每个 CDP 都做这样的叠加,就得到了 CDP 叠加剖面(图 8a)。图 8 中的测井曲线包括 SP 曲线、 $v_p$  曲线、GR 曲线和层析成像曲线。

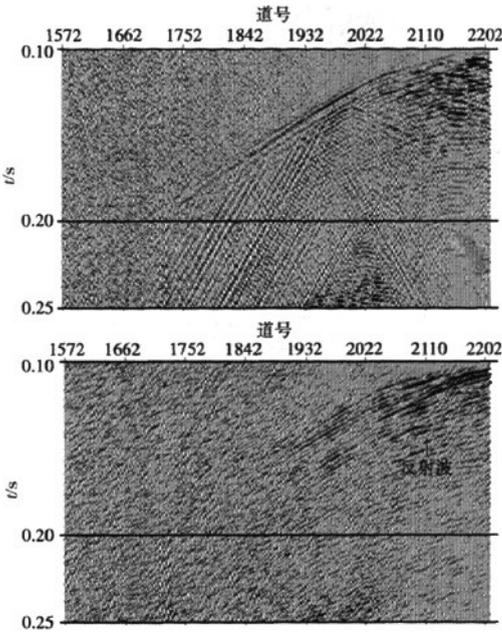


图 6 原始道集(上)及上行反射波道集(下)

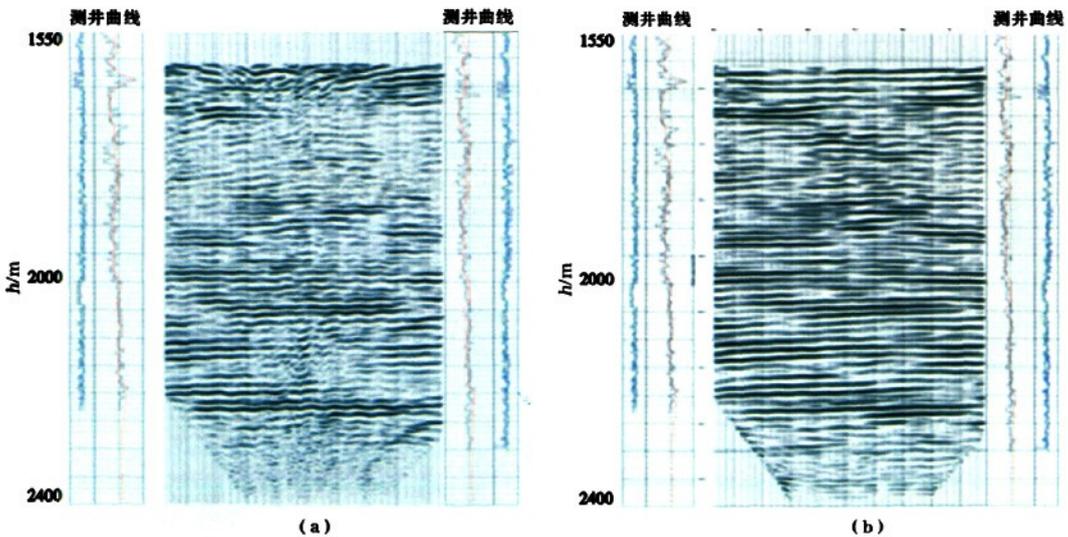


图 8 CDP-MAP 成像(a)和偏移成像(b)剖面示意

在 CDP-MAP 的基础上,再进行小孔径的克希霍夫偏移,使得反射波归位,绕射波较好收敛。众所周知,反射波入射角超过临界角时就会产生广角反射,广角反射情况下的反射波往往会产生诸如波形畸变、频率降低、极性翻转等效应。而井中震源能量辐射水平方向能量较强的特性决定了井间地震角度道集中存在相当部分的广角反射,小角度反射微乎其微,为了消除广角反射对叠加效果的影响,可将大于临界角的反射切除而不使其参与叠加,这便是角度选择的上限;另外,由于角道集的小角度区域多为杂乱噪声干扰,小角度反射较少,为消除噪声对叠加成像的影响,需要确定角度选择的下限。因此,优选角度叠加技术避开了小角度无反射区的杂乱干扰和广角反射的波形畸变区域入射波入射角度,实现了最佳范围的正常反射叠加(图 8b)。

### 3 效果分析

以永3-147—永3-检1为例(图9~图11)进行分析。

井间地震与地面地震对比,井间地震剖面的构

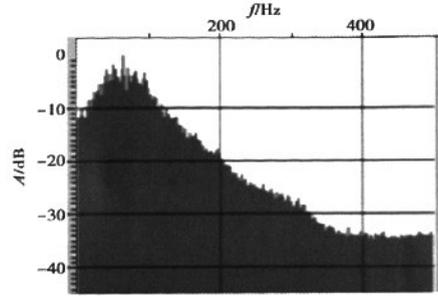


图9 偏移剖面的波数谱

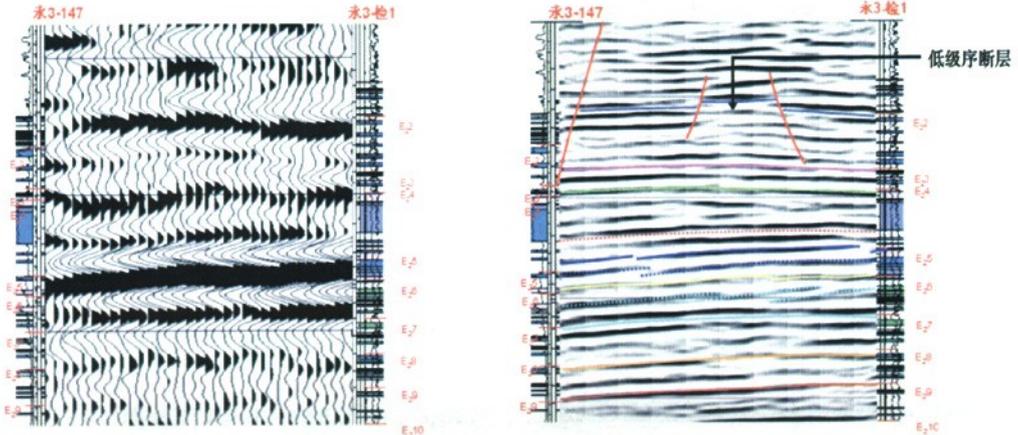


图10 过井三维地面地震剖面(左)及井间地震剖面(右)

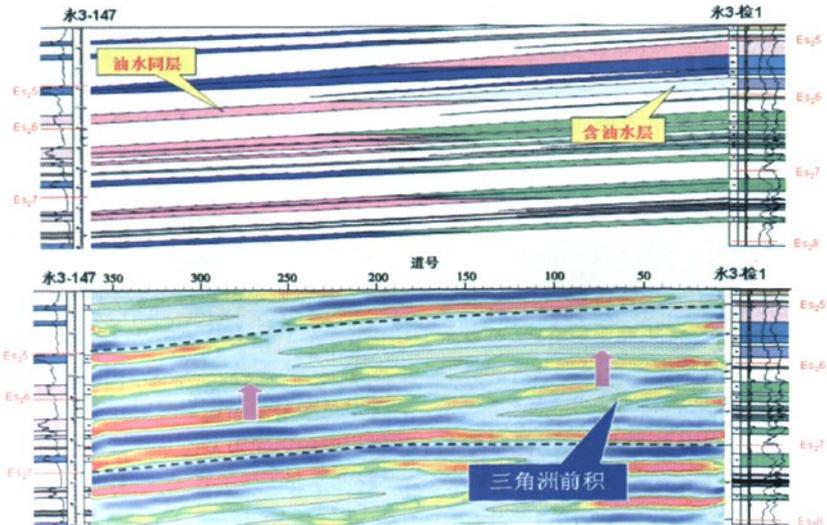


图11 地层对比剖面(上)井间地震振幅属性剖面(下)

造和地层产状与地面地震剖面的大构造背景和地层产状基本一致,但地面地震是若干薄层的低频反射的叠加效应,而井间地震利用其高频优势,可以把地层内部细致的层状特征反映得更清晰。

井间地震具有相对较高的分辨能力,对永 3-147—永 3-检 1 井间地震反射波成像资料(图 9)进行分析,主波数达 80 个/km,高截波数达到 120 个/km(图 9);深-时转换后的时间域资料上主频达到 100 Hz,高截频可达到 150 Hz。在地层速度为 2 600 m/s 的中浅层,可分辨的地层厚度达 3~5 m。

井间 E<sub>27</sub> 砂组在常规三维地震剖面上表现为一个较连续的反射同相轴(图 10),不能分辨砂组内储层的横向变化。从该相位来看两井间也不存在断层或岩性的变化,而在井间地震剖面上反映了丰富的层间信息,可以划分低级序断层。

在井间地震振幅属性剖面上,不仅较清楚地反映出了砂体内幕储层的横向变化情况,可以看出砂层组内部具有前积反射特征,表明该砂层组为前积型沉积的砂体,而且较好地解决了永 3-147—永 3-检 1 井间油水关系矛盾,从地层对比剖面上可见永 3-147—永 3-J1 井间 E<sub>26-2</sub> 小层高部位为含油层,低部位为油层,在常规三维地震剖面上表现为连续的强振幅反射同相轴(图 10),无法解释油水矛盾,但在井间地震剖面上可以看到永 3-147 和永 3-检 1 井解释的 E<sub>26-2</sub> 储层不是同一储层(图 11)。

## 4 结束语

在油田开发中,随着勘探开发程度的加深,对于储层描述的精度要求越来越高,需要描述储层内幕、小断层等精细地质目标。永新区块井间地震技术的应用表明,与地面地震相比,井间地震技术具有高分辨率优势,能够解决油藏开发中遇到的难题。

## 参考文献:

- [1] 廖林昌. 井间地震观测问题初探[J]. 石油地球物理勘探, 1994, 29(5): 574-580.
- [2] 赵群. 井间地震观测系统的物理模型研究[J]. 石油物探, 2004, 43(3): 298-300.
- [3] 唐金良, 曹辉, 王立华, 等. 中值滤波在井间地震资料处理中的应用[J]. 石油物探, 2005, 44(1): 47-50.
- [4] 李小红. 中值滤波在地震资料处理中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(3): 248-250.
- [5] 周建宇, 李建平, 张永辉. 井间地震应用效果分析[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 567-575.
- [6] 李庆忠, 王建华. 井间地震勘探的误区及出路[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(1): 1-11.
- [7] 曹辉, 唐金良, 郭全仕, 等. 井间地震反射波场分离及应用研究[J]. 石油物探, 2004, 43(6): 518-522.
- [8] 吴律. 层析基础及其在井间中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 168-207.
- [9] 陈国金. 井间层析成像质量影响因素分析[J]. 石油物探, 1996, 35(4): 18-28.
- [10] 裴正林. 井间地震层析成像的现状与进展[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 91-97.
- [11] 孔庆丰, 左建军, 魏国华, 等. 井间地震资料处理方法研究与应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(6): 533-537.
- [12] 李建华, 刘百红, 张延庆, 等. 基于井间地震资料的储层精细描述方法[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 41-47.

## THE APPLICATION OF THE CROSSWELL SEISMIC TECHNOLOGY IN YONGXIN AREA

ZUO Jian-jun<sup>1,2</sup>, LIN Song-hui<sup>2</sup>, KONG Qing-feng<sup>2</sup>, WEI Guo-hua<sup>2</sup>, WEI Hong-quan<sup>2</sup>, LI Jiu-sheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield Branch Co., Dongying 257022, China)

**Abstract:** The authors designed the observation system in favor of the reflection wave imaging in Yongxin area, applied the least square conjugate gradient method to tomographic inversion, and obtained the velocity of the crosswell reflective wave imaging. The VSP-CDP imaging and Kirchhoff migration method were employed to get the fine profile of the upgoing wave. The crosswell profile reflects abundant layer information, and the result has solved the problem of the oil and water connection.

**Key words:** crosswell; observation system; tomography; VSP-CDP imaging; Kirchhoff migration

**作者简介:** 左建军(1970-),男,高级工程师,现为中国科学院地质与地球物理研究所博士生,从事井间地震研究工作,公开发表学术论文数篇。