

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1000-3754. 2009. 05. 048

高分辨率三维地震勘探技术及其应用

王建民 勾永峰 周志才 许建军 王兆湖

(大庆油田有限责任公司钻探工程公司地球物理勘探一公司, 黑龙江 大庆 163357)

摘要: 为满足松辽盆地北部薄互层储层不断勘探开发的需要, 在以往研究的基础上以提高地震资料分辨率为核心, 从地震资料采集、处理和解释3个环节的需求及存在的难点出发, 针对激发宽高频地震信号、拓展地震资料有效频宽、提高构造和岩性解释精度等方面的关键技术开展了研究工作。经过研究攻关和大量试验, 形成了一套适合松辽盆地北部薄互层沉积特点的高分辨率三维地震勘探技术系列, 进一步提高了地震资料的分辨率和精度。该技术在松辽盆地广泛应用, 大幅度提高了小断层、小幅度构造的解释精度以及砂岩预测、油气预测的精度, 有效地保证了大庆油田油气储量任务的完成, 促进了大庆油田油气勘探的良性循环。该技术同样适用于地质条件类似的其他薄互层沉积地区。

关键词: 高分辨率三维地震; 薄互层; 储层描述; 延迟激发; 有效频宽拓展; 模式识别预测储层和油气
中图分类号: P613.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3754 (2009) 05-0281-07

HIGH RESOLUTION 3D SEISMIC EXPLORATION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION

WANG Jian-min, GOU Yong-feng, ZHOU Zhi-cai, XU Jian-jun, WANG Zhao-hu

(No. 1 Geophysical Exploration Company of Drilling Engineering Company, Daqing 163357, China)

Abstract: To meet the requirement of continuous development in exploration and development of thin interbed in the north of Songliao Basin, based on the previous research, taking the improvement of seismic resolution as premise, starting from the requirements and difficulties in seismic acquisition, processing and interpretation, the key technology research was implemented in respects of shooting broadband and high-frequency seismic signal, extending effective bandwidth, and improving the interpretation accuracy of structure and lithology. Through numerous researches and experiments, a set of high resolution 3D seismic exploration technical system was established, which is suitable to the sedimentary features of thin interbed in the north of Songliao Basin, and makes a further improvement in the resolution and accuracy of seismic data. Through the wide application of this technology in Songliao Basin, the interpretation accuracy for small faults and low amplitude structure and the prediction accuracy for sandstone and hydrocarbon are significantly improved, effectively ensuring the submission of oil and gas reserves, and promoting the beneficial cycle of hydrocarbon exploration in Daqing oilfield. This technology is also appropriate for other thin-interbed sedimentary area with similar geologic conditions.

Key words: high resolution 3D seismic; thin interbed; reservoir description; delay shooting; effective bandwidth extension; reservoir and hydrocarbon prediction by pattern recognition method

收稿日期: 2009-05-18

作者简介: 王建民, 男, 1961年生, 教授级高级工程师, 博士, 中国石油天然气集团公司高级技术专家, 从事地球物理勘探方法研究。

E-mail: wangjianmin002@cnpc.com.cn

松辽盆地是一个大型陆相薄互层沉积盆地,中浅层地层平缓、构造幅度小,断层多且断距小,油气储层为薄互层,单层砂岩厚度一般仅为几米,且横向分布比较零散。因此用常规地震勘探技术难以对这类储层进行精确描述,进而很难满足精细油气勘探、开发的需要。针对这些特点,大庆钻探工程公司物探一公司从“七五”开始并历经“八五”和“九五”的持续研究,一直围绕解决构造的精细描述和储层的精确预测问题开展高分辨率地震勘探技术攻关,使该项技术有了较大的进展,提高了探井的成功率,指导了油田的开发,发现和查明了一批油气田,取得了较好的地质效果和显著的经济效益,为大庆油田发展作出了相当大的贡献^[1-3]。

但是,随着大庆油田勘探和开发的不断发展,对地震勘探的精度要求愈来愈高,现有的高分辨率地震勘探技术从分辨率和保真度等方面仍难以满足薄互层储层勘探和开发的需要。因此,在“十五”及“十一五”期间,继续围绕地震资料采集、处理和解释3个环节开展了技术攻关工作,取得了丰硕成果,形成了一套适合松辽盆地北部沉积特点的高分辨率三维地震勘探技术。目前,这些技术已在大庆探区多个三维地震区块中进行了应用,提高了地震勘探的分辨率和准确度。

1 主要技术方法

1.1 高分辨率三维地震资料采集技术

高分辨率地震资料采集是获取高分辨率地震资料的基础,要在激发宽、高频信号、减小表层对高频信号的衰减、提高仪器记录微弱高频信号的能力以及压制噪声等方面来提高采集信号的频率成分^[4,5]。在松辽盆地北部,高分辨率地震采集主要存在以下难点:(1)表层速度横向变化快,井深选取及静校正难度大;(2)地层对高频成分吸收衰减强;(3)环境及激发噪声干扰强烈;(4)高频成分信噪比低。针对以上难点、要求以及以往研究存在的不足,开展了研究工作,取得了很好的效果,实现了如下的高分辨率三维地震采集技术进步:(1)高精度表层调查及静校正量提取技术;(2)激发井深综合设计技术;(3)基于延迟雷管的延迟激发技术;(4)中自然频率检波器多只串并联面积组合接收技术;(5)震检联合组合压制噪声技术;(6)较大道密度三维地震观测技术。

1.1.1 高精度表层调查及静校正量提取技术

在表层调查数据采集上,一是加大微测井采集

密度。目前的微测井密度为1个/km²,对于复杂区域,密度达到3~10个/km²;二是科学布设表层调查点。根据地表高程、以往老资料、表层沉积地质资料等进行布设,以控制低速带变化和岩性变化为原则,在横向突变或变化剧烈的地段适当加密测点,从而保证表层调查结果的精度。

在表层结构分析及静校正量提取上,采用自主研究的表层结构分析及静校正量计算技术,可较好地利用小折射和微测井资料进行表层结构分析,还可以提供表层静校正量。其突出优点是利用层位解释交互进行表层剖面解释,这样可以判断单点解释结果的合理性以及测点分布是否满足要求,从而提高了表层结构平面分析的精度,为精确设计井深和计算静校正量提供了高精度的基础资料。后验微测井的资料分析表明:低速带厚度及总厚度误差均小于0.5 m,地层速度误差不大于3%。

1.1.2 激发井深综合设计技术

在激发井深设计上,综合多种方法确定井深:(1)量化方法。根据虚反射影响下传地震波的机理,计算出下传地震波频率与潜水面下激发深度的关系,此关系是确定井深要考虑的重要因素之一。(2)根据潜水面、虚反射界面、表层岩性及速度综合分析确定井深。(3)根据波的运动学和动力学特征综合确定井深。利用微测井剖面,分析激发岩性对采集效果的影响,根据波的运动学和动力学特征综合确定井深。

例如某一试验点的潜水面深度为3 m,结合岩性分析激发深度应在3~14 m。图1显示的是此试验点的微测井记录,可以看到在6.5 m深度激发时,检波器接收到的地震波的频率较高,并且根据地震波的初至时间,可以看到此位置的地层速度较高,经综合分析,激发井深选定为6.5 m。图2为此点不同井深的记录对比,经过了BP 60~120 Hz滤波。可以看到,井深为6 m、6.5 m及7 m的记录要好于井深为12 m的记录,并且以6.5 m为最好。

在定性综合确定激发井深的基础上,研究出定量的实时动态激发井深设计技术,即按照点、线、面的技术路线,实现地震激发井深的综合设计。实时动态激发井深设计技术优点在于实现了高程、岩性、微测井资料、试验点资料等的最佳结合和统一;改进了地震采集野外施工的流程,使生产组织更加流畅,大幅度提高了生产效率。

1.1.3 基于延迟雷管的延迟激发技术

为了实现延迟激发,从而产生能量强、频带宽的

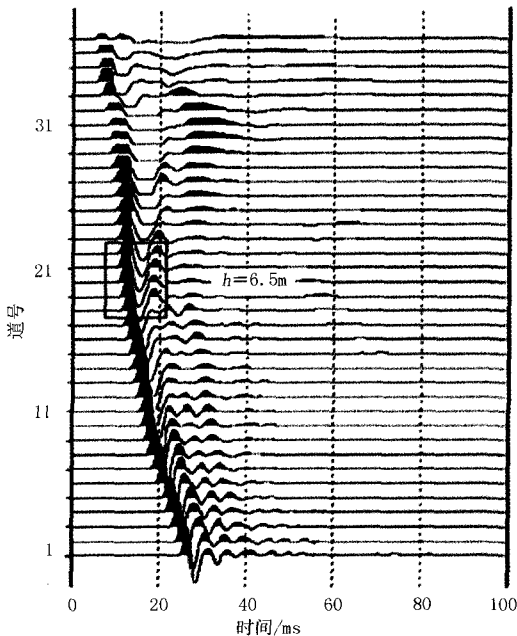


图1 某试验点微测井记录
Fig.1 Microlog in a certain test site

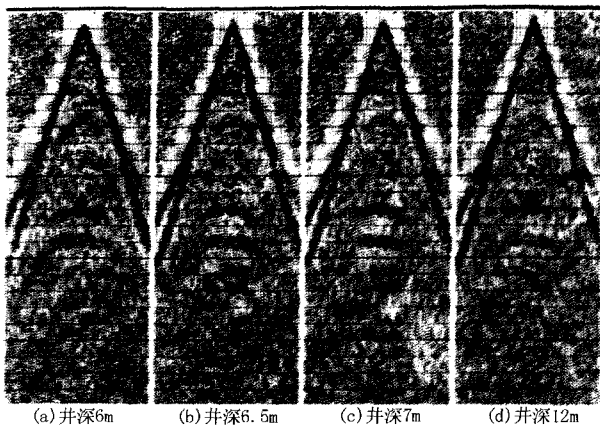


图2 对应图1试验点的不同井深的记录对比
(经过BP60~120Hz滤波)
Fig.2 Comparison of well logging in different well depth in the same test site in Fig.1 (after BP filtering (60-120 Hz))

地震波,提出了用延迟雷管实现延迟激发的方法。通过攻关,研制出了精度在 0.2 ms 以内的延迟雷管,对于普通爆炸机可同时引爆 15 发以上,且性能稳定,从而为延迟激发奠定了基础,并深入分析研究了药包间的黏滞距离,结合表层岩性分析,形成了延迟地震激发技术。图 3 是延迟激发单炮扫描记录,可以看到,在 100 ~ 200 Hz 档的扫描记录上仍然存在可靠的 T_2 层反射,取得了很好的效果。

1.1.4 较大道密度三维地震观测技术

道密度是指每平方千米内的地震观测总道数,

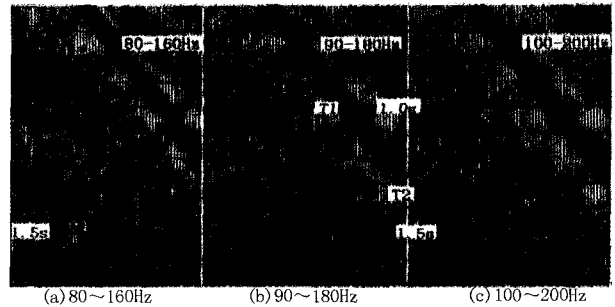


图3 延迟激发单炮扫描记录
Fig.3 Single shot scanning record under delay shooting

它涉及了面元和覆盖次数 2 个参数,面元越小,覆盖次数越高,道密度就越大。它能够可靠地指示三维地震勘探潜在的质量^[6],道密度越大,地震资料的信噪比和分辨率就越高。大道密度三维地震观测技术是指采用小的面元、较高覆盖次数、单点或小组合基距接收提高地震数据品质的地震观测技术。通过不断研究和实践,近几年高分辨率三维地震生产已经呈现了道密度持续增大的发展趋势,面元由过去的 20 m × 30 m、25 m × 25 m 发展到现在普遍采用的 20 m × 20 m,覆盖次数由过去的 80 次左右发展到现在的 100 次左右,道密度由过去的 128 000 道/km² 左右发展到现在的 250 000 道/km² 左右。2008 年在大庆长垣萨尔图油田进行的高密度观测高分辨率三维开发地震面元为 10 m × 10 m,覆盖次数为 80,道密度达到 800 000 道/km²,有效保证了地震资料质量的普遍提高。

1.2 高分辨率三维地震资料处理技术

高分辨率地震资料处理是高分辨率地震勘探的关键,要在噪声衰减、球面扩散校正、吸收补偿、同相叠加、提高高频端信噪比及拓宽有效频宽等方面来提高地震资料的信噪比、分辨率及保真度,从而为地震资料解释打下坚实的基础。针对这些问题,开展了攻关研究,取得了很好的效果,形成了如下的高分辨率三维地震处理技术:(1)层析折射静校正技术;(2)高保真叠前噪音衰减技术;(3)振幅补偿处理技术;(4)高保真拓展有效频宽技术。

1.2.1 层析折射静校正技术

近地表(特别是低速带)结构的纵横向变化大,对地震资料处理效果影响大,解决近地表的静校正难题,是地震资料处理的关键环节之一。层析折射静校正技术利用折射波初至旅行时,采用梯度法与遗传算法联合反演准确求取近地表模型,并计

算低速带静校正量，以解决由于低速带变化引起的静校正量对地震剖面的影响。该算法利用了梯度法的收敛速率高和遗传算法全局最优的优点，同时回避了它们各自的弱点，从而减少了多解性，使求取的低速带模型更加准确，计算的静校正量在实际应用中效果良好。另外，利用滚动时窗能量比方法确定初至时间，实现了初至自动拾取，并且精度较高，大大提高了工作效率。实际应用表明，采用自动初至拾取比手工拾取效率提高 10 倍以上，处理剖面与绿山折射静校正相比质量得到明显改善(图 4)。

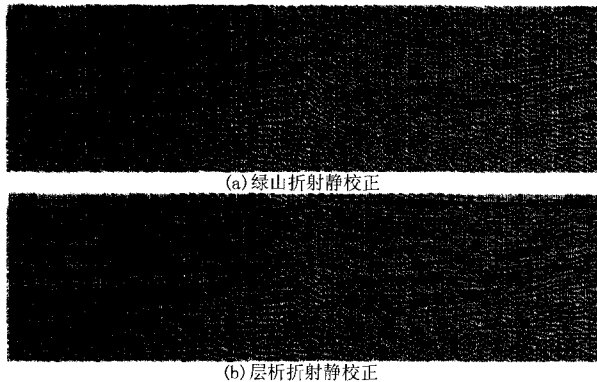


图4 层析折射静校正与绿山折射静校正剖面对比
Fig.4 Profile comparison of the tomographic refraction statics and the green-mountain refraction statics

1.2.2 高保真叠前噪音衰减技术

在信号相对保真的条件下消除面波的关键是对面波的估计。要求这个估计中不含反射信号，且尽可能与面波接近。面波虽然是规则噪声，但其视速度是渐变的，且通常在炮集记录中有多组面波，这给提取面波带来困难。为此，研究成功了基于非线性变换的 K-L 分解叠前去噪技术及高保真非线性约束面波衰减技术，取得了较好的效果。

基于非线性变换的 K-L 分解叠前去噪技术是采用非线性变换方法，把实际的面波弯曲同相轴转换为变换域内的水平直线，在变换域内，面波成为能量很强的水平同相轴，反射波成为弱倾斜同相轴。然后对变换域内的数据进行 K-L 分解，提取主分量所对应的相干成分，然后作反变换就得到面波的估计，再从原始数据减去面波得到去噪后记录。经实际应用可知，该技术在有效信号损失非常小的前提下基本消除了原始单炮记录中的面波和折射波等相干干扰波。图 5 为利用此技术消除面波的一个实例。

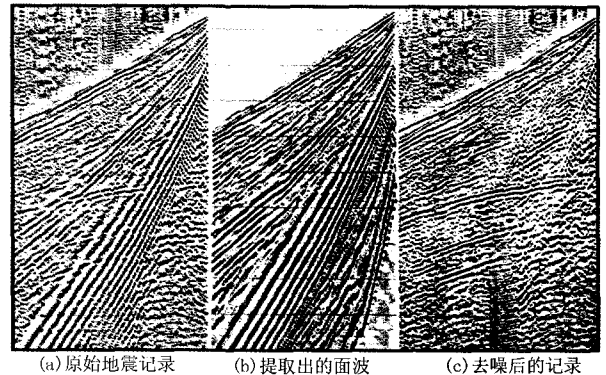


图5 用基于非线性变换的K-L分解叠前去噪方法消除面波
Fig.5 Surface wave elimination using the pre-stack denoising method based on nonlinear K-L transform

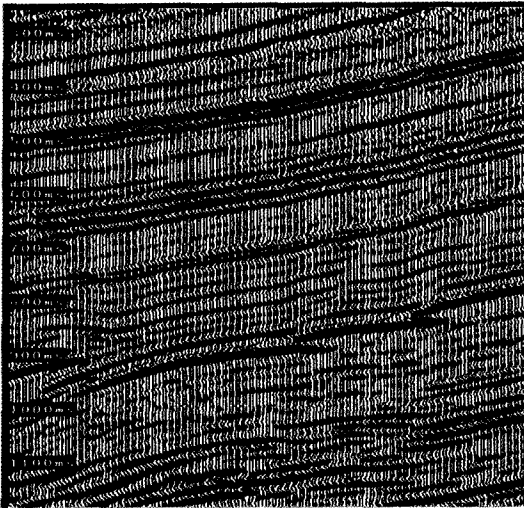
1.2.3 高保真拓展有效频宽技术

高分辨率处理的核心是进一步拓展有效频带的宽度，保护和扶植信号的高频成分。反褶积处理是提高地震资料分辨率的重要方法，为此进行了重点研究，形成了多域统计地表一致性压缩子波技术、组合反褶积逐级压缩子波技术、叠后剩余子波反褶积技术、提高高频段信噪比及压缩子波技术。

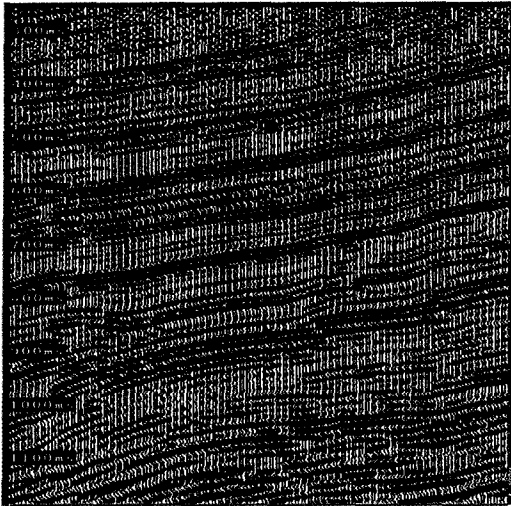
实际资料的共炮点与共检波点、共中心点、共偏移距因产生的机理不同而对地震子波的影响不同，其自相关子波差异也较大，采用由炮点、检波点、共中心点及共偏移距 4 种因素所造成的综合子波进行子波压缩效果不理想^[7]。为此，研究采用地表一致性反褶积原理，实现共炮点提取子波，进行炮点虚反射的压缩，在此基础上再对共检波点、共中心点及共偏移距提取综合子波，配以最小相位，用作该道的反褶积因子，再进行子波压缩，这就是多域统计地表一致性压缩子波技术。该技术提取的子波稳定，子波压缩后的资料保真度、分辨率均较高。图 6 显示了利用常规反褶积处理得到的剖面与多域统计地表一致性压缩子波技术得到的剖面对比情况，可以看到，经后者处理后，剖面分辨率得到明显地改善。

1.3 高分辨率三维地震资料解释技术

对于高分辨率地震资料解释，存在以下特点：由于剖面频率增高，从而提高了对层位标定和对比技术水平的要求；由于小断层反映与岩性变化特征相似性增强，从而增加了两者的区分难度；由于要对油层顶面进行构造成图，从而增加了构造精细刻画难度；岩性解释的目标层变薄，从而对储层预测的方法和精度提出了更高的技术需求；对隐蔽油气藏的识别和评价是高分辨率地震资料解释需要完



(a) 常规反褶积



(b) 多域统计地表一致性压缩子波

图6 常规反褶积处理与多域统计地表一致性压缩子波技术处理的剖面对比
Fig.6 Comparison of the profile from conventional deconvolution processing and multi-domain statistical surface consistent wavelet processing

成的工作。根据以上特点,通过攻关,实现了如下的高分辨率三维地震解释技术进步:(1)高精度层位标定技术;(2)提高小断层解释精度技术;(3)地震属性相似性分析技术;(4)3D AVO分析技术;(5)高精度模式识别储层和油气预测技术。

1.3.1 高精度层位标定技术

高精度层位标定是高精度地震解释的基础,而合成地震记录的制作精度和准确度是进行高精度地震资料解释过程中至关重要的一步。由于合成地震记录的制作是由于波和反射系数褶积而成,反射系数是由测井曲线求得的,合成地震记录与实际地震

记录的符合度,很大程度上与测井资料有关。由于测井资料受到井眼环境的影响,井径条件越差,对测井资料的影响程度越大。因此,在制作合成地震记录过程中,必须对测井曲线进行编辑校正及修饰性处理,实现合成地震记录波形显示清晰,并与实际地震剖面达到最佳的匹配。研制的高精度合成地震记录制作软件包可以对测井曲线进行编辑、校正、滤波等处理,可制作时变子波合成地震记录及对合成地震记录进行小波变换等修饰性处理。同时,采用密度与声速计算反射系数制作合成地震记录,利用VSP测井资料并选用变频率子波制作合成地震记录,从实际地震剖面提取子波制作合成记录。此项成果在实际应用中取得了较好的效果,制作的合成地震记录与地震剖面有较好的对应,具有较高的精度,从而提高了层位标定精度。

1.3.2 提高小断层解释精度技术

在断层解释中,除了采用同相轴错断、扭曲、合并、分叉、数量变化、振幅突变等方法外,对断层的剖面解释及平面组合进行了更深地研究。首先,通过正演模型论证了剖面视频率与实际分辨小断层能力之间的数量关系,为小断层的解释提供了理论基础。在此基础上,通过进一步研究,形成了提高小断层解释精度技术,包括断层的剖面解释技术、断层的平面组合技术及相干体切片断层多边形提取技术。断层剖面解释技术采取抽道显示的方式进行大断层的断面闭合,综合上、下地层的变化确定小断层,多剖面连续观察确定小断层,采用大比例、变密度剖面解释小断层。断层的平面组合技术借助层剩余时差图及层倾角图判断断层的平面组合。在高分辨率三维地震资料的断层解释上,利用层剩余时差图、层倾角图对断层的显示更加细微,不但可以利用它们进行断层的平面组合,而且可以发现在层位对比中漏掉的小断层。层振幅图、层曲率图及层边棱检测图等也都具有上述作用。另外,利用三维可视化、相干数据体水平切片及厚度切片,在层位对比之前便可以了解断层的平面展布规律,并进行断层平面的初步解释。

1.3.3 地震属性相似性分析技术

地震属性相似性分析技术是多种地震属性信息综合分析的一种有效的技术^[8]。此技术是利用统计、类比、叠加等手段以及某一已知井信息将所选择的地震属性信息综合到一张图中,这样的图称为相似图。此相似图上每一点的值表示的是研究区中这一点与选定的已知井位置的相似程度,而选定的

井一般为油气井,因此,根据相似程度不同可以进行有利区带和不利区带的预测。此技术需要的数据是一组能反映研究区中目标储层特性的沿层地震属性值、所选的某一已知井的坐标以及由此井出发确定的基准区的范围。这里,把选定的已知井称为控制井。产生相似图需要3个步骤,分别为各属性控制井基准区内的基准值计算、按基准值对相应属性上所有点进行分属以及将分类后的所有属性的平面图相加。

采用地震属性相似性分析技术进行油气预测,首先要选择地震属性参数,从众多的地震属性参数中优选出能充分反映油气储层特征的地震属性进行分析。为此,采用了在较早时间提出的井旁地震道逐样点地震属性对比法^[9]。对于控制井基准区范围的确定,提出了相干性分析方法。以控制井为中心,选取一系列分析半径;对于每一分析半径内的地震属性值,求取相似性系数,然后进行分析。在井附近,相似性系数要高,但随着分析半径增大,地层情况发生变化,相似性系数就要降低。根据相似性系数从高到低的变化,找到相对突变点,从而确定控制井基准区的半径。

1.3.4 3D AVO 分析技术

AVO 分析技术是通过叠前地震资料反射振幅随炮检距变化的特征进行分析,以此对储层中流体的性质和岩性作出判断,其理论基础是 Zoeppritz 方程。研究区域选在松辽盆地北部的宋站地区。首先利用正演得到的过井 CMP 道集以及实际的 CMP 道集数据对宋站地区含气砂岩的 3D AVO 特征进行分析,得出了含气砂岩在 CMP 道集上的反射振幅具有随炮检距的增大而增大的特征。然后,在上述结论的指导下利用比较远近炮检距范围叠加得到的剖面来识别 3D AVO 异常,从而指出可能的含气范围。利用此项技术对宋站工区扶余油层 3D AVO 异常进行了识别,并得到了 AVO 异常体的可视化透视图,如图 7 所示。图 7 指出了可能的含气范围,并与已钻井完全符合,取得了较好的效果。

1.3.5 高精度模式识别储层和油气预测技术

对于多种地震属性组合应用预测储层和油气,通常采用多元回归、神经网络等模式识别方法^[10-12]。根据样本空间的复杂性,提出了双重神经网络模型,可使得非紧致集的样本模式类在一定程度上实现紧致化,具有紧致集的特征,从而提高神经网络分类预测的精度。实际应用表明,双重神经网络的这一设计思想适用于地震勘探储层预测的

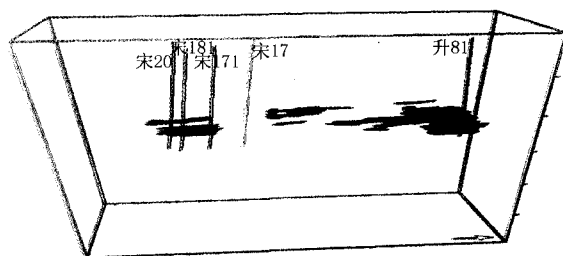


图7 宋站工区扶余油层AVO异常区

Fig. 7 AVO abnormal in Fuyu oil layer in Songzhan

实际需要。

双重神经网络是由2种神经网络组成。其中,输入层由自组织神经网络(SOM)构成,输出层由BP网络构成。这种神经网络的工作过程分为2个阶段:第一个阶段为学习期,首先对输入的已知样本用自组织神经网络进行分类,并得到自组织神经网络的权值,然后对每一分类结果分别用BP网络进行训练,得到各BP网络的权值;第二阶段为工作期,用学习得到的2种网络的权值,对所有输入的信息作出预测。对于地质条件复杂,储层及围岩性质变化较大的地区,其地震特征也表现得非常复杂,比如:储层性质相同,其地震特征可能相差较大,而储层性质不同,其地震特征可能很相近。这样,单独使用某一种网络难以得到正确的预测结果,而使用这种双重神经网络,既可以弥补这2种神经网络的局限性,又充分发挥了它们各自的优点。

2 实际应用及效果分析

2.1 提高了地震勘探的分辨率和精度

单炮记录采集频率 T_1 反射层可达 70 Hz 以上, T_2 反射层可达 60 Hz 以上,地震剖面视主频 T_1 反射层可达 70 ~ 80 Hz、 T_2 反射层可达 60 ~ 70 Hz,能发现断距为 3 ~ 5 m 的小断层和幅度为 5 m 左右的小幅度构造(图8、图9),可有效识别 5 m 以上的薄砂体,地震深度符合率可达 95% 以上,砂岩预测符合率可达 80% 以上,油气预测符合率可达 75% 以上。

2.2 提高了钻井成功率

探井成功率从 40% 左右提高到 70% ~ 80%,单井控制面积从 4 ~ 5 km² 提高到 7 ~ 8 km²,单井控制储量从 (150 ~ 200) × 10⁴t 提高到 (250 ~ 350) × 10⁴t。

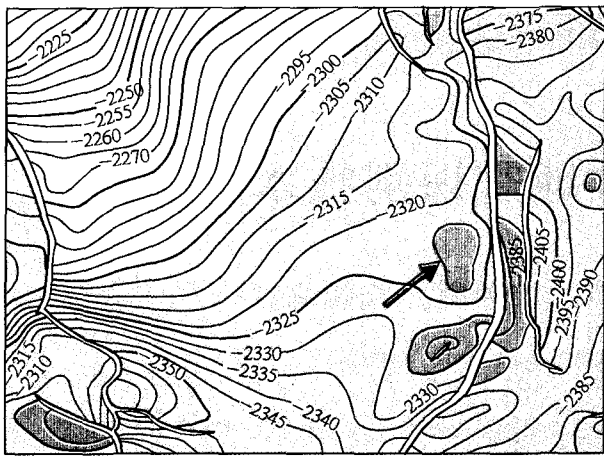


图8 幅度小于5m的小幅度构造在构造图上的显示

Fig.8 The showing of low amplitude structure with amplitude less than 5m in structural map

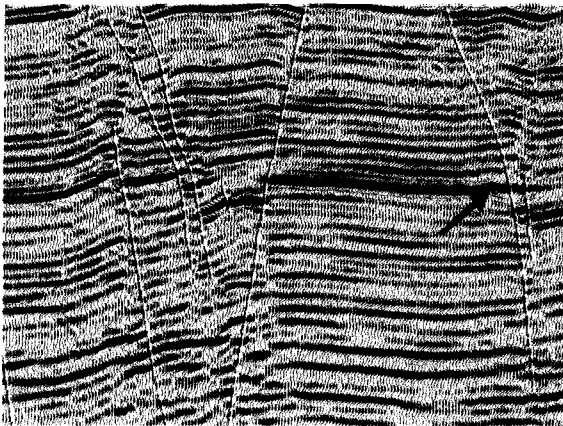


图9 幅度小于5m的小幅度构造在地震剖面上的显示

Fig.9 The showing of low amplitude structure with amplitude less than 5m in seismic profile

3 进一步攻关方向

松辽盆地中浅层薄互层高分辨率地震勘探技术目前已达到国内领先、国际先进水平。但是, 现有的高分辨率地震勘探技术从分辨率和保真度等方面仍不能完全满足薄互层油层勘探开发的需要, 特别体现在长垣油田及其底部和两侧的扶杨油层的勘探开发, 需要继续针对其不足开展研究工作。在“十一五”末和“十二五”期间, 要通过开展高密度地震勘探技术、提高采集频率的高性能震源激发技术、地震资料各向异性保真处理技术、地震资料

高保真拓展有效频宽技术、井震联合提高地面地震资料成像精度和分辨率技术、大庆长垣中浅层提高地震分辨率处理技术、“三低”薄互层储层精确识别和预测技术及老油区剩余油分析预测技术等项研究工作, 继续提高松辽盆地中浅层薄互层高分辨率地震勘探技术水平, 使其达到总体国际先进、部分国际领先水平, 为大庆长垣油田密井网开发老区剩余油的挖掘以及松辽盆地扶杨油层的有效开采, 为达到有效识别断距3 m以上断层、厚度1 m以上储层的认知程度、提升5%的可采储量采收率的目标, 为进一步提高松辽盆地中浅层可采储量动用率及大庆油田的可持续发展提供强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 唐建人, 李勤学, 陈道宏, 等. 高分辨率地震勘探技术在大庆油田的应用 [M] // 苏树林, 萧德铭. 大庆油田发现40年论文集. 北京: 石油工业出版社, 1999: 184-195.
- [2] 勾永峰, 陈道宏, 杨文采, 等. 用于储层描述的反射地震方法与应用 [J]. 石油物探, 1999, 38 (1): 31-43.
- [3] 勾永峰, 刘振彪, 张克民, 等. 大庆探区高分辨率及深层地震勘探技术 [M] // 中国石油天然气集团公司, 中国石油天然气股份有限公司. 中国石油勘探与生产工程技术座谈会报告集. 北京: 石油工业出版社, 2004: 92-108.
- [4] 蒋连斌, 刘财, 王建民. 高分辨率地震勘探资料采集技术 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2000: 73-94.
- [5] 李庆忠. 走向精确勘探的道路 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 45-58.
- [6] Lansley M R. CMP fold: A meaningless number? [J]. The Leading Edge, 2004, 23 (10): 1038-1041.
- [7] 田梦, 张海生, 万传彪, 等. 宽方位角地震勘探与常规地震勘探对比研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26 (6): 138-142.
- [8] Michelena R J, Ezequiel G S M, Mariangela C P. Similarity analysis: A new tool to summarize seismic attributes information [J]. The Leading Edge, 1998, 17 (4): 545-548.
- [9] 崔凤林, 勾永峰, 蔡朝晖. 用于火山岩预测的地震属性提取及有效性分析方法研究 [J]. 石油物探, 2005, 44 (6): 598-600.
- [10] 勾永峰, 年静波, 刘喜武, 等. 利用小波参数进行油气预测 [J]. 石油物探, 1996, 35 (4): 52-58.
- [11] 张向君, 李勤学, 崔凤林, 等. 模糊神经网络油气预测 [J]. 石油物探, 1998, 37 (2): 49-55.
- [12] 邹才能, 张颖. 油气勘探开发实用地震新技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 218-237.

编辑: 李安峰