

·勘探技术·

叠前叠后联合反演技术在油气藏精细描述中的应用

——以东营凹陷永安镇油田永3井区为例

慎国强^{1,2}, 汤 婕¹, 王玉梅², 钮学民², 陈松莉²

(1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石化胜利油田分公司 物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要: 不同的地震反演方法具有不同的适用范围, 叠前和叠后反演成果在单独应用时存在一定的局限性。针对东营凹陷永安镇油田永3井区地质情况复杂, 油气藏精细描述过程中的储层发育特征难以识别的问题, 在岩石物理特征分析、约束模型和算法应用、叠前及叠后成果综合解释分析的基础上, 根据叠前及叠后反演在储层预测和流体描述方面的不同侧重点, 选用统一的地质约束模型和反演算法控制2种反演方法的关联性, 加强了叠前及叠后反演处理成果的一致性和可对比性。开展叠前叠后联合反演技术的研究, 实现了油气藏储层特征及流体特性的精细描述。在永3井区沙二段复杂断块油气藏精细描述实际应用中取得了良好的效果, 沙二段5砂层组的油层预测准确率达到80%以上。

关键词: 叠前叠后联合反演 岩石物理特征 约束模型 地质统计学 油气藏精细描述

中图分类号: P631.44

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)02-0087-04

地震反演是油气田勘探开发过程中重要的油气藏描述技术, 可分为叠前和叠后2种反演。其中, 叠后反演侧重于对储层的识别, 而叠前反演则更多地应用于对流体性质的判别。理论上二者具有一定的继承性和融合性, 但是由于资料不充分、反演算法不统一等因素的影响, 目前叠前反演和叠后反演往往被作为2种独立的反演方法分别加以应用, 从而影响了反演的实际效果。

在东营凹陷永安镇油田永3井区油气藏开发过程中面临着断裂系统复杂、储层厚度变化大以及储层与围岩速度差别小等难题, 单纯依靠叠后或叠前反演均难以实现对储层特征及流体特性的精确描述。为此, 在研究区以地质、测井及岩石物理特征综合分析为基础, 建立统一的地质约束模型和反演算法控制, 通过叠后岩性及叠前多参数反演的结合开展叠前叠后联合反演技术的研究, 得到多种岩石及流体参数, 实现了叠前叠后联合反演技术在油气藏精细描述中的应用。

1 区域概况

永安镇油田构造上位于东营凹陷中央隆起带

东端的环带地区, 自北向南被3条近东西向的二级断层切割成4个台阶带, 总体上分为高、中、低3个构造带, 其内部四级断层的切割作用使得油藏复杂化, 形成了30多个含油小断块^[1-2]。其中, 永3井区作为永安镇油田的开发主体, 以三角洲沉积体系为主, 主力含油层系为沙二段。沙二段可进一步划分为11个砂层组共26个含油小层, 其中5和6砂层组单砂体厚度一般大于12 m, 其他砂层组单砂体厚度则小于8 m。

2 岩石物理特征分析

储层和非储层的岩石物理特征是否具有可识别的差异, 是利用反演方法获得相应岩石物理参数进而对储层进行有效描述的基础。为了分析永3井区进行地震反演的可行性, 对其目的层储层参数及岩石物理特征, 特别是储层及流体的参数敏感性进行了分析。

2.1 岩石电性特征

永3井区数10口井的测井资料中声波时差和自然电位数据较齐全, 但普遍缺乏密度数据。通过对所用的测井速度及波阻抗曲线进行标准化处理,

收稿日期: 2013-12-27。

作者简介: 慎国强, 男, 高级工程师, 在读博士研究生, 从事地震资料处理及地震反演研究。联系电话: (0546) 8793310, E-mail: fsshgq@163.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“863”项目“油藏地球物理关键技术”(2011AA060300)。

得到研究区特征一致的基础资料,同时对自然电位曲线进行泥岩基线校正和归一化处理。在此基础上,对测井数据进行统计分析,沙二段储层与围岩参数的对比结果显示其自然电位曲线与砂、泥岩的对应关系较好,存在较好的储层识别能力;但砂岩和泥岩的速度具有较大的重叠区域,储层与围岩的速度没有明显差别,表明利用波阻抗反演结果进行储层描述会存在多解性。基于以上分析结果,选择叠后岩性反演方法来描述储层特征。

2.2 岩石物理参数正演模拟

为了进一步分析研究区储层参数特征,开展了以岩石物理参数正演模拟为基础的储层参数分析。利用永3-检1井的纵波声波时差、密度、岩性、孔隙度和含水饱和度测井曲线,求取岩石的横波速度,并应用纵波与横波速度计算得到泊松比^[3-4]。永3-检1井岩石物理正演模拟道集显示,油层底部的振幅随偏移距增大而增大,该特征与实际井旁地震道集显示的特征基本一致,表明叠前地震道集的振幅具有随偏移距变化的特征。将求取的永3-92井岩石物理参数进行综合交会分析,结果(图1)表明,不同类型的地层和流体的泊松比存在较大差异。其中,油层具有相对较低的泊松比。

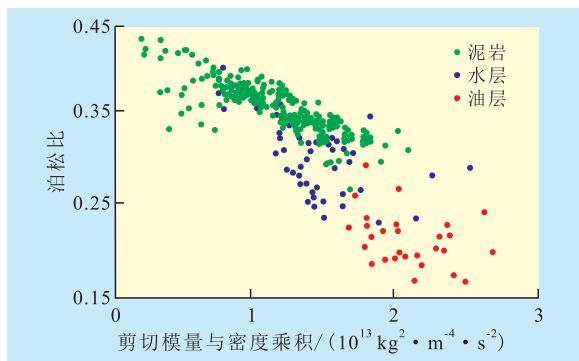


图1 永3-92井岩石物理参数综合交会

因此,根据叠前地震道集的振幅随偏移距变化的特征以及泊松比等参数与岩性、流体具有良好对应关系的特性,可以通过叠前地震反演进行储层和流体精细描述。

3 多参数约束模型建立

永3井区断裂系统复杂,给叠前叠后联合反演初始模型的建立和约束控制造成了很大的困扰。为此,在精细构造解释和储层标定的基础上,开展了复杂断层框架控制下的多参数约束模型的建立和研究^[5]。

3.1 基于速度控制的储层精细标定

地震地质标定作为储层描述的基础,主要目的是建立储层的地震反射特征(时间域)与测井参数(深度域)之间的响应特征。针对永3井区储层纵、横向厚度变化快的问题,对反演所用测井数据进行了精细标定和对比分析,严格控制标定速度和小层对比关系,标定结果最终要求精细到储层单元。首先,以研究区的区域速度背景为参考,对比地震合成记录与实际地震道之间的波组对应关系,调整大套地层的平均速度,使得所有井标定的时深关系与区域速度关系保持一致,通过测井标定速度关系对比和平面速度分析,较好地控制标定的效果;其次,结合沉积研究和小层对比,在保证单井合成记录以及时深关系合理的前提下进行调整,使得测井曲线的横向特征符合地质规律。在稳定的时深关系控制下,结合测井岩性参数,以砂层组为单元,精细调整速度关系,严格控制速度调整幅度,进而实现以砂层组为单元的储层精细标定。在此基础上,通过叠前、叠后单井标定相互验证调整,将多口井的标定结果和地震剖面结合进行分析,进一步调整目的储层空间地震响应特征以及构造变化特征之间的关系,使地震与测井信息的对应关系更加合理、准确。

通过单井—二维连井—三维连片实现由点到面、构造—地层—小层的由粗到细的一系列精细标定分析,在永3井区的三维空间形成统一的地震地质储层精细标定结果,将地震与测井数据有机地结合在一起,为地质模型的建立奠定了良好的基础。

3.2 复杂构造框架约束多参数地质模型

建立能够充分反映地下构造、沉积特征的地质初始模型是影响反演结果的关键。永3井区断层对储层和成藏具有明显的控制作用,在精细构造解释的基础上,分析研究区的构造特征及构造层位关系,利用基于地质建模的初始模型建立技术,针对研究区小断层分布范围有限,多为层间断层的特点,采用断层组合、趋势面控制、断面散点平滑等多种断层模型技术,分析断层的组合关系,建立研究区初始约束构造模型。在初始约束构造模型的基础上,选择合适的空间数据加权关系,对叠前及叠后反演需要的纵波速度、横波速度和密度等参数在构造框架约束下的分布情况进行精细对比、调整,保证各项地层参数分布合理,进而获得能够反映目的层段的构造、地层及其横向关系等特征的三维空间多断层控制的多参数地质模型。

4 叠前叠后联合反演

在叠前叠后联合反演过程中,需要选择相同的核心算法确保叠前及叠后反演效果的一致性,提高反演预测准确度。研究区地震反演采用的是基于贝叶斯推论^[6-7]和马尔科夫链的蒙特卡罗法的计算方法。利用该方法建立符合测井、地质和地震数据的地质模型^[8-12],将高分辨率的测井信息以及低分辨率的三维地震信息进行整合,所获得的地质体细节不仅比常规地震反演丰富,而且能够与地质特征充分吻合。基于这种地质统计学方法有助于在叠前叠后联合反演过程中利用吸收地质模型和地震响应的有效信息,加强叠前和叠后反演的信息融合,进而有效地解决不同厚度储层描述的难题。

4.1 联合反演算法原理

基于马尔科夫链的地质统计反演方法主要是应用已有数据信息建立概率密度函数(包括直方图与变差函数),描述每一种输入信息(比如测井曲线,地震数据)的空间概率分布。实际应用时,直方图和变差函数是通过测井分析、岩石物理模型和地质分析来获得。直方图定义任意给定点的属性值的概率分布,而变差函数则给出了地质体在横向和垂向上的规模和分布特征。

在直方图和变差函数分析的基础上,应用贝叶斯推论将多个概率密度函数合并起来,得到基于所有已知和假设信息的后验有条件概率分布函数,其表达式为

$$P(\theta|D) = \frac{P(\theta)P(D|\theta)}{P(D)} \quad (1)$$

式中: $P(\theta|D)$ 为后验有条件概率分布函数; θ 为模型参数; D 为观测数据; $P(\theta)$ 为先验概率函数; $P(D|\theta)$ 为似然函数; $P(D)$ 为模型化常量。

后验有条件概率分布函数表征所有输入概率分布函数的交集。在其控制下,利用基于马尔科夫链的蒙特卡罗法,进行地质统计学协模拟运算,获得统计意义上公平的数据结果,其表达式为

$$P(X_t|X_1, X_2, \dots, X_{t-1}) = P(X_t|X_{t-1}) \quad (2)$$

式中: X 为随机变量; t 为随机变量所处的位置。

由式(2)得到的下一个随机变量只与当前的随机变量有关,而与以前的变量无关,是一个平稳随机过程。

由于地质统计学反演以及协模拟的计算过程

是迭代完成的,其迭代收敛条件是获得的模型与所有的输入地质信息吻合。因此,利用该方法得到的地震反演数据结果具有较高的分辨率和先验数据吻合度。

4.2 基于地质统计学的叠前叠后联合反演

4.2.1 叠后岩性参数反演

岩石物理参数分析结果表明,永3井区砂、泥岩速度差异不明显,单纯依靠叠后波阻抗反演不能解决岩性划分问题,需进行叠后岩性参数反演。根据目的层的沉积特征,对各地层的测井泥质含量进行统计分析,得到相应的直方分布函数和变差函数,并在三维空间进行大量随机模拟,同时加强地震波阻抗约束,进而实现随机模拟波阻抗和岩性反演。叠后随机反演成果(图2)显示,储层识别的最薄厚度可达到4~6 m,特殊条件下(如上、下地层参数差异较大,围岩较厚时)甚至可以分辨更薄的储层且储层横向变化规律清楚。将反演结果与未参与反演的斜井数据进行对比结果表明,验证井数据和井旁反演结果的对应情况良好,描述的砂体吻合程度达到87%。

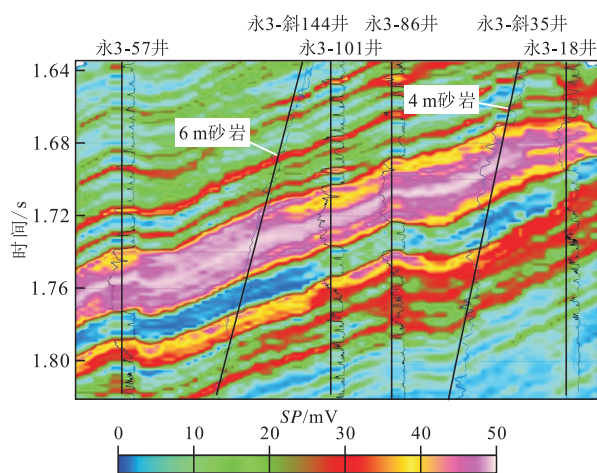


图2 永3井区叠后岩性随机反演剖面

4.2.2 多参数叠前反演

结合永3井区沙二段的沉积特征,对其岩性、纵波速度、横波速度及密度等数据进行统计分析,得到相应的直方分布函数和变差函数,在多个部分角度叠前地震数据的空间约束下,实现基于地质统计学的多参数叠前反演。对研究区各种物性参数进行分析发现,这些物性参数与测井数据吻合较好,其中泊松比、密度和纵横波速度比等参数能够较好地反映储层和流体的变化情况。

从永3井区沙二段6砂组泊松比反演剖面(图3)可以看出,油层泊松比较低,为0.1~0.22,对应的测井曲线的自然电位为负异常,可以作为含油气识

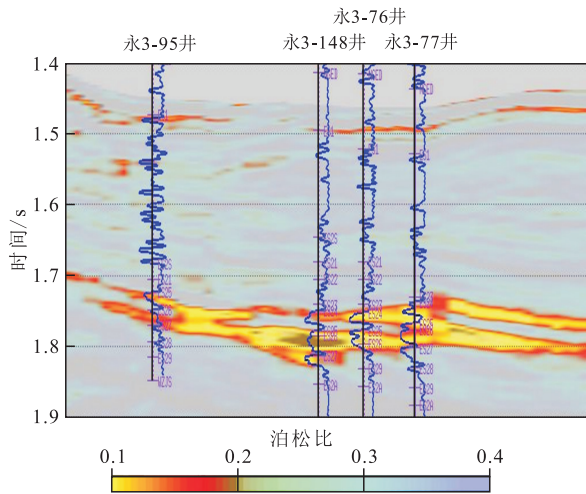


图3 永3井区沙二段6砂组泊松比反演剖面

别的有效属性;而水层泊松比为0.21~0.33,在测井曲线上也显示为自然电位负异常,与实际情况相符合。

4.2.3 叠前叠后联合反演

根据前期的岩石物理特征分析,通过剖面、平面和三维等多方面的油藏综合描述,利用叠后岩性反演结果和叠前多参数反演获得的泊松比参数进行综合分析,得到永3井区沙二段5砂组有利储层的平面分布特征(图4)。自2007年以来,依据叠前叠后联合反演预测结果,在永3井区部署新钻井19井,其中永30-斜3井钻遇油层5层8.6 m,表明反演预测结果与实钻数据吻合较好,钻井统计结果显示油层预测准确率达到80%以上。

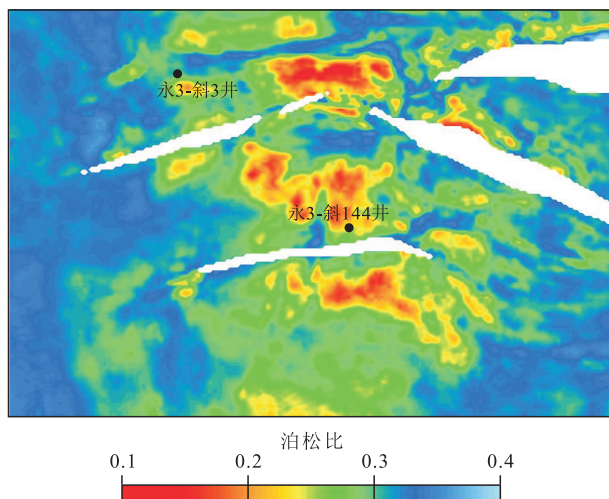


图4 永3井区沙二段5砂组叠前与叠后联合反演预测有利储层平面分布

5 结论

东营凹陷永安镇油田永3井区地质情况复杂,导致油气藏精细描述过程中存在的储层发育特征难以识别的问题。在岩石物理特征分析、约束模型和算法应用、叠前及叠后反演成果综合分析的基础上,明确了叠前及叠后反演在储层和流体描述方面的不同侧重点,选用统一的地质约束模型和反演算法控制2种反演方法的关联性,加强了叠前和叠后反演处理成果的一致性和可对比性,通过叠前叠后联合反演技术的研究,实现了对油气藏储层特征及流体特征的精细描述,并在永3井区沙二段复杂断块油气藏精细描述的应用中取得了良好效果,沙二段5砂组的油层预测准确率达80%以上。

参考文献:

- [1] 薛雁,吴智平,李伟,等.永安镇地区断层特征及其与油气成藏的关系[J].油气地质与采收率,2013,20(3):10-13.
- [2] 王端平,杨勇,梁承春,等.复杂断块油藏三级细分技术的研究与应用——以永安镇油田永3-1断块沙二段7-9层系为例[J].油气地质与采收率,2011,18(2):62-64.
- [3] 王玉梅,苗永康,孟宪军.岩石物理横波速度曲线计算技术[J].油气地质与采收率,2006,13(4):58-61.
- [4] 谢月芳,张纪.岩石物理模型在横波速度估算中的应用[J].石油物探,2012,51(1):65-70.
- [5] 王玉梅.叠前地震反演精度影响因素[J].油气地质与采收率,2013,20(1):55-58.
- [6] 胡华锋,印兴耀,吴国忱.基于贝叶斯分类的储层物性参数联合反演方法[J].石油物探,2012,51(3):225-232.
- [7] 王文涛,朱培民.地震储层预测中贝叶斯反演方法的研究[J].石油天然气学报,2009,31(5):263-266.
- [8] 全敏波,高飞,李春霞,等.叠前密度反演在苏北盆地永区储层及烃类预测中的应用[J].油气地质与采收率,2012,19(4):42-45.
- [9] 刘百红,李建华,魏晓东,等.随机反演在储层预测中的应用[J].地球物理学进展,2009,24(2):581-589.
- [10] 黄哲远,甘利灯,戴晓峰,等.随机地震反演关键参数优选和效果分析(英文)[J].Applied Geophysics,2012,9(1):49-56.
- [11] 李桂梅.叠前地震反演预测民丰地区沙四段盐下砂砾岩体含油气性[J].油气地质与采收率,2013,20(2):52-54.
- [12] 吴建军,杨培杰,王长江.地震多属性非线性反演方法在东营三角洲中的应用[J].油气地质与采收率,2013,20(1):52-54.