

贝叶斯判别方法在叠前反演数据解释中的应用

王振涛,王玉梅,钮学民

(胜利油田物探研究院,山东东营 257022)

摘 要:通过开展贝叶斯判别理论在叠前反演数据解释中的应用研究来提高储层预测的准确性。以岩石物理模拟、叠前反演处理和概率密度函数建立作为该技术的关键,基于贝叶斯理论利用测井和岩石物理模拟数据作为先验信息,利用反演成果作为基本数据估计不同岩相的分布概率。该技术充分利用概率和统计作为处理地质不确定性的工具定量解释繁多的叠前反演成果,用这种方法对岩相进行表征和识别,更加适合地质复杂性和多解性特点。火成岩储层预测中的应用表明,贝叶斯判别理论对储层含气性表征更加准确,解决了储层含气性预测难题。

关键词:叠前反演;贝叶斯判别理论;地质统计;概率密度函数;岩相判别

中图分类号:P631.443

文献标识码:A

目前叠前反演技术研究主要集中在反演方法和流程的研究,特别是基于 Zoeppritz 近似方程三参数反演方法研究^[1,2],对于稳定、准确、可靠的弹性参数的获得起到了重要作用,但对于反演成果的有效利用缺乏研究。叠前反演得到的地层属性众多,地质情况复杂,岩性和流体组合多种多样,即使采用多参数联合识别也难免存在多解性。利用敏感弹性参数进行岩性和流体识别在统计上是有规律可循的,同时也存在相当的不确定性,在以往的叠前反演成果解释中只是应用参数的敏感性,通过设定阈值方法或者交汇镂空的方法去识别岩相类型,这些方法没有考虑地质不确定性,对特征储层解释评价过于绝对,表征不准确。概率统计技术广泛应用于各种工程领域^[3],并得到认同,笔者在叠前反演数据解释中充分采用概率统计来处理地质解释中的不确定性^[4],引入贝叶

斯理论判别分析方法进行叠前反演成果综合解释,储层表征更加明确,在火成岩地区开展了贝叶斯判别分析理论在叠前反演解释中的应用技术研究,取得了较好的应用效果。

1 贝叶斯岩相判别理论

对于叠前反演数据体解释来说,首先要开展测井和岩石物理研究,对地下岩相进行划分,归纳的目的层主要有岩石类型或者是含流体类型,确定目标岩相最佳敏感参数或者敏感参数组合,根据弹性参数特征来判别未知点属于哪一种岩相。测井和岩石物理模拟信息作为先验概率信息在岩相判别分析中具有重要的作用,而用先验信息的方法统称为贝叶斯判别分析。先岩信息越丰富,概率统计越准确,识别精度就越高。

对于给定点反演数值 x ,这里的 x 可以是单参数也可以是多参数,利用贝叶斯公式表述岩相 c_i 概率为:

收稿日期:2011-10-12

作者简介:王振涛(1980—),男,工程师,主要从事地震资料反演和储层预测工作。E-mail: wangzhentao998. slyt@ sinopec. com

$$P(c_i|x) = \frac{P(x|c_i)}{P(x)} = \frac{P(x|c_i)P(c_i)}{P(x)} \quad (1)$$

贝叶斯判别的准则为:

如果 $i \neq j$, $P(c_i|x) > P(c_j|x)$, 那么可以把反演数值 x 划分为岩相 c_i 。

式中: $P(c_i)$ 为研究目的层一种岩相出现的概率, 又称先验概率, 通过测录井资料可以得到目的层的先验概率, 例如在胜利某探区馆陶上地层中钻遇泥岩的可能性要比钻遇砂岩的可能性大, 泥岩出现的概率为 70%, 而砂岩出现的概率为 30%;

$P(x|c_i)$ 为相 c_i 状态下 x 的概率密度分布函数, 称为条件概率密度分布函数;

$P(x, c_i)$ 为条件概率密度函数和先验概率的联合概率;

$P(x)$ 为无条件概率密度函数, 描述的是整个弹性参数值的分布, 对于 N 个储层状态, 可表示为 $P(x) = \sum_{i=1}^N P(x|c_i)P(c_i)$, 在这里它只是作为一个比例因子, 把各个分类相的概率做了标准化, 保证对于某一点各个分类相的概率之和为 1, 在对于贝叶斯分类来说不会起任何作用。

2 方法实现

2.1 岩石物理模拟

岩石物理分析是进行叠前反演成果解释的基础, 通过岩石物理模拟不仅可以获得测井中缺失的横波曲线, 而且利用岩性和流体替换技术能够模拟不同储层状态下弹性参数变化, 对于测井信息的扩展, 储层岩石物理响应特征的认识起到重要作用, 基于测井和岩石物理信息才能进行敏感参数的识别和概率密度函数的准确构建。

1951 年 Gassmann^[5] 提出了预测岩石体积模量的 Gassmann 方程, 建立了岩石基质模量、孔隙度、流体和干岩石模量的关系, 为研究弹性参数随孔隙和流体的变化规律提供了理论依据^[6]。

比较常用的 Gassmann 方程的形式如下:

$$K = K_d + \frac{\left(\frac{1-K_d}{K_m}\right)^2}{\frac{\varphi}{K_f} + \frac{1-\varphi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}} \quad (2)$$

$$\mu = \mu_d \quad (3)$$

式中: K 和 μ 分别为饱和岩石的体积模量和剪切模量;

K_m 、 K_d 、 K_f 分别为岩石基质、干岩石骨架和流体的体积模量;

φ 为孔隙度。

得出饱和岩石的体积模量和剪切模量后, 可以利用下面的公式求取饱和岩石的纵波速度、横波速度和纵横波速度比等弹性参数:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (5)$$

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{K}{\mu} + \frac{4}{3} \quad (6)$$

式中: v_p 、 v_s 和 ρ 分别为饱和岩石的纵横波速度和密度。

其中密度又可用下式计算:

$$\rho = \varphi\rho_f + (1-\varphi)\rho_m \quad (7)$$

式中: ρ_f 和 ρ_m 分别为流体和岩石基质的密度。

严格意义上讲 Gassmann 关系式只对低频有效, Gassmann 关系对 3D 地面地震频率是合适的, 在具有重油的油藏和致密孔隙度的岩石应用上不合适。在 Gassmann 方程中还涉及到了流体以及干岩石骨架的弹性模量, 因此又开展了流体和干岩石骨架模量计算方法研究。

地下流体主要有石油、天然气以及地层水中的一种或者几种混合组成, 对于单项流体 Batzle 和 Wang 做了深入研究, 对于混合流体 Wood 给出了求解方程。

Xu 和 White 利用了 Kuster—Toköz 理论^[7], 考虑了泥质含量、孔隙大小和形状及孔隙度含流体性质对岩石模量的影响, 给出了泥质砂岩的体积模量和剪切模量的解析式:

$$K(\phi) = K_m(1-\phi)^p \quad (8)$$

$$\mu(\phi) = \mu_m(1-\phi)^q \quad (9)$$

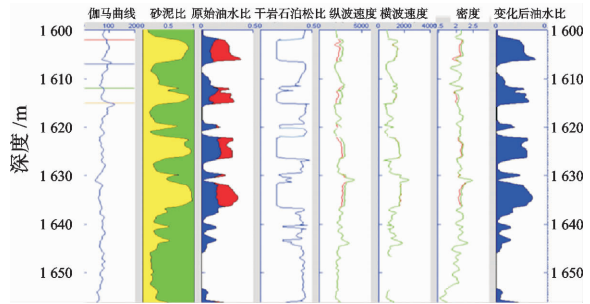
其中: $p = \frac{1}{3} \sum_{l=s,c} C_l T_{ijj}(\alpha_l)$, $q = \frac{1}{5} \sum_{l=s,c} C_l F(\alpha_l)$ 。

式中: $K(\phi)$ 和 $\mu(\phi)$ 分别为孔隙 ϕ 时干岩石的体积和剪切模量;

C_l 为砂岩和泥岩占基质的体积百分比。

通过开展干岩石骨架、流体和饱和岩石弹性模量的计算研究, 形成了饱和岩石弹性模量计算

方法。基于以上计算方法,孔隙度和流体替换技术能够模拟储层岩石物理弹性参数。图 1 为流体替换中储层孔隙度为 26%,气饱和度为 50%左右,气完全替换为水层后,纵波速度、密度增大,横波速度基本不变,基于岩石物理的孔隙度和流体的替换技术,能够扩充不同状态下的岩石物理资料,分析岩石物理性质影响因素。



红色(流体替换前);绿色(流体替换后)

图 1 流体替换

Fig. 1 Replacement of liquid

2.2 叠前三参数同时反演

叠前三参数同时反演的过程就是利用地震角道集叠加数据,以岩石物理研究为依据,基于先验模型约束,通过多次迭代求解地下地层岩石物理参数的过程。在反演求解过程中,需要对参与约束的求解的反演结果进行趋势和范围的约束,通过趋势和范围的约束,可以将反演结果控制在一定的范围之内,同时保证反演合成记录与地震记录残差最小,进而保证反演结果既尊重实际测量,又能反映地下岩石物理参数空间的变化。

叠前 AVA 三参数同步反演方法,把不同角度范围对应的多个角度叠加地震数据联合运用,同时利用多个部分角叠加地震数据体进行反演处理,把待反演的纵波阻抗、横波阻抗和密度参数,在反演处理过程中一次性运算完成,并且充分考虑到了这些属性参数之间的内在联系和相互制约关系。这种叠前反演方法在压制噪音和提高计算优势都有独特有时,在实际生产中得到广泛应用。

在这里采用了商业软件提供的叠前三参数同时反演方法,采用的基本算法叠后与稀疏脉冲反演算法有许多相似之处,其中包括反射系数误差

函数、地震反射信号误差函数、垂向约束误差函数等,以下为叠前同时反演的目标函数及误差函数约束:

$$F(v_p, v_s, \rho, \tau) = \sum_i \sum_j (F_{reflect_{ij}} + F_{seism_{ij}} + F_{trend_{ij}} + F_{spat_{ij}} + F_{contrast_{ij}} + F_{Gardner_{ij}} + F_{mudrock_{ij}} + F_{time_{ij}}) \tag{10}$$

除了误差函数约束,还包括测井趋势和空间约束,纵横波速度和密度约束,同时增加了参数之间的约束,计算结果要受常用经验公式约束,如速度和密度间 Gardner 经验公式以及纵横速度间的 Muderock 经验公式约束。通过叠前三参数反演技术应用,估算得到地层岩石物理弹性参数,利用岩石物理和概率统计构建与油藏参数的关系,进行数据的定量解释。

2.3 概率密度函数估算

在贝叶斯判别理论中概率密度函数是其重要的组成部分,只有建立了各种概率密度分布函数后才能够应用贝叶斯判别理论对反演数据进行岩相的判别分类,因此,概率密度分布函数建立是进行贝叶斯岩相判别的重要一步。测井和岩石物理模拟数据是概率密度函数建立的主要信息来源,对已知数据进行统计分析选择最佳概率模型用于概率密度函数的建立。对于不同储层状态岩石物理信息通常在统计上服从高斯正态分布,因此,可以利用正态分布模型去建立概率密度分布函数。

随机向量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 服从 n 维正态分布,存在 m 个 n 维总体,则第 i 个 n 维总体也服从正态分布,可表示为:

$$\mathbf{X}_i \sim (\mu^{(i)}, \sum_i) \tag{11}$$

$\mu^{(i)}, \sum_i$ 未知,需要利用先验信息估算:

$$\hat{\mu}^{(i)} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} X_j^{(i)} \tag{12}$$

$$\hat{\sum}_i = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (X_j^{(i)} - \hat{\mu}^{(i)})(X_j^{(i)} - \hat{\mu}^{(i)}) \tag{13}$$

则第 i 个总体 n 维分布状态条件概率密度可以用正态密度函数表示为:

$$p_i(x) = \frac{1}{(2\pi)^2 \left| \sum_i \right|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(x - \hat{\mu}^{(i)})' \sum_i^{-1} (x - \hat{\mu}^{(i)})} \tag{14}$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$; $x = x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

在统计样点足够多的情况下,每个总体的先验概率可表示为:

$$q_i = \frac{N_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_m}$$

(15)

得到了各种条件状态下概率密度函数后可以利用(1)式计算某种岩相出现的概率,利用这种方法可以得到岩相概率体,例如砂岩概率体、泥岩概率体或者含油砂岩概率体、含水砂岩概率体等,最后利用贝叶斯判别准则就能实现岩相判别。

3 应用实例

某地区火山岩储层发育,由于独特地质成因,同碎屑岩比,火山岩成层性差,岩性、物性和含流体性变化更快,横向连通性更为复杂,非均质性强,含气性预测十分困难。图 2 为过 A 井、B 井和 C 井的一条地震剖面。A 井和 C 井钻遇储层地震反射特征相当,在叠后地震中都表现为强振幅特征,但产气情况却差别较大,C 井日产气为 $44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而 A 井只有 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,B 井为钻遇储层地震表现为弱振幅杂乱地震反射特征,同样也为含气储层,产气为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。含气储层在全叠加地震剖面中特征不明显,很难去解释评价储层含气情况。

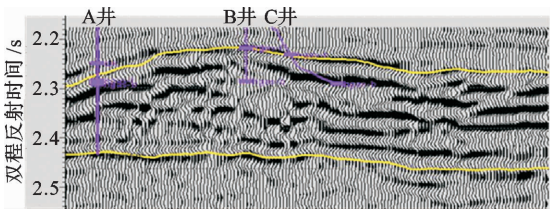


图 2 过多井地震剖面

Fig. 2 A seismic line passing through several wells

根据火成岩储层特点,利用扁平孔隙来代替储层裂缝,利用 Gassmann 方程建立了火成岩储层模型,利用岩石物理模拟的方法就可以得到纵波阻抗和纵横波速度比随孔隙和含气饱和度变化规律(图 3),含水饱和度相同纵横波阻抗及纵横波速度比随孔隙的增大而减小,相同孔隙度,弹性参数随含水饱和度的增大而增大,增大幅度差别

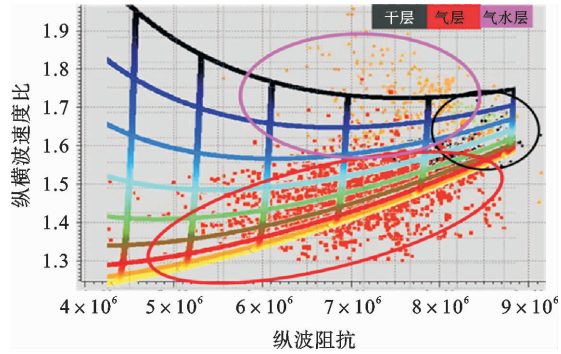


图 3 储层敏感弹性参数分析

Fig. 3 Sensitive elasticity analysis of a reservoir

较大,纵横波速度比对流体最敏感,增大幅度要更大,测井上同样表现相同的变化规律特征。

基于岩石物理正演方法对缺失的横波曲线进行了计算,针对火成岩成层性差的特点进行了多次块体建模技术进行了约束模型建立,最后利用叠前同时反演技术得到纵波阻抗、横波阻抗以及纵横波速度比等岩石弹性数据(图 4),这些参数物理意义明确,不同弹性数据交汇能够反映不同含流体性储层,但也存在一定的叠置,对含气性储层进行数据的联合解释困难。利用贝叶斯判别分析理论对叠前反演数据体进行了解释,可以把反映储层含流体情况的多弹性参数体变为更具地质意义的岩相体,使地质工作者应用起来更加方便。

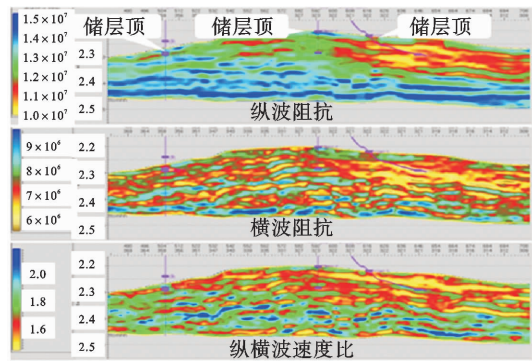


图 4 叠前反演岩石弹性参数剖面

Fig. 4 A prestacking inversion profile of elastic coefficient

基于贝叶斯利用测井资料和岩石物理模拟资料建立不同储层状态对于纵波阻抗和纵横波速度比的概率密度分布函数,对于双参数可以用二维

平面图来表示不同储层状态的概率密度分布,图 5 显示了该区气层、气水层以及干层状态条件概率密度分布,不同储层状态具有不同的分布区间,通过建立概率密度分布函数构建和贝叶斯判别理论对反演得到的纵波阻抗和纵横波速度比数据体联合应用就可以得到含气储层概率体(图 6),含气储层概率对储层含气性具有更加明确的评价,剖面中的 3 口钻井位于火山口附近,钻遇了高含气概率储层,均为工业气井,含气储层概率体表明火山口一近火山口附近储集物性好,天然气富集的特点。同时 3 口井间含气概率要存在差异,A 井和 B 井高概率含气储层厚度和规模明显小于 C 井;因此,3 口井产气情况要存在差异,C 井要优于 A 井和 B 井。对工区内钻井钻遇的主要储层弹性参数、储层含气概率以及储层判别进行了统计,并与实际钻遇储层情况进行了对比(表 1)。表 1 中除了对 A 储层情况出现偏差外,其他储层吻合较好。通过贝叶斯判别分析理论在火成岩叠前反演数据解释中的应用,用概率给出了储层含气情况定义,使含气储层表征更加明确,同时对储层含气情况判断更加合理准确。

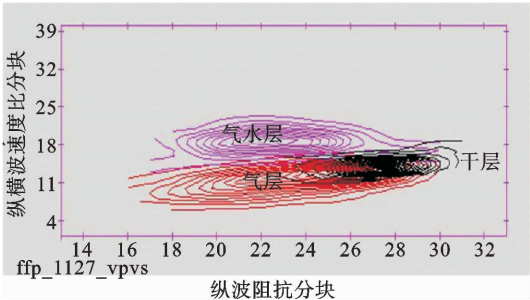


图 5 不同储层状态概率密度分布

Fig. 5 Probability density distribution for different reservoirs

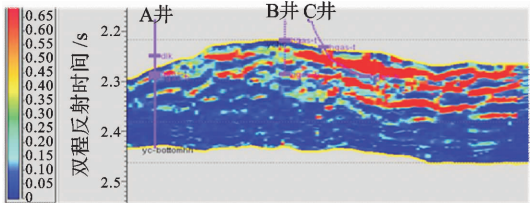


图 6 含气概率储层剖面

Fig. 6 Probability cross section of a gas-bearing reservoir

表 1 储层识别结果

Table 1 Results of reservoir discrimination

储层代码	波阻抗($\times 10^7$)	纵横波速度比	含气概率/%	储层判别类型	实际储层类型
A	1.226 6	1.822	11.9	干层	差气层
B	1.237 53	1.6	43.6	差气层	差气层
C	1.042 21	1.494	95.6	气层	气层
D	1.149 17	1.538	86.7	气层	气层
E	1.237 18	1.61	34.3	差气层	差气层
F	1.181 74	1.597	64.4	气层	气层

4 结论

由于叠前反演得到弹性参数多,岩性敏感参数叠置,利用单一参数或多参数交汇解释都会带来很大多解性。贝叶斯判别分析技术在火成岩含气储层预测实际应用表明,储层含气性表征准确,与井资料吻合较好,具有较好的应用效果。贝叶斯判别分析理论基于测井和岩石物理资料统计信息,能够更加有效地对叠前多参数反演成果进行

解释评价,使储层表征更加明确,岩性和流体判别也更加合理。同时应该注意,先验信息不足以及地质情况复杂性等会影响技术应用效果,该技术灵活应用方能得到较好的效果。

参考文献:

[1] 孟宪军,慎国强,王玉梅,等. 叠前 AVA 地震地震纵横波阻抗同步反演技术研究[J]. 石油物探, 2004, 43(增刊): 53-55.

[2] 杨培杰,穆 星,印兴耀. 叠前三参数同步反演方法及其应

用[J]. 石油学报,2009,30(2):232-236.

[3] 常兆光,王清河,杜彩凤. 应用统计方法[M]. 北京:石油工业出版社,2009.

[4] Avseth P, Mukerji T, Mavko G. Quantitative Seismic Interpretation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

[5] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. Geophysics,1951,16(4):673-685.

[6] 王玉梅,苗永康,孟宪军,等. 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(6):58-61,79.

[7] 徐胜峰,李勇根,曹 宏,等. 地震岩石物理研究概述[J]. 地球物理学进展,2009(2):680-691.

APPLICATION OF BAYES CRITERION TO INTERPRETATION
OF PRESTACKING SIMULTANEOUS INVERSION DATA

WANG Zhentao, WANG Yumei, NIU Xuemin

(Shengli Geophysical Research Institute, Dongying 257022, Shandong, China)

Abstract: Prestacking simultaneous inversion provide a tool to fully use prestacking seismic information. In combination with production data, it is possible to reveal changing lithology of and liquid in a reservoir. Of course, there are uncertainties in data interpretation. The uncertainties could be estimated if Bayes criterion is used in interpretation of prestacking simultaneous inversion data. Rock physics simulation, prestacking inversion and probability density function construction remain the keys of the technique. Data of well logging and rock physics simulation are the information required prior to the processing, and inversion data can be used as the basic information to estimate the probability density function of different lithofacies. This technique takes all the advantages of using probability and statistic as tools to quantitative interpret prestacking inversion data, and it is more reliable for complex geological targets with multi-solution, such as characterization and identification of lithofacies. As to the application of this technique to reservoir prediction in igneous rocks, it shows that Bayes Criterion is much better to identify gas bearing reservoirs, and thus could better serve the prediction of gas-bearing igneous rocks.

Key words: prestack inversion; bayes theory; geostatistics; probability density function; lithofacies discrimination