

测井曲线相关性分析及其在致密砂岩气层识别中的应用

王志磊, 郭红梅

(中国石油测井有限公司 长庆事业部, 西安 710201)

摘要: 为解决致密砂岩气层测井识别的难题, 首先从响应机理上对 neutron 测井与密度测井、电阻率测井与密度测井的相关性进行分析研究, 研究认为: 对于气层, neutron 测井响应值与密度测井响应值、电阻率测井响应值与密度测井响应值呈负相关性; 而对水层, 则呈现正相关性。据此提出了基于 neutron 测井与密度测井、电阻率测井与密度测井相关关系的致密砂岩气层测井识别方法, 然后编制对应的计算机程序, 实现了全井段自动计算测井曲线的相关系数, 进而达到识别致密砂岩气层的目的。对川中地区须家河组的 7 口有测试的气井进行的识别处理测井解释试油符合率达到 80% 以上。同时该技术也在老井复查中见到明显效果, 发现了新的致密气层。

关键词: 测井曲线; 相关性; 致密砂岩; 气层; 流体识别

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

收稿日期: 2010-10-08

Correlation Analysis of Well Logging and Its Application to Identifying Gas Zone in Tight Sand

Wang Zhilei, Guo Hongmei

(Changqing Division, China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: In order to resolve the problem of gas zone identification in tight sand, this paper firstly analyzes the correlation of neutron logging and density logging along with resistivity logging and density logging on the basis of logging response mechanism. It is illustrated from the results that the response values of neutron logging and density logging along with the response values of resistivity logging and density logging display negative correlation in gas zone, but display positive correlation in water zone. Based on these results, the paper proposes a new gas zone identification method in tight sand, compiles corresponding program, and thus the correlation coefficient of logging can be calculated automatically in all well sections. Finally the paper introduces the application of this new method in well logging from seven wells in Xujiahe group reservoir in southwest China, which achieves good results, i.e. the coincidence rate of log interpretation exceed eighty percent. Besides, the paper also describes the important role that the method plays in old wells reinterpretation. At the same time, some new gas zones of tight sand have been found by means of the method.

Key words: well logging; correlation; tight sand; gas zone; fluid identification

1 引言

以孔隙度-电阻率系列为主的常规测井在常规油气层的识别中发挥了很大的作用,但对致密砂岩气层的测井识别一直以来都是测井解释研究人员面临的难题,这是由于致密砂岩储集层横向变化大,非均质强,受构造幅度、岩性和物性限制以及气、水分异程度差的影响,常规测井资料识别这类气层的“盲区”日益显现。目前,国内外主要从两个方面对致密砂岩气层测井识别展开研究工作:①通过对致密砂岩气层样本的分析,研究其成因机制,挖掘常规测井资料中储层岩性、水性和物性等有效信息,解决致密砂岩储集层解释的多解性,从自然伽马、自然电位、电阻率与三孔隙度的匹配关系中发掘储层的含气信息^[1~3];②积极探索利用成像测井新技术识别致密砂岩气层^[4~7]。由于受成本限制,成像测井技术只能在部分重点井中采集,应用范围太窄。但测井中的“常规九条”在每口井中几乎都得以采集。因此笔者立足于常规测井资料,对中子测井与密度测井、电阻率测井与密度测井的相关性进行了分析,提出一种基于测井曲线相关系数的识别致密砂岩气层方法,并对川中地区须家河组致密砂岩气层的进行识别验证,以确立此方法的可行性。

2 测井曲线相关性分析

2.1 中子测井与密度测井相关性

毛志强等^[8]根据中子测井与密度测井的测量原理,推导出了电子密度指数与含氢指数的理论关系式证实了中子测井响应与密度测井响应具有相关性,此为利用中子测井与密度测井的相关性判别复杂储集层流体性质提供了应用理论基础之一。据此可以推导出中子视孔隙度 φ_N 和密度视孔隙度 φ_D 关系式如下:

$$\begin{aligned} \varphi_D &= \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{mf}} \\ &= \varphi \left[1 + S_{hr} \frac{\rho_{mf} - \rho_{hr}}{\rho_{ma} - \rho_{mf}} \right] \\ &\quad + V_{sh} \frac{\rho_{ma} - \rho_h}{\rho_{ma} - \rho_w} \quad (1) \\ \varphi_N &= \frac{IH_b - IH_{ma}}{IH_w - IH_{ma}} \\ &= \varphi \left[1 - S_{hr} \frac{IH_{mf} - IH_{hr}}{IH_{mf} - IH_{ma}} \right] \end{aligned}$$

$$+ V_{sh} \frac{IH_{sh} - IH_{ma}}{IH_{mf} - IH_{ma}} \quad (2)$$

式中, ρ_{ma} 、 ρ_h 、 ρ_{mf} 和 ρ_{hr} 分别为纯砂岩骨架、泥质、泥浆滤液和冲洗带残余油气的密度; IH_{ma} 、 IH_{sh} 、 IH_{hr} 和 IH_{mf} 分别为纯砂岩骨架、泥质、泥浆滤液和冲洗带残余油气的含氢指数; φ 、 V_{sh} 和 S_{hr} 分别为孔隙度、泥质含量和冲洗带残余油气饱和度。根据式(1)和式(2)可以得出如下结论:①对于纯水层,在不含泥质的情况下, φ_N 与 φ_D 均等于介质孔隙度, φ_N 与 φ_D 表现出明显的正相关,即中子测井响应与密度测井响应表现出正相关关系;②对于油气层,由于油气的存在,使得 φ_D 增大而 φ_N 减小,导致 φ_D 与 φ_N 表现出负相关性,即中子测井响应与密度测井响应表现出负相关性,而且中子的挖掘效应加剧了这种负相关性;③当 ρ_{ma} 小于 ρ_h 时,泥质的存在会模糊油气层 φ_N 与 φ_D 的负相关性。

2.2 电阻率测井与密度测井相关性

Archie 模型证实了电阻率测井响应与孔隙度测井响应具有相关性,此也为利用电阻率测井与孔隙度测井的相关性判别复杂储集层流体性质提供了应用理论基础之二。在井眼条件好的情况下,常用深测向 R_{LLD} 或者深感应 R_{ILD} 表示地层电阻率,并且优选密度测井计算得到的孔隙度表示储层的孔隙度,由 Archie 公式可以得到电阻率与密度测井相关函数:

$$R_{LLD} = \frac{abR_w}{\left(\frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{mf}} \right)^m S_w^n} \quad (3)$$

式中 a 、 b 、 m 、 n 为大于零常数,一般根据地区特征不同选择不同的值; R_w 为地层水电阻率, ρ_{ma} 、 ρ_{mf} 和 ρ_b 分别为纯砂岩骨架密度、泥浆滤液密度和密度测量值。对于纯水层, $S_w = 1$, 随着密度测井响应值的增加,孔隙度减小,电阻率测井响应增加,因此电阻率测井响应与密度测井响应呈现正相关关系;而对于纯油气层, $S_w = S_{wi}$, 经验表明^[12]: 粒度中值和孔隙度对束缚水饱和度 S_{wi} 影响最大,对于给定岩性和粒径,束缚水饱和度 S_{wi} 与孔隙度的关系可以表示为 $\varphi S_{wi} = C$, 代入上式,且设 $A = abR_w / C^n$, $B = n - m$, 可得:

$$R_{LLD} = A \left(\frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{mf}} \right)^B \quad (4)$$

显然, A 大于零, B 会在很小范围内变动,但它始终是大于零的。因此,在纯油气层,随着密度测井响应值增加,孔隙度减小,电阻率测井响应也减小,即电阻率测井响应与密度测井呈现负相关关系。

2.3 相关性分析影响因素和准确性

实际解释过程中所用到的测井资料大多是采用多种不同的测井设备采集得到, 这些设备的采样间隔、纵向分辨率、仪器本身的缺陷等方面都有所不同, 在一定程度上影响相关性的解释工作, 因此解释前必须将各种资料标准化, 使得采集资料在一个油田单元内有很好的的一致性。某些测井资料中做相关对比的两条曲线深度存在的偏差, 使得解释结果不能很好的反映实际结果, 曲线深度检验也是解释前必要工作之一。另外对于已开发区块中验证存在油气显示的层位, 可以将这些层位的试油气结果作为检验相关对比的有力证据, 将这些结论所影响的因素加入曲线判别解释中, 能更好的确定优良的解释结论。计算机解释靠的是一些特定的规则来决定解释结果的, 在将解释成果应用于油气开发时, 需要人为的参与进来, 将这些结果与其他资料认真对比分析, 以得到满意的解释结论, 这样能在油气开发过程中减少不必要的损失。

3 测井曲线相关性识别致密砂岩气层方法及技术实现

既然中子测井与密度测井、电阻率测井与密度测井在油气层具有负相关关系, 而在水层具有正相关关系, 那么有必要定量计算出两条测井曲线的相关关系, 以达到快速识别致密砂岩气层的目的。

实际应用中可以把中子测井响应值与密度测井响应值或者电阻率测井响应值与密度测井响应值看成两组相互独立的井深随机变量, 根据概率论与数理统计的观点^[13], 两个随机变量 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与 $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 之间的相关系数为:

$$R_{XY} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 / n \right]}} \quad (5)$$

式中 n 表示数组长度, 它表明由两组同长度的数列可以求得这两个数列的相关系数, 更多体现出这两个数列的变化趋势关系, 这也正是测井曲线相关性与概率统计的结合点。 R_{XY} 的计算结果在 +1 与 -1 之间, 若 X 与 Y 的变化趋势一致, 则 R_{XY} 大于零或接近 +1, 称 X 与 Y 正相关; 若 X 与 Y 的变化趋势相反, 则 R_{XY} 小于零, 称 X 与 Y 负相关; 当 X 与 Y 无相关时, R_{XY} 接近等于零。

依据上述理论编制相应的程序, 实现了连续计算全井段相关系数, 进而判别致密砂岩气层的

目的。具体步骤如下。

1) 由于计算相关系数的两个变量必须是同一量纲, 因此首先需对中子测井曲线与密度测井曲线、密度测井曲线与电阻率测井曲线进行归一化处理。

2) 应用式(5)对进行过归一化的中子与密度、密度与电阻率进行相关系数计算, 这里 n 值一般选择 8, 因为目前气层识别中认为最小可开采气层厚度一般为 1m, 测井数据采集的采样间隔一般为 0.125m, 所以一般情况下 n 值取最小 8, 这样既不遗漏气层又可以保证一定的精度。

3) 应用自然伽马测井曲线计算全井段泥质含量, 对于泥质含量大于 40%, R_{XY} 取值为 0; 对于泥质含量小于 40%, R_{XY} 值为负可判断为油气层, R_{XY} 取值为正, 则可判断为水层。

4 实例分析

应用上述方法对川中地区 7 口井的资料进行了实际处理, 测井解释结果试油符合率达到 80% 以上。在老井复查中应用该技术对须家河组致密砂岩储集层进行了流体性质的判别, 发现了新的致密砂岩气层。结果表明: 此项应用技术对致密砂岩气层的识别是切实可行的。

图 1 上半段是常规气层解释与相关性解释方法应用对比结果, 下半部分为川中地区须家河组某井致密气层识别的成果图。图中第 5 道和第 6 道分别为三孔隙度差值、比值法识别致密气层的解释结论, 其中 $B=0, C=1$ 时为水层的信息显示, $B>0, C>1$ 时为气层的信息显示, 图中灰色充填部分是为了增加这种识别的效果; 第 7 道和第 8 道分别为中子测井与密度测井相关系数法、电阻率测井与密度测井相关系数法在致密气层识别中的应用展示, 其中 $R_{CNL/DEN}$ 表示中子测井响应值与密度测井响应值的相关系数, $R_{RT/DEN}$ 表示电阻率测井响应值与密度测井响应的相关系数。这里相关系数表示为正相关时(相关系数大于零或等于 1), 为水层的信息显示; 相关系数表示为负相关时(相关系数小于零), 为油气层的信息显示。

从图 1 可以看出, 在对应的两个测试层段, 相关系数法的识别效果明显优于三孔隙度差、比值法。三孔隙度差、比值法在 1 号气层中显示有气的存在, 但在 2 号、3 号气层中不明显, 导致 2~3 号气层和 4~5 号水层无法正确的判别, 而相关系数法则很好区分出了气层和水层。

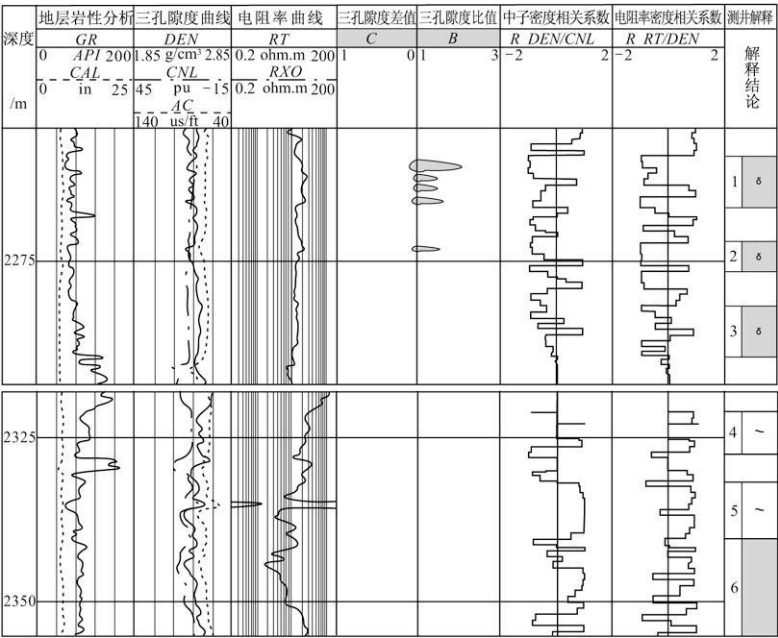


图 1 川中地区须家河组某井致密气层识别成果

Fig. 1 Recognition results figure of a well dense gas in Xujiahe in central Sichuan

值得注意的是,在测试气层段,仍能看见部分相关系数显示正相关,这主要是泥质影响造成的,在识别过程中应区别分析;而且电阻率测井与密度测井测量的纵向分辨率有差异,这也一定程度上会混淆气层段的这种负相关性。所以识别过程中应结合这两种相关系数进行综合分析。

5 结 论

- 1) 理论分析表明,中子测井响应值与密度测井响应值、电阻率测井响应值与密度测井响应值之间具有相关关系。
- 2) 中子测井响应值与密度测井响应值、电阻率测井响应值与密度测井响应值在气层段显示负相关性,而在水层段显示正相关性。
- 3) 利用编程实现了中子测井与密度测井、电阻率测井与密度测井的相关系数识别致密砂岩气层的技术,并对川中地区须家河组 7 口有测试的井进行了处理,应用效果明显。
- 4) 应用此方法时可以加入根据井径曲线以判别非规则井眼和规则井眼的规则,抛却不规则井眼解释处理,真正做到油气层识别的自动解释。

参考文献:

[1] 刘洪亮,鱼红侠,崔红珠,等.红台地区低孔低渗储层测井流体识别方法研究[J].石油天然气学报,2007,29(3):93~96.

[2] 李云省,李士伦. BP 网络快速识别油气层初探[J]. 天然气工业,1999,19(4):40~42.

[3] 赵克超,陶果,王天波,等.泌阳凹陷深层系低孔低渗油气层测井识别技术[J].石油大学学报(自然科学版),2005,29(6):27~31.

[4] 张冲,毛志强,王兆年,等.测井新技术在包-界地区须家河组储层评价中的应用[J].科技导报,2009,27(13):78~82.

[5] 张宇晓.核磁共振测井在低孔低渗油气层识别中的应用[J].新疆石油地质,2004,22(3):315~318.

[6] 谭茂金,赵文杰,范宜仁.用测井双TW观测数据识别储层流体性质[J].天然气业,2006,26(4):38~40.

[7] 匡立春.电缆地层测试技术在准噶尔盆地油气田勘探中的应用[J].测井技术,2002,26(3):229~232.

[8] 毛志强,谭廷栋.密度测井和中子测井的相关性及其在识别天然气层中的应用[J].地球物理学报,39(1):125~132.

[9] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东营:石油大学出版社,1996.

[10] Archie G R. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics[J]. Trans. A. I. M. E., 1942, 146: 54~56.

[11] Archie G R. Electrical Resistivity and Aid in Core Analysis Interpretation[J]. Bulletin A. A. P. G., 1947, 31(2): 350~366.

[12] Schlumberger Log Interpretation Principles/ Applications [EB/OL]. <https://www.slb.com/resources/publications/books/lipa.aspx>, 1991.

[13] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2003.