

Research on the Impact of Complex Wellbore Environments on Density Logging Responses and Correction Methods

Zefang Chen

Jiangnan Logging & Recording Branch, Sinopec Jingwei Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

The quality of logging data profoundly impacts the accuracy of geological evaluations, particularly during the mid-to-late stages of oil and gas exploration and development when reservoir complexities become increasingly apparent. The mud cake adhesion phenomenon, along with its physical mechanisms and error characteristics, significantly affects density logging responses. This study establishes a mud cake correction model using the ratio of dual-detector count rates, effectively eliminating mud cake effects. After field validation, this method demonstrates capability in suppressing measurement deviations caused by environmental factors. The corrected density curves exhibit high consistency with core analysis data, providing a robust technical foundation for precise evaluation of complex reservoirs.

Keywords

density logging; complex wellbore; mud cake correction; wellbore diameter compensation; instrument eccentricity

复杂井眼环境对密度测井响应影响及校正方法研究

陈泽方

中石化经纬有限公司江汉测录井分公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

测井数据的质量会深刻地影响到地质评价的准确性的, 尤其是在油气勘探开发进入到中后期阶段的时候, 目标储层的复杂性就会越凸显出来, 那么泥饼附着现象, 它的物理机制以及误差特性, 对密度测井响应会构成显著影响。本文开展了双探测器计数率比值的泥饼校正模型的构建工作, 能够有效地把泥饼影响剔除, 这种方法通过实地验证后, 得以开展对环境因素所导致的测量偏差的抑制工作。密度曲线经过校正之后, 和岩心分析数据高度契合。这样就为复杂储层的精细评价, 拥有了坚实的技术依据。

关键词

密度测井; 复杂井眼; 泥饼校正; 井径补偿; 仪器偏心

1 引言

密度测井会对地层电子密度做出响应, 通过它可以去处理计算孔隙度、识别岩性以及评价含油气饱和度等工作。在大斜度井或者水平井开展作业的过程当中, 由于受到重力的作用, 会使得测井仪器难以实现居中, 进而产生了比较严重的偏心现象。密度测井仪所接收到的伽马射线计数率, 会受到泥浆、泥饼以及仪器位置等非地层因素的影响, 从而不再单纯地表征地层的特性, 要是环境影响没有进行校正, 那么孔隙度计算就会产生显著的偏差, 同时岩性识别方面也会出现谬误, 这样储量评估以及开发方案就都会受到误导。目前现有的测井软件虽然拥有环境校正功能, 不过它的经验公式在极端复杂条件方面的适用性经常会显得不足, 很难来实

现高精度地质建模的支撑, 本文聚焦于复杂井眼环境给密度测井响应所带来的影响, 深入去探讨泥饼、井径变化以及仪器偏心这三大因素是怎样造成误差的。以双探测器密度测井原理当作基石, 来构建出适应性适宜并且精度较高的综合校正模型, 测井资料处理质量得以提升, 给中石化经纬有限公司在复杂区块开展测录井作业提供了理论支撑以及技术参照, 这对于提高油气勘探的成功率有着切实的价值。

2 密度测井原理及环境影响机制

2.1 密度测井基本原理

补偿密度测井仪通常会包含伽马射线源, 比如 ^{137}Cs , 以及两个探测器, 分别拥有长源距和短源距, 伽马射线在穿透岩层的过程当中, 康普顿散射现象会占据主导地位, 它的散射强度直接和地层电子密度有关联, 而这个密度又跟岩石体积密度密切相连。深部地层的信息主要是通过长源距探测器来进行反映, 井眼环境对其产生的影响比较小, 不过计数

【作者简介】陈泽方(1998-), 中国河南沁阳人, 本科, 助理工程师, 从事测井专业工作研究。

率会偏低，并且统计起伏比较显著；短源距探测器探测深度浅，对井眼附近的泥饼、冲洗带及仪器位置极为敏感，计数率高、统计精度高。传统的数据处理利用长短源距计数率的比值来消除源强衰减的影响，并通过经验图版或公式将计数率转换为地层密度，那么，仪器贴靠在井壁，并且泥饼的厚度保持恒定，同时井径也是规则的，这些理想化的条件就构成了转换过程当中所基于的假设。要是实际工况偏离了理想假设，那么测量结果就会出现系统性误差。

2.2 泥饼对密度测井的影响

钻井液当中的固相颗粒，在压差的驱动作用下来向渗透性地层进行迁移，在井壁表面逐渐地堆积起来，进而得以形成滤饼，泥饼的密度是低于致密岩石的，并且它的自由水含量比较高。泥饼存在的情况下，会让短源距探测器所接收的伽马射线大量被泥饼进行散射，计数率也就会因此出现异常增高的状况，这样一来，由此换算得出的视密度明显低于地层的真实密度，长源距探测器在厚泥饼环境当中，它的探测深度尽管较大，不过探测体积里面还会渗入泥饼信号，从而使得读数出现下降。泥饼的厚度、密度以及它和地层密度之间的差异，共同决定了其影响的程度，要是泥饼厚度超过了 1 厘米，那未经校正的密度测井值就会产生超过 0.05 克每立方厘米的误差。在低孔隙度的致密储层当中，这个误

差足以让孔隙度计算结果的偏差突破两个百分点，甜点识别方面会面临显著的挑战。

2.3 井径扩大与仪器偏心的耦合效应

井眼扩径现象，也就是在结构松散的砂岩层或者易碎裂的泥岩层段当中，表现得尤为显著，井筒的尺寸超出了钻具的直径，这样就在工具和井壁之间形成了环形间隙，并且钻井液会对这个区域进行填充。钻井液的密度处于 1.0 至 1.2 克每立方厘米的范围，明显低于岩石的密度。这么一个低密度的介质层存在于地层和探测器之间，会让测量的数值出现偏低的倾向，仪器偏心这一状况构成了另外一个关键的干扰因素。要是井眼不规则，那么仪器在垂直井当中可能就无法开展紧贴井壁的工作；在水平井当中，仪器会受到重力的作用，始终处于井眼的下方，仪器在圆周方向上距离的分布并不均匀，这样探测器和井壁之间的间距就增大了。偏心效应开展了对伽马射线平均路径长度的调整工作，并且改变了散射角分布，这使得长短源距探测器响应比例出现了非线性的变动，在大井眼出现严重偏心情况的时候，短源距探测器往往会完全浸入到钻井液当中，从而去失去对地层开展探测的功能，使得密度曲线出现明显的低频波动或者数据异常的现象。表 1 展示了把模拟密度测井响应在不同井眼状况当中的误差特性给呈现了出来。

表 1 不同复杂井眼条件下的密度测井响应误差模拟

工况类型	视密度偏差 ($\Delta \rho$)	主要误差特征	对孔隙度计算影响
理想井眼	0.00 g/cm ³	无系统误差	基准
薄泥饼	-0.03 g/cm ³	整体偏低，曲线平滑	孔隙度偏高约 1.5%
厚泥饼	-0.08 g/cm ³	显著偏低，掩盖低阻层	孔隙度偏高约 4.0%
井径扩大	-0.12 g/cm ³	大幅偏低，伴随噪声	孔隙度严重虚高
严重偏心	-0.05~-0.15 g/cm ³	波动剧烈，非线性失真	孔隙度解释不可靠

3 复杂环境影响校正方法研究

3.1 基于双探测器比值的泥饼校正模型

泥饼校正构成了密度测井去处理工作的首要方面，泥饼信号会被短源距探测器进行捕捉，地层信息则会由长源距探测器来获取。鉴于这个特性，来建立一个校正模型，长源距计数率也就是我们用 NL 来表示，而短源距计数率呢，就记成 NS。在无泥饼的理想状态当中，地层密度 ρ_b 与 NS/NL 之间会呈现出一种特定的函数关联，泥饼的出现会使得这个比值偏离了正常的范围，进行校正这项工作的时候，把改良的脊肋图版法当作方法来使用了。借助蒙特卡洛模拟来开展构建泥饼厚度以及密度对应的响应数据库的工作，校正量 $\Delta \rho$ 也就是把它定义成 $\Delta \rho = f(NS/NL, \rho_{app})$ ，这里面 ρ_{app} 所代表的是未经校正的视密度。引入泥饼密度修正因子 kmc 提高了测量精度，这个因子凭借自然伽马或者中子测井数据来辅助判断泥饼的特性，像由重晶石加权泥浆形成的重泥饼，地层密度校正值 ρ_{corr} 是借助视密度 ρ_{app} 以及密度差 $\Delta \rho$ 乘以泥饼补偿系数 kmc 的和

来获得。这种方法可以对厚度低于 30 毫米的泥饼效应开展有效的修正工作。

3.2 井径补偿与偏心几何修正

泥饼校正完成之后，对于井径扩大以及仪器偏心所带来的残余效应，还是需要去处理，井径校正一般是依靠机械臂测量得到的井径值也就是 CAL 来开展，并且假设仪器是居中的。不过，在复杂的井眼环境当中，这个假设常常难以成立。一种几何概率算法被提出来，是用来进行偏心问题的修正工作，三轴加速度计的数据会被用来开展确定仪器的倾角以及方位角的工作，并且井径数据还能够辅助去处理仪器偏心距的估算工作。探测器以及井壁的几何关系模型，基于井眼呈现椭圆截面这一假设来开展构建，伽马射线在穿过钻井液的时候，它的衰减系数被记成 μ_m 。要是存在仪器偏心的情况，那就会引入一项额外的衰减效应。这个附加的衰减项能够表述成指数函数的形式。这里的 θ 角所代表的是探测器位置以及偏心方向之间的夹角。模拟计数率和实际测量值之间存在的差异，借助反复开展地层密度参数的调整工作来进行缩减。这个过程是为了来实现对真实的地层密度数

值的逼近,对于井径出现显著扩张的区域而言,单纯依靠密度测井来获取可靠的信息是存在困难的。中子孔隙度测井被引入之后,联合约束得以实现建立,中子测井以及密度测井针对井眼环境的响应规律存在着差异,借助两者的重叠差异也就是 $\Delta\rho-\phi N$,能够识别由于井眼问题所导致的异常点,运用趋势面分析来开展插值工作,以此填补曲线的连续性。

3.3 综合校正流程实现

自动化校正流程是基于前面所说的理论来构建的,它包含了数据预处理方面,会对原始计数率开展死时间校正工作,同时会把背景辐射扣除掉,并且同步开展统计平滑处理工作,那么就会开展井径数据的获取工作,同时把泥浆密度数值读取出来。泥饼厚度得以估测,并且把仪器姿态信息提取出来。来执行泥饼校正工作,运用双探测器比值模型,输出初步校正后的密度,通过对仪器姿态开展分析得出偏心距,把几何修正因子运用到密度数据当中,来实现最终校正,质量控制这个环节当中,把校正数据和岩心密度值进行相互比对。要是差异超出了预设限度,比如每立方厘米超出 0.03 克,那就需要启动人工核查流程。这么做是为了排查潜在的复杂情形,像气体侵入等系统没捕捉到的工况高密度的矿物包裹体以及其他类似物质。

4 实例应用与效果分析

把中石化江汉油田的一口深层探井当作验证方法实际应用能力的案例来使用,潜江组盐间泥页岩构成了这口井的目的层,它的地层压力系数偏高,开展了钻井液密度的配置工作,达到 1.8 g/cm^3 ,井壁稳定性方面表现得不太好。实测井径曲线显示,多处井段的扩径率已经超过了 30%,那么,厚实的泥饼就随之得以形成了。密度曲线在还没进行校正的时候,这个井段呈现出了显著的“锯齿状”低值特性,依据这个来计算得出的孔隙度数值达到了 25%,这样的结果和邻近井眼的同一地层以及岩心分析数据也就是孔隙度通常在 12%至 15%之间存在着重大差异,地质评价初步开展显示,这个层具备高产的潜力,由此便引发了显著的决策风险。泥饼所产生的影响通过校正方法去处理后得以实现消除,在 2850 - 2870 米的井段当中,识别出平均厚度大概为 15 mm

的高密度泥饼,校正之后密度值回升了 0.08 g/cm^3 。在 2900 米的深度,扩径现象比较显著,借助偏心修正算法以及平滑约束的运用,地层真实密度趋势得以实现恢复,把钻井液侵入所引发的虚假低密度尖峰有效消除,校正密度曲线所揭示出的孔隙度范围是在 13%至 16%之间,这个情况和随钻取芯所得到的实测数据是高度一致的。借助校正密度曲线以及声波时差、中子孔隙度曲线的重叠关系,来开展岩性变化规律的呈现工作,这样就能清晰地把它呈现出来,并且两层有效储层也就能得以成功识别,表 2 展示了这口井关键层位在开展校正工作前后,进行解释结论对比的相关情况。进行密度校正的精准实施工作,超越了单纯开展数据运算的范畴,并且它直接和油气资源的勘探成效有关联,要是原始数据没有开展验证工作,就极有可能引发误判情况。

5 结论

密度测井的精度通常会受到复杂井眼条件方面的限制,通过理论分析以及实际数据验证得以揭示这一影响机制。泥饼校正模型基于双探测器比值来开展构建,并且结合几何概率的偏心修正算法,从而形成综合校正方法,以适应各类复杂工况,结果表明,这个技术方案能够把密度测量偏差限制在每立方厘米 0.03 克以下的范围,把高质量的密度校正工作开展起来,能够有效地对地层真实物理属性进行恢复,从而为岩性识别、储层评价以及油气层判定等方面提供可以依靠的数据支撑。随着随钻测井技术得到广泛的运用以及人工智能算法持续地进步,开展实时动态校正工作正逐渐成为了行业发展的主流方向,会把深度学习网络运用来开展挖掘多源测井数据间深层联系的工作。复杂环境下的密度测井响应可以进行智能化实时校正。

参考文献

- [1] 昌吉.面向复杂井眼环境的智能测井岩相识别方法研究[D].中国科学技术大学,2022.
- [2] 张丽华,王建国.补偿密度测井环境影响因素分析及校正技术[J].测井技术,2021,45(3):28-34.
- [3] Ellis D V, Singer J M. Well Logging for Earth Scientists[M]. Springer Science & Business Media, 2007.