

The Principles of ALD Density Measurement While Drilling from Halliburton and Its Curve Selection

Jian Li¹, Wei Zhang², Jiayin Zhu², Jun Wan¹

¹Shenzhen Branch, CNOOC Co. Ltd., Shenzhen Guangdong

²Shenzhen Branch, China Oilfield Services Co. Ltd., Shenzhen Guangdong

Email: lijian7@cnooc.com.cn

Received: Jul. 22nd, 2017; accepted: Jun. 24th, 2018; published: Aug. 15th, 2018

Abstract

The Oilfield was located at the northwest slope of Dongsha Uplift of Pearl River Mouth Basin in South China Sea. FEWD system from Halliburton was used for logging while drilling operation. When drilling new wells in this area, some over-responding density readings (ALCDLC) occurred in logs got from ALD tools of Halliburton Company. Starting from the principles of ALD density measurement, the response characters of each density curve going through the formation are compared, the proper conditions of different curves in logging interpretation are clarified, and based on actual situations in different wells, the principles for curve selection are proposed. It is used for logging evaluation in the area and better effect is obtained in application.

Keywords

Density Logs of ALD, Measuring Principle, Response through Formation, Curve Selection

哈里伯顿ALD随钻密度测量原理及曲线优选

李 建¹, 张 伟², 朱佳音², 万 钧¹

¹中海石油有限公司深圳分公司, 广东 深圳

²中海油田服务股份有限公司深圳作业公司, 广东 深圳

作者简介: 李建(1976-), 男, 工程师, 主要从事油田开发工作。

Email: lijian7@cnooc.com.cn

收稿日期: 2017年7月22日; 录用日期: 2018年6月24日; 发布日期: 2018年8月15日

摘 要

南海东部某油田位于珠江口盆地东沙隆起西北斜坡, 随钻测井作业使用哈里伯顿FEWD系统, 作业中发现随钻方位密度测井仪(ALD)提供的高值密度(ALCDLC)过层界面时出现响应过激现象。从ALD密度测量原理入手, 对比了各密度曲线穿层时的响应特征, 明确了不同曲线在测井处理解释工作中的适用条件, 并针对不同井眼实际井况提出优选曲线处理原则, 在该区测井评价工作中取得了较为良好的效果。

关键词

随钻密度, 测量原理, 穿层响应, 曲线优选

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着地质导向对井眼轨迹要求的不断提高, 随钻方位密度成为不可或缺的测井工具, 国外三大油田服务公司均开发出了各自的方位密度测井仪, 主要是通过对测量区域进行象限划分的方式来提供多条密度曲线, 如低边密度、高边密度、平均密度等, 但实际地层评价中如何选用却没有明确的规范。研究表明, 不同的井斜、井眼条件及仪器串组合都会影响测井仪器对地层密度的测量; 从仪器本身的测量原理入手, 总结其在不同条件的响应特征, 可以明确不同的密度曲线与井眼地层条件的匹配关系, 从而在后续的地层评价中采用更为可靠的测井资料。笔者以南海东部某油田开发井为例, 总结了哈里伯顿随钻方位密度测井仪(ALD)密度曲线的优选原则。

2. 密度曲线响应过激现象

研究区开发井随钻测井作业使用哈里伯顿 FEWD 系统, 密度测量采用 ALD (图 1)。

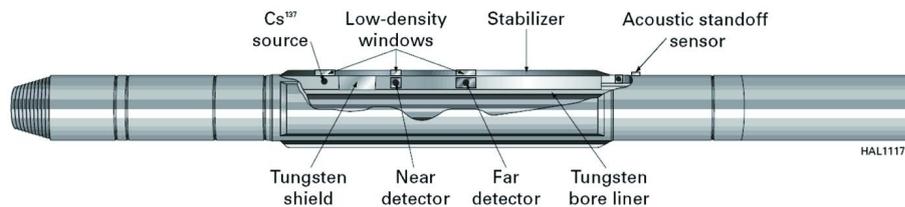
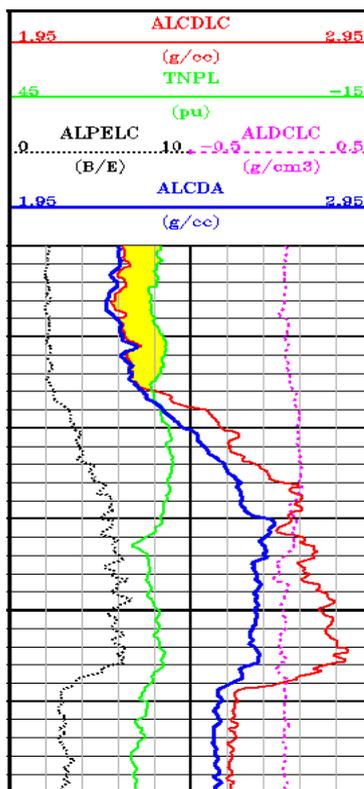


Figure 1. The azimuth density logging tool while drilling (ALD)
图 1. 随钻方位密度测井仪(ALD)

在该区 A 井实钻过程中发现，ALD 提供的高值密度(ALCDLC)在穿越某些地层界面时出现响应过激现象(图 2): A 井的相邻预探井同层段砂岩密度一般为 2.25 g/cm^3 左右，泥岩密度一般为 2.55 g/cm^3 左右，而 A 井实钻测量到的 ALCDLC (红色)过层界面时测量值最高达到了 2.85 g/cm^3 左右，与地层经验值差异较大，明显不符合地层规律；对比之下，平均密度(ALCDA) (蓝色)测量值更接近经验值。研究区作业井型均为大斜度井与水平井，确定 ALD 不同密度曲线测量原理及适用条件，有利于准确计算孔、渗、饱参数，对于测井处理解释及油藏开发工作意义重大。



注：TNPL 是中子孔隙度；ALPELC 是光电吸收截面指数；ALDCLC 是密度补偿。

Figure 2. The over-responding density readings of ALCDLC from Well A
图 2. A 井 ALCDLC 过层界面响应过激现象

3. ALD 随钻密度测量原理

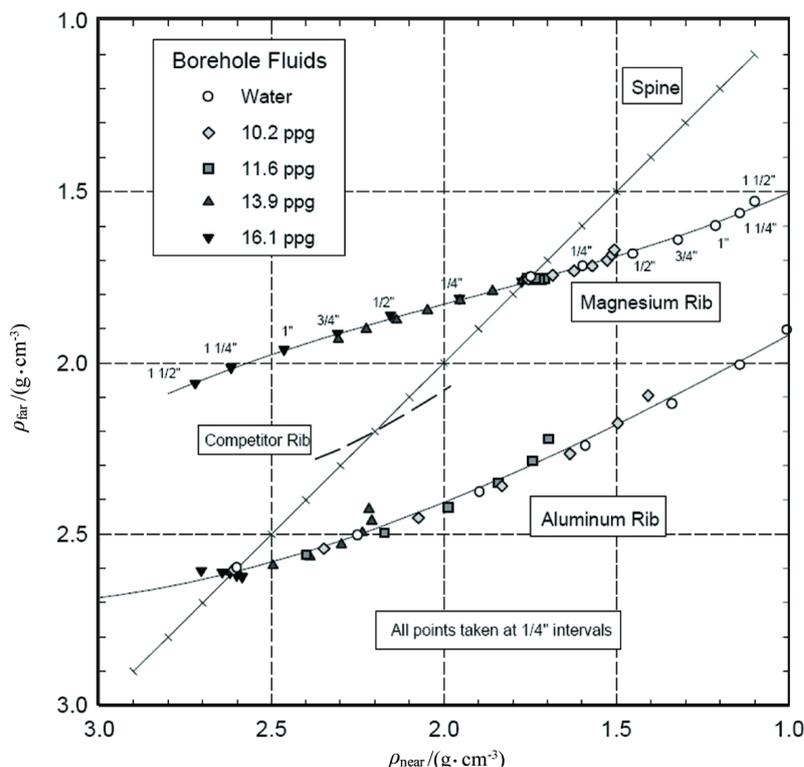
3.1. 密度测井测量原理

密度测井是利用康普顿散射原理来进行地层密度测量的一种测井技术。工具通过铯(Cs^{137})源向地层

辐射伽马射线，再利用与源相距一定距离的探测器测量经过地层散射和吸收后的伽马射线强度。伽马射线在地层中散射的概率仅取决于地层的电子密度，通过校正将电子密度转换为体积密度可实现地层密度的测量[1]。

3.2. 密度测井环境校正

在随钻密度测井中，最常见的是对井壁间隙(standoff)的环境校正。环境校正受 standoff 的大小、工具与井壁间的泥浆密度影响，通过“脊肋图”的方式来实现环境校正(图 3)。“脊线”对应于工具翼肋紧靠在井壁上的情况(standoff = 0")，此时井眼流体的干扰为零，远、近探测器测量得到的视密度值相同；“肋线”反映工具与地层间存在不同大小 standoff 时所对应的响应趋势[2]。



注： ρ_{far} 为远探测器的视密度； ρ_{near} 为近探测器的视密度；Spine 为脊线；Magnesium Rib 为镁肋线；Competitor Rib 为对比肋线；Aluminum Rib 为铝肋线（不同形状点点对应不同井内流体密度）；All points taken at 1/4" intervals 为所有数据点取 1/4 in 井壁间距区间变化；ppg 为密度单位（1ppg=0.1198g/cm³）。

Figure 3. The spine and ribs plot of ALD environmental correction

图 3. ALD 环境校正“脊肋图”

由于远探测器对地层密度较为敏感，近探测器对井眼环境较为敏感，在工具与井壁之间存在间隙时，为获得准确的密度读数，必须在远探测器的视密度读数上加一个附加校正量，以抵消井眼对于密度读数的影响，该校正量是远探测器读数和与该点所处的肋线与脊线交叉处对应的密度之间的差值。standoff 校正公式为：

$$\Delta\rho = a + bx + cx^2 + dx^3 \tag{1}$$

$$x = \rho_{far} - \rho_{near} \tag{2}$$

式中： $\Delta\rho$ 为密度附加校正量，g/cm³；a、b、c、d 为拟合常数，1。

在实际测量中得到远、近探测器的视密度后, 通过两者间的差值得到 $\Delta\rho$, 校正后的电子密度为:

$$\rho_e = \rho_{\text{far}} + \Delta\rho \quad (3)$$

式中: ρ_e 为校正后的电子密度, g/cm^3 。

ρ_e 可转换为体积密度:

$$\rho_b = 1.070\rho_e - 0.188 \quad (4)$$

式中: ρ_b 为体积密度, g/cm^3 。

当泥浆密度比较小时, $\Delta\rho$ 为正值, ρ_b 为正向校正(测量值偏小); 当泥浆密度大于地层密度时, 由于近探测器受泥浆和井眼条件的影响更大, 则 $\Delta\rho$ 为负值, ρ_b 为反向校正(测量值偏大)。

3.3. ALD 密度曲线类型

3.3.1. 平均密度(ALCDA)

ALD 可以将采样区间分为 4、8、16 个象限。研究区方位密度存储数据分为 360° 、8 扇区(图 4), ALCDA 为 8 个扇区共同的平均密度。

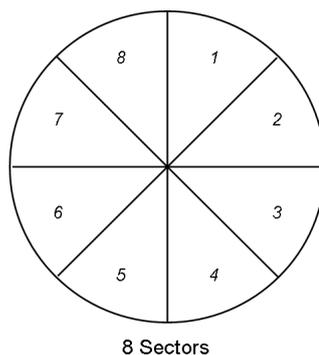


Figure 4. The diagrammatic sketch of 8 sectors of ALD
图 4. ALD 的 8 扇区示意图

与电缆测井不同, 随钻测井工具的特点是在旋转中测量。而“脊肋图”校正算法适用于工具静止采集数据(不旋转)的情况。在钻具旋转的过程中, 特别是井眼存在扩径现象时, “静态”测量条件很可能被破坏, 导致额外误差值的形成。

在随钻密度工具采样期间内, 如果井径没有明显扩大, 即工具间隙值小($\text{standoff} < 0.5''$)时, 肋线距脊线较近且近于直线, 此时得到的 ALCDA 测量值较为准确。在井径扩大的情况下, 工具间隙值大($\text{standoff} > 0.5''$)时, 井眼形状和井径均不规则, 在远、近视密度肋脊线交会图上, 肋线距脊线较远且较弯曲, 此时 ALCDA 测量有偏差。由此可知, 井况越好, 远、近密度值越接近, 肋线形态越接近于直线, 工具测量得到的 ALCDA 越准确。

3.3.2. 低边密度(ALCDLC_B)

低边密度(ALCDLC_B)取低边左 45° 到低边右 45° 区间(扇区 4 + 5)的平均密度。在均一地层、大井斜的情况下, 低边密度可以被认为是地层密度。

3.3.3. 高值密度 LCRB (ALCDLC)

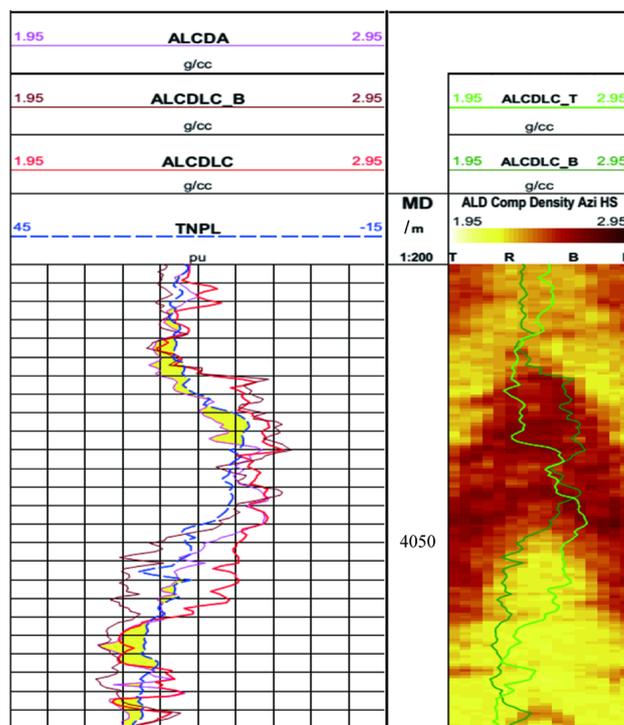
当井眼条件欠佳或者有较大的 standoff 时, ALD 会运行“快速采样模式”, 用以解决 ALCDA 受旋转与扩径影响造成测量失准的缺点。

“快速采样模式”的原理为：在井眼扩大井段，仪器旋转过程中在各个方向上的间隙不同，仪器从各个方向上获得的地层反馈信号强弱不同；根据每个采样点计数率(Count Rate)高低不同，把采样获得的数据由低到高分成3组——Bin1、Bin2、Bin3。实际试验发现，Bin2 区域采样点很少，主要采样点落在其他2个区域。Bin1 定义为低计数率区(Low Count Rate Bin), Bin3 定义为高计数率区(High Count Rate Bin)。使用 Bin1、Bin3 原始采样数据获得的密度分别叫 LCRB(即 ALCDLC)和 HCRB。

快速采样模式在一个采样期间快速对不同计数率数据进行分区，划分最小 standoff 和最大 standoff 的采样计数率，进而得出最小 standoff 和最大 standoff 的密度值。在低泥浆密度情况下，ALCDLC 反映了在工具旋转过程中，standoff 最小时获得的密度值，对比其他方法，此时的 ALCDLC 准确度更高一些。在扩径段，ALCDLC 会比其他密度(HCRB 和 ALCDA)要高一些，可以理解为 ALCDLC 是测量值最高的密度曲线，即为高值密度。

4. 实例分析

以 B5H 井水平段(图 5)为例，在 4040~4045 m 井段，仪器由低密度向高密度穿层，ALCDLC (红色)与 ALCDLC_B (褐色)差异不大，均大于 ALCDA (紫色)；而在 4048~4054 m 井段，仪器从高密度向低密度穿层，ALCDLC 取上部高密度层密度，ALCDLC_B 取下部低密度层密度，ALCDA 介于两者之间；由井径曲线可知，整个井段井径较为规则，此时 ALCDA 能够较为准确地代表地层密度。



注：MD 为垂深；ALCDLC_T 是高边密度；ALD Comp Density Azi HS 是方位密度成像。

Figure 5. The diagram of through-formation logging in Horizontal Well B5H

图 5. B5H 井水平段穿层测井图

如图 6 所示，在 B6H 井水平段 4258~4288 m，井眼靠近砂泥岩的交界面，井眼上部为泥岩，密度较高，此时 ALCDLC 取井眼上部泥岩密度，井眼下部为低密度砂岩，ALCDLC_B 取井眼底部砂岩密度，ALCDA 介于两者之间，由于井径没有扩大，ALCDA 能够准确反映地层密度。

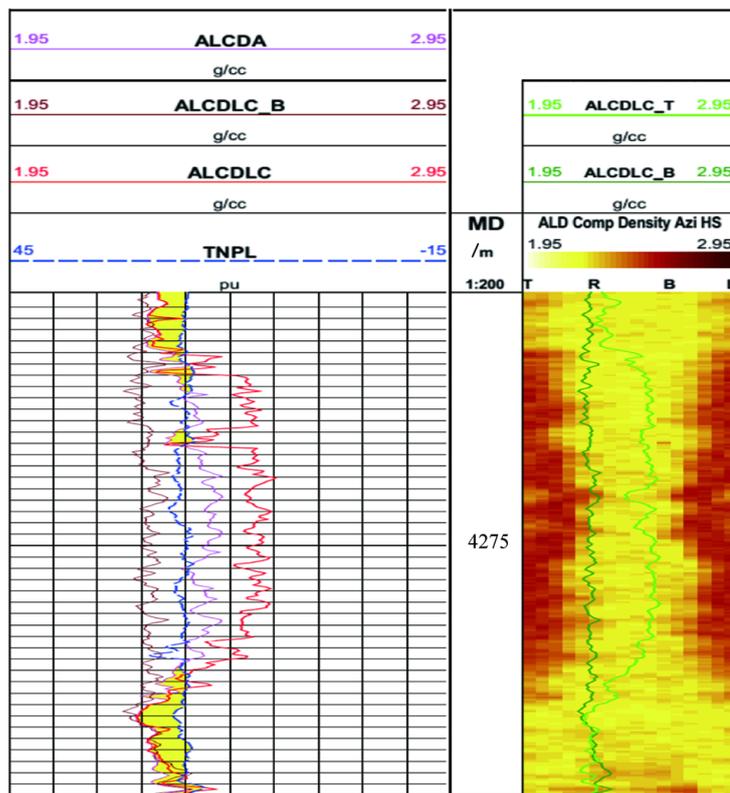


Figure 6. The diagram of through-formation logging in Horizontal Well B6H
 图 6. B6H 井水平段穿层测井图

通过上述实例可知，“快速采样模式”原理决定了 ALCDLC 在穿越层界面时，测量值取仪器旋转过程中相邻地层的最高值，一般高于 ALCDA，导致了 ALCDLC 过界面时响应过激现象。在井况较好的均质地层中，ALCDLC 与 ALCDA 接近，2 种密度均能较为真实地反映地层密度。

在井况条件不好的地层中，如 C4P2 井着陆段为 12.25in 井眼大斜度井段，存在不同程度的扩径现象，部分井段扩径严重，导致 standoff 增大，ALCDA 受扩径影响较大，故在测井处理解释工作中应选择 ALCDLC 作为密度处理曲线。

5. 结论

- 1) 哈里伯顿随钻方位密度测井仪 ALD 可同时提供平均密度、低边密度、高值密度等 3 类密度曲线。
- 2) 高值密度曲线为低计数率区密度，用以解决平均密度在扩径时测量失准的缺点，反映仪器旋转过程中相邻地层的最高值；井况较好时，平均密度能够真实反映地层密度；井况较差时，扩径使得工具偏心距增大，导致平均密度测量值偏差较大。
- 3) 结合工区实际井况，提出 ALD 密度曲线优选原则为：在扩径严重的 12.25in 井眼中，选取高值密度进行处理解释工作；在井况较好的水平段，选取平均密度进行处理解释工作。

参考文献

[1] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 东营: 石油大学出版社, 1993.
 [2] 安旅行, 王俊超, 朱军, 等. 随钻密度测井在大斜度井水平井中的误差分析[J]. 测井技术, 2015, 39(5): 607.

[编辑] 龚丹

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org