

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2021022

引用格式: 李继博, 钱德儒, 郑奕挺, 等. 近钻头伽马高精度实时成像技术研究与应用 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 135-141.

LI Jibo, QIAN Deru, ZHENG Yiting, et al. Research and application of high-precision real-time imaging technology with near-bit gamma [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 135-141.

近钻头伽马高精度实时成像技术研究与应用

李继博^{1,2}, 钱德儒^{1,2}, 郑奕挺^{1,2}, 张 卫^{1,2}, 吴金平^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘 要: 常规随钻测量工具的测点离钻头较远, 无法及时准确判断钻头处的地层岩性和倾角, 储层钻遇率较低, 也不满足储层精确描述的要求。为此, 研究了高转速条件下地层伽马射线动态扫描成像技术, 以及时判断滑动和复合钻进状态下的地层岩性; 研究了地层倾角的计算方法, 实现了钻头处地层倾角的准确计算。研究认为, 近钻头伽马高精度实时成像技术可以实时测量近钻头伽马、动态井斜角、温度及转速等参数, 并进行成像, 为实现钻头在储层内的精确控制提供数据。现场应用显示, 该技术可以满足地质导向钻井对测量数据的需求, 通过对所钻储层的精确描述及时调整钻井轨迹, 从而提高优质储层钻遇率。研究结果表明, 基于国产化近钻头伽马成像工具的地质导向钻井技术在薄油层、倾角变化快地层等具有较好的推广应用价值。

关键词: 地质导向; 近钻头; 成像测井; 方位伽马; 跨螺杆传输; 伽马测井

中图分类号: P631.8 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)03-0135-07

Research and Application of High-Precision Real-Time Imaging Technology with Near-Bit Gamma

LI Jibo^{1,2}, QIAN Deru^{1,2}, ZHENG Yiting^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, WU Jinping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China)

Abstract: The measurement point of the conventional MWD tool is far distant from the bit, and the lithology and dip angle of the formation around the bit cannot be accurately judged in time. This result in a low success rate for drilling formation and a failure to meet the requirements of accurate reservoir description. Therefore, a gamma-ray dynamic formation scanning imaging technology under high-speed conditions, which can realize real-time judgement of the formation lithology under sliding and compound drilling conditions, was studied. In addition, the calculation method realizing the accurate calculation of formation dip angle at the bit was also studied. The high-precision real-time imaging technology with near-bit gamma can image and measure the parameters of near-bit gamma, dynamic well deviation, temperature, and rotation speed in real time, and provide data source for the accurate control of the bit in reservoirs. The field application shows that this technology could meet the needs of geosteering drilling for measurement data, and timely adjust the drilling trajectory through the accurate description of the drilled formation, thus improving the drilling ratio of high-quality reservoirs. The result suggests that the geosteering drilling technology based on domestic near-bit gamma imaging tools deserves wide applications in drilling thin oil layers and those formations with quick dip changes.

Key words: geosteering; near-bit; imaging logging; azimuthal gamma; trans-screw signal transmission; gamma logging

随着国内外油气勘探开发进入中后期, 新探明储量大多处于边缘地区, 储层含量少、分散、超薄, 复杂的油藏地质结构使勘探开发难度大幅增加, 对井眼轨迹控制精度的要求也越来越高^[1]。随着随

收稿日期: 2020-08-18; 改回日期: 2021-02-01。

作者简介: 李继博 (1981—), 男, 山东临沂人, 2004年毕业于西安石油大学工业设计专业, 2007年获西安石油大学机械电子工程专业硕士学位, 2012年获西北工业大学机械制造及其自动化专业博士学位, 副研究员, 主要从事井下随钻测量工具设计及控制技术研究工作。E-mail: lijbo.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“低渗透油气藏高效开发钻完井技术”(编号: 2016ZX05021)和中国石化科技攻关项目“近钻头随钻伽马成像系统工程化研究”(编号: P18001-7)部分研究内容。

钻录井、地质导向等测量工具在钻井中的大量应用,伽马数据成为区分地层岩性必须使用的资料之一^[2]。常规MWD/LWD由于探测器安装位置距离钻头通常在10 m以上,获取的测量数据存在较大延迟,降低了随钻决策和调整的及时性^[3-4]。由于无法及时判断所钻地层的倾角和岩性,影响了井眼轨迹的控制精度,在复杂油藏开发中后期,该问题日趋明显。

近钻头地质导向技术将传感器安装在尽量靠近钻头的位置,从而可以更及时地获得地层信息,国内外油服公司先后研发了近钻头地质导向系统^[5-6]。由于工具越靠近钻头,所受到的振动、压力、冲击、冲蚀等越严重,给参数采集和系统设计带来很大难度;同时,如何在钻具旋转、不规则振动和强冲击的环境下实现高精度伽马成像,也是该项技术需要解决的关键问题。为此,笔者根据方位伽马成像测井方法和机电一体化设计理论,研究了近钻头伽马成像系统的成像测量方法和关键技术,设计了近钻头伽马成像工具,开发了地面实时成像系统,为近钻头伽马高精度实时成像技术在薄油层、倾角变化快地层的应用提供了技术支持。

1 近钻头伽马成像系统

地层岩石中含天然放射性核素(铀系、钍系、钾),其衰变时产生不同能量的伽马射线。地层岩石的自然伽马放射性主要是由铀、钍和钾的含量决定的。近钻头伽马成像测井是将伽马射线探测器和定向传感器同时安装在位于钻头和螺杆之间的钻铤内部,并采用背面屏蔽、侧向开窗的方式来定向探测地层中某一扇区内总的自然伽马射线强度,随着井下钻具的旋转扫描,可以获得全井眼不同扇区地层的伽马射线强度变化图^[7],进而反映地层的岩性变化(见图1)。

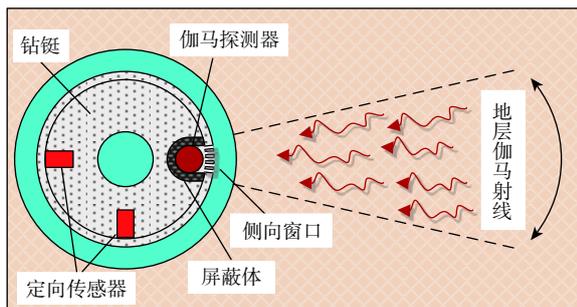


图1 近钻头伽马成像测井原理

Fig.1 Principle of near-bit gamma imaging logging

近钻头伽马成像系统主要由近钻头测量短节、接收短节、随钻测量系统和地面接收成像设备等部分组成^[8-10]。首先,测量短节测量地层方位伽马、井底温度、井斜角和钻头转速等数据,通过无线短传通道将数据跨螺杆传输至接收短节;然后,接收短节将接收到的近钻头数据经过处理后发送给井下随钻测量系统,并借助钻井液压力脉冲上传至地面接收成像设备中,供地质导向软件进行成像显示分析(见图2)。地质导向软件对已钻地层进行判断和解释,并及时调整井眼轨迹,从而达到提高储层钻遇率的目的。

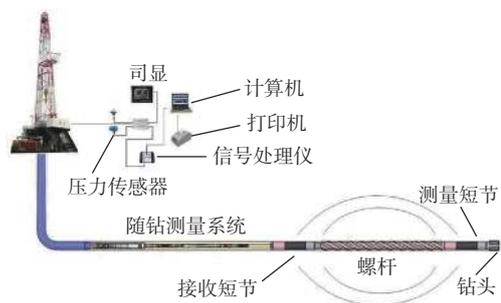


图2 近钻头伽马成像系统组成

Fig.2 Composition of a near-bit gamma imaging system

近钻头伽马成像系统的所有参数测量功能均能通过测量短节实现,主要技术指标如下:1)井眼控制参数。复合钻进造斜率9°/30m,定向钻进造斜率17°/30m,定向钻进最大狗腿度为17°/30m。2)测量参数。伽马成像测量范围0~500 API,实时8扇区存储16扇区成像,动态井斜角0°~180°,动态井斜角精度±0.5°。3)工作环境参数。耐温150℃,耐压105 MPa,工作时间不短于200 h。4)测量点距钻头距离。伽马探测器0.50 m,井斜角传感器0.70 m,无线短传距离不小于11.50 m。

2 随钻伽马成像测量关键技术

近钻头伽马成像系统的测量短节外侧分布有伽马射线探测器,提供分区方位测量。旋转钻井时,短节以二分之一圆周、八分之一圆周或十六分之一圆周为单位对全井壁进行扫描测量,并连续记录测量数据,然后将数据以电磁波形式通过测量短节发射天线跨螺杆发送给接收短节,接收短节将数据压缩打包,通过随钻测量系统的钻井液脉冲器发送至地面。

近钻头伽马随钻成像工具装在螺杆马达两端,测量短节在螺杆马达与钻头之间,能够跨螺杆与接收短节实现短距传输,并且提供足够的空间存储传

感器测量的数据。接收短节能够实现数据的接收及其与随钻测量系统的通讯,同时提供足够的空间存储接收到的数据。伽马成像测量主要包括高转速伽马成像、动态井斜角计算方法、地层相对倾角计算方法和跨螺杆无线传输等关键技术。

2.1 高转速伽马成像

伽马成像短节对地层圆周的不同扇区分别进行测量,获得圆周不同扇区的数据集合。系统开发过程中,应使晶体探头体积和屏蔽层厚度最大化,探头外侧钻铤壁厚最小化,以实现伽马灵敏度最大化的目的。钻柱旋转时,以井眼高边为成像测量零点,系统最高测量精度是能够实现至少每隔 22.5°测量一次伽马数据,并进行记录。

伽马探测器和工具面磁传感器在伽马成像测量钻具内的布局为:1)伽马探测器的伽马敏感区域背向地层的内侧,采用伽马屏蔽材料填充,以降低地层伽马射线作用于伽马探测器背部的强度;2)2个工具面传感器垂直布置于测量钻具内(见图 3),伽马测量扇区、时间与伽马计数的关系如图 4 所示。

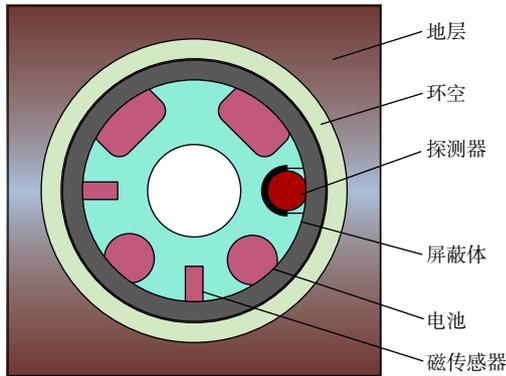


图 3 钻铤内伽马探测器和磁传感器的布局

Fig.3 Layout of gamma detectors and magnetic sensors in a drill collar

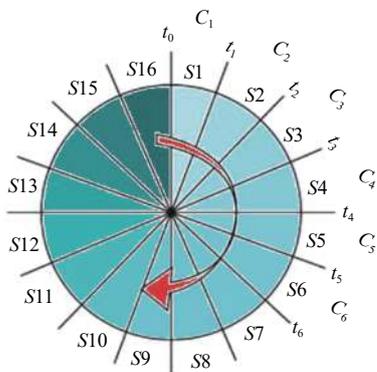


图 4 扇区、时间、伽马计数示意

Fig.4 Schematic illustration of sectors, time, and gamma counting

2.2 动态井斜角计算方法

近钻头地质导向的关键是如何在钻具旋转、不规则振动和强冲击的环境下提取重力加速度信号,进而实现近钻头动态井斜角的精确测量;同时,还需要根据温度对传感器的影响进行温漂补偿。近钻头伽马成像系统的测量短节上正交放置 3 个加速度传感器 A_X 、 A_Y 和 A_Z , 其中 A_X 和 A_Y 为旋转方向且互相垂直, A_Z 沿钻柱轴向(见图 5)。根据钻铤旋转、静止和滑动等状态,分别计算不同的井斜角 α 。

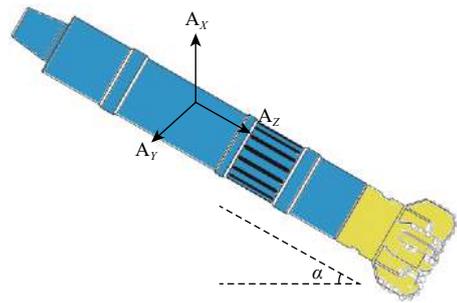


图 5 动态井斜计算方法

Fig.5 Calculation method of dynamic well deviation

钻铤不同状态下的井斜角 α 为:

$$\alpha = \begin{cases} \sin^{-1} \left(\frac{gz_d}{\sqrt{g_{Xg}^2 + g_{Yg}^2 + g_{Zg}^2}} \right) & \text{旋转时} \\ \sin^{-1} \left(\frac{gz_d}{\sqrt{g_{Xd}^2 + g_{Yd}^2 + g_{Zd}^2}} \right) & \text{静止时} \\ \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{g_{Xg}^2 + g_{Yg}^2}}{\sqrt{g_{Xg}^2 + g_{Yg}^2 + g_{Zg}^2}} \right) & \text{滑动时} \end{cases} \quad (1)$$

式中: g_{Xg} , g_{Yg} , g_{Zg} 分别为地面测量的重力加速度, m/s^2 ; g_{Xd} , g_{Yd} , g_{Zd} 分别为井下测量的重力加速度, m/s^2 。

2.3 地层相对倾角计算方法

地质导向过程中,当钻头穿过放射性不同地层边界时,伽马成像图在地层边界处呈正弦曲线特征,利用扇区伽马成像图可以精确反演井眼相对倾角,确定地层边界,控制井眼轨迹。地质导向工程人员可以根据正弦曲线的特征来估计地层相对倾角,从而指导钻进过程。国内外的地质导向软件大多采用人工拾取方式拾取地层边界处的正弦曲线,不仅工作量较大,而且不同解释人员的解释结果存在较大差异。随钻伽马成像在提取正弦曲线时采用中值拟合法进行自动提取,该方法在不同方位伽马曲线的中值处进行插值求取其对应的深度,再将深

度和相应的方位角进行正弦拟合,从而得到地层边界处的正弦曲线。图 6 所示为在相对倾角 80°的地层中利用中值拟合法拾取的正弦曲线,从图 6 可以看出,利用中值拟合法拾取的正弦曲线可以较准确地反映地层边界。

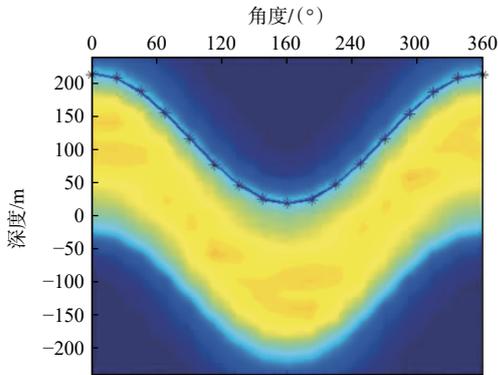


图 6 中值拟合法拾取的地层边界处正弦曲线

Fig.6 Sine curves at the stratigraphic boundary obtained by median fitting method

首先利用随钻过程中测量得到的随方位和深度变化的伽马值进行成像,然后根据成像信息来估计井眼相对倾角的变化趋势,从而调整钻头方向,实现地质导向钻进。利用成像结果计算相对倾角 α_r 的公式为^[11]:

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{H}{D+2d}\right) \quad (2)$$

式中: H 为伽马成像图正弦波高度值,即伽马成像图中地层边界正弦曲线的波峰与波谷的垂直距离(见图 7), m ; D 为井眼直径, m ; d 为垂直井轴方向上观测到的伽马成像的地层深度,也称伽马成像深度, m 。

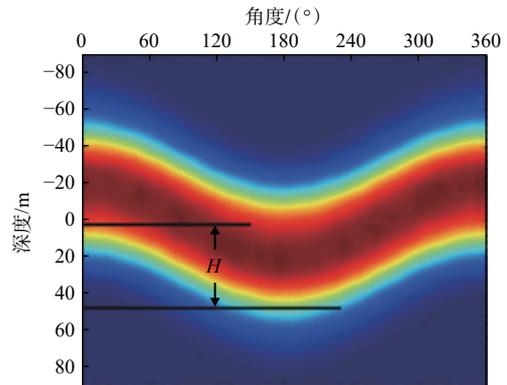


图 7 倾斜地层的随钻伽马成像图

Fig.7 Gamma images while drilling for the inclined strata

H 可以从伽马成像图中得到,但是由于 H 受到井眼和地层条件的影响,因而计算得到的相对倾角也会受到井眼和地层条件的影响。

2.4 跨螺杆无线传输

测量的近钻头数据需要跨过螺杆传输到接收短节才能通过随钻测量系统传输至地面,常用的传输方式有电磁波、超声波和导线^[12-14],由于超声波和导线传输的仪器维护不便且费用昂贵,因此采用无线磁偶极子短传技术。与其他传输方式相比,无线磁偶极子短传技术具有可靠性高、误码率低等特点,尤其适用于油基钻井液和高矿化度钻井液。该技术建立无线电磁传输信道的方法是:用 2 个绕有线圈的磁环作为发射天线和接收天线,两磁环分别装在测量短节和接收短节上,测量短节上安装的是发射天线,接收短节上安装的是接收天线(见图 8)。

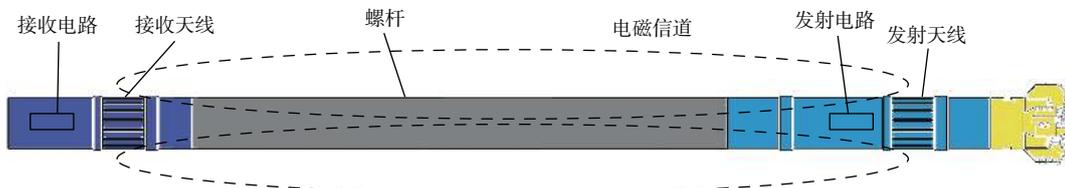


图 8 无线电磁短传信道构成

Fig.8 Structure of a short wireless electromagnetic transmission channel

无线传输的工作原理是:将近钻头测量数据进行调制,放大成频率为 f 的信号电流施加到发射天线上,在信号电流的激励下产生频率为 f 的交变磁场,而这交变磁场又在接收天线上感应出电磁信号,经过多级放大、噪声滤波、解调和信号检波等一系列处理,最终还原出近钻头测量数据。电磁信号

在井下传播除与自身频率和传输介质有关外,还与天线的设计形式、发射方向和功率有关。

建立无线电磁短传信道的方法是:接收天线接收的微弱信号经接收电路放大并处理,信号传输处理过程中,受螺杆、地层、钻井液及放大电路自身噪声的影响,传输可靠性较差。为提高信号传输的可

靠性, 需要进行调制, 并加入信道纠错编码技术。通信系统可以采用多种调制方式对信号进行调制, 最常用的是相移键控调制方式, 其中二进制相移键控 (BPSK) 是灵敏度最高的相移键控调制方式, 同时 BPSK 调制信号在接收端的调制处理也更简单^[15]。BPSK 信号的时域表达式为:

$$e_{\text{BPSK}}(t) = \left[\sum_n a_n g(t - nT_s) \right] \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

式中: $g(t)$ 是单个矩形脉冲; T_s 为脉宽; ω_c 为载波频率; t 为时间; a_n 为输入基带信号。输入基带信号的特征为:

$$a_n = \begin{cases} +1 & \text{概率为 } P \\ -1 & \text{概率为 } 1 - P \end{cases} \quad (4)$$

可见, 在一个码元的持续时间 T_s 内 $e_0(t)$ 为:

$$e_{\text{BPSK}}(t) = \begin{cases} \cos(\omega_c t) & \text{概率为 } P \\ -\cos(\omega_c t) & \text{概率为 } 1 - P \end{cases} \quad (5)$$

即发送码元 1 时, $e_{\text{BPSK}}(t)$ 的相位取 π ; 发送码元 0 时, $e_{\text{BPSK}}(t)$ 的相位取 0。通过不同相位的载波来表示传输数据信息的调制方式, 称为绝对相移的相位键控方式。

3 短节结构设计及力学分析

近钻头伽马短节搭载了多个功能复杂的电子电路系统, 包括各种探测器、电路板和供电电池等, 同时还需要承载钻进破岩作用力, 其结构设计的可靠性是实现测量、传输等功能的基础和关键。由于短节上需要加工各种凹槽放置各种电子电路系统, 导致其具有多个危险截面, 本体要承受拉、压、弯、扭等交变载荷, 经分析计算短节能够满足抗拉、抗压、抗弯强度要求, 为了保证开槽钻铤在一定扭矩下具有足够抗扭特性, 需要计算钻铤开槽后所能够承受的最大扭矩。钻铤开槽之后结构复杂, 理论求解计算难以实现, 因此, 采用有限元法建立钻铤开槽后的有限元模型, 对其进行静力分析, 以评估钻铤开槽后承受最大扭矩时的安全性。

测量短节内有内部过流通道、外部有安装电路板、传感器、发射天线和电池的槽, 进行强度分析时, 根据扣型选用最大上扣扭矩 21.658 kN·m 作为受力条件^[16], 短节承受的最大应力位于中部靠近密封圈槽处, 达到 2.197 MPa (见图 9)。最大应力小于钻铤能够承受的应力, 表明测量短节结构强度满足要求。



图 9 测量短节扭转应力图

Fig.9 Torsional stress of a measuring nipple

4 地面实时成像系统

地面实时成像系统对随钻方位伽马数据进行接收、解码、预处理、实时显示和导向应用。伽马数据在进行了井深校正和成像预处理后, 就可以用于地质构造和地层岩性的识别。方位伽马数据通常采用成像图方式进行展示和应用^[17]。成像图的显示主要包括沿井眼轨迹方向显示、沿水平方向投影显示和沿垂向方向投影显示等 3 部分 (见图 10, 图中: U, D, L 和 R 分别表示上、下、左、右方位; GR_U , GR_D , GR_L 和 GR_R 分别为上、下、左、右伽马曲线)。沿井眼轨迹显示伽马探测器在钻进中的实际测量数据; 水平投影显示地层沿径向延伸的变化情况, 识别径向上地质构造变化; 垂直投影显示则用来识别地层沿垂向的岩性变化。

地面实时成像系统还可以对井下传输上来的方位伽马数据进行精细化成像处理, 形成多扇区地层成像图。井下方位伽马数据实际上是由一系列数据线构成, 地面读取后进行滤波、插值、拟合处理, 形成更加均匀光滑的成像图。地面实时成像系统实现了随钻遥测系统的数据通讯、井深跟踪、伽马成像数据处理显示和井眼轨迹绘制, 而且方位伽马数据带有方位信息, 可以准确判断钻头在地层的位置, 预测地层走向及井眼相对倾角变化趋势。

5 现场应用

近钻头伽马高精度实时成像技术已在多个油田 10 余口井进行了现场应用, 取得了较好的现场应用效果。胜利油田临盘油区某井设计垂深 2 123.00 m, 水平段长 789.00 m, A 靶点储层顶垂深 2 118.00 m、底垂深 2 128.00 m, B 靶点储层顶垂深 2 116.00 m、底垂深 2 126.00 m。近钻头伽马成像系统入井钻具组合为 $\phi 215.9$ mm 金刚石钻头+近钻头测量短节+

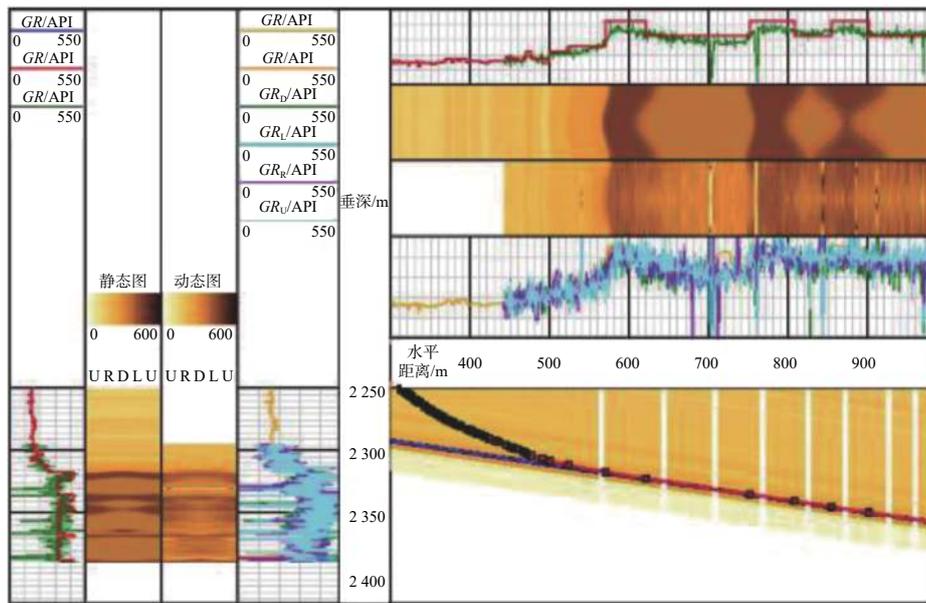


图 10 地面实时成像系统显示界面

Fig.10 Display interface of a real-time surface imaging system

1.25°单弯螺杆+浮阀+接收短节+常规 MWD+无磁承压钻杆+加重钻杆+ $\phi 127.0$ mm 常规钻杆。近钻头方位伽马零长为 0.74 m, 远端 MWD 方位伽马零长为 15.90 m。

二开近钻头伽马成像系统入井后, 累计进尺 1 200.00 m, 累计工作时间超过 100 h, 整个二开期间伽马测量数据稳定, 地层参数变化清晰, 进入 A 靶点后通过实时监控伽马值的变化趋势, 及时调整井眼轨迹, 保证了钻头在预定储层中穿行, 最终该井进行了 3 趟钻施工, 水平段储层钻遇率达到 96%。根据近钻头伽马实时成像图, 能够很容易判断钻头是否出储层(见图 11), 从井深 2 148.00 m 开始近钻头上(或顶)、下(或底)伽马值开始升高, 成像图由亮变暗, 表明开始进入高放射性泥岩层段, 这与地面岩屑伽马测量仪测量结果一致, 结合地面实时成像软件计算出相对倾角为 1.2°, 需要及时调整井斜角, 以 4.0°/30m 的纠斜能力回调, 需要约 19.00 m 重新回到储层, 储层钻遇率约损失 2.4%; 若以常规的远端 MWD 方位伽马作为测量依据, 则从发现钻头出层到调整回储层需要约 49.00 m, 储层钻遇率损失约 6.2%。可见, 采用近钻头伽马成像系统能够大幅提高储层钻遇率。

6 结论

1) 近钻头伽马成像系统采用机械电子一体化设

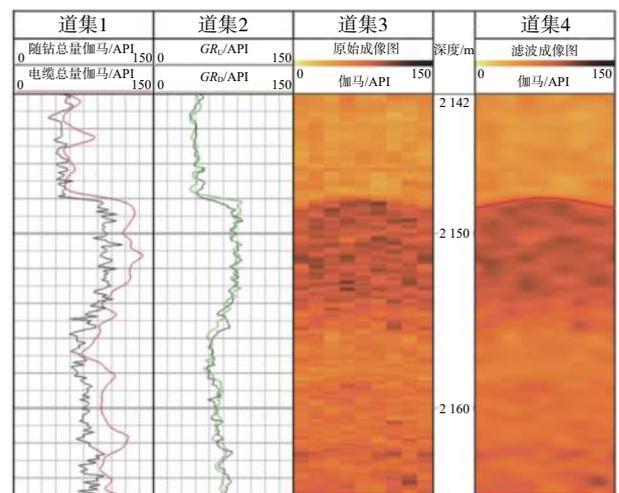


图 11 近钻头伽马现场实时数据

Fig. 11 Real-time data of near-bit gamma imaging

计, 将常规 LWD 导向时的测量盲区由 10.00 m 多缩短至不到 1.00 m, 能够实现近钻头地质参数测量和数据传输, 可提前发现储层边界和相对倾角并及时调整井眼轨迹, 从而提高储层钻遇率。

2) 近钻头伽马成像系统解决了靠近钻头位置强振动、高转速条件下的伽马精确测量、高精度随钻成像、跨螺杆数据传输和复杂截面结构设计等难题, 为地质导向钻井系统的研发奠定了基础。

3) 近钻头伽马高精度成像技术在定向井、水平井勘探开发中具有良好的应用前景, 尤其在薄油层、构造不确定性较高和横向变化大的区块应用时

优势更加明显, 通过伽马成像实时监控钻头位置, 可以保证井眼轨迹在优质储层中穿行, 提高储层钻遇率。

参 考 文 献

References

- [1] 向长生, 王智锋, 亢武臣. 随钻自然伽马地层边界模型分析 [J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1): 112-114.
XIANG Changsheng, WANG Zhifeng, KANG Wuchen. Modeling and analysis of formation boundaries based on LWD natural gamma[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(1): 112-114.
- [2] 骆庆锋, 王铁永, 梁羽佳, 等. 方位自然伽马探测器设计研究 [J]. 石油仪器, 2012, 26(4): 1-3.
LUO Qingfeng, WANG Tiejong, LIANG Yujia, et al. Design of the azimuth gamma detector[J]. *Petroleum Instruments*, 2012, 26(4): 1-3.
- [3] 王智锋. MRC 近钻头地质导向系统总体设计与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 1-4.
WANG Zhifeng. Overall design and application of MRC near-bit geosteering system[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(4): 1-4.
- [4] 刘伟, 伍贤柱, 韩烈祥, 等. 水平井钻井技术在四川长宁—威远页岩气井的应用 [J]. 钻采工艺, 2013, 36(1): 114-115.
LIU Wei, WU Xianzhu, HAN Liexiang, et al. Application of horizontal well drilling technology in Changning-Weiyuan shale gas well in Sichuan[J]. *Drilling & Production Technology*, 2013, 36(1): 114-115.
- [5] 刘明. 近钻头地质导向钻井技术在江苏油田的应用 [J]. 中国石化和化工标准与质量, 2013, 33(17): 106-107.
LIU Ming. Application of near bit geosteering drilling technology in Jiangsu Oilfield[J]. *Chinese Petroleum and Chemical Standards and Quality*, 2013, 33(17): 106-107.
- [6] 王敏生, 光新军. 定向钻井技术新进展及发展趋势 [J]. 石油机械, 2015, 43(7): 12-18.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Advances and trend of directional drilling technology[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(7): 12-18.
- [7] WANG Jiabin, HUISZON C, XU Libai, et al. Quantitative study of natural gamma ray depth of image and dip angle calculations[R]. SPWLA -2013-BBB, 2013.
- [8] 郑奕挺, 方方, 吴金平, 等. 近钻头随钻伽马成像快速正弦曲线拟合方法 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 116-122.
ZHENG Yiting, FANG Fang, WU Jinping, et al. Rapid sinusoidal fitting method for near-bit gamma imaging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 116-122.
- [9] 路保平, 倪卫宁. 高精度随钻成像测井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 148-155.
LU Baoping, NI Weining. The key technologies of high precision imaging logging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 148-155.
- [10] 郑奕挺, 方方, 吴金平, 等. 近钻头随钻伽马成像系统研制及应用 [J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(3): 70-76, 126.
ZHENG Yiting, FANG Fang, WU Jinping, et al. Development and application of near-bit gamma-ray imaging system during drilling[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(3): 70-76, 126.
- [11] BITTAR M, CHEMALI R, MORYS M, et al. The “depth-of-electrical image” a key parameter in accurate dip computation and geosteering[R]. SPWLA-2008-TT, 2008.
- [12] 段永贤, 张雷, 陈军, 等. 基于电信号传输数据的近钻头测量仪器研究 [J]. 石油机械, 2017, 45(2): 41-44.
DUAN Yongxian, ZHANG Lei, CHEN Jun, et al. Study on near-bit measuring instrument based on electric signal transmitting data[J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(2): 41-44.
- [13] 周静, 倪文龙, 李娜, 等. 井下声波短传中 DDS 信号发生器的设计 [J]. 石油机械, 2015, 43(4): 14-18.
ZHOU Jing, NI Wenlong, LI Na, et al. Design of a DDS signal generator for short-distance transmission of downhole acoustic waves[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(4): 14-18.
- [14] 侯胜明, 王以法, 管志川, 等. 基于超声波的近钻头无线随钻测斜系统设计 [J]. 石油机械, 2010, 38(10): 1-3.
HOU Shengming, WANG Yifa, GUAN Zhichuan, et al. Design of an ultrasonic wave-based near-bit wireless inclinometry-while-drilling system[J]. *China Petroleum Machinery*, 2010, 38(10): 1-3.
- [15] LANGE R, SMUTNY B. Optical inter-satellite links based on homodyne BPSK modulation: heritage, status, and outlook[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5712(1): 593711.
- [16] API RP 7G—1998 Recommended practice for drill stem design and operating limits[S].
- [17] 段友祥, 仝兆岐, 李卿, 等. 面向随钻的井筒可视化方法研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 63-70.
DUAN Youxiang, TONG Zhaoqi, LI Qing, et al. Wellbore visualization method for logging while drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(6): 63-70.

[编辑 滕春鸣]