

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019101

## 近钻头随钻伽马成像快速正弦曲线拟合方法

郑奕挺<sup>1,2,3</sup>, 方方<sup>1</sup>, 吴金平<sup>2,3</sup>, 钱德儒<sup>2,3</sup>, 张卫<sup>2,3</sup>

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川成都 610059; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘要:** 针对现有随钻测井数据传输速率较低的问题和井下实时获取伽马成像图的需求, 模拟分析了近钻头伽马成像测井仪器穿过倾斜界面进入高放射性泥岩层的扇区成像特征, 提出了基于扇区伽马成像图的快速正弦曲线拟合方法。设计了近钻头伽马成像测井中的快速正弦曲线拟合固件算法, 将最小二乘估计算法和三参数正弦拟合相结合, 提取得到正弦曲线的幅度、频率、相位和直流分量等4个参数, 为拟合反演形成多扇区伽马成像图提供数据。利用快速正弦曲线拟合方法, 测试了用标准岩样构造分层倾斜地层模拟井眼采集的伽马数据, 实现了多扇区伽马成像测量值的拟合, 且拟合误差较小。研究表明, 拟合反演得到的8扇区伽马成像图的正弦曲线特征明显, 能够准确反映倾斜地层界面信息, 验证了快速正弦曲线拟合方法的可行性和正确性。

**关键词:** 随钻测井; 伽马成像; 近钻头; 扇区; 倾斜界面; 正弦曲线; 拟合方法

**中图分类号:** P631.8<sup>+</sup>17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2019)06-0116-07

## Rapid Sinusoidal Fitting Method for Near-Bit Gamma Imaging While Drilling

ZHENG Yiting<sup>1,2,3</sup>, FANG Fang<sup>1</sup>, WU Jinping<sup>2,3</sup>, QIAN Deru<sup>2,3</sup>, ZHANG Wei<sup>2,3</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

**Abstract:** Seeking to solve the problem of low transmission rate of existing LWD data and the demands on real-time gamma imaging, sector gamma-ray imaging characteristics were simulated and analyzed. This occurred while a near bit gamma-ray imaging tool crossing inclined interface moving from low-level radioactive sandstone to high-level radioactive mudstone, and thus a rapid sinusoidal fitting method based on the sector gamma imaging was proposed. Based on the studies, a rapid sinusoidal fitting firmware algorithm for near-bit gamma imaging logging was designed. This algorithm combined the least squares frequency estimation and 3-parameter sine fitting to obtain the 4 parameters of the sinusoid, such as amplitude, frequency, phase and DC component, hence obtaining the multi-sector gamma imaging through fitting inversion. By using the fast sinusoidal fitting method, the gamma data was acquired in the simulated wellbore fabricated with the standard rock samples and layered dipping strata, and the fitting of multi-sector gamma imaging measurement was realized with a small fitting error. The results showed that the sinusoidal features of the 8-sector gamma image obtained by fitting inversion were clear and they could accurately reflect the information of the inclined strata interface, which verified the correctness and feasibility of the fast sinusoidal fitting method.

**Key words:** logging while drilling; gamma-ray imaging; near bit; sector; inclined interface; sinusoid; fitting method

具有低渗透、非均质和各向异性特征的复杂油气藏逐渐成为油气勘探开发的重点, 无论从储层评价还是钻井工程来看, 对近钻头地质导向系统均有迫切需求<sup>[1-2]</sup>。目前, 近钻头伽马成像测井已成为国外随钻地质导向作业的常用技术, 在钻井过程中首先利用安装在钻铤侧面的单个或多个伽马探测器、定向探测地层中某一扇区内总的自然伽马射线强度, 然后随着井下钻具旋转动态扫描获取全井眼不

收稿日期: 2019-01-08; 改回日期: 2019-08-20。

**作者简介:** 郑奕挺(1979—), 男, 福建仙游人, 2000年毕业于成都理工大学电子仪器与测量技术专业, 2006年获成都理工大学测试计量技术及仪器专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事放射性测量、随钻伽马成像和无线短传技术等方面的研究工作。E-mail: zhengyt.sripe@sinopec.com。

**基金项目:** 国家科技重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(编号: 2016ZX05021-002)、“海相碳酸盐岩超深油气井关键工程技术”(编号: 2017ZX05005-005)联合资助。

同方位扇区地层的伽马成像图,最后根据成像信息来估算地层与井眼的变化趋势,据此调整钻头前进方向,以实现地质导向作业<sup>[3-5]</sup>。D. C. Minette<sup>[6]</sup>最早介绍了方位伽马测井,在LWD仪器随钻头旋转过程中,将测量的伽马强度分组到相应的各个扇区,得到各个扇区的伽马测量值;后来,R. L. Spross<sup>[7]</sup>根据仪器与井壁的环空间隙对钻进中各个方位的采样数据进行了加权,得到了各个扇区的伽马计数,实现了扇区伽马成像;M. Bittar等人<sup>[8]</sup>在扇区伽马成像测井中引入了“成像深度”的概念,以精确计算地层倾角,并准确进行地质导向作业;K. McKinny等人<sup>[9]</sup>介绍了正弦曲线自动拾取方法,并采用蒙特卡罗模拟和相关数学方法,进行了成像计算倾角的误差分析;袁超等人<sup>[10]</sup>进行了扇区伽马成像正演模拟,分析了井眼条件对方位伽马成像的影响;Wang Jiabin等人<sup>[11]</sup>采用平均值拟合法实现了正弦曲线的自动拾取,利用蒙特卡罗模拟分析了地层密度、井筒环境、钻井液密度和仪器偏心等因素对成像深度的影响,并给出了计算倾角的方法。

地质导向作业中,倾斜地层界面在近钻头伽马成像图中呈现出正弦曲线特征,提取该曲线的特征参数,可以分析地层走向和井眼轨迹。但是,现有随钻测井数据遥测系统的传输能力有限,无法将大量的扇区伽马成像数据实时上传至地面测控系统,因而不能及时地指导司钻进行井眼轨迹调整,给钻井作业带来了风险。近年来,大规模集成器件(如数字信号处理器DSP)在随钻测井仪器中得到了广泛应用,可以实现对井下复杂情况的控制,并且具有较强的计算处理能力<sup>[12-13]</sup>。其中,DSP中实时多扇区伽马测量值拟合是近钻头伽马成像测井仪器的关键技术之一。为了满足现场实时获取伽马成像图的迫切需求,笔者提出了一种基于扇区伽马成像的快速正弦曲线拟合方法,并将其应用于近钻头伽马成像测井中井下固件算法的设计,以解决成像数据与传输速率不匹配的问题;在此基础上,试验研究了用标准岩样构造分层倾斜地层模拟井眼采集的伽马数据,反演得到8扇区伽马成像图,并验证了快速正弦曲线拟合方法的可行性和准确性。

## 1 倾斜界面近钻头伽马成像特征

为分析倾斜界面近钻头伽马成像特征,建立了充满液体井眼倾斜界面地层模型,如图1所示。模型中,地层界面与井眼轴线的夹角为 $\alpha$ ,井眼直径

$R$ 为215.9 mm,井眼内充满淡水;钻头附近,钻铤外径 $r_0$ 为172.0 mm,钻铤侧面开槽放置1个伽马探测器,钻铤水眼中充满淡水,水眼直径 $r_1$ 为57.0 mm;上部地层为低放射性的纯砂岩目的层,放射性强度为0;下部地层为高放射性的泥岩地层。模拟计算时,使近钻头伽马成像测井仪器旋转,从上部低放射性砂岩层穿过下部高放射性泥岩,记录伽马探测器在8或16个方位的伽马计数率,并采用样条插值方法获取全井眼8扇区或16扇区伽马成像图。

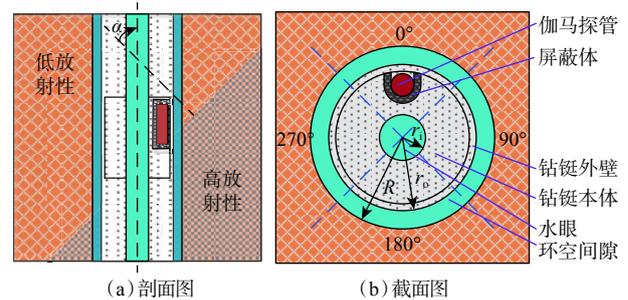


图1 充满液体井眼倾斜界面地层模型

Fig. 1 Inclined interface stratigraphic model with liquid-filled wellbore

近钻头伽马成像测井仪器从上部低放射性目的层穿过倾斜界面进入高放射性泥岩层,利用蒙特卡罗方法模拟获取了8扇区伽马成像图(见图2)。

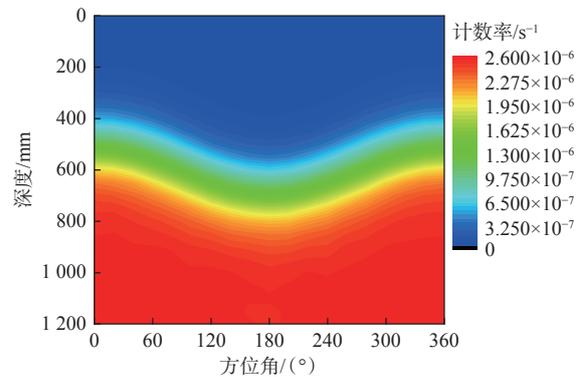


图2 倾斜界面近钻头8扇区伽马成像图

Fig. 2 Inclined interface near-bit 8-sector gamma image

从图2可以看出,当近钻头伽马成像测井仪器随着钻进方向测量时,伽马探测器在井眼内逐渐从顶部靠近地层边界,在方位角 $0^\circ$ 处首先探测到高放射性泥岩层;当该仪器随着钻进继续前移,其他方位开始探测到高放射性泥岩层;最后,该仪器完全通过层界面,并全部进入到高放射性泥岩层中;近钻头伽马成像测井仪器穿过倾斜界面进入高放射性泥岩层时,地层界面在扇区伽马成像图中呈现正弦曲线特征。成像图可直观地显示高放射性地层,亮

度越大,表示该位置的放射性强度越高。

根据扇区伽马成像图的正弦曲线特征,可计算出地层倾斜界面与井眼相交的相对倾角,计算公式为:

$$\alpha = \arctan \frac{H}{D+2d} \quad (1)$$

式中: $H$ 为伽马成像图正弦波高度(地层边界正弦曲线的波峰与波谷的垂直高度),mm; $D$ 为井眼直径,mm; $d$ 为在垂直井眼轴线方向上观测到伽马成像的地层深度(也称伽马成像深度),mm。

$H$ 和 $d$ 可以从伽马成像图中得到。但由于 $H$ 和 $d$ 受井眼和地层条件的影响,计算得到的相对倾角也会受到井眼和地层条件的影响。而近钻头伽马成像测井仪器以一定井眼相对倾角穿过地层界面进入高放射性泥质围岩层,可以测量得到呈正弦曲线特征的扇区成像图。利用扇区伽马成像图可以精确反演井眼相对倾角和围岩地层厚度,从而确定地层边界,实现井眼轨迹精确控制。

## 2 快速正弦曲线拟合方法

基于扇区伽马成像图,通过拟合正弦曲线可以提取成像图中特征参数,利用式(1)可以计算井眼相对倾角;与之相似,扇区伽马成像测量值与方位角的关系也可采用正弦曲线来表征。前人已对正弦曲线的拟合方法进行了大量研究,例如四参数正弦波拟合算法属于非线性迭代拟合,若拟合初始值距离目标值“太远”,则容易导致迭代过程发散或收敛到局部最优点而不是总体最优点,致使拟合结果错误<sup>[14]</sup>;并且,利用四参数正弦波拟合算法进行拟合耗时较长,会影响算法的时效性和适用性。另外,近钻头伽马成像测井仪器井下电子系统的处理能力有限,无法在井下进行大量的数学迭代运算。为此,针对实时获取井下伽马成像图的需求以及考虑随钻测井数据传输速率的限制,基于扇区伽马成像图呈现正弦曲线的特征,提出了一种快速正弦曲线拟合方法:先对扇区成像图中正弦曲线的频率进行估计,再在频率已知的条件下进行三参数正弦曲线快速拟合,以获得正弦曲线的幅度、相位和直流分量等3个参数,最后利用正弦曲线的幅度、频率、相位和直流分量等4个参数来拟合反演形成扇区伽马成像图。

多扇区(8或16扇区)伽马成像图中某一正弦曲线可以看成均匀采样后获得的等间隔采样序列

(如图3所示),记为 $Ga_1, Ga_2, \dots, Ga_n$ 。设方位采样间隔为 $\Delta Az$ ,方位角采样数据序列表示为 $Az_i = (i-1)\Delta Az$ , $i = 1, 2, \dots, n$ ,数字角频率表示为 $\omega = 2\pi f\Delta Az$ ,则理想正弦信号的离散形式为:

$$Ga(i) = E \cos[\omega(i-1) + \varphi] + Q \quad (2)$$

式中: $E$ 为信号幅值,API; $\varphi$ 为信号的初相位,rad; $Q$ 为信号的直流分量,API。

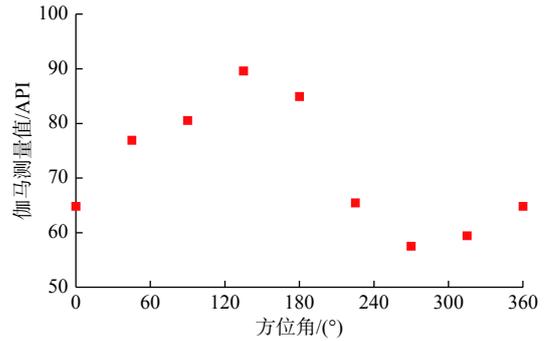


图3 多扇区伽马成像数据序列

Fig. 3 Multi-sector gamma imaging data sequence

令 $x(i) = E \cos[\omega(i-1) + \varphi]$ , $i = 1, 2, \dots, n$ ,记伽马测量值 $Ga_i$ 的误差为 $\gamma_i$ ,并令 $g = 2 \cos \omega$ ,则:

$$Ga_i = Ga(i) + \gamma_i = x(i) + Q + \gamma_i \quad (3)$$

$$x(i) + x(i-2) = 2 \cos \omega E \cos[\omega(i-2) + \varphi] = g x(i-1) \quad (4)$$

$$Ga(i) - Q + Ga(i-2) - Q = g[Ga(i-1) - Q] \quad (5)$$

$$Ga_i - Q - \gamma_i + Ga_{i-2} - Q - \gamma_{i-2} = g(Ga_{i-1} - Q - \gamma_{i-1}) \quad (6)$$

$$Ga_{i+1} - Q - \gamma_{i+1} + Ga_{i-1} - Q - \gamma_{i-1} = g(Ga_i - Q - \gamma_i) \quad (7)$$

再令 $z_i = Ga_i - Ga_{i-1}$ , $\zeta_i = \gamma_i - \gamma_{i-1}$ ,式(6)和式(7)相减,得:

$$z_{i+1} + z_{i-1} - g z_i = \zeta_{i+1} + \zeta_{i-1} - g \zeta_i \quad (8)$$

由于伽马测量值的误差 $\gamma_i$ 为随机误差,故式(8)右侧同样可以认为是随机误差。通过选取 $g$ 的取值,使 $\rho = \sum_{i=3}^{n-1} (z_{i+1} + z_{i-1} - g z_i)^2$ 最小,即 $d\rho/dg = 0$ ,则:

$$g = \frac{z_n z_{n-1} + z_3 z_2 + 2 \sum_{i=4}^{n-1} z_i z_{i-1}}{\sum_{i=3}^{n-1} z_i^2} \quad (9)$$

$$\tilde{\omega} = \arccos \frac{g}{2} \quad (10)$$

式中: $\tilde{\omega}$ 为数字角频率的最小二乘估计值。

基于最小二乘估计获得正弦曲线的频率 $f$ 后,利用三参数正弦拟合算法构造残差平方和 $\varepsilon$ ,即:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n [Ga_i - A_1 \cos(2\pi fAz_i) - B_1 \sin(2\pi fAz_i) - C]^2 \quad (11)$$

将式(11)改写成矩阵形式:

$$\varepsilon = (\mathbf{y} - \mathbf{D}_0 \mathbf{s}_0)^T (\mathbf{y} - \mathbf{D}_0 \mathbf{s}_0) \quad (12)$$

$$\text{其中 } \mathbf{D}_0 = \begin{bmatrix} \cos(2\pi fAz_1) & \sin(2\pi fAz_1) & 1 \\ \cos(2\pi fAz_2) & \sin(2\pi fAz_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(2\pi fAz_n) & \sin(2\pi fAz_n) & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} Ga_1 \\ Ga_2 \\ \vdots \\ Ga_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{s}_0 = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据最小二乘拟合方法,使式(12)所述残差平方和 $\varepsilon$ 最小<sup>[15]</sup>,则式(12)的最小二乘解为:

$$\hat{\mathbf{s}}_0 = (\mathbf{D}_0^T \mathbf{D}_0)^{-1} (\mathbf{D}_0^T \mathbf{y}) \quad (16)$$

故正弦曲线的拟合函数为:

$$\tilde{G}a(i) = A_1 \cos(\tilde{\omega}i) + B_1 \sin(\tilde{\omega}i) + C \quad (17)$$

其幅度和相位表达式为:

$$\tilde{G}a(i) = A \cos(2\pi fAz_i + \theta) + C \quad (18)$$

$$\text{其中 } A = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad (19)$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan \frac{-B_1}{A_1}, & A_1 \geq 0 \\ \arctan \frac{-B_1}{A_1} + \pi, & A_1 < 0 \end{cases} \quad (20)$$

拟合残差有效值为:

$$\rho = \sqrt{\frac{\varepsilon}{n}} \quad (21)$$

上面所推导的是信号频率估计算法和三参数正弦拟合算法的相关公式。将信号频率估计算法和三参数正弦拟合算法进行结合,即为快速正弦曲线拟合方法。利用快速正弦曲线拟合方法获取正弦曲线的幅度、频率、相位和直流分量等 4 个参数,再利用式(18),就可拟合反演形成扇区伽马成像图。相比于四参数拟合方法,上述拟合过程只涉及四则运算,不需要迭代运算,属于闭合的线性过程,绝对收敛。快速正弦曲线拟合方法具有速度快、过程简洁的特点,适合用于提取井下伽马成像图正弦曲线特征参数。

### 3 快速正弦曲线拟合固件算法的实现

近钻头伽马成像测井仪器下短节采用 DSP 进行各种计算和处理, DSP 的结构和指令集可高效地实现乘积、累加和傅里叶变换等功能,数据处理主要包括滤波、伽马计数累加、多扇区伽马测量值拟合、数据压缩和可变增益控制等算法。井下 DSP 实时多扇区伽马测量值拟合是近钻头伽马成像测井仪器的关键技术之一,为此,设计了近钻头伽马成像测井的快速正弦曲线拟合固件算法,以拟合多扇区伽马成像测量值。快速正弦曲线拟合方法具有绝对收敛、算法简洁、运算速度快和内存占用空间小等特点,可以较好地实现多扇区伽马成像测量值的拟合。

仪器下短节 DSP 控制及数据处理流程如图 4 所示。仪器处于地面工作模式时,主要利用 SCI 接口或 485 总线接口,通过 SCI 接口完成工作参数设置,通过 485 总线接口读取仪器 FLASH 存储器中的数据。仪器处于延时工作模式时,禁止 DSP 内部的各种外围设备,并保存关键参数后进入休眠模式;到达设定的时间间隔后,由微控制器通过产生外部中断的方式唤醒 DSP,使其进入随钻测井工作模式。随钻测井工作模式下,仪器按照预设的方式工作,启动定时器,采集 8 扇区或 16 扇区伽马测量值、动态工具面等参数,并写入缓存中形成一帧数据序列。在微控制器的控制下,按照预设命令同步启动随钻测井工作循环,由微控制器实现大量的控制工作,产生仪器各部分的工作时序,使 DSP 实时完成每一帧伽马测量值的处理与拟合,并进行数据传输。

井下实时多扇区伽马测量值的拟合采用快速正弦曲线拟合方法,其流程如图 5 所示。首先,从缓存中读取一帧数据序列中的原始伽马测量值数据,并进行数据预处理操作,剔除奇异值,形成有效伽马测量值数据序列;然后,对伽马测量值数据序列进行频率估计,获取正弦曲线频率的最小二乘估计值;最后,在频率已知的条件下,进行三参数正弦曲线拟合,获得正弦曲线的幅度、频率、相位和直流分量等 4 个参数。由于钻井液脉冲传输数据的速率较低,大量的原始伽马测量数据和实时计算结果需要保存到井下仪器中的 FLASH 存储器中,只是将井下实时拟合获得的正弦曲线 4 个特征参数传输到地面测控系统,再由地面处理程序进行人机交互拟合反演形成 8 扇区或 16 扇区伽马成像图,就可以获得比较可信的成像效果。

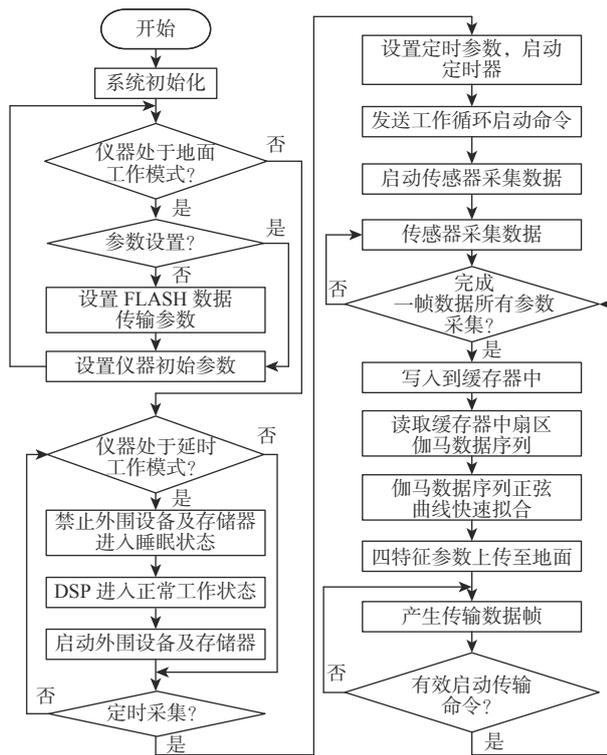


图4 仪器下短节 DSP 控制及数据处理流程

Fig. 4 DSP control and data processing workflow of instrument below the sub

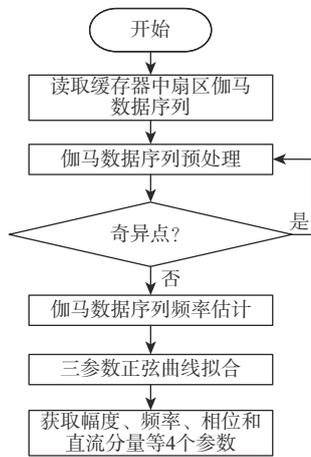


图5 伽马测量值快速正弦曲线拟合流程

Fig. 5 Rapid sinusoidal fitting process for gamma measurement value

### 4 近钻头伽马成像测井仪器成像试验

用标准岩样构造分层倾斜地层模拟井眼, 进行近钻头伽马成像测井仪器成像试验, 以验证快速正弦曲线拟合方法的可行性和正确性。

建立的井眼模型如图6所示。模型外径为800.0 mm, 长度为2 200.0 mm; 井眼直径为215.9 mm,

井眼内充满空气; 井眼周围地层由2种不同放射性强度的分层倾斜地层组合而成, 高放射性地层A为天然放射性标准花岗岩样混合介质, 低放射性地层B为模拟沉积岩混凝土介质; 倾斜地层的边界与井眼轴线的夹角为32°。该井眼模型既可以垂直放置, 模拟直井分层倾斜地层; 也可以水平放置, 模拟水平井分层倾斜地层。

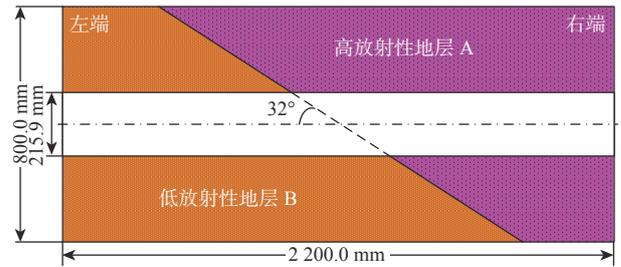
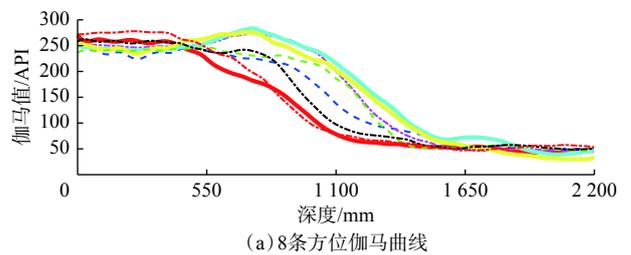


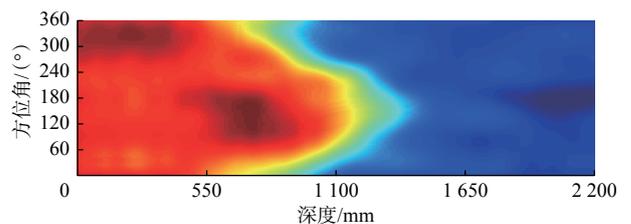
图6 用标准岩样构成的分层倾斜地层井眼模型

Fig. 6 Layered dipping strata wellbore model fabricated with standard rock samples

井眼模型水平放置时, 近钻头伽马成像测井仪器下短节旋转, 从井眼的右端移动到井眼的左端进行8扇区伽马成像数据采集, 地层放射性强度从250 API变化到50 API, 转速30 r/min, 水平移动速度0.25 m/min。仪器下短节在井眼内从右端向左端移动时, 首先探测到高放射性花岗岩层; 然后逐渐向左端移动, 从底部靠近倾斜地层边界时, 在方位角0°处首先探测到低放射性沉积岩混凝土层; 仪器下短节继续向左端移动, 其他方位开始探测到低放射性沉积岩混凝土层; 最后, 仪器下短节完全通过地层边界, 并进入到低放射性沉积岩混凝土层中, 得到8条方位伽马曲线和8扇区伽马成像图(见图7)。



(a) 8条方位伽马曲线



(b) 8扇区伽马成像图

图7 8条方位伽马曲线和8扇区伽马成像图

Fig. 7 8 azimuth gamma curves and 8-sector gamma image

从图 7 可以看出,当仪器下短节从高放射性地层穿过倾斜地层边界进入低放射性地层时,伽马测量值从大变小,并且 8 条方位伽马曲线在地层边界处有明显差异,地层边界在扇区伽马成像图中呈现正弦曲线特征。

采用井下固件程序中的快速正弦曲线拟合算法自动提取正弦曲线 4 个特征参数,并拟合得到每个深度位置的扇区伽马成像数据曲线(见图 8,图中离散点表示方位伽马测量值)。

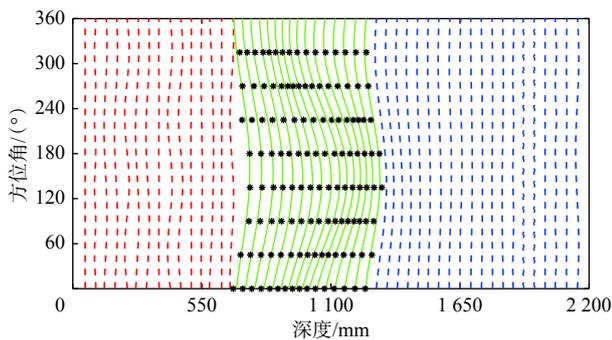


图 8 8 扇区伽马成像数据拟合曲线

Fig. 8 Data fitting curve of 8-sector gamma image

从图 8 可以看出,当仪器下短节完全处于高放射性或低放射性地层时,在每个深度位置处测量的扇区伽马成像数据拟合呈直线(见图 8 中红线和蓝线),各个方位伽马成像测量值基本一致,存在一定的统计涨落误差;当仪器下短节穿过倾斜地层边界时,在每个深度位置处测量的扇区伽马成像数据呈正弦曲线特征,拟合确定系数大于 0.75,拟合效果较好(见图 8 中绿线)。

基于快速正弦曲线拟合算法,利用正弦曲线 4 个特征参数在地面上反演,得到的 8 扇区伽马成像和地层界面预测结果如图 9 所示(图中离散黑点表示伽马成像测量值,紫色曲线表示倾斜地层边界)。

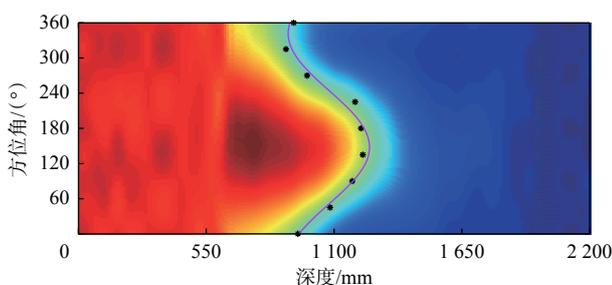


图 9 拟合反演得到的 8 扇区伽马成像和地层界面预测结果

Fig. 9 8-sector gamma image obtained by fitting inversion and the prediction results of strata interface

从图 9 可以看出,拟合反演得到的 8 扇区伽马成像图与原始的 8 扇区伽马成像图基本一致,扇区伽马成像图的正弦曲线特征比较明显,能够准确反映倾斜地面界面信息。依据拟合反演的 8 扇区伽马成像图,按照式(1)计算出地层倾斜界面与井眼相交的相对倾角为  $55.6^\circ$ ,即倾斜地层边界与井眼轴线夹角为  $34.4^\circ$ ,与模拟井眼实际倾斜角的相对误差为 7.6%。由此可知,利用快速正弦曲线拟合方法能够提取正弦曲线 4 个特征参数,进而可以拟合反演形成 8 扇区伽马成像图,验证了利用快速正弦曲线拟合方法能够准确反演形成扇区伽马成像图。根据倾斜地层界面相对倾角、不同方位伽马曲线中值和深度位置,确定了伽马成像测量值和倾斜地层边界。倾斜地层边界在扇区伽马成像中呈正弦曲线特征,与上文数值模拟获取的 8 扇区伽马成像图一致,这也验证了利用快速正弦曲线拟合方法反演形成扇区伽马成像图具有可行性。

## 5 结论与建议

1)近钻头伽马成像测井仪器穿过倾斜界面进入高放射性泥岩层测量得到的扇区伽马成像图呈现正弦曲线特征,利用扇区伽马成像图可以准确反演井眼相对倾角和围岩厚度,从而确定地层边界,精确控制井眼轨迹。

2)设计了近钻头伽马成像测井中的快速正弦曲线拟合固件算法,该算法将最小二乘估计算法和三参数正弦拟合相结合来获取正弦曲线的幅度、频率、相位和直流分量等 4 个参数,为拟合反演得到 8 扇区或 16 扇区伽马成像图提供数据支持。

3)近钻头伽马成像测井仪器成像试验结果表明,快速正弦曲线拟合方法可以实现扇区伽马成像测量值的拟合,且误差较小。拟合反演得到的 8 扇区伽马成像图的正弦曲线特征比较明显,能够准确反映倾斜地面界面信息,验证了快速正弦曲线拟合方法的正确性和可行性。

4)在现有随钻测井数据遥测系统传输能力有限的条件下,建议加强快速正弦曲线拟合方法在井下数据压缩技术方面的应用,以提高随钻成像测井技术的实时性。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 石油工程技术对油气勘探的支撑与未

- 来攻关方向思考:以中国石化油气勘探为例[J].石油钻探技术,2016,44(2):1-9.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The support of petroleum engineering technologies in trends in oil and gas exploration and development: case study on oil and gas exploration in Sinopec[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 1-9.
- [2] 王敏生, 光新军, 皮光林, 等. 低油价下石油工程技术创新特点及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(6): 1-8.
- WANG Minsheng, GUANG Xinjun, PI Guanglin, et al. The characteristics of petroleum engineering technology design and innovation in a low oil price environment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(6): 1-8.
- [3] PITCHER J L, SCHAFFER D B, BOTTERELL P, et al. A new azimuthal gamma at bit imaging tool for geosteering thin reservoirs[R]. SPE 118328, 2009.
- [4] WHEELER A J, BILLINGS T, RENNIE A, et al. The introduction of an at-bit natural gamma ray imaging tool reduces risk associated with real-time geosteering decisions in coalbed methane horizontal wells[R]. SPWLA-2012-167, 2012.
- [5] SUH A, JAMES B, FELTHAM G. Overcoming complex geosteering challenges in the Cardium Reservoir of the Foothills of Canada to increase production using an instrumented mud motor with near bit azimuthal gamma ray and inclination[R]. SPE 173036, 2015.
- [6] MINETTE D C. Method for analyzing formation data from a formation evaluation MWD logging tool: US5091644[P]. 1992-02-25.
- [7] SPROSS R L. Methods for determining characteristics of earth formations: US6619395B2[P]. 2003-09-16.
- [8] 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.
- [9] McKINNY K, BOONEN P, HUISZON C. Analysis of density image dip angle calculations[R]. SPWLA-2008-ZZ, 2008.
- [10] 袁超, 周灿灿, 张锋, 等. MC 模拟在随钻方位伽马成像正演中的应用[J]. 原子核物理评论, 2014, 31(4): 505-510.
- YUAN Chao, ZHOU Cancan, ZHANG Feng, et al. Application of Monte Carlo method in forward simulation of azimuthal gamma imaging while drilling[J]. Nuclear Physics Review, 2014, 31(4): 505-510.
- [11] 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.
- [12] 卢俊强, 鞠晓东, 乔文孝, 等. 数字信号处理器在随钻声波测井中的应用[J]. 测井技术, 2013, 37(5): 527-530.
- LU Junqiang, JU Xiaodong, QIAO Wenxiao, et al. Application of digital signal processor to acoustic LWD tool[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(5): 527-530.
- [13] LEONARD Z S, RAHMAN S, STEINSIEK R R, et al. Development of transducer and electronics technology for an LWD ultrasonic imaging tool[R]. OTC 27758, 2017.
- [14] IEEE Std 1057-1994 IEEE standard for digitizing waveform recorders[S].
- [15] IEEE Std 1057-2017 IEEE standard for digitizing waveform recorders[S].

[编辑 令文学]

## 贝克休斯公司研制出可辅助控制井眼轨迹的 PDC 钻头

目前, 多用水平井开发非常规油气藏, 用弯壳体井下马达和旋转导向系统控制井眼轨迹, 在钻进过程中常因钻头移动、地层推动等外力导致井眼轨迹发生偏移, 需通过滑动钻进调整井眼轨迹, 这会严重影响机械钻速。常规 PDC 钻头在定向钻井中的主要作用是实现预期的造斜率和机械钻速, 对井眼轨迹控制的帮助不大。为此, 贝克休斯公司研制了带保径衬垫的、可辅助控制井眼轨迹的 PDC 钻头(以下简称防移动 PDC 钻头)。与常规 PDC 钻头相比, 该钻头具有防移动功能, 可以减少不必要的井眼轨迹偏移, 还可以在更短的钻井时间内钻出高质量的井眼, 降低钻井成本。

与常规带保径衬垫的 PDC 钻头相比, 防移动 PDC 钻头主要优化了保径衬垫的设计, 其目的是使钻头的侧向切削能力随着侧向力的变化而发生改变。因此, 具体的设计原则是: 防移动保径衬垫的功能在于提供足够的支撑表面, 以抵抗较小的横向运动, 但该支撑表面不能太大, 以避免降低钻头的侧向切削能力; 在钻头保径的顶部或附近最靠近柄部的地方, 耐磨带在保径条和保径齿排之间具有较大的间隙表面; 该保径衬垫的作用, 是以非常小的钻头倾斜角与井壁接触, 防止井眼轨迹产生细微偏移; 当井底钻具组合受到的侧向力足够大时, 钻头仍能有效切削侧向井壁, 获得所需要的造斜率。总之, 贝克休斯公司设计的防移动 PDC 钻头, 在较小的横向力(如由钻头移动、井底钻具组合移动或地层推动而产生的力)作用下, 钻头的横向运动较小, 可以保证沿设计的井眼轨道钻进; 在较大的侧向力作用下, 钻头将提供正常的侧向切削量以实现所需要的造斜率。

目前, 防移动 PDC 钻头在北美长水平段水平井中进行了应用, 并与常规 PDC 钻头的应用效果进行了对比。现场应用结果表明: 该 PDC 钻头能够有效解决地层因素(倾角、地层界面等)对水平井段井眼轨迹的影响, 可减小狗腿严重度, 从而提高井身质量; 同时, 因为所钻井眼更直, 缩短了滑动钻进进尺, 在相同长度的设计井段内, 其需要的钻井时间比常规 PDC 钻头要短。

[供稿 石钻]