

◇ “全国储层声学及深部钻测技术前沿研讨会”举办十周年 ◇

三维感应成像测井仪设计与实现*

汤天知^{1†} 陈 涛¹ 白 彦^{1,2} 宋青山¹ 范晓文¹ 史 超¹

(1 中国石油测井有限公司 西安 710077)

(2 吉林大学物理学院 长春 130012)

摘要: 砂泥岩薄互层电阻率准确测量是提高泥质砂岩储层计算的一项重要工作。为了解决薄互层电阻率准确测量问题,该文提出一种三维感应成像测井仪的设计与实现方法。首先,基于感应电磁测量方法,设计由 1 个三轴发射器、4 个单轴接收阵列和 3 个三轴的接收阵列组成的三维探测器。在此基础上,通过三维线圈系参数与结构创新设计、多频循环发射、高精度多道同步采集、高性能发射接收一体化集成等技术实现,在每一个深度点可获取 78 个电导率测量值。最后,利用数据校正与处理技术来消除各种环境影响,经过理论模型和实际资料的处理结果均证实,该仪器处理得到 5 条不同径向探测深度的水平电阻率与垂向电阻率、地层倾角等曲线,实现了对薄互层电阻率的准确测量。

关键词: 三维感应; 系统设计; 水平电阻率; 垂直电阻率; 地层倾角

中图分类号: P631.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2020)01-0071-10

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.01.009

System design and implementation of three-dimensional induction imaging logging tool

TANG Tianzhi¹ CHEN Tao¹ BAI Yan^{1,2} SONG Qingshan¹ FAN Xiaowen¹ SHI Chao¹

(1 China Petroleum Logging Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

(2 College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Accurate measurement of resistivity of sand-mudstone thin interaction layer is an important task in improving the calculation of argillaceous sandstone reservoirs. In order to solve the problem of accurate measurement of thin interaction layer resistivity, this paper proposes a design and implementation method of 3D induction imaging logging tool. First, based on the inductive electromagnetic measurement method, a 3D detector consisting of a three-axis emitter, four single-axis receiving arrays and three three-axis receiving arrays is designed. On this basis, through the 3D coil system parameters and structural innovation design, high-performance transmission and reception integration, multi-frequency cyclic transmission, high-precision multi-channel synchronous acquisition and other technologies, 78 conductivity measurements are available at each depth point. Finally, data correction and processing techniques are used to eliminate various environmental impacts, and the results of theoretical models and actual data are confirmed that in addition to effectively providing array resistivity curves for five different depths of detection and three different longitudinal resolutions of induction logging tools, the instrument can also obtain formation information parameters such as formation horizontal resistivity, vertical resistivity, formation dip angle and azimuth angle, which effectively solves the problem of accurate measurement of resistivity of sand-mudstone thin interaction layer.

Keywords: Three-dimensional induction; System design; Horizontal resistivity; Vertical resistivity; Dip

2019-08-10 收稿; 2019-11-28 定稿

*国家科技重大专项 (2017ZX05019001)

作者简介: 汤天知 (1963-), 男, 湖南人, 教授级高工, 研究方向: 测井科研管理和仪器研发。

†通信作者 E-mail: tangtz@cnpcl.com.cn

0 引言

国内外大部分油田在地质勘探开发与测井评价过程中,往往遇到薄互层和高陡构造地层,该地层存在着电阻率的各向异性测量问题。过去在电阻率测量上,常规感应测井仪器测量的是地层径向电阻率,参与解释计算含油饱和度偏低,这给对非均值储层的评价带来难题。研究发现三维感应测井技术为各向异性储层勘探和评价提供了重要的手段^[1],2000年,Kriegshauser等^[2]提出利用5个磁场分量来探测地层各向异性的三轴感应测井仪器(3DEX);2003年,Rosthal等^[3]提出利用9个磁场分量来探测地层各向异性的多分量感应测井仪;2004年,Rabinovich等^[4]研制出阵列三轴感应测井仪器(Rt Scanner);2013年,Hou等^[5]研究了适用于油基泥浆井眼的三维感应测井仪器,与各种常规电法测井技术不同,该仪器在测量地层各向异性、倾角及方位角等方面起到了很好的作用。

为此,为了解决砂泥岩薄互层等复杂储层测量问题^[6-7],本文提出一种新型的三维感应成像测井仪。它由1个三轴发射器、4个针对井眼校正和数据处理的短间距的单轴接收阵列和3个三轴的接收阵列组成,每一对三轴发射、接收阵列产生9个分量。在垂直井中的水平层里,对于地层电导率,只有 XX 、 YY 、 ZZ 正交分量有响应,而在斜井或者是有角度的地层中,9个分量都有响应,对计算的电阻率都有贡献。该仪器主要包括三维探测器、测量系统、处理软件三部分。探测器采用主辅一体化三维线圈结构设计, X 、 Y 、 Z 三个方向布置三维线圈系,利用 Z 方向线圈系测得地层水平电阻率, X 方向和 Y 方向的线圈系测量地层垂直电阻率。测量系统采用电子仪与线圈系高集成、发射接收一体化设计^[8],实现了仪器长度与重量比传统阵列感应仪器缩小一半;通过采用高性能DSP与FPGA架构,采用16通道采集,实现采样频率与测量信号采集时间提高,在单位时间内来提高测量系统的信噪比^[9-11],实现小信号测量精度提高。为了尽可能降低井眼校正库的维数以及校正库的大小,以便提高井眼环境校正处理的效率,采用三维感应数值模拟、井眼校正处理及一维多参数反演处理实现三维感应仪器数值模拟连续地层响应、测井资料的直井校正处理及一维多参数反演处理功能,增强仪器对井眼、各向异性等复杂地层的资料处理能力^[12-13]。三维感应测井仪器除了可以得到5条不同径向探测深度和3种分辨率的水平电阻率曲线外,还可以提供地层垂向电

阻率、地层倾角测量,实现了对薄互层储集层的准确评价。

1 仪器设计与实现

1.1 三维探测器测量方法

三维感应测井基于均值化地层电磁场理论^[14],采用三轴发射线圈向地层中发射低频交变电磁场,在地层中产生感应电流,感应电流形成二次交变电磁场,在三维接收线圈阵列中产生感应电动势。图1为三维感应仪器探测器结构。三维感应探测器是由1组三轴发射线圈 T 、3组不同接收位置的三轴接收线圈($A4$ 、 $A6$ 、 $A7$)组成的测量9个分量的三维探测器阵列,同时增加4组不同接收位置的单轴接收线圈($A1$ 、 $A2$ 、 $A3$ 、 $A5$)测量 ZZ 分量,共同组成7组三维阵列感应探测器。如图1(b)所示,三轴 X 、 Y 和 Z 方向发射与接收线圈结构,其中对称设计 X 和 Y 方向线圈,尺寸大小与匝数相同,并与 Z 方向线圈保持同轴共点。如图1(c)所示,每组三维子阵列包含1个三轴发射线圈和1个三轴接收线圈与三轴屏蔽线圈组成的三线圈系结构, L_R 、 L_B 表示接收线圈与屏蔽线圈到发射线圈的距离。

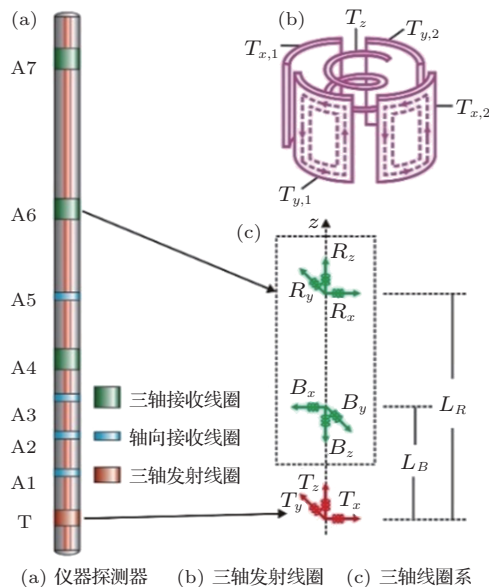


图1 三维感应线圈系结构图

Fig. 1 The schematic diagram of 3DIT tools

设3个正交发射线圈的磁矩分别为 $M_x = N_{Tx}AT_x$, $M_y = N_{Ty}AT_y$, $M_z = N_{Tz}AT_z$, 3个正交主接收线圈的磁矩为 $R_x = A_{Rx}NR_x$, $R_y = A_{Ry}NR_y$, $R_z = A_{Rz}NR_z$, 3个正交屏蔽接收线圈的磁矩为 $B_x = A_{Bx}NB_x$, $B_y = A_{By}NB_y$, $B_z = A_{Bz}NB_z$,则三维感应主磁通量组成的张量为

$$\bar{\Phi}_M = \begin{pmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} & \Phi_{xz} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} & \Phi_{yz} \\ \Phi_{zx} & \Phi_{zy} & \Phi_{zz} \end{pmatrix}_M = \begin{pmatrix} R_x & & \\ & R_x & \\ & & R_x \end{pmatrix} \mu \begin{pmatrix} H_{M,x''x''} & H_{M,x''y''} & H_{M,x''z''} \\ H_{M,y''x''} & H_{M,y''y''} & H_{M,y''z''} \\ H_{M,z''x''} & H_{M,z''y''} & H_{M,z''z''} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_x \\ M_x \end{pmatrix} \\ = i\omega\mu^2 I_0 \begin{pmatrix} N_{Rx}A_{Rx}N_{Tx}A_{Tx}H_{M,x''x''} & N_{Rx}A_{Rx}N_{Ty}A_{Ty}H_{M,x''y''} & N_{Rx}A_{Rx}N_{Tz}A_{Tz}H_{M,x''z''} \\ N_{Ry}A_{Ry}N_{Tx}A_{Tx}H_{M,y''x''} & N_{Ry}A_{Ry}N_{Ty}A_{Ty}H_{M,y''y''} & N_{Ry}A_{Ry}N_{Tz}A_{Tz}H_{M,y''z''} \\ N_{Rz}A_{Rz}N_{Tx}A_{Tx}H_{M,z''x''} & N_{Rz}A_{Rz}N_{Ty}A_{Ty}H_{M,z''y''} & N_{Rz}A_{Rz}N_{Tz}A_{Tz}H_{M,z''z''} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

正交屏蔽接收线圈系上磁通量组成的张量为

$$\bar{\Phi}_B = \begin{pmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} & \Phi_{xz} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} & \Phi_{yz} \\ \Phi_{zx} & \Phi_{zy} & \Phi_{zz} \end{pmatrix}_B = \begin{pmatrix} B_x & & \\ & B_x & \\ & & B_x \end{pmatrix} \mu \begin{pmatrix} H_{B,x''x''} & H_{B,x''y''} & H_{B,x''z''} \\ H_{B,y''x''} & H_{B,y''y''} & H_{B,y''z''} \\ H_{B,z''x''} & H_{B,z''y''} & H_{B,z''z''} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_x \\ M_x \end{pmatrix} \\ = \mu \begin{pmatrix} N_{Bx}A_{Bx}N_{Tx}A_{Tx}H_{B,x''x''} & N_{Bx}A_{Bx}N_{Ty}A_{Ty}H_{B,x''y''} & N_{Bx}A_{Bx}N_{Tz}A_{Tz}H_{B,x''z''} \\ N_{By}A_{By}N_{Tx}A_{Tx}H_{B,y''x''} & N_{By}A_{By}N_{Ty}A_{Ty}H_{B,y''y''} & N_{By}A_{By}N_{Tz}A_{Tz}H_{B,y''z''} \\ N_{Bz}A_{Bz}N_{Tx}A_{Tx}H_{B,z''x''} & N_{Bz}A_{Bz}N_{Ty}A_{Ty}H_{B,z''y''} & N_{Bz}A_{Bz}N_{Tz}A_{Tz}H_{B,z''z''} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

总磁通量组成的张量为

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_M + \bar{\Phi}_B \\ = \mu \begin{pmatrix} N_{Rx}A_{Rx}N_{Tx}A_{Tx} & N_{Rx}A_{Rx}N_{Ty}A_{Ty} & N_{Rx}A_{Rx}N_{Tz}A_{Tz} \\ (H_{M,x''x''} + \alpha_x H_{B,x''x''}) & (H_{M,x''y''} + \alpha_x H_{B,x''y''}) & (H_{M,x''z''} + \alpha_x H_{B,x''z''}) \\ N_{Ry}A_{Ry}N_{Tx}A_{Tx} & N_{Ry}A_{Ry}N_{Ty}A_{Ty} & N_{Ry}A_{Ry}N_{Tz}A_{Tz} \\ (H_{M,y''x''} + \alpha_y H_{B,y''x''}) & (H_{M,y''y''} + \alpha_y H_{B,y''y''}) & (H_{M,y''z''} + \alpha_y H_{B,y''z''}) \\ N_{Rz}A_{Rz}N_{Tx}A_{Tx} & N_{Rz}A_{Rz}N_{Ty}A_{Ty} & N_{Rz}A_{Rz}N_{Tz}A_{Tz} \\ (H_{M,z''x''} + \alpha_z H_{B,z''x''}) & (H_{M,z''y''} + \alpha_z H_{B,z''y''}) & (H_{M,z''z''} + \alpha_z H_{B,z''z''}) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中, $\alpha_x = \frac{N_{Bx}A_{Bx}}{N_{Rx}A_{Rx}}, \alpha_y = \frac{N_{By}A_{By}}{N_{Ry}A_{Ry}}, \alpha_z = \frac{N_{Bz}A_{Bz}}{N_{Rz}A_{Rz}},$

$$\left\{ \begin{aligned} H_{M,x''x''} &= \frac{1}{4\pi L^3} \left[\sin^2 \gamma \left(\frac{L}{S} \right)^2 k_v S k_h L e^{ik_v S} + \frac{\sin^2 \gamma - \cos^2 \gamma \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} i k_h L (e^{ik_v S} - e^{ik_h L}) \right. \\ &\quad \left. + (i k_h L - 1) e^{ik_h L} + \cos^2 \gamma k_h^2 L^2 e^{ik_h L} \right], \\ H_{M,y''y''} &= \frac{1}{4\pi L^3} \left[\cos^2 \gamma \left(\frac{L}{S} \right)^2 k_v S k_h L e^{ik_v S} + \frac{\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} i k_h L (e^{ik_v S} - e^{ik_h L}) \right. \\ &\quad \left. + (i k_h L - 1) e^{ik_h L} + \sin^2 \gamma k_h^2 L^2 e^{ik_h L} \right], \\ H_{M,z''z''} &= \frac{1}{4\pi L^3} [-i k_h L (e^{ik_v S} - e^{ik_h L}) - 2(i k_h L - 1) e^{ik_h L}], \\ H_{M,x''y''} &= H_{M,y''x''} = \frac{\sin \gamma \cos \gamma}{4\pi L^3} \left[\left(\frac{L}{S} \right)^2 k_v S k_h L e^{ik_v S} + \frac{(\cos^2 \theta + 1)}{\sin^2 \theta} i k_h L (e^{ik_v S} - e^{ik_h L}) \right. \\ &\quad \left. - k_h^2 L^2 e^{ik_h L} \right], \\ H_{M,x''z''} &= H_{M,z''x''} = \frac{1}{4\pi L^3} \left[\frac{\cos \gamma \cos \theta}{\sin \theta} i k_h L (e^{ik_v S} - e^{ik_h L}) \right], \\ H_{M,y''z''} &= H_{M,z''y''} = \frac{1}{4\pi L^3} \left[\frac{\sin \gamma \cos \theta}{\sin \theta} i k_h L (e^{ik_v S} - e^{ik_h L}) \right], \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式(4)中, L 是代表发射线圈T到接收线圈R的距离; θ 是地层倾角; γ 是仪器方位角; k_v 、 k_h 为电磁传播系数, 其中 $k_v = k_v(\mathbf{x}) = \sqrt{i\omega\mu\sigma_v(\mathbf{x}) + \omega^2\mu\varepsilon(\mathbf{x})}$, $k_h = k_h(\mathbf{x}) = \sqrt{i\omega\mu\sigma_h(\mathbf{x}) + \omega^2\mu\varepsilon(\mathbf{x})}$, $\mathbf{x}$ 表示是场

点地层电导率的场点坐标的函数^[14]。

利用文献[1]中给出低频近似为 $k_h L \rightarrow 0$, $k_v S \rightarrow 0$, $n \geq 1$, 带入式(4)得到

$$\begin{bmatrix} h_x^x \\ h_y^y \\ h_x^y \\ h_z^z \\ h_x^z \\ h_y^z \end{bmatrix} = \text{Im} \begin{bmatrix} H_{M,x''x''} \\ H_{M,y''y''} \\ H_{M,x''y''} \\ H_{M,z''z''} \\ H_{M,x''z''} \\ H_{M,y''z''} \end{bmatrix} = \frac{\omega\mu\sigma_h}{8\pi L} \begin{bmatrix} \sin^2 \gamma & \sin^2 \gamma - \cos^2 \gamma \cos^2 \theta & 1 & \cos^2 \gamma \\ \cos^2 \gamma & \cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma \cos^2 \theta & 1 & \sin^2 \gamma \\ \sin \gamma \cos \gamma & \sin \gamma \cos \gamma (\cos^2 \theta + 1) & 0 & -\sin \gamma \cos \gamma \\ 0 & -\sin^2 \theta & -2 & 0 \\ 0 & -\cos \gamma \cos \theta \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & \sin \gamma \cos \theta \sin \theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2}{\zeta \lambda^2} \\ \frac{2}{\sin^2 \theta} (1 - \zeta) \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, $k_v S = k_h L \zeta$, $S = L \zeta \lambda$, $\zeta = \sqrt{\cos^2 \theta + \frac{1}{\lambda^2} \sin^2 \theta}$, $\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ 。

由式(5), 解得倾角 θ 、方位角 γ 、水平电导率 σ_h 、垂直电导率 σ_v 四个参数:

$$\sigma_h = \frac{1}{4g} \left\{ h_x^x + h_y^y + 3h_z^z + \frac{2h_z^z (h_x^y)^2}{(h_x^z)^2 + (h_y^z)^2} \pm \left[\left(h_x^x + h_y^y + 3h_z^z + \frac{2h_z^z (h_x^y)^2}{(h_x^z)^2 + (h_y^z)^2} \right)^2 - 8h_z^z (h_x^x + h_y^y + 3h_z^z) \right]^{1/2} \right\} - \frac{h_z^z}{2g} \begin{cases} +, & \sigma_h > \sigma_v \\ -, & \sigma_h < \sigma_v \end{cases}, \quad (6)$$

$$\gamma = -\arctan(h_y^z/h_x^z), \quad (7)$$

$$\tan \theta = -\sin \gamma \frac{(\zeta - 1) h_x^z}{\zeta h_y^z}, \quad (8)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tan^2 \theta}{\zeta^2 (1 + \tan^2 \theta) - 1}, \quad (9)$$

$$\sigma_v = \sigma_h / \lambda^2. \quad (10)$$

最后, 利用式(4) ~ 式(10)及三维感应测井数据, 处理得到地层倾角 θ 、方位角 γ 、水平电导率 σ_h 、垂直电导率 σ_v 四个参数。

1.2 测量系统主控模块设计

为了实现本文提出的1组三轴发射器、4组针对井眼校正和数据处理的短间距的单轴接收器和3组三轴的接收器测量, 如图2所示, 设计了三维感应主控测量系统。该系统由电源模块、三轴发射驱动、多通道前置放大、主控和数据采集等单元组成。主控和数据采集单元产生同步发射控制波形, 分时驱动(X/Y/Z)三组发射驱动电路, 再分别连接到对应的(X/Y/Z)三轴发射线圈组进行发射, 7组接收线圈阵列接收经过地层后的二次感应信号, 由前置放大电路进行低噪声放大, 送主控和数据采集单元完成线圈阵列信号采集、多频点数字相敏检波计算、数据打包后通过遥测上传至地面进行数据处理。

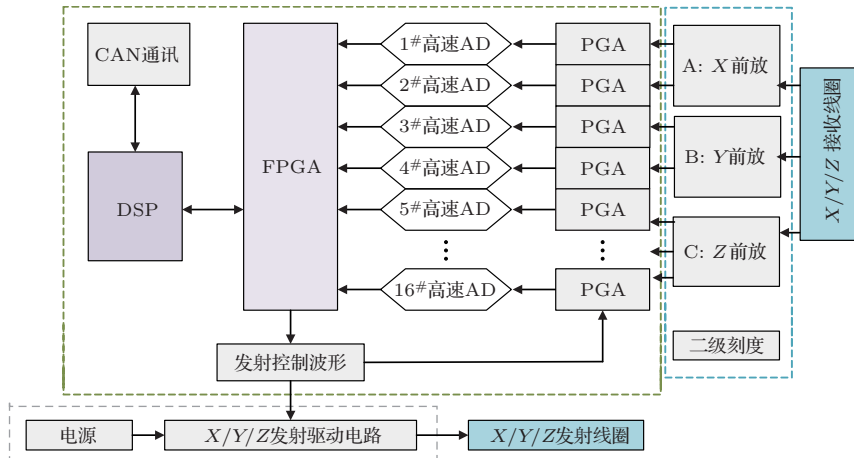


图2 3DIT6531 系统测量框图

Fig. 2 The measurement system of 3DIT6531 tools

主控和数据采集单元作为系统控制核心,完成三轴分时发射波形控制、接收线圈微弱信号自动增益控制与校准、温度和参考电压等辅助参数测量、多通道接收线圈阵列同步采集与处理、系统通讯等功能。三维感应主控和数据采集单元DSP+FPGA交互工作时,DSP收到遥传命令启动FPGA开始采集,FPGA控制多通道AD依次完成接收线圈主测量信号预采样、PGA增益设置、线圈主测量信号采集、发射监控信号采集。FPGA分时驱动(X/Y/Z)三组发射驱动电路,同时接收所有接收线圈通道信号并累加处理后通知DSP取走,最后DSP完成数据处理和打包,等待接收遥传数据帧命令后上传数据。

1.3 三维感应数据处理方法

三维感应测井资料中包含着十分丰富的地层和井眼信息,可以用于解决多种复杂的地质问题。但是,三维感应测井仪受到井眼半径、泥浆、层厚、地层电导率、井眼倾角、偏心距以及偏心角等多种因素的影响,必须配套一系列复杂的数据处理方法与相关软件,消除井眼环境对测量结果的影响,有效获取地层水平和垂直电导率以及各向异性系数,来解决薄交互储层以及各向异性地层中油气评价的问题。图3为三维感应测井资料综合处理系统数据处理流程,实现从原始测井数据采集输入,经过预处理单元、趋肤效应校正单元、井眼环境影响校正处理单元、聚焦合成和匹配处理单元、一维多参数反演处理单元,最终输出不同探测深度的电阻率地层水平电阻率、地层垂直电阻率、地层倾角以及方位角曲线。

三维感应数据处理流程具体包括以下内容:

(1) 从原始测井数据采集输入,三维感应资料首先经过温度校正、偏心角提取与偏心角校正,以消除仪器温度变化、仪器偏心旋转的影响;

(2) 在进行偏心角提取与偏心角校正的基础上,输入趋肤效应校正处理单元,消除数据不同频率的趋肤效应影响;

(3) 通过井眼校正库、多维非线性拟合以及自适应正则化迭代实现井眼环境影响的校正,尽可能消除井径、井眼泥浆、仪器偏心以及偏心角的影响;

(4) 环境校正完成后,利用聚焦处理算法对去除井眼影响的数据曲线中的ZZ分量的数据,输入聚焦合成和匹配处理处理模块,通过聚焦滤波数据库进行真分辨率聚焦处理,得到不同探测深度的电阻率曲线;

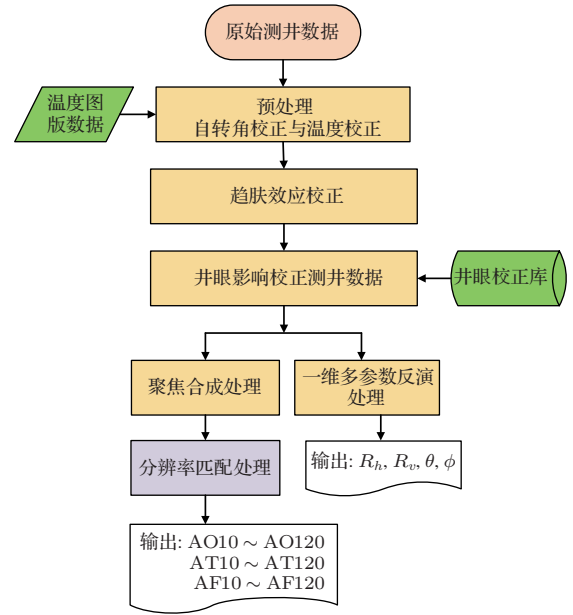


图3 3DIT6531 数据处理流程图

Fig. 3 Data processing flow of 3DIT6531 tools

(5) 利用井眼校正后的处理数据和初始模型,从井眼环境校正水平和垂直电导率曲线中提取出各个地层上电导率的初值,结合正则化自适应一维迭代反演算法:

根据测井响应资料 $m_i(\mathbf{x}) = m_i(x_1, x_2, \dots, x_N)$, $i = 1, 2, \dots, M$ (M 为测井采集数据点数), 定义目标函数 $O(\mathbf{x})$ 。 $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\sigma_h, \sigma_v, \theta, \gamma)$ 是待反演参数, $m_i(\mathbf{x})$ 为 $\mathbf{x}$ 的非线性函数^[1]。

$$O(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{W} \mathbf{e} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M w_i \left(\frac{\tilde{m}_i - m_i}{m_i} \right)^2$$

$$= \left[\frac{\tilde{m}_1 - m_1}{m_1} \dots \frac{\tilde{m}_M - m_M}{m_M} \right]^T. \quad (11)$$

设参数空间位置矢量 $\mathbf{x}^k$, 得

$$\frac{\tilde{m}_i(x_1 \dots x_N)}{m_i} = \frac{\tilde{m}_i(x_1^k \dots x_N^k)}{m_i} + \sum_{a=1}^N \frac{x_a^k}{m_i} \frac{\partial \tilde{m}_i}{\partial x_a} \bigg|_{x_a=x_k} \left[\frac{x_a - x_a^k}{x_a^k} \right] + o(x_1^k, \dots, x_N^k). \quad (12)$$

方程(12)写成矢量的形式,

$$\tilde{m}(\mathbf{x}) = \tilde{m}(\mathbf{x}^k) + \mathbf{J} \cdot \mathbf{p} + o(p), \quad (13)$$

式(13)中, $\mathbf{p} = [\mathbf{x} - \mathbf{x}^k]$, $\mathbf{J} = \nabla \tilde{m}(\mathbf{x}^k)$ 。

将式(13)代入式(12), 目标函数为

$$O(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{W} \mathbf{e} + \frac{1}{2} \mathbf{p}^T \mathbf{I} \mathbf{p}, \quad (14)$$

其中, $\mathbf{W}$ 和 $\mathbf{I}$ 是对角矩阵, $\mathbf{W}$ 是权因子矩阵, $\mathbf{I}$ 是正则化因子矩阵。使得目标函数最优满足条件:

$$\nabla_x O(\mathbf{x}) = \nabla_p O(\mathbf{x}) = 0. \quad (15)$$

将式(14)代入式(13)得

$$[\mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J} + \mathbf{I}] \cdot \mathbf{p} = -\mathbf{J}^T \mathbf{W} \cdot \mathbf{e}_k, \quad (16)$$

由方程(16)结合方程式(4)~(10), 利用高斯-牛顿迭代反演地层水平电阻率、垂直电阻率、地层倾角及方位角四个参数。

2 系统测试

为了验证本文提出的三维感应测井仪及配套数据处理技术, 通过理论模型数值模拟和系统测试验证配套数据处理软件合理性; 通过系统室内测试仪器的线性验证测量精度, 与标准井测井资料重复性对比, 验证仪器的稳定性; 最后, 结合实际井场测

量资料的处理结果, 考察了设计的三维感应测井仪器对解决各向异性砂泥岩薄互层的地质问题。

2.1 理论模型测试

图4为考察三维数值模拟计算仪器偏心与居中情况下, 低阻泥浆对电场电流密度的空间影响。数值模拟结果表明, 在均匀地层中, 当仪器居中时, 电流密度在井眼附近显示为均匀分布的涡旋场; 当仪器偏心时, 由于井眼中泥浆介质的影响, 井眼中产生较强的井眼电流, 仪器对偏心影响十分敏感, 必须采用井眼校正来消除环境因素对仪器测量结果的影响。

图5为井眼半径0.1 m、泥浆电阻率等于1.0 $\Omega \cdot \text{m}$ 仪器偏心情况下, 三维感应数值模拟正演结果、井眼环境校正、软件聚焦以及反演结果。第1~3道分别是该模型的ZZ、XX和YY分量正演结果; 第4~6道分别是该模型的ZZ、XX和YY

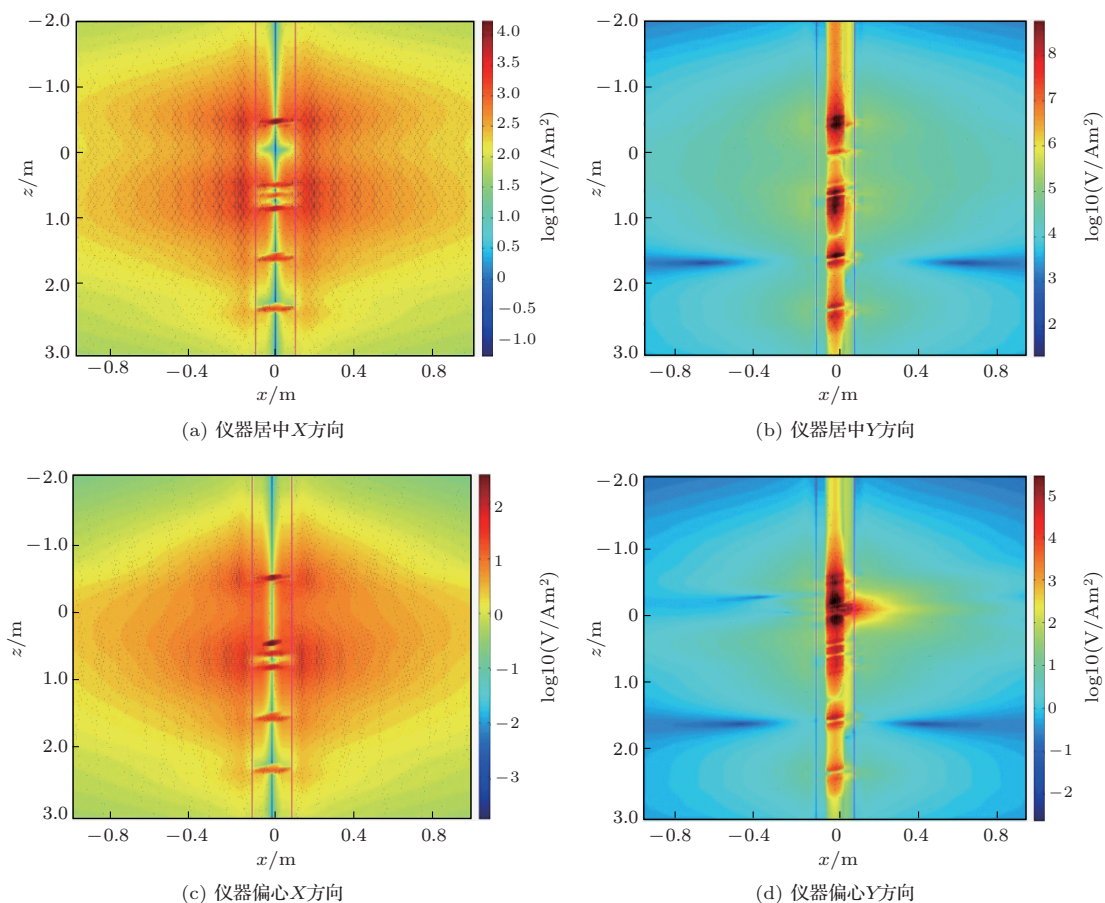


图4 低阻泥浆井眼中仪器居中和偏心情况下电流强度空间分布的对比

Fig. 4 The current intensity's spatial distribution comparison between the instrument is centered and eccentricity, when the instrument is in the low resistivity mud borehole

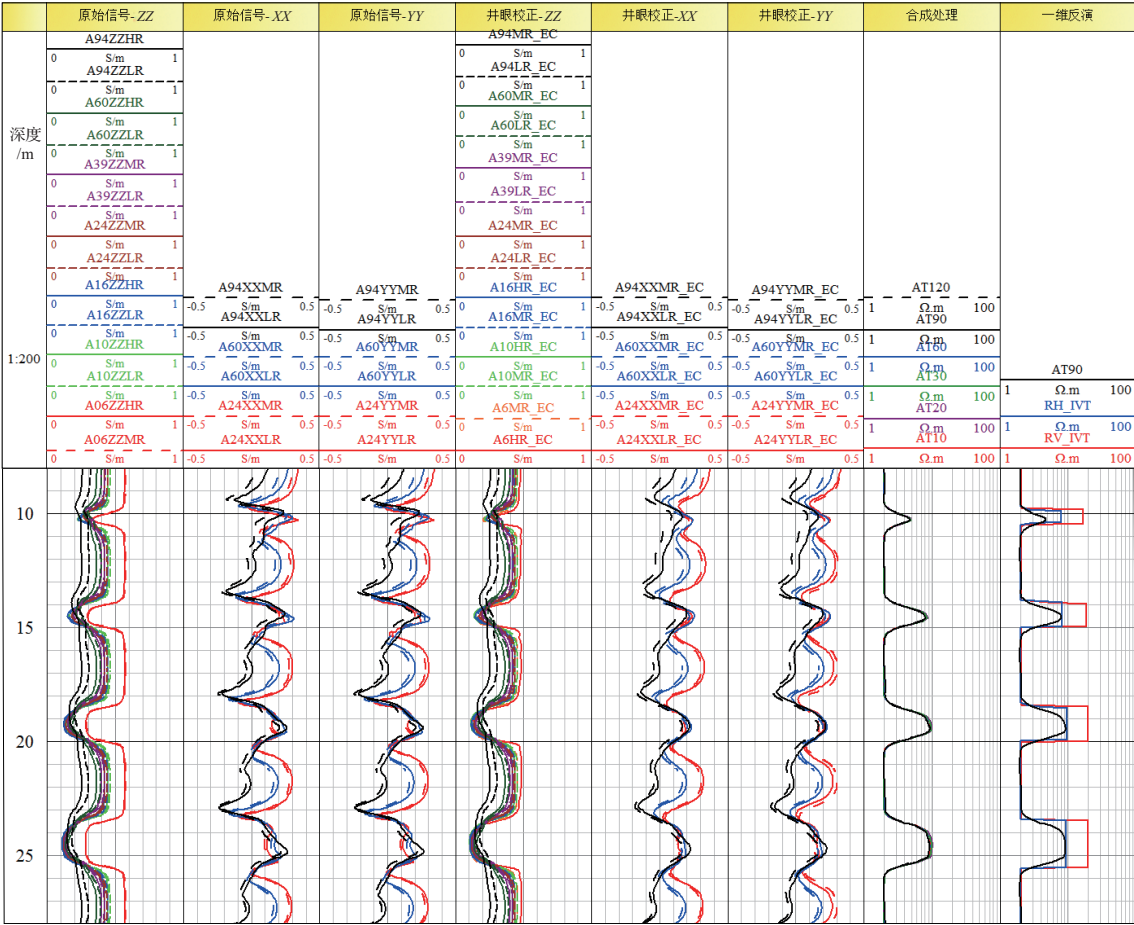


图5 不同层厚各向异性正演模型计算结果、井眼环境校正、软件聚焦以及反演结果

Fig. 5 The results of forward modeling, borehole environment correction, software focus and inversion in the anisotropy model with different layer thickness

分量井眼校正后的曲线，第7道是由ZZ分量经过软件聚焦得到的曲线，最后一道是水平与垂直电阻率反演结果。结果显示，在厚度0.5 m以上的地层，反演曲线中的水平与垂直电导率的相对大小与真实模型中电导率的相对大小一致；当层厚度达到1.5 m以上时，水平电导率与其真值一致，而垂直电导率接近模型真值，从理论模型上表明数据处理软件系统满足了设计效果要求。

2.2 仪器室内测试

为了测试仪器的整体稳定性，通过室内刻度环线性测试，建立测量信号与刻度电阻之间的关系。图6为3DIT在室内使用刻度环电阻进行整机测试的结果，考虑到仪器的结构参数对称性，在分析三维感应测井仪器线性刻度响应与刻度电阻参数关系时，给出了XX、XY、XZ、ZX和ZZ五组分量的测试结果。从图6中可以清晰看出，XX、XZ、ZX分量刻度环倾角取60°，方位角取0°，而

XY、YX分量刻度环方位角取45°、刻度电阻取5 Ω、10 Ω、20 Ω、50 Ω、100 Ω、200 Ω时，XX、XY、XZ、ZX四个分量在200 Ω电阻以内线性良好；ZZ分量刻度环倾角取0°，方位角取0°，刻度电阻取5 Ω、10 Ω、20 Ω、50 Ω、100 Ω、200 Ω、500 Ω以内线性良好，表明仪器测量的ZZ分量，在刻度电阻200 Ω以内线性较好，有效保证了仪器的测量精度。

2.3 实测井资料处理

图7给出了三维感应仪器在实测井的原始曲线重复性对比，图中每道包括主测和重复曲线，左侧为重复性相对误差，具体体现在红绿填充色图上，第1道为深度数据，第2~8道为轴向ZZ分量主测与重复测量对比结果，绿色表示所采集到的数据在2%~5%的重复性误差，红色表示所采集到的数据在大于5%情况下的重复性误差。从重复性数据对比结果来看，测量ZZ分量重复性良好，数据质

量良好;第9~17道为三维接收器9个原始信号在X-Y-Z方向的电导率曲线的重复性,各个曲线重叠说明数据质量良好。从图7中左侧重复性误差统计

结果可以看出,整段曲线平均相对误差,相同条件下仪器各原始曲线基值对比,红色填充越小对应测量误差越小,测量准确性越高。

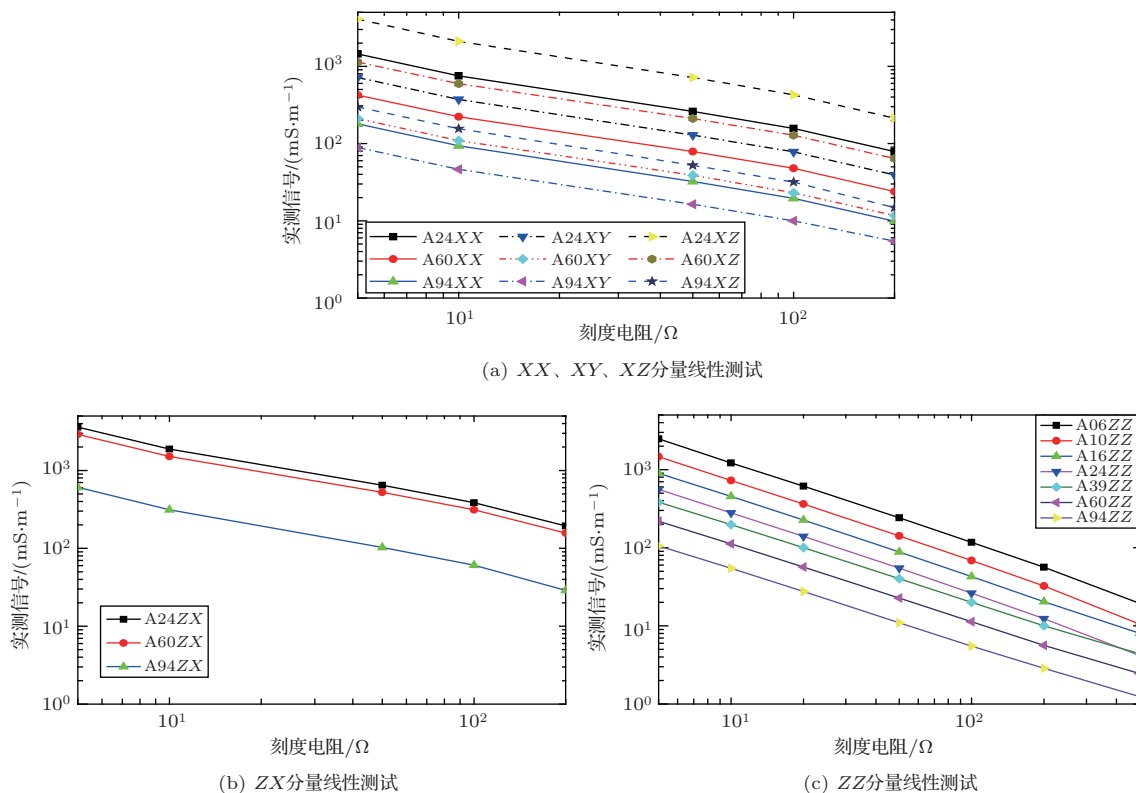


图6 3DIT6531室内刻度环电阻变化线性测试图

Fig. 6 The linear test diagram of the 3DIT6531 indoor scale ring's resistance

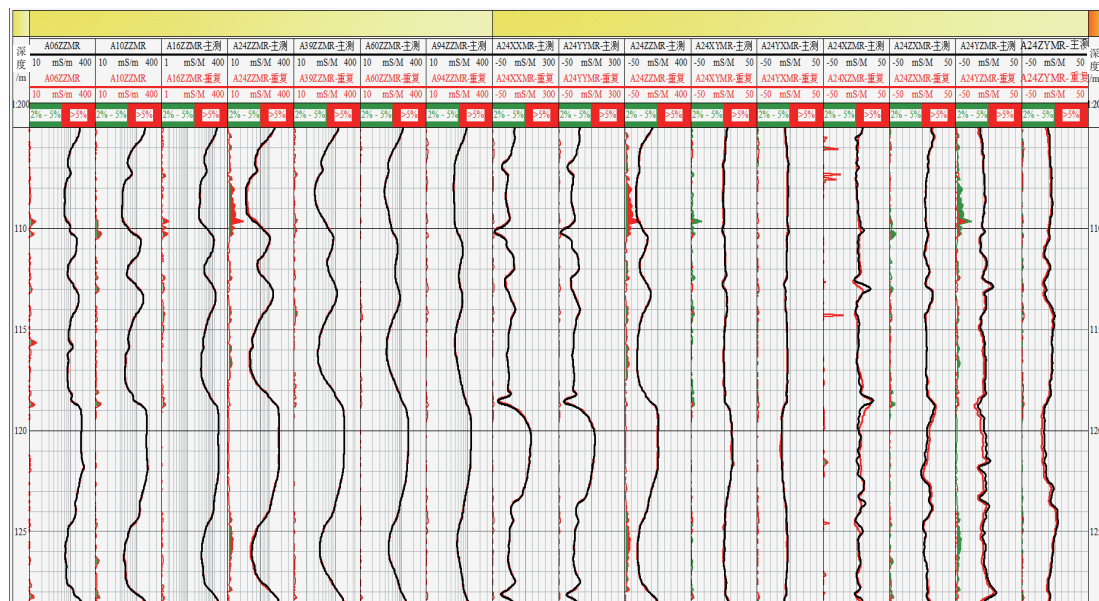


图7 3DIT6531 XX标准井原始曲线重复性对比图

Fig. 7 The repeatability comparison diagram of XX standard well original curve of 3DIT6531 tools

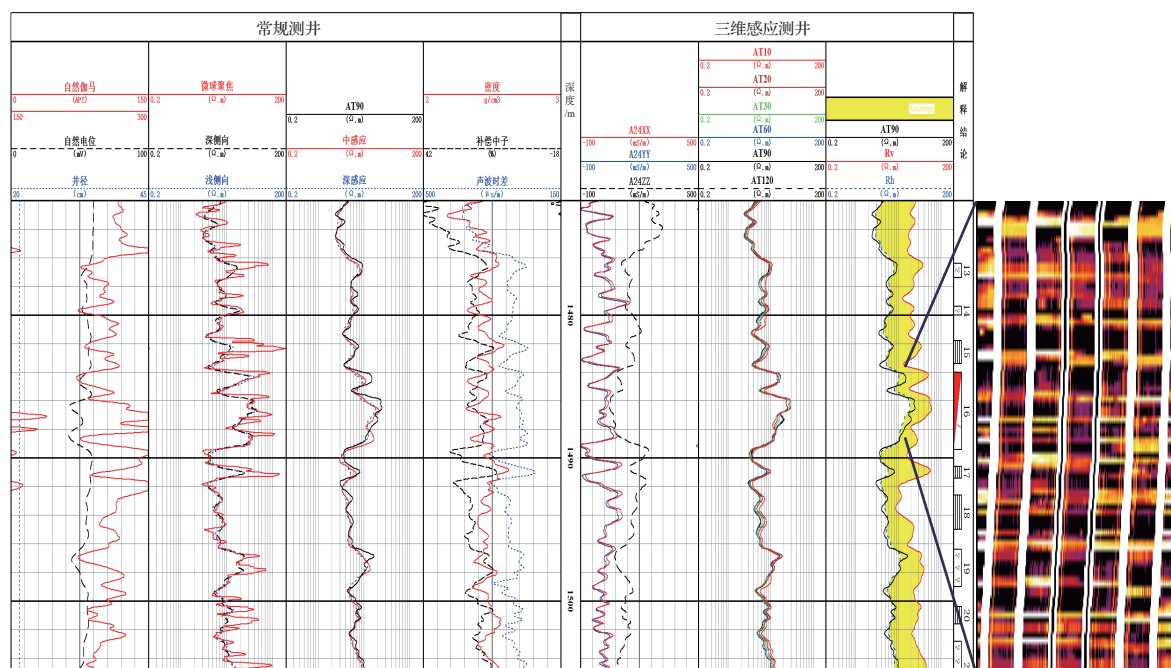


图8 EILog平台(3DIT6531)测井资料成果图

Fig. 8 The logging data map of EILog platform (3DIT6531)

为了考察砂泥岩薄互地层电阻率准确测量,图8为三维感应测井仪3DIT挂接EILog平台在塔X井综合处理结果图,井径为21.59 cm,井眼泥浆电阻率为 $1.2 \Omega \cdot \text{m}$ 。第1道分别为自然伽马、电位和井径曲线;第2道分别为微球聚焦、深侧向和浅侧向曲线;第3道分别为AT90、深感应和中感应曲线;第4道分别为AT90、深感应和中感应曲线;第5道分别为密度、补偿中子和声波曲线;第6道显示深度曲线;第7道为实测合成6条不同探测深度的电阻率AT10~AT120曲线;第8道为垂向电阻率 R_v 与水平电阻率 R_h 与AT90曲线对比结果,其中蓝色表示水平电阻率,红色表示垂直电阻率,阴影区域表示各向异性;第9道为解释结论;第10道为电成像曲线。从图8中可以看出,三维感应测井数据对地层的层边界反映明显,利用多分量原始数据能够很好地判别砂泥岩薄交互层。从普通双侧向、双感应和阵列感应,其测量结果都基本与3D感应的水平电阻率一致,而3D感应在这个层段能较好地揭示出地层电阻率的各向异性。此外,本测量段垂直电阻率普遍高于水平电阻率,16号层按新仪器解释为油水同层与实际测试结果相符。另外,在其他层位,通过对比发现,该井段的声波、中子比其他层高、密度低,反映储层物性有所变差,从计算结果看,垂直电阻率低于16号层垂直电阻率,垂向与水平电阻率之

比 R_v/R_h 略大,反映砂体中的泥质薄夹层变多,是储层物性的变差重要原因。这表明,应用该方法处理各向异性介质水平地层电导率和垂直地层电导率的正确性。

3 结论

本文提出一种探测深度深、分辨率高的新型三维感应测井仪器,采用发射接收一体化设计、电路厚膜集成技术设计了16通道测量硬件采集系统与软件数据处理系统,实现了层状薄互层中测井响应的数值模拟与数据处理算法,讨论了三维感应仪器在薄层中受井眼环境影响的响应特征,进一步通过系统室内测试验证了仪器的稳定性、重复性和数据处理能力。得出以下结论:

- (1) 提出3组三维主辅组合线圈设计保证线圈系源距同轴共点,解决了三维线圈结构带来的直耦信号过大和基值漂移技术难题;
- (2) 用16通道同步采集,结合高性能DSP进行大数据量处理,有效提升硬件测量系统信噪比,实现小信号测量精度提高;
- (3) 三维感应仪器测量的电阻率曲线能更清楚地显示层边界位置,与常规感应合成处理结果相比,水平和垂直电阻率更接近薄层的真实电阻率;
- (4) 开发的适于三维感应数据处理软件,经过

数据处理得到地层水平电阻率、垂直电阻率、地层倾角以及方位角等地层参数,有效提高了三维感应仪器在砂泥岩薄互层中电阻率测量和储量计算的精度。

本文研究成果为新型三维阵列感应测井仪器的现场推广应用奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 白彦. 视电导率函数理论在三维感应测井反演地层电导率中的应用[J]. 测井技术, 2014, 38(6): 669–673.
Bai Yan. Application of apparent conductivity function theory to inverting horizontal and vertical conductivities from 3D induction logs[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(6): 669–673.
- [2] Kriegshuser B, Fanini O, Forgang S. A new multi-component induction logging tool to resolve anisotropic formations[C]. SPWLA 40th Annual Logging Symposium, 2000.
- [3] Rosthal R, Barber T, Bonner S. Field test results of an experimental fully-triaxial induction tool[C]//SPWLA 44th Annual Logging Symposium, 2003.
- [4] Rabinovich M, Corley B, Georgi D, et al. Multicomponent induction logging: 10 years after[C]//SPWLA 48th Annual Logging Symposium, 2007.
- [5] Hou J S, Sanmartin L, Wu D G, et al. Real-time borehole correction of multicomponent induction data acquired in OBM wells: algorithm and applications[J]. Petrophysics, 2013, 54(2): 128–141.
- [6] Wang H, Davydycheva S, Zhou J, et al. Sensitivity study and inversion of the fully-triaxial induction logging in cross-bedded anisotropic formation[C]//SEG Annual Meeting, Las Vegas, 2008.
- [7] Wang H, Barber T, Chen K C, et al. Triaxial induction logging—Theory, modeling, inversion and interpretation[C]. International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, SPE, 2006.
- [8] 陈涛, 陈章龙, 宋青山, 等. 快测平台阵列感应成像测井仪研制与应用[J]. 测井技术, 2015, 39(1): 83–88.
Chen Tao, Chen Zhanglong, Song Qingshan, et al. Development and application of the platform express multi-array induction logging tool[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(1): 83–88.
- [9] 张冬玲, 王良红. 基于 DSP 的微弱信号检测采集系统设计[J]. 微计算机信息, 2005, 21(7): 83–84, 141.
Zhang Dangling, Wang Lianghong. Design an acquisition system for weak signals based on DSP[J]. Microcomputer Information, 2005, 21(7): 83–84, 141.
- [10] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [11] 布莱赫特. 数字信号处理的快速算法[M]. 北京: 电子工业出版社, 1992.
- [12] 白彦, 杨守文, 马玉刚, 等. 垂直井眼中三维阵列感应测井资料自适应井眼校正[J]. 地球物理学报, 2018, 61(9): 3876–3888.
Bai Yan, Yang Shouwen, Ma Yugang, et al. Adaptive borehole correction of three-dimensional array induction logging data in a vertical borehole[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(9): 3876–3888.
- [13] Yu L, Kriegshauser B, Fanini O, et al. A fast inversion method for multicomponent induction log data[C]//SEG, 71st Annual International Meeting, 2001.
- [14] 李剑浩. 感应测井视电导率和真电导率关系的积分方程[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(5): 928–933.
Li Jianhao. Integral equation of relationship on the apparent conductivity and true conductivity in induction logging[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2014, 44(5): 928–933.