

过套管电阻率测井仪器刻度及井下测量数值模拟

耿 敏, 梁华庆, 尹洪东, 刘得军, 高 杨

(中国石油大学 地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

摘要:为提高过套管电阻率测井的准确性,对刻度装置建模并数值模拟刻度过程,提出套管电流近似算法,数值模拟薄、厚两种地层模型的近似电流、地层视电阻率和二阶电位差。结果表明:仪器刻度数值模拟结果能够确定刻度装置参数,提供理论刻度曲线,辅助计算电极系数;井下测量数值模拟所提出的电流近似算法具有较强的地层分层能力,且低阻薄地层的视电阻率逼近程度明显下降,高阻厚地层的二阶电位差值极小,对测井仪分辨率要求较高。

关键词:电测井;过套管电阻率测井;数值模拟;仪器刻度;井下测量

中图分类号:P 631.8

文献标志码:A

Numerical simulation of resistivity logging through casing on instrument calibration and down-hole measurement

GENG Min, LIANG Hua-qing, YIN Hong-dong, LIU De-jun, GAO Yang

(College of Geophysics and Information Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of resistivity logging through casing, numerical simulation research on instrument calibration and down-hole measurement was constructed. In the aspect of instrument calibration, the calibration device was modeled and the numerical simulation on instrument calibration was executed. In the aspect of down-hole measurement, the approximate method for current calculation was proposed, and the approximate current, the apparent formation resistivity and the second order potential difference of the thin layer and the thick layer were simulated numerically. The simulation results of instrument calibration help to select the parameter for the calibration device, provide the theoretical calibration curve and assist to calculate the coefficient of the electrode array. The simulation results of down-hole measurement show that the approximate method for current calculation has strong ability to distinguish layer boundaries, and the approximate degree of apparent formation resistivity for the thin layer with low resistivity drops obviously. The thick layer with high resistivity requires high instrument resolution because its second order potential difference is extremely small.

Key words: electric logging; resistivity logging through casing; numerical simulation; instrument calibration; down-hole measurement

过套管电阻率测井是目前油藏动态监测、剩余油分布监测、定性识别及定量测量解释油田水淹情况的主要手段^[1]。Kaufman^[2-3]提出钢套管井内电场分布模型,建立了过套管电阻率传输线测量理论,过套管电阻率测井技术一直不断发展^[4-13]。测井仪必须具备准确、高精度、可重复的特性,才能够有效拾取井下测量信号。为了确保测井仪的可靠性,必须对测井仪进行刻度校验。以往的文献主要针对刻

度系统的设计^[14-15],而数值模拟刻度过程能够指导选择刻度装置参数、为刻度结果提供正确的理论依据、辅助评估测井仪的测量精度。在井下测量过程中,视电阻率计算^[16-18]所需的部分参数无法直接测量,需要采用近似算法计算。笔者引入电流近似算法,开展过套管电阻率测井仪器刻度和井下测量数值模拟研究。

1 过套管电阻率测井原理

1.1 传输线模型

套管井内的电场分布可用传输线模型进行分析^[16-19],套管内电场只有垂直分量,地层内电场只有径向分量,从套管泄露到地层中的微弱电流即是测量对象。取长度 dz 的套管段作为研究对象,套管电位 U 沿地层深度坐标 z 轴的变化率及套管电流 I 沿 z 轴的变化率分别满足:

$$\frac{dU}{dz} = -IR_z, \quad \frac{dI}{dz} = -\frac{U}{R_l} \quad (1)$$

式中, R_z 为单位长度套管电阻; R_l 为轴向单位长度地层的径向电阻。

由式(1),并用电位差分代替导数,得到俄罗斯过套管地层电阻率测井的理论基础,

$$\frac{\Delta^2 U}{\Delta z^2} - \frac{1}{R_z} \frac{dR_z}{dz} \frac{\Delta U}{\Delta z} - \frac{R_z}{R_l} U = 0 \quad (2)$$

1.2 地层视电阻率计算公式

俄罗斯过套管电阻率测井仪测量原理^[20-22]如图1所示。

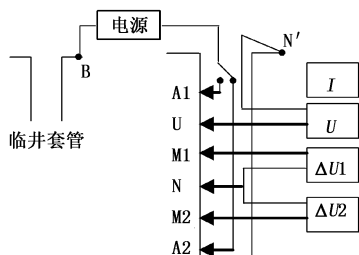


图1 俄罗斯过套管电阻率测井仪原理

Fig.1 Schematic diagram of Russian resistivity logging tool through casing

测井仪由供电电极 A1、A2, 测量电极 M1、N、M2, 电位电极 U 组成。测量过程分为两个阶段, 向 A1 供电(上供电)测量套管电位 $U(I_{A1})$ 、套管电流 I_{A1} 、电位一阶差分 $\Delta U_{M2M1}(I_{A1})$ 及 $\Delta U_{M1N}(I_{A1})$, 向 A2 供电(下供电)再测一组数值 $U(I_{A2})$ 、 I_{A2} 、 $\Delta U_{M2N}(I_{A2})$ 、 $\Delta U_{M1N}(I_{A2})$, 并由两组值计算 M2 和 M1 之间的电位一阶、二阶差分。将这些值代入公式(2), 并联立求解^[17-18], 得

$$\rho_a = k \left[\frac{\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1}) - \Delta U_{M2M1}(I_{A1})}{I_{A1}} + \frac{\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A2}) + \Delta U_{M2M1}(I_{A2})}{I_{A2}} \right] \times \left[\frac{U(I_{A1}) \Delta U_{M2M1}(I_{A2}) - U(I_{A2}) \Delta U_{M2M1}(I_{A1})}{-\Delta U_{M2M1}(I_{A1}) \Delta^2 U_{M2M1}(I_{A2}) + \Delta U_{M2M1}(I_{A2}) \Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1})} \right] \quad (3)$$

式中, ρ_a 为地层视电阻率; k 为电极系数。

再定义函数 f , 作为刻度函数,

$$f = \left[\frac{\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1}) - \Delta U_{M2M1}(I_{A1})}{I_{A1}} + \frac{\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A2}) + \Delta U_{M2M1}(I_{A2})}{I_{A2}} \right] \times \left[\frac{U(I_{A1}) \Delta U_{M2M1}(I_{A2}) - U(I_{A2}) \Delta U_{M2M1}(I_{A1})}{-\Delta U_{M2M1}(I_{A1}) \Delta^2 U_{M2M1}(I_{A2}) + \Delta U_{M2M1}(I_{A2}) \Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1})} \right] \quad (4)$$

2 测井仪刻度数值模拟

测井仪器在下井作业前都要经过仪器刻度, 以保证仪器处于良好的工作状态。过套管电阻率测井仪的刻度过程尤其重要。过套管电阻率测井的测量信号水平非常低, 是极微弱信号, 一般在纳伏级。并且为了克服趋肤效应, 测量信号选择的是频率 1 ~ 10 Hz 的低频信号, 而测井仪中放大元件的噪声与频率的平方成反比, 造成测量电路的噪声增大。因此, 过套管电阻率测井仪要对大噪声背景下的极微弱信号进行检测, 必须对测井仪进行刻度, 以保证检测信号的可靠性。对测井仪刻度过程进行数值模拟, 能够确定最佳的刻度装置参数、为刻度结果提供理论参考依据, 同时确定电极系数、检验测井仪的测量范围和精度, 以确保井下测量取得有效的数据, 准确评价套后储层参数。

2.1 模型

刻度装置见图2, 此为下供电模式, 上供电模式将电流源接至 A1 即可。图中弧形导线模拟围岩, 其阻值 R_1 和 R_3 相等。阻值为 R_x 的外接电阻模拟被测地层, 阻值为 R_2 的电阻模拟供电电缆。刻度过程分为三个步骤: ①在上、下供电模式下, 测量计算刻度函数 f 所需各参数; ②计算刻度函数 f ; ③绘制刻度曲线, 建立 f 与 R_x 之间的函数关系。多次刻度, 能够验证仪器的可重复性。

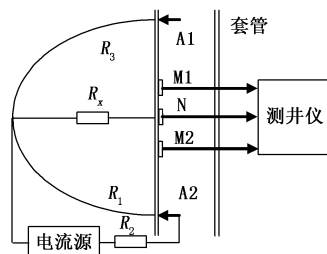


图2 刻度装置系统模型

Fig.2 System model of calibration device

俄罗斯过套管电阻率测井仪刻度装置的几何尺

寸定义如下: A1M1 段、A2M2 段套管长度均为 1.3 m, M1N 段、M2N 段套管长度均为 0.5 m。井下测量电极距与此相同。

为了模拟刻度过程的仪器响应,建立如图 3 所示的刻度装置电路模型。 I_0 为供电电流, R_4 为 A2N 段套管电阻, R_5 为 A1N 段套管电阻。图 3(a) 为上供电模式电路模型,图 3(b) 为下供电模式电路模型。

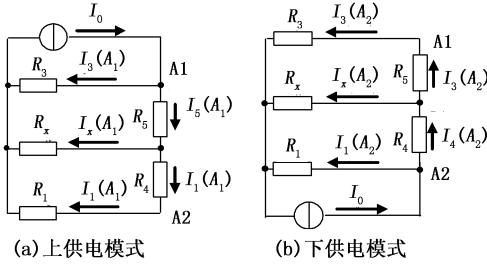


图 3 刻度装置电路模型

Fig. 3 Circuit model of calibration device

刻度响应满足如下方程

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & R_x & -R_3 & R_5 \\ R_1 + R_4 & -R_x & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_1(A_1) \\ I_x(A_1) \\ I_3(A_1) \\ I_5(A_1) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{vmatrix} -\frac{0.5}{1.8}R_4 & -\frac{0.5}{1.8}R_5 \\ (R_1 + R_4) + \frac{1.3}{1.8}R_5 & \frac{1}{1.8}R_5 \\ -\frac{0.5}{1.8}R_4 & \frac{0.5}{1.8}R_5 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_1(A_1) \\ I_5(A_1) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta U_{M2M1}(A_1) \\ U_N(A_1) \\ \Delta^2 U_{M2M1}(A_1) \end{vmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \\ R_1 & -R_x & 0 & -R_4 \\ 0 & R_x & -(R_3 + R_5) & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_1(A_2) \\ I_x(A_2) \\ I_3(A_2) \\ I_4(A_2) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{vmatrix} \frac{0.5}{1.8}R_5 & \frac{0.5}{1.8}R_4 \\ R_3 + \frac{1.3}{1.8}R_5 & 0 \\ -\frac{0.5}{1.8}R_5 & \frac{0.5}{1.8}R_4 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_3(A_2) \\ I_4(A_2) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta U_{M2M1}(A_2) \\ U_N(A_2) \\ \Delta^2 U_{M2M1}(A_2) \end{vmatrix}. \quad (8)$$

将各响应值代入公式(4),可得到对应地层电

阻 R_x 的刻度结果。电流值 $I_5(A_1)$ 和 $I_4(A_2)$, 即公式(4)中的 I_{A1} 和 I_{A2} , 实际刻度时不易测量, 要选择合适的 R_1 和 R_3 , 以实现注入电流在套管与导线之间的固定分流。

2.2 结果分析

设定以下参数: 测井仪分辨率 50 nV, R_x 为 1 ~ 100 Ω , 供电电流 7 A, 套管电阻率 $2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$, 套管半径 0.1 m, 套管厚度 0.005 m。改变阻值 R_1 和 R_3 , 模拟上供电模式下刻度响应 I_{A1} 和 $\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1})$, 结果如图 4~5 所示。

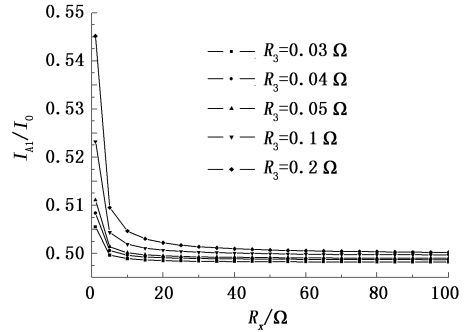


图 4 $I_{A1}/I_0 - R_x$ 关系曲线

Fig. 4 $I_{A1}/I_0 - R_x$ relation curve

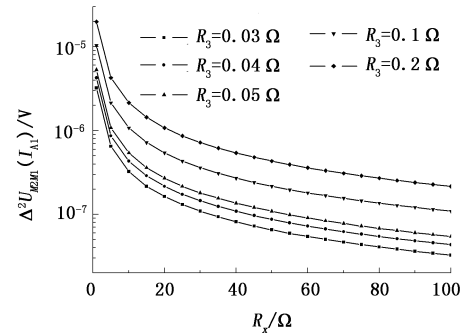


图 5 $\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1}) - R_x$ 关系曲线

Fig. 5 $\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1}) - R_x$ relation curve

从图 4、5 可以看出, R_3 越小, I_{A1}/I_0 越接近常数, 而 $\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1})$ 也越小, 对仪器分辨率的要求越高。 R_3 的选择要同时兼顾这两个条件。下供电模式可以得到相同的结论。当 R_3 分别取 0.04 Ω 和 0.05 Ω 时, 相应的 $\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1})$ 最小值分别达到 43.5 nV 和 54.4 nV。在仪器分辨率为 50 nV 的条件下, R_3 应设置为 0.05 Ω , I_{A1} 和 I_{A2} 近似为 $I_0/2$, 数值模拟得到 $f - R_x$ 关系曲线, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, $f - R_x$ 关系曲线近似为线性关系。如果在多次仪器刻度试验中, 能够获得与图 6 相同的刻度曲线, 证明测井仪具有很高的准确度和良好的可重复性, 并达到了 50 nV 的分辨率。如果

刻度条件改变,需要重新选择 R_3 模拟刻度函数。

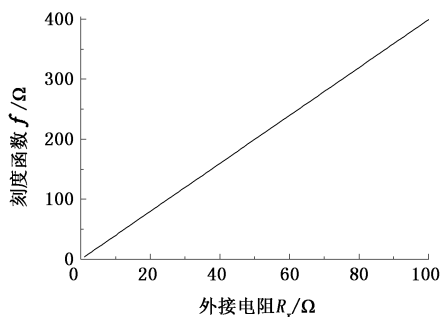


图6 $f-R_x$ 关系曲线

Fig. 6 $f-R_x$ relation curve

根据图6所示测井仪刻度数值模拟结果,可用下式拟合 R_x-f 函数关系:

$$R_x = 0.2504f - 0.025. \quad (9)$$

R_1 可由下式计算:

$$R_1 = \frac{\rho_a}{2\pi} \ln \frac{b}{a}. \quad (10)$$

式中, b 为地层径向有效厚度; a 为套管半径。

令 R_x 等于 R_1 , k 可由公式(3)、(4)、(9)和(10)联立求解。

3 井下测量数值模拟

在井下测量过程中,同样存在套管电流 I_{A1} 和 I_{A2} 无法直接测量的问题,必须设计套管电流的近似算法。数值模拟能够验证电流近似算法的有效性、分析不同地层条件下 $\Delta^2 U_{M2M1}$ 的变化情况、揭示仪器分辨率与适用地层条件的关系。

3.1 模型

过套管电阻率测量时,注入电流沿套管分别向上、下流动,并在流动过程中逐渐泄漏到地层中,有效地层厚度与套管长度相当,结合地层轴向(井轴方向)层状分布特性,建立图7所示的地层模型^[16]。

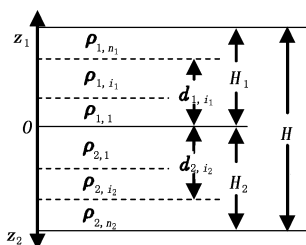


图7 数值模拟地层模型

Fig. 7 Formation model for numerical simulation

图中, o 点为电流注入点,即图1中的 $A1$ 或 $A2$; z_1 、 z_2 方向分别为轴向向上、向下方向; H_1 、 H_2 分别为上、下半空间地层厚度; H 为 H_1 与 H_2 之和;

ρ_{1,i_1} 、 ρ_{2,i_2} 分别为上、下半空间第 i_1 、 i_2 层地层电阻率,均为常数; d_{1,i_1} 、 d_{2,i_2} 分别为上、下半空间第 i_1 、 i_2 层地层边界的轴向坐标; n_1 、 n_2 分别为上、下半空间地层层数。

3.2 计算公式

由式(1)推导出上、下半空间第 i_1 、 i_2 层套管电流、电位解析式,

$$\begin{cases} I_{1,i_1}(z_1) = A_{1,i_1} e^{\alpha_{1,i_1} z_1} + B_{1,i_1} e^{-\alpha_{1,i_1} z_1}, \\ U_{1,i_1}(z_1) = -\xi_{1,i_1} A_{1,i_1} e^{\alpha_{1,i_1} z_1} + \xi_{1,i_1} B_{1,i_1} e^{-\alpha_{1,i_1} z_1}, \\ I_{2,i_2}(z_2) = A_{2,i_2} e^{\alpha_{2,i_2} z_2} + B_{2,i_2} e^{-\alpha_{2,i_2} z_2}, \\ U_{2,i_2}(z_2) = -\xi_{2,i_2} A_{2,i_2} e^{\alpha_{2,i_2} z_2} + \xi_{2,i_2} B_{2,i_2} e^{-\alpha_{2,i_2} z_2}. \end{cases} \quad (11)$$

式中, A_{1,i_1} 、 B_{1,i_1} 、 A_{2,i_2} 、 B_{2,i_2} 为求解系数; ξ_{1,i_1} 、 ξ_{2,i_2} 、 α_{1,i_1} 、 α_{2,i_2} 为地层特性参数^[16]。

结合以下边界条件:

$$\begin{cases} I_{1,1}(0) + I_{2,1}(0) = I_0, \\ U_{1,1}(0) = U_{2,1}(0), \\ I_{1,n_1}(H_1) = I_{2,n_2}(H_2) = 0, \\ I_{1,i_1}(d_{1,i_1}) = I_{1,i_1+1}(d_{1,i_1}), \\ U_{1,i_1}(d_{1,i_1}) = U_{1,i_1+1}(d_{1,i_1}), \\ I_{2,i_2}(d_{2,i_2}) = I_{2,i_2+1}(d_{2,i_2}), \\ U_{2,i_2}(d_{2,i_2}) = U_{2,i_2+1}(d_{2,i_2}). \end{cases} \quad (12)$$

由公式(11)和(12),解出套管上各点电流、电位值,用电流 I_{M1} 和 I_{M2} 取代 I_{A1} 和 I_{A2} ,连同上、下供电模式其他测量数据,代入公式(3),可精确计算某深度地层的视电阻率。

3.3 结果分析

视电阻率计算公式参数 I_{M1} 和 I_{M2} 无法实际测量,设计以下算法近似计算:①电流比值关系近似为电压比值关系;② I_{M1} 、 I_{M2} 之和近似为注入总电流。算法可表述为

$$\frac{I_{M1}}{I_{M2}} = \frac{\Delta U_{M1M2}(I_{A1})}{\Delta U_{M2M1}(I_{A2})},$$

$$I_{M1} + I_{M2} = I_0.$$

设定与刻度数值模拟相同的供电和套管参数,引入电流近似算法,定义两种地层模型,计算电流近似值与真实值误差 ΔI 、地层视电阻率 ρ 和上供电模式的电位二阶差分 $\Delta^2 U_{M2M1}(I_{A1})$,结果如图8~10所示。

由图8可见,电流误差最大值出现在地层电阻率最低处,也是围岩与地层电阻率比值最大处。对两种地层模型而言,在地层电阻率低至 $10 \Omega \cdot m$ 、围岩与地层电阻率比值高至 10:1 的情况下,电流误差最大

值不超过 0.035 72 A,仅为注入电流的 0.510 3%,表明采用近似算法计算得出的套管电流与真实电流较

为接近,可以将电流近似值代入视电阻率计算公式。

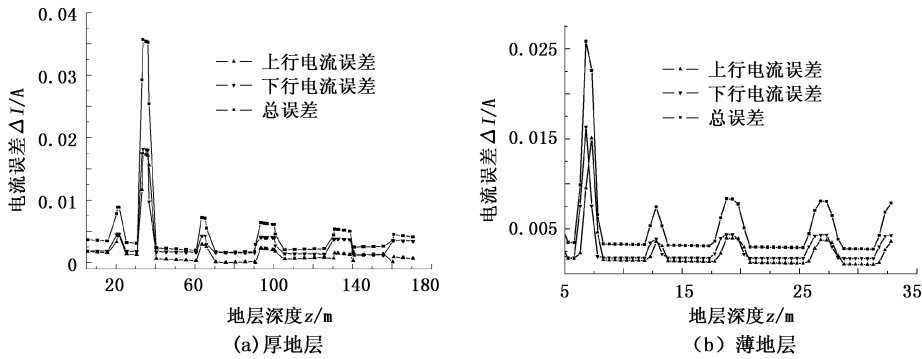


图 8 厚地层与薄地层套管电流误差模拟结果

Fig. 8 Simulation results of casing current error for thick layer and thin layer

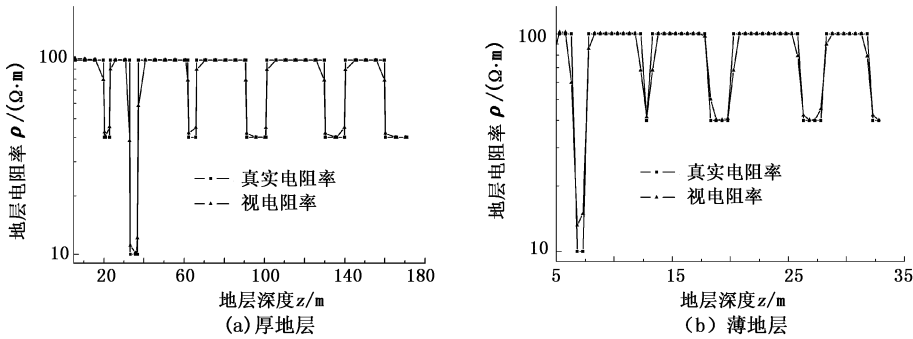


图 9 厚地层与薄地层视电阻率模拟结果

Fig. 9 Simulation results of apparent resistivity for thick layer and thin layer

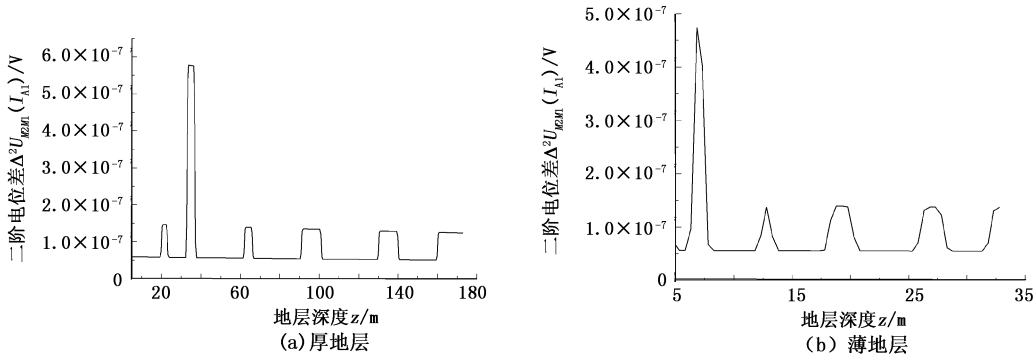


图 10 厚地层与薄地层二阶电位差模拟结果

Fig. 10 Simulation results of second order potential difference for thick layer and thin layer

由图 9 可见,视电阻率分层能力较强,在绝大部分分层段能够较好地逼近地层的真实电阻率,逼近程度最低处出现在薄地层的低阻层段,这也是薄地层的电流误差最大处。因此,视电阻率模拟结果同时受地层厚度、地层电阻率、电流误差等因素的影响。

从图 10 可以看出,二阶电位差最小值出现在地层电阻率最高处,也是地层与围岩电阻率比值最大处。因此,当井眼周围存在较厚的高阻地层时,必须要考虑测井仪的分辨率,否则测量结果将无效。对

所定义的两层地层而言,二阶电位差的最小值分别为 50.2 nV 和 54.8 nV,在刻度数值模拟中所使用的 50 nV 分辨率的测井仪能够满足井下测量的要求。

4 结 论

(1) 仪器刻度数值模拟能够确定刻度装置参数,提供理论刻度曲线,辅助计算电极系数。

(2) 利用近似算法计算得出的上、下行电流误差及总误差数值很小,可以用于地层视电阻率的计

算,近似算法有效。

(3)由电流近似值计算得出的视电阻率,对地层具有较好的分层能力,低阻薄地层的模拟结果对真实电阻率的逼近程度下降较为明显。

(4)地层电阻率对二阶电位差具有较大的影响,存在高阻较厚层段的地层对测井仪分辨率的要求较高。

参考文献:

- [1] 包德洲,程希,吴金云. 过套管电阻率测井技术研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2007,22(5): 25-28.
BAO De-zhou, CHENG Xi, WU Jin-yun. Study on through-casing resistivity logging technique [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007,22(5): 25-28.
- [2] KAUFMAN A A. The electrical field in a borehole with a casing [J]. Geophysics, 1990,55(1): 29-38.
- [3] KAUFMAN A A, WIGHTMAN W E. A transmission-line model for electrical logging through casing [J]. Geophysics, 1993,58(12): 1739-1747.
- [4] SCHENKEL C J, MORRISON H F. Electrical resistivity measurement through metal casing [J]. Geophysics, 1994,59(4): 1072-1082.
- [5] VAIL W B. Formation resistivity measurements through metal casing at the MWX-2 in Rifle: SPWLA 1995: proceedings of the 36th Annual Logging Symposium, Colorado, June 26-29, 1995 [C]. Louisiana: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, c1995.
- [6] 张金钟. 水泥环对套管井电阻率测井的影响[J]. 测井技术, 1995,19(6): 406-410.
ZHANG Jin-zhong. The effect of cement annulus on resistivity log in cased hole [J]. Well Logging Technology, 1995,19(6): 406-410.
- [7] 尹军强,冯启宁,朱龙德,等. 通过金属套管测量地层电阻率的可行性研究[J]. 测井技术, 1998,22(5): 376-379.
YIN Jun-qiang, FENG Qi-ning, ZHU Long-de, et al. Feasibility study on formation resistivity measurement through metal casing [J]. Well Logging Technology, 1998,22(5): 376-379.
- [8] 谢树棋,储昭坦,李克沛,等. 套管井电阻率测井方法研究[J]. 测井技术, 1999,23(5): 338-343.
XIE Shu-qi, CHU Zhao-tan, LI Ke-pei, et al. On methodology of resistivity logging through casing [J]. Well Logging Technology, 1999,23(5): 338-343.
- [9] ASKEY S, FARAG S, LOGAN J, et al. Cased hole re-

sistivity measurements optimize management of mature water flood in Indonesia; SPWLA 2002: proceedings of the 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, June 2-5, 2002 [C]. Louisiana: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, c2002.

- [10] ZHOU Q, JULANDER D, PENLEY L. Experiences with cased hole resistivity logging for reservoir monitoring: SPWLA 2002: proceedings of the 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, June 2-5, 2002 [C]. Louisiana: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, c2002.
- [11] BENIMELI D, LEVESQUE C, ROUAULT G, et al. A new technique for faster resistivity measurements in cased holes: SPWLA 2002: proceedings of the 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, June 2-5, 2002 [C]. Louisiana: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, c2002.
- [12] 高杰,刘福平,包德洲,等. 过套管电阻率测井方法研究[J]. 测井技术, 2007,31(3): 229-232.
GAO Jie, LIU Fu-ping, BAO De-zhou, et al. Study on through-casing resistivity logging [J]. Well Logging Technology, 2007,31(3): 229-232.
- [13] 吴银川,张家田,严正国. 过套管地层电阻率测井技术综述[J]. 石油仪器, 2006,20(5): 1-5.
WU Yin-chuan, ZHANG Jia-tian, YAN Zheng-guo. An overview of the logging technology of formation resistivity through casing [J]. Petroleum Instruments, 2006, 20(5): 1-5.
- [14] 郑璐,张家田,严正国. 过套管电阻率测井刻度概述[J]. 石油仪器, 2010,24(1): 7-8.
ZHENG Lu, ZHANG Jia-tian, YAN Zheng-guo. An overview of the cased hole formation resistivity logging calibration [J]. Petroleum Instruments, 2010,24(1): 7-8.
- [15] 郑璐,张家田,严正国,等. 过套管电阻率测井刻度系统设计[J]. 石油仪器, 2010,24(2): 9-11.
ZHENG Lu, ZHANG Jia-tian, YAN Zheng-guo, et al. Design of the calibration system of cased hole formation resistivity logging [J]. Petroleum Instruments, 2010,24(2): 9-11.
- [16] 刘福平,高杰,孙宝佃,等. 实际井眼条件下过套管电阻率测井响应的传输线方程正演算法[J]. 地球物理学报, 2007,50(6): 1905-1913.
LIU Fu-ping, GAO Jie, SUN Bao-dian, et al. Forward calculation of the resistivity logging response through casing by transmission line equation for multi-layer formations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007,50(6): 1905-1913.

- [17] 高杰,刘福平,包德洲,等. 非均匀套管井中的过套管电阻率测井响应[J]. 地球物理学报, 2008,51(4):1255-1261.
GAO Jie, LIU Fu-ping, BAO De-zhou, et al. Responses simulation of through-casing resistivity logging in heterogeneous-casing wells [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008,51(4):1255-1261.
- [18] 谢进庄,杨景海,刘福平,等. 过套管地层电阻率曲线环境影响校正方法研究[J]. 地球物理学进展, 2010,25(1):258-265.
XIE Jin-zhuang, YANG Jing-hai, LIU Fu-ping, et al. Study on the environment effect and its correction method for the formation resistivity logging data through casing [J]. Progress in Geophysics, 2010,25(1):258-265.
- [19] 高杰,柯式镇,魏宝君,等. 电法测井数值模拟现状及发展趋势分析[J]. 测井技术, 2010,34(1):1-5.
GAO Jie, KE Shi-zhen, WEI Bao-jun, et al. Introduction to numerical simulation of electrical logging and its development trend [J]. Well Logging Technology, 2010,34(1):1-5.
- [20] 孙金浩. 俄罗斯过套管电阻率测井技术适用性研究[J]. 国外测井技术, 2009,169:34-38.
SUN Jin-hao. Study on the applicability of Russian through-casing resistivity logging technology [J]. World Well Logging Technology, 2009,169:34-38.
- [21] 王正国. 俄罗斯过套管电阻率测井研究及应用[J]. 测井技术, 2009,33(4):374-378.
WANG Zheng-guo. Study on the Russian through casing resistivity logging and its application [J]. Well Logging Technology, 2009,33(4):374-378.
- [22] 李永发. 俄罗斯过套管电阻率测井仪 U 电位波形干扰分析[J]. 石油仪器, 2011,25(4):15-17.
LI Yong-fa. U potential waveform interference analysis for Russian through-casing resistivity logging tool [J]. Petroleum Instruments, 2011,25(4):15-17.

(编辑 修荣荣)

(上接第 42 页)

- [20] IRWIN H, CURTIS C D, COLEMAN M. Isotopic evidence for the source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments[J]. Nature,1977,269:209-213.
- [21] MORAD S. Carbonate cementation in sandstones; distribution patterns and geochemical evolution [C]// MORAD S. Carbonate cementation in sandstones; Special Publication Number 26 of the International Association of Sedimentologists. Oxford: Blackwell Science, c1998:1-26.
- [22] 王大锐. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- [23] SURDAM R C, CROSSEY L J, EGLINTON G, et al. Organic-inorganic reactions during progressive burial: key to porosity and permeability enhancement and preservation and discussion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London,1985,315:135-156.
- [24] BATH T, BJØRLYKKE K. Organic acids from source rock maturation: generation potentials, transport mechanisms and relevance for mineral diagenesis[J]. Applied Geochemistry, 1993,8:325-337.
- [25] 周江羽,吴冲龙,韩志军. 鄂尔多斯盆地的地热场特征与有机质成熟史[J]. 石油实验地质,1998,20(1):20-23.
ZHOU Jiang-yu, WU Chong-long, HAN Zhi-jun. Geothermal field and maturing history of organic matter in the Ordos Basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 1998,20(1):20-23.

(编辑 徐会永)