

刘福平, 陈小安, 孟宪军, 等. 测量电极接触电阻的过套管电阻率测井响应数值模拟与分析[J]. 石油物探, 2016, 55(6): 887-893

LIU Fuping, CHEN Xiaolan, MENG Xianjun, et al. The numerical simulation and analysis of resistivity logging responses for the contact resistance of logging tool's electrodes through casing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(6): 887-893

测量电极接触电阻的过套管电阻率 测井响应数值模拟与分析

刘福平^{1,2}, 陈小安³, 孟宪军⁴, 王玉梅⁴, 杨长春²

(1. 北京印刷学院信息工程学院, 北京 102600; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中国石油集团长城钻探工程有限公司测井技术研究院, 北京 100176; 4. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257022)

摘要:为解决过套管电阻率测井中测量电极接触电阻的影响问题,以过套管电阻率测井的测量方式、仪器结构等为基础,提出了电极接触电阻测井响应数值模拟计算方法,给出了接触电阻、电表内阻与井壁电势测量值之间的关系。利用 KAUFMAN 传输线方法计算了金属套管壁的电势分布,利用该分布实现了电极接触电阻测井响应的定量计算。针对目前所使用的单极供电和双极供电 2 种过套管电阻率测井的测量方式,给出了电极接触电阻测井响应数值算例,结果表明:当任意一个测量电极存在接触电阻时都会引起测井曲线的较大变化,甚至还有可能会出现测井负异常,上、下电极所在的位置为测井曲线的奇异点,在电极附近有可能导致数倍或数十倍的测量误差;并且发现目前使用的 2 种测量方式的测井曲线存在较大差异,曲线奇异点的位置与测量方式有关。这些结果可用于过套管电阻率测井异常的考察、接触电阻的测井响应分析以及过套管电阻率测井解释等。

关键词:过套管电阻率测井;接触电阻;传输线方程;测井响应;测井异常

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:1000-1441(2016)06-0887-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2016.06.014

The numerical simulation and analysis of resistivity logging responses for the contact resistance of logging tool's electrodes through casing

LIU Fuping^{1,2}, CHEN Xiaolan³, MENG Xianjun⁴, WANG Yumei⁴, YANG Changchun²

(1. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. R & D Academy of Well Logging, CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100176, China; 4. Shengli Oilfield Geophysical Research Institute, SINOPEC, Dongying 257022, China)

Abstract: In order to solve the influence of the contact resistance for logging tool's measuring electrode on the measured results in the resistivity logging through casing, based on the measured model and tool's structure, we proposed a numerical computation method of resistivity logging response through casing when the electrode of logging tool exists the contact resistances and derived the relationship among casing potential, contact resistances of logging tool's electrodes and inner resistance of voltmeter. The logging responses of the contact resistance for measuring electrodes was calculated quantitatively by casing potential distribution, which is the solution of transmission line equation of Kaufman. The numerical computation ex-

收稿日期:2015-12-07; **改回日期:**2016-03-20。

作者简介:刘福平(1960—),男,教授,主要从事地震波、电磁波传播理论、数值计算及数值模拟方面的研究和教学工作。

基金项目:北京市自然科学基金重点项目 B 类(KZ201510015015)、北京市自然科学基金(4142016)、北京市教育委员会项目(KM201510015009 和 KM201410015006)联合资助。

This research is financially supported by the Beijing Municipal Natural Science Foundation (Grant No. KZ201510015015), the Natural Science Foundation of Beijing (Grant No. 4142016) and the Beijing City Board of Education Science and Technology Project (Grant Nos. KM201510015009, KM201410015006).

amples were provided in accordance with two measured models of resistivity logging through casing. The results show that if there is contact resistivity in anyone of the three measuring electrodes (upper, middle, lower), it will cause a great change in the logging curve. There may even be negative anomaly of logging curve, where the positions of upper and lower electrodes is the singular point of logging curve. The measurement error in the vicinity of the electrodes may be several times or dozens of times larger than that of the regular result. It was found that there are large differences of the measured results with the two measured models of resistivity logging through casing, which cause the different positions of the singular points on the logging curves. With the proposed method we can analyze the logging responses of the contact resistance for measuring electrodes and further give the logging interpretation.

Keywords: resistivity logging through casing, contact resistance, transmission line equation, logging response, logging anomaly

20 世纪 90 年代 KAUFMAN 等发表了一系列过套管井电阻率测井的测量方法及计算理论的文章^[1-5]。此后在过套管井电阻率测井的仪器研制与数值模拟等方面均取得了较大的进展^[6-13], 同时我国也进行了仪器引进和方法研究等工作^[12-24]。在应用过程中, 遇到了诸如电极接触电阻影响、测井负异常、井内流体测井响应等需要解决的问题^[10, 15-16, 25-29], 这些问题需要理论支持。其中测量过程中电极接触电阻对过套管井电阻率测量结果的影响是一个特别突出的问题。由于套管的锈蚀及套管壁原油的存在, 使得测量电极与套管之间存在着接触电阻, 实践发现电极接触电阻对过套管井电阻率测量结果的影响非常大^[10, 13, 15]。但是针对接触电阻对测量结果影响的认识严重不足, 尚无可供借鉴的理论依据。由于金属套管的高导电性, 与接触电阻存在巨大的反差, 再加之接触电阻的随机性, 对接触电阻影响的定量测量和计算存在较大困难。现有的测井资料表明, 在同一测井井段不同时间段的测量结果往往存在很大的差别, 甚至会出现负值, 这可能是接触电阻的影响, 但目前还无法解释和校正。电极接触电阻的影响问题是过套管电阻率测井不可避免的实际问题, 因此开展过套管电阻率测井接触电阻对测量结果影响的研究十分必要。

我们针对过套管电阻率测井的测量方式、仪器结构提出了电极接触电阻对测量结果产生影响的计算方法, 并给出了单极供电和双极供电 2 种测量方式的数值算例。

1 地层视电阻率计算方法

在测井过程中, 一旦发射电极与套管接触, 套管中电势分布就已确定, 只要供电电极的电流不变, 则整个套管电势分布就不会变。供电电极接触电阻对电势分布的幅值有影响, 但对电势分布的规

律几乎没有影响。由于视电阻率利用电势空间分布的二阶导数计算得到, 所以供电电极接触电阻对地层电阻率整体测量幅度影响不大, 对电阻率分布曲线的空间分布几乎没有影响。

由于测量电极接触电阻会影响测量的电势差, 又因为套管电势分布是确定的, 所以套管某点电位与无穷远处电位差为一常数; 当用电位差计测量时, 接触电阻会影响电表的读数 (即接触电阻会影响流过电表的电流), 这样接触电阻相当于电表的一个内阻的作用 (这是因为二阶电位差为 nV 数量级), 电表内阻对二阶电位差测量的影响非常大, 其简化测量如图 1 所示。

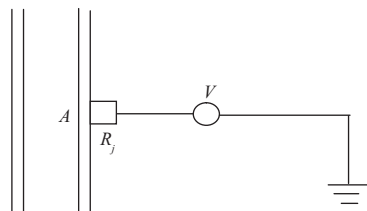


图 1 简化测量示意

图 1 中, R_j 为接触电阻, 设电表内阻为 R_i , 由于 A 点电势 U_A 在空间确定的点为一常数, 当 $R_j = 0$ 时, 则电表读数即为 U_A , U_A 可由 KAUFMAN 传输线方程计算, 当 $R_j \neq 0$ 时, 电表读数为:

$$U_V = \frac{U_A}{R_j + R_i} R_i \quad (1)$$

由于接触电阻的存在, 使电位差计读数变小, 因此会直接影响过套管电阻率测井的测量结果。目前有关地层视电阻率的测量和计算有 2 种方法。第 1 种测量方法为单极供电测量方式 (方法 1):

$$R_a = K \frac{U(z)}{\Delta_2 U} \quad (2)$$

式中: $K = L^2 R_w / 4$; R_w 为套管单位长度对应的地层横向电阻; $\Delta_2 U$ 为二阶电位差; $U(z)$ 为 z 点电势。

第 2 种测量方法是采用上、下供电电极 A_1 和 A_2 交替供电, 称为双极供电测量方式 (方法 2), 由

测量电极 M_1, M_2, N (N 在中间) 测得电位 U , 一阶电位 $\Delta_1 U_{M_2 M_1}$, 二阶电位 $\Delta_2 U_{M_2 M_1}$ 。当电极 A_1 供电时, 设: $U_N(I_{A_1})$ 为中心测量电极与套管接触点的电位; $\Delta_1 U_{M_2 M_1}(I_{A_1})$ 为与套管相接触的两个上部测量电极之间的初级电位差; $\Delta_2 U_{M_2 M_1}(I_{A_1})$ 为 3 个测量电极与套管接触点之间的二次电位差; I_{A_1} 为上供电电极 A_1 与套管接触点的电流, 电极距 $L = M_1 M_2$ 。当电极 A_2 供电时用类似的符号表示, 则视电阻率 R_a 可以写为:

$$R_a = k \{ [\Delta_2 U(I_{A_1}) - \Delta_1 U_{M_2 M_1}(I_{A_1})] / I_{A_1} + [\Delta_2 U(I_{A_2}) - \Delta_1 U_{M_2 M_1}(I_{A_2})] / I_{A_2} \} \cdot \{ [U_N(I_{A_1}) \cdot \Delta_1 U_{M_2 M_1}(I_{A_2}) - U_N(I_{A_2}) \cdot \Delta_1 U_{M_2 M_1}(I_{A_1})] / [-\Delta_1 U_{M_2 M_1}(I_{A_1}) \cdot \Delta_2 U(I_{A_2}) + \Delta_1 U_{M_2 M_1}(I_{A_2}) \cdot \Delta_2 U(I_{A_1})] \} \quad (3)$$

式中: k 为仪器系数。

数值模拟计算表明^[13, 23, 29], 在套管均匀的条件下, 公式(2)和公式(3)计算结果完全一致, 如果井内存在流体界面或出现套管接箍、套管电阻的非均匀变化等, 公式(3)可较大幅度地压制套管接箍处视电阻率曲线的异常跳跃^[10, 13, 23, 29]。

公式(3)考虑的是测量电流和井壁的电势, 计算结果应更接近套管内及地层中电流流动实际情况, 而公式(2)的电极系数中包含套管的电阻, 因此套管的电阻变化对地层的测量结果会有较大的影响。

利用 KAUFMAN 传输线方程计算出 U_A , 即套管上的电势分布, 再利用(1)式计算电位差计的实际读数, 二阶电位差 $\Delta_2 U$ (电表测量值) 计算公式为:

$$\Delta_2 U = U_V \left(z + \frac{l}{2} \right) + U_V \left(z - \frac{l}{2} \right) - 2U_V(z) \quad (4)$$

可设在点 $z + l/2, z, z - l/2$ 处接触电阻不同, 由此计算 R_a , 从而考察接触电阻的影响。

当上、下电极分别供电时, 利用类似方法可分别计算当接触电阻存在时各电极的测量电势, 利用各电极电势测量结果可计算接触电阻的测井响应, 从而实现利用公式(3)计算视电阻率的测井响应。

2 测井响应算例

当发射电极存在接触电阻而测量电极不存在

接触电阻时, 不会影响电势的分布规律, 这种情况下测井曲线不会改变, 因此下面重点研究当测量电极存在接触电阻时的测井响应。计算参数采用: 套管电阻率为 $2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$; 套管半径为 0.089 8 m; 套管厚度(壁厚)为 0.007 72 m, 地层电阻率 $R_t = 10 \Omega \cdot m$, 电表内阻 $R_i = 100\ 000 \Omega \cdot m$, 逐渐改变接触电阻的大小研究计算出的视电阻率测井曲线, 分析电极接触电阻测井响应。

图 2 至图 5 为 2 种测量方法的电极接触电阻的测井响应。图中, R_a 为地层视电阻率; R_j 为电极接触电阻; R_{M_1} 为只有电极 M_1 存在接触电阻时的视电阻率; R_{M_2} 为只有电极 M_2 存在接触电阻时的视电阻率; R_N 为只有电极 N 存在接触电阻时的视电阻率; $R_{M_1 M_2}$ 为电极 M_1 和 M_2 同时存在接触电阻时的视电阻率; R_{NM_1} 为电极 N 和 M_1 同时存在接触电阻时的视电阻率; R_{NM_2} 为电极 N 和 M_2 同时存在接触电阻时的视电阻率。

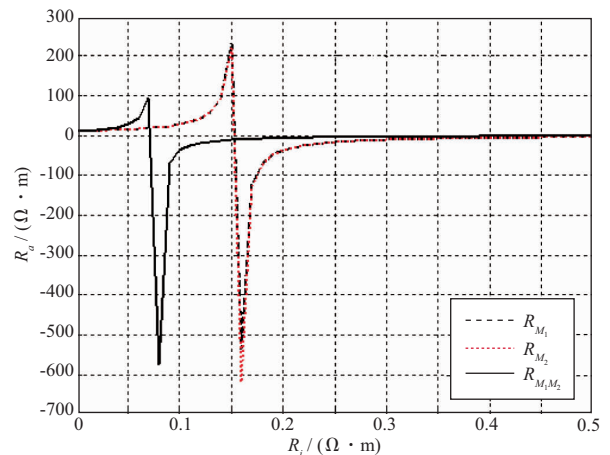


图 2 单极供电测量方式下电极 M_1 和 M_2 接触电阻测井响应

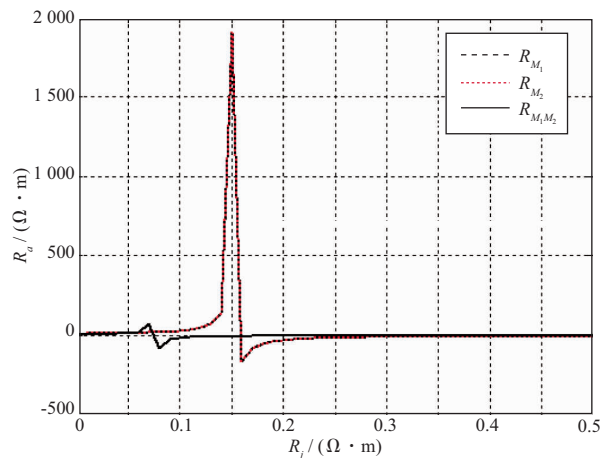


图 3 双极供电测量方式下电极 M_1 和 M_2 接触电阻测井响应

在算例中如果 2 个测量电极同时存在接触电阻,则认为 2 个电极接触电阻相同。图 2 和图 3 中 3 个地层视电阻率曲线分别代表为只有电极 M_1 存在接触电阻、只有电极 M_2 存在接触电阻以及电极 M_1 和 M_2 同时存在接触电阻时的计算结果。由图 2 和图 3 可以发现:测井曲线存在奇异点,这是因为在 2 种测量方法中都存在电势的二阶电位差的导数项,由于接触电阻的存在,使电极电势读数变小,有时可使电势的二阶电位差存在零点,所以当电极存在接触电阻时地层视电阻率曲线会存在奇异点。

当电极存在接触电阻时地层视电阻率有可能变化很大,也可能出现负的测井异常,这也可能是形成测井负异常的另一原因^[10,13,23,29]。

由图 2 还可发现方法 1 中测井曲线 R_{M_1} 与曲线 R_{M_2} 几乎重合,但在奇异点附近不重合;而方法 2 中测井曲线 R_{M_1} 与曲线 R_{M_2} 完全重合(图 3),这是因为方法 1 中电势分布不具有对称性,而由于方法 2 采用上、下电极供电方式完全对称所致。

曲线 $R_{M_1 M_2}$ 奇异点的位置在曲线 R_{M_1} 与曲线 R_{M_2} 奇异点接触电阻一半的位置。

图 4 和图 5 为只有电极 N 存在接触电阻、电极 N 与 M_1 同时存在接触电阻以及电极 N 与 M_2 同时存在接触电阻时的地层视电阻率曲线。由图 4 和图 5 可以看出随着接触电阻的增大,地层视电阻率逐渐减小,并不存在奇异点,因为电极 N 接触电阻的存在使电极 N 电势读数变小,使电势的二阶电位差变大并不会出现零点,所以当电极 N 存在接触电阻时地层视电阻率会变小。

图 4 和图 5 还显示出无论采用单极供电测量方式还是采用双极供电测量方式,测井曲线 R_{NM_1}

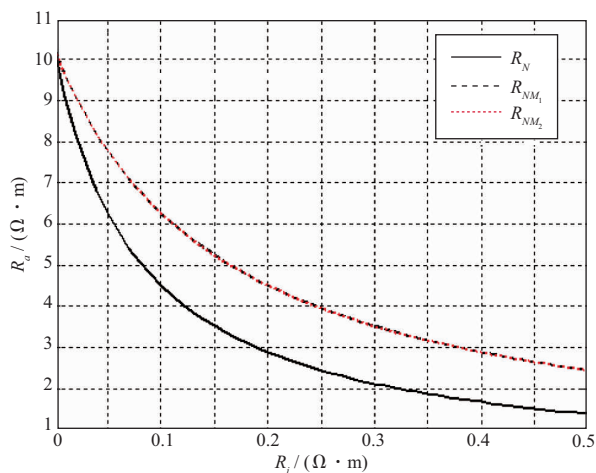


图 4 单极供电测量方式下电极 M_1 , N 和 M_2 接触电阻测井响应

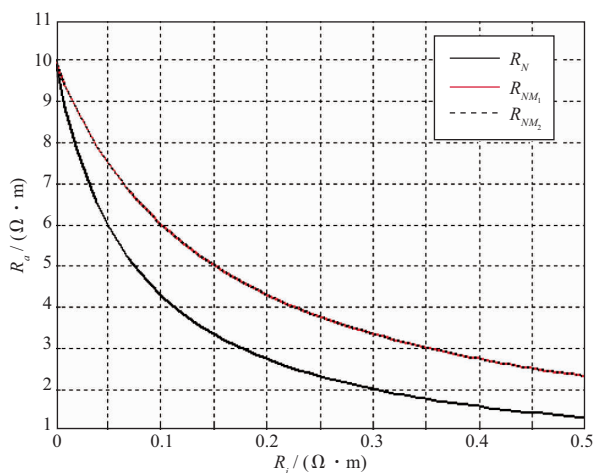


图 5 双极供电测量方式下电极 M_1 , N 和 M_2 接触电阻测井响应

与 R_{NM_2} 均完全重合。

3 电表内阻对测量结果的影响分析

前文算例重点研究了接触电阻的变化对测量结果的影响,其电表内阻保持不变,下面将研究在一个或多个电极存在接触电阻的情况下,电表内阻的改变对测量结果的影响(通常电表内阻范围为 $100\ 000 \sim 1\ 000\ 000\ \Omega \cdot m$)。

计算参数如下:套管电阻率为 $2 \times 10^{-7}\ \Omega \cdot m$;套管半径为 $0.089\ 80\ m$;套管厚度(壁厚)为 $0.007\ 72\ m$,地层电阻率 $R_t = 10\ \Omega \cdot m$,电表内阻 $R_i = 100\ 000\ \Omega \cdot m$ 或 $500\ 000\ \Omega \cdot m$ 。

图 6 和图 7 为只有电极 M_1 存在接触电阻、只有电极 M_2 存在接触电阻以及电极 M_1 和 M_2 同时存在接触电阻时地层视电阻率曲线,由于曲线 R_{M_1} 与曲线 R_{M_2} 特点类似,所以图 6 和图 7 中只画出了

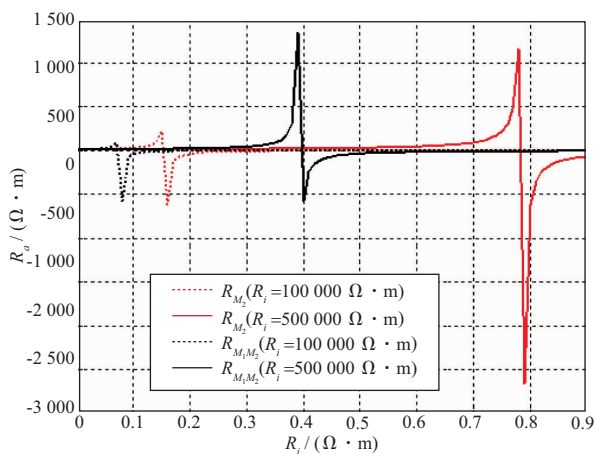


图 6 单极供电测量方式下电表内阻对测量结果的影响(电极 M_1 , M_2 或 $M_1 M_2$ 同时存在接触电阻)

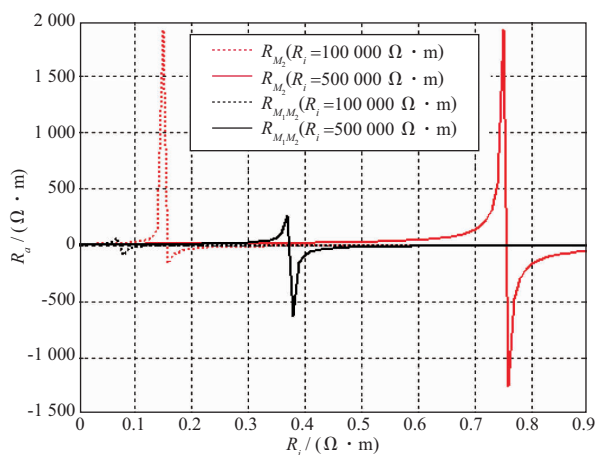


图7 双极供电测量方式下电表内阻对测量结果的影响(电极 M_1, M_2 或 $M_1 M_2$ 同时存在接触电阻)

曲线 R_{M_2} 。曲线存在奇异点,曲线奇异点的位置与电表内阻的大小有关,即发生在使二阶电位差为零的位置,随电表内阻的增大,使曲线出现奇异点的接触电阻值变大,或者说曲线奇异点右移。由此发现单极供电测量方式(方法1)的测井曲线 R_{M_2} 与双极供电测量方式(方法2)的测井曲线 R_{M_2} 幅度存在非常大的差异,且曲线奇异点的位置也不相同,单极供电测量方式(方法1)曲线上奇异点对应的接触电阻值大一些。曲线 $R_{M_1 M_2}$ 奇异点的位置在曲线 R_{M_2} 的奇异点接触电阻一半的位置。

图8和图9为只有电极 N 存在接触电阻、电极 N 与 M_1 同时存在接触电阻时地层视电阻率曲线(电极 N 与 M_2 同时存在接触电阻时的情况与此类似)。由图8和图9可以发现:随着接触电阻的增大,地层视电阻率逐渐减小,不存在奇异点。

随电表内阻的增大,2种测量方式显示测井曲

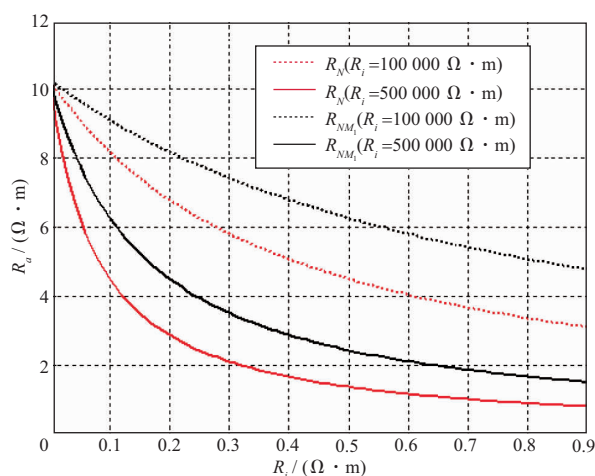


图8 单极供电测量方式下电表内阻对测量结果的影响(电极 N 或 $M_1 N$ 同时存在接触电阻)

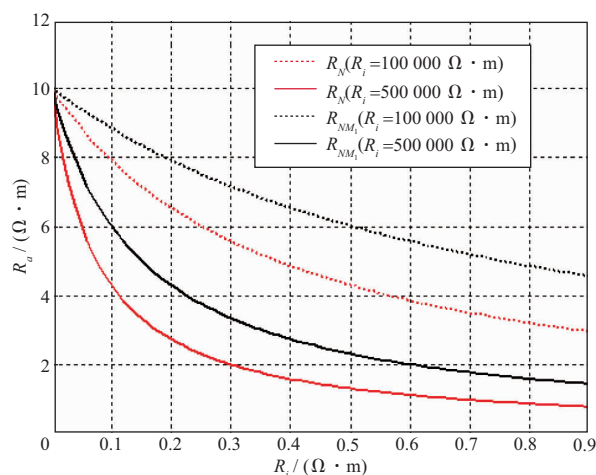


图9 双极供电测量方式下电表内阻对测量结果的影响(电极 N 或 $M_1 N$ 同时存在接触电阻)

线 R_N 幅值变大。在相同接触电阻条件下 R_N 小于 R_{NM_1} 。

4 结束语

针对过套管电阻率测井的测量方式与仪器结构提出了测量电极电势的计算方法,就目前所采用的2种电阻率测量方式,利用KAUFMAN传输线方法计算的金属套管壁电势分布给出了电极接触电阻测井响应数值算例,对接触电阻测井响应进行了分析,获得了一些新的认识:

1) 仪器测量电极的接触电阻对过套管电阻率测井有较大的影响,并与接触电阻大小、接触点位置等因素有重要关系,当只有上、下测量电极(M_1 和 M_2)分别存在接触电阻时,测量结果有可能出现测井异常(负值),在电极附近有可能造数倍或数十倍的测量误差;当中间测量电极(N)存在接触电阻时不存在测井异常,测量结果低于正常测量值。

2) 只有发射电极存在接触电阻时对测井曲线影响非常小,但不同测量电极存在接触电阻时会产生不同的测井响应,其视电阻率曲线间存在较大的差别,测量仪器的电表内阻的变化也会导致明显的测井响应变化。

3) 目前常用的2种过套管电阻率测量方式的测井曲线存在较大差异,曲线奇异点位置与幅值大小的差别也较大,说明不同的测量方式的测量结果会有所不同。

电极接触电阻可造成过套管电阻率测井负异常的出现,这是本文所取得的一个新的认识,目前还没有见到类似的研究报道。要消除这种测井异

常,建议其一应尽量减小接触电阻的数值,即尽可能刮除套管壁原油等高阻介质;其二是进行测井异常的校正,但这是下一步需要研究的工作。本文的研究为过套管电阻率测井异常的分析及实现接触电阻测井响应正演模拟提供了计算方法。

参 考 文 献

- [1] KAUFMAN A A, WIGHTMAN W E. A transmission-line model for electrical logging through casing [J]. *Geophysics*, 1993, 58(12): 1739-1747
- [2] KAUFMAN A A. Electrical field in a borehole with a casing [J]. *Geophysics*, 1990, 55(1): 29-38
- [3] SCHENKEL C J, MORRISON H F. Effects of well casing on potential field measurements using down-hole current sources [J]. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38(6): 663-686
- [4] SCHENKEL C J, MORRISON H F. Electrical resistivity measurement through metal casing [J]. *Geophysics*, 1994, 59(7): 1072-1082
- [5] ASKEY S, FARAG S, LOGAN J, et al. Cased hole resistivity measurements optimize management of mature waterflood in Indonesia [J]. *SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, 2002: 9-22
- [6] FONDYGA A, ECUADOR Q, SHERBA G, et al. Cased hole density, neutron, sonic and resistivity logging in South America, case histories, lessons learned, and a methodology for including the technology in formation evaluation programs [J]. *SPWLA 45th Annual Logging Symposium*, 2004: 6-9
- [7] AULIA K, POERNOMO B, RICHMOND W, et al. Resistivity behind casing [J]. *Oil Field Review*, 2001, 13(1): 1-94
- [8] 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 F P, GAO J, SUN B D, et al. Responses simulation of through-casing resistivity logging in heterogeneous-casing wells [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(6): 1905-1913
- [9] 包德洲, 刘杰, 王利宁, 等. TCFR 型过套管电阻率测井仪研制 [J]. *测井技术*, 2013, 37(3): 314-317
BAO D Z, LIU J, WANG L N, et al. Development of TCFR casedhole resistivity logging tool [J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(3): 314-317
- [10] ZHOU Q, JULANDER D, PENLEY L. Experiences with casedhole resistivity logging for reservoir monitoring [J]. *SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, 2002: 1-8
- [11] VAIL W B, MOMI S T, HAINES H, et al. Formation resistivity measurements through metal casing at the MWX-2 well in Rifle, Colorado [J]. *SPWLA 36th Annual Logging Symposium*, 1995: 1-12
- [12] 刘胜建, 张明锋. 过套管电阻率测井应用探讨 [J]. *油气井测试*, 2003, 12(4): 23-25
LIU S J, ZHANG M F. The discuss of appliance of resistance rate for over-thimble [J]. *Well Testing*, 2003, 12(4): 23-25
- [13] 刘福平, 陈小安, 杨长春. 过套管电阻率测井响应数值模拟研究进展 [J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(6): 2018-2025
LIU F P, CHEN X A, YANG C C. The progress on calculation of resistivity logging response through casing [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(6): 2018-2025
- [14] 刘迪仁, 徐建华. 套管井中低频电流源的场及其特性 [J]. *江汉石油学院学报*, 1998, 20(2): 43-47
LIU D Y, XU J H. The electrical field of low-frequency current in cased well and its behavior [J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1998, 20(2): 43-47
- [15] 刘宇, 刘国强. 套管非匀质性对过套管电阻率测井影响的数值模拟与分析 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(4): 1345-1355
LIU Y, LIU G Q. Numerical simulation and analysis on the influence of casing inhomogeneity on through-casing resistivity logging response [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(4): 1345-1355
- [16] 周继宏, 袁瑞. 过套管电阻率测井异常测量值的自动检验方法 [J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 1189-1194
ZHOU J H, YUAN R. Automatic test method for abnormal data formation resistivity logging through casing [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(3): 1189-1194
- [17] 栗建军, 孟凡顺, 孟恩. 金属套管对井间电磁测井的影响 [J]. *石油物探*, 2003, 42(2): 256-260
LI J J, MENG F S, MENG E. Effects of casing on cross well electromagnetic logging [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2003, 42(2): 256-260
- [18] 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 J Q, FENG Q N, ZHU L D, et al. Feasibility study on formation resistivity measurement through metal casing [J]. *Well Logging Technology*, 1998, 22(5): 376-379
- [19] BENIMELI D, LEVESQUE C, ROUAULT G, et al. A new technique for faster resistivity measurements in cased holes [J]. *SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, 2002: 5-18
- [20] 蔡明, 刘迪仁, 郑占树, 等. 金属套管对井中电磁场特性影响的有限元分析 [J]. *石油物探*, 2011, 50(5): 470-474
CAI M, LIU D R, ZHENG Z S, et al. Finite element

- analysis for the effect of metal casing on electromagnetic field in casing borehole[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(5): 470-474
- [21] 李健, 孙建孟, 王正楷. 俄罗斯过套管电阻率测井技术应用研究[J]. 测井技术, 2012, 36(1): 63-67
- LI J, SUN J M, WANG Z K. On through casing resistivity logging (ECOS) [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(1): 63-67
- [22] 耿敏, 梁华庆, 尹洪东, 等. 过套管电阻率测井仪器刻度及井下测量数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 43-49
- GENG M, LIANG H Q, YIN H D, et al. Numerical simulation of resistivity logging through casing on instrument calibration and down-hole measurement [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(2): 43-49
- [23] 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 J, LIU F P, BAO D Z, et al. Responses simulation of through-casing resistivity logging in heterogeneous-casing wells [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1255-1261
- [24] 杨景海, 刘福平, 谢进庄, 等. 过套管电阻率测井仪器的径向探测特性[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 2215-2219
- YANG J H, LIU F P, XIE J Z, et al. The detecting characteristics of resistivity log tool through casing [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(6): 2215-2219
- [25] CHEN Y H, ORISTAGLIO M L. A modeling study of borehole radar for oilfield application [J]. Geophysics, 2002, 67(5): 1486-1494
- [26] 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 J Z, YANG J H, LIU F P, et al. Study on the environment effect and its correction method for the resistivity logging data through casing [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(1): 258-265
- [27] 刘福平, 王安玲, 杨长春. 环形槽孔钻铤随钻感应测井场分布的解析解[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(2): 193-384
- LIU F P, WANG A L, YANG C C. Analytical solution of electromagnetic field generated by induction logging tool in a fan-ring slot of drill collar while drilling [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(7): 2128-2137
- [28] 袁瑞, 周继宏. 双极供电型过套管电阻率测井仪的薄层校正方法与实现[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 279-284
- YUAN R, ZHOU J H. Correction method and implementation of thin layers for cased hole resistivity logging tool with double-injection-electrode [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 279-284
- [29] 周继宏, 王雷, 袁瑞. 套管接箍对过套管电阻率测井的影响分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 421-426
- ZHOU J H, WANG L, YUAN R. Analysis on effect of casing collar on formation resistivity logging through casing [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 421-426

(编辑: 朱文杰)

(上接第 886 页)

- in parts of Upper Assam Basin [J]. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1995, 32(2): 49-63
- [19] 王贵文, 朱振宇, 朱广宇. 烃源岩测井识别与评价方法研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 50-52
- WANG G W, ZHU Z Y, ZHU G Y. Logging identification and evaluation of Cambrian-Ordovician source rocks in syncline of Tarim basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 50-52
- [20] 于翔涛. 测井技术在烃源岩评价中的应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2009, 6(2): 198-201
- YU X T. Application of well logging technology to source rocks evaluation [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2009, 6(2): 198-201
- [21] 赵希刚, 吴汉宁, 杨建军, 等. 碎屑岩油气藏沉积微相的测井参数特征识别研究[J]. 石油物探, 2005, 44(6): 582-587
- ZHAO X G, WU H N, YANG J J, et al. The signature recognition of comprehensive logging parameters in sedimentary microfacies clastic reservoirs [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2005, 44(6): 582-587

(编辑: 陈杰)