

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019005

## 随钻高分辨率电阻率成像仪器探测特性研究

倪卫宁<sup>1,2</sup>, 康正明<sup>3,4</sup>, 路保平<sup>1,2</sup>, 柯式镇<sup>3,4</sup>, 李 新<sup>1,2</sup>, 李铭宇<sup>3,4</sup>

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 3. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 4. 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

**摘 要:** 针对现有随钻电阻率成像仪器周向钮扣电极分布少的问题, 设计了一种新的钮扣电极分布方案。该仪器周向排布 8 个圆形钮扣电极, 纵向分为 2 排, 且每排钮扣电极直径不同, 既能在复合钻进时进行全井眼覆盖扫描成像, 又能在滑动钻进时获得 8 个扇区固定方位的井眼图像; 建立了复杂的水平层状地层、含周向异常体地层和水平井地层等 3 种地层模型, 利用有限元方法分析了仪器在不同地层模型中的测井响应特征。分析结果表明: 该仪器具有较好的纵向分辨率, 钮扣电极的纵向分辨率与其直径相当, 可以准确识别方位性高阻地层; 水平井地层界面对仪器不同方位测量的影响不同, 侧向测量模式在地层界面处的响应与电缆侧向测井类似。该仪器在复杂地层中具有较好的适用性, 研究结果对随钻电阻率成像仪器的研发和数据解释具有指导作用。

**关键词:** 随钻电阻率成像; 测井响应; 水平井; 层状地层; 异常体; 数值模拟

中图分类号: P631.3<sup>+</sup>3 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2019)02-0114-06

## The Detection Characteristics of a High Resolution Resistivity Imaging Instrument while Drilling

NI Weining<sup>1,2</sup>, KANG Zhengming<sup>3,4</sup>, LU Baoping<sup>1,2</sup>, KE Shizhen<sup>3,4</sup>, LI Xin<sup>1,2</sup>, LI Mingyu<sup>3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 4. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Focusing on the problem of low distribution of circumferential imaging electrodes in existing resistivity imaging instruments while drilling, a new instrument imaging electrode distribution scheme was designed. The new instrument arranges 8 circular imaging electrodes in the circumferential direction. They are placed in 2 rows in the longitudinal direction, and each row of imaging electrodes has different diameters. In this configuration, it is possible that it can not only perform full wellbore coverage scan imaging during composite drilling, but also obtain the borehole images of 8 sectors with fixed orientation during slide drilling. Taking that into consideration, the complex horizontal layered strata, strata with circumferential anomalous bodies and horizontal well stratigraphic models were established, and analyzed the logging response and laws of the instrument in different stratigraphic models by using finite element method. The analysis results showed that this instrument had good longitudinal resolution, the longitudinal resolution of the imaging electrode was equivalent to its diameter, which could identify the azimuthal strata with high resistivity accurately; the horizontal well strata interface had different effects on the various orientation measurements of this instrument. Further, the response of lateral measurement mode at the strata interface was similar to that of cable lateral logging. The instrument scheme has good applicability in complex strata, and in the future, the research results could be used to guide instrument development and data interpretation.

**Key words:** resistivity imaging while drilling; logging response; horizontal well; layered strata; anomalous body; numerical simulation

目前, 海上钻井几乎都采用随钻测井, 陆上钻井采用随钻测井的比例也在不断提高<sup>[1]</sup>。其中, 随钻电阻率成像测井仪器能提供高分辨率的井壁图像, 从而可以较准确地判断出裂缝、孔洞等地质构造, 实现对地层的准确评价和实时地质导向<sup>[2-6]</sup>, 在水平井钻井中发挥着重要作用。国外的随钻电阻率成像测井理论和测井仪器已经趋于成熟, Schlumberger、Halliburton 和 Baker Hughes 等公司都推出了随钻电

收稿日期: 2018-08-28; 改回日期: 2018-11-29。

**作者简介:** 倪卫宁(1979—), 男, 安徽黄山人, 2000年毕业于石油大学(华东)应用电子技术专业, 2003年获石油大学(华东)控制理论与控制工程专业硕士学位, 2006年获中国科学院半导体研究所微电子学与固体电子学专业博士学位, 副研究员, 主要从事井下智能、随钻测控技术研究。E-mail: niwn.sripe@sinopec.com。

**通信作者:** 康正明, kzm991430414@sina.cn。

**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)资助。

阻率成像测井仪器<sup>[7-13]</sup>, 这些成像测井仪器的钮扣电极在纵向上分布 1~3 排, 而周向上钮扣电极布置的较少, 造成仪器周向扫描时间较长。目前, 国内在随钻电阻率成像测井理论研究和仪器研制方面尚处于起步阶段, 有必要借助数值模拟手段对随钻电阻率成像测井进行研究。

笔者设计了一种新的测井仪器钮扣电极系分布方案, 并增加了测量侧向电阻率和钻头电阻率的功能, 不仅缩短了测量时间, 同时具有 2 种不同探测深度的电阻率成像、地层评价和地质导向功能, 是一种高分辨率、多模式、多参数和近钻头的测量方案。为了分析该仪器方案的探测特征, 借助有限元模拟平台, 考察了其在复杂层状地层、周向异常体地层和水平井地层中的测井响应特征。

### 1 测量原理

随钻电阻率成像测井仪器有 2 种激励机制: 一种是直接给电极加载电流; 另一种是通过螺绕环激励在钻铤上产生等电位, 以达到自动聚焦的作用。第二种方法在工艺上容易实现, 因此被广泛应用<sup>[14]</sup>, 笔者的仪器方案也应用该原理。假定钻铤在井轴方向上无限长, 井轴与柱面坐标系 Z 轴一致, 发射螺绕环可以等效为长度磁矩的理想化磁环<sup>[15]</sup>, 如图 1 所示。

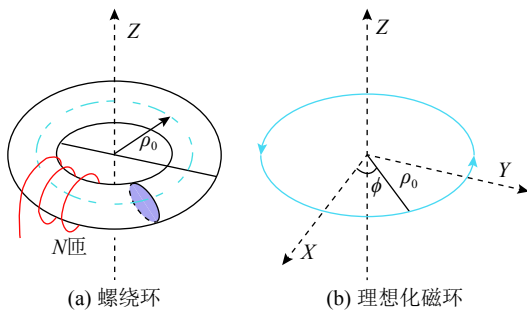


图 1 发射螺绕环等效为理想化磁环示意

Fig. 1 Schematic of a launching spiral ring that is equivalent to the idealized magnetic ring

实际测量过程中由于测量频率低, 可以忽略频率的影响, 因此可以将螺绕环等效为延长的电压偶极子<sup>[16-17]</sup>。此时, 测量原理与传统侧向测井类似, 采用欧姆定律对视电阻率进行标定。视电阻率的计算公式为:

$$R_a = K \frac{U}{I} \quad (1)$$

式中:  $R_a$  为视电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $K$  为仪器常数;  $U$  为螺绕环两端的电压,  $V$ ;  $I$  为钮扣电极和接收螺绕环接收

到的电流,  $A$ 。

### 2 仪器结构参数方案

根据电磁场原理, 可得到特定仪器在空间均匀场内的响应, 但是实际测井环境复杂, 具有明显的非均质性, 径向上由井眼、侵入带、过渡带和原状地层组成, 而纵向上由目的层和围岩组成, 很难利用解析方法求解如此复杂的地层模型, 需要借助数值方法。因此, 利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件建立水平层状地层、异常体地层和水平井地层等 3 种地层模型, 进行复杂地层的数值模拟。

数值模拟验证的仪器由 1 个发射螺绕环、2 排钮扣电极 ( $R_4$ 、 $R_5$  周向相隔  $90^\circ$ , 各分布 4 个钮扣电极) 和 2 个接收螺绕环组成 (见图 2), 可以测量不同深度的电阻率、侧向电阻率和钻头电阻率, 对不同方位钮扣电极的测量结果进行加权平均可以获得浅侧向电阻率和中侧向电阻率。

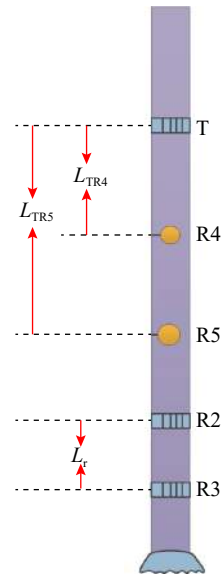


图 2 仪器结构示意图

Fig. 2 Structure of the instrument

在确定源距和钮扣电极直径之前, 需要考察二者对测量电流的影响, 以确定最优的仪器结构参数。模拟时, 发射螺绕环两端电压  $U$  取  $0.1 V$ , 地层电阻率  $R_t$  的变化范围为  $0.1 \sim 1\,000.0 \Omega \cdot m$ , 钮扣电极与发射螺绕环之间的距离 (源距) 为  $0.10 \sim 1.50 m$ , 钮扣电极直径为  $10.0 mm$ , 不考虑井眼的影响, 模拟结果如图 3 所示。从图 3 可以看出: 随着源距增大, 测量电流信号的变化幅度越来越小, 最后基本趋于稳

定;不同地层电阻率下的测量信号随源距变化趋势基本相同;源距相同时,测量电流与电阻率呈反比关系。

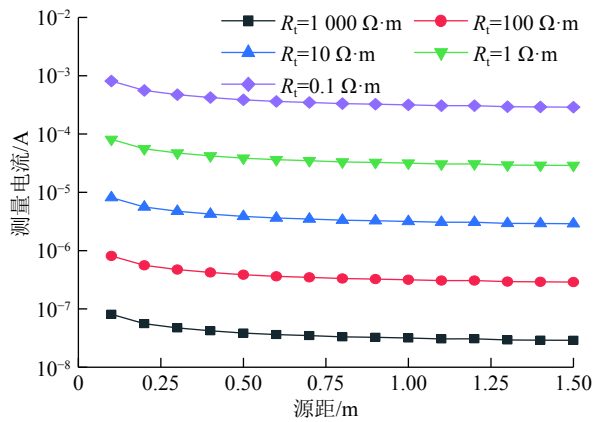


图 3 源距对测量电流的影响

Fig. 3 Effect of source distance on measured current

同理,模拟了钮扣电极直径对测量电流信号的影响,源距为 0.508 m,钮扣电极直径的变化范围为 5.0~50.0 mm,其他模拟参数与图 3 相同,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出:随着钮扣电极直径增大,测量电流信号在双对数坐标中呈线性增大趋势;不同地层电阻率下的测量信号随钮扣电极直径变化的趋势基本相同;钮扣电极直径相同时,测量电流与电阻率呈反比关系。

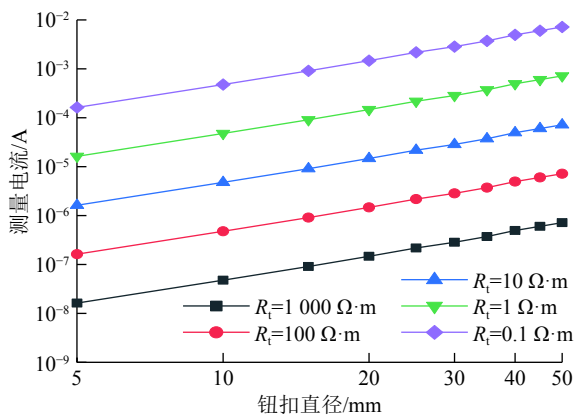


图 4 钮扣电极直径对测量电流的影响

Fig. 4 Effect of button electrode diameter on measured current

对比图 3 和图 4 可以发现,源距对测量电流信号的影响较小,因此可以灵活选取。钮扣电极直径对测量信号影响较大,可综合其他因素选取。国外测井仪器测量结果表明,钮扣电极直径较小时,其纵向分辨率较高,但只能探测电阻率为几百欧姆米

的地层;适当增大钮扣电极直径,虽然降低了其纵向分辨率,但增大了其探测地层电阻率的范围,可以探测电阻率为几千欧姆米的地层。因此,综合考虑钮扣电极测量地层电阻率的范围、钮扣电极纵向分辨率和测量信号等 3 个因素,设计了 2 种不同直径的钮扣电极。

综上,最终选取图 2 中的仪器结构和以下参数进行模拟:钮扣电极 R4 的直径为 10.0 mm,为高分辨率钮扣电极,钮扣电极 R5 直径为 25.4 mm,为标准钮扣电极。发射螺绕环与钮扣电极 R4 的距离  $L_{TR4}$  为 0.508 m,发射螺绕环与钮扣电极 R5 的距离  $L_{TR5}$  为 1.016 m,用于测量深侧向电阻率和钻头电阻率 2 个螺绕环间的距离  $L_r$  为 0.381 m。由于侧向电阻率和钻头电阻率的测量原理和测井响应在文献[16-17]中均有介绍,下面主要研究钮扣电极测量模式的测井响应特征。

### 3 不同类型地层中的测井响应

#### 3.1 层状地层

由于随钻电阻率成像测井仪钮扣电极的直径较小,因此可以分辨较薄的地层。为了研究上述结构仪器对地层的纵向分辨能力,建立了 14 层的水平层状地层,每层地层坐标、厚度和地层电阻率属性如表 1 所示。

表 1 水平层状地层模型参数

Table 1 The model parameters of horizontally layered strata

编号	纵向坐标/m	地层厚度/m	地层电阻率/( $\Omega \cdot m$ )
1	-100.000	100.000	10
2	0	0.005	100
3	0.005	0.005	10
4	0.010	0.010	100
5	0.020	0.010	10
6	0.030	0.020	100
7	0.050	0.020	10
8	0.070	0.040	100
9	0.110	0.040	10
10	0.150	0.060	100
11	0.210	0.060	10
12	0.270	0.080	100
13	0.350	0.080	10
14	0.430	99.570	10

利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件模拟水平层状地层的结果如图 5 所示。模型第 1 层为巨厚层, 因此没有显示, 图 5 中只显示了从第 2 层到第 13 层及第 14 层的部分地层的测井响应。由于钮扣电极 R5 的直径为钮扣电极 R4 直径的 2.54 倍, 明显地, 钮扣电极 R4 对地层的分辨率高于钮扣电极 R5。当地层厚度达到 0.01 m 时, 钮扣电极 R4 的视电阻率接近模型值, 而对于钮扣电极 R5, 当地层厚度达到 0.02 m 时, 其视电阻率才开始接近模型值。当地层厚度大于 0.02 m 后, R4 和 R5 均可以分辨地层, 通过对比钮扣电极直径和其纵向分辨率可以发现, 其对地层的分辨率大致为钮扣电极的直径尺寸。同时, 由于模拟中只考虑了 1 个发射螺绕环的情况, 没有对视电阻率进行补偿, 因此模拟得到的测量曲线和地层模型不对称, 在靠近上下地层界面处, 电阻率出现“一高一低”的情况。

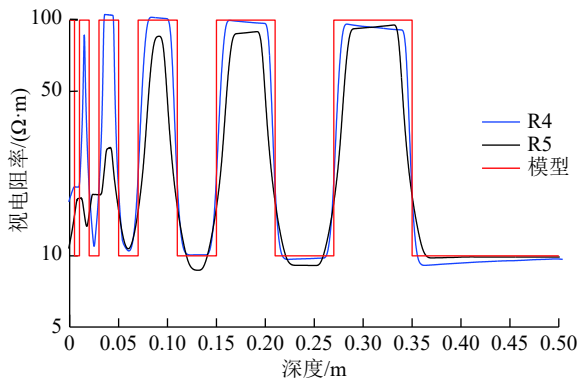


图 5 测井仪器在水平层状地层的测井响应

Fig. 5 Logging response of the logging instrument in horizontally layered strata

### 3.2 周向非均匀地层

为了考察仪器的周向探测特性, 建立了含有方位地层的周向异常体地层模型(见图 6), 通过改变异常体张开角度来考察仪器的方位探测特性。计算模型由仪器结构、井眼、地层和异常体组成。异常体初始位置位于正北方向, 张开角度  $\theta$  的变化范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 异常体厚度为无限厚, 分布于井眼之外。井眼直径  $D_h$  为 215.9 mm, 钻井液电阻率  $R_m$  为  $0.1 \Omega \cdot m$ , 地层电阻率  $R_l$  为  $1.0 \Omega \cdot m$ , 异常体电阻率  $R_b$  为  $100.0 \Omega \cdot m$ 。

以钮扣电极 R4 为例, 模拟异常体张开角度从  $0^\circ$  变化到  $360^\circ$  时不同方位的测井响应, 结果如图 7 所示。图 7 中, RN4 代表 R4 位于正北方向的钮扣电极, RE4、RS4、RW4 分别代表 R4 位于正东、正南、正西

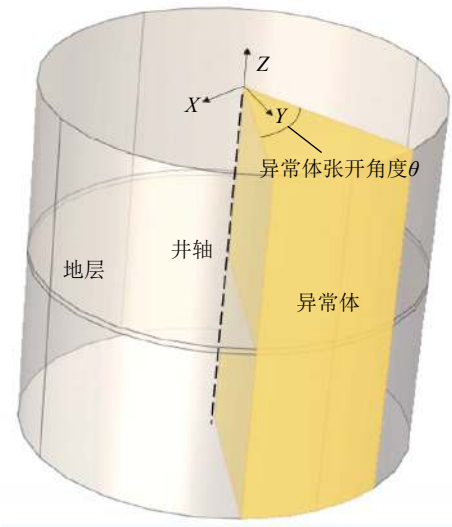


图 6 含方向性异常体的地层模型

Fig. 6 Stratigraphic model with directional anomalous bodies

方位上的钮扣电极。从图 7 可以看出: 当位于正北方向的异常体张开角度从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  增大时(从正北方向两侧对称增大), 正北方位钮扣电极测量的视电阻率呈线性增大, 从  $90^\circ$  到  $135^\circ$  缓慢接近异常体电阻率; 考虑到方位钮扣电极分布的对称性, RE4 和 RS4 视电阻率曲线重合, 当异常体张开角度从  $0^\circ$  增至  $135^\circ$  时, 该方位钮扣电极对异常体几乎没有识别能力; 当异常体张开角度从  $135^\circ$  增至  $270^\circ$  时, 正东方向钮扣电极的视电阻率基本呈线性增大, 此后视电阻率随异常体张开角度增大保持不变。对比而言, 位于正南方向的钮扣电极由于距离异常体较远, 因此对异常体的识别度较低, 当异常体角度大于  $315^\circ$  时, 其视电阻率才开始增大, 并接近异常体电阻率。

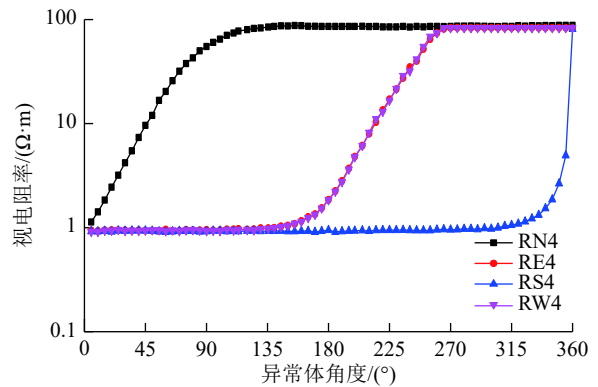


图 7 钮扣电极视电阻率与异常体张开角度的关系曲线

Fig. 7 The relationship curve between the apparent resistivity of the button electrode and the anomalous body opening angle



由于 R2 测量的侧向视电阻率和 R3 测量的钻头视电阻率没有方位探测特性, 异常体张开角度为 0° 时 (即不考虑异常体), 二者的视电阻率接近地层真电阻率, 为 1.0 Ω·m (见图 8), 可以看出曲线略微受到井眼的影响, 其中钻头视电阻率受井眼的影响较严重。当异常体张开角度从 0° 到 360° 变化, 侧向和钻头的视电阻率均随异常体张开角度增大而增大, 但侧向视电阻率略大于钻头视电阻率。当异常体张开角度增加到 360° 时, 侧向和钻头的视电阻率接近异常体的电阻率 (仍受到井眼的影响)。对比图 7 和图 8 可以看出, 钮扣电极与侧向电阻率测量电极、钻头电阻率测量电极对异常体的灵敏度不同, 钮扣电极可以分辨较小张开角度的异常体, 而侧向电阻率测量电极和钻头电阻率测量电极则无法检测较小张开角度的异常体, 因此在测井解释方面, 可以利用方位钮扣电极测量结果识别方位性高阻储层。

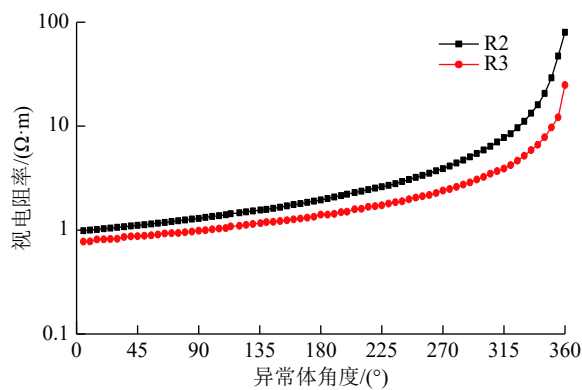


图 8 深侧向与钻头视电阻率与异常体张开角度的关系曲线  
 Fig. 8 The relationship curve between the apparent resistivity of deep laterolog/bit and the anomalous body opening angle

### 3.3 水平井地层

随钻电阻率成像测井相比于常规电阻率成像测井的优势是其可以应用于大斜度井和水平井, 为了考察仪器在水平井中的测井响应, 建立了如图 9 所示的水平井地层模型。该模型由 3 层地层组成, 上下层为围岩, 电阻率  $R_s$  为 1 Ω·m, 中间层为目的层, 电阻率  $R_t$  为 10 Ω·m, 仪器位于目的层中, 目的层厚度  $H$  为 2 m, 仪器初始位置位于目的层中间, 坐标  $Z$  为 0, 向上靠近地层界面  $Z$  值为正, 向下靠近地层界面  $Z$  值为负。

钮扣电极 R4 测量的水平井中不同方位视电阻率与仪器距离地层界面距离的关系如图 10 所示, R4 正北方向和正南方向的钮扣电极靠近地层界面,

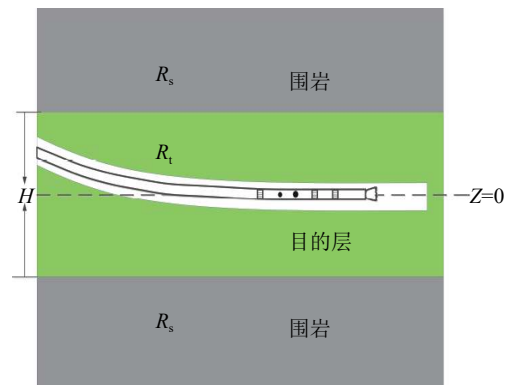


图 9 水平井数值模拟模型示意  
 Fig. 9 The model of horizontal well numerical simulation

而正东和正西方向的钮扣电极与地层界面垂直。从图 10 可以看出: 正北方向和正南方向钮扣电极的视电阻率曲线与仪器在直井中的测井响应曲线类似, 当仪器靠近地层界面处时, 由于电荷的累积, 具有“犄角”现象, 仪器离开地层界面时也是如此; 仪器在地层上下界面处的测井响应不对称; 相比而言, 正东方向和正西方向钮扣电极的测量曲线几乎重合, 具有良好的对称性。

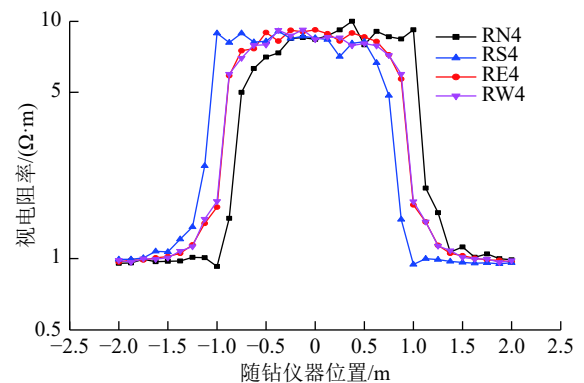


图 10 钮扣电极测量的视电阻率与仪器距地层界面距离的关系曲线

Fig. 10 The relationship curve between the apparent resistivity measured by the buttonelectrode and the distance of the instrument to strata interface

将 R4 和 R5 不同方位的钮扣电极测量的视电阻率进行加权平均, 可以获得不同径向探测深度的浅侧向电阻率和深侧向电阻率, 可以用于地层评价。计算结果表明, 浅侧向 R4、中侧向 R5 和深侧向 R2 视电阻率相差不大, 且关于地层对称 (见图 11)。该结果与 H. M. Wang 等人<sup>[18]</sup>模拟的双侧向结果类似, 测量的钻头视电阻率也关于地层模型对称, 但是其测量值远远小于目的层的真实电阻率。

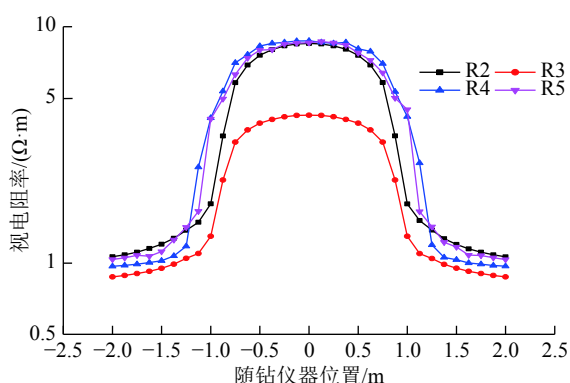


图 11 侧向、钻头测量的视电阻率与仪器距地层界面距离的关系曲线

Fig. 11 The relationship curve between the apparent resistivity measured by the laterolog/bit and the distance of the instrument to strata interface

## 4 结论与建议

1) 随钻电阻率成像测井纵向分辨率取决于钮扣电极的直径, 并与钮扣电极的直径相当。测井仪器周向设计分布 4 个方位性钮扣电极, 能够识别方位性高阻地层。

2) 不同方位的钮扣电极在水平井中的测井响应特征不同, 靠近地层界面钮扣电极的测井曲线在地层界面处有明显的“犄角”现象, 而与地层界面垂直的钮扣电极以及仪器侧向电阻率测量电极在地层界面处的测井响应与常规电缆侧向电阻率测井类似。

3) 作为仪器研发的先导, 数值模拟可以有效缩短仪器的研发周期, 但是其模拟环境大多为理想环境, 与真实地层环境具有一定的差距, 建议尽快研制出随钻电阻率测井仪器样机和建立地层模型, 以验证该仪器方案的可行性。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 张辛耘, 王敬农, 郭彦军. 随钻测井技术进展和发展趋势[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 10-15.  
ZHANG Xinyun, WANG Jingnong, GUO Yanjun. Advances and trends in logging while drilling technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(1): 10-15.
- [2] 杨震, 肖红兵, 李翠. 随钻方位电磁波仪器测量精度对电阻率及界面预测影响分析[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 115-120.  
YANG Zhen, XIAO Hongbing, LI Cui. Impacts of accuracy of azimuthal electromagnetic logging-while-drilling on resistivity and interface prediction[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 115-120.
- [3] 杨世夺, 雷霄, 蔡军, 等. 随钻电阻率成像测井在北部湾碳酸盐岩储层中的综合应用[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 177-182.

- YANG Shiduo, LEI Xiao, CAI Jun, et al. Integrated solution of LWD resistivity image logging in carbonate reservoir in Beibu Gulf, China[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(2): 177-182.
- [4] 李安宗, 李启明, 朱军, 等. 方位侧向电阻率成像随钻测井仪探测特性数值模拟分析[J]. 测井技术, 2014, 38(4): 407-410.  
LI Anzong, LI Qiming, ZHU Jun, et al. Numerical analysis of logging response for LWD azimuthal laterolog resistivity imaging tool[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(4): 407-410.
- [5] 林楠. 随钻电阻率成像技术在页岩气压裂评价中的应用[J]. 录井工程, 2015, 26(2): 16-20.  
LIN Nan. LWD resistivity imaging technology in the evaluation of shale gas fracturing[J]. Mud Logging Engineering, 2015, 26(2): 16-20.
- [6] 王邦伟, 张树东, 吉人, 等. 高分辨率随钻电阻率成像测井在四川盆地碳酸盐岩储层的应用[J]. 测井技术, 2017, 41(3): 358-363.  
WANG Bangwei, ZHANG Shudong, JI Ren, et al. Application of microscope high resolution LWD resistivity image logging in carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(3): 358-363.
- [7] ALLOUCHE M, CHOW S, DUBOURG I, et al. High-resolution images and formation evaluation in slim holes from a new logging-while-drilling azimuthal laterolog device[R]. SPE 131513, 2010.
- [8] ORTENZI L, DUBOURG I, van OS R, et al. New azimuthal resistivity and high-resolution imager facilitates formation evaluation and well placement of horizontal slim boreholes[J]. Petrophysics, 2011, 53(3): 197-207.
- [9] PRAMMER M G, MORYS M, KNIZHNIK S, et al. Field testing of an advanced LWD imaging resistivity tool[R]. SPWLA-2007-AA, 2007.
- [10] PRAMMER M G, MORYS M, KNIZHNIK S, et al. A high-resolution LWD resistivity imaging tool-field testing in vertical and highly deviated boreholes[J]. Petrophysics, 2009, 50(1): 49-66.
- [11] RITTER R N, CHEMALI R, LOFTS J, et al. High resolution visualization of near wellbore geology using while-drilling electrical images[R]. SPWLA-2004-PP, 2004.
- [12] AKIMOV O, BAULE A, FULDA C, et al. Real-time imaging while drilling: US7272504[P]. 2007-09-18.
- [13] FULDA C, HARTMANN A, GOREK M. High resolution electrical imaging while drilling[R]. SPWLA-2010-46830, 2010.
- [14] ARPS J. J. Inductive resistivity guard logging apparatus including toroidal coils mounted on a conductive stem: US3305771[P]. 1967-02-21.
- [15] GIANZERO S, CHEMALI R, LIN Y, et al. A new resistivity tool for measurement-while-drilling[R]. SPWLA-1985-A, 1985.
- [16] 康正明, 柯式镇, 李新, 等. 钻头电阻率测井仪器探测特性研究[J]. 石油科学通报, 2017, 2(4): 457-465.  
KANG Zhengming, KE Shizhen, LI Xin, et al. The detection characteristics study of the at-bit resistivity logging tool[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(4): 457-465.
- [17] 李铭宇, 柯式镇, 康正明, 等. 螺旋环激励式随钻侧向测井仪测量强度影响因素及响应特性[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 128-134.  
LI Mingyu, KE Shizhen, KANG Zhengming, et al. Influence factors of measured signal intensity and the response characteristics of the toroidal coil excitation LWD laterolog instrument[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 128-134.
- [18] WANG H M, SHEN L C, ZHANG G J. Dual laterolog response in 3-D environments[R]. SPWLA-1998-X, 1998.