

# 钻头电阻率测井仪器探测特性研究

康正明<sup>1,2</sup>, 柯式镇<sup>1,2\*</sup>, 李新<sup>3</sup>, 米金泰<sup>3</sup>, 倪卫宁<sup>3</sup>, 张冰<sup>1,2</sup>, 张红蕾<sup>1,2</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249

3 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

\* 通信作者, wksz@cup.edu.cn

收稿日期: 2017-08-25

十三五国家科技重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(2016ZX05021-002)资助

**摘要** 钻头电阻率测量是一种服务于地质导向的方法, 在钻井过程中可以有效地降低作业风险。开展钻头电阻率测井仪器探测特性的数值模拟是研制精密仪器的重要手段, 但其复杂的螺绕环激励源为数值模拟带来困难, 因此需要利用一种等效的方法来简化。本文利用三维有限元素法(3D FEM), 将复杂的螺绕环激励源简化为延伸的电压偶极子, 实现了钻头电阻率测井探测特性的数值模拟。考察了钻头电阻率测井探测深度、纵向分辨率与前视探边能力及其影响因素。数值模拟结果表明, 钻头电阻率测井探测深度与泥浆类型、泥浆电阻率和井底钻具长度有关。钻头电阻率测井纵向分辨率取决于井底钻具长度, 井底钻具长度越小, 钻头测量分辨率越高。钻头测量具有一定的前视探边能力, 其与源距没有关系, 导电性地层前视能力好于电阻性地层。井底钻具长度越小, 仪器的前视探边能力越好。本文结果可为钻头电阻率测井仪器设计与解释提供理论依据。

**关键词** 3D FEM; 钻头电阻率; 探测深度; 纵向分辨率; 前视探边能力

## 0 引言

随着高角度井、水平井和大斜度井钻井活动的增多, 随钻测井的应用也愈加广泛。目前, 随钻测井仪器的测量质量正在持续地提高, 仪器的种类越来越趋于多样化<sup>[1]</sup>。随钻电阻率测井可以简单的分为两类, 即侧向类和感应类。侧向类适合于在导电泥浆、高电阻率地层环境使用; 感应类在低电阻率地层测量效果好, 适合于导电或非导电泥浆<sup>[2-3]</sup>。目前这两类方法均可以满足地质导向、地层评价和电阻率成像需求<sup>[4-5]</sup>。1967年, Arps提出了一种适合随钻侧向测井的螺绕环发射和接收装置, 可以代替电缆侧向测井的电极<sup>[6]</sup>。商业化的侧向类随钻测井仪器大多数采用这种螺绕环装置。这种发射装置可以提供侧向电阻率、钻头电阻

率和用于纽扣成像。斯伦贝谢、哈里伯顿和贝克休斯相继推出了随钻测井仪器, 比如RAB, GVR, AFR, StarTrak等。钻头电阻率具有地质导向、及时地提供下套管和取芯的位置等优点<sup>[7]</sup>, 有效地减小了钻井过程的成本并降低了操作风险, 因此越来越被重视。

前人对激励源为螺绕环的钻头电阻率测井仪器的理论研究和数值模拟做了大量工作。Gianzero等将螺绕环等效为磁流环, 考虑频率影响并推导了完整的理论, 同时忽略趋肤效应的影响, 将该理论简化为电压偶极子, 并利用2D有限元方法计算了随钻测量的测井响应<sup>[8-9]</sup>。Gruppig针对不同泥浆类型, 模拟了改进的随钻测量测井响应<sup>[10-11]</sup>。Bonner等对钻头电阻率仪器RAB的探测特性和测井响应进行了详细介绍, 并提出了一种“圆柱形聚焦技术”将测量电极前方的

引用格式: 康正明, 柯式镇, 李新, 米金泰, 倪卫宁, 张冰, 张红蕾. 钻头电阻率测井仪器探测特性研究. 石油科学通报, 2017, 04: 457-465

KANG Zhengming, KE Shizhen, LI Xin, MI Jintai, NI Weining, ZHANG Bing, ZHANG Honglei. The detection characteristics study of the at-bit resistivity logging tool. Petroleum Science Bulletin, 2017, 04: 457-465. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.042

等位面恢复成圆柱形,克服仪器在高电阻率地层中较差的测井响应<sup>[12]</sup>。Bittar等采用模式匹配法和3D有限元素法分别模拟了交流和直流情况下螺绕环在各向异性地层的测井响应,并对两种方法进行了比较<sup>[13]</sup>。Prammer等详细介绍了哈里伯顿AFR仪器的成像原理并分析了该仪器测量过程中受到环境影响因素<sup>[14-15]</sup>。Allouche等介绍了在小井眼中随钻成像测井仪器的测井响应,并分析了不同纽扣尺寸下仪器的探测特性和测井响应<sup>[16-19]</sup>。Lindsay利用有限元方法对比了近钻头电阻率测井和随钻电磁波测井各自的优势和面临的挑战<sup>[20]</sup>。Decker等介绍了钻头测量技术在水平井中的应用情况<sup>[21]</sup>。Bergt证明了钻头电阻率测井受到泥浆侵入的影响很小,因此可以提供实时的地层评价<sup>[22]</sup>。储昭坦等考察了测量探头结构以及其在各种地层条件下的测量响应<sup>[23]</sup>。Jia等成功地将小波包降噪算法应用到近钻头电阻率数据处理方面<sup>[24]</sup>。

钻头电阻率测井中,井底钻具长度对仪器的探测特性具有较大的影响,特别是关于仪器的前视探边能力,很少有文献专门介绍其影响因素。本文将复杂的螺绕环激励源等效为延伸的电压偶极子,利用3D有限元素法模拟了钻头电阻率测井探测特性的影响因素。考察了钻头电阻率测井仪器的径向探测深度、纵向分辨率以及前视探边能力,并给出了钻头电阻率测井仪器井底钻具长度参数。本文研究成果可为钻头电阻率测井仪器生产和解释提供理论依据。

## 1 测量原理

侧向类随钻电阻率测井具有两种聚焦方法,一种是电路直接给钻铤供电流聚焦,另一种是通过螺绕环供电,并在钻铤上产生感应电流聚焦。商业化的随钻侧向仪器大多采用第二种方法,它可以有效地减小仪器在钻进过程的磨损,满足高温、高压的钻井环境的需要。

如图1所示,将钻铤看作完美导体时,在发射螺绕环T上部钻铤和下部钻铤分别形成正负等量电压。电流一部分从下部钻铤出发,经过井眼和地层,最后回到上部钻铤,这与传统的电缆侧向测井测量方式十分类似;另一部分从钻头出发,流向钻头下方地层,用于测量钻头前方的电阻率。由于钻头电阻率测井频率为1 kHz左右,因此可以忽略测量频率的影响,螺绕环在钻铤和地层中产生的电流方式可以等效为一个延伸的电压偶极子。发射器下方的电压极子相当于电流源,发射器上方的电压极子起到回流的作用,因此

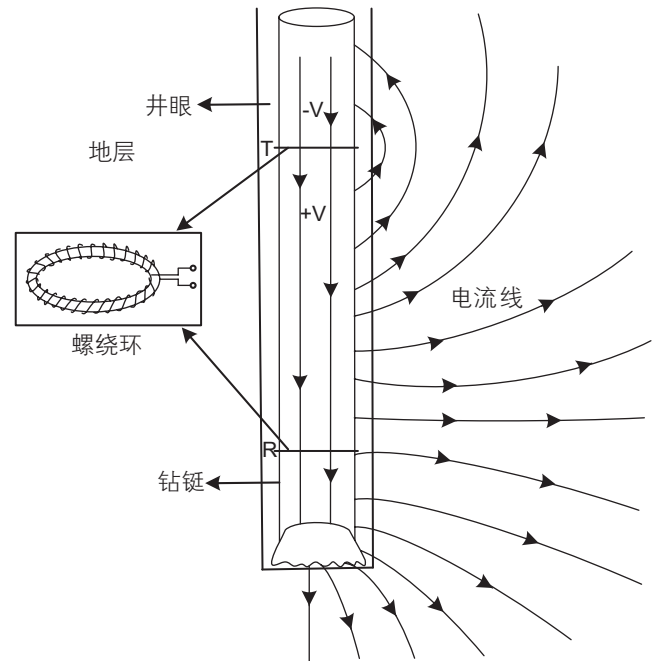


图1 含螺绕环的钻头电阻率测井原理示意图

Fig. 1 Schematic of at-bit resistivity logging principle with toroidal coils

可以将螺绕环激励源等效为常规直流模式进行模拟。

接收螺绕环R记录的轴向电流可以通过欧姆定律转化为钻头电阻率(公式1)。对于钻头测量而言,接收螺绕环下方的钻铤部分称为“井底钻具(BHA)”,其作用相当于侧向测井中的电极。

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

式中, $R_a$ 为视电阻率, $K$ 为仪器常数, $V$ 为发射螺绕环在钻铤上形成的电压差, $I$ 为下接收螺绕环采集到轴向电流。本文模拟的钻头电阻率测井仪器结构由一个发射螺绕环和一个接收螺绕环组成,二者的源距固定为1.651 m。

## 2 数值模拟方法

为了方便计算和分析,分别建立了两层地层、三层地层和多层地层(Oklahoma地层)的3D FEM模型。图2为两层地层模型横截面示意图,其他地层模型类似。模型为圆柱形状,高40 m,半径为20 m,模型尺寸完全满足计算精度要求。模型中随钻仪器和井眼位于模型的中央,源距为 $L_r$ ,井底钻具长度为 $L$ , $R_u$ 代表钻头上方地层电阻率, $R_d$ 代表钻头下方地层电阻率。

随钻侧向测井频率较小,在大多数情况下可以忽略其频率的影响。Gianzero等人将磁流环等效为延伸

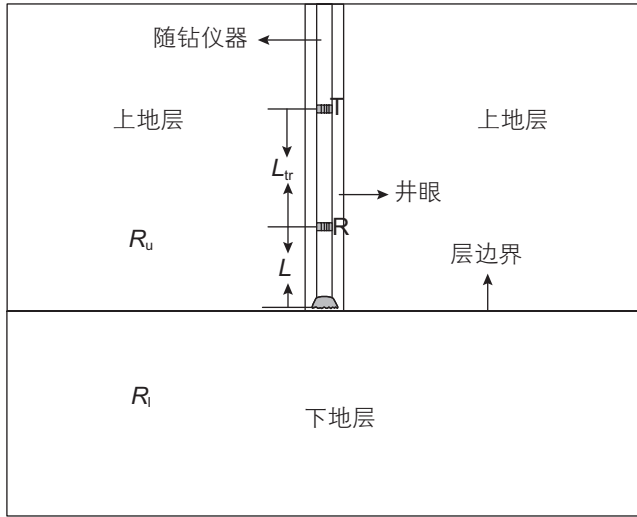


图2 含螺绕环的钻头电阻率测井原理示意图  
 Fig. 2 Schematic of at-bit resistivity logging principle with toroidal coils

的电压偶极子，并利用了2D有限元素法模拟了随钻测量仪器(MWD)的测井响应。本文将其扩展到三维，即忽略频率的影响，将复杂的螺绕环激励源等效为延伸的电压偶极子，在直流条件下利用3D FEM模拟钻头电阻率测井响应。直流电测井满足以下基本方程：

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0 \tag{2}$$

式中， $\sigma$ 为地层电导率， $u$ 为地层中的电位场。

在直角坐标系下，地层电阻率 $R$ 的电位场 $u(x, y, z)$ 满足下面泛函表达式<sup>[25]</sup>：

$$F(u) = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \frac{1}{R} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \sum_c I_c U_c \rightarrow \min \tag{3}$$

式中， $F(u)$ 为 $u(x, y, z)$ 的泛函， $\Omega$ 为求解区域， $U_c$ 为钻铤上电压， $I_c$ 下接收螺绕环接收到的轴向电流值。钻铤上电压 $U$ 和无限远地层边界满足第1类边界条件<sup>[26]</sup>：

$$\begin{cases} u = 0, & \text{无穷远地层} \\ u = C, & \text{钻铤表面, } C \text{ 为常数。} \end{cases} \tag{4}$$

电阻率 $R$ 分布满足：

$$R = \begin{cases} R_m, & \text{在井眼中} \\ R_{xo}, & \text{在侵入带中} \\ R_s, & \text{在围岩层中} \\ R_l, & \text{在原状地层中。} \end{cases} \tag{5}$$

通过对 $F(u)$ 进行离散化，可以得到每个单元的表

达形式：

$$F(u) = \sum_{e=1}^{e_0} F_e(u) \tag{6}$$

将求解的所有单元的节点合起来形成要求解的刚度矩阵：

$$[K][u] = [S] \tag{7}$$

式中， $K$ 为总刚度矩阵， $u$ 为要求解的未知量， $S$ 为施加条件。

公式(7)为大型稀疏矩阵，文中采用广义最小余量法(FGMRES)对方程组求解，计算结果表明，该方法可以较好收敛。仪器结构的网格整体剖分较细。网格尺寸从源中心向外依次变大，合理控制最大网格尺寸和最小网格尺寸，使得既能达到计算需要的精度，又能有效地节省计算机内存资源。在钻铤和井眼界面处使用边界层处理。模型总自由度个数为 $8 \times 10^5$ 至 $10 \times 10^5$ 。图3为三层地层网格剖分的结果。

### 3 等效源有效性验证

在实际模拟中考虑频率时，螺绕环的计算模型比较复杂，将其简化为延伸的电压偶极子源可以有效地节约计算资源。为了验证将复杂螺绕环结构等效为延伸的电压偶极子算法的有效性，利用3D FEM，分别

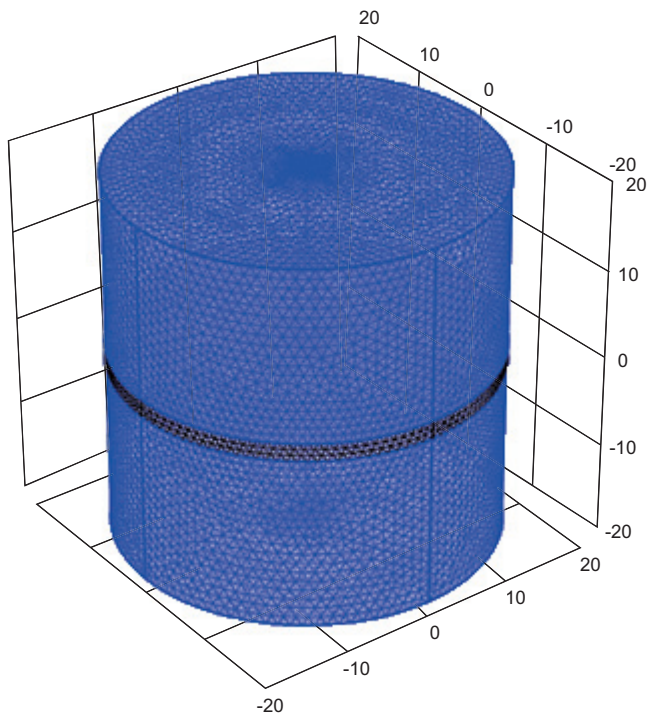


图3 三层地层网格剖分结果  
 Fig. 3 The meshing result of three layers formation



建立了两种激励源的三层地层模型,模型尺寸与图2一致。螺绕环激励源频率为1 kHz,将钻铤看作完美导体。目的层电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ ,上下围岩层电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,目的层厚度为2 m,围岩为无限厚地层。分别计算了激励源为螺绕环结构和延伸的电压偶极子两种不同情况。从图4可以看出,延伸的电压偶极子在三层地层中的测井响应曲线与螺绕环激励源在三层地层中的测井响应曲线几乎重合,最大误差小于3%,说明将复杂的螺绕环结构简化为电压偶极子源是可行的。

#### 4 径向探测深度

利用伪几何因子理论<sup>[27]</sup>(公式8),考察了仪器探测深度。定义伪几何因子 $PGF=0.5$ 对应的侵入半径为仪器的探测深度。

$$PGF = \frac{R_a - R_t}{R_{x0} - R_t} \quad (8)$$

式中, $R_a$ 为视电阻率, $R_t$ 为原状地层电阻率, $R_{x0}$ 为侵入带电阻率。

分别考虑了低阻侵入( $R_t > R_{x0}$ )和高阻侵入( $R_t < R_{x0}$ )情况下钻头测量的探测深度。井底钻具长度 $L$ 取0.609 6 m。泥浆低侵时,泥浆电阻率 $R_m=1 \Omega \cdot \text{m}$ ,侵入带电阻率 $R_{x0}=1 \Omega \cdot \text{m}$ ,原状地层电阻率 $R_t=10 \Omega \cdot \text{m}$ 。泥浆高侵时,泥浆电阻率 $R_m=10 \Omega \cdot \text{m}$ ,侵入带电阻率 $R_{x0}=10 \Omega \cdot \text{m}$ ,原状地层电阻率 $R_t=1 \Omega \cdot \text{m}$ 。从图5a可以看出对于低阻侵入,仪器的探测深度为0.21 m;对于高阻侵入,此时用 $PGF=0.5$ 无法确定仪器的探

测深度。同理,考察了油基泥浆的探测深度, $L$ 取0.609 6 m,地层电阻率 $R_t=10 \Omega \cdot \text{m}$ , $R_m=R_{x0}=\{400 \ 600 \ 800 \ 1000 \ 1200\} \Omega \cdot \text{m}$ 。从图5b可以看出对于油基泥浆而言,钻头探测深度与泥浆高侵类似,此时用 $PGF=0.5$ 也无法确定其探测深度,同时可以看出,随着侵入深度增加,伪几何因子逐渐接近最大值,并且稳定不变,油基泥浆电阻率越高,同一侵入深度对应的伪几何因子越小。由于钻头直接与地层接触,因此钻头电阻率在油基泥浆钻井条件下具有良好的应用前景。同时注意到,随着侵入半径的增加,图5中伪几何因子均没有接近1,这与电缆侧向测井不同。当钻头前方地层电阻率远大于井眼侧面地层电阻率时,电流无法进入前方,只能沿径向流动,因此可以用伪几何因子定义探测深度。当钻头前方地层电阻率小于井眼侧面地层电阻率时,电流主要流入前方,且很难回到侧面,测量值主要反映前方电阻率,两者电阻率差别越大,越明显。因此,侵入带电阻率大于地层电阻率时,不能用伪几何因子分析其探测深度。

钻头电阻率测井测量点位于井底钻具中点,因此不同井底钻具长度对探测深度具有一定的影响。井底钻具长度分别取 $L=\{0.5 \ 1 \ 2 \ 5\}$  m,考察 $L$ 对探测深度的影响,井眼、侵入带和地层电阻率信息与图5a保持一致。从图6可以看出,当 $L=0.5$  m时,钻头电阻率仪器测量深度为0.35 m,当 $L=1$  m时,钻头电阻率探测深度仅有几厘米。当 $L$ 继续增加时,伪几何因子变的非常大,无法用 $PGF=0.5$ 给出其探测深度,同时也说明, $L$ 大于2 m时,钻头测量失效,几乎无法探测到钻头下方地层信息,关于这一点,下面的模拟中也有印证。

#### 5 纵向分辨能力

钻头电阻率采集通过接收螺绕环流向井底钻具的轴向电流来反映钻头前方地层电阻率信息,因此其纵向分辨率与井底钻具长度密切相关。建立了纵向三层地层模型,中间层为目的层,上下层为围岩,其厚度为无限厚。目的层电阻率 $R_t=100 \Omega \cdot \text{m}$ ,围岩电阻率为 $R_s=10 \Omega \cdot \text{m}$ ,地层厚度 $H=\{0.1 \ 0.2 \ 0.5 \ 1 \ 2\}$  m,井底钻具长度 $L=\{0.1 \ 0.2 \ 0.5 \ 1 \ 2\}$  m。从图7可以看出,钻头电阻率测井曲线通过地层界面时,由于电荷的累积,出现“犄角”现象,与常规电缆测井中侧向测井类似。当井底钻具长度小于1 m时,仪器的纵向分辨率较高,仪器能够识别出较薄地层,测井曲线的视厚度与真厚度差别较小,当井底钻具长度大于1 m时,仪器的纵向分辨率变低。当井底钻具长度为2 m时,钻头电阻

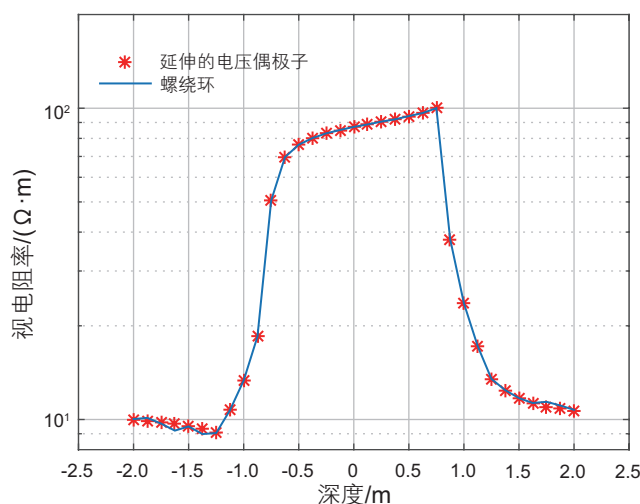


图4 延伸的电压偶极子激励源算法验证

Fig. 4 Verification of the extended voltage dipole source

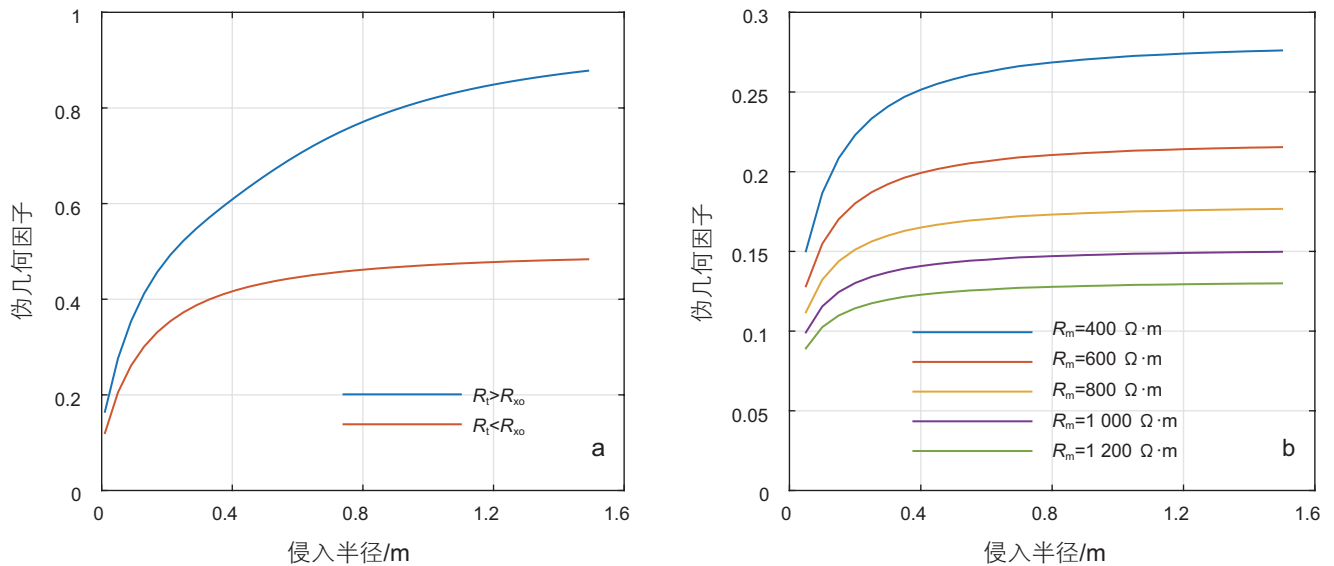


图 5 钻头电阻率测井探测深度 (a、b 分别为水基泥浆和油基泥浆的探测深度)

Fig. 5 Depth of investigation of at-bit resistivity logging (a and b are depth of investigation of water based mud and oil based mud respectively)

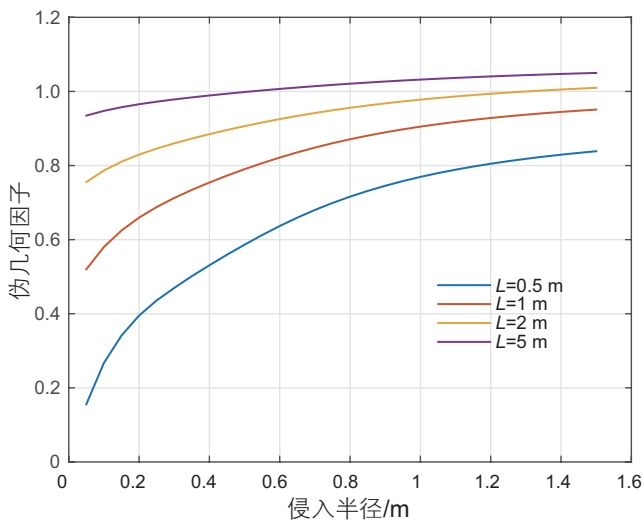


图 6 不同井底钻具长度情况下的探测深度

Fig. 6 Depth of investigation in different lengths of BHA

率测井曲线失真。

Oklahoma 地层是考察电法类测井仪器探测能力的标准地层，经常用于新仪器探测特性的分析。固定井底钻具长度  $L$  为 0.5 m，考察仪器在 Oklahoma 地层中钻头测井响应。在模拟过程采用的地层序列总共包含 27 层地层，既有连续的厚层，也有连续的薄层以及薄层和厚层的交互层，地层电阻率选取符合实际测井的范围，纵向上地层总厚度为 60.96 m。通过图 8 可以看出，由于钻头测量没有补偿功能，模拟测井响应与随钻侧向电阻率未补偿曲线类似，在地层界面处“犄角”现象比较明显，测井响应所受界面影响较大。同时，

视电阻率曲线在厚层和单一薄层可以很好的反映出真实地层电阻率信息，但是仪器在面对连续薄层测井响应变差，如第 24、25、26 层明显受到围岩的影响，视电阻率和真电阻率差值较大。

## 6 仪器前视探边能力

钻头电阻率仪器最主要作用是地质导向，本文中的仪器前视探边能力为钻头未到达地层界面时，仪器探测地层边界的能力，分析其前视探边能力及其影响因素对仪器设计具有指导意义。模拟了两层地层情况下钻头测量的测井响应，模拟模型与图 2 所示两层地层模型一致。分别考察了源距  $L_r$  和井底钻具长度  $L$  对钻头电阻率测井前视探边能力的影响。

不考虑钻头尺寸并且仪器没有扶正器时，钻头测量的测量点位于井底钻具长度中点，因此测量点并不在钻头处，钻头电阻率测井严格意义上为近钻头电阻率测井。为了研究仪器的前视探边能力，下面的模拟中将测量点提前到钻头处。为了验证仪器前视探边能力与发射螺绕环和接收螺绕环距离的关系，固定  $L=0.5$  m， $R_o=100 \Omega \cdot m$ ， $R_t=10 \Omega \cdot m$ ，分别选取源距  $L_r=\{0.254 0.508 0.762 1.016 1.27 1.524 1.778 2.032 2.286 2.54\}$  m，泥浆电阻率  $R_m=0.1 \Omega \cdot m$ ，井眼直径  $D_w$  为 0.215 9 m，井眼在钻头处截断，更加符合真实钻井时的情况。图 9 中，地层界面为横坐标零处位置，钻头移动方向为从右向左(下同)。从图 9 可以看出距离地层界面 1 m 处测井曲线开始有变化，说明钻头电阻

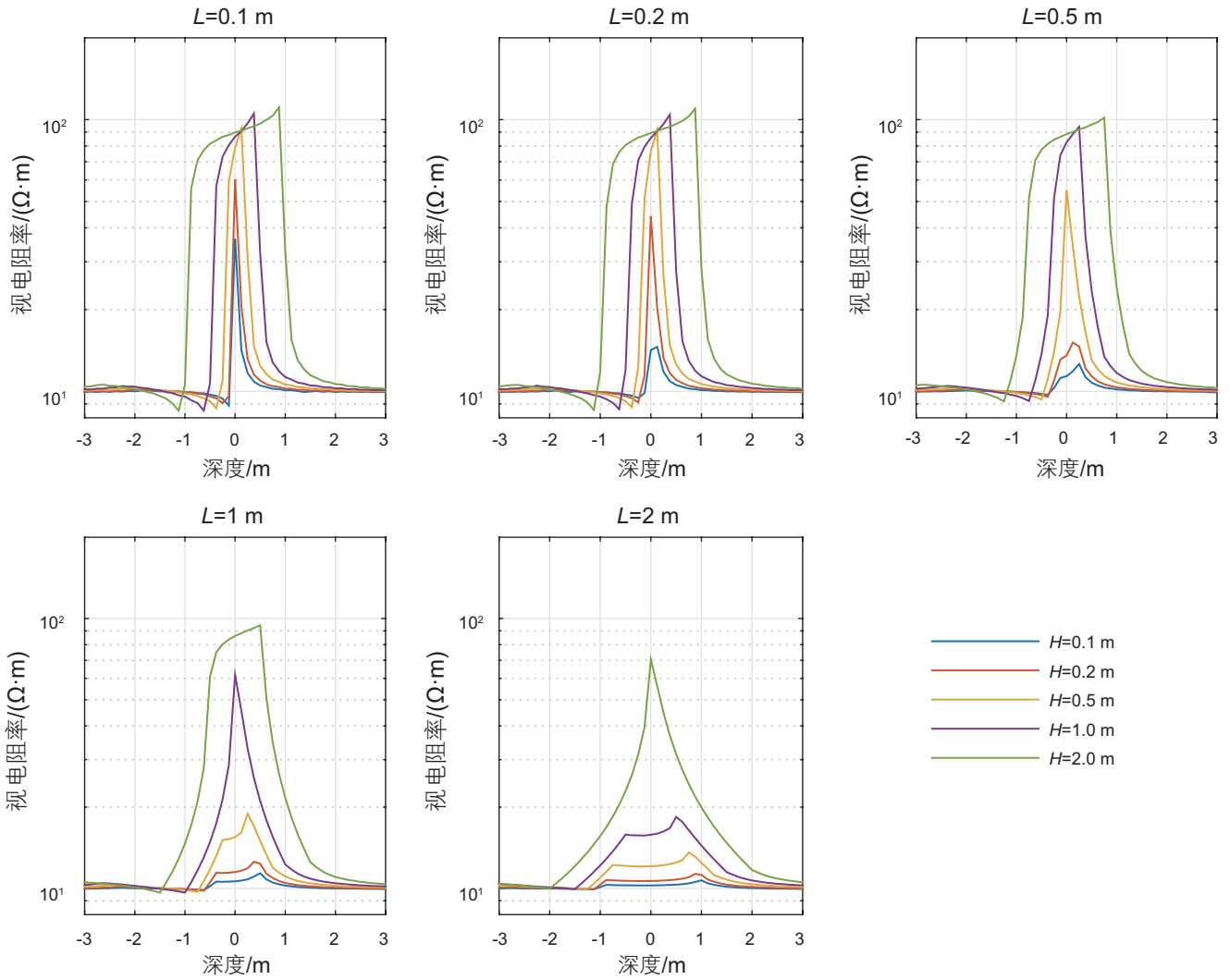


图7 钻头测量在纵向三层介质中响应  
Fig. 7 Response of bit measurement in three layers medium

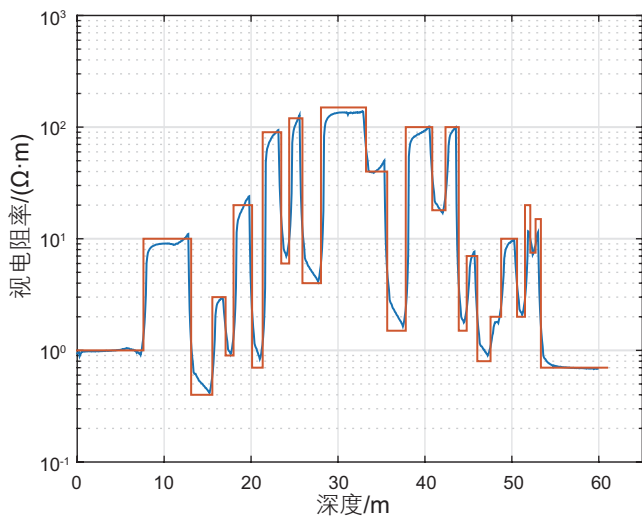


图8 钻头测量在Oklahoma地层中响应  
Fig. 8 Responses of bit measurement in Oklahoma formation

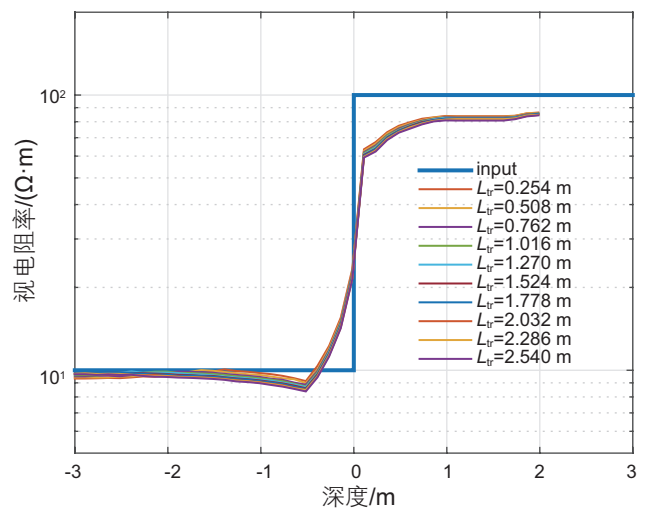


图9 不同源距钻头测量响应  
Fig. 9 Bit responses in different spacings

率测井仪器对边界具有一定的识别能力，其前视探边距离为 1 m。不同源距的所有曲线全部重合，说明仪器前视探边能力与发射螺绕环和接收螺绕环距离无关。同时注意到，固定井眼尺寸为 0.215 9 m，泥浆电阻率为 0.1  $\Omega\cdot\text{m}$  时，该井眼环境对不同源距的钻头测量结果影响是相同的，而且测量结果对高阻地层的影响较大，对低阻地层的影响较小。

通过改变井底钻具长度  $L=\{0.01\ 0.02\ 0.05\ 0.1\ 0.2\ 0.5\ 1\ 2\}$  m，考察了钻头下方地层电阻率不同时仪器的前视探边能力，分别选取了钻头下方为电阻性地层和电导性地层进行分析，此时忽略了井眼的影响。在图 10 和图 11 中蓝线为模型输入值，可以看出，仪器距离界面 1 m 时，钻头测井响应对界面有反应(与图 9 结论一致)，且与井底钻具长度关系不大。井底钻具长度越小，钻头接近地层界面过程中测量值变化越大，界面越容易被发现，因此，降低井底钻具长度可以有效地增加仪器的前视探边能力。对比图 10 和图 11 可以发现，当钻头下方地层为电导性地层时，钻头未到达地层界面时，测井响应数值变化较电阻性地层大很多，因此钻头测量对于电导性地层比对电阻性地层具有较好的前视能力。井底钻具的长度也影响仪器过地层界面后接近钻头下方地层真实电阻率的速度，井底钻具长度越小，速度越快，反之亦然。

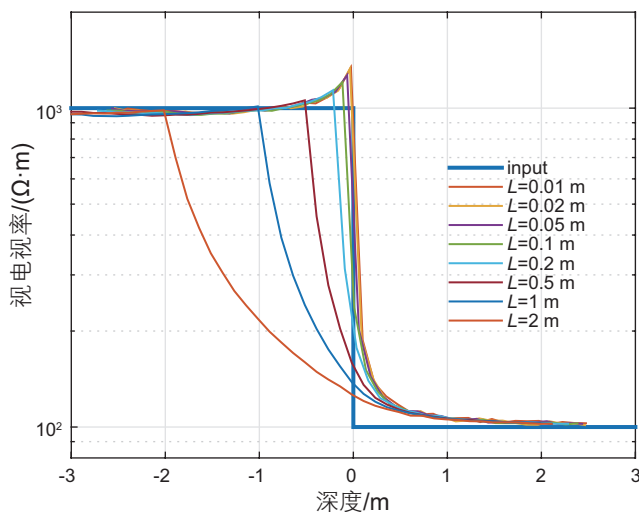


图 10 钻头下方地层为电阻性地层时的测井响应  
Fig. 10 Bit responses in resistive formation

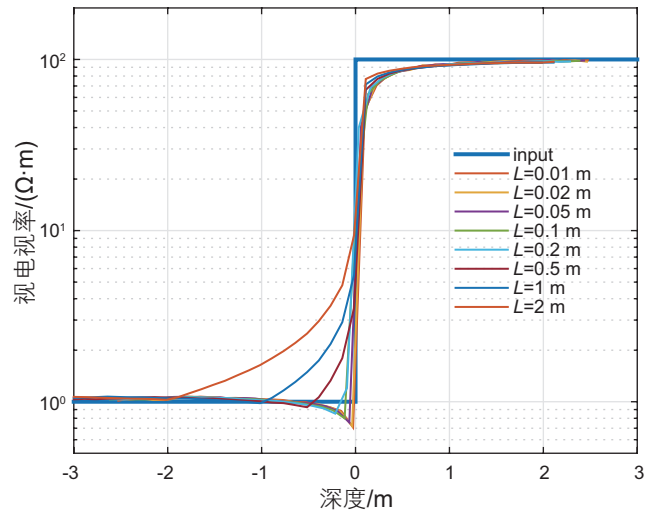


图 11 钻头下方地层为电导性地层时的测井响应  
Fig. 11 Bit responses in conductive formation

## 7 结论

本文介绍了钻头电阻率测井中常用的螺绕环发射和接收装置的工作原理，将复杂的螺绕环结构等效为延伸的电压偶极子，实现了钻头电阻率测井的全三维有限元数值模拟。可以得到以下结论：

(1) 钻头电阻率测井其探测深度与泥浆类型、泥浆电阻率和井底钻具长度有关。对于水基泥浆，泥浆高侵探测深度大于泥浆低侵探测深度。油基泥浆电阻率越大，同一侵入深度对应的伪几何因子越小。同时，井底钻具长度越大，探测深度越小。

(2) 钻头电阻率测井的纵向分辨率取决于井底钻具长度，井底钻具长度越小，钻头测量分辨率越高，当井底钻具长度大于 1 m，其纵向分辨率明显变低。

(3) 由于测量点不在钻头处，所以钻头电阻率测量为定性测量。钻头电阻率具有一定的前视探边能力，其与源距没有关系，而且电导性地层前视能力好于电阻性地层。井底钻具长度越小，仪器的前视探边能力越好。

(4) 在仪器设计时，控制井底钻具长度在 1 m 以内，可以有效地提高仪器的探测深度、纵向分辨率和前视探边能力。

## 参考文献

[1] BONNER S, BURGESS T, CLARK B, et al. Measurements at the bit: A new generation of MWD tools[J]. Oilfield Review, 1993, 5: 44-54.  
[2] BONNER S, FREDETTE M, LOVELL J, et al. Resistivity while drilling-Images from the string[J]. Oilfield Review, 1996, 8(1): 4-19.



- [3] 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 X Y, WANG J N, GUO Y J, Advances and trends in logging while drilling technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(1): 10–15.]
- [4] 姜明, 柯式镇, 李安宗, 等. 3D FEM随钻电磁波电阻率测井响应影响因素研究[J]. 石油科学通报, 2016, (03): 342–352. [JIANG M, KE S Z, LI A Z, et al. Factors effecting simulation of the response of LWD electromagnetic wave resistivity based on 3D FEM[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 342–352.]
- [5] 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 A Z, LI Q M, ZHU J, et al. Numerical analysis of logging responses for LWD azimuthal laterolog resistivity imaging tool[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(4): 407–410.]
- [6] ARPS J J. Inductive resistivity guard logging apparatus including toroidal coils mounted on a conductive stem[P] US, US3305771. 1967.
- [7] PRILLIMAN J, BRATTON T, FREDETTE M, et al. A comparison of wireline and LWD resistivity images in the Gulf of Mexico[C]. SPWLA 24th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. Houston, 1997.
- [8] CHEMALI, R, GIANZERO S, STRICKLAND R W, et al. The shoulder bed effect on the dual laterolog and its variation with the Resistivity of the borehole fluid[C]. SPWLA 24th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. Calgary, 1983.
- [9] GIANZERO S, CHEMALI R, LIN Y, et al. A new resistivity tool for measurement while drilling[C]. SPWLA 26th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. Dallas, 1985.
- [10] GRUPPING T I F, HARRELL J W, DICKINSON R T. Performance update of a dual resistivity MWD tool with some promising results in oil-based mud applications[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. Houston, 1988.
- [11] GRUPPING T I F, WAGSTAFF J D. Recent performance of the dual-resistivity MWD Tool[J]. SPE formation evaluation, 1990, 5(02): 171–176.
- [12] BONNER S, BAGERSH A, CLARK B, et al. A new generation of electrode resistivity measurements for formation evaluation while drilling[C]. SPWLA 35th Annual Logging Symposium Transactions. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. Tulsa, 1994.
- [13] BITTAR M S, HU G. The effects of rock anisotropy on LWD toroidal resistivity sensors[C]. SPWLA 45th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. Noordwijk, 2004.
- [14] PRAMMER M G, MORYS M, KNIZHNIK S, et al. Field testing of an advanced LWD imaging resistivity tool[C]. SPWLA 48th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. Austin, 2007.
- [15] 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(01).
- [16] 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[C]. SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. Barcelona, 2010.
- [17] BORGHI M, PIANI E, BARBIERI E, et al. New logging-while-drilling azimuthal resistivity and high resolution imaging in slim holes[C]. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Offshore Mediterranean Conference. Ravenna, 2011.
- [18] 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[C]. SPWLA 52nd Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. Colorado Springs, 2011.
- [19] ERIC ZUCKMEYER, TOTAL ABK, AHMET AKI. Real-time formation evaluation using advanced high resolution LWD resistivity imaging, formation testing, and traditional methods[C]. ADIPEC Technical Conference. Abu Dhabi, 2013.
- [20] LINDSAY G. An analysis of the at-bit resistivity decision making process[C]. In International Petroleum Technology Conference. Kuala Lumpur, 2008.
- [21] DECKER D, BURGESS T R. At the bit technology improves horizontal drilling performance[C]. World Petroleum Congress. Stavanger, 1994.
- [22] BERGT D. Resistivity measurements at the bit provide real-time formation evaluation before invasion[J]. Journal of Petroleum Technology, 1995, 47(06): 492–492.
- [23] 储昭坦, 王克协, 盛利民, 等. 随钻测井中近钻头电阻率测量方法研究[C]. 中国地球物理学会年会. 北海, 2002.[CHU Z T, WANG K X, SHENG L M, et al. Study of near bit resistivity measurement in LWD[C]. Chinese Geophysical Society Annual Symposium. Beihai, 2002.]
- [24] JIA H, SHENG L, DOU X, et al. Wavelet packet noise reduction algorithm based near-bit resistivity measurement method and device[C]. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. Tianjin, 2012.
- [25] 柯式镇. 井壁电成像测井全三维数值模拟与裂缝评价模型[J]. 中国科学 地球科学(中文版), 2008, 38: 150–153. [Ke S Z. Full 3D numerical simulation and fracture evaluation model of borehole electrical imaging logging[J]. Science in China Series D-Earth Sciences



(in Chinese), 2008, 38: 150–153.]

- [26] 李大潜, 郑宋穆, 谭永基. 有限元素法在电法测井中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1980. [LI D Q, ZHENG S M, TAN Y J. Application of finite element method in electrical logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1980.]
- [27] 张庚骥. 电法测井[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. [ZHANG G J, Electrical logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.]

---

## The detection characteristics study of the at-bit resistivity logging tool

KANG Zhengming<sup>1,2</sup>, KE Shizhen<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>3</sup>, MI Jintai<sup>3</sup>, NI Weining<sup>3</sup>, ZHANG Bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Honglei<sup>1,2</sup>

*1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum- Beijing, Beijing 102249, China*

*2 College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum- Beijing, Beijing 102249, China*

*3 Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China*

**Abstract** At-bit resistivity measurement is a method for geosteering, which could effectively reduce the risk of drilling operations. Simulating the investigation characteristics of an at-bit resistivity logging tool is a means of developing precise tools, but it is difficult to perform this work because of the complex toroidal coil excitation. So a method is needed to simplify it. Based on 3D FEM, the complicated toroidal coils are simplified as an extended voltage dipole and the detection characteristics of the tool are simulated in this paper. The depth of investigation, vertical resolution, the boundary detection capacity and investigation characteristics effect factors of the tool are studied. The simulated results show that depth of investigation relates to the type of mud, the resistivity of the mud and the length of the bottom hole assembly (BHA). The resolution of the tool depends on the BHA length, and the shorter the BHA length is, the higher resolution of the tool is. The tool has the capacity of boundary detection and it has no connection with spacing. The look ahead capacity in conductive formations is better than that of the low-conductivity formations. The shorter the BHA length is, the better boundary detection capacity of the tool is. The results of this paper could provide theoretical support for design and interpretation of at-bit resistivity logging tools.

**Keywords** 3D FEM; at-bit resistivity; depth of investigation; resolution; boundary detection capacity

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.042

(编辑 付娟娟)