



## 模块化随钻电磁波测井仪器结构对测量信号的影响

秦文娟 康正明 张意 仵杰 倪卫宁

### Influence of Structure of Modular Electromagnetic Logging While Drilling Instrument on Measurement Signals

QIN Wenjuan, KANG Zhengming, ZHANG Yi, WU Jie, NI Weining

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023101>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 随钻超深电磁波仪器探测深度及响应特征模拟

Simulation to Determine Depth of Detection and Response Characteristics while Drilling of an Ultra-Deep Electromagnetic Wave Instrument

石油钻探技术. 2020, 48(1): 114–119 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019132>

#### 利用随钻电磁波测井探测直井水力裂缝的正演模拟

Forward Modeling in Hydraulic Fracture Detection by Means of Electromagnetic Wave Logging While Drilling in Vertical Wells

石油钻探技术. 2020, 48(2): 123–129 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019133>

#### 随钻一体化测井仪平台开发

The Development of an Integrated Logging Instrument Platform while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(1): 118–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019016>

#### 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

Impacts of Accuracy of Azimuthal Electromagnetic Logging-while-Drilling on Resistivity and Interface Prediction

石油钻探技术. 2017, 45(4): 115–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704020>

#### 随钻方位电磁波电阻率测井仪分段组合线圈系设计

The Design of the Coil System in LWD Tools Based on Azimuthal Electromagnetic-Wave Resistivity Combined with Sections

石油钻探技术. 2017, 45(2): 115–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702019>

#### 基于拟牛顿法的随钻方位电磁波电阻率仪器响应实时反演与现场试验

Real Time Inversion and Field Test of LWD Azimuthal Electromagnetic Waves Based on Quasi-Newton Method

石油钻探技术. 2020, 48(3): 120–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020025>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2023101

引用格式: 秦文娟, 康正明, 张意, 等. 模块化随钻电磁波测井仪器结构对测量信号的影响 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 137-145.

QIN Wenjuan, KANG Zhengming, ZHANG Yi, et al. Influence of structure of modular electromagnetic logging while drilling instrument on measurement signals [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 137-145.

## 模块化随钻电磁波测井仪器结构对测量信号的影响

秦文娟<sup>1</sup>, 康正明<sup>1</sup>, 张 意<sup>2</sup>, 作 杰<sup>1</sup>, 倪卫宁<sup>3,4</sup>

(1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西西安 710065; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西西安 710054; 3. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 4. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

**摘 要:** 常规的随钻电磁波测井是一种重要的地层流体评价方法, 但其不具有方位特性。为此, 提出了一种具有较好方位探测特性的新型模块化随钻电磁波测井仪器结构。为准确了解模块化随钻电磁波测井仪器结构对测量电压信号的影响情况, 采用有限元法建立了三维模型, 探究了仪器各部分的影响规律。研究得出: 随着钻铤和天线槽填充物电阻率增大, 接收电压信号出现了突变区间且与仪器的频率和几何尺寸密切相关; 盖板材料的电阻率对接收信号强度的影响较大, 盖板应选择电阻率比金属稍低材料, 而测量信号随传感器本体电阻率增大而增大, 因此传感器本体应选择非金属材料; 钻铤和填充物的电阻率较小时, 接收电压信号有明显的衰减, 填充物电阻率较大时其影响可以忽略; 通过扣除空气介质中的仪器响应, 可以较好地消除仪器结构的影响, 扣除仪器结构影响后线圈中磁通量减小, 导致仪器信号低于扣除前。该研究结果可为实际测井仪器的设计制造提供理论依据。

**关键词:** 模块化; 随钻测井; 电磁波; 仪器结构; 数值模拟

中图分类号: P631.8<sup>+</sup>13

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)03-0137-09

## Influence of Structure of Modular Electromagnetic Logging While Drilling Instrument on Measurement Signals

QIN Wenjuan<sup>1</sup>, KANG Zhengming<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>, WU Jie<sup>1</sup>, NI Weining<sup>3,4</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China; 2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an, Shaanxi, 710054, China; 3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China; 4. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co. Ltd., Beijing, 102206, China)

**Abstract:** Conventional electromagnetic logging while drilling is an important method for evaluating stratigraphic fluids, but it does not have azimuth property. In this paper, a new modular electromagnetic logging while drilling instrument was proposed with good azimuth detection property. In order to accurately understand the influence of modular electromagnetic logging while drilling instrument on the measured voltage signal, a 3D model was established using the finite element method, and the influence laws of various instrument parts were explored. The results show that with the increased resistivity of the drill collar and antenna slot filling material, the received voltage signal has a sudden change, which is closely related to the frequency and geometric size of the instrument. The resistivity of the cover plate material has a great influence on the intensity of the received signal, and the cover plate should be selected with a little lower resistivity than metal. The measurement signal increases with the increasing resistivity of the sensor body, so the non-metallic material should be selected as the sensor body. When the resistivity of the instrument structure such as

收稿日期: 2023-12-09; 改回日期: 2024-03-25。

作者简介: 秦文娟 (1997—), 女, 陕西西安人, 2021 年毕业于西安石油大学测控技术与仪器专业, 在读硕士研究生, 从事电法测井理论方法研究。E-mail: 2423811902@qq.com。

通信作者: 康正明, 190720@xsyu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究”(编号: U19B6003)、国家自然科学基金青年科学基金项目“水平井随钻电阻率成像测井裂缝张开度计算方法研究”(编号: 42304138)、陕西省教育厅重点科学研究计划项目“基于随钻电成像测井的页岩气储层裂缝参数计算模型研究”(编号: 22JY053)和西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划(编号: YCS23114126)联合资助。

drill collar and filling material is low, the received voltage signal has obvious attenuation, and its influence can be ignored when the resistivity of the filling material is high. By deducting the instrument response in the air medium, the influence of the instrument structure can be well eliminated. After deducting the influence of the instrument structure, the magnetic flux in the coil decreases, resulting in a smaller instrument signal than before. The research results can provide a theoretical basis for the design and manufacture of actual logging instruments.

**Key words:** modularization; logging while drilling; electromagnetic wave; instrument structure; numerical simulation

随钻电磁波测井作为地质导向测量的关键技术之一,为钻井工程的有效开展提供了先决信息<sup>[1-2]</sup>。传统的随钻电磁波测井仪器采用轴向发射和轴向接收的线圈组合方式,可以探测井眼周围地层的电阻率信息,可有效进行流体评价,但该类仪器缺乏方位识别能力<sup>[3-5]</sup>,从而限制了钻井中的地质导向能力,在大斜度井及水平井中的应用效果较差<sup>[6]</sup>。为克服传统随钻电磁波测井仪器的这一局限性,出现了方位电磁波测井仪器,相比而言,随钻方位电磁波测井仪器采用轴向发射倾斜接收或径向接收的线圈组合方式<sup>[7-8]</sup>,能够较早地检测到地层边界,对储层信息的分析更加直观<sup>[9-11]</sup>。但其线圈系设置复杂,研发周期较长,且仪器不方便拆卸,导致其井下应用不够灵活,需更换器件时不方便操作。

近年来,WRT(Well Resolutions Technology)公司推出了一种新型模块化随钻电磁波测井仪器。该测井仪器是在近钻头处配置“传感器”<sup>[12]</sup>,在近钻头钻铤侧面开槽,将传感器本体放置在凹槽位置,其测量线圈系统绕在传感器本体上,在外部装配金属屏蔽罩保护线圈天线及电子线路不受磨损。钻井过程中,随着钻铤旋转,传感器本体可进行地层方位信息测量,较好地实现方位识别。但关于该测井仪器的理论研究尚浅,目前只是对其方位探测特性(包括方位电阻率、方位角、方位分辨率)进行了一定研究。而该测井仪器结构复杂,每一种结构都会对接收信号产生不同的影响,进而影响结构参数设计,因此有必要进行深入研究。

基于此,笔者利用三维数值模拟方法,探究了模块化随钻电磁波测井仪器结构对测量电压信号的影响规律。首先,验证了该测井仪器的方位探测特性;其次,分析了钻铤、水眼、盖板、天线槽、填充物等对仪器响应的影响,通过分析各部分仪器结构响应信号的变化规律,进一步确定了各结构电学参数和尺寸大小;最后,通过扣除仪器结构的影响,使仪器获得较好的线性刻度范围。本文获得的数值模拟结果对该测井仪器设计和刻度均具有一定的参考意义。

## 1 仪器结构及测量原理

模块化随钻电磁波测井仪器包括钻铤、水眼、仪器槽、传感器本体、天线槽和可拆卸仪器盖板,整体结构如图1所示。

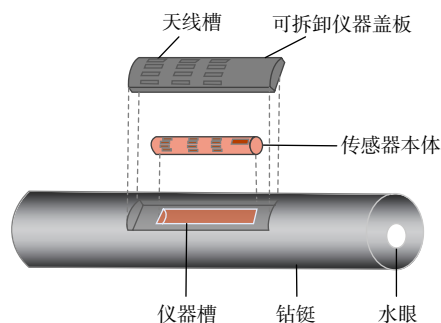


图1 仪器整体结构示意图

Fig.1 Overall structure of the instrument

该测井仪器在钻铤侧面开设仪器槽,将传感器本体(其结构如图2所示)放置在仪器槽中并封装仪器盖,测量线圈绕在传感器本体上。这样设计,使本身不具有方位性的测井仪器具有方位性,而且线圈不受钻井液侵蚀及井壁磨损的影响。可拆卸仪器盖上开设有天线槽,天线槽是电磁信号能够较好传播出去的唯一通道。模块化电阻率传感器包括具有纵轴的传感器本体,该本体可以由橡胶、聚醚醚酮、玻璃纤维、陶瓷或其他非导电材料制成。传感器本体内部不提供用于钻井液通过的流体管道。发射线圈和接收线圈天线缠绕在传感器本体上,至少一个线圈天线以平行于传感器本体纵轴的方向产生磁矩。接收线圈天线可以产生磁矩,其方向平行于传感器本体的纵轴或以某个角度(例如正交)产生磁矩。传感器本体还可以载装用于发送和接收天线电磁信号电子部分的。电子部分优先放在传感器本体中,也可以单独放在其他位置。

模块化随钻电磁波测井仪器线圈系结构为单发双收线圈系,线圈绕在传感器本体的天线凹槽上,发射线圈向周围地层发射电磁波,两个接收线圈处会产生感应电动势,因此记录其电压  $U_{R1}$  和  $U_{R2}$ ,通

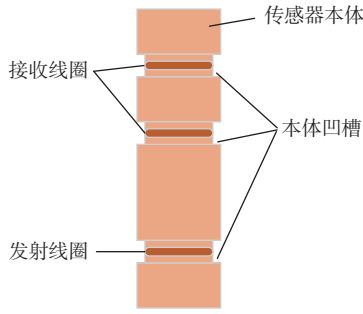


图 2 传感器本体示意

Fig.2 Sensor body

过接收线圈电压的幅度比信号和相位差信号进行转换,从而获得地层的电阻率信息。幅度比信号和相位差信号的公式为<sup>[13]</sup>:

$$Att = 20 \lg \frac{\sqrt{[\operatorname{Re}(U_{R1})]^2 + [\operatorname{Im}(U_{R1})]^2}}{\sqrt{[\operatorname{Re}(U_{R2})]^2 + [\operatorname{Im}(U_{R2})]^2}} \quad (1)$$

$$PS = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}(U_{R2})}{\operatorname{Re}(U_{R2})} - \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}(U_{R1})}{\operatorname{Re}(U_{R1})} \quad (2)$$

式中:  $U_{R1}$  为近接收线圈电压, V;  $U_{R2}$  为远接收线圈电压, V;  $Att$  为幅度比, dB;  $PS$  为相位差, (°);  $\operatorname{Re}$  表示取电压实部,  $\operatorname{Im}$  表示取电压虚部。

## 2 数值模拟方法

### 2.1 有限元基本原理

模块化随钻电磁波测井仪器采用单发双收的线圈系结构,给发射线圈通以恒定频率的交变电流,其在空间中产生的电磁场为时谐电磁场。时谐电磁场的 Maxwell 方程为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\mathbf{E} + \mathbf{J}_m \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\epsilon\mathbf{H} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为磁场强度, A/m;  $\sigma$  为电导率, S/m;  $\mathbf{E}$  为电场强度, V/m;  $\mathbf{J}_m$  为磁流密度矢量, A/m<sup>2</sup>;  $\epsilon$  为介电常数, F/m;  $i$  为虚数单位;  $\omega$  为角频率, rad/s。

引入矢量磁位  $\mathbf{A}$ , 波动方程可以表示为:

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_s \quad (5)$$

$$\text{其中} \quad k^2 = i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon) \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{J}_s$  为电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $k$  为传播常数。

有限元法可以计算复杂模型结构所构造的微分方程,是一种通过计算不同离散化近似方程的数值计算方法<sup>[14]</sup>,本文采用该方法对上述波动方程进行求解。求解时,将待求解区域剖分成多个不规则网

格单元,利用有限元数值模拟计算软件 COMSOL 求解空间域中三维 Maxwell 方程的边界值问题<sup>[15]</sup>。金属钻铤及仪器盖板表面的电场边界条件为:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{n}$  为分界面法线方向的单位矢量。

根据变分原理和边界条件,可得电场强度  $\mathbf{E}$  的泛函表达式<sup>[16]</sup>:

$$F(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \iiint_U \left[ \frac{1}{\mu_r} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - k^2 \epsilon_r \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \right] dU + i\omega\mu_0 \iiint_U \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dU \quad (8)$$

式中:  $\mu_r$  为地层相对磁导率, H/m;  $\epsilon_r$  为地层相对介电常数, F/m;  $\mu_0$  为真空中的磁导率, H/m;  $U$  为电压, V;  $\mathbf{J}$  为电流密度, A/m<sup>2</sup>。

将式(5)代入式(8)并求极值,整理后可得到矩阵方程:

$$\mathbf{KX} = \mathbf{P} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{K}$  为系数矩阵;  $\mathbf{X}$  为需要求解的未知变量;  $\mathbf{P}$  为已知向量。

通过求解式(9)中大型疏松矩阵,可得到整个求解域电磁场分布。

接收线圈中的电压为:

$$U = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 2\pi r N_R E_\phi(r, L) \quad (10)$$

式中:  $r$  为接收线圈的半径, m;  $l$  为线圈长度, m;  $N_R$  为接收线圈匝数;  $L$  为发射线圈和接收线圈之间的距离, m;  $E_\phi$  为电场分量, A/m。

将式(10)代入式(1)、式(2)中可得到幅度比信号和相位差信号。

### 2.2 数值验证

在均匀地层中计算数值解和解析解,并进行对比,以此验证数值解的准确性。模型中,仪器发射线圈和接收线圈匝数均为 100 匝,线圈半径为 0.03 m,电流强度为 1 A,发射频率为 2 MHz,计算了均匀地层中源距分别为  $L_1=0.480$  m 和  $L_2=0.635$  m 时接收线圈电压的绝对值。幅度比信号和相位差信号的对比结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,解析解和数值解一致性较好,二者平均相对误差小于 1%,验证了本文中所用方法的准确性。

## 3 数值模拟结果分析

模块化随钻电磁波测井仪器三维结构的横截面



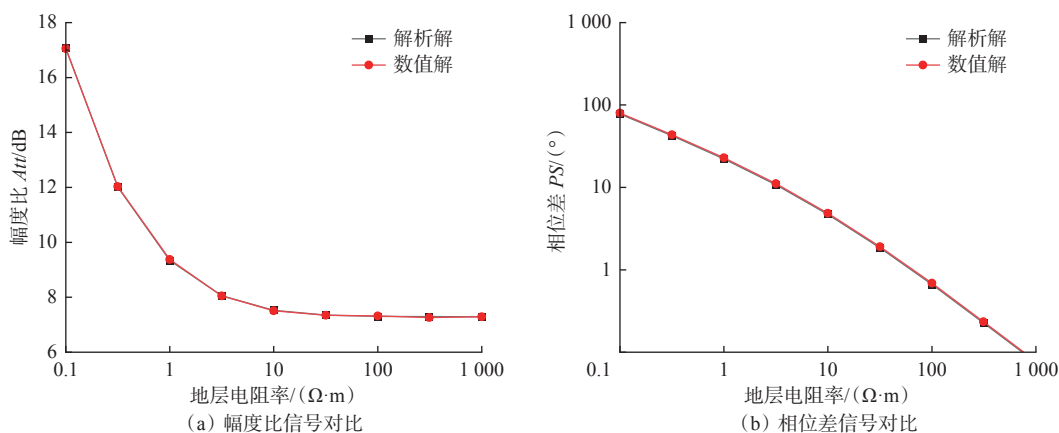


图3 数值解与解析解的对比

Fig.3 Numerical solution versus analytical solution

如图4所示(钻铤外径为171.45 mm,水眼半径为17.15 mm)。分析该测井仪器结构对测量电压信号的影响规律时,分析了各部分尺寸和材料属性的影响。其中,尺寸包括钻铤尺寸、水眼尺寸、天线槽长度;材料包括钻铤、传感器本体、仪器盖、填充物等的材料。计算分析该测井仪器结构的影响时,设置发射频率为2 MHz,电流强度为1 A,所有线圈均为100匝,源距 $L_1$ 为0.480 m、 $L_2$ 为0.635 m,线圈半径为0.028 m,均匀地层的电阻率为10  $\Omega \cdot m$ 。

### 3.1 仪器方位特性

模块化随钻电磁波测井仪器主要测量地层的方位,为了验证该测井仪器的方位特性,分别设置模型地层的电阻率为1和100  $\Omega \cdot m$ ,将仪器模型放置在电阻率100  $\Omega \cdot m$ 的地层中,距离层界面为0.2 m,得到仪器沿周向旋转不同角度的电压信号,结果见图5(a)。从图5(a)可以看出,电压信号随旋转角度呈周期性变化,其变化周期为360°,模块化随钻

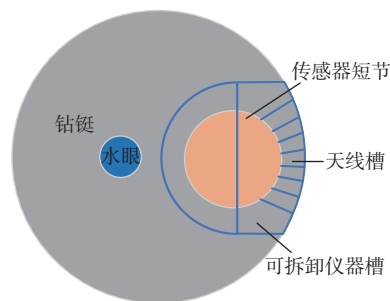


图4 块化随钻电磁波测井仪器三维结构横截面示意

Fig.4 Cross-section of 3D structure of modular electromagnetic logging while drilling instrument

电磁波测井仪器具有方位性;图5(b)为常规随钻电磁波测井仪器旋转不同角度时的电压信号。从图5(b)可以看出,随着仪器旋转,其电压值基本不变,进一步说明常规测井仪器没有方位性。

### 3.2 仪器结构影响分析

#### 3.2.1 钻铤尺寸及其电阻率的影响

钻铤一般采用无磁不锈钢材料,这种材料具有

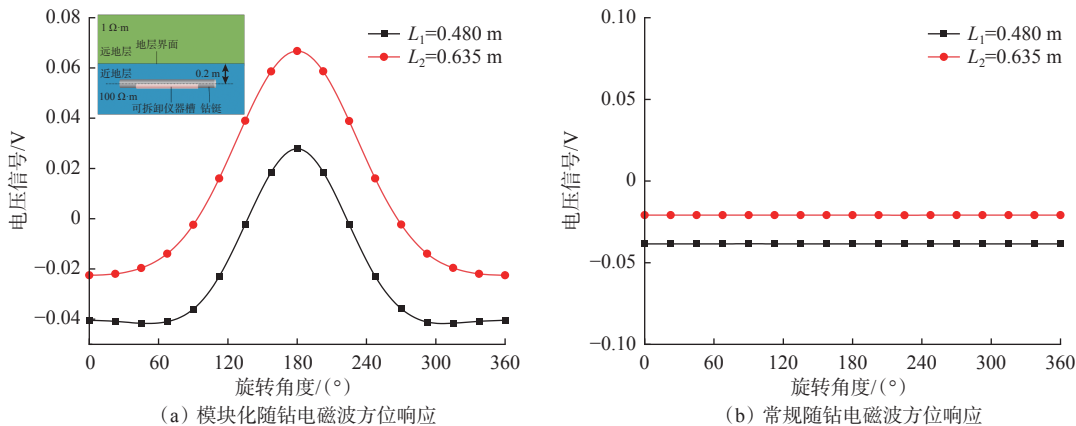


图5 模块化随钻电磁波测井仪器与常规仪器的方位性对比

Fig.5 Comparison of azimuth property of modular electromagnetic logging while drilling instrument and conventional instruments

较好的耐腐蚀性和耐磨性,既可以避免电磁信号对接收电压的影响,也可以满足钻井过程中高强度的要求<sup>[17-18]</sup>。由于模块化随钻电磁波测井仪器线圈没有缠绕在钻铤上,因此有必要研究钻铤的几何尺寸

以及钻铤电阻率对接收电压信号的影响。在均匀地层模型中,计算采用外径 120.65 mm 和 171.45 mm、不同电阻率钻铤时接收线圈的电压,结果如图 6 所示( $D$  为钻铤外径, mm)。

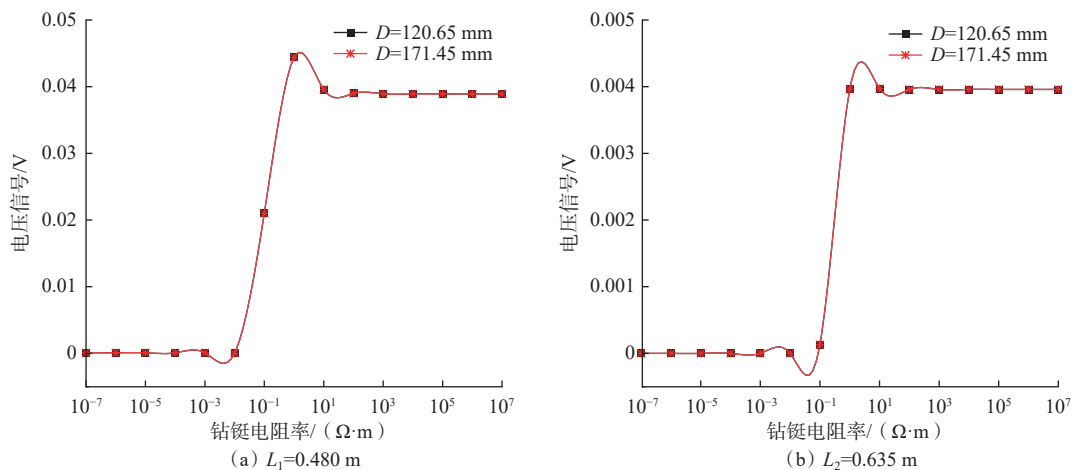


图 6 钻铤对接收电压信号的影响

Fig.6 Influence of drill collar on received voltage signal

从图 6 可以看出:改变钻铤的尺寸,接收电压信号没有变化;当钻铤尺寸不变时,钻铤电阻率越小,钻铤表面电磁信号的趋肤深度越小,所以接收线圈的电压信号值也越小。实际钻井过程中,为了兼顾钻铤的机械强度,钻铤材料一般选择电阻率较小的金属材料,大部分为无磁合金钢材料。因此,对于实际的随钻测井仪器,钻铤材料是导致电磁信号衰减的主要原因之一。

### 3.2.2 水眼的影响

在模块化随钻电磁波测井仪器开槽设计中,将水眼设置在钻铤偏心侧,使水眼和仪器槽保持一定的距离,防止水眼中的钻井液进入仪器槽。水眼与钻铤内腔流道相连通,构成了钻井液由钻铤内部进入井底的通道。实际钻进中,为了提高钻进效率,可能在不同阶段使用不同尺寸的水眼。为了计算水眼尺寸对测量信号的影响,在均匀地层模型中,其他参数不变的情况下,分别计算无水眼、水眼半径为 17.15 mm、水眼半径为 34.29 mm 等 3 种情况下的接收线圈电压信号,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,水眼尺寸对接收电压信号无影响。具体水眼尺寸可根据钻铤和井眼需求选择。

### 3.2.3 传感器本体的影响

传感器本体通常包括 2 个子体,一个是线圈天线,另一个是电子部分。传感器本体材料对接收线圈电压信号的影响如图 8 所示。

从图 8 可以看出:当传感器本体材料的电阻率

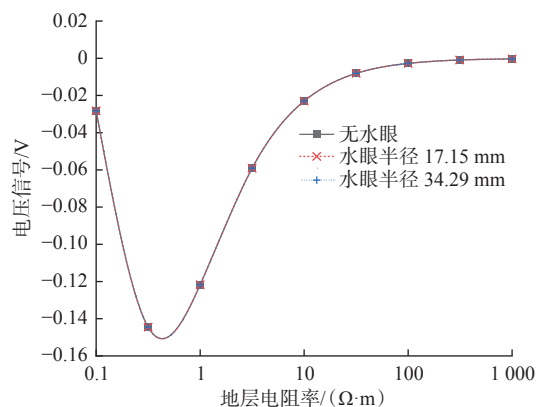


图 7 水眼对接收电压信号的影响

Fig.7 Influence of water bore on received voltage signal

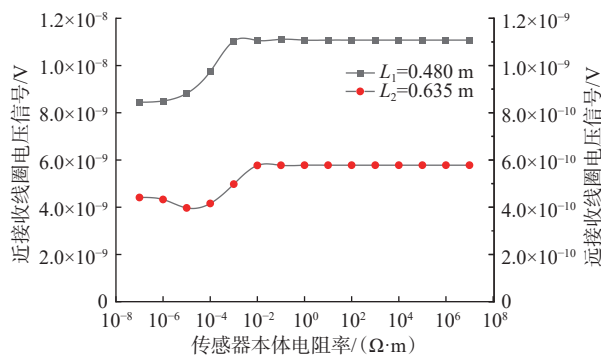


图 8 传感器本体材料对接收电压信号的影响

Fig.8 Influence of sensor body material on received voltage signal

较小时,接收线圈的电压信号也比较低,随着传感

器本体材料电阻率增大,电压信号也随之增大;当传感器本体材料电阻率大于 $1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收电压值不再变化。由此可知,传感器本体材料对接收电压信号是有影响的。线圈天线本体可以由完全非导电材料制成,如橡胶、玻璃纤维或陶瓷。在这种情况下,仪器天线槽内可以不设置绝缘层,也不会影响线圈天线对电磁信号的接收。

在传感器本体线圈外面设有保护罩,并在线圈保护罩上开设天线槽,这样线圈天线不受外界因素侵蚀和影响。由于天线槽是电磁信号传输的唯一通道,天线槽的大小会影响信号的传播。接收电压与仪器天线槽长度的关系曲线如图9所示。

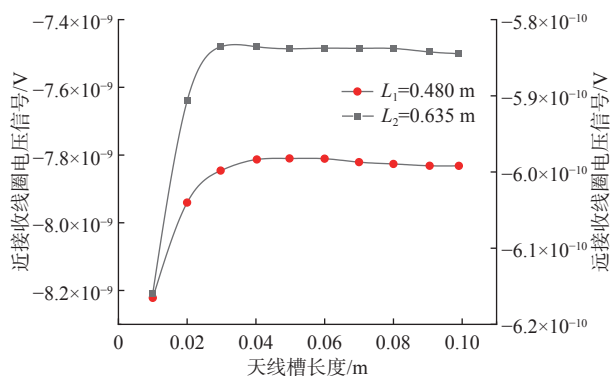


图9 天线槽长度对接收电压信号的影响

Fig.9 Influence of antenna slot length on received voltage signal

从图9可以看出,接收电压随天线槽长度增长而增大,但天线槽长度大于0.03 m后接收线圈电压信号基本不变,表明电磁信号近似全部传播出去。传感器本体在仪器槽中,而且外面封装有仪器盖,所以天线槽长度可以根据实际所需线圈匝数以及天线槽宽度来定,最优的天线槽长度为0.03 m。

### 3.2.4 盖板的影响

在模块化随钻电磁波测井仪器凹槽外面封装盖板,可以保护线圈以及传感器本体不受外界钻井液的侵蚀和其他因素的影响。盖板通常采用金属材料,以保证钻铤整体的机械强度不受损害。盖板上虽开设有天线槽,但天线槽以外的金属材料会对电磁信号产生一定的屏蔽作用。图10所示为接收电压信号随盖板材料电阻率变化的曲线。

从图10可以看出:盖板电阻率越小,接收电压信号越高;当盖板电阻率为 $0.01 \sim 1.00 \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收电压信号随盖板电阻率增大明显衰减,该电阻率区间范围与盖板几何尺寸以及发射频率相关。金属盖

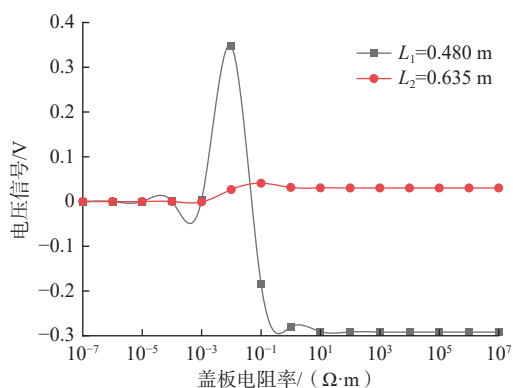


图10 盖板材料对接收电压信号的影响

Fig.10 Influence of cover plate material on received voltage signal

板是导致电磁信号减小的主要原因之一,应选择电阻率比金属稍小的材料制作盖板。

天线槽是电磁信号能够较好传播出去的唯一通道,对线圈信号强度以及仪器结构的设计都有很大影响。仪器槽盖板上每个线圈处设置有4个天线槽,图11为天线槽长度与接收电压信号的关系曲线。

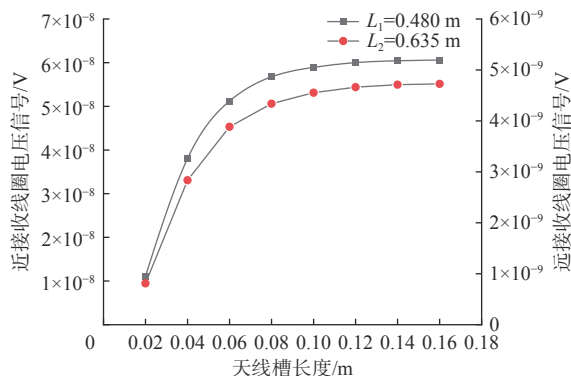


图11 盖板天线槽长度对接收电压信号的影响

Fig.11 Influence of antenna slot length of cover plate on received voltage signal

从图11可以看出,随着天线槽长度增加,接收线圈电压值也随之增大。当盖板上天线槽长度选择0.1 m时,既能保证电磁信号的强度,又能兼顾金属盖板的机械强度不受损害。

当盖板天线槽长度确定时,其占空比对接收电压信号也会产生重要影响。分别限制每个天线开槽处天线槽有4个和2个,分析天线槽占空比对接收电压信号的影响,结果见表1。

由表1可知,当天线槽长度不变时,天线槽占空比越大,接收电压信号越强,这与理论分析相符合。为保证测井仪器的机械强度以及电压信号大

表 1 天线槽占空比对接收电压的影响  
Table 1 Influence of antenna slot duty cycle on received voltage

天线槽数/个	长度/m	$L_1=0.480\text{ m}$		$L_2=0.635\text{ m}$	
		电压实部/V	电压虚部/V	电压实部/V	电压虚部/V
4	0.02	$-1.11\times10^{-8}$	$4.43\times10^{-9}$	$-8.12\times10^{-10}$	$-1.32\times10^{-9}$
	0.04	$-3.80\times10^{-8}$	$1.53\times10^{-8}$	$-2.85\times10^{-9}$	$-4.43\times10^{-9}$
	0.06	$-5.12\times10^{-8}$	$2.12\times10^{-8}$	$-3.93\times10^{-9}$	$-5.98\times10^{-9}$
	0.08	$-5.67\times10^{-8}$	$2.39\times10^{-8}$	$-4.33\times10^{-9}$	$-6.53\times10^{-9}$
	0.10	$-5.89\times10^{-8}$	$2.52\times10^{-8}$	$-4.61\times10^{-9}$	$-6.81\times10^{-9}$
	0.12	$-6.01\times10^{-8}$	$2.59\times10^{-8}$	$-4.72\times10^{-9}$	$-6.91\times10^{-9}$
	0.14	$-6.04\times10^{-8}$	$2.61\times10^{-8}$	$-4.71\times10^{-9}$	$-6.92\times10^{-9}$
	0.16	$-6.06\times10^{-8}$	$2.62\times10^{-8}$	$-4.79\times10^{-9}$	$-6.95\times10^{-9}$
2	0.02	$-3.05\times10^{-9}$	$1.38\times10^{-9}$	$-2.31\times10^{-10}$	$-3.55\times10^{-10}$
	0.04	$-1.06\times10^{-8}$	$4.52\times10^{-9}$	$-1.82\times10^{-10}$	$-1.24\times10^{-9}$
	0.06	$-1.45\times10^{-8}$	$6.33\times10^{-9}$	$-1.14\times10^{-9}$	$-1.73\times10^{-9}$
	0.08	$-1.60\times10^{-8}$	$7.12\times10^{-9}$	$-1.32\times10^{-9}$	$-1.85\times10^{-9}$
	0.10	$-1.67\times10^{-8}$	$7.39\times10^{-9}$	$-1.33\times10^{-9}$	$-1.92\times10^{-9}$
	0.12	$-1.70\times10^{-8}$	$7.62\times10^{-9}$	$-1.35\times10^{-9}$	$-1.94\times10^{-9}$
	0.14	$-1.70\times10^{-8}$	$7.68\times10^{-9}$	$-1.36\times10^{-9}$	$-1.95\times10^{-9}$
	0.16	$-1.71\times10^{-8}$	$7.69\times10^{-9}$	$-1.41\times10^{-9}$	$-1.97\times10^{-9}$

小, 选择每个天线处有 4 个盖板天线槽即可满足要求。  
3.2.5 填充物材料的影响

在传感器本体和仪器槽之间通常会设置填充物, 主要用来隔离钻井液, 以保护传感器本体和线圈。电压信号绝对值与填充物电阻率的关系曲线如图 12 所示。

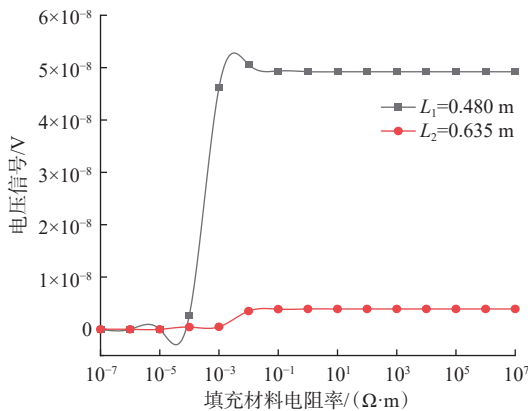


图 12 填充材料对接收电压的影响

Fig.12 Influence of filling material on received voltage

从图 12 可以看出: 当填充物材料的电阻率在  $1\times10^{-5}\sim1\times10^{-3}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$  之间时, 接收电压信号随着电

阻率减小有明显衰减趋势; 当电阻率大于  $1\times10^{-3}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$  或小于  $1\times10^{-5}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$  时, 接收电压信号基本没有改变。绝缘材料的电导率一般不大于  $1\times10^{-7}\text{ S/m}$ , 所以在设计该测井仪器时可以选择绝缘材料作为填充物。

分析以上仪器各部分对电压信号的影响规律, 可以为相关测井仪器的设计提供理论指导依据。为了更好地进行该测井仪器的开发和使用, 分别给出仪器各部分的建议尺寸及制作材料的电阻率: 钻铤外径 120.65 和 171.45 mm, 水眼半径 17.15 和 34.29 mm, 盖板天线槽长度 0.10 m, 仪器天线槽长度 0.03 m; 传感器本体材料电阻率  $1\times10^3\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ , 盖板材料电阻率  $1\times10^{-5}\sim1\times10^{-7}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ , 填充物材料电阻率  $1\times10^7\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。

4 仪器结构影响的扣除

由上述模拟结果可知, 模块化随钻电磁波测井仪器的结构对测量信号具有一定影响。因此, 在测井仪器下井之前, 往往需要对其进行刻度, 进而消除结构的影响。图 13 所示为模块化随钻电磁波测井仪器结构对幅度比和相位差信号的影响。



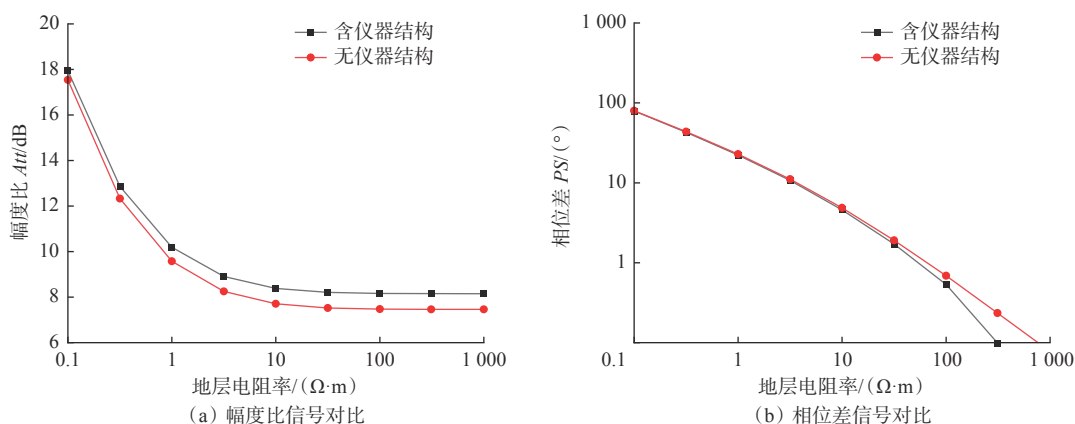


图 13 仪器结构对幅度比和相位差信号的影响

Fig.13 Influence of instrument structure on amplitude ratio and phase difference signal

从图 13 可以看出: 仪器结构对幅度比信号的影响较为显著, 含仪器结构的幅度比信号明显高于无仪器结构时的幅度比信号; 而仪器结构对相位差信号的影响很小, 在地层电阻率较小时, 含仪器结构相位差信号和无仪器结构相位差信号基本重合。

为了探究仪器结构影响扣除前后响应信号的变化, 分别计算了所有仪器结构对不同源距下接收电压信号的影响。仪器结构影响扣除公式为:

$$U_0 = K(U_2 - U_1) \quad (11)$$

式中:  $U_0$  为无仪器结构影响时的电压信号, V;  $K$  为仪器常数;  $U_1$  为真空中仪器电压信号, V;  $U_2$  为有仪器结构影响时的电压信号, V。

仪器结构影响扣除前后的信号对比结果如图 14 所示。从图 14 可以看出, 由于扣除仪器结构的影响, 导致线圈中的磁通量减小, 扣除后仪器结构影

响的接收线圈电压信号比扣除前低。扣除仪器结构影响后, 电压信号曲线更接近无仪器结构的模拟结果。

## 5 结 论

1) 随着钻铤和天线槽填充物的电阻率增大, 接收线圈电压信号出现了突变区间, 这部分的电压信号与仪器的频率和几何尺寸密切相关。

2) 盖板材料电阻率对接收信号强度的影响很大, 实际仪器设计中, 盖板应选择电阻率比金属稍小的材料。而且, 响应信号随传感器本体电阻率增大而增大, 传感器本体应选择非金属材料。

3) 钻铤和填充物的电阻率较小时, 接收电压信号有明显的衰减, 填充物电阻率较大时其影响可以忽略, 填充物一般选择绝缘材料。

4) 扣除仪器结构影响后, 线圈周围磁场发生变化引起线圈中磁通量减小, 导致仪器信号低于扣除前。

5) 该模块化随钻电磁波测井仪器具有较好的方位探测特性, 其侧向开槽放置线圈的方式有效解决了实际钻井应用中线圈拆卸困难、更换不便的问题。基于数值模拟数据分析, 在器件选型、材料设置等工艺制作方面提供了一定的参考依据, 为随钻电磁波测井仪器的创新设计提供了新思路。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 刘亚伟. 随钻电磁波电阻率测井仪结构设计与性能分析 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.  
LIU Yawei. Structure design and performance analysis of electromagnetic wave resistivity logging tool while drilling [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.

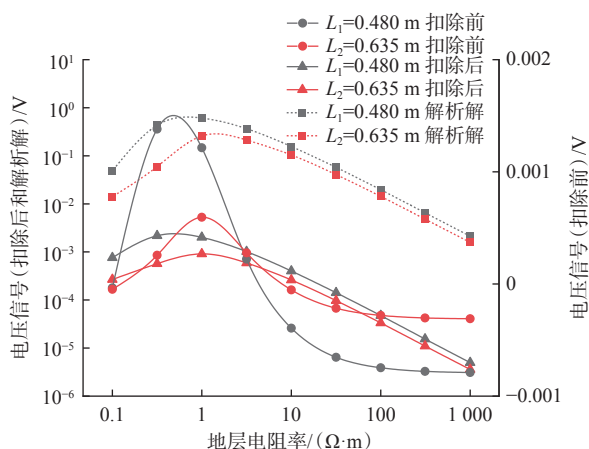


图 14 仪器结构影响扣除前后电压信号对比

Fig.14 Comparison between voltage signals before and after deduction of the influence of instrument structure

- [2] 汪昊, 高杰, 陈航. 各向异性地层随钻电磁波电阻率测井信号处理方法研究 [C]//2019 年中国地球科学联合学术年会论文集(二十九)——专题 77: 井孔地球物理学及深部钻测; 专题 78: 地球化学进展; 专题 79: 地球深部碳循环; 专题 80: 航空地球物理勘查技术与应用. 北京: 中国和平音像电子出版社, 2019: 58–61.  
WANG Hao, GAO Jie, CHEN Hang. Study on signal processing method of electromagnetic wave resistivity logging while drilling in anisotropic formation[C]//Proceedings of the 2019 China Earth Science Joint Academic Annual Conference (29)—Special Topic 77: Well geophysics and deep drilling; Special Topic 78: Progress in geochemistry; Special Topic 79: Deep earth carbon cycle; Special Topic 80: Aerial geophysical exploration technology and applications. Beijing: China Heping Audio Video Electronic Publishing House, 2019: 58–61.
- [3] 唐海全, 肖红兵, 李翠, 等. 基于随钻测井的地层界面识别方法 [J]. 天然气勘探与开发, 2016, 39(4): 8–12.  
TANG Haiquan, XIAO Hongbing, LI Cui, et al. Methods to identify formation boundary based on logging-while-drilling[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2016, 39(4): 8–12.
- [4] 林发武, 田超国, 耿学杰, 等. 随钻电磁波测井响应函数理论及探测特性 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 60–68.  
LIN Fawu, TIAN Chaoguo, GENG Xuejie, et al. Theory of response function and analysis of detecting characteristic of electromagnetic logging while drilling[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2021, 45(1): 60–68.
- [5] 仵杰, 任焱煜, 贺秋利, 等. 电磁远探测仪器参数设计 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2021, 36(1): 105–112.  
WU Jie, REN Yaoyu, HE Qiuli, et al. Parameter design of remote detection tool with electromagnetic method[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2021, 36(1): 105–112.
- [6] 岳喜洲, 刘天淋, 李国玉, 等. 随钻方位电磁波测井响应快速正演方法与地质导向应用 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(5): 1909–1920.  
YUE Xizhou, LIU Tianlin, LI Guoyu, et al. An analytically fast forward method of LWD azimuthal electromagnetic measurement and its geo-steering application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(5): 1909–1920.
- [7] 张晓彬. 随钻方位电磁波电阻率测井仪线圈系设计方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.  
ZHANG Xiaobin. Research on the design of coil system for azimuthal propagation resistivity LWD instrument[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.
- [8] 仵杰, 姬玉, 成志刚, 等. 泥浆侵入对随钻电磁波电阻率测井响应的影响 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 49–54.  
WU Jie, JI Yu, CHENG Zhigang, et al. Influence of mud invasion on response of electromagnetic wave resistivity logging while drilling[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2020, 35(1): 49–54.
- [9] 仵杰, 叶雨, 白茹宝, 等. 随钻双感应测井仪背景影响研究 [J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(3): 46–50.  
WU Jie, YE Yu, BAI Rubao, et al. The background influence research of LWD dual-induction logging instrument[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(3): 46–50.
- [10] 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.
- [11] 吴世伟, 刘得军, 赵阳, 等. 层状介质水力裂缝电磁响应的有限元正演模拟 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 132–138.  
WU Shiwei, LIU Dejun, ZHAO Yang, et al. Finite-element forward modeling of electromagnetic response of hydraulic fractures in layered medium[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 132–138.
- [12] WANG T, TCHAKAROV B J. Modular resistivity sensor for down-hole measurement while drilling: US 9638819 B2[P]. 2017–05–02.
- [13] 康正明, 秦浩杰, 张意, 等. 基于 LSTM 神经网络的随钻方位电磁波测井数据反演 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 116–124.  
KANG Zhengming, QIN Haojie, ZHANG Yi, et al. Data inversion of azimuthal electromagnetic wave logging while drilling based on LSTM neural network[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 116–124.
- [14] MA Zhonghua, LIU Dejun, LI Hui, et al. Numerical simulation of a multi-frequency resistivity logging-while-drilling tool using a highly accurate and adaptive higher-order finite element method[J]. Advances in Applied Mathematics and Mechanics, 2012, 4(4): 439–453.
- [15] 魏宝君, 徐丹, 王莎莎. 通讯槽对电磁波传播随钻测量信号的影响 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 56–60.  
WEI Baojun, XU Dan, WANG Shasha. Influence of communication slots on signal of electromagnetic propagation measurement while drilling[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(1): 56–60.
- [16] 刘得军, 马中华, 苑赫, 等. 自适应高阶矢量有限元方法在随钻电阻率测井中的应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 77–83.  
LIU Dejun, MA Zhonghua, YUAN He, et al. Application of adaptive higher-order vector finite element method to simulate resistivity logging-while-drilling tool response[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 77–83.
- [17] 宋殿光, 段宝良, 魏宝君, 等. 金属钻铤对随钻电磁波电阻率测井仪测量信号的影响 [J]. 测井技术, 2014, 38(2): 201–205.  
SONG Dianguang, DUAN Baoliang, WEI Baojun, et al. The influence of metal mandrel on electromagnetic resistivity logging responses[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(2): 201–205.
- [18] 许巍, 柯式镇, 李安宗, 等. 随钻电磁波测井仪器结构影响的三维有限元模拟 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 50–56.  
XU Wei, KE Shizhen, LI Anzong, et al. Structural effects analysis of an electromagnetic wave propagation resistivity LWD tool by 3D finite element method[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 50–56.