

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.01.014

# 随钻方位电阻率测井仪线圈系设计方法研究\*

万勇<sup>1</sup> 张晓彬<sup>1</sup> 倪卫宁<sup>2</sup> 张卫<sup>2</sup> 孙伟峰<sup>1</sup> 戴永寿<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院 青岛 266580; 2. 中石化石油工程技术研究院 北京 100101)

**摘要:**随钻方位电磁波电阻率测井仪器实现地层方位电阻率测量和地层界面检测的关键在于测井仪线圈系结构的设计,且测井仪器的检测性能主要受电磁波信号发射频率、线圈源距、线圈间距、线圈倾角以及所测地层电阻率的影响。针对随钻方位电磁波电阻率测井仪器的不同检测要求,确定测井仪器的检测方式。根据线圈系结构在不同检测方式的条件下所满足的约束条件,采用仿真实验的手段设计随钻方位电磁波电阻率测井仪的线圈系结构,为实际工程应用中线圈系的结构设计提供参考依据。

**关键词:** 随钻测量;方位电阻率;测量目标;线圈系设计

**中图分类号:** TN821 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.4010

## Research on the design of coil system for azimuthal propagation resistivity LWD

Wan Yong<sup>1</sup> Zhang Xiaobin<sup>1</sup> Ni Weining<sup>2</sup> Zhang Wei<sup>2</sup> Sun Weifeng<sup>1</sup> Dai Yongshou<sup>1</sup>

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The key point of azimuthal propagation resistivity logging-while-drilling focuses on the structural design of the coil system. And the detection performance of azimuthal propagation resistivity LWD is mainly affected by the transmission frequency of electromagnetic wave signal, the transmitter-receiver spacing, the receiver interval, the coil's angle and the formation resistivity. The testing method of measurements is determined with different inspection requirements of azimuthal propagation resistivity LWD. According to the various constraints of the coil system under the condition of different testing method, the structure of the coil system for azimuthal propagation resistivity LWD is designed by experimental simulation method. The results provide reference for the structural design of the coil system for azimuthal propagation resistivity LWD.

**Keywords:** LWD; azimuthal resistivity; measurement goals; coil system design

## 1 引言

随钻方位电磁波电阻率测井仪器区别于传统的随钻电磁波电阻率测井仪器,可实现地层方位电阻率的检测,避免钻井仪器钻出储集层,在水平井和大斜度井的勘探和开发中发挥着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。然而随钻方位电磁波电阻率测井仪器的检测性能主要取决于其线圈系的结构设计。合理的线圈系结构设计,可以提高测井仪器的径

向探测深度和纵向分辨率,并实现多径向深度和方位地层电阻率的测量,进而精确地实现测井仪器的地质导向功能。已有的关于线圈系设计的文献[3-4],仅给定了各参数所应满足的约束条件,未考虑多参数之间的影响规律,无法满足测井现场的各项检测需求。

针对以上问题,本文明确了测井仪器的不同检测需求,在考虑各种约束条件和多参数影响的条件下,采用仿真实验的手段提出了测井仪器线圈系的结构设计方案,为实现测井仪器的地质导向和地层评价功能提供理论支撑。

收稿日期:2016-07 Received Date: 2016-07

\* 基金项目:国家重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(2016ZX05021-002)资助项目

## 2 随钻方位电磁波电阻率测井仪器基本原理

将线圈视为磁偶极子,在地层直角坐标系  $xz$  平面下建立线圈系和地层结构的模型,如图 1 所示。其中  $\theta_T$  和  $\theta_R$  分别为发射线圈和接收线圈磁矩方向与仪器轴向的夹角,  $L$  为线圈源距,  $T$  为发射线圈,  $R_1$  和  $R_2$  表示相邻的两个接收线圈。

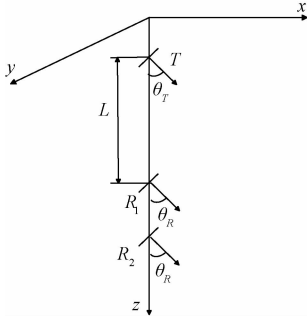


图 1 倾斜线圈系结构

Fig. 1 Structure of tilted coils system

如图 1 所示,线圈系结构模型建立在  $xz$  平面条件下,因此发射线圈在接收线圈处所产生的感应磁场强度无  $y$  分量,可求得接收线圈处感应磁场强度的  $x$  分量和  $z$  分量<sup>[5-6]</sup>如下:

$$\begin{aligned} H_x &= H_{xx} + H_{xz} \\ H_z &= H_{zx} + H_{zz} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $H_{xx}$  表示  $x$  方向单位磁偶极子源在接收线圈处所产生磁场强度的  $x$  分量,  $H_{xz}$  表示  $z$  方向单位磁偶极子源在接收线圈处所产生磁场强度的  $x$  分量,  $H_{zx}$  表示  $x$  方向单位磁偶极子源在接收线圈处所产生磁场强度的  $z$  分量,  $H_{zz}$  表示  $z$  方向单位磁偶极子源在接收线圈处所产生磁场强度的  $z$  分量。

由磁流源并矢 Green 函数可得源点处 3 个相互垂直的单位磁偶极子源在场点处产生的磁场强度如以下矩阵所示<sup>[7-8]</sup>:

$$\mathbf{G}^{HM} = \begin{bmatrix} G_{xx}^{HM} & G_{xy}^{HM} & G_{xz}^{HM} \\ G_{yx}^{HM} & G_{yy}^{HM} & G_{yz}^{HM} \\ G_{zx}^{HM} & G_{zy}^{HM} & G_{zz}^{HM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $G_{xx}^{HM}$ 、 $G_{yy}^{HM}$ 、 $G_{zz}^{HM}$  分别表示  $x$  方向单位磁偶极子源所产生磁场强度的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分量,  $G_{xy}^{HM}$ 、 $G_{yx}^{HM}$ 、 $G_{yz}^{HM}$  分别表示  $y$  方向单位磁偶极子源所产生磁场强度的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分量,  $G_{xz}^{HM}$ 、 $G_{yz}^{HM}$ 、 $G_{zx}^{HM}$  分别表示  $z$  方向单位磁偶极子源所产生磁场强度的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分量。

将式(2)代入式(1)可得接收线圈处感应磁场强度的  $x$  分量和  $z$  分量分别为:

$$\begin{aligned} H_x &= M_T (G_{xx}^{HM} \sin\theta_T + G_{xz}^{HM} \cos\theta_T) \\ H_z &= M_T (G_{zx}^{HM} \sin\theta_T + G_{zz}^{HM} \cos\theta_T) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $M_T$  为发射线圈在  $xz$  平面内所产生的磁矩( $M_T = I_T N_T A_T$ ,  $I_T$  为发射线圈的电流强度,  $N_T$  为发射线圈的匝数,  $A_T$  为发射线圈的横截面积)。

将接收线圈处感应磁场强度的  $x$  分量和  $z$  分量投影到接收线圈磁矩方向可得接收线圈处的感应磁场强度  $H_R$  为:

$$H_R = H_x \sin\theta_R + H_z \cos\theta_R \quad (4)$$

由接收线圈处的感应磁场强度可求得接收线圈处的感应电动势信号为:

$$V = -j\omega\mu H_R A_R N_R = |V| e^{j\omega\Phi} \quad (5)$$

式中:  $|V|$  为接收线圈处感应电动势信号的幅值,  $\Phi$  为接收线圈处感应电动势信号的相位。

由式(5)可知,接收线圈  $R_1$  和  $R_2$  处的感应电动势分别为:

$$\begin{aligned} V_1 &= -j\omega\mu H_{R_1} A_{R_1} N_{R_1} = |V_1| e^{j\omega\Phi_1} \\ V_2 &= -j\omega\mu H_{R_2} A_{R_2} N_{R_2} = |V_2| e^{j\omega\Phi_2} \end{aligned} \quad (6)$$

可求得相邻接收线圈处感应电磁波信号的幅度比和相位差分别为:

$$\begin{aligned} EATT &= 20 \lg \frac{|V_2|}{|V_1|} \\ \Delta\Phi &= \Phi_2 - \Phi_1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $|V_1|$ 、 $\Phi_1$  分别为接收线圈  $R_1$  处感应电动势信号的幅值和相位,  $|V_2|$ 、 $\Phi_2$  分别为接收线圈  $R_2$  处感应电动势信号的幅值和相位。

实际测井过程中,通过测量相邻接收线圈处感应电磁波信号的幅度比和相位差即可反演得到所测地层的电阻率参数。

## 3 基于不同检测需求的线圈系结构和参数设计

为合理地设计线圈系结构,应明确随钻方位电磁波电阻率测井仪器的不同检测需求:为精确地实现测井仪器的地质导向和地层评价功能,测井仪器应同时检测不同径向深度的地层电导率参数;为实现地层层界面的检测,测井仪器须实现地层方位电导率检测;为增大钻铤钻遇层界面的反应时间,避免钻铤钻出储集层,应提高测井仪器的径向探测深度;为提高测井仪器对薄层的探测能力,应提高测井仪器的纵向分辨率。针对以上检测需求,分别完成线圈系的结构和参数设计。

### 3.1 多径向深度地层电导率检测

为精确地实现地质导向和地层评价功能,需要检测多径向深度的地层电阻率参数。多径向深度地层电阻率的检测主要受线圈源距和电磁波信号发射频率的影响,其中

线圈源距直接决定了测井仪器的径向探测深度,同时受电磁趋肤效应的影响,电磁波信号在地层中传播时高频信号的径向探测深度小于低频信号的径向探测深度。

因此,采用多发射频率和多源距的线圈系结构实现多径向深度地层电阻率的检测。为降低介电常数对测量结果的影响,电磁波信号发射频率应满足以下约束条件:

$$f \ll \frac{\sigma_{\min}}{2\pi\epsilon} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{\min}$ 为仪器可测得的最小电导率, $\epsilon$ 为地层介电常数( $\epsilon = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ )。由于国内大部分油田油层电阻率为  $3 \sim 1\,000 \Omega/\text{m}^{[9]}$ ,可知电导率最小取值为  $0.001 \text{ S}/\text{m}$ ,计算可得  $f \ll 18 \text{ MHz}$ 。由于  $f = 2 \text{ MHz}$  与  $18 \text{ MHz}$  为 9 倍的关系,满足约束条件  $f \ll 18 \text{ MHz}$ ,且国内外主流测井仪器的最高频率均采用  $2 \text{ MHz}$ ,故测井仪器的电磁波信号发射频率须小于  $2 \text{ MHz}$ 。又因为发射频率小于  $100 \text{ kHz}$  时,属于感应测井的范畴<sup>[10]</sup>,可得电磁波电阻率测井仪器的最佳工作频段为  $100 \text{ kHz} \sim 2 \text{ MHz}$ 。

由于不同频率的电磁波发射信号需要匹配不同的谐振电路,受井下钻井仪器空间的限制,国内外主流随钻方位电磁波电阻率测井仪器均采用  $2 \sim 3$  种电磁波信号发射频率实现多径向深度地层电阻率的测量,如表 1 所示。

表 1 主流随钻方位电磁波电阻率测量工具所采用的发射频率

Table 1 The frequency of mainstream azimuthally propagation resistivity LWD system

仪器	电磁波信号发射频率
PeriScope15 (斯伦贝谢)	100 kHz, 400 kHz, 2 MHz
AziTrak (贝克休斯)	400 kHz, 2 MHz
ADR (哈里伯顿)	125 kHz, 500 kHz, 2 MHz
GW-LWD(BWR) <sup>[11]</sup> (长城钻探)	500 kHz, 2 MHz

由表 1 可知,为实现多径向深度地层电阻率的测量,在电磁波电阻率测量工具的最佳工作频段范围内等比例选定  $125 \text{ kHz}$ 、 $500 \text{ kHz}$  和  $2 \text{ MHz}$  三种发射频率。不同频率信号的地层电导率( $\sigma = 1/R$ )检测范围受电磁波信号波长和仪器所能分辨的最小信号幅值的影响,研究结果表明不同频率信号的地层电导率检测范围如表 2 所示。

表 2 不同频率信号的地层电导率检测范围

Table 2 The formation resistivity test ranges of different frequency signals

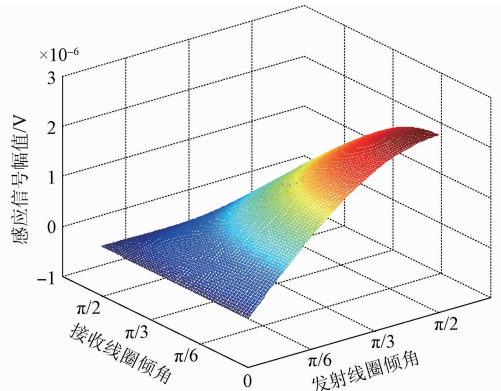
频率	电导率检测范围/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
125 kHz	0.3 ~ 10
500 kHz	0.002 ~ 5
2 MHz	0.001 ~ 5

线圈源距的大小直接影响接收线圈处感应信号的幅值,从而影响测井仪器的径向探测深度。根据大量的硬件实验结果可知,实际电路中所产生的噪声信号通常为  $10^{-6} \text{ V}$ 。为提高接收信号的信噪比,保证测井仪器的检测精度,应保证接收线圈处所能检测到的最小信号幅值为  $10^{-6} \text{ V}$ ,根据式(4)即可求得不同频率条件下所允许的最大线圈源距。

因此除采用不同频率的电磁波信号发射频率外,应在仪器所允许的最大源距范围内选择多种源距实现不同径向深度地层电阻率的测量。

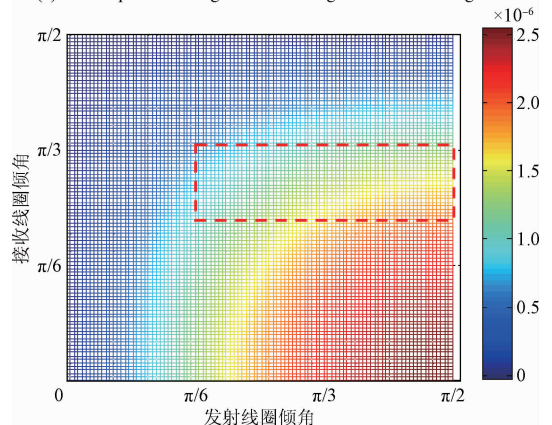
### 3.2 地层方位电导率检测

为检测地层方位电导率,精确地实现测井仪器的地质导向功能,应合理地设计线圈系倾角<sup>[12]</sup>。为此,仿真分析了发射线圈和接收线圈倾角的变化对接收线圈处感应信号幅值的影响规律,得到接收线圈处感应信号幅值随发射线圈和接收线圈倾角变化的曲线和接收线圈处感应信号的幅值分布特性,如图 2 所示。



(a) 感应信号幅值变化曲线

(a) The amplitude change of electromagnetic induction signal



(b) 感应信号幅值分布特性

(b) The characteristics of electromagnetic induction signal

图 2 感应信号幅值与线圈系倾角变化关系

Fig. 2 Relation between the amplitude of electromagnetic induction signal and the tilt angle of the coils system

由图 2 可知,接收线圈处感应信号幅值随发射线圈

倾角的增大而增大,随接收线圈倾角的增大而减小。为提高测井仪器的检测精度,以接收线圈处的最小信号幅值为  $10^{-6}$  V 为依据,发射线圈倾角应大于  $\pi/6$ ,接收线圈倾角应小于  $\pi/3$ 。此外,已有研究表明,接收线圈倾角越大,测井仪器对层界面检测的敏感性越强<sup>[13]</sup>,为保证测井仪器对层界面检测的敏感性,接收线圈倾角应大于  $\pi/4$ 。综上所述,线圈倾角应满足表 3 所示的设计范围(即图 2(b)中方框内所示的取值范围)。

表 3 线圈倾角的范围

Table 3 Range of the coil's angle

线圈	倾角设计范围
发射线圈	$[\pi/6, \pi/2]$
接收线圈	$[\pi/4, \pi/3]$

### 3.3 提高仪器的径向探测深度

为及时检测层界面的存在,避免钻铤钻出储集层,应提高仪器的径向探测深度。仪器的径向探测深度受电磁波信号发射频率、线圈源距、线圈倾角以及所测地层电导率等参数的影响。此外,为提高接收信号的信噪比,保证测井仪器的检测精度,接收线圈处的感应信号幅值应大于  $10^{-6}$  V。

电磁波信号在地层中传播时受趋肤效应<sup>[14-15]</sup>的影响,信号会产生较大的衰减,电磁波信号在地层中的探测深度  $\delta$  如下:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (9)$$

由式(8)可知,电磁波信号在地层中的投入深度与电磁波信号发射频率成反比,因此高频电磁波信号更难穿透导电性的地层介质。因此,为提高测井仪器的径向探测深度,应采用 125 kHz 的电磁波信号发射频率。为此,在电磁波信号发射频率为 125 kHz 时,仿真分析接收线圈处感应信号幅值随地层电导率的变化规律,得到接收线圈处感应信号幅值随地层电导率的变化曲线,如图 3 所示。

根据图 3 仿真结果可知,接收线圈处感应信号幅值随地层电导率的增大而减小,为保证线圈系源距的设计范围适用于全部地层电导率条件,选定地层电导率参数为仪器可测得的最大电导率(即  $\sigma$  取  $10$  S/m);同时为保证线圈系源距的设计范围适用于线圈系倾角设计范围内的全部线圈倾角组合,选定感应信号幅值最小时的线圈倾角组合(即发射线圈和接收线圈的倾角均取  $\pi/4$ ),得到接收线圈处的感应信号幅值随源距的变化曲线如图 4 所示。

由于通过增加发射功率提高信号幅值会同时提高噪

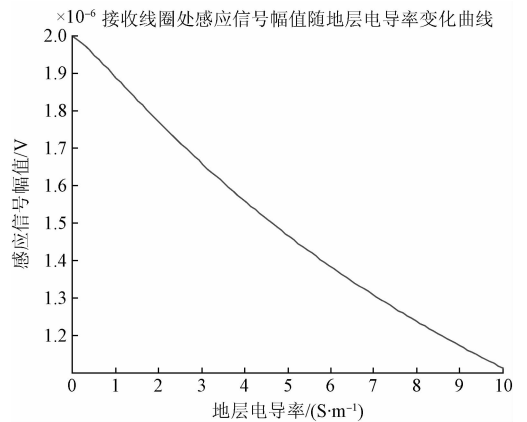


图 3 感应信号幅值与地层电导率变化关系

Fig. 3 Relation between the amplitude of electromagnetic induction signal and the formation resistivity

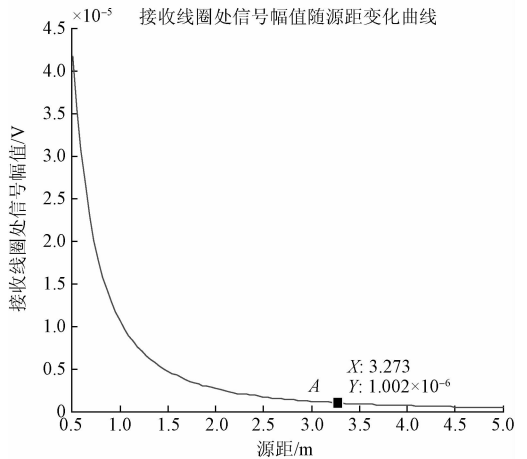


图 4 感应信号幅值与线圈源距变化的关系

Fig. 4 Relation between the amplitude of electromagnetic induction signal and the transmitter-receiver spacing

声信号的幅值,因此在测井仪器发射频率和线圈倾角确定的条件下,仅可通过增加线圈源距提高测井仪器的径向探测深度。由于仪器可分辨的最小信号幅值为  $10^{-6}$  V,如图 4 中 A 点所示,当接收线圈处感应信号幅值为  $10^{-6}$  V 时对应的线圈源距为 3.273 m (128 in)。因此测井仪器所允许的最大线圈源距为 3.273 m (128 in),而国外主流随钻方位电磁波电阻率测井仪器 PeriScope15 和 InSite ADR 的最大线圈源距分别为 96 和 48 in<sup>[16]</sup>,均小于 128 in。

综上所述,为提高仪器的径向探测深度,测井仪器发射频率、线圈倾角以及线圈源距应满足表 4 所示的范围。

### 3.4 提高仪器的纵向分辨率

测井仪器的纵向分辨率指仪器所能检测到的最小薄层厚度,仪器的纵向分辨率受电磁波信号发射频率和线

表 4 为提高仪器的径向探测深度,线圈系参数的设计范围

Table 4 Parameter design results of the coils system, in order to improve radial investigation depth of the instrument

频率	线圈倾角	源距/in
125 kHz	发射线圈	$[\pi/4 \sim \pi/2]$
	接收线圈	$[\pi/6 \sim \pi/4]$
		(0 ~ 128)

圈间距的影响。由电磁波信号的检测特性可知,高频信号具有较高的纵向分辨率。根据表 2 所示结果可见,针对不同的地层电导率检测范围,可选定多种电磁波信号发射频率,如表 5 所示。

表 5 不同地层电导率范围的频率选定结果

Table 5 Frequency selected results according to the different formation resistivity

电导率检测范围/(S·m <sup>-1</sup> )	选定电磁波信号发射频率
0.001 ~ 0.002	2 MHz
0.002 ~ 0.3	500 kHz, 2 MHz
0.3 ~ 5	125 kHz, 500 kHz, 2 MHz
5 ~ 10	125 kHz

由表 5 可知,为提高仪器的纵向分辨率,当地层电导率检测范围为 0.001 ~ 5 S/m 时,须选定 2 MHz 的电磁波信号发射频率;当地层电导率检测范围为 5 ~ 10 S/m 时,须选定 125 kHz 的电磁波信号发射频率。此外,设计线圈间距时,线圈间距应满足如下约束条件。

1) 为降低仪器的测量误差,应确保相邻接收线圈处接收信号的相位差小于  $2\pi$ ,因此线圈间距  $\Delta L$  应小于最小电磁波波长  $\lambda_{\min}$ ,即  $\Delta L < \lambda_{\min}$ 。

2) 为保证仪器的测量精度,相邻接收线圈处感应电动势信号的相位差  $\Delta\Phi$  应大于仪器所能分辨的最小相位差  $\Delta\Phi_{\min}$ ,由于相邻接收线圈处所检测到的相位差为  $\Delta\Phi = \frac{360 \cdot \Delta L}{\lambda}$ ,因此,由  $\Delta\Phi > \Delta\Phi_{\min}$  可得  $\Delta L > \frac{\lambda \cdot \Delta\Phi_{\min}}{360^\circ}$ 。

3) 线圈间距应小于仪器所能检测到的最小薄层的厚度  $d$ (随钻方位电磁波电阻率测井仪器所能分辨的最小薄层厚度为 20 ~ 30 cm,因此在线圈系结构设计和参数优化时给定仪器所能分辨的最小薄层厚度为 20 cm<sup>[17]</sup>)。

根据表 5 中电磁波信号发射频率的选定结果可知,当地层电导率检测范围为 0.001 ~ 5 S/m 时,为提高仪器的纵向分辨率,选定 2 MHz 的电磁波信号发射频率并以线圈间距的约束条件为依据,采用仿真手段分析线圈间

距的设计范围,如图 5 所示(线圈间距随约束条件 2 和 3 的变化曲线差别较小,为区分不同约束条件下的线圈间距变化曲线,仿真计算时对约束条件 2 取对数,以便于精确地设计线圈间距的范围)。

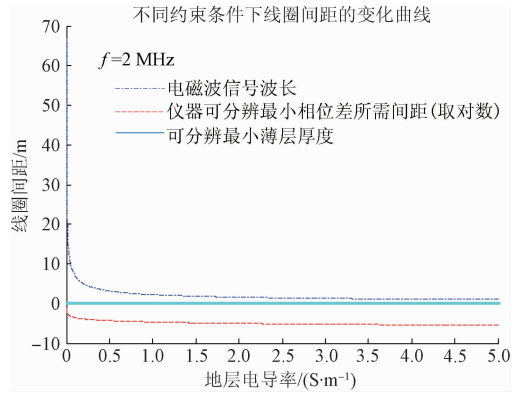


图 5 不同约束条件下线圈间距的变化曲线 ( $\sigma = 0.001 \sim 5 \text{ S/m}$ )

Fig. 5 Curve of transmitter-receiver spacing change according to different constraints ( $\sigma = 0.001 \sim 5 \text{ S/m}$ )

由图 5 可知,地层电导率检测范围为 0.001 ~ 5 S/m 时,线圈间距的设计主要受后两个约束条件的制约。将图 5 中地层电导率为 0.001 ~ 0.04 S/m 的部分进行局部放大并对约束条件 2 取原值,得到图 6 所示结果。

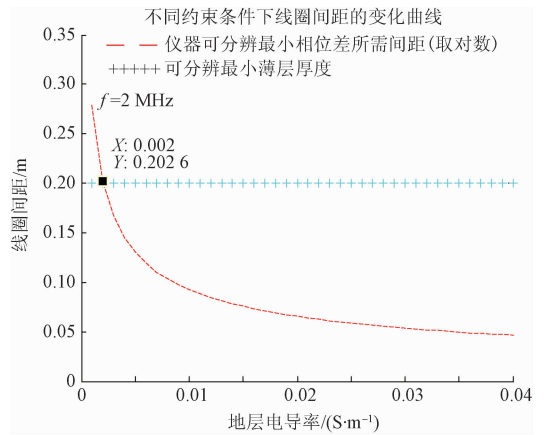


图 6 局部放大曲线

Fig. 6 Partial enlarged detail

如图 6 中点 B 所示,当地层电导率变化范围为 0.001 ~ 0.002 S/m 时,线圈间距必须大于仪器可分辨最小相位差所需的间距,同时应小于电磁波信号的波长,即  $\frac{\lambda \cdot \Delta\Phi_{\min}}{360^\circ} < \Delta L < \lambda$ ;由图 5 和 6 可知,当地层电导率变化范围为 0.002 ~ 5 S/m 时,线圈间距应大于仪器可分辨最小相位差所需的间距,同时应小于仪器所能分辨的最小薄层厚度  $d$ ,即  $\frac{\lambda \cdot \Delta\Phi_{\min}}{360^\circ} < \Delta L < d$ 。

同理,当地层电导率检测范围为 5 ~ 10 S/m 时,为提高仪器的纵向分辨率,选定 125 kHz 的电磁波信号发射频率,并以线圈间距的约束条件为依据,采用仿真手段分析线圈间距的设计范围,如图 7 所示。

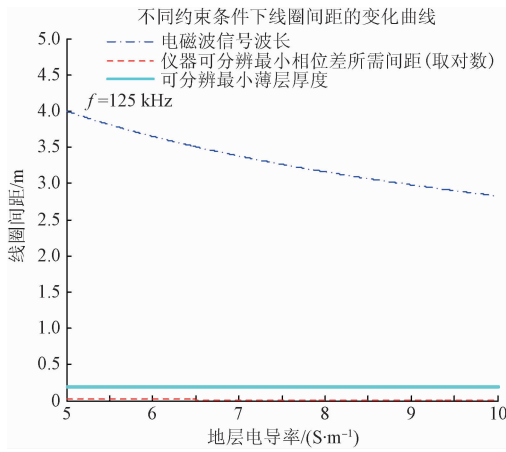


图 7 不同约束条件下线圈间距的变化曲线 ( $\sigma = 5 \sim 10 \text{ S/m}$ )

Fig. 7 Curve of transmitter-receiver spacing change according to different constraints ( $\sigma = 5 \sim 10 \text{ S/m}$ )

由图 7 可知,当地层电导率的取值范围为 5 ~ 10 S/m 时,线圈间距应大于仪器可分辨最小相位差所需的间距,且应小于仪器所能分辨的最小薄层的厚度,即  $\frac{\lambda \cdot \Delta\Phi_{\min}}{360^\circ} < \Delta L < d$ 。

综上所述,为提高仪器的纵向分辨率,电磁波信号发射频率和线圈间距的设计应满足表 6 所示结果。

表 6 为提高仪器纵向分辨率,线圈系参数的设计范围

Table 6 Parameter design results of the coils system, in order to improve vertical resolution of the instrument

电导率检测范围/ ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	选定电磁波 信号发射频率	线圈间距设计范围	
		最小间距/in	最大间距/in
0.001 ~ 0.002	2 MHz	$\frac{\lambda \cdot \Delta\Phi_{\min}}{360^\circ}$	$\lambda$
0.002 ~ 5	2 MHz	$\frac{\lambda \cdot \Delta\Phi_{\min}}{360^\circ}$	$d$
5 ~ 10	125 kHz	$\frac{\lambda \cdot \Delta\Phi_{\min}}{360^\circ}$	$d$

## 4 结 论

分别针对随钻方位电磁波电阻率测井仪器对多径向深度地层电阻率检测、地层方位电阻率检测、提高仪器的径向探测深度和纵向分辨率等不同的检测要求和测量目标,研究影响仪器检测性能的主要参数以及所应满足的

各种约束条件,提出了不同测量目标和检测要求下线圈系结构和参数的设计方法。研究结果可为实际工程应用中测井仪器线圈系结构和参数的设计提供参考依据。

## 参考文献

[ 1 ] 张晓彬,戴永寿,倪卫宁,等. 随钻方位电磁波电阻率测量系统发展进展[J]. 测井技术, 2016, 40(1): 12-17.  
ZHANG X B, DAI Y SH, NI W N, et al. Development of azimuthal propagation resistivity Measurement While Drilling system [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(1):12-17.

[ 2 ] 贾衡天,彭浩,邓乐,等. 随钻电磁波电阻率测量系统[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6):123-126.  
JIA H T, PENG H, DENG L, et al. Electromagnetic resistivity MWD system [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(6):123-126.

[ 3 ] ZHAO Y, LI M, DUN Y, et al. Analysis and design of the coils system for electromagnetic propagation resistivity logging tools by numerical simulations[C]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 137:335-341.

[ 4 ] 卢涛,师奕兵,周华俊,等. 多频幅相感应测井仪线圈系设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(9): 38-43.  
LU T, SHI Y B, ZHOU H J, et al. Design of coil system for multi-frequency induction amplitude-phase logging tool [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(9):38-43.

[ 5 ] WEI B J, ZHANG G J, LIU Q. Recursive algorithm and accurate computation of dyadic Green's functions for stratified uniaxial anisotropic media [J]. Science in China: Series F, 2008, 51(1):63-80.

[ 6 ] 魏宝君,王甜甜,王颖. 用磁流源并矢 Green 函数的递推矩阵方法计算层状各向异性地层中多分量感应测井响应[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11):2920-2928.  
WEI B J, WANG T T, WANG Y. Computing the response of multi-component induction logging in layered anisotropic formation by the recursive matrix method for magnetic-current-source dyadic Green's function [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(11): 2920-2928.

[ 7 ] 朱炜煦,袁志勇,童倩倩. 电磁力反馈中磁场特性分析与线圈姿态计算[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4):590-597.  
ZHU W X, YUAN ZH Y, TONG Q Q. Coil magnetic field characteristics analysis and coil spatial pose calculation in magnetic haptic feedback [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 590-597.

- [ 8 ] 杨锦舟,魏宝君,林楠. 倾斜线圈随钻电磁波电阻率测量仪器基本原理及其在地质导向中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(1):44-49.  
YANG J ZH, WEI B J, LIN N. Basic theory of electromagnetic wave resistivity measurement while drilling tool with tilted antennas and its application for Geo-steering [ J ]. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(1):44-49.
- [ 9 ] 赵留运,陈清华,刘强. 低电阻率油层研究现状[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1):22-25.  
ZHAO L Y, CHEN Q H, LIU Q. The research on low-resistivity layers [ J ]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(1):22-25.
- [10] 马欢波. 随钻感应测井响应数值计算研究[D]. 西安:西安石油大学, 2011.  
MA H B. A study on numerical modeling of logging response of TRIM [ D ]. Xi ' an: Xi ' an Shiyu University, 2011.
- [11] 刘乃震,王忠,刘策. 随钻电磁波传播方位电阻率仪地质导向关键技术[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5):1767-1775.  
LIU N ZH, WANG ZH, LIU C. Theories and key techniques of directional electromagnetic propagation resistivity tool for geosteering applications while drilling [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(5):1767-1775.
- [12] 吴意明,熊书权,李楚吟,等. 探边工具 AziTrak 在开发井地质导向中的应用[J]. 测井技术, 2013, 37(5):547-551.  
WU Y M, XIONG SH Q, LI CH Y, et, al. Application of AziTrak tool to geosteering of horizontal well development [ J ]. Well Logging Technology, 2013, 37(5):547-551.
- [13] 魏宝君,田坤,张旭,等. 定向电磁波传播随钻测量基本理论及其在地层界面预测中的应用[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10):2507-2515.  
WEI B J, TIAN K, ZHANG X, et al. Physics of directional electromagnetic propagation measurements-while-drilling and its application for forecasting formation boundaries [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(10):2507-2515.
- [14] 龙玲,陈庆,刘飞. 电磁波随钻测量干扰信号消除算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9):2144-2152.  
LONG L, CHEN Q, LIU F. Research on eliminating interference signal algorithm of EM-MWD [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9):2144-2152.
- [15] 刘明亮,朱江森. 数字信号处理对电子测量与仪器的

影响研究 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2014(10):1041-1046.

LIU M L, ZHU J M. Investigation in influence of digital signal processing to electronic measurement and instrument [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014(10):1041-1046.

[16] PENG Q, LI Q H, ZHANG Q. Application status of the technology of logging while drilling [ C ]. Advanced Materials Research, 2014, 1010-1012:1650-1653.

[17] 赵媛,顿月芹,袁建生. 随钻电磁波测井仪器线圈系数设计方法研究 [ J ]. 测井技术, 2011, 35(3):224-229.

ZHAO Y, DUN Y Q, YUAN J SH. On coil system design for MWD electromagnetic wave logging tools [ J ]. Well logging technology, 2011, 35(3):224-229.

### 作者简介



**万勇**, 1979 年出生, 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院讲师, 主要研究方向为随钻方位电磁波电阻率测井仪器研究与开发、计算机测控系统设计。

Email: upcwanyong@163.com

**Wan Yong** was born in 1979, lecturer in College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum. His main research field is the research and development of azimuthal propagation resistivity LWD, and the design of computer measurement and control system.



**张晓彬**, 1992 年出生, 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向为随钻方位电磁波电阻率测井仪器研究与开发。

E-mail: 1044533970@qq.com

**Zhang Xiaobin** was born in 1992, M. Sc. candidate in College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum. His main research field is the research and development of azimuthal propagation resistivity LWD.



**倪卫宁**, 1979 年出生, 2000 年毕业于石油大学(华东), 2006 年获中国科学院半导体研究所微电子学与固体电子学博士学位, 副研究员, 主要从事随钻工具与仪器方面的研究。

E-mail: niwn.sripe@sinopec.com

**Ni Weining** was born in 1979, graduated from China University of Petroleum in 2000, received Ph. D. in microelectronics and solid-state electronics from Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, in 2006, and associate researcher. His main research field is the research on LWD tools and instruments.