

螺绕环式随钻电阻率成像测井仪发射技术研究

贾将^{1,2}, 柯式镇^{1,2*}, 张冰^{1,2}, 康正明^{1,2}, 陈士昌^{1,2}, 梁超伟^{1,2}

1 中国石油大学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)地球物理学院, 北京 102249

* 通信作者, wksz@vip.sina.com

收稿日期: 2018-07-15

本文由“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 螺绕环式激励是一种相较于电极型和线圈型聚焦激励更适合随钻电阻率成像测井的激励方式, 本文针对螺绕环式激励发射技术做出了一系列探究。设计实验对螺绕环式激励的电气特性进行了探究, 结果表明螺绕环式激励装置可以等效为一种多匝对单匝的非理想变压器, 其初次级电压比等于匝数比, 但初次级电流比和功率比具有非线性且存在输出功率上限。从电磁理论出发, 对螺绕环进行了参数优化, 最终选取截面积为 1 cm^2 的铁基纳米晶材料作为磁芯, 用漆包铜线密绕 100 匝制成螺绕环发射装置, 设定激励频率为 1 kHz。基于数字信号处理器 DSP 和直接数字频率合成器 DDS 设计了信号发射电路, 产生频率和幅度可调的交变信号用以驱动螺绕环发射装置。以无磁钢筒代替钻铤, 设计带螺绕环的纽扣电极作接收装置, 用电阻器件代替地层和钻井液泥浆进行物理模拟实验, 实验结果表明测量的视地层电阻和真实电阻之间具有很高的相关性, 所设计的信号发射电路配合螺绕环发射装置适用于随钻电阻率成像测井仪, 相应成果对于螺绕环式随钻电阻率成像仪器的研发具有较强的参考价值。

关键词 螺绕环; 电气特性; 磁芯; 激励条件; 发射电路; 物理模拟

0 引言

近年来, 为了适应高角度井和水平井等愈发恶劣的测井环境, 随钻电阻率测井仪器得以蓬勃发展^[1], 电极型和线圈型两种电流聚焦方式在随钻电阻率测井仪器的发展历程中活跃了很长的时间^[2-3]。1967年, Arps 提出了一种适用于随钻电阻率测量的螺绕环式激励方式^[4-5]。螺绕环式激励方式的电场分布更接近于电极型电阻率测井仪, 相比于感应式电阻率测井仪, 这样的激励方式利于实现高精度的电阻率成像测量。电极型电阻率测井仪的电极需要裸露在仪器外表直接与钻井液接触, 在仪器设计时需要考虑电化学腐蚀及机

械磨损等因素, 工艺难度较大。而螺绕环式激励则规避了这些问题, 是更适合随钻电阻率成像测井仪的激励方式, 越来越多的随钻电阻率测井仪采用这样的激励方式^[6]。

当给发射螺绕环(包含磁芯的绕制线圈)施加交变电流时, 螺绕环上下两侧会感应出电势差, 如图 1 所示。可以将螺绕环等效成一个交变电压源, 电流经过一侧钻铤流入钻井液后流入地层, 最后再经过钻井液从另一侧钻铤流回“电压源”的负极。在距离发射螺绕环一定距离(源距)外放置另一个接收螺绕环, 发射螺绕环激励产生的激励电流将部分穿过接收螺绕环。这部分电流携带了地层的阻抗信息, 当它们穿过接收

引用格式: 贾将, 柯式镇, 张冰, 康正明, 陈士昌, 梁超伟. 螺绕环式随钻电阻率成像测井仪发射技术研究. 石油科学通报, 2018, 04: 399-409
JIA Jiang, KE Shizhen, ZHANG Bing, KANG Zhengming, CHEN Shichang, LIANG Chaowei. Research on transmitting technology of a LWD resistivity imaging tool with annular solenoid excitation. Petroleum Science Bulletin, 2018, 04: 399-409. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.04.036

螺绕环时,同样会在接收螺绕环的绕线上感应出电流,可用通过测量接收螺绕环绕线上的电流值来间接测量穿过螺绕环的电流大小。因此,地层视电阻率可以用下式进行计算:

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

式中, R_a 为地层视电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$; K 为仪器常数,单位为 m^{-1} ; U 为施加给发射螺绕环的电压值,单位为 V ; I 为流经地层后被测量得到的感应电流大小,单位为 A 。

可以简单地用变压器原理解这种测量原理,发射螺绕环视作变压器初级,钻铤和地层组成的电流回

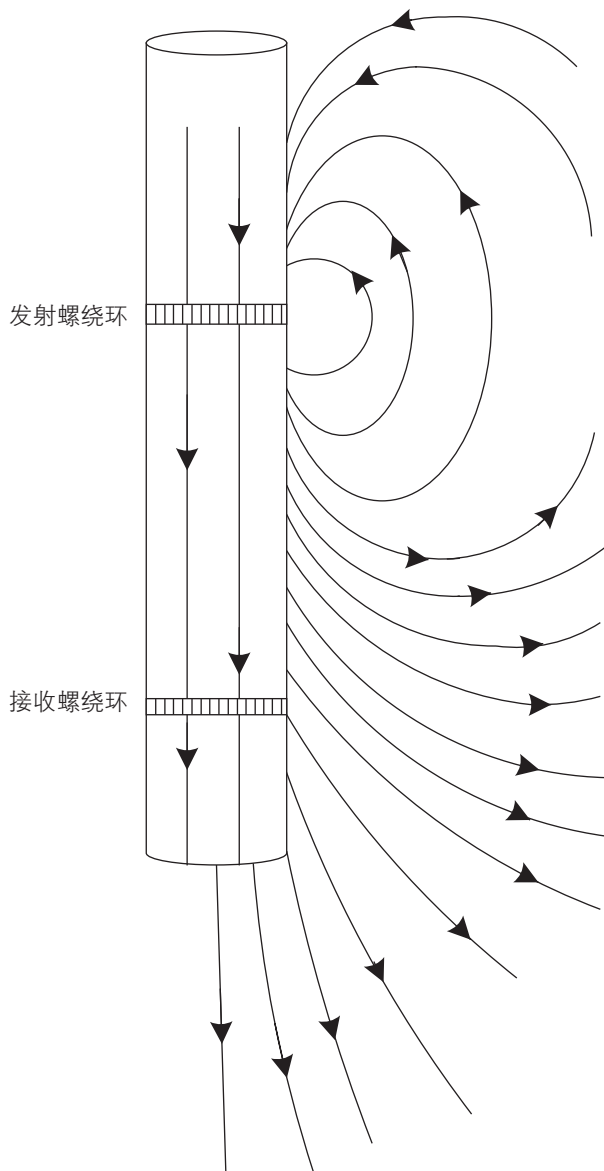


图1 螺绕环式随钻电阻率成像测井仪测量原理

Fig. 1 Measuring principle of LWD resistivity imaging tool with annular solenoid excitation

路视作变压器次级。同理,接收螺绕环可视作另一变压器的次级,地层和钻铤回路则作为初级。如果在钻铤侧面装配同样包含螺绕环的纽扣电极(纽扣电极极柱从螺绕环中心穿过以提供电流路径,如图2所示),便可以进行方位电阻率测量。国内外学者在螺绕环式随钻电阻率测井仪的探测特性^[6-12]、响应机理^[13-16]及数据解释方法^[17]等方面做了大量研究,但没有文献对仪器的具体实现方法进行阐述,本文着眼于螺绕环式随钻电阻率测井仪器的工业化推进,对其发射技术进行探究,以期对商业化的仪器研发提供有益支持。

1 螺绕环优化设计

1.1 螺绕环的电气特性

理想的变压器具有如下电气特性:(1)初次级线圈端电压大小与线圈匝数成正比;(2)初次级线圈中电流大小与线圈匝数成反比;(3)初级输入功率等于次级输出功率(变压器没有功率损耗)。

设计如下简单实验对螺绕环式激励的电气特性进行探究。如图3所示,在锌锰铁氧体磁环上均匀绕制53匝漆包铜线制得简易螺绕环作为初级回路。将螺绕环套在铜棒(模拟无磁钻铤)上,并在铜棒两端串接一个 10Ω 的电阻形成次级回路。通过信号发生器向螺绕环施加频率和幅度固定的交流激励信号,测量并记录初次级端的电压与电流大小,并用示波器观察其波形,实验测量数据如表1所示。实验结果表明:

(1)如图4所示,螺绕环激励装置的初次级电压比值 U_1/U_2 保持稳定,约等于初次级匝数比(次级为1

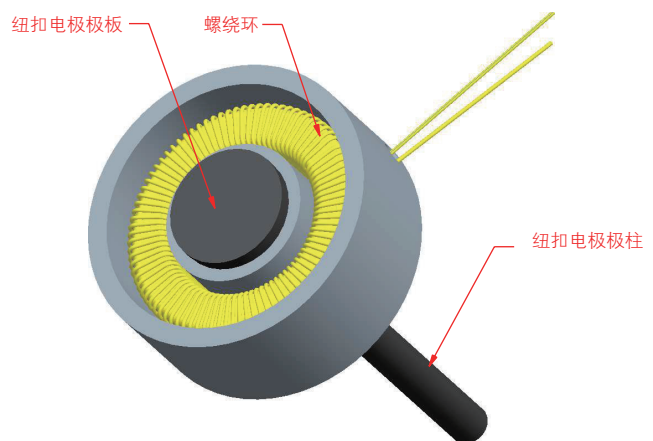


图2 纽扣电极结构示意图

Fig. 2 Schematic of the button electrode structure

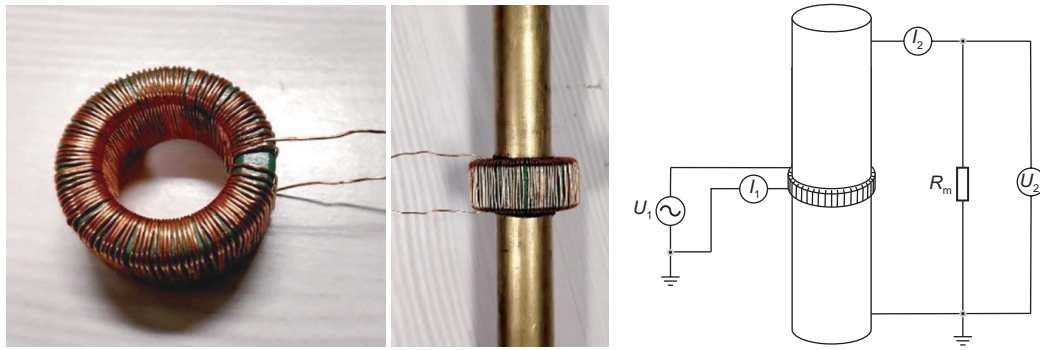


图3 螺绕环式激励装置电气特性测试

Fig. 3 Electrical characteristics test of the annular solenoid excitation device

表1 螺绕环电气特性测试结果

Table 1 Electrical characteristics test results of the annular solenoid excitation device

初级电压 U_1/mV	初级电流 I_1/mA	次级电压 U_2/mV	次级电流 I_2/mA	电压比 U_1/U_2	电流比 I_1/I_2	功率比 P_1/P_2
744.1	0.62	13.9	1.39	53.53	2.24	23.88
2229.2	1.57	41.8	4.18	53.33	2.64	20.13
2973.0	1.93	56.0	5.60	53.08	2.90	18.30
3710.8	2.18	69.8	6.98	53.16	3.20	16.60
5928.5	2.61	112.2	11.22	52.83	4.29	12.30
6675.1	2.70	125.3	12.53	53.27	4.63	11.48
7418.5	2.83	138.6	13.86	53.52	4.89	10.94
8897.3	3.10	166.5	16.65	53.43	5.37	9.95
10 373.6	3.44	196.7	19.67	52.73	5.70	9.24
11 860.2	3.97	223.6	22.36	53.04	5.62	9.42
13 326.0	4.94	249.7	24.97	53.36	5.05	10.56
14 069.0	5.81	264.8	26.48	53.13	4.55	11.66
14 807.0	7.22	279.4	27.94	52.99	3.86	13.70
15 547.0	10.6	294.3	29.43	52.82	2.77	19.04

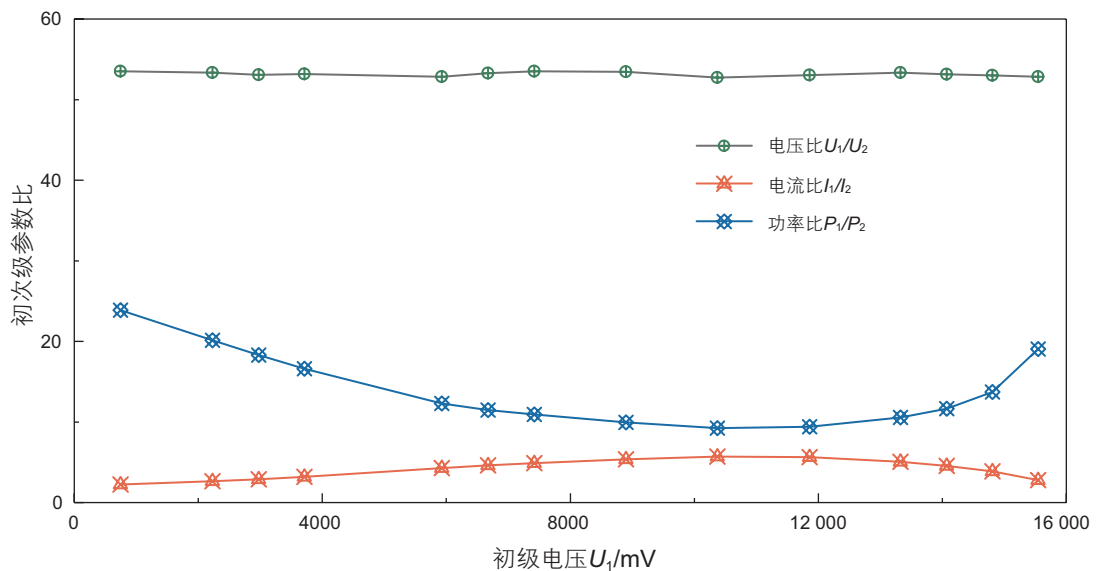


图4 变压器等效验证实验结果(1 kHz激励下测量)

Fig. 4 Transformer equivalent verification experimental result (measured at 1 kHz)

匝), 该值几乎不受激励电压的大小影响, 与理想变压器特性一致。

(2) 与理想变压器不同, 螺绕环激励装置的初次级的电流比值 I_1/I_2 并非定值, 功率比值 P_1/P_2 也远大于 1, 且随着激励电压的增大呈现出先减小后增大的趋势 (如图 4 所示)。这说明螺绕环会在功率转换的过程中消耗功率, 且消耗功率的大小会随着初级激励电压的增加而增加。随着初级激励电压的提升, 输出功率会趋于饱和, 所以初次级的功率比会呈现先降低后增加

的趋势。

(3) 如图 5 所示, 螺绕环的感生电压与励磁电流之间具有明显的非线性特征, 且当初级激励电压增加到一定程度时, 初级电流会发生畸变 (如图 6 蓝色曲线所示), 畸变程度随着激励电压的增加而加剧, 测试过程中也能听到螺绕环发出人耳可闻的鸣叫声。

综上所述, 要进行螺绕环式激励装置的设计, 不能粗略地将其等效为理想变压器, 需要从电磁学角度再深入探究螺绕环的电磁转换过程, 继而对螺绕环的

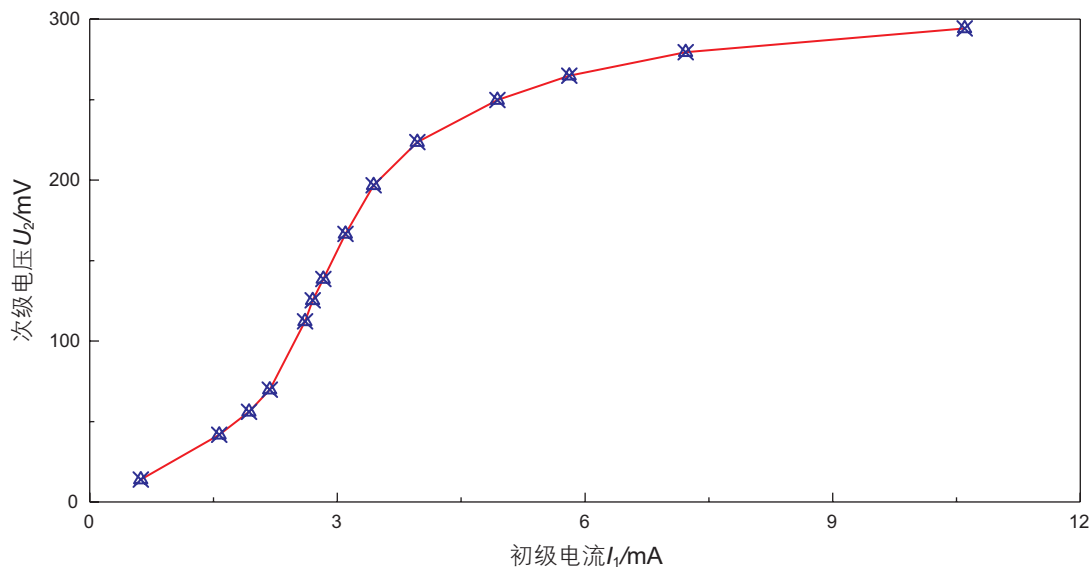


图 5 螺绕环式激励装置输出特性曲线

Fig. 5 Output characteristics of a solenoid excitation device

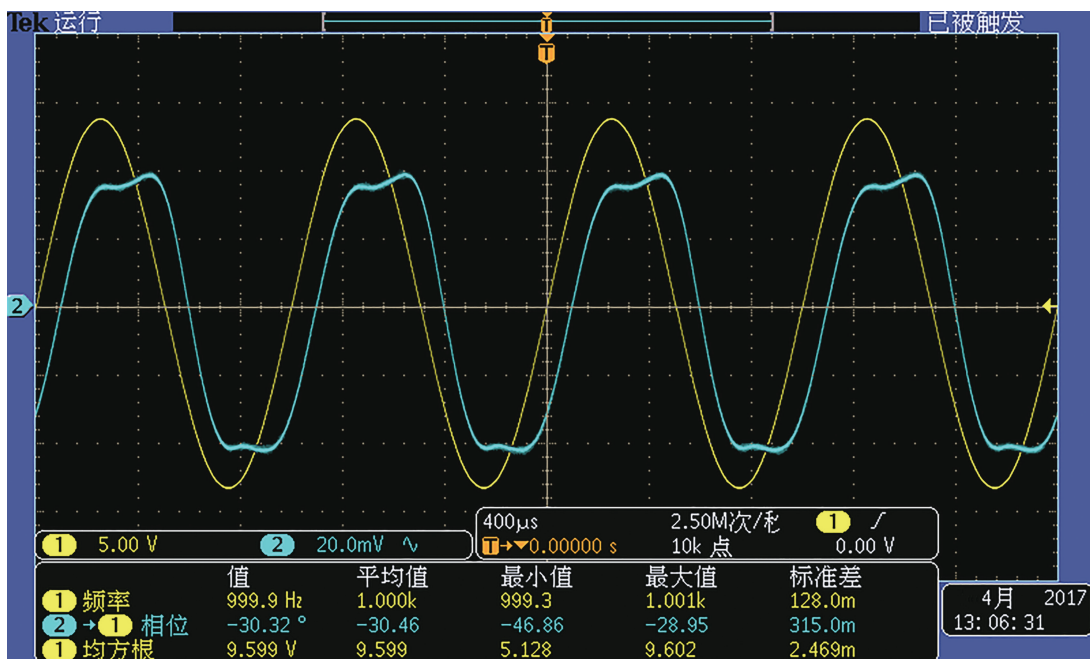


图 6 励磁电流发生畸变

Fig. 6 The distortion of excitation current

结构进行优化设计。

1.2 磁芯的选择

对于螺绕环激励装置这种一个多匝对单匝的非理想变压器，不能通过增加次级匝数来提升输出电压幅度。但是根据电磁感应定律：

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$\phi = B \cdot S \quad (3)$$

式中， E 为感应电动势，单位为V； ϕ 为磁通量，单位为Wb； t 为时间，单位为s； B 为磁感应强度，单位为T； S 为线圈截面积，单位为 m^2 。

可以通过提高磁芯的磁通密度来提升螺绕环激励的输出电压。磁介质一般分为顺磁质、抗磁质和铁磁质，铁磁质的应用最为广泛^[18]。以铁磁质作为螺绕环的磁芯，当给螺绕环通以交变电流时，磁芯中会感应出交变的磁通密度，磁场强度 H 在 $-H_s$ 到 H_s 间周期性变化，磁芯的磁化特征如图7所示。

磁芯材料存在饱和磁通密度上限 B_s ，造成了螺绕环激励装置的输出功率同样存在上限。在进行螺绕环的设计时，螺绕环的最大励磁电流 I_m 对应的磁通密度 B_m 要低于在磁芯饱和磁通密度 B_s ，使螺绕环磁芯处于磁滞曲线线性度较好的区域。

当磁芯达到磁饱和状态后，需要施加一定的反向磁场才能使磁芯的磁通密度回到零，这一反向磁场的强度称为矫顽力 H_c 。矫顽力反映磁介质磁化和退磁的难易程度，其大小反应了磁芯在磁场发生偏转时的能

量损耗。通常磁介质的相对磁导率越大， H_c 越小。使用磁导率较高的磁芯可以增加螺绕环的电感量，降低励磁电流的大小，减少无功损耗。

因此，在对螺绕环进行设计时，需要选择磁导率和饱和磁通密度足够大，矫顽力较小的磁芯材料。铁基纳米晶合金材料是目前综合性能最好的软磁合金，具有饱和磁通密度大，磁导率高，矫顽力低等特点^[19-20](如图8所示)，非常适合作为发射螺绕环的磁芯材料。

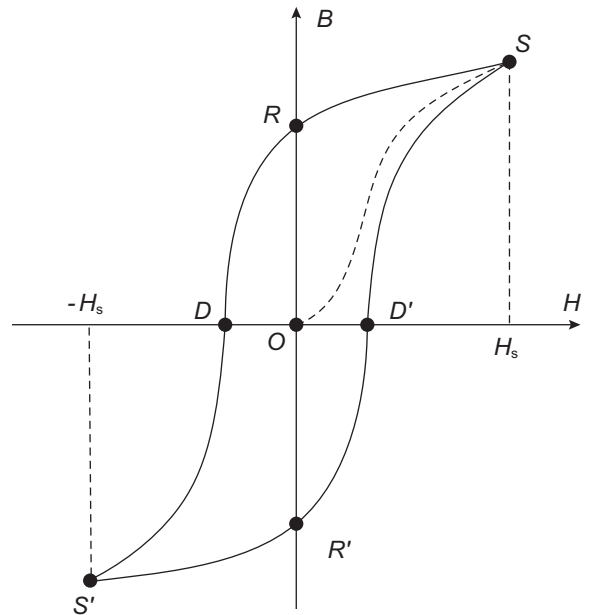


图7 磁芯磁化特性曲线
Fig. 7 Magnetization characteristics of the magnetic core

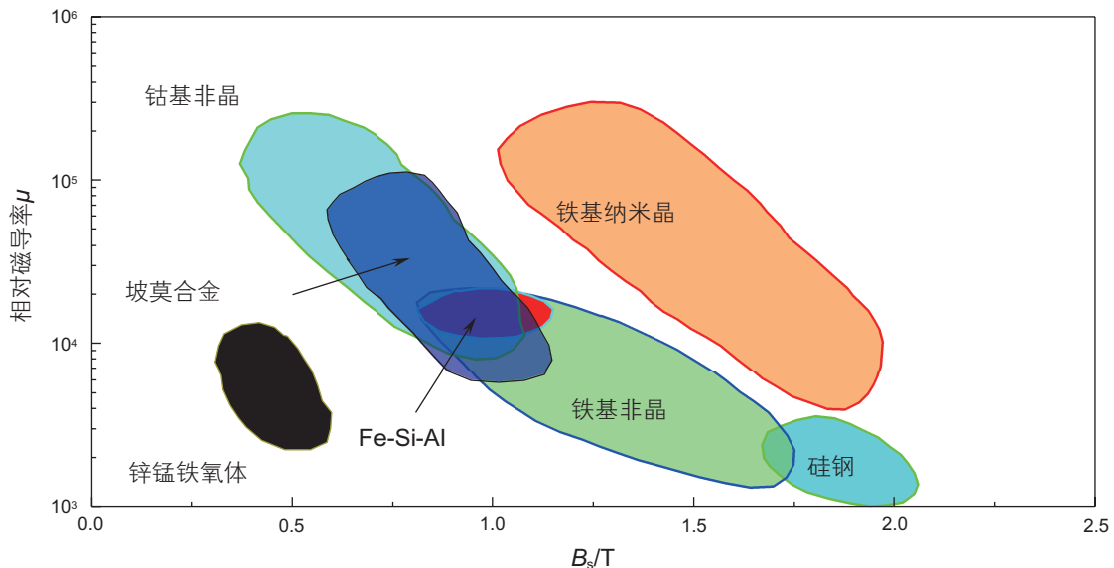


图8 软磁材料磁性特征对比
Fig. 8 Comparison of magnetic characteristics of soft magnetic materials

1.3 匝数及激励条件设置

除了磁芯材料外,螺绕环的匝数及激励条件也会对其电气特性产生影响。如果给螺绕环施加一个简谐电压激励 $e_s = E_s \sin(\omega t)$,螺绕环会感应出一反向的电势 $e_m = E_m \sin(\omega t)$ 。根据基尔霍夫电压定律有:

$$e_s = -e_m \quad (4)$$

根据法拉第电磁感应定律:

$$e_m = \frac{d\phi_m}{dt} \quad (5)$$

可得:

$$\phi_m = -\frac{E_m}{\omega} \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$B_m = -\frac{E_m}{\omega NS} \cos(\omega t) \quad (7)$$

式中, S 为磁芯的截面积,单位为 m^2 ; N 为初级线圈匝数。

假设磁芯内部的磁通密度处处相等,即磁芯被均匀磁化。根据安培环路定理:

$$B_m = \frac{N\mu i_m(t)}{l} \quad (8)$$

式中, l 为磁芯长度,单位为 m ; μ 为磁导率,单位为 $H \cdot m^{-1}$ 。

由于磁导率 μ 具有非线性,因此励磁电流 $i_m(t)$ 不再是一简谐量,所以会表现出图6所示的畸变现象。磁芯磁通密度峰值 B_{max} 与励磁电压有效值之间的关系可以由式(6)得到:

$$E = \sqrt{2}\pi f N B_{max} S \quad (9)$$

式中, f 为励磁电压的频率,单位为 Hz 。

这一规律同样适用于次级感生电势,对于螺绕环激励装置,次级为单匝,上式变为:

$$E = \sqrt{2}\pi f B_{max} S \quad (10)$$

可见,螺绕环激励装置的输出电压同样存在上限。输出电压的提升有利于提高测井仪器的信噪比,提升螺绕环的输出电压可以从以下3方面实现:(1)选择高饱和磁通密度磁芯;(2)提高信号的激励频率;(3)增大磁芯的截面积。磁芯材料选定的情况下,其饱和磁通密度即为定值。提升激励信号的频率,在增加次级输出的同时,也会增加螺绕环的功率损耗,降低转换效率。因此,增加磁芯的截面积是增加螺绕环输出电压的最佳方案。

螺绕环匝数的增加一方面会增加初级线圈的电感

量,降低励磁电流,避免励磁电流在磁芯接近饱和时发生畸变,产生尖峰电流对激励源造成损害。另一方面会使初次级电压比例增大,匝数多的螺绕环需要加更大的激励电压才能获得同样的输出电压幅度,因此,螺绕环的匝数应该适中。

综合上述讨论,设定激励电压频率为 1 kHz ,根据钻铤尺寸,选择尺寸为 18 cm (内径) \times 19 cm (外径) \times 2 cm (高)的环形铁基纳米晶合金磁芯(截面积为 1 cm^2),用漆包铜箔均匀密绕 100 匝制成螺绕环。如图9所示,漆包线恰好绕满磁芯,将漏磁降至最低。

2 发射电路设计

信号发射电路相当于一个信号源,输出具有足够功率的频率和幅度可调的高质量激励信号,激励发射螺绕环完成测量信号的发射。信号发射系统包含主控电路、信号源产生电路和功率放大电路3个主要部分,如图10所示。主控部分实现信号频率和幅度的调节以及与控制指令的发送和接收;信号源产生电路用于产生高质量的正弦交流信号;功率放大电路将产生的信号源经功率放大后用于驱动发射螺绕环。

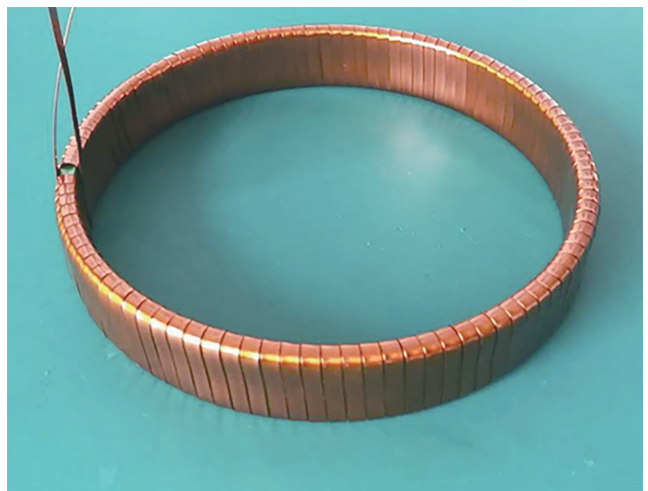


图9 螺绕环实物图

Fig. 9 The annular solenoid excitation

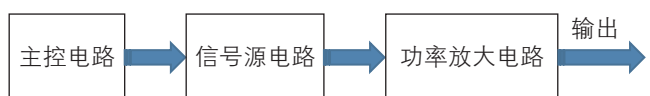


图10 信号发射电路系统框图

Fig. 10 System diagram of signal transmitting circuit

主控电路以TMS320F28335作为主控DSP芯片,其精度高,外设丰富,开发简单方便,使用稳定高效。主控电路包括DSP最小系统电路、电源电路及保护电路、串口通信电路等。电源电路的核心是双通道低压差线性稳压器TPS767D301,将其5V的输入电压稳压至3.3V和1.8V以供DSP和DDS芯片正常运转。SCI串口通信电路用于与上位机控制软件进行通信,可以动态的设置信号发射电路的工作状态。SPI串口负责向信号源电路模块发送控制指令,实现配置和控制信号发射的功能^[9]。

信号源电路选取AD9952作为DDS芯片,外接40MHz有源晶振,在主控电路的控制下产生相应波形信号,经滤波调理后输出至功率放大电路。单端电平经单端转差分芯片MC100LEVL16转换为差分电平后输入至DDS外部时钟差分引脚以降低干扰。

功率放大电路为两级放大结构。初级为由AD8009搭建的差分放大电路,将信号源电路输出的波形进行4倍的电压幅度放大。第二级为由PA119CE搭建的比例放大电路,放大倍数为10倍,对初级放大电路的输出信号进行功率放大以提高驱动能力。

3 实验测试

设计如11图所示的装置进行模拟地层电阻率的测量实验。以无磁钢质套筒模拟钻铤,将螺绕环套在钢筒左端,并将钢筒左端设为参考地。在钢筒右侧安装纽扣电极用以测量电流,测量原理与螺绕环激励原理相似。在钻铤的左端和纽扣电极极板之间连接电阻 R_t 代表流经地层最终被纽扣电极接收到的那部分电流所反应的地层阻抗,即随钻测井中的方位电阻率的大小。用另一个电阻 R_m 连接钢质套筒的两端,模拟感生电流从发射螺绕环左端的“钻铤”流出后又回到右端“钻

铤”这一路径上的整体阻抗。由于泥浆的存在,这一路径的阻抗较小,取 $R_m = 10 \Omega$ 。

螺绕环的磁芯的截面积 $S = 1 \text{ cm}^2$,其饱和磁通密度为0.8T,设定激励频率为1kHz,根据式(9)计算可得该发射螺绕环在钻铤上可产生的最大电势 $E_m = 355 \text{ mV}$ 。为防止磁芯饱和造成励磁电流过大,将输出电势设定在200mV左右,此时初级需要的激励源电压为20V左右。

用信号发射电路板为发射螺绕环提供稳定电压激励 U_1 ,设定发射信号频率为1kHz。用变阻箱来代替方位电阻 R_t ,改变其阻值大小,同时记录流经纽扣电极极柱的电流值 I_t 、纽扣电极螺绕环连接的电流前置放大板输出的电压值 V_{out} 以及套筒两端的电压差 U_t 。

实验测试结果如表2所示,螺绕环上的激励电压 U_s 和钻铤与地层回路上的感生电压 U_t (套筒两端的电压差)的有效值比值大致等于螺绕环的匝数。电流前置放大板的输出电压有效值 V_{out} 与极柱上流经的电流值 I_t 之间有很好的线性关系,如图12所示。因此,实际的随钻仪器可以通过测量纽扣电极螺绕环电流前置放大板的输出电压 V_{out} 来反映纽扣电极极柱上的电流 I_t 的大小,即:

$$V_{out} = K_1 I_t \tag{11}$$

式中, K_1 为常系数,其大小与纽扣电极内螺绕环的匝数和接收电路的放大倍数有关。则视地层电阻 R_{ta} 可由下式估算:

$$R_{ta} \approx \frac{K_1 U_s}{\sqrt{2} N V_{out}} \tag{12}$$

式中, N 为激励螺绕环的匝数。

实验结果表明, R_{ta} 和 R_t 之间具有极强的相关性,趋势线斜率接近1,数据点大致分布在直角坐标系第一象限的45°角平分线上(如图13所示)。这一结果说

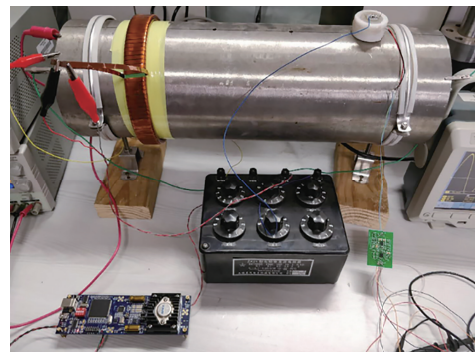
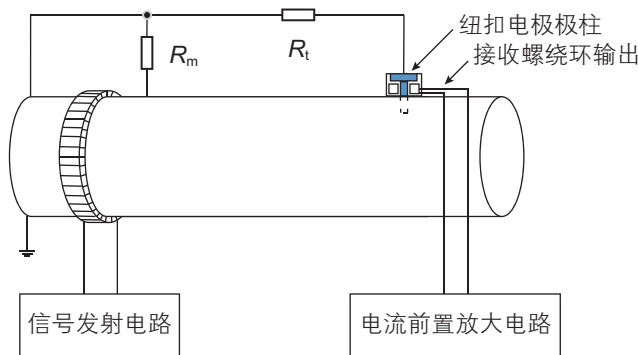


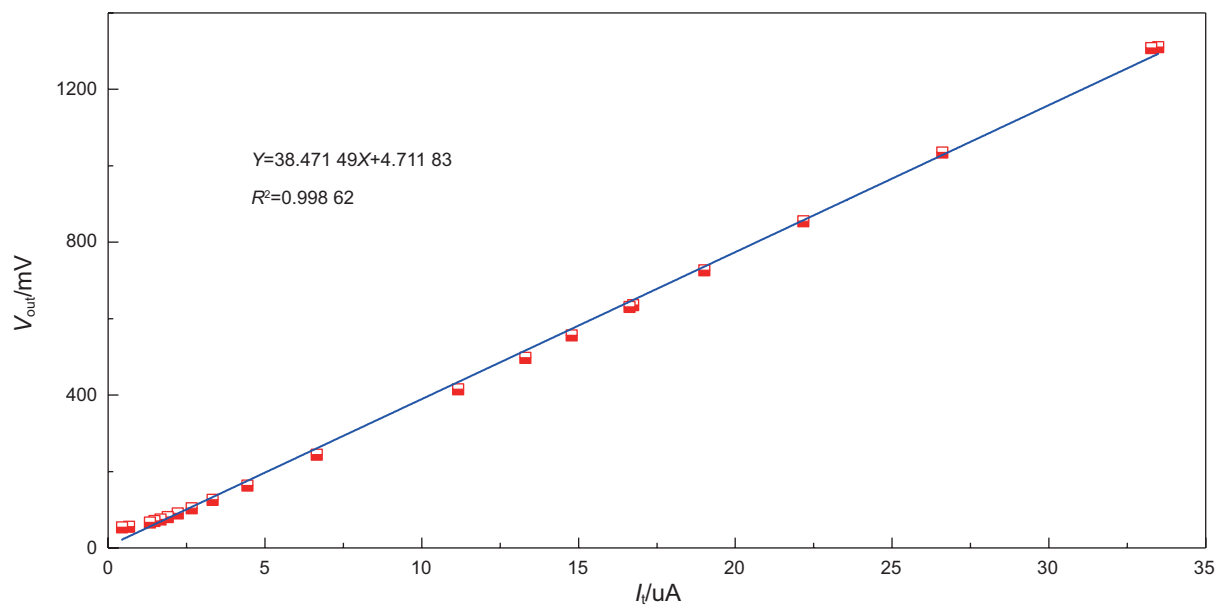
图 11 发射装置物理模拟实验

Fig. 11 Physical simulation experiment of the solenoid excitation device

表2 物理模拟实验测量结果

Table 2 Physical simulation test results

$R_t / k\Omega$	U_s / V	U_t / mV	V_{out} / mV	$I_t / \mu A$	U_s / U_t	$R_{ta} / k\Omega$
1	3.484	33.48	1310.1	33.48	104.06	1.00
2	3.484	33.48	635.5	16.74	104.06	2.00
3	3.48	33.48	415.2	11.16	103.94	3.00
4	13.85	133.03	1308.1	33.26	104.11	4.00
5	13.85	133.00	1034.5	26.6	104.14	5.00
6	13.85	133.02	854.5	22.17	104.12	6.00
7	13.85	133.05	726.7	19.01	104.10	7.00
8	13.85	133.04	630.4	16.63	104.10	8.00
9	13.85	133.02	555.9	14.78	104.12	9.00
10	13.85	133.02	497.3	13.30	104.12	10.00
20	13.85	133.06	244.0	6.65	104.09	20.01
30	13.85	133.08	163.6	4.44	104.07	29.97
40	13.85	133.10	125.7	3.33	104.06	39.97
50	13.86	133.10	103.8	2.66	104.13	50.04
60	13.86	133.12	90.2	2.22	104.12	59.96
70	13.86	133.18	81.0	1.90	104.07	70.09
80	13.86	133.24	74.8	1.67	104.02	79.78
90	13.86	133.14	70.6	1.48	104.10	89.96
100	13.86	133.18	66.6	1.33	104.07	100.14
200	13.86	133.20	55.7	0.67	104.05	198.81
300	13.86	133.20	54.0	0.44	104.05	302.73

图12 纽扣电极极柱电流 I_t 与信号放大电路输出电压 V_{out} 的相关性Fig. 12 Correlation between I_t and V_{out}

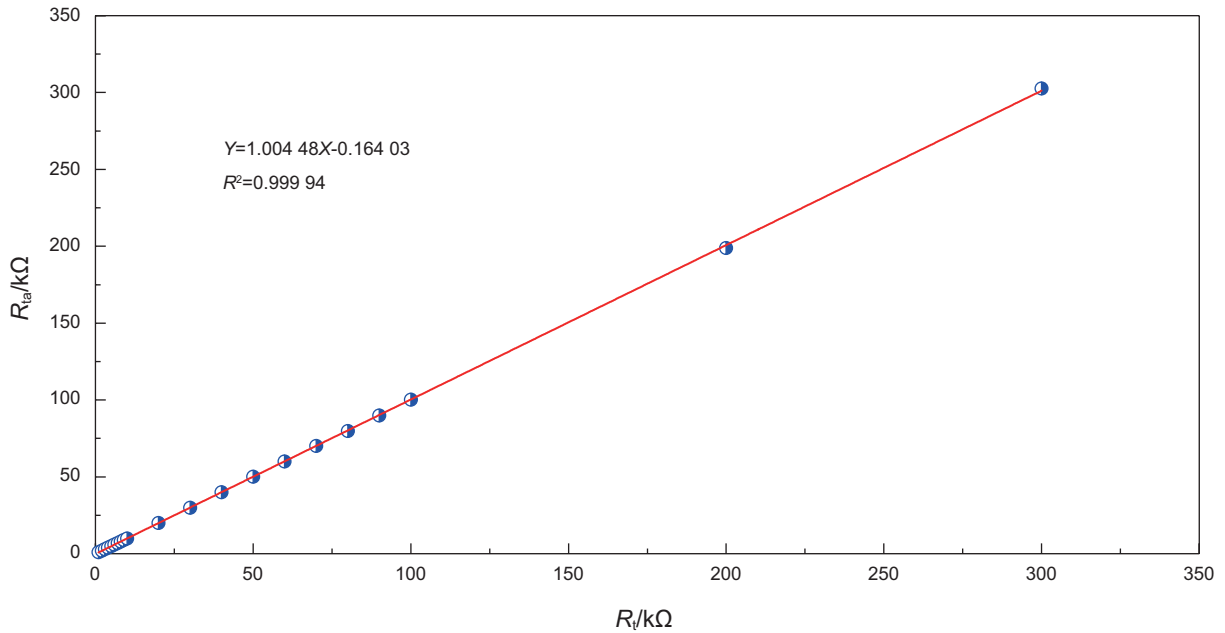


图 13 模拟地层电阻 R_t 与视地层电阻 R_a 的相关性
Fig. 13 Correlation between R_t and R_a

明设计的螺绕环激励装置在信号发射电路的驱动下，配合测量装置可以对地层电阻率进行准确地测量。

4 结论

(1)螺绕环式激励装置可以等效为多匝对单匝的非理想的变压器，初次级电压比等于匝数比，但初次级的电流比和功率比具有非线性特征。由于磁芯具有饱和磁通密度上限，螺绕环存在功率损耗，输出功率也存在上限。

(2)螺绕环磁芯材料的截面积、磁性参数(相对磁

导率、饱和磁通密度和矫顽力)的大小、螺绕环绕线匝数和激励信号的频率都会影响螺绕环的电气特性，增大磁芯截面积是提升螺绕环输出电压的最佳途径。选择截面积为 1 cm^2 的环形(适应钻铤尺寸)铁基纳米晶材料作为磁芯，用漆包铜线绕制 100 匝制成发射螺绕环可以满足设计需求。

(3)基于 DSP 和 DDS 设计了输出频率和幅度可调的信号发射电路，利用无磁钢套筒模拟钻铤，以电阻器件等效地层和钻井液，设定激励频率为 1 kHz 进行物理模拟实验，实验结果证实该设计方案可以实现地层电阻率测量，可靠性强。

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] ARPS J J. Inductive resistivity guard logging apparatus including toroidal coils mounted on a conductive stem: US, US 3305771 A [P]. 1967.

[5] BONNER S, BAGERSH A, CLARK B, et al. A new generation of electrode resistivity measurements for formation evaluation while drilling[J]. Proceedings of the Nutrition Society 1994, 5: 263-274.

[6] PRAMMER M G, MORYS M, KNIZHNIK S, et al. A high-resolution LWD resistivity imaging tool-feld testing in vertical and highly deviated boreholes[J]. Petrophysics, 2009, 50(01): 49-66.

[7] ALLOUCHE M, CHOW S, DUBOURG I, et al. High-resolution images and formation evaluation in slim holes from a new log-

- ging-while-drilling azimuthal laterolog device[C]. SPE EUROPEC/ EAGE Annual Conference and Exhibition, Barcelona, 2010.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ERIC Z, TOTAL A, AHMET A. Real-time formation evaluation using advanced high resolution LWD resistivity imaging, formation testing, and traditional methods[C]. ADIPEC Technical Conference, Abu Dhabi, 2013.
- [11] 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, 04: 457-465. [KANG Z M, KE S Z, LI X, et al. The detection characteristics study of the at-bit resistivity logging tool[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 04: 457-465.]
- [12] 李铭宇, 柯式镇, 康正明, 等. 螺绕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(1): 128-134. [LI M Y, KE S Z, KANG Z M, 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(1): 128-134.]
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] GRUPPING T I F, WAGSTAFF J D. Recent performance of the dual-resistivity MWD tool[J]. SPE formation evaluation, 1990, 5(02): 171-176.
- [17] 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.
- [18] 梁灿彬, 秦光荣, 梁竹健. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 296-307. [LIANG C B, QIN G R, LIANG Z J. Electromagnetics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 296-307.]
- [19] 纪松, 钱坤明, 张延松, 等. 非晶/纳米晶软磁材料及其应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005(01): 51-55. [JI S, QIAN K M, ZHANG Y S, et al. Amorphous/ nanocrystalline soft magnetic materials and their applications[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005(01): 51-55.]
- [20] 周庆华, 周勇, 周志敏, 等. 纳米晶磁芯螺线管微电感的模拟研究[J]. 电子元件与材料, 2008(09): 14-17. [ZHOU Q H, ZHOU Y, ZHOU Z M, et al. Simulation of micro-inductance of nanocrystalline core Solenoid[J]. Electronic Components and Materials, 2008(09): 14-17.]

Research on transmitting technology of a LWD resistivity imaging tool with annular solenoid excitation

JIA Jiang^{1,2}, KE Shizhen^{1,2}, ZHANG Bing^{1,2}, KANG Zhengming^{1,2}, CHEN Shichang^{1,2}, LIANG Chaowei^{1,2}

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

2 College of Geophysics, China University of Petroleum-Beijing, Beijing, 102249, China

Abstract A series of developments has been made on annular solenoid excitation. This is an excitation method that is more suitable for a resistivity imaging logging-while-drilling (LWD) tool than the traditional electrode-type and coil-type focusing excitation. Experiments were carried out to investigate the electrical characteristics of an annular solenoid. The results show that an annular solenoid excitation device can be equivalent to a sort of multiple turn to single turn non-ideal transformer. The voltage ratio is equal to the turn ratio of the primary-to-secondary windings but the current ratio and power ratio are nonlinear and there is an upper output power limit. The annular solenoid was optimized based on electromagnetic theory. An annular solenoid excitation device was fabricated by using enameled copper wire around a magnetic core of iron-based nanocrystalline material

with a cross-sectional area of 1 cm^2 for 100 turns and the excitation frequency was set to 1 kHz. The signal transmitting circuit is designed based on a DSP (digital signal processor) and a DDS (direct digital frequency synthesizer) to generate an alternating voltage with adjustable frequency and amplitude. The physics simulation experiment was carried out with resistances instead of the formation and drilling mud. A non-magnetic steel cylinder was used to replace the drill collar and a button electrode with an annular solenoid was designed as the receiving device. The results show that there is a high correlation between the measured resistance mimicking the formation and the real resistance. It proves that the signal transmitting circuit and the annular solenoid excitation device are suitable for a LWD resistivity imaging tool and the corresponding results are a useful reference for its further development.

Keywords annular solenoid; electrical specification; magnetic core; excitation conditions; signal transmitting circuit; physics simulation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.04.036

(编辑 付娟娟)