

导向钻井工具中电能传输用旋转式变压器设计

周 静, 高建邦, 饶 飞, 尚海燕

(西安石油大学电子工程学院, 陕西西安 710065)

摘 要:在导向钻井过程中,为保证导向钻井工具中旋转的主轴与不旋转套之间电能传输稳定,根据导向钻井工具的机械结构和空间要求设计了旋转式可分离变压器。通过理论分析,选择铁合金材料作为磁芯材料;根据 ANSYS 仿真,确定变压器初级和次级绕组之间的间隙为 1 mm,旋转变压器的最佳工作频率为 38 kHz;通过分析,选择初级串联次级并联型补偿电路,并根据变压器的互感模型计算了补偿电路的电容。不同输入功率下旋转变压器传输效率的室内测试结果表明,最佳输入功率约为 150 W,此时变压器的动静态传输效率都不低于 82%,而当输入功率大于 200 W 小于 300 W 时,传输效率不足 80%。这表明,所设计的旋转变压器可以应用到旋转导向钻井系统中,但该变压器在输入功率高时传输效率较低,达不到 80%的工程要求,还需进行改进。

关键词:导向钻井 旋转式变压器 分离式变压器 电能传输

中图分类号:TE927 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)01-0117-05

The Design of the Rotary Transformer for Power Transmission in Steering Drilling Tool

Zhou Jing, Gao Jianbang, Rao Fei, Shang Haiyan

(School of Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: To ensure the stability of electric power transmission between rotating spindle and non-rotating sleeve in steering drilling, a rotary separable transformer was designed according to the mechanical structure and space requirements of relevant steering tools. Iron alloy was chosen as the magnetic core material through theoretical analysis, and the clearance between primary winding and secondary winding was determined to be 1 mm and the optimum working frequency of the transformer to be 38 kHz, based on ANSYS simulation. Moreover, the primary series+secondary parallel compensation circuit was adopted, and its capacitance with the mutual inductance model of the transformer was calculated. Finally, the transmission efficiency of the transformer in laboratory under different input power was tested. The results showed that the optimum input power was about 150 W, under which both dynamic and static transmission efficiencies of the transformer were not less than 82%. When the input power was greater than 200 W and less than 300 W, the transmission efficiency was less than 80%. This suggested that the rotary transformer could be applied to the rotary steering drilling system, but it should be improved since its transmission efficiency was low (less than 80%) under high input power.

Key words: steering drilling; rotary transformer; detachable transformer; power transmission

旋转导向钻井是在钻柱旋转状态下用近钻头处的导向钻井工具控制钻头钻进方向的钻井技术。旋转导向钻井克服了滑动导向钻井的不足,更适合钻进复杂地层^[1-4]。导向钻井工具(可控偏心器)利用不旋转套上的可控翼肋在不同方向上的伸出量达到控制井眼轨迹的目的,是旋转导向钻井系统的重要部件。翼肋由不旋转外套上的电机泵推动。在钻柱高速旋转的情况下,必须给位于不旋转外套中的电路系统持续稳定地供电。

非接触电能传输技术是基于电磁感应原理的一

收稿日期:2014-04-04;**改回日期:**2014-12-06。

作者简介:周静(1964—),女,1985年毕业于西北电讯工程学院电路与系统专业,1988年获西安电子科技大学信号与处理专业硕士学位,教授,主要从事旋转导向智能钻井系统的研究。

联系方式:(029)88382636,xtcs2636@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油田及煤层气开发”专题“旋转导向及随钻测录、酸性气层测试技术与装备”(编号:2011ZX05021-005)部分研究内容。

种全新电能无线传输技术。导向钻井工具的主轴和不旋转外套之间存在相对转动,不宜用导线连接,因此可将非接触电能传输技术应用到导向钻井工具中。自20世纪80年代非接触式电能传输概念提出至今,国内外进行了大量的相关研究^[5-6]。国外非接触式电能传输技术已经很成熟,并在石油钻井中得到应用。国内对非接触电能系统的研究起步晚,且研究较少,相关产品处于起步阶段。非接触电能传输系统由发射端电路处理模块、旋转变压器和接收端电路处理模块等3部分组成。目前大多数研究集中在电路处理模块改进上^[7-9],很少从变压器本身入手来提高系统的电能传输效率。为此,笔者根据旋转式变压器的原理,从旋转变压器的机械结构、磁芯材料、线圈设计等多方面入手,提高变压器的耦合系数、降低变压器的无功损耗、增强变压器的功率输出能力。

1 导向钻井工具中的非接触电能传输系统

非接触感应电能传输系统是一种全新的传输技术,通过电磁感应耦合的方式传输电能。导向钻井工具中非接触感应传输系统的组成如图1所示。

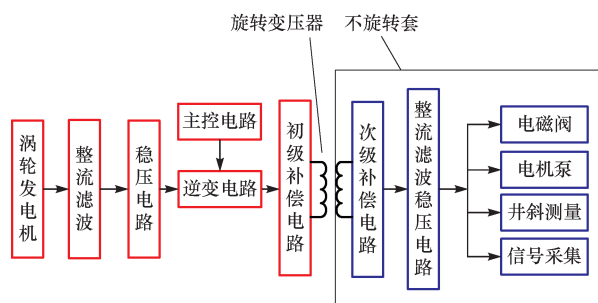


图1 非接触电能传输系统

Fig. 1 Contactless power transmission

旋转变压器的初级和次级绕组之间有空气磁路,漏感较大,在低频段电能传输效率低。导向钻井工具在井下工作时,能量源于涡轮发电机产生的交流电,而涡轮发电机所产生交流电的频率低,需要对其处理后再输送到旋转变压器的初级绕组。低频交流电先通过整流滤波电路变成稳定的直流电,再通过高频逆变电路产生高频交流电输送至变压器的初级绕组。通过电磁感应在次级绕组上得到感应电动势,经过整流滤波稳压后给用电设备供电。

旋转变压器和常规变压器在原理上类似,都是

应用电磁感应原理实现电能从变压器初级绕组到次级绕组的变换。但旋转式可分离变压器的初级绕组和次级绕组是分离的,其漏感大、耦合系数低,所以设计出性能优良的旋转式可分离变压器是实现非接触感应电能传输的关键。

2 旋转变压器的设计过程

2.1 变压器的机械结构

非接触电能传输系统的主要形式有滑动式^[10]、旋转式^[11]以及多线圈平台式^[12]3种形式。由于井下环境特殊,考虑到导向钻井工具的机械结构,选用旋转式传输系统,内环(变压器的初级绕组)安装在旋转的主轴上,外环(变压器的次级绕组)安装在不旋转外套上。

旋转变压器初级绕组与次级绕组之间的间隙越大,磁阻就会越大,空气中消耗的能量就越多,因而导致变压器的性能变低。设置旋转变压器输出电压15 V,频率30 kHz,负载10 Ω ,改变变压器初级绕组与次级绕组的间隙,利用ANSYS软件分析变压器传输效率与初级绕组和次级绕组间隙的关系,结果见图2。

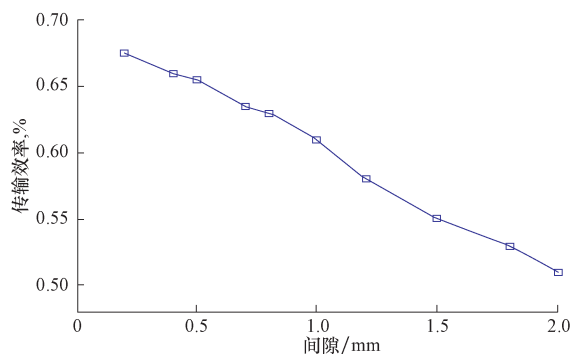


图2 变压器传输效率与初次级绕组间隙的关系

Fig. 2 Relationship between transmission efficiency of the transformer and primary-secondary winding clearance

从图2可以看出,变压器的传输效率随着间隙的增大而减小,所以在机械结构允许的情况下应尽量减小初级绕组与次级绕组之间的间隙。

2.2 磁芯材料的选取

磁芯是由各种氧化铁混合物组成的一种烧结磁性金属氧化物,主要作用是增强电磁体的磁感应强度,是高频变压器中的重要部件。合适的磁

芯能扩大使用温度范围、降低损耗和成本。选择磁芯的标准是既要有软性磁材料的特性(具有高的磁导率、高电阻率和低铁损),又要适合于加工和研磨为合适的尺寸(符合导向钻井工具的机械结构),而且要耐高温高压。

最初使用的变压器磁芯材料为铁氧体,但铁氧体价格高,不易加工而且加工周期长。随后采用非晶磁芯,其具有优异的磁性、耐腐蚀性、耐磨性和机电耦合性能,强度和电阻率高,而且易于加工(实验室内部就可以进行加工)。但非晶磁芯是带状的(其电阻率很低,需要做成片状提高电阻率,减少涡流损耗)不利于加工成所需的形状,且不能保证加工精度,因而不能保证间隙足够小。最后采用铁合金材料,其饱和磁感应强度在 1.5 T 左右,矫顽力较小,磁导率可达 45×10^4 H/m,磁损耗也小,耐高温,硬度较大,并且易于加工,成本相对较低,十分实用。

2.3 绕组线圈的设计

绕组的绕制方式对变压器性能有较大影响。笔者设计的变压器是传输逆变电路输出的高频方波信号,所以要求绕组具有高度对称性,绕组之间的耦合性要强,并且分布电容要小。在设计绕组线圈时应注意减小变压器的漏感,主要措施有减少匝数、增加绕组高度和减小绕组间的绝缘厚度。

笔者设计旋转变压器传输的信号是高频方波信号,表达式为:

$$U_1 = 4 \times 10^{-8} f B_m S_c N_1 \quad (1)$$

式中: U_1 为初级绕组外加电压的幅值, V; f 为工作频率, Hz; B_m 为工作磁感应强度, T; S_c 为磁芯有效截面积, cm^2 ; N_1 为初级绕组线圈的匝数。

磁芯有效截面积 S_c 的表达式为:

$$S_c = K_c S \quad (2)$$

式中: K_c 为磁芯填充系数,一般取 0.50~0.95; S 为磁芯几何截面积, m^2 。

由式(1)得初级绕组线圈匝数 N_1 :

$$N_1 = 10^8 U_1 / (4 f B_m S_c) \quad (3)$$

由输出电压 U_2 计算出可分离变压器次级电压幅值 U_2 ,进而求得次级绕组线圈的匝数 N_2 :

$$N_2 = (U_2 N_1) / U_1 \quad (4)$$

最后计算出线圈导线截面积 S_u :

$$S_u = I / j \quad (5)$$

式中: I 为流过某个线圈的有效电流, A; j 为导线许可的电流密度, A/m^2 。

3 变压器的最佳工作频率

通过 ANSYS 软件对设计出的旋转变压器进行仿真,寻找变压器的最佳工作频率。在仿真的基础上对变压器进行试验,以获得变压器实际工作中的最佳工作频率。

设置旋转变压器初级绕组与次级绕组的间隙为 1 mm,输出电压 15 V,负载为 10Ω ,改变电压输出频率,模拟频率对旋转变压器传输效率的影响,并与试验数据进行对比,结果见图 3。

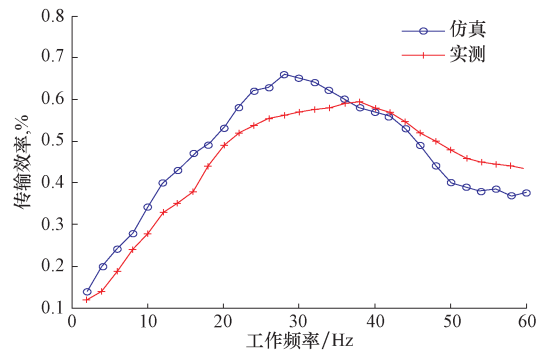


图 3 变压器工作频率与传输效率的关系

Fig. 3 Relationship between work frequency and transmission efficiency of the transformer

由图 3 可知:旋转变压器的工作频率为 38 kHz 时,实际测试传输效率最大达到 59.6%;工作频率为 28 kHz 时,仿真传输效率最大达到 66.5%。仿真传输效率和实测传输效率有一定误差的原因是变压器的实际工作参数与 ANSYS 仿真的参数略有不同,但是二者都在某一频率达到最大,为寻找最优频率提供了依据。变压器实际工作时,工作频率尽量选在实测传输效率最大的频率附近。这里变压器的工作频率选择 38 kHz。

4 补偿电路的设计

4.1 补偿电路的原理

为了使变压器处于最佳工作状态,应该设计出最优的线圈补偿电路。所谓补偿电路就是使电路工作在谐振状态,电路呈纯阻性。初、次级线圈同时增加补偿电路可以更好地改善系统的阻抗特性,而两侧补偿电容在电路中起不同作用^[13]。次级补偿电容能提高系统的负载能力,此时次级电路为 LC 电路,而且工作在次级谐振状态,变压器的功率传输能力达到最高。初级绕组侧添加补偿电容后,初级电

路工作在次级谐振频率下,电路呈纯阻性,可降低能量损耗。

初级串联型电路中,初级绕组侧补偿电容的大小与负载无关,所以当负载电阻变化时,变压器的谐振频率不会变化,依旧工作在最佳工作点上,而初级串联次级并联型补偿电路在谐振点处阻抗小,可以从电源处获得更多的有功功率,所以选择初级串联次级并联型补偿电路(见图4)。

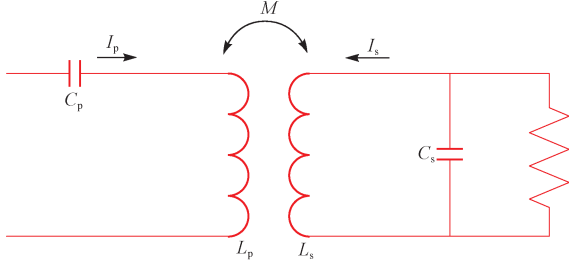


图4 初级串联补偿电路

Fig. 4 The primary and secondary compensation circuit

分析次级等效电路,次级电路的总导纳为:

$$Y = \frac{1}{R} + j\left(\omega C_s - \frac{1}{\omega L_s}\right) \quad (6)$$

式中: \$Y\$ 为次级电路的总导纳, \$1/\Omega\$; \$R\$ 为负载电阻, \$\Omega\$; \$L_p\$ 为初级电感, H; \$L_s\$ 为次级绕组电感, H; \$C_s\$ 为次级绕组侧补偿电容, F, \$\omega\$ 为角频率, rad/s

当补偿电容与次级绕组电感处于谐振状态时,次级电路的总导纳虚部为零,这时 \$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}\$, 所以次级并联电路的补偿电容 \$C_s\$ 为:

$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 L_s} \quad (7)$$

次级绕组反映到初级绕组的电压 \$\dot{U}_{2-1}\$ 为:

$$\dot{U}_{2-1} = -j\omega M \dot{I}_s \quad (8)$$

式中: \$M\$ 为互感系数; \$\dot{I}_s\$ 为初级电流, A。

\$-j\omega M \dot{I}_s\$ 等同于输入电压 \$\dot{U}_p\$ 的负载,因此可以用反射阻抗的形式代替,则次级绕组反射到初级绕组的阻抗为:

$$Z_r = -\frac{j\omega M \dot{I}_s}{\dot{I}_p} = \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R}}} = \frac{M^2 R}{L_s^2} - j\frac{\omega M^2}{L_s} \quad (9)$$

式中: \$\dot{I}_p\$ 为次级电流, A。

初级绕组侧包括补偿电容 \$C_p\$ 的初级等效阻抗 \$Z\$ 为:

$$Z = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + Z_r \quad (10)$$

让初级等效阻抗 \$Z\$ 的虚部为零,可以求得初级串联补偿电容 \$C_p\$:

$$C_p = \frac{L_s^2 C_s}{M^2 - L_p L_s} \quad (11)$$

由式(7)和式(11)可知,只有得到 \$L_p\$、\$L_s\$ 和 \$M\$ 的值,才能求出 \$C_p\$ 和 \$C_s\$。线圈的自感(\$L_p\$ 和 \$L_s\$)可通过 LCR 测试仪测得。当工作频率为 38 kHz 时,采用文献[14]中的方法计算互感系数 \$M\$,结果见表1。

表1 变压器初次级绕组的电感互感系数

Table 1 Coefficients of inductance and mutual inductance of primary and secondary windings

测试次数	\$L_p/\mu\text{H}\$	\$L_s/\mu\text{H}\$	\$M\$
1	69.484	99.548	82.519 0
2	69.336	100.001	82.313 5
3	69.590	99.236	81.734 7
4	71.143	98.536	83.130 7
5	68.485	99.326	82.673 5
均值	69.608	99.329	82.474 3

将最佳工作频率(38 kHz)和表1中初、次级绕组电感及互感系数代入式(7),计算出次级并联补偿电容 \$C_s\$ 为 6.972 \$\mu\text{F}\$,单个电容最接近计算值的是 6.3 \$\mu\text{F}\$ 的电解电容,这时的工作频率 \$f_0\$ 约为 40 kHz。

将新的工作频率(40 kHz)和表1中的电感代入式(11),计算出初级串联补偿 \$C_p\$ 为 610.112 \$\mu\text{F}\$,单个电容最接近计算值的是 680 \$\mu\text{F}\$ 的电解电容,也可以选择几个电容并联得到更接近计算值的电容。

5 测试试验

为了验证上述分析,对设计出的旋转变压器进行了室内测试试验。试验系统组成如图5所示。

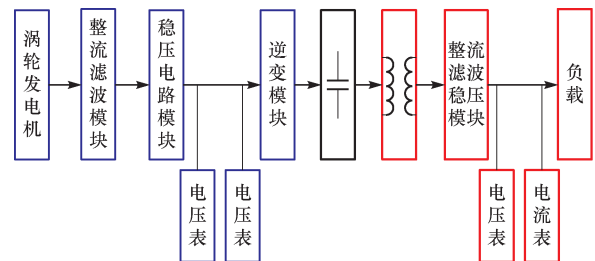


图5 试验系统示意

Fig. 5 Experimental system

在实验室中对旋转变压器进行稳定的静态试验及变压器外环和内环相对转动并加入强振动的动态试验。用电机代替实际钻井中钻井液驱动的涡轮发电机产生电能。涡轮发电机输出的电能经过整流电路模块、滤波电路模块、稳压电路模块和逆变模块后,产生 40 kHz 的方波信号输入变压器的初级绕组。改变负载的阻值,测试旋转变压器在不同输入功率下的传输效率。试验结果如图 6 所示。

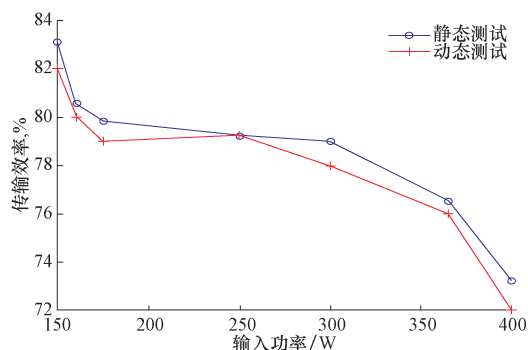


图 6 旋转变压器的输入功率与传输效率的关系

Fig. 6 Relationship between input power and transmission efficiency of the rotary transformer

由图 6 可以看出:静态测试结果和动态测试结果相差不大,静态情况下,变压器的工作情况稍好;最佳输入功率约为 150 W,此时,变压器的传输效率达到 82%,动态传输效率达到 83%;当输入功率大于 200 W 小于 300 W 时,传输效率不足 80%。经过测试,输出功率和传输效率都能达到要求。

6 结论及建议

1) 设计的旋转变压器可解决导向钻井中钻井设备之间相对旋转情况下稳定供电的问题。

2) 基于旋转式变压器的非接触无线电能传输系统可以应用到导向钻井中,但输入功率高时传输效率较低,还需要进行进一步研究。

3) 目前所设计的旋转变压器只能用来传输电能,以后应设计基于旋转式变压器的非接触无线电能和数据传输系统。

参 考 文 献

References

[1] 刘匡晓,魏士军,郭金爱,等. 川东北超深水平井轨迹制方法优选[J]. 断块油气田,2011,18(2):254-256.
Liu Kuangxiao, Wei Shijun, Guo Jinai, et al. Optimization of

trajectory control technique of ultra-deep horizontal well in Northeast Sichuan Area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011,18(2):254-256.

[2] 姜伟,蒋世全,盛利民,等. 旋转导向钻井工具系统的研究及应用[J]. 石油钻采工艺,2008,30(5):21-24.
Jiang Wei, Jiang Shiquan, Sheng Limin, et al. Research on rotary navigation drilling tools and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(5):21-24.

[3] 刘新华,董广华,赵洪山,等. 旋转导向井下工具控制系统设计及室内试验[J]. 石油钻探技术,2011,39(5):86-90.
Liu Xinhua, Dong Guanghua, Zhao Hongshang, et al. Design and laboratory test of control system for rotary steering motor[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(5):86-90.

[4] 付建民,韩雪银,马英文,等. vortex 型动力导向钻井系统在渤海油田的应用[J]. 石油钻探技术,2014,42(3):118-122.
Fu Jianmin, Han Xueyin, Ma Yingwen, et al. Application of PowerDrive vortex rotary steering drilling system in Bohai Bay[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(3):118-122.

[5] Bieler T, Perrotter M, Nguyen V. Contactless power and information transmission[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2002,38(5):1266-1272.

[6] 武瑛,严陆光,徐善纲. 新型无接触能量传输系统[J]. 变压器,2003,40(6):1-6.
Wu Ying, Yan Luguang, Xu Shangang. New contactless power transmission system[J]. Transformer, 2003,40(6):1-6.

[7] 周静,王兴. 稳压系统在非接触感应电能传输系统中的应用[J]. 电源技术,2012,36(4):550-553.
Zhou Jing, Wang Xing. Application of voltage regulation system in contactless induction power transmission system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012,36(4):550-553.

[8] 周静,安慰东,李永振. 提高感应电能传输效率的研究[J]. 电子测试,2010(1):5-10,15.
Zhou Jing, An Weidong, Li Yongzhen. Research and implementation of high-frequency inverter circuits[J]. Electronic Test, 2010(1):5-10,15.

[9] 周静,安慰东,张磊. 全桥高频逆变电路的研究与实现[J]. 电子测试,2009(7):79-82.
Zhou Jing, An Weidong, Zhang Lei. Research and implementation of high-frequency inverter circuits[J]. Electronic Test, 2009(7):79-82.

[10] Ayano H, Nagase H, Inaba H. A highly efficient contactless electrical energy transmission system[J]. Electrical Engineering in Japan, 2004,148(1):66-74.

[11] Klontz K W, Divan D M, Novotny D W, et al. Contactless power delivery system for mining applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995,31(1):27-35.

[12] Jufer M, Macabrey N, Perrottet M. Modeling and test of contactless inductive energy transmission[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1998,46(3/4):197-211.

[13] Stielau O H, Covic G A. Design of loosely coupled inductive power transfer systems; PowerCon 2000 International Conference on Power System Technology, Perth, December 4-7, 2000 [C].

[14] Ryu M, Cha H, Park Y, et al. Analysis of the contactless power transfer system using modelling and analysis of the contactless transformer; the 31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Raleigh, November 6-6, 2005 [C].

[编辑 刘文臣]