

# 典型结构无线供电线圈工作特性仿真比较

董 朋, 冯 晓, 钱思尧, 周 岩

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏南京 210023)

**摘 要:** 以圆形、方形和 DD 形耦合线圈为例, 研究了无线供电系统中三种典型结构线圈在不同条件下对理论最大传输效率的影响。利用 Maxwell 有限元仿真软件分别构造出典型线圈在等距结构和紧凑结构条件下, 其空心线圈和加入磁芯的线圈对系统等效电阻、耦合系数、品质因数等关键电参数的影响。通过对三种典型耦合线圈性能的仿真数据对比分析, 给出了线圈在不同条件下的特性变化趋势, 对无线供电系统的线圈设计具有重要的指导意义。

**关键词:** 无线供电; 耦合线圈; 最大传输效率; 等效电阻; 品质因数; 耦合系数

中图分类号: TM55

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0030-06

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.008

## Comparative simulation on operating characteristics of typical coil structures in wireless power transfer system

DONG Peng, FENG Xiao, QIAN Si-yao, ZHOU Yan

School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Taking circular, square and DD coils as examples, this paper studies the influence of three typical coils on maximum efficiency of wireless power transfer system under various structures. Based on the simulation results of Maxwell, the effects of magnetic cores and distances between wires on the resistance, coupling coefficient and quality factor of coils are analyzed. By comparing and analyzing the simulation data, the changing tendencies of three typical coupling coils under different conditions are given. The proposed method offers a method to design the coupling coils in wireless power transfer system.

**Key words:** wireless power transfer; coupling coil; maximum transfer efficiency; equivalent resistance; quality factor; coupling coefficient

### 1 引言

近年来, 随着无线供电技术在机器人、电动汽车等中、大功率场合中的广泛应用, 无线供电线圈之间的最大传输效率越来越受到重视。在无线电能传输系统中, 功率发射线圈和接受线圈的合理设计直接影响到系统的工作效率和稳定性。线圈之间的理论最大传输效率受线圈的结构、耦合特性、品质因数及传输距离等因素影响。不同结构线圈的理论最大传输效率差异明显, 且不同线圈结构对纵向距离和横向偏移的敏感程度也各不相同, 因此全面评估、优化线圈设计具有重要的工程应用价值<sup>[1-7]</sup>。

### 2 电路模型

无线供电系统线圈之间的等效电路模型如图 1 所示。其中:  $U_p$  为原边等效电压,  $I_p$  和  $I_n$  分别为原、副边电路中流过的电流,  $R_p$  和  $R_n$  分别为原、副边线圈的等效电阻,  $L_p$  和  $L_n$  分别为原、副边线圈的电感,  $M_{pn}$  分别为原、副边的互感系数。

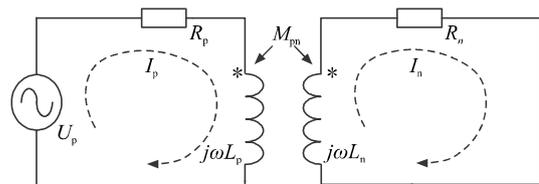


图 1 无线电能传输线圈等效电路模型

无线供电系统线圈之间的最大理论传输效率为<sup>[1]</sup>:

$$\eta_{\max} = \frac{(kQ)^2}{\left[1 + \sqrt{1 + (kQ)^2}\right]^2} \quad (1)$$

其中,  $k = M_{pn} / \sqrt{L_p L_n}$  为线圈之间的耦合系数;  $Q = \sqrt{Q_p Q_n}$  为线圈品质因数,  $Q_p = \omega L_p / R_p$  是原边线圈的品质因数,  $Q_n = \omega L_n / R_n$  是副边线圈的品质因数;  $\omega$  是电能传输时的角频率。为了计算方便, (1)可等效为:

$$\eta_{\max} \approx 1 - \frac{2}{kQ} \quad (2)$$

由(1)式可见, 相同工作条件下当线圈  $kQ$  因子最大时, 线圈之间理论传输效率获得最大值。

线圈  $Q$  值主要受到耦合线圈自感、铜损、磁损等因素的影响;  $k$  主要受线圈结构、选用的磁性材料等因素的影响。同时, 不同结构线圈的  $kQ$  值也会受纵向距离和横向距离的影响。因此, 通过分析不同典型结构线圈对  $kQ$  值的影响, 可有效指导线圈的设计。

本文通过 Maxwell 软件, 针对圆形、方形和 DD 形三种典型结构耦合线圈进行了分析与比较, 系统

研究耦合线圈  $kQ$  值在不同工作条件下的变化趋势, 分析不同结构对线圈最大传输效率的影响。

### 3 三种结构线圈的性能分析

由于线圈之间理论最大传输效率由原、副边线圈的  $Q$  值以及耦合系数  $k$  决定, 因此需要全面评价线圈结构差异、磁芯和偏移距离等因素对  $kQ$  值的影响。本文选取了圆形、方形和 DD 型三种典型耦合线圈为研究对象, 分别采用等距结构和紧凑结构两种间距进行对比与分析。

耦合线圈中添加磁芯可有效提升系统的耦合系数  $k$  和品质因数  $Q$ 。在实际的无线电能传输系统中, 磁芯引入的磁芯损耗也会增加线圈的等效电阻, 造成系统在高磁场强度下由于磁芯饱和而引起谐振点的偏移等不利因素。为了简化分析, 本文在软件中选择了磁导率为 2000、电阻率为  $5 \Omega \cdot \text{m}$  的铁氧体磁芯线性模型进行研究, 其铁氧体磁芯模块的长、宽、高分别为 820 mm、820 mm、4 mm。同时, 对有无磁芯条件下线圈横向偏移半径长度时对  $kQ$  影响进行了分析, 以此来综合评价耦合线圈的工作特性。软件中设置的耦合线圈结构参数如表 1 所示。

表 1 谐振线圈 Maxwell 仿真结构参数(直径 3.3 mm, 匝数 10, 电流 10 A, 频率 85 kHz, 垂直间距 175 mm)

耦合线圈类型	圆形等距	圆形紧凑	方形等距	方形紧凑	DD 等距	DD 紧凑
匝间距/mm	36.7	0	36.7	0	36.7×16.7	0
线圈边长/mm	800(直径)	800(直径)	800×800	800×800	800×800	800×800

#### 3.1 圆形耦合线圈

为了研究圆形耦合线圈间距结构及有无磁芯对其无线电能最大传输效率的影响, 本文构造了等距、紧凑、有无磁芯圆形耦合线圈仿真模型, 共 4 种情况, 如图 1 所示。在等距耦合线圈中, 每匝线圈呈等距分布, 线圈起始点距圆心的距离等同于匝间距。相比于等距耦合线圈, 紧凑耦合线圈无匝间距, 线

圈环绕十分紧密。为了简化分析, 其导线之间的距离可忽略不计。

为了研究不同导线间距、有无磁芯、线圈横向偏移对线圈理论最大传输效率的影响, 对等距型和紧凑型两种圆形耦合线圈的上线圈进行横向移动 400 mm(占线圈直径一半)。在相同工作条件下, 圆形等距和紧凑耦合线圈的仿真结果如表 2 所示。

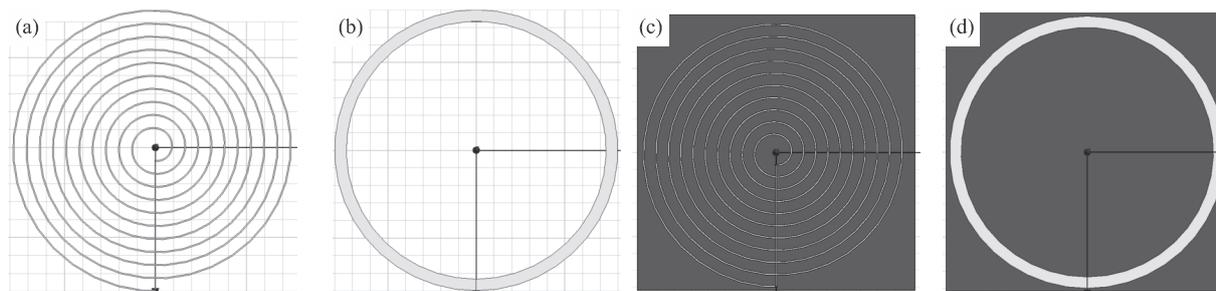


图 2 圆形耦合线圈仿真模型: (a)等距耦合, (b)紧凑耦合, (c)磁芯等距耦合, (d)含磁芯紧凑耦合

表 2 圆形谐振线圈仿真结果

	等效电阻/mΩ	电感/μH	频率/kHz	Q	k		η <sub>max</sub> /%	
					横移前	横移后	横移前	横移后
等距线圈	22.286	37.463	85	897.323	0.2891	0.0454	99.2	95.1
紧凑线圈	38.136	187.02	85	2617.770	0.2143	0.0711	99.6	98.9
含磁芯等距线圈	24.339	76.374	85	1675.025	0.4675	0.0299	99.7	96.0
含磁芯紧凑线圈	44.274	355.81	85	4289.908	0.3112	0.0692	99.9	99.3

当两种线距圆形线圈增加磁芯后，线圈的品质因数  $Q$ 、耦合系数、自感都得到显著提升。引入磁芯后，由于磁芯损耗的影响，线圈的等效电阻略有增大。但线圈电感量提升明显，因此线圈的  $Q$  值显著提高。相对于等距线圈，紧凑型线圈增加磁芯后对等距线圈的参数特性改善更为明显。

对于圆形线圈之间传输效率，在无磁芯时情况下，等距耦合线圈的最大传输效率为 99.2%，紧凑耦合线圈的最大传输效率 99.6%，可见紧凑型圆形耦合线圈理论最大传输效率稍优于等距型。横移后等距耦合线圈的理论最大传输效率为 95.1%，紧凑耦合线圈的最大传输效率 98.9%。可见在抗线圈偏移特性上，紧凑耦合线圈的最大传输效率显著优于等间距耦合线圈。

增加磁芯后，等距耦合线圈的最大传输效率为 99.7%，比无磁芯时传输效率略有提升。同样，含磁芯紧凑耦合线圈的最大传输效率优于无磁芯时的最大传输效率。横移条件下，含磁芯等距耦合线圈的最大传输效率为 96.0%，横移后含磁芯紧凑耦合线

圈的最大传输效率为 99.3%。

可见无论有无磁芯，相同工作条件下紧凑型线圈特性均优于等距型线圈。与相同工作条件下的空心线圈相比，增加磁芯对于提升等距型和紧凑型两种圆形线圈之间的理论最大传输效率和系统抗横向偏移能力等方面均有显著改善。

### 3.2 方形耦合线圈

类似地，研究方形耦合线圈间距结构及有无磁芯对无线电能最大传输效率的影响，构造了等距、紧凑、有无磁芯方形耦合线圈仿真模型，如图 3 所示。在方形等距耦合线圈中，每匝线圈呈等距分布，线圈起始点距圆心的距离等同于匝间距。相比于等距耦合线圈，紧凑耦合线圈无匝间距，线圈环绕十分紧密。同样为了简化分析，其导线之间的距离可忽略不计。

为了研究不同导线间距、有无磁芯、线圈横向偏移对线圈理论最大传输效率的影响，对等距型和紧凑型两种耦合线圈的上线圈进行横向移动 400 mm(占线圈边长一半)。在相同工作条件下，仿真结果如表 3 所示。

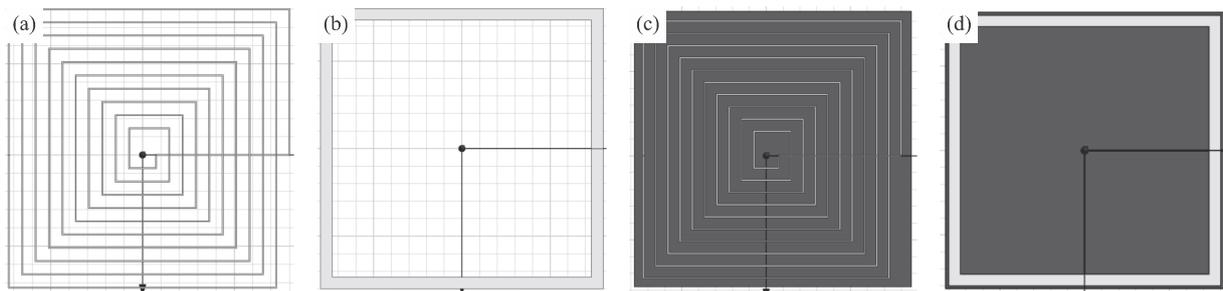


图 3 方形耦合线圈仿真模型：(a)等距耦合线圈，(b)紧凑耦合线圈，(c)含磁芯等距耦合线圈，(d)含磁芯紧凑耦合线圈

表 3 方形谐振线圈仿真结果

	等效电阻/mΩ	电感/μH	频率/kHz	Q	k		η <sub>max</sub> /%	
					横移前	横移后	横移前	横移后
等距线圈	27.702	43.729	85	842.63	0.2807	0.0596	99.2	96.0
紧凑线圈	48.411	227.42	85	2507.628	0.2085	0.0898	99.6	99.1
含磁芯等距线圈	29.714	85.686	85	1539.025	0.4471	0.0403	99.7	96.8
含磁芯紧凑线圈	51.914	383.01	85	3938.258	0.2527	0.0887	99.8	99.4

当两种线距方形线圈增加磁芯后，跟圆形线圈相似，线圈的品质因数  $Q$ 、耦合系数、自感显著提升，等效电阻略有增大，对等距线圈的参数特性改善更为明显。

对于方形线圈之间传输效率，在无磁芯时情况下，与圆形耦合线圈相似，紧凑型方形耦合线圈理论最大传输效率稍优于等距型，方形紧凑型耦合线圈在抗线圈偏移特性上，优于方形等间距耦合线圈。

增加磁芯后，等距方形耦合线圈和紧凑型方形耦合线圈的最大传输效率得到了提升，两种方形线圈的抗横向偏移能力也有显著改善，类似于圆形线圈增加磁芯的情况。

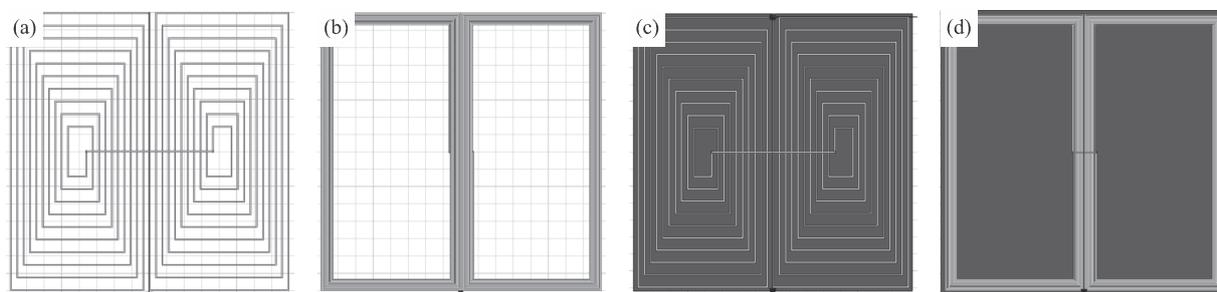


图4 DD耦合线圈仿真模型：(a)等距耦合线圈，(b)紧凑型耦合线圈，(c)含磁芯等距耦合线圈，(d)含磁芯紧凑型耦合线圈

表4 DD谐振线圈仿真结果

	等效电阻/m $\Omega$	电感/ $\mu$ H	频率/kHz	$Q$	$k$		$\eta_{\max}/\%$	
					横移前	横移后	横移前	横移后
形等距线圈	44.574	80.461	85	963.568	0.1999	0.1035	98.9	98.0
形紧凑型线圈	71.819	347.66	85	2584.009	0.1576	0.0810	99.5	99.0
含磁芯等距线圈	51.731	171.2	85	1766.572	0.3874	0.1689	99.7	99.3
含磁芯紧凑型线圈	101.79	723.32	85	3793.184	0.3181	0.1301	99.8	99.6

当两种线距 DD 线圈增加磁芯后，与圆形线圈、方形线圈一致，参数特性得到了改善，且等距线圈的改善更明显。

对于 DD 形线圈之间传输效率，在无磁芯情况下，紧凑型 DD 形耦合线圈理论最大传输效率稍优于等距型 DD 形紧凑型耦合线圈，在抗线圈偏移特性上，也优于 DD 形等间距耦合线圈，与圆形线圈和方形线圈的情况一致。

增加磁芯后，DD 形紧凑型耦合和等距耦合线圈的最大传输效率都优于无磁芯时的最大传输效率，两种 DD 形线圈的抗横向偏移能力也有一定改善，与圆形和方形线圈增加完磁芯后效果一致。

#### 4 线圈理论最大传输效率比较分析

根据上述仿真研究，可以对典型形状线圈在等

#### 3.3 DD耦合线圈

类似地，研究 DD 耦合线圈间距结构及有无磁芯对无线电能最大传输效率的影响，仿真模型如图 4 所示。在等距耦合线圈中，左右两边每匝线圈呈等距分布，两边线圈起始点距圆心的距离等同于匝间距。相比于等距耦合线圈，紧凑型耦合线圈左右两边无匝间距，线圈环绕十分紧密。同样忽略导线间距离，简化分析。

为了研究不同导线间距、有无磁芯、线圈横向偏移对线圈理论最大传输效率的影响，对等距型和紧凑型两种 DD 形耦合线圈的上线圈进行横向移动 400mm(占线圈直径一半)。在相同工作条件下，圆形等距和紧凑型耦合线圈的仿真结果如表 2.4 所示。

距或紧凑型线距、空心或带磁芯工作条件下的工作特性进行全面评价。

图 5 示出了线圈在 6 种条件组合下的等距和紧凑型品质因数  $Q$  对比。无论有无磁芯，紧凑型耦合线圈的  $Q$  值总是高于等距结构耦合线圈；同种结构耦合线圈增加磁芯后，线圈  $Q$  值都明显提高。同时在紧凑型中，无论空心或增加磁芯，圆形线圈的  $Q$  值都优于相同工作条件下的方形和 DD 型线圈。

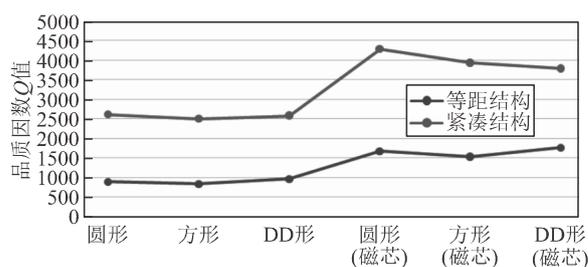


图5 耦合线圈品质因数比较

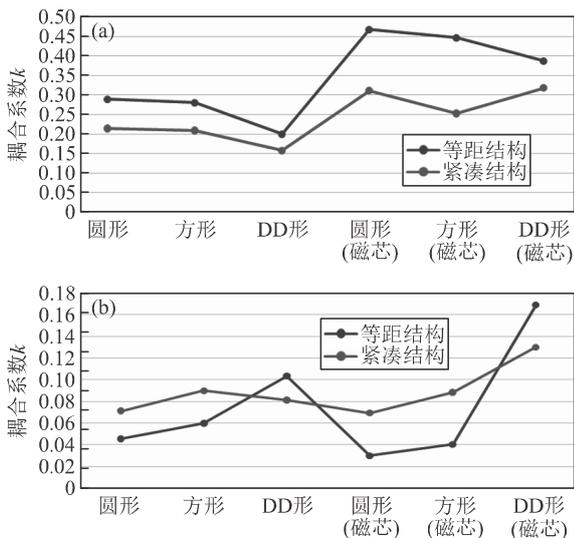


图 6 线圈耦合系数比较: (a)线圈对正, (b)线圈横移半径后

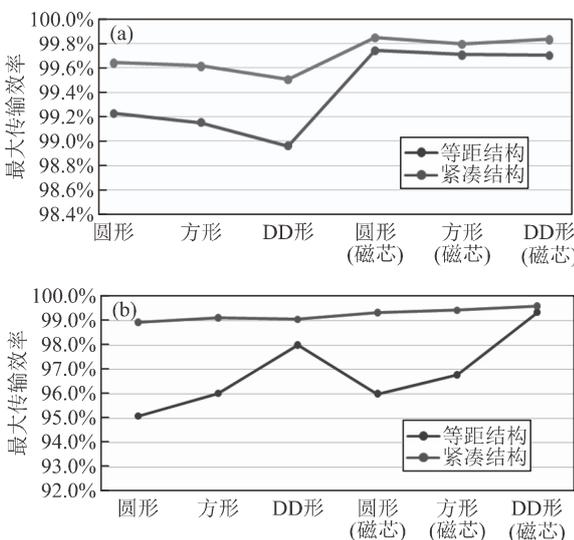


图 7 耦合线圈  $\eta_{max}$  比较: (a)线圈对正(b)线圈横移半径后

两个线圈对正和横移两种情况、6 种条件组合下的耦合系数比较如图 6 所示。由图 6a 可知, 当两个线圈完全对正时, 无论有无增加磁芯等距结构耦合线圈的耦合系数  $k$  高于紧凑结构耦合线圈。当耦合线圈增加磁芯后, 不同类型的线圈耦合系数  $k$  都明显提高。其中, 在有磁芯条件下, 圆形等距耦合线圈的耦合系数最大。

由图 6b 可知, 当线圈之间出现横向偏移一半直径时, 各种组合耦合线圈的耦合系数  $k$  均显著降低。其中紧凑型圆形和方形线圈抗偏移能力均优于等距型圆形和方形线圈, 而紧凑型 DD 线圈抗偏移能力低于等距型 DD 线圈。相同条件下, 含磁芯的 DD 形等距耦合线圈抗偏移能力最强。

根据(2)式可知, 不同组合线圈的理论最大传输

效率  $\eta_{max}$  会随其耦合系数和品质因数变化。

两个线圈对正和横移两种情况、6 种条件组合下的  $\eta_{max}$  比较如图 7 所示。由图 7a 可知, 当线圈完全对正时, 紧凑结构耦合线圈的  $\eta_{max}$  高于等距结构耦合线圈; 同时, 相同结构耦合线圈增加磁芯后  $\eta_{max}$  都明显提高。在线圈完全对正时, 有磁芯的圆形紧凑耦合线圈的理论最大传输效率最高。

由图 7b 可知, 当线圈横移半径距离时, 紧凑型耦合线圈的  $\eta_{max}$  同样优于等距结构耦合线圈。相同结构耦合线圈添加磁芯后,  $\eta_{max}$  一定提升。当耦合线圈发生横移后, 含磁芯的 DD 形紧凑耦合线圈的  $\eta_{max}$  数值最高。

### 5 结论

仿真结果表明, 无论有无磁芯, 相同工作条件下紧凑型线圈特性均优于等距型线圈。与相同工作条件下的空心线圈相比, 增加磁芯对于提升等距型和紧凑型两种圆形线圈之间的理论最大传输效率和系统抗横向偏移能力等方面均有显著改善。其中, 含磁芯的紧凑圆形耦合线圈可获得较高的品质因数, 在线圈完全对正时拥有较高的耦合系数和最大传输效率。当耦合线圈发生横移后, 含磁芯的 DD 形紧凑耦合线圈的  $\eta_{max}$  数值最高。

需要指出的是, 本文基于 Maxwell 分析模型为理想条件下获得的仿真结果, 在实际系统中由于线圈的铜损、磁芯材料的非线性及其引入的等效电阻均会对  $Q$  值、线圈理论最大传输效率产生重要影响, 因此虽然理想模型与实际装置存在差异, 但本文相关研究结论对于线圈的选择、优化设计依然具有较好的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Acero J, Serrano J, Carretero C, et al. Analysis and design of tubular coils for wireless inductive power transfer systems[C]. Applied Power Electronics Conference & Exposition. IEEE, 2017.
- [2] Budia M, Boys J T, Covic G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2013, 60(1): 318-328.
- [3] Zhang J, Yuan X, Wang C, et al. Comparative analysis of two coil and three-coil structures for wireless power transfer [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2017, 32(1): 341-352.
- [4] Mizuno T, Yachi S, Kamiya A, et al. Improvement in efficiency of wireless power transfer of magnetic resonant

coupling using magnetoplated wire [J]. IEEE Trans Magn, 2011, 47(10): 4445-4448.

- [5] Jiang J, Zhu C, Song K, et al. Novel power receiver for dynamic wireless transfer system [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2015-, Conference of the IEEE. IEEE, 2015.
- [6] 吕超. 磁耦合无线能量传输系统的线圈优化设计[D]. 北

\*\*\*\*\*  
(上接 13 页)

直流偏置能力。对细晶粒结构而言, 由于晶界多, 受晶界附近局域退磁场影响的面积也大, 当有较强外加直流磁场时, 材料便不易于趋近磁化饱和, 这是细晶粒结构有利于高直流偏置特性的原因所在。至于在多重结构情况下, 能否提供比在单独细晶粒结构情况下更为有利的抗直流叠加特性及其原理, 还有待进一步的深入研究。

#### 4 结论

(1) 高矫顽力  $H_c$  是获得高抗直流偏置能力的因素之一, 即具有较高矫顽力  $H_c$  的样品更易获得较好的抗直流偏置的能力。

(2) 样品微观结构中如果存在较多小晶粒围绕稍大晶粒的特殊多重结构时, 这种以细晶粒为主的特殊微结构, 有利于提高材料抗直流偏置的性能。

**致谢:** 感谢韩志全在机理解释方面给予的帮助, 对文章质量的提升和完善起到了重要作用。

#### 参考文献:

- [1] 黄爱萍, 谭福清, 冯则坤, 等. Mn-Zn 铁氧体材料磁导率直流叠加特性研究[J]. 磁性材料及器件, 2004, 35(3): 29-31.
- [2] Hsiang H J, Wu J L. Copper-rich phase segregation effects on the magnetic properties and DC-bias-superposition characteristic of NiCuZn ferrites [J]. J Magn Magn Mater, 2015, 374: 367-37.
- [3] Baguley C A, Carsten B, Madawala U K. An investigation into the impact of DC bias conditions on ferrite core losses [C]// Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2007.
- [4] 王自敏. 软磁铁氧体生产工艺与控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [5] 苏桦. 低温烧结 NiCuZn 铁氧体(LTCF)材料及叠层片式电感应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [6] Tang X L, Zhang H W, Su H, et al. Influence of microstructure on the DC-bias-superposition characteristics

of NiZn ferrites [J]. IEEE Trans Magn, 2011, 47(10): 4332-4335.

- [7] 郭尧, 朱春波, 宋凯, 等. 平板磁芯磁耦合谐振式无线电能传输技术[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2014, 46(5): 23-27.
- 作者简介:** 董 朋(1991—), 男, 汉, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 研究方向为无线电能与信号同步传输。
- of NiZn ferrites [J]. IEEE Trans Magn, 2011, 47(10): 4332-4335.
- [7] Hsiang H J, Chueh Jui Fu. Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Addition effects on the sintering mechanism, magnetic properties, and DC superposition behavior of NiCuZn ferrites [J]. Int J Appl Cera Techno, 2015, 12(5): 1008-1015.
- [8] Yan S, Dong L, Chen Z, et al. The effect of the microstructure on the DC-bias superposition characteristic of NiCuZn ferrite [J]. J Magn Magn Mater, 2014, 353: 47-50.
- [9] Xie F, Jia L J, Xu F, et al. Improved sintering characteristics and gyromagnetic properties of low-temperature sintered Li<sub>0.42</sub>Zn<sub>0.27</sub>Ti<sub>0.11</sub>Mn<sub>0.1</sub>Fe<sub>2.1</sub>O<sub>4</sub>, ferrite ceramics modified with Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, glass additive [J]. Cera Int, 2018: S0272884218310010.
- [10] 董丽, 颜钰清, 冯则坤. 助烧剂对 NiCuZn 铁氧体直流叠加特性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2012, 43(3): 45-48.
- [11] Wang Yuh Ruey, Wang Sea Fue. Liquid phase sintering of NiCuZn ferrite and its magnetic properties [J]. Int J Inorg Mater, 2001, ( 3):1189-1192.
- [12] Sun K, Lan Z, Yu Z, et al. Grain growth, densification and magnetic properties of NiZn ferrites with Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additive [J]. J Phys D Appl Phys, 2008, 41(23):3850-3856.
- [13] 韩志全. 铁氧体及其磁性物理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010, 15, 237,73, 62.
- [14] P.O.Box J. The effect of direct current on the inductance of a ferritecore, technical information of Fair-Rite Products Corp, 2003, [On-line]. Available: <http://www.fair-rite.com/Directcurrent.pdf>.
- [15] Su H, Tang X L, Zhang H W, et al. Effects of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on DC-bias-superposition characteristic of the low-temperature-fired NiCuZn ferrites [J]. IEEE Trans Magn, 2013, 49(7): 4222-4225.
- [16] Garashi H and Okazaki K. ?[J]. J Am Cera Soc, 1977, 60(1-2): 51.
- [17] 宦丽. 抗偏置低温烧结 NiCuZn 铁氧体及在功率片式电感中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [18] 赵海, 刘颖力, 张怀武. Co<sup>2+</sup>取代与 Li<sup>+</sup>掺杂对 NiCuZn 铁氧体磁性能和直流叠加特性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2011, 42(1): 64-68.

**作者简介:** 沈琦杭(1991—), 男, 汉族, 四川崇州人, 硕士研究生, 主要研究方向为磁性功能复合铁氧体材料。