

无线电能传输中螺旋型线圈磁耦合系统的分析与优化

The Design and Optimization of Spiral-Coil Magnetic Coupling System In The Wireless Power Transmission Field

黄天祥, 董纪清, 陈为, 钟晓龙
福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108

摘要: 本文针对一种应用谐振式无线电能传输技术的输出电压 220V、输出功率 300W、传输距离 27mm 的某企业实际产品开发需求, 对其平面螺旋型线圈磁系统进行仿真分析与优化, 选取合适的磁系统参数, 最后完成样机制作, 经测试, 样机能满足实际的要求。

关键词: 无线电能传输, 磁系统, 螺旋型线圈, 磁耦合

1 引言

随着科学技术的快速发展和人民的生活水平的提高, 人们对电子信息产品消费不断增加。移动电子设备诸如移动电话、MP3、笔记本电脑、数码相机、PDA 等都沿着更小、更轻、更薄的方向发展。这些移动电子设备的待机时间有限, 在充电时还需用到数据线、电线及插座等设备, 限制了这些设备的移动灵活性、安全性、稳定性及环境美观性。通过导线及插座将电能传输到终端的传统电能传输方式存在摩擦、易产生电火花等问题, 不仅影响电气设备的安全可靠性, 还会缩短电气设备的使用寿命, 尤其是在易燃易爆场所使用导线直接供电时, 如果发生接触摩擦容易产生微小电火花, 进而可能造成严重的安全事故。因此, 为了满足特定条件的要求, 我们需要一种新的电能传输技术来代替传统的电能传输方式。

磁系统在无线电能传输系统中起着关键的作用, 它影响无线电能传输的效率、体积、成本及电路元件参数的选取等等因素。因此, 本文对平面螺旋型线圈磁耦合系统进行分析设计, 分析线圈电感感值与是否含有磁芯有关, 再将对含有磁芯情况的不同方案进行设计并通过 Ansoft 仿真比较优化, 最终选取合适的方案为样机制作提供参考。

2 基本计算分析

对于高频工作条件下, 本应该考虑线圈交流电阻等方

面影响, 但是当采用多股绞线时, 初步分析可以用直流电阻来进行计算。

这里在发射线圈参数给定的情况下, 对接收线圈的磁芯进行分析。发射线圈和接收线圈均为圆环螺旋型线圈结构, 对于给定的发射侧平台, 已知发射线圈 31 匝, 所通电流最大为 60A (即 $I_p=60A$), 发射线圈与接收线圈之间距离为 $h=27mm$, 同时磁芯尺寸结构都确定的情况下, 需要在接收线圈侧获得 $U_s=220V$ 、 $P_s=300W$ 的功率。下面先以理想情况为例根据基本计算公式对相关参数进行计算, 可得:

$$I_s = \frac{P_s}{U_s} = \frac{300}{220} = 1.364(A) \quad (1)$$

按照 $6A/mm^2$ 的导线截面积电流密度来计算, 则 $d_1=0.539mm$, 而选择 $0.6mm$ 的线径导线作为接收侧线圈绕组, 如果采用 $0.6mm$ 线径则根据理论计算可以通过 $1.640A$ 电流, 故选用 $0.6mm$ 的线径先进行仿真分析。而对于接收侧电阻负载的阻值计算为:

$$R_s = \frac{U_s^2}{P_s} = \frac{220^2}{300} = 161(\Omega) \quad (2)$$

M 当工作频率为 $30kHz$ 时, 则互感计算为:

$$M = \frac{U_s}{\omega I_p} = \frac{220}{2.3.14 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{60}{1.414}\right)} = 0.0276(mH) \quad (3)$$

所以理论上在设计接收侧线圈尺寸时, 其互感只需要

满足达到 0.0276mH 即可。

3 磁系统仿真

3.1 接收侧线圈含有磁芯和没有磁芯的情况进行比较

在发射侧线圈固定的情况，只考虑接收侧线圈的情况。发射侧的线圈如图 1 所示。为了简化二维模型，将辐条状磁芯近似为圆片状磁芯，建立 ROZ 坐标上的二维对称模型。发射侧磁芯的测量数据：磁芯厚度为 4mm，高度为 13.6mm。

(a) 接收侧没有磁芯的情况仿真分析。

建立 Ansoft 二维仿真模型，二维仿真如图 2 所示。

其中发射侧线圈的磁芯内半径 $M_{di}=15\text{mm}$ 、外半径 $M_{do}=70\text{mm}$ ，发射侧线圈绕组内半径 $D_{pi}=20\text{mm}$ 、外半径 $D_{po}=70\text{mm}$ ；接收侧线圈绕组内、外半径 D_i 、 D_o 是变化的。

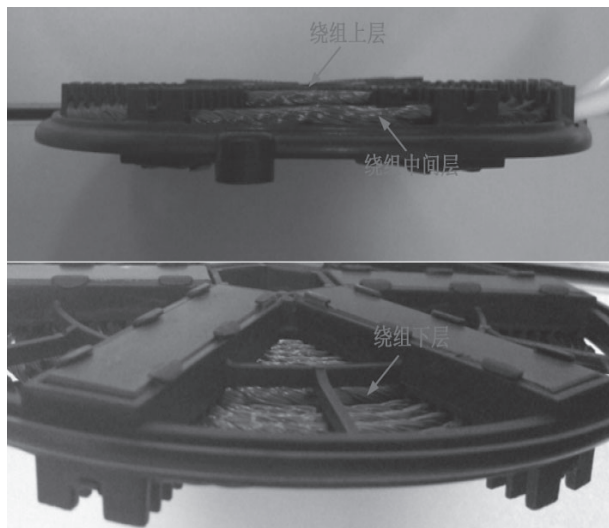


图 1 发射侧螺旋型线圈

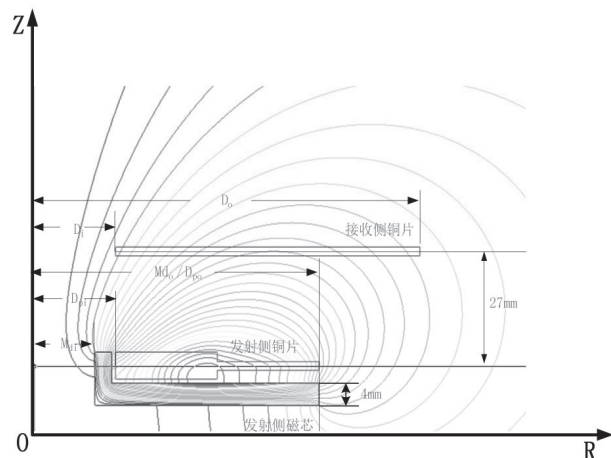


图 2 不含磁芯情况下 Ansoft 仿真模型

我们用 L_{ix} 、 L_{rx} 、 M 、 k 来表示发射线圈单匝自感、接收线圈单匝自感、互感以及耦合系数，开关频率 f 为 30kHz，发射侧线圈匝数 $N_{ix}=31$ 匝，接收侧采用单层绕组绕制，假设每一根导线的直径 0.6mm 并且相互之间间隔 0.1mm，所以：

$$N_{rx} = \frac{D_o - D_i}{(0.6 + 0.1)} \quad (4)$$

$$R = \frac{\rho_{\text{铜}} L}{S} \quad (5)$$

仿真结果如图 3、4 所示：

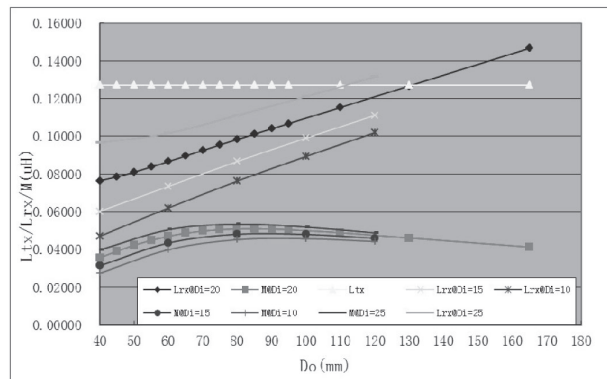


图 3 自感、互感与接收侧线圈绕组外半径曲线图

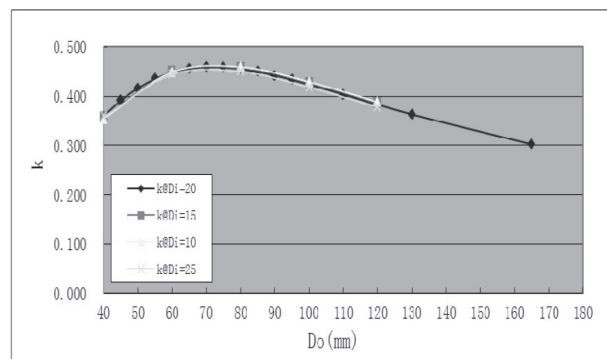


图 4 耦合系数与接收侧线圈绕组外半径曲线图

从以上各参数相互之间曲线图可知：单位匝数互感和耦合系数都存在一个最大值。接收侧线圈的绕组内径对耦合系数及总的互感影响不大；接收侧线圈的绕组内径除了对接收侧线圈单匝自感有比较明显的影响外，对这个耦合系统的其他参数基本上没有影响。

(b) 接收侧含有磁芯情况仿真分析。

Ansoft 仿真模型如图 5 所示。发射侧的参数和 (a) 中的一样。接收侧线圈磁芯内半径 $M_{di}=10\text{mm}$ 、外半径 $M_{do}=75\text{mm}$ ，以下是仿真结果如图 6 和图 7 所示：

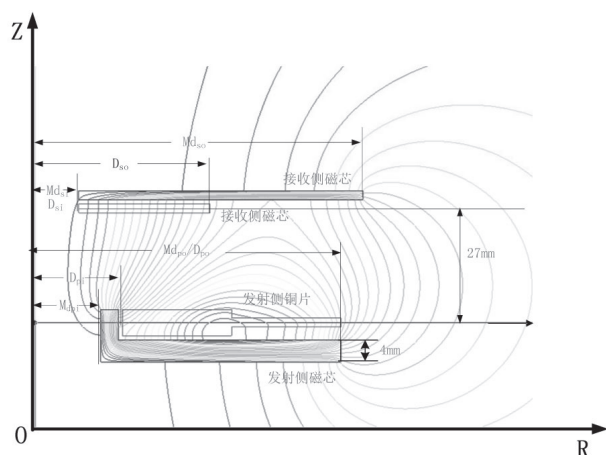


图5 含有磁芯情况下 Ansoft 仿真模型

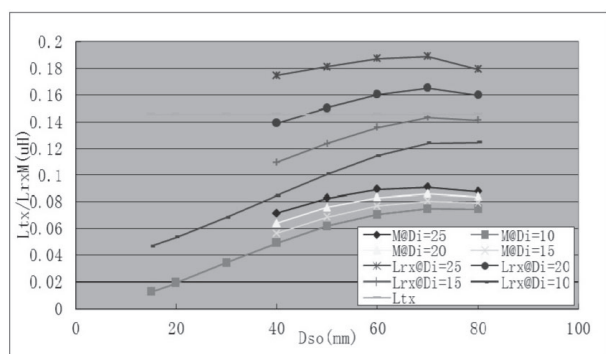


图6 自感互感与接收侧线圈绕组外半径曲线图

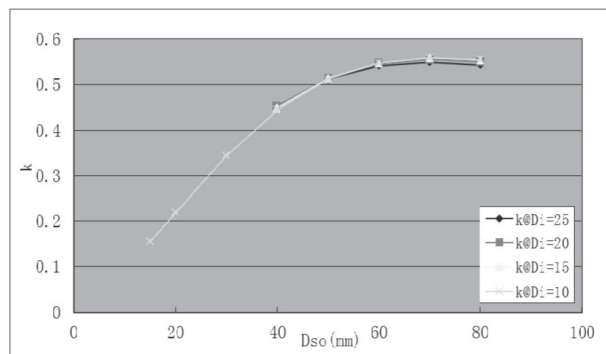


图7 耦合系数与接收侧线圈绕组外半径曲线图

从以上的各参数之间的曲线关系图可知：接收侧线圈绕组内径大小对耦合系数基本没有影响，耦合系数和单位绕组长度互感都存在一个最大值；绕组内径大小除了对接收侧线圈电感 L_{rx} 有相对明显的影响外，对这个耦合系统的其他各项参数影响都不大，同时 L_{rx} 也有存在一个最大值的情况。

(c) 接收侧有、无磁芯情况时系统输出比较：

根据这些仿真结果，互感计算均满足 3.1.1 中

$M=0.0276\text{mH}$ 的要求，把有磁芯和无磁芯情况时仿真结果的磁耦合系统参数代入到谐振电路做进一步的电路分析，电路分析采用 Mathcad 编制的程序进行，对两种情况下的输出作比较。

图 8 为发射侧和接收侧均为串联谐振时的等效电路图，以发射侧与接收侧均采用串联谐振模式为例，选取接收侧线圈绕组内、外半径为 $D_i=25\text{mm}$ 、 $D_o=60\text{mm}$ ，发射侧和接收侧线圈匝数分别为： $N_{ix}=31$ 匝， $N_{rx}=50$ 匝， $R_{ix}=0.1$ ， $R_{rx}=0.83$ 。假设工作频率为 30kHz ，发射侧电流峰值为 60A 。 $R_o=160\Omega$ 负载。

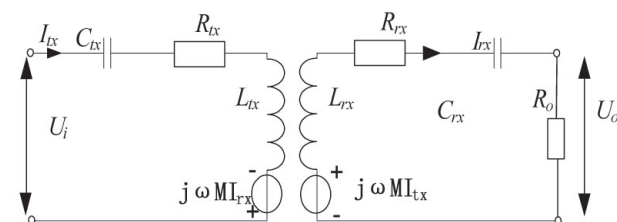


图8 发射侧接收侧均为串联谐振等效电路图

无磁芯情况参数：单匝 $L_{ix}=0.12707\mu\text{H}$ 、 $L_{rx}=0.10157\mu\text{H}$ ， $k=0.444$ ；

有磁芯情况参数：单匝 $L_{ix}=0.14564\mu\text{H}$ 、 $L_{rx}=0.18719\mu\text{H}$ ， $k=0.541$ 。

通过对比分析，在绕组结构同样时，有磁芯情况的输出电压、输出功率及接收侧线圈电压均比无磁芯情况大，因此在需要同等输出时，无磁芯情况要比有磁芯情况的绕组匝数多，综合考虑尺寸以及磁屏蔽需求等方面因素，选择有磁芯情况进行样机制作比较合理。

3.2 接收侧有磁芯情况下的磁系统三维仿真

从以上理论计算及仿真分析比较可知，整个系统满足 300W 及 220V 输出功率和输出电压的要求，且选择有磁芯情况作为样机制作更加符合实际需求。现发射侧的条幅状的磁芯参数为：每条磁芯的长 55mm 、宽 13mm 、厚 4mm 、左边高度 13.6mm ，发射侧的线圈采用三层共 31 匝。从 3.1 中可知，接收侧的内径对耦合系数和互感基本没有影响，故接收侧磁芯内半径 M_i 和线圈内半径 D_i 都定为 15mm ，及 $M_i=D_i=15\text{mm}$ 。从图 (7) 中可知，耦合系数在接收侧线圈外半径 $D_o=60\sim 80\text{mm}$ 之间达到最大值且基本不变，考虑到发射侧线圈的外半径 $M_{p0}=70\text{mm}$ ，接收侧的仿真参数如表 1 所示。其中 M_o 、 D_o 分别表示接收侧磁芯外半径、线圈外半径。

三维仿真模型如图 9、图 10 所示。其中接收侧条幅状磁芯的宽度为 13mm，厚度为 4mm。

表 1 磁系统的二维三维仿真参数结果

方案	M_0 (mm)	D_0 (mm)	L_1 (μ H)	L_2 (μ H)	M (μ H)	k
三维片状	70	60	138.04	351.13	100.54	0.45666
	70	65	137.98	354.29	103.16	0.46659
	65	60	136.62	343.66	97.395	0.44949
	65	65	136.81	344.97	99.815	0.45945
三维条幅状	70	60	123.21	307.94	81.549	0.41866
	70	65	123.22	309.05	83.462	0.42769
	65	60	122.53	301.86	79.442	0.41308
	65	65	122.47	300.68	80.974	0.42196

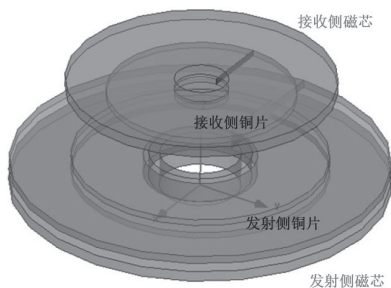


图 9 三维片状磁芯仿真模型

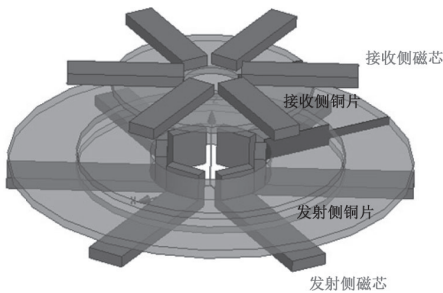


图 10 三维条幅状磁芯仿真模型

从上面仿真结果可知， M_0 和 D_0 的大小对接收侧线圈的自感、互感以及耦合系数等主要参数的影响是很小的，因此从材料节省成本以及尺寸大小以及对整个系统将来在实际应用时的体积等方面综合考虑，选择 M_0 和 D_0 都是最小的情况，即： $M_0=65\text{mm}$ ， $D_0=60\text{mm}$ 的情况。而对于宽度和厚度的选择，为了降低机械加工方面的成本以及减小机械应力和电磁应力，以及从实际应用情况考虑，我们将宽度选择为 13mm，厚度选择为 4mm。

4 样机制作

根据 3.2 所确定的接收侧的参数，发射侧与接收侧的

距离 27mm、接收侧输出电压 220V、输出功率 300W，负载电阻为 160 Ω 的要求来制作产品样机，如图 11 所示。经测试，磁系统满足实际的要求。



图 11 160 Ω 电阻负载实验装置图

5 结论

本文主要对谐振式无线电能传输中的磁耦合系统进行仿真分析，得到以下结论：

1) 在绕组结构同样时，接收侧有磁芯情况的输出电压、输出功率及接收侧线圈电压均比无磁芯情况大，因此在需要同等输出时，无磁芯情况要比有磁芯情况的绕组匝数多，综合考虑到尺寸以及磁屏蔽需求等方面因素，选择接收侧有磁芯情况进行样机制作比较合理。

2) 接收侧线圈的绕组内径除了对接收侧线圈单匝自感有比较明显的影响外，对这个耦合系统的其他参数基本上没有影响。

3) 接收侧采用片状磁芯时的自感、耦合系数和采用条幅状磁芯时相比，相差很小，考虑到接收侧的体积、成本等因素，因此采用条幅状的磁芯作为样机制作。

4) 以接收侧的磁芯参数（宽度 13mm、厚度 4mm、内半径 15mm、外半径 65mm）和接收侧的线圈参数（匝数 60 匝、内半径 15mm、外半径 60mm）的磁系统制作的样机能满足输出电压 220V、输出功率 300W 的实际产品的要求。

参考文献

- [1] 谢文燕. 谐振式无线电能传输磁耦合系统研究:[福州大学硕士学位论文]. 福州:福州大学, 2013.
- [4] 宋显锦, 韩如成, 宋晓鹏. 无线电能传输的发展历史与应用现状, 山西财经大学学报, 2010.

下转118页