

# Design and Optimization of Inductive Wireless Power Transmission System

Gang Yang<sup>1,2</sup>, Jianhui Su<sup>1,2</sup>, Jian Zhang<sup>1,2</sup>, Shuo Liu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Automatic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

<sup>2</sup>Research Center for Photovoltaic Systems Engineering of Ministry of Education, Hefei Anhui

Email: yg597441941@163.com

Received: Dec. 7<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2017; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Based on the requirement of wireless power transmission system, Ansoft Maxwell, a finite element analysis software of electromagnetic field, was used to simulate the magnetic core and coil winding of loosely coupled transformers with different structures. The influence of the relative position changes on the coupling coefficient was discussed. We design a High Power Density Loosely Coupled Transformer. The simulation of the loosely coupled transformer and its resonant compensation network is verified by the method of field-circuit coupled co-simulation based on Simplorer software system. Building 3.3 KW wireless power transmission system experimental platform to verify the feasibility of the design, the overall system transmission efficiency is up to 95%.

## Keywords

Wireless Power Transmission, Loosely Coupled Transformers, Ansoft Maxwell, Simplorer

---

# 感应式无线电能传输系统设计及优化

杨刚<sup>1,2</sup>, 苏建徽<sup>1,2</sup>, 张健<sup>1,2</sup>, 刘硕<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥

<sup>2</sup>教育部光伏系统工程研究中心, 安徽 合肥

Email: yg597441941@163.com

收稿日期: 2017年12月7日; 录用日期: 2017年12月22日; 发布日期: 2017年12月29日

---

## 摘要

基于无线电能传输系统的要求, 利用电磁场有限元分析软件Ansoft Maxwell, 对三种典型结构的松耦合

文章引用: 杨刚, 苏建徽, 张健, 刘硕. 感应式无线电能传输系统设计及优化[J]. 电气工程, 2017, 5(4): 306-313.

DOI: 10.12677/jee.2017.54037

变压器磁芯及线圈绕组方式进行仿真分析, 讨论初级侧和次级侧相对位置变化对其耦合系数的影响, 设计一种高功率密度松耦合变压器。采用基于Simplorer软件系统场路耦合联合仿真的方法对设计的松耦合变压器及其谐振补偿网络进行仿真验证。最终搭建3.3 KW无线电能传输系统实验平台, 验证该设计的可行性, 系统整体传输效率最高达到95%。

## 关键词

无线电能传输, 松耦合变压器, Ansoft Maxwell, Simplorer

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

感应式无线电能传输技术(inductive contactless power transfer, ICPT)是一种利用磁场耦合原理, 将电能以非导线连接的方式从电源端传输到负载端的技术。它提高了用电设备的灵活性, 是一种安全、可靠、灵活的供电方式[1]。实现电能无线传输的主要挑战在于其较低的传输效率和功率传输能力, 造成这种结果的主要原因是由于其相较于传统变压器, 发射绕组和接收绕组之间存在较大气隙, 耦合系数较低且存在较大漏感, 系统整体的功率因数很低, 所以必须加入谐振补偿电路, 使系统工作在单位功率因数, 提高电路整体的效率。因此, 提高变压器耦合系数及设计合理的补偿网络是感应式无线电能传输系统的主要研究方向[2]。

目前已有较多文献对磁耦合机构的设计及参数优化进行了研究。文献[3] [4]研究了不同磁芯结构和原副线圈相对位置变化时的对耦合系数的影响, 文献[5]研究了不同个数及形状的辐射状磁条对耦合系数的影响, 但以上文献均未详细介绍如何在特定传输功率等级, 效率约束值及空间约束下设计优化松耦合变压器。本文基于电磁场有限元分析软件 Ansoft Maxwell 在上述几种约束条件下对三种典型结构的磁芯和线圈进行仿真分析, 提出一种满足原副边线圈气隙为 50 mm, 最大水平方向偏移 50 mm 的高功率密度松耦合变压器的设计优化方法。并根据变压器参数设计双边 LCC 谐振补偿网络[8], 将松耦合变压器的 Maxwell 电磁场有限元分析模型引入 Simplorer 多域机电系统设计仿真软件中进行整个系统的联合仿真, 为实验前期的设计提供验证[6] [7]。最后搭建 3.3 KW 无线电能传输实验平台, 验证该无线电能传输系统设计的可行性。

## 2. 松耦合变压器的仿真分析及优化

松耦合变压器的耦合系数是决定系统功率传输能力和效率的决定性因素之一, 高功率密度松耦合变压器设计的关键在于在一定约束条件下获得尽可能高的耦合系数。本文主要讨论平面型松耦合变压器, 线圈层数为一层且相邻两匝之间没有间隙。空间约束条件为 300 mm \* 300 mm 的平面区域, 在原副边垂直距离(气隙)为 50 mm, 最大水平方向错位 50 mm 时保证耦合系数高于 0.4, 实现系统高效运行。

### 2.1. 磁芯及线圈结构讨论

图 1 是三种典型的平面型松耦合变压器结构, 其磁芯均是厚度为 10 mm 的 PC95 铁氧体磁芯, 线圈分别为圆形, 方形, DD 形绕法, 各变压器主要包括以下几个参数: 磁芯外尺寸 L 为 300 mm, 线圈内径 R 为 90 mm, 线圈宽度 W 为 60 mm。为了易于对比, 其原边与副边完全相同, 故匝比为 1:1。

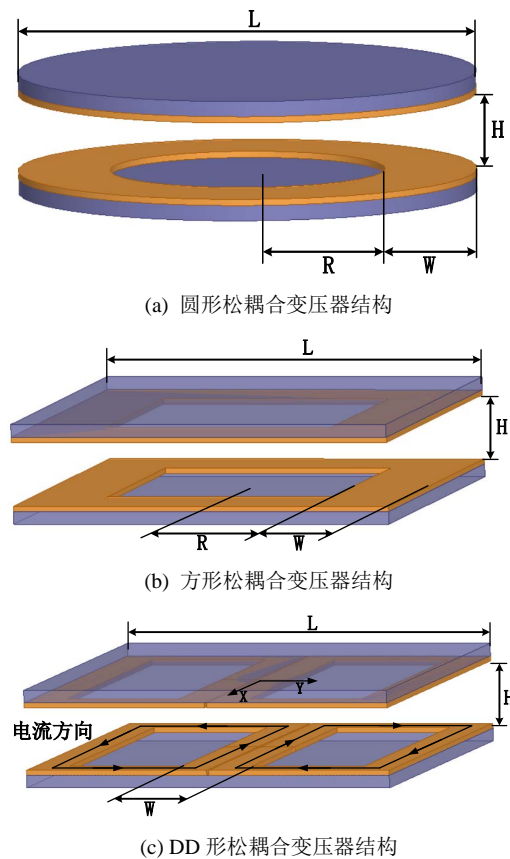


Figure 1. Planar loose coupling transformer structure  
图 1. 平面型松耦合变压器结构图

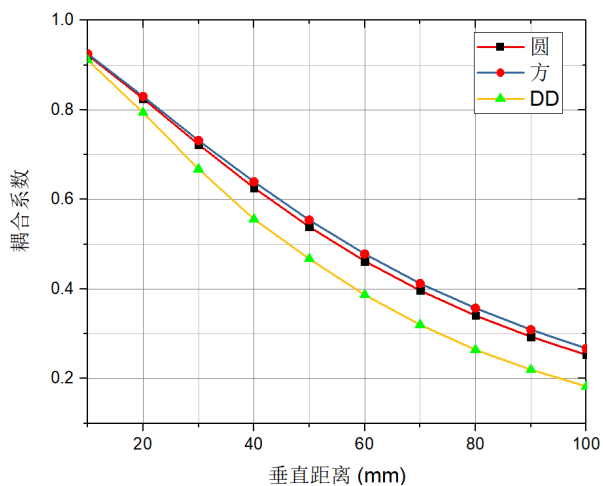
当发射端和接收端的垂直距离(气隙)改变或存在水平方向上的错位时,会影响其磁场分布进而影响耦合程度,在 Maxwell 软件三维静态场中进行参数化求解,可以分别获得不同结构的松耦合变压器耦合系数变化情况。

图 2 是初级侧和次级侧未发生水平方向偏移条件下,耦合系数随垂直距离(气隙)变化情况,可以看出,耦合系数与气隙成近似线性关系,随着气隙增加,耦合系数逐渐减小。当气隙相同时,方形结构松耦合变压器耦合系数最高。当固定绕组气隙为 50 mm 时,耦合系数随水平方向偏移的变化情况如图 3 所示,当错位小于 60 mm 时,方形耦合系数最高,由于 DD 型在 X 方向和 Y 方向的错位对耦合程度的影响不同,对 X 方向的偏移十分敏感,接近 90 mm 时耦合系数降为 0,而在 Y 方向上受偏移影响较小,当偏移大于 60 mm 时耦合系数超过方形。本文主要考虑原副边线圈对水平偏移方向不敏感情况下的无线电能传输,故选择方形结构进行下一步分析。

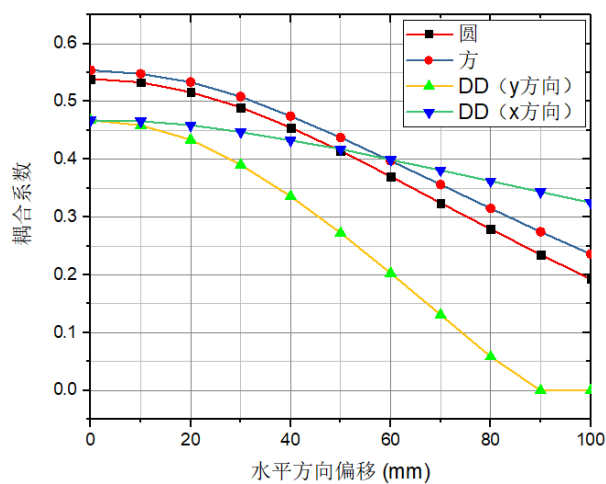
## 2.2. 线圈绕组位置对耦合系数的影响

磁芯选择 300 mm \* 300 mm 方形磁芯,保持线圈宽度 60 mm 不变,线圈与磁芯的相对位置也会对原副边的耦合产生影响,图 4 表示耦合系数随线圈内径 R 的变化情况。

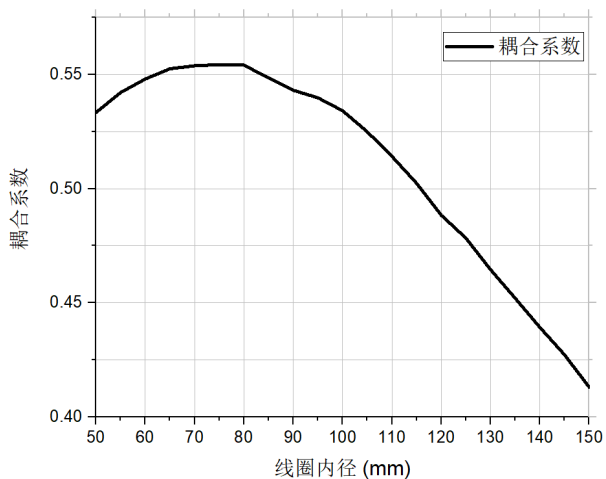
可以看出,当线圈内径较小时,耦合系数随着其增大呈上升趋势,这是由于内径更大的线圈可以提供更大范围的磁场,在线圈内径增加到 80 mm 时,耦合系数越达到峰值,随后呈下降趋势,通过分析磁感应强度场图的变化可知,当线圈的外径接近但不等于磁芯的外径时,原副边线圈在相同电流激励下获得的磁感应强度最高,耦合程度最好。



**Figure 2.** Influence of vertical distance on coupling coefficient  
**图 2.** 垂直距离变化对耦合系数的影响



**Figure 3.** Influence of horizontal offset on coupling coefficient  
**图 3.** 水平方向偏移对耦合系数的影响



**Figure 4.** Effect of coil inner diameter on coupling coefficient  
**图 4.** 线圈内径对耦合系数的影响

### 2.3. 磁芯结构的优化

平面磁芯的主要作用是线圈内高频电流产生的交变磁场提供导磁通路，根据上述分析，在不影响耦合系数的同时对其进行优化，以减小变压器的体积质量。本文设计如图 5 所示新型松耦合变压器。

新型松耦合变压器在方形磁芯的基础上进行改进，保持线圈内径 80 mm 不变，改由磁条代替整片磁芯，为确保磁条不会因为过细导致饱和，在仿真结果中观察磁芯内部磁感应强度场图，如图 6 所示，原副边线圈通过 20A 电流激励时，线圈附近磁感应强度最大约为 25 mT，没有达到高频条件下铁氧体磁芯的饱和磁感应强度。图 7 是新型松耦合变压器原副边气隙为 50 mm，耦合系数随水平方向发生偏移时的变化情况。在水平方向没有错位时，耦合系数为 0.5，水平方向错位 50 mm 时，耦合系数降到 0.4 左右。

### 3. 仿真分析及验证

通过联合 Maxwell 电磁场有限元分析和 Simplerer 电路系统分析可以得到精确的无线电能传输系统仿真模型。针对得到的上述新型松耦合变压器的无功补偿网络，本文采用双边 LCC 补偿拓扑，图 8 是将 Maxwell 中仿真模型导入到 Simplerer 软件后的联合仿真界面。

电源  $V_{in}$  是模拟逆变输出的方波电压源， $L_{f1}$ ， $C_{f1}$ ， $C_1$  组成初级侧谐振补偿网络， $L_{f2}$ ， $C_{f2}$ ， $C_2$  组成次级侧谐振补偿网络，其参数可以由谐振频率，变压器初级侧和二次侧自感以及互感确定，电路主要参数见表 1。

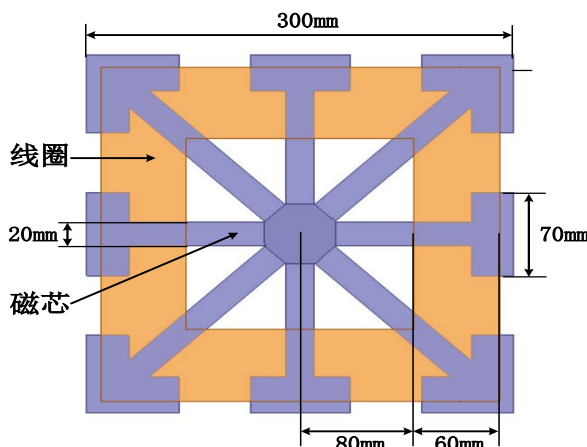


Figure 5. New loose coupling transformer structure  
图 5. 新型松耦合变压器结构图

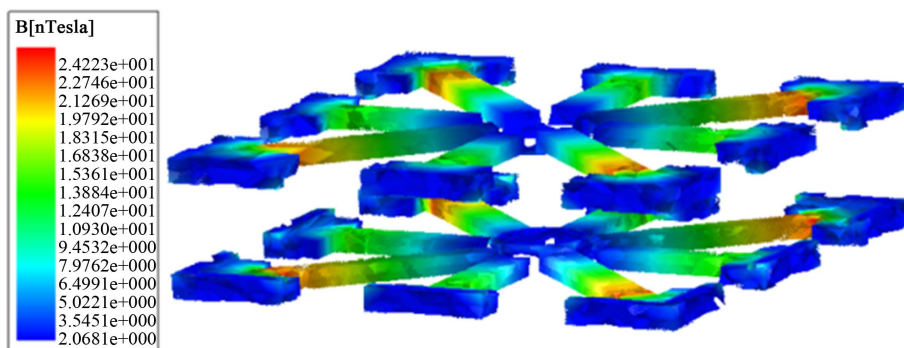
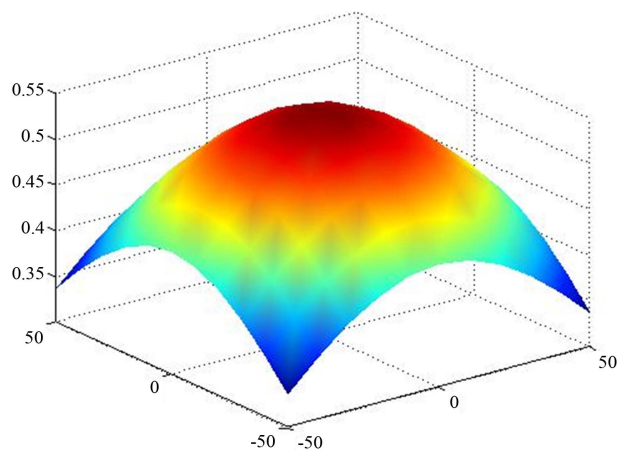
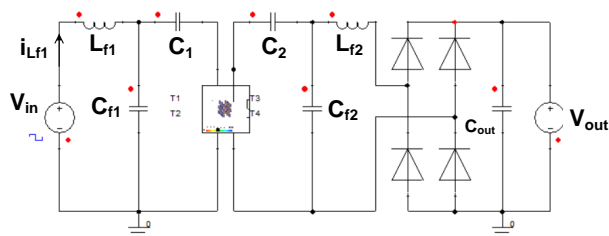


Figure 6. Core magnetic flux density distribution  
图 6. 磁芯磁感应强度分布



**Figure 7.** Influence of horizontal offset on coupling coefficient  
**图 7.** 水平方向偏移对耦合系数的影响



**Figure 8.** Co-simulation circuit  
**图 8.** 联合仿真电路图

**Table 1.** Parameters of simulation circuit  
**表 1.** 仿真电路参数

仿真参数	数值
输入方波电压 $V_{in}$	400 V
工作频率 $f$	90 kHz
初级线圈自感 $L_s$	151 $\mu$ H
次级线圈自感 $L_p$	151 $\mu$ H
耦合系数 $k$	0.4~0.5
初级串联电感 $L_{f1}$	60.5 $\mu$ H
次级串联电感 $L_{f2}$	60.5 $\mu$ H
初级并联电容 $C_{f1}$	51.7 nF
次级并联电容 $C_{f2}$	51.7 nF
初级串联电容 $C_1$	34.6 nF
次级串联电容 $C_2$	34.6 nF
输出电源电压 $V_{out}$	300 V

运行后可以得到初级侧谐振网络输入电压电流波形，图 9 为松耦合变压器原副边气隙为 50 mm，未发生水平偏移时的仿真输入波形，此时输入电压与输入电流同相位，系统在单位功率因数下运行，传输

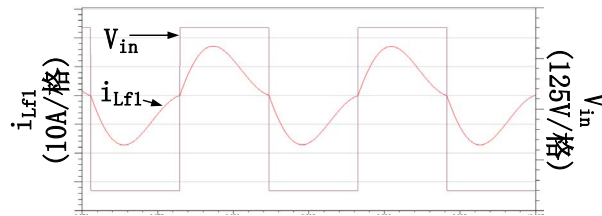


Figure 9. Simulation waveform of Primary Resonant Network  
图 9. 初级谐振网络输入仿真波形

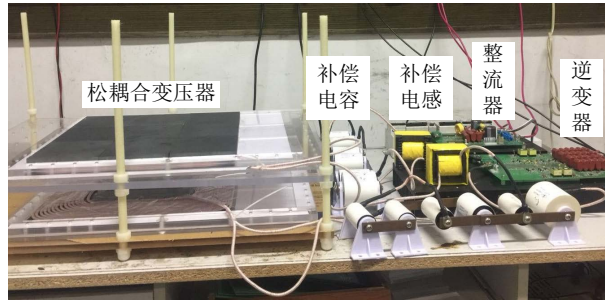


Figure 10. Experiment platform  
图 10. 实验平台

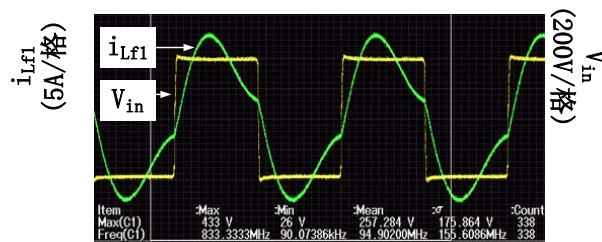


Figure 11. Primary resonant network input waveform  
图 11. 初级谐振网络输入波形

功率 3.5 KW。改变松耦合变压器原副边线圈相对位置后，耦合系数发生改变，但系统仍在单位功率因数下运行，满足约束条件下的设计要求。

#### 4. 实验验证

为验证以上分析，搭建如图 10 所示的实验平台，逆变器输入端接 400 V 直流电源，经原边补偿网络，松耦合变压器，副边补偿网络，整流器后接入负载，电路参数和仿真电路一致，图 11 给出了系统在输入电压 400 V，松耦合变压器原副边气隙为 50 mm，未发生水平偏移时的初级谐振网络输入波形。

可以看出，实验波形与仿真波形基本一致，此时系统工作在单位功率因数下，输出功率为 3.3 KW，系统整体(逆变输入到整流输出)实测效率达 95%。因此，该无线电能传输系统满足设计要求。

#### 5. 结论

本文针对无线电能传输系统特点，通过仿真分析对比了三种典型结构松耦合变压器优缺点，讨论松耦合变压器耦合系数的影响因素，在传统方形松耦合变压器基础上进行优化，设计了满足设置约束条件的新型高功率密度松耦合变压器。并通过仿真及实验结果表明联合 Maxwell 和 Simplorer 仿真软件建立精确无线电能传输系统仿真模型的方法可以实现实验前期的设计验证，并具有较高的仿真精度。

## 参考文献 (References)

- [1] 曹玲玲, 陈乾宏, 任小永, 等. 电动汽车高效率无线充电技术的研究进展[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 1-13.
- [2] 张巍, 陈乾宏, Wong, S.C., 等. 新型非接触变压器的磁路模型及其优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 108-116.
- [3] Zhang, W. and White, J.C. (2015) Loosely Coupled Transformer Structure and Interoperability Study for EV Wireless Charging Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 6356-6367.
- [4] Lu, J.H., Zhang, J.K. and Li, W.J. (2015) Parameters Design Method of Magnetic Coupled Coil in ICPT System. 2015 *International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration*, 268-271.
- [5] Budhia, M., Covic, G.A. and Boys, J.T. (2011) Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **26**, 3096-3108.
- [6] 陈新, 张桂香. 电磁感应无线充电的联合仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014(4): 434-440.
- [7] 李秋生, 张国兴, 李培英, 等. 电动汽车无线充电松耦合变压器仿真研究[J]. 电子设计工程, 2017, 25(8): 27-31.
- [8] Li, S., Li, W., Deng, J., Nguyen, T.D. and Mi, C.C. (2015) A Doublesided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **64**, 2261-2273.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)