

应用于汽车无线充电的松散耦合变压器优化设计

唐云宇，祝帆，马皓

浙江大学电气工程学院，浙江杭州 310027

中图分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517（2016）12-4-163

摘要：无线充电方式相比较传统的插电式充电方式，具有无接触火花，对充电环境要求较低的特点，因此在电动汽车系统中存在广阔的应用前景。该文研究无线充电系统中的松散耦合变压器的优化，通过有限元仿真以及实验测量，分析不同线圈覆盖面积和磁芯摆放位置情况下的耦合系数变化。最后通过实验测试了不同偏移下装置的耦合系数。

关键词：无线充电，松散耦合变压器，耦合系数，效率优化

Optimizations of Loosely Coupled Transformer for Wireless Power Transfer in EV applications

Tang Yunyu, Zhu Fan, Ma Hao

College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China

Abstract: Compared with conventional plug-in charging methods, wireless power transfer methods are insensitive to environment and without contact spark. Therefore, this technology is promising in electric vehicle (EV) applications. In this paper, optimizations of loosely coupled transformer are carried out by finite element method (FEM) and experiment measurement. The coupling coefficient varying with different coverage area of windings and positions of magnetic cores are analyzed and discussed. Finally, some test results are given when considering the misalignment of secondary plate.

1 引言

由于无线充电技术不需要物理线路的连接，因此相比于普通的插电式充电系统具有更高的安全系数，更加适用于严苛的充电环境，如矿场作业，雨雪天气等。电动汽车在节能环保的大环境下具有更好的应用前景，但是储能密度不高，电池体积过大一直限制电动汽车的发展。应用无线充电技术可以减小电池体积，同时提供方便、安全的充电环境 [1]。

决定无线充电系统效率的主要因素是松散耦合变压器，因此需要合适的方法来优化变压器的结构特性以及电路参数特性，达到系统效率的最优化。由于体积、空间的限制，松散耦合变压器一般采用平面结构。根据变压器产生的磁通分布特点，可分为单面变压器和双面变压器结构。

文献 [2] 给出了单面圆盘状的变压器结构，文献 [3] 在 [2] 的基础上提出了一种优化的“DD”变压器结构。虽然该结构能够得到相对优化的耦合系数，但是因为零耦合偏移点的存在限制了偏移的范围。该文提出通过增加一组额外的绕组和电路来提升偏移范围，但是电路的整体成本增加，系统稳定性下降。而螺线管结构的双面变压器结构不存在零耦合偏移点，因此偏移条件下的耦合特性更好。同时磁路路径大，适用于原副边距离比较大的应用场合。虽然双面变压器的背部漏磁比较大，但是可以通过屏蔽装置减小背部漏磁，增大原副边的耦合特性。

为提高系统的整体效率，首先从磁路的角度出发，在结构上优化变压器原副边的线圈覆盖面积和磁芯的布局，运用有限元仿真软件和实验测试，在不同的线圈和磁芯位

置情况下，找出能够使耦合系数最大的结构。最后讨论了在偏移条件下，不同的位置优化结果对整体优化的影响。

2 松散耦合变压器结构对比

从磁路的分布特点主要可以将平面松散耦合变压器分成两种：单面变压器和双面变压器。如图 1 所示，单面变压器的绕组分布在磁芯的一边，而双面变压器的绕组是围绕着磁芯分布，其中： R_{st} 、 R_{dt} 分别为单面、双面变压器磁通分布的主要半径。可以看出，双面变压器的磁通分布路径的半径更大，因此耦合到接受边的磁通更多，通过合理的设计可以得到更大的耦合系数。

另外一个需要注意的地方是，单面变压器存在零耦合偏移点，即在一定的偏移情况下，由于原边耦合到副边的磁通相互抵消，导致耦合系数基本为零。这个偏移量的大

小限制了整体的偏移范围。一般需要额外加上其他的绕组来提高偏移范围，但是由于额外电路的增加导致电路的整体成本增加，可靠性降低。而双面变压器原副边不存在零耦合偏移点，因此适用于偏移情况比较恶劣的应用场合。

双面变压器的主要缺点是背部漏磁比单面变压器大，因此相应地减弱原副边的耦合。通过增加无源屏蔽装置，如铝板，高磁导率材料等，可以减小这一部分的漏磁，进而增大耦合系数。

3 双面变压器的设计与优化

3.1 螺线管平面变压器

本文以双面变压器基本结构为基础，提出了一种新型的螺线管结构平面变压器。如图 2 所示，原副边结构都是由绕组，磁芯和屏蔽铝板组成。从成本和结构的角度考虑，磁芯采用四根条状磁芯代替传统的整块磁芯。由于将无线充电应用于汽车充电时，需要考虑汽车底盘与地面的距离，因此这里优化的原副边距离设定为 200mm。

为了克服原边背部漏磁比较大的缺点，本文提出了一种改进的原边屏蔽结构，如图 3 所示。相比较于图 3(a) 中传统的屏蔽结构，图 3(b) 中增加了引导磁芯，目的是将一部分背部漏磁的磁场方向改变，使得更多的磁通发射到副边磁芯上。这种方法在增加少量的磁芯的情况下能够提高原副边的耦合系数，并且减少铝板吸收的漏磁的量，进而使得铝板上产生的热量减少，提高系统的整体效率。

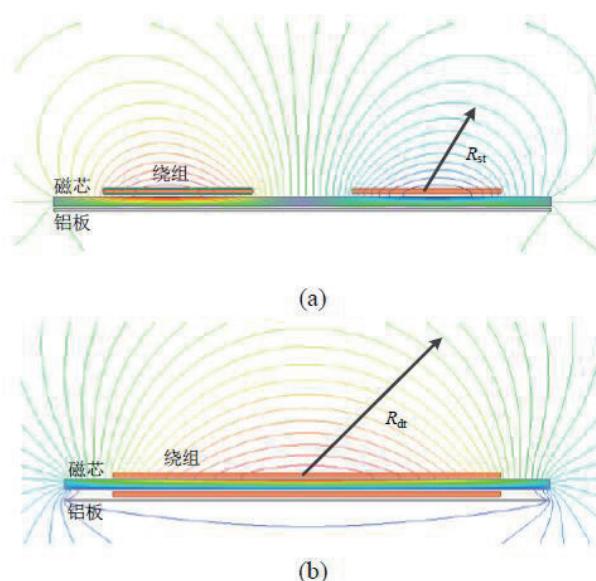


图 1 单面变压器 (a) 和双面变压器 (b) 主要磁通分布图

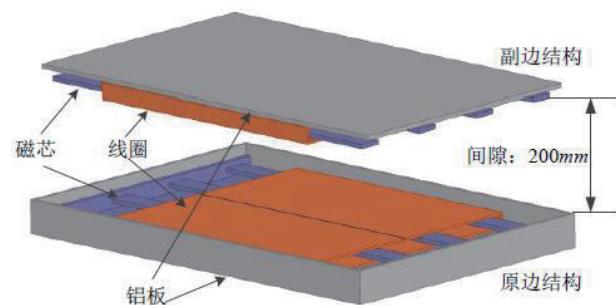


图 2 螺线管结构双面变压器的主要结构图

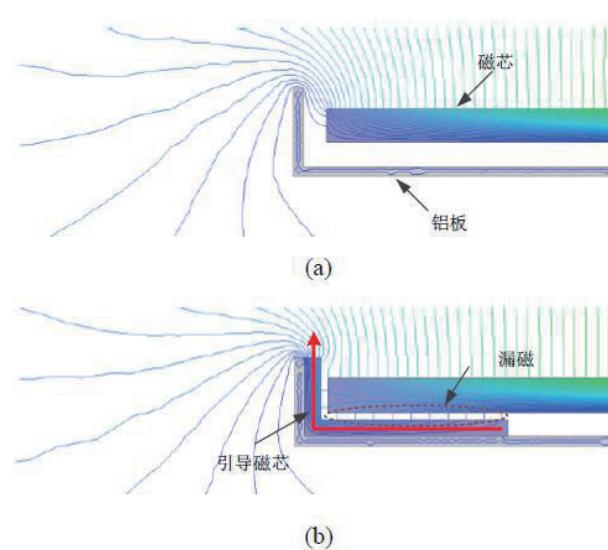


图 3 传统铝板屏蔽装置 (a) 和改进的铝板屏蔽装置 (b) 图

为了使耦合系数在合适的范围之内，一般先设定变压器的尺寸为合适的大小表面，因此这里假定变压器的表面尺寸为 $600\text{mm} \times 400\text{mm}$ 。变压器的厚度由选定的磁芯的厚度决定。提高系统的整体效率首先需要提高原副边的耦合系数，所以本文首先研究在不同的线圈覆盖面积和磁芯摆放位置条件下的耦合系数的变化。

3.2 线圈覆盖面积优化

图 4 为没有铝板屏蔽下的主要磁通的路径图。通常将原边发射出来的磁通分成两个部分：漏磁通和耦合磁通。相应的路径长度分别为： l_e 和 l_c 。通过磁路分布可以得出，增加线圈的覆盖长度 d_c 同时会增加漏磁通和耦合磁通的路径长度。前者会增大耦合系数，而后者会减小耦合系数，因此需要得到在不同的线圈覆盖面积下的耦合系数才能知道最优的线圈覆盖组合。

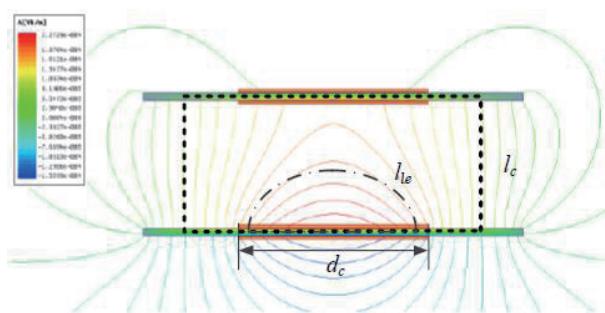
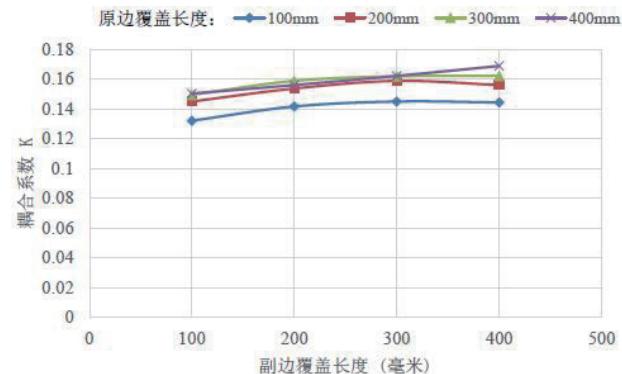


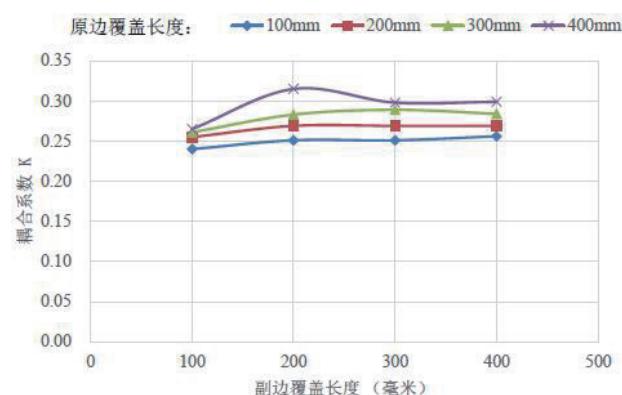
图 4 磁通分布主要路径图

文献 [1]–[3] 都是采用有限元仿真的方法来得到相应条件下的耦合系数，但是仿真三维结构对计算资源要求较高，同时耗时较长。如果采用精简模型则很难保证相应的精度。因此本文给出相应的不同线圈覆盖面积下的耦合系数测试结果。同时综合考虑线圈的成本以及磁通的覆盖范围，原副边的覆盖长度都在 400mm 以内。如图表 5 所示为不同的原副边覆盖长度组合下的耦合系数的变化情况。

图 5(a) 和 (b) 的实验结果表明，加屏蔽装置和不加屏蔽装置的规律有所不同。主要原因是屏蔽装置改变了本身漏磁阻的特性，使得整体的耦合特性发生变化。不加屏蔽装置情况下，最大的耦合系数出现在原边和副边覆盖长度都为 400mm 的条件下。而加上屏蔽装置之后，原边为 400mm，副边为 200mm 的情况下耦合系数最大。因此本文采用加上屏蔽装置之后的优化结果作为原副边的线圈覆盖长度。



(a) 原副边无屏蔽装置



(b) 原副边有屏蔽装置

图 5 不同线圈覆盖面积下的耦合系数变化图

3.3 磁芯位置优化

磁芯作为导磁材料，同样对耦合特性产生很大的影响。本文研究磁芯位置的主要变量为中间两条磁芯之间的间距： d_f 。这里假定原副边的磁芯位置对应相同。磁芯的位置变化对于线圈内的磁场分布会有很强的引导作用，相对位置的改变磁通的分布以及耦合磁场的路径长度。图 7 给出了不同的磁芯间距下的耦合系数变化趋势。耦合系数随着间

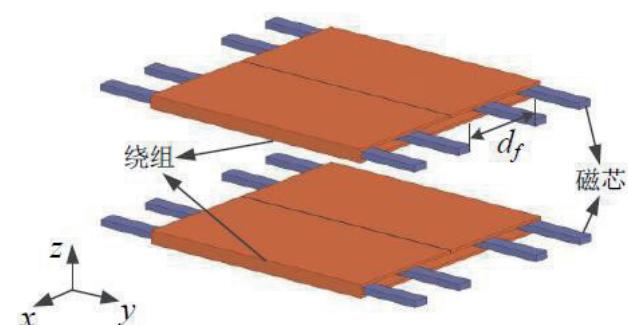


图 6 磁芯位置分布图

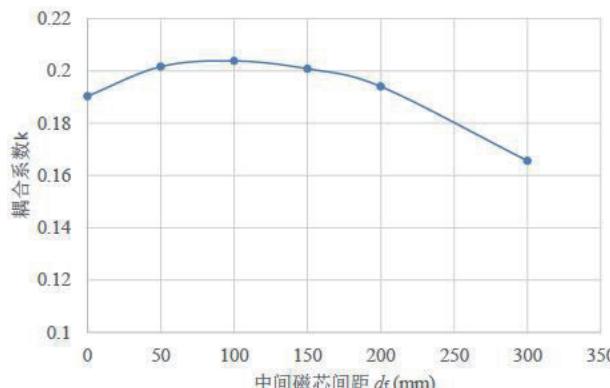


图 7 中间磁芯间距与耦合系数之间的关系图

距的增大呈现先增大后减小的变化过程。最高的耦合点出现在磁芯间距为 100mm 的位置，即为四条磁芯的均分点。与线圈优化的位置相同，因此选定磁芯为平均排布的方式。这样得到的耦合系数最高。

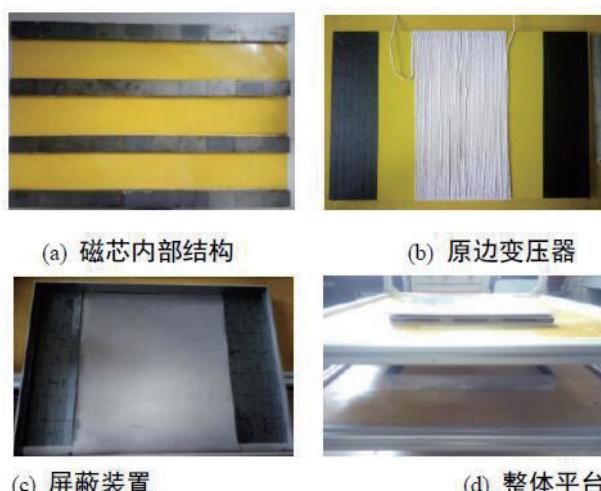


图 8 搭建平台流程

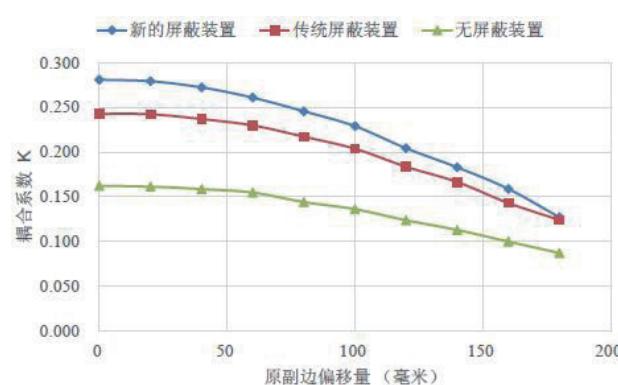


图 9 不同屏蔽情况下耦合系数与偏移量的关系图

3.4 偏移条件下的耦合系数

按照优化过程搭建实验平台，测试耦合系数如图 8 所示。通过图 9 的测试结果看出，相对于传统的屏蔽装置，加上引导磁芯的屏蔽装置可以显著改善原副边的耦合系数。而不加屏蔽装置的耦合系数相对较低。

4 结语

本文首先对比了单边松散耦合变压器与双边松散耦合变压器的优缺点，通过仿真讨论耦合系数的影响因素。主要讨论了不同的线圈的覆盖面积和不同的磁芯位置对于耦合系数的影响，并且提出了一种新型的屏蔽结构，通过实验验证了对于耦合系数提高的有效性。

参考文献

- [1] G. B. Joung and B. H. Cho, "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of transcutaneous transformer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 6, pp. 1013–1022, Nov 1998.
- [2] M. Budhia, G. A. Covic and J. T. Boys, "Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, Nov. 2011.
- [3] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic and C. Y. Huang, "Development of a single-sided flux vehicle IPT charging systems", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 318–328, Jan 2013.

作者简介：

唐云宇 男，1990 年生，博士研究生，主要研究方向为 IGBT 并联均流技术研究，应用于汽车的无线充电技术研究，tyywylb@163.com。

马皓 男，1969 年生，博士，教授，研究方向为电力电子技术及其应用、电力电子先进控制技术、电力电子系统故障诊断，mahao@zju.edu.cn。