

# 感应耦合式非接触电能传输系统中线圈绕制方法 对耦合系数影响研究

祝帆, 唐云宇, 马皓

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## Investigating on Influence of Coil Winding Method on Coupling Coefficient of Inductive Coupled Power Transfer System

ZHU Fan, TAN Yun-yu, MA Hao

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

**ABSTRACT:** Coupling coefficient is the main factor affecting efficiency of inductive coupled power transfer (ICPT) system. Generally, copper sheet is used instead of coil with real structure in simulation of ICPT which ignores the effect of the coil winding method of coupling coefficient. Two types of winding methods are discussed in this paper, one is the vertical winding method which is similar to the simulation structure, and the other one is tilt winding method which makes coil distribute evenly along core. Furthermore, relationships between coupling coefficient and the combinations of clockwise winding coils, counterclockwise winding coils and rotated winding coils are researched. Conclusion that the combination of clockwise winding and counterclockwise winding coils can get the maximum coupling coefficient is given out by theoretical analysis and 3D simulations. A set of experiments are processed to verify the effectiveness of the optimized coils.

**KEY WORDS:** coupling coefficient; tilt winding method; coil optimization; combination.

**摘要:** 耦合系数是影响感应耦合式非接触电能传输系统工作效率的关键参数, 一般变压器仿真时都采用铜排结构来代替实际线圈绕组以简化模型, 忽略了线圈绕制方法对耦合系数的影响。本文分析讨论了近似仿真结构的垂直绕制法和均匀分布的三角斜绕法两种线圈绕制方法, 并在此基础上研究了三角斜绕法中线圈正绕、反绕、线圈翻转等不同绕制方法组合时对系统耦合系数的影响。通过理论分析和有限元仿真不同组合下的变压器耦合系数变化情况, 得出在线圈匝数、覆盖面积不变的情况下, 线圈原副边采取正绕与反绕相结合的绕制方法能够得到最大的耦合系数。实验结果验证了理论分析的正确性, 令线圈结构得到了优化。

**关键词:** 耦合系数; 三角斜绕法; 线圈优化; 组合

中图分类号: TM4 文献标识码: B  
文章编号: 1606-7517(2016)03-5-136

## 1 引言

感应耦合式非接触电能传输系统通过电磁感应传输能量而不依赖于物理接触, 具有安全、清洁、低环境敏感度等优点, 在电子设备、电动汽车<sup>[1]</sup>、医疗植入<sup>[2]</sup>等领域被广泛研究与应用。松散耦合变压器是感应耦合式非接触电能传输系统的核心, 其设计的好坏直接影响系统的传输性能。目前, 提高系统传输效率的主要方法是通过优化线圈和磁芯结构来提高系统耦合系数。文献[3][4]提出了双面绕组的线圈结构, 相对于传统的单面绕组圆盘线圈, 双面绕组变压器在相同磁芯尺寸的情况下具有更高的基波磁通路径高度, 这意味着在相同气隙高度处, 双面绕组变压器具有更高的耦合系数。当变压器背面加上屏蔽铝板之后, 系统耦合系数还能提高近 50%。文献[5]提出了利用双面绕组内部多层不等长磁芯叠加, 使得磁芯横截面面积沿轴线呈阶梯下降, 从而得到磁芯内部磁场强度近似均匀分布, 减少磁芯损耗。关于松散耦合变压器的磁芯结构、线圈覆盖面积、间距等方面的研究<sup>[6]</sup>已经很多, 但是实际上即便在相同磁芯结构、线圈覆盖范围、线圈间距的情况下, 线圈绕制方法不同也会对系统耦合系数造成一定影响, 关于该方面的研究则是很少。

本文基于双面绕组变压器结构模型, 分析比较了近似仿真结构的垂直绕制方法和三角斜绕法两种常见绕制方法对系统耦合系数的影响, 并进一步研究了线圈正绕、反绕、翻转组合等绕制细节对系统耦合系数的影响, 将结合三维有限元分析仿真在第三部分进行详细讨论。

## 2 垂直绕制方法和三角斜绕法研究

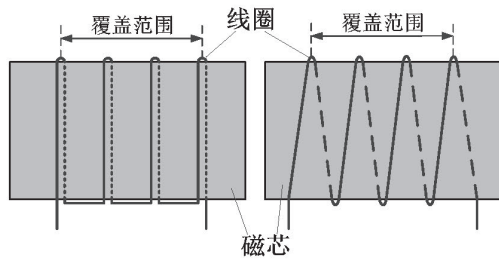


图 1 垂直绕制方法和三角斜绕法绕制方法示意图

图 1 为基于双面绕组变压器结构的线圈垂直绕制法和三角斜绕法两种常见线圈绕制方法示意图。垂直绕制方法比较接近一般计算和软件仿真时的结构，具有电流走向与磁芯轴线垂直，单匝线圈集中的特点。而三角斜绕法则类似螺线管绕制方法，单匝线圈正好均匀绕满一个线圈间距，不存在垂直绕制法中线圈之间的连接线。根据上述结构特点，对两种绕制方法进行了 3D 有限元仿真，图 2 给出了仿真模型，具体仿真参数如表 1 所示。

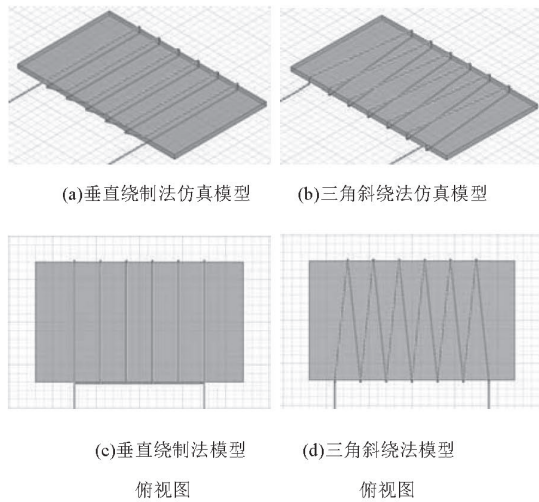


图 2 垂直绕制法和三角斜绕法 3D 有限元仿真模型

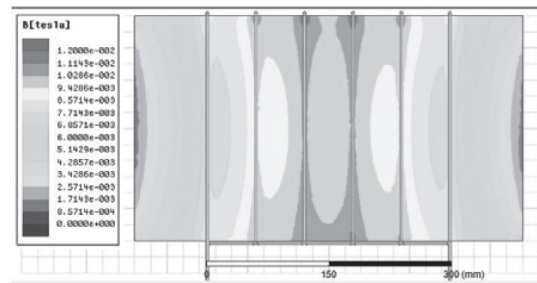
表 1 3D 有限元仿真模型参数

磁芯尺寸	480mm*280mm*12mm	
气隙高度	200mm	
线圈覆盖范围	300mm	
原副边线圈匝数	原边	副边
	6 匝	6 匝
原副边激励电流	10A	10A

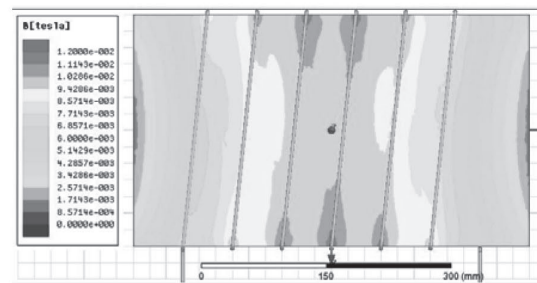
表 2 两种绕制方法仿真结果对比

模型	原边电感量/ $\mu\text{H}$	副边电感量/ $\mu\text{H}$	耦合系数
垂直绕制法	16.881	16.890	0.21302
三角斜绕法	16.776	16.780	0.21155

表 2 给出了垂直绕制法和三角斜绕法两种模型的仿真结果，可以发现相同的磁芯结构、线圈间距、覆盖范围的情况下，两种绕制方法耦合系数相差不大。



(a) 垂直绕制法模型磁芯内部磁感应强度分布图



(b) 三角斜绕法模型磁芯内部磁感应强度分布图

图 3 两种绕制方法磁芯内部磁感应强度

图 3 给出了两种绕制方法的变压器磁芯内部磁感应强度分布图，从图中可以看出由于垂直绕制法单匝线圈集中，导致线圈底下的磁芯磁感应强度较大，线圈间磁芯磁感应强度变化较为明显，而三角斜绕法中单匝线圈正好均匀绕满一个线圈间距，所以磁芯内部磁感应强度过度均匀，有利于减少磁芯内部损耗并增强散热。

## 3 线圈绕制方向对系统耦合系数影响的理论分析

根据第二部分的分析，三角斜绕法与垂直绕制法具有相近的耦合系数，但其磁芯内部磁场分布更加均匀有利于系统优化。三角斜绕法存在正绕法和反绕法两种，如图 4 所示。当原副边线圈中有一个线圈翻转时，两者相对面的线圈走向将会改变，所以原副边的线圈绕制方法组合总共有 16 种，根据模型对称性，最终存在四种不同的线圈绕制方法组合，如表 3 所示，其中磁芯相对线圈是指原副边线圈与气隙相邻一面的线圈分布，主要与系统耦合系数的构成相关。

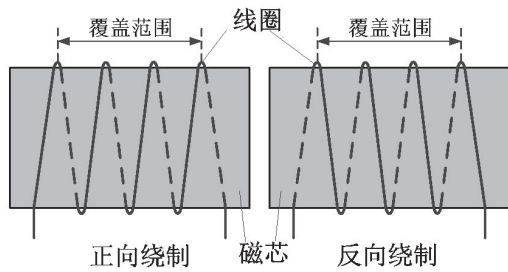
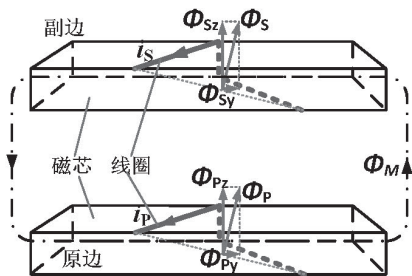


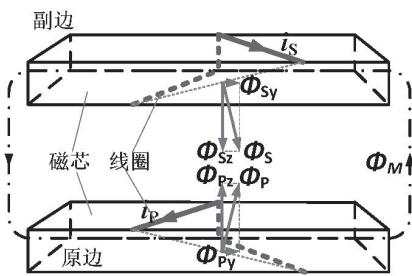
图 4 正绕法、反绕法绕制方法示意图

表 3 变压器不同绕制方法组合示意图

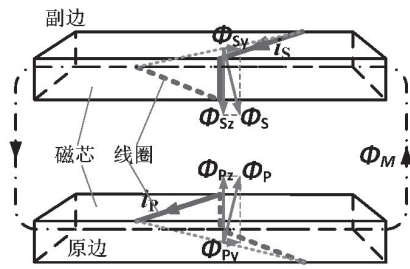
绕制方法	原边线圈	+	副边线圈	磁芯相对线圈
正绕 + 正绕		+		
正绕 + 正绕翻转		+		
正绕 + 反绕		+		
正绕 + 反绕翻转		+		



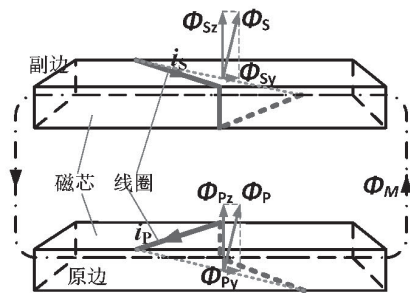
(a) 原边正绕，副边正绕变压器磁通量分布



(b) 原边正绕，副边反绕变压器磁通量分布



(c) 原边正绕，副边正绕翻转变压器磁通量分布



(d) 原边正绕，副边反绕翻转变压器磁通量分布

图 5 四种绕制方法变压器磁通量分布示意图

图 5.a 是原副边均为正绕时的变压器磁通量分布图，当原边加入激励电流  $i_p$  时，副边产生感应电流  $i_s$ 。由于线圈均匀绕制一个线圈间距，所以  $i_p$  和  $i_s$  产生的磁通量  $\Phi_P$  和  $\Phi_S$  不与磁芯内的互感磁通  $\Phi_M$  平行，存在水平分量和垂直分量。从图 5.a 可以发现两者的垂直分量  $\Phi_{Pz}$  和  $\Phi_{Sz}$  同向，不能像  $\Phi_{Py}$  和  $\Phi_{Sy}$  一样形成互感磁通链路，且  $\Phi_{Sz}$  的存在会增加副边背部漏磁。

图 5.b 是原边正绕，副边反绕时的变压器磁通量分布图，原边激励  $i_p$  产生感应电流  $i_s$ ，两者产生的磁通量垂直分量  $\Phi_{Pz}$  和  $\Phi_{Sz}$  方向相反，能够形成磁通链路，从而增强耦合系数。

根据上述分析可以给出原边正绕、副边正绕翻转组合和原边正绕、副边反绕翻转组合时变压器磁通量分布图，如图 5.c 和图 5.d 所示，其垂直磁通量分量与图 5.b 和图 5.a 相似。从图中还可以发现，单个线圈的翻转会使得原边和副边线圈的对应单匝线圈，在俯视图里呈现正三角和倒三角的组合，重叠面积只占了三角面积的一半，导致原副边垂直磁通分量的耦合与不耦合情况在单匝线圈中出现各占一半，具体分布如图 6 所示，图中阴影面积代表原副边线圈在该区域内耦合。根据面积计算可以得出，原边正绕副边正绕翻转组合系统和原边正绕副边反绕翻转组合系统

的耦合系数近似相等，对耦合系数的提高效果为原边正绕副边反绕组合系统的一半。

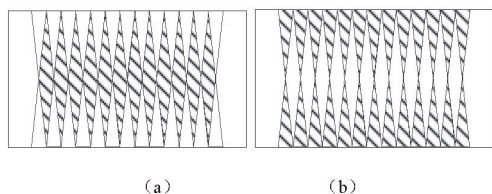


图 6 (a) 原边正绕，副边正绕翻转 (b) 原边正绕，副边反绕翻转时垂直方向耦合情况俯视图

#### 4 线圈绕制方向对系统耦合系数影响的仿真结果

图 7 给出了原边 6 匝，副边 6 匝情况下，线圈采取四种绕制方法组合时关于耦合系数的 3D 有限元仿真结果和实验结果，变压器参数同表 1。可以发现，原副边采取正绕与反绕组合能够在不改变线圈匝数、覆盖面积的情况下取得最大耦合系数。正绕加正绕翻转组合与正绕加反绕翻转组合由于单匝线圈重叠面积占单匝线圈一半，所以耦合系数相对于原副边均正绕组合从 0.2116 提高到了 0.2220 和 0.2238，但是低于线圈正绕加反绕组合所得到的耦合系数  $k=0.2325$ ，耦合系数增加量近似为线圈正绕加反绕组合的一半，与理论分析中的面积计算结果相符。

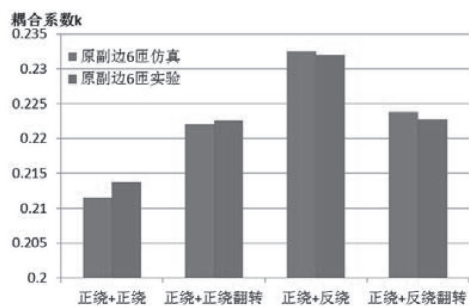


图 7 原边副边各 6 匝四种线圈绕制组合仿真结果与实验结果

原副边同匝数的对称设计是较为特殊的一种情况，原副边对应单匝线圈覆盖范围相同。更多实际情况下为了优化系统电路效率，系统设计时采取非对称设计，原副边线圈出现不完全重合。参考大量文献实验参数以及一般系统设计的要求，本文首先设定副边固定为 6 匝，原边分别为 6 匝、12 匝、18 匝和 24 匝四种不同匝数组合，电感量范围为  $16\mu\text{H}$  到  $245\mu\text{H}$ 。表 4 给出了其中较为典型的两种线圈绕制方法组合结构示意图，即原边分别为 12 匝和 18 匝，耦合系数的仿真结果为表

中对应的  $k$  值。

图 8 给出了四种匝数组合下的仿真结果比较图，结合表 4 的磁芯相对线圈图中可以看出当原副边匝数不同时，四种绕制方法都出现了磁芯相对线圈位置交错，即都存在线圈的垂直耦合。线圈正绕加反绕组合将线圈正绕加正绕组合中大部分不耦合面积转变为磁通链路耦合，耦合系数提升最大，而线圈正绕加正绕翻转组合与线圈正绕加反绕翻转组合由于对应线圈的单匝线圈三角朝向不同，耦合系数提升效果低于正绕加反绕组合。由于线圈覆盖范围不变，随着原边线圈匝数的增加，线圈间距减少，导致图 5 中的磁通量  $\Phi_P$  和  $\Phi_S$  与磁芯内部互感磁通  $\Phi_M$  之间的最大夹角变小，即两者的垂直分量  $\Phi_{Pz}$  和  $\Phi_{Sz}$  变小，所以耦合系数提升效果会随之减弱。

表 4 原边 12 匝与 18 匝时不同绕制方法比较

绕制方法	原边 12 匝+副边 6 匝 磁芯相对线圈位置	原边 18 匝+副边 6 匝 磁芯相对线圈位置
正绕 + 正绕	$k=0.22628$	$k=0.23189$
正绕 + 正绕翻转	$k=0.23145$	$k=0.23587$
正绕 + 反绕	$k=0.23633$	$k=0.23854$
正绕 + 反绕翻转	$k=0.23269$	$k=0.22628$

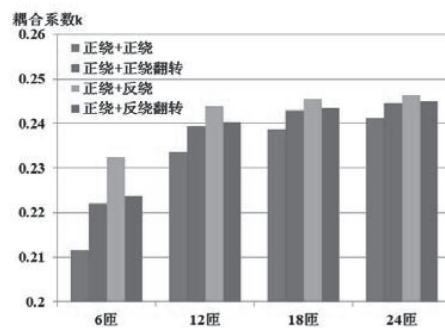


图 8 不同匝数时，绕制方法对耦合系数影响的仿真结果

## 5 线圈绕制方向对系统耦合系数影响的实验结果

表 5 实验绕制变压器规格

磁芯尺寸	480mm*280mm*12mm
气隙高度	200mm
导线规格	600*0.1mm litz 线
线圈覆盖面积	300mm
测量频率	40kHz

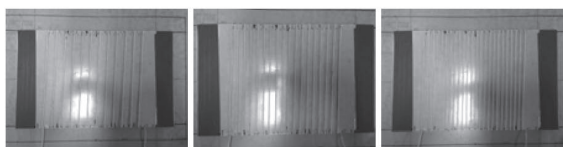
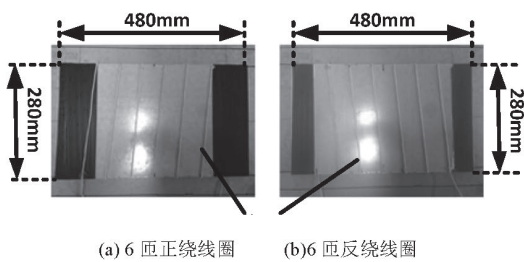


图 9 实验用 (a) 6 匝正绕, (b) 6 匝反绕, (c) 12 匝正绕, (d) 18 匝正绕, (e) 24 匝正绕线圈变压器

图 9 是按照表 5 的参数绕制的实验用变压器, 图 10 给出了不同匝数时绕制方法组合对耦合系数影响的实验结果。从图中可以看出以线圈正绕加正绕组合为基准, 线圈正绕加反绕组合对耦合系数的提高量最大, 加入翻转后系统耦合系数提高效果居中, 与理论分析及仿真结果相符。实验所得的耦合系数比仿真结果要高, 这与仿真磁芯等效模型、变压器背面铝板位置等因素有关。

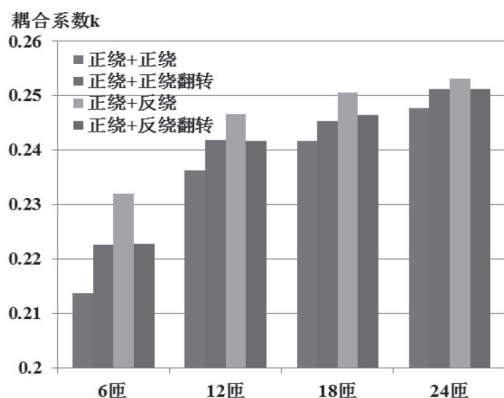


图 10 不同匝数时, 绕制方法组合对耦合系数影响的实验结果

## 6 结论

线圈的绕制方法对系统耦合系数起到了一定的影响作用, 本文主要研究了线圈正绕、反绕、线圈翻转等不同组合对系统耦合系数的影响。

首先, 通过仿真分析垂直绕制法和三角斜绕法两种结构的优缺点, 提出采用三角斜绕法绕制变压器。然后, 通过分析不同绕制方法组合时线圈重叠面积对原副边垂直耦合的影响, 得出在不改变线圈匝数、覆盖面积等条件下, 线圈正绕加反绕组合对系统耦合系数的提升作用最大。最后, 仿真结果和实验结果验证了所设计的优化绕制方法的有效性。

## 参考文献

- [1] Jaegue Shin, Seungyong Shin, Yangsu Kim, Seungyoung Ahn, Seokhwan Lee, Guho Jung, Seong-Jeub Jeon, Dong-Ho Cho. Design and Implementation of Shaped Magnetic Resonance Based Wireless Power Transfer System for Roadway Powered Moving Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1179-1192.
- [2] Je-Dok Kim, Sun C, In-Soo Suh. A proposal on wireless power transfer for medical implantable applications based on reviews[A]. IEEE 2014, Wireless Power Transfer Conference (WPTC)[C], 2014: 166-169.
- [3] M Budhia, G A Covic, J T Boys. A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems[A]. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society[C], 2010: 2487-2492.
- [4] P Nagatsuka, N Ehara, Y Kaneko, S Abe, T Yasuda. Compact contactless power transfer system for electric vehicles[A]. International Power Electronics Conference[C], 2010: 807-81.
- [5] Changbyung Park, Sungwoo Lee, Gyu Hyeong Cho, Rim C T. Innovative 5-m-Off-Distance Inductive Power Transfer Systems With Optimally Shaped Dipole Coils[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2015, 30(2): 817-827
- [6] Covic GA, Kissin MLG, Kacprzak D, Clausen, Hao Hao. A Bipolar Primary Pad Topology for EV Stationary Charging and Highway Power by Inductive Coupling[J]. IEEE 2011, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)[C], 2011: 1832-1838.