

Overview of Coil Structures for Wireless Charging in Electric Vehicle

Qi Zhang, Yiliang Zhang, Yan Zhu*

Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan
Email: *zhuyankmust@foxmail.com

Received: Mar. 20th, 2018; accepted: Apr. 27th, 2018; published: May 4th, 2018

Abstract

With the rapid development of the electric vehicle (EV) market, the emerging wireless electric vehicle charging technology has received more and more attention in recent years. As a key part of the wireless charging system for electric vehicles, coil design is indispensable for improving system performance. This review summarizes the designs of wireless charging coils for electric vehicles and describes their basic structures, working principles and different characteristics. The basic topology of the coil includes the circular rectangular pad (CRP), circular pad (CP), homogeneous pad (HP), double D pad (DDP), double D quadrature pad (DDQP) and bipolar pad (BP). This paper analyzes and discusses their corresponding advantages and limitations, and compares some key factors in designing the topology of different coil structures. Finally, the issue of exposing human body to the electromagnetic environment is discussed.

Keywords

Wireless Charging, Electric Vehicle, Coil Structure

电动汽车无线充电线圈结构研究进展

张 奇, 张怡良, 朱 艳*

昆明理工大学, 云南 昆明
Email: *zhuyankmust@foxmail.com

收稿日期: 2018年3月20日; 录用日期: 2018年4月27日; 发布日期: 2018年5月4日

摘 要

随着电动汽车(EV)市场的快速发展, 新兴的无线电动车充电技术受到越来越多的关注。作为电动汽车无线充电系统的关键部分, 线圈设计对于提高系统性能是不可缺少的。本文总结了电动汽车无线充电线圈的设计, 并描述了它们的基本结构、工作原理和不同的特性。线圈的基本拓扑结构包括圆形矩形垫(CRP)、圆形垫(CP)、均匀垫(HP)、双D垫(DDP)、双D正交垫(DDQP)和双极垫(BP)。本文分析和讨论了它们各自的优势和局限性, 并比较了设计不同线圈拓扑结构的一些关键因素。最后, 讨论了将人体暴露在电磁环境中的问题。

线充电系统的关键部分，线圈设计对于提高系统性能是不可或缺的。本文概述了电动汽车无线充电的线圈设计，阐述了它们的基本结构，工作原理和不同的特性。线圈的基本拓扑结构有圆形矩形垫(CRP)，圆形垫(CP)，均质垫(HP)，双D垫(DDP)，双D正交垫(DDQP)和双极垫(BP)等。本文对每种拓扑结构的优点和局限性都进行了分析和讨论，并对实际设计不同线圈拓扑结构的关键环节进行了对比。最后，讨论了人体暴露在电磁环境的问题。

关键词

无线充电，电动汽车，线圈结构

Copyright © 2018 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

近年来，插电式电动汽车(EV)和插电式混合动力电动汽车(HEV)的供需增长非常快[1] [2] [3]。日益增长的电动汽车市场，刺激了对更加便捷和可靠的电动汽车充电方法的需求[4] [5] [6]。现有的导电充电方式要求大功率充电设备或充电站在短时间内对车辆进行充电[7]。此外，不兼容的插头插座也会给不同品牌的电动汽车之间带来充电的不便，这些都限制了电动汽车的快速发展。为了避免物理接触和频繁插拔，研究者们提出了用于电动汽车充电的无线电力传输(WPT)技术。该技术在电力传输方面具有独特性和不可缺少性，因此传统的充电方法所造成的不便和危害，基本上可以通过无线充电的方式来解决[8] [9] [10]。

在没有电缆和插头在无线充电系统上连接的情况下，磁芯材料和线圈绕组的形状、大小和位置对无线充电性能起着至关重要的作用，也包括充电距离、功率电平和传输效率对无线充电效率的影响。通常情况下，主发射端是固定在静态电动汽车和动态电动汽车(RPEV)所处道路的地下[11] [12]。初级侧的功率传输单元可以由一个细长的导体(用来沿轨道连续输送功率)或集中的线圈垫(在离散位置为固定的电动汽车充电和 RPEV 输送电力)构成。另一方面，次级接收端位于电动汽车的底部，它的设计目的是为了捕获传输功率。次级侧的功率接收单元可以在不同的拓扑结构中使用不同的线圈垫[13]。

本文的目的是对图 1 所示的用于无线电动汽车充电的集总线圈衬垫设计进行概述[14]。从初级发射单元到次级接收单元，不同的衬垫结构包括圆形矩形垫(CRP)、圆形垫(CP)、均质垫(HP)、双 D 垫(DDP)、双 D 正交垫(DDQP)、双极垫(BPP)，本文对这些线圈结构进行讨论和分析。同时，对其特点、基本结

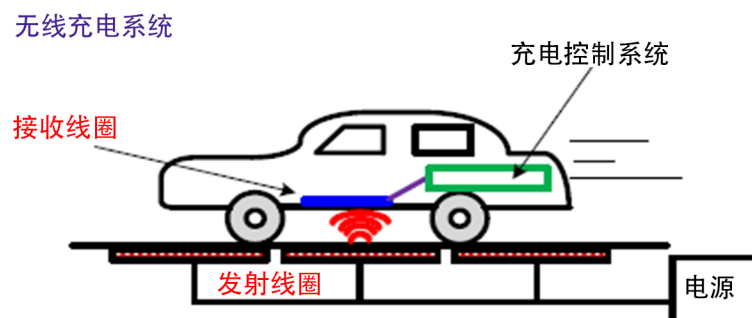


Figure 1. Schematic wireless EV charging system [14]

图 1. 电动汽车无线充电模型[14]

构、操作原理、优势和局限性进行了分析和研究。

2. 不同线圈设计

发射线圈和接收线圈设计的典型线圈拓扑结构，都可用于静态和动态电动汽车充电[1] [15]。在无线充电的早期发展中，多年前就已经提出了圆形矩形垫[16]，其由四个圆角构成，如图 2 所示。该拓扑主要可改善通量面积，并且可以减少边缘漏磁。然而，低效率和大量的漏磁是不可避免的。因此，根据具体要求通常被用于发射线圈的设计。

为了促进低磁阻磁通路径和减少磁通泄漏，铁氧体条被提出来并添加在线圈垫的背面，如图 3 所示[17]，铝板放置在整个线圈的后面以保持磁通量的分布。这种拓扑结构的优点在于该结构在围绕中心轴的对称分布磁通量下容易建立。然而，传输距离，即主磁通高度受到焊盘尺寸的限制。

对于某些电动汽车在指定区域内移动的情况，有必要创建一个均匀磁场来确保所有目标都能成功在任意位置获得足够的能量。基于这一点，提出了一种新的初级线圈结构，如图 4 所示[18] [19]。这种绕组方案可以增加平均磁通密度，并使相应的磁场分布不会快速消退。然而，高导电损耗、低功率和制造困难的缺点限制了其应用。

基于 CP 拓扑结构，提出了一种称为 DDP 的改进拓扑结构。如图 5 所示，其中双线圈中的电流方向

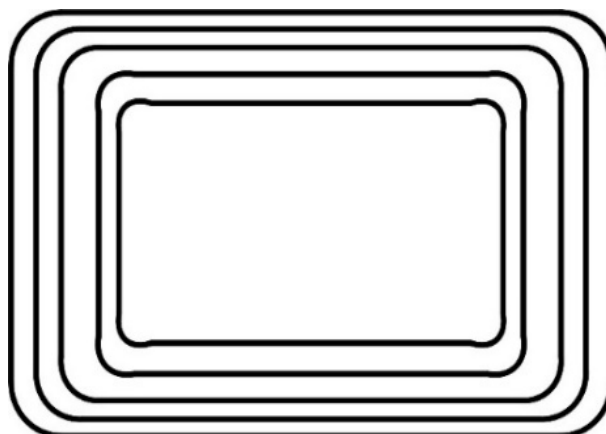


Figure 2. Typical single-coil circular rectangular pad [16]
图 2. 典型的单线圈圆形矩形垫[16]

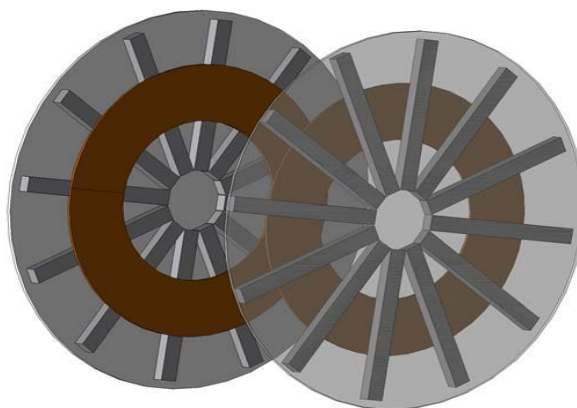


Figure 3. Typical single-coil circular non-polarized pad [17]
图 3. 典型的单线圈圆形非极化垫[17]

相反[20]。由于平行场结构，磁通路径可以沿着铁氧体棒变得更窄、更高。因此，可以高效地延长传输距离。但是，当接收器焊盘集中对齐时，此拓扑结构的互操作性较差，在 CP 拓扑结构中也是一样。为了克服这一互操作性问题，DDQP 拓扑结构被设计成能够产生平行和垂直磁场[21]。如图 6 所示，DDQP 拓扑在 DDP 拓扑中增加了一个额外的线圈。由于 DDQP 拓扑可以通过调节线圈电流来产生极化和非极化场，因此系统的灵活性比其他拓扑更高。但缺点是线圈数量增加，导致成本增加。

与 DDQP 拓扑相比，如图 7 所示引入了另一种被称为 BPP 的高灵活性拓扑结构来生成平行和垂直磁场[22]，其中两个线圈部分重叠。同时，由于减少了一个线圈使系统的复杂性和成本降低。根据电流方向的不同情形，BPP 拓扑可以在 CRP 模式、单线圈模式和 DD 模式下工作。因此，BPP 拓扑可以有效地适用于多模次级焊盘设计，这对于无线电动车充电具有很大的潜力。

在初级和次级焊盘设计中，可根据具体应用和要求考虑各种类型的拓扑。例如，为了扩大充电区域，发射线圈和接收线圈可采用 DDP-DDQP 系统，其充电区域比传统的 CP-CP 系统高 5 倍[23]。此外，采用 DDQP 或 BPP 次级拓扑的系统性能要优于 CP 和 DDP 拓扑，比如在电能效率方面前者较高，在充电区域

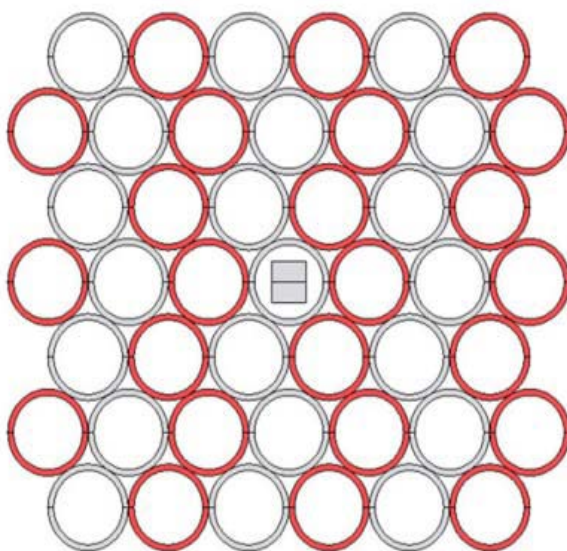


Figure 4. A multiple-coil homogeneous pad (HP) [18] [19]

图 4. 多线圈均质垫(HP) [18] [19]

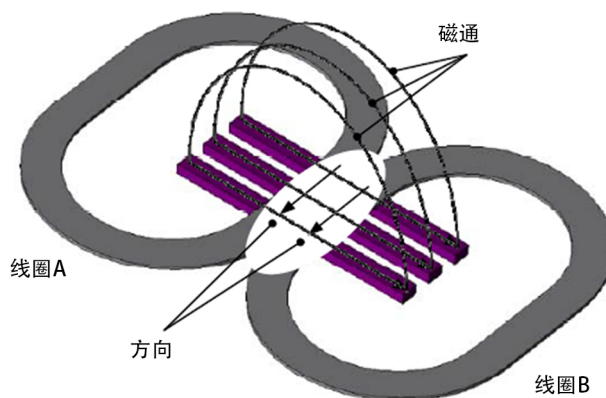


Figure 5. Typical double-D polarized pad (DDP) [20]

图 5. 典型的双 D 极化垫(DDP) [20]

方面前者较大,在传输距离方面前者较大,其原因就是 DDQP 或 BPP 的线圈结构复杂,可以调节线圈结构,系统的灵活性较高。但前者需要更多的材料,而且整流器和控制器的成本较高。因此,为了有效地选择合适的拓扑结构,上述线圈拓扑结构在表 1 中进行了比较。此外,常用线圈垫的特征也在表 2 中进行了总结比较。

3. 电磁环境对人体的影响

一般情况下,无线充电的功率大小和传输距离分别能达到 20 千瓦和 50 毫米。根据功率和距离,实际应用的一个明显焦点是电动汽车内部或外部的电磁场(EMF)对人体的安全性问题[24]。根据 EMF 的频率和强度,会出现对人体健康的不利影响,如图 8 所示[24]。在实际的无线充电系统中,工作频率一般会低于 100 KHz。

在具有多个铁氧体条的 CP 结构实际系统设计中,在 140 kHz 工作频率下驱动电流约为 100 A,其中 EV 外的磁场强度分布列于表 3 中[25]。从该表中可以看出, EV 外部的磁通密度低于参考电平,并且沿着远离 EV 的距离快速消退。在这种情况下,最大电场强度只有人体磁暴露基本安全限制值的 3.4% [25]。此外,由于车身由钢制成,所以磁通路径可以主要集中在钢上,并且可以使车辆内部的磁通量密度减小。铝制防护罩可用于减少车内更多的漏磁。铝材料的另一个优点是在工作频率为 85 kHz 和 150 kHz 的情况下,其磁通密度分布是钢制材料的三分之一[26]。很显然,铝制防护罩具有良好的磁通流量降低效果,并确保车内人体磁暴露的安全。

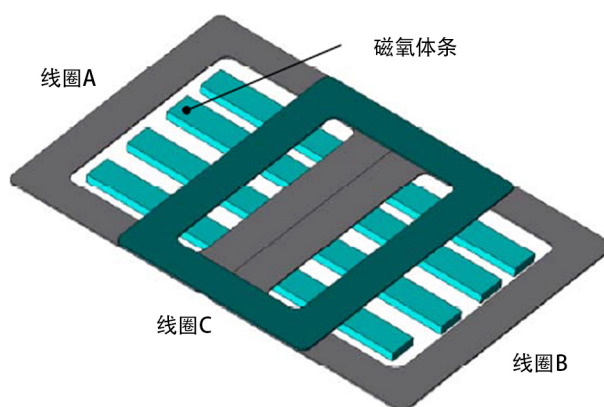


Figure 6. An improved multiple-coil double-D quadrature polarized pad (DDQP) [21]

图 6. 多线圈双 D 正交极化焊盘(DDQP) [21]

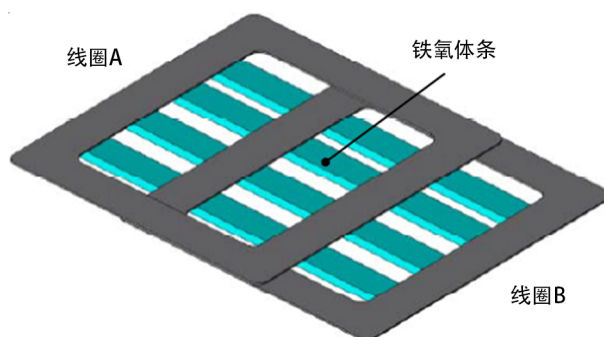


Figure 7. An improved multiple-coil bipolar polarized pad (BPP) [22]

图 7. 改进的多线圈双极性极化垫(BPP) [22]

Table 1. Comparison of various coil topologies
表 1. 各种线圈拓扑结构的比较

	CRP	CP	HP	DDP	DDQP	BPP
电能转化	中	中	低	高	高	高
设计尺寸	中	中	大	小	小	小
重量	小	小	大	小	中	中
材料费用	低	低	高	中	高	中
传输距离	小	小	中	中	高	高

Table 2. Comparison of commonly used coil pads with features
表 2. 常用线圈垫的特点比较

类型	CRP&CP	HP	DDP	DDQP	BPP
特点	1.磁通量对称 CP 垫的中心 2.互操作性比较差 3.耦合垂直通量	1.生成并耦合沿焊盘长度偏振的平行磁通量 2.常用于初级线圈 3.错位能力强	1.互操作性强 2.常用于初级线圈 3.无反向通量	1.常用于次级线圈 2.具有可变的激励模式 3.中间线圈的设计含有气隙	1.使用比 DDQP 结构更少的铜 2.常用于次级线圈

Table 3. Magnetic field strength distribution outside EV
表 3. 电动汽车外部的磁场强度分布

	0	10	20	30	40	50	60
0	-60.6	-65.7	-71.4	-76.8	-82.3	-87.6	-92.5
20	-66.9	-71.7	-76.6	-81.3	-86.2	-90.3	-95.4
40	-73.4	-77.5	-81.7	-85.4	-89.9	-93.6	-97.7
60	-79.5	-83.1	-86.5	-90.1	-93.7	-97.3	-100.6
80	-86.4	-89.3	-92.2	-95.4	-98.3	-101.2	-103.8
100	-93.6	-95.78	-98.1	-100.2	-102.4	-104.5	-106.7

水平线表示与 EV 门线的水平距离，垂直线表示与地面的垂直距离。磁场可用 $20 \log(H/H_{max})$ 来表示[23] [24] [25]。

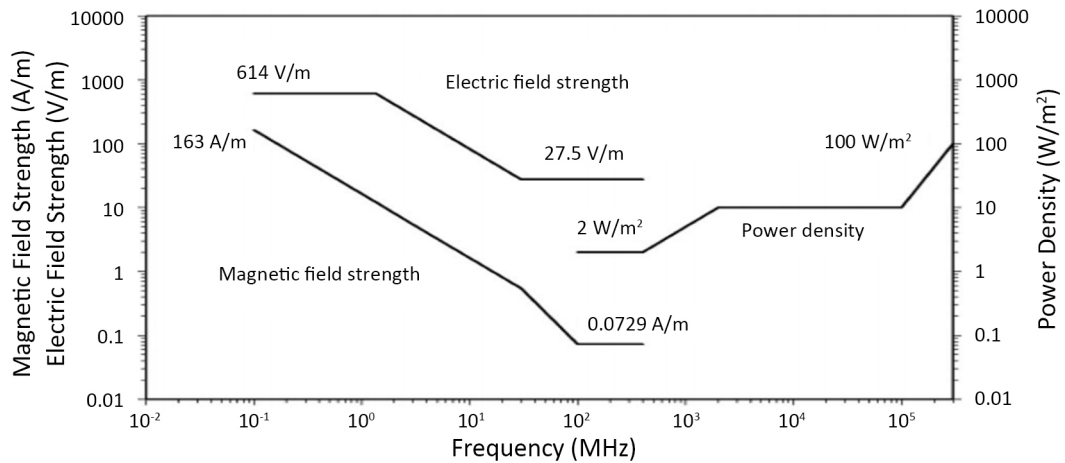


Figure 8. IEEE reference levels for human exposure issues of EMF [24]
图 8. IEEE 针对人体磁暴露问题的参考标准[24]

为了推广电动汽车无线充电技术,应进一步开展人体磁暴露问题的研究,以减少线圈垫的磁通泄漏[27]。到目前为止,可以采用许多特殊的磁性设计来引导磁通使漏磁通量最小化,例如:

- 在汽车底盘下的不同线圈位置如在后部、中部或前部安装次级线圈垫;
- 对铝质屏蔽和线圈垫设计,用不同边缘高度和厚度的叠层薄铝板以最大限度地减少涡流[28];
- 将铁氧体棒放置在不同的位置,以减少漏磁,优化铁氧体棒的厚度、宽度和数量[29];
- 特别是对于 DDQP 和 BPP 拓扑,在功率水平、传输距离或水平偏移的不同条件下控制方法的优化[30];
- 其他方式引导车辆外部的磁通量。

4. 结论

本文介绍了电动汽车无线充电的线圈设计的研究进展,根据其关键特性并从设计的角度考虑,对各种线圈拓扑(包括 CRP、CP、HP、DDP、DDQP 和 BPP)进行了讨论和分析。此外,对它们的性能也进行总结和探讨。文章还回顾和讨论了电磁场中人体磁暴露的问题,为电动汽车无线充电系统的线圈选择提供了指导。可调节化是未来电动汽车无线充电线圈结构的发展方向之一,在不同的充电环境中,使线圈结构可以调节成最佳充电模式。同时在保证性能的条件下尽可能降低线圈的复杂度与成本也是未来电动汽车无线充电线圈结构研究中要解决的问题。

参考文献

- [1] Qiu, C., Chau, K.T., Ching, T.W., *et al.* (2014) Overview of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*, **12**, 1679-1685. <https://doi.org/10.4130/jaev.12.1679>
- [2] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2584-2600.
- [3] Zhang, Z., Chau, K.T., Qiu, C., *et al.* (2015) Energy Encryption for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 5237-5246. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2363686>
- [4] Liu, C., Chau, K.T., Zhang, Z., *et al.* (2015) Multiple-Receptor Wireless Power Transfer for Magnetic Sensors Charging on Mars via Magnetic Resonant Coupling. *Journal of Applied Physics*, **117**, 17E702.
- [5] Chen, W., Liu, C., Lee, C., *et al.* (2016) Cost-Effectiveness Comparison of Coupler Designs of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Dynamic Charging. *Energies*, **9**, 906. <https://doi.org/10.3390/en9110906>
- [6] Liu, C., Chau, K.T., Zhang, Z., *et al.* (2015) Wireless Power Transfer and Fault Diagnosis of High-Voltage Power Line via Robotic Bird. *Journal of Applied Physics*, **117**, 1631. <https://doi.org/10.1063/1.4919117>
- [7] 刘文霞, 仇国兵, 张建华, 等. 电动汽车快速充电站需求分析与设备优化方法[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2012(12): 1110-1115.
- [8] Jiang, C., Chau, K.T., Liu, C., *et al.* (2017) Wireless DC Motor Drives with Selectability and Controllability. *Energies*, **10**, 49. <https://doi.org/10.3390/en10010049>
- [9] Zhang, Z., Chau, K.T., Liu, C., *et al.* (2014) An Efficient Wireless Power Transfer System with Security Considerations for Electric Vehicle Applications. *Journal of Applied Physics*, **115**, 17A328. <https://doi.org/10.1063/1.4866238>
- [10] 郭淳. 磁耦合谐振式无线充电系统的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2017.
- [11] Zhang, X., Yuan, Z., Yang, Q., *et al.* (2016) Coil Design and Efficiency Analysis for Dynamic Wireless Charging System for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, **52**, Article No. 8700404. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2529682>
- [12] Qiu, C., Chau, K.T., Liu, C., *et al.* (2014) Quantitative Comparison of Dynamic Flux Distribution of Magnetic Couplers for Roadway Electric Vehicle Wireless Charging System. *Journal of Applied Physics*, **115**, 17A334. <https://doi.org/10.1063/1.4866882>
- [13] Patil, D., McDonough, M., Miller, J., *et al.* (2017) Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **4**, 3-37.
- [14] 徐健云. 电动汽车动态无线充电关键技术的思考[J]. 中国战略新兴产业, 2018(4).
- [15] Qiu, C., Chau, K.T., Liu, C., *et al.* (2015) Modular Inductive Power Transmission System for High Misalignment Electric Vehicle Application. *Journal of Applied Physics*, **117**, 1-4. <https://doi.org/10.1063/1.4918563>
- [16] 罗垚, 陈柏超, 袁佳歆, 等. 倾斜轴空心矩形截面圆柱线圈互感计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 132-136.

- [17] Zhang, Z., Chau, K.T., Liu, C., *et al.* (2015) A Positioning-Tolerant Wireless Charging System for Roadway-Powered Electric Vehicles. *Journal of Applied Physics*, **117**, 17B520. <https://doi.org/10.1063/1.4916187>
- [18] Zhang, Z. and Chau, K.T. (2015) Homogeneous Wireless Power Transfer for Move-and-Charge. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 6213-6220. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2414453>
- [19] Chen-Dong, L.I., Huang, S.D., Zhong-Qi, L.I., *et al.* (2014) Analysis on the Power and Efficiency of Magnetic Coupling Resonant Based on Wireless Power Transfer. *Power Electronics*.
- [20] Zaheer, A., Hao, H., Covic, G.A., *et al.* (2015) Investigation of Multiple Decoupled Coil Primary Pad Topologies in Lumped IPT Systems for Interoperable Electric Vehicle Charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 1937-1955. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2329693>
- [21] Boys, J.T. and Covic, G.A. (2015) The Inductive Power Transfer Story at the University of Auckland. *Circuits & Systems Magazine IEEE*, **15**, 6-27. <https://doi.org/10.1109/MCAS.2015.2418972>
- [22] Budhia, M., Covic, G. and Boys, J. (2010) A New IPT Magnetic Coupler for Electric Vehicle Charging Systems. *Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, 7-10 November 2010, 2487-2492.
- [23] Liu, C., Jiang, C. and Qiu, C. (2017) Overview of Coil Designs for Wireless Charging of Electric Vehicle. *Emerging Technologies: Wireless Power Transfer*, Chongqing, 20-22 May 2017.
- [24] Hui, S.Y.R., Zhong, W. and Lee, C.K. (2014) A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 4500-4511. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2249670>
- [25] Zang, M., Cimala, C., Clemens, M., *et al.* (2017) A Co-Simulation Scalar-Potential Finite Difference Method for the Numerical Analysis of Human Exposure to Magneto-Quasi-Static Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, **53**, Article No. 7202804. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2657819>
- [26] Campi, T., Cruciani, S., Maradei, F., *et al.* (2017) Near-Field Reduction in a Wireless Power Transfer System using LCC Compensation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **59**, 686-694.
- [27] 张娴, 肖彪, 黄华, 等. 电磁灶 EMF 人体暴露评估的标准适用性研究[J]. 安全与电磁兼容, 2017(2).
- [28] 张卫民, 曾卫琴, 杨秀江, 等. 基于平面线圈阵列传感器的铝板材料裂纹电涡流检测[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(11): 1101-1105.
- [29] 李永烽, 郭庆功. 基于铁氧体反射器的磁谐振无线能量传输效率的优化[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2017, 54(4).
- [30] Zaheer, A., Kacprzak, D. and Covic, G.A. (2012) A Bipolar Receiver Pad in a Lumped IPT System for Electric Vehicle Charging Applications. *Energy Conversion Congress and Exposition*, Raleigh, 15-20 September 2012, 283-290.

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: 2327-0853, 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: oics@hanspub.org