电动汽车无线充电系统辐射及屏蔽问题研究

苗俊杰[1]，常 浩[2]，曾 浩[3]，唐国深[4]

（1. 国网河北省电力有限公司，河北 石家庄 050022；2. 国网河北省电力有限公司检修分公司，河北 石家庄 050000；3. 国网烟台供电公司，山东 烟台 264001；4. 山东大学电气工程学院，山东 济南 250061）

摘要：电动汽车无线充电技术因为具有便捷、智能等优势越来越受到关注，但其辐射过高等安全性问题仍有待解决。为研究电动汽车无线充电系统工作时辐射的分布及屏蔽问题，首先推导了串串型无线充电系统输出功率表达式，以及发射线圈和接收线圈电流的表达式，并通过MATLAB编程计算了在特定功率下发射线圈和接收线圈电流值。其次通过MATLAB/Simulink搭建上述无线充电系统模型，并得到发射线圈和接收线圈的电流仿真值，验证理论结果的正确性；以上述电流值修正结果为激励，搭建ANSYS Maxwell模型并仿真有无底盘屏蔽层存在时系统的参数差异，总结了底盘屏蔽层对系统的影响；最后，设计了新型屏蔽层，并通过仿真验证了新型屏蔽层的屏蔽效果。

关键词：电动汽车；无线充电；辐射；屏蔽

Research on radiation and shielding of electric vehicle wireless charging system

MIAO Junjie[1], CHANG Hao[2], ZENG Hao[3], TANG Guoshen[4]

(1. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050022, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Company Maintenance Branch, Shijiazhuang 050000, China; 3. State Grid Yantai Power Supply Company, Yantai 264001, China; 4. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The EV wireless charging system has attracted great attention due to its advantages such as convenience and intelligence, but its radiation and other safety issues still need to be solved. In order to study the radiation distribution and shielding problem of the EV wireless charging system, the expression of the output power, the expressions of the transmitting coil current and the receiving coil current are derived, and the current values of the transmitting and receiving coils under specific conditions are calculated by MATLAB programming. Secondly, the model of the above wireless charging system is built by MATLAB Simulink, and the current simulation values of the transmitting and receiving coils are obtained to verify the correctness of the theoretical results. Based on the corrected current values, the ANSYS Maxwell model is built, the difference of the system parameters is simulated when the chassis shielding layer exists. Finally, a new kind of shielding layer is designed, and the shielding effectiveness of the new shielding layer is verified by simulation.

Key words: electric vehicle; wireless charging; radiation; shielding

0 引言

电动汽车无线充电的辐射问题一直以来备受关注，该问题也是阻碍电动汽车无线充电推广的关键问题之一。根据国际非电离辐射防护委员会（The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection，ICNIRP）2010年更新的标准，在100 kHz的交变磁场下，公众暴露的磁感应强度限值为27 μT[1]。长期暴露在

高于此限值的交变磁场环境下的人体，会造成组织器官功能紊乱。由于电动汽车无线充电系统一般功率较大，磁场泄漏较严重，因此其电磁屏蔽结构必不可少，对于削弱辐射磁场的削弱研究具有十分重要的意义。

针对电动汽车无线充电系统的辐射问题，国内外学者采用多种方法计算了电动汽车无线充电系统工作时人体中的磁场分布。文献[2-4]均建立了人体模型，研究人体各部位的磁场强度，不同的是文献[2]采用的方法是三维有限元仿真，文献[3]采用的是准静态时域有限差分（QS-FDTD）数值计算方法，文献[4]采用的是缩放频域有限差分（SF-FDTD）数值计算方法。以上文献仅仅研究了人体中的磁场分布，并未提出屏蔽方案，但可以为辐射屏蔽提供理论依据。

改善无线充电系统辐射的方法即磁场屏蔽，目前主要将其分为两种方法：一种是被动屏蔽；另一种是主动屏蔽。

被动屏蔽主要采用高磁导率或者高电导率材料。采用高磁导率材料可以将磁场约束在发射线圈与接收线圈之间，在降低辐射损耗的同时可以提升传输效率和功率密度[5]。高电导率材料（比如铝板）的屏蔽机理是利用高频交变磁场在该材料中感应出的涡流磁场对源磁场的抵消作用，进而削弱源磁场，以达到屏蔽的目的。文献[6]研究了无线充电系统加入非铁磁性材料作为屏蔽材料对无线充电系统的影响机理。文献[7]提出了一种简单的铝板屏蔽方案，通过增加铝板半径和厚度来达到屏蔽效果。文献[5-7]将屏蔽方式聚焦于铝板上，要取得好的屏蔽效果必将采用厚重的铝板，实用性不好。文献[8]将一系列周期排列的金属片平行插入一整块铁氧体板中，可有效降低磁场泄漏，然而方式较为复杂，实际生产中难以在铁氧体板中嵌入金属。

主动屏蔽主要是在电动汽车车轮附近放置屏蔽线圈，通过合理的控制，使得屏蔽线圈产生与泄漏磁场幅度相同、方向相反的磁场，从而达到屏蔽效果[9-11]。相对于被动屏蔽，主动屏蔽效果较好，但需要增加额外线圈，而且实现方法较为复杂。

本文在以上研究的基础上，通过电路与磁路仿真研究电动汽车无线充电系统额定工作时在车体内及充电装置周围产生的电磁场，进而提出新的屏蔽方法。首先，通过MATALB/Simulink仿真模型的搭建得到电动汽车无线充电系统额定工作时的发射线圈和接收线圈中的电流，为磁场仿真的电流设置提供依据；其次通过三维有限元仿真系统研究泄漏磁场的状态和特点，分析已有屏蔽结构的屏蔽原理和缺点；最后，根据三维磁场仿真提出一种新的屏蔽结构，以达到更好的屏蔽效果。

1 理论分析和MATLAB模型搭建

1.1 理论分析

图1为无线充电系统串串型补偿结构的等效电路图。在图1中，U_s为逆变器输出的高频电压源；R_1为发射线圈的内阻；L_1为发射线圈等效电感；C_1为发射端串联补偿电容；R_2为接收线圈的内阻；L_2为接收线圈等效电感；C_2为接收端串联补偿电容；R_L为负载等效电阻；U_{21}表示接收线圈在发射线圈中的感应电压；U_{12}表示发射线圈在接收线圈中的感应电压；I_1、I_2分别为发射端和接收端的电流；M为发射线圈和接收线圈的互感；ω为系统的谐振角频率。

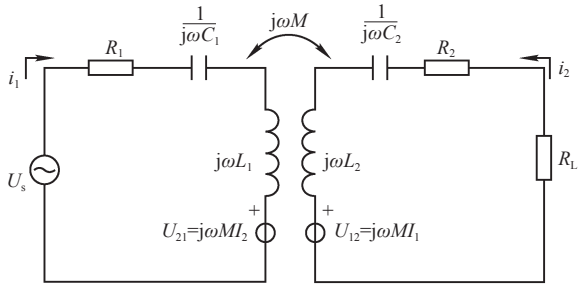


图 1 SS型无线充电系统等效电路图

Fig. 1 Wireless charging system equivalent circuit of SS topology

假设

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_1} + \mathrm{j}\omega L_1 = R_{11} + \mathrm{j}X_{11} \\ Z_2 = R_2 + R_L + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_2} + \mathrm{j}\omega L_2 = R_{22} + \mathrm{j}X_{22} \end{cases} \quad (1)$$

根据相关电路理论，可推导出

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_1 \\ \boldsymbol{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \begin{bmatrix} Z_2 & -\mathrm{j}\omega M \\ -\mathrm{j}\omega M & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

从而可以得出系统的输出功率表达式，即

$$P_{out} = I_2^2 R_L = \frac{\omega^2 M^2 U_s^2 R_L}{(\omega^2 M^2 + R_{11}R_{22} - X_{11}X_{22})^2 + (R_{22}X_{11} + R_{11}X_{22})^2} \quad (3)$$

针对特定电动汽车无线充电系统，根据式（2）和式（3），通过MATLAB编程计算即可得到系统达到特定功率的发射端电流I_1和接收端电流I_2的有效值。

1.2 MATLAB模型搭建与仿真

1.1节分析了串串结构的无线充电理论及相关公式，本节根据相关实践，搭建无线充电系统MATLAB/Simulink仿真模型，如图2所示。仿真模型主要由直流源、全桥逆变、线圈耦合、整流桥和负载组成。采用Simulink仿真可以得到与实际相差不大的发射端与接收端电流值，以此验证1.1节中无线充电系统电流值计算的正确性。

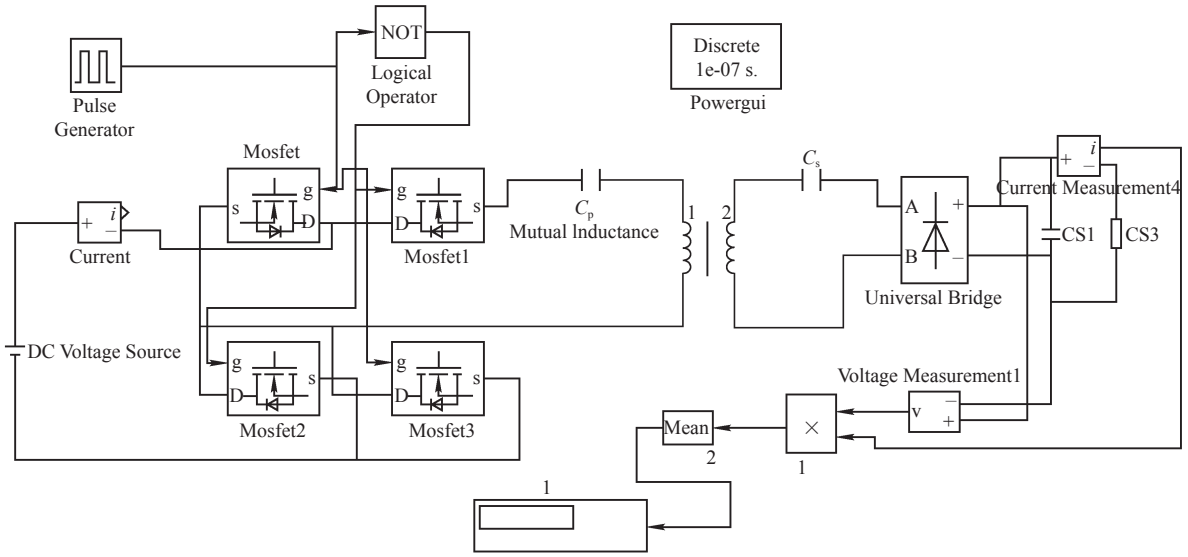


图 2 Simulink仿真模型

Fig. 2 Simulink simulation model

通过Simulink仿真得到的发射线圈和接收线圈的电流波形如图3所示。通过方均根计算，可得其电流有效值。将该有效值与1.1节的电流计算有效值作对比，修正存在的错误。然后，有限元仿真的激励即可通过式（4）的计算得出。

$$I_i^{total} = I_i N_i \quad i=1, 2 \quad (4)$$

式中，I_1、I_2分别为发射端和接收端线圈电流；N_1、N_2分别为发射端和接收端线圈匝数；I_1^{total}、I_2^{total}分别为有限元仿真中发射端和接收端线圈激励的大小。

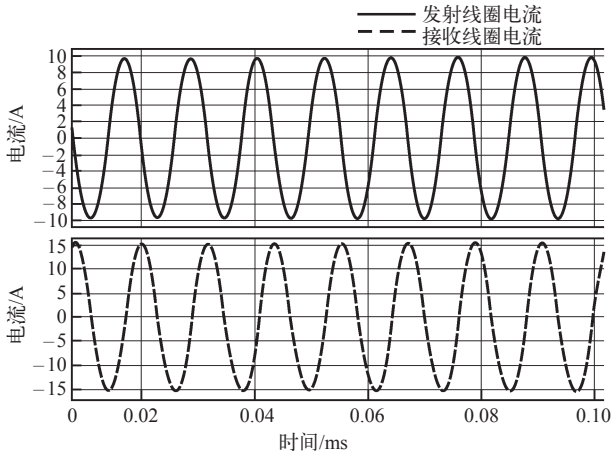


图 3 Simulink仿真所得发射线圈和接收线圈电流波形

Fig. 3 Simulink simulation of the transmitter and receiver coil current waveform

2 屏蔽层加入的影响分析

2.1 屏蔽层对磁场分布的影响

本文以DD线圈为例，研究屏蔽层的加入对无线充电系统的影响。由于无线充电线圈一般要装到汽车的底盘上，底盘一般为复合钢材料。所以，底盘其实也是一种本来就存在的屏蔽层。首先，通过ANSYS Maxwell建立仿真模型，按照计算电流值添加激励，并分别仿真加入底盘的前后DD线圈的磁场分布，如图4、图5所示。

由图4、图5所知，由于汽车底盘的存在，接收线圈上测到的磁场基本被完全屏蔽，所以，可以认为电动汽车无线充电系统的辐射主要分布于车身四周。

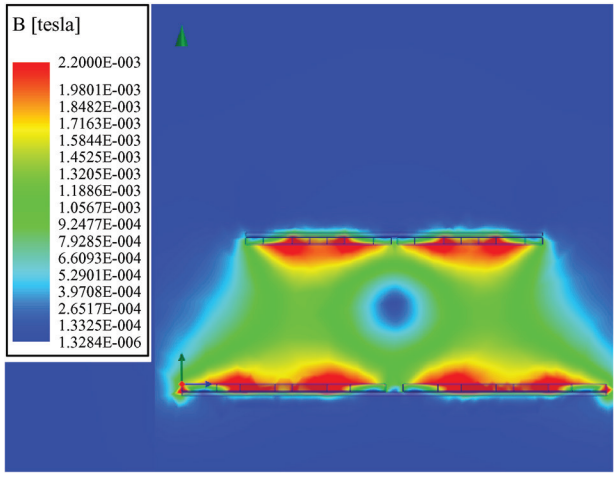


图 4 DD线圈无底盘的磁场分布图

Fig. 4 DD coil without chassis magnetic field distribution diagram

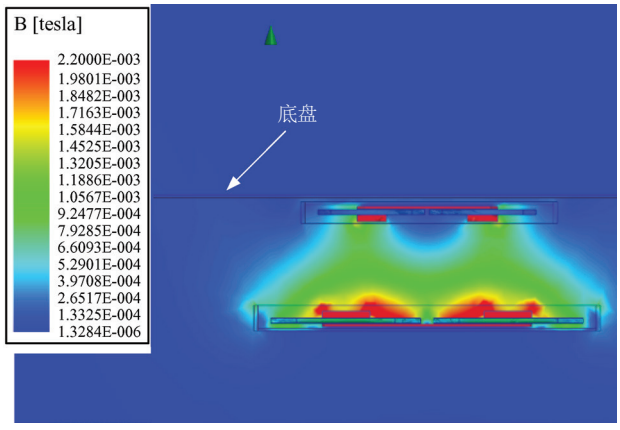


图 5 DD线圈有底盘的磁场分布图

Fig. 5 DD coil with chassis magnetic field distribution diagram

为了进一步研究线圈四周的磁场分布及磁感应强度的大小，在线圈气隙中绘制一条直线，直线位置如图6所示。该线距离发射线圈的垂直距离为5 cm。通过ANSYS Maxwell仿真计算可得沿该直线的磁感应强度分布曲线，如图7所示。

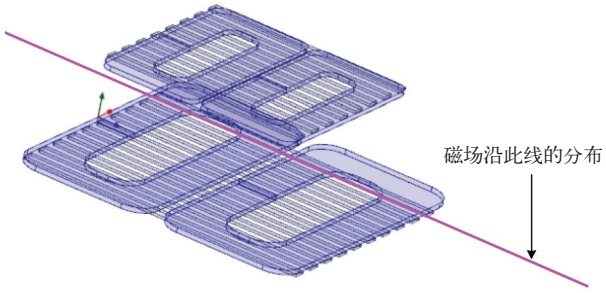


图 6 DD线圈气隙中直线位置

Fig. 6 DD coil linear position in the air gap

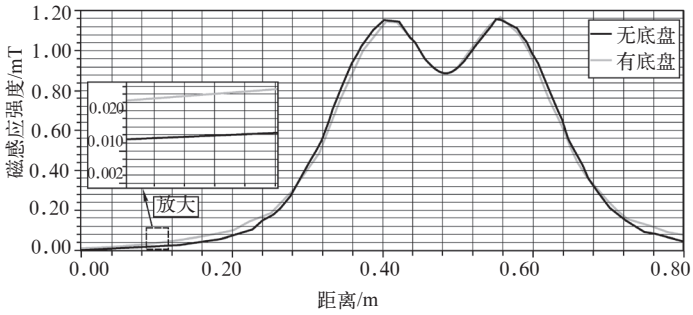


图 7 DD线圈气隙磁场沿线分布

Fig. 7 Air gap magnetic field distributed along DD coil

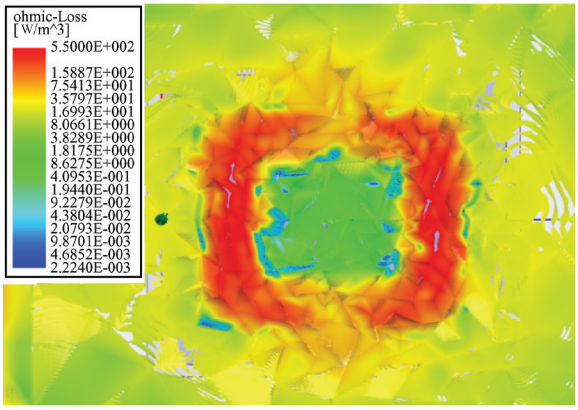
在图7中，可以看出底盘加入之后使得上方磁场减弱，周边磁场变强（如左边的放大部分所示）。所以，对于DD线圈来讲，底盘的加入使得垂直方向磁场减弱，进而会使四周方向磁场加强，即底盘将磁场纵向“压缩”了。底盘的引入会使得DD线圈的垂直方向磁场泄漏变小，但四周磁泄漏会更加严重，这使得DD线圈的四周磁场屏蔽需求变得更加迫切。

2.2 屏蔽层的损耗分布

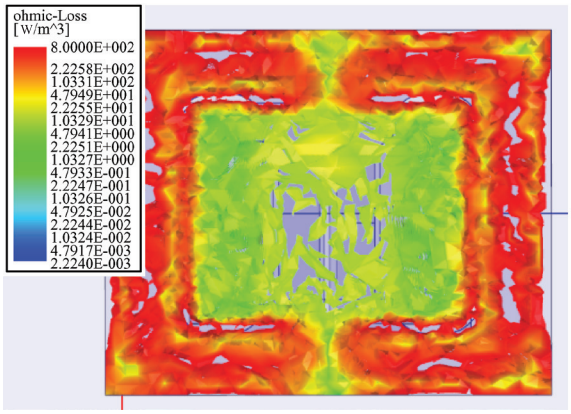
底盘的加入还会增加额外的涡流损耗，从而降低系统效率。涡流损耗分布图如图8所示。由图8可知，DD线圈导致的铝板损耗主要集中于线圈外轮廓部分。

2.3 屏蔽层对线圈耦合的影响

底盘的加入还会影响发射线圈和接收线圈的



(a) 接收线圈铝板损耗



(b) 发射线圈屏蔽层损耗

图 8　DD线圈屏蔽层损耗分布

Fig. 8 Loss distribution of DD coil shielding layer

耦合。根据涡流场仿真结果，未加入底盘的耦合系数为0.206，加入底盘之后耦合系数为0.211。因此，由于底盘屏蔽层对磁场的纵向“压缩”作用，底盘的加入会使得DD线圈的耦合系数稍微增加。

经过以上分析，底盘对无线充电系统的影响主要分为三个方面：①产生涡流损耗，降低无线充电系统效率；②加强无线充电四周辐射；③改变线圈耦合程度。但实际中无线充电系统一般需要安装在底盘上，所以只能研究减小底盘的影响的方法。此外，底盘的存在加强了四周辐射，这就需要设计屏蔽层来削弱四周辐射。最后，底盘存在的优点就是使得无线充电系统上方的辐射远低于标准之下（见图5）。

3　屏蔽层的设计

根据以上所述，由于大面积底盘的存在，磁泄漏主要在于无线充电系统左右前后侧，而不在于上下两侧。这意味着水平侧磁泄漏大于垂直侧磁泄漏，水平侧屏蔽成为主要内容。下面以DD线圈为例，设计水平方向的磁泄漏屏蔽层。

首先，传统的无线充电系统多在磁心下侧再铺一层铝板以达到屏蔽的效果。但是，该铝板起的作用与上述大面积底盘类似，并不能屏蔽水平侧磁泄漏。然而，由于泄漏磁场能够轻松穿透较薄的单层铝板，单层的立式铝条仍然起不到很好的屏蔽效果。所以，本文采用立式铝条和立式条状磁心组合的方式屏蔽水平磁泄漏，经仿真验证，该种屏蔽层有较好的屏蔽效果。屏蔽层结构设计如图9所示。

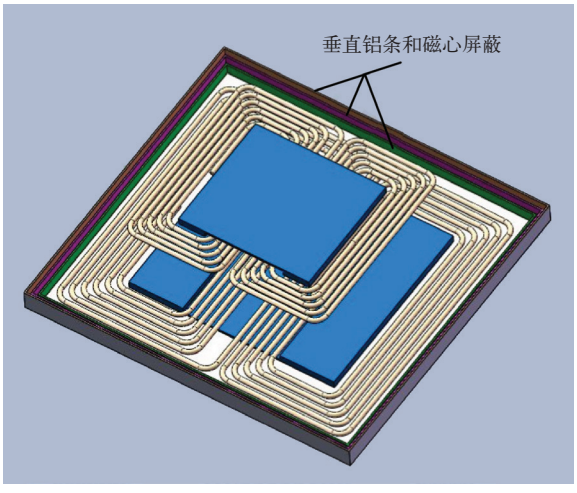


图 9　新型屏蔽层结构

Fig. 9 New structure of shielding layer

新型屏蔽结构的屏蔽效果如图10所示。根据图10的结果可以看出，新型屏蔽层的加入可以大大降低远处的辐射，如图10放大部分所示，在同一点，磁感应强度由原来的29 μT降低至19 μT，而且该屏蔽层的加入对耦合区的磁场并没有很大影响。新型屏蔽层可以明显降低底盘的影响，具有十分重要的实用意义。

4　结束语

电动汽车无线充电系统正蓬勃发展，但其辐射问题仍是阻碍其商业化的关键问题之一。为研究电动汽车无线充电系统的辐射问题，本文首先分析了串串型无线充电系统的基本公式，得出了

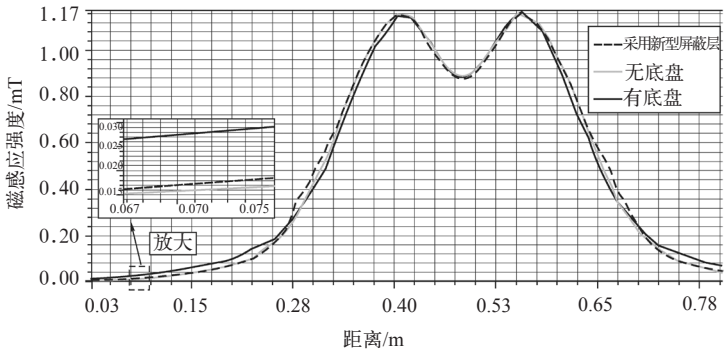


图 10　采用新型屏蔽层之后DD线圈气隙磁场沿线分布

Fig. 10 Air gap magnetic field distribution with new shielding layer

在特定输出功率下的发射端和接收端的电流值，并可通过MATLAB编程计算该电流值的大小。其次，搭建了串串型无线充电系统的MATLAB/Simulink仿真模型，验证了上述电流值的正确性，并得到有限元仿真的电流激励。以DD线圈为例，通过ANSYS Maxwell仿真，首先研究了底盘的加入对DD线圈磁场分布的影响，总结了底盘影响分为三个方面：①产生涡流损耗，降低无线充电系统效率；②加强无线充电四周辐射；③改变线圈耦合程度。通过上述系列仿真发现，电动汽车无线充电系统的辐射主要分布在系统四周。经过上述分析，为屏蔽四周辐射，本文采用立式铝条和立式条状磁心组合的方式屏蔽水平磁泄漏，并通过仿真发现，该种屏蔽层有较好的屏蔽效果，能有效降低远处辐射。

参考文献

[1] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields [J]. Health Physics, 2010, 99(6): 818-836.

[2] 徐桂芝，李晨曦，赵军，等. 电动汽车无线充电电磁环境安全性研究[J]. 电工技术学报，2017，32(22)：153-157.

[3] PARK. Evaluation of electromagnetic exposure during 85 kHz wireless power transfer for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54, (1): 1-8.

[4] ZANG M, CLEMENS C, CIMALA C, et al. Simulation of inductive power transfer systems exposing a human body with two-step scaled-frequency FDTD methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 1-4.

[5] 张献，章鹏程，杨庆新，等. 基于有限元方法的电动汽车无线充电耦合机构的磁屏蔽设计与分析[J]. 电工技术学报，2016，31(1)：72-79.

[6] TAN L, LI J, CHEN C, et al. Analysis and performance improvement of WPT systems in the environment of single non-ferromagnetic metal plates[J]. Energies, 2016, 9(8): 1-16.

[7] HARIRI A, HARIRI M E, SAYYED A E, et al. An iterative design approach for shielding of WPT systems in electric vehicle charging applications[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2016: 1-4.

[8] PARK H H, KWON J H, SANG I K, et al. Magnetic shielding analysis of a ferrite plate with a periodic metal strip[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(8): 1-8.

[9] KIM J, et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1332-1342.

[10] KIM S, et al. Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2014, 62(4): 1057-1066.

[11] QIU Derong, et al. Feasibility study of Closed-Loop No-Insulation coil to shield alternating magnetic field[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(6): 1-5.

作者简介

苗俊杰

苗俊杰（1979－），男，硕士，正高级工程师，主要研究方向为变电运维和智能巡检等。

(收稿日期：2019－07－05)EA