

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306734

无线电能传输系统高效率低漏磁的全向环绕型 有源磁屏蔽结构*

李中启^{1,2} 甘子玥¹ 任立权¹ 孔彭生³ 熊鑫博¹ 程宇³ 周鑫¹

(1. 湖南工业大学电气与信息工程学院 株洲 412007; 2. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082;
3. 湖南工业大学轨道交通学院 株洲 412007)

摘要:在电动汽车无线电能传输系统(WPT)中,如何通过电磁屏蔽技术来降低WPT系统中的漏磁,同时维持较高的传输效率是一个难题。为此本文提出了一种全向环绕型有源磁屏蔽线圈结构来减少WPT系统中的漏磁。首先,分析了该结构的磁屏蔽工作原理以及设计思路,推导了该结构的数学模型;其次,根据本文线圈结构高效率低漏磁的特点,提出了一种线圈优化方法,得到了满足设计要求的线圈参数;最后,根据得到的线圈参数,搭建了一套基于所提线圈结构的WPT系统,并通过仿真和实验验证了该结构和方法的合理性。结果显示,在传输功率为4 kW时,本文提出的线圈结构在偏移0 cm时,目标面的最大漏磁为3.76 μT ,相比无屏蔽线圈结构降低了43.63%的漏磁,并且传输效率高达95.58%;在偏移10 cm时目标面的最大漏磁为6.03 μT ,仍符合漏磁安全标准,并且传输效率为92.92%,高于同尺寸无源屏蔽线圈结构和传统有源屏蔽线圈结构的传输效率。

关键词:电动汽车;无线电能传输;电磁屏蔽;电磁兼容;电磁场

中图分类号: TM724

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 470.99

Omni-directional wrap-around active magnetic shield structure with high efficiency and low magnetic leakage for wireless power transfer systems

Li Zhongqi^{1,2} Gan Ziyue¹ Ren Liqun¹ Kong Pengsheng³ Xiong Xinbo¹ Cheng Yu³ Zhou Xin¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. College of Railway Transportation, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: In the wireless power transfer (WPT) system of electric vehicles, it is a difficult problem to reduce the magnetic leakage and maintaining a high transmission efficiency through electromagnetic shielding technology. In this paper, an omni-directional wrap-around active magnetic shielding coil structure is proposed to reduce the magnetic leakage in the WPT system. First, the magnetic shielding principles and design rationale of this structure are analyzed, and the mathematical model of the structure is derived. Secondly, a method of coil optimization is proposed according to the high efficiency and low magnetic leakage characteristics of the coil structure, and the coil parameters to meet the design requirements are obtained. Finally, based on the obtained coil parameters, a WPT system based on the proposed structure is constructed, the reasonableness of the structure and method is verified by simulation and experiment. The results show that, the maximum magnetic leakage of the target surface is 3.76 μT at a transmission power of 4 kW when the proposed structure is offset by 0 cm, which represents a 43.63% reduction compared to an unshielded structure, and the transmission efficiency is as high as 95.58%. At the offset of 10 cm, the maximum magnetic leakage on target surface is 6.03 μT , which still complying with the magnetic leakage safety standards. And the transmission efficiency is 92.92%, which is higher than the same-sized passive shielded structures and traditional active shielded structures.

Keywords: electric vehicle; wireless power transmission; electromagnetic shielding; electromagnetic compatibility; electromagnetic field

收稿日期: 2023-07-14 Received Date: 2023-07-14

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3403200)、湖南省自然科学基金(2022JJ30226)、湖南省教育厅重点项目(23A0432)资助

0 引言

近年来,磁耦合谐振式无线电能传输技术(wireless power transfer, WPT)作为一种高效便捷的电能传输方式^[1-3],受到了越来越多的关注。随着新能源汽车、智能手机、无人机等智能设备的普及和快速发展,传统有线充电方式逐渐无法满足人们日益增长的充电需求。相比有线充电,无线充电系统的发射端和接收端不需要电路间的物理连接,具有自动充电、传输效率高、灵活性强和舒适度高优点^[4],具有很好的发展前景^[5-7]。当 WPT 技术应用到电动汽车时,充电过程中会产生较强的漏磁^[8],这种漏磁会对周围的电子设备、人体健康等产生潜在的危害^[9-11],因此研究 WPT 系统的磁屏蔽方法来降低漏磁,是无线电能传输技术发展的重要方向之一。

为此,国内外学者在电磁屏蔽方面做出了许多有意义的尝试和探索,相继提出了无源屏蔽、有源屏蔽等屏蔽方式^[12]。

无源屏蔽中的屏蔽线圈通过电磁感应产生与主线圈磁场方向相反的抵消磁场,不需要添加外部激励^[13]。KAIST 团队针对电动汽车 WPT 系统中漏磁过大的问题,提出了一种基于调谐电容的无功谐振屏蔽方法,降低了系统漏磁^[14],该方法通过得到测试点的磁感应强度来获得最优的电容组合,具有很大的局限性。随后该团队将屏蔽线圈放置在 WPT 系统较远位置^[15],提高了漏磁屏蔽效果,当抵消磁场与漏磁场保持 180° 相位时,该屏蔽方法处于最佳屏蔽状态,然而上述方法没有考虑到抵消磁场的相位情况,因此没有达到最优屏蔽效果。许乔迪等^[16]学者计算出最优电感使目标面具有最优磁屏蔽效果,并将观测样本拓展为二维平面,然而该方法不适用于三维空间,不利于实际应用场合。

有源屏蔽主要指通过外加激励源的屏蔽线圈产生与漏磁场相反的抵消磁场来降低 WPT 系统中的漏磁^[17]。意大利拉奎拉大学 Cruciani 等^[18]提出了一种将屏蔽线圈与发射线圈串联放在同一水平面上的有源屏蔽方法,实现了对空间特定区域的漏磁场抑制,但只对局部区域起到减少漏磁的效果,对系统整体的漏磁屏蔽效果较弱。Campi 等^[19]在 WPT 系统发射端放置两个屏蔽线圈,在保证传输效率的同时,降低了目标面的漏磁,但只对线圈附近特定区域的漏磁,具有局限性。在此基础上,该团队继续提出在发射和接收两端增设铁氧体和铝板^[20]的方式,来提高系统的传输效率,但也增加了系统体积。有源屏蔽会在一定程度上降低系统的传输效率,为此周国超^[21]在反串联屏蔽线圈的基础上,研究了屏蔽线圈的高度对 WPT 系统效率的影响。Mi 等^[22]学者提出一种直接与发射线圈串联的双环有源屏蔽线圈,消去了屏蔽线圈

与接收线圈之间的附加耦合,但结构中采用了整块的铁氧体与铝板,成本高^[23],且在线圈偏移时传输效率较低。在电动汽车无线充电系统中,如何通过电磁屏蔽技术降低 WPT 系统中产生的漏磁,并同时维持较高的传输效率一直是急需解决的问题。

本文提出了一种全向环绕型有源屏蔽线圈结构(omni-directional wrap-around active magnetic shielding, OWAMS)来降低 WPT 系统中的漏磁,该结构发射端与接收端线圈构成相同,其中屏蔽线圈与主线圈反串联,分布在线圈四周。这种结构与传统有源线圈相比,屏蔽线圈磁场方向在内侧与主线圈磁场方向相同,并且在目标面上形成与主线圈相反的磁场方向。由于上述特性,这种结构能够在降低 WPT 系统漏磁的同时维持较高的传输效率。本文分析了 OWAMS 线圈结构的漏磁屏蔽原理,并根据该结构高效率低漏磁的特点,提出了一种线圈优化方法,得到了满足设计要求的线圈参数。最后通过对比理论值、仿真值和实验值,验证了所提结构和方法的合理性。实验结果表明,所提出的线圈结构比无屏蔽线圈结构降低了 43.63% 的漏磁,并且传输效率能达到 95.58%。

1 磁感应强度计算

为了计算空间内的磁场分布情况,本节引入一种基于矢量磁位的矩形线圈磁感应强度计算方法^[24]。图 1 为两个矩形线圈 Coil₁ 和 Coil₂ 的空间分布示意图。

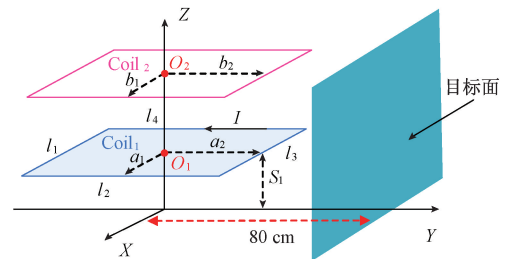


图 1 矩形线圈的空间位置分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spatial distribution of rectangular coil

a_1 和 a_2 是 Coil₁ 的长度和宽度, b_1 和 b_2 是 Coil₂ 的长度和宽度。Coil₁ 分为 4 个部分 (l_1, l_2, l_3, l_4), s_1 是 Coil₁ 中心点离坐标轴原点的垂直距离, 参数 I 表示流过 Coil₁ 的电流。

在图 1 中设置空间任意点 $P(x, y, z)$, 其矢量磁位表达式如下:

$$A(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J}(x', y', z') dv'}{R} \quad (1)$$

式中: \mathbf{J} 为电流密度; v 为导体的电流分布; R 为任意点 P

到点源 (x', y', z') 的距离。

已知入射磁感应强度与磁矢量关系式如下：

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

磁感应强度 B_i 在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的表达式如下：

$$B_{ix}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{ix} \cdot e^{-kz} \cdot e^{j(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (3)$$

$$B_{iy}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{iy} \cdot e^{-kz} \cdot e^{j(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (4)$$

$$B_{iz}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{iz} \cdot e^{-kz} \cdot e^{j(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (5)$$

其中：

$$C_{ix} = \frac{-j2\mu_0 I \sin(\xi a_1) \sin(\eta a_2)}{\eta} \cdot e^{s_1 k} \quad (6)$$

$$C_{iy} = \frac{-j2\mu_0 I \sin(\xi a_1) \sin(\eta a_2)}{\xi} \cdot e^{s_1 k} \quad (7)$$

$$C_{iz} = \frac{-2\mu_0 I k \sin(\xi a_1) \sin(\eta a_2)}{\xi \eta} \cdot e^{s_1 k} \quad (8)$$

其中， ξ 和 η 为双傅里叶积分变量：

$$k = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (9)$$

因此，磁感应强度可以表示为：

$$B = |B| = \sqrt{|B_{ix}|^2 + |B_{iy}|^2 + |B_{iz}|^2} \quad (10)$$

在电动汽车静态无线充电的实际应用中，需要考虑到系统周围漏磁对人体及设备的影响，因此本文根据 SAEJ2954 国际标准对距离汽车底盘中心 80 cm 处的目标面进行电磁屏蔽，目标面如图 1 所示。本节所提出的磁感应强度计算为下文的漏磁优化提供了理论基础。

2 全向环绕型有源磁屏蔽结构

2.1 全向环绕型有源磁屏蔽结构磁屏蔽原理

本文所提出的 OWAMS 结构采用有源屏蔽线圈来降低 WPT 系统目标面上的漏磁。首先分析传统有源屏蔽线圈结构的屏蔽原理，传统有源屏蔽线圈结构由主线圈和屏蔽线圈反串联组成，如图 2(a) 所示，屏蔽线圈与主线圈电流方向相反，因此形成一个与主线圈相反的磁场方向，能够有效降低目标面漏磁，如图 2(b) 所示。然而屏蔽线圈电流大小始终与主线圈相同，使 WPT 系统传输效率降低。

本文对屏蔽线圈磁感应强度方向进行分析，改进了传统有源屏蔽线圈结构的不足，提出了 OWAMS 结构，使屏蔽线圈能够在降低目标面漏磁的同时提高 WPT 系统的传输效率。OWAMS 结构的磁屏蔽原理可以通过磁场横截面图表示，如图 3 所示，图中下侧为发射端线圈，上侧为接收端线圈。

图 3 中间区域为主线圈电流方向横截面图，两侧为

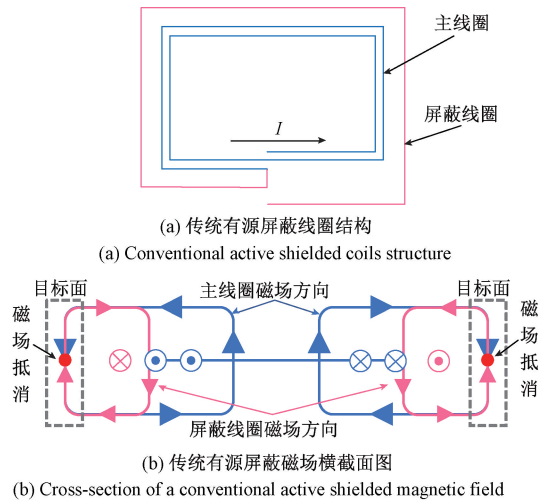


图 2 传统有源线圈磁屏蔽原理

Fig. 2 Conventional active coil magnetic shielding principle

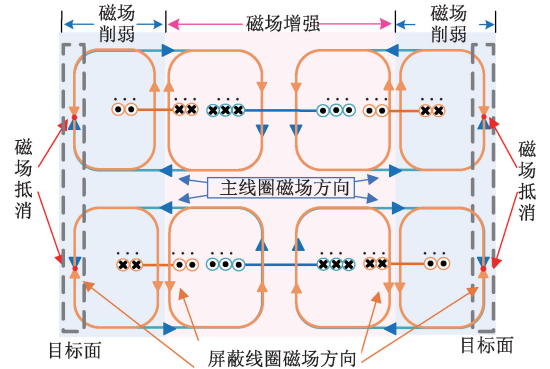


图 3 OWAMS 结构磁场横截面图

Fig. 3 Magnetic field cross-section diagram of the OWAMS structure

屏蔽线圈电流方向横截面图。由于屏蔽线圈与主线圈反向串联，屏蔽线圈靠近主线圈侧磁场方向与主线圈方向一致，磁场同向叠加提高了 WPT 系统的传输效率。而屏蔽线圈外侧磁场方向与主线圈磁场方向相反，使目标面的漏磁大幅度降低，由于发射端线圈结构与接收端一致，因此磁场分布原理相同。

综上所述，本文所提出的 OWAMS 结构，理论上可以克服传统有源屏蔽线圈结构的弊端，从而达到提高传输效率与降低磁泄漏的双重效果。

2.2 全向环绕型有源磁屏蔽结构

本文提出的 OWAMS 结构如图 4(a) 所示，发射端由 1 个主线圈 T_{X1} 和 4 个屏蔽线圈 T_{X2} 、 T_{X3} 、 T_{X4} 、 T_{X5} 构成正方形，其中 T_{X2} 、 T_{X3} 、 T_{X4} 、 T_{X5} 正向串联后与主线圈 T_{X1} 反向串联，接收端线圈分别为 R_{X1} 、 R_{X2} 、 R_{X3} 、 R_{X4} 、 R_{X5} ，接收线圈结构与发射线圈相同。 T_{X1} 与 R_{X1} 同轴，且发射

端与接收端之间的传输距离 O_1O_2 为 15 cm。4 个屏蔽线圈靠近主线圈侧电流 I 方向与主线圈的电流 I 方向相同, 4 个屏蔽线圈外侧电流与主线圈电流方向相反。OWAMS 结构的俯视图如图 4(b) 所示, L_{SS} 为主线圈的长, L_{XX} 、 L_{YY} 分别为屏蔽线圈的长和宽。

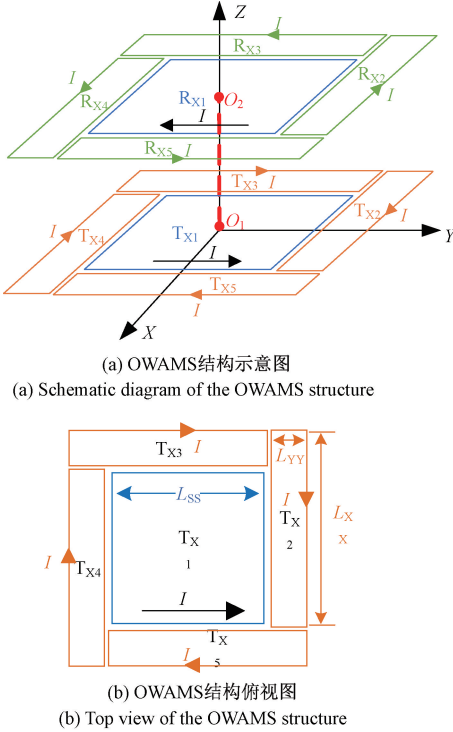


图 4 磁屏蔽结构图

Fig. 4 Magnetic shielding structure diagram

为了更直观的说明磁场削弱的原理, 分析了磁场矢量叠加示意图, 如图 5 所示。发射线圈 T_{x1} 的磁场矢量表示为 B_{Tx1} , 发射线圈 T_{x2} 、 T_{x3} 、 T_{x4} 、 T_{x5} 磁场矢量方向同相, 因此由 B_{Tx2-5} 来表示其磁场矢量叠加值, $B_{Tx2-5} = B_{Tx2} + B_{Tx3} + B_{Tx4} + B_{Tx5}$ 。由于 T_{x1} 与 T_{x2-5} 反串联, 因此 B_{Tx1} 与 B_{Tx2-5} 方向相反。接收线圈与发射线圈相同, R_{x1} 与 R_{x2-5} 反串联, 因此其磁场矢量 B_{Rx1} 与 B_{Rx2-5} 方向相反。所以屏蔽线圈所合成磁场 B_{WPT2} 与 $B_{Tx1} - B_{Rx1}$ 合成磁场方向相反, 可以通过控制屏蔽线圈的匝数和尺寸使总磁场 B_{Total} 降低。

2.3 基于 OWAMS 结构的两线圈数学模型

根据图 4 的线圈结构可以得到等效电路模型如图 6 所示。参数 L_1 、 L_2 、 R_1 、 R_2 分别为发射线圈和接收线圈的自感和内阻。 C_{Tx} 、 C_{Rx} 定义为发射线圈和接收线圈的谐振电容。 M 为线圈间的互感, R_s 为电源 V_s 的内阻。根据图 6 可得基尔霍夫电压方程矩阵为:

$$\begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M \\ j\omega M & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Tx} \\ I_{Rx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

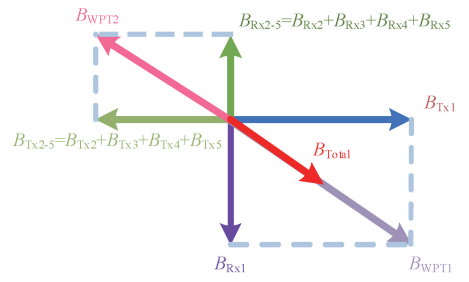


图 5 磁场矢量叠加示意图

Fig. 5 Schematic representation of the magnetic field vector superposition

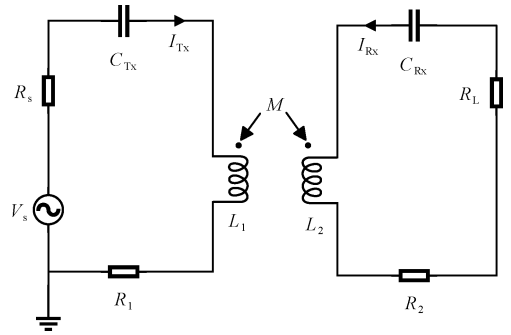


图 6 两线圈等效电路模型

Fig. 6 Two-coil equivalent circuit model

发射线圈和接收线圈的电流由式 (12) 表示:

$$\begin{cases} I_{Tx} = \frac{Z_2 V_s}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \\ I_{Rx} = -\frac{j\omega M V_s}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \end{cases} \quad (12)$$

其中, Z_1 、 Z_2 分别表示为发射线圈和接收线圈的阻抗:

$$\begin{cases} Z_1 = R_s + R_1 + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C_{Tx}} \\ Z_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_{Rx}} \end{cases} \quad (13)$$

由式 (12) ~ (13) 可获得系统传输效率 η :

$$\eta = \left| \frac{I_{Rx}^2 R_L}{V_s I_{Tx}} \right| = \left| -\frac{(\omega M)^2 R_L}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2 Z_2} \right| \quad (14)$$

当系统在谐振状态下工作时, 有 $Z_1 = R_s + R_1$, $Z_2 = R_2 + R_L$, 可以进一步得到新的传输效率表达式:

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_s + R_1)(R_2 + R_L)^2 + (\omega M)^2 (R_2 + R_L)} \quad (15)$$

当传输效率最大时, 可以得到最优负载 $R_{L,opt}$, 其表达式为:

$$R_{Lopt} = \sqrt{\frac{(R_s + R_1)R_2^2 + (\omega M)^2 R_2}{(R_s + R_1)}} \quad (16)$$

实验验证部分的理论值可以使用 2.3 节的数学模型计算得出。

3 全向环绕式有源磁屏蔽结构的优化

3.1 漏磁优化

本文提出的 OWAMS 线圈结构旨在解决目标面处磁场泄漏问题。根据电工标准化委员会所颁布的 EN 62233 检测标准,对人体基本无害的磁场值应该小于 $6.25 \mu\text{T}$ 。该标准主要适用于评估人体接触电气设备时所受到的电磁场辐射,确保人员在接触电气设备时不会遭受电磁场辐射进而对其健康造成负面影响。因此为了避免 WPT 系统产生的漏磁对人体造成危害,需要对 OWAMS 结构进行优化,使目标面上的最大漏磁值小于 $6.25 \mu\text{T}$ 。

根据 SAEJ2954 国际标准,在电动汽车静态无线充电的实际应用中,发射线圈和接收线圈通常放置在停车位中心和汽车底盘中心,漏磁优化目标面位于距离汽车底盘中心 80 cm 处,并与地面垂直,如图 7 所示。

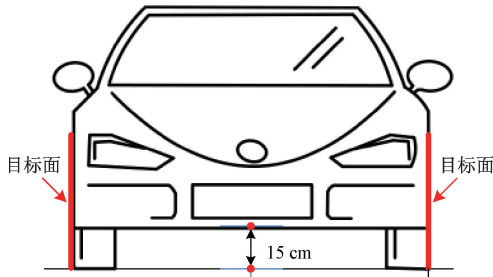


图 7 漏磁目标面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of leakage magnetic field target surface

本小节根据矩形线圈的磁感应强度计算公式(10),对线圈结构参数进行优化,以实现在维持低漏磁、高效率特性时,结构尺寸能够尽可能地缩小。

根据文献[24]磁感应强度的大小与线圈的长度、宽度以及线圈之间的相对距离有关。对线圈参数进行优化以保持目标面的最大漏磁低于安全值 $6.25 \mu\text{T}$,并使系统传输效率高于 96%。优化具体步骤如下:

1) 参数设定与初始化:铜线直径为 3.9 mm 。发射线圈和接收线圈之间的传输距离设置为 15 cm 。最大漏磁 B_{\max} 设置为 $6.25 \mu\text{T}$,输出功率设置为 4 kW 。传输效率设置为 96%。

2) 初始参数范围设置:根据实际情况设置,发射端 T_{x1} 内边长 L_{ss} 范围设置为 $16 \sim 24 \text{ cm}$,匝数 N_s 范围设置

为 $15 \sim 20$ 匝。线圈 T_{x2} 、 T_{x3} 、 T_{x4} 、 T_{x5} 尺寸相同,其内边长 L_{xx} 范围设置为 $4 \sim 8 \text{ cm}$,匝数 N_p 设置为 $1 \sim 5$ 匝。接收端线圈参数尺寸与发射端一致。匝数的步长设置为 1 匝,内边长步长设置为 1 cm 。

3) 计算漏磁 B : X 轴范围为 $(-100, 100) \text{ cm}$, Z 轴范围为 $(0, 70) \text{ cm}$, Y 轴设置为 80 cm 。根据式(7)~(13),可以计算出目标面上的漏磁分布,得到最大漏磁值。

4) 条件判断:为了使目标面的磁场值维持在对人体无害的安全情况,必须满足条件 $B \leq 6.25 \mu\text{T}$,将 OWAMS 结构应用到电动汽车无线充电领域,要保证较高的充电效率,因此需要满足条件 $\eta \geq 96\%$,若结果满足上述条件,则将保存结果。否则,结果将不保存,并调节线圈参数继续优化。如果线圈参数全部达到最大值,则漏磁优化程序结束。

5) 输出最优参数矩阵:保存满足条件的所有参数矩阵,并输出满足所有约束条件的最优参数。

漏磁优化流程如图 8 所示。

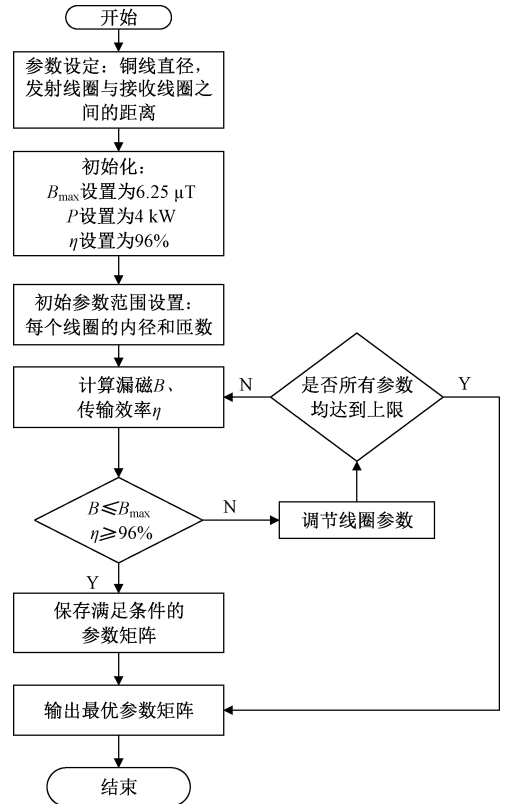


图 8 优化流程

Fig. 8 Optimize the flow chart

3.2 优化结果

根据 3.1 节的参数优化方法,得到了满足条件的最优数据参数,所有线圈的具体尺寸参数如表 1 所示。

运用 Ansys Maxwell 软件,画出 OWAMS 结构最优参数尺寸时的线圈模型,对线圈模型进行仿真得到自感 L_1 、

表 1 系统各线圈匝数尺寸

Table 1 Turns and dimensions of each coil of the system

线圈	内长/cm	内宽/cm	外长/cm	外宽/cm	匝数
T_{x1}	20.0	20.0	34.4	34.4	18
T_{x2-5}	20.0	2.60	24.0	9.20	5
R_{x1}	20.0	20.0	34.4	34.4	18
R_{x2-5}	20.0	2.60	24.0	9.20	5

L_2 , 内阻 R_1 、 R_2 , 谐振电容 C_{Tx} 、 C_{Rx} 以及互感 M , 代入到式(15)中得到系统在谐振时的最大传输效率为 96.95%。根据式(16)得到对应当前线圈结构尺寸下的最优负载为 14Ω 。

与其他学者的研究内容进行比较, 内容包括屏蔽方法、屏蔽效果以及传输效率, 如表 2 所示。结果表明本文提出的 OWAMS 结构具有较好的电磁屏蔽效果和传输效率。

表 2 仿真对比现有不同磁屏蔽方案

Table 2 Simulation comparison of different existing magnetic shielding solutions

文献	屏蔽方法	屏蔽效果	传输效率
[15]	无源屏蔽	30.80%	/
[20]	有源屏蔽	40.00%	90.90%
[22]	有源屏蔽	40.74%	92.60%
[25]	无源屏蔽	30.00%	93.70%
[26]	金属屏蔽	26.90%	/
本文结构	有源屏蔽	45.76%	96.95%

在图 9 和 10 中, 为了直观地表示 OWAMS 结构的屏蔽效果, 将目标面处无屏蔽线圈的三维磁场分布与 OWAMS 屏蔽线圈的三维磁场分布进行了比较。可以观察到, 在离汽车底盘中心 80 cm 与 Y 轴垂直的目标面处, 不带屏蔽的两线圈系统的最大漏磁为 $6.95 \mu\text{T}$, OWAMS 屏蔽线圈结构的系统的最大漏磁为 $3.77 \mu\text{T}$ 。由此可以看出, OWAMS 线圈结构有效削弱了目标面上的漏磁。

4 实验验证

4.1 实验装置

为了验证所提结构的安全性及正确性, 在实验室中搭建了一套 4 kW 实验平台, 如图 11 所示, 实验平台主要组成部分为负载、WT5000 功率分析仪、RT-unit 逆变-整流模块、示波器、线圈实物模型、直流电源、以及 NF-5035S 电磁辐射分析仪。

根据表 1 的线圈尺寸参数得出本文 OWAMS 结构的实物模型为长为 52 cm 的正方形结构, 发射线圈 T_x 和接收线圈 R_x 结构相同。实验将 4 种不同屏蔽结构的漏磁和传输效率进行对比, 来验证 OWAMS 线圈结构的有效

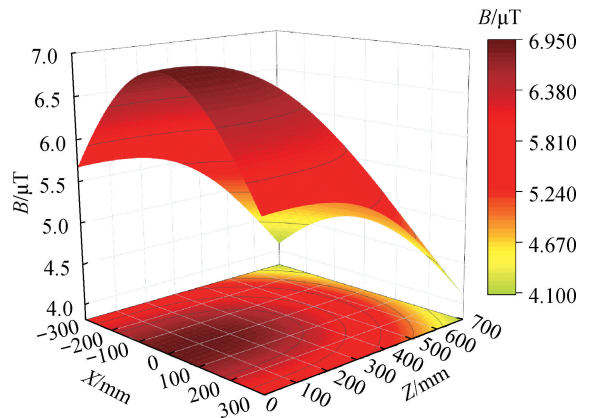


图 9 不带屏蔽的三维磁场分布

Fig. 9 Three dimensional magnetic field distribution without shielding

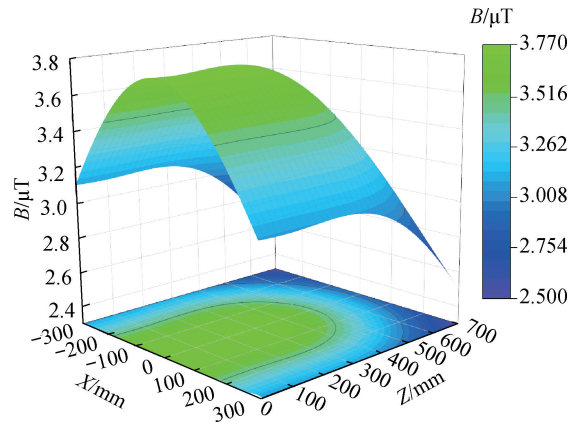


图 10 OWAMS 的三维磁场分布

Fig. 10 Three dimensional magnetic field distribution with OWAMS shielding

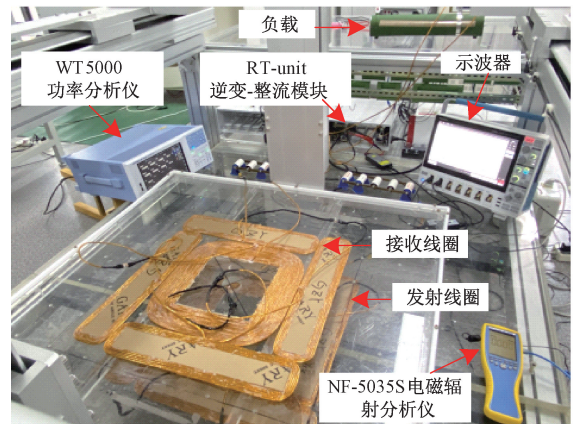


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

性, 如图 12 所示。OWAMS 结构中的线圈绕制均采用规

格为 0.1 mm × 800 股的利兹线,最大耐受电流为 31.415 A。

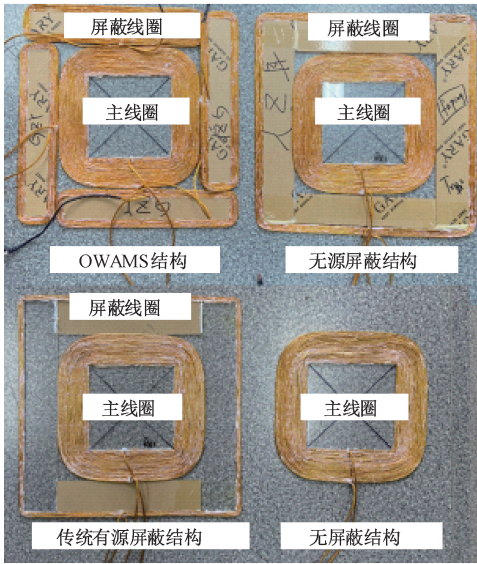


图 12 线圈实物图

Fig. 12 Physical diagram of the coil

首先使用 IM3536 阻抗分析仪测量线圈结构的物理参数,实验测得的 OWAMS 线圈结构的详细物理参数如表 3 所示。其次通过示波器观察线圈发射端和接收端的电流电压波形来判断谐振状态,然后调整直流源电压使输出功率达到 4 kW,使用 WT5000 功率分析仪测试系统传输效率,并使用 NF-5035S 电磁辐射分析仪及其配套的 MCS 电磁辐射分析软件测试目标面的漏磁。

表 3 线圈的测量参数

Table 3 Measurement parameters of coil

参数名称	物理意义	数值
$L_1/\mu\text{H}$	发射线圈的自感	220.04
$L_2/\mu\text{H}$	接收线圈的自感	223.06
C_{Tx}/nF	发射线圈的谐振电容	15.05
C_{Rx}/nF	接收线圈的谐振电容	15.61
$R_1/\text{m}\Omega$	发射线圈的寄生电阻	234.69
$R_2/\text{m}\Omega$	接收线圈的寄生电阻	240.13
f_0/kHz	工作频率	85
R_L/Ω	负载	14

4.2 系统的漏磁

首先利用 MATLAB 计算出系统漏磁的理论值 B_e ;其次,运用 Ansys Maxwell 软件,画出 OWAMS 结构的线圈模型,对线圈模型进行仿真得到漏磁的仿真值 B_s ;最后,利用 NF-5035S 电磁辐射分析仪测量了 OWAMS 结构的漏磁实验值 B_c 。漏磁仿真值与漏磁实验值之间的误差定义为 ε_s ,漏磁理论值与漏磁实验值之间的误差定义为 ε_c ,两者表达式为:

$$\varepsilon_s = \frac{|B_s - B_e|}{B_e} \quad (17)$$

$$\varepsilon_c = \frac{|B_c - B_e|}{B_e} \quad (18)$$

通过对比图 12 中 4 种屏蔽结构在偏移相同距离时目标面的最大漏磁,来验证 OWAMS 结构漏磁屏蔽的有效性。

表 4~7 分别显示了在无屏蔽线圈结构、无源屏蔽线圈结构、传统有源屏蔽线圈结构和 OWAMS 线圈结构时,接收线圈沿 Y 轴方向偏移时的漏磁理论值、仿真值、实验值与误差率。四种线圈结构的误差率均在 6% 以下,验证了漏磁理论值与仿真值的正确性。

从表 5 得出,在偏移 10 cm 时,无源屏蔽线圈结构相比无屏蔽时的实测最大漏磁降低了 29.66%。表 6 显示传统有源屏蔽线圈结构在偏移 10 cm 时测得最大漏磁为 7.69 μT ,相比无屏蔽线圈结构降低了 31.71% 的漏磁。表 7 显示 OWAMS 结构在偏移 10 cm 时测得最大漏磁为 6.03 μT ,比无屏蔽线圈结构的最大漏磁降低了 46.45%,并且在系统对准时能降低 43.63% 的漏磁。

因此,可以得出结论,在偏移 10 cm 时,OWAMS 结构测得最大漏磁为 6.03 μT ,仍满足漏磁安全标准,并且在相同偏移距离时,OWAMS 结构的磁屏蔽效果均优于同尺寸大小的无源屏蔽线圈结构和传统有源屏蔽线圈结构。

表 4 无屏蔽时接收线圈沿 Y 轴漏磁理论、仿真、实验值和漏磁误差率

Table 4 Magnetic leakage theoretical, simulation, measured value and magnetic leakage error rate of the receive coil along the Y-axis without shielding

偏移距离/cm	$B_e/\mu\text{T}$	$B_s/\mu\text{T}$	$B_c/\mu\text{T}$	$\varepsilon_s/\%$	$\varepsilon_c/\%$
0	6.95	6.73	6.67	0.85	4.13
2	7.33	7.34	7.24	1.31	1.18
4	7.88	7.80	7.65	1.97	3.00
6	8.62	9.21	9.01	2.14	4.30
8	9.74	9.66	9.27	4.22	5.12
10	11.26	11.44	11.26	1.61	0.05

表 5 无源屏蔽时接收线圈沿 Y 轴漏磁理论、仿真、实验值和漏磁误差率

Table 5 Magnetic leakage theoretical, simulation, measured value and magnetic leakage error rate of the receive coil along the Y-axis with passive shielding

偏移距离/cm	$B_e/\mu\text{T}$	$B_s/\mu\text{T}$	$B_c/\mu\text{T}$	$\varepsilon_s/\%$	$\varepsilon_c/\%$
0	3.99	3.96	4.05	2.29	1.53
2	4.31	4.55	4.46	1.99	3.23
4	4.80	4.85	4.71	2.94	1.84
6	5.49	5.47	5.41	1.20	1.44
8	6.55	6.68	6.39	4.57	2.50
10	8.00	8.28	7.92	4.51	1.03

表 6 传统有源屏蔽时接收线圈沿 Y 轴漏磁理论、仿真、实验值和漏磁误差率

Table 6 Magnetic leakage theoretical, simulation, measured value and magnetic leakage error rate of the receive coil along the Y-axis with traditional active shielding

偏移距离/cm	$B_c/\mu\text{T}$	$B_s/\mu\text{T}$	$B_e/\mu\text{T}$	$\varepsilon_s/\%$	$\varepsilon_e/\%$
0	3.89	4.03	4.06	4.19	0.74
2	4.15	4.27	4.21	1.43	1.43
4	4.56	4.77	4.53	0.66	5.30
6	5.22	5.44	5.34	2.25	1.87
8	6.23	6.48	6.31	1.27	2.69
10	7.73	7.77	7.69	0.52	1.04

表 7 OWAMS 结构时接收线圈沿 Y 轴漏磁理论、仿真、实验值和漏磁误差率

Table 7 Magnetic leakage theoretical, simulation, measured value and magnetic leakage error rate of the receive coil along the Y-axis with OWAMS shielding

偏移距离/cm	$B_c/\mu\text{T}$	$B_s/\mu\text{T}$	$B_e/\mu\text{T}$	$\varepsilon_s/\%$	$\varepsilon_e/\%$
0	3.77	3.85	3.76	2.01	0.27
2	3.95	3.97	3.88	2.31	1.82
4	4.24	4.39	4.33	1.26	2.24
6	4.66	4.69	4.64	1.09	0.35
8	5.32	5.52	5.44	1.60	2.21
10	6.25	5.97	6.03	1.00	4.36

根据表 4~7 的数据,得到了漏磁随接收线圈偏移不同距离时的变化曲线图,如图 13 所示。从图中可以看出,漏磁随着接收线圈偏移距离的增加而增大,通过分析图 13 可以得到结论,在偏移相同距离时,OWAMS 结构屏蔽效果最好,验证了所提结构和方法的有效性。

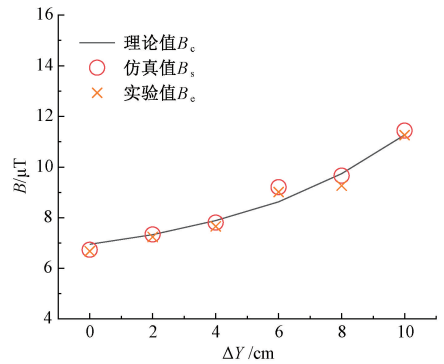
4.3 系统的传输效率

在偏移相同距离时,本节通过对比无屏蔽结构、无源屏蔽结构、传统有源屏蔽线圈结构和 OWAMS 屏蔽结构等四种屏蔽条件下的传输效率,来验证 OWAMS 结构的有效性。

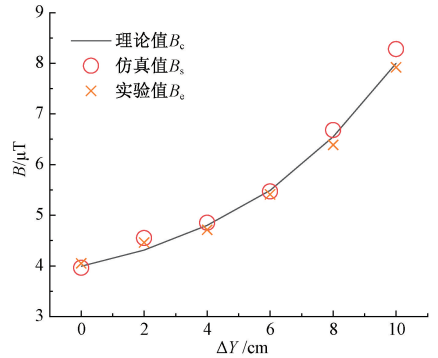
首先通过式(15)得到了系统传输效率的理论值 η_c ,其次通过 MATLAB/Simulink 得到了仿真值 η_s ,最后通过 WT5000 功率分析仪测量了系统传输效率的实验值 η_e 。

表 8~11 分别显示了无屏蔽线圈结构、无源屏蔽线圈结构、传统有源屏蔽线圈结构和 OWAMS 线圈结构的传输效率与偏移距离的变化关系。

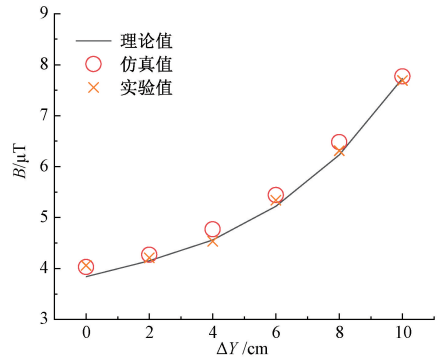
分析表 8~11,4 种屏蔽结构的传输效率随偏移距离的增加呈下降趋势,并且在偏移 10 cm 时传输效率达到最低值,此时 OWAMS 结构的传输效率仍比无源屏蔽实测的传输效率高 48.57%,比传统有源屏蔽结构实测的传输效率高 6.91%。从表 11 中的数据能够看出,OWAMS 结构在线圈偏移时也能保持较高的传输效率,传输效率



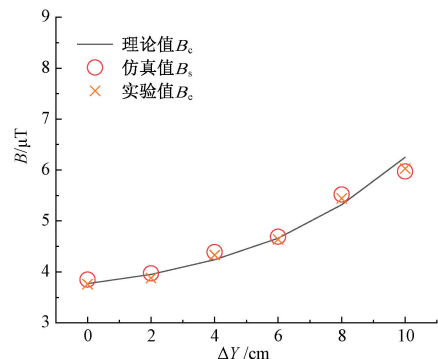
(a) 不带屏蔽下的漏磁
(a) Magnetic leakage without shielding



(b) 无源屏蔽下的漏磁
(b) Magnetic leakage under passive shielding



(c) 传统有源屏蔽下的漏磁
(c) Magnetic leakage under traditional active shielding



(d) OWAMS屏蔽下的漏磁
(d) Magnetic leakage under OWAMS shielding

图 13 不同屏蔽条件下的漏磁

Fig. 13 Magnetic flux leakage under different shielding conditions

波动较低,在最大偏移 10 cm 处达到传输效率最小值 92.92%,理论上传输效率能维持在 95% 以上。

表 8 无屏蔽时接收线圈沿 Y 轴传输效率理论值、仿真值和实验值

Table 8 Theoretical, simulated and measured values of transmission efficiency of the receive coil along the Y-axis without shielding

偏移距离/cm	$\eta_c/\%$	$\eta_s/\%$	$\eta_e/\%$
0	97.55	97.35	95.97
2	97.54	97.32	95.90
4	97.15	96.90	95.32
6	97.23	96.89	95.14
8	96.91	96.62	94.93
10	96.58	96.42	94.16

表 9 无源屏蔽时接收线圈沿 Y 轴传输效率理论值、仿真值和实验值

Table 9 Theoretical value, simulation value and measured value of transmission efficiency of the receive coil along the Y-axis with passive shielding

偏移距离/cm	$\eta_c/\%$	$\eta_s/\%$	$\eta_e/\%$
0	78.54	77.28	77.78
2	77.84	77.46	75.80
4	73.96	73.58	71.65
6	67.66	67.31	66.10
8	58.66	58.31	55.86
10	47.00	46.70	44.35

表 10 传统有源屏蔽时接收线圈沿 Y 轴传输效率理论值、仿真值和实验值

Table 10 Theoretical value, simulation value and measured value of transmission efficiency of the receive coil along the Y-axis with traditional active shielding

偏移距离/cm	$\eta_c/\%$	$\eta_s/\%$	$\eta_e/\%$
0	94.25	94.21	91.96
2	94.22	93.89	90.95
4	93.75	93.43	90.30
6	93.12	92.78	89.01
8	91.67	91.32	88.33
10	89.30	89.19	86.01

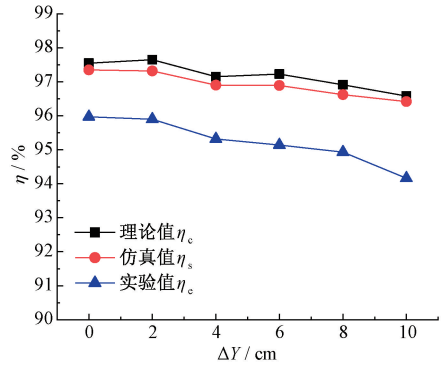
因此,在无偏移情况下,实验测得 OWAMS 结构传输效率能达到 95.58%。在偏移相同距离时,OWAMS 结构的传输效率高于无源屏蔽线圈结构和传统有源屏蔽线圈结构的传输效率。

4 种屏蔽条件下的传输效率随偏移距离的变化曲线,如图 14 所示,从图中可以更直观的看到系统效率随偏移距离的增加呈下降趋势,在最大偏移距离 10 cm 处效率达到最低点。

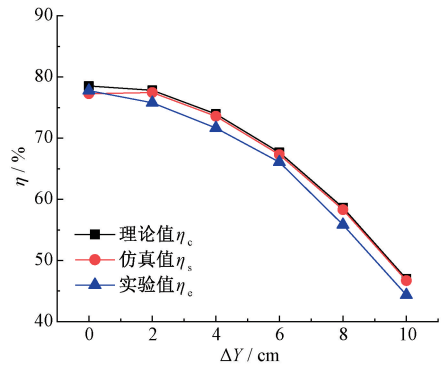
表 11 OWAMS 结构时接收线圈沿 Y 轴传输效率理论值、仿真值和实验值

Table 11 Theoretical value, simulated value and measured value of receive coil transmission efficiency along Y-axis with OWAMS shielding

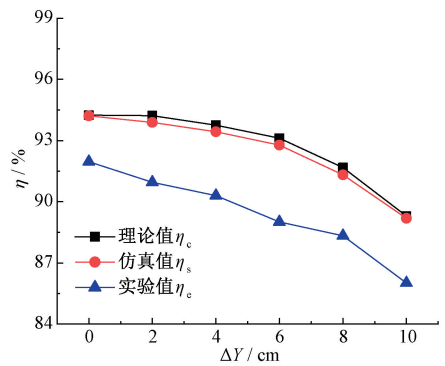
偏移距离/cm	$\eta_c/\%$	$\eta_s/\%$	$\eta_e/\%$
0	96.95	96.64	95.58
2	96.91	96.59	95.15
4	96.79	96.84	95.10
6	96.46	96.19	94.44
8	96.06	95.71	93.83
10	95.35	94.98	92.92



(a) 无屏蔽下的传输效率
(a) Transmission efficiency without shielding



(b) 无源屏蔽下的传输效率
(b) Transmission efficiency under passiveshielding



(c) 传统有源屏蔽下的传输效率
(c) Transmission efficiency under traditionalactiveshielding

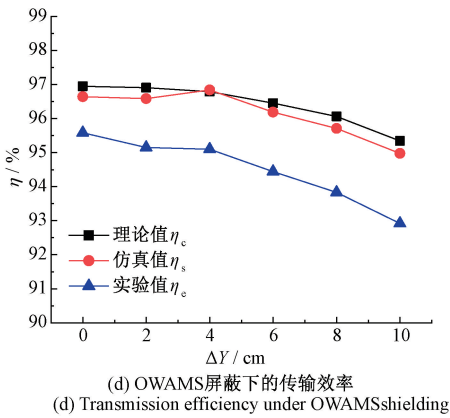


图 14 不同屏蔽条件下的传输效率

Fig. 14 Transmission efficiency under different shielding conditions

通过分析 4 种不同屏蔽结构,在相同偏移条件下的目标面上漏磁和传输效率,得出本文 OWAMS 结构具有较好的漏磁屏蔽效果以及更高的传输效率。

5 结论

本文提出了一种全向环绕型有源磁屏蔽结构。该结构的主要优势是在实现低漏磁的安全标准同时,仍能够维持较高的传输效率,具有较强的稳定性。并且根据本文线圈结构高效率低漏磁的特点,提出了一种线圈优化方法,得到了满足设计要求的线圈参数,使目标面的漏磁达到安全漏磁标准。实验测得 OWAMS 结构在线圈无偏移时能够实现 $3.76 \mu\text{T}$ 的安全漏磁,并且传输效率能达到 95.58%。通过分析理论值、仿真值和实验数据,能够发现,相比无屏蔽线圈,OWAMS 结构使目标面漏磁降低 43.63%。并且在偏移 10 cm 处传输效率相比无源屏蔽线圈提升了 48.57%,相比传统有源屏蔽线圈提升了 6.91%。

该结构在没有任何铁氧体磁芯结构时,仍能实现目标面的最大漏磁在安全范围 $6.25 \mu\text{T}$ 下,极大地降低了 WPT 系统的成本并具有良好的实用价值,可以应用到电动汽车无线充电。未来需改进本文结构,在减少线圈漏磁的同时降低材料成本,并且获得更好的屏蔽效果和传输效率。

参考文献

[1] 李中启,熊鑫博,孔彭生,等. 无线充电系统电磁屏蔽与效率优化技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 151-162.
LI ZH Q, XIONG X B, KONG P SH, et al. Research on electromagnetic shielding and efficiency optimization technology of wireless charging system [J]. Journal of

Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 151-162.

- [2] 江兵,王子博,俞子豪,等. MCR-WPT 系统接收线圈偏移角度的测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 1-7.
JIANG B, WANG Z B, YU Z H, et al. Research on the measurement method of receive coil offset angle in MCR-WPT system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 1-7.
- [3] 程靖宜,武小兰,白志峰. 基于耦合系数估计的电动汽车无线电能传输最大效率跟踪[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 180-186.
CHENG J Y, WU X L, BAI ZH F. Maximum efficiency tracking of wireless power transfer for electric vehicles based on coupling coefficient estimation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 180-186.
- [4] AHN J, KIM J, PARK D, et al, An active shielding control method for a wireless power transfer system under misalignment conditions [J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2022, 22(1): 56-63.
- [5] 沈栋,杜贵平,丘东元,等. 无线电能传输系统电磁兼容研究现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2855-2869.
SHEN D, DU G P, QIU D Y, et al. Current status and development trend of electromagnetic compatibility of wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2855-2869.
- [6] 薛明,杨庆新,章鹏程,等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547-1568.
XUE M, YANG Q X, ZHANG P CH, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1547-1568.
- [7] 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): 71-79.
ZHANG X, ZHANG P CH, YANG Q X, et al. Magnetic Shielding design and analysis for wireless charging coupler of electric vehicles based on finite element method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 71-79.
- [8] LEE S, LIM D H, CHO Y, et al. Low leakage electromagnetic field level and high efficiency using a novel hybrid loop-array design for wireless high power transfer system [J]. IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, 2019, 66(6): 4356-4367.
- [9] 陈琛, 黄学良, 谭林林, 等. 电动汽车无线充电时的电磁环境及安全评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 61-67.
CHEN CH, HUANG X L, TAN L L, et al. Electromagnetic environment and security evaluation for wireless charging of electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 61-67.
- [10] 董亮, 林飞宏, 王晨曲, 等. 无接触网供电城轨车辆中人体电磁场评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 40-45.
DONG L, LIN F H, WANG CH Q, et al. Assessing human exposure to electromagnetic fields from catenary-free power supply urban rail transit vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 40-45.
- [11] 朱庆伟, 陈德清, 王丽芳, 等. 电动汽车无线充电系统磁场仿真与屏蔽技术研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 143-147.
ZHU Q W, CHEN D Q, WANG L F, et al. Study on the magnetic field and shielding technique for an electric vehicle oriented wireless charging system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 143-147.
- [12] 窦润田, 张献, 李永建, 等. 磁耦合谐振无线电能传输系统电磁屏蔽应用发展与研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6020-6040.
DOU R T, ZHANG X, LI Y J, et al. Review on the application development and research of electromagnetic shielding of magnetically coupled resonant wireless power transfer system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6020-6040.
- [13] 李佳原, 文海兵, 张克涵, 等. 磁耦合无线电能传输系统电磁干扰抑制研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7387-7403.
LI J Y, WEN H B, ZHANG K H, et al. Research progress on electromagnetic interference suppression of magnetically coupled wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7387-7403.
- [14] KIM J, KIM J, KONG S, 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.
- [15] KIM S, PARK H, KIM J, et al. Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(4): 1057-1066.
- [16] 许乔迪, 徐叶飞, 麦瑞坤. 具有目标面最优磁屏蔽效
果的 IPT 谐振式无功屏蔽系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5490-5498, 5597.
XU Q D, XU Y F, MAI R K. IPT resonant reactive shielding systems with the characteristics of optimal magnetic shielding effect on the target surface [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5490-5498, 5597.
- [17] 蒙金雪, 张玉旺, 郭彦杰, 等. 电动汽车无线充电系统的有源磁屏蔽研究[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(4): 44-51.
MENG J X, ZHANG Y W, GUO Y J, et al. Research of active magnetic shielding for wireless power transfer system of electric vehicles [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(4): 44-51.
- [18] CRUCIANI S, CAMPI T, MARADEI F, et al. Active shielding design for a dynamic wireless power transfer system [C]. 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE, Rome, Italy, 2020, 1-4.
- [19] CAMPI T, CRUCIANI S, MARADEI F, et al. Active coil system for magnetic field reduction in an automotive wireless power transfer system [C]. 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI), New Orleans, LA, USA, 2019, 189-192.
- [20] CAMPI T, CRUCIANI S, MARADEI F, et al. Magnetic field mitigation by multi coil active shielding in electric vehicles equipped with wireless power charging system [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(4): 1398-1405.
- [21] 周国超. 电动汽车无线电能传输系统耦合机构磁辐射抑制方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
ZHOU G CH. Research on magnetic radiation suppression method of coupling mechanism of wireless power transmission system of electric vehicle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [22] MI M F, YANG Q X, LI Y J, et al. Multi-objective active shielding coil design for wireless electric vehicle charging system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 8700505.
- [23] MOHAMMAD M, CHOI S. Optimization of ferrite core to reduce the core loss in double-D pad of wireless charging system for electric vehicles [C]. 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, USA, 2018, 1350-1356.
- [24] 李中启, 李上游, 李晶, 等. 动态无线电能传输系统多接收线圈正反串联结构的互感计算与优化[J]. 电

工技术学报, 2021, 36(24): 5153-5164.

LI ZH Q, LI SH Y, LI J, et al. Mutual inductance calculation and optimization of multiple receiving coils in positive and negative series structure for dynamic wireless energy transmission system [J]. Journal of Electrotechnology, 2021, 36(24): 5153-5164.

[25] LUO Z C, NIE S, PATHMANATHAN M, et al. Exciter-quadrature-repeater transmitter for wireless electric vehicle charging with high lateral misalignment tolerance and low EMF emission [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2156-2167.

[26] ZHANG B, CARLSON R B, GALIGEKERE V P, et al. Electromagnetic shielding design for 200 kW stationary wireless charging of light-duty EV [C]. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE),

Detroit, MI, USA, 2020, 5185-5192.

作者简介



李中启(通信作者),2009年于长沙学院获得学士学位,2012年于湖南工业大学获得硕士学位,2016年于湖南大学获得博士学位,2020年在湖南大学攻读博士后,现为湖南工业大学副教授,主要研究方向为无线电能传输技术。

Li Zhongqi (Corresponding author) received B. Sc. degree from Changsha University in 2009, received M. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2012, received Ph. D. degree from Hunan University in 2016. He pursued his postdoctoral studies at Hunan University in 2020. Now he is an associate professor in Hunan University of Technology. His main research interest includes wireless power transfer technology.