

电动汽车无线充电系统的有源磁屏蔽研究

蒙金雪^{1,2,3}, 张玉旺^{1,2}, 郭彦杰^{1,2}, 王丽芳^{1,2,3}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了降低电动汽车无线充电过程中车身周围的磁感应强度, 本文提出了一种有源线圈屏蔽的方法。首先, 建立了有源磁屏蔽系统和无线充电系统的联合模型, 推导了有源磁屏蔽系统的理论方法及设计步骤。然后, 通过有限元仿真验证了该有源磁屏蔽方法的有效性, 最后, 设计了一套 3.3 kW 无线充电系统的有源磁屏蔽台架, 成功实现了电动汽车无线充电系统的有源磁屏蔽, 并通过进一步优化有源磁屏蔽线圈中的电流幅值和相位, 实现了最佳的有源磁屏蔽效果, 证明了该有源磁屏蔽理论及设计方法的有效性。

关键词: 无线充电系统; 有源磁屏蔽; 有限元仿真; 屏蔽线圈电流

DOI: 10.12067/ATEEE2011023

文章编号: 1003-3076(2021)04-0044-08

中图分类号: TM724

1 引言

近年来, 随着无线充电(Wireless Power Transfer, WPT)技术的快速发展^[1,2], WPT系统广泛应用于电动汽车、医学设备和电子设备。WPT系统通过磁场耦合将能量从一个线圈传输到另一个线圈, 以给电动汽车充电^[3,4]。WPT系统可以有效减少系统内部的电气接触, 便于在潮湿的地方使用。此外, 移动式无线充电技术可以实现电动汽车在行驶过程中充电, 增加驾驶里程^[5,6]。然而, 在无线充电过程中, 由WPT系统泄露到空气中的磁场在一定程度上会对生物体产生生理影响、干扰电子设备的正常运行^[7,8]。美国汽车工程师协会(SAE)将电动汽车无线充电的频带确立在 85 kHz, 我国也出台了与电磁安全相关的法规和标准。我国在电磁安全限制上的要求严于国际标准, 并且将逐步加强对电磁环境安全的监管和要求。因此, WPT系统在充电过程中的磁场安全性研究是一项十分关键的课题。

为解决磁场泄露问题, 国内外研究团队主要提出了四种类型方案: ①磁屏蔽法。文献[9-12]在无线充电系统周围放置了铁氧体, 使得系统的主要磁

路沿着铁氧体方向, 有效降低了外围空间的磁场强度。然而, 随着铁氧体材料的增加, 整个系统的重量和成本大幅升高。②导电屏蔽法。文献[13,14]通过在无线充电系统周围放置水平或垂直地金属屏蔽板, 可以有效屏蔽系统周围的磁通量泄露。然而, 在一些应用中, 金属材料安装在车体内部, 充电过程中需要向下移动金属材料至地面以阻碍气隙中的磁场向外扩散^[15], 上下移动过程中增加了与周围设备的摩擦。③谐振式无功屏蔽法。文献[16,17]设计了谐振式无功屏蔽线圈, 利用漏磁在屏蔽线圈中激发感应电流, 从而抵消原磁场。④有源磁屏蔽法。有源磁屏蔽法可以通过主动调节屏蔽线圈产生的磁场, 从而完全抵消原磁场。文献[18]提出了一种有效的有源屏蔽方法, 可以降低屏蔽线圈内部特定点或屏蔽线圈周围环路区域的磁场。文献[19]通过改变有源线圈的几何形状和电流, 可以有效屏蔽原磁场。然而, 以上文献都没有考虑车体对WPT系统的影响。

在以上研究成果的基础上, 本研究将针对电动汽车无线充电系统有源磁屏蔽展开研究。本文以 3.3 kW 电动汽车无线充电系统为研究对象, 基于有

收稿日期: 2020-11-18

基金项目: 国家国际科技合作专项(2019YFE0100200)、国家自然科学基金项目(51807188)、中科院先导专项(XDA22010403)

作者简介: 蒙金雪(1994-), 女(壮族), 广西籍, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车无线充电;

王丽芳(1971-), 女, 山西籍, 研究员, 博士, 研究方向为电动汽车能量管理及其充电技术(通讯作者)。

限元磁场仿真,设计了一套针对该无线充电系统的有源磁屏蔽系统,最后设计了台架进行了磁屏蔽效果实验验证。

2 有源磁屏蔽系统和无线充电系统联合模型

有源磁屏蔽系统和无线充电系统联合模型如图1所示。其中充电系统原边线圈和副边线圈组成了无线能量传输结构;铝板模拟电动汽车的底盘结构,主要用于屏蔽电动汽车内部的磁场,从而保护车内乘客、金属结构和电子设备等。当电动汽车进行无线充电时,充电系统会向车体周围辐射磁场,会对车体周围的乘客产生影响。为解决这一问题,本研究采用有源磁屏蔽线圈降低目标区域的磁场强度。

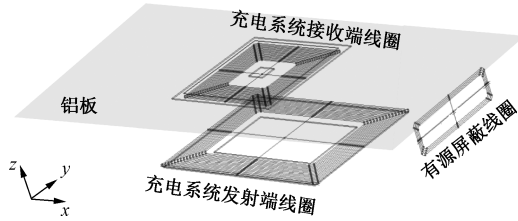


图1 有源磁屏蔽系统和无线充电系统联合模型

Fig.1 Joint model of WPT system and active magnetic shielding system

2.1 无线充电系统的电路分析

有源磁屏蔽系统和无线充电系统联合电路模型如图2所示,其中上半部分为原无线充电系统; U_{d1} 是无线充电系统的直流母线电压源;逆变器的频率表示为 f_{WPT} ;发射端补偿电路由 L_p , C_{p1} 和 C_{p2} 组成; L_1 , L_2 和 $M_{1,2}$ 分别为无线充电系统发射端线圈自感,接收端线圈自感和两个线圈之间互感;接收端补偿电路由 C_{s1} , C_{s2} 和 L_s 组成, R_L 为充电系统的负载, R_e 表示整流桥输入端的等效负载。图2的下半部分为有源磁屏蔽系统,其中 U_{d2} 是有源磁屏蔽系统的直流母线电压;逆变器的频率表示为 f_{sh} ;谐振电路由 L_{sh3} 和 C_{sh} 组成; L_3 为屏蔽线圈的自感; $M_{1,3}$ 和 $M_{2,3}$ 分别为屏蔽线圈与发射端线圈以及接收端线圈之间的互感。

为了在达到较好的有源磁屏蔽效果的同时不影响系统的传输效率,需要将屏蔽线圈放置于距离发射端线圈和接收端线圈较远处,从而降低系统的 $M_{1,3}$ 和 $M_{2,3}$ 。对于本研究中电动汽车无线充电系统来说,则将屏蔽线圈放置于靠近车身边缘的铝板下面,此时的 $M_{1,3}$ 和 $M_{2,3}$ 接近于0,即实现了原无线充

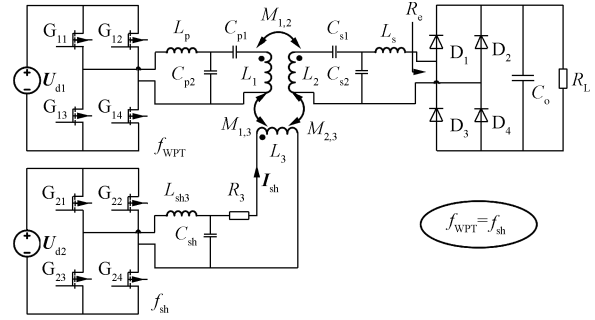


图2 有源磁屏蔽系统和无线充电系统联合电路模型

Fig.2 Joint circuit model of WPT system and active magnetic field shielding system

电系统和屏蔽系统的解耦,这一结论将在第三节仿真实验中说明。

在实现原无线充电系统和屏蔽系统的解耦之后,则可以分别用戴维宁定理分别对以上无线充电和有源磁屏蔽系统的等效电路模型进行简化,其中无线充电系统电路的简化结果如图3所示。

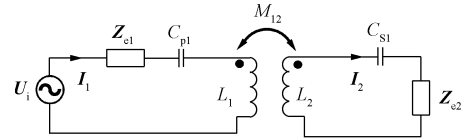


图3 无线充电系统的简化电路模型

Fig.3 Simplified circuit model of WPT system

其中, U_i 为发射端线圈的等效交流电压源;其表达式如式(1)所示; I_1 和 I_2 分别表示发射端线圈和接收端线圈的电流; Z_{e1} 和 Z_{e2} 分别如式(2)和式(3)所示。另外, U_{in} 为无线充电系统逆变器输出电压的基波,其幅值为: $|U_{in}| = 4U_{d1}/\pi$ 。

$$U_i = \frac{1}{1 - \omega^2 L_p C_{p2}} U_{in} \quad (1)$$

$$Z_{e1} = \frac{j\omega L_p}{1 - \omega^2 L_p C_{p2}} \quad (2)$$

$$Z_{e2} = \frac{j\omega L_s + R_e}{1 + j\omega C_{s2} R_e + L_s / C_{s2}} \quad (3)$$

式中, $\omega = 2\pi f_{WPT}$; $R_e = 8R_L/\pi^2$; Z_{e1} 为 C_{p1} 输出等效阻抗; Z_{e2} 为 C_{s2} 输入等效阻抗; L_s 为接收端补偿电感。

无线充电系统的磁场分布和线圈中的电流有关,因此为获得无线充电系统周围的磁场分布,需首先求得发射端线圈和接收端线圈的电流(I_1 和 I_2)。根据图3,可得基尔霍夫电压方程组:

$$\begin{bmatrix} U_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M_{12} \\ -j\omega M_{12} & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, Z_1 和 Z_2 分别表示发射端和接收端线圈回路的自阻抗。表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} Z_1 = r_{L1} + Z_{e1} + 1/j\omega C_{p1} + j\omega L_1 \\ Z_2 = r_{L2} + Z_{e2} + 1/j\omega C_{s1} + j\omega L_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中, r_{L1} 和 r_{L2} 分别为发射端和接收端线圈的内阻。将式(5)代入式(4)中,可以求得两个线圈中的电流如式(6)所示。

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U_i}{Z_1 + (\omega M_{12})^2 / Z_2} \\ I_2 = \frac{-j\omega M_{12} U_i}{Z_1 Z_2 + (\omega M_{12})^2} \end{cases} \quad (6)$$

对于有源磁屏蔽系统, L_{sh3} 和 C_{sh} 谐振, 则其电路模型可等效为图4, 其中 U_{sh} 为有源磁屏蔽系统逆变器输出电压的基波, 其幅值为 $4U_{d2}/\pi$, 频率为逆变器频率(f_{sh})。图4中, U_{sh} , I_3 和 I_{sh} 的关系可表示为:

$$\begin{aligned} U_{sh} &= j\omega L_{sh3} I_{sh} + (1 - \omega^2 C_{sh} L_{sh3}) j\omega (R_3 + L_3) I_3 \\ &= j\omega L_{sh3} I_{sh} \end{aligned} \quad (7)$$

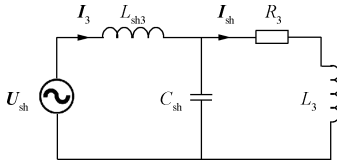


图4 有源磁屏蔽系统的简化电路模型

Fig.4 Simplified circuit model of active magnetic shielding system

所以 I_{sh} 的相位比 U_{sh} 滞后 90° , 且其幅值与 U_{sh} 成正比, 而与屏蔽线圈本身的参数无关。

2.2 带有源磁屏蔽的电动汽车无线充电系统的磁场分析

电动汽车无线充电系统中的铝板具有屏蔽磁通作用。在铝板屏蔽作用下, 原无线充电系统和有源磁屏蔽线圈产生的磁场方向均会发生变化。沿着图1所示的无线充电系统和屏蔽线圈的中轴线所在的 $x-z$ 平面, 发射端和接收端线圈产生的磁感应强度方向如图5(a)所示, 有源磁屏蔽线圈产生的磁感应强度方向如图5(b)所示。可以发现, 在目标磁场屏蔽区域(即电动汽车车身附近区域)内, 二者产生的磁感应强度方向基本相反, 因此可通过控制有源磁屏蔽线圈的电流, 实现目标区域内的磁场屏蔽。

2.3 有源磁屏蔽原理分析

磁感应强度 B 满足磁场叠加原理, 即某一时刻的总磁感应强度为各个磁场源所产生的磁感应强度

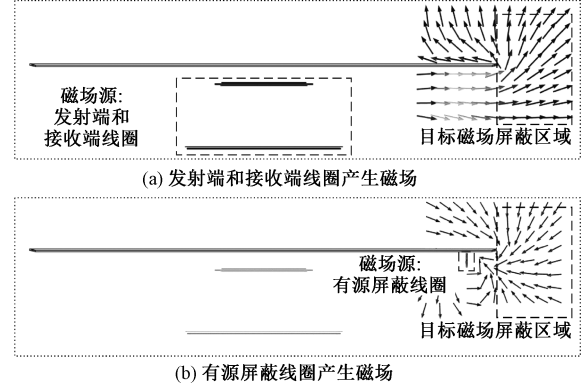


图5 无线充电线圈和有源磁屏蔽线圈分别产生的磁感应强度方向

Fig.5 Direction of magnetic induction intensity generated by the WPT coil and active magnetic shielding coil

的叠加。为了实现目标区域内的磁场屏蔽, 需要在目标区域内产生与原磁感应强度 B_{WPT} 大小相等、方向相反的屏蔽磁感应强度 B_{sh} 。

对于图1所示的无线充电系统, 其发射端线圈和接收端线圈的电流(I_1 和 I_2) 频率均为 f_{WPT} , 所以该系统产生的磁感应强度 B_{WPT} 也是频率为 f_{WPT} 的简谐波, 其表达式如式(8)所示。表达式的第一部分为磁感应强度 B_{WPT} 的幅值和空间方向, 第二部分为 B_{WPT} 的简弦波随时间的变化规律。当无线充电系统稳定运行时, I_1 和 I_2 是一定的, 系统周围磁场的空间方向 $r_{B, WPT}$ 、幅值 $|B_{WPT}|$ 、角频率 ω_{WPT} 和相位 $\varphi_{B, WPT}$ 确定的。

$$\begin{cases} B_{WPT} = (|B_{WPT,x}|x + |B_{WPT,y}|y + |B_{WPT,z}|z) \cdot \sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B, WPT}) \\ B_{WPT} = |B_{WPT}|r_{B, WPT}\sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B, WPT}) \\ \omega_{WPT} = 2\pi f_{WPT} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $|B_{WPT,x}|$ 、 $|B_{WPT,y}|$ 和 $|B_{WPT,z}|$ 分别为无线充电系统在 x 方向、 y 方向和 z 方向上的磁感应强度幅值。

对于图1所示的有源磁屏蔽系统, 其屏蔽线圈的电流频率为 f_{sh} , 所以该线圈产生的磁感应强度 B_{sh} 也是频率为 f_{sh} 的简谐波, 其表达式如式(9)所示。

$$\begin{cases} B_{sh} = (|B_{sh,x}|x + |B_{sh,y}|y + |B_{sh,z}|z) \cdot \sin(\omega_{sh}t + \varphi_{B, sh}) \\ = |B_{sh}|r_{B, sh} \sin(\omega_{sh}t + \varphi_{B, sh}) \\ \omega_{sh} = 2\pi f_{sh} \end{cases} \quad (9)$$

为了实现目标空间区域内的磁场屏蔽, B_{WPT} 和 B_{sh} 的合磁感应强度 B_{final} 的幅值应低于 B_{WPT} 的幅值, 即:

$$|B_{final}| = |B_{WPT} + B_{sh}| < |B_{WPT}| \quad (10)$$

所以首先需要保证 $f_{WPT} = f_{sh}$ 。其次需要满足: 当 $r_{B,WPT}$ 和 $r_{B,sh}$ 参考方向相同时, $\varphi_{B,WPT} = \varphi_{B,sh} + 180^\circ$; 否则当 $r_{B,WPT}$ 和 $r_{B,sh}$ 参考方向相反时, $\varphi_{B,WPT} = \varphi_{B,sh}$ 。如图 5 所示, 本文中 $r_{B,WPT}$ 和 $r_{B,sh}$ 参考方向相反, 所以 B_{final} 可以表示为:

$$\begin{aligned} B_{final} &= B_{WPT} + B_{sh} \\ &= (|B_{WPT}| + |B_{sh}| r_{B,sh}) \sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B,WPT}) \\ &= |B_{final}| r_{final} \sin(\omega_{WPT}t + \varphi_{B,WPT}) \quad (11) \end{aligned}$$

记空间方向 $r_{B,WPT}$ 和 $r_{B,sh}$ 的夹角为 θ ($\theta > 90^\circ$)。可以证明, 当 $|B_{sh}| = |B_{WPT}| \cos(\pi - \theta)$ 时, $|B_{final}|$ 达到最小, 且 $|B_{final}| = |B_{WPT}| \sin(\pi - \theta)$ 。其矢量和如图 6 所示。

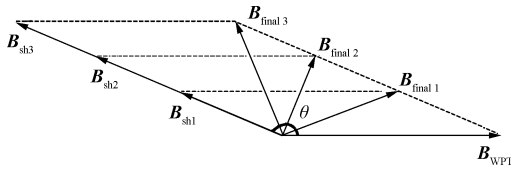


图 6 当无线充电系统和有源磁屏蔽系统磁场相位相同时的磁感应强度的叠加原理

Fig.6 Superposition principle of magnetic induction intensity with same magnetic field phase of the WPT system and active magnetic shielding system

综上所述, 为达到最优屏蔽效果, 需要首先确保无线充电系统和屏蔽系统的频率完全相等; 然后调节屏蔽线圈的电流相位, 在 $r_{B,WPT}$ 和 $r_{B,sh}$ 参考方向相反的基础上, 使屏蔽线圈和原充电系统的磁感应强度相位相等 ($\varphi_{B,WPT} = \varphi_{B,sh}$), 此时目标磁场屏蔽区域的磁感应强度达到最低; 最后调节屏蔽线圈的电流幅值 I_{sh} , 达到 $|B_{final}|$ 最小, 即为该有源磁屏蔽系统的最佳屏蔽效果。

3 电动汽车无线充电系统的有源磁屏蔽系统仿真设计

根据以上理论, 本文将为 3.3 kW 电动汽车无线充电系统设计有源磁屏蔽系统, 系统结构如图 1 所示。接收线圈和发射线圈的尺寸分别为 320 mm×320 mm 和 580 mm×420 mm, 对应的线圈匝数分别为 15 和 20, 匝间距均为 6.24 mm, 线径均为 5 mm; 发射线圈和接收线圈间距为 210 mm, 两个线圈上方

均铺有一层厚度为 3 mm 的铁氧体材料; 接收线圈铁氧体上方 8 mm 处放置一块 1200 mm×1700 mm 铝板。在距离发射线圈中心 750 mm 处 (距铝板边缘 100 mm 处) 垂直放置屏蔽线圈, 其尺寸为 320 mm×100 mm, 线圈匝数为 4 匝, 匝间距为 6.24 mm, 线径为 5 mm。

该带屏蔽线圈的 3.3 kW 电动汽车无线充电系统的电路模型如图 2 所示, 图 2 中各电路参数的实测值如下所示: 系统输入与负载参数分别为 $f_{WPT} = 85$ kHz, $U_{dl} = 470$ V 和 $R_L = 46$ Ω ; 发射端补偿网络参数分别为 $L_p = 80.1$ μ H, $C_{p1} = 18.84$ nF 和 $C_{p2} = 83.01$ nF; 发射端/接收端线圈自感和互感分别为 $L_1 = 229.3$ μ H, $L_2 = 219$ μ H 和 $M_{1,2} = 21.45$ μ H; 接收端补偿网络参数分别为 $C_{s1} = 22.2$ nF, $C_{s2} = 76.71$ nF 和 $L_s = 84$ μ H; 屏蔽线圈自感及其与发射端/接收端线圈的互感分别为 $L_3 = 6.7$ μ H, $M_{1,3} = 0.115$ μ H 和 $M_{2,3} = 0.023$ μ H; 发射端线圈/接收端线圈/屏蔽线圈内阻分别为 $r_{L1} = 226.4$ m Ω , $r_{L2} = 210$ m Ω 和 $r_{L3} = 20$ m Ω 。

可以发现, 屏蔽线圈与原发射端/接收端线圈的互感 $M_{1,3}$ 和 $M_{2,3}$ 非常小, 所以屏蔽线圈和原无线充电系统之间的耦合关系可以忽略, 即将系统简化为 $M_{1,3} = 0, M_{2,3} = 0$ 。此时便可以根据式 (6) 求解发射端/接收端线圈的电流 I_1 和 I_2 , 如表 1 所示。

表 1 无线充电系统发射端/接收端线圈电流值

Tab.1 Coil current value of transmitter/receiver of WPT system

线圈电流	I_1	I_2
幅值/A	24.3	24.06
相位/($^\circ$)	-38.55	-128

将求解出的无线充电系统线圈电流 I_1 和 I_2 代入有限元仿真模型作为线圈电流激励。通过调节屏蔽线圈 I_{sh} 的相位和幅值, 从而调节屏蔽线圈所产生的磁感应强度的相位 $\varphi_{B,sh}$ 和幅值 $|B_{sh}|$, 最终实现磁屏蔽效果。图 7 所示为有屏蔽线圈时和无屏蔽线圈时的磁感应强度对比图。图 7 中虚线区域为目标磁场屏蔽区域, 对应于电动汽车车身周围的区域。该无线充电仿真系统的左侧没有安装有源磁屏蔽系统, 代表该无线充电系统本身的磁场辐射程度; 系统右侧安装了有源磁屏蔽系统。结果显示, 在有源磁屏蔽系统的作用下, 目标区域内的磁感应强度大幅降低, 证明了该有源磁屏蔽系统的有效性。

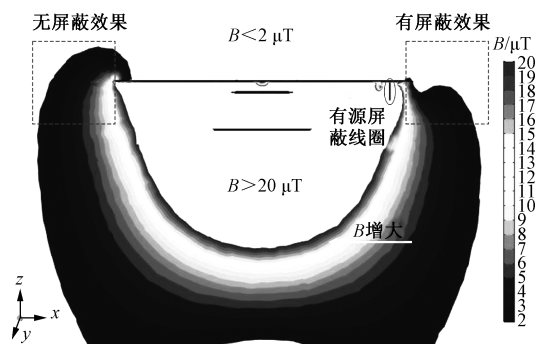


图7 有磁屏蔽线圈侧和无磁屏蔽线圈侧的磁感应强度对比

Fig.7 Comparison of magnetic induction intensity between magnetic shielding coil side and non-magnetic shielding coil side

4 有源磁屏蔽系统实验验证

4.1 实验台架设计

为验证以上有源屏蔽系统设计方法的有效性,本文搭建了带有源屏蔽系统 3.3 kW 电动汽车无线充电系统实验台架。台架的电路实物图如图 8 所示。无线充电系统和有源屏蔽系统均工作在 85 kHz 频率下, WPT 系统由直流电压源、逆变器、驱动、产生驱动信号的 DSP、发射端 LCC 补偿网络、发射端/接收端线圈、接收端 LCC 补偿网络、整流器和负载组成。有源屏蔽系统由直流电压源、逆变器、驱动、产生驱动信号的 FPGA 驱动信号延时系统、LC 谐振电路和磁屏蔽线圈组成。台架的结构参数以及电路参数见第三章仿真参数。最终采用 Narda EHP200 测试设备测试目标磁场屏蔽区域内的磁感应强度,通过调节 I_{sh} 的相位和幅值实现最优屏蔽效果。

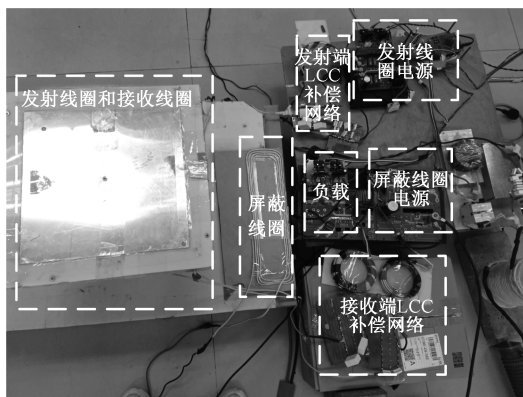


图8 3.3 kW 电动汽车无线充电系统的磁屏蔽系统台架

Fig.8 Magnetic shielding system bench for 3.3 kW WPT system of electric vehicle

4.2 有源磁屏蔽线圈的相位和幅值调节

如第 2.3 节所讨论的结果,为达到有源磁屏蔽线圈的最优屏蔽效果,需要确保无线充电系统的频率 f_{WPT} 完全等于屏蔽线圈的频率 f_{sh} ,同时需要屏蔽线圈电流 I_{sh} 的相位和幅值可调。

首先,对于有源磁屏蔽线圈的频率和相位,本研究设计了 FPGA 驱动信号延时系统,通过将 WPT 系统逆变器的驱动信号可控延时输出,则可以保证 f_{sh} 完全等于 f_{WPT} ,且形成有源屏蔽系统逆变器输出电压和 WPT 系统之间的可控相位差。然后根据式 (7),便可以求得并调节 I_{sh} 的相位。本系统采用的 FPGA 芯片为 EPEC3T144C8N,其时钟为 48 MHz,所以本相位调节系统的角度精度为 $(85 \text{ kHz}/48 \text{ MHz}) \times 360^\circ = 0.6735^\circ$ 。

然后,对于有源磁屏蔽线圈中的电流幅值,本文则通过调节该系统的直流输入电压来调节该幅值。根据式 (7), I_{sh} 的相位不会随直流电压 U_{d1} 的变化而变化。从而可以实现独立调节 I_{sh} 的相位和幅值。

4.3 有源磁屏蔽线圈的电流相位和幅值调优

按照第 2.3 节的 I_{sh} 相位和幅值调优方法,本文首先以 (910, 0, 220) 点处 (距铝板外边缘 60 mm, 高度 220 mm 点处) 作为测试点,通过调节 I_{sh} 的相位和幅值,使该测试点处磁感应强度值达到最低。首先,当 3.3 kW 无线充电系统运行时,该测试点处的实测 85 kHz 磁感应强度值为 12.76 μT 。然后,设置 I_{sh} 的幅值为 3.57 A,调节 I_{sh} 的相位,可测得该点的磁感应强度变化如图 9 所示。可得当 I_{sh} 的相位为 55.7° 时,该点的磁感应强度达到最低,即 I_{sh} 的最优相位为 55.7°。之后,设置 I_{sh} 的相位为 55.7°,调节 I_{sh} 的幅值,可测得该点的磁感应强度变化如图 10 所示。可得当 I_{sh} 的幅值为 3.57 A 时,该点的磁感应强度达到最低,即 I_{sh} 的最优幅值为 3.57 A。最后,在 I_{sh} 的最优相位和幅值点处,该测试点处的磁感应强度减小到 0.78 μT ,减小量达到 94%,证明了该有源磁屏蔽系统的有效性。

在 I_{sh} 相位为 55.7°、幅值为 3.57 A 时,本研究另外测试了除该测试点之外其他区域的磁感应强度减小情况。图 11 为 x 分别为 910 mm, 930 mm, 972.5 mm, 990 mm (即距铝板外侧边缘 60 mm, 80 mm, 112.5 mm, 130 mm) 且高度为 220 mm 处的磁屏蔽效果,图 12 为 x 为 930 mm (即距铝板外侧边缘距离 80 mm) 且不同高度 (202 mm, 210 mm, 243 mm, 264 mm, 287 mm) 处的磁屏蔽效果,结果显示

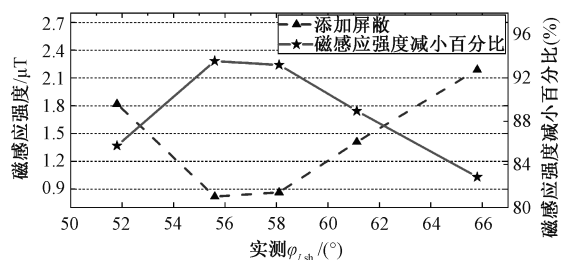


图9 测试点处磁感应强度随电流相位的变化曲线($\varphi_{I,sh}=55.7^\circ$)

Fig.9 Change curve of magnetic induction intensity with current phase at the test point ($\varphi_{I,sh}=55.7^\circ$)

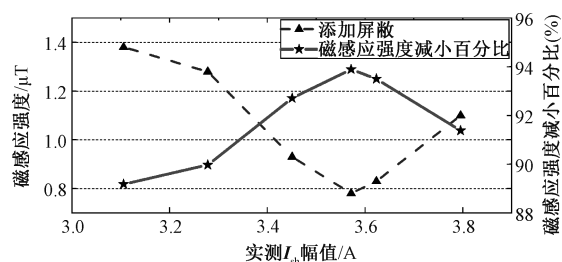


图10 测试点处磁感应强度随电流幅值的变化曲线($|I_{sh}|=3.57\text{ A}$)

Fig.10 Change curve of magnetic induction intensity with current amplitude at test point ($|I_{sh}|=3.57\text{ A}$)

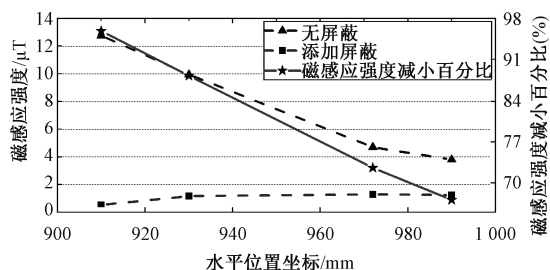


图11 目标磁屏蔽区域内不同 x 点处的磁屏蔽效果曲线($z=220\text{ mm}$)

Fig.11 Magnetic shielding effect curve at different x points in target magnetic shielding area ($z=220\text{ mm}$)

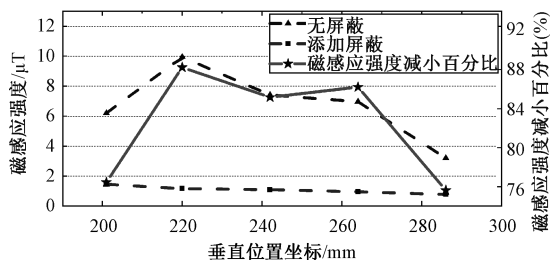


图12 目标磁屏蔽区域内不同 z 点处的磁屏蔽效果曲线($x=930\text{ mm}$)

Fig.12 Magnetic shielding effect curve at different z points in target magnetic shielding area ($x=930\text{ mm}$)

该区域内的磁感应强度均下降到了 $1.5\text{ }\mu\text{T}$ 以下,进一步证明了该有源磁屏蔽系统的实用性和有效性。

5 结论

本文提出并设计了一种有源磁屏蔽系统以降低无线充电过程中电动汽车车身周围的磁场。首先,本文建立了有源磁屏蔽系统和无线充电系统联合电路模型,在此基础上推导了有源磁屏蔽的理论并设计了有源屏蔽磁系统的优化方法。最终,仿真和实验结果均显示该有源屏蔽磁系统可以有效降低目标磁屏蔽区域内的磁感应强度,目标磁屏蔽区域内的磁感应强度均下降到了 $1.5\text{ }\mu\text{T}$ 以下,具有很好的应用前景。此有源屏蔽方法及系统设计方法对无线充电系统磁场屏蔽有一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 张亚蒙,张希,张智敏 (Zhang Yameng, Zhang Xi, Zhang Zhimin). 基于阻抗检测的多路自动调谐式无线充电金属检测系统 (Impedance detection based multi-channel automatic tuning metal object detection system for wireless charging device) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (4): 53-63.
- [2] 陈祺浩,韩亚东,阚永琪 (Chen Qihao, Han Yadong, Kan Yongqi). 无线充电技术的发展展望 (Prospect of wireless charging technology) [J]. 集成电路应用 (Applications of IC), 2020, 37 (7): 128-129.
- [3] 侯春,朱旺,水恒琪,等 (Hou Chun, Zhu Wang, Shui Hengqi, et al.). 基于 LCL-LC/LCL 混合补偿的多电动汽车恒流恒压无线充电系统特性分析 (Characteristic analysis of constant current and voltage wireless charging system for multi-electric vehicles based on LCL-LC / LCL hybrid compensation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 58-68.
- [4] 杨雅晴,张立炎,龙容,等 (Yang Yaqing, Zhang Liyan, Long Rong, et al.). 电动汽车动态无线充电系统集成线圈设计与实验研究 (Design and experimental study on integrated coils of electric vehicle dynamic wireless charging system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (2): 73-80.
- [5] 刘超群,魏斌,吴晓康,等 (Liu Chaoqun, Wei Bin, Wu Xiaokang, et al.). 电动汽车移动式无线充电技术工程化应用研究 (Engineering application of dynamic wireless charging technology for electric vehicles) [J].

- 电网技术 (Power System Technology), 2019, 43 (6): 2211-2218.
- [6] 郭彦杰, 王丽芳, 李树凡, 等 (Guo Yajie, Wang Lixiang, Li Shufan, et al.). 电动汽车移动式无线充电系统动态建模与特性分析 (Dynamic modeling and characteristic analysis on dynamic wireless charging system of electric vehicle) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (2): 73-78.
- [7] 王惠中, 赵辉, 庄亚杰 (Wang Huizhong, Zhao Hui, Zhuang Yajie). 磁耦合谐振式无线电能传输中磁屏蔽特性分析 (Analysis of magnetic shielding characteristics in magnetically coupled resonant radio power transmission) [J]. 自动化技术与应用 (Techniques of Automation and Applications), 2020, 39 (10): 37-40.
- [8] 李海燕, 逯迈, 董绪伟 (Li Haiyan, Lu Mai, Dong Xuwei). 纯电动汽车典型无线充电线圈电磁暴露安全评估研究 (Research on electromagnetic exposure safety assessment of typical wireless charging coil for battery electric vehicle) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (11): 74-80.
- [9] 周丽波, 梁迪飞, 李维佳, 等 (Zhou Libo, Liang Difei, Li Weijia, et al.). 无线充电用磁屏蔽材料 (Magnetic shielding material for wireless charging) [J]. 磁性材料及器件 (Journal of Magnetic Materials and Devices), 2019, 50 (6): 57-63.
- [10] 李厚基, 王春芳, 魏芝浩, 等 (Li Houji, Wang Chunfang, Wei Zhihao, et al.). 无线电能传输系统用屏蔽层结构的研究 (Research of shield structure for wireless power transfer system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (5): 74-83.
- [11] 王惠中, 薛超, 庄亚杰 (Wang Huizhong, Xue Chao, Zhuang Yajie). 谐振式无线电能传输中铁氧体屏蔽特性 (Shielding character of ferrites in WCR-MPT) [J]. 兰州理工大学学报 (Journal of Lanzhou University of Technology), 2020, 46 (2): 80-85.
- [12] 景馨 (Jing Xin). 无线电能传输系统用复合磁材结构的研究 (Study on composite magnetic material structure for wireless power transfer system) [D]. 青岛: 青岛大学 (Qingdao: Qingdao University), 2019.
- [13] 王惠中, 房理想, 贺珂珂 (Wang Huizhong, Fang Lixiang, He Keke). 基于 Maxwell 的无线电能传输耦合机构的磁屏蔽分析 (Analysis on magnetic shielding of wireless power transfer coupling mechanism based on Maxwell) [J]. 电气自动化 (Electrical Automation), 2020, 42 (1): 105-107.
- [14] 徐翀, 王松岑, 郭伟健, 等 (Xu Chong, Wang Songcen, Guo Weijian, et al.). 应用于电动汽车无线充电系统的金属材料屏蔽结构研究 (Research on metal shielding structure applied to electric vehicle wireless charging system) [J]. 电气自动化 (Electrical Automation), 2020, 42 (5): 9-11, 15.
- [15] Shin J, Shin S, Kim Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61 (3): 1179-1192.
- [16] Elnait K E I, Huang L, Tan L, et al. Resonant reactive current shield design in WPT systems for charging EVs [A]. 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) [C]. Kinabalu, Sabah, 2018. 56-59.
- [17] Park J, Shin Y, Kim D, et al. Planar resonance reactive shield for reducing the EMI in portable WPT device application [A]. 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI) [C]. Long Beach, USA, 2018. 419-422.
- [18] Cruciani S, Campi T, Maradei F, et al. Active shielding design for wireless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61 (6): 1953-1960.
- [19] Campi T, Cruciani S, Maradei F, et al. Active coil system for magnetic field reduction in an automotive wireless power transfer system [A]. 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI) [C]. New Orleans, USA, 2019. 189-192.

Research of active magnetic shielding for wireless power transfer system of electric vehicles

MENG Jin-xue^{1,2,3}, ZHANG Yu-wang^{1,2}, GUO Yan-jie^{1,2}, WANG Li-fang^{1,2,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to reduce the magnetic induction intensity around the vehicle body in the process of wireless power transfer of electric vehicles, a method of shielding by active coil is proposed. Firstly, the joint model of active magnetic shielding system and wireless power transfer system is established, and the theoretical method and design steps of active magnetic shielding system are deduced. Then, the effectiveness of the active magnetic shielding method is verified by the finite element simulation. Finally, an active magnetic shielding platform for 3.3kW wireless power transfer system is designed, and the active magnetic shielding of the wireless power transfer system of electric vehicle is successfully realized. By further optimizing the current amplitude and phase in the active magnetic shielding coil, the best active magnetic shielding effect is achieved, which proves the effectiveness of the active magnetic shielding theory and the design method.

Key words: wireless power transfer system; active magnetic shielding; finite element simulation; shielding coil current