DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.182 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

基于电动汽车无线充电系统DD线圈的磁场屏蔽优化

王新月，张立炎，陈启宏，周 泽
(武汉理工大学自动化学院，武汉 430070)

摘要：电动汽车无线充电技术能够克服传统有线充电方式便利性低、安全隐患大等不足，但其传输过程中的漏磁可能导致电磁干扰，甚至对人体健康构成威胁。为解决无线充电中的漏磁问题，研究了高功率DD线圈周围的磁场分布，提出了1种新颖的有源屏蔽设计，即将有源屏蔽线圈直接与初级线圈串联，以减少磁场泄漏，同时消除屏蔽线圈与无线充电系统接收线圈之间的额外耦合。此外，以目标表面的最大磁通密度、系统负载的输出功率和系统传输效率为目标函数，进行多目标优化，确定屏蔽线圈最优参数。最后，搭建了5 kW实验样机来验证分析结果并研究屏蔽线圈对系统参数的影响。结果表明，优化后的屏蔽设计在目标区域的磁场强度降低了33.5%，而无线充电系统的功率和效率没有显著降低。

关键词：电动汽车；无线充电系统；漏磁；有源屏蔽；多目标优化

Magnetic Field Shielding Optimization for DD Coil-based Electric Vehicle Wireless Charging System

WANG Xinyue, ZHANG Liyan, CHEN Qihong, ZHOU Ze
(School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The wireless charging technology for electric vehicles can overcome the shortcomings of traditional wired charging methods such as low convenience and high safety risk, but the magnetic flux leakage in its transmission process may lead to electromagnetic interference and even pose a threat to human health. To solve the magnetic flux leakage problem in wireless charging, the magnetic field distribution around a high-power DD coil is studied, and a novel active shielding design is proposed, i.e., the active shielding coil is directly connected in series with the primary coil to reduce the leakage magnetic field. At the same time, the additional coupling between the shielding coil and the receiving coil of the wireless charging system is eliminated. In addition, multi-objective optimization is performed to determine the optimal parameters of the shielding coil with the maximum magnetic flux density of the target surface, the output power of system load and the system transmission efficiency as the objective functions. Finally, a 5 kW experimental prototype was built to verify the analysis results and investigate the effect of the shielding coil on the system parameters. Results show that the optimized shielding design reduces the magnetic field intensity in the target region by 33.5%, while the power and efficiency of the wireless charging system are not significantly reduced.

Keywords: Electric vehicle; wireless charging system; magnetic flux leakage; active magnetic shielding; multi-objective optimization

汽车无线电力传输WPT(wireless power transfer)技术是近年来迅速发展的1种新型充电方式，其能为汽车提供更加便捷、快速和高效的能量补给方式，具有广阔的应用前景[1-2]。WPT系统通过耦合电磁场在2个线圈之间实现电能传递，对电动汽车进行充电[3]。然而，对于大功率WPT系统，如果耦合器和屏蔽设计不当，极易产生大量高强度磁场，从而降低系统传输效率，对人体

收稿日期：2024-06-13；**修回日期**：2024-08-16；**录用日期**：2024-09-02；**网络首发日期**：2024-09-25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62273265)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 62273265

安全构成威胁[4-5]。

DD 线圈产生的磁场与单极(如圆形、方形或矩形)线圈不同[6]，铁氧体含量越高，圆形线圈的漏磁场越大，而 DD 线圈的漏磁则相反。文献[7]分析了铝和铁氧体屏蔽对圆形线圈和 DD 线圈耦合场的影响。对于圆形线圈来说，铁氧体用量越多，耦合系数越高，而 DD 线圈的耦合系数变化很小，铝的优势很小。因此，铝屏蔽在漏磁方面更适合圆形线圈，而铁氧体、纳米晶等高导磁率磁性材料更适合 DD 线圈。文献[8]提出了 1 种通用的磁屏蔽设计，它可以扩展到高功率的基于 DD 线圈的 WPT 系统。文献[9]针对 DD 线圈提出了 1 种由纳米晶带材、铁氧体和铝箔构成的复合屏蔽层结构，相比传统屏蔽结构具有很大优势。然而，文献[8-9]中使用的铁氧体、纳米晶体等材料大幅增加了系统的重量和成本。

主动屏蔽作为被动屏蔽方法的重要补充，利用屏蔽线圈产生的反向磁场抵消目标区域的磁场泄漏。文献[10]提出了 1 种多线圈有源屏蔽配置，以减轻电动汽车 WPT 系统产生的磁场。文献[11]提出了 1 种与一次侧直接串联的双回路有源屏蔽线圈，通过内环和外环的反接来消除屏蔽线圈与二次侧的反向耦合，同时达到令人满意的靶面屏蔽效果。文献[12]提出将 LCC-LCC 补偿网络中的补偿电感的一部分和功率传输线圈集成在 1 个磁耦合器中，作为漏磁抵消线圈。文献[13]提出了 1 种有源磁屏蔽的方法，并通过进一步优化有源磁屏蔽线圈中的电流幅值和相位，实现了最佳的屏蔽效果。然而，文献[10-13]中提出的主动屏蔽设计均针对单极圆形和矩形线圈进行研究，而对 DD 线圈的磁场屏蔽研究有限。

为了最大限度地减少 DD 线圈的漏磁，需要对 DD 线圈的屏蔽结构进行优化设计。通常通过改变屏蔽层的结构尺寸和材料来优化磁耦合机构，由于线圈尺寸的约束和高导磁率磁性材料有限，优化效果空间较小；因此，可以探索有源屏蔽线圈进行相关优化。本文针对 DD 线圈设计了 2 个与初级线圈直接串联的屏蔽线圈，与初级线圈平行放置在地面上，通过内环和外环的反向连接来消除屏蔽线圈和次级线圈之间的反向耦合。同时，使用多目标优化算法对有源屏蔽线圈的匝数和尺寸进行优化，在减少 DD 线圈漏磁的同时保持令人满意的系统传输效率。

1　有限元分析

电动汽车充电的 WPT 线圈由 SAE J2954 标准化，实现互操作性[14]。在 SAE J2954 标准中，车辆周围和内部被划分为 3 个区域，如图 1 所示。区域 1 是车辆下方的整个区域，包括无线充电组件及其周围，不受限制；区域 2 位于车辆外部，其公共暴露限值为 27 μT；区域 3 在车辆内部，限值为 15 μT。

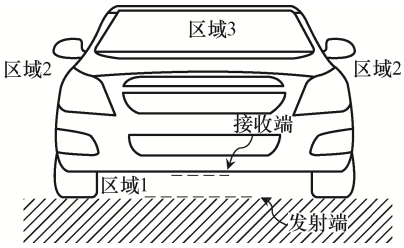


图 1　电动汽车内部和外部的 3 个区域

Fig. 1 Three areas inside and outside electric vehicle

在 Maxwell 中对 5 kW 的 WPT 系统进行建模，将基于利兹线的多圈线圈表示为 1 个块状线圈。按照 SAE J2954 的建议，测试平面的距离设置为距接收器中心 800 mm，位于区域 2。假设轴系原点在发射器的中心，沿 X 轴和 Y 轴在 800 mm 处选择 2 个观测点，分别表示为 P_S 和 P_F，如图 2 所示。通过 P_S 点的 ZX 平面和通过 P_F 点的 YZ 平面分别被称为侧面和正面。表 1 给出了 5 kW WPT 的系统参数。

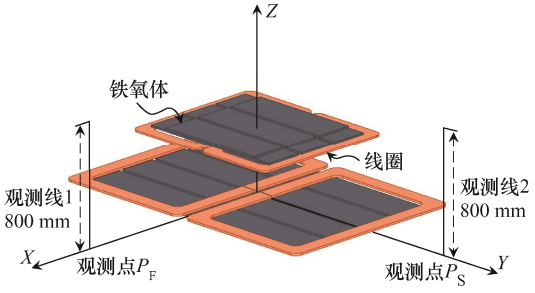


图 2　基于 DD 线圈的有限元模型

Fig. 2 Finite element model based on DD coils

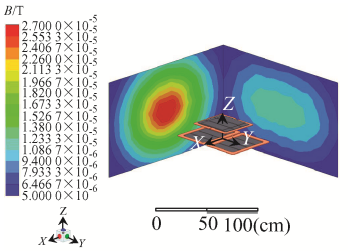
表 1 5 kW WPT 的系统参数

Tab. 1 Parameters of 5 kW WPT system

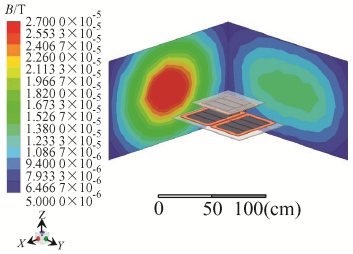
参数名称	参数值
额定功率/kW	5
线圈电流 I_{tx}，I_{rx}/A	25, 20
匝数 N_{tx}，N_{rx}	7, 7
电感 L_{tx}，L_{rx}/μH	170, 107
发射器尺寸/mm	800×540
接收器尺寸/mm	450×400
耦合系数 k	0.25
气隙 d/mm	150

每个 DD 线圈都有顺时针和逆时针的绕线方向，串联连接。因此，这些绕组沿相反方向承载相同的电流。来自这 2 个绕组的磁场 Z 分量在很大程度上相互抵消，导致 B_Z 较小。此外，2 个绕组之间的磁链会在空气中产生水平对齐的磁通。

不同屏蔽条件下基于DD线圈的磁场分布结果如图 3 所示。图 3(a)和(b)中的结果表明添加铝与没有任何铝的设计相比，铝板增加了漏磁。研究矢量分量发现，Z 分量在单极线圈的磁场中占主导地位，而 X 和 Y 分量在双极线圈的磁场中占主导地位。因此，铝屏蔽层对抑制单极线圈的漏磁非常有效，而不能有效抑制 DD 线圈的漏磁。



(a) 线圈和铁心



(b) 线圈、铁心和铝板

图 3 不同条件下基于 DD 线圈的磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution based on DD coils under different conditions

2 屏蔽层的优化设计

为了进一步优化屏蔽层，可考虑使用有源线圈屏蔽，因为与磁屏蔽相比，它们更轻便、更便宜。有源线圈屏蔽技术基于 1 个或多个线圈，其中注入合适的电流，产生与 WPT 线圈相反的磁场。

2.1 有源屏蔽线圈配置

在提出的配置中，有源线圈的几何形状按照一般指导原则预先设置[15-16]，其主要思想是使其磁通量与耦合区域中 WPT 线圈产生的磁通量同相，而在减轻磁场的区域中反相。研究证明使用围绕 WPT 线圈的半环形有源线圈可以获得非常好的屏蔽效果[15-16]，设计的有源屏蔽线圈如图 4 所示。

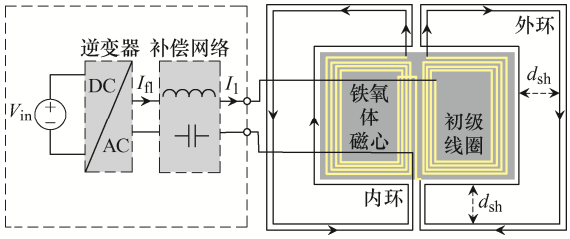


图 4 有源屏蔽线圈的配置

Fig. 4 Configuration of active shielding coils

有源屏蔽线圈配置采用半环形设计，环绕在 DD 线圈外围，为简单起见，有源屏蔽线圈仅安装在一次侧作为参考，如图 5 所示。采用这种结构时，有源屏蔽线圈外环产生的磁场与一次侧线圈产生的磁场相反，用于抵消目标区域的漏磁，而内环产生的磁场在 WPT 耦合区域内是同向的。这种配置在减轻一次侧线圈外部磁场的同时，增加了一次侧线圈内部的磁场，从而也导致了 WPT 性能的增强。

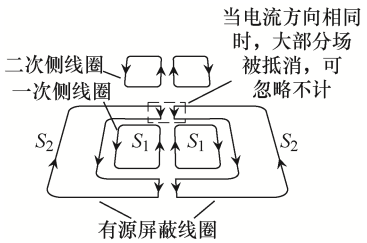


图 5 主动屏蔽系统的简化配置

Fig. 5 Simplified configuration of active shielding system

2.2 多目标优化

图 6 给出了典型的 LCC-S 无线充电系统的电路模型。其中，L_{f1} 为补偿电感；L_{11} 和 L_2 分别为WPT设备的发射器(或一次侧)和接收器(或二次侧)线圈；L_{12} 为屏蔽线圈电感；C_{f1}、C_1 和 C_2 分别为相应支路上的电容，以实现谐振；R_1、R_2 分别为一次侧和二次侧线圈的等效内阻；R_{f1} 为一次侧补偿电感的寄生电阻；R_{L} 为等效负载电阻。

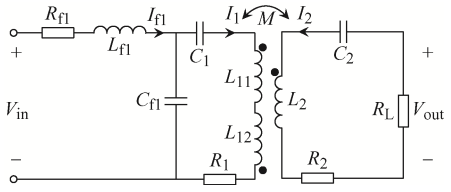


图 6　基于有源屏蔽线圈的 WPT 系统等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit for WPT system based on active shielding coils

当系统的一、二次侧均处于谐振状态下时，通过使用 KVL 并求解电路网格的电压方程，可得到谐振模式下的系统模型，忽略寄生参数可得

$$I_1 = \frac{V_{\mathrm{in}}}{\mathrm{j}\omega L_{\mathrm{f1}}} \tag{1}$$

$$V_{\mathrm{out}} = \frac{MV_{\mathrm{in}}}{L_{\mathrm{f1}}} \tag{2}$$

式中：M 为发射线圈与接收线圈之间的等效互感；I_1 为一次侧线圈电流；V_{in} 为 LCC-S 拓扑的输入电压；V_{out} 为输出电压；ω 为角频率。由式(1)和式(2)可知，在谐振工作模式下，LCC-S 型 WPT 系统一次侧发射线圈恒流，二次侧输出恒压。由于内阻存在，当输出电压 V_{out} 随互感 M 变化时，系统的传输效率会因此受到影响。将一次侧补偿电感的寄生电阻 R_{f1} 忽略不计，可得到输出功率 P_{out} 和传输效率 η 的表达式为

$$P_{\mathrm{out}} = \left[\frac{MV_{\mathrm{in}}}{L_{\mathrm{f1}}(R_{\mathrm{L}}+R_2)}\right]^2 R_{\mathrm{L}} \tag{3}$$

$$\eta = \frac{\omega^2 M^2}{\omega^2 M^2 + R_1(R_2+R_{\mathrm{L}})}\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_2+R_{\mathrm{L}}} \tag{4}$$

由式(3)和式(4)可知，输出功率 P_{out} 和传输效率 η 主要与角频率 ω、耦合线圈的互感 M 和等效负载电阻 R_{L} 有关。当等效负载电阻 R_{L} 确定后，输出功率和传输效率都随着互感的增大而增大。

将线圈内环与外环之间的距离 d_{sh}、内环匝数 N_1 和外环匝数 N_2 设置为变量，在 ANSYS Maxwell 中进行仿真。由于求解时间较长，故将有源屏蔽线圈的几何尺寸 d_{sh} 在 5~25 cm 的范围内优化，步长为 5 cm。此外，有源线圈匝数过多会导致交流损耗增大，因此内环和外环的匝数均优化为 1~3。优化目标为系统负载的输出功率 P_{out}、目标表面的最大磁通密度 B 和系统传输效率 η，如图 7 所示。

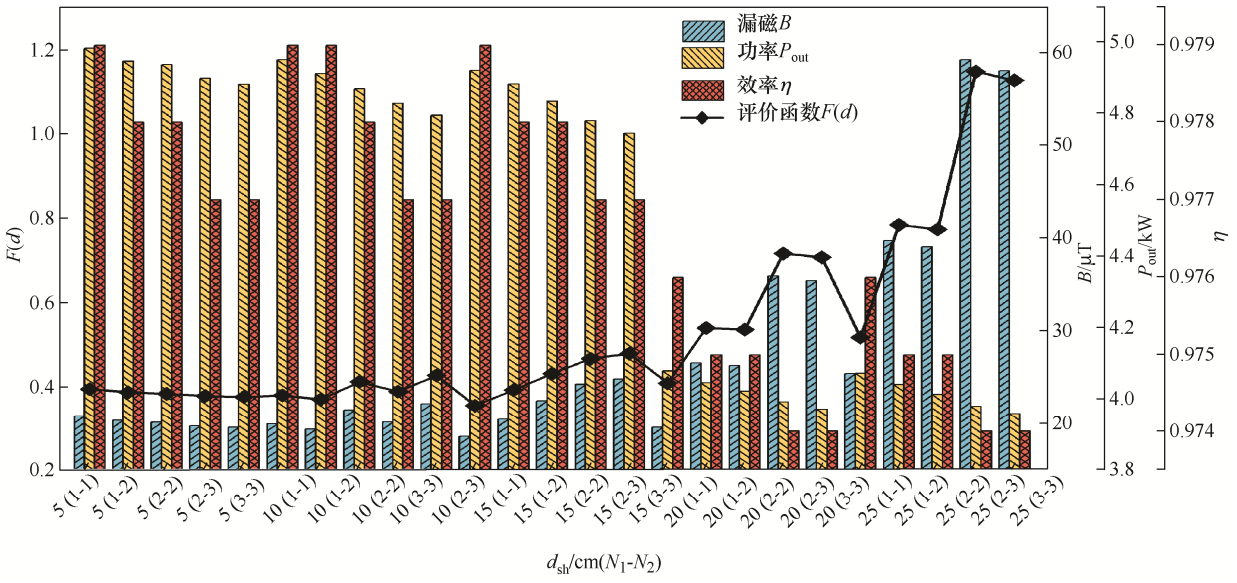


图 7　多目标函数的优化解

Fig. 7 Optimized solution of multi-objective function

为简化分析过程，将操作区域确定为 P_S 和 P_F 面，在优化过程中应满足一些限制条件。例如，需要保证目标表面的最大磁通密度不超过国际非电离辐射防护委员会 ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)2010 年规定的磁场暴露限值。此外，由于互感 M 减小而导致的输出功率和传输效率下降在可接受范围内，因此系统输出功率 P_{out} 不大于 5 kW，系统传输效率在 0 到 1 之间。

综上，可以将磁耦合机构的多目标优化模型简化为

$$\begin{cases}\min f_1 = B(d_{sh}, N)\\ \min f_2 = P_{out}(M) = P_{out}(d_{sh}, N)\\ \min f_3 = \eta(M) = \eta(d_{sh}, N)\end{cases} \tag{5}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}B < 27\ \mu\text{T}\\ P_{out} \leqslant 5\ \text{kW}\\ 0 < \eta \leqslant 1\end{cases} \tag{6}$$

为了进一步确定最优解，采用线性加权和法将多目标优化问题转化为评价函数的数值优化问题。评价函数 $F(d)$被构造并定义为归一化目标函数 f_i 乘以它们各自的权重系数 w_i，具体为

$$F(d) = \sum_{i=1}^{3} w_i \frac{|f_i - f_i^*|}{f_{cons} - f_i^*} \tag{7}$$

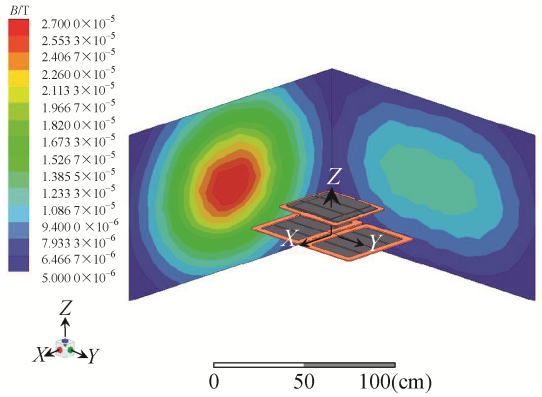
式中：f_i^* 为理想值；f_{cons} 为约束目标函数的上限值。将权重系数确定为 w_1=0.5, w_2=0.2, w_3=0.3。

图 7 给出了 3 个目标函数以及评价函数 $F(d)$ 在不同位置、内环匝数和外环匝数下的值。从图 7 可以看出，评价函数 $F(d)$在 N_1=1、N_2=1 和 d_{sh}=15 cm 时获得最小值。因此，采用这组参数进行后续的仿真和实验。

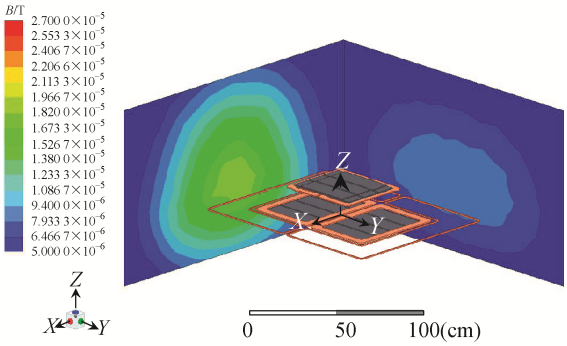
2.3 仿真结果分析

通过 ANSYS 有限元分析，比较了 6 种情况下目标表面的磁场分布。将铁氧体磁心屏蔽、有源屏蔽及 X 轴方向偏移 20 cm 和 Y 轴方向偏移 20 cm 时的对应情况进行比较，结果如图 8 所示。一次侧的有源屏蔽是在铁氧体磁心的基础上提供的，二次侧的屏蔽类型相同。

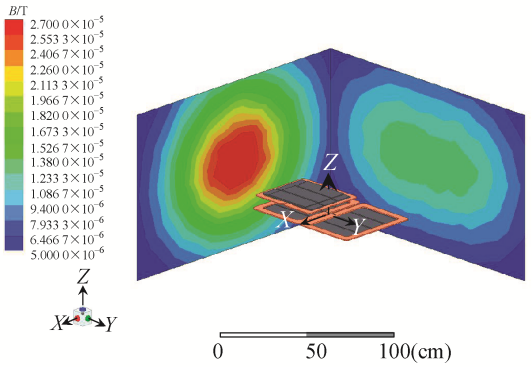
单独使用铁氧体屏蔽无法将目标表面的最大



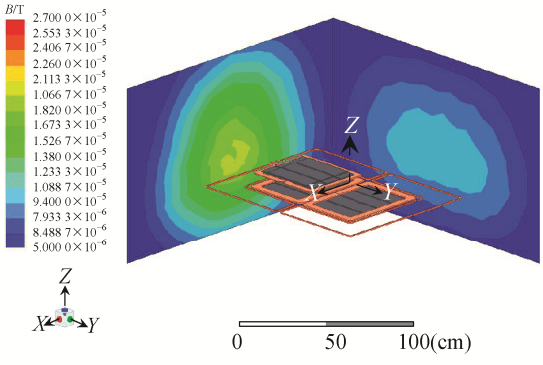
(a) 采用铁氧体屏蔽



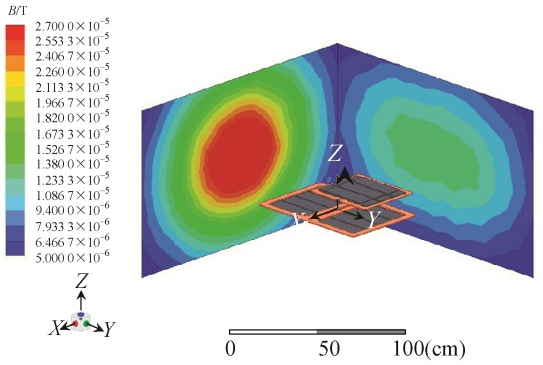
(b) 采用有源屏蔽



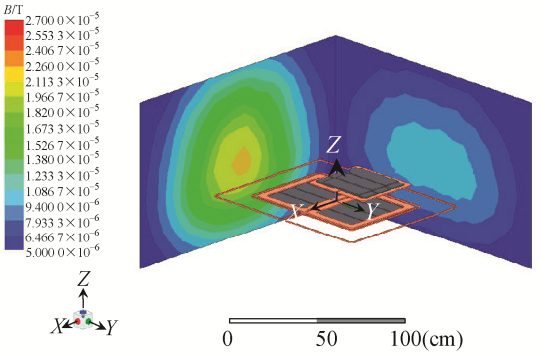
(c) 采用铁氧体屏蔽(X=20 cm)



(d) 采用有源屏蔽(X=20 cm)



(e) 采用铁氧体屏蔽(Y=20cm)



(f) 采用有源屏蔽(Y=20cm)

图 8　目标表面磁场分布对比

Fig. 8 Comparison of magnetic field distribution on target surface

磁通密度降低至 ICNIRP2010 规定的限值。采用有源屏蔽可显著提高目标表面的屏蔽效果。当二次侧线圈在 X 轴或 Y 轴方向偏移 20 cm 时，有源屏蔽仍能保证目标表面的最大磁通密度在暴露限度内，并低于铁氧体屏蔽。

3　实验验证

3.1　实验平台

为了验证方案的可行性，搭建了 5 kW 实验样机来验证屏蔽线圈对系统参数的影响，实验样机如图 9 所示。

当线圈的自感和谐振频率确定后，计算补偿电容为

$$\begin{cases} C_{\mathrm{f1}} = \dfrac{1}{(2\pi f)^2 L_{\mathrm{f1}}} \\ C_1 = \dfrac{1}{(2\pi f)^2 (L_1 - L_{\mathrm{f1}})} \\ C_2 = \dfrac{1}{(2\pi f)^2 L_2} \end{cases} \tag{8}$$

式中：谐振频率 f 为 85 kHz；输入电压为 200 V；补偿电感 L_{f1} 为 27 μH；等效负载电阻 R_{L} 为 12 Ω。实验平台主要元器件型号见表 2。

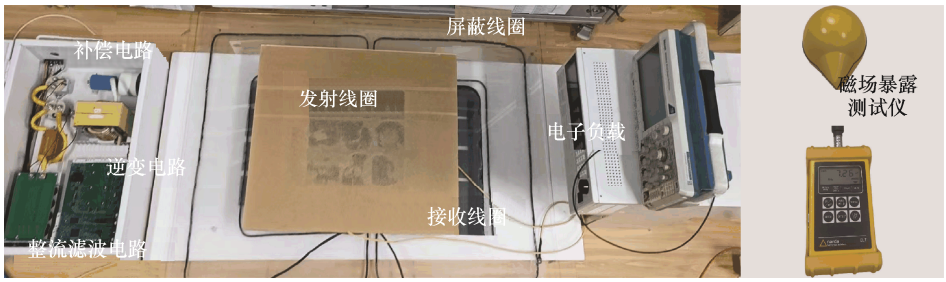


图 9　无线电力传输实验样机

Fig. 9 WPT experimental prototype

3.2　系统传输功率与效率

除了目标区域的屏蔽效能外，还需要研究屏蔽类型对系统输出参数的影响。2 种屏蔽类型的参数比较见表 3。

通过分析图 9 中所示的电路，在屏蔽系统对无线充电系统的效率影响方面进行评估，定义为

$$\eta = \frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}} \tag{9}$$

式中：P_{out} 为输出有功功率；P_{in} 为输入有功功率。有源屏蔽的输出功率 P_{out} 为 4.7 kW，比仅使用铁氧体磁心时的 4.9 kW 降低了 0.2 kW。采用有源屏蔽的传输效率 η 为 97.24%，比仅使用铁氧体磁心时的 97.73%降低了 0.49%。2 种屏蔽类型的输入电压 V_{in}、输出电压 V_{out}、输入电流 I_{f1}、输出电流 I_2 的波形比较如图 10 所示。

表 2 实验平台主要元器件型号

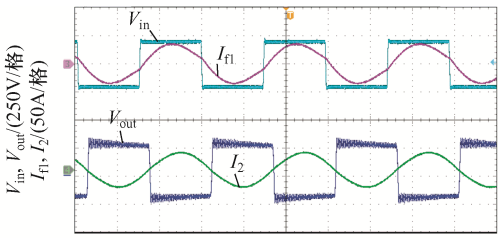
Tab. 2 Main component types of experimental platform

电路单元	型号	备注
逆变电路	NTH4L020N120SC1	单桥臂并联 2 个 SIC MOSFET
整流电路	MSCDC100A120D1PAG	二极管阵列
谐振补偿电容	DAWN 公司谐振电容	135 nF、26 nF 和 32.5 nF
DSP 控制板	TMS320F28335	
发射线圈	利兹线 2USPI/0.1*1 500	
接收线圈	利兹线 2USPI/0.1*1 000	
磁心	JF95	

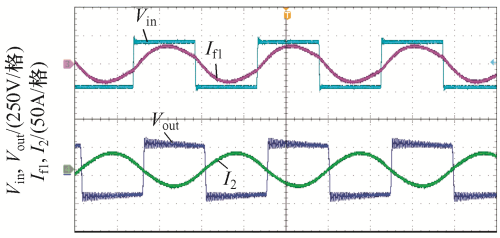
表 3 屏蔽类型参数比较

Tab. 3 Comparison of parameters between two types of shielding

屏蔽类型	L_1/μH	M/μH	耦合系数 k	线圈电阻 R_1/mΩ
铁氧体屏蔽层	182.1	36.9	0.250	233.38
有源屏蔽层	193.3	36.5	0.243	246.79



(a) 仅采用铁氧体屏蔽



(b) 采用有源屏蔽

图 10 2 种屏蔽类型的输入电压 V_{in}、输出电压 V_{out}、输入电流 I_{f1}、输出电流 I_2 的波形对比

Fig. 10 Comparison of waveforms of input voltage V_{in}, output voltage V_{out}, input current I_{f1} and output current I_2 between two types of shielding

有源屏蔽传输功率与效率的下降主要是屏蔽线圈产生的交流损耗造成的，但其仍然具有较高的功率和系统传输效率，符合设计要求。因此，这种较低程度的下降是可以接受的。

为了进一步分析屏蔽线圈的功率损耗，有必要明确 M 对传输效率的影响。调整有源屏蔽的垂直位置，得到与铁氧体屏蔽相同的互感 M。由于输入电压的微小变化对电流的影响可以忽略不计，2 种屏蔽类型对应的支路电流几乎相等，这意味着只有发射线圈的等效内阻发生变化。因此，现在测得的效率差可以近似看作屏蔽线圈产生的交流损耗。与铁氧体屏蔽相比，有源屏蔽的传输效率和功率损耗见表 4，其中 η_1 为垂直位置相同时的传输效率，η_2 为 M 相同时的传输效率，$\Delta\eta_1$ 为由于 M 减小而导致的效率降低，$\Delta\eta_2$ 为屏蔽线圈交流损耗的比例。

表 4 与铁氧体屏蔽相比的有源屏蔽的传输效率和功率损耗

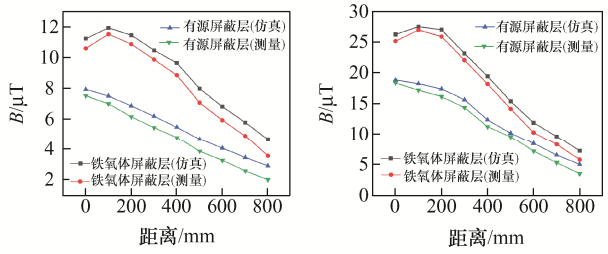
Tab. 4 Comparison of transmission efficiency and power loss with ferrite shielding

屏蔽类型	η_1/%	η_2/%	$\Delta\eta_1$	$\Delta\eta_2$
铁氧体屏蔽层	97.73	97.73	N/A	N/A
有源屏蔽层	97.24	97.37	0.13%	0.36%

3.3 屏蔽效果比较

SAE J2954 对电磁场泄漏的安全范围做出了明确规定，考虑到一般情况下人使用车辆时所处的位置，区域 1 是人类无法进入的，其他区域均应符合安全规定。采用高精度 Narda ELT-400 磁场暴露测试仪测量目标区域的磁场。根据人可能所处的位置，分别在观测点 P_S 和 P_F 处设置 2 条与 Z 轴平行的漏磁观测线，如图 2 所示。磁通密度 B 的仿真结果与测量结果比较如图 11 所示。

图 11 展示了 P_S 和 P_F 处观测线 1、2 处漏磁场的分布情况，漏磁越小说明屏蔽效果越好。仅采用铁氧体屏蔽时，目标表面测得的最大磁通密度超过了 ICNIPR2010 规定的限值。采用有源屏蔽后，该值为 18.3 μT，比铁氧体屏蔽降低了 33.5%。实验结果验证了所提设计在目标区域磁场屏蔽方面的



(a) 观测线1的漏磁分布　　(b) 观测线2的漏磁分布

图 11　观测线上的漏磁分布

Fig. 11 Magnetic flux leakage distribution on measurement lines

有效性，因此可将其应用于更高功率的电动汽车 WPT 系统。

4　结论

随着电动汽车无线充电系统向高功率密度、低成本等方向发展，屏蔽层设计变得尤为重要。本文研究了 DD 线圈大功率 WPT 系统的磁场特性，提出了 1 种新颖的有源屏蔽设计。与单极圆形和矩形线圈相反，DD 线圈的被动涡流屏蔽增加了漏磁，因此传统的铝屏蔽无法应用于 DD 线圈。采用主动屏蔽能够显著降低 WPT 组件附近关键区域的磁场，本文提出了利用多目标优化算法提高系统输出功率和系统效率的参数设计策略。最后，将有源屏蔽线圈对系统电气性能的影响进行了评估。结果表明，在磁场被屏蔽的目标区域磁场显著减少，而 WPT 系统的耦合性能和效率没有显著降低。

综上所述，所提出的屏蔽结构的优化设计更加符合今后电动汽车 WPT 技术的发展需求，可以扩展并应用于抑制来自极高功率 DD 和基于双极线圈无线充电系统的漏磁。

参考文献：

[1] Machura P, Li Quan. A critical review on wireless charging for electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 104: 209-234.

[2] 陈志鑫, 张献, 沙琳, 等. 基于频率调节的电动汽车无线充电互操作性提升方法研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1237-1247.
Chen Zhixin, Zhang Xian, Sha Lin, et al. Research on improving interoperability of electric vehicle wireless power transfer based on frequency adjustment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1237-1247. (in Chinese)

[3] 夏晨阳, 任刚, 韩毅, 等. 基于正交 DD 线圈副边去耦合干扰的双负载无线电能传输系统[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 161-167.
Xia Chenyang, Ren Gang, Han Yi, et al. Double-load wireless power transfer system with secondary-side interference decoupling based on orthogonal DD coil [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 161-167. (in Chinese)

[4] 李卓玥, 王春芳, 魏芝浩, 等. 电动汽车无线充电磁耦合器屏蔽层的优化设计[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 144-151.
Li Zhuoyue, Wang Chunfang, Wei Zhihao, et al. Optimization and design of shielding layer in magnetic coupler for wireless charging of electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 144-151. (in Chinese)

[5] 徐先峰, 吴慧玲, 杨雄政, 等. 空间约束下电动汽车无线充电系统磁耦合结构优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3581-3588.
Xu Xianfeng, Wu Huiling, Yang Xiongzheng, et al. Optimization of magnetically coupled structure of wireless charging system for electric vehicles under space constraint [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3581-3588. (in Chinese)

[6] De Santis V, Campi T, Cruciani S, et al. Assessment of the induced electric fields in a carbon-fiber electrical vehicle equipped with a wireless power transfer system [J]. Energies, 2018, 11(3): 684.

[7] Damhuis C, Kraus D, Herzog H G. Study on coil sizing and shielding materials high-power wireless power transfer systems for electric vehicle charging [C]// 2022 Wireless Power Week (WPW). Bordeaux, France, 2022: 454-459.

[8] Mohammad M, Onar O C, Galigekere V P, et al. Magnetic shield design for the double-D coil-based wireless charging system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15740-15752.

[9] 卢哲, 王春芳, 杨凌云, 等. 由复合屏蔽层构成的电动汽车无线充电磁耦合器[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 75-83.
Lu Zhe, Wang Chunfang, Yang Lingyun, et al. Magnetic

coupler with composite shielding layer for wireless charging of electric vehicle [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 75-83. (in Chinese)

[10] Campi T, Cruciani S, Maradei F, et al. Magnetic field mitigation by multicoil active shielding in electric vehicles equipped with wireless power charging system [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(4): 1398-1405.

[11] Mi Mingfa, Yang Qingxin, Li Yongjian, et al. Multi-objective active shielding coil design for wireless electric vehicle charging system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 8700505.

[12] Pan Shuaishuai, Xu Yefei, Lu Yuanfang, et al. Design of compact magnetic coupler with low leakage EMF for AGV wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 1044-1052.

[13] 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 Jinxue, Zhang Yuwang, Guo Yanjie, 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. (in Chinese)

[14] SAE International Recommended Practice. Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology: J2954_202408 [S]. SAE International, 2022.

[15] 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.

[16] 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.



王新月

作者简介：

王新月(2000—)，女，硕士研究生。研究方向：电动汽车无线充电。E-mail：wxy_whut@whut.edu.cn。

张立炎(1971—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：无线电能传输，车用新能源动力装置与控制。E-mail：zlywhut@whut.edu.cn。

陈启宏(1976—)，男，博士，教授。研究方向：新能源电力变换与控制和车用新能源动力装置与控制。E-mail：qh_chen@hotmail.com。

周泽(1994—)，男，博士，讲师。研究方向：电力-交通系统，新能源电力变换与控制。E-mail：zhouze@whut.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)