DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.208 **中图分类号**：TM12 **文献标志码**：A

基于磁耦合谐振式无人机无线供电桩的干扰屏蔽特性

赵 航[1]，贾 静[1]，陈小飞[1]，安 媚[1]，杨 磊[2]，陈学娜[2]
(1.国网陕西省电力有限公司咸阳供电公司，西安 712000；2.西安理工大学电气工程学院，西安 710054)

摘要：无人机的航行安全依赖于其电子设备和传感器等飞行控制系统的正常运行。电磁干扰可能使飞行控制系统出现误差，影响飞行路径和飞行的稳定性。采用金属材料可以有效进行电磁屏蔽，但引入金属会改变系统的磁场特性，导致补偿网络失谐，使得供电系统输出功率偏差大、效率低。为研究铝-铁氧体电磁屏蔽效果和该屏蔽结构对磁耦合谐振式无线供电系统电气参数的影响，首先研究铝板对空间磁场的影响，分析对线圈自感、互感及非工作区域内的磁感应强度的变化规律。然后，加入铁氧体改善电气参数，使得线圈自感互感接近初始数值。最后，仿真验证了非工作区域内的电磁辐射满足安全标准，再搭建实验平台，分析输出参数特性，验证了该屏蔽结构的有效性。

关键词：磁耦合谐振式无线电能传输；无人机；电磁屏蔽；金属干扰

Interference Shielding Characteristics of UAV Wireless Power Supply Pile Based on Magnetic Coupling Resonance

ZHAO Hang[1], JIA Jing[1], CHEN Xiaofei[1], AN Mei[1], YANG Lei[2], CHEN Xuena[2]
(1. Xianyang Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 712000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The navigation safety of UAV depends on the normal operation of its electronic equipment and sensors. Electromagnetic interference may lead to errors or failures of flight control systems, affecting the flight path and stability. The use of metal materials can effectively shield the electromagnetic field, but the introduction of metal will change the magnetic field characteristics of the system, resulting in the detuning of the compensation network and leading to the power supply system output power deviation and low efficiency. To study the electromagnetic shielding effect of aluminum-ferrite and the influence of the shielding structure on the electrical parameters of a magnetically coupled resonant wireless power supply system, the influence of the aluminum plate on the spatial magnetic field is studied at first, and the variations of the coil self-inductance, mutual inductance and the magnetic induction intensity in the non-working area are analyzed. Then, ferrite is added to improve the electrical parameters, so that the self-inductance and mutual inductance of the coil are close to the initial values. Finally, simulation results verified that the electromagnetic radiation in the non-working area met the safety standards. In addition, an experimental platform was built to analyze the characteristics of output parameters and verify the effectiveness of the shielding structure.

Keywords: Magnetically coupled resonant wireless power transmission; UAV; electromagnetic shielding; metal interfereence

收稿日期：2024-07-06；**修回日期**：2024-08-07；**录用日期**：2024-08-13；**网络首发日期**：2024-08-20
基金项目：国网陕西省电力有限公司科技资助项目(5226XY240001)
This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. under the grant 5226 XY240001

无人机因具有操作简单和价格低廉等优势，在遥感监测、抢险救灾、安全巡检等领域发挥着重要

作用。目前无人机的性能虽然在不断提高，但续航问题一直未能得到有效改善，这极大限制了无人机的飞行作业性能。目前，提高无人机续航性能的方法主要有 3 种：一是减少飞行时的损耗，这种方法通常通过减少无人机的自身质量来实现，但并未彻底解决无人机续航性能的问题；二是选取大容量的电池，但由于受到电池技术以及携带体积质量的限制，该方法的效果并不理想；三是建立飞行补给站，通过充电桩实现无人机工作过程中的自主能源补充，从根本上解决其续航能力不足的问题[1-3]。但目前自主充电桩主要采用接触式电能传输方式，该方法虽然具有充电效率高、使用成本低的优势，但是野外环境下应用接触式充电不可避免地存在充电时短路的安全隐患。因此，需要使用 1 种新的、安全可靠且自动化程度高的无人机电能传输方案。

无线电能传输是新型电能传输方式研究的重要方向[4-5]，当前主要的无线电能传输技术有磁耦合谐振式[6-8]、电场感应式[9-11]、微波辐射式[12-14]、激光式[15-17]等，其中采用磁耦合谐振式的无线充电系统的磁场强度和线圈耦合程度较高。本文的无人机采用该方法具有传输功率适中、传输效率高、安全性好等优势。

然而无线充电技术利用电磁场来传输能量，可能会产生频谱上的干扰。无人机周围可能存在其他敏感的电子设备和无线通信系统[18]，如果无人机的电磁辐射未受控制，有可能会导致通信中断或设备损坏，有效的电磁屏蔽措施可以确保无人机在飞行过程中不受外部电磁影响的干扰。屏蔽材料有铝、铜、复合材料和铁氧体等，铝板具有密度低、耐腐蚀、成本相对较低等特点，因其具有良好的电导率，在高频电磁场中表现出较好的屏蔽效果，但在低频磁场中表现不如铁磁材料。铜因具有更高的电导率，所以在广泛的频率范围内都能有效屏蔽电磁干扰。但相比铝，铜的密度更高，屏蔽结构质量更大，成本也更高。复合材料能够针对特定频率或应用场景定制屏蔽解决方案，但高级复合材料的制备需要复杂的工艺，使生产成本增加，对环境条件(如湿度、温度)也更敏感。铁氧体在低频范围内(0~100 kHz)具有卓越的屏蔽效果，能够有效吸收和分散磁场，减少电磁干扰，但铁氧体材料通常较脆。考虑到低频和高频电磁场中的屏蔽效果和成本问题，屏蔽材料选择铝和铁氧体。本文基于铝-铁氧体复合结构的无人机电磁屏蔽方法[19]，分析铝板和铁氧体对无线供电系统电磁特性的影响机理，通过在发射线圈和接收线圈两侧都加入屏蔽装置，不仅可以改善系统参数，提高系统传输效率及输出功率，还可以屏蔽系统对周围电子设备的干扰。

1　磁耦合谐振式无线充电的屏蔽原理

1.1　补偿谐振网络理论分析

磁耦合谐振式无线电能传输系统的电路模型如图 1 所示，其等效为 S-S 型补偿网络，如图 2 所示。

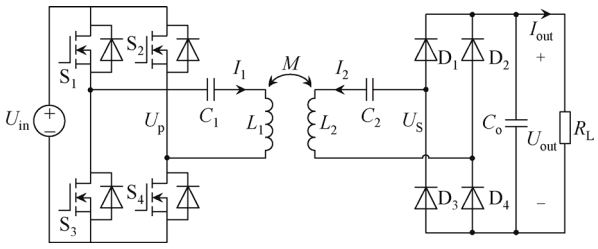


图 1　磁耦合谐振式无线电能传输系统的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of magnetically coupled resonant wireless power transmission system

图中，R_1 为发射线圈的等效电阻；R_2 为接收线圈的等效电阻；C_1 和 C_2 分别为发射线圈补偿电容和接收线圈补偿电容；L_1 和 L_2 分别为发射线圈等效电感和接收线圈等效自感；R_L 为可变负载。该结构的优势在于：其谐振状态不受互感变化的影响；结构简单稳定、等效损耗小；具有恒流输出特性，适合大功率负载。

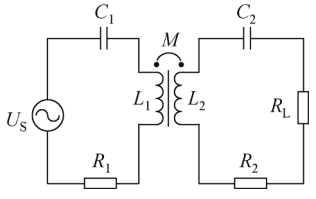


图 2　S-S 型补偿网络

Fig. 2 S-S compensation network

根据基尔霍夫电压定律列写方程为

$$\begin{bmatrix} U_S \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & \mathrm{j}\omega M \\ \mathrm{j}\omega M & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：U_S为电源；I_1为发射端电流；I_2为接收端电流；M为发射线圈与接收线圈之间的互感；ω为系统角频率；Z_1为发射端阻抗，$Z_1 = R_1 + \mathrm{j}\omega L_1 - \mathrm{j}\dfrac{1}{\omega C_1}$；$Z_2$为接收端阻抗，$Z_2 = R_1 + R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 - \mathrm{j}\dfrac{1}{\omega C_2}$。

当系统满足谐振条件$\omega = \dfrac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \dfrac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$时，系统的输出功率和输出效率为

$$P_{\mathrm{out}} = I_2^{\,2} R_{\mathrm{L}} = \frac{(\omega M)^2 U_S^{\,2} R_{\mathrm{L}}}{[(\omega M)^2 + R_1(R_2 + R_{\mathrm{L}})]^2} \tag{2}$$

$$\eta = \frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}} = \frac{I_2^{\,2} R_{\mathrm{L}}}{I_1 U_S} = \frac{(\omega M)^2 R_{\mathrm{L}}}{(R_2 + R_{\mathrm{L}})[(\omega M)^2 + R_1(R_2 + R_{\mathrm{L}})]} \tag{3}$$

从式(2)和式(3)可知，线圈自感的变化会影响系统的谐振状态，自感变化使得系统失谐进而影响系统的输出效率。而线圈互感变化对系统输出功率和输出效率会产生不同方向的影响，互感与输出功率负相关，与输出效率正相关。

1.2 屏蔽理论分析

基于磁通更易流过磁导率高的支路的原理，本文采用被动屏蔽方案。无线供电桩在工作过程中会产生高频的交变磁场，泄漏于非工作区域的漏磁会在铝板上产生感应电动势，形成涡流磁场，该涡流磁场的方向与原磁场的方向相反，会抵消一部分原磁场，铝板中的涡流最终将能量以热损耗的形式消耗掉，如图 3(a)所示。相较于空气而言，铁磁性材料具有较高的磁导率，因此无线供电桩泄露出的大部分漏磁会被收束在工作区域，减小空气中的漏磁，从而达到屏蔽和改善电气参数的效果[20]，如图 3(b)所示。

采用铝板屏蔽后，铝板产生的涡流等效为无数个小电感，以接收端加入铝板屏蔽为例，其等效电路如图 4 所示。

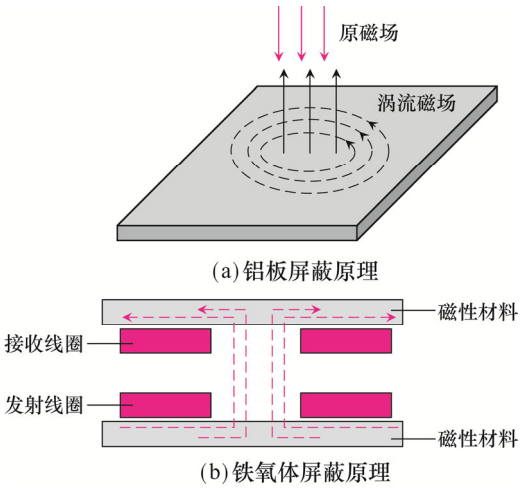


图 3 不同材料的屏蔽原理

Fig. 3 Shielding principle for different materials

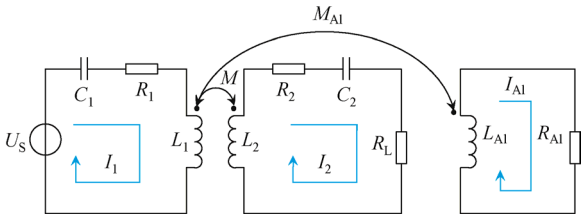


图 4 加入铝板屏蔽后的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit after adding aluminum plate shielding

对电路拓扑列写基尔霍夫电压定律方程为

$$\begin{bmatrix} U_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & M & 0 \\ M & Z_2 & M_{\mathrm{Al}} \\ 0 & M_{\mathrm{Al}} & Z_{\mathrm{Al}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_{\mathrm{Al}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：I_{Al}为铝板中的感应电流；L_{Al}为铝板的等效电感；M_{Al}为铝板等效电感与接收端之间的互感；$Z_1 = R_1 + \mathrm{j}\omega L_1 + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_1}$；$Z_2 = R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_2} + R_{\mathrm{L}}$，$Z_{\mathrm{Al}} = R_{\mathrm{Al}} + \mathrm{j}\omega L_{\mathrm{Al}}$。

当系统处于谐振状态时，令$Z = \dfrac{(\omega M_{\mathrm{Al}})^2}{R_{\mathrm{Al}} + \mathrm{j}\omega L_{\mathrm{Al}}}$，可得输出功率及输出效率分别为

$$P_{\mathrm{out}} = I_2^2 R_{\mathrm{L}} = \frac{(\omega M)^2 U_S^2 R_{\mathrm{L}}}{[(\omega M)^2 + R_1(R_2 + R_{\mathrm{L}} + Z)]^2} \tag{5}$$

$$\eta = \frac{P_{\mathrm{out}}}{P_{\mathrm{in}}} = \frac{I_S^2 R_{\mathrm{L}}}{I_1 U_S} = \frac{(\omega M)^2 R_{\mathrm{L}}}{(R_2 + R_{\mathrm{L}} + Z)[(\omega M)^2 + R_1(R_2 + R_{\mathrm{L}} + Z)]} \tag{6}$$

由式(5)和式(6)可知，当系统周围存在金属材料时，线圈自感和互感会发生变化，系统工作频率也会发生变化。工作频率的偏移会使得谐振频率改变，最终影响系统的输出特性，在一定程度上使输出功率和输出效率减少。

2　无线供电桩磁场分布研究

无线供电系统耦合线圈仿真等效模型如图 5 所示，线圈内径为 40 mm，外径为 146 mm，匝数为 27 匝，导线直径为 3 mm，频率为 150 kHz；根据补偿网络设计，该系统补偿电容为 12.98 nF，传输间距为 40 mm。此时线圈自感为 86.581 μH，互感为 40.326 μH。

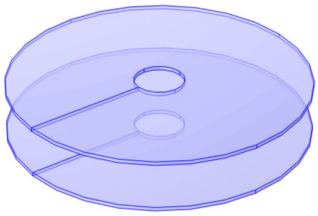


图 5　耦合线圈仿真等效模型

Fig. 5 Simulated equivalent model of coupling coil

2.1　磁耦合谐振式无线供电系统磁场分布

泄露在环境中的电磁场会对无人机周围的无线通信系统造成不良影响，因此国际上规定了不同频率下的电磁场暴露标准限值。其中，150 kHz 频率下磁感应强度 B 要低于 0.12 μT。初始线圈切面的磁场分布如图 6 所示。

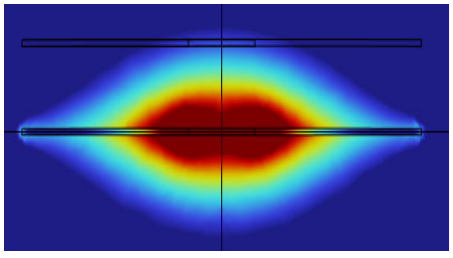
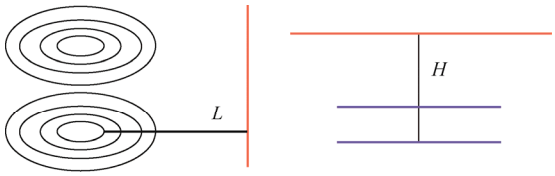


图 6　初始线圈切面的磁场分布

Fig. 6 Magnetic field distribution of coil

由图 6 可知，无线供电系统正常工作时，磁场呈轴对称分布，线圈间距之间磁场分布最强，然后向四周逐步衰减，靠近线圈的位置磁场有明显的上升趋势。

为了对比线圈轴线方向磁感应强度的分布特性，通过仿真对不同位置的磁感应强度进行测量。线圈截线位置示意如图 7 所示，垂直方向与中轴线的距离为 L，水平方向与中轴线的距离为 H。

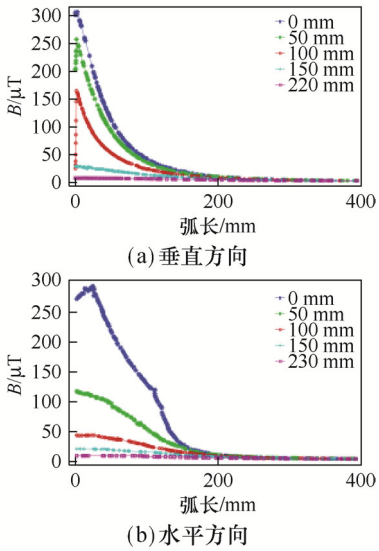


(a) 垂直方向距离　　(b) 水平方向距离

图 7　截线位置示意

Fig. 7 Schematic of cross-sectional position

仿真测算不同位置的磁感应强度及其变化如图 8 所示。垂直方向磁感应强度最大时达到 310 μT，远离线圈磁感应强度也会随之减小，当垂直距离为 220 mm 时，非工作区域内的磁感应强度符合规定标准。水平方向磁感应强度最大时达到 300 μT，远离线圈时磁感应强度明显下降，当水平距离为 230 mm 时，非工作区域内的磁感应强度符合规定标准。



(a) 垂直方向

(b) 水平方向

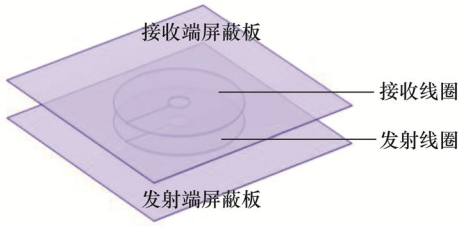
图 8　不同位置的磁感应强度分布

Fig. 8 Magnetic induction intensity distribution at different positions

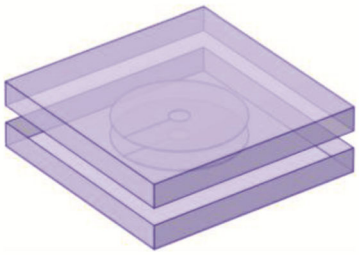
2.2　铝板的屏蔽效果

为了研究屏蔽结构对无线充电系统正常运行产生的影响及屏蔽效果，本节计算分析了不同结构

的铝板对无线充电系统周围空间磁场分布特性及系统参数的影响，通过观测线圈自感和互感的变化，分析系统的运行情况。在线圈两端加入铝板，上下铝板距离线圈均为 50 mm，铝板厚度为 1 mm，对屏蔽结构进行优化，优化前后的屏蔽结构如图 9 所示。



(a) 优化前

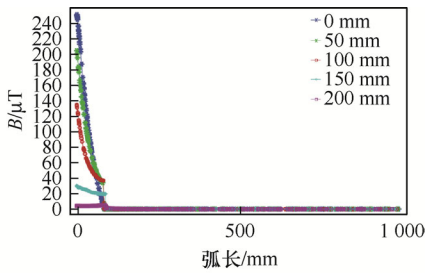


(b) 优化后

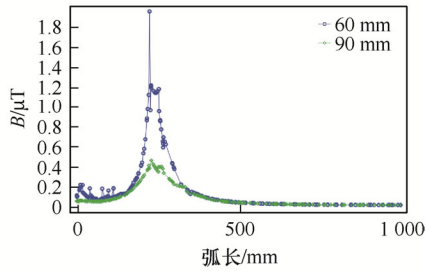
图 9 优化前后的屏蔽结构

Fig. 9 Shielding structure before and after optimization

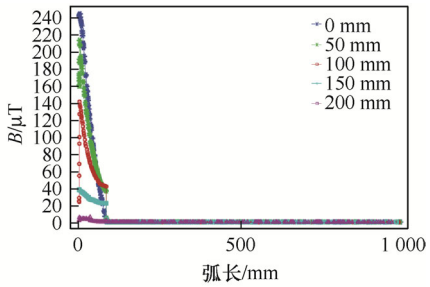
优化前后的磁感应强度分布如图 10 所示。对比图 8 可知，加入铝板屏蔽可以有效减少垂直方向的磁感应强度，非工作区域内的磁场感应强度的最大值从 310 μT 减小到 250 μT。此外，在铝板处磁



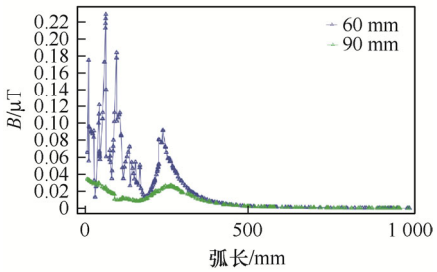
(a) 优化前垂直方向



(b) 优化前水平方向



(c) 优化后垂直方向



(d) 优化后水平方向

图 10 优化屏蔽结构前后不同位置的磁感应强度分布

Fig. 10 Distribution of magnetic induction intensity at different positions before and after optimizing the shielding structure

感应强度会急剧下降，磁场被大量集中在工作区域内。对比优化前后水平方向的磁感应强度曲线可知，增加侧面铝板可以减少非工作区域内的漏磁，如图 10(b)和(d)所示，说明优化后的屏蔽结构具有较大优势。

从上述分析可知，铝板结构具有较好的屏蔽能力，屏蔽后在 H=90 mm 处磁感应强度低于 0.12 μT，符合标准。但在加入铝板屏蔽后，线圈自感与互感均减小。铝板上会产生涡流，其涡流大小与铝板所处位置的磁场大小有关。若要降低铝板对系统的干扰，可以加入高磁导率的铁氧体，铁氧体的聚磁特性会使得更多的磁场集中在线圈附近，减少铝板附近的磁场，从而减小了铝板产生的涡流。此时，铝板等效电感减小，系统的输出特性也将得到改善。

2.3 铝-铁氧体的传输效果

铝-铁氧体屏蔽结构如图 11 所示，相对磁导率为 1 000，电导率为 12 S/m，铁氧体为条状结构，厚度为 3 mm。加入铁氧体前后的磁场分布如图 12 所示。

对比加入铁氧体前后的磁场分布图，未加入铁氧体时，仍有很大一部分磁场通过铝板之间的间隙漏出，系统整体的磁通量降低。加入铁氧体后，从

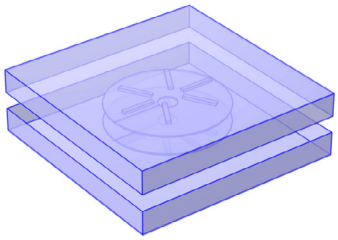
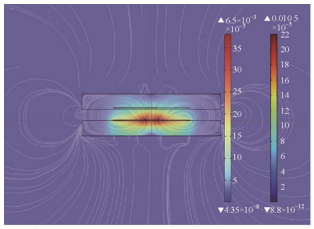
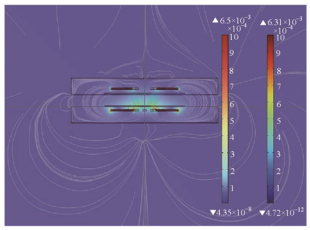


图 11　铝-铁氧体屏蔽结构

Fig. 11 Aluminum-ferrite shielding structure



(a) 仅有铝壳时



(b) 铝壳+铁氧体时

图 12　加入铁氧体前后的磁场分布

Fig. 12 Magnetic field distribution before and after adding ferrite strips

铝板空隙中漏出的磁场减小，大量的磁通被铁氧体收束，系统整体的磁通量增加。

3　实验验证供电桩传输性能

基于上述分析搭建无人机无线供电的实验平台，如图 13 所示，实验参数见表 1。

未加入屏蔽结构时，若外界存在金属干扰，实验结构如图 14(a)所示，测得系统一、二次侧的谐振波形如图 14(b)和(c)所示。图中，U_1 为一次侧电压波形，I_1 为一次侧电流波形，U_2 为二次侧电压波形，I_2 为二次侧电流波形。

当加入外界金属干扰后，系统不再谐振。实验表明外界金属介入会使得系统失谐，进而导致系统输出性能下降。下面对其输出性能进行分析，在输入电压为 120 V 时，系统的输出结果如图 15 所示。

通过功率分析仪测得加入干扰前后系统功率从 496.2 W 降到 94.3 W，输出效率也从 95.033%下降到 84.540%，从结果可以分析得出，金属的介入会极大地影响系统的输出功率和效率。

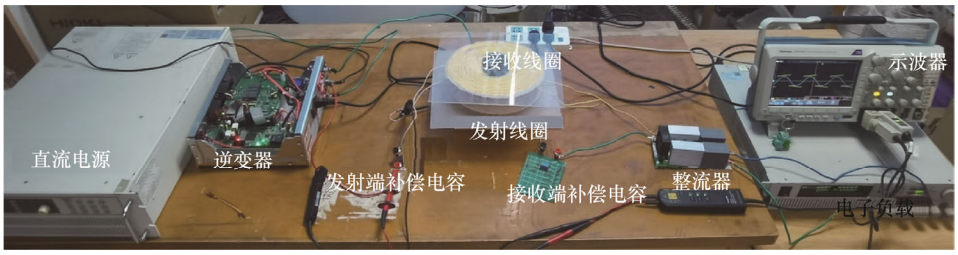


图 13　无屏蔽结构的实验平台

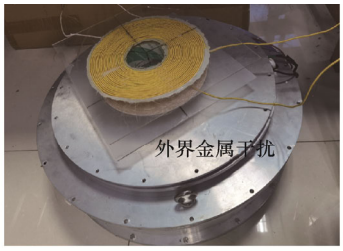
Fig. 13 Experimental platform without shielding structure

表 1　实验平台参数

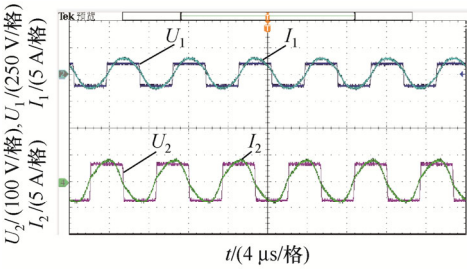
Tab. 1 Parameters of experimental platform

参数	数值
发射线圈自感 L_1/μH	83.47
接收线圈自感 L_2/μH	84.49
发射端补偿电容 C_1/nF	11.5
接收端补偿电容 C_2/nF	12.3
谐振频率 f/kHz	150
负载电阻 R_L/Ω	50
输入电压 U_S/V	120

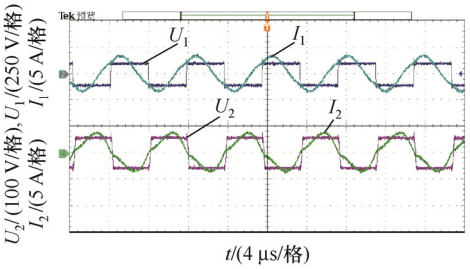
加入屏蔽后，若存在外界金属干扰，则对系统的影响较小。加入屏蔽结构的实验平台如图 16 所示。



(a)有金属干扰时的结构



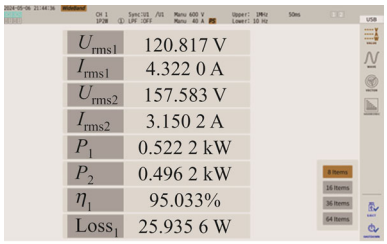
(b)无金属干扰时的波形



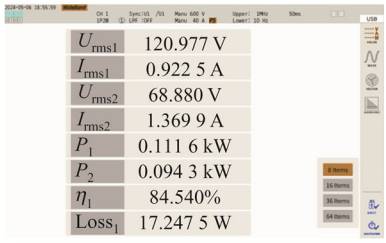
(c)有金属干扰时的波形

图 14 未加入屏蔽时的外界金属干扰

Fig. 14 External metal interference without shielding



(a)无金属干扰时的输出



(b)有金属干扰时的输出

图 15 未加入屏蔽时外界金属干扰的输出结果

Fig. 15 Output result under external metal interference without shielding

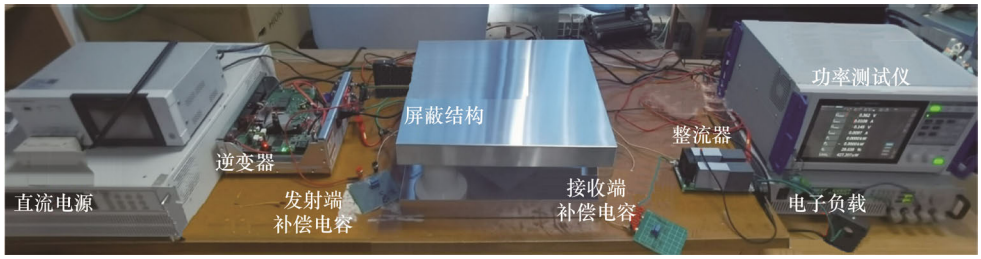
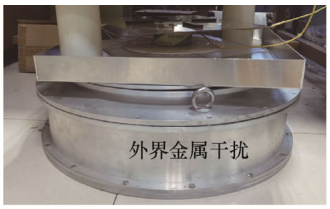


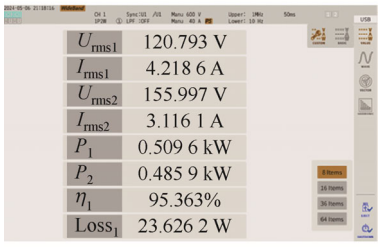
图 16 有屏蔽结构的实验平台

Fig. 16 Experimental platform with shielding structure

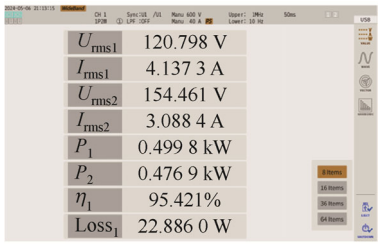
加入屏蔽后的实验结构如图 17(a)所示。对加入屏蔽结构后的输出性能进行分析，功率分析仪显示如图 17(b)和(c)所示。



(a)有金属干扰时的结构



(b)无金属干扰时的输出



(c)有金属干扰时的输出

图 17 加入屏蔽后的外界金属干扰

Fig. 17 External metal interference after adding shielding

此时系统的输出功率从 485.9 W 下降到 476.9 W，系统的输出效率几乎没有影响。故此屏蔽结构能够有效屏蔽外界金属对系统输出的影响。加入屏蔽结构后，得益于铁氧体对磁场较强的收束性，磁场被集中在工作区域，金属所处区域的磁场有所削弱，此时涡流损耗减小。因此，加入屏蔽后的系统整体效率高于屏蔽前的。

对加入屏蔽后的系统进行长时间稳定性测试，其输出特性如图 18 所示。根据图 18 可以看出，系统加入屏蔽后长时间运行的输出特性波动很小，处于稳定状态，说明无人机充电桩加入屏蔽结构后在户外长时间运行下性能稳定。

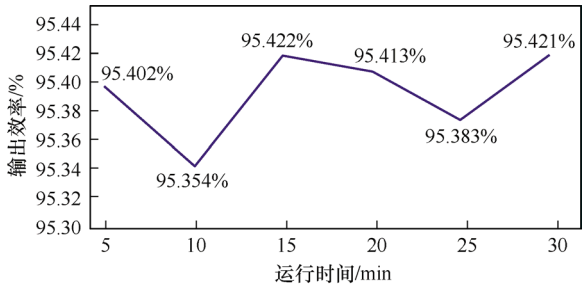


图 18　长时间稳定性测试输出特性

Fig. 18 Output characteristics of long-term stability test

4　结语

为研究铝-铁氧体电磁屏蔽效果和该屏蔽结构对磁耦合谐振式无线供电系统电气参数的影响，本文首先研究铝板对空间磁场的影响，分析对线圈自感、互感及非工作区域内的磁感应强度的变化规律。再加入铁氧体改善电气参数，使得线圈自感互感接近初始数值。最后搭建实验平台验证，未加入屏蔽和外界干扰时，系统输出功率为 496.2 W，输出效率为 95.033%；未加入屏蔽加入干扰时，系统输出功率为 111.6 W，输出效率为 84.540%。采用屏蔽不加干扰时，系统输出功率为 485.9 W，输出效率为 95.363%；采用屏蔽并加入干扰时，系统输出功率为 476.9 W，输出效率为 95.421%。实验结果说明了该屏蔽结构能够有效屏蔽电磁干扰。

参考文献：

[1] 李阳, 安张磊, 孟航, 等. 基于双耦合线圈的无人机轻量化无线充电耦合机构设计[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 168-175.
Li Yang, An Zhanglei, Meng Hang, et al. Design of lightweight wireless charging coupling mechanism for UAVs based on dual coupling coils [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 168-175. (in Chinese)

[2] 隋宇, 宁平凡, 牛萍娟, 等. 面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3636-3648.
Sui Yu, Ning Pingfan, Niu Pingjuan, et al. Review on mounted UAV for transmission line inspection [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3636-3648. (in Chinese)

[3] 李刚, 贾龙, 毕旒宇, 等. 基于无人机无线充电系统接收侧轻量化设计[J/OL]. 电源学报, 2024: 1-17. (2024-05-27)[2025-08-07]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DYXB20240522001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
Li Gang, Jia Long, Bi Liuyu, et al. Lightweight design based on the receiver side of UAV wireless charging system [J/OL]. Journal of Power Supply, 2024: 1-17. (2024-05-27)[2025-08-07]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DYXB20240522001&dbname=CJFD& dbcode=CJFQ. (in Chinese)

[4] Liu Yuxin, Liu Chunhua, Liu Senyi, et al. Design and control of a novel wireless energy router with independent power transmission channels [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 2940-2955.

[5] Kao Jiajing, Lin Chunliang, Yang J. Adaptive wireless power transfer system with relay transmission and communication [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 4110-4123.

[6] Wang Shuang, Peng Tao, Chen Jinqiao, et al. A new method for magnetic gain modulation of chemical oxygen iodine laser based on flat-top pulsed magnetic field [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14400-14409.

[7] Yang Jinxu, Wu Xinke, Muhammad F, et al. External magnetic field minimization for the integrated magnetics in series resonant converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 498-508.

[8] 冯宏伟, 刘媛媛, 黄从贵, 等. 带中继谐振器的磁耦合谐振式无线电能传输系统的效率特性分析[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 166-172.
Feng Hongwei, Liu Yuanyuan, Huang Conggui, et al. Analysis of efficiency characteristics of MCR-WPT system with relay resonator [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 166-172. (in Chinese)

[9] 顾文超, 丘东元, 张波, 等. 水下无线输电技术研究综述[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 125-138.
Gu Wenchao, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. Review of underwater wireless power transfer technologies [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 125-138. (in Chinese)

[10] Kao Jiajing, Lin Chunliang, Yang J. Adaptive wireless power transfer system with relay transmission and communication [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 4110-4123.

[11] Zhao Fading, Inserra D, Gao Guoliang, et al. High-efficiency microwave rectifier with coupled transmission line for low-power energy harvesting and wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(1): 916-925.

[12] Liu Changjun, Lin Hang, He Zhongqi, et al. Compact patch rectennas without impedance matching network for wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(5): 2882-2890.

[13] 王聪, 陈庆彬, 杨丰钢, 等. 无线电能传输磁耦合系统损耗优化[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 108-116.
Wang Cong, Chen Qingbin, Yang Fenggang, et al. Loss optimization of magnetic coupling system for WPT [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 108-116. (in Chinese)

[14] 闫争超, 胡谦宇, 赵晨旭, 等. 水下航行器感应式无线电能传输技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9668-9682.
Yan Zhengchao, Hu Qianyu, Zhao Chenxu, et al. Review on inductive wireless power transfer technology for underwater vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9668-9682. (in Chinese)

[15] 张智翔, 张宣. 无线电能传输抗偏移线圈的设计方法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 157-165.
Zhang Zhixiang, Zhang Xuan. Design method of anti-offset coil for wireless power transmission [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 157-165. (in Chinese)

[16] Haga N, Chakarothai J, Konno K. Circuit modeling of a wireless power transfer system containing ferrite shields using an extended impedance expansion method [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(5): 2872-2881.

[17] Zhang Zhen, Pang Hongliang. Continuously adjustable capacitor for multiple-pickup wireless power transfer under single-power-induced energy field [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6418-6427.

[18] Chen Hao, Qiu Dongyuan, Rong Chao, et al. A double-transmitting coil wireless power transfer system based on parity time symmetry principle [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 13396-13404.

[19] 李马炎, 张希. 电动汽车无线电能传输系统建模与电磁安全评估[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 177-185.
Li Mayan, Zhang Xi. Modelling and electromagnetic safety evaluation of wireless power transfer system for electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 177-185. (in Chinese)

[20] 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)



赵航

作者简介：

赵航(1987—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail：yuuhang@vip.qq.com。

贾静(1994—)，女，硕士，工程师。研究方向：新能源接入电网分析。E-mail：1461643990@qq.com。

陈小飞(1976—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：大数据与 AI 在电力系统中的应用。E-mail：zjzaj@126.com。

安媚(1986—)，女，硕士，高级工程师。研究方向：系统工程，分布式网络计算。E-mail：shhhenlan@163.com。

杨磊(1986—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：无线电能传输。E-mail：yanglei0930@xaut.edu.cn。

陈学娜(2002—)，女，本科。研究方向：无线电能传输。E-mail：2592134096@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)