

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614993

基于激励可调的三绕组无线充电系统抗偏移特性研究*

谢荣焕^{1,2}, 程翔鹏^{1,2}, 庄一展^{1,2}, 陈孝莺^{1,2}, 张艺明^{1,2}

(1. 福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108; 2. 福建省新能源发电与电能变换重点实验室 福州 350108)

摘 要:针对现有无线充电系统对偏移敏感、能量传输效率显著下降的问题,提出了一种基于激励可调的三绕组无线充电系统。将传统单发射线圈物理拆分为 3 个同心布置的平行绕组,通过共面集成设计优化空间布局,构建三路独立发射功率通道。采用三半桥逆变器架构配合占空比调制策略来调节激励,实现各绕组电流幅值和相位的独立控制与动态协调。进一步通过电感-电容-电容(LCC)补偿网络与发射侧串联谐振电容的复用设计,在无需额外解耦绕组和谐振电容的前提下实现三绕组间的完全解耦。为验证方案,搭建了一台实验样机,并在 0~120 mm 的 X 轴单向偏移和 0~90 mm 的 X/Y 轴对角线偏移范围内进行测试。实验结果表明所提三绕组方案在 X 轴偏移全程内输出电压波动率仅为 1.50%,系统最高效率可达 91.09%;在 X/Y 轴偏移内,输出电压波动率为 1.56%,效率高达 91.27%。相同条件下,单发射线圈方案的输出电压波动率分别达 35.4% 和 45.5%,反绕线圈方案则分别为 32.1% 和 39.0%。三绕组方案在宽范围偏移条件下能够维持近乎恒定的输出电压与高传输效率,其抗偏移性能显著优于传统方案。该方案成功融合了单线圈方案的高功率密度优势与多线方案优异的抗偏移特性,为无线充电技术从辅助功能向高功率基础设施的演进提供了解决方案。

关键词: 无线电能传输;三绕组;抗偏移;占空比调制;恒压

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on the anti-offset characteristics of wireless charging system with adjustable excitation

Xie Ronghuan^{1,2}, Cheng Xiangpeng^{1,2}, Zhuang Yizhan^{1,2}, Chen Xiaoying^{1,2}, Zhang Yiming^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To address the problem of the existing wireless charging system being sensitive to the offset and the significant decrease in energy transmission efficiency, this article proposes a three-winding wireless charging system based on adjustable excitation. The traditional single transmitting coil is physically divided into three concentrically arranged parallel windings. The spatial layout is optimized through a coplanar integrated design to construct three independent power channels. A three-half-bridge inverter architecture is adopted in combination with a duty cycle modulation strategy to adjust the excitation, achieving independent control and dynamic coordination of the current amplitude and phase of each winding. Further, through the reuse design of the inductor-capacitor-capacitor (LCC) compensation network and the transmitting side series resonant capacitor, complete decoupling among the three windings is achieved without additional decoupling windings and resonant capacitors. To evaluate the proposed scheme, an experimental prototype is established and tested under X -axis offsets ranging from 0 to 120 mm and X/Y -axis offsets from 0 to 90 mm. Experimental results show that the proposed three-winding scheme achieves an output voltage fluctuation of only 1.50% over the X -axis offset range, with a maximum system efficiency of 91.09%. Over the X/Y -axis offset range, the output voltage fluctuation is 1.56%, and the efficiency reaches 91.27%. Under the same offset ranges, the output voltage fluctuations of the single-coil scheme are 35.4% and 45.5%, and those of the reverse-winding scheme are 32.1% and 39.0%, respectively. The three-winding scheme can maintain constant output voltage and high transmission efficiency under a wide range of offsets, and its anti-offset performance is significantly better than that of

收稿日期:2026-03-07 Received Date: 2026-03-07

* 基金项目:国家自然科学基金(52577187,52407197)项目资助

the traditional schemes. This scheme successfully integrates the high-power density advantage of the single-transmitting coil scheme with the anti-offset characteristics of the multi-coil scheme, providing a solution for the evolution of wireless charging technology from an auxiliary function to a high-power infrastructure.

Keywords: wireless power transfer; three winding; anti-offset; duty cycle modulation; constant voltage

0 引言

无线充电技术作为电动汽车、智能终端及物联网设备的核心使能技术,正加速从消费电子领域向高可靠性、高功率应用场景渗透,成为推动移动能源革命的关键驱动力^[1-3]。随着全球电动汽车市场的快速扩张和智能设备多模态交互需求的激增,无线充电系统在消除线缆束缚、提升用户体验及实现无缝能源供给方面展现出不可替代的价值^[4-5]。该技术不仅简化了日常使用流程,还为电动汽车自动泊车充电、工业设备连续运行、医疗设备无接触供电等场景提供了创新解决方案。在能源转型与智能化浪潮的双重推动下,无线充电技术正从辅助功能演变为移动能源网络的基础设施,其产业化进程已进入规模化落地的关键阶段,为全球能源互联生态奠定基础^[6-8]。

单线圈系统凭借结构简单、成本低廉、易于集成等优势,已成为消费电子领域(如智能手机、无线耳机)的主流无线充电方案^[9-11]。该系统基于基本电磁感应原理,通过单一发射线圈与接收线圈的耦合实现能量传输,其设计简洁性大幅降低了生产成本^[12-13]。然而,该方案的固有缺陷在于对接收器偏移的极度敏感性:当接收器与发射器发生微小偏移时,线圈间耦合效率急剧下降,导致能量传输效率显著衰减,严重制约了用户体验的提升。此外,单发射线圈的中心空间未被充分利用,进一步限制了系统在对空间高要求场景下的适应性。这些问题使得单线圈系统仅适用于接收器位置固定的静态环境,难以满足电动汽车动态充电、移动设备多场景使用等新兴需求^[14]。

为解决偏移问题,研究者提出了双线圈方案^[15-16]。该方案通过在同一物理结构中集成两个物理连接的线圈,形成基础抗偏移能力,其中反绕线圈方案是双线圈方案的典型实现形式。反绕线圈方案采用方向相反的平行双绕组,在接收器发生二维偏移时,利用磁场方向相位差形成动态抵消机制。当接收器向某一方向偏移时,正向绕组的耦合增强,反向绕组的耦合减弱,两者相互补偿使总耦合强度波动幅度显著降低,从而提升系统的抗偏移性能^[17]。然而,反向绕组的磁场相互抵消导致有效耦合面积减少,使得该系统在相同偏移条件下功率密度明显下降^[18]。同时,由于线圈间物理连接限制了电流的独立调节,其抗偏移机制仅能依赖于磁场相位互补,无法实现

较大范围的补偿。在电动汽车高功率应用或空间受限的工业场景中,自由度缺失与功率密度不足的双重缺陷尤为突出,导致该方案仅适用于低功率静态充电场景,难以支撑移动化、高动态化的实际应用需求。

四线圈方案通过将4个线圈以田字形布局集成在同一物理结构中,形成一个整体的发射结构^[19]。该方案能够在二维平面内形成更加均匀的磁场分布,进而改善系统的抗偏移特性。但4个线圈在物理上相互连接,电流同样无法独立调节,导致磁场调节的灵活性受限^[20]。线圈的相邻区域存在磁场抵消效应,这是该方案具有均匀磁场的原因,但也影响了耦合强度,使得系统传输效率下降。此外,该结构的制造工艺相对复杂,4个线圈的对称性和一致性要求较高,增加了生产成本和质量控制难度^[21]。因此,尽管田字形四线圈方案在抗偏移特性方面较双线圈方案有所提升,但仍难以满足高动态化应用场景的需求。

阵列式线圈方案在四线圈方案的基础上进一步扩展,理论上能够实现全区域无死角无线充电覆盖^[22]。然而,该方案的硬件成本极其高昂,每个线圈均需配置独立的功率电子器件^[23]。系统控制复杂度显著提升,需采用复杂的控制算法实时监测接收器位置并动态调整多个线圈的工作状态。此外,当多线圈同时工作时,系统效率会因交叉耦合效应和开关损耗而明显降低^[24]。因此,尽管阵列式线圈方案在理论上具备优异的抗偏移特性,但在实际工程应用中往往受限于高昂的成本和复杂的系统架构,难以实现大规模商业化推广。

综上所述,多线圈结构在抗偏移特性研究领域呈现出明显的两极分化格局。单线圈和双线圈方案虽然硬件结构简单、成本低廉,但抗偏移性能提升空间有限;四线圈方案在结构复杂度与性能表现之间取得了一定平衡,但仍存在固有局限性;而阵列式线圈方案虽具备卓越的抗偏移性能,却因成本高昂、控制复杂而难以在实际应用中广泛部署。这种技术路线的分化现象凸显了无线充电系统在抗偏移性能与工程可行性之间的权衡困境。

上述多线圈结构的演进主要聚焦于物理拓扑的优化,而无线充电系统的控制策略同样在近年来取得了显著进展。为应对接收端偏移带来的性能挑战,研究者们提出了多种新型控制方案。动态调频控制通过实时调整系统工作频率来适应负载变化和偏移工况,能够在一定程度上维持输出电压稳定,但频率调节范围受限于谐振网络的带宽,且在大范围偏移时难以实现精确控制^[25]。

双频谐振技术采用两个不同频率的谐振点进行能量传输,在特定偏移条件下能够实现更宽的稳定输出范围,但该方案需要复杂的双频逆变器和谐振网络,系统成本和复杂度显著增加^[26-27]。可控谐振方案通过引入可调谐振元件来动态调整谐振参数,虽然提供了更大的控制自由度,但可调元件的引入增加了系统成本和可靠性风险^[28-29]。相比之下,占空比调制控制作为一种时域控制策略,具有响应速度快、硬件实现简单、无需改变工作频率以及拓扑兼容性好等显著优势,相较于依赖频率切换或元件调谐的新型方案更具实用价值。

基于此,本文提出一种采用三绕组结构、具备激励可调能力的无线充电系统。与传统多线圈方案不同,本方案将单发射线圈物理拆分为3个平行布置的同心绕组,通过共面集成设计优化空间布局,有效减小耦合结构体积。采用三半桥逆变器架构配合占空比调制策略,实现了各绕组电流幅值和相位的独立控制与动态协调。进一步地,系统通过电感-电容-电容(inductor-capacitor-capacitor, LCC)补偿网络与发射侧串联谐振电容的复用设计,在无需额外解耦绕组和谐振电容的前提下实现了三绕组间的完全解耦,避免交叉耦合问题。实验结果表明,该方案在宽范围偏移条件下均能维持近乎恒定的输出电压与高传输效率,其融合了单线圈方案的高功率密度优势与多线圈方案的优异抗偏移特性,同时有效规避了反绕线圈方案的低功率密度问题以及阵列式方案的高昂成本瓶颈,为无线充电技术从辅助功能向高功率基础设施的演进提供了兼具工程可行性与性能优越性的创新解决方案。

1 理论分析

本章对传统的单线圈方案、反绕线圈方案及所提的三绕组方案进行理论分析。首先,建立单发射线圈方案的等效电路模型,揭示其在接收端偏移情况下的输出衰减机制;其次,分析反绕线圈方案通过磁场抵消实现抗偏移特性的原理;最后,提出本文所采用的三线圈发射结构,通过理论建模阐明其在抗偏移能力方面的优势。通过对比分析,为后续实验验证提供理论基础。

1.1 单发射线圈方案

单发射线圈方案的系统架构如图1所示,由直流电源 V_{IN} 、全桥逆变器、电感-电容-电容-串联谐振(inductor-capacitor-capacitor-series, LCC-S) 谐振拓扑、全桥整流器及负载电阻 R_L 构成。系统工作时,全桥逆变器将直流电源转换为高频交流电压,经 LCC 补偿网络为发射线圈提供电能;发射线圈产生的交变磁场通过磁耦合在接收线圈中感应出电流,经 S 补偿网络后进入整流电路,最终为负载输送电能。

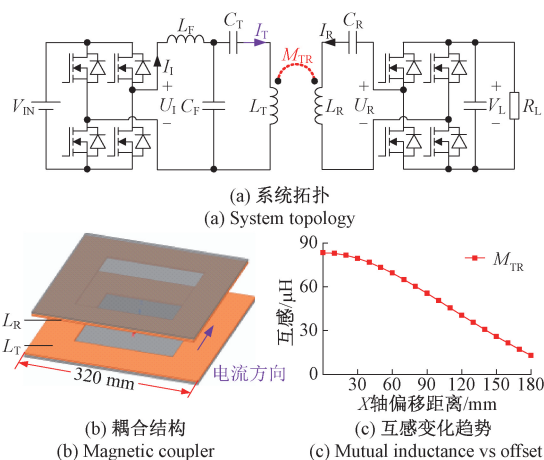


图1 单发射系统架构

Fig. 1 Single-transmitting system architecture

其中, U_I 和 I_I 分别表征全桥逆变器的输出电压与电流。在 LCC-S 谐振拓扑中, L_F 为原边串联补偿电感, C_F 为原边并联补偿电容, C_T 为原边串联补偿电容, C_R 为副边串联补偿电容。发射线圈 L_T 与接收线圈 L_R 的互感为 M_{TR} , 电流 I_T 产生的磁场在接收线圈中感应出电流 I_R , 从而实现能量的无线传输。 U_R 和 I_R 分别为全桥整流器的输入电压与电流, V_L 为负载电阻 R_L 两端的等效电压。

U_I 和 U_R 的表达式为:

$$\begin{cases} U_I = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{IN} \\ U_R = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_L \end{cases} \quad (1)$$

系统工作频率 f 定义为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_T C_F C_T}{C_F + C_T}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} \quad (2)$$

在工作频率下,对电路列写基尔霍夫电压方程得:

$$\begin{cases} U_I = j\omega L_F I_T \\ -j\omega L_F I_I = j\omega M_{TR} I_R \\ U_R = j\omega M_{TR} I_T \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\omega = 2\pi f$ 为工作角频率。

联立式(1)和(3)可得负载电压 V_L 为:

$$V_L = \frac{M_{TR}}{L_F} V_{IN} \quad (4)$$

由式(4)可知,在输入电压 U_I 和串联电感 L_F 固定时,负载电压 V_L 仅取决于互感 M_{TR} 。单发射线圈方案的互感变化趋势如图1所示。接收端偏移导致 M_{TR} 急剧下降,使 V_L 显著降低,进而影响充电效率。因此,单发射线圈方案仅适用于接收器位置固定的静态场景,难以满足电动汽车动态充电、移动设备多场景应用等需求。

1.2 反绕线圈方案

反绕线圈方案的系统架构如图2所示。

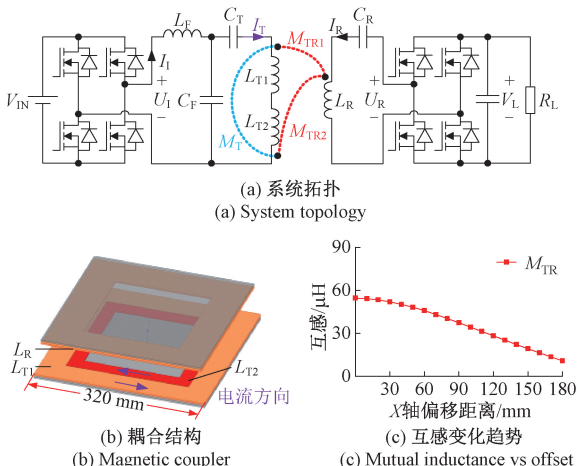


图2 反绕线圈方案系统架构

Fig. 2 Reverse-winding scheme system architecture

其整体架构与单发射线圈方案相似,核心差异在于中心位置增设反绕线圈,与接收线圈构成双耦合结构。工作时,两个发射线圈流过相同电流但产生方向相反的磁场,二者相互抵消,从而显著提升磁场均匀性。

其中, L_{T1} 和 L_{T2} 分别为正绕线圈和反绕线圈,二者互感为 M_T ,共同构成发射线圈。 L_R 为接收线圈,与发射线圈的互感分别为 M_{TR1} 和 M_{TR2} 。

系统工作频率设为 f ,满足:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{T1} + L_{T2}) \frac{C_F C_T}{C_F + C_T}}} \quad (5)$$

在工作频率 f 下,基于基尔霍夫电压定律列写电路方程得:

$$\begin{cases} U_i = j\omega L_F I_T \\ -j\omega L_F I_i = (j\omega M_{TR1} - j\omega M_{TR2}) I_R \\ U_R = (j\omega M_{TR1} - j\omega M_{TR2}) I_T \end{cases} \quad (6)$$

联立式(1)和(6)可得负载电压 V_L 为:

$$V_L = \frac{(M_{TR1} - M_{TR2})}{L_F} V_{IN} \quad (7)$$

与单发射线圈方案对比可知,反绕线圈方案的负载电压 V_L 同时依赖于互感 M_{TR1} 和 M_{TR2} 。反绕线圈方案的互感变化趋势如图2所示,其中 $M_{TR} = M_{TR1} - M_{TR2}$ 。通过对 L_{T1} 和 L_{T2} 进行优化设计,可在特定偏移范围内维持 M_{TR} 恒定,从而确保 V_L 稳定。因此,该方案具备较好的抗偏移性能,但会引入额外的磁场损耗。

1.3 三绕组方案

本文提出的三绕组无线充电系统架构如图3所示,包含3个半桥逆变器,3路独立发射功率通道(分别连接发射线圈 L_{T1} 、 L_{T2} 和 L_{T3})、LCC-S 补偿网络、全桥整流器及负载。

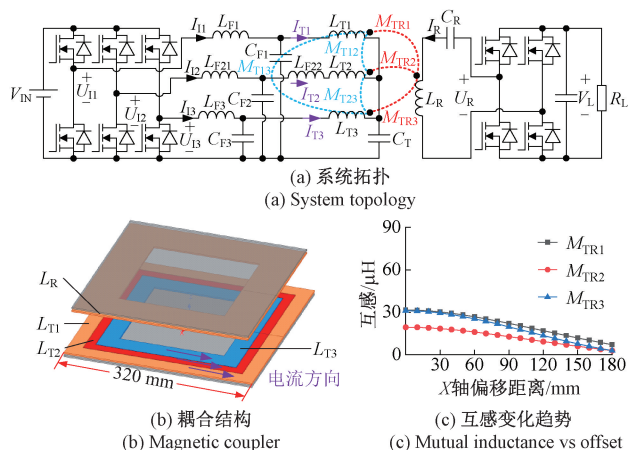


图3 三绕组系统架构

Fig. 3 Three-winding system architecture

3路功率通道的输入端均连接至半桥逆变器中点,实现并行能量传输。各通道输出的交流电能经磁耦合传输至副边,通过补偿网络整流滤波后供给负载。其中, U_{li} ($i=1,2$ 和 3) 和 I_{li} 分别表示半桥逆变器的输出电压与电流, U_R 和 I_R 为全桥整流器的输入电压与电流, V_L 为负载电阻 R_L 两端的等效电压。 L_{Fi} 为原边串联补偿电感, C_{Ti} 为原边串联补偿电容, C_{Fi} 为原边并联补偿电容, C_{Ri} 为副边串联补偿电容。 L_{Ti} 为发射线圈, L_R 为接收线圈。发射线圈间互感为 M_{T12} 、 M_{T23} 和 M_{T13} ,发射-接收线圈互感为 M_{TR1} 、 M_{TR2} 和 M_{TR3} 。系统采用占空比控制策略,3个半桥逆变器具有相同占空比 D 。

U_{li} 的表达式为:

$$U_{li} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{IN} \sin(\pi D) \quad (8)$$

传统方案中,每个LCC补偿网络需独立配置串联补偿电容并增设解耦绕组以抑制线圈耦合干扰。本方案通过 C_T 复用设计,使3路功率通道共享原边串联补偿电容,不仅实现系统谐振调谐,还基于互感对称性完成发射线圈解耦,无需额外解耦绕组和谐振电容,从而显著简化硬件结构并降低系统成本。

三绕组方案的等效电路如图4所示。

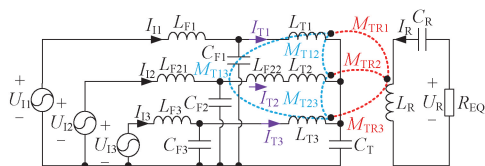


图4 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit

3个发射线圈具有对称性,因此只需分析 L_{T1} 发射回路即可。根据基尔霍夫电压定律可得:

$$\begin{aligned} \frac{I_{11}}{j\omega C_{F1}} = & \left(j\omega L_{T1} + \frac{1}{j\omega C_{F1}} + \frac{1}{j\omega C_T} \right) I_{T1} + j\omega M_{TR1} I_R + \\ & \left(j\omega M_{T13} + \frac{1}{j\omega C_T} \right) I_{T3} + \left(j\omega M_{T12} + \frac{1}{j\omega C_T} \right) I_{T2} \end{aligned} \quad (9)$$

当满足 $M_{T12} = M_{T23} = M_{T13} = M_T$ 且 M_T 与 C_T 发生谐振时,可消除涉及 I_{T1} 、 I_{T2} 和 I_{T3} 的耦合项,从而实现发射线圈之间的解耦。此时,式(9)可进一步简化为:

$$\frac{I_{11}}{j\omega C_{F1}} = j\omega M_{TR1} I_R \quad (10)$$

由式(10)可见,经由 L_{T1} 的功率通道具备独立的功率传输能力,能够将功率输送至副边,且与 L_{T2} 和 L_{T3} 相互隔离。同理,经由 L_{T2} 和 L_{T3} 的功率通道也具备相同的独立传输特性。

为实现发射线圈间互感相等,本文提出了一套针对多线圈系统的优化设计流程。首先采用等匝数初始方案,将3个发射线圈的初始匝数均设定为10匝。考虑到三线圈系统中各线圈间存在强耦合效应,任意单个线圈参数的调整均会同时影响至少两个互感值,因此采用分步迭代优化策略:在首轮优化过程中,固定线圈 L_{T1} 和 L_{T2} 的匝数不变,仅对线圈 L_{T3} 的匝数进行迭代调整。通过有限元仿真软件对每次调整后的线圈结构进行电磁场仿真,计算3个互感值。当任意两个互感值之差的绝对值均小于 $0.01 \mu\text{H}$ 时,判定该组参数满足要求,将其作为可行的备用方案予以保留;若不满足,则逐步减小 L_{T3} 的匝数并重复上述仿真与判断过程。当优化过程中出现 L_{T3} 或 L_{T2} 的匝数递减至1匝的边界情况时,需相应减小前序线圈(即 L_{T2} 和 L_{T1})的匝数,并将 L_{T3} 的匝数重新设定为10匝,继续进行新一轮迭代优化。最终,从所有满足互感要求的备用方案中,综合考虑系统传输效率和功率容量,筛选出最优的发射线圈参数组合,用于后续的实验验证与系统性能测试。

系统工作频率 f 满足:

$$\begin{aligned} f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Fi}C_{Fi}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} = \\ \frac{1}{2\pi\sqrt{M_T C_T}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{Ti} - M_T) C_{Fi}}} \end{aligned} \quad (11)$$

本方案解耦等效电路如图5所示。在工作频率 f 下,基于基尔霍夫电压定律建立电路方程:

$$\begin{cases} U_{Li} = j\omega L_{Fi} I_{Ti} \\ -j\omega L_{Fi} I_{Li} = j\omega M_{TRi} I_R \\ U_R = j\omega M_{TR1} I_{T1} + j\omega M_{TR2} I_{T2} + j\omega M_{TR3} I_{T3} \end{cases} \quad (12)$$

可得负载电压 V_L 为:

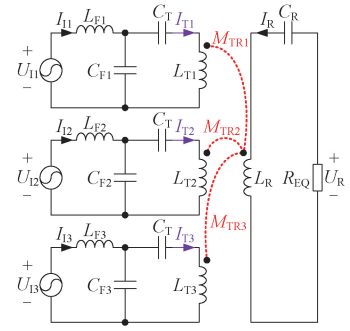


图5 解耦等效电路

Fig. 5 Decoupling equivalent circuit

$$\begin{aligned} V_L = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \left(\frac{M_{TR1}}{L_F} U_{11} + \frac{M_{TR2}}{L_F} U_{12} + \frac{M_{TR3}}{L_F} U_{13} \right) = \\ \frac{V_{IN}}{2} \left(\frac{M_{TR1}}{L_{F1}} + \frac{M_{TR2}}{L_{F2}} + \frac{M_{TR3}}{L_{F3}} \right) \sin(\pi D) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)表示负载电压、互感和占空比之间的数学关系,其中3个逆变器输出电压通过相同的占空比进行统一调制。3个同心布置的发射线圈产生的交变磁场在空间中进行矢量叠加,形成优化的合成磁场分布。当接收线圈发生偏移时,虽然各发射线圈与接收线圈之间的互感会发生变化,但由于三线圈结构提供了多通道耦合冗余,互感代数和的变化幅度显著减小。

由(13)可得占空比 D 可表示为:

$$D = \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{2V_L}{V_{IN} \left(\frac{M_{TR1}}{L_{F1}} + \frac{M_{TR2}}{L_{F2}} + \frac{M_{TR3}}{L_{F3}} \right)} \quad (14)$$

当目标输出电压 V_L 固定时,占空比随互感的变化而动态调整,而互感又是偏移量 (x, y) 的函数,从而实现了占空比对偏移量的自适应调节。考虑占空比的物理限制,当占空比达到上限0.5时,此时的偏移量即为最大偏移量;当占空比达到下限0.05时,系统能工作的最小偏移量也相应确定。

在偏移工况下,系统通过调节占空比增大3个通道的输出电压幅值,相当于动态调节各线圈的激励电流,实现合成磁场的空间重构。当接收线圈偏移到某区域时,增强该区域附近线圈的激励,使合成磁场在接收线圈位置的磁通密度保持稳定。3个独立功率通道借助共享的串联补偿电容实现完全解耦,各通道电流不仅可在全范围内连续调节,还支持方向切换,通过实时调控三线圈的相对电流相位,动态合成所需的磁场分布。三线圈设计优化了磁场空间梯度的分布,使得互感对位置的变化率显著降低,从而有效维持系统在偏移工况下的稳定运行。相较于传统单发射线圈方案及反绕线圈解耦方案,三绕组方案通过多自由度磁场调控机制,可实现高效率功率分配与鲁棒响应,增强动态适应性及多工况稳定性。

2 实验验证

为验证所提出的方案,本文构建了实验原型,如图 6 所示。

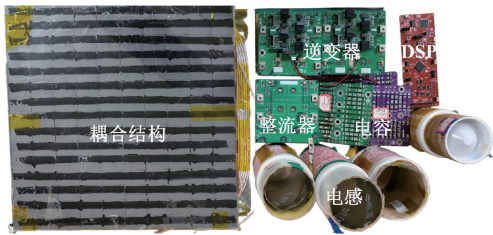


图 6 实验样机
Fig. 6 Experimental prototype

实验参数如表 1 所示,系统工作频率设定为 85 kHz。发射线圈 L_{T1} 、 L_{T2} 和 L_{T3} 的尺寸分别为 320 mm×320 mm、270 mm×270 mm 和 238 mm×238 mm,接收线圈 L_R 的尺寸为 300 mm×300 mm。各线圈匝数依次为 8、5、10 和 20 匝,对应 L_{T1} 、 L_{T2} 、 L_{T3} 和 L_R 。接收线圈与发射线圈间的气隙固定为 80 mm。实验主要考察在不同偏移工况下的输出性能,测试范围包括接收线圈沿 X 轴从中心位置逐步移动至 120 mm 的单向偏移路径,以及沿 X/Y 轴同时移动至 90 mm 的对角线偏移路径,以此模拟实际应用中可能出现的复杂错位场景。

表 1 实验参数
Table 1 Experimental parameters

参数	数值	单位
V_{IN}	200.00	V
L_{F1}	37.51	μH
L_{F21}	20.92	μH
L_{F22}	20.95	μH
L_{F3}	39.59	μH
L_{T1}	64.40	μH
L_{T2}	27.25	μH
L_{T3}	66.73	μH
L_R	201.16	μH
C_{F1}	92.80	nF
C_{F2}	165.09	nF
C_{F3}	84.69	nF
C_T	133.46	nF
C_R	17.43	nF
R_L	10.00	Ω

为确保比较的可靠性,本文同时测试了单发射线圈方案、反向绕组方案及三绕组方案。单发射线圈方案采用单个 320 mm×320 mm 线圈,总匝数 23 匝;反向绕组方案的外层线圈同样为 320 mm×320 mm,内外线圈的匝数分别为 18 和 5 匝。所有方案均采用统一的线圈参数(外尺寸 320 mm×320 mm、总匝数 23 匝、同规格利兹线),以确保成本的一致性。3 种方案的互感变化如图 7 所示。

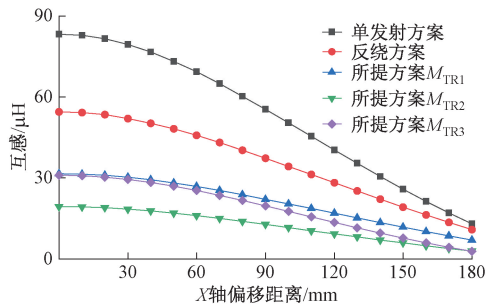


图 7 3 种方案互感随 X 轴偏移距离变化
Fig. 7 The mutual inductance among the three schemes varies with the X -axis offset distance

单发射线圈方案互感波动最大,在偏移条件下难以维持稳定输出;反向绕组方案因互感变化趋势稳定,具备天然抗偏移优势,但功率密度与效率有所降低;三绕组方案的互感变化介于两者之间。通过动态调节半桥逆变器占空比,系统可有效融合两种方案的优点。

定义输出电压和效率的波动率如(15)所示。

$$\Delta V_L = \frac{V_{L-MAX} - V_{L-MIN}}{V_{L-MAX} + V_{L-MIN}} \times 100\%$$
$$\Delta Eff = \frac{Eff_{MAX} - Eff_{MIN}}{Eff_{MAX} + Eff_{MIN}} \times 100\%$$

(15)

在偏移范围内对 3 种方案进行测试,输出电压与系统效率如图 8 和 9 所示,两者的波动率如表 2 所示。

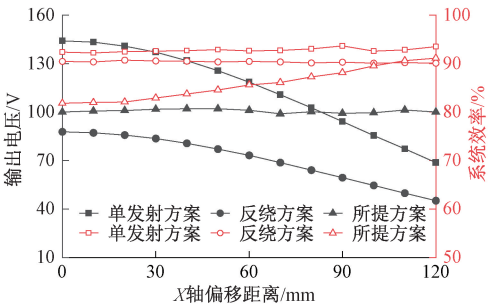


图 8 输出电压和效率随 X 轴偏移距离变化曲线
Fig. 8 Curves showing the variation of output voltage and efficiency with the offset distance along the X -axis

在单向偏移测试中,3 种方案具有不同的传输特性。单发射线圈方案在中心位置具有最优的功率传输能力,

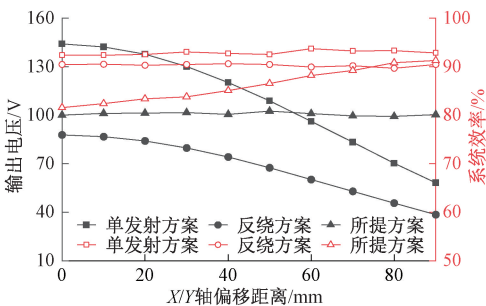


图 9 输出电压和效率随 X/Y 轴偏移距离变化曲线
Fig. 9 Curves showing the variation of output voltage and efficiency with the offset distance along the X/Y -axes

表 2 输出电压和效率的波动率

Table 2 The fluctuation of output voltage and efficiency

方案	$\Delta V_L/\%$		$\Delta Eff/\%$	
	X 轴偏移	X/Y 轴偏移	X 轴偏移	X/Y 轴偏移
单发射线圈方案	35.40	45.50	0.72	0.52
反绕线圈方案	32.10	39.00	0.34	0.51
所提方案	1.50	1.56	5.37	5.64

其输出电压和系统效率分别为 144.11 V 和 92.38%。然而,该方案对偏移极为敏感,随着接收端沿 X 轴移动,互感迅速减小,导致输出电压急剧下降。当偏移量达到 120 mm 时,其输出电压已跌至 68.76 V,输出电压波动率为 35.4%。反绕线圈方案由于线圈反向串联产生的磁场抵消效应,其在中心位置的耦合系数较低,初始输出电压仅为 87.78 V,效率为 90.46%,显著低于单发射线圈方案。随着偏移量增加,在 120 mm 处输出电压降至 45.15 V,输出电压波动率略低于单发射线圈方案。这表明在该实验配置下,反绕结构尽管初始传输能力较弱,但具备更好的抗偏移能力。

相比之下,所提三绕组方案通过多线圈协同工作与占空比动态调节策略,在宽偏移范围内确保了系统的运行稳定性与动态供电能力。在中心位置,系统采用最小占空比,且占空比随偏移距离增大而逐步提升。随着偏移距离增大,该方案能将输出电压稳定在 99.02~102.04 V,输出电压波动率仅为 1.50%,远优于其他两种方案。虽然该方案在中心位置的效率略低于传统方案,这是由低占空比的额外损耗所致,但随着偏移量增加,系统效率稳步上升,在较大偏移工况下达到 91.09%,证明了其在维持高功率传输的同时仍能保持较高的能量转换效率。

在沿 X/Y 轴偏移的测试中,传统方案有较大的局限性。当接收线圈移动至 90 mm 处时,单发射线圈方案的输出电压下降至 58.14 V,反绕线圈方案降至 38.52 V,输出电压波动率分别为 45.5% 和 39.0%。而所提方案在

此位置下仍能提供 100.38 V 的输出电压,效率高达 91.27%,输出电压波动率仅为 1.56%。这一结果表明三绕组方案有效补偿了偏移带来的互感损失,展现出更好的空间鲁棒性。

图 10~12 展示了不同位置的系统波形。

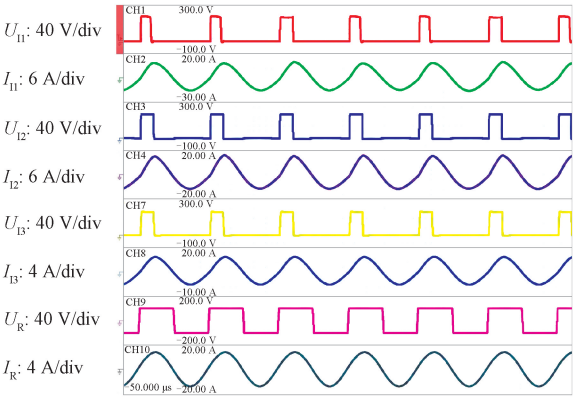


图 10 中心位置波形

Fig. 10 Waveforms at the center position

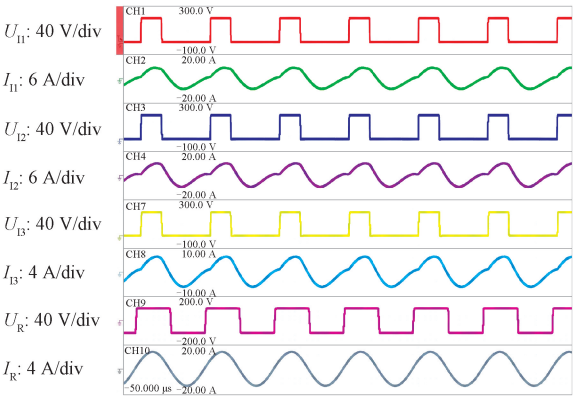


图 11 X 轴偏移距离 120 mm 波形

Fig. 11 Waveforms with an X -axis offset distance of 120 mm

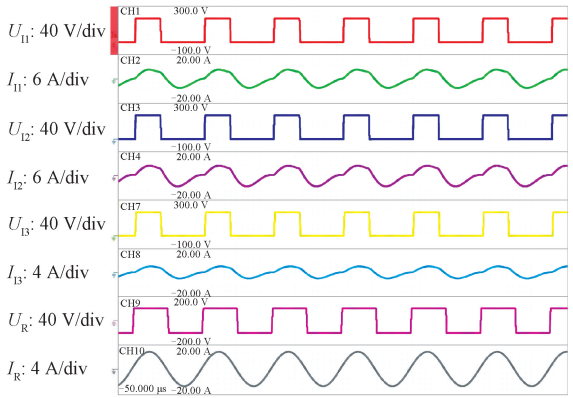


图 12 X/Y 轴偏移距离 90 mm 波形

Fig. 12 Waveforms with an X/Y axis offset distance of 90 mm

各路逆变器的输入电压与电流波形呈近似正弦特性,波形畸变率较低,这表明系统输出频谱以基波分量为主导,高次谐波含量得到有效抑制。这种频谱特性有利于降低电磁干扰,提高系统效率,同时也为后续的功率传输提供了良好的波形基础。输入电压与输入电流的相位差接近 0° ,这不仅表明系统工作在谐振状态,同时也意味着谐振腔的阻抗角趋近于零,即谐振腔呈现纯阻性。这与理论分析中关于系统在谐振频率下工作的预期完全吻合,验证了复用原边串联补偿电容实现谐振调谐的有效性。

综合对比3种方案的性能数据可知,单发射线圈方案虽具有高功率密度潜力,但抗偏移能力较差;反绕线圈方案在本实验参数下功率密度低且抗偏移能力同样不够理想。而所提三绕组方案成功解决了这一矛盾,它实现了在全偏移范围内近乎恒定的电压和功率输出特性。特别是在较大偏移条件下,三绕组方案不仅避免了传统方案出现的输出断崖,还保持了优异的系统效率。实验结果证明了所提拓扑结构及控制策略在无线充电及多场景智能终端供电应用中的显著优势,为克服无线电能传输中的位置敏感性难题提供了切实可行的解决方案。

尽管三绕组方案在抗偏移性能方面展现出显著优势,但该拓扑方案仍存在一些需要完善之处。三半桥逆变器架构的引入虽然实现了各线圈电流的独立调控,但也相应增加了系统的硬件复杂度和成本投入。实验数据显示,系统在中心位置时效率略低于传统方案,这一现象主要源于低占空比工作模式下产生的额外开关损耗。同时,为实现发射线圈间的完全解耦,方案对互感对称性提出了严格要求,这对线圈的制造工艺和装配精度带来了更高挑战。未来工作将重点针对上述不足进行优化改进,进一步提升该方案的工程适用性。

3 结 论

本文针对无线充电系统对接收器偏移敏感的问题,提出了一种基于激励可调的三绕组无线充电系统。通过将传统单发射线圈物理拆分为3个同心线圈,结合三半桥逆变器架构与占空比调制策略,实现了系统在宽偏移范围内的稳定输出和高效率。实验结果表明,三绕组方案在 X 轴偏移 $0 \sim 120$ mm 时,输出电压波动率仅为 1.50%,系统效率可达 91.09%;在 X/Y 轴偏移 $0 \sim 90$ mm 时,输出电压波动率仅为 1.56%,系统效率高达 91.27%。相比之下,单发射线圈方案的输出电压波动率高达 35.4% 和 45.5%,反绕线圈方案的波动率也达到 32.1% 和 39.0%。三绕组方案有效克服了接收器偏移带来的互感损失,为无线充电技术从消费电子领域向电动汽车动

态充电、工业设备连续运行等高功率应用场景的拓展提供了切实可行的解决方案。

参考文献

- [1] 王佩月, 蒋金橙, 冯天旭, 等. 基于平面双解耦型信号线圈的无线电能与全双工信号同步传输系统[J]. 电工技术学报, 2025, 40(24): 7891-7905.
WANG P Y, JIANG J CH, FENG T X, et al. Wireless power and full-duplex signal transfer system based on the planar double-decoupled signal coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(24): 7891-7905.
- [2] 徐科峰, 雷华明. 应用于金属转轴监测的无线电能与信号同步传输系统优化研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(10): 70-77.
XU K F, LEI H M. Optimization study of simultaneous wireless power and data transfer system applied in metal shaft monitoring[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(10): 70-77.
- [3] 李陶, 王懿杰, 李阳, 等. 面向水下无线电能传输系统涡流损耗抑制与效率优化的接收端控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(4): 1572-1581.
LI T, WANG Y J, LI Y, et al. Research on receiver-side control methods for eddy current loss suppression and efficiency optimization in underwater wireless power transfer systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(4): 1572-1581.
- [4] 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): 9668-9681.
YAN ZH CH, HU Q Y, ZHAO CH X, et al. Review on inductive wireless power transfer technology for underwater vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9668-9681.
- [5] MUNSI A, PRADHAN S, ADITYA K. Advancements in inductive wireless power transfer: A comprehensive review[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2025, 11(4): 75-101.
- [6] 杨奕, 李桂玉, 张路, 等. 基于混合拓扑的恒压恒流自切换输出无线电能传输系统[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(11): 270-285.
YANG Y, LI G Y, ZHANG L, et al. Constant voltage and constant current self-switching output wireless power transmission system based on hybrid topology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(11): 270-285.
- [7] XIE R H, CHEN Y, HUANG ZH J, et al. A series of dual-frequency hybrid topologies with vertical and horizontal misalignment tolerance performance in induc-

- tive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11 (4): 10203-10211.
- [8] 田子涵, 张雪莹, 王钰博, 等. 可实现接收端轻量化和抗短路的无线充电系统 LCC-S 补偿参数配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (18): 7223-7231.
- TIAN Z H, ZHANG X Y, WANG Y B, et al. Compensation parameter configuration method for wireless charging system with LCC-S topology to achieve a lightweight receiver and short-circuit tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7223-7231.
- [9] 耿宇宇, 陈华国, 王涛. 无线电能传输系统最优负载优化与最大效率跟踪控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 23-34.
- GENG Y Y, CHEN H G, WANG T. Optimization of optimal load and maximum efficiency tracking control method for wireless power transfer system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 23-34.
- [10] CHENG CH W, CHEN T, CUI X M, et al. Harmonic modeling and analysis of series-parallel compensated IPT systems with an inductive filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 13405-13414.
- [11] XIE R H, YU X P, LIU Q L, et al. A dual-frequency hybrid wireless charging system with anti-offset integrated receiver for mobile desktop charging [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2025, 71 (1): 571-578.
- [12] WANG CH F, WANG J Y. A Hybrid LCC-SP compensation network with adjustable impedance angle used for single-stage wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 3452-3463.
- [13] 刘焱晨, 寇志伟, 马蕴文, 等. 基于可变电容调控的抗偏移性输出无线电能传输系统[J]. 仪器仪表学报, 2026, 47(3): 24-35.
- LIU Y CH, KOU ZH W, MA Y W, et al. An output-regulated misalignment-tolerant wireless power transfer system based on switched-control capacitor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2026, 47(3): 24-35.
- [14] WANG Q, LI ZH, YANG B, et al. Inductive power transfer system with constant current-constant voltage charging tolerating misalignment based on multiobjective optimization for compensation topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(3): 4581-4591.
- [15] 谢文燕, 陈为, 陈庆彬, 等. 双耦合 SP-S 补偿紧凑型抗偏移 WPT 系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 714-725.
- XIE W Y, CHEN W, CHEN Q B, et al. Compact anti-offset WPT system with dual-coupled SP-S compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 714-725.
- [16] 程江洲, 罗应权, 鲍刚, 等. 输电线路 U 型三线圈 WPT 系统参数优化研究 [J]. 电子测量技术, 2025, 48(18): 20-28.
- CHENG J ZH, LUO Y Q, BAO G, et al. Research on parameter optimization of U-shaped three-coil WPT system for power transmission lines [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(18): 20-28.
- [17] LI ZH Q, ZHANG W J, GAN Z Y, et al. Study on composite structure of tian-font magnetic shielding and anti-series active coils for wireless power transfer system [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2025, 10(1): 97-109.
- [18] XIE R H, WU J, CHEN Y, et al. Wireless charging system based on dynamic phase-shift controlled dual-transmitting coils and its misalignment tolerance mechanism [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026, 73(6): 9534-9539.
- [19] AHMAD A, ALAM M S, MOHAMED A A S. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 934-945.
- [20] LI H J, LIU M, KONG L CH, et al. An independent dual-coil driving topology for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1378-1383.
- [21] EREL M Z, IMTIAZ T, ELSANABARY A, et al. Enabling quadruple-D compensation coil integration for efficient power transfer to receiver in wireless power transfer systems for EV charging [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2025, 13(4): 4278-4288.
- [22] CAI CH W, YANG J J, WU SH, et al. Landing position detection and array coil matching of multi-UAVs wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11 (5): 11054-11064.
- [23] WU J D, JIN ZH H, HAN X X, et al. Construction and optimization of power transfer route in array wireless power transfer network with multiple load nodes [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(3): 3842-3850.
- [24] LIU X, MA AN M, BIAN SH L, et al. Research on

- location identification and efficiency improvement strategies for array-based wireless charging systems with passive beacon coils[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2026, 41(1): 1447-1460.
- [25] 谢诗云, 黄杰, 彭春尧, 等. 计及高次谐波影响下无线电能传输系统辅助线圈式动态调谐方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(18): 5742-5758.
- XIE SH Y, HUANG J, PENG CH Y, et al. A dynamic tuning method with an auxiliary coil for wireless power transfer system considering the influence of higher harmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(18): 5742-5758.
- [26] 黎祎阳, 杨斌, 何双江, 等. 具有抗偏移恒压输出特性的复合式双频感应电能传输系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7232-7239.
- LI Y Y, YANG B, HE SH J, et al. Research on hybrid dual-frequency IPT system against misalignment with constant output voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7232-7239.
- [27] XIONG W J, YU Q H, LIU Z X, et al. A dual-frequency-detuning method for improving the coupling tolerance of wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 6923-6928.
- [28] 李振杰, 霍玉昇, 何家房, 等. 基于磁通可控电感的无线充电系统调谐方法[J]. 电力电子技术, 2024, 58(2): 55-58, 126.
- LI ZH J, HUO Y SH, HE J F, et al. Tuning method of wireless power charging system based on magnetic flux

controllable inductor[J]. Power Electronics, 2024, 58(2): 55-58, 126.

- [29] LI J, ZHU CH, XIE J X, et al. Design and implementation of high-misalignment tolerance WPT system for underwater vehicles based on a variable inductor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 11726-11737.

作者简介



谢荣焕, 2022 年于福州大学获得学士学位, 现为福州大学博士研究生, 主要研究方向为无线电能传输与和谐振变换器。

E-mail: 2500110011@fzu.edu.cn

Xie Ronghuan received his B. Sc. degree from Fuzhou University in 2022. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Fuzhou University. His main research interests include wireless power transfer and resonant converters.



张艺明 (通信作者), 2011 年于清华大学获得学士学位, 2016 年于清华大学获得博士学位。现为福州大学电气工程与自动化学院教授, 主要研究方向为无线电力传输和谐振变换器。

E-mail: zym@fzu.edu.cn

Zhang Yiming (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees from Tsinghua University in 2011 and 2016, respectively. He is currently a professor at the School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University. His main research interests include wireless power transfer and resonant converters.