

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514228

凹型扁平螺线管线圈抗偏移性能研究*

杨 奕, 林治浩, 张 路, 李海啸, 周钊屹

(重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘 要:针对无线电能传输(WPT)系统中传统扁平螺线管磁耦合机构在水平横向偏移条件下耦合系数显著下降、传输效率受限的问题,提出了一种面向工程应用的凹型扁平螺线管线圈磁耦合机构设计方法,以实现系统的强抗偏移性能。首先,基于基波分析法(FHA)对典型补偿拓扑进行电压增益特性研究,揭示电压增益 G 与互感之间的解析关系,阐明通过减小偏移对互感 M 的敏感性可提升系统抗偏移能力。其次,从绕组排布角度出发,深入分析线圈绕线方式、匝间距及端口凹陷角度对磁场分布均匀性及耦合系数保持率的作用机理,并提出相应的参数权衡与优化方法。随后,基于Ansys/Maxwell建立多构型磁耦合机构仿真模型,比较不同结构在水平偏移条件下的磁场分布与耦合系数变化规律。结果表明,采用非均匀排布、端口凹陷角度为 30° 的凹型结构在 $\pm 60\%$ 水平偏移下仍能保持较高的耦合系数和稳定的传输性能。为实现轻量化与集成化,接收端设计为柔性印刷电路板(FPC)线圈结构,满足中小功率便携式设备对小型化与高功率密度的要求。最后,搭建了一台100 W实验样机,实验结果显示:在接收端 X 轴 ± 15 mm、 Y 轴 ± 30 mm的偏移范围,系统输出电压波动控制在4%以内,最大传输效率达到87.3%。验证了所提磁耦合结构在偏移容差与系统性能提升方面的有效性及工程应用价值。

关键词:无线电能传输;扁平螺线管;抗偏移;高功率密度

中图分类号: TH162 TM724

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 470.40

Research on misalignment tolerance of concave planar spiral coils for wireless power transfer systems

Yang Yi, Lin Zhihao, Zhang Lu, Li Haixiao, Zhou Zhaoyi

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: To address the decline in coupling coefficient and transmission efficiency of traditional flat solenoidal magnetic coupling structures in wireless power transfer (WPT) systems under lateral misalignment, this article proposes an engineering-oriented concave flat solenoidal coil design method with enhanced misalignment tolerance. First, based on the first harmonic approximation (FHA), the voltage gain characteristics of typical compensation topologies are analyzed, and an analytical relationship between voltage gain G and mutual inductance M is established. It shows that reducing the sensitivity of M to lateral displacement can improve system tolerance to misalignment. Secondly, from the perspective of coil arrangement, the effects of winding distribution, turn spacing, and concave end angle on magnetic field uniformity and coupling coefficient retention are investigated, and trade-off and optimization methods are proposed. Subsequently, magnetic coupling structures are modeled in Ansys/Maxwell, and their magnetic field distributions and coupling variations under lateral misalignment are compared. The results shows that a non-uniform winding distribution with a 30° concave end angle can maintain a high coupling coefficient and stable transfer performance under $\pm 60\%$ lateral displacement. For lightweight and integrated design, the secondary side is implemented with a flexible printed circuit board (FPC) coil, meeting the miniaturization and high-power density requirements of medium- and small-scale portable devices. Finally, a 100 W prototype shows that within a misalignment range of ± 15 mm along the X -axis and ± 30 mm along the Y -axis, output voltage fluctuation is within 4%, and maximum transmission efficiency reaches 87.3%. These findings validate the effectiveness and engineering applicability of the proposed magnetic coupling structure in enhancing lateral misalignment tolerance and system performance.

Keywords: wireless power transfer; planar solenoid; misalignment tolerance; high power density

收稿日期: 2025-07-04 Received Date: 2025-07-04

* 基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2024NSCQ-MSX0382)、重庆市教育委员科学技术研究项目(KJQN202201103)资助

0 引 言

无线电能传输技术(wireless power transfer, WPT)以其非接触式、高便利性和环境适应性的特点,正在成为现代电子设备和工业应用的重要技术。该技术方案在新能源交通工具、移动智能终端以及中小型医用电子装置等领域的电能补给系统中具有重要的应用价值^[1-5]。此外,WPT 在这些应用中对精密度测量的需求日益增加,例如精确监控能量传输效率和设备状态^[6-7]。然而,现实中的使用场景收发端之间通常存在空间偏移问题,如水平错位、角度偏差或工作距离的变化,这对系统的效率、稳定性和精密度测量提出了严峻挑战^[8-10]。因而,为了提高 WPT 实际应用中的抗偏移性能和测量精度,现有研究从控制策略、补偿拓扑、磁耦合机构 3 个方面进行了相应研究^[11-13]。

在控制策略方面,现有研究通过相角控制^[14]或者调节频率^[15]、逆变器占空比^[16]实现磁耦合机构偏移时功率输出、负载电压的稳定。相角控制需精确相位检测,增加系统复杂度;频率调节易受负载/环境影响导致频率偏移;占空比调节响应滞后,影响能量传输的效率。因此,单一控制策略方式不能根本上提升系统抗偏移性能。

在补偿拓扑方面,现有研究提出了 S-S/LCC-S^[17]、S/SP^[18]、LCC/LCC^[19]、LCC/S^[20]等拓扑结构,S-S/LCC-S 组成的混合补偿拓扑可以在接收线圈 XY 平面偏移时实现系统稳定的电压输出,但其磁耦合机构复杂且电容参数存在多解性;S/SP 结构对于负载变化具有良好的适应性,可以在接收侧小幅度偏移条件下维持相对稳定的输出;LCC/LCC 拓扑在接收端长距离、大幅度偏移条件下能够保持较好的性能和效率;LCC/S 拓扑与 SP/S、S/SP 相比,其具有更宽的工作频带,通过结合 LCC 的高效特性和串联结构,也能更好的适应发射端和接收端之间的偏移,即使在偏移或负载变化的情况下,系统也能保持相对稳定的输出功率。在拓扑复杂性方面,LCC/S 在维持 LCC/LCC 优点的同时,降低了系统中谐振元件的个数,系统电压增益 G 更可控。因此,通过优化拓扑结构设计,可在系统参数发生偏移时有效抑制输出电压波动,增强系统整体的抗偏移性能。

在磁耦合机构设计方面,现有研究通过构造均匀磁场来提升磁耦合机构抗偏移性能,先后提出了螺旋管(flat spiral pad, FSP)线圈^[21]、双 D 型正交(double-d quadrature, DDQ)线圈^[22]、三极性(triple polar, TP)线圈^[23]、网格型螺旋管(grid flat spiral pad, GFSP)线圈^[24]、立方体(cubic coil, CC)线圈^[25]等耦合机构。文献[21]研究表明,相较于平面方形与圆形耦合机构,螺旋管拓扑在水平纵向抗偏移特性方面展现出显著优势。基于该结构衍生的网格型螺旋管线圈及组合型螺旋管线圈

虽继承此特性,但其水平横向抗偏移能力仍亟需提升。值得注意的是,现有方案中发射端与接收端均采用全对称拓扑架构,具体表现为磁芯几何尺寸、绕组间距及匝数的高度一致性。因此,在不同的应用场景下,这样的设计不单单会增加系统运行成本,同时也不满足中小型设备无线电能传输系统小型化、轻量化这一要求。

基于以上研究现状,现有研究存在 3 点不足之处:1)控制方法依赖输出反馈进行调整,难以实时匹配耦合变化,系统输出稳定性下降明显;2)多数补偿拓扑基于固定互感设计,实际偏移导致失谐现象严重,谐振点偏移、电压波动问题突出,系统损耗显著;3)现有磁耦合机构多对某一方向偏移具有良好抗偏移效果,但难以同时兼顾 X 、 Y 轴偏移,并且增强磁通覆盖面积所需结构体积通常较大,限制了其应用场景。为解决上述不足,现提出一种凹型扁平螺旋管线圈无线电能传输系统。首先,对不同补偿拓扑的电压增益进行分析,分析互感 M 对电压增益的影响;然后,通过 Ansys Maxwell 有限元仿真优化设计发射端螺旋管线圈的绕线方式、铁氧体端口角度来达到使接收端发生偏移时互感 M 变化范围较小的目的,同时结合全桥逆变器的电压增益特性,使得系统发生偏移时输出电压的变化范围较小,接收端也无需额外的 DC-DC 变换器。接收侧螺旋管线圈采用柔性印刷电路板(flexible printed circuit, FPC)来提高系统功率密度,减小了系统整体体积;最后搭建一台 100 W 实验样机,用于验证磁耦合机构的抗偏移特性及电路系统的工作性能,以证实所提方案的可行性。

1 WPT 拓扑选型与耦合机构设计

1.1 电压增益对比分析

中小型无线电能传输系统中,副边整流后的输出电压须保持在特定范围内,以满足后级电源管理模块或负载设备的电压输入要求。若输出电压波动过大,可能导致系统供电不稳定,甚至损坏负载电路。因此,在电路拓扑选型中需确保系统在不同偏移距离及负载变化条件下整流侧输出电压始终处于合理范围内。该过程中,互感 M 与电压增益 G 间的可控性成为了选型的关键所在。

在忽略线路阻抗前提下,基于基波近似法(fundamental harmonic approximation, FHA)对前文所提 4 种补偿拓扑在谐振状态下的电压增益进行建模分析,等效模型如图 1 所示。

文献[17]所提基于 S-S/LCC-S 混合补偿拓扑的电压增益如式(1)所示。

$$G_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{R_L}{\sqrt{\frac{R_L^2}{\omega^4 C_F^2 M_Q^2} + \frac{\pi^4 \omega^2 M_T^2}{16}}} \quad (1)$$

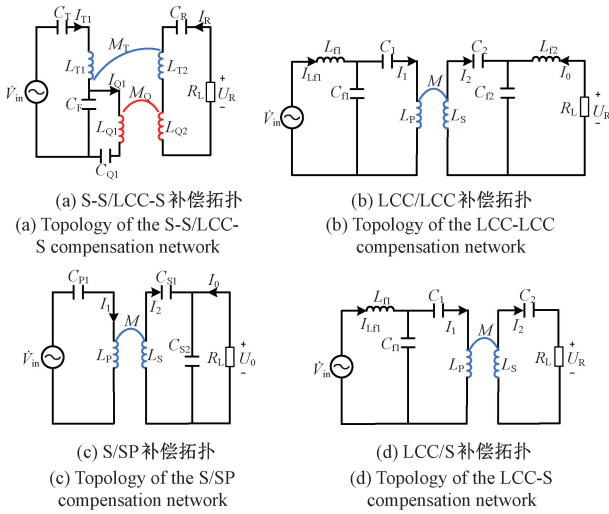


图1 补偿拓扑等效模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of the compensation topology

式中: M_T 为 S-S 侧线圈互感; M_Q 为 LCC-S 侧线圈互感; C_F 为 LCC-S 侧并联谐振补偿电容; R_L 为整流桥的等效输入阻抗。式(1)中参数较多,呈非线性耦合关系,随着 M_T 、 M_Q 的改变,其整体电压增益波动幅度较大。如此电压增益特性会导致系统难以在多变工况中维持稳定输出,在实际中易受器件容差、互感偏差等因素影响,进而影响系统性能预测准确性。

文献[18]所提 S/SP 补偿拓扑的电压增益如式(2)所示。

$$G_2 = \frac{2R_L M_0 M}{M^2(R_L - j\omega M) + M_0^2(R_L + j\omega M)} \quad (2)$$

式中: R_L 为整流桥的等效输入阻抗; M 为系统正对时的互感; M_0 为系统偏移后的互感。随着 M_0 的改变,增益幅值与相位对频率变化高度敏感,易因频率偏移引发增益波动。

文献[19]所提 LCC/LCC 补偿拓扑的电压增益如式(3)所示。

$$G_3 = \frac{C_{j1}}{\omega^2 M^2 C_{j2} C_{j2}} \quad (3)$$

式中: M 为系统接、发线圈之间的互感; C_{j1} 、 C_{j2} 为发射端并联谐振电容; C_{j2} 为接收端并联谐振电容。其增益与频率 ω^2 成反比,易受互感 M 及多个补偿电容的耦合影响,频率偏移也会显著改变增益幅值,导致动态工况下输出电压波动,同时,电容参数的容差或漂移(如温度、老化)会进一步加剧增益不确定性,增加系统设计复杂度。

文献[20]所提 LCC/S 补偿拓扑的电压增益如式(4)所示。

$$G_4 = \frac{M}{L_{j1}} \quad (4)$$

式中: M 为系统接、发线圈之间的互感; L_{j1} 为发射端串联谐振电感。其电压增益为频率无关的实数表达式,仅由固定参数互感 M 与电感 L_{j1} 线性决定。该电压增益消除了频率敏感性及复数增益的相位不确定性,可有效规避频率偏移引发的增益波动及谐振点附近的相位裕度不足问题,从而显著提升动态工况下的稳定性。在 L_{j1} 感值确定,互感 M 波动较小的状态下,其电压增益更加可控。

综上所述,LCC/S 拓扑在保持系统电压输出稳定上具有显著优势,其电压增益几乎不受频率偏移、虚部项或多参数耦合的影响,能够在动态工况下有效抑制由频率波动或参数容差引起的增益波动和失稳风险。凭借其低敏感性、确定性及单参数依赖特性,该拓扑不仅简化了系统设计复杂度,还显著提升了电压输出的鲁棒性与稳定性。

WPT 系统电路拓扑图如图 2 所示,由全桥逆变电路、LCC/S 补偿电路、松耦合变压器、整流滤波电路 4 个部分组成。 U_{DC} 为系统注入直流电压,通过全桥逆变电路 GaN 开关管 $S_1 \sim S_4$ 转为等效高频交流电压 U_{AB} ,再通过 LCC-S 补偿网络将激励电流注入到发射线圈 L_1 中。发射线圈 L_1 所传输的能量通过磁场耦合传递到接收端 L_2 中,接收线圈将磁场能量通过补偿结构转化为交流电压 U_{ab} ,经整流桥输出滤波后合成直流电压 U_0 ,为负载 R_L 供能。

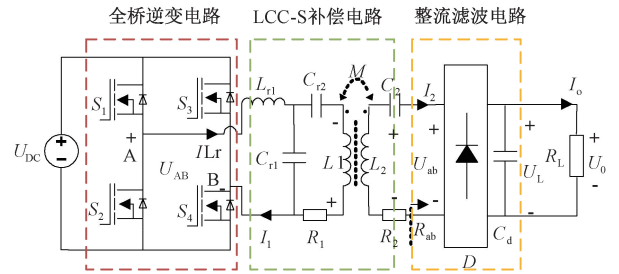


图2 WPT 系统电路拓扑图

Fig. 2 WPT system circuit topology

1.2 耦合机构设计

图 3 所示的传统螺线管线圈由于磁芯横截面具有双磁回路,磁场分布相对均匀,在接收端向 X 轴侧偏移情况下耦合系数衰减较缓,但向 Y 轴侧偏移时耦合系数急剧下降,同时为增强磁通聚集效果,铁氧体表面常需采用多匝利兹线等环绕制,不仅增加系统重量和成本,还在偏移情况下引起能量耦合效率下降,难以满足中小功率无线电能传输系统对高功率密度和轻量化的需求。

螺线管线圈对比平面圆形、平面方形等线圈来讲,其优势在于能够充分捕获磁极产生的磁通量,这种设计能够更高效地利用磁场。本文以螺线管线圈为基础,设计的磁耦合机构如图 4(a) 所示,接收端拆分图如图 4(b) 所示。

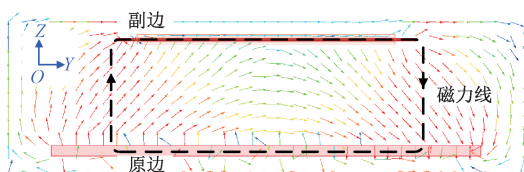


图 3 传统扁平螺线管线圈平面磁场分布

Fig. 3 Planar magnetic field distribution of a conventional flat solenoidal coil

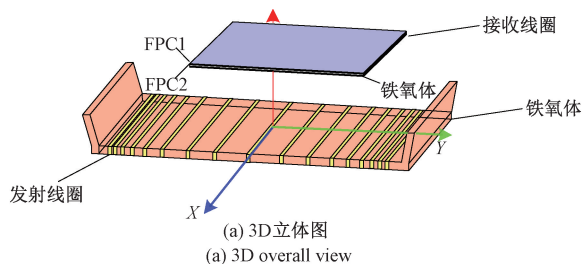
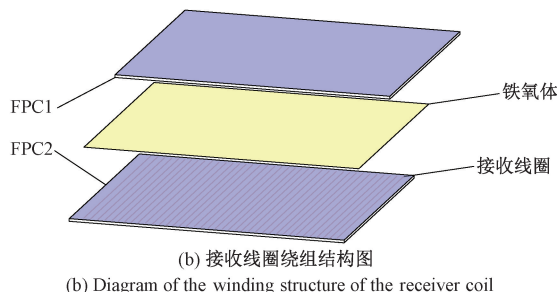
(a) 3D 立体图
(a) 3D overall view(b) 接收线圈绕组结构图
(b) Diagram of the winding structure of the receiver coil

图 4 凹型扁平螺线管磁耦合机构

Fig. 4 Concave flat solenoidal coil magnetic coupling mechanism

WPT 系统发射端线圈由利兹线以非等距方式绕制在铁氧体表面,接收端线圈由 2 层柔性 FPC 铜导线和磁芯薄片构成。发射端铁氧体尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$,接收端磁芯薄片尺寸为 $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,二者之间的耦合气隙设定为 10 mm 。

图 5 展示了凹型扁平螺线管线圈绕制方案,发射端绕组由利兹线按非等距排列方式进行松散缠绕,接收端绕组沿 Y 轴等距均匀排列。

2 磁耦合机构参数设定及抗偏移性能分析

2.1 耦合机构设计

高功率密度 WPT 系统磁耦合机构设计中,耦合系数由磁芯材料、线圈匝数及铁氧体尺寸决定。接收端受限于应用场景、尺寸及成本约束,需在有限空间内实现高密度集成,故体积通常小于发射端。该设计既减少磁芯用量,又满足系统轻量化需求。

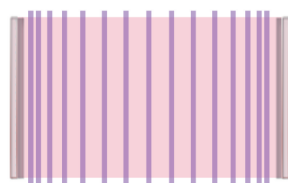
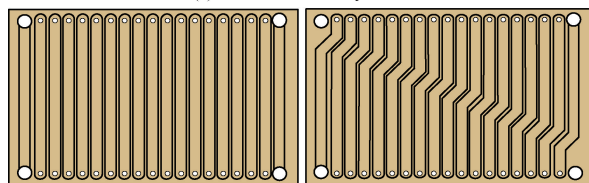
(a) 发射端线圈排布图
(a) Transmitter coil layout(b) 接收端 FPC 线圈排布正、反面图
(b) Front and back views of the receiver-side FPC coil arrangement

图 5 线圈绕制方案

Fig. 5 Coil winding configuration

为了更好的对磁耦合机构抗偏移性能进行量化比较,磁耦合机构抗偏移性能可以用耦合系数保持率 (coupling coefficient retaining ratio, CCRR)^[10] 进行量化,定义如式(5)所示。

$$CCRR = \frac{k_m}{k_0} \quad (5)$$

式中: k_m 和 k_0 分别为磁耦合机构在偏移工况及正对状态下的耦合系数。

如图 6 所示,通过 Ansys Maxwell 有限元仿真软件得到关于发射端线圈匝数 N 对耦合系数 k 影响规律。当接收线圈处于对准、偏移、偏转状态时无论 N 如何变化,对处于任一状态时的接收线圈 k 值均无影响,综合考虑选择发射线圈匝数为 15 匝。

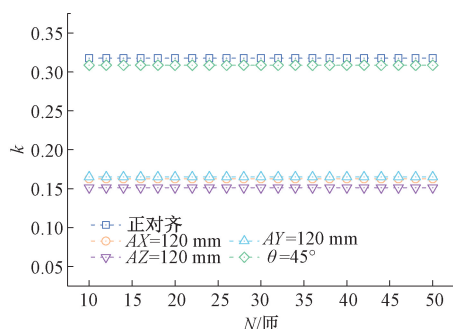
图 6 N 对 k 影响规律Fig. 6 Trend of k with respect to N

图 7 展示了铁氧体厚度 F 对于耦合系数 k 的影响规律,可见 k 值随着 F 的增加而快速上升,最终趋于平缓,考虑到接收端的小型化、轻薄性,最终选择发射端铁氧体厚度 F 为 2.5 mm ,接收端磁芯薄片厚度 F 为 1 mm 。

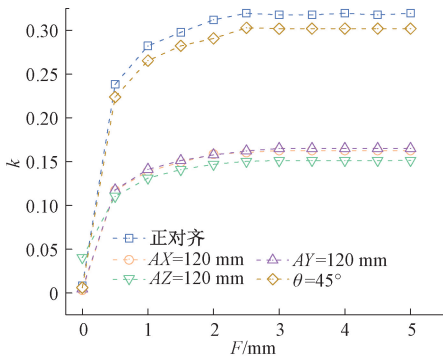


图 7 F 对 k 影响规律

Fig. 7 Trend of k with respect to F

当发射线圈匝数均为 15 匝时,铁氧体绕线空间排布 W 呈等比、等差、均匀状态下对 CCRR 的规律如图 8 所示,可见当发射线圈以等差数列排布时系统的 CCRR 值波动最小,即在该排布状态下系统 Y 轴侧抗偏移能力最强,综合考虑后选择接收端线圈以等差数列方式进行排布。

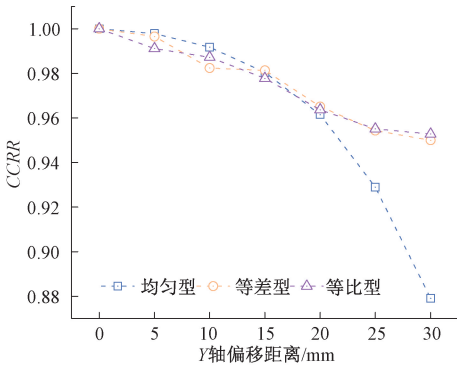


图 8 W 对 CCRR 影响规律

Fig. 8 Trend of CCRR with respect to W

综合以上仿真结果,凹型扁平螺线管线圈磁耦合机构的整体尺寸参数设定如表 1 所示。

表 1 凹型扁平螺线管磁耦合机构参数取值

Table 1 Parameter selection for concave flat solenoid magnetic coupling structures

参数	取值
发射端磁芯尺寸/mm	100×50×2.5
接收端磁芯尺寸/mm	50×25×1
气隙距离/mm	10
绕组匝数/匝	15

2.2 发射端绕组匝数设定

为提升系统在偏移条件下的鲁棒性,现选择对发射端线圈排布进行优化,采用等差间距缠绕方式,通过

调控线圈分布密度以实现发射面磁场分布的均匀化,从而扩展有效磁通作用区域,增强偏移状态下的磁耦合性能。

设发射端线圈为一维展平线圈,总长度为 L ,线圈匝数为 N ,利兹线宽度为 ω ,等差间距公差为 d 。第 n 匝的中心位置可表示为式(6)。

$$x_n = x_0 + (n - 1) \cdot \left[\omega + (n - 1) \cdot \frac{d}{2} \right],$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

式中:线圈位置从结构中心向外呈非均匀扩展趋势,形成中密疏边或中疏边密结构,具体取决于中心点及其排列方向。

系统总耦合系数 k 可以等效为所有发射匝对接收匝之间互感 M_{ij} 的加权平均,如式(7)所示。

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M M_{ij}(x_i, y_j)}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (7)$$

式中: M_{ij} 是第 i 匝与第 j 匝接收线圈之间的互感; x_i, y_j 分别是发射、接收线圈的实际空间坐标; L_p, L_s 为发射、接收端的自感量。当接收端偏移后, x_r 覆盖范围如式(8)所示。

$$x_r \in [x_1, x_n] \quad (8)$$

若接收线圈仍能覆盖多个 x_i 位置,则系统在偏移状态下仍能维持较高的有效互感,即系统抗偏移性能良好。

将发射线圈视为线性阵列排布,耦合系数在 X/Y 方向偏移时主要依赖磁通密度沿偏移方向的分布梯度。引入磁通密度分布函数 $\Phi(x)$,其在接收端轨迹上有效耦合磁通的投影积分如式(9)所示。

$$\Phi(x_{\text{off}}) = \int_{x_{\text{off}} - \Delta}^{x_{\text{off}} + \Delta} \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n) \cdot B_n(x) dx \quad (9)$$

式中: x_n 表示第 n 匝位置; $B_n(x)$ 为第 n 匝在位置 x 处的磁场强度; x_{off} 为偏移量。

其中,磁场分布在发射面上形成非均匀磁通密度,导致偏移时各线圈对接收端耦合的响应不一致。根据数值仿真可得:存在一个最优公差 d_{opt} ,使得在给定偏移范围 $[-x_m, x_m]$,平均耦合系数下降最小,最优公差表达式如式(10)所示。

$$d_{\text{opt}} = \operatorname{argmin} \left(\frac{1}{2x_m} \int_{-x_m}^{x_m} |k(x_{\text{off}}, d) - k(0, d)| dx_{\text{off}} \right) \quad (10)$$

因此抗偏移函数可定义为式(11)所示。

$$\eta(d_{\text{opt}}) = \min_{x_{\text{off}} \in [-x_m, x_m]} \frac{k(x_{\text{off}}, d)}{k(0, d)} \quad (11)$$

即可以找到最优的一个 d_{opt} 值,使得 $\eta(d_{\text{opt}})$ 最大。经 Ansys Maxwell 有限元仿真参数扫描后,得出的最优 d_{opt} 值近似为 0.57 mm。

2.3 凹型端口角度对系统抗偏移性能分析

在凹型扁平螺线管线圈作为 WPT 系统发射端时,当接收端在 Y 轴发生水平偏移,凹型磁耦合机构端口角度对耦合系数 k 和 CCRR 有重要影响。耦合系数 k 可表示为式 (12) 所示。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (12)$$

式中: M 为发射端与接收端之间的互感; L_1 和 L_2 是发射端与接收端之间的自感,将 M 展开为式 (13) 所示。

$$M = \mu_0 \mu_r \frac{N_1 N_2}{d} A \cos(\theta) \quad (13)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_r 为铁氧体材料的相对磁导率; N_1 、 N_2 为发射端和接收端线圈的匝数; d 为发射端、接收端线圈之间的距离; A 为有效磁通面积; $\cos(\theta)$ 为磁通方向与接收线圈法线方向的夹角余弦值。改变端口的倾斜角度等效于调整磁通方向与接收线圈法线之间的夹角端口角度 θ ,从而直接影响互感 M 和耦合系数 k 。

在保证端口斜边长度、耦合距离 d 以及线圈参数等其他条件不变的前提下,端口角度增大,即其与水平段趋近于垂直时,磁通方向更接近接收线圈的法线方向, $\cos(\theta)$ 趋近于 1,此时互感 M 增加,耦合系数 k 增大;端口角度减小时,与水平段接近平行状态,此时磁通方向与接收线圈法线方向的夹角 θ 增大, $\cos(\theta)$ 减小,互感 M 和耦合系数 k 逐渐减小。由 Ansys Maxwell 有限元仿真得出的仿真结果如图 9 所示。

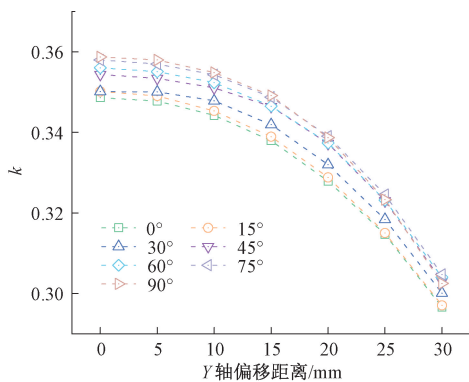


图 9 凹型端口角度对 k 影响规律变化

Fig. 9 Variation of the effect of concave port angle on k

接收端在水平端发生偏移时,凹型端口角度会改变磁通方向,会对 CCRR 带来影响。当接收端偏移时,其感受到的有效磁通密度 B_{eff} 如式 (14) 所示。

$$B_{\text{eff}} = B \cos(\theta) \quad (14)$$

磁通密度分布的均匀化可用标准差量化表示为式 (15) 所示。

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{1}{\Delta x} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} [B(x) - \bar{B}]^2 dx} \quad (15)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} B(x) dx \quad (16)$$

式中: B 为发射端产生的磁通密度; \bar{B} 为平均磁通密度; σ_B 为磁通密度分布均匀差量化。较小的 σ_B 表示磁通密度更均匀分布,使接收端偏移过程中互感 M 整体变化范围更小,进而提升系统整体抗偏移性能。当凹型端口角度增大,与水平段接近垂直状态时, $\theta = 90^\circ$,磁通垂直于接收线圈平面,中心区域 B_{eff} 最大,边缘衰减快,此时系统对水平偏移更加敏感,抗偏移性能降低;当凹型端口角度减小,与水平段接近平行状态时, $\theta < 90^\circ$,磁通方向倾斜,覆盖范围更广,边缘 B_{eff} 衰减缓慢,尽管其耦合系数 k 值会有所降低,但其互感 M 整体变化范围更小,系统整体抗偏移性能会有所提升。Ansys Maxwell 有限元仿真结果如图 10 所示。

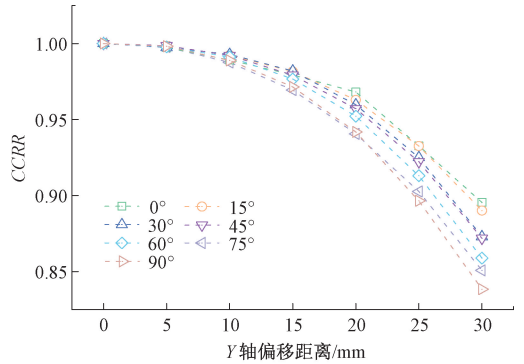


图 10 凹型端口角度对 CCRR 影响规律变化

Fig. 10 Variation of the effect of concave port angle on CCRR

综上所述,在实际设计中,为了兼顾耦合效率和抗偏移性能,端口角度 θ 会根据 WPT 系统的使用场景来设计。当需要高耦合效率的场景,如接收线圈位置固定且无偏移时,凹型端口角度取 $70^\circ \sim 90^\circ$ 时其耦合效率较高;当接收线圈存在一定偏移时,凹型端口角度取 $30^\circ \sim 60^\circ$ 时其能在保持高耦合效率的同时提高抗偏移性能;当接收线圈位置易变或偏移较大时,凹型端口角度取 $10^\circ \sim 30^\circ$ 时其抗偏移性能较强。

鉴于本文所设计的 WPT 系统中发射端与接收端尺寸均较小,且接收端偏移范围在 $-60\% \sim 60\%$,因此选用端口角度为 30° 的凹型磁耦合机构。

2.4 凹型磁耦合机构抗偏移性能分析

对于不同发射端,其磁阻的大小会影响磁通密度 B 的分布,也对系统抗偏移性能有重要影响。磁通密度 B 可表示为式 (17) 所示, R_m 展开为式 (18) 所示。

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{NI}{R_m A} = \frac{NI \mu_0 \mu_r}{l} \quad (17)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (18)$$

式中: N 为发射端线圈匝数; I 为激励电流, R_m 为磁路总磁阻; l 为磁路有效长度; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为铁氧体材料的相对磁导率; A 为有效磁通面积。式(18)表明磁通密度 B 与磁路长度 l 成反比。凹型磁芯通过改变端口角度 θ 来缩短磁路长度 l , 减小磁阻, 同时延伸磁力线的范围从而改善磁通密度 B 的分布情况, 进而增强系统的抗偏移性能。其中传统型磁路有效长度 l_1 可表示为式(19)所示, 凹型磁芯型磁路有效程度 l_2 可表示为式(20)所示。

$$l_1 \approx 2(L + W) + 2d \quad (19)$$

$$l_2 \approx 2h + 2h \sec(\theta) + 2d \quad (20)$$

式中: L, W 为发射端磁芯尺寸; h 为端口凹陷高度; d 为空气隙。传统型磁芯磁通从发射线圈出发, 沿磁芯顶部传播, 穿过空气隙到接收线圈, 再沿磁芯侧面和底部闭合, 磁路长度近似为磁芯周长加上空气隙; 凹型磁芯的端口凹陷使磁通集中在凹陷区域, 磁路路径主要包括凹陷高度和空气隙, 端口角度 θ 会影响磁通路径的几何投影。

基于 Ansys Maxwell 有限元仿真平台, 在接收端结构固定的条件下, 对比分析不同发射端磁耦合机构的性能。为保障仿真有效性, 所有模型均保持磁芯材料、绕组匝数、利兹线规格、气隙距离及接收线圈参数一致, 同时以绕线方式、磁芯形状、结构端偏移角度作为变量, 搭建了多组磁耦合机构仿真模型, 其平面磁通密度分布情况如图 11 所示。

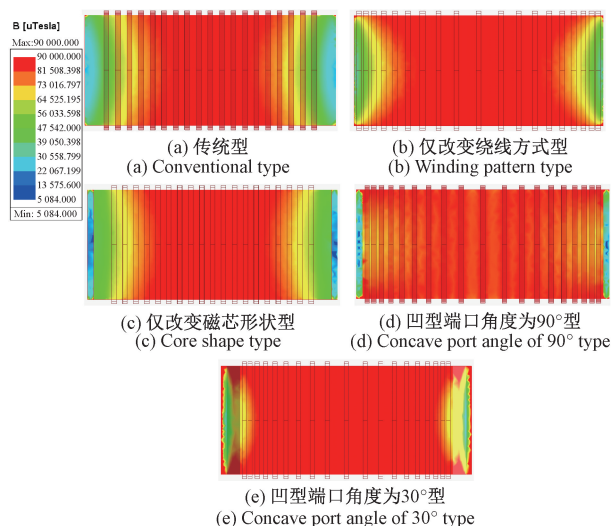


图 11 多构型发射端在 XY 平面内的磁通密度分布特性

Fig. 11 XY-plane B -field distribution of multi-topology transmitters

图 11(a) 传统型螺线管中采用平面型结构及均匀绕线分布, 此时磁通路径 l 涵盖磁芯周长和空气隙的总路

径, 同时由于磁芯材料的相对磁导率 μ_r 较高, 中心区域的有效磁通面积 A 接近接收线圈的物理面积, 致使在中心区域产生较高的磁通密度。然而, 在偏离中心区域的部分, 磁通扩散在空气中, 相对磁导率 μ_r 降低, l 增加, 致使磁阻 R_m 显著升高, 磁通密度迅速下降, 磁通密度分布均匀化 σ_B 变大, 导致其抗偏移性能较差。

对比图 11(b) 和(a), 绕线方式变为等差数列时, 磁通密度空间均匀性有所改善, 绕线调整使得中心区域的 R_m 略有降低, 且中疏边密的排布使得边缘 R_m 的急剧升高被部分缓解, 磁通密度分布均匀化 σ_B 较传统型有所降低, 抗偏移性能有较小提升。

图 11(c) 中, 磁芯形状变为凹型结构, 此结构缩短了磁通路径 l , 磁阻 R_m 降低, 使中心区域的磁通密度有所提升, 但此结构有效磁通面积 A 主要集中于中心位置, 边缘磁通扩散到空气中时磁阻 R_m 显著升高, 磁通密度迅速下降, 致 σ_B 仍然较大, 磁通密度分布均匀性仍不足。

对比图 11(d) 和(c), 绕线方式变为等差数列时, 凹型结构磁阻分布的变化和绕线方式进一步降低了中心磁阻 R_m , 这种高中心磁阻梯度解释了分布的窄化, 磁通密度分布均匀性增加, 抗偏移性能有所提升。

图 11(e) 中, 耦合机构端口角度变为 30° , 中心磁阻 R_m 因短磁路和高 μ_r 保持较低水平。倾斜端口使磁通方向偏离垂直, 向外扩散, 有效磁通面积 A 分布宽度增加, 边缘 R_m 升高幅度减小。同时等差绕制进一步优化了 B 的空间均匀性, 降低了 R_m 的局部梯度, 这种低中心磁阻、平缓边缘磁阻的分布模式使 σ_B 较上述 4 种结构有较大降低, 提升了磁通密度分布均匀性, 显著提升了抗偏移性能。

在 Ansys Maxwell 有限元仿真软件 YZ 平面对凹型端口角度为 30° 的扁平螺线管磁耦合机构磁感应强度进行仿真分析, 图 12 揭示了正对工况下磁芯区域呈横向对称分布特性, 其中心区域磁通较密集, 耦合效率较高。

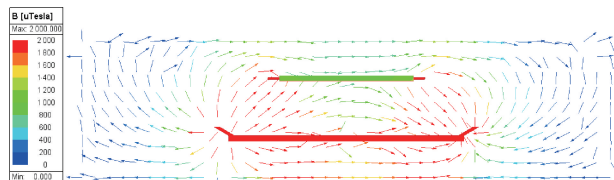


图 12 耦合机构正对平面磁场分布

Fig. 12 Magnetic field distribution of the coupling structure in the frontal plane

图 13 为接收线圈在 Y 轴正方向偏移 30 mm 时的磁感应强度分布图, 接收绕组偏移工况下磁链衰减表明磁通显著向 Y 轴负方向聚集。因磁通路径有效截面积较平面基准拓扑(方形/圆形)缩减, 磁阻增量趋缓, 致耦合系

数衰减梯度同步减小,这一性质在凹型端口为 30°的耦合机构抗偏移性能上得到了更好的延续。

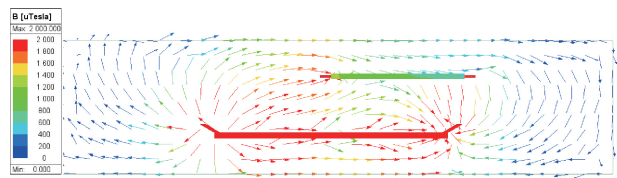


图 13 Y 轴正方向偏移 30 mm 平面磁场分布
Fig. 13 Magnetic field distribution in the plane with a 30 mm positive Y-axis offset

图 14 为接收线圈在 X 轴正方向上偏移 15 mm 时的磁感应强度分布图,接收线圈依然能够有效的接收到发射线圈的磁场且磁感应强度基本保持不变,说明凹型端口为 30°的扁平螺旋管磁耦合机构延续了扁平螺旋管绕组在 X 轴向的抗偏移特性。

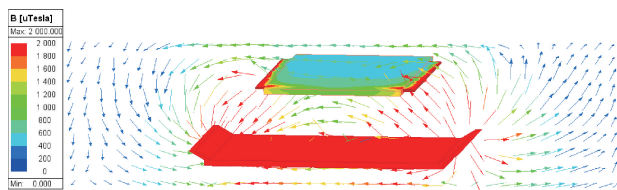


图 14 X 轴正方向偏移 15 mm 平面磁场分布
Fig. 14 Magnetic field distribution on the plane with a 15 mm offset along the positive X-axis

图 15 揭示了 5 种耦合机构在 Y 轴偏移工况下的 CCRR 变化规律,当 Y 轴向偏移达 30 mm 时,CCRR 降幅如表 2 所示。

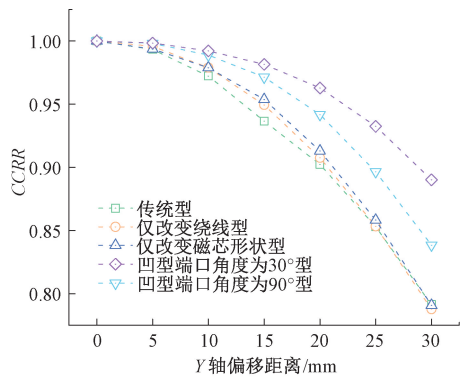


图 15 不同耦合机构沿 Y 轴正方向偏移 30 mm CCRR 变化规律
Fig. 15 Variation of CCRR for different coupling structures with a 30 mm offset along the positive Y-axis

图 16 揭示了 5 种耦合机构在 X 轴偏移工况下的 CCRR 变化规律,当 X 轴向偏移达 15 mm 时,CCRR 降幅如表 3 所示。

表 2 磁耦合机构 CCRR 降幅量
Table 2 CCRR reduction of magnetic coupling mechanisms

拓扑类型	CCRR	降幅量百分比/%
传统型	0.78	22
仅改变绕线型	0.79	21
仅改变磁芯形状型	0.79	21
凹型端口角度为 90°型	0.84	16
凹型端口角度为 30°型	0.90	10

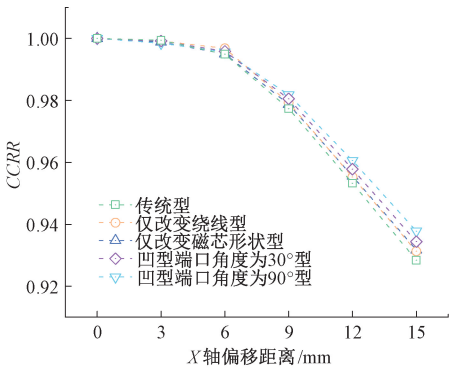


图 16 不同耦合机构沿 X 轴正方向偏移 15 mm CCRR 变化规律
Fig. 16 Variation of CCRR for different coupling structures with a 15 mm offset along the positive X-axis

表 3 磁耦合机构 CCRR 降幅量
Table 3 CCRR reduction of magnetic coupling mechanisms

拓扑类型	CCRR	降幅量百分比/%
传统型	0.92	8
仅改变绕线型	0.93	7
仅改变磁芯形状型	0.93	7
凹型端口角度为 90°型	0.94	6
凹型端口角度为 30°型	0.93	7

整体看来,上述几类耦合机构在 X 轴向上均有较为优异的抗偏移能力。

综上所述:凹型端口角度为 30°型磁耦合机构对比其他 4 种磁耦合机构,其既具备传统扁平螺旋管在 X 轴上优异的抗偏移性能,也在 Y 轴上表现出更为突出的抗偏移能力。

3 实验验证

3.1 实验样机搭建

为验证该小型化、轻薄型无线电能传输(WPT)系统

的抗偏移能力,构建了如图 17 所示的实验测试平台。该平台包含直流电源、辅助电源、示波器、电压与电流探头以及直流电子负载。待测样机主要由全桥逆变器、补偿网络及整流桥构成。此外,基于凹型扁平螺线管结构,分别设计了传统型、凹型 90°型和凹型 30°型 3 种耦合机构,其具体结构如图 18 所示。系统基本参数详见表 4,各磁耦合机构的关键参数则分别列于表 5~7。

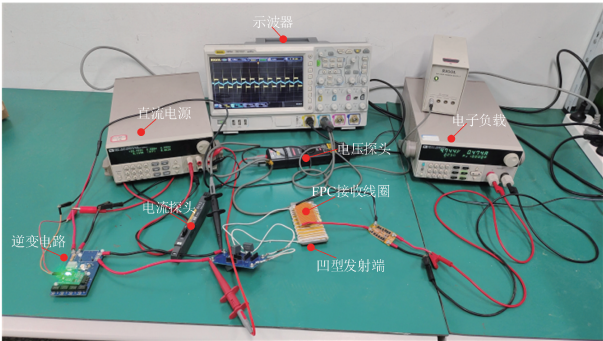


图 17 WPT 系统实验平台

Fig. 17 WPT system experimental platform

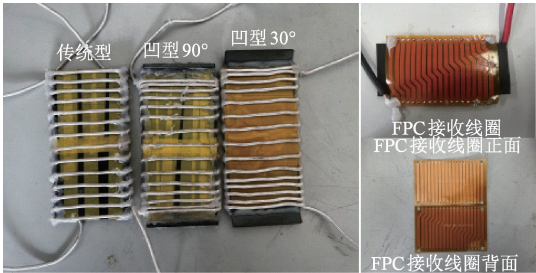


图 18 磁耦合机构及接收线圈

Fig. 18 Magnetic coupling structure and receiving coil

表 4 系统基本参数

Table 4 Basic system parameters

参数	数值(型号)
输入电压 U_{dc}/V	100
开关频率/kHz	200
原边控制器 MCU	STM32G030F6P6
功率开关管 $S_1 \sim S_4$	GS66508T
整流二极管 $VD_1 \sim VD_4$	SB1045L
负载 R_0/Ω	4

3.2 实验结果及分析

采用传统型、凹型端口为 90°及 30°型耦合机构的系统效率曲线对比结果如图 19 所示。

结果表明,当接收端处于正对位置时,传统型扁平螺线管对应的系统效率为 91%,而当接收端沿 Y 轴方向

表 5 传统型耦合机构参数

Table 5 Parameters of conventional coupling mechanism

参数	数值(型号)
发射端补偿电感 $L_{r1}/\mu H$	10.0
发射端并联补偿电容 C_{r1}/nF	65.3
发射端串联补偿电容 C_{r2}/nF	44.4
发射线圈自感 $L_1/\mu H$	14.3
线圈互感 $M/\mu H$	2.4
接收端补偿电容 C_2/nF	43.5
接收线圈自感 $L_2/\mu H$	13.7
发射线圈内阻 $R_1/m\Omega$	89.2
接收线圈内阻 $R_2/m\Omega$	16.0

表 6 凹型端口为 90°型耦合机构参数

Table 6 Parameters of the concave-type coupling structure with a 90° port angle

参数	数值(型号)
发射端补偿电感 L_{r1}/μ	10.0
发射端并联补偿电容 C_{r1}/nF	63.8
发射端串联补偿电容 C_{r2}/nF	46.7
发射线圈自感 $L_1/\mu H$	23.1
线圈互感 $M/\mu H$	3.2
接收端补偿电容 C_2/nF	43.5
接收线圈自感 $L_2/\mu H$	13.7
发射线圈内阻 $R_1/m\Omega$	25.0
接收线圈内阻 $R_2/m\Omega$	16.5

表 7 凹型端口为 30°型耦合机构参

Table 7 Parameters of the concave-type coupling structure with a 30° port angle

参数	数值(型号)
发射端补偿电感 $L_{r1}/\mu H$	10.0
发射端并联补偿电容 C_{r1}/nF	63.3
发射端串联补偿电容 C_{r2}/nF	36.4
发射线圈自感 $L_1/\mu H$	27.3
线圈互感 $M/\mu H$	3.5
接收端补偿电容 C_2/nF	45.3
接收线圈自感 $L_2/\mu H$	13.9
发射线圈内阻 $R_1/m\Omega$	26.3
接收线圈内阻 $R_2/m\Omega$	21.4

偏移 30 mm 后,系统效率显著下降至 56.3%,此时系统传能效率相较于正对时大幅降低,降低的原因是接收端沿 Y 轴方向大范围移动时传统扁平螺线管受发射、接收线圈错位影响,磁通量急剧减少导致耦合系数急剧降低,

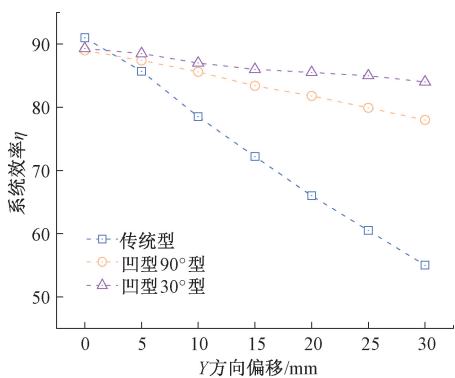


图 19 不同耦合机构 Y 方向系统效率对比

Fig. 19 Comparison of system efficiency for different coupling structures along the Y-axis

表明其对偏移的敏感性较高。凹型端口为 90° 型磁耦合机构在正对时其系统效率为 89%；当接收端沿 Y 轴横向侧方向偏移 30 mm 时,效率为 78.5%。相比传统型扁平螺旋线圈而言,90° 型磁耦合机构在 Y 轴上效率偏移的降幅实现了一定程度上的降低。

相比之下,30° 型磁耦合机构在接收端正对位置下的系统效率为 89.3%；当接收端沿 Y 轴偏移 30 mm 时其系统效率降至 83.5%；降幅对比传统型、90° 型而言最小,证明 30° 型磁耦合机构在 Y 轴上表现出更为优异的抗偏移性能。

如图 20 所示,传统型、90° 及 30° 型磁耦合机构在 X 轴方向上均呈现出较为优异的抗偏移性能,效率均在 84% 以上。

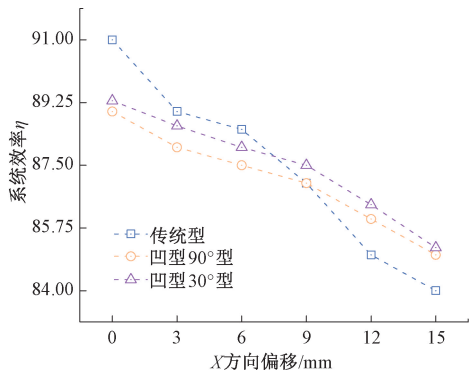


图 20 不同耦合机构 X 方向系统效率对比

Fig. 20 Comparison of system efficiency for different coupling structures along the X-axis

在 X 轴方向偏移距离为 0~6 mm 时,传统型效率高 于凹型 90° 和凹型 30° 型,小范围偏移中,传统型因其绕线均匀排布,其有效磁通面积 A 在中心区域产生较高的磁通密度,此时接收线圈仍捕获大部分磁通,互感 M 相对变化较小,耦合效率高,能够使接收端在偏移过程中保持在极好的谐振状态,使功率传输效率最大化。

90° 型和 30° 型相比而言,在 X 轴方向偏移较小时,其通过缩短磁路显著提高磁通密度 B ,但高 B 会使线圈寄生电容升高,谐振匹配度此时没有传统型高,影响系统初始整体效率。在 X 轴方向偏移 6~15 mm 时,传统型由于其偏移过程中有效磁通面积 A 减小且磁阻较高,互感 M 偏移梯度上升,致使系统失谐严重,效率大大降低;相较而言,凹型结构缩短了磁通路径 l ,磁阻 R_m 降低,优化了 B 的空间均匀性,缓冲了磁通损失。虽然谐振失调存在但 M 偏移梯度得到了缓解,致使效率下降幅度放缓。

综上所述,实验结果与前文“凹型端口角度对 k 、CCRR 影响规律变化图”的仿真结果基本一致,尽管 30° 型磁耦合机构在接收端正对时耦合系数相较 90° 型磁耦合机构略有下降,但在 XY 平面小范围偏移时,CCRR 和平均效率均优于传统扁平螺旋线圈和 90° 磁耦合机构,验证了 30° 型磁耦合机构在 XY 平面优异的抗偏移性能。

30° 型磁耦合机构 WPT 系统实验样机的波形图如图 21 所示。

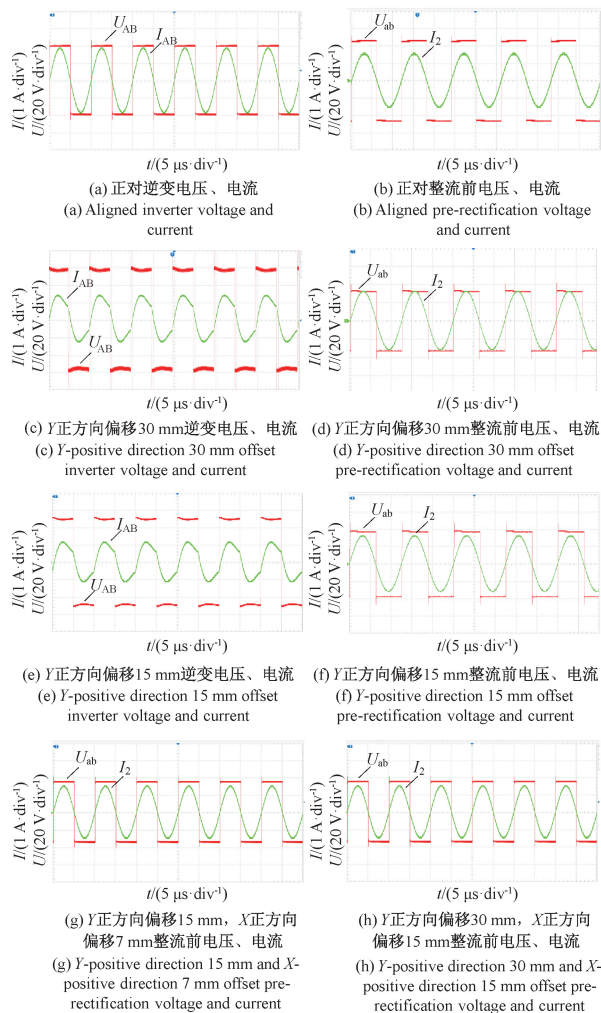


图 21 30° 型耦合机构 WPT 系统实验样机波形

Fig. 21 Waveform diagram of the experimental prototype of the 30° coupling mechanism WPT system

当接收端处于 4 种典型位置时,全桥逆变器端口输出电压及电流波形如图 21(a)、(c)、(e)、(g)所示,整流前输入电压、电流波形如图 21(b)、(d)、(f)、(h)所示,接收端处于不同位置时直流侧输入电压始终保持在 100 V,负载 $R_0=4\ \Omega$ 。图 21(g)、(h)是接收端在 XY 同时偏移时系统整流前电压、电流的工作波形,对比图 21(b)接收端正对时的波形来看,接收端在 XY 平面同时偏移后其电压电流的变化率不超过 4%。因此可近似认为系统在接收端偏移时能够实现恒定输出,验证了 30° 型磁耦合机构 WPT 系统在 XY 平面优异的抗偏移性能。

系统在额定工况运行下的系统热成像图如图 22 所示。

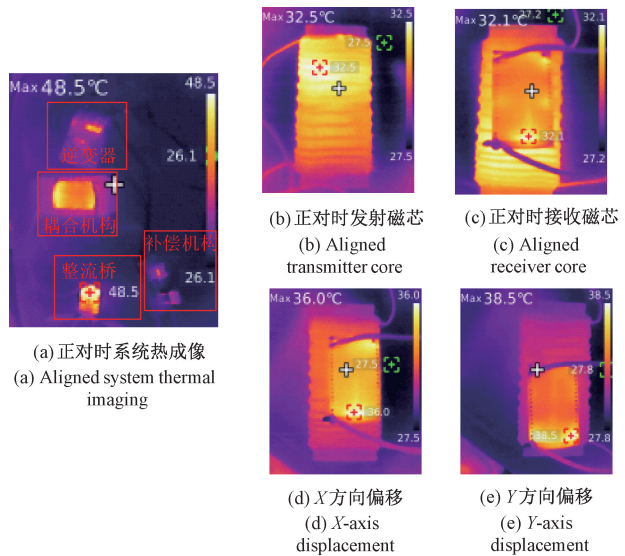


图 22 系统热成像
Fig. 22 System thermal imaging

图 22(a) 为系统正对工况下的热成像图,主要热源为整流桥,在额定工况下其温度上升至 48.5℃,耦合机构温度略低于整流桥。图 22(b)展示了发射端磁芯在额定工况空载下的实况温度,温度上升至 32.5℃。

接收端处于不同位置时接收端磁芯温度变化如图 22(c)~(e)所示,正对时磁芯温度为 32.1℃,随着接收线圈向 XY 方向偏移,其磁芯温度略有升高,分别为 36.0℃ 和 38.5℃,这说明接收端尽管磁芯偏移会使耦合系数有所下降,但由于磁场设计的均匀性和补偿机构的有效性,系统仍维持较高效率,损耗增加较为温和,磁芯整体温升可控,该结构特性有助于系统保持较稳定的工作状态。

将以上实验结果与现有文献进行对比,对比结果如表 8 所示。不同尺寸允许偏移距离不同,最大偏移距离占线圈边长的比例可统一描述磁耦合机构抗偏移性能。对比文献[21-25]及凹型磁耦合机构,其中文献[21-23]与所提磁耦合机构相比,所提磁耦合机构在横向、纵向允许偏移距离更大,偏移至最大距离时 CCRR 最高,即抗偏移性能最佳。另一方面,文献[24-25]的峰值及平均效率均低于所提磁耦合机构。通过以上对比,证明了所提磁耦合机构在横向、纵向抗偏移性能上均有较大提升,且综合性能最优。从系统适用性而言,所提耦合机构因其集成化、高功率密度等优点更适合用于中小型 WPT 系统。

图 23 给出了系统在 100 W 满载输出下的损耗分布。当磁耦合机构对准时,整流桥的损耗占比最大。其主要原因是接收端整流模块采用了由 STPS30L60CT 构成的全桥肖特基二极管整流电路,每组 3 个并联结构以有效提升整流容量,从而适应负载侧的大电流输出。因此,该

表 8 与现有工作的对比
Table 8 Comparisons with existing methods

文献	发射-接收线圈	补偿拓扑类型	尺寸大小/mm	偏移距离/mm	CCRR	效率/%
[21]	CP-CP	S-S	$\Phi 800$	X:300(37.5%) Y:300(37.5%)	0.29	≥ 91
[22]	DD-BP	LCC-LCC	512×248	X:180(35.2%) Y:75(30.24%)	0.20	≥ 81
[23]	LCT-TC	LCC-LCC	450×400	X:160(40.0%) Y:180(40.0%)	0.32	≥ 92
[24]	GFSP-GFSP	LCC-S	200×200	X:120(60.0%) Y:120(60.0%)	0.51	≥ 80
[25]	CU-CU	LCC-S	200×200	X:100(50.0%) Y:100(50.0%)	0.68	≥ 60
本文	FSP-FSP	LCC-S	100×50	X:30(60.0%) Y:60(60.0%)	0.83	≥ 84

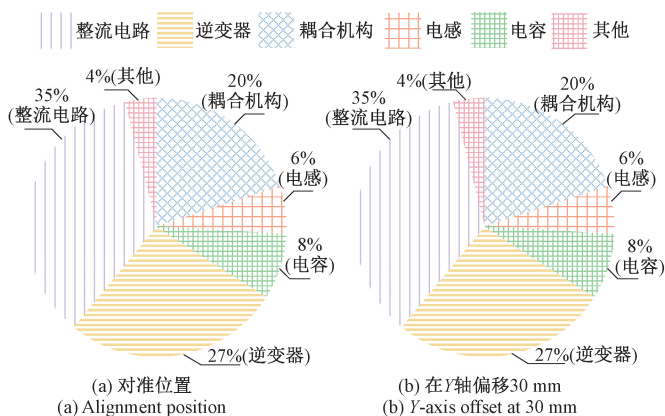


图 23 实验系统损耗分布

Fig. 23 Loss distribution of experimental system

器件的正向导通压降引发较大的导通损耗,成为 WPT 系统中的主要能量损耗来源。同时,逆变电路中的开关损耗与导通损耗占总体损耗的主要部分,相较之下,电容与电感器件的损耗影响较小。当接收端沿 XOY 平面 Y 轴方向发生偏移时,尽管耦合系数有所降低,但由于系统采用 LCC-S 补偿网络,整体仍维持在近似谐振状态,磁耦合机构的能量损耗基本保持稳定。

4 结 论

为解决中小功率无线电能传输设备低功率密度,接收端偏移导致电压波动幅度大、效率急剧降低,这一问题,提出了一种基于传统扁平螺线管的凹型磁耦合机构,通过端口凹陷设计提升了系统的抗偏移能力,使系统在不同偏移距离下整流侧输出电压始终处于合理范围内。结合理论分析与实验结果,可得到的主要结论为:

1) 创新性地采用端口凹陷式结构设计,显著提升了系统的空间自由度。接收端采用柔性印刷电路(FPC)集成化设计,后续也无需额外 DC-DC 变换器,提高了系统整体功率密度,系统体积也大幅减小,更适用于空间受限的便携式电子设备应用场景。

2) 通过对螺线管磁通密度分布进行均匀化,均匀的磁场分布确保了传感器或检测设备在不同点上的响应一致性,减少了信号噪声和漂移,进而提高了数据的可靠性和重复性,从而降低因位置或环境变化引发的测量误差,使其能有效增强测量的稳定性和准确性。

3) 通过有限元仿真与实验测试表明,当凹型端口角度优化至 30° 时,系统在接收线圈 $\pm 60\%$ 偏移范围,磁场磁通密度分布较为均匀,互感变化较小且耦合系数较高,电压增益 G 可控,输出电压波动率控制在 4% 以内,系统峰值效率达 87.3%,验证了该凹型磁耦合机构在提升传输效率和抗偏移能力方面的有效性。

参考文献

- [1] 陈阳, 杨斌, 彭云尔, 等. 感应式无线电能传输系统抗偏移技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5537-5557.
CHEN Y, YANG B, PENG Y ER, et al. Review of anti-misalignment technology in inductive wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5537-5557.
- [2] 郭海潮, 张献, 杨庆新, 等. 空间全向无线电能传输技术研究与综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 9006-9022.
GUO H CH, ZHANG X, YANG Q X, et al. Review of research and application of spatial omnidirectional wireless power transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 9006-9022.
- [3] ALABSI A, HAWBANI A, WANG X F, et al. Wireless power transfer technologies, applications, and future trends: A review[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2024, 10(1): 1-17.
- [4] 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, et al. 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.
- [5] 谢诗云, 吴莲, 李津, 等. 基于等效负载跟踪的旋转磁场耦合式 WPT 系统最大效率控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 110-122.
XIE SH Y, WU L, LI J, et al. Method of maximum

- efficiency control based on equivalent load tracking in WPT system with rotating magnetic field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 110-122.
- [6] 冯波, 彭大为, 杨奕, 等. 改进型扁平螺线管线圈高抗偏移无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2025, 40(12): 3716-3726.
- FENG B, PENG D W, YANG Y, et al. High-misalignment-tolerant wireless power transfer system using enhanced flat solenoid coils[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(12): 3716-3726.
- [7] 武帅, 陈星维, 孟祥尧, 等. 具有强抗偏移及轻量化特性的电场耦合式无人机无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2404-2413.
- WU SH, CHEN X W, MENG X Y, et al. Electric-field coupled wireless power transfer system with misalignment-tolerance and light-weight characteristics for unmanned aerial vehicle applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2404-2413.
- [8] 彭云尔, 张滨山, 杨斌, 等. 基于双螺旋正交线圈的强抗偏移 IPT 系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7352-7363.
- PENG Y ER, ZHANG B SH, YANG B, et al. A high misalignment tolerant inductive power transfer system based on double-solenoid quadrature pad[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7352-7363.
- [9] 谢诗云, 官涵宇, 黄杰, 等. 基于旋转磁场耦合的非对称式无线电能传输系统[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 193-206.
- XIE SH Y, GUAN H Y, HUANG J, et al. Wireless power transfer system with an asymmetric coupling structure based on rotating magnetic field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 193-206.
- [10] 王懿杰, 陆凯兴, 姚友素, 等. 具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3907-3917.
- WANG Y J, LU K X, YAO Y S, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3907-3917.
- [11] LIU Y R, MADAWALA U K, MAI R K, et al. An optimal multivariable control strategy for inductive power transfer systems to improve efficiency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8998-9010.
- [12] CHEN SH X, LI H CH, TANG Y. Extending the operating region of inductive power transfer systems through dual-side cooperative control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(11): 9302-9312.
- [13] 麦建伟, 曾宪瑞, 刘治钢, 等. 基于 S/SP 补偿拓扑的强抗偏移感应式无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1525-1537.
- MAI J W, ZENG X R, LIU ZH G, et al. A strong misalignment-resistant inductive wireless energy transmission system based on S/SP compensation topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1525-1537.
- [14] BREESAM N K, AL-HUSSAIBI W A, ALI F H, et al. Efficient resource allocation for wireless-powered MIMO-NOMA communications [J]. IEEE Access, 2022, 10: 130302-130313.
- [15] TAN P AN, SONG B, LEI W, et al. Decoupling control of double-side frequency tuning for LCC/S WPT system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(11): 11163-11173.
- [16] ZHENG K SH, HOU Y, WANG X S, et al. An active rectifier with pulse width modulation (PWM) mode on-and off-delay compensation for wireless power transfer (WPT) system[J]. IEEE Access, 2023, 11: 118204-118216.
- [17] 张艺明, 王辉, 沈志伟, 等. 利用混合拓扑实现强抗偏移性能的紧凑型电动汽车无线充电系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2979-2987.
- ZHANG Y M, WANG H, SHEN ZH W, et al. Misalignment-tolerant compact electric vehicle wireless charging system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2979-2987.
- [18] 麦建伟, 曾宪瑞, 刘治钢, 等. 基于 S/SP 补偿拓扑的强抗偏移感应式无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1525-1537.
- MAI J W, ZENG X R, LIU ZH G, et al. A strong misalignment-resistant inductive wireless energy transmission system based on S/SP compensation topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1525-1537.
- [19] LI J G, ZHANG X Z, TONG X Q. Research and design

- of misalignment-tolerant LCC-LCC compensated IPT system with constant-current and constant-voltage output[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(1): 1301-1313.
- [20] WEI Y CH, WU F J, LIU H CH. Indirect control strategy of secondary charging voltage and current and transient analysis of LCC-S WPT system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 11(2): 2364-2376.
- [21] MOON S C, MOON G W. Wireless power transfer system with an asymmetric four-coil resonator for electric vehicle battery chargers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(10): 6844-6854.
- [22] RASEKH N, KAVIANPOUR J, MIRSALEM M. A novel integration method for a bipolar receiver pad using LCC compensation topology for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7419-7428.
- [23] CHEN Y, MAI R K, ZHANG Y Y, et al. Improving misalignment tolerance for IPT system using a third-coil[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(4): 3009-3013.
- [24] 杨奕, 郭科, 郭强, 等. 网格型螺线管线圈单管逆变无线电能传输系统研究与设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 161-174.
- YANG Y, GUO K, GUO Q, et al. Research and design of single-switch inverter wireless power transfer system for grid flat spiral pad coils[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 161-174.
- [25] WANG K Y, SUN ZH, LI X Z, et al. A cubic wireless charging container system with highly uniform magnetic field distribution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(3): 4613-4629.
- [26] 姜萍萍, 付文浩, 王志武, 等. 用于胃肠道微型机器人的组合螺线管式无线能量发射系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 114-122.

JIANG P P, FU W H, WANG ZH W, et al. Research on combined solenoid wireless power transmitting system for gastrointestinal micro-robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 114-122.

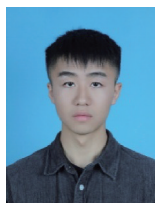
作者简介



杨奕, 1991 年于西南师范大学获得学士学位, 2003 年于西安交通大学获得硕士学位, 现为重庆理工大学教授, 主要研究方向为无线电能传输技术、电能变换与控制技术。

E-mail: yangyi@cqut.edu.cn

Yang Yi received his B. Sc. degree from Southwest Normal University in 1991, and his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2003. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include wireless power transfer and power conversion and control technology.



林治浩, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输技术、电能变换与控制技术。

E-mail: Mrslinezhi@outlook.com

Lin Zhihao is currently a master's student at Chongqing University of Technology. His main research interests include primarily focused on wireless power transfer technology and power conversion and control technology.



张路(通信作者), 2009 年于重庆大学获得学士学位, 2017 年于重庆大学获得工学博士学位, 现为重庆理工大学讲师, 主要研究方向为无线电能传输技术、电能变换与控制技术。

E-mail: road@cqut.edu.cn

Zhang Lu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2009, and his Ph. D. degree in Engineering from Chongqing University in 2017. He is currently serves as a lecturer at Chongqing University of Technology. His main research interests include wireless power transfer technology and power conversion and control technology.