

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241622

改进型扁平螺线管线圈高抗偏移 无线电能传输系统

冯波 彭大为 杨奕 郭科 刘则阳

(重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054)

摘要 针对传统扁平螺线管线圈水平横向偏移至边缘位置时,耦合系数和效率会迅速降低的问题,该文提出一种改进型扁平螺线管线圈无线电能传输系统。首先,建立耦合机构的等效磁路模型,揭示其耦合系数的影响因素。通过改进传统扁平螺线管线圈的发射端磁心形状及绕线方式,增强磁场均匀性,从而提升耦合机构的抗偏移性能。然后,以磁心形状和绕线方式为变量建立多组仿真模型进行对比,有限元仿真结果显示,改进后耦合机构在偏移时耦合系数变化率会显著降低,而磁场均匀性及抗偏移特性会明显提升。最后,搭建并测试了一台100 W系统实验样机,实验结果表明,当接收端在X、Y方向 $\pm 50\%$ 范围内偏移时,系统输出电压波动维持在5%以内,传输效率达到89%,验证了所提出系统的有效性和可行性。

关键词: 无线电能传输 均匀磁场 扁平螺线管线圈 抗偏移

中图分类号: TM724

0 引言

无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术是一种利用近场电磁耦合原理实现电能非物理接触式传输的前沿供电技术,相较于传统的插拔充电,该技术有效减少了电缆的使用,且具有自由度大、维护成本低、安全性高等优点,早已实现商业化,并广泛应用于电动汽车、便携式消费电子设备、智能无人系统以及医疗电子设备等电池充电场合^[1-5]。但是,上述优点都是建立在耦合机构对准的前提下,实际情况中耦合机构无法保证实时对准,偏移后系统的耦合系数会降低,传输能效、系统效率也随之下降,系统性能出现显著恶化^[6-7]。

为了提高WPT系统的抗偏移能力,从目前国内外的研究现状来看,大多数学者都是通过控制策略^[8-11]、谐振拓扑^[12-13]和耦合机构^[14-19]几个方面进行研究。在控制策略上,文献[8]通过移相控制增强了WPT耦合机构的抗偏移能力,但接收端的反馈

信号需要实时传输到发送端,这对无线通信有很高的要求。文献[9]采用变频控制方式,在控制过程中会使WPT系统的输入阻抗角过大,导致发射端电流应力过大,影响系统的稳定性,同时这样的控制方式对通信也有很高的要求。在补偿拓扑方面,近年来提出了T/S^[20]、SP/S^[21]、S/SP^[22]、LCC/S^[23]等拓扑结构,LCC/S拓扑在继承LCC/LCC拓扑优点的同时,元器件较少,具有恒流输入恒压输出、易实现软开关等特点。尽管抗偏移性能能够通过补偿拓扑得以提升,但过多谐振元件的加入使得系统阶数升高,增加了分析的难度。在耦合机构设计上,大量研究试图通过优化耦合线圈的结构来提升抗偏移性能,研究人员为构造出均匀磁场来提升系统抗偏移能力,提出了双极性(Bipolar, BP)线圈、三极性(Tripolar Pad, TP)线圈、螺线管(Flat Spiral Pad, FSP)线圈、双D型(Double-D, DD)线圈、双D型正交(Double-D Quadrature, DDQ)线圈等耦合机构。文献[17]提出了扁平螺线管线圈耦合机构,对比平面圆形、平面方形耦合机构,其具有优异的水平纵向抗偏移性能,由此衍生出了网格型螺线管^[18]、改进型三维螺线管^[19]等耦合机构都具有不错的抗偏移性能,但其水平横向抗偏移性能仍有待提升,

且其发射端和接收端都采用相同尺寸的方形磁心，线圈匝数与间距都相同。考虑到不同的应用场景，这样的设计难以在实际应用中实现，同时增加了系统成本。对于无线电能传输系统，不仅要求其效率高、抗偏移，同时还应该具备高频化、轻量化和小型化等特点。

基于上述背景，本文提出了一种改进型扁平螺线管线圈无线电能传输系统，通过改变扁平螺线管耦合机构的发射磁心结构和绕线方式，增强系统的抗偏移性能。首先，建立 LCC/S 补偿电路等效模型，分析其输出特性，推导其谐振元件参数配置方法。然后，建立磁路模型，分析耦合系数影响因素，通过有限元仿真揭示不同机构空间位置磁场分布规律及耦合系数变化规律。最后，搭建一台 100 W 样机验证了所提系统的有效性和可行性。

1 系统简介及补偿拓扑结构分析

1.1 系统简介

如图 1 所示为 WPT 系统电路拓扑，由全桥逆变器、LCC/S 补偿拓扑、松耦合变压器、整流桥、DC-DC 变换器五个部分组成。 U_{dc} 为系统输入直流电压， $S_1 \sim S_4$ 为 GaN 开关管， U_{AB} 为全桥逆变后的等效输入交流电压， L_1 为发射线圈自感， L_2 为接收线圈自感， M 为耦合线圈互感， R_1 为发射线圈内阻， R_2 为接收线圈内阻， L_f 为发射端补偿电感， C_f 为发射端并联补偿电容， C_1 为发射端串联补偿电容， C_2 为接收端串联补偿电容， R_{ab} 为等效阻性负载，VD 为整流桥， U_{ab} 为整流前电压， C_d 为输出滤波电容， R_o 为负载电阻， U_L 为 DC-DC 变换器的输入电压。DC-DC 变换器可实现 20 V 恒压输出，输出功率可达 100 W。

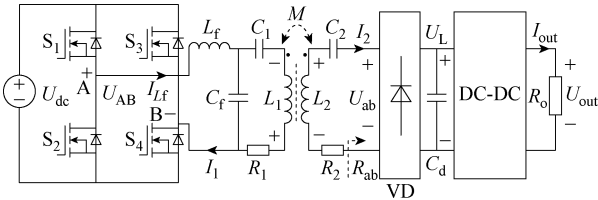


图 1 WPT 系统电路拓扑

Fig.1 WPT system circuit topology

1.2 LCC/S 补偿拓扑分析

本文采用 LCC/S 型补偿拓扑。该拓扑由发射端 LCC 补偿和接收端 S 补偿组合而成。由于 LCC/S 补偿网络具有良好的高阶滤波特性，可采用谐波近似法进行分析^[24]，LCC/S 交流等效模型如图 2 所示。图 2 中， \dot{U}_{AB} 为等效输入交流电压， \dot{I}_{L_f} 为发射端补

偿电感电流， \dot{I}_1 为发射线圈激励电流， \dot{I}_2 为接收线圈输出电流， \dot{U}_{ab} 为整流桥输入电压。

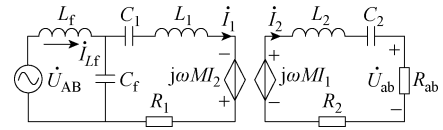


图 2 LCC/S 交流等效模型

Fig.2 LCC/S AC equivalent model

当系统处于谐振状态时，由 LCC 工作特性可知，存在

$$L_f C_f = L_2 C_2 = (L_1 - L_f) C_1 = \frac{1}{\omega^2} \quad (1)$$

根据基尔霍夫定律，图 2 中 LCC/S 交流等效模型的 KVL 方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{AB} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega \dot{I}_{L_f} L_f + \frac{\dot{I}_{L_f} - \dot{I}_1}{j\omega C_f} \\ \frac{\dot{I}_1}{j\omega C_1} + j\omega \dot{I}_1 L_1 + \dot{I}_1 R_1 - j\omega M \dot{I}_2 - \frac{\dot{I}_{L_f} - \dot{I}_1}{j\omega C_f} \\ \frac{\dot{I}_2}{j\omega C_2} + j\omega \dot{I}_2 L_2 + \dot{I}_2 (R_1 + R_2) - j\omega M \dot{I}_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

可求得

$$\begin{cases} \dot{I}_{L_f} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\omega^2 L_f^2} \left(R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_{ab}} \right) \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{AB}}{j\omega^2 L_f} \\ \dot{I}_2 = \frac{M \dot{U}_{AB}}{L_f (R_{ab} + R_2)} \end{cases} \quad (3)$$

由式 (3) 可知，发射线圈激励电流仅与补偿电感和交流输入电压有关，与互感、自感及负载无关，发射线圈激励电流具有恒流特性。

整流输入电压 \dot{U}_{ab} 可以表示为

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_2 R_{ab} = \frac{M \dot{U}_{AB} R_{ab}}{L_f (R_{ab} + R_2)} \quad (4)$$

可得

$$U_L = \frac{\sqrt{2} M \dot{U}_{AB} R_{ab}}{2\pi L_f (R_{ab} + R_2)} \quad (5)$$

因此，系统电压增益 G 为

$$G = \frac{\sqrt{2} M R_{ab}}{2\pi L_f (R_{ab} + R_2)} \quad (6)$$

由式 (6) 可知，电压增益 G 与等效负载 R_{ab} 、接收线圈内阻 R_2 、发射端补偿电感 L_f 和互感 M 有关，具有恒定电压输出特性。

2 耦合机构磁场分析

2.1 磁路模型分析

考虑到无线充电的应用场景，发射端位置通常较为固定，如电动汽车、手机无线充电、机器人、无人机等，发射端受空间和尺寸限制较小，而接收端受用户需求、产品尺寸等因素影响，其体积一般要受到限制。因此，接收端的体积往往小于发射端。这不仅减轻了接收端的磁心用量，还降低了制造成本并且提高了接收端设备的灵活性。基于这样的设计思想，有如图3所示传统扁平螺线管线圈耦合机构，包括发射端和接收端，两端都采用相同厚度的铁氧体磁心，发射端的长度和宽度都是接收端的两倍，其中，发射端磁心尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ ，接收端磁心尺寸为 $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ ，耦合机构传输气隙为 10 mm ，利兹线松散缠绕在铁氧体磁心，沿 X 轴等间距均匀排布，属于单磁通回路结构，在其磁心横截面仅有一个磁通回路。

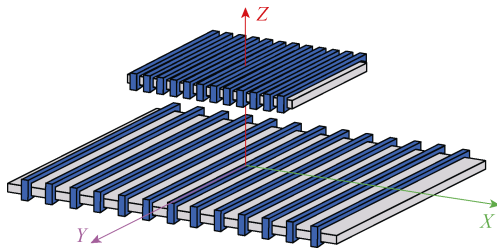


图3 传统扁平螺线管线圈耦合机构

Fig.3 Conventional flat solenoid coil coupling mechanism

图4给出了传统扁平螺线管线圈耦合机构磁通分布。不同于方形，圆形线圈磁心的横截面具有双磁通回路，扁平螺线管耦合机构在接收端偏移时，主磁通中不会出现方向相反的磁力线，因此避免了互相抵消的现象，使得其耦合系数下降缓慢。图中虚线表示耦合机构中磁力线的分布情况，扁平螺线管耦合机构的磁通主要由自耦合部分和互耦合部分组成，其中互耦合部分磁通是影响互感和耦合系数的主要因素。

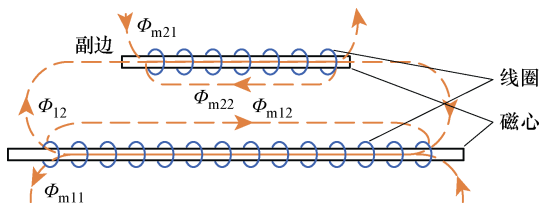


图4 传统扁平螺线管线圈耦合机构磁通分布

Fig.4 Flux distribution in a conventional flat solenoid coil coupling mechanism

由图4中磁通分布特性，利用磁阻来表示磁通的分布，构建如图5所示的等效磁路模型。发射线圈和接收线圈的激励电流与其匝数的乘积决定了电路的磁动势。图5中， R_{m11} 和 R_{m12} 为发射端的自耦合磁阻， R_{m21} 和 R_{m22} 为接收端的自耦合磁阻，而 R_{12} 为互耦合磁阻。 Φ_{m1} 为发射端自耦合磁通， Φ_{m2} 为接收端自耦合磁通， Φ_{12} 则为互耦合部分磁通， $n_1 i_1$ 为发射端磁动势， $n_2 i_2$ 为接收端磁动势， n_1 为发射线圈匝数， i_1 为发射线圈电流， n_2 为接收线圈匝数， i_2 为接收线圈电流。

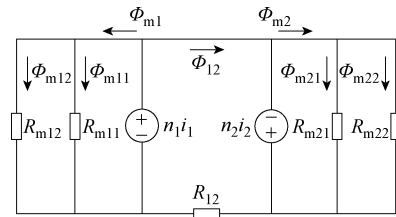


图5 传统扁平螺线管耦合机构等效磁路模型

Fig.5 Equivalent circuit model of conventional flat solenoid coupling mechanism

根据图5传统扁平螺线管耦合机构等效磁路模型，分别将发射端的自耦合磁阻 R_{m11} 、 R_{m12} 以及接收端的自耦合磁阻 R_{m21} 、 R_{m22} 作如下处理

$$R_{m1} = \frac{R_{m11}R_{m12}}{R_{m11} + R_{m12}} \quad (7)$$

$$R_{m2} = \frac{R_{m21}R_{m22}}{R_{m21} + R_{m22}} \quad (8)$$

由耦合机构等效磁路模型，推导得泄漏电感 L_{12} 和耦合电感 L_{11} 、 L_{22} 的表达式分别为

$$L_{12} = \frac{n_1 n_2}{R_{12}} \quad (9)$$

$$L_{11} = \frac{n_1^2}{R_1} + \frac{n_1^2}{R_{12}} \quad (10)$$

$$L_{22} = \frac{n_2^2}{R_2} + \frac{n_2^2}{R_{12}} \quad (11)$$

综上所述，得耦合机构耦合系数 k 的表达式为

$$k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = \sqrt{\frac{R_{m1}R_{m2}}{(R_{m1} + R_{12})(R_{m2} + R_{12})}} \quad (12)$$

由式(12)可知，耦合系数 k 仅与自耦合磁阻 R_{m1} 、 R_{m2} 及互耦合磁阻 R_{12} 相关，减小 R_{12} 或者增大 R_{m1} 、 R_{m2} 都可以提高耦合系数。由于磁心的尺寸、

形状、绕组分布以及磁通路径都会影响磁阻，因此，通过优化线圈的绕制方式，可以改变磁通和磁阻，从而提高耦合系数。

综上所述，当线圈覆盖磁心的表面积增加时，耦合部分的面积增大，这有助于减少漏磁磁路的磁阻，从而提高耦合系数。同时，增加线圈绕组的间隔距离会增加漏磁磁路的磁阻，也会提高耦合系数。

2.2 改进型扁平螺线管线圈结构

为收束磁力线，使其更加集中从而提升耦合机构的耦合系数，往往需要大量的利兹线，这不仅增加了系统的质量还使系统的成本大大提高。为此，该文对传统扁平螺线管线圈进行改进，设计了一种 U 型铁氧体磁心结构以收束磁力线，同时对线圈绕组分布方式进行重构，提出了一种改进型扁平螺线管线圈耦合机构，如图 6 所示。

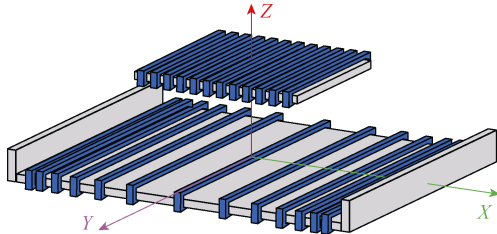


图 6 改进型扁平螺线管线圈耦合机构
Fig.6 Improved coupling mechanism for flat solenoid coils

为了更好地对比不同耦合机构的抗偏移能力，定义耦合系数保持系数（Coupling Coefficient Retaining Ratio, CCRR）^[17]为

$$CCRR = \frac{k_{mis}}{k_0} \quad (13)$$

式中， k_0 和 k_{mis} 分别为耦合机构正对和偏移后的耦合系数。

根据磁心大小确定了原边绕组匝数 $N_1=15$ ，接收端绕组匝数 $N_2=11$ ，接收端相对于原边的偏移量在 X 方向上 $[-30, 30]$ mm，步长为 5 mm，在 Y 方向上 $[-15, 15]$ mm，步长为 3 mm。接收端绕组采用等间距，间距为 0.1 mm。原边绕组则采用非均匀的排布方式，绕组间距按等差数列，从两侧向中间依次等差增加，公差为 d ，呈两边密集、中间稀疏的形式。

记录发射线圈间距改变下各仿真点对应的发射线圈自感 L_1 、接收线圈自感 L_2 以及互感 M_{12} 。计算出耦合系数之后，记做一组数据，其中最大值与最小值的差值记作极差，用 R_i ($i=1, 2, 3, \dots$) 表示，极差越小表示在偏移范围内耦合系数变化的程度越

小，即抗偏移能力越强，通过不断优化间距的大小，降低 R_i ，提升耦合机构的抗偏移能力。设计流程如图 7 所示，选取偏移范围内耦合系数变化量最小的为最佳参数，最终选取 $d=0.64$ mm，从而确定具体耦合机构参数。

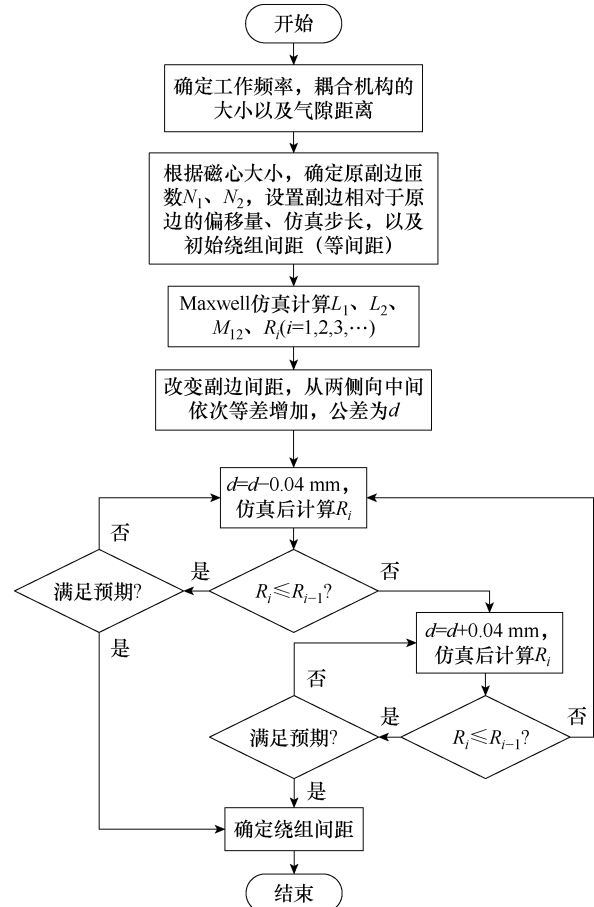


图 7 设计流程

Fig.7 Design flowchart

2.3 与传统扁平螺线管线圈结构的对比

为了进一步说明所提出耦合机构的抗偏移特性，利用有限元仿真软件 Ansys Maxwell，以绕线方式和磁心形状为变量，建立了多组磁耦合机构的仿真模型。为保证对比的有效性，不同机构的铁氧体磁心材料、绕组匝数、气隙距离和利兹线规格都相同，接收端都采用相同绕组等距分布的扁平螺线管线圈。

无接收端的情况下仅对发射机构施加激励进行仿真，图 8 给出了不同发射机构 XY 平面磁通密度分布情况，对比图 8a 和图 8b，传统型的磁通密度主要集中在磁心中部，虽然其最大磁通密度略高于仅改变绕线方式型，但仅改变绕线方式型的磁通密度在整个平面上呈均匀分布；对比图 8a 和图 8c，在改变磁心形状后，其整体磁通密度得到了很大的

提升,磁心形成的U型结构起到收束磁力线的作用,但两者磁通密度在左右两侧仍然有明显衰减,这种不均匀的磁通分布是耦合机构接收端偏移时耦合系数迅速下降的主要原因;对比图 8a 和图 8d,改进型的发射磁心在磁通密度强度和磁通密度分布的均匀程度上都得到了极大的提升,这意味着改进型耦合机构在动态偏移时,耦合系数将在较宽的范围内保持稳定,下降速度较为缓慢。

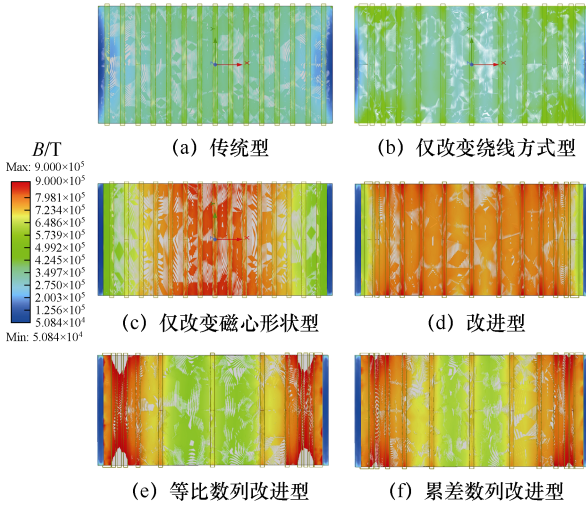


图 8 不同发射机构 XY 平面磁通密度分布情况

Fig.8 Distribution of magnetic flux density in the XY plane for different launching mechanisms

图 8e、图 8f 分别对应绕组间距按等比数列、累差数列排布的发射端磁通密度分布情况,两者磁心结构均发生改变。由于两侧绕组过于密集,因此两者在空间中产生的磁场呈双驼峰状,从图中可以明显看出,其磁通密度都集中在左右两侧。对比图 8d,可以明显看出,绕组间距按等差数列排布的磁心,在磁通密度分布的均匀程度上要明显优于按等比数列、累差数列排布的磁心。因此,后续的仿真中不再对这两种机构进行分析。

图 9 给出了改进型扁平螺线管耦合机构 YZ 平面磁感应强度分布。耦合机构正对时如图 9a 所示,磁心附近的磁感应强度左右均匀分布,图 9b 为接收端向 Y 正方向偏移 15 mm 时的磁感应强度分布,此时接收端磁心内的磁感应强度分布为左密右疏,说明偏移过程中磁通在往 Y 负方向聚集,不同于平面方形、平面圆形耦合机构,这将会减缓磁阻的增大,从而耦合系数下降更加缓慢,传统扁平螺线管耦合机构也具有这样的特点,这一性质在改进后的耦合机构上得到很好的延续。

不同耦合机构 CCRR 变化规律如图 10 所示,

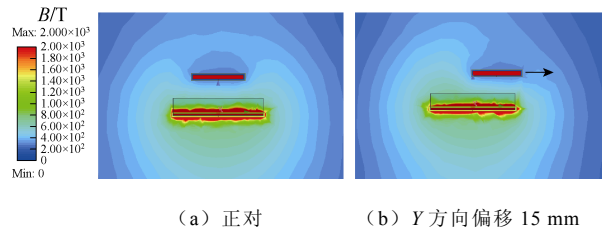
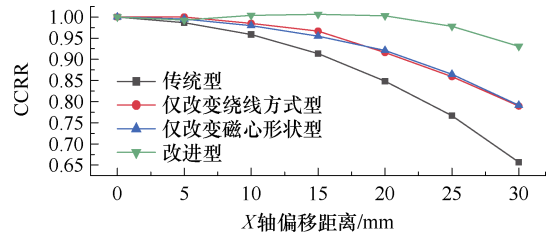


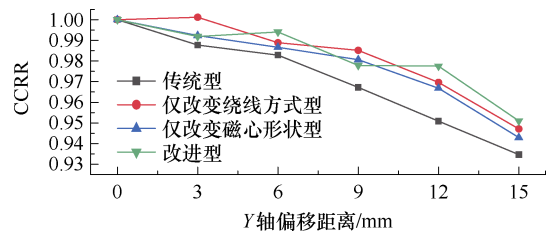
图 9 改进型扁平螺线管耦合机构 YZ 平面磁感应强度分布

Fig.9 Improved flat solenoid coupling mechanism YZ plane magnetic induction intensity distributions

图 10a 给出了四种耦合机构接收端在 X 轴方向发生偏移时 CCRR 变化规律,偏移量达到 30 mm 时,传统型耦合机构 CCRR 的下降速度最快,降至 0.656;仅改变绕线方式型耦合机构 CCRR 降至 0.789;仅改变磁心形状型耦合机构 CCRR 降至 0.791;而改进型耦合机构 CCRR 仅降至 0.93,下降速度缓慢,始终保持在 90%之上。图 10b 为四种耦合机构接收端在 Y 轴方向发生偏移时 CCRR 变化,传统扁平螺线管线圈已经具有非常突出的 Y 方向抗偏移性能,虽然四种耦合机构在 Y 轴方向发生偏移时的 CCRR 变化差别不大,都能够保持在较高水平,但改进型耦合机构仍然表现更优。



(a) 在 X 轴偏移



(b) 在 Y 轴偏移

图 10 不同耦合机构 CCRR 变化规律

Fig.10 CCRR change rule of different coupling institutions

图 11 给出了不同耦合机构在 XY 平面偏移耦合系数变化规律。随着 X 轴偏移距离的增加,改进型耦合机构的耦合系数以 0.003 cm^{-1} 的变化率衰减,小于传统型的 0.016 cm^{-1} , 小于仅改变绕线方式型的 0.008 cm^{-1} , 小于仅改变磁心形状型的 0.01 cm^{-1} 。当耦合机构发生 Y 轴方向偏移时,不同耦合机构耦

合系数变化率分别为传统型的 0.006 cm^{-1} ，仅改变绕线方式型的 0.004 cm^{-1} ，仅改变磁心形状型的 0.005 cm^{-1} ，改进型的 0.003 cm^{-1} ，改进型仍然占据优势。综合上述对比可知，改进型扁平螺线管耦合机构抗偏移性能最佳。

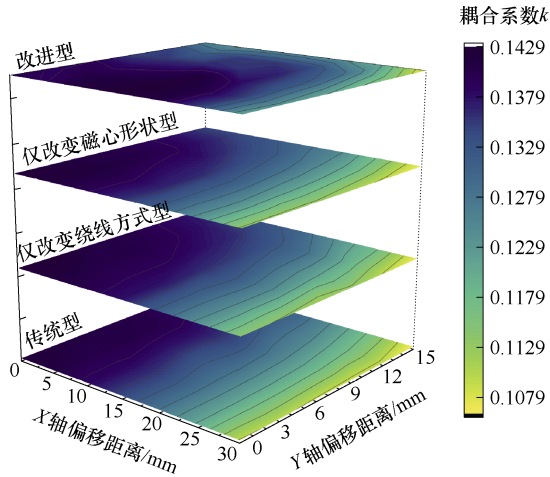


图 11 不同耦合机构在 XY 平面偏移耦合系数变化规律
Fig.11 Different coupling institutions in the XY plane offset coupling coefficient change rule of law

3 实验验证

为验证 WPT 系统的抗偏移性能，搭建了如图 12 所示的实验样机测试平台，WPT 系统样机参数见表 1，图 12a 中所示调试设备主要包括直流电源、辅助电源、电压探头、电流探头、示波器和电子负载，WPT 系统主要由全桥逆变电路、补偿机构、整流桥、DC-DC 电路组成。此外，以扁平螺线管线圈

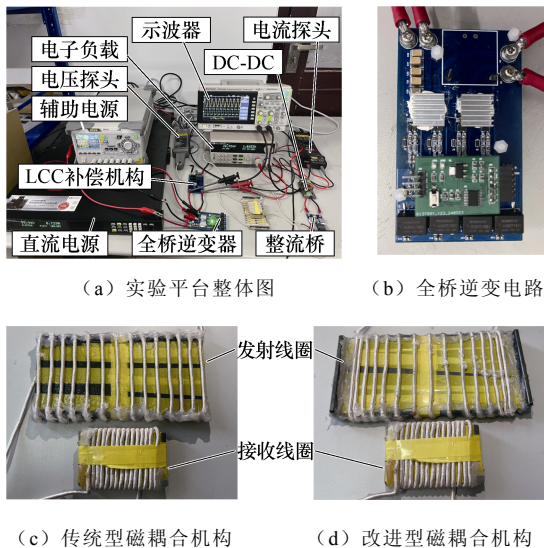


图 12 实验样机测试平台

Fig.12 Experimental prototype testbed

表 1 系统基本参数

Tab.1 Basic system parameters

参 数	数 值 (型号)
输入电压 U_{dc}/V	100
开关频率 f/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
DC-DC 开关管 VD_5, VD_6	CSD19534Q5A
负载 R_o/Ω	4

为基础绕制了传统型和改进型两种耦合机构，其具体参数分别见表 2 和表 3，具体设计如图 12c 和图 12d 所示，耦合机构发射端与接收端之间的气隙距离为 10 mm。

表 2 传统型耦合机构参数

Tab.2 Parameters of conventional coupling mechanism

参 数	数 值
发射端补偿电感 $L_f/\mu H$	10.2
发射端并联补偿电容 C_f/nF	65.3
发射端串联补偿电容 C_1/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

表 3 改进型耦合机构参数

Tab.3 Parameters of the improved coupling mechanism

参 数	数 值
发射端补偿电感 $L_f/\mu H$	9.8
发射端并联补偿电容 C_f/nF	63.8
发射端串联补偿电容 C_1/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
接收线圈内阻 $R_2/m\Omega$	16

图 13 为采用传统型耦合机构与改进型耦合机构的系统效率曲线对比。结果显示，传统型耦合机构接收端正对准位置下的系统效率为 91.4%；当沿 X 方向偏移 30 mm 时，效率降至 60.5%；在沿 Y 方

向偏移 15 mm 时,效率降至 80.6%。效率的显著降低是传统扁平螺旋线圈耦合机构在水平位置偏移时耦合系数迅速下降所导致。

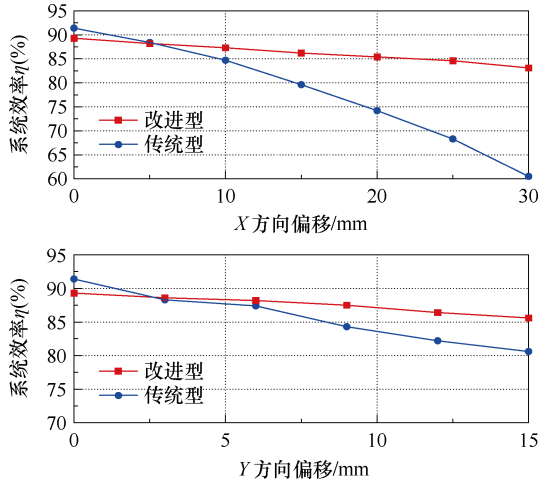
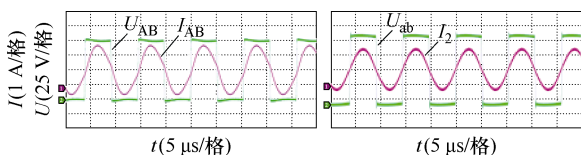


图 13 系统效率曲线对比

Fig.13 Comparison of system efficiency curves

相比之下,改进型耦合机构接收端正对准位置下的系统效率为 89.3%;当沿 X 方向偏移 30 mm 时,效率为 83.1%;在沿 Y 方向偏移 15 mm 时,效率为 85.6%;基于改进型耦合机构所搭建的系统在 X、Y 方向偏移时,系统效率都保持在 83% 以上。实验结果与两种耦合机构 CCRR 随偏移变化关系的仿真结果基本一致,验证了改进型耦合机构优越的抗偏移能力。

图 14 为改进型耦合机构 WPT 系统实验样机波形,包括了接收端分别在正对准、X 方向偏移、Y 方向偏移以及 X、Y 方向同时偏移下系统的主要工作波形,包括逆变器的输出电压 U_{AB} 和逆变器输出电流 I_{AB} 与接收端整流前输入电压 U_{ab} 和整流前输入电流 I_2 。不同位置下直流侧输入电压始终保持 100 V,负载 $R_o=4 \Omega$ 。实验结果表明,不同偏移条件下,逆变器输出电压和电流皆存在较小的相位差,系统阻抗偏感性,开关器件能够始终处于 ZVS 状态,实现软开关,系统实现高效的能量传输。图 14g 和图 14h 给出了系统在 X、Y 方向同时发生偏移时整流前电压、电流,对比图 14b 正对时波形,偏移后电压、电流变化率不超过 5%,可近似认为系统恒定输出,验证了系统在 XY 平面的抗偏移性能。



(a) 正对逆变电压、电流 (b) 正对整流前电压、电流

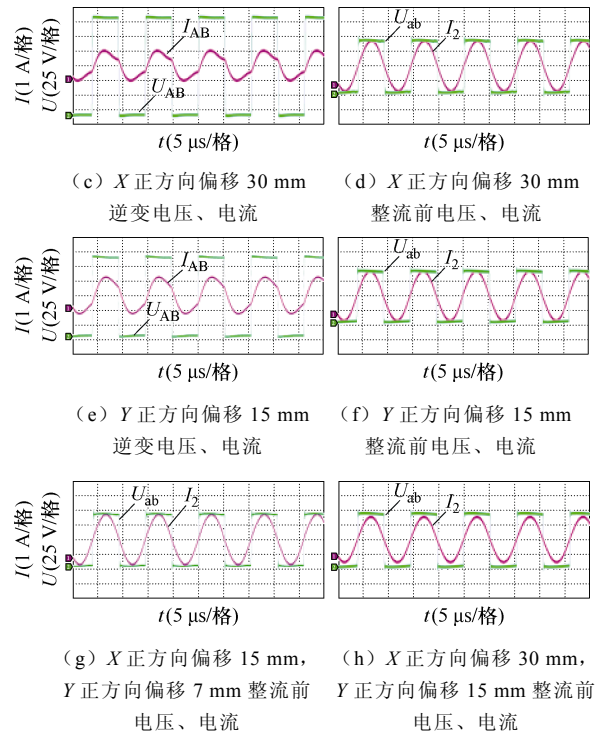
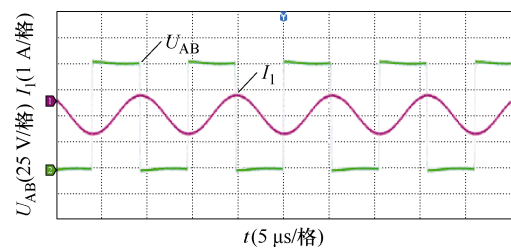


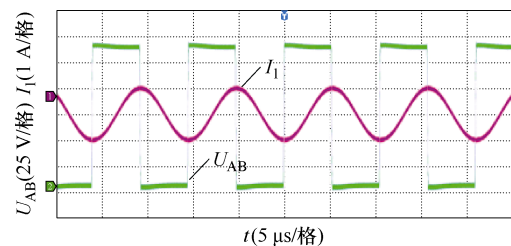
图 14 改进型耦合机构 WPT 系统实验样机波形

Fig.14 Improved coupling mechanism WPT system experimental prototype waveforms

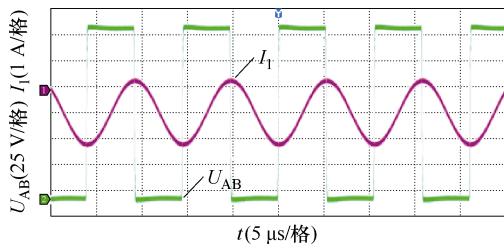
图 15 为改进型耦合机构 WPT 系统接收端分别在正对准、在 X 正方向偏移 30 mm 和 Y 正方向偏移 15 mm 三种不同位置下系统的逆变器电压与发射线圈激励电流波形,实验结果表明,在三种不同位置下发射线圈激励电流 I_1 始终与逆变器输出电压 U_{AB} 保持 90° 的相位差,且三种不同位置下发射线圈激励电流 I_1 幅值近似相等,与式 (3) 理论推导一致,体现了 LCC/S 补偿拓扑的传输特性。



(a) 正对逆变电压、发射线圈电流



(b) X 正方向偏移 30 mm 逆变电压、发射线圈电流

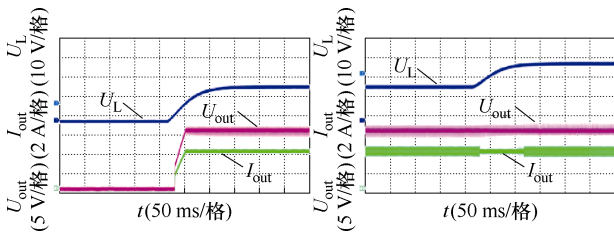


(c) Y 正方向偏移 15 mm 逆变电压、发射线圈电流

图 15 改进型耦合机构 WPT 系统逆变器电压与发射线圈电流波形

Fig.15 Improved coupling mechanism WPT system inverter voltage and transmitter coil current waveforms

虽然所提出改进型耦合机构具有非常好的抗偏移性能，但为保证输出电压的恒定，本文在负载侧前端加入了能够实现 22~55 V 宽范围输入、20 V 恒压输出的 DC-DC 变换器，其最大效率为 96%。图 16a、图 16b 分别为 DC-DC 变换器在启动与突增过程中输入电压 U_L 、输出电流 I_{out} 和输出电压 U_{out} 波形，图 16a 中， U_L 从 0 V 阶跃至 25 V，图 16b 中， U_L 从 25 V 突增至 50 V。两个过程中变换器输出电压、电流都能够实现很好的跟踪，且具有很快的响应速度，体现了 DC-DC 变换器良好的静、动态性能。



(a) 启动过程

(b) 突增过程

图 16 DC-DC 变换器输入电压，输出电压、电流波形

Fig.16 DC-DC converter input voltage, output voltage and current waveforms

所搭建 WPT 系统在额定工况下连续工作 20 min，系统热成像如图 17 所示。系统最大损耗源自整流桥，其在贴装了散热片的情况下仍然达到 42.6℃。耦合机构次之，如图 17b~图 17e 所示，无论正对或发生 X、Y 方向偏移，磁心温度相对稳定，主要集中在发射磁心中心位置，最大温度为 56.2℃，这是磁滞损耗和涡流损耗所导致的温升。接收磁心温度远低于发射端，不超过 30℃。当系统处于长时间工作状态下，原边需要选择合理的散热方式，接收磁心由于体积小、热损低，不需要额外的散热装置，更适合植入到手机、无人机等可移动便携式设备，同时凭借该耦合机构优异的抗偏移性能，使其

应用前景更加广阔。补偿机构、逆变器、DC-DC 变换器的损耗相对较少，还存在包括线路损耗以及电路建模偏差等引起的其他损耗。具体的系统输出损耗分布如图 18 所示，后续的研究将继续改进，实现效率优化。

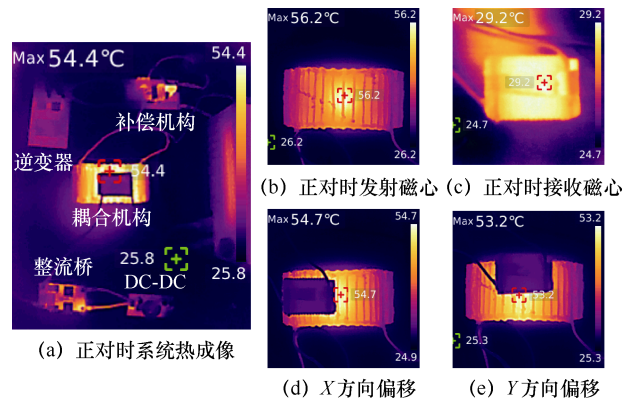


图 17 系统热成像

Fig.17 System thermal imaging

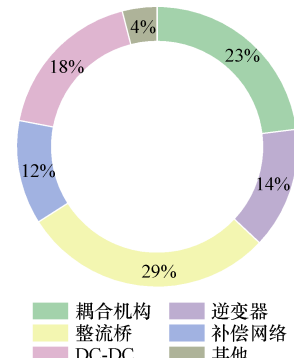


图 18 系统输出损耗分布

Fig.18 System output loss distribution

4 结论

本文提出了一种改进型扁平螺线管线圈耦合机构，继承了传统扁平螺线管的优异纵向抗偏移性能，有效提升了系统的横向抗偏移能力。通过建立磁路模型，分析了线圈磁场分布，并对比了改进前后耦合机构在不同偏移位置下的耦合系数变化规律，同时给出了耦合机构的优化方法。实验结果表明，搭建的 LCC/S 补偿型样机在 X、Y 方向±50%偏移范围内，系统输出电压波动率保持在 5%以内，传输效率达到 89%，验证了所提出系统的有效性与其可行性。

参考文献

[1] 唐丁源, 周玮, 黄亮, 等. 具有恒压输出特性的电场耦合式动态无线电能传输技术[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5385-5397.

- Tang Dingyuan, Zhou Wei, Huang Liang, et al. Dynamic electric-field coupled wireless power transfer system with constant voltage output characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5385-5397.
- [2] 周玮, 高侨, 陈泽林, 等. 基于同侧解耦型电场耦合机构的多发射多接收无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4811-4822.
- Zhou Wei, Gao Qiao, Chen Zelin, et al. Same-sided decoupled electric-field coupler based wireless power transfer system with multi-transmitter and multi-receiver[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4811-4822.
- [3] 谢文燕, 陈为. 全方向无线电能传输技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 202-215.
- Xie Wenyan, Chen Wei. Research progress of omnidirectional wireless power transfer technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 202-215.
- [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): 9668-9682.
- Yan Zhengchao, Hu Qianyu, Zhao Chenxu, et al. Summary of research on induction wireless power transmission technology of underwater vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9668-9682.
- [5] 焦超群, 杨旭, 杨俊峰, 等. 基于多目标优化理论的耦合无关恒压输出型 LCC/S 补偿感应电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6565-6580.
- Jiao Chaoqun, Yang Xu, Yang Junfeng, et al. Coupling-independent constant-voltage output LCC/S compensation inductive power transfer system based on multi-objective optimization theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24): 6565-6580.
- [6] 谢诗云, 杨奕, 李恋, 等. 基于双极性耦合磁场调控的高抗偏移偏转无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4838-4852.
- Xie Shiyun, Yang Yi, Li Lian, et al. Wireless power transfer system with high misalignment tolerance based on bipolar coupling magnetic-field control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4838-4852.
- [7] Yao Yousu, Wang Yijie, Liu Xiaosheng, et al. A novel unsymmetrical coupling structure based on concentrated magnetic flux for high-misalignment IPT applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3110-3123.
- [8] Hao Hao, Covic G A, Boys J T. An approximate dynamic model of LCL-T-based inductive power transfer power supplies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5554-5567.
- [9] Gati E, Kampitsis G, Manias S. Variable frequency controller for inductive power transfer in dynamic conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1684-1696.
- [10] Liu Yeran, Madawala U K, Mai Ruikun, 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.
- [11] Chen Shuxin, Li Hongchang, Tang Yi. Extending the operating region of inductive power transfer systems through dual-side cooperative control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9302-9312.
- [12] 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): 1525-1536.
- Mai Jianwei, Zeng Xianrui, Liu Zhigang, et al. An IPT system based on S/SP compensation topology with high misalignment tolerance[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1525-1536.
- [13] Hou Jia, Chen Qianhong, Wong S C, et al. Analysis and control of series/series-parallel compensated resonant converter for contactless power transfer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 124-136.
- [14] Wang Yijie, Wang Haoyu, Liang Tian, et al. Analysis and design of an LCC/S compensated resonant converter for inductively coupled power transfer[C]// 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Harbin, China, 2017: 1-5.
- [15] Kim S, Covic G A, Boys J T. Tripolar pad for inductive power transfer systems for EV charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5045-5057.

- [16] 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 Xiongzhen, 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.
- [17] 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 Yijie, Lu Kaixing, Yao Youyu, 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.
- [18] 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 Yi, Guo Ke, Guo Qiang, 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.
- [19] 谷鹏, 王懿杰, 关弘路, 等. 基于改进型三维螺线管磁耦合结构的多线圈长气隙无线电能传输系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8762-8772.
Gu Peng, Wang Yijie, Guan Honglu, et al. Research on multi-coil large air gap wireless power transfer system based on improved 3D solenoid magnetic coupling structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8762-8772.
- [20] Zhao Jinbo, Cai Tao, Duan Shanxu, et al. A general design method of primary compensation network for dynamic WPT system maintaining stable transmission power[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8343-8358.
- [21] Villa J L, Sallan J, Sanz Osorio J F, et al. High-misalignment tolerant compensation topology for ICPT systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 945-951.
- [22] 李中启, 张晨曦, 王建斌, 等. 基于变频重构 S/SP 拓扑的无线电能传输系统恒压恒流研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4718-4732.
Li Zhongqi, Zhang Chenxi, Wang Jianbin, et al. Research on constant current and constant voltage of WPT system based on variable frequency reconfiguration S/SP topology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4718-4732.
- [23] Wei Yuchen, Wu Fengjiang, Liu Hongchen. 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, 2023, 11(2): 2364-2376.
- [24] 杨奕, 张葛, 曹桂梅, 等. 基于多线圈阵列的单管无线电能传输电路优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5398-5410.
Yang Yi, Zhang Ge, Cao Guimei, et al. Optimization on single-switch wireless power transfer circuit based on multi-coils array[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5398-5410.

作者简介

冯 波 男, 1982 年生, 实验师, 硕士生导师, 研究方向为无线电能传输技术、电力系统自动化。

E-mail: fengbo@cqut.edu.cn

杨 奕 男, 1970 年生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为无线电能传输技术、电能变换技术。

E-mail: yangyi@cqut.edu.cn (通信作者)

Enhanced Flat Solenoid Coil with High Misalignment Tolerance for Wireless Power Transfer System

Feng Bo Peng Dawei Yang Yi Guo Ke Liu Zeyang

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

Abstract Wireless power transfer (WPT) technology has garnered widespread attention in recent years due to its advantages in safety, reliability, and flexibility. However, these benefits are often dependent on the precise

alignment of the coupling mechanism. In practical applications, as perfect alignment cannot always be ensured, misalignment leads to a reduction in the coupling coefficient, significantly degrading transmission efficiency and system performance. Traditional flat solenoid coils perform well in resisting longitudinal misalignment, but when lateral misalignment occurs, especially near the coil's edge, the coupling coefficient and efficiency drop rapidly. To address this issue, this paper proposes an improved flat solenoid coil WPT system.

First, an equivalent model of the LCC/S compensation circuit is established to analyze the effects of circuit parameters on output characteristics, and a method for configuring the parameters of resonant elements is derived, revealing key circuit parameters affecting voltage gain. Then, an equivalent magnetic circuit model is built to analyze the magnetic field distribution characteristics of the coil, demonstrating that core shape and winding configuration significantly influence the coupling coefficient. Consequently, an optimized winding distribution is proposed using an arithmetic progression for the inter-turn spacing, and the specific optimization process is provided. Additionally, the core shape of the transmitter coil in the traditional flat solenoid design is improved to better concentrate the magnetic field lines, enhancing magnetic field uniformity and increasing the misalignment tolerance of the coupling mechanism.

To verify the optimization effects, multiple simulation models were created with core shape and winding configuration as variables for comparison. Finite element simulation results show that the improved transmitter core achieves more uniform magnetic flux density distribution, significantly reducing the rate of change in the coupling coefficient. Magnetic field uniformity and misalignment tolerance are markedly improved. Finally, a 100 W WPT system prototype was built, and thermal imaging was used to analyze the system's loss distribution.

Experimental results show that when the receiver is laterally misaligned within $\pm 50\%$ in both the X and Y directions, the output voltage fluctuation is controlled within 5%, and transmission efficiency reaches 89%. These results validate the effectiveness and feasibility of the proposed system.

Keywords: Wireless power transfer, uniform magnetic field, flat solenoid coils, misalignment tolerance

(编辑 陈 诚)