

基于偶极线圈的高抗偏移性无线电能传输系统^{*}司庆贺 李建贵 王隆杨 罗光斌
(武汉理工大学机电工程学院 武汉 430070)

摘要: 为提高无线电能传输系统在耦合器偏移时的容错性能,保证输出的稳定性,本文提出了一种基于偶极线圈的具有高抗偏移性能的无线电能传输系统结构。首先,提出了口字型和田字型偶极线圈结构,采用有限元方法对其进行了研究,并对其磁极方向与结构尺寸进行优化;其次,基于田字型偶极线圈,在输入电压相同时,对比了LCC-S与S-S补偿拓扑的输入电流、输出功率与效率的特性;最后,对田字型偶极线圈进行了实验研究,在用线量与尺寸等条件相同的情况下,所设计的偶极线圈在X、Y轴的偏移范围为 $-60\sim+60$ mm时,相较于方形线圈,耦合系数变化率减少了8.51%,功率变化率降低了11.12%,且偏移过程中效率始终大于80%。

关键词: 无线电能传输;偶极线圈;抗偏移;LCC-S补偿拓扑

中图分类号: TM724;TP23;TN751.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4

A high anti-offset wireless power transfer system based on dipole coils

Si Qinghe Li Jiangui Wang Longyang Luo Guangbin

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To achieve high fault tolerance of wireless power transfer system during coupler offset and ensure output stability, a wireless power transfer system structure with high anti-offset performance based on dipole coils has been proposed in this paper. Firstly, a new type of dipole coil has been proposed, which has been studied using finite element method and its magnetic pole direction and structural size are optimized and analyzed. Secondly, based on the new dipole coil, the characteristics of input current, output power and efficiency of LCC-S and S-S compensation topologies were compared when the input voltage is constant. Finally, experimental researches were conducted on the new dipole coil under the same conditions of leads-line quantity and size, compared with the square coil, the designed dipole coil has a reduction of 8.51% in coupling coefficient change rate, 11.12% in power change rate when the offset range of the X and Y axes is -60 to $+60$ mm, and the efficiency always greater than 80% during the offset process.

Keywords: wireless power transfer; dipole coil; anti-offset; LCC-S compensation topology

0 引言

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术因其灵活可靠、安全便捷等优点广泛应用于电动汽车充电、可穿戴电子设备、植入式医疗设备、家用电器等领域^[1-2]。磁耦合机构是WPT系统重要组成部分,其结构与尺寸直接影响着系统的传输性能。在实际应用中,充电设备进行静态无线充电时难免会发生发射线圈与接收线圈不对准的情况,当耦合器发生偏移时,互感减小,系统的传输功率和传输效率会受到较大的影响^[3]。因此,WPT系统应具有较强的抗偏移性能,以保证良好的输出特性。

为了减小耦合器偏移对WPT系统的影响,许多学者针对耦合器的设计进行了大量的研究,根据是否使用磁芯,可分为平面线圈和偶极线圈。Bosshard等^[4]设计了一种双

D(double-D, DD)型平面线圈,该耦合器在纵向上具有良好的误差容差,但由于存在两个相反的磁通回路,在横向偏移过程中存在零耦合点。巩兆伟等^[5]在此基础上增加了一个额外的正交绕组形成双D正交(double-D quadrature, DDQ)型平面线圈,有效解决了零耦合点问题,但发射端需要两路逆变电路,且耦合系数较小,传输距离短。为增大耦合器间的耦合程度,Choi等^[6]将铁氧体磁芯应用于WPT系统,称之为偶极线圈,相较于传统的平面线圈,偶极线圈由于磁芯的加入,线圈之间的互感和耦合系数明显提升,漏磁减少,但在横向抗偏移性能较差。Rong等^[7]设计了一种立方体型偶极线圈,可以实现多方位无线电能传输,在接收端不对准时,能够实现稳定的输出功率,然而发射端结构复杂,使用场景有所限制。目前针对耦合器的研究已取得一

定的进展,但存在自由度单一、体积冗余、缺乏补偿拓扑偏移敏感度研究的问题。

为此,本文提出了一种新型偶极线圈,并对其结构进行优化设计,分析了串联-串联(series-series, S-S)拓扑与电感-电容-电容-串联(inductor-capacitor-capacitor-series, LCC-S)拓扑对耦合器位置的敏感度大小。基于所设计的耦合器采用 LCC-S 拓扑进行补偿,制作了实验样机,并对比相同尺寸、用线量的方形线圈,验证了所设计的偶极线圈在 X、Y 轴均具有良好的抗偏移性能。

1 基于偶极线圈的耦合器

1.1 单极偶极线圈磁路分析

相较于传统空芯线圈,偶极线圈通过添加铁氧体以获得更大的耦合系数。铁氧体是一种高磁导率低电导率的软磁材料,该磁性材料在无线电能传输系统中得到广泛应用,能够显著提升系统传输效率并同时降低电磁泄露^[8-9]。

图 1 所示为偶极线圈磁通分布,可以分为自耦合磁通和互耦合磁通,其中 Φ_p 与 Φ_s 分别为发射线圈与接收线圈的自耦合磁通,与自感相关; Φ_m 为两个线圈的互耦合磁通,决定了线圈的互感; N_p 与 N_s 分别为发射线圈与接收线圈的匝数; I_p 与 I_s 为两个线圈的电流。

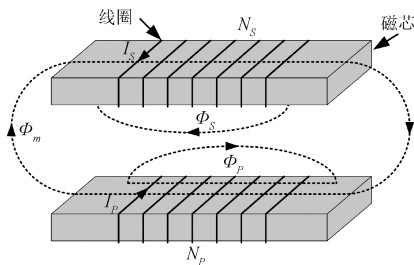


图 1 偶极线圈磁通分布

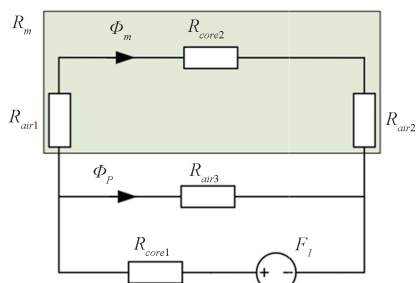
Fig. 1 Dipole coil magnetic flux distribution

根据磁通的分布建立等效磁路模型,如图 2 所示,其中图 2(a)、(b)分别为考虑发射线圈与未考虑发射线圈的等效磁路模型。参照电路欧姆定律,发射线圈产生的磁动势相当于电压源,磁通相当于电流,不同介质的磁导率差异相当于电路中不同的负载,通过接收线圈拾取磁通的大小来反应互感与耦合系数。其中, F_1 为发射线圈所激发的磁动势,其大小与 N_p 和 I_p 相关, R_{air} 表示空气中的磁阻, R_{core} 表示线圈中磁芯的磁阻, R_m 表示互感磁通支路上的磁阻之和。

根据磁路基尔霍夫电压定律^[10]:

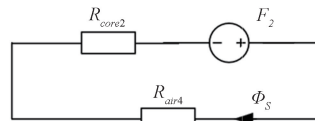
$$\begin{cases} \Phi_p = \frac{N_p I_p R_m}{(R_{air3} + R_m) R_{core1} + R_{air3} R_m} \\ \Phi_m = \frac{N_p I_p R_{air3}}{(R_{air3} + R_m) R_{core1} + R_{air3} R_m} \end{cases} \quad (1)$$

发射线圈所产生的磁通经过接收线圈,两者形成互感磁链 Ψ_m :



(a) 发射与接收线圈耦合

(a) Coupling of transmitting and receiving coils



(b) 仅考虑接收线圈

(b) Only consider the receiving coil

图 2 偶极线圈等效磁路模型

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit model of dipole coil

$$\Psi_m = N_s \Phi_m \quad (2)$$

进而可求得发射线圈与接收线圈的互感 M 与耦合系数 k :

$$\begin{cases} M = \frac{\Psi_m}{I_m} = \frac{N_p I_p R_{air3}}{(R_{air3} + R_m) R_{core1} + R_{air3} R_m} \\ k = \frac{\Phi_m}{\Phi_p + \Phi_m} = \frac{R_{air3}}{R_{air3} + R_m} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 口字型线圈磁极分析

为了更加直观地对偶极线圈的不同磁极组合方式进行分析,将偶极线圈等效为磁极,如图 3 所示。

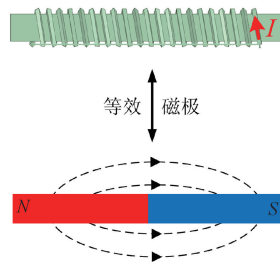


图 3 等效磁极

Fig. 3 Equivalent magnetic pole

在利兹线绕向一致时,电流方向决定着磁极方向,为了分析不同的磁极组合方式对于偶极线圈耦合的影响,在一个尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的铁氧体的中心处去除一个 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的长方体,得到所需的镂空矩形铁氧体,在其四边缠绕利兹线,得到所需线圈。

对于所得到的线圈,若改变每条边的利兹线绕向,则可以得到不同的磁极组合方式。为了便于讨论,规定在矩形顶点处,若磁极为 N-N 或 S-S 则认为该顶点为相斥顶点,若为 N-S 或 S-N 则认为该顶点为相吸顶点,因此共存图 4 中的 4 种磁极组合方式:4 相斥、2 相斥(对侧顶点相斥)、2 相

斥(同侧顶点相斥)、0相斥。在 ANSYS MAXWELL 中对四种组合方式进行磁场分析,得到图 4。

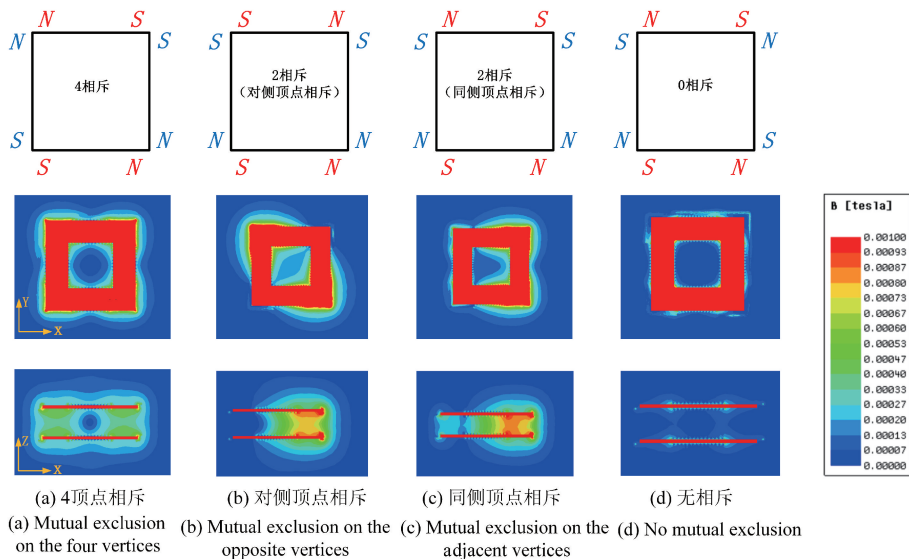


图4 偶极线圈在不同磁极组合方式下的磁场分析

Fig. 4 Magnetic field analysis of dipole coils under different pole combinations

由图 4(a)中可以看出,在偶极线圈中 4 相斥磁极组合方式虽然磁场均匀,但是其产生的磁场太小,不适于应用在实际系统中,而由图 4(d)可以看出 0 相斥方式磁场小且不均匀。因此本文中不采用 4 相斥与 0 相斥的磁极组合方式进行耦合机构的分析。主要针对图 4(b)中对侧顶点相斥与图 4(c)中同侧顶点相斥两种磁极组合方式进行研究。

图 5(a)、(b)分别为对侧顶点相斥与同侧顶点相斥沿 X、Y 轴偏移时耦合系数变化情况。从图中可以看出,在不同方向上偏移时,对侧顶点相斥与同侧顶点相斥的耦合系数变化趋势基本一致,但是对侧顶点相斥的耦合系数要远大于同侧顶点相斥。

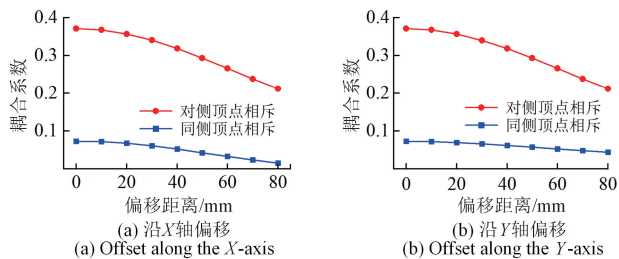


图5 偏移与耦合系数变化关系

Fig. 5 The relationship between offset and coupling coefficient variation

由图 6(a)可知,在 X 轴方向发生偏移时,对侧顶点相斥的磁极组合方式耦合系数变化率较小,具有更好的鲁棒性,所以对侧顶点相斥在 X 轴方向具有比同侧顶点相斥更好的抗偏移性能。由图 6(b)可以看出,在 Y 轴方向上,当偏移较小时,对侧顶点相斥的耦合系数变化率较小,而当偏移较大时,同侧顶点相斥的耦合系数变化率更小。

由图 6(a)可知,在 X 轴方向发生偏移时,对侧顶点相

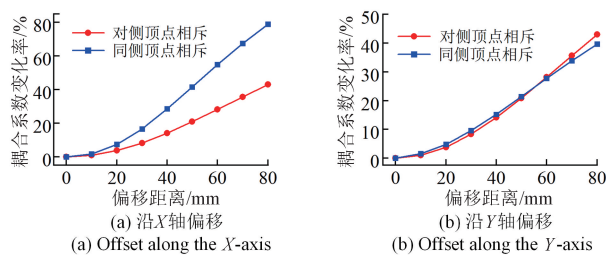


图6 偏移与耦合系数变化率关系

Fig. 6 The relationship between offset and the rate of change of coupling coefficient

斥的磁极组合方式耦合系数变化率较小,具有更好的鲁棒性,所以对侧顶点相斥在 X 轴方向具有比同侧顶点相斥更好的抗偏移性能。由图 6(b)可以看出,在 Y 轴方向上,当偏移较小时,对侧顶点相斥的耦合系数变化率较小,而当偏移较大时,同侧顶点相斥的耦合系数变化率更小。

综合以上分析可以得知,除了在 Y 轴方向上产生大偏移(偏移量 ≥ 57 mm)时,同侧顶点相斥的抗偏移性能略优于对侧顶点相斥,其余偏移工况,对侧顶点相斥的抗偏移性能均优于同侧顶点相斥。此外,对侧顶点相斥的固有耦合系数远大于同侧顶点相斥,这有利于提供更好的输出性能,因此在本文中,针对基于对侧顶点相斥的磁极组合方式进行耦合机构设计与优化。

1.3 田字型线圈分析

基于 2 相斥的磁极组合方式,对图 7(a)所示的口字形线圈进行优化设计,提出一种田字型线圈结构。在 $180\text{ mm} \times 180\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的铁氧体中挖去四个相等的 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的长方体,得到所需的铁氧体结构,具体尺寸见图 7(b)。

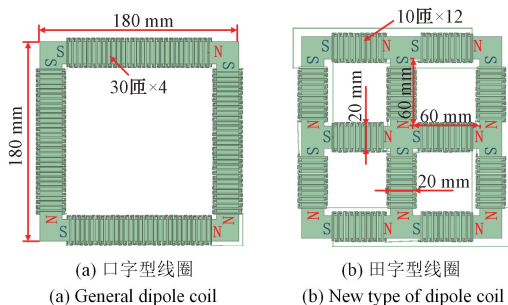


图 7 线圈结构图

Fig. 7 Coil structure diagram

在铁氧体各边均匀绕制利兹线,形成一个田字型结构,无论是小正方形或是大正方形,都采用对侧顶点相斥的磁极组合方式。在仅铁氧体结构不同的情况下,保持尺寸大小、用线量、匝间距等条件相同,对口字型线圈与田字型线圈进行对比,得到图 8。

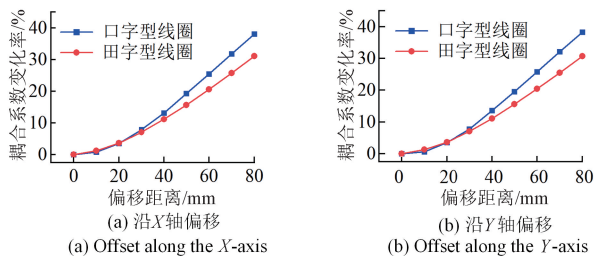


图 8 偏移与耦合系数变化率响应关系

Fig. 8 The response relationship between offset and coupling coefficient change rate

由图 8 可以得知,偏移距离 ≤ 20 mm 时,在 X、Y 轴上田字型线圈耦合系数变化率差距较小,其余偏移工况,田字型线圈的耦合系数变化率都低于口字型线圈,田字型线圈结构具有更好的抗偏移性能。

2 基于田字型线圈的补偿拓扑建模

谐振补偿拓扑具有减小系统无功功率、优化传输效率、提高系统在变负载情况下的输出可控性等优点。不同的补偿拓扑对输出端有不同的影响,因此补偿拓扑的设计是无线电能传输系统设计中的重要环节。低阶补偿拓扑包括串联型(series, S)和并联型(parallel, P),对其两两组合,得到 S-S、S-P、P-S 和 P-P 4 种类型^[11]。其中 S-S 型补偿拓扑发射端谐振电容仅与发射线圈的工作频率有关,系统的谐振状态不受负载大小和互感的影响,是最常用的补偿拓扑之一^[12]。在高阶补偿拓扑中, LCC-S 补偿拓扑可以实现恒压输出和零输入阻抗角,其无功分量在理想状态下为零^[13]。

如图 9(a)所示,为 S-S 补偿拓扑,其中: U_{IN} 为高频逆变器输出电压; R_P 和 R_S 分别为发射线圈和接收线圈的寄生电阻; L_P 和 L_S 分别为发射线圈和接收线圈的自感; C_P 和 C_S 分别为发射线圈和接收线圈补偿电容; M 为发射线

圈和接收线圈之间的互感; I_P 和 I_S 分别为流经发射线圈和接收线圈的电流; R_L 为等效负载。图 9(b)为 LCC-S 补偿拓扑的等效电路模型,其结构相当于在发射端增加了补偿电感 L_F 及其谐振电容 C_F 。

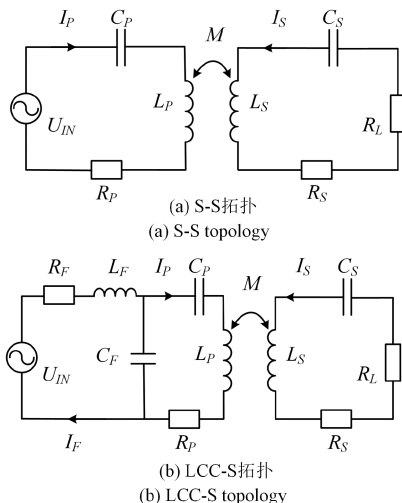


图 9 WPT 系统补偿拓扑结构

Fig. 9 WPT system compensation topology

对于 S-S 补偿拓扑,由基尔霍夫电压定律^[14]:

$$\begin{cases} U_{IN} = I_P(R_P + j\omega L_P + \frac{1}{j\omega C_P}) - j\omega MI_S \\ j\omega MI_P = I_S(R_S + R_L + j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S}) \end{cases} \quad (4)$$

对于 LCC-S 补偿拓扑:

$$\begin{cases} U_{IN} = I_F(R_F + j\omega L_F) + (I_F - I_P) \frac{1}{j\omega C_F} \\ (I_F - I_P) \frac{1}{j\omega C_F} = I_P(R_P + j\omega L_P + \frac{1}{j\omega C_P}) - j\omega MI_S \\ j\omega MI_P = I_S(R_S + R_L + j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S}) \end{cases} \quad (5)$$

则两种拓扑的谐振条件以及忽略线圈内阻时各支路电流、输出电压、输出功率具体表达式如表 1 所示。

3 基于田字型线圈的补偿拓扑仿真分析

为分析两种补偿拓扑对耦合器位置敏感度大小,利用表 2 中田字型线圈的参数,通过 MATLAB 仿真显示了互感从 $35 \mu\text{H}$ 降至 $15 \mu\text{H}$ 时两种拓扑发射线圈电流的变化情况,分别如图 10(a)、(b)所示。

结合表 1 中发射线圈电流表达式可知,当输入电压 U_{IN} 一定时, S-S 拓扑的输入电流 I_P 随负载和互感的变化而变化, I_S 随互感的变化而变化,与负载无关,具有恒流特性。当互感降低时,发射端线圈电流变大,理论上,当接收线圈距离足够远时,互感几乎为 0,此时发射线圈电流将无限大,但是在实际情况下,由于线圈内阻的存在,最大发射

表 1 两种补偿拓扑的变量表达式

Table 1 Expression of variables for two types of compensation topology

参数名称	表达式	
	S-S	LCC-S
谐振条件	$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_P C_P}} = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}}$	$j\omega L_F + \frac{1}{j\omega C_F} = 0, j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S} = 0$ $j\omega L_P + \frac{1}{j\omega C_P} + \frac{1}{j\omega C_F} = 0$
各支路电流	$I_P = \frac{R_L U_{IN}}{\omega^2 M^2}, I_S = -\frac{U_{IN}}{j\omega M}$	$I_P = \frac{U_{IN}}{j\omega L_F}, I_S = \frac{MU_{IN}}{L_F R_L}, I_F = \frac{M^2 U_{IN}}{L_F^2 R_L}$
输出电压	$U_L = -\frac{U_{IN} R_L}{j\omega M}$	$U_L = \frac{MU_{IN}}{L_F}$
输出功率	$P_{out} = \frac{U_{IN}^2 R_L}{\omega^2 M^2}$	$P_{out} = \frac{M^2 U_{IN}^2}{L_F^2 R_L}$

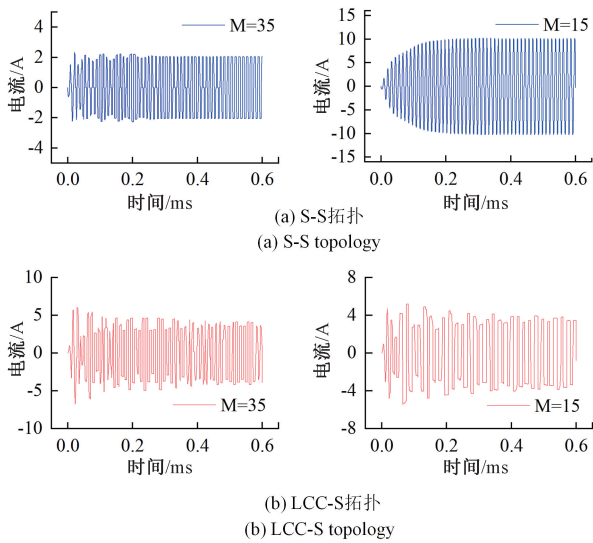


图 10 不同互感下的发射线圈电流变化

Fig. 10 Current variation of emission coil under different mutual inductance

端电流为:

$$I_{P_{\max}} = \frac{U_{IN}}{R_P} \quad (6)$$

但是通常线圈的内阻较小,所以当互感降低时容易造成线圈过流。对于 LCC-S 拓扑,当系统工作频率一定时,发射线圈电流和负载、线圈的耦合情况无关,具有恒流输入特性,接收端输出电压与负载无关,具有恒压输出特性。

图 11 显示了两种不同拓扑下输出功率和效率随互感变化情况。从图 11(a)中可以看出,随着互感的降低,S-S 拓扑输出功率从 47 W 增大至 217 W,因此在耦合器发生错位的情况下,系统容易发生过载现象。而 LCC-S 拓扑输出功率随互感的降低而降低,且变化趋势相较于 S-S 拓扑更为平缓。图 11(b)为效率与互感的关系,当互感从 35 μH 降低至 15 μH 时,S-S 拓扑的系统效率降低了

6.7%,而 LCC-S 拓扑结构的系统效率仅降低了 2.5%。因此,当耦合器偏移情况相同时 LCC-S 拓扑相较于 S-S 拓扑具有更好的输出稳定性。

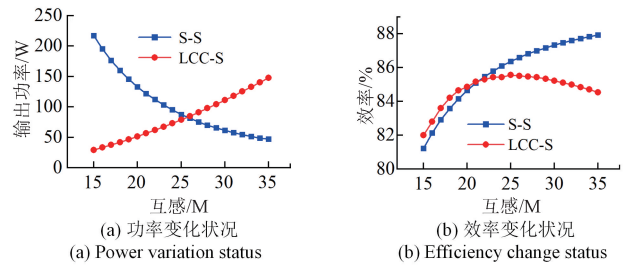


图 11 互感变化输出状况对比

Fig. 11 Comparison of output status of mutual inductance changes

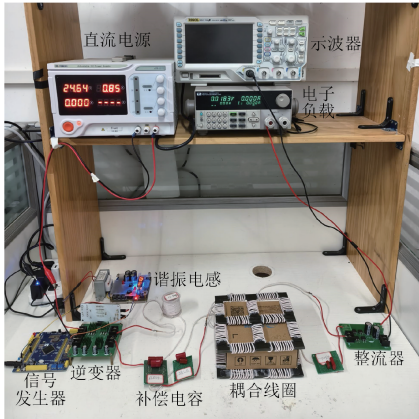
综上所述,本章通过对 S-S 与 LCC-S 补偿拓扑进行仿真分析,对比了其输入电流与输出功率、效率的变化情况,验证了 LCC-S 拓扑对耦合器位置敏感度更低,具有更好的鲁棒性。

4 实验验证

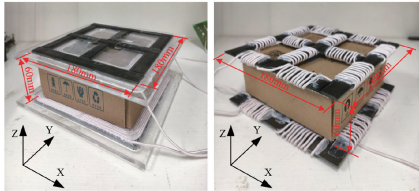
为验证田字型线圈抗偏移能力,根据仿真模型制作了实验样机,并绕制了常用的方形线圈作为对照实验,如图 12 所示。其中逆变器的功率开关型号选用 CREE C2M0080120,可以承载较高的输入电压和系统频率;整流器选用型号为 MBRB20220CT 的肖特基二极管,反向恢复时间短,正向导通压降小。

在两种线圈绕制过程中,利兹线用量和规格、铁氧体磁芯用量和形状、气隙长度、尺寸大小均保持一致,两者都采用 LCC-S 拓扑进行补偿。

根据工信部对无线充电设备管理的规定^[15],系统频率采用 85 kHz,输入电压 36 V。通过 MATLAB 对不同负载下的效率进行仿真分析,得到图 13。由图中可知在负载从 5 Ω 变化至 40 Ω 过程中,效率先增大后减小,在负载为



(a) 系统样机
(a) System prototype



(b) 田字型线圈
(b) Dipole coils

(c) 平面线圈
(c) Planar coils

图 12 系统样机

Fig. 12 System prototype

20 Ω 时系统效率达到最大值 85.55%。其他实验具体参数如表 2 所示。由表中可知,在使用材料规格相同的情况下,方形线圈的自感仅为田字型线圈的 0.591 倍。这意味着在自感一致时,田字型线圈所需用电量更小,且相同气隙下的耦合系数也要高于方形线圈。

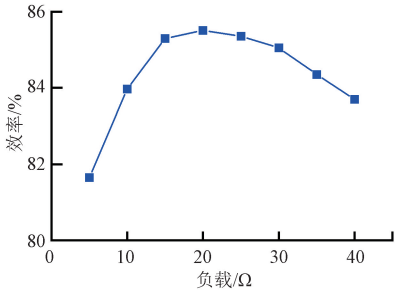


图 13 效率与负载关系图

Fig. 13 Efficiency and load relationship diagram

图 14 为田字型线圈与方形线圈在偏移过程中耦合系数变化率状况图。偏移极限为耦合器尺寸的 1/3,且偏移过程中气隙长度保持不变,由于两种线圈均为轴对称结构,在沿 X 轴与 Y 轴正、负方向偏移时,耦合系数变化幅度是相似的。从图中可以看出,在偏移过程中田字型线圈的耦合系数变化程度总体小于方形线圈。在沿 X 轴偏移 60 mm 时,其耦合系数降低了 28.01%,而方形线圈降低了 36.5%;偏移至 Y 轴极限位置时,田字型耦合系数降低了 27.5%,方形线圈则降低了 36.1%。

表 2 WPT 系统参数

Table 2 WPT system parameter

参数	数值	
	田字型线圈	方形线圈
直流输入电压 U_{IN}/V	36	36
系统频率 f/kHz	85	85
发射线圈自感 $L_P/\mu H$	110	65
接收线圈自感 $L_S/\mu H$	110	65
发射谐振电感 $L_F/\mu H$	22	13
发射补偿电容 C_P/nF	39.84	83.47
发射补偿电容 C_F/nF	159.36	269.69
接收补偿电容 C_S/nF	31.87	53.94
线圈内阻 $R_P, R_S/\Omega$	0.5	0.5
系统互感 $M/\mu H$	26	13.5
等效负载 R_L/Ω	20	20
线圈气隙间距/mm	60	60

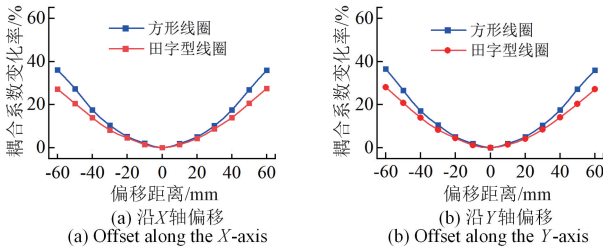
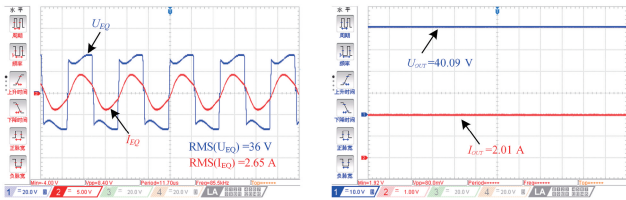


图 14 耦合系数变化对比图

Fig. 14 Comparison chart of coupling coefficient changes

图 15(a)、(b)分别为田字型线圈正对时,逆变器输出与负载输出波形图,从图中可以看出,在线圈正对时,输出电压为 40.09 V,输出电流为 2.01 A,输出功率为 80.58 W,输入功率为 95.4 W,输出效率 84.5%。



(a) 逆变器输出电压、电流
(a) Inverter output voltage and current

(b) 负载输出电压、电流
(b) Load output voltage and current

图 15 线圈正对时系统输出

Fig. 15 The system output when the coil is aligned

图 16 中(a)、(b)分别为方形线圈和田字型线圈沿 X、Y 轴偏移时功率变化情况。从图中可以看出随着偏移距离的增大,两种线圈的功率变化率逐渐升高,且方形线圈变化程度始终大于田字型线圈。偏移至 X 轴极限时,方形线圈功率下降了 55.8%,而田字型线圈功率仅下降 44.6%;偏移至 Y 轴极限时,田字型线圈相较于方形线圈功率变化

率降低了 11.12%,证明在两个方向田字型线圈均具有更好的抗偏移性能。

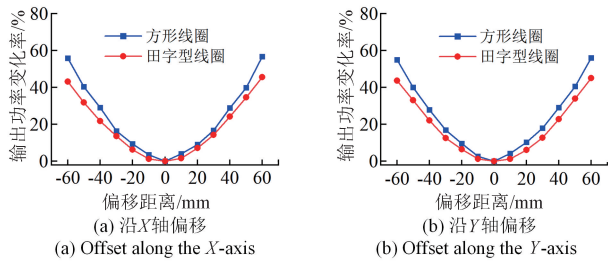


图 16 功率变化率对比图

Fig. 16 Comparison of the rate of change of power

图 17 中(a)、(b)分别显示了在沿 X、Y 轴偏移过程中方形线圈和田字型线圈的效率变化情况。从图中可以看出,随着偏移距离的增大,两种耦合器的效率均逐渐降低,当田字型线圈正对时,效率为 84.54%,沿 X 轴方向偏移量达到 60 mm 时,效率最低降至 81.91%,仅下降 2.63%,而方形线圈在偏移至 Y 轴极限时,效率下降到最小,降低了 5.8%,意味着田字型线圈具有更好的鲁棒性。

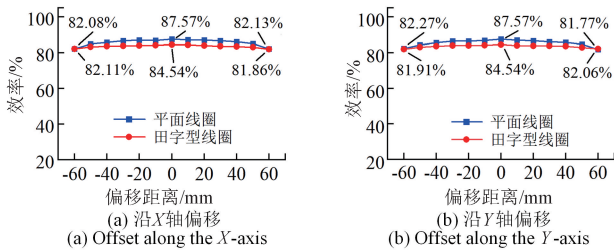


图 17 效率对比图

Fig. 17 Efficiency comparison chart

综上所述,田字型线圈在偏移过程中,耦合系数变化与功率变化程度在 X 轴与 Y 轴方向均小于方形线圈,且偏移程度为线圈尺寸的 1/3 时,效率仅下降 2.63%,说明所提出的新型偶极线圈相较于方形线圈对耦合器的位置敏感度更低,具有更好的鲁棒性。

5 结 论

针对无线充电过程中,耦合器偏移导致系统的输出功率与效率下降的问题,本文提出了一种基于偶极线圈的具有高抗偏移性能的无线电能传输系统结构。通过对偶极线圈磁极方向的设计与结构尺寸的优化,建立了田字型线圈模型;从输入电流变化、输出稳定性的角度对比分析了 LCC-S 拓扑与 S-S 拓扑对耦合器位置的敏感度大小;为了提高实验的科学性与严谨性,绕制了尺寸、用线量、磁芯规格、气隙长度均相同的方形线圈作为对比。实验结果表明,当耦合器沿 X、Y 轴的偏移范围为 $-60 \sim +60$ mm 时,基于田字型线圈的 WPT 系统功率跌落程度相较于方形线圈降低 11.12%,且效率仅下降 2.63%,验证了其具有良好的抗偏移性能。为应对 WPT 系统越来越复杂的工作环

境,后续将进一步提高耦合器在垂直方向与旋转方向的抗偏移性能。

参考文献

- [1] 赵永秀, 万光一, 王亚辉, 等. 三线圈 MCR-WPT 系统中继线圈轴向位置的优化研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 1-5.
ZHAO Y X, WAN G Y, WANG Y H, et al. Optimization research on axial position of relay coil in three coil MCR-WPT system [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 1-5.
- [2] 苏玉刚, 檀竹斌, 胡宏晟, 等. 电场耦合电动车动态无线充电系统及耦合机构设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2024: 1-12. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232022.
SU Y G, TAN ZH B, HU H SH, et al. Design method of dynamic wireless charging system and coupling mechanism for electric vehicle coupled with electric field[J]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-12. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.232022.
- [3] SHEN D, DU G P, ZENG W, et al. Research on optimization of compensation topology parameters for a wireless power transmission system with wide coupling coefficient fluctuation [J]. IEEE Access, 2020, 8: 59648-59658.
- [4] BOSSHARD R, IRURETAGOYENA U, KOLAR J W. Comprehensive evaluation of rectangular and double-D coil geometry for 50 kW/85 kHz IPT System[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1406-1415.
- [5] 巩兆伟, 李金刚, 同向前. 并联混合拓扑的抗偏移恒流输出无线充电系统[J]. 西安理工大学学报, 2023, 39(4): 595-602.
GONG ZH W, LI J G, TONG X Q. Anti offset constant current output wireless charging system with parallel hybrid topology [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(4): 595-602.
- [6] CHOI B H, THAI V X, LEE E S, et al. Dipole-coil-based wide-range inductive power transfer systems for wireless sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3158-3167.
- [7] RONG C C, HE X R, ZENG Y Q, et al. High-efficiency orientation insensitive WPT systems using magnetic dipole coil for low-power devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 4985-4990.
- [8] 李中启, 熊鑫博, 孔彭生, 等. 无线充电系统电磁屏蔽与效率优化技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 151-162.

- LI ZH Q, XIONG X B, KONG P SH, et al. Research on electromagnetic shielding and efficiency optimization technology of wireless charging system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 151-162.
- [9] RITURAJ G, KUMAR P. A new magnetic structure of unipolar rectangular coils in WPT systems to minimize the ferrite volume while maintaining maximum coupling[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(6): 2072-2076.
- [10] 陈雨晨, 陈凯楠, 郑树轩, 等. 无线电能传输平板型磁耦合机构电感解析建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1504-1517.
- CHEN Y CH, CHEN K N, ZHENG SH X, et al. Analytical modeling method for inductance of planar magnetic coupling mechanism for wireless power transmission [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2023, 43(4): 1504-1517.
- [11] KUPERMAN A. Additional two-capacitor basic compensation topologies for resonant inductive wpt links [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2568-2570.
- [12] 尹有为, 赵金伟, 李磊, 等. 基于 SS 拓扑的无线电能传输偏移特性研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(5): 73-77.
- YIN Y W, ZHAO J W, LI L, et al. Research on the offset characteristics of wireless energy transmission based on SS topology[J]. Power Electronics Synopsis, 2021, 55(5): 73-77.
- [13] 李乐, 程冰, 何良宗, 等. 基于补偿网络电流分析的恒压恒流无线充电系统[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 101-110.
- LI L, CHENG B, HE L Z, et al. A constant voltage and constant current wireless charging system based on compensation network current analysis[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 101-110.
- [14] 张红辉. MCR-WPT 系统补偿结构设计及其传输特性建模分析[J]. 电子测量技术, 2019, 42(17): 23-26.
- ZHANG H H. Design of compensation structure and modeling analysis of transmission characteristics for MCR-WPT system [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(17): 23-26.
- [15] 工业和信息化部关于印发无线充电(电力传输)设备无线电管理暂行规定的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2023(22): 32-34.
- Notice of the ministry of industry and information technology on issuing interim regulations on radio management of wireless charging (power transfer) equipment[J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2023(22): 32-34.

作者简介

司庆贺, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输。

E-mail: 332682@whut.edu.cn

李建贵(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型电机及控制、电动汽车驱动及控制、无线电能传输、新型磁性材料、可再生能源发电等。

E-mail: jianguili@whut.edu.cn

王隆扬, 博士研究生, 主要研究方向为无线电能传输、电力新能源。

E-mail: wanglongyang1994@163.com

罗光斌, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输。

E-mail: 271266@whut.edu.cn