

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.04.016

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式: 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 Zhaowei, LI Jingang, TONG Xiangqian. Parallel hybrid wireless charging with misalignment tolerance and constant current output[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(4): 595-602.

并联混合拓扑的抗偏移恒流输出无线充电系统

巩兆伟^{1,2}, 李金刚¹, 同向前¹

(1. 西安理工大学 电气工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为了抑制耦合线圈偏移导致系统输出电流的波动, 设计基于参数优化的 LCC-S 并联混合型抗偏移恒流无线充电系统。首先建立 LCC-S 混合补偿拓扑的电路模型, 总结分析系统输出电流与耦合线圈间互感和负载的关系。利用 DDQ(double-D quadrature)线圈结构解耦特性, 消除混合型电路的交叉互感。其次提出混合电路参数优化设计方法, 实现系统最大偏移范围内稳定输出。实验结果表明, 在耦合线圈的 0%~50% 的偏移范围内, 接收端可实现变负载条件下 10 A 恒流输出, 且电流变化率均不超过 5%。

关键词: 无线充电; 抗偏移; LCC-S 并联混合型; 恒流输出

中图分类号: TM 724

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)04-0595-08

Parallel hybrid wireless charging with misalignment tolerance and constant current output

GONG Zhaowei^{1,2}, LI Jingang¹, TONG Xiangqian¹

(1. Faculty of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to suppress the fluctuation of system output current caused by coupling coil offset, a parallel hybrid LCC-S topology based on parameter optimization with misalignment tolerance and constant-current output wireless charging system is designed. Firstly, the circuit model for the LCC-S hybrid compensation topology is established, with the relationship between the output current of the system and the mutual inductance and load of the coupling coil summarized and analyzed. The coupling characteristic of DDQ (double-D quadrature) coil structure is used to eliminate cross inductance of hybrid circuit. Secondly, a hybrid circuit parameter optimization design method is proposed to achieve anti-offset constant current output of the system. The experimental results show that the output current of the secondary side can maintain 10 A in the variable load condition, and that the output current fluctuation is less than $\pm 5\%$, when the offset range of the coupling coil is between 0% and 50%.

Key words: wireless charging; misalignment tolerance; LCC-S parallel hybrid structure; constant current output

无线电能传输技术(wireless power transfer, WPT)具有无直接接触、无漏电,且环境友好性等优点^[1-5],因此 WPT 技术可应用于医疗设备、电子产品和电动汽车等多领域^[6-8]。WPT 系统的负载多为

电池性负载。在充电过程中,系统的负载阻值会发生变化,且耦合线圈间极易产生相对偏移,这就要求 WPT 系统能够实现抗偏移恒流输出^[9-11]。

现阶段各研究者们针对无线充电的研究主要

收稿日期: 2022-06-01; 网络首发日期: 2023-04-24

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230424.1520.016.html>

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2022GY-310); 陕西省科技厅资助项目(2021GY-324)

通信作者: 巩兆伟,男,博士生,研究方向为电动汽车无线充电技术。E-mail:911737860@qq.com

集中在补偿电路设计、耦合线圈结构设计以及系统控制策略的研究等方面。文献[12]提出在接收端增加 DC-DC 变换器,抑制线圈的耦合系数变化和负载的变化,实现负载端恒流充电,系统最高效率为 88%。文献[13]采用增加 Buck 变换器抑制由于耦合线圈偏移导致输出功率的波动,系统效率最高可达 94.29%。系统初级部分逆变器通过变频和移相控制也可实现抗偏移输出^[14-15],但是变频控制可能会出现频率分裂问题^[16],导致系统输出功率减少,降低传输效率。而移相控制很难实现系统宽范围 ZPA(zero phase angle)输出。同时,这些控制方法需要采集负载端的电压和电流,通过无线通信的方式进行信息交互,但是当发生通信故障的极端情况时,会造成输出不稳定,甚至烧毁逆变器的危险。在线圈耦合结构方面,主要设计均匀的磁场结构,抑制线圈偏移造成的耦合系数波动。文献[17]提出 3 维耦合机构线圈结构并建立其线圈模型,该结构在不同方向具有较好的传输性能,但是其模型较大,不适用于接收端有限空间的无线能量传输系统,例如电动汽车等。文献[18]提出一种非对称的耦合结构并进行实验验证。结果表明,当耦合线圈间的相对偏移达到 1/3 时,系统仍具有较高的传输效率。文献[19]提出一种 H-DD 耦合线圈结构,有效提升耦合线圈在 x 、 y 和 z 方向的抗偏移工作范围。同时,结合参数优化算法,可实现耦合系数 0.1~0.4 变化范围内,系统输出电流波动小于 16.6% 的抗偏移输出效果。文献[20]针对水下自动航行器无线充电偏移问题,提出旋转式耦合线圈,通过 Biot-Savart 定律详细分析系统磁场的分布。在补偿网络方面,文献[21]提出混合型抗偏移恒压输出的无线电能传输系统并搭建实验平台。实验结果表明,系统耦合机构线圈最大偏移量可达 50%。文献[22]提出 QDQP 耦合线圈结构,该线圈结构可实现水平面方向最大 37.5% 偏移条件下稳定输出。文献[23]提出将补偿电感的参数优化方法用于混合拓扑无线充电系统,但是该参数设计方法是基于耦合线圈偏移互感变化相同的情况设计的,但实际应用中很难保证耦合线圈变化一致,同时方法设计复杂。

本文提出基于参数优化的 LCC-S 并联混合型无线充电方法实现了系统抗偏移恒流输出,无需复杂的闭环控制策略和无线通信装置,采用定频 85 kHz, 占空比 50% 的方波逆变器,降低系统控制复杂度。首先建立 LCC-S 混合补偿拓扑的电路模型,总结分析系统输出电流与耦合线圈间互感和负载的关系。采用 DDQ 线圈结构消除耦合线圈间交叉耦

合,通过对系统补偿电路参数优化设计,选择合适的电路参数,实现系统在 50% 偏移范围内恒流输出。最后搭建 600 W 实验样机,实现在横向偏移 140 mm 范围内始终保持在一定范围的恒流输出,并且最高效率可达 90%。

1 系统电路拓扑分析

图 1 是 LCC-S 混合补偿网络拓扑电路,其中 E 是系统直流供电电压, U_{in} 和 I_{in} 分别是逆变器输出的高频交流电压和电流, ω 为系统工作频率, M_{12} 和 M_{34} 是耦合线圈间的主互感, M_{13} 、 M_{14} 、 M_{23} 、 M_{24} 是耦合线圈间的交叉互感, R_L 是系统负载电阻, C_L 是直流侧滤波电容。

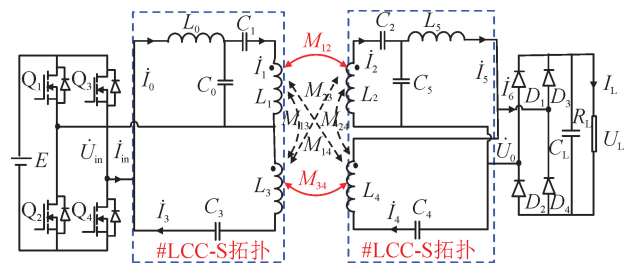


图 1 LCC-S 混合拓扑电路
Fig. 1 LCC-S hybrid topology circuits

LCC-S 混合补偿网络分别在原边和副边采用并联的方式,系统参数工作于完全谐振状态下,即拓扑电路中的各电感 L 、电容 C 满足以下谐振关系:

$$\begin{cases} \omega^2 L_0 C_0 = \omega^2 L_1 \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} = 1 \\ \omega^2 L_3 C_3 = \omega^2 L_2 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} = 1 \\ \omega^2 L_4 C_4 = \omega^2 L_5 C_5 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

R_{AB} 是系统的等效负载电阻,与负载 R_L 满足以下关系:

$$R_{AB} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (2)$$

列写系统 KVL 方程,可得

$$\begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} & 0 & Z_{14} & Z_{15} \\ 0 & Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & 0 \\ 0 & Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} \\ 0 & 0 & Z_{42} & 0 & Z_{44} & Z_{45} \\ 0 & Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \\ \dot{I}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ 0 \\ -\dot{U}_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{00} = j\omega L_0 + (j\omega C_0)^{-1}, Z_{01} = -(j\omega C_0)^{-1} \\ Z_{10} = (j\omega C_0)^{-1}, Z_{11} = -(j\omega C_0)^{-1} - (j\omega C_1)^{-1} - j\omega L_1 \\ Z_{12} = j\omega M_{12}, Z_{14} = -j\omega M_{13}, Z_{15} = j\omega M_{14} \\ Z_{21} = j\omega M_{13}, Z_{22} = -j\omega M_{23}, Z_{23} = (j\omega C_3)^{-1} + j\omega L_3 \\ Z_{24} = -j\omega M_{34}, Z_{31} = j\omega M_{12} \\ Z_{32} = -(j\omega L_2 + (j\omega C_2)^{-1} + (j\omega C_5)^{-1} + R_{AB}) \\ Z_{33} = j\omega M_{23}, Z_{34} = -j\omega M_{24}, Z_{35} = (j\omega C_5)^{-1} \\ Z_{42} = -(j\omega C_5)^{-1}, Z_{44} = R_{AB} \\ Z_{45} = j\omega L_5 + (j\omega C_5)^{-1} + R_{AB}, Z_{51} = j\omega M_{14} \\ Z_{52} = -j\omega M_{24}, Z_{53} = j\omega M_{34} \\ Z_{54} = -(j\omega L_4 + (j\omega C_4)^{-1} + R_{AB}), Z_{55} = -R_{AB} \end{array} \right. \quad (4)$$

为了简化分析过程,当耦合线圈的交叉互感 $M_{13}, M_{14}, M_{23}, M_{24}$ 均为零时,对式(3)计算电路拓扑的相关电流,

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_0 = R_{AB} \left(\frac{\dot{U}_{in} M_{12}^2}{\omega^2 L_0^2 L_3^2} + \frac{\dot{U}_{in} M_{12}}{\omega^2 L_0 L_5 M_{34}} \right) \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega L_0} \\ \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{in} M_{12}}{j\omega L_0 L_5} \\ \dot{I}_4 = -R_{AB} \left(\frac{\dot{U}_{in} M_{12}}{\omega^2 L_0 L_5 M_{34}} + \frac{\dot{U}_{in}}{\omega^2 M_{34}^2} \right) \\ \dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega M_{34}} \end{array} \right. \quad (5)$$

由式(5)整理逆变器的总输出电流和系统输入阻抗 Z_{in} 分别为,

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{in} = \dot{I}_0 - \dot{I}_4 = \frac{R_{AB} \dot{U}_{in}}{\omega^2} \left(\frac{M_{12}}{L_0 L_5} + \frac{1}{M_{34}} \right)^2 \\ Z_{in} = \frac{\dot{U}_{in}}{\dot{I}_{in}} = \frac{L_0^2 L_5^2 M_{34}^2 \omega^2}{(L_0 L_5 + M_{12} M_{34})^2 R_{AB}} \end{array} \right. \quad (6)$$

由式(6)可以明显发现,系统的输入阻抗是纯阻性,整个系统工作于完全谐振条件下,系统的无功功率传输为零,有利于提高系统整体效率。

同时可以发现,负载端输出电流为,

$$\dot{I}_6 = \dot{I}_4 + \dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_{in} M_{12}}{j\omega L_0 L_5} + \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega M_{34}} \quad (7)$$

当系统发生偏移情况时,耦合线圈的主互感 M_{12}, M_{34} 是同时变化的,随着偏移增大互感会同时降低。此时 LCC-LCC 拓扑电路的输出电流会下降, S-S 拓扑电路的输出电流会增大,因此,通过合理设计系统参数可以使系统在一定的偏移范围内输

出电流趋于稳定。

2 系统线圈设计与参数优化分析

2.1 DDQ 线圈设计

根据混合型拓扑电路传输特性分析得出在交叉耦合为零时系统输出与负载无关的恒定电流值。目前, DD 和 DDQ 线圈结构可实现四线圈无线充电,同时满足交叉互感得到抑制的需求。本文无线充电系统选择 DDQ 线圈模型,图 2 是系统耦合机构的 DDQ 型线圈,其中 L_1 和 L_2 分别是 Q 线圈, L_3 和 L_4 构成 DD 线圈。DD 线圈与 Q 线圈外围大小都是 $280 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$, 垂直距离 110 mm 。

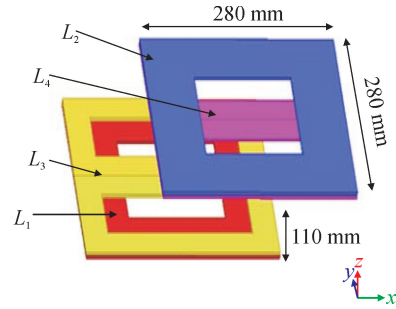


图 2 DDQ 结构线圈

Fig. 2 DDQ coil structure

耦合线圈在实际应用中不可避免地会发生偏移,图 3 是 DDQ 线圈在 x 方向和 y 方向的偏移互感实测曲线。由图 3(a) 可以发现,当系统线圈在 x 方向发生偏移时,耦合线圈的主互感 M_{12} 和 M_{34} 变化明显,即随着偏移距离的增大而降低,同时耦合线圈的交叉互感 $M_{13}, M_{14}, M_{23}, M_{24}$ 很小,可以忽略不计。由图 3(b) 当系统线圈在 y 方向发生偏移时,耦合线圈的主互感 M_{12} 和 M_{34} , 交叉互感 M_{14} 和 M_{23} 同时变化剧烈,而同侧的 M_{13} 和 M_{24} 接近为 0。通过对 DDQ 线圈结构的分析可得,当系统在 y 方向进行偏移时,耦合线圈不能消除交叉耦合。实际应用中, x 代表电动汽车前进的方向, y 方向代表电动汽车左右方向。 y 方向偏移可以通过电动汽车辅助设备进行调整,而 x 方向很难调整。因此本文重点分析 DDQ 耦合线圈机构 x 方向发生偏移对系统输出的影响。

2.2 参数优化设计

本文提出一种系统混合补偿电路中参数 L_0 及 L_5 的优化方法,使系统在既定的偏移量下具有较强的抗偏移性。根据图 3(a) 中实测互感在 x 方向的变化趋势,系统的互感 M_{12} 和 M_{34} 满足如下关系式:

$$M_{34} = aM_{12} + b \quad (8)$$

式中 a 和 b 是系数,根据拟合函数得到。根据实验

测得系统的主互感 M_{12} 和 M_{34} 得出参数 a 和 b 分别是 0.52 和 2.17×10^{-6} , 系统输出电流表达式为:

$$I_6 = \frac{U_{in}}{\omega} \left(\frac{M_{12}}{L_0 L_3} + \frac{1}{0.52 M_{12} + 2.17 \times 10^{-6}} \right) \quad (9)$$

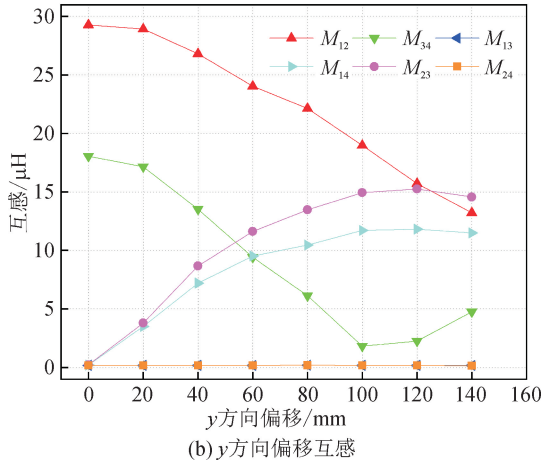
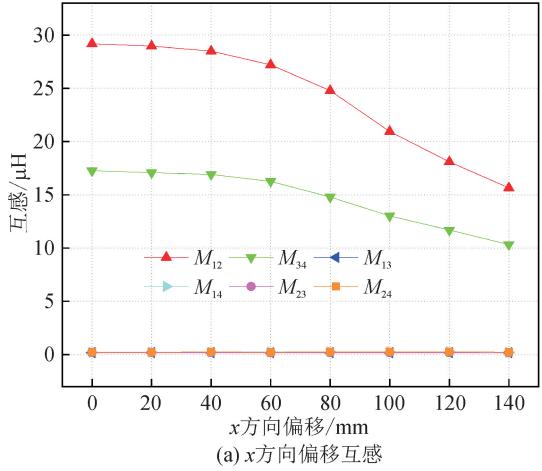


图3 DDQ耦合线圈
Fig. 3 The DDQ coils

由 LCC-S 并联混合拓扑的输出电流和耦合互感的变化曲线可知, 该输出电流呈现凹函数变化趋势, 即随着耦合互感的降低, 表现为先减少到最低点, 然后反向增大。则系统输出最小电流对应的耦合互感为 M_{12_opt} , 令混合拓扑的输出电流表达式对 M_{12} 偏导等于零, 即:

$$\frac{dI_6(M_{12})}{dM_{12}} = 0 \quad (10)$$

进而求解可得:

$$M_{12_opt} = -\frac{b}{a} + \sqrt{\frac{L_0 L_5}{a}} \quad (11)$$

同时对系统输出电流 I_6 求解 M_{12} 可得, 其中 M_{12_1} 是凹函数曲线左侧值, M_{12_2} 是凹函数曲线右侧值, 即:

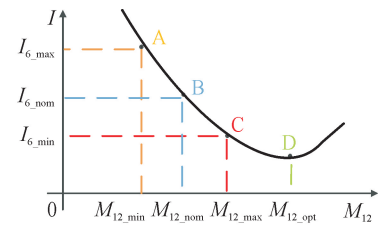
$$\begin{cases} M_{12_1} = \frac{-bU_{in} + aI_6 L_0 L_5 \omega - \sqrt{\Delta}}{2aU_{in}} \\ M_{12_2} = \frac{-bU_{in} + aI_6 L_0 L_5 \omega + \sqrt{\Delta}}{2aU_{in}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:

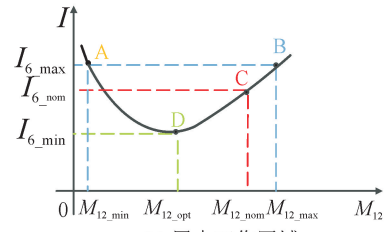
$$\Delta = (-bU_{in} + aI_6 L_0 L_5 \omega)^2 + 4aU_{in}(-L_0 L_5 \omega + bI_6 L_0 L_5 \omega) \quad (13)$$

当系统工作于图 4(a) 条件下, 可整理得到此时耦合互感的工作范围 ΔM_{12_a} , 即:

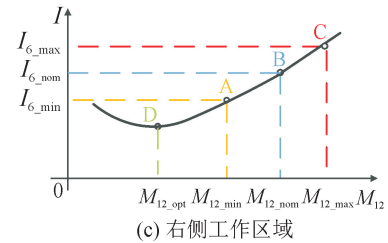
$$\Delta M_{12_a} = M_{12_1}(I_{6_min}) - M_{12_1}(I_{6_max}) = \frac{a(I_{6_min} - I_{6_max})L_0 L_5 \omega - \sqrt{\Delta_{I_{6_min}}} + \sqrt{\Delta_{I_{6_max}}}}{2aU_{in}} \quad (14)$$



(a) 左侧工作区域



(b) 居中工作区域



(c) 右侧工作区域

图4 系统输出电流与互感的变化曲线

Fig. 4 Output current curve based on mutual inductance

当系统工作于图 4(b) 条件下, 可整理得到此时耦合互感的工作范围 ΔM_{12_b} , 即:

$$\Delta M_{12_b} = M_{12_2}(I_{6_max}) - M_{12_1}(I_{6_max}) = \frac{\sqrt{\Delta_{I_{6_max}}}}{aU_{in}} \quad (15)$$

当系统工作于图 4(c) 条件下, 可整理得到此时耦合互感的工作范围 ΔM_{12_c} , 即:

$$\Delta M_{12_c} = M_{12_2}(I_{6_max}) - M_{12_2}(I_{6_min}) = \frac{a(I_{6_max} - I_{6_min})L_0 L_5 \omega + \sqrt{\Delta_{I_{6_max}}} - \sqrt{\Delta_{I_{6_min}}}}{2aU_{in}} \quad (16)$$

结合图 4, 我们可以得到 ΔM_{12_b} 比 ΔM_{12_a} 和

ΔM_{12_c} 的抗偏移工作范围大。因此,本文补偿参数工作于图 4(b)的状态。

进而可整理表达式:

$$\begin{cases} \frac{U_{in}}{\omega} \left(\frac{M_{12_{opt}}}{L_0 L_5} + \frac{1}{aM_{12_{opt}} + b} \right) \geq I_{min} \\ \frac{U_{in}}{\omega} \left(\frac{M_{12_{max}}}{L_0 L_5} + \frac{1}{aM_{12_{max}} + b} \right) \leq I_{max} \\ \frac{U_{in}}{\omega} \left(\frac{M_{12_{min}}}{L_0 L_5} + \frac{1}{aM_{12_{min}} + b} \right) \leq I_{max} \end{cases} \quad (17)$$

对式(17)进行求解,可得:

$$\begin{cases} L_0 L_5 \leq \frac{2U_{in}^2 - bI_{min}U_{in}\omega}{aI_{min}^2\omega^2} + 2\sqrt{\frac{-U_{in}^4 + bI_{min}U_{in}^3\omega}{a^2I_{min}^4\omega^4}} \\ L_0 L_5 \geq \frac{bM_{12_{max}}U_{in} + aM_{12_{max}}^2U_{in}}{-U_{in} + bI_{max}\omega + aI_{max}M_{12_{max}}\omega} \\ L_0 L_5 \geq \frac{bM_{12_{min}}U_{in} + aM_{12_{min}}^2U_{in}}{-U_{in} + bI_{max}\omega + aI_{max}M_{12_{min}}\omega} \end{cases} \quad (18)$$

本文设定系统额定输出电流的标准值为 10 A, 输出电流的变化不超过设定值的 5%, 即输出最大电流为 10.5 A, 最小输出电流 9.5 A, 耦合互感变化范围为 15~30 μH , 主互感 M_{12} 和 M_{45} 的相关系数 a 和 b 分别是 0.52 和 2.17×10^{-6} , 系统输入电压 50 V, 工作角频率 85 kHz, 进而可计算得:

$$366 \times 10^{-12} \leq L_0 L_5 \leq 426 \times 10^{-12} \quad (19)$$

由于 LCC-LCC 补偿网络的对称性, 假设 L_0 和 L_5 相等, 最终计算出 19 μH , 根据式(1)可计算其他补偿元件的参数。

图 5 是不同参数 L_0 取值的系统输出电流变化曲线。

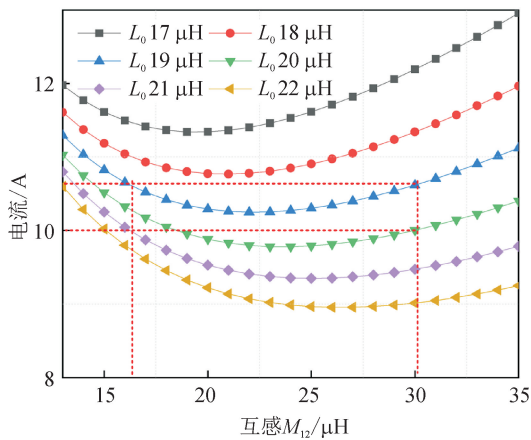


图 5 x 方向偏移 M_{12} - I_6 关系图

Fig. 5 Function of I_6 and M_{12} in x -axis

由图 5 可以发现, 补偿参数 L_0 的取值越大, 系统输出电流越小。同时, 随着偏移量的增大, 其互感

M_{12} 减小, 系统输出电流缓慢下降至最低点, 然后逐渐增大。设定系统输出电流的标准值为 10 A, 输出电流的变化不超过设定值的 5%。图 5 中红色虚线框为系统输出电流变化的允许波动范围, 满足在系统 x 方向偏移 50% 情况下恒流输出, 则当参数 L_0 和 L_5 取值为 19 μH 时, 系统输出具有更好的抗偏移性。该系统输出电流变化趋势与参数优化过程保持一致。

3 实验验证

为了验证上述理论的正确性, 搭建图 6 所示的抗偏移恒流无线充电实验平台, 电路实验参数见表 1。

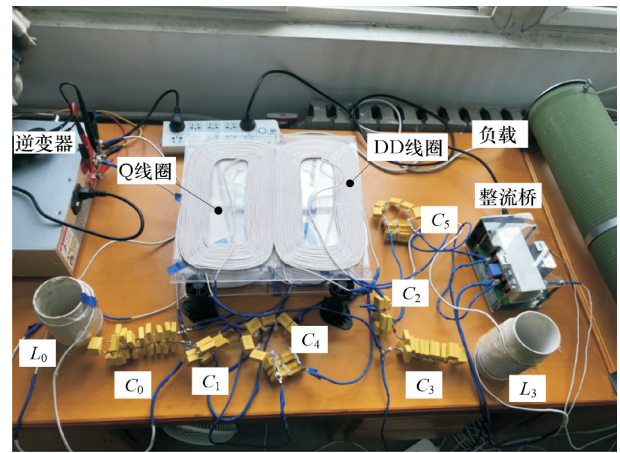


图 6 并联混合拓扑无线充电实验装置图

Fig. 6 Experiment prototype of parallel hybrid IPT system

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值
工作频率 f/kHz	85
电感 $L_0/\mu\text{H}$	19.2
初级线圈自感 $L_1/\mu\text{H}$	150.1
次级线圈自感 $L_2/\mu\text{H}$	150.0
电感 $L_3/\mu\text{H}$	156.1
初级线圈自感 $L_4/\mu\text{H}$	156.0
次级线圈自感 $L_5/\mu\text{H}$	19.1
电容 C_0/nF	185.1
电容 C_1/nF	26.5
电容 C_2/nF	26.6
电容 C_3/nF	22.5
电容 C_4/nF	22.5
电容 C_5/nF	185.1
直流源电压 E/V	50

图7为变负载的负载端输出电流曲线,可以发现当接收线圈从偏移为0增加至140 mm位置,系统输出电流介于9.5~10.5 A,系统输出电流的偏移量不超过设定值的 $\pm 5\%$ 。其中,系统在相同的偏移情况下,负载越大系统输出电流越小。在偏移量80 mm时,系统输出电流最小。系统线圈 x 方向偏移0增加至140 mm过程中,负载端电流变化情况与参数优化曲线保持一致。

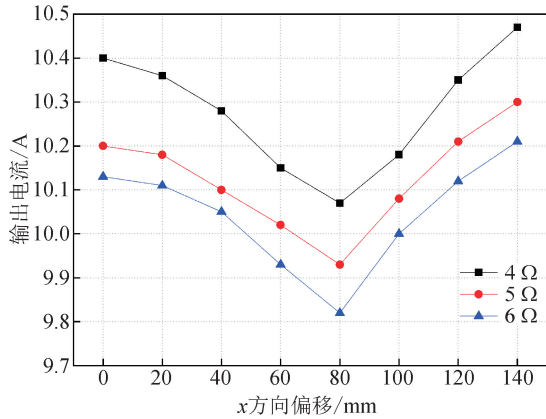


图7 x 方向不同偏移量下系统输出电流

Fig. 7 System output current at different offsets in x -axis

图8为6 Ω负载在系统偏移0 mm、80 mm、140 mm的实验波形。可以明显发现,负载端电流分别为10.13 A、9.82 A和10.21 A,其电流变化率分别为1.3%、1.8%和2.1%。同时,逆变器的输出电压和电流具有较小的相位差,系统无功功率较小。

图9是LCC-LCC和S-S补偿网络的输出电流,在接收端偏移不断增大的过程中,S-S补偿网络的输出电流 I_5 逐渐增大,而LCC-LCC补偿网络的输出电流 I_3 逐渐减小,二者输出电流变化与系统电路分析过程保持一致。随着偏移量增大LCC-LCC补偿网络的输出电流 I_3 畸变严重,主要是由于LCC-LCC补偿网络的输出电流逐渐减小导致基波电流含有量降低造成的。

图10是负载电阻分别是4 Ω、5 Ω和6 Ω时,系统整体输出功率和效率随耦合线圈偏移的变化曲线。可以发现,系统输出功率在耦合线圈0~140 mm偏移范围内平缓变化,整体呈现先降低后增大的变化趋势,见图10(a)。随着耦合线圈 x 方向偏移的增加,系统效率逐渐下降,当系统耦合线圈处于正对的时候,达到最高传输效率90%。

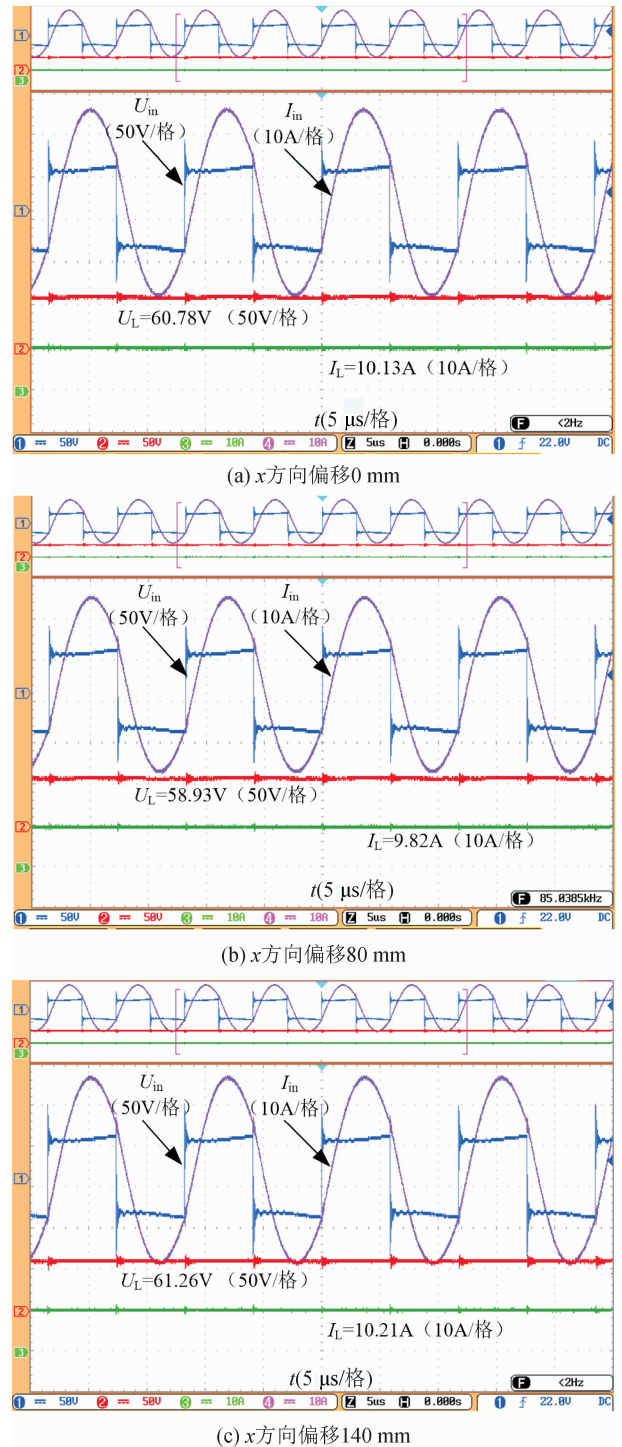


图8 负载6 Ω时 x 方向偏移情况的实验波形
Fig. 8 Experimental waveforms of U_{in} , I_{in} , U_L , I_L of the misalignment in x -axis at $R_L = 6 \Omega$

4 结论

本文提出基于参数优化的LCC-S并联混合型无线充电补偿网络,建立数学模型分析系统输出特性。选取DDQ耦合线圈结构,消除四线圈间的交叉互感。提出LCC-S并联混合型补偿电路的参数

优化设计方法,有利于实现最大范围抗偏移输出。最终搭建 600 W 实验平台,负载电阻在 4~6 Ω 变化时,耦合线圈在 x 方向最大偏移 50% 范围内,负载端电流输出 10 A,且电流波动范围低于 5%,可以实现宽范围抗偏移恒流输出。

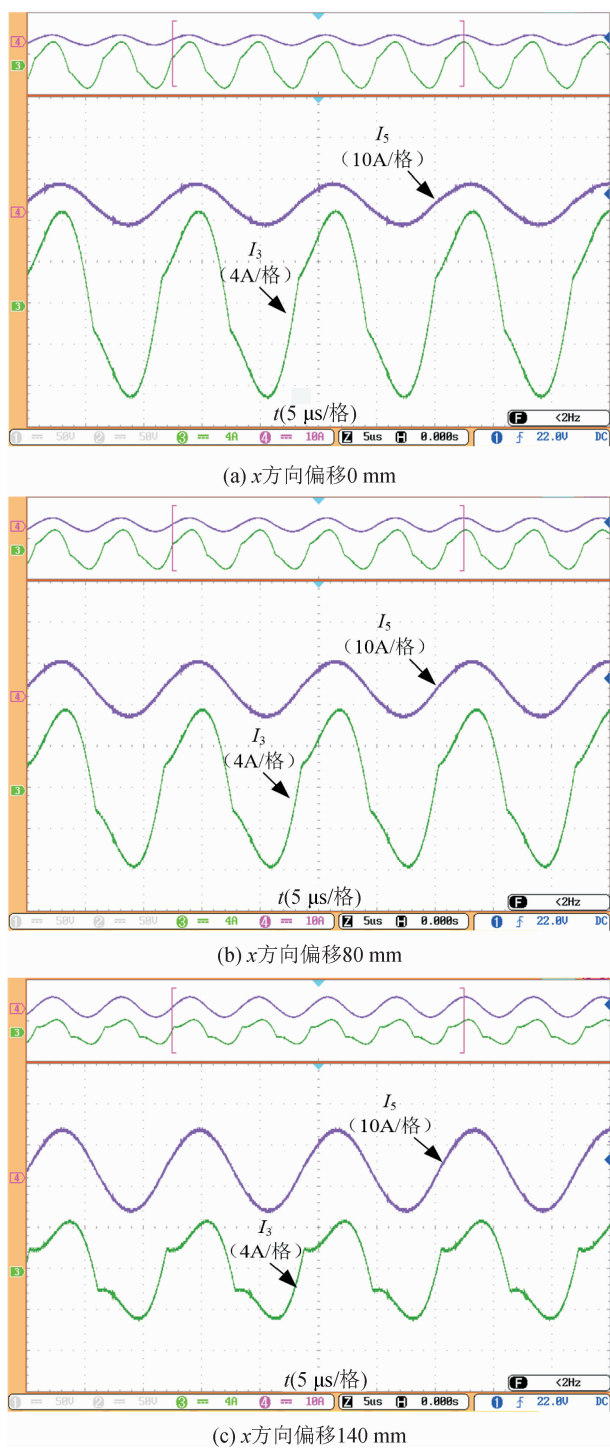


图9 负载 6 Ω 时 x 方向偏移的不同拓扑输出电流波形
Fig. 9 Experimental waveforms of I_{LCC} , I_S of the misalignment in x -axis at $R_L = 6 \Omega$

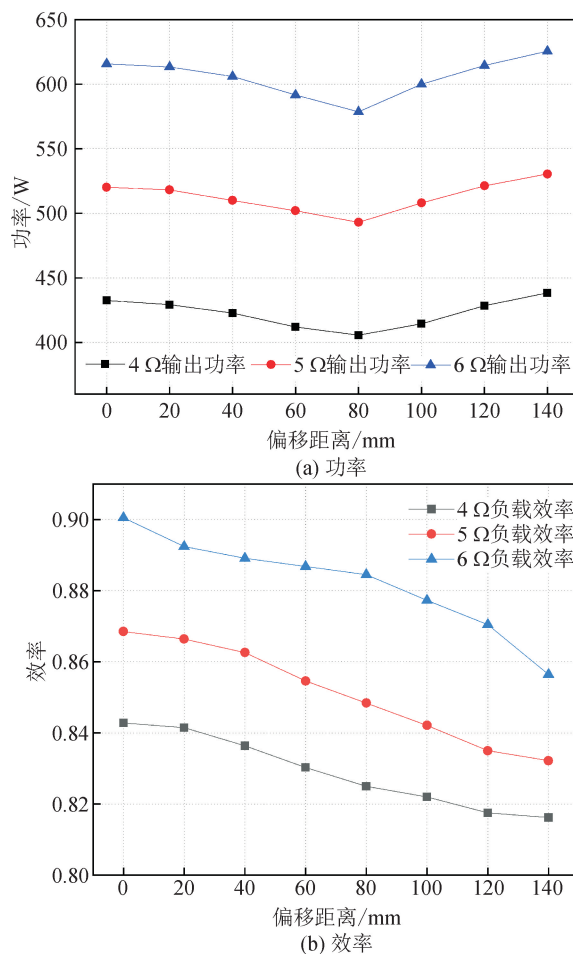


图10 系统功率和效率随耦合线圈偏移的变化
Fig. 10 Variation in power and efficiency due to the misalignment

参考文献:

[1] 吴理豪,张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(上篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6):1153-1165.
WU Lihao, ZHANG Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: part I [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6):1153-1165.

[2] 张文杰,秦伟,宋建成,等. 具有原边互感识别功能的恒流恒压无线充电系统开发[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(4): 52-60.
ZHANG Wenjie, QIN Wei, SONG Jiancheng, et al. Development of constant current and constant voltage wireless charging system with mutual inductance identification function in primary side [J]. Electric Mathines and Control, 2021, 25(4): 52-60.

[3] 张献,白雪宁,沙琳,等. 电动汽车无线充电系统不同结构线圈间互操作性评价方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4150-4160.
ZHANG Xian, BAI Xuening, SHA Lin, et al. Research on interoperability evaluation method of different coils in wireless charging system of electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4150-4160.

[4] 郭星,刘利强,齐咏生,等. 基于 LCL-LCL/S 混合自切换谐振式无线充电系统[J]. 电工技术学报, 2022, 37

- (10): 2422-2434.
 GUO Xing, LIU Liqiang, QI Yongsheng, et al. Hybrid self-switching resonant wireless charging system based on LCL-LCL/S[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2422-2434.
- [5] MI C C, BUJA G, CHOI S Y, et al. Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6533-6543.
- [6] KAN Tianze, ZHANG Yiming, YAN Zhengchao, et al. A rotation-resilient wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 6935-6942.
- [7] 吴旭升, 孙盼, 杨深钦, 等. 水下无线电能传输技术及应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1559-1568.
 WU Xusheng, SUN Pan, YANG Shenqing, et al. Review on underwater wireless power transfer technology and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1559-1568.
- [8] 刘超群, 魏斌, 吴晓康, 等. 电动汽车移动式无线充电技术工程化应用研究[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2211-2218.
 LIU Chaoqun, WEI Bin, WU Xiaokang, et al. Engineering application of dynamic wireless charging technology for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2211-2218.
- [9] 宋凯, 李振杰, 杜志江, 等. 变负载无线充电系统的恒流充电技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 130-136.
 SONG Kai, LI Zhenjiang, DU Zhijiang, et al. Constant current charging technology for variable load wireless charging system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 130-136.
- [10] 麦瑞坤, 陈阳, 张友源, 等. 基于变次级补偿参数的感应式无线充电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3263-3269.
 MAI Ruikun, CHEN Yang, ZHANG Youyuan, et al. Study on secondary compensation capacitor alteration based IPT charging system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3263-3269.
- [11] QU Xiaohui, CHU Haijun, HUANG Zhicong, et al. Wide design range of constant output current using double-sided LC compensation circuits for inductive-power-transfer applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 23640-2374.
- [12] DAI Xin, LI Xiaofei, LI Yong, et al. Impedance-matching range extension method for maximum power transfer tracking in IPT system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4419-4428.
- [13] 时辉, 李维汉, 尹安东, 等. 无线充电系统线圈参数优化与偏移特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(9): 1179-1186.
 SHI Hui, LI Weihang, YIN Andong, et al. Research on coil parameter optimization and misalignment characteristics of wireless charging system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Nature Science), 2021, 44(9): 1179-1186.
- [14] SONG Kai, LI Zhenjie, JIANG Jinhai, et al. Constant current/voltage charging operation for series-series and series-parallel compensated wireless power transfer systems employing primary-side controller[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 8065-8080.
- [15] LI Zhenjie, SONG Kai, JIANG Jinhai, et al. Constant current charging and maximum efficiency tracking control scheme for supercapacitor wireless charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 9088-9100.
- [16] WANG C, COVIC G A, STIELAU O H. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 148-157.
- [17] ZHANG Zhen, ZHANG Bowen. Angular-misalignment insensitive omnidirectional wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2755-2764.
- [18] 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): 3110-3122.
- [19] KE Guangjie, CHEN Qianhong, XU Liliang, et al. Analysis and optimization of a double-sided S-LCC hybrid converter for high misalignment tolerance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4870-4881.
- [20] 程志远, 陈坤, 李东东, 等. 旋转式无线充电系统偏移特性研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4648-4657.
 CHENG Zhiyuan, CHEN Kun, LI Dongdong, et al. Research on offset characteristics of rotary wireless charging system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4648-4657.
- [21] 寇志豪, 杨斌, 陈阳, 等. 二维平面具有抗偏移恒压输出特性的感应式无线充电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4576-4584.
 KOU Zhihao, YANG Bin, CHEN Yang, et al. Study on IPT charging systems with the characteristics of misalignment tolerant in 2-dimension plane and constant voltage output[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4576-4584.
- [22] CHEN Yang, YANG Bin, ZHOU Xiaobin, et al. A hybrid inductive power transfer system with misalignment tolerance using quadruple-D quadrature pads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6039-6040.
- [23] 李砚玲, 杜浩, 何正友. 基于双D形正交混合拓扑的感应电能传输系统恒流输出研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 942-950.
 LI Yanling, DU Hao, HE Zhengyou. Research on constant current output of inductive power transfer system with double-D quadrature hybrid topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 942-950.

(责任编辑 王绪迪)