DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.200 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

双发射端无线充电系统效率优化方法研究

班明飞，周 滔，李振杰(中国电源学会会员)，刘一琦(中国电源学会会员)
(东北林业大学计算机与控制工程学院，哈尔滨 150040)

摘要：充电效率是衡量无线充电系统性能优劣的重要指标。为了提升双发射线圈层叠式磁耦合无线充电系统的充电效率，提出了1种基于电流比例的双环控制方法，在实现恒压、恒流输出的同时可提高约4%的系统效率。首先阐述了关于LCC-S补偿网络的双发射无线充电系统工作原理，建立了互感模型并推导了输出电压、电流关系；然后研究了互感变化和系统效率之间的耦合关系，提出基于最佳电流比的效率优化策略和外环控制实现恒流、恒压输出，内环控制电流分配实现效率优化的双闭环控制方法；最后，通过仿真和250 W实验平台验证了效率最优双闭环控制策略的可行性。

关键词：无线电能传输；效率优化；恒压、恒流充电；电流控制

Research on Efficiency Optimization Method for Dual-transmitter Wireless Charging System

BAN Mingfei, ZHOU Tao, LI Zhenjie, *Member*, *CPSS*, LIU Yiqi, *Member*, *CPSS*
(College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Charging efficiency is an important index for evaluating the performance of a wireless charging system. A dual-loop control method based on current proportion is proposed to improve the charging efficiency of a layered magnetic coupling wireless charging system with dual transmitting coils, which can achieve constant voltage and constant current output while improving the system efficiency by approximately 4%. First, the working principle for the dual-transmitter wireless charging system based on LCC-S compensation network is introduced, a mutual inductance model is established, and the relationship between output voltage and current is deduced. Then, the coupling relationship between the changes in mutual inductance and system efficiency is studied, and a double closed-loop control method based on the optimal current proportion is proposed to achieve constant current and constant voltage output by outer-loop control and efficiency optimization by inner-loop control current distribution. Finally, the feasibility of the double closed-loop control strategy with optimal efficiency was verified by simulations and an experimental platform with 250 W.

Keywords: Wireless power transfer; efficiency optimization; constant voltage/constant current charging; current control

无线电能传输WPT(wireless power transfer)作为1种新兴的电能传输技术，弥补了传统接触式充电方式安全性低、不宜维护和特殊场景充电困难等多种缺陷[1-3]，因此被广泛地应用于电动汽车[4-5]、自动导航车、便携式可穿戴设备等多种工业和生活场景[6-7]。目前，无线电能传输方式包括磁场耦合式、电场耦合式和激光传输等，其中磁场耦合式作为当前应用最广泛的1种无线电能传输方式[8]，其研究主要集中在耦合系统、充电控制和能效提升等方面[9]。

文献[10]研究了高频电流对磁性物质中的涡流损耗的影响机理，建立了增加屏蔽层后的系统电路

收稿日期：2024-07-02；**修回日期**：2024-07-29；**录用日期**：2024-08-05；**网络首发日期**：2024-08-23
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52107001)；中国博士后科学基金资助项目(2022M710641)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52107001; China Postdoctoral Science Foundation under the grant 2022M710641

模型，提出优化磁性材料设计减小涡流损耗的方法；类似地，文献[11]通过建立耦合机构和性能参数的解析表达式，以传输效率为优化目标，使用NSGA-Ⅱ算法对耦合线圈参数进行了优化设计，实现了系统的效率提升。除优化耦合机构设计外，也有学者提出通过配置补偿网络的参数实现效率优化的方法。文献[12]研究了双边 LCC 补偿网络参数和系统效率的关系，通过优化补偿电容和补偿电感参数提升系统效率；文献[13]针对三线圈结构提出 1 种不完全补偿的 S/S/S 网络参数配置方法，使系统 AC-AC 的效率提升了 5.8%。

优化耦合机构和补偿拓扑参数的方法虽能提升系统效率，但是实际系统参数受环境和工况等影响较大，难以长时间使系统稳定工作在最大效率状态。因此，需要引入合适的控制方法，以实现系统效率的优化控制。文献[14]通过加入额外的双向四开关 DC-DC 电路实现了恒流输出和最大效率追踪的协同控制；文献[15]针对双发射、单接收系统，分析了耦合系数和效率之间的关系，提出了根据耦合系数选择激励线圈的效率提升方法；文献[16]研究了补偿电容和输入阻抗及互感之间的关系，通过切换补偿电容实现了互感估算和效率优化。

引入控制策略可有效降低参数漂移对效率的影响，但大多控制方法在实现效率优化的同时只能满足恒流或恒压输出，难以适应常规电池负载恒流、恒压的 2 阶段充电需求。为了解决上述问题，在提升系统效率的同时要满足负载恒压、恒流的充电需求。本文针对双发射无线充电系统提出了 1 种双闭环效率优化控制方法，通过分别控制 2 个发射线圈的激励电流，在实现恒压、恒流输出的同时提高系统工作效率。本文首先介绍了双发射、单接收无线充电系统的拓扑原理；接着详述了能效提升方法和控制策略；然后为了实现互感参数计算，设计了 1 种具有良好抗偏移性能的磁耦合机构；最后通过搭建 250 W 的实验平台验证了该方法的有效性。

1　电路拓扑分析

本文的无线充电系统结构如图 1 所示，其发射端包括全桥逆变器 H_1 和 H_2、一次侧 LCC 补偿拓扑、发射线圈自感 L_{T_1}、L_{T_2} 及其寄生电阻 R_{T_1}、R_{T_2}；其接收端包括二次侧补偿电容 C_s、接收线圈自感 L_s 及其寄生电阻 R_s、二极管整流器、滤波电路和负载。其中：u_{p1}、u_{p2} 分别为 2 个逆变器 H_1 和 H_2 的输出电压；i_{T_1}、i_{T_2} 和 i_s 分别为通过发射线圈和接收线圈的激励电流；M_{T_1R}、M_{T_2R} 分别为 2 个发射线圈 T_1、T_2 和接收线圈 R 之间的互感；u_e 为整流器输入电压；I_o、U_o 为负载端输出电流和输出电压；R_o 为等效负载电阻。

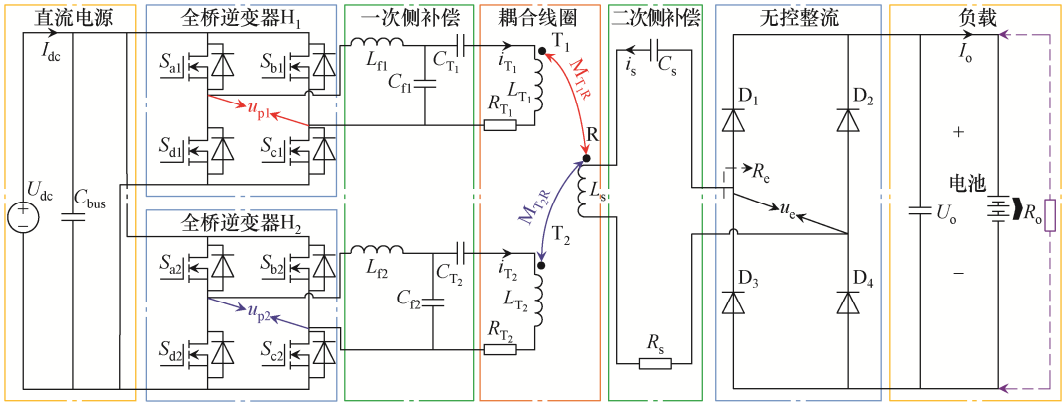


图 1　双发射端无线充电系统拓扑示意

Fig. 1 Schematic of topology of dual-transmitter wireless charging system

在无线充电系统中，由于谐振网络的选频特性对高次谐波电流存在抑制作用，无线充电系统中能量传递大多集中在基波上，因此在下文的分析中仅考虑电压、电流的基波分量。由反射阻抗理论可知，

整个接收网络在发射端可等效为阻抗 Z_s 进行分析，因此 LCC 补偿网络可以用 1 个如图 2 所示的 T 型电路进行分析。其中：L_{fx}、C_{fx}、C_{px} 分别为补偿电感和补偿电容；L_{T_x} 为发射线圈的自感；I_{T_x} 为线圈的激励电流有效值；U_{px}、I_{px} 分别为逆变器输出电压、输出电流的有效值；x=1，2 分别表示 2 个发射端。

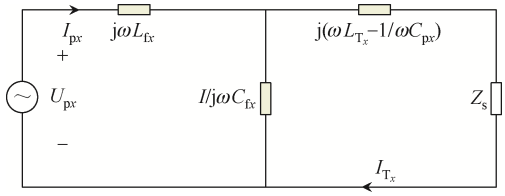


图 2 等效 T 型电路

Fig. 2 Equivalent T-type circuit

假设系统的工作频率为 ω，则补偿网络参数应满足的关系式为

$$\omega L_{fx}=\frac{1}{\omega C_{fx}}=\omega L_{T_x}-\frac{1}{\omega C_{px}} \tag{1}$$

同时，由基尔霍夫电压定律可知，图 2 等效 T 型电路应满足的电压、电流关系为

$$\begin{cases} j\omega L_{fx}I_{px}+\dfrac{1}{j\omega C_{fx}}(I_{px}-I_{T_x})=U_{px} \\ j\left(\omega L_{fx}-\dfrac{1}{j\omega C_{px}}\right)I_{T_x}+Z_sI_{T_x}-\dfrac{1}{j\omega C_{fx}}(I_{px}-I_{T_x})=0 \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可解得线圈电流 I_{T_x} 和逆变器输出电压 U_{px} 之间的关系为

$$I_{px}=-j\frac{U_{px}}{\omega L_{fx}} \tag{3}$$

从式(3)可以看出，在系统工作频率 ω 和补偿电感 L_{fx} 确定以后，发射线圈激励电流 I_{T_x} 的幅值和相位仅由逆变器输出电压 U_{px} 决定。因此，只要保证逆变器 H_1 和 H_2 的输出电压相位相同就能实现电流 i_{T_1}、i_{T_2} 的相位同步，避免因线圈电流相位偏差引起系统性能劣化；同时，也可以通过控制逆变器输出电压 U_{px} 实现对线圈电流大小的调节。

假设 U_{p1} 和 U_{p2} 相位相同且忽略电路中的寄生参数，再通过磁耦合机构设计消除发射端线圈之间的耦合关系，则由电磁感应定律可得如图 3 所示的互感模型。

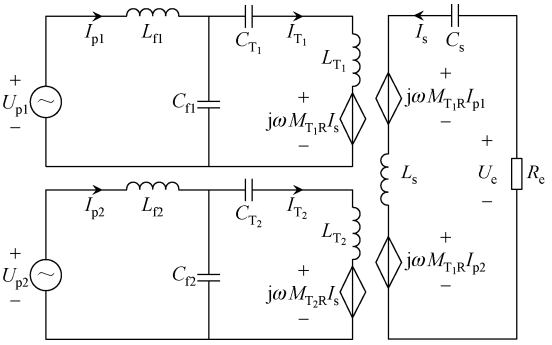


图 3 互感模型

Fig. 3 Mutual induction model

其中，I_{p1} 和 I_{p2} 分别为逆变器 H_1 和 H_2 的输出电流，I_s 为接收端线圈电流。由基尔霍夫电压定律列 KVL 方程为

$$\begin{cases} j\omega L_{f1}I_{p1}+\dfrac{1}{j\omega C_{f1}}(I_{p1}-I_{T_1})-U_{p1}=0 \\ j\left(\omega L_{T2}-\dfrac{1}{\omega C_{T_2}}\right)I_{T_2}+j\omega M_{T_2R}I_s-\dfrac{1}{j\omega C_{f1}}\cdot \\ \quad (I_{p1}-I_{T2})=0 \\ j\left(\omega L_{T_1}-\dfrac{1}{\omega C_{T_1}}\right)I_{T_1}+j\omega M_{T_1R}I_s-\dfrac{1}{j\omega C_{f1}}\cdot \\ \quad (I_{p1}-I_{T_1})=0 \\ j\omega M_{T_1R}I_{T_1}+j\omega M_{T_2R}I_{T_2}+j\omega L_sI_s+\dfrac{1}{j\omega C_s}I_s- \\ \quad U_e=0 \\ j\omega L_{f2}I_{p2}+\dfrac{1}{j\omega C_{f2}}(I_{p2}-I_{T_2})-U_{p2}=0 \end{cases} \tag{4}$$

同时，接收端补偿网络存在 $\omega L_s=1/\omega C_s$；针对二极管整流电路，其输出电压 $U_o=\sqrt{2}\pi U_e/4$，则可计算得到系统输出电压 U_o 关于逆变输出电压 U_{p1} 和 U_{p2} 的表达式为

$$U_o=\frac{\sqrt{2}\pi}{4}\left(M_{T_1R}\frac{U_{p1}}{L_{f1}}+M_{T_2R}\frac{U_{p2}}{L_{f2}}\right) \tag{5}$$

由式(5)可知，基于 LCC-S 补偿拓扑的无线充电系统具有恒压输出特性；当互感参数确定后，系统输出电压 U_o 仅由逆变器输出电压 U_{p1} 和 U_{p2} 决定。同时，在充电过程中蓄电池等效电阻 R_o 变化

缓慢[15]，在短时间内可认为阻值不变。由欧姆定律可得系统的输出电流 I_o 的表达式为

$$I_o=\frac{U_o}{R_o}=\frac{\sqrt{2}\pi}{4R_o}\left(M_{T_1R}\frac{U_{p1}}{L_{f1}}+M_{T_2R}\frac{U_{p2}}{L_{f2}}\right) \tag{6}$$

因此，也可以通过控制逆变器输出电压 U_{p1} 和 U_{p2}，实现系统的恒流输出。

2　效率优化和充电控制

2.1　效率优化理论分析

由于无线充电系统中逆变器拓扑和补偿网络选择不同，因此线圈电流和输入电压之间的关系也会存在差异。为了简化分析，本文将忽略变换器和补偿拓扑的损耗，对耦合机构进行更加普适的损耗分析，简化的损耗模型如图 4 所示。

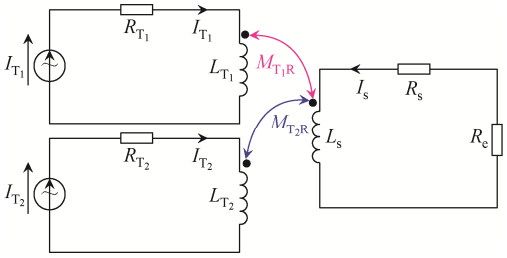


图 4　无线充电系统简化模型

Fig. 4 Simplified model of wireless charging system

图中 I_{T_1} 和 I_{T_2} 为等效电流源，由式(3)可知其电流值可通过调节逆变器输出电压 U_{p1} 和 U_{p2} 进行控制；由于无功元件不耗散功率，因此系统的效率 η 可表示为

$$\eta=\frac{I_s^2R_e}{I_{T_1}^2R_{T_1}+I_{T_2}^2R_{T_2}+I_s^2R_s+I_s^2R_e} \tag{7}$$

发射线圈电流 I_{T_1} 、I_{T_2} 相位相同，若假设其有效值满足 $I_{T_1}=\beta I_{T_2}$ (β 为比例系数)，则式(7)可化简为

$$\eta=\frac{R_e}{(\beta^2R_{T_1}+R_{T_2})\dfrac{I_{T_2}^2}{I_s^2}+R_s+R_e} \tag{8}$$

同时，由于线圈参数已经确定，其寄生电阻为确定值，因此可假设 $R_{T_1}=\gamma R_{T_2}$，γ 为比例常数。联立式(4)和式(8)可以得到效率 η 为

$$\eta=\frac{R_e}{F(\beta)+R_s+R_e} \tag{9}$$

$$F(\beta)=\frac{(\gamma\beta^2+1)(R_e+R_s)^2R_{T_2}}{\omega^2(\beta M_{T_1R}+M_{T_2R})^2} \tag{10}$$

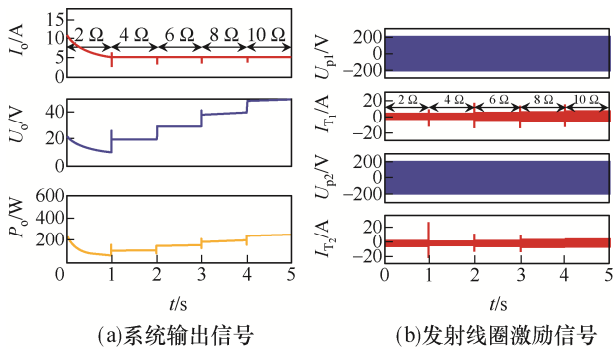
因此，在 $F(\beta)$的最小值点可以得到系统的最大效率。对式(10)求导，得到当 $F(\beta)$取得最小值时，β 满足的关系式为

$$\beta=\frac{M_{T_1R}}{\gamma M_{T_2R}} \tag{11}$$

故当 2 个发射线圈的激励电流满足式(11)的比例关系时可以使系统工作在最大效率状态。

2.2　闭环控制方法

为了同时实现恒压、恒流输出和效率最优控制，本文提出了双闭环的控制方法。通过逆变器 H_1 控制移相角 α_1 控制输出电压和输出电流，实现恒压、恒流输出；通过逆变器 H_2 控制移相角 α_2 追踪偏移后的互感变化，实现线圈电流比例控制，提高充电系统效率。对于恒压、恒流输出控制环路，主要采用 Wi-Fi 等无线通信方式将系统的输出电压 U_o、输出电流 I_o 反馈至一次侧控制器实现控制闭环。一次侧控制器接收到反馈信号后通过 PI 控制器调节移相角 α_1 控制逆变输出电压 U_{p1}，进而实现对输出电压 U_o、输出电流 I_o 的控制。令 $M_{T_1R}=M_{T_2R}=10$ μH，使用增大等效负载电阻的方式模拟充电过程，在 PLECS 中进行系统仿真。恒流输出仿真结果如图 5 所示，图 5(a)分别为输出电流 I_o、输出电压 U_o 和输出功率 P_o 的波形，图 5(b)分别为



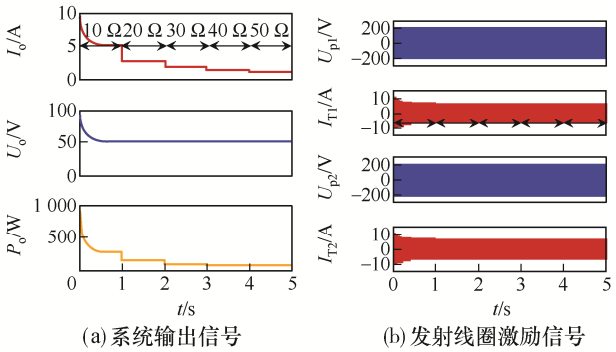
(a)系统输出信号　　(b)发射线圈激励信号

图 5　恒流控制仿真结果

Fig. 5 Simulation result under constant current control

发射端逆变器输出电压 U_{p1}、U_{p2} 和线圈激励电流 I_{T_1}、I_{T_2} 的波形。从图 5 中可以看出，随着蓄电池等效内阻的增加，输出电压 U_o 和输出功率 P_o 均逐步上升，流过线圈的激励电流 I_{T_1}、I_{T_2} 等比例增加，但整个充电过程中输出电流 I_o 始终保持不变，系统可以有效实现恒流输出。

恒压输出仿真结果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出，在恒压充电阶段，输出电流 I_o 和输出功率 P_o 随着等效电阻的增加而减小，但整个过程中输出电压 U_o 始终稳定不变。图 6(b)中线圈激励电流 I_{T_1}、I_{T_2} 也维持不变，体现了 LCC-S 补偿拓扑的恒压特性。



(a) 系统输出信号　　(b) 发射线圈激励信号

图 6　恒压控制仿真结果

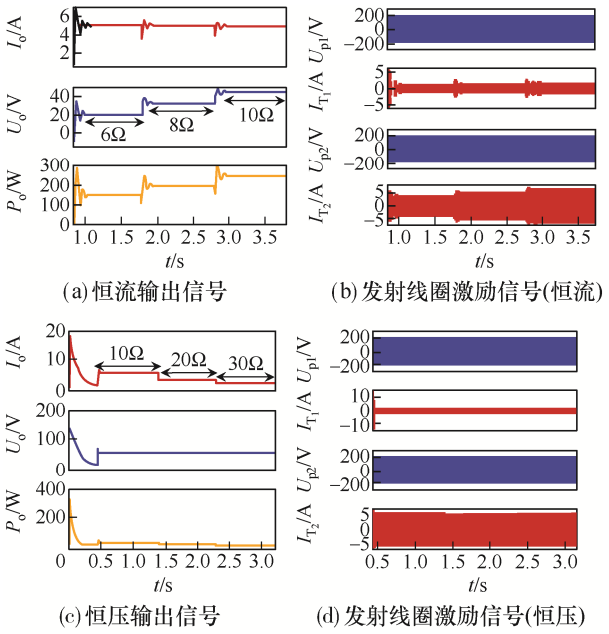
Fig. 6 Simulation result under constant voltage control

若要实现系统运行效率最优控制，由式(11)可知，必须求出偏移过程后的互感 M_{T_1R} 和 M_{T_2R}，以获得最优的电流比例 β。由于 I_{T_1} 和 I_{T_2} 为闭环控制环路中的被控对象，因此为已知参数；同时，当线圈结构确定后，其寄生电阻 R_s 可以看作固定参数；整流输入等效电阻满足关系 $R_e=8R_o/\pi^2$。此外，通过合理地设计耦合机构，可以使发射线圈和接收线圈的总互感 M_{TR} 在偏移过程中几乎保持不变。

由式(5)中接收端的回路方程可知，若再测量得到接收线圈电流 I_s，则可以求出互感参数 M_{T_1R}、M_{T_2R} 为

$$\begin{cases} M_{T_2R}=\dfrac{\pi^2\omega M_{TR}I_{T_1}+I_s(\pi^2R_s+8R_o)}{\pi^2\omega(I_{T_1}-I_{T_2})} \\ M_{T_1R}=M_{TR}-M_{T_2R} \end{cases} \tag{12}$$

互感 M_{T_1R}、M_{T_2R} 确定后，对于电流比例控制环路，先由式(11)求得最优电流控制比 β，最后通过 PI 控制器调节逆变器 H_2 的移相角 α_2 控制线圈电流 I_{T_2}，使其有效值满足 $\beta=I_{T_1}/I_{T_2}$，使系统始终工作在最大效率点。令 β=0.2，使用该控制方法在 PLECS 中得到仿真结果，如图 7 所示。



(a) 恒流输出信号　　(b) 发射线圈激励信号(恒流)

(c) 恒压输出信号　　(d) 发射线圈激励信号(恒压)

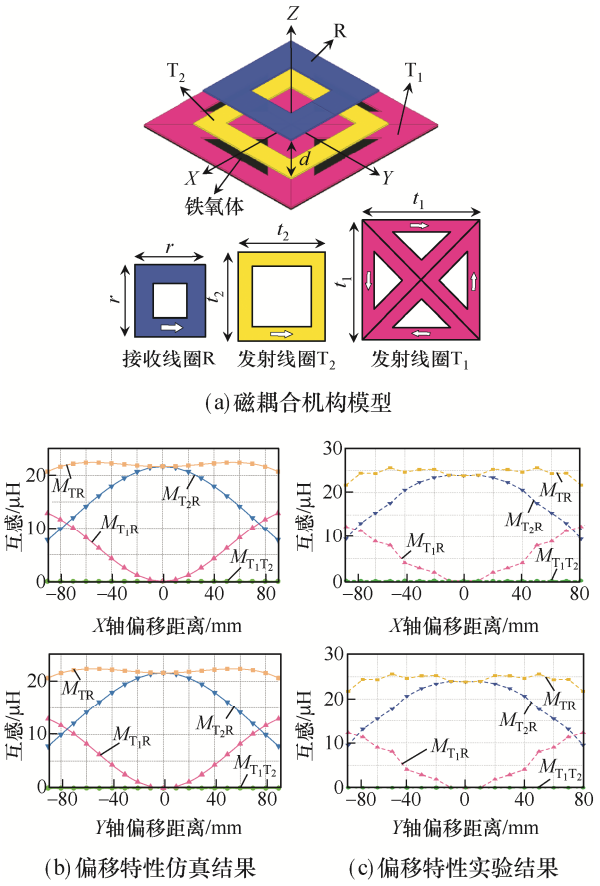
图 7　电流比例控制仿真结果

Fig. 7 Simulation result under current proportion control

图 7(a)、(b)分别为恒流模式下输出信号波形和线圈激励信号波形，图7(c)、(d)分别为恒压模式输出信号波形和线圈激励信号波形。从图 7(b)和(d)可以看出，该控制方法无论是在恒流充电阶段还是在恒压充电阶段，都可以使发射端线圈激励电流始终保持在最佳的电流比例，从而提高系统效率。

3　耦合机构设计

如前文所述，若要实现在线的互感值估算，耦合机构需要具有较强的抗偏移性能，即在偏移过程中保持总互感值稳定。因此，本文设计了图8(a)所示的具有双发射端的强抗偏移耦合机构。该耦合机构由 2 个发射线圈 T_1、T_2 和 1 个接收线圈 R 组成，其中发射线圈 T_2 和接收线圈 R 均为单极性线圈，发射线圈 T_1 为磁场互补的 4 个三角形四极性线圈。因此，可以实现 2 个发射线圈的解耦。



(a) 磁耦合机构模型

(b) 偏移特性仿真结果　　(c) 偏移特性实验结果

图 8　磁耦合机构模型及偏移特性

Fig. 8 Model of magnetic coupler and anti-misalignment characteristics

通过在 ANSYS 中对该耦合机构匝数、外径等参数进行设计和仿真分析，最后得出耦合机构的设计参数，见表 1。

表 1　耦合机构设计参数

Tab.1 Design parameters of coupler

设计参数	数值
线径 l/mm	2.4
距离 d/mm	60
接收线圈外径 r/mm	180
发射线圈 T_1 外径 t_1/mm	200
发射线圈 T_2 外径 t_2/mm	300
接收线圈匝数 n_R/匝	15
发射线圈 T_1 匝数 n_{T_1}/匝	14
发射线圈 T_2 匝数 n_{T_2}/匝	14

该耦合机构的偏移特性如图 8(b)和(c)所示，从该偏移特性曲线可以看出，该磁耦合机构在 X 轴和 Y 轴方向上均具有良好的抗偏移性能，且 2 个发射线圈之间没有耦合关系。

4　实验验证

为了验证所提方法的有效性，本文搭建了如图 9 所示的 250 W 实验平台。实验通过改变负载电阻 R_o 来模拟锂电池充电过程，恒流阶段充电电流维持 5 A 不变，等效电阻从 2 Ω 增加至 10 Ω，电压也随之增加至 50 V；恒压阶段，电压维持 50 V 恒定，负载电阻从 10 Ω 增加至 50 Ω，电流也随之减小至 1 A，最后结束充电。

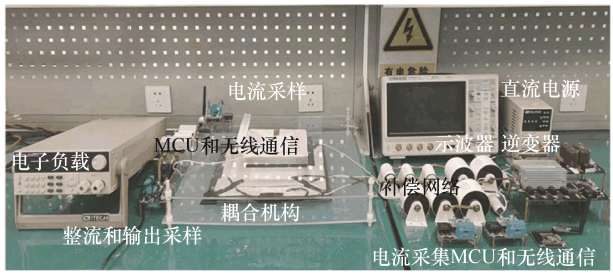
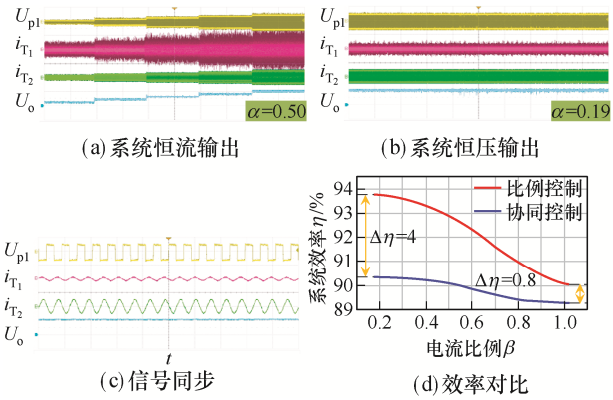


图 9　实验平台

Fig. 9 Experimental platform

实验结果如图 10 所示，其中图 10(a)和(b)分别为恒流、恒压输出实验结果；图 10(c)为线圈电流相位同步的波形结果；图 10(d)为不同的偏移距离对应电流比 β 下的效率对比曲线。



(a) 系统恒流输出　　(b) 系统恒压输出

(c) 信号同步　　(d) 效率对比

图 10　实验波形结果

Fig. 10 Result of experimental waveforms

从图 10(a)和(b)中可以看出，该系统在不同比例的线圈电流下均可实现恒压和恒流输出。为了实现线圈激励电流相位同步，本文使用单控制器产生驱动信号，从图 10(c)可以看出，该方法可以有效

实现线圈电流相位的同步。图 10(d)为不同偏移情况下 2 种控制方法下效率的对比结果，可以看出互感差异越大，本文提出的控制方法效率提升越明显，最大可以提高 4%的系统效率。

5 结语

本文针对双发射端无线充电系统效率提升问题，提出了 1 种依据互感值分配电流的控制方法。该方法不仅能有效提高系统工作效率，也能同时实现恒流、恒压输出，满足大部分场景的蓄电池充电需求。本文首先阐述了双发射无线充电功率拓扑的工作原理；然后推导分析了电流比例控制的理论基础，并详细介绍了控制方法；最后通过搭建的 250 W 无线充电硬件实验平台验证了该方法的有效性，实验结果表明，本文所提控制方法在互感差距较大的情况下最高可以实现 4%的能效提升。

参考文献：

[1] 陈雨晨, 陈凯楠, 郑树轩, 等. 无线电能传输磁耦合机构磁心解析模型与设计方法[J]. 电气技术, 2022, 23(6): 83-92.
Chen Yuchen, Chen Kainan, Zheng Shuxuan, et al. Analytical model and design method of magnetic core for wireless power transfer magnetic coupler [J]. Electrical Engineering, 2022, 23(6): 83-92. (in Chinese)

[2] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547-1568.
Xue Ming, Yang Qingxin, Zhang Pengcheng, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1547-1568. (in Chinese)

[3] 杨庆新, 张献, 章鹏程. 电动车智慧无线电能传输云网[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 1-12.
Yang Qingxin, Zhang Xian, Zhang Pengcheng. Intelligent wireless power transmission cloud network for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 1-12. (in Chinese)

[4] Liu Xin, Gao Fei, Wang Tianfeng, et al. A multi-inverter multi-rectifier wireless power transfer system for charging stations with power loss optimized control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 9261-9277.

[5] 陈凯楠, 蒋烨, 檀添, 等. 轨道交通 350 kW 大功率无线电能传输系统研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2411-2421, 2445.
Chen Kainan, Jiang Ye, Tan Tian, et al. Research on 350 kW high power wireless power transfer system for rail transit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2411-2421, 2445. (in Chinese)

[6] Ma Jun, Li Zhenjie, Liu Yiqi, et al. Thermal analysis and optimization of the magnetic coupler for wireless charging system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 16269-16280.

[7] 苏建强, 任凯斌, 刘利强, 等. 基于 ADRC 的 LCC-S 谐振型无线充电副边闭环控制研究[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 111-119.
Su Jianqiang, Ren Kaibin, Liu Liqiang, et al. Research on secondary-side closed-loop control of LCC-S resonant wireless charging based on ADRC [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 111-119. (in Chinese)

[8] 黄学良, 谭林林, 陈中, 等. 无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 1-11.
Huang Xueliang, Tan Linlin, Chen Zhong, et al. Review and research progress on wireless power transfer technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 1-11. (in Chinese)

[9] 李阳, 石少博, 刘雪莉, 等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 389-403.
Li Yang, Shi Shaobo, Liu Xueli, et al. Summary of magnetic field coupling wireless power transmission coupling mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 389-403. (in Chinese)

[10] 陈德清, 王丽芳, 廖承林, 等. 无线充电系统损耗分析及磁体结构优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 154-158.
Chen Deqing, Wang Lifang, Liao Chenglin, et al. The power loss analysis and magnetic structure optimization of wireless power transfer for EVs [J]. Transactions of

China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 154-158. (in Chinese)

[11] 张云, 王丽芳, 郭彦杰, 等. 基于 NSGA-Ⅱ算法的无线充电系统磁耦合机构多目标优化[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(12): 28-34.
Zhang Yun, Wang Lifang, Guo Yanjie, et al. Multi-objective optimization of magnetic coupler for wireless power transfer system based on NSGA-Ⅱ algorithm [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(12): 28-34. (in Chinese)

[12] 王付胜, 郭娟娟, 王文洋, 等. 电动汽车无线充电系统实现软开关的参数优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 258-267.
Wang Fusheng, Guo Juanjuan, Wang Wenyang, et al. Parameter optimization design method of soft-switching in wireless charging system of electric vehicle [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 258-267. (in Chinese)

[13] 田子涵, 吴晓康, 张雪莹, 等. S/S/S 拓扑三线圈 WPT 系统非完全补偿效率优化方法[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(2): 176-184.
Tian Zihan, Wu Xiaokang, Zhang Xueying, et al. Non-full compensation optimized efficiency method for three-coil WPT system with S/S/S topology [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(2): 176-184. (in Chinese)

[14] 魏辰阳, 魏斌, 蒋成, 等. 基于最大效率追踪的 BWPT 协同控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(1): 101-104, 113.
Wei Chenyang, Wei Bin, Jiang Cheng, et al. Cooperative control method of bidirectional wireless power transfer based on maximum efficiency tracking [J]. Power Electronics, 2023, 57(1): 101-104, 113. (in Chinese)

[15] Li Zhenjie, He Jiafang, Huo Yusheng, et al. High-misalignment tolerance and output adjustable wireless charging system via detuned series-series compensated reconfigurable transmission channels [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 11786-11801.

[16] 刘旭, 宋翔昱, 原熙博, 等. 一种利用可切换补偿电容的三线圈无线电能传输系统互感识别及效率优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8309-8321.
Liu Xu, Song Xiangyu, Yuan Xibo, et al. A mutual inductance identification and efficiency optimization method for the three-coil wireless power transfer system by utilizing switchable compensation capacitor [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8309-8321. (in Chinese)



班明飞

作者简介：

班明飞(1988—)，男，博士，副教授。研究方向：电动汽车技术，微电网技术。E-mail：banmingfei@nefu.edu.cn。

周滔(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：无线充电技术。E-mail：taozhounefu@163.com。

李振杰(1988—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：多场景无线电能传输技术及其应用。E-mail：lizhenjie0725@nefu.edu.cn。

刘一琦(1984—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：电力系统。E-mail：ee_617@nefu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)