DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.226 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

一种拓扑自动重构的恒压恒流无线充电系统

苏君平[1,2](中国电源学会会员)，邱 椿[3]，张陈涛[3]
(1.厦门城市职业学院智能制造学院，厦门 361008；2.厦门开放大学，厦门 361008；3.厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院，厦门 361102)

摘要：电池充电过程一般包括先恒流再恒压2个阶段。然而，现有的无线电能传输技术WPT(wireless power transfer)在从恒流到恒压的切换过程中仍面临若干挑战，包括电池状态监测、双边通信需求及多线圈间交叉耦合问题等。为解决这些问题，提出1种新颖的准CLC-LCC拓扑，该拓扑无需额外的控制方法即可实现恒流到恒压模式的平稳过渡。发射端电路采用CLC型补偿网络，使得流经发射侧线圈的电流等效为恒定电流源。二次侧电路由2个串联补偿电路并联组成，充电初期2个支路协同实现对电池的恒流充电；随着充电过程的推进，由于二极管的单向导电性，其中1个支路会被钳位断开，系统实现恒压输出。最后，搭建了1个2.6 A/105 V实验平台，验证了所提无线充电拓扑的可行性。

关键词：无线电能传输；恒流；恒压；拓扑设计

Constant Voltage and Constant Current Wireless Charging System with Automatic Reconstruction of Topology

SU Junping[1,2], *Member*, *CPSS*, QIU Chun[3], ZHANG Chentao[3]
(1. School of Intelligent Manufacturing, Xiamen City University, Xiamen 361008, China; 2. Xiamen Open University, Xiamen 361008, China; 3. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: The battery charging process typically consists two stages, i.e., constant current (CC) followed by constant voltage (CV). However, the existing wireless power transfer (WPT) technology still encounters several challenges during the transition from the CC mode to CV mode, including battery state monitoring, requirement for bilateral communication and cross-coupling among multiple coils. To address these problems, a novel quasi-CLC-LCC topology is proposed, which can realize the smooth transition from the CC mode to CV mode without the need for additional control. A CLC compensation network is employed by the transmitter circuit, enabling the transmitting coil current to be considered as a CC source. On the secondary side, two series compensation circuits are connected in parallel, and two branches collaboratively achieve CC charging for the battery at the initial charging stage. As the charging process progresses, owing to the unidirectional conductivity of diodes, one of the branches is clamped and disconnected, enabling the WPT system to enter into CV output. Finally, an experimental platform with 2.6 A charging current and 105 V charging voltage was constructed to validate the feasibility of the proposed wireless charging topology.

Keywords: Wireless power transfer (WPT); constant current (CC); constant voltage (CV); topology design

收稿日期：2024-11-29；**修回日期**：2025-01-21；**录用日期**：2025-02-17；**网络首发日期**：2025-03-06
基金项目：福建省自然科学基金资助项目(2023J01047)；厦门市自然科学基金资助项目(3502Z20227185)
This work is supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province of China under the grant 2023J01047; the Natural Science Foundation of Xiamen City under the grant 3502Z20227185

在科技日新月异的今天，无线充电技术已广泛渗透到日常生活、医疗领域、工业生产及诸多危险环境中[1-4]，极大地提升了人们的生活便利性。传统锂电池充电方式依赖于导线连接，在实际应用中

存在诸多局限性[5]。因此，将无线电能传输 WPT (wireless power transfer)技术与电池充电相融合，不仅巧妙地规避了有线充电的诸多不便，还开辟了更为广阔的应用前景[6-7]。目前，为实现不考虑线圈偏移及系统失谐场景下电池充电过程中的恒流 CC(constant current)−恒压 CV(constant voltage)模式切换，科研工作者提出了多种方法，主要可分为以下几类。

第一类方法采用实时闭环控制策略[8-11]。文献[8]提出了 1 种通过调节接收侧 DC-DC 变换器的占空比来实现恒流与恒压模式切换的方案，然而，由于级联了 DC-DC 变换器，该方法不可避免地导致系统效率下降，同时大量无源器件的使用也增加了系统成本、尺寸及质量等；文献[10]提出了 1 种在接收侧采用有源整流技术的方法，通过控制开关管的导通与关断实现恒流与恒压模式的切换，该方法使用了更少的无源器件从而简化了电路的结构，由于二次侧电流相位及频率信息的额外采样需求，也带来了更为复杂的控制挑战；文献[11]在接收电路中增加了 1 个交流开关和附加电容，通过切换开关状态来改变接收侧串联补偿电容，从而实现恒流与恒压模式的切换，然而，在切换过程中，开关需要承受极高的电压应力，这对开关组件的耐压能力和长期运行可靠性提出了严峻的挑战。

第二类方法利用电路自身的固有传输特性，通过不同拓扑组合实现特定输出增益。文献[12]使用交流开关切换，实现从 S-S 型拓扑恒流输出到 LLC-S 拓扑恒压输出的转换，其优势在于控制策略简洁，然而，该方法面临两大技术挑战：一是开关在瞬态切换时承受高电压应力，影响组件的耐压能力和长期运行可靠性；二是切换时机的精确性要求高，需基于精准的电池状态监测，以保障充电安全。此外，基于高阶补偿网络在不同谐振点具有不同输出增益的特性，文献[13]提出了 1 种基于 LCC-S 补偿网络的 WPT 系统及其参数设计方法，该系统通过开关频率切换，无需更改电路拓扑结构，能在 2 个不同的频率点分别实现与负载无关的恒流和恒压充电输出及零相角 ZPA(zero phase angle)特性，但由于切换频率仅能通过发射电路的逆变器调整，因此一、二次侧通信在此系统中至关重要，可能导致系统在恶劣环境下运行受阻。

为了使 WPT 系统不依赖于控制实现负载无关的恒流恒压输出切换，文献[14]在 S-S 拓扑结构基础上，在发射侧增设了钳位线圈。在恒流充电模式下，随着充电电阻的增加，一次侧电流相应增大，当达到系统预设阈值时，钳位电路中的二极管导通，从而无需继电器切换拓扑结构，即可平滑过渡至恒压充电模式。该方法因省去了一、二次侧通信和控制电路的需求，展现出显著的技术优越性，然而，始终难以完全消除多线圈系统中线圈间的交叉耦合问题。

为了解决上述问题，本文提出了 1 种准 CLC-LCC 的两线圈 WPT 系统，依赖二次侧整流二极管间的电压钳位关系，可以在无需控制的前提下实现恒流/恒压模式之间的转换，极其适合电池的无线充电场合。

1　拓扑介绍

所提 WPT 系统拓扑如图 1 所示，图中：V_{dc} 为输入直流电压源；C_a 为输入滤波电容；S_1~S_4 为开关，构成了 H 桥逆变电路；V_{in} 为逆变器输出电压；i_r 为逆变器输出电流；C_r 和 L_r 分别为一次侧补偿网络中的电容及电感；i_p 为流经发射线圈的电流；L_p 和 C_p 分别为一次侧发射线圈及其对应的补偿电容；i_s 为接收线圈电流；L_s 和 C_s 分别为二次侧接收线圈及其对应的补偿电容；i_f 为钳位支路电流；C_f 和 L_f 分别为钳位支路的电容及电感；M_{ps} 为收发线圈之间的互感；D_1~D_4 为二极管；C_b 为直流滤波电

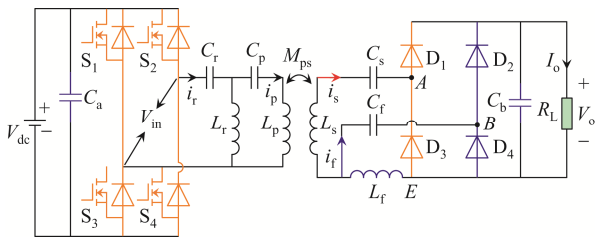


图 1　WPT 系统示意

Fig. 1 Schematic of WPT system

容；R_L 为等效电池负载；I_o 和 V_o 分别为直流充电电流和电压。

V_{dc} 经过逆变器转换为交流电压信号 V_{in}，其幅值满足

$$V_{in}=\frac{2\sqrt{2}}{\pi}V_{dc} \tag{1}$$

C_r、L_r、C_p 构成 T 型补偿网络，对于 T 型补偿网络，其输出特性可以使得流过一次侧发射线圈的电流等效于 1 个恒流源，需满足的参数谐振条件为

$$\begin{cases}\omega L_r=\dfrac{1}{\omega C_r}\\ \omega L_p+\omega L_r=\dfrac{1}{\omega C_p}\\ \omega L_s+\omega L_f=\dfrac{1}{\omega C_s}\\ \omega L_f=\dfrac{1}{\omega C_f}\end{cases} \tag{2}$$

式中，ω 为工作角频率。

因此，CLC、LCC 及 LCL 补偿网络均可以采用，为减少谐振电感使用，本文最终所采用的 T 型补偿网络为 CLC 型。L_f、C_s、C_f 为接收电路补偿元件，其与整流桥间的连接方式区别于传统以 LCC 型补偿网络为基础的接收回路，一、二次侧的无源元件值满足谐振关系式(2)。

2 系统建模及理论分析

2.1 恒流模式

当充电过程刚开始时，二次侧电流 I_s 的幅值较小，经过 L_f 感应到另一回路的电位 V_{BE} 高于 V_{AE}，故二极管 D_1~D_4 均能完全导通，整个系统工作于恒流模式。此时，恒流模式等效电路如图 2 所示，图中：R_1 和 R_2 为电阻 R_L 经过 2 个半桥的等效电阻；V_{AE} 与 V_{BE} 为 2 个电阻的端电压，显然两者相等。恒流模式下二次侧电压电流示意如图 3 所示。由于各回路端口交流电压与输出电压 V_o 之间可看作为半波整流，因此三者满足关系

$$V_{AE}=V_{BE}=\frac{2V_o}{\pi} \tag{3}$$

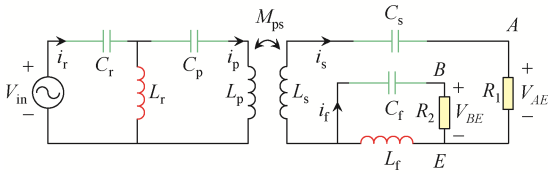


图 2 恒流模式等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of CC mode

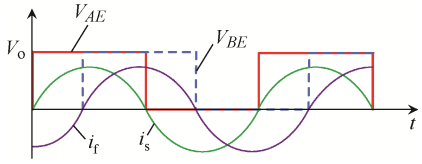


图 3 恒流模式下二次侧电压电流示意

Fig. 3 Schematic of secondary-side voltage and current in CC mode

基于基尔霍夫电压定律，并使用谐振关系可以求解得到各回路电流间，以及与输入电压间的关系表达式分别为

$$R_1 i_s=V_{AE}=\mathrm{j}V_{BE}=\mathrm{j}R_2 i_f=\omega L_f i_s \tag{4}$$

$$i_s R_1+\mathrm{j}\omega L_f i_f-\mathrm{j}\omega M_{ps} i_p=0 \tag{5}$$

$$\hat{i}_p=-\frac{1}{\mathrm{j}\omega L_r}V_{in} \tag{6}$$

由式(4)可以推导出 R_1 的表达式为

$$R_1=\omega L_f \tag{7}$$

在图 2 中，R_1 和 R_2 分别表示半桥整流器 D_1、D_3 和 D_2、D_4 的交流电阻，因此 R_1、R_2 与 R_L 的关系满足

$$\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{2}{\pi^2}R_L \tag{8}$$

联立式(7)和式(8)可以解得 R_2 的表达式为

$$R_2=\frac{2\omega L_f R_L}{\pi^2\omega L_f-2R_L} \tag{9}$$

将式(4)代入式(5)，可得 i_s 和 i_f 有效值的关系为

$$I_s+I_f=\frac{M_{ps}}{L_f}I_p \tag{10}$$

根据系统能量守恒原则，等效电阻 R_1 和 R_2 两端消耗的功率应等于电池内阻 R_L 两端消耗的功率，可得

$$V_{AE}I_{\mathrm{s}}+V_{BE}I_{\mathrm{f}}=V_{\mathrm{o}}I_{\mathrm{o}}=\frac{V_{\mathrm{o}}^2}{R_{\mathrm{L}}} \tag{11}$$

联立式(3)、式(10)和式(11)，可以得出 I_{o} 的表达式为

$$I_{\mathrm{o}}=\frac{\sqrt{2}M_{\mathrm{ps}}}{\pi\omega L_{\mathrm{f}}L_{\mathrm{r}}}V_{\mathrm{in}} \tag{12}$$

此外，联立式(3)、式(4)和式(12)，可以推出 i_{f} 有效值的表达式为

$$I_{\mathrm{f}}=\frac{\pi^2\omega M_{\mathrm{ps}}L_{\mathrm{f}}-2M_{\mathrm{ps}}R_{\mathrm{L}}}{\pi^2\omega^2L_{\mathrm{r}}L_{\mathrm{f}}^2}V_{\mathrm{in}} \tag{13}$$

联立式(2)、式(12)和式(13)，可以求解得到恒流模式下的等效输入阻抗为

$$Z_{\mathrm{inc}}=\frac{\pi^2\omega^2L_{\mathrm{f}}^2L_{\mathrm{r}}^2}{2R_{\mathrm{L}}M_{\mathrm{ps}}^2} \tag{14}$$

显然，由式(12)可以得出系统输出电流不受负载变化的影响，即所提准 CLC-LCC 拓扑具备负载无关恒流输出的能力，且由式(14)可得系统在恒流模式下的输入阻抗为纯阻性，系统能够实现近似 ZPA 特性。

根据式(13)可知，当 R_{L} 增大到一定值时会使电流 i_{f}=0，此时的电阻称为恒流/恒压模式切换电阻 R_{s}，其表达式为

$$R_{\mathrm{s}}=\frac{\pi^2}{2}\omega L_{\mathrm{f}} \tag{15}$$

2.2 恒压模式

当电池内阻 R_{L}>R_{s}时，i_{f}= 0，本质上为 V_{BE}低于 V_{AE}，二极管 D_2无法导通，整个拓扑的原理可以等效为 CLC-S 补偿网络，如图 4 所示，此时的模态如图 5 所示。

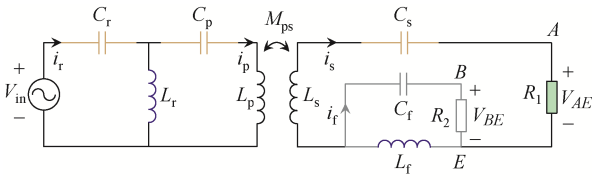


图 4　恒压模式等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of CV mode

由于 C_{s}、L_{f}和 L_{s}满足谐振关系，因此 R_1两端的电压 V_{AE}可表示为

$$V_{AE}=\omega M_{\mathrm{ps}}I_{\mathrm{p}} \tag{16}$$

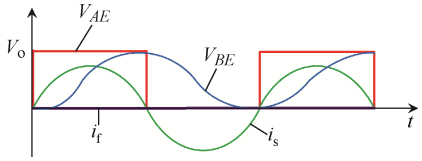


图 5　恒压模式下二次侧电压电流示意

Fig. 5 Schematic of secondary-side voltage and current in CV mode

由图 4 可得输出电压 V_{o}为 V_{AE}经过半波整流所得，因此可得

$$V_{\mathrm{o}}=\frac{\pi M_{\mathrm{ps}}}{\sqrt{2}L_{\mathrm{r}}}V_{\mathrm{in}} \tag{17}$$

此时的输入等效阻抗可以表示为

$$Z_{\mathrm{inv}}=\frac{L_{\mathrm{r}}^2}{M_{\mathrm{ps}}^2}R_{\mathrm{L}} \tag{18}$$

结合式(17)和式(18)，负载无关的电压输出和零相角输入特性均可在恒压模式下实现。综上所述，所提拓扑结构能够在整个充电过程中，实现与负载无关的恒定输出能力及零相角输入特性，适用于普遍存在的无线电池充电器。

3　实验验证

3.1 平台搭建

对图 1 所示的 WPT 系统进行参数设计。设定系统的输入电压为 100 V，输出电流为 2.6 A，输出电压为 105 V。值得说明的是，此实验平台的输入输出设计仅是为验证所提拓扑的传输特性，实际中可依据应用场景对系统的功率等级进行对应的放大缩小。为了增强耦合机构的耦合能力，使用 0.1×300 的利兹线绕制对称的圆形收发线圈，具体层数为 9 层，直径为 18 cm。最后使用 LCR 仪测量得到发射线圈 L_{r} 和接收线圈 L_{s} 的感值分别为 108.67 μH 和 108.79 μH。系统工作频率为 85 kHz，符合目前交通电气领域的标准。一旦确定输入和输出参数及线圈电感，即可结合式(15)得出 L_{f}的值。同样地，通过将已知条件代入式(2)和式(3)，以确定 L_{r}、C_{r}、C_{p}、C_{s} 和 C_{f}的值。系统的参数设计流

程如图 6 所示，最终确定并选取参数见表 1。

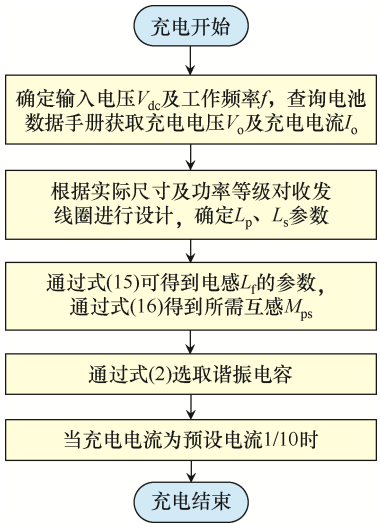


图 6 参数设计流程

Fig. 6 Flow chart for design of parameters

表 1 WPT 系统参数

Tab. 1 Parametric values of WPT system

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	100	V_o /I_o	105 V/2.6 A
L_p/μH	108.67	L_f/μH	15.15
L_s/μH	108.79	f/kHz	85
L_r/μH	69.15	C_s/nF	28.29
C_r/nF	50.76	C_f/nF	231.41
C_p/nF	19.73	M_{ps}/μH	36.31

此外，为了测试所提系统的实际性能，基于表 1 的参数搭建如图 7 所示的实验样机平台。大功率直流电源作为输入源，4 个 IRFP4227 组成一次侧全桥逆变器，多个标称的聚丙乙烯电容通过串并联的方式，既减小了实际值与设计值之间的误差，又

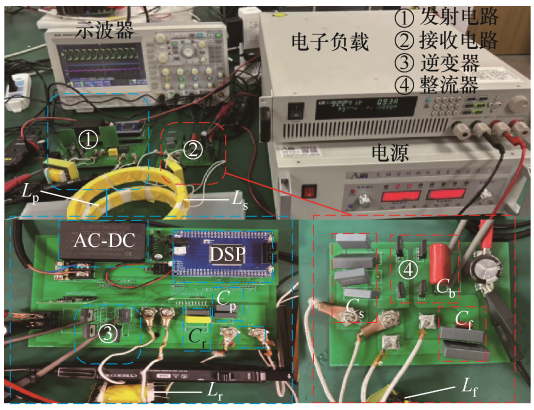


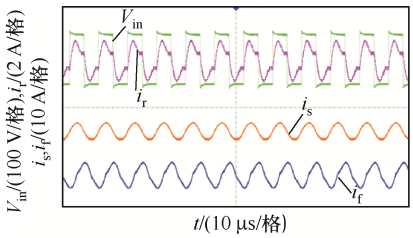
图 7 实验样机平台

Fig. 7 Platform for experimental prototype

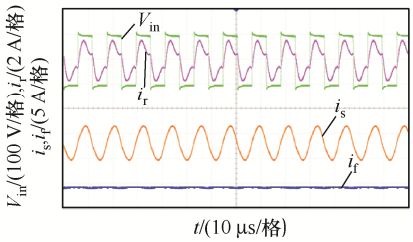
降低了谐振回路损耗。2 个线圈垂直方向的偏移距离为 7 cm。在接收侧，由于较低的导通压降，4 个肖特基二极管组成了 2 个整流回路，且每个肖特基二极管的电压应力等于输出电压，故根据输出选择肖特基二极管型号为 MBRF20200。电子负载用来模拟电池充电过程中的等效负载变化。

3.2 测试结果

首先，示波器分别给出了所提系统工作在恒流模式和恒压模式下的 V_{in}、i_p、i_s 及 i_f 的静态波形，分别如图 8(a)和(b)所示。可以看出，2 种工作模式下逆变器输出电压和电流之间的相位差都接近于 0，这意味着系统实现了零相角输入特性，系统内没有无功功率输入，可以降低环路损耗进而改善系统效率。此外，恒流模式下，i_s 和 i_f 表现为正弦波形，且 i_s 的相位始终领先 i_f 90°，与式(6)相符，此时 i_s 和 i_f 协同给负载供电；在恒压模式下，i_f 会因为二极管 D_2、D_4 的关断而等于 0，仅有 i_s 给负载供电。



(a) 恒流模式，R_L=15 Ω



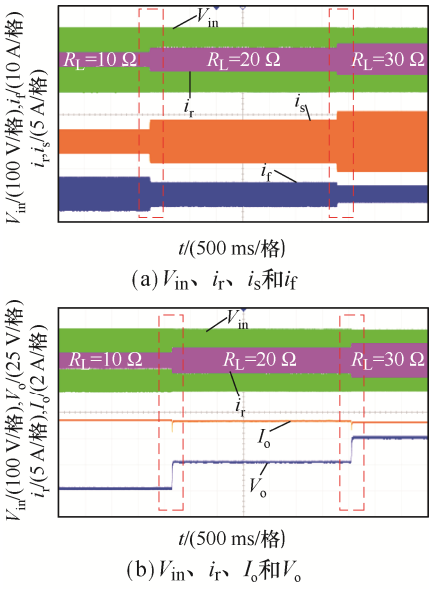
(b) 恒压模式，R_L=50 Ω

图 8 静态波形

Fig. 8 Static waveforms

此外，系统的动态特性是衡量系统性能的关键指标之一。图 9 和图 10 直观地展示了系统在恒流和恒压模式下的动态响应特性。由图 9 可见，在恒流模式下，随着等效负载 R_L 从 10 Ω 变为 20 Ω 再增大到 30 Ω，i_s 增大，i_f 缓慢减小，但输出电流基本保持恒定，因此输出电压呈现线性增大，整个响

应过程不超过 50 ms，且整个切换过程极为平滑，无任何电压电流尖峰的出现。与之相反，在恒压模式下，随着等效负载 R_L 从 75 Ω 变为 100 Ω 再增大到 125 Ω，输出电压基本保持不变，输出电流呈现线性下降，此时 i_f 始终为 0，而由于输出功率的降低，一次侧的输入电流和二次侧谐振电流的幅值均会下降，同恒流模式下一样，整个变化过程中的动态性能也表现良好。

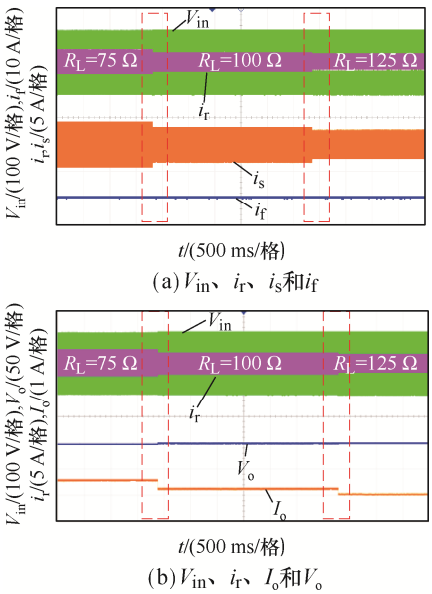


(a) V_{in}、i_r、i_s和i_f

(b) V_{in}、i_r、I_o和V_o

图 9　恒流模式下 R_L 从 10 Ω 到 20 Ω 到 30 Ω 变化的动态波形

Fig. 9 Dynamic waveforms in CC mode when R_L changes from 10 Ω to 20 Ω and 30 Ω in sequence



(a) V_{in}、i_r、i_s和i_f

(b) V_{in}、i_r、I_o和V_o

图 10　恒压模式下 R_L 从 75 Ω 到 100 Ω 到 125 Ω 变化的动态波形

Fig. 10 Dynamic waveforms in CV mode when R_L changes from 75 Ω to 100 Ω and 125 Ω in sequence

为了更好地评估充电过程中系统输出电压 V_o 与输出电流 I_o 的变化特性，对电阻值从 10 Ω 到 400 Ω 变化范围内的输出电压电流进行采集，并据此绘制输出电压与输出电流的变化曲线，如图 11 所示。在恒流充电模式下，观察到充电电流随负载电阻 R_L 的增加而呈现出轻微的下降趋势，但总体上维持在约 2.6 A 的水平。此阶段，由于电流保持恒定，电池得以迅速累积电荷，从而导致输出电压逐步上升。当恒流充电模式结束，系统转而进入恒压充电模式，此时输出电压呈现出稳定的上升趋势，并基本维持在约 105 V 的水平；与此同时，充电电流迅速减小，直至减小至设定电流的 1/10，标志着整个充电流程结束。

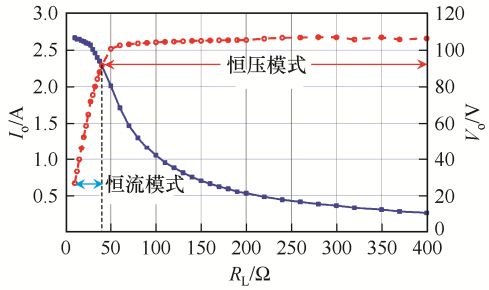


图 11　实测充电电压和电流曲线

Fig. 11 Curves for measured charging voltage and current

为考虑线圈内阻对输出的影响是否可以忽略，通过仿真分析了所提拓扑在不同线圈内阻条件下的输出电压特性。如图 12 所示，当线圈内阻小于 1 Ω 时，整个 WPT 系统在恒压模式下输出差异可以维持在 1 V 以内，随着线圈电阻的增大，输出电压与预设值有越来越大的差距，但考虑到目前设计线圈内阻基本不超过 0.50 Ω(如本文一、二次侧线圈内阻分别为 0.35 Ω 和 0.37 Ω)，故线圈内阻对系统输出的影响基本可以忽略。同时，由于输出电压和输出电流遵循欧姆定律，根据输出电压随线圈电阻变化的趋势，可反向推断出输出电流相应的变化情况，在此不再赘述。

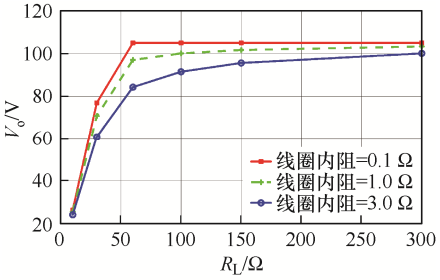


图 12 线圈内阻对输出的影响曲线

Fig. 12 Curves for influence of internal resistance of coils on output

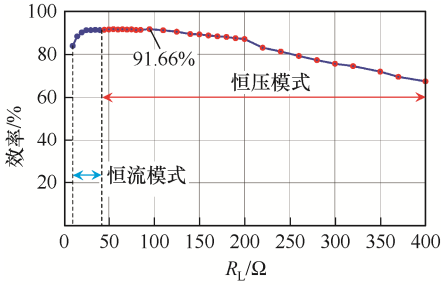


图 13 电子负载从 10 Ω 到 400 Ω 对应的实测系统效率曲线

Fig. 13 Curve for measured system efficiency when electronic load changes from 10 Ω to 400 Ω

系统实测效率曲线如图 13 所示，在恒流模式下，系统通过 2 路电流 i_s 和 i_f 为电子负载充电，使得接收电路的寄生参数消耗能量降低，加之零电压开通特性的实现，整个系统能够在较宽的负载范围内维持较高的传输效率。随着输出功率的升高，系统效率从 83.91%显著提升至 91.12%。随后，系统进入恒压模式，效率一直升至最高值 91.66%，之后逐渐下降，直至充电完成。

为了证明所提系统的优势所在，将本文所提系统与目前相关研究的详细性能进行对比，见表 2。相对于文献[10-13]，本文提出的拓扑结构不涉及控制策略，无需任何采样及闭环调控过程；文献[14]虽然能够不使用控制策略实现恒流恒压切换，但是三线圈系统会有不可避免的交叉耦合现象，进而导致传输性能变差。相比之下，本文提出的拓扑在无需控制下自动实现 CC 与 CV 间的切换，且不需要任何钳位线圈的添加，具有更大的优势。

表 2 同类文献性能比较

Tab. 2 Comparison of performance among references of the same type

参考文献	电感数量	电容数量	线圈数量	二极管数量	最高效率/%	是否使用控制策略	是否存在交叉耦合
[10]	1	4	2	2	90.00	是	否
[11]	0	5	2	4	94.20	是	否
[12]	1	5	3	4	95.40	是	是
[13]	1	4	2	4	93.90	是	否
[14]	0	4	3	8	90.20	否	是
本文	2	5	2	4	91.66	否	否

4 结语

本文提出了 1 种能够自动实现恒流恒压切换的无线电池充电拓扑。理论分析构建了所提系统的等效电路模型，证实了所提系统在无需额外器件添加或双边通信手段的辅助下，随负载值的增大自动进行等效拓扑的重组，从而实现恒流恒压模式的切换。此外，该系统不需要额外辅助线圈，有效避免了多线圈系统中常见的交叉耦合现象。这不仅保证了输出的稳定性和安全性，还大大提高了设计的灵活性，为系统的进一步优化提供了可能。此外，更少的无源元件显著优化了系统体积、质量和成本。最后，为了验证所提拓扑的实际性能，构建了 1 台最大功率为 273 W 的实验样机。实验结果表明，所提系统能够在整个电池充电周期内稳定地实现恒流/恒压模式自动切换，且能够实现零电压开通和零无功输入特性，最高效率可达 91.66%，且在 10 Ω 到 400 Ω 的宽负载范围可以维持较好的传输性能。

参考文献：

[1] 胡鹏, 王宁, 杨庆胜, 等. 具有全向抗偏移能力及恒流输出的电动汽车无线充电系统[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(12): 92-99.

Hu Peng, Wang Ning, Yang Qingsheng, et al. Wireless

charging system for electric vehicles with omnidirectional anti-offset capability and constant current output [J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(12): 92-99. (in Chinese)

[2] 赵航, 贾静, 杨哲, 等. 平台式无人机强耦合无线电能传输方法[J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 158-168.
Zhao Hang, Jia Jing, Yang Zhe, et al. Strongly coupled platform wireless power transmission method for UAV [J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(2): 158-168. (in Chinese)

[3] 周晓燕, 王鹤霖, 贾海涛, 等. 一种适用于电动汽车无线充电的恒压恒流混合补偿拓扑[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 343-351.
Zhou Xiaoyan, Wang Helin, Jia Haitao, et al. A hybrid compensation topology with constant voltage and constant current for EV bidirectional wireless charging [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(11): 343-351. (in Chinese)

[4] 李振杰, 崔航, 袁得春, 等. 面向旋翼无人机的无线电能传输线圈自对准方法研究[J/OL]. 电源学报, 2024: 1-12. (2024-10-21)[2024-11-29]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241018.1246.005.
Li Zhenjie, Cui Hang, Yuan Dechun, et al. Research on self-alignment method of wireless power transmission coils for rotorcraft unmanned aerial vehicles [J/OL]. Journal of Power Supply, 2024: 1-12. (2024-10-21)[2024-11-29]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241018.1246.005. (in Chinese)

[5] 赵英杰, 张闯, 刘素贞, 等. 基于电极等效电路模型的锂离子电池无析锂快充策略优化研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5868-5882.
Zhao Yingjie, Zhang Chuang, Liu Suzhen, et al. Optimization of fast charging strategy for lithium-ion batteries without deposition based on electrode equivalent circuit model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5868-5882. (in Chinese)

[6] 宋凯, 朱春波, 李阳, 等. 基于磁耦合谐振的自主无线充电机器人系统设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 38-43.
Song Kai, Zhu Chunbo, Li Yang, et al. Design and implementation of an autonomous wireless charging robot system using magnetically coupled resonance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 38-43. (in Chinese)

[7] 冯鸿运, 林飞, 杨中平, 等. 应用于自动导引小车无线充电系统的导航与供电一体化线圈研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4294-4304.
Feng Hongyun, Lin Fei, Yang Zhongping, et al. A research on a navigation and power supply integrated coil for automatic guided vehicle wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4294-4304. (in Chinese)

[8] Zhang Hailong, Chen Yafei, Kim D H, et al. Variable inductor control for misalignment tolerance and constant current/voltage charging in inductive power transfer system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 4563-4573.

[9] 黄文聪, 饶天彪, 蒋煊焱, 等. 无线电能传输系统最大效率追踪及恒压输出复合控制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3589-3601.
Huang Wencong, Rao Tianbiao, Jiang Xuanyan, et al. Maximum efficiency tracking and constant voltage output compound control method for wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3589-3601. (in Chinese)

[10] 黄钦鸿, 李优新, 李志忠, 等. 基于次级改进型有源整流的无线电能传输系统[J]. 电力电子技术, 2023, 57(7): 88-91.
Huang Qinhong, Li Youxin, Li Zhizhong, et al. Wireless power transmission system based on improved active rectifier at receiving terminal [J]. Power Electronics, 2023, 57(7): 88-91. (in Chinese)

[11] 李乔, 李明轩, 杨斌, 等. 基于副边可变电容的 IPT 恒流恒压充电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5741-5749, 5902.
Li Qiao, Li Mingxuan, Yang Bin, et al. Secondary-side variable capacitor-based IPT system for constant current and constant voltage charging [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5741-5749, 5902. (in Chinese)

[12] 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 Le, Cheng Bing, He Liangzong, et al. Constant-voltage and constant-current wireless charging system based on compensation network current analysis [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 101-110. (in Chinese)

[13] 邹静, 徐耘英, 彭娟娟, 等. 基于频率切换实现电池恒流和恒压充电的LCC-S补偿WPT系统研究[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 117-124.
Zou Jing, Xu Yunying, Peng Juanjuan, et al. Research on LCC-S compensated WPT system based on frequency switching to realize CC and CV charging for battery [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 117-124. (in Chinese)

[14] Huang Zhicong, Wang Guoyu, Yu Jidong, et al. A novel clamp coil assisted IPT battery charger with inherent CC-to-CV transition capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 8607-8611.



苏君平

作者简介：

苏君平(1984—)，男，中国电源学会会员，硕士，高级工程师。研究方向：电力电子和智能制造领域的技术研发与产品创新设计。E-mail：sujunping@xmcu.edu.cn。

邱椿(1995—)，男，硕士研究生。研究方向：智能机器人。E-mail：2601629412@qq.com。

张陈涛(1986—)，男，通信作者，博士，助理教授。研究方向：智能机器人。E-mail：zhangct@xmu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)

(上接第 166 页)

(in Chinese)

[13] 范学鑫, 杨北超, 揭贵生, 等. 考虑漏感频变特性的三相立体卷铁心变压器建模及分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 140-152.
Fan Xuexin, Yang Beichao, Jie Guisheng, et al. Modeling and analysis of 3D wound core transformer considering frequency-dependent characteristics of leakage inductance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 140-152. (in Chinese)



刘浩

作者简介：

刘浩(1999—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：多脉波整流变压器谐波。E-mail：597746869@qq.com。

孔玲玲(1980—)，女，硕士，副教授。研究方向：电力电子技术在电力系统中的应用研究。E-mail：kongling0104@163.com。

余思宇(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：多脉波整流变压器。E-mail：1471967451@qq.com。

(责任编辑：耿越)