

三相多负载无线电能传输系统建模与特性分析^{*}

刘伟 王贇 符气叶

(广东农工商职业技术学院智能工程学院 广州 510507)

摘要:为了提高无线电能传输系统单体容量和整体传输能力,提出采用基于三相逆变器的多负载无线电能传输系统,发射端采用电压型双极性正弦脉冲宽度调制(SPWM)控制桥式逆变器,接收端为3个采用并联谐振电路的独立单元。通过耦合电路理论推导了系统传输效率公式,分析了传输效率与负载、互感系数的关系。在此基础上,提出了传输系统恒流输出自适应PID控制方案和负载切入切出控制方法。最后通过MATLAB仿真和实物实验平台验证了所提及拓扑和控制方案的有效性和可行性。三相传输系统每相的输出功率达到60W左右,传输效率分别达到90%以上,与单相无线系统输出功率和传输效率相当,有效提高了传输系统的单体容量和传输能力。

关键词:三相逆变器;多负载;建模分析;自适应;PID控制;恒流输出

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Modelling and characterisation of three-phase multi-load wireless energy transmission systems

Liu Wei Wang Yun Fu Qiye

(Intelligent Engineering College, Guangdong AIB Polytechnic College, Guangzhou 510507, China)

Abstract: To improve the single-unit capacity and overall transmission capability of wireless power transmission systems. This paper proposes a multi-load wireless power transmission system based on a three-phase inverter. The transmitting end uses a voltage-type bipolar SPWM controlled bridge inverter, and the receiving end is composed of three independent units with parallel resonant circuits. Through the theoretical derivation of the coupling circuit, the system transmission efficiency formula is obtained, and the relationship between transmission efficiency and load and mutual inductance coefficient is analyzed. On this basis, an adaptive PID control scheme for constant current output of the transmission system and a load cut-in and cut-out control method are proposed. Finally, the effectiveness and feasibility of the mentioned topology and control scheme are verified through MATLAB simulation and a physical experiment platform. The output power of each phase of the three-phase transmission system reaches about 60 W, and the transmission efficiencies reach more than 90% respectively, which is equivalent to the output power and transmission efficiency of a single-phase wireless system, effectively improving the single-unit capacity and transmission capability of the transmission system.

Keywords: three-phase inverter; multi-load; modelling analysis; adaptive; PID control; constant current output

0 引言

无线电能传输技术(wireless power transfer, WPT)经过多年的发展,在基础理论研究方面越来越完善,为了提高家电设备、农机装备、智能装备的无线电能传输效率、自由度和续航能力,部分研究成果开始实现产品化和商业

化,其应用越来越广泛,发展越来越快^[1]。为了增大系统功率传输能力和空间传输自由度,通过增加激励单元数量,可以满足对多个负载同时充电,提高系统功率的传输能力。研究者提出多激励源(multi excitation unit, MEU)的WPT系统,该系统可以提升输出功率和传输能力,提高系统功率调节自由度,降低单体电压、电流应力。文

收稿日期:2024-08-24

^{*} 基金项目:2021年广东省普通高校重点领域专项(新一代信息技术)(2021ZDZX1143)资助

献[2]提出一种采用 MEU 拓扑结构的 WPT 系统,这种基于模型逆的控制器矩阵,实现了低阶控制器对高阶 WPT 系统控制,该系统提升了传输功率,提高了功率调节自由度。但是存在线圈交叉耦合效应较大,线圈耦合损耗与影响较大的问题,影响传输效率。文献[3]针对多负载无线传输技术不同类型的发射和接收线圈,主要研究了无线电能的传输特性。分别对比了不同类型多负载无线电能传输系统的发射端结构、系统传输原理和传输特性,并提出它们的适用场合,针对存在的技术瓶颈提出了发展方向。但是没有重点研究多负载无线电能传输系统多负载切入切出变化时对系统影响和控制方法。文献[4]针对无线电能传输系统传输效率受耦合线圈之间互感以及负载影响的特点。提出采用阻抗匹配方法实现最大效率追踪及基于前馈的 PI 控制的恒压输出复合控制方法,提高了系统快速性和抗干扰性。但是缺少对多激励源多负载无线传输 PID 控制的恒流输出自适应控制方法研究。文献[5]提出了一种以相角控制法控制的三相系统(magnetic coupling resonant wireless power transfer, MCR WPT)。本文对三相 MCR WPT 系统的工作原理进行分析。得到相角控制法控制简单,易于实现。丰富和拓展了多相 MCR WPT 系统的研究内容,为多相 MCR WPT 系统的开发应用提供了理论参考和技术储备。但是缺少对 WPT 系统三相逆变器输出频率、电压幅值、相序的控制方法的研究。

文献[6]针对无线电能传输技术在各种工程领域广泛应用。由于它的灵活与高效性,WPT 技术得到了广泛应用和快速发展,但是在如何增大系统功率传输能力和空间传输尺度,研究者还没提出有效提升控制多激励源协调控制的方法。文献[7]提出采用多相 MCR WPT 系统通过增加发射线圈和接收线圈可有效降低系统线圈不对称影响传输效率问题。还提出了相角控制方法分析对该系统无线传输影响。但是对多负载无线电能传输系统的发射端电压幅值、频率还缺少分析,提出控制方法。文献[8]对

多负载 WPT 系统输出端控制进行研究,并提出了多负载 WPT 系统的输出控制策略。但是,缺少对既需多级输出又需要延长传输距离的使用场合。为了解决线圈偏移对系统传输效率和功率下降的影响问题,文献[9]提出了一种切换的拓扑群结构,通过制定一种切换规则来对发射端线圈进行选择,保证电能传输系统在传输过程中可靠性。但是没有提出负载变换对发射电路拓扑的影响和解决方案。

为了减少多线圈之间的交叉耦合效应,提高系统控制性,采用一种三相谐振式多负载无线电能传输系统设计。发射端采用三相桥式正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 逆变器设计 (SPWM three-phase bridge inverter, STPBI),产生三相正弦波,分别与 3 个接收线圈产生耦合。本文设计多负载无线电能传输系统结构属于集中式单补偿电路结构,即发射端由三相电压型 SPWM 发生器控制逆变器输出三相电压,经耦合谐振,由独立的谐振补偿电路接收线圈接收。发射端和接收端采用“串联—并联 (SP) 结构”作为谐振补偿网络。利用耦合电路原理对多激励源多负载无线传输系统模型进行理论分析,主要分析影响传输效率的因素,如负载和互感系数。提出优化电路参数设计^[10-11],在发射端采用基于 SPWM 控制方法,为了实现恒流输出提出了闭环控制方法,分析了多负载切入切出变化时对系统影响^[12]。利用 MATLAB/Simulink 对传输系统仿真,搭建实物实验平台,验证系统设计的有效性。

1 三相多负载 WPT 系统工作特性分析

1.1 系统拓扑结构及工作原理

经简化分析,本文研究对象有 3 个激励源发射端和 3 个接收单元的多负载 WPT 系统,该系统电路组成主要由三相桥式逆变器电路、SPWM 控制电路、串并联谐振电路 (SP 谐振电路)、和负载电路组成。如图 1 所示,三相桥式逆变电路的 Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{13} 、 Q_{14} 、 Q_{15} 、 Q_{16} 是 MOSSET 开关

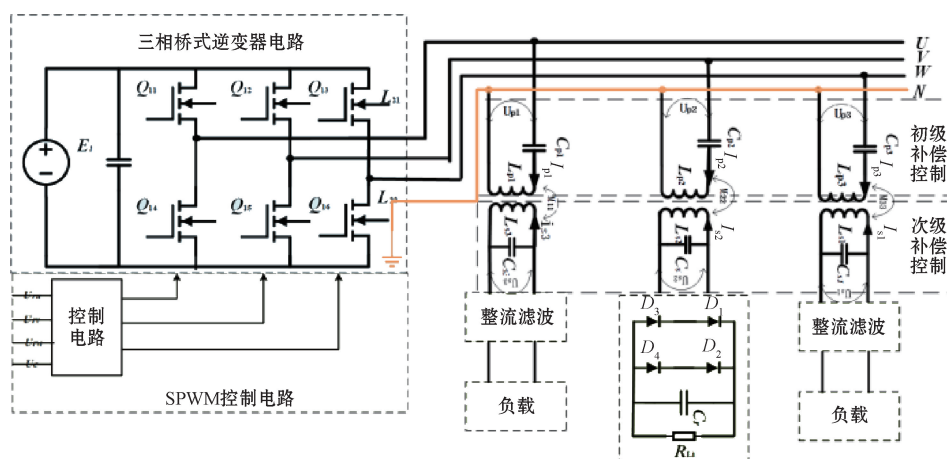


图 1 三相谐振式多负载无线电能传输系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of three-phase resonant multi-load wireless power transfer system

管;SP 谐振电路中 L_{p1}, L_{p2}, L_{p3} 为原边的电感分别与电容 C_{p1}, C_{p2}, C_{p3} 组成串联谐振发射电路, I_{p1}, I_{p2}, I_{p3} 是发射端谐振电流; L_{s1}, L_{s2}, L_{s3} 为副边的电感分别与电容 C_{s1}, C_{s2}, C_{s3} 组成并联谐振接收电路, I_{s1}, I_{s2}, I_{s3} 是接收端谐振电流; M_{11}, M_{22}, M_{33} 为原副边线圈的互感; U_{p1}, U_{p2}, U_{p3} 以及 U_{s1}, U_{s2}, U_{s3} 是分别是发射和接收端的谐振电压。以上部分共同构成三相串并联谐振耦合电路。负载电路的组成主要由整流二极管 D_1, D_2, D_3, D_4 组成整流桥, C_r 为滤波电容, R_L 为负载, 确保负载直流充电^[13]。

三相多负载无线电能传输系统传输原理是磁耦合谐振式无线电能传输方式, 为了便于对传输系统发射端三相交流电压幅值和频率等的控制, 本文提出了基于 SPWM 控制电路控制方法^[14]。其传输系统(图 1)发射端电路包含了直流电源、三相 SPWM 控制电路、桥式逆变器、LC 串并联谐振发射线圈。接收端由 3 个独立的 LC 并联谐振接收电路和负载组成。其工作过程是发射端采用三相桥式逆变器电路产生对称的三相交流电, 交流电幅值、相位、频率由 SPWM 控制电路进行调节。经过三相逆变器输出高频三相交流电信号, 经过 LC 串联谐振电路发射后, 由 LC 并联谐振电路接收, 再经过整流滤波后对负载供电^[15]。

1.2 系统建模分析

三相多负载无线电能传输系统的等效电路如图 2 所示。

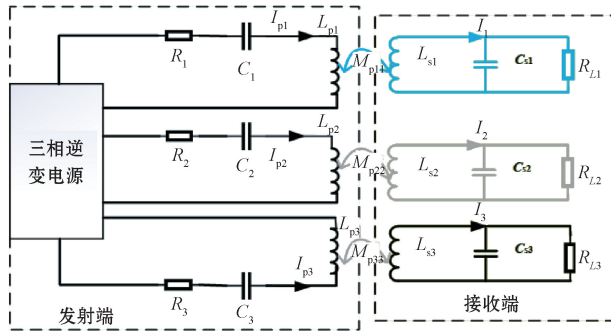


图 2 三相谐振式无线电能传输系统的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of three-phase resonant wireless power transfer system

当发射线圈采用平行放置, 组成一个“品”字型, 可忽略各接收线圈之间的互感, 只考虑发射线圈和接收线圈之间的互感^[15], 根据 KVL 列写其中两相两负载线圈系统的电路方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_u \\ \dot{U}_v \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{p1} & 0 & j\omega M_{p11} & j\omega M_{p12} \\ 0 & Z_{p2} & j\omega M_{p21} & j\omega M_{p22} \\ j\omega M_{p11} & j\omega M_{p21} & Z_1 & \\ j\omega M_{p12} & j\omega M_{p22} & & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{p1} \\ \dot{I}_{p2} \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$Z_1 = R_{L1} + j\omega L_{s1} + 1/j\omega C_{s1}; Z_2 = R_{L2} + j\omega L_{s2} + 1/j\omega C_{s2} \quad (2)$$

$$Z_{p1} = R_1 + j\omega L_{p1} + 1/j\omega C_{p1}; Z_{p2} = R_2 + j\omega L_{p2} + 1/j\omega C_{p2} \quad (3)$$

将 $M_{T1} = M_{1T}, M_{T2} = M_{2T}, M_{T3} = M_{3T}$ 代入式(1), 可求出发射线圈、接收线圈 1 和接收线圈 2 的回路电流为:

$$\dot{I}_1 = -\frac{\omega^2 M_{p22} M_{12} + j\omega M_{p11} Z_2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2} \dot{I}_{p1} \quad (4)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{\omega^2 M_{p11} M_{12} + j\omega M_{p22} Z_1}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2} \dot{I}_{p2} \quad (5)$$

$$U_u = \left(Z_p + \frac{\omega^2 M_{p12} M_{12} + j\omega M_{p21} Z_1}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2} + \frac{\omega^2 M_{p11} M_{12} + j\omega M_{p22} Z_1}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2} \right) \dot{I}_{p1} \quad (6)$$

则可以得到接收线圈 1 的负载电阻 R_{L1} 上的输出功率为:

$$P_{O1} = |\dot{I}_1|^2 R_{L1} = \left| \frac{\omega^2 M_{p22} M_{12} + j\omega M_{p11} Z_2}{Z_p (Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2) + \omega^2 M_{p11}^2 Z_1 - 2j\omega^3 M_{p11} M_{p22} M_{12}} \right|^2 U_u^2 R_{L1} \quad (7)$$

同样可以达到接收线圈 2 的负载电阻 R_{L2} 上的输出功率为:

$$P_{O2} = |\dot{I}_2|^2 R_{L2} = \left| \frac{\omega^2 M_{p11} M_{12} + j\omega M_{p22} Z_2}{Z_p (Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{12}^2) + \omega^2 M_{p11}^2 Z_1 - 2j\omega^3 M_{p11} M_{p22} M_{12}} \right|^2 U_u^2 R_{L2} \quad (8)$$

从而系统总传输功率为 $P_O = P_{O1} + P_{O2}$ 。由式(7)、(8)可得, 两负载多线圈系统的传输效率为:

$$\eta = \frac{P_{O1} + P_{O2}}{P_{in}} = \frac{|\dot{I}_1|^2 R_{L1} + |\dot{I}_2|^2 R_{L2}}{2U_i I_{p1}} \times 100\% \quad (9)$$

当发射线圈、接收线圈 1 和接收线圈 2 的参数相同, 即 $R_1 = R_2 = R_3 = R, R_{L1} = R_{L2} = R_L, M_{T1} = M_{T2} = M_T$ 。收线圈 1 和接收线圈 2 之间的互感远小于与发射线圈之间的互感时候, 即 $M_{12} = 0$ 。由式(2)~(7)可得:

$$\eta = \frac{2\omega^2 M_{pi}^2 R_L}{R(R + R_L) + 2\omega^2 M_{pi}^2 (R + R_L)} \quad (10)$$

根据式(8), 利用 MATLAB 软件, 代入表 1 电路参数, 得到传输效率 η 和负载 R_L 关系曲线如图 3 所示。从图 3 可知, 系统传输效率是随着负载增加增大, 达到峰值后逐渐减少。图 3 中不同的曲线表示当耦合系数 K 值增加曲线向上平移, 可见在相同的负载情况下, K 值越大, 传输效率越高。

根据式(10), 得到传输效率 η 与耦合线圈互感系数 M

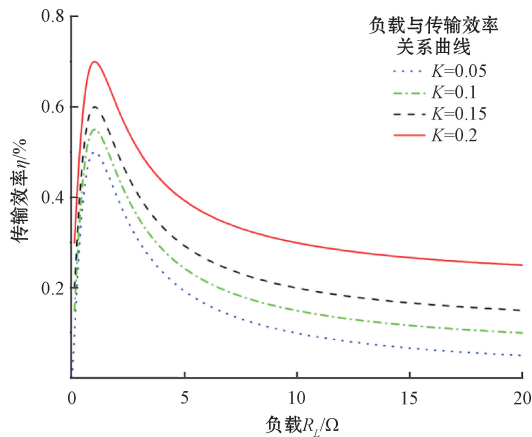


图3 系统传输效率与负载的关系曲线
Fig. 3 Relationship curve between system transmission efficiency and load

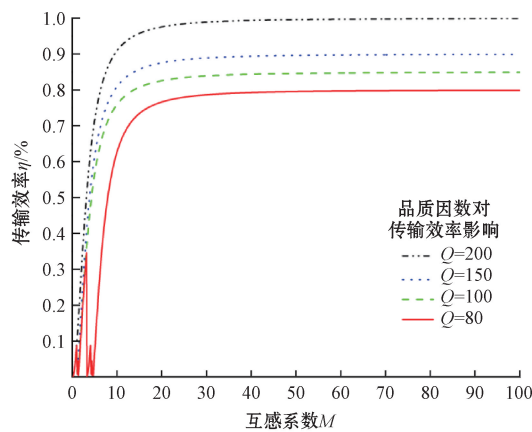


图4 系统传输效率与耦合系数的关系曲线
Fig. 4 Relationship curve between system transmission efficiency and coupling coefficient

的关系曲线如图4所示。系统传输效率是随着互感系数增加而增加,随着互感系数 M 值越大,传输效率趋近于

100%。传输效率曲线与传输系统品质因数有关,在相同的互感系数 M 值,品质因数 Q 值越大,传输效率越大。

2 三相多负载 WPT 系统控制方法

2.1 系统的基本控制原理

三相谐振式多负载无线电能传输系统采用双极性 SPWM 控制方式,该控制方式特点是通常共用一个三角波载波,用 3 相位互差 120° 正弦波作为参考波,以获得三相对称输出。通过参考波和载波比较,在交点处产生开关管的控制信号,改变参考波的幅值就可以改变三相逆变器输出交流电压的大小,改变参考波的频率就可以改变三相逆变器输出交流电压的频率,改变三相参考波的相序就可以改变输出交流电的相序,调压和调频同时在逆变器控制中完成,不再需要调控直流电压,因此电压型 SPWM 逆变器可以采用不可控整流器作为直流输入电源,方便调节三相逆变器输出交流信号的频率、幅值和相序^[16-17]。双极性 SPWM 控制下三相逆变器输出仿真波形如图 5 所示。

2.2 系统恒流控制原理

针对输出信号不稳定的情况,本文提出了基于自适应 PID 闭环控制系统,实现信号的稳定输出。闭环控制系统从负载电流采样,采样值经反馈网络和 PWM 期望参数比较求差,经过 PID 控制调整 PWM 控制电路的电流幅值,从而稳定三相逆变器的输出电流幅值,实现负载电流稳定输出^[18]。恒压控制拓扑如图 6 所示。

2.3 负载切换分析

传输系统实际应用中,需要考虑接收端负载 R_L 切入或切出动态变化对传输系统发射端的影响。负载动态变化会影响初级绕组的互感系数,如式(11)可知,在负载动态变化过程中原边线圈的电压 u_{p1} 受到自感系数 L_{p1} 和互感系数 M_{11} 影响^[19]。主要表现在负载变化时,在原边线圈中的电路产生的反向互感电动势增大,电路中的电流变小。

$$u_{p1} = L_{p1} \frac{di_{p1}}{dt} + M_{11} \frac{di_{s2}}{dt} \quad (11)$$

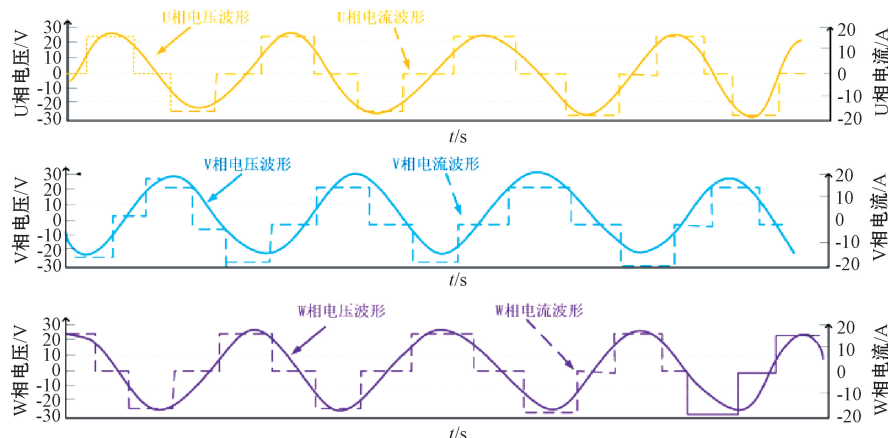


图5 双极性 SPWM 控制方式三相桥式逆变器输出仿真波形
Fig. 5 Simulation waveforms of output of three-phase bridge inverter with bipolar SPWM control mode

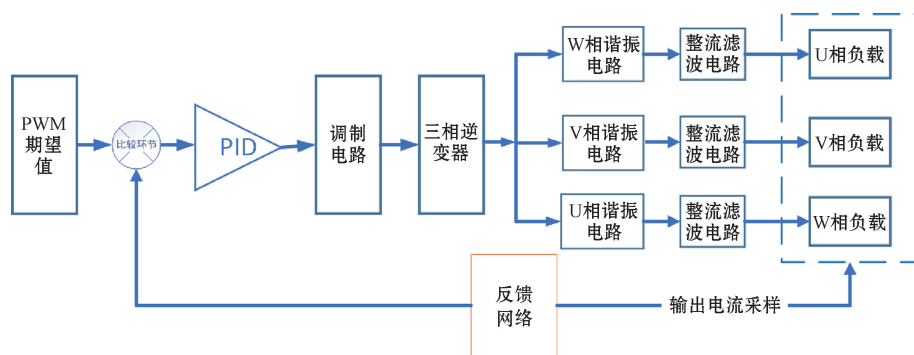


图6 恒压控制拓扑

Fig. 6 Constant voltage control topology

当传输系统负载切入变化时需要控制逆变器开关管上管开通,下管断开保证三相逆变器该相通路,如图7(a)所示。而当有负载切出时,原边线圈中的互感电动势减少,原边线圈电流增大,这时需要切断原边线圈电路避免因为过流损坏逆变器的开关管或击穿发射线圈,可将逆变器开关管上管断开,下管开通,如图7(b)所示。

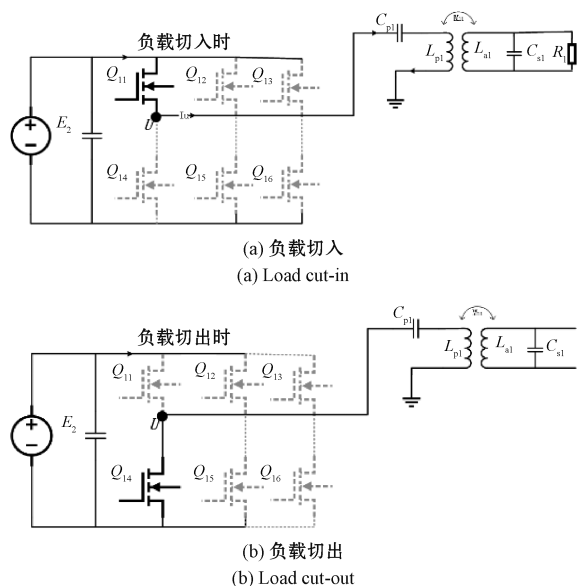


图7 某相电路负载切入切出时传输系统的影响

Fig. 7 Influence of transmission system when load of a certain phase circuit is cut in and out

2.4 系统负载切换控制方法

以某相电路为例,接收端检测负载是否接入的依据主要是原边线圈电路电流变化。当检测电流突然增大时,可判断负载切出,此时为了避免开关管过流损坏,发射线圈绝缘部分过压击穿的情况发生,需要将上管断开,下管开通。当原边线圈电路电流减少,可判断负载切入,为了保证通路,需要控制上管开通,下管断开,控制流程如图8所示。

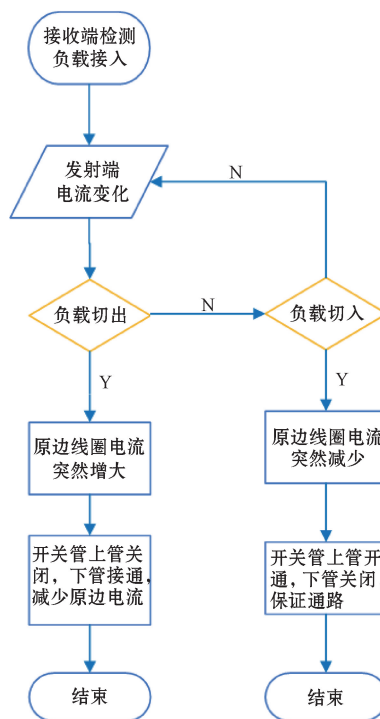


图8 负载切入切出控制流程

Fig. 8 Flow chart of load cut-in and cut-out control

3 实验结果

3.1 仿真验证结果

基于 Simulink 仿真,讨论了模型自适应 PID 闭环控制方案,得到模型稳态输出仿真波形,以及单相负载切入切出动态变化时,输出电压波形变化仿真过程。系统参数设置如表1所示。

用 MATLAB/Simulink 仿真软件,根据图1搭建三相多负载无线电能传输系统电路。该电路发射端控制电路采用三相电压型 PWM 逆变器控制,副边线圈分别是独立的3个 LC 并联谐振接收器。发射端与接收端采用“串-并”连接耦合方式。运行仿真后得到接收线圈输出电压波

表1 电路参数数值

Table 1 Numerical values of circuit parameters

参数	数值
负载: R_{load}	23Ω
原边线圈电感: L_{p1}, L_{p2}, L_{p3}	$0.3 \times 10^{-3} \text{ H}$
副边线圈电感: L_{s1}, L_{s2}, L_{s3}	$1.1 \times 10^{-3} \text{ H}$
互感系数: M_{11}, M_{22}, M_{33}	$0.4 \times 10^{-3} \text{ H}$
C_{pi}	$1/(\omega^2 \cdot L_{pi}) = 2.11 \times 10^{-7} \text{ F}$
C_{si}	$1/(\omega^2 \cdot L_{si}) = 5.76 \times 10^{-8} \text{ F}$
电阻大小: R_1, R_2	$0.001, 10 \Omega$
直流供电电源	24 V
PWM Generator 三角波信号频率	$1\ 000 \text{ Hz}$
PWM Generator 输出电压频率	$20\ 000 \text{ Hz}$

形如图9(a)所示,峰峰值电压为20V;某相发射端输出电流波形如图9(b)所示,峰峰值电流约为2A。

三相WPT传输系统达到稳态输出后,负载切换动态变化时,如将负载从20Ω切换为0Ω。根据系统负载切换控制方法(图8),结合式(11)可知,某相电路接收端负载动态变化影响原边线圈电压 u_{p2} 。仿真波形如图10所示,可知,此时接收端的电流是三相正弦交流稳态输出,当负载切出时,电流有明显的增大扰动。在PID自适应控制反馈作用下,逆变器开关管上管关闭,下管接通,此时输出电流为0。

当负载从0Ω切换到20Ω时,如图11所示,原来因逆变器开关管上管关闭,下管接通输出电流为0。当在切换负载过程中,相电流波形有明显增大扰动。此后有稳定的相电流波形加载到负载。

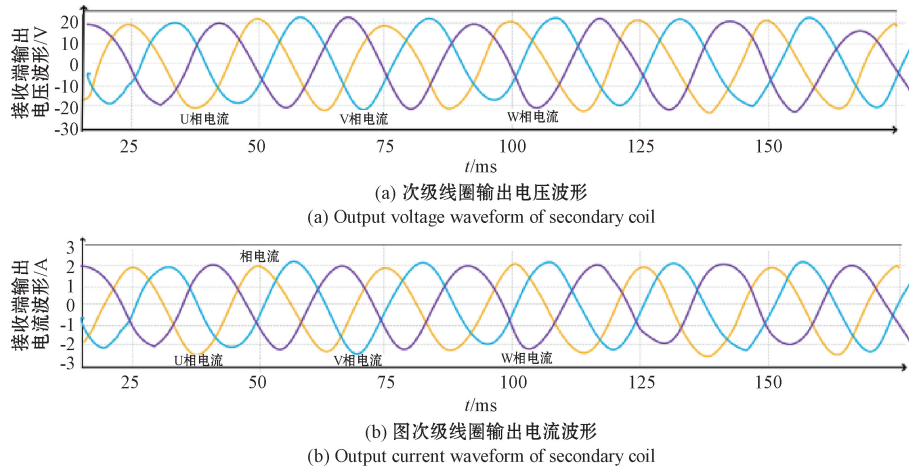


图9 接收端三相稳态波形

Fig. 9 Three-phase steady-state waveforms at the receiving end

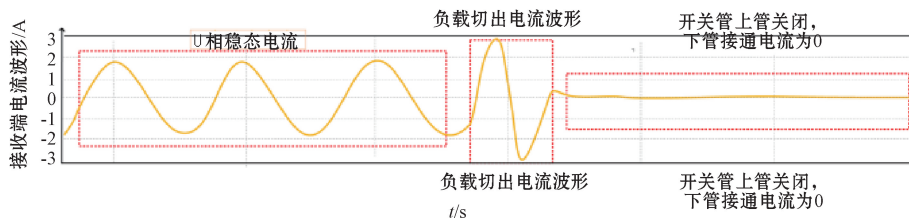


图10 负载切出接收端电流波形动态变化

Fig. 10 Dynamic change of current waveform at the receiving end when the load is cut out

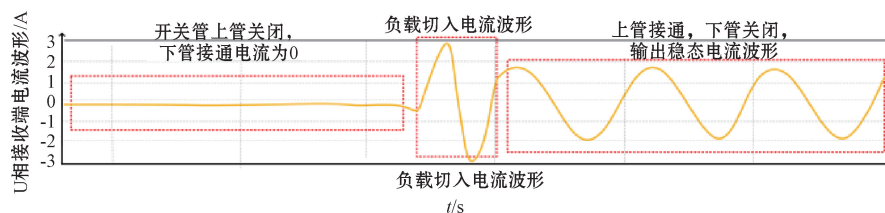


图11 负载切入接收端电流波形动态变化

Fig. 11 Dynamic change of current waveform at the receiving end when the load is cut in

由仿真结果可知,在负载切换过程中输出电压会发生动态扰动变化,但是负载电流维持恒流输出。当负载切入后,负载的两端电压下降,在自适应PID闭环控制作

用下,补偿电压下降影响,负载电流能维持恒流输出,仿真电压波形如图12(a)所示,仿真电流波形如图12(b)所示。

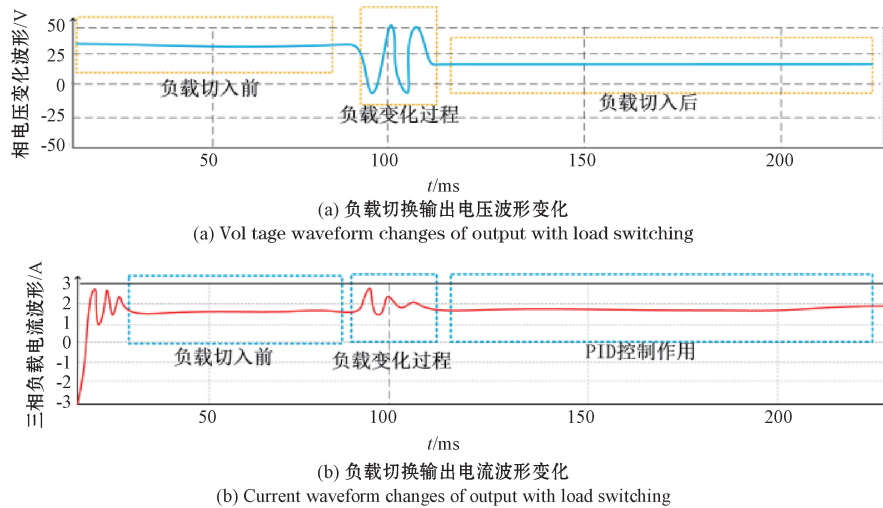


图12 单相负载切入变化发射线圈的电压、电流仿真波形

Fig. 12 Simulation waveforms of voltage and current of transmitting coil when single-phase load is cut in

由仿真结果可知,直流供电电压是DC24 V,某相发射端输出电流波形,峰值电压为20 V,峰值电流是2 A,与供电电源电压相似如图9所示。负载从20 Ω切换为0 Ω时,为避免开关管过流损坏,采用PID自适应控制反馈,逆变器开关管上管关闭,下管接通,此时输出电流为0,如图10所示。当负载从0 Ω切换到20 Ω时,在自适应PID闭环控制作用下,补偿电压下降影响,负载电流能维持恒流约2 A输出,如图12所示。本文通过引入PID自适应控制方法,在负载切换过程中,提高了逆变电路的安全性。保证系统输出端恒流输出。

3.2 传输系统稳态传输的波形与实验数据

为了验证三相谐振式多负载无线电能传输系统控制方法的有效性,根据电路拓扑结构(图1)搭建了实验平台如图13所示,其中WPT系统工作频率采用20 kHz。直流逆变器采用24 V直流电供电,电路中使用的开关管型号为IRFB4227,采用GDS-1104E示波器用来记录实验波

形,耦合线圈是200股的利兹绕制而成圆形结构,外径为13 cm,实验系统参数设置如表2所示。三相发射和接收线圈分别放在同一个平面内,减少发射或接收线圈之间的互感的影响^[13]。

表2 实验平台具体参数

Table 2 Specific parameters of the experimental platform

参数	数值
三相发射线圈电感 L_{p1} 、 L_{p2} 、 L_{p3}	34.6、33.6、33.2 μ H
三相发射端谐振电容 c_{p1} 、 c_{p2} 、 c_{p3}	1.83、1.85、1.85 μ F
三相接收端谐振电感 L_{s1} 、 L_{s2} 、 L_{s3}	27.8、27.6、27.3 μ F
三相接收端谐振电容 c_{s1} 、 c_{s2} 、 c_{s3}	2.28、2.28、2.29 μ F
互感/互感系数	15 μ H/0.19
负载电阻	20 Ω
工作频率	20 kHz
电源电压	24 V
传输距离	20 mm

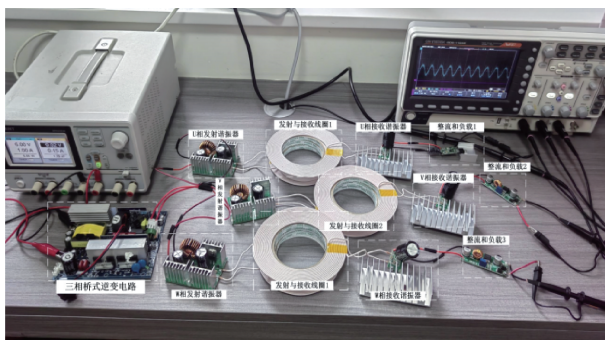


图13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

三相逆变器输出的稳态波形如图14所示,经过无线发射和接收系统输出稳态负载波形如图15所示。经过测量可知,三相发射功率分别是332.6、288.35、332.03 W,三相接收功率分别是305.75、264.33、300.48 W。总的传输效率达到91.36%,如表3所示。

3.3 闭环控制测试结果

实验观测自适应PID控制三相WPT系统在负载切入切出变化时,对负载电流的稳定调节作用。设定输出参考电压DC24 V,当负载切入时,此过程输出电压有短暂的

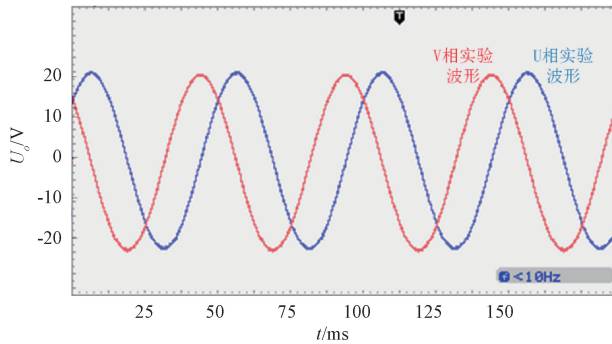


图 14 接收端稳态输出电压波形

Fig. 14 Steady-state output voltage waveform at the receiving end

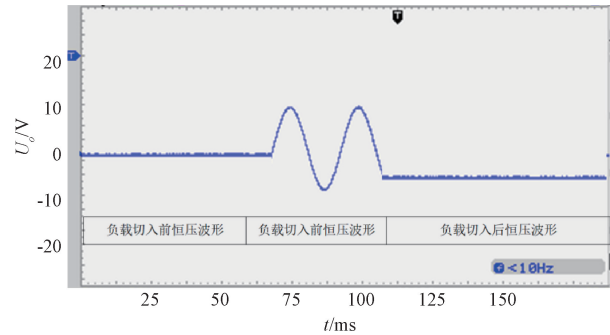


图 16 PID控制作用下负载电压波形

Fig. 16 Load voltage waveform under the action of PID control

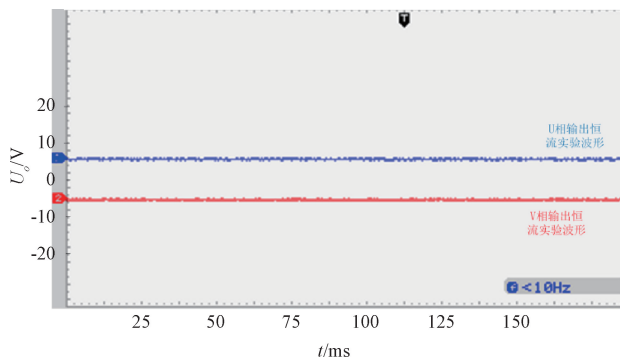


图 15 稳态输出负载波形

Fig. 15 Steady-state output load waveform

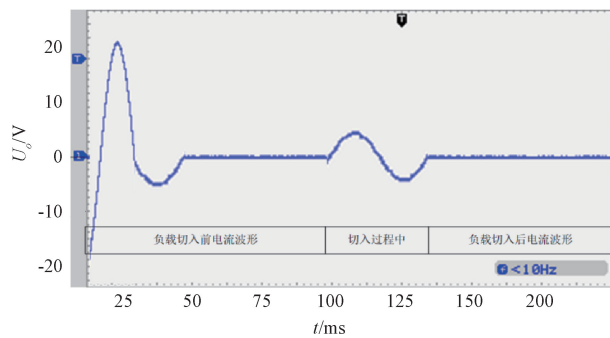


图 17 PID控制作用下负载电流波形

Fig. 17 Load current waveform under the action of PID control

表 3 三相谐振无线传输系统传输数据

Table 3 Transmission data of three-phase resonant wireless transmission system

	U 相	V 相	W 相
发射端电压/V	23.56	24.31	23.75
发射端电流/A	2.89	2.75	2.79
接收端电压/V	22.25	22.86	22.21
接收端电流/A	2.81	2.68	2.7
发射功率/W	68.01	66.84	66.27
接收功率/W	62.52	61.26	59.97
消耗功率/W	5.49	5.58	6.3
传输效率/%	91.93	91.66	90.49

扰动,稳定后输出电压略有下降,输出电压约为 23 V 直流输出,如图 16 所示。负载切入时,负载电流有短暂的扰动,在 PID 控制作用下,以负载切入前的恒流 2.8 A 输出,如图 17 所示。实验结果与图 12 一致,结果表明自适应 PID 控制在负载变化的 WPT 系统表现出很好的鲁棒性。

3.4 负载切入切出

三相 WPT 系统在无线电能传输中,常会遇见负载随机切入切出的变化情况。因此有必要测试负载发生变化时三相逆变器输出的控制变化过程,以及系统输出电流的

稳定性。如图 18 所示,在系统达到稳态时,将负载从 $20\ \Omega$ 切换到 $0\ \Omega$,保持参考电压不变。负载输出电流发生明显的变化,此时三相逆变器上管关闭,下管接通,切断电路(图 7(a)),此时输出负载电流为 0,实验结果与图 10 一致。待负载切入稳定后,输出电流保持稳定输出,三相逆变器上管开通,下管断开,如图 19 所示,此实验结果与图 11 一致。表明系统自适应 PID 控制系统对负载变化具有一定的调节作用。

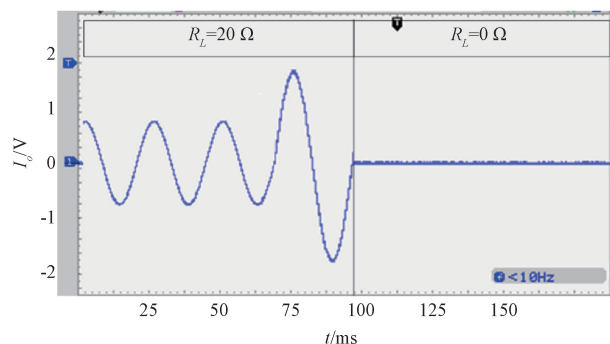


图 18 负载切出接收端电流实验波形

Fig. 18 Experimental waveform of current at the receiving end when the load is cut out

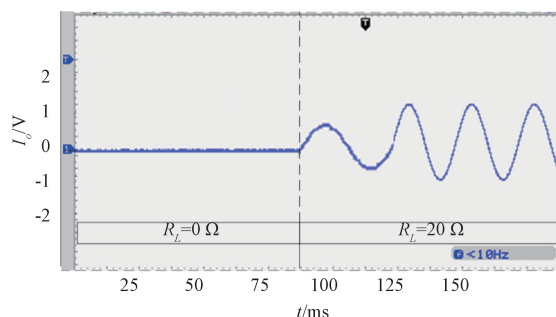


图 19 负载切入接收端电流波形

Fig. 19 Current waveform at the receiving end when the load is cut in

4 结论

采用双极性 SPWM 控制方式的三相逆变器多负载无线电能传输系统是无线传输技术研究热点,是实现电气装备智能化、轻量化、提高续航能力一项重要的技术。采用三相逆变器多负载无线电能传输技术可以实现电气隔离,提高无线电能传输安全性和便捷性,应用领域越来越广阔。本文从提高多负载无线电能传输效率考虑,对比多激励源多负载传输系统方案,设计一种采用三相桥式 SPWM 控制方式逆变器输出无线传输系统,无线传输原理是磁耦合谐振式。本文方案优点如下:1)调压调频同时在双极性 SPWM 控制器的控制中完成,其响应速度取决于控制器,调节速度快;2)采用三相电压型 SPWM 逆变器作为发射端主电路,和控制电路的相接,使装置体积小、重量轻、可靠性高;3)提出三相 WPT 多负载系统自适应 PID 控制,反馈网络从输出端电流取样,经过与期望值比较求差,输入信号在 PID 控制作用下,保证负载动态变化情况下能恒流输出,通过实验搭建验证了该控制方案的有效性,总的传输效率达到 91.36%。利用耦合电路理论知识,完成数学建模,推导了传输系统效率公式。通过 MATLAB 软件分析了系统传输效率分别与负载和互感的关系,随着接收端负载的增加,负载电压、电力值减少,输出功率降低;而随着互感系数的增大,传输效率逐渐达到饱和。最后通过实验验证了电路的有效性。未来还可以在提高系统耦合系数,提高系统耦合线圈抗偏移能力。目前是通过次耦合机构的设计或系统闭环控制等方式提高系统的抗偏移能力。还有未来在建立系统精确的动态模型并提出相应控制策略,对系统动态行为进行控制,提升系统稳定性,也是今后研究方向。

参考文献

[1] 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 M, YANG Q X, ZHANG P CH, et al.

Research status and key issues of wireless power transfer technology applications [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (8): 1547-1568.

- [2] 戴欣,夏梓壹,犹安红. 多激励端 WPT 系统基于模型逆的输出控制 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7319-7332.
DAI X, XIA Z Y, YOU AN H, et al. Output control of multi-excitation terminal WPT system based on model inversion [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7319-7332.
- [3] 黄文聪,饶天彪,蒋焯焱,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): 3589-3601,3615.
HUANG W C, RAO T B, JIANG X Y, et al. Compound control method for maximum efficiency tracking and constant voltage output of wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (12): 3589-3601,3615.
- [4] 殷勇,贾亚辉,王成亮,等. 多负载远距离无线电能传输系统研究 [J]. 电力电子技术, 2021, 55(9): 139-142.
YIN Y, JIA Y H, WANG CH L, et al. Research on multi-load long-distance wireless power transfer system [J]. Power Electronics Technology, 2021, 55(9): 139-142.
- [5] 沈斌. 三相磁谐振式无线电能传输系统建模与控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
SHEN B. Modeling and control research of three-phase magnetic resonant wireless power transfer system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [6] ARNITZ D, REYNOLDS M S. MIMO wireless power transfer for mobile devices [J]. IEEE Pervasive Computing, 2016, 15(4): 36-44.
- [7] FAN X, GAO L L, MO X Y, et al. Over-view of research status and application of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1353-1380.
- [8] AHMAD A, ALAM M S, CHABAAN R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 38-63.
- [9] 马秀娟,武帅,蔡春伟,等. 应用于无人机的无线充电技术研究[J]. 电机与控制学报, 2019(8):1-9.
MA X J, WU SH, CAI CH W, et al. Research on wireless charging technology applied to unmanned

- aerial vehicles [J]. *Electric Machines and Control*, 2019(8):1-9.
- [10] 卢伟, 陈伟铭, 李慧荣. 多负载多线圈无线电能传输系统各路输出的恒压特性设计[J]. *电工技术学报*, 2019,34(6):1137-1147.
LU W, CHEN W M, LI H R. Design of constant voltage characteristics of each output of multi-load multi-coil wireless power transfer system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6):1137-1147.
- [11] PANTIC Z, LEE K, LUKIC S M. Receivers for multifrequency wireless power transfer: Design for minimum interference[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(1):234-241.
- [12] 罗成鑫, 丘东元, 张波, 等. 多负载无线电能传输系统[J]. *电工技术学报*, 2020,35(12):2499-2516.
LUO CH X, QIU D Y, ZHANG B, et al. Multi-load wireless power transfer system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35 (12): 2499-2516.
- [13] 高吉林. 无人机集群无线充电系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
GAO J L. Research on wireless charging system for unmanned aerial vehicle swarm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [14] 谢玉磊. 多负载无线恒流充电系统设计与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
XIE Y L. Design and research of multi-load wireless constant current charging system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [15] 黄郑, 王红星, 王成亮, 等. 一种适用于无人机的无线充电系统[J]. *电力电子技术*, 2020,54(9):51-53,94.
HUANG ZH, WANG H X, WANG CH L, et al. A wireless charging system suitable for unmanned aerial vehicles [J]. *Power Electronics Technology*, 2020, 54(9):51-53,94.
- [16] 马秀娟, 武帅, 蔡春伟, 等. 应用于无人机的无线充电技术研究[J]. *电机与控制学报*, 2019,23(8):1-9.
MA X J, WU SH, CAI CH W, et al. Research on wireless charging technology applied to unmanned aerial vehicles [J]. *Electric Machines and Control*, 2019,23(8):1-9.
- [17] 江兵, 王子博, 俞子豪, 等. MCR-WPT 系统接收线圈偏移角度的测量方法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(9): 1-7.
JIANG B, WANG Z B, YU Z H, et al. Research on measurement method of offset angle of receiving coil in MCR-WPT system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37 (9): 1-7.
- [18] 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.
- [19] 赵靖英, 赵纪新, 崔玉龙, 等. 不对称补偿 MCR-WPT 系统的传输特性研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2018,32(2):106-112.
ZHAO J Y, ZHAO J X, CUI Y, et al. Research on transmission characteristics of asymmetrically compensated MCR-WPT system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(2):106-112.

作者简介

- 刘伟, 硕士, 副教授, 主要研究方向为无线电能传输。
E-mail: weiliu@gdaib.edu.cn
- 王赞, 硕士, 讲师, 主要研究方向为控制理论与控制工程。
E-mail: yunwang@gdaib.edu.cn
- 符气叶(通信作者), 硕士, 讲师, 主要研究方向为电子与信息工程技术。
E-mail: qyfu@gdaib.edu.cn