

采用改进遗传算法的无线电能传输系统参数优化设计

杨阳¹, 章治¹, 吴雪钰¹, 曹嘉亿², 郑晖¹

(1. 长安大学能源与电气工程学院, 710018, 西安; 2. 长安大学未来交通学院, 710018, 西安)

摘要: 针对高阶补偿拓扑的无线电能传输(WPT)系统的谐振参数较多且相互关联,从而导致系统设计时各个元件具体参数难以确定的问题,提出了一种适用于一次侧LCC、二次侧LC串联拓扑(LCC-S)的WPT系统参数优化设计方法。利用MATLAB/Simulink搭建WPT系统仿真平台并进行理论分析,评估了谐振参数、耦合系数和等效负载对该系统输出特性的影响,选择影响程度最复杂的变量作为决策变量,构建系统非线性优化模型;以提高WPT系统的传输效率为目标,在遗传算法基础上加入非线性优化策略,并设计新的突变函数,利用改进后的遗传算法(IGA)给出了系统参数的优化设计方案。仿真结果表明:IGA使系统传输效率达到98.34%,相较遗传算法提高了2.52%,且收敛速度显著提高。搭建WPT系统实验平台并进行测试,结果表明:该系统能够以97.98%的传输效率保持300 W的功率输出;当负载电阻处于6~46 Ω 时,系统传输效率能够维持在90%以上。研究结果可为LCC-S型WPT系统参数设计提供参考。

关键词: 无线电能传输;LCC-S型;拓扑结构;改进遗传算法;谐振参数优化

中图分类号: TM724 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202504009 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0093-12

Parameter Optimization Design for Wireless Power Transmission Systems Using Improved Genetic Algorithm

YANG Yang¹, ZHANG Zhi¹, WU Xueyu¹, CAO Jiayi², ZHENG Xuan¹

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China;

2. School of Future Transportation, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: In order to address the issue of numerous and interrelated resonance parameters in high-order compensated wireless power transmission (WPT) systems, which makes it challenging to determine specific component parameters during system design, a parameter optimization method for WPT systems with primary-side LCC and secondary-side LC series compensation topology (LCC-S) is proposed. By utilizing MATLAB/Simulink to construct a WPT system simulation platform and conducting theoretical analysis, the impact of resonance parameters, coupling coefficients, and equivalent loads on the system's output characteristics is evaluated. The variables with the most complex impact are selected as decision variables to construct a nonlinear optimization model. Aiming to improve the transmission efficiency of the WPT system, a nonlinear optimization strategy is

收稿日期: 2024-11-10。 作者简介: 杨阳(1986—),男,副教授;郑晖(通信作者),男,教授,博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB1600200);陕西省重点研发计划资助项目(2024SF-YBXM-599);陕西省教育厅服务地方专项计划资助项目(24JE009)。

网络出版时间: 2024-12-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241226.1144.002>

incorporated into the genetic algorithm, and a new mutation function is designed. An optimized design scheme for system parameters is provided using the improved genetic algorithm (IGA). Simulation results demonstrate that the IGA achieves a system transmission efficiency of 98.34%, a 2.52% improvement over the genetic algorithm, with significantly enhanced convergence speed. An experimental platform for the WPT system is constructed and tested, showing that the system can maintain a power output of 300 W with an efficiency of 97.98%. When the load resistance ranges from 6 to 46 Ω , the system's transmission efficiency can be maintained above 90%. The research findings can serve as a reference for parameter design of LCC-S type WPT systems.

Keywords: wireless power transmission; LCC-S type; topology structure; improved genetic algorithm; resonant parameter optimization

无线电能传输技术是一种无电气接触的新型输电方式,避免了有线充电接口的反复插拔,使得充电更加便捷、安全和可靠,被认为是一种在能源传输领域的革命性进步^[1-3]。随着无线电能传输技术的发展,科研工作者在充电系统的输出功率、传输效率及传输距离等传输性能上不断突破,在电动汽车、手机充电和医疗设备等领域不断提出与无线电能传输(WPT)技术相关的名词和概念^[4]。具有高效率等优点的 WPT 系统近年来被广泛研究。该系统的组成包括直流电源、高频全桥逆变电路、原副边磁耦合线圈、谐振补偿网络、能够实现直流供电的整流电路以及负载,系统总体框架如图 1 所示。

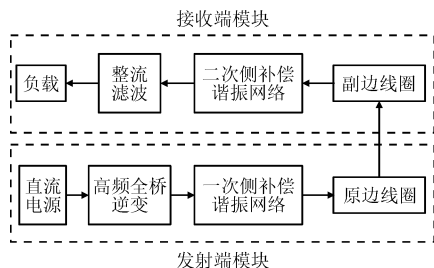


图 1 WPT 系统总体框架图

Fig. 1 WPT system overall frame diagram

提高 WPT 系统传输效率的关键有 3 方面:一是研究耦合线圈的匝数、外径、内径以及间距等对传输效率的影响,这些参数的改变会引起互感的变化,从而影响传输效率^[5];二是通过在 WPT 系统的一次侧补偿谐振网络加入谐振元件来改善系统的传输性能,这些谐振元件能够调节系统的谐振状态,进而优化电能的传输效率;三是避免系统频率的改变、耦合线圈的偏移、谐振元件的老化等问题。

由于低阶补偿拓扑的局限性,具有高阶补偿拓扑的系统近年来得到广泛研究与应用^[6-7]。随着 WPT 技术的发展,具有不同高阶补偿网络拓扑结构的系统被提出,6 种典型的复合结构高阶补偿网

络拓扑如图 2 所示。

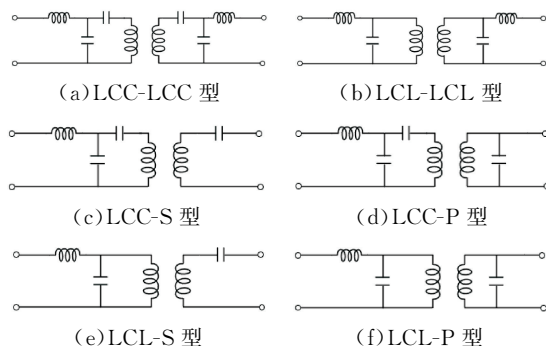


图 2 具有高阶补偿网络的 WPT 系统拓扑结构

Fig. 2 WPT system topology with high order compensation network

补偿网络阶数是由谐振元件数量决定的,谐振元件数量越多,则系统阶数越高。例如,LCC-S 型 WPT 系统具有 4 阶补偿网络,其发射端的 LCC 网络包含 3 个储能元件,接收端的串联回路包含一个储能元件。更高阶数的拓扑实际应用较少,这是因为谐振元件数量的增多在实际应用中会增加发射端及接收端的体积和系统成本^[8],且谐振状况错综复杂增加了系统参数计算的复杂性。

与低阶拓扑系统相比,具有上述补偿网络的系统可变谐振元件参数更多。基于这一特点,结合非线性数学模型,加入非线性寻优算法优化系统参数,可以使系统设计符合特定需求和目标。文献[9-11]以 WPT 系统耦合线圈为对象,以系统的传输效率为优化目标,采用遗传算法(GA)优化设计耦合线圈的参数,但并未考虑补偿元件参数的改变对系统传输效率的影响。文献[12]以 S-S 型 WPT 系统为研究对象,以传输效率为优化目标,采用遗传算法调整系统参数,但仅通过仿真来验证算法的有效性。文献[13]以 LCC-S 型 WPT 系统为研究对象,从工作频率、互感系数、负载电阻这 3 个方面分析对系统传

输性能的影响,提出了一种改进的猎人猎物算法,但并未通过实验验证算法的可行性。文献[14-17]对 LCC-S 型 WPT 系统传输效率等性能进行了分析,通过切换补偿网络拓扑,实现了系统输出恒流/恒压,且该系统在不同工作状态下二次侧输出端具有明显的恒流或恒压特性。文献[18]研究了 3 种不同形状和尺寸的线圈对 WPT 系统传输效率的影响,结果发现线圈尺寸的变化对系统传输性能的影响大于线圈形状。但是,并未讨论补偿拓扑元件参数改变对系统传输性能的影响。文献[19]将 4 种基本补偿网络和双边 LCC 型补偿网络的系统进行对比,评估了它们在输出功率和传输效率等方面的差异,但仅限于仿真层面的比较。文献[20]基于实验过程中谐振元件电容和电感参数不可避免地会发生偏差,提出了一种针对 LCC 型补偿网络快速且成本低的调谐方法。为实验中谐振元件参数偏差而导致的系统失谐提供了一种解决方案。

上述文献分别从耦合机构、补偿网络、传输性能等角度对 WPT 系统开展了相关研究,但其中大多数仅限于仿真层面的分析,且并未过多研究 WPT 系统补偿元件参数的改变对传输性能的影响。本文选择 LCC-S 型 WPT 系统为优化设计对象主要原因有以下 3 点:一是二次侧负载输出电压稳定^[21];二是系统工作频率恒定^[22];三是系统具有一定的容错性能^[23]。但是,该系统数学模型表现出显著的高阶非线性特性,传统的人工设计方法难以确定系统的最优参数设计,而且目前关于这一问题的分析和研究成果仍然较为缺乏。基于此,本文针对 LCC-S 型 WPT 系统,在补偿元件参数满足全谐振的条件下,从耦合系数、负载电阻等多个方面分析其对系统传输特性的影响。提出了一种采用改进遗传算法(IGA)的系统参数优化设计方法,该算法适用于高阶非线性模型,尤其是在多约束条件下,能够对 LCC 网络及等效负载进行优化设计,并以此搭建了仿真和实验平台。该方法提高了 WPT 系统的传输效率,同时减小了系统在负载电阻发生变化时传输效率的波动。

1 LCC-S 型谐振补偿网络分析

1.1 拓扑结构分析

考虑线圈内阻的 LCC-S 型 WPT 系统拓扑结构如图 3 所示。其中,原边高频逆变器和副边整流器都采用全桥式结构,采用直流电源作为系统输入,输出端采用电子负载。图 3 中: U_{in} 和 U_{out} 为谐振网络的输入电压和输出电压; I_0 为一次侧输入电流, I_1

和 I_2 分别为一次侧输出电流和二次侧输出电流; L_1 、 L_s 和 L_p 分别为原边补偿电感、原边线圈自感和副边线圈自感,其中 L_1 作为可变的键谐元件参数,可以用于调节系统的输出电压及传输效率等; R_1 、 R_p 、 R_s 分别为原边补偿电感的内阻和原、副边耦合线圈的内阻; C_p 、 C_1 、 C_2 分别为原边补偿电容、原边线圈串联电容、副边线圈串联电容; M 、 k 分别为耦合线圈的互感和耦合系数; R_L 为整流桥、滤波电容和负载电阻 R 的等效电阻, R_L 和 R 的关系为

$$R_L = \frac{8}{\pi^2} R \quad (1)$$

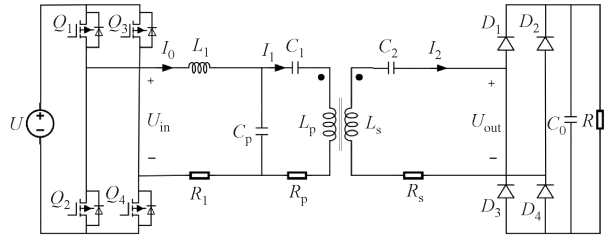


图 3 LCC-S 型无线 WPT 系统电路拓扑结构
Fig. 3 The circuit topology of LCC-S WPT system

简化上述 WPT 系统拓扑结构,得到其等效电路拓扑,如图 4 所示。

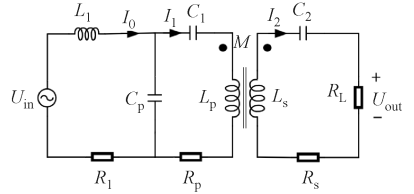


图 4 WPT 系统等效电路拓扑
Fig. 4 Equivalent circuit topology of WPT system

根据该等效模型进一步求得系统相关参数。根据基尔霍夫电压和电流定律,求得该系统输入端等效阻抗及二次侧等效阻抗为

$$\begin{cases} Z_{eq} = R_1 + j\omega L_1 + \\ \frac{(j\omega C_p)^{-1}(j\omega L_p + (j\omega C_1)^{-1} + Z_{22} + R_p)}{(j\omega C_p)^{-1} + j\omega L_p + (j\omega C_1)^{-1} + Z_{22} + R_p} \\ Z_{22} = \frac{(\omega M)^2}{j\omega L_s + (j\omega C_2)^{-1} + R_L + R_s} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Z_{eq} 为系统的输入阻抗; Z_{22} 为二次侧在一次侧的反映阻抗。由欧姆定律及并联分流公式,求得一次侧输入电流 I_0 和输出电流 I_1 为

$$\begin{cases} I_0 = \frac{U_{in}}{Z_{eq}} \\ I_1 = \frac{U_{in}}{Z_{eq}(Z_{22} + R_p)j\omega C_p} \end{cases} \quad (3)$$

通过将互感电压表示为受控电压源,得到二次侧输出电流 I_2 和输出电压 U_{out} 为

$$\begin{cases} I_2 = \frac{j\omega M I_1}{R_L + R_s} = \frac{j\omega M U_{in}}{j\omega C_p (R_L + R_s) Z_{eq} (Z_{22} + R_p)} \\ U_{out} = \frac{j\omega M I_1 R_L}{(R_L + R_s)} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 谐振网络分析

当 WPT 系统同时满足一二次侧谐振条件时,处于全谐振模式。因 LCC-S 型 WPT 系统工作在全谐振模式下,系统的输入阻抗显纯阻性,此时系统获得同等输入条件下的最优传输效率和最大输出功率^[24],故本文在系统满足全谐振条件的基础上对相关参数进行优化计算。全谐振下的谐振参数配置关系如下

$$\begin{cases} \omega L_1 = \omega L_p - \frac{1}{\omega C_1} \\ \omega L_1 = \frac{1}{\omega C_p} \\ \omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \\ \omega = \omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω 为系统频率; ω_0 为补偿元件和耦合线圈所构成的固有谐振频率。此时,一二次侧输入阻抗呈纯阻性,将式(5)代入式(2),可得

$$\begin{cases} Z_{eq} = R_1 + \frac{(j\omega C_p)^{-1} (j\omega L_p + (j\omega C_1)^{-1})}{Z_{22} + R_p} \\ Z_{22} = \frac{(\omega M)^2}{R_L + R_s} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,系统一次侧输入阻抗 Z_{eq} 在全谐振的条件下显纯阻性,此时 WPT 系统电压和电流波形之间的相位差为 0,可实现零相角启动。同时,在不考虑线圈内阻的情况下,将 $R_p = R_s = R_1 = 0$ 代入式(4),可得副边输出电压为

$$U_{out} = \frac{k \sqrt{L_p L_s}}{L_1} U_{in} \quad (7)$$

由此,得到电压增益为

$$G = \frac{k \sqrt{L_p L_s}}{L_1} \quad (8)$$

分析式(5)~(8)可知,在元件参数存在偏差时,LCC-S 型 WPT 系统的高阶补偿拓扑能够有效地调整系统的谐振状态,所以其输出性能受影响程度较小。而且,该 WPT 系统在线圈内阻较小的时候,能够通过改变原边补偿电感来调整系统输出电压。

对于 WPT 系统而言,最直观且决定其实际应用的两个因素是输出功率与传输效率。在系统满足

全谐振条件下,LCC-S 型 WPT 系统的输入功率、输出功率和传输效率为

$$\begin{cases} P_{out} = |I_2|^2 R_L = \left| \frac{j\omega k \sqrt{L_p L_s} I_1}{R_L + R_s} \right|^2 R_L \\ P_{in} = U_{in}^2 \left(R_1 + \frac{(R_L + R_s)(C_p - (\omega^2 C_1)^{-1})}{C_p (\omega M)^2 + C_p R_p (R_L + R_s)} \right)^{-1} \\ \eta = \frac{|P_{out}|}{|P_{in}|} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{in} 为系统输入功率; P_{out} 为系统的输出功率; η 为系统的传输效率。其中,等效负载与电路整体的匹配程度以及耦合系数的变化影响着系统的输出功率和传输效率,等效负载和耦合系数对 WPT 系统传输特性的影响见 2.3 节分析。

2 参数优化算法设计及仿真分析

2.1 IGA 最优问题建立

采用 IGA 对 LCC-S 型 WPT 系统的谐振网络进行参数优化配置。该算法在传统的 GA 算法基础上添加了非线性优化策略、精英策略^[25]、引入新个体、改进突变函数和锦标赛选择^[26]等方法来加快算法的收敛速度并更好地使算法跳出局部最优解。IGA 优化步骤及实验设计流程如图 5 所示。

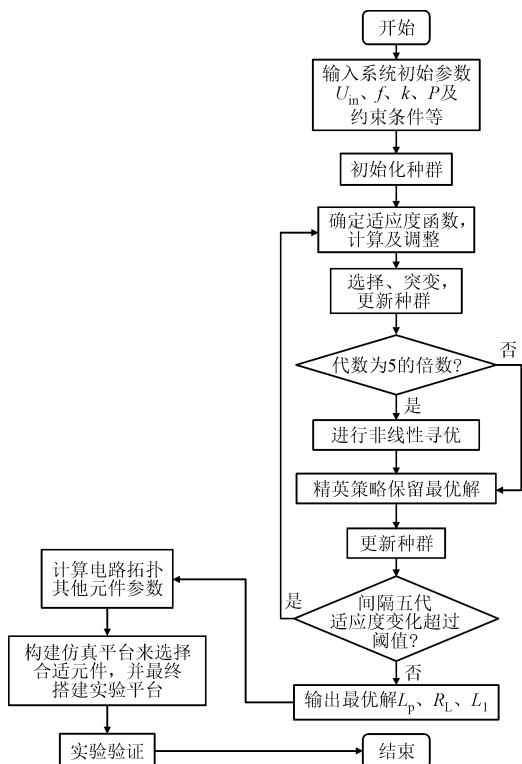


图 5 算法优化及实验设计流程图

Fig. 5 Flowchart of algorithm optimization and experiment design

不同于传统的 GA,IGA 引入的突变概率函数公式

$$P_c = \frac{GP_{c,\max} + (S-G)P_{c,\min}}{S} \quad (10)$$

式中: $P_{c,\max} = 0.6$ 为突变概率最大值; $P_{c,\min} = 0.1$ 为突变概率最小值; G 为当前迭代数; $S = 200$ 为总迭代数。突变概率 P_c 随着迭代数的增大而减小,在算法初期使用较大的突变概率可以提高种群的多样性,更好地避免算法陷入局部最优;随着迭代的进行,突变概率逐渐降低,算法能够持续稳定地搜索并保留最优解,同时减小种群的波动。通过调整 $P_{c,\min}$ 和 $P_{c,\max}$ 以达到不同情况下的期望效果。

通过分析系统传输效率表达式,可以发现传输效率和谐振元件参数之间的关系是非线性的。将系统参数作为变量,传输效率作为目标函数,输出功率、谐振条件等作为约束条件,那么 WPT 系统的参数设计问题就可以看成是一个多参数、多约束条件下

$$\eta = \frac{|(j\omega k \sqrt{L_p L_s} I_1)/(R_L + R_s)|^2 R_L \{R_1 + [(R_L + R_s)(C_p - (\omega^2 C_1)^{-1})]/[C_p(\omega M)^2 + C_p R_p(R_L + R_s)]\}}{U_{in}^2} \quad (11)$$

(2)选取决策变量。在未施加任何约束的情况下,WPT 系统中的各个参数都是独立的,均可作为决策变量。在增加约束条件后,系统中的电感和电容之间不一定是相互独立的,特别是谐振网络中的补偿元件。通过分析 LCC-S 型 WPT 系统传输特性可知,原边补偿电感、原边线圈自感、等效负载对系统的输出特性有着显著的影响,故选取上述 3 个变量作为 IGA 的优化对象,优化公式为

$$\eta = \max \eta(L_1, L_p, R_L) \quad (12)$$

(3)约束条件的建立。WPT 系统优化模型中,谐振条件作为最基本的约束条件,应当首先考虑。而且,根据实际应用需求,输出功率和等效负载也应当控制在所需要的范围内。此外,还应考虑谐振网络各支路元件取值的合理性。在实际选取谐振网络补偿元件的时候,需要考虑电感(或电容)的取值。因为电感(或电容)取值过大时,会导致元件的等效内阻过大,从而增加元件功率损耗^[27]。具体来说,电感(或电容)的等效内阻所导致额外的功率损耗不仅可能导致系统的谐振状态发生改变,从而使得系统的整体效率降低,还可能导致元件温升过高以至于损坏元件。当电感(电容)取值过小时,补偿元件所在支路中电流(电压)过大以至于超过元件额定承受范围,从而引发绝缘击穿或损坏。因此,补偿元件的取值必须保持在一个合理的范围内,以确保系统

的非线性寻优问题。其中,目标函数和约束条件的选择可以根据实际需求进行相应调整,例如将输出功率作为目标函数、传输效率作为约束条件去设计 WPT 系统。非线性优化模型主要包括目标函数、决策变量以及约束条件 3 个部分,具体分析如下。

(1)目标函数的建立。目标函数体现的是优化设计目标和决策变量之间的数学关系,主要用于评价 WPT 系统的性能,通常根据实际需求来确定目标函数的选取。常见的 WPT 性能指标是输出功率和传输效率等,除此之外有的实际应用场景中还要控制搭建成本和体积。在构建 WPT 系统非线性优化模型时,要根据具体的性能需求来选取合适的设计目标,继而利用决策变量构建目标函数。由于传输效率是 WPT 系统中最基本也是最重要的性能指标,因此本文选择传输效率作为目标函数。由(9)可知,传输效率表达式为

能实现有效的能量传输。WPT 系统参数设计的约束条件可以表示为

$$\text{s. t. } \begin{cases} \omega L_1 = \omega L_p - \frac{1}{\omega C_1} \\ \omega L_1 = \frac{1}{\omega C_p} \\ L_p > L_1 \\ L_p = L_s \\ \omega = 1/\sqrt{L_s C_s} \\ 1 \leq L_1/\mu H \leq 30 \\ 1 \leq L_p/\mu H \leq 50 \\ 298 \leq P_{out}/W \leq 302 \\ 1 \leq R_L/\Omega \leq 20 \\ L_p = L_s \end{cases} \quad (13)$$

在算法执行过程中,将输出功率 300 W 作为约束条件过于苛刻,这使得适应度函数(传输效率)只有在满足该功率条件时才能被计算,此时只有特定的参数组合满足需求,这降低了种群在算法搜索中的效率。所以,将目标输出功率控制在误差 2 W 内,而不是仅以 300 W 输出作为约束条件,有助于提升算法的优化效果。

2.2 系统参数设计及优化

为了优化设计 WPT 系统决策变量,首先确定系统运行所需参数值。本文构建的 WPT 系统目标

传输功率为 300 W、直流电源电压设置为 80 V、系统频率设置为 85 kHz。过大的耦合系数会导致系统三次谐波分量增加^[28],所以耦合系数设置为 0.4。考虑到实际中原边补偿电感线圈和耦合线圈存在内阻,将原边补偿电感线圈内阻 R_1 设置为 $0.08\ \Omega$,原副边线圈内阻 R_p 和 R_s 设置为 $0.05\ \Omega$ 。

将上述系统参数作为算法输入条件,并设置种群数为 100。在目标输出功率误差不超过 2 W 等约束条件下,GA、IGA、PSO 算法适应度(传输效率)曲线对比如图 6 所示。

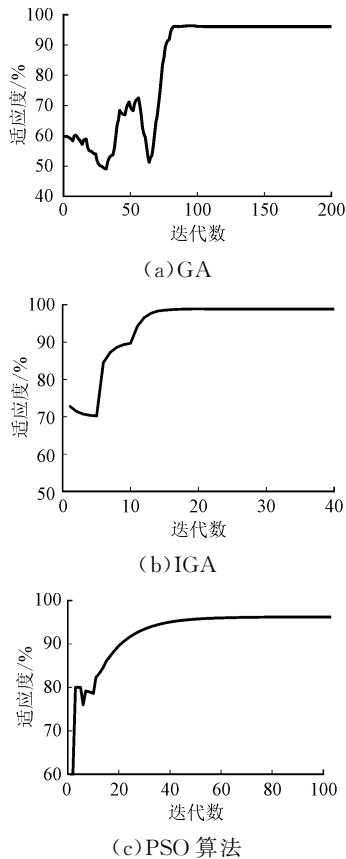


图 6 GA、IGA、PSO 算法收敛效果对比
Fig. 6 Comparison of convergence effect of GA, IGA and PSO algorithms

由图 6 可知,IGA 收敛速度最快,PSO 算法收敛速度最慢。算法均以每 5 代适应度变化不超过阈值 0.01 作为结束条件,并输出当前最大适应度值。考虑到 GA、IGA、PSO 算法随机性较强,分别对各算法进行 3 次仿真,记录适应度收敛到最大值的迭代数,结果如表 1 所示。可以看出:IGA 在迭代数达到 14 时收敛到最大适应度 98.34%;传统的 GA 迭代速度较慢,在迭代 71 次后达到最大适应度 95.82%;PSO 算法收敛速度最慢,在迭代 75 次后达到最大适应度 96.27%。

表 1 GA、IGA、PSO 算法迭代速度和适应度的仿真结果对比
Table 1 Comparison of simulation results of iteration speed and fitness function of GA, IGA and PSO algorithms

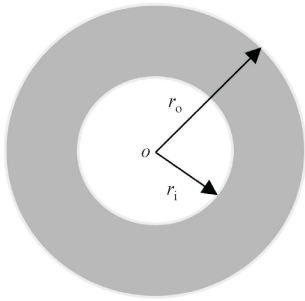
参数	数值		
	仿真 1	仿真 2	仿真 3
GA 迭代数	71	62	96
IGA 迭代数	14	19	11
PSO 迭代数	75	94	83
GA 适应度	95.82%	94.37%	94.12%
IGA 适应度	98.34%	98.51%	97.49%
PSO 适应度	96.27%	96.28%	96.21%

算法对比结果表明,IGA 不仅可以使适应度函数更好地跳出局部最优解,同时其收敛速度也极大提高,且适应度函数(传输效率)能够提升 2.52%。IGA 收敛速度较大程度领先其他两种算法,其主要原因是在种群某一个体到达较高适应度值时,子代会快速接近最大适应度;GA 收敛速度较慢且种群多样性较低,易陷入局部最优解;PSO 算法收敛速度最慢,且其随着迭代数增加,粒子的位置过于集中导致易陷入局部最优解。因为 IGA 在进行初始化、交叉、变异及选择等过程中具有随机性,所以重复 3 次,最后将决策变量 L_1 、 L_p 、 R_L 这 3 次优化的结果取平均值,再通过全谐振条件,进而求得其他谐振元件 C_p 、 C_1 、 C_2 、 L_s 的参数值。IGA 优化后的系统参数如表 2 所示。

表 2 IGA 优化后的系统参数设计值
Table 2 System parameter design values after IGA optimization

参数	设计值
直流电源 U/V	80
一次侧输入电压 U_{in}/V	80
系统频率 f/kHz	85
原边耦合线圈内阻 R_p/Ω	0.05
副边耦合线圈内阻 R_s/Ω	0.05
原边补偿电感内阻 R_1/Ω	0.08
耦合系数 k	0.4
系统目标输出功率 P_{out}/W	300
等效负载 R_L/Ω	10
负载电阻 R/Ω	11.1
原边线圈自感 L_p/H	32.6
副边线圈自感 L_s/H	32.6
原边线圈串联电容 C_1/nF	200.3
副边线圈串联电容 C_2/nF	107.5
原边补偿电容 C_p/nF	232.2
原边补偿电感 $L_1/\mu H$	15.3

利用 IGA 优化得到的原副边自感量设计耦合线圈尺寸。原副边耦合线圈均采用平面圆形线圈,示意图如图 7 所示。



r_o —线圈外径; r_i —线圈内径。

图 7 平面圆形线圈示意图

Fig. 7 Schematic diagram of a flat circular coil

线圈相关参数满足以下关系式。

$$\begin{cases} k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \\ h = \sqrt{\left(\frac{\mu_0 \pi N^2 r_a^4}{2M}\right)^{2/3} - r_a^2} \\ r_a = \frac{r_o + r_i}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式中:真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。根据表 2 优化结果可知, $L_p = L_s = 32.6 \mu\text{H}$,通过计算得到线圈尺寸相关参数设计为:线圈匝数 $N = 15$,线圈外径 $r_o = 0.0385$ m,线圈内径 $r_i = 0.0995$ m,耦合系数 $k = 0.4$ 。进而可得磁耦合机构两线圈气隙间距 $h = 60.5$ mm。本文第 3 节利用上述参数搭建 LCC-S 型 WPT 系统实验样机的电磁耦合机构。

2.3 传输特性仿真分析

利用表 2 中 IGA 优化后的系统参数对 WPT 系统传输输出功率及传输效率进行仿真分析。

WPT 系统传输效率三维曲线如图 8 所示。可以看出:在负载电阻不变的情况下,系统传输效率和耦合系数呈线性相关且为正比,随着耦合系数 k 的增大而增大。当负载电阻较小时:传输效率随着 k 的增大上升得更快;当 k 保持不变时,传输效率随着负载电阻的增加先逐渐提升,到达最大值后,开始迅速下降。因此,负载电阻既不可过大也不可过小,过大的负载会在耦合系数较低时难以实现理想的传输效率,而过小的负载则可能引发系统过电流问题,从而导致系统运行不稳定。

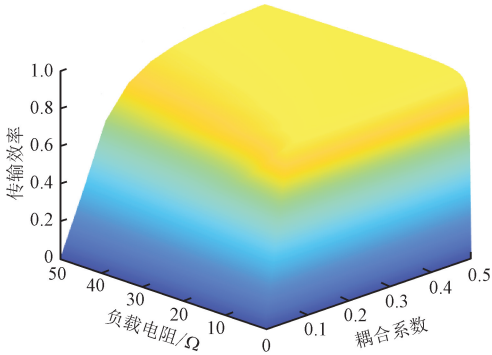


图 8 WPT 系统传输效率三维曲线

Fig. 8 3D transmission efficiency curve of WPT system

WPT 系统输出功率三维曲线如图 9 所示。分析可知:固定耦合系数 k ,系统输出功率随着负载电阻 R 的增大而减小,在耦合系数较大的情况下,这种现象表现得更加明显;固定负载电阻,系统输出功率随着耦合系数的增大而增大,在负载电阻 R 较小时,这种现象表现得更加明显;系统在不同耦合系数下的输出功率峰值也有所不同,随着耦合系数 k 的增大,系统输出功率峰值也有所增大。

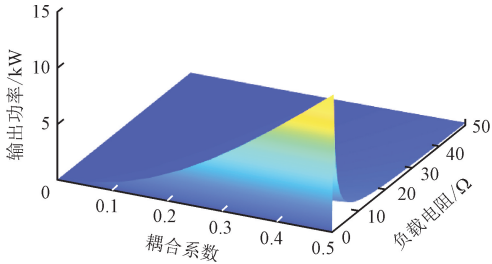
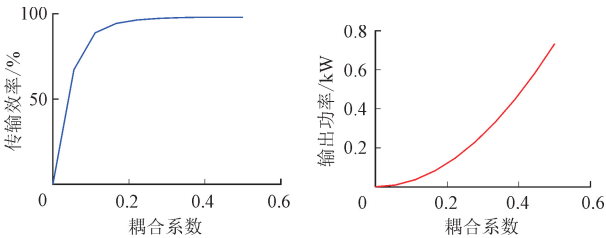


图 9 WPT 系统输出功率三维曲线

Fig. 9 3D output power diagram of WPT system

分别从耦合系数 k 和负载电阻 R 两个方面探究系统的传输特性。利用表 2 系统参数设计值进行仿真,结果如图 10、11 所示。



(a)传输效率 (b)输出功率

图 10 传输效率和输出功率随耦合系数的变化曲线
Fig. 10 System efficiency and output power change curve with coupling coefficient

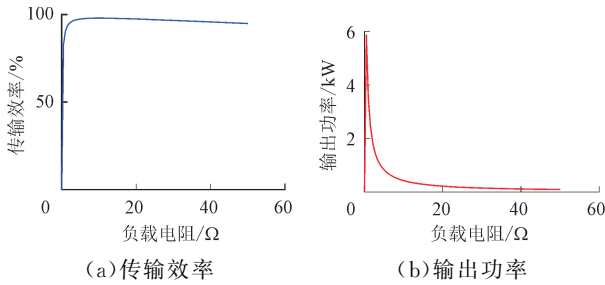


图 11 传输效率和输出功率随负载电阻的变化曲线

Fig. 11 System efficiency and output power curve with load resistance

负载电阻 $R=11.1\ \Omega$ 、耦合系数 k 在 $0\sim 0.5$ 范围内变化的传输效率和输出功率仿真结果如图 10 所示。分析可知,系统的输出功率随耦合系数 k 的增大而增大,增大的速度也随之加快。系统的传输效率也随着耦合系数 k 的增大而增大,但增大的速度逐渐放缓,最终曲线趋向平稳。通过仿真结果可以看出,耦合系数 k 的变化对 WPT 系统传输特性的影响相对固定。因此,本文在参数设计时不以耦合系数 k 为决策变量,而将其配置为固定值以此来搭建实验和仿真平台。

耦合系数 $k=0.4$ 、负载电阻 R 在 $0\sim 50\ \Omega$ 范围内变化的传输效率和输出功率仿真结果如图 11 所示。分析可知:系统传输效率随着 R 的增大先迅速增大,在负载电阻为 $11.1\ \Omega$ 时达到峰值,当负载电阻大于 $11.1\ \Omega$ 时,系统传输效率随之下降;系统输出功率随着 R 的增大先迅速飙升,在负载电阻等于 $0.5\ \Omega$ 时达到最大值,当 $R>0.5\ \Omega$ 时,系统输出功率随着 R 的增大而迅速减小。

同样利用表 2 系统参数设计值绘制传输效率关于原边补偿电感及原边线圈自感的变化曲线,如图 12 所示。分析可知:当原边补偿电感 L_1 保持不变时,传输效率随着原边线圈自感 L_p 的增大先上升至峰值,随后开始下降;当原边线圈自感 L_p 保持不变时,随着原边补偿电感 L_1 的增大,传输效率的变化

情况和保持 L_1 不变增大 L_p 的情况如出一辙。对于 LCC-S 型 WPT 系统而言:原边补偿电感 L_1 的增大可以改善系统一次侧输入阻抗和二次侧输入阻抗的匹配程度,但是增大到一定程度后会引起系统失谐,并导致传输效率降低;原边线圈自感 L_p 的增大会提高一次侧能量储存能力以及系统传输效率,但增大到一定程度后也会导致系统传输效率降低。从上述分析可以看出,传输效率受 L_p 及 L_1 的影响较为复杂,当 L_p 和 L_1 在某一区间内达到最佳匹配时,系统传输效率将达到最大值。

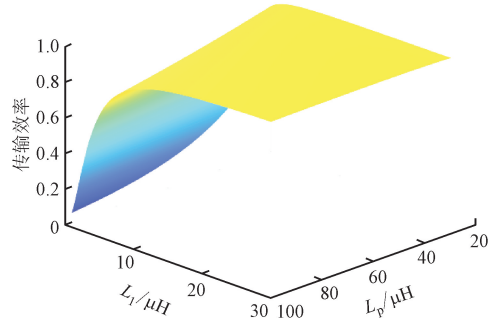


图 12 传输效率关于原边补偿电感 L_1 和原边线圈自感 L_p 变化的三维曲线图

Fig. 12 Transmission efficiency three dimensional graph of the change of the primary compensated inductance L_1 and the self-inductance L_p of the primary coil

综合上述分析可知,LCC-S 型 WPT 系统的传输特性与原边补偿电感 L_1 、原边线圈自感 L_p 以及等效负载 R_L 密切相关。因此,本文将 L_1 、 L_p 、 R_L 这 3 个变量作为 IGA 优化的关键变量,旨在通过精确调节这些参数,提升系统的传输效率。通过后续的仿真分析和实验验证,确保优化结果具有实际可行性。

2.4 WPT 系统仿真模型分析

利用 MATLAB/Simulink 搭建 300 W 的 LCC-S 型 WPT 系统仿真模型,如图 13 所示。

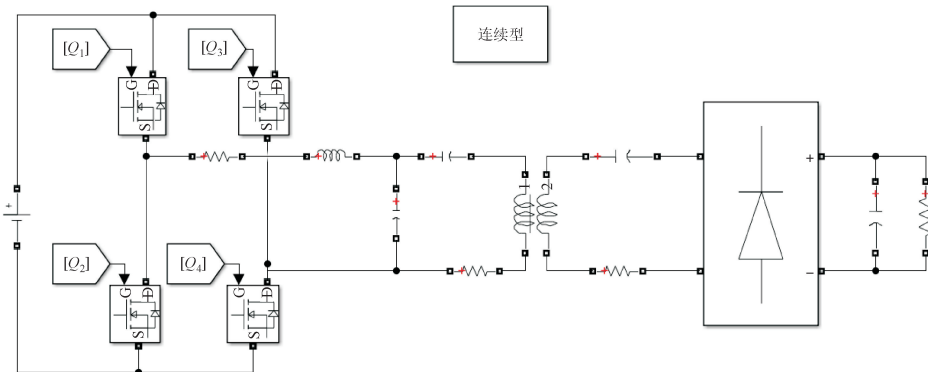


图 13 LCC-S 型 WPT 系统仿真模型

Fig. 13 LCC-S WPT system simulation model

系统的参数配置采用了经过 IGA 优化后的结果。 $Q_1 \sim Q_4$ 是施加给全桥逆变电路 MOS 管的栅

极高频脉冲信号。运行该仿真模型,记录系统输入、输出电压和电流波形,如图 14 所示。

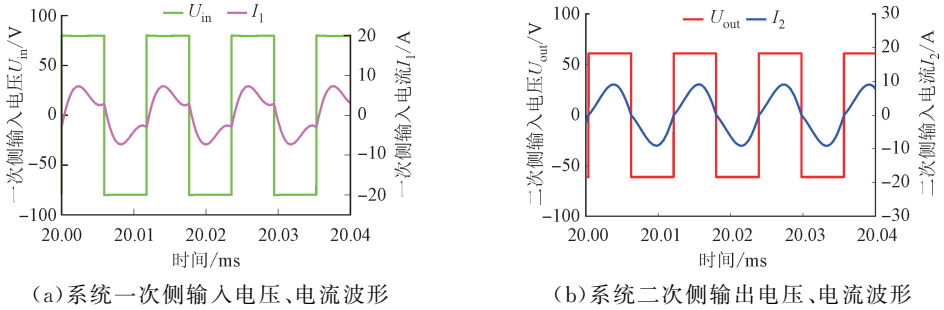


图 14 系统输入及输出电压、电流仿真波形图

Fig. 14 The simulation waveform diagrams of the system's input and output voltage and current

利用 Simulink 中 RMS 以及 Scope 模块可得电压顶端值以及电流有效值为: $U_{in} = 80\text{ V}$, $I_1 = 4.93\text{ A}$, $U_{out} = 61.02\text{ V}$, $I_2 = 6.29\text{ A}$ 。对于 LCC-S 型 WPT 系统而言,一次侧输入电流相较二次侧输出电流有一定程度上的畸变,主要原因与该系统的谐振特性和非线性因素有关,高频谐波的产生也会导致波形发生畸变,不同类型的 WPT 系统在畸变程度上也有所不同。

3 实验平台搭建与验证

利用 IGA 优化后的系统参数,结合实际条件,搭建了一个输出为 300 W 的 LCC-S 型 WPT 系统实验平台,如图 15 所示。受天气、温度等运行环境以及实验条件的影响,WPT 系统中的谐振网络参数实际情况下难以做到完美匹配^[29]。基于现有实验条件和环境的搭建系统参数值如表 3 所示。



图 15 LCC-S 型 WPT 系统实验平台

Fig. 15 LCC-S WPT system experimental platform

表 3 LCC-S 型 WPT 系统参数实验值

Table 3 Experimental values of the parameters for the LCC-S WPT system

参数	实验值	参数	实验值
直流电源 U/V	80	一次侧输入电压 U_{in}/V	77.72
负载电阻 R/Ω	11	系统频率 f/kHz	85
原边耦合线圈内阻 R_p/Ω	0.05	副边耦合线圈内阻 R_s/Ω	0.05
原边补偿电感内阻 R_l/Ω	0.08	耦合系数 k	0.4
原边线圈自感 $L_p/\mu H$	32.7	副边线圈自感 $L_s/\mu H$	32.4
原边线圈串联电容 C_1/nF	230.3	副边线圈串联电容 C_2/nF	117.5
原边补偿电容 C_p/nF	234.4	原边补偿电感 $L_1/\mu H$	15.9
气隙间距 h/mm	60.5	线圈外径 r_o/mm	98.7
线圈内径 r_i/mm	38.9		

对实验波形进行测量,结果如图 16 所示。图中:一次侧输入电压测量峰值为 77.26 V,一次侧输入电流有效值为 4.73 A;二次侧输出电压测量峰值为 58.64 V,二次侧输出电流有效值为 5.53 A。对比图 14 和图 16 可知,实验波形与仿真波形在整体趋势上高度一致。实验电压波形的测量峰值以及电流波形的测量峰值均与仿真结果相符,误差控制在合理的范围内,实验结果验证了 IGA 优化系统参数所搭建的仿真及实验模型的有效性。

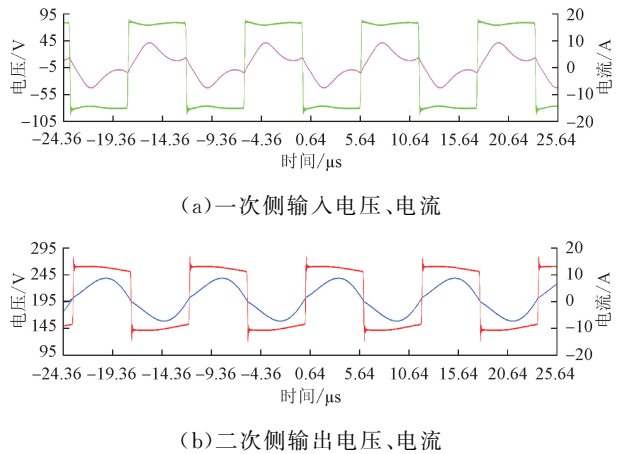


图 16 输入及输出电压、电流实验波形图

Fig. 16 Experimental waveform diagrams of input and output voltage and current

利用功率分析仪对所搭建的系统进行测量,测得的输入和输出的电压、电流和功率如表 4 所示。计算得到系统传输效率为 97.98%。

表 4 实验样机运行时输入及输出的电压、电流和功率

参数	一次侧输入值	二次侧输出值
电压有效值/V	77.72	57.68
电流有效值/A	5.038	5.874
有功功率/W	305.6	299.4

实验过程中,设置电子负载阻值并记录实验数据,在其他参数不变的情况下测量系统的传输效率及输出功率,得到系统传输效率和输出功率的变化曲线,如图 17 所示。

由图 17 可知,系统的传输效率随着负载电阻的增大先增大后减小。实验结果显示:系统传输效率在 $R=11\ \Omega$ 处取得最大值,最大为 97.98%;系统的输出功率随着负载的增大而减小,在 $R=2\ \Omega$ 处存

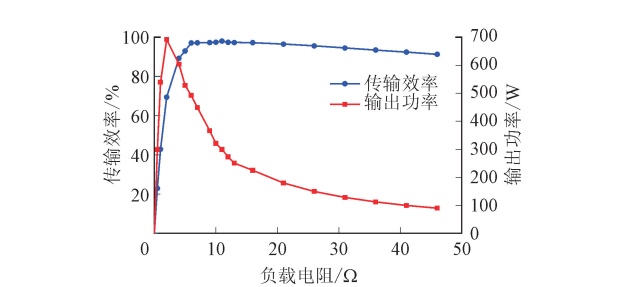


图 17 负载电阻对传输效率及输出功率的影响

Fig. 17 Influence of load resistance on transmission efficiency and output power

在功率峰值,系统最大输出功率达到 691.2 W,在 $R=11\ \Omega$ 时系统输出功率为 299.4 W,满足 2.2 小节所设定的将系统输出功率控制在 2 W 误差范围内的约束条件。由于实验条件受限,分析图 11(b)的输出功率变化曲线可知,负载电阻 R 在 $0.5\ \Omega$ 左右获得最大输出功率,且远超出 1 kW。所以,在实验测试时,让电子负载选取在 $0.5\ \Omega$ 附近的阻值点,以此来验证输出功率总体变化情况。

将图 17 和图 11(a)的传输效率变化曲线同时绘制于图 18。分析可知,仿真与实验的传输效率波形均先随着负载电阻的增大而飙升,但当负载电阻达到一定值之后,传输效率开始下降,其原因主要是 LCC-S 型 WPT 系统处在全谐振的条件下输出具有恒压特性,即输出电压不随着负载电阻的改变而改变,所以负载电阻增大到一定程度后,WPT 系统输出电压不变,然而输出电流逐渐减小,所以输出功率也随之减小。当负载电阻大于 $6\ \Omega$ 时,系统传输效率变化幅度较小,具有较好的功率传输特性。通过对比仿真与实验的结果可知,仿真所得传输效率最大值在 $R=11.1\ \Omega$ 处取得,为 98.34%,而实验所得最大值在 $R=11\ \Omega$ 处取得,为 97.98%。实验与仿真所得结果高度一致,且误差在可接受的范围内,验证了 IGA 在优化系统参数方面的有效性与可行性。

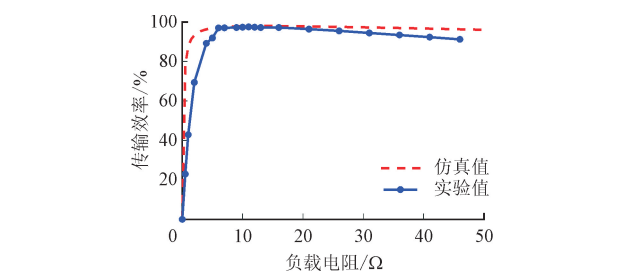


图 18 负载电阻对传输效率的影响仿真与实验对比图

Fig. 18 Simulation and experimental comparison of the influence of load resistance on transmission efficiency

4 结 论

本文以 LCC-S 型 WPT 系统为研究对象,利用 IGA 对 WPT 系统的谐振元件参数进行了优化设计。解决了具有高阶补偿结构的 WPT 系统谐振元件参数难以确定的问题。将传输效率作为目标函数, L_1 、 L_p 、 R_L 作为决策变量,创新性地把 WPT 系统的系统参数设计问题转换成非线性参数优化的问题,利用 IGA 优化设计所得到的系统参数搭建仿真和实验平台,得到以下结论。

(1)IGA 不仅使适应度函数值更好地跳出局部最优解,同时收敛速度也得到了极大的提升。通过仿真结果可知,IGA 优化下的系统传输效率较 GA 提升 2.52%,较 PSO 算法提升 2.07%。

(2)通过实验测得该 WPT 系统传输效率为 97.98%,验证了 IGA 能够实现以传输效率为目标的系统参数设计。

(3)通过对比仿真结果与实验结果得出,二者的输出特性曲线吻合,验证了 IGA 在系统参数优化方面的可行性以及该 WPT 系统对一定范围的负载波动也能实现较好的功率传输特性。

参考文献:

[1] 刘耀,肖晋宇,赵小令,等. 无线电能传输技术发展与应用综述 [J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 48-67.

LIU Yao, XIAOJinyu, ZHAO Xiaoling, et al. Development and application review on wireless power transmission technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(2): 48-67.

[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.

[3] RAMAKRISHNAN V, SAVIO A D, BALAJI C, et al. A comprehensive review on efficiency enhancement of wireless charging system for the electric vehicles applications [J]. IEEE Access, 2024, 12: 46967-46994.

[4] 王成亮,潘志新,翟学锋,等. 基于改进粒子群算法的无线充电系统参数优化 [J]. 电气传动, 2023, 53(3): 64-69.

WANG Chengliang, PAN Zhixin, ZHAI Xuefeng, et

al. Parameter optimization of wireless charging system based on improved PSO algorithm [J]. Electric Drive, 2023, 53(3): 64-69.

[5] 殷勇,朱禄靖,王成亮,等. 恒压输出 MC-WPT 系统研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2021(12): 13-19.

YIN Yong, ZHU Lujing, WANG Chengliang, et al. Research on constant voltage output MC-WPT system [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(12): 13-19.

[6] 张路. 包络调制无线电能传输系统关键问题研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.

[7] 杨洪杰. 基于 LCC-S 拓扑的 MC-WPT 系统参数规划与恒流/恒压研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.

[8] 王党树,董振,古东明,等. 基于双边 LCL 变补偿参数谐振式无线充电系统的研究与分析 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4019-4028.

WANG Dangshu, DONG Zhen, GU Dongming, et al. Research and analysis of resonant wireless charging system based on bilateral LCL variable compensation parameters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4019-4028.

[9] BAGHERI A, ERFANIAN A, ABRISHAMIFAR A. A systematic methodology for optimal design of wireless power transfer system using genetic algorithm [J]. Energies, 2020, 13(2): 383.

[10] 刘长春. 基于遗传算法的无线电能传输系统参数优化 [J]. 机械与电子, 2015, 33(2): 23-27.

LIU Changchun. Parameter optimization for wireless power transmission system based on genetic algorithm [J]. Machinery & Electronics, 2015, 33(2): 23-27.

[11] 杨云虎,梁大壮,洪若飞,等. 遗传算法对三线圈无线电能传输系统参数优化 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 122-129.

YANG Yunhu, LIANG Dazhuang, HONG Ruofei, et al. Parameter optimization of three coils by genetic algorithm for wireless power transmission systems [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 122-129.

[12] 曾智强,郑心城,陈为. 基于遗传算法优化的谐振式无线电能传输系统 [J]. 电气开关, 2016, 54(5): 42-46.

ZENG Zhiqiang, ZHENG Xincheng, CHEN Wei. The optimization of magnetic resonances based on wireless energy transfer system by genetic algorithm [J]. Electric Switchgear, 2016, 54(5): 42-46.

[13] 韦金柱,曹珍贵. 无线充电传输效率优化 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 12-15.

WEI Jinzhu, CAO Zhenguan. Wireless charging transmission efficiency optimization [J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition), 2024, 42(3):

- 12-15.
- [14] 杨云虎, 贾维娜, 梁大壮, 等. LCC-LCC/S 自切换恒流-恒压复合型无线电能传输系统 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4823-4837.
- YANG Yunhu, JIA Weina, LIANG Dazhuang, et al. A Self-Switching wireless power transfer system based on hybrid topology of LCC-LCC/S with constant current and constant voltage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4823-4837.
- [15] 姚友素, 曾明, 李刚, 等. 无线电能传输系统恒流/恒压输出切换方法 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 8-17.
- YAO Yousu, ZENG Ming, LI Gang, et al. Switching method from constant current mode to constant voltage mode for wireless power transfer system [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(6): 8-17.
- [16] 李博. 基于 LCC-S/P 补偿网络切换的 IPT 系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [17] 胡挺. 基于变结构补偿网络的恒流-恒压无线充电系统研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [18] 杨阳, 张久鹏, 曹元博, 等. 智能道路无线充电系统耦合线圈互操作性分析 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 113-125.
- YANG Yang, ZHANG Jiupeng, CAO Yuanbo, et al. Research and analysis on coupling coils of wireless charging systems for intelligent road [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 113-125.
- [19] 杨阳, 王澍, 颜黎明, 等. 电动汽车无线充电系统双边 LCC 型谐振补偿网络及电磁安全性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 171-180.
- YANG Yang, WANG Shu, YAN Liming, et al. Research on double-sided LCC resonant topology and electromagnetic safety for wireless charging system of electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 171-180.
- [20] XIAO Chunyan, CAO Bin, LIAO Chunmao. A fast construction method of resonance compensation network for electric vehicle wireless charging system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.
- [21] 赵志斌, 孙跃, 苏玉刚, 等. ICPT 系统原边恒压控制及参数遗传优化 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 170-176.
- ZHAO Zhibin, SUN Yue, SU Yugang, et al. Primary side constant input voltage control and parameters optimization of ICPT systems by genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 170-176.
- [22] 李宗峰, 徐磊. 非接触通用供电平台多负载解谐控制方法研究 [J]. 现代电子技术, 2009, 32(3): 133-136.
- LI Zongfeng, XU Lei. Research on detuning control of general contactless power supply platform with multiple loads [J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(3): 133-136.
- [23] 田子涵, 程诗豪, 李良晨, 等. 具有故障容错能力的双耦合 LCC-S 拓扑模块化无线充电系统 [J/OL]. 中国电机工程学报. (2024-11-05) [2024-11-06]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241121>.
- TIAN Zihan, CHENG Shihao, LI Liangchen, et al. Fault-tolerant modular wireless charging system with dual-coupled LCC-S topology [J/OL]. Proceedings of the CSEE. (2024-11-05) [2024-11-06]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241121>.
- [24] 贾金亮, 闫晓强. 磁耦合谐振式无线电能传输特性研究动态 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4217-4231.
- JIA Jinliang, YAN Xiaoqiang. Research trends of magnetic coupling resonant wireless power transfer characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4217-4231.
- [25] LI Zheng, LI Guosheng, BILAL M, et al. Blockchain-assisted server placement with elitist preserved genetic algorithm in edge computing [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(24): 21401-21409.
- [26] EREMEEV A V. A genetic algorithm with tournament selection as a local search method [J]. Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2012, 6(3): 286-294.
- [27] 夏静林. 电场耦合式无线充电系统谐振参数优化方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022: 268-271.
- [28] XIA Jinglin, YUAN Xinmei, LU Sizhao, et al. A two-stage parameter optimization method for capacitive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 1102-1117.
- [29] 国玉刚, 崔纳新. LCC-S 型无线电能传输系统优化配置及特性研究 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3723-3731.
- GUO Yugang, CUI Naxin. Research on optimal configuration and characteristics based on LCC-S type wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3723-3731.

(编辑 陶晴)