

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407614

多负载 MCR-WPT 系统耦合线圈的优化方法研究*

江兵 王子博 刘响 陶锴
(南京邮电大学自动化学院 南京 210046)

摘要:针对传统多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统在实际充电过程中容易出现用电设备摆放不齐或者是没有完全对准的情况,进而导致系统充电效率下降的问题,提出了一种基于自适应遗传算法的多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统参数优化方法。首先,分析了多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统中负载径向偏移、负载数量、传输距离和负载阻值对系统传输效率的影响,并使用 Maxwell 和 Simplorer 联合仿真进行验证。其次,通过所提出的自适应遗传算法对影响系统传输效率的几个重要参数:负载径向偏移距离、传输距离和负载阻值寻求最优解,获得系统最佳传输效率。仿真结果表明,优化后系统的总体传输效率达到了 83.2%,比优化前提高了 7.7%。最后搭建了多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统实验平台进行验证,实验结果表明,优化后系统的总体传输效率达到了 81.6%,比优化前提高了 8.2%。仿真结果和试验结果证明了所提出的基于自适应遗传算法的多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统参数优化方法的有效性。

关键词: 无线电能传输;多负载;参数优化;偏移距离

中图分类号: TN015 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.99

Research on optimization methods for coupling coils in multi-load MCR-WPT systems

Jiang Bing Wang Zibo Liu Xiang Tao Kai

(School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: To address the common issue in traditional multi-load MCR-WPT systems, where misalignment or improper placement of charging equipment often leads to a decrease in charging efficiency, a parameter optimization method for MCR-WPT systems based on an adaptive genetic algorithm is proposed. Firstly, the impact of load radial offset, load quantity, transmission distance, and load resistance on system transmission efficiency in multi-load MCR-WPT systems is analyzed, and the results are verified using a combined simulation with Maxwell and Simplorer. Subsequently, an adaptive genetic algorithm is employed to find the optimal solution for key parameters affecting system efficiency, such as load radial offset, load resistance, and transmission distance, thereby achieving the best transmission efficiency for the system. The simulation results indicate that the overall transmission efficiency of the optimized system reaches 83.2%, a 7.7% improvement compared to the efficiency before optimization. Finally, an experimental platform for the multi-load MCR-WPT system is established for validation, and the experimental results show that the overall transmission efficiency of the optimized system reaches 81.6%, an 8.2% enhancement over the pre-optimization figures. Both simulation and experimental results confirm the effectiveness of the proposed adaptive genetic algorithm-based parameter optimization method for multi-load MCR-WPT systems.

Keywords: WPT; multi-load; parameter optimization; offset distance

0 引言

无线电能传输是指从电源到负载的一种没有经过电

气直接接触的能量传输方式^[1-2],它具有高灵活性,高安全性和较长的使用寿命等特点^[3-4]。近年来无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术广泛应用于水下航行器充电^[5]、电动汽车充电^[6]、植入式医疗设备^[7-8]、电子

设备的无线供电等^[9]。现如今,大多数学者研究的是“一对一”的无线电能传输系统,对“一对多”或者“多对多”的研究相对较少。随着家用用电设备数量逐渐增多,如果每个用电设备都配备一个无线充电系统,肯定会造成资源浪费。伴随着越来越多支持无线充电的电子产品出现在市场上,单负载 WPT 系统显然无法实现同时给多个用电设备供电^[10-11]。因此,无线电能传输技术发展到今天,已经从单负载系统领域拓展到了多负载系统领域^[12]。

多负载磁耦合谐振式无线电能传输 (magnetically coupled resonant wireless power transfer, MCR-WPT) 的研究中,依然存在许多技术上的问题,例如:各用电设备的接收线圈规格不统一、各个负载的用电需求不同、接收线圈的偏移对接收端功率和传输效率影响大、接收线圈间的交叉耦合会对系统的传输性能造成影响等,这些问题还亟待解决。文献[13]针对多负载 MCR-WPT 系统发射线圈和接收线圈存在径向和轴向偏移现象,提出了一种基于反射阻抗的 MCR-WPT 系统接收线圈偏移角度计算方法,可以较为精确地计算出短距离无线电能传输系统接收线圈的偏移角度。文献[14]提出了一种基于共享功率信道的双频双负载 MCR-WP 系统。所提出的 MCR-WPT 系统提供了针对不同负载的选择性配电,并具有恒流输出特性。但是该系统的电路设计复杂且系统的传输效率低。

文献[15-16]设计了一种双频接收线圈结构,接收线圈能够同时在两种不同的谐振频率下工作,从而与不同频率的发射端线圈进行高效电能传输。两种线圈拥有不同的自感和耦合,通过两个独立的驱动电源实现并行操作,该设计增强了系统的适应性和灵活性,但是这种装置设计较为复杂,且传输效率不高。文献[17]提出了一种多负载 WPT 系统自适应阻抗匹配方法,采用基于神经网络算法的“T”型阻抗匹配网络,针对不同负载对匹配网络中的电容进行实时调整,实现了系统与负载的自适应匹配,但是论文对发射线圈和接收线圈相对位置改变时传输效率下降问题分析不够具体,控制成本高且没有将自适应阻抗匹配方法推广到有两个负载以上的 WPT 系统。

虽然上述研究在多负载无线电能传输中针对线圈间的径向、轴向偏移,多频传输和阻抗匹配等方面做出了一

定贡献,但是存在以下几点问题:电路设计复杂;阻抗匹配控制成本高;传输效率低;没有综合考虑负载径向偏移、负载数量、传输距离和负载阻值对系统传输效率的影响;对多负载的研究也仅仅局限于两个负载。该文采用了一种基于自适应遗传算法 (adaptive genetic algorithm, AGA) 的参数优化方法,以 6 个负载为研究对象,对影响系统传输效率的这几个重要参数寻求最优解,获得系统最佳传输效率,电路结构简单,大大提高了系统的传输效率。

1 多负载 MCR-WPT 系统原理分析与建模

该文建立了多负载 MCR-WPT 系统理论模型,采用 S-S 型谐振补偿网络结构,建立等效电路理论方程^[18-20],简化后的等效电路理论模型如图 1 所示。

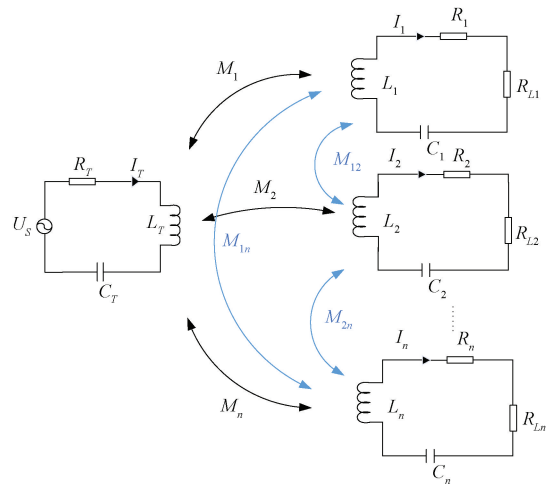


图 1 多负载 MCR-WPT 系统等效电路模型

Fig. 1 Multi-load MCR-WPT system equivalent circuit model

其中, U_s 表示高频交流电源; C_T 、 L_T 和 R_T 分别为发射端补偿电容、发射线圈自感和内阻, R_1 、 $R_1 \cdots R_n$ 分别为各接收线圈等效内阻, C_1 、 $C_2 \cdots C_n$ 分别为接收端串联谐振补偿电容, L_1 、 $L_2 \cdots L_n$ 分别为接收端各个线圈自感, R_{L1} 、 $R_{L1} \cdots R_{Ln}$ 分别为各个接收端负载电阻, M_1 、 $M_2 \cdots M_n$ 为发射线圈与接收线圈之间的互感, M_{12} 、 $M_{1n} \cdots M_{2n}$ 为接收线圈之间的互感, ω 为谐振角频率。

由基尔霍夫电压定律可得:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_T + jX_T & -j\omega M_1 & -j\omega M_2 & \cdots & -j\omega M_n \\ -j\omega M_1 & R_{L1} + R_1 + jX_1 & -j\omega M_{12} & \cdots & -j\omega M_{1n} \\ -j\omega M_2 & -j\omega M_{21} & R_{L2} + R_2 + jX_2 & \cdots & -j\omega M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -j\omega M_n & -j\omega M_{n1} & -j\omega M_{n2} & \cdots & R_{Ln} + R_n + jX_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:发射回路和接收回路的电抗分别为:

$$\begin{cases} X_T = \omega L_T - \frac{1}{\omega C_T} \\ X_m = \omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \quad (m = 1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

发射回路和各接收回路的阻抗分别为:

$$\begin{cases} Z_T = R_T + jX_T \\ Z_m = R_{Lm} + R_m + jX_m \quad (m = 1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

收发线圈之间的互感对系统功率和效率有很大影响,而接收线圈间的互感对功率和效率的影响可忽略不计,因此为简化推导过程,令 $M_{12} = M_{1n} = \dots = M_{2n} = 0$,系统工作在谐振状态时,电路中的感抗和容抗相等,即:

$$j\omega L_T - j \frac{1}{\omega C_T} = j\omega L_m - j \frac{1}{\omega C_m} = 0 \quad (m = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

每个接收回路的电流可表示为:

$$I_i = \frac{-j\omega M_{ri} I_T}{R_i + R_{Li}} \quad (5)$$

每个接收回路的反射阻抗可表示为:

$$R_{refi} = \frac{j\omega M_{ri} I_i}{I_T} = \frac{\omega^2 M_{ri}^2}{R_i + R_{Li}} \quad (6)$$

输入功率和接收功率分别为:

$$P_{in} = \frac{U_s^2}{R_s + \sum_{i=1}^n R_{refi}} \quad (7)$$

$$P_{Li} = I_i^2 R_{Li} = \frac{\omega^2 M_{ri}^2 U_s^2}{[(R_i + R_{Li})(R_T + \sum_{i=1}^n R_{refi})]^2} R_{Li} \quad (8)$$

根据等效电路模型,得出系统各接收线圈的效率 η_i 和整个系统的传输效率 η 分别为:

$$\eta_i = \frac{R_{refi} R_{Li}}{(R_{Li} + \sum_{i=1}^n R_{refi})(R_i + R_{Li})} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n R_{refi} \frac{R_{Li}}{R_i + R_{Li}}}{R_T + \sum_{i=1}^n R_{refi}} \quad (10)$$

由式(9)和(10)可得,影响系统输出功率和传输效率的因素主要为收发线圈间互感 M ,谐振频率 ω 和负载阻值 R 。随着接入回路中的接收线圈增加,电路结构会更加复杂,此时对系统传输性能也会有一定的影响。

2 多负载数量及位置关系仿真分析

多负载 MCR-WPT 系统可以同时为多个用电设备供电,大大提高了系统的总体效率。但是在实际充电过程

中,往往会出现用电设备摆放不齐或者是没有完全对准的情况,导致系统充电效率下降,此时需要考虑当负载与接收线圈相对位置固定时,接收线圈与发射线圈、接收线圈之间的相互作用关系改变对系统效率的影响。本节建立六负载无线电能传输系统模型,探究负载位置关系、负载数量增加以及接收线圈径向偏移对系统效率的影响。

2.1 负载径向偏移对效率的影响

在实际应用中,两线圈之间发生的大多是径向偏移情况,因此本节主要分析线圈的径向偏移情况。首先,6个接收线圈紧密地排列成一圈,采用螺旋缠绕的方式,发射线圈和接收线圈匝数均为 10 匝的圆形励磁线圈,线圈横截半径均为 2 mm,发射线圈半径 12 cm,接收线圈半径 3 cm,传输距离为 6 cm,输入电压有效值为 24 V。令 6 个接收线圈分别沿着远离发射线圈轴心的方向等距离移动,6 个接收线圈始终关于发射线圈轴心呈中心对称,移动示意图如图 2(a)、(b)所示,发射线圈和接收线圈轴心距离分别设置为:6、7、8、9、10、11、12 cm,通过仿真得到各线圈的相关参数并计算系统的效率和功率值。

另设一组对照,令一个接收线圈与发射线圈圆心重合,其余 5 个接收线圈分别沿着远离发射线圈轴心的方向等距离移动,移动示意图如图 2(c)、(d)所示,通过仿真分析分别测量系统运行后接收端的电压和电流值,计算出此时每个线圈的传输效率和功率值,进而得到系统总效率值。

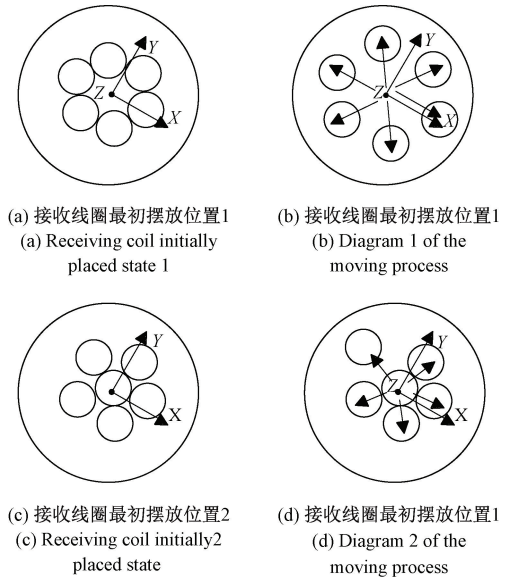


图 2 接收线圈径向移动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radial movement of receiving coil

轴对称状态下,径向移动距离为 6 cm 时,接收线圈初始摆放状态时电路中的电压有效值为 12.5 V,电流有效值为 0.43 A,计算得到接收端负载功率为 $P_{out} = U_L I_L =$

$12.5 \times 0.43 = 5.38 \text{ W}$ 。总效率为 $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 72.6\%$ 。设

d 为移动线圈圆心与发射线圈轴心的径向偏移距离,令 d 分别为 6、7、8、9、10、11 和 12 cm,仿真得出不同径向偏移距离下对应的电压、电流数值,计算结果如表 1 所示。

表 1 轴对称状态下系统的总传输效率

Table 1 The total transmission efficiency of a system in an axisymmetric state

径向偏移距离/cm	6	7	8	9	10	11	12
发射功率/W	44.46	44.38	43.69	43.19	42.55	42.03	39.72
单个负载接收功率/W	5.38	5.13	4.76	4.27	3.81	3.14	2.39
总传输效率/%	72.6	69.3	65.4	59.3	53.7	44.8	36.1

同理,接收线圈在非轴对称状态下,分析线圈径向偏移距离与系统传输效率的关系,各个负载的接收功率与传输效率的计算结果如表 2 所示。

表 2 非轴对称状态下系统的总传输效率

Table 2 Total Transmission efficiency of the system in non-axisymmetric states

径向偏移距离/cm	6	7	8	9	10	11	12
发射功率/W	45.73	45.34	44.83	43.49	43.71	42.87	41.06
中心负载接收功率/W	5.81	5.76	5.72	5.64	5.49	5.23	4.92
非中心负载接收功率/W	5.57	5.32	5.05	4.76	4.26	3.57	2.70
总传输效率/%	73.6	71.4	69.1	66.2	61.3	53.8	44.9

上述两种计算结果如图 3 所示。

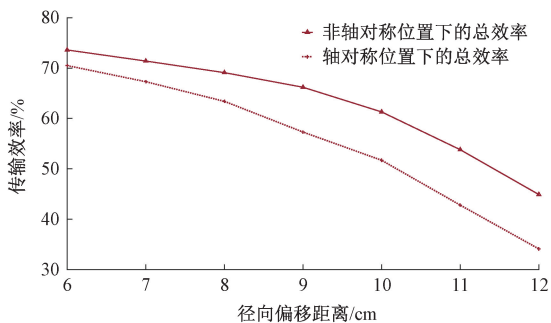


图 3 线圈径向偏移距离与效率的关系

Fig. 3 Relationship between radial offset distance of coil and efficiency

由上图可知,六接收线圈的非轴对称径向偏移对效率的影响低于轴对称,且线圈非轴对称位置下的总效率高于轴对称位置下的总效率。在两种偏移情况下的初始位置时,接收线圈非轴对称摆放位置下系统的总效率为 75.5%,而轴对称摆放位置下系统的总效率为 72.6%,两者相差了 2.9%,初步分析原因为非轴对称摆放时,其中一个接收线圈与发射线圈是中心轴正对位置,此时中心接收线圈的效率达到了最佳,因此系统的总体效率要高

于另一种情况。

2.2 负载数量对效率的影响

为了探究负载数量对系统效率的影响,在 Ansys Maxwell 软件中搭建线圈耦合模型,首先令一个接收线圈与发射线圈中心对称,接着逐个添加接收线圈,线圈按照图 2(c) 所示的线圈位置关系摆放,接收线圈的各个参数、尺寸大小均一致。在 Simplorer 软件中搭建多负载系统外围电路,与 Maxwell 联合仿真,得到电路中电压、电流仿真值,并计算系统效率值。负载数量增加对系统效率的影响如图 4 所示。

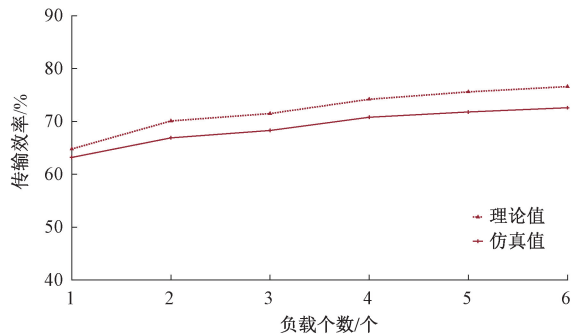


图 4 负载个数对系统效率的影响

Fig. 4 The impact of the number of loads on system efficiency

由上图可知,随着负载数量的增加,系统总体效率会逐渐增大,在负载从 1 增加到 2 个时,效率会有明显增加;负载从 4 个增加到 6 个,系统效率增加幅度较为缓慢。由多负载系统效率推导公式可得,随着负载数量的增加,单个接收线圈的效率有大幅下降,最后下降幅度趋于缓和。在多负载 MCR-WPT 系统应用场景下,如何提高单个负载的效率是需要考虑并解决的问题。

2.3 线圈传输距离因素分析

线圈传输距离是影响系统传输特性的关键因素,传输距离过大或过小都会降低系统的传输效率,系统一定存在一个最优传输距离。本节以单负载为例,讨论传输距离变化时对系统传输效率的影响。

根据互感计算公式,可知:

$$M = \frac{\pi\mu_0 nr^4}{2h^3} \quad (11)$$

其中, μ_0 为空气磁导率, n 和 r 分别为线圈匝数和半径。

由 2.1 节已知输出功率表达式为:

$$P_L = I_2^2 R_L = \frac{\omega^2 M^2 U_s^2}{[(R_2 + R_L)R_1 + (\omega M)^2]^2} R_L \quad (12)$$

其中, I_2 为接收端电流, R_L 为负载阻值, M 为两线圈互感, R_1 、 R_2 分别为发射线圈和接收线圈内阻, U_s 为输入电源。

由上式对互感 M 求导,当输出功率取得极大值时互感 M 为:

$$M = \frac{\sqrt{R_1(R_2 + R_L)}}{\omega} \quad (13)$$

联立式(11)与(12),得到输出功率取得极大值时传输距离 h 的表达式为:

$$h_T = \sqrt[3]{\frac{\pi\mu_0 nr^4 \omega}{[R_1(R_2 + R_L)]^{1/2}}} \quad (14)$$

式中: μ_0, n, r 均为线圈固有参数,对于特定的 WPT 系统,仅有输入角频率 ω 一个未知量。

对于中短距离的小功率无线电能传输系统而言,传输距离一般在 0~30 cm。不改变发射线圈和接收线圈的自身参数,分别设置不同的传输距离,采用 Maxwell 和 Simplorer 进行联合仿真,得出负载电压的值,再通过功率计算公式计算出输出功率的值。进行多组仿真实验,线圈传输距离 h 和输出功率 P 对应数据如表 3 所示。

表 3 仿真设置距离 h 与负载功率 P_L 关系

Table 3 Simulation setting distance h and load power P_L relationship

仿真距离 h/cm	3	5	7	9	9.2	11	13	15	17
负载电压/V	5.87	7.62	9.14	10.57	11.28	10.65	7.96	5.25	3.43
功率 P_L/W	1.72	2.90	4.18	5.59	6.36	5.67	3.46	2.28	0.59

由表 3 数据可知,仿真距离从 3 cm 增加到 9.26 cm 时,负载功率呈逐渐上升趋势,在 9.2 cm 时取得极大值,为 6.36 W;仿真距离从 9.2 cm 到 17 cm,负载功率呈下降趋势。

$$P_i = I_i^2 R_{Li} = \left[\frac{U_s}{R_T + \frac{\omega^2 M_1^2}{(R_1 + R_{L1})} + \frac{\omega^2 M_2^2}{(R_2 + R_{L2})}} \right]^2 \left(\frac{\omega M_i}{R_i + R_{Li}} \right)^2 R_{Li} (i = 1, 2) \quad (15)$$

$$\eta = \frac{P_1 + P_2}{P_{\text{输入}}} = \frac{\omega^2 M_1^2 R_{L1} (R_2 + R_{L2})^2 + \omega^2 M_2^2 R_{L2} (R_1 + R_{L1})^2}{\omega^2 M_1^2 (R_1 + R_{L1}) (R_2 + R_{L2})^2 + \omega^2 M_2^2 (R_1 + R_{L1})^2 (R_2 + R_{L2}) - R_T (R_1 + R_{L1})^2 (R_2 + R_{L2})^2} \quad (16)$$

对式(15)和(16)进行仿真分析,得到负载阻值与系统输出功率和传输效率的关系如图 6、7 所示。

由图 6 可知,负载阻值从 0 增加到 20 Ω 时,单个接收线圈的输出功率呈快速增加趋势,随后缓慢增加。由图 7 可知,负载阻值从 0 增加到 8 Ω 时,系统总传输效率呈急剧增加趋势,从 8~100 Ω 之间,系统总传输效率先缓慢增加,然后稳定在最大值保持不变。

3 基于自适应遗传算法的参数优化

对多负载 MCR-WPT 系统而言,由于摆放位置的限制,多个接收线圈往往无法同时与发射线圈严格对齐,因

根据表 3 中数据绘制相应的传输距离和负载功率的关系曲线图如图 5 所示。

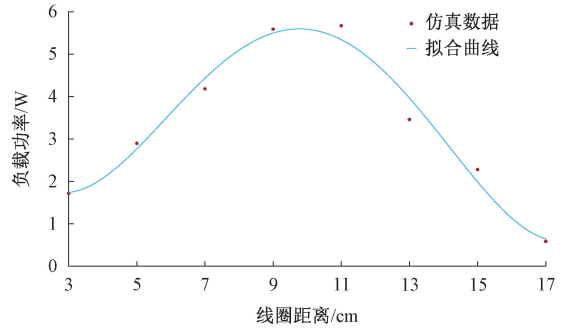


图 5 距离和负载功率的关系

Fig. 5 Relationship between distance and load power

由图 5 可以看出,传输距离在 9~11 cm 之间时,输出功率存在极大值,传输距离取值过大或过小都会降低系统的传输功率。

2.4 负载阻值因素分析

在 MCR-WPT 系统中,不同的负载阻值对系统传输特性会产生影响。为了便于通过三维图像来分析本系统的传输特性,下面以两个负载系统为例使用 MATLAB 进行三维仿真。令发射线圈半径 12 cm,接收线圈半径 3 cm,传输距离为 6 cm,系统输入电压 24 V,谐振频率 85 kHz,线圈内阻 $R_T = R_1 = 2 \Omega$,匝数为 10 匝,电容 $C_1 = C_2 = 25 \text{ nF}$,电感 $L_1 = L_2 = 264.7 \mu\text{H}$,负载阻值的取值范围为 0~100 Ω 。已知系统输出功率和传输效率表达式分别为式(8)和(10),当负载个数为 2 时,令 $i = 2$,则以上公式可简化为:

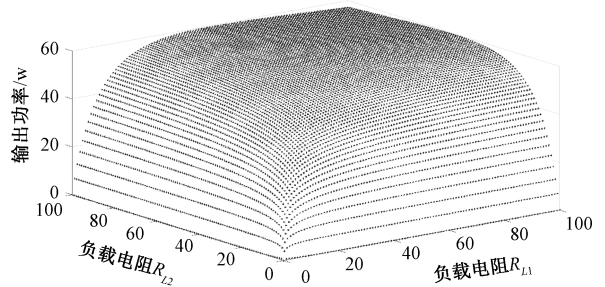


图 6 负载电阻与输出功率的关系

Fig. 6 The relationship between load resistance and output power

此需要考虑接收线圈相对发射线圈发生位置偏移时,对

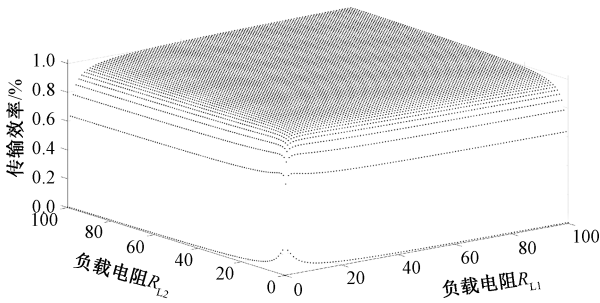


图7 负载电阻与传输效率的关系

Fig. 7 The relationship between load resistance and transmission efficiency

系统传输效率的影响。针对以上分析,该文采用 AGA 对系统中的一些关键参数进行优化,使得多负载 MCR-WPT 系统能够获得最佳传输效率。

3.1 AGA 算法分析

AGA 在传统遗传算法 (genetic algorithm, GA) 上进行了改进,引入了自适应机制,将交配和变异概率改为随适应度函数值的变化而自动改变,通过改变不同适应度值下的交叉和变异几率,能提升计算效率并加快算法的收敛速度。AGA 算法的具体构造过程如下:

1) 构建目标函数

根据多负载系统数学模型,该文将系统的传输效率作为优化目标,传输效率表达式由式 (10) 给出,优化目标函数为:

$$F = \text{Max}(\eta) = \frac{\sum_{i=1}^n R_{refi} \frac{R_{Li}}{R_i + R_{Li}}}{R_T + \sum_{i=1}^n R_{refi}} \quad (17)$$

其中, $R_{refi} = \frac{\omega^2 M_{ri}^2}{R_i + R_{Li}}$ 。接收线圈和发射线圈参数均

相等且线圈参数不变,即线圈的自感值和线圈内阻已知。由 2.2 节可知,随着负载个数的增加,总体传输效率也一直增加,所以对负载个数进行寻优没有意义。所以该文以传输效率 $\text{Max}(\eta)$ 为目标函数,对影响传输效率的关键参数:传输距离 h 、负载阻值 R_L 和接收线圈径向偏移距离 d 寻求最优解,即:

$$X = (h \ R_L \ d)^T \quad (18)$$

2) 建立约束条件

随着负载数量的增加,接收线圈之间会产生复杂的交叉耦合现象,这种现象会消耗一部分能量,降低整个系统的供电利用率。同时,由于发射线圈半径和发射端电压的限制,负载数量过多会导致每个负载的接收功率大大降低,而无法满设备正常工作,因此,接收线圈个数不宜过多,该文以六接收线圈为例。考虑到线圈所用材质和绝缘问题,设传输线圈能够承受的最大电压为 V_{\max} ,发射端电路电压不应超过这个数值才能保证系统正常工作。此外,为了在获得多负载系统较优的传输效率的同时,使每个接收端的输出功率达到最低要求,需要设定输出功率的取值范围。由接收功率和耦合系数的初始取值,建立约束条件为:

$$\text{constr} = \begin{cases} 0 \leq h \leq 20 \\ V |j\omega L_T I_T| \leq V_{\max} \\ P_0(1 - 0.015) \leq P \leq P_0(1 + 0.015) \\ K_0(1 - 0.015) \leq K \leq K_0(1 + 0.015) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $P_0 = 4.1, K_0 = 0.32$ 。

AGA 算法的具体优化过程如图 8 所示。

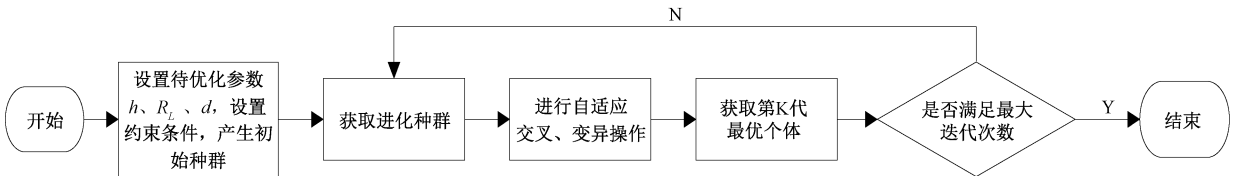


图8 AGA 算法优化过程图

Fig. 8 AGA optimization process

首先,根据要求设置传输距离、负载阻值、偏移距离这 3 个待优化参数及约束条件,产生初始种群。通过迭代计算,不断对种群进行更新和优化,在每一代中,根据个体的适应度来选择优秀的个体进行繁殖,产生下一代种群。然后,对个体进行自适应交叉、变异。当达到最大迭代次数时算法结束,此时可求解出传输距离、负载阻值、偏移距离这 3 个参数的最优解。

3.2 仿真分析

该文的优化目标是在固定线圈参数和电路参数、满足一定输出功率的前提下,通过改变线圈传输距离 h 、负载阻值 R_L 和接收线圈径向偏移距离 d , 获得多负载 MCR-WPT 系统的最大传输效率。为使效率最大化,6 个接收线圈的最初摆放位置为图 2 (c) 所示,线圈径向偏移方式为图 2 (d) 所示,即令一个接收线圈与发射线圈中心对称,其余 5 个接收线圈分别沿着远离发射线圈中心

的方向等距离移动。该文利用 MATLAB 结合优化算法进行仿真分析,在 GA 和 AGA 中,设置种群数 $N = 80$,迭代次数 $X = 200$ 。GA 和 AGA 算法的传输效率收敛曲线如图 9 所示。

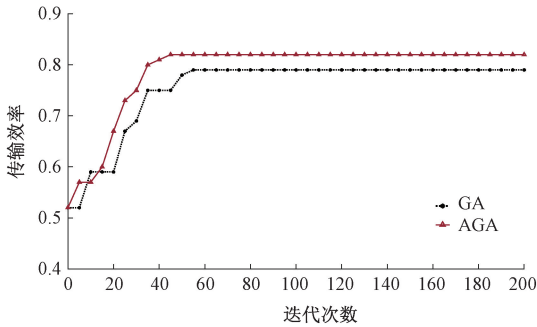


图 9 GA 和 AGA 收敛曲线图

Fig. 9 GA and AGA convergence curves

由图 8 可知,GA 在迭代次数到达 55 次时收敛到最大适应度,为 79.1%;AGA 在迭代次数到达 45 次时收敛到最大适应度,为 83.2%,而优化前系统的传输效率为 75.5%,提高了 7.7%,因此,AGA 相比 GA 法拥有更好的优化效果。

为了更加直观地反映 GA 和 AGA 的迭代过程,对两种算法分别进行 6 组对比,在 MATLAB 中的仿真结果如表 4 所示。

表 4 GA 和 AGA 仿真结果对比

Table 4 Comparison of GA and AGA simulation results

GA			AGA		
序号	迭代次数	传输效率/%	序号	迭代次数	传输效率/%
1	19	0.59	1	27	0.66
2	25	0.67	2	30	0.68
3	31	0.71	3	34	0.76
4	38	0.78	4	39	0.79
5	44	0.78	5	42	0.81
6	55	0.79	6	45	0.83

AGA 相比 GA 法收敛速度更快,AGA 因为引入了自适应算子,在迭代时能够随适应度函数值的变化而自动改变,避免了种群快速收敛而陷入局部最优。在 GA 和 AGA 算法的最优适应度下,系统的优化参数如表 5 所示。

表 5 参数优化结果

Table 5 Parameter optimization results

算法	传输距离/cm	负载阻值/ Ω	径向偏移距离/cm
GA	8.16	16.73	6.12
AGA	8.07	15.50	6.03

3.3 实验分析

为了验证上述理论分析与算法仿真优化的正确性,该文搭建了完整的六负载 MCR-WPT 系统实验平台,如

图 10 所示,所用装置包括:直流电源、信号发生器、示波器、整流器、发射端电路、谐振线圈。线圈均采用励磁线圈绕制而成,匝数均为 10 匝,发射线圈半径 12 cm,接收线圈半径 3 cm,输入电源为 24 V,系统频率为 85 kHz,负载阻值、传输距离和非中心线圈偏移距离采用优化算法求解的数值,电路中其余参数均不变。根据实验测得接收端的电压、电流值如图 11、12 所示。

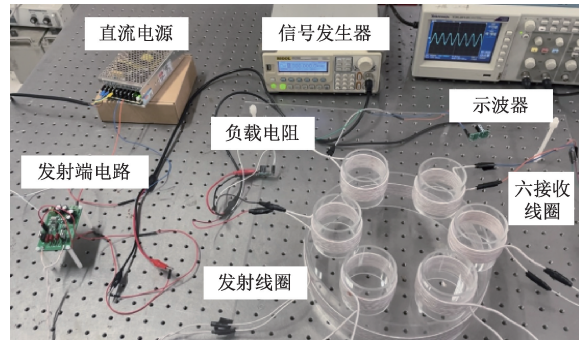


图 10 多负载 MCR-WPT 系统实验平台

Fig. 10 Multi load MCR-WPT system experimental platform

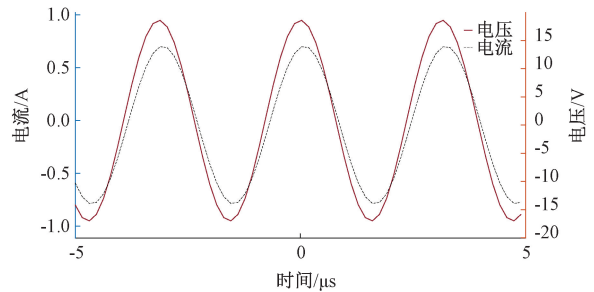


图 11 中心接收线圈输出电压和电流值

Fig. 11 Output voltage and current values of the central receiving coil

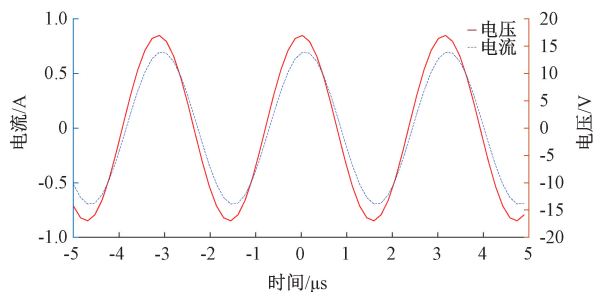


图 12 非中心接收线圈输出电压和电流值

Fig. 12 Output voltage and current values of non-central receiving coils

由图 11 可知,中心接收线圈的输出电压有效值为 13.72 V,电流有效值为 0.59 A,输出功率为 8.09 W;由图 12 可知非中心接收线圈的输出电压有效值为 12.23 V,电流有效值为 0.47 A,输出功率为 5.75 W,由

式(16)计算出系统总传输效率为 81.6%。

为了多次验证 AGA 算法的正确性,下面对不同传输距离和径向偏移距离与系统总传输效率的关系进行实验分析。首先,负载阻值和传输距离采用优化后的数值,即 15.5 Ω 和 8 cm。令接收线圈径向偏移距离从 6 cm 增加到 12 cm,得到优化前后线圈径向偏移距离与总传输效率的关系,移动示意图如图 13 所示,实验结果如表 6 所示。

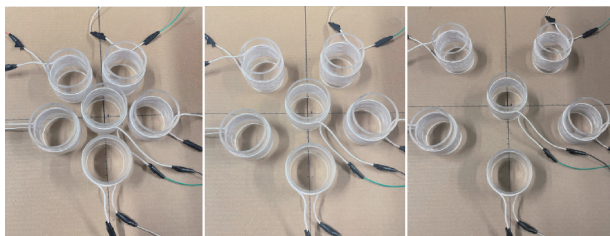


图 13 径向偏移实验示意图

Fig. 13 Schematic diagram of radial offset experiment

表 6 径向偏移距离与系统传输效率的关系

Table 6 Relationship between radial offset distance and system transmission efficiency

径向偏移距离/ cm	传输距离/ cm	优化前传输效率/ %	优化后传输效率/ %
6	8	73.6	81.6
7	8	71.7	78.5
8	8	69.3	74.6
9	8	66.5	71.5
10	8	61.8	65.8
11	8	54.9	59.1
12	8	45.6	48.9

由上表可知,接收线圈径向偏移距离从 6 cm 增加到 12 cm,测得系统传输效率实验值逐渐减小。优化前最高传输效率为 73.6%,优化后最高传输效率为 81.6%,优化前系统的传输效率平均值为 63.3%,优化后系统的传输效率平均值为 68.6%,比优化前平均增加了 5.3%。接收线圈在不同径向偏移距离下测得的传输效率实验数据和仿真数据、理论值的对比如图 14 所示。

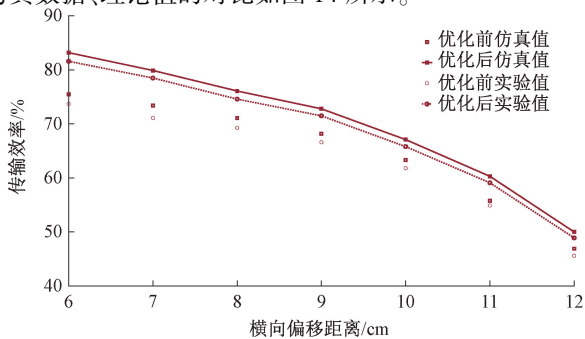


图 14 优化前后径向偏移距离与传输效率的关系

Fig. 14 Relationship between radial offset distance and transmission efficiency before and after optimization

由图 14 可得,采用 AGA 对系统参数优化后,理论值、仿真值和实验测量值均大于优化前的数值,且变化趋势基本一致。

同理,保持负载阻值和径向偏移距离为优化后的数值不变,即 15.5 Ω 和 6 cm。接收线圈按照图 2(c)的方式摆放,改变线圈的传输距离,测量出对应的实验值并计算系统传输效率,结果如表 7 所示。

表 7 传输距离与系统传输效率的关系

Table 7 Relationship between transmission distance and system transmission efficiency

传输距离/ cm	径向偏移 距离/cm	优化前传输 效率/%	优化后传输 效率/%
5	6	67.5	76.1
6	6	69.5	78.3
7	6	70.6	80.0
8	6	73.6	81.6
9	6	71.9	79.2
10	6	71.5	77.8
11	6	70.3	75.8
12	6	67.2	72.9

由表 7 可知,当传输距离为 8 cm 时,优化前后系统的传输效率均达到最大值,当传输距离从 5 cm 增加到 8 cm 时,优化前后系统传输效率均增大,从 8 cm 增加到 12 cm 时,优化前后系统传输效率均减小。优化前最高传输效率为 73.6%,优化后最高传输效率为 81.6%,优化前传输效率平均值为 70.3%,优化后传输效率平均值为 77.7%,比优化前平均增加了 7.4%。接收线圈在不同传输距离下测得的传输效率实验数据和仿真值、理论值的对比如图 15 所示。

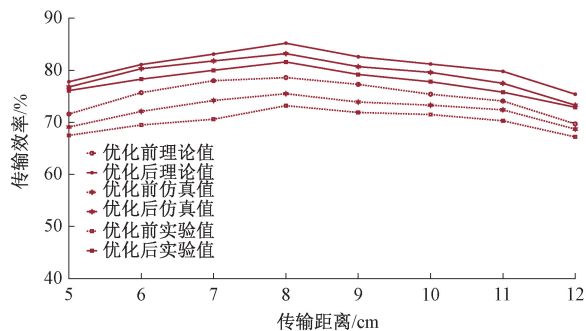


图 15 优化前后传输距离与传输效率的关系

Fig. 15 Relationship between transmission distance and transmission efficiency before and after optimization

实验结果表明,优化后系统的总体传输效率达到了 81.6%,比优化前提高了 8.2%。通过上述对比可得,优化后仿真计算值和实验测量结果变化趋势基本保持一致,由于没有考虑频率分裂、线圈品质因数等因素的影响,造成了实验和仿真存在一些偏差。综上所述,借助自

适应优化算法能够快速、精确地实现对系统参数寻求最优解,解决了传统方法对多负载 MCR-WPT 系统参数寻优过程的繁琐问题。

4 结 论

论文提出了一种基于自适应遗传算法的多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统参数优化方法。首先,分析了多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统中负载径向偏移、负载数量增加、负载阻值和负载位置对应关系对系统传输效率的影响。然后,以六负载无线电能传输系统为研究对象,通过所提出的自适应遗传算法对传输距离、负载阻值和负载径向偏移距离寻求最优解,获得系统最佳传输效率,弥补了以往对多负载无线电能传输系统中缺乏综合考虑负载径向偏移、传输距离和负载阻值对系统传输效率影响的缺点。并搭建了多负载 MCR-WPT 系统实验平台,验证了理论分析和优化结果的有效性。仿真结果表明,优化后系统的总体传输效率达到了 83.2%,比优化前提高了 7.7%。实验结果表明,优化后系统的总体传输效率达到了 81.6%,比优化前提高了 8.2%。下一步会深入研究线圈品质因数对系统传输效率的影响并进行参数优化。

参考文献

- [1] HUI S Y R, YANG Y, ZHANG CH. Wireless power transfer: A paradigm shift for the next generation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(3): 2412-2426.
- [2] FAN Y, SUN Y, DAI X, et al. Simultaneous wireless power transfer and full-duplex communication with a single coupling interface [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,36(6): 6313-6322.
- [3] LI X, ZHANG Y M, CHEN SH X, et al. Coil relative position transient issue in wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(3): 2621-2630.
- [4] 杨奕,郭科,郭强,等. 网格型螺线管线圈单管逆变无线电能传输系统研究与设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 161-174.
YANG Y, GUO K, GUO Q, et al. Research and design of single-switch inverter wireless power transfer system for grid flat spiral pad coils[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 161-174.
- [5] ZENG Y Q, LU C H, LIU R ZH, et al. Wireless power and data transfer system using multidirectional magnetic coupler for swarm AUVs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(2): 1440-1444.
- [6] ZHANG SH Y, JAMES J Q. Electric vehicle dynamic wireless charging system: Optimal placement and vehicle-to-grid scheduling[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(8): 6047-6057.
- [7] ROY S, AZAD A N M W, BAIDYA S, et al. Powering solutions for biomedical sensors and implants inside the human body: A comprehensive review on energy harvesting units, energy storage, and wireless power transfer techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 12237-12263.
- [8] HAERINIA M, SHADID R. Wireless power transfer approaches for medical implants: A review[J]. Signals, 2020, 1(2): 209-229.
- [9] SONG M, JAYATHURATHNAGE P, ZANGANEH E, et al. Wireless power transfer based on novel physical concepts [J]. Nature Electronics, 2021, 4(10): 707-716.
- [10] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3):13.
ZHAO ZH M, ZHANG Y M, CHEN K N. New progress in magnetic coupling resonant radio energy transmission technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 33(3):13.
- [11] KIM G, LEE B. Design of wireless power and information transfer systems considering figure of merit for information[J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2020, 20(4):241-247.
- [12] 陈晓平,刘岩. 多负载磁耦合谐振无线电能传输系统功效分析与优化[J]. 电气技术, 2022, 23(4): 37-41.
CHEN X P, LIU Y. Efficiency analysis and optimization of multi-load magnetic coupling resonance wireless power transfer system [J]. Electronical Technology, 2022, 23(4): 37-41.
- [13] 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 the measurement method of receive coil offset angle in MCR-WPT system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 1-7.
- [14] HOU X Y, WANG ZH H, SU Y G, et al. A dual-frequency dual-load multirelay magnetic coupling wireless power transfer system using shared power channel[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15717-15727.
- [15] AHN D, KIM S, KIM S W, et al. Wireless power transmitter and receiver supporting 200 kHz and

- 6.78 MHz dual-band operation without magnetic field cancelling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(9): 7068-7082.
- [16] AHN D, KIM S M, KIM S W, et al. Wireless power transfer receiver with adjustable coil output voltage for multiple receivers application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(5): 4003-4012.
- [17] 吴月宝, 赵晋斌, 张少腾, 等. 基于径向基神经网络的多负载无线电能传输系统自适应阻抗匹配方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 3969-3977.
- WU Y B, ZHAO J B, ZHANG SH T, et al. Adaptive impedance matching method for multi load radio energy transmission system based on radial basis function neural network [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 3969-3977.
- [18] YE Z, SUN Y, LIU X, et al. Power transfer efficiency analysis for omnidirectional wireless power transfer system using three-phase-shifted drive [J]. Energies, 2018, 11(8):2159.
- [19] FENG J J, LI Q, LEE F, et al. Transmitter coils design for free-positioning omnidirectional wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4656-4664.
- [20] KIM J, JEONG J. Range-adaptive wireless power transfer using multiloop and tunable matching techniques [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6233-6241.

作者简介



江兵(通信作者),2007年于中国科学技术大学获博士学位,现为南京邮电大学副教授,主要研究方向为智能仪器与测控系统。

E-mail: jiangb@njupt.edu.cn

Jiang Bing (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2007. Now he is an associate professor at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include intelligent instruments and measurement and control systems.