

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416895

# 基于遗传模拟退火算法的无线电能传输系统

吴金龙 高楚珊 唐小波

(南京师范大学 南京 210023)

**摘要:** 针对磁耦合谐振式无线电能传输系统的各项参数变化对传输效率的影响及传输效率不高的问题。以提高系统的传输效率为目标,通过 Matlab 仿真软件对频率、电阻、线圈互感等参数对传输效率的影响进行了分析,引入遗传模拟退火算法对系统工作频率、线圈匝数、线圈半径、线圈间距离以及负载阻值进行参数优化。最后在 Python 软件中对遗传模拟退火算法进行了仿真,得到了系统参数对应的一组最优解使得系统的最高传输效率可达 94.27%。仿真结果表明该优化算法的可行性和有效性,能够有效地优化系统参数从而提高无线电能传输系统的传输效率,具有一定的实际应用价值。

**关键词:** 无线电能传输;磁耦合谐振;参数优化;遗传模拟退火算法

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

## Wireless power transfer system based on genetic simulation annealing algorithm

Wu Jinlong Gao Chushan Tang Xiaobo

(Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of various parameter changes on the transmission efficiency of the magnetic coupling resonant wireless power transmission system and the problem of low transmission efficiency. With the goal of improving the transmission efficiency of the system, the influence of frequency, resistance, coil mutual inductance and other parameters on the transmission efficiency was analyzed through Matlab simulation software, and the genetic simulated annealing algorithm was introduced to optimize the system operating frequency, coil turns, coil radius, coil distance and load resistance. Finally, the genetic simulated annealing algorithm was simulated in Python software, and a set of optimal solutions corresponding to the system parameters were obtained, so that the maximum transmission efficiency of the system can reach 94.27%. The simulation results show the feasibility and effectiveness of the optimization algorithm, which can effectively optimize the system parameters and thus improve the transmission efficiency of the wireless power transmission system, and has certain practical application value.

**Keywords:** wireless power transmission; magnetic coupling resonance; parameter optimization; genetic simulated annealing algorithm

## 0 引言

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术是近年来快速发展的一种新兴技术,指在电源和负载之间不再需要物理接触<sup>[1-2]</sup>。相对有线电能传输方式而言,WPT系统具备灵活、快捷、安全性高等优点<sup>[3]</sup>。无线电能传输技术包含微波辐射模式、磁场耦合模式和电场耦合模式<sup>[4]</sup>,磁场耦合模式进一步分为磁感应方式和磁耦合谐振方式。磁耦合谐振式(magnetically coupled resonant, MCR)因具有传输距离较远、传输效率高优点被广泛应用在电动汽

车、医疗设备、消费电子和工业自动化等领域。

在磁耦合谐振式无线电能传输系统中传输效率的大小受到线圈的耦合结构<sup>[5-6]</sup>、电阻、工作频率等参数的影响,会影响整个系统的传输性能。对于线圈耦合结构涉及到线圈的匝数、半径、匝间距、距离多个参数的共同作用使得对系统传输效率优化成为一个多参数优化问题<sup>[7-8]</sup>。由于在实际应用中,系统的多个参数之间相互影响,往往使得无线电能传输系统的传输效率无法达到最优。因此无线电能传输系统的参数优化研究尤为重要。

针对无线电能传输系统的参数优化,目前已经有一些

研究将传统的优化算法应用在提高系统传输效率上。但算法结构单一优化速度缓慢且容易陷入局部最优解,不易得到系统的全局最优解。还有一些研究仅优化了系统的部分参数未能全局优化,从而难以使得系统工作在最优状态。Prosen 等<sup>[9]</sup>利用了遗传算法优化圆形平面螺旋线圈,以提高发射线圈和接收线圈之间的耦合系数,从而增强无线电能传输系统的效率。Du 等<sup>[10]</sup>采用了改进的鲸鱼优化算法优化了谐振频率和负载阻值,有效地优化了传输效率。但 these 方法仅对系统的部分参数进行了优化未能把系统的耦合系数、谐振频率和负载阻值进行综合优化,研究范围相对有限。李星灿等<sup>[11]</sup>采用改进型多目标灰狼优化算法对系统参数进行优化,得到了系统输出功率和传输效率的最优解。王成亮等<sup>[12]</sup>通过改进的粒子群算法优化系统的工作频率、补偿电感和负载阻抗,避免了优化结果陷入局部最优进而提高了系统的传输效率。然而这些算法的收敛速度和收敛精度表现一般,对参数的设置较为敏感,当约束条件复杂时很难找到全局最优解。张智娟等<sup>[13]</sup>通过有限元仿真优化了限定尺寸下的线圈结构,但并未把多个参数同时考虑到,且仿真时间长与计算量偏大。Hu 等<sup>[14]</sup>对水下无线电能传输系统应用非支配排序遗传算法对耦合机制进行多目标优化,得到帕累托前沿解集,提高了系统的传输效率和功率密度。虽然该算法在许多优化问题中表现优越,但其计算复杂度较高,在面对非常大规模的优化问题时,其优化效率仍有待改进。

基于上述研究,针对当前无线电能传输系统的参数优化不够全面及使用的算法优化效果一般使得系统传输效率不高的问题。本文采用遗传模拟退火算法对系统进行优化设计,考虑到了线圈匝数、半径、传输距离、负载阻值和谐振频率对系统传输效率的影响。仿真结果表明,相较于传统的遗传算法,遗传模拟退火算法结合了遗传算法的全局搜索能力和模拟退火算法的局部跳跃能力从而可以有效的找到系统的最优参数。从而使无线电能传输系统处于最佳运行状态,提高了系统的传输效率。

## 1 系统的等效电路模型

系统有多种谐振补偿网络,本文采用 LCL-S 型补偿拓扑结构,在发射端利用 LCL 型补偿结构,接收端利用 S 型补偿结构。当系统处于谐振工作状态下可以实现输出电压不随负载变动而改变<sup>[15]</sup>,因此该谐振补偿网络被广泛使用在轨道交通无线充电<sup>[16]</sup>、无人机无线充电<sup>[17]</sup>、大功率无线充电设备中。LCL-S 型电路拓扑结构如图 1 所示。图 1 中  $U_m$  为输入电压,  $L_3$  为电感,  $I_m$  为输入电流,  $I_1$  和  $I_2$  分别为发射线圈电流和接收线圈电流,  $C_1$  是发射端线圈补偿电容,  $C_2$  是接收端线圈补偿电容,  $L_1$  为发射线圈的自感,  $L_2$  为接收线圈的自感,  $M$  为发射线圈与接收线圈之间的互感,  $R_1$  为发射线圈的寄生电阻,  $R_2$  为接收线圈的寄生电阻,  $R_L$  为电路的等效负载。

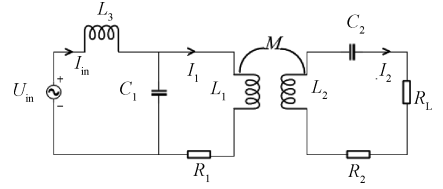


图 1 LCL-S 型电路拓扑结构

Fig.1 LCL-S Type circuit topology

根据 LCL-S 结构等效电路,由基尔霍夫电压定律 (KVL) 可列方程为:

$$\begin{cases} \dot{U}_m - j\omega L_3 \dot{I}_m - (j\omega L_1 + R_1) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 = 0 \\ Z_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

接收端等效阻抗  $Z_2$  为:

$$Z_2 = R_L + R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (2)$$

把接收端阻抗等效到发射端线圈支路上阻抗  $Z_r$  为:

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \quad (3)$$

则系统的输入阻抗  $Z_{in}$  为:

$$Z_{in} = j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L_1 + Z_r + R_1}} \quad (4)$$

在磁耦合谐振式无线电能系统中为提高传输效率需要使系统处于谐振状态中电路为纯阻性电路,即:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_1}} \quad (5)$$

$$j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = 0, j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} = 0 \quad (6)$$

当发射端电路参数满足式(5)时,此时可推导出  $L_1 = L_3$ ,则系统的输入阻抗可以化简为:

$$Z_{in} = \frac{L_1}{(Z_r + R_1)C_1} = \frac{L_3}{(Z_r + R_1)C_1} = \frac{L_1}{(Z_r + R_1)C_1} \quad (7)$$

通过式(7)可以计算出电路的输入电流  $I_m$ ,再结合式(1)可计算出流过发射线圈的电流  $I_1$ ,即:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{Z_{in}}, I_m = \frac{U_m C_1 (Z_r + R_1)}{L_1} \quad (8)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_m - j\omega L_3 \dot{I}_m}{j\omega L_1 + (Z_r + R_1)}, I_1 = \frac{U_m}{j\omega L_1} \quad (9)$$

此时在接收线圈产生的电压为:

$$U_o = j\omega M I_1 = \frac{M}{L_1} U_m \quad (10)$$

由式(10)可以得出系统的输出功率,再由式(2)、(3)和式(8)可得系统的输入功率,即:

$$P_o = I_o^2 R_L = \frac{U_o^2 R_L}{(R_L + R_2)^2} = \frac{M^2 U_m^2 R_L}{L_1^2 (R_L + R_2)^2} \quad (11)$$

$$P_{in} = U_m I_m = \frac{U_m^2 [R_1 (R_L + R_2) + \omega^2 M^2]}{\omega^2 L_1^2 (R_L + R_2)} \quad (12)$$

最后,由式(11)和(12)可以得到系统的传输效率为:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{[R_1(R_L + R_2) + \omega^2 M^2](R_L + R_2)} \quad (13)$$

由式(13)可以看出无线电能传输系统的效率不仅与负载阻值大小有关,还与线圈的内阻与线圈间的互感  $M$  以及系统的工作频率有关。本文中的发射线圈与接收线圈采用物理结构相同的两个线圈,因而发线圈与接收线圈间的互感  $M$  大小与各个参数的关系<sup>[18]</sup>为:

$$M = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{dl_1 dl_2}{h} \approx \frac{\mu_0 \pi N^2 r^4}{2(\sqrt{h^2 + r^2})^3} \quad (14)$$

式中: $r$ 为线圈的半径; $N$ 为线圈的匝数; $h$ 为两线圈间的传输距离; $\mu_0$ 为真空磁导率。

## 2 系统传输特性分析

由上述分析可知,无线电能传输系统的传输效率受多个参数的影响。当系统的补偿拓扑结构确定时,需要对其进行仿真得到合适的元件参数从而使系统的传输效率得到提高。下面将运用 Matlab 仿真软件对上述 LCL-S 型补偿结构进行分析,研究单一参数变化对传输效率的影响以及多参数变化对系统传输效率的影响。

### 2.1 单个参数影响分析

首先研究系统负载  $R_L$  阻值的变化给传输效率带来的影响。设定发射线圈与接收线圈的物理结构相同,设系统采用 220 V 电源供电、谐振频率  $f$  为 85 kHz、线圈间互感  $M$  为 150  $\mu$ H、发射线圈与接收线圈的内阻  $R_1$  和  $R_2$  大小都为 2  $\Omega$ 、负载阻值取值范围为 0~300  $\Omega$ 。通过 Matlab 仿真出负载阻值与系统传输效率的关系如图 2 所示,可以看出当系统负载阻值从较小值缓慢增加时,传输效率在快速上升至 90% 以上后达到峰值,达到峰值后传输效率会随着负载阻值的增加而缓慢减小。

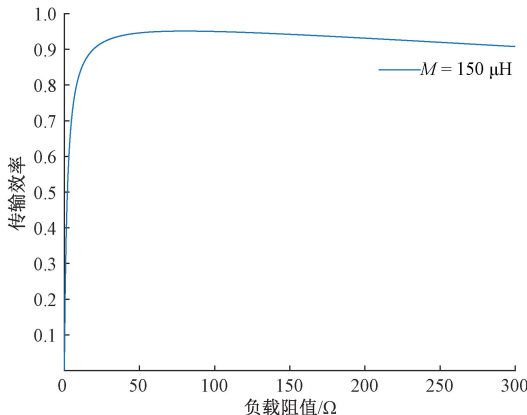


图2 传输效率与负载阻值的关系

Fig. 2 The relationship between transmission efficiency and load resistance

除了负载阻值的大小会影响系统的传输效率,系统谐振频率的变化也会引起传输效率的改变。设定系统一直处

于谐振工作状态中,负载阻值大小设定为 50  $\Omega$ ,谐振频率的变化范围为 0~120 kHz。则系统的传输效率与频率的关系如图 3 所示,从图中可以看出频率增大时,系统的传输效率先增大后趋于平缓,谐振频率超过 40 kHz 时系统的传输效率可达 90% 以上。

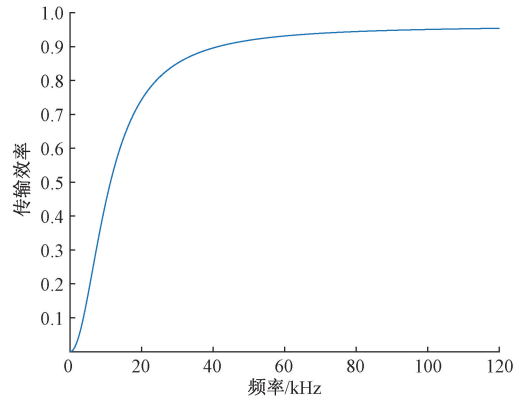


图3 传输效率与频率的关系

Fig. 3 The relationship between transmission efficiency and frequency

### 2.2 多个参数影响分析

多个参数共同作用时系统的传输效率也会发生变化。当系统的频率取值范围为 10~120 kHz,负载阻值取值范围为 0~300  $\Omega$  时,传输效率随负载阻值和频率变化的关系如图 4 所示,从图中可以看出在低频低负载阻值的情况下效率较低,高频高负载阻值时效率较高,效率最高点处在频率较高且负载阻值范围在 150~250  $\Omega$  内。

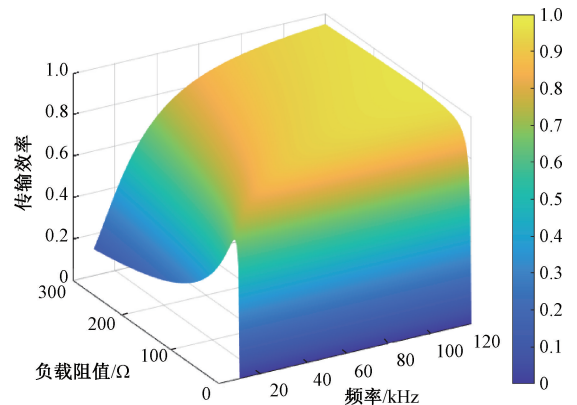


图4 传输效率与负载阻值、频率的关系

Fig. 4 The relationship between transmission efficiency, load resistance and frequency

除了负载阻值与频率会影响系统的传输效率,发射线圈与接收线圈的互感  $M$  也会影响传输效率。设定系统的谐振频率为 85 kHz,互感  $M$  的大小在 0~300  $\mu$ H 之间变化,负载的阻值在 0~300  $\Omega$  之间变化,传输效率与互感  $M$ 、负载  $R_L$  的关系如图 5 所示。在互感  $M$  较低时,传输效率增长较为明显,在  $M$  达到 100  $\mu$ H 时效率的增长较为缓慢

并趋于稳定,传输效率随着负载  $R_L$  变化先增大然后逐渐平稳,在  $100 \sim 200 \Omega$  之间效率达到最高值。

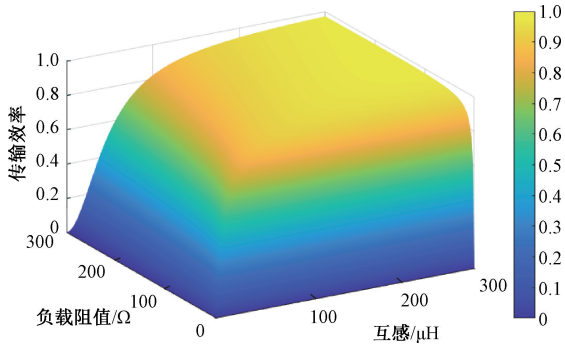


图 5 传输效率与互感、负载阻值的关系

Fig. 5 The relationship between transmission efficiency, mutual inductance and load resistance

由于系统的多个参数之间相互影响,当某个参数发生变化时会对其他参数的取值造成影响。因此,想要有效提高系统的传输效率,需要对系统的多个参数进行整体优化。而且考虑到现实的工程应用中,参数的变化是存在一定的取值范围,当对这些参数进行优化时需要对其设置约束。

### 3 基于遗传模拟退火算法系统参数优化

#### 3.1 遗传模拟退火算法介绍

遗传算法是一种全局优化算法,主要优势在于其出色的全局搜索能力且适应性强,但在精确搜索局部最优解方面表现较差。模拟退火算法在局部搜索方面表现出色,然而存在全局搜索能力和寻优速度一般的缺点。针对遗传算法和模拟退火算法存在的优缺点,本文将这两种算法的优势相结合采用遗传模拟退火算法来寻找全局最优解。遗传模拟退火算法的具体步骤如下:

##### 1) 编码与种群的初始化

染色体编码的定义是解决遗传算法问题的首要步骤,根据本文的实际需求,采用实数编码方法。实数编码方法可以表示较大范围内的数字,也可以用于较大的空间搜索,相比传统的二进制编码方式其在处理连续变量优化的问题时精度更高。因此,优化参数的染色体表示为:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] = (f, N, r, h, R_L) \quad (15)$$

在完成染色体编码后,便可以随机生成一个初始种群,生成种群中的每一个个体便是一组参数  $(f, N, r, h, R_L)$  的随机组合。

##### 2) 适应度函数

在遗传算法中,适应度函数通常是由目标函数转换而来的。当需要求解目标函数的最大值时,可以将目标函数值作为个体的适应度值,因此将式(13)所示的目标函数视为遗传算法的适应度函数。

##### 3) 选择操作

选择操作用于从当前种群中选择适应度高的个体,通

常通过轮盘赌选择、锦标赛选择等方法进行。在使用锦标赛选择策略时,每次随机从种群中挑选出  $\delta$  个适应度值较高的个体进入新群体中。

##### 4) 交叉操作

交叉操作模拟生物遗传过程中的基因重组。通过交换两个父代个体的部分基因产生新的子代个体。以两点交叉为例,它通过选择两个交叉点,将父代个体的基因片段进行交换,从而产生新的基因组合。

##### 5) 变异操作

变异操作是指通过将个体中的部分基因替换为该个体中的其他潜在基因变体,从而产生一个新的个体。通过变异操作可以保持物种多样性和防止早熟收敛,而且能够探索交叉操作未能触及的解空间区域,从而增强算法的全局搜索能力。

##### 6) 模拟退火操作

模拟退火的核心思想是通过逐渐降低“温度”来控制搜索过程的范围,本文使用指数退火法进行温度递减。温度衰减函数为:

$$T_{i+1} = k \times T_i \quad (16)$$

式中:  $T_{i+1}$  为第  $i+1$  次迭代的系统温度;  $k$  为降温系数;  $T_i$  为第  $i$  次迭代的系统温度。

在模拟退火算法中,为了避免算法陷入局部最优解,应用 Metropolis 准则来判断是否用新个体取代当前个体。Metropolis 准则如下:

$$P = \begin{cases} 1, & \eta_{\text{new}} \geq \eta_{\text{current}} \\ \exp\left(\frac{\eta_{\text{new}} - \eta_{\text{current}}}{T_i}\right), & \eta_{\text{new}} < \eta_{\text{current}} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P$  是当前个体被新个体取代的概率;  $\eta_{\text{new}}$  表示新生成个体的效率;  $\eta_{\text{current}}$  表示当前个体的效率。因此,当新解更优时直接接受新解。当新解较差时以较小的概率接受它,从而保持探索的多样性,尤其在高温时更容易接受。随着温度的下降,接受较差解的概率逐步降低,逐步收敛到最优解。

#### 3.2 遗传模拟退火算法的应用

在无线电能传输系统中,将工作频率  $f$ 、线圈匝数  $N$ 、线圈半径  $r$ 、线圈间距离  $h$ 、负载阻值  $R_L$  作为影响系统传输效率的优化变量,并将适应度函数定义为系统传输效率。LCL-S 补偿结构适应度函数为:

$$\text{Max}(f) = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{[R_1(R_L + R_2) + \omega^2 M^2](R_L + R_2)} \quad (18)$$

其中,

$$M = \frac{\mu_0 \pi N^2 r^4}{2(\sqrt{h^2 + r^2})^3} \quad (19)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (20)$$

$$s. t. \begin{cases} 20 \leq f \leq 120 \\ 10 \leq N \leq 30 \\ 0.1 \leq r \leq 0.25 \\ 0.05 \leq h \leq 0.3 \\ 5 \leq R_L \leq 35 \\ R_1 = R_2 = 2 \\ \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \end{cases} \quad (21)$$

遗传模拟退火算法的求解流程图如图 6 所示,具体的实现过程将在 Python 软件编写程序来计算出结果。首先种群初始化规模为 200,迭代次数设定为 200,计算种群适应度函数值来进行选择、交叉、变异操作,其中交叉率为 0.8,发生变异的概率设为 0.02。然后进行模拟退火操作,模拟退火算法中的初始温度为 100,终止温度为 5,降温系数为 0.99。最后若满足算法的终止条件则输出最优解结束计算,否则返回计算种群的适应度继续计算迭代。

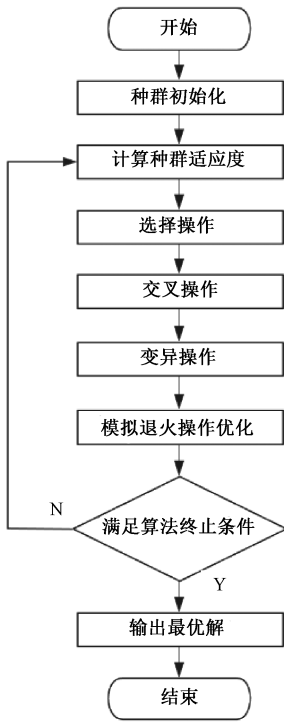


图 6 遗传模拟退火算法求解流程图

Fig. 6 Genetic simulated annealing algorithm solution flow chart

### 4 仿真结果分析

在 Python 中编写了遗传模拟退火算法程序来仿真分析。为了验证遗传模拟退火算法优化的有效性,将把使用遗传算法优化与使用遗传模拟退火算法优化来对比。在仅使用遗传算法计算得到的参数最优值为[98 kHz、25、0.191 m、0.133 m、34 Ω],即工作频率为 98 kHz,线圈的匝数为 25,线圈的半径为 0.191 m,发射线圈与接收线圈间的距离为 0.133 m,负载阻值为 34 Ω 时无线电能传输系统的传输效率达到最大。遗传算法的适应度曲线如图 7 所示。当使用

遗传模拟退火算法计算得到的参数最优值为[103 kHz、28、0.216 m、0.053 m、34 Ω],系统传输效率最大。遗传模拟退火算法的适应度曲线如图 8 所示。

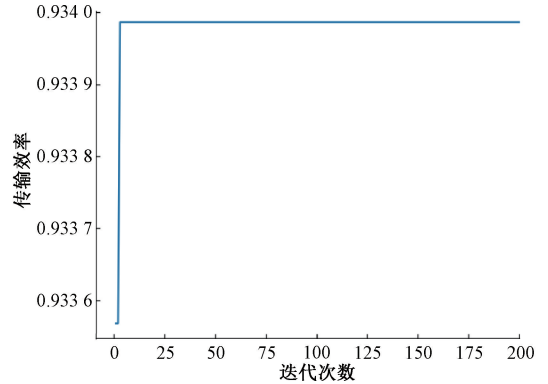


图 7 遗传算法适应度曲线

Fig. 7 Genetic algorithm fitness curve

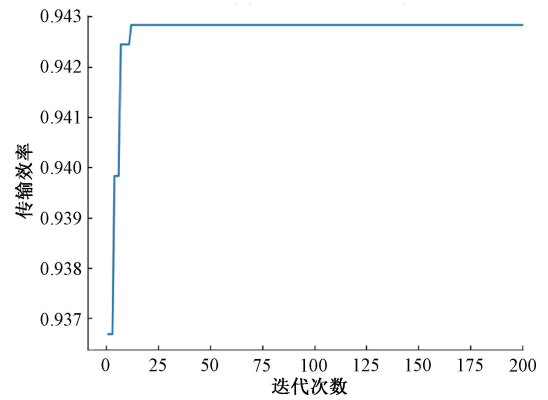


图 8 遗传模拟退火算法适应度曲线

Fig. 8 Genetic simulated annealing algorithm fitness curve

通过图 7 可以观察到,遗传算法在迭代次数到达第 3 次时便收敛了输出了最优解,此时系统的传输效率约为 93.40%。从图 8 可以看出,遗传模拟退火算法在迭代初期具备较强的全局搜索能力,系统的传输效率快速增大。一旦锁定到局部最优范围后,算法能够迅速收敛至全局最优解,当迭代次数达到 13 次时,系统的传输效率稳定在 94.27%。由此证明,遗传模拟退火算法能够有效地对系统参数进行优化以提高无线电能传输系统的传输效率。

### 5 结 论

本文基于电路互感耦合理论,对 LCL-S 型补偿结构的无线电能传输系统建立了完整的数学模型。在 Matlab 中分析了无线电能传输系统中工作频率、线圈间互感、负载阻值对系统传输效率的影响,为系统优化设计提供了理论依据。由于传统的优化算法无法达到最佳效果,本文将遗传算法的优点与模拟退火算法的优点相结合来对影响系统传输效率的参数进行优化,得到最优解对应的参数值,此时系统的最高传输效率达到 94.27%。最后在 Python 中对遗

传算法和遗传模拟退火算法进行仿真,仿真结果显示采用遗传模拟退火算法能够有效地优化系统的传输效率至最佳状态,这对实际应用中无线电能传输系统的效率优化具有重要的应用价值和理论参考意义。后续研究中,可以利用其他算法的思想对遗传模拟退火算法进行进一步改进,同时对无线电能传输系统的效率优化结合更多的实际情况作进一步的完善。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨林,耿直,王萌,等.基于 S-CC 补偿的恒压型无线充电系统研究[J].国外电子测量技术,2022,41(7):101-105.  
YANG L, GENG ZH, WANG M, et al. Research on constant voltage wireless charging system based on S-CC compensation[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(7): 101-105.
- [3] 于天琦,李建贵,王琛,等.锂电池充电用可切换串联混合拓扑 WPT 系统[J].电子测量技术,2023,46(21):1-6.  
YU T Q, LI J G, WANG CH, et al. Switchable series hybrid topology WPT system for lithium battery charging [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(21): 1-6.
- [4] 苏玉刚,钱林俊,刘哲,等.水下具有旋转耦合机构的电场耦合无线电能传输系统及参数优化方法[J].电工技术学报,2022,37(10):2399-2410.  
SU Y G, QIAN L J, LIU ZH, et al. Underwater electric field coupled wireless power transmission system with rotating coupling mechanism and parameter optimization method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (10): 2399-2410.
- [5] 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 grid-type solenoid coil single-tube inverter wireless power transmission system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (12): 161-174.
- [6] 张献,韩大稳,沙琳,等.一种共享磁通多耦合模式的无线电能传输系统抗偏移方法[J].电工技术学报,2022,37(21):5359-5368.  
ZHANG X, HAN D W, SHA L, et al. Anti-bias method for wireless power transmission system with shared flux multi-coupling mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (21): 5359-5368.
- [7] 刘扬靖,曹彪.锥形线圈无线电能传输特性优化[J].电子测量技术,2022,45(19):12-18.  
LIU Y J, CAO B. Optimization of wireless power transfer characteristics of conical coils[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(19): 12-18.
- [8] 王猩.磁谐振无线电能传输系统优化设计方法[J].黑龙江电力,2022,44(4):307-312.  
WANG X. Optimization design method of magnetic resonance wireless power transmission system [J]. Heilongjiang Electric Power, 2022, 44(4): 307-312.
- [9] PROSEN N, DOMAJNKO J. Optimization of a circular planar spiral wireless power transfer coil using a genetic algorithm[J]. Electronics, 2024, 13(5): 978.
- [10] DU Y, WANG J L, LU J G. Optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer based on improved whale optimization algorithm[J]. Journal of Industrial Intelligence, 2023, 1(1): 63-74.
- [11] 李星灿,王琪,杨飞.磁耦合谐振式无线电能传输功效优化研究[J].国外电子测量技术,2022,41(6):99-104.  
LI X C, WANG Q, YANG F. Research on efficiency optimization of magnetically coupled resonant wireless power transmission[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(6): 99-104.
- [12] 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 CH L, PAN ZH X, ZHAI X F, et al. Parameter optimization of wireless charging system based on improved particle swarm algorithm [J]. Electric Drive, 2023, 53(3): 64-69.
- [13] 张智娟,郑龙飞,杨瑞.限定尺寸的无线电能传输线圈优化设计[J].科学技术与工程,2021,21(9):3626-3632.  
ZHANG ZH J, ZHENG L F, YANG R. Optimal design of wireless power transmission coils with limited size[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3626-3632.
- [14] HU Q, ZHENG M L, LI Z F, et al. Multi-objective optimization study on the coupling mechanism of underwater wireless power transfer systems [J]. Machines, 2024, 12(7): 445.
- [15] 张海平,何志琴,徐凌桦,等.LCL-S型ICPT系统输出电压特性分析与设计[J].实验室研究与探索,2020,39(1):140-144.  
ZHANG H P, HE ZH Q, XU L H, et al. Analysis and design of output voltage characteristics of LCL-S type ICPT system [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(1): 140-144.
- [16] 乐文韬,吕卓,刘华东.轨道交通无线电能传输效率研究[J].控制与信息技术,2020(6):35-41.  
LE W T, LYU ZH, LIU H D. Research on the efficiency of wireless power transmission in rail transit[J]. Control and Information Technology, 2020(6): 35-41.
- [17] 宋立业,姜钧.电力巡检无人机无线充电线圈场效应分析及优化[J].制造业自动化,2023,45(3):58-62,69.  
SONG L Y, JIANG J. Field effect analysis and optimization of wireless charging coil for power inspection drones [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(3): 58-62,69.
- [18] 马艺林,李锐华,胡波.电动汽车无线充电系统磁耦合线圈结构的多目标优化设计[J].电机与控制应用,2022,49(6):53-59.  
MA Y L, LI R H, HU B. Multi-objective optimization design of magnetic coupling coil structure for electric vehicle wireless charging system[J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(6): 53-59.

## 作者简介

吴金龙,硕士研究生,主要研究方向为无线电能传输技术。

E-mail: 2021980353@qq.com

唐小波(通信作者),副教授,博士,主要研究方向为电网规划、智能电网、分布式发电等。

E-mail: xiaobotang@126.com