

磁耦合谐振式无线电能传输系统参数优化

王亚晓 王鹏坤

(西安工业大学机电工程学院 西安 710021)

摘要: 针对磁耦合谐振式无线电能传输系统在设计过程中不同的参数选择会对系统的输出功率和传输效率造成较大影响,难以对二者进行兼顾,提出了一种改进型多目标麻雀搜索算法(IMOSSA)用于系统的参数设计。首先,构建了LCC-S型电路拓扑结构的数学模型,并对与系统输出功率和传输效率相关的关键参数进行了深入分析。在此基础上,确立了以输出功率和传输效率为优化目标,以工作频率、负载阻值和传输距离为优化参数的目标函数。为提升算法性能,提出了3种改进策略对传统多目标麻雀搜索算法(MOSSA)进行改进,并基于此对目标函数进行了寻优。仿真结果显示,与MOSSA算法和NGSA-II算法相比,IMOSSA算法得到的解集在评价指标上具有显著优势。在设定的权重系数下,IMOSSA算法能够实现更高的输出功率和传输效率。最后,通过仿真模型对优化参数进行了仿真验证,证实了其可行性。

关键词: 磁耦合谐振式;无线电能传输系统;改进型麻雀搜索算法;参数优化

中图分类号: TM724;TN751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Parameter optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system

Wang Yaxiao Wang Pengkun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In the design process of magnetically coupled resonant wireless power transfer systems, different parameter selections significantly affect the system's output power and transmission efficiency, making it challenging to balance the two. This paper proposes an improved multi-objective sparrow search algorithm (IMOSSA) for optimizing system parameters. First, a mathematical model of the LCC-S circuit topology is constructed, and an in-depth analysis of the key parameters related to system output power and transmission efficiency is conducted. Based on this, an objective function is established with output power and transmission efficiency as the optimization goals, and working frequency, load resistance, and transmission distance as the optimization parameters. To enhance the algorithm's performance, three improvement strategies are proposed to refine the traditional multi-objective sparrow search algorithm (MOSSA), and optimization of the objective function is carried out accordingly. The simulation results demonstrate that, when compared to the MOSSA and NGSA-II algorithms, the solution set obtained by the IMOSSA algorithm demonstrates significant advantages in evaluation metrics. Under the specified weight coefficients, the IMOSSA algorithm achieves higher output power and transmission efficiency. Finally, the optimized parameters are validated through simulation models, confirming their feasibility.

Keywords: magnetically coupled resonant; wireless power transfer system; improved sparrow search algorithm; parameter optimization

0 引言

近年来,随着无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术的快速发展,其已广泛应用于电动汽车、医疗

器械和家用电器等领域^[1-3]。其中,磁耦合谐振式无线电能传输(magnetic resonance coupling wireless power transfer, MRC-WPT)因其具有较长的传输距离且传输效率较高,成为了研究的热点。MRC-WPT系统通过利用相

同谐振频率的线圈之间产生的共振,实现能量从发射端到接收端的高效传输^[4]。

在无线电能传输系统中,系统的输出功率和传输效率是衡量系统性能的重要指标。文献[5]以输出功率为优化目标,实现了对 WPT 系统最大功率点的快速跟踪,但未考虑最大功率点跟踪时的传输效率。文献[6]通过推导线圈传输效率与线圈品质因数的关系,并利用粒子群算法对线圈的内阻和互感参数进行了优化;文献[7]考虑了频率、传输距离、负载阻值 3 个参数对系统传输效率的影响,得到了最优解对应的参数值。虽然这些研究对提升系统的传输特性有深入研究,但是都只对传输效率或输出功率单一目标进行优化,导致系统无法得到同时平衡传输效率与输出功率的最优解,因此系统的传输效率和输出功率难以同时达到目标要求。文献[8]考虑了负载两端电压对于功率和效率的影响,提出了一种同时实现功率分配和效率最大化的优化方法,但未研究频率、线圈间距对于系统性能的影响。

针对上述研究的不足,本文通过建立 LCC-S 型耦合机构的电路等效模型,推导出输出功率和传输效率与系统各参数之间的数学关系,并据此建立了多目标优化数学模型。为优化耦合机构参数,本文采用改进型多目标麻雀搜索算法(improved multi-objective sparrow search algorithm, IMOSSA),以实现系统传输效率和输出功率的同时最优。

1 LCC-S 型补偿电路模型

无线电能传输系统的补偿拓扑有多种类型,常用的基本结构包括 SS 型、SP 型、PS 型和 PP 型。为了获得更优的输出特性,LCC、LCL、LLC 和 CLC 等复合型补偿拓扑得到了广泛研究^[9-11]。本文采用了 LCC-S 型补偿拓扑,相较于 SS 型等基本补偿拓扑,LCC-S 型具有更强的抗偏移能力,并且在负载变化时能够实现电压的恒定输出。LCC-S 型电路拓扑结构如图 1 所示。

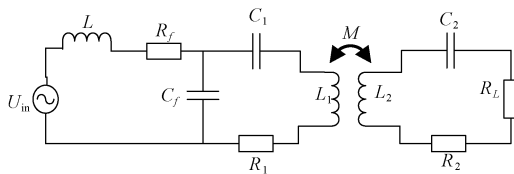


图 1 LCC-S 型电路拓扑结构

Fig. 1 Topology diagram of LCC-S type circuit

其中, R_1 、 R_2 、 C_1 、 C_2 、 L_1 、 L_2 分别为发射端和接收端的线圈寄生内阻、补偿电容、线圈自感, U_{in} 为输入电压, C_f 为发射侧并联补偿电感, L_f 为发射侧补偿电感, R_f 为补偿电感内阻, R_L 为等效负载, M 为发射侧线圈与接收侧线圈之间的互感。

接收电路侧阻抗为:

$$Z_s = R_2 + R + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 \quad (1)$$

式中: ω 为系统的谐振频率。

将接收侧映射到发送侧,得到等效电路如图 2 所示。

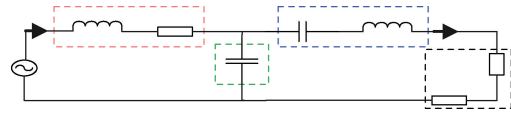


图 2 LCC-S 型发射侧等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of LCC-S emission side

等效到发射侧的反射电阻为:

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

根据基尔霍夫定律建立系统的数学模型:

$$\begin{bmatrix} U_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{eq} \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$A_{11} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}$$

$$A_{12} = \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_2}$$

$$A_{21} = \frac{1}{Z_2}$$

$$A_{22} = \frac{Z_2 + Z_3}{Z_2}$$

$$Z_1 = R_f + j\omega L_f$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_f}$$

$$Z_3 = \omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

由此可得系统的输入阻抗为:

$$Z_{in} = \frac{A_{11} Z_{eq} + A_{12}}{A_{21} Z_{eq} + A_{22}} \quad (4)$$

其中:

$$Z_{eq} = Z_r + R_1$$

由式(1)~(4)推导可得系统的输入功率为:

$$P_{in} = \frac{U_{in}^2 |A_{21} Z_{eq} + A_{22}|}{|A_{11} Z_{eq} + A_{12}|} \quad (5)$$

系统的输出功率为:

$$P_{out} = \frac{(\omega M)^2 U_{in}^2 R_L}{|Z_s (A_{11} Z_{eq} + A_{12})|^2} \quad (6)$$

系统的传输效率为:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\omega M)^2 R_L}{|(A_{11} Z_{eq} + A_{12})(A_{21} Z_{eq} + A_{22}) Z_s|^2} \quad (7)$$

圆形螺旋线圈轴向放置时的互感经验公式为:

$$M = \frac{\pi \mu_0 N_1 N_2 (r_1 r_2)^2}{2(h^2 + r_1^2)^{1.5}} \quad (8)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率,取值 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^{-2}$;

N_1 和 N_2 为线圈匝数; r_1 和 r_2 为线圈半径; h 为传输距离。

2 系统传输特性定性分析

由式(6)~(8)可知,系统的传输功效与多个参数相关,采取控制变量法研究不同参数变化时对系统输出功效的影响。系统的仿真参数如表1所示。

表1 仿真电路参数

Table 1 Simulation Circuit Parameters

电路参数	数值
收发侧线圈内阻 $R_{1,2}$	0.1Ω
收发侧线圈电感 $L_{1,2}$	$30 \mu\text{H}$
收发侧补偿电容 $C_{1,2}$	$440 \mu\text{F}/337 \mu\text{F}$
发射端并联补偿电容 C_f	$1\ 447 \mu\text{F}$
发射端补偿电感 L_f	$7 \mu\text{H}$
线圈半径 $r_{1,2}$	0.2 m
线圈匝数 $N_{1,2}$	28

2.1 工作频率对输出功效的影响

在负载阻值为 10Ω 、传输距离为 15 cm 时系统输出功效关于工作频率的变化曲线如图3所示。

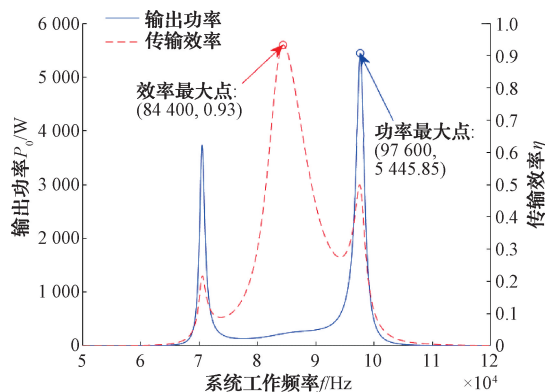


图3 输出功效关于系统工作频率的特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of output efficiency with respect to system operating frequency

由图3可知,随着系统工作频率的增加,系统的输出功效均有多个极值点,当工作频率进一步增大时都呈现下降趋势,输出功率与传输效率的最大值点不在同一工作频率下取得。从图3中选取系统的工作频率范围为 $60 \sim 110 \text{ kHz}$ 。

2.2 负载阻值对输出功效的影响

工作频率为 80 kHz 、传输距离为 0.15 m 时输出功效关于负载阻值的变化曲线如图4所示。

由图4可知,当负载阻值较小时,系统输出功效随着负载阻值的增大而上升,继续增加负载的阻值,传输效率

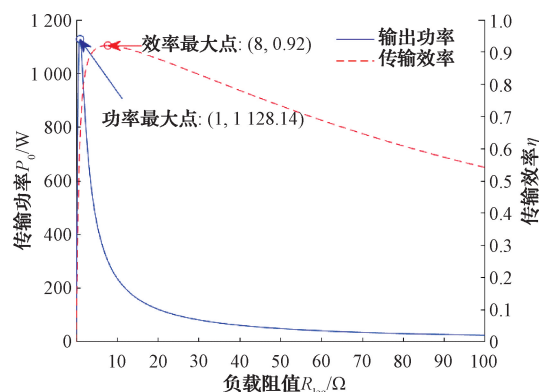


图4 输出功效关于负载阻值的特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of output efficiency with respect to load resistance

逐渐下降,输出功率快速下降;系统最佳功率和最佳效率在不同负载阻值下取得。从图4中选取负载阻值的范围为 $1 \sim 50 \Omega$ 。

2.3 传输距离对输出功效的影响

工作频率为 80 kHz 、负载阻值为 10Ω 时输出功效关于传输距离的变化曲线如图5所示。

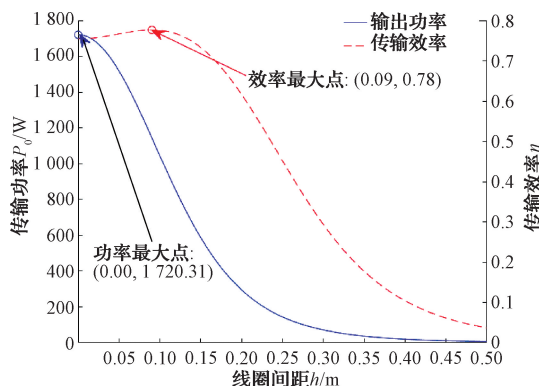


图5 输出功效关于传输距离的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of output efficiency with respect to transmission distance

由图5可知,当传输距离增大时输出功率逐渐减小,系统传输效率随着传输距离的增加缓慢增大,当传输距离继续增大时,线圈之间的耦合程度减弱,系统传输效率急剧下降,输出功率和传输效率在不同的传输距离处达到最大值。从图5中选取传输距离范围为 $0 \sim 0.4 \text{ m}$ 。

2.4 优化模型的建立

当系统的某一个参数变化时,会对系统传输效率和输出功率产生不同的影响,这些影响可能是相互冲突的,导致系统输出功率与传输效率无法同时达到最优。因此,优化以提高无线电能传输系统的传输效率和输出功率为目标,以工作频率、负载阻值和传输距离为优化参数,最终确定的系统多目标优化模型如下:

$$\begin{cases} \text{Max}(P) = \frac{(\omega M)^2 U_{in}^2 R_L}{|Z_s(A_{11}Z_{eq} + A_{12})|^2} \\ \text{Max}(\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\omega M)^2 R_L}{|(A_{11}Z_{eq} + A_{12})(A_{21}Z_{eq} + A_{22})Z_s|^2} \\ \text{s. t. } \begin{cases} 60 < f < 110 \\ 0 < h < 0.4 \\ 1 < R_L < 50 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

3 改进型多目标麻雀搜索算法

由上述分析可知,无线电能传输系统的输出功率和传输效率受到多个因素的共同影响。本文采用改进型多目标麻雀搜索算法对影响系统输出功率和传输效率的工作频率、负载阻值和传输距离 3 个参数进行寻优,找到系统的最佳参数。

3.1 多目标麻雀搜索算法(MOSSA)

麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是Xue等^[12]受麻雀觅食行为和反捕食行为的启发而提出的一种智能优化算法。MOSSA 算法遵循了麻雀搜索算法的基本原理,共有 3 种类型的麻雀组成,分别为发现者、加入者和侦察者。发现者负责寻找食物,为种群提供觅食区域信息;加入者会追随发现者寻找食物,为了提高自身的捕食率,加入者通常会争夺高摄取量同伴的食物资源;侦察者发现捕食者时会发出警报信号,发现者带领加入者前往安全区域。

发现者更新公式如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot \text{iter}_{\max}}\right), & R < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L, & R \geq ST \end{cases} \quad (10)$$

式中: t 是当前的迭代次数; $\text{iter}_{\max}$ 是最大迭代次数; $X_{i,j}^t$ 是第 t 次迭代时第 i 个麻雀在第 j 维的位置; α 是 0~1 之间的随机数; R 是预警值,在 $[0,1]$ 之间; ST 是安全值,在 $[0.5,1]$ 之间; Q 是一个服从正态分布的随机数; L 是个 $1 \times d$ 的全为 1 的矩阵。当 $R < ST$ 时代表种群附近没有捕食者,可以安全觅食;当 $R \geq ST$ 时代表种群附近存在捕食者,所有麻雀需要向安全区域移动。

加入者更新公式如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(-\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: X_p^{t+1} 是第 $t+1$ 次迭代后的最佳位置; X_{worst} 是全局最差位置; A 是一个 $1 \times d$ 的矩阵,每个元素随机赋值 1 或 -1,且 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。当 $i > n/2$ 时,代表第 i 个加入者正在挨饿,需要前往其他区域进行觅食。

侦察者更新公式如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta |X_{i,j}^t - X_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \cdot \left(-\frac{|X_{i,j}^t - X_{\text{worst}}^t|}{(f_i - f_w) + \epsilon}\right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (12)$$

式中: X_{best}^t 是侦察者第 t 次迭代后的最佳位置; β 是步长控制参数; K 是 $[-1,1]$ 之间的随机数; f_g 和 f_w 分别是全局最优值和全局最差值; ϵ 是一个极小的常数,保证分母不为 0。

每次迭代后得到的新的解,将此解与存储库中的非支配解进行对比实现寻优。对于发现者的选取中使用轮盘赌的方式,超立方体选取的概率为:

$$P_i = \frac{a}{G_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

式中: a 为一个 >1 的常数; G 为每个超立方体内粒子数量。选择拥挤度较低的超立方体中的粒子作为发现者,避免出现聚集现象,引领其他麻雀朝着食物的方向靠近。针对 MOSSA 存在的收敛速度慢和后期寻优速度不足的问题,本文提出了改进型麻雀搜索算法。

3.2 改进型 MOSSA 算法

1) 精英反向学习策略

MOSSA 算法确定初始种群时采取的时随机初始化的策略,能够有效避免陷入局部最优,但是会使得算法的收敛速度降低^[13]。精英反向学习策略通过构造出反向解,减少对最优解的依赖,使得初始种群更具有随机性,提高了算法的全局搜索能力,使算法具有更好的收敛速度。

假设 $X_i' = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij})$ 是在第 t 次迭代中第 i 只麻雀在第 j 维空间的一个解,反解为 $(X_i')^t$,适应度函数为 $F(x)$,则当 $F((X_i')^t) < F(X_i^t)$ 时,称 X_i' 为精英个体;当 $F((X_i')^t) > F(X_i^t)$ 时,称 X_i' 为普通个体。

$$(X_i')^t = K \cdot (\alpha_j + \beta_j) - X_{i,j}^t \quad (14)$$

式中: K 为 $[0,1]$ 之间的随机数; α_j 和 β_j 分别为精英个体的上下边界。

2) 改进发现者的位置更新策略

在 MOSSA 算法中,当 $R < ST$ 时, $y = \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot \text{iter}_{\max}}\right)$ 的函数图像如图所示,其中 $\text{iter}_{\max}$ 取值为 1 000。

由图 6 可知,当迭代次数从 i 增加到 $\text{iter}_{\max}$ 时, $\exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot \text{iter}_{\max}}\right)$ 的取值范围逐渐变小,使得发现者的每一维值都在减小,减少了探索种群的多样性,导致丢失部分最优解。为了提高算法的搜索能力和效率,使算法前期具有更大的搜索范围,中后期局部搜索能力更强,使用黄金正弦算法^[14]对发现者位置更新公式进行改进:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot |\sin(r_1)| - r_2 \cdot \sin(r_1) \cdot |x_1 D_i^t - x_2 X_{i,j}^t|, & R < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L, & R \geq ST \end{cases} \quad (15)$$

$$x_1 = a \cdot (1-t) + b \cdot t \quad (16)$$

$$x_2 = a \cdot t + b \cdot (1-t) \quad (17)$$

式中: t 为黄金分比率 $\frac{\sqrt{5}-1}{2}$; $a = -\pi$; $b = \pi$; x_1, x_2 为黄金分割系数; D_i^t 是第 i 只麻雀在第 t 次迭代时的最佳位置; r_2 为 $[0, 2\pi]$ 之间的随机值; r_1 为 $[0, \pi]$ 之间的随机值。

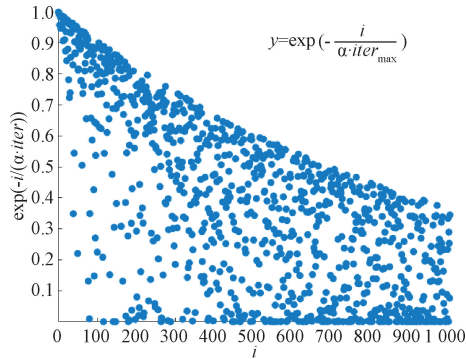


图6 $y = \exp(-i/(\alpha \cdot iter_{\max}))$ 的函数值图像

Fig. 6 Function value graph of $y = \exp(-i/(\alpha \cdot iter_{\max}))$

使用黄金正弦算法改进发现者的位置更新策略解决了算法前期搜索范围逐渐变小造成的部分最优解丢失和陷入局部最优的问题,提高了算法的搜索速度和优化结果的准确性。

3) 改进加入者的位置更新策略

在加入者跟随发现者靠近最优捕食区域时会造成种群的聚集,从而造成算法陷入局部最优。本文通过在加入者位置更新公式中引入一个随着迭代次数变化的权重因子 λ ,使得加入者在跟随发现者进行位置更新的同时,也有一定的搜索能力,降低了最有位置对加入者的影响,避免了算法陷入局部最优。为提高加入者搜索范围的随机性,本文采取 ICMIC 混沌映射生成相关参数。ICMIC 混沌映射如下:

$$x_{i+1} = \sin\left(\frac{a}{x_i}\right) \quad (18)$$

其中, a 的取值范围为 $[0, +\infty]$ 。

ICMIC 混沌映射分布与随机映射分布如图 7 所示。

可以看出 ICMIC 混沌映射的随机数随机性和均匀性更好,可以使加入者的随机范围更广。

改进后的加入者位置更新公式如下:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(-\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{L} \cdot \lambda \cdot \cos(2\pi k), & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

$$\lambda = m + (n - m) \left(\frac{i}{iter_{\max}} \right) \quad (20)$$

式中: m 为初始权重系数,取值为 0.9; n 为最终权重系数,取值为 0.4; k 为混沌映射中的一个随机数。引入的权重因子随着迭代次数的增加而增大,算法前期加入者以螺旋式进行范围搜索并靠近发现者,可以在最优个体周围搜索更优值。若发现更优值则加入者转化为发现者,并进行位置更新;在算法后期,权重系数变大,加入者加速向最优

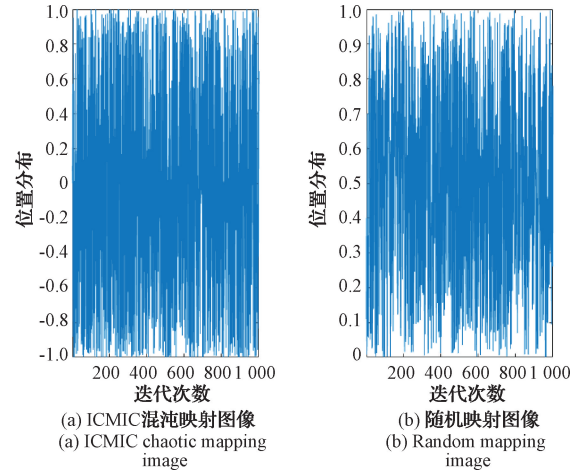


图7 ICMIC 混沌映射和随机映射位置分布对比

Fig. 7 Comparison of position distribution between ICMIC chaotic mapping and random mapping

值靠近,提升系统的搜索精度和速度。

4) 算法流程

改进后的算法流程如图 8 所示。

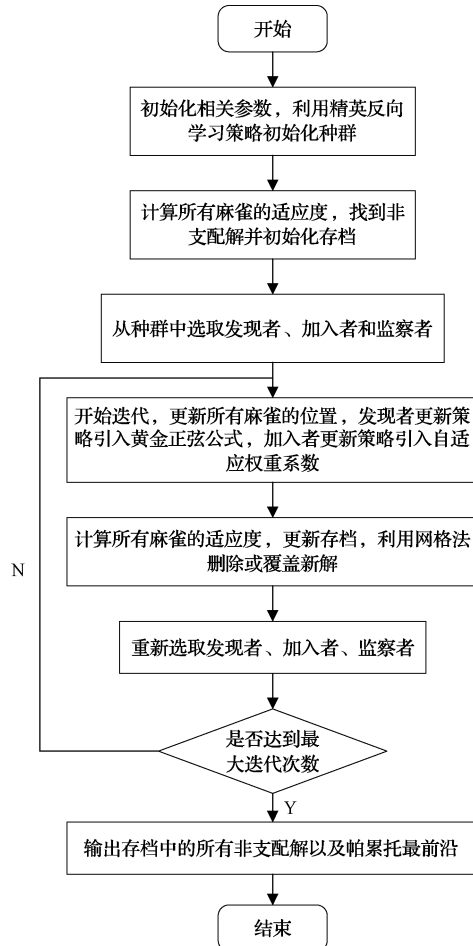


图8 IMOSSA 算法流程

Fig. 8 IMOSSA algorithm flowchart

4 优化结果与分析

4.1 评价指标

1) 超体积(HV)指标

超体积是一种用于多目标优化问题的指标,用于评估解集的优劣。通过计算目标空间中由解集和参考点共同确定的区域的体积,可以比较不同解集的覆盖范围和多样性。

$$HV = \delta(U_{i=1}^{|S|} v_i) \quad (21)$$

式中: δ 表示 Lebesgue 测度; $|S|$ 表示非支配解集的数目; v_i 表示参照点与解集中第 i 个解构成的超体积。HV 值越大说明覆盖范围越大,解集越好。

2) 反转世代距离(IGD)

反转世代距离是 Pareto 前沿上的点到非支配解集的平均距离。IGD 的值越小,说明算法的性能越好,计算公式如下:

$$IGD = \frac{\sum_{y \in PF} d(y, x)}{|PF|} \quad (22)$$

式中: PF 是 Pareto 前沿上的点集, $|PF|$ 表示最优解集中解的个数; x 表示算法获得的解集; $d(y, x)$ 表示 y 到 x 的最小欧氏距离。

4.2 测试结果与分析

为验证改进后算法的寻优能力,本文将以无线电能传输电路建立的数学模型为优化函数,对 IMOSSA 算法与 MOSSA 算法和快速精英多目标遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms-II, NSGA-II)算法进行对比。设置3种算法的初始种群大小为200,最大迭代次数为100;NSGA-II算法的遗传交叉概率为0.8,变异概率为0.1。运行结果如图9所示。

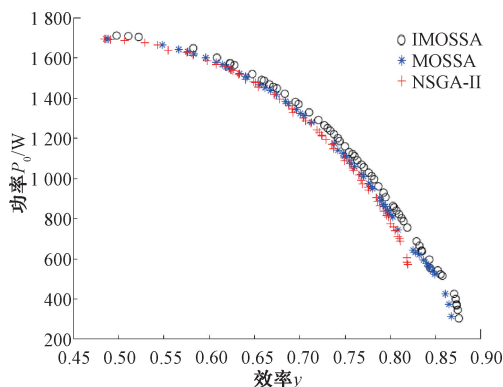


图9 3种算法的 Pareto 解集

Fig. 9 Pareto solution sets for three algorithms

由于系统的输出功率和传输效率拮抗的关系,随着输出功率的增加,系统传输效率逐渐降低。由于优化目标为输出功率和传输效率的同时最大,故可以看出 IMOSSA 算法的 Pareto 解集相较于 MOSSA 算法和 NSGA-II 算法的解集更好,因此优化后的麻雀搜索算法寻优能力更强。

将算法分别运行30次取平均值,得到的评价指标的

值如表2所示。

表2 评价指标均值

Table 2 Mean of evaluation indicators

指标	IMOSSA	MOSSA	NSGA-II
HV	4.298×10^{-1}	3.61×10^{-1}	3.509×10^{-1}
IGD	7.196×10^{-1}	2.139	5.367

从 HV 指标中可以看出,IMOSSA 算法的效果最好,其 HV 均值明显大于其他两种算法,而 MOSSA 算法和 NSGA-II 算法的 HV 均值相差不大,说明 IMOSSA 算法具有更好的综合性能。

从 IGD 指标中可以看出,IMOSSA 的 IGD 指标为 7.196×10^{-1} 最小,其次是 MOSSA,NSGA-II 的 IGD 指标最大,说明 IMOSSA 算法的收敛性和多样性最好,其次是 MOSSA,NSGA-II 的性能最差。

4.3 优化结果的选取

优化算法得到的 Pareto 解集为一系列无法相互比较优劣的解的集合,为了兼顾输出功率与传输效率,需要从 Pareto 解集中选取最佳的解。

本文通过加权法对最优解进行选取。

$$y = w_1 \frac{y_1}{y_{1\max}} + w_2 \frac{y_2}{y_{2\max}} \quad (23)$$

式中: w_1 、 w_2 分别是两个目标函数的权重系数; y_1 、 y_2 为目标函数值; $y_{1\max}$ 、 $y_{2\max}$ 为目标函数解集中的最大值。对每个目标值进行归一化处理,用对应的参数进行加权,对比所有的 Pareto 解,选择 y 值最大的 Pareto 解。

在设计无线电能传输系统时,在保证输出功率足够时,系统应具有更高的传输效率,故本文设置的输出功率权重为0.2,传输效率权重为0.8^[15]。得到系统的最佳参数值及其对应的输出值如表3所示。

表3 带有权重下的参数最优值及对应输出值

Table 3 Optimal values of parameters with weights and corresponding output values

参数	IMOSSA	MOSSA	NSGA-II
f/kHz	62	60	61
h/m	0.15	0.17	0.17
R/Ω	6.4	5.7	5.8
P_0/W	1 056.01	939.18	1 040.05
$\eta/\%$	79.15	77.09	76.96

由表3可知,在设定权重下 IMOSSA 算法寻优参数对应的函数值均优于 MOSSA 和 NSGA-II 的寻优参数的结果,输出功率分别提升了12.45%和1.53%,传输效率分别提升了2.68%和2.84%。

4.4 仿真结果验证

表1参数结合4.3节得到的数据建立 MATLAB/Simulink 电路仿真模型进行仿真验证。仿真模型如图10所示。

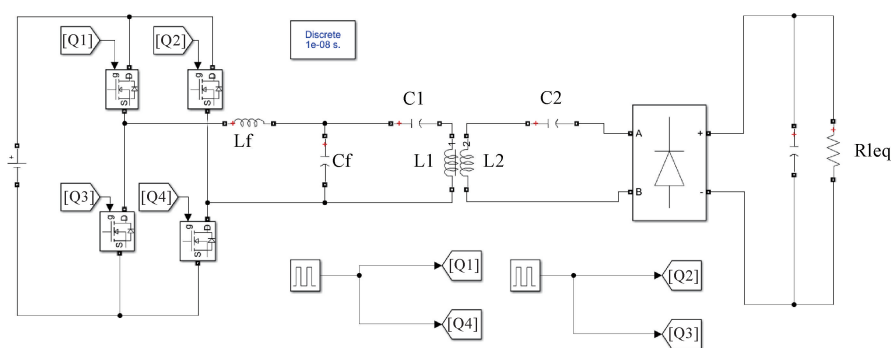


图 10 电路仿真模型
Fig. 10 Circuit simulation model

将表 3 中不同算法优化后的参数进行仿真,得到的传输效率和输出功率如表 4 所示。

表 4 不同算法的传输效率与输出功率的理论值与仿真值

Table 4 Theoretical and simulated values of transmission efficiency and output power for different algorithms

算法	仿真 P_o/W	仿真 $\eta/\%$
IMOSSA	1 021.78	79.337
MOSSA	916.42	77.525
NSGA-II	1 013.89	77.036

从表 4 可以看出,仿真结果与理论结果相一致,IMOSSA 算法优化得到的最优解对应的传输效率和输出功率均要优于 MOSSA 算法与 NSGA-II 算法。

根据 IMOSSA 寻优后得到的最佳参数在 Maxwell 中对线圈模型进行建模,结合 MATLAB/Simulink 进行联合仿真,对 1 ms 时线圈周围的磁场强度进行分析,得到的仿真图像如图 11 所示。

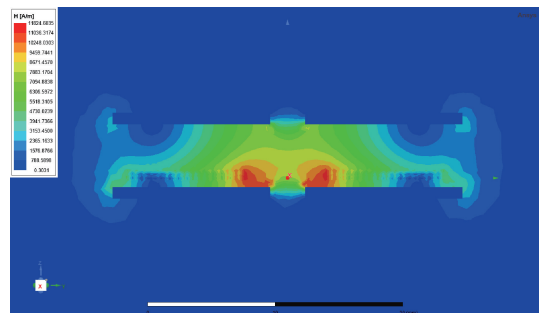


图 11 线圈周围磁场分布
Fig. 11 Distribution of magnetic field around the coil

从图 11 可以看出,由 IMOSSA 算法优化后的参数建立的系统仿真模型,在发射线圈和接收线圈之间建立起了强耦合,可以实现能量从发射端到接收端的高效传输。

5 结 论

本文针对磁耦合谐振式无线电能传输系统参数设计

复杂的问题,采用了 IMOSSA 算法对系统参数进行了寻优。首先,通过建立 LCC-S 型拓扑结构的电路模型,并推导出其数学模型,深入分析了系统的输出功率和传输效率与工作频率、负载阻值和传输距离之间的关系,并在此基础上构建了多目标优化模型。针对 MOSSA 算法的不足,本文提出了 3 项改进策略:1)使用精英反向学习策略优化初始种群;2)引入黄金正弦算法改进发现者的位置更新策略;3)采用随机步长改进加入者的位置更新策略。改进后的算法应用于多目标寻优,并与 MOSSA 算法和 NSGA-II 算法进行了对比分析。研究表明,在指定的权重系数下,IMOSSA 算法在收敛速度和优化精度方面均优于 MOSSA 和 NSGA-II 算法。最后,本文搭建了联合仿真实验平台,对优化结果进行了验证。实验结果表明,使用 IMOSSA 算法优化后得到的数据能够实现发射端与接收端之间的高效能量传输,成功实现了在大功率传输条件下保持系统高传输效率的目标。

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 Y, XIAO J Y, ZHAO X L, et al. Overview of the development and application of wireless energy transmission technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(2): 48-67.

[2] 范兴明,高琳琳,莫小勇,等.无线电能传输技术的研究现状与应用综述(英文)[J].电工技术学报,2019, 34(7): 1353-1380.
FAN X M, GAO L L, MO X Y, et al. Review of research status and application of radio energy transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1353-1380.

[3] 李建坡,李烁,王一钧,等.磁耦合谐振式无线电能传输技术研究综述[J].电测与仪表,2024,61(8): 1-11.
LI J P, LI SH, WANG Y J, et al. Review of

- research on magnetic coupled resonant radio energy transmission technology [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(8): 1-11.
- [4] WANG Y, SONG J, LIN L, et al. Research on magnetic coupling resonance wireless power transfer system with variable coil structure[C]. 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2017: 1-6.
- [5] 赵越, 沈艳霞. 基于改进粒子群优化算法的无线电能传输系统最大功率点跟踪[J]. *信息与控制*, 2021, 50(1): 113-118, 128.
ZHAO Y, SHEN Y X. Maximum power point tracking for radio power transmission system based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Information and Control*, 2021, 50(1): 113-118, 128.
- [6] 余庆昌, 李浩然, 朱玉玉. 磁耦合谐振式无线充电线圈的优化方法研究[J/OL]. *电源学报*, 1-14 [2024-10-24].
YU Q CH, LI H R, ZHU Y Y. Research on optimization method of magnetically coupled resonant wireless charging coil [J/OL]. *Journal of Power Supply*, 1-14 [2024-10-24].
- [7] 焦宇峰, 李锐杰, 宋国兵. 磁耦合谐振无线传输系统传输特性的研究及优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 112-120.
JIAO Y F, LI R J, SONG G B. Research and optimization of transmission characteristics of magnetic coupling resonant wireless transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 112-120.
- [8] 陈晓平, 刘岩. 多负载磁耦合谐振无线电能传输系统能效分析与优化[J]. *电气技术*, 2022, 23(4): 37-41.
CHEN X P, LIU Y. Efficacy analysis and optimization of multi-load magnetically coupled resonant wireless power transfer system [J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(4): 37-41.
- [9] 程靖宜, 武小兰, 白志峰. 基于耦合系数估计的电动汽车无线电能传输最大效率跟踪[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(3): 180-186.
CHENG J Y, WU X L, BAI ZH F. Maximum efficiency tracking of wireless power transmission for electric vehicles based on coupling coefficient estimation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(3): 180-186.
- [10] 张红辉. MCR-WPT 系统补偿结构设计及其传输特性建模分析[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(17): 23-26.
ZHANG H H. Design of compensation structure and modeling and analysis of transmission characteristics of MCR-WPT system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(17): 23-26.
- [11] 徐佳毅, 李洪宇, 谢子铭, 等. 面向最优效率的潜标耦合电能传输系统[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 75-82.
XU J Y, LI H Y, XIE Z M, et al. Optimal efficiency coupled electrical energy transmission system for AUVs[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4): 75-82.
- [12] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm [J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [13] 钱敏, 黄海松, 范青松. 基于反向策略的混沌麻雀搜索算法[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(8): 333-339, 487.
QIAN M, HUANG H S, FAN Q S. Chaotic sparrow search algorithm based on reverse strategy [J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(8): 333-339, 487.
- [14] ERKAN T, DEMIR G. Golden sine algorithm: A novel math-inspired algorithm [J]. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2017(17): 71-78.
- [15] 黄文聪, 张凤顺, 胡滢, 等. 基于 IMOGWO 算法的无线电能传输系统参数优化[J/OL]. *控制工程*, 1-9 [2024-10-21].
HUANG W C, ZHANG F SH, HU Y, et al. Parameter optimization of the radio energy transmission system based on the IMOGWO algorithm [J/OL]. *Control Engineering*, 1-9 [2024-10-21].

作者简介

王亚晓, 副教授, 主要研究方向为计算机辅助精密测量、机电系统设计与控制。

E-mail: 461696704@qq.com

王鹏坤, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输。

E-mail: 2016658537@qq.com