DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.275 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统参数优化

魏曙光(中国电源学会会员)，许非凡，李嘉麒，袁 东
(中国人民解放军陆军兵种大学，北京 100072)

摘要：无人平台具有体积小、成本低、无需载员操作等优势，广泛应用于各类军事任务中。目前，无人平台主要以电能作为能源，其对可靠电能传输方式的需求不断增大，在人员无法参与、充电接口不适配、充电流程效率低等场合，有线充电或更换电池存在弊端，无法满足无人平台对电能传输的需求。针对无人平台无线电能传输需求设计系统结构，并基于该结构提出了一种基于粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法的参数优化方法。通过对无人平台无线电能传输系统补偿电路、耦合线圈、储能器件结构及特性进行分析，提出系统参数优化数学模型的优化目标及功率、效率、电流 3 个方面的约束条件，设计基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统参数优化方法的算法流程。通过算法仿真与样机实验相结合的方法进行验证，结果表明，提出的基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统参数优化方法能够降低系统输出电压和功率、效率随负载电阻和耦合系数变化的波动幅度，提高无人平台无线电能传输系统的鲁棒性和环境适应性。

关键词：无线电能传输；LCC/S 补偿电路；参数优化方法；粒子群优化算法

Parameter Optimization of Wireless Power Transfer System Based on PSO Algorithm for Unmanned Platforms

WEI Shuguang, *Member*, *CPSS*, XU Feifan, LI Jiaqi, YUAN Dong
(Army Arms University of PLA, Beijing 100072, China)

Abstract: The unmanned platforms have the advantages of small size, low cost and no man-carrying operation, and are widely used in various military missions. At present, the unmanned platforms mainly use electric energy as power source, and their demand for reliable power transmission methods is increasing. In the cases where personnel cannot participate, the charging interfaces are not suitable, and the charging process is low in efficiency, wired charging or battery replacement has drawbacks, which cannot meet the demand for electric power transmission of the unmanned platforms. The system structure is designed to meet the requirements of unmanned platforms wireless power transfer, and based on this structure, a parameter optimization method based on particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed. By analyzing the structure and characteristics of the compensation circuit, coupling coil and energy storage device of the unmanned platform wireless power transfer system, the optimization objectives of the mathematical model of the system parameter optimization and the constraints of power, efficiency and current are proposed, and the algorithm flow of the parameter optimization method of the unmanned platform wireless power transfer system based on PSO algorithm is designed. The results show that the proposed optimization method based on PSO algorithm can reduce the fluctuation amplitude of the output voltage, power and efficiency with the load resistance and coupling coefficient change, and improve the robustness and environmental adaptability of the unmanned platform wireless power transfer system.

Keywords: Wireless power transfer; LCC/S compensation topology; parameter optimization method; particle swarm optimization (PSO) algorithm

收稿日期：2024-03-11；**修回日期**：2024-04-06，2024-04-17；
录用日期：2024-05-02；**网络首发日期**：2024-05-13

随着国防科技的不断发展，无人平台因其体积小、成本低、无需载员操作等优势，已广泛应用于

情报获取、监视、侦察、运输与后勤、排雷、安置简易爆炸装置、提供火力支援等多种军事任务中，并可应用于通信中转、医疗转移等多种任务场合[1-2]。随着无人平台电气设备和电力装置的快速进步，为满足其遂行多样化战斗任务的需求，无人平台对电能质量、功率等级及可靠电能传输方式的需求均不断增大[3]，尤其是长时间、跨域、野外等任务场景下，无人平台可靠电能传输技术对提升平台续航能力、增强任务载荷能力、拓宽平台间能源交互渠道提供了有力支撑。

当前，无人平台通常采用有线充电或更换电池的方式补充电能，这些方式需要人员协助完成且存在一定的安全隐患[4]，极大地降低了无人平台的自主性和环境适应性，而且在人员无法参与、充电接口不适配、充电流程效率低等场合，有线充电或更换电池难以满足无人平台对电能传输的需求，具体如下。

(1)无人平台在执行无人值守、边境巡逻、战场侦察等任务时，通常不需要作战人员参与，在这种情况下，无法通过人工连接充电线的方式补充电能；在遭遇敌核生化打击的环境下，人员也无法下车给无人平台进行有线充电。

(2)无人平台上用电设备种类繁多，不同设备充电接口的电气特性和机械结构不尽相同，有线充电需要满足充电线专用、接口适配的条件，在无合适充电线的情况下，即使有电能也无法充电，通用性较差。

(3)无人平台通常采用集群作战，当需要充电的无人平台数量较多时，人员采用有线充电的方法步骤烦琐、流程复杂、充电效率低。

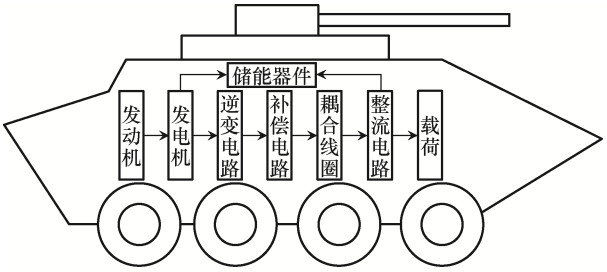
基于有线电能传输技术存在的上述缺陷，该方式不能实现无人平台的最优电能传输，因此采用无线电能传输技术以进一步完善无人平台的能源交互和能源互联。磁耦合谐振式无线电能传输技术作为一种能在电能发射端和接收端相对位置发生变化的条件下，通过电磁场近场耦合实现非接触电能传输的技术，可以在米级距离下保持较高的传输效率和较大的传输功率，且传输线圈无需对准、传输双方间允许阻挡、电能传输不受环境影响，能够满足无人平台无线电能传输的需求[5]。当前对磁耦合谐振式无线电能传输系统的研究主要集中在补偿拓扑电路设计[6-8]、耦合线圈结构优化[9-13]、各类控制策略[14-18]等方面，而在系统参数优化方面的研究相对较少。文献[19]提出一种基于遗传算法的系统负载和耦合系数的识别方法，该方法无需增加额外电路，降低了电路复杂度并且减小了系统体积，但该方法识别误差较大；文献[20]针对电动汽车运行充电过程中耦合系数变化导致系统输出功率和效率降低的问题，提出一种基于加权平均效率的LCC-S 拓扑结构参数优化设计方法，该方法综合考虑了高、中、低 3 种不同耦合水平下的系统效率优化，优化后的电路参数能更好地适应系统耦合系数变化的特点，提高系统的综合效率，但该方法较为复杂；文献[21]考虑实际系统元器件应力约束和元件参数漂移的影响，建立了多目标优化模型，并基于多目标遗传算法对补偿网络参数进行优化配置，从工作模式分布、元件应力、传输效率及输出功率等多个角度分析了系统在多工作模式下运行的优缺点，优化了无线电能传输系统各工作模式下的传输性能，但该方法考虑因素过多，优化模型难以获得全局最优值。

当前对无人平台的磁耦合谐振式无线电能传输系统参数优化研究还存在误差大、复杂度高、全局寻优能力弱等问题，且需要结合无人平台在执行任务过程中相关参数的变化范围来设计适应性更好的系统参数。因此，本文提出一种无人平台磁耦合谐振式无线电能传输系统结构，该结构能够满足大多数无人平台无线电能传输的需求。在设计系统参数时，考虑到无人平台无线电能传输的特点，本文将系统的传输功率与效率作为优化目标，并根据任务需要分别赋予相应权重，选择系统运行过程中对传输功率、效率影响较大的负载电阻、耦合系数和补偿系数作为优化变量，采用多目标优化的粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法求解，仿真和实验结果验证了所提参数优化算法能有效提高无人平台无线电能传输系统对参数变化的适应性。

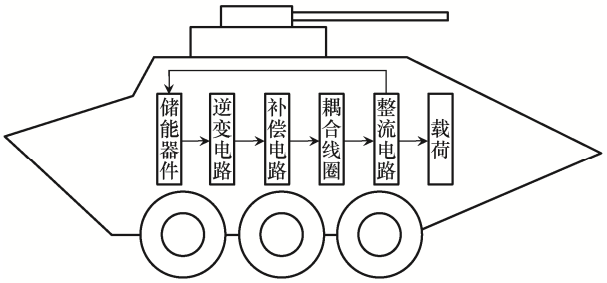
1　无人平台无线电能传输系统设计

1.1　系统整体结构

无人平台根据供电模式的不同，一般可分为自发电式和供电式 2 种，2 种无人平台无线电能传输系统的结构如图 1 所示。自发电式无人平台一般适用于大型无人平台，使用发动机-发电机组作为主要供电来源，配合动力电池和超级电容等储能元件，共同构成无人平台动力部分；供电式无人平台一般适用于小型无人平台，仅使用动力电池作为供电来源。2 种供电模式的无人平台均采用驱动电机作为平台的驱动部分，载荷部分均主要包括脉冲功率负载、恒功率负载及其他负载，系统各部分之间均使用直流母线进行连接。



(a) 自发电式无人平台



(b) 供电式无人平台

图 1　无人平台无线电能传输系统结构

Fig. 1 Structure of unmanned platforms wireless power transfer systems

无人平台车载无线电能传输系统的一般结构如图 2 所示，主要包括发射端逆变电路、补偿电路、耦合线圈、接收端整流及调压电路、控制电路 5 个部分。无线电能传输系统的发射端部署在自发电式无人平台上，接收端部署在供电式无人平台上，无线电能传输系统发射端的高频逆变电路从自发电式无人平台的直流网络上吸收电能并逆变为高频交流电，经发射端补偿电路补偿无功损耗后，通过发射线圈形成电磁场并被接收线圈接收，经接收端补偿电路补偿无功损耗后，由接收端高频整流电路整流为直流电后被供电式无人平台直流网络吸收，从而实现电能在 2 种平台之间的无线传输。在进行无线电能传输的过程中，发射端和接收端的控制电路实时检测电路参数并对系统进行控制，所使用的发射线圈和接收线圈的结构也进行过优化设计，以提高无人平台车载无线电能传输系统的适应性。

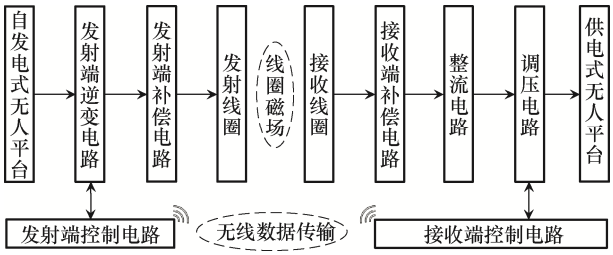


图 2　无人平台车载无线电能传输系统的整体结构

Fig. 2 Overall structure of wireless power transfer systems for unmanned platforms

1.2　补偿电路

补偿电路能够降低无人平台无线电能传输系统的无功功率，减弱系统对耦合系数、负载等参数变化的敏感性，提高系统的传输能力。针对补偿电路的研究主要包括基本补偿电路和高阶补偿电路 2 个方面，4 种基本补偿电路虽然能补偿耦合线圈的自感，但对线圈互感变化的适应性较弱；高阶补偿电路主要包括发射端和接收端均电感-电容补偿(LCL/LCL)、发射端和接收端均电感-电容-电容补偿(LCC/LCC)、发射端为电感-电容-电容补偿、接收端为串联电感补偿(LCC/S)等类型，其中，LCL/LCL 和 LCC/LCC 补偿电路均能实现负载无关的恒流输出，相比于 LCL/LCL 补偿电路，LCC/LCC 补偿电路具有更高的参数设计自由度，但补偿器件的数量较多；LCC/S 补偿电路可实现与负载无关的恒压输出，同时具有一定的参数设计自由度，且使用的补偿器件数量较少，具备良好的稳定性和适用性，适用于无人平台无线电能传输系统[22]。

LCC/S 补偿电路的结构如图 3 所示，图中：L_f 为发射端附加谐振电感；R_f 为发射端附加谐振电感

内阻；C_f为发射端谐振补偿电容；I_f为流过发射端附加谐振电感的电流；R_P为发射回路等效电阻；C_P为发射端隔直电容；C_S为接收端的谐振补偿电容；R_S为接收端等效电阻；Z_E为负载等效阻抗；U_{in}为发射端输入电压；U_E为接收端输出电压；L_P和L_S分别为发射线圈和接收线圈自感；M为线圈互感；I_P和I_S分别为流过发射线圈和接收线圈的电流；ω为谐振角频率。假设系统工作在全谐振状态，则补偿电感电容参数需满足

$$\begin{cases} \omega L_f = \dfrac{1}{\omega C_f} = \omega L_P - \dfrac{1}{\omega C_P} \\ \omega L_S = \dfrac{1}{\omega C_S} \end{cases} \tag{1}$$

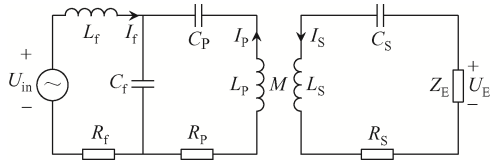


图 3 LCC/S 补偿电路结构

Fig. 3 Structure of LCC/S compensation topology

对 LCC/S 补偿电路进行交流阻抗分析，系统各支路电流为

$$\begin{cases} I_f = \dfrac{[R_P(Z_E+R_S)+\omega^2M^2]U_{in}}{R_f\omega^2M^2+(Z_E+R_S)(R_fR_P+\omega^2L_f^2)} \\ I_P = \dfrac{\omega L_f(Z_E+R_S)U_{in}}{R_f\omega^2M^2+(Z_E+R_S)(R_fR_P+\omega^2L_f^2)} \\ I_S = \dfrac{\omega^2ML_fU_{in}}{R_f\omega^2M^2+(Z_E+R_S)(R_fR_P+\omega^2L_f^2)} \end{cases} \tag{2}$$

进一步推导，得到系统输出功率的表达式为

$$P = \frac{\omega^4M^2L_f^2Z_EU_{in}^2}{[R_fR_P(Z_E+R_S)+R_f\omega^2M^2+(Z_E+R_S)\omega^2L_f^2]^2} \tag{3}$$

根据上述推导，可得到系统输出效率的表达式为

$$\eta = (\omega^4M^2L_f^2Z_E)/\{[R_P(Z_E+R_S)+\omega^2M^2]\cdot [R_fR_P(Z_E+R_S)+R_f\omega^2M^2+(Z_E+R_S)\omega^2L_f^2]\} \tag{4}$$

无人平台无线电能传输系统的补偿器件内阻R_P、R_S、R_f、输入电压U_{in}、谐振角频率ω在运行时可视为恒定，补偿电路输出端负载等效阻抗Z_E可由系统输出端负载电阻R_L计算得出。因此，由式(3)和式(4)可知，系统的输出功率和效率与负载电阻R_L、线圈互感M和谐振电感L_f有关。

定义谐振电感L_f与发射线圈自感L_P之比为补偿系数α，对于 LCC/S 补偿拓扑，L_f<L_P，补偿系数α的表达式为

$$\alpha = \frac{L_f}{L_P} \qquad 0<\alpha<1 \tag{5}$$

1.3 耦合线圈

为了设计适应无人平台无线电能传输的耦合线圈，将螺线管线圈和 DD 线圈进行叠加，文献[23]中使用 0.05 mm×1 000 股的利兹线(线径 2.4 mm)和 200 mm×200 mm×3 mm 的铁氧体磁心制作一种双层耦合线圈并对线圈参数进行优化，优化后的线圈具备良好的抗偏移、抗偏转性能，能够较好地满足无人平台无线电能传输系统对耦合线圈的需求，提出的线圈结构如图 4 所示。图 5 为耦合线圈的磁场分布云图，使用有限元仿真软件模拟无人平台运动过程中耦合线圈的磁场变化，可得耦合系数变化范围为 0.1~0.2。

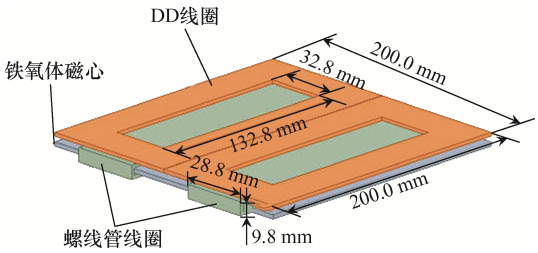


图 4 双层耦合线圈结构

Fig. 4 Structure of double-layer coupling coils

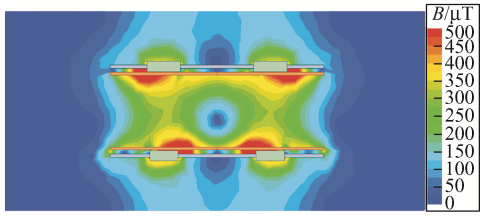


图 5 双层耦合线圈磁场云图

Fig. 5 Magnetic field distribution of double-layer coupling coils

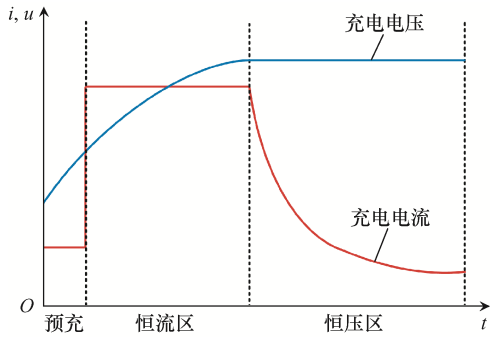
为了更好地表示耦合线圈的抗偏移、抗偏转能力，用耦合系数k来表示耦合线圈之间的耦合程度，

耦合系数 k 与线圈自感 L_P、L_S 和线圈互感 M 之间的关系为

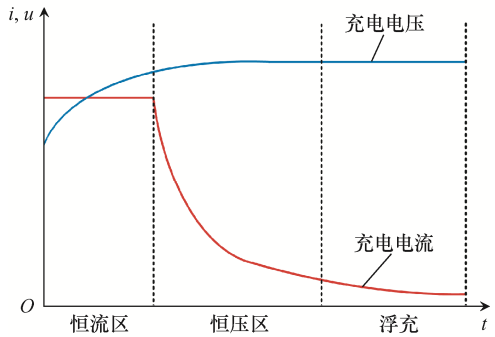
$$k=\frac{M}{\sqrt{L_P L_S}} \tag{6}$$

1.4 储能器件

无人平台在进行无线电能传输时，主要是对储能设备进行充电，储能设备主要包括锂离子电池、蓄电池和超级电容等，锂离子电池分阶段恒流-恒压充电曲线如图 6(a)所示，蓄电池分阶段恒流充电曲线如图 6(b)所示。通过对某型无人平台电池充电时内阻变化进行分析，其在正常充电电压和电流条件下，电池内阻的变化范围为 10~50 Ω。



(a) 锂离子电池



(b) 蓄电池

图 6　2 种储能设备充电曲线

Fig. 6 Charging curves of two energy storage devices

2　无人平台无线电能传输系统参数优化数学模型

通过对无人平台无线电能传输系统的输出特性进行分析，可建立如下数学模型。

2.1 优化目标

通常无线电能传输系统将系统传输功率或传输效率单独作为优化目标，考虑无人平台执行任务的需求不同，本研究将系统输出功率和效率共同作为优化目标，并根据任务需要分别赋予相应的权重，优化目标可表示为

$$\mathrm{Max}(f_{\mathrm{obj}})=mP+n\eta \tag{7}$$

式中：f_{obj} 为系统的优化目标函数；m 和 n 分别为系统输出功率 P 和效率 η 的权重系数。

2.2 约束条件

2.2.1　功率约束

无人平台在进行无线电能传输时，输出功率需要在一定范围内，若输出功率过小，则充电时间较长；若输出功率过大，会导致输出电压或电流过大，电路温度升高，使系统存在安全隐患。因此，无人平台无线电能传输系统需要满足

$$P_{\min}<P<P_{\max} \tag{8}$$

式中，$P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为系统输出功率的最小值和最大值。

2.2.2　效率约束

对于无人平台无线电能传输系统，影响系统效率的因素较多，例如，补偿器件寄生内阻、开关器件损耗、耦合线圈漏磁等。本研究主要考虑电路内阻对补偿电路效率的损耗，发射线圈内阻 R_P 和接收线圈内阻 R_S 在线圈结构确定后可使用 LCR 数字电桥测量，谐振电感内阻 R_f 随着谐振电感 L_f 的变化而变化，可通过线圈的品质因数进行计算。若系统输出效率过低，则表示电能在无线传输过程中损耗过大，因此需对无人平台无线电能传输系统的输出效率进行约束，即

$$\eta_{\min}<\eta<1 \tag{9}$$

式中，$\eta_{\min}$ 为系统输出效率的最小值。

2.2.3　电流约束

无人平台在进行无线电能传输时所用的耦合线圈通常采用利兹线和铁氧体磁心绕制，利兹线有一定的耐流等级和温度限制，若电路电流过大，会造成耦合线圈熔断等问题。因此，无人平台无线电能传输系统需要满足的电流约束为

$$I_f, I_P, I_S<I_{\max} \tag{10}$$

式中，I_{max} 为电路电流的最大值。

3 无人平台无线电能传输系统参数优化仿真及实验

本研究问题模型的求解，可视为多约束条件下的多目标优化问题，在系统功率约束、效率约束、电流约束条件下，求解优化目标函数的最大值。PSO 算法作为一种随机搜索算法，能够在多个约束条件下对多个目标进行优化，且收敛到全局最优解的概率较大[24-25]。PSO 算法能够用于无人平台无线电能传输系统的参数优化，且比传统方法具有更快的计算速度和更好的全局搜索能力。本研究提出一种基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统的参数优化方法，通过仿真与实验相结合的方法验证所提算法的可行性。

3.1 算法流程

PSO 算法是由 Eberhart 和 Kennedy 2 位学者通过研究鸟群捕食行为提出。该算法受鸟群觅食行为启发，在问题求解空间中利用群体中的个体对信息的共享，从随机解出发，通过迭代寻优，以适应度评价解的品质，使整个群体的运动产生从无序到有序的演化过程，从而获得最优解。PSO 算法具有实现容易、精度高、收敛快等优点，算法流程如图 7 所示。

步骤 1 确定无人平台无线电能传输系统参数。

根据某型无人平台无线电能传输系统设计系统参数，见表 1。表中，f 为谐振频率。

步骤 2 选择无人平台无线电能传输系统优化变量。

通过分析 LCC/S 补偿电路的传输特性可知，负载电阻 R_L、耦合系数 k 和补偿系数 α 对系统的输出功率和传输效率有显著影响。因此，在 PSO 算法中，选择上述 3 个参数作为粒子个体 $\boldsymbol{x}$ 的 3 个维度，即

$$\boldsymbol{x}=[R_L \quad k \quad a]^T \tag{11}$$

步骤 3 初始化粒子种群。

粒子种群大小设置为 100，种群迭代 500 次。对于种群中的单个粒子，粒子 3 个维度的取值范围分别为负载电阻 R_L：10~50 Ω，耦合系数 k：0.1~0.2，补偿系数 α：0~1。

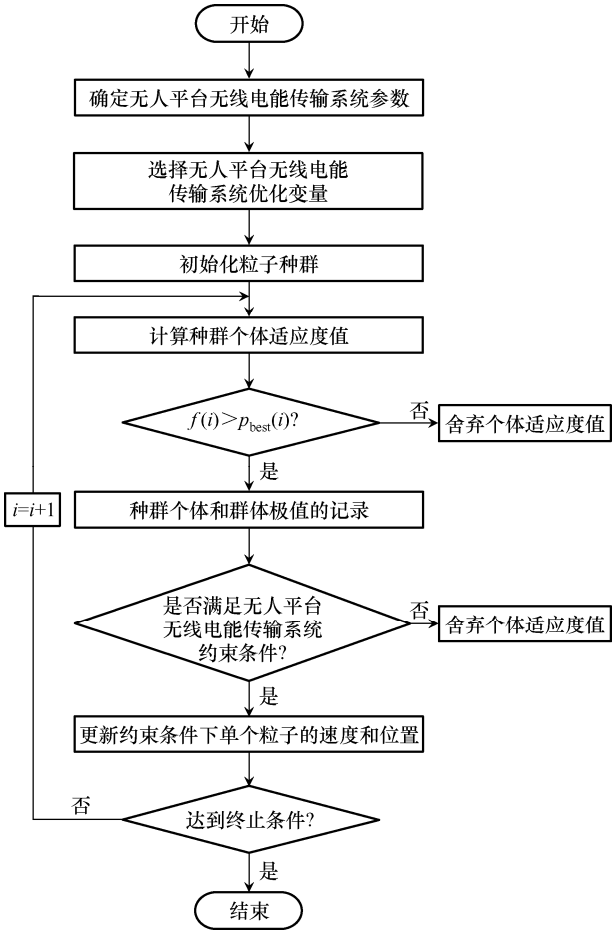


图 7 PSO 算法流程

Fig. 7 Flowchart of PSO algorithm

表 1 无人平台无线电能传输系统参数

Tab. 1 Parameters of wireless power transfer systems for unmanned platforms

参数	数值
U_{in}/V	100
L_P/μH	214.3
R_P/Ω	0.19
f/kHz	85
L_S/μH	352.3
R_S/Ω	0.26

步骤 4 计算个体适应度。

根据无人平台无线电能传输系统的数学模型，利用优化目标函数构造了粒子的适应度函数，计算

每个粒子的适应度值。

步骤 5 个体和群体极值的记录。

随着种群的不断迭代，根据个体参数计算系统的输出功率和效率，并根据适应度函数计算每个个体的适应度。对于每个粒子 i，将其适应度值 $f(i)$ 与当前极值 $p_{best}(i)$进行比较。如果 $f(i)>p_{best}(i)$，则用 $f(i)$更新 $p_{best}(i)$。同理，计算种群适应度 g_{best} 的极值。

步骤 6 判断是否满足无人平台无线电能传输系统约束条件，并更新约束条件下单个粒子的速度和位置。

无人平台无线电能传输系统的参数优化需要考虑一定的约束条件，更新种群个体的速度和位置时，需要计算更新个体的适应度和当前参数下系统的输出功率、效率和各支路电流。如果系统参数不在约束条件范围内，则舍弃该条件下个体的适应度值。

步骤 7 判断终止条件。

判断粒子种群是否达到最大迭代次数。如果达到最大迭代次数，则终止 PSO 算法，并输出参数优化结果。否则，返回步骤 4 继续进行种群迭代。

3.2 仿真分析

根据某型无人平台无线电能传输系统设计仿真参数。系统输入电压 U_{in}=100 V，谐振频率 f=85 kHz；最小输出功率 P_{min}、最大输出功率 P_{max} 和最小输出效率 η_{min} 分别为 100 W、1 000 W 和 80%；通过传输线圈的最大电流 I_{max}=5 A。实验中，发射线圈和接收线圈的相对位置动态变化，耦合系数在 0.1~0.2 之间变化。充电过程中无人平台储能电池内阻随充电过程不断变化，实验中可通过接收端电子负载调节，负载电阻 R_L 在 10~50 Ω 之间变化。根据补偿系数选择合适的谐振电感，通过式(1)计算谐振电容，在适应度函数中，系统的输出功率 P 和效率 η 的权重系数分别为 1 和 1 000。在 PSO 算法模型中，惯性权重参数 ω_0、个体学习系数 c_1 和全局学习系数 c_2 分别设为 1、1.5 和 2.0。种群规模设为 100，粒子种群迭代 500 次。种群的适应度函数变化曲线如图 8 所示。

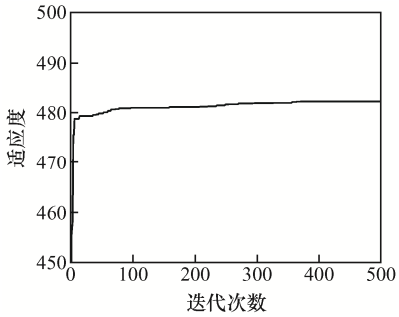


图 8　种群适应度变化曲线

Fig. 8 Curves of population fitness

当粒子种群迭代到 350 代时，种群适应度函数的值达到最大且趋于稳定，其值为 482.32。在此条件下，LCC/S 补偿电路的参数为：L_f=42.45 μH，C_P=20.40 nF，C_S=9.95 nF，C_f=82.58 nF。当无人平台无线电能传输系统耦合系数为 0.194、负载电阻为 31.68 Ω 时，系统的输出功率和效率的理论值分别为 491.12 W 和 98.23%。

3.3 实验验证

为验证所提无人平台无线电能传输系统参数优化方法的可行性，设计了包含 2 组参数的无线电能传输系统样机 G_1 和 G_2，第一组参数使用所提参数优化算法进行计算，第二组参数使用常规方法进行计算。2 组实验样机参数见表 2，其他系统参数与系统仿真相同。

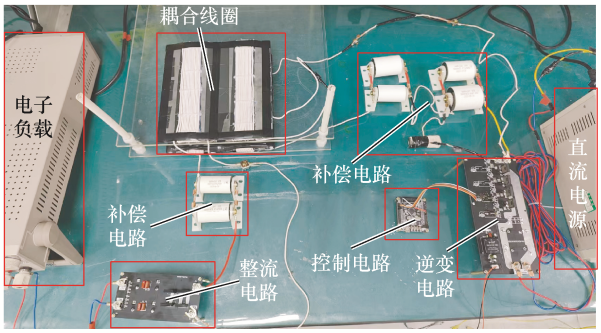
表 2　2 组实验样机参数

Tab. 2 Parameters of two experimental prototypes

样机	参数	数值
G_1	L_{f1}/μH	42.45
	C_{P1}/nF	20.40
	C_{S1}/nF	9.95
	C_{f1}/nF	82.58
G_2	L_{f2}/μH	21.43
	C_{P2}/nF	18.18
	C_{S2}/nF	9.95
	C_{f2}/nF	163.60

2 组参数的无线电能传输系统样机除了补偿电感和电容的参数不同外，其余器件完全相同，实验样机如图 9(a)所示。耦合线圈使用 1.3 节提到的双

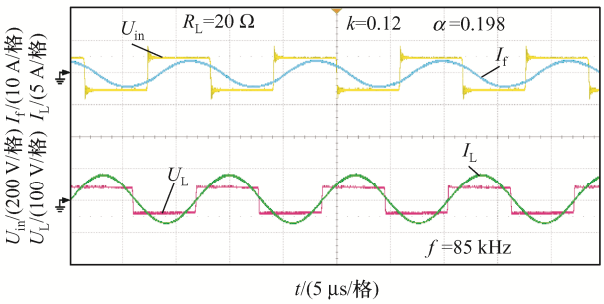
层耦合线圈，可通过调整发射线圈和接收线圈间的相对位置来调节线圈耦合系数，其结构如图 9(b)所示。实验中，使用程控直流电源作为系统的输入电压源；逆变电路由单片机控制，由直流电源供电；使用数字示波器、电压探头、电流探头检测电路电压、电流波形；输出负载使用可编程直流电子负载，便于模拟储能器件充电时的负载变化，示波器波形如图 9(c)所示，其中，U_L 和 I_L 分别为负载两端的电压和流过的电流。



(a) 实验样机



(b) 耦合线圈



(c) 实验波形

图 9 实验样机及结果

Fig. 9 Experimental prototypes and results

无人平台无线电能传输系统输出电压和功率随负载电阻和耦合系数的变化曲线分别如图 10 和图 11 所示。

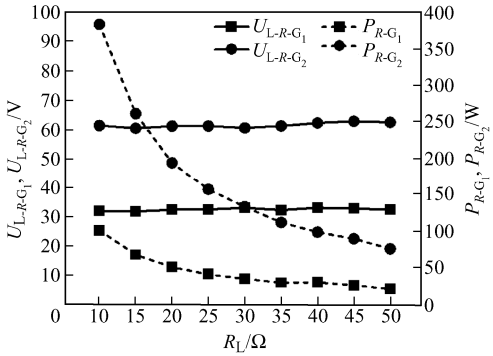


图 10 2 组参数系统输出电压和功率随负载电阻变化曲线

Fig. 10 Curve of system output voltage and power change with load resistance for G_1 and G_2

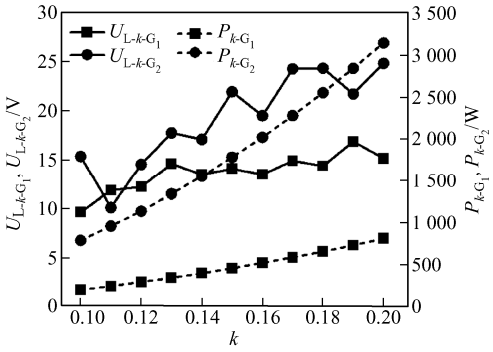


图 11 2 组参数系统输出电压和功率随耦合系数变化曲线

Fig. 11 Curve of system output voltage and power change with coupling coefficient for G_1 and G_2

图 10 描述了 G_1 和 G_2 系统负载电压和输出功率随负载电阻变化的趋势。随着负载电阻 R_L 从 10 Ω 增大到 50 Ω，G_2 的输出电压较高但波动较大，波动率为 1.27%；G_1 的输出电压较低且波动较小，波动率为 1.25%。G_1 和 G_2 的系统输出功率均随负载电阻的增大而逐渐减小，G_1 的输出功率波动率为 53.30%，G_2 的输出功率波动率为 56.10%，G_1 输出功率波动率小于 G_2。

G_1 和 G_2 系统负载电压和输出功率随耦合系数变化的趋势如图 11 所示，G_1 和 G_2 的系统输出电压和输出功率均随着耦合系数的增大整体呈上升趋势，输出电压波动率分别为 13.46%和 40.26%，输出功率波动率分别为 23.46%和 40.24%，G_1 输出电压和输出功率随耦合系数变化的波动率均小于 G_2 输出电压和输出功率的波动率。

G_1 和 G_2 系统的补偿电路效率和系统效率的实验结果见表 3。实验样机运行过程中，系统逆变电

表 3　2 组参数系统补偿电路效率和系统效率实验结果

Tab. 3 Experimental results of compensation topology and system efficiency for two experimental prototypes

R_L/Ω	补偿电路效率/%		系统效率/%		k	补偿电路效率/%		系统效率/%	
	G_1	G_2	G_1	G_2		G_1	G_2	G_1	G_2
10	93.93	93.51	92.89	90.80	0.11	93.08	91.58	90.84	89.65
15	93.06	92.48	92.01	88.77	0.12	93.09	91.82	91.27	89.81
20	91.61	90.80	90.20	89.62	0.13	93.12	92.43	91.57	89.96
25	90.82	90.68	88.69	86.60	0.14	93.24	92.71	91.91	90.43
30	89.48	89.41	88.38	84.00	0.15	93.29	92.73	92.32	90.82
35	87.91	86.82	86.60	83.67	0.16	93.33	92.81	92.58	90.95
40	86.52	86.14	84.12	81.96	0.17	93.38	93.13	92.81	91.11
45	84.96	84.55	83.23	81.25	0.18	93.65	93.36	92.88	91.60
50	83.71	83.28	81.61	78.62	0.19	93.90	93.47	93.60	91.87
波动率/%	3.79	3.81	4.24	4.61	波动率/%	0.38	0.78	1.09	1.23

路和整流电路均存在损耗，系统在运行过程中会产生热损耗，且理论推导未考虑电容内阻及补偿器件的参数畸变，因此系统效率略低于补偿电路效率，二者均明显低于理论值，但满足效率约束条件。由表 3 可知，随着负载电阻 R_L 的增大，G_1 和 G_2 的系统补偿电路效率和系统效率均逐渐降低，且 G_1 的波动率小于 G_2；随着耦合系数 k 的增大，G_1 和 G_2 的系统补偿电路效率和系统效率均逐渐升高，且 G_1 的波动率小于 G_2。

上述实验结果表明，相较于采用传统计算方法得到的 G_2 的参数，采用本文所提基于 PSO 算法的无线电能传输系统参数优化方法得到的 G_1 的参数对负载电阻和耦合系数的变化具有更好的适应性，在负载电阻和耦合系数变化时，输出电压、输出功率和系统效率的波动率均较小，能够满足无人平台无线电能传输系统的工作需求。

4　结语

为了使无人平台无线电能传输系统能更好地满足任务需求，本文设计了无人平台无线电能传输系统的结构，并基于该结构提出了一种基于 PSO 算法的参数优化方法。首先对无人平台无线电能传输系统的整体结构进行叙述，再着重对补偿电路、耦合线圈、储能器件结构及特性进行分析。针对上述分析，提出了无人平台无线电能传输系统参数优化数学模型和模型的优化目标及功率、效率、电流 3 个方面约束条件。设计基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统参数优化方法的算法流程，通过算法仿真与样机实验相结合的方法，验证所提算法的可行性。实验结果表明，相比于传统系统参数的计算方法，所提基于 PSO 算法的无人平台无线电能传输系统参数优化方法能够降低系统输出电压和功率、效率随负载电阻和耦合系数变化的波动幅度，提高了无人平台无线电能传输系统的鲁棒性和环境适应性。

参考文献：

[1] 陈慧岩, 张玉. 军用地面无人机动平台技术发展综述[J]. 兵工学报, 2014, 35(10): 1696-1706.
Chen Huiyan, Zhang Yu. An overview of research on military unmanned ground vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(10): 1696-1706. (in Chinese)

[2] 江炳蔚, 魏斌, 蒋成, 等. 电力巡检机器人移动式无线充电系统分析与验证[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 360-368.
Jiang Bingwei, Wei Bin, Jiang Cheng, et al. Analysis and verification of dynamic wireless charging system for substation inspection robot [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 360-368. (in Chinese)

[3] 李嘉麒, 魏曙光, 廖自力, 等. 陆战平台全电化关键技术发展综述[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2049-2059.
Li Jiaqi, Wei Shuguang, Liao Zili, et al. Review on the

key technologies and development of all-electric land warfare platform [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10): 2049-2059. (in Chinese)

[4] 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. (in Chinese)

[5] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 磁耦合谐振无线电能传输的研究现状及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 75-82, 99.
Fan Xingming, Mo Xiaoyong, Zhang Xin. Research status and application of wireless power transfer via coupled magnetic resonances [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 75-82, 99. (in Chinese)

[6] Triviño A, González-González J M, Aguado J A. Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review [J]. Energies, 2021, 14(6): 1547.

[7] 赵争鸣, 刘方, 陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30-40.
Zhao Zhengming, Liu Fang, Chen Kainan. New progress of wireless charging technology for electric vehicles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 30-40. (in Chinese)

[8] 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, Xiao Jinyu, 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. (in Chinese)

[9] 崔淑梅, 宋贝贝, 王志远. 电动汽车动态无线供电磁耦合机构研究综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 537-554.
Cui Shumei, Song Beibei, Wang Zhiyuan. Overview of magnetic coupler for electric vehicles dynamic wireless charging [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 537-554. (in Chinese)

[10] 李阳, 石少博, 刘雪莉, 等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(z2): 389-403.
Li Yang, Shi Shaobo, Liu Xueli, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(z2): 389-403. (in Chinese)

[11] 郭海潮, 张献, 杨庆新, 等. 空间全向无线电能传输技术研究与应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 9006-9021.
Guo Haichao, Zhang Xian, Yang Qingxin, et al. Review of research and application of spatial omnidirectional wireless power transmission technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 9006-9021. (in Chinese)

[12] 徐先峰, 吴慧玲, 杨雄政, 等. 空间约束下电动汽车无线充电系统磁耦合结构优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3581-3588.
Xu Xianfeng, Wu Huiling, Yang Xiongzheng, et al. Optimization of magnetically coupled structure of wireless charging system for electric vehicles under space constraint [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3581-3588. (in Chinese)

[13] 王维, 王硕, 吕晓飞, 等. 电动船舶无线充电新型螺线管磁耦合机构设计与优化[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 247-257.
Wang Wei, Wang Shuo, Lü Xiaofei, et al. Design and optimization of novel solenoid magnetic coupler for electric boats wireless charging [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 247-257. (in Chinese)

[14] Nguyen H T, Alsawalhi J Y, Al Hosani K, et al. Review map of comparative designs for wireless high-power transfer systems in EV applications: Maximum efficiency, ZPA, and CC/CV modes at fixed resonance frequency independent from coupling coefficient [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4857-4876.

[15] Yao Yousu, Sun Pengfei, Liu Xiaosheng, et al. Simultaneous wireless power and data transfer: A comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3650-3667.

[16] Li Zhenjie, Zhu Chunbo, Jiang Jinhai, et al. A 3-kW wireless power transfer system for sightseeing car supercarpacitor charge [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3301-3316.

[17] 王金明, 胡越, 于长虹, 等. 电动汽车双向无线充电系统及其控制技术研究[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 210-217.
Wang Jinming, Hu Yue, Yu Changhong, et al. Research on bidirectional wireless charging system and control technology for electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(7): 210-217. (in Chinese)

[18] 黄文聪, 饶天彪, 蒋煊焱, 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.
Huang Wencong, Rao Tianbiao, Jiang Xuanyan, et al. Maximum efficiency tracking and constant voltage output compound control method for wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3589-3601. (in Chinese)

[19] 苏玉刚, 陈龙, 吴学颖, 等. 基于遗传算法的 SS 型磁耦合 WPT 系统负载与互感识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4199-4206.
Su Yugang, Chen Long, Wu Xueying, et al. Load and mutual inductance identification method of SS-type magnetically-coupled WPT system based on genetic algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4199-4206. (in Chinese)

[20] 田勇, 朱泽, 田劲东, 等. 基于 LCC-S 补偿的电动汽车动态无线充电系统拓扑参数优化[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 150-159.
Tian Yong, Zhu Ze, Tian Jindong, et al. Parameters optimization of electric vehicles dynamic wireless power transfer system based on LCC-S compensation topology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 150-159. (in Chinese)

[21] 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. (in Chinese)

[22] Xu Feifan, Wei Shuguang, Yuan Dong, et al. Review on key technologies and development of magnetic coupling resonant-dynamic wireless power transfer for unmanned ground vehicles [J]. Electronics, 2023, 12(6): 1506.

[23] 许非凡, 魏曙光, 袁东, 等. 无人平台野外无线充电线圈设计与优化分析[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 184-194.
Xu Feifan, Wei Shuguang, Yuan Dong, et al. Design and optimization analysis of coils for wireless charging of unmanned platforms in desolate places [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 184-194. (in Chinese)

[24] Rezaee Jordehi A. Particle swarm optimisation for dynamic optimisation problems: A review [J]. Neural Computing and Applications, 2014, 25(7): 1507-1516.

[25] Yao Yousu, Wang Yijie, Liu Xiaosheng, et al. Particle swarm optimization-based parameter design method for S/CLC-compensated IPT systems featuring high tolerance to misalignment and load variation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5268-5282.



魏曙光

作者简介：

魏曙光(1975—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：无线电能传输，陆战平台综合电力系统。E-mail：weishuguang1975@163.com。

许非凡(1999—)，男，博士研究生。研究方向：无线电能传输。E-mail：extraordinaryxu@163.com。

李嘉麒(1991—)，男，博士，讲师。研究方向：永磁电机，无线电能传输。E-mail：lijiaqi8643@163.com。

袁东(1981—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：能量管理。E-mail：yuandong198106@163.com。

(责任编辑：耿越)