·农林智能装备与技术 Intelligent Equipment and Technology for Agriculture and Forestry·

林区巡检无人机无线电能传输系统的核心部件优化

栾林倩[1]，朱良宽[1]，李先震[1]，赵尽淘[2]，李振杰[1*]
（1. 东北林业大学 控制与信息工程学院，哈尔滨 150040；2. 中国铁路哈尔滨局有限公司哈尔滨供电段，哈尔滨 150070）

摘　要：林区地形复杂、基站部署受限，巡检无人机普遍存在"续航焦虑"，且野外高湿、多尘、散热条件差的环境严重制约无线充电系统的稳定运行。为此，开展面向林区巡检无人机的无线充电系统核心部件参数多目标优化研究。首先，建立基于串联-串联补偿拓扑的系统等效电路，揭示系统核心部件磁耦合机构参数与传输效率、温升特性的内在关联。其次，提出冠豪猪算法（crested porcupine optimizer，CPO）-非支配遗传算法Ⅱ（non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ，NSGA-Ⅱ）混合优化算法（CPO-NSGA-Ⅱ），在NSGA-Ⅱ框架下引入CPO的动态防御搜索机制，提升算法的收敛精度和全局寻优能力。以提升系统林区适应性为核心，建立兼顾传输能力、轻量化和热可靠性的多目标优化模型，通过电-磁-热多物理场联合仿真获取训练数据，驱动Pareto最优解集搜索。最终研制的试验样机在林区实际工况下测试显示，系统传输效率达89.6%，连续充电1 h后最高温度为56.9 ℃，用线量较优化前减少18.2%，有效解决林区无人机无线充电系统"重、热、低效"的工程难题。

关键词：无线电能传输；磁耦合机构；多目标优化；智能算法；林区巡检无人机
中图分类号：S778　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.017

Research on Optimization of Core Components of WPT System for Forest Inspection UAV

LUAN Linqian[1], ZHU Liangkuan[1], LI Xianzhen[1], ZHAO Jintao[2], LI Zhenjie[1*]
(1. College of Computer and Artificial Intelligence, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Harbin Power Supply Section, China Railway Harbin Bureau Group Co., Ltd, Harbin 150070, China)

Abstract: The terrain in forest areas is complex, and the deployment of base stations is restricted. Inspection unmanned aerial vehicles in forest areas generally suffer from "range anxiety", and the high humidity, dust, and poor heat dissipation conditions in the wild severely restrict the stable operation of wireless charging systems. Therefore, this paper conducts a multiobjective optimization study on the core component parameters of wireless charging systems for inspection unmanned aerial vehicles in forest areas. Firstly, a system equivalent circuit based on the series-series compensation topology is established to reveal the intrinsic relationship between the parameters of the core component-the magnetic coupling mechanism and the transmission efficiency and temperature rise characteristics. Secondly, a CPO-NSGA-Ⅱ (crested porcupine optimizer-non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ) hybrid optimization algorithm is proposed, within the NSGA-Ⅱ (non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ) framework, the dynamic defensive search mechanism of the crested porcupine optimizer (CPO) is introduced to improve the convergence accuracy and global optimization ability of the algorithm. With the core of improving the system's forest area's adaptability, a multiobjective optimization model that considers transmission capacity, lightweight design, and thermal reliability is established. Training data is obtained through joint electromagnetic-thermal multi-physical simulation to drive the search for the Pareto-optimal solution set. The final experimental prototype tested under actual working conditions in the forest area shows that the system transmission efficiency reaches 89.6%, the maximum temperature after continuous charging for 1 hour is 56.9 ℃, and

收稿日期：2026-04-21
基金项目：国家自然科学基金项目(52107001)。
第一作者简介：栾林倩，硕士研究生。研究方向为无线电能传输技术。E-mail：15823682330@163.com
***通信作者：**李振杰，博士，副教授。研究方向为无线电能传输技术。E-mail：lizhenjie0725@nefu.edu.cn
引文格式：栾林倩，朱良宽，李先震，等. 林区巡检无人机无线电能传输系统的核心部件优化[J]. 森林工程，2026，42(5)：1068-1080.
Luan Linqian，Zhu Liangkuan，Li Xianzhen，et al. Research on optimization of core components of WPT system for forest inspection UAV[J]. Forest Engineering，2026，42(5)：1068-1080.

the wire usage is reduced by 18. 2% compared with the optimization before, effectively solving the engineering problems of "heavy, hot, and low efficiency" of the wireless charging system for unmanned aerial vehicles in forest areas.
Keywords: Wireless power transfer; magnetic coupler; multi-objective optimization; intelligent algorithm; forest inspection unmanned aerial vehicle

0　引言

近年来,无人机技术的快速发展与智能化升级极大地推动了林业数字化、精细化转型,其应用已全面覆盖病虫害遥感监测、森林防火早期预警、野生动植物种群动态调查、森林资源确权与蓄积量测算、精准植保施药及林业执法巡查等核心业务场景[1]。与传统人工巡检相比,无人机具有覆盖范围广、作业效率高、地形适应性强、人员风险低等显著优势,已成为现代林业管理不可或缺的技术手段。我国林区总面积达2. 2亿 hm^2,其中80%以上分布在地形复杂、交通不便的偏远山区,人工巡检单次作业半径不足5 km,且面临滑坡、野兽袭击等安全风险,而无人机单次作业半径可达20 hm^2以上,能够快速完成大面积林区的常态化巡检任务。然而,林区地形崎岖起伏、通信基站部署极度受限、基础设施薄弱,巡检无人机普遍面临严峻的"续航焦虑",即当前主流工业级无人机单次飞行时间通常不足30 min,实际有效作业时间仅15~20 min,难以满足大面积林区连续作业需求,可靠的野外自动补能已成为制约林业无人机规模化、常态化应用的核心技术瓶颈。

无线电能传输(wireless power transfer,WPT)技术凭借无机械接触、安全可靠、易实现无人值守、环境适应性强等独特优势,为林业无人机的全天候自主巡检提供了理想的能量补给方案[2-3]。与传统有线充电和换电模式相比,WPT系统无需人工插拔充电接口,避免了林区高湿多尘环境下接口氧化、接触不良等问题;也无需建设大量换电站和储备备用电池,大幅降低了基础设施建设成本和后期维护难度。通过在林区关键节点部署无线充电基站,无人机可实现"边巡检边补能"的自主作业模式,理论上能够无限延长作业时间,彻底解决续航短板。作为WPT系统的能量传输核心,磁耦合机构承担着电能从发射端到接收端的无线传输任务,其结构设计与参数配置直接决定了系统的传输效率、功率密度、轻量化水平与长期运行可靠性[4]。在林区应用场景下,磁耦合机构不仅需在宽气隙波动范围内保持高传输效率,还需满足无人机严格的载重限制和恶劣环境下的热可靠性要求,这对其设计优化提出了远超试验室理想环境的挑战。

现有磁耦合机构性能优化方法主要分为基于智能算法的参数优化与基于仿真建模的结构优化两类[5-6]。其中,非支配排序遗传算法Ⅱ、粒子群优化算法、遗传算法等传统群智能算法因能有效处理多目标、多约束优化问题,实现多个相互冲突性能指标之间的合理权衡,已被广泛应用于磁耦合机构的多目标优化设计[7-9]。但这类算法依赖固定的交叉变异更新机制,缺乏对搜索过程的自适应调节能力,在处理高维非线性、多峰多谷的复杂设计空间时普遍存在收敛速度慢、易陷入局部最优、解集分布不均匀的固有缺陷。尤其对于林区无人机WPT系统而言,其优化问题不仅涉及互感、用线量、温升等多个相互冲突的目标,还需满足气隙波动范围大(10~20 mm)、无人机载重限制严格、环境温度变化范围广等多重约束,进一步增加了设计空间的复杂度,传统算法往往需要大量迭代才能获得较优解,且容易陷入局部最优,难以满足工程设计的高效性和准确性要求。相关研究虽通过改进粒子群算法的惯性权重[10]、引入改进粒子群优化-反向传播混和算法(improved particle swarm optimization-back-propagation,IPSO-BP)构建参数-性能映射模型[11]等方式在一定程度上改善了收敛特性,但仍未从根本上解决全局探索与局部开发的自适应平衡问题,在面对林区复杂工况下的多目标优化问题时效果有限。

为更精确表征磁耦合机构的物理特性,部分研究将多目标优化算法与三维有限元仿真或解析建模相结合,对系统的传输效率、耦合性能及轻量化水平进行综合优化,显著提升了多性能指标的权衡能力[12-18]。然而,上述研究大多未将系统运行过程中由铜损、铁损引起的温升作为独立优化目标显式纳入统一优化框架,通常仅将温升作为事后验证指标或简单约束条件处理。对于林区应用场景而言,这一缺陷尤为突出。野外高湿多尘、自然对流散热条件差,且夏季林区环境温度可达35 ℃以上,灰尘覆盖在磁耦合机构表面会进一步降低散热效率,导致相同损耗下的温升显著高于试验室环境。过高的温度不仅会降低线圈导电率和磁芯磁导率,进而降低系统传输效率,还会加速绝缘材料的老化,缩短系统使用寿命,甚至可能引发火灾,对林区生态安全构成严重威胁。因此,必须将温升作为核心优化目标,与传输性能和轻量化水平进行同步权衡,才能保证系统在林区复杂环境下的长期稳定运行。

为兼顾优化效率与仿真精度,近年来有学者将代理模型、元模型及数据驱动方法与群智能算法相结合,

通过构建参数-性能映射模型替代耗时的有限元仿真，实现磁耦合机构参数的快速预测与优化搜索[19-23]。例如，基于神经网络的线圈性能预测模型[21]、多项式混沌代理模型结合非支配排序遗传算法Ⅱ（non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ，NSGA-Ⅱ）的结构优化方法[23]等，均在一定程度上缩短了优化周期。但现有方法仍难以在复杂设计空间中实现全局搜索与局部开发的动态自适应平衡，且多数研究仍基于试验室理想环境进行建模与优化，未充分考虑林区特殊环境对系统性能的影响，导致优化结果在实际应用中往往出现性能下降的问题。

针对上述问题，提出一种融合冠豪猪算法（crested porcupine optimizer，CPO）与非支配排序遗传算法Ⅱ（NSGA-Ⅱ）的混合多目标优化方法（CPO-NSGA-Ⅱ）。该方法保留NSGA-Ⅱ成熟的非支配排序、拥挤距离计算与精英保留框架，同时引入CPO算法独特的4种动态防御策略增强全局搜索能力，有效解决传统算法易早熟、收敛慢的问题，实现搜索过程中全局探索与局部开发的自适应平衡。在此基础上，基于电-磁-热多物理场联合仿真，充分考虑林区环境温度、散热条件等因素的影响，构建以互感最大化、用线量最小化和热稳态温度最低化为目标的多目标优化模型，通过数据驱动方式搜索获得分布均匀的Pareto最优解集，并根据林区实际工况需求选取最优设计方案。本研究成果旨在为林区巡检无人机无线充电系统的工程化设计与应用提供理论依据和技术支撑。

1 电路拓扑与工作原理分析

在实际运行中，林区巡检无人机无线充电系统面临与试验室理想环境截然不同的复杂工况，见图1。无人机自主降落时受地形起伏、侧风干扰和GPS定位误差影响，磁耦合机构气隙与横向偏移量波动较大；同时林区昼夜温差大、高湿多尘的环境会显著改变系统电气参数与散热条件。上述因素导致系统传输特性呈现强非线性与时变性，例如，气隙从设计值15 mm增至20 mm时互感可下降30%以上，严重影响充电效率与热稳定性。现有研究多基于恒定气隙、理想散热的假设建模，理论分析与实际运行特性存在较大偏差。为保证系统在林区复杂工况下稳定高效运行，本部分建立系统等效电路模型与电-磁-热多物理场耦合模型，深入分析关键结构参数对系统传输特性与热特性的影响规律，为后续多目标参数优化提供理论支撑。

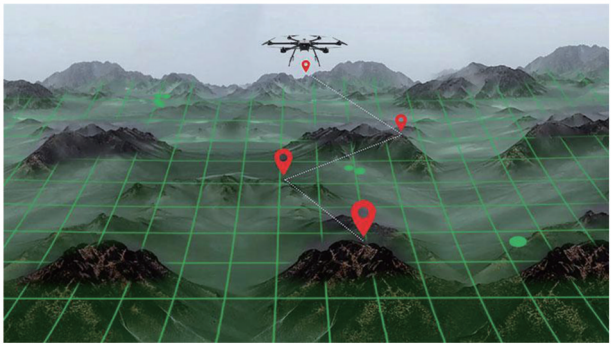


图1 林业无人机巡检场景

Fig. 1 Forestry UAV inspection scenario

本研究提出的林区巡检无人机WPT系统采用串联-串联（series-series，SS）补偿拓扑，电路结构见图2。全桥逆变器（S1—S4）将经输入滤波电容C_{in}稳定后的直流输入电压U_{in}和输入电流I_{in}逆变为高频交流电，为发射端供电；串联-串联（SS）补偿网络由发射线圈、串联电容C_1、接收线圈和串联电容C_2构成，通过磁耦合实现能量无线传输；接收端高频交流电经全桥整流器（D1—D4）整流、滤波电容（C_0）平滑后，为无人机电池负载（R_L）提供稳定直流输出电压U_0。

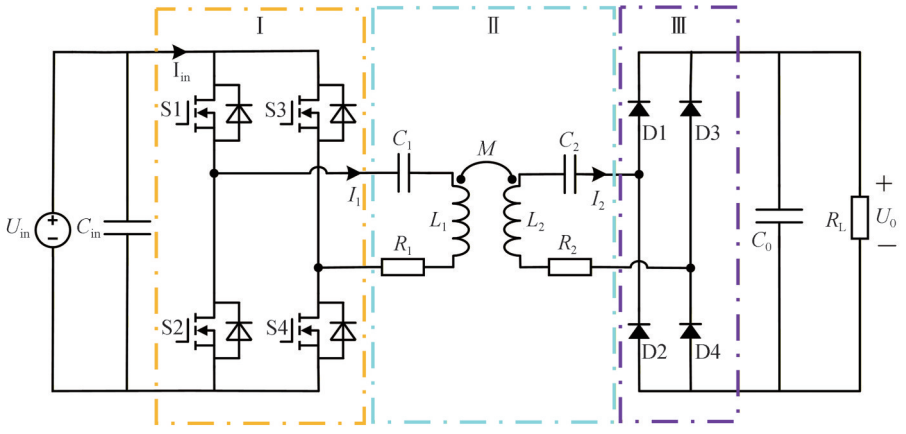


图2 SS补偿拓扑型WPT系统电路

Fig. 2 Circuit diagram of the SS-compensated WPT system

对上述SS补偿型WPT系统主回路进行简化，得到等效电路，见图3。其中，U_{in}为直流输入电压；R_0为输入等效电阻；R_1、R_2分别为发射线圈与接收线圈的内阻；L_1、L_2分别为发射线圈与接收线圈的自感；M为发射端与接收端之间的互感；I_1、I_2分别为发射端回路电流和接收端回路电流。

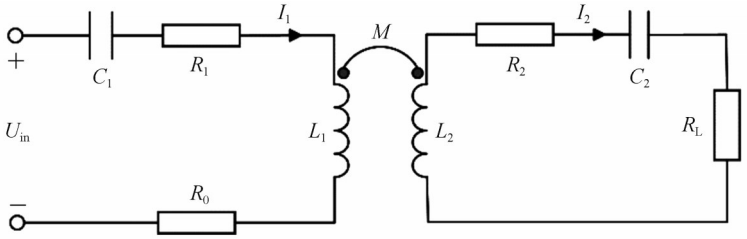


图3　SS补偿拓扑型WPT系统等效电路

Fig. 3　Equivalent circuit of the SS-compensated WPT system

根据基尔霍夫电压定律，可得

$$\begin{cases} U_{in} = \left(R_0 + R_1 + j\omega L_1 + \dfrac{1}{j\omega C_1}\right) I_1 - j\omega M I_2 \\ 0 = \left(R_2 + R_L + j\omega L_2 + \dfrac{1}{j\omega C_2}\right) I_2 - j\omega M I_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中，ω为谐振角频率；j为复数中的虚数单位。当系统发生谐振时，即$j\omega L_1 = \dfrac{1}{j\omega C_1}$，$j\omega L_2 = \dfrac{1}{j\omega C_2}$，可推导出

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{(R_2 + R_L)U_{in}}{(R_0 + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \\ I_2 = \dfrac{\omega M U_{in}}{(R_0 + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \end{cases} \tag{2}$$

系统的输入输出功率为

$$\begin{cases} P_{in} = U_{in} I_1 = \dfrac{(R_2 + R_L)U_{in}^2}{(R_0 + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \\ P_{out} = I_2^2 R_L = \dfrac{(\omega M U_{in})^2 R_L}{\left[(R_0 + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2\right]^2} \end{cases} \tag{3}$$

系统的传输效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_2 + R_L)\left[(R_0 + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2\right]} \tag{4}$$

上述推导表明，磁耦合机构作为WPT系统性能的核心决定因素，其结构参数直接影响系统传输效率、轻量化水平与热稳定性。在林区宽气隙、严载重、强散热的多重约束下，各性能指标相互冲突，单一参数调整难以兼顾，传统经验试错法无法实现全局最优，亟需采用科学的多目标优化方法进行系统性参数设计。

2　磁耦合机构模型构建

磁耦合机构设计是典型的多参数多约束多目标耦合问题，传输效率、轻量化与热可靠性3大核心目标相互制约，传统单目标优化难以兼顾，在林区严苛约束下易出现性能失衡。本研究选取发射线圈匝数(N_t)、接收线圈匝数(N_r)和磁芯间距(d_{fe})为核心优化变量，其中，N_t、N_r决定磁通激发与耦合能力，直接影响传输效率与系统重量；d_{fe}主导磁场分布与漏磁损耗，同时影响系统对林区气隙波动的适应性。基于上述关联，构建兼顾3大核心目标的多目标优化模型。

2.1　线圈尺寸确定

多目标优化前需明确磁耦合机构的几何边界尺寸，这是构建合理参数搜索空间的前提，直接决定优化结果的工程可行性与计算效率。接收线圈需固定安装于无人机底部的预留安装位，其外侧边长(l_r)受无人机机身结构、气动布局与重心平衡的严格限制，过大的线圈会破坏无人机飞行稳定性，影响林区复杂地形与侧风条件下的安全作业，结合所用巡检无人机的实际安装空间，将l_r设定为140 mm。由图4可知，采用Ansys Maxwell建立三维电磁场仿真模型，定量分析发射线圈外侧边长(l_t)在120~220 mm范围内对系统互感(M)的影响规律。该范围的选取兼顾了耦合性能与工程实用性，过小的发射线圈会导致耦合能力

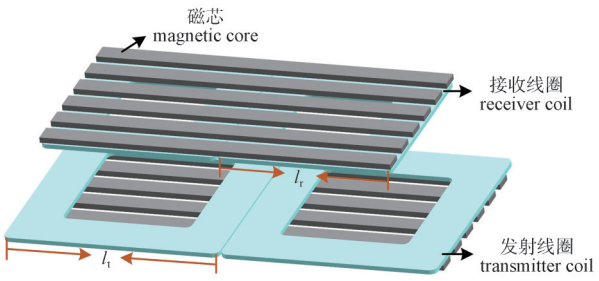


图4　磁耦合机构的仿真模型

Fig. 4　Simulation model of the magnetic coupling mechanism

不足，无法适应林区无人机自主降落时的气隙与横向偏移波动；过大的发射线圈则会显著增加基站体积、重量与建设成本，不利于林间狭窄空间的部署与维护。

发射线圈外侧边长(l_t)与系统互感(M)的仿真结果见图5。随着l_t从120 mm逐渐增大，系统互感(M)呈现先快速上升后缓慢下降的单峰特性，当l_t小于接收线圈尺寸时，增大发射线圈能够有效增加两线圈的有效耦合面积，提升磁通交链程度，互感随之显著提高；但当l_t超过173 mm后，发射线圈边缘产生的漏磁会急剧增加，大部分磁通无法被接收线圈捕获，反而导致有效互感逐渐下降。

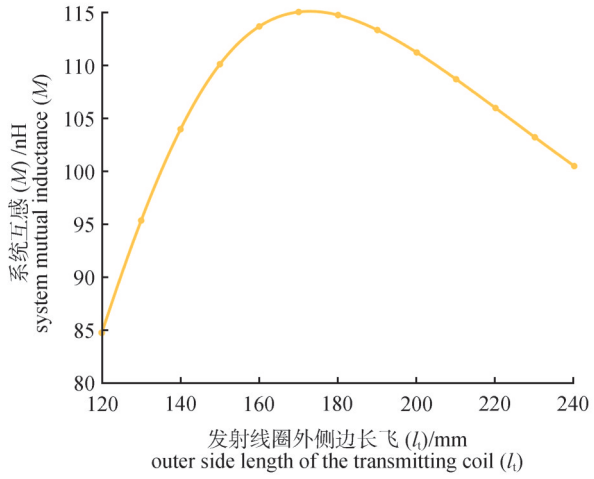


图5 l_t与M关系曲线

Fig. 5 Relationship between l_t and M

2.2 优化目标

本研究确立互感最大化、用线量最小化、热稳态温度最低化3个优化目标，提升林区无人机无线充电系统的综合性能与运行稳定性。其中，互感最大化能够保障系统在气隙波动下的传输鲁棒性；用线量最小化满足无人机严苛的载重限制，释放有效载荷；热稳态温度最低化则是林区高湿多尘、散热差的环境下的关键安全要求。三者相互制约，需通过多目标优化实现全局最优平衡。

2.2.1 互感

在WPT系统运行过程中，工作角频率(ω)遵循行业规范统一设定，负载电阻(R_L)与等效输入电阻(R_0)由电路架构及负载工况确定，参数取值保持固定。由此可见，真正决定系统传输效率与输出功率的关键变量，主要为系统互感(M)、发射线圈内阻(R_1)与接收线圈内阻(R_2)，且三类参数均由磁耦合机构的结构尺寸与绕制方式直接决定。同时，线圈内阻R_1、R_2远小于R_0与R_L，对系统整体损耗的影响可近似忽略，据此，可对式(4)进行合理简化，简化后公式为

$$\eta \approx \frac{(\omega M)^2}{(\omega M)^2 + R_L R_0} = 1 - \frac{R_L R_0}{(\omega M)^2 + R_L R_0}。 \quad (5)$$

由式(5)可知，当ω、R_L和R_0为定值时，传输效率与M有关，且随M的增大而增大。因此，优化传输效率本质上等效于优化互感。

2.2.2 用线量

林业无人机对机载载荷与整机质量高度敏感，接收线圈搭载于机身底部，其结构重量会直接影响飞行能耗、续航时长与飞行操控稳定性。林区大范围常态化巡检任务对无人机续航性能要求严苛，减重降载是提升作业能力的重要前提。因此，需将磁耦合机构质量纳入优化体系，以实现无线充电系统的轻量化设计，进一步提升整机运行能效。本研究以接收端为研究对象，其磁耦合机构质量为

$$m = l \times 0.57 + v \times 5.2。 \quad (6)$$

式中：l为接收线圈长度，其密度为0.57 g/cm；v为接收端铁芯体积，其密度为5.2 g/cm^3。当v固定时，m只与l有关，且随着l的增大而增大。因此，质量优化可等效为接收线圈用线量的优化。

2.2.3 温度

磁耦合机构工作期间，线圈铜损与磁芯损耗会共同引发温升问题。温度升高会劣化磁芯导磁特性、降低磁导率，削弱原副边磁耦合能力，造成互感衰减，进而导致系统传输效率下降；同时，高温易产生热应力，加速绝缘材料与线圈导体老化，缩短器件使用寿命，严重削弱无线充电系统长期运行的稳定性与可靠性。林区环境散热条件有限，温升带来的负面影响更为显著。因此，需将运行温升纳入优化目标，在保证系统传输性能的前提下有效抑制发热，为无人机无线充电系统的可靠运行提供保障。

2.3 约束条件

在磁耦合机构多目标优化设计中，约束条件直接影响算法收敛效果与优化方案的工程实用性。几何空间约束能够限定参数合理范围，确保优化结果符合实际安装要求，排除脱离工程实际的设计方案。为保障系统稳定运行、规避过载风险，无线充电系统输出功率P_{out}需满足额定功率需求，不低于设定值P_{req}。在线材与补偿电容选型确定的前提下，发射线圈工作电流I_1、接收线圈工作电流I_2需分别低于最大额定电流(I_{1max}、I_{2max})；收发两端补偿电容的端电压V_1、V_2也应控制在额定耐压(V_{1max}、V_{2max})以内，从而保障元器件长期安全工作。

2.4　优化模型

完整涵盖设计变量、目标函数与约束条件。本研究以收发线圈匝数、磁芯间距作为优化设计变量,在严格满足器件电气应力限制、系统额定输出功率等约束条件的基础上,将互感最大化、运行温升最低化与接收线圈用线量最小化设为优化目标。通过多目标协同求解,合理匹配关键结构参数,最终实现磁耦合机构综合性能的最优设计。磁耦合机构的多目标优化数学模型为

$$\min F=[-M(N_t,N_r,d_{fe}),l(N_t,N_r,d_{fe}),T(N_t,N_r,d_{fe})]$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}1\leqslant N_t\leqslant 19\\1\leqslant N_r\leqslant 15\\1\text{mm}\leqslant d_{fe}\leqslant 10\text{mm}\\P_{out}-P_{req}\geqslant 0\\I_{1max}-I_1\geqslant 0\\I_{2max}-I_2\geqslant 0\\V_{1max}-V_1\geqslant 0\\V_{2max}-V_2\geqslant 0\end{cases}。\tag{7}$$

3　CPO-NSGA-Ⅱ算法

NSGA-Ⅱ算法是一种基于非支配排序的经典多目标进化算法,在多目标优化领域应用广泛。该算法通过非支配排序分层与拥挤度距离计算,有效实现Pareto最优前沿的精准逼近与解集多样性的稳定维持;迭代过程中,依靠交叉、变异等遗传算子生成子代个体,并引入精英保留策略,将父代与子代中的优秀个体保留至下一代,保障种群进化的优越性与收敛效率。然而,NSGA-Ⅱ算法采用固定的交叉、变异算子生成子代,在磁耦合机构多目标优化这类复杂约束、多峰且目标耦合性强的搜索空间中,易出现早熟收敛、种群多样性下降等问题,难以突破局部最优,无法高效找到全局最优解集。为改善这一缺陷、提升算法的全局搜索能力与收敛性能,本研究在保留NSGA-Ⅱ算法核心的非支配排序与精英保留框架基础上,引入冠豪猪优化算法(CPO)的4种防御策略,替代传统交叉、变异算子,构建一种改进型多目标优化算法-冠豪猪算法-非支配遗传算法Ⅱ(CPO-NSGA-Ⅱ),以适配磁耦合机构多目标优化的复杂需求。

冠豪猪优化算法(CPO)是Lakshmanan等于2024年提出的新型元启发式群智能优化算法,其核心思想是模拟冠豪猪在不同威胁感知下的防御行为,实现个体位置自适应更新与群体协同搜索。该算法将冠豪猪的多种防御策略,映射为全局探索与局部开发相结合的多样化搜索机制,可动态平衡算法的全局寻优与局部挖掘能力。同时,CPO引入多策略自适应切换机制,能根据搜索阶段与环境变化调整种群搜索行为,有效增强算法跳出局部最优的能力、提升收敛性能,在复杂多峰、多约束的优化问题中表现出优异的鲁棒性与寻优效率,适配林业无人机WPT系统多目标优化的复杂需求。

3.1　视觉威慑

当冠豪猪感知到捕食者逼近时,会竖立并抖动背部棘刺,借助体态威慑天敌。捕食者后续会产生远离或持续逼近2种行为,对应算法中2类差异化搜索机制,捕食者远离时,个体向更广区域探索,拓宽全局搜索范围;捕食者持续逼近时,个体围绕当前最优解邻域开展精细搜索,加快局部收敛。为模拟这一随机决策过程,引入服从正态分布的随机数τ_1作为判别因子。当$\tau_1\in(-1,1)$,判定捕食者正在靠近;反之则视为捕食者远离,其公式为

$$x_i^{t+1}=x_i^t+\tau_1\cdot\left|2\tau_2\cdot x_{best}^t-y_i^t\right|。\tag{8}$$

式中:x_i^t为第t次迭代时第i个个体的位置;x_i^{t+1}为下一次迭代时第i个个体的位置;x_{best}^t为当前种群中最优个体的位置;τ_2为[0,1]区间内的均匀随机数,用于调节搜索步长;y_i^t为第t代中捕食者的位置,由当前个体与随机选出的另一个体位置取平均所得,其公式为

$$y_i^t=\frac{x_i^t+x_r^t}{2}。\tag{9}$$

式中:x_r^t为第t次迭代时第r个个体位置;r为[1,N]内的随机整数,N为种群大小。

3.2　听觉威慑

当捕食者持续逼近时,冠豪猪会发出特定噪声以干扰并抵御威胁,噪声强度的差异会直接改变捕食者的行为决策,1)弱噪声环境下,捕食者会继续靠近;2)中等噪声会使其短暂停滞;3)强噪声则可迫使捕食者主动撤离。为精准模拟该行为机制,算法引入二值随机变量(U_1)判别震慑效果。U_1=0对应捕食者停滞的中间状态;U_1=1时,捕食者将表现出靠近或远离的行为,分别驱动算法完成局部深度搜索与全局拓展搜索,具体数学表达式为

$$x_i^{t+1}=(1-U_1)x_i^t+U_1[y+\tau_3(x_{r1}^t-x_{r2}^t)]。\tag{10}$$

式中:$U_1\in\{0,1\}$为二值随机变量;y为捕食者的当前位置,介于当前冠豪猪和从总体中随机选择的冠豪猪之间;τ_3为区间[0,1]内的随机数;x_{r1}^t和x_{r2}^t为从种群中随机选取的2个不同个体的位置。

当U_1=0时,有$x_i^{t+1}=x_i^t$,表示捕食者被成功震慑而停滞,对应上述第2)种情形;当U_1=1时,个体新位置的移动方向将由扰动项$\tau_3(x_{r1}^t-x_{r2}^t)$决定。若

$x_{r1}^t - x_{r2}^t > 0$，捕食者会靠近冠豪猪，对应第1)种情形；若 $x_{r1}^t - x_{r2}^t < 0$，捕食者会远离冠豪猪，对应第3)种情形。

3.3 气味攻击

当捕食者持续逼近时，冠豪猪会释放刺激性气味，在周边区域形成防护性气味屏障，以此阻挡捕食者进一步靠近，完成被动防御。该防御行为表达式为

$$x_i^{t+1} = (1 - U_1)x_i^t + U_1[x_{r1}^t + S_i^t(x_{r2}^t - x_{r3}^t) - \tau_3\delta\gamma_t S_i^t]。 \tag{11}$$

式中：x_{r1}^t、x_{r2}^t、x_{r3}^t 为从当前种群中随机选择的三头冠豪猪的位置；γ_t 为防御因子；δ 为搜索方向控制参数；S_i^t 为气味扩散因子，取值范围通常为(0.3，2.6)。随机变量 U_1 用于判断冠豪猪是否释放气味：当 U_1=0时，冠豪猪停止气味扩散，捕食者与冠豪猪之间的距离保持不变；当 U_1=1时，冠豪猪释放刺鼻气味，捕食者远离冠豪猪。

搜索方向控制参数(δ)和防御因子(γ_t)的数学定义式为

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{rand} \leqslant 0.5 \\ -1 & \text{其他} \end{cases}。 \tag{12}$$

$$\gamma_t = 2\text{rand}\left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right)^{\frac{t}{T_{\max}}}。 \tag{13}$$

式中：t 为当前迭代次数；$T_{\max}$ 为最大迭代次数。

3.4 物理攻击

当捕食者攻击冠豪猪时，冠豪猪会启动最终的物理攻击。此时，捕食者与冠豪猪之间发生剧烈的碰撞，CPO算法将这种行为模拟为一维非弹性碰撞。其数学表达式为

$$x_i^{t+1} = x_{\text{best}}^t + (\alpha(1 - \tau_4) + \tau_4)(\delta x_{\text{best}}^t - x_i^t) - \tau_5\delta\gamma_t F_i^t。 \tag{14}$$

式中：α 为收敛速度因子，通常取值为0.2；τ_4、τ_5 为[0，1]上的随机数；F_i^t 为冠豪猪攻击第 i 个捕食者时的平均作用力，其数学表达式为

$$F_i^t = \tau_6 \times m_i \times (v_i^{t+1} - v_i^t)。 \tag{15}$$

$$m_i = \mathrm{e}^{\frac{f(x_i^t)}{\sum_{k=1}^{N} f(x_k^t) + t}}。 \tag{16}$$

$$v_i^t = x_i^t。 \tag{17}$$

$$v_i^{t+1} = x_r^t。 \tag{18}$$

式中：τ_6 为区间[0，1]上的随机数；m_i 为第 i 个个体(捕食者)的质量；v_i^t 为第 i 个个体在第 t 代的速度；v_i^{t+1} 为第 i 个个体在第 t+1代的速度；$f(x_i^t)$ 为第 t 次迭代时第 i 个个体对应的目标函数。

CPO-NSGA-Ⅱ算法从种群初始化、个体更新到Pareto最优解集生成的流程见图6。

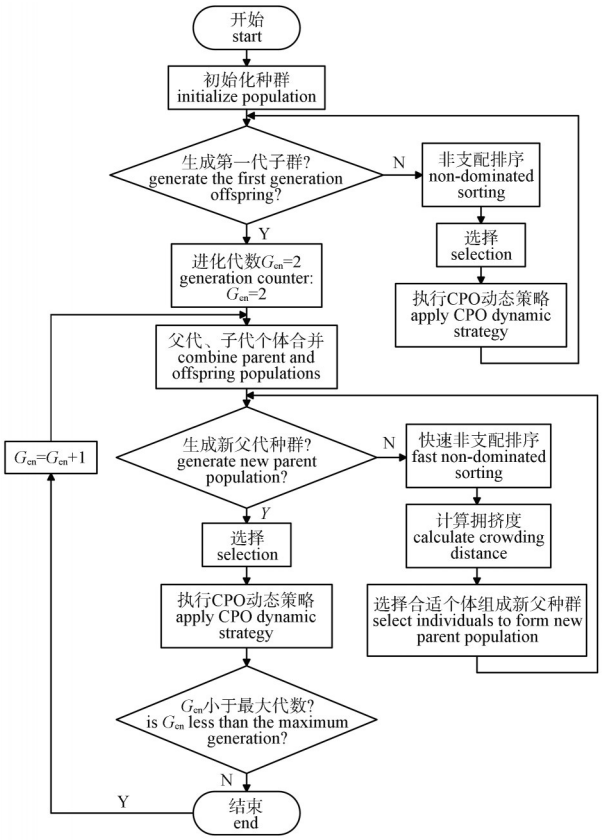


图6 CPO-NSGA-Ⅱ算法流程图

Fig. 6 Flow chart of CPO-NSGA-Ⅱ

4 仿真分析与算法验证

4.1 磁耦合机构仿真

磁耦合机构主要由发射线圈、接收线圈及磁芯构成，其结构见图4。为实现磁耦合机构的多目标优化设计，本研究提出多物理场联合仿真与数据驱动优化相结合的协同设计方法。首先，基于安赛斯麦克斯韦(Ansys Maxwell)搭建Double-D(DD)型磁耦合机构三维电磁模型，对不同设计变量组合开展电磁仿真，精准计算互感、自感参数及电磁损耗。其次，依托电磁仿真结果，在PLECS中搭建SS补偿拓扑无线充电系统电路模型，于85 kHz谐振频率下完成电路求解，获取满足额定功率与电气约束条件的工作电流、电容电压等关键电气指标。随后，将仿真得到的电磁损耗作为热源条件导入Icepak，结合无人机实际运行工况开展热场仿真，提取稳态最高温度，以此作为温升优化目标。通过电磁、电路、热场多物理场耦合仿真，构建高精度、高可信度的性能数据集，为优化计算提供数据支撑。在此基础上，采用本研究所提CPO-NSGA-Ⅱ改进多目标算法进行全局寻优，有效平衡互感、轻量化与温升之间的制约关系，求解得到全局Pareto最优解集，最终完成磁耦合机构多性能协同的优化设计。磁耦合机构多目标优化设计流程见图7。

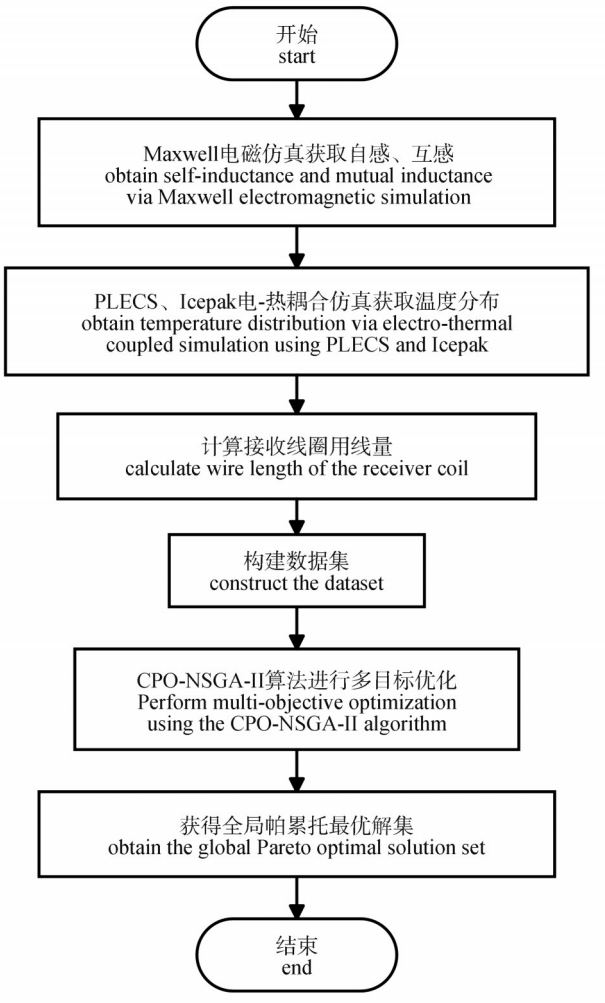


图 7　磁耦合机构多目标优化设计流程图

Fig. 7　Flow chart of multiobjective optimization design of magnetic coupling mechanism

为实现磁耦合机构的多目标优化设计,本研究提出多物理场联合仿真与数据驱动优化相结合的协同设计方法。首先,基于 Ansys Maxwell 搭建 DD 型磁耦合机构三维电磁模型,对不同设计变量组合开展电磁仿真,精准计算互感、自感参数及电磁损耗。其次,依托电磁仿真结果,在 PLECS 中搭建 SS 补偿拓扑无线充电系统电路模型,于 85 kHz 谐振频率下完成电路求解,获取满足额定功率与电气约束条件的工作电流、电容电压等关键电气指标。随后,将仿真得到的电磁损耗作为热源条件导入 Icepak,结合无人机实际运行工况开展热场仿真,提取稳态最高温度,以此作为温升优化目标。通过电磁、电路、热场多物理场耦合仿真,构建高精度、高可信度的性能数据集,为优化计算提供数据支撑。在此基础上,采用本研究所提 CPO-NSGA-Ⅱ改进多目标算法进行全局寻优,有效平衡互感、轻量化与温升之间的制约关系,求解得到全局 Pareto 最优解集,最终完成磁耦合机构多性能协同的优化设计。

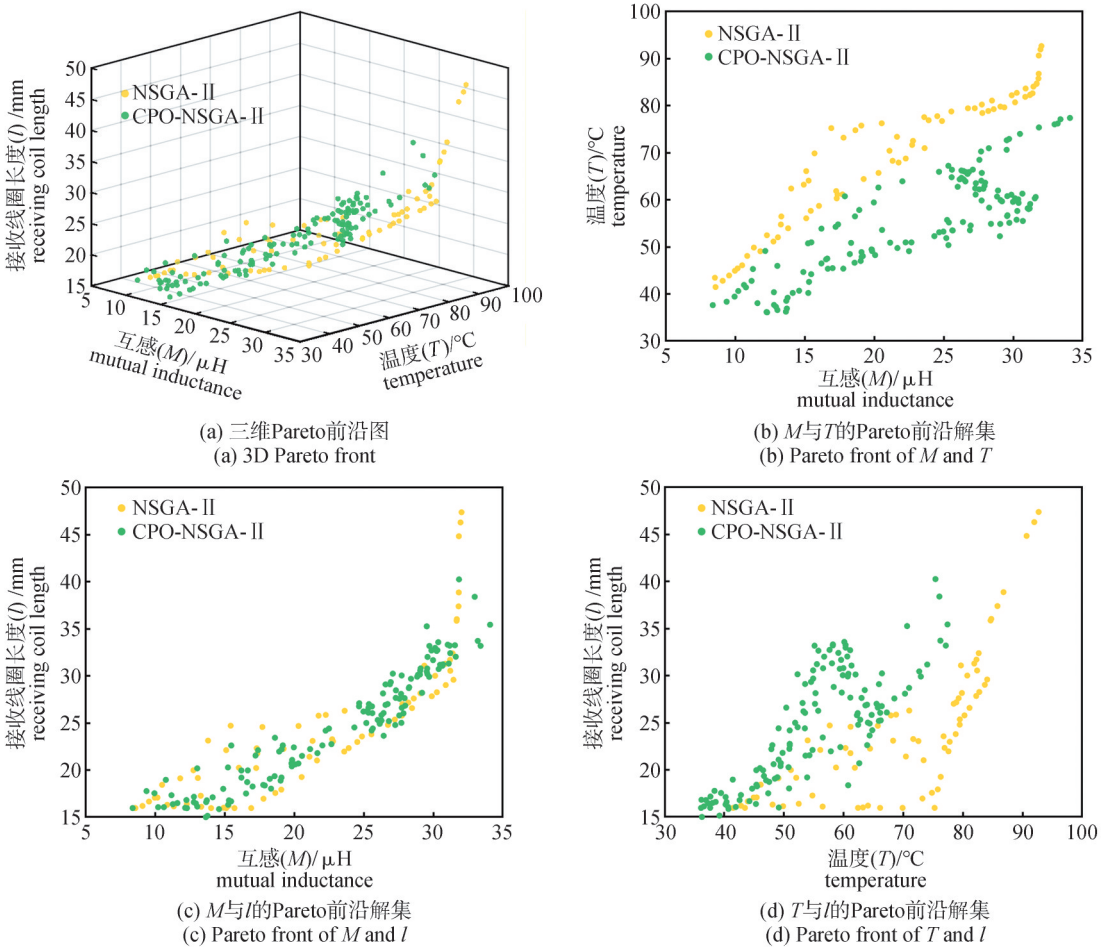
4.2　优化结果与分析

为客观对比传统 NSGA-Ⅱ算法与改进型 CPO-NSGA-Ⅱ算法的寻优性能,确保试验的公平性与结果的可靠性,专门设置统一的试验参数,种群规模固定为 100,该规模既能保证种群多样性以避免早熟收敛,又能控制计算量、提升试验效率;最大迭代次数设为 200,可充分确保算法收敛至稳定状态;交叉概率设定为 0.9、变异概率为 0.15,符合多目标优化的常规参数配置;同时,CPO-NSGA-Ⅱ算法的防御机制触发概率按均匀分布设置,兼顾全局探索与局部挖掘的平衡,为后续对比分析提供统一基准。基于上述统一参数,分别将 2 种算法应用于磁耦合机构的参数寻优,迭代过程中实时记录 Pareto 前沿的分布特征、算法收敛速度及寻优精度。优化得到的 Pareto 前沿解集见图 8,传统 NSGA-Ⅱ算法收敛速度较慢,且其 Pareto 前沿分布较为稀疏,受局部最优解限制,难以覆盖高互感、低温升的优质区域,寻优精度有限;而 CPO-NSGA-Ⅱ算法凭借其自适应防御策略与灵活的搜索机制,收敛速度较传统算法提升 30% 以上,Pareto 前沿分布连续均匀,能够有效覆盖高互感、低温升的优质解区域,既保证了寻优精度,又兼顾了工程实际应用需求。

2 种算法的超体积指标(hypervolume,HV)收敛曲线对比见图 9。迭代过程中,CPO-NSGA-Ⅱ能够更早进入稳定收敛阶段,迭代后期 HV 指标始终维持在更高数值;而传统 NSGA-Ⅱ需要更多迭代步数方可完成收敛,且稳态阶段的 HV 整体水平更低。结果表明,CPO-NSGA-Ⅱ收敛速度显著提升,同时所求解的 Pareto 前沿分布更优、综合解集质量更佳。

2 种算法的分布性能指标收敛曲线见图 10。CPO-NSGA-Ⅱ的 Spread 值在迭代过程中整体保持在较低且稳定的区间,波动幅度相对较小;NSGA-Ⅱ的分布性能指标值在整个迭代过程中波动更为明显,且稳定阶段的分布性能指标水平相对较高。CPO-NSGA-Ⅱ在优化过程中能够更有效地维持解集分布的稳定性与多样性,从而在多目标搜索过程中保持较好的解集分布均匀性。

为验证 CPO-NSGA-Ⅱ算法的优化效果,从其求解得到的 Pareto 前沿解集中,选取 6 组具有代表性的优化方案进行详细分析,涵盖不同性能侧重的参数组合,全面反映磁耦合机构的综合优化效果,具体参数及性能指标见表 1。6 组代表性方案覆盖了从“高互感—高温度”到“低互感—低温度”的全性能区间,清晰呈现了



(a) 三维Pareto前沿图
(a) 3D Pareto front

(b) M与T的Pareto前沿解集
(b) Pareto front of M and T

(c) M与l的Pareto前沿解集
(c) Pareto front of M and l

(d) T与l的Pareto前沿解集
(d) Pareto front of T and l

图8 Pareto前沿分布对比

Fig. 8 Comparison of Pareto front distributions

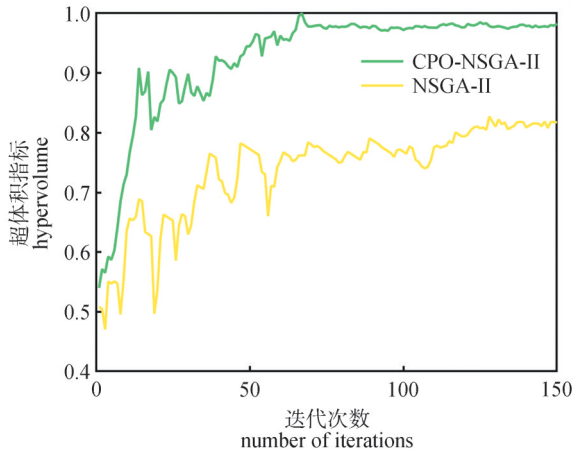


图9 超体积指标收敛曲线

Fig. 9 Hypervolume convergence curve

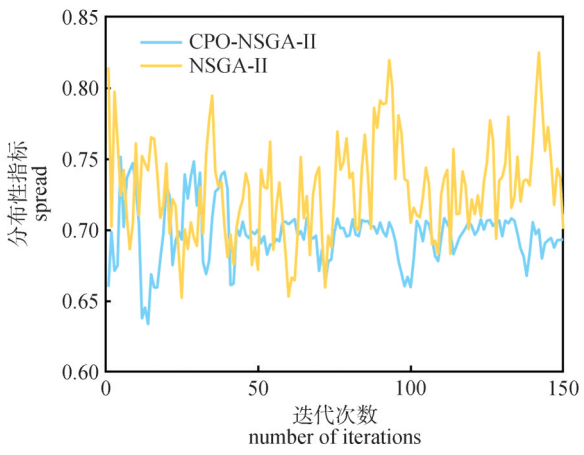


图10 分布性能指标多样性收敛曲线

Fig. 10 Spread diversity convergence curve

磁耦合机构关键参数(匝数、磁芯间距)与性能指标(互感、温度、用线量)的关联规律,验证了CPO-NSGA-Ⅱ算法能够有效找到满足不同工程需求的最优解,为实际工程应用提供了多样化的参数选择方案。

5 试验验证

基于前文优化得到的磁耦合机构设计形状及线圈结构参数,结合图2的SS补偿电路拓扑,搭建输入电压

表 1　部分 Pareto 前沿解

Tab. 1　Partial Pareto frontier solutions

组 group	磁芯间距(d_{fe})/mm core spacing	发射线圈匝数(N_t)/匝 transmitting coil turns	接收线圈匝数(N_r)/匝 receiving coil turns	互感(M)/μH mutual inductance	温度(T)/℃ temperature	接收线圈长度(l)/mm receiver coil length
A	2.0	19	7	33.40	77.13	33.32
B	8.0	11	9	31.85	75.39	40.32
C	9.0	14	7	31.04	58.20	33.32
D	2.0	17	5	26.15	64.37	25.20
E	7.0	13	4	19.81	49.47	20.72
F	6.0	10	3	12.3	36.1	15.96

为 149. 5 V、输出负载 R_L 为 10 Ω 的 WPT 试验样机,见图 11。该样机以优化后的磁耦合机构为核心,整合了 SS 补偿电路、测温仪、示波器等配套测控设备,可模拟磁耦合机构正常运行工况,精准测量互感、工作温度、各端口电压电流等关键性能参数,验证前期优化设计的合理性与有效性。试验样机具体包括优化后的磁耦合机构、SS 补偿电路模块、负载模块及测控设备,能够真实还原林业场景下的运行状态,为后续验证 CPO-NSGA-Ⅱ 算法的优化效果、检验磁耦合机构综合性能提供可靠的试验平台。系统的主要参数见表 2。

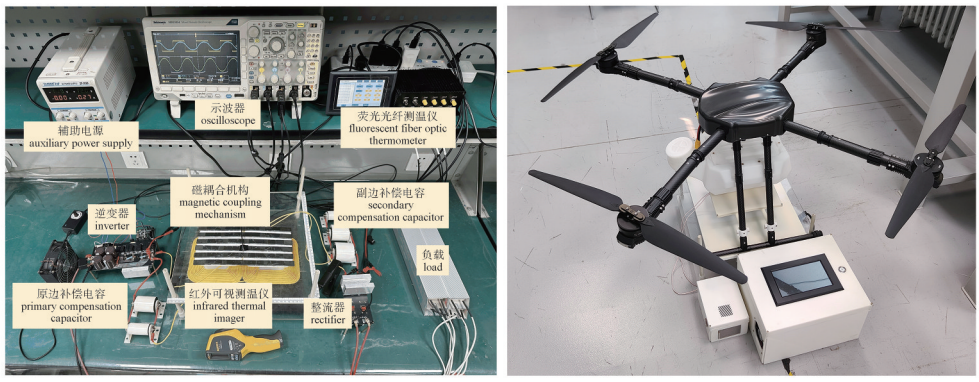


图 11　试验样机

Fig. 11　Experimental prototype

表 2　系统主要参数

Tab. 2　Main parameters of system

参数 parameters	数值 value	参数 parameters	数值 value
工作频率(f)/kHz operating frequency	85.00	原边补偿电容(C_1)/nF primary compensation capacitor	25.95
输入电压(U_{in})/V input voltage	149.50	副边补偿电容(C_2)/nF secondary compensation capacitor	88.66
发射端电感(L_1)/μH transmitter inductance	135.24	负载电阻(R_L)/Ω load resistance	10.00
接收端电感(L_2)/μH receiver inductance	39.58		

试验波形见图 12。其中,U_1、I_1 分别为高频逆变器输入系统的电压、电流;U_2、I_2 分别为接收线圈的输出电压、电流;U_0、I_0 分别为负载上的电压、电流。系统输入的直流电压和电流大小分别为 149. 5 V、4. 78 A,通过波形曲线可以得知 U_0、I_0 大小分别为 36. 26 V、17. 66 A,计算得到系统的总损耗为 74. 26 W,传输效率为 89. 6%。

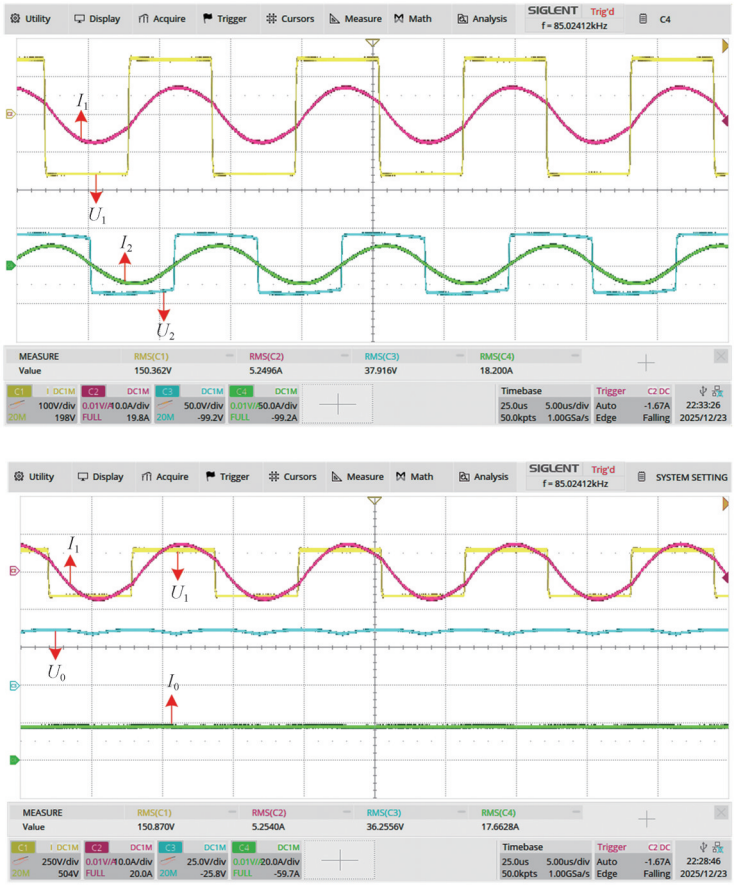
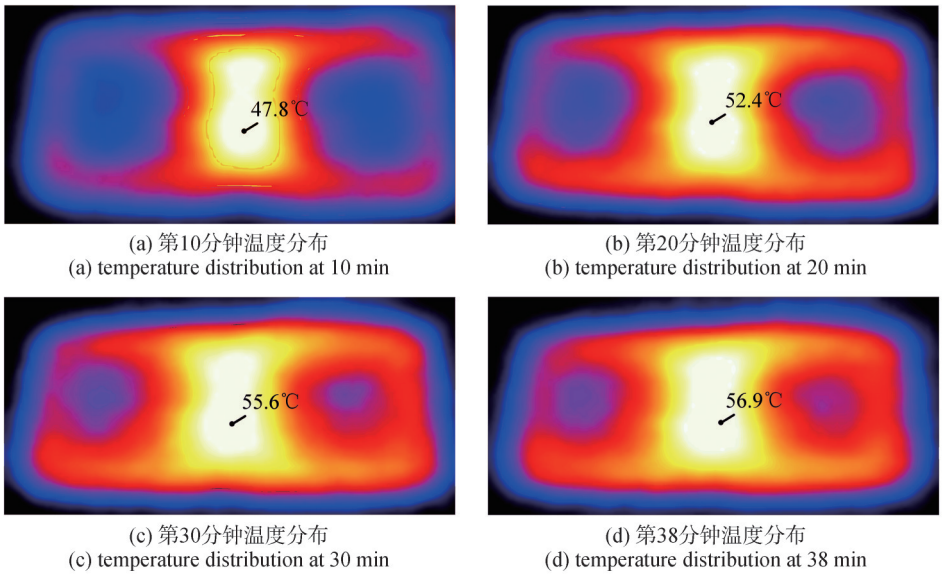


图 12 试验波形

Fig. 12 Experimental waveforms

在试验过程中，WPT 系统在 38 min 左右基本达到热稳定状态。使用 FLUKE VT04A 视觉红外测温仪捕捉了接收端顶部最高温度点的热图像，见图 13。



(a) 第10分钟温度分布
(a) temperature distribution at 10 min

(b) 第20分钟温度分布
(b) temperature distribution at 20 min

(c) 第30分钟温度分布
(c) temperature distribution at 30 min

(d) 第38分钟温度分布
(d) temperature distribution at 38 min

图 13 磁耦合机构温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of the magnetic coupling mechanism

图 13 中的 4 张图片分别为在第 10 分钟、第 20 分钟、第 30 分钟和第 38 分钟的温度分布。可以看到温度在前 10 min 内快速上升,然后在 30~38 min 的时候逐渐达到稳态。在该试验条件下,磁耦合机构的最高温度为 56.9 ℃,与仿真优化得到的温度之间误差为 2.3%,验证了所提出参数优化方法的准确性和有效性。

6　结论

针对林区巡检无人机无线充电面临的复杂地形、恶劣环境(高湿多尘、散热不佳)及续航不足等核心痛点,重点聚焦系统核心部件——磁耦合机构,开展多目标参数优化设计,成功破解了林区无线充电系统"重、热、低效"的工程难题。研究中,将冠豪猪优化算法(CPO)的动态防御机制融入 NSGA-Ⅱ算法,有效提升了算法的全局搜索效率与局部寻优精度,同时结合电-磁-热多物理场联合仿真获取可靠训练数据,为优化过程提供坚实支撑,最终得到适配林区复杂工况的磁耦合机构最优参数组合。在林区实际工况下的测试结果显示,优化后的试验样机性能表现突出,系统传输效率达 89.6%,连续充电 1 h 后最高温度控制在 56.9 ℃(符合安全运行标准),用线量较优化前减少 18.2%,充分验证了所提优化方法的工程适用性与可行性。与常规优化方法相比,本研究提出的 CPO-NSGA-Ⅱ混合优化算法在多目标权衡能力、Pareto 解集分布均匀性及收敛稳定性上均表现出显著优势,为同类复杂场景下无线充电部件的优化设计提供了可行的技术思路与参考。

参　考　文　献

[1] 张军国,闫浩,胡春鹤,等. 无人机在林业中的应用及前景展望[J]. 林业工程学报,2019,4(1):8-16.
Zhang Guojun, Yan Hao, Hu Chunhe, et al. Application and future development of unmanned aerial vehicle in forestry [J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4 (1): 8-16.

[2] Zhao Y, Shen S, Yin F, et al. A high misalignment-tolerant hybrid coupler for unmanned aerial vehicle WPT charging systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 1570-1581.

[3] 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 Yilin, Li Ruihua, Hu Bo. Multi-objective optimization design of magnetic coupling coil structure forWireless charging system of electric vehicle [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(6): 53-59.

[4] 张云,王丽芳,郭彦杰,等. 基于NSGA-Ⅱ算法的无线充电系统磁耦合机构多目标优化[J]. 电工电能新技术,2020,39(12):28-34.
Zhang Yun, Wang Lifang, Guo Yanjie, et al. Multi-objective optimization of magnetic coupler for wireless power transfer system based on NSGA-Ⅱ algorithm [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(12): 28-34.

[5] Rong C, He X, Wu Y, et al. Optimization design of resonance coils with high misalignment tolerance for drone wireless charging based on genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 58(1): 1242-1253.

[6] Wang F, Zhu J, Sun A, et al. Multiobjective optimization of double-D orthogonal coil in the underwater environment [C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE: Hefei, China, 2023: 2296-2301.

[7] 李阳,黄悦蓬,刘雪莉,等. 动态无线电能传输系统多目标粒子群优化方法[J]. 电工电能新技术,2022,41(8):41-50.
Li Yang, Huang Yuepeng, Liu Xueli, et al. Multi-objective particle swarm optimization method for dynamic WPT system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(8): 41-50.

[8] Kapanov A, Almaganbet A, Yazdi S S H, et al. Coil parameters optimization for dynamic wireless charging of electric vehicles using particle swarm optimization (PSO) algorithm [C]//2023 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2023 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). Sep 01-02, 2023, Istanbul, Turkiye. IEEE, 2023: 1-7.

[9] 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]. 电源学报,2026,24(4):284-292.
Yu Qingchang, Li Haoran, Zhu Yuyu. Research on optimization method for magnetic coupling resonant wireless charging coil [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(4): 284-292.

[10] 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 an improved PSO algorithm[J]. Electric Drive, 2023, 53(3): 64-69.

[11] 李振杰,白玉鸿,刘一琦,等. 基于 IPSO-BP 算法的 WPT 系统结构参数优化方法[J]. 电源学报,2025,23(8):174-181.

Li Zhenjie, Bai Yuhong, Liu Yiqi, et al. Optimization method for structural parameters of WPT system based on IPSO-BP algorithm[J]. Journal of Power Supply, 2025, 38(8): 174-181.

[12] Lin J, Mao X, Su T, et al. Magnetic coupler parameters optimization for electric vehicle charging system with DQD coil structure[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 13(6): 8091-8100.

[13] Wang S, Liu H, Gao F, et al. Quasi-decoupled arc-shaped magnetic integrated couplers for underwater wireless power transfer systems and its multiobjective parameter optimization scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2026, 41(3): 3542-3556.

[14] Xie B, Fan F, Guo X, et al. Research on parameter modeling and turn optimization design method of WPT magnetically coupled system [C]//2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). IEEE: Guangzhou, China, 2023: 1769-1774.

[15] Bandyopadhyay S, Prasanth V, Bauer P, et al. Multiobjective optimisation of a 1-kW wireless IPT systems for charging of electric vehicles [C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Nov 10-13, 2023, Guangzhou, China. IEEE, 2016: 1-7.

[16] Zeng Y, Lu C, Liu R, 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.

[17] 马涛,苏玉刚,王子驰,等. LCC-S型无线电能传输系统的磁耦合机构参数多目标优化技术[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(4): 52-63.
Ma Tao, Su Yugang, Wang Zichi, et al. Multi-objective optimization technology for parameters of magnetic coupler of LCC-S type MC-WPT system [J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(4): 52-63.

[18] 齐生昊,朱良宽,李振杰,等. 面向动态无线充电系统的三线圈耦合机构参数优化研究[J/OL]. 电源学报, 1-12[2025-07-15].
Qi Shenghao, Zhu Liangkuan, Li Zhenjie, et al. Parameter optimization of a triple-coil coupling structurefor dynamic wireless charging systems [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12 [2025-07-15].

[19] Terrah M, Smail M K, Pichon L, et al. Meta-model based WPT optimization: UAV application [C]//2025 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE). Jun 03-06, 2025, Rome, Italy. IEEE, 2025: 1-4.

[20] Li Z, Li X, Yuan D, et al. Optimization of magnetic couplers in wireless charging systems using the surrogate model[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2025, 13(4): 5406-5420.

[21] Kim M, Jeong M, Cardone M, et al. Optimization of spiral coil design for WPT systems using machine learning[C]// 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Mar 19-23, 2023, Orlando, FL, USA. IEEE, 2023: 822-828.

[22] Ma J, He J, Li Z, et al. Parameter design method of the magnetic coupler for wireless charging system using metamodel of optimal prognosis[C]//2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). May 10-12, Harbin, China. IEEE, 2024: 2298-2302.

[23] Yu Q, Lv G, Pi S, et al. Surrounding active shielding coil design and efficient multiobjective optimization for WPT [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(4): 10605-10617.