

系留式大载荷灭火无人机电推进 系统优化设计

杨 球¹, 屈 峰^{2*}, 廖智麟¹, 李荣登³, 钱书平², 沈 铨²

(1. 山河星航实业股份有限公司, 湖南 株洲 412000;

2. 卧龙电气驱动集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312300;

3. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

Optimization Design of the Electric Propulsion System for a Tethered High-Payload Firefighting UAV

YANG Qiu¹, QU Feng^{2*}, LIAO Zhilin¹, LI Rongdeng³, QIAN Shuping², SHEN Cheng²

(1. Starair Aircraft Co. Ltd., Zhuzhou 412000, China;

2. Wolong Electric Group Co. Ltd., Shaoxing 312300, China;

3. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: [Objective] Tethered heavy-payload firefighting UAVs performing sustained hovering at 200 m altitude face critical challenges: Insufficient power density, excessive winding temperature rise, and inadequate 100-hour operational reliability. Addressing performance limitations in conventional external-rotor permanent magnet synchronous motor—specifically high AC copper losses from round-wire windings and low air-gap flux density due to parallel magnetization, this study proposes an integrated solution combining multiphysics collaborative optimization with innovative topological design. The approach targets stringent triple requirements for electric propulsion systems: lightweight construction, minimized heat dissipation, and superior operational robustness in aerial firefighting scenarios. [Methods] Using a multi-parameter sensitivity hierarchical degradation model validated for predictive accuracy, parameter co-optimization for an external-rotor motor with 36 slot/32 pole was performed via response surface methodology. The design incorporated a five-segment Halbach magnet array topology to enhance fundamental air-gap flux density while suppressing torque ripple through optimized magnetization angle distribution. This was combined with flat-wire winding

technology and a dovetail-groove stator design, achieving a 78% slot fill factor and reducing AC copper losses via three-dimensional end-turn optimization. Pareto-optimal solutions balancing thermal stability and efficiency were selected using a genetic algorithm based on a composite objective function. Prototypes underwent rigorous validation through propeller dynamometer tests simulating full-load aerodynamic profiles and flight demonstrations at 200 m altitude under variable atmospheric conditions. [Results] The optimized motor achieved a power density of 3.73 kW/kg with 92.9% system efficiency under rated propeller load. Winding temperature rise stabilized at 118 K, the electric drive system operated stably during the 200 m altitude flight test. Following 100 hours of continuous flight, efficiency degradation remained below 0.1%, outperforming similar products. [Conclusion] The hierarchical optimization framework synergized with Halbach-flat wire winding technology, achieving unprecedented power density and operational reliability essential for prolonged firefighting missions, while offering a scalable methodology for high-altitude electric propulsion design.

Key words: tethered high-payload firefighting UAV; electric propulsion system; optimization design; Pareto

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3090500); 国家自然科学基金(U24A20145)

National Key Research and Development Program of China (2022YFC3090500); National Natural Science Foundation of China (U24A20145)

摘 要: [目的] 系留式大载荷灭火无人机在 200 m 高空长时悬停场景下面临动力系统功率密度不足、绕组温升及百小时级可靠性欠缺的严峻挑战。本研究针对传统外

转子永磁同步电机因圆线绕组铜耗大、平行充磁气隙磁密低导致的性能瓶颈,提出融合多物理场协同优化与创新拓扑设计的系统性解决方案,旨在满足高空消防任务对电推进系统轻量化、低热耗与高环境适应性的三重严苛需求。【方法】基于多参数敏感度分级降解模型,采用响应面法对 36 槽 32 极外转子电机开展多参数耦合优化。通过引入五段 Halbach 永磁阵列拓扑提升气隙磁密基波幅值并抑制转矩脉动,结合扁线绕组端部拓扑优化与燕尾槽定子设计将槽满率提高至 78%,显著降低交流铜耗。利用遗传算法筛选综合目标函数的 Pareto 最优解,完成样机制作,并构建螺旋桨台架测试系统与 200 m 整机飞行验证平台。【结果】优化后电机功率密度达 3.73 kW/kg,系统额定工况效率为 92.9%;额定螺旋桨负载下绕组温升 118 K;200 m 高空飞行测试中电驱动系统运行稳定;100 h 持续飞行后效率衰减小于 0.1%,优于同类产品。【结论】本研究提出的分级优化框架与 Halbach-扁线绕组技术协同方案,显著提升了系留无人机动力系统的功率密度与运行可靠性,为高空长时悬停作业场景提供了经飞行验证的优选技术路径。

关键词: 系留式大载荷灭火无人机;电推进系统;优化设计;Pareto

0 引言

随着全球城市化进程的加速,高层及超高层建筑集群化的发展趋势愈发显著。据世界高层建筑与都市人居学会统计,2020~2030 年间全球 200 米以上超高层建筑数量预计增长 46.8%。此类建筑的高密度特性导致火灾荷载强度超过 3.5 MJ/m²,且烟囱效应使火势垂直蔓延速度提升 40%~60%^[1],使得高空消防救援成为现代城市安全体系建设的核心议题。随着低空重载无人机及 eVTOL 的快速发展,其能源动力系统显著提升^[2-4]。高空分布式电力系留无人机,通过地面供电可实现不间断作业,成为主要发展方向^[5-8]。其中,电推进系统是消防系留无人机的唯一动力来源,高可靠性、高功率密度是重要指标^[9]。

直驱式永磁电机结构简单,在无人机及 eVTOL 中有着较为广泛的应用。Tani 等人^[10]综合对比了不同极槽配合的外转子和内转子永磁电机,表明相同尺寸下外转子永磁电机性能优势明显,更有利于实现高功率密度。Bird^[11]针对永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)在电动飞行器动力系统的应用做了总结,

分析了不同功率电动飞行器的动力系统功率密度与转矩密度范围。单曦^[12]设计了全电飞机用外转子永磁电机,并分析了高电磁性能和机械强度情况下的轻量化设计方法。系留无人机由于工作场景固定,工作转速范围较小,使用外转子 PMSM 可以更好实现高功率密度电推进系统设计^[13-15]。

目前,重载无人机外转子推进电机通常采用铜线绕组和平行充磁技术,制约了电机效率和功率密度的提升。Halbach 阵列通过特殊磁化方向排列显著增强永磁电机单侧气隙磁密,同时抑制反向漏磁,从而在轴向磁场无铁心电机中实现更高的转矩密度和更低的转矩脉动;其磁场自屏蔽特性减薄转子轭部、减轻重量,并通过抑制谐波降低铁损,为消防无人机、eVTOL 等对功率密度和可靠性要求严苛的应用提供关键技术支撑^[16-19]。

本文基于多参数敏感度分级降解模型,采用响应面法对 36 槽 32 极外转子电机开展多参数耦合优化。利用整机升力模型构建整机指标与电机参数指标模型,确认综合优化目标,使用遗传算法筛选综合目标函数的 Pareto 最优解。通过引入五段 Halbach 永磁阵列拓扑提升气隙磁密基波幅值并抑制转矩脉动,结合扁线绕组端部拓扑优化与燕尾槽定子设计将槽满率提高至 78%,显著降低交流铜耗。完成样机制作,并构建螺旋桨台架测试系统与 200 m 整机飞行验证平台。最终完成优化设计及验证,电机功率密度提升 41%。通过对比 100 h 整机飞行试验前后单电机螺旋桨台架测试数据,得出相同工况下效率衰减小于 0.1%,验证了优化方式的可行性及电推进系统的稳定性。

表 1 电推进系统指标需求

Tab. 1 Requirements for electric propulsion system performance metrics		
参数名称	需求值	现方案设计值
母线电压范围/V	500~850	500~850
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 200	3 200
额定功率/kW	16	16
峰值转速/(r·min ⁻¹)	3 700	3 700
峰值功率/kW	26	26
电机外径/mm	≥180	170
效率/%	≤91	91.2
质量/kg	<6.5	6.05

1 优化设计方法

消防系留无人机电推进系统三维结构模型如图 1 所示,主要由转子组件、转轴组件、定子组件及后端盖四个部分组成。其中转子中磁钢参数与定子组件中定子冲片参数、绕组参数是决定电机功率密度及效率的主要参数。

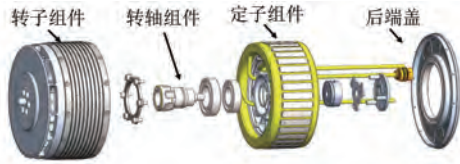


图 1 电推进系统 3D 结构模型

Fig. 1 3D structural model of the electric propulsion system

电机定转子拓扑参数存在高度耦合性,传统单阶段优化框架难以有效协调多目标间的冲突关系^[20-23]。当设计变量超过 5 时,参数间的非线性耦合效应会导致优化效率衰减率高。传统优化流程将全部设计变量纳入单一优化维度,缺乏对参数敏感度层级的识别机制,致使基于有限元仿真的样本空间抽样过程中,高敏感度参数区间的有效覆盖概率低。这种粗粒度优化模式易陷入局部 Pareto 前沿,无法实现全局最优解域搜索。本文采用分级优化的方式,首先在全球参数中通过敏感性分析确定优化参数分层;在系统级协同优化层,对高敏感参数进行 Pareto 前沿探索;结合优化目标之间的关系及权重,确认最终优化目标,综合优化目标及优化参数得到最终优化方案。具体实施方案如图 2 所示。

2 电推进系统优化设计

2.1 优化模型搭建

根据原电机拓扑结构,待优化参数如图 3 所示。

图 3 中, R_{RT} 为转子外圆半径; R_{ST} 为定子内圆半径; g_{air} 为气隙; H_m 为磁钢厚度; α 为极弧系数; B_{s0} 为槽口宽度; H_{s0} 为槽口高度; H_{s1} 为槽楔高度; H_{s2} 为齿高; T_w 为齿宽。

优化设计在原方案基础上采用扁线绕组,其示意图如图 4 所示,显著提升了电机功率密度。由于趋肤效应和邻近效应,扁线绕组会产生显著

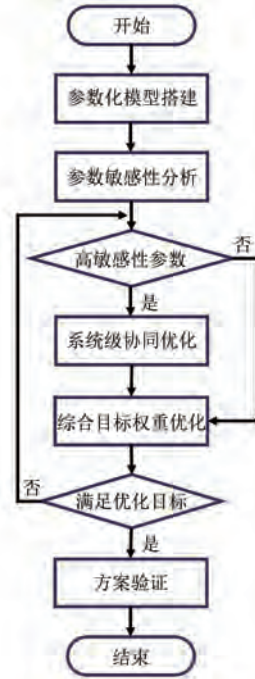


图 2 电推进系统优化方法

Fig. 2 Optimization method of the electric propulsion system

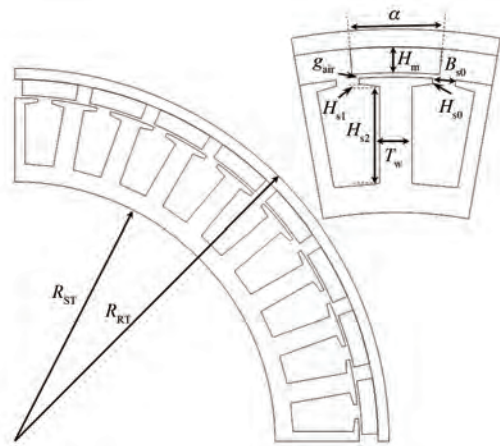


图 3 电机参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of motor parameters

的交流铜耗^[24-26]。针对扁线绕组,铜耗可以由式(1)~式(3)计算得到:

$$P_{Cu} = P_{ac} + P_{dc} \quad (1)$$

$$P_{ac} = L_a \frac{w_r h_r^3 \sigma (\omega B)^2}{24} \quad (2)$$

$$P_{dc} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{dc} \quad (3)$$

式中: P_{Cu} 为总铜耗; P_{ac} 为交流铜耗; P_{dc} 为直流铜耗; L_a 为导体的有效长度; B 为正弦外部磁场的磁通密度; ω 为角频率; σ 为电导率; R_{dc} 为导体电

阻; I 为相电流有效值; w_r 、 h_r 分别为扁线的宽度、高度。

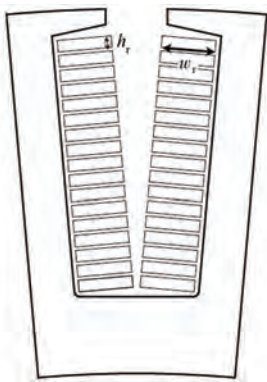


图 4 电机扁线绕组示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flat-wire winding in the motor

图 3 中除 R_{RT} 作为随动变量,其余参数作为优化变量。效率、转矩密度 T_d 作为优化目标;质量 M 、转矩 T 作为约束值;铜耗 P_{Cu} 、电流密度 C_d 作为参考值。搭建参数化优化模型,其中电机质量参考电磁重量占电机总重量 M 的 55% 计算得到。

2.2 优化参数敏感性分析

由于优化参数多,参数与目标值之间是复杂非线性系统,预后系数 (Coefficient of Prognosis, CoP) 矩阵如图 5 所示,可通过交叉验证直接量化模型对未知数据的预测性能,适用于第一步全局敏感度分析,进而筛选出高敏感度参数,如式 (4) 所示:

CoP = 1 - \frac{SS_E^{rediction}}{SS_T} \tag{4}

SS_T = \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_Y)^2 \tag{5}

式中: $SS_E^{rediction}$ 为预测误差的平方和; SS_T 为输

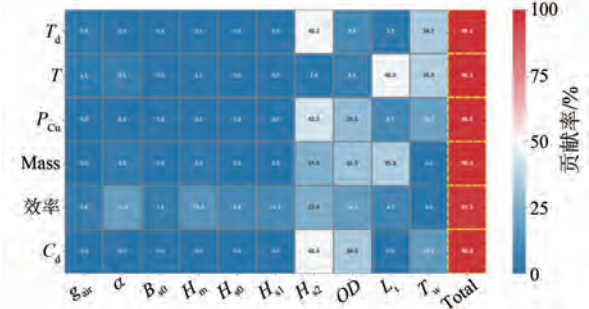


图 5 CoP 矩阵

Fig. 5 CoP matrix

出 Y 的总变化量。

由图 5 可知,所有响应参数 CoP 总值较高,说明电机参数模型在交叉验证中表现优异,能够稳定、准确地预测新数据,表明模型搭建的可靠性能满足后续优化需求。

各个优化变量与响应目标之间的相关性系数如图 6 所示。

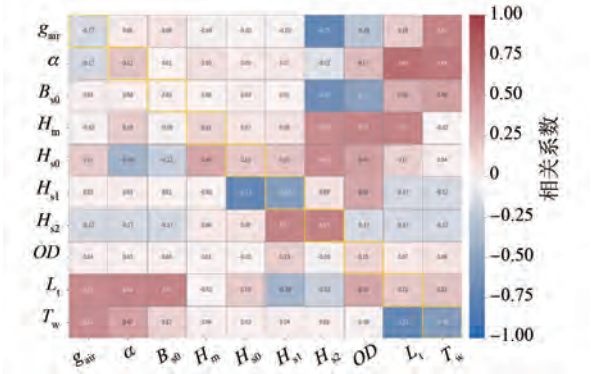


图 6 输入-输出线性相关性矩阵

Fig. 6 Input-output linear correlation matrix

由图 6 可知,质量 M 、转矩密度 T_d 、转矩 T 、铜耗 P_{Cu} 和电流密度 C_d 主要受到齿高 H_{s2} 、电机外径 OD 、电机叠长 L_t 和齿宽 T_w 的影响,效率受所有参数影响,因此可以将这 4 个参数作为高敏感性进行系统级协同优化,其余参数作为低敏感性参数可用于综合目标调优。

2.3 系统级协同优化

由敏感性分析结果确认将 H_{s2} 、 OD 、 T_w 和 L_t 4 个参数作为主要优化目标,分析其对电机转矩密度 T_d 、效率的影响,结果如图 7 所示。响应参数之间的相关性系数如图 8 所示。

由图 7 可知, H_{s2} 、 T_w 是影响 T_d 的关键参数,随着 T_w 增大, T_d 线性增加;随着 H_{s2} 增大, T_d 线性降低。 H_{s2} 、 OD 是影响效率的关键参数,随着 H_{s2} 增大,效率降低;随 OD 增大,效率增加。

图 8 中,效率与 T_d 相关性系数为-0.90,即 T_d 越大,效率越低。对比图 8 中不同方案下效率与 T_d 的对应关系,可以看出在转矩密度大于 10.5 N·m/kg 时,随 T_d 增加效率降低明显,转矩密度在 8.5~10 N·m/kg 之间存在效率高的点。

2.4 综合调优

电机效率的提升可以降低单位体积下电机的发热量,有利于保证电机长时高温工作环境的可

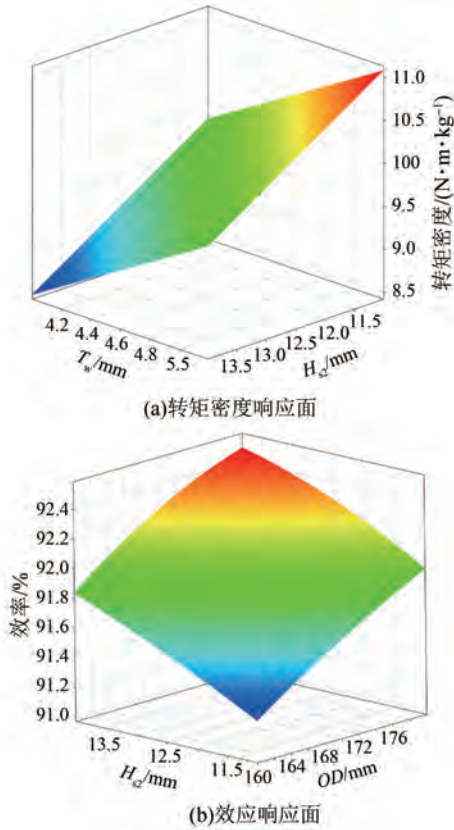
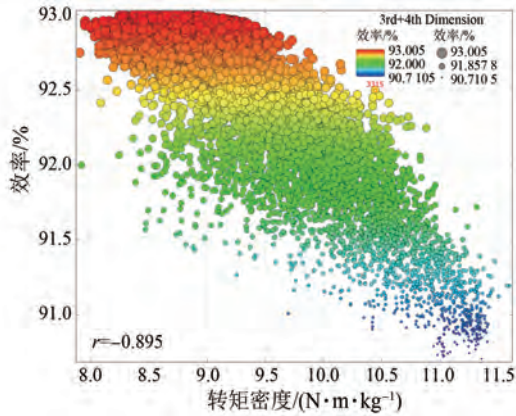


图 7 转矩密度、效率响应面

Fig. 7 Response surfaces of torque density and efficiency

图 8 效率和 T_d 的相关系数Fig. 8 Correlation coefficient between efficiency and T_d

靠性,同时效率提升电流降低可同步降低系留线缆重量; T_d 的提升可以提升单位体积下电机的输出,有利于提升整机的载重能力。

对于消防系留无人机,无人机整机质量与整个电动力系统效率 η 及 T_d 的关系如式(6)所示:

$$\begin{cases} M_{\text{total}} = M_{\text{frame}} + M_{\text{cable}}(H) + M_{\text{motor}} \\ M_{\text{cable}}(H) = \rho_{\text{cable}} \cdot H \\ F_{\text{thrust}} = k_T \cdot T_d \cdot M_{\text{motor}} \\ F_{\text{thrust}} \geq M_{\text{total}} \cdot g + F_{\text{drag}} \\ P_{\text{input}} = \frac{F_{\text{thrust}} \cdot P_{\text{hover}}}{\eta} \\ P_{\text{input}} \leq P_{\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: M_{total} 为整机质量; M_{frame} 为机身质量; $M_{\text{cable}}(H)$ 为系留线缆质量; M_{motor} 为电动力系统质量; ρ_{cable} 为系留线缆密度; H 为飞行高度; F_{thrust} 为拉力; k_T 为螺旋桨推力系数; g 为重力加速度; F_{drag} 为附加拖拽力; P_{input} 为动力系统输入功率; P_{hover} 为悬停需用功率; P_{max} 为地面电源最大功率。

以整机最高飞行高度为最优引入电机效率与 T_d , 如式(7)所示:

$$\begin{cases} \max(H) = f(T_d, \eta) \\ F_{\text{thrust}} \geq M_{\text{total}} \cdot g + \frac{1}{2} C_d \rho_{\text{air}} v_{\text{wind}}^2 A \\ \alpha + \beta = 1 \\ H \propto \alpha \eta + \beta T_d \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_d 为阻尼系数; ρ_{air} 为空气密度; v_{wind} 为风速; A 为飞机迎风面积; α 、 β 为效率、扭矩密度对整机飞行高度影响的比例。

综合无人机整机参数及飞行要求评估, T_d 较效率权重更大, 占比约为 3:7, 根据设计需求引入综合优化目标 G , 如式(8)所示:

$$\begin{cases} G = \frac{E_{\text{fi}}}{E_{\text{f0}}} \times 0.3 + \frac{T_{\text{Di}}}{T_{\text{D0}}} \times 0.7 \\ E_{\text{fi}} \geq E_{\text{f0}} \\ T_{\text{Di}} \geq T_{\text{D0}} \\ M_i \leq M_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: E_{f0} 为效率基准值; E_{fi} 为优化方案 i 的效率; T_{D0} 为扭矩密度基准值; T_{Di} 为优化方案 i 的扭矩密度; M_0 为质量基准值; M_i 为优化方案 i 的质量。

通过引入综合优化目标 G , 结合协调优化响应面数据, 以 α 、 H_m 、 H_{s1} 、 H_{s2} 、 T_w 采用遗传算法, 优化流程如图 9 所示。优化集群及 Pareto 前沿如图 10 所示。

图 10 中第四代与第五代遗传集群结果表明集群趋于 G 最大时, 效率无法满足优化需求。

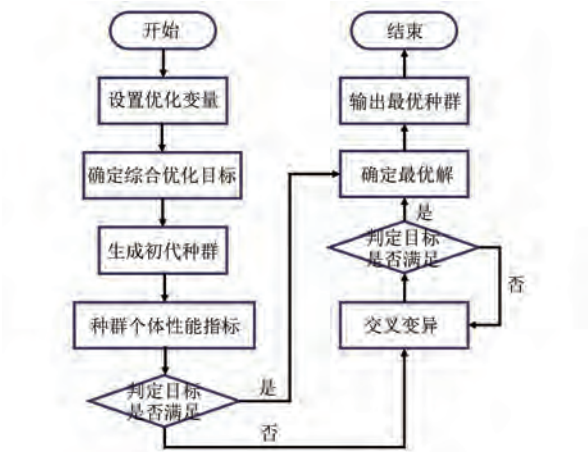


图 9 优化流程图

Fig. 9 Optimization clusters

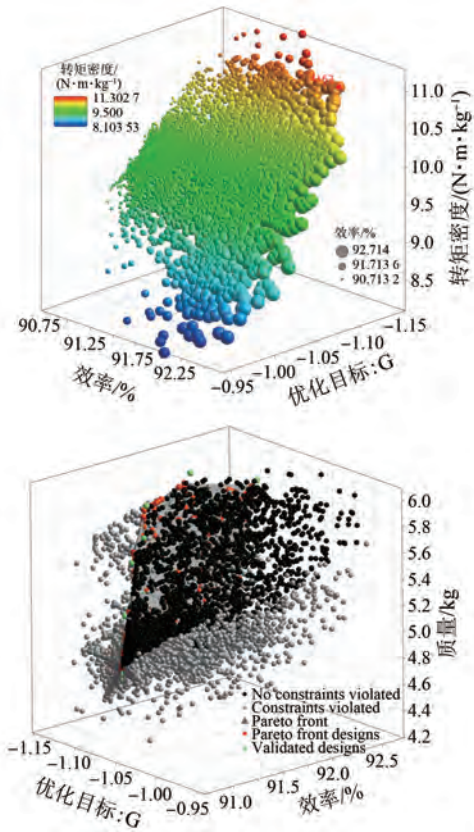


图 10 优化集群

Fig. 10 Optimization clusters

通过在 Pareto 前沿选取优化方案,满足效率大于 92%、转矩密度大于 9.5 N·m/kg。通过有限元校核,优化方案与原方案优化结果对比如表 2 所示。

由表 2 可知,优化方案较原方案效率提升 0.98%,质量降低 20.5%,转矩密度提升 27.80%。

表 2 优化结果对比

Tab. 2 Optimization results comparison

参数名称	原方案	优化方案
效率/%	91.20	92.09
质量/kg	6.05	4.81
转矩密度/(N·m·kg ⁻¹)	7.77	9.93
转矩/(N·m)	47.21	47.74
铜耗/W	793.32	694.42

3 Halbach 阵列充磁优化

Halbach 阵列的磁利用空间磁场矢量合成原理构建自增强磁场结构,在气隙区域形成高强度正弦磁场分布。通过正交磁化矢量叠加,显著提升气隙磁密基波幅值以增强电磁转矩密度,同时借助磁场波形正弦化降低高次谐波分量,降低损耗并优化转矩脉动。基于已优化模型,针对 Halbach 阵列充磁分别对磁钢分段数、充磁方式以及不等分磁钢进行研究。

3.1 Halbach 等分阵列充磁优化

基于 Halbach 充磁原理,分别通过改变永磁体磁化方向和分段数量进行研究。以单个电机极对作为 Halbach 阵列,将每块永磁体分别划分为三段、四段和五段。各方案的磁化方向与角度配置如图 11 所示。

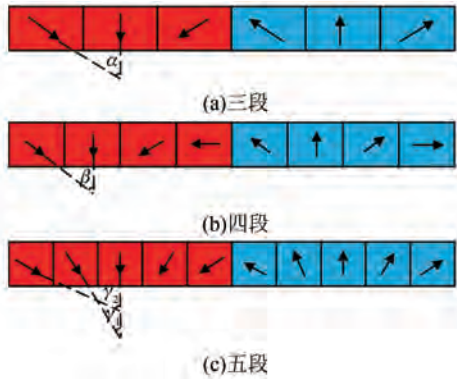


图 11 不同分段数 Halbach 阵列磁化方向示意图

Fig. 11 Schematic diagram of magnetization directions for Halbach arrays with different segment numbers

不同 Halbach 方案的电磁特性与最佳磁化角度的对比如表 3 所示,在相同定子参数及电流情况下,五分段阵列在 $\gamma_1 = 18.8^\circ$ 、 $\gamma_2 = 43.8^\circ$ 时,转矩最大。

优化结果表明,将永磁体每极划分为五等分

时,可获得最佳综合性能,转矩最大,效率最高。其中,充磁角度与转矩关系如图 12 所示。

表 3 不同 Halbach 分段数性能

Tab. 3 Performance comparison of different halbach array segmentation configurations

性能	三段	四段	五段
转矩/(N·m)	51.12	51.48	52.92
效率/%	92.97	92.82	93.53
反电势 THD/%	4.29	3.54	3.10
转矩脉动/%	4.12	2.90	3.03
功率密度/(kW·kg ⁻¹)	4.13	4.18	4.29
$\alpha/(^{\circ})$	28	/	/
$\beta/(^{\circ})$	/	21.25	/
$\gamma_1/(^{\circ})$	/	/	18.8
$\gamma_2/(^{\circ})$	/	/	43.8

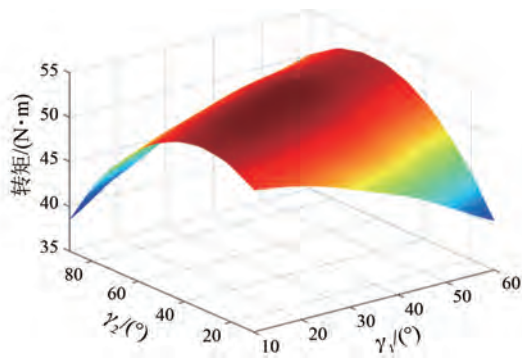


图 12 五段 Halbach 阵列充磁角度与转矩关系

Fig. 12 Relationship between magnetization angles and torque in a five-segment Halbach array

3.2 Halbach 不等分阵列充磁优化

将各磁极划分为五段非对称子单元,如图 13 所示。通过建立多参数优化模型,选取 $b=2a$,分析不等分磁钢充磁角度对转矩的影响。

由图 13 可知,当 $b=2a$ 时,在 $\gamma_1=32.5^{\circ}$ 、 $\gamma_2=41.3^{\circ}$ 时转矩最大,如图 14 所示,相较于五段等分 Halbach 充磁,转矩约提升 1.89%。

Halbach 三段、五段等分及五段不等分充磁条



图 13 不均匀 Halbach 充磁

Fig. 13 Non-uniform magnetization of Halbach array

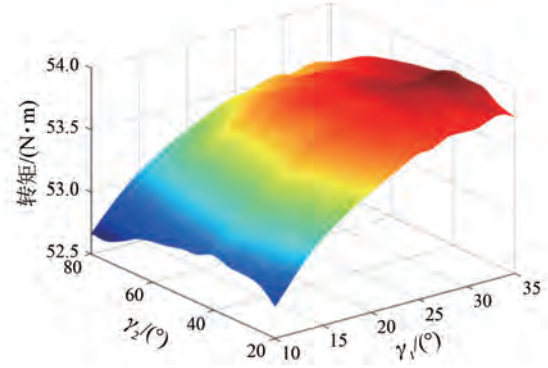


图 14 五段不等分 Halbach 阵列充磁角度与转矩关系

Fig. 14 Relationship between magnetization angles and torque in a five-segment unequal Halbach array

条件下的转矩波形对比如图 15 所示。

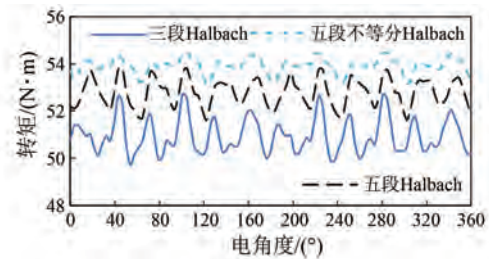


图 15 不同 Halbach 阵列充磁方式转矩波形

Fig. 15 Torque waveforms of Halbach arrays with different magnetization methods

由图 15 可知,五段不等分 Halbach 充磁时转矩提升最为明显,且转矩脉动最小。但由于电机外径较小,五段不等分 Halbach 实现工艺及成本较高。

4 制样与测试

4.1 样机制样

基于优化方案,进行首批电机制样及装机测试。对于方案中的扁线绕组先采用模具单个制样装配,验证绝缘耐压及装配工艺后制作定子总成,如图 16 所示。定子齿部采用燕尾槽设计,端部采用汇流排焊接,预设 3 路负温度系数 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 热敏电阻固定在绕组端部,完成总装后进行真空灌封,进一步提升定子绕组的可靠性。

由于电机外径为 180 mm,选用五段等分 Halbach 设计,磁钢及整机质量如图 17 所示。整机质量为 4.29 kg,较原方案减重 1.76 kg。



图 16 扁线绕组及定子总成
Fig. 16 Flat-wire winding and stator assembly

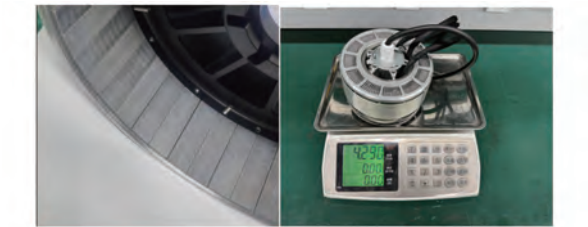


图 17 Halbach 磁钢整列及整机质量
Fig. 17 Halbach magnet array and total machine mass

4.2 样机台架测试

样机装配完成后采用螺旋桨台架进行测试, 测试环境如图 18 所示, 测试工况额定转速为 3 200 r/min, 额定功率为 16 kW。台架采集数据如图 19 所示, 电机温升数据如图 20 所示。

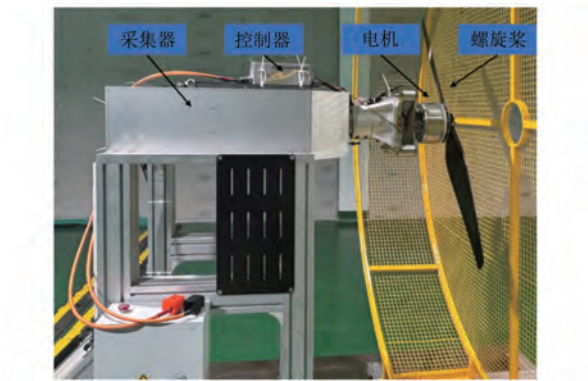


图 18 螺旋桨测试台架
Fig. 18 Propeller test bench

基于 3 200 r/min 额定设计需求进行螺旋桨台架测试, 由图 19 可知, 电机输出功率稳定为 16 kW; 电机与电控系统效率达到 92.9%, 满足设计需求。图 20 为电机绕组端部温升曲线, 稳态状态温升为 118 ℃, 绕组选用 H 级漆膜及灌封工艺, 有较大温升余量。

4.3 整机测试

样机完成 12 套 6 轴对桨装配, 并完成 120 m、



图 19 螺旋桨测试上位机
Fig. 19 Propeller test host computer

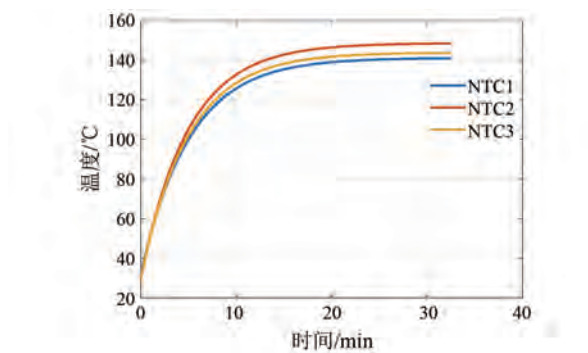


图 20 额定工况温升曲线
Fig. 20 Temperature rise curve under rated operating conditions

150 m 及 200 m 飞行任务, 如图 21 所示, 飞行数据如图 22 所示。



图 21 无人机整机及高空飞行测试
Fig. 21 UAV prototype and high-altitude flight test

由图 22 可知, 整机 12 套动力系统, 心跳稳定, 整机姿态调整会随转速波动, 相电流与温度有一定差异。在运行 1 h 的飞行任务中, 无人机与电机状态均满足消防任务。

整套无人机系统完成各类飞行任务 100 h 后, 单电机台架复测, 相同工况下, 较出厂状态系统效率降低小于 0.1%, 系统稳定可靠。

5 结语

本文基于多参数敏感度分级降解模型, 采用

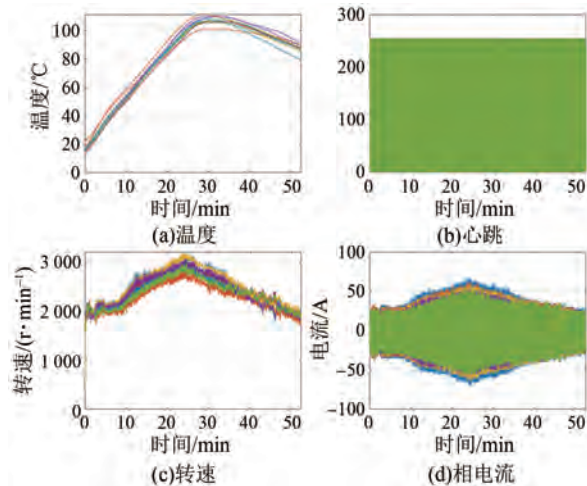


图 22 飞行数据

Fig. 22 Flight data

响应面法对 36 槽 32 极外转子电机开展多参数耦合优化,确认综合优化目标,使用遗传算法筛选综合目标函数的 Pareto 最优解。同时引入 Halbach 与集中式扁线绕组,完成样机制作,并突破 Halbach 一体化充磁、集中式扁线绕组绕制-焊接工艺及无缝灌封等工艺,完成样机制作。最后,构建螺旋桨台架测试系统与 200 m 整机飞行验证平台,完成优化设计验证,得出电机功率密度提升 41%。对比 100 小时整机飞行试验前后单电机螺旋桨台架测试数据,相同工况下效率衰减小于 0.1%,验证了优化方式的可行性及电推进系统的稳定性。

在下一阶段,本研究将深入研究螺旋桨负载下电磁-热-机械的耦合设计,为高空系留消防无人机提供高效可靠的结构设计。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

杨球、屈峰进行了方案设计、内容与结论撰写,廖智麟、李荣登进行了试验验证,钱书平、沈铖参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意最终稿件提交。

The scheme design, content composition, and conclusion drafting were conducted by Yang Qiu and

Qu Feng. The experimental verification was carried out by Liao Zhilin and Li Rongdeng. The paper review and modification were participated in by Qian Shuping and Shen Cheng. All authors have read and approved the final version for submission.

参考文献

- [1] KHAN M S, CHINNAIYAN R, BALACHANDAR S, et al. Centralized and reliable digital twin models for smart city's buildings protection during disaster [C]// 2022 International Conference on Computational Modelling, Simulation and Optimization, Pathum Thani, 2022.
- [2] HAMMADI M A, ALMESAFRI N, ZAFAR S, et al. Design and analytical analyses of eVTOL UAV performance calculator for power and energy [C]// 2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies, Istanbul, 2023.
- [3] MARZOOQI H A, ABDULRAHMAN M, ALRAMSI H, et al. Powering the future of urban air mobility: electrical design and systems in eVTOL vehicles [C]// 2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies, Dubai, 2024.
- [4] DAVE N, GERADA D, VAKIL G, et al. Fast sizing tool and optimization technique for concentrated wound slotless outer rotor motor for eVTOL application [C]// 2022 International Conference on Electrical Machines, Valencia, 2022.
- [5] ASHWINI K P, PRADEEP K S, KARAN P, et al. Unmanned smart fire fighting systems for forest and wildlife protection [C]// 2024 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference, Bagalkote, 2024.
- [6] 范镇. 高层建筑灭火救援过程中多旋翼无人机的合理使用[J]. 今日消防, 2023, 8(4): 26-28.
FAN Z. Reasonable use of multi-rotor drones in fire fighting and rescue of high-rise buildings [J]. Fire Protection Today, 2023, 8(4): 26-28.
- [7] ALKHATIB A A, MOHAMMAD K JABER, ALMADI M. A proposed automatic forest fire extinguishing and prevention system using drones [C]// 2024 IEEE International Humanitarian Technologies Conference, Bari, 2024.
- [8] 李玉童. 无人机在应急救援中的应用研究[J]. 今

- 日消防, 2023, 8(1): 49-51.
- LI Y T. Research on the application of drones in emergency rescue [J]. Fire Protection Today, 2023, 8(1): 49-51.
- [9] BENZAQUEN J, HE J, MIRAFZAL B. Toward more electric powertrains in aircraft: technical challenges and advancements [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(3): 177-193.
- [10] TANI Y, MORIMOTO S, SANADA M. Influence of number of poles, magnet arrangement, and current density on characteristics of inner and outer rotor PMSMs [C]// 2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore, 2011.
- [11] BIRD J Z. A review of electric aircraft drivetrain motor technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 1-8.
- [12] 单曦. 全电飞机驱动电机轻量化设计与仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- SHAN X. Lightweight design and simulation of an all-electric aircraft drive motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [13] CAO W, MECROW B C, ATKINSON G J, et al. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3523-3531.
- [14] ISMAGILOV F R, URAZBAKHITIN R R, MUSTAEV E I. Development of a synchronous electric motor with permanent magnets for small-sized unmanned aerial vehicles [C]// 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, Magnitogorsk, 2024.
- [15] DAVE N, GERADA D, VAKIL G, et al. Fast sizing tool and optimization technique for concentrated wound slotless outer rotor motor for eVTOL application [C]// 2022 International Conference on Electrical Machines, Valencia, 2022.
- [16] 初秋, 车爽, 李春艳. 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机优化设计 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 22-28.
- CHU Q, CHE S, LI C Y. Optimization design of less-rare-earth Halbach permanent magnet synchronous motor with module poles [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(3): 22-28.
- [17] 温建民, 罗成. 两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动特性对比研究 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(2): 36-40+55.
- WEN J M, LUO C. Comparison research on characteristics of two double-sided Halbach arrays permanent magnet eddy current braking [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(2): 36-40+55.
- [18] SINGH S, PILLAY P. High torque density traction motor using soft magnetic composites material with surface ring-type Halbach-array PM rotor topology [C]// IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, 2021.
- [19] 周赣, 黄学良, 周勤博, 等. Halbach 型永磁阵列的应用综述 [J]. 微特电机, 2008, (8): 52-55.
- ZHOU G, HUANG X L, ZHOU Q B, et al. The applications of the Halbach permanent magnet array: A review [J]. Small & Special Electrical Machines, 2008, (8): 52-55.
- [20] 李博, 李辉杰, 赵晓龙, 等. 基于改进等效面电流法的梯形 Halbach 永磁直线同步电机气隙磁场特性研究 [J]. 电机与控制应用, 2025, 52(6): 658-668.
- LI B, LI H J, ZHAO X L, et al. Research on air gap magnetic field characteristics of trapezoidal Halbach permanent magnet linear synchronous motor based on improved equivalent surface current method [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(6): 658-668.
- [21] 马志敏, 齐晓刚, 王少勃, 等. 基于全域解析法的外转子轮毂永磁同步电机多目标优化 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 44-54.
- MA Z M, QI X G, WANG S B, et al. Multi-objective optimization of outer rotor hub permanent magnet synchronous motor based on global analytical method [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(1): 44-54.
- [22] 王艾萌, 温云. 基于混合遗传算法的内置式永磁同步电机的优化设计 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(3): 59-65+95.
- WANG A M, WEN Y. Optimal design of interior permanent magnet synchronous motor based on hybrid genetic algorithm [J]. Electric Machines & Control Application 2017, 44(3): 59-65+95.
- [23] 刘栋良, 詹成根, 屈峰, 等. 无人机 17 kW 电机振动噪声分析与巡航转速下尖端噪声优化 [J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1749-1763.

- LIU D L, ZHAN C G, QU F, et al. Vibration noise analysis and tip noise optimization of unmanned aerial vehicle 17 kW motor at cruise speed [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6) : 1749-1763.
- [24] ZHU S H, PACIURA K, BARDEN R. Application of flat rectangular wire concentrated winding for ac loss reduction in electrical machines [C]// 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Vancouver, 2021.
- [25] LIU L X, SHI D, WANG Y C. High-accuracy analytical method for AC copper loss in flat wire windings [C]// 2024 IEEE 7th Student Conference on Electric Machines and Systems, Macao, 2024.
- [26] FANG H H, CHEN Q G, WAN X C, et al. Design and optimization of high efficiency flat wire motor for electric vehicle [C]// 2023 China Automation Congress, Chongqing, 2023.
-
- 收稿日期:2025-05-11
收到修改稿日期:2025-08-05
作者简介:
杨 球(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为航空器电推进系统、电动力系统和航电系统开发设计及优化,yangqiu@starair.cn;
* 通信作者:屈 峰(1996-),男,硕士,研究方向为电动航空动力系统设计机优化,qfeng137@163.com。