

基于能耗监测的民用无人机续航优化控制系统设计

聂佳磊

(江苏海洋大学, 江苏 连云港 222005)

摘要: 针对民用无人机在测绘巡检、物流配送等作业中能耗浪费、续航受限、环境适配能力弱的问题, 本文设计了一种基于实时能耗监测的无人机续航优化控制系统。系统以嵌入式主控为核心, 融合多类传感器完成飞行能耗与状态数据的精准采集, 通过建立动力能耗数学模型并结合改进粒子群算法, 动态优化飞行速度、高度、姿态及航迹参数, 减少无效能耗。系统采用分层架构, 实现能耗监测、数据分析、优化决策与闭环控制的一体化运行。测试结果表明, 相较于传统固定参数飞行方式, 该系统可显著降低无人机能耗, 续航性能提升 15.3%, 运行稳定、实时性好, 具备较高的工程应用价值。

关键词: 民用无人机; 能耗监测; 续航优化; 粒子群算法; 闭环控制系统

中图分类号: V279 **文献标识码:** B **文章编号:** 3134-9803(2026)04-0001-03

随着低空经济快速发展, 民用多旋翼无人机凭借灵活便捷、成本较低的优势, 广泛应用于电力巡检、国土测绘、物流配送等低空作业领域, 应用规模持续扩大, 但续航不足始终是限制其常态化、规模化作业的核心瓶颈^[1]。目前主流民用无人机续航仅20~40min, 难以满足长时间、大范围的作业需求。现有续航优化手段多依赖电池升级、机身轻量化等硬件改造, 存在成本高、迭代周期长、提升空间有限等问题^[2]。在软件控制方面, 传统无人机多采用固定飞行参数运行, 难以适配风速、负载波动等复杂工况, 无效能耗较大, 现有优化系统也普遍存在监测精度低、调控滞后、环境适配性差等缺陷, 无法实现动态精准续航优化^[3]。为此, 本文设计软硬件协同的无人机续航优化控制系统, 通过高精度传感器采集飞行与环境能耗数据, 构建动态能耗模型, 结合改进粒子群算法自适应优化飞行参数, 搭建能耗监测、分析、决策、调控一体化闭环体系。在不改动硬件的前提下降低无效能耗、提升续航性能, 可为民用无人机长效稳定作业提供技术支撑。

1 系统总体方案设计

1.1 设计思路

系统核心设计思路为实时能耗感知+动态模型建模+智能优化调控+闭环反馈修正。摒弃传统固定参数飞行控制模式, 通过多源传感器实时采集无人机电池电压、工作电流、飞行姿态、飞行速度、环境风速、搭载负载等关键数据, 精准计算实时功率消耗与累计能耗; 基于飞行力学与能量守恒原理构建无人机动态能耗模型, 量化各飞行参数与能耗的关联关系; 通过

改进粒子群算法迭代求解最优飞行参数组合, 动态调节无人机飞行状态; 同时引入闭环反馈机制, 实时修正优化策略, 确保不同工况下始终保持最优能耗状态, 实现续航能力最大化。

1.2 系统整体架构

本系统采用分层模块化设计, 整体分为感知采集层、数据处理层、优化决策层、执行控制层四大层级, 各层级独立运行、协同联动, 系统整体架构如图1所示。

(1) 感知采集层: 作为系统数据输入端, 集成电流电压传感器、惯性测量单元(IMU)、风速传感器、高度传感器, 负责实时采集无人机动力能耗数据、姿态数据、飞行位置数据及环境气象数据, 采样频率设置为100Hz, 保障数据实时性与完整性, 为能耗计算与优化决策提供原始数据支撑。

(2) 数据处理层: 以STM32嵌入式主控芯片为核心, 对采集的原始数据进行滤波去噪、异常剔除、数据校准处理, 计算无人机实时功耗、单位里程能耗、剩余电量及预估续航时长, 构建动态能耗数据库, 同时完成数据归一化处理, 为优化算法提供有效输入参数。

(3) 优化决策层: 系统核心模块, 依托构建的能耗数学模型, 通过改进粒子群优化算法, 以“单位作业能耗最低、续航时长最长”为目标, 结合实时工况约束条件, 迭代求解最优飞行速度、飞行高度、姿态倾角、航迹轨迹参数, 输出最优控制指令。

(4) 执行控制层: 接收优化决策层输出的控制指令, 通过无人机飞控模块调节电机转速、舵机角度, 完成飞行状态动态调整; 同时实时反馈执行结果, 形成闭环控制, 持续修正优化策略, 保障系统稳定运行。

感知采集层→数据处理层→优化决策层→执行控制层→
闭环反馈,各层级包含对应传感器、主控、算法模块及飞
控执行单元,实现全流程能耗优化控制。

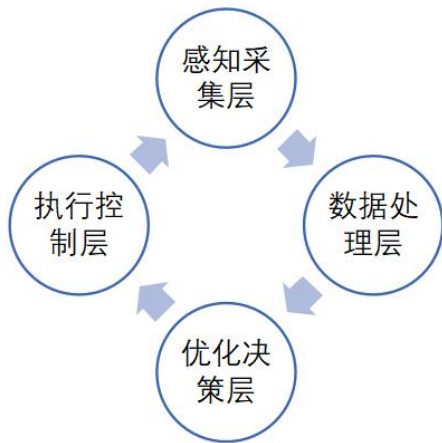


图1 系统整体架构图

1.3 系统硬件选型

硬件选型遵循低成本、高适配、小型化、低功耗原则,适配主流民用四旋翼无人机,核心硬件参数如表1所示。

表1 系统核心硬件参数表

硬件模块	型号规格	核心参数	功能说明
主控芯片	STM32F407ZGT6	168MHz 主频, 192KB RAM, 1MB Flash	数据处理、算法运行、系统控制
电流电压传感器	INA219	电压 0~26V, 电流 ±3.2A, 精度 0.5%	实时采集电池能耗数据
惯性测量单元	MPU6050	三轴加速度、三轴角速度, 采样率 100Hz	采集无人机姿态、飞行状态数据
风速传感器	FS400	风速 0~30m/s, 精度 ±0.2m/s	采集环境风场数据, 适配环境能耗补偿
高度传感器	MS5611	测高精度 ±10cm, 响应速度快	实时采集飞行高度数据

2 系统核心模型与算法设计

2.1 无人机能耗数学模型构建

无人机飞行能耗主要由悬停能耗、平飞能耗、姿态调整能耗及环境扰动能耗四部分组成。基于飞行力学与能量守恒原理,忽略微小机械损耗,构建无人机实时能耗模型。

无人机实时总功率消耗计算公式:

$$P = P_h + P_f + P_a + P_w$$

式中: P 为无人机实时总功耗 (W); P_h 为悬停功耗 (W); P_f 为水平飞行功耗 (W); P_a 为姿态调整功耗 (W); P_w 为风场扰动补偿功耗 (W)。

悬停功耗由无人机自重与升力平衡决定,公式为:

$$P_h = \sqrt{\frac{(mg)^3}{2\rho S}}$$

式中: m 为无人机整机质量 (kg); g 为重力加速度 (9.8m/s²); ρ 为空气密度 (kg/m³); S 为旋翼有效受力面积 (m²)。

水平飞行功耗与飞行速度、空气阻力正相关,姿态调整功耗由姿态倾角变化速率决定,风场扰动功耗随风速、风向夹角动态变化。基于上述模型,可精准量化不同飞行状态、不同环境下的无人机能耗损耗,为优化控制提供理论依据。

2.2 改进粒子群优化算法设计

传统粒子群算法存在易陷入局部最优、收敛速度慢的问题,无法满足无人机实时动态优化需求。本文对传统算法进行改进,引入自适应权重因子与收敛阈值机制,以单位作业距离能耗最低为目标函数,以飞行速度、高度、姿态倾角为优化变量,结合无人机最大升力、最大速度、电池额定功率等约束条件,实现飞行参数动态最优求解。目标函数设置如下:

$$\min E = \frac{\int_0^t P(t)dt}{L}$$

式中: E 为单位里程能耗 (J/m); L 为飞行里程 (m); $P(t)$ 为实时功耗。

改进算法通过动态调整惯性权重,迭代前期增大权重扩大搜索范围,迭代后期减小权重精准收敛最优解,有效提升算法收敛速度与全局寻优能力,适配无人机实时工况动态变化的优化需求。

2.3 续航优化控制策略

基于能耗模型与改进算法,设计分层优化控制策略。一是稳态巡航优化,无人机平稳飞行时,算法实时迭代最优飞行速度与高度,保持最小能耗巡航状态;二是动态扰动优化,遭遇逆风、侧风、负载波动时,快速调整姿态倾角与飞行功率,抵消环境扰动带来的额外能耗;三是航迹优化,结合全局能耗最优原则,修正飞行航迹,规避高能耗飞行区域,减少无效飞行损耗。同时设置能耗预警阈值,当实时能耗超出阈值时,自动触发节能模式,优先保障续航时长。

3 系统软件设计

系统软件基于Keil MDK开发,采用模块化编程思路,主要包含数据采集模块、数据预处理模块、能耗计算模块、优化算法模块、飞控执行模块及串口通信模块,软件运行流程清晰、响应速度快。软件主流程:系统上电初始化后,各传感器模块启动自检,自检通过后以100Hz频率持续采集能耗、姿态、环境数据;对原始数据进行均值滤波、异常值剔除处理,提升数据

精度；通过能耗模型计算实时功耗、剩余电量及预估续航；调用改进粒子群算法求解最优飞行控制参数；将优化指令传输至飞控模块，完成飞行状态调节；实时采集执行反馈数据，循环迭代优化，实现闭环持续调控。系统软件核心功能模块运行参数如表2所示。

表2 系统软件模块参数性能表

软件模块	运行频率	响应延迟	核心功能
数据采集模块	100Hz	≤10ms	多源传感器数据同步采集
数据预处理模块	100Hz	≤5ms	滤波去噪、数据校准、异常处理
能耗计算模块	50Hz	≤8ms	实时功耗、续航时长计算
优化算法模块	20Hz	≤20ms	最优飞行参数迭代求解
飞控执行模块	100Hz	≤5ms	飞行参数调节与闭环控制

4 系统测试与结果分析

4.1 测试方案

为验证系统续航优化效果，采用同型号四旋翼民用无人机开展对比测试，测试环境为常温常压、低空开阔场地，设置传统固定参数飞行模式为对照组，本优化控制系统为实验组。两组无人机搭载相同电池、相同负载，执行相同航线、相同作业任务，分别记录两组飞行总时长、平均功耗、单位里程能耗数据，每组测试重复5次，取平均值作为最终测试结果，排除偶然误差干扰。

4.2 测试结果与分析

对比测试数据如表3所示，通过数据分析可直观验证系统优化效果。

由测试数据可得：相较于传统固定参数飞行模式，本系统优化后无人机平均功耗降低11.4W，单位里程能耗降低16.2J/m，无效能耗损耗减少12.7%；续航时长由

28.7min提升至33.1min，续航提升幅度达15.3%。测试结果表明，本系统可精准识别无人机无效能耗损耗，通过动态优化飞行参数有效降低能耗，显著提升续航能力。同时，测试过程中系统运行稳定，参数调节平滑无突变，姿态控制精准，无失控、抖动等异常现象，响应延迟满足无人机实时飞行控制需求，具备良好的可靠性与实时性。

表3 对比测试数据

测试组别	平均功耗/W	单位里程能耗 (J·m ⁻¹)	续航时长/min
对照组（传统模式）	89.6	128.3	28.7
实验组（优化模式）	78.2	112.1	33.1

5 结论

本文设计的基于能耗监测的民用无人机续航优化控制系统，通过搭建多源数据感知体系，构建精准的无人机动态能耗数学模型，结合改进粒子群优化算法实现飞行参数自适应动态调控，形成了完整的能耗闭环优化控制体系。系统无需改动无人机硬件结构，通过软件算法优化即可实现能耗降低、续航提升，成本低廉、适配性强。实测结果证明，系统可有效适配复杂低空作业工况，显著降低无人机无效能耗，大幅提升续航时长，同时保障飞行稳定性与安全性，有效解决了民用无人机续航短板问题，具备极高的工程推广价值。

参考文献：

[1] 李继宇, 张植勋, 赵胤伟, 等. 农用多旋翼无人机作业能耗白盒模型构建与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54 (08): 67-76.
[2] 卢艳鹏, 郭金, 周蒙. 基于能量闭环的太阳能无人机能源管理 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (08): 2624-2631.
[3] 李斌, 蔡海晨, 赵传信. 基于计算重用的无人机辅助边缘计算系统能耗优化 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46 (7): 2740-2747.

Design of Civil UAV Endurance Optimization Control System Based on Energy Consumption Monitoring

Nie Jialei

(Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222005)

Abstract: This paper proposes a real-time energy consumption monitoring-based endurance optimization control system to address the disordered energy consumption, limited flight duration and poor environmental adaptability of civil UAVs in mapping, inspection and logistics missions. The system adopts an embedded main controller and integrated multi-sensors to achieve high-precision full-condition energy data monitoring. Combined with the established dynamic energy consumption model and improved particle swarm optimization algorithm, flight parameters including altitude, velocity, attitude angle and flight path are dynamically optimized to reduce invalid energy loss. A hierarchical framework is constructed to realize autonomous closed-loop control throughout monitoring, analysis and decision-making. Experimental results verify that the system reduces invalid energy consumption by 12.7% and increases endurance by 15.3% compared with the traditional fixed-parameter flight mode, which possesses excellent stability and practical engineering value for civil multi-rotor UAV applications.

Keywords: civil UAV; energy consumption monitoring; endurance optimization; particle swarm optimization algorithm; closed-loop control system