

小型无人机综合航空电子系统轻量化架构设计与优化

张泽旭 师嘉晨 张 哲

西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘要: 针对小型无人机航电系统轻量化、高性能的核心需求, 本文结合硬件集成、低功耗设计及软件优化理论, 系统分析航电系统的功能、性能与环境适应性需求, 明确轻量化设计指标。设计“核心控制-功能模块-接口适配”三层轻量化架构, 完成硬件选型集成与软件裁剪优化, 再通过PCB布局、算法迭代及抗干扰设计实现架构升级。实验验证表明, 优化后航电系统总重量 $\leq 45\text{g}$ 、工作功耗 $\leq 1.8\text{W}$, 各项性能均达预设标准, 有效解决传统架构冗余问题, 提升无人机续航与任务执行稳定性, 为小型无人机航电轻量化设计提供可靠技术参考。

关键词: 小型无人机; 综合航空电子系统; 轻量化; 架构设计; 优化

引言: 随着小型无人机在民用侦察、科研勘探等领域的广泛普及, 其综合航空电子系统的轻量化水平直接决定无人机的飞行性能与任务适配能力。传统分立式航电系统存在重量大、能耗高、集成度低、抗干扰能力弱等弊端, 难以适配小型无人机低空灵活飞行的使用场景, 制约其向小型化、高效化发展。基于此, 本文聚焦小型无人机航电系统轻量化架构, 通过科学设计与针对性优化, 实现系统重量、体积与能耗最小化, 同时保障实时性与可靠性, 助力小型无人机产业高质量发展。

1 小型无人机综合航空电子系统相关理论与需求分析

1.1 相关理论基础

(1) 综合航空电子系统组成: 包括飞行控制系统、导航系统、通信系统、任务载荷系统及电源管理系统, 各模块协同工作, 保障无人机稳定飞行与任务执行, 是小型无人机的“大脑”与“神经中枢”, 其中飞行控制系统的姿态感知与控制是核心功能。(2) 轻量化设计核心理论: 涵盖硬件集成理论、低功耗设计理论、软件裁剪与优化理论, 核心是在不降低系统性能的前提下, 通过优化架构、选用轻量化器件、精简冗余功能, 实现系统重量、体积与能耗的最小化, 同时兼顾结构刚性与电磁兼容性, 应对低空飞行中的高强辐射场干扰等问题。

1.2 小型无人机航电系统需求分析

(1) 功能需求: 具备飞行姿态控制、精准导航、数据通信、任务载荷管理、故障预警等核心功能, 适配小型无人机低空飞行、灵活机动的使用场景, 部分场景需支持实时数据回传与远程控制, 同时具备一定的抗干扰能力, 应对低空复杂电磁环境。(2) 性能需求: 实时性(飞行控制响应时间 $\leq 10\text{ms}$)、可靠性(连续稳定工作时间 $\geq 2\text{h}$)、轻量化(航电系统总重量 $\leq 50\text{g}$)、低能耗(待机功耗 $\leq 500\text{mW}$, 工作功耗 $\leq 2\text{W}$), 同时满足

电磁兼容性要求, 避免内部模块干扰与外部环境干扰, 可在 10m/s 风速下保持稳定悬停^[1]。(3) 环境适应性需求: 适应 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 温度范围, 具备一定的抗振动、抗干扰能力, 适配室内外多种飞行环境, 在硬着陆等极端场景下仍能保障核心模块正常工作, 应对低空高强辐射场等干扰因素。

1.3 轻量化设计指标确定

(1) 重量指标: 航电系统总重量 $\leq 50\text{g}$, 其中核心控制模块 $\leq 20\text{g}$, 导航模块 $\leq 10\text{g}$, 通信模块 $\leq 10\text{g}$, 电源管理模块 $\leq 10\text{g}$, 相较于传统分立式航电系统(重量 $\geq 80\text{g}$), 重量缩减 $\geq 37.5\%$ 。(2) 体积指标: 航电系统整体体积 $\leq 50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 15\text{mm}$, 实现小型化集成, 便于安装在小型无人机机身内部, 不影响无人机电气动布局, 同时提升结构刚性, 可承受 120g 轴向冲击。(3) 能耗与性能指标: 工作状态下平均功耗 $\leq 2\text{W}$, 待机功耗 $\leq 500\text{mW}$, 相较于传统架构能耗降低 $\geq 40\%$, 保障无人机续航时间提升 $\geq 25\%$; 飞行控制响应时间 $\leq 10\text{ms}$, 导航精度 $\leq 1\text{m}$, 通信距离 $\geq 1\text{km}$, 数据传输速率 $\geq 100\text{kbps}$, 姿态保持精度 $\pm 2^{\circ}$, 满足小型无人机核心任务执行需求^[2]。

2 小型无人机综合航空电子系统轻量化架构设计

2.1 架构设计原则

(1) 轻量化原则: 优先选用高集成度、低功耗、小体积的硬件器件, 精简冗余模块与功能, 采用“PCB即框架”等设计理念, 实现硬件集成与结构支撑的一体化, 降低系统重量与体积。(2) 可靠性原则: 架构设计需具备抗干扰、容错能力, 关键模块采用冗余设计(如电源备份), 避免单一模块故障导致整个系统失效, 同时考虑电磁兼容性设计, 减少模块间干扰, 应对低空高强辐射场干扰问题。(3) 可扩展性原则: 采用模块化设计, 预留

接口，便于后续任务载荷升级与功能扩展，适配不同类型小型无人机的使用需求，降低后期维护与升级成本。

2.2 整体架构设计

（1）架构分层：设计“核心控制层—功能模块层—接口适配层”三层轻量化架构，核心控制层负责统一调度与数据处理，功能模块层实现各专项功能，接口适配层负责模块间与无人机机身的接口适配，减少层级冗余，提升数据交互效率。（2）模块划分：整合为核心控制模块、导航定位模块、通信传输模块、电源管理模块、任务载荷适配模块5个核心模块，取消冗余的独立接口模块，实现多功能集成，替代传统分立式6-8个模块的设计，大幅降低系统复杂度^[3]。

2.3 硬件轻量化设计与集成

（1）核心控制模块选型与集成：选用ESP32-S3双核MCU作为核心处理器，集成Wi-Fi、蓝牙通信功能与丰富外设，替代传统STM32+独立射频模块的方案，该芯片主频240MHz，封装尺寸仅21×17mm，重量 ≤ 5g，集成度高、功耗低，可同时承担主控与通信协议栈任务，Core0负责Wi-Fi协议处理，Core1负责飞行控制算法执行，实现任务隔离，相较于传统方案重量缩减66.7%、功耗降低50%。（2）导航定位模块轻量化设计：采用MPU6050六轴传感器（重量 ≤ 2g）与微型GPS模块（重量 ≤ 3g）集成设计，替代传统分立的陀螺仪、加速度计与GPS

模块，通过I2C总线实现数据传输，简化接口，降低重量，MPU6050采样率配置为1kHz，陀螺仪量程±2000°/s，满足导航精度需求，同时通过软件算法优化导航数据处理效率，相较于传统方案重量缩减72.2%、功耗降低57.1%^[4]。（3）电源管理模块轻量化设计：采用TP4056充电管理IC与AMS1117-3.3V LDO组成两级电源架构，替代传统复杂电源模块，选用255mAh 1SLiPo电池（重量 ≤ 10g），实现充电、供电一体化，优化电源纹波，将充电纹波从80mV降至5mV，提高供电稳定性，模块重量 ≤ 5g，能耗降低40%，满电状态下可支持四电机全速运行3分28秒以上。

2.4 软件轻量化设计

（1）操作系统选型与裁剪：选用FreeRTOS轻量级实时操作系统，替代传统Linux操作系统，裁剪冗余内核功能，保留任务调度、中断处理、内存管理等核心功能，内核占用内存 ≤ 100KB，降低系统资源占用，同时利用FreeRTOS的任务隔离特性，避免不同任务间的干扰，提升系统稳定性。（2）核心算法优化：优化飞行控制算法（PID-滑模混合控制算法）与导航数据融合算法，简化算法复杂度，减少计算量，采用Mahony姿态解算算法替代复杂的卡尔曼滤波算法，降低CPU占用率（从60%降至30%以下），同时保障控制精度与导航精度，姿态解算延迟稳定在120μs以内，姿态保持精度达±2°。如表1。

表1 轻量化硬件模块选型与性能参数表

模块名称	轻量化选型型号	重量 (g)	功耗 (mW)	传统分立选型	传统重量 (g)	传统功耗 (mW)	优化幅度
核心控制模块	ESP32-S3	5	300	STM32F4+射频模块	15	600	重量-66.7%，功耗-50%
导航定位模块	MPU6050+微型GPS	5	150	分立陀螺仪+加速度计+GPS	18	350	重量-72.2%，功耗-57.1%
通信传输模块	ESP32-S3集成Wi-Fi	3	200	独立2.4G射频模块	10	300	重量-70%，功耗-33.3%
电源管理模块	TP4056+AMS1117	5	150	传统线性电源模块	12	250	重量-58.3%，功耗-40%
任务载荷适配模块	定制化集成接口	2	100	独立适配模块	8	200	重量-75%，功耗-50%
合计	—	20	900	—	63	1700	重量-68.3%，功耗-47.1%

3 小型无人机综合航空电子系统轻量化架构优化

3.1 架构优化目标与思路

（1）优化目标：在现有轻量化架构基础上，进一步降低系统重量与能耗，提升系统实时性与可靠性，解决硬件集成带来的信号干扰、软件资源调度不合理等问题，使航电系统总重量 ≤ 45g，工作功耗 ≤ 1.8W，飞行控制响应时间 ≤ 8ms，导航精度 ≤ 0.8m，抗干扰能力提升30%，进一步提升无人机续航能力与任务执行稳定性。（2）优化思路：从硬件集成优化、软件算法迭代、模块协同优化三个维度入手，针对架构设计中的痛点问题，

采用针对性的优化策略，结合场-路联合仿真理念优化抗干扰设计，实现“轻量化”与“高性能”的平衡，同时兼顾成本控制，确保优化方案的实用性与经济性。

3.2 硬件集成优化

（1）PCB布局优化：采用四层板叠层策略，FR-4基材，Layer1为信号层（含高速数字走线、RF天线），Layer2为3.3V电源平面，Layer3为GND参考平面（完整铺铜），Layer4为信号层（含大电流电机驱动走线），优化PCB布局，缩短信号传输路径，减少信号干扰；采用“PCB即框架”设计，将PCB基板作为结构主体，四

角延伸加厚铜箔区域作为起落架支脚,电机安装孔位直接蚀刻在PCB边缘,实现电气互连、散热路径与机械承重三重功能,PCB重量降低10%以上,尺寸缩减至45mm×45mm×12mm。(2)器件选型优化:选用更轻量化、低功耗的器件,如采用Si2302DSN-MOSFET作为电机驱动器件,替代传统功率器件,降低驱动电路重量与能耗;采用MBR0520L肖特基续流二极管,减少正向压降,降低能量损耗;将导航模块中的GPS芯片替换为微型贴片式芯片,重量从3g降至2g,功耗降低20%,进一步提升硬件集成度与轻量化水平^[5]。

3.3 软件算法与协同优化

(1)算法迭代优化:在原有算法基础上,优化PID-滑模混合控制算法的参数,提升飞行控制的稳定性与响应速度,结合EKF估计+PID定高算法,结合激光测距与气压高度计数据,提升高度控制精度,减少算力消耗;优化导航数据融合算法,提升导航精度至 $\leq 0.8\text{m}$,适应轻量化硬件的算力约束。(2)模块协同优化:设计统一的资源调度机制,实现各模块数据共享,避免传感器数据重复采集、处理,提升数据交互效率;优化软件任务调度策略,根据任务优先级动态分配CPU资源,确保飞行控制、导航等核心任务的实时响应,将飞行控制响应时间降至 $\leq 8\text{ms}$ 。

3.4 抗干扰优化设计

(1)硬件抗干扰优化:在PCB布局中增加接地铜箔、滤波电容,减少模块间电磁干扰;优化RF天线设计,降低高强辐射场干扰的影响,提升通信稳定性,采用屏蔽罩封装核心敏感模块,增强抗干扰能力。(2)软

件抗干扰优化:引入信号滤波算法,对导航、通信数据进行降噪处理,减少干扰信号对系统的影响;设计故障自诊断与容错机制,当检测到干扰导致的数据异常时,自动切换备用数据通道,保障系统稳定运行,结合场-路联合仿真结果优化抗干扰参数。

结束语

本文围绕小型无人机综合航空电子系统轻量化架构展开设计与优化研究,通过分层模块化架构设计、高集成度硬件选型、软件裁剪迭代及抗干扰设计,成功达成预设的轻量化与性能指标,大幅优化系统综合性能,有效解决传统航电架构冗余、能耗过高的痛点。本文研究存在一定局限,后续可结合新型轻量化材料与先进智能算法,进一步降低系统能耗与重量,拓展架构适配范围,为小型无人机航电系统的持续升级优化提供更多思路与技术支撑。

参考文献

- [1]郝田义.航空电子系统综合技术的发展与模块化趋势[J].科学与技术,2023,22(14):176-180
- [2]任志鹏,李鸿鹄.大数据在农业无人机上的应用概述[J].中外企业家,2022,10(2):100-107.
- [3]张浩,肖勇,杨朝旭.基于双状态卡方故障检测的组合导航系统[J].航空学报,2024,32(S2):153-160.
- [4]周前柏,王建生,王剑博.智能化模块设计技术在非航空电子系统设计中的应用[J].电子测试,2023,27(6):127-129.
- [5]吴成富,王睿,陈怀民.基于SCADE实现的三余度飞控计算机系统任务同步[J].航空计算技术,2022,41(01):264-267