

嵌入式技术的小型无人机飞行控制系统分析

赖友源

广东工程职业技术学院, 信息工程学院, 广东 广州 510520

摘要: 嵌入式技术的快速发展推动了小型无人机飞行控制系统的研究进入了一个新阶段。无人机凭借出色的灵活性、环境适应能力和信息化特性, 在军事侦察、农业监测和高空拍摄等领域得到了广泛应用。然而, 传统飞行控制系统在能耗、数据传输效率以及实时响应能力方面仍存在一些难点, 制约了该技术的发展。为此, 本文以嵌入式技术为基础, 从现状分析入手, 探讨了当下存在的主要问题, 并梳理了未来可能的优化方向, 力求为小型无人机飞行控制系统的改进提供借鉴和参考。

关键词: 嵌入式技术; 飞行控制; 小型无人机

Analysis of Flight Control System of Small UAV Based on Embedded Technology

Lai, Youyuan

Guangdong Engineering Polytechnic, Institute of Information Technology, Guangzhou, Guangdong, 510520, China

Abstract: The rapid development of embedded technology has pushed the research of flight control system of small unmanned aerial vehicle into a new stage. With its excellent flexibility, environmental adaptability and information characteristics, UAV has been widely used in military reconnaissance, agricultural monitoring and aerial photography. However, the traditional flight control system still has some difficulties in energy consumption, data transmission efficiency and real-time response ability, which restricts the development of this technology. Therefore, based on embedded technology, this paper starts with the analysis of the current situation, discusses the main problems existing at present, and combs the possible optimization direction in the future, in order to provide reference for the improvement of the flight control system of small UAV.

Keywords: Embedded technology; Flight control; Small UAV

DOI: 10.62639/ssps29.20240104

近年来, 航空技术和电子信息领域的快速发展, 使无人机的应用范围从专业军事装备逐步扩展到农业、环保、物流以及公共安全等多个行业。小型无人机因成本较低、操作灵活、任务适应性强等优势, 逐渐成为全球科技创新和产业升级的一个重要领域。根据相关文献报道, 未来五年内, 全球无人机市场预计将保持年均超过15%的增长速度, 这一趋势对飞行控制系统的性能提出了更高要求。然而, 现有系统在能耗、数据传输效率和控制精度方面仍存在一些不足, 限制了无人机在复杂场景中的应用能力。因此, 围绕嵌入式技术进行小型无人机飞行控制系统的改进, 成为当下技术与经济价值并存的研究方向。

一、小型无人机飞行控制系统现状

当前, 多数小型无人机的飞行控制系统都是由飞行控制模块、通信模块和地面监控模块组成。

(一) 飞行控制模块

基于嵌入式技术的飞行控制模块广泛采用STM32、S3C2410等32位ARM微处理器, 这些微控制器具有低功耗、信号处理能力强大的优势, 能够高效管理飞行数据和执行任务。部分系统还引入DM368等协处理器, 用于处理图像和视频, 可实现数据的实时采集和处理^[1]。

(二) 通信模块

数据传输主要采用XT09-SI等无线射频模块与标准串行接口(RS-232)结合的形式, 该模块化设计可有效提高通信灵活性, 然而在一些复杂的环境下, 难以避免干扰问题和数据延迟问题。

(三) 地面监控模块

地面监控站利用UC/OS-II等实时操作系统与无人机进行交互, 系统界面采用Qt等开发工具, 可支持数据的实时接收与指令发送。然而, 由于数据链路的不稳定性, 监控响应的实时性和准确性仍具有较大的优化空间。

二、嵌入式技术的小型无人机飞行控制系统存在的主要问题

尽管嵌入式技术在无人机飞行控制领域取得了显著进展, 但仍存在以下关键问题:

(一) 功耗与续航

无人机飞行控制系统的能耗问题一直是限制其长时间飞行和远距离任务的重要因素。飞行控制模块通常采用ARM架构的32位微处理器, 虽然这些芯片以低功耗见长, 但在执行复杂任务时, 仍然具有很高的电流需求。特别是在视频采集和传输过程中, 协处理器需要高频率运行来支持H.264编码和解码, 其峰值功耗往往达到数瓦, 这对无人机有限的电池容量造成较大压力。

(稿件编号: IS-24-4-1029)

作者简介: 赖友源 (1970-02), 男, 汉, 广东饶平人, 硕士, 信息工程学院副教授, 主要研究方向为嵌入式系统, 无人机开发。

此外, 传感器模块的持续运行、通信模块的频繁数据交换以及电机控制单元的动态调节都在不断消耗能源。虽然锂电池具备高能量密度, 但在实际运行中, 它的充放电效率会受环境温度、负载状态等因素影响, 会缩短续航时间。

(二) 数据传输效率

当前多数小型无人机采用无线射频模块传输数据, 这类模块的带宽受制于通信频率范围, 一般处于数百 kbps 至几 Mbps 之间^[2]。在实时视频传输场景中, H.264 或 MPEG4 编码的高清视频数据量较大, 传输速率容易达到模块带宽的上限。此外, 在高压电线巡检或其他复杂电磁环境中, 干扰信号还可能造成频率漂移、包丢失甚至通信中断。这些问题最终将导致地面监控站接收到的数据存在延迟、完整性降低等现象, 使操作的精准性大打折扣。

为增强抗干扰能力和传输稳定性, 部分系统采用 RS-232 串行通信接口, 但它的传输速率远低于现代通信需求, 无法适应高速数据交换的需求。

(三) 实时控制与算法优化

在飞行中, 无人机需要快速响应复杂的任务场景, 这对控制算法的实时性和灵活性提出了更高要求。虽然传统 PID 控制的结构简单、计算量小, 但在处理非线性系统问题时表现出明显的滞后性和不足, 例如, 在轨迹跟踪和负载转矩补偿时, 传统 PID 控制并无法有效适应快速变化的环境变量。

为了提升控制精度和响应速度, 模糊 PID 控制已被逐步应用, 但参数设置方面通常依赖于人工经验, 无法实时调整。进一步的研究表明, 粒子群优化 (PSO) 算法能够优化模糊 PID 控制器参数, 提升响应速度和鲁棒性, 但由于在计算复杂度方面有所增加, 对嵌入式硬件的处理能力提出了更高的要求。可见, 如何在资源有限的嵌入式系统中实现高效算法优化, 仍是当前的一大难点。

(四) 系统集成度

小型无人机的飞行控制系统需要在有限的空间内实现多功能模块的高效协作, 然而现有的模块化设计虽然便于硬件扩展, 但各模块间的数据传输和信号处理常依赖总线通信, 增加了系统的布线复杂度, 使信号干扰风险增加。此外, 多模块设计导致重量增加, 这对小型无人机的负载能力也构成了额外挑战。

在高集成度要求下, 片上系统 (SoC) 逐渐成为解决方案之一, 将处理器、存储器和传感器接口集成在单一芯片中, 可以显著减少体积和重量。但是在设计 SoC 时, 需要平衡好性能与成本, 开发门槛较高且验证周期较长等问题在一定程度上限制了 SoC 在小型无人机领域的普及。

三、对策与优化路径

针对上述问题, 可从硬件与算法两方面入手优化嵌入式技术。

(一) 硬件优化

硬件优化是提升小型无人机飞行控制系统性能的关键环节, 从处理器选型到通信模块的更新

再到传感器的优化设计, 每一部分都直接影响着系统的功耗、效率和可靠性。首先, 在应用低功耗处理器时, 需要得到更高效的架构支持, 如 Cortex-M 系列的嵌入式微处理器, 这类芯片采用先进的 RISC 架构, 具备动态电压和频率调节能力, 可根据任务负载调整功耗, 降低整体能耗。除此之外, 在复杂任务场景中, 还需要引入协处理器, 下表 1 的 DM368 协处理器可用于视频编解码, 将高密度计算任务从主控制器中剥离, 在缓解功耗压力的同时提升数据处理的实时性。

表 1 DM368 协处理器

参数类别	具体描述
处理器类型	ARM 926EJ-S
主频	高达 432 MHz
视频编码格式	H.264、MPEG4、MJPEG
分辨率支持	支持 1080p 全高清视频
存储支持	内置 16KB 指令缓存, 32KB 数据缓存
接口类型	I2C、SPI、UART、SD/MMC 等
功耗	低功耗设计, 典型功耗在几百毫瓦范围内
应用场景	实时视频处理、多媒体数据传输
优势	集成度高, 处理能力强, 适合嵌入式应用

通信模块的升级直接关系到数据传输的速度和抗干扰性能, 在传统无线射频模块无法满足高速传输需求的情况下, 应用 Wi-Fi 6 或 5G 等高频段通信技术可大幅提高带宽, 降低传输延迟, 再结合高速光耦隔离设计, 便能够有效屏蔽环境噪声和电磁干扰, 增强信号的稳定性和可靠性^[3]。最后, 传感器集成化是优化系统重量和功耗的重要方向, 开发多功能一体化传感器, 将加速度计、陀螺仪和磁力计整合到一个单元中, 可以减少外部模块的数量, 从而降低整机重量和功耗。

为了进一步提升集成度, 使用片上系统 (SoC) 方案将传感器接口和数据处理单元合并到同一芯片中, 也是一种值得探索的路径, 该设计方案既可简化硬件架构, 还能提升信号处理的速度和效率, 有助于解决当前模块化设计中布线复杂性和信号干扰的问题。综合来看, 我们不能将硬件优化不等同于单一模块性能的提升, 而是需要从全局角度去考虑整体架构的协同工作, 既要满足性能需求, 又要实现低功耗、轻量化和高集成度的平衡。

(二) 软件优化

软件优化在无人机飞行控制系统的性能提升过程中发挥着不可替代的作用, 从操作系统功能的拓展, 到算法设计的智能化, 再到数据处理效率的提升, 每一项改进都需要紧密贴合任务需求, 同时又要充分考虑硬件能力的承载水平。首先, 在优化实时操作系统时, 应优先考虑扩展任务管理能力和调度策略, 例如升级为 UC/OS-III 这类多任务操作系统, 可支持优先级中断调度和动态任务分配, 减少资源竞争的同时提高系统的实时响应能力。为了更充分地适应复杂的飞行任务, 提高系统的稳定性, 还建议在操作系统内核引入内存保护和多核调度机制。

在智能控制算法的应用过程中, 需要基于任务实际情况以及系统的非线性特征作出针对性设计方案, 如模糊 PID 控制器结合传统 PID 的精

确定性和模糊控制的鲁棒性,能够在飞行轨迹调整和负载转矩补偿方面提供更灵活的控制。而为了进一步提升控制效果,可以将粒子群优化算法(PSO)集成到参数调节过程中,实时更新Kp、Ki和Kd等参数,提高对非线性动态变化的适应能力。这一过程需要嵌入式硬件具备较高的计算能力,同时还要求软件系统能够高效管理算法的迭代和计算负载。

数据压缩技术是视频传输效率提升的核心,在优化H.264编码算法时,可考虑从像素预测和压缩策略入手,在场景变化频率较高的视频片段中优先选择4×4像素块进行精准预测,而在静态场景中使用16×16像素块进行简化处理,减少计算复杂度和传输数据量。为了进一步提高编码效率,还可以采用加法和移位操作对帧内预测模式进行简化,再结合位流优化策略降低带宽占用。这些软件层面的改进彼此呼应,相互促进,在提升无人机飞控精度和任务执行效率的同时,也为嵌入式硬件资源的合理利用提供了有力支持。从整体来看,软件优化需要在实时性、稳定性和处理效率之间找到恰当的平衡,并且关注算法设计与硬件能力之间的协调,以更好地适应复杂任务和动态场景的多样化需求。

表2 H.264 编码算法优化策略

优化策略	具体措施	预期效果
像素块动态选择	- 高动态场景: 4×4 像素块精准预测 - 静态场景: 16×16 像素块简化处理	降低计算复杂度和资源占用
帧内预测模式优化	利用加法和移位操作简化预测模式, 减少运算复杂度	提升编码速度, 保持预测精度
位流优化策略	使用 CABAC 熵编码技术压缩位流大小, 减少冗余	降低带宽需求, 提升传输效率
动态码率调整	根据场景实时调整编码参数, 兼顾画质与数据量平衡	适应复杂场景, 维持高画质和低数据负担
硬件加速支持	集成 DSP/GPU 硬件加速单元, 提高编码速度	增强实时性, 减轻主控制器负担
编码效率与功耗平衡	采用低功耗算法, 根据任务切换编码模式	减少能耗, 延长无人机续航时间

(三) 集成与协同优化

片上系统(SoC)设计为提升小型无人机飞行控制系统的集成度提供了一种高效解决方案,将微处理器、存储器、通信模块和传感器接口等功能模块整合到一块芯片中。这种设计能够极大地减少系统的体积和重量,使无人机在空间受限的条件下释放更多的负载能力,同时减少模块间的信号连接需求,降低了传统分布式设计中复杂布线和信号干扰的风险。从硬件架构的角度来看,SoC整合了数字信号处理(DSP)、模拟前端(AFE)和电源管理单元(PMU)等核心功能,能够在有限的资源内实现更高效的分配和信号处理。以飞控任务为例,SoC可将实时任务调度与数据采集功能集成到主控制单元,同时通过内嵌的片上存储器(如SRAM或eMMC)实现高速数据缓存和存储,大幅减少外部存储器的延迟问题。

SoC设计还可显著提升抗干扰能力,AMBA协议等内部通信总线有效减少了数据传输中的信

号耦合现象,而片内集成的射频模块和信号调制解调器(RFIC)又可进一步优化数据传输的稳定性,这种高度集成的架构既简化了硬件设计流程,又降低了生产和组装成本。为了充分发挥SoC的潜力,设计中需要综合考虑硬件与任务负载的匹配问题,为高计算需求的飞控任务预留专用协处理器区域,同时采用7nm或5nm节点等先进制程工艺来平衡高性能和低功耗的需求。未来,SoC的广泛应用有望彻底革新小型无人机的硬件设计模式,为飞行控制系统的智能化、轻量化和高效化奠定更加坚实的基础。

表3 7nm 或 5nm 节点的特性对比

参数类别	7nm 节点	5nm 节点
晶体管密度	每平方毫米约 1.2 亿个晶体管	每平方毫米约 1.73 亿个晶体管
功耗	相较 10nm 节点降低约 40%	相较 7nm 节点进一步降低约 20%
性能提升	比 10nm 节点提升约 20%-30%	比 7nm 节点提升约 15%-20%
制造成本	制造工艺较成熟, 成本较低	制造工艺复杂, 成本高
适用场景	适用于中高性能需求的嵌入式和通用处理器	更适合高计算需求、低功耗的场景, 例如 AI 任务处理
电压调节能力	支持更精细的动态电压调节	动态电压调节能力进一步增强
热管理	发热量较低, 热设计功耗(TDP)易于控制	发热量进一步减少, 适合小型设备和轻量化设计

四、结语

总的来说,嵌入式技术为小型无人机飞行控制系统的优化与发展提供了坚实基础,而硬件与软件的协同提升,也让无人机在多个领域的应用前景更加广阔。本文基于现有情况,对飞行控制系统在功耗、数据传输效率、实时控制和系统集成度等方面的不足进行了深入分析,并提出了相应的优化策略。这些方案在理论上具备一定的可操作性,但仍需直面一些实际挑战,比如高效处理器与通信模块之间的兼容性问题、智能控制算法的硬件适配难度,以及高集成度设计对技术积累和验证时间的高要求。在未来的研究与应用中,技术手段的进步需要与具体任务需求相结合,综合考量各种因素,避免因过度聚焦单一模块的优化而忽略系统整体性能的提升。通过持续探索技术、性能与成本之间的最佳平衡点,小型无人机的飞行控制系统有望迈向更高效、更稳定、更智能的阶段,为复杂多样的应用场景提供可靠支持。

参考文献:

- [1] 冯扬帆, 牛玥瑶, 朱文斌. 基于天脉 2 操作系统的小型无人机飞行控制软件设计[J]. 电子测试, 2022, 36 (21): 80-83.
- [2] 张朋, 李春涛. 基于 VxWorks 的小型无人机飞行控制软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (08): 2687-2691.
- [3] 朱球辉. 多旋翼无人机的嵌入式自主飞行控制系统设计的研究[J]. 电子测试, 2017, (04): 17-18.