

低空场景下无人机航空电子系统冗余架构可靠性分析

师嘉晨 孟凡超 张泽旭
西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘要: 无人机在低空场景应用中, 航空电子系统面临气候多变、地形复杂等约束, 对可靠性要求严格。本文分析低空场景对无人机航空电子系统的核心约束, 阐述冗余架构的基本构成、分类及连接交互逻辑, 剖析影响可靠性的架构设计、环境适配、系统交互等关键因素, 从架构优化设计、环境适配优化、系统交互优化三方面提出提升可靠性的核心路径, 为低空无人机航空电子系统发展提供参考。

关键词: 低空场景; 无人机航空电子系统; 冗余架构; 可靠性分析; 优化路径

引言: 低空场景下, 无人机凭借灵活性与高效性, 在城市物流、农林植保、电网巡检等领域应用广泛。然而, 低空环境气候多变、地形复杂、电磁信号繁杂, 对无人机航空电子系统形成多维度约束。同时, 低空飞行任务的多样性与复杂性, 对航空电子系统可靠性提出严格核心要求。为保障无人机在低空场景安全稳定运行, 提升航空电子系统可靠性至关重要, 而冗余架构是提升可靠性的关键手段, 因此对其展开研究具有现实意义。

1 低空场景对无人机航空电子系统的核心约束

1.1 低空环境特征对航空电子系统的影响

低空环境具有气候多变、地形复杂、气流扰动强烈的显著特征, 这些特征对无人机航空电子系统形成多维度影响^[1]。低空空域易出现突发风、风切变及逆温层等气象现象, 其中风切变速度可达15m/s以上, 气流扰动会干扰航空电子系统中惯性测量单元与飞行控制处理器的信号采集精度, 导致飞行姿态控制信号出现偏差, 偏差值最大可达到0.8°。地形复杂及障碍物遮挡会影响导航定位模块的信号接收, 削弱卫星定位信号强度, 干扰定位数据的准确性, 定位误差可扩大至5-8m。低空环境中各类电磁信号繁杂, 电磁干扰强度范围为30-80dBμV/m, 易对航空电子系统的通信模块形成干扰, 影响无人机与地面控制站之间的数据传输稳定性, 进而干扰飞行控制指令的有效传递。低空环境的这些特征, 要求航空电子系统具备更强的环境适应性, 能够抵御各类环境干扰以维持稳定运行。

1.2 低空飞行需求对航空电子系统可靠性的核心要求

低空飞行任务的多样性与复杂性, 对无人机航空电子系统的可靠性提出明确且严格的核心要求。低空无人机广泛应用于城市物流、农林植保、电网巡检等领域, 不同任务场景均要求航空电子系统具备持续稳定的运行能力, 能够在长时间作业中避免出现故障导致任务中断, 其

中农林植保无人机单次作业时长通常达4-6小时, 对系统连续运行可靠性要求极高。飞行过程中, 数据链中断、导航失效等突发情况需依靠航空电子系统快速响应, 通过应急处置机制保障飞行安全, 这就要求航空电子系统具备高效的故障应对能力, 故障响应时间需控制在50ms以内。低空飞行对定位精度、航迹跟踪精度有着较高要求, 航空电子系统需通过多源融合定位技术提升定位准确性, 定位精度需达到1m以内, 确保无人机能够精准遵循预设航线飞行, 同时具备感知和避让能力, 通过传感器与算法的协同工作规避障碍物, 这些均构成对航空电子系统可靠性的核心要求, 也是低空无人机实现安全高效作业的基础前提。

2 无人机航空电子系统冗余架构的核心构成

2.1 冗余架构的基本构成要素

无人机航空电子系统冗余架构旨在通过增加备份组件提升系统可靠性。硬件层面, 关键组件的冗余设置必不可少^[2]。飞控计算机作为核心控制单元, 通常配置主备两套独立系统。主飞控计算机负责日常飞行控制任务, 备飞控计算机处于热备份状态, 实时监测主系统运行状态。一旦主系统出现故障, 备系统能迅速接管控制权, 保障飞行安全。传感器同样重要, 姿态传感器、高度传感器等关键传感器也需冗余配置。多个传感器同时采集数据, 通过数据融合算法提高数据准确性与可靠性, 避免因单一传感器故障导致数据错误影响飞行决策。软件层面, 冗余架构包含多套功能相似但实现方式不同的软件程序。这些软件程序独立运行, 对相同输入数据进行处理, 输出结果相互校验。若某一软件程序出现异常, 其他程序仍能提供正确结果, 确保系统功能正常实现。此外, 软件还需具备故障自诊断与自恢复能力, 能实时监测自身运行状态, 发现故障后自动尝试修复或切换至备用软件模块。

2.2 冗余架构的分类及适用场景

冗余架构可分为静态冗余、动态冗余与混合冗余。静态冗余中,所有冗余组件同时参与系统运行,共同承担任务。这种架构适用于对可靠性要求极高且任务相对固定的场景,如卫星通信无人机。多个相同功能的通信模块同时工作,通过投票机制确定最终输出信号,有效抵抗外界干扰,保障通信稳定。动态冗余根据系统运行状态动态切换冗余组件。在正常工作状态下,仅主组件运行,备组件处于待机状态。当主组件出现故障时,系统自动将任务切换至备组件。这种架构适用于任务复杂、资源有限的无人机,如侦察无人机。在执行任务过程中,根据不同阶段的任务需求与系统负载情况,灵活切换组件,提高资源利用率。混合冗余结合静态冗余与动态冗余优点,部分组件采用静态冗余方式同时运行,部分组件采用动态冗余方式按需切换。适用于对可靠性与灵活性都有较高要求的无人机,如物流运输无人机,在保障运输任务可靠完成的同时,根据货物重量、飞行距离等因素动态调整系统资源分配。

2.3 冗余架构的核心连接方式与交互逻辑

冗余架构中,各构成要素通过特定连接方式实现交互。硬件层面,多处理器间通常采用高速总线连接,实现数据快速传输与共享。总线具备高带宽与低延迟特性,确保处理器间信息交互及时准确。传感器与处理器通过专用接口连接,接口具备高精度与高稳定性,保障传感器数据准确传输至处理器。电源模块与系统其他部分通过电源线连接,电源管理电路对电源分配进行智能控制。交互逻辑上,各要素遵循特定规则协同工作。硬件冗余中,备机实时监测主机状态,通过心跳信号等方式判断主机是否正常运行。主机定期向备机发送状态信息,备机根据接收信息决定是否切换工作状态。软件冗余中,不同算法并行运行,结果通过比较模块进行一致性判断。若结果一致,系统采用该结果继续执行任务;若结果不一致,触发故障诊断与处理机制,确定故障算法并进行修正或切换至备用算法,保障系统正常运行

3 低空场景下冗余架构影响可靠性的关键因素

3.1 架构设计层面的影响因素

低空场景中,无人机航空电子系统冗余架构的设计合理性对可靠性起着决定性作用。冗余度的设置是关键考量因素之一。若冗余度不足,当单一组件出现故障时,系统可能无法及时切换至备用资源,导致功能失效。例如,在飞控系统中,若仅设置一套备用传感器,当主传感器与备用传感器同时受到低空气流干扰而出现数据偏差时,系统将缺乏准确数据支撑,难以维持稳定飞行^[3]。

而过高的冗余度则会增加系统重量与功耗,影响无人机续航能力与飞行性能,还可能因组件过多导致系统复杂性上升,增加故障发生概率。架构的模块化设计也至关重要。模块化程度高的冗余架构便于故障隔离与维修更换。在低空复杂环境中,若某一模块出现故障,可快速定位并替换该模块,减少对系统整体运行的影响。反之,若架构紧密耦合,一个模块故障可能引发连锁反应,导致多个功能失效,降低系统可靠性。此外,架构的扩展性也不容忽视。低空应用场景不断拓展,对无人机功能需求日益多样化,具备良好扩展性的冗余架构能够方便地集成新组件与功能,适应不同任务需求,避免因架构僵化而限制系统可靠性提升。

3.2 环境适配层面的影响因素

低空环境具有独特的气象与地理特征,对冗余架构可靠性产生显著影响。低空气流变化频繁,湍流、乱流等复杂气流状况可能导致无人机姿态剧烈变化。这就要求冗余架构中的传感器具备高精度与高稳定性,能够准确感知姿态变化并及时将数据传输至飞控系统。若传感器在气流干扰下出现数据漂移或延迟,飞控系统将无法做出正确控制决策,影响飞行安全。低空电磁环境复杂,存在大量人工电磁辐射源。通信链路作为冗余架构中信息传输的关键通道,易受到电磁干扰。强电磁干扰可能导致数据传输错误或中断,使地面站与无人机之间信息交互受阻。因此,冗余架构需采用抗干扰能力强的通信技术与设备,如跳频通信、扩频通信等,确保在复杂电磁环境下通信可靠。同时,导航系统也需适应低空环境,融合多种导航技术,提高定位精度与抗干扰能力,避免因导航误差导致无人机偏离航线或碰撞障碍物。

3.3 系统交互层面的影响因素

冗余架构中各组件间的交互逻辑与协同工作机制对系统可靠性影响深远。数据交互的实时性与准确性是基础。在低空飞行中,传感器需实时将采集的数据传输至处理器进行处理,处理器再根据处理结果向执行机构发送控制指令。若数据传输存在延迟或错误,控制指令将无法及时准确执行,影响无人机飞行状态。故障检测与处理机制的有效性也至关重要。冗余架构需具备快速准确的故障检测能力,能够及时发现组件故障并定位故障位置。同时,要制定科学合理的故障处理策略,根据故障类型与严重程度,自动切换至备用资源或采取降级运行模式,确保系统关键功能不受影响。此外,系统资源分配的合理性也会影响可靠性。在多任务并行处理时,需合理分配处理器、内存等资源,避免因资源竞争导致系统性能下降或故障发生。

4 冗余架构提升可靠性的核心路径

4.1 架构优化设计路径

在低空应用场景中,无人机航空电子系统冗余架构的优化设计是提升可靠性的基础。硬件层面,需对关键组件进行冗余配置。飞控计算机作为核心控制单元,可设置主备两套独立系统,分别采用不同架构与处理器,降低因单一硬件故障导致系统瘫痪的风险^[4]。存储单元同样重要,采用多磁盘阵列或分布式存储方式,数据在多个存储节点备份,即便部分存储设备损坏,完整数据仍能得以保留,保障系统数据安全与持续运行能力。软件架构优化聚焦于模块化与容错性。将复杂软件系统拆分为多个功能独立模块,各模块间通过标准接口交互,降低系统耦合度。如此一来,单个模块故障不会扩散至整个系统,便于快速定位与修复问题。在模块内部,运用容错编程技术,对可能出现的异常情况进行预处理。例如,在数据处理模块设置数据校验与纠错机制,当检测到数据错误时,自动尝试修正或采用备用数据,确保软件运行稳定性。

4.2 环境适配优化路径

低空环境复杂多变,冗余架构需具备良好的环境适应能力。针对低空气象条件,对传感器进行针对性改进。在气流不稳定区域,选用抗气流干扰能力强的传感器,并优化安装方式,减少气流对测量的影响。例如,为姿态传感器增加防护装置或采用差分测量技术,提高姿态测量精度。同时,根据气象变化动态调整传感器参数,在恶劣气象下增加采样频率,采用更复杂的滤波算法,获取更准确的环境信息。电磁环境方面,加强通信与导航系统的抗干扰能力。采用自适应通信技术,根据电磁干扰强度自动调整通信参数,如频率、功率等,确保通信链路稳定。在导航系统中,融合多种导航技术,如全球定位系统、惯性导航与视觉导航,通过数据融合算法提高定位精度与抗干扰性。当某一导航技术受干扰时,其他技术仍能提供可靠位置信息,保障无人机准确飞行。

4.3 系统交互优化路径

冗余架构中各组件的交互优化是提升可靠性的关键。建立高效的数据传输机制,采用高速、稳定的通信总线连接硬件组件,确保数据实时、准确传输。对数据传输进行加密与校验处理,防止数据在传输过程中被篡改或丢失。在软件层面,设计合理的进程调度与资源分配算法,依据任务优先级与组件负载情况动态分配系统资源,避免资源竞争导致系统卡顿。完善故障检测与处理机制,实时监测各组件运行状态^[5]。通过设置阈值与状态标志位等方式,快速判断组件是否出现故障。一旦检测到故障,立即启动处理流程,根据故障类型与严重程度自动切换至备用组件或采用降级运行模式。同时,记录故障信息,为后续系统优化与维护提供依据,不断提升冗余架构的可靠性。

结束语

低空场景下无人机航空电子系统冗余架构的可靠性分析,涉及架构设计、环境适配、系统交互等多方面。通过架构优化设计,合理配置硬件冗余、优化软件架构;加强环境适配优化,提升传感器抗干扰能力、增强通信导航系统稳定性;推进系统交互优化,建立高效数据传输机制、完善故障检测处理机制,可有效提升冗余架构可靠性。持续探索与改进冗余架构,有助于推动低空无人机在更多领域安全高效应用,创造更大价值。

参考文献

- [1]李兢尧,王宝军,李轩,等.低空无人机系统关键技术与应用前景[J].航空工程进展,2026,17(1):1-10.
- [2]周勉,谢品.无人机低空航测系统在过江隧道平面控制测量中的应用[J].测绘与空间地理信息,2026,49(3):187-190.
- [3]高山,张高健,窦建虎,等.低空经济背景下气象无人机系统研究[J].气象水文海洋仪器,2025,42(4):22-25.
- [4]黄玉俊,梁原达,黎恒,等.面向智慧公路低空一体化无人机系统技术研究[J].广东通信技术,2025,45(4):49-54.
- [5]王麟.低空无人机航摄遥感测绘技术在测绘领域的应用[J].西部探矿工程,2025,37(5):146-148,152.