

无人机航空电子系统抗极端环境适应性设计研究

孟凡超 张 哲 师嘉晨
西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘 要：无人机航空电子系统作为无人机运行的核心，需应对极端温度、气压、湿度、电磁干扰等复杂环境挑战。本文围绕系统核心构成，剖析极端环境对硬件与软件的影响机制，提出硬件层面的元器件选型、结构防护、热设计等优化方向，以及软件层面的抗干扰算法、环境自适应调节等设计策略，并阐述材料、封装、信号处理等关键技术支撑，为提升无人机航空电子系统极端环境适应性提供系统性解决方案。

关键词：无人机航空电子系统；极端环境；适应性设计；软硬件协同；关键技术

引言：随着无人机应用场景向极端环境领域持续拓展，航空电子系统面临的运行挑战日益严峻。从极地低温到沙漠高温，从高海拔低气压到强电磁干扰区域，复杂环境对飞行控制、导航、通信等核心模块的性能稳定性构成直接威胁。系统硬件的物理特性易受温度、湿度、振动等因素影响，软件功能则可能因信号干扰、数据畸变出现执行偏差。因此，如何通过软硬件协同设计提升系统极端环境适应性，成为保障无人机可靠运行、拓展任务边界的关键课题。

1 无人机航空电子系统核心构成

1.1 飞行控制系统

飞行控制系统是无人机航空电子系统的核心操控中枢，集成主控制器、姿态传感器、电机驱动模块等关键组件，承担无人机飞行姿态调整、飞行状态管控的核心功能^[1]。系统通过接收各类传感器反馈数据，经过算法解算后输出控制指令，实现无人机自动起飞、巡航、降落等自主飞行操作，同时实时调节飞行姿态与速度，保障飞行过程的稳定性与可控性，是无人机能够精准响应操控指令的核心支撑。其控制算法的响应时间通常要求在10ms以内，以确保飞行的实时性和稳定性。

1.2 导航系统

导航系统为无人机飞行提供精准的位置、高度、航速及航向等关键数据，是保障无人机按预定路径飞行、精准抵达任务区域的重要支撑。系统普遍采用全球导航卫星系统与惯性导航系统相结合的组合导航架构，整合GPS、北斗等卫星导航信号与惯性传感器数据，通过数据融合算法降低外部干扰带来的定位误差，为无人机飞行控制与任务执行提供可靠的位置与姿态辅助信息。数据融合算法可将定位误差降低至1-2米以内，大大提高了导航的精度。

1.3 通信系统

通信系统构建无人机与地面控制站、中继设备之间的无线信息传输链路，承担指令交互与数据传输的核心职能。系统通过特定频段实现地面控制指令的上传与无人机飞行状态、任务数据的下行传输，确保地面操作人员能够实时监控无人机运行状态，并根据任务需求下发操控指令，同时保障任务数据传输的实时性与完整性，是无人机远程操控与任务协同的关键纽带。其数据传输速率通常在1Mbps-10Mbps之间，以满足不同任务对数据传输的要求。

1.4 任务载荷系统

任务载荷系统是无人机实现特定作业任务的功能载体，依据任务需求搭载各类功能设备，决定无人机的应用方向与作业能力。系统需与无人机飞行平台、电源系统及控制系统协同适配，其设计与选型直接影响整机结构布局、动力分配及飞行稳定性，通过搭载成像、探测、中继等不同类型设备，可实现测绘、巡检、搜救等多样化任务，是无人机发挥实用价值的核心模块。

1.5 电源管理系统

电源管理系统负责无人机各类电子模块的能源供给与能耗调控，是保障航空电子系统持续稳定运行的基础。系统整合多种电源来源与能源管理策略，优化供电拓扑结构，实现对各模块供电的精准调控，抑制载荷动态负载对供电稳定性的影响，同时通过能耗优化延长无人机续航时间，为飞行控制、导航、通信及任务载荷等模块提供稳定、可靠的能源支撑，直接决定无人机的作业时长与任务完成效率。

2 无人机航空电子系统面临的极端环境类型及影响机制

2.1 极端温度环境及影响

极端温度环境涵盖极端高温与极端低温两种场景，温度偏离常规工作范围时，会通过热传导、热辐射作用

改变电子元器件物理特性^[2]。极端高温会加速元器件老化速率，破坏半导体材料稳定性，导致电路参数漂移、绝缘性能下降，甚至引发元器件热击穿；极端低温会降低元器件活性，增加电路导通电阻，影响信号传输效率，同时导致封装材料收缩，引发焊点脱落、线路断裂等结构损伤，破坏系统电路完整性。

2.2 极端气压（高低海拔）环境及影响

极端气压环境与海拔高度直接相关，高海拔区域低气压的核心影响体现在散热效率与元器件封装性能上。低气压会降低空气密度，削弱对流散热效果，导致电子模块热量积聚，进而引发性能衰减；低气压还会破坏元器件密封结构，使水汽、杂质渗入内部，引发电路短路。低海拔高压环境则会增加元器件封装压力，可能导致封装外壳变形、破裂，影响内部电路的稳定性与安全性。

2.3 极端湿度与降水环境及影响

极端湿度与降水环境通过水汽渗透、电化学腐蚀作用影响航空电子系统运行。高湿度环境下，水汽易渗入系统内部，附着在电路表面形成水膜，降低绝缘性能，引发漏电、短路等故障；当相对湿度超过 80%时，电路漏电的概率会显著增加。长期高湿度会加速金属触点氧化腐蚀，破坏电路连接可靠性。降水会直接冲刷系统表面，渗入密封间隙，同时可能伴随低温结冰，覆盖传感器探头、通信天线，阻碍信号接收与数据采集，破坏系统正常功能发挥。

2.4 强电磁干扰环境及影响

强电磁干扰环境源于自然电磁现象与人为电磁辐射，干扰信号通过传导、辐射两种路径作用于航空电子系统。干扰信号会侵入系统电路与信号传输链路，导致信号畸变、误码率升高，破坏导航、通信模块的数据传输准确性；强电磁辐射还会干扰元器件正常工作，导致控制指令传输延迟、失效，甚至损坏敏感电子组件，破坏系统协同工作能力，严重时引发飞行失控。

2.5 振动与冲击极端环境及影响

振动与冲击极端环境多源于飞行过程中的气流扰动、起降冲击及外部碰撞，通过机械力传递作用影响系统结构与组件连接。持续极端振动会导致元器件固定松动、线路磨损断裂，破坏模块间连接可靠性，引发信号传输中断；瞬时冲击载荷会对系统结构造成不可逆损伤，导致封装破裂、元器件脱落，同时干扰传感器数据采集精度，影响飞行控制指令的精准输出，威胁系统运行安全。

2.6 沙尘与盐雾极端环境及影响

沙尘与盐雾极端环境通过物理磨损与化学腐蚀双重作用破坏系统性能^[3]。沙尘颗粒会侵入系统内部，磨损元器件表面与触点，导致接触不良，同时堵塞散热通道，影响散热效率；盐雾中含有的腐蚀性离子会通过密封间隙渗入系统，对金属组件、电路触点产生电化学腐蚀，破坏电路导通性，长期作用会导致元器件失效、系统功能瘫痪，显著缩短系统使用寿命。

3 无人机航空电子系统抗极端环境适应性设计核心方向

3.1 硬件层面抗极端环境设计

硬件层面是抗极端环境设计的基础，通过优化硬件选型、结构与性能设计，提升系统硬件对极端环境的承受能力，筑牢系统运行根基。元器件选型需结合极端环境特性，筛选耐温、耐气压、抗腐蚀、抗干扰性能优异的航空级元器件，优化封装增强抗侵蚀能力。结构防护聚焦密封性与抗侵蚀，针对沙尘、盐雾等环境优化密封结构，同步优化布局提升抗冲击振动性能。热设计适配极端温环境，设计高效散热结构缓解高温积聚，采用保温措施维持低温下元器件正常工作。电磁兼容围绕强干扰环境，优化电路布局与布线，采用屏蔽技术阻断干扰。抗振动冲击通过强化结构刚度、采用缓冲组件，削弱载荷传递，加固部件连接避免失效，不同极端环境对应的具体设计措施与目标梳理如表1所示。

表1

极端环境类型	硬件抗极端环境设计措施	设计目标
极端温度（高低温）	选用耐温航空级元器件，优化封装，设计散热与保温结构	维持元器件正常工作，避免性能失效与封装损坏
极端气压（高低海拔）	优化密封结构与封装材料，提升散热适配性	防止杂质渗入，保障散热与电路稳定性
极端湿度与降水	优化密封，选用抗腐蚀元器件，防护外露部件	阻断水汽，防止短路与腐蚀，保障信号正常
强电磁干扰	优化电路布局，采用屏蔽技术，选用抗干扰元器件	阻断干扰，抑制信号畸变，避免指令失效
振动与冲击	优化结构刚度，采用缓冲组件，加固部件连接	削弱机械冲击，避免部件松动、断裂与结构损伤
沙尘与盐雾	优化密封，选用抗磨抗腐蚀材料，防护散热通道	防止侵入与腐蚀，避免失效，延长系统寿命

3.2 软件层面抗极端环境设计

软件层面设计作为硬件防护的补充，通过算法优化

与功能设计，弥补硬件在极端环境下的性能短板，提升系统整体抗环境适应性与运行可靠性。抗干扰软件设计

针对电磁干扰引发的信号畸变、误码等问题,采用信号滤波、纠错编码等技术,还原失真信号,降低干扰对数据传输与指令执行的影响,保障信号传输的准确性与完整性。环境自适应调节算法设计依托传感器采集的环境参数,实时识别极端环境类型与强度,自动调节系统工作参数,适配环境变化,降低极端环境对系统功能的影响,维持系统稳定运行。冗余设计通过设置备用模块与数据备份机制,当核心模块因极端环境失效时,备用模块可快速切换投入使用,备份数据保障任务连续性,避免单一模块失效导致整个系统瘫痪,提升系统容错能力。

4 抗极端环境设计的关键技术支撑

4.1 材料技术

材料技术是抗极端环境设计的基础支撑,直接决定硬件组件的环境耐受能力。设计过程中需选用耐极端温度、抗腐蚀、抗磨损、绝缘性能优异的功能材料,兼顾材料轻量化与结构强度,适配无人机飞行特性^[4]。耐高低温材料可有效抵御极端温度对元器件的损伤,维持材料物理化学稳定性;抗腐蚀材料能阻断盐雾、湿度等环境的侵蚀,保护金属组件与电路触点;高强度轻量化材料可优化结构设计,提升抗振动与抗冲击性能,同时控制整机重量,为系统稳定运行奠定材料基础。

4.2 封装技术

封装技术承担着元器件与外部极端环境的隔离防护功能,通过优化封装结构与工艺,增强元器件抗环境侵蚀、抗振动冲击的能力。封装工艺需结合元器件特性与极端环境需求,采用密封封装、真空封装等技术,阻断水汽、沙尘、盐雾等杂质渗入,避免电路短路与元器件腐蚀。封装材料需与元器件适配,具备良好的热传导性与绝缘性能,既能辅助散热,又能抵御极端温度变化引发的收缩与变形,保障元器件在极端环境下的结构完整性与性能稳定性。采用陶瓷封装材料可使元器件的耐高温性能提高至 300℃ 以上,同时具有良好的绝缘性能。

4.3 信号处理技术

信号处理技术是软件层面抗极端环境设计的核心支撑,主要解决极端环境下信号畸变、干扰等问题,保障信号传输与处理的准确性。通过采用数字滤波、自适应信号调理、纠错编码等技术,过滤外部电磁干扰与环境噪声,还原失真信号,降低误码率。同时优化信号采集

与处理算法,提升信号响应速度,适配极端环境下的信号波动,确保导航、通信等模块的信号传输稳定,为系统控制指令的精准输出提供技术保障,弥补硬件抗干扰设计的不足。数字滤波算法可将信号中的噪声功率降低 30 - 50dB,显著提高信号质量。

4.4 电源抗环境波动技术

电源抗环境波动技术是保障系统持续稳定运行的关键,聚焦极端环境下电源供给的稳定性,破解高低温、低气压等环境导致的供电异常问题^[5]。通过优化电源拓扑结构,采用抗环境波动的电源组件,提升电源在极端温度、气压环境下的输出稳定性,抑制载荷动态负载引发的电压波动。同时融入电源滤波、过压过流保护等技术,抵御电磁干扰对电源系统的影响,减少极端环境下电源故障的发生,为飞行控制、导航、通信等所有模块提供稳定、可靠的能源支撑,保障系统功能持续有效发挥。采用具有过压过流保护功能的电源模块,可使电源在异常情况下自动切断输出,保护系统其他模块不受损坏。

结束语

无人机航空电子系统的极端环境适应性设计需贯穿硬件选型、结构优化、软件算法开发及关键技术应用的全流程。通过耐环境材料与先进封装工艺提升硬件耐受性,借助抗干扰算法与环境自适应策略增强软件鲁棒性,依托信号处理与电源管理技术保障系统稳定性,可有效降低极端环境对系统功能的干扰。这一系统性解决方案不仅能提升无人机在复杂场景下的任务执行能力,更为航空电子技术向高可靠性、强适应性方向演进提供了实践路径。

参考文献

- [1]肖文卓.航空电工电子技术在无人机领域应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(z1):38-40.
- [2]王兴华,王军强,牛振中,等.无人机综合模块化航空电子体系架构技术研究[J].航空计算技术,2021,51(5):92-96.
- [3]王梦璇.通用航空无人机飞行管控系统设计[J].中国军转民,2022(7):63-65.
- [4]宋扬.基于虚拟仿真平台的航空电子机载系统集成测试系统设计与探索[J].软件,2025,46(12):135-137.
- [5]豆海利.基于FlexRay总线的无人机航电系统设计[J].现代电子技术,2021,44(23):13-17.