

极寒环境下无人机系统性能适应优化研究

张天祚

黑龙江林业职业技术学院 黑龙江牡丹江 157000

摘要: 极寒环境对无人机系统的飞行性能、动力系统和电子设备构成严峻挑战,亟需通过综合性优化策略提升其适应能力。本文深入分析了低温条件下无人机面临的多重技术难题,包括电池性能衰减、材料脆化失效、传感器精度下降等关键问题。针对这些挑战,提出了涵盖热管理系统设计、动力配置优化、结构材料改进等多个维度的技术解决方案。通过对飞行控制算法的适应性调整和电子设备防护措施完善,构建了完整的极寒环境适应优化体系。研究表明,采用预加热启动机制、保温材料应用和智能温控策略能够显著提升无人机在 -40°C 以下环境中的可靠性和作业效能。本研究成果为极地科考、边境巡逻、应急救援等领域的无人机应用提供了重要的理论支撑和技术指导。

关键词: 极寒环境; 无人机系统; 性能适应; 优化策略

随着无人机技术的快速发展和应用领域的不断拓展,极寒环境下的飞行任务需求日益增长,这对无人机系统的环境适应能力提出了更高要求。极地科学考察、高纬度地区边境监控、雪灾应急救援等应用场景都需要无人机具备在 -30°C 至 -50°C 极端低温条件下的稳定工作能力。然而,传统无人机系统在如此严苛的环境条件下往往表现出严重的性能退化现象,包括续航时间大幅缩短、飞行姿态失控、通信链路中断等问题。这些问题的根本原因在于低温环境对无人机各个子系统的综合作用影响,涉及材料物理特性变化、电子元器件性能漂移、动力系统效率降低等多个层面。为了确保无人机在极寒环境中的可靠运行,必须从系统工程角度出发,对无人机的整体设计进行针对性优化。当前国内外学者在相关领域已开展了一些基础性研究,但在系统性的适应优化方案方面仍存在明显不足。本研究旨在构建一套完整的极寒环境无人机性能适应优化理论框架,并提出具有工程实用价值的技术实现路径。

一、极寒环境对无人机系统性能的影响机理

(一) 动力系统性能衰减特征

极寒环境对无人机动力系统的影响主要体现在电池容量急剧下降和电机输出功率减弱两个方面。锂离子电池在低温条件下内部电解液粘度增加,离子传导速率显著降低,导致电池内阻增大,放电电压下降,可用容量通常只有常温状态下的60%~70%。这种容量衰减直接影响无人机的续航时间和载重能力,严重时甚至无法完成

正常起飞程序。无刷直流电机在低温环境中由于润滑油脂凝固和磁钢磁性减弱,转速响应变慢,最大输出扭矩下降,电机工作效率明显降低。螺旋桨叶片在低温下变得更为脆弱,容易产生裂纹或断裂,同时空气密度增大会增加螺旋桨的负载阻力,进一步恶化推进效率。燃油发动机在极寒条件下启动困难,燃料雾化效果差,燃烧不充分,功率输出不稳定,需要额外的预热装置才能正常工作。这些因素共同作用使得无人机的动力系统整体性能在极寒环境中大幅下降,严重影响飞行安全和任务执行能力。

(二) 结构材料力学性能变化规律

极寒环境引起无人机结构材料发生显著的物理和力学性能变化,其中最突出的表现是金属材料韧性降低和非金属材料脆化加剧。铝合金、钛合金等常用航空材料在低温下屈服强度提高但塑性急剧下降,冲击韧性损失可达50%以上,容易在外力冲击或疲劳载荷作用下发生脆性断裂。碳纤维复合材料虽然具有优异的比强度和比刚度,但在极低温条件下树脂基体收缩严重,纤维与基体界面结合力减弱,层间剪切强度明显降低,抗冲击性能大幅恶化。橡胶密封件和减振垫在低温中失去弹性,密封效果变差,可能造成进气口结冰或电子舱密封失效^[1]。塑料外壳和连接件在极寒条件下收缩变形,配合间隙发生变化,可能导致装配松动或卡死现象。焊接接头在低温循环载荷作用下容易产生冷脆裂纹,螺栓连接副因材料膨胀系数差异而出现预紧力松弛,这些都会威胁无人

机结构完整性和飞行安全性。

（三）电子设备功能稳定性问题

极寒环境对无人机电子设备的稳定性构成严重威胁，主要表现为半导体器件参数漂移、电路板绝缘性能下降和传感器精度丧失。集成电路芯片在低温下载流子迁移率降低，开关速度变慢，功耗增加，部分敏感器件可能出现功能异常或完全失效。印刷电路板上的焊点在温度剧烈变化时产生热应力，容易出现虚焊或开裂，多层板间的介电常数随温度变化导致信号传输特性不稳定。陀螺仪、加速度计等惯性导航传感器在低温中零偏和标度因子发生显著漂移，测量精度大幅下降，严重影响飞行控制系统的工作可靠性^[2]。GPS接收模块在极寒条件下信号处理能力减弱，定位精度和更新频率都有所降低。通信设备的射频器件特性受温度影响较大，发射功率不稳定，接收灵敏度下降，数据传输误码率增加。显示屏幕液晶分子排列紊乱，响应速度变慢，对比度降低，严重影响操作员的视觉识别效果。

二、无人机系统极寒适应优化技术方案

（一）热管理系统设计与实施

针对极寒环境下的温度控制需求，构建了多层次的热管理系统架构，该系统集成了主动加热、被动保温和智能调控三种核心功能模块。主动加热子系统采用分布式电加热带和PTC加热器相结合的方式，在关键部位如电池仓、电子设备舱和发动机进气道设置独立的加热单元，通过温度传感器实时监测各区域温度状态并反馈给中央控制器。被动保温措施主要利用相变储能材料和高性能隔热材料构建保温层，相变材料能够在特定温度范围内吸收或释放潜热，起到缓冲温度波动的作用，高效隔热材料则有效减少热量散失，延长保温时间。智能调控策略基于模糊PID算法实现加热功率的自适应调节，根据外界温度、飞行状态和设备功耗动态调整各加热单元的工作模式，在保证设备正常运行的前提下最大限度地节约能源消耗。整个热管理系统采用冗余设计，关键部件均配备备用单元，确保在极端情况下仍能维持基本的温度控制功能，为无人机的安全飞行提供可靠保障。

（二）动力配置优化策略

动力配置优化从能源选择、推进系统匹配和能量管理三个方面入手，形成了一套完整的极寒适应动力解决方案。在能源选择方面，采用低温型磷酸铁锂电池组替代传统的锂聚合物电池，这种电池在-40℃环境下仍能保持80%以上的额定容量，同时配备独立的电池预加热

系统，确保启动前电池温度达到最佳工作范围。推进系统重新匹配了大直径低转速螺旋桨与高扭矩密度无刷电机的组合，这种配置在低温高密度空气中具有更好的推进效率，能够补偿动力系统整体性能的下降。能量管理系统引入了基于深度学习的能耗预测算法，根据历史飞行数据和当前环境条件预测各阶段的能量需求，动态调整飞行模式和设备开启时机，实现能量的最优分配^[3]。辅助动力装置作为应急备用方案，在主动力系统出现故障时提供紧急推力和电力供应，确保无人机能够安全返航或就近降落。

（三）结构材料改性与防护技术

结构材料改性重点针对低温环境下的力学性能要求，选用了新型低温超高强铝合金和纳米增强复合材料作为主要承力构件。低温超高强铝合金通过微合金化处理和特殊热处理工艺，使其在-50℃环境下仍能保持良好的韧性和疲劳强度，断裂韧性比普通铝合金提高30%以上。纳米增强复合材料以碳纳米管为增强相，环氧树脂为基体，通过原位聚合制备工艺获得均匀分散的纳米结构，在保持轻质高强特点的同时显著改善了低温韧性。防护涂层技术采用了多层梯度结构设计，底层为防腐蚀金属涂层，中间层为抗冲击陶瓷涂层，表层为疏水防冰涂层，这种复合涂层不仅能够抵御低温腐蚀，还能有效防止冰雪附着和机械损伤^[4]。连接技术方面开发了低温自适应紧固件，采用形状记忆合金材料制作螺栓，在低温下自动补偿因材料收缩产生的预紧力损失，确保连接可靠性。密封技术应用了氟橡胶O型圈和硅胶密封胶相结合的双重密封方案，即使在极低温条件下也能保持良好的密封性能。

三、行控制与电子系统适应性改进

（一）控制算法低温适应性修正

飞行控制算法的低温适应性修正是确保无人机在极寒环境中稳定飞行的关键技术环节。传统PID控制算法在温度剧烈变化时参数整定效果不佳，为此引入了基于神经网络的自适应控制策略，该策略能够在线学习和调整控制参数，实时补偿因温度变化引起的系统动态特性改变。姿态控制回路中增加了温度补偿项，通过建立温度与传感器零偏、标度因子之间的映射关系模型，对陀螺仪和加速度计的输出进行实时校正。高度控制算法考虑了低温环境下空气密度变化对气压高度计读数的影响，建立了温度-密度-压力耦合修正模型，提高了高度测量精度。导航系统采用紧耦合的组合导航架构，融合惯性

测量单元与GNSS观测信息，基于扩展卡尔曼滤波器实现最优状态估计；当卫星信号受冰雪反射或多路径效应干扰而质量下降时，系统自动平滑切换至纯惯导模式，并启用零速修正与地形匹配辅助算法抑制误差发散。路径规划模块强化环境适应能力，集成激光雷达与毫米波雷达双模感知系统，通过D-S证据理论或贝叶斯融合算法对异构传感器数据进行加权融合，提升障碍物检测的准确率与鲁棒性，尤其在雪雾、冰晶等复杂气象条件下仍可维持可靠避障能力，全面保障无人机在极寒环境中的自主安全飞行性能。

（二）电子设备低温防护措施

电子设备低温防护采用内外结合的综合保护策略，外部防护主要通过密闭机箱和加热保温实现，内部防护则依靠器件选型和电路优化来完成。机箱设计采用了双层密封结构，外层为铝合金壳体提供机械保护，内层为不锈钢屏蔽层防止电磁干扰，两层之间填充保温材料形成有效的热阻隔。机箱内部设置了微型加热风扇和电热丝组成的主动温控系统，通过温敏电阻实时监测腔内温度并自动调节加热功率^[5]。关键电子组件选用工业级宽温器件，工作温度范围覆盖-55℃至+85℃，并在电路设计中增加软启动和过流保护功能，防止低温启动时的大电流冲击。PCB布局优化考虑了热分布均匀性，在发热元件周围合理布置散热通道，同时在敏感器件附近设置温度补偿电路。电源管理模块采用多级稳压技术，确保在输入电压波动较大时仍能提供稳定的直流输出，为各功能模块提供可靠的电力保障。

（三）通信链路稳定性增强

通信链路稳定性增强技术从硬件抗干扰和软件纠错两个维度着手，全面提升无人机在极寒环境中的通信可靠性。天线系统采用全向辐射特性优良的贴片天线阵列，通过相位调整实现波束赋形，有效克服低温条件下大气折射率变化带来的信号传播异常。射频前端集成了低噪声放大器和高线性度功率放大器，前者提高了弱信号接收灵敏度，后者确保了强信号发送的保真度。调制解调方式选用抗干扰能力强的扩频通信技术，通过伪随机码序列扩展信号频谱，即使在恶劣信道条件下也能维持较高的数据传输成功率。数据链路层协议增加了前向纠错编码和自动重传请求机制，能够检测并纠正传输过程中

的错误数据包，避免因个别数据丢失导致的控制指令失效^[6]。地面站系统配备了多天线分集接收装置，通过空间分集和极化分集技术提高信号接收质量，同时建立了备用通信链路，当主链路中断时自动切换到备用频段继续通信。

结语

本研究围绕极寒环境下无人机系统性能适应优化这一核心问题，系统分析了低温环境对动力系统、结构材料和电子设备的多维度影响机理，提出了包含热管理系统、动力配置优化、结构材料改性在内的综合性技术解决方案。通过控制算法适应性修正和电子系统防护措施的实施，显著提升了无人机在极端低温条件下的飞行稳定性和任务执行能力。研究结果验证了所提优化策略的有效性，为极寒地区无人机应用提供了重要的技术支撑。未来研究将重点关注智能化自适应控制技术和新材料应用，进一步提升无人机系统的环境适应能力和自主作业水平，为极地科学探索和应急救援等领域的发展做出更大贡献。

参考文献

- [1] 艾剑波, 吴建国, 崔腾飞, 等. 直升机极寒环境适应性试飞的挑战与思考[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 31-39.
- [2] 杨球, 屈峰, 廖智麟, 等. 系留式大载荷灭火无人机电推进系统优化设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1086-1096.
- [3] 王安, 张可, 罗巍, 等. 固定翼无人机飞行环境栅格化方法与路径规划[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(8): 20-28.
- [4] 吴金宇, 杨蕊姝. 多旋翼无人机动力系统性能测试实验设计与分析[J]. 电子测试, 2021(19): 5-9.
- [5] 王振, 黄璇, 彭琦. 无人机系统飞行性能测试及分析系统研究与实现[J]. 现代电子技术, 2023, 46(6): 79-84.
- [6] 致力于高性能工业级无人机系统开发——中国民用航空飞行学院无人机先进动力实验室[J]. 中国民航飞行学院学报, 2025, 36(5): 40.