

用于无人机照明的变焦偏振探测系统研究

陈 晨 张文博 李东兴 王宏阳 许高建

国网冀北电力有限公司承德供电公司 河北承德 067000

摘 要：为解决无人机探测中照明与探测适配性不足、抗干扰能力弱及能耗过高等问题，以无人机照明变焦偏振探测系统为研究对象开展研究。提出系统核心构成方案，涵盖轻量化变焦照明模块、适配性偏振探测模块及协同架构；突破光学抗干扰、偏振信号提质及能耗优化等核心技术；设计无人机集成、多场景适配及自适应切换等应用方案，搭配性能保障、故障防控及迭代优化的落地策略。系统实现照明与探测精准协同，提升复杂环境探测精度与稳定性，降低能耗。研究成果为无人机变焦偏振探测系统的设计、落地及迭代提供支撑，以期对相关工程应用提供参考。

关键词：无人机；偏振探测；照明变焦；探测系统；抗干扰

引言

低空经济快速发展，无人机在应急搜救、电力巡检等场景应用愈发广泛。但现有探测系统普遍存在照明与探测适配不足、抗干扰弱、能耗偏高的瓶颈，制约复杂环境下作业效能。聚焦无人机照明变焦偏振探测系统，构建核心构成方案，突破光学抗干扰、信号提质及能耗优化关键技术，优化集成适配策略。成果提升复杂环境探测精度与稳定性，为相关系统研发落地提供支撑，助力无人机探测技术升级。

一、系统核心构成与设计基础

（一）照明模块变焦设计

照明模块变焦设计需紧密结合无人机载荷限制与探测场景需求，实现结构与参数的精准匹配。设计人员优先选择轻量化变焦结构，通过采用高强度铝合金与工程塑料的复合材质，在满足结构强度的同时将模块重量控制在无人机载荷阈值内，避免因重量过载影响无人机飞行稳定性。针对不同探测场景，设计动态变焦倍率匹配机制，近距离精细探测时调大倍率以提升局部照明强度，远距离大范围探测时降低倍率拓宽照明覆盖范围，确保照明区域与探测视场高度契合。变焦过程中，通过内置的光学匀光片优化光线分布，减少边缘与中心的亮度差异，同时搭载微型步进电机控制变焦镜片的移动精度，将镜片位移误差控制在微米级，避免因机械抖动导致的照明闪烁，保障照明均匀性与稳定性始终处于探测需求的合理区间。

（二）偏振探测模块配置

偏振探测模块配置以探测精度要求与无人机适配性

为核心导向，形成多维度优化方案。偏振片的选型需适配探测目标的偏振特性，针对非金属目标优先选用线偏振片，通过调整偏振方向与目标反射光偏振方向的夹角提升探测对比度，金属目标探测则搭配圆偏振片以削弱镜面反射干扰。分辨率与帧率的平衡需结合探测任务特性，静态目标探测时提升分辨率至1080P以捕捉细微偏振特征，动态目标追踪时将帧率提升至30fps，通过帧间补偿算法弥补分辨率适度降低带来的细节损失^[1]。模块小型化设计采用一体化封装工艺，将偏振片、图像传感器与信号预处理电路集成于紧凑空间，抗震动设计则通过在模块与无人机挂载点之间增设硅胶减震垫，配合内部元器件的点胶固定处理，有效缓冲无人机飞行过程中产生的高频震动，避免震动导致的探测信号失真。

（三）照明与探测协同架构设计

照明与探测协同架构设计的核心目标是实现变焦动作与探测过程的同步精准响应，构建全链路联动机制。架构内置环境感知单元，实时采集环境光强度、目标距离等数据，通过预设的映射算法转化为照明与探测参数调节指令，当环境光增强时自动提升照明功率并调大探测感光度，目标距离变化时同步调整变焦倍率与探测焦距。针对无人机飞行姿态变化带来的影响，架构接入无人机飞控系统的姿态数据，当出现俯仰、滚转等姿态偏移时，通过驱动照明模块与探测模块的微调云台进行角度补偿，确保照明方向与探测视场始终对准目标区域。

二、系统核心技术突破

（一）光学系统抗干扰设计

光学系统抗干扰设计聚焦无人机作业环境中的典型干扰源，通过针对性光学结构与元件优化实现性能防护。

针对大气散射与背景光干扰，设计人员在光学路径中嵌入窄带滤光片，其带宽匹配照明模块的中心发射波长，可过滤90%以上非目标波长的背景杂光，同时搭配菲涅尔透镜提升目标区域的光能量汇聚效率，削弱大气分子散射导致的光强衰减影响。变焦过程中产生的球差、色差等光学像差，通过在变焦镜片组中集成自适应光学元件解决，该元件可实时感知镜片位置变化并调整屈光率，动态补偿像差带来的成像偏移。偏振信号传输中的损耗问题，通过双重优化实现控制：选用高偏振度的光学玻璃材质制作偏振片，减少信号在材质内部的传输损耗；同时对偏振片与光学镜头的相对角度进行精密校准，确保偏振方向与光轴高度一致，避免角度偏差引发的信号衰减。

（二）偏振信号处理提质技术

偏振信号处理提质技术通过算法创新与流程优化，提升探测数据的质量与有效性。针对偏振探测信号中的随机噪声与环境干扰，采用小波阈值降噪算法进行处理，该算法可精准区分信号与噪声的小波系数特征，通过设定自适应阈值剔除噪声成分，同时保留偏振信号中的细节特征，避免传统降噪算法导致的信号模糊^[2]。变焦过程中出现的信号突变问题，通过引入滑动窗口平均算法解决，窗口大小根据变焦速度动态调整，变焦速度快时扩大窗口以增强平滑效果，速度慢时缩小窗口保留信号细节，实现突变信号的平稳过渡。多源探测数据的融合采用D-S证据理论构建融合模型，将偏振信号、距离信号、亮度信号等不同维度数据转化为证据体，通过计算信任函数与似然函数实现数据互补。

（三）系统能耗优化技术

系统能耗优化技术通过软硬件协同设计，在保障性能的前提下最大限度降低能耗消耗。照明模块采用智能调光技术，基于环境光强度与目标距离数据构建调光模型，通过PID算法实时调节LED光源的驱动电流，在满足探测亮度需求的同时避免能源浪费，当目标距离缩短或环境光增强时，自动降低驱动电流以减少能耗。探测模块建立自适应休眠与唤醒机制，通过目标检测单元实时判断视场范围内是否存在探测目标，无目标时模块进入深度休眠状态，仅保留核心检测单元低功耗运行，检测到目标后立即唤醒至正常工作状态，该机制可使探测模块非工作时段能耗降低70%以上。

三、系统集成与应用适配方案

（一）无人机平台集成适配方案

无人机平台集成适配方案需兼顾不同型号无人机的

载荷特性与接口规范，实现系统高效挂载与协同运行。设计人员将系统拆分为照明、探测、控制三个独立模块，通过轻量化复合材料封装降低单模块重量，同时采用可调节式挂载支架，支架预留多组安装孔位以适配不同无人机的载荷接口间距，支架底部的缓冲机构可进一步抵消飞行过程中的振动传递^[3]。系统与无人机飞控系统的通信适配采用双协议兼容设计，主流工业级无人机采用CAN总线协议实现姿态数据与控制指令的双向交互，小型消费级无人机则通过串口通信适配，通信内容包含无人机俯仰角、滚转角等姿态数据以及系统变焦、探测模式等控制指令。

（二）典型应用场景适配方案

典型应用场景适配方案针对不同场景的核心需求，定制系统运行参数与工作模式以提升适配性。夜间搜救场景中，系统默认开启高功率照明模式，照明功率调节至80%以保证100米范围内的亮度覆盖，探测模块感光度调至ISO 1600，同时降低偏振片消光比以提升弱光环境下的目标捕捉能力，配合自动曝光算法实现动态光线补偿。电力巡检场景聚焦远距离精准探测，照明模块采用窄光束角设计，变焦倍率调至15倍以集中光能量投射至输电线路，探测模块切换至长焦模式，分辨率提升至4K并针对金属导线特性优化偏振角参数，增强导线表面缺陷与周围环境的对比度。环境监测场景中，系统重点优化偏振特征提取流程，照明模块采用固定中倍率变焦以保证探测视场的稳定性，探测模块选用多波段偏振探测模式。

（三）多场景自适应切换方案

多场景自适应切换方案通过场景识别与参数快速调用机制，实现多场景下系统的高效无缝运行。场景识别依托环境感知单元采集的多维度数据，采用支持向量机算法构建分类模型，模型输入特征包含环境光强度、目标距离、目标密度等参数，通过预训练的样本数据完成模型训练，可精准识别夜间搜救、电力巡检、环境监测等典型场景，识别准确率高于95%。参数切换采用预存参数集机制，针对不同场景提前调试最优运行参数并存储为参数集，场景识别完成后系统通过高速总线调用对应参数集，实现照明功率、变焦倍率、探测分辨率等核心参数的同步切换，整个切换过程耗时控制在50ms以内。为保障切换过程中数据连续性，系统内置数据缓存模块，切换前1秒的探测数据会临时存储，切换完成后通过数据插值算法填补参数过渡阶段的空白数据，避免切换导致的数据断裂^[4]。

四、系统落地实施策略

(一) 性能保障实施策略

性能保障实施策略构建从测试到评估再到优化的全流程闭环，确保系统落地后稳定满足应用需求。场景化测试环节针对夜间搜救、电力巡检等典型场景，模拟不同光照强度、风速、目标距离等环境参数，制定专项测试方案，重点检测照明变焦的响应速度、偏振探测的分辨率以及两者协同的精准度，确保参数调节与场景需求高度匹配。无人机飞行状态测试依托飞行模拟平台与实地试飞结合的方式，在悬停、巡航、姿态调整等不同飞行模式下，监测系统的振动抗性、信号传输稳定性以及能耗变化规律，避免飞行姿态变化对性能产生不利影响。量化评估体系设定照明均匀度、偏振探测准确率、协同响应延迟等核心指标，采用层次分析法确定各指标权重，通过数据采集与分析形成评估报告，评估结果直接反馈至优化环节，针对不达标指标制定针对性改进方案，如通过优化光学镜片装配精度提升照明均匀度，形成“测试-评估-优化”的持续保障机制。

(二) 故障防控与运维策略

故障防控与运维策略聚焦系统全生命周期可靠性，通过监测预警、快速修复与安全保障形成多维防护。实时监测系统嵌入核心组件，针对光学镜头、步进电机、传感器等关键部件，实时采集工作温度、电压、运行速度等参数，设定阈值预警机制，当参数超出正常范围时立即触发声光报警并推送故障位置信息，实现故障早发现早处置^[5]。快速诊断采用故障树分析方法，梳理组件故障与系统异常表现的对应关系，建立诊断知识库，运维人员通过输入异常现象即可快速定位故障原因，配合模块化设计，故障组件可直接更换以缩短修复时间，部分软件类故障通过远程推送补丁实现自动修复。故障降级策略预设多级保障机制，当非核心组件故障时，系统自动关闭冗余功能并聚焦核心探测任务，如照明模块部分光源故障时，自动提升剩余光源功率以维持基础照明；若核心组件故障，立即启动安全停机程序，避免故障扩大导致无人机飞行风险，保障运维安全与任务连续性。

(三) 技术迭代优化策略

技术迭代优化策略以兼容性与扩展性为核心，建立贴合需求演进的持续升级机制。模块化设计为迭代提供基础支撑，照明、探测、控制等模块采用标准化接口连接，升级时仅需替换目标模块即可完成性能提升，如将

传统图像传感器替换为更高分辨率的新型传感器，无需改动整体结构，同时预留接口扩展位以支持新增功能模块接入。需求驱动的升级流程定期收集用户反馈与行业技术动态，针对新出现的探测精度需求或新型无人机平台适配需求，制定升级方案，算法层面通过迭代训练数据优化偏振特征提取模型，提升复杂环境下的目标识别能力；硬件层面跟进新型低功耗器件研发成果，及时替换老旧组件以降低能耗。迭代适配保障通过搭建过渡测试环境实现，新模块或新算法在测试环境中完成与现有系统的兼容性验证，数据迁移采用格式转换工具与增量迁移结合的方式，确保历史探测数据完整保留且可正常调用，避免迭代过程中出现系统中断或数据丢失问题。

结语

本文围绕无人机照明变焦偏振探测系统展开全面探索，构建完整的系统设计、技术突破、集成适配及落地实施体系。核心构成设计实现照明与探测的精准适配，核心技术突破扫清光学干扰、信号质量与能耗等关键障碍，集成适配方案满足多平台挂载与多场景应用需求，落地策略为系统稳定运行与持续优化提供保障。系统在夜间搜救、电力巡检等场景中表现出优异的探测精度与环境适应性，故障防控机制与迭代策略进一步提升全生命周期可靠性。此项研究填补无人机偏振探测领域在照明协同方面的技术空白，为相关系统研发提供实践范式。未来可结合人工智能技术深化场景识别与特征提取能力，拓展在更复杂环境下的应用场景，推动技术成果向更多领域转化。

参考文献

- [1] 许家伟. 强光背景下空间目标偏振探测技术研究[D]. 长春理工大学, 2024.
- [2] 史浩东, 范瑞晗, 王稼禹, 等. 快照式高光谱偏振变焦成像光学系统设计[J]. 光学学报, 2025, 45(01): 212-225.
- [3] 刘旭光. 偏振多光谱皮肤镜成像关键技术研究[D]. 长春理工大学, 2024.
- [4] 陈鑫. 偏振成像光学系统设计与图像增强算法研究[D]. 安徽大学, 2023.
- [5] 黎四明. 可变焦液晶眼镜的关键技术研究[D]. 东南大学, 2022.