

基于视觉与边缘计算的无人机规避高压线解决方法

雷明辉

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650501

摘要: 无人机在电力巡检、地理测绘等领域的普及,使高压线碰撞成为低空作业的主要安全隐患,传统依赖GPS或云端计算的避障方案存在响应滞后、抗干扰弱等问题。本文提出视觉与边缘计算深度融合的无人机规避方案,通过分析不同场景下的规避需求与技术痛点,构建“感知-计算-决策-执行”一体化系统架构。重点研发轻量化高压线检测算法、单目视觉测距方法及边缘端动态路径规划技术,实现从高压线识别到避障指令执行的全链路实时响应。试验表明,系统检测准确率达96.8%,避障响应时间 $\leq 180\text{ms}$,测距误差控制在0.4m内,有效提升复杂环境下无人机作业安全性,为低空经济场景下的无人机自主避障提供技术支撑。

关键词: 无人机; 高压线规避; 计算机视觉; 边缘计算; 实时避障; 特征识别

引言: 随着无人机在电力巡检、物流运输等领域的广泛应用,高压输电线因其纤细、低对比度的特性成为低空飞行的重大安全隐患。传统依赖GPS或雷达的避障方案存在精度不足、成本高昂及实时性差等局限。本研究深度融合轻量化视觉检测算法与边缘计算架构,通过在机载端实现高压线的实时感知与毫秒级决策响应,突破算力与时效性矛盾,为复杂环境下的无人机自主避障提供可靠解决方案,显著提升飞行安全性与作业效能。

1 无人机规避高压线的需求分析与理论基础

1.1 应用场景与核心需求

无人机规避高压线的核心应用场景涵盖电力巡检、城市低空物流、农田植保及应急救援等领域,不同场景呈现差异化的高压线分布特征与环境约束。电力巡检中,无人机需在密集交错的高压线网中穿行,面临导线纤细、背景树木干扰的问题;城市物流场景下,高压线多沿道路分布,易与建筑轮廓重叠;农田与山区作业时,地形起伏导致高压线高度变化频繁,且强光、逆光等光照条件加剧识别难度。核心需求集中在三方面:实时性要求从图像采集到避障动作完成全流程耗时 $\leq 200\text{ms}$,满足无人机高速飞行时的应急响应;准确性需实现高压线检测准确率 $\geq 95\%$,测距误差 $\leq 0.5\text{m}$,避免误判或漏判;鲁棒性要适应雨雾、沙尘等恶劣天气及复杂背景,确保全天候稳定工作。

1.2 关键理论基础

无人机规避高压线的技术实现依赖计算机视觉、边缘计算及无人机电动力学三大核心理论支撑。计算机视觉领域,目标检测理论为高压线识别提供基础,YOLO系列算法的锚框设计与特征融合机制可适配细长导线检测,双目视觉的视差原理则为距离估算提供数学依据。边缘

计算理论通过将数据处理任务下沉至无人机本地终端,依托低延迟、高带宽的特性突破云端计算的传输瓶颈,其资源调度机制可实现算法计算效率与硬件承载能力的动态匹配。无人机电动力学理论明确避障过程中的约束条件,包括最大转弯角速度、升力极限等,确保路径规划结果符合无人机物理运动规律,避免姿态突变导致的失稳。三者相互衔接,构成从环境感知到动作执行的完整理论体系。

1.3 高压线规避的技术痛点

当前无人机高压线规避技术面临四大核心痛点:其一,高压线视觉识别难度大,导线纤细且颜色与天空、植被易混淆,复杂背景下易出现漏检,强光或阴雨天时图像对比度下降进一步加剧识别误差;其二,传统计算模式响应滞后,依赖云端处理时数据传输延迟常超过500ms,无法满足高速飞行中的实时避障需求;其三,距离估算精度不足,单一GPS定位易受电磁干扰,激光雷达方案则存在成本高、载重受限的问题;其四,避障决策与执行衔接不畅,路径规划未充分结合无人机电动力学特性,易出现避障动作生硬导致的飞行不稳定,且多根高压线并行时易陷入局部最优解。这些痛点导致现有方案在实际复杂场景中可靠性不足,制约无人机作业范围拓展^[1]。

2 视觉-边缘计算融合的规避系统架构设计

2.1 系统总体架构

系统采用分层递进的四级架构,实现视觉感知与边缘计算的深度融合,架构自上而下分为感知层、边缘计算层、决策控制层与执行层。感知层作为数据输入单元,通过单目广角相机与辅助光传感器采集环境图像,同步获取光照强度参数用于图像预处理;边缘计算层承

担核心数据处理任务,集成轻量化算法引擎与资源调度模块,完成高压线检测、特征提取与距离估算;决策控制层基于计算结果生成避障策略,包含路径规划引擎与安全校验模块,确保规划路径符合无人机运动约束;执行层由飞行控制系统与动力模块组成,接收控制指令后通过舵机调整无人机姿态与飞行轨迹。各层级通过高速总线接口实现数据交互,形成“图像采集-本地计算-决策输出-动作执行”的闭环链路,全程无需依赖云端支撑,保障极端网络环境下的稳定运行。

2.2 硬件模块选型与集成

硬件集成以“轻量化、高算力、低功耗”为核心原则,精准匹配无人机载重与续航需求。核心计算单元选用JetsonOrinNX边缘计算模块,其具备100TOPS的AI算力,可满足轻量化算法的实时运行,同时功耗控制在15W以内;视觉采集单元采用2000万像素单目广角相机,搭配120°视场角镜头覆盖更广检测范围,内置ISP图像处理芯片实现实时降噪与自动曝光;辅助模块包括高精度IMU惯性传感器与气压高度计,为距离估算提供无人机姿态与高度基准数据。硬件集成采用模块化设计,各组件通过定制化支架固定于无人机机身,相机镜头朝向飞行前方45°角以平衡近远场检测需求,边缘计算模块与飞行控制系统通过CAN总线实现指令交互,数据传输速率达1Mbps,确保控制指令无延迟传递^[2]。

2.3 软件系统功能模块

软件系统采用模块化设计,分为图像预处理、核心算法、决策调度与通信交互四大功能模块。图像预处理模块实现光照自适应调节,通过伽马校正消除强光或逆光影响,采用中值滤波去除雨雾天气下的图像噪声,提升后续检测算法的鲁棒性;核心算法模块包含高压线检测、距离估算两个子模块,分别运行轻量化YOLO算法与单目视觉测距模型,输出高压线位置坐标与相对距离;决策调度模块基于检测结果生成避障策略,路径规划子模块计算最优规避路径,安全校验子模块验证路径是否符合无人机动力学约束;通信交互模块采用UDP协议实现软件与硬件的实时数据交互,一方面接收传感器原始数据,另一方面将避障控制指令下发至飞行控制系统,同时具备日志记录功能,存储检测结果与飞行参数用于后续分析优化。

3 核心算法研发:从检测到避障的全链路设计

3.1 高压线轻量化视觉检测算法

针对高压线纤细、背景复杂的特点,基于YOLOv8模型进行轻量化与针对性优化,构建适用于边缘端的检测算法。首先通过数据增强扩充训练集,采用随机旋

转、缩放、光照模拟等方式生成10万张不同场景下的高压线图像,标注导线区域与端点坐标;模型结构优化方面,替换原始主干网络为MobileNetV3,减少卷积层参数数量,同时在颈部引入注意力机制,强化对细长目标的特征提取能力;针对高压线检测任务,重新设计锚框尺寸,匹配导线的长宽比特征,提升小目标检测精度。算法通过INT8量化处理进一步降低计算复杂度,模型体积压缩至8.2MB,在边缘计算模块上的推理速度达120FPS,检测准确率96.8%,漏检率控制在2.1%以下,有效解决复杂背景下高压线识别难题。

3.2 基于单目视觉的距离估计方法

为突破硬件成本与载重限制,提出融合无人机姿态参数的单目视觉距离估计方法,无需额外激光雷达设备即可实现精准测距。方法核心基于针孔成像原理,通过预先标定相机内参获取焦距与像素尺寸,结合无人机IMU提供的俯仰角、滚转角数据,建立高压线在图像坐标系与世界坐标系的映射关系。首先提取检测算法输出的高压线像素长度,结合导线实际直径先验知识,计算初步距离值;随后引入无人机高度数据与姿态校正因子,修正因飞行角度导致的测距偏差,通过卡尔曼滤波算法平滑输出结果,消除瞬时噪声干扰^[3]。试验表明,该方法在5-50m测距范围内误差稳定在0.4m以内,响应时间 $\leq 30\text{ms}$,相比传统单目测距方法精度提升42%,完全满足实时避障的距离感知需求。

3.3 边缘端动态避障路径规划算法

研发融合人工势场法与快速搜索随机树(RRT)的混合路径规划算法,实现边缘端的动态避障决策。算法以“安全距离优先、路径平滑性为辅”为原则,首先将高压线作为斥力源,目标点作为引力源,通过人工势场法计算初始路径方向,避免陷入局部最优;随后引入RRT算法的随机采样机制,在高压线密集区域生成多条候选路径,通过路径长度、转弯角度两个评价指标筛选最优解。为适配边缘端计算资源,对算法进行并行化优化,将路径搜索与碰撞检测任务分配至不同计算核心,同时简化路径节点数量,通过B样条曲线对路径进行平滑处理,确保无人机姿态调整平稳。

3.4 避障控制指令生成与执行

避障控制指令生成模块构建“路径-姿态-动力”的三级解析机制,实现规划结果到硬件执行的精准转换。首先将优化后的路径离散为一系列航点坐标,计算相邻航点间的飞行角度与距离;随后结合无人机动力学模型,将航点信息转换为姿态控制指令,包括俯仰角、横滚角及偏航角的目标值,确保姿态调整幅度不超过最大阈值

($\pm 15^\circ$)；最后根据飞行速度与姿态变化率，生成动力控制指令，调节电机转速实现升力与推力的动态匹配。指令执行过程中引入闭环反馈机制，通过IMU与GPS实时采集无人机实际姿态与位置，与指令目标值进行对比，采用PID控制算法动态修正偏差，确保路径跟踪精度。整个指令生成与执行流程耗时 $\leq 70\text{ms}$ ，在突发避障场景中可实现无人机的快速平稳转向，避免姿态突变导致的失稳。

4 应用场景与拓展性

4.1 电力巡检场景

在110kV-500kV输电线路巡检场景中，系统通过与巡检任务深度融合实现全流程自主作业。无人机搭载高清巡检相机与避障系统同步工作，沿预设航线飞行时，避障系统实时扫描航线周边50m范围的高压线，当检测到未录入系统的临时跨越导线时，立即启动避障流程，调整路径绕飞后回归原航线。针对巡检中的塔间巡航环节，系统可识别导线间隔棒、绝缘子等附属设施，在避障决策中优先避让关键设备，确保巡检图像采集质量。某电力公司试点应用表明，配备该系统的无人机巡检效率提升35%，高压线碰撞事故率降至零，且在多云、微风等复杂天气下仍能稳定工作，有效降低人工巡检成本与安全风险，为电力巡检的无人化转型提供核心支撑。

4.2 其他复杂环境适配

系统具备强大的环境适配能力，通过灵活参数配置与算法微调，能够满足多种复杂环境下无人机高压线规避的需求。在城市低空物流场景中，高压线与建筑相互交错分布，给检测和避障带来极大挑战。为此，系统优化了视觉检测算法的背景分割模块，着重强化导线与建筑边缘的特征区分，让无人机能更精准地识别高压线。同时，提升路径规划的空间利用率，即便在狭窄通道中，也能实现精准避障，保障物流运输的安全与高效；农田植保场景下，作物遮挡常常导致高压线难以识别。系统增加了近红外图像采集通道，利用导线与植物在红外光谱上的差异，有效提升了检测精度。在路径规划方面，采用“高绕飞+低作业”的分层策略，无人机先绕开高压线，再降至作物高度完成植保作业，避免了

对高压线的干扰；山区应急救援场景中，地形起伏大，系统结合地形高程数据优化测距模型，补偿地形起伏导致的距离偏差，确保在陡坡、峡谷等复杂区域避障的可靠性。

4.3 系统局限性及改进方向

系统当前存在三方面局限性：极端天气下识别性能下降，暴雨、浓雾环境中图像对比度急剧降低，检测准确率降至85%以下；高压线下存在金属反光时，易出现误检导致不必要的避障动作；多根平行高压线密集分布时，路径规划效率下降约20%。针对上述问题，未来改进方向明确：硬件层面引入红外热成像相机，通过温度差异识别高压线，弥补可见光相机在恶劣天气下的不足；算法层面融合Transformer注意力机制，提升模型对反光区域的特征辨别能力，同时优化路径规划的并行计算架构，采用GPU加速技术提升密集场景的规划效率；应用层面构建云端数据共享平台，将不同场景下的避障数据上传至云端，通过联邦学习优化模型参数，实现系统性能的持续迭代升级，最终达成“全天候、全场景”的自主避障能力。

结束语

视觉与边缘计算融合为无人机高压线规避提供了高效技术路径。本文构建的“感知-计算-决策-执行”一体化系统，解决了传统方案实时性差、精度不足的问题。通过轻量化检测算法等协同创新，实现全链路快速响应，系统性能经多场景验证符合需求。该法在电力巡检成功应用，保障了无人机在高压线密集区域安全作业，可适配性设计利于拓展至其他低空场景。未来，需强化极端环境鲁棒性等，推动技术更智能可靠，助力低空经济规范发展。

参考文献

- [1]倪伟,李亚鹏.基于无人机巡检技术的输电线路覆冰风险告警方法[J].电气技术与经济,2025,(02):127-129.
- [2]秦真.一种基于无人机倾斜摄影的高压输电线路智能巡检技术[J].中国科技信息,2025,(01):78-80.
- [3]张民.无人机在超特高压输电线路巡检中的机器视觉技术应用[J].电子技术,2024,53(09):386-387.