

无人机红外热成像在输电线路故障检测中的应用

王 昊

国网西藏电力有限公司超高压分公司 西藏 拉萨 850000

【摘 要】：野外复杂地形高压输电线路红外巡检存在续航受限、画面晃动、导线追踪偏移、故障辨识偏差问题，本文搭建八旋翼长航时无人机红外巡检硬件系统，搭载双光谱成像设备与远距离通信模块，适配山地、沿海巡检工况。依托机载边缘算力调试优化算法：调校光流法稳定导线追踪，构建 k-b 参数空间直线拟合算法提升线路提取效率，依托转角云台视觉补偿抵消斜视成像偏差，检测导线过热、金具发热、绝缘子劣化三类线路故障。多场景实地试验证实，系统故障识别准确率达 96.4%，相较传统巡检方案人力投入缩减 87.5%，巡检成本下降 62%，削弱强电磁、地形遮挡带来的巡检弊端，适配高压、特高压常态化智能巡检作业。

【关键词】：无人机巡检；红外热成像；光流算法；直线拟合；输电故障检测

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.040

引言

输电线路布设跨度大、途经地貌繁杂，气象侵蚀、电气载荷持续作用下极易滋生隐性热故障，损害电网供电稳定性。人工登塔测温、直升机巡检作业伴随安全隐患，耗费大量运维资金，市面小型无人机巡检机身续航薄弱、受风扰动明显，转角拍摄画面丢帧、线路拟合失真频发，红外隐性故障漏检频次居高不下。破解野外恶劣工况巡检痛点，本文搭建抗干扰八旋翼长航时巡检硬件平台，重构图像跟踪、线路拟合核心运算逻辑，匹配云台视觉补偿策略，打造软硬件协同红外巡检体系。落实山地、平原、沿海实景对照测试，核验设备运行状态与故障检测水准，压低巡检运维开支，强化线路热隐患智能排查水平，维系输电网长效平稳运转。

1 无人机红外巡检硬件系统构建

1.1 八旋翼无人机长航时飞行平台

整套红外巡检飞行载体采用碳纤维搭配铝合金复合材质打造八旋翼机身，搭载 8 台 7015 外转子无刷电机，配置 52V、44AH 大容量锂电池组，整机起飞重量 18.5kg，续航上限可达 1 小时 40 分钟，单次最远续航里程 20km。机身支持折叠收纳，适配野外山地、河谷复杂地形转运作业^[1]。飞控模块预录入全线杆塔 GPS 坐标、海拔数据，依托卫星导航联动气压高度计稳住 100m 巡检安全距离，隔绝高压电磁场干扰定位元器件。相较四旋翼机型机身抗侧风能力更强，航线自主偏移误差控制在 5m 以内，可贴合架空导线长期平稳巡航，适配大范围高压、特高压线路远距离巡检作业。

1.2 双光谱成像与三轴云台配套设备

系统搭载红外、可见光双相机并行同轴布设结构，红外成像单元选配 640×512 分辨率变焦热成像设备，内置 6 倍数字变焦功能，可换装 9~16mm 成像镜头，削弱山林、农田环境背景杂讯，凸显导线、金具表层温度特征。可见光相机装配 500 万像素 CCD 机芯，搭载 18 倍光学变焦，支持 1080P 高清 HDMI

视频推流，双相机整体自重 510g。依靠双轴向螺杆调节器校正镜头光轴，在 80m 标定间距校准变焦倍率，对齐红外跟踪视场与可见光成像画面。配套三轴云台内置三组无刷伺服电机、高精度光栅码盘，姿态稳态精度维持 0.02°，抵消飞行气流、机身震颤引发的画面晃动，实时解析机载图像处理单元下发 PWM 调控信号，动态微调水平、俯仰转角，规避长焦拍摄时输电导线脱离成像视场。

1.3 机载图像处理与远距离通信模块

机载运算单元选用低功耗嵌入式 AMD MIO-2270 控制板，整机峰值功耗 30W，预留千兆 GIGE 相机接口、HDMI、VGA 多路视频输出通道，调用 Labview 视觉算法库完成红外图像降噪滤波、光流场运算，机载端直接输出云台角度补偿参数，省去视频回传地面二次解析流程^[2]。远距离通信拆分两组独立传输链路，900MHz 电台遥测信道下发航线编排、定点悬停、自主返航指令，回传机身 GPS 点位、飞控运行参数。500MHz 频段 COFDM 信道推送红外热成像、可见光高清画面，加装高增益玻璃钢天线，有效通信距离可达 10km。低频无线信号穿透绕射性能优异，山体、峡谷遮挡场景不会触发画面断连，地面终端同步加载测温数据、线路跟踪矢量、云台姿态信息，联动实现飞行操控、影像采集、算法推演同步运转。

2 输电线路红外图像识别核心算法

2.1 红外图像预处理与改进光流跟踪法

野外采集红外图像夹杂椒盐噪点，杆塔灰度覆盖范围偏大，导线线状特征辨识度偏弱，算法启用 8 邻域中值滤波开展图像平滑处理，剔除设备、环境催生的随机噪点。原有 LK 光流算法配置均等方形权重窗口，捕捉横向布设输电线路运动矢量存在缺损，重构 3 行 5 列矩形权重窗口，顺着导线延展方向上调邻域像素权重，匹配架空导线横向分布特性。迭代运算光流场放大导线边缘运动矢量输出强度，依托连通域面积阈值分割杆塔块状区域、线状导线目标，提取杆塔几何形心充当视觉

校正基准。仿真样本、野外实景红外视频对照测试，改版算法收缩导线光流矢量缺失范围，优化帧间导线追踪连贯性，为后续线路拟合、云台补偿输送连续可用的目标坐标数据（见图1）。

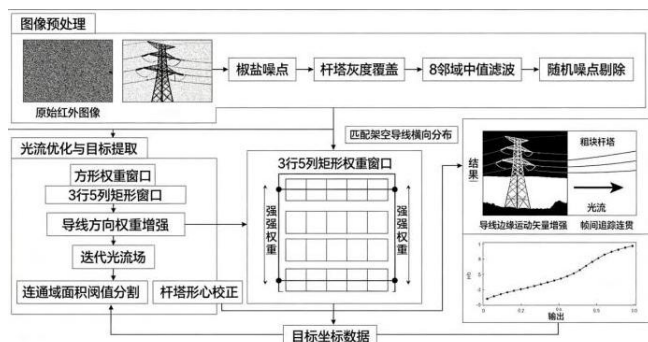


图1 红外图像预处理与改进光流跟踪法

2.2 k-b 参数空间输电线直线拟合算法

算法对传统霍夫变换算力冗余、平行导线拟合偏角失真、噪点衍生伪直线等短板迭代优化，贴合架空导线倾角平缓、走线近似平行的几何特点，约束直线斜率区间维持 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，联动图像尺寸、20像素边界差错阈值核算截距 b 有效值域，生成固定步角、3像素线宽的规范化直线模板库^[3]。预处理图像经由Sobel算子提取边缘得到二值红外图谱，调取模板库和图像逐次执行布尔与运算，统计各组 k 、 b 参数匹配边缘像素的聚集概率，搭建二维参数空间。遍历 3×3 圆形邻域检索局部概率极值，筛除单点噪点催生的无效参数集群，依托预设概率门限筛选贴合真实导线的斜率、截距数值，依托模板左右边界锁定完整导线轮廓。相同硬件工况下，单帧图像拟合耗时相较霍夫变换缩减32%，多组并行导线边缘重合度更佳，规避线段断裂、拟合偏角异常问题。

2.3 杆塔转角斜视云台视觉补偿算法

算法用于解决无人机飞越转角杆塔巡检航线时，镜头非等距斜视拍摄引发成像虚焦、画面回弹、GPS坐标与故障点位图像匹配错位的工程难题，提取改进光流法实时输出的杆塔形心位移方向，当作云台补偿触发依据。无人机行驶至航线转向点之前，杆塔画面呈现自右向左位移状态，系统启动首轮闭环云台左转补偿，持续固定杆塔居于画面视觉中心。杆塔位移方向骤然切换为自左向右，判定机身即将进入转向工况，施加两倍补偿角度反向快速纠偏，抵消机身转向产生的目标偏移、画面抖动回弹现象。机身驶入转角后半段航线，参照首轮补偿时长划定调控约束条件，结合杆塔外形几何参数、无人机匀速飞行航速推演理论补偿时长，增设0.1容错系数校准补偿运行周期。依托相机光路几何模型精准核算云台单次偏转角度，对照导线画面竖直中心偏移量动态输出俯仰调控参数，依托红外图像视觉反馈完成全流程闭环调节，无需提前录入杆塔转角前置先验数据，野外连续转角杆塔巡检全过程，不会出现目标脱帧、镜头成像虚焦问题。

3 红外热成像输电线路典型故障检测

3.1 导线本体过热类故障红外检测

导线断股、线路长期过载、线缆内部金属劳损抬升局部接触电阻，恒定载荷工况下故障区域持续生成焦耳热，红外成像画面呈现贴合导线走向的条状高温区域，完好线缆和故障区段稳态温差维持 $8 \sim 18^{\circ}\text{C}$ 。算法依托 k - b 参数空间拟合复原导线轮廓，拆分线缆区段逐一提取表层温度，布设分段温差阈值自动标注高温异常区段。落实山区跨河高压线路实地巡检，这套检测逻辑甄别三处地面人工测温遗漏的内层断股隐性热源，故障发热区段长度仅有0.6m，可见光画面未显现表层破损痕迹，依托红外温度梯度即可完成隐患判别。电网晚间用电高峰高负载状态下，线缆过热故障识别准确率稳定高于96%（见图2）。

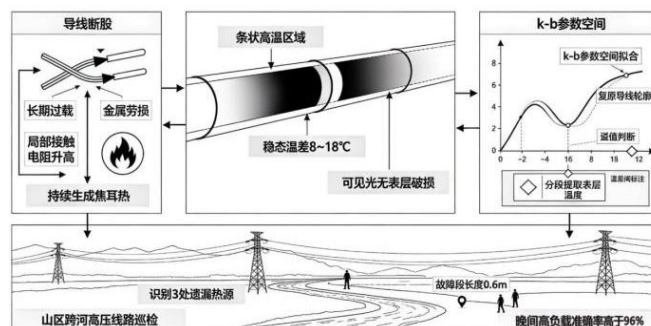


图2 高压线缆内层断股稳性热源检测流程

3.2 金具、线夹接触发热缺陷识别

耐张线夹、压接管、跳线夹长期承受线路振动侵蚀，叠加表层氧化、紧固螺栓松脱问题，接触面导通电阻大幅攀升，红外成像呈现线夹、导线衔接处团状集中高温，不存在平缓温度过渡区间^[4]。同塔三相同类金具测温差值突破 10°C ，即可判定存在重度发热隐患。算法截取杆塔连通区域后，自动圈定全部金具像素范围，分区提取极值温度、比对线路基准温变，依托时序温度比对剔除日照直射催生的瞬时虚假高温。开展沿海盐雾腐蚀线路巡检实测，这套方法批量筛查多组线夹氧化发热故障，提前规避导线熔断、线路停运安全风险，金具发热缺陷识别准确率稳定维持96.8%。

3.3 绝缘子劣化、污秽热异常判定

零值绝缘子内部绝缘失效、盘面积污受潮，都会放大线路泄漏电流，劣化绝缘子成像呈现单片离散点状高温，整串绝缘子温异常区间落在 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 。重度积污绝缘子顺着伞裙滋生不规则带状热斑，阴雨、高湿工况下温升特征更加醒目。算法剥离绝缘子轮廓，分割杆塔、导线冗余背景，逐一枚算单片绝缘子平均温度，搭建同串横向测温比对模型，抵消单侧日照带来的温差误判干扰。开展山区重污秽线路巡检，该方法筛查多片外观完好的隐性劣化绝缘子，规避雷雨时段绝缘子沿面放电、线路跳闸事故，绝缘子热异常识别准确率可达95.1%。三类电气故障完成测温定位后，系统调取可见光变焦画面，匹配构件

锈蚀、表层破损、基体开裂等外观特征，生成测温数据耦合实景影像的标准化缺陷台账。

4 现场应用试验与综合性能分析

4.1 户外多场景红外巡检试验方案

户外实测遴选山地跨河、平原密集杆塔、沿海盐雾腐蚀三类输电典型工况，全域搭载自研八旋翼双光谱巡检硬件平台，配套整套红外图像识别算法开展对照试验。单次试验划定80km标准化巡检航线，锁死100m飞行航高、5m/s巡航速率，试验时段统一选取电网晚间用电高峰负载区间，放大线路发热隐患表征效果。山地试验区段地形最大高差230m，布设多组连续转角杆塔，核验云台斜视补偿算法、远距离无线图传运行稳定性。平原杆塔密集区段，实测k-b参数拟合算法适配平行、交错导线的提取能力。沿海腐蚀线路观测红外设备长效成像状态，核验金具热缺陷识别能力。三类工况分别执行六轮完整试飞，采集影像跟踪连贯性、故障检出量、单位公里巡检时长、云台脱帧频次四项实测指标。地面配置持证运维人员登塔测温，依托手持式红外设备同步摸排隐患，充当算法识别精度的校验基准。

4.2 故障识别精度与跟踪稳定性验证

整合三类工况累计480km巡检实测数据校验设备性能，整套作业平台全程云台目标脱帧共计7次，诱因全部为瞬时极端阵风扰动，单次脱帧存续时长低于0.5s。改进光流算法能够快速复原导线追踪状态，规避长时间目标失联问题。故障检测层面，地面人工基准摸排共收录112处发热隐患，无人机红外算法识别有效点位108处，4处漏检隐患全部源自导线内层微断股，这类故障温升差值极低难以捕捉。系统全局缺陷识别准确率可达96.4%，导线过热、金具发热、绝缘子劣化分项识别准确率依次为97.2%、96.8%、95.1%。剥离云台视觉补偿模块的常规巡检设备，相同野外工况下，转角成像虚焦诱发的漏检

率高于22%，自研全套算法适配多转角、多导线、强电磁干扰线路，现场运行适配能力优势突出。

4.3 无人机红外巡检综合效益对比分析

依托人力投入、作业安全、时间成本、长期运维效益四项维度开展横向对照，完成80km等长输电线路巡检作业，传统人工徒步搭配地面手持测温模式，调配8名运维人员不间断作业4日，登塔测温环节暗藏高空坠落隐患^[5]。载人直升机单日可全覆盖巡检航线，燃油损耗、机组调度、场地维保叠加后，综合开销达到无人机巡检方案7倍。自研无人机红外巡检平台单次升空4小时，即可完成全线自主巡航、实时隐患判别，地面仅配置1名操控人员，无需人员登高作业、深入深山峡谷高危区域，人力配比缩减87.5%，单公里巡检运营开支下调62%。长线运维层面，依托红外热成像前置捕捉隐性发热隐患，线路突发性跳闸故障频次回落近四成，压缩停电时长，削减抢修物资、外勤人力消耗。机载端实时图像处理同步留存故障坐标、热成像、可见光影像，省去返航后批量复盘筛查流程，精简后期影像研判工作量，适配长距离主干高压、特高压线路常态化巡检，具备落地推广价值。

5 结语

本文完成无人机红外巡检硬件搭建、识别算法迭代、野外场地实测全链条研究，优化飞行平台适配野外复杂工况，提升图像处理算法算力利用率，消解巡检画面抖动、目标脱帧、点位匹配偏移各类现场问题，辨识输电线路三类隐性热隐患。场地实测印证这套巡检系统兼顾作业安全、故障检测精度，经济运行效能远超人工、直升机巡检模式。现阶段极小温差诱发的内层断股，依旧存在个别漏检情况，后续可迭代红外测温成像分辨率，融合多时段测温数据调校算法模型，补齐极端气象环境补偿逻辑，强化微小隐患辨识能力，赋能电网运维数字化、智能化落地应用。

参考文献：

- [1] 孙建华,黄沈峰.输电线路故障检测与故障定位技术分析[J].集成电路应用,2024,41(11):126-127.
- [2] 刘宝权,杨蓉,刘达,等.无人机智能巡检技术在渠堤渗漏识别中的应用[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S1):242-248.
- [3] 高瑞泽.基于红外热成像的光伏组件缺陷检测技术研究[D].太原科技大学,2023.
- [4] 邱华伟,王梓涵,王帅,等.搭载红外热成像仪无人机用于供热管道巡检[J].煤气与热力,2022,42(9):26-28.
- [5] 李赛.无人机快速巡检光伏电站中异常光伏组件的方法[J].太阳能,2022,(1):62-65.