多晶硅厂区电缆桥架巡检无人机搭载式红外检测系统研究

潘多明

（特硅基新材料有限公司，新疆 昌吉 831100）

摘 要 针对多晶硅厂区腐蚀性粉尘多、桥架分布跨度大、人工登高巡检风险高、电缆发热隐患难以早期识别的现实问题，本研究设计了一套无人机搭载式红外检测系统。结合厂区实际工况完成硬件选型、机载采集模块与地面解析平台搭建，规范红外图像采集流程，实现电缆桥架接头、线缆表层温度的数据采集、热异常标记以及缺陷初步判别。现场测试表明，该系统可完成长距离桥架非接触巡检，有效识别电缆局部过热、连接点发热隐患，降低现场作业安全风险，提升多晶硅厂区供配电运维智能化水平，在化工厂区电气运维领域具备良好的推广价值，可为同类企业电缆桥架智能巡检提供参考。

关键词 多晶硅厂区；电缆桥架；无人机巡检；红外热成像；设备运维

中图分类号：TM727；TH811 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.012

0 引言

多晶硅生产厂区设备密集、电缆桥架线路长，腐蚀性粉尘易侵蚀线缆接头与紧固件，造成接触不良发热、绝缘老化等隐患[1]。传统人工登高巡检劳动强度大、部分高风险位置难以接近，红外测温覆盖不全，隐蔽性发热缺陷难以及时发现，易引发电气火灾。无人机搭载红外热成像设备具有机动灵活、非接触检测优势，但针对多晶硅桥架的专用巡检系统研究较少，缺少适配粉尘环境的采集策略与缺陷判别流程[2]。基于此，本研究构建无人机搭载式红外检测系统，完成硬件配置与作业流程设计并开展现场试验，为多晶硅厂区电缆桥架智能化巡检提供技术方案。

1 多晶硅厂区电缆桥架巡检工况分析

多晶硅厂区属于化工生产场景，生产过程产生硅粉等腐蚀性颗粒物，长期附着在电缆桥架、电缆接头表面，会加速金属构件锈蚀，造成螺栓松动、接触电阻增大，运行时产生局部过热现象。厂区桥架分为室内工艺廊道桥架、室外长距离架空桥架，线路跨度大，部分桥架布置于设备上方，人工抵达作业点位难度高。常规人工红外巡检受观测角度、粉尘遮挡影响，测温误差偏大，漏检风险较高[3]。

厂区电缆桥架典型故障表现为电缆接头过热、线缆过载温升、桥架接地跨接件腐蚀发热、电缆绝缘老化升温。故障早期无明显外观变化，仅体现为温度异常，依靠可见光巡检无法识别，必须依托红外热成像手段捕捉温度差异。同时，厂区存在电磁干扰、局部气流、粉尘遮挡等干扰因素，无人机巡检需要规避设备构筑物，对飞行路径、红外采集参数提出约束条件。

从发热机理来看，电缆接头部位因压接工艺偏差、螺栓紧固力矩不足或腐蚀层介入，接触电阻显著高于线缆本体，在负荷电流作用下依据焦耳定律产生额外温升，长期运行加速绝缘热老化，最终可能引发绝缘击穿甚至相间短路。多晶硅厂区还原炉、氢化炉等大型用电设备启停频繁，负荷电流波动幅度大，接头部位承受周期性热应力，导致接头部位反复承受热胀冷缩应力，进一步加剧接触劣化进程。因此，建立高效、全覆盖的桥架温度巡检手段，对早期识别发热缺陷、防范电气火灾具有重要的工程意义[4]。

2 无人机搭载式红外检测系统总体方案

无人机搭载式红外检测系统分为机载采集子系统与地面解析处理子系统两大部分。机载部分由多旋翼无人机平台、红外热成像模组、可见光相机、数据存储传输模块组成；地面子系统包含地面站、图像解析软件、温度数据库，完成热图接收、温度读取、热异常点位标记、巡检台账输出[5]。

作者简介：潘多明（1988-），男，本科，高级工程师，研究方向：机械电子和光伏硅基、大化工企业设备完整性管理。

2.1 机载硬件选型

无人机选用工业级多旋翼机型，具备粉尘耐受能力、定点悬停、航线规划功能，满足厂区复杂环境下飞行作业。红外热成像模组测温范围 -20 ℃～ 150 ℃，测温精度 ±2 ℃，同步搭载可见光摄像头，实现红外—可见光图像同步采集，方便故障位置对照定位。机载模块具备防尘外壳，降低硅质粉尘对镜头的污染；机载存储单元保存原始红外图像，可实时回传关键画面至地面站。

红外热成像模块的工作原理是通过非制冷红外探测器接收被测物体表面发出的红外辐射，经光电转换和信号处理后生成温度分布伪彩图像。相较于接触式测温，红外热成像可在不停电、不接触的条件下对运行中电缆进行大面积温度扫描，尤其适合桥架密集敷设区域的快速筛查。系统配置时，发射率参数参照交联聚乙烯电缆绝缘表面设置为 0.85 ～ 0.9，环境温度参数由机载温湿度传感器实时修正，同时将机载激光测距模块测得的镜头至被测目标距离作为输入参数，纳入测温补偿计算，削弱厂区环境温度波动对测温结果的影响。

2.2 地面解析子系统

地面站实现无人机航线设置、飞行状态监控，接收机载回传图像数据。解析软件读取红外热图原始温度矩阵[6]，可框选桥架电缆接头、线缆本体区域提取最高温度及相对温差，参照《带电设备红外诊断应用规范》（DL/T 664-2025）及工业电缆运维判别标准，对温差超阈值区域自动标记疑似缺陷点位，生成巡检记录，保存点位、温度、现场图像，形成桥架巡检电子台账，便于运维人员后续复核处置。

3 无人机搭载式红外检测系统作业流程设计

3.1 巡检前期准备

开展现场踏勘，梳理厂区电缆桥架走向，标记构筑物、高大设备作为禁飞区域，规划自动巡检航线，设置悬停采样点位，重点覆盖电缆接头、三通弯头、电缆密集敷设区段。检查红外镜头洁净度，清理粉尘污渍，使用标准面源对红外模组进行现场测温校验，完成测温参数校准，避免厂区粉尘造成测温偏差[7]。

3.2 现场数据采集

无人机按照预设航线飞行，在关键点位悬停，同步采集红外热图像与可见光图像；镜头垂直或者小角度对准桥架被测部位，尽量减少粉尘、反光干扰。采集过程记录对应位置信息，每一处接头、密集线缆区域留存不少于 2 组红外样本。遇到大风、扬尘浓度过高天气停止巡检，保障成像质量。

3.3 数据解析与缺陷判别

将采集热图导入地面解析平台，提取被测区域温度，计算部件之间相对温差。依据《带电设备红外诊断应用规范》（DL/T 664-2025）中电流致热型设备的相对温差判据法，以接头与对应正常本体参照点之间的相对温差百分比 δ_t 作为核心主判据，结合设备负荷工况、环境温度完成修正后，按规范分档判定缺陷等级；同时将接头绝对温度结合设备额定载流量做差异化修正后作为早期预警辅助判据，形成多维度双重预警机制。同步匹配可见光图像确认现场位置，输出巡检报告，列明隐患位置、温度数据、风险等级，推送运维人员开展现场复核检修。对于标记为严重缺陷的点位，系统自动生成检修工单，关联历史巡检数据形成温度趋势曲线，辅助运维人员判断缺陷发展速率并制定消缺计划。

4 无人机搭载式红外检测系统现场测试与结果分析

选取某多晶硅生产厂区室外一段长 420 m 梯式电缆桥架开展系统测试，桥架敷设动力电缆，包含 22 处电缆中间接头。无人机飞行高度距桥架约 5 m ～ 8 m，镜头与被测面基本垂直，分别使用本无人机红外系统与传统人工手持红外测温同步开展对比巡检。

无人机巡检完成全部区段耗时约 42 min，识别出 3 处接头存在相对温差超标疑似发热点；后续人工登桥复核确认，3 处点位均存在紧固件锈蚀、接触电阻偏大问题，与检测结果一致。人工巡检全程需要登高作业，耗时约 135 min，受观测角度限制，1 处隐蔽接头前期未能有效识别。

测试结果表明，该无人机搭载红外检测系统巡检效率明显优于传统人工模式，能够捕捉多晶硅厂区粉尘环境下电缆桥架的早期发热隐患，规避人员登高作业风险。测试中也发现，当镜头表面附着硅粉会带来测温轻微偏移，作业中需要定时检查清理镜头；局部强日光直射场景，需要调整拍摄角度降低环境对热成像的干扰。

在测温准确性方面，对 3 处确认发热接头进行无人机红外测温与人工接触式复测对比，无人机测得接头区域最高温度分别为 68.2 ℃、71.5 ℃、65.8 ℃，人工接触式复测分别为 69.7 ℃、73.1 ℃、67.2 ℃，绝对误差均在 2 ℃以内，满足工业设备红外测温精度要求。在缺陷判别方面，3 处接头与相邻本体温差绝对值分别为 18.5 ℃、22.3 ℃、16.1 ℃，结合现场环境温度与负荷电流换算为相对温差（δ_t）后分别为 42.3%、51.6%、38.7%，对照《带电设备红外诊断应用规范》（DL/T 664-2025）中对应设备类型的电流致热

型缺陷分档阈值，均达到一般缺陷判定条件，判为一般缺陷及以上，与现场复核结论一致。

综合对比来看，无人机红外巡检在作业效率、覆盖范围、人员安全性三个维度均具有明显优势。效率方面，单架次可完成400 m以上桥架巡检，耗时仅为人工的三分之一左右；覆盖方面，无人机可从多个角度对桥架上下层、弯头、三通等人工难以接近部位进行成像，消除检测盲区；安全方面，作业人员无需登高，在地面站即可完成全部巡检操作，大幅降低高处坠落和触电风险。

5 无人机搭载式红外检测系统应用优化与改进策略

结合现场测试结果，针对多晶硅厂区高硅粉尘、强腐蚀、光照与电磁干扰复杂的现场工况，从硬件防护、图像识别算法优化、现场作业管控、数字化运维体系建设四个维度对本无人机搭载式红外检测系统开展优化改进，进一步提升系统检测精度、设备可靠性与智能化运维能力。

1. 硬件防护方面。硅质粉尘易黏附于红外镜头、机身散热缝隙，既会造成测温数据偏移，也会加速金属零部件腐蚀。可在红外热成像镜头前端增设可快速拆装的防尘抗腐蚀光学保护镜片，镜片选用抗硅粉磨损的光学材料，便于现场快速擦拭更换；对无人机机身、机载传输模块强化密封防护，提升整机防尘抗腐蚀等级，降低粉尘侵入内部电路的概率。同时，增加机载镜头自清洁辅助结构，在巡检间隙可快速清除镜头表面浮尘，减少因镜头积灰带来的测温误差，延长机载设备在化工厂区的使用寿命[8]。

2. 图像识别算法优化方面。厂区强光直射、粉尘散射会造成红外图像噪点多、局部反光伪温问题。可基于现场采集的大量桥架红外样本数据集，完善图像预处理算法，增加降噪、反光抑制、伪温剔除模块，削弱外界环境因素对热图质量的干扰。优化缺陷判别逻辑，结合厂区负荷波动特征动态修正相对温差与绝对温度双重判据，构建适配多晶硅电缆桥架工况的缺陷识别模型，区分真实发热缺陷与环境、光照带来的虚假高温，降低系统漏检与误检率，减少后期人工复核工作量。

3. 现场作业管控方面。推行分级差异化巡检策略。对于室外架空桥架、老旧线缆区段、还原炉等大功率设备供电桥架缩短巡检周期；结合厂区设备布局动态迭代巡检航线，更新禁飞区、障碍物数据库，优化悬停采样点位，保证电缆接头、三通弯头、线缆密集段全部纳入采样范围。严格执行天气准入条件，大风、高扬尘、强光暴晒时段暂停巡检，保障红外成像质量。

4. 数字化运维体系建设方面。完善地面解析平台数据库，对历次巡检温度数据进行归档，建立电缆桥架设备电子档案。对发热隐患点位持续跟踪，自动生成温度变化趋势曲线，实现缺陷风险动态评估，将传统事后故障排查转变为预测性维护，提升多晶硅化工厂区供配电运维的精细化水平。

上述四个维度的优化措施相互协同、层层递进：硬件防护从源头削弱环境干扰，算法优化提升数据质量与判读效率，作业管控保障巡检规范与覆盖度，数字化运维实现隐患全生命周期管理。四者同步推进可使系统在多晶硅复杂工况下的测温稳定性、缺陷识别准确率与运维响应速度得到整体性提升，为厂区电缆桥架安全运行提供更加可靠的技术保障。

6 结束语

多晶硅厂区特殊腐蚀粉尘环境下，电缆桥架接头发热隐患是厂区供配电安全的重要风险源，传统人工巡检效率低、作业风险高，部分点位存在检测盲区。本研究搭建无人机搭载式红外检测系统，完成机载硬件与地面解析平台配置，建立适配多晶硅厂区工况的巡检作业流程，现场测试验证系统可高效完成长距离桥架红外巡检，有效识别电缆接头、线缆局部过热缺陷，提升巡检作业安全性与检测覆盖面。未来需要进一步优化镜头防尘防护结构与图像预处理算法，削弱粉尘、强光对测温结果的干扰，完善缺陷智能识别模型，降低人工判读工作量。

参考文献：

[1] 隋宇,宁平凡,牛萍娟,等.面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J].电网技术,2021,45(09):3636-3648.
[2] 张昊洋,刘英顺,张光远,等.无人机技术在输配电架空专业中的应用[J].农村电气化,2024(09):25-27.
[3] 沈洋.基于红外热成像技术的配电线路缺陷诊断技术研究[J].电工技术,2024(S2):657-659.
[4] 陈加文.红外热成像技术在配电线路缺陷诊断中的应用[J].农村电气化,2024(05):85-87.
[5] 邓琨,温启良,张渊渊.基于超声红外热像的电缆终端局部放电缺陷检测方法[J].红外技术,2022,44(09):972-978.
[6] 严丹昭,陈晶,兰旺耀,等.基于表层温度深度学习的电缆接头绝缘劣化非接触式诊断[J].红外技术,2024,46(06):712-721.
[7] 贾宏满,李腾,孙铁铮,等.基于红外技术的远距离电缆测温装置研制[J].东北电力技术,2023,44(10):17-20,52.
[8] 孙政樑,马立博,焦政国,等.无人机在架空输电线路智能巡检中的应用[J].农村电气化,2025(01):42-45.