



光伏电站无人机巡检技术白皮书

北京鉴衡认证中心有限公司
阳光智维科技股份有限公司
联合发布

2023年5月

1. 白皮书编制背景和目的

进入“十四五”之后，在碳达峰碳中和目标的支撑下，光伏度电成本下降的加持下，光伏发电迎来全速发展的新周期，国家政策、地方规划密集出台，央国企及其他传统行业的企业强势加入，推动光伏电站快速发展。

据国家能源局数据，2023 年一季度光伏发电新增装机 33.66GW，累计装机容量已达 425.89GW，光伏正式超越水电成为全国第二大电源。随着大型地面电站的规模越建越大，建设地点、站址类型越来越复杂，多建设于高海拔地区、沙戈荒地区，甚至近海区域；分布式光伏电站，则建设地点分散、面广站多。常规人工巡检运维方式已无法满足电站安全、高效的运维要求。如何高效、安全的高质量开展光伏电站运行维护工作，成为目前行业内重点关心的话题。

“智能运维”是未来光伏发电的必然选择，无人机巡检作为电站智能运维底层支撑，软硬件技术日趋成熟，应用范围也越来越广。无人机搭载可见光及红外镜头等设备，可提供组件红外检测、组件及周边环境外观检查等多种检测，实现实时监测、分析、智能诊断等功能。近几年无人机巡检技术的应用也越来越多地被业界关注。总体看，无人机巡检技术尚处在起步应用阶段，可以预见，随着该项技术在场景匹配性和性能可靠性水平方面的不断完善和提高，将会获得越来越广泛的应用。

阳光智维科技股份有限公司（以下称“阳光智维”）是一家专注于电站全生命周期智慧运维及资产增值服务的国家高新技术企业。企业依托母公司阳光电源二十多年交直流转换技术和电站集成实践优势，自 2018 年开始从事光伏电站智能巡检解决方案研究，目前已开发出适合于山地、水面、工商业屋顶等不同场景的光伏电站智能巡检解决方案。截至 2022 年底，“阳光智维”无人机巡检产品和系统解决方案已成功应用于 50 多个电站项目中。

为证实光伏电站无人机巡检技术应用的性能水平、应用效果，受阳光智维委托，北京鉴衡认证中心（以下称“鉴衡”）对该技术的系统优势、潜在风险点及控制措施的适度性进行了深度评审，并选择样本电站，对无人机巡检技术应用性能、应用效果进行了验证。依据 CGC-PGF 015: 2022《光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量评价技术规范》，阳光智维科技股份有限公司光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量等级的综合评定结果为“Level 4”，最高等级。

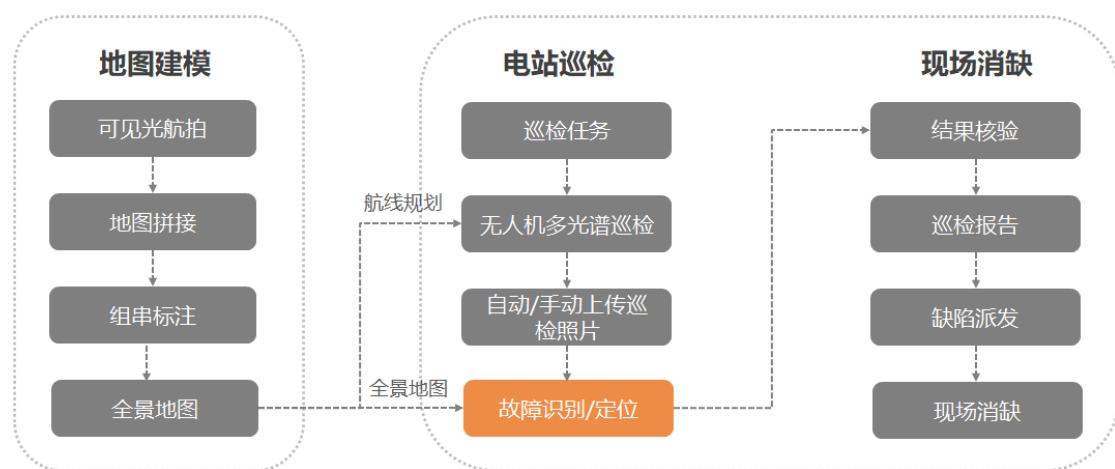


为使业界全面了解阳光智维光伏电站无人机巡检系统设计方案及相关技术，鉴衡和阳光智维联合发布“光伏电站无人机巡检技术白皮书”。本白皮书较为详尽地介绍了阳光智维无人机巡检系统设计方案及相关技术以及鉴衡技术评审和验证结果，旨在：

- 为业主选择光伏电站无人机巡检系统提供参考；
- 为业界提供经验和技術分享；
- 提高社会对光伏电站无人机巡检技术的认知程度。

2. 阳光智维光伏无人机系统设计方案及相关技术说明

基于无人机的光伏巡检是通过无人机搭载可见光及红外镜头等设备，结合人工智能技术对光伏电站进行自动化高精度的智能设备缺陷识别巡检方式。光伏电站无人机智能巡检系统包括无人机设备管理、任务下发、组串及组件缺陷智能诊断分析、报告生成、缺陷下发、数据存储发布、缺陷导航管理等功能，可全自主对光伏电站进行运行监测、缺陷识别与精准定位，并通过缺陷下发实现站端消缺流程的全链路闭环管理。光伏电站无人机巡检流程一般包括路径规划、地图建模、多光谱巡检、报告生成、消缺闭环等节点。



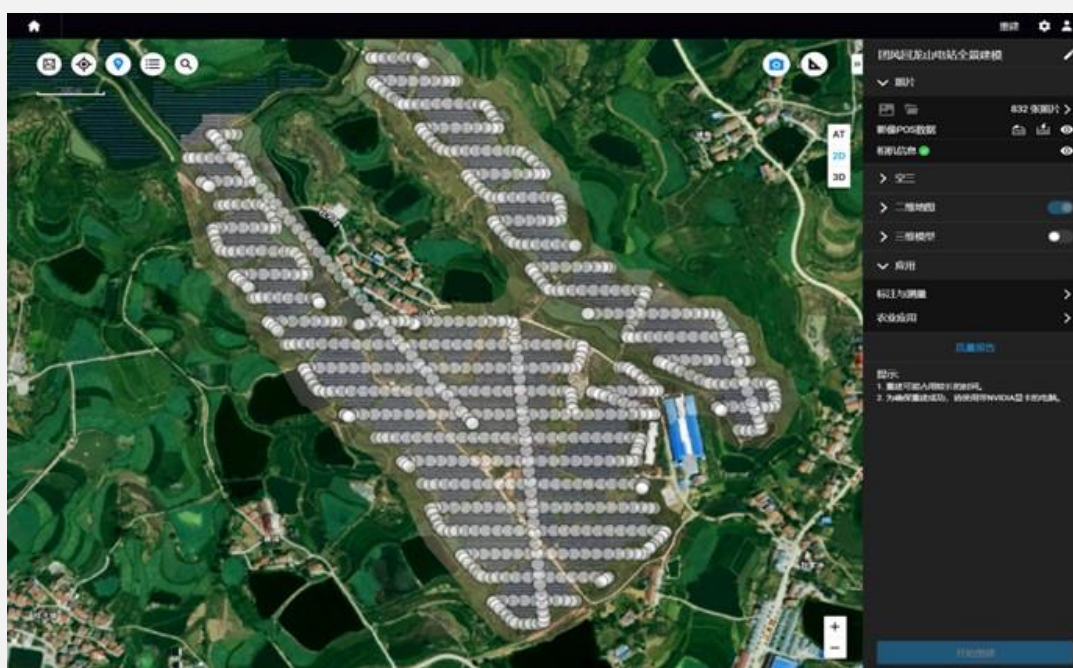
2.1. 设计理念和思路

2.1.1. 地图建模

地图二维建模是基于摄影测量原理利用无人机采集的影像生成所射区域的数字表面模型（DSM）及数字正射影像（DOM）的过程。通过航线规划软件对光伏组件进行航线规划，使用建模无人机采集二维正射影像，对收集的电站航拍影像通过制图软件进行拼接，生成高精度电站全景地图。其中航线路径规划需全部覆盖巡检目标，开展电站建模飞行时，飞行路径旁向覆盖率不低于 70%，航向覆盖率不低于 80%，飞行高度一般不低于 120 米。开展外观及热斑检测时，旁向覆盖率不低于 50%，航向覆盖率不低于 60%，飞行高度不低于 40 米。



设定航线进行电站正射图像收集



使用制图软件进行正射影像拼接构建电站全景图

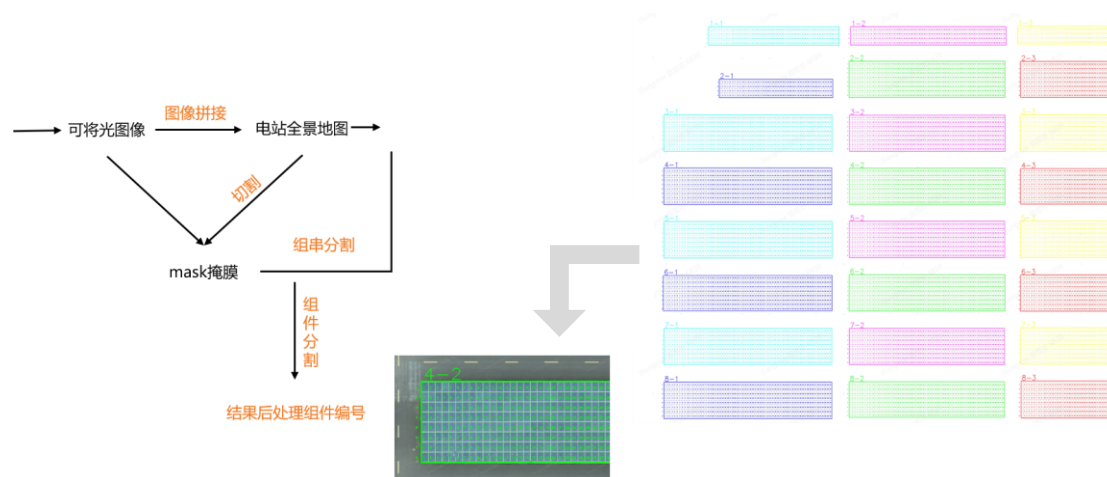
2.1.2. 全景地图可视化

高清电站全景地图需基于瓦片地图 GIS 引擎，在 WEB 端及移动端进行流畅高清展示，以能够清晰分辨出组件为标准。并且系统支持自动采集在线卫星图像，为缺陷点的定位提供依据。并且地图可支持缺陷定位、放大、缩小、移动、地图测量等功能。



2.1.3. 组串分割标注

针对数据中存在的倾斜、噪声、以及多类型组件等情况，结合图像滤波、噪声匹配聚类以及自校正回位算法进行光伏场站组串及组件图像数据清洗、标准化。对标准化后的组串区域进行分割，并根据电站竣工图，对应编制光伏组串和组件的位置编号，位置编号的形式示例：方阵号-汇流箱号-组串号-组件号，最终在全景地图上完成组串及组件的分割以及编号。



2.1.4. 缺陷智能诊断

组件缺陷智能诊断是光伏运维的重点，相比于人工巡检，基于 AI 及三维重建技术的分割、缺陷检测及定位具备自主化、高精度、不受地形地貌限制、安全性能高以及巡视更全面等优势，不仅可以降低巡检的成本预算，也可以提高光伏巡检的工作效率。在 1 组 2 人的巡检队伍情况下，无人机智能巡检水面 100MW 电站仅需 3 个工作日，相比传统巡检方式可节省 30~40 个工作日时间。同时借助大数据的 AI 算法视觉模型可大幅提高巡检缺陷的检出率和正确性，目前行业基于红外及可见光的视觉缺陷检测准确率均可达到 95%以上，可帮助电站精准定位每一个组件缺陷问题。安全性上，部分集中式电站处于偏远山区、高原荒漠、大面积水域地区，作业环境恶劣，巡检难度大，对巡检人员要求非常高，而采用 AI 智能算法的缺陷检测通过大量电站数据学习，无需人工检测，可自动形成分析报告，给出具备较高泛化性的检测推理结果，配合无人机高精度定位技术，可进一步减少专业人员依赖，代替人工巡检。

光伏电站无人机智能巡检系统中组件缺陷检测、定位等模块流程如下图所示，在进行巡检数据采集后，需要进行数据分包，数据预处理等前处理工作，对于分包后数据，各模块并发处理，结果数据匹配融合后经过坐标映射得到缺陷及缺陷定位信息。



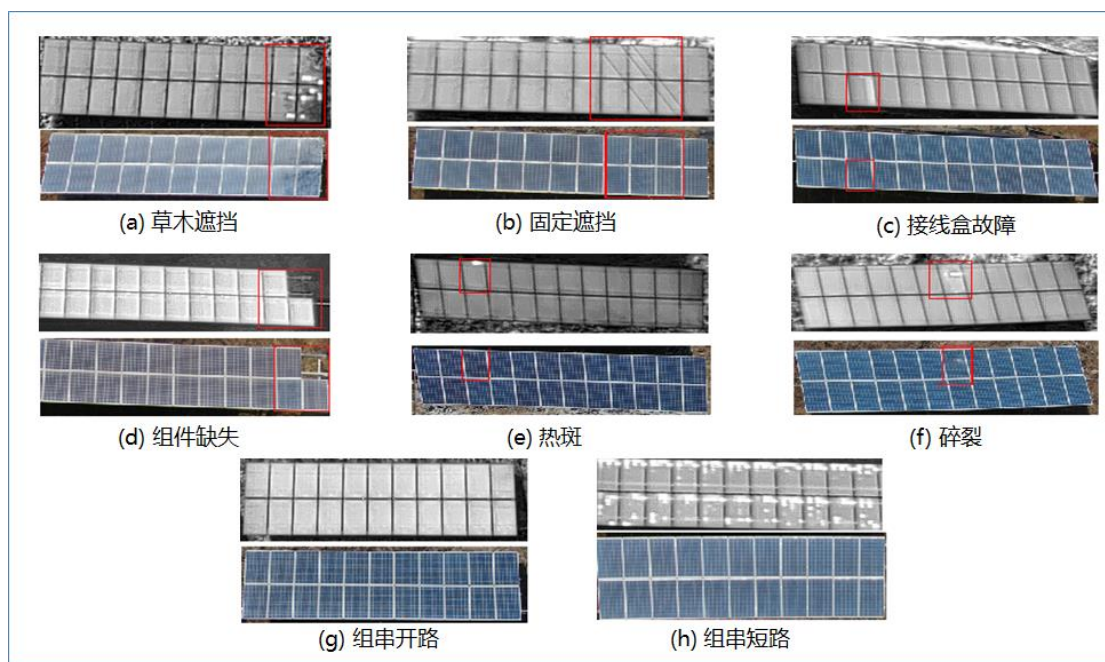
2.2. 技术特点

2.2.1. 组件缺陷识别

组串或组件缺陷一般包括外部缺陷如遮挡、污损等,内部缺陷如二极管故障、组件玻璃碎裂、电池片缺陷等。针对不同种类型缺陷,可通过巡检无人机搭载不同类型光谱成像设备进行缺陷图片/视频数据的采集,常见有可见光成像设备、红外成像设备。

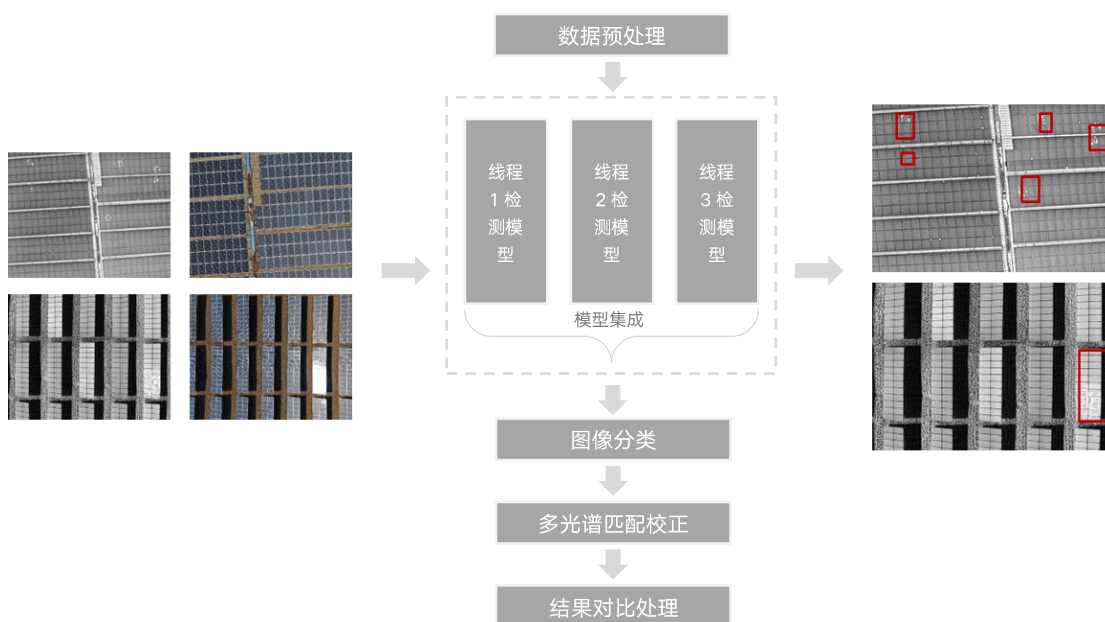
故障名称	形成原因	故障表现
热斑	部分电池片受到遮挡或自身原因导致电流降低,成为负载消耗能量在组件内形成局部过热现象	组件红外光下呈现亮点或斑状热斑
组件表面污秽	组件边缘积灰、鸟粪、铁锈、附着物等组件表面污秽现象,易导致发电效率降低以及热斑等故障形成	可见光下可见灰尘、底部积灰、铁锈等; 红外光下可见单个或多个斑状、条状、块状热斑
组件遮挡	组件周边树木、杂草遮挡,建筑、电线杆等固定遮挡以及组串缝隙中杂草遮挡等,易形成热斑	可见光下可见遮挡;红外光下斑状热斑或条形热斑
组件碎裂	组件由于外力作用,组件表面玻璃破碎或组件玻璃自爆;	可见光下可见碎裂;红外光下热斑亮点或亮斑
接线盒故障	组件质量或散热不当导致组件二极管击穿或短路现象,严重导致整个接线盒烧毁	红外光下条状区域亮斑
组串开路	熔丝熔断,电缆断路,MC4端子烧坏或松脱等因素	红外光下组串整体呈现不发电或整体热斑
组串短路	人为接线错误,电缆绝缘损坏、直流线路老化等因素导致	红外光下组串不规则散状热斑
组件缺失	拆卸、环境外力导致组件缺失、偏移	可见光及红外下组件缺漏

红外与可见光下组件缺陷呈现特征如图，热斑、遮挡、缺失、开路、短路、碎裂等组件或组串缺陷表象亦会根据电站类型呈现多样化特征表现。



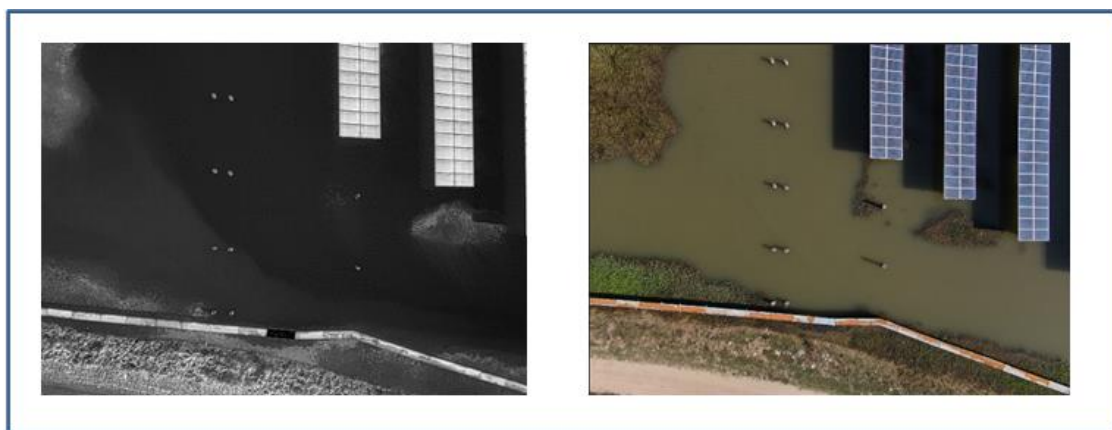
2.2.2. 多模型融合识别

依据检测算法对于边界样本以及少样本缺陷识别效果有限，会出现误检及漏检现象。在初步检测结果分析基础上需要结合图像分类、阈值分析、多光谱匹配融合、集成学习等方法对结果进行进一步处理分析，综合对比筛选，输出各场景下高概率缺陷。

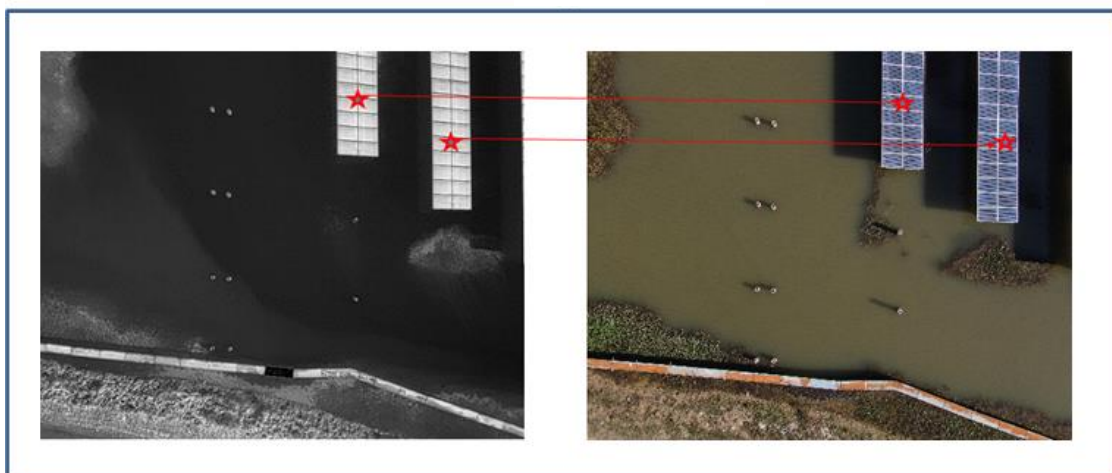


2.2.3. 双光匹配融合

无人机搭载的云台相机上匹配红外镜头和可见光镜头，在对光伏电站进行巡检时，同时拍摄光伏电站的红外图片和可见光图片，由于红外镜头和可见光镜头自身硬件参数差异，在同一时刻拍摄的红外图片和可见光图片会存在较大的差异，如下图所示，左侧图片是红外图片，右侧是可见光图片，从图中可以看出，可见光图片视角范围更大，红外图片中的信息均包含在可见光图片中。利用双光检测模型时，需保证红外图片和可见光图片的位置能够一一对应，因此要对红外图片和可见光图片进行双光匹配。利用相机和红外图像的自身参数、图像特征点匹配等方法进行双光匹配，匹配融合后的结果如下图所示，各点可一一对应，辅助多光谱下缺陷对比。

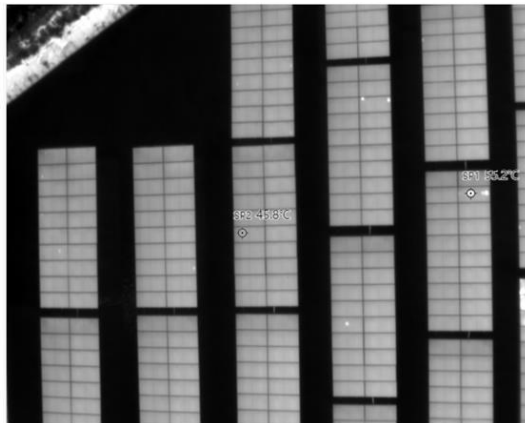
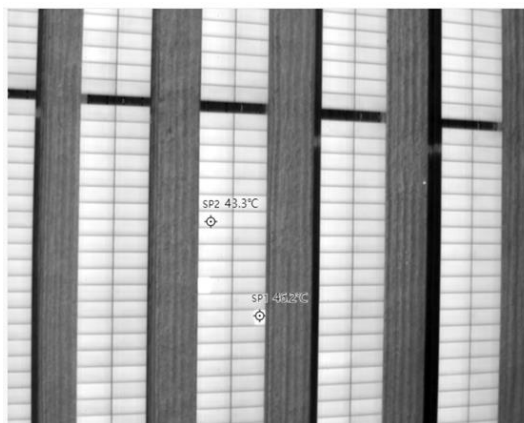


↓ 特征检测匹配



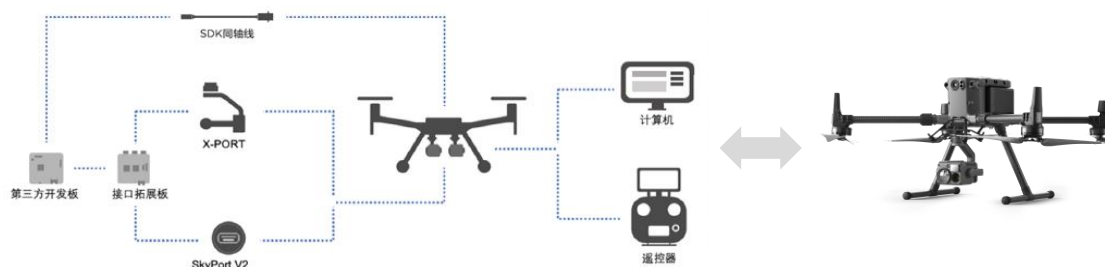
2.2.4. 缺陷温度检测

缺陷温度检测基于红外测温原理即采集物体表面的红外辐射转换为电信号，电信号经过放大、算法及发射率校正后得到对应温度值。使用无人机进行温度检测需要使用配置红外镜头的无人机进行数据采集，红外图片分析处理及温度校正步骤。解析获取到图片中对应位置的温度信息后，可以根据缺陷点温度值与非缺陷点的温度值进行比较，进一步判定缺陷检测结果是否准确。



2.2.5. 边缘实时检测

组件缺陷检测采用机器视觉目标检测技术，结合边缘计算技术可以在无人机端侧实时检测组串缺陷，并进行缺陷原因分析及结果上传。为了实现对光伏电站组件进行实时缺陷检测识别，将缺陷检测识别部署到边缘计算设备中，然后将边缘计算设备搭载到无人机上，实时读取无人机相机拍摄的图片进行实时缺陷检测识别。

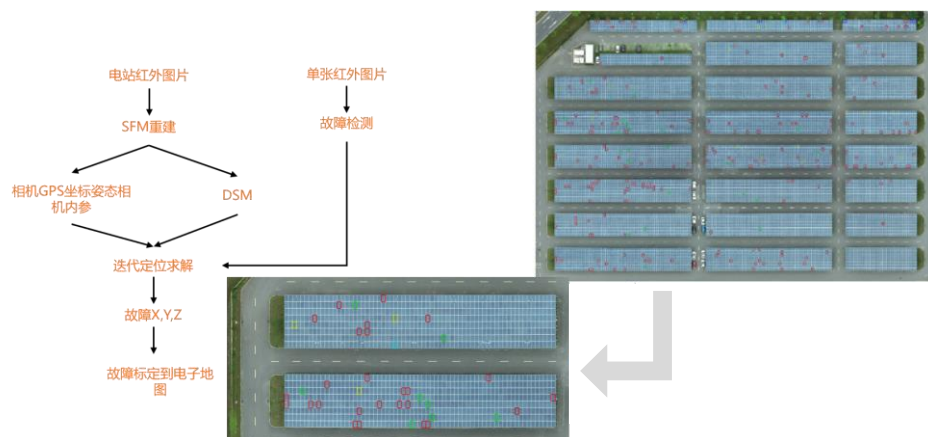


边缘侧与云端进行边缘协同，云端接收采集数据进行算法模型训练、量化，下发规则模型至边缘侧进行实时检测推理，推理结果回传至云端进行进一步分析处理。



2.2.6. 组件缺陷定位

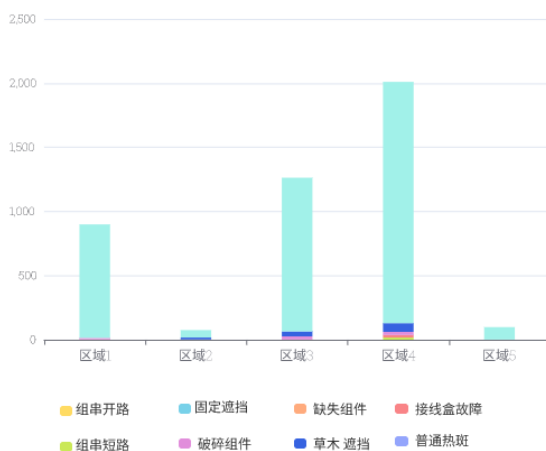
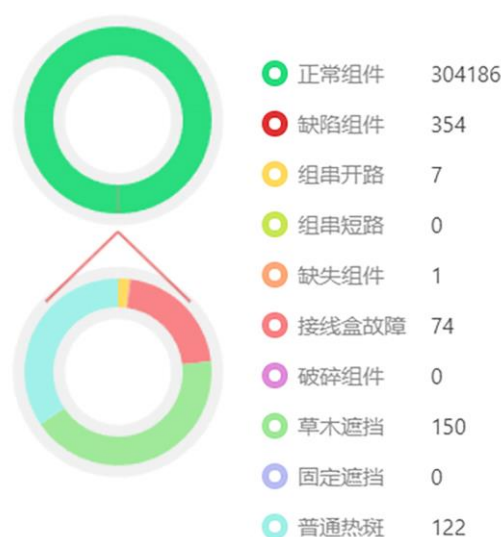
对整个光伏电站进行高精度航测，生成带差分 GPS 信息的电子地图后，采用三维重建方法和多模态信息融合定位策略，可生成 SFM 重建的电站红外图像点云。基于组串、组件和三维点云进行组件缺陷多维度自修正的缺陷点定位，从而进行直接的地理位置定位，将缺陷位置在电子地图中进行标注。根据定位信息可进行导航，指引用户在现场完成缺陷定位和缺陷消除工作。



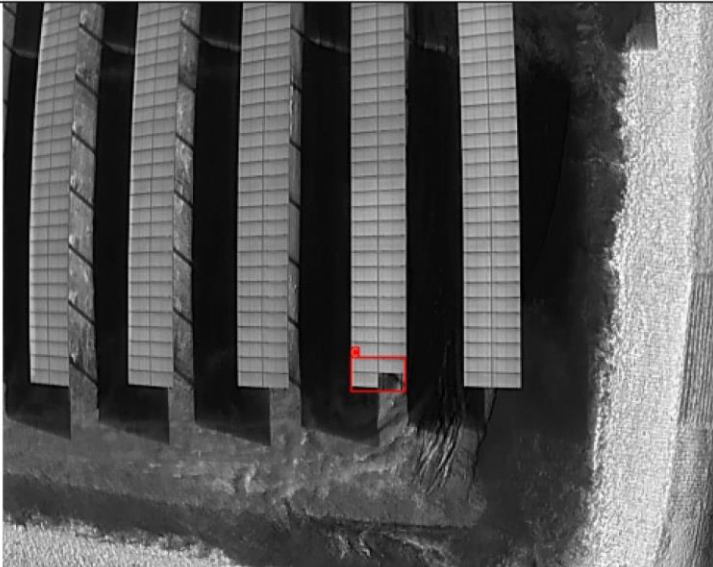
2.2.7. 报告自动生成

在经过系统分析巡检电站组件缺陷后，系统应自动对巡检电站进行缺陷报告生成。报告应包含分区域、分类统计电站缺陷数量及缺陷率，具体组件缺陷及可见光、红外光下缺陷表现、缺陷组件级定位等信息。

下图分别为缺陷组件总占比（分子为缺陷组件总数，分母为检测光伏组件总数）与各类缺陷占比情况（分子为各类缺陷组件数，分母为缺陷组件总数）。

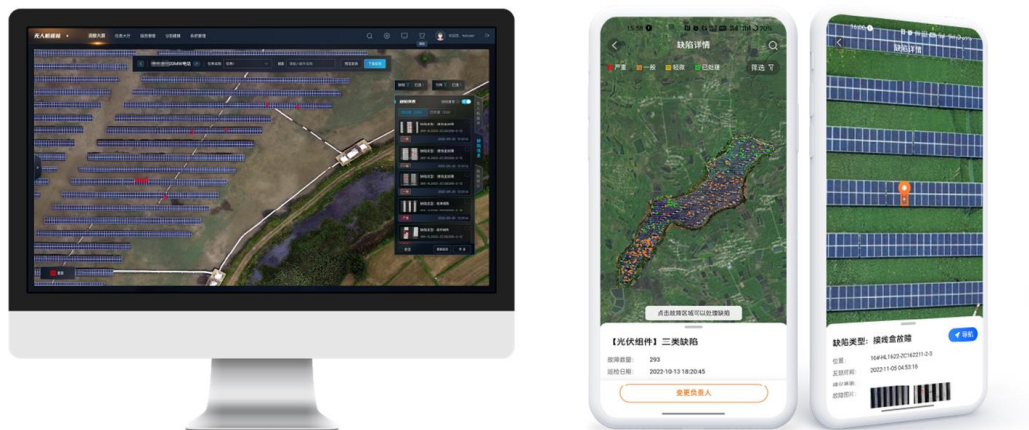


以下为真实电站缺陷实例：

图片编号	DJI_20230219143354_0026_T_73.JPG DJI_20230219143354_0026_W.JPG	检测日期	2023-04-27
缺陷类型	缺失组件	逻辑位置	1_8_8
			
			

2.2.8. 缺陷管理

缺陷智能诊断完成后，WEB 端及移动端可同步进行缺陷管理，方便运维人员浏览电站全景地图、查询缺陷分布情况、缺陷组件定位信息及缺陷点的双光谱高清图，并且移动端具备精准导航功能，可方便巡检人员在现场对缺陷位置定位及现场缺陷复核，快速准确的完成消缺工作，提升工作效率。



2.2.9. 智能分发

系统为了方便与其他系统集成，对外需提供元数据、主数据、参考数据和事务数据的交互模块，系统预定义了电站、设备、报告、算法等实体的元数据，同时定义实体相关表结构以及数据字典等参考数据，方便企业系统再获取这些数据时能作进一步集成分析。数据交互模块同时采用离线和实时分发推送并行的技术策略，保证数据同步的及时性和完整性。

接口功能一览表：

元数据	设备模型	电站、设备、组串、无人机等	同步/异步
	算法模型	入参、出参、性能规格等	同步/异步
	文件（含报告）	标识、地址、压缩地址、文件类型等	同步/异步
	人员	标识、名称、角色、权限等	同步/异步
字典数据	系统字典	系统字典标识、值、位置	同步/异步
主数据	电站	同步电站、组串、等模型数据	同步/异步
	设备	同步设备数据	同步/异步
	人员	同步人员数据	同步/异步
	报告	同步报告数据	同步/异步
	自定义	自定主数据同步	同步/异步
事务数据	巡检记录	记录巡检活动	同步/异步
	飞行记录	无人机飞行记录	同步/异步
	算法运行记录	算法运行日志	同步/异步
	报告下载记录	报告下载和查看记录	同步/异步
	人员操作记录	系统登录等记录	同步/异步

3. 示范项目性能和质量等级验证

受企业委托，2023年5月11日至2023年5月21日，依据CGC-PGF015:2022《光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量评价技术规范》、CGC-PGF004:2022《光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量评价实施规则》，鉴衡对阳光智维光伏无人机系统设计方案及相关技术进行了评审，并选择“骄阳项目”进行了性能和质量验证。图3-1为示范项目性能和质量验证过程概览。

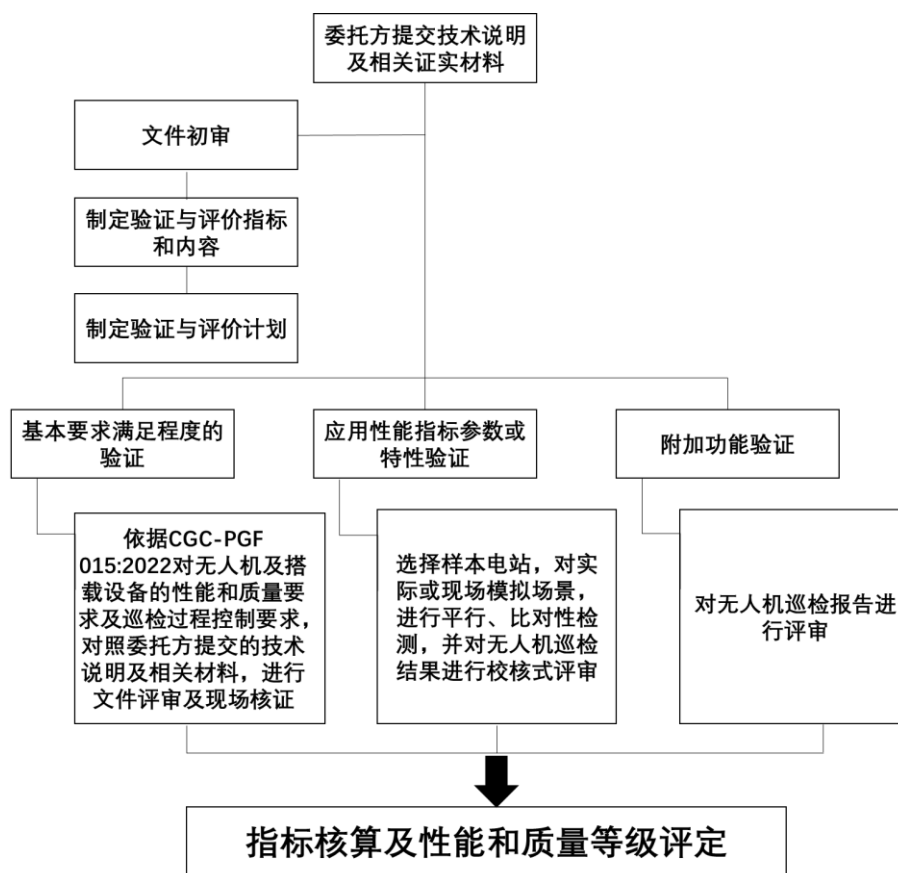


图 3-1 评审和验证的基本过程

围绕图 3-2 所示内容，依据 CGC-PGF 015: 2022《光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量评价技术规范》，鉴衡派出验证组对阳光智维开发应用的光伏电站无人机巡检技术开展了验证与评价工作。

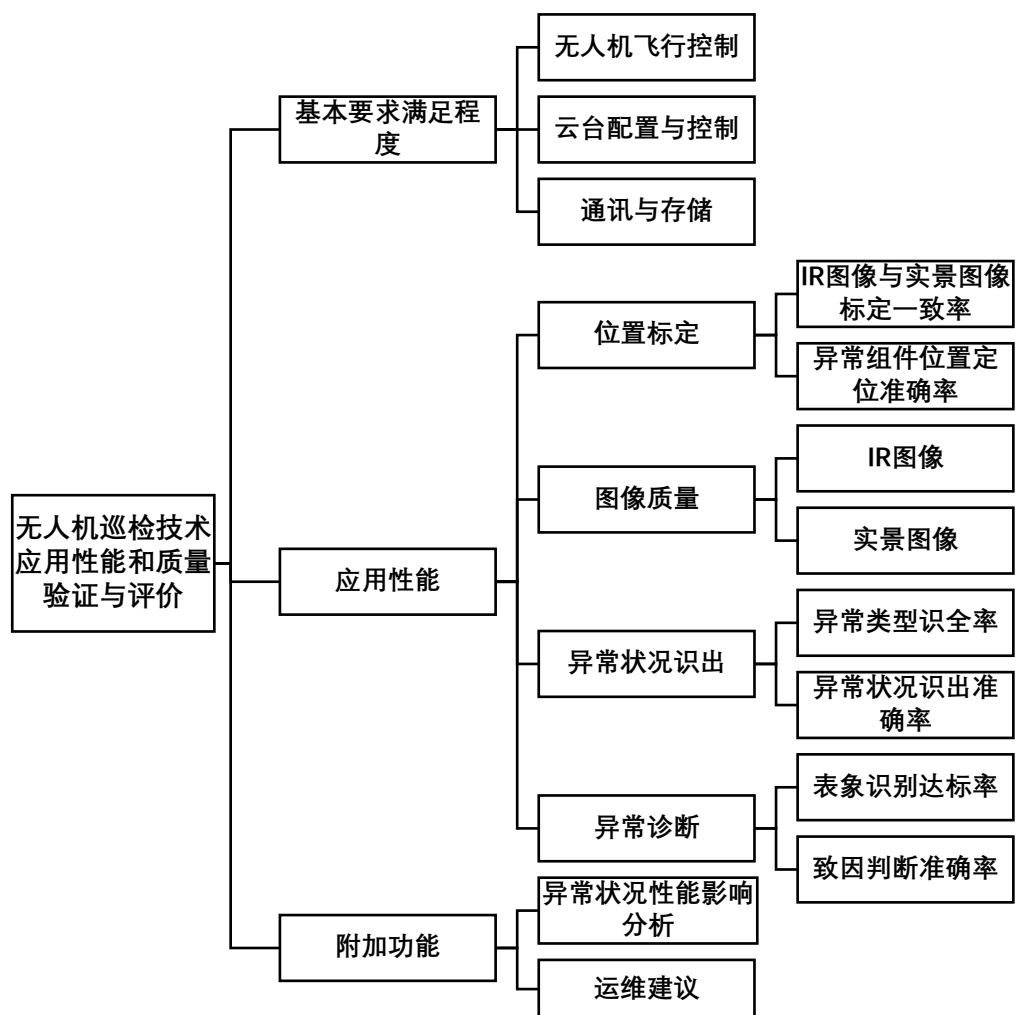


图 3-2 无人机巡检技术应用性能和质量验证与评价内容

根据 CGC-PGF 015: 2022, 在选定方阵内, 随机选择组件、组串和子方阵, 模拟不同场景, 并进行无人机巡检和现场比对的平行测试。现场模拟场景详见表 3-1。

表 3-1.现场验证模拟场景列表

序号	类别	细分类型
1	组件表面积灰尘（垢）	组件表面存在污物
		组件表面积灰
2	阵列/组件周边遮挡	树木、杂草遮挡
		周边建（构）筑物遮挡
3	组件质量缺陷	二极管击穿/导通
		组件面板玻璃碎裂
		其他自身缺陷
4	系统电气故障	掉串（组件、组串、方阵）
		短路

现场验证选择巢湖骄阳光伏电站, 该电站位于安徽省合肥市巢湖市苏湾镇, 现场安装组件为晶澳 260W 光伏组件, 图 3-3 为电站实景图。

依据 CGC-PGF 015: 2022, 阳光智维科技股份有限公司光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量等级的综合评定结果为“Level 4”, 光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量评定标准见表 3-2, 分项内容和指标验证与评定结果见表 3-3~表 3-5。



图 3-3 光伏电站实景图

表 3-2 光伏发电站无人机巡检技术应用性能和质量评定标准

评价等级	评定标准
Level 4 (领先)	基本要求满足程度不存在低于 90%的项次，评价结果不低于 95%； 评价等级不存在低于“Level 3”的项次，评价结果达到“Level 4”的项次不低于 75%。
Level 3 (先进)	基本要求满足程度不存在低于 90%的项次，评价结果不低于 90%； 评价等级不存在低于“Level 3”的项次，评价结果达到“Level 4”的项次不低于 60%。
Level 2	基本要求满足程度不存在低于 80%的项次，评价结果不低于 85%； 评价等级不存在低于“Level 3”的项次，评价结果达到“Level 4”的项次不低于 50%。

表 3-3 光伏电站无人机巡检技术应用性能和质量评定结果

类别	内容/指标	验证与评价结果	评价等级	综合评定
基本要求 满足程度	无人机飞行控制得分指数	100%	-	Level 4 (领先)
	云台配置与控制得分指数	100%		
	通讯与存储得分指数	100%		
应用性能	位置标定	IR 图像与实景图像异常位置标定一致率	100%	
		异常组件位置定位准确率	100%	
	图像质量	IR 图像质量达标率	100%	
		实景图像质量达标率	98.06%	
	异常状况识出	异常类型识全率	86.67%	
		异常状况识出准确率	97.87%	
	异常诊断	表象识别达标率	97.87%	
		致因判断准确率	97.22%	
附加功能	异常状况性能影响分析	满足要求	-	
	运维建议	满足要求	-	

综合评定等级“Level 4”判定标准：不存在低于“Level 3”的项次，评价结果达到“Level 4”的项次不低于 75%。

表 3-4 “基本要求满足程度”验证结果

验证与评价项目	验证结果	得分指数
无人机飞行控制	无人机避障为视觉避障，前后左右障碍物感知范围为：0.7~40m，上下障碍物感知范围为：0.6~30m，探测到障碍物后会发出报警信息并在抵近障碍物前主动空中刹车； 现场验证无人机避障功能，无人机在设定避障距离内，遇到树木、建筑物、铁塔等障碍物，无人机会报警并在抵近障碍物前，采取主动躲避动作，空中刹车或绕开障碍物飞行。	未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。 得分指数：100%

	经现场验证，无人机水平方向和垂直方向导航定位偏差水平平均满足要求。 经现场验证，无人机在飞行时可在指定位置悬停，悬停时水平定位精度和垂直定位精度均不超过$\pm 0.1\text{m}$，满足要求。	未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。 得分指数：100%
	飞行控制满足要求； 对考核电站现场实际验证，飞行高度为 60 米，飞行速度为 3m/s 时，能够识别遮挡、电气故障、组件质量缺陷等大部分热异常，拍摄的 IR 及实景图像质量好。 结合电站实际地形地貌，获得每一块光伏组件的离地高度、安装方位角及倾角可提前规划精细化巡检路线，满足 IR 相机在巡检时镜头垂直光伏组件的要求，受限于光伏电站组件数量庞大，精准测绘难度较大，无人机在正常巡检时 IR 相机镜头垂直于地面，满足相机与光伏组件平面间夹角大于 30°要求。	未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。 得分指数：100%
	IR 相机满足要求； 1) 查阅无人机携带云台技术资料，关于 IR 相机温度感应和测温范围为$-40^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$（高增益模式），满足要求； 2) 相机分辨率为 640×512，满足要求； 3) 技术资料显示 IR 相机绝对测量误差 < 2K，满足要求； 4) 查阅无人机携带云台技术资料，IR 相机运行环境温度范围为$-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$，满足要求。	未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。 得分指数：100%
云台配置与 控制	实景相机基本要求满足要求； 1) 查阅无人机携带云台技术资料，变焦相机有效像素 2000 万，满足要求； 2) 镜头视角为 $66.6^{\circ} \sim 4^{\circ}$，满足要求； 3) 拍摄照片格式为 JPEG，满足要求； 4) 拍摄视频格式为 MP4，满足要求。	未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。 得分指数：100%
	飞行镜头转动角度满足要求； 现场验证无人机云台转动功能，俯仰角度为$-120^{\circ} \sim 30^{\circ}$，平移转动角度为$-320^{\circ} \sim 320^{\circ}$，满足要求。	未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。 得分指数：100%
	云台稳定性满足要求；	未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用

查阅无人机携带云台技术资料，云台在工作环境下角度抖动量为 $\pm 0.01^\circ$ ，满足要求。

要求的问题。

得分指数：100%

通讯与存储

通讯满足要求；

现场验证

1) 无人机在距离高压线缆安全保护范围内飞越场内高压线缆时，可迅速有效执行遥控器发出的任何指令，满足要求；

未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。

2) 无人机在飞行高度为 80m 时，飞行至距离遥控器 2.2km 处，可迅速有效执行遥控器发出的任何指令，满足要求；

得分指数：100%

3) 无人机在飞行高度为 80m 时，飞行至距离遥控器 2.2km 出，可实时传输影像，满足要求。

存储满足要求；

未发现不满足 CGC-PGF015:2022 中适用要求的问题。

现场验证，云台具备 SD 卡存储功能，可支持 128G 存储，满足要求。

得分指数：100%

表 3-5 分级评价标准及与验证及评定结果

评价指标	分级评价标准	验证及评定结果
位置标定	C1：IR 图像与实景图像异常位置标定一致率	
	Level 4：IR 图像与实景图像异常位置标定一致率 > 95%。	L4 (通过图像比对验证，IR 图像与实景图像异常位置标定一致率为 100%)
	Level 3：IR 图像与实景图像异常位置标定一致率 > 90%。	
	C2：异常组件位置定位准确率	
	Level 4：异常组件位置定位准确率 > 90%。	L4 (现场验证，异常组件位置定位准确率为 100%)
	Level 3：异常组件位置定位准确率 > 85%。	
图像质量	C3：IR 图像质量达标率	
	Level 4：IR 图像质量达标率 > 95%。	L4 (审查 IR 图像，IR 图像质量达标率为 100%)

Level 3: IR 图像质量达标率 > 90%。

C4: 实景图像质量达标率

Level 4: 实景图像质量达标率 > 95%。

Level 3: 实景图像质量达标率 > 90%。

L4 (审查实景图像, 实景图像质量达标率为 98.06%)

**异常状况识
出****C5: 异常类型识全率**

Level 4: 异常类型识全率 > 90%。

Level 3: 异常类型识全率 > 85%。

L3 (现场比对验证, 异常类型识全率为 86.67%)

C6: 异常状况识出准确率

Level 4: 异常状况识出准确率 > 90%。

Level 3: 异常状况识出准确率 > 85%。

L4 (现场比对验证, 异常状况识出准确率为 97.87%)

异常诊断**C7: 表象识别达标率**

Level 4: 致因判断准确率 > 90%。

Level 3: 致因判断准确率 > 85%。

L4 (现场比对验证, 表象识别达标率为 97.87%)

C8: 致因判断准确率

Level 4: 致因判断准确率 > 90%。

Level 3: 致因判断准确率 > 85%。

L4 (现场比对验证, 致因判断准确率为 97.22%)