

基于变电站无人机与固定摄像机的智能巡视系统对比研究与应用

李鑫卓*, 张历, 张俊杰

贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州贵阳, 中国

*通讯作者

【摘要】变电站无人机与变电站固定摄像机作为变电站智能巡视系统目前最主要的智能终端, 已经在国内两大电网公司获得了及其广泛的应用。其中变电站无人机智能巡视系统具备部署快、可以规划高位视角、动态调整能力强、联合多专业进行设备巡视的优点, 变电站固定摄像机智能巡视系统则具备多维度同时巡视、状态稳定、安全风险较低的优点。本文选取了电网公司某典型 220kV 变电站为例, 在技术路线、工作效率、安全风险、系统造价四个维度对变电站无人机智能巡视系统以及变电站固定摄像机智能巡视系统进行对比分析, 阐明了两套系统各自的优点与缺点并对变电站部署上述系统提出了建议。

【关键词】变电站; 无人机; 固定摄像机; 智能巡视

1.引言

变电站巡检是变电站运行管理的核心业务之一, 其中投入了大量人力资源并配套了相应的物资资源, 由于变电站常分布于偏僻的位置, 因此变电站巡检等工作中伴随了大量的交通和人身风险。随着变电站规模的不断增加, 与变电运检队伍不断缩减产生了尖锐的矛盾, 与此同时, 数字电网的发展以及生产组织模式优化改革工作的加速推进, 多种变电站智能巡检终端例如变电站巡检机器人、变电站无人机、变电站固定个摄像机、变电站智能传感器等智能终端大量涌现[1-4]。国家两大电网公司都在积极响应国家政策, 并推动变电站智能巡视系统的建设, 如何科学高效地利用新一代智能技术全面提升变电站智能巡检水平是智能变电站建设的关键之一。变电站无人机与变电

站固定摄像机是目前两大电网公司开展变电站智能巡检工作的应用最广泛的智能终端, 本文以某典型的 220kV 变电站为例, 在技术路线、工作效率、系统造价、安全风险等四个方面对变电站无人机系统[5,6] (后面简称无人机系统) 以及变电站固定摄像机智能巡视系统[7,8] (后面简称智能巡视系统) 进行对比分析, 阐明了两套系统各自的优点与缺点并对不同电压等级变电站部署上述系统提出了针对性的建议。

2.技术路线维度分析

2.1 技术架构对比

2.1.1 无人机系统

无人机系统的技术架构主要包含了感知层、平台层, 具体架构图见图 1。

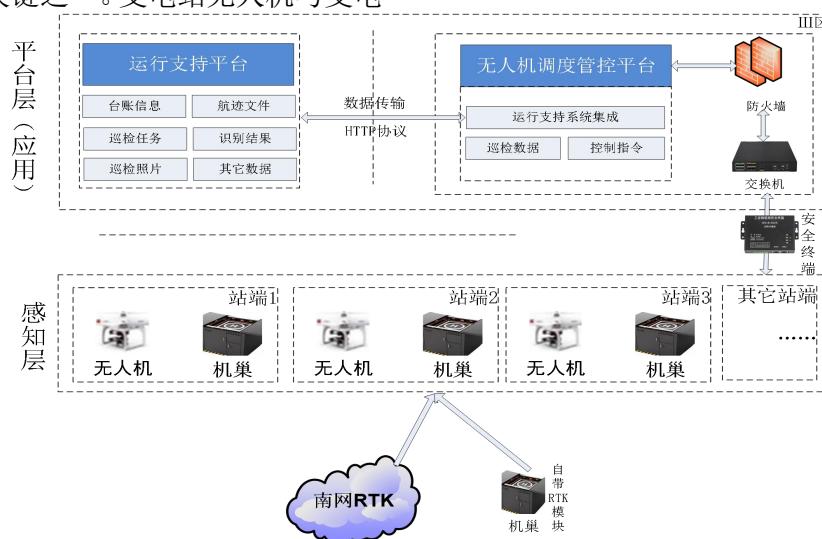


图 1.无人机系统技术架构

无人机系统的感知层,即部署于各变电站站端的无人机和机巢,无人机通过无人机调度管控平台(其部署于综合数据网Ⅲ区)下达的指令如巡检任务和远程操纵指令等,无人机在完成巡检任务后将机巡数据上送至无人机调度管控平台,无人机调度管控平台与变电站站端的无人机机巢的数据通信以综合数据网Ⅲ区内网有线方式进行连接,无人机机巢与无人机之间采用加密认证自组网点对点的单点终端设备通讯。部署在站端的机巢,自带 RTK 基站模块,可提供无人机 RTK 信号,提高无人机定位精准度。另外,无人机的 RTK 信号源除了机巢的自带 RTK 模块(需要与外网进行通讯)外,也可使用部署在内网的南网 RTK

信号,提高巡检定位精准度。

无人机系统的平台层主要包含了建设在综合数据网Ⅲ区的变电运行支持平台以及无人机调度管控平台。无人机调度管控平台通过综合数据网,实现对感知层无人机的指令下达、数据下载,以及获取无人机的巡检数据和巡检画面等。

应用功能主要是相关管理职能部门开展的远程操控、视频巡检数据采集、航线规划、数据管理以及相关接口服务等。

2.1.2 智能巡视系统技术架构

智能巡视系统技术架构主要包含感知层、平台层(含应用功能),具体架构图见图 2。

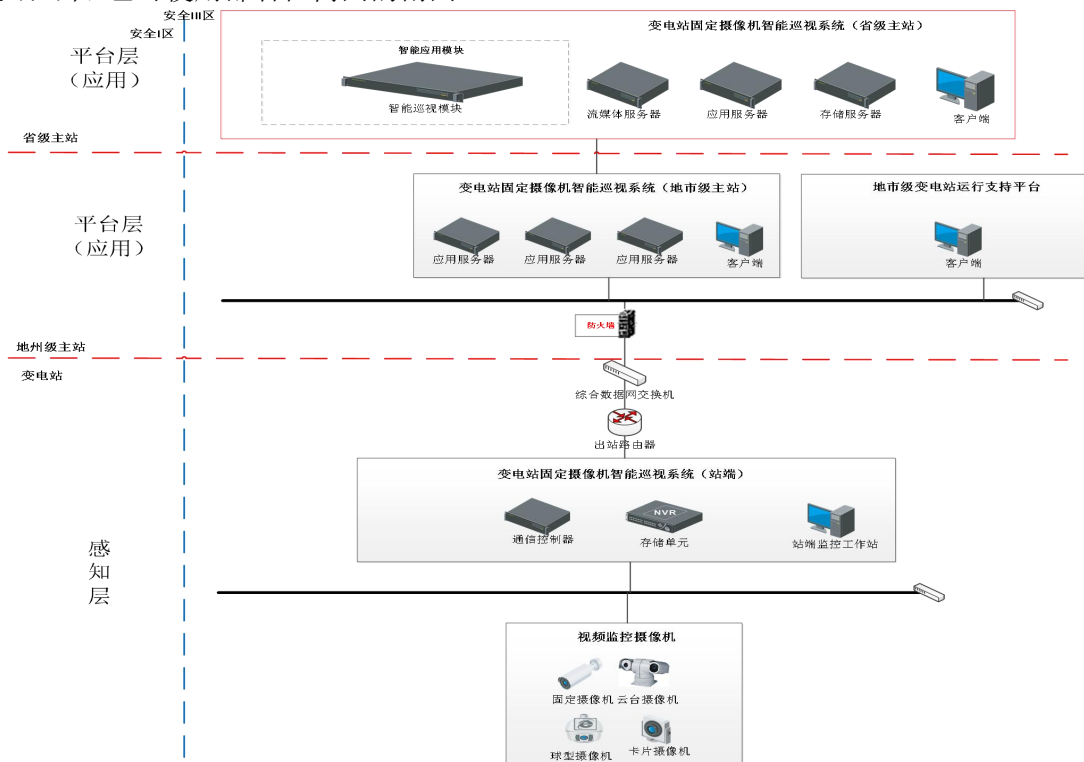


图 2.智能巡视系统技术架构

智能巡视系统感知层主要包括不同类型的前端视频监控摄像机(高速球型摄像机、双光谱红外热成像球型摄像机等),可以通过可见光以及红外热成像技术采集信息,并通过站内有线网络传递至智能巡视系统(站端),视频图像等资料通过智能巡视系统(站端)中的存储单元进行站内就地存储,同时通过综合数据网交换机(Ⅲ区)上送至平台层。

智能巡视系统平台层(含应用功能)主要包含了建设在综合数据网Ⅲ区的变电运行支持平台以及智能巡视系统(地市级主站和省级主站),变电运行支持平台以及智能巡视系统(地市级主站)独立运行。变电运行支持平台

主要进行变电智能巡检任务的派发、跟踪、报告生成以及审核工作。

2.1.3 小结

1) 智能终端方面。无人机系统以及智能巡视系统都存在大量的智能终端。前者主要包括无人机以及机巢,一座变电站通常会配置一台无人机机巢,无人机具体种类型号相对较少,无人机和机巢数量根据变电站场地及设备规模大小会适当的增加;后者系统摄像机种类繁多,数量会根据变电站场地及设备规模进行调整。

2) 信息传输方面。无人机需要通过加密无线传输的方式与机巢进行信息交互,通过

RTK 模块获取实时定位信息, 机巢通过有线传输将巡检图片等信息上传至无人机调度管控平台; 由于采用了无线传输, 无人机部署较快, 但存在一定的网络安全风险。智能巡视系统从智能终端至平台层全部采用有线传输的方式, 具有较高的安全性, 但是部署工期较长, 且存在大量的隐蔽工程, 后期改动存在一定的困难。

3) 平台应用方面。两个系统的数据最终都会接入变电运行支持系统进行数据挖掘以及智能分析, 变电运行支持系统制定的巡检任务以及相关指令会下发至智能终端执行。

2.2 智能终端对比

2.2.1 无人机系统

1) 无人机系统机巢。安装部署方面, 需要满足地基、供电、供网以及接地的需求, 部署示意图见图 3。

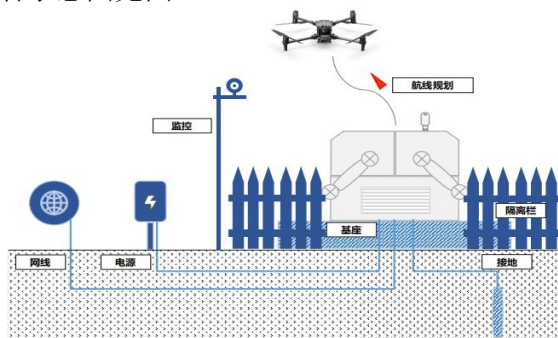


图 3.变电站无人机机巢部署示意图

地基方面。为保证无人机系统[9-11]机巢部署安全可靠, 土壤砂石地面需要事先预埋地基, 硬化路面如水泥地等可以酌情安排; 供电方面, 使用单相交流电供电, 输入电压 100 至 240V, 额定功率在 1500W 左右; 供网方面, 网络带宽上下行速率不低于 100Mbps; 接地方面, 通过接地线连接附近接地体, 接地电阻小于 10Ω。

性能方面。机巢占地面积 1~2 平方米, 重量在 100kg 左右(不同产品型号会有一定差异); 一体化设计, 高度集成超广角监控相机、一体化气象站、内置图传模块、RTK 模块、边缘计算模块等; 在-30℃至 50℃的环境中起飞作业, -35℃至 50℃存放运行; 整体系统具备 IP55 的防护等级, 核心部件具备 IP67 的防护等级, 起飞降落风力可达 12m/s; 内置浪涌保护器, AC 接口以及以太网接口具备防雷能力; 断电保护, 内置备用电源, 支持断电数小时内云端在线并保障无人机安全返航; 30 分钟可将无人机电量从 10%充至 90%; 配合无人机的续航能力, 机场的有效作业半径在 6km

左右。

2) 无人机。硬件配置方面, 主要配置了激光测距仪、广角相机、变焦相机、热成像相机。环境适应性方面, 防护等级达到 IP55, 抗风等级达到 15m/s, 最高工作海拔达到 7000m; 信息传输方面, 2 发天线实现 2.4G+5.8G 双载波传输, 媒体文件下载速率翻倍; 飞行方面, 配置双 IMU、双气压计、双指南针、双 GNSS, 具备避障和夜间飞行的能力[12,13]。

2.2.2 智能巡视系统

1) 智能巡视系统智能终端主要由可见光摄像机以及双光谱红外热成像摄像机等类型组成, 一般性能要求为 200 万有效像素, 低温模式 -20℃~+150℃, 高温模式 100℃~+550℃防护等级不低于 IP66。

2.2.3 小结

1) 无人机系统优点。a、无人机具备设计灵活、空间利用率高、载荷丰富、自主控制能力强; b、无人机在巡视、测温、环境等场景应用较好, 并可向变电站周围 3-5 公里半径范围的输、配电设备进行延伸覆盖; c、无人机具备高空以及全景的巡视角度, 极大地扩展了变电站的巡视区域。

2) 无人机系统的缺点。a、无人机受限于极端天气、北斗 RTK 定位技术, 部分需长期精准定位的场景仍需进一步改善; b、无人机任务相应较慢, 需要按照既定的巡航线路进行巡视, 特殊点位的巡视需求响应不及时; c、无人机单次巡航能力只有 30 分钟左右, 较大规模变电站完成全站巡视工作需要多次进行充电, 整体巡视时间较长, 高温天气下, 由于无人机长时间运行, 存在炸机风险; d、无人机存在巡视盲区, 例如开关柜、室内、以及空间狭窄的区域, 无人机巡视无法完全覆盖; e、无人机系统为串行运转模式, 无人机或者机巢出现故障会导致整个变电站巡视工作停滞; f、无人机为移动的巡视终端, 在极端天气以及带电磁干扰环境下, 穿行于变电站设备间容易发生掉落、碰撞, 影响设备运行安全; g、无人机在大风、大雨、暴雪等极端天气无法开展巡视工作; h、无人机的定位信号需要进行无线传输, 与此同时 RTK 模块存在与外网的互联, 存在一定程度的网络安全风险。

3) 智能巡视系统的优点。a、摄像机具备数据量大、定位精准、相应速度快的优势, 能够覆盖室内、开关柜内、设备空间狭窄区域的巡视范围, 可以更大程度的实现人员巡视替代; b、摄像机作业效率高, 可覆盖智能巡视、

安全管理、人员管理等场景，能够支持生产运行、技改施工、安防等场景需求；c、可更便捷地支持设备远方操作、状态确认；d、摄像机采用有线形式安装，网络安全风险较小；e、摄像机可以发挥蜂群作战效应，多座变电站可以联合巡视，可以规划专项巡视工作，巡视工作自主选择性更大；f、摄像机的巡视工作可保持全天运转且不受极端天气的影响；g、摄像机为并行工作模式，一台摄像机的损坏不影响整个变电站智能巡视系统的正常运行，容错性更好。

4) 智能巡视系统的缺点。a、部署风险较高，存在需要站内一次设备停电才能安装的情况，需在站内布设专用电源及通信网络，网络节点多，高空作业风险较高、现场安全管控难度大；b、摄像机及其附属设备数量较多，网络链路较长，容易出现故障，后期设备维护难度较大；c、大量摄像机会造成网络资源极度紧张，需要配置更加合适的网络策略。

3.工作效率维度分析

以贵州电网典型的 220kV 变电站为例，变电站电压等级分为 220kV、110kV、35kV 三个等级，主要区域为室内区域、主变区域、220kV 区域、110kV 区域、35kV 区域、站外区域。工作效率维度分析主要从部署调试、设备巡视、覆盖范围三个子维度进行。

3.1 无人机系统

1) 部署调试。无人机系统的部署调试主要包括现场踏勘（包括机巢选址、供电方式的确定）、机巢部署（土建实施、配件安装、网电调试）、点云建模（激光雷达数据采集、拼接去噪处理、网电调试）、航线规划（规划航线、航线验证）。部署调试的时间周期约为一周。

2) 设备巡视。典型 220kV 变电站的巡视点位共计 14845 个，其中无人机可以覆盖巡视点位 14783 个，巡视点位覆盖率为 99.58%。总巡视航线 13 条，巡视内容主要包括主变、母线、断路器、水平刀闸、垂直伸缩刀闸、电流互感器、电压互感器、避雷器、支撑绝缘子、接地刀闸、绝缘子串、电容器、出线杆塔及线路通道环境、围墙环境等。按照巡视一条航线需 20min、充电一次需要 30min 计算，典型 220kV 变电站全站巡视一次需要 620min，需要单机巢不间断工作 10.3h。

3.2 智能巡视系统

1) 部署调试。智能巡视系统的部署调试主要包括现场踏勘（点位确认）、摄像机部署

（土建实施、配件安装、网电调试）、预置位设置等步骤。部署调试的时间周期约为 2 个月。

2) 设备巡视。典型 220kV 变电站的巡视点位共计 14845 个，智能巡视系统点位覆盖点位 14845 个，覆盖率为 100%。典型 220kV 变电站全站巡视一次需要 2h。

3.3 小结

无人机系统部署调试时间较短，智能巡视系统部署调试时间相对较长；智能巡视系统巡视效率相对无人机系统巡视效率较高。巡视效率对比见表 1。

表 1. 巡视效率对比

类型	部署调试	设备巡视
无人机系统	一周	10.3 小时
智能巡视系统	两个月	2 小时

4.系统造价维度分析

成本预测范围包括建设阶段设备及材料采购、安装实施、平台开发调试成本，运行阶段维护及耗材成本。成本预算只包括变电站站端直接成本，不包括变电站无人机管控平台、变电站智能巡视系统省级主站建设、AI 算法、数据存储扩容等相关内容。贵州电网典型 220kV 变电无人机系统建设成本约 130 万元，220kV 变电站智能巡视系统建设成本约 200 万元。

4.1 无人机系统

无人机系统主要覆盖设备巡视、红外测温、环境监测、周边隐患排查、高空设备作业等场景。系统主要包括基础设施、无人机设备、变电站三维模型、航线库建设实施等几大类成本。无人机系统的维护对象主要包括无人机、电池、机巢等内容，每年的维护成本主要体现在电池上。

4.2 智能巡视系统

智能巡视系统主要包括控制机存储设备、前端摄像机、辅助机系统连接设备、线缆、施工及系统辅助材料。智能巡视系统维护对象主要包括机柜、摄像机及布线、电源适配箱、线缆与光缆、站端设备功能测试等内容。

4.3 无人机系统基础设备

无人机系统基础设备较少，系统结构相对简单，具备极强的整合性，运维频率相对较低，平均无故障事件超过 2 万小时。智能巡视系统设备较多，系统结构相对复杂，设备较为分散，运维频率相对较高，线路、摄像机、录像机、存储硬盘、电源适配器、场地交换机、防雷器等部分损坏频率较高。例如云台摄像机以及球

形摄像机等机械旋转部分较多的摄像机,日动作次数超过 200 次,易造成机械机构的磨损老化以及摄像机预置位的偏差累积,运维较为复杂。

5.安全风险维度分析

安全维度主要依据资产全生命周期并从人身、设备、电网运行、网络安全四个维度进行。

5.1 无人机系统存在的风险

1) 人身风险。无人机执行任务时存在跌落砸伤变电站内部及围墙外部人员的风险。

2) 设备风险。无人机运行时存在炸机风险,炸机跌落的无人机存在损伤变电站室外设备的风险,无人机时串联运行模式,其中一个模块或设备损坏会导致整个系统无法正常运转。

3) 电网运行风险。无人机运行时跌落至变电站关键运行设备上时,存在影响电网正常运行的风险。

4) 网络安全风险。无人机系统中涉及外网传输以及无线传输,存在一定的网络风险。

5.2 智能巡视系统存在的风险

1) 人身风险。摄像机安装以及运维的时候需要靠近带电设备以及登高,存在触电以及高坠的人身风险。

2) 设备风险。变电站装设摄像机的立杆可能会因为环境等原因倒杆,存在损坏变电站内设备的风险。

3) 电网运行风险。变电站装设摄像机的立杆可能会因为环境等原因倒杆,对变电站内设备造成损坏,存在影响电网正常运行的风险。

4) 网络安全风险。暂无。

6.总结

6.1 技术路线维度

无人机系统结构相对简单,智能终端较少,部署灵活,空间利用率高,巡视角度大但存在一定的盲区,通过无线传输方式与机巢进行信息交互,存在一定的网络风险;受天气影响较大,巡航能力较弱,需要进行反复充电。无人机在输电、配电专业的应用已较为成熟。在无人机硬件、无人机服务、无人机巡检支持系统三个方面都有多年的应用基础,以变电站或运维中心为中心,覆盖输配电场景,并最终实现输配电专业的业务统一管理、数据统一管理、基础平台的统一利用,具备较好的条件。

智能巡视系统相对复杂,感知终端多,部署相对缓慢,巡视角度相对狭窄但是可以解决

巡视盲区的问题,通过有线方式进行信息交互,数据量大,定位精准,不受天气影响,巡视相应速度快,可更好地实现后台支持与前端作业的云边协同,容错性较好,可以开展多站联合巡视。摄像机在变电站内应用场景较为广泛,包括动力环境监测、设备状态监测、表计计数、智能监盘;与此同时,摄像机作为通用、标准的设备平台,可在反恐、人员及安全管理等多个场景下综合应用。

6.2 工作效率维度

无人机系统部署调试时间较短,只需要一周时间;智能巡视系统部署时间相对较长,需要两个月。设备巡视方面智能巡视系统完成 220kV 典型变电站全站巡视需要 2 个小时,而无人机系统由于需要频繁地充电,巡视时间需要 10.3 个小时。

6.3 系统造价维度

贵州电网典型 220kV 无人机系统建设成本 130 万元,智能巡视系统建设成本 200 万元。无人机系统基础设备较少,系统结构相对简单,具备极强的整合性,运维频率相对较低。智能巡视系统设备较多,系统结构相对复杂,设备较为分散,运维频率相对较高。

6.4 安全风险维度

无人机系统存在一定的人身、设备、电网运行以及网络安全风险;智能巡视系统存在一定的人身、设备、电网运行风险。

参考文献

- [1] Pan J S, Lv J X, Yan L J, et al., Golden eagle optimizer with double learning strategies for 3D path planning of UAV in power inspection[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2022,193: p.509-532.
- [2]杨磊,肖礼荣,熊玲等.变电站及输电设备无人机巡检安全距离分析[J/OL].南昌大学学报(理科版),2024.
- [3]王冕,颜康,罗鑫等.基于三维点云数据的预处理技术研究与应用[J].电力大数据,2024,27(09):61-68.
- [4]蔡焕青,付晶,杨宁等.500 kV 变电站无人机巡检作业安全距离[J].高电压技术,2024,50(07):3199-3208.
- [5]王干军,江玉欢,丁宗宝等.变电站边缘计算多无人机协同避障方法[J].计算机仿真,2022,39(07):396-401.
- [6]张永挺,韩彦微,林永昌等.变电站室内无人机位姿估计方法[J].电力科学与技术学

- 报, 2024, 40 (01): 138-145.
- [7]姜寒, 王凯.面向变电站无人化巡检的多源融合即时定位与建图方法综述[J].广东电力, 2025, 38 (03): 55-68.
- [8]李游, 龙伟迪, 魏绍东.基于微型红外双光机载装置的变电站无人机巡检系统研究[J].湘潭大学学报(自然科学版), 2025, 45 (02): 118-126.
- [9]王巍, 花春亮, 罗海军.无人机航测在变电站选址中的应用[J].测绘通报, 2020, 增刊: 187-191.
- [10]弓国军, 符国晖, 李福权.基于无人机摄影的变电站复杂地形三维测绘技术研究[J].自动化与仪器仪表, 2025, 5: 129-132.
- [11]邹彪, 朱晓康, 任伟达.强电磁扰动环境变电站无人机自主高精巡检研究[J].中国安全科学学报, 2025, 35 (增1): 239-245.
- [12]许逵, 李鑫卓, 张历等.自然场景下配电网施工安全帽佩戴检测算法[J].计算机工程与应用, 2024, 60 (08): p320.
- [13]张炜, 黄锋, 梁俊斌等.变电站巡检机器人读取仪表指针示值方法研究[J].机械设计与制造, 2023, 5 (05): 296-304.