

基于无人机的大型铁塔阵列智能化巡护应用技术

尹训锋

北京房山区拱辰大街，北京 102401

[摘要]大型铁塔阵列及其附属设备作为通信、电力等领域的基础设施，其状态直接决定系统功能的稳定性与可靠性。铁塔阵列传统人工巡护模式存在效率低下、安全风险高、检测精度不足等问题，难以满足复杂场景下的运维保障需求。无人机技术凭借其机动灵活、覆盖范围可变、搭载载荷广泛等优势，能为大型铁塔阵列巡护提供支撑。文中介绍了针对铁塔阵列的无人机巡护系统组成，提出了实现流程路径，介绍了关键技术，对基于无人机解决大型铁塔阵列的日常巡查、重点巡护、故障定位以及安全监测等提供参考。

[关键词]无人机；大型铁塔阵列；任务规划；故障识别

DOI: 10.33142/sca.v8i10.18299

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Intelligent Patrol Application Technology for Large Iron Tower Array Based on Drones

YIN Xunfeng

Beijing Fangshan District Gongchen Street, Beijing, 102401, China

Abstract: As the infrastructure of communication, power and other fields, the status of large iron tower arrays and their ancillary equipment directly determines the stability and reliability of system functions. The traditional manual patrol mode of the iron tower array has problems such as low efficiency, high safety risks, and insufficient detection accuracy, which are difficult to meet the maintenance and support needs in complex scenarios. Drone technology, with its advantages of maneuverability, variable coverage, and wide payload capacity, can provide support for large-scale tower array patrols. The article introduces the composition of a drone patrol system for iron tower arrays, proposes the implementation process path, introduces key technologies, and provides reference for solving daily patrols, key patrols, fault location, and safety monitoring of large iron tower arrays based on drones.

Keywords: drones; large iron tower array; task planning; fault identification

引言

大型铁塔阵列通常包含多类型、高复杂度的电力或天线阵列及配套设施，无论铁塔阵列构成何种设施，其结构完整性、姿态准确性及信号传输性能都需要持续监测巡护。传统巡护模式依赖人工攀爬、仪器手持测量等，但大型铁塔阵列通常占地面积广，地表植被及地形地貌复杂，耕地农作物受季节限制，巡护周期长、视野窄，存在死角，人工主观判断易导致螺丝松动、部件形变等细微缺陷的漏检，且容易出现意外事故和人力资源浪费。此外，人工巡护还存在踩踏农作物等纠纷隐患问题。研究采用无人技术手段进行大型铁塔阵列的巡查巡护具有事半功倍的效果。无人机是一种新兴的高科技手段，在通信、电力等领域的应用已形成规模化效应，和传统的人工巡视相比，具有人力占用少，巡视效率高，不受地形环境限制等优点。

1 无人机巡护系统组成

无人机巡护系统由无人机平台、传感器与载荷系统、通信与控制系统、数据处理与分析系统组成，各系统协同工作，实现大型铁塔阵列的自动化巡护和智能化数据分析处理。

1.1 无人机平台

无人机平台是巡护系统的核心载体，需根据铁塔阵列的地形特点与巡护需求选择合适类型，对于铁塔阵列相对集中分布的区域，通常选择多旋翼无人机。多旋翼无人机具有悬停能力强、操作灵活的优势，适用于铁塔阵列的近距离精细检测，可搭载高清摄像头检查铁塔及附属设备表面缺陷，多旋翼无人机载重通常在 0.5~5kg，续航时间 20~40min。多旋翼无人机核心组件包括机身、动力系统与飞控系统。动力系统由电机、螺旋桨和电调组成，飞控系统通常集成惯性测量单元（IMU）、GPS/北斗模块等，

为精准巡护提供区域保障。

1.2 传感器与载荷系统

传感器用于无人机巡护系统获取环境与设备信息，需根据巡护任务进行针对性配置。光学摄像头是基础载荷，分辨率从 1080p 至 8K 不等，搭配 10~30 倍光学变焦镜头，可远距离捕捉铁塔螺丝松动、线路磨损等细节。热成像仪通过检测设备热量分布，能发现铁塔附属馈线接触不良导致的过热问题。激光雷达则用于铁塔结构的三维建模，生成厘米级精度的点云数据，点云密度超过 100 点/m²，可精准检测铁塔及附属设施的形变情况。为确保数据采集的稳定性，传感器需通过三轴稳定云台搭载，可抵御飞行中的振动与风扰。同时，载荷系统配备不同容量的存储模块与实时传输单元，实现数据的本地保存与远程上传。

1.3 通信与控制系统

通信与控制系统用于无人机与地面站之间的指令传输与数据交互，近距离巡护多采用 2.4GHz/5.8GHz 无线链路，对于超视距巡护，可通过 4G/5G 蜂窝网络实现通信，延迟小于 20ms，带宽超过 100Mbps，满足 4K 视频的实时传输需求。在偏远或信号遮挡区域，卫星通信模块可提供全球覆盖，解决通信盲区问题。地面控制站由硬件设备与软件系统组成，硬件包括遥控器、平板电脑或专用控制台，软件支持航线规划、飞行状态监控、数据实时显示等功能。无人机通信过程通常采用加密与身份认证技术，防止数据拦截与无人机劫持，保障系统安全。

1.4 数据处理与分析系统

数据处理与分析系统部署于地面站后台，用于对传感器采集的图像、点云等数据进行处理，提取有效信息并生成巡护报告。该系统集成图像预处理、特征提取、缺陷识别等功能模块，通过计算机视觉库实现边缘检测与目标定位，结合机器学习算法对铁塔方位角偏差、部件破损等缺陷进行自动识别。激光雷达点云数据，采用三维重建算法生成铁塔结构模型，与标准模型对比实现形变检测。处理后的结果以可视化图表形式呈现，便于巡护人员快速定位问题并制定处置方案。

2 无人机巡护系统任务功能及实现流程

2.1 无人机巡护系统的任务功能

铁塔阵列无人机巡护系统主要任务包括状态监测、安全隐患排查、性能参数评估等，具体实现功能如下。

2.1.1 结构功能性检测

采用无人机搭载高清摄像头和激光雷达等载荷对铁塔线路及杆塔的异物、断股、松股、绝缘子、拉环、间隔棒等进行高清可见光影像采集，从多角度采集铁塔结构数

据，利用三维建模与图像比对技术，识别超出阈值的结构形变。

2.1.2 运行参数校准

铁塔及附属设备的运行参数直接决定通信质量，传统人工测量易受环境干扰，无人机通过集成方向图测量系统等，可实现参数的自动化测量，确保性能参数符合网络性能指标。同时，无人机可监测铁塔的电磁辐射强度，排查参数异常导致的极化隔离度超标等问题。

2.1.3 周界安全防护

大型铁塔阵列通常设有严格的安全周界，需防范非法入侵、异物堆积、植被过度生长等安全隐患。无人机通过预设航线对周界进行常态化巡逻，搭载红外摄像头可实现 24h 监控，即使在夜间或恶劣天气下也能精准识别入侵目标。对于林区铁塔场地，无人机可排查树木倒伏风险，避免其触碰铁塔馈线导致信号中断。

2.1.4 应急支援响应

在大风、暴雨雪等极端天气或设备故障后，无人机巡护系统可快速开展应急巡护，评估铁塔受损情况。如大风过后，无人机巡护系统可在短时间内完成大范围铁塔场地的排查，定位倒塌支架、破损铁塔等严重故障，为抢修队伍提供精准的现场数据，缩短故障处置时间。

2.2 无人机巡护系统实现流程

大型铁塔阵列无人机巡护系统按照任务规划、数据采集、数据智能处理和结果应用的流程组织实施，各环节紧密衔接，确保巡护任务的高效精准。

2.2.1 任务规划

结合铁塔阵列的数字地图、设备分布、巡护需求制定详细方案，通过 GIS 系统导入场地三维模型，标注铁塔位置、周界范围、禁飞区域等关键信息；利用地面控制站规划飞行航线，设置航点坐标、飞行高度、拍摄角度等参数，确保覆盖所有巡护目标，同时避开高压线路、建筑物、居民区或敏感区域等。

2.2.2 数据采集

无人机按照预设航线执行自主飞行，在飞行过程中通过传感器实时采集数据。飞控系统结合 GPS/北斗与 RTK 定位技术，确保无人机精准抵达各航点，误差控制在厘米级。通信系统实现飞行状态数据与传感器数据的同步传输，地面操作员可实时监控任务进展，必要时进行手动干预。数据采集过程中，系统自动进行数据标记，关联采集时间、位置等元数据，为后续处理提供依据。

2.2.3 数据智能处理

数据采集完成后，通过无线传输或物理存储介质将数

据导入处理系统。图像数据经过去噪、增强等预处理后，由 AI 算法进行缺陷识别与参数测量；激光雷达点云数据通过滤波、配准生成三维模型，与标准模型对比实现形变检测。处理过程中，系统自动生成缺陷清单，标注缺陷位置、类型、严重程度等信息，减少人工干预。

2.2.4 结果应用

根据数据处理结果生成巡护报告，以图表、图像标注等形式直观呈现铁塔状态。对于轻微缺陷，如螺丝松动等，巡护人员可制定计划性维修；对于严重故障，如铁塔形变等，启动应急抢修流程。将巡护数据存入历史数据库，通过长期数据对比分析铁塔性能变化趋势，实现故障的提前预警。

3 无人机巡护系统的关键技术

3.1 高精度姿态测量技术

无人机巡护的关键部件是搭载高清摄像机或激光雷达的吊舱，为使无人机吊舱的载荷在运动状态下对铁塔阵列目标进行准确拍照或扫描，通常采用双闭环策略实现无人机吊舱自动跟踪控制，外环实现距离控制，当无人机足够接近巡护点后启动瞄准和跟踪，确保采集获取足够图像分辨率的图像信息或点云数据。内环实现姿态控制，利用高精度姿态测量系统获取无人机的姿态信息、坐标及待巡检铁塔坐标，实时解算出需要调整的俯仰角及方位角，驱动吊舱调整仰角及方位角度，实现稳定的目标指向和自动跟踪。

高精度姿态测量通过多传感器融合实现，能有效弥补单一传感器的不足，提升测量的稳定性与准确性。主要依赖惯性测量单元（IMU）、卫星定位系统（GPS/北斗）、实时动态差分（RTK）技术的融合应用。IMU 由加速度计、陀螺仪和磁力计组成，可实时测量无人机的角速率、加速度和磁场强度，通过积分运算得到姿态角，但存在漂移误差，长期测量精度下降。GPS/北斗系统通过接收卫星信号计算无人机位置，精度可达米级，但在遮挡环境下信号易丢失。RTK 技术通过基准站与无人机的实时数据通信，消除卫星信号误差，将定位精度提升至厘米级。

3.2 周界控制技术

采用无人机进行铁塔阵列巡护虽然能够提升维护效率，节省人力资源，但铁塔阵列通常没有严格的界限，如无人机如使用不当，可能存在入侵私人领地，侵犯隐私的问题，容易产生法律纠纷。为确保无人机在复杂场地环境中安全飞行，避免触碰铁塔设备、障碍物及禁飞区域，同时精准覆盖巡护目标，无人机巡护系统需具备周界控制技术，其核心是边界识别与动态避障。

周界控制技术由环境感知、边界定义、路径调整组成。环境感知通过激光雷达、视觉传感器、超声波传感器实时采集周围环境数据，识别铁塔、树木等障碍物；边界定义通过预设场地电子围栏实现，在地面控制站中导入场地边界坐标，无人机飞行过程中实时比对自身位置与围栏信息，一旦接近边界即触发告警并自动调整航向。路径调整基于 GIS 边界数据信息、和无人机实时感知结果，通过避障算法实时优化航线，确保无人机在安全边界内飞行。为应对铁塔场地的电磁干扰，周界控制系统需具备多传感器冗余能力，当某一传感器信号受干扰时，自动切换至其他传感器数据，确保边界识别的可靠性。例如，激光雷达信号受干扰时，系统可依赖视觉传感器与超声波传感器实现避障。

3.3 故障识别技术

故障识别技术是无人机巡护系统的核心，通过采集多源数据进行智能分析，自动识别铁塔阵列及附属设备的缺陷与故障，为巡护决策提供依据。该技术融合计算机视觉、机器学习、信号处理等多领域技术，实现从数据到信息的转化。根据检测数据类型，故障识别技术可分为图像识别和结构形变检测等。图像识别技术通过光学摄像头采集铁塔表面图像，利用算法提取缺陷特征，识别螺丝松动、部件破损、馈线老化等问题。该技术需通过大量标注样本训练模型，提升缺陷识别的准确率与泛化能力。

结构形变检测技术利用激光雷达点云数据，生成铁塔三维模型，与设计模型或历史模型进行比对，通过计算点云偏差识别形变、支架弯曲等结构性故障。雷达点云数据构建铁塔阵列及其附属设备精细化三维实景模型，主要采用 Mesh 重建和纹理映射等技术。Mesh 重建是将点云数据转换为三维网格模型的过程，通过三角剖分算法将离散的点云数据连接成连续的三角形网格，形成铁塔阵列及其附属设备的基本几何形状。在重建过程中，根据点云数据的密度和精度，调整网格的分辨率，确保模型的细节和精度。纹理映射是为三维网格模型添加真实纹理的过程，通过无人机搭载的高清摄像头采集铁塔阵列的影像数据，将影像纹理映射到三维网格模型的表面，使模型更加逼真。在纹理映射过程中，需要进行影像的校正和配准，确保纹理的准确性和一致性。为保证模型的准确性和场景还原度，需要进行模型坐标系校准和验证，通过与地面控制点的坐标进行比对，调整模型的坐标系，使其与实际地理坐标系一致。同时，通过实地测量和对比，验证模型的场景还原度，确保模型能够准确反映铁塔阵列的实际情况。

3.4 航迹规划技术

无人机巡护系统需根据场地环境与巡护任务，计算最

优飞行路径，通过航迹规划算法实现，针对铁塔阵列及附属设备的特点，需重点考虑天线面等附属设备精准覆盖、电磁干扰规避等因素，常见算法有基于栅格法的静态路径规划和基于 RRT* 的动态路径规划等。

基于栅格法的静态路径规划将铁塔阵列划分为均匀的栅格地图，每个栅格标注为“可飞区”“障碍物区”“目标区”，通过搜索算法寻找从起点到终点的最优路径。常用的搜索算法包括 A* 算法与 Dijkstra 算法等，在应用中，需根据铁塔高度、设备分布调整栅格大小，对于密集铁塔区域采用小栅格（如 $0.5m \times 0.5m$ ），确保路径精度；对于开阔区域采用大栅格，提高规划速度。该算法适用于静态环境下的常规巡护，可提前规划好覆盖所有目标的最优航线。

基于 RRT*（快速搜索随机树星算法）的动态路径规划针对铁塔阵列中可能出现的临时障碍物，实现动态路径规划，实时调整航线。当传感器检测到新的障碍物时，RRT* 通过随机采样生成路径节点，逐步构建通往目标的路径树，同时对路径进行优化，确保路径最短且平滑，避免无人机绕行过远影响巡护效率。在应急巡护中，RRT* 算法可快速规划通往故障点的最优路径，为抢修争取时间。

3.5 任务规划技术

铁塔阵列无人机巡护系统，采用全局控制、本地控制和动态调整相结合的任务规划策略，实现任务的精细化管理。无人机操作员负责全局控制，完成整体任务调度，包括航线规划、任务分配、数据汇总等。无人机平台执行本地控制，包括姿态调节、传感器数据采集、局部避障等，通过飞控系统实现自主起飞、自主巡航、自主降落。针对铁塔阵列的特点，无人机平台应将铁塔顶端和避雷针作为主要障碍物进行设置，尽可能提升无人机对铁塔和避雷针的识别速度，提高避障策略的稳定性和精准度。当与地面站通信中断时，无人机自动切换至本地自主模式，执行预设的应急航线，确保任务不中断。

巡护任务执行过程中，系统可根据实时情况动态调整

任务参数。当传感器检测到疑似故障时，地面站自动下发指令，控制无人机降低飞行高度、调整拍摄角度，进行二次精细检测，获取更清晰的数据；当无人机电量低于阈值时，系统计算剩余电量可支撑的巡护范围，优先完成关键区域检测后自动返航，避免中途迫降；当遭遇大风降雨等恶劣天气时，无人机自动暂停巡护任务，返航至安全区域。

4 结束语

尽管无人机巡护技术在电力、通信等领域取得显著进展，但在大型铁塔阵地巡护应用中仍存在诸多瓶颈，如复杂电磁环境下的通信干扰问题，铁塔场地的强电磁辐射易导致无人机与地面站的通信链路中断；高精度测量与长续航矛盾问题，搭载重型传感器会缩短无人机续航时间，限制大范围巡护能力；多源数据的融合分析能力不足问题，现有系统多专注于单一缺陷检测，缺乏对铁塔阵列及其附属设备性能的综合评估。针对无人机巡护系统的短板瓶颈，研究无人机巡护系统的智能化升级，实现从缺陷识别到故障预测，构建多无人机协同的立体化巡护网络等将是下一步无人机巡护系统重点关注的方向。

[参考文献]

- [1]祁衡达,杨世琛.智能无人机巡检在广播电视台发射台的应用[J].广播电视台网络,2025,32(1):110-112.
- [2]李芳,赵凤玺.无人机在发射台巡检中的应用[J].数字传媒研究,2022,39(9):57-59.
- [3]黄广龙.基于无人机图像识别技术的水利工程输电线路缺陷检测方法[J].水利科技与经济,2022,28(8):137-141.
- [4]卜勇涛,焦岩,王凝哲,等.基于无人机的风电智能巡检系统分析[J].电子技术,2023,52(7):370-371.
- [5]张长安,李建峰,陈相吾.无人机巡检图像识别算法研究和系统设计[J].自动化仪表,2023,44(5):88-93.
- [6]卞昌浩.输电线路自主巡检无人机避障路径控制方法[J].自动化应用,2025,66(22):135-137.

作者简介：尹训锋（1982.2—），男，山东泗水人，汉族，硕士研究生，高级工程师，从事通信工程建设管理工作。