

# Research on Path Planning and Energy Efficiency Optimization Strategy for Unmanned Aerial Vehicle Inspection in Smart Grid

Yumei Xu

Beijing Huashang Electric Light Co., Ltd., Beijing, 101400, China

## Abstract

The safe and stable operation of smart grids is closely related to the economy and reliability of power energy supply. However, in actual operation, the power grid is easily affected by factors such as natural environment, topography, and human damage, which can lead to communication failures, data errors, or equipment damage, seriously affecting the safety of power grid operation. To this end, power companies need to detect safety hazards in advance through inspections, in order to eliminate various faults and defects to the greatest extent possible. This article will discuss the planning ideas for unmanned aerial vehicle inspection paths in smart grids and propose optimization strategies for inspection energy efficiency, aiming to provide theoretical reference and guidance for the construction of intelligent and large-scale inspection models in smart grids.

## Keywords

smart grid; UAV; Inspection route; energy efficiency optimization

# 智能电网无人机巡检路径规划与能效优化策略研究

徐玉梅

北京华商电灯有限公司，中国·北京 101400

## 摘要

智能电网的安全稳定运行与电力能源供应的经济性、可靠性密切相关，而电网在实际运行当中，受到自然环境、地形地貌、人为破坏等因素的影响，极易出现通信故障、数据错误或者设备损坏等问题，使得电网的运行安全受到严重影响。为此，电力企业需要通过巡检的方式提前发现安全隐患，以最大限度地消除各类故障及缺陷隐患。本文将通过对智能电网无人机巡检路径规划思路的论述，提出巡检能效优化策略，旨在为智能电网巡检智能化、规模化模式构建提供建议与参考。

## 关键词

智能电网；无人机；巡检路径；能效优化

## 1 引言

无人机巡检技术在智能电网巡检领域的推广应用，不仅突破了地理空间的限制，实现了对输电线路、杆塔金具、绝缘子等关键设备的全方位、高精度监测，并且缺陷识别准确率显著提升。但是，在对无人机巡检路径进行规划时，需要充分考虑巡检场景的复杂性、设备分布离散性以及多重约束条件，否则，将出现路径重复规划、障碍规避不及时、关键设备漏检的问题。为此，电力企业应当兼顾全局，设计一套满足路径优化多重需求的混合算法，以提高路径规划的科学性与合理性。并通过能效优化的方法，延长无人机续航时间、降低巡检成本，实现巡检路径最优化、能量消耗最小化与巡检效益最大化的美好愿景。

**【作者简介】**徐玉梅（1981-），女，中国北京人，本科，助理工程师，从事无人机应用于智能电网巡检研究。

## 2 智能电网无人机巡检路径规划思路

### 2.1 基于场景分层，规划巡检路径

智能电网所经路线复杂多样，每一个场景的巡检路径均呈现明显的差异性特征，为此，在规划无人机巡检路径时，首先需要考虑巡检场景，并结合电网设备的电压等级、地理环境特征、设备密集程度等指标参数，将巡检区域划分为不同层级，每个层级对应差异化的规划目标。比如将巡检场景划分为 500kV 及以上输电线路的超高压远距离山区巡检层、110kV-220kV 输电线路的高压城市近郊巡检层、10kV 及以下配电线路的密集城区巡检层，针对不同层级，分别规划不同的路径。以超高压远距离山区巡检层为例，设定的巡检目标是最大化延长单次飞行巡检里程，减少起降与补给次数。比如某省东部山区 500kV 输电线路，线路全长 178 公里，穿越 3 个山区县，沿线海拔落差达 1100 米，存在 42 处信号盲区与 22 个大型山体障碍。规划巡检路径时，借助于 GIS 地图

与激光雷达测绘数据构建三维地形模型，精准识别障碍区域与信号遮挡点。然后，采用折线式巡航、定点悬停相结合的模式，在地形平缓区域保持 6-8m/s 的经济巡航速度，减少能量消耗，并在杆塔附近及复杂地形区域降低速度至 3-5m/s，确保巡检精度<sup>[1]</sup>。最后，合理设置中途补给点，结合能耗预测算法，将单次飞行路径长度控制在无人机续航极限的 80% 以内，避免因突发情况导致的续航不足问题。这种基于场景分层的路径规划思路，能够快速适应不同的巡检场景，显现出较强的通用性，并且可以大幅提升巡检综合效益。

## 2.2 基于多重目标，优化巡检路径

针对智能电网开展无人机巡检工作时，技术人员需要满足覆盖完整性、路径最短化、能耗最低化、安全最大化多重目标，并以此为突破口，对巡检路径予以优化。如果只是单一的考虑路径最短的目标，则会影响巡检覆盖的完整性，或者增加飞行安全风险，如果单纯的考虑安全避障目标，则会增加能耗与巡检成本。为此，电力企业应当根据巡检任务的优先级与巡检场景特征，合理分配目标权重。以某城市中心街区 220kV 输电线路巡检为例，该线路全长 75 公里，沿线分布有 11 个大型居民小区、7 个商业综合体及 5 座交通枢纽，巡检场景的核心特点是人口密集、建筑物密集、电磁干扰严重，安全最大化与覆盖完整性成为首要目标，路径最短化与能耗最低化作为次要目标进行协同优化。其中，安全最大化权重设定为 0.4，覆盖完整性权重设定为 0.3，路径最短化与能耗最低化权重分别设定为 0.15。路径规划时，通过高清地图与电网设备台账数据，明确所有巡检点的精准坐标，确保覆盖完整性目标的实现。然后利用电磁仿真技术，绘制沿线电磁干扰强度分布图，将干扰强度超过安全阈值的区域划定为禁飞区，同时避开建筑物、交通要道等人员密集区域，设置不少于 50 米的安全飞行距离，保障飞行安全。最后，在满足安全与覆盖目标的前提下，采用路径平滑算法优化飞行轨迹，减少急加速、急转向等能耗较高的飞行行为，实现路径长度与能耗的合理控制。这种规划模式既可以圆满完成巡检任务，也能够提高无人机巡检数据准确率。

## 2.3 兼顾全流程动态反馈，制定路径迭代优化机制

无人机巡检全流程涉及巡检期间的所有数据信息，包括无人机飞行状态数据、设备检测数据、环境变化数据，通过对全流程数据的深度分析与精准评估，判断当前路径的合理性与优化空间，如果出现环境突变、设备缺陷、路径偏差等情况，需要及时调整路径规划方案，确保巡检任务的顺利推进与优化目标的实现。以某沿海地区 110kV 输电线路巡检为例，该线路全长 89 公里，沿线穿越滩涂、港口、工业区等多种地形，巡检过程中易受台风、雷暴等突发天气影响，同时港口起重机、工业电磁设备等会产生动态干扰，设备缺陷发生率较高，静态规划路径难以适配复杂多变的实际情况。在优化巡检路径时，首先搭建多源数据实时采集平台，通过无人机搭载的 GPS 定位模块、惯性导航系统、能耗传感器、可

见光 / 红外相机等设备，实时采集飞行位置、飞行姿态、剩余电量、设备状态、环境参数等数据。其次，建立路径评估模型，设定评估阈值，当某一维度指标超出阈值时，触发路径优化指令。最后，采用快速路径调整算法，结合实时采集的数据，在 1-2 秒内完成局部路径的重新规划，确保巡检任务的连续性。这种路径迭代优化机制的建立，不仅可以提高任务完成率，同时，路径规划精准度也得到持续提升<sup>[2]</sup>。

## 3 智能电网无人机巡检能效优化策略

### 3.1 基于飞行全工况，实施能耗精准管控

无人机巡检过程中，主要包括四个核心工况，分别是：起飞爬升、水平巡航、悬停拍摄、下降降落，不同的工况，其能耗多少也存在明显差异。因此，为了实现巡检全流程能耗最优化，电力企业应当制定精准的能耗管控策略。首先，建立工况、参数、能耗的映射模型，优化飞行速度、高度、姿态角等关键参数，减少无效能耗。比如某山区 330kV 输电线路，线路全长 148 公里，沿线地形起伏较大，巡检点间距为 400-600 米，无人机需频繁进行爬升、巡航、悬停等操作，能耗控制难度较大。在起飞爬升阶段，根据巡检点海拔高度差异，采用分段式爬升速度策略，即：低于 500 米的低海拔区域采用 3m/s 的较快爬升速度，缩短爬升时间。高于 1000 米的高海拔区域采用 1.5-2m/s 的平缓爬升速度，减少电机输出功率，避免高负荷能耗。水平巡航阶段，根据巡检点间距与地形复杂度，动态调整巡航速度。地形平坦区域采用 7m/s 的经济巡航速度，兼顾效率与能耗。山谷、山脊等地形复杂区域采用 4-5m/s 的低速巡航速度，减少绕障与姿态调整带来的能耗增加。悬停拍摄阶段，优化拍摄角度与顺序，减少无人机水平位移与姿态调整次数，将单次悬停拍摄时间控制在 8-10 秒内，避免长时间悬停导致的能耗累积。下降降落阶段，采用滑翔式下降策略，当无人机距离地面高度超过 100 米时，关闭部分电机，利用重力势能缓慢下降，以减少下降阶段能耗<sup>[3]</sup>。

### 3.2 基于设备优先级，实施巡检动态调度策略

不同的电力设备，其巡检优先级也有所不同，为了进一步提高巡检能效，降低能量消耗，电力企业应当建立设备优先级评估体系，动态调度巡检任务顺序与资源分配。在对设备优先级进行评估时，需要综合考虑设备电压等级、运行年限、故障影响范围、缺陷历史数据等多维度指标，并采用层次分析法确定各指标权重，将设备划分为特级、一级、二级、三级四个优先级等级。特级设备为超高压变电站出线杆塔、跨区输电线路关键杆塔等核心枢纽设备。一级设备为主干线杆塔、重要联络线等重要的输电通道设备，二级设备为一般输电线路设备，三级设备为配网分支线路设备。设备优先级划分标准与巡检策略如表 1 所示。

从表 1 可以看出：这种动态调度策略的应用使巡检过程中的能量消耗大幅降低，巡检能效显著提升。以某城市电

网无人机巡检为例，传统的无人机巡检模式下，单次飞行平均能耗为 1810Wh，完成全区域巡检需飞行 41 架次。采用动态调度策略后，无人机单次飞行平均能耗降至 1280Wh，全区域巡检仅需飞行 25 架次。并且特级设备的巡检响应时

间从原来的 48 小时缩短至现在的 12 小时，缺陷发现率较原来提升 30% 以上，一级设备的巡检覆盖率保持 100%，二级与三级设备的巡检效率提升 45%，实现了能耗降低与能效提升的双重目标。

表 1 电网设备优先级划分标准与巡检策略

设备优先级	核心评估指标	典型设备示例	巡检频率	能耗优化策略
特级	电压等级 $\geq 500\text{kV}$ 、故障影响范围 $\geq 100$ 万户、运行年限 $\geq 15$ 年、近 3 年缺陷率 $\geq 8\%$	500kV 跨区输电线路枢纽杆塔、特高压变电站出线绝缘子	每月 1 次	优先调度高性能无人机、采用“精准巡检+实时回传”模式，缩短巡检路径半径，避免无关区域飞行
一级	220kV-330kV 电压等级、故障影响范围 10-100 万户、运行年限 10-15 年、近 3 年缺陷率 3%-8%	220kV 城市主干线杆塔、区域联络线断路器	每 2 月 1 次	采用“常规巡检+重点复核”模式，优化巡检点顺序，减少跨区域往返飞行
二级	110kV 电压等级、故障影响范围 1-10 万户、运行年限 5-10 年、近 3 年缺陷率 1%-3%	110kV 近郊输电线路杆塔、配网主干线设备	每季度 1 次	合并邻近区域巡检任务，采用“批量巡检+集中分析”模式，降低起降频次与飞行距离
三级	$\leq 10\text{kV}$ 电压等级、故障影响范围 < 1 万户、运行年限 < 5 年、近 3 年缺陷率 < 1%	10kV 小区分支线杆塔、低压配电变压器	每半年 1 次	采用“无人机+地面巡检”融合模式，无人机仅覆盖地面难以到达区域，减少低空密集飞行

### 3.3 基于多能源补给，提高无人机续航能力

在执行大规模、长距离的巡检任务时，无人机的续航能力至关重要，为避免因续航不足导致的能耗浪费与任务中断现象的出现。电力企业应当构建一个多能源补给体系，以地面充电基站、空中换电平台、应急便携充电设备为核心，形成固定补给、移动补给、应急补给的全方位补给网络。以某跨省 1000kV 特高压输电线路巡检为例，该线路全长 710 公里，穿越平原、山区、沙漠等多种地形，沿线仅在两端及中间 3 个变电站设有固定场所，传统单一地面充电基站的补给模式难以满足长距离巡检需求。在多能源补给体系的应用中，首先在沿线 5 个变电站设置地面充电基站，配备 60kW 快速充电器，充电 15 分钟可满足无人机 30 公里飞行需求。在沙漠与山区等无固定场所的长距离路段，设置 8 个空中换电平台，每个平台覆盖半径 30 公里，无人机可自主对接换电，换电时间仅需 5 分钟。同时，巡检车辆配备 12 台应急便携充电设备，跟随无人机巡检路线移动，应对突发续航问题。另外，在实际应用过程中，一旦某一补给点设备出现故障，系统可以快速切换至备用补给方案，确保巡检任务不受影响。并且通过持续优化补给点布局与能耗预测算法，进一步降低补给成本与能耗损失。

### 4 结语

智能电网巡检工作的高效化、智能化水平事关电网的安全运行，而无人机巡检技术的介入为巡检效率与缺陷识别精度的提升提供了强大的技术支撑。为此，电力企业应当基于场景分层的规划框架、多目标协同的优化体系与全流程动态反馈的迭代机制，有效解决传统巡检模式场景适配性差、目标单一化、静态化局限的问题，促进巡检工作高效开展。与此同时，基于无人机飞行全工况的能耗精准管控、设备优先级的任务动态调度与多能源补给的续航拓展三大策略，构建飞行全流程能效优化体系，以延长无人机续航时间、降低巡检成本、减少能量消耗，实现智能电网巡检过程的自主决策与智能调度，为智能电网安全稳定运行保驾护航。

### 参考文献

- [1] 徐曜,陈潇,张成巍,等.无人机巡检智能管理系统在电网巡检作业的设计与应用[J].网络安全和信息化,2022,(04):74-76.
- [2] 张驯,杨启帆,李志茹,等.面向主干输电网架空设备巡检的无人机路径规划方法[J].自动化技术与应用,2023,42(11):122-124+168.
- [3] 国家电网公司无人机巡检图像人工智能识别技术评测结果公布[J].变压器,2023,60(05):37.