

无人机+AI：高压输电巡检的智能化升级与成本效益分析

杨少钦

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 654000

摘要：本文聚焦于无人机与人工智能（AI）技术在高压输电巡检领域的应用，探讨其带来的智能化升级以及成本效益情况。首先阐述了传统高压输电巡检方式的局限性，进而分析无人机与AI结合所实现的智能化升级。随后从成本投入和效益产出两个维度进行详细分析，通过构建成本效益模型，结合实际案例数据，论证无人机+AI巡检方式在降低人力成本、提高电网可靠性等方面的显著优势，为高压输电巡检行业的智能化转型提供理论支持和实践参考。

关键词：无人机；人工智能；高压输电巡检；智能化升级；成本效益分析

引言

高压输电线路作为电力系统的重要组成部分，其安全稳定运行直接关系到整个社会的电力供应。传统的输电巡检方式主要依赖人工，不仅效率低下、劳动强度大，而且在面对复杂地形和恶劣环境时，巡检质量和安全性难以保障。随着科技的不断进步，无人机技术和人工智能技术逐渐成熟，将二者结合应用于高压输电巡检领域，为解决传统巡检方式的难题提供了新的思路和方法^[1]。通过无人机搭载各种传感器和设备，结合AI的图像识别、数据分析等能力，可以实现高压输电线路的快速、精准巡检，大大提高巡检效率和可靠性。同时，对这种新型巡检方式的成本效益进行分析，有助于电力企业科学决策，推动高压输电巡检行业的智能化升级。

1 传统高压输电巡检方式的局限性

传统高压输电巡检长期依赖人工与直升机作业，其局限性在效率、安全与数据管理层面尤为突出。人工巡检需攀爬铁塔或沿线路步行，日均巡检距离仅5-10公里，且受沼泽、雪山等复杂地形限制，部分区域甚至无法抵达；直升机虽能覆盖更广范围，但单次飞行成本高达10万元，且需专业飞行员操作，难以实现高频次巡检。安全风险方面，高压电场（220kV以上线路电场强度可达10kV/m）可能引发人员眩晕或触电，而悬崖、河流等危险地形更导致坠落、溺水事故频发——据统计，电力巡检事故中人员伤亡占比超30%。数据层面，人工记录依赖纸质表单或手持终端，易出现漏检、误判，且不同巡检员经验差异导致缺陷识别标准不统一，数据追溯与分析效率低下。

2 无人机+AI实现高压输电巡检的智能化升级

2.1 无人机在高压输电巡检中的应用优势

无人机与AI的融合为这些痛点提供了系统性解决方案。在效率上，无人机单日巡检距离可达50-100公里，

是人工的10倍以上，且可7×24小时不间断作业；国家电网在江苏地区的实践显示，部署无人机后巡检周期从1个月缩短至3天。安全层面，人员无需接触高压设备，仅需在地面监控中心操作，事故率降低90%以上；无人机搭载的应急降落伞可在故障时确保安全返航。数据智能化方面，AI通过自动生成缺陷报告（含位置、类型、严重程度），将准确率提升至95%以上，大幅减少人工复核时间；历史数据积累形成的设备健康档案，更支持预测性维护（如绝缘子剩余寿命预测），推动巡检模式从“被动修复”向“主动预防”转变。

2.2 核心技术实现路径

无人机与AI的协同效能依赖于硬件优化、算法突破与边缘计算-云端协同三大技术支柱的深度融合。

2.2.1 无人机硬件的适应性进化

针对高压巡检的特殊需求，无人机在续航、抗干扰与通信能力上实现关键突破。动力系统方面，氢燃料电池（续航4-6小时）与油电混合动力应用，解决了锂电续航短（通常<1小时）的瓶颈；电磁屏蔽技术通过在机臂和任务载荷舱内嵌入导电涂层，将50Hz工频电磁干扰对传感器的影响降低50%以上；通信冗余设计则同时搭载4G/5G、数传电台和卫星通信模块，确保在山区、海洋等弱信号区域仍能稳定传输数据。多传感器融合进一步拓展了检测维度：可见光相机以4K以上分辨率捕捉金具、绝缘子细节；红外热成像仪通过检测导线接点温度异常（如超过设计值20%即报警），提前预警过热故障；激光雷达（LiDAR）生成的点云数据可精确计算导线弧垂（精度±5cm）与树障距离；紫外成像仪则通过捕捉电晕放电产生的紫外线信号，定位绝缘子裂纹或污秽等隐蔽缺陷。

2.2.2 AI算法的创新与应用深化

AI算法的突破是提升缺陷检测精度的核心。针

对罕见故障（如鸟巢引发短路）数据不足的问题，数据增强技术通过旋转、缩放、添加噪声等方式扩充样本库，迁移学习则基于预训练模型（如ResNet、VisionTransformer）进行微调，减少对标注数据的依赖；自监督学习利用未标注的巡检图像训练特征提取器，显著提升模型泛化能力^[2]。在三维分析与时序预测领域，点云分割算法（如PointNet++）可识别铁塔、导线、植被等目标并构建三维模型；基于导线两端坐标和张力的数据的有限元分析，能模拟不同工况下的弧垂变化；LSTM时序模型结合历史缺陷数据与环境因素（温度、湿度），可预测设备劣化趋势，为维护决策提供科学依据。

2.2.3 边缘计算与云端的协同架构

为满足实时性需求，边缘计算与云端协同成为关键架构。机载AI芯片（如NVIDIA Jetson AGX Orin或华为昇腾310）支持每秒300帧的4K视频实时分析，轻量化模型优化技术（模型剪枝、量化）将参数量减少80%，使其适应边缘设备算力限制。5G+MEC（移动边缘计算）通过在基站侧部署MEC服务器，将部分计算任务（如初步缺陷筛选）下沉至网络边缘，将延迟降低至20ms以内；网络切片技术为巡检数据分配专用带宽，避免公网拥塞。数字孪生平台则集成BIM（建筑信息模型）、GIS（地理信息系统）和IoT数据，构建虚拟线路模型，支持仿真测试（如模拟台风、覆冰对线路的影响），优化维护策略。

2.3 典型应用场景的实践拓展

2.3.1 日常精细化巡检的自动化升级

自动化航线规划是日常巡检的基础。基于高精度地图（如0.1米分辨率DEM数据），系统可生成最优路径并动态调整飞行参数（如根据风速、温度优化速度、高度），确保图像质量稳定。缺陷分类与分级体系则通过AI实现标准化：一级缺陷（如导线断股、铁塔倾斜 $>5^\circ$ ）需24小时内处理，二级缺陷（如绝缘子破损、金具锈蚀）需72小时内修复，三级缺陷（如鸟巢、污秽）纳入月度维护计划。这种分级管理使资源分配更聚焦于高风险缺陷，提升维护效率。

2.3.2 应急响应与灾后评估的快速部署

在地震、台风等灾害后，无人机+AI的快速勘察能力至关重要。搭载高清相机和LiDAR的无人机可在2小时内完成100公里线路的倒塔、断线定位，并结合AI分析生成受损热力图，指导抢修队伍优先处理关键节点^[3]。山火预警场景中，红外热成像监测线路周边温度，当检测到持续高温区域（如 $>100^\circ\text{C}$ ）时触发报警，并与气象数据联动预测火势蔓延路径，提前切断相关线路供电，最大限度减少损失。

2.3.3 特殊环境巡检的技术突破

跨江跨海线路巡检中，无人机通过搭载浮力装置在水面低空飞行（高度5-10米），利用LiDAR测量塔基高程变化，结合声呐探测水下塔基冲刷情况，补充视觉检测盲区。高海拔地区则采用抗低温电池（ -40°C 仍可工作）和增压舱设计，适应青藏高原等缺氧环境；卫星遥感数据与光谱分析技术的结合，可监测覆冰厚度（通过识别冰层反射特征），为融冰作业提供依据。

3 无人机+AI 高压输电巡检的成本分析

“无人机+AI高压输电巡检成本”分初始投资与运营维护两部分。初始投资中，无人机设备采购因需长续航、高精度定位等特性且要配传感器，成本较高；AI系统开发需专业人员、大量时间，且要定制化，开发成本高；地面控制中心建设要高性能服务器等设备及操作室、监控系统，成本不低。运营维护方面，无人机长期使用需定期维护保养、维修更换零部件；AI系统要随技术和需求变化不断更新优化；巡检人员需培训无人机操作等技能，产生培训费用和时间成本。

4 无人机+AI 高压输电巡检的效益分析

4.1 直接经济效益

4.1.1 降低人力成本

传统的高压输电巡检需要大量的人力投入，而无人机+AI巡检方式可以大大减少巡检人员的数量。例如，一条100公里长的高压输电线路，传统人工巡检可能需要10名巡检人员，而采用无人机+AI巡检方式，只需2—3名巡检人员即可完成巡检任务，从而降低了人力成本。

4.1.2 减少设备维修成本

通过无人机+AI巡检方式，可以及时发现输电线路的故障和隐患，并采取相应的措施进行处理，避免故障的扩大和恶化，减少设备维修成本。例如，及时发现绝缘子的破损并进行更换，可以避免因绝缘子故障导致的线路跳闸事故，减少停电损失和设备维修费用。

4.1.3 提高巡检效率，增加发电量

无人机+AI巡检方式可以大大缩短巡检周期，及时发现和处理线路故障，提高电网的可靠性和稳定性^[4]。电网可靠性的提高可以减少停电时间和停电次数，从而增加发电量，为企业带来直接的经济效益。

4.2 间接经济效益

4.2.1 提升企业形象和竞争力

采用先进的无人机+AI巡检技术，体现了电力企业的科技创新能力和管理水平，有助于提升企业的形象和竞争力。在市场竞争中，具备先进巡检技术的企业更容易获得用户的信任和认可，从而拓展市场份额，提高企业

的经济效益。

4.2.2 促进电力行业的智能化发展

无人机+AI巡检方式的应用,为电力行业的智能化发展提供了有益的探索和实践。通过推广和应用这种新型巡检方式,可以带动整个电力行业的技术创新和转型升级,促进电力行业的可持续发展。

4.3 社会效益

4.3.1 保障电力供应安全

高压输电线路的安全稳定运行直接关系到社会的电力供应。无人机+AI巡检方式可以及时发现和处理线路故障,减少停电事故的发生,保障电力供应的安全可靠,为社会经济的发展和人民生活提供有力支持。

4.3.2 减少环境污染

传统的人工巡检方式需要巡检人员驾驶车辆进行长途跋涉,会产生一定的尾气排放和能源消耗。而无人机巡检方式采用电动或燃油动力,且飞行距离相对较短,能够减少尾气排放和能源消耗,对环境保护具有一定的积极作用。

5 成本效益模型构建与案例分析

5.1 成本效益模型构建

设初始投资成本为 C_0 ,包括无人机设备采购成本、AI系统开发成本和地面控制中心建设成本;运营维护成本为 C_1 ,包括无人机维护成本、AI系统更新成本和人员培训成本;直接经济效益为 B_1 ,包括降低人力成本、减少设备维修成本和提高巡检效率增加的发电量;间接经济效益为 B_2 ,包括提升企业形象和竞争力、促进电力行业智能化发展;社会效益为 B_3 ,包括保障电力供应安全和减少环境污染。则成本效益比 R 可以表示为:

$$R = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{C_0 + C_1}$$

5.2 案例分析

以某电力企业的一条200公里长的高压输电线路为例,采用传统人工巡检方式和无人机+AI巡检方式进行对比分析。

5.2.1 传统人工巡检方式

初始投资成本较低,主要为巡检工具和设备的采购成本,约为10万元。运营维护成本主要为巡检人员的工资和福利费用,每年约为50万元。由于巡检效率低下,每年因线路故障导致的停电损失和设备维修费用约为100

万元。

5.2.2 无人机+AI巡检方式

初始投资成本较高,包括无人机设备采购成本、AI系统开发成本和地面控制中心建设成本,约为200万元。运营维护成本每年约为30万元。采用该巡检方式后,每年可降低人力成本30万元,减少设备维修成本20万元,提高巡检效率增加发电量带来的经济效益约为40万元。同时,还提升了企业形象和竞争力,促进了电力行业的智能化发展,保障了电力供应安全,减少了环境污染,具有一定的社会效益。

根据成本效益模型计算,传统人工巡检方式的成本效益比为:

$$R_1 = \frac{100}{10 + 50} \approx 1.67$$

无人机+AI巡检方式的成本效益比为:

$$R_2 = \frac{30 + 20 + 40 + B_2 + B_3}{200 + 30}$$

考虑到间接经济效益和社会效益的难以量化性,即使仅考虑直接经济效益,当 $B_2 + B_3$ 大于一定值时, R_2 也大于 R_1 ,说明无人机+AI巡检方式具有更好的成本效益。

6 结语

本文分析无人机+AI在高压输电巡检中的应用得出结论:其实现智能化升级,克服传统局限,提升巡检效率、质量与安全性;虽初始投资成本高,但运营维护成本低,能带来显著效益,成本效益比佳,且通过模型构建与案例分析验证了可行性与优越性。展望未来,随着无人机、人工智能技术发展及5G普及,无人机+AI应用将更广泛深入,电力企业应积极接纳新技术,加快高压输电巡检智能化升级,为社会经济发展和人民生活提供可靠电力保障。

参考文献

- [1]李鑫.基于多无人机的智能化高压输电线路异物巡检研究[D].长春工业大学,2025.
- [2]蒲阳.电网高压输电无人机巡检关键点图像融合研究[J].电子设计工程,2025,33(08):150-154.
- [3]张民.无人机在超特高压输电线路巡检中的机器视觉技术应用[J].电子技术,2024,53(09):386-387.
- [4]李云松,崔健,李煜稼,等.高压输电线路无人机巡检技术运维管理分析[J].农电管理,2024,(01):49-50.