

输电线路智能巡检技术及应用研究

王云光 张兴哲

国网浙江省电力有限公司青田县供电公司 浙江 丽水 323900

摘要：本文系统阐述了输电线路智能巡检的技术内涵与发展动因，深入剖析了其核心技术构成，包括基于无人机与机器视觉的自主巡检平台、基于深度学习的缺陷智能识别算法、多源异构数据融合与分析技术以及智能决策支持系统。文章进一步探讨了智能巡检在提升巡检效率、保障人员安全、实现状态检修和优化资产管理等方面的综合应用价值。最后，针对当前技术发展中存在的挑战，如复杂环境下的感知精度、算法泛化能力、标准体系缺失及数据安全等问题，提出了未来发展的方向与策略。研究表明，构建一个高度自动化、智能化、协同化的输电线路巡检新范式，是推动电网数字化转型、建设坚强智能电网的必然选择。

关键词：输电线路；智能巡检；无人机巡检；人工智能；深度学习

引言

电力是现代社会的“血液”，安全、可靠、高效输送电力关乎国家经济与社会稳定。输电线路作为连接发电与用电的骨干，跨越广袤区域，长期暴露于复杂自然环境，雷击、覆冰等多种因素都可能引发故障，导致大面积停电，造成重大损失。因此，全面精准巡检输电线路、消除隐患是电网运维关键。长期以来，输电线路巡检主要靠人工，巡检人员徒步或借助简单工具目视检查。此模式弊端明显：效率低，长线路全面巡检耗时长；安全风险高，恶劣地形作业威胁人身安全；主观性强，质量依赖个人经验与责任心，易漏检误判；数据离散，难形成结构化知识库，不利于长期评估与预测。随着特高压、超高压电网发展，社会对供电可靠性要求提高，传统模式局限愈发突出。如今，新一轮科技革命带来变革机遇，先进无人飞行器、高精度传感器等深度融合，构建起智能巡检体系，能解放人力、降低风险，实现线路状态全天候感知与智能诊断，推动电网运维模式转变。本文将系统梳理与前瞻研究该前沿领域，为相关技术发展应用提供理论参考。

1 输电线路智能巡检的核心技术体系

1.1 智能巡检平台：无人机与机器视觉的融合

智能巡检平台是整个体系的物理载体和前端感知单元，其核心是搭载了多种传感器的无人机（UAV）系统。（1）无人机平台：多旋翼无人机凭借其垂直起降、悬停灵活、操作简便等优势，已成为输电线路精细化巡检的主流平台。固定翼无人机则因其续航时间长、巡航速度快，更适用于长距离通道的快速普查。近年来，具备RTK（实时动态差分定位）功能的无人机能够实现厘米级的精准定位，确保每次巡检都能在相同的预设航线

上飞行，为后续的缺陷比对与变化检测奠定了基础^[1]。

（2）多模态传感器载荷：为了全面获取线路信息，无人机通常集成多种传感器。可见光高清相机用于拍摄杆塔、金具、绝缘子等部件的细节图像；红外热像仪能够非接触式地测量设备表面温度，有效识别因接触不良、过载等原因引起的发热点；激光雷达（LiDAR）则可穿透植被，精确获取线路走廊的三维点云数据，用于构建数字孪生模型、分析导线弧垂、净空距离及树障情况。这些多源传感器协同工作，共同构成了一个立体的、多维度的感知网络。

1.2 智能识别算法：基于深度学习的缺陷诊断

如果说无人机平台是“眼睛”，那么智能识别算法就是“大脑”，负责从海量的巡检数据中自动、准确地识别出各类缺陷。（1）深度学习模型的应用：卷积神经网络（CNN）及其变体（如Faster R-CNN, YOLO系列, EfficientDet等）已成为图像目标检测与识别的主流技术。通过对大量标注好的输电线路缺陷样本（如绝缘子破损、销钉缺失、螺栓松动、导线断股、鸟巢等）进行训练，模型能够学习到各类缺陷的深层特征表示，从而在新的巡检图像中实现高精度的自动定位与分类。（2）小样本学习与迁移学习：在实际应用中，某些罕见缺陷的样本数量极为有限，难以训练出鲁棒的模型。为此，小样本学习（Few-shot Learning）和迁移学习（Transfer Learning）技术被广泛应用。通过利用在大规模通用图像数据集上预训练好的模型权重，再针对特定的电力缺陷数据进行微调，可以在少量样本的情况下快速构建有效的识别模型，大大降低了数据标注的成本和门槛。（3）多模态信息融合识别：单一模态的数据往往存在局限性。例如，可见光图像在夜间或雾霾天气下效果不佳，

而红外图像虽能反映温度异常，但难以精确定位缺陷类型。因此，将可见光、红外、甚至LiDAR点云等多模态信息进行融合，可以相互补充、相互验证，显著提升缺陷识别的准确性与鲁棒性。例如，结合可见光图像中的位置信息和红外图像中的温度信息，可以更精准地判断一个发热点的具体成因。

1.3 多源异构数据融合与分析技术

智能巡检产生的数据具有体量大、类型多、来源广的特点，包括图像、视频、点云、温度、GPS坐标、气象信息等。如何高效地管理、融合与分析这些多源异构数据，是释放其价值的关键。（1）数据治理与标准化：首先需要建立统一的数据接入、存储与管理规范，对来自不同设备、不同时间、不同格式的数据进行清洗、转换和标准化处理，形成结构清晰、易于查询的数据湖或数据仓库。（2）时空关联分析：输电线路设备的状态是随时间和空间变化的。通过将历次巡检数据按时间和空间维度进行关联，可以构建设备的健康状态演变曲线，实现对缺陷发展趋势的预测。例如，通过对比同一绝缘子串在不同时间点的红外图像，可以判断其发热问题是否在恶化^[2]。（3）大数据挖掘与知识图谱：利用大数据分析技术，可以从海量历史巡检数据中挖掘出设备故障与环境因素（如温度、湿度、污秽等级）、运行参数（如负荷电流）之间的潜在关联规则。进一步地，可以构建输电线路领域的知识图谱，将设备、部件、缺陷、故障、处置措施等实体及其关系进行结构化表示，为智能诊断和决策提供强大的知识支撑。

1.4 智能决策支持系统

智能巡检的最终目的是为运维决策提供科学依据。智能决策支持系统（IDSS）是连接数据分析与业务应用的桥梁。（1）风险评估与预警：系统能够根据缺陷的类型、严重程度、发展趋势以及设备的重要等级，自动计算出风险值，并对高风险设备进行分级预警，提醒运维人员优先处理。（2）检修策略优化：传统的检修计划往往是固定的周期性安排。而基于智能巡检数据的状态检修，则可以根据设备的实际健康状况动态调整检修策略。系统可以自动生成最优的检修任务清单，包括所需人员、物料、工器具及预计工时，实现检修资源的精准投放。（3）数字孪生与可视化：通过整合BIM（建筑信息模型）、GIS（地理信息系统）和巡检数据，可以构建输电线路的数字孪生体。运维人员可以在虚拟环境中直观地查看线路的三维实景、设备状态、缺陷位置及历史记录，极大地提升了运维管理的可视化与交互性水平。

2 智能巡检技术的综合应用价值

2.1 大幅提升巡检效率与覆盖范围

传统的人工巡检方式受限于地形、天气和人力，效率低下且覆盖面有限。相比之下，无人机巡检的速度是人工巡检的数倍乃至数十倍，能够在短时间内完成对长距离、大范围线路的全覆盖巡检。特别是在高山峻岭、河流沼泽等人员难以到达的区域，无人机可以轻松飞越，实现无死角勘察。这种能力在应急巡检和灾后勘察中尤为关键，能够为快速定位故障点、评估受损情况、制定抢修方案争取到宝贵的“黄金时间”，从而极大地缩短停电时长，保障社会生产和生活的正常秩序。

2.2 根本性改善作业安全

电力巡检工作长期伴随着高风险，巡检人员需要攀爬百米高的铁塔，在高压电场环境下作业，面临高空坠落、触电、野兽袭击以及极端天气（如雷暴、冰雪）等多重安全威胁。智能巡检技术，特别是无人机和在线监测系统的应用，将一线巡检人员从这些高危、艰苦的野外环境中彻底解放出来。他们的角色转变为在室内对由智能设备回传的高清图像、视频和各类传感器数据进行分析与复核^[3]。这一转变从根本上消除了绝大多数人身安全风险，体现了“以人为本”的现代安全管理理念。

2.3 实现精准化状态检修

智能巡检的核心优势在于其能够进行持续、客观、标准化的数据采集。通过搭载高清摄像头、红外热像仪、激光雷达等多类型传感器，系统可以精确捕捉到杆塔倾斜、绝缘子破损、金具锈蚀、导线断股以及异常发热点等细微缺陷。基于这些海量数据，结合人工智能算法进行深度分析，运维部门能够准确掌握每基杆塔、每个部件的实时健康状况。这使得电网维护模式从传统的、粗放的“到期必修”或“故障后修”，转变为科学、经济的“该修才修”的精准化状态检修。此举不仅避免了大量不必要的计划性停电和人力物力浪费，更能确保在设备出现严重隐患前就得到及时处理，显著提高了电网运行的整体可靠性和稳定性。

2.4 优化资产全生命周期管理

每一次智能巡检所积累的数据，都是电网资产宝贵的数字档案。这些贯穿设备服役全过程的海量历史数据，构成了一个强大的数据库。通过对这些数据的挖掘与分析，可以科学地评估设备的剩余使用寿命，精准预测未来可能发生的故障类型和时间，从而提前做好预防措施。同时，这些洞察也为优化备品备件的库存策略、制定更具前瞻性和经济性的技术改造与更新规划提供了坚实的数据支撑。最终，智能巡检技术助力电网企业实现了从设备采购、工程建设、运行维护到最终退役处置

的全生命周期精细化管理，最大化了电网资产的价值。

2.5 促进运维管理模式变革

智能巡检不仅是技术工具的升级，更是运维管理思想的一场革命。它强力推动了电网运维模式从劳动密集型向技术密集型、从依赖老师傅个人经验驱动向依靠大数据和人工智能驱动的根本性转变。在此基础上，催生了诸如“集中监控、远程诊断、智能派单、移动作业”等一系列新型运维组织模式。省级或地市级的监控中心可以集中处理来自全域的巡检数据，专家团队可远程进行会诊，并通过智能算法自动生成最优的检修工单并派发给最近的作业班组。这种扁平化、集约化的管理模式，极大地提升了整个电网企业的数字化、智能化管理水平和运营效率。

3 面临的挑战与未来发展方向

3.1 面临挑战

(1) 复杂环境下的感知与识别精度：在强电磁干扰、雨雪雾霾、低光照等恶劣条件下，无人机的飞行稳定性、传感器的成像质量以及AI算法的识别准确率都会受到严重影响。如何提升系统在极端环境下的鲁棒性，是亟待解决的技术瓶颈。(2) 算法的泛化能力与可解释性：当前的深度学习模型虽然在特定数据集上表现优异，但其泛化能力（即对未见过的新场景、新缺陷的适应能力）仍有待提高。此外，AI模型常被视为“黑箱”，其决策过程缺乏透明度，这在对安全性要求极高的电力行业是一个重要障碍。发展可解释的人工智能（XAI）技术，让算法的判断依据变得清晰可信，是未来的重要方向^[4]。(3) 标准体系与互操作性缺失：目前市场上无人机、传感器、软件平台等产品众多，但缺乏统一的技术标准和数据接口规范，导致不同厂商的设备与系统之间难以互联互通，形成了新的“信息孤岛”。建立开放、统一的行业标准体系，是实现规模化、集约化应用的前提。(4) 数据安全与隐私保护：智能巡检涉及大量高精度的地理信息和电网核心资产数据，一旦泄露或被恶意利用，将对国家安全构成威胁。因此，必须构

建完善的数据安全防护体系，包括数据加密传输、访问权限控制、安全审计等，确保数据全生命周期的安全。

3.2 未来发展

面向未来，输电线路智能巡检技术将朝着更加自主、协同、智慧的方向发展。自主化方面，将探索基于强化学习的无人机全自主导航与避障技术，实现真正意义上的“一键巡检”。协同化方面，将构建“空-天-地”一体化的立体巡检网络，融合卫星遥感、固定式在线监测装置、移动巡检机器人等多种手段，形成立体交叉、优势互补的感知体系。智慧化方面，将进一步深化AI与大数据技术的应用，从“看得见”、“认得出”向“想得深”、“判得准”迈进，最终构建一个能够自我学习、自我进化、自我决策的智慧运维生态系统。

4 结语

输电线路智能巡检技术是信息技术与电力工业深度融合的典范，它不仅是应对当前电网运维挑战的有效解决方案，更是引领未来电网向更高水平智能化演进的战略支点。通过构建以无人机为载体、以人工智能为核心、以大数据为驱动的智能巡检体系，我们能够以前所未有的效率、精度和安全性，守护国家能源大动脉的安全。尽管前路仍存挑战，但随着相关技术的不断突破、标准体系的逐步完善以及应用模式的持续创新，一个更加安全、可靠、高效、绿色的智能电网未来可期。持续投入研发、加强跨学科合作、推动标准制定，将是加速这一愿景实现的关键路径。

参考文献

- [1] 靳强. 立体巡检背景下输电线路智能可视化技术研究[J]. 电力设备管理, 2026, (04): 59-61.
- [2] 王海龙, 李昂, 徐儒鸿. 电力输电线路的智能巡检与维护技术研究[J]. 中国设备工程, 2025, (21): 182-185.
- [3] 张炳楠. 基于人工智能的输电线路无人机巡检技术分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(10): 404-405.
- [4] 钦林武. 智能巡检技术在输电线路中的应用研究[J]. 张江科技评论, 2025, (05): 114-116.