电力设备异常状态预测中无人机智能巡检技术的应用分析

孟磊
国网天津市电力公司武清供电分公司　天津　301700

【摘　要】智能电网建设持续推进，电力设备的规模不断扩张，传统人工巡检方式在复杂环境下难以适配，异常状态识别效率不高，风险预警能力也存在局限。无人机智能巡检技术以无人机平台为载体，搭载智能感知设备，结合人工智能分析方法，为电力设备状态监测、故障预测提供新的技术路径。本文针对电力设备异常状态预测中的无人机智能巡检技术应用开展研究，梳理多源巡检数据融合难度大、智能识别算法适配性不足等实际应用难题，提出构建多源数据融合预测体系、增强人工智能算法识别能力、完善“端—边—云”协同计算模式、建立智能巡检闭环管理机制等优化策略，为电力设备智能化运维提供参考。

【关键词】电力设备；异常状态预测；无人机

Application analysis of unmanned aerial vehicle intelligent inspection technology in abnormal state prediction of power equipment

Meng Lei
State Grid Tianjin Electric Power Company Wuqing Power Supply Branch Tianjin　301700

【Abstract】The construction of smart grids continues to advance, and the scale of power equipment continues to expand. Traditional manual inspection methods are difficult to adapt to complex environments, and the efficiency of identifying abnormal states is not high. There are also limitations in risk warning capabilities. The intelligent inspection technology of unmanned aerial vehicles is based on unmanned aerial vehicle platforms, equipped with intelligent sensing devices, and combined with artificial intelligence analysis methods, providing a new technological path for power equipment status monitoring and fault prediction. This article focuses on the application of unmanned aerial vehicle intelligent inspection technology in the prediction of abnormal states of power equipment. It summarizes the practical application difficulties of multi-source inspection data fusion and insufficient adaptability of intelligent recognition algorithms. It proposes optimization strategies such as building a multi-source data fusion prediction system, enhancing the recognition ability of artificial intelligence algorithms, improving the "end edge cloud" collaborative computing mode, and establishing an intelligent inspection closed-loop management mechanism, providing reference for the intelligent operation and maintenance of power equipment.

【Key words】power equipment; Abnormal state prediction; drone

前言：

电力系统正逐步朝数字化、智能化方向推进，涉及输电线路、变电设备及配电设施等多个环节的运行管理，需满足更高要求。电力设备长期在复杂环境下运转，自然因素、设备老化、负荷变化等都会对其造成影响，容易形成隐性缺陷，这类缺陷若未及时排查，会让运行风险出现。过往的巡检模式主要依赖人工定期开展检查，存在工作强度较大、检测覆盖范围有限、异常预测能力存在不足等问题。

1.无人机智能巡检技术应用的重要性

当前电力系统规模不断扩大，电网运行环境的复杂程度持续提升，电力设备运维管理要应对的问题包括设备数量增多，分布范围广，运行条件多变这类实际难题。输电线路、变电设备和配电设施长期暴露在自然环境中，温度变化、风雨侵蚀、机械损伤、设备老化等多种因素都会对其产生影响，逐步出现绝缘性能下降，连接部件异常，结构损伤这类潜在风险。传统人工巡检主要靠运维人员按照固定周期开展现场检查，能发现部分明显的设备缺陷，在巡检范围覆盖、异常早期识别以及连续状态监测方面存在一定不足[1]。

2.无人机智能巡检技术应用难点

2.1 多源巡检数据融合分析难度较大

要依托无人机智能巡检技术开展电力设备异常状态预

测，必须以大量、多类型、高精度的巡检数据作为分析依据，但电力设备的运行状态复杂且随时变化，只靠单一来源的数据没法完整体现设备的健康状况，实际巡检时会用到可见光图像、红外热成像数据、设备运行参数、地理环境信息以及历史检修记录等多种数据类型，这些来自不同渠道的数据，在采集方式、数据格式、空间位置以及时间尺度上都存在差异，使得数据融合分析的难度比较大，要把无人机智能巡检技术用在电力设备异常状态预测上，同样需要以大量、多类型、高精度的巡检数据作为分析基础[2]。

2.2 智能识别算法适应能力不足

应用于无人机智能巡检的人工智能算法，可完成设备目标定位、缺陷识别以及异常状态预测，不过电力设备的运行环境复杂多变，这类智能识别算法在实际应用时，仍存在适应能力不足的情况。实验环境中的设备类型、环境条件以及缺陷表现形式，和现场巡检时的实际情况有比较大的差异，算法模型得具备较强的泛化能力，才能保障异常识别结果的准确性和稳定性。搭建持续学习机制，依据新增的巡检数据逐步优化模型参数，增强算法对设备状态变化的响应能力。同时，人工智能算法的应用结合专业运维知识，对识别结果做综合判断，避免只靠模型输出出现误判[3]。

3.电力设备异常状态预测中无人机智能巡检技术应用策略

3.1 构建多源数据融合的智能预测体系

要准确预测电力设备的异常状态，需要高质量、多维度的数据做支撑，仅依靠单一类型的巡检信息，无法完整体现设备的真实运行情况。在运用无人机智能巡检技术时，要搭建多源数据融合的智能预测体系，整合设备图像信息、红外检测数据、运行参数以及环境信息等多维数据，对电力设备状态开展综合分析，提升异常识别和风险预测的精准度。多源数据融合体系的建设，需覆盖数据采集环节，完善数据处理、特征提取以及状态评价等关键流程，将巡检数据转化为具备应用价值的设备状态信息。在数据采集环节，要依据不同类型电力设备的运行特点，合理配置无人机搭载的检测设备，提升巡检数据的完整性。巡检输电线路时，可用高清摄像设备记录线路外观状态，重点拍摄绝缘子、导线、杆塔和连接部件等关键区域的图像，搭配红外热成像设备，获取设备的温度分布情况，排查局部温升异常等潜在问题。巡检变电设备时，可配合设备运行参数采集系统，同步收集温度、电流、电压、负荷变化等信息。多种感知设备协同运作，可弥补单一检测方式的信息缺失，为后续智能预测提供更全面的数据基础。在数据管理环节，要建立统一的数据标准和规范化管理机制[4]。

无人机巡检涉及图像、文本、传感数据以及空间信息等多种类型数据，这些数据来自不同渠道，在格式、精度和时间标识上存在差异，要完成数据清洗、格式转换以及时间同步等操作，让数据保持一致。拿设备图像数据处理来说，要依照设备类型、缺陷类别完成分类标注，生成结构化的数据资源，针对红外监测数据，要结合设备正常运行的温度范围搭建基础数据库，方便后续对比分析设备异常状态。搭建完善的数据管理体系，能提升巡检数据的利用效率，让智能预测模型拥有可靠的运行基础。数据分析环节，要增强多源数据之间的关联挖掘能力，电力设备出现异常状态往往是多种因素共同影响的结果，只分析某一类数据可能没法准确判断设备存在的风险。

3.2 提升人工智能算法识别能力

无人机依托智能巡检技术精准预判电力设备异常状态，核心支撑是人工智能算法的识别能力，算法水平高低会直接左右设备缺陷的排查效率、风险判断的准确程度，还有后续检修决策的科学合理性。输电线路、变电站的设备总量持续增长，电力设备运行状态数据变得规模庞大、类型多样且实时变动，只靠人工经验排查缺陷，没法满足现代电网高可靠性的运行要求。现有研究数据显示，依托深度学习搭建的电力设备缺陷检测模型，在标准测试环境里识别准确率一般能超过 90%，部分经过优化的目标检测模型，平均精度均值（mAP）约为 95%，自动化程度比传统人工特征提取方法更高。进入实际应用场景中，这类算法还会受到多种因素限制，包括设备类型存在差异、缺陷样本储备不足、环境干扰较强、模型迁移能力有限等。要强化人工智能算法的性能，可从优化算法模型、扩充训练数据、提升智能识别精度、开展模型应用验证这几个方面持续推进。电力设备缺陷大多带有隐蔽性，有些异常在初期只表现为局部区域的颜色改变、纹理变化或温度波动，人工巡检得靠长期积累的经验判断，人工智能算法则可通过学习大量样本，掌握设备正常与异常状态的区别。就拿输电线路绝缘子来说，其表面裂纹尺寸一般很小，在无人机拍摄的图像里可能只占几十个像素的区域，传统图像处理方法很容易漏掉这类缺陷。引入深度卷积神经网络后，模型可借助多层特征提取结构捕捉细微变化，增强小目标缺陷的检测能力。相关研究数据显示，用改进型 YOLO 系列算法识别绝缘子缺陷，检测效率比传统人工检测方式提升 50%以上，模型识别准确率处于 93%～97%区间。对于杆塔螺栓松动、金具腐蚀这类结构性缺陷，可结合目标检测与图像分割技术，精准定位缺陷区域，让算法可先判断是否存在异常，再进一步分析异常的发生位置和影响范围。

3.3 完善“端—边—云”协同计算模式

实际作业时，工作人员可在无人机上部署轻量化目标检测模型，完成对输电线路中绝缘子、杆塔、金具等关键部件

的快速识别，一旦系统检测到疑似异常的目标，就会把对应的高清数据上传到边缘节点或云端，完成后续的深度分析。这种模式能大幅减少无效数据传输量，提升巡检效率。部分研究结果显示，采用端边协同架构的电力巡检智能系统中，无人机负责采集高清视频流，边缘计算平台部署 YOLO 系列故障检测模型，实时检测关键部件的缺陷，让人工智能算法满足低时延巡检的需求。边缘计算层作为无人机与云端平台之间的连接枢纽，主要完成实时数据处理、初步判断异常情况以及动态调整任务等工作。传统云端计算模式下数据传输路径较长，边缘计算则能缩短这一路径，把部分计算任务转移到离数据源更近的位置，降低网络延迟。比如，开展输电线路巡检时，边缘节点可实时分析无人机上传的视频流，一旦检测到绝缘子破损、线路存在异物或设备温度异常，就会立刻反馈风险信息，调整无人机的飞行路径，让无人机对异常位置进行二次拍摄。增强边缘计算的处理能力，能改善无人机巡检的实时性。部分研究数据显示，采用 5G+云边 AI 协同架构的输电线路巡检系统，和传统 4G 搭配云端服务器的处理模式相比，平均下行速率提升约 4 倍，平均上行速率提升约 1.77 倍，平均通信时延降低约 83.3%，平均处理时间缩短约 79%，总体作业效率提升约 25%。这些数据显示，边缘计算能减轻云端的数据处理负担，加快异常信息的反馈速度，为电力设备状态预测提供更及时的数据支撑。

3.4 建立智能巡检闭环管理机制

各类电力设备总量大、分布广，且运行环境区别显著，不同设备的风险等级、巡检要求也存在比较大的差异。采用统一固定周期巡检模式，低风险设备会被反复检查，高风险设备监测不足，这类问题易出现。要制定动态巡检计划，结合设备运行状态、历史缺陷记录、所处环境及重要等级，拿具体场景来说，长期处于高温、高湿、强风区域的输电线路，可提升无人机巡检频率，运行稳定、历史缺陷少的设备，可适当减少巡检次数。推行风险导向型巡检机制，精准分配巡检资源，提升设备管理效率。执行巡检任务时，要借助智能巡检平台，完成巡检计划自动生成、任务下发、飞行监控及数据归档等操作，无人机完成巡检任务后，系统会自动匹配设备编号、巡检时间、飞行轨迹及采集到的数据，生成完整的巡检档案。比如，已有部分智能巡检平台覆盖巡检计划编制、无人机自主飞行、数据实时回传、AI 缺陷识别及隐患整改的全流程管理。三峡集团搭建的无人机智能巡检管理体系，覆盖 12 座新能源场站，配置 21 座无人机机巢与 28 架巡检无人机，能实现统一调度、智能诊断及闭环消缺，和传统人工巡检模式相比，每年可节省人工工时超 11 万小时，巡检效率提升 13.2 倍，设备隐患提前检出率达 63%。未来，随着人工智能、大数据分析、数字孪生和自动化运维技术不断融合，智能巡检闭环体系将进一步实现设备状态实时感知、风险精准预测和维护决策智能优化，为电力系统安全稳定运行提供更加可靠的技术支撑，相关内容如表 1 所示。

表 1　无人机智能巡检闭环管理流程及功能分析

管理环节	主要内容	应用技术	实现功能
巡检任务规划	根据设备类型、运行环境、历史缺陷记录制定巡检方案	GIS 地理信息系统、设备管理系统、智能任务规划算法	自动生成巡检任务，优化无人机飞行路径
数据采集阶段	获取设备高清图像、红外温度信息	高清摄像、红外热成像、传感器技术	实现设备状态多维度感知
数据智能分析	对采集数据进行目标识别、缺陷检测和状态评价	深度学习、机器视觉、人工智能算法	自动识别绝缘子破损、金具腐蚀

结语：

综上所述，无人机巡检系统未来会进一步向自主化、精准化和实时化方向演进，逐步形成覆盖设备监测、状态预测、风险评估和智能决策的一体化运维体系，背后是人工智能、大数据、数字孪生及智能感知技术的持续发展，给新型电力系统安全稳定运行提供更可靠的技术支撑。

参考文献

[1]闫斌,陶俊,薛蒙.基于轻量卷积神经网络的电力设备无人机巡检缺陷定位[J].国外电子测量技术,2025,44(11):151-157.
[2]熊斌,陆杨文,沈伶康.基于超声波技术的电力设备带电清洗无人机作业效率提升研究[J].中国机械,2025,(3):13-16.
[3]郦铁锋,吴欣,丁翔.基于无人机的配网电力设备自动巡检方法[J].信息与电脑(理论版),2023,35(19):10-12.
[4]杨振伟,陈炳海,张淏凌.面向电力设备检修的多无人机协同飞行路径规划算法[J].微型电脑应用,2023,39(1):88-91.
作者简介：孟磊（1985.12），男，汉族，天津人，助理工程师职称，大学本科，研究方向为设备运维与巡视。