配电线路及设备信息化巡检模式构建与应用研究

翁后军
宿迁三新供电服务有限公司泗阳分公司　江苏 宿迁　223700

摘　要　针对传统人工巡检模式存在效率低、风险高且数据管理不合规等问题，本文搭建出依托“云—管—边—端”架构的配电线路及设备信息化巡检模式。排布设计系统物理拓扑及核心功能模块，厘清数据流转规则与接口相关标准。关键技术维度上，提出改进YOLOv8的缺陷识别算法，引入坐标注意力机制及BiFPN结构提升小目标检测精准度；研发基于边缘计算的实时数据处理与自适应传输协议，达成毫秒级响应；探究多源数据融合及特征对齐路径，统筹可见光、红外及局放信号开展设备状态诊断。将该模式应用于500 kV变电站及220 kV输配电线路典型场景，核验其在缺陷发现率、巡检时效及运维成本管控层面的优势性。结果显示，该信息化巡检模式可大幅提高巡检工作的智能化层次与数据驱动能力，可为电力企业推动设备运维数字化转型提供技术支撑。

关键词　信息化巡检；云—管—边—端架构；缺陷识别；边缘计算；多源数据融合

Research on the Construction and Application of Information-Based Inspection Modes for Distribution Lines and Equipment

Weng Houjun
Siyang Branch, Suqian Sanxin Power Supply Service Co., Ltd., Suqian 223700, Jiangsu Province, China

Abstract　To address the problems of low efficiency, high risk, and non-compliant data management in traditional manual inspection modes, this paper develops an informationized inspection model for distribution lines and equipment based on the “cloud-pipe-edge-device” architecture. The physical topology and core functional modules of the system are designed, and the data flow rules and interface standards are clarified. At the key technical level, an improved YOLOv8 defect recognition algorithm is proposed, in which a coordinate attention mechanism and the BiFPN structure are introduced to enhance small-object detection accuracy; a real-time data processing and adaptive transmission protocol based on edge computing is developed to achieve millisecond-level response; and the pathways of multi-source data fusion and feature alignment are explored to carry out equipment status diagnosis by integrating visible light, infrared, and partial discharge signals. The model is applied to typical scenarios of a 500 kV substation and 220 kV transmission and distribution lines to verify its advantages in defect detection rate, inspection timeliness, and operation and maintenance cost control. The results show that this informationized inspection model can substantially improve the intelligence level and data-driven capability of inspection work, and can provide technical support for power enterprises to promote the digital transformation of equipment operation and maintenance.

Key words　Information-Based Inspection; Cloud-Pipe-Edge-Device Architecture; Defect Recognition; Edge Computing; Multi-Source Data Fusion

配电线路及设备的安全稳定运行是保障电网可靠供电的核心根基，传统人工巡检模式长期依赖运维人员的目视查看与经验估判，面对日趋扩容的电网体量和错综复杂的自然环境，显露出效率偏低、劳动强度高、高风险区域难覆盖、数据记录偏主观且难回溯等显著问题。尤其在偏远山区、恶劣天气场景下，人工巡检不仅面临人身安全隐患，更难实现对设备状态的实时感知与精准把控。伴随电网数字化转型战略的逐步推进，传统巡检模式已难以适配现代电力系统对运维工作提出的高可靠、高效率与智能化诉求。因此，目前亟须搭建一种集数据自动获取、智能辨识、远端管控于一体的信息化巡检模式，来替代或辅助人工完成繁重巡检任务，提升设备运维的及时度与精准度，削减运营成本，并为设备全生命周期管理提供可信的数据支撑。

1　信息化巡检模式的总体架构设计

1.1　系统物理拓扑与分层架构

信息化巡检系统采用“云—管—边—端”四层物理拓扑结构，云端部署高性能图形处理器（graphics processing unit，

GPU）服务器集群，承担深度学习模型训练、大规模历史数据存储与分析任务。边缘计算网关安装于变电站主控室或线路杆塔旁，选用NVIDIA Jetson AGX Orin工业级嵌入式设备，提供高达275 TOPS的AI算力，可在本地完成实时推理与数据预处理。终端层涵盖多种巡检设备：轮式机器人搭载双光云台与气体传感器，四旋翼无人机配备30倍光学变焦相机与激光雷达，固定摄像头支持360°全景监控，手持PDA集成RFID读取与北斗定位功能[1]。

1.2 核心功能模块划分

系统划分为6个核心功能模块，任务调度模块基于规则引擎与优先级队列自动生成巡检任务，规则引擎读取设备台账、上次巡检时间、天气预报及历史缺陷记录，按紧急程度分配任务至空闲终端。数据采集模块对接多源传感器：可见光相机输出1 920×1 080JPEG图像，红外热像仪输出640×480温度矩阵，紫外传感器输出光子计数序列，局放检测仪输出相位分辨局部放电（phase resolved partial discharge，PRPD）图谱。智能分析模块采用两级协同架构：边缘端运行轻量化YOLOv8s模型完成初步缺陷识别，置信度低于0.6的样本上传云端由YOLOv8x模型二次复核。告警与工单模块在缺陷确认后自动创建维修工单，通过短信与App推送至责任人，工单状态实时同步至任务调度模块。数据管理模块使用时序数据库InfluxDB存储传感器波形与温度曲线，支持按设备ID与时间范围快速检索回放[2]。可视化展示模块基于Cesium引擎搭建三维地理信息系统（geographic information system，GIS）地图，叠加设备实时状态图标、巡检轨迹线及缺陷热力图，运维人员可点击图标查看设备全生命周期档案。

1.3 数据流转机制及接口规范

数据从终端采集到云端入库经历4个环节，终端按固定频率（默认每秒1帧）采集原始图像与传感数据，经本地缓存后通过消息队列遥测传输协议（message queuing telemetry transport，MQTT）发布至边缘节点主题。边缘节点订阅主题后执行三步处理：先用开源计算机视觉库（open source computer vision library，OpenCV）进行畸变校正与缩放至640×640，再用TensorRT量化后的模型推理得到检测框，最后将原始图像与检测结果打包为Protocol Buffers格式并压缩。压缩包通过gRPC流式传输至云端消息中间件Kafka，云端消费者程序解包后写入MinIO对象存储与PostgreSQL关系库。数据接口统一采用RESTful API与gRPC混合架构：查询类接口使用RESTful返回JSON，命令下发与数据推送使用gRPC双向流以降低延迟。

2 面向多源异构数据的巡检关键技术

2.1 基于改进YOLOv8的设备缺陷智能识别算法

选取YOLOv8n作为基线模型，针对电力设备典型缺陷开展改进。在Backbone末端嵌入坐标注意力机制Coordinate Attention，该机制沿水平与垂直方向分别聚合特征，生成具有方向感知的位置编码，使模型更关注绝缘子串、导线断股等细长小目标的纹理细节。Neck部分用加权双向特征金字塔BiFPN替换原PANet结构，BiFPN为不同尺度的特征层赋予可学习权重，浅层保留空间位置信息，深层传递语义抽象，两者融合后对小目标召回率提升明显。损失函数方面，边界框回归采用CIoU Loss，同时考虑重叠面积、中心点距离与长宽比一致性，定位精度较原始IoU Loss提高约2%[3]。训练数据集由10万张现场巡检图像构成，其中可见光图像8万张，红外图像2万张，均由持有高压电工证的专业工程师使用LabelImg工具标注，标注类别包括绝缘子自爆、鸟巢、金具锈蚀、导线异物、发热点、均压环倾斜六类。按7∶2∶1随机划分为训练集、验证集与测试集，训练时采用Mosaic数据增强与MixUp策略，初始学习率设为0.01，使用余弦退火调度，共训练300轮。实验在单张NVIDIA RTX 4090显卡上进行，测试集结果如表1所示。

表1 改进YOLOv8与原始YOLOv8在六类缺陷上的检测性能对比

缺陷类别	原始 YOLOv8 mAP@0.5（%）	改进 YOLOv8 mAP@0.5（%）	召回率提升（%）	参数量变化（MB）
绝缘子自爆	82.3	89.7	+7.4	+0.8
鸟巢	79.1	86.5	+7.4	+0.8
金具锈蚀	76.8	84.2	+7.4	+0.8
导线异物	74.5	83.1	+8.6	+0.8
发热点	81.2	88.0	+6.8	+0.8
均压环倾斜	72.6	81.3	+8.7	+0.8

2.2 基于边缘计算的实时数据处理与传输协议

边缘计算节点部署于变电站或线路杆塔旁，承担数据预处理与轻量级推理任务，目的是将云端带宽占用降低70%以上，端到端延迟压缩至200 ms以内，并在网络中断时保持本地自主运行。边缘节点搭载NVIDIA Jetson AGX Orin，软件栈包含JetPack SDK、TensorRT 8.6与Flask Web服务器。带宽低于10 Mbps时，分辨率降为640×480，质量因子降至70，同时仅传输检测框内的感兴趣区域（region of interest，ROI）。差分编码记录相邻两帧的像素差异，仅发送变化区域，进一步减少冗余数据。

2.3 多源数据融合及特征对齐方法

可见光与红外图像的空间配准是实现融合诊断的前提，采用尺度不变特征变换（scale-invariant feature transform，SIFT）算法提取两幅图像的特征点，通过最近邻匹配与随机抽样一致（random sample consensus，RANSAC）剔除误匹配点，求解仿

射变换矩阵，将红外图像映射到可见光坐标系下。实测500组配对图像的平均配准误差为1.7 px，满足后续融合需求。决策层融合采用加权投票策略：可见光模型输出缺陷类别与置信度，红外模型输出温度异常区域与温差值[4]。当预测概率超过0.7时，系统自动生成预防性检修建议，将被动告警转变为预测性维护，提前消除潜在隐患。

3 信息化巡检模式的实践应用与效能评估

3.1 典型场景应用案例——某500 kV变电站设备巡检

华东地区某500 kV户外变电站占地约200亩，拥有主变压器、断路器、隔离开关、互感器等设备共计1 200余台，日常巡检任务繁重。传统模式下需4名运维人员耗时4 h完成一轮全覆盖巡视，且高空设备（避雷器、套管、架空母线）依赖望远镜观察，漏检率高。实施方案为：部署2台轮式巡检机器人，每台搭载可见光与红外双光云台，可见光相机分辨率1 920×1 080，红外热像仪测温范围－20～150 ℃，精度±2 ℃；另配置1架四旋翼无人机，搭载30倍光学变焦相机与激光测距模块，用于高空设备精细化检查。数据自动归档率100%，每台设备生成独立巡检报告，包括可见光图像、红外热图、温度曲线及缺陷标签，存储于云端数据库供历史回溯。

3.2 某220 kV输配电线路无人机巡检应用

南方山区某220 kV输配电线路全长45 km，途经高山密林，海拔落差超过800 m，传统人工巡线需携带砍刀开路，单次巡视耗时5 d，且难以到达陡坡处的杆塔。实施方案采用大疆M300 RTK无人机搭载禅思L1激光雷达与Zenmuse H20T混合相机，激光雷达扫描频率160 kHz，点云密度优于200点/m^2，可穿透植被获取地面高程。累计飞行32架次，总航程约1 440 km，发现树障隐患17处，其中与导线净空距离不足5 m的超高树木11处，藤蔓攀爬6处[5]；鸟巢9处，分布在耐张塔横担与跳线处；导线散股2处，位于大档距中央。平均每千米巡检耗时仅8 min，较人工巡视的40 min降低80%。激光雷达点云数据经后处理生成通道三维模型，自动计算导线弧垂与树障距离，输出危险点清单与处置建议。

3.3 综合效能分析与模式推广价值

基于上述两个案例，提取关键指标进行定量对比。单次巡检人数方面，变电站从4人降至1人，输配电线路从6人降至1人；平均耗时变电站从240 min降至90 min，输配电线路从5 d（2 400 min）降至0.5 d（240 min）；缺陷发现率变电站从人工的70%提升至96%，输配电线路从55%提升至92%，信息化巡检模式与传统人工模式综合效能对比结果见表2。

表2 信息化巡检模式与传统人工模式综合效能对比

对比维度	传统模式	信息化模式	变化百分比
单次巡检人数（人）	4	1	－75.0%
平均耗时（min）	240	90	－62.5%
缺陷发现率（%）	70	96	+37.1%
数据完整性（%）	60	100	+66.7%
年度直接成本（万元）	48	28	－41.7%

4 结束语

本文以配电线路及设备信息化巡检模式的搭建与落地使用作为对象进行探究，排布出云—管—边—端四层物理架构，厘清了核心功能模块边界与数据流转路径。在关键技术维度，给出改进的YOLOv8缺陷识别算法，纳入坐标注意力机制与BiFPN结构提高小目标检测精准度；开发出依托边缘计算的实时数据处理与自适应传输协议，做到毫秒级响应以及弱网环境里的稳妥传输；掌握多源数据融合及特征对齐方法，融合可见光、红外与局放信号完成设备状态诊断。将研究成果应用于500 kV变电站与220 kV输配电线路典型场景，核验该模式在缩短巡检耗时、提升缺陷发现率、削减运维成本方面的突出长处。该信息化巡检模式为电力企业提供可落地、可复制的智能化运维解决方案，有助于推动设备管理从计划检修向状态检修转变，对提高电网运行可靠性、降低人工安全风险具有重要的工程应用价值。

参考文献

[1]任晓明,洪晓翠,鲁佳明.信息化技术在消防设施日常巡检中的应用研究[J].劳动保护,2026(6):89-91.

[2]尹思源.燃机电厂电气设备巡检的信息化与智慧化策略分析[J].中国新通信,2026,28(6):38-40.

[3]韩瑜.基于信息化的火电厂输煤栈桥智慧巡检系统创新与构建[J].企业管理,2025(S2):174-175.

[4]胡文贞.无人机技术在电力巡检信息化管理中的运用分析[J].电子元器件与信息技术,2024,8(7):126-128.

[5]白玫.基于智慧林业巡检管理服务平台的林业信息化管理变革与创新[J].农业技术与装备,2024(6):108-110.

（本文编辑 杜宇琪）

