

智能化技术在电力线路运维中的应用分析

李锦腾

广西电网有限责任公司来宾象州供电局 广西来宾 545800

摘要: 伴随着现代电网规模不断扩大、特高压交直流输电技术迅猛发展, 电力线路运行环境越来越复杂, 传统的依靠人工巡视为主的运维方式已经不能满足电网对于高可靠、高安全、高效率的要求。智能化技术是促使电力行业转型升级的主要动力, 它已经渗透到电力线路运行、维护和检修的方方面面。本文从多角度出发对智能化技术在隐患精准排查、灾害自动预警、全生命周期资产管理和降本增效方面的作用进行了分析, 同时用表格的形式对降本增效的效果进行了量化对比。最后就目前智能化运维存在的数据孤岛、网络安全、算法泛化能力等提出相应的改进措施。本文试图给创建“广泛互联、智能互动、安全可控”的现代智慧电网运维体系赋予充实的理论支撑和操作参照。
关键词: 智能化技术; 电力线路; 运行维护; 无人机巡检

引言

电力线路是电网输送和分配电能的物理大动脉, 它是否安全、稳定地运行直接关系到全社会能源供应保障和经济建设的发展。近些年来, 由于电网跨区域互联不断加快, 输配电线路走廊环境愈加繁杂, 很多线路要穿过高海拔山区、原始森林和极端气候区, 地理情况十分艰险, 而且很容易遭遇冰冻、雷击、台风这些自然灾害灾害的袭击^[1]。在此情况下, 传统的“定期检修”和“人工徒步巡检”模式存在着效率低、盲区多、风险大等严重缺陷^[2]。

一、电力线路运维中的关键智能化技术体系

1. 空地协同的无人机与机器人自动巡检技术

无人机(UAV)和巡检机器人深度应用之后, 电力线路物理巡视方式被彻底改变。架空输电线路中搭载高精度差分GPS(RTK)模块的多旋翼无人机已经可以达到厘米级自主导航飞行。利用激光雷达(LiDAR)和多光谱相机, 无人机可以在高速飞行时对线路走廊进行三维点云建模, 准确测量导线弧垂和树线距离, 完全消除人工目测的误差^[3]。对于复杂的杆塔结构无人机可以做精细的“细巡”, 悬停时多角度拍摄绝缘子串、防震锤和销钉的照片。在变电站内部或者地下电缆隧道中, 履带式或者轨道式智能巡检机器人起着不可替代的作用。这些机器人装有红外热成像、局部放电检测和气体浓度检测装置, 可以按照事先设定的路线自由地在高压设备之间穿梭, 对设备接头过热、绝缘介质泄漏等隐蔽性的缺

陷进行实时的检测。空地协同立体化的巡检网络, 可以做到全天候、无死角地对设备进行状态感知, 并且把运维人员从高危、繁重的现场作业中解放出来, 大大提高了巡检的安全性和作业效率^[4]。

2. 泛在物联网与低功耗智能传感网络技术

泛在物联网技术就是实现电力线路状态全面感知的神经末梢。在漫长的输电线上分布着数以万计的智能传感器, 有微气象监测站、导线温度/张力传感器、杆塔倾斜姿态仪、微风振动监测仪等等。这些传感器具有很高的灵敏度和良好的环境适应性, 可以把物理世界中细微的变化转换成连续的数字信号^[5]。为了解决野外无源环境下供电和通信的问题, 现代传感网络广泛地使用了低功耗广域网(LPWAN)、感应取电、太阳能微储能等能量采集技术, 在非常恶劣的环境下可以工作多年甚至几十年, 不需要定期更换电池。采集到的多维状态数据用光纤复合架空地线(OPGW)或者5G无线网络实时回传到云端。边缘计算网关出现之后, 部分数据处理、清洗等工作可以由离数据源最近的节点来完成, 以此来降低主干网络的带宽压力以及传输延迟。该种以端、边、网、云为基础的物联网架构, 把设备的物理实体和数字孪生空间之间的数据桥梁打通了, 给之后的大数据分析和智能决策赋予了高保真的数据来源。

3. 人工智能与机器视觉的缺陷自动识别技术

获取大量的巡检图像和视频数据之后, 怎样有效地、准确地从中提取出设备缺陷, 就成为智能化运维所面对的主要难题。人工智能(AI)和机器视觉技术的革新,

给这个难题找到了一个几乎完美的办法。基于深度卷积神经网络（CNN）的图像识别算法，例如YOLO、Faster R-CNN等，已经被用在了云端服务器以及前端巡检设备上。运维人员用已有上千万张带有标记的线路缺陷图像（绝缘子破损、防震锤下滑、导线断股、鸟巢搭建等）对AI模型做详细的训练，使它具备优于人类专家的特征提取及缺陷判断能力。无人机传回的高清图像立即被送入到AI分析引擎中，在毫秒内就可确定出缺陷在哪儿，判定出是哪一种类型的缺陷，评估出它的严重程度，并且可以输出结构化的巡检报告。同时由于小样本学习、迁移学习技术的发展，使AI算法对罕见缺陷的识别鲁棒性也得到了提高。该种以机器视觉为基础的自动化诊断过程，完全摆脱了人工依靠“看图找茬”来加快巡检数据处理速度的困境，使巡检数据处理的速度和准确度都达到了前所未有的水平。

二、智能化技术的典型应用场景与效能分析

1. 隐患排查与设备状态检修的精准化

智能化技术给隐患排查场景里带来的最大好处就是把隐患排查由原来的计划检修变成现在的状态检修。传统的检修周期是固定的，容易造成“过度检修”造成资源的浪费或者“欠检修”造成隐患的漏掉。引入智能化技术之后，系统依靠物联网传感器所实时传送的设备温度，局部放电，导线张力等诸多数据，并融合AI视觉识别到的微观缺陷，给每一个杆塔以及每一段导线赋予了动态化的“健康档案”。通过对设备劣化趋势进行综合评价，可以准确地找到处于亚健康状态的设备，然后自动触发工单系统，使运维人员有针对性地对设备进行定点

消除。当遇到导线接续管发热这种常见的隐患的时候，固定式红外测温装置加AI温度趋势预测模型，可以提前数周发出预警，运维人员可以据此提前安排带电作业或者计划停电进行修复，把突发性停电事故消灭在萌芽状态之中，达到检修资源最优配置和线路健康度大幅提升的目的。

2. 灾害预警与应急抢修响应的自动化

电力线路常常处在恶劣的自然环境之中，智能化技术在应对气象灾害和突发事件的时候，有着很强的应急能力。在冬季覆冰多发季节，安装在容易发生覆冰的区段上的拉力传感器、微气象站可以实时监测导线等覆冰厚度，当冰载荷接近设计极限的时候，系统会发出自动报警信号，并且可以联动变电站内的直流融冰装置，智能计算出融冰电流和时间，从而达到一键式自动化融冰的效果。对跨越公路、施工区的线路设置边缘计算摄像头可以及时发现吊车、挖掘机等大型机械的违规入侵，当计算出机械臂轨迹接近安全距离时，前端设备立刻发出高音喇叭和声光报警驱离，同时把现场视频推送到运维人员手机上。而当发生断线等极端故障的时候，智能调度系统可以快速地对停电范围和故障录波数据进行综合分析，准确地找到故障点的位置，然后自动规划出抢修队伍的最佳行进路线，从而达到应急抢修的秒级响应和分钟级派单的效果。

3. 传统运维与智能化运维的核心效能指标对比分析

为了更直观地体现智能化技术给电力线路运维带来的革命性变化，本文从巡检效率、隐患发现率、作业成本、人员安全四个方面对传统的手工运维方式和以无人

表1 传统电力线路运维与智能化运维效能对比表

评估维度	传统人工运维模式	智能化运维模式 (无人机+IoT+AI)	效能提升与价值体现
巡检效率	每人每日仅能巡视约3-5基高塔，受制于山地地形与体力消耗，耗时长。	无人机自主巡航每日可完成30-50基杆塔的精细化巡视及通道建模。	效率提升10倍以上，大幅缩短巡视周期，实现线路走廊的高频次、全覆盖扫描。
隐患发现率	依赖肉眼和望远镜，受视线死角和个人经验限制，微小缺陷漏检率较高（约15-20%）。	搭载多光谱雷达，结合云端AI算法自动识别，对细微缺陷与树线距离进行毫米级计算。	缺陷识别准确率可达95%以上，消除人工盲区，实现微小隐患的尽早暴露。
作业成本	需配置大量一线巡线工，且差旅、车辆及后勤保障支出庞大，长期成本居高不下。	减少人工依赖，一次性硬件投资后，边际数据处理成本极低，运维资源高度集约。	综合人力与车辆成本削减约60%，有效缓解电力企业一线人员老龄化与短缺压力。
安全风险	需频繁进行登塔高空作业及跨越恶劣地形，存在跌落、触电、蛇虫咬伤等极高生命风险。	实施“机器人”，人员在地面安全区域遥控操作或系统全自动远程巡航。	彻底规避登高作业风险，人员伤亡事故率趋近于零，大幅提升电网安全生产安全水平。

机、AI、物联网为依托的智能化运维方式进行量化比较。从表1可以看出,智能化运维各项效能指标都比其他技术方案好,对电力资产管理有巨大的作用。

三、智能化运维面临的挑战与未来优化策略

1. 数据孤岛现象与网络安全防范机制的强化

虽然智能化技术在设备层端取得很大成就,但是系统集成、数据融合还存在着严重的“数据孤岛”问题。目前电力企业生产管理系统、无人机巡检系统、物联网监测平台等大多是由不同的供应商开发的,底层数据架构和通信协议互不兼容,造成大量的运行数据分散在各个独立的信息孤岛里,不能够联合起来进行查询和挖掘,极大地削弱了全局智能决策的能力。为了解决上述问题,电力企业要加快数据中台的建设步伐,制定统一的电力物联网数据接入标准和语义模型,使各个不同的数据源之间可以互相连接起来,并且互通有无。与此同时,由于感知节点呈爆发式增长、控制链路网络化,电力线路系统所处的公共网络空间受到的攻击面也变得非常大。任何对传感网络或者边缘网关实施恶意入侵、数据篡改或者DDoS攻击的行为,都会造成错误的检修指令,严重时还会引发电网震荡。因此必须建立端到端的内生安全防御体系,用国密算法对通信数据进行硬件级加密,部署基于零信任架构的身份认证机制,在云端用机器学习对异常网络流量进行实时阻断,保证智能化运维系统数据安全和控制主权绝对可靠。

2. 算法模型的复杂适应性与复合型运维人才的培育

人工智能技术在电力线路运维中表现出的高度依赖于算法模型的泛化能力和鲁棒性。目前大多数视觉识别模型在天气晴朗、光照充足的标准数据集上表现较好,但是当遇到大雾、强逆光、雨雪遮挡等复杂的野外环境时,其缺陷识别率会出现一个急剧下降的“断崖”。另外对于一些发生率极低的罕见缺陷(比如某一型号金具的隐性裂纹),由于没有足够的训练样本,很容易造成模型过拟合或者识别不了的情况。因此,未来算法的改进要向着“小样本学习”和“多模态融合”两个方面发展,用生成对抗网络(GAN)人工制造出极端工况下缺陷的样本库来加强模型的抗干扰性能,并且把视觉数据同红外热力学、激光雷达深度信息融合起来加以研判,从而提高诊断的可信度。人才队伍建设上,智能化转型给传

统的巡线工人的工作带来了严峻的挑战。未来电力运维人员要成为既能掌握电力系统专业知识,又能了解输电电气特性,还能操作无人机、进行数据分析和算法基础逻辑运算的复合型技术工匠。电力企业要创建系统的跨学科培训体系和新型岗位认证标准,加快员工能力模型的更新换代,为电网智能化运维打下坚实的人员基础。

结论

智能化技术深入到电力线路运维领域之后,在应对电网规模扩大和极端天气条件下发挥着越来越重要的作用,同时也是电力系统由原来的数字化、智慧化向更高层次发展的一种重要动力。依靠空地协同无人机巡检、泛在物联网感知、人工智能视觉诊断、大数据状态评价这些技术的系统使用,电力企业冲破了传统人工运维的效率束缚和物理盲区,达成对线路设备全生命周期的精确掌控并开展主动防御。从量化的角度来讲,智能化技术对于隐患排查的精准度、应急处置的速度和运维成本控制等方面有着非常大的优势,从而大大提高现代电网的韧性和安全基线。就目前而言,行业仍然存在着数据壁垒、网络安全以及算法泛化能力等种种问题,需要不断推进标准化数据中台的创建,构筑起内生的安全防线,并且要加大跨学科人才的培养力度。随着数字孪生、低轨卫星通信、通用人工智能大模型的发展,电力线路运维将向着全息感知、自主决策、无人干预的“自愈型”智慧网络迅速前进,给全球能源安全稳定的供应提供更加有力的技术支持。

参考文献

- [1] 计洋. 智能化技术在配电运维中的应用与发展趋势[J]. 数字化用户, 2025(45).
- [2] 张金城. 智能化技术在变电运维中的应用分析[J]. 数字化用户, 2025(2).
- [3] 苏同辰. 智能化技术在电网运维管理中的应用[J]. 中国管理信息化, 2025, 28(18): 163-165.
- [4] 谢潇磊, 秦雪, 顾晨杰, 等. 数字智能化技术在变电运维技术中的应用[J]. 电工技术, 2024(S2): 181-183.
- [5] 彭鑫. 智能化技术在变电运维技术中的应用分析[J]. 新潮电子, 2025(19): 19-21.