

电力工程技术中输配电线路智能化监测与故障诊断方法

何叶平

342601*****5614

摘要: 随着全球能源转型与电网规模的持续扩大,传统输配电线路的运维模式面临巨大挑战。人工巡检效率低、响应慢,难以满足高可靠性与高供电质量的要求。以物联网、人工智能、大数据、无人机及先进传感技术为核心的智能化监测与故障诊断方法,正成为现代电力系统发展的关键方向。本文系统阐述了输配电线路智能化监测体系的核心架构,详细分析了分布式光纤传感、无人机视觉巡检、图像识别、高频行波监测、暂态特征分析等关键技术的原理与应用现状,并深入探讨了基于深度学习与大数据分析的智能故障诊断模型。研究表明,智能化技术能够实现对线路运行状态的实时感知、隐患的早期预警与故障的精准定位,显著提升电网运维的自动化、精准化与智能化水平,是构建坚强智能电网的重要支撑。

关键词: 输配电线路;智能化监测;故障诊断;人工智能;物联网;状态检修

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.004

引言

电力作为现代社会的基础能源,其安全、稳定、高效供应对国家经济发展与社会稳定至关重要。输配电线路作为电能传输的“动脉”,覆盖地域广、运行环境复杂,长期暴露于自然环境中,易受雷击、风雨、覆冰、外力破坏及设备老化等因素影响,导致故障频发。传统的线路运维主要依赖定期人工巡检与计划性检修,存在劳动强度大、巡检盲区多、故障发现滞后、诊断依赖经验等固有缺陷。尤其在极端天气或特殊地理环境下,人员难以及时抵达现场,可能导致故障范围扩大,甚至引发连锁停电事故。

近年来,以“大云物移智链”为代表的新一代信息技术与电力系统深度融合,推动电网向智能化方向加速演进。构建覆盖全线路、全状态的智能感知网络,实现对线路运行参数、气象环境、机械状态、电气特征的实时采集与综合分析,并利用智能算法对潜在风险进行预警、对已发生故障进行快速诊断与定位,已成为电力行业的研究热点与实践共识。发展智能化监测与故障诊断技术,不仅是提升线路运维效率、降低停电损失的技术手段,更是实现状态检修、优化资产管理、保障电网安全经济运行的战略需求。本文旨在系统梳理当前输配电线路智能化监测与故障诊断的主要技术方法,分析其原理、优势与挑战,以期对相关领域的研究与工程实践提供参考。

1 智能化监测体系的总体架构

现代输配电线路的智能化监测是一个多层次、多技术融合的系统工程。其典型架构通常包括“感知层、网络层、平台层、应用层”四个层次。

感知层是系统的“神经末梢”,由部署在线路设备、杆塔及通道环境中的各类智能传感器构成。这些传感器按功能可分为:(1)电气量传感器,如智能电子设备(IED)、故障指示器,用于监测电压、电流、功率、谐波等;(2)机械状态传感器,如张力传感器、倾角传感器、振动传感器,用于监测导线弧垂、杆塔倾斜、金具松动等;(3)环境参数传感器,如气象站(温湿度、风速、风向)、覆冰监测装置、图像/视频监控设备;(4)特殊监测装置,如分布式光纤测温/应变传感(DTS/DAS)、局部放电(PD)传感器、雷电定位系统等。感知层的目标是实现全方位、高密度、高精度的数据采集。

网络层是系统的“信息高速公路”,负责将感知层采集的海量、异构数据安全、可靠、低延时地传输至数据中心。通信方式根据现场条件灵活选择,包括电力线载波(PLC)、无线公网(4G/5G)、无线专网(LTE、微功率无线)、光纤通信(OPGW/ADSS)以及卫星通信等。在偏远或信号薄弱地区,常采用多模融合通信与边缘计算节点(MEC)相结合的方式,对数据进行本地预处理与压缩,以降低传输带宽需求和云中心处理压力。

平台层是系统的“智慧大脑”,通常基于云计算或边缘计算构建,具备强大的数据存储、管理与处理能力。

它集成大数据平台、物联网平台和人工智能平台，负责对汇聚的时序数据、图像视频、文本记录等进行清洗、关联、融合与标准化，形成统一的状态数据模型。该层为上层应用提供数据服务、算法模型服务与计算资源服务^[1]。

应用层面向具体的业务需求，基于平台层提供的数据与算法服务，开发各类智能化应用。核心应用包括：实时状态全景展示、风险预警（如覆冰预警、舞动预警、树障预警）、故障诊断与定位（短路、接地、断线等）、智能巡检管理、设备健康状态评估与寿命预测、辅助决策支持等。应用层通过可视化大屏、移动 APP、Web 端等方式，为运维管理人员提供直观、高效的交互界面。

2 关键智能化监测技术

分布式光纤传感技术：该技术利用铺设于输电线路地线（OPGW 或普通光缆）或依附于导线/杆塔的通信光纤作为传感介质，通过分析光在光纤中传输时产生的背向散射光（如拉曼散射、布里渊散射）特性，可实现沿线温度、应变、振动等物理量的连续、分布式测量。其实时监测导线温度可评估载流量（动态增容），监测应变可分析覆冰厚度、大风舞动；通过识别振动信号特征，还能有效预警外破施工（如挖掘机、打桩机）、山火等通道隐患。该技术监测距离长、无需供电、抗电磁干扰，尤其适用于长距离、大跨距的重要线路。

无人机与机器人巡检技术：无人机（固定翼、多旋翼）搭载可见光、红外热成像、紫外放电检测及激光雷达（LiDAR）等载荷，实现了对线路杆塔、导线、绝缘子、金具等设备的高空、近距离、多角度精细化巡检。可见光巡检通过高清图像识别绝缘子自爆、金具锈蚀、鸟巢等缺陷；红外热成像可发现导线接头过热、绝缘子劣化等发热性故障；紫外成像可检测电晕放电；机载 LiDAR 可精确获取线路通道的三维点云数据，用于树障分析、交叉跨越距离测量及数字孪生建模。此外，巡检机器人（如沿地线行走的行走机器人、爬塔机器人）可在恶劣天气或特殊区段进行定点、持续监测，作为无人机的有效补充。

图像识别与计算机视觉技术：该技术是处理无人机、固定摄像头等采集的海量视觉数据的关键。基于深度学习的卷积神经网络（CNN）等模型，经过大量标注图像数据的训练，能够自动、准确地识别线路部件及其缺陷。例如，识别绝缘子串的缺失、破损，识别防震锤的滑移、

脱落，识别导地线的断股、异物悬挂，识别通道内的违章建筑、高大树木等。该技术大幅提升了图像分析的自动化水平与识别准确率，减少了人工判读的工作量和主观误差^[2]。

高频行波与暂态录波监测技术：当线路发生故障时，会产生向线路两端传播的高频暂态行波信号。通过在线路两端或关键节点安装行波测距装置，捕捉故障产生的初始行波波头，利用双端或单端测距算法，可实现故障的精准定位（误差通常在百米以内）。此外，故障录波装置记录的故障前后电压电流的暂态波形，蕴含丰富的故障类型（单相接地、两相短路等）、故障位置及故障原因信息。结合人工智能算法对暂态波形特征进行深度挖掘，可提升故障诊断的准确性和鲁棒性。

多源信息融合技术：单一监测技术往往存在局限性。智能化监测强调将上述电气量、机械量、环境量、视觉信息等多源异构数据进行时空关联与深度融合。例如，将气象预报数据、现场微气象数据与线路历史荷载数据结合，可更精准预测覆冰风险；将雷击定位信息、故障录波信息与线路绝缘配置信息结合，可更准确判断是否为雷击故障及其影响程度。信息融合技术通过数据互补，能够形成对线路状态更全面、更可靠的认知。

3 智能化故障诊断方法

故障诊断是智能化监测的终极目标之一，旨在故障发生后快速确定故障性质、位置和原因。传统方法主要依赖保护装置动作信号和人工经验，智能化方法则基于数据驱动模型。

基于大数据分析的故障预警：通过对历史运行数据（包括正常与故障数据）、环境数据、运维记录等进行关联分析，利用机器学习算法（如支持向量机 SVM、随机森林 RF）建立线路或设备的状态评估与风险预测模型。该模型能够识别导致故障的潜在因素组合，在故障发生前发出早期预警，例如预测某段线路在特定气象条件下发生接地故障的概率，从而实现从“事后处理”到“事前预防”的转变。

基于深度学习的故障分类与定位：

故障类型识别：将故障录波装置采集的电压、电流波形数据作为输入，利用一维 CNN、长短时记忆网络（LSTM）或其组合（如 CNN-LSTM）等深度学习模型，自动提取波形中的深层特征，实现对不同故障类型（如单相接地、两相短路、断线等）的高精度、快速分类^[3]。

故障精确定位：除了行波法，基于深度学习的方法也展现出潜力。例如，将故障前后的电压电流数据、线路参数、拓扑结构等信息输入到深度神经网络（DNN）或图神经网络（GNN）中，模型可直接输出故障距离的估计值。这种方法能够在一定程度上克服传统阻抗法受线路参数不确定、过渡电阻影响大的缺点。

故障原因推断：结合故障特征（波形、位置）、实时环境数据（雷击、风速、降雨）、历史缺陷记录等多维度信息，构建知识图谱或采用贝叶斯网络等推理模型，可以辅助推断故障最可能的原因（如雷击、风偏、树竹碰线、外力破坏等），为故障修复和后续防范提供决策依据。

数字孪生驱动的故障诊断与模拟：数字孪生是通过物理模型、传感器更新、运行历史等数据，在虚拟空间中构建的与物理线路完全映射的数字化模型。在故障诊断中，数字孪生体可以实时同步物理线路的状态。当故障发生时，既可在孪生体中进行故障过程的回溯与模拟，分析故障发展机理；也可将疑似故障信息注入孪生体进行仿真推演，将仿真结果与实际数据对比，从而验证诊断结论。数字孪生为故障诊断提供了一个可计算、可模拟、可验证的强大工具。

4 面临的挑战与发展趋势

尽管智能化监测与故障诊断技术取得了显著进展，但在实际应用中仍面临诸多挑战：（1）成本与规模化问题：全面部署高密度传感器和通信网络初期投资巨大，如何平衡成本与效益，实现经济高效的规模化应用是关键。（2）数据质量与融合难题：多源数据存在格式不一、采样频率不同、存在噪声与缺失值等问题，高质量的数据融合与治理体系尚需完善^[4]。（3）算法泛化能力：基于数据驱动的AI模型在特定场景下表现优异，但面对未见过的新故障类型、新环境或不同电压等级线路时，其泛化能力和可靠性有待提升，需要大量高质量标注数据进行持续训练。（4）网络安全风险：高度网络化的监测系统面临数据窃取、恶意攻击等网络安全威胁，需建立纵深防御体系。（5）标准与规范缺失：相关技术、设备、数据接口、评估方法等方面的标准尚不统一，制约了系统的互联互通和产业健康发展。

未来发展趋势将聚焦于：（1）边缘智能与云边协

同：将更多的计算与分析能力下沉到边缘侧，实现本地快速响应与数据预处理，云端进行模型训练与复杂分析，形成高效协同。（2）轻量化与低成本传感：研发功耗更低、体积更小、成本更优的新型传感器和自供能技术，降低部署门槛。（3）AI模型可解释性与物理信息融合：发展可解释人工智能（XAI），使诊断决策过程透明可信；将物理定律（如电磁暂态方程）与数据驱动模型结合，构建物理信息神经网络（PINN），提升模型的物理一致性与泛化能力。（4）全景状态感知与数字孪生深化：向“空-天-地”一体化立体监测网络发展，并深化数字孪生模型的应用，实现从监测诊断到预测、优化、决策的全生命周期智能管理。（5）标准体系构建与生态建设：加快相关技术标准的制定，推动产学研用协同，构建开放合作的产业生态。

5 结语

输配电线路的智能化监测与故障诊断是电力系统迈向智能化的核心环节，是保障电网安全、可靠、高效运行的必然选择。通过构建融合先进传感、物联网通信、大数据与人工智能的智能化体系，能够实现对线路运行状态的实时全景感知、隐患的智能预警和故障的快速精准诊断，从根本上变革了传统的运维模式，显著提升了运维效率和经济性。当前，相关技术已从理论研究走向规模应用，并在实践中不断成熟与完善。尽管在成本、数据、算法、安全等方面仍存在挑战，但随着技术的持续突破、标准的逐步建立以及商业模式的创新，智能化监测与故障诊断技术的深度和广度将不断拓展。

参考文献

- [1] 谢礼. 智能电网运维技术在电力工程输电线路故障检测中的应用[J]. 电气技术与经济, 2025, (10): 121-123.
- [2] 孙洁莹. 电力工程技术中输配电线路智能化监测与故障诊断方法[J]. 信息与电脑, 2025, 37(16): 37-39.
- [3] 陈宗来. 电力工程中的输配电线路安全运行及其检修维护探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (20): 1-3.
- [4] 吕人凤. 输配电线路带电作业技术的研究与发展[J]. 科学技术创新, 2019, (27): 186-187.