

地下电缆线路故障检测与智能运维技术探讨

徐金奎

南水北调中线信息科技有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i10.5047

[摘要] 随着城市化进程加速和电网智能化水平提升,地下电缆因其占地少、环境友好、抗干扰能力强等优势,在现代配电网中应用日益广泛。然而,地下电缆一旦发生故障,其隐蔽性强、定位困难、修复周期长,严重影响供电可靠性与社会运行效率。传统的故障检测与运维方式已难以满足高可靠、高效率、低成本运维需求。本文系统梳理了地下电缆常见故障类型及其成因,分析了现有故障检测方法(如行波法、阻抗法、频域反射法等)的技术原理与局限性;重点探讨了基于物联网、大数据、人工智能及数字孪生等新一代信息技术驱动下的智能运维体系构建路径。并提出若干建议,以期构建安全、高效、智能的城市地下电力网络提供理论支撑与实践指导。

[关键词] 地下电缆; 故障检测; 智能运维; 行波法; 人工智能; 数字孪生; 状态监测

中图分类号: TM726 **文献标识码:** A

Research on Fault Detection and Intelligent Operation and Maintenance Technology of Underground Cable Lines

Jinlei Xu

Information Technology Co., Ltd. of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project

[Abstract] With the acceleration of urbanization and the continuous improvement of smart grid development, underground cables are increasingly widely used in modern distribution networks due to their advantages such as small land occupation, environmental friendliness, and strong anti-interference capability. However, once faults occur in underground cables, they are characterized by strong concealment, difficult localization, and long repair cycles, which seriously affect power supply reliability and social operation efficiency. Traditional fault detection and operation and maintenance methods can no longer meet the requirements of high reliability, high efficiency, and low-cost maintenance. This paper systematically reviews the common types of underground cable faults and their causes, and analyzes the technical principles and limitations of existing fault detection methods such as traveling wave methods, impedance methods, and frequency-domain reflectometry. It further focuses on the construction pathways of intelligent operation and maintenance systems driven by next-generation information technologies, including the Internet of Things (IoT), big data, artificial intelligence (AI), and digital twin technology. Several suggestions are proposed to provide theoretical support and practical guidance for building a safe, efficient, and intelligent urban underground power network.

[Key words] Underground Cable; Fault Detection; Intelligent Operation and Maintenance; Traveling Wave Method; Artificial Intelligence; Digital Twin; Condition Monitoring.

引言

近年来,我国城市配电网建设持续推进“架空线入地”工程,地下电缆敷设比例显著提高。地下电缆虽具备美观、安全、抗风灾等优点,但其运行环境复杂(如土壤腐蚀、机械应力、热老化等),且一旦发生故障,难以直观发现,排查耗时长、成本高,极易引发大面积停电事故。传统运维模式依赖定期巡检与事后抢修,存在“被动响应、信息滞后、资源浪费”等问题。随着“双

碳”目标推进与新型电力系统建设,电网对供电连续性、设备健康状态感知能力及运维智能化水平提出了更高要求。在此背景下,融合传感技术、通信网络、数据分析与智能算法的“智能运维”体系成为解决地下电缆运维难题的关键路径。

1 地下电缆常见故障类型及成因分析

1.1 故障类型分类

地下电缆故障按性质可分为:(1)绝缘击穿故障:包括单相

接地、相间短路、三相短路等,是最常见的故障类型,通常由绝缘老化或外力损伤引起。(2)断线故障:导体断裂导致开路,多由施工破坏、热胀冷缩或长期过载引起。(3)局部放电:绝缘内部存在气隙或杂质,在电场作用下产生微小放电,是绝缘劣化的早期征兆^[1]。(4)水树/电树老化:水分渗透形成树枝状通道(水树),在电场作用下发展为电树,最终导致击穿。(5)接头与终端故障:电缆附件(如中间接头、终端头)因密封不良、安装工艺缺陷或材料老化而失效。

1.2 主要成因

一是外部机械损伤:市政施工、打桩、挖掘等外力破坏是导致电缆故障的首要原因,占比超60%。二是绝缘老化:长期运行导致聚合物绝缘材料性能退化,尤其在高温、高湿、高电场环境下加速老化。三是制造与安装缺陷:电缆本体或附件存在气泡、杂质、屏蔽层不连续等缺陷。四是环境因素:土壤腐蚀、地下水侵蚀、鼠蚁啃咬等生物或化学作用。五是过电压与过载:雷击、操作过电压或长期超负荷运行引发过电压集中。

2 传统故障检测方法及其局限性

2.1 阻抗法

阻抗法是一种基于线路参数变化进行故障测距的经典方法,其基本原理是利用故障点前后线路阻抗的突变来推算故障距离。该方法在低阻接地或短路故障场景下具有一定实用性,计算过程相对简单,对硬件要求较低。然而,其局限性也十分明显:一方面,当故障电阻较高时(如数百欧姆以上),阻抗变化微弱,难以被准确捕捉;另一方面,实际电缆线路存在分布电容、互感及非均匀参数等复杂特性,使得理论模型与实际情况偏差较大,导致测距精度显著下降。此外,该方法对系统运行方式敏感,在多电源或环网结构中误差进一步放大,难以满足现代高精度定位需求。

2.2 行波法

行波法凭借其高精度与强适应性,已成为当前地下电缆故障定位的主流技术。该方法利用故障瞬间产生的高频暂态行波沿线路传播的特性,通过在电缆两端同步采集行波到达时间,结合波速计算故障点位置。其优势在于不受故障电阻大小影响,理论上可实现米级定位精度,尤其适用于高阻故障的检测^[2]。然而,行波信号在长距离传输中衰减迅速,高频成分易被电缆分布参数滤除,导致远端信号信噪比极低;同时,行波在T接、分支或多回平行线路中会发生多次折射与反射,波形叠加复杂,给波头识别带来巨大挑战。此外,该方法依赖高采样率(通常需1MHz以上)的数据采集系统与高精度时间同步装置,设备成本与部署难度较高,限制了其在配电网中的大规模应用。

2.3 低压脉冲反射法

低压脉冲反射法(TDR)通过向电缆注入一个窄脉冲信号,并检测其在阻抗不连续点(如断点、短路点)产生的反射波,根据往返时间确定故障位置。该方法操作简便、成本低廉,特别适用于断线或低阻短路故障的快速排查。然而,其探测能力受限于脉冲能量与频率带宽,无法有效激发高阻故障点的反射信号,因而对

绝缘劣化类故障几乎无能为力。此外,电缆接头、弯曲或终端负载等正常结构也可能产生反射,易造成误判,需依赖经验丰富的技术人员进行波形解读,自动化程度较低。

2.4 频域反射法

频域反射法(FDR)通过向电缆施加扫频正弦信号,测量不同频率下的反射系数,进而反演出沿线阻抗分布。相比时域方法,FDR对微小缺陷更为敏感,能够识别局部绝缘薄弱区域。但由于其依赖复杂的频谱分析与逆问题求解,计算量大、实时性差,难以用于在线监测。同时,土壤介电常数变化、邻近线路耦合等因素会干扰测量结果,降低定位可靠性。因此,FDR更多用于实验室或离线诊断场景,尚未在工程现场广泛应用。

2.5 局部放电检测

局部放电检测是评估电缆绝缘健康状态的重要手段。通过高频电流互感器(HFCT)、超声波传感器或超高频(UHF)天线捕捉放电信号,可实现对绝缘内部缺陷的早期预警。然而,PD信号幅值微弱(通常为毫伏级),极易被开关操作、无线通信等电磁噪声淹没;且不同类型放电(如内部放电、表面放电、电晕放电)的波形特征相近,判别难度大。目前仍高度依赖专家经验进行模式识别,缺乏统一的量化评估标准,难以实现全自动诊断。尽管如此,随着信号处理与人工智能技术的发展,PD检测正逐步从“定性判断”迈向“定量评估”,成为智能运维体系中的关键感知环节。

3 智能运维体系架构与关键技术

3.1 体系架构

为突破传统运维模式的瓶颈,亟需构建一个覆盖“感知—传输—分析—决策—执行”全链条的智能运维体系。该体系以分布式传感网络为基础,在电缆本体、接头、隧道等关键位置部署温度、振动、接地电流、局部放电及光纤测温(DTS/DAS)等多类型传感器,实现对运行状态与环境参数的全方位、高密度采集。采集到的数据通过5G、NB-IoT或电力载波等通信技术汇聚至边缘节点或云端平台,形成低延时、高可靠的传输通道。在平台层,依托云边协同架构构建数据中台,完成数据清洗、标准化、存储与融合,为上层应用提供高质量数据服务^[3]。应用层则集成故障诊断、风险预警、寿命预测、检修优化等智能算法模块,支持可视化展示与辅助决策。最终,系统可通过调度巡检机器人、无人机或AR远程协作终端,实现从“发现问题”到“解决问题”的闭环管理,推动运维模式由“被动抢修”向“主动预防”转变。

3.2 关键技术

3.2.1 多源异构数据融合

地下电缆的状态信息来源于多种异构传感器,其数据格式、采样频率、时空分辨率各不相同,直接使用易导致信息冗余或冲突。为此,需采用先进的数据融合技术,将来自光纤测温、红外成像、负荷电流、环境温湿度等多源数据进行时空对齐与特征级融合。例如,通过卡尔曼滤波动态校正温度测量偏差,或利用深度自编码器提取高维时序数据的潜在表征,再结合D-S证据理论对不同证据源进行置信度加权,从而生成更鲁棒、更全面的电

缆健康状态画像。这种融合不仅提升了单一传感器的可靠性,还能揭示变量间的隐性关联,为后续智能分析奠定基础。

3.2.2 基于深度学习的故障智能诊断

传统阈值报警机制难以应对复杂工况下的非线性故障特征。深度学习技术凭借其强大的特征自动提取与模式识别能力,为故障诊断提供了新范式。一维卷积神经网络(CNN)可直接处理原始行波或局部放电信号,自动学习故障波形的时频特征,实现高精度分类;长短期记忆网络(LSTM)则擅长建模电缆温度随负荷、环境变化的动态演化规律,可用于热点预测与异常检测;对于具有拓扑结构的电缆网络,图神经网络(GNN)能够模拟行波在分支节点的传播路径,显著提升复杂接线方式下的定位准确性。这些模型在大量历史数据训练下,可逐步替代人工判读,实现诊断过程的自动化与智能化。

3.2.3 数字孪生驱动的状态可视化

数字孪生技术通过构建电缆物理实体的高保真虚拟映射,将设计参数、实时监测数据、历史检修记录、地理信息等多维信息集成于统一平台。运维人员可在三维可视化界面中直观查看电缆全线温度分布、局部放电活跃度、接头老化指数等关键指标,并叠加风险热力图进行态势研判。更重要的是,数字孪生支持“假设分析”功能,例如模拟某段电缆在极端负荷下的温升情况,或评估不同检修方案对系统可靠性的影响,从而为科学决策提供量化依据。这种“虚实互动”模式极大提升了运维的透明度与前瞻性。

3.2.4 预测性维护

预测性维护是智能运维的核心目标之一。它摒弃了固定周期检修的粗放模式,转而基于设备实际退化状态动态制定维护策略。通过建立电缆绝缘老化模型(如Arrhenius方程、Wiener随机过程),结合实时监测数据,可估算剩余使用寿命(RUL)并计算健康指数(HI)。当HI低于预设阈值时,系统自动触发预警,并推荐最优检修窗口^[4]。例如,对临近寿命终点的中间接头提前安排更换,或在台风季前对低洼易涝区段加强防水措施。这种“按需维护”不仅延长了设备可用时间,也显著降低了不必要的检修成本。

3.2.5 边缘智能与轻量化部署

面对海量监测数据带来的传输与计算压力,边缘智能成为不可或缺的补充。通过在变电站或隧道入口部署边缘计算节点,运行轻量化的AI模型(如MobileNet、TinyML),可在本地完成初步异常检测与事件过滤,仅将关键告警或摘要数据上传至云端。

这不仅减轻了中心平台的负载,也大幅降低了通信带宽需求与响应延迟,特别适用于5G覆盖不足或对实时性要求极高的场景。未来,随着芯片算力提升与模型压缩技术进步,边缘智能将在地下电缆运维中扮演更加重要的角色。

4 面临的挑战与对策

尽管智能运维技术展现出广阔前景,其规模化落地仍面临多重挑战。首先,地下环境高温、高湿、强电磁干扰,对传感器的长期可靠性与寿命构成严峻考验。对此,应加快研发耐腐蚀、自供能(如压电、热电)的新型传感材料与封装工艺。其次,海量敏感数据的采集、传输与存储存在泄露与篡改风险,需引入端到端加密、区块链存证及联邦学习等隐私计算技术,在保障数据安全的同时促进跨部门协同。再次,当前各厂商设备协议不统一,系统集成困难,亟需推动IEC、IEEE等国际标准的制定,建立开放、兼容的接口规范。此外,深度学习模型的“黑箱”特性削弱了运维人员的信任度,应结合SHAP、LIME等可解释AI工具,增强决策过程的透明性与可追溯性。最后,智能运维系统初期投资较大,回报周期较长,建议采用“试点先行、分步推广”策略,并探索与保险、碳交易等机制联动的创新商业模式,提升经济可行性。

5 结语

地下电缆作为城市能源动脉,其安全稳定运行关乎国计民生。面对日益复杂的运行环境与更高的可靠性要求,传统运维模式已难以为继。以物联网、大数据、人工智能为核心的智能运维技术,通过构建“全面感知、智能诊断、精准预测、主动干预”的新型运维范式,正成为提升地下电缆管理水平的关键支撑。未来,需进一步加强跨学科融合,突破核心传感与算法瓶颈,完善标准与生态体系,推动智能运维从“试点示范”走向“规模化应用”。唯有如此,方能构建起韧性、绿色、智慧的城市地下电力网络,为新型电力系统与智慧城市发展奠定坚实基础。

[参考文献]

- [1]赵宏大,张凤佳,朱铭霞,等.基于人机交互的地下电力电缆线路故障排查方法研究[J].自动化技术与应用,2022,41(03):44-47.
- [2]李思尧,董章.基于数字化智能终端平台的地下电缆线路关键位置提取技术研究[J].微型电脑应用,2022,38(10):65-67+89.
- [3]付佳佳,李玉洁,刘彩霞.城市电网地下电力电缆典型故障定位方法分析与展望[J].电工技术,2025,(15):83-86.
- [4]杨伟杰,周志军,刘继承.地下电缆防破坏智能预警技术[J].河南电力,2025,(S1):30-33+49.