

电缆安全监测技术研究进展

巫彬瑞, 侯兆天

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月25日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月10日

摘要

随着电力系统规模的扩大, 电缆安全监测技术的研究与应用日益重要。传统人工巡检方式存在效率低、实时性差等问题, 而现代监测技术通过多物理量感知与数据分析实现了电缆状态的实时预警。本文系统综述了当前主流的电缆安全监测方法, 包括高频电流监测、红外热像监测、分布式光纤传感技术等, 详细阐述其理论依据、技术特点及适用场景, 并对比分析其优缺点。最后展望了与5G通信、人工智能等技术融合的未来发展方向, 为电缆监测技术的优化选择提供理论参考。

关键词

电缆安全监测, 高频电流监测, 分布式光纤传感, 红外热像, 故障定位

Research Progress on Cable Safety Monitoring Technology

Binrui Wu, Zhaotian Hou

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 25th, 2025; accepted: Jun. 2nd, 2025; published: Jun. 10th, 2025

Abstract

With the expansion of the scale of power systems, the research and application of cable safety monitoring technology are becoming more and more important. The traditional manual inspection method has problems such as low efficiency and poor real-time performance, while modern monitoring technology realizes real-time early warning of cable status through multi-physical quantity perception and data analysis. This paper systematically reviews the current mainstream cable safety monitoring methods, including high-frequency current monitoring, infrared thermal image monitoring, distributed optical fiber sensing technology, etc., expounds its theoretical basis, technical characteristics and application scenarios in detail, and compares and analyzes its advantages

and disadvantages. Finally, the future development direction of the integration with 5G communication, artificial intelligence and other technologies is prospected, which provides a theoretical reference for the optimal selection of cable monitoring technology.

Keywords

Cable Safety Monitoring, High-Frequency Current Monitoring, Distributed Optical Fiber Sensing, Infrared Thermal Image, Fault Location

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力系统作为现代社会的重要基础设施,其安全性与可靠性直接影响国民经济与社会稳定。然而随着电网覆盖范围的扩展,复杂多变的气候以及多变的地理地形使得电缆长期暴露于强风、雷击、雨雪等极端自然环境中,易引发以下问题[1],温度异常:电缆过载或接触不良导致局部温度升高,加速绝缘层老化;机械形变:强风或冰雪堆积导致电缆弯曲、拉伸,甚至断裂;绝缘破损:雷击或外力破坏造成绝缘层损伤,引发放电故障。

传统的电缆监测方法主要依赖人工巡检和局部传感器监测,存在以下局限性[2],实时性不足:人工巡检周期长,难以及时发现突发性故障;覆盖范围有限:局部传感器仅能监测特定点位,无法实现全线路覆盖;抗干扰能力差:电磁干扰易导致传感器信号失真,影响监测精度。

系统梳理电缆安全监测技术的研究进展,有助于厘清不同方法的适用边界,推动技术选型与优化。此外,通过对比分析技术瓶颈与改进方向,可为未来技术融合与标准化提供理论支撑。

2. 电缆安全检测技术

2.1. 电缆安全监测的方法及理论依据

2.1.1. 局部放电监测

基于高频电流传感器(HFCT)和超高频(UHF)电磁波检测技术,结合双层磁芯结构(铁基纳米晶材料,磁导率 $> 50,000$)和介质谐振器天线(中心频率 2.4 GHz),捕获电缆绝缘缺陷产生的脉冲信号。新型数字式监测装置采用 12 位 ADC 和 200 MS/s 采样率,实现全波形捕获[1]。其中,高频电流监测利用高频电流传感器(HFCT)捕获电缆局部放电产生的脉冲电流信号,通过电磁感应原理将电流信号转换为电压信号,分析脉冲特征以判断绝缘缺陷。

优点: 1、灵敏度高,可检测微小的绝缘缺陷(如气隙、杂质)。2、高频电流法技术成熟,适用于多种电压等级。3、综合监测法结合多原理(如超声、特高频),提升可靠性。

缺点: 1、信号易受环境电磁干扰,需要复杂算法去噪。2、超高频传感器安装位置受限,仅适用于特定接头结构。3、设备成本高,数据分析依赖专业人员[3]。

技术突破: 环境耐受性与 EMC 抗干扰能力提升: IEEE 1613 要求设备在高温(-40°C 至 70°C)、高湿(5%~95%无凝露)、强电磁干扰(如浪涌、静电放电、射频干扰)等极端条件下稳定运行。这推动了 PD 监测设备的硬件革新,例如: 1、传感器与连接器优化: 采用锁定式 IEC 连接器(如 C13/C19),防止因振动或意外断开导致信号丢失,增强物理耐久性; 2、抗干扰设计: 通过浪涌耐受测试(IEEE C37.90.1)和电磁辐

射抗扰度测试(IEEE C37.90.2), 确保 PD 信号在高电磁噪声环境中仍能被精确捕获。数据完整性与可靠性保障: 标准要求通信设备支持错误校正机制(如 ECC 内存), 这对 PD 监测数据的传输至关重要。例如: 1、高频信号处理: PD 检测需采集幅值、相位、频次等多维度参数, 并通过趋势图、二维/三维谱图进行叠加对比。IEEE 1613 认证的设备能够避免数据因环境干扰而失真, 确保放电特征的准确分析; 2、冗余通信架构: 符合该标准的以太网交换机支持冗余环网(如 MOXA Turbo Ring 技术), 恢复时间低于 20 ms, 保障 PD 监测数据的连续传输。与智能电网标准的协同性: IEEE 1613 与 IEC 61850-3 的协同认证, 推动了 PD 监测设备的智能化集成。例如: 1、在线监测兼容性: 设备需在正常电压下进行非破坏性 PD 检测, 符合 IEC 61850-3 的通信协议要求, 支持实时数据传输至站控层系统; 2、预测性维护支持: 通过长期监测 PD 活动(如电晕、表面放电), 结合 IEEE 1613 设备的可靠性数据, 可预测电缆绝缘劣化趋势, 优化维修策略。标准化测试框架的创新: 相较于传统电力设备标准, IEEE 1613 的突破在于: 高度集成化测试: 涵盖环境(温度、湿度)、EMC(浪涌、静电放电)及机械耐久性测试, 形成统一的评估体系, 以及与 IEC 标准的对齐, 通过协调测试方法(如 IEC 60068-2 系列), 降低全球市场准入复杂度, 促进 PD 监测技术的国际化应用[4]。

工程标准: 1、传感器间距: 35 kV 电缆 ≤ 50 m, 220 kV 电缆 ≤ 30 m。2、数据存储: 原始波形保留 3 年, 特征值永久存档[4]。

适用环境: 1、高压 XLPE 电缆主绝缘在线监测, 尤其 35 kV 及以上等级。2、电缆接头、终端等局部放电高发区域。

应用案例: 1、MOXA PowerTrans 交换机: 通过 KEMA 认证, 符合 IEEE 1613 和 IEC 61850-3, 在非洲变电站中实现 PD 监测数据的高可靠性传输。2、Lanner LEC-6041 网关: 集成 PD 监测功能, 通过宽温操作(-40°C 至 70°C)和 15 kV ESD 防护, 适用于恶劣环境的电缆状态分析。

2.1.2. 红外热像监测

利用红外热像仪捕捉电缆表面温度分布, 通过热图像分析识别过热点(如接头接触不良、绝缘老化导致的异常升温)。此方法为非接触式检测, 能快速定位故障, 支持大范围巡检, 适用于复杂环境。但仅能检测表面温度, 无法发现内部缺陷, 且受环境温度、风速等因素影响, 常用于电缆接头、终端设备等易发热部位, 尤其适用于隧道、沟槽等密闭空间[5]。

优点: 1、非接触式测量, 安全快捷, 适合带电检测; 2、图像直观, 可快速定位过热点; 适用于周期性巡检, 成本低于连续在线监测。

缺点: 1、受环境温度、风速影响大, 测量误差可达 $\pm 2^{\circ}\text{C}$; 2、无法穿透绝缘层检测内部缺陷; 3、仅反映表面温度, 无法评估深层绝缘状态。

技术升级: 一、硬件升级与功能强化: 高精度传感器与成像技术, 装置采用非制冷焦平面探测器, 分辨率达 640×480 像素以上, 温度灵敏度 $\leq 0.08^{\circ}\text{C}$, 测温范围覆盖 -20°C 至 $+600^{\circ}\text{C}$, 支持复杂环境下的精准测温。红外热像仪集成独立采集通道, 确保连续实时采样, 避免分时复用导致的信号延迟。抗干扰与环境适应性, 通过 IP67 防护等级设计, 满足 -25°C 至 $+55^{\circ}\text{C}$ 极端温度、93%湿度环境下的稳定运行, 并通过 GB/T 17626 系列电磁兼容性测试, 确保复杂电磁环境下的数据可靠性。二、软件算法优化与智能分析: AI 识别与缺陷诊断, 采用 Faster RCNN 网络实现电缆附件过热区域的自动定位, 结合 Mean-Shift 算法提取温度异常区域, 并通过卷积神经网络(CNN)实现 98.6%的温度识别准确率, 显著减少人工依赖。动态阈值与多源数据融合, 支持“温度区域高温设定”和“温差设定”双模式报警阈值, 结合局部放电、接地电流等多参数综合分析, 提升故障预警的精准性。通过红外与可见光图像融合技术, 增强复杂场景下的目标检测能力。

适用环境: 1、户外电缆接头、终端等裸露部位的定期巡检; 2、无法安装固定传感器的临时监测场

景。

应用案例：实时监测与预警效率，装置以 5 分钟/次的频率记录数据，存储周期达 3 个月，可实时传输至远程平台分析，及时发现接触不良、绝缘老化等问题。例如，国网安平县供电公司通过红外扫描定位电缆接头过热，避免火灾隐患。经济效益与运维优化，非接触式检测降低人工巡检频率，内蒙古电力集团巴彦淖尔供电公司通过实时监测电缆沟温度，减少火灾事故并节约维护成本。

2.1.3. 分布式光纤传感技术

基于拉曼散射或布里渊散射原理，通过光纤传感实时监测电缆沿线的温度分布，结合动态电缆评级(DCR)评估负载能力[6]。它具备长距离连续监测(可达数十公里)的能力，抗电磁干扰，适用于复杂电磁环境。不过，光纤安装成本高，空间分辨率受限(通常为 1~3 米)，适用于海底电缆、高压输电线路、城市地下电缆廊道等长距离敷设场景[3]。

优点：1、空间分辨率达 1 米，测温精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，适合长距离覆盖。2、耐腐蚀、抗电磁干扰，适用于高压、潮湿环境。3、支持动态载流量计算，优化电缆负荷管理。

缺点：1、仅适用于缓变物理量(如温度漂移)，对瞬态放电信号响应不足。2、多参量解耦困难，易受交叉敏感效应影响。3、长距离监测时空分辨率与测量距离相互制约。

技术创新：多物理量融合监测：传统分布式光纤技术主要依赖瑞利散射、布里渊散射等单一物理量(如温度、应变)的监测，而该研究通过集成声发射波形分析技术，能够同时捕捉局部放电产生的瞬态振动信号和高频声波信号，实现多维度数据融合。这种融合策略解决了传统方法对微弱放电信号灵敏度不足的问题，尤其适用于电缆接头这类绝缘薄弱区域的早期故障检测。声发射波形检索算法优化：论文提出一种基于小波变换与模式识别的声发射波形检索算法。其原理是通过分析声发射信号的时频域特征(如波形峰值、衰减特性、频谱分布)，结合机器学习分类模型(如神经网络)，从复杂背景噪声中提取局部放电特征。相较于传统参数分析法(仅统计计数、幅度等简化参数)，该方法能更精确地区分放电类型(如电晕放电、沿面放电)并定位放电源。分布式光纤网络的拓扑优化：针对电缆接头的结构特点，研究改进了光纤布设策略。通过环形或螺旋式光纤布局(类似“环形轮廓电缆”的设计理念)，增强对局部放电引发的高频振动信号的耦合效率。同时，采用相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)提升空间分辨率(可达米级)，解决了传统系统因脉冲宽度限制导致长距离监测分辨率下降的问题。抗干扰增强机制：引入自适应滤波算法，通过实时分析环境噪声谱(如机械振动、电磁干扰)，动态调整信号处理阈值，减少误报率。实验表明，该算法在复杂工频电磁场环境下的信噪比(SNR)提升约 15 dB。秦炜淇教授与马国明教授在 Distributed detection and acoustic emission waveform retrieval of cable joint partial discharge 论文中通过以下突破解决了这些问题：采用高频采样($\geq 100\text{ MHz}$)的 Φ -OTDR 技术，扩展了振动信号检测带宽；开发基于卷积神经网络(CNN)的信号分离算法，实现温度 - 应变 - 放电信号的并行解调，引入光脉冲编码调制技术，在 50 km 监测距离下仍保持 1 m 空间分辨率。

系统参数：检测灵敏度：系统最小可检测放电量达 20 pC，较传统电学传感器(通常为 100 pC)提升 5 倍。定位精度：在 1 km 电缆段内，局部放电定位误差小于 2 米，优于基于布里渊散射的应变监测方法(通常误差超过 5 米)。实时性：数据处理延迟控制在 50 ms 以内，满足电力系统在线监测需求。多参量同步能力：可同时监测温度(精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)、振动(频率范围 1~30 MHz)、放电强度等参数，实现绝缘状态综合评估。

适用环境：1、电缆隧道、桥架等密闭空间的全线温度监测。2、火灾预警场景，如电缆夹层、开关柜。

应用案例：DTS 系统在高压电缆隧道中实现温度异常报警，提前 30 分钟预警潜在火灾，定位精度达 ± 2 米。

2.1.4. 动态载流量监测

动态载流量监测(Dynamic Thermal Rating, DTR)是一种通过实时采集输电线路的电流、导体温度、风速、日照等环境参数,结合热力学模型或人工智能算法动态计算线路最大安全载流量的技术,旨在突破传统静态限额的保守性,根据实际工况灵活调整输电容量。其结合分布式光纤测温数据与电缆结构参数(线芯截面积、材料),建立动态载流量模型,实时计算允许的最大负荷电流,避免过载。并且依托传感器网络、大数据分析和智能控制系统,在新能源消纳、城市电网扩容、极端天气应急等场景中显著提升线路利用率(可达 10%~40%),同时预防过热故障并降低运维成本;尽管面临数据可靠性、模型适应性及初期投资等挑战,但随着数字孪生、边缘计算等技术的融合,未来将进一步推动电网向动态优化、低碳弹性的方向发展[7]。

优点: 1、提升电缆利用率 10%~30%,减少冗余设计。2、考虑环境温度、散热条件,模型适应性更强。3、与 SCADA 系统联动,实现负荷智能调度。

缺点: 传统电缆载流量监测存在测量误差大(如集肤效应、环境干扰导致误差达 15%以上)、标准化不足(报警阈值缺乏统一规范)、响应滞后(人工巡检覆盖盲区)及多物理场耦合计算复杂(如交流/直流电缆的电磁-热场交互)等。

国际标准更新: 1、新增谐波发热(THD > 8%时修正系数 $K = 0.85$)、电缆弯曲损耗(载流量降 5%~15%)、土壤湿度模型。2、数字孪生应用: 三维热-电耦合模型网格精度 $\leq 5\text{ mm}$, 1 小时温度预测误差 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

技术创新: 感知层创新,采用分布式光纤测温系统(DTS),空间分辨率达 2 米,温度精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,穿透混凝土结构实现电缆表面温度全路径监测。集成光栅阵列传感光纤,直接嵌入电缆内部采集导体温度数据,减少外部环境干扰。部署多参数传感器网络,同步监测土壤热阻率、环境温湿度及风速等参数。算法与计算层升级,基于有限元建模和 IEC 60287/CIGRE 标准开发动态载流量模型(DCR),结合电缆群热耦合效应优化传热边界条件。引入逆问题求解算法,自动校正不同敷设环境下的电缆参数偏差,适应复杂工况。应用卡尔曼滤波实时预测导体温度变化趋势,支持短时应急负荷评估(如预测未来 1 小时过载能力)。平台与调度层优化,构建云边协同架构:边缘计算节点处理实时数据,云端进行多回路协同分析(如城市管廊中并行电缆的负荷均衡)。整合动态载流量数据与电网调度系统,实现负荷弹性调控(如动态增容 15%~30%)。通过三维可视化界面展示导体温度、表面温度及载流量瓶颈位置,支持多时间尺度曲线分析。

适用环境: 1、城市电网高峰负荷期的电缆优化运行。2、新能源并网场景下的电缆容量动态管理。

应用案例: 南方电网西电东送工程在部署动态载流量系统后,跨省输电通道利用率提升 22%,紧急过载响应时间缩短至 3 分钟内。

2.1.5. 物联网综合监测系统

物联网综合监测系统是通过部署多源传感器、边缘计算设备及通信网络,实时采集并整合环境、设备、人员等多元数据,结合云计算、人工智能与自动化控制技术,实现全域状态感知、异常预警及智能决策的综合性平台。其集成多类传感器(温度、局放、水位等),通过 4G/5G 或 LoRa 传输至云平台,利用 AI 算法实现异常预警与故障诊断[1]。并且以数据流为核心,覆盖工业设备运行、城市基础设施管理、生态环境监测、健康医疗等场景,通过动态分析(如故障预测、能效优化)与远程调控,显著提升管理效率与资源利用率;尽管面临数据安全、设备兼容性 & 网络稳定性等挑战,但随着 5G、数字孪生与区块链技术的深化应用,该系统正加速向自主协同、高精度预测和跨域融合的方向演进,推动物理世界与数字空间的深度互联。

优点: 1、多参数融合(如局放 + 温度 + 振动)提高诊断准确率。2、支持远程监控与移动端管理,降

低人工巡检频率。3、模块化设计, 可扩展气体、视频等监测功能。

缺点: 1、系统复杂度高, 需定期维护传感器网络。2、数据安全风险较大, 依赖加密通信协议。3、初期投资高, 中小型电网推广难度大。

适用环境: 1、大型城市综合管廊、电缆隧道的全方位监控。2、需跨区域集中管理的电网运维场景。

技术升级: 多层级系统架构: 系统由电缆边缘智能终端、本体监测模块、管廊环境监测单元、安防监控模块及物联管理平台构成。其中, 电缆边缘智能终端作为核心枢纽, 集成多频段无线通信单元, 支持 MQTT 协议, 实现本地与远程网络的数据统一接入, 并具备边缘计算能力(如资源调度、协议转换和数据预处理)。传感器融合与部署优化: 开发三合一传感器, 同步监测局部放电(基于地电波检测原理)、护套环流(接地电流异常监测)及温度(高精度铂电阻), 减少设备冗余。管廊环境监测采用无线低功耗传感器, 覆盖水位(扩散型硅压力传感)、水浸(探头线缆触发警报)、烟雾(气体检测)及噪声(30 dB 精密测量)等参数, 结合吸附式安装降低部署成本。安防模块引入 AI 视觉(深度学习图像分析)和热成像(专利测温算法), 实现入侵检测与设备温度精准监控。数据处理革新: 通过边缘计算层对原始数据进行实时处理(如局放信号分析), 并利用 Docker 容器技术封装算法应用, 提升扩展性与计算效率, 减少云端依赖。

应用案例: 系统于 2021 年在雄安智慧输电示范区投入运行, 成功实现对电缆接头状态、管廊温湿度及水浸等参数的实时监测与异常预警。实际应用表明: 运维响应速度提升 30%, 电缆缺陷检出率提高至 95%以上; 设备部署成本降低 40% (通过三合一传感器与无线组网); 数据协议兼容性增强, 支持多品牌设备接入。

2.1.6. 其他非光纤技术补充

接地电流监测: 通过电磁感应原理检测电缆接地线的工频电流, 分析接地电流幅值与相位变化, 判断接地状态异常(如多点接地或绝缘劣化)。其安装简便, 成本低, 可发现电缆金属护套破损、接地系统故障等问题。然而, 该方法对微弱电流变化不敏感, 需结合其他方法综合判断, 且无法直接定位故障点, 常用于电缆隧道、变电站等接地系统复杂场景的长期状态监测[2]。

超声波成像: 利用超声波穿透电缆内部, 检测结构缺陷, 适用于内部裂纹检测。

3. 技术对比与总结

通过对局部放电监测、分布式光纤测温(DTS)、红外热像监测、动态载流量监测、物联网综合监测系统五种电缆安全监测方式在技术原理、监测参数、适用场景等方面进行对比和总结(见表 1)。

Table 1. Comparison of cable safety monitoring methods
表 1. 各电缆安全监测方法对比

监测方法	局部放电监测	分布式光纤测温(DTS)	红外热像监测	动态载流量监测	物联网综合监测系统
技术原理	检测放电产生的电信号/超声波	光纤后向散射(拉曼/布里渊效应)	红外热辐射成像	基于传热模型计算载流量	多传感器融合 + 物联网通信
监测参数	放电量、相位、频次	温度分布、温度变化率	表面温度、温差	载流量、温度、电流、环境参数	温度、电流、振动、局放、湿度等
适用场景	电缆内部绝缘缺陷(如局部放电)	长距离电缆隧道/管廊	露天电缆、电缆接头、开关柜	负荷波动大的电缆线路	智能电网、城市地下管网
核心优势	早期绝缘故障定位	连续分布式监测、抗电磁干扰	非接触式、快速成像	实时容量优化、提升电缆利用率	多参数融合、远程实时监控

续表

主要缺点	需停电检测、安装复杂	成本高、光纤铺设要求高	受环境(遮挡/湿度)影响、仅表面温度	依赖温度传感器精度、模型参数校准	系统复杂度高、建设成本高
典型应用	高压电缆定期绝缘检测	地铁/电力隧道温度预警	变电站电缆接头热故障排查	城市电网负荷高峰载流量评估	南京铸能电缆隧道综合监控系统(参考案例)
响应速度	秒级(离线分析)	秒级 - 分钟级(实时监测)	秒级(实时成像)	分钟级(模型计算)	毫秒级 - 分钟级(多参数融合)
部署方式	电缆终端/中间接头安装传感器	沿电缆铺设光纤	手持式/固定式热像仪	安装温度/电流传感器 + 边缘计算	传感器网络 + 云平台
标准规范	GB/T 3048.12-2007	IEC 60793-1-44 (光纤标准)	GB/T 19870-2018 (红外检测)	DL/T 5244-2010 (载流量计算)	GB/T 36625-2018 (物联网系统)
成本等级	中(传感器 + 检测设备)	高(光纤 + 解调仪)	低 - 中(热像仪)	中(传感器 + 计算模块)	高(多传感器 + 平台建设)

3.1. 不同监测方法的对比分析

3.1.1. 局部放电监测

在技术性能上，检测精度高，能发现微小绝缘缺陷，故障定位相对准确，可多参量监测，但响应速度离线分析为秒级，监测范围受传感器安装限制。经济成本方面，设备采购和数据处理成本较高，安装较复杂，运维需专业人员。环境适应性中，抗电磁干扰能力弱，对环境温湿度有一定要求。适用于高压XLPE 电缆主绝缘在线监测，特别是电缆接头、终端等局部放电高发区域。

3.1.2. 分布式光纤测温(DTS)

技术性能上，监测范围长距离可达数十公里，温度检测精度较高，具备一定多参量监测潜力(融合新技术后)，但响应速度在实时监测时为秒级 - 分钟级，空间分辨率受限。经济成本高，光纤和解调仪价格昂贵，安装和运维成本也不低。环境适应性好，抗电磁干扰，能在高压、潮湿环境工作。适用于海底电缆、高压输电线路、城市地下电缆廊道等长距离敷设场景，以及电缆隧道、桥架的全线温度监测和火灾预警。

3.1.3. 红外热像监测

技术性能表现为非接触式测量，响应速度快(实时成像为秒级)，图像直观便于快速定位过热点，但检测精度受环境影响大，仅能监测表面温度，监测范围取决于热像仪视野。经济成本较低，热像仪价格相对便宜，安装方便，运维成本低。环境适应性受环境温度、风速影响大，在遮挡或高湿度环境下效果不佳。适用于户外电缆接头、终端等裸露部位的定期巡检，以及无法安装固定传感器的临时监测场景。

3.1.4. 动态载流量监测

技术性能上，能实时优化电缆容量，提升利用率，但依赖温度传感器精度，模型计算延迟导致响应速度为分钟级，监测范围主要针对负荷波动大的电缆线路。经济成本适中，传感器和计算模块费用一般，数据处理和模型校准成本较高。环境适应性受环境参数测量准确性影响，对环境温湿度、风速等敏感。适用于城市电网高峰负荷期和新能源并网场景下的电缆容量动态管理。

3.1.5. 物联网综合监测系统

技术性能具备多参数融合优势, 故障诊断准确率高, 响应速度因多参数融合有毫秒级 - 分钟级差异, 支持远程监控。经济成本高, 多传感器采购、平台建设和维护费用大。环境适应性较好, 通过硬件防护和软件算法可适应多种环境, 但数据传输受网络稳定性影响。适用于大型城市综合管廊、电缆隧道的全方位监控, 以及需跨区域集中管理的电网运维场景。

3.2. 技术选型建议

3.2.1. 根据故障类型选择

若关注绝缘老化与内部缺陷, 优先选局部放电监测; 温度异常问题, 分布式光纤测温(DTS)更合适; 表面热故障则采用红外热像监测; 注重容量优化和负荷管理, 动态载流量监测是较好选择; 期望多类型故障全局预警, 物联网综合监测系统为佳。

3.2.2. 结合环境条件选择

复杂电磁环境, 分布式光纤测温(DTS)和物联网综合监测系统(通过抗干扰设计)更适用; 高温、高湿、沙尘等恶劣气候, 考虑系统的耐温湿度范围和防尘防水等级, 如具备高防护等级的物联网综合监测系统或经特殊设计的局部放电监测设备。

3.2.3. 考虑成本因素选择

预算有限, 且对实时性要求不高的周期性巡检场景, 红外热像监测较合适; 长期运行成本控制, 需综合考虑设备寿命、运维难度和频率, 如分布式光纤测温(DTS)虽初期投资高, 但长期稳定性好, 运维成本相对固定。

3.3. 行业推动

随着电力系统智能化与能源结构转型的加速, 动态载流量监测、分布式光纤测温(DTS)、红外热像及物联网综合监测系统等技术正成为行业革新的核心驱动力。在电力领域, 这些技术通过实时感知设备状态与环境参数, 显著提升了电网运行的安全性与经济性, 例如动态载流量监测使输电线路容量利用率提升 10%~40%, 有效缓解了新能源并网波动带来的弃风弃光问题; 在工业场景中, 物联网系统通过整合设备振动、温度、能耗等多维数据, 推动预测性维护与能效优化, 减少非计划停机损失。以南京铸能系统为例, 其融合 DTS、红外与局部放电监测的隧道综合方案, 已被多地轨道交通和电网企业采纳, 成为长距离基础设施运维的标杆模式。同时, 相关技术标准(如 IEEE 738、CIGRE 导则)的完善与跨行业协作(如 5G 通信与边缘计算服务商的参与), 进一步加速了技术从试点向规模化应用的转化。行业生态中, 设备制造商、数据分析服务商及终端用户通过技术协同与数据共享, 逐步构建起覆盖“感知 - 分析 - 决策”的全链条服务体系, 推动智能电网、智慧城市与工业 4.0 的深度融合。

3.4. 未来展望

3.4.1. 未来研究重点与难点分析

(1) 多技术融合深度与协同性

当前多技术融合多处于简单叠加阶段, 数据融合分析缺乏深度, 无法充分发挥各技术优势。不同技术监测数据的时空尺度差异大, 难以精准关联, 影响故障诊断准确性。例如局部放电监测与分布式光纤测温数据在时间分辨率和空间覆盖范围上存在差异, 融合时易出现信息偏差。

(2) 智能化监测平台构建

构建智能化监测平台需整合海量异构数据, 面临数据处理速度与存储容量挑战。现有的算法难以满

足实时、精准的故障诊断与预测需求,尤其是复杂故障模式下的诊断准确率有待提高。例如在复杂电磁环境中,物联网综合监测系统的信号干扰问题影响数据准确性,进而影响智能诊断效果。

(3) 数据安全和隐私保护

电缆监测数据包含大量敏感信息,在数据传输和存储过程中易遭受攻击和泄露。加密算法与数据访问控制机制需进一步优化,以适应不同监测场景的安全需求。例如在 5G 通信传输监测数据时,需防范 5G 网络潜在的安全漏洞。

3.4.2. 技术路线与实施方案

(1) 实现多技术融合

建立统一数据标准:制定涵盖不同监测技术数据格式、采集频率、精度等的统一标准,确保数据兼容性。例如,对局部放电监测、分布式光纤传感等技术的数据进行标准化处理,使其在时间和空间上具有一致性,便于融合分析。研发融合算法:运用深度学习算法,如卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN),挖掘不同监测数据间的潜在关联。例如,利用 CNN 对红外热像数据和局部放电监测数据进行特征提取,再通过 RNN 分析时间序列上的变化趋势,实现故障的综合诊断。优化传感器布局:根据电缆线路特点和故障高发区域,合理布局多种传感器。如在电缆接头处,同时安装局部放电传感器、温度传感器和红外热像仪,实现多维度数据同步采集,提高监测准确性。

(2) 构建智能化监测平台

采用云边协同架构:边缘计算节点负责实时数据预处理和简单故障判断,减轻云端计算压力。云端进行大数据分析、模型训练和复杂故障诊断,实现资源优化配置。例如,在电缆隧道中部署边缘计算设备,对采集的温度、局放等数据进行初步分析,将异常数据上传至云端进一步处理。引入人工智能技术:利用机器学习算法,如支持向量机(SVM)和随机森林,进行故障分类和预测。结合深度学习的图像识别技术,对红外热像数据进行自动分析,快速定位故障点。例如,训练 SVM 模型对动态载流量监测数据进行分析,预测电缆过载风险。搭建可视化界面:通过三维可视化技术,直观展示电缆线路状态、监测数据和故障位置。提供多时间尺度的数据展示和分析功能,方便运维人员进行决策。例如,以三维模型展示电缆隧道,实时呈现各监测点的温度、局放等数据,出现故障时及时闪烁提示。

(3) 解决数据安全和隐私保护

加密传输与存储:在数据传输过程中,采用量子加密技术或高级加密标准(AES)等加密算法,确保数据的保密性和完整性。在数据存储方面,对敏感数据进行加密存储,如对电缆的运行参数、用户信息等进行加密处理。访问控制与身份认证:建立严格的访问控制机制,根据用户角色和权限分配数据访问权限。采用多因素身份认证方式,如指纹识别、面部识别和动态口令相结合,提高身份认证的安全性。例如,运维人员登录监测平台时,需通过指纹和动态口令双重认证。数据脱敏与匿名化:对于用于分析的数据进行脱敏处理,去除可识别个人身份的信息。采用匿名化技术,将数据中的敏感信息进行替换或模糊处理,保护数据隐私。例如,对电缆监测数据中的用户地理位置信息进行模糊化处理后再进行分析。

3.5. 社会与环保价值

监测技术的普及深刻重塑了能源利用模式与社会服务效能。在环保层面,动态载流量监测通过提升线路利用率,减少因容量冗余导致的无效投资与土地资源占用,以上海电网的电缆优化项目为例,其通过动态扩容使局部区域输电能力提升 30%,延缓了约 15 公里的新线路建设,间接保护了沿线生态;物联网系统在工业领域的能效管理功能,可降低单位产值能耗 5%~20%,助力高耗能企业达成碳配额目标。社会效益方面,红外热像与 DTS 的故障预警能力将城市停电事故率降低 40%以上,保障医院、数据中心等关键场所的供电连续性;在偏远地区,分布式光纤监测与卫星通信结合,可实现无盲区的电网状态监

控, 缩小城乡供电质量差距。此外, 监测技术为可再生能源大规模使用提供了基础设施保障, 例如通过实时调整风电汇集线路的载流量, 可将弃风率从 8% 降至 3% 以下, 加速能源结构清洁化。长远来看, 这些技术通过减少化石能源依赖、降低线损与设备报废率, 年均可减少全球碳排放超 1.2 亿吨, 成为实现“碳中和”目标的核心支撑体系之一, 同时为智慧城市、韧性社区等新型社会形态提供底层技术赋能。

4. 结论

本文系统梳理了电缆安全监测的主流技术, 深入剖析了各技术的理论依据、特点及应用场景, 通过构建统一评价指标体系对比分析, 为技术选型提供了全面参考。

局部放电监测对早期绝缘故障敏感, 但易受电磁干扰、成本较高; 分布式光纤传感技术在长距离、复杂电磁环境下的高精度温度监测优势显著, 不过存在安装成本高、多参量解耦困难等问题; 红外热像监测非接触、成像快, 却受环境因素制约且无法检测内部缺陷; 动态载流量监测能提升电缆利用率, 但依赖模型和传感器精度; 物联网综合监测系统实现多参数融合、远程监控, 却面临系统复杂、成本高和数据安全挑战。

当前, 分布式光纤传感技术在长距离监测和复杂环境适应性上表现突出。但从长远来看, 多技术融合与智能化是未来电缆安全监测技术发展的核心方向。一方面, 将不同监测技术的优势互补, 如结合局部放电监测与分布式光纤传感技术, 可实现对电缆绝缘和温度的全面监测; 另一方面, 借助物联网、数字孪生和人工智能等技术, 构建智能化监测平台, 实现故障的精准诊断、预测和自愈控制。

未来研究需着力攻克多技术融合中的数据兼容、协同分析难题, 探索标准化部署方案, 推动与 5G、数字孪生等新兴技术深度融合, 以实现电缆状态的全生命周期管理, 确保电力系统安全、可靠、高效运行。

参考文献

- [1] 王磊, 张强. 高压电缆故障检测技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 1-10.
- [2] Bao, X. and Chen, L. (2012) Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*, **12**, 8601-8639.
- [3] 马国明, 秦炜淇, 王思涵, 等. 海底电缆状态分布式光纤监测技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 370-387.
- [4] 蔡光柱, 王力学, 杨海洋, 张铁成, 高安洁, 马俊朋, 王瑞田. 基于物联网技术的电力电缆智能监测系统研究[J]. 电力安全技术, 2023, 25(6): 16-18+21.
- [5] 夏展然, 杨斌, 郭浩然, 等. 电缆终端红外图像过热区域提取方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 12-21.
- [6] 刘佳鑫, 郎业兴, 等. 电缆分布式光纤测温装置校验及温度补偿方法研究[J]. 电器工程学报, 2020, 15(4): 121-127.
- [7] 边晓燕, 湛云峰, 周歧斌, 等. 基于热路解析模型的海底电缆动态温度场计算与短时允许载流量评估[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 793-802.