

电缆缺陷检测及其模型的研究

夏小鹏¹ 单金龙¹ 窦开心¹ 曾俊翔¹ 汪宇涵¹ 闫晨²

1 南京工程学院材料科学与工程学院, 江苏南京, 211167;

2 江东合金技术有限公司, 江苏南通, 226400;

摘要: 高压交联聚乙烯 (XLPE) 电缆是城市电网输配电系统中的关键设备, 其绝缘系统在电-热-机械多场耦合作用下易产生各类缺陷, 严重影响电网运行可靠性。本文阐述 XLPE 电缆中表层缺陷与多尺度缺陷的形成机理与演化规律, 揭示缺陷引发的局部放电、温度异常及绝缘参数变化等典型信号特征。在此基础上, 深入探讨了高频局部放电检测、神经网络温度预测、多源信息融合评估等先进检测方法 with 诊断模型的研究进展, 分析不同方法在缺陷识别与状态评估中的适用性与局限性。面向未来, 研究指要构建融合多物理量监测与智能算法的电缆状态诊断体系, 推动缺陷检测从单一判据向多模态协同感知的范式演进, 为实现电缆全生命周期智能运维提供理论依据与技术路径。

关键词: 高压 XLPE 电缆; 缺陷检测; 局部放电; 智能诊断

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.021

引言

高压交联聚乙烯 (XLPE) 电缆凭借其卓越的电气性能、机械强度及铺设便利性, 已成为城市电网输配电系统中不可或缺的关键设备。随着城市化进程加快和电力需求持续增长, 高压电缆的运行可靠性直接关系到电网安全稳定和能源供应的质量。然而, 在电缆的生产制造、现场敷设及长期运行过程中, 其绝缘系统在电场、热场、机械应力以及环境因素的联合作用下, 不可避免地会形成各类缺陷。这些缺陷不仅引发局部电场畸变、加速绝缘材料老化, 更是导致绝缘性能劣化直至击穿的主要原因, 严重威胁电网的安全运行, 因此电缆缺陷检测及其模型研究对于供电系统具有重要意义。

1 XLPE 电缆缺陷类型

1.1 XLPE 电缆表层缺陷

高压交联聚乙烯 (XLPE) 电缆作为电力系统中的关键设备, 图 1(a)展示电缆本体结构, 由外至内依次为外护套、金属护套、外半导体层、XLPE 绝缘层、内半导体层与铜芯导体。运行统计数据显示, 电缆终端与本体是故障高发区域, 图 1(b)中故障率分别高达 50.87% 与 34.68%, 凸显了这两部分在结构可靠性与绝缘完整性方面所面临的严峻挑战。在电缆的制造、运输及敷设环节中, 受机械外力或工艺波动影响, 表层容易形成诸如金属毛刺、微气泡及护套划痕等初始缺陷, 如图 1(c)、

(d)所示。此类缺陷在电缆长期服役过程中, 将作为电场畸变的核心区域, 诱发局部温度异常与空间电荷的持续积累, 从而显著加剧局部放电活动。局部放电的持续作用不仅促使绝缘材料发生化学降解与物理损伤, 还将显著削弱其绝缘强度, 最终引发击穿故障。特别是在电缆接头区域, 由于几何结构复杂、电场分布高度不均, 表面缺陷更易演化为永久性故障, 对电网供电的连续性与安全性构成直接威胁。此外, 表层缺陷的演化不仅取决于初始制造与安装质量, 还受到运行环境温湿度、电气负荷波动以及机械振动等多重外部因素的耦合影响, 呈现出明显的时变性与非线性特征。

1.2 尺度缺陷与热老化

李欢^[4]依据缺陷的物理尺度特征, 构建一套系统的缺陷分类体系。图 1(e)中将 XLPE 绝缘中的缺陷结构划分为三个明确的尺度层级: 纳米尺度缺陷的尺寸 $<100\text{nm}$, 主要包括交联副产物 (如羟基醇、苯乙酮) 以及热氧老化过程中生成的羰基等化学缺陷, 这些分子级结构异常会显著改变材料的陷阱能级分布与载流子迁移行为, 进而影响绝缘的电荷存储与输运特性; 微米尺度缺陷的尺寸为 $0.1\text{--}100\mu\text{m}$, 涉及结晶不完全的球晶及其与非晶区之间的界面缺陷, 此类缺陷作为电场集中点和老化起始位置, 对绝缘材料的长期介电性能与机械强度具有决定性影响; 毫米尺度缺陷的尺寸约 0.1mm , 以水树枝、电树枝等宏观绝缘损伤为代表, 可直接导致

绝缘系统的功能性失效，是电缆运行中最需警惕的故障前兆。

朱梦瑶^[2]在动态热老化条件下，针对外护套破损、受潮水珠、杂质颗粒、半导体层凸起及水树枝等典型缺陷，图 1(f)展示其分布位置，研究缺陷与电场畸变之间的耦合演化规律。通过 160℃ 条件下 0–384 小时的加速热老化实验，并结合多物理场耦合仿真分析发现：电缆径向存在的显著温度梯度导致绝缘材料老化程度呈非线性空间分布，进而对缺陷区域的电场分布特性产生显

著调制作用。具体表现为：位于外半导体层附近的缺陷随老化进程呈现电场畸变加剧趋势，局部放电风险显著提升；而内半导体层附近的缺陷反而出现“自愈”现象，电场畸变程度随老化时间延长而有所缓解；绝缘中部的杂质颗粒缺陷对热老化进程表现出较低敏感性。研究进一步量化了各类缺陷的电场畸变率，其中水树枝引发的畸变率高达 456.2%，而外护套破损仅为 51.6%，揭示缺陷空间位置与热老化进程之间的内在关联机制。

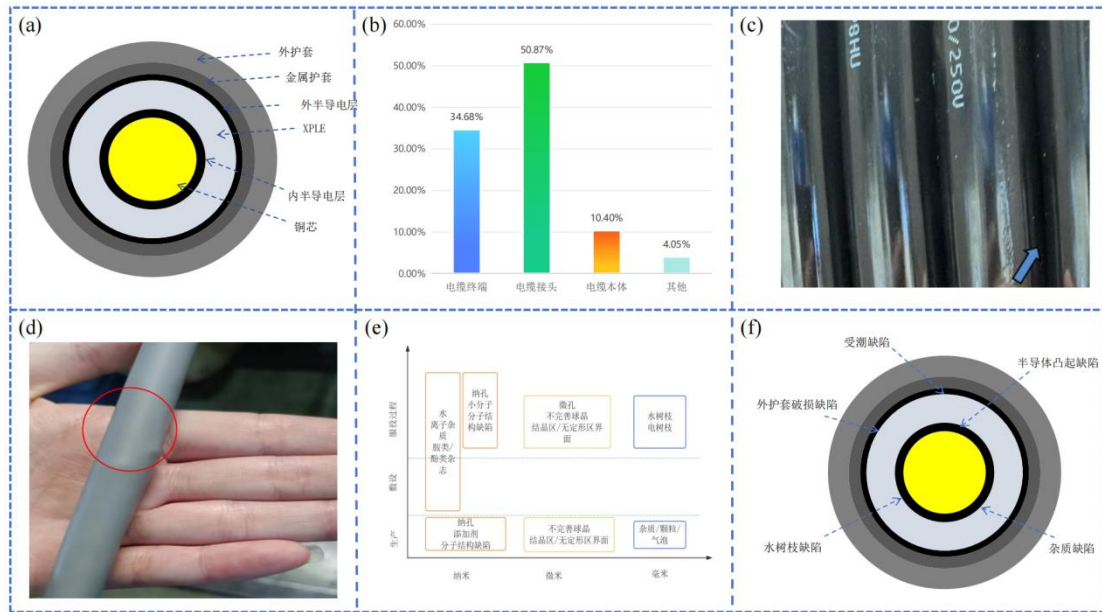


图 1 (a) XPLE 电缆本体结构 (b) 电缆故障类型统计分布 (c) 电缆表面划伤
(d) 气泡凸起 (e) XLPE 电缆绝缘中不同尺度的缺陷结构 (f) 5 种缺陷在电缆本体的分布位置

1.3 缺陷的宏观表现与可检测信号特征

电缆内部缺陷的演化过程将外显为一系列可被检测的宏观物理信号，为状态监测与故障预警提供了重要依据。根据缺陷的物理属性及其引发的响应机制，可将典型信号特征归纳为三类：第一类为局部放电信号，主要由金属尖端、微气泡等导致的电场集中所激发，其脉冲序列在相位分辨局部放电（PRPD）谱图中呈现特定的统计分布模式，是识别电缆内部微观缺陷及其发展程度的有效手段；第二类为温度异常信号，直接反映了接头接触不良、导体过热等缺陷导致的焦耳热效应，为基于红外热像或分布式光纤传感的温度预测模型提供了明确的检测目标；第三类为宽频带绝缘响应信号，与电树枝生长、护套破损等渐进性绝缘劣化过程密切相关，表现为接地电流谐波成分的增多以及介质损耗因数的上升，是实现电缆早期绝缘预警的重要判据。这三类信

号在时域、频域及统计特征上各具特色，为构建多参量融合的智能诊断体系奠定了物理基础。

2 电缆缺陷的检测技术与状态评估策略

2.1 缺陷诊断与温度预测

刘凤莲^[3]采用高频局部放电检测技术进行缺陷识别，图 2(a)展示检测系统构成，通过高频电流传感器采集电缆接地线中的脉冲电流信号，并运用时频分析技术将一维时序信号转换为二维时频谱图，以实现背景噪声的有效分离与放电特征的增强提取。进一步结合相位分辨局部放电（PRPD）谱图对信号进行深度解析，从而准确识别由屏蔽罩连接铜线脱落引发的悬浮电位缺陷。实验数据表明，该方法所检测到的局部放电信号幅值稳定维持在约 79mV 水平，且其 PRPD 谱图呈现出典型的悬浮放电分布模式，具有明显的相位聚集性与特定幅值分布

规律。该研究验证了高频局部放电检测技术在识别电缆内部悬浮电位类缺陷方面具有较高的灵敏度与定位准确性，为基于放电信号波形特征的缺陷类型辨识与严重程度评估提供了可靠依据。

付明星^[4]提出一种基于 Elman 神经网络的电缆导体温度动态计算模型，图 2(b)示意了该模型的基本架构，其以电缆运行电流与外表面温度为输入参量，以导体实时温度为输出目标。为进一步提升模型的预测精度与收敛效率，引入粒子群优化（PSO）算法对网络初始权值与阈值进行自适应全局寻优，并通过多组不同负荷条件下的温升实验数据完成模型的训练与验证。研究结果显示，该动态计算模型在不同运行工况下导体温度预测的平均误差小于 3℃，显著优于传统热路模型 7~8℃的误差水平。该模型在不依赖电缆复杂性参数的条件下，实现了对导体温度的实时、精准推算，为电缆载流量动态评估与过热风险预警提供了有效的技术手段。

2.2 运维信息与安全控制

刘英^[5]建立了融合运维信息与在线检测数据的电缆状态综合评估体系，采用层次分析法（AHP）对运行年限、负荷历史、故障记录及环境条件四大模块进行科学权重分配，并引入“浴盆曲线”理论对运行年限评分进

行修正优化，如图 2(c)所示。该体系将红外热像检测与接地电流监测设为常用检测项，局部放电检测作为备用项，通过缺项容错机制与动态权重因子保障其在工程实践中的灵活性与适用性。经过 5 条电缆的实验，该体系评估结果与绝缘样品的理化测试结果高度一致：评级为“良”的电缆击穿场强更高、羰基指数更低，表明其老化程度较轻；评级为“中”的电缆则显示出更显著的劣化特征。该评估体系可实现电缆状态的准确分级，为电缆剩余寿命预测与差异化运维策略制定提供依据与决策支持。

陆宇升^[6]基于经典热路模型，利用 Runge-Kutta 数值方法求解微分方程组以获得离散暂态温度序列，再采用 Levenberg-Marquardt 优化算法进行非线性拟合，得到具有正弦阻尼衰减特性的温度预测模型。该建模策略有效结合了热路模型的物理机理与数据驱动的参数优化能力，既保留了传热过程的明确物理意义，又通过参数反演提升了模型对实际暂态温升过程的拟合精度。试验结果显示，该模型预测的温度极值与实际测量值之间的绝对误差小于 0.2℃，提升了电缆温控试验的安全性与控制效率，为电缆运行状态的实时精准感知与热安全预警提供了可靠的技术支持。

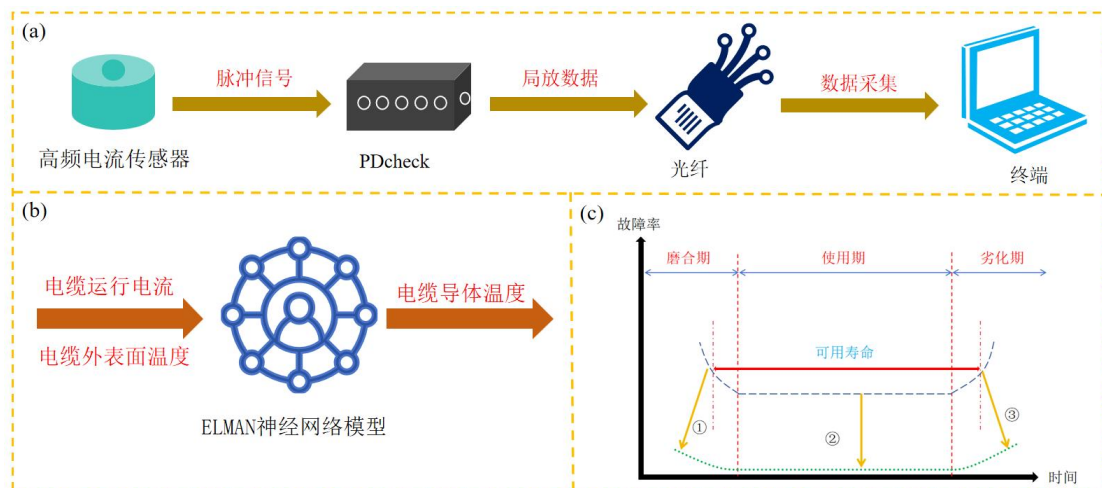


图 2 (a) 检测系统示意图 (b) 导体温度计算示意图 (c) 浴盆曲线

2.3 检测模型未来展望

在当前 XLPE 电缆缺陷检测研究领域，普遍存在依赖单一物理量进行状态诊断的技术局限性。然而，工程实践中的电缆缺陷往往呈现多类型并发、多尺度分布的综合特征，且各类缺陷与不同物理参量之间的映射关系具有显著的差异性。这种基于单一参量的监测模式难以

全面、准确地表征电缆的真实健康状态，更无法有效识别复合缺陷间的协同耦合效应与潜在故障风险。

为突破这一技术瓶颈，未来应致力于构建基于多源信息融合的电缆智能诊断体系。通过系统整合机器视觉、分布式光纤测温、高频局部放电监测、接地电流谐波分析等多模态检测手段，结合边缘计算与云端协同的数据

处理架构,实现对电缆状态的多维度、高分辨率感知。在缺陷类型的选择与监测参量的匹配上,需建立科学的选型准则与优化配置策略:既要确保所选缺陷类型能够敏感反映电缆关键性能指标的退化趋势,又要充分考虑不同物理参量间的互补性与独立性,避免信号混淆与相互干扰。通过研发先进的特征提取算法与高效的多源数据融合策略,可显著提升缺陷识别的准确率与诊断结果的置信度,最终推动电缆状态评估从传统的单一阈值判断向基于多元信息融合与人工智能分析的智能诊断范式转变,为实现电缆全生命周期智能运维与精准管理提供核心技术支撑。

参考文献

- [1]李欢,翟双,陈杰,等. 交联聚乙烯电缆绝缘中不同尺度缺陷结构综述[J]. 绝缘材料,2019,52(12):1-9.
- [2]朱梦瑶,李欢,张瑞祥. 热老化对 XLPE 电缆本体中

典型缺陷所引发的电场畸变的影响[J]. 中国电机工程学报,2024,44(22):9076-9087.

[3]刘凤莲,邓元实,薛志航,等. 110 kV 高压电缆中间接头系列故障分析[J]. 电线电缆,2017,(06):36-40.

[4]付明星,李悦冬,潘书磊,等. 基于 Elman 神经网络的高压电缆导体温度动态计算方法[J]. 高压电器,2019,55(10):121-127.

[5]刘英,张博剑,高鑫. 高压 XLPE 电缆线路状态评估综合体系的建立及应用[J]. 高电压技术,2022,48(11):4437-4444.

[6]陆宇升,李筠,杨海马,等. 基于 Levenberg-Marquardt 优化算法的双路电缆温度预测[J]. 电力科学与工程,2022,38(01):1-7.

基金项目:南京工程学院研究生科技创新基金项目(TB202517047)。