

电力电缆故障诊断研究综述

程子霞, 李子扬, 李奕杰

郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001

DOI:10.61369/ME.2025070031

摘要 电力电缆是城市基础建设中必不可少的一环, 是传输电能的重要载体, 它的正常运行关系到城市生产生活的安全和稳定, 因此电力电缆线路的故障诊断是一直以来的关键问题。为了保证电力电缆安全可靠地运行, 必须快速、准确地检测出故障。本文简述了电力电缆故障产生的原因并对电力电缆的故障检测以及定位方法进行了梳理, 对比分析了不同类型的电力电缆故障检测以及定位方法, 以此推进电力电缆故障诊断的研究和应用工作。

关键词 电力电缆; 故障诊断; 故障识别; 故障定位

Review of Research on Fault Diagnosis of Power Cables

Cheng Zixia, Li Ziyang, Li Yijie

School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001

Abstract : Power cables are an indispensable part of urban infrastructure and an important carrier for transmitting electrical energy. Their normal operation is crucial to the safety and stability of urban production and life. Therefore, the fault diagnosis of power cable lines has always been a key issue. To ensure the safe and reliable operation of power cables, it is necessary to detect faults quickly and accurately. This paper briefly describes the causes of power cable faults and sorts out the detection and location methods of power cables. It also compares and analyzes different types of power cable fault detection and location methods to promote the research and application of power cable fault diagnosis.

Keywords : power cable; fault diagnosis; fault identification; fault location

引言

随着我国经济持续发展, 城市化进程不断加快, 电力电缆因其自身所具有的供电可靠性高、不受地面、空间建筑的影响、不受恶劣气候侵害、安全隐蔽耐用等特点, 获得了越来越广泛的应用^[1]。但与架空输电线路相比, 电缆线路故障具有不可观测性: 混合线路多且走线复杂、敷设方式多样、运行情况复杂, 一旦发生故障将直接影响整个电力系统的安全运行, 如果故障发现不及时, 则可能导致火灾、大规模停电等严重事故。因此, 实现故障的快速识别与精准定位, 不仅能够缩短故障处理时间, 更能有效提升供电系统的整体可靠性, 对保障城市电力供应具有重要意义^[2]。

为了确保电力系统安全可靠运行, 如何快速、准确地监测电缆故障, 减少故障修复费用以及停电损失, 成为日益关注的问题。

一、电缆故障特性分析

(一) 电力电缆故障原因

随着电缆数量的增多以及运行时间的延长, 由于电缆绝缘老化特性等因素, 故障发生率大大增加^[3]。电缆故障点的查找与测量是通讯和电力供应畅通的有力保障, 但是因为电缆线路的隐蔽性、个别运行单位的运行资料不完善以及测试设备的局限性, 使电缆故障的查找非常困难。尤其是在狂风、暴雨等恶劣天气中, 给故障的查找、维修带来了很大不便。因此了解电缆故障的原因, 对于减少电缆的损坏, 快速地判定出故障点是十分重要的。

电力电缆发生故障的原因是多种多样的, 常见的几种主要原因主要包括机械损伤、绝缘老化变质、化学腐蚀、设计制作工艺不良等^[4], 表1为各种电力电缆故障类型以及主要原因分析。

表1 电力电缆故障原因、机理及后果

故障原因	发生机理	影响后果
机械损伤	安装时外力挤压 / 拖拽导致绝缘层开裂, 破坏绝缘结构的介损特性, 引发局部电场畸变	绝缘击穿, 造成短路故障
绝缘老化变质	电缆运行中绝缘内部气隙发生局部放电, 产生臭氧、酸类物质, 加速绝缘材料裂解, 形成炭化通道	绝缘电阻下降, 最终导致击穿故障
化学腐蚀	电缆敷设在有酸碱作业的地区, 以及煤气站的苯蒸汽都会腐蚀电缆护套和铠装层, 降低机械强度	护套破损, 水分侵入, 引发接地故障
设计制作工艺不良	设计初期, 人员操作不当、连接不稳定或者采用劣质材料	导致早期故障
电气过载	电缆温度升高, 超过绝缘材料允许上限, 加速绝缘老化	绝缘层熔融, 引发火灾或短路故障

(二) 电力电缆故障类型

根据故障电阻与击穿间隙的情况, 电缆故障可分为低阻、高阻、开路与闪络性故障。

表2 电力电缆故障类型

低阻接地或短路故障	电缆线路一相导体对地或数相导体对地或数相导体之间的绝缘电阻低于正常阻值较多, 电阻值低于 $10Z_c$ (Z_c 为电缆线路波阻抗), 而导体连续性良好。
高阻接地或短路故障	与低电阻接地或短路故障相似, 但区别在于接地或短路的电阻大于 $10Z_c$ 而芯线连接良好。
开路故障	电缆各相导体的绝缘电阻符合规定, 但导体的连续性试验证明有一相或数相导体不连续, 或虽未断开但工作电压不能传输到终端, 或虽然终端有电压但负载能力较差。
闪络故障	低电压时电缆绝缘良好, 当电压升高到一定值或在某一较高电压持续一定时间后, 绝缘发生瞬时击穿现象。

二、电力电缆故障诊断技术研究现状

目前, 国内外电力电缆故障检测技术主要分为两大类: 基于传统电气量诊断以及基于机器学习、人工智能对故障进行诊断识别, 且都取得了较好的效果。

(一) 基于传统电气量的故障诊断

基于传统电气量的电力电缆故障诊断方法是最早、也是使用最为广泛的诊断方法。姚海燕^[9]等人提出了基于多尺度小波判据和时频特征关联的检测与识别方法: 先对比不同扰动源引起的电缆过流电流特性, 通过多尺度小波变换提取故障电流的高频细节系数、低频近似系数和模极大值; 再构建电缆早期故障时频特征向量, 利用灰色关联分析计算待测故障电流与标准早期故障电流的关联度以识别早期故障。最后仿真验证, 结果显示该方法能有效检测电缆过流暂态过程, 对电缆半周波、多周波单相短路早期故障识别正确率高。李根^[10]等人提出基于护层电流特征分析的故障诊断方法: 通过建立考虑电缆排列方式、共用接地及小段长度影响的护层电流计算模型, 分析正常与故障状态下的电流分布特征; 采集交叉互联接地箱的三相护层电流数据, 利用离散傅里叶变换形成以电流均值和偏差为核心的故障判据。该方法无需依赖负荷电流测量与理论正常值计算便能有效识别护层典型故障。周正雄^[11]等人提出基于时域序列结合变点检测与改进自适应神经网络的识别方法: 先采用非参数化双边累积和算法监测三相电流正负向偏移累积和, 确定暂态事件的异常相; 再通过改进的自适应线性单元, 识别半周波、多周波早期故障。PSCAD/EMTDC仿真表明, 该方法对恒阻故障及其他过流扰动有良好区分度; 现场在运电缆监测数据验证, 其故障识别率高。Lei Wang^[12]等提出基于金属护套接地电流监测的电缆故障诊断方法。他们用含多传感器的综合接地箱, 实时采集 110kV 及以上高压电缆护套接地点的电流、电压数据, 经多源融合平台预处理后, 结合边缘计算与灰色马尔可夫模型分析, 通过设定电流阈实现报警。

(二) 基于传统机器学习的电缆故障诊断及识别

近年来, 随着电力系统规模不断扩大, 电力电缆在电力传输中的应用也更加广泛。然而, 传统的故障检测不仅效率低下难以高效判断故障, 而且时常伴随着危险。人工智能的蓬勃发展给电力电缆故障诊断提供了智能、安全、高效的方法, 具有重要的实践意义。

张育梁^[13]等人提出基于 Bagging- 异质 k 近邻的故障诊断方法: 先归一化主芯及护层的电流、电压、接地电阻等电气参数,

构建特征矩阵; 再基于 k 近邻算法, 用不同 k 值和距离度量构建异质子学习器, 结合 Bagging 算法提升学习效率。结果显示, 该方法识别接地系统直接接地故障的概率达 94.35%; Dongyang Wang^[10]提出改进 M-training 算法结合 GGCM-GMRF 特征融合的方法, 通过局部放实验平台采集 PRPD 与 PSA 光谱数据, 融合灰色梯度共生矩阵 (GGCM) 的 15 维纹理特征与高斯马尔可夫随机场 (GMRF) 的 10 维特征构建向量, 再用改进 M-training 算法诊断。结果显示, 模型识别准确率 97.8%; Anitha B^[11]等人提出 IoT、云平台与机器学习结合的地下电缆故障检测定位方法。他们用传感器采集电缆电压、电流、温度及土壤化学数据, 传输至 ThingSpeak 平台进行去噪、归一化预处理, 再分别训练随机森林、DenseNet (全连接提取非线性特征)、迁移学习三类模型。结果显示, 迁移学习准确率 99%, 随机森林 97%, DenseNet 93%, 可实现实时故障检测, 为电力系统可靠性提升提供支持。

(三) 基于深度学习的电缆故障诊断研究进展

由于传统机器学习仍旧需要人为选取特征量来进行诊断, 难以进行复杂的关系拟合^[12], 随着神经网络的迅速发展, 通过多层次的神经网络自动对大量样本进行学习, 极大提升了故障诊断及识别的效率和准确性, 下表为近年来的相关研究进展。

表3 基于深度学习的电缆故障诊断研究进展

文献	研究进展
文献 [13]	高超等人提出基于 1DCNN-BiLSTM 的故障诊断方法: 先在 Simulink 搭建 10kV 配电网仿真模型, 提取各种接地故障的电压信号构建样本集; 将样本输入模型, 由 1DCNN 提取故障信号局部特征, BiLSTM 捕捉时序信息, 通过自动提取的特征实现故障诊断。结果显示, 该方法仿真中整体准确率达 98.37%
文献 [14]	肖阡等人提出基于 EEMD 融合 BAS-CNN 的故障诊断方法: 采集护层电流去噪后, 用 EEMD 分解选高相关 IMF 分量, 再以 BAS 优化 CNN 超参数建模。经验证, 该方法诊断准确率达 96.95%、MAPE 3.05%, 性能优于人工设参的 CNN。
文献 [15]	李效明提出结合 Light-GBM 与 CNN-BiLSTM 的改进 Light-GBM 算法: 设计 Light-GBM 三层结构, 输入环境与故障信号并经隐藏层处理, 再用 CNN-BiLSTM 实时优化其梯度优化因子。验证显示, 该方法故障识别准确率达 95.3%、信号采集效率 91.3%, 均高于同类算法, 且绝对误差 2.35%、平方误差 1.26%, 抗扰能力强
文献 [16]	Huan Zhang 提出基于卷积神经网络 (CNN) 的检测方法: 先在 PSCAD/EMTDC 搭建 25kV 电缆早期故障模型, 生成含恒阻故障、励磁涌流等的过流样本; 用小波变换提取样本 30 个时频特征, 输入 CNN, 通过修改损失函数与自适应学习率优化模型以解决过拟合与学习效率问题
文献 [17]	Zhichun Dong 等人提出 mRMR 算法结合混沌粒子群优化 CNN 的方法: 先提取故障电流时频域 20 个特征, 用 mRMR 筛选出 11 个高关联特征; 再用混沌粒子群算法优化 CNN 参数, 以 PSCAD 生成的 25kV 电缆 5 类故障样本训练模型。结果显示, 优化后的 CPSO-CNN 准确率达 98.95% 可准确识别电缆故障。
文献 [18]	Chang Liu 等提出 ICEEMDAN-FE 结合 IGSA 优化 CNN-BiGRU 的方法: 在 110kV 电缆局部放电实验平台采信号, 用 ICEEMDAN 分解信号并筛选有效 IMF 分量, 结合模糊熵构建特征向量; 用 IGSA 优化 CNN-BiGRU 超参数。结果显示, 模型诊断准确率 99.67%, 显著优于 CNN、GRU 等模型, 可精准诊断局部放电故障。
文献 [19]	Yangqin Liu 提出基于麻雀搜索算法优化 BP 神经网络 (SSA-BP) 的电力电缆故障诊断方法。他们以故障诊断准确率为适应度函数, 用 SSA 优化 BP 的初始权重与阈值, 并对比 BP、SSA、SSA-BP 三类算法。结果显示, SSA-BP 性能最优, 单相接地故障诊断准确率达 98.91%, 显著优于传统 BP 与单独 SSA 算法。

三、电力电缆故障定位方法研究

电力电缆作为输电的关键介质，不仅要在短时间内诊断故障，更要精确定位故障所在位置，以便及时进行隐患排查、避免中断供电。因此，电力电缆的故障定位对于维持电力系统的安全稳定运行具有至关重要的意义。

王荣亮^[20]等人针对现有电力电缆故障定位精度低、效率差的问题，提出基于行波互相关法（TWC 方法）的故障定位新方法，该方法融合高频信号注入、小波变换去噪与互相关参数优化技术；在电缆一端注入高频检测信号并采集另一端反射信号，对反射信号采用小波变换去噪，再优化互相关窗口长度与滑动步长，通过计算入射波与反射波的互相关系数，依据峰值时间延迟计算故障点距离，以实现电缆故障定位。冯新宇^[21]等人提出基于改进经验小波变换（EWT）结合 Teager 能量算子的故障定位方法，通过改进 EWT 分解信号获取多分辨率分量，再用 TEO 求解 MRA 分量的瞬时能量谱，将能量谱峰值点对应的时间代入行波计算公式确定故障位置。结果显示，该方法较传统 EMD、小波变换定位更准确，在不同电缆长度和故障位置下，定位误差范围为 0.07%–0.64%，平均定位误差达 0.37%，且能有效抵抗噪声干扰。付大廣^[22]提出改进时域反射法结合应答器–脉冲发生器的定位方案。在电缆反射端设 FPGA 应答器，检测到局部放电信号后触发脉冲发生器发射大脉冲替代弱反射脉冲，通过脉冲匹配定位。定位误差在 5m 内，软件对电缆局部放电识别率达 92%，有效解决传统方法缺陷。孙春雨^[23]提出基于高频信号幅频特征的双端定位方法：先搭建电缆仿真与试验平台，分析局放信号衰减特

性，再用与电缆波阻抗相等的电阻等效分支结构，通过计算反射系数反演并剔除反射波形干扰；最后双端检测局放信号，利用信号幅频特征中幅值比与局放源位置的函数关系插值定位。结果显示，该方法定位误差基本在 2% 以下，受波速影响小、稳定性强，有效解决传统方法缺陷。

四、结束语

作为电力和通信行业的重要组成部分，电力电缆的质量和性能直接关乎国家基础设施的安全、稳定与高效运行^[24]，其故障诊断是电力系统的重要研究方向，有助于预测电缆故障，对规避永久性损坏、保障系统稳定运行的重要性愈发突出^[25]。当前故障诊断技术已形成多维度发展脉络：既有基于关键电气参数监测的传统分析路径，也有针对特定场景的专项诊断方案；既涵盖传统机器学习的智能化检测思想，也包含神经网络等优化算法的进阶方法，为不同工况下的电缆故障提供了多元技术支撑。

与此同时，现有技术仍面临亟待突破的瓶颈：部分监测方法易受环境干扰导致判断偏差，部分智能算法存在计算复杂度较高的问题，面对多故障耦合、极端运行环境等复杂场景时，适应性与鲁棒性仍需提升。未来研究可聚焦多技术协同融合、算法轻量化优化、复杂工况适应性增强等方向，进一步推动故障诊断技术向更精准、更高效、更可靠的方向发展。期望本综述能为电力电缆故障诊断技术的理论深化与工程应用提供参考，助力提升电力系统整体运维水平。

参考文献

- [1] 贾宏涛. 基于深度学习的电力电缆故障在线诊断研究 [D]. 西安理工大学, 2023.
- [2] 张兴超, 肖妮, 王陆. 一种电力电缆故障定位系统设计 [J]. 中国科技信息, 2025, (13): 119–122.
- [3] 袁燕岭, 李世松, 董杰, 等. 电力电缆诊断检测技术综述 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 1–7.
- [4] 高青松, 杨靖. 电力电缆故障诊断研究综述 [J]. 贵州电力技术, 2016, 19(05): 54–58.
- [5] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(09): 115–123.
- [6] 李根, 周文俊, 喻莹, 等. 邻近共地高压电缆线路护层电流特征与故障诊断 [J]. 高电压技术, 2025, 51(02): 698–707.
- [7] 周正雄, 夏向阳, 朱鹏, 等. 高压电缆早期间歇性电弧接地故障识别方法 [J]. 中国电力, 2020, 53(12): 167–176.
- [8] Wang, L., Li, Z., Wang, X., Zhang, P., Zhang, J., & Li, Z. (2023, December). Cable Fault Diagnosis Based on Metal Sheath Grounding Current Monitoring Technology. In 2023 IEEE 6th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE) (pp. 748–752). IEEE.
- [9] 张育梁. 基于护层电流在线监测的高压电缆故障识别方法与系统设计研究 [D]. 长沙理工大学, 2022.
- [10] Wang, D., Zhang, X., Guo, L., Hu, Y., Ma, H., Liu, B., & Zhou, L. (2024). Fault diagnosis for terminal of 10-kV XLPE cable based on the improved m-training algorithm. IEEE Sensors Journal, 24(8), 13142–13152.
- [11] Anitha, B., Mathavan, S., Santhosh, S., & Sowmiya, R. (2025, April). Machine Learning for Fault Detection and Localization in Underground Power Cables: Improving Reliability in Power Systems. In 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM) (pp. 1516–1521). IEEE.
- [12] 吴川兰, 吴浩, 邱富泓, 等. 电力电缆早期故障诊断技术研究综述 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2025, (01): 16–20+32.
- [13] 高超, 刘泽辉, 曹栋, 等. 基于 1DCNN–BiLSTM 的电力电缆故障诊断 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(05): 86–92.
- [14] 肖肝, 周莉, 李敬兆, 等. 基于 EEMD 融合 BAS–CNN 的高压电缆故障诊断 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(04): 160–167.
- [15] 李效明. 结合 Light–GBM 算法和 CNN–BiLSTM 算法的改进电缆故障诊断方法 [J]. 电气自动化, 2025, 47(02): 108–111.
- [16] Zhang, H. (2023, August). Cable Fault Detection and Diagnosis Method Based on Convolutional Neural Network. In 2023 IEEE International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA) (pp. 1463–1466). IEEE.
- [17] Dong, Z., Feng, B., Hu, X., Zeng, H., Wu, Y., & Chen, Q. (2023, December). Cable Fault Identification Method Based on mRMR and Optimized Convolutional Neural Network. In 2023 6th International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology (EEET) (pp. 99–104). IEEE.
- [18] Liu, C., Qi, Y., Zhang, Y., Xu, Z., Wang, S., Ding, Y., ... & Wu, Y. (2024, September). Diagnosis Method for Partial Discharge Faults in Power Cables Based on Deep Learning. In 2024 The 9th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE) (pp. 91–96). IEEE.
- [19] Liu, Y., Qiu, Y., Chen, Q., Xie, Q., Lin, L., & Zhang, T. (2025, May). Research on Power Cable Fault Diagnosis Based on Sparrow Search Algorithm. In 2025 IEEE 5th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI) (pp. 310–314). IEEE.
- [20] 王荣亮, 李天翼, 王浩楠. 基于行波互相关法的电力电缆故障定位技术研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (03): 96–98.
- [21] 冯新宇, 柴侨峰, 付志伟, 等. 改进 EWT 算法的高压电缆局部放电故障定位方法 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(02): 259–265.
- [22] 付大廣. 高压电缆局部放电源定位技术研究 [D]. 大连交通大学, 2020.
- [23] 孙春雨. 基于高频信号幅频特征的电缆局部放电定位技术研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2023.
- [24] 魏永飞, 袁志文, 亓松. 我国电力电缆行业发展现状及展望 [J]. 电力与能源, 2025, 46(03): 237–244.
- [25] 唐丹, 吴浩, 蔡源. 电力电缆早期故障诊断研究综述 [J]. 电线电缆, 2023, (06): 1–5.