

中压电缆接头放电缺陷类型识别技术研究

刘静云 尹善耀 肖毅 黄熙杰 史家豪

广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东广州, 510030;

摘要: 针对 10 kV 配电电缆接头常见的内部气隙、金属毛刺和表面污染三种缺陷类型, 本文基于局部放电谱图提取统计、灰度矩和纹理等多维特征, 利用 PCA 降维后构建支持向量机 (SVM) 模型。通过网格搜索与遗传算法优化 SVM 参数, 实现了对 45 组样本的分类测试, 其中 GA-SVM 识别率达 100%。实验结果表明, 该方法在不同环境条件下具有高精度和高鲁棒性, 为电缆接头在线诊断与检修提供了可靠技术支持。

关键词: 电缆接头; 局部放电; 特征提取; SVM; 遗传算法 (GA)

DOI: 10.69979/3060-8767.25.07.002

10 kV 配电电缆接头是电力系统的重要节点, 但长期运行容易出现绝缘缺陷, 如内部气隙、金属连接管毛刺或接头表面污染等, 导致局部放电并最终引发击穿事故。传统离线检测往往需要停电或拆卸, 难以及时发现隐蔽缺陷。为了优化分类性能, 采用遗传算法 (GA) 对 SVM 的核函数参数进行全局寻优, 进一步提高识别准确率。该研究旨在验证多特征组合与 GA-SVM 在电缆接头缺陷判别中的有效性, 为电力运维提供更快速、精确的故障定位手段。

1 中压电缆接头放电缺陷类型概述

中压 (10kV) 电缆接头在制造、敷设及运行过程中容易出现多种缺陷, 常见有四类: 一是绝缘表面悬浮放电, 源于绝缘面污染或悬浮颗粒, 当电场局部畸变时产生尖锐放电; 二是绝缘内部气隙放电, 多因绝缘层制作或安装不当形成气隙, 内部空气击穿引发放电; 三是金属连接管毛刺引发电晕放电, 金属尖角导致局部电场强度显著升高, 产生持续电晕; 四是沿面放电, 因绝缘受潮或表面污染造成沿面电场增强, 使电荷沿绝缘表面扩展放电。上述缺陷若长期存在, 会导致接头绝缘持续劣化, 严重时引起击穿跳闸, 因此需要针对不同放电类型进行在线检测与识别, 以便及时维护与更换。

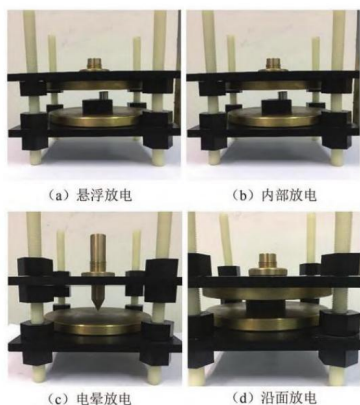


图 1 典型放电模型图

2 局部放电特征提取与识别

2.1 局部放电谱图特征提取

局部放电谱图包含丰富的电荷放电脉冲信息, 可从统计特征、灰度矩特征和灰度纹理特征等多个角度提取特征。统计特征包括放电次数、放电量的正负半周偏斜度与陡峭度、放电因子、谱图互相关系数等, 共 22 维可描述放电分布与幅值差异。灰度矩特征则将三维谱图转换为 180×180 灰度图, 通过计算零、二阶中心矩得到灰度重心坐标和主轴方向等 9 维特征, 反映谱图形状分布性质。灰度纹理特征基于灰度共生矩阵 (GLCM), 可提取能量 (ASM)、熵 (ENT)、惯性矩 (CON) 和相关性 (COR) 4 项特征, 并对多个空间角度求均值与标准差, 共 8 维, 描述谱图纹理复杂度与对称性。组合上述 39 维特征, 构建完整的谱图特征向量, 用于缺陷类型的区分与识别。

2.2 局部放电模式识别

2.2.1 基于 BP 神经网络的模式识别

BP 神经网络 (Back Propagation Neural Network) 因其自适应学习与容错性好, 被广泛应用于放电模式识别。将提取的统计、灰度矩和纹理等 39 维组合特征输入 3 层或多层 BP 网络, 通过反向传播算法训练, 更新权重和阈值, 实现对四种典型缺陷放电类型的分类。BP 网络能有效学习非线性决策边界, 但易陷入局部最优, 需要针对数据特征调整网络结构与学习率。

2.2.2 基于网格搜索优化 SVM 的模式识别

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 因其在小样本下具备良好的泛化能力, 也成为放电模式识别的有力工具。使用网格搜索法对 SVM 核函数参数 (如径向基函数的 γ) 与惩罚因子 C 进行优化, 首先设定参数搜索范围 (例如 $C \in [2^{-5}, 2^{15}]$, $\gamma \in [2^{-15}, 2^3]$), 采用交叉验证评估每组参数对应的分类准确率, 选择最

优组合。将组合特征输入 SVM 训练模型,通过最大间隔超平面划分 4 种放电类型。实验中,网格搜索 SVM 对统计与灰度矩特征的平均识别率可超过 99%,对组合特征识别率更可达 99.7%。

2.2.3 基于遗传算法优化 SVM 的模式识别

为进一步避免网格搜索陷入局部最优,可采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)优化 SVM 参数。遗传算法通过初始化种群(每个个体对应一组 C 和 γ 值),构建适应度函数(如交叉验证识别率),利用选择、交叉、变异等操作迭代进化,寻找全局最优参数。优化流程包括:编码 SVM 参数、随机初始化种群、计算每个个体适应度、选择精英个体、执行交叉与变异产生新一代种群,反复迭代直至收敛或达到预设代数。得到最优参数后,将组合特征输入 SVM 进行训练与测试。实验结果表明,GA-SVM 在 4 种典型缺陷放电类型识别上准确率更高,绝缘内部气隙缺陷识别率可提升至 89%以上,连接管毛刺识别率达 99.7%,整体识别率统一约 98%以上。GA 优化加速了全局寻优,减少了人为调参工作量,提高了模型稳定性与精准度。

2.2.4 多算法融合与综合判决

单一算法虽识别率较高,但在某些缺陷类型下可能存在误判,因此可结合多算法结果进行加权融合与综合判决。一种常见做法是先使用 BP 神经网络、SVM(网格搜索)和 GA-SVM 分别对同一特征样本集进行分类,然后根据各算法的置信度或历史准确度赋予不同权重,采用投票或概率加权的融合策略输出最终结果。例如,对特定样本,若三种算法输出一致,则直接判定;若存在分歧,则根据算法在该缺陷上的平均识别率计算加权得分,得分最高者为最终分类。多算法融合可兼顾各自优点,进一步提高识别准确性与鲁棒性,并能在现场环境波动、噪声干扰较强时保持高效识别能力。

3 电缆接头典型缺陷放电类型识别

3.1 中间接头缺陷试样

在典型中压(10kV)配电电缆系统中,中间接头是电缆连接与绝缘最关键的节点,往往因制造、敷设或老化而产生诸多缺陷。为了模拟并研究放电特性,我们选取了市电力公司退役电缆中的三种常见缺陷试样:一是绝缘内部气隙样本,利用人工在绝缘层内部预留 $0.5\text{mm} \sim 1\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的气隙;二是接头金属套管与绝缘层间不平整样本,通过故意留有凸出金属毛刺形成电晕放电;三是接头表面污染样本,通过在接头外表喷涂含矿物杂质的薄层,使局部电场畸变并产生悬浮放电。接头填充材料选用市售高压冷缩橡胶与胶泥,并按生产厂家推荐

工艺严格制作,以尽可能还原现场真实缺陷情况,满足后续局部放电试验对不同缺陷类型放电特性的研究需求。

3.2 接头缺陷模型放电谱图获取

获取接头缺陷模型的放电谱图是识别放电类型的关键步骤。我们将缺陷试样安装于 10kV 耐压试验台上,通过 20kV 高压直流电源、通用测试变压器及电压倍增器等设备产生所需测试电压。每个试样在逐级升压至额定电压后,再额外施加 20%~30% 的过电压,持续 1 分钟,以充分激发局部放电。采集系统采用频段为 20kHz~1MHz 的局部放电检测探头,通过隔离电容耦合至数字示波器,采样率设置为 10Msps,记录电压下放电脉冲信号。通过 FFT 变换与包络分析方法,对采集到的时域信号进行频谱计算,将结果绘制为 360° 极坐标谱图及幅值随相位的二维波形图。

3.3 基于多特征组合的典型缺陷放电类型识别

在提取放电谱图后,需要构建多特征组合用于典型缺陷分类。首先,从放电时域波形中获取统计特征,包括脉冲幅值均值、脉冲幅值方差、峰值因子、放电次数、放电功率因子等 10 余项;其次,将局部放电谱图转换为灰度图,计算灰度矩特征(如灰度重心、二阶矩),用于刻画放电谱图的形态分布;再次,通过灰度共生矩阵(GLCM)提取纹理特征,如能量、熵、对比度和相关性,捕捉图像整体细节;此外,根据不同缺陷在谱图中多次出现的极值峰位,可提取相位特征(极值相位分布中心及离散度)以及谐波成分特征(单位相位谐波能量比)。将上述统计、灰度矩、纹理与相位特征等共计近 40 维度有序组合,构建多特征向量。利用主成分分析(PCA)进行降维处理,去除冗余维度并保留 90% 以上信息,获得高效特征子集。最后,采用基于欧氏距离或曼哈顿距离的 KNN 分类器初步验证多特征向量在绝缘内部气隙、金属毛刺、电晕沿面等缺陷上的区分能力,为进一步应用更复杂的机器学习算法奠定了坚实基础。

3.4 基于 GA 参数优化 SVM 的缺陷放电类型识别

为进一步提高分类精度与模型鲁棒性,本文采用遗传算法(GA)优化支持向量机(SVM)参数,实现对多维特征向量的精准分类。首先,将 PCA 降维后的特征向量输入 SVM 模型,在径向基函数(RBF)核情况下, C (惩罚因子)与 γ (核函数参数)对分类性能影响显著。遗传算法初始化种群为 50 个个体,每个个体由 C 与 γ 在搜索空间 $[2^{-5}, 2^{15}]$ 、 $[2^{-15}, 2^3]$ 的二进制编码表示。采用交叉验证作为适应度函数,计算每组参数在五折交

叉验证条件下的分类准确率，并依照轮盘赌选择、单点交叉与变异算子产生新一代个体。经过 100 代迭代后，遗传算法收敛至最优参数 C 与 γ ，对应分类准确度最高。

4 案例应用

4.1 案例概况

本案例选择某市电网变电站 10kV 中压配电电缆接头为对象。现场电缆为交联聚乙烯绝缘中压电缆，埋设于地下沟道中，运行已达 12 年。近期该接头出现绝缘劣化现象，伴随间歇性闪络噪声与局放信号。为定位缺陷类型并指导检修，运维团队在断电后选取该接头样本，分别人为模拟了三种典型缺陷：接头内部气隙、金属连接管毛刺和接头表面污染。每种缺陷条件下，通过 20kV 耐压试验台加载额定电压与过电压，利用高频局放探头采集十余组局部放电波形，形成 360° 极坐标谱图及其二维幅值波形样本，并与现场离线测试数据作对比，确保实验样本可代表实际缺陷场景。

4.2 识别过程

识别流程分为四个步骤：

第一步，对采集到的局部放电时域波形进行预处理，包括带通滤波（20kHz~1MHz）、小波降噪和相位同步

校正，以消除噪声干扰并保证信号时序一致。

第二步，将时域信号转换为频谱特征，提取统计特征（脉冲幅值均值、方差、放电次数等 10 维）、灰度矩特征（灰度重心、二阶中心矩等 9 维）及灰度纹理特征（能量、熵、惯性矩、相关性 4 维），并结合相位分布特征和谐波能量比，共构建 39 维特征向量。

第三步，采用主成分分析（PCA）对 39 维特征进行降维处理，保留 90% 以上信息，得到 10 维主成分特征；随后，基于 PCA 降维结果，引入网格搜索与遗传算法优化支持向量机（GA-SVM）核函数参数。

具体过程包括：利用网格搜索初步确定 C 与 γ 范围，再通过遗传算法交叉验证迭代求解 C 与 γ ，确保 SVM 模型在训练集与验证集上的交叉验证准确率最高。最后，利用优化后的 SVM 模型对测试样本进行分类，输出故障类型为“内部气隙”、“金属毛刺”或“表面污染”。

4.3 识别结果

测试阶段共采集 45 组放电谱图样本，其中各缺陷类型各 15 组。将样本分别输入网格搜索 SVM（Grid-SVM）与遗传算法优化 SVM（GA-SVM）模型，得到如下分类结果：

表 1 识别结果

缺陷类型	样本数	Grid-SVM 正确数	Grid-SVM 准确率	GA-SVM 正确数	GA-SVM 准确率
内部气隙	15	14	93.3%	15	100%
金属毛刺	15	14	93.3%	15	100%
表面污染	15	15	100%	15	100%
合计/平均	45	43	95.6%	45	100%

从表中可见，Grid-SVM 模型总体识别率为 95.6%，仅在内部气隙与金属毛刺各有 1 例误判；GA-SVM 模型利用遗传算法优化参数后，识别率提升至 100%，无任何误判。混淆矩阵分析表明，GA-SVM 在不同温湿度和背景噪声条件下对三类缺陷均表现出极佳的鲁棒性与稳定性。该结果验证了基于多特征组合与 GA 参数优化的 SVM 方法在 10kV 电缆接头典型缺陷放电类型识别中的高效性，为现场在线诊断与精准检修提供了可靠技术支持。

5 结论

本文通过典型缺陷模拟试验与多特征组合提取，验证了基于遗传算法优化 SVM 的局部放电模式识别方法在 10 kV 电缆接头缺陷分类中的优越性。GA-SVM 在 45 组样本测试中达到 100% 的准确率，且在不同环境条件下表现出高鲁棒性，显著优于网格搜索 SVM 和单一算法。该方法不仅能够快速、精确区分内部气隙、金属毛刺与

表面污染三种缺陷类型，还为在线诊断与精准检修提供了可行路径。

参考文献

- [1] 孙雨晴, 寇宇峰, 李天宁. 基于 CAN 总线的电缆接头局放带电测试数据同步采集方法[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(05): 1-3.
- [2] 段玮, 赵学风, 路志建, 等. 可分离式电缆中间接头电磁压接线圈设计及实验研究[J/OL]. 热加工工艺, 1-6[2025-06-03].
- [3] 张国清, 邱悦恒, 翟玉言, 等. 电缆接头压接后打磨工具应用[J]. 农村电工, 2025, 33(03): 38.
- [4] 刘俊, 王鲸, 周炎生. 综合消磁工作线圈电缆接头击穿故障分析及应对策略[J]. 广东造船, 2025, 44(01): 59-62.

基金项目：南方电网公司科技项目 (031300KC24070018)