

高压电缆交接试验中局部放电检测技术应用与缺陷识别研究

贺俊良

广东电网有限责任公司佛山供电局 广东 佛山 528000

【摘要】：高压电缆交接试验是发现绝缘潜伏缺陷的重要环节，局部放电检测可捕捉常规电气试验难以识别的微弱异常。针对现场干扰导致信号失真、放电特征提取不充分及缺陷类型判定困难等问题，构建信号采集、干扰抑制、特征提取及模式识别相衔接的检测方法，解析不同绝缘缺陷的局放特征。应用结果表明，该方法能够增强有效放电信号辨识能力，提高典型缺陷定位及分类准确性，为电缆交接试验质量判定提供可靠依据。

【关键词】：高压电缆；交接试验；局部放电检测；特征提取；缺陷识别

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.005

引言

高压电缆投运前的交接试验直接关系绝缘状态判定质量，部分制造损伤、附件安装偏差及绝缘内部微小缺陷具有较强隐蔽性，仅依靠耐压、绝缘电阻等试验参数难以充分捕捉异常。局部放电产生的脉冲信号能够反映绝缘薄弱区域，但现场电磁干扰、信号传播衰减以及不同缺陷放电特征交叠，会增加检测结果解析难度。如何从复杂信号中分离有效局放信息，并依据相位分布、放电幅值、脉冲频次等特征准确区分典型缺陷，成为提升高压电缆交接试验检测精度需要解决的关键技术问题。

1 高压电缆交接试验局部放电检测技术基础

1.1 交接试验绝缘状态检测要求

高压电缆交接试验需要对电缆本体、中间接头、终端等关键部位的绝缘完整性进行系统核验，检测重点不能局限于耐压条件下是否发生击穿，还应关注尚未发展为贯穿性故障的局部绝缘异常。试验过程中需结合电缆额定电压、绝缘结构、线路长度及附件配置确定施加电压和检测条件，使局部放电测量能够覆盖实际运行中可能承受的电场应力。对于绝缘内部微小气隙、界面贴合异常、附件装配偏差等潜伏缺陷，应同步记录放电起始电压、熄灭电压、放电量及重复率，核查升压、稳压和降压阶段信号变化，避免单纯依赖某一时刻的放电幅值作出绝缘状态判断。

1.2 局部放电信号形成机理

高压电缆绝缘结构存在气隙、杂质、尖端或界面接触异常时，局部区域电场会发生重新分布，电场强度达到介质局部击穿条件后形成短时放电，并产生具有陡峭前沿的脉冲电流^[1]。交联聚乙烯绝缘内部缺陷形成的放电通常受到缺陷尺寸、介电常数、电场方向及空间电荷积聚状态共同影响；终端和中间接头处则受半导体层处理、应力锥装配、界面压力及屏蔽连续性影响更明显。每次局部放电都会改变缺陷区域电荷分布，使后续放电的相位、幅值和重复频次发生变化。脉冲信号沿电缆传播时还会受到衰减、反射及色散影响，因此检测端获得的波形并非电源信号的简单复制。

1.3 局放检测参数判读依据

局放检测结果判读需要从单一幅值判断转向多参数关联分析，将视在放电量、放电相位、脉冲重复率、信号极性、频谱分布及放电起始特征纳入同一识别框架。相位分辨局部放电图谱能够呈现一个工频周期内脉冲数量、幅值及相位位置的聚集规律，不同绝缘缺陷对应的放电区间、对称程度和密集程度存在差异。高频信号的中心频率、能量分布及脉冲时宽可进一步用于区分真实局放和现场周期性、随机性干扰。判读时还需比较不同试验电压等级下参数变化趋势，若放电量随电压升高持续增加且特征图谱保持稳定聚集，应结合传播时差和信号衰减规律进一步锁定异常位置及缺陷属性。

2 高压电缆交接试验局放检测关键问题

2.1 复杂电磁环境引发信号干扰

交接试验现场存在开关设备操作脉冲、无线通信、电力电子装置及邻近带电设备产生的多源电磁干扰，其频带可能与局部放电脉冲发生重叠。部分干扰经接地回路、空间耦合或试验线路进入采集通道后，会形成幅值突变、周期性脉冲及高频振荡，使真实局放信号的波形边界趋于模糊。若仅设置固定幅值阈值进行筛选，容易将低幅值有效信号滤除，或将强干扰误判为局部放电，直接影响交接试验异常识别的可靠性。

2.2 传播衰减造成局放特征失真

局部放电脉冲从缺陷位置传播至检测端需要经过较长电缆线路，高频分量受导体损耗、介质损耗及屏蔽结构影响会出现明显衰减，同时伴随波形展宽和频谱迁移。中间接头、终端及阻抗不连续位置产生的反射信号还可能与原始脉冲叠加，使峰值、极性和到达时间发生改变^[2]。距离检测端较远的微弱放电更容易淹没于背景噪声，造成视在放电量低估、脉冲特征缺失及定位偏差，增加长距离高压电缆交接试验的检测难度。

2.3 特征交叠增加缺陷判别难度

绝缘气隙、界面异常、尖端电场畸变及附件装配缺陷产生的局放信号并非具有完全独立的特征边界，相近电场条件下可能出现相似的相位分布、幅值区间和脉冲密度。试验电压变化、

缺陷发展程度及空间电荷积聚还会改变原有放电模式，使同类缺陷呈现不同图谱形态。依赖单项参数或人工图谱比对容易出现类别混淆，需要从时域、频域、相位分布及能量特征等维度建立更稳定的缺陷表征依据。

3 高压电缆局部放电检测技术优化

3.1 多源局放信号精准采集

多源局放信号采集应兼顾电缆本体、终端和中间接头的结构差异，依据放电脉冲传播路径合理配置高频电流传感器、超高频传感单元及同步采集通道，减少单一检测点对远端微弱放电的遗漏。采集端需根据局放脉冲上升时间短、频带宽的特点匹配采样率、模拟带宽和触发阈值，并通过阻抗匹配降低信号反射对原始波形的影响。交接试验升压过程中实施连续同步采样，将试验电压相位信息与各通道脉冲到达时刻建立对应关系，保留幅值、极性、相位和时间序列等原始信息。不同检测位置获得的信号可通过时间同步和通道关联形成多源数据集，再利用脉冲到达时间差、幅值变化及传播方向筛查疑似放电源，使局放采集由单点测量转向多位置协同感知，为后续干扰分离和缺陷定位提供完整数据基础。

3.2 噪声干扰抑制及有效脉冲分离

噪声处理不宜采用单一幅值门限直接截除，而应依据干扰信号的周期性、频谱结构、持续时间及通道相关性建立分层抑制机制。采集前通过屏蔽、规范接地和检测回路隔离降低空间耦合及接地环流形成的背景噪声；数字处理阶段对原始序列进行频带分析，识别窄带周期干扰、高频随机噪声及突发脉冲的频率边界。针对局放信号非平稳、瞬态性强的特征，可利用小波分解、时频滤波等方法保留脉冲突变成分，避免过度滤波造成有效高频信息损失^[3]。完成初步降噪后，再结合脉冲持续时间、峰值位置、相位聚集程度和多通道到达次序进行聚类分离，将具有稳定相位关联和传播一致性的脉冲从复杂数据中提取出来。动态阈值可根据现场噪声水平自适应调整，使微弱局放信号不会因固定门限设置过高而被直接剔除。现场干扰抑制需同步控制金属屏蔽层与铠装的接地回路，单芯电缆常见单点接地形式如图1所示。

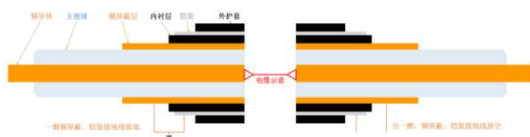


图1 单芯电缆铜屏蔽及铠装单点接地示意

3.3 局放时频特征深层提取

局放信号特征提取需要突破单纯依靠峰值和视在放电量判别的局限，将瞬态波形内部携带的时间、频率及相位信息转化为可量化的缺陷特征参数。时域层面可提取脉冲峰值、上升时间、持续时间、脉冲间隔、能量及重复率，描述放电强度和

连续性；频域分析重点获得中心频率、频带宽度、谱峰位置及频谱能量分布，用于刻画不同放电源的高频响应差异。针对局放信号频率成分随时间快速变化的特性，引入时频分析形成局部能量分布矩阵，可保留传统傅里叶分析容易丢失的瞬态信息。进一步将相位分辨局放图谱中的相位区间、正负半周对称性、放电密度等参数进行特征化处理，构建时域—频域—相位域多维特征向量，降低单一参数受电压波动和传播衰减影响产生的识别偏差。

4 局部放电特征驱动的电缆缺陷识别

4.1 绝缘内部缺陷放电特征判定

绝缘内部缺陷识别需要关注放电活动与工频电压相位、电场强度变化之间的对应关系。交联聚乙烯绝缘层存在微孔、气隙、杂质或局部结构不均匀时，缺陷区域介电常数发生差异，电场容易产生局部集中，达到起始放电条件后形成重复性脉冲。判定过程中可将正负半周放电起始相位、峰值放电量、脉冲密度及相位分布宽度进行关联，观察放电簇是否形成相对稳定的聚集区域。内部气隙类缺陷通常具有较明显的周期相关性，其放电幅值和重复频次还会随试验电压升高发生规律性变化。对于杂质、绝缘分层等不规则缺陷，则需关注脉冲离散程度、能量波动及频谱重心变化。结合升压、稳压阶段连续数据分析，可区分偶发随机脉冲和持续性绝缘异常，减少仅依据瞬态高幅值信号造成的误判，使缺陷判定能够反映绝缘内部电场畸变及放电发展的真实状态。

4.2 电缆附件缺陷局放模式辨识

电缆终端和中间接头属于交接试验缺陷识别的重点区域，其局放模式受界面结构、应力控制状态和施工质量影响明显。半导体层切削不平整、应力锥位置偏移、绝缘界面贴合不良以及内部残留微小空隙，均可能改变附件区域原有电场分布，使局部高场强区域产生具有空间集中性的放电脉冲^[4]。模式辨识时，应结合传感通道位置比较脉冲幅值、极性和到达时间，利用不同测点之间的信号强弱关系缩小异常区域，再分析放电相位分布、脉冲重复规律及频谱能量集中区间。界面类异常往往受表面电荷迁移和接触状态影响，局放图谱可能呈现较宽的相位分布；电场集中型异常则更容易出现幅值较高、相位聚集程度较强的脉冲簇。将局放模式与附件结构位置、试验电压变化和传播路径联合校核，可避免把外部干扰或本体放电错误归入附件缺陷，提高终端、接头异常识别的针对性。附件制作缺陷在耐压条件下可能进一步发展为击穿，解体后的主绝缘击穿点及半导体颗粒残留如图2所示。

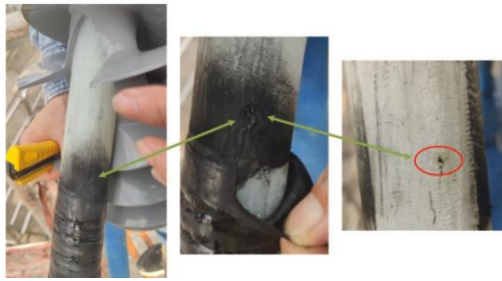


图2 电缆终端击穿解体及典型缺陷位置

4.3 多维特征融合缺陷分类判定

单一局放参数难以稳定区分特征相近的绝缘缺陷，因此缺陷分类可将时域、频域、相位域及多通道传播信息进行融合，形成具有较高区分度的特征集合。时域参数反映脉冲幅值、持续时间和重复规律，频域参数刻画频谱重心、带宽及能量分布，相位特征揭示放电活动与工频电压周期的关联，多通道时差则补充放电空间位置的信息。数据进入分类环节前，可通过归一化和特征筛选降低量纲差异及冗余变量影响，再依据特征相关程度建立缺陷模式特征向量。针对类别边界交叠问题，可引入聚类分析、支持向量机或轻量化智能分类模型，对历史交接试验样本形成的特征库进行训练和匹配，并通过置信度输出保留疑似缺陷的复核空间。分类结果同时关联局放位置、放电强度及电压变化趋势，可形成“信号特征—空间区域—缺陷类别”的对应关系，提升复杂工况下缺陷判定的一致性。

5 局放检测技术应用效果及试验质量控制

5.1 局放信号辨识精度改善

多通道同步采集、动态降噪和时频联合分析应用后，交接试验中的有效局放脉冲能够从复杂背景信号中得到更清晰分离。信号处理不再依赖固定幅值门限，而是利用脉冲持续时间、频谱能量、相位聚集性及通道传播关联进行联合筛选，使周期性干扰、随机噪声与真实放电之间形成更明确的特征边界。经过处理的局放波形能够较完整保留峰值、上升沿及高频成分，

微弱放电被噪声覆盖的概率相应降低。检测结果还可通过相邻测点信号相关性进行交叉验证，减少单通道异常造成的误报，为后续缺陷分类提供可信度更高的原始数据。

5.2 典型绝缘缺陷识别能力提升

缺陷识别由局放幅值单指标判断转向波形、频谱、相位及空间位置的联合解析后，不同绝缘异常之间的细微差别能够得到更充分表征^[5]。内部气隙、界面异常、电场集中及附件装配缺陷可依据放电簇分布、能量变化、重复频次和传播时差建立对应特征关系，对相似局放图谱则通过多维参数交叉约束缩小类别边界。连续升压过程产生的数据还能反映缺陷由起始放电到稳定放电的动态变化，避免瞬时异常左右识别结果。结合历史检测特征库持续校正分类参数，可增强复杂缺陷、低幅值缺陷及多源放电并存条件下的辨识稳定性。

5.3 交接试验检测结果综合判定

交接试验结果判定需要把局部放电检测数据纳入电缆绝缘状态整体评价，而非依据某次脉冲幅值直接确定试验结论。判定环节可综合试验电压水平、放电起始及熄灭特性、局放量变化趋势、异常位置、缺陷类别和信号重复稳定性，形成分层判据。对于持续出现且随电压升高明显增强的异常信号，应结合定位结果核查对应电缆本体或附件区域；对于偶发且缺乏相位关联的脉冲，则需通过复测和多通道数据校核其真实性。检测数据、原始波形、特征图谱及判定结果同步归档，可形成可追溯的数字化交接试验记录，为投运前质量控制提供完整证据链。

6 结语

高压电缆交接试验采用局部放电检测，可从微弱脉冲中捕捉绝缘异常信息。多源采集、噪声抑制、时频特征提取及多维融合识别相互衔接，能够降低复杂干扰和传播衰减造成的判别偏差，增强电缆本体及附件潜伏缺陷的识别精度，为交接试验质量控制提供可靠技术依据。

参考文献：

- [1] 李小龙,郭来功,来文豪,等.基于改进 K-means 聚类高压电缆的局部放电定位和识别[J].电工技术,2025,(6):124-130.
- [2] 王鸿,卢一晗,盛勇,等.长距离超高压电缆交接试验时分布式局部放电传感器安装位置的优化研究[J].电网与清洁能源,2023,39(12):104-114+120.
- [3] 潘彪,周永涛,董秦龙,等.基于 FDTD 建模的高压电缆局部放电检测方法[J].浙江电力,2023,42(12):12-19.
- [4] 刘秀婷,李烨,高峰,等.高压电缆局部放电检测及识别系统研究[J].电子测量技术,2024,47(17):97-107.
- [5] 张羽翔.高压电气试验的局部放电检测方法及其故障诊断研究[J].防爆电机,2025,60(4):124-127.