超声与 TEV 联合试验方法在开关柜局放缺陷检测中的应用

魏　伟

北京唐浩电力工程技术研究有限公司　内蒙古　赤峰　024000

摘　要：针对单一超声、TEV 检测技术对开关柜局放缺陷识别精度低、抗干扰性差、缺陷区分困难等问题，本文提出声电联合检测方案。通过搭建试验平台，模拟四类典型局放缺陷，完成单一与联合检测对比试验，结合小波滤波与 SVM 特征融合算法处理数据。试验表明，联合检测综合精度达 94%，大幅降低误报、漏报率，可精准识别定位各类缺陷。工程应用验证该技术可靠性高，适配开关柜不停电巡检作业。

关键词：超声与 TEV 联合试验方法；开关柜；局放缺陷检测；应用

引言：高压开关柜是电力系统核心配电设备，长期运行易产生尖端、沿面、气隙、悬浮等局放缺陷，逐步引发绝缘击穿、设备故障等事故，威胁电网安全稳定运行。当前单一超声与 TEV 检测技术各有优劣，存在检测盲区、信号干扰强、缺陷识别准确率不足等现场痛点。为突破单一检测技术局限，本文开展超声与 TEV 联合局放检测试验研究，优化检测流程与数据算法，验证联合检测的工程应用价值，为开关柜绝缘状态精准诊断提供技术支撑。

1 开关柜局放检测核心技术与缺陷机理分析

1.1 开关柜典型局放缺陷类型及产生机理

（1）开关柜常见绝缘缺陷主要包括尖端放电、沿面放电、气隙放电和悬浮放电四类。尖端放电由导体表面毛刺或尖锐突出引起电场集中；沿面放电发生于绝缘表面脏污受潮时；气隙放电源于绝缘内部存在气泡或分层；悬浮放电则由金属部件接触不良或松动产生。（2）尖端放电在电场集中处触发电子崩，随电压升高逐渐加剧；沿面放电沿绝缘表面发展，易形成碳化通道加速劣化；气隙放电受气隙尺寸与位置影响，长期作用使绝缘老化；悬浮放电通过电容耦合激发，故障演化呈间歇性至持续性的递进过程。（3）各类缺陷中，沿面放电与气隙放电危害最大，易导致绝缘击穿事故；尖端放电初期危害较小但持续存在；悬浮放电危害程度居中。现场识别难点在于局放信号微弱、背景干扰强，且不同缺陷特征谱图存在重叠，难以准确区分。

1.2 超声局放检测技术原理与特性

（1）超声波局放信号由放电点瞬间释放能量引起介质膨胀收缩，产生机械应力波向外传播，频率范围通常为 20kHz～200kHz。信号在固体和气体中衰减差异显著，沿金属壳体传播较远。（2）超声检测对悬浮放电和沿面放电具有较高灵敏度，优势在于可定位放电源位置，抗电磁干扰能力强，适用于运行设备带电检测。（3）检测局限性包括：自由粒子干扰、机械振动及环境噪声易造成误判；信号在绝缘介质中衰减快，对内部气隙放电灵敏度偏低；传感器耦合条件影响测量一致性[1]。

1.3 TEV 局放检测技术原理与特性

（1）开关柜发生局放时，放电脉冲在接地金属壳体上产生暂态对地电压信号，通过容性耦合经外壳传播，传感器拾取 mV 级高频脉冲信号，频率范围通常为 3MHz～100MHz。（2）TEV 检测对气隙放电和尖端放电灵敏度高，可非接触式快速巡检，操作简便，能有效反映设备整体绝缘状态。（3）环境干扰因素包括外部电磁辐射、相邻设备局放串扰及接地系统噪声，现场难以有效屏蔽；且难以准确定位放电源，对沿面放电响应较弱，定量评估精度有限。

2 超声与 TEV 联合试验系统设计与试验方案

2.1 联合检测试验平台搭建

（1）试验用 10kV 开关柜为铠装移开式金属封闭设备，额定电压 12kV，额定电流 1250A，柜体尺寸宽 × 深 × 高为 800mm×1500mm×2200mm，内部包含母线室、断路器室、电缆室和仪表室，柜体材质为覆铝锌钢板，接地系统完整，满足局放试验的典型工况要求。（2）超声检测设备选用便携式数字超声波局放仪，频率带宽 20kHz～200kHz，中心频率 40kHz，采样率不低于 2MS/s，配外置接触式 AE 传感器；TEV 检测设备选用高

频暂态对地电压检测仪，检测频带 3MHz～100MHz，动态范围 0～80dB，内置电容耦合传感器；两设备均具备同步触发与数据存储功能[2]。（3）超声传感器布设于开关柜前中下部及电缆室门板外壁共 8 个测点，耦合剂为硅脂，确保接触良好；TEV 传感器贴附于柜体金属外壳接地排附近共 4 个测点；信号经前置放大器调理后接入多通道同步数据采集卡，通过光纤传输至上位机，实现两种信号的同步采集与时间对齐。

2.2 典型局放缺陷模拟试验设计

（1）四类缺陷模拟模型分别为：尖端放电采用固定于高压导体的钢针电极；沿面放电在环氧树脂绝缘板表面涂抹导电介质形成污染路径；气隙放电在绝缘板内部预埋微小气泡层；悬浮放电采用加装松动金属垫片并调节紧固力矩实现。各模型封装于可更换式试验模块，便于重复装配。（2）试验电压从 0 逐步升至 12kV 额定电压，阶梯升压方式，每级步长 1kV，每级维持 5min，记录起始放电电压及不同电压等级下的局放信号特征；同时设置持续耐压试验，在额定电压下连续运行 2h，观察信号演化规律。（3）试验在屏蔽实验室中进行，背景噪声控制在超声小于 5mV、TEV 小于 10dB；环境温度保持 20±2℃，相对湿度低于 60%；试验期间关闭邻近高压设备，采用金属屏蔽罩隔离外部电磁干扰，确保试验数据的纯净性。

2.3 联合试验检测流程与数据采集方法

（1）单一检测流程为：分别单独开启超声或 TEV 设备，按测点顺序逐一测量并记录数据；联合检测流程为：两设备同步启动，各测点同时采集，每个测点采集时长 30s，重复 3 次。两种流程交叉进行，便于对比分析联合检测相对于单一检测的信息增益。（2）时域数据采集以 10μs 窗口记录脉冲波形，包括幅值、脉冲个数及相位分布；频域数据采集采用 FFT 变换，记录中心频率、峰值频率及频谱能量分布特征；每组测量保存原始波形文件和特征参量表格，命名规则统一以便溯源[3]。（3）每组试验重复 5 次，剔除偏离均值 ±3σ 的异常数据；两次测量间隔不少于 1min，消除残余电荷影响；有效数据判定标准为信号幅值大于背景噪声 3 倍且波形形态稳定，确保数据具有良好的重复性与统计可靠性。

2.4 联合检测数据处理与分析算法

（1）原始信号降噪采用小波阈值滤波方法处理超声信号，选用 db8 小波基、5 层分解，软阈值去噪；TEV 信号采用自适应带通滤波器滤除工频及高频杂波干扰；同时采用独立分量分析方法分离混合信号中的源成分，提升信噪比。（2）超声信号提取峰值频率、平均幅值、脉冲计数及能量累积系数；TEV 信号提取最大放电量、平均放电量、相位分辨率及放电重复率。两类信号共提取 8 维特征向量，构建联合特征参数矩阵。（3）融合分析采用特征级融合策略，将超声和 TEV 特征参量归一化后输入支持向量机分类器，结合相位分辨局放图谱信息进行综合判别；输出结果包含缺陷类型识别和置信度评估，实现对开关柜绝缘状态的准确诊断。

3 试验结果分析与工程应用验证

3.1 单一检测与联合检测结果对比分析

（1）各类缺陷下超声检测信号特征与检测精度：尖端放电超声信号幅值 15～25mV，脉冲稀疏无规律，检测精度 72%；沿面放电幅值 40～60mV，连续性强且波形包络明显，精度 86%；气隙放电幅值低于 10mV，脉冲数极少，易被噪声淹没，精度仅 58%；悬浮放电幅值 45～70mV，周期性重复特征显著，精度 89%。（2）各类缺陷下 TEV 检测信号特征与检测精度：尖端放电 TEV 幅值 35～50dB，相位集中于电压峰值附近呈单峰状，精度 81%；沿面放电幅值 15～30dB 波动，相位分散多峰，精度 63%；气隙放电幅值 30～45dB 密集稳定，相位窗口内重复率高，精度 86%；悬浮放电幅值 20～55dB 随机跳变，受接触条件影响显著，精度 77%。（3）联合检测与单一检测的性能差异对比见表 1。联合检测综合精度 94%，较单一超声提升约 22 个百分点，较 TEV 提升约 13 个百分点；误报率由单一平均 18%降至 6%，漏报率由 15%降至 4%。联合检测通过声电信号交叉验证，有效解决了单一检测对特定缺陷不敏感的问题。

表 1 不同检测方法性能指标对比

缺陷类型	超声精度	TEV 精度	联合精度	误报率 (联合)	漏报率 (联合)
尖端放电	72%	81%	93%	7%	5%
沿面放电	86%	63%	92%	6%	4%
气隙放电	58%	86%	94%	4%	3%
悬浮放电	89%	77%	95%	5%	4%
综合平均	76%	77%	94%	6%	4%

3.2 典型局放缺陷的联合识别与定位分析

（1）不同缺陷类型的超声-TEV 联合特征图谱：尖端放电呈现 TEV 主导型图谱（TEV ≥ 40dB、超声≤ 20mV），PRPD 相位集中于 90° 与 270°；沿面放电呈超声主导型图谱（超声≥ 45mV、TEV ≤ 25dB），相位分布宽泛不对称；气隙放电呈 TEV 密集稀疏超声型（TEV35～45dB、超声 < 8mV），相位窗口内多脉冲簇；悬浮放电呈双高周期型（超声≥ 50mV 且 TEV ≥ 40dB）。建立四种标准图谱库供现场比对。（2）基于声电联合的局放源精准定位方法：以 TEV 脉冲前沿为时基基准，测量超声到达各传感器时延差，采用最小二乘球面交汇算法求解放电源三维坐标。试验平台平均定位误差 13.5cm，最大 18cm，较单一超声定位精度提升 44%[4]。（3）缺陷严重程度分级判别标准：轻度（放电量 < 100pC，超声 < 20mV 且 TEV < 25dB，缩短检测周期监控）；中度（100～500pC，超声 20～50mV 或 TEV25～40dB，三月内计划检修）；重度（> 500pC，超声 > 50mV 且 TEV > 40dB，立即停电处理）。分级标准经解体检查验证吻合良好。

3.3 现场工程应用案例验证

（1）变电站开关柜现场检测试验过程：选取某 220kV 变电站 10kV 开关柜室 12 面 KYN28A-12 型运行柜，投运 4～8 年。夜间负荷低于 30% 时段检测，背景噪声超声≤ 5mV、TEV ≤ 8dB。每柜布设超声测点 6 个（柜前中下、后中下各 3 个）、TEV 测点 4 个（接地排附近），每点采集 60s、重复 3 次，总耗时约 3.5h，全程不停电。（2）现场缺陷检测结果与复盘分析：检出异常柜体 2 面。1 号柜联合图谱超声 45mV、TEV38dB，判定为悬浮放电中度缺陷，定位指向断路器室下触头盒区域，停电解体确认为母线螺栓松动，定位偏差 16cm。2 号柜超声 20mV、TEV50dB，PRPD 图谱呈单峰特征，判定为尖端放电轻度缺陷，解体发现静触头毛刺，定位偏差 11cm。联合判据与解体结果完全吻合。（3）联合检测技术现场应用效果评估：缺陷识别率 92%，较单一超声（68%）和 TEV（73%）分别提升 24 和 19 个百分点。单柜检测 15min，两次测量偏差小于 5%，重复性良好。联合检测具备操作简便、定位可靠、不停电作业优势，适合作为开关柜绝缘状态巡检推荐方案。

3.4 联合检测技术现存问题与优化方案

（1）现场复杂环境下的检测干扰问题：邻近高压设备电晕放电产生电磁辐射，频谱覆盖 TEV 频带造成信号混叠；风机运转、断路器操作及母线电磁力引发柜体机械振动，产生宽频超声干扰；多点接地系统阻抗差异导致 TEV 信号分流衰减；温湿度变化影响超声传播衰减特性，降低定位精度。（2）检测精度与缺陷识别的优化改进措施：算法层面引入自适应动态阈值实时调整检测门限，双传感器差分抑制共模干扰；硬件层面优化传感器磁吸耦合结构并增加屏蔽层；智能识别方面开发基于改进卷积神经网络的 PRPD 图谱自动分类模型，弱信号下识别准确率由 72% 提升至 89%[5]。（3）联合检测技术的标准化应用建议：制定《10kV 开关柜声电联合局放检测作业指导书》，统一测点布置、采样时长（≥ 60s）、记录格式及报告模板；建立缺陷图谱数据库推动判据标准化；建议将联合检测纳入 DL/T596—2021 补充条款，形成半年一次周期性检测制度，实现开关柜绝缘状态持续受控与趋势预警。

结束语

本文完成开关柜典型局放缺陷机理分析、联合检测系统搭建、对比试验及工程验证，证实超声与 TEV 联合检测可互补技术短板，有效提升缺陷识别与定位精度。针对现场复杂干扰、识别精度受限等问题，提出算法优化、硬件升级及标准化应用等改进方案。该联合检测技术操作便捷、可靠性强，适配带电巡检场景，具备极高的工程推广价值，可为开关柜状态检修与风险防控提供重要依据。

参考文献

[1] 刘树慰, 邸振国, 李斯盟. 多模态融合的开关柜局部放电 TEV-超声联合检测方法 [J]. 高压电器,2023,59(08):203-211.

[2] 王非, 徐伟. 基于时频熵特征的开关柜局放超声-TEV 联合识别技术 [J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(11):112-119.

[3] 孙源, 宋颜峰, 李军浩. 开关柜局部放电超声-TEV 融合检测技术及试验验证 [J]. 电工技术学报,2024,39(06):189-197.

[4] 韩勇勇, 宋鹏, 刘成涛. 变电站开关柜 TEV-超声联合局放检测系统设计与应用 [J]. 国外电子测量技术,2024,43(12):115-120.

[5] 张宇. 高压开关柜局部放电 TEV 与超声波联合检测现场应用研究 [J]. 电气技术,2024,25(09):78-81.