10 千伏开关柜局部放电带电检测技术应用研究

安建波[1]，肖　博[2]

（1. 国网北京电力公司海淀供电公司，北京 100086；
2. 北京海淀供电实业开发有限公司，北京 100086）

摘　要　局部放电是引发 10 千伏开关柜绝缘劣化并最终导致故障的核心诱因。传统停电试验难以在设备运行状态下实时感知绝缘隐患，而带电检测技术可在不中断供电的前提下完成对开关柜绝缘状态的动态评估，对支撑配电网从计划检修向状态检修转型具有重要的工程价值。本文阐释了开关柜内部局部放电的产生机理与典型物理表征特性，对比了暂态地电压、超声波、特高频与高频电流四种主流带电检测方法的物理基础、信号特征与适用场景差异。在此基础上提出以“广谱初筛—精准定位—类型识别”为核心逻辑的多技术联合诊断框架，归纳得到不同典型局部放电类型的多维度检测特征图谱。针对现场复杂电磁环境下的信号干扰难题，提出了分层信号抑制与多源数据融合研判的现场实施策略，旨在弥补单一检测方法难以覆盖全部故障模式的技术短板，为显著提升绝缘故障诊断准确率提供借鉴。

关键词　10 千伏开关柜；局部放电；绝缘故障；带电检测技术；超声波检测技术

中图分类号：TM591；TM835.4　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.003

0　引言

在配电网系统中，10 千伏开关柜承担着电能分配与线路故障保护的核心功能，其运行状态直接决定了供电质量与电网整体稳定性。传统的预防性绝缘试验通常需要将设备停运后开展离线检测，难以满足当前配电网高可靠性供电的运行要求。为破解这一矛盾，针对 10 千伏开关柜局部放电带电检测技术开展系统性研究，可实现在设备持续带电运行的状态下完成绝缘状态的动态评估。由于不同检测技术对各类放电缺陷的检测灵敏度与场景适应性存在显著差异，单一检测手段难以完整覆盖所有潜在故障类型。科学构建多技术融合的联合诊断策略，逐步成为提升局部放电检测结果准确性与可解释性的核心研究方向[1]。因此，本文系统对比 10 千伏开关柜局部放电带电检测技术的物理机制与适用边界，探讨多技术融合诊断的工程应用逻辑，以期为配网状态检修提供更具可操作性的技术参考。

1　10 千伏开关柜局部放电产生机理与检测物理基础

1.1　10 千伏开关柜局部放电的物理过程与效应

在高电压的作用之下，绝缘系统内部的部分区域会发生放电。该过程持续时间极短，一般在纳秒至微秒量级，并且还会伴随产生多种物理效应：放电伴随电磁波、弹性波、热及光辐射：电流脉冲激发电磁波，介质分子受撞产生弹性波，能量转化为热，高能电子轰击引发光辐射。对应检测为脉冲电流法耦合接地线高频信号、天线接收特高频电磁辐射、超声波传感器采集 20 kHz 至数百 kHz 弹性波，支撑检测技术多样性。

1.2　10 千伏开关柜绝缘结构对放电信号传播的影响

金属封闭结构被运用到 10 千伏开关柜当中，其内部绝缘体系囊括了空气、固体以及复合等不同形态。金属外壳对电磁波具有屏蔽作用，不过柜体表面存在着不连续的地方，如绝缘子安装孔、观察窗、通风百叶窗、板间接缝等，这些不连续的地方会构成电磁波的泄漏通道。不同频段信号在传播过程中受开关柜结构影响存在显著差异，把特高频（300 MHz ～ 3 GHz）天线置于柜外，由于其波长较短、穿透能力较弱，信号主要依靠柜体缝隙等不连续点泄漏传播。信号强度随泄漏孔尺寸与波长比值变化；当孔隙尺寸小于波长时，泄漏效率急剧下降，外部仅能接收微弱泄漏电磁波。柜体表面的电压脉冲会被电压传感器直接进行耦合。超声波信号的传播轨迹和电磁波所呈现出的轨迹有着明显的区别，超声波实际上就是机械波，需要借

作者简介：安建波（1978-），男，专科，工程师，研究方向：电力运维。

助介质来开展传播工作，在空气以及固体绝缘的交界处会发生反射以及折射，能量的衰减程度比较大。开关柜内复杂的绝缘结构导致超声波传播路径曲折，在穿过不同介质界面时能量衰减显著。特别是柜体金属板对超声波的衰减程度极大，使得内部放电产生的超声波信号很难直接穿透金属柜壁，因此超声波检测对传感器放置位置极为敏感，通常需要靠近柜体缝隙进行检测。

2 10千伏开关柜局部放电带电检测技术特性对比

2.1 暂态地电压检测技术

暂态地电压的检测是基于局部放电所产生的电磁波从柜体表面泄漏并感应出瞬态电压的机理。柜内放电激发的电磁波在金属壳体表面形成高频电流，该电流沿壳体内外表面扩散，并在壳体与接地系统之间产生瞬态电位差；将电容传感器贴合柜体表面，即可通过耦合获取电压信号[2]。

暂态地电压信号在数兆赫到数十兆赫这个区间内集中分布，其传感器输出信号的幅度和放电强度呈现出正比例关系，通常运用分贝毫伏或者分贝微伏来进行量化表征，这项技术在安装传感器方面很便捷，具有非侵入的特性，可以开展在线监测，并且针对开关柜典型放电缺陷表现出了良好的响应灵敏度。在现场应用中，可通过暂态地电压信号快速锁定某馈线柜异常，避免非计划停电，表明其适用于大面积快速筛查。但电压脉冲沿柜体表面衰减快，传感器检测范围有限，需多点布设。

2.2 超声波检测技术

压电传感器用于捕获局部放电产生的声波信号，在电场驱动之下，放电区域介质分子会进行剧烈运动，进而产生疏密波并向外扩散。这些波动频率多样，囊括了可听声波以及超声波。工业现场的环境噪声能量大多集中在低频段，因此超声波检测通常选用约40 kHz的中心频率作为工作频率，以此有效避开背景噪声的干扰。

超声波在空气中传播时衰减效应显著，高频段超声波的传播距离通常不超过数米，会对远距离检测的灵敏度形成制约；但超声波作为机械振动波，本身不受电磁信号干扰，天然具备抗电气干扰能力强、声源定位精度高的技术特性。传感器捕捉到了峰值信号，它的朝向也就大致指示出了放电源的方位。在空气绝缘开关柜当中，尖端放电以及悬浮电位放电能够借助超声波来开展有效的探测工作。而固体绝缘内部气隙放电所产生的超声波信号，需要穿透固体介质才可以向外传播，在现场检测的实践当中，开展拾取工作的效果往往不太理想，信号的衰减程度比较显著。例如：在某变电站检测中，技术人员通过超声波信号准确锁定母排接触不良引发的悬浮放电，体现了其抗干扰强、定位精度高的优势。但超声波在空气中传播距离短，且对固体绝缘内部气隙放电不敏感，因信号需穿透固体介质，衰减极大，内部信号难以传出。

2.3 特高频检测技术

特高频检测所覆盖的频段为300 MHz～3 GHz，对应电磁波波长范围为0.1 m～1 m，局部放电脉冲前沿极为陡峭，上升沿处于纳秒甚至亚纳秒量级，可辐射出包含丰富特高频成分的电磁波[3]。与暂态地电压信号相比，特高频信号频率显著提升，抗低频干扰性能更优。借助多天线信号的时差，可实现高精度定位。特高频检测在10千伏开关柜应用中的核心障碍在于信号泄漏路径难以精确掌控，其原因是开关柜典型尺寸与特高频下半频段波长相当，柜体构成波导截止结构，频率较低的电磁波难以有效传播至柜外。柜体缝隙等不连续点尺寸远小于波长，导致外部检测到的信号极为微弱，常出现柜内放电强烈而柜外检测无显示的矛盾现象。若开关柜尺寸远小于特高频半波长，柜体波导截止结构会显著阻碍电磁波向外传播；现场检测时，柜内放电表现明显，而柜外特高频信号往往较微弱[4]。特高频检测通常需要把传感器深入柜体内部，或者使传感器贴近缝隙区域，极大程度上增加了带电作业方面的安全风险。小型化特高频传感器技术日益成熟，使得内置式检测方案得以实现。不过，该方案要求设备处于断电状态才能够安装，这对它在现有开关柜上的广泛部署造成了制约。

2.4 检测技术综合对比

不同检测技术的原理、适用范围以及定位能力方面的差异极为显著，单一技术很难将现场检测需求全面覆盖。高频电流检测经高频CT/罗氏线圈耦合接地线、屏蔽层局放脉冲电流，频带数百kHz至数十MHz；幅值关联放电量，相位图谱辅助识型。受柜体屏蔽影响小，适用开关柜进出线电缆接地线；但受接地结构和接线影响，柜内定位有限。

3 多技术联合诊断方法与案例分析

3.1 典型缺陷的检测特征分析

不同的放电类型在多项技术检测信号中呈现出差异化特性，尖端放电现象会出现在高压导体的突出位置，放电源直接和空气进行接触，产生的超声波信号非常强烈，并且指向十分明确，同时暂态地电压以及特高频信号也较显著。放电脉冲集中出现在电压峰值附近，正、负半周对称性良好。金属部件接触不良时会引发悬浮电位放电，开关柜内支撑件松动、屏蔽罩接触不佳等均属此类[5]。这类放电现象通常会蕴含着较高能量，运用多种检测手段都能够有效捕捉到该信号，其显著特征为放电相位覆盖范围较广，脉冲幅度起伏明显。

3.2 典型应用案例分析

某变电站的开关柜检测到暂态地电压信号出现了异常情况，数值是 28 dBmV，已经超出了标准范围。在开关柜前中部区域中捕捉到超声波显著信号，其有效值达到了 25 分贝。图谱中放电脉冲大多集中在第一象限以及第三象限，其幅值保持平稳，根据这个情况可以推断出放电类型属于沿面放电。

运用声波成像技术来开展开关柜检测工作，确认放电位置。也就是 B 相穿柜套管附近区域存在着放电源，把高频传感器贴近柜体缝隙来开展复核工作，捕捉到了放电脉冲序列。在穿柜套管位置，检测到了沿面放电的现象，穿柜套管区域的母排表面附着了大量的污秽，同时存在明显的放电迹象，把污秽处理完毕之后进行重新装配，复测的时候暂态地电压降低到了 8 毫伏分贝，超声波信号没有了，缺陷得以成功消除。采用多技术联合诊断的有效性得以验证，开展了暂态地电压的普筛工作，借助超声波以及声波成像来实现精确定位，利用相位分解图谱辅助去处理放电类型判断工作，检修决策得到了多重技术方面的支撑，并且这些技术支撑相互之间进行验证，从而形成了可靠的基础（见图 1）。

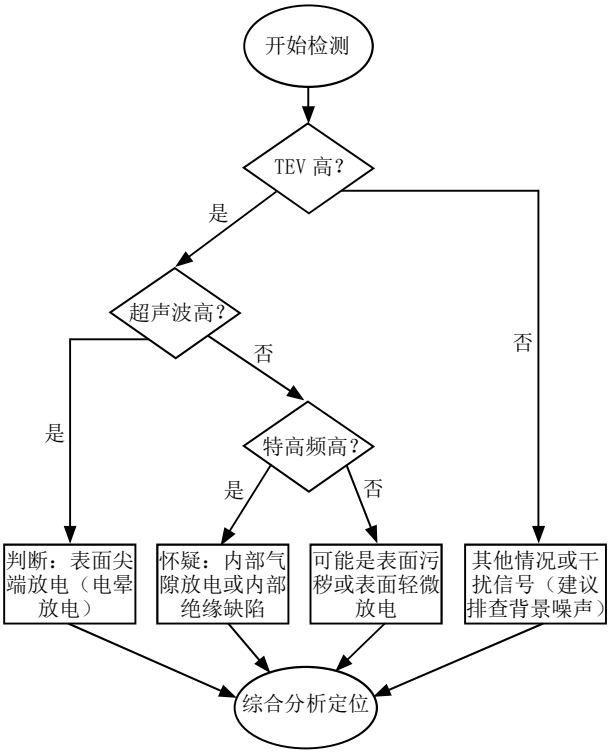


图 1 多技术联合诊断决策流程图

4 结束语

10 千伏开关柜局部放电检测技术的物理依据是源自放电现象所引发的电磁辐射、声波释放以及电流脉冲等效应。在信号感知精度、故障点辨识能力以及对外部噪声的抑制效果方面，它们的区别极为显著。暂态的电压检测范围非常广泛，便于开展排查工作；超声波定位技术拥具有精确性的特性，然而它难以有效捕捉内部气隙放电现象。特高频抗低频干扰能力强，但柜外泄漏信号弱；高频电流法可耦合接地线脉冲电流，但受接地结构影响。多技术联合应用具有理论必要性和工程实用价值，单一技术难以全面覆盖各类故障模式。未来研究需面向多物理场信息深度融合与智能模式识别，突破放电能量与绝缘寿命的定量评估模型；同时研发无盲区感知技术，结合边缘计算与云协同，构建预测性维护体系，实现从被动检测向主动预警的智能化跨越。

参考文献：

[1] 毛宏宇,文大缀,闫玮琪,等.高压开关柜局部放电检测技术应用研究[J].电气应用,2026,45(05):115-118.
[2] 徐锐.局部放电检测技术在开关柜绝缘故障检测中的应用[J].大众用电,2021,36(05):42-43.
[3] 李超.开关柜局部放电特高频检测研究[J].电工技术,2026(09):40-42.
[4] 王勇.35 kV 高压开关柜异常放电原因及解决措施[J].大众标准化,2026(12):125-127.
[5] 李民坤.基于带电检测技术的高压开关柜绝缘故障自动诊断方法[J].自动化应用,2024,65(17):149-151.