

# 12 kV 开关柜局部放电超声波信号特征研究

杨龙山, 曾潮旭, 杨森, 丁晨, 蔡乐辉, 陈天翔  
(成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610059)

**摘要:** 为识别区分 12 kV 开关柜常见局部放电故障类型, 依据开关柜实际运行故障设计了尖端、悬浮、沿面与气隙 4 种局部放电缺陷模型, 搭建了真型开关柜局放实验平台。模拟开关柜局部放电过程并采集超声波 (acoustic emission, AE) 信号, 利用快速傅里叶变换分析了 AE 信号频域参数、相位分布、上升沿时间、下降沿时间、波形形状特征, 对各类特征量进行了对比研究。结果表明: 4 种缺陷产生的 AE 信号副频段及放电相位特征差异明显, 不同缺陷产生的 AE 信号形状各异, 下降沿与上升沿时间比值的明显差异可作为局放类型判别依据。通过对同种放电类型 AE 信号共性 & 不同放电类型 AE 信号特性的研究, 得出不同缺陷的 AE 信号形状和时间特征可以有效区分局部放电类型。

**关键词:** 开关柜; 局部放电; 超声波; 信号特征; 类型判别

## Research on the Characteristics of Ultrasonic Signals of Partial Discharge in 12 kV Switchgear Cabinet

YANG Longshan, ZENG Chaoxu, YANG Sen, DING Chen, CAI Lehui, CHEN Tianxiang  
(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** To identify and differentiate common partial discharge faults in 12 kV switchgear, four types of partial discharge defect models—tip, floating, surface, and air gap—were designed based on actual operational faults of the switchgear. A prototype switchgear partial discharge experimental platform was established. The partial discharge process of the switchgear was simulated, and ultrasonic (acoustic emission, AE) signals were collected. The frequency domain parameters, phase distribution, rise time, fall time, and waveform shape characteristics of the AE signals were analyzed using Fast Fourier Transform (FFT), and a comparative study of various features was conducted. The results showed that the sub-frequency bands and discharge phase characteristics of the AE signals generated by the four defects were significantly different. The shapes of the AE signals produced by different defects varied, and the distinct differences in the ratio of fall time to rise time could serve as a basis for distinguishing partial discharge types. Through the study of the common characteristics of AE signals of the same discharge type and the characteristics of AE signals of different discharge types, it was concluded that the shape and time characteristics of the AE signals of different defects can effectively distinguish partial discharge types.

**Key words:** switchgear; partial discharge; ultrasonic; signal characterization; type discrimination

## 0 引言

高压开关柜广泛应用于供电系统, 开关柜安全运行与可靠供电息息相关<sup>[1-3]</sup>。数据表明, 开关柜发生所有故障中, 绝缘故障占据最大比例, 达 31.9%<sup>[4-7]</sup>。由开关柜绝缘劣化引起事故的台次占开关柜总事故台次的 68%, 绝缘劣化多数从局部放电开始<sup>[8-9]</sup>。因此快速、准确检测并识别局

部放电及其类型, 可提高现场运维人员工作效率, 保证开关柜安全稳定运行<sup>[10]</sup>。

目前开关柜局部放电检测方法中超声波检测技术因其不受电磁干扰特点被广泛应用<sup>[11-12]</sup>。电力设备发生局部放电时会使小范围内温度急剧上升, 进而使介质局部体积发生变化产生一定脉冲压力波, 即为频率大于 20 kHz 的超声波<sup>[13-15]</sup>。研究表明开关柜局放引起的 AE 信号频率集中在

40 kHz<sup>[16]</sup>，由于实际运行的变电站的背景噪声频率大多集中在 20 kHz 以下，因此利用超声波法检测开关柜内局部放电具有明显优势<sup>[17-18]</sup>。

文[19]提出了超声—暂态对地电压(transient earth voltage, TEV)融合传感技术并设计了融合传感器，实现了 AE 信号与 TEV 信号在时空上的同步测量，对开关柜 4 种典型缺陷模型局部放电检测展开研究，但并未对信号频域以及信号的波形特征展开分析。文[20]提出了基于能量谱分析与基于密度的噪声应用空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)改进算法实现多源信号的聚类分离，实现了局部放电信号类型较为有效的分类，但存在将部分样本点误判为噪声点情况。文[21]采用 AE 法对环网柜局放进行研究，通过 AE 信号的幅值与相位比较了不同局部放电类型的特征和差异。文[22]通过对四种典型缺陷模型局放相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)图谱特征参数进行了统计分析，得到了不同类型局放的脉冲幅值特征，但均未对故障产生的 AE 波形特征参数进行对比研究。

文中依据开关柜实际运行情况，设计了尖端、悬浮、沿面与气隙 4 种局部放电缺陷模型，搭建局放实验平台，模拟开关柜局部放电过程并采集 AE 信号。用快速傅里叶变换(Fast Fourier

transform, FFT)分析 AE 信号频域参数、相位分布、上升沿时间、下降沿时间、波形形状特征。在同一温湿度条件下，研究“针—板”间距对尖端放电以及“铜柱—螺丝钉”间距对悬浮放电 AE 信号特征量影响，研究沿面放电中爬距对信号特征量影响。对各类特征量进行对比研究，研究同种放电类型 AE 信号共性及其不同放电类型 AE 信号特性。

## 1 实验平台

### 1.1 4 种典型局部放电缺陷模型

在实际运行过程中，开关柜结构和所处环境十分复杂，同一种局放类型可能有多种表现形式<sup>[23-24]</sup>。已有研究较少考虑电极间距对尖端放电和悬浮放电的影响，开关柜内可能存在多处金属毛刺或悬浮体，每处电极间距不同，因此探究间距对这两类局部放电模式的影响，找出不同间距下同种放电模式的共性具有重要意义。沿面放电类型中爬距及绝缘表面是否存在水膜对其产生的 AE 信号影响在国内外研究中很少体现<sup>[25-27]</sup>。现有研究对不同类型局放产生的单股 AE 信号下降沿与上升沿时间比值引起的波形形状特征研究不足<sup>[28-29]</sup>。基于上述考虑设计制作的局部放电缺陷模型，4 种局部放电等效模型见图 1。

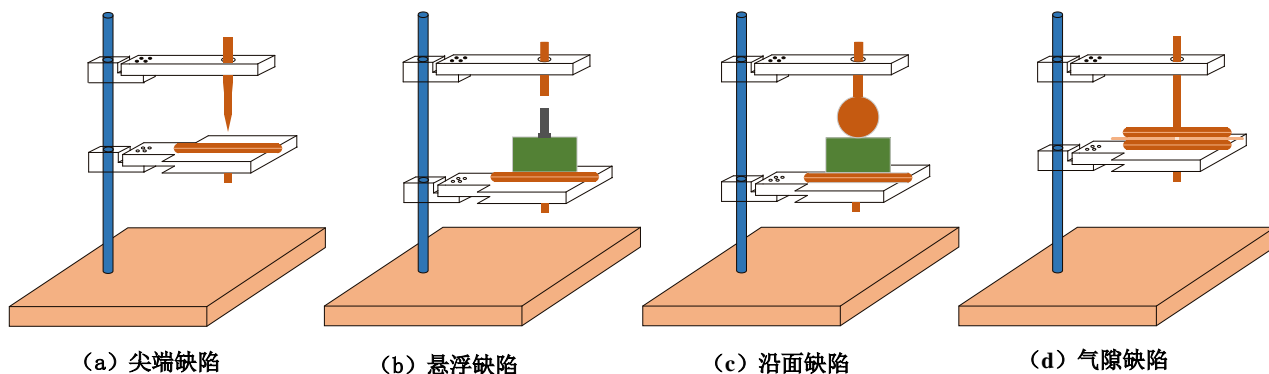


图 1 4 种局部放电等效模型图

Fig. 1 Equivalent model diagrams of four partial discharges

1)尖端放电模型：高压尖端部分由直径为 5 mm 的铜制圆柱和圆锥构成，其中圆锥高为 5 mm，接地端安装直径为 100 mm 光滑铜板。模拟开关柜内表面毛刺或接地体毛刺，针板间距可调。

2)悬浮放电模型：环氧树脂上放置螺丝钉，高压端悬置直径为 12 mm，高为 15 mm 铜柱，钉长 10 mm，尖端直径 12 mm。模拟开关柜内存在的脱落或松散的螺丝钉，上方高压端铜柱与下方螺丝钉距离可调。

3)沿面放电模型：高压、接地端两个电极分别为半径为 25 mm 铜球与直径 100 mm 铜板，中间夹有厚度为 40 mm、半径为 40 mm 的环氧树脂。模拟受潮电缆之间、金属导体与绝缘套管接触处等发生的沿面放电，改变上方高压端铜球与下方环氧树脂上表面的接触点位置(其中上方铜球与环氧树脂上表面始终保持良好接触)，测量出不同接触点与下方铜板之间的最近距离作为沿面放电爬距。

4)气隙放电模型：上下 2 个电极均为直径 100 mm 铜板，中间夹 3 层厚度为 1 mm、直径为 120 mm 环氧板，其中中间层中心有直径为 5 mm 气隙。模拟绝缘子内部出现气隙等的局部放电现象。

## 1.2 开关柜局部放电实验平台

实验平台包括无局放实验变压器、升压器、12 kV 开关柜及四种局放故障等效模型、AE 传感器(中心频率为 40 kHz)、录波器(采样频率为 333.2 kS/s)。开关柜实际运行中单相故障最易发生，因此对故障模型加 5.77 kV 电压，模拟 12 kV 开关柜单相对地故障。AE 传感器贴于靠近母线室的开关柜柜门缝隙处，通过录波器采集记录

不同类型局部放电时 AE 信号，实验平台示意图见图 2。

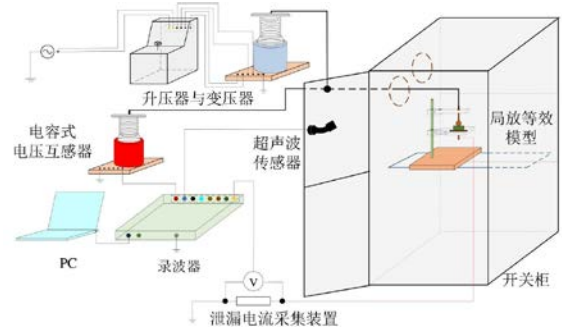


图 2 实验平台示意图

Fig. 2 Experimental platform diagram

## 2 局部放电时频域分析

### 2.1 尖端放电

#### 2.1.1 频域分析

对尖端放电时 AE 信号进行 FFT 频域分析得出：尖端放电 AE 信号频率集中在 39~40.5 kHz 范围。当间距为 6 mm 时，AE 信号峰值在-86.73 dB，且随“针—板”间距增大，AE 信号峰值降低，当间距为 9 mm 时，AE 信号峰值仅有-97.48 dB，曲线不再有明显凸起部分。尖端放电 AE 信号 FFT 频域见图 3。

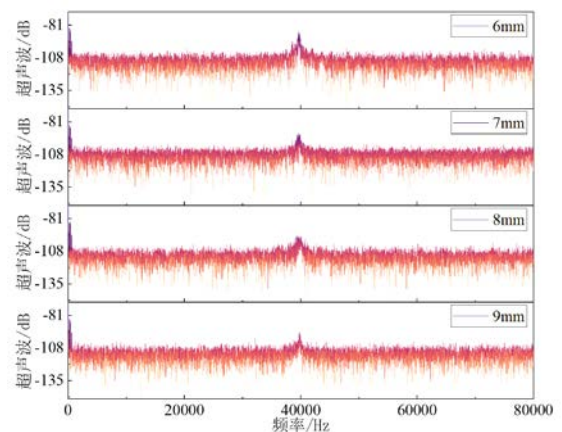


图 3 尖端放电 AE 信号 FFT 频域分析

Fig. 3 FFT frequency domain analysis of tip discharge ultrasonic signal

分析原因为：随着针板间距增大，极不均匀电场下两极之间电容量减小，在电压不变的情况

下电荷量减小、带电粒子平均自由程增加,使得尖端放电过程难以发展,放电过程不再剧烈,极间空气被电离次数减少,空气振动程度不再剧烈,因此 AE 信号明显降低。

将 AE 传感器贴于开关柜柜顶,后柜门中部,前柜门中部等缝隙处仍能采集到 AE 信号,且经 FFT 频域分析后与图 3 中 AE 信号频率范围大体

相同,但 AE 信号峰值会因 AE 传感器放置位置不同而有差异。

### 2.1.2 时域分析

尖端放电 AE 时域分析图见图 4,蓝色曲线为工频电压,红色曲线为 AE 信号。AE 相位在工频电压  $100^{\circ}\sim 135^{\circ}$  范围内十分集中,且与“针—板”间距无关。

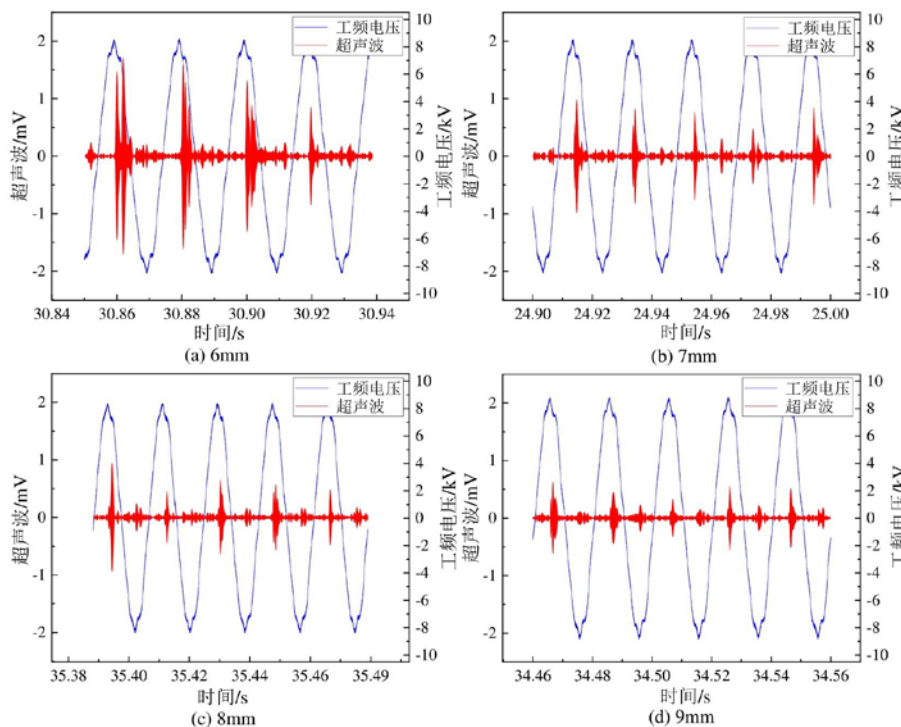


图 4 尖端放电 AE 时域分析

Fig. 4 Ultrasonic time domain analysis of tip discharge

不同间距下尖端放电上升沿时间(time rise,  $t_r$ )均在  $600\sim 800\ \mu\text{s}$ , 下降沿时间(time down,  $t_d$ )均在  $1\ 700\sim 2\ 200\ \mu\text{s}$ , 下降沿时间约是上升沿时间 2.5 倍。表明在尖端放电初期电子崩头部空间电荷数量在极短时间内达到临界值,放电通道迅速发展,此时针板间隙之间充满了带电粒子,同时电子崩中部发生电荷中和,带电粒子复合过程中,原先在电离时所吸收的电离能会以光子形式释放,这种光辐射又导致其他气体分子光电离,从而使去游离过程相对缓慢,因此尖端放电 AE 信号下降沿时间远大于上升沿时间。

尖端放电 AE 波形特征分析见图 5。当“针—板”间距为  $6\sim 7\ \text{mm}$  时,AE 信号达到其峰值后,波形会经历一个明显下降过程,到达一个平台期后,持续一段时间缓慢衰减。当“针—板”间距为  $8\sim 9\ \text{mm}$ ,AE 信号达到峰值后,波形明显下降,随后再次缓慢上升到新峰值,但后续峰值低于先前峰值。间距为  $8\sim 9\ \text{mm}$ ,即间距较大时,这种现象会交替出现,但峰值逐步衰减,形成了周期性峰谷变化,直至归零。

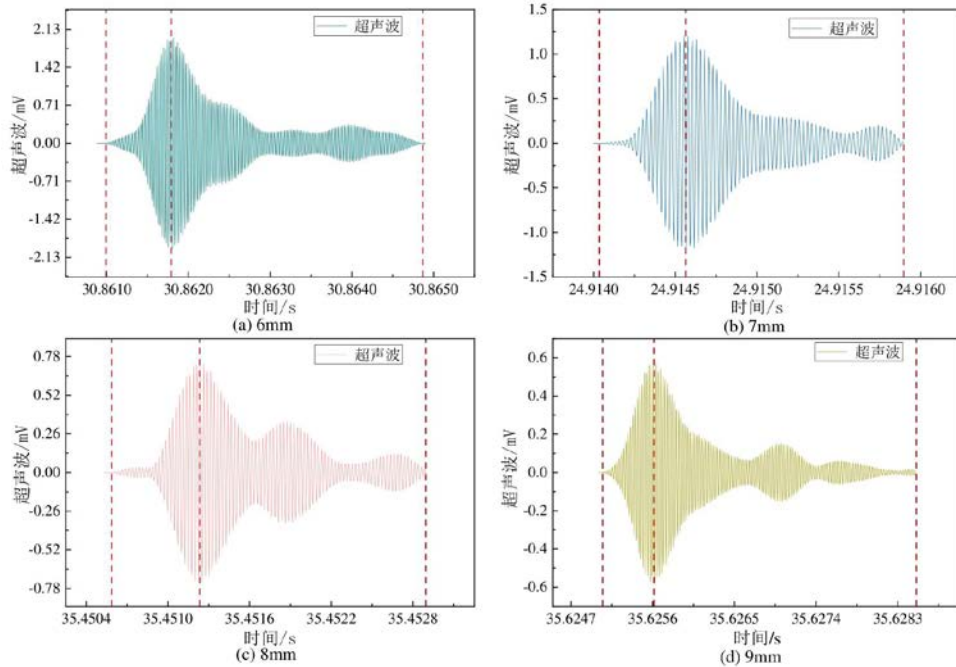


图 5 尖端放电 AE 波形特征分析

Fig. 5 Characterization of ultrasonic waveform of tip discharge

AE 信号下降沿时间远大于其上升沿时间，与“针—板”间距无关，整个波形呈“利剑”状。这一现象表明，尖端放电现象发生时，AE 能够迅速达到此次放电的最大峰值，但是不会立即衰减到零，而是会经历一个相对缓慢的衰减过程。

## 2.2 悬浮放电

### 2.2.1 频域分析

对悬浮放电 AE 信号进行 FFT 频域分析，信号主要集中在频率为 38~41.5 kHz 区间，随“铜柱与螺丝钉”间距缩小，在 54~55.5 kHz 频率范围内逐渐出现明显信号，但剧烈程度低于主频段 38~41.5 kHz 内信号。悬浮放电 AE 信号 FFT 频域见图 6。

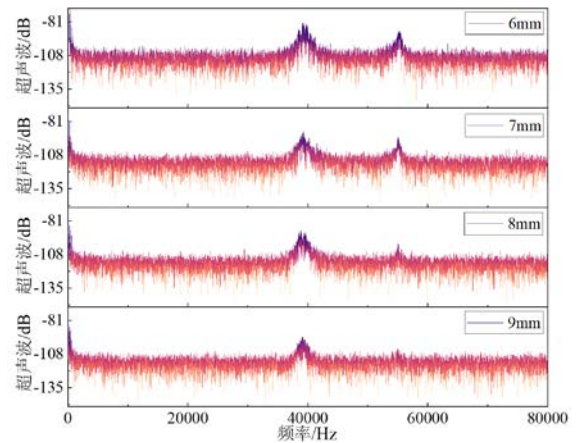


图 6 悬浮放电 AE 信号 FFT 频域分析

Fig. 6 FFT frequency domain analysis of suspended discharge ultrasonic signal

当间距为 6 mm 时，主频段信号峰值可达 -81.37 dB，副频段信号峰值达 -87.56 dB；当间距为 9 mm，主频段信号峰值仍有 -94.7 dB，但副频段信号已不再明显。整体来看，悬浮放电产生的 AE 信号幅值较高。分析原因为：在悬浮放电过程中，两极间被分为铜柱、螺丝钉、接地铜板三部分，高压端铜柱对螺丝钉放电产生的能量以 AE 形式向外扩散形成 FFT 图中主频段，而螺丝

钉作为悬浮体，其对接地铜板放电产生的 AE 构成了副频段。

## 2.2.2 时域分析

悬浮放电 AE 时域分析见图 7。

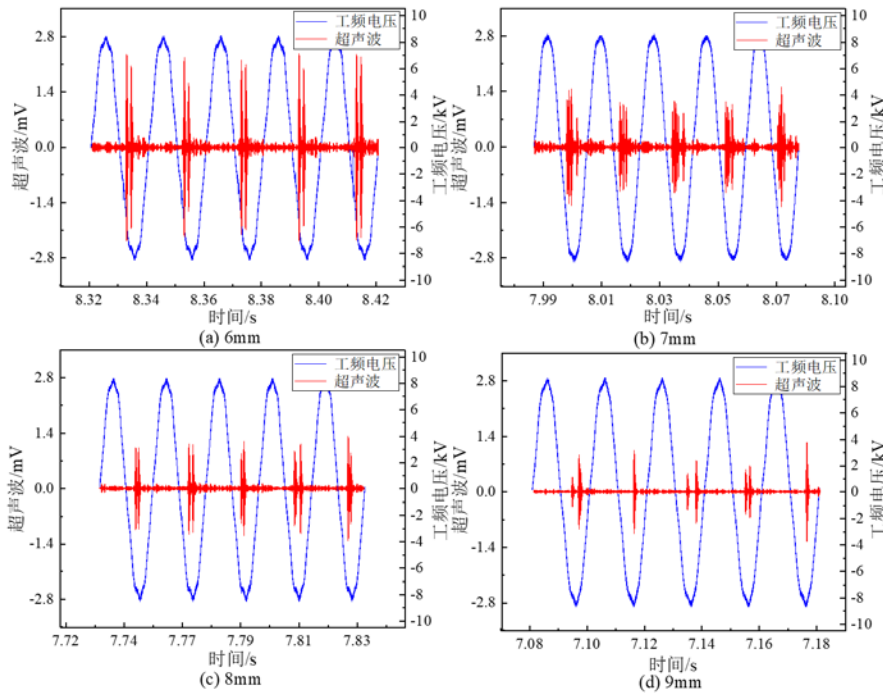


图 7 悬浮放电 AE 时域分析

Fig. 7 Ultrasonic time domain analysis of suspended discharge

在工频电压负半周能检测到明显 AE 信号；当间距为 6 mm 时，在工频电压  $220^{\circ}\sim 255^{\circ}$  会出现明显 AE 信号；当间距为 7 mm 时，AE 信号集中在工频电压  $225^{\circ}\sim 300^{\circ}$  区间；当间距为 8 mm 时，在工频电压  $240^{\circ}\sim 270^{\circ}$  出现峰值较高 AE 信号；最后，当间距为 9 mm 时，AE 相位范围变为工频电压  $250^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 。虽然悬浮放电 AE 相位会随间距变化而改变，但是 AE 出现相位范围相对比较集中，都出现在工频电压负半周且跨度较小。分析原因为：悬浮放电过程为铜柱—螺丝钉—接地铜板之间放电，放电过程相对温和，仅有电晕放电，极间并未击穿，因此在工频电压负半周期时故障模型起晕电压较低，放电相对剧烈，AE 信号幅值明显。

由图 7 可见，AE 信号平均峰值随间距增大而减小，但相位集中。不同间距下发生悬浮放电，

其 AE 信号上升沿时间( $t_r$ )均在  $450\sim 550\ \mu\text{s}$  间，受“铜柱—螺丝钉”间距影响不大，下降沿时间( $t_d$ )则在  $950\sim 1\ 200\ \mu\text{s}$  内，下降沿时间约是上升沿时间两倍。

悬浮放电 AE 波形特征分析见图 8。从 AE 信号形状特征来看，悬浮放电中 AE 信号上升阶段与下降阶段均是单调变化，波形整体走势流畅顺滑，但下降沿时间明显大于上升沿时间。分析原因为：放电模式由铜柱对螺丝钉放电和螺丝钉对接地铜板放电两部分组成。螺丝钉可等效为尖端，因此在悬浮放电上升沿时间较短，尖端电极使空气电离时空间内产生光子较多，阻碍了去游离过程，因此 AE 信号下降沿时间较上升沿时间更长。

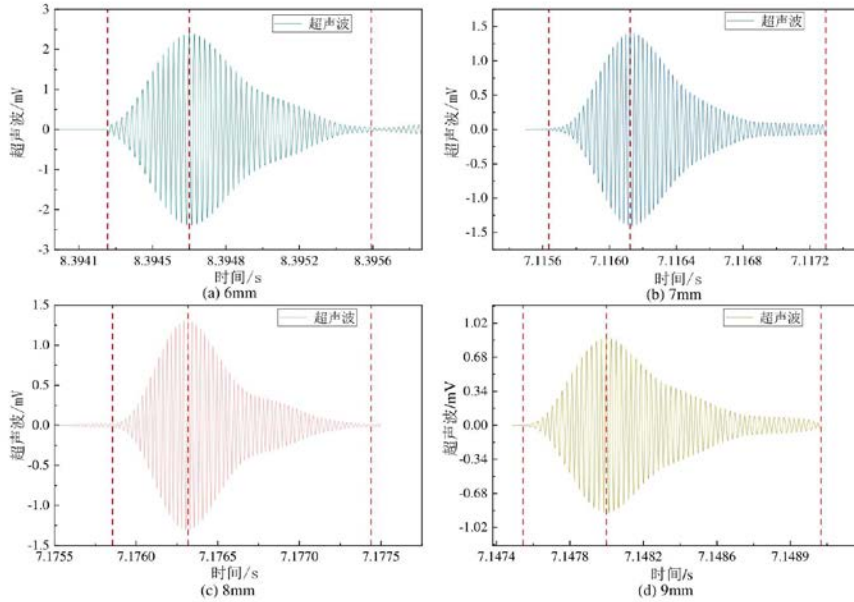


图 8 悬浮放电 AE 波形特征分析

Fig. 8 Characterization of ultrasonic waveforms for suspended discharges

## 2.3 沿面放电

### 2.3.1 沿面湿润时频域分析

沿面放电模型中设置放电爬距分别为 6、8 cm。由于放电之前对沿面进行喷水浸湿形成水路，所以当工频电压提高至 4 kV 时，电压波形立即发生畸变，即发生击穿、拉弧现象。对绝缘表面湿润时 AE 信号进行 FFT 频域分析，见图 9。

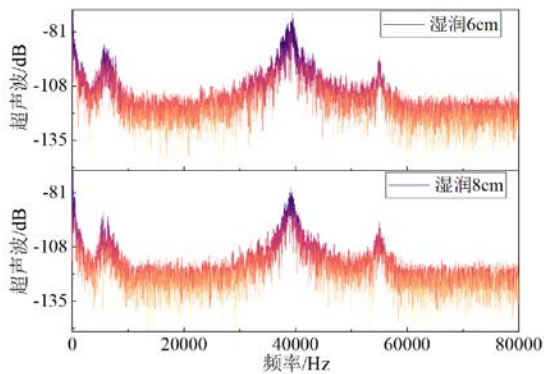


图 9 绝缘表面湿润时 AEF 频域分析

Fig. 9 FFT frequency domain analysis of ultrasonic waves discharged along the surface

发现该信号不仅集中于 38~41 kHz 区间，在 4~8 kHz 及 54~55 kHz 内同样存在明显凸起，且与放电爬距无关。沿面放电 AE 存在 3 个频段，分析原因为：绝缘体表面水膜形成通路，离子电导在绝缘体表面移动，中心粒子被碰撞迅速电离，能量以声波形式向外扩散，构成 FFT 图主频段；表面水膜烤干，蒸发过程中水分子剧烈碰撞，产生声波，主要集中在 4~8 kHz，在人耳能听见频段范围内；高温使绝缘表层空气热运动加剧，促进电离并产生 AE，集中在 54~55 kHz。

### 2.3.2 沿面湿润时时域分析

绝缘表面湿润时 AE 时域分析见图 10。大部分 AE 信号相位分布在 120°~160°区间以及负半周 240°~280°区间。但是仍有部分 AE 信号相位分布散乱，无明显规律，表明绝缘体表面受潮位置及程度差异会使沿面放电 AE 信号相位更为复杂。

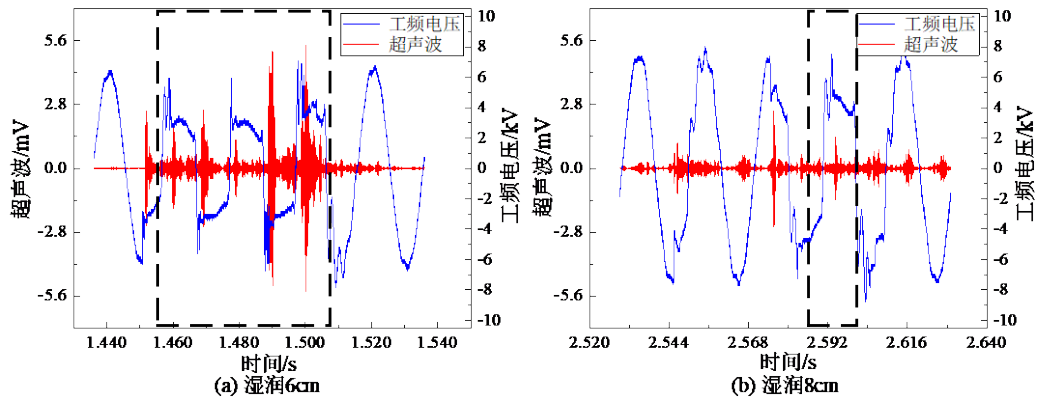


图 10 绝缘表面湿润时 AE 时域分析

Fig. 10 Ultrasonic time domain analysis when the insulation surface is wetted

该实验模拟具有强垂直分量沿面放电，绝缘表面附着水膜，使得绝缘表面电阻分压极不均匀，造成绝缘表面各处场强差别很大。因存在强垂直分量，带电粒子在工频电压作用下反复撞击介质表面，造成热电离，带电粒子数再次剧增，表面

电阻剧降，加上水膜中大量离子移动，放电通道迅速发展，此时电压略微升高就会导致沿面出现树枝状明亮火花，即滑闪放电现象。其发展过程相较其他三种缺陷放电更为直观，滑闪放电发展过程见图 11。

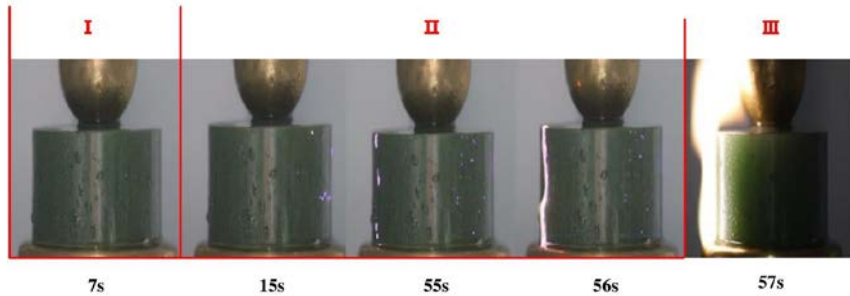


图 11 滑闪放电

Fig. 11 Slip-flash discharge

对一段完整 AE 信号进行分析，当爬距为 6、8 cm 时，AE 上升沿时间( $t_r$ )分别为 751.8、566.3  $\mu$ s，下降沿时间( $t_d$ )分别为 2 328.1、2 378.46  $\mu$ s，

发现下降沿时间为上升沿时间 3 到 4 倍。绝缘表面湿润时 AE 波形特征分析见图 12。

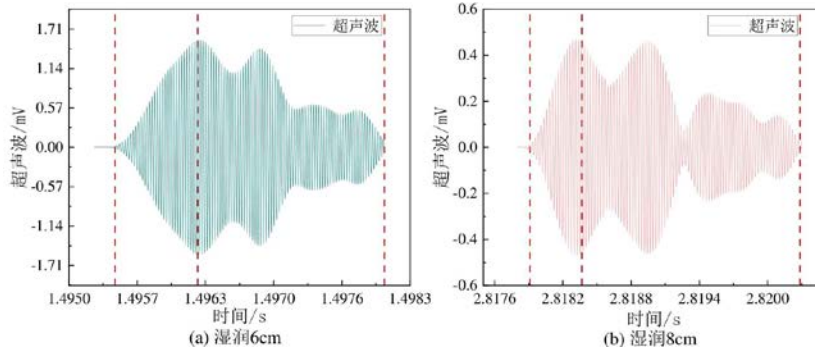


图 12 绝缘表面湿润时 AE 波形特征分析

Fig. 12 Characterization of ultrasonic waveforms when the insulation surface is wet

从绝缘表面湿润时波形特征来看，当沿面放电进入拉弧阶段(如图 10 框线范围)时，信号顺滑地上升至顶峰，随后出现一个波谷又随之回升，整体波形呈现“陀螺”状，且第一个波峰略高于回升之后的第二个波峰。此外，AE 信号会经过一个幅值较低的平稳阶段后才逐渐降至 0。分析原因为：水膜形成通路，离子电导放电通道迅速移动，碰撞中性粒子，电离过程能量以声波形式向外扩散，使空气振动，AE 幅值迅速上升，当通路中的中性粒子电离结束，AE 幅值缓慢下降；沿面放电产生弧光较为明显，释放了大量光子激发第二次电离，AE 到达第二个波峰，随后光子扩散，AE 幅值缓慢降至 0。

### 2.3.3 沿面干燥时频域分析

当绝缘表面上水分被烤干，工频电压波形不再畸变，将电压升至 5.77 kV，沿面放电模型仅出现微弱放电现象。对 AE 信号进行 FFT 频域分析，放电信号主要集中在 39~40.5 kHz 区间。绝缘表面干燥时 AE 信号 FFT 频域分析见图 13。

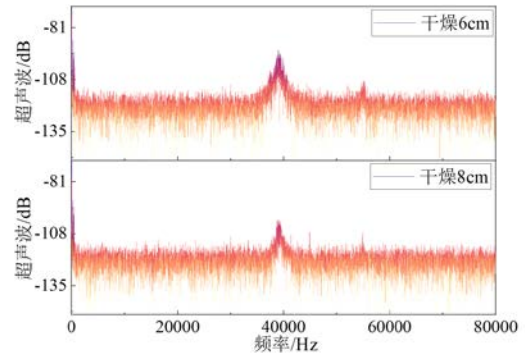


图 13 绝缘表面干燥时 AEF 频域分析

Fig. 13 Ultrasonic FFT frequency domain analysis during drying of insulation surface

绝缘表面干燥时绝缘表面水分子减少，绝缘表面电场分布较为均匀，且带电粒子数减少，放电通道不易发展，但水分烤干后会在绝缘表面留下盐碱颗粒，若绝缘材料表面再度受潮，滑闪放电起始电压会再度下降。此时仍存在绝缘表层空气热运动，发生热电离产生 AE 信号，集中在 54~55 kHz。绝缘表面干燥与存在水膜情况不同，FFT 频域图在 4~8 kHz 没有明显凸起，原因为不存在水分沸腾蒸发情况。

### 2.3.4 沿面干燥时时域分析

绝缘表面干燥时 AE 时域分析见图 14。与湿润时相比，此时 AE 信号幅值大幅减小，且当爬距为 8 cm，仅能采到微弱超声波信号，AE 信号主要集中在 90°与 270°附近。绝缘表面干燥时 AE 信号相较于绝缘表面湿润时相位分布更加规律。

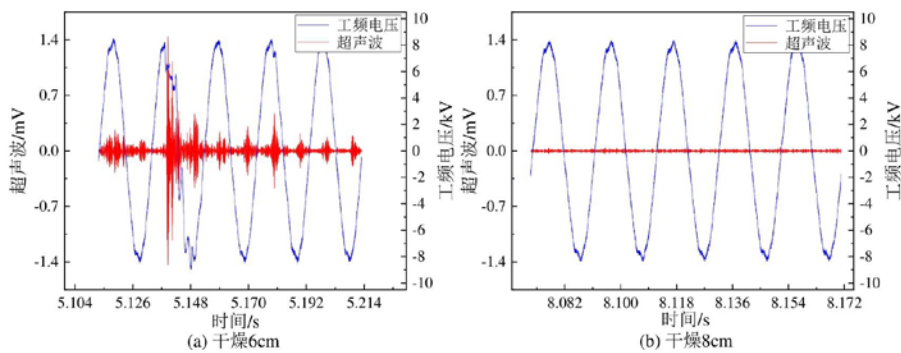


图 14 绝缘表面干燥时 AE 时域分析

Fig. 14 Ultrasonic time domain analysis during drying of insulation surface

对一段绝缘表面干燥时 AE 信号进行细致分析, 发现其放电波形参数与绝缘表面湿润时拉弧

阶段(如图 10 框线范围)有一定区别, 绝缘表面干燥时 AE 波形特征分析见图 15。

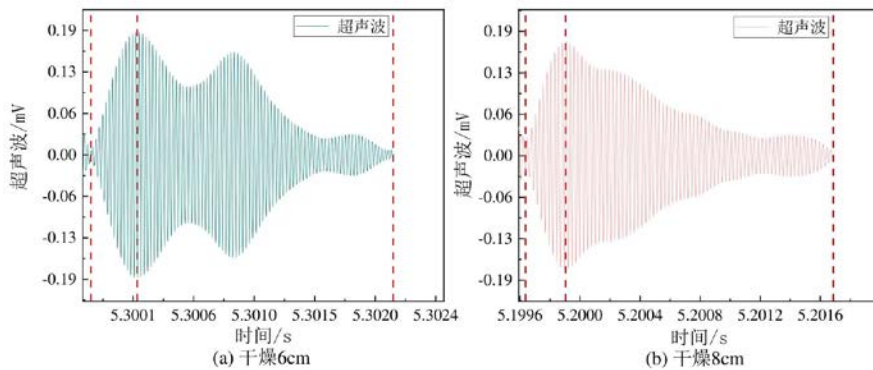


图 15 绝缘表面干燥时 AE 波形特征分析

Fig. 15 Characterization of ultrasonic waveform during drying of insulation surface

爬距为 6 cm 时上升沿时间( $t_r$ )为 480.68  $\mu$ s, 略小于拉弧阶段, 而下降沿时间( $t_d$ )为 2 267.48  $\mu$ s, 与拉弧阶段近似, 波形上升到最高峰值再衰减为零, 下降沿时间为上升沿时间 4 到 5 倍。除了波形参数, 该阶段波形特征也有改变, 信号升至最高峰后缓慢下降, 整体波形形状较为平缓。

质而被分配了更高电压, 因此该处电场强度最大, 小孔气隙最易击穿, 其击穿过程使小孔内空气膨胀向周围以声波形式扩散能量, 表现为 FFT 信号主频段。另外, 环氧板表面还存在微弱沿面放电, 绝缘表层空气热运动, 发生热电离产生 AE, 表现为 FFT 信号副频段, 集中在 54~55 kHz。

## 2.4 气隙放电

### 2.4.2 时域分析

#### 2.4.1 频域分析

气隙放电 AE 时域分析见图 17。对 AE 信号进行时域分析, AE 信号相位分布在工频电压  $35^\circ \sim 155^\circ$  以及  $210^\circ \sim 345^\circ$ , 说明气隙放电时产生的 AE 信号相位分布较为广泛。正半周 AE 信号略强于负半周 AE 信号, 且在气隙放电中, AE 信号相位分布固定。

气隙放电 AE 信号 FFT 频域分析见图 16。信号频率主要集中于 38~41 kHz, AE 幅值最高达 -96 dB。副频段区间在 57~58 kHz, 幅值在 -108 dB。

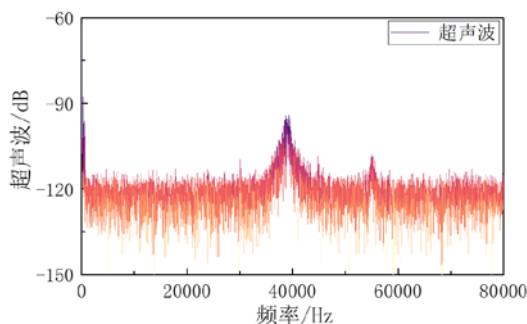


图 16 气隙放电 AE FFT 频域分析

Fig. 16 Ultrasonic FFT frequency domain analysis of air gap discharge

分析原因为: 中间块中心处小孔气隙击穿电压较小, 但其相对介电常数低于周围固体绝缘介

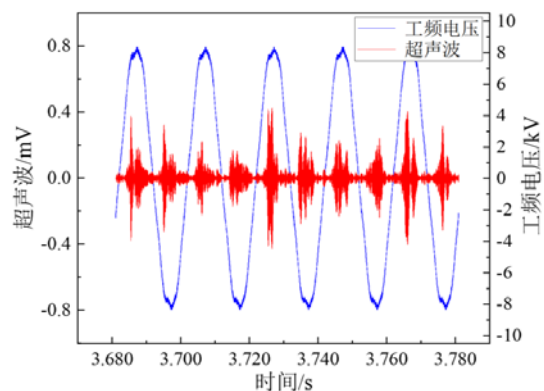


图 17 气隙放电 AE 时域分析

Fig. 17 Ultrasonic time domain analysis of air gap discharge

由图 17 可知，AE 信号在每个周期占据时间长，相邻几个波峰峰值基本持平、差异不大，与悬浮放电类似，呈现出一种均匀缓和态势，展示出该缺陷下放电稳定的特性。

气隙放电 AE 波形特征分析见图 18。由图 18 框线区间所示，每一组信号都存在单波峰，即从零值平滑上升至峰值再平滑下降至零值的阶段，

未见明显曲线畸变现象，上升沿时间( $t_r$ )为 450  $\mu\text{s}$  左右，下降沿时间( $t_d$ )为 350  $\mu\text{s}$  左右，两者几乎相等。分析原因为：由于气隙放电中空气间隙形状均匀且加在两块均匀铜板之间，气隙所处电场近似等效为均匀电场，因此放电相位分布较为固定。

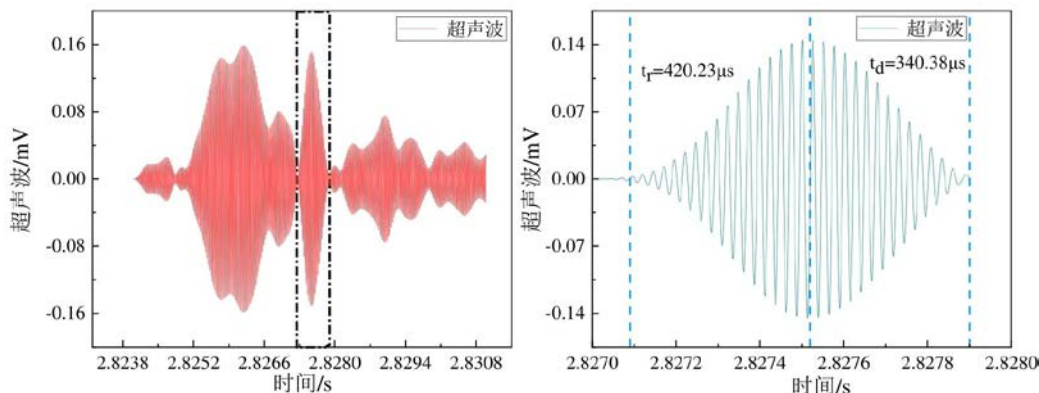


图 18 气隙放电 AE 波形特征分析

Fig. 18 Characterization of ultrasonic waveforms for air gap discharge

## 2.5 不同放电信号特征统计

不同缺陷发生局部放电 AE 信号频段分布见表 1。不同缺陷发生局部放电时采集的 AE 信号时域特征对比见表 2，从放电相位特征展现不同

缺陷差异。不同局放类型下 AE 波形参数，上升沿时间( $t_r$ )、下降沿时间( $t_d$ )对比见表 3，确定了下降沿时间与上升沿时间( $t_r/t_d$ )比值大小。

表 1 AE 信号频段对比

Table 1 Comparison of ultrasonic signal frequency bands

局放类型	主频段/kHz	副频段/kHz
尖端放电	39.0~40.5	无
悬浮放电	38.0~41.5	54.0~55.5
沿面放电	38.0~41.0	4.0~8.0 及 54.0~55.0
气隙放电	38.0~41.0	57.0~78.0

表 2 AE 信号相位特征对比

Table 2 Comparison of phase characteristics of ultrasonic signals

局放类型	相位范围/(°)
尖端放电	100~135
悬浮放电	220~300
沿面放电	120~160 及 240~280
气隙放电	35~155 及 210~345

表 3 AE 信号波形参数对比

Table 3 Comparison of ultrasonic signal waveform parameters

局放类型	上升沿时间 $t_r/\mu\text{s}$	下降沿时间 $t_d/\mu\text{s}$	$t_r/t_d$
尖端放电	650~800	1 700~2 200	$\approx 2.5$
悬浮放电	450~550	950~1 200	$\approx 2.0$
沿面放电	550~750	2 300~2 400	$> 3.0$
气隙放电	400~450	300~350	$< 1.0$

由表 1 可知,不同放电类型产生的 AE 信号 FFT 频谱主频段无明显差异,可根据副频段区分放电类型。由表 2 可知,4 种放电类型产生的 AE 信号放电相位差异明显,可据此区分放电类型。由表 3 可知,4 种局部放电类型 AE 信号上升沿时间近似,同种放电类型上升沿时间( $t_r$ )具有一定分散性,不同放电类型上升沿时间( $t_r$ )有重叠部分,故不能作为单独识别局部放电类型的依据,而尖端和沿面下降沿时间( $t_d$ )差异不大,仅可作为识别的参考依据;但 4 种局部放电类型 AE 信号下降沿时间与上升沿时间比值有着较为明显差异,可以作为局放类型的重要识别依据。

### 3 结论

文中对 4 种典型局部放电类型 AE 信号进行了特征量提取,对比了同种局放类型共性和不同局放类型在同一特征量下的差异,找到了识别局部放电类型依据,得出以下主要结论。

1)从 AE 信号 FFT 频域特征来看,主频段频率范围差异均不大,不能作为判别局放类型的依据;不同局部放电类型副频段特征差异较大,可以作为识别局部放电类型的依据。

2)从 AE 相位特征来看,尖端放电相位最集中,且不受“针—板”间距影响,正负半周差异性大;气隙放电相位范围在正负半周呈现强对称性的特点,悬浮放电相位会随间距变化而改变,但是 AE 信号均出现在工频电压负半周,沿面放

电相位分布散乱。不同局部放电类型下相位差异明显,可以作为故障类型区分的依据。

3)4 种类型局部放电产生的 AE 信号下降沿时间( $t_d$ )与上升沿时间( $t_r$ )比值有明显差异,可以作为局放类型的重要识别依据。尖端放电 AE 波形呈“利剑”状,悬浮放电 AE 波形呈“水母”状,沿面放电 AE 波形呈“陀螺”状,而气隙放电 AE 信号波形呈“铃铛”状,可根据 AE 波形特征识别和区分 4 种放电类型。

### 参考文献:

- [1] 倪鹤立,姚维强,傅晨钊,等. 电力设备局部放电技术标准现状述评[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 1-15.  
NI Heli, YAO Weiqiang, FU Chenzhao, et al. Review on status of technical standards of partial discharge in electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 1-15.
- [2] 叶海峰,钱勇,王红斌,等. 开关柜表面暂态地电压信号频谱特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3849-3857.  
YE Haifeng, QIAN Yong, WANG Hongbin, et al. Spectrum characteristics of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3849-3857.
- [3] 罗思敏,田妍,郑服利,等. 开关柜局部放电检测技术应用[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 204-208.  
LUO Simin, TIAN Yan, ZHENG Fuli, et al. Application of partial discharge detection technology in switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 204-208.
- [4] 刘云鹏,王江伟,裴少通,等. 基于短时傅里叶变换和稀疏表示的局放识别分类方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 31-36.

- LIU Yunpeng, WANG Jiangwei, PEI Shaotong, et al. Method for identifying and classifying partial discharge based on short time Fourier transform and sparse representation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(23): 31-36.
- [5] 李大华, 孔凌风, 高 强, 等. 基于三次相关改进的广义互相关时延估计法在局部放电超声波定位中的研究[J]. *声学技术*, 2022, 41(5): 774-781.
- LI Dahua, KONG Lingfeng, GAO Qiang, et al. Study on cubic correlation improvement based generalized cross correlation time delay estimation method of supersonic waves detection method for location partial discharge[J]. *Technical Acoustics*, 2022, 41(5): 774-781.
- [6] 王 非, 徐 伟. 基于 Choi-Williams 分布和排列熵的开关柜局部放电类型识别[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(10): 32-40.
- WANG Fei , XU Wei. Partial discharge type identification of switchgear based on Choi-Williams distribution and permutation entropy[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(10): 32-40.
- [7] 戴昕宇, 徐焕宇, 张 宁. 移动端卷积神经网络开关柜局部放电样本生成与检测[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(12): 141-147.
- DAI Xinyu , XU Huanyu , ZHANG Ning. Partial discharge sample Generation and detection of convolutional neural network switchgear at Mobile end[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(12): 141-147.
- [8] 查坚卿, 郭 磊, 邵 宣, 等. 高压开关柜局部放电超声波信号传播特性[J]. *云南电力技术*, 2023, 51(5): 26-28.
- ZHA Jianqing , GUO Lei , SHAO Xuan , et al. Ultrasonic propagation in switchgear[J]. *Yunnan Electric Power*, 2023, 51(5): 26-28.
- [9] 彭兆裕, 岳 丹, 颜 冰, 等. 开关柜内沿面放电及电弧放电多光谱特征分析[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(1): 84-90.
- PENG Zhaoyu, YUE Dan, YAN Bing, et al. Multi-spectral characteristics of creeping discharge and arc discharge in switch cabinet[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(1): 84-90.
- [10] 杨 刚. 典型缺陷局部放电超声信号的特征与模式识别方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- YANG Gang. Study on ultrasonic signal characteristics and pattern recognition method of typical defect partial discharge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [11] 罗海静, 柳 赟. 10 kV XLPE 电缆中局部放电声波衰减规律研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(2): 186-195.
- LUO Haijing, LIU Yun. Study on the acoustic wave attenuation of partial discharge in 10 kV XLPE cable[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(2): 186-195.
- [12] 贾晨昊. 开关柜局部放电信号统计特征及模式识别研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- JIA Chenhao. Research on statistical characteristics and pattern recognition of partial discharge signals in Switch cabinet[D]. Beijing : North China Electric Power University, 2022.
- [13] 田 天, 周 秀, 丁 培, 等. 交直流电压下油纸绝缘典型缺陷的局部放电特征[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(6): 40-46.
- TIAN Tian , ZHOU Xiu , DING Pei , et al. Partial discharge characteristics of typical defects in oil paper insulation under AC and DC voltage[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(6): 40-46.
- [14] 刘世涛, 徐兆国, 杨 凯, 等. 典型缺陷下电力电缆局部放电特征与识别[J]. *高电压技术*, 2023, 49(s1): 36-39.
- LIU Shitao, XU Zhaoguo, YANG Kai, et al. Partial discharge characteristics and identification of power cables under typical defects[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(s1): 36-39.
- [15] 黎宏飞, 高宗宝, 江建明, 等. 开关柜典型缺陷模型的 TEV 和超声波法局部放电特征研究[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(5): 81-86.
- LI Hongfei, GAO Zongbao, JIANG Jianming, et al. Study on partial discharge characteristics of typical defect model of switch cabinet by TEV and ultrasonic method[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(5): 81-86.
- [16] 曾潮旭, 徐会凯, 杨淳岚, 等. 开关柜典型局部放电类型超声波信号特征量研究[J/OL]. *高压电器*, 1-10[2024-09-09].http : //kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20231122.1025.002.html.
- ZENG Chaoxu, XU Huikai, YANG Chunlan, et al. Study on the characteristic quantities of ultrasonic signals of typical partial discharge types in switchgears[J/OL]. *High Voltage Apparatus*, 1-10[2024-09-09].http :

//kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.tm.20231122.1025.002.html.

- [17]于泊宁, 任明, 张志斌, 等. 配电设备分布式局部放电感知技术的实现方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1929-1938.
- YU Boning, REN Ming, ZHANG Zhibin, et al. Implementation method of distributed partial discharge sensing technology for power distribution equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1929-1938.
- [18]任双赞, 曾肖明, 吴经锋, 等. 基于TEV和超声波的开关柜局部放电便携式检测仪的研制[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 135-139.
- REN Shuangzan, ZENG Xiaoming, WU Jingfeng, et al. Development of a portable detection device for partial discharge in switchgear based on TEV and ultrasonic wave methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 135-139.
- [19]孙源, 宋颜峰, 王昊天, 等. 开关柜局部放电超声-TEV融合检测技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5052-5060.
- SUN Yuan, SONG Yanfeng, WANG Haotian, et al. Ultrasonic-TEV combined detection technology of partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5052-5060.
- [20]万中一, 胡岳, 陈炳树, 等. 基于能量谱分析和DBSCAN改进算法的多源局部放电分类识别方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4335-4344.
- WAN Zhongyi, HU Yue, CHEN Bingshu, et al. Multi-source Partial Discharge Classification and Recognition Method Based on Energy Spectrum Analysis and DBSCAN Improved Algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4335-4344.
- [21]白鹭, 李小婧, 董理科, 等. 基于超声波法识别环网柜的局部放电类型研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 42-48.
- BAI Lu, LI Xiaojing, DONG Like, et al. Study on the partial discharge types of ring network cabinets based on ultrasonic method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 42-48.
- [22]谢荣斌, 杨超, 申强, 等. TEV与HFCT法测量开关柜局部放电的特性对比[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 37-47.
- XIE Rongbin, YANG Chao, SHEN Qiang, et al. Comparative study on the switchgear partial discharge characteristics based on transient earth voltage and pulse current detection methods[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 37-47.
- [23]范敏, 叶会生, 段肖力, 等. 真型开关柜模拟缺陷下的局部放电实验研究[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 134-138.
- FAN Min, YE Huisheng, DUAN Xiaoli, et al. Partial discharge experiment research under simulated defect of real switch cabinet[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 134-138.
- [24]王鹏, 刘玉婷, 邹阳, 等. TEV和超声波检测法在开关柜局部放电检测中的应用评述[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 75-83.
- WANG Peng, LIU Yuting, ZOU Yang, et al. Application of TEV and ultrasonic detection methods in partial discharge detection of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 75-83.
- [25]YU Hongqi, HUANG Hui, XU Ruibo, et al. A method for testing partial discharge characteristics of Switch cabinet based on improved particle swarm algorithm[J]. Journal of Physics. Conference Series, 2024, 2728(1): 012-067.
- [26]SAHOO R, KARMAKAR S. Comparative analysis of machine learning and deep learning techniques on classification of artificially created partial discharge signal[J]. Measurement, 2024(235): 114947.
- [27]SUN Yuwei, ANQIANG L V, XIE Zhiyuan, et al. Research on partial discharge detection based on distributed optical fiber acoustic sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(8): 011086.
- [28]周晶, 罗日成, 黄军. 基于改进小波阈值—CEEMDAN的变压器局部放电超声波信号白噪声抑制方法[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 163-171.
- ZHOU Jing, LUO Richeng, HUANG Jun. White noise suppression method of partial discharge ultrasonic signal of transformer based on improved wavelet threshold-CEEMDAN[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 163-171.
- [29]陈倩, 李跃忠. 基于离散信号相关性的超声波回波信号动态阈值研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(12): 105-110.
- CHEN Qian, LI Yuezhong. Research on dynamic threshold of ultrasonic echo signal based on discrete signal correlation[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(12): 105-110.

杨龙山(1999—), 男, 硕士, 主要从事高电压试验技术与绝缘检测技术研究(E-mail: 1711241693@qq.com)。