

引用格式:张彬,张周胜,于瑞冬,等.直流均匀电场下金属微粒运动状态与识别[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):265-273.

Citation: ZHANG Bin, ZHANG Zhousheng, YU Ruidong, et al. Motion state and identification of metal particles in a uniform DC electric field[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 265-273.

直流均匀电场下金属微粒运动状态与识别

张彬,张周胜,于瑞冬,张馨月

(上海电力大学电气工程学院,上海 200090)

摘要:直流气体绝缘封闭输电线路(gas insulation transmission line, GIL)中自由金属微粒在腔体内运动会严重降低气体绝缘水平,极端情况下可能造成局部放电或沿面闪络。为此,对直流均匀电场下金属微粒的运动状态及识别方法开展研究。首先,搭建直流电压下金属微粒运动及超声检测实验平台,通过大量实验记录金属微粒在平行极板间的启举电压、运动轨迹和微粒运动产生的超声信号波形,实验结果表明:正极性电压下线形金属微粒会存在特殊的下极板飞萤运动状态,且线形金属微粒直径越大、长度越长越趋于发生下极板飞萤运动。随后,搭建交流脉冲局部放电实验平台,测量不同状态下金属微粒运动局部放电图谱,实验结果可以验证电晕放电是造成下极板飞萤运动状态的主要因素之一。最后,根据实验装置采集到的金属微粒运动超声信号波形进行去噪处理,提取超声信号3个特征参量并对不同微粒运动状态进行参数对比,结果表明:参数阈值法能够有效区分球形金属微粒的大小及线形金属微粒的运行状态。

关键词:直流气体绝缘封闭输电线路;金属微粒;飞萤现象;超声检测;局部放电

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.028 中图分类号: TM85 文章编号: 1673-9140(2025)01-0265-09

Motion state and identification of metal particles in a uniform DC electric field

ZHANG Bin, ZHANG Zhousheng, YU Ruidong, ZHANG Xinyue

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The movement of free metal particles within the cavity of a direct current gas insulation transmission line (GIL) can significantly reduce the gas insulation level, and in extreme cases, it may cause partial discharge or surface flashover. The motion states of metal particles under a uniform DC electric field and their identification methods are investigated. An experimental platform is established for the movement of metal particles under DC voltage and ultrasonic detection. Through extensive experiments, the uplift voltage of metal particles between parallel plates, their motion trajectories, and the ultrasonic signal waveforms generated by their movement are recorded. The experimental results indicate that under positive polarity voltage, linear metal particles exhibit a unique state of lower plate flying firefly movement, with a higher tendency for this movement in linear metal particles with larger diameters and greater lengths. A partial discharge experimental platform of alternating current pulse is also set up to measure the partial discharge patterns of metal particles in different motion states. The results confirm that corona discharge is one of the main factors contributing to the lower plate flying firefly movement. Noise reduction processing is applied to the ultrasonic signal waveforms of metal particle movement collected by the experimental setup, and three characteristic parameters of the ultrasonic signal are extracted for comparison across different particle motion states. The findings suggest that the parameter threshold method can effectively differentiate between the size of spherical metal particles and the operational states of linear metal particles.

Key words: DC gas insulation transmission line; metal particle; flying firefly phenomenon; ultrasonic detection; partial discharge

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-05-29

基金项目: 上海市科学技术委员会科技项目(20020500800)

通信作者: 张周胜(1969—),男,博士,教授,主要从事电力设备状态监测与故障诊断、电力设备智能化、电介质物理理论与介电现象以及气体放电等研究; E-mail: shengzz@shiep.edu.cn

“双碳”背景下为满足日益增长的电力负荷需求,中国在“十四五”期间规划大力发展特高压输电工程^[1],对西部水电、东南沿海风电等清洁能源大容量远距离传输,减少温室气体排放,实现“碳达峰”、“碳中和”的双碳目标^[2]。由于气体绝缘封闭输电线路(gas insulation transmission line, GIL)具有优良的绝缘性能、传输容量大、电磁兼容性好以及可靠性高等优点,特殊地理环境下其能够取代架空线路及高压电缆^[3-4],因此得到了广泛关注。

在运输、装配及运行过程中,GIL不可避免地会在腔体内部引入金属微粒,运行过程中微粒可能附着在绝缘子表面或在极板间自由运动而产生电场畸变,造成气隙击穿或发生局部放电现象,严重威胁 GIL 生产运行安全。根据近 5 年 GIL 运行数据表明:GIL 故障缺陷中 73 % 故障是由绝缘故障产生,其中 38 % 故障是由于腔体内自由运动金属微粒造成^[5]。GIL 内自由金属微粒通常以球形、线形、螺旋形以及金属粉末的形式存在^[6-7],目前,国内外学者对金属微粒的运动特征分析及局部放电检测方法进行了大量研究。文献[8]搭建了同轴圆柱电极,对 GIL 中影响最大的线形金属微粒运动状态进行检测,结果表明:线形金属微粒越短越容易达到跳跃的运动状态,微粒越长越容易保持站立状态;文献[9]设计了气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)内部球形金属导电微粒 3 种运动状态模型,即滚动、非贯穿性跳跃和贯穿性跳跃,通过提取球形金属微粒运动超声脉冲信号,提出基于超声波时间序列区分微粒运动状态的方法,结果表明:依据 $\Delta u - \Delta t$ 统计分布图谱可对球形金属微粒运动状态进行区分;文献[10]建立球形金属微粒碰撞极板超声信号实验平台、基于弹性力学的金属微粒碰撞极板力学模型,统计结果表明:金属微粒直径与最大接触力呈线性关系,微粒碰撞极板最大接触力与超声信号幅值的变化趋势大致相同。目前,对于金属微粒运动特性及局部放电检测研究主要关注球形微粒,线形微粒的运动过程由于具有一定随机性,对其进行定量分析则变得相当困难;此外,线形金属微粒碰撞超声信号的研究也很少,多数学者将 GIS/GIL 内不同种类金属微粒当做单一缺陷类型进行甄别,并未对不同种类金属微粒进行有效识别。

本文搭建平行电极实验模型,对不同规格球形、线形金属微粒在直流均匀电场下的运动状态进行研究,理论分析并试验验证金属微粒下极板飞萤

状态机理。针对下极板飞萤运动过程中存在局部放电,其长期发展对 GIL 绝缘危害大的问题,本文采用超声法对金属微粒运动状态进行检测,并通过不同特征参数阈值对球形微粒大小和线形微粒状态进行区分。

1 实验装置及研究方法

本文搭建直流下自由金属微粒运动及超声信号检测实验平台,包括高压直流电源、实验观察舱体、高速摄像机以及超声信号采集系统等,可以同时采集存储金属微粒运动的运动行为及微粒运动超声信号。实验平台如图 1 所示。

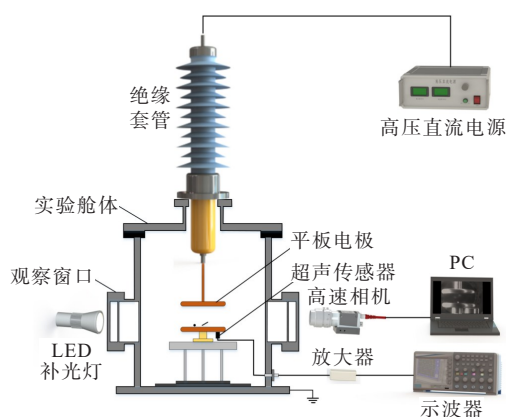


图 1 微粒运动及超声检测实验平台

Figure 1 Experimental platform for particle movement and ultrasonic detection

图 1 中高压直流电源型号为 ZGF-60 kV,可施加正极性 60 kV 电压;高速摄像机(WP-UT130M)分辨率为 130 万像素,拍摄帧率为 210 fps;超声传感器为 G40 窄带声发射传感器,频率范围为 15 ~ 75 kHz,配置前置放大器,放大信号为 40 db;采用 MDO3104 泰克示波器,采样率为 2.5 Gs/s;为方便记录微粒运动情况同时配备 2 个 LED 补光灯。实验采用平板铝电极,直径为 15 cm,边缘做圆角处理,平行极板极间距为 20 mm。

平板电极置于实验舱体内部,舱体内部环境为标准大气压空气环境,实验舱有 4 个观察窗口,1 个窗口放置高速摄像机并连接至 PC 端,以便记录微粒运动状态;2 个窗口放置强力 LED 灯保证摄像机画面清晰;高压直流电源通过高压绝缘套管接至上极板,下极板接地,同时在下极板紧贴超声传感器,传感器线路通过传感器窗口连接示波器,记录不同微粒在极板间运动产生的超声信号。为了降低升压速度过快对微粒启举产生影响,采用 500 V/s 调

压速率,直至在 PC 端观察到微粒运动再停止加压,记录启举电压并由示波器记录微粒运动声发射信号。

2 GIL 金属微粒运动状态实验检测与分析

2.1 直流下金属微粒受力

以长直管道为主的直流 GIL 单元段长度可达 10~18 m^[11],在远离绝缘子及管道接口处的腔体内大部分区域轴向电场分量可以忽略,此区域仅考虑径向电场方向微粒受力情况,为简化计算,可将 GIL 腔体径向间受力情况通过平板电极间均匀电场进行分析。由于球形和线性金属微粒在电场中有相同的受力情况,因此选取球形金属微粒进行分析,简化后模型受力情况如图 2 所示,受力表达式^[12]如表 1 所示, k 为面电荷引起的镜像修正系数^[13],当微粒与电极接触或与同性电极接触时, $k=0.832$,其余情况下 $k=1$; q 为金属微粒所带电荷量, Re 为雷诺数, r 为铝球微粒半径, ρ_{gas} 为绝缘气体密度, ρ 为金属微粒密度, v 为微粒运动速度, g 为重力加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

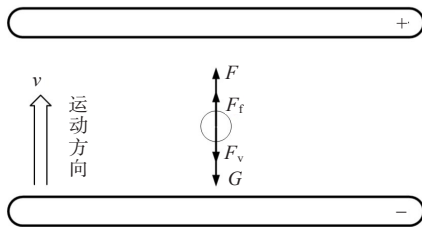


图 2 极板间微粒受力分析

Figure 2 Force analysis of particles between polar plates

表 1 金属微粒受力分析

Table 1 Force analysis of metal particles

受力类型	受力表达式
库仑力	$F = kqE_c$
气体阻力	$F_v = \left(\frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \right) \pi r^2 \rho_{\text{gas}} v^2$
重力	$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$
浮力	$F_f = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{gas}} g$

微粒在极板间受到重力 G 、库仑力 F 、粘滞阻力 F_v 以及浮力 F_f 的影响。在外施加直流电压下球形微粒在裸电极上通过传导带电^[14],其带电量可通过势函数多级展开偏微分方程组求解,即

$$q_r = \oint_s D ds = \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \epsilon_r r^2 E_c \quad (1)$$

式中, q_r 为球形金属微粒电荷量; D 为电位移矢量; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为绝缘气体相对介电常数; E_c 为微粒所处电场强度。

线形金属微粒平躺和站立在下极板时的带电量有所不同,其带电量^[15]分别为

$$q_l = 2\pi\epsilon_0 r_l l E_c \quad (2)$$

$$q_s = \frac{\pi\epsilon_0 \epsilon_r l^2 E_c}{\ln(2l/r_l) - 1} \quad (3)$$

式中, r_l 、 l 分别为线形微粒半径、长度。

理论分析下在平行极板间持续加压,直至微粒发生初始向上运动,此电压称为临界启举电压,微粒启举时速度较小,其所受浮力和气体阻力可以忽略,此时仅考虑受到电场力和重力的作用,在竖直方向 $F \geq G$ 条件^[16]下,球形微粒启举电压为

$$U_{\text{inf}} = \frac{d}{\pi} \sqrt{\frac{2r\rho g}{k\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (4)$$

式中, d 为平行极板极间距。

2.2 球形、线形金属微粒运动状态与飞行图谱测量

2.2.1 球形微粒运动状态

本文采用直径分别为 0.5、1.0、2.0 mm 的金属铝球微粒,每组微粒在实验平台重复实验 50 次,通过高速相机观测球形微粒运动状态。微粒到达启举电压时即发生贯穿极板的下极板-碰撞上极板-下极板的“类谐振”运动。直径为 1.0 mm 的球形金属微粒在临界启举场强下的飞行图谱如图 3 所示。

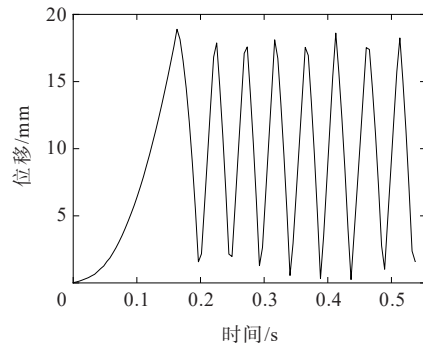


图 3 铝球类谐振运动飞行图谱

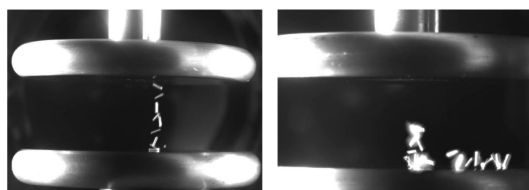
Figure 3 Flight trajectory of resonance-like movement of aluminum particles

对于一些学者提到运动过程中出现的小球微粒滚动状态^[17],可认为平板电极未处于完全水平状态,小球受力存在一个切向分量,在静止状态下小球克服静摩擦力,而随着直流电压的升高电场力变大,相应小球最大静摩擦力减小,在一定条件下金

属微粒切向分量大于静摩擦力而使微粒在未发生启举时在地电极发生滚动。

2.2.2 线形微粒运动状态

本文采用直径为 0.3、0.8、1.0 mm, 长度分别为 3、5、7、9 mm 的线形金属微粒, 对每种规格的线形微粒进行 30 组实验。线形金属微粒在极板间运动状态分为 3 种: 极板间完全贯穿运动、极板间未完全贯穿运动以及下极板飞萤。线形微粒的运动状态如图 4 所示。



(a) 完全贯穿 (b) 未完全贯穿/下极板飞萤

图 4 线形金属微粒运动状态

Figure 4 Motion state of linear metal particles

1) 极板间完全贯穿运动。线形微粒达到启举电压后一端抬起, 由于微粒两端电荷分布及电场强度不同, 因此其在运动至上极板过程中会旋转翻滚, 做持续碰撞上极板-下极板-上极板的类谐振运动。

2) 极板间未完全贯穿运动。金属微粒在碰撞几次上极板后, 做未碰撞上极板运动, 后又在下极板做小幅度跳跃, 即“下极板飞萤”。

3) 下极板飞萤。线形微粒一端接触下极板, 另一端倾斜发生持续绕轴旋转, 在此期间微粒发生轻微跳动, 下极板飞萤过程往往伴随着长期“竖直”现象的发生, 在微粒竖直状态时增加一定幅值电压, 其依旧保持竖直状态。

根据实验结果统计不同直径和长度的线形微粒在极板间碰撞上极板的概率, 如图 5 所示。

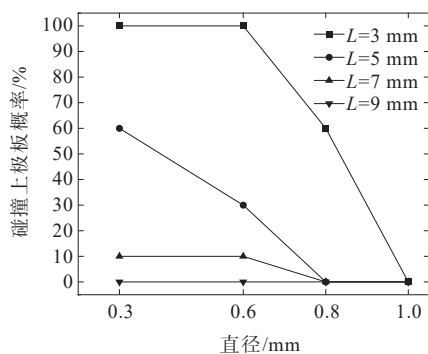


图 5 线形微粒运动状态概率

Figure 5 Probability of linear particle motion states

实验统计结果表明: 不同规格的线形金属微粒受到直径和长度的影响, 碰撞上极板的概率有显著的不同。对于相同直径的线形金属微粒, 长度越短越容易发生碰撞上极板的运动; 对于相同长度的线形金属微粒, 直径越小越容易发生碰撞上极板运动。

2.3 金属微粒运动“飞萤”机理

对于线形金属微粒特有的负极性“飞萤”现象^[18-20], 本文针对测量所得微粒典型下极板飞萤运动特征, 以微粒运动引起空间电荷分布变化对微粒“飞萤”进行分析, 微粒上升过程中空间电荷分布如图 6 所示。

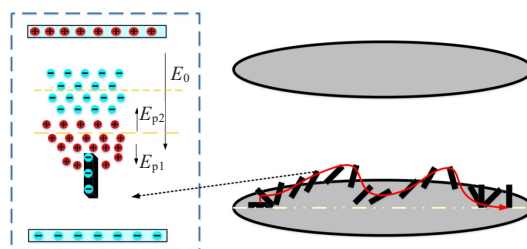


图 6 下极板飞萤运动空间电荷分布

Figure 6 Spatial charge distribution of lower plate flying firefly movement

当线性微粒在极板间达到启举电压后, 微粒一端翘起向高压电极运动, 此时微粒通过下极板传导带电, 金属微粒带负电荷, 线性微粒由于两端电场强度不同致使微粒在向上极板运动过程中会产生一定旋转。在微粒上升阶段时可将“线性微粒-高压电极”模型看作负棒正板模型, 在极性效应下此时空间中负电荷向高压电极运动, 而正电荷向负极板发生运动, 在正、负电子交会处产生方向不同的电场 E_{p1} 、 E_{p2} 。 E_{p1} 作用下会加强微粒上端电场强度, 此时微粒起晕电压降低, 更容易发生局部放电, 而在金属微粒上端也会形成一个 E_{p2} 电场, 此电场作用下该位置电场强度削减, 金属微粒运动至此电场力降低, 阻碍微粒进一步向高压电极运动。

在平行极板间由于金属微粒起晕电压的降低, 其翘起靠近上极板的一端电荷分布密集, 在微粒尖端容易导致局部放电现象的发生。不同于 SF_6 气体环境, 空气中气体分子在高压下更容易发生电离, 电离产生正离子和电子。电子运动速度快, 向正极板发生运动; 一部分正离子附着在带负电荷的线形微粒上, 使微粒电荷量减小或极性变化, 导致电场力减小或产生一个反向电场力, 使得微粒未碰到上极板而反向做碰撞下极板的“飞萤”运动。“飞萤”状态下微粒在极板间做小幅度跳跃, 此状态运动稳定

下微粒会竖立立在极板上,此时持续加压微粒依旧保持竖立状态。

3 线性金属微粒下极板飞萤的局部放电验证测量

根据文 2 中分析,线形金属微粒存在特殊的“下极板飞萤”运动状态,运行过程中可能发生局部放电对绝缘造成严重污染,本文通过搭建交流脉冲局部放电监测系统对飞萤机理进行验证,实验平台如图 7 所示,包括电流电源、保护电阻、自由金属微粒缺陷平台和检测系统等。

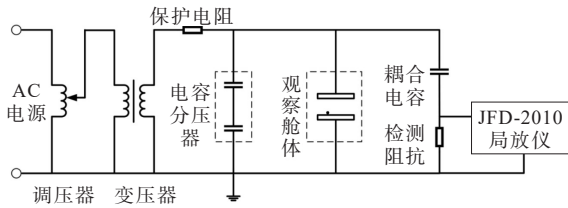


图 7 局部放电检测系统实验平台

Figure 7 Experimental platform for partial discharge detection system

图 7 中金属微粒缺陷平台由实验舱体和平板电极构成;检测系统由脉冲电流局部放电系统构成,利用检测阻抗获取金属微粒运动局部放电电流脉冲信号,通过 JFD-2010 局部放电检测仪可以捕捉到局部放电信号,采用局放仪自带分析软件获取金属微粒放电图谱^[21]。由测量结果可知,球形金属微粒和线形类谐振金属微粒运动过程中放电小于 5 pC,由于本次实验所用变压器为无局放变压器(局放量小于 5 pC),因此,认为球形、线形金属微粒发生类谐振运动过程中几乎没有局部放电现象发生;而下极板飞萤状态下线形金属微粒局部放电量达 109 pC。提取线形微粒局部放电椭圆图谱如图 8 所示。

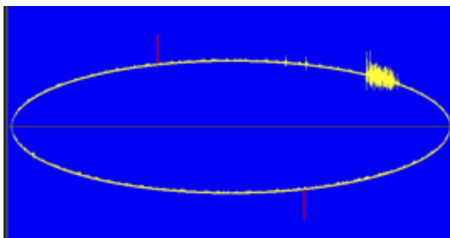


图 8 线形微粒电晕放电椭圆图谱

Figure 8 Elliptical spectrum of corona discharge for linear particles

椭圆图谱表明该放电类型为标准电晕放电图谱,放电处于正半周期为地电极的电晕放电,由此可知,线形金属微粒“下极板飞萤”过程中存在电晕

放电,且电晕放电是造成线形金属微粒运动状态发生改变的主要因素之一。

4 金属微粒运动状态的超声信号图谱分析

首先对采集的金属微粒运动超声信号进行降噪信号处理,然后对比金属微粒运动飞行图谱和超声信号图谱的一致性,最后对金属微粒超声信号图谱进行分析,为区分球形和线性金属微粒运动状态的特征参量提取提供依据。

4.1 超声信号去噪

采用微粒运动超声实验平台(图 1)测量得到微粒超声信号波形,由于受到白噪声、有色噪声污染,影响信号质量和准确性,不利于波形特征信号的提取与分析,故需要对信号进行去噪处理^[22]。本文采用文献[23]中的改进软阈值小波去噪法,通过对小波系数进行阈值处理,实现噪声抑制。阈值函数方程为

$$\omega_\lambda = \begin{cases} \text{sgn}(\omega) \left(|\omega| - \frac{2^\lambda}{\exp\left(\frac{|\omega| - \lambda}{\lambda}\right)} \right), & |\omega| \geq \lambda \\ 0, & |\omega| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中, ω_λ 为阈值处理后的小波系数; ω 为原始小波系数; λ 为通用阈值(visushrink)。

新的阈值函数是以 $y=X$ 为渐近线,当 ω 趋于无穷时, ω_λ 逐渐接近 ω ,这样可以改正软阈值下改进小波系数恒定偏差的缺陷,有效保持信号的特征信息。采用超声检测系统对下极板飞萤运动状态金属微粒运动信号进行检测,超声信号波形去噪前、后波形如图 9 所示。

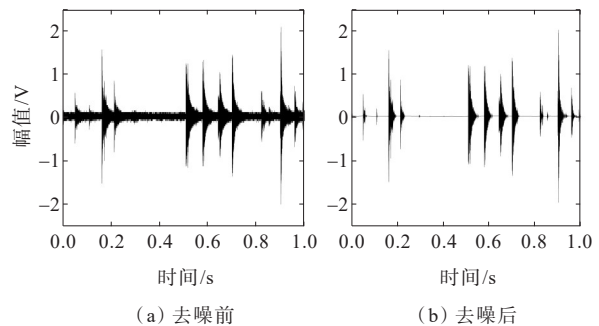


图 9 去噪前、后下极板飞萤微粒运动超声图谱

Figure 9 Ultrasonic spectrum of lower plate flying firefly particle movement before and after noise reduction

4.2 微粒运动及超声信号联合

金属微粒运动所采集到的超声信号可能由两部分构成:局部放电和微粒碰撞极板所产生的超声

信号。金属微粒运动尖端电场畸变,当电场强度超过气体击穿场强时,金属微粒气体周围就会产生局部放电^[24-25],放电过程中电荷的快速移动和气体分子的激发会导致局部区域的气体快速加热和膨胀而产生超声波;当金属微粒与极板碰撞时,其动能一部分转化为声能,导致极板和周围介质产生振动形成声波,这一过程涉及微粒与极板之间的非弹性碰撞,其中微粒受到形变和能量损失,而碰撞产生的声波则是因振动导致的介质压缩和扩散所引起的^[26]。

当采用直径为 0.8 mm、长度为 5 mm 的线形金属微粒时,启举电压为 17.23 kV,通过实验平台(图 1)同时采集金属微粒下极板飞萤运动飞行图谱及超声信号图谱,并对 2 个图谱联合分析,联合图谱如图 10 所示。

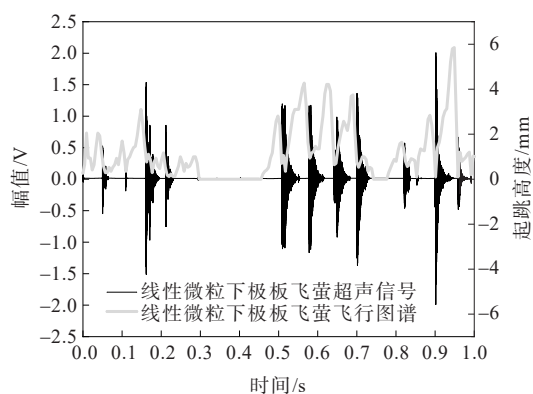


图 10 联合微粒运动及超声图谱

Figure 10 Combined particle movement and ultrasonic spectrum

由图 10 可知,金属微粒超声信号与金属微粒碰撞下极板时刻具有非常好的一致性,即金属微粒在极板间运动,仅在碰撞下极板时才能采集到超声脉冲信号,对于金属微粒运动过程中产生的局部放电信号,示波器所采集到的超声信号在此过程中并无明显变化。因此,可认为超声传感器安装在下极板对运动过程中发生的局部放电及碰撞上极板产生的超声信号并不敏感,所采集到的超声信号都是金属微粒碰撞下极板时所产生的脉冲信号,微粒在悬浮状态下不会产生超声信号。

4.3 基于时间序列的微粒运动超声信号分析

采用改进后的小波去噪算法对测量信号进行滤波处理,得到球形、线形微粒运动状态碰撞超声波形,如图 11 所示。

单个金属微粒的运动超声表现为多个振荡衰减的脉冲信号。目前,众多学者通过提取不同缺陷下的单个脉冲波形来分析超声信号,使用统计参数进行时频域特征提取和模式识别,然而,在表征微

粒运动状态的超声信号中,忽略了大量微粒运动特征。本文综合考虑微粒时域信号内的脉冲幅值和脉冲时间间隔对运动超声波形进行分析。

球形金属微粒在极板间做连续碰撞上、下极板的类谐振运动,每次碰撞脉冲幅值相近,连续碰撞时间间隔随着碰撞次数的增加而趋于稳定;线形类谐振运动在运动过程中碰撞脉冲幅值较球形金属微粒有较大的差异,且连续碰撞时间间隔也不稳定;下极板飞萤运动的碰撞脉冲幅值有显著差异,其脉冲时间间隔存在显著的密集区和非密集区。

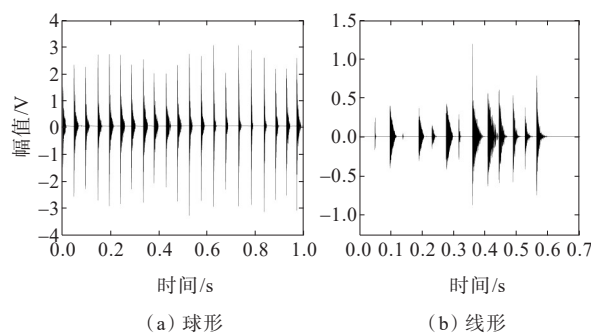


图 11 金属微粒谐振运动超声图谱

Figure 11 Ultrasonic spectrum of resonant movement of metal particles

根据以上波形特征可以提取时域信号特征参数,对微粒运动初期 GIL 内部绝缘影响最大的线形金属微粒“下极板飞萤”运动状态进行识别,避免故障缺陷进一步加重。

5 基于阈值法的金属微粒运动状态识别

根据超声时间序列图谱,以碰撞超声脉冲幅值 F_i 和时间间隔 Δt_i 为基础值,结合不同状态金属微粒运动超声信号特征,对微粒运动超声信号波形特征提取以下特征参量:幅值平均值 F_{ave} 、幅值变异系数 (coefficient of variation, CV)、时间变异系数。表达式分别为

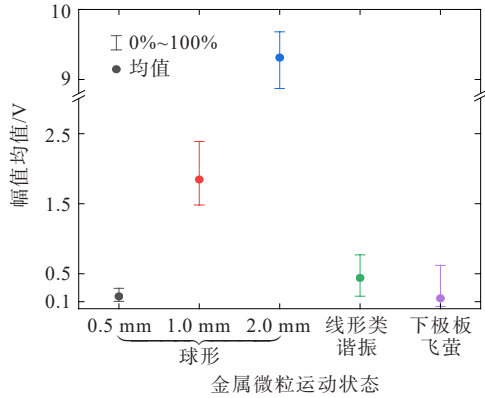
$$F_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n F_i \quad (6)$$

$$\sigma_{CV,F} = \frac{1}{F_{ave}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (F_i - F_{ave})^2} \quad (7)$$

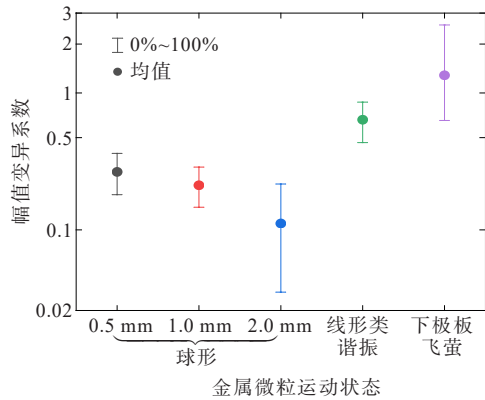
$$\sigma_{CV,t} = \frac{1}{\Delta t_{ave}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \Delta t_{ave})^2} \quad (8)$$

式(6)~(8)中, N 为超声信号脉冲数; F_i 为单个信号脉冲幅值; F_{max} 、 F_{min} 分别为脉冲幅值最大、最小值; Δt_i 为相邻脉冲时间间隔; Δt_{ave} 为相邻脉冲时间间隔平均值。

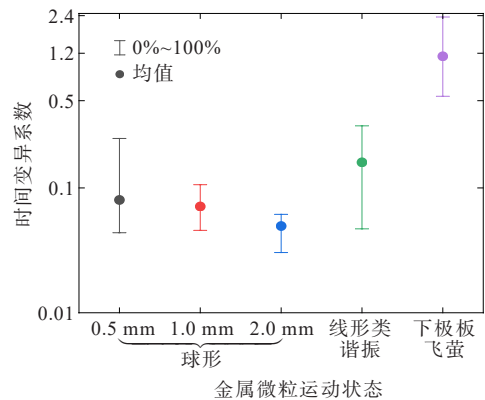
不同状态下金属微粒特征参数变化如图 12 所示。微粒运动碰撞极板产生超声信号受到外施电压和微粒直径影响^[10],使得碰撞极板产生的最大接触力发生改变,影响碰撞超声幅值。对于球形金属微粒,随着微粒直径和启举电压变大,其碰撞超声信号幅值显著增加,由于球形金属微粒形状规则,连续碰撞脉冲幅值较为稳定,因此幅值变异系数较小,且球形类谐振运动中连续碰撞时间间隔趋于稳定,超声信号时间变异系数较小。



(a) 超声信号幅值均值



(b) 超声信号幅值变异系数



(c) 超声信号时间变异系数

图 12 超声信号特征参数对比

Figure 12 Comparison of characteristic parameters in ultrasonic signals

线形类谐振运动超声信号波形与球形微粒相似,但线形微粒运动过程中由于两端电荷分布及电场强度差异的影响,运动过程中将产生一定的旋转,因此,金属微粒碰撞部位及碰撞角度有明显的不同,导致碰撞在不同时间尺度下超声幅值差异较大,使得线形类谐振运动比球形金属微粒的幅值变异系数区间大。

对于下极板飞萤运动,由于金属微粒在运动过程中放电具有一定随机性,使得不同规格金属微粒起跳高度、碰撞角度有一定随机性,因此碰撞超声信号幅值差异较大,明显大于球形金属微粒的幅值变异系数,且下极板飞萤运动存在连续跳跃和下极板竖直阶段,超声信号波形时间间隔存在明显的密集区和非密集区,因此下极板飞萤运动的时间变异系数较大。

基于以上超声信号超声运动特征,对直径为 0.5、1.0、2.0 mm 球形金属微粒和 2 种不同状态线形金属微粒的特征参数进行比较,如表 2 所示。

表 2 超声信号特征参数阈值比较

Table 2 Comparison of thresholds for characteristic parameters in ultrasonic signals

微粒状态	幅值平均值/V	幅值变异系数	时间变异系数
0.5 mm 球形	(0.10,0.29)	(0.11,0.39)	(0.04,0.25)
1.0 mm 球形	(1.48,2.40)	(0.15,0.31)	(0.04,0.11)
2.0 mm 球形	(8.80,9.70)	(0.03,0.23)	(0.03,0.06)
类谐振线形	(0.17,0.77)	(0.46,0.88)	(0.05,0.32)
下极板飞萤	(0.03,0.62)	(0.66,2.58)	(0.54,2.35)

根据表 2 可知,下极板飞萤状态金属微粒超声信号时间变异系数阈值为(0.54,2.35),可对其状态有效区分;随着球形金属微粒的直径增加,脉冲幅值均值阈值可以对直径 1.0、2.0 mm 球形金属微粒进行区分;而对于 0.5 mm 球形和类谐振线形金属微粒,脉冲幅值均值和时间变异系数有一定范围重叠,可根据幅值变异系数对这 2 种微粒进行区分,2 种状态金属微粒幅值变异系数阈值范围分别为(0.11,0.39)、(0.46,0.88)。

因此,综合考虑超声信号中提取的 3 个特征参数阈值,可以实现对球形金属微粒大小及线形金属微粒运动状态进行识别,从而对 GIL 内部绝缘状况进行评估,以采取相应预防和治理措施。

6 结语

1) 利用搭建的微粒运动检测平台,通过大量实

验对不同规格线形金属微粒运动行为状态进行记录。统计结果表明:微粒半径越小长度越短越容易发生贯穿极板的运动状态,微粒半径越大长度越长越容易发生下极板“飞萤”的运动状态。

2) 采用脉冲电流局部放电检测系统对不同规格金属微粒运动下局部放电情况进行检测。实验结果表明:球形和类谐振线形金属微粒运动过程中均无局部放电发生,仅在下极板飞萤运动状态下可以检测到电晕放电,放电量可达 109 pC。可以认为电晕放电是造成下极板飞萤运动状态产生的主要因素之一。

3) 以微粒运动特征对超声信号进行分析,提取超声信号 3 个特征参数:幅值均值、幅值变异系数、时间变异系数。通过参数阈值法对球形金属微粒大小、线形金属微粒运动状态能够进行有效区分。

参考文献:

- [1] 梁芳蔚,张长虹,吕金壮,等. 直流气体绝缘输电线路关键问题及装备研发现状综述[J]. 高压电器,2023,59(9): 1-11.
LIANG Fangwei, ZHANG Changhong, LYU Jinzhuang, et al. Review of key problems and development status of DC gas insulated transmission line[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(9):1-11.
- [2] 张长虹,张博雅,李明洋,等. 高压直流 GIL 设备绝缘关键技术研究综述[J]. 高电压技术,2023,49(3):920-936.
ZHANG Changhong, ZHANG Boya, LI Mingyang, et al. Review of key insulation technologies of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering,2023,49(3):920-936.
- [3] 刘鹏,李智凯,田汇冬,等. 直流电压下气体绝缘输电线路中微粒运动特性研究及微粒陷阱效能分析[J]. 中国电机工程学报,2022,42(15):5740-5751.
LIU Peng, LI Zhikai, TIAN Huidong, et al. Research on motion characteristics of metal particles and capture efficiency of particle traps in gas insulated transmission lines under DC Voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(15):5740-5751.
- [4] 李庆民,薛乃凡,王媛,等. 交直流输电管道绝缘运行安全关键技术[J]. 中国电机工程学报,2024,44(4):1629-1649.
LI Qingming, XUE Naifan, WANG Yuan, et al. Key technologies for operation safety of AC/DC gas insulated transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2024,44(4):1629-1649.
- [5] 王健. 直流 GIL 金属微粒的荷电运动机制与治理方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
WANG Jian. Research on the moving mechanisms of charged metal particles in DC GIL and suppressing methods[D]. Beijing: North China Electric Power University,2017.
- [6] 薛乃凡,魏来,李庆民,等. 平板电极下微米级粉尘弥散浓度探测方法与时空演化特性分析[J]. 电工技术学报,2024,39(7):2132-2142.
XUE Naifan, WEI Lai, LI Qingmin, et al. Detection method and spatial-temporal evolution characteristics analysis of micron dust dispersion concentration under flat electrodes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(7):2132-2142.
- [7] 董曼玲,臧春艳,詹振宇,等. GIL 内部金属微粒问题研究进展[J]. 高压电器,2024,60(1):1-14.
DONG Manling, ZANG Chunyan, ZHAN Zhenyu, et al. Research progress on metal particle issues inside GIL[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(1):1-14.
- [8] 王健,李庆民,李伯涛,等. 直流 GIL 中自由线形金属微粒的运动与放电特性[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4793-4801.
WANG Jian, LI Qingming, LI Botao, et al. Motion and discharge behavior of the free conducting wire-type particle within DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(17):4793-4801.
- [9] 谭向宇,郭浩,张乔根,等. 直流下 GIS 内运动金属微粒的超声波特性及状态识别[J]. 高电压技术,2010,36(2): 391-395.
TAN Xiangyu, GUO Hao, ZHANG Qiaogeng, et al. DC ultrasonic characteristics and states recognition of motion metallic particles in GIS[J]. High Voltage Engineering,2010,36(2):391-395.
- [10] 律方成,刘宏宇,颜湘莲,等. 直流均匀场中球形金属微粒与电极碰撞的超声特性研究[J]. 高压电器,2017,53(12):1-7.
LYU Fangcheng, LIU Hongyu, YAN Xianglian, et al. Ultrasound characteristics of impact between spherical metal particles and electrode in DC uniform field[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(12):1-7.
- [11] 阮全荣,谢小平. 气体绝缘金属封闭输电线路工程设计研究与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011:5-12.
RUAN Quanrong, XIE Xiaoping. Research and practice on engineering design of gas insulated metal enclosed transmission line[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press,2011:5-12.
- [12] 胡智莹,耿秋钰,魏来,等. 直流 GIS/GIL 中驱赶电极与微粒陷阱的协同抑制作用及优化设计方法[J]. 电工技术学报,2023,38(12):3338-3349.
HU Zhiying, GENG Qiuyu, WEI Lai, et al. Synergistic inhibitory effect and optimal design method of driving electrode and particle trap in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(12):3338-3349.
- [13] SAKAI K, TSURU S. Conducting particle motion and

- particle-initiated breakdown in dc electric field between diverging conducting plates in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999,6(1):122-130.
- [14] PÉREZ A T. Charge and force on a conducting sphere between two parallel electrodes[J]. Journal of Electrostatics,2002,56(2):199-217.
- [15] SAKAI K I,ABELLA D L,KHAN Y,et al.Experimental studies of free conducting wire particle behavior between nonparallel plane electrodes with AC voltages in air[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2003,10(3):418-424.
- [16] 李星,刘卫东,许渊,等.冲击振动下GIS内金属颗粒运动及其诱发沿面闪络特性[J].中国电机工程学报,2023,43(7):2838-2848.
- LI Xing, LIU Weidong, XU Yuan, et al. Movement behavior of metal particles and its induced insulator flashover characteristics under impact vibration in GIS [J].Proceedings of the CSEE,2023,43(7):2838-2848.
- [17] 刘思华.直流GIL中自由金属微粒的放电特性及危险程度评估[D].北京:华北电力大学,2017.
- LIU Sihua. Characteristics of partial discharges caused by free metal particle in DC GIL and severity evaluation [D].Beijing:North China Electric Power University,2017.
- [18] 常亚楠,耿秋钰,胡莹莹,等.直流电应力下线形微粒飞萤运动物理机制与临界起始判据[J].电工技术学报,2023,38(3):648-658.
- CHANG Yanan,GENG Qiuyu,HU Zhiying,et al.Physical mechanism and critical starting criterion of wire particle firefly movement under DC electric stress[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (3):648-658.
- [19] 戴锋,陈轩,王立宪,等.直流GIL中球形金属颗粒运动特性研究[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):173-180.
- DAI Feng, CHEN Xuan, WANG Lixian, et al. Kinetic characteristic analysis of spherical metal particles in DC GIL[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(3):173-180.
- [20] 程涵,魏威,Bilallqbal Ayubi,等.直流GIL中线形金属微粒电动力学行为研究[J].电工技术学报,2021,36(24):5283-5293.
- CHENG Han, WEI Wei, Bilallqbal Ayubi, et al. Study on the electrodynamic behavior of linear metal particles in DC gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(24):5283-5293.
- [21] 丁浩,苏志雄,王婷婷,等.基于脉冲电流和紫外测弧的开关柜局部放电缺陷识别方法[J].高压技术,2022,48(11):4527-4539.
- DING Hao, SU Zhixiong, WANG Tingting, et al. Partial discharge defect identification method of switch cabinet based on pulse current and ultraviolet arc measurement [J].High Voltage Engineering,2022,48(11):4527-4539.
- [22] 江友华,朱毅轩,杨兴武,等.基于Hankel-SVD-CEEMDAN改进阈值的局部放电特征提取方法[J].电网技术,2022,46(11):4557-4567.
- JIANG Youhua, ZHU Yixuan, YANG Xingwu, et al. Hankel-SVD-CEEMDAN improved threshold partial discharge feature extraction method[J]. Power System Technology,2022,46(11):4557-4567.
- [23] 邓鹏,张良力,刘瑞,等.基于改进阈值函数小波的微电网检测信号去噪[J].电测与仪表,2021,58(6):180-185.
- DENG Peng, ZHANG Liangli, LIU Rui, et al. Detected signal de-noising of micro-grid based on the improved threshold function wavelet[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(6):180-185.
- [24] 宋颜峰,郑中原,于金山,等.机-电联合作用下SF₆气体中金属微粒运动行为与局部放电特性研究[J].西安交通大学学报,2023,57(7):74-83.
- SONG Yanfeng, ZHANG Zhongyuan, YU Jinshan, et al. Study on the motion behavior and partial discharge characteristics of metal particles in SF₆ gas under the combined action of mechanical and electrical[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2023,57(7):74-83.
- [25] 杜志叶,郝兆扬,赵鹏飞,等.适用于声源定位的气体绝缘输电线路超声导波传播特性研究[J].电工技术学报,2024,39(3):852-862.
- DU Zhiye, HAO Zhaoyang, ZHAO Pengfei, et al. Research on propagation characteristics of gas-insulated transmission line ultrasonic guided wave for sound source localization[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(3):852-862.
- [26] 王伟,李鹏江,李国栋,等.基于超声波的GIS盆式绝缘子螺栓松动程度监测方法[J].高压电器,2024,60(3):111-119.
- WANG Wei, LI Pengjiang, LI Guodong, et al. Monitoring method on bolt looseness degree of GIS insulating spacer based on ultrasonic wave[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(3):111-119.