

气体绝缘全封闭组合电器内金属 微粒尺寸数字化推演方法

张长虹¹, 黎卫国¹, 杨旭¹, 李明洋¹, 王森², 罗林根²

(1. 中国南方电网有限责任公司 超高压输电公司电力科研院, 广州 510663;

2. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)

摘要: 自由金属微粒缺陷是气体绝缘全封闭组合电器(GIS)设备中频繁发生的放电缺陷类型之一, 对其尺寸参数和放电严重程度的准确估计, 有利于掌握设备绝缘损伤情况。本文提出基于数字虚拟测试的GIS内部金属微粒尺寸估计方法。首先, 分析金属微粒在GIS中的起跳及其往返运动的数学模型; 然后, 基于数字化推演所得微粒坐标序列, 结合金属微粒往返运动特性, 建立微粒尺寸与运动行为的关联关系; 最后, 提出数字化仿真遍历和运动轨迹相似性分析方法, 实现金属微粒尺寸的在线估计, 并通过仿真研究验证了所提方法的可行性与准确性。所提方法为利用数字化技术推演GIS设备内部绝缘状态提供了新的思路。

关键词: 气体绝缘全封闭组合电器; 局部放电; 数字化推演; 金属微粒尺寸

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A

Digital Inference Method for Metal Particle Size Inside Gas Insulated Switchgear

ZHANG Changhong¹, LI Weiguo¹, YANG Xu¹, LI Mingyang¹, WANG Miao², LUO Lin'gen²

(1. Electric Power Research Institute of EHV Transmission Company of China
Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Free metal particle defects are one of the frequent discharge defect types in gas insulated switchgear (GIS) equipment. Therefore, accurate estimation of their size and discharge severity is beneficial for understanding the insulation damage of equipment. In this paper, a method is proposed for estimating the size of internal metal particle in GIS through digital virtual test. First, the mathematical model of GIS metal particle jumping and its reciprocating motion is analyzed. Then, a relationship between particle size and its motion behavior is established by using the particle coordinate sequence obtained from digital inversion, and considering the back-and-forth motion characteristics and simulation analysis of metal particles. Finally, digital simulation traversal method and motion trajectory similarity analysis are proposed to achieve online estimation of metal particle size, and the simulation study verifies the feasibility and accuracy of the proposed method, which provides a basis for inferring the internal insulation condition of GIS equipment based on digital technology.

Keywords: gas insulated switchgear (GIS); partial discharge; digital inference; metal particle size

长期运行的气体绝缘全封闭组合电器(gas insulated switchgear, GIS)设备内部存在潜伏性绝缘缺陷,可能引发绝缘故障,从而导致大范围长时间停电事故。GIS设备中的绝缘缺陷会使电场畸变,局部区域场强升高,进而产生局部放电^[1-2]。较强局部放电会对绝缘介质造成不可逆损伤,使其绝缘性能快速下降;而绝缘介质造成损伤又会进一步加剧局部放电,增强的放电则使绝缘性能继续恶化,形成恶性循环。GIS中的绝缘缺陷主要包括自由金属颗粒和异物、绝缘子缺陷、金属突出物等,以上缺陷类型均会引起不同程度局部放电^[3]。其中,自由金属微粒是出现频率最高且危害最大的缺陷类型。导电微粒在GIS腔体内部进行贯穿性运动,显著增加了绝缘材料短路与击穿的风险^[4],因此,针对于GIS设备内部金属微粒缺陷进行局部放电故障检测与诊断,准确高效表征其绝缘性能,有助于指导针对性检修工作。

估算金属微粒缺陷的尺寸和带电量是诊断分析的重要内容,国内外学者对此展开深入研究。文献[5]中根据特高频(ultrahigh frequency, UHF)信号时间间隔来定性判断微粒运动与母线碰撞关系。文献[6]中根据微粒位置和尺寸划分缺陷序号作为神经网络输出,从模式识别角度实现对微粒尺寸和带电量估计。文献[7]中提出以超声波信号飞行图幅值和“驼峰”数目定性判断微粒缺陷严重程度,但是该方法衡量标准模糊且泛化能力有限。文献[8]中根据超声脉冲频率估计微粒碰撞外壳频率,结合微粒最大视在放电量与最大带电量的比例关系实现微粒尺寸估算;然而,该方法需要对实际设备开展大量局放试验得到比例关系样本库,在设备运行条件下难以实现。文献[9]中利用高速相机拍摄微粒运动轨迹得到粒子运动速度和加速度,由牛顿第二定律反推得到放电量,但该方法只对在实验室环境中配备有高速相机的GIS设备有效。总体而言,当前研究尚缺少可行的金属微粒尺寸在线评估方法。

随着电力设备数字化技术发展,如何基于数字化仿真技术对设备内部运行状态进行评估与预测成为研究热点^[10-12]。文献[13]中在L型GIS仿真模型中将UHF信号参量输入机器学习算法进行局放定位,为基于数字孪生模型局放故障诊断方法提供思路,但未建立虚拟模型与物理实体设备关系,其应用效果有待验证。文献[14]中提出基于局部放电仿真数据库GIS设备内部放电点位置和视在放电量的反演计算方法。目前,对电力设备绝缘缺陷的推演或反演研究较少,主要因为气体放电模型缺乏完整理

论支撑,并且传统高压试验周期长,难以穷尽不同绝缘缺陷及其演化过程并建立其与UHF信号的映射关系。

本文以金属微粒放电为研究对象,探索利用数字化仿真技术,通过设备UHF信号推演微粒尺寸的方法。提出一种基于GIS内部金属微粒运动轨迹数字化推演的尺寸估计方法。该方法利用微粒缺陷位置变化具有对称性的特点,对金属微粒进行反演定位,获取其坐标时序序列,进而对微粒运动轨迹进行二阶拟合。依据微粒起跳初速度和初始相位,对不同尺寸金属微粒进行遍历仿真;通过比较拟合轨迹与仿真轨迹的波形相似度,给出尺寸估计结果,并同步得到带电量变化谱图;最后,在仿真场景下验证所提方法可行性与准确性。

1 GIS自由金属微粒运动轨迹的数字化推演方法

1.1 金属微粒起跳与往返运动特性分析

金属微粒的形状与材质会影响其运动轨迹,对形状和材料的辨识过程较为复杂。本文仅针对铝质球形金属微粒开展运动轨迹分析与尺寸估计研究。将金属微粒置于GIS金属圆筒内远离盆式绝缘子处,即高压导体及其接头的大部分区域内轴向不均匀电场均可忽略不计,因此在受力分析时,只需考虑其所在二维径向横截断面的受力情况,从而简化了金属微粒运行轨迹仿真的难度。微粒在静止、起跳和往返运动状态转换过程中,受力情况发生改变^[15]。以高压导杆电压为正,竖直向上为正方向,分别对不同状态下微粒受力进行分析。假设初始时刻,微粒静止于GIS金属外壳底部,此时受力情况如图1所示。

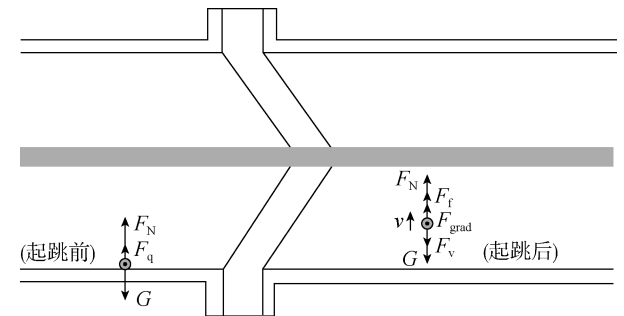


图1 球形自由金属微粒受力情况

Fig. 1 Force conditions of spherical free conducting particle

微粒主要受重力 G 、支持力 F_N 和库仑力 F_q ,满足如下关系:

$$\left. \begin{aligned} G &= F_q + F_N \\ G &= \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{metal}} g \\ F_q &= -k E_0 q \\ E_0 &= \frac{u}{(R_1 - a) \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \approx \frac{u}{R_1 \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \\ q &= -\frac{2\pi^3 r^2 \epsilon_0 \epsilon_r E_0}{3} \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: r 为球形微粒半径; ρ_{metal} 为导电微粒密度, 铝质微粒密度取为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度; R_1 、 R_2 分别为金属外壳内半径和高压导杆外半径; u 为母线电压瞬时值; E_0 为金属微粒起跳前所在位置场强瞬时值, 由同轴电极系统电极间的电场强度公式计算得到, 由于导电微粒半径远小于同轴电极间隙, 在微粒起跳运动之前, 保持在腔体底部静止不动, 所以可以将 E_0 近似为金属外壳处场强瞬时值; a 为金属微粒的直径; q 为导电微粒与外壳接触感应所得带电量, 由触碰瞬间 E_0 决定, 因此粒子所带电荷量与接触瞬间工频相位相关; k 为由镜像电荷引起的库仑力修正系数, 本文中, 当微粒与金属外壳之间距离小于 5 倍半径时, k 取 0.832, 其余粒子运动范围 $k = 1$; ϵ_0 为真空介电常量; ϵ_r 为电介质相对介电常数, SF_6 气体的相对介电常数为 1.002 1.

运行电压下, 忽略金属外壳振动对微粒运动的影响. 当外施电压满足微粒起跳条件后, 微粒受到的库仑力克服自身重力, 脱离壳体进入起跳状态, 在电极间进行自由运动. 由于在工频交流电压下电压极性会发生周期性翻转, 导致微粒与高压导杆碰撞的概率较低^[16], 所以仅考虑微粒在高压导杆和壳体间径向往返运动模式. 起跳后的自由金属微粒受力情况如图 1 所示, 包括库仑力 F_q 、重力 G 、浮力 F_f 、气体黏滞阻力 F_v 和微粒运动速度 v .

微粒运动过程中所受库仑力 F_q 由粒子带电量 q 和起跳后所处位置场强 E 决定. 忽略微粒在飞行过程中的微弱放电现象, 微粒带电量为上次与外壳碰撞时获得的感应电荷量. h 表征导电微粒沿径向方向距外壳的距离, 微粒飞行高度越高, 距离高压导杆越近, 所受库仑作用越强. E 和 F_q 计算表达式如下:

$$E = \frac{u}{(R_1 - h) \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} \quad (2)$$

$$F_q = -k E q \quad (3)$$

高压导杆与壳体间电场是不均匀电场, 由偶极子极化产生的极性力在静电力方向上不同, 形成电梯度力. 施加在金属微粒上的电梯度力 F_{grad} 和重力与气

体浮力的合力 G' 如下:

$$F_{\text{grad}} = 2\pi r^3 \epsilon_0 \epsilon_r |\nabla E^2| \quad (4)$$

$$G' = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_{\text{gas}} - \rho_{\text{metal}}) g \quad (5)$$

式中: ρ_{gas} 为 SF_6 气体密度, 取 5.32 kg/m^3 .

当金属微粒起跳脱离金属外壳后, 飞行过程中受到 SF_6 气体摩擦阻力即 F_v 的作用, 其作用方向与微粒运动方向相反. 流体力学中利用雷诺数表征流体流动状态, 计算 SF_6 气体黏度之前, 需要计算雷诺数确定气体黏性阻力类型, 其计算公式为

$$Re = \frac{\rho_{\text{gas}} |v| (2r)}{\mu_{\text{gas}}} \quad (6)$$

式中: μ_{gas} 为 SF_6 气体黏度系数, 取 $1.377 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

GIS 腔体内自由金属微粒运动速度一般满足 $v > 0.2 \text{ m/s}$, 微粒尺寸可满足半径 $r > 50 \mu\text{m}$, 因此雷诺数范围为 $Re > 5$. 根据流体力学理论, 对于大雷诺数球体周围的流动阻力, 通常采用经验方程:

$$F_v = \left(\frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \right) \pi r^2 \frac{\rho_{\text{gas}} v^2}{2} \quad (7)$$

1.2 金属微粒起跳与往返运动特性分析

根据微粒受力情况建立自由金属微粒运动行为数值仿真模型, 进而能够在仿真场景中对不同微粒尺寸进行遍历模拟, 作为微粒运动轨迹反演的仿真对比库. 对于球形金属微粒, 随着工频电压增加, 作用在微粒上的库仑力大于等于重力, 粒子满足起飞条件. 结合式(1)~(3), 可得球形微粒在同轴电极系统内起跳条件为

$$u > \frac{1.096}{\pi} R_1 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \sqrt{\frac{\rho_{\text{metal}} r g}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (8)$$

根据牛顿第二定律, 微粒起跳后在电极间往返运动行为由运动方程决定:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = F_q + F_{\text{grad}} + G' + F_v \quad (9)$$

式中: m 为金属微粒的质量; t 为时间. 自由导电微粒以一定运动速度与壳体发生碰撞后, 其带电荷量发生变化, 随后微粒反弹继续向高压电极运动, 分离速度与碰撞瞬间速度成比例关系. 考虑二者非弹性碰撞过程, 则碰撞后粒子运动速度可表示为

$$v_{\text{after}} = k_e v_{\text{bef}} \quad (10)$$

式中: v_{after} 、 v_{bef} 分别为碰撞前后微粒飞行速度; k_e 为碰撞恢复系数, 根据微粒材料取 0.553.

具有初始恢复速度 v_{after} 的导电粒子, 在库仑力等作用下再次向高压电极运动, 运动行为与上述过程类似, 运动加速度取决于受力情况, 以库仑力为主导的作用力与运动起始相位密切相关, 最终粒子速

度衰减为零或与高压电极碰撞后转为萤飞运动. 利用线性多步法求解运动方程,能够得到导电微粒在高压电极和壳体间运动轨迹,微粒往返运动数值仿真的流程如图 2 所示.

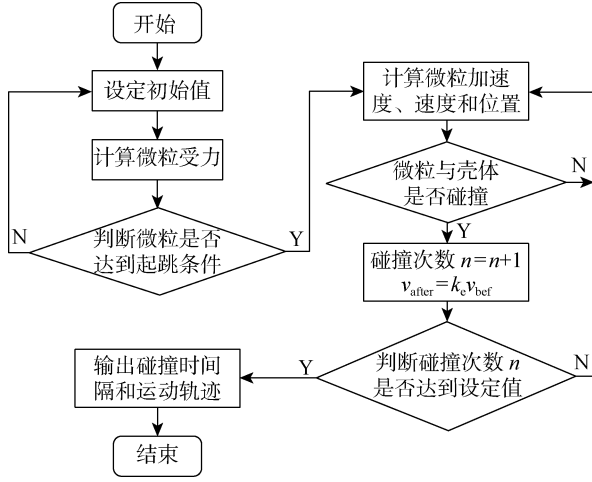


图 2 金属微粒运动行为数值仿真流程

Fig. 2 Flow chart of numerical simulation of motion behavior of metal particles

2 基于运动轨迹的金属微粒缺陷尺寸反演方法

2.1 基于三次 B 样条插值法的微粒运动轨迹拟合

自由导电微粒运动行为的相关研究中,对于粒子实际运动轨迹的获取依赖实验室环境下配备的高速相机. 本文提出一种基于模拟故障数据库的微粒运动轨迹反演方法,利用基于故障数据库定位所得运动微粒 z 轴坐标序列,对微粒运动轨迹进行反向拟合. 在文献[14]中反演定位所得 z 轴离散坐标序列基础上,拟合生成平滑运动轨迹曲线. 金属微粒在飞行过程中所处空间位置不同时,UHF 信号折反射和传播衰减规律存在一定程度差异,导致不同位置反演定位误差分布存在波动,坐标序列中个别样本会发生偏离. 借鉴计算机科学中运动目标轨迹跟踪技术^[17],采用 B 样条曲线拟合方法对 z 轴坐标离散序列平滑拟合,该方法生成的路径轨迹相较于 z 轴坐标离散序列更为平稳,个别异常离散点不会改变运动轨迹线整体趋势,抑制了离散序列中噪声数据对运动轨迹的影响,具有较强的抗噪声能力.

以 4 个离散点的插值拟合为例,简要说明 3 次 B 样条曲线拟合法原理,拟合示意图如图 3 所示. 假设离散点集合 $\{P_0(x_0, y_0), P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3)\}$,其中 P_0 和 P_3 分别为待拟合轨迹的起点和终点. 分别在 P_0 和 P_3 两侧扩展生成

$P_S(x_S, y_S)$ 和 $P_E(x_E, y_E)$, 满足如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} P_S &= 2P_0 - P_1 \\ P_E &= 2P_3 - P_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

以更新后的离散点集 $\{P_0(x_0, y_0), P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3), P_S(x_S, y_S), P_E(x_E, y_E)\}$ 中的各元素为控制点绘制 3 次 B 样条曲线:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ y(t) &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= (x_0 + 4x_1 + x_2)/6 \\ a_1 &= -(x_0 - x_2)/2 \\ a_2 &= (x_0 - 2x_1 + x_2)/2 \\ a_3 &= -(x_0 - 3x_1 + 3x_2 - x_3)/6 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= (y_0 + 4y_1 + y_2)/6 \\ b_1 &= -(y_0 - y_2)/2 \\ b_2 &= (y_0 - 2y_1 + y_2)/2 \\ b_3 &= -(y_0 - 3y_1 + 3y_2 - y_3)/6 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

曲线的斜率为

$$k_p = (a_1 + a_2 t + a_3 t^2)/(b_1 + b_2 t + b_3 t^2) \quad (15)$$

由图 3 可知,该方法的拟合过程几何原理为通过构造点 S 和 E ,使得拟合曲线以平均通过式的方式经过原始起点、终点以及所构造的点 S 和 E . 其中, S 点位于 $\Delta P_0 P_1 P_2$ 的中线 $P_1 M_1$ 上,距 P_1 点 $P_1 M_1/3$ 处; E 点位于 $\Delta P_0 P_1 P_2$ 的中线 $P_2 M_2$ 上,距 P_2 点 $P_2 M_2/3$ 处.

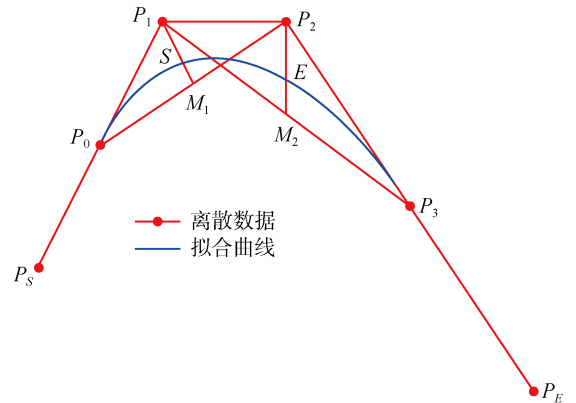


图 3 三次 B 样条拟合法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cubic B-spline fitting

相较于车辆、机器人等对象可无限延续的运动特征,自由金属微粒运动轨迹具有对称性且不可延展性,因此修改离散点集的控制点选取方法. 根据超声信号得到碰撞间隔即微粒飞行时间 Δt ,该轮次运动周期内微粒运动起始位置 P_S 和终止位置 P_E 分别为 $(t_1, 0)$ 、 $(t_1 + \Delta t, 0)$. 将 P_S 和 P_E 设定为控制点集

的固定元素,以中心点 P_d 作为分界点,其中 d 为运动轨迹离散序列中心点位置,将两侧对称点依次作为控制点集中的可变元素,则修改后的控制点集可表示为

$$\begin{cases} \{P_S, P_j, P_{d-j+1}, P_E\}, \\ \left\{ \begin{array}{l} d \text{ 为奇数, } j = 1, 2, \dots, (d-1)/2 \\ d \text{ 为偶数, } j = 1, 2, \dots, d/2 \end{array} \right. \end{cases} \quad (16)$$

分别对所有控制点集进行 3 次 B 样条插值拟合,得到 $(d-1)/2$ 或 $d/2$ 条拟合曲线. 由于 z 轴坐标序列中不可避免地存在奇异偏离点,为最大程度提高拟合所得运动轨迹抗偏离能力,将均方误差最小的运动轨迹曲线作为最终结果.

2.2 基于运动轨迹相似度的微粒尺寸反演方法

根据不同工况条件下半径为 0.2~3 mm 金属微粒的运动特性仿真和实验模拟^[17-18],当 GIS 设备运行工况保持一定时, Δt 主要取决于微粒运动速度 v 变化情况. 由粒子运动方程可知,其运动速度由 r 、起跳初始相位 φ 、母线电压瞬时值 u 和初始运动速度 v_0 决定. 利用上述微粒运动轨迹拟合结果,能够直接得到 Δt 及 u ,通过微分计算得到 v_0 ,从而基于遍历仿真法建立微粒飞行时间与尺寸参数关系.

在已知工频电压、设备尺寸的前提下,根据起跳初始相位、粒子初始速度能够在数值仿真场景中对不同尺寸的微粒运动行为进行遍历模拟,所得粒子飞行时间取决于微粒尺寸. 通过对比遍历仿真所得微粒运动轨迹与反演轨迹,引入轨迹相似度参数作为评价指标,将轨迹相似度最高的微粒尺寸作为估计结果,实现微粒运动轨迹尺寸估算. 使用基于曼哈顿距离的波形相似度指标反映轨迹相似程度^[19],在几何度量空间中,曼哈顿距离是一种常用的衡量信号相似度方法,为两点间在标准坐标系上的绝对轴距离之和,因此该方法具有提取绝对距离信息的特点. 考虑到微粒运动轨迹中飞行时间为关键参数,规定利用微粒飞行下降阶段中二者运动轨迹差小于 0.01 mm 后的曼哈顿距离衡量相似度特征,引入飞行时间作为评判因素之一. 得到轨迹相似度指标计算公式为

$$d(z^s, z^f) = |z_l^s - z_l^f| + |z_{l+1}^s - z_{l+1}^f| + \dots + |z_w^s - z_w^f| = \sum_{i=l}^w |z_i^s - z_i^f| \quad (17)$$

式中: z^s 、 z^f 分别表示遍历仿真所得微粒运动轨迹和反演定位所得拟合轨迹; l 为微粒飞行下降阶段满足 $|z^s - z^f| \leq 0.01$ mm 时的起始时间序号; w 表示该运动周期内时间序列长度.

由于金属微粒半径一般在 0.2~3 mm,所以为

降低遍历仿真计算量,采用变步长法对不同微粒尺寸运动过程进行数值仿真模拟,遍历仿真流程如图 4 所示. 以第 i 个有效运动周期为例,初始半径遍历等级设为 0.1、1、2 和 3 mm,分别以不同遍历等级为微粒半径条件进行数值仿真,进而计算所得仿真微粒运动轨迹与轨迹拟合结果的波形相似度. 将相似度最高值和次高值对应的微粒半径作为次级遍历等级的上界和下界,以步长 0.1 mm 进行次级遍历. 同理,根据次级遍历结果的相似度指标确定终极遍历上界和下界,随后以 0.01 mm 为步长进行终极遍历. 最后,将波形相似度最高的仿真轨迹对应的微粒半径作为本轮次微粒尺寸估计结果 r_j .

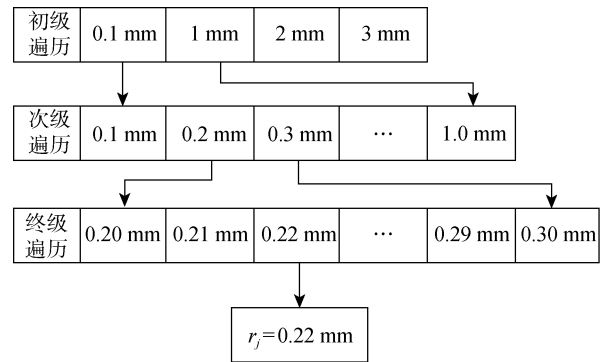


图 4 不同尺寸金属微粒遍历仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of traversal simulation of metal particles of different sizes

分别估计 N' 个有效运动周期内的微粒尺寸 r_j , 得到微粒尺寸估计最终结果 \bar{r} :

$$\bar{r} = \sum_{j=1}^{N'} (r_j / N') \quad (18)$$

进一步,根据式(1)中微粒带电量计算公式,可以得到每次碰撞瞬间微粒感应带电变化量,从而绘制以运动周期序号为自变量的微粒带电量变化谱图. 结合微粒尺寸估计结果,微粒带电变化谱图能够为缺陷放电严重程度在线评估提供依据.

3 实验验证

3.1 仿真条件与步骤

以直线型 GIS 数字化模型为例,在仿真场景下验证所提微粒缺陷识别及尺寸评估方法. 分别对半径为 0.20、1.00 和 1.50 mm 铝质球形微粒运动进行数值仿真模拟,仿真时长设为 10 个运动周期. 调整外施电压大小,使得微粒运动最大高度大于 8 cm,即反演定位误差平均水平. 将所得 3 组微粒运动轨迹视为实际粒子飞行轨迹,作为后续仿真验证数据基础.

分别对金属微粒和金属突出物缺陷进行局放仿真模拟实验,将搜集到的 UHF 信号作为实测数据,计算反演定位坐标序列的对称性指标.具体仿真流程如下:在模拟故障数据库中随机选取 50 个局部放电模拟点位,对运动金属微粒引发局部放电进行仿真模拟. x 、 y 轴坐标值保持不变,由数值模拟所得粒子飞行轨迹决定 z 轴坐标变化.考虑到动态微粒仿真耗时长,以半径为 0.2 mm 微粒运动数值仿真结果为例,在 10 个运动周期内以均匀时间间隔离散化运动轨迹,每个运动周期内选取 10 个离散点,依次在离散点位以金属微粒缺陷高斯脉冲电流模型作为放电源,放电时间与数值仿真中碰撞瞬间微粒放电时间保持一致.将仿真探针测得 UHF 信号参量输入反演定位网络得到定位结果,提取 z 轴坐标构成 $50 \times 10 = 500$ 组微粒往返运动坐标序列,每个模拟点位对应 10 组坐标序列,每组坐标序列包括 10 个离散点.

随机选取 10 个模拟点位,分别在每个模拟点位以 3 级微粒尺寸的数值仿真轨迹为基准进行离散化及局部放电仿真模拟实验.各点位运动微粒离散化及仿真模拟方法与上述方法相同.在每个模拟点位处各级微粒尺寸具体仿真验证流程为:

(1) 分别对 10 个运动周期内局部放电进行反演定位,生成定位坐标序列.

(2) 利用 3 次 B 样条插值法对离散坐标序列进

行拟合,得到微粒运动轨迹拟合结果.

(3) 根据运动估计拟合结果得到每次起跳初始速度和相位,以此为数值仿真条件对不同尺寸微粒进行遍历仿真.

(4) 计算遍历仿真轨迹与实际轨迹波形相似度,将曼哈顿距离最小时对应的微粒尺寸对应该轮次往返运动的尺寸估计结果,由 10 个运动周期平均估计结果得到最终微粒半径估计值.

(5) 以微粒半径估计结果为仿真条件,通过数值仿真模拟得到运动过程中微粒带电量变化谱图.

3.2 微粒运动数值仿真结果

对不同尺寸微粒运动行为进行数值仿真,将仿真所得运动轨迹作为真实参考值,仿真结果如图 5 所示.图中: v 为速度.由图可知,微粒起跳后首个运动周期内运动高度远小于贯穿性跳动时幅度,一段时间小幅跳动后,微粒运动高度明显增大,微粒飞行时间在 10 个工频周期左右.微粒最大运动速度略大于 200 cm/s,运动周期内速度大小呈现幅值变化正弦振荡规律.对比不同尺寸微粒仿真结果可知,随着微粒半径增加,达到相同运动幅度时所需外施电压增高,原因在于微粒所受重力随半径增大而增大,提高外施电压等级能够使库仑力等增加从而克服重力束缚.此外,离散化坐标位置由运动周期内均匀采样得到, z 轴坐标值呈现对称特征,验证了基于对称指标缺陷识别方法的可行性.

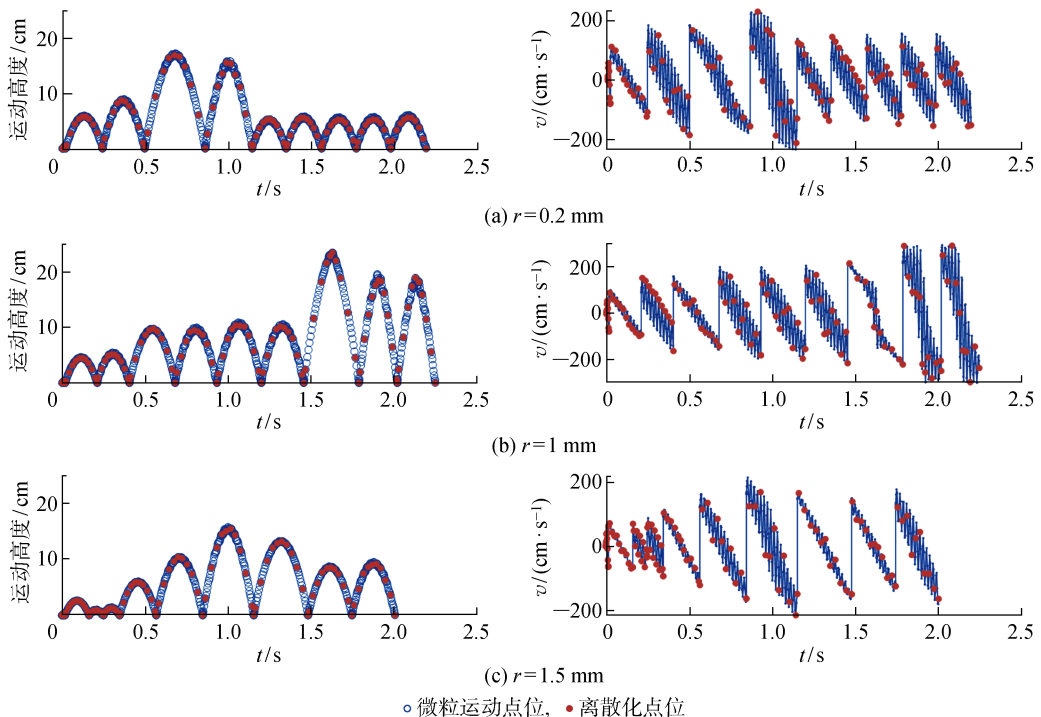


图5 金属微粒运动轨迹数值仿真结果

Fig. 5 Numerical simulation results of metal particle trajectories

增加半径为 0.2 mm 的微粒运动仿真时长至 100 个运动周期,提取初始相位在 $0.99\pi \sim 1.01\pi$ 范围内运动轮次,其飞行高度、速度和加速度变化情况如图 6 所示.图中: a 为加速度; E 为电场强度; u 为电压.观察发现,在初始相位接近的运动周期内,飞行速度数值存在差别,但粒子飞行速度变化趋势相似,飞行时间、加速度数值和变化趋势基本相同.这是由于微粒运动轨迹波形与抛物线类似,飞行时间

由微粒运动加速度决定,而加速度大小主要取决于库仑力、电场梯度力和重力,其变化趋势与库仑力和电场梯度力趋势相同,对应外施工频电压正弦变化.粒子运动初始相位相同时,外施工频电压瞬时值相同,则微粒所受加速度大小相近.由此可知,在微粒尺寸相同、初始相位相近的条件下,微粒飞行时间基本相同,从而验证了遍历仿真法评估微粒尺寸的理论基础.

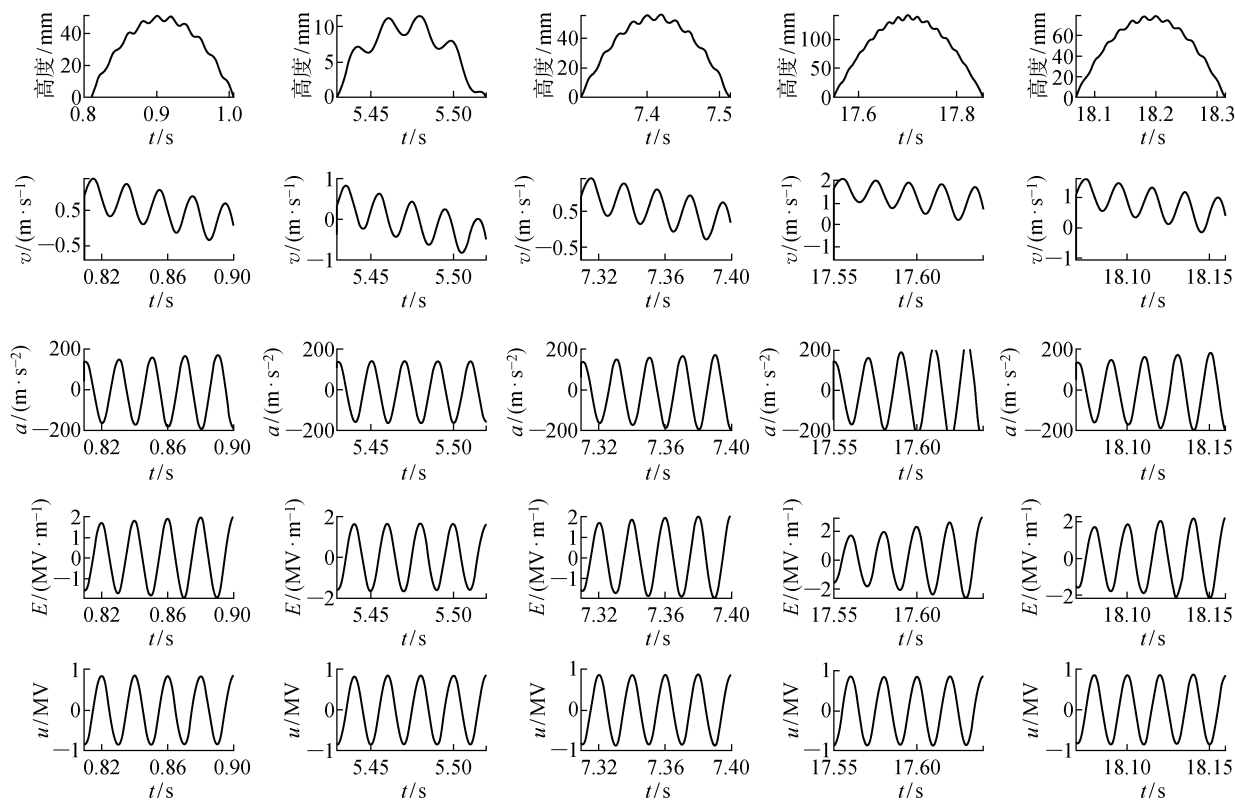


图 6 初始条件对飞行时间的影响

Fig. 6 Influence of initial conditions on flight time

3.3 金属微粒尺寸估计结果分析

对反演所得离散坐标序列进行插值拟合,得到微粒运动轨迹拟合结果.测试表明,所有运动周期内拟合轨迹平均误差为 3.68 cm,初始速度拟合误差为 13.08%.以某模拟点位处不同尺寸金属微粒轨迹拟合结果为例,如图 7 所示.由图可知,拟合结果与实际轨迹相似度较高,表明 3 次 B 样条插值法具有较强抗干扰能力,能够有效对含有误差的坐标序列进行拟合而复现实际运动轨迹.受反演定位效果影响,运动幅度低于 8 cm 运动周期内拟合结果与实际轨迹差距较大,有必要提取拟合轨迹中运动最大高度大于 8 cm 的区段作为有效运动周期,以提高后续微粒尺寸估计准确率.

根据初始相位和反演所得初速度,对不同微粒

尺寸进行分级遍历,仿真结果表明尺寸估计平均误差为 0.04 mm,带电量估计平均误差为 28.67%.以微粒半径为 0.2 mm 的某次运动周期遍历过程为例,遍历仿真结果与拟合轨迹对比如图 8 所示.初级遍历和次级遍历阶段,仿真与拟合轨迹波形的曼哈顿距离差距较大,易于区分微粒半径所在区间;终极遍历阶段,仿真步长缩小至 0.01 mm,仿真轨迹波形间相似度极高,以曼哈顿距离值定量衡量波形相似程度,最终得到尺寸估计结果为 0.25 mm.根据遍历结果可知,利用初始速度和相位条件能够完成对运动周期内微粒运动行为复现,在反演拟合轨迹与实际值一致程度较高前提下,所提分级遍历方法能够实现自由金属微粒缺陷的尺寸估计.

由尺寸估计值和碰撞瞬间相位得到运动周期内

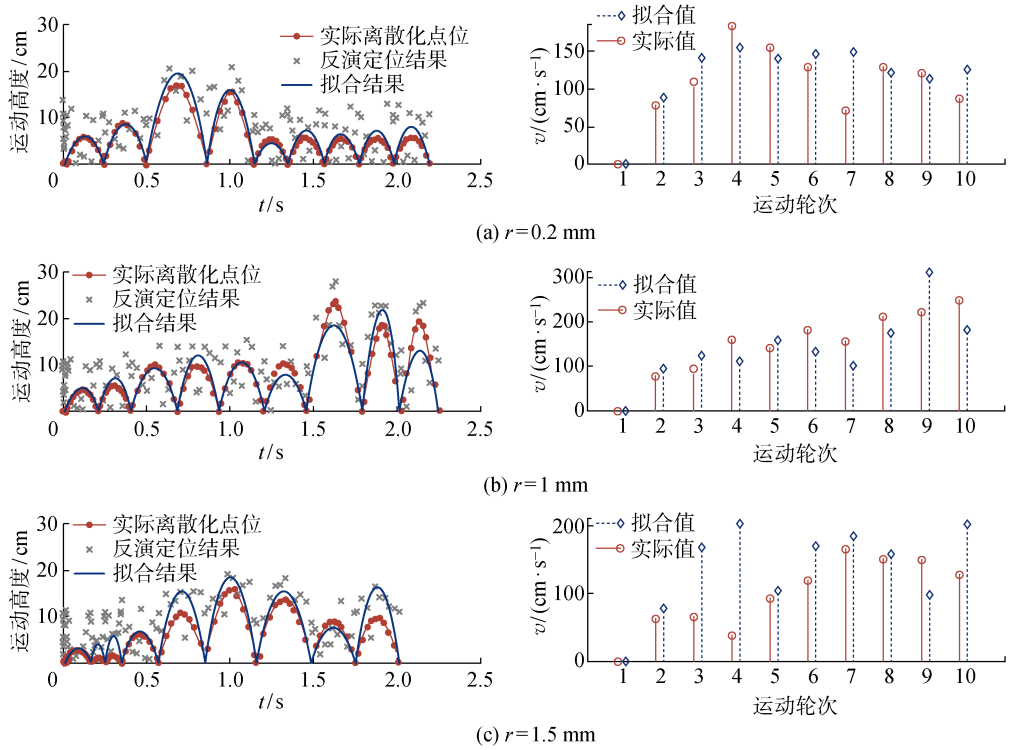


图 7 不同尺寸微粒运动轨迹拟合结果

Fig. 7 Trajectory fitting results of particles of different sizes

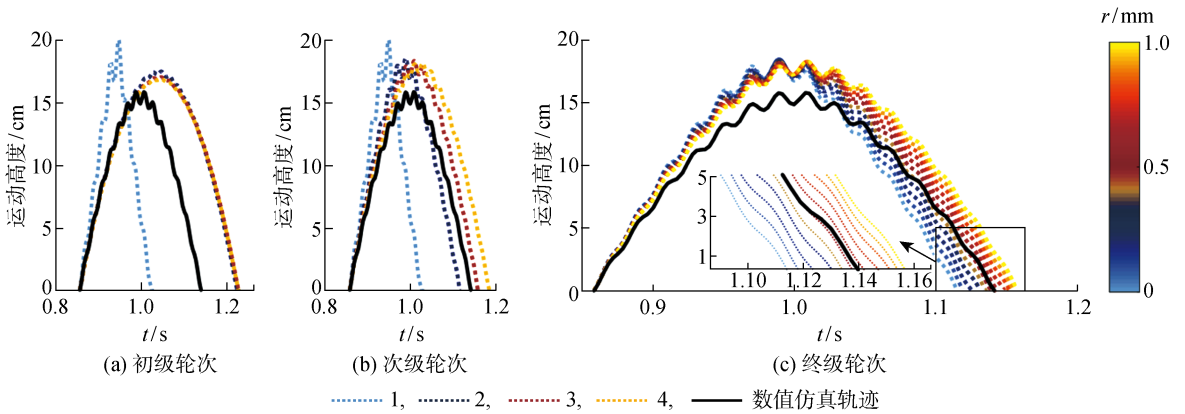


图 8 $r=0.2\text{ mm}$ 微粒遍历仿真结果

Fig. 8 Simulation results of particle traversal ($r=0.2\text{ mm}$)

微粒带电量变化谱图,如图 9 所示.带电量估计偏差取决于尺寸评估误差,因此不同运动周期内的估计误差相近.受尺寸误差限制,带电量数值误差在 30%左右.与脉冲电流法提供的视在放电量相比,所提方法误差水平稍高,但能够实现对带电量等级和变化趋势有效评估,具有实现带电量在线估计的应用前景.同时,该方法不依赖于前期预实验标定放电曲线即可获取真实带电量结果,具备操作简单、评价参量直观的特点.

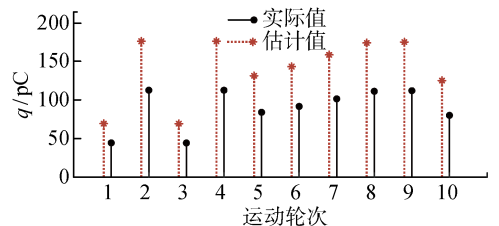


图 9 微粒带电量变化谱图

Fig. 9 Spectrum of charge variation of metal particle

4 结论

针对 GIS 设备内自由金属微粒运行轨迹及尺寸数字化推演问题开展研究, 得到结论如下: ①反演定位所得微粒 z 轴坐标序列能够反映微粒运动上升和下降阶段呈现的对称性, 该对称性也可作为金属微粒缺陷类型有效识别特征; ②3 次 B 样条插值法能够对微粒运动轨迹进行拟合, 对于偏离坐标点具有一定抗干扰能力, 从拟合轨迹中提取的初始运动速度, 可作为遍历仿真的初始条件; ③基于曼哈顿距离相似度指标能够实现对轨迹相似度评价, 通过遍历仿真逐步长法能够准确得到金属微粒尺寸估计和带电量变化情况。

研究中对金属微粒形状、位置等做了简化, 然而盆式绝缘子附近位置的微粒运动对实验中 GIS 绝缘性能影响更为严重, 且金属微粒一般为群体出现, 为进一步验证所提方法的可行性与灵敏度, 后续将开展复杂工况下 GIS 内金属微粒尺寸估算方法研究及其实验验证工作。

参考文献:

- [1] 詹诗语, 高国强, 曹炳磊, 等. 基于深度学习的局部放电分类识别研究综述[J]. *电气工程学报*, 2025, 20(2): 371-382.
ZHAN Shiyu, GAO Guoqiang, CAO Binglei, *et al.* Review on classification and recognition of partial discharge rest on deep learning[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2025, 20(2): 371-382.
- [2] 陶然, 沈培锋, 陈挺, 等. 数字化模型下的气体绝缘封闭开关设备特高频信号反演实际放电量方法[J]. *上海交通大学学报*, 2025, 59(6): 800-811.
TAO Ran, SHEN Peifeng, CHEN Ting, *et al.* Estimation method of actual discharge quantity inferred from ultra-high frequency signals in digital modeling of GIS[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2025, 59(6): 800-811.
- [3] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. *高电压技术*, 2016, 42(3): 849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, *et al.* Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 849-860.
- [4] 胡智莹, 魏来, 耿秋钰, 等. 直流 GIS/GIL 中线形金属微粒群飞萤运动现象与危险程度评估[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(15): 6219-6229.
HU Zhiying, WEI Lai, GENG Qiuyu, *et al.* Firefly movement phenomenon of wire particle swarm and

- risk assessment in DC GIS/GIL[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(15): 6219-6229.
- [5] SELLARS A G, FARISH O, HAMPTON B F. Assessing the risk of failure due to particle contamination of GIS using the UHF technique [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 1994, 1(2): 323-331.
- [6] BUDIMAN F N, KHAN Y, MALIK N H, *et al.* Utilization of artificial neural network for the estimation of size and position of metallic particle adhering to spacer in GIS[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2013, 20(6): 2143-2151.
- [7] 戎琳, 贾勇勇, 杨景刚. 基于超声波飞行图的 GIS 自由金属微粒缺陷诊断研究[J]. *电工电气*, 2014(10): 19-23.
RONG Lin, JIA Yongyong, YANG Jinggang. Study on defect diagnosis of free metal particle in gas insulated switchgear based on ultrasonic flighting plot[J]. *Electrotechnics Electric*, 2014(10): 19-23.
- [8] 张西子, 季洪鑫, 李成榕, 等. 采用碰撞频率和放电量估算运行电压下线形金属颗粒的尺寸[J]. *高压电器*, 2017, 53(4): 107-115.
ZHANG Xizi, JI Hongxin, LI Chengrong, *et al.* Size estimation of linear metal particle based on the collision frequency and discharge amplitude [J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(4): 107-115.
- [9] 孙继星, 陈维江, 李志兵, 等. 直流电场下运动金属微粒的带电估算与碰撞分析[J]. *高电压技术*, 2018, 44(3): 779-786.
SUN Jixing, CHEN Weijiang, LI Zhibing, *et al.* Charge estimation and impact analysis of moving metal particle under DC electric field [J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(3): 779-786.
- [10] 盛戈峰, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Linggen, *et al.* Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3072-3084.
- [11] 李旭斌, 田付强, 郭亦可. 新型电力系统中电力设备健康管理及智能运维关键技术探究[J]. *电网技术*, 2023, 47(9): 3710-3727.
LI Xubin, TIAN Fuqiang, GUO Yike. Key technologies for health management and intelligent operation and maintenance of power equipment in new power systems [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(9): 3710-3727.

- [12] 彭在兴,王颂,陈佳莉,等. 基于数字孪生的数字电力设备思考与展望[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(12): 9-15.
PENG Zaixing, WANG Song, CHEN Jiali, *et al.* Thinking and prospect of digital power equipment based on digital twin[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(12): 9-15.
- [13] ABU-RUB O, DARWISH A. Partial discharge localization in gas-insulated switchgear using various learning algorithms[C]// **2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy**. Doha, Qatar: IEEE, 2019: 1-6.
- [14] 王淼,罗林根,钱勇,等. 基于模拟故障数据库的GIS局部放电反演方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(5): 1663-1673.
WANG Miao, LUO Linggen, QIAN Yong, *et al.* Partial discharge inversion method for GIS based on simulated fault database[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(5): 1663-1673.
- [15] LU XinSheng, TIAN Yi, NIU Haitian, *et al.* Study of Electrostatic Motion Behavior and Inhibition of Metallic Particles in GIS/GIL[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(1): 83-92.
- [16] 吴治诚,张乔根,宋佳洁,等. GIS内自由导电微粒缺陷的局部放电相位图谱[J]. *高电压技术*, 2019, 45(6): 1995-2002.
WU Zhicheng, ZHANG Qiaogen, SONG Jiajie, *et al.* Phase resolved partial discharge pattern of free conductive particle defects in GIS[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(6): 1995-2002.
- [17] 张永华,杜煜,潘峰,等. 基于三次B样条曲线拟合的智能车轨迹跟踪算法[J]. *计算机应用*, 2018, 38(6): 1562-1567.
ZHANG Yonghua, DU Yu, PAN Feng, *et al.* Intelligent vehicle path tracking algorithm based on cubic B-spline curve fitting[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(6): 1562-1567.
- [18] 李杰,李晓昂,吕玉芳,等. 正弦振动激励下GIS内自由金属微粒运动特性[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(21): 4580-4589.
LI Jie, LI Xiaolang, Lü Yufang, *et al.* Motion characteristics of free metal particles in GIS under sinusoidal vibration[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(21): 4580-4589.
- [19] 朱军,唐万奇,李凯. 基于曼哈顿距离模糊C聚类及粒子群优化的中继车辆选择算法[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4): 35-40.
ZHU Jun, TANG Wanqi, LI Kai. The relay vehicle selection algorithm based on Manhattan distance-based fuzzy C clustering and particle swarm optimization[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2021, 45(4): 35-40.

(本文编辑:王历历)