第 52 卷 第 5 期：2112-2120 高电压技术 Vol.52, No.5: 2112-2120
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251118

飞萤姿态对直流 GIS 内部金属异物运动及吸附特性的影响

郭东宇[1]，李晓龙[1]，徐建源[1]，王　雯[2]，邢云琪[3]
（1. 沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110870；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；
3. 河北工业大学电气工程学院，天津 300401）

摘　要：线形金属异物的飞萤运动行为是导致直流气体绝缘开关电器(gas insulated switchgear，GIS)绝缘故障的关键因素之一。为了探究直流 GIS 内部线形金属异物飞萤姿态对其轨迹分布与吸附特性的影响规律，搭建了包含绝缘子的透明实验腔体，搭配 YOLO 目标检测模型，对直流电压下线形金属异物启举到吸附的全过程进行了研究。结果表明，在正极性电压下，金属异物主要表现为极间往复运动并伴随跳跃飞萤运动，提高电压幅值会增加飞萤运动发生次数。在负极性电压和增加异物长度等条件下，金属异物出现摇摆飞萤运动次数增加，导致其在腔体上半部分运动的时间比例降低。金属异物吸附通常发生在飞萤运动过程中，其中跳跃飞萤状态下更易吸附于绝缘子凸面，且在吸附过程中可能沿绝缘子表面进行翻滚运动，而摇摆飞萤状态下则更易吸附于绝缘子凹面。该研究内容可以为直流 GIS 金属异物防护与治理提供参考。

关键词：DC-GIS；盆式绝缘子；金属异物；飞萤运动；目标检测

Influence of Firefly Attitude on Movement and Adsorption Characteristics of Metallic Particles in DC-GIS

GUO Dongyu[1], LI Xiaolong[1], XU Jianyuan[1], WANG Wen[2], XING Yunqi[3]
(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
3. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The flying motion behavior of linear metallic particles is a key factor contributing to insulation failure in direct current (DC) gas insulated switchgear (GIS). To investigate how the movement of these linear metallic particles in DC-GIS affects their trajectory distribution and adsorption characteristics, a transparent experimental cavity containing insulators is constructed. A YOLO target detection model is then used to study the entire process, from the lifting to the adsorption, of these linear metallic particles under DC voltage. The results show that, under a positive voltage, the metallic particles primarily exhibit reciprocating motion between the electrodes, accompanied by a 'jumping firefly' phenomenon. Increasing the voltage amplitude increases the number of firefly movements. Conversely, under a negative voltage or with an increase in the metallic particles' length, the number of swing firefly movements of metallic particles increases, which reduces the time ratio of metallic particles' movements in the upper part of the cavity. Adsorption of the metallic particles typically occurs during their flight. Specifically, the insulator's convex surface is more prone to adsorption when the particles are in a jumping firefly state, and they may roll along the insulator surface during this process. In contrast, the insulator's concave surface is more readily adsorbed when the particles are in a swing firefly state. The findings of this research can provide reference for the protection and treatment of metallic particles in DC-GIS.

Key words: DC-GIS; basin-type insulator; metallic particles; firefly motion; object detection

基金资助项目：辽宁省自然科学基金面上项目(2024-MS-105)；辽宁省教育厅面上项目(JYTMS20231206)。
Project supported by General Program of Natural Science Foundation of Liaoning Province (2024-MS-105), General Program of Liaoning Provincial Department of Education General Project (JYTMS20231206).

0 引言

气体绝缘开关电器(gas insulated switchgear，GIS)因其结构紧凑、抗干扰能力强等优点，在一些空间受限、自然环境恶劣的场景下可以发挥关键作用，具有较高的应用前景和研究价值[1-2]。而工程中发现，GIS 运行时内部可能存在金属异物，由金属异物引起的绝缘故障是影响设备可靠性的关键因素之一[3]。

研究发现，金属异物在电场作用下启举后会在 GIS 腔体内进行无规则运动，诱发气体放电，甚至有可能吸附于绝缘子表面，导致闪络[4]。特别是在直流电压作用下，金属异物的运动更加剧烈，且会出现飞萤运动[5]。飞萤状态下金属异物长期在高压电极附近的高场强区运动，对绝缘威胁更高，且会导致设置于腔体外壳的异物抑制措施失去作用，严重阻碍了直流 GIS 设备的应用进程[6]。目前已经有学者针对直流电压下金属异物运动与吸附特性开展了相关研究[7-8]。常亚楠等人使用平板电极研究了线形金属异物的飞萤运动机理，发现随着异物长度增加、半径减小或气压降低，正负极性飞萤起始电场强度均呈减小趋势[9]；李玄等人研究了金属粉尘在三支柱绝缘子表面的吸附机理，发现电场力与库仑力是导致异物吸附的关键因素[10]。然而目前对于直流 GIS 内部线形金属异物飞萤姿态对其运动轨迹与吸附特性影响规律的研究还鲜有报道。

现有金属异物运动特性研究普遍使用高速相机成像方法[11-12]，但因其目标较小且在直流电压下运动速度较快，使用传统方法难以对其大范围运动特性进行研究。针对这一问题，有学者提出了金属异物运动特性研究的新方法。王媛等使用光散射法对直流 GIS 内部微纳粉尘弥散浓度分布特性进行了研究[13]；张宇彤等使用可视化算法研究了直流 GIS 内部金属粉尘的径向空间分布与吸附特性[14]。但是上述方法仅能针对金属异物的分布特性进行研究，无法捕捉金属异物的运动轨迹。而 YOLO 目标识别算法可以实现对微小目标的精准辨识[15]，DeepSORT 跟踪算法可以对目标的运动轨迹进行跟踪标记[16]，这 2 种算法配合使用可以实现对线形金属异物长时间、大范围运动轨迹跟踪记录。

针对上述问题，本文搭建了含绝缘子的透明同轴圆柱腔体，对腔体外壳进行了导电处理以模拟实际 GIS 内部电场分布。使用高速相机对直流电压下线形金属异物启举到吸附的全过程进行拍摄，并通过 YOLO 目标检测模型搭配 DeepSORT 跟踪算法对金属异物运动轨迹进行跟踪识别。本文第 1 章对实验平台与方法进行了介绍，第 2 章对典型实验结果进行了分析，第 3 章对金属异物运动与吸附特性的影响因素进行了研究。本文研究内容可以为直流 GIS 内部金属异物的防护与治理提供参考。

1 实验平台与方法

本文所用实验平台如图 1 所示，由透明实验腔体、高速相机、补光灯板与直流电源组成。其中实验腔体采用同轴圆柱电极结构，高压电极上同向安装了 2 个盆式绝缘子，距离为 265 mm。本文参考某型号±200 kV 直流 GIS 设计实验腔体，考虑装配等问题，对绝缘子结构、导杆半径进行微调，真型 GIS 导杆直径为 90 mm，腔体内径为 320 mm。腔体外壳材质为有机玻璃，为了使实验腔体内部电场分布贴近金属壳体的真型 GIS 内部电场分布特性，在腔体外壳内表面粘贴了导电薄膜，导电薄膜两端通过与金属盖板连接实现接地。图 2 为真型 GIS 与实

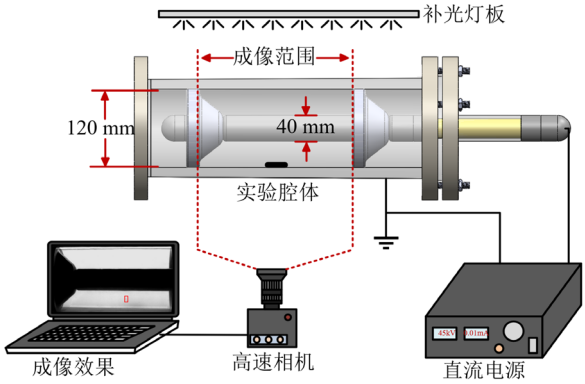


图 1 实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental platform

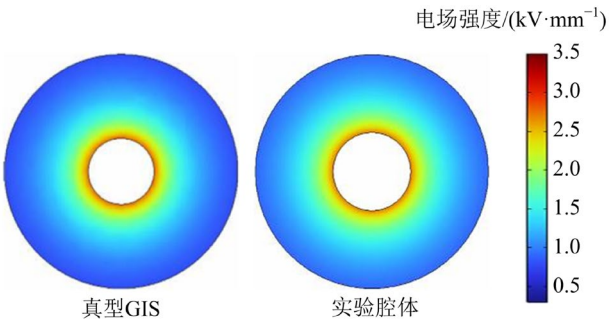


图 2 实验腔体与真型 GIS 电场分布对比图

Fig.2 Comparison of electric field distribution between experimental cavities and real GIS

验腔体截面电场分布对比图，可以看到，经过导电化处理的实验腔体内部电场分布贴近真型 GIS。同时，因为导电薄膜较高的电导率，金属异物与其碰撞后可以快速进行电荷交换。

高压电极材质为铝合金，绝缘子材质为掺杂了氧化铝颗粒的环氧树脂。补光灯板与高速相机分别放置在墙体两侧，相机成像帧率为 815 帧/s，分辨率为 640×480 像素。

图 3 为 GIS 内部因拆装过程由于磨损等原因产生的金属异物形貌，主要为线形、边缘不规则的片状与粉尘状，其中线形金属异物长度为 2~8 mm，半径为 0.1~0.2 mm。

因此，本文分别选择长度 l 为 4 mm、半径 r 为 0.15 mm，长度为 4 mm、半径为 0.2 mm 与长度为 8 mm、半径为 0.15 mm 的线形铝丝作为金属异物进行实验，如图 4 所示。

实验前先使用无水乙醇对金属异物进行清洗，之后将其放入腔体外壳底部中间位置，随后对实验腔体抽真空，待真空度低于 50 Pa 后充入 0.3 MPa SF_6 气体，静置 30 min 后开始实验。为了防止金属异物在升压过程中启举，实验中先开始拍摄，随后匀速升压至预定电压，录制 5 min 金属异物运动图像后停止实验。

实验后采用图像识别算法对录制的金属异物运动视频进行处理。图像识别算法采用 YOLO 模型，搭配 DeepSORT 模型对运动中的金属异物进行跟踪标记。其中 YOLO 模型负责识别出每一帧图像中的金属异物的位置，输出单张图像，DeepSORT 模型则负责对 YOLO 模型输出图像中金属异物的位置进行跟踪标记，并按时间顺序对识别点进行连线，最终得到金属异物的运动轨迹[17]。图 5 为金属异物实际运动图像(编号为 P1—P35)与图像识别算法输出的金属异物运动轨迹对比图。

2 金属异物运动及吸附行为分析

2.1 金属异物运动轨迹空间分布特性

为了探究金属异物运动轨迹空间分布特性，本节分析了 40 kV 电压下，长度为 4 mm、半径为 0.15 mm 的金属异物运动轨迹。图 6 为金属异物运动 2 s 的轨迹分布，从图 6 中可以看到，金属异物在腔体底部启举后向高压电极运动，碰撞高压电极后转向腔体外壳运动，此后在腔体底部外壳与高压电极之间做往复运动，同时有可能运动到腔体上半部分。



图 3 GIS 中金属异物形貌

Fig.3 Shape of metallic particles in GIS

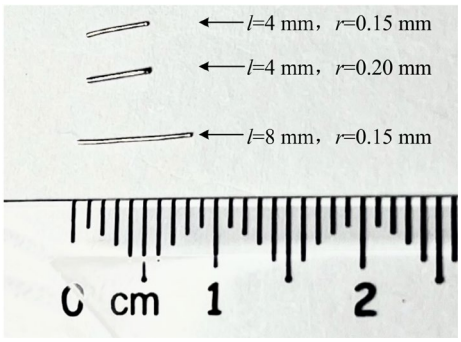


图 4 实验所用金属异物形貌

Fig.4 Shape of metallic particles in the experiment

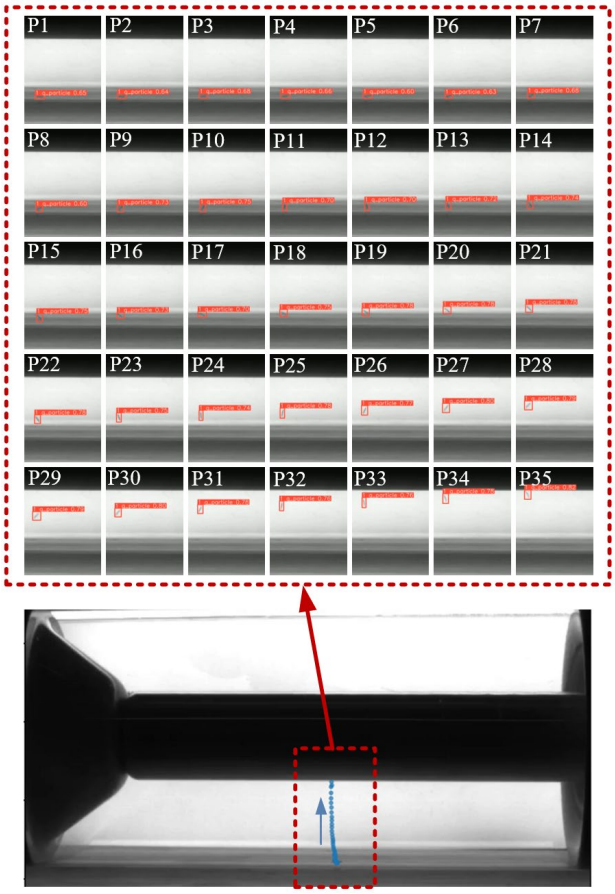


图 5 金属异物运动跟踪检测效果图

Fig.5 Diagram of detection effect of metallic particle motion tracking

对金属异物的运动轨迹进行分析可以发现，如图 6 中虚线方框所示，金属异物在往复运动过程中会随机出现跳跃飞萤运动，即与高压电极碰撞后向接地外壳运动途中改变运动方向。但是飞萤运动并不持久，往往在持续数个运动周期后就重现转变为往复运动。

为了进一步分析金属异物运动轨迹的时空分布特性，统计了金属异物启举后 30 s 与 60 s 时间内在腔体不同位置出现频次，并以热力图形式在图 7 中进行展示。对比可以发现，金属异物启举后主要在腔体中间部分运动，极少运动到绝缘子附近，同时 30 s 与 1 min 的频次分布没有明显差异。将腔体外壳底部均匀划分为 5 个区域，分别统计了金属异物在腔体底部 3 个不同位置启举后 30 s 时间内与腔体底部 5 个区域的碰撞次数，结果如图 8 所示。其中位置 1 与位置 3 分别距离左侧与右侧绝缘子 20 mm，位置 2 则位于 2 个绝缘子中间。

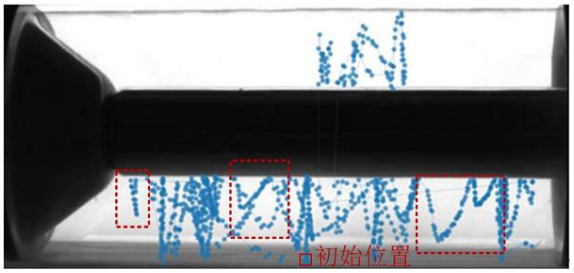
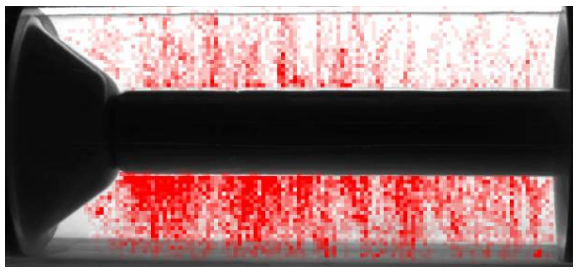
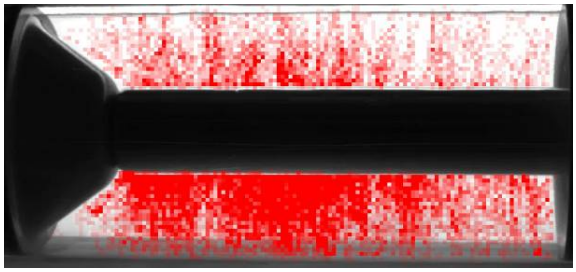


图 6 40 kV 电压下金属异物运动 2 s 轨迹

Fig.6 Trajectories of metallic particles at 40 kV over 2 s



(a) 40 kV 电压下金属异物 30 s 内出现频次热力图



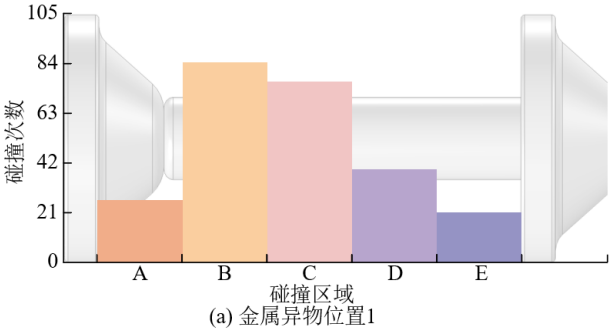
(b) 40 kV 电压下金属异物 60 s 内出现频次热力图

图 7 40 kV 电压下金属异物出现频次热力图

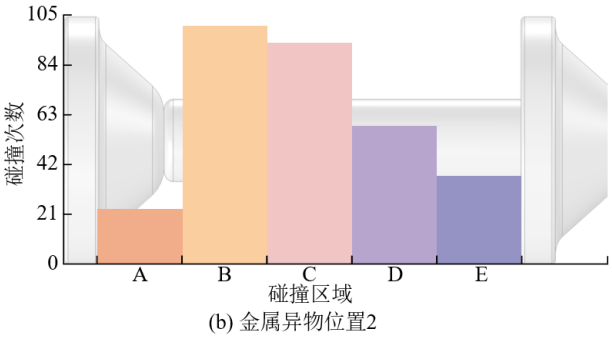
Fig.7 Heatmap of occurrence frequency of metallic particles at 40 kV

从图 8 中可以看出，在启举后 30 s 时间范围内，位置 1 启举金属异物与腔体底部 5 个区域的碰撞次数分别为 26、84、76、39 次与 21 次，总计碰撞了 246 次，每个区域的碰撞次数比例分别为 11%、34%、30%、16%与 9%；位置 2 启举金属异物与腔体底部 5 个区域的碰撞次数分别为 23、100、93、58 次与 37 次，总计碰撞了 311 次，每个区域的碰撞次数比例分别为 11%、31%、24%、18%与 16%；位置 3 启举金属异物与腔体底部 5 个区域的碰撞次数分别为 21、121、90、81 次与 56 次，总计碰撞了 369 次，每个区域的碰撞次数比例分别为 6%、33%、24%、22%与 15%。

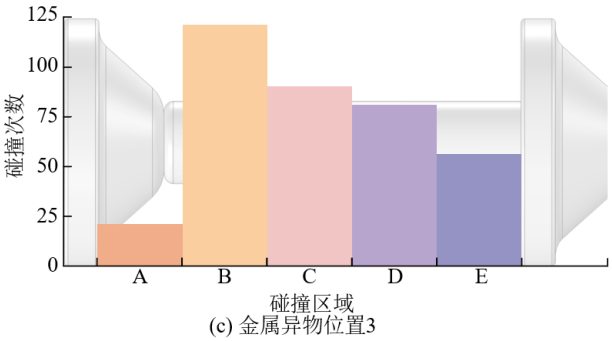
本节进一步统计了金属异物在位置 2 启举后 10 s 与 20 s 时间内与腔体底部不同区域的碰撞次数比例，结果分别为 11%、31%、24%、18%、16%与 10%、30%、29%、17%、14%。可以发现，不同启



(a) 金属异物位置1



(b) 金属异物位置2



(c) 金属异物位置3

图 8 金属异物 30 s 与腔体外壳底部碰撞次数

Fig.8 Collision count of metallic particles with cavity bottom within 30 s

举位置与不同运动时间内金属异物与腔体底部中间位置的碰撞次数比例均高于两端，因此可以考虑在相应位置布置微粒陷阱。

2.2 金属异物吸附特性

为了探究金属异物吸附特性，本节分析了40 kV 电压下，长度为 4 mm、半径为 0.15 mm 的金属异物吸附前的运动轨迹。因为正极性电压下 10 次实验中金属异物仅吸附于绝缘子凹面 1 次，不具有典型性，因此只针对金属异物吸附于绝缘子凸面的情况进行了分析。图 9 为金属异物吸附于绝缘子凸面前的典型运动轨迹。需要说明的是，为了更加清晰地展示金属异物的运动轨迹，图 9(a)与图 9(b)中 2 个相邻的金属异物图像在时间上并非等间隔。

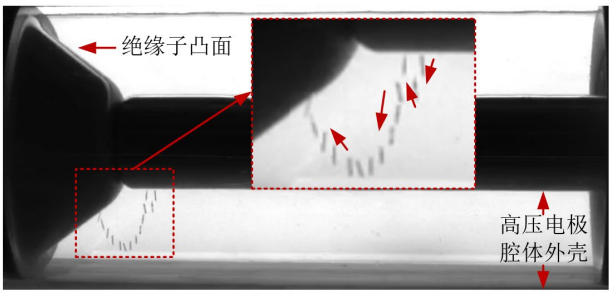
图 9(a)中金属异物在气体中通过局放荷电[18]异极性电荷，出现跳跃飞萤运动，同时受电场力影响向绝缘子凸面运动，并在向上运动过程中与绝缘子凸面下半部分发生碰撞，最终吸附于绝缘子表面。图 9(b)中金属异物在腔体上半部分飞萤后与绝缘子发生碰撞，碰撞后沿绝缘子表面滑落，与腔体底部外壳接触并通过传导荷电后沿绝缘子向上运动，过程中发生翻滚，并在运动到绝缘子靠近导杆位置时停止翻滚，之后保持竖立姿态沿绝缘子表面向下滑动，最终竖立吸附于绝缘子表面。

对比实验中金属异物吸附前的运动轨迹可以发现，金属异物吸附均发生在飞萤运动阶段，这可能是因为金属异物在往复运动时速度较快，难以吸附。而根据飞萤运动机理[9]，金属异物与高压电极碰撞后向腔体外壳运动，在途中通过局部放电荷电异极性电荷，开始减速，如果在与腔体外壳碰撞前速度减为 0 则在气体中改变运动方向，这一现象即跳跃飞萤运动。因此，飞萤状态下金属异物存在减速运动阶段，与绝缘子碰撞后更容易吸附。

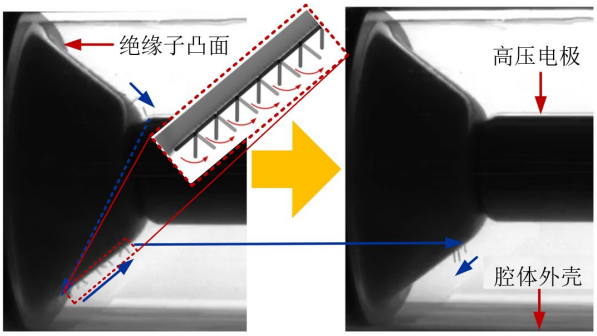
3 金属异物运动及吸附行为影响因素分析

3.1 电压极性的影响

为了探究电压极性对金属异物运动及吸附特性的影响，本节在−40 kV 电压下，使用长度为 4 mm、半径为 0.15 mm 的金属异物进行了 10 次实验，并对实验结果进行了分析。图 10 为金属异物运动 3 s 轨迹，可以发现，除了在电极间出现往复运动与间歇性跳跃飞萤运动，负极性电压下金属异物出现长时间的摇摆飞萤运动。图 11 为金属异物运动 30 s 的频次热力分布图。与图 7(a)展示的正极性结果对比可以发现，摇摆飞萤运动导致负极性电压下金属异物运动在腔体上半部分运动的时间比例降低。



(a) 典型运动轨迹1



(b) 典型运动轨迹2

图 9 40 kV 电压下异物吸附于凸面前典型运动轨迹

Fig.9 Typical trajectory of metallic particles adsorbed on the convex surface at 40 kV

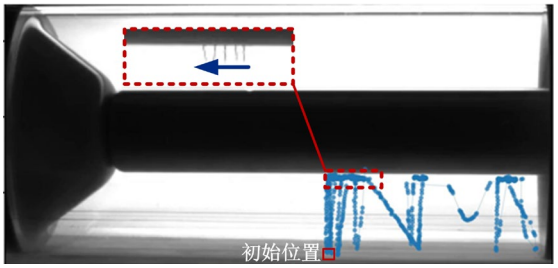


图 10 −40 kV 电压下金属异物运动 3 s 轨迹图

Fig.10 Trajectory of metallic particles at −40 kV over 3 s

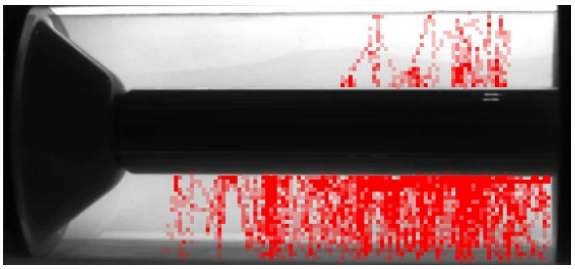


图 11 −40 kV 电压下金属异物 30 s 内出现频次热力图

Fig.11 Heatmap of occurrence frequency of metallic particles at −40 kV within 30 s

表 1 对比了 40 kV 与−40 kV 电压下 10 次实验中金属异物吸附于绝缘子表面次数，可以发现，正负极性电压下金属异物发生吸附的次数比例均较

表 1 不同电压极性下金属异物吸附次数

Table 1 The number of metallic particles adsorption at different voltage polarities

电压/kV	吸附凸面次数	吸附凹面次数	未吸附次数
40	7	1	2
−40	5	4	1

高，且与正极性电压相比，负极性电压下金属异物吸附于绝缘子凹面的次数比例增加。

图 12 展示了−40 kV 电压下金属异物吸附于绝缘子凹面前的典型运动轨迹,对其进行分析可以解释正负极性电压下吸附特性的差异。因为金属异物在绝缘子凹面的部分运动轨迹被遮挡，所以使用示意图的方式呈现。如图 12 所示，金属异物在高压电极表面出现摇摆飞萤运动，同时受电场力影响向绝缘子凹面运动，与绝缘子碰撞后沿表面滑落，并最终吸附于绝缘子凹面底部。

图 13 为±40 kV 电压下绝缘子表面电场线分布，可以发现，绝缘子凸面大部分区域电场线为穿出绝缘子，凹面则均为穿入绝缘子，摇摆飞萤状态下金属异物与高压电极接触，携带同极性电荷，因此更易吸附于绝缘子凹面。同理，跳跃飞萤状态下金属异物通过局放荷电携带异极性电荷，更易吸附于绝缘子凸面。因此，负极性电压下金属异物摇摆飞萤次数增加导致吸附于绝缘子凹面的次数比例增加。需要说明的是，本文在对金属异物吸附特性分析时忽略了绝缘子表面电荷的影响，因为绝缘子表面电荷积聚是长时间的过程[19]，本文单次实验时间不超过 5 min，绝缘子表面仅积聚少量电荷，对金属异物吸附行为影响较小。

3.2 电压幅值的影响

为了探究电压幅值对金属异物运动及吸附特性的影响，本节在 35 与 45 kV 电压下，使用长度为 4 mm、半径为 0.15 mm 的金属异物进行了 10 次实验，并对实验结果进行了分析。图 14 为金属异物在腔体内出现频次热力分布图。对比可以发现，与 35 kV 相比，45 kV 电压下腔体下半部分的轨迹分布更加集中，同时导杆附近轨迹分布更加密集。

为了进一步分析不同电压幅值下金属异物运动轨迹的径向分布特性，本节将腔体上半部分与腔体下半部分分别均匀划分为 3 个区域，并对不同电压幅值下金属异物在不同区域出现次数比例进行了统计，结果如图 15 所示。

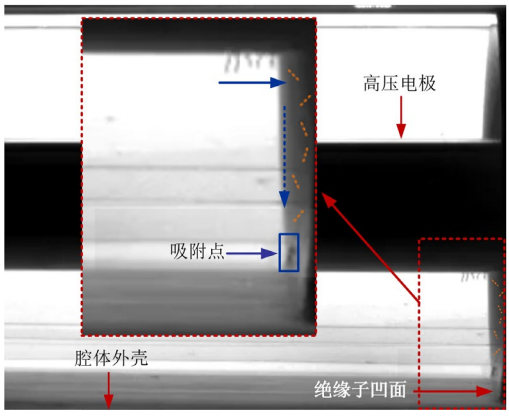


图 12 −40 kV 电压下金属异物吸附于凹面前典型运动轨迹

Fig.12 Typical trajectory of particles adsorbed on the concave surface at −40 kV

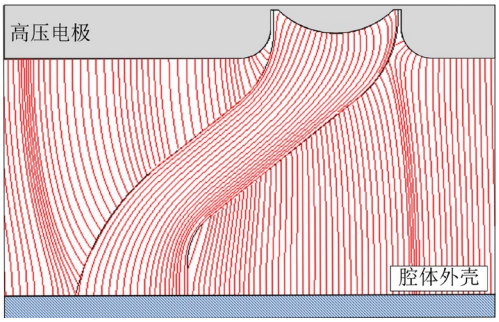
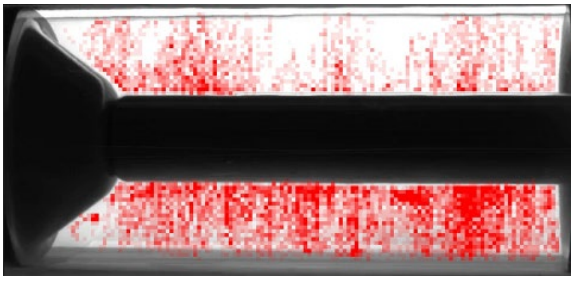
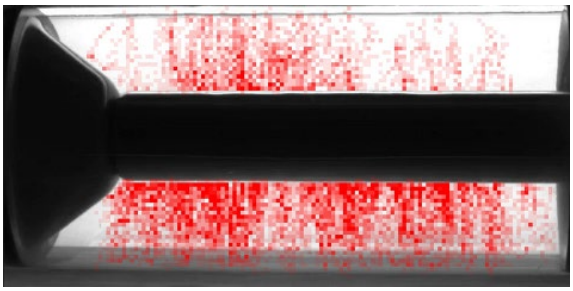


图 13 绝缘子表面电场线分布

Fig.13 Distribution of electric field lines on insulator surface



(a) 35 kV 电压下



(b) 45 kV 电压下

图 14 不同电压幅值下金属异物 30 s 内出现频次热力图

Fig.14 Heatmap of occurrence frequencies of metallic particles with different voltage amplitudes within 30 s

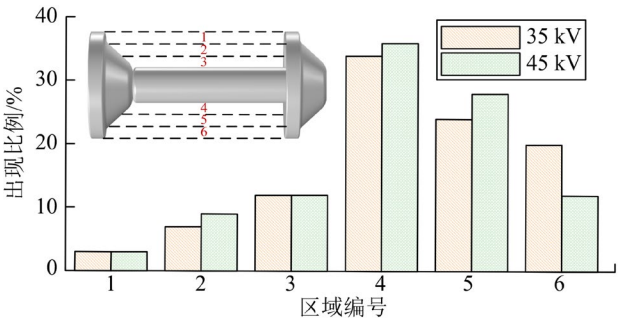


图 15 金属异物在腔体内径向不同区域出现次数比例

Fig.15 Proportion of metallic particles appearing in different longitudinal regions of the cavity

从图 15 中可以发现，随着电压幅值升高，金属异物在腔体上半部分出现次数比例没有发生明显变化。在腔体下半部分，高电压幅值下金属异物在区域 6 出现次数比例明显降低，同时有更高的比例在区域 4 与区域 5 出现，说明高电压幅值下金属异物出现飞萤运动次数增加。

表 2 为 35、40 kV 与 45 kV 电压下 10 次实验中金属异物吸附于绝缘子表面次数的统计结果。可以发现，与 35 kV 相比，45 kV 电压下金属异物吸附次数比例降低，且 2 种电压下金属异物的吸附次数比例均小于 40 kV。这可能是因为低电压下电场强度较低，金属异物在绝缘子表面受到的电场力难以抵消重力，而高电压下虽然电场强度增加，但是金属异物的运动速度也随之增加，较快的运动速度导致金属异物与绝缘子碰撞后难以吸附。

3.3 金属异物长度和半径的影响

前文实验所用金属异物均为长度为 4 mm、直径为 0.15 mm，为了探究金属异物长度或直径变化对其运动与吸附特性的影响，本节分别使用长度为 8 mm、半径为 0.15 mm 与长度为 4 mm、半径为 0.2 mm 的金属异物在 40 kV 电压下进行了 5 次实验。

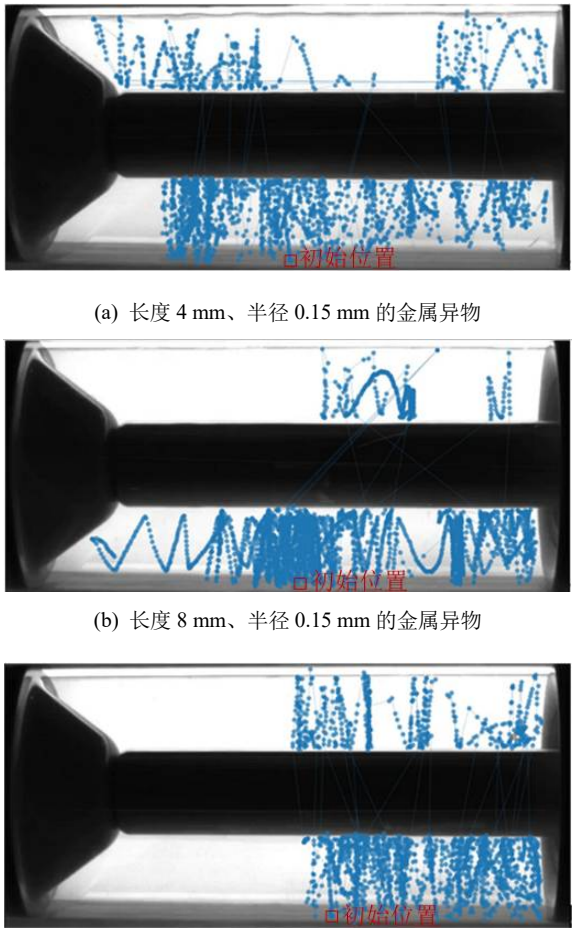
图 16 为 3 种形貌金属异物启举后运动 5 s 的轨迹分布典型结果。对比图 16(a)与图 16(b)可以发现，在径向空间分布上，长度增加导致金属异物在腔体上半部分运动的时间比例降低；在轴向空间分布上，长度增加则导致金属异物运动轨迹更加分散。对比图 16(a)与图 16(c)可以发现，半径增加后金属异物的运动轨迹更加集中。

为了进一步分析金属异物形貌变化对运动特性的影响，本节分别统计了长度为 8 mm 与半径为 0.2 mm 的金属异物启举 30 s 后在腔体不同位置出现的频次，结果如图 17 所示。

表 2 不同电压幅值下金属异物吸附次数

Table 2 The number of metallic particles adsorption at different voltage amplitudes

电压/kV	吸附凸面次数	吸附凹面次数	未吸附次数
35	2	0	3
40	7	1	2
45	0	0	5



(a) 长度 4 mm、半径 0.15 mm 的金属异物

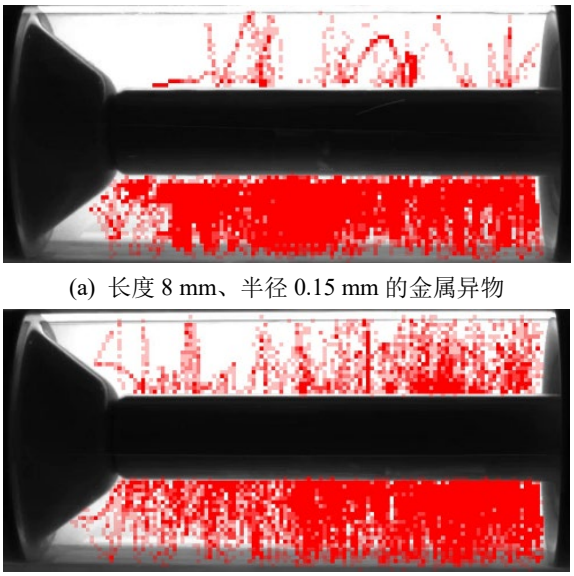
(b) 长度 8 mm、半径 0.15 mm 的金属异物

(c) 长度 4 mm、半径 0.2 mm 的金属异物

图 16 不同形貌金属异物运动 5 s 轨迹

Fig.16 Trajectories of metallic particles with various morphologies over 5 s

对比图 7(a)与图 17(a)可以发现，随着运动时间增加，8 mm 长的金属异物难以运动到墙体上半部分的现象更加明显。对比图 7(a)与图 17(b)则可以发现，半径为 0.2 mm 的金属异物运动轨迹遍布整个腔体，与半径为 0.15 mm 的金属异物相比没有明显差异，前文半径为 0.2 mm 的金属异物运动 5 s 的轨迹集中在腔体右侧，可能是受金属异物碰撞后的随机反射角影响。



(a) 长度 8 mm、半径 0.15 mm 的金属异物

(b) 长度 4 mm、半径 0.2 mm 的金属异物

图 17 不同形貌金属异物 30 s 内出现频次热力图

Fig.17 Heatmap of occurrence frequency of metallic particles with different morphologies within 30 s

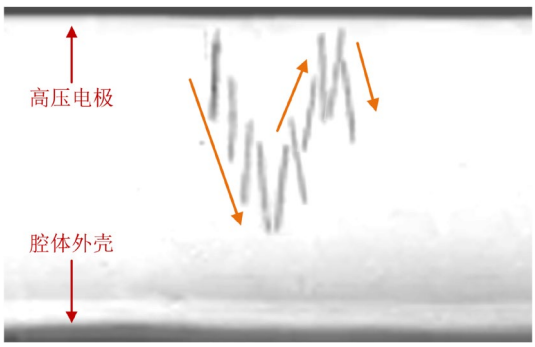


图 18 不接触式跳跃飞萤

Fig.18 Non-contact jumping firefly

表 3 不同形貌金属异物吸附次数

Table 3 Numbers of different morphologies metallic particles adsorption

长度/mm	半径/mm	吸附凸面次数	吸附凹面次数	未吸附次数
8	0.15	1	4	0
4	0.20	3	2	0

金属异物形貌变化会影响其受到的电场力、重力与气体阻力，进而影响其运动特性。同时，实验中发现，形貌变化同样会影响金属异物的运动模式，进而影响运动特性。当金属异物长度增加时发生飞萤运动的次数增加，导致其在腔体上半部分运动的时间比例降低。实验发现 8 mm 长金属异物即使在正极性电压下也有较高的可能发生摇摆飞萤运动，并且出现新的飞萤运动姿态——不接触式跳跃飞萤，如图 18 所示，金属异物每次运动方向转变均发生在气体中，在整个飞萤运动过程中不与高压电极或腔体外壳发生碰撞。实验中还发现，8 mm 长的金属异物有可能悬停在气体中。

上述运动模式显著降低了金属异物与腔体外壳碰撞次数。根据统计，8 mm 长金属异物在腔体底部中间位置启举后 30 s 时间内大约与腔体底部外壳碰撞了 170 次，与 4 mm 长的金属异物相比碰撞次数减少了 42%。金属异物这种不与腔体外壳或高压电极发生碰撞的运动模式可能会使微粒陷阱与驱赶电极等防护措施失去效果，因此需要特别关注。

为了对比金属异物长度或半径变化对金属异物吸附特性的影响，本节分别统计了长度为 8 mm 与半径为 0.2 mm 的金属异物在 40 kV 电压下 5 次实验中吸附于绝缘子表面的次数，结果如表 3 所示。与表 1 所示的长度为 4 mm、半径为 0.15 mm 的金属异物吸附次数可以发现，因为金属异物长度增加后出现摇摆飞萤运动次数增加，所以更有可能吸附于绝缘子凹面，半径增加则对金属异物吸附特性没有明显影响。

4 结论

1）正极性电压下，金属异物的主要运动模式为电极间往复运动，期间伴随短时间的跳跃飞萤运动，几乎不发生摇摆飞萤运动，且与腔体底部中间外壳的碰撞次数比例高于两端；金属异物的吸附行为主要发生在飞萤运动过程中，且在吸附凸面过程中可能沿绝缘子表面翻滚运动。

2）不同飞萤运动姿态下金属异物的吸附位置存在差异：跳跃飞萤时金属异物更倾向吸附于电场线主要为穿出的绝缘子凸面；摇摆飞萤时金属异物因与高压电极接触携带同极性电荷，更易吸附于电场线为穿入的绝缘子凹面。

3）提高电压幅值会增加金属异物发生飞萤运动的次数，使得金属异物在腔体下半部分的运动更为集中，同时在导杆附近出现频次增加；负极性电压与增加金属异物长度等条件，会使金属异物发生跳跃和摇摆飞萤运动的次数增加，进一步降低其在腔体上半部分运动的时间比例。

参考文献 References

[1] 董佳楠，杜伯学，梁虎成，等. 高压 GIS 功能梯度绝缘子交/直流电场优化与沿面闪络抑制[J]. 中国电机工程学报，2024，44(8)：

3297-3305.
DONG Jia'nan, DU Boxue, LIANG Hucheng, et al. Electric field relaxation and surface flashover suppression under AC/DC voltages by functionally graded spacer for HVDC GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3297-3305.

[2] 李 泽，钱 勇，刘 伟，等. GIS 局部放电光信号检测技术及光学图像诊断方法[J]. 电工技术学报，2025，40(1)：253-263.
LI Ze, QIAN Yong, LIU Wei, et al. Optical signal detection technology and optical image diagnostic method of partial discharge in GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 253-263.

[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)：5740-5750.
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): 5740-5750.

[4] 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)：4580-4589，4597.
LI Jie, LI Xiaoang, LYU 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, 4597.

[5] 刘 博，苏 伟，张泽皓，等. 直流 GIS/GIL 金属异物运动特征、抑制及检测方法[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1038-1051.
LIU Bo, SU Wei, ZHANG Zehao, et al. Motion characteristics, suppression and detection methods of metal particles in DC GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1038-1051.

[6] 程 涵，魏 威，AYUBI B I，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, AYUBI B I, 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.

[7] 王 健，平 安，常亚楠，等. 直流应力下主动式微粒抑制方法的动态配合研究[J]. 电工技术学报，2023，38(10)：2794-2805，2831.
WANG Jian, PING An, CHANG Ya'nan, et al. Research on dynamic coordination of active particles suppression methods under DC stress[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2794-2805, 2831.

[8] 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)：6219-6228.
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): 6219-6228.

[9] 常亚楠，耿秋钰，胡智莹，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 Ya'nan, 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.

[10] 李 玄，尹奕淳，王 媛，等. 直流 GIL 内金属微粒/粉尘面向三支柱绝缘子的吸附行为与闪络特性[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2516-2528.
LI Xuan, YIN Yichun, WANG Yuan, et al. Adsorption behavior and flashover characteristics of DC GIL metal particles/dust facing tri-post insulator[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2516-2528.

[11] 律方成，马 康，刘华琦，等. 直流 GIL 微粒陷阱的捕获机理分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报，2022，42(15)：5751-5762.
LYU Fangcheng, MA Kang, LIU Huaqi, et al. Capture mechanism analysis and optimization design of DC GIL particle trap[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5751-5762.

[12] LI X, LIU W D, DING D W, et al. Metal particle movement and induced insulator flashover under impact vibration generated by switching operation in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 757-766.

[13] 王 媛，杨睿成，苏宝亮，等. 直流 GIS/GIL 内微纳粉尘弥散浓度分布特性及对气隙击穿强度的影响[J]. 电工技术学报，2025，40(5)：1601-1613.
WANG Yuan, YANG Ruicheng, SU Baoliang, et al. Characterization of diffuse concentration distribution of micron-nano dust in DC GIS/GIL and the effect on air gap breakdown strength[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1601-1613.

[14] ZHANG Y T, XIN L M, JIN C B, et al. Random distribution and adsorption characteristics of metal particles and visualization algorithm for DC GIS/GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(2): 1102-1112.

[15] 贾 志，李茂军，李婉婷. 基于改进 YOLOv5+DeepSort 算法模型的交叉路口车辆实时检测[J]. 计算机工程与科学，2023，45(4)：674-682.
JIA Zhi, LI Maojun, LI Wanting. Real-time vehicle detection at intersections based on improved YOLOv5+DeepSort algorithm model[J]. Computer Engineering& Science, 2023, 45(4): 674-682.

[16] LIU S N, ZHANG J P, ZHENG H J, et al. An improved DeepSORT-based model for multi-target tracking of underwater fish[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(7): 1256.

[17] WANG P A, KIM S, HAN X Z. Development of an automatic beehive transporting system based on YOLO and DeepSORT algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109749.

[18] 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.

[19] LI X L, HAN S L, WANG W, et al. Transient surface charge of SF_6-filled direct current gas-insulated transmission lines insulator under thermal-electric coupled fields: effects of ambient temperature, load current and gas pressure[J]. IET Generation, Transmission& Distribution, 2022, 16(13): 2688-2700.



郭东宇
1999—，男，硕士
主要从事金属微粒运动机理、直流 GIS 绝缘特性方面的研究工作
E-mail: guodongyu@smail.sut.edu.cn

GUO Dongyu



李晓龙(通信作者)
1989—，男，博士，副教授，博导
主要从事高压电力设备研发、电力设备状态检测等研究工作
E-mail: xiaolongli@sut.edu.cn

LI Xiaolong
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



徐建源
1962—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统过电压与保护、电弧理论等研究工作
E-mail: intxjy@163.com

XU Jianyuan
Ph.D., Professor

收稿日期 2025-07-24 在线出版日期 2025-11-10 编辑 曾文君