第 50 卷 第 1 期：339-347 高电压技术 Vol.50, No.1: 339-347
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221974

冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动及其诱发间隙击穿特性

胡新文[1]，李晓昂[1]，王舒啸[1]，李志兵[2]，郝越峰[3]，张乔根[1]
（1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；3. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局，贵阳 550001）

摘　要：大量 GIS 故障案例表明，断路器带电操作后的一段时间内，气室中常突发由金属微粒引起的间隙击穿故障。断路器操作产生的冲击振动可以有效地激励 GIS 中多个潜伏性微粒的起跳，但多个微粒起跳后在运动过程中诱发间隙击穿的过程尚不明确。针对于此，本研究在 252 kV 真型 GIS 实验平台上进行了多微粒共存时的断路器带电操作实验，以复现 GIS 运行过程中微粒在冲击振动激励下的运动过程，并探究多微粒被激励起跳后诱发 GIS 放电故障的机理。研究表明，在带电实验中未操作断路器时，耐压期间自由金属微粒存在较大的概率可运动至气室的末端，并保持静止，形成了多微粒的聚集；在带电操作断路器后，多微粒受到壳体冲击振动的激励而起跳，并在起跳后的运动过程中于气隙间形成了多微粒串联击穿现象，而且断路器带电操作时多微粒引起的击穿电压总是低于耐压期间的击穿电压。基于流注放电理论，研究认为相较于耐压期间分散性的多微粒，带电操作前已形成聚集的多微粒彼此靠近，在操作后的运动过程中对电场的畸变能力更强，因此形成多微粒的串联击穿电压更低。
关键词：GIS；金属微粒；断路器操作；冲击振动；串联击穿

Free Metal Particles Movement and Its Induced Gap Breakdown Characteristics in GIS Under Impact Vibration

HU Xinwen[1], LI Xiaoang[1], WANG Shuxiao[1], LI Zhibing[2], HAO Yuefeng[3], ZHANG Qiaogen[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
3. Guiyang Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550001, China)

Abstract: A lot of GIS fault cases show that, after a period of live operation of the circuit breaker, the gap breakdown faults caused by particles often occur in the chamber. The impact vibration generated by circuit breaker operation can effectively stimulate the lift-off of latent metal particles in GIS, but the mechanism of gap breakdown induced by multiple particles during movement after lift-off is still unclear. In view of this, we carried out live operation experiments of withstand voltage and circuit breaker when multiple particles coexisted in the 252 kV GIS experimental platform to reproduce the normal operation and live operation process. The result shows that, in the long-term withstand voltage process, there is a greater probability that the moving particles in the circuit breaker will move to the end of the chamber and remain stationary, forming the aggregation of multiple particles. After the live operation of the circuit breaker, the multiple particles are excited by the impact vibration and jump, the series breakdown phenomenon is formed in the movement after the jump, and the breakdown voltage of the circuit breaker caused by the multiple particles during the live operation is always lower than the breakdown voltage during the withstand voltage. Based on steamer inception criterion, it is believed that, compared with the dispersive particles during the withstand voltage period, the aggregated particles formed before the live operation are closer to each other, and the distortion ability of the electric field is stronger during the movement process after the operation, so the series breakdown voltage of the particles formed is lower.
Key words: GIS; metal particles; circuit breaker operation; impact vibration; series breakdown

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(5500-202255135A-1-1-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202255135A-1-1-ZN).

0 引言

目前，金属微粒仍是威胁气体绝缘金属封闭组合电器(gas insulated metal-enclosed switchgear，GIS)绝缘安全的主要缺陷之一[1-5]。根据 2006 年至 2015 年国网系统中 252 kV 及以上等级 GIS 的故障统计，设备内发生间隙击穿的故障占比高达 30%，是 GIS 主要的绝缘故障之一[6-8]。此外，在所统计的案例中，有近 28%的故障是发生在开关操作后的数秒至数分钟的量级内，故障位置较为随机，并且发现在击穿故障发生的气室内往往存在大量金属微粒。究其原因，GIS 内金属微粒运动呈现随机性、潜伏性，开关操作产生的快速暂态过电压由于衰减时间极短，一般在毫秒级，尚不能充分激励微粒运动[9]，而开关操作瞬间产生的冲击振动却对 GIS 内静止的金属微粒的起跳存在显著的激励作用，一旦金属微粒受激后运动至 GIS 内不利于绝缘的位置，极有可能引发放电故障。

目前，已有学者开展了 GIS 开关动作产生的冲击振动对金属微粒运动的激励及其诱发绝缘故障的研究。张乔根等人研究了工频电压叠加冲击振动作用下不均匀电场中自由金属微粒的起跳特性，发现冲击振动激励能够明显降低微粒起跳场强，并且激励效果随振动强度与开关距离呈正相关性[10-11]。华北电力大学的李成榕等学者通过仿真的手段，分析了冲击力对微粒运动的影响，发现冲击引起的振动波在 GIS 壳体上由碰撞点开始向两边传播，并且传播过程中引起的壳体径向位移及速度从碰撞点开始逐渐往外衰减。在壳体冲击力作用下，断路器气室内的微粒大概率会运动至绝缘件表面和屏蔽罩下方等不利于绝缘的位置[12]。中国电科院的许渊和清华大学刘卫东团队分别采用了磁铁吸引微粒和外施力锤激励微粒的方式，模拟开关动作对微粒位移的影响，复现了微粒运动至绝缘子缝隙和绝缘子表面并诱发闪络的故障[9,13-14]。

已有的研究均表明，壳体的冲击振动对自由金属微粒的起跳存在显著的激励作用，而且微粒起跳后大概率会运动至绝缘子表面并引发闪络，但尚缺少冲击振动激励下微粒在气室内起跳运动并诱发间隙击穿的研究。此外，大量现场故障的检修报告表明，发生间隙击穿的开关气室内常发现大量金属微粒，而多个微粒诱发间隙击穿特性与单个微粒的情况也不完全相同，因此有必要研究多微粒共存时，开关操作后冲击振动对微粒运动特性的影响，以及多微粒共存时诱发间隙击穿的特性。有鉴于此，本文以 252 kV 真型 GIS 为实验平台，研究在真实断路器气室内，正常运行中和开关操作前后微粒的运动特性，以及多微粒运动过程中诱发间隙击穿的过程。

1 实验平台与实验方法

1.1 实验平台

本研究中采用的 252 kV 真型 GIS 实验平台如图 1 中所示。该 GIS 的断路器气室外壳的内直径为 550 mm，高压导体外直径为 200 mm，高压导体外挡气罩的外直径为 310 mm。实验电压由铠装变压器通过一段母线施加，可施加的电压有效值最高可达 368 kV。

众多 GIS 故障案例以及现场的调研分析表明，高压断路器运行和开断过程中常产生大量外形不规则的片状金属微粒，微粒尺寸基本在毫米级[15]。由于断路器静触头侧的挡气罩尺寸相对较大，挡气罩下方电场强度也比周围更强，因此微粒往往会在挡气罩附近引发 SF_6 间隙击穿。鉴于此，实验选用尺寸为 4 mm×4 mm×0.3 mm 的方片状金属铝微粒作为缺陷，并将 20 个这样的方片微粒均匀布置在挡气罩下方，如图 2 所示。

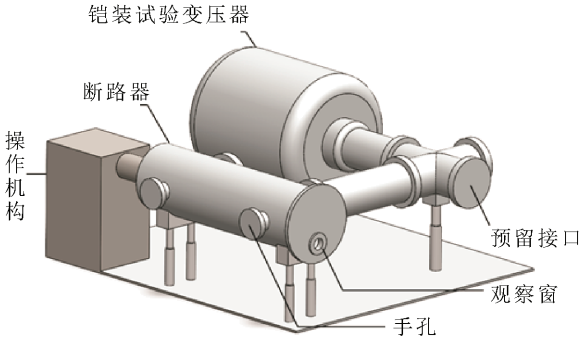


图 1 252 kV 真型 GIS 实验平台示意图

Fig.1 Experimental platform diagram of the 252 kV GIS

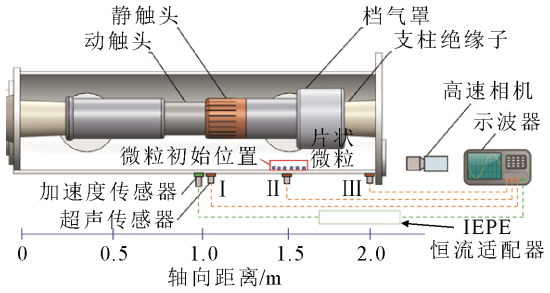


图 2 试验断路器内部结构与实验布置图

Fig.2 Diagram of the circuit breaker internal structure and experimental layout

为记录和分析断路器操作前后微粒的运动和诱发间隙击穿过程，在断路器气室端部外壳上开有观察窗，实验时在观察窗前架设高速相机(Redlake Motionpro X3)，拍摄帧率为 1000 帧/s。由于运动微粒碰撞外壳时会产生声信号，而声检测法对运动微粒的检测与识别具有极高的灵敏性[16-17]，因此在断路器气室静触头侧壳体外表面下方均匀布置 3 个超声传感器(Soundwel SR40M，频率响应范围为 15~70 kHz)，以监测实验过程中微粒运动情况。

当断路器操作时，GIS 壳体上将会出现较大的冲击振动，其大小可通过壳体上的冲击振动加速度 a 来衡量，加速度的单位为 g(g=9.8 m/s^2)。实验采用了 IEPE 型加速度传感器(灵敏度 50.1 mV/g，量程 200 g，频率响应范围为 0.17 ~10 kHz)来测量该断路器操作后的机械振动特性。加速度传感器紧贴在断路器触头正下方的壳体表面，并通过一个 IEPE 恒流适配器与示波器相连。实验测得断路器动作时动触头正下方壳体上的冲击振动加速度信号，如图 3 中所示。采用数值拟合的方法得到其函数解析式近似为反指数正弦衰减函数[10]，其表达式为：

$$a = A_0 \mathrm{e}^{-t/\tau} \sin(2\pi f t) \tag{1}$$

式中：A_0 为壳体冲击振动加速度幅值，85.8 g；τ 为冲击振动加速度信号时间阻尼系数，0.025 s；f 为冲击振动加速度信号的频率，172 Hz。

1.2 实验方法

由于实验复现的是长期运行下 GIS 内自由金属微粒的运动情况，因此每次实验进行的时间较长，微粒在与电极间的多次局部放电会使微粒端部和电极表面产生一定程度的烧蚀，改变了接触面的光滑度。因此每次进行实验前选用 2000 目的砂纸对壳体内表面进行打磨。片状微粒在放入腔体实验前，也需采用砂纸小心打磨端部，保证每个微粒具有相同的粗糙度，并且去除金属铝微粒表面的氧化膜。

将微粒分散布置于挡气罩下方，封闭断路器气室并完成抽真空后，再充入 SF_6 至 0.6 MPa(额定相对气压)。根据以往经验，GIS 内微粒诱发间隙击穿故障具有偶发性，在长期工况下或者断路器操作时，微粒并不能总是诱发间隙击穿。因此，目前在一般的实验条件下，复现实际运行中的 GIS 内微粒诱发间隙击穿故障的难度较大，为了便于在实验平台上复现故障以利于研究冲击振动作用下微粒诱发间隙击穿机理，实验选择在较低工作系数下进行，即在较高的电压等级下进行耐压和断路器的带电操作实验，如果在最高实验电压条件下，耐压和带电操作后微粒均未诱发间隙击穿，则在保持其他实验条件不变的情况下，降低 0.1 MPa 的 SF_6 气压重复实验。

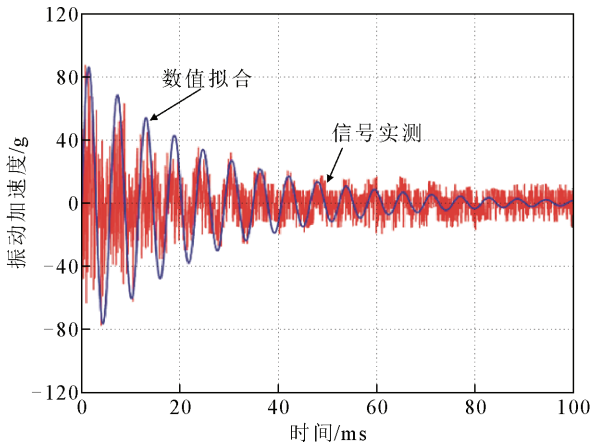


图 3 冲击振动加速度实测信号与数值拟合情况

Fig.3 Comparison between measured signal and numerical fitting of impact vibration acceleration

据此，为了对比正常运行工况下和断路器带电操作前后微粒的运动及诱发间隙击穿特性，现设计如下实验步骤：

1）为避免升压速率不同影响微粒运动，每次实验都保持 10 kV/s 的升压速率，将电压加至额定相电压有效值 145 kV 后，进行 10 min 的耐压实验。

2）在 145 kV 下的耐压实验结束后，进行断路器的分、合闸操作，观察断路器操作前后微粒的运动情况以及是否诱发间隙击穿。

3）若在 145 kV 的耐压期间和带电操作前后微粒均未诱发间隙击穿，则继续逐级升压至最高可施加电压 368 kV 处进行 10 min 的耐压实验，耐压实验结束后，进行断路器的分、合闸操作，观察此时断路器操作前后微粒的运动情况以及是否诱发间隙击穿。

4）若在耐压或升压过程中微粒引发了间隙击穿，则在同一条件下重复实验 5 次，获取微粒在该条件下未操作断路器时的平均击穿电压 $U_{\mathrm{b_av}}$，并在小于此击穿电压 10~30 kV 的电压处进行断路器的带电操作，记录冲击振动激励下微粒诱发间隙的击穿电压。

2 微粒运动与诱发击穿特性

2.1 耐压期间微粒的运动与分布情况

在逐级升压的初始阶段，片状微粒先在原地小幅度的移动，但并未起跳。当电压升高至 106 kV 时，

位于挡气罩正下方的部分片状金属微粒先开始起跳。达到额定电压 145 kV 后，大部分微粒都已起跳，并在挡气罩下方的一定范围内跳动。随着施压时间的增长，部分片状微粒会运动至断路器气室端部，随即静止，不再运动，此时仍有部分微粒在挡气罩的下方剧烈跳动。耐压期间不同时刻的微粒运动过程如图 4 所示。

在 145 kV 的耐压实验分别为第 5 min 和 10 min 时，采集到图 2 中的 I、II、III 3 处位置的超声信号如图 5 所示。

采用文献[16]中提出的基于“微粒碰撞时间间隔-碰撞次数归一化”谱图评估微粒数量的方法，获得布置超声传感器的 3 个部位在不同时刻的微粒数量，如图 6 中所示。随着耐压时间的变长，挡气罩下方微粒的数量逐渐减少，而触头下方和气室右侧末端的微粒数量逐渐增多。

2.2 断路器带电操作时微粒运动与诱发间隙击穿情况

根据前述实验步骤，每次将 SF_6 气压降低 0.1 MPa 后重复实验。若在耐压或升压过程中，微粒诱发间隙击穿，则在相同实验条件下再重复实验 5 次，以降低实验结果的分散性。在不同 SF_6 气压 p 下，断路器未带电操作时，微粒诱发的间隙击穿电压 U_b 如图 7 中所示。

在进行断路器的带电操作前，微粒保持耐压结束时的状态，即：大部分微粒聚集在气室右侧的端部并保持静止状态，少量的微粒仍在挡气罩和断路器触头下方运动。操作断路器时，原静止在气室端部的多个微粒受壳体冲击振动的激励而再次起跳，随后大概率可跳动至高场强区域持续运动。聚集于气室端部的多微粒因壳体冲击振动激励后而重返高场强区域运动时，微粒之间仍保持较近的距离，并在挡气罩下方形成多微粒的串联击穿。实验中在 320 kV 时进行断路器的带电操作后，多微粒被激励起跳并在运动过程中形成串联击穿如图 8 中所示(图中第 0 s 为断路器操作时刻，–1 s 为断路器操作前 1 s 的时刻)。

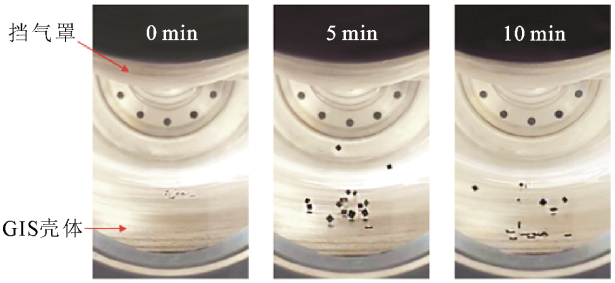


图 4 耐压过程中不同时刻微粒运动过程

Fig.4 Particle movement process at different times during voltage withstand

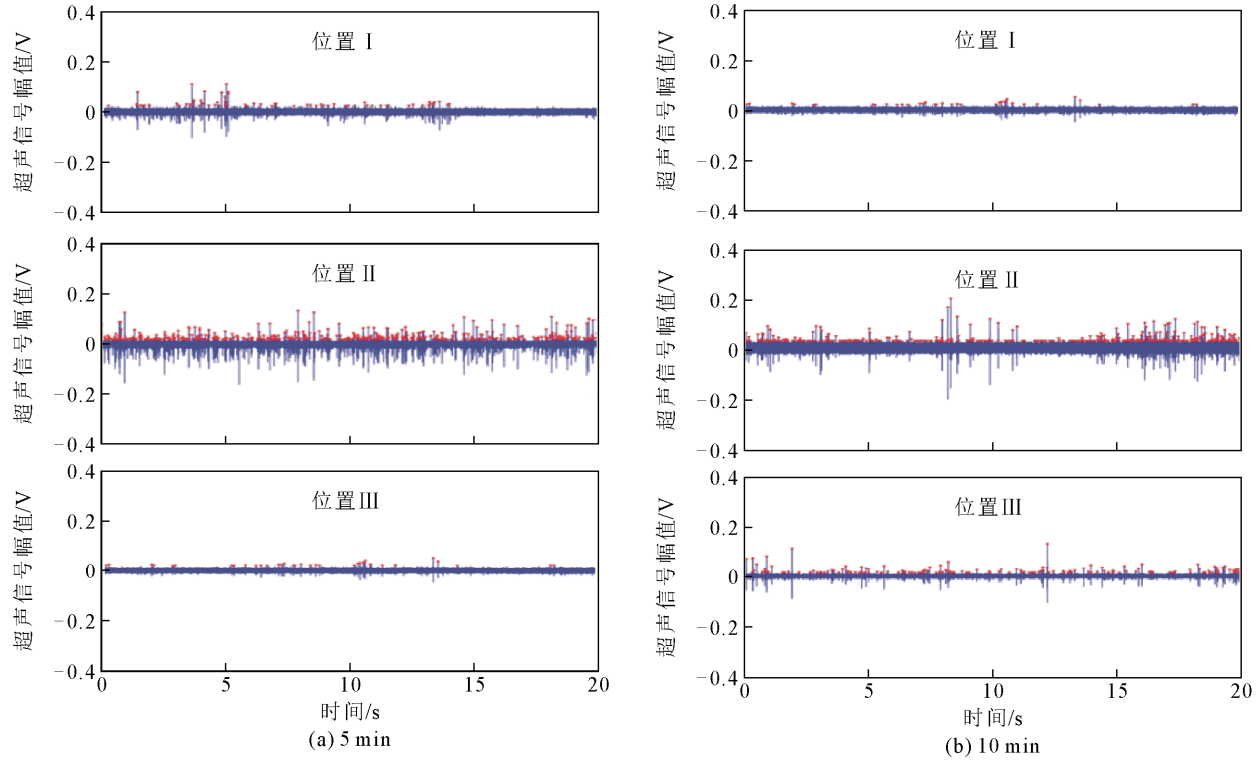


图 5 第 5 min 与 10 min 时刻下不同位置处采集的声信号

Fig.5 Acoustic signals collected at different locations at the time 5 min and 10 min

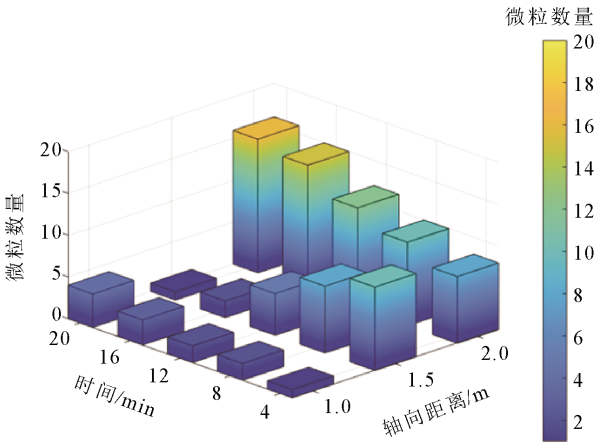


图 6　断路器不同部位的微粒数量随时间变化情况

Fig.6　Variation of particle number at different parts of circuit breaker with time

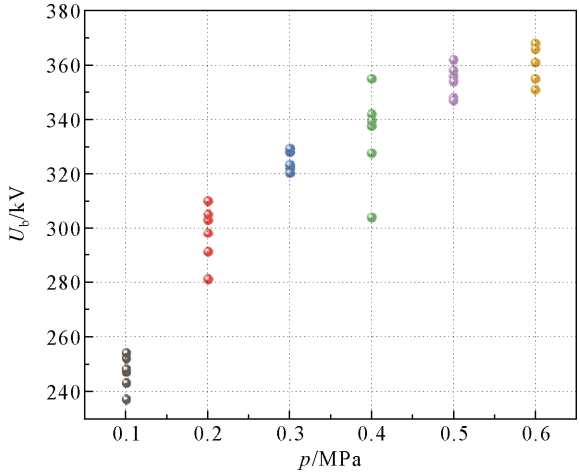


图 7　不同 SF_6 气压 p 下断路器未带电操作时微粒诱发间隙击穿的电压值 U_b

Fig.7　Voltage value U_b of breakdown induced by particles when circuit breaker is not operated under different SF_6 pressure p

将图 8 中的第 8 s、第 9 s 与第 10 s 的现象进行对比发现，第 8 s、9 s 时刻存在可运动至高压电极附近的金属微粒，此时微粒在高压电极附近可以引起较强的电场畸变，甚至与高压电极间发生微放电，但这些微粒并没有达到诱发间隙击穿的条件。当多个微粒在 GIS 腔体中运动且彼此距离较近时，微粒对电场的畸变能力也更强，提高了气隙击穿的概率。并且当多个微粒沿着半径同一方向运动时(类似于图 8 中第 10 s 的“多星连珠”串联击穿现象)，极有可能共同构成放电通道，增强了诱发放电的能力。

不同气压下，微粒在断路器未带电操作时诱发的平均击穿电压值 U_{b_av}，与带电操作时的击穿电压值 U_c 的对比情况如图 9 所示。

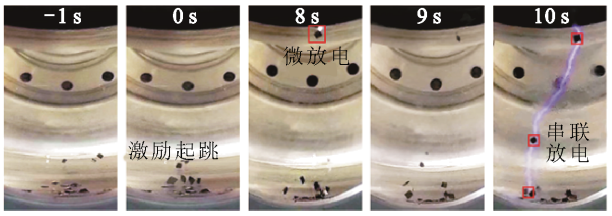


图 8　断路器操作后静止的多微粒被激励运动并形成串联间隙击穿过程

Fig.8　Process of stationary particles being excited to move and forming the series breakdown after the operation of the circuit breaker

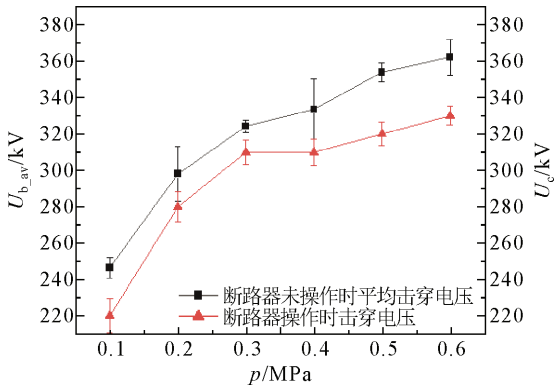


图 9　不同 SF_6 气压 p 下片状微粒诱发间隙击穿电压平均值 U_{b_av} 与带电操作击穿电压值 U_c

Fig.9　Average breakdown voltage U_{b_av} and operating breakdown voltage U_c under different SF_6 pressure p

通过图 9 中对比可见，断路器带电操作后微粒引起的气隙击穿电压明显降低，虽然实验中所得的操作击穿电压未必是微粒引起的最低击穿电压，但无一例外全部小于未操作断路器时平均击穿电压的 10%左右。

3　冲击振动激励前后微粒运动与诱发间隙击穿过程分析

3.1　耐压期间微粒运动与分布规律

GIS 内自由金属微粒带电后将受到电场的作用力而起跳，微粒的运动因电场的交变而不断变化，因此分析微粒在断路器气室内的运动情况应重点考虑电场的分布情况。实验所用的真型 GIS 断路器气室内的电场分布云图见图 10。由图 10 中电场分布情况可知，挡气罩下方的电场要强于断路器内其它部位，而挡气罩右侧的气室端部则为弱场强区域。

利用高斯定律对边长为 L 的片状金属微粒的带电量 q 进行粗略估算[18]，约为：

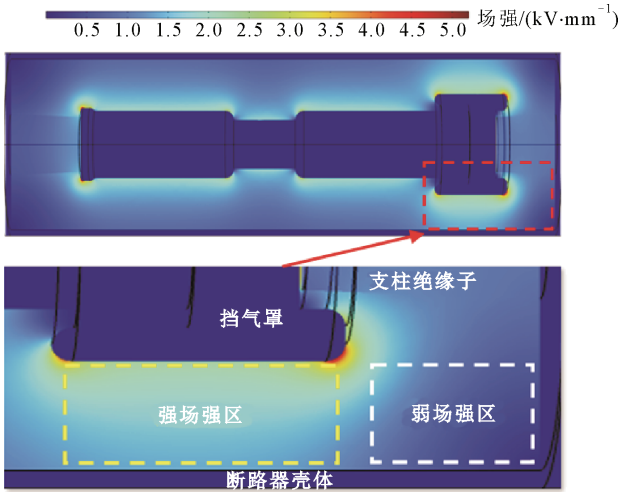


图 10 运行电压峰值下断路器内电场分布云图

Fig.10 Distribution of electric field in circuit breaker at positive peak phase voltage

$$q=\oint_S \varepsilon_0\varepsilon_r E\ \mathrm{d}s=\varepsilon_0\varepsilon_r L^2 E \tag{2}$$

式中：ε_0 为真空介电常数；ε_r 为 SF_6 相对介电常数；E 为微粒所在处场强大小。静止时微粒将会承受重力 G，电场力 F_q 和 GIS 壳体的支持力 F_N，受力情况如图 11 所示。

静止于 GIS 壳体表面时微粒的力学方程可表示为：

$$F_q+F_N+G=0 \tag{3}$$

不存在开关激励的条件下，当电场力 F_q 大于重力 G 时，微粒满足起跳条件，此时片状金属微粒的起跳场强为：

$$E_{\text{lift-off}}=\sqrt{\frac{h\rho g}{k\varepsilon_0\varepsilon_r}} \tag{4}$$

式中：h 为微粒厚度；ρ 为金属铝密度；g 为重力加速度；k 为镜像电荷引起的修正系数，0.832[1]。

微粒起跳场强和运行电压峰值下挡气罩下方壳体内表面处的场强 E_{run} 大小见图 12。当某一区域高压导体的运行场强大于微粒起跳场强时，微粒满足起跳条件并剧烈飞行，这部分区域称为微粒的“起跳区”；当某一区域高压导体的运行场强小于微粒起跳场强时，则微粒无法在电场力作用下持续飞行并静止于此，这部分区域称为微粒的“潜伏区”。

初始阶段微粒在挡气罩下方的强场强区剧烈运动，表现为微粒运动飞行较高，运动范围较大，并且微粒在剧烈运动过程中存在大概率运动至气室端部的弱场强区域，接着潜伏于此。因此，在 GIS 断路器长期带电运行过程中，多个自由金属微粒最终会聚集在气室端部。上述微粒运动过程见图 13。

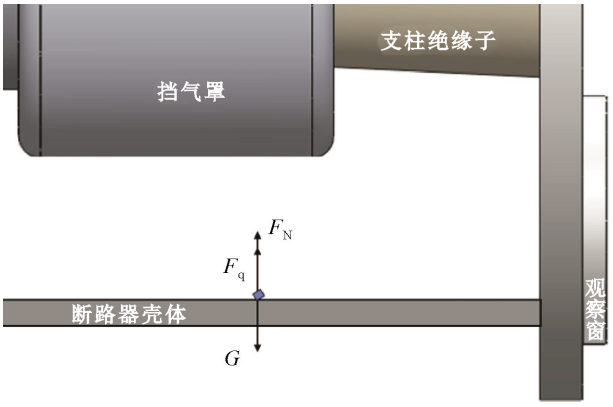


图 11 微粒静止于 GIS 壳体表面时的受力情况

Fig.11 Forces on the particle when the particle resting on the surface of the GIS enclosure

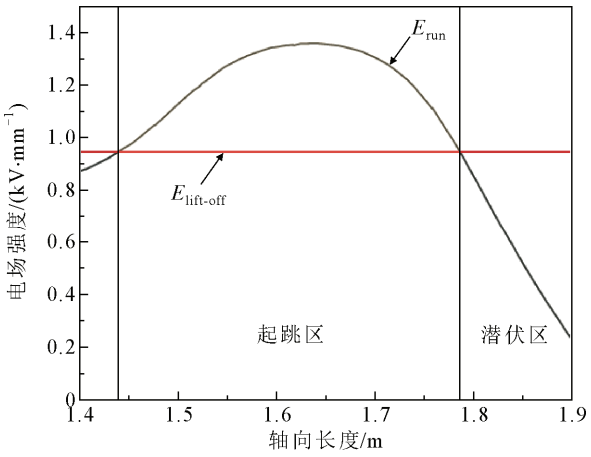


图 12 断路器壳体内表面场强与微粒起跳场强大小对比

Fig.12 Comparison between the field strength on the inner surface of the circuit breaker and the particle lift-off electric field strength

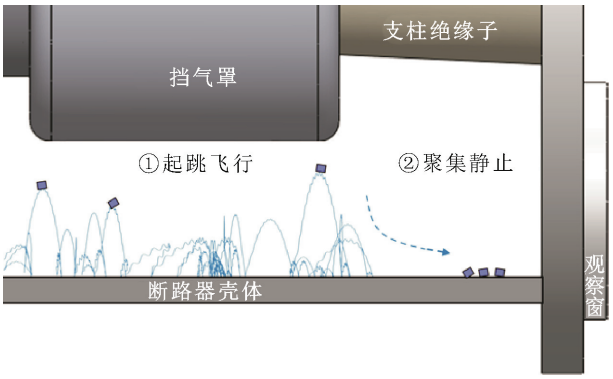


图 13 GIS 长期带电运行中微粒运动变化过程

Fig.13 Process of particles motion changing in GIS long-term run

3.2 冲击振动对微粒运动影响

断路器操作后，静止的金属微粒将随气室的壳体一同振动，未脱离壳体时，微粒与壳体保持相对静止，具有相等的加速度。此时，在重力 G、电场力 F_q 和壳体支持力 F_N 的共同作用下，微粒在竖直方向上满足的力学方程为：

$$F_q + F_N + G = ma \tag{5}$$

当微粒即将脱离壳体时，微粒受到的壳体支持力 F_N 等于 0，而且此时微粒的瞬时加速度仍等于壳体的振动加速度，方向竖直向下。脱离壳体后微粒获得径向上的初始速度并起跳运动，此时微粒的起跳场强 $E'_{\text{lift-off}}$ 即为：

$$E'_{\text{lift-off}} = \frac{F_q}{q} = \frac{G - m|a|}{q} = \sqrt{\frac{h\rho(g-|a|)}{k\varepsilon_0\varepsilon_r}} \tag{6}$$

对比式(4)和式(6)可以看出，当壳体冲击振动加速度幅值$|a|$在 0~g 之间时，微粒的起跳场强显著地小于壳体无冲击振动时的起跳场强；当壳体冲击振动加速度幅值$|a|>g$ 时，微粒将直接从壳体表面起跳飞行。

如图 14(a)中所示，由于片状金属微粒的边缘电场畸变程度最大，电荷主要聚集在微粒的边缘，因此微粒受到电场力的施力点也在微粒的边缘部位，而非微粒中心。断路器动作产生的壳体冲击振动会促使微粒的端部翘起，此时微粒在电场力的作用下会以某一端部为支点发生“翻转”运动，见图 14(b)。在电场力和电场梯度力的作用下，微粒极有可能返回挡气罩下方的强场强区域再次飞行运动。

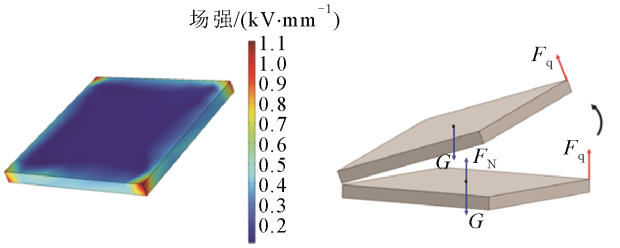
断路器操作后壳体产生的冲击振动可有效地激励静止在气室端部的多个微粒起跳运动。微粒起跳后，在 GIS 气隙间除了受到重力 G 和电场力 F_q，还将受到电场梯度力 F_g 以及 SF_6 气体的阻力 F_v 作用，如图 15 所示。可建立三维直角坐标系 xyz 来定量表述微粒的受力和运动情况，其中水平方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴，GIS 管道的轴向为 z 轴，具体如图 15 所示。

根据牛顿第二定律，可得到微粒在 GIS 气隙中运动时的力学方程为：

$$\begin{cases} ma_x = m\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = F_{qx} + F_{gx} - F_{vx} \\ ma_y = m\dfrac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = F_{qy} + F_{gy} - G - F_{vy} \\ ma_z = m\dfrac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2} = F_{qz} + F_{gz} - F_{vz} \end{cases} \tag{7}$$

式中：F_{qx}、F_{qy}、F_{qz}，F_{gx}、F_{gy}、F_{gz} 和 F_{vx}、F_{vy}、F_{vz} 分别为 F_q、F_g、F_v 在 x、y、z 上的分量。

多个微粒受激起跳后，存在较大的概率同时或者先后运动至挡气罩下方，此时多微粒之间仍保持一定的聚集性，彼此的距离较近，对高场强区域的电场畸变能力较强，极有可能形成多微粒的串联间隙击穿。静止的多微粒受冲击振动激励起跳并形成串联击穿的过程如图 16 所示。



(a) 微粒表面电场分布情况　　(b) 微粒受力与运动示意图

图 14　片状微粒表面电场分布与受力情况

Fig.14　Distribution of electric field on the surface and the forces on the flaky particle

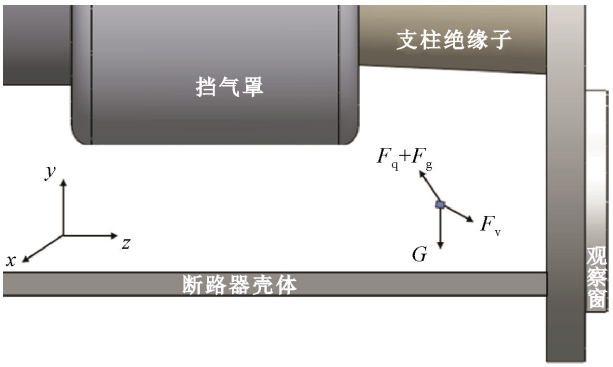


图 15　微粒起跳后在 GIS 中的受力情况

Fig.15　Forces on the particle after lifting-off in GIS

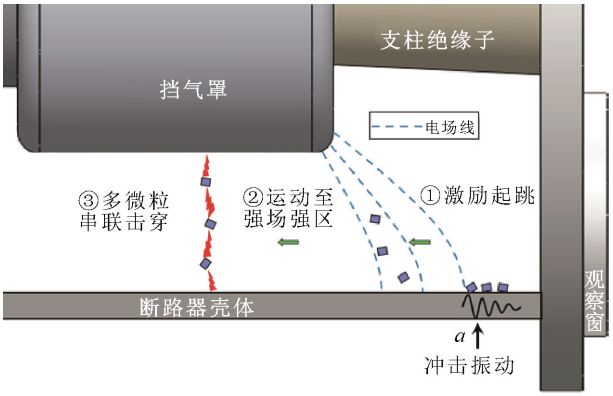


图 16　冲击振动作用下多微粒起跳形成串联击穿过程

Fig.16　Process of multiple particles lifting off and forming series breakdown under impact vibration

在耐压期间，也有多个微粒在挡气罩下方运动，但是并未引发间隙击穿，或者引发间隙击穿时的电压较高，这是由于此时运动的微粒空间分散性较大，对电场的畸变能力远不如聚集性的多微粒，因此所需的击穿电压较高。

3.3 多微粒运动过程中串联诱发间隙击穿机理

微粒诱发 GIS 中的气体击穿现象常通过流注理论来进行一定的解释。当微粒端部产生的电子崩达到一定的数量时，即满足 SF_6 气体的自持放电条件，引发 GIS 间隙的稍不均匀电场的击穿故障，该自持放电的判据式即为 Shuman's equation[19]：

$$\int_0^{x_c}(\alpha-\eta)\mathrm{d}x=\int_0^{x_c}c\left(E-p(E/p)_0\right)\mathrm{d}x\geq K \quad (8)$$

式中：c=28 kV^{-1}；$(E/p)_0$=88.5 kV/(MPa·mm)；K=10.5；x_c 为临界电子崩长度。当 $E-p(E/p)_0$ 关于路径 x 积分值大于或等于 K/c 时，即认为满足流注自持放电条件，在非均匀场的气隙中，就会发生贯穿性放电。由式(8)知，流注的形成与气压 p 和场强 E 的大小有关，因此微粒能否诱发气隙的击穿取决于自由金属微粒的几何形状、微粒在间隙中的位置以及交流电压的幅值，并且当微粒的数量增多时，可进一步促使电场产生更强的畸变情况，从而降低了流注发生的条件[20-21]。

当某个微粒在运动过程中靠近高压电极并满足流注自持放电判据而与电极发生微放电时，微粒与高压电极形成短接，相当于高压电极上出现了一个“尖刺”，“尖刺”的等效长度为微粒长度与间隙距离之和[22-23]。

与高压电极形成短接后，微粒与高压电极等势，其另一端的电场得到了极大的增强，促使形成的“尖刺”端部附近的下一个微粒与“尖刺”间发生微放电。在短路效应下，“尖刺”的等效长度进一步增加。在某个时刻，若恰好有若干个微粒在满足这样的击穿条件，进而诱发整个 GIS 腔体内气隙的贯穿性击穿。多微粒以类似“多星连珠”的形式在 GIS 间隙中形成串联击穿过程如图 17 中所示。

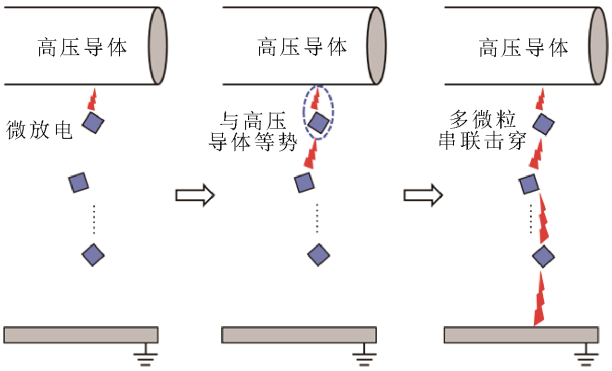


图 17 多微粒串联击穿过程示意图

Fig.17 Schematic diagram of multiple particles forming series breakdown process

4 结论

1）正常运行下，GIS 断路器气室内自由金属微粒大概率会扩散至气室端部的弱场强区域，并静止于此。当断路器内多个微粒共存时，随着带电运行时间变长，气室末端会形成多个微粒的聚集。

2）断路器操作后的壳体冲击振动可以有效地激励气室端部静止微粒的起跳。聚集性的多微粒起跳后，由于微粒间的距离较近，对气隙电场的畸变能力增强，存在一定的几率形成多个微粒的串联间隙击穿现象。

3）相较于无微粒或者存在单微粒时诱发的间隙击穿，多微粒运动过程在间隙中形成的串联击穿电压更低。这可以作为断路器带电操作后，气室内常发生间隙击穿故障的一种解释。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 庞先海，王 潇，乔松松，等. SF_6/N_2 混合气体中金属微粒在工频电压下运动的仿真与实验研究[J]. 高电压技术，2021，47(2)：679-686.
PANG Xianhai, WANG Xiao, QIAO Songsong, et al. Simulation and experimental study on the motion of metal particles in SF_6/N_2 mixed gas under power frequency voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 679-686.

[3] 树 婷，杨玥坪，郭若琛，等. 交流与负极性雷电冲击叠加电压下 SF_6 中自由金属颗粒局部放电激发特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3305-3315.
SHU Ting, YANG Yueping, GUO Ruochen, et al. Partial discharge excitation characteristics of free metal particles in SF_6 Gas under AC and negative lightning impulse superposition voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3305-3315.

[4] 刘云鹏，黄志成，耿江海，等. 颗粒与绝缘子碰撞粘附问题的模型选择[J]. 高电压技术，2022，48(3)：809-819.
LIU Yunpeng, HUANG Zhicheng, GENG Jianghai, et al. Selection of model for particle-insulator collision adhesion problem[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 809-819.

[5] 张连根，路士杰，李成榕，等. GIS 中线形和球形金属微粒的运动行为和危害性[J]. 电工技术学报，2019，34(20)：4217-4225.
ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Motor behavior and hazard of spherical and linear particle in gas insulated switchgear[J].

Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4217-4225.

[6] 张乔根，李晓昂，刘　琳，等. GIS 中 SF_6 绝缘系统缺陷放电的“0-1”现象[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2689-2698.
ZHANG Qiaogen, LI Xiaoang, LIU Lin, et al. "One-Zero" phenomenon of discharge induced by defects in SF_6 insulation systems in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2689-2698.

[7] 李庆民，常亚楠，王　健，等. 气体绝缘输电管道微粒陷阱设计技术研究进展[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4182-4193.
LI Qingmin, CHANG Ya'nan, WANG Jian, et al. Methodological advances of metal particle traps design in gas insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4182-4193.

[8] 季洪鑫. 交流运行电压下 GIS 中金属颗粒运动行为及放电特征[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2017.
JI Hongxin. Study on movement behavior and discharge characteristic of metal particle in GIS under AC operating voltage[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

[9] 许　渊. 运行中 GIS 绝缘子表面金属颗粒诱发放电研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2020.
XU Yuan. Investigation on mechanism of metallic particle induced flashover of GIS insulators in operation condition[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020.

[10] 李晓昂，李　杰，任　静，等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒起跳特性[J]. 高电压技术，2022，48(5)：2005-2012.
LI Xiaoang, LI Jie, REN Jing, et al. Lift-off characteristics of free metal particles in GIS under shock vibration[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 2005-2012.

[11] 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, 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, 4597.

[12] 庞志开. 冲击力对 GIS 中自由金属颗粒行为影响及其危害性研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2017.
PANG Zhikai. Study on the behavior and harmfulness of free metallic particle in GIS affected by the impact[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

[13] 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)：2838-2847.
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): 2838-2847.

[14] 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, doi: 10.1109/TPWRD. 2022.3197221.

[15] YOU H Y, ZHANG Q G, GUO C, et al. Motion and discharge characteristics of metal particles existing in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 876-885.

[16] LI X A, LI J, REN J, et al. Acoustic method for multiple free metallic particle recognition in GIS/GIL[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2104-2111.

[17] WU Z C, ZHANG Q G, SONG J J, et al. Improved method for acoustic identification of free conductive particle defects in GIL[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1317-1323.

[18] 李　杰，李晓昂，吕玉芳，等. 工频电压下片状自由金属微粒带电特性与运动规律研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：1166-1175.
LI Jie, LI Xiaoang, LYU Yufang, et al. Study on the charge characteristics and movement pattern of lamellar particles under power frequency voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1166-1175.

[19] LI X A, PEI Z H, WU Z C. Free microparticles–an inducing mechanism of pre-firing in high pressure gas switches for fast linear transformer drivers[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(3): 035113.

[20] NEGARA Y, YAJI K, IMASAKA K, et al. AC particle-triggered corona discharge in low pressure SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 91-100.

[21] HARA M, NEGARA Y, SETOGUCHI M, et al. Particle-triggered pre-breakdown phenomena in atmospheric air gap under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 1071-1081.

[22] 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)：4793-4800.
WANG Jian, LI Qingmin, 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): 4793-4800.

[23] 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(北京)，2017.
WANG Jian. Research on the moving mechanisms of charged metal particles in DC GIL and suppressing methods[J]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.



胡新文
1998—，男，硕士生
主要研究方向为 GIS/GIL 绝缘状态监测与诊断技术。
E-mail: 1145426768@qq.com

HU Xinwen



李晓昂(通信作者)
1989—，男，博士，副研究员，硕导
主要从事脉冲功率技术、高电压试验技术、脉冲放电等离子体方面的研究工作。
E-mail: li_xiaoang@xjtu.edu.com

LI Xiaoang
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



王舒啸
1999—，女，硕士生
主要研究方向为GIS/GIL 绝缘状态监测与诊断技术
E-mail: 464340814@qq.com

WANG Shuxiao



李志兵
1975—，男，博士，教授级高工
主要从事高压开关设备和串补偿装置研制 GIS 中 VFTO 研究、新型快速开关研发等工作
E-mail: lizb@epri.sgcc.com.cn

LI Zhibing
Ph.D., Professor

收稿日期　2022-12-02　修回日期　2023-09-23　　编辑　曹昭君