

GIS 内自由导电微粒缺陷超声信号飞行图谱特性研究

吴治诚¹, 张乔根¹, 宋佳洁¹, 杜乾栋¹, 李晓昂¹, 李志兵²

(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, 北京 100192)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS) 开始向小型化、高可靠性、智能化发展。GIS 中自由导电微粒缺陷是 GIS 设备绝缘的最大威胁, 如何检测 GIS 内自由导电微粒缺陷成为提高 GIS 设备运行可靠性亟待解决的问题。超声法作为一种非侵入式的局部放电检测手段, 在 GIS 设备现场交接试验时被广泛采用。利用超声幅值-飞行时间图谱可以对 GIS 内自由导电微粒缺陷进行特征识别。本文搭建了 GIS 内自由导电微粒超声特性研究平台, 对声发射传感器进行标定后, 测量自由导电微粒产生的超声信号, 研究了超声幅值-飞行时间图谱的特性; 结合数值计算结果及理论分析, 给出了自由导电微粒缺陷超声信号飞行图谱的特征表达式, 并与数值计算结果及实验结果进行了对比。结果表明, 将微粒受力分解为重力及电场力, 可将飞行图谱分解为“重力线”及正弦分量, 推导得到的特征表达式与数值计算结果与实验结果相符。

关键词: 气体绝缘金属封闭开关设备; 自由导电微粒; 超声信号; 超声幅值-飞行时间图谱

DOI:

文章编号:

Study on Acoustic Flight Pattern of Free Conducting Particle Defects in GIS

WU Zhicheng¹, ZHANG Qiaogen¹, SONG Jiajie¹, DU Qiantong¹, LI Xiaolang¹, LI Zhibing²

(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)

Abstract: The development of gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) shows the tendency of miniaturization, intelligence and higher reliability. The presence of metal conductive particles in GIS is the greatest threat to GIS insulation. The detection method for foreign matter defects in GIS, especially free conductive particles, is one of the problems to be urgently solved to improve the reliability of GIS equipment. As a non-invasive partial discharge detection method, ultrasonic method is widely used in GIS equipment field transfer test. The characteristics of free conductive particle defects in GIS can be identified by ultrasonic amplitude - flight time map. In this paper, the research on the ultrasonic characteristics of free conducting particles in GIS is carried out. After the acoustic emission sensor is calibrated, the ultrasonic signals produced by free conductive particles are measured and the characteristics of ultrasonic amplitude-flight time pattern are studied. Combining numerical results and theoretical analysis, The characteristic expression of the flight map of the free conductive particle defect ultrasonic signal is given and compared with the numerical results and the experimental results. The results show that the force spectrum is decomposed into gravity and electric field force, and the flight map can be decomposed into "gravity line" and sinusoidal component. The characteristic expression and numerical result are in agreement with the experimental results.

Key words: Gas-insulated metal-enclosed switchgear; free conducting particle; acoustic method; acoustic amplitude-flight time pattern

0 引言

为了在满足城市及土地面积紧张地区设置变

电站的需要, 气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS) 开始向小型化、高可靠性、智能化发展^[1-5]。根据国际大电网会议 CIGRE 33/23.12 工作组的统计, 由微粒或外来异物造成的绝缘失效占全部绝缘失效

故障的 20%。在外施电场或机械振动的影响下,微粒或外来异物可能在 GIS 设备中运动,在特快速瞬态过电压(Very Fast Transient Overvoltage, VFTO) 到来时,可能引发异常放电^[6]。GIS 内自由导电微粒是对 GIS 设备正常运行的最大威胁^[7]。如何检测 GIS 内自由导电微粒缺陷,是提高 GIS 设备运行可靠性亟待解决的问题。

根据标准《GB 7674-2008 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》的规定, GIS 设备在现场交接时开展工频短时耐受试验后,应补充开展工频局部放电试验或雷电冲击耐受试验^[8]。开展局部放电试验时,通常采用的方法有脉冲电流法、特高频法及超声法。脉冲电流法是标准《GB/T 7354 局部放电测量》规定的常规方法,但现场试验环境干扰较大,难以使用脉冲电流法进行局部放电测量^[9]。特高频法检测局部放电激发的高频电磁波,不受电晕干扰的影响,具有较高的信噪比,但特高频信号最好由 GIS 内部耦合器获取,内部耦合器可能畸变电场,提高维护费用^[10,11]。超声法接收局部放电激发的振动信号,仅需要在 GIS 外壳放置传感器,对于 GIS 内运动的微粒缺陷灵敏度较高。因此,超声法作为一种非侵入式的局部放电检测手段,在现场交接试验时被广泛采用^[12]。

使用超声信号相位图谱及幅值对自由微粒威胁诊断均不理想^[13],1995 年,学者 Holmberg 注意到飞行时间(运动时间间隔)可以用于自由微粒缺陷的风险评估^[14]。之后,学者 Runde 首次使用超声幅值-飞行时间图谱对自由微粒的运动模式进行诊断^[15]。超声幅值-飞行时间图谱的构造方法为:将超声信号时间序列进行数据处理,得到脉冲间隔时间及脉冲幅值,绘制到散点图中得到超声幅值-飞行时间图谱,简称飞行图谱。

国内外学者对于 GIS 内自由导电微粒缺陷的飞行图谱特性进行了广泛研究。学者们认为飞行图谱是一种典型的 GIS 内自由导电微粒的模式识别图,飞行时间与信号幅值规律地出现三角脉冲分布群,可以根据三角脉冲分布群的幅值及数量判断缺陷的严重程度^[16-18]。以上研究都集中于飞行图谱的定性描述,并未从理论角度给出飞行图谱的物理含义。

本文搭建了 GIS 内自由导电微粒超声特性研究平台,对声发射传感器进行标定后,测量自由

导电微粒产生的超声信号,研究了超声幅值-飞行时间图谱的特性;结合数值计算结果及理论分析,给出了自由导电微粒缺陷超声信号飞行图谱的特征表达式,并与数值计算结果及实验结果进行了对比。

1 实验设置及方法

为了研究 GIS 内自由导电微粒缺陷超声信号飞行图谱特性,搭建了如图 1 所示的 GIS 内自由导电微粒超声特性研究平台。

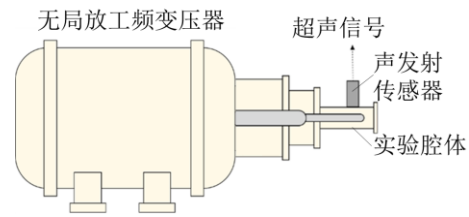


图 1 实验平台示意图

Fig.1 Experimental platform diagram

实验腔体使用缩小比例为 1:10 的 1100 kV GIS 母线段,母线直径为 18 mm,壳体内径为 88 mm。为了模拟 GIS 内自由导电微粒缺陷,实验选用铝质球形微粒模拟 GIS 内部的自由导电微粒。

超声信号采集系统主要由声发射传感器、前置放大器和示波器组成。根据《DLT 304-2011 气体绝缘金属封闭输电线路现场交接试验导则》,超声测量频率应在 20 kHz 至 100 kHz 之间,实验选用型号为 SR40M 的声发射传感器,谐振频率为 40 kHz,满足测量需求^[9]。传感器与实验腔体外壳紧密接触,接触面均匀涂抹耦合剂,消除传感器与实验腔体间的气隙,减小信号衰减。实验采用型号为 PAI 的前置放大器,其带宽为 10 kHz 至 2 MHz,增益为 40 dB,输入阻抗大于 50 MΩ,满足对超声信号的放大要求。

进行实验前,将实验腔体抽至真空后,再向腔体内充入 0.5 MPa SF₆ 气体,静置后进行实验。实验时使用 Tektronix DPO4104 示波器对超声信号进行采集,该示波器带宽为 1 GHz,采样率为 5 GS/s。

2 实验结果及讨论

2.1 声发射传感器的标定方法

学者 Lundgaard 的实验研究表明,声发射传

传感器采集到的超声信号幅值与微粒碰撞动量成正比, 如式(1)所示^[19]。式中, k_s 为声发射传感器灵敏度, A 为超声信号幅值, p 为微粒碰撞动量。

$$A = k_s p \quad (1)$$

由于实测到的超声信号不仅与声发射传感器灵敏度有关, 还与碰撞距离、外壳材料等有关。因此有必要在测量前对声发射传感器灵敏度进行标定。

使用自由落体碰撞反弹实验可以对声发射传感器的灵敏度进行标定。设质量为 m 的微粒开始自由落体的时间为 t_0 , 第 i 次碰撞时刻为 t_i , 该次碰撞时速度为 v_i , 产生超声信号的幅值为 A_i 。对于两次碰撞之间处于运动状态的微粒, 可分为竖直上抛运动及自由落体运动, 由于这两次运动完全过程对称, 所用时间相等, 可以得到第 i 次的碰撞动量如式(2)所示。

$$p_i = gm \frac{t_{i+1} - t_i}{2} \quad (2)$$

将每次碰撞的碰撞动量带入式(1)可得到声发射传感器的灵敏度, 如式(3)所示。

$$k_s = \frac{2A_i}{gm(t_{i+1} - t_i)} \quad (3)$$

将 50 次实验平均值作为该次试验传感器的灵敏度。本文声发射传感器灵敏度为 1.03×10^6 V/(kg · m/s)。

2.2 超声信号飞行图谱特性

在实验腔体内设置直径为 1 mm 的铝质球形微粒, 外施电压为 45 kV 至 90 kV 工频电压, 测量 100 s 内的超声信号, 提取超声信号时间序列后, 绘制超声信号飞行图谱, 如图 2 所示。

同时, 由于超声幅值与碰撞动量成正比, 使用文献[20]中 GIS 内自由导电微粒运动数值计算程序计算出微粒的运动状态, 使用式(1)将微粒碰撞动量与声发射传感器灵敏度 k_s 相乘得到超声幅值, GIS 内自由导电微粒缺陷的飞行图谱数值计算结果如图 3 所示。

由图 2 及图 3 可知, 对于 GIS 内自由导电微粒缺陷, 数值计算得到的飞行时间图谱与实验结果较为接近。飞行时间图谱为带状包络, 带状包络可观察到频率为 50 Hz 的正弦分量, 随飞行时间变化交替出现极大值与极小值。包络线极大值出现在四分之三周期处, 飞行时间为 $0.15 + 0.02n (n \geq 0)$; 极小值出现在四分之一周期

处, 飞行时间为 $0.05 + 0.02n (n \geq 0)$ 。每个周期内上包络线的极小值与下包络线的极大值可构成经过零点的直线。综合以上特征, GIS 内自由导电微粒缺陷超声信号飞行图谱的上、下包络线通式可使用式(4)、式(5)描述。另外, 随着外施电压升高, 包络线的正弦分量增大, 周期个数增加。

$$A_{up} = C_1 t_{flight} + C_2 [\sin(100\pi t_{flight} - \pi) + 1] \quad (4)$$

$$A_{down} = C_1 t_{flight} + C_2 [\sin(100\pi t_{flight} - \pi) - 1] \quad (5)$$

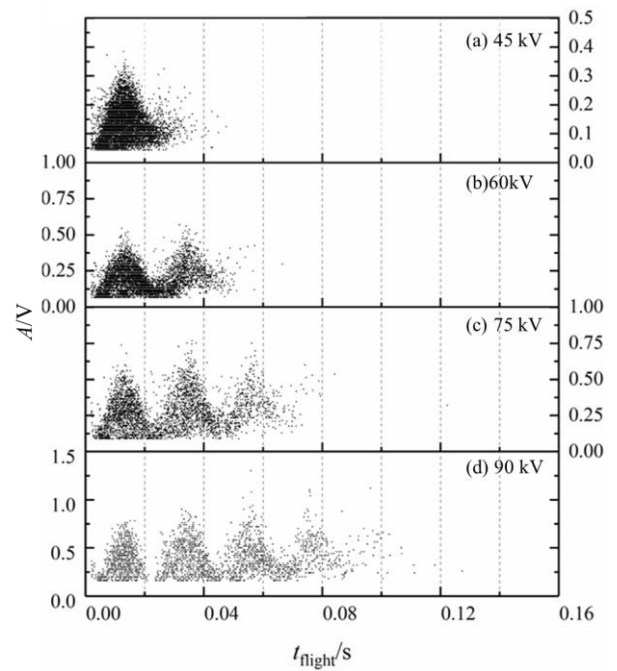


图 2 飞行时间图谱与外施电压的关系 (实验结果)

Fig.1 Acoustic flight pattern as a function of applied voltage (experimental result)

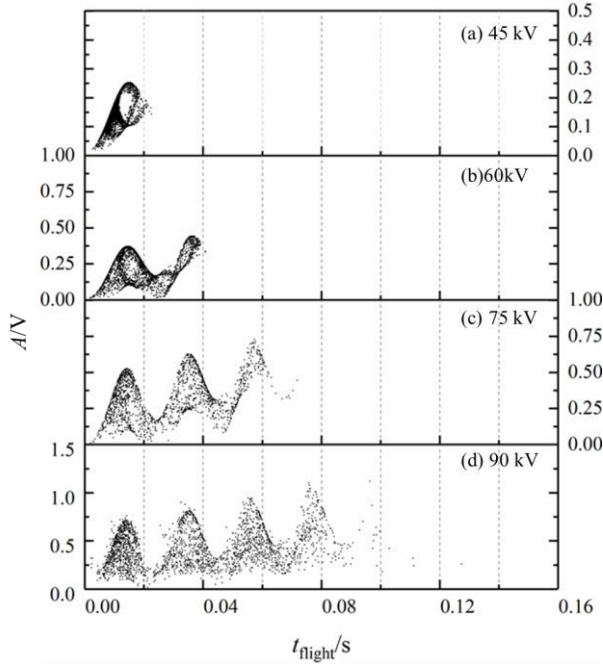


图3 飞行时间图谱与外施电压的关系（数值计算结果）

Fig.3 Acoustic flight pattern as a function of applied voltage
(calculated result)

下节将根据自由导电微粒的运动过程分析式(4)、式(5)中常数 C_1 、 C_2 的取值。

2.3 超声信号飞行图谱理论分析

飞行图谱包络线的正弦分量随外施电压升高而增大，因此图谱的形态与微粒运动中的带电量应具有密切的关系。将微粒带电量使用不同颜色表示在超声信号飞行图谱中，如图4所示。若微粒呈电中性，使用绿色表示；正、负极性最大带电量使用红、蓝两色表示。

从图4中分析可知，飞行时间图谱上包络线的极大值及下包络线的极小值均由带电量最大的微粒构成，上包络线的极小值及下包络线的极大值均由呈现电中性的微粒产生。由于该式表示呈电中性微粒的超声幅值与飞行时间的关系，因此，以下将该直线称为“重力线”。考虑仅受重力作用的情况可得到“重力线”的斜率，即 C_1 。

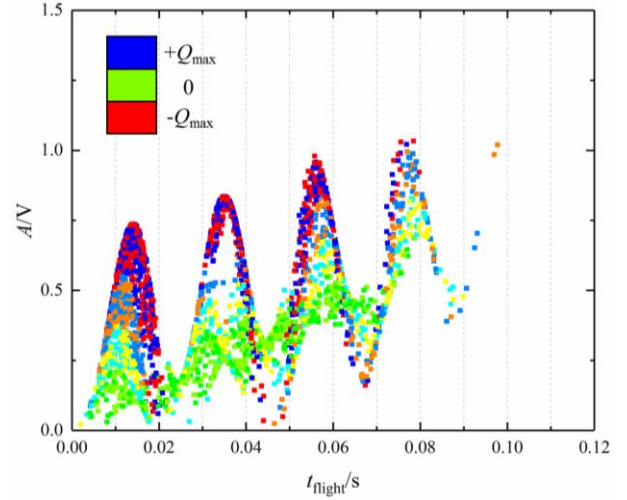


图4 飞行图谱中的微粒带电量分布

Fig.4 Particle charge distribution in acoustic flight pattern

对于电中性的微粒，两次碰撞极板之间的运动可看作是对称的竖直上抛运动及自由落体运动，对于飞行时间为 t_{flight} 的自由落体运动，有：

$$v = g \frac{t_{\text{flight}}}{2} \quad (6)$$

联立式(1)与式(6)，可以得到包络线直线分量的表达式，如式(7)所示。

$$A = \frac{1}{2} k_s g m t_{\text{flight}} \quad (7)$$

对应到式(4)、式(5)中的常数 C_1 ，有

$$C_1 = \frac{1}{2} g k_s m \quad (8)$$

将图谱分为“重力线”与正弦分量的实质是将微粒受力分为重力与交变电场力。明确交变电场力对微粒运动的影响可得到常数 C_2 的取值。

考虑一个仅受交变电场力作用微粒的运动状态。由于图谱包络线的极大值、极小值均由带电量最大的微粒碰撞得形成，即上次碰撞相位位于工频峰值处，因此考虑带电量最大的微粒的运动状态。设微粒碰撞时刻为正峰值，碰撞时间为时间零点，则外施电压瞬时值 U 如式(9)所示。

$$U = U_p \cos(100\pi t) \quad (9)$$

式中 U_p 为电压峰值。

带电微粒在交变电场力作用下具有式(10)所示的加速度 a_q 。

$$a_q = \frac{q_{\text{max}} E_p \cos(100\pi t)}{m} \quad (10)$$

式中 q_{max} 为微粒最大带电量， E_p 为电压位于

峰值时微粒所在位置的场强。对于实验所用的球形微粒而言, 其带电量可用式(11)计算。

$$q_{\max} = \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon r^2 E_p \quad (11)$$

由于微粒的尺寸远小于同轴圆柱电极间隙, 碰撞时刻可使用外壳底部位置的电场强度估算微粒所在位置电场强度, 计算公式如式(12)。

$$E_p = \frac{U_p}{R_1 \ln(\frac{R_1}{R_2})} \quad (12)$$

式中, R_1 、 R_2 分别为壳体内半径及母线半径。

加速度过零时刻对应速度最大时刻, 即四分之一周期。从零时刻至四分之一周期对加速度进行积分可以得到仅受电场力作用下微粒的最大速度 v_{\max} , 如式(13)所示。

$$v_{\max} = \int_0^{\frac{T}{4}} a_q dt = \frac{q_{\max} E_p}{100\pi m} \quad (13)$$

仅受电场力作用的微粒的加速度、速度与电压瞬时值的关系如图 5 所示。由于一个周期内微粒经历了加速运动、减速运动、反向加速运动与反向减速运动阶段, 由于运动的对称性, 一个周期范围内微粒运动速度不变。因此, 微粒在两次碰撞间的飞行过程中, 其速度的最大变化量 Δv 与仅受电场力作用微粒的最大速度 v_{\max} 相同, 如式(14)所示。

$$\Delta v = v_{\max} = \frac{q_{\max} E_p}{100\pi m} \quad (14)$$

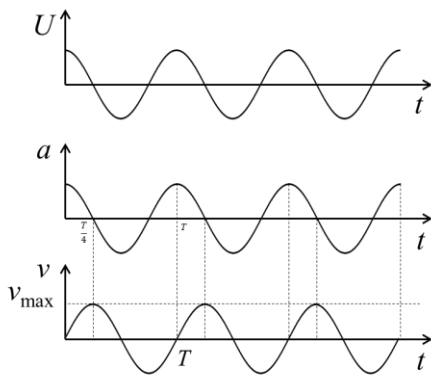


图 5 仅受电场力作用的微粒的加速度、速度与电压瞬时值的关系

Fig.5 Acceleration and velocity of particle as a function of instantaneous voltage (gravity-free condition)

微粒飞行过程中速度最大变化量 Δv 对应到飞行时间图谱中, 即对应上包络线最大值(下包

络线最小值)与“重力线”差值, 即 $2C_2$ 。联立式(1)与式(14)可以得到 C_2 的表达式, 如式(15)所示。

$$C_2 = \frac{1}{2} k_s \Delta v = \frac{k_s q_{\max} E_p}{200\pi} \quad (15)$$

综上所述, GIS 内自由导电微粒的飞行图谱可以使用式(4)、式(5)、式(8)及式(15)描述。

为了验证以上分析的正确性, 以 75 kV 下的实验及数值计算为例, 将理论推导的飞行图谱包络线表达式与数值计算结果及实验结果进行对比。根据式(4)、式(5)、式(8)及式(15)得到该条件下自由导电微粒缺陷的飞行图谱的“重力线”、上包络线与下包络线, 使用黑色虚线分别标示在图 6 中。图 6 表明, 理论推导的飞行图谱特征表达式与数值计算结果、实验结果均吻合良好。

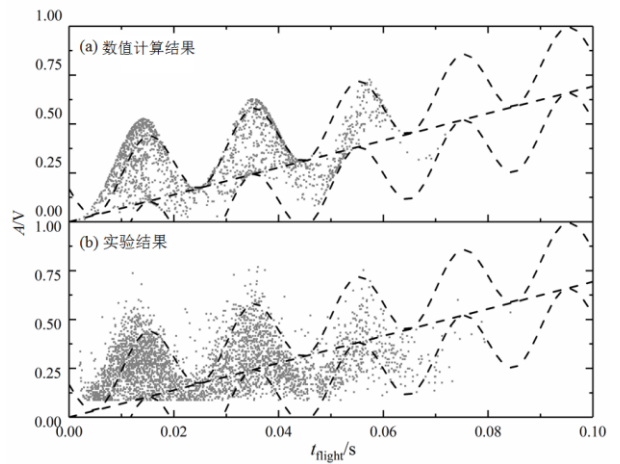


图 5 飞行图谱特征表达式的验证

Fig.5 Corroboration of flight pattern envelope expression

3 结论

- 1) 使用声发射传感器测量的超声幅值与微粒碰撞动量成正比, 使用自由落体碰撞反弹实验可以对声发射传感器的灵敏度进行标定。
- 2) GIS 内自由导电微粒缺陷的飞行图谱为带状包络, 包络线由过零点直线与正弦函数叠加而成。随外施电压升高, 包络的正弦分量增大, 周期个数增加。
- 3) 将微粒受力分解为重力及电场力, 可将飞行图谱分解为“重力线”及正弦分量, 通过理论推导可以得到飞行图谱特征表达式的物理含义。推导出的特征表达式与数值计算结果与实验结果相符。

参考文献 References

- [1] Kobayashi S, Horide A, Takagi I, *et al.* Development and field test evaluation of optical current and voltage transformers for gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 815-821.
- [2] 候平印, 江 洪. GIS 小型化探讨[J]. 高压电器技术, 2002 (4): 1-5.
HOU Pingyin, JIANG Hong. Discussion on GIS miniaturization[J]. High Voltage Apparatus, 2002(4): 1-5.
- [3] 李 鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, *et al.* Achievements in the Newest Technology of UHV AC Power Transmission Equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [4] Srivastava K, Morcos M. A review of some critical aspects of insulation design of GIS/GIL systems [C]//Proceedings of 2001 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2001: 787-792.
- [5] Riechert U, Halaus W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.
- [6] Boeck, Al E. Insulation co-ordination of GIS, Return of Experience, On Site Tests and Diagnostic Techniques[J], Electra, 1998, 176, 67-97.
- [7] Laghari J R, Qureshi A H. A review of particle-contaminated gas breakdown[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1981 (5): 388-398.
- [8] 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB/T 7674—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above: GB/T 7674—2008[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2008.
- [9] 气体绝缘金属封闭输电线路现场交接试验导则: DLT 304-2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
Guide for hand-over test of gas-insulated metal-enclosed transmission line on site: DLT 304-2011[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2011.
- [10] 姚陈果, 周电波, 陈 攀, 等. 采用超高频法监测变电站设备局放水平及其早期预警[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1670-1676.
YAO Chenguo, ZHOU Dianbo, CHEN Pan, *et al.* UHF-based monitoring for equipment PD within the substation and early warning[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1670-1676.
- [11] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, *et al.* Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J], High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [12] 刘云鹏, 李岩松, 黄世龙, 等. 基于光纤传输的气体绝缘开关设备局部放电超声波检测系统[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 186-191.
LIU Yunpeng, LI Yansong, HUANG Shilong, *et al.* Ultrasonic detection system for gas insulated switchgear partial discharge based on optical fiber transmission[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 186-191.
- [13] 黎大健, 杨景刚, 米楚明, 等. 基于超声波信号的 GIS 内自由金属颗粒危险评估研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 53-57.
LI Dajian, YANG Jinggang, MI Chuming, *et al.* Risk assessment of basis of free metallic particles in GIS based on ultrasonic signal[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 53-57.
- [14] M. Holmberg, M. L-A, Sjoberg. Identification of metallic particles in GIS by statistical analyzes of acoustical measurements and computer simulations[C]//9th International Symposium on HV Engineering. Graz, Austria, 1995: 5661.
- [15] Runde M, Aurud T, Ljokelsoy K, *et al.* Risk assessment basis of moving particles in gas insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 714-721.
- [16] 谭向宇, 杨 卓, 赵现平, 等. 基于飞行图模式的 GIS 内金属性缺陷超声信号特性研究[J]. 高压电器, 2013(5): 90-94.
TAN Xiangyu, YANG Zhuo, ZHAO Xianping, *et al.* Ultrasonic signal characteristics research of metallic defects in GIS based on the flight graph mode[J]. High Voltage Apparatus, 2013(5): 90-94.
- [17] 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.
- [18] HD Schlemper, Feser. Estimation of mass and length of moving particles in GIS by combined acoustical and electrical PD detection[C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Millbrae, USA: IEEE, 1996: 90-93.
- [19] Lundgaard L E. Particles in GIS characterization from acoustic signatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1064-1074.
- [20] WU Zhicheng, ZHANG Qiaogen, SONG Jiajie, *et al.* Simulation and motion analysis of spherical free conducting particle between coaxial electrodes[C]//Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Xi'an, CHINA: IEEE, 2017: 324-327.



WU Zhicheng

吴治诚

1993—, 男, 博士生

主要从事 GIS 绝缘特性研究

E-mail: z_c_wu@163.com

ZHANG Qiaogen
Ph. D., Professor

张乔根

1965—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事电力设备绝缘与结构设计技术、新一代智能输变电技术与电力设备试验与绝缘状态评估研究

E-mail: hvzhang@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 XXXX-X-XX 修回日期 XXXX-X-XX 编辑 X X