

GIS 盆式绝缘子表面污秽模态分析检测方法研究

袁文泽，何聪，蔡鋈，侯志强，李军浩
(西安交通大学电气工程学院，710049，西安)

摘要：为探究气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)盆式绝缘子振动模态与表面污秽状况之间的关联关系,采用模态分析方法对盆式绝缘子表面污秽状况进行了检测分析。通过三维有限元软件进行了数值仿真,研究了污秽质量、面积、位置、材料特性对盆式绝缘子模态特性的影响,并在 220 kV GIS 模型上进行盆式绝缘子的模态试验,对其表面污秽状况检测技术进行了相关研究。研究结果表明:污秽质量是影响盆式绝缘子模态特性的关键因素,污秽面积、位置、材料特性对其模态特性的影响较小;当盆式绝缘子表面污秽质量增加时,相关系数会明显减小,在2 000~3 000 Hz 信号频段,污秽累加值显著增加,2 000~4 000 Hz 信号频段内污秽指数明显增大。本文的研究结果为 GIS 盆式绝缘子表面污秽状况的带电检测提供了一种可现场实施的方法。

关键词：盆式绝缘子;表面污秽检测;模态分析

中图分类号：TM84 **文献标志码：**A

DOI: 10.7652/xjtuxb202102012 **文章编号：**0253-987X(2021)02-0100-12



OSID 码

A Detection Method of Surface Pollution of GIS Basin Insulator
Using Modal Analysis

YUAN Wenze, HE Cong, CAI Jun, HOU Zhiqiang, LI Junhao
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the relationship between the vibration mode of a gas insulated switchgear (GIS) basin insulator and the surface contamination, this study detects and analyzes the surface contamination of basin insulators based on the modal analysis method. The effects of pollution mass, area, location and material on the modal characteristics of basin insulators are simulated, and the modal test of basin insulators is carried out on the 220 kV GIS model, and related research on the surface contamination detection technology is carried out. The research results show that the pollution mass is the key factor that affects the modal characteristics of the basin insulator, and the pollution area, location and material have little effect on the modal characteristics. When the pollution mass on the surface of the pot insulator increases, the correlation coefficient will decrease significantly, the pollution accumulation value in the 2 000—3 000 Hz vibration signal will increase significantly, and the pollution index in the signal frequency band 2 000—4 000 Hz will increase obviously. This research may provide a method that can be implemented on-site for the live detection of surface contamination of GIS basin insulators.

Keywords: basin insulator; surface contamination detection; modal analysis

与传统敞开式电气设备相比,气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)具有结构紧凑、安装快、环境适应

能力强、安全性高、维护工作量少、检修周期长等优点^[1-5],因而被广泛采用,特别是在高电压等级电网中,其优点更突出。盆式绝缘子作为核心绝缘部件,在 GIS 设备中广泛应用,其绝缘状况与 GIS 的正常运行密切相关。导致绝缘子闪络的原因主要有以下 4 种。第一,盆式绝缘子表面出现裂纹、不平滑、划伤等原因造成其表面粗糙,导致表面电场发生畸变,从而使盆式绝缘子表面闪络电压降低^[6-8]。第二,盆式绝缘子存放环境湿度过大,造成盆式绝缘子表面吸附水分,进而在表面形成水膜,使沿面电压分布不均,使闪络电压显著降低。第三,GIS 运行现场防尘措施不够完善,空气中弥漫的粉尘进入气室内部,粉尘微粒会在垂直气室和管道的水平盆式绝缘子的上表面不断积存,日积月累,附着在盆式绝缘子表面的杂质越积越多,造成盆式绝缘子表面电场分布不均,闪络电压降低,易发生闪络放电^[9]。第四,隔离开关或者断路器动作时触头碰撞会产生金属微粒,金属微粒在电场作用下附着在绝缘子表面^[10],导致绝缘子表面电场畸变,使得闪络电压降低。可见,导致盆式绝缘子闪络的主要原因是其表面状态发生了改变。其中,最为常见的是盆式绝缘子表面污秽的附着导致电场畸变,进而使闪络电压降低。现场拆开的某附着污秽的 GIS 盆式绝缘子表面状况如图 1 所示,其污秽质量可达到 50 g 以上。基于上述原因,对盆式绝缘子表面污秽状况进行带电检测技术的研究是非常有必要的。

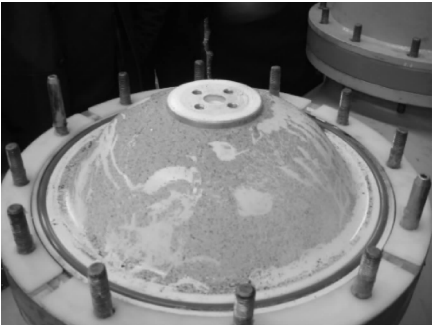


图 1 现场附着污秽的盆式绝缘子表面状况

使用模态分析法诊断机械故障具有灵敏度高、无损检测等优点,因而被广泛应用于 GIS 机械故障检测^[11-15]。法国 Rébillat 等将支柱绝缘子放置在地震模拟平台上,通过检测振动信号,发现一阶谐振频率能分辨支柱绝缘子的损伤程度^[16]。李秀广等对隔离开关触头是否接触良好进行振动信号检测与分析,结果表明触头接触不良会导致振动信号出现 300 Hz 和 600 Hz 的频率分量^[17]。华北电力大学

马朋飞等利用 ANSYS 软件对存在裂纹的绝缘子进行有限元分析,结果表明裂纹会导致绝缘子固有频率下降,尤其当裂纹贯穿绝缘子时,固有频率下降会十分明显^[18]。武汉大学李晓红等采用频谱分析和小波分析结合的方法对支柱绝缘子振动信号进行研究,结果表明该方法能检测 4 mm 深的裂纹损伤^[19]。东北电力大学于卓琦等采用有限元软件计算了正常和含有缺陷的盆式绝缘子的模态频率,研究了气室压力和裂纹大小对模态频率的影响,结果表明模态分析法检测盆式绝缘子机械状况具有可行性^[20]。牛博等通过仿真研究了超声波法检测盆式绝缘子表面污秽状态,但是尚未进行试验研究^[21]。华北电力大学梁伟平等利用有限元分析法研究了污秽绝缘子表面温度分布规律,为红外检测绝缘子污秽程度理论提供了一定的参考^[22]。

目前,鲜见有学者提出检测盆式绝缘子表面污秽的有效方法。基于以上情况,本文对模态分析法检测盆式绝缘子表面污秽状况进行了相关仿真研究和试验研究,并提出污秽检测指标。

1 盆式绝缘子固有模态特性仿真分析

1.1 盆式绝缘子的固有模态

以 220 kV 盆式绝缘子为研究对象,建立盆式绝缘子三维模型,如图 2 所示。盆式绝缘子几何尺寸均为实测,外径为 480 mm,厚度为 38 mm,曲面采用圆角处理使其光滑,螺孔直径为 10 mm。

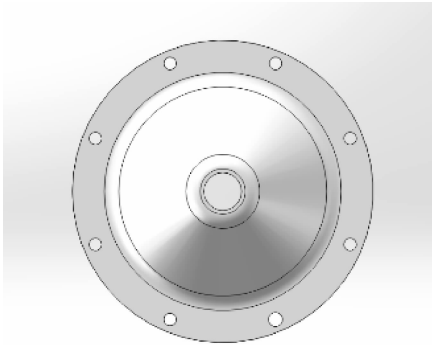


图 2 盆式绝缘子三维模型

将所建盆式绝缘子三维模型导入有限元分析软件进行仿真。盆式绝缘子材料填充选择环氧树脂,污秽的密度设置为尘土堆积密度 $1\ 070\text{ kg/m}^3$,材料的弹性模量和泊松比如表 1 所示。由于固有模态为结构自由振动时的模态特性,因此对模型不必添加任何边界约束条件。

表 1 材料参数

材料	弹性模量/Pa	泊松比
环氧树脂	1.00×10^9	0.38
污秽	1.90×10^{11}	0.16

仿真得到洁净的盆式绝缘子的前 10 阶固有频率如图 3 所示,其对应的振型如图 4 所示。

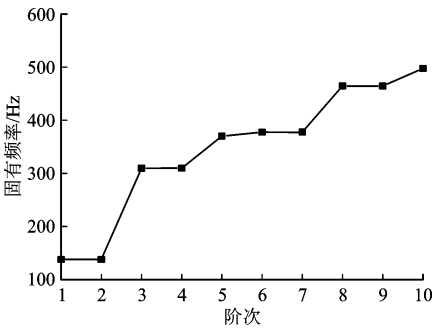
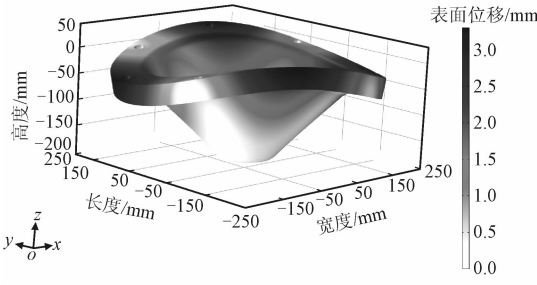
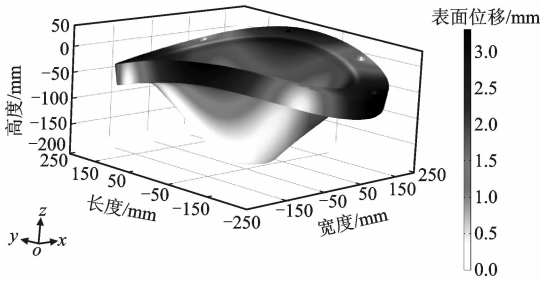


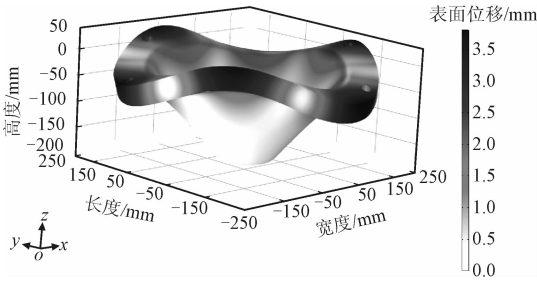
图 3 盆式绝缘子固有频率



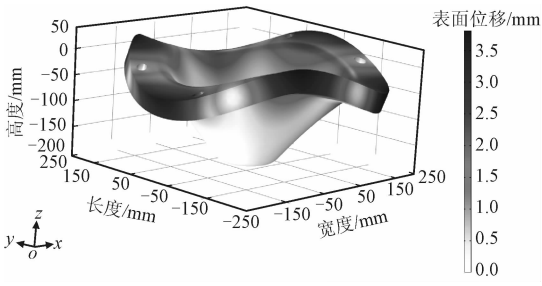
(a)1 阶振型



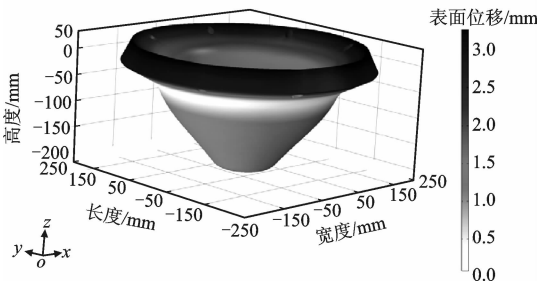
(b)2 阶振型



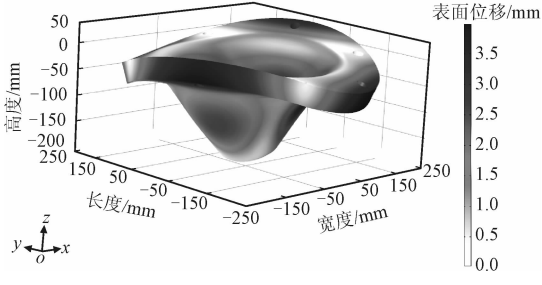
(c)3 阶振型



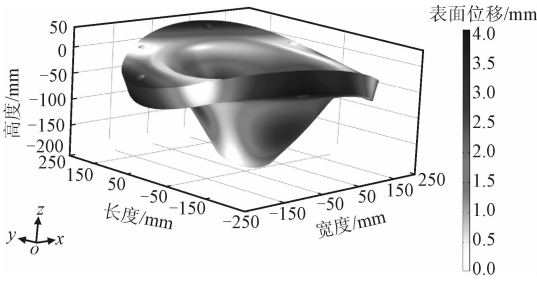
(d)4 阶振型



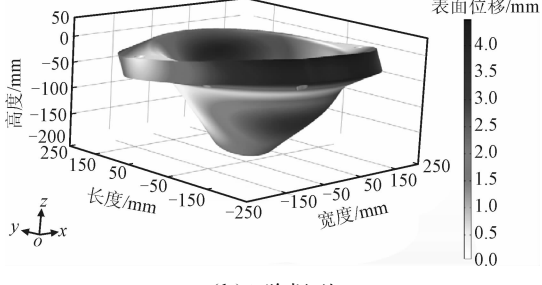
(e)5 阶振型



(f)6 阶振型



(g)7 阶振型



(h)8 阶振型

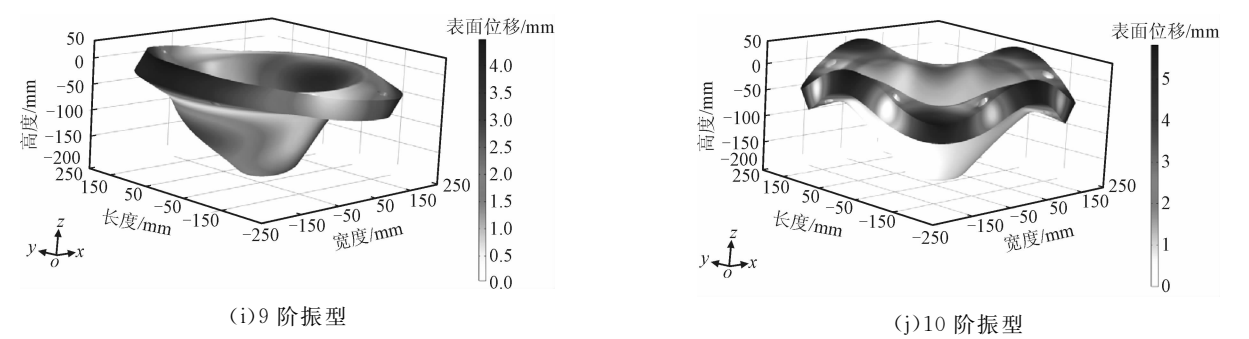


图 4 盆式绝缘子前 10 阶振型

从图 3 可以看到,1、2 阶,3、4 阶,6、7 阶,8、9 阶固有频率分别十分接近,而且它们所对应的振型十分相似,但是模态振型的相位不同,振型相互正交,即出现了重根模态。重根是对循环对称结构的特殊振动特性即振型随激振点移动特性的一种数学描述,出现重根模态的主要原因为盆式绝缘子具有循环对称性。

1.2 污秽质量对盆式绝缘子固有模态的影响

在盆式绝缘子表面覆盖污秽薄面研究污秽质量对其固有模态的影响。设置整个盆式绝缘子表面均匀添加污秽,污秽种类为非导电性污秽。通过对无污秽(0 g)和添加 50、100、200、300 g 污秽 5 种情况进行固有频率仿真,得到 1~14 阶固有频率结果如图 5 所示。从图 5 可以看到,添加污秽之后,每一阶的固有频率都会上升,而且污秽质量越大固有频率越高。证明污秽足以改变盆式绝缘子的固有频率,改变其模态特性。

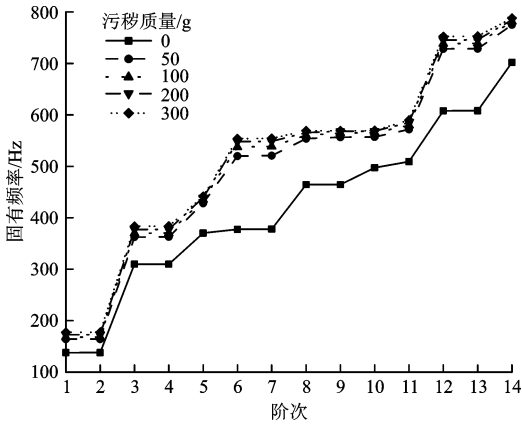


图 5 污秽质量对绝缘子固有频率的影响

1.3 污秽位置对盆式绝缘子固有模态的影响

设置污秽质量为 100 g,污秽种类为非导电性污秽,污秽面积为盆式绝缘子表面积的 1/4。污秽位置示意图如图 6 所示,其中阴影部分为污秽。

对以上 4 种污秽情况进行仿真得到固有频率如

图 7 所示。从图 7 可以看出,4 种污秽情况下绝缘子的固有频率差异十分微小,这是因为从空间上看,4 种污秽实际是对称分布的,可通过空间旋转重合。无污秽时第 8、9 阶是重根模态,但是添加 1/4 面积的污秽之后,第 8、9 阶的重根模态现象消失,这是因为添加污秽对其循环对称结构造成了一定程度的破坏。

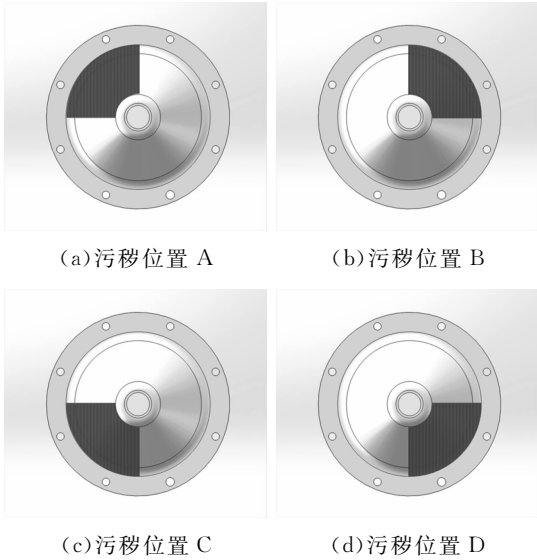


图 6 污秽位置示意图

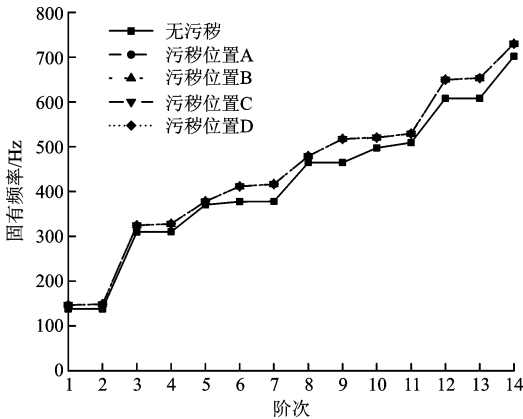


图 7 污秽位置对绝缘子固有频率的影响

1.4 污秽面积对盆式绝缘子固有模态的影响

设置污秽质量为 100 g,污秽种类为非导电性污秽,仅改变污秽面积,研究污秽面积对盆式绝缘子固有频率的影响。污秽面积设置为 3 种情况,即 1/3 盆式绝缘子表面积、2/3 盆式绝缘子表面积和整个盆式绝缘子表面。3 种污秽分布面积示意图如图 8 所示,对 3 种污秽分布情况进行仿真得到如图 9 所示结果。

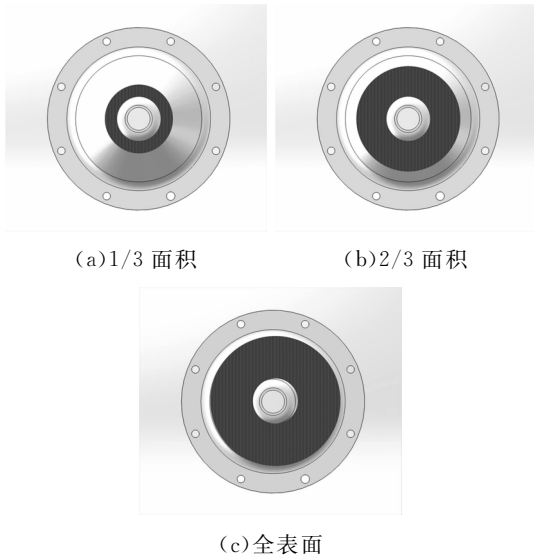


图 8 污秽面积示意图

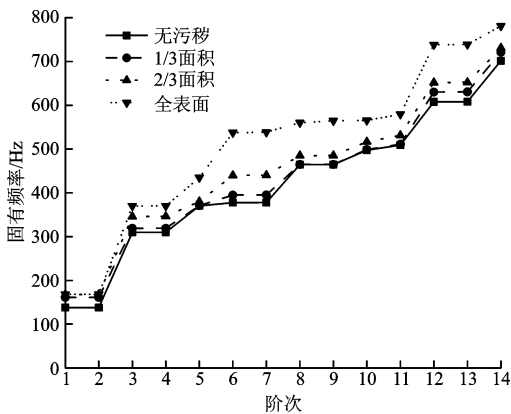


图 9 污秽面积对绝缘子固有频率的影响

从图 9 可以看到,相同质量的非导电性污秽在盆式绝缘子分布的范围越广,则 1~14 阶固有频率越高。

1.5 污秽材料特性对盆式绝缘子固有模态的影响

设置污秽质量为 100 g,污秽覆盖整个盆式绝缘子表面,仅改变污秽材料特性。由于 GIS 盆式绝缘子表面通常会附着开关装置碰撞产生的铝粉,污秽本身受潮也会改变自身刚性,因此,将污秽沉积物分别设置为尘土和铝粉。铝粉的堆积密度为 1 400

kg/m³,泊松比为 0.35,弹性模量为 6.90×10^{10} Pa,经过计算得到铝粉的厚度为 0.78 mm,尘土污秽厚度为 1 mm。仿真结果如图 10 所示,可以看出,污秽材料特性对绝缘子固有频率的影响十分微小。

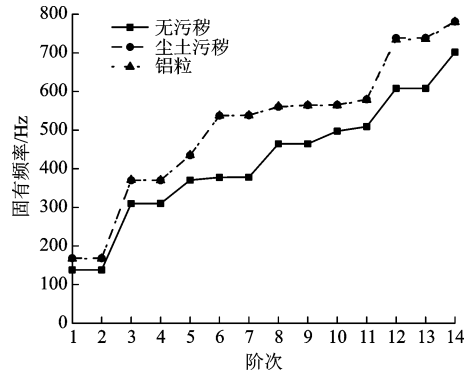


图 10 污秽材料特性对绝缘子固有频率的影响

固有模态仿真结果表明,污秽质量和污秽面积是影响盆式绝缘子模态特性的主要因素,污秽位置对其影响较小。污秽质量越大、污秽面积越广对固有频率改变越大。由于污秽可以改变盆式绝缘子的模态特性,因此,可以通过检测盆式绝缘子模态特性的方式判断其表面污秽状况。

2 盆式绝缘子表面污秽检测试验

2.1 模态特性检测试验系统

盆式绝缘子污秽检测系统由采集卡、振动加速度传感器、力锤和上位机四部分组成。污秽检测系统整体结构示意图如图 11 所示,实物图如图 12 所示。

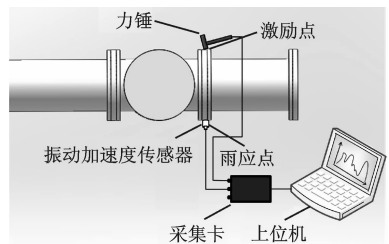


图 11 污秽检测系统结构示意图



图 12 污秽检测系统实物图

由于力锤简单易操作、移动方便、不影响被测结构的动态特性,因而选择力锤作为激励设备。力锤

内部的传感器可以获取激励信号,振动加速度传感器接受振动响应信号,通过采集卡采集激励信号和响应信号将其传输到上位机的数据处理软件中,然后进行数据处理以及模态特征提取,经过分析得到盆式绝缘子表面的污秽状况。由于力锤的击振能量有限,因此传感器布置的响应点离激励点的位置不能太远,太远会导致信号衰减太快,损失大量的信息。选择盆式绝缘子裸露在空气中的部分作为力锤信号的激励点。为了利于力锤的敲击,选择盆式绝缘子的上部,激励点的具体位置如图 11 所示。对 GIS 筒体和盆式绝缘子上大量测试点的试验表明,在盆式绝缘子正对激励点最下方的位置布置振动传感器最能反映盆式绝缘子的表面状态,响应点位置如图 11 所示。力锤敲击盆式绝缘子后,盆式绝缘子在垂直方向的振动最为剧烈,一旦盆式绝缘子表面附着污秽将会最明显地反映出来,而且该点的测试结果很稳定。

模态试验过程中用到的仪器有 UA328 采集卡、SALC05KE 力锤、15117 振动加速度传感器以及上位机,其中力锤和加速度传感器均为电压信号输出。UA328 采集卡、SALC05KE 力锤、15117 加速度传感器的主要参数分别如表 2~表 4 所示。

表 2 UA328 采集卡的主要参数

性能参数	数值
分辨率/bit	16
精度	>0.02%(满量程)
最高采样频率/kHz	80
输入阻抗/MΩ	>1
采样时钟	10M 晶振

表 3 SALC05KE 力锤的主要参数

性能参数	数值
灵敏度/(mV·N ⁻¹)	0.989
测量范围/N	0~5
输出阻抗/Ω	<100
工作电压/V	18~28
工作电流/mA	2~10
激励信号频率范围/Hz	0~5

污秽检测试验在 220 kV GIS 模型上进行,通过力锤在竖直方向敲击盆式绝缘子上部激励盆式绝缘子及其附近结构振动,振动加速度传感器紧贴盆式绝缘子正下方接收响应信号。对激励信号和响应信号进行快速傅里叶变换,在对应频率信号点处用响

应信号幅值除以激励信号幅值,可得到该盆式绝缘子的频响函数曲线。频响函数曲线与激励信号和响应信号均无关,仅仅与盆式绝缘子本身结构的模态特性相关,因而可以进行多次重复试验得到频响函数曲线,然后在每一个频率点处取平均值以减小试验误差。本文实测到的频响函数曲线均为 20 次重复试验的平均值。

表 4 15117 振动加速度传感器的主要参数

性能参数	数值
灵敏度/(mV·m ⁻¹ ·s ⁻²)	30.66
分辨率/(m·s ⁻²)	3.92×10 ⁻⁴
频率范围(±5%)/Hz	1.0~4 000
加速度范围/(m·s ⁻²)	±163.66
可承受的最大加速度/(m·s ⁻²)	1 470
敏感元件材料	压电陶瓷

2.2 盆式绝缘子表面污秽模态特性试验结果

2.2.1 污秽质量对盆式绝缘子模态特性曲线的影响 将污秽面积设置为整个盆式绝缘子表面,污秽种类为非导电性污秽(由细沙和尘土混合然后加入少量水构成)。尽量使污秽涂抹均匀,研究污秽质量对盆式绝缘子模态特性的影响。经过调研已拆卸的 GIS 内部的盆式绝缘子,发现其表面污秽质量可以达到 50~300 g。将污秽质量按照 50 g 的梯度设置,分别为 0(无污秽)、50、100、150、200、250、300 g,研究污秽质量对盆式绝缘子模态特性的影响。试验得到的模态特性曲线如图 13 所示,可观察到,在 2 000 Hz 以上的频段,随着污秽质量的增加模态特性曲线会明显偏离无污秽情况下的曲线。

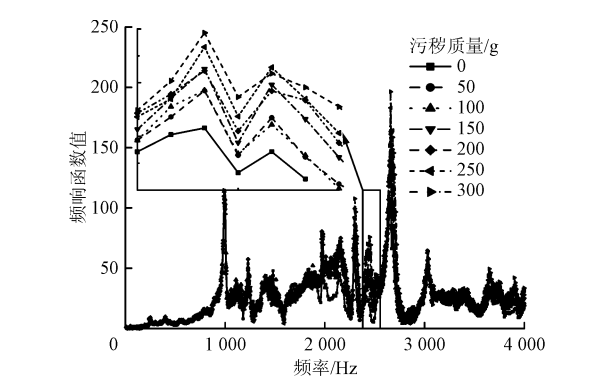


图 13 污秽质量对盆式绝缘子模态特性曲线的影响

2.2.2 污秽位置对盆式绝缘子模态特性曲线的影响 将污秽质量固定为 150 g,污秽面积设置为盆式绝缘子表面积的 1/4,污秽种类设置为非导电性污秽,盆式绝缘子表面有金属屏蔽层,改变污秽的位

置,污秽的分布位置与图 5 所示一致,研究其对结构模态特性的影响。各种污秽位置下的模态特性曲线如图 14 所示。可以看出,4 种污秽情况下的模态特性曲线接近重合,无污秽情况下的模态特性曲线与有污秽情况下差异较大。

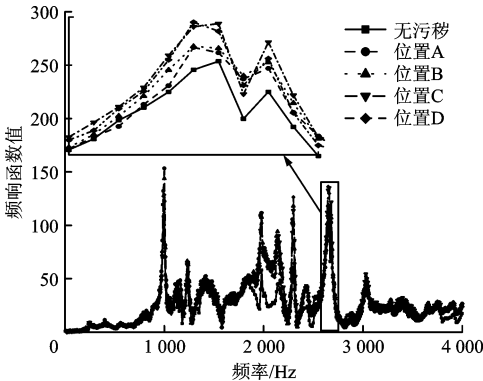


图 14 污秽位置对盆式绝缘子模态特性曲线的影响

2.2.3 污秽面积对盆式绝缘子模态特性曲线的影响 将污秽质量固定为 150 g,污秽种类设置为非导电性污秽。污秽面积设置为 3 种情况,1/3 盆子表面积、2/3 盆子表面积和盆式绝缘子全表面,研究其对结构模态特性的影响。试验得到的 3 种污秽面积下的模态特性曲线如图 15 所示,可观察到,3 种污秽面积情况下的模态特性曲线近似重合,却偏离无污秽情况下的曲线。

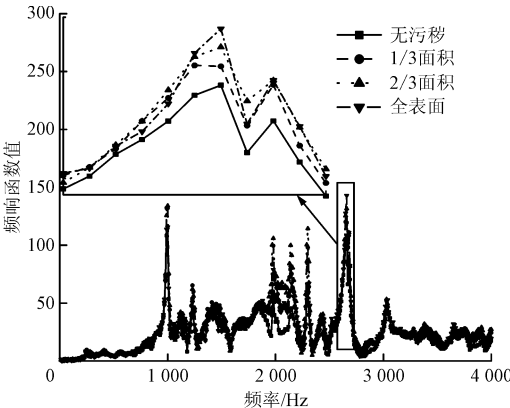


图 15 污秽面积对盆式绝缘子模态特性曲线的影响

2.2.4 污秽材料特性对盆式绝缘子模态特性曲线的影响 将污秽质量固定为 150 g,污秽面积覆盖整个盆式绝缘子表面,改变污秽的材料特性,污秽 1 为 150 g 尘土污秽、污秽 2 为 50 g 铝粉+100 g 尘土、污秽 3 为 100 g 铝粉+50 g 尘土,研究污秽材料特性对盆式绝缘子结构模态特性的影响。无污秽和 3 种污秽情况下的频响函数曲线如图 16 所示,可观察到,在大部分频段,3 种污秽材料特性下的模态特性

曲线近似重合,却偏离无污秽材料情况下的曲线。

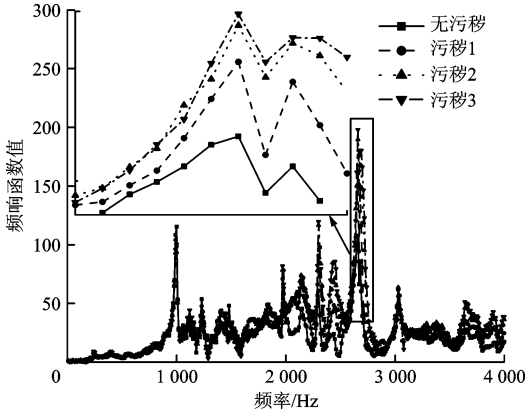


图 16 污秽材料特性对盆式绝缘子模态特性曲线的影响

3 分析与讨论

GIS 盆式绝缘子结构可以看作多自由度线性系统,其振动微分方程可以表示为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \tag{1}$$

式中: M 、 C 、 K 分别代表质量矩阵、阻尼矩阵和静止矩阵; $\ddot{x}(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $x(t)$ 分别为加速度、速度和位移矢量; t 为振动时间; $f\{t\}$ 为动力矢量。

对方程(1)进行处理,可导出频响矩阵

$$H(j\omega) = \sum_{r=1}^N \left[\frac{\{\varphi_r\} \{\varphi_r\}^T}{2j(j\omega - p_r)} + \frac{\{\varphi_r^*\} \{\varphi_r^*\}^T}{2j(j\omega - p_r^*)} \right] = \begin{bmatrix} H_{11}(j\omega) & H_{12}(j\omega) & \cdots & H_{1m}(j\omega) \\ H_{21}(j\omega) & H_{22}(j\omega) & \cdots & H_{2m}(j\omega) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{m1}(j\omega) & H_{m2}(j\omega) & \cdots & H_{mm}(j\omega) \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: m 、 N 分别为自由度和节点总数;上角标 T 和 * 分别为转置矩阵符号和共轭符号。式(2)可进一步表达为留数矩阵,表达式如下

$$H(j\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\begin{bmatrix} R_r(1,1) & R_r(1,2) & \cdots & R_r(1,m) \\ R_r(2,1) & R_r(2,2) & \cdots & R_r(2,m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_r(m,1) & R_r(m,2) & \cdots & R_r(m,m) \end{bmatrix}}{2j(j\omega - p_r)} - \sum_{r=1}^N \frac{\begin{bmatrix} R_r^*(1,1) & R_r^*(1,2) & \cdots & R_r^*(1,m) \\ R_r^*(2,1) & R_r^*(2,2) & \cdots & R_r^*(2,m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_r^*(m,1) & R_r^*(m,2) & \cdots & R_r^*(m,m) \end{bmatrix}}{2j(j\omega - p_r^*)} = \sum_{r=1}^N \left[\frac{R_r}{2j(j\omega - p_r)} - \frac{R_r^*}{2j(j\omega - p_r^*)} \right] \tag{3}$$

式中: R_r 是第 r 阶模态的留数矩阵。根据方程(3),

在 GIS 盆式绝缘子结构的自由度 Y 和 X 之间的频响函数可表示为式(4), $\mathbf{H}_{\text{XY}}(\text{j}\omega)$ 表示在自由度 X 处激励,在自由度 Y 处的频响函数。

$$\mathbf{H}_{\text{YX}}(\text{j}\omega) = \sum_{r=1}^N \left[\frac{\mathbf{R}_r(\text{Y}, \text{X})}{2\text{j}(\omega - p_r)} - \frac{\mathbf{R}_r^*(\text{Y}, \text{X})}{2\text{j}(\omega - p_r^*)} \right] \quad (4)$$

对模态试验测量得到的频响数据拟合可获得 GIS 盆式绝缘子结构的模态模型,当结构模态特性确定时,其动态特性也就唯一确定^[23],当结构模态特性发生改变时其动态特性也会发生改变,而激励信号的幅值(与力锤敲击力度有关)则不会影响结构本身的模态特性。模态试验结果表明,污秽对频响函数的影响主要集中在2 000~4 000 Hz 频段,污秽分布对每一个频率点对应的幅值影响规律并不一致,对某个频段内的频响函数信号进行整体分析更便于识别盆式绝缘子表面的污秽状况。

为了量化分析盆式绝缘子表面污秽对其模态特性的影响,定义 3 个衡量污秽状态的指标,并将 4 000 Hz 以内的振动信号分为 4 个频段,分别为 0~1 000、1 000~2 000、2 000~3 000、3 000~4 000 Hz,3 个指标分别为相关系数 r 、污秽累加值 s 和污秽指数 p 。相关系数用于衡量4 000 Hz 以内的整体信号。污秽累加值和污秽指数分别对 4 个频段的信号进行单独分析,前者用于衡量各频段信号的绝对变化量,后者用于衡量各频段信号的相对变化量。污秽对某个单一频率对应的幅值影响很小,但是对 2 000~4 000 Hz 频段内的模态特性均有影响,因此可对单一频率下幅值的改变进行累加,使得检测灵敏度大幅提升。结合 3 个指标可对盆式绝缘子的污秽状况有可靠清晰的判断。

在盆式绝缘子无污秽情况下进行污秽检测试验得到两组数据,然后在盆式绝缘子表面添加污秽情况下进行污秽检测得到第三组数据。假设无污秽情况下第一组频响函数信号为变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$,第二组频响函数信号为变量 $w_1, w_2, \dots, w_n$,添加污秽后得到的频响函数信号为 $y_1, y_2, \dots, y_n$,则变量 x 和 y 之间的相关系数 r 可表示为

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}l_{yy}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

污秽累加值 s 的计算公式如下

$$s = \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (6)$$

污秽指数 p 的计算公式如下

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{\sum_{i=1}^n |w_i - x_i|} \quad (7)$$

污秽指标的对比方法为:把两组无污秽情况下的对照组计算出的污秽指标与对照组和试验组(有污秽)计算出的污秽指标进行对比。该对比方法可进一步减小试验本身带来的误差。

3.1 污秽质量对盆式绝缘子模态特性指标的影响

0、50、100、150、200、250、300 g 污秽下频响函数的相关系数如表 5 所示。可以看出,污秽质量越大,对相关系数的影响越大。

表 5 污秽质量对频响函数相关系数的影响

	0 g	50 g	100 g	150 g	200 g	250 g	300 g
0 g	1						
50 g	0.96	1					
100 g	0.94	0.99	1				
150 g	0.88	0.98	0.97	1			
200 g	0.85	0.96	0.95	0.99	1		
250 g	0.82	0.94	0.92	0.98	0.98	1	
300 g	0.79	0.91	0.89	0.96	0.97	0.99	1

随着污秽质量的增加,相关系数的变化趋势如图 17 所示。从图 17 可以看到,当盆式绝缘子表面的污秽超过 50 g 时,有污秽情况与无污秽情况下的相关系数随着污秽质量的增加出现明显的下降,表明污秽质量的增加逐渐改变了盆式绝缘子的表面状况,因此,可以利用相关系数判断盆式绝缘子表面的污秽状况。

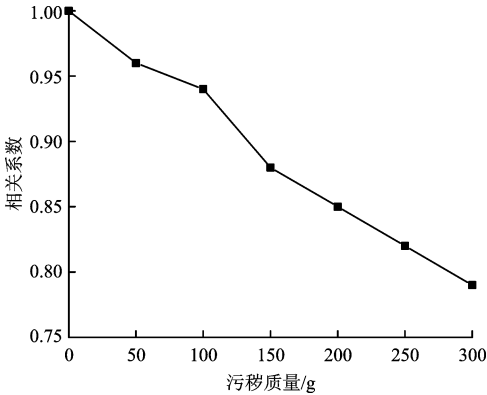


图 17 污秽质量对频响函数相关系数的影响

不同污秽质量情况下的污秽累加值 s 的计算结果如图 18 所示。从图 18 可以看到,随着污秽质量的增加,0~1 000 Hz 信号的污秽累加值几乎没有

发生明显的变化,1 000~2 000 Hz 以及 3 000~4 000 Hz 信号的污秽累加值在污秽质量超过 150 g 时增加较为明显,2 000~3 000 Hz 信号的污秽累加值随着污秽质量的增加明显增大,且在污秽质量 50 g 时已经较为明显。表明污秽质量对 2 000~3 000 Hz 频段内信号的污秽累加值 s 影响更加显著,该频段内污秽累加值更能反映污秽质量的变化情况。

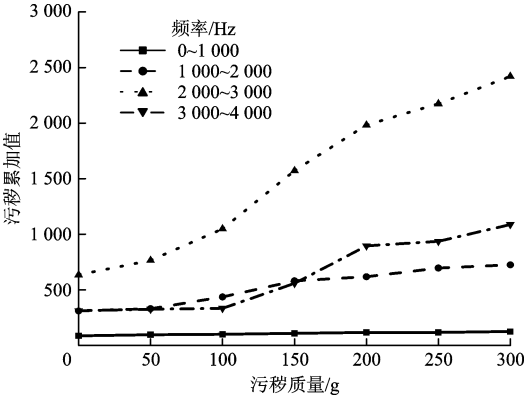


图 18 污秽质量对污秽累加值的影响

不同污秽质量情况下的污秽指数 p 的计算结果如图 19 所示。从图 19 中可以看到,随着污秽质量的增加,0~1 000 Hz 信号的污秽指数几乎都在 1 附近,1 000~2 000 Hz、2 000~3 000 Hz 以及 3 000~4 000 Hz 信号的污秽指数随着污秽质量的增加明显增大,而且在污秽质量 100 g 时已经较为明显,其中 2 000~4 000 Hz 频段信号更加显著。表明添加污秽对 2 000~4 000 Hz 信号的污秽指数影响更加显著,该频段内污秽指数更能反映污秽质量的变化情况。

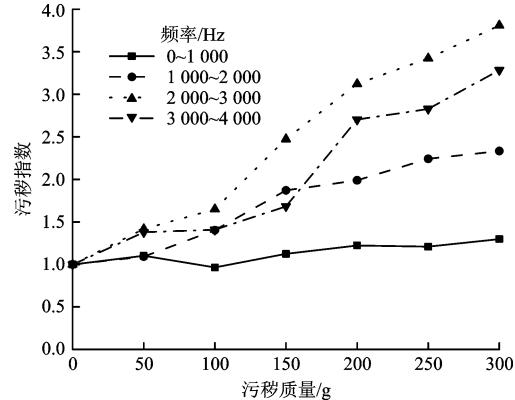


图 19 污秽质量对污秽指数的影响

盆式绝缘子表面污秽积聚质量越大,对其表面电场分布的畸变就会越严重,其电气绝缘性能就会大幅下降,当下降到一定程度时,很容易导致局部放电甚至闪络的发生,严重影响 GIS 的安全运行。因

此,盆式绝缘子表面污秽质量与其电气绝缘性能密切相关,可通过检测表面污秽质量判断盆式绝缘子的电气绝缘性能。

3.2 污秽位置对盆式绝缘子模态特性指标的影响

污秽位置 A、位置 B、位置 C、位置 D 情况下和无污秽情况下频响函数的相关系数如表 6 所示。从表 6 可以看出,污秽涂抹在盆式绝缘子 A、B、C、D 4 个位置时与无污秽情况下的相关系数都在 0.89 左右,变化很小,而且污秽涂抹在盆式绝缘子 A、B、C、D 4 个位置时它们之间的相关系数普遍在 0.96~0.99 之间,表明相关系数无法区分出污秽的位置。

表 6 污秽位置对相关系数的影响

	无污秽	位置 A	位置 B	位置 C	位置 D
无污秽	1				
位置 A	0.88	1			
位置 B	0.88	0.99	1		
位置 C	0.89	0.96	0.98	1	
位置 D	0.90	0.97	0.98	0.99	1

3.3 污秽面积对盆式绝缘子模态特性指标的影响

3 种污秽面积和无污秽情况下模态特性的相关系数如表 7 所示。从表 7 可以看出,3 种污秽面积与无污秽情况下的相关系数较为接近,单独从相关系数来看不能够区分污秽的面积,表明污秽面积对绝缘子模态特性的影响较小。

表 7 污秽面积对相关系数的影响

	无污秽	1/3 面积	2/3 面积	全面积
无污秽	1			
1/3 面积	0.89	1		
2/3 面积	0.88	0.98	1	
全面积	0.90	0.96	0.95	1

3.4 污秽材料特性对盆式绝缘子模态特性指标的影响

无污秽和 3 种材料特性污秽情况下模态特性的相关系数如表 8 所示。从表 8 可以看出,当污秽中铝粉的比例上升时,相关系数未发生明显改变,即污

表 8 污秽材料特性对相关系数的影响

	无污秽	污秽 1	污秽 2	污秽 3
无污秽	1			
污秽 1	0.88	1		
污秽 2	0.88	0.94	1	
污秽 3	0.90	0.96	0.98	1

秽材料特性对结构模态特性的影响很小。

试验模态分析结果表明,污秽质量是影响盆式绝缘子模态特性的关键因素,实际工程中污秽随机分布在盆式绝缘子表面,但污秽面积和污秽位置对其模态特性影响非常小,因此,污秽的随机分布不会对模态分析法检测污秽造成影响。对于运行状态下的GIS盆式绝缘子表面状态检测,必须考虑GIS本身的振动。分析认为,GIS本身的振动对盆式绝缘子模态检测的影响很小,原因有二。其一,根据当前GIS现场振动检测的经验,正常情况下,GIS整体振动信号的频率为100 Hz^[24],而盆式绝缘子表面污秽状态检测所关注的频率范围主要集中在2 000~4 000 Hz,即使GIS运行出现机械故障,其大多情况下异常频率信号范围也在1 000 Hz以内,很少会出现频率超过2 000 Hz的振动信号;其二,GIS本身的振动信号幅值远远低于锤击检测到的振动信号幅值,所以其对模态检测影响很小。

当盆式绝缘子表面附着污秽时,其频响函数曲线与无污秽情况下频响函数曲线的相关系数会随着污秽质量的增加明显减少,当 $0.9 \leq r < 0.95$ 时,可认为污秽程度为轻;当 $0.8 \leq r < 0.9$ 时,可认为污秽程度为中;当 $r < 0.8$ 时,可认为污秽程度为重。污秽对频响函数曲线的影响主要集中在2 000~4 000 Hz, s 随着污秽质量的增大在2 000~3 000 Hz信号频段会显著增大, p 随着污秽质量的增大在2 000~4 000 Hz信号频段会从1.5上升到4。同时,污秽对0~2 000 Hz以内的振动频响函数信号影响较小, s 和 p 均未发生较大的变化。因此,盆式绝缘子表面污秽对盆式绝缘子模态特性的影响主要集中在高频段2 000~4 000 Hz,这是因为污秽在盆式绝缘子表面的集中区域十分有限,因而更易对高频段信号造成影响,而覆盖在GIS筒体表面的污秽由于覆盖区域很广,影响到GIS整体结构的模态特性,因而更易对低频段信号造成影响。为排除GIS其他区域的未知因素影响,应对0~4 000 Hz以内的振动频响函数信号进行3个污秽指标的综合分析,进而判定盆式绝缘子表面污秽状况。

由于振动模态与研究对象本身结构、材料等特性有关,据此推论,污秽对不同电压等级、尺寸差异较大的盆式绝缘子振动模态的影响是存在差异的,因此,其他电压等级的GIS中盆式绝缘子污秽检测方法有待于进一步研究。

4 结 论

(1)通过仿真研究污秽质量、面积、位置和材料

特性对盆式绝缘子固有模态的影响,发现污秽质量增加时,绝缘子前14阶固有频率增大,污秽分布不对称则会使其重根模态现象消失。

(2)通过试验研究污秽质量、面积、位置和材料特性对盆式绝缘子振动模态的影响,发现污秽质量是影响盆式绝缘子模态特性的主要因素,污秽面积、位置和材料特性对其模态特性的影响较小。

(3)提出了基于模态分析的污秽检测方法,并给出了相关系数、污秽累加值和污秽指数3个衡量指标。当盆式绝缘子表面污秽质量增加时,相关系数会明显减小,2 000~3 000 Hz信号的污秽累加值会显著增大,2 000~4 000 Hz内信号的污秽指数会明显增大。

参考文献:

- [1] 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): 116-134.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 116-134.
- [2] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007: 2-10.
- [3] 安滨. 1 000 kV GIS设备故障检测及实例分析[J]. 电工电气, 2019(8): 46-49.
AN Bin. Fault detection and case analysis of 1 000 kV GIS equipment [J]. Electrician Electric, 2019(8): 46-49.
- [4] 路士杰,张连根,周宏扬,等. 温度对工频下环氧支柱沿面闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2774-2781.
LU Shijie, ZHANG Liangen, ZHOU Hongyang, et al. Influence of temperature on the flashover voltage of epoxy pillars at power frequency [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2774-2781.
- [5] 丁登伟,唐诚,高文胜,等. GIS中典型局部放电的频谱特征及传播特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3243-3251.
DING Dengwei, TANG Cheng, GAO Wensheng, et al. Spectrum characteristics and propagation characteristics of typical partial discharges in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3243-3251.
- [6] 肖燕,郁惟镛. GIS中局部放电在线监测研究的现状与展望[J]. 高电压技术, 2005(1): 49-51.
XIAO Yan, YU Weiyong. The status and prospects of on-line partial discharge monitoring research in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2005(1): 49-51.

- [7] 李锦辉. GIS交流耐压试验盆式绝缘子闪络的原因及防范措施[J]. 电气技术, 2018, 19(9): 133-135, 141.
LI Jinhui. Causes of flashovers of basin insulators in GIS AC withstand voltage test [J]. Electrical Engineering, 2018, 19(9): 133-135, 141.
- [8] 刘荣海, 臧春艳, 杨迎春, 等. 盆式绝缘子开裂故障的无损检测技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 151-155.
LIU Ronghai, ZANG Chunyan, YANG Yingchun, et al. Research on nondestructive testing technology of basin insulator cracking failure [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 151-155.
- [9] 牛博, 杨鼎革, 于义亮, 等. 基于超声波的 GIS 盆式绝缘子表面污秽检测技术仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 105-110.
NIU Bo, YANG Dingge, YU Yiliang, et al. Simulation of surface contamination detection technology of GIS basin insulator based on ultrasound [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 105-110.
- [10] 张璐, 王森, 孙蕾, 等. 金属微粒对 GIS 中绝缘子冲击闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2807-2814.
ZHANG Lu, WANG Sen, SUN Lei, et al. Impact of metal particles on impact flashover characteristics of insulators in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2807-2814.
- [11] 郭翠娟, 杨明珠, 荣锋, 等. 基于振动响应分析的盆式绝缘子损伤检测系统[J]. 传感技术学报, 2016, 29(10): 1606-1612.
GUO Cuijuan, YANG Mingzhu, RONG Feng, et al. Basin insulator damage detection system based on vibration response analysis [J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(10): 1606-1612.
- [12] 黄清, 魏旭, 许建刚, 等. 基于振动原理的 GIS 母线触头松动缺陷诊断技术研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 99-104, 108.
HUANG Qing, WEI Xu, XU Jiangang, et al. Research on diagnosis technology of loose contact defect of GIS bus bar based on vibration principle [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 99-104, 108.
- [13] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠. 基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011(12): 110-115.
HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan. Method for mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2011(12): 110-115.
- [14] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J]. 高压电器, 2015(8): 171-179.
QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Summary of mechanical failure analysis and diagnosis technology for high voltage isolation switch [J]. High Voltage Apparatus, 2015(8): 171-179.
- [15] 孙来军, 胡晓光, 纪延超. 一种基于振动信号的高压断路器故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006(6): 159-163.
SUN Laijun, HU Xiaoguang, JI Yanchao. A new method for fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on vibration signals [J]. Proceedings of the CSEE, 2006(6): 159-163.
- [16] RÉBILLAT M, BARTHES C B, MECHBAL N, et al. Structural health monitoring of high voltage electrical switch ceramic insulators in seismic areas [C]//7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Nantes, France; EWSHM, 2014: 2183-2190.
- [17] 李秀广, 吴旭涛, 朱洪波, 等. 基于振动信号的 GIS 触头接触异常研究分析[J]. 高压电器, 2016(10): 165-169.
LI Xiuguang, WU Xutao, ZHU Hongbo, et al. Research and analysis of contact abnormality of GIS contact based on vibration signal [J]. High Voltage Apparatus, 2016(10): 165-169.
- [18] 马鹏飞, 史腾飞, 刘云海, 等. 振动法评估盆式绝缘子机械状态的分析[J]. 云南电力技术, 2017(3), 45(3): 19-22.
MA Pengfei, SHI Tengfei, LIU Yunhai, et al. Analysis of mechanical condition of basin insulators by vibration method [J]. Yunnan Electric Power Technology, 2017(3): 19-22.
- [19] 李晓红, 郭慧英, 刘云, 等. 基于振动法检测的瓷绝缘子损伤探讨[J]. 高压电器, 2009(1): 106-108.
LI Xiaohong, GUO Huiying, LIU Yun, et al. Discussion on damage of porcelain insulators based on vibration detection [J]. High Voltage Apparatus, 2009(1): 106-108.
- [20] 于卓琦, 高晋文, 王克胜, 等. 基于模态分析的 GIS 盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 53(9): 100-104.
YU Zhuoqi, GAO Jinwen, WANG Kesheng, et al. Research on GIS basin insulator crack defect detection method based on modal analysis [J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2019, 53(9): 100-104.
- [21] 牛博, 杨鼎革, 于义亮, 等. 基于超声波的 GIS 盆式绝缘子表面污秽检测技术仿真研究[J]. 高压电器,

2018, 54(11): 97-102.

NIU Bo, YANG Dingge, YU Yiliang, et al. Simulation research on surface contamination detection technology of GIS basin insulators based on ultrasonic [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 97-102.

[22] 梁伟平, 张旭, 高敏. 基于有限元的积污绝缘子温度场研究 [J]. 电力科学与工程, 2019(10): 36-41.

LIANG Weiping, ZHANG Xu, GAO Min. Research on temperature field of contaminated insulator based on finite element [J]. Electric Power Science and Engineering, 2019(10): 36-41.

[23] 刘万锋, 张维锋. 一种快速方便的试验模态分析方法: 锤击法 [J]. 西安公路学院学报, 1993, 13(4): 80-85.

LIU Wanfeng, ZHANG Weifeng. A fast and convenient experimental modal analysis method-hammering method [J]. Journal of Xi'an Highway University, 1993, 13(4): 80-85.

[24] 刘媛, 杨景刚, 贾勇勇, 等. 基于振动原理的 GIS 隔离开关触头接触状态检测技术 [J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1591-1599.

LIU Yuan, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Contact state detection technology of GIS disconnect switch based on vibration principle [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1591-1599.

[本刊相关文献链接]

吴泽华, 田汇冬, 靳守锋, 等. 252 kV 紧凑型气体绝缘金属封闭输电线路三相盆式绝缘子结构综合优化. 2020, 54(12): 138-146. [doi:10.7652/xjtuxb202012017]

贾云飞, 高璐, 汲胜昌, 等. 1 100 kV 气体绝缘金属封闭输电线路用三支柱绝缘子电气性能优化. 2020, 54(7): 168-179. [doi:10.7652/xjtuxb202007020]

郭小凯, 卢雨欣, 孙廷玺, 等. 用于电缆局部放电检测的储能式交流激励型振荡波测试系统. 2020, 54(10): 100-107. [doi:10.7652/xjtuxb202010012]

李乃一, 彭宗仁. 气固绝缘系统电场模型的建立与求解方法. 2019, 53(6): 151-160, 168. [doi:10.7652/xjtuxb201906020]

庞培川, 孙泽明, 张芊, 等. 直流电压作用下极不均匀电场中 SF₆/N₂ 混合气体局部放电起始特性研究. 2019, 53(4): 44-50. [doi:10.7652/xjtuxb201904007]

韩旭涛, 刘泽辉, 张亮, 等. GIS 中局部放电光信号传播特性仿真研究. 2018, 52(6): 128-134. [doi:10.7652/xjtuxb201806019]

赵煦, 刘晓航, 孟永鹏, 等. 采用小波包树能量矩阵奇异值分解的局部放电模式识别. 2017, 51(8): 116-121. [doi:10.7652/xjtuxb201708019]

崔彦捷, 彭平, 曹沛, 等. 针板电极下局部放电对油浸绝缘纸板表面的影响. 2017, 51(4): 37-44. [doi:10.7652/xjtuxb201704006]

邵先军, 何文林, 刘石, 等. 电力设备局部放电特高频电磁波数值计算技术研究. 2016, 50(12): 24-31. [doi:10.7652/xjtuxb201612005]

李文栋, 刘哲, 有晓宇, 等. 叠层式介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化. 2016, 50(10): 19-26. [doi:10.7652/xjtuxb201610004]

邵先军, 何文林, 刘石, 等. 电力设备局部放电特高频电磁波数值计算技术研究. 2016, 50(12): 24-31. [doi:10.7652/xjtuxb201612005]

张亮, 车斌, 韩旭涛, 等. 负极性振荡雷电冲击电压下 SF₆ 尖板模型局部放电特性. 2016, 50(4): 108-116. [doi:10.7652/xjtuxb201604017]

钟理鹏, 汲胜昌, 刘凯, 等. 低微水的体积分数对 SF₆ 局部放电及分解特性的影响. 2016, 50(3): 112-119. [doi:10.7652/xjtuxb201603018]

(编辑 亢列梅)