

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.12.004

GIS设备发热研究进展

黄孟丹, 肖 纯, 杨芷宁, 庞文龙, 吴细秀
(武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关设备(GIS), 由于其封闭特性, 内部故障难以及时检测。对GIS设备的故障进行分析, 发现GIS的发热问题突出, 常造成设备烧毁甚至系统停电。通过分析GIS设备的发热现状, 发热理论研究 and 发热检测方式, 研究GIS设备的发热进展。结果表明要使温升计算精确有效, 需要考虑多场耦合, 且考虑因素应与计算复杂度、时效性相结合。在GIS设备发热机理的基础上, 简述了GIS设备的各发热故障检测方法, 如回路电阻法、红外测温法和光纤光栅测温, 并进行对比分析, 得到各方法的优缺点。通过讨论GIS设备发热的研究现状及不足, 指出了发展趋势, 为进一步研究GIS设备发热情况提供一定的指导。

关键词: GIS设备; 发热现状; 发热机理; 发热检测方法

Research Progress of GIS Equipment Heating

HUANG Mengdan, XIAO Chun, YANG Zhining, PANG Wenlong, WU Xixiu
(School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: It's difficult to detect the internal faults of gas insulated switchgear (GIS) in time because of its enclosed characteristics. By analyzing the fault of GIS, it's found that the heating problem of GIS is prominent, which often causes the burning of equipment and even the system power failure. By analyzing the heating status, the theoretical studies of heating mechanism and heating detection methods of GIS, the heating progress of GIS was studied. The results show that in order to make the temperature rise calculation accurate and effective, it is necessary to consider the multi-field coupling, which should be combined with the computational complexity and timeliness. On the basis of the heating mechanism of GIS, the detection methods of various heating faults of GIS equipment, such as loop resistance method, infrared temperature measurement method and fiber bragg grating temperature measurement method, are briefly described, and the advantages and disadvantages of each method are compared and analyzed. By discussing the research status and shortcomings of GIS equipment heating, this paper points out the development trend, and provides some guidance for further research on GIS heating.

Key words: GIS; heating status; heating mechanism; heating detection technology

0 引言

GIS存在两种定义——IEC(国际电工委员会)将其定义为“气体绝缘开关设备”(gas insulated switchgear), IEEE(美国电气电子工程师学会)则将其定义为“气体绝缘变电站”(gas insulated substations)^[1], 尽管定义不同, 但均是指气体绝缘金属封闭开关设

备。是除变压器外, 电气一次系统中的高压元件(断路器、隔离开关、接地开关、互感器、母线、避雷器、电缆头, 进出线套管等), 按电气主接线的连接方式紧凑地组合在一起, 并全部安装在充有绝缘性能和灭弧性能优异的六氟化硫(sulfur hexafluoride, SF₆)气体的金属壳内, 形成密封的高压开关装置, 见图1。GIS具有占地面积小、运行可靠、恶劣环境保护、抗

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51107093); 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金。

Project Supported by National Science Foundation of China(51107093), State key Laboratory Fund of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology).

震、清洁要求最低、安装周期短、使用寿命长、噪声小等优点,在电力系统得到了广泛的应用^[1]。



图1 某GIS变电站图

Fig. 1 Scene of a GIS substation site

尽管GIS有很多优点,但其在运行过程中仍会有各种故障事故发生。如绝缘故障,导体过热故障,机械故障等。其中,热故障是最主要的故障表现形式之一^[2]。热故障会引起一系列事故,通常伴随着闪络、绝缘及短路事故。热故障的发生意味着GIS设备可靠性存在问题,故开展GIS设备发热研究,对保障GIS设备安全运行,提高电网运行的可靠性具有重要意义。为了准确检测GIS设备的发热故障,文中在GIS设备发热现状的基础上,总结其发热原因及传热过程,在此基础上分析了GIS设备的发热计算与发热故障检测方法,为GIS设备发热研究理清了思路。

1 GIS设备发热现状

1.1 GIS设备故障

2006—2015年发生的GIS故障分类见图2。

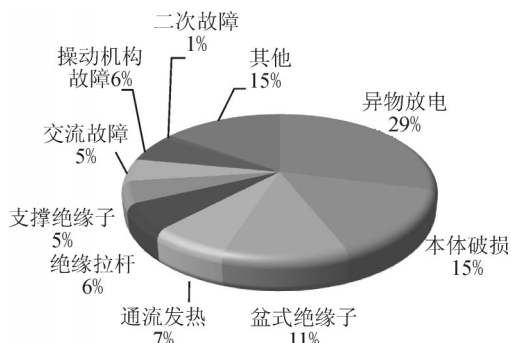


图2 2006—2015年GIS故障分类

Fig. 2 GIS fault classification in 2006—2015

由图2可知,异物放电、本体破损、绝缘子故障、通流发热、绝缘拉杆故障和传动系统故障总占比为78%,且这些故障在发生时,均伴有发热现象,即约78%的故障最终表现为发热。若GIS设备的发热没有得到及时检测和处理,可能造成设备绝缘、接触不良和烧毁等隐患,引发一系列严重的电气事故^[3]。发热故障主要发生在触头及连接处,如GIS隔离开关触头和GIS母线绝缘子,故障特征主要表现为烧

蚀、熏黑或出现粉末状二次产物,见图3。根据南方电网对2010—2015年GIS事故统计分析,导体接头异常温升问题表现突出,2015年接头异常温升占全年GIS故障数量的50%^[4]。由此可见,GIS的异常温升不容忽视,需要对GIS设备的发热开展研究。

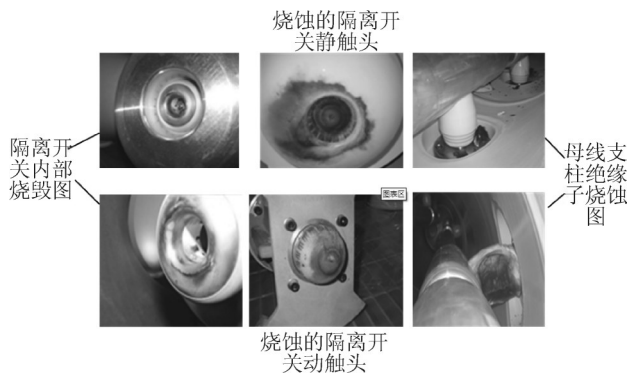


图3 GIS现场发热故障

Fig. 3 Heating fault in GIS field

1.2 GIS设备发热分类

GIS设备的发热按成因划分,可分为电流致热型、电压致热型、磁场致热型和其他类型。

1) 电流致热型设备。电流致热型设备是指因电流效应引起发热的设备,主要特征为导体接触不良。当负荷电流流过导电回路中的金属导体时,引起焦耳损耗

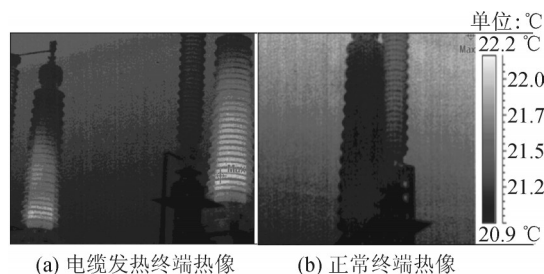
$$P_r = K_f I^2 R \quad (1)$$

式(1)中: K_f 为附加损耗系数,是集肤效应系数与邻近效应系数的乘积; I 为通过的负荷电流; R 为截流导体的直流电阻。

2) 电压致热型设备。电压致热型设备是指由于电压效应引起发热的设备见图4。主要特征为介质损耗增大。介质损耗在GIS中主要指,支柱绝缘子,绝缘穿墙套管等固体绝缘材料,在交变电压作用下引起的能量损耗,其损耗发热功率为

$$P_g = U^2 C \omega \tan \delta \quad (2)$$

式(2)中: U 为施加的电压; ω 为交变电压的角频率; C 为介质等值电容; $\tan \delta$ 为绝缘介质损耗因数(介质损耗角正切值)。



(a) 电缆发热终端热像 (b) 正常终端热像

图4 电压致热型设备——介损引起的发热图

Fig. 4 Voltage heating equipment-heating diagram caused by dielectric loss

3)磁场致热型设备。磁场致热型设备是指由于铁磁损耗增大引起发热的设备,主要特征为铁心的磁滞,涡流。其他热缺陷有套管缺油,套管柱头发热,主变接地引线螺丝处发热,和避雷器中断局部发热等。是对GIS设备发热原因的分类见表1。

表1 GIS发热原因分类

Table 1 Classification of causes of heating in GIS

致热类型	发热点	热像特征	故障原因	检测方法
电流致热	元件接头、触头、连接件	热点明显	接触不良	测量接触电阻,一次回路电阻
电压致热	有电容性质的设备	区域发热	介质损耗增大	伏安特性、局部放电试验、介质损耗测量
磁场致热	含铁心部位	局部发热	铁磁损耗增大	磁滞,涡流检测

GIS设备的发热研究,主要从发热机理和发热检测方法两方面进行研究。其中发热机理研究主要是针对设备的典型发热情况开展发热温升计算,如母线连接处的温升计算,隔离开关触头温升计算。发热检测研究包括检测方法原理和检测方法实现两方面。论文从GIS设备发热理论研究和发热检测方法展开论述。

2 GIS设备发热理论研究

2.1 发热机理

GIS设备发热温升主要由发热与散热组成,本节在发热热源与传热过程的基础上,分析GIS的发热模型建立及温升计算研究。

2.1.1 发热热源

载流回路长期运行会引起发热,其热源主要包括载流回路的电阻损耗,绝缘件的介质损耗,交变磁场作用下的铁磁损耗。电阻损耗由集肤损耗与邻近损耗组成,铁磁损耗由磁滞损耗与涡流损耗组成。在GIS设备中,热源主要来自载流导体的焦耳损耗(集肤效应),外壳及屏蔽罩的涡流损耗,绝缘子、套管等的介质损耗。发热功率 P_f 为

$$P_f = P_r + P_g + P_{Fe} \quad (3)$$

式(3)中: P_r 为电阻损耗; P_g 为介质损耗; P_{Fe} 为磁性材料的铁磁损耗。

电阻损耗,又称“焦耳损耗”,其具体计算为

$$\begin{cases} P_r = K_f I^2 R \\ K_f = K_j K_l \\ R = \rho \frac{l}{A} \\ I = J \times A \\ m = \gamma l A \end{cases} \quad (4)$$

电阻损耗的表达式为

$$P_r = \frac{K_j K_l J^2 m \rho}{\gamma} \quad (5)$$

式(5)中: K_f 为集肤效应系数; K_l 为邻近效应系数; A 为导体截面积; l 为导体长度; ρ 为电阻率,与温度有关; J 为电流密度; m 为导体的质量; γ 为导体密度。

集肤效应是指导体处于交变电磁场或交流电时,导体内外电流不均匀,电流集中在导体表层,外部电流密度大于内部电流密度的现象。集肤效应强度与频率成正比,其系数计算

$$K_j = \frac{A}{P \cdot b} = \frac{A}{P} \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\rho}} \quad (6)$$

式(6)中: P 为截面周长; b 为集肤深度; μ 为导体磁导率。

邻近效应是指相邻载流导体间,因磁场相互作用,导体内电流密度不均匀的现象。频率越高,导体间距离越近,邻近效应就越显著。

介质损耗属于电压致热引起的损耗,其计算式见式(2),介质损耗的大小与电场强度、频率及介质损耗因数有关。

铁磁损耗的计算为:

$$P_{Fe} = P_h + P_e \quad (7)$$

$$P_h = K_h f B_m^\eta V \quad (8)$$

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 V \quad (9)$$

式(7)~(9)中: P_h 为磁滞损耗; P_e 为涡流损耗; K_h 、 K_e 是与材料有关的损耗系数; η 是施泰因梅茨系数; B_m 为最大磁感应强度; V 为体积。

磁滞损耗是指,铁磁物质在交变磁化下,内部发生的不可逆过程,磁化强度滞后于磁场强度,引起铁磁物质发热,产生损耗。磁滞损耗值与频率的一次方、最大磁感应强度的 η 次方成正比, η 由材料决定,其值在1.5~2.5之间。涡流损耗是指,导体在不均匀磁场中运动或在交变磁场中时,导体内形成一圈圈闭合的电流线,产生感应电流,引起的发热损耗。涡流损耗主要与磁场的变化方式,导体的运动、几何形状,磁导率,电导率等因素有关。

因此要控制或降低GIS设备的发热,可以通过降低电阻损耗与铁磁损耗,减少介质损耗。影响电

阻损耗的主要因素有:①材料导电率;②导体载流密度;③导体接触电阻。介质损耗的降低,应选取绝缘层电容 C 和介质损耗因数 $\tan\delta$ 均较小的材料。铁磁损耗的大小与频率和导电材质有关, GIS 外壳可通过采用不锈钢薄板、铝板、铝筒等无磁性材料,减少铁磁损耗。

2.1.2 传热过程

GIS 热量传递过程包括热传导、对流、和辐射 3 种方式。

1)热传导。热传导是指相对位置不变各物体间,微观粒子热运动产生的热能传递,其一维导热能量为

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (10)$$

式(10)中: Φ 为热能量; λ 为导热系数; A 为导热体接触面面积; t 为物体表面温度。

2)热对流。GIS 设备内填充的气体是 SF_6 , 是有体积可形变可流动的流体。热对流是指流体宏观运动,流体各部分间相对位移变化,冷热流体之间的热量传递,其能量为

$$\Phi = hA \Delta t = \begin{cases} hA(t_w - t_f) & \text{流体被加热时} \\ hA(t_f - t_w) & \text{流体被冷却时} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: h 为表面传热系数; t_f 为壁面温度; t_w 为流体温度。

3)热辐射。任何物体都存在热辐射,其能量为

$$\Phi = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (12)$$

式(12)中: σ 为流体辐射常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε 为物体的发热率(黑度); T 为流体热力学温度。辐射传热的计算首先计算辐射传热的角系数,确定其有效辐射,进而确定辐射传热量。

GIS 设备的传热过程属于圆筒壁传热,筒壁内侧半径为 r_i , 对应 d_i ; 外侧半径为 r_o , 对应 d_o ; 筒壁材料传热系数 λ ; 筒壁内外侧复合传热系数分别为 h_i , h_o ; 内外侧壁温分别是 t_{wi} 与 t_{wo} ; 内外侧流体温度分别是 t_{fi} 与 t_{fo} 。传热过程为热对流—热传递—热对流,稳态条件下其传热示意图见图 5。

$$t_{fi} - t_{wi} = \frac{\Phi}{Ah} = \frac{\Phi}{h_i \pi d_i l} \quad (13)$$

$$t_{wi} - t_{wo} = \frac{\Phi}{2\pi \lambda l} \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (14)$$

$$t_{wo} - t_{fo} = \frac{\Phi}{h_o \pi d_o l} \quad (15)$$

由式(7)–(9)可得,外侧面积传热为

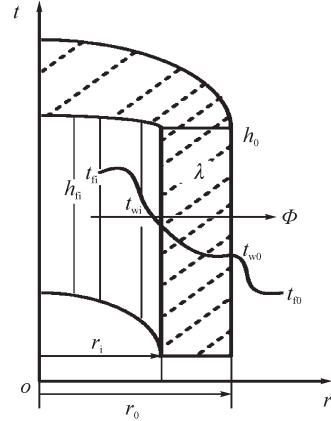


图 5 流体在管壁传热示意图

Fig. 5 Schematic of fluid heat transfer on pipe wall

$$\Phi = \frac{\pi l (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{h_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o}} = k A_o (t_{fi} - t_{fo}) = k \pi d_o l (t_{fi} - t_{fo}) \quad (16)$$

以筒外侧面积为基准的传热系数为

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (17)$$

2.2 GIS 设备建模原理与发热研究

2.2.1 GIS 设备建模原理

GIS 设备的建模包括物理建模与温升计算的数学建模。GIS 设备物理建模主要是根据设备的组成部件及部件发热的热源建模,考虑到计算速度及复杂程度,对模型进行适当简化^[6-7]。

温升计算是在发热机理的基础上,建立数学模型,并进行分析与计算。数学模型分为一维、二维和三维,由相应场的控制方程和定解条件组成。温度场是主要研究对象,分析热传递的能量。依据能量守恒定律和傅里叶定律,建立导热体内温度场控制方程,即导热微分方程式。要得到导热具体温度分布,需加入定解条件,即初始条件和边界条件。通常初始条件是指初始时刻的具体温度分布值。边界条件一般有 3 种:①给定边界上的温度分布;②规定边界上的热流分布;③给出壁面温度与热流密度间的函数关系。

由于 GIS 设备的温升,在主导体通电时,除导体本身发热外,导体与外壳之间因电磁耦合通常会产生产生感应电流,形成涡流损耗;周围的气体温度、密度变化,产生气体流动,形成自然对流与散热。因此仅对单一的温度场仿真计算,得到的结果不够准确,要得到更加准确的温升结果,需要加入其他场的耦合,如电磁场、流场。

1)电磁场。电磁场计算主要是分析涡流损耗,涡流分布与焦耳热,并将涡流损耗及焦耳热作为温

度场或温度场与流场的热源。根据麦克斯韦方程组,确定电磁场控制方程,其初始条件通常是设备运行的工频电流,边界条件一般认为远端边界矢量磁位为0。

2)流场。流场主要是分析热对流能量传递。热对流的微分控制方程,分为质量守恒方程,动量守恒方程(Navier-Stokes 方程)和能量守恒方程。求解对流传热,初始条件为给定气体压强,边界条件选取第1类或第2类边界条件。由自然对流经验公式计算得到表面传热系数,从而确定表面温度。

早期 GIS 设备的温升数学建模仅考虑传热学里面的热传导理论,进行温度场分布与温升计算研究^[8];之后出现了磁场与温度场耦合,计算磁感应强度分布及涡流损耗,将损耗值作为体积热源,计算其温度场和各部分具体温升值^[9];随着研究的深入和计算工具的开发,出现了电磁场-流体场-温度场等多场耦合模型^[10-11]。

2.2.2 GIS设备的发热研究

GIS的发热分为内部与外部两个方面,其中内部发热是主要因素,影响较大且难以检测发现。内部发热主要集中在接头触头处,如隔离开关动静触头、断路器、母线连接处、真空灭弧室,连接螺栓处等。其中发热分析常用的方法主要有两种:有限元法^[12-13]和热路法^[14]。

根据 GIS 的发热温升原理,有很多学者对 GIS 的热故障进行了研究。文[7]采用一维数学模型,通过温升计算,求解导热反问题,红外诊断表面温度,推断内部温度,计算中将固体材料物性参数和外壳导热系数视为定值,一维模型难以准确描述其发热情况和温度分布;文[15-18]采用二维数学模型,进行耦合场分析,忽略了气体的轴向流动;文[5, 8-10, 12-13, 17-27]采用三维数学模型,更准确地反映了设备的温度分布。现将 GIS 设备的发热研究分类,见表2。

表2 GIS设备发热研究分类

Table 2 Classification of bus fever research in GIS

模型	数学模型	考虑因素	不足
一维 ^[7]	温度场,流场	气体对流,封闭腔内辐射传热。	未考虑电阻损耗、涡流等引起的发热;模型过于简单,不能完整地反映设备的温升状况。
二维	两场耦合 ^[14、16-17] ;多物理场耦合 ^[15]	涡流损耗,气体对流,集肤效应,电导率,辐射散热,重力加速度,传热系数;环境温度,导体电流。	忽略了气体的轴向流动和热量传递过程 ^[14] ;考虑影响因素较少 ^[15] ;参数建模,计算模型较简单 ^[16] ;忽略了电阻率与温度的关系 ^[17] 。
三维	两场耦合 ^[8,12,20] 多物理场耦合 ^[5,9-10,17-19,22-26]	内部气体流动 ^[19] ;流体流速,重力加速度,电导率,对流散热与热辐射 ^[20-21] ;焦耳热,涡流 ^[19-23] 。	忽略位移电流,泄漏电流,风速和环境温度的波动 ^[19-20] ;未与实测结合,试验数据较少 ^[21] ;忽略磁场因素 ^[22] ;无实测数据 ^[23] 。

文[8]对 GIS 母线的电磁场-温度场进行耦合,分析了考虑与不考虑外壳涡流两种情况下,母线及外壳温度场的分布,未考虑外壳电导率的随温度的变化,仅进行理论分析,没有与实测相结合;文[9]采用磁-热-流耦合,磁场数学模型是三维,温度场-一流场是二维数学模型。将磁场计算得到的涡流损耗作为温度场-一流场的热源载荷,分析温升情况。文[24-25]考虑了外壳对流换热系数及材料气体物性随温度的变化,多物理场耦合与有限元数值分析,采用导电桥,等效模拟母线导电杆与接头的电流收缩效应与焦耳效应,对过热故障进行模拟。分析较全面深入,但未能研究不同环境温度,不同工况下其发热温升情况。文[26]以整个间隔为研究对象,在温升计算的基础上,提出基于差分进化算法的多目标、多参数优化方法。

综上,目前 GIS 设备发热研究,仅是通过建模仿真实验及实测验证,来确定外壳温度与内部温度的

位置及数值关系,其计算结果与检测方式、检测点,不能通用于不同电压等级的 GIS 设备,大部分还处于理论研究阶段。三维多物理场耦合,多边界条件分析,从单个部位的温升至多部位温升的计算,是温升研究的热点。温升过程模拟及监测系统设计,是目前 GIS 温升研究的难点与主要方向。

3 GIS设备发热故障检测方法研究

GIS设备发热机理的研究,是为了能够及时发现设备的发热故障,做出相应的处理。目前国内外 GIS 发热检测方法有:①通过局放检测研究(超声波检测,超、特高频法,脉冲电流法等),或对 SF₆分解物的检测,回路电阻测试法,来辅助判断 GIS 发热情况^[28-30];②红外测温法(红外点式测温、红外热像测温),光纤光栅测温法,来直接检测 GIS 设备的发热。由于局放检测与 SF₆分解物检测方式,不能判断设备故障是否由发热引起,更不能确定设备发热的温度范

围。为了更有效地检测GIS设备的发热,文中对GIS发热主要检测方法进行研究。

3.1 回路电阻测试法

回路电阻测试法又称“接触电阻测试法”,GIS回路电阻测试仪的工作原理是直流压降法,需要将待测GIS停电分离,见图6。对被测回路电阻施加额定的直流电流,根据其两端的压降计算出回路的电阻值^[3]。但该检测方式只能在停电计划检修时进行,GIS停电检修将会导致停电范围的扩大,回路电阻测试不能满足带电检测的需求,一般作为辅助检测方式,用于新安装的GIS设备,检查GIS设备的安装质量和导电回路的完整性;以及对停电设备的检修,检测接触电阻的大小,确定发热点及发热原因。

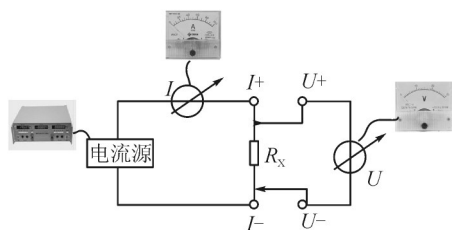


图6 回路电阻测试法原理图

Fig. 6 Principle diagram of loop resistance test method

3.2 红外测温法

红外测温法包括红外点式测温 and 红外热像测温法。红外点式测温(又称红外辐射测温),用简单的数字显示;红外热像测温,采用多点测温,进行热成像,具有安全、高效、防漏检等优点。

红外测温法通过测量GIS的温度信息,判断相应的故障位置及严重程度,具有非接触、无损检测等优点。理论上说凡是伴随着热效应的设备故障都可用红外方法做出诊断^[3]。红外测温基础是,通过测量物体自身辐射红外能量的大小,就能准确地测定它的表面温度^[31],见图7。

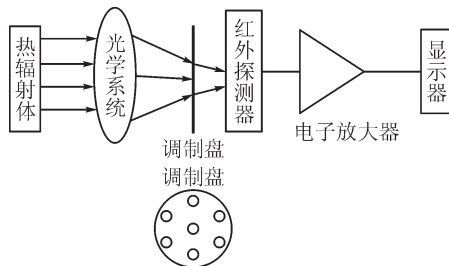


图7 红外测温仪结构原理图

Fig. 7 Infrared thermometer structure schematic diagram

GIS过热性故障常见于气体绝缘组合电器(GIS)、气体绝缘断路器(GCB)等SF₆电气设备内部数量众多的刀闸触头处^[32],见图8。针对GIS发热点的红外测温技术的研究,目前主要有两种:直接检测与间接检测。①直接检测,即通过将红外温度传感

器安装在GIS外壳外表面,探头通过测量孔接收触头辐射出的红外光波,直接进行触头温度的红外测量;②间接检测,即通过测量触头位置处金属屏蔽罩的温度,建立GIS传热学模型和实验研究,获得触头温度与金属屏蔽罩温度的定量关系,通过屏蔽罩温度和环境温度来反推触头温度,实现触头温度的准确预测。

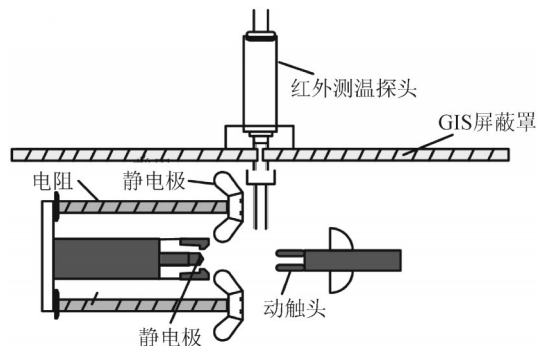


图8 GIS隔离开关红外测温直接检测示意图

Fig. 8 The schematic diagram of infrared temperature measurement for GIS disconnector

目前对于触头温度的直接红外测量,有学者进行了深入的研究^[7,33-39]。文[30]针对GIS隔离开关的结构特点,提出基于红外传感的GIS设备触头温度在线监测法。直接检测GIS触头温度的方式,结构简单,成本较低,抗干扰能力强,但由于涂敷高辐射涂料,传感器安装过程的密封,传感器发热率的补偿等因素,存在绝缘问题和较小误差。文[40-41]比较了红外点式测温与红外热像分析温度检测,红外热像测温多适用于外部,大面积温度检测;红外点式测温更适用于内部或外部小面积发热点的测温,为现场的检测工作提供了有效参考。

也有学者对触头温度的间接红外测量进行了探讨^[30,42-45]。文[30]仿真中将导体屏蔽罩和外壳内部的发射率均设为定值0.05,而实际温度变化时发射率可能改变,实验采用的热电偶温度传感器误差是1℃,仿真结果和实际结果存在一定的误差,外壳温度和导体温度的相关性还处于研究阶段,根据温差来判断内部状态尚缺乏有效的诊断判据。

3.3 光纤布拉格光栅测温法

光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)简称光纤光栅,是一段纤芯中具有折射率周期性变化结构的光纤,利用光纤的光敏特性制成。光纤光栅传感器的传感过程是通过外界参量对布拉格中心波长的调制来获取传感信息。通过空间周期性的强紫外激光照射使外界入射光子和纤芯里面的掺杂粒子相互作用,使纤芯形成折射率沿轴向非周期性或周期性分布的结构,从而形成空间相位光栅。

FBG 结构见图9。图9中,内层为纤芯结构,外层为包层结构,纤芯的折射率比包层的折射率稍大。图中 Λ 为光栅的周期,当光波通过FBG传感器时,满足特定波长的光被光纤光栅反射回去,其他波长的光透过。

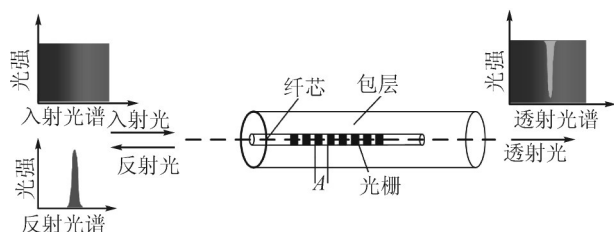


图9 光纤光栅结构原理示意图

Fig. 9 schematic diagram of fiber grating structure

目前,将光纤光栅传感器用于GIS触头温度监测中存在两种方式:

1)直接测温。直接测温是指在GIS屏蔽罩内部触头处,将光纤光栅温度传感器植入,直接测量触头的温度。该方法准确及时,但安装复杂,同时可能影响设备的绝缘水平。

2)间接测温。间接测温是指通过利用光纤光栅温度传感器,测量GIS外壳固定点的温度,根据外壳测量点与触头的温度计算关系,间接获取触头的温度。间接测温的测量范围较广,不破坏设备的绝缘水平和热平衡,但对外界环境及传感器的精度和时

效性要求较高。

文[46]设计了高性能的光纤光栅温度传感器及波长解调系统。侧重于传感器的增敏及检测系统的开发,对母线内外热传递,及影响因素的分析不全面。文[13]基于测量多点外壳温度及环境温度,间接计算导体触头温度的方法。无需破坏现有GIS的结构,但存在空间差异,金属抛光发射率变化,物理模型简化,实验误差等的影响,仿真结果与实测存在一定的误差。同时人工神经网络(artificial neural network, ANN)需要更全面的实验数据作为样本数据。文[26]选择确定了适用于GIS测温的光纤光栅传感器和解调仪,及其最优安装位置,开发了触头温度预测系统。除此之外,文[47]介绍了基于电磁谐波法和计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法,预测GIS中部件稳定温升;文[48]开发了非接触式温度传感器,使用卤化银光纤。

GIS设备发热故障检测技术的研究主要集中在回路电阻检测法,红外测温法(红外辐射测温法和红外热像检测法),光纤布拉格光栅检测法。后两种检测方法又都可以分为直接检测和间接检测,检测到的温度精度与模型的搭建及测温所用的传感器的精度紧密相关。

综上,对GIS设备发热故障检测技术进行比较分析,见表3。

表3 GIS设备发热故障检测方法比较分析

Table 3 Comparison and analysis of GIS heating fault detection technology

检测方法	优点	缺点	发展趋势
回路电阻法	原理简单,停电检测实用、准确。	需停电离线检测,无法及时发现故障;无法获取放电和触头温度的定量关系。	GIS投入运行前的辅助检测;温度预测,对主回路电阻,温升计算和实验对比研究。
红外辐射法	间接测温,解决了电磁干扰和高压隔离问题。	触头表面发射率低,需涂非金属辐射涂料,影响GIS的气密性。	非金属辐射涂料对GIS绝缘的影响,及GIS气密性的研究。
红外热像法	图像直观,不接触测温,不受电磁干扰。	导热反问题的研究还不成熟,还处于定性判断阶段。	三维,多场耦合;可以从导热反问题求解转向直接求解研究。
光纤光栅法	测温范围广,不破坏设备绝缘水平及热平衡。	对传感器的精度,及响应时间要求高;测温结果易受环境因素影响。	多点分布式光纤光栅测温;有限元多场耦合,导体与所测设备温度计算关系;完善设备温度与系统信息交互。

4 结论

1)国内外针对GIS设备的发热研究分为两个方面:①侧重于发热现象分析,故障原因及解决方法研究,多用于发热故障出现之后的设备检修参考;②是侧重于发热理论研究,计算导体的温度分布,温度传感器的优化,以及在此基础上的GIS中个别部件的优化研究,用于发热故障的预测和监控,其中发热温升计算,热故障的预测与监控是目前研究

的热点与难点。

2)目前现场用到的GIS设备发热故障检测技术主要有回路电阻测试、红外辐射测温、红外热像检测、光纤光栅测温。国内外GIS设备发热故障检测技术的研究主要侧重于红外测温法和光纤光栅测温法,但都处于研究阶段,未能大规模推广使用。回路电阻测试主要作为辅助检测,可以在今后开展GIS导体主回路电阻与温升关系计算和试验对比分析研究。

3)红外点式测温仪可以实时检测导体关键点的温度。所检测导体表面涂敷高辐射涂料与GIS绝缘性的关系需要进一步研究(高稳定化学性质,高辐射率且不影响绝缘);加入红外测温探头后,GIS的密封性、绝缘性需要更进一步研究,红外传感器的选用及测量精度有待进一步提高。测温精度影响因素较多,可以尝试从发热反问题求解,转换为红外热像或红外点式测温仪,直接求解发热点的温度,确定发热点的位置。

4)目前光纤光栅测温法主要是通过多点测量GIS外壳温度,反推内部触点温度。GIS外壳温度测量位置的确定,实验模型,传感器的选择,及触头温度与电力系统的交互等,需要进一步研究。

参考文献:

- [1] YOO W J, CHO D H, JANG K W, et al. Infrared fiber-optic sensor for non-contact temperature measurements[C]//3rd International Conference on Sensing Technology. Tainan: 2008: 500-503.
- [2] SONG Haoyong, HOU Guobin, WANG Wei, et al. Application of computational fluid dynamics to predict the temperature-rise of gas insulated switchgears[C]//4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an: 2017: 694-697.
- [3] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 基于光纤光栅的气体绝缘开关母线温度在线监测系统[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 155-160.
WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. On-line temperature monitoring system for gas insulated switch buses based on FBG[J]. Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 155-160.
- [4] LI Q M, CONG H X, XING J Y, et al. On-line temperature monitoring of the GIS contacts based on infrared sensing technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 9(4): 1385-1393.
- [5] 李炜, 和彦森, 冯英, 等. 一种用于GIS的可拆装内置式红外测温装置: CN103575404A[P]. 2014-02-12.
LI Wei, HE Yanmiao, FENG Ying, et al. A demountable built-in infrared thermometer for GIS: CN103575404A[P]. 2014-02-12.
- [6] 刘连升, 庞先海, 刘勇, 等. 基于红外测温检测技术的GIS设备发热缺陷典型案例[J]. 河北电力技术, 2018, 37(2): 60-62.
LIU Liansheng, PANG Xianhai, LIU Yong, et al. Typical case analysis of heating defects of GIS equipment based on infrared temperature measurement technology[J]. Hebei Electric Power Technology, 2018, 37(2): 60-62.
- [7] YE T, ZHEN L, YONG Z, et al. On-line monitoring of GIS switch contact temperature based on infrared sensing[C]//13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Wuhan, China: IEEE, 2018: 2187-2191.
- [8] 赵雪丽, 郭治平. 变电站GIS设备内部发热问题查找方法[J]. 中国科技博览, 2016(13): 1-3.
ZHAO Xueli, GUO Zhiping. Searching method for internal fever problem of GIS equipment in substations[J]. China Science and Technology Expo, 2016(13): 1-3.
- [9] 陈仁刚, 冯新岩, 辜超, 等. 红外测温技术在GIS故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 190-194.
CHEN Rengang, FENG Xinyan, GU Chao, et al. Application of infrared thermometry in GIS fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 190-194.
- [10] 丛浩熹, 李庆民, 齐波, 等. 基于红外传感的GIS隔离开关触头温度在线监测技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 144-148.
CONG Haoxi, LI Qingmin, QI Bo, et al. Research on on-line monitoring technology of contact temperature of GIS disconnecter based on infrared sensing[J]. Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 144-148.
- [11] 丛浩熹, 李庆民, 李成榕, 等. 一种提高GIS设备金属导体红外在线测温准确性的方法: CN103162838A[P]. 2013-06-19.
CONG Haoxi, LI Qingmin, LI Chengrong, et al. A method to improve the accuracy of infrared on-line temperature measurement of metal conductors in GIS equipment: CN103162838A[P]. 2013-06-19.
- [12] 李庆民, 丛浩熹, 李成榕, 等. 一种GIS设备在线测温红外温度传感器装置: CN203298871[P]. 2013-11-20.
LI Qingmin, CONG Haoxi, LI Chengrong, et al. An on-line infrared temperature sensor for temperature measurement of GIS equipment: CN203298871[P]. 2013-11-20.
- [13] 武胜斌, 郑研, 陈志彬. 基于红外测温技术的GIS导体温度在线监测的方案[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 100-102.
WU Shengbin, ZHENG Yan, CHEN Zhibin. A scheme for on-line monitoring of conductor temperature in GIS based on infrared thermometry[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 100-102.
- [14] 贾勇勇, 杨景刚, 唐炬, 等. 一种基于红外测温技术的GIS局部过热故障模拟装置: CN106841955A[P]. 2017-06-13.
JIA Yongyong, YANG Jinggang, TANG Ju, et al. A GIS partial overheating fault simulation device based on infrared temperature measurement technology: CN106841955A[P]. 2017-06-13.
- [15] 尤婷, 李培江, 吕梅蕾, 等. 基于物联网平台的GIS红外测温装置: CN204758129U[P]. 2015-11-11.
YOU Ting, LI Peijiang, LÜ Meilei, et al. Infrared temperature measurement device based on internet of things platform: CN204758129U[P]. 2015-11-11.
- [16] 丛浩熹, 李庆民, 齐波, 等. 基于红外传感的GIS隔离开关触头温度在线监测技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 144-148.
CONG Haoxi, LI Qingmin, QI Bo, et al. Research on on-

- line monitoring technology of contact temperature of GIS disconnecter based on infrared sensing[J]. Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 144-148.
- [17] 王俊波, 苗银银, 罗容波, 等. GIS触头接触状况检测现状分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 137-140.
- WANG Junbo, MIAO Yinyin, LUO Rongbo, et al. Analysis of the status of contact detection in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 137-140.
- [18] 丛浩熹, 行晋源, 李庆民, 等. 有屏蔽罩结构的GIS触头温度红外在线监测技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 148-153.
- CONG Haoxi, XING Jinyuan, LI Qingmin, et al. Infrared on-line monitoring technology of GIS contact temperature with shield structure[J]. Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 148-153.
- [19] MA Guoming, WU Zhen, ZHOU Hongyang, et al. A wireless and passive online temperature monitoring system for GIS based on surface-acoustic-wave sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1270-1280.
- [20] 何良, 王红梅, 张旭波, 等. 一起220 kV GIS设备发热异常检测及解体分析实例[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 236-240.
- HE Liang, WANG Hongmei, ZHANG Xubo, et al. An example of abnormal detection and disintegration analysis of 220 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 236-240.
- [21] 陈雪薇. 基于声表面波的GIS开关触头温度监测的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- CHEN Xuwei. Research on GIS switch contact temperature monitoring based on surface acoustic wave[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [22] 郭煜敬, 张博, 王之军, 等. GIS整间隔温升仿真及典型通流结构优化技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(s1): 257-265.
- GUO Yujing, ZHANG Bo, WANG Zhijun, et al. Research on GIS integer interval temperature rise simulation and typical flow structure optimization technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(s1): 257-265.
- [23] 李洪涛. 气体绝缘母线接头过热性故障机理的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- LI Hongtao. Study on the mechanism of overheating failure of gas insulated bus joints[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [24] 李洪涛, 舒乃秋, 孙国霞, 等. 气体绝缘开关设备母线接头过热失效的相似模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4137-4144.
- LI Hongtao, SHU Naiqiu, SUN Guoxia, et al. Similar model for overheating failure of busbar joints of gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4137-4144.
- [25] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 141-147.
- WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Numerical calculation and analysis of temperature field of gas insulated busbar based on fluid multi-component transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 141-147.
- [26] WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 7006704.
- [27] YOON J H, AHN H S, CHOI J, et al. An estimation technology of temperature rise in GIS bus bar using three-dimensional coupled-field multiphysics[C]//International Symposium Oil Electrical Insulation. Vancouver, BC: IEEE, 2008: 432-436.
- [28] 张俊民, 侯振华, 张春朋, 等. 27.5 kV GIS母线室三维温度场的数值计算[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 62-67.
- ZHANG Junmin, HOU Zhenhua, ZHANG Chunpeng, et al. Numerical calculation of 3-D temperature field in 27.5 kV GIS bus compartment[J]. Journal of Electrical Technology, 2011, 26(12): 62-67.
- [29] 曾亮, 郭建炎, 袁传镇, 等. 基于有限元分析的三相共箱GIS母线温度场分布[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 196-199.
- ZENG Liang, GUO Jianyan, YUAN Chuazhen, et al. Temperature field distribution of three-phase common-box GIS bus based on finite element analysis[J]. Hydropower and Energy Science, 2015, 33(9): 196-199.
- [30] 金虎, 彭在兴, 王颂, 等. 252 kV三相共箱GIS母线壳体温度场分布特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 20-25.
- JIN Hu, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Temperature field distribution characteristics of 252 kV three-phase common-box GIS bus housing[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 20-25.
- [31] KIM J K, LEE J Y, WEE S B, et al. A novel coupled magneto-thermal-flow analysis for temperature rise prediction of power apparatus[C]//The International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Wuhan, China: [s.n.], 2008: 585-588.
- [32] NOVAK B, KOLLER L. Steady-state heating of gas insulated busbars, 2012[C]//PES T & D. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [33] 范镇南, 张德威, 陈显坡, 等. GIS母线损耗发热状况的电磁场与流场计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(s1): 241-244.
- FAN Zhennan, ZHANG Dewei, CHEN Xianpo, et al. Calculation and analysis of electromagnetic field and flow field of GIS bus loss and fever[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(s1): 241-244.
- [34] 周娜. 基于准分布式光纤测温技术的GIS母线触点温度在线监测系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- ZHOU Na. Research on on-line monitoring system of bus contact temperature in GIS based on quasi-distributed

- optical fiber temperature measurement technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [35] 刘亚男, 舒乃秋, 李彦彰, 等. 基于等效热路模型的GIS隔离开关温升计算[J]. 电测与仪表, 2017, 54(19): 7-12.
- LIU Yaman, SHU Naiqiu, LI Yanzhang, et al. Temperature rise calculation of GIS disconnector based on equivalent thermal circuit model[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(19): 7-12.
- [36] 陈强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 基于多点分布式光纤光栅的GIS隔离开关触头温度在线监测技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 298-306.
- CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. On-line monitoring technology of contact temperature of GIS disconnector based on multi-point distributed fiber grating[J]. Journal of Electrical Technology, 2015, 30(12): 298-306.
- [37] 周甜, 李自品, 沈泉宇, 等. GIS隔离开关触头温升多场耦合数值计算与分析[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 13-20.
- ZHOU Tian, LI Zipin, SHEN Quanyu, et al. Multi-field coupling numerical calculation and analysis of contact temperature rise of GIS disconnector[J]. China Electric Power, 2018, 51(2): 13-20.
- [38] 康添慧. 高压GIS多物理耦合场分析及温度监测系统的研发[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- KANG Tianhui. Research and development of multi-physical coupling field analysis and temperature monitoring system for high-voltage GIS[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [39] 宋帆, 申春红, 林莘, 等. 南方. 800 kV GIS隔离开关磁场-温度场计算与分析[J]. 高电压技术, 2008, 33(7): 1383-1388.
- SONG Fan, SHEN Chunhong, LIN Xin, et al. Calculation and analysis of magnetic field-temperature field of Southern. 800 kV GIS disconnector[J]. High Voltage Engineering, 2008, 33(7): 1383-1388.
- [40] 汪汛, 康添慧, 饶夏锦, 等. 高压同轴GIS母线三维磁热耦合场的计算与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(8): 73-77.
- WANG Fang, KANG Tianhui, RAO Xiajin, et al. Calculation and analysis of three-dimensional magneto-thermal coupling field of high-voltage coaxial GIS bus[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2014, 41(8): 73-77.
- [41] 师晓岩, 查伟, 孙福, 等. UHV GIS内部温度场的红外热诊断技术[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 16-20.
- SHI Xiaoyan, CHA Wei, SUN Fu, et al. Infrared thermal diagnosis technology of temperature field in UHV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 16-20.
- [42] 郝军利, 赵静, 仲红刚, 等. PMO作用下连铸二冷区电磁场-流场-温度场的数值模拟[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(3): 412-421.
- HAO Junli, ZHAO Jing, ZHONG Honggang, et al. Numerical simulation of electromagnetic field-flow field-temperature field in secondary cooling zone of continuous casting under PMO[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2018, 24(3): 412-421.
- [43] 陈强. 基于光纤光栅的GIS触头温度多点分布式测量系统研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- CHEN Qiang. Development of a multi-point distributed measuring system for GIS contact temperature based on fiber bragg grating[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [44] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 460-461.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 460-461.
- [45] 金虎, 彭在兴, 王颂, 等. GIS导体接头异常温升问题研究简述[J]. 电子世界, 2017(22): 32-33.
- JIN Hu, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Brief introduction to the study of abnormal temperature rise of conductor joints in GIS[J]. Electronic World, 2017(22): 32-33.
- [46] 王先培, 黄云光. 光谱分析技术在GIS绝缘故障诊断中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 2-8.
- WANG Xianpei, HUANG Yunguang. Application of spectral analysis technology in GIS insulation fault diagnosis[M]. Beijing: Science Press, 2017: 2-8.
- [47] 毛文奇, 吴水锋, 谢国胜, 等. GIS设备局部放电带电检测技术应用综述[J]. 湖南电力, 2016, 36(2): 9-13.
- MAO Wenqi, WU Shuifeng, XIE Guosheng, et al. Summary of the application of live partial discharge detection technology in GIS equipment [J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(2): 9-13.
- [48] 赫尔曼·科赫. GIS(气体绝缘金属封闭开关设备)原理与应用[M]. 钟建英, 林莘, 张友鹏, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- KOCH H. Principle and application of GIS(gas insulated metal enclosed switching equipment)[M]. ZHONG Jianying, LIN Xin, ZHANG Youpeng, et al. Translated. Beijing: Machinery Industry Press, 2017.

黄孟丹(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为状态检测与故障诊断(E-mail: 15972928026@139.com)。

肖纯(1970—), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能控制与信息系统集、工程结构远程健康监测。

杨芷宁(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配网防雷、GIS电磁干扰。

庞文龙(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压绝缘、高压电器有限元仿真。

吴细秀(1976—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电器电弧理论、开关电器暂过程及其电磁兼容(通信作者)(E-mail: wuxixiu@163.com)。