

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.07.040

基于红外检测的GIS内部过热缺陷严重程度的评估方法研究

刘 凯¹, 彭在兴¹, 金 虎¹, 王 颂¹, 陈 曦²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663; 2. 中国南方电网公司, 广州 510623)

摘要: 为研究基于红外检测的GIS内部过热缺陷严重程度的评估方法, 分别在母线三相共箱结构GIS腔体内的A相和B相设置“工”字形导体, 模拟GIS内部导体接触不良引起的过热缺陷, 开展了不同电流下的GIS温升实验。实验中, 采用电子式测温技术和红外测温技术分别对GIS内部导体以及壳体的温度进行测量。实验结果表明, 模拟缺陷分别设置于A相和B相时, 前者内部导体和壳体的温升均高于后者。内部导体和壳体的温升在轴向上呈现出先升高后降低的变化趋势, 模拟缺陷处的温升值最大。通过分析内部导体和壳体的温升关系, 发现模拟缺陷处内部导体与正常处的导体温升差和径向对应点的壳体温升差比值为定值。利用壳体温度、正常处导体温升与温升差比值可以计算获得缺陷处导体实际温升值, 根据导体的允许温升值, 实现了对GIS内部过热缺陷严重程度的评估。

关键词: 过热缺陷; 红外测温技术; 温升差比值; 评估方法

Research of Assessment Method for GIS Internal Overheating Defects Severity Based on Infrared Detection

LIU Kai¹, PENG Zaixing¹, JIN Hu¹, WANG Song¹, CHEN Xi²

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China)

Abstract: A “I” shaped conductor is set up in the A phase and the B phase in three phase enclosed GIS structure, the GIS temperature-rise experiment under different current is carried out by simulating the overheating defects caused by the bad contact of the internal conductor of GIS. In the experiments, thermosensitive sensors and infrared thermometry are respectively adopted to detect the temperature of inner conductor and shell. It is concluded that, the temperature of inner conductor and shell under A phase overheating defects is higher than B phase overheating defects. The temperature-rise of the inner conductor and the shell changes along the axial direction and the tendency to rise first and then decrease, the maximum temperature-rise at the simulated defect. By analyzing the relationship between inner conductor and shell, the temperature-rise difference ratio of inner conductor to shell is constant. The actual temperature-rise of the conductor at the defect can be calculated by the shell temperature, the temperature-rise of the normal conductor and the temperature-rise difference ratio. According to the allowable temperature-rise of the conductor, the assessment for GIS internal overheating defects severity is achieved.

Key words: overheating defects; infrared thermometry technology; temperature - rise difference ratio; assessment method

0 引言

GIS设备因其占地面积小,运行可靠,检修维护周期长等优点,在电力系统中得到了越来越广泛的应用^[1-2]。然而,当GIS内部导体接触不良时,由于接触电阻变大,在负荷电流流过时会产生过热现象。导体过热会引起绝缘老化或者直接熔融破坏GIS内部绝缘,从而引发短路,形成重大事故,这种过热缺陷引发的短路故障定义为载流故障。南方电网

2010—2016年GIS设备故障率情况见图1,7年平均载流故障率为0.028 2次/(百间隔·年),仅次于绝缘子故障率0.062 1次/(百间隔·年),位列第二。在2015年,载流故障率达到了0.047 4次/(百间隔·年),超过了绝缘故障率,故障造成了巨大的经济损失^[3-4]。目前,针对GIS内部过热缺陷的检测方法仍不成熟,且GIS导体封闭在壳体内部,现场只能检测壳体温度,无法获取内部导体发热的严重程度。因此,加强GIS内部过热缺陷的检测和分析,研究评估其内

部热缺陷严重程度的方法,对避免GIS发生过热故障

障以及保证电网的安全稳定运行具有重要的意义。

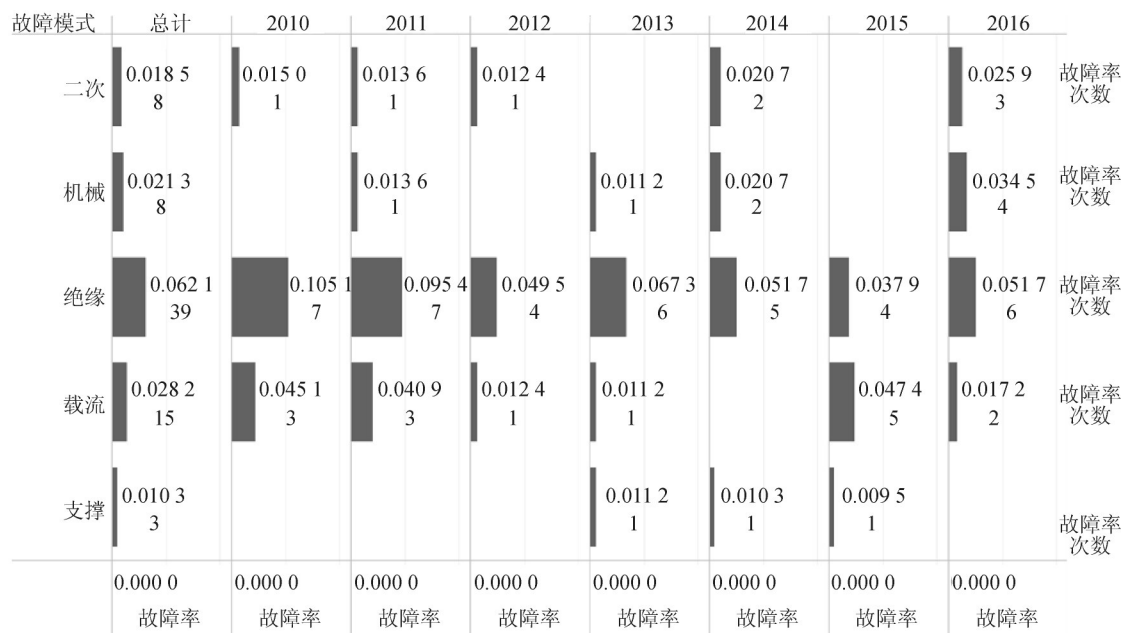


图1 南方电网GIS设备2010—2016年故障情况

Fig. 1 GIS fault condition between 2010 and 2016 in China southern power grid

目前GIS内部过热缺陷的检测技术主要包括测量回路电阻、电子式测温技术、红外辐射技术以及红外热诊断技术。回路电阻测量方法简单,易于实现,但存在误差较大、无法实现在线检测等问题^[5-6]。电子式测温是指在设备内部导体放置热敏传感器,直接对其温度进行监测。但由于传感器置于高电位,易受电磁干扰,并且GIS内部运行环境清洁度要求高,传感器很难置入^[7-8]。红外辐射测温技术受内部导体金属表面发射率、传输介质SF₆气体对红外线吸收等因素的影响,温度测量的误差极大^[9-10]。红外热诊断技术监测设备内部过热故障具有图像直观、不接触测温、不受电磁干扰等优点,然而目前对于高压开关设备导热反问题的研究不够成熟,目前红外热诊断仍然处于定性判断阶段^[11-13]。针对GIS内部过热缺陷严重程度评估方法的研究,华北电力大学李庆民^[14-15]、西安交通大学师晓岩等学者通过建立传热过程的物理和数学模型^[16],通过间接测温,进而计算得到GIS内部导体温度。但是均未对GIS内部热缺陷严重程度进行划分,并且所建模型较简单,外部环境、触头及屏蔽罩结构等诸多因素有待进一步考虑^[17-19]。

文中通过在自行设计的252 kV三相共箱GIS母线腔体内设置内部导体过热缺陷,利用电子式测温技术和红外测温技术分别监测GIS母线以及壳体的温度。开展了1 000、1 500、2 000 A电流下GIS温升实验,探讨了GIS内部导体温升与壳体温升的关系,

研究了评估GIS内部热缺陷严重程度的方法,具有重要的学术指导意义和工程应用价值。

1 实验系统

1.1 实验平台

GIS内部过热实验在自行设计的252 kV GIS腔体内进行,见图2。母线采用三相共箱结构,整个腔体长度为8.7 m,分为故障模拟段、中间过渡段和正常模拟段。腔体内部充装0.4 MPa的SF₆气体。

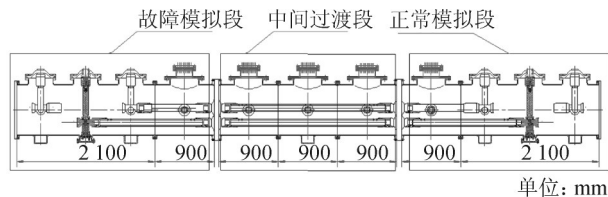
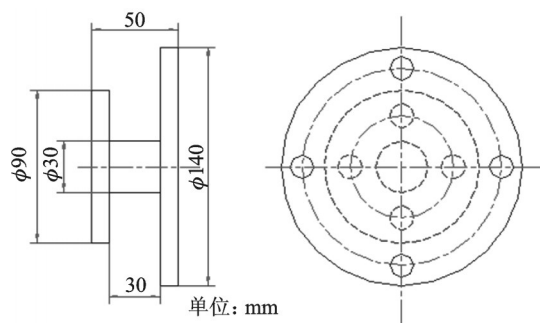


图2 252 kV GIS实验平台

Fig. 2 Experiment platform of the 252 kV GIS

GIS设备发热多由触头接触不良造成,此时接触电阻变大,为了模拟这种发热,设置了“工”字形导体,见图3。两头分别为直径90 mm和140 mm的圆板,分别连接正常导杆连接部位和绝缘子触头座。中间为直径30 mm的细导杆,长度50 mm,采用电阻率较大的材料Q235,减少导杆的通流能力,使导杆在通流情况下产生局部过热。在高位导体A相和低位导体B相分别设置GIS内部导体发热模拟缺陷,模拟缺陷位于故障模拟段和中间过渡段之间临近盆式绝缘子的位置,见图4。



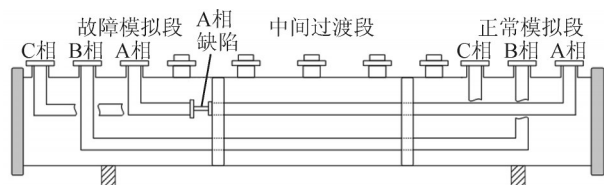
(a) 结构示意图



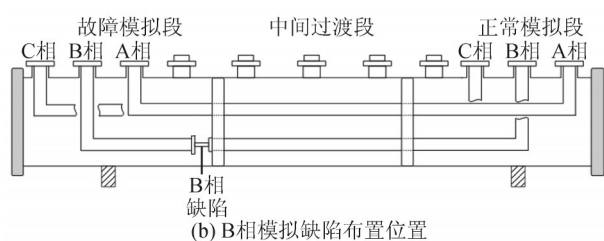
(b) 实际结构图

图3 发热缺陷模拟图

Fig. 3 Overheating defects models



(a) A相模拟缺陷布置位置



(b) B相模拟缺陷布置位置

图4 模拟缺陷设置部位图

Fig. 4 Structures of artificial defect models

实验中监测内部导杆温度的热敏传感器埋点情况见图5,英文字母代表传感器的埋点位置,过热缺陷附近为温度主要关注区域,热敏传感器埋点密度较大。GIS内部热量通过SF₆气体的对流与扩散传递在壳体上,高温区域位于壳体上部。GIS壳体的红外测温区域见图6,图6中框为边长200 mm的正方形,选取正方形内最大温度作为此区域的检测温度。

1.2 红外检测系统

实验中使用GL800红外热像仪对GIS壳体温度进行检测,热灵敏度为0.015 K,温宽范围能调节至0.1 K,分辨率800×600像素。红外热像仪测温原理

见图7。

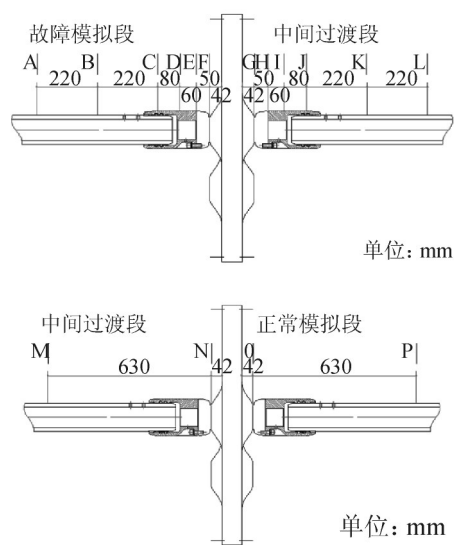


图5 故障相导杆热敏传感器埋点示意图

Fig. 5 Distribution diagram of thermosensitive sensor

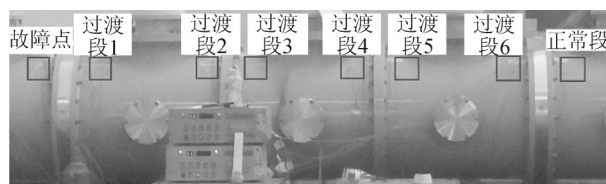


图6 红外测温区域示意图

Fig. 6 Distribution diagram of infrared thermometry



图7 红外测温原理图

Fig. 7 Schematic diagram of infrared thermometry

物体红外辐射能量与物体温度成函数关系,见式(1)。

$$W = \varepsilon \delta A T^4 \quad (1)$$

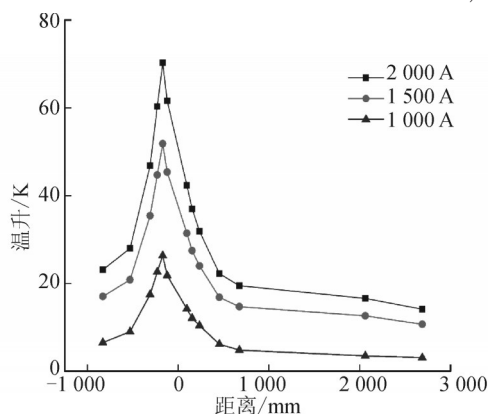
式(1)中: W 为发热体发射功率, W ; ε 为辐射率,文中取0.9; δ 为玻尔兹曼常数; A 为发射体表面积, cm^2 ; T 为发射体绝对温度, K 。红外辐射能量通过光学系统聚焦到红外探测器上,经过信号放大以及 A/D 转换,输出温度信号或将温度信号以图像形式显示。

2 实验结果及分析

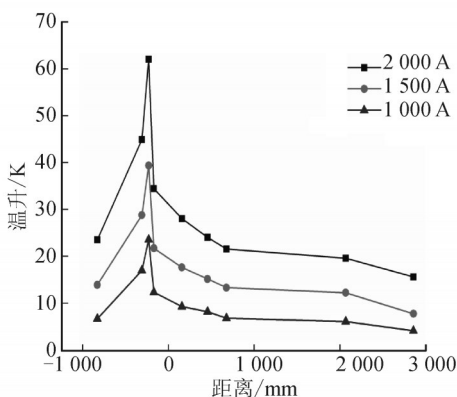
2.1 不同电流下GIS内部导体和壳体温升特性研究

为了研究GIS内部导体过热缺陷下的温升特性,文中针对过热缺陷位于高位导体和低位导体两种情况,分别开展了2 000、1 500、1 000 A电流下的温升实验。

实验中,每隔 30 min 采样内部导体上的温升值,当导体同一部位的温升在 1 h 内小于 0.5 K 时,温升达到稳定。温升稳定后,内部导体不同位置处的温升值见图 8,图 8 中距离 0 点对应图 5 中 G 点。高位导体热缺陷下,通流 2 000、1 500、1 000 A 电流下故障点对应的温升分别为 70.3、51.8、26.3 K。低位导体热缺陷下,相同电流下故障点对应的温升分别为 62.08、39.41、23.6 K。低位导体缺陷温升较高位导体低,这是因为低位导体缺陷的发热点靠近 GIS 腔体下部,参与热对流的 SF₆ 气体多,对流较充分,对流带走了较多的热量。不同电流高、低位导体缺陷下,导体温升随距离呈现出相同的变化趋势。温升由故障点向两边降低,并且靠近故障点的温升下降率高于远端。这是因为导体温升主要由导体自身发热和热传导决定,而前者起主导作用。由于传导效率低,因此温升由故障点向两边迅速下降。当远离故障点时,温升下降缓慢,这是因为此处的温升几乎为导体自身发热,热传导影响较小,温升值也与计算得到的导体正常温升吻合(正常导体通流 2 000、1 500、1 000 A 对应的温升分别为 15.7、9.36、4.51 K)。



(a) 不同电流高位导体缺陷下导体温升随距离的变化趋势



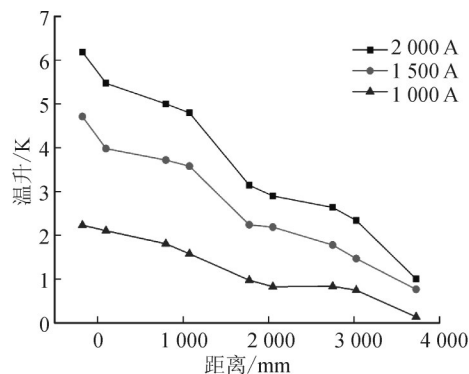
(b) 不同电流低位导体缺陷下导体温升随距离的变化趋势

图 8 不同电流下内部导体温升随距离的变化趋势

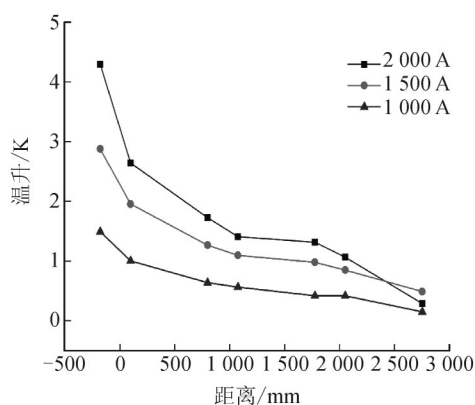
Fig. 8 Changing trends of the conduct temperature rise over distance under different current

不同电流高、低位导体缺陷下壳体温升随距离

的变化趋势见图 9。高位导体热缺陷下,通流 2 000、1 500、1 000 A 电流下故障点对应的壳体温升分别为 6.19、4.71、2.23 K。低位导体热缺陷下,相同电流下故障点对应的壳体温升分别为 4.50、3.12、1.70 K,前者高于后者。GIS 壳体的温升主要来自于内部 SF₆ 气体的对流传热,随距离呈现出逐渐降低的趋势。



(a) 不同电流高位导体缺陷下壳体温升随距离的变化趋势



(b) 不同电流低位导体缺陷下壳体温升随距离的变化趋势

图 9 不同电流下壳体温升随距离的变化趋势

Fig. 9 Changing trends of the shell temperature rise over distance under different current

2.2 GIS 内部导体过热缺陷严重程度评估方法研究

当 GIS 内部导体存在过热缺陷时,只能通过红外检测获得壳体的温升。为了进一步评估缺陷的严重程度,需要通过壳体温升准确反推内部导体的实际温升。

通过对 GIS 内部导体和壳体的温升情况进行分析,发现故障点处内部导体的温升差与径向对应点的壳体温升差的比值近似为固定值,温升差比值计算见式(2)。

$$\text{温升差比值} = \frac{\text{故障点导体温升} - \text{导体正常运行温升}}{\text{故障点壳体温升} - \text{壳体正常运行温升}} \quad (2)$$

实验中,以 ZF16-252(L)/Y4000-50 型的六氟化硫气体绝缘全封闭组合电器为例进行设备温升试验。施加 1.1 倍额定电流,环境温度 27.4 °C。结果表明,正常运行下,内部导体温升 65.0 K。因为在开

关设备中的发热正比于电流的平方,指数通常为2。由于辐射和对流,指数可能变化。经验表明,该指数取决于开关设备和控制设备的设计以及开关设备和控制设备内的元件,通常在1.6~2.0的范围。1.8代表了一个折中的数值,涵盖了大多数工况,并且是在IEC 62271-306:2012中使用的数值。通过温升与电流值的比例关系,求得正常运行情况下,额定电流分别为2 000、1 500、1 000 A时,导体温升分别为15.7、9.36、4.51 K。正常运行下,GIS壳体的温度近似等于环境温度。

计算得到不同电流高、低位导体缺陷下的温升差比值见图10。图10中,高位导体缺陷通流2 000、1 500、1 000 A下比值分别为8.83、9.00、9.79,低位导体缺陷通流2 000、1 500、1 000 A下比值分别为10.30、10.01、10.53。温升差比值受电流大小与缺陷位置影响较小,文中将温升差比值近似取10。

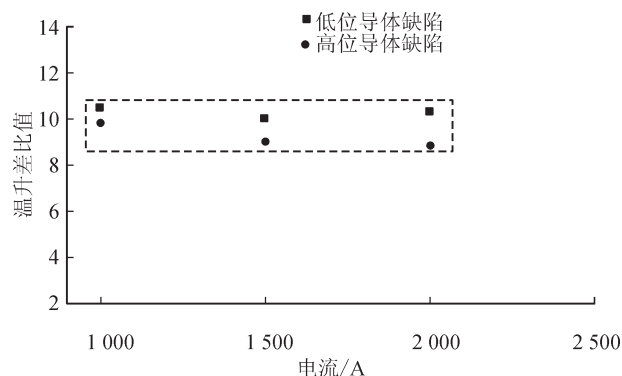


图10 不同电流高、低位导体缺陷下温升差比值

Fig. 10 Temperature-rise difference ratio in A and B phase

利用温升差比值,根据测得的壳体温升,并结合正常运行下内部导体与壳体的温升,可以获得内部导体的实际温升,见图11。根据导体的温升情况,将内部过热缺陷严重程度进行了划分。根据GB/T 11022—2011规范规定,GIS内部导体允许温升最大值为75 K,当温升大于75 K时,设备存在严重缺陷;当内部导体温升大于50 K小于75 K时,设备存在异常;当内部导体温升大于正常运行温升小于50 K时,设备应引起注意。

3 结论

文中通过在自行设计的252 kV三相共箱GIS母线腔体内设置内部导体过热缺陷,利用电子式测温技术和红外热诊断技术分别监测GIS母线以及壳体的温度,开展了不同电流下GIS温升实验,得到的主要结论如下:

1)通流相同电流,高位导体热缺陷下内部导体

和壳体温升均高于低位导体热缺陷。导体温升主要来自于自身发热和热传导,壳体温升主要来自于SF₆气体的热对流。导体和壳体温升随着离故障点的距离增加而下降。

2)导体温升差与壳体温升差比值与通流大小、过热缺陷位置无关,为固定值。

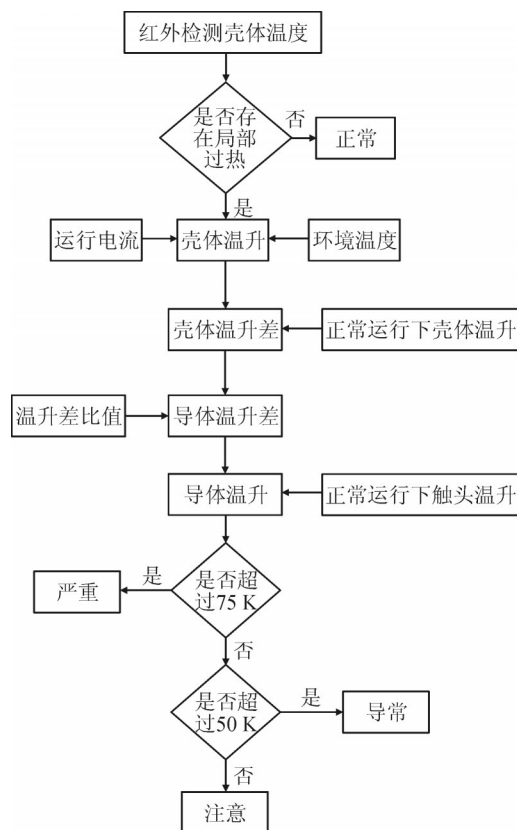


图11 GIS内部导体过热缺陷严重程度评估流程图

Fig. 11 Severity assessment flow diagram in GIS

3)基于温升差比值可以计算得到内部导体实际温升,根据导体的允许温升值,实现了对GIS内部过热缺陷严重程度的评估。

参考文献:

- [1] KAUFMANN B, KUDOKE M, GROSSMANN S. Experimental verification of convective heat transfer computations for gas insulated switchgear[C]//2013 4th International Youth Conference on Energy. Siófok, Hungary: IEEE, 2013: 1-6.
- [2] 周 鑫, 鲁铁成, 罗容波, 等. 气体绝缘组合电器触头电接触状态检测与评估方法[J]. 高压电技术, 2015, 41(1): 217-224.
ZHOU Li, LU Tiecheng, LUO Rongbo, et al. Detection and evaluation method of electrical contact state in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 217-224.
- [3] 纽春萍, 强若辰, 王小华, 等. 高压断路器接触电阻的耦

- 合面积法分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 18-23.
- NIU Chunping, QIANG Ruochen, WANG Xiaohua, et al. Simulation of high-voltage circuit breaker contact resistance via contact area coupling method[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 18-23.
- [4] 丁 健. 金属封闭高压开关柜触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 114-117.
- DING Jian. Heating mechanism analysis on metal-enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 114-117.
- [5] 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 present situation of GIS contact detection[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 137-140.
- [6] 刘佳鑫, 鲁旭臣, 韦德福, 等. GIS 长母线回路电阻测试方法研究[J]. 东北电力技术, 2015, 36(5): 16-19.
- LIU Jiaxin, LU Xuchen, WEI Defu, et al. Research on test method of loop resistance of GIS long bus[J]. Northeast Electric Power Technology, 2015, 36(5): 16-19.
- [7] 罗林根. GIS 局部放电在线检测装置-多通道高速数据采集系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- LUO Linggen. Study on the detection device of a multi channel online partial discharge GIS high speed data acquisition system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [8] 王天健. GIS 局部放电检测与故障识别[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- WANG Tianjian. Monitoring partial discharges of GIS and indentifying the type of faults[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [9] 韩玉兰, 芦 兴, 路 灿, 等. 高压开关柜隔离触头温度红外检测系统的研制[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 578-581.
- HAN Yulan, LU Xing, LU Can, et al. Temperature monitoring system for contacts of high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 578-581.
- [10] 张良胜, 张 杰. 红外在线监测系统在封闭开关柜中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 150-153.
- ZHANG Liangsheng, ZHANG Jie. Application of switch tank temperature online monitor system based on infrared[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 150-153.
- [11] 张文峰, 彭向阳, 陈锐民, 等. 基于无人机红外视频的输电线路发热缺陷智能诊断技术[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1334-1338.
- ZHANG Wenfeng, PENG Xiangyang, CHEN Ruimin, et al. Intelligent diagnostic techniques of abnormal heat defect in transmission lines based on unmanned helicopter infrared video[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1334-1338.
- [12] HUDA A, TAIB S. Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 220-227.
- [13] JADIN M S, TAIB S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4): 236-245.
- [14] 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. Online GIS switch contact temperature monitoring based on IR sensing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 144-148.
- [15] 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 online temperature monitoring technology for shielded GIS contacts[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 148-153.
- [16] 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, ZHA Wei, SUN Fu, et al. Inner temperature distribution of UHV GIS using infrared thermo-diagnosis technology[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 16-20.
- [17] 陈 强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 引入多重边界条件的GIS母线温度分布多场耦合计算及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 187-195.
- CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Numerical calculation and correlative factors analysis on temperature distribution of GIS bus bar based on coupled multi-physics methodology combined with multiple boundary conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 187-195.
- [18] 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. Thermal field calculation and analysis of gas insulated busbars based on fluid multiple species transport[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 141-147.
- [19] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发热故障中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 92-95.
- CHEN Baoyi. Application of infrared diagnostic technology in high voltage circuit breaker internal heat fault[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 92-95.

刘 凯(1991—), 男, 工程师, 主要从事高压开关故障监测方面的研究工作。