

〈红外应用〉

基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子红外检测方法

李唐兵¹, 龙 洋², 万亚玲³, 姚建刚³, 游勇华¹, 周求宽¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013; 3. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了解决传统绝缘子红外检测方法存在检测盲区的问题, 在绝缘子盘面温升规律仿真分析和实验研究的基础上, 将盘面特征纳入劣化绝缘子诊断判据中, 提出了一种基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子红外检测方法, 现场实测验证情况表明该方法可以提高绝缘子检测的准确率。绝缘子盘面温升规律实验研究表明: 劣化绝缘子盘面温度较相邻正常绝缘子低, 呈“负温升”特征; “负温升”特征的明显程度与劣化绝缘子在串中位置、环境湿度和表面污秽状况有关: 两端位置时劣化绝缘子盘面“负温升”特征更明显, 湿度大时劣化绝缘子盘面“负温升”特征更明显。

关键词: 红外测温; 劣化绝缘子; 盘面温升; 环境湿度

中图分类号: TP301.6; TM85

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)12-1193-06

Infrared Image Synthetic Diagnosis Method of Faulty Insulators Based on Temperature Rise Characteristics of Steel Caps and Disks

LI Tangbing¹, LONG Yang², WAN Yaling³, YAO Jiangang³, YOU Yonghua¹, ZHOU Qiukuan¹

(1. Electric Power Research Institute of Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330096, China;

2. Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China;

3. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To improve the accuracy of insulator detection technology based on infrared thermal imaging, a diagnosis method based on temperature rise characteristics of insulator steel caps and disks is proposed. According to the voltage distribution of insulator strings and heating model of insulators, the temperature rise law of insulator steel caps and disks is studied. Simulation and experimental results show that the insulator disk temperature of a faulty insulator is lower than that of adjacent normal insulator, which shows negative temperature rise characteristics. The evident degree of negative temperature rise characteristics of faulty insulators is related to environment humidity, insulator surface contamination, and the position of the faulty insulator on the insulator string. The higher the ambient humidity, the more evident is the negative temperature rise characteristic of the faulty insulator disk. When the faulty insulator is at the end of the insulator string, the negative temperature rise characteristics of the faulty insulator disk are more evident.

Key words: infrared temperature measurement, faulty insulator, disk temperature rise, environmental humidity

0 引言

盘形悬式瓷绝缘子(下称绝缘子)是使用最广泛的绝缘子类型^[1-2]。绝缘子所处环境复杂, 运行中的绝缘子受强电场、强机械应力的作用, 会出现低、零值等劣化情况, 容易引发绝缘子闪络、掉串等电网事

故^[3-4]。为了防止类似事故的发生, 需要对绝缘子的劣化情况做出及时准确的判断, 以便在危险来临之前, 采取必要的措施。当前, 我国电网已进入大电网、特高压、远距离、交直流并联输电的发展阶段, 采用带电检测设备获取绝缘子运行状态下的劣化情况, 对电网安全经济运行尤为重要^[5-6]。红外检测技术由于

收稿日期: 2017-10-23; 修订日期: 2018-05-22.

作者简介: 李唐兵(1983-), 男, 硕士研究生, 从事输变电设备状态检测技术研究工作。E-mail: 63463723@qq.com.

基金项目: 国网江西省电力有限公司科技项目: 基于光学成像的输变电设备带电检测关键技术研究(52182016001S)。

其不接触、不停运、不受电磁干扰等优点成为绝缘子劣化检测的主要发展方向^[7-8]。

劣化绝缘子的存在会导致绝缘子串电压分布和发热分布出现畸变^[9]，所以可以通过红外成像技术来检测劣化绝缘子。传统的绝缘子红外检测方法依据的是DL/T664-2008《带电设备红外诊断应用规范》^[10]，该标准以相邻绝缘子铁帽温差为1℃作为劣化绝缘子诊断标准。文献[11]分析了以铁帽温升特征为判据的劣化绝缘子红外检测方法存在的检测盲区现象：随着绝缘电阻的降低，绝缘子铁帽发热功率呈先增大后减小的趋势，故存在一个阻值区间，劣化绝缘子铁帽发热功率和正常绝缘子相当，铁帽温度曲线无劣化特征，该阻值区间即为检测盲区。

为了解决传统红外方法存在检测盲区的问题，本文深入研究了绝缘子的发热原理和红外成像规律，提出了一种基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子诊断方法，在铁帽温升特征不明显时，以盘面温升特征为辅助，可以准确识别和定位劣化绝缘子。

1 绝缘子温升规律研究

运行状态下的绝缘子发热包括以下3个部分^[12]，分别是：交变电场作用下绝缘介质极化效应引起的介质损耗发热 P_j 、劣化通道漏电阻损耗发热 P_L 和表面爬电泄漏电流引起的发热 P_w 。图1是绝缘子的等效电路图。

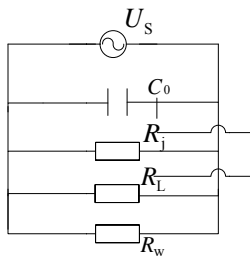


图1 绝缘子的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of insulator

图中 C_0 是极间电容， R_j 是介质损耗等值电阻； R_L 是劣化通道漏电损耗的等效电阻，其值取决于绝缘子内部劣化程度，正常时为无穷大； R_w 是表面污秽层漏电损耗的等值电阻，其值取决于绝缘子外表面的污秽状况和环境湿度； U_s 是绝缘子极间电压，其值取决于劣化绝缘子在绝缘子串中的位置。

绝缘子铁帽处的发热功率 P_1 由 P_L 和 P_j 和决定，发热功率为：

$$P_1 = P_j + P_L = U_s^2 \times \left(\frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_L} \right) \quad (1)$$

绝缘子盘面处的发热功率 P_2 由 P_w 决定，发热功率为^[13]：

$$P_2 = P_w = U_s^2 / R_w = U_s^2 / f \rho_w \quad (2)$$

式中： ρ_w 为绝缘子表面电阻率，单位 $\Omega \cdot m$ ； f 为形状系数。

由式(1)和(2)可知，正常绝缘子铁帽和盘面的发热功率均与其电压的平方成正比。假设绝缘子串两端的运行电压为 U_N ，绝缘子串在劣化绝缘子两极的等效阻抗为 Z_D ，则有：

$$P_1 = \left(\frac{Z_s U_N}{Z_s + Z_D} \right)^2 \times \left(\frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_L} \right) \quad (3)$$

$$P_2 = \left(\frac{Z_s U_N}{Z_s + Z_D} \right)^2 \times \frac{1}{f \rho_w} \quad (4)$$

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{f \rho_w} + w C_0 \quad (5)$$

式中： w 为系统角频率； Z_s 为劣化绝缘子的等效阻抗； Z_D 是劣化绝缘子两端的系统等效阻抗。

以220 kV电压等级XWP-70型绝缘子串为仿真对象， $U_N=127$ kV， $C_0=50$ pF， $R_j=5000$ M Ω ， $f=0.73$ ^[14]，以绝缘电阻500 M Ω 和50 G Ω 分别作为正常绝缘子温升的上、下限，绝缘子铁帽和盘面发热功率与劣化电阻 R_L 的关系曲线分别如图2和图3所示。

图2中 ρ_w 为 $5 \times 10^8 \Omega \cdot m$ 。

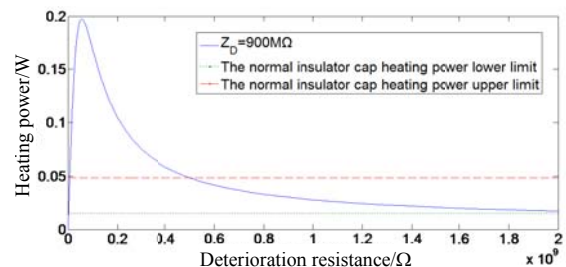


图2 绝缘子铁帽处发热功率与劣化等效电阻的关系

Fig. 2 Relation between heating power and insulator cap at the deterioration of equivalent resistance

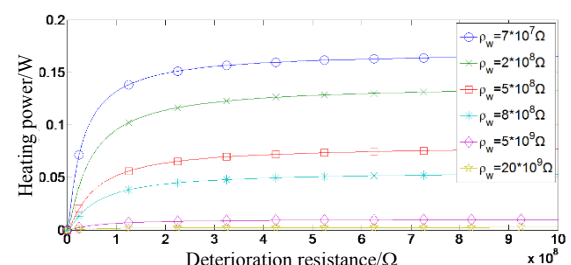


图3 绝缘子盘面发热功率与劣化等效电阻的关系

Fig.3 Relationship between the heating power of the insulator disk and the deterioration equivalent resistance

根据以上数据可以得到：

1) R_L 在5 M Ω 左右时，劣化绝缘子铁帽的发热与正常绝缘子相当，即绝缘子铁帽热像特征与正常绝

缘子无差异,该区域即为传统红外检测方法的检测盲区。当 R_L 小于盲区下限时,绝缘子铁帽温度与正常绝缘子比较呈“负温升”特征,当 R_L 大于盲区上限时,呈“正温升”特征。需要指出的是,检测盲区的范围和最大发热功率均与 Z_D 有关, Z_D 主要反映的是劣化绝缘子在绝缘子串中的位置。

2) 表面电阻率和劣化电阻是决定绝缘子盘面发热功率的两大因素。

表面电阻率大于 5×10^9 时(绝缘子表面污秽度较低或表面干燥情况),劣化绝缘子和正常绝缘子盘面发热功率均非常小,劣化电阻的改变几乎对绝缘子盘面发热功率不产生影响。

表面电阻率处于 $10^8 \sim 10^9 \Omega \cdot m$ 范围,劣化等效电阻大于 $150 M\Omega$ 时,盘面发热功率几乎不变化;劣化等效电阻小于 $100 M\Omega$,盘面发热功率随劣化等效电阻的降低快速下降。

2 绝缘子发热实验研究

为了研究劣化绝缘子的红外热像规律,在江西省电力科学研究所的人工污秽实验室模拟了220 kV绝缘子串的运行状况,通过改变环境条件、劣化绝缘子在串中位置来分析劣化绝缘子的红外成像规律。

2.1 实验方案

绝缘子采取垂直悬挂方式,上端接地,下端加压。人工污秽实验室内的湿度通过湿度控制系统来进行调节。实验选取现场拆换的XWP-70型号绝缘子,表面污秽等级为C级,劣化绝缘子实测阻值为 $4.25 M\Omega$ 。实验方案如下:

1) 为了研究劣化绝缘子在串中位置对其发热的影响,将劣化绝缘子依次放置1~15号位置(绝缘子从高电位向地电位依次编号),其他位置绝缘子保持不变,通过加压设备升压至实验电压127 kV,保持2 h让绝缘子达到热稳定状态,再用FLIR T640红外热像仪拍摄绝缘子串的红外图像。

2) 研究环境湿度对劣化绝缘子盘面发热的影响,保持劣化绝缘子位置不变(2号位置),加压2 h后利用湿度控制系统对实验室进行缓慢、持续加湿,湿度变化范围为65%~87%,每隔30 min用红外热像仪得到不同湿度下的劣化绝缘子串红外图谱。

图4为实验过程中拍摄的劣化绝缘子串红外图谱,室温 $26^\circ C \sim 28^\circ C$ 。

2.2 实验结果及分析

1) 位置对绝缘子盘面红外成像的影响

相对湿度65%。劣化绝缘子处于1、4、8及12

号位置时绝缘子串铁帽和盘面的温度分布曲线分别如图5、图6所示。由图5可知,在盲区附近的劣化绝缘子铁帽发热与正常绝缘子差异不大,劣化特征不明显,尤其是处于串中间的劣化绝缘子;由图6可知,劣化绝缘子盘面温度较相邻正常绝缘子低,呈“负温升”特征,盘面温度曲线中劣化绝缘子所在位置均出现局部低点,热像特征表现为劣化绝缘子盘面较相邻正常绝缘子盘面颜色偏暗。

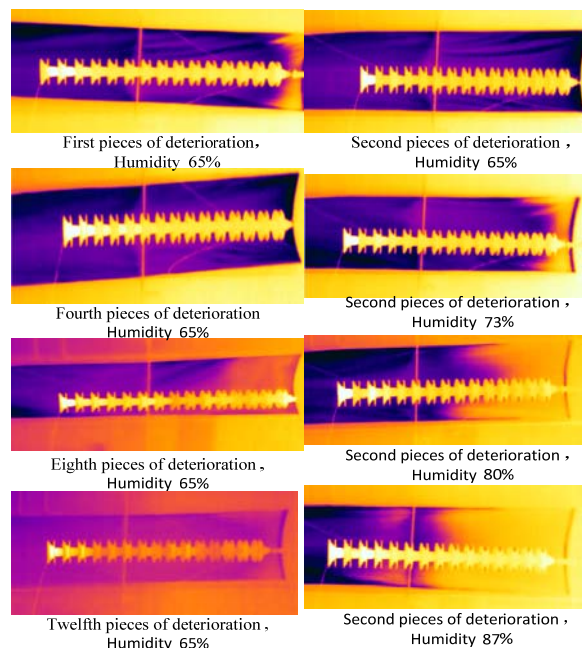


图4 劣化绝缘子串实验红外图谱

Fig. 4 Infrared spectrum of faulty insulators

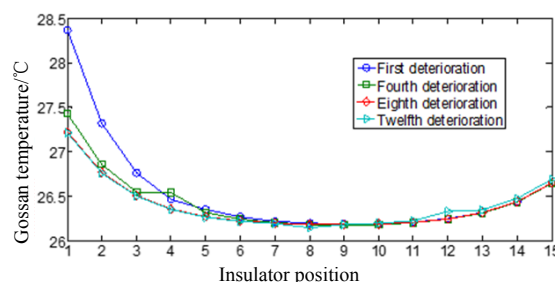


图5 劣化位置对铁帽温度分布的影响

Fig. 5 Influence of faulty insulator's position on temperature distribution of gossan

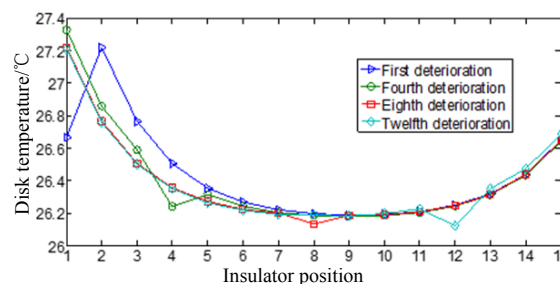


图6 劣化位置对盘面温度分布的影响

Fig. 6 Influence of faulty insulator's position on temperature distribution of disk surface

2) 环境湿度对绝缘子盘面红外成像的影响

劣化绝缘子处于2号位置, 室温26℃, 环境相对湿度65%~87%, 绝缘子串盘面温度分布曲线如图7所示。随湿度的增大, 劣化绝缘子与正常绝缘子发热差异逐渐增大, “负温升”特征趋于明显。随着湿度的增大, 盘面温度分布呈整体温度抬升的现象, 串两端的绝缘子温度抬升较串中间明显。

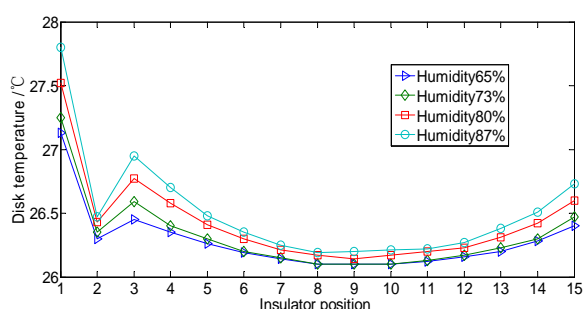


图7 环境湿度对盘面温度分布的影响

Fig. 7 Influence of ambient humidity on temperature distribution of disk surface

3 基于铁帽和盘面温升特征的诊断方法

本文在上述对绝缘子串盘面发热机理和实验研究的基础上, 提出了一种基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子诊断方法。该方法将铁帽和盘面的温度分布曲线分别与正常绝缘子串的标准温度分布曲线进行对比, 趋势变化不一致的位置按情况判定为劣化绝缘子。具体包括以下步骤:

1) 采集待诊断绝缘子串的红外热像图谱, 提取绝缘子串红外热像图谱中每片绝缘子的铁帽温度和盘面温度。

2) 将1)所述绝缘子铁帽温度和盘面温度分别按位置编号保存并绘制温度曲线, 得到绝缘子串的盘面温度分布曲线和铁帽温度分布曲线。

3) 将绝缘子串盘面温度分布曲线和铁帽温度分布曲线分别与标准曲线进行比较, 找出畸变点, 并按照以下准则进行劣化绝缘子判断:

①绝缘子串盘面温度分布曲线出现局部低点、绝缘子串铁帽温度分布曲线相同位置出现局部高点, 判断该位置为低值绝缘子。

②绝缘子串盘面温度分布曲线出现局部低点、绝缘子串铁帽温度分布曲线相同位置出现局部低点, 判断该位置为零值绝缘子。

③绝缘子串盘面温度分布曲线未出现局部低点、绝缘子串铁帽温度分布曲线出现局部高点, 判断绝缘子串铁帽温度分布曲线出现明显局部高点位置为低值绝缘子。

④绝缘子串铁帽温升曲线出现连续局部低点和高点, 则定位盘面曲线出现局部最低点的位置绝缘子为劣化绝缘子, 再依据②和③判断低/零值。

⑤绝缘子盘面温度分布曲线出现局部低点、绝缘子串铁帽温度分布曲线无畸变点, 判断该位置为处于盲区内劣化绝缘子。

⑥绝缘子串盘面温度分布曲线未出现局部低点且绝缘子串铁帽温度分布曲线无畸变点, 判断该绝缘子串无劣化绝缘子。

根据②判断出的零值绝缘子建议列为严重缺陷, 应尽快安排停电更换; 根据⑤判断出的盲区内劣化绝缘子建议列为较严重缺陷, 结合停电检修安排更换; 根据①和③判断出的低值绝缘子, 建议列为一般缺陷, 可视绝缘子串含劣化绝缘子的数量适时安排更换。

4 现场验证

2016年10月, 应用基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子诊断方法江西某220 kV变电站开展绝缘子红外检测, 发现多片劣化绝缘子。

4.1 检测实例

图8为现场检测出的典型盲区绝缘子红外图谱及温度分布曲线。用传统红外方法开展诊断, 绝缘子中各相邻绝缘子铁帽温差均未超过0.3℃, 铁帽温升曲线无明显畸变点, 判定为正常绝缘子串。利用本文方法开展诊断, 绝缘子串盘面曲线在5号位置有明显局部低点, 相同位置的铁帽温度曲线中有一定的微弱负温升特征, 判定5号位置为盲区劣化绝缘子。该绝缘子串的绝缘电阻测试结果如表1所示, 5号绝缘子的绝缘电阻为7.8 MΩ, 与诊断结果相符。

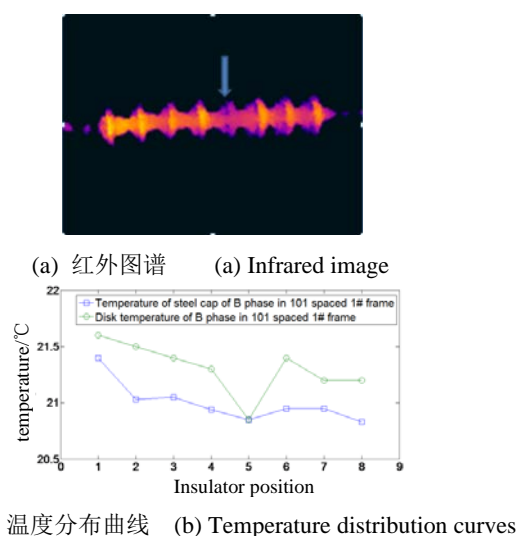


图8 现场检测出的典型盲区绝缘子

4.2 几种方法的对比分析

为了验证本文方法的效果,采用火花间隙法、传统红外法和绝缘电阻法对该站待更换绝缘子的全部绝缘子进行了测试,检测结果对比情况见表2。

分析表中数据可以得到:

1) 火花间隙检测法劣化绝缘子检测效果不佳,正确检出率仅37%,主要原因是该方法对低值绝缘子不敏感,漏检率大。

表1 绝缘电阻测试结果
Table 1 Test results of insulation resistance

Serial number	Insulation resistance/MΩ	Traditional infrared method	The method proposed in this paper
1	5920	Good	Good
2	7170	Good	Good
3	7800	Good	Good
4	4730	Good	Good
5	7.8	Good	Faulty
6	6050	Good	Good
7	4560	Good	Good
8	2040	Good	Good

表2 某220kV变电站绝缘子检测数据

Table 2 Insulator detection data of a 220kV substation

Method	Correct detection			Missed	Detection rate
	zero value	low value	total		
Insulation resistance test	5	22	27	-	-
Spark gap method	4	7	11	16	37%
Traditional infrared method	0	8	8	19	29.6%
The method proposed in this paper	4	19	23	4	85.2%

Note: ①based on insulation resistance test results

②zero value(0-10)MΩ, low value(10-300)MΩ

2) 传统红外法即标准DL/T664《带电设备红外诊断技术应用导则》提出的劣化绝缘子诊断方法效果不佳,正确检出率仅29.6%。

3) 本文方法的检测效果较传统红外法有很大的改进,劣化绝缘子正确检出率达到了为85.2%。

5 结论

本文提出了一种基于铁帽和盘面温升特征的劣化绝缘子诊断方法,现场实测验证情况表明该方法可以

大幅度提高检测准确率。本文还研究了劣化绝缘子的发热机理和发热规律,得到了以下结论:1) 绝缘子铁帽发热功率随劣化电阻的减小呈现先增大后减小的趋势,基于铁帽温升特征的红外检测存在检测盲区;2) 劣化绝缘子盘面温度较相邻正常绝缘子低,呈“负温升”特征,盘面温度曲线中劣化绝缘子所在位置均出现局部低点,3) 劣化绝缘子盘面“负温升”特征的明显程度与劣化绝缘子在串中位置、环境湿度和表面污秽状况有关:两端位置时劣化绝缘子盘面“负温升”特征更明显,湿度大时劣化绝缘子盘面“负温升”特征更明显。

参考文献:

[1] 关志成, 刘瑛岩, 周远翔, 等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang, et al. Insulators and External Insulation of Transmission and Transformation Equipment[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2006.

[2] 张斌. 劣化绝缘子检测技术的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2016(SI): 275-278.

ZHANG Bin. Current study situation of faulty insulator detection method home and abroad[J]. Power System Technology, 2006, 30(SI): 275-278.

[3] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 输电线路悬式瓷绝缘子老化形式分析与试验研究[J]. 高电压技术, 2016(4): 1259-1267.

QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on aging modes and test of transmission line porcelain suspension insulators[J]. High Voltage Engineering, 2016(4): 1259-1267.

[4] 顾洪连, 沈其荣. 输电线路绝缘子掉串事故的原因分析[J]. 电力建设, 2002, 23(2): 30-31.

GU Honglian, SHEN Qirong. Analysis on causes of string breakage failure of insulators on transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2002, 23(2): 30-31.

[5] 蒋兴良, 黄斌, 苑吉河, 等. 电网络法计算交流特高压绝缘子串电压分布[J]. 高电压技术, 2008(1): 7-10.

JIANG Xingliang, HUANG Bin, YUAN Jihe, et al. Calculation of voltage distribution along insulator strings of UHV AC transmission line by electric-network method[J]. High Voltage Engineering, 2008(1): 7-10.

[6] 陈林华, 梁曦东. 特高压交流瓷绝缘子串电压分布的计算分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 376-381.

CHEN Linhua, LIANG Xidong. Computational analysis on voltage distribution along ceramic insulator strings of UHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 376-381.

[7] 夏强峰. 瓷质悬式绝缘子劣化非接触式检测方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 7-10.

XIA Qiangfeng. Research on Non Contact Inspection Method of Porcelain Suspension Insulator Deterioration[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 7-10.

(下转第1205页)

- [7] 郭冠华, 熊鸿建. 中国射线检测技术现状及研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2016, **37**(8): 1683-1695.
- WU Guanhua, XIONG Hongjian. Current status and research progress of Chinese radiation detection technology[J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2016, **37**(8): 1683-1695.
- [8] 张兴正, 宋隆均, 高昭福. 液化石油气罐车罐体内表面腐蚀的原因及防护[J]. 黑龙江科技信息, 2007(24): 19.
- ZHANG Xingzheng, SONG Longjun, GAO Zhaofu. Causes and protection of surface corrosion of liquefied petroleum gas tank cars[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2007(24): 19.
- [9] 许罗鹏, 王清远. 基于红外成像技术的铝锂合金2198疲劳裂纹监测机制研究[J]. 科学技术与工程, 2017, **17**(19): 1-7.
- XU Luopeng, WANG Qingyuan. Research on monitoring mechanism of aluminum and lithium alloy 2198 fatigue crack based on Infrared Imaging Technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, **17**(19): 1-7.
- [10] 白秋菊. 热成像检测中材料表面热发射率影响机理及其抑制方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- BAI Qiuju. Mechanism of thermal emissivity of material surface in thermal imaging detection and its suppression method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [11] LI H, LIN Z, SHEN X, et al. A convolutional neural network cascade for face detection[C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2015: 5325-5334.
- [12] 王晨, 汤心溢, 高思莉. 基于深度卷积神经网络的红外场景理解算法[J]. 红外技术, 2017, **39**(8): 728-733.
- WANG Chen, TANG Xinyi, GAO Sili. Infrared scene understanding algorithm based on deep convolutional neural network[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(8): 728-733.
- [13] Hidenorilde, Takio Kurita. Improvement of learning for CNN with ReLU activation by sparse regularization[C]// *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2017: 2161-4407.
- [14] Ersan YAZAN, Fatih Talu M. Comparison of the stochastic gradient descent based optimization techniques[C]// *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium(IDAP)*, 2017: 1-5.

(上接第1197页)

- [8] 姚建刚, 关石磊, 陆佳政, 等. 相对温度分布特征与人工神经网络相结合的零值绝缘子识别方法[J]. 电网技术, 2012(2): 170-175.
- YAO Jiangang, GUAN Shilei, LU Jiazheng, et al. Identification of zero resistance insulators by combining relative temperature distribution characteristics with artificial neural network[J]. *Power System Technology*, 2012(2): 170-175.
- [9] 安玲, 江秀臣, 朱宇, 等. 检测劣质绝缘子的新方法——敏感绝缘子法[J]. 中国电机工程学报, 2002, **22**(9): 109-112.
- AN Ling, JIANG Xiuchen, ZHU Yu, et al. A new method of detection degradation insulator: sensitive insulator method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, **22**(9): 109-112.
- [10] 国家能源局. DL/T664-2008 带电设备红外诊断技术应用导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- National Energy Board. DL/T664-2008, Technical guide for infrared diagnosis of alive equipment[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [11] 姚建刚, 彭子健, 张也, 等. 高压瓷绝缘子红外热像检测盲区研究[J]. 电网技术, 2017, **41**(11): 3705-3712.
- YAO Jiangang, PENG Zijian, ZHANG Ye, et al. Research on infrared thermal image blind spot of high voltage porcelain insulator[J]. *Power System Technology*, 2017, **41**(11): 3705-3712.
- [12] 金光照, 权光日. 高压绝缘子串电压分布及其表面温升的理论研究[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2011(6): 733-736.
- JIN Guangxi, QUAN Guangri. Theoretical study of the voltage distribution and the surface temperature rise of high voltage insulator strings[J]. *Journal of Beihua University: Natural Science*, 2011(6): 733-736.
- [13] 李佐胜, 姚建刚, 杨迎建, 等. 湿污绝缘子发热模型[J]. 电工技术学报, 2009(7): 21-27.
- LI Zuosheng, YAO Jiangang, YANG Yingjian, et al. Heating model of polluted and wetted insulators[J]. *Transactions of China Electro Technical Society*, 2009, **24**(7): 21-27.
- [14] 陈丽勤, 周军, 时卫东. 双伞型绝缘子交流污闪电压值的计算[J]. 高电压技术, 2010(4): 952-956.
- CHEN Liqin, ZHOU Jun, SHI Weidong. Calculation of AC flashover voltage of polluted double-shed insulators[J]. *High Voltage Engineering*, 2010(4): 952-956.