

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.230087.

光纤光缆技术与应用

刘焱. 复合绝缘子表面异常发热点识别方法[J]. 光通信研究, 2024(6):230087.

Liu Y. Method for Identifying Abnormal Hot Spots on the Surface of Composite Insulators [J]. Study on Optical Communications, 2024(6):230087.

复合绝缘子表面异常发热点识别方法

刘焱

(国网宁夏电力有限公司, 银川 750000)

摘要:【目的】为了避免复合绝缘子热故障造成的高压输电线路运行风险,文章研究了复合绝缘子表面异常发热点识别的方法。【方法】文章分析了电流发热型、电压发热型以及综合发热型3种复合绝缘子表面异常发热形式,基于分析结果,利用光纤光栅集中测温技术,将光纤光栅传感器布设于复合绝缘子附近,采用光纤光栅集中测温单元计算相应波长偏移量及温度变化值,将变化值经数字信号处理单元解析后,生成复合绝缘子热图像。之后,文章使用最大类间方差法分割复合绝缘子热图像,计算复合绝缘子热图像的平均灰度,获取最优阈值划分复合绝缘子热图像中的像素。根据复合绝缘子热图像分割结果,利用像素统计方法,统计复合绝缘子分割图像横向的行像素点,划分复合绝缘子结构区域。依据带电设备热图像诊断应用规范,结合光纤光栅集中测温原理,将光纤光栅传感器采集的复合绝缘子热图像以伪彩色呈现复合绝缘子表面温度分布情况。最后,通过目标图像各结构区域间的温度关系,实现复合绝缘子表面异常发热点的识别。【结果】实验结果表明,该方法能够准确测量复合绝缘子表面任意点温度,最大均方根误差仅为1.39%;能有效划分复合绝缘子分割图像的结构区域,各结构之间分界明显,不存在重合现象。【结论】使用文章所提方法识别高压输电线路不同区域的复合绝缘子表面异常发热点的性能均较为理想,复合绝缘子结构区域划分效果较为优良。

关键词: 光纤光栅;集中测温;复合绝缘子;异常发热点;最大类间方差;像素统计

中图分类号:TM930

文献标志码:A

Method for Identifying Abnormal Hot Spots on the Surface of Composite Insulators

LIU Yao

(State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750000, China)

Abstract:【Objective】To avoid the operational risk of high-voltage transmission lines caused by thermal faults of composite insulators, a method for identifying abnormal hot spots on the surface of composite insulators is studied. 【Methods】Three types of abnormal surface heating forms of composite insulators, current heating type, voltage heating type, and comprehensive heating type, are analyzed. Based on the analysis results, the fiber Bragg grating centralized temperature measurement technology is used to deploy the fiber Bragg grating sensor near the composite insulator. The fiber optic dispersion centralized temperature measurement unit is used to calculate the corresponding wavelength offset and temperature change value. After being analyzed by the digital signal processing unit, the thermal image of the composite insulator is generated. Using the maximum inter class variance method to segment the thermal image of composite insulators, the average gray level of the thermal image of composite insulators is calculated, and the optimal threshold to partition the pixels in the thermal image of composite insulators is obtained. Based on the thermal image segmentation results of composite insulators, pixel statistical methods are used to calculate the horizontal row pixel points of the composite insulator segmentation image and divide the structural area of the composite insulator. According to the application specification of thermal image diagnosis for live equipment and the principle of fiber grating centralized temperature measurement, the thermal image of composite insulator collected by the fiber grating sensor is displayed in pseudo color to show the surface temperature distribution of composite insulator. The abnormal hot spots on the surface of composite insulators are identified through the temperature relationship among various structural regions of the target image. 【Results】The experimental results show that this method can accurately measure the temperature of any point on the surface of composite insulators, and the maximum Root-mean-square deviation is only 1.39%. It is shown that the proposed method can effectively divide the structural regions of composite insulator segmentation images, with clear boundaries between each structure and no overlap phenomenon. 【Conclusion】The recognition performance of abnormal hot spots on the surface of composite insulators in different areas of high-voltage transmission lines is relatively ideal, and the division effect of composite insulator structure areas is relatively good.

Key words: fiber bragg grating; centralized temperature measurement; composite insulator; abnormal hot spot; maximum interclass variance; pixel statistics

收稿日期:2023-08-08;

修回日期:2023-09-21;

纸质出版日期:2024-12-10

作者简介:刘焱(1987—),男,陕西渭南人。高级工程师,硕士,主要研究方向为变电运维新技术、变电集中监控技术和智慧变电站技术等。
通信作者:刘焱,高级工程师。E-mail:egaisi1@163.com。

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

复合绝缘子因具有体积小和防污闪性能优等特点,被广泛应用于高压输电线路中^[1-2]。外力因素导致复合绝缘子表面异常发热现象频繁出现^[3],给高压输电线路的安全稳定运行带来巨大威胁^[4-5]。因此,研究复合绝缘子表面异常发热点识别方法十分必要。

王永平等^[6]通过添加卷积模块及调整部分超参数对检测结构基础网络架构进行优化,实现了高压开关设备异常发热点的快速检测、识别和定位,建立了用于高压开关设备红外图像异常发热点的数据集,通过训练得出了合适的权重;刘云鹏等^[7]基于人工智能深度学习理论,采用深度学习算法体系中基于区域建议网络的快速区域卷积神经网络(Faster Region-based Convolutional Neural Network, Faster-RCNN)算法实现了对输变电红外图像发热故障的检测、识别及定位,以红外热成像仪采集到的输变电设备发热故障图像库为基础,构建了输变电设备异常发热红外智能检测模型。以上方法的泛化能力较好,识别精度可达到91%左右,但测温过程中易受不对称参数的影响,导致复合绝缘子热图像质量较低。

光纤光栅传感器以光纤光栅集中测温原理为基础,通过对中心波长信号的解调,持续测量物体表面温度变化值,并能将其转化成人眼可识别到的热图像,非常适用于复合绝缘子表面异常发热点识别。本文对复合绝缘子表面异常发热点的识别方法进行了研究。

1 复合绝缘子表面异常发热点识别方法

1.1 复合绝缘子表面异常发热形式

复合绝缘子表面异常发热主要包括电流发热型、电压发热型以及综合发热型3种形式,具体描述如下:

① 电流发热型:在负荷电流流经回路的情况下,可使用下式计算复合绝缘子表面产生的发热功率 P_I :

$$P_I = K_I I^2 R, \quad (1)$$

式中: K_I 为损耗系数; I 为负荷电流; R 为直流电阻。

② 电压发热型:交变电压易引起复合绝缘子的极化现象,从而造成能量损耗,此时复合绝缘子表面产生的发热功率 P_U 可表示为

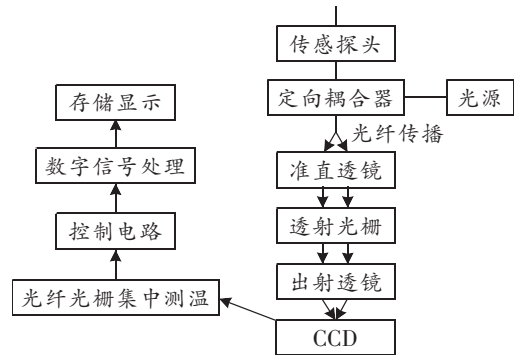
$$P_U = \omega C U^2 \tan \theta, \quad (2)$$

式中: ω 为电压角频率; C 为复合绝缘子的等值电容; U 为复合绝缘子上的电压; θ 为复合绝缘子损耗角。

③ 综合发热型:当复合绝缘子内部包含的磁滞和涡流产生损耗时,会以发热的形式进行释放^[8],加之复合绝缘子运行异常导致的短路现象,也会使损耗增加,从而引发其局部过热。

1.2 光纤光栅集中测温的复合绝缘子热图像采集

光纤光栅传感器以光纤光栅集中测温原理为基础,依据测量的设备表面温度变化值,生成设备热图像。因此,在上一小节分析复合绝缘子表面异常发热形式的基础上,本文将光纤光栅传感器布设于复合绝缘子附近,用于采集复合绝缘子热图像,从而为后续复合绝缘子表面异常发热点的识别提供数据支持。光纤光栅传感器工作原理示意图如图1所示。



注:CCD为电荷耦合器件。

图1 光纤光栅传感器工作原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of the working principle of fiber optic grating sensor

使用传感探头扫描复合绝缘子表面,通过定向耦合器将传感探头输出的光利用光纤进行传播,在准直透镜的作用下,使光入射到透射光栅上,并使用透镜完成分光处理,同时运用CCD探测器检测各分光波长的光强,若发生光波长偏移现象^[9-10],则采用光纤光栅集中测温单元计算相应波长偏移量及温度变化值,将计算所得经数字信号处理单元解析后生成复合绝缘子热图像,并利用存储显示单元呈现出来。

光纤光栅集中测温原理具体描述如下:光纤以石英为主要材料,包含纤芯和包层两部分,由于纤芯的折射率比包层小,纤芯可以支持光的传播。光栅的形成方式为依据一定周期完成光纤纤芯折射率的配置。在光入射到透射光栅的情况下,依据纤芯折射率,光栅将反射中心波长为 λ_B 的窄带光。 λ_B 的计算可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (3)$$

式中： n_{eff} 为光栅有效折射率； Λ 为光栅条纹周期。

由于轴向外力和温度对光纤的影响， n_{eff} 、 Λ 和 λ_B 均会随之改变，通过微分处理式(3)^[11]，可以得到 λ_B 的偏移量 $\Delta\lambda_B$ ，表示为

$$\Delta\lambda_B = 2(\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + n_{\text{eff}}\Delta\Lambda), \quad (4)$$

式中： Δn_{eff} 为 n_{eff} 的变化量； $\Delta\Lambda$ 为 Λ 的变化量。

在仅考虑温度对光纤影响的条件下， Δn_{eff} 和 $\Delta\Lambda$ 的计算过程分别为

$$\Delta n_{\text{eff}} = \xi n_{\text{eff}} \Delta T, \quad (5)$$

$$\Delta\Lambda = \alpha\Lambda \Delta T, \quad (6)$$

式中： ΔT 为温度变化量； ξ 和 α 分别为光纤热光系数和热膨胀系数。综合式(3)~式(6)，可以得到

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda\Delta T(\alpha + \xi) = K_T\Delta T\lambda_B, \quad (7)$$

式中， K_T 为灵敏度系数。当复合绝缘子表面温度发生变化时，即可通过式(7) 计算 $\Delta\lambda_B$ ，从而得出复合绝缘子表面温度变化值 ΔT 。

1.3 基于最大类间方差法的复合绝缘子热图像分割

使用最大类间方差法对上小节采集的复合绝缘子热图像进行分割，得到复合绝缘子目标图像。假设在复合绝缘子热图像中，灰度值等于 i 的像素有 n_i 个，灰度级数量用 L 描述，且灰度级介于 $0 \sim L-1$ 之间，则复合绝缘子热图像像素数量总数 N 为

$$N = \sum_{i=0}^{L-1} n_i. \quad (8)$$

各灰度级呈现的概率为 p_i ，其可通过将 n_i 和 N 作商获得。通过阈值 T 划分复合绝缘子热图像中的像素，使其变成 C_0 和 C_1 两个区域，两区域中像素灰度值分别介于 $[0, T-1]$ 和 $[T, L-1]$ 范围内，两个区域的概率分别为 p_0 和 p_1 ，平均灰度分别为 μ_0 和 μ_1 ，则两个区域的最大类间方差 σ_B^2 为

$$\sigma_B^2 = p_0(\mu_0 - \mu)^2 + p_1(\mu_1 - \mu)^2, \quad (9)$$

式中： μ 为复合绝缘子热图像的平均灰度。

在 $[0, L-1]$ 区间内依次取值赋给 T ，同时使用式(9) 完成每次取值后方差的计算，若某个 T 值可以最大化方差，则该 T 值即为最优阈值。通过所求最优阈值划分复合绝缘子热图像中的像素^[12-13]，比 T 小的像素组成的区域为目标区域，其余像素组成的区域为背景区域，以此实现复合绝缘子热图像的分割。

1.4 基于像素统计的复合绝缘子结构区域划分

依据 1.3 节获得的复合绝缘子热图像分割结果，使用像素统计方法进行复合绝缘子结构区域划分，以

提升后续复合绝缘子表面异常发热点识别效果。

统计复合绝缘子分割图像横向的行像素点总数，构成像素矩阵 Q ，其维数为 $M \times 1$ 。假设给定阈值为 H ，若 $Q(i) < H$ ，则表明矩阵第 i 行属于非复合绝缘子主体部分，令 $Q(i) = 0$ ，并生成新像素矩阵 Q_1 ，具体操作过程为

$$\begin{cases} Q_1(i) = Q(i), & \text{if } Q(i) \geq H \\ Q_1(i) = 0, & \text{if } Q(i) < H \end{cases}. \quad (10)$$

针对矩阵 Q_1 的 $1 \sim (5/6)M$ 行，求解其极小、极大值矩阵以及绝对差值矩阵，3 者分别用 U_{\min} 、 U_{\max} 和 U 描述。复合绝缘子某结构的两个端点行分别为 i_{1-1} 和 i_{1-2} ，两者为 U 内最大及次最大值对应 U_{\min} 的行，两个端点行的形式为

$$\begin{cases} i_{1-1} = \arg\{U_{\min}[\max(U)]\} \\ i_{1-2} = \arg\{U_{\min}[\max(U)]\} \end{cases}. \quad (11)$$

复合绝缘子分割图像在以上两个端点行间的最大区域，可通过求解最大内接矩阵 R_1 得到^[14-15]。两个端点行可以将 Q_1 划分成 $Q_2[1 \sim \min(i_{1-1}, i_{1-2})]$ 和 $Q_3[\max(i_{1-1}, i_{1-2}) \sim M]$ 两个新矩阵，利用其极大值与极小值的差可以更进一层划分矩阵。

针对 Q_2 ，若其前极大值 $U_{2, \max i}$ 和后极小值 $U_{2, \min i}$ 的差达到最大值，则此极小值 $U_{2, \min}$ 对应行 i_2 为端点行，针对 Q_3 ，若其前极小值 $U_{3, \min i}$ 和后极大值 $U_{3, \max(i+1)}$ 的差达到最大值，则此极小值 $U_{3, \min}$ 对应行 i_3 为端点行，两个端点行的形式为

$$\begin{cases} i_2 = \arg\{U_{2, \min}[\max(U_{2, \max i} - U_{2, \min i})]\} \\ i_3 = \arg\{U_{3, \min}[\max(U_{3, \min i} - U_{3, \max(i+1)})]\} \end{cases}. \quad (12)$$

通过以上两个端点行可将矩阵划分为 Q_{2-1} 、 Q_{2-2} 、 Q_{3-1} 和 Q_{3-2} ，从而完成复合绝缘子结构区域的划分。

1.5 复合绝缘子表面异常发热点识别实现

依据带电设备热图像诊断应用规范，通过复合绝缘子各结构区域间的温度关系，即可实现复合绝缘子表面异常发热点识别。由光纤光栅集中测温原理可知，光纤光栅传感器采集的复合绝缘子热图像以伪彩色呈现复合绝缘子表面温度分布情况，因此温差 T_δ 以及相对温差 δ_T 可表示为

$$\begin{cases} T_\delta = T_{\text{th}} - T_n \\ \delta_T = (T_{\text{th}} - T_n) / (T_{\text{th}} - T_{\text{ref}}) \times 100\% \end{cases}, \quad (13)$$

式中： T_{th} 为复合绝缘子表面最热点温度； T_n 为正常点温度； T_{ref} 为环境温度。依据带电设备热图像诊断应用规范，当复合绝缘子表面某区域内某点的 $\delta_T < 35\%$ 时，表明该点为正常发热点，否则即为异

常发热点;若 $80\% > \delta_T \geq 35\%$, 则代表复合绝缘子的故障等级为一般;若 $95\% > \delta_T \geq 80\%$, 则代表严重;若 $\delta_T \geq 95\%$, 则代表危急。

2 实例分析

将某高压输电线路上的复合绝缘子作为实验对象,使用 Matlab 软件搭建测试平台,将环境温度和相对湿度分别设置为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 和 59% , 并利用本文方法集中测量各复合绝缘子的表面温度,生成相应的热图像,并据此识别复合绝缘子表面异常发热点,图 2 所示为实验系统示意图,包含各测试平台的基本组成部分。图中,环境监测仪器用于测量环境温度和相对湿度;数据采集和存储设备用于采集和存储复合绝缘子表面温度数据;测温设备使用热像仪或红外相机测量复合绝缘子表面温度;Matlab 软件

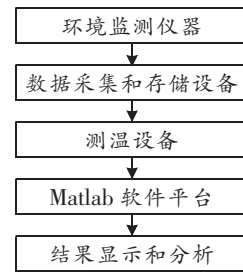


图 2 实验系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of experimental system

平台用于数据处理、分析和生成热图像;结果显示和分析模块用于识别复合绝缘子表面的异常发热点。

在某个复合绝缘子前端、中部和末端分别选取 4 个测量点,使用本文方法和文献[6]方法进行对比实验,获取的各测量点温度值和实际值的情况如图 3 所示。

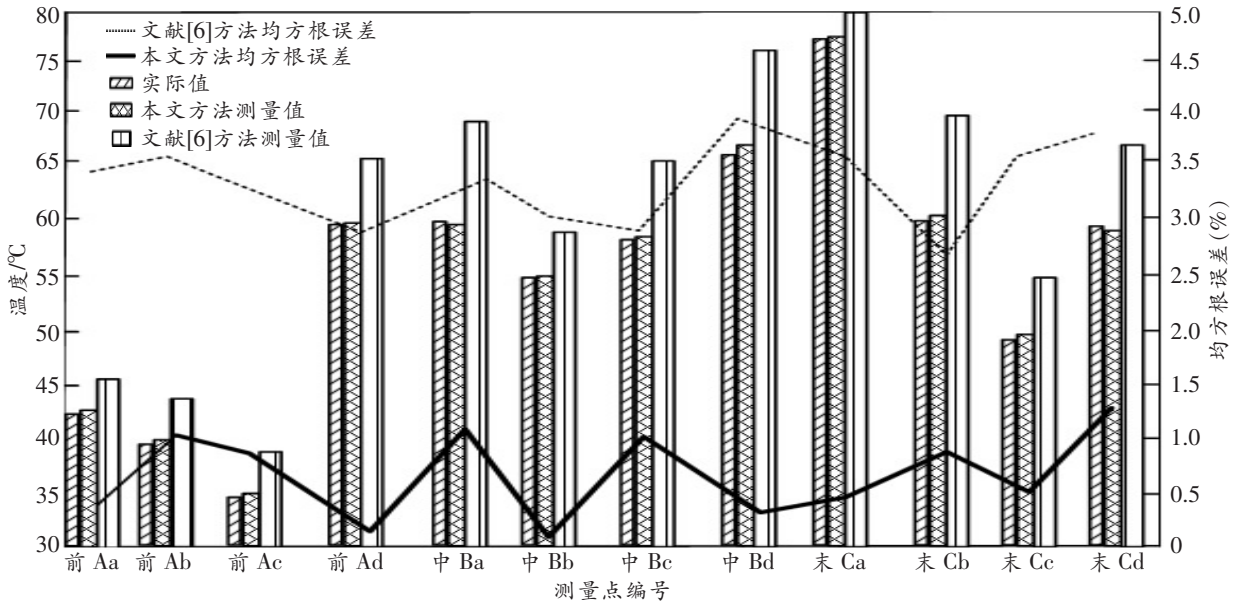


图 3 复合绝缘子表面温度测量结果

Figure 3 Surface temperature measurement results of composite insulators

由图可知,使用本文所提方法获取的各测量点温度值与实际值的最大均方根误差仅为 1.39% , 最小低至 0.20% , 表明本文所提方法使用的光纤光栅集中测温技术可以实现复合绝缘子表面任意点温度的精确测量。

图 4 所示为高压输电线路某两个区域的复合绝缘子热图像及其分割结果。由图可知,使用本文所提方法生成的复合绝缘子热图像质量较高,可以通过伪彩色清晰呈现复合绝缘子表面温度情况;经过图像分割可以有效消除繁杂的背景区域,获得的复合绝缘子目标区域较为完整,边缘轮廓及纹理特

征保留完好,表明本文所提方法具有较理想的复合绝缘子热图像采集和分割效果。

使用本文所提方法对复合绝缘子分割图像进行结构区域划分,所得结果如图 5 所示。由图可知,本文所提方法能有效划分复合绝缘子分割图像的结构区域,各结构之间分界明显,不存在重合现象,并且各部分结构排列紧密,未发生遗漏情况,表明本文所提方法的复合绝缘子结构区域划分效果较为优良。

随机选取高压输电线路某 3 个区域的复合绝缘子进行表面异常发热点识别测试,具体结果如图 6 所示,相应异常发热点的热响应曲线如图 7 所示。

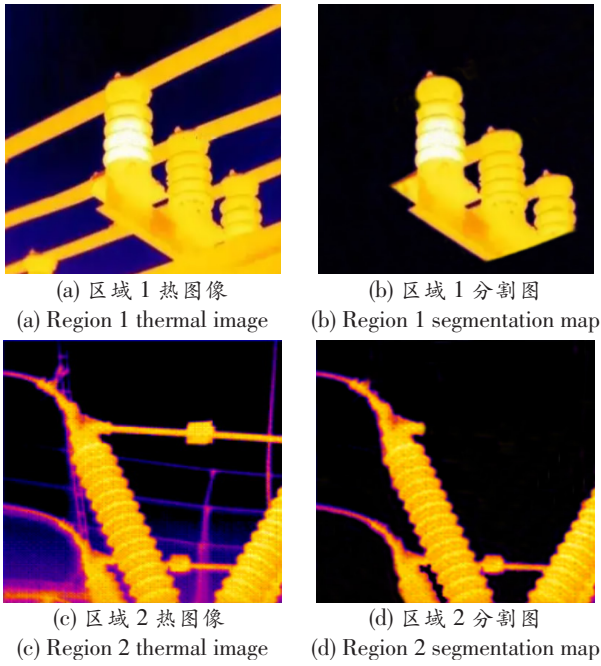


图 4 复合绝缘子热图像分割结果
Figure 4 Thermal image segmentation results of composite insulators

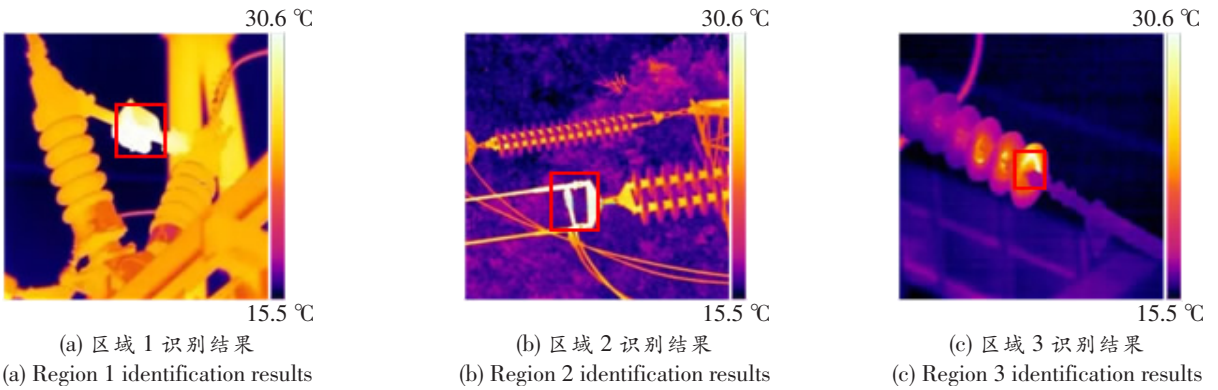


图 6 复合绝缘子表面异常发热点识别结果

Figure 6 Identification results of abnormal hot spots on the surface of composite insulators

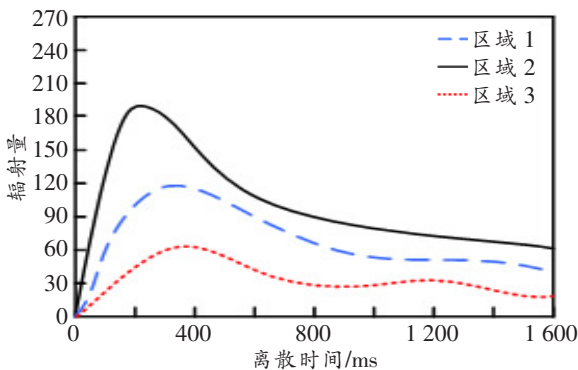


图 7 异常发热点的热响应曲线

Figure 7 Thermal response curve of abnormal hot spots

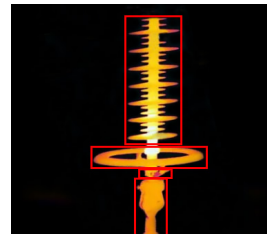


图 5 复合绝缘子结构区域划分结果

Figure 5 Division results of composite insulator structure area

由图 6 可知,当复合绝缘子表面出现异常发热现象时,伪彩色呈亮白状态,本文所提方法能将亮白区域准确标记出来,并且标记框符合目标区域大小,验证了本文所提方法具有较优异的复合绝缘子表面异常发热点识别能力。由图 7 可知,区域 2 中异常发热点的辐射量始终保持最高,其次为区域 1,最后为区域 3,表明区域 2 内异常发热点的故障等级最高,故障等级最低的为区域 3 内的异常发热点。由此可知,通过异常发热点的热响应曲线可以清晰呈现各异常发热点的故障程度。

高压输电线路的安全稳定运行,本文研究了复合绝缘子表面异常发热点识别方法。该方法运用光纤光栅集中测温技术,可以实现复合绝缘子表面任意点温度的精确测量,生成的复合绝缘子热图像质量较高,且该方法通过图像分割可提取完整的目标区域,并能有效划分目标区域的结构,在准确识别复合绝缘子表面异常发热点的同时,还能利用热响应曲线确定异常发热点的故障程度。在未来的研究中,可以进一步设计自动报警功能,在各情况下设定合理阈值,一旦复合绝缘子某处温度到达阈值,即向工作人员发出告警。同时,与保证高压输电线路其他部件的系统进行叠加分析,能够智能化显示输电线路故障原因,节约检修时间并提高安全保障。

3 结束语

为了及时、准确地检测复合绝缘子热故障,保证

参考文献:

- [1] 刘立帅, 郭晨黎, 王黎明, 等. 基于频域热特征成像的复合绝缘子缺陷检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2498-2505.
Liu L S, Guo C J, Wang L M, et al. Defects Detection Method for Composite Insulators based on Frequency Thermal Characteristics Imaging[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2498-2505.
- [2] 贾勇勇, 李玉杰, 陶加贵, 等. GW6B-252型隔离开关异常发热数值仿真与实验对比分析[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 240-246.
Jia Y Y, Li Y J, Tao J G, et al. Numerical Simulation and Experimental Analysis on Abnormal Overheating of GW6B-252 High-voltage Disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 240-246.
- [3] 张施令. 基于图像深度学习与三维电场仿真的电力用复合绝缘子缺陷挖掘分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 197-201.
Zhang S L. Defect Mining and Analysis of Electric Power Composite Insulator based on Image Deep Learning and Three-dimensional Electric Field Simulation[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(9): 197-201.
- [4] 周正钦, 冯振新, 周东国, 等. 基于扩展 Meanshift 电气设备发热故障区域提取方法[J]. 红外技术, 2019, 41(1): 78-83.
Zhou Z Q, Feng Z X, Zhou D G, et al. Fault Region Extraction of Electrical Equipment in Infrared Image by Using an Extended Mean Shift Method[J]. Infrared Technology, 2019, 41(1): 78-83.
- [5] 郭晨黎, 涂彦昕, 刘立帅, 等. 复合支柱绝缘子界面热波模型及其界面缺陷无损检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7160-7169.
Guo C J, Tu Y X, Liu L S, et al. Interfacial Thermal Wave Model of Composite Post Insulator and Its Non-destructive Detection Method on Interfacial Defects[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7160-7169.
- [6] 王永平, 张红民, 彭闯, 等. 基于 YOLO v3 的高压开关设备异常发热目标检测方法[J]. 红外技术, 2020, 42(10): 983-987.
Wang Y P, Zhang H M, Peng C, et al. The Target Detection Method for Abnormal Heating Point of High-voltage Switchgear based on YOLO v3[J]. Infrared Technology, 2020, 42(10): 983-987.
- [7] 刘云鹏, 裴少通, 武建华, 等. 基于深度学习的输变电设备异常发热红外图片目标检测方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(2): 27-33.
Liu Y P, Pei S T, Wu J H, et al. Deep Learning based Target Detection Method for Abnormal Hot Spots Infrared Images of Transmission and Transformation Equipment[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(2): 27-33.
- [8] 郭海涛, 孙玉洲, 李付永, 等. 高压隔离开关用复合绝缘子设计分析及其特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 141-147.
Guo H T, Sun Y Z, Li F Y, et al. Design Analysis and Characteristic Research of Composite Insulator for High-voltage Disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 141-147.
- [9] 周振宇, 张钰民, 孟凡勇, 等. 面向电机测温的嵌套结构管式光纤光栅传感器[J]. 半导体光电, 2021, 42(2): 201-206.
Zhou Z Y, Zhang Y M, Meng F Y, et al. A Nested Structure Tubular Fiber Bragg Grating Sensor for Motor Temperature Measurement[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(2): 201-206.
- [10] 张佳斌, 贺庆, 张青超. 光纤光栅传感器阵列在空间温度场测量中的应用[J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 724-728.
Zhang J B, He Q, Zhang Q C. Application of Fiber Bragg Grating Sensor Array in Space Temperature Field Measurement[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(6): 724-728.
- [11] 赵龙波, 毕勇, 赵龙翔. 防雷线路复合绝缘子并联间隙电场分布仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 100-103.
Zhao L B, Bi Y, Zhao L X. Simulation of Electric Field Distribution in Parallel Gap of Composite Insulators for Lightning Protection Lines[J]. Computer Simulation, 2019, 36(7): 100-103.
- [12] 黄新宇, 张洋, 王黎明, 等. 基于 Mask-RCNN 算法的复合绝缘子串红外图像分割与温度读取[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 87-94.
Huang X Y, Zhang Y, Wang L M, et al. Infrared Image Segmentation and Temperature Reading of Composite Insulator Strings based on Mask-RCNN Algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 87-94.
- [13] 高高, 陆倚鹏, 王笑倩, 等. 基于深度学习的悬式瓷绝缘子红外图像识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 119-125.
Gao S, Lu Y P, Wang X Q, et al. Infrared Image Recognition Method of Porcelain Disc-suspended Insulators based on Deep Learning Technology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 119-125.
- [14] 唐小煜, 黄进波, 冯洁文, 等. 基于 U-net 和 YOLO v4 的绝缘子图像分割与缺陷检测[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 15-21.
Tang X Y, Huang J B, Feng J W, et al. Image Segmentation and Defect Detection of Insulators based on U-net and YOLO v4[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(6): 15-21.
- [15] 聂斌, 王曦, 胡雪. 非正态变异下的非线性轮廓异常点识别方法研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(1): 101-107.
Nie B, Wang X, Hu X. Nonlinear Profile Outlier Detection for Non-normal Variation[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(1): 101-107.