

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.02.016

武永泉, 周晖, 赵轩, 等. 基于红外图像特征参量和 GK-SVM 算法的复合绝缘子劣化诊断方法研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(2): 184-194.

基于红外图像特征参量和 GK-SVM 算法的 复合绝缘子劣化诊断方法研究

武永泉¹, 周晖¹, 赵轩¹, 张四维¹, 祝仁杰¹,
黄昭¹, 王艺蛟², 乔新涵², 张东东²

1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 南京 210024;

2. 南京工程学院 输配电装备与新技术研究所, 南京 211167

摘要: 复合绝缘子劣化、局部温升已成为输电系统运行过程中的严重问题, 红外图像可用于复合绝缘子发热的识别, 但复合绝缘子发热影响因素复杂、缺乏有效识别方法等问题制约了红外图像的有效应用。考虑风速、湿度、碳化通道长度、水分侵入等条件, 建立了复合绝缘子碳化通道电—热—流多物理场仿真模型, 系统研究了劣化复合绝缘子发热的影响因素, 并提出基于环境输入参量及红外图像特征参量的粒度高斯核支持向量机(GK-SVM)故障识别方法。研究表明: 电压等级、风速、湿度、碳化通道长度、水分侵入等级均对复合绝缘子缺陷处温度产生影响, 相同条件下, 220 kV 复合绝缘子缺陷处的相对温升最大, 可达 13.2 °C。其中碳化通道缺陷长度和水分侵入等级对复合绝缘子缺陷处温度产生较大影响, 当缺陷长度从 0 mm 升至 200 mm 时, 缺陷处温度相对于环境温升增加了 4.3 倍; 而水分侵入等级从 0 级升至 3 级时, 缺陷处温度相对于环境温升增加了 0.7 倍。湿度和风速均对缺陷处温度产生负向影响, 当环境湿度从 30% 升至 80% 时, 缺陷处温度相对于环境温升降低了 20.6%; 而环境风速从 0 m/s 升至 6 m/s 时, 缺陷处温度相对于环境温升降低了 24.2%。基于环境输入参量及红外图像特征参量, 应用 GK-SVM 算法的复合绝缘子发热故障识别方法对 110 kV 和 220 kV 线路故障绝缘子的故障识别率分别可达 93.98% 和 94.67%, 误报率仅为 7.14% 和 5.33%。研究结果对于劣化复合绝缘子诊断方法的应用具有重要的参考价值。

关键词: 红外图像特征; 复合绝缘子; 劣化; 发热; 识别方法;

粒度高斯核

中图分类号: TM216

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)02-0184-11

Research on Composite Insulator Degradation Diagnosis Method Based on Infrared Image Feature Parameters and GK-SVM

收稿日期: 2024-03-06

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023087); 江苏省自然科学基金项目(BK20181021)。

作者简介: 武永泉, 高级工程师, 主要从事输电线路运检研究。

WU Yongquan¹, ZHOU Hui¹, ZHAO Xuan¹, ZHANG Siwei¹,
ZHU Renjie¹, HUANG Zhao¹, WANG Yijiao²,
QIAO Xinhao², ZHANG Dongdong²

1. Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210024, China;
2. Institute of Transmission and Distribution Equipment and New Technologies, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China

Abstract: The degradation and local temperature rise of composite insulators have become a serious problem in the operation of transmission systems. Infrared image can be used for identifying the heating of composite insulators, however, the complex factors affecting the heating of composite insulators and the lack of effective identification methods have hindered the effective application of infrared image. This research considered conditions such as wind speed, humidity, carbonization channel length, and moisture intrusion to establish a electricity-heat-flow multi-physical field simulation model for composite insulator carbonization channels. The factors affecting the heating of deteriorated composite insulators were systematically studied, and a Granular Gaussian Kernel Support Vector Machine (GK-SVM) fault identification method based on environmental input parameters and infrared image characteristic parameters was proposed. Research had shown that voltage level, wind speed, humidity, carbonization channel length, and moisture intrusion all had an impact on the temperature at the defect location of composite insulators. Under the same conditions, the relative temperature rise at the defect location of 220 kV composite insulators was the highest, reaching 13.2 °C. The length of carbonization channel defects and the level of moisture intrusion had a significant impact on the temperature at the defect site of composite insulators. When the defect length increased from 0 to 200 mm, the temperature at the defect site increased by 4.3 times relative to the environmental temperature rise. When the moisture intrusion level increased from 0 to 3, the temperature at the defect site increased by 0.7 times relative to the environmental temperature rise. Both humidity and wind speed had a negative impact on the temperature at the defect site. When the environmental humidity increased from 30% to 80%, the temperature at the defect site decreased by 20.6% relative to the environmental temperature rise. When the environmental wind speed increased from 0 to 6 m/s, the temperature at the defect site decreased by 24.2% relative to the environmental temperature rise. Based on environmental input parameters and infrared image feature parameters, the composite insulator heating fault identification method using GK-SVM can achieve identification rate of 93.98% and 94.67% with false alarm rate of only 7.14% and 5.33% for faulty insulators in 110 kV and 220 kV transmission lines, respectively. The research results have important reference value for the application of diagnosis method of deteriorated composite insulators.

Key words: infrared image feature; composite insulator; deterioration; heat generation; identification method; Granular Gaussian kernel

复合绝缘子由于其重量较轻, 具有较好的抗污闪特性, 已广泛应用于高压和超特高压输电系统中^[1-4]。大多数复合绝缘子具有良好的运行状态, 但仍有些复合绝缘子由于内部缺陷逐渐出现断裂现象和其他极端故障^[5-6]。早期的复合绝缘子故障通常引起发热现象, 绝缘子发热产生温升, 一方面容易造成复合材料的加速老化, 导致憎水性降低, 进一步导致绝缘子绝缘性能降低^[7], 从而容易发生污闪、雨闪等外绝缘闪络事故; 另一方面, 发热产生温升为复合绝缘子故障的非接触式在线监测提供了可能^[8]。但异常温升问题与其

外部气候条件相关,例如,当天气潮湿,水分浸入复合绝缘子时,缺陷产生的极化损耗、泄漏电流、局部放电可能会导致绝缘子局部温度升高^[5, 9]。因此在进行发热识别过程中,除了内部缺陷本身之外,应充分考虑外部环境等影响因素。

为了保证复合绝缘子安全可靠的运行,国内外学者对复合绝缘子的发热及识别方法进行了大量的研究^[5-6, 10-20]。文献[10]通过试验研究了湿度、污染和局部电场对老化绝缘子温度和介电性能的影响,研究发现局部加热是造成表面硅橡胶(SIR)材料老化的主要原因,老化后的 SIR 材料在高局域交流电场和高相对湿度下具有较强的介电损耗;文献[11]研究了复合绝缘子红外检测中的不稳定温升现象,研究发现复合绝缘子的不稳定温升现象与环境湿度和红外热像仪的观测角度有关,高湿条件下的温升远高于低湿条件下的温升,观测角度会影响红外测温结果,建议采用多角度拍摄,避免测量误差;文献[12]研究了复合绝缘子不同形式的异常温升。复合绝缘子的异常温升可分为点状温升和条状温升 2 种,建议在复合绝缘子上检测到点状温升时,应适当缩短绝缘子的检测周期;一旦检测到条状温升,应立即更换绝缘子;文献[13]通过数值模拟分析和仿真模型试验,系统地确定了不同类型复合绝缘子条件热缺陷的缺陷温度与红外结果之间的相互关系,特别是湿度与热之间的关系,研究结果有助于阐明复合绝缘子的热流传导规律,为了优化现有的复合绝缘子检测标准,应尽可能在干燥环境中检测复合绝缘子,盲目提高温升的阈值是不可取的。

上述研究对于揭示复合绝缘子异常发热原因以及基于红外图像故障识别方法的应用具有重要的意义。然而,由于缺乏系统的复合绝缘子发热影响因素研究,通过红外图像的故障识别误检漏检率较高。因此,本文系统研究了缺陷复合绝缘子发热影响因素,并基于分析结果,提出基于环境输入参量及红外图像特征参量的 GK-SVM 故障识别方法,研究结果对于劣化复合绝缘子的诊断具有重要参考价值。

1 劣化复合绝缘子发热特征影响因素仿真

碳化通道缺陷及受潮缺陷是复合绝缘子最为常见的劣化类别,图 1 展示了一种芯棒碳化酥朽的解剖图。本文考虑风速、湿度、碳化通道长度、水分侵入等条件,对复合绝缘子最常见的碳化通道缺陷进行电—热—流多物理场仿真研究。为研究电压等级的影响,本文建立了



图 1 芯棒碳化酥朽案例

110 kV、220 kV、500 kV、1 000 kV 复合绝缘子的几何模型,复合绝缘子结构尺寸如表 1 所示,碳化通道及受潮缺陷设置位置示意图如图 2 所示。

表 1 复合绝缘子参数与结构尺寸

绝缘子型号	电压/ kV	结构高度/ mm	大小伞裙直径/ mm	芯棒直径/ mm	伞裙间隙/ mm
FXBW-110/100	110	1 260	125/106	25	55
FXBW-220/120	220	2 150	150/100	28	46
FXBW-500/180	500	4 450	170/100	28	40
FXBW-1000/210	1 000	9 750	170/115	30	40

计算过程中同时考虑电磁热和非等温流动多场耦合建立仿真模型,为了提高计算效率,网格划分采用局部加密的方式,局部划分结果如图 3 所示,不同材料参量如表 2 所示。其中,缺陷碳化通道根据水分侵入受潮等级,其介电常数均匀递增至 80 F/m(水的介电常数约为 81 F/m)。

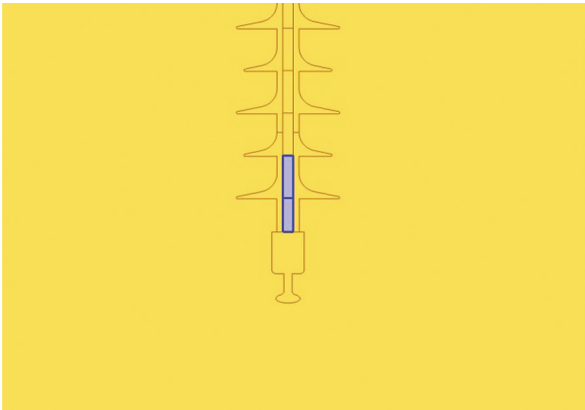


图 2 缺陷设置位置

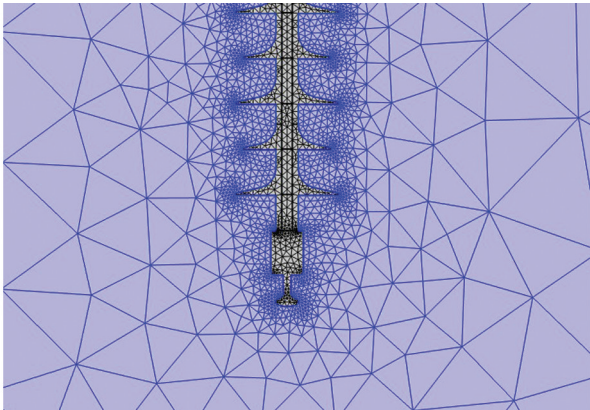


图 3 网格划分结果

表 2 不同材料参量

组成部分	芯棒	碳化通道	金具
材料	玻璃纤维	碳	钢
相对介电常数	2.25	20	1×10^8
电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	7.35×10^{-11}	1×10^3	6×10^7
导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.29	80	33
恒压热容/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	1 200	460	460
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 760	2 090	7 850

组成部分	伞裙	护套	空气域
材料	硅橡胶	硅橡胶	空气
相对介电常数	3.5	3.5	1
电导率/($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	2.35×10^{-10}	2.35×10^{-10}	1×10^{-30}
导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.27	0.27	0.03
恒压热容/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	1 700	1 700	1 005
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 140	1 140	1.293

2 复合绝缘子发热特征影响因素仿真分析

2.1 复合绝缘子多物理场仿真结果

根据前文所述方法,对 110 kV、220 kV、500 kV、1 000 kV 复合绝缘子分别建模,施加相应电压。风速设置为 0 m/s,环境温度设为 20 ℃,不考虑环境湿度影响,以高压端碳化缺陷 100 mm 为例,研究不同电压等级对碳化缺陷处温度的影响情况,不同电压等级复合绝缘子热场分布如图 4 所示。同时给出电场分布以解释局部发热原因,如图 5 所示。根据图 4 可得到电压等级对温升的影响,如图 6 所示。

由图 4~图 6 可以看出,电压等级对复合绝缘子缺陷处温度会产生一定影响。当电压等级从 110 kV 升至 1 000 kV 时,绝缘子缺陷处温度从 35.3 ℃升至 46.9 ℃,绝缘子相较于空气的温升逐渐增加,但是相对于同电压等级无缺陷的温升呈现先增加后降低的趋势。220 kV 复合绝缘子缺陷处的相对温升最大,可达 13.2 ℃,这是因为随着电压等级的增加,介质损耗产生的热量越多,所以电压等级越高,绝对温升越高。但是电压等级越高,其无缺陷条件的基础温升也增加了,导致 500 kV 和 1 000 kV 复合绝缘子的相对温升下降,最终导致 220 kV 复合绝缘子缺陷处的相对温升最大。因此在通过红外图像对绝缘子缺陷进行识别时,应考虑电压等级的影响。

此外,电场强度在碳化通道缺陷处最高。不同电压等级的复合绝缘子,在碳化缺陷处的电场强度均有所升高,绝缘子其他部位无明显变化,碳化通道导致的电场增加是缺陷处发热的原因之一。

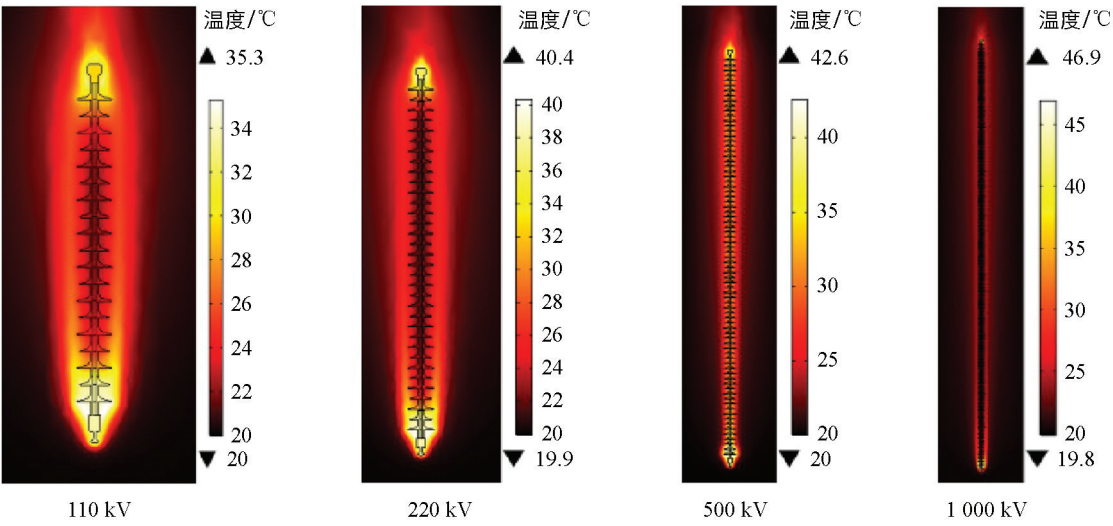


图 4 不同电压等级的劣化绝缘子热场分布

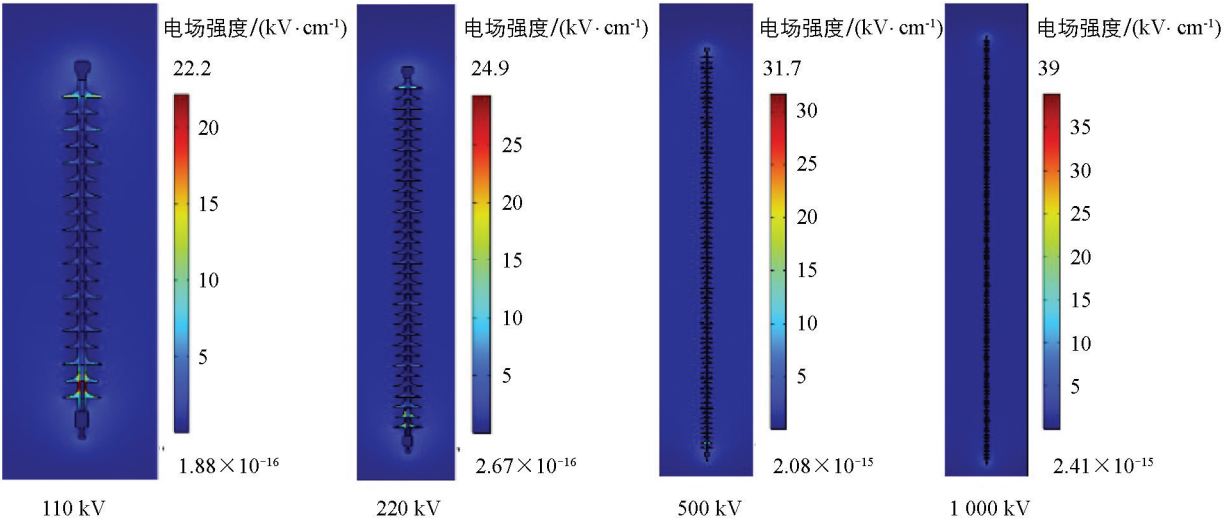


图 5 不同电压等级的劣化绝缘子电场分布

2.2 缺陷长度及受潮的影响

本文根据实际的碳化通道尺寸调研，选取了 0、20、40、60、80、100、120、140、160、180、200 mm 的碳化通道长度作为不同缺陷等级的模拟。根据前文所述方法，以 110 kV 复合绝缘子为例分别建模，施加相应电压，风速设置为 0 m/s，环境温度设为 20 ℃，不考虑环境湿度影响，并根据前文所述方法，以 100 mm 碳化通道长度为例，研究 4 个等级的水分侵入，仿真得到缺陷长度和水分侵入等级对温度和温升的影响，如图 7、图 8 所示。

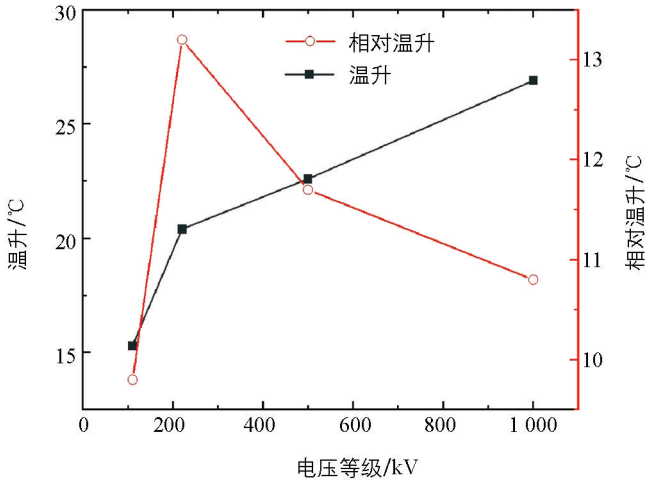


图 6 电压等级对温升的影响

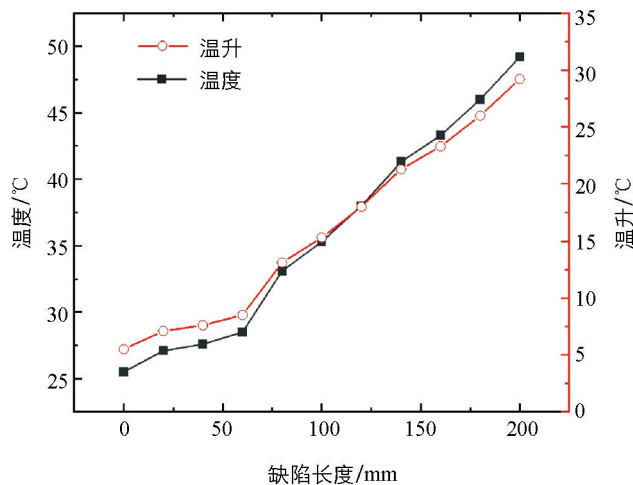


图 7 缺陷长度对温升的影响

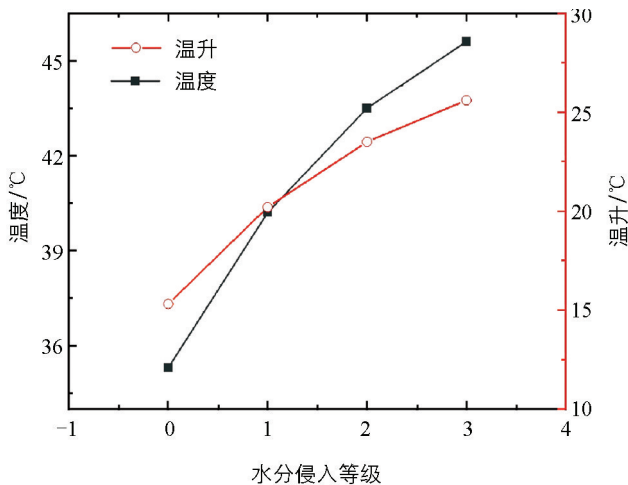


图 8 水分侵入等级对温升的影响

由图 7、图 8 可以看出,复合绝缘子碳化通道缺陷长度和水分侵入等级均对复合绝缘子缺陷处温度产生正向影响。当缺陷长度从 0 mm 升至 200 mm 时,绝缘子缺陷处温度从 25.5 °C 升至 49.2 °C,相对于环境温升由 5.5 °C 升至 29.2 °C,增加了 4.3 倍。而水分侵入等级从 0 级升至 3 级时,绝缘子缺陷处温度从 35.3 °C 升至 45.6 °C,相对于环境温升由 15.3 °C 升至 25.6 °C,增加 0.7 倍。由此可以看出,碳化通道尺寸和水分侵入等级均对复合绝缘子产生较大影响,因此可以通过红外图像对绝缘子缺陷进行识别。

2.3 环境因素的影响

环境因素是影响红外图像进行复合绝缘子缺陷识别的重要因素,因此本文研究了湿度和风速因素对于缺陷复合绝缘子发热的影响。根据前文所述方法,以 110 kV 复合绝缘子为例分别建模,施加相应电压,风速设置为 0~6 m/s,环境温度设为 20 °C,环境湿度设置为 30%~80%,仿真得到湿度和风速因素对温度和温升的影响,如图 9 所示。

由图 9 可以看出,当高压端碳化通道缺陷为 100 mm 时,在电—热—流耦合仿真下,相对湿度为 30% 时复合绝缘子温度分布与前文得到的整体分布结果基本一致。由于考虑了湿度的影响,与前文 35.3 °C 的温度相比略降低为 33.1 °C。

湿度和风速均对复合绝缘子缺陷处的温度产生负向影响。当环境湿度从 30% 升至 80% 时,绝缘子缺陷处温度从 33.1 °C 降低至 30.4 °C,相对于环境温升由 13.1 °C 降低至 10.4 °C,降低了 20.6%。而环境风速从 0 m/s 升至 6 m/s 时,绝缘子缺陷处温度从 35.3 °C 降低至 31.6 °C,相对于环境温升由 15.3 °C 降低至 11.6 °C,降低了 24.2%。由此可以看出,湿度和风速环境因素均对复合绝缘子发热产生一定的影响,因此通过红外图像对绝缘子缺陷进行识别时,应考虑环境因素的影响。

2.4 空气湿度对发热特性的影响机制分析

本文仿真得到的空气湿度对绝缘子缺陷处温升的影响是负向的,但是文献[21]中的影响和本文的研究结果不一致,因此本文对此不同点进行了分析。本文仿真结果与文献[21]测试结果对比如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,在本文的研究中,随着湿度的逐步增加,仿真得到的温升是逐渐降低的,这是因为空气当中水分的增加加快了芯棒的散热,因此有利于散热并使得温升降低。但从文献[21]中可以看出,随着湿度的增加,温升是先增加后降低的,空气中的水分从护套开裂处侵入绝缘子内部,由于水分子为极性分子,在交变电场作用下产生有损极化损耗,从而使复合绝缘子温升增大。

仿真与试验最主要的区别是,仿真温升的影响是短时的,仅作用于散热方面,而现实当中长时间的高湿度会导致水分侵入,湿度一方面影响介质损耗发热,另一方面会影响散热。综上,湿度也对复合绝缘子发热产生一定的影响,因此通过红外图像对绝缘子缺陷进行识别时,还应考虑湿度的影响。

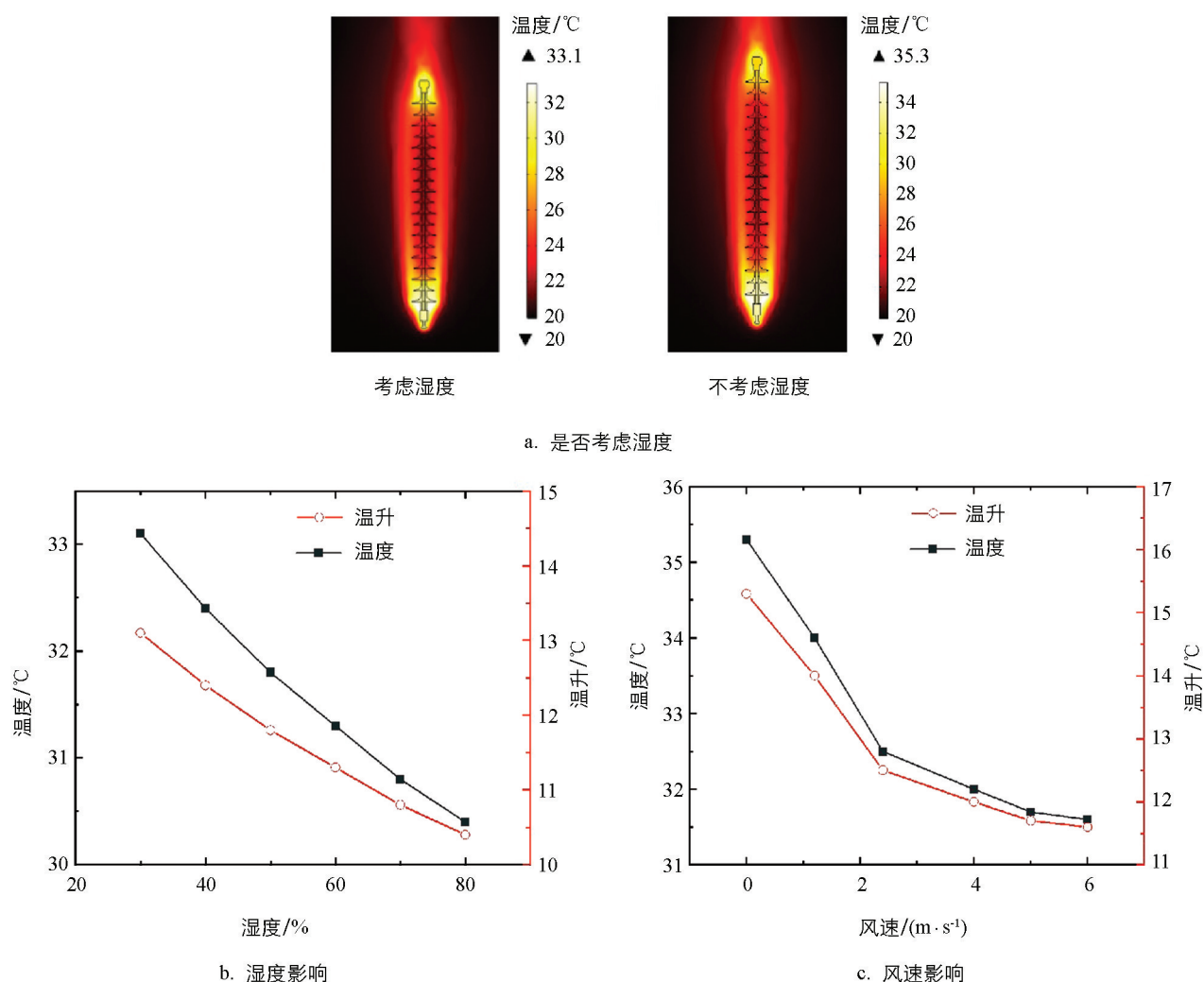


图 9 环境因素对温升的影响

3 基于红外图像的发热识别方法

3.1 环境输入参量及红外图像特征参量

3.1.1 环境输入参量

根据上一章的研究结果，复合绝缘子发热受到湿度、风速等因素影响，因此建模过程应考虑这些环境因素。本文以输电线路所在地区最小单位时间环境平均湿度 H_{ave} 、环境平均风速 V_{ave} 作为 2 个输入参量，其中最小单位时间为对应红外图像采集可获得环境参数的最小时间段。此外，在识别模型训练过程中将不同电压等级纳入不同类别。

3.1.2 红外图像温度特征参量

获取复合绝缘子红外图像的环境背景温度 T_{back} 、最大温度 T_{max} 、平均温度 T_{ave} 作为统计特征参量。

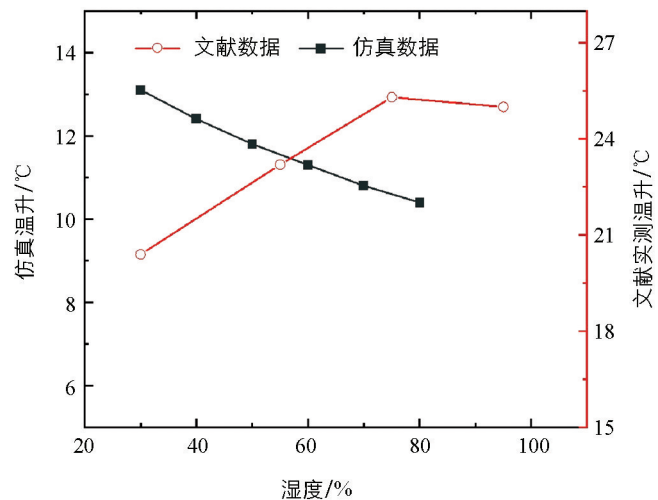


图 10 空气湿度影响分析

3.1.3 红外图像几何特征参量

首先进行图像预处理,预处理包括将RGB图像转为灰度图像和图像去噪,这2个步骤都是必不可少的,在分割算法前以提高输入热图的图像质量。

其次进行图像分割,采用最优阈值分割和平滑技术对重点区域进行分割,以探索故障区域。应用最优阈值算法得到的二值图像数学表达式为:

$$B(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } G(i, j) \geq \alpha \\ 0 & \text{if } G(i, j) < \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: $G(i, j)$ 和 $B(i, j)$ 分别为灰度图像和变换后的二值图像; α 为具体阈值。

通过式(1)进行图像分割,可得二值图像。处理单元对图像故障区域进行定位,然后在二值对象中提取几何和统计特征数据。

最后进行红外图像的特征参量提取,其中 A_r 表示故障区域面积,其数学表达式为:

$$A_r = \sum_{i=1}^n B(x, y) \quad (2)$$

式中: $B(x, y)$ 为二值图像。

Mj_a 表示被分割的故障区域的最长弦,其数学表达式为:

$$Mj_a = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3)$$

最长弦端点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 通过计算对象中每个边界像素之间的距离来确定,边界像素之间的最大距离被认为是最长弦。

Mn_a 表示被分割的故障区域的最短弦,其数学表达式为:

$$Mn_a = \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2} \quad (4)$$

最短弦端点 (x'_1, y'_1) 和 (x'_2, y'_2) 通过计算对象中每个边界像素之间的距离来确定,边界像素之间的最小距离被认为是最短弦。

偏心度 $Ecc(R)$ 表示最长弦与最短弦的比值,它提供了有关分段故障区域形状的信息。

$$Ecc(R) = \frac{Mj_a}{Mn_a} \quad (5)$$

$P(R)$ 为周长,其数学表达式为:

$$P(R) = \sum_i \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} \quad (6)$$

式中: x_i 和 y_i 为边界区域上第 i 个像素的坐标。

3.2 构建 GK-SVM 分类器

GK-SVM 表示基于粒度高斯核的支持向量机,其中 GK 表示粒度核,本文选用粒度高斯核。传统 SVM 学习算法中,每个数据点都要参加训练,其学习速度取决于给定样本的规模。本文利用信息粒代替传统的训练样本点,可大大提高学习器的效率。

SVM 从输入特征向量中选取支持向量,并绘制超平面进行分类,2 类决策超平面的数学表达式为:

$$h(x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } f(x) \geq 0 \\ -1 & \text{if } f(x) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $h(x_i)$ 表示分类器超平面; $f(x)$ 表示超平面函数。若归类为 +1,表明位于超平面右侧,属于正类。

相反,若归类为-1,表明位于超平面左侧,属于负类。

此外,通常线性 SVM 的性能不适用于多类分类问题,基于核的 SVM 在多类问题处理中具有良好效果。因此,采用高斯核 SVM(GK-SVM)对绝缘子进行故障分类。高斯超平面函数的数学表达式为:

$$f(x)=\sum_i^N \infty_i y_i k(x_i,x)+b$$

(8)

式中: ∞_i 表示权值,它可以为 0; $k(x_i,x)$ 表示利用支持向量绘制的高斯核方程,其数学表达式为:

$$k(x_i,x)=\exp\left(\frac{\|x-x_i\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

(9)

为了建立分类器,将环境输入参量、红外图像温度和几何特征转化为向量集,并按照 70%和 30%的比例进行训练和测试。

3.3 案例分析

研究中总共获得了 1 200 张(110 kV 的 700 张,其中故障样本 83 张;220 kV 的 500 张,其中故障样本 75 张)热成像图像。以其中 2 个故障图片为案例进行分析,图像处理过程如图 11 所示。根据 GK-SVM 算法进行预测识别,关键参数中的正则参数 C 选取 100,核参数 σ 选取 1,并选择人工神经网络算法(ANN)进行对比,最终结果如表 3 所示。在表 3 中,以 110 kV 为例,总量表示样本的总量为 700,故障表示样本真实故障数为 83,故障识别表示被识别出来的真实故障样本数量为 78,故障识别率表示正确的故障识别在真实故障数中的占比(78/83),误报表示把无故障识别为故障的样本量为 6,误报率表示误报数与总识别故障之比(6/(6+78))。

从表 3 中可以看出,本文所提的基于环境输入参量及红外图像特征参量的 GK-SVM 故障识别方法对于不同电压等级的复合绝缘子故障识别率均较高,110 kV 和 220 kV 线路的故障识别率分别可达 93.98%和 94.67%,误报率仅为 7.14%和 5.33%。110 kV 和 220 kV 线路的故障识别率均高于 ANN 算法的结果,且误报率也低于 ANN 算法的结果,具有较好的故障识别效果。

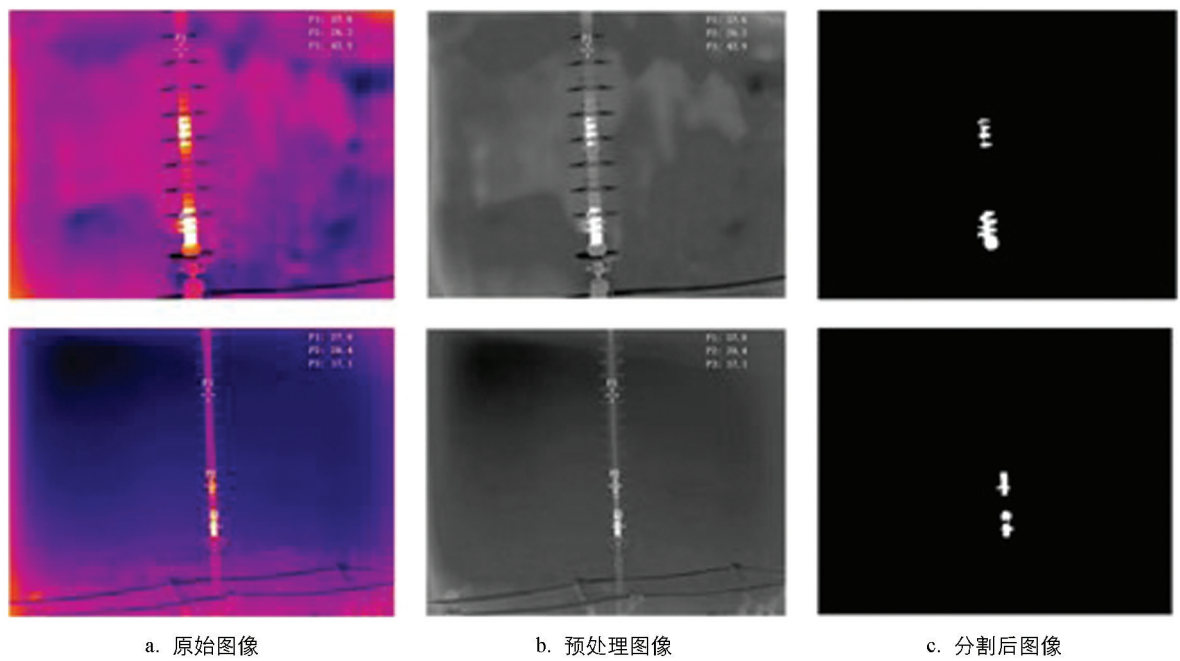


图 11 红外图像处理案例

表 3 验证结果

电压等级	110 kV		220 kV	
	GK-SVM	ANN	GK-SVM	ANN
总量	700	700	500	500
故障	83	83	75	75
故障识别	78	62	71	62
故障识别率/%	93.98	74.70	94.67	82.67
误报	6	15	4	7
误报率/%	7.14	19.48	5.33	10.14

4 结论

本文研究了基于红外图像特征参量和 GK-SVM 算法的复合绝缘子劣化诊断方法, 得到主要结论如下:

1) 电压等级对复合绝缘子缺陷处的温度产生一定影响, 当电压等级从 110 kV 升至 1 000 kV 时, 缺陷处温度相较于空气的温升逐渐增加, 但是相对于同电压等级无缺陷处的温升呈现先增加后降低的趋势, 220 kV 复合绝缘子的缺陷处相对温升最大, 可达 13.2℃。

2) 碳化通道缺陷长度和水分侵入等级均对复合绝缘子缺陷处的温度产生正向影响, 缺陷长度从 0 mm 升至 200 mm 时, 缺陷处温度相对于环境温升增加了 4.3 倍。而水分侵入等级从 0 级升至 3 级时, 缺陷处温度相对于环境温升增加 0.7 倍。因此, 碳化通道尺寸和水分侵入等级均对复合绝缘子产生较大影响, 可以通过红外图像对绝缘子缺陷进行识别。

3) 湿度和风速均对复合绝缘子缺陷处的温度产生负向影响, 当环境湿度从 30% 升至 80% 时, 绝缘子缺陷处温度相对于环境温升降低了 20.6%。而环境风速从 0 m/s 升至 6 m/s 时, 绝缘子缺陷处温度相对于环境温升降低了 24.2%。

4) 基于环境输入参量及红外图像特征参量, 应用 GK-SVM 算法的复合绝缘子发热故障识别方法对 110 kV 和 220 kV 线路故障绝缘子的故障识别率分别可达 93.98% 和 94.67%, 误报率仅为 7.14% 和 5.33%。

参考文献:

[1] BAKER A C, BELL S, BERNSTORF R A, et al. High Voltage Composite Line Post Insulators Combined Load Limits [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 38-45.

[2] JIN H, LV Z K, YUAN Z K, et al. Micro-Cracks Identification and Characterization on the Sheds of Composite Insulators by Fractal Dimension [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1821-1824.

[3] LU M, LI Y Y, HU J L. Influence of Sheds Damage on the AC Pollution Flashover Performance of Different Voltage Class Composite Insulators [J]. IEEE Access, 2020, 8: 84713-84719.

[4] PALANGAR M F, AMIN U, BAKHSHAYESH H, et al. Identification of Composite Insulator Criticality Based on a New Leakage Current Diagnostic Index [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9004110.

[5] 李龙龙. 考虑太阳辐射和水分侵入对复合绝缘子的温升影响研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.

[6] 张立明, 马立, 曹铖. 某 500 kV 输电线路复合绝缘子掉串故障分析 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(26): 97-101.

[7] 文龙, 李特, 赵浩然, 等. 220 kV 沿海线路复合绝缘子异常发热问题原因分析 [J]. 电工技术, 2023(21): 210-213.

[8] ZENG X J, ZHANG H F, REN Y H, et al. Finite Element Simulation on the Thermal Degradation of Silicone Rubber of Composite Insulator [C] //2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), May 7-10, 2023, Shanghai, China. IEEE, 2023: 1-4.

[9] 张东东, 万武艺, 黄宵宁, 等. 基于热—电—流耦合的芯棒碳化复合绝缘子发热特性研究 [J]. 电网技术, 2023, 47(7): 3010-3018.

[10] TU Y P, GONG B, YUAN Z K, et al. Moisture Induced Local Heating of Overhead Line Composite Insulators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 483-489.

[11] LI Z T, SHEN W, CAO W, et al. Study on Unstable Temperature Rise of Slightly Heating Composite Insulator Based on Infrared Detection [C] //2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), November 13-18, 2022, Kitakyushu, Japan. IEEE, 2022: 746-749.

[12] YUAN Z K, TU Y P, LI R H, et al. Review on the Characteristics, Heating Sources and Evolutionary Processes of the Operating Composite Insulators with Abnormal Temperature Rise [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 910-921.

[13] CHENG L, LIAO R J, YANG L J, et al. An Optimized Infrared Detection Strategy for Defective Composite Insulators According to the Law of Heat Flux Propagation Considering the Environmental Factors [J]. IEEE Access, 2018, 6: 38137-38146.

[14] YUAN Z K, TU Y P, ZHAO Y F, et al. Analysis on Heat Source of Abnormal Temperature Rise of Composite Insulator Housings [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3578-3585.

[15] CHENG L, ZHANG Z H, ZHANG F Z, et al. Study on Electrical Properties and Field Solutions of Water Related Heating of Composite Insulators on 500 kV AC Transmission Lines [C] //2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), October 18-21, 2015, Ann Arbor, MI, USA. IEEE, 2015: 672-675.

[16] 胡琴, 刘黎, 徐兴, 等. 基于随机森林算法的异常发热复合绝缘子分类模型 [J]. 电网技术, 2024, 48(1): 416-425.

[17] 李欣然, 黄齐林, 陈晓琳, 等. 基于不同发热特征的复合绝缘子老化原因分析 [J]. 绝缘材料, 2023, 56(8): 100-107.

[18] 刘辉, 张洋, 李子岳, 等. 复合绝缘子内部缺陷微波致热检测方法 [J]. 高压电器, 2023, 59(3): 179-188.

[19] 王晓杰, 许军, 林朝晖, 等. 输电线路复合绝缘子温升现象及其成因分析 [J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 165-171.

[20] 于业齐. 架空线路绝缘子内外部缺陷检测方法研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.

[21] 侯思祖, 钟正, 张思敏, 等. 不同湿度和观测距离下酥朽复合绝缘子的温升特性研究 [J]. 绝缘材料, 2022, 55(5): 102-107.

责任编辑 柳剑

崔玉洁