

# 基于红外热像技术的氧化锌避雷器故障检测方法

吴顺成\*

(国网天津市电力公司宁河供电分公司, 天津 301500)

**摘要:** 因氧化锌避雷器故障分布随机性强, 检测结果可靠性低, 为此, 提出基于红外热像技术的氧化锌避雷器故障检测方法。采用分辨率为 640 像素 × 480 像素的 FLIR T600 红外热像仪捕捉避雷器热感图像, 通过故障位置温度特征与二值化处理图像识别故障区域, 将温度异常区域的检测输出。测试结果表明, 对于测试氧化锌避雷器装置不同区域状态的检测结果与人工检测结果完全一致, 并未出现漏检或误检的情况。

**关键词:** 红外热像技术; 氧化锌避雷器; 故障检测; 温度扩散特征; 内接矩形

## Fault detection method for zinc oxide lightning arrester based on infrared thermal imaging technology

WU Shun-Cheng\*

(State Grid Tianjin Electric Power Company Ninghe Power Supply Branch, Tianjin 301500, China)

**ABSTRACT:** Due to the strong randomness of fault distribution and low reliability of detection results in zinc oxide lightning arresters, a fault detection method for zinc oxide lightning arresters based on infrared thermal imaging technology is proposed. The FLIR T600 infrared thermal imager with a resolution of 640×480 pixels is used to capture thermal sensing images of lightning arresters. The fault area is identified through temperature characteristics of the fault location and binary image processing, and the detection output of temperature abnormal areas is obtained. The test results show that the detection results of different areas of the zinc oxide lightning arrester device are completely consistent with the manual detection results, and there are no missed or false detections.

**KEY WORDS:** infrared thermal imaging technology; zinc oxide lightning arrester; fault detection; temperature diffusion characteristics; inscribed rectangle

## 0 引言

一个性能良好的避雷器可以有效地将雷电流引入大地, 从而保护电气设备不受过电压的损害<sup>[1]</sup>。然而, 避雷器在运行过程中会受到多种因素的影响导致避雷器的性能下降。因此, 对避雷器的状态进行定期检测和维护至关重要。在以混合遗传算法为基础的 10 kV 避雷器劣化状态识别研究中<sup>[2]</sup>, 通过光纤电流互感器采集避雷器状态信息, 再利用混合遗传算法, 从众多原始特征中选取有意义的劣化状态特征, 通过 AdaBoost 算法, 构建弱分类器并训练, 得到强分类器, 结合选取的劣化状态特征, 分类识别 10 kV 避雷器劣化状态。实验结果表明, 该方法的识别准确性较高。然而, 对于不同类型的避雷器, 可能需要

重新进行特征选择和分类器训练, 这增加了实际应用的复杂性。在以改进 YOLOv3 为基础的避雷器红外图像故障检测方法中<sup>[3]</sup>, 通过改进 YOLOv3 模型, 提高了对 MOA 红外图像故障的识别精度和检测速度。实验结果表明, 该方法具有较高的识别精度和较快的识别速度。但是红外图像的质量对检测结果有很大影响, 如果图像质量不佳, 可能会导致误检或漏检。

结合上述的分析可以看出, 针对避雷器故障检测进行进一步的研究具有重要的现实意义。为此, 本文提出基于红外热像技术的氧化锌避雷器故障检测方法研究, 并通过对比测试的方式, 分析验证了设计方法的性能。所提方法利用红外热像仪捕捉氧化锌避雷器表面的红外辐射, 并通过红外热像仪进行图像采集。基于非接触、无损的检测方法, 避免了对避雷器造成物

\* 通信作者: 吴顺成, 高级技师, 研究方向为电压互感器、电流互感器、避雷器、电缆、无功设备试验。E-mail: wsc2024@126.com

\* Corresponding author: WU Shun-Cheng, Senior Technician, State Grid Tianjin Electric Power Company Ninghe Power Supply Branch, Tianjin 301500, China. E-mail: wsc2024@126.com

理损伤的风险。根据氧化锌避雷器的形状特征,分割出避雷器的底座和上端保护罩部分,并通过内接矩形截取避雷器的二值图像,舍弃边缘部分。减少了后续处理的复杂性,提高了检测的准确性。

## 1 氧化锌避雷器故障检测方法设计

### 1.1 氧化锌避雷器热感图像采集

氧化锌避雷器是电力系统中广泛使用的一种过电压保护设备,主要由氧化锌电阻片组成,其具有良好的非线性伏安特性,能够在系统正常运行时呈现高电阻状态,有效限制工作电压下的泄漏电流。在系统遭受雷电过电压或操作过电压时,电阻片可迅速转变为低电阻状态,允许大电流通过,并将过电压限制在设备绝缘水平以下,从而保护电力设备免受过电压损害。

随着运行时间的增长,氧化锌电阻片会逐渐老化,其非线性特性和通流能力会逐渐下降。在雷击、大风、暴雨等恶劣天气条件下,避雷器内部或外部会受到水分、尘埃或其他污染物的侵入,影响电阻片的电气性能,降低其绝缘强度和通流能力,增加故障风险。而对氧化锌避雷器故障进行检测是降低隐患的措施之一,为此,研究氧化锌避雷器故障检测方法。

氧化锌避雷器发生故障的最直接表现就是局部温度会显著升高,并随着时间的推移,升温范围不断扩大<sup>[4-6]</sup>。通过红外热像仪采集氧化锌避雷器的热感图像,可以实时监测避雷器各部位的温度分布情况。通过热感图像可以直观地观察到这些温度异常点,从而实现了对早期故障的预警。针对此,本文利用红外热像技术采集氧化锌避雷器热感图像,将其作为后续氧化锌避雷器故障检测的执行基础。

对于具体的采集装置,本文选择分辨率为 $640 \times 480$ 像素的FLIR T600红外热像仪<sup>[7]</sup>,其可执行的测温范围为 $-20 \sim 600^\circ\text{C}$ ,能够满足氧化锌避雷器实际工作温度范围测量的实际需求,对应的热灵敏度为 $0.05^\circ\text{C}$ ,能够捕捉细微的温度变化。在 $25.0\text{ mm}$ 焦距以及 $24^\circ \times 18^\circ$ 的视场角(FOV)下,可以适应不同距离场景,实现对避雷器整体的完整覆盖<sup>[8]</sup>。

在具体的采集阶段,本文以红外热像仪放置在能够清晰观察氧化锌避雷器的位置作为采集的执行区域,调整热像仪与避雷器的距离在 $3.0 \sim 10.0\text{ m}$ 之间,以获得清晰的图像且不失真,同时确保热像仪镜头与避雷器表面之间的角度无视差。其中,具体如图1所示。

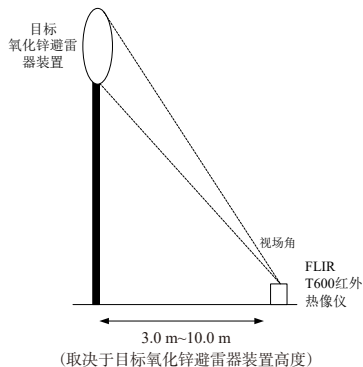


图1 氧化锌避雷器热感图像采集方式

Fig.1 Thermal image acquisition method of zinc oxide arrester

按照图1所示的方式,实现对氧化锌避雷器热感图像的采集,为后续的故障检测提供可行基础。

### 1.2 氧化锌避雷器故障检测

通过红外热像技术采集的氧化锌避雷器热感图像,可以直观地显示氧化锌避雷器各部位的温度分布情况。当氧化锌避雷器内部存在故障或隐患时,如氧化锌阀片老化、受潮或局部放电等,这些故障点会产生异常的热量,导致温度升高。热感图像能够迅速捕捉到这些温度异常点,实现故障的检测,避免故障进一步发展导致严重后果。

结合1.1部分采集的氧化锌避雷器热感图像,本文在具体的故障检测阶段,主要根据故障位置温度升高以及温度扩散的特征,实现对具体故障分布的分析和判断。具体检测内容如下。

首先,根据氧化锌避雷器的形状特征<sup>[9-10]</sup>,分割出避雷器的底座和上端保护罩部分。在此基础上,提取避雷器在图像中的位置信息,本文主要通过内接矩形截取避雷器的二值图像,同时舍弃边缘部分。对于故障区域的检测问题就转化为了温度信息分布的提取与计算问题。其中,整体平均温度的计算方式可以表示为:

$$T_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (1)$$

其中, $T_{\text{avg}}$ 表示整体氧化锌避雷器热感图像的平均温度参数, $N$ 表示分割氧化锌避雷器热感图像的内接矩形数量, $T_i$ 表示第 $i$ 个内接矩形对应的温度参数。具体的内接矩形数量受整体氧化锌避雷器热感图像大小以及故障检测的精度要求影响,整体氧化锌避雷器热感图像越大,故障检测精度越高,内接矩形数量越多。

在此基础上,对于整体氧化锌避雷器热感图像而言,当其存在故障时,则存在最高温度中心,对应像素点的温度值呈现出围绕其向外逐渐降低的发展趋势且中心点的温度高于平均值。针对此,对于故障区域的判定方式可以表示为:

$$\begin{cases} T_i > T_{\text{avg}} \text{ and } \frac{\Delta T}{\Delta x} \neq \alpha, \text{ 故障点} \\ \text{else, 非故障点} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\Delta T$ 表示连续内接矩形的温度差, $\Delta x$ 表示连续内接矩形的距离差, $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ 即为氧化锌避雷器热感图像相邻像素间的温度变化率, $\alpha$ 表示常数,当 $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ 为非定值时,表示此时的温度扩散特征满足故障点温度扩散特征,同时中心像素的温度远远大于整体图像的平均温度,则表示此时的中心像素点即为故障点;否则,则表示不存在故障。

按照上述所示的方式,结合温度扩散特征和故障点温度特征,实现对故障位置的检测,即如果某一区域的温度明显高于周围区域,且温度梯度不具有相对稳定的属性时,则表示该区域存在局部故障,以此完成避雷器故障的检测。

## 2 应用测试

### 2.1 测试准备

在分析本文设计避雷器故障检测方法应用效果的过程中,分别设置混合遗传算法避雷器故障检测方法,改进YOLOv3避雷器故障检测方法作为测试的对照组。通过在相同的测试环境

下对三种不同方法的测试结果与实际情况进行比较,对其具体的检测性能作出客观评价。

对于具体的测试对象,以某实际应用中的氧化锌避雷器装置为基础,测试氧化锌避雷器装置被安装在一个 110 kV 的变电站中,主要用于保护变压器和其他重要设备免受雷电过电压的损害。该变电站位于雷电活动较为频繁的地区,因此避雷器的性能和稳定性至关重要。在此基础上,对测试氧化锌避雷器装置的性能参数进行统计,具体如表 1 所示。

表 1 测试氧化锌避雷器装置参数配置

Table 1 Test the parameter configuration of zinc oxide lightning arrester device

性能	参数
避雷器型号	(H)Y5WS-5/15
避雷器额定电压(kV)	5.0
系统标称电压(kV)	3.0
持续运行电压(kV)	4.0
直流 $U_1$ mA 参考电压(kV)	$\geq 7.5$
陡波冲击电流残压(峰值, kV)	$\geq 17.3$
电冲击电流残压(峰值, kV)	$\geq 15$
操作冲击电流残压(峰值, kV)	$\geq 12.8$
2 ms 方波电流(峰值, A)	$\geq 75.0$
4/10 $\mu$ s 冲击电流(峰值, kA)	$\geq 40.0$

在表 1 所示的参数配置基础上,测试氧化锌避雷器装置能够在雷电冲击下迅速动作,将过电压限制在设备可以承受的范围内,从而有效保护电力设备的安全运行。但是在长期运行过程中,为保持稳定的工作状态,需要对故障状态进行周期性检测。为此,分别采用三种方法进行测试分析。

## 2.2 测试结果

在上述测试环境的基础上,分别对三种不同方法的检测性能进行分析,其中,本文将测试氧化锌避雷器装置划分为 6 个等面积的区域,具体如图 2 所示。



图 2 测试氧化锌避雷器装置区域划分

Fig.2 Region division of testing zinc oxide arrester device

根据图 2 所示,分别对 6 个区域是否存在故障进行诊断,并采用人工核验的方式进行验证,得到的测试结果如表 2 所示。

在表 2 的实验结果中可以看出,“1”表示存在故障,“0”表示不存在故障。对表 2 所示的测试结果进行分析,其中,在混合遗传检测方法下,出现了故障区域漏检的情况(区域 2);在改进 YOLOv3 检测方法下,虽然并未出现对故障区域漏检的情况,但是将正常区域 6 错误识别为故障区域;在本文设计方法下,对于测试氧化锌避雷器装置不同区域状态的检测结果与人工检测结果完全一致,并未出现漏检或误检的情况。

由此可以得出结论,本文设计的红外热像故障检测方法可以实现对氧化锌避雷器故障状态的有效检出,对于实际的氧化锌避雷器管理和维护具有可靠的指导价值。

表 2 不同方法测试结果对比表

Table 2 Comparison table of test results from different methods

区域编号	实际检验结果	混合遗传检测方法	改进 YOLOv3 检测方法	本文设计检测方法
1	1	1	1	1
2	1	0	1	1
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	1	0

## 3 结束语

无论是从安全的角度出发,还是从性能的角度出发,对避雷器存在的安全隐患进行有效的检测都是极为必要的。本文提出基于红外热像技术的氧化锌避雷器故障检测方法,通过对氧化锌避雷器的红外热像影像进行分析,实现对具体故障状态的判定与分析。借助本文对于避雷器故障状态的识别研究,以期实际的避雷器应用管理提供有价值的参考。在未来的研究中,还需结合对应的人工智能算法对温度图像进行深度分析,实现故障的自动识别和分类。同时,可以通过物联网技术将检测数据实时传输至远程监控中心,实现避雷器状态的远程监测和预警。

## 参考文献

- [1] 李敏,赵芳芳,孙山峰,等.雷击线路电磁暂态响应干扰下电缆避雷器故障传感检测[J].传感器世界,2024,30(02):17-21.
- [2] 贺政,曹宏斌,赵富强.基于混合遗传算法的 10kV 避雷器劣化状态识别仿真[J].微型电脑应用,2023,39(11):69-72.
- [3] 胡泰山,刘浩,刘刚,等.基于改进 YOLOv3 的避雷器红外图像故障检测方法[J].红外技术,2023,45(11):1256-1261.
- [4] 吴雯,杨凯迪.一起 110 kV 金属氧化物避雷器故障带电检测诊断分析[J].农村电气化,2023,(09):24-26.
- [5] 卢文浩,肖翔,韦晓星,等.长脉宽冲击电流下氧化锌避雷器阀片老化特性[J].电瓷避雷器,2023,(04):90-95.
- [6] 周利军,魏仁伟,刘聪,等.多重雷击下氧化锌避雷器的冲击老化特性[J].高电压技术,2022,48(09):3507-3516.
- [7] 黄志明,汤德宁,满洲.多检测方法在金属氧化物避雷器故障诊断中的应用研究[J].山西电力,2023,(04):32-35.
- [8] 李洪坤,杨雪飞,李应宏,等.一起 500 千伏金属氧化物避雷器故障分析及运维措施[J].广西电业,2022,(12):34-38.
- [9] 尹肇琦,谢鹏康,王博闻,等.冲击电流下氧化锌避雷器多物理场有限元分析[J].电瓷避雷器,2023,(01):216-222.
- [10] 任大江,叶海鹏,李建萍,等.一起 500 kV 金属氧化物避雷器故障原因分析[J].电瓷避雷器,2020,(03):127-132.

## 作者简介

吴顺成,高级技师,研究方向为电压互感器、电流互感器、避雷器、电缆、无功设备试验。