

# 基于三相自搜寻比较法的电气设备过热故障识别方法

许志浩<sup>1</sup>, 郑诗泉<sup>1</sup>, 康兵<sup>1</sup>, 袁刚<sup>1</sup>, 赵天成<sup>2</sup>, 杨代勇<sup>2</sup>

(1. 南昌工程学院 电气工程学院, 江西 南昌 330099;

2. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 电力设备过热故障图谱识别是判断电力设备故障程度的重要手段。工程实际中通常是对变电设备热拍照并进行人工甄别。为提高设备热像图故障判定准确率和效率, 本文针对电力三相设备的特点, 提出了一种通过三相分区块自动搜寻及温度对比的过热区域判定方法, 通过将三相设备热像图每相分离, 调整为相似大小与姿态, 将新图像分块进行对比, 判定对应区块是否有异常温升, 从而判定某相设备出现的热故障。试验结果表明, 本文基于计算机自动搜寻和判定的设备热诊断方法能够更加高效准确地判定识别三相设备热故障, 从而能够提高电力设备热故障检测的效率、准确性与自动化程度。

**关键词:** 红外图像; 电力三相设备; 图像处理; 热故障识别

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)11-1112-07

## Overheat Fault Identification Method for Electrical Equipment Based on Three-phase Self-searching Comparison Method

XU Zhihao<sup>1</sup>, ZHENG Shiquan<sup>1</sup>, KANG Bing<sup>1</sup>, YUAN Gang<sup>1</sup>, ZHAO Tiancheng<sup>2</sup>, YANG Daiyong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

2. Electric Power Research Institute Jilin State Grid Electric Power Co. LTD, Changchun 130021, China)

**Abstract:** Overheat fault atlas identification of power equipment is an important tool for judging the fault degree of power equipment. In engineering practice, thermal photography of substation equipment and manual screening are usually carried out. To improve the heat equipment's figure fault decision accuracy and efficiency according to the characteristics of the three-phase power, this study proposes an automatic search determination method; this method involves the use of the three-phase partition piece temperature contrast of overheating area to separate every figure of the three-phase equipment heat, adjustment of images of similar size and attitude, comparing the new image block, and determining whether there is a corresponding block of abnormal temperature rise to identify the thermal faults of certain phase equipment. The test results show that the equipment thermal diagnostic method based on computer automatic search and determination can identify the thermal fault of three-phase equipment more efficiently and accurately, which improves the efficiency, accuracy, and automation degree of thermal fault detection of power equipment.

**Key words:** infrared image, power three-phase equipment, image processing, thermal fault identification

## 0 引言

变电站电力设备长期处于工况运行状态, 易发生各类故障而威胁电网安全稳定运行。研究显示<sup>[1]</sup>, 在电气设备故障中超过半数均伴有设备异常发热现象。

20世纪中期国外的一些研究机构与电力企业尝试使用热像仪记录设备温度进行故障检测<sup>[2]</sup>。发展至

今, 国内外的技术人员通过对运行设备定期热拍照, 由检测者观察设备热图像的温度分布并判定设备中存在的异常温升, 确定热故障类型<sup>[3]</sup>, 该方法可有效检测出电力设备的异常温升。加上其无接触检测的优点, 适应电力系统要求, 因而在电力系统故障检测中得到推广运用。然而当前电力设备热图谱普遍采用人工观察, 判断较主观<sup>[4-5]</sup>, 且其准确程度对检测人员经

收稿日期: 2021-03-04; 修订日期: 2021-05-28.

作者简介: 许志浩(1988-), 男, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 硕导, 主要从事电力设备智能检测与人工智能应用研究工作。E-mail:zhxuhi@whu.edu.cn.

通信作者: 康兵(1987-), 男, 湖北孝感人, 研究所所长, 工学博士, 主要从事智能配电网相关方向研究。E-mail:525982460@qq.com.

基金项目: 吉林省电力科学研究院有限公司资助项目(KY-GS-20-01-07)。

验依赖大, 准确度波动大且不够高效, 并且此类传统的人工图像特征分析方法较难提炼异常发热区域特征与分布。近年来计算机技术和人工智能技术飞速发展, 研究者们提出了一些具有自动化和智能化功能的设备热像图故障识别方法, 以提高判定与故障处理效率与准确性。对于自动化算法来说, 如何利用电力设备的各类特点敏锐地发现热像图中的异常温升区域是热故障识别的关键。胡世征等人通过检测设备对应测量点间温差与其中较热点温升的比值, 实现相对温差判断<sup>[6]</sup>。郭英军等提出使用红外摄像机在线监测与计算变压器铁心的温升变化情况<sup>[7]</sup>。王如意等根据设备热图谱在异常温升处的色差进行图像分割而提取故障点<sup>[8]</sup>。孙怡等人提出利用不同电气设备出现异常温升的经验数值进行分类阈值判定的方法<sup>[9]</sup>。王淼等人通过分析导线热像图诊断输电线路<sup>[10]</sup>。冯振新等采用局部区域聚类的方法对热图谱温升区进行提取<sup>[11]</sup>。而现有研究较多关注于故障点程度的分割、计算和分析工作, 而运用三相设备自有特征进行故障区域自动查找定位的研究却较少涉及。

在目前现状下, 本文提出一种三相自搜寻比较的电力设备热像图自动诊断算法, 变电站三相设备或并列运行的同类设备通常具有完全相同的外观特点, 其电气运行状态相同或相近(严重三相不平衡和短路故障情况除外), 因而正常运行时三相设备一般具有相同的热状态, 对应部位的发热状态一致, 这是热检测的重要判据。当其中某相设备发生局部热故障时, 正常相设备可成为其余两相设备发热异常判定的良好参照物。通过计算机自动搜寻算法提取并利用三相对应的热状态信息对比, 可自动高效地发现热故障并准确判定其发生部位, 进行诊断分析。

## 1 三相自搜寻比较算法

三相自搜寻比较法的思路是以热点区域为追踪目标, 对三相设备热像图进行计算机处理, 自动化地得到可直接相比较分析的三相图片。其方法实施流程如图1所示。

为实现自动热区域搜寻和比较, 本路线中先利用数学形态学的方法对图像中视图相连的三相设备进行分割处理, 进一步将每相提取为单独图片, 另外由于取景角度和杂物的影响, 需对单相图像进行图像调整使其保持相同图像大小、角度, 通过这样的自动化处理就得到了可进行对应区域映射对比的单相图片。接着为了最优程度地进行对应处比较, 采用数据模块化方法, 将处理完成的单相图像按照同等规格进行区域划分, 由于先前的单相图同等化处理 and 同规格的分

区, 每张图片相同坐标的区块温度很大程度上反应了三相设备相同部位的温度水平。对每区温度取平均值, 并对三相设备全区块进行温度分布统计, 可很好地反应出各相的温度水平和温升情况, 基于此相同的数据模型, 可以便捷地实现设备温升判定和热数据信息分析, 完成自动温升搜寻和故障比较识别。

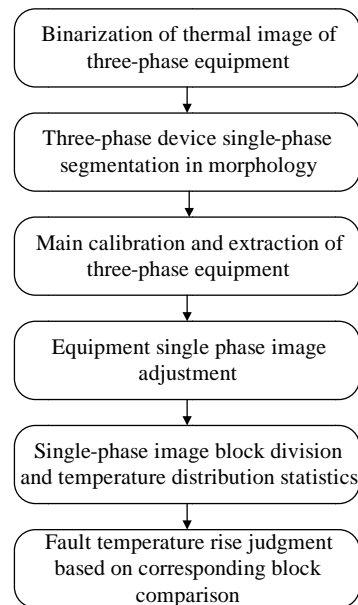


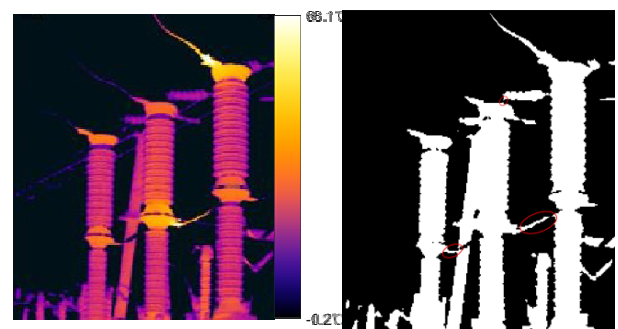
图1 三相自搜寻比较法执行流程图

Fig.1 Three-phase self-search comparison execution flowchart

## 2 三相设备热像图的提取分割

### 2.1 热像图形态学处理

实现三相设备或同类设备之间的热像图对比, 需要将图片中三相设备按相进行分离。由于图像中存在连接体、环境异物影响, 以及拍摄角度不规范导致设备局部重叠等原因, 致使照片中的设备间常有连接物存在, 增加了三相设备主体形域的提取分割难度, 如图2所示。



(a) Original thermal image of the equipment (b) Binarization figure of the equipment

图2 断路器三相设备连接图及其二值化

Fig.2 Circuit breaker three-phase equipment connection diagram and its binarization

图2为电力断路器三相设备热像图及其提取的二值化图像。热像图中最亮处温度达68.1℃，最暗处为-0.2℃。从图中可看出，对图像二值化后，这些干扰一般体现为设备主体形状间的纤细连接，为去除这些连接干扰，可以采用对三相设备热像图的二值图像进行形态学开操作运算。

形态学是由动植物形态研究发展而来。数学形态学的处理可实现从图像中提取边界、骨架等表达描绘图形的图像分量，常用操作有腐蚀膨胀，开闭运算等。

形态学上称类似的图形间的纤细连接为不可靠连接，可以使用形态腐蚀膨胀等操作将其切断去除。其中，在二维图像 $Z^2$ （即一个二维整数空间）以一个一定像素大小的结构元 $B$ 对图形对象 $A$ 进行空间卷积， $\hat{B}$ 为 $B$ 的补集， $B$ 对 $A$ 腐蚀定义为：

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (1)$$

而膨胀则是：

$$A \oplus B = \left\{ z \mid \left( \hat{B} \right)_z \cap A \neq \emptyset \right\} \quad (2)$$

可得出，腐蚀操作可消除运算对象接触的所有边界点，使其边界向内收缩，该过程能够消除目标对象附近小而无意义的物体（可干扰体）<sup>[2]</sup>，而膨胀操作则相反，其使目标区域范围“变大”。将目标区域接触的背景点合并到该目标物中，使目标边界向外部扩张<sup>[2]</sup>，可以用来填补目标区域中某些空洞以及消除包含在目标区域中的小颗粒噪声。

在此基础上，利用腐蚀和膨胀操作可以衍生出开启运算：

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3)$$

即对图形对象进行先腐蚀后膨胀的操作。

以及闭合运算：

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (4)$$

即对图形对象进行先膨胀后腐蚀的操作。它们对图形操作具有不同的效果，都能部分平滑对象轮廓，开操作断开较窄的狭颈并消除细的突出物，闭操作则一般弥合较窄的间断和细长的沟壑，消除小的孔洞，填补轮廓线中的断裂等<sup>[12]</sup>。

结合三相设备热像图及其得到的二值图像的特点，可对其分别进行合适的开闭类操作，实现对不可靠连接干扰的处理。

如图3所示，可看出开运算对短小纤细处等不可靠连接进行了“切断”处理，并去除了周边的小干扰体，而闭运算弥合了狭窄的目标间缝隙，使得目标扩大连接在一起。

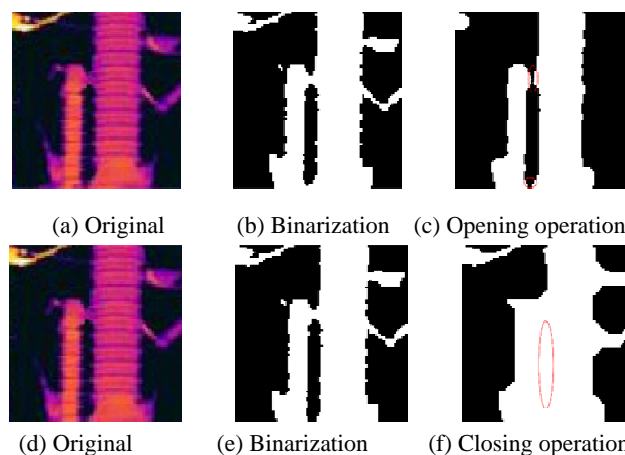


图3 开运算和闭运算操作

Fig.3 Opening and closing operations

针对去除不可靠连接，分离三相设备主体形态的目的，可使用合适程度的开运算操作，现采用合适大小的圆状结构元，对图4所示三相断路器设备的热像图进行开运算操作。

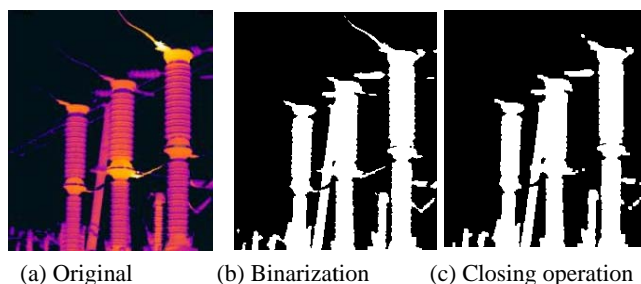


图4 三相设备开运算

Fig.4 Opening operation for three-phase equipment

可以看出，开运算操作对三相设备热像图二值图像中不可靠连接具有较好的“切断”作用。且开运算运用像素半径不同的结构元执行，将得到有区别的执行效果，结构元尺寸减小，图像将由从连接处“猛烈截断”到保留了更多区域细节，应根据图像情况调整合适的结构元大小。

## 2.2 三相设备主体的标定与提取

经过形态处理后还需进一步将三相设备主体提取出来，观察形态处理后的二值图像，可以看出白色目标区域主要是设备主体区域以及无用的杂散对象，在图像中，把这些具有相同像素值且相互邻接的一片像素区域作为连通区域或连通分量，在二值图像中即前景白色的数个区域。为进一步提取设备区域，可将图像中的连通区域分配不同数字标签并标定。根据其分布特性，将每个白色（像素值1）的连通分量像素标为同一值，不同连通分量分别标定1,2,3...等标签，形成新的标签矩阵，并将其用不同颜色表示，如图5所示。

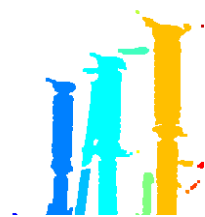


图5 连通分量的标定

Fig.5 Calibration of connected components

根据分析与标签结果,图像中标定的区域主要是设备主体区域以及附带设备、背景或未完全去除的线管等。依据开运算操作时处理尺度不同,标定区域的大小与数量也不同,而在所有的标签区域中,需要提取三相设备主体所在的连通分量。

根据设备热像图的拍摄特点分析,设备本体是拍摄的主要目标,对合格的设备热像图来说,电气设备主体应占据照片主要区域。利用这个特点,三相设备热像图中,标定连通区域中像素数量最大的3个区域即是三相设备的主体区域,即设备目标区域。

如图6所示,搜集所有标定区域的像素数与标签号,找到具有前三多像素数的区域标签,并将其标记到新的矩阵图像中并进行颜色标定。可以看出,图像中标定了三相设备主体所在的最大的3个连通区域,去除了其他干扰区域的影响。

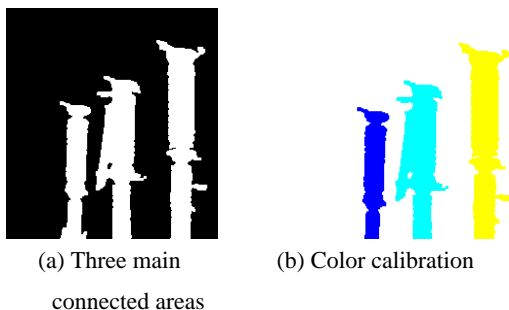


图6 三相主体区域提取

Fig.6 Three phase main area extraction

因二值图像目标区域像素值为1,而背景为0,进一步可将新的三相区域二值矩阵与原设备热像图执行对应元素相乘,如图7所示,能够得到去除所有干扰与背景元素的三相设备热像对比图。



图7 三相设备主体目标热图像

Fig.7 Thermal image of main target of three-phase equipment

### 2.3 设备图像分相及调整

得到三相设备主体的热图像后,为实现每相设备之间的热状态对比,应将其每相分离至单张图片上,并裁切调整至一致。由于每相所在的连通区域已标定不同标签,能够确定标签及所在位置,因此可为每相区域创建相同大小图像,将三相区域分别标定,即能得到分离的三相设备热图像。

将每相设备图像如图8单独分离后,由于其大小有差异以及背景位置不同,为进行对应位置的比对,应将其裁切并调整为相同图片大小与方向。利用每相二值图像记录的设备区域位置裁切,并可通过图像分辨率调整将其调整为等大图像,如图9所示。

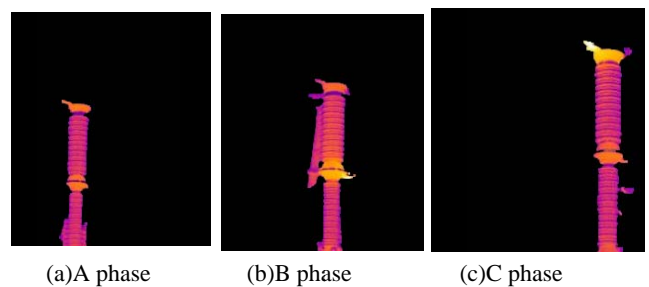


图8 设备热图像多相分离  
Fig.8 Device thermal image multiphase separation

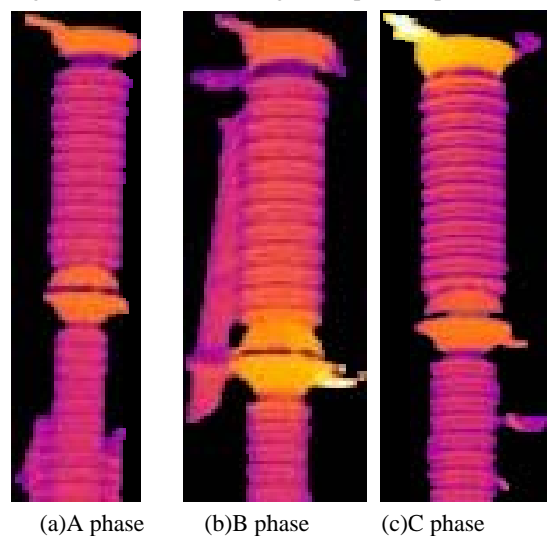


图9 单相设备热像图调整

Fig.9 Thermal image adjustment of single-phase equipment

### 3 三相设备区块对比与温升区域判定

采用同类比较法,判定设备某区域是否出现异常温升,在完成了设备提取和图像调整后,三相热像图应是大小一致的图像。热像图中由颜色亮暗代表温度高低,由比色条色彩标定,由此将热像图矩阵转变为对应像素的温度分布矩阵,即可进行温度对比。可将彩色热像图的RGB像素值转换为反应亮暗程度的灰度图像:



$$\text{gray} = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (5)$$

由热像图比色条中给出的图像温度区间  $[T_{\min}, T_{\max}]$ , 将灰度图像素值矩阵映射至该温度区间, 即:

$$T = (T_{\max} - T_{\min})\text{gray} + T_{\min} \quad (6)$$

由此可得相同大小设备温度分布矩阵。而根据电气设备的故障发热特点, 某处的故障可能会造成该处一片区域发热而产生异常温升, 因此, 可将每相的温度分布矩阵划分为数个区块, 每个区块温度取其均值, 以反映每处的温度分布水平。如图 10 是实验设备三相的分区块均温分布表。

6	27	14	2	?	1	0	0	0	16	16	6	6	1	0	0	45	35	0	0	0	0	0	0	
0	7	39	46	45	42	27	20	0	1	33	47	47	33	1	0	18	66	52	41	34	17	14	10	
0	0	18	44	41	43	40	32	2	2	21	35	33	35	7	0	0	29	68	62	62	46	7	2	
0	0	3	22	26	21	5	0	10	21	24	32	31	15	1	0	0	10	46	40	39	15	0	0	
0	0	16	35	35	34	16	5	0	0	15	39	38	21	0	0	0	8	38	38	33	12	0	0	
0	0	20	35	35	34	15	4	0	12	30	38	37	19	0	0	0	8	36	36	33	13	0	0	
0	0	21	35	35	33	13	2	0	15	33	38	38	18	0	0	0	6	35	36	33	12	0	0	
0	0	20	34	34	33	10	1	0	19	34	39	39	18	0	0	0	6	34	36	32	12	0	0	
0	0	20	36	35	34	10	0	0	20	34	40	39	18	0	0	0	7	34	35	33	12	0	0	
0	0	21	35	35	34	10	0	0	23	36	40	39	18	0	0	0	6	34	34	33	12	0	0	
0	0	22	35	35	33	9	0	0	25	36	40	40	17	0	0	0	6	32	34	32	12	0	0	
0	0	22	34	34	32	6	0	0	1	29	37	40	40	17	0	0	6	33	35	33	12	0	0	
0	0	23	35	35	33	6	0	0	2	32	38	42	41	16	0	0	7	34	34	33	12	0	0	
0	0	23	34	35	32	6	0	0	5	32	38	42	42	17	0	0	7	34	35	34	13	0	0	
0	1	27	36	37	33	6	0	0	7	36	40	45	45	17	0	0	6	34	38	36	12	0	0	
0	1	27	36	37	33	6	0	0	10	32	35	54	53	14	0	0	3	33	44	40	9	0	0	
0	0	23	41	42	30	3	0	0	13	27	36	50	54	18	0	0	10	37	46	43	18	0	0	
0	1	30	42	43	32	1	0	0	24	38	54	55	57	46	10	5	0	4	36	48	46	35	5	0
0	5	38	43	44	40	11	1	0	26	29	30	58	55	51	33	22	0	0	16	34	22	3	2	0
0	0	22	48	49	38	15	4	0	28	14	12	44	34	1	0	0	0	25	36	30	3	0	0	
0	0	7	34	35	6	0	0	0	11	0	18	40	33	2	0	0	0	24	35	30	4	0	0	
0	0	17	36	36	11	0	0	0	0	0	15	37	29	1	0	0	0	24	35	30	16	13	11	
0	0	17	36	36	11	0	0	0	0	0	14	36	28	0	0	0	0	25	34	28	10	13	11	
0	0	17	35	35	9	0	0	0	0	0	15	37	28	1	0	0	0	1	26	35	28	1	0	0
0	0	17	34	33	6	0	0	0	0	0	16	36	30	2	0	0	0	1	26	36	30	5	0	0
0	0	21	35	33	6	0	0	0	0	0	16	36	28	1	0	0	0	0	24	35	30	10	0	0
0	13	28	34	33	6	0	0	0	0	0	17	37	29	2	0	0	0	0	24	35	27	1	0	0
0	23	31	35	34	17	8	1	0	0	0	17	37	30	2	0	0	0	0	25	36	28	1	0	0
4	28	31	35	34	28	6	0	0	0	0	17	37	31	3	0	0	0	0	27	37	28	0	0	0
10	22	21	25	24	22	6	0	0	0	0	17	37	31	3	0	0	0	0	27	37	28	0	0	0

(a) A phase      (b) B phase      (c) C phase

图 10 三相分区温度分布表 (°C)

Fig.10 Three-phase partition temperature distribution table (°C)

根据各个区块的平均温度值分布情况, 还可对各相不同温度范围内的区块数量进行统计, 更直观地分析其温度分布情况, 如图 11 将示例三相断路器的每相的温度分布的区块数量以直方图统计。由图可看出, 排除背景的低温区块, 该设备温度区块主要分布在  $30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$  温度范围内。而在更高的温度层级, B相、C相有少量区块的温度跨过了一般范围直接达到  $60^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$  温度范围, 相对大多数区块所在温度范围属于较明显的温升, 而 A 相则相对正常, 无少量区块相较有明显的温度跃升。

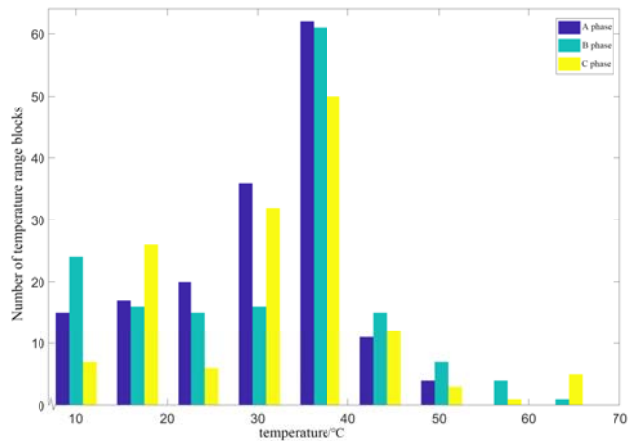


图 11 每相各温度区块数量分布直方图

Fig.11 Histogram of quantity distribution of each temperature block in each phase

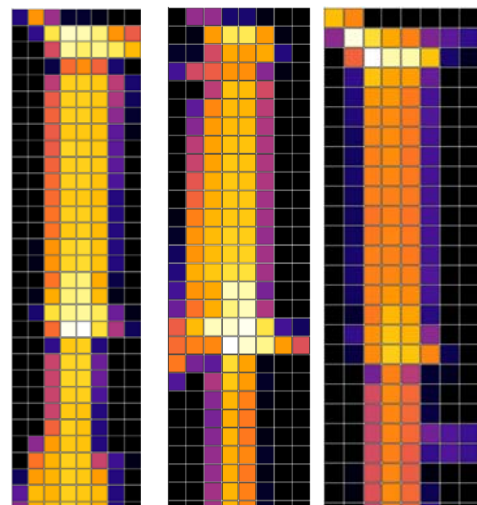
除讨论不同温度范围的区块数量外, 各区块相对位置的温度分布情况是判定温升区域的重点。为了能够清晰地看出每相设备的区块温度分布情况, 使用常规的红外图像比色条对温度分布表中每区块温度进行映射, 如图 12 所示。



图 12 热像图比色条

Fig.12 Thermal image colorimetric bar

将所有区块按温度均值映射回红外图像标记色。如图 13 可见, 可清晰获取感知每区块的均值温度, 而按红外图像温度颜色标记的区块图可清晰地体现区块的温度水平及每相对应区块的温差。为更清晰体现温度比对水平, 可进一步将红外比色区块图制为柱状图, 如图 14。



(a) A phase      (b) B phase      (c) C phase

图 13 三相设备区块对比

Fig.13 Three-phase equipment block comparison

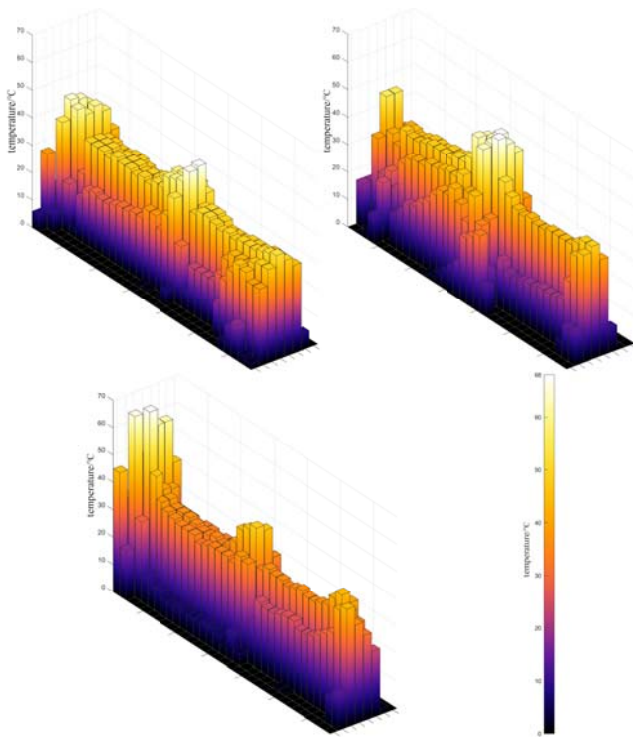


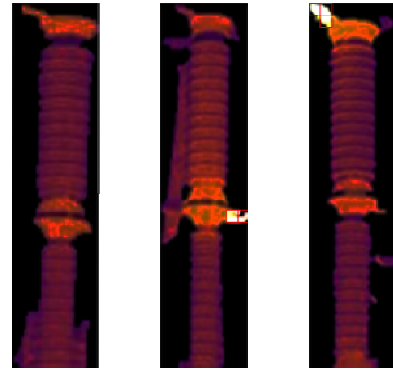
图 14 三相设备温度对比柱状图

至此, 每相设备分区块的温度对比即已清晰明了, 只要根据设定的阈值标准, 即可判定异常温升的存在, 在热成像电力设备故障检测领域中, 即可根据同类比较, 如同组三相设备、同相设备之间及同类设备之间对应部位的温差进行比较分析, 这类判定方法中的相对温差法是一种良好的根据周边温度差值进行温升判定的检测方法<sup>[6]</sup>, 利用相对温差 $\delta_1$  即同类设备对应测量点间的温差与其中较高温点温升的比值:

$$\delta_1 = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1} \times 100\% = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $\tau_1$  和  $T_1$  为发热点的温升和温度;  $\tau_2$  和  $T_2$  为正常相对应点的温升和温度;  $T_0$  为环境温度参照体的温度。以示例三相断路器图谱分析, 设定异常温升参考值为 20K, 进行区块温差比较计算发现, B 相区块中部和 C 相顶部连接处出现异常温度高值, 计算相对四周的 $\delta_1$ 过大、超限, 结果符合图 15 的温度区块数分布图的统计分析结果。由此能判定 B 相和 C 相均存在区域发生了超限温升热故障。

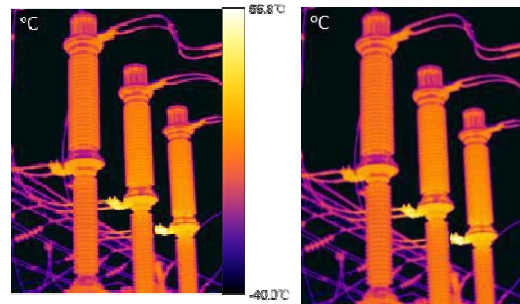
如图 15 所示, 准确地分析出设备存在的发热区域, 是快速识别诊断热故障的关键。运用该方法可有效实现三相设备异常温升区域的自动查找。图 16 和图 17 分别为用该方法实现两组不同角度拍摄的三相电流互感器设备发热故障搜寻效果图。



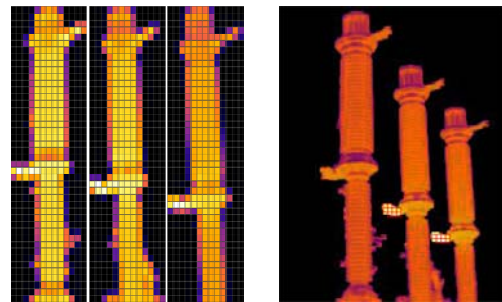
(a) A phase (b) B phase (c) C phase

图 15 异常温升区块判定

Fig.15 Determination of abnormal temperature rise block



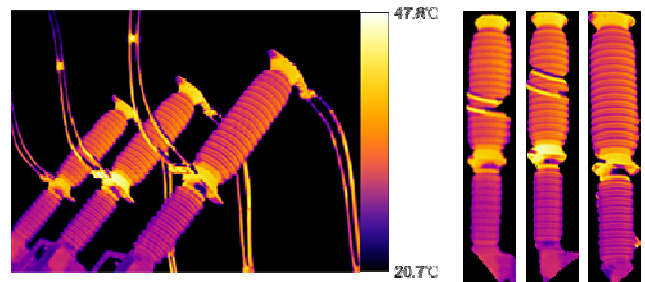
(a) Three-phase equipment (b) Morphological background removal



(c) Block temperature statistics (d) heating block determination

图 16 三相自搜寻比较法发热查找

Fig.16 Three-phase self-search comparative method heat search



(a) Three-phase equipment (b) Morphological background removal

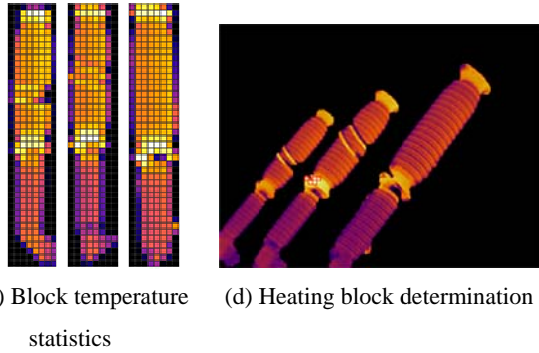


图 17 三相自搜寻比较法发热查找

Fig.17 Three-phase self-search comparative method heat search  
基于此,三相自搜寻比较法按照图 1 本文方法流程对电力设备热像图进行内部比较判断,自动分析识别,从而能更有效地识别设备温升与热故障。

该方法适用于具有成套相同设备、多相并列运行等易于进行相间温度比较的电力设备或者相内温升明显易确定相对温差的设备。若针对拍摄角度随意的多相设备热图谱,其记录的各相热信息缺失,较难准确地对各部位的温升情况做出故障判定,另外对于形态较为独特或不连续的设备,其判定能力可能受限。因此本方法对热像图拍摄质量有一定要求,后续研究可通过积累大量热故障判定实例来提高多相判定的准确性和对各种热图谱的兼容性,以提升方法智能化水平。

## 4 结语

以电力设备红外热成像检测中同类比较法与相对温差法为基础,本文提出了一种基于电气设备热信息的三相自搜寻比较检测算法。对电网常见的三相设备、同类设备的检测热像图,本算法针对三相设备热像图的故障显示特征,基于图像处理和温差分析实施对热故障的自动搜寻与处理,获得三相温升比较对象,并进行分区块温度分布统计与自动温升比较分析,实现以同类比较法和相对温差法为分析基础的电力设备热故障高效自动化检测。与传统的设备热像图人工检测分析方法相比,本方法能够实现设备热故障的计算机自动搜寻检测,相对人工检测具有更高的效率和准确度,且能够实现三相设备热故障的全自动化搜寻检测。不足之处是对热像图拍摄角度、质量有一定要求,工程实际中需要对红外检测作业人员的拍摄角度进行必要规范,形成符合要求的三相设备热像图。

## 参考文献:

[1] 康龙. 基于红外图像处理的变电站设备故障诊断[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

KANG Long. Substation equipment fault diagnosis based on infrared image processing[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

[2] 杨洋. 电气设备红外图像分析与处理[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

YANG Yang. Infrared Image Analysis and Processing of Power Equipments[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[3] 王旭红, 李浩. 基于改进 SSD 的电力设备红外图像异常自动检测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 302-310.

WANG Xuhong, LI Hao. Infrared image anomaly automatic detection method for power equipment based on improved single shot multi box detection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(1): 302-310.

[4] 刘嵘, 刘辉, 贾然, 等. 一种智能型电网设备红外诊断系统的设计[J]. 红外技术, 2020, 42(12): 1198-1202.

LIU Rong, LIU Hui, JIA Ran, et al. Design of Intelligent Infrared Diagnosis System for Power Grid Equipment[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(12): 1198-1202.

[5] 张明. 基于红外图像的变电设备分类及在故障诊断中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.

ZHANG Ming. Substation Equipment Classification and Its Application in Fault Diagnosis Based on Infrared Image[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.

[6] 胡世征. 电气设备红外诊断的相对温差判断法及判断标准[J]. 电网技术, 1998, 22(10): 47-50.

HU Shizheng. Method and Criterion of Relative Temperature Difference Determination of Infrared Diagnosis for Electric Equipment[J]. *Power System Technology*, 1998, 22(10): 47-50.

[7] 郭英军, 孙丽华, 孙会琴, 等. 电力变压器热故障的在线诊断技术[J]. 河北科技大学学报, 2007(2): 147-149.

GUO Yingjun, SUN Lihua, SUN Huiqin, et al. An online diagnosis method of transformer hot fault[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2007(2): 147-149.

[8] 王如意. 变电站电力设备红外图像分割技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.

WANG Ruyi. Research of Infrared Image Segmentation for Power Equipment in Substation[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.

[9] 孙怡, 吴邦树, 刘仪卜, 等. 基于红外图像处理的电气设备故障诊断方法[J]. 机电工程技术, 2016, 45(6): 59-62.

SUN Yi, WU Bangshu, LIU Yibu, et al. Method of default diagnosing of electric equipments based on infrared image processing[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2016, 45(6): 59-62.

[10] 王淼, 杜伟, 孙鸿博, 等. 基于红外图像识别的输电线路故障诊断方法[J]. 红外技术, 2017, 39(4): 383-386.

WANG Miao, DU Wei, SUN Hongbo, et al. Transmission Line Fault Diagnosis Method Based on Infrared Image Recognition[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(4): 383-386.

[11] 冯振新, 许晓路, 周东国, 等. 基于局部区域聚类的电力设备故障区域提取方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 45-50.

FENG Zhenxin, XU Xiaolu, ZHOU Donggu, et al. Extraction method of power device fault region based on local clustering algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(8): 45-50.

[12] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

Rafael C. Gonzalez. *Digital Image Processing*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.