

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190202

基于双重背景分离及自适应网格的电压致热型 设备红外图像状态分析

周可慧, 廖志伟, 陈琳韬, 黄杰栋

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510000)

摘要: 针对发热量小、温度变化范围窄的电压致热型设备故障红外图像难以识辨的难题, 提出一种基于双重背景分离及自适应网格划分的电压致热型设备红外图像运行状态分析方法。以电流互感器套管红外图像为例, 首先提出红外图像双重背景分离及部件区域提取算法, 即基于 RGB 和 HSV 颜色空间特点, 转换红外图像颜色空间, 分离出第一层背景区域。接着将 Ostu 算法与 Hough 变换相结合, 提出基于 Hough 变换的 Ostu 改进算法, 实现背景的第二重分离, 得到部件区域。之后, 导入红外图像温度, 运用自适应网格方法划分部件区域, 获得每一网格平均温度, 提取温度特征向量, 比较待分析图像与正常图像获取温差值, 以此判断设备运行状态。最后, 通过案例分析验证算法的有效性。同时, 对避雷器本体、电压互感器电容单元、断路器支柱等电压致热型设备进行分析, 说明算法具有良好的扩展性。

关键词: 双重背景分离; 电压致热型设备红外诊断; 自适应网格划分; Ostu; HSV

Research on state analysis of voltage-heating equipment based on dual background separation and adaptive meshing of infrared image

ZHOU Kehui, LIAO Zhiwei, CHEN Lintao, HUANG Jiedong

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the infrared image of the voltage-heating fault of power equipment with small heat generation and narrow temperature variation is difficult to distinguish, a method for analyzing the operating state of voltage-heating equipment based on dual background separation and adaptive meshing infrared image processing is proposed. Firstly, taking the infrared image of current transformer casing as an example, the dual infrared background separation and component region extraction algorithm are proposed. That is, based on the RGB and HSV color space characteristics, the infrared image color space is converted and the first layer background region is separated. Then, the Ostu algorithm is combined with the Hough transform, proposing the improved Ostu algorithm based on Hough transform to realize the second separation of the background and obtain the component area. Then it imports infrared image temperature, uses adaptive meshing component area method to obtain average temperature of each mesh and extracts temperature feature vector. Comparing the component temperature feature vector of the image to be analyzed with the normal image, the temperature difference is obtained. In this way, the operating state of the equipment can be judged. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by case analysis. At the same time, the voltage-heating equipment such as the arrester body, voltage transformer capacitor unit and circuit breaker struts are analyzed, which shows that the method has good scalability.

This work is supported by National Youth Science Foundation of China (No. 61702192) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. GDKJQQ20152088).

Key words: dual background separation; infrared diagnosis of voltage-heating devices; adaptive meshing; Ostu; HSV

0 引言

电力设备作为电力系统的纽带, 其状态监测、

故障诊断对保障系统安全稳定运行有着重要意义, 红外检测是电力设备状态监测的重要方法^[1-3]。然而, 当前红外图像分析仍以人工为主, 存在人为因素影响大、图像分析效率低等缺点^[4]。随着电网智能化发展及巡检机器人的应用, 仅依靠传统人工分析已不能满足海量图像分析需求, 图像的智能化处

基金项目: 国家青年科学基金项目资助(61702192); 中国南方电网公司科技项目资助(GDKJQQ20152088)

理已成为该领域的研究热点^[5-7]。文献[8]采用粒子群算法与 Niblack 算法相结合实现设备热图像分割，并构建支持向量机实现故障特征参量提取及参数配置；文献[9]基于多源信息融合技术，将红外热像仪配合 CCD 摄像机和 ZigBee 传感器实现对设备热缺陷的监测；文献[10]提出了基于深度学习的一种实时检测设备零件的方法，预测设备部件的坐标、方向角和类型；文献[11]基于改进的 MSER 算法对电力设备故障区域进行提取。上述研究主要针对的是热图谱界限分明的红外图像，对发热量小、温度变化范围窄的电压致热型设备故障的红外图像仍难以检测，是该领域亟待解决的难题。

为高效准确分析电压致热型部件的运行状态，本文提出一种基于双重背景分离及自适应网格的电压致热型设备红外图像状态分析方法。以电流互感器套管为例，分析设备发热故障机理，确定设备不同部件的红外特征；其次提出基于红外图像双重背景分离的部件区域提取算法，即利用 RGB 和 HSV 颜色空间特点，转换红外图像颜色空间，分离出第一层背景区域；提出基于 Hough 变换的 Ostu 改进算法，对背景进行第二重分离，得到部件区域；在此基础上将部件区域做自适应网格划分，导入红外图像温度数据，获得网格区域的平均温度，分析图像部件温度特征向量及温差值，判断设备运行状态；最后，由于大部分电力设备，如避雷器、电压互感器、断路器等都存在电压致热性故障，因此，本文针对不同的电压致热型设备进行扩展研究。实验结果表明，本文提出的方法有着良好的效果和延展性，对电压致热性设备的状态监测有着重要的意义。

1 基于颜色空间转换的背景分离研究

1.1 电力设备发热故障机理及红外特征分析

电力设备主要包含电流致热型、电压致热型和综合致热型三种故障类型。电流致热型故障是由电流效应引起的，当设备导体连接或接触不良时，故障部位接触电阻将增大，根据焦耳定律，热能增加，温度显著上升，在红外图谱对比明显，易于被察觉。电压致热型故障是由电压效应引起的，当设备内部绝缘介质老化、受潮时，绝缘介质损耗增大，温度变化非常小，且当温升达 2~3 ℃ 时，部件已经发生了严重故障，在红外图谱中难以辨别和判断。

本文以如图 1 所示的 SF₆ 气体绝缘电流互感器为例展开研究，其主要故障部位为顶部绕组部分和套管部分^[12]。顶部绕组部分由一次导电杆、二次绕组以及绕组屏蔽罩等组成，可能发生绕组局部短路，内、外部导体连接部分接触不良等电流致热型故

障^[13]，其红外热像图中顶部绕组和导体连接位置均有较明显的温升现象。套管部分主要由屏蔽筒、电容屏和二次引线等组成^[14]，该部分故障一般是由支柱绝缘杆、电容屏表面或者外部沿面放电闪络引起的^[15]，为电压致热型故障，与负荷电流没有关系，红外热像图中对应部分的温升现象轻微，不易发觉，是本文的研究重点。

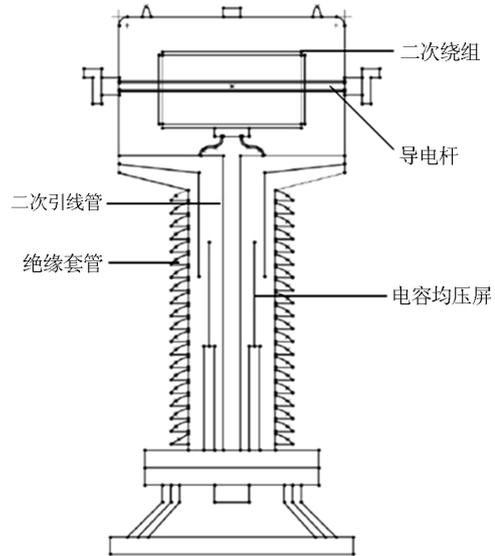


图 1 电流互感器结构简图

Fig. 1 Current transformer structure schematic diagram

1.2 基于 RGB 和 HSV 颜色空间转换的背景分离

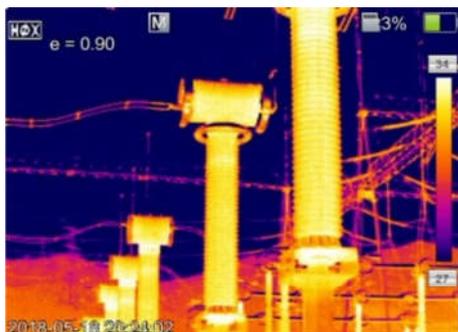
电力设备红外图像背景往往较为复杂，如图 2(a) 所示图像中除了目标部件外，还包含其他的电流互感器、站内支持钢架和母线等非均匀背景及噪声，影响目标部件检测。在 RGB 颜色空间中，两点间的欧式距离与颜色距离不成比例，因此很难实现提取某种颜色的唯一性和完整性^[16]。为了更好地从原图中提取目标区域，颜色空间的转换成为研究的方向。RGB 颜色空间以红色(Red, R)、绿色(Green, G)和蓝色(Blue, B)为基础，HSV 颜色空间则是以色调(Hue, H)、饱和度(Saturation, S)和明度(Value, V)为参数，其中饱和度 S 取值为 0~1，取值越大，表示饱和度越高，颜色越深艳。RGB 颜色空间和 HSV 颜色空间中饱和度 S 的转换关系为

$$S = \begin{cases} 0 & \max = 0 \\ 1 - \min / \max & \max \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

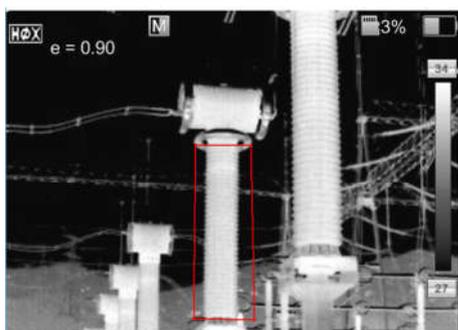
式中： $\max = \max(R, G, B)$ ； $\min = \min(R, G, B)$ 。

RGB 颜色空间中，红色的分量为 [255, 0, 0]，由式(1)可得，转换到 HSV 空间的红色饱和度维度值 S=1。依此特点，本文首先将红外原图转换为灰度图，选取若干顶点，分别用红色标记并连接，形成

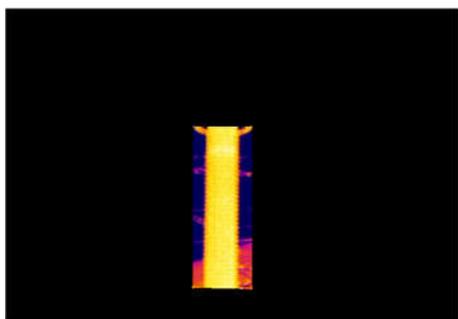
一个矩形区域, 如图 2(b)所示; 其次, 将颜色空间转换为 HSV 颜色空间, 则灰度图部分的饱和度 $S=0$, 红色连接部分的饱和度 $S=1$; 然后, 基于饱和度差别, 利用最大类间方差法将图像二值化, 提取边界并填充所围成区域, 消除无关干扰; 最后, 将填充部分与原图对比, 获取目标区域, 如图 2(c)所示。



(a) 红外图像原图



(b) 目标区域灰度图



(c) 目标区域

图 2 目标区域提取

Fig. 2 Target area extraction

2 基于改进 Ostu 算法的背景分离

Ostu 算法是常用的基于阈值的图像处理方法^[17], 然而, 由于红外图像分辨率差、对比度低、视觉效果模糊, 常规 Ostu 算法难以得到理想的分离效果。为进一步消除图 2(c)所示目标区域的背景噪声, 本文提出改进的 Ostu 算法, 将原算法与边缘检测、Hough 变换结合, 提高背景分离效果。

2.1 Ostu 算法研究

Ostu 方法是一种自适应阈值确定算法, 其基本原理如下^[18]。

首先将图像的灰度级分为 L 级, 则像素的领域平均灰度也分成了 L 级。设图像中灰度为 i 的像素点个数为 N_i , 则总的像素点个数为 $N = N_0 + N_1 + \dots + N_{L-1}$, 其中, 灰度值为 i 的点的概率为 $P_i = N_i / N$ 。

根据此灰度特性, 设定阈值 T , 将图像分为目标和背景两个部分。当取最佳阈值时, 两部分之间的差别最大, 在 Ostu 算法中所采用的衡量差别标准为最大类间方差。记目标点数占图像比例为 ω_0 , 平均灰度为 μ_0 , 背景点数的图像比例为 ω_1 , 平均灰度为 μ_1 , 则有方差 g , 计算公式为

$$g = \omega_0 \times \omega_1 \times (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (2)$$

当方差 g 最大时, 可以认为此时目标和背景差异最大, 即灰度 G' 是最佳阈值。像素点的灰度 $i > G'$, 则将其变为 255, 否则, 其灰度变为 0。

通过 Ostu 算法, 可以得到如图 3。



图 3 Ostu 算法分割效果

Fig. 3 Ostu algorithm segmentation effect

2.2 基于 Hough 变换的改进 Ostu 算法

从图 3 可以看出, 图像背景和目标的分离效果并不是非常精确, 边界与目标区域存在着一些差距。为提高分离效果, 本文基于 Hough 变换, 对电流互感器套管做直线检测, 获取其与竖直方向夹角值, 确定该直线斜率, 并通过在目标区域内平移该直线提取目标, 分离背景。

2.2.1 边缘检测算法

Hough 变换是直线检测的经典算法, 有着显著优势, 也存在占用内存空间大, 实时性较差等不足。为提高 Hough 变换计算速度, 本文先对图像做边缘检测, 消除大量干扰, 减少计算时间。边缘是图像局部区域亮度变化显著的部分, 该区域的灰度剖面一般可以看作是一个阶跃, 即从一个灰度值在很小的缓冲区域内急剧变化到另一个相差较大的灰度

值。基于此特点，可以通过对图像各像素点求微分或二阶微分来定位边缘像素点。

目前，边缘检测算子有多种，如 Roberts、Sobel、Canny 等。对比其他算法而言，Canny^[19]检测算子不容易受噪声的干扰，是运用最为广泛的边缘检测方法。Canny 边缘检测算法可以分为以下 5 个步骤。

1) 使用高斯函数对图像 $f(x,y)$ 滤波，以平滑图像，滤除噪声，得到一个已平滑的数据阵列，如式 3 所示。

$$S(x,y) = f(x,y) * G(x,y,\sigma) \quad (3)$$

式中： $f(x,y)$ 为图像表达式； x 、 y 为像素点坐标值； $G(x,y,\sigma)$ 为高斯函数； σ 为高斯函数的散布函数，反映平滑程度。

2) 计算图像中每个像素点的梯度强度和方向。可用 2×2 一阶有限差分来近似计算 x 、 y 的偏导数，其数学表达式为

$$P(x,y) \approx \frac{1}{2}(S(x,y+1) - S(x,y) + S(x+1,y+1) - S(x+1,y)) \quad (4)$$

$$Q(x,y) \approx \frac{1}{2}(S(x,y) - S(x+1,y) + S(x,y+1) - S(x+1,y+1)) \quad (5)$$

其幅值和方向分别为

$$M(x,y) = \sqrt{P(x,y)^2 + Q(x,y)^2} \quad (6)$$

$$\theta(x,y) = \arctan(Q(x,y)/P(x,y)) \quad (7)$$

3) 进行非极大值抑制，计算图像上每个像素梯度方向相邻两个像素的梯度幅值，若当前像素的梯度幅值大于相邻两个像素梯度幅值，则当前像素可能为边缘点，以消除边缘检测带来的杂散响应。

4) 通过双阈值检测确定潜在边缘。图像中每个像素点分别通过高门限和低门限值得到边缘图像的强边缘点和弱边缘点。

5) 跟踪强边缘点，当其到达端点时，在弱边缘点对应位置搜索，连接强边缘点的间断，将强边缘点连接起来，最终完成边缘检测。其边缘检测后的图像如图 4 所示。

2.2.2 Hough 变换算法

Hough 变换原理是利用图像空间和 Hough 参数空间点与线的对偶性，将直角坐标中的直线转换为参数空间中的点，通过参数空间中交点判断直线^[20]。在直角坐标系中，直线表示方式为 $y' = kx' + b$ ，其中 k 和 b 为参数，则过直角坐标系中任一点 $P_0(x_0, y_0)$ 的所有直线，均满足方程：

$$y_0 = kx_0 + b \quad (8)$$

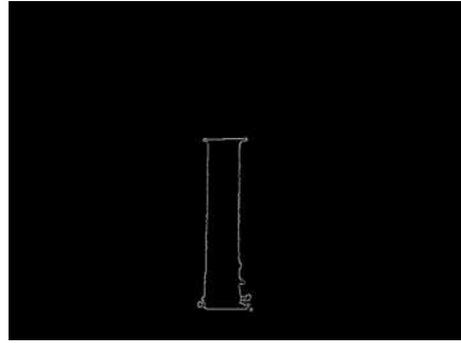


图 4 边缘检测

Fig. 4 Edge detection

式(8)在 $k-b$ 参数空间下表示一条直线，即直角坐标中的任一点确定参数空间下的一条直线，而对于直角坐标中一条直线上的所有点，其参数 k 和 b 均相同，当转换到 k 和 b 参数空间时必然存在交点，于是直角坐标下图像中直线检测问题，在 $k-b$ 参数空间下将转换为交点的检测问题^[21-22]，交点峰值处对应于原图中的最长直线。Hough 变换后，直线检测结果如图 5 所示，并在目标区域内平移该直线，提取部件区域，如图 6 所示。

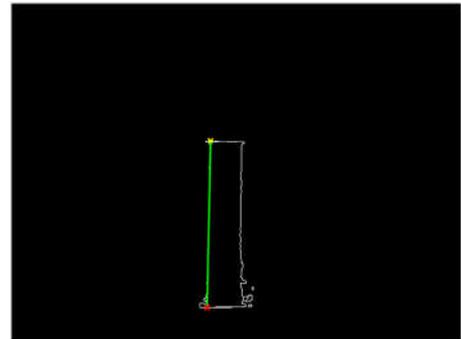


图 5 直线检测

Fig. 5 Line detection



图 6 部件区域

Fig. 6 Component area

2.3 双重背景分离效果分析

为验证背景分离效果，将分割后的部件在原始

图像中标记, 并以部件分割结果面积与部件真实面积之比作为量化特征。以图 7 为例, 部件分割结果面积为 10 714 个像素点, 部件真实面积为 11 184 个像素点, 即 95.8%的部件可以被有效分割提取, 满足温度分析要求。

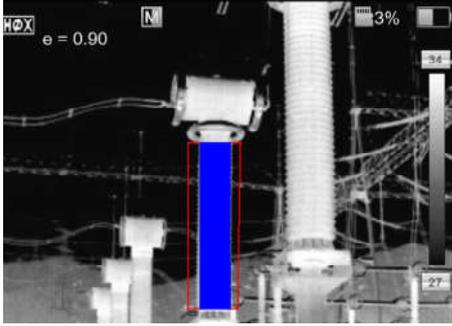


图 7 原图中的部件分割结果

Fig. 7 Result of the part split in the original image

3 温度特征提取研究

3.1 自适应网格划分的温度特征提取研究

为确认部件是否发生故障及其故障位置, 为后续对比分析提供依据, 本文采用自适应网格划分方法提取温度特征。基于 2.2 节 Hough 变换的直线检测, 获取待诊断部件长度 l , 根据图像规格确定网格大小 a , 则 $n_0 = l/a$, 网格个数为

$$n = \begin{cases} n_1, & b < a/2 \\ n_1 + 1, & b \geq a/2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: n_1 为 n_0 的整数部分; b 为 n_0 的余数部分。

导入红外图像温度数据, 确认划分后每一网格的平均温度 $t_n (n=1, 2, \dots)$, 形成温度特征向量 T_n 。比较待分析部件与同类部件的温度特征向量, 获取每一网格的相对温差值 $\Delta T_n (n=1, 2, \dots)$, 以此来确定部件运行状态, 若 ΔT_n 超过阈值范围, 则诊断部件发生故障, 且故障位置在第 n 个网格范围内。以背景分离后的电流互感器套管为例, 其网格划分如图 8 所示。

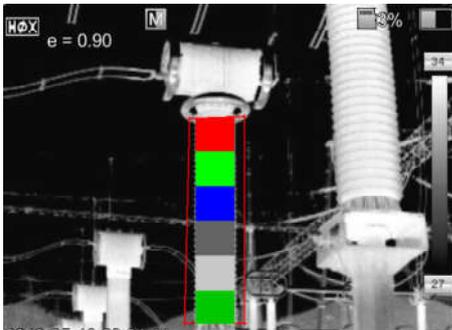


图 8 网格划分

Fig. 8 Mesh generation

3.2 案例分析

为验证温度特征向量的准确性, 借助红外分析软件, 从软件中获取对应套管网格区域温度, 计算每个区域的平均值, 形成向量 T_n , 如图 9 所示, 两者温度比较见表 1。

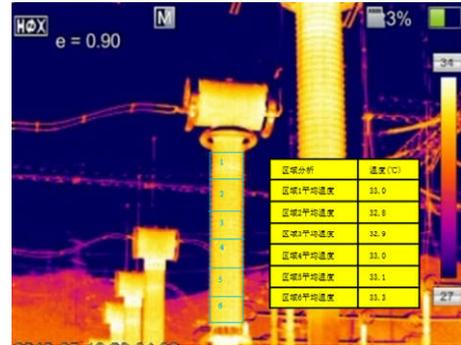


图 9 分割的套管部件

Fig. 9 Split casing component

表 1 温度特征向量准确性比较

Table 1 Comparison of accuracy of temperature feature vectors

区域	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	区域 6
$t_n / ^\circ\text{C}$	33.0	32.8	32.9	33.0	33.1	33.3
$ t_n - t_r $	0.23	0.15	0.11	0.13	0.07	0.01

由表 1 可知, 以从红外分析软件中获取的部件温度为参考, 实验获取的温度特征向量误差在 0.15~0.2 $^\circ\text{C}$, 完全满足变电设备温度比较所需精度。

4 电力设备运行状态分析研究

带电设备红外诊断方法包含表面温度判断法、同类比较判断法和相对温差判断法等^[12]。由于电压致热型设备的发热受到环境和测量条件影响较大, 同时, 带电设备红外诊断应用规范中电压致热型设备是以温差大小作为判断依据, 因此, 不宜直接采取表面温度判断。相同运行情况下同组设备或者同类设备的环境和测量条件相似, 发热量差别较小, 温差的分散性小^[23]。因此, 采用同类比较判断法或相对温差判断法作为缺陷判断的参考量更加可靠和高效, 具体算法流程如图 10 所示。

4.1 电流互感器套管运行状态分析

为验证本文方法的有效性和可靠性, 选取相同运行条件下(温度为 30 $^\circ\text{C}$ 、湿度为 60%, 无风、夜间拍摄)的电流互感器套管作为实验样本。然而, 实际运行过程中, 电力设备故障情况较少, 因此, 本文通过 Matlab 仿真来扩大样本的数量集, 确保算法验证过程覆盖更多可能性。基于双重背景分离后得到了部件区域, 将导入后的红外图像温度矩阵与部

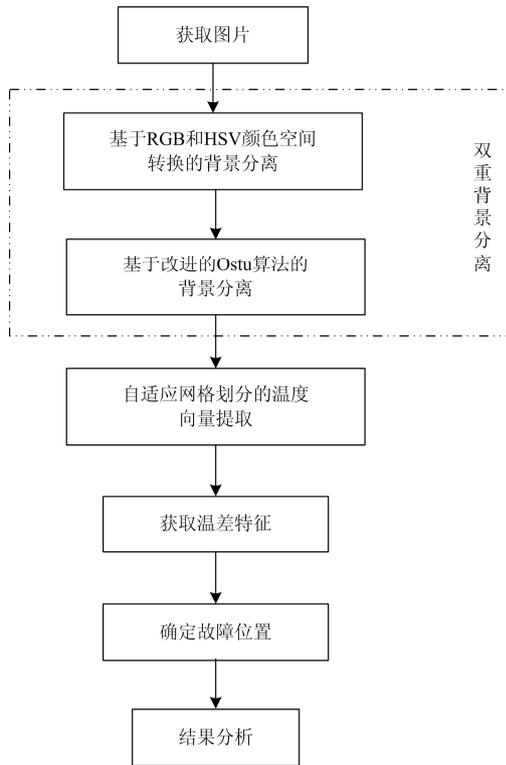


图 10 流程图

Fig.10 Flow chart

件区域对应，提取部件区域温度矩阵。随机选取提取后的部分区域，改变该区域的温度大小。依据红外诊断应用规范^[12]，电流互感器套管温升超过 3℃，判断设备出现故障，为符合实际运行情况，选取部分温度改变值在 3℃左右。将改变后的红外图像温度数据导入到算法中，形成新的温度特征矩阵，模拟设备相同运行条件下的不同运行状态，最大程度包含设备实际运行的各种可能性。基于实际案例和仿真案例，总共确定 100 组样本，其中 80 组正常样本，20 组故障样本。按照本文算法，提取样本温度向量，获取温差特征。部分温差特征及测试样本输出结果如表 2 和表 3 所示。

由表 2、表 3 可以看出，本文建立的基于双重背景分离及自适应网格划分的电压致热型设备运行状态监测算法的正确率达到 96%，具有较高的准确性，其中，正常样本的正确率为 97.5%，效果较好。故障样本的正确率稍低，从温差特征分析发现，可能存在的原因因为故障位置正好位于网格划分的边界，因而求出的相应网格平均温差偏高，但均未超过阈值。为确定网格划分对实验结果的影响，以网格个数为参考依据，获取其与本文算法正确率之间的关系，如表 4 所示。

表 2 部分温差特征输出结果

Table 2 Partial temperature difference characteristic output

序号	故障类型	温差特征						故障位置	备注
1	无故障	0.501 3	0.864 8	0.236 8	0.153 8	0.604 7	0.475 9	无	判断正确
2	无故障	0.850 9	0.423 8	0.825 1	0.784 6	0.662 0	0	无	判断正确
3	套管中部存在故障	0.153 4	0.476 8	1.841 5	3.142 8	0.911 0	0.451 9	n=4	判断正确
4	套管上部存在故障	2.752 1	1.982 3	0.841 3	0.665 4	0.751 2	0.158 9	无	判断错误
5	套管下部存在故障	0.945 8	1.123 7	0.115 8	0.657 8	3.841 5	1.100 2	n=5	判断正确
6	套管上部存在故障	3.258 4	1.195 2	0.874 1	0.852 1	0.625 8	1.036	n=1	判断正确
7	无故障	1.158 4	2.084 7	1.235 6	0.984 5	3.023	1.023	n=5	判断错误
8	套管上部存在故障	2.158 4	2.584 7	0.635 6	0.984 5	1.023	3.023	n=6	判断错误

表 3 测试样本判断结果

Table 3 Test sample judgment result

样本类型	样本数	类型误判数	位置误判数	误判样本总数	正确率/%
正常样本	80	2	0	2	97.5
故障样本	20	1	1	2	90
合计	100	3	1	4	96

表 4 网格个数与算法正确率关系表

Table 4 Relationship between the grids number and the algorithm correct rate

网格个数	5	6	7	8	9	10
正确率/%	94	96	96.5	97.1	97	97.2

从表 4 可以看出，随着网格个数的增加，算法的准确率有所上升，当网格个数增加到一定程度时，准确率保持不变。此结果说明自适应网格划分时，需要考虑到网格个数对实验结果的影响，若选取的网格个数过少，算法准确性将受到影响；若选取个

数过多,不但不会增加算法准确性,还加大结果分析的复杂性。

4.2 扩展研究

本文除详细分析电流互感器套管的运行状态外,还对避雷器本体、电压互感器电容单元和断路器绝缘支柱等可能发生电压致热型故障的部件进行了相应的试验。研究表明,此方法同样适用于其他电压致热型部件,算法具有较好的扩展性。其部件提取后的结果如图 11 所示。

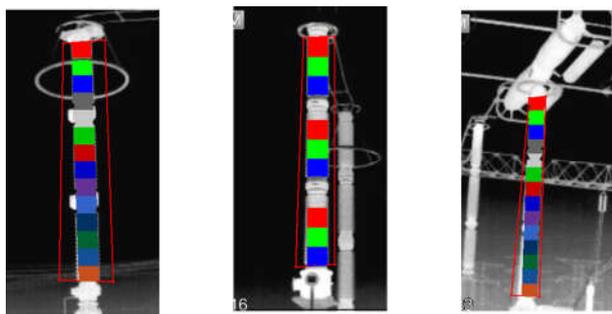


图 11 避雷器、电压互感器、断路器部件特征区域

Fig. 11 Arrester, voltage transformer, circuit breaker component feature area

5 结论

电压致热型部件运行状态监测是电力设备安全运行的重点研究对象。本文以电流互感器套管为例,提出了一种基于红外图像双重背景分离及自适应网格图像处理的电压致热型设备状态分析方法,消除了变电站复杂环境的影响,为部件状态分析奠定了良好基础。同时,对避雷器本体、电压互感器电容单元和断路器绝缘支柱进行扩展研究。研究表明此方法具有良好的适用性和扩展性,适用于不同类型电压致热型设备的状态监测。

参考文献

- [1] 李刚, 张博, 赵文清, 等. 电力设备状态评估中的数据科学问题: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 10-20.
LI Gang, ZHANG Bo, ZHAO Wenqing, et al. Data science issues in state evaluation of power equipment: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 10-20.
- [2] ZHAO Zhenbing, XU Guozhi, QI Yincheng. Representation of binary feature pooling for detection of insulator strings in infrared images[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2858-2866.
- [3] 侯旺, 孙晓亮, 尚洋, 等. 红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势[J]. 红外技术, 2015, 37(1): 1-10.
HOU Wang, SUN Xiaoliang, SHANG Yang, et al. Present state and perspectives of small infrared targets detection technology[J]. Infrared Technology, 2015, 37(1): 1-10.
- [4] 漆灿, 李庆武, 郑云海, 等. 基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 135-141.
QI Can, LI Qingwu, ZHENG Yunhai, et al. Infrared monitoring system for substation based on intelligent visual internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 135-141.
- [5] 林颖, 郭志红, 陈玉峰. 基于卷积递归网络的电流互感器红外故障图像诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 87-94.
LIN Ying, GUO Zhihong, CHEN Yufeng. Convolutional-recursive network based current transformer infrared fault image diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 87-94.
- [6] HU Zhuangli, HE Tong, ZENG Yihui, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 149-158. DOI: 10.1186/s4601-018-0088-y.
- [7] 崔昊杨, 许永鹏, 孙岳, 等. 基于自适应遗传算法的变电站红外图像模糊增强[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 902-908.
CUI Haoyang, XU Yongpeng, SUN Yue, et al. Substation infrared image fuzzy enhancement algorithms based on improved adaptive genetic theory[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 902-908.
- [8] 李鑫, 崔昊杨, 许永鹏, 等. 电力设备 IR 图像特征提取及故障诊断方法研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 659-664.
LI Xin, CUI Haoyang, XU Yongpeng, et al. Research on infrared image feature extraction and fault diagnosis of power equipment[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(5): 659-664.
- [9] 熊军华, 贡超, 王亭岭. 基于多源信息融合的热缺陷监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 146-150.
XIONG Junhua, YUN Chao, WANG Tingling. Research on monitoring system of thermal defects based on multi-source information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 146-150.
- [10] GONG Xiaojin, YAO Qi, WANG Menglin, et al. A deep learning approach for oriented electrical equipment detection in thermal images[J]. IEEE Access, 2018(6): 41590-41597.
- [11] 冯振新, 周东国, 江翼, 等. 基于改进 MSER 算法的电

力设备红外故障区域提取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 123-128.

FENG Zhenxin, ZHOU Dongguo, JIANG Yi, et al. Fault region extraction using improved MSER algorithm with application to the electrical system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 123-128.

[12] 国家发展和改革委员会. 带电设备红外诊断应用规范: DL/T 664—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

National Development and Reform Commission. Infrared diagnostic application specification for live equipment: DL/T 664—2008[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[13] 周海滨, 陈国华. 500 kV SF₆ 电流互感器事故分析及预防措施[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 99-108.

ZHOU Haibin, CHEN Guohua. Accident analysis and prevention measures of 500 kV SF₆ current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 99-108.

[14] 杨家辉, 程建伟. 500 kV SF₆ 电流互感器主绝缘故障的仿真分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(5): 29-35.

YANG Jiahui, CHENG Jianwei. Main insulation fault simulation analysis of 500 kV SF₆ current transformer[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 29-35.

[15] 宋永佳, 温才权. SF₆ 电流互感器内部故障不同接线方式保护动作分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 130-135.

SONG Yongjia, WEN Caiquan. Analysis of protection movement with different wiring model for SF₆ current transformer internal fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 130-135.

[16] 陈帅, 赵海龙, 衣俊艳. 基于 HSV 空间的创新型车牌定位方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 527-530.

CHEN Shuai, ZHAO Hailong, YI Junyan. Creative license plate locating method based on HSV space[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 527-530.

[17] OTSUN. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. Automatica, 1975, 11(285-296): 23-27.

[18] 周封, 任贵新. 基于颜色空间变量的输电线图像分类及特征提取[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 89-98.

ZHOU Feng, REN Guixin. Image classification and feature extraction of transmission line based on color space variable[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 89-98.

[19] JOHN C. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698.

[20] XU Z, SHIN B S, KLETTE R. Accurate and robust line segment extraction using minimum entropy with houghtransform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(3): 813-822.

[21] 张广斌, 束洪春, 于继来. 基于 Hough 变换直线检测的行波波头标定[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 165-173.

ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai. Surge identification for travelling wave based on straight[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 165-173.

[22] 郝艳捧, 刘国特, 薛艺为, 等. 输电线路覆冰厚度的小波分析图像识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 368-373.

HAO Yanpeng, LIU Guote, XUE Yiwei, et al. Wavelet image recognition of ice thickness on transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 368-373.

[23] 林其雄. 电压型致热设备温度统计分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 39-45.

LIN Qixiong. Temperature statistics analysis of voltage type heating equipment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(4): 39-45.

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-07-12

作者简介:

周可慧(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为人工智能、故障诊断; E-mail: 2903807982@qq.com

廖志伟(1973—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统智能控制、故障诊断. E-mail: epliao@scut.edu.cn

(编辑 许威)