

基于红外图像的变电设备热故障诊断方法研究

谢永流

国网三明供电公司

摘要: 为了保障变电设备安全、稳定运行,提高变电设备故障处理效果,可利用红外检测技术,结合变电设备红外图像特点,通过提取电力设备形状特征有效识别设备。根据红外图像中的设备热点温度值,运用相对温差法诊断变电设备的热故障。结果表明相对温差法能够实现故障诊断的可视化,提高日常巡检智能化水平。由此可以得出相对温差法是一种有效的故障诊断方法,值得在具体实践中推广和运用。

关键词: 变电设备; 红外图像; 热故障; 诊断方法

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-6288.2023.12.097

现阶段,红外热成像技术在电力设备中应用越来越广泛,通过对红外热成像技术的运用,可以实现电力设备的状态监测,排查电力设备运行过程中存在的隐患及故障,确保变电站电力设备平稳输送电能。因此应加大对基于红外图像变电设备热故障诊断方法的研究,以此加强变电站电力设备热故障的诊断效果,达到早期预警、早期防治的目的,为变电站稳定运行提供重要保障。

一、基于红外图像的变电设备热故障诊断

(一) 红外测温原理

红外测温是指基于普朗克黑体辐射定律,利用红外光辐射功率极强的温升效应,采用热成像仪或者红外测温仪等仪器设备,对波长在0.75um-1000um之间红外光波进行捕获,重新排列组合后生成热图像。生成的红外图像具有以下特点:被测物体不同温度由不同较为艳丽颜色所表示,亮度高,灰度分布较集中,且层次分布不明;抗干扰能力强、不受光线亮度影响;测试距离远、不受电磁干扰;信噪比低、噪声较大;分辨率低,边缘不清晰,仅能够反映物体和所处环境温度信息^[1]。

(二) 热故障判断方法

1. 表面温度判断法

该方法根据采集的电力设备红外数据,对发热设备负荷状态以及所处区域环境温度进行判断,以此诊断发热设备是否处于正常运行状态。该方法优势在于高效、简单等,但是易受外界条件的影响,在判断设备热缺陷时,存在较大的局限性。

2. 相对温差判断法

从电力设备热故障发生原因来看,主要包括两类,一类是加热设备负荷增加引起的热故障,另一类是设备

周围环境升高引起的热故障。基于此,国家推出相对温差判断法,该方法根据采集的同一型号设备中相同或类似设备对应测点的数据以及状态(对应测点温差、外部温度、电力负荷,较高温度点的温升率百分比等),诊断电气设备热故障^[2]。该方法优势在于有效、简单、应用广泛等。针对电流和电压同时加热的电力设备,也可以采用该方法进行热故障诊断,其判断公式如下:

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

式(1)中, σ_t 、 τ_1 、 τ_2 、 T_1 、 T_2 分别表示的相对温差、发热点温升、正常对应点的温升、发热点温度、正常对应点的温度、参考环境温度(选择与被测装置物理性质相近的环境参照体,且接近于被测装置所处的环境条件)。

3. 档案分析法

该方法是将档案中类似数据作为依据,与实验检测数据进行比较分析,对致热参数的变化趋势进行计算,以此对电力设备故障状态进行判断。一般在对结构复杂的重要设备进行分析诊断时,适宜采用档案分析法。该方法需要研究者处理大量信息数据,相较于其他方法,该方法应用较少。

(三) 设备热故障等级

针对变电设备异常发热情况,可以分为三级,具体如下表1所示。

二、基于红外图像的变电设备热故障诊断方法

基于上述内容的研究,可通过提取红外图像中温度值,利用相对温差法对电力设备进行热故障诊断,结合最高、环境参考温度选取,达到变电设备热故障诊断可

表1 设备热故障等级^[3]

等级	表现	后果	措施
一般故障	设备过热、温度场梯度小	短时间内安全运行,不影响设备正常运行	记录和监测电力设备
严重故障	设备严重过热,温度长梯度变化大	短时间继续运行,威胁设备使用寿命、性能、安全	尽快确定故障原因并解决
危急故障	设备超出规定最高温度	设备无法运行,容易引起事故	消除或降低负载电流,停运设备,尽快确定故障原因并解决

可视化目标。具体方法如下。

(一) 变电设备红外图像预处理

变电设备红外图像往往存在图像边缘模糊、信噪比低等问题，不利于热故障诊断。因此需对红外热成像进行预处理。首先应对红外图像进行去噪处理，常用的去噪方法有中值滤波、均值滤波、自适应滤波等方法，需要根据具体的情况，选择适宜的方法进行降噪处理，以此改善图像清晰度^[4]。经过试验证明，基于小波半软阈值的去噪算法是一种不错的去噪方法；其次应对变电设备红外图像合理分割，这主要是因为部分设备红外图像可能存在被遮挡的情况，需要通过分割将红外图像与背景物分离。常用的图像分割方法有Otsu分割法（最大类间方差法）、二维Otsu阈值方法、区域生长法等，这些方法具有各自的优势和不足，可将二维Otsu阈值方法、区域生长法结合运用，以便于在复杂环境条件下，精确、完整地提取目标区域；最后还需要加强红外图像特征的提取，以精确区分电力设备类型。在提取时，可以将Zernike 不变矩（Zernike Polynomials, 泽尔尼克多项式）作为图像的形状特征，并且对其稳定性进行验证。基于SVM（Support Vector Machine, 支持向量机）的变电站设备分类方法是一种较好的方法，通过改进SVM，以此对Zernike 矩特征矢量进行分类，选取最优RBF 参数（Radial Basis Function, 径向基函数），最后进行样本比较，对比不同条件下变电设备的类型。

(二) 变电设备温度获取

1. 比色条及其温度对应

红外图像获取后，从中提取像素阵，将其转换成温度矩阵后，提取红外图像中温度。红外图像像素与温度值具有相关性，通过颜色条中的像素与温度值的函数关系建立，确定颜色条的像素以及相应红外图像中的像素的温度值。同时比较颜色条坐标和温度值，并且与一次函数进行线性拟合。在热成像仪成像过程中，红外图像上需附比色条，基于这一点，需研究比色条像素点与温度之间的关系。在具体研究过程中，可以根据RGB分量原理（Red、Green、Blue，颜色模型），确定比色条中所对应的RGB分量值^[5]，具体如图1所示。从图1中可

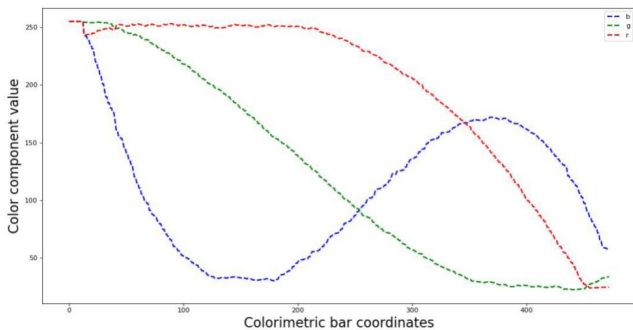


图1 比色条的RGB分量值

以确定比色条横坐标有374个像素，纵坐标为RGB分量值（0-255），红色线条、绿色线条、蓝色线条分别表示的是R分量（Red，红）、G分量（Green，绿）、B分量（Blue，蓝），对于图像中任何像素RGB组合，都与其他像素存在区别，由此为温度识别提供了基础。

图像中从上往下比色条坐标表示的是温度值的差异值，针对比色条纵坐标和温度值之间的关系，可以用线性函数进行映射，映射关系如图2所示。

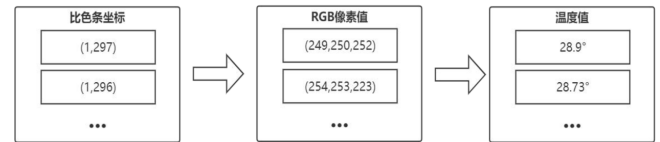


图2 比色条坐标、RGB像素值、温度值对应关系

2. 温度获取

在红外测温过程中，最值温度若从单一像素点中获取，易受噪声干扰，无法保证最值温度的准确性。因此可以选取3×3的像素区域作为最值温度获取区域，取平均像素温度Tn进行识别，温度识别原理如图3所示。改进后最值温度识别流程如下：从比色条最上部或者最底部开始遍历，提取像素点对应的温度值，找出红外图像中是否有与温度值与之相等的小区，若没有，则提取比色条下一行对应的温度值，若有，该小区域温度均值则为最低温度点或者最高温度点^[6]。

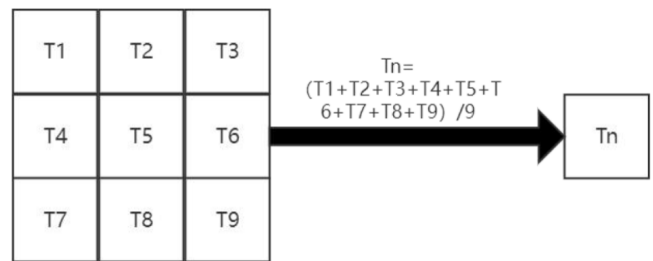


图3 温度识别原理

确定图像最值温度后，还需要获取目标平均温度，其获取方法与最值温度获取方法相同。

(三) 变电设备不同区域温度特征提取

1. 自适应网格划分的温度特征提取

通过高压套管的红外图像可以了解到，同一种设备的发热区域，具有一定的相似性。因此在变电设备热故障诊断故障中，还需要获取设备发热部位热点温度和环境参照体温度，其中环境参照体的选择，必须保证要接近于被测设备物理属性和环境因素。因此可以采用网格划分方法提取不同区域温度特征。以往采用的温度阈值划分网格方法，存在许多的弊端，若温度阈值过小，线夹等易高温区域则会被分为多段，导致不同网格区域的计算冗余，若温度阈值过大，则难以保证温度提取的精确性。为解决这一问题，可采用自适应网格划分方法，

确定自适应网格划分的合理性。假设待诊断部件长度，可以用来表示，针对目标区域规格，确定网格大小 a ， $n_0 = \lfloor a/b \rfloor$ ， n 的计算公式如下：

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

式(2)中， n 表示的是网格个数， n_1 、 b 分别表示的是 n_0 的整数部分和余数部分。

划分目标区域的网格后，按照最大值温度获取方法(2.1.2小节方法)，对每一格的平均温度进行计算，将其作为温度特征向量 T_n 。各网格相对温度差值 ΔT_n 可以通过分析同一类别的部件温度来获取，并且与划定的热故障阈值范围进行对比，若 ΔT_n 超出该阈值范围，则可判断该区域存在热故障且发生在第 n 个网格范围。

以高压套管为例，设备本身自身温度区域进行网格划分的同时，还需要将同一张红外图像中同类设备进行网格划分，并且作为环境参照物。套管环境参照物可以选择同一图像中的导线，这主要是因为导线也包含铜线等金属，也起到运输电流的功能，可以为套管热故障诊断提供合理依据。套管环境参照体系网格划分如图4所示。

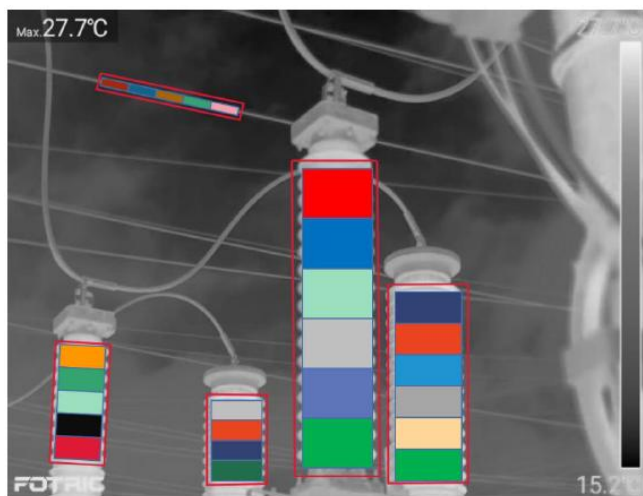


图4 套管环境参照体系网格划分

2. 温度精准确度验证

为了保证温度特征向量的准确性，还需要对温度特征向量进行试验验证，具体需要计算网格化后不同设备区域温度平均值，对获得的不同区域温度特征向量 T_r 准确性进行比较。套管网格化后划分的六个区域的温度特征向量准确性比较，具体如表2所示。通过表2可以看出，网格化后各区域温度特征向量误差在0.02~0.22℃。在利用相对温差法进行计算时，可以运用获取的温度值，即将温度数据最小值和温度最大值分别作为相对温差公式中的环境参考温度和热点温度，进而确定

相对温差，以此来判断热故障等级。

表2 温度特征向量准确性比较

区域	区域1	区域2	区域3	区域4	区域5	区域6
$t_r/^\circ\text{C}$	26.6	26.4	26.5	26.6	26.7	26.0
$ t_n - t_r $	0.22	0.14	0.10	0.12	0.06	0.02

(三) 设备诊断与分析

在变电设备热故障诊断时，可以利用热故障诊断系统，首先将所获取的电力设备红外图像输入系统，系统对电力设备红外图像进行识别，确定电力设备类型。之后利用相对温差法计算出相对温差 σt ，根据相对温差结果，以此来判断电力设备热故障等级。根据相对温差法判定热故障范围，高压套管 $\sigma t \geq 35\%$ 为一般热故障， $\sigma t \geq 80\%$ 为重大热故障， $\sigma t \geq 95\%$ 为危急热故障。根据确定热故障等级，采用表1的解决措施。

三、结语

通过上述内容可以了解到，红外检测技术具有高效简单的优势，在变电设备热故障诊断中发挥了重要作用。在变电设备热故障诊断过程中，要科学、合理的运用红外图像，加强对红外图像采集和预处理，从红外图像中获取温度特征值，通过对温度经准确验证，确保所获取的温度值精准性。最后利用相对温差法，确定变电设备热故障等级，以此采取适宜的热故障处理措施。由此可以看出，运用上述方法进行变电设备热故障诊断，可以实现变电设备热故障的可视化，提高了变电设备热故障检修水平。

参考文献

- [1]张滇.基于红外图像处理的输变电设备故障智能检测方法[J].光源与照明,2023(6):171-173.
- [2]陈华伟,谢志辉,姜盼.基于红外监测技术的热缺陷分类及典型故障分析[J].机电工程技术,2023,52(6):50-53.
- [3]王媛彬,李媛媛,段誉,等.基于轻量骨干网络和注意力结构的变电设备红外图像识别[J/OL].电网技术:1-12.
- [4]叶剑涛,杨为,柯艳国,等.基于红外图像实例分割的敞开式开关设备发热缺陷智能诊断方法[J].高压电器,2021,57(12):201-208.
- [5]李文璞,毛颖科,廖道,等.基于旋转目标检测的变电设备红外图像电压致热型缺陷智能诊断方法[J].高电压技术,2021,47(9):3246-3253.
- [6]肖懿,罗丹,蒋沁知,等.基于温度概率密度的变电站高压设备故障热红外图像识别方法[J].高电压技术,2022,48(1):307-318.