[预警]

风力发电厂输变电设备电连接发热故障主动预警研究

文/戚浩明
中国电建集团湖北工程有限公司

研究风力发电厂输变电设备电连接发热故障主动预警方法，提升电连接发热故障主动预警效果。利用红外热成像技术，采集输变电设备电连接部位的热红外图像；利用二维最大类间图像分割法，分割热红外图像，得到电连接部位目标图像与背景图像；通过核密度估计方法，在目标图像内，提取电连接部位的温度概率密度，初始归类电连接部位像素点；利用模拟退火的粗糙集K均值聚类算法，结合初始归类数量，聚类分析各像素点的温度数据，如果聚类结果内极少数像素点的温度较高，则说明存在电连接发热故障，应主动预警，并定位故障区域。实验证明：该方法可有效采集输变电设备电连接部位的热红外图像，并有效分割热红外图像；该方法可有效提取温度概率密度，实现电连接发热故障主动预警，并定位故障区域。

受接触压力与环境温度等因素影响，输变电设备中故障概率最高的故障类型为电连接发热故障[1]。出现电连接发热故障时，会提升其接触电阻，进而损坏电子元件和导线，降低电气传输的效率和稳定性，影响输变电设备运行可靠性[2-4]。为避免电连接故障威胁输变电设备运行安全性，需研究电连接发热故障预警方法，及时告知运维人员输变电设备电连接发热故障信息，尽快制定维修计划[5]，缩小电连接发热故障影响范围。例如，李俊卿等人通过随机森林算法，依据重要性，排列输变电设备故障特征，作为关联物理量输入深度置信网络内，利用层次分析法与反熵值，确定网络训练结果的权重，输出输变电设备故障预警阈值。当输变电设备故障值超过预警阈值时，则认为该输变电设备存在故障，发出警报。该方法具备输变电设备故障预警的可行性[6]。邵先军等人依据输变电设备历史数据，塑造输变电设备故障预警信息决策表。通过遗传算法约简决策表，提取决策规律，得到故障预警知识。依据故障预警知识，构造输变电设备故障预警模型，实现故障预警。该方法可有效挖掘输变电设备故障预警知识，完成故障预警，为输变电设备智能化运维提供参考[7]。但上述方法均容易出现误判和漏判问题，影响输变电设备运行的稳定性。利用温度概率密度函数，可精准呈现输变电设备的温度特征，及时发现输变电设备的发热故障问题，有效降低故障误判与漏判概率。为此，有必要研究风力发电厂输变电设备电连接发热故障主动预警方法，提升电连接发热故障主动预警准确度。

输变电设备电连接发热故障主动预警

1. 输变电设备电连接部位热红外图像采集

通过热红外成像技术，采集风力发电厂内输变电设备电连接部位的热红外图像。借助线阵列红外探测器，对输变电设备电连接部位进行扫描[8]。在扫描过程中，将输变电设备电连接部位的扫描空间划分为n个面元，并逐一对每个面元进行扫描，单

元扫描时间是t，计算公式为

$$t=\frac{1}{\beta n} \tag{1}$$

式中，β为帧频。

经过扫描获得的红外信号可以通过固态摄像器件转换成相应的电信号，并生成输变电设备电连接部位的热红外图像[9]。

2. 输变电设备电连接部位热红外图像分割

通过二维最大类间方差图像分割法，对采集到的输变电设备电连接部位红外图像进行处理，将其分割成目标图像与背景图像。

令输变电设备电连接部位热红外图像内，坐标(x,y)的像素点灰度值是$\xi(x,y)$，则(x,y)的邻域平均灰度为

$$g(x,y)=\frac{\sum_{i=\frac{N-1}{2},j=\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}}\xi(x+i,y+i)}{N^2} \tag{2}$$

式中，$\xi(x,y)$的正方形邻域宽度为N。

通过$\xi(x,y)$与$g(x,y)$构建二元组(i,j)，用于描绘输变电设备电连接部位热红外图像，如果(i,j)出现频数是$\xi(i,j)$，那么对于一幅$M\times M$的输变电设备电连接部位热红外图像来说，对应的联合概率密度为

$$p(i,j)=\frac{\xi(i,j)}{M\times M} \tag{3}$$

令二维矢量分割阈值是(S,T)，利用可将输变电设备电连接部位热红外图像的二维直方图，分割为四个区域，分别是背景区域[10-11]、噪声区域、目标区域和边缘区域。

令输变电设备电连接部位热红外图像的背景区域为Z_1，目标区域为Z_0，则Z_0与Z_1出现的概率分布为

$$\begin{aligned}Q_0&=\sum_{i=0}^{S}\sum_{j=0}^{T}p(i,j)\\Q_1&=\sum_{i=S+1}^{L-1}\sum_{j=T+1}^{L-1}p(i,j)\end{aligned} \tag{4}$$

式中，$L-1$为输变电设备电连接部位热红外图像的灰度级。

Z_0与Z_1的均值矢量为

$$\begin{aligned}u_0&=\sum_{i=0}^{S}\sum_{j=0}^{T}\frac{ip(i,j)}{Q_0}\frac{jp(i,j)}{Q_0}\\u_1&=\sum_{i=S+1}^{L-1}\sum_{j=T+1}^{L-1}\frac{ip(i,j)}{Q_1}\frac{jp(i,j)}{Q_1}\end{aligned} \tag{5}$$

令$Q_0+Q_1\approx1$，则总体均值为

$$u=Q_0u_0+Q_1u_1 \tag{6}$$

令Z_0与Z_1间的离散测度矩阵为

$$B=Q_0\left[(u_0-u)(u_0-u)^{T'}\right]+Q_1\left[(u_1-u)(u_1-u)^{T'}\right] \tag{7}$$

式中，T'为转置符号。

以B的迹$\hat{B}$为与间的距离测度函数，计算公式为

$$\hat{B}=Q_0\left[(u_{0i}-u_i)+(u_{0j}-u_j)\right]^2+Q_1\left[(u_{1i}-u_i)+(u_{1j}-u_j)\right]^2 \tag{8}$$

以最大$\hat{B}$时，对应的阈值(S,T)为输变电设备电连接部位热红外图像分割的最佳阈值，进行热红外图像分割[12-13]，得到输变电设备电连接部位的目标图像与背景图像。

3. 输变电设备电连接部位的温度概率密度提取

利用核密度估计法，在分割获取的输变电设备电连接部位目标图像内，提取电连接部位的温度概率密度。

令输变电设备电连接部位目标图像内，η个像素点上的温度是$a_1,a_2,\cdots,a_\eta$，全部温度点均处于区间$[a_{\min},a_{\max}]$内，即$a_{\min}\leqslant a_1,a_2,\cdots,a_\eta\leqslant a_{\max}$。

按照相应区间中的温度概率密度$\psi(a)$积分，计算各像素点温度数据落入$[a_{\min},a_{\max}]$内的概率ρ，计算式为

$$\rho=\int_{a_{R,\min}}^{a_{R,\max}}\psi(a)\mathrm{d}a \tag{9}$$

式中，温度区域R的温度区间是$[a_{R,\min},a_{R,\max}]$。

如果R的宽度h很小，那么可以不考虑$\psi(a)$的变化，式（9）变更为

$$\rho=\psi(a)h \tag{10}$$

在已有的η个像素点内，落入R内的像素点数量是k，则此时的概率为$\rho=\frac{k}{\eta}$，结合式（10）可获取温度概率密度，计算公式为

$$\psi(a)=\frac{k}{\eta h} \tag{11}$$

令任意一个像素点$a_{i'}$的温度分布概率为

$$K\left(\frac{a-a_{i'}}{h}\right)=\frac{\exp\left(-0.5\left(\frac{a-a_{i'}}{h}\right)^2\right)}{\sqrt{2\pi}} \tag{12}$$

利用$K\left(\frac{a-a_{i'}}{h}\right)$估计$k$，得到

$$k=\sum_{i'=1}^{\eta}K\left(\frac{a-a_{i'}}{h}\right) \tag{13}$$

在式（11）引入式（13）得到最终的温度概率密度，计算公式为

$$\hat{\psi}(a)=\frac{\sum_{i'=1}^{\eta}K\left(\frac{a-a_{i'}}{h}\right)}{\eta h} \tag{14}$$

h的计算公式为

$$h=\left(\frac{4}{3\eta}\right)^{\frac{1}{2}}\sigma \tag{15}$$

式中，σ为输变电设备电连接部位温度数据的标准差。

通过式（14）在输变电设备电连接部位目标图像内，提取温度概率密度[14]。

通过计算温度概率密度的极值，利用不同极值点温度a_{E0}、a_{E1}，确定相应的温度变化幅度$\frac{a_{E0}-a_{E1}}{a_{E0}}$，令温度阈值为$\varepsilon$。当$\varepsilon>\frac{a_{E0}-a_{E1}}{a_{E0}}$时，将相应的极值点归为一类，完成温度概率密度的初始归类[15]，得到l个类别。

4. 电连接发热故障主动预警的实现

以温度概率密度初始归类数量l，为模拟退火的粗糙集K均值聚类算法的聚类数量，对输变电设备电连接部位目标图像的像素点温度数据进行聚类处理。如果大部分像素点的温度均较高，则不是电连接发热故障，而是由大负载导致的温度升高，无需主动预警。因为实际运行过程中，电连接发热故障点的数量较少。所以，当极少数像素点温度较高时，说明该输变电设备存在电连接发热故障，需主动预警，并定位故障区域。

输变电设备电连接发热故障主动预警的具体步骤为：

1）参数初始化。

2）令循环计数变量为零。

3）通过式（16）分析输变电设备电连接部位目标图像内的非孤立点，得到初始聚类中心的候选点集Y，计算公式为

$$\gamma\left(y_{i'}\right)=z\left(y_{i'},\frac{\max d\left(y_{i'},y_{j'}\right)}{2}\right)\geqslant \mathrm{sqrt}\left(l\right) \tag{16}$$

式中，$y_{i'}$、$y_{j'}$为输变电设备电连接部位目标图像内第i'、j'类像素点温度数据中心点；γ为半径；z为以$y_{i'}$为中心，γ为半径区域内的像素点数量z；$d(y_{i'},y_{j'})$为$y_{i'}$与y_j的距离。

如果式（16）成立，那么以$y_{i'}$为初始中心点的候选点集Y，防止将孤立点当成初始中心点，降低聚类准确度。

以温度概率密度初始归类数量为聚类类别数l，得到l个聚类中心点。利用粗糙集结合K均值，求解此时的目标函数值，计算公式为

$$\hat{F}(\tau)=\min\sum_{i'=1}^{l}\left(w_Y\sum_{Y}^{v_Y}d\left(Y-y_{i'}\right)+w_b\sum_{Y}^{v_b}d\left(Y-y_{i'}\right)\right) \tag{17}$$

式中，v_Y为输变电设备电连接部位目标图像内全部像素点温度数据的下逼近集；v_b为边界集；w_Y、w_b为v_Y与v_b的权值；$d(Y-y_{i'})$为Y与$y_{i'}$间的距离；τ为循环次数。

4）求解新的距离中心，计算公式为

$$\hat{y}_{i'}=w_u\frac{\sum_{y_{i'}}^{v_u}y_{i'}}{|v_u|}+w_b\frac{\sum_{y_{i'}}^{v_b}y_{i'}}{|v_b|} \tag{18}$$

式中，w_u为输变电设备电连接部位目标图像内全部像素点温度数据的上逼近集；w_u为v_u的权值。

求解此时的目标函数为$\hat{F}(\tau+1)$，那么$\Delta\hat{F}=F(\tau+1)-F(\tau)$，通过模拟退火理论，分析是否接受新的聚类中心点。如果$\Delta\hat{F}<0$，那么接受新的聚类中心点。反之，利用概率$q=e^{\frac{\hat{F}(\tau+1)-\hat{F}(\tau)}{o(\tau)}}$接受新的聚类中心点，当下温度是$0(\tau)$。

5）循环次数达到最大值，那么继续步骤6，反之返回步骤3。

6）如果$0(\tau)$达到结束温度，那么继续步骤7，反之，进行降温，并返回步骤2。

7）输出输变电设备电连接部位目标图像内，像素点温度数据的聚类结果。

8）设置阈值，当聚类结果中，高温像素点数量超过阈值时，则不存在电连接发热故障，无须主动预警；当高温像素点数量低于阈值时，则存在电连接发热故障，应主动预警，提醒运维人员及时维修输变电设备电连接发热故障。

实验分析

以位于广西壮族自治区北流市和容县交界处山脊的玉林天堂顶风电场工程为研究对象，高程在420～1 020 m之间，西侧毗邻先期建设的六坪顶风电场；场址中心距玉林市37 km，距北流市24 km；施工区域比邻二级水源保护区，施工对环境保护、

水土保持的要求非常高。天堂顶风电场总装机容量为 80 MW，单机容量2.65 MW（20套）/3.00 MW（9套）；天堂顶风电场与六坪顶风电场共用一座升压站。

以该风电场工程内随机一个存在电连接发热故障的输变电设备为例，利用本文方法采集该输变电设备电连接部位的热红外图像，采集结果如图1所示。

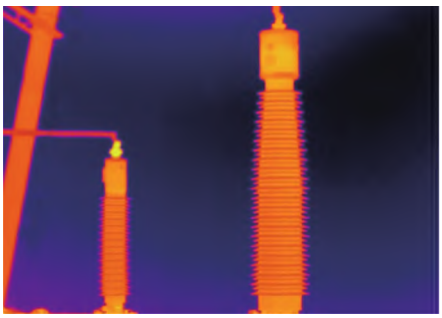


图1　输变电设备电连接部位热红外图像采集结果

根据图1可知，本文方法可有效采集输变电设备电连接部位的热红外图像，且图像清晰度较高。

利用本文方法对采集的热红外图像进行图像分割，如图2所示。

（a）目标图像　　（b）背景图像

图2　电连接部位热红外图像分割结果

根据图2可知，本文方法可有效分割输变电设备电连接部位热红外图像，得到输变电设备电连接部位的目标图像和背景图像，减少后续电连接发热故障主动预警的计算量。

利用本文方法提取该输变电设备电连接部位的温度概率密度，提取结果如图3所示，温度阈值为45 ℃。

根据图3可知，本文方法可有效提取输变电设备电连接部位的温度概率密度，依据温度阈值，将温度概率密度的极值点进行归类，共归为两类，分别是正常运行类与疑似故障类。

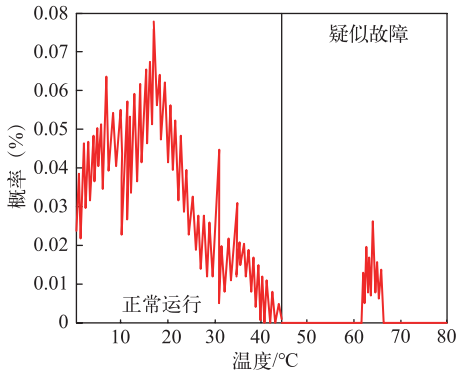


图3　温度概率密度提取结果

本文方法利用聚类分析将输变电设备电连接部位目标图像内全部像素点的温度数据进行归类，以确定聚类类别数量，如图4所示。

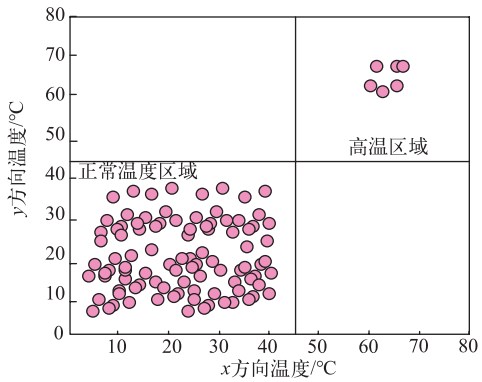
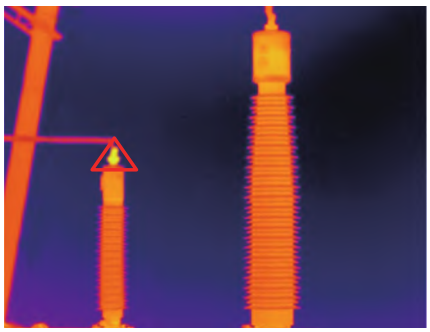


图4　各像素点温度的聚类结果

根据图4可知，本文方法可有效聚类输变电设备电连接部位目标图像内全部像素点的温度数据。其中，高温区域内的像素点数量较少，说明该输变电设备存在电连接发热故障，需进行主动预警，提醒运维人员。

利用本文方法定位输变电设备电连接发热故障区域，如图5所示。



△主动预警故障区域

图5　输变电设备电连接发热故障定位与主动预警结果

根据图5可知，本文方法可有效完成输变电设备电连接发热故障主动预警，并定位故障区域，及时提醒运维人员输变电设备存在电连接发热故障，并告知其故障区域，缩短故障维修时间。

结束语

电连接发热故障直接影响输变电设备运行稳定性，为此，研究风力发电厂输变电设备电连接发热故障主动预警方法，精准主动预警电连接发热故障，并为运维人员提供发热故障位置，便于运维人员及时查看与维修，提升输变电设备运行的稳定性。EA

（收稿日期：2023-12-26）

参考文献

[1] 黄志鸿，吴晟，肖剑，等．基于引导滤波的电力设备热故障诊断方法研究[J]．红外技术，2021，43(9)：910-915．

[2] 王晶，姚邹静，赵春晖．基于红外图像时空特征的电力设备故障诊断[J]．控制工程，2021，28(8)：1683-1690．

[3] 耿苏杰，王秀利．基于模糊贝叶斯网络的电力设备故障诊断和状态评估[J]．计算机集成制造系统，2021，27(1)：63-71．

[4] 夏文苗，黄伟．基于XGBoost和自适应阈值的电厂风机故障预警[J]．计算机仿真，2023，40(2)：108-112．

[5] 林少娃，陈奕汝，顾洁，等．基于隐含狄利克雷分布主题模型和特征级异构数据融合的电力故障主动性预警研究[J]．电子器件，2022，45(2)：432-438．

[6] 李俊卿，陈雅婷，李斯璇．基于深度置信网络的同步发电机励磁绕组匝间短路故障预警[J]．电力自动化设备，2021，41(2)：153-158．

[7] 邵先军，陈孝信，詹江杨，等．基于多源状态参量融合的油纸绝缘套管缺陷预警方法研究[J]．电网与清洁能源，2022，38(12)：1-7．

[8] 韩万里，茅大钧，蔡晔，等．基于数据融合的风电变桨系统故障预警研究[J]．太阳能学报，2022，43(12)：236-241．

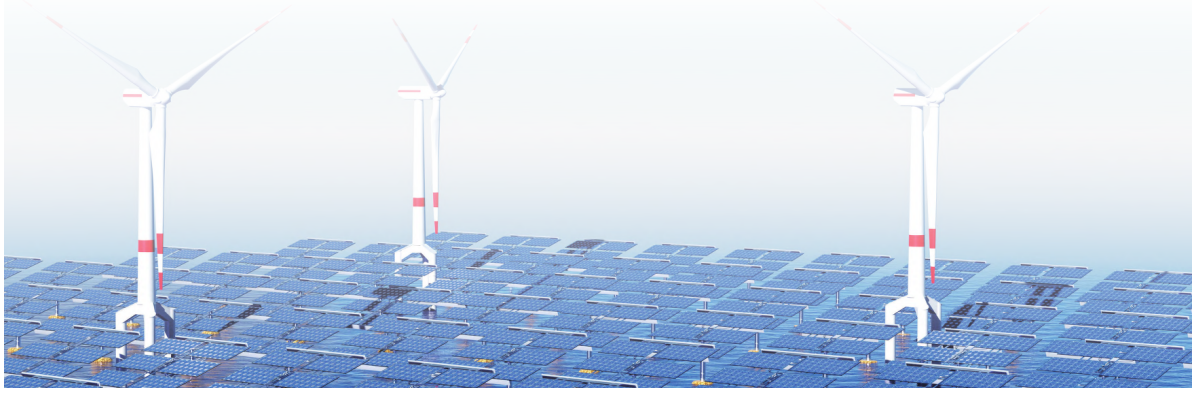
[9] 李群山，刘志成，李鑫，等．基于模糊逻辑算法的电力线路绝缘故障预警方法[J]．电力科学与技术学报，2022，37(6)：190-197．

[10] 崔昊杨，周坤，张宇，等．电力设备多光谱图像融合及多参量影响的故障渐变规律演化预测研究[J]．电网技术，2021，45(1)：115-125．

[11] 许志浩，郑诗泉，康兵，等．基于三相自搜寻比较法的电气设备过热故障识别方法[J]．红外技术，2021，43(11)：1112-1118．

[12] 梁剑，黄志鸿，张可人．基于多尺度引导滤波和决策融合的电力设备热故障诊断方法研究[J]．红外技术，2022，44(12)：1344-1350．

[13] 王宇飞，李俊娥，刘艳丽，等．容忍阶段性故障的协同网络攻击引发电网级联故障预警方法[J]．电力系统自动化，2021，45(3)：24-32．

[14] 柏林，晏锐，刘小峰，等．基于多层深度互信息变分网络的风电机组轴承故障预警方法[J]．太阳能学报，2022，43(11)：194-202．

[15] 姜兴华，韩万里，茅大钧．基于核主元分析和GRU神经网络的电站辅机故障预警研究[J]．热能动力工程，2021，36(7)：93-98．