

DOI: 10.7667/PSPC171084

# 基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统

漆 灿<sup>1</sup>, 李庆武<sup>1,2</sup>, 郑云海<sup>3</sup>, 王门鸿<sup>3</sup>

(1. 河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022;  
3. 国网泉州供电公司, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 变电站电力设备故障导致大面积停电时会造成巨大的经济损失和社会影响。根据电力设备故障会产生温度异常的特点, 提出一种基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统。该系统通过无线组网实现远程监控, 对设备发热异常进行实时报警。利用基于空间位置约束和方向约束的红外图像与可见光图像配准方法实现异常发热区域的精确定位。对异常发热区域和温度较高区域打上视觉标签, 分析温度变化情况, 预防故障的发生和升级。实验结果表明, 该系统能够准确、实时地检测和定位设备温度异常区域, 对温度过高区域进行持续监测并对故障进行预警, 为变电站设备异常监测提供了可靠保证。

**关键词:** 变电站; 红外监测; 智能视觉物联网; 精确定位; 视觉标签

## Infrared monitoring system for substation based on intelligent visual internet of things

QI Can<sup>1</sup>, LI Qingwu<sup>1,2</sup>, ZHENG Yunhai<sup>3</sup>, WANG Menhong<sup>3</sup>

(1. College of IOT Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Chanzhou 213022, China;

3. State Grid Quanzhou Electric Power Supply Company, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** The widespread power cut caused by substation power equipment failure will bring about huge economic losses and negative impact on society. According to the characteristic that power equipment failure can produce abnormal temperature, an infrared monitoring system based on intelligent visual internet of things for substation is presented. This system realizes remote monitoring by wireless network and alarms the equipment's heat anomaly in real time. The accurate locating of the abnormal heat-generating area is achieved by using the infrared image and the visible image registration method based on the spatial position constraint and the direction constraint. The system will mark the abnormal heating area and the high temperature area with visual labels, and analyze the temperature change in the heat region as a result of which the occurrence and even the severity of the breakdown can be prevented. The experimental results demonstrate that the system can detect and locate the equipment's temperature anomaly immediately and accurately, achieve the continuous monitoring of the abnormal temperature area as well as alarming the breakdown, and provide reliable guarantee for the monitoring of substation equipment anomaly.

This work is supported by Key Research and Development Program of Jiangsu Province (No. BE2016071).

**Key words:** substation; infrared monitoring; intelligent visual internet of things; accurate positioning; visual label

## 0 引言

绝大多数电力设备发生故障或出现异常情况时, 最初都伴随着局部、整体的过热或温度分布相对异常的现象<sup>[1]</sup>, 因此, 为确保电力设备的安全运行, 需要对电力设备热状态进行实时监测<sup>[2]</sup>。电力

设备的温度越高, 红外辐射的能量越强<sup>[3]</sup>。红外热成像是将物体的热辐射扫描成像的一种检测技术, 以设备的热状态分布为依据对设备运行状态良好与否进行诊断, 具有远距离、不接触、实时、快速、直观地对设备的热状态进行成像的特点, 故在电力检修中应用十分广泛<sup>[4-5]</sup>。

传统的变电站故障主要通过人工进行检测, 存在着主观因素影响大、工作效率低等缺陷<sup>[6]</sup>, 因此,

基金项目: 江苏省重点研发计划项目资助 (BE2016071)

迫切需要提高设备异常检测的实时性和智能化水平。翟瑞聪<sup>[7]</sup>等进行了电力设备远程监测诊断中心系统巡视信息联动应用研究,实现了电力设备的多维度智能监控与分析;成永红<sup>[8]</sup>等设计了变电站电力设备绝缘综合在线监测系统,系统采用总线方式进行数据传输,存在布线困难、线路易损坏、维护成本高等缺点;夏宾<sup>[9]</sup>等提出了智能型红外在线监控系统在无人值守变电站中的应用,有效提高设备监测效率,但也仅仅是对温度超限进行报警;李宏伟<sup>[10]</sup>提出应用于智能变电站的智能视觉系统,实现了设备故障的检测和定位,但缺少对异常发热区域状态的持续监测和分析;随着物联网技术的发展,以视觉传感器、信息传输和智能视觉分析组成的智能视觉物联网逐渐应用到监控领域<sup>[11]</sup>。本文提出一种基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统,感知和分析电力设备的温度场信息,及时发现设备发热异常,快速定位异常区域并分析缺陷类型,利用视觉标签对变电站电力设备状态进行监测和分析,及时发现和预警设备发热异常。

### 1 系统整体架构

本系统的整体架构如图 1 所示,系统主要分为监测模块、服务器模块和客户端模块。监测模块由监测节点组成,监测节点包括红外热像仪<sup>[12]</sup>、可见光摄像头、温度感知模块、工控机等,主要完成数据的采集和处理,摄像头搭载在云台上,系统通过旋转云台的运动实现对电力设备的全场景扫描,数据采集包括电力设备红外视频流、可见光视频流、环境温度等数据的采集,数据处理包括电力设备区域分割、设备异常发热区域检测、异常发热区域精确定位、视觉标签分析和异常预警;服务器模块主要接收监测节点的异常数据,存储到数据库中并向客户端发送报警和预警信号;客户端可通过网络向服务器发送请求方便地查询异常信息并及时掌握设备异常情况。

#### 1.1 数据采集

数据采集是智能视觉物联网的基础,在本系统中数据采集包括电力设备红外视频流、可见光视频流和环境温度信息的获取,结构如图 2 所示,温度传感器与 MCU(Microcontroller Unit)相连,MCU 通过串口将温度数据传输至工控机,数据通信格式如表 1 所示,起始位固定为 0xAA,数据位分别为温度的整数部分和小数部分,校验位为数据位的和,结束位固定为 0xFF;红外热像仪和可见光摄像头通过网线与工控机相连,工控机间隔 5 s 获取一次数据进行处理。

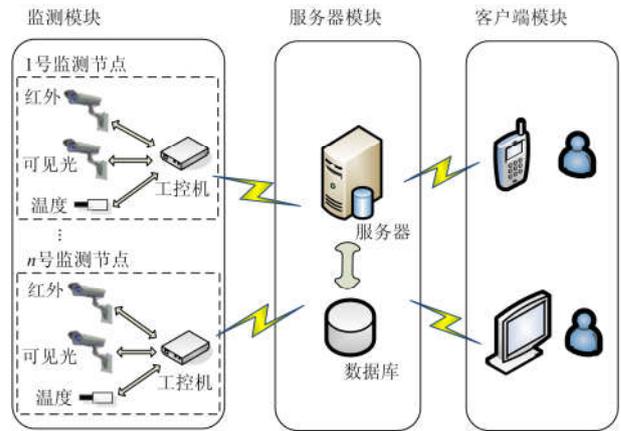


图 1 系统整体架构

Fig. 1 Overall architecture of the system

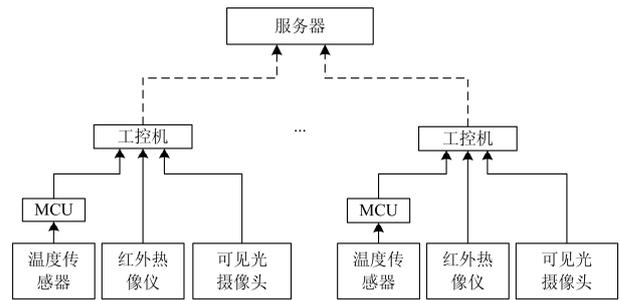


图 2 数据采集硬件结构图

Fig. 2 Data acquisition hardware structure

表 1 MCU 与工控机数据通信格式

Table 1 MCU and computer data communication format

起始位	数据位	校验位	结束位
0xAA	0x1C	0x48	0xFF

#### 1.2 数据处理

监测节点采集数据后,由工控机先进行本地处理,再通过网络传输到服务器,以减轻远程数据传输的压力。数据采集后,首先在红外图像中分割出设备区域作为检测区域,然后结合环境温度信息对红外图像进行发热异常检测、通过红外图像与可见光图像的配准实现异常区域的精确定位、通过视觉标签分析异常发热区域的变化情况,具体算法和实现见第 3 节:检测算法的设计与实现。

#### 1.3 数据传输

数据传输分两部分,第一部分是监测节点与服务器之间的数据传输,工控机在初始化时向服务器发送请求并建立 Socket 连接<sup>[13]</sup>,服务器监听与工控机建立连接的端口,当有数据传输时,服务器接收数据并存储到数据库中。第二部分是客户端与服务端之间的数据传输,客户端初始化时向服务器发送

请求并建立 Socket 连接,一方面,当客户端需要查询数据时,向服务器发送查询参数,服务器从数据库中查询符合条件的数据并发送给客户端显示,另一方面,当电力设备产生异常发热或将要产生异常发热时,服务器向客户端发出报警和预警信号。

## 2 软件设计

### 2.1 监测节点软件设计

监测节点是系统的重要组成部分,负责数据的采集和处理,其工作流程如图3所示。

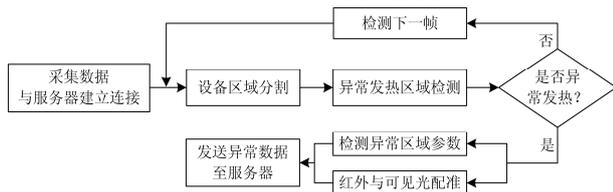


图3 监测节点工作流程图

Fig. 3 Monitoring node work flow chart

电力设备故障往往伴随着异常发热的现象,因此,需实时监测设备温度并及时检测出异常发热区域。系统运行过程中,工控机每隔5s获取一帧红外图像进行处理,首先分割出发热区域作为检测区域,然后对检测区域进行发热异常检测,当检测出异常发热时,进一步检测异常区域参数,包括异常区域中心坐标、异常区域面积、最高温度、最低温度、平均温度、相对温差、温升速度和缺陷等级,并通过红外与可见光图像的配准实现异常发热区域的精确定位,最后将异常数据发送至服务器并向客户端发送报警信号,若没有发热异常但检测出区域温度较高时,对温度较高区域打上视觉标签,持续监测并分析温度变化情况,在异常发生前通过服务器向客户端发送预警信号,否则检测下一帧。

### 2.2 客户端软件设计

客户端软件包括异常信息更新模块、异常预警模块、异常信息详情模块和异常信息查询模块。

(1) 异常信息更新模块,当监测节点检测到发热异常时,发送异常信息至服务器,服务器转发至客户端显示,实时更新,并向客户端发送报警信号。

(2) 异常预警模块,监测节点通过视觉标签持续监测并分析设备温度较高区域的温度变化情况,在异常发生前通过服务器向客户端发送预警信号。

(3) 异常信息详情模块,显示异常的详细信息,包括红外异常检测图、可见光异常区域定位图和异常详细参数。

(4) 异常信息查询模块,使用人员可以设置查询

参数并向服务器发送请求查询需要的数据。

## 3 检测算法的设计与实现

### 3.1 异常发热区域分割与检测

为了提高异常发热区域的检测速度和效率,先提取设备区域作为检测区域,再对检测区域的设备进行异常发热检测。

#### 1) 设备区域提取

根据红外图像的成像特性,发热目标区域具有比其他区域更高的灰度值,采用模糊C均值(fuzzy c-means,简称FCM)算法<sup>[14]</sup>可以利用该特点实现设备区域与非设备区域的自动分割。传统的FCM聚类迭代次数多,耗时长,不适合在线检测需要,本系统改进了FCM算法,以达到实时性、低漏检率需求。算法步骤如下述。

(1) 精简数据集<sup>[15]</sup>。统计图像的灰度级,同一灰度级作为一个子集代入计算,由于灰度级最多只有256级,减少了模糊聚类的运算量,提高了图像分割速度。

(2) 优化聚类中心。将图像灰度统计直方图划分为像素数相等的两部分,划分点对应的灰度级为 $q$ ,则定义类中心的目标函数为

$$f = \alpha \cdot \left( \frac{p_i}{H_1} + \frac{p_j}{H_2} \right) + \beta \cdot \frac{x_j - x_i}{x} \quad (1)$$

式中: $i$ 和 $j$ 为像素灰度级, $0 \leq i < q$ , $q < j \leq 255$ ;  $p_i$ 、 $p_j$ 是灰度级为 $i$ 和 $j$ 的像素数; $H_1$ 、 $H_2$ 分别为两部分的像素总数; $x_i$ 、 $x_j$ 分别为灰度级 $i$ 、 $j$ 对应的灰度值; $x$ 为最大灰度级; $\alpha$ 、 $\beta$ 为两部分对应的权值,这里分别取0.4,0.6,使得 $f$ 最大时的 $i$ 、 $j$ 为初始聚类中心对应灰度级。

(3) 邻域相关性约束。根据以上求得初始模糊场后,利用高斯函数为邻域像素赋权值并对隶属度进行加权平均作为该像素的隶属度 $u_{mn}^k$ ,如式(2)。

$$u_{mn}^k = h(x, y) \cdot u_{xy}^k \quad (2)$$

式中: $m$ 、 $n$ 为像素点横、纵坐标; $k$ 为所属类别; $x \in (m-1, m+1)$ , $y \in (n-1, n+1)$ ;  $h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$ 为高斯核函数; $\sigma$ 取0.8,邻域取 $3 \times 3$ 邻域。

分割效果如图4所示,改进的FCM算法比传统的FCM算法分割出的电力设备区域更完整,速度为后者的5~7倍。

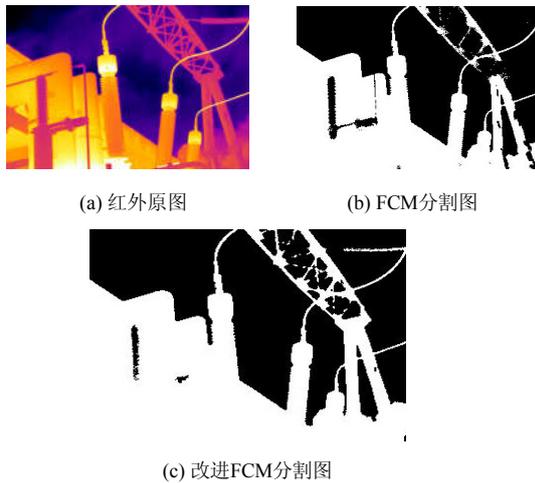


图 4 发热区域分割

Fig. 4 Heat zone segmentation

### 2) 异常发热区域检测

电力设备缺陷一般分为三类：一般缺陷、重大缺陷和紧急缺陷。检测标准依据《中华人民共和国电力行业标准带电设备红外诊断技术应用导则》<sup>[16]</sup>。红外热像仪成像的同时会生成伪彩色-温度的映射表，获取红外图像后，通过访问图像灰度值并利用映射表可以方便地获取到图像中每个像素点的温度，结合环境温度信息对检测区域进行发热异常检测，可以检测出的参数有异常区域中心坐标、异常区域面积、最低温度、最高温度、平均温度、相对温差和缺陷等级。异常发热区域检测效果如图 5 所示。

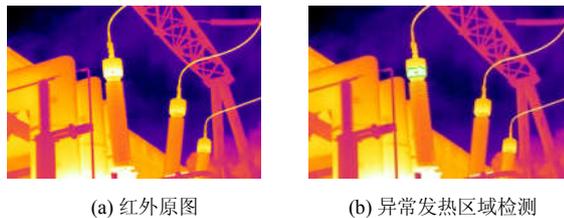


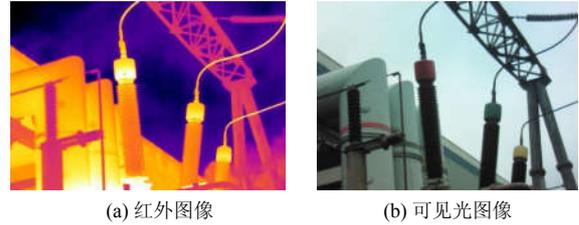
图 5 异常发热区域检测

Fig. 5 Abnormal heat zone detection

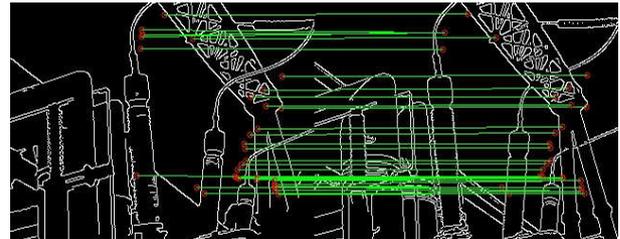
### 3.2 异常发热区域精确定位

红外图像分辨率较低、成像模糊，可见光图像分辨率高，成像符合人眼视觉特性，通过红外图像到可见光图像的映射可以实现异常区域的精确定位，但因红外热像仪和可见光成像设备的安装位置不同，图像中的目标会有位置差异，需要对二者所获图像进行配准。由于红外图像和可见光图像的成像原理不同，图像间的相关性较小，图像灰度和特征存在较大差异，传统的基于随机抽样一致

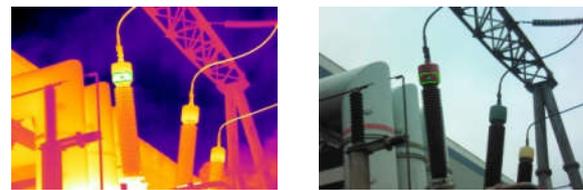
(RANSAC)<sup>[17]</sup>的特征点配准方法存在误匹配点对的问题，配准效果较差，如图6(c)所示，本文利用特征点对连线的方向大约一致性约束和空间几何约束筛选出正确的特征匹配点对，实验证明该算法较好地去除误匹配特征点对，如图6(d)所示，定位效果如图6所示，算法步骤如下。



(c) 基于RANSAC算法特征点匹配



(d) 本文算法



(e) 异常发热区域检测

(f) 异常发热区域精确定位

图 6 异常发热区域的精确定位

Fig. 6 Abnormal heating area precise positioning

- (1) 对红外图像  $I_{\text{frared}}$  和可见光图像  $I_{\text{light}}$  灰度化处理得到灰度图像  $I_{\text{fraredGray}}$  和  $I_{\text{lightGray}}$ ；
- (2) 利用Canny边缘检测<sup>[18]</sup>算法检测红外图像和可见光图像得到边缘图像  $I_{\text{fraredEdge}}$  和  $I_{\text{lightEdge}}$ ；
- (3) 利用SURF算法<sup>[19]</sup>检测边缘图像  $I_{\text{fraredEdge}}$  和  $I_{\text{lightEdge}}$  的特征点，得到特征点集  $P_{\text{frared}}$  和  $P_{\text{light}}$ ；
- (4) 对于  $P_{\text{frared}}$  中的每个点  $P_{\text{frared}}(i)$ ，找出其在

$P_{\text{light}}$  中欧式距离最近的前两个特征点, 如果最近距离除以次近距离小于阈值(本文阈值取0.7), 则接受这一对匹配点, 否则, 去除。得到粗匹配点对集  $O$  和新的特征点集  $P'_{\text{frared}}$  和  $P'_{\text{light}}$ ;

(5) 计算所有粗匹配点对的欧式距离并得到最大距离  $d_{\text{max}}$ , 对于距离小于  $\alpha \cdot d_{\text{max}}$  的匹配点对进行筛选, 本文  $\alpha$  取0.2, 得到新的匹配点对集  $O'$  和特征点集  $P''_{\text{frared}}$  和  $P''_{\text{light}}$ ;

(6) 利用正确匹配点对的连线方向具有大约一致的约束关系进行误匹配点对的去除, 统计粗匹配点对连线斜率的直方图, 正确特征匹配点对连线的斜率相近且集中, 斜率密度较大, 则

$$K' = k \pm \varepsilon \quad (3)$$

式中:  $K'$  为正确匹配点对连线的斜率范围;  $k$  为斜率直方图最集中的斜率值; 本文  $\varepsilon$  取2。斜率统计直方图如图7所示。

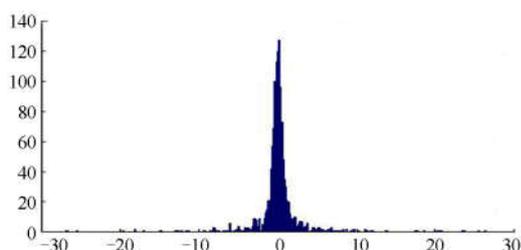


图 7 斜率统计直方图

Fig. 7 Slope statistics histogram

(7) 用相似三角形的几何约束进一步去除误匹配点对, 选取一对特征点对  $(P''_{\text{frared}}(i), P''_{\text{light}}(i))$ , 与其相邻的两对特征点对  $(P''_{\text{frared}}(i+1), P''_{\text{light}}(i+1))$ ,  $(P''_{\text{frared}}(i+2), P''_{\text{light}}(i+2))$ , 依次连成三角形, 如果是正确匹配点对, 进行仿射变换, 对应边的比例保持不变, 红外图像中三条边分别为  $l_i$ 、 $l_{i+1}$ 、 $l_{i+2}$ , 可见光图像中三条边分别为  $l'_i$ 、 $l'_{i+1}$ 、 $l'_{i+2}$ , 则

$$\left| \frac{l_i}{l'_i} - \frac{l_{i+1}}{l'_{i+1}} \right| = \left| \frac{l_{i+1}}{l'_{i+1}} - \frac{l_{i+2}}{l'_{i+2}} \right| = \left| \frac{l_i}{l'_i} - \frac{l_{i+2}}{l'_{i+2}} \right| < \varepsilon \quad (4)$$

式(4)中的每一项为两对边比例的差值, 本文中  $\varepsilon$  取0.2, 不满足条件的特征点对为误匹配点对。

(8) 利用最小二乘法求解出仿射变换矩阵  $H$ , 将红外图像中检测出的异常发热区域通过变换矩阵  $H$  映射到可见光图像中, 实现异常发热区域的精确定位, 如图6所示。

### 3.3 基于视觉标签的发热区域重点监测

视觉标签是智能视觉物联网的重要组成部分, 将视觉标签技术用于发热区域的状态监测, 对发热

区域打上虚拟标签, 持续监测并反馈设备状态信息, 有利于及时发现设备异常, 预防故障的发生和升级。标签属性包括监测位置、区域中心坐标、区域面积、最低温度、最高温度、平均温度、参考温度、相对温差、温升速度、缺陷等级、监测时间等, 如图8所示。



图 8 视觉标签

Fig. 8 Visual label

当检测出异常发热时, 给异常发热区域打上视觉标签并持续监测, 当异常发热区域温度发生变化时可根据异常区域中心坐标判断是否为同一区域, 同时根据两次检测的异常区域温度和检测时间间隔计算出温度上升速度, 并在异常区域发生更严重故障前及时报警, 避免更严重故障的产生。

当设备区域未产生异常发热但温度较高时, 给温度较高区域打上视觉标签并持续监测, 分析温升速度, 在异常发生前及时预警, 避免故障的产生。

$$T = T_0 + vt \quad (5)$$

式中:  $T$  为异常温度阈值;  $T_0$  为当前温度;  $v$  为温升速度;  $t$  为时间。

由式(5)可知:

$$t = (T - T_0) / v \quad (6)$$

根据异常发生的时间  $t$  来进行预警, 在异常发生前向客户端发出预警信号,  $t$  的取值根据具体情况确定。

## 4 实验结果及分析

本系统通过对真空断路器进行一段时间的实时监测并获取 120 帧图像进行异常检测和智能化分析, 表 2 所示为对其中第 80~84 帧图像进行异常发热区域检测的数据, 包括异常区域中心坐标、异常区域面积、最高温度、最低温度、平均温度、参考温度、相对温差、温升速度、缺陷等级和监测时间; 120 帧红外图像中有 62 帧有异常发热, 实际检测出 62 帧发热异常, 其中 46 帧为一般缺陷, 16 帧为重大缺陷, 检测结果与实际结果一致; 在异常区域精

确定位方面, 主观上在可见光图像上定位的异常区域与实际的异常区域基本一致; 经测试, 系统能够

长时间稳定运行并能准确、快速地检测出异常。综合以上分析, 本系统可以满足变电站异常监测的需求。

表 2 异常发热区域检测数据

Table 2 Abnormal heating zone detection data

异常区域中心坐标	异常区域面积(像素)	最高温度/°C	环境温度/°C	平均温度/°C	参考温度/°C	相对温差/%	温升速度/(°C/h)	缺陷等级	监测时间
(80,180)	322	52.2	22.0	22.3	23.2	25.2	0.09	一般	17-06-23-09-12-23
(76,181)	328	52.9	22.0	22.6	23.2	25.8	0.14	一般	17-06-23-09-17-23
(80,180)	333	53.5	22.0	22.6	23.2	26.3	0.12	一般	17-06-23-09-22-23
(79,182)	340	54.3	22.0	23.0	23.2	26.9	0.16	一般	17-06-23-09-27-23
(77,181)	347	55.2	22.0	23.5	23.2	27.8	0.18	一般	17-06-23-09-32-23

## 5 结论

本文设计开发的基于智能视觉物联网的变电站红外在线监测系统, 通过视觉传感器、无线网络传输和智能视觉分析来感知和分析电力设备的温度场信息, 实时、准确地检测设备发热异常并发出报警信号。通过红外与可见光图像的配准精确定位异常区域, 并利用视觉标签对变电站电力设备状态进行监控和分析, 及时发现和预警设备发热异常, 实现了电力故障检测的自动化、网络化和智能化。经大量测试, 该系统可以准确、实时、连续地对变电站设备进行异常监测、实时报警和预警。

## 参考文献

[1] 江疆, 张富刚, 樊越甫, 等. 110 kV 变电站电压互感器故障原因分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 139-140.  
JIANG Jiang, ZHANG Fugang, FAN Yuefu, et al. Fault analysis of 110 kV substation PT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 139-140.

[2] 刘琦, 程春, 吴健, 等. 智能变电站温度监测主站系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 130-135.  
LIU Qi, CHENG Chun, WU Jian, et al. Design and implementation of temperature monitoring system for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 130-135.

[3] 何洪英, 姚建刚, 王玲. 一种基于 Bayes 估计的小波自适应绝缘子红外图像去噪方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 37-41.  
HE Hongying, YAO Jiangang, WANG Ling, et al. A wavelet adaptive insulator infrared image denoising method based on bayes estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 37-41.

[4] 律方成, 马建桥, 汪佛池, 等. 基于红外成像的瓷支柱绝缘子发热规律研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 130-135.

LÜ Fangcheng, MA Jianqiao, WANG Fochi, et al. Research on thermal law of porcelain post insulator based on infrared imaging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 130-135.

[5] JADIN M S, TAIB S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4): 236-245.

[6] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 148-153.  
YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui, et al. On-line monitoring and fault diagnosis of secondary circuit of relay protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 148-153.

[7] 戴志辉, 张天宇, 刘譞, 等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 14-21.  
DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, et al. Research on smart substation protection system reliability for condition-based maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 14-21.

[8] 成永红, 陈玉, 孟永鹏, 等. 变电站电力设备绝缘综合在线监测系统的开发[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 61-65.  
CHENG Yonghong, CHEN Yu, MENG Yongpeng, et al. Development of the integrated online-monitoring system for the insulation of power equipment in the transformer substation[J]. High Volt age Engineering, 2007, 33(8): 61-65.

[9] 夏宾, 夏照国. 智能型红外在线监控系统在无人值守变电站中的应用[J]. 供用电, 2013, 30(4): 63-67.  
XIA Bin, XIA Zhaoguo. Application of the intelligent infrared online monitoring system in the self-service substation[J]. Distribution and Utilization, 2013, 30(4): 63-67.

- [10] 李宏伟. 应用于智能变电站的智能视觉系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 141-147.  
LI Hongwei. Intelligent vision system of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 141-147.
- [11] 周智勇. 利用智能视觉物联网构建机场周界报警系统[J]. 中国公共安全, 2012(9): 162-165.  
ZHOU Zhiyong. Construction of airport perimeter alarm system by intelligent visual internet of things[J]. China Public Security, 2012(9): 162-165.
- [12] 白敬晨, 于庆波, 胡贤忠, 等. 基于红外热像仪的物体表面发射率测量方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(12): 1747-1750.  
BAI Jingchen, YU Qingbo, HU Xianzhong, et al. Surface emissivity measurement technique based on infrared thermal imager[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(12): 1747-1750.
- [13] 浮明军, 刘昊昱, 董磊超. 智能变电站继电保护装置自动测试系统研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 40-44.  
FU Mingjun, LIU Haoyu, DONG Leichao. Research and application of relay protection automatic test system for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 40-44.
- [14] 肖满生, 肖哲, 文志诚, 等. 一种空间相关性与隶属度平滑的 FCM 改进算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1123-1129.  
XIAO Mansheng, XIAO Zhe, WEN Zhicheng, et al. Improved FCM clustering algorithm based on spatial correlation and membership smoothing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(5): 1123-1129.
- [15] 霍冠英, 刘静, 李庆武, 等. 空间约束 FCM 与 MRF 结合的侧扫声呐图像分割算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 226-235.  
HUO Guanying, LIU Jing, LI Qingwu, et al. Side-scan sonar image segmentation algorithm based on space-constrained FCM and MRF[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 226-235.
- [16] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 中华人民共和国电力行业标准 DL/T 664—1999: 带电设备红外诊断技术应用导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.  
The National Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. People's Republic of China Power Industry Standard DL/T 664—1999: guidelines for the application of infrared diagnostic technology for live equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [17] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [18] 段红燕, 邵豪, 张淑珍, 等. 一种基于 Canny 算子的图像边缘检测改进算法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1861-1865.  
DUAN Hongyan, SHAO Hao, ZHANG Shuzhen, et al. An improved algorithm for image edge detection based on Canny operator[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(12): 1861-1865.
- [19] BAY H, TUYTELAARS T, GOOL L V. SURF: speeded up robust features[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2006, 110(3): 404-417.

收稿日期: 2017-07-19; 修回日期: 2017-09-07

作者简介:

漆 灿(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字图像处理; E-mail: qican101@gmail.com

李庆武(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能感知与图像处理. E-mail: li\_qingwu@163.com

(编辑 魏小丽)