

# 基于改进 YOLOv4 的智能变电站 二次设备稳态 AR 红外测温技术

柳皓<sup>†</sup>, 马强, 付强, 陈远, 赵通汉

(国网宁夏电力有限公司 固原供电公司, 宁夏 固原 756000)

**摘要:**研究了基于改进 YOLOv4 的智能变电站二次设备稳态 AR 红外测温技术, 实现智能变电站二次设备稳态识别。在分析红外测温原理的基础上, 利用 AR 红外测温眼镜采集智能变电站二次设备温度的红外图像, 通过改进加权引导滤波增强算法对采集智能变电站二次设备温度的红外图像实施图像增强处理, 将处理后的红外图像输入改进 YOLOv4 网络中, 实现智能变电站二次设备稳态识别。实验表明: 该方法可准确采集智能变电站二次设备 8 个保护屏柜的内部温度, 且接近设备实际运行温度; 同时有效降低智能变电站二次设备的红外图像的噪声, 对智能变电站二次设备稳态识别的应用效果较好, 能准确识别出智能变电站的二次设备异常状态, 助力智能变电站运维管理员针对设备异常状态做出对应维修方案。

**关键词:**改进 YOLOv4; 智能变电站; 二次设备稳态; AR 红外; 测温技术; 损失函数

**中图分类号:** TN271

**文献标识码:** A

## Steady State AR Infrared Temperature Measurement Technology of Secondary Equipment in Intelligent Substation Based on Improved YOLOv4

LIU Hao<sup>†</sup>, MA Qiang, FU Qiang, CHEN Yuan, ZHAO Tonghan

(Guyuan Power Supply Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Guyuan, Ningxia 756000, China)

**Abstract:** The steady state AR infrared temperature measurement technology of secondary equipment in intelligent substation based on improved YOLOv4 is studied to realize the steady state identification of secondary equipment in intelligent substation. On the basis of analyzing the principle of infrared temperature measurement, the AR infrared temperature measuring glasses are used to collect the infrared image of the temperature of the secondary equipment in the intelligent substation, and the infrared image of the temperature of the secondary equipment in the intelligent substation is enhanced by the improved weighted guided filter enhancement algorithm. The processed infrared image is input into the improved YOLOv4 network to realize the steady recognition of the secondary equipment in the intelligent substation. The experiment shows that this method can accurately collect the internal temperature of 8 protection panels of the secondary equipment in the intelligent substation, and is close to the actual operating temperature of the equipment; At the same time, it can effectively reduce the noise of the infrared image of the secondary equipment of the intelligent substation, and has a good application effect on the steady-state identification of the secondary equipment of the intelligent substation. It can accurately identify the abnormal status of the secondary equipment of the intelligent substation, and help the operation and maintenance administrator of the intelligent substation to make corresponding maintenance plans for the abnormal status of the equipment.

**Key words:** improved YOLOv4; intelligent substation; steady state of secondary equipment; AR infrared; temperature measurement technology; loss function

智能变电站是国家电网的基础设施,智能变电站设备稳态运行对电网安全运行至关重要<sup>[1-3]</sup>。智能变电站二次设备是智能变电站系统的核心部分,主要包括保护装置、通信装置、智能终端等,对智能变电站一次设备起到保护的作用<sup>[4]</sup>。智能变电站二次设备的状态识别作为智能变电站二次设备检修的关键,迫切需要针对智能变电站二次设备状态识别展开研究,这对电网安全运行具有深远的意义<sup>[5,6]</sup>。但是以往智能变电站二次设备状态识别方法非常局限,如叶远波等<sup>[7]</sup>研究多模型融合集成学习的状态评估方法,利用双层基学习器实现对智能变电站二次设备状态的评估。该方法评估过程非常复杂,导致智能变电站二次设备状态识别效果不佳。邬小坤等<sup>[8]</sup>研究一种智能变电站二次设备状态评价方法,通过红外测温枪采集智能变电站二次设备温度红外图像,利用云模型求出隶属度值明确二次设备运行状态。但红外测温枪采集图像阶段的工作量大,测温容易出现漏测、误测及磁疗存放不方便等问题,导致识别精度较低。简学之等<sup>[9]</sup>在变电站二次设备运检中,结合聚类分析和点集验证的算法,构建了包含标准化作业指导库和运检资源库的二次设备运维系统,改善重复性强、人员效率低且易出错等问题,但是外源干扰因素过多,分析过程不稳定。律方成等<sup>[10]</sup>基于误差、识别准确度和训练速度,研究了算法设计过程对自建数据库的标注值宽高数据聚类效果及检测结果的影响,分析了光谱成像电气设备运行状态的现场诊断效果,但是电气设备相关网络参数处理过程较为繁杂,生成的维修方案较为普通。

深度学习的改进 YOLOv4 网络在设备图像识别方面具有优势,能有效提高图像识别精度。增强现实(augmented reality, AR)技术是实际物体通过计算机生成虚拟影像展示出来的视觉技术。该技术已经在各领域得到广泛应用并取得较好的应用效果。创新性地改进 YOLOv4 网络和 AR 红外测温技术结合,采用 Focal loss 函数替换 YOLOv4 网络的分类交叉熵损失函数,并反复确认欧氏距离,更新置信度,二次明确目标出现后的红外定位具体位置,赋予其稳态属性,可以有效地实现智能变电站二次设备稳态识别。

## 1 智能变电站二次设备稳态 AR 红外测温技术

### 1.1 智能变电站二次设备稳态红外图像采集

为实现智能变电站二次设备稳态识别,变电站二次设备稳态红外图像采集是前提,研制智能二次

设备测温系统 1 套,包含红外探头、AR 红外测温眼镜及其连接配件 1 套,数据传输服务器 1 台,服务器内置数据处理软件 1 套。其中采用具有 AR 红外测温技术的 AR 眼镜采集智能变电站二次设备红外图像,将采集图像作为基础,结合改进 YOLOv4 网络实现智能变电站二次设备状态的识别。

红外测温原理为采用红外光温度效应实现对物体的测温<sup>[11]</sup>。当物体温度大于热力学零度温度时,物体会发出红外光波,其波长区间一般在 0.77  $\mu\text{m}$ 至 1000  $\mu\text{m}$ 。红外测温技术以普朗克分布定律为理论依据,其表达式为:

$$Q_{\delta} = o_1 \delta^{-5} / (e^{o_2/\delta T} - 1) \quad (1)$$

其中:黑体光谱辐射通量密度用  $Q_{\delta}$  描述;光谱波长用  $\delta$  描述;绝对温度用  $T$  描述;第 1 辐射常数用  $o_1$  描述,  $o_1 = 3.7415 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$ ;第 2 辐射常数用  $o_2$  描述,  $o_2 = 1.43879 \text{ cm} \cdot \text{K}$ 。

相关研究表明,黑体辐射光谱和温度成正比,峰值较长的波段处,测温效果最佳。AR 红外测温眼镜以红外测温技术为基础,由接口拓展电路、冷焦平面红外热成像传感器、终端服务器、AR 显示器、电源端组成 AR 红外测温眼镜。AR 红外测温眼镜利用冷焦平面红外热成像传感器采集智能变电站二次设备温度红外数据,并经接口拓展电路传输至 AR 显示器,投影出设备图像和视频,并呈现在终端服务器,智能变电站管理员在终端服务器查看智能变电站二次设备状态图像及视频。电源端为 AR 红外测温眼镜提供续航电源。AR 红外测温眼镜内部具备 AI 矫正纠偏算法,确保在不同范围内,温度数据采集准确。2 m 以内温度数据偏差小于或等于 0.3 $^{\circ}\text{C}$ ,4 m 内温度偏差小于或等于 0.5 $^{\circ}\text{C}$ ,测温范围最远可达 6 m,对 6 m 以内的设备精确测温,同时可以通过语音功能调节测温距离,提高测温速率。眼镜上的红外热成像传感器可以实时捕捉二次设备发热点,将热力图呈现在镜片上,同时具备截图功能,可以将留存的二次设备热力图进行截图,当图片内二次接线过多、红外成像未精确定位时,自动校对底片与红外成像点,在底片上自动标注,清晰呈现具体发热的线缆。测温数据可以通过 RestApi 接口发送至数据管理系统,数据管理系统将相关告警及测温数据自动生成报表,存储至数据传输终端服务器中方便调阅。

### 1.2 智能变电站二次设备稳态红外图像增强

采用改进加权引导滤波增强算法对 AR 红外测温眼镜采集智能变电站二次设备的红外图像实施红外图像增强处理,有效降低智能变电站二次设

备的红外图像的噪声,保留红外图像中有价值的数  
据,为智能变电站二次设备稳态识别提供数据支  
持。改进加权引导滤波算法实施红外图像增强  
的第一步是构建引导图像。对 AR 红外测温眼镜  
采集智能变电站二次设备的红外图像原图  $u$  在横  
纵坐标方向上实施一阶求导后得出原图边缘数  
据  $\nabla u$ ,同时和原图叠加生成引导智能变电站二  
次设备的红外图像  $S$ 。 $\nabla u$  的表达式为:

$$\nabla u = \sqrt{[(\partial u / \partial x)^2] + [(\partial u / \partial y)^2]} \quad (2)$$

其中:横纵坐标分别为  $x$ 、 $y$ 。

引导智能变电站二次设备的红外图像  $S$  表  
达式为:

$$S = (1 - g_1) \nabla u + g_1 u \quad (3)$$

式中:叠加系数用  $g_1$  描述。

采用改进加权引导滤波算法对构建引导图像  
实施滤波处理,通过在引导滤波算法中添加 Canny  
算子修正正则化和边缘权重等因子。

修正正则化因子公式如下:

$$\varphi' = \varphi / B(i) \quad (4)$$

其中:正则化因子用  $\varphi$  描述;边缘权重因子用  
 $B(i)$  描述。

边缘权重因子公式如下:

$$B(i) = (1/N) \sum_{i=1}^N [\alpha(i') \times \sigma^2(i') + \lambda] / [\alpha(i) \times \sigma^2(i) + \lambda] \quad (5)$$

其中:常量用  $\lambda$  描述;方差用  $\sigma^2(\cdot)$  描述;引导  
图像像素点用  $i'$  描述;Canny 算子用  $\alpha(\cdot)$  描述;总  
像素用  $N$  描述。当  $B(i) > 1$  时,权重比较高,此时  
像素点位于边缘像素处;当  $B(i) < 1$  时,权重比较  
低,此时像素点位于平滑像素处<sup>[12-14]</sup>。通过边缘  
权重因子可增强智能变电站二次设备的红外图像  
边缘效果。

在对智能变电站二次设备的红外图像的边缘  
实施滤波处理后,通过模糊集算法增强智能变电站  
二次设备的红外图像的细节信息,满足人眼视觉观  
测需求。该算法包括以下三种函数。

隶属度函数表达式为:

$$W = \sin \{ [1 - (x_{\max} - x_i) / 128] \times (\pi \times 0.5) \} \quad (6)$$

其中:像素最大值用  $x_{\max}$  描述;待增强图像像  
素用  $x_i$  描述。

模糊增强函数表达式为:

$$W_{en} = \begin{cases} (1 - W) \times (1 - W) \times (-2), \eta \leq W < 1 \\ W \times W \times 2, 0 \leq W < \eta \end{cases} \quad (7)$$

其中:增强阈值用  $\eta$  描述。

反模糊化函数表达式为:

$$\nu_{mo} = \{ [1 - (2/\pi)] \times \sin^{-1} W_{en} \} \times x_{\max} \quad (8)$$

采用三维块匹配法对通过模糊集算法增强后  
智能变电站二次设备的红外图像实施降噪处理,提  
取有价值数据<sup>[15]</sup>。采用块匹配参数搜索全部和图  
像相似块,相似块大小公式如下:

$$d(\Psi_{xR}, \Psi_x) = \| \zeta' \times \Psi_{xR} - \zeta' \times \Psi_x \|_2^2 / (\rho_1^{ht})^2 \quad (9)$$

其中:搜索块用  $\Psi_x$  描述;阈值用  $\zeta'$  描述;目标  
块用  $\Psi_{xR}$  描述;搜索块规格用  $\rho_1^{ht}$  描述。

通过硬阈值参数估计智能变电站二次设备的  
红外图像相似块集合,其公式为:

$$\epsilon = \psi_{3D}^{-1} [(\zeta) \times \psi_{3D}] \quad (10)$$

其中:硬阈值参数用  $\zeta$  描述;1 维小波变换与 2  
维余弦变换用  $\psi_{3D}$  描述。

依据变换后系数求解维纳收缩系数的加权最  
后估计,其表达式为:

$$\bar{\omega} = \psi_{3D}^{-1} [\iota \times \psi_{3D}] \quad (11)$$

其中: $\iota$  表示维纳收缩系数。

通过指数运算计算出去噪后智能变电站二次  
设备的红外图像,其表达式如下:

$$\bar{\omega}_1 = \log_2 [\bar{\omega} - 1] \quad (12)$$

### 1.3 改进 YOLOv4 的智能变电站二次设备稳态识别

将经过图像增强处理后智能变电站二次设备  
的红外图像输入改进 YOLOv4 网络中,实现智能  
变电站二次设备稳态识别。YOLOv4 网络基本结  
构,如图 1 所示。

由图 1 可知,YOLOv4 网络基本结构包括输  
入层、主干网架层、颈部层和输出层。其中,输入层  
负责接收图像信息,主干网架层训练集中信息并提  
取信息特征,由颈部层对提取信息实施融合后,利  
用输出层输出识别目标状态和置信度。

在 YOLOv4 网络的主干网架层增加多尺度卷  
积模块,其中卷积核规格分别为  $3 \times 3$ 、 $5 \times 5$ 、 $7 \times 7$ ,  
通过该模块有效提取智能变电站二次设备红外图  
像的多尺度特征数据。

YOLOv4 的损失函数表达式为:

$$L = L_{class} + L_{conf} + L_{loc} \quad (13)$$

其中: $L_{class}$  表示分类误差; $L_{conf}$  表示置信度误  
差; $L_{loc}$  表示位置损失。

采用  $L_{class}$  损失函数明确预测框的种类即智能  
变电站二次设备状态种类概率,利用交叉熵求解  
 $L_{class}$ ,其求解公式如下:

$$L_{class} = \sum_{i=0}^{Z \times Z} I_{ij}^{obj} \sum_{c=C_{class}} [\log(1-P) \times (1-\hat{P}) + \hat{P} \log P] \quad (14)$$

其中:输入智能变电站二次设备的红外图像被划分的网格数用  $Z \times Z$  描述;预测框中存在识别目标用  $I_{ij}^{obj}$  描述;网络中的一个类别用  $c$  描述; $C$  表示网络中全部种类;预测框类别概率用  $P$  描述;真实框类别概率用  $\hat{P}$  描述。

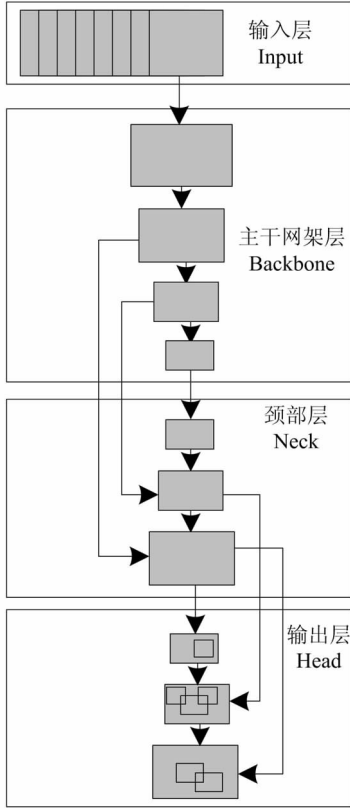


图1 YOLOv4 网络基本结构

采用  $L_{conf}$  损失函数明确预测框里是否有检测目标概率,通过交叉熵求解  $L_{conf}$ ,其求解公式如下:

$$L_{conf} = [\log(1-E) \times (1-\hat{E}) + \hat{E} \log E] \times \sum_{i=0}^{Z \times Z} \sum_{j=0}^A (\lambda_{noobj} \times I_{ij}^{noobj} + I_{ij}^{obj}) \quad (15)$$

其中:预测框置信度用  $E$  描述;误差权重用  $\lambda_{noobj}$  描述;真实框置信度用  $\hat{E}$  描述;预测框数量用  $A$  描述;预测框中不存在识别目标用  $I_{ij}^{noobj}$  描述。

采用  $L_{loc}$  损失函数明确目标出现具体点,通过 CIUO 损失求解  $L_{loc}$ ,其求解公式如下:

$$L_{loc} = \sum_{i=0}^{Z \times Z} \sum_{j=0}^A I_{ij}^{obj} [1 - R_{IoU} + [\mathcal{D}^2(a, a^{gt})]/d^2 + \beta \times \mu] \quad (16)$$

其中:真实框与预测框交互比用  $R_{IoU}$  描述;预

测框中心点坐标用  $a$  描述;真实框中心点坐标用  $a^{gt}$  描述;两个框中心点的欧氏距离用  $\mathcal{D}^2(a, a^{gt})$  描述;对角线距离用  $d$  描述;权重参数用  $\beta$  描述;长宽比参数用  $\mu$  描述。

长宽比参数  $\mu$  的表达式为:

$$\mu = 4/\pi^2 \times [\arctan(m^{gt}/h^{gt}) - \arctan(m/h)]^2 \quad (17)$$

权重参数  $\beta$  表达式为:

$$\beta = \mu / [(1 - R_{IoU}) + \mu] \quad (18)$$

其中:预测框宽度值用  $m$  描述;预测框高度值用  $m^{gt}$  描述;真实框宽度值用  $h$  描述;真实框高度值用  $h^{gt}$  描述。

采用 Focal loss 函数替换 YOLOv4 网络的分类交叉熵损失函数,用于智能变电站二次设备的红外图像分类,提高分类效率并增强网络泛化能力,实现智能变电站二次设备稳态识别。

Focal loss 函数表达式为:

$$L_E = -\chi \times (1-q')^{\kappa} \log q' \quad (19)$$

其中:预测值用  $q'$  描述;调节参数用  $\chi$  描述;调节损失函数权重用  $\kappa$  描述。

改进后 YOLOv4 网络的总损失函数表达式为:

$$L' = L_E + L_{loc} + L_{conf} \quad (20)$$

改进后的 YOLOv4 网络,以增强处理后智能变电站二次设备的红外图像输入,完成智能变电站二次设备稳态识别。

## 2 实验分析

实验选取某地 500 kV 全室内智能变电站作为实验对象,该智能变电站线路共 40 km,共有 750 MV 变压器,500 kV 出线 4 回,为该地周边县市提供电源。

采用本文方法对该智能变电站的二次设备进行稳态识别,测试本文方法的应用效果。

### 2.1 温度测量测试

采用本文方法测量该智能变电站二次设备的 8 个保护屏柜内部温度,并和温度计(实际测量)测试结果对比,温度测量测试结果如图 2 所示。

分析图 2 可知,分别采用本文方法和温度计测量方法测量智能变电站二次设备的 8 个保护屏柜内部温度,两个测试结果之间误差在  $2^\circ\text{C}$  以内,说明本文方法利用 AR 红外测温眼镜可准确采集智能变电站二次设备的 8 个保护屏柜内部温度,且接近实际智能变电站的二次设备保护屏柜运行温度。

考虑不同测量环境对智能变电站的二次设备的 8 个保护屏柜内部温度的影响,将测试环境分为室内和室外,设置环境温度为  $-4\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,分别采用本文方法和温度计测量方法在不同测量环境下测量 6 次温度,结果如表 1 所示。

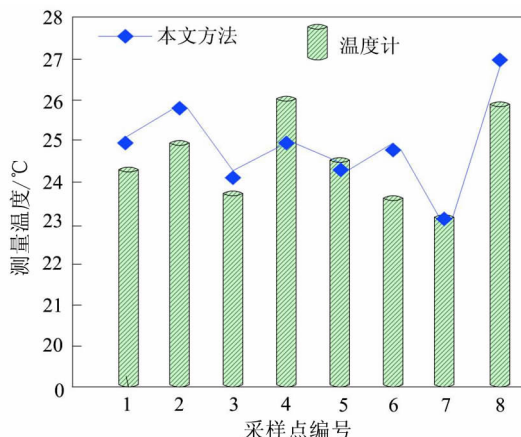


图 2 保护屏柜温度测量结果

表 1 不同测量环境测量结果

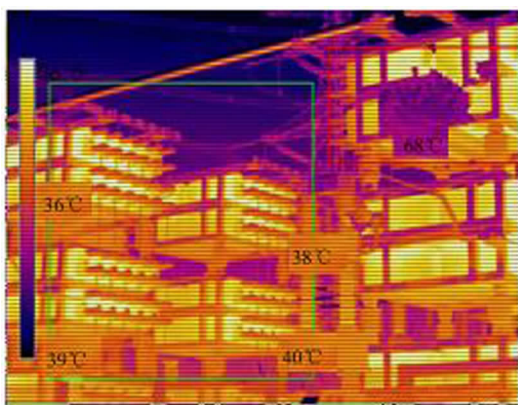
项目	测试编号					
	1	2	3	4	5	6
温度计测量值/ $^{\circ}\text{C}$	-4	2	14	17	19	22
本文方法测量值/ $^{\circ}\text{C}$	-3.9	1.9	13.9	17.1	18.9	21.6
相对误差/%	2.5	5	0.71	0.59	0.53	1.82

分析表 1 可知,在不同测量环境下,采用本文方法测量温度的平均相对误差为 1.86%,说明本文方法对智能变电站的二次设备温度检测精度高,能有效测试保护屏柜内部温度,提高设备运行安全性。

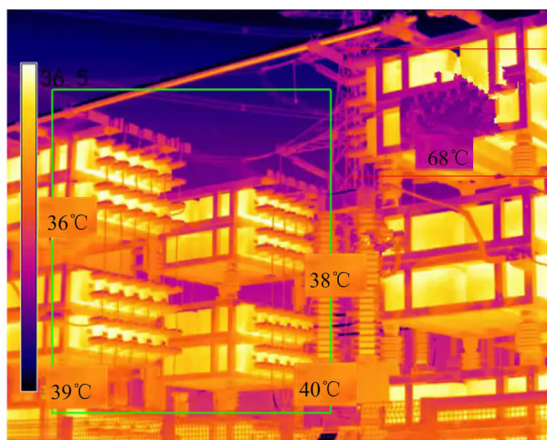
### 2.2 图像增强效果测试

本文方法采用改进加权引导滤波算法对 AR 红外测温眼镜采集智能变电站二次设备(电容)的红外图像实施图像增强处理后的效果,如图 3 所示。

分析图 3 可知,本文方法采用改进加权引导滤波增强算法对 AR 红外测温眼镜采集智能变电站二次设备的原始红外图像实施图像处理,有效降低智能变电站二次设备的红外图像的噪声,图像中设备轮廓清晰,保留红外图像中价值数据,图中红色标记框为设备异常状态,绿色标记框为设备稳态运行状态,为智能变电站二次设备稳态识别提供数据支持。



(a)原始红外图像



(b)图像增强后红外图像

图 3 图像处理效果图

### 2.3 应用效果分析

智能变电站运维管理员采用本文方法对智能变电站的二次设备继电保护终端进行稳态识别。该智能变电站的二次设备继电保护终端共有 5 个主要的电流继电器,电流继电器稳态运行温度一般在  $40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,本文方法的电流继电器识别结果如图 4 所示。

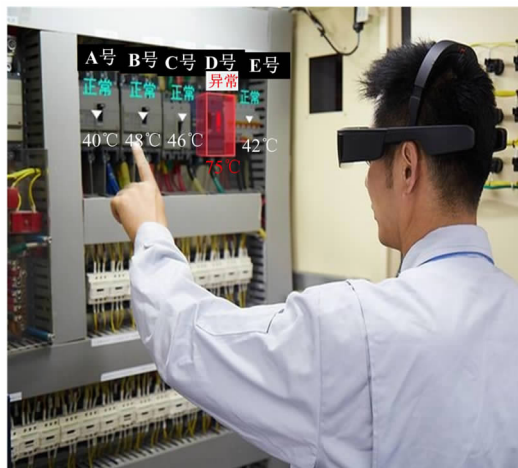


图 4 本文方法的电流继电器识别结果

分析图4可知,采用本文方法对智能变电站的二次设备继电保护终端进行稳态识别的应用效果较好,准确识别出D号电流继电器温度高达75℃。智能变电站运维管理员通过本文方法直观了解到D号电流继电器存在异常状态,需要更换新的电流继电器,其余4个电流继电器运行温度正常,并趋于稳态运行。

### 3 结论

因智能变电站二次设备类型和设备状态数据量比较多,导致智能变电站二次设备识别工作难度大。本文研究了基于改进YOLOv4的智能变电站二次设备稳态AR红外测温技术,可提高智能变电站二次设备识别效果,保障智能变电站安全运行。实验结果表明,本文方法对智能变电站二次设备稳态识别效果较好,能准确识别出智能变电站二次设备异常状态,为智能变电站运维管理员提供理论依据。

### 参考文献

[1] 唐志军,李泽科,陈建洪,等.考虑设备相关性的智能变电站二次系统可靠性分析[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(6):782-789.

[2] 周凯,唐璽,胡志坚,等.基于NSST图像融合的变电站开关状态识别[J].高压电器,2021,57(10):50-58.

[3] 吴添权,郭竞,苟先太,等.基于改进高斯卷积核的变电站设

备红外图像检测方法[J].红外技术,2021,43(3):230-236.

[4] 姚艳秋.基于趋势分析的变电站设备异常检测方法[J].吉林大学学报(理学版),2021,59(3):649-652.

[5] 任博,郑永康,王永福,等.基于深度学习的智能变电站二次设备故障定位研究[J].电网技术,2021,45(2):713-721.

[6] 肖发龙,吴岳忠,沈雪豪,等.基于深度学习和知识图谱的变电站设备故障智能诊断[J].电力建设,2022,43(3):66-74.

[7] 叶远波,黄太贵,谢民,等.基于多模型融合集成学习的智能变电站二次设备状态评估[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):148-157.

[8] 邹小坤,赵武智,牛静,等.一种智能变电站二次设备状态评价方法[J].电子器件,2021,44(3):664-669.

[9] 简学之,刘子俊,文明浩,等.AR增强现实技术在变电站二次设备运检中的应用[J].电力系统保护与控制,2020,48(15):170-176.

[10] 律方成,牛雷雷,王胜辉,等.基于优化YOLOv4的主要电气设备智能检测及调参策略[J].电工技术学报,2021,36(22):4837-4848.

[11] 范新南,黄伟盛,史鹏飞,等.基于改进YOLOv4的嵌入式变电站仪表检测算法[J].图学学报,2022,43(3):396-403.

[12] 梁文武,朱维钧,李辉,等.基于粗糙集的智能变电站保护设备仿生故障诊断方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(21):132-140.

[13] 张宸滔,郑永康,卢继平,等.基于图神经网络的智能变电站二次回路故障定位研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(11):81-90.

[14] 章剑光,陈晓宇,朱松涛,等.基于GIM模型的智能变电站二次回路三维可视化系统设计[J].电力系统保护与控制,2022,50(19):179-186.

[15] 李学生,张尊扬.基于数据流检测技术的电气设备状态监测仿真[J].计算机仿真,2022,39(7):433-436+506.