**基于机器视觉的电能表异常检测现场分析系统**

蒋超，陈圣泽，张智晶，李蕊

（国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200051）

摘要：针对当前电能表异常检测领域中更换贴片电阻与焊点异常的检测取证难度高、检测装置不便携等问题，基于机器视觉提出了电阻与焊点异常检测算法，开发实现了一套电能表异常检测现场分析系统。电阻异常检测算法首先将K-D树与Ransac相结合完成高效率电能表配准，然后通过差影法对电阻可疑异常区域进行检测，再根据分类网络对可疑异常区域识别到的电阻数值判断电阻异常情况；焊点异常检测算法通过显著性检测对图像进行特征增强，然后分割获取焊点目标信息，最后结合连通域分析判定焊点异常情况。实验结果表明，此系统贴片电阻异常检测正检率达95.28%，检测时间约1.52s；焊点异常检测正检率达96.74%，检测时间约0.74s。设计实现的系统满足现场检测精度和速度的需求，具有较好的应用价值。

关键词：电能表；异常检测；模板匹配；显著性检测

中图分类号：TM933 文献标识码：B 文章编号：1001-1390（2020）00-0000-00

**Field analysis system of anomaly detection of c based on machine vision**

Jiang Chao, Chen Shengze, Zhang Zhijing, Li Rui

*(State Grid Shanghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Shanghai 200051*)

**Abstract**：Aiming at the problems in the current field of abnormality detection of electric energy meters, such as the difficulty of detecting and obtaining evidence for replacing chip resistors and abnormal solder joints, and the inconvenience of the detection device. a set of on-site analysis system for anomaly detection of energy meter was developed based on machine vision, and an abnormal detection algorithm for resistance and solder joint was proposed. The resistance anomaly detection algorithm first combines the K-D tree with Ransac to complete the registration of the high-efficiency energy meter, and then detects the suspicious abnormal area of the resistance by the differential method, and then determines the resistance anomaly according to the value of the resistance character identified by the classification network for the suspicious anomalous area; The solder joint anomaly detection algorithm enhances the image through saliency detection, then obtains the solder joint target information by segmentation, and finally determines the solder joint anomaly in combination with the connection domain analysis. Experimental results show that the positive detection rate of anomaly detection of chip resistance of this system is 95.28%, and the detection time is about 1.52s, and the positive detection rate of solder joint anomaly is 96.74%, and the detection time is about 0.74s. This system meets the needs of on-site detection accuracy and speed, and has good application value.

**Keywords**：Electric energy meter, Anomaly detection, Template matching, Saliency detection

# 0　引 言

目前供电企业常通过人工对用电量数据进行对比，然后根据电能表的封印情况初步确定用户是否有窃电嫌疑。由于过去窃电行为简单粗暴，肉眼清晰可见，所以现场检测方便。但窃电技术在不断发展，当前已有通过更换贴片电阻和短接电流输入区域焊点的方式，使电能表实际记录的电量减少从而达到窃电目的，同时由于这两种异常方式隐蔽性较高，人工目测的方式难以发现和取证[1-2]。国内学者对基于图像处理、机器视觉等技术的检测设备研究较多，也取得了一些实用性成果[3-8]。阮春雷通过对模板匹配的基本算法研究，改进了基本的模板匹配算法 [9-10]；梁伟建设计了基于机器视觉的电能表外观缺陷检测系统 [11-12]；李少腾基于自动控制技术，设计了智能电能表印刷电路板一致性检测系统[13]，替代人工检测模式，并应用于实验室内检测工作中; 牛嘉申采用深度学习的方法检测PCB贴片元件[14]，但其对采样数据和硬件算力有苛刻的要求，并且所需硬件算力成本高，运行功耗大，无法在现场环境下推广使用。

为了解决上述的种种问题，异常检测算法将经典的图像处理技术与大数据驱动的深度学习技术相结合，完成贴片电阻异常检测算法、焊点异常检测算法。同时开发了一套电能表异常现场检测分析系统，相比于其他已有系统，在现场环境使用中具有功耗低、成本价廉、交互友好等优点，对窃电取证工作具有辅助作用，具有较好的应用价值。

# 1　算法设计

## 数据集制作

电能表PCB数据集是实现电阻与焊点异常检测任务的基础，无论是传统的图像视觉方法还是深度学习方法，高质量图像数据集都是不可或缺的。深度学习作为一种典型的数据驱动的方法，需要优质且充足的样本，来训练模型得到最优的网络权重参数。而文中提出的异常检测算法也有大量的需要人工设置的关键参数，其在一定程度上影响着算法的质量，所以在算法设计时同样采取数据驱动的方式，通过大量数据集的验证选择最优的参数，以增强文中算法的泛化能力。实验中共用到PCB原始数据集300张，如图1所示。

|  |
| --- |
|  |

图1 电能表数据集

Fig.1 Electric energy meter datasets

其中100张为实验用电能表样本，由上海市电力公司电力科学研究院提供；仅通过已有电能表样本获取的图像数据集，无法达到算法设计的需求，所以在实验中进行了PCB图像的采集工作，另外200张样本为收集的不同类型、不同尺寸、不同用途的贴片元件电路板。通过设计的电能表异常分析装置，对固定在支撑区域的PCB图像进行采集，然后经过旋转、裁剪、亮度变换后得到电能表数据集。

## 1.2　贴片电阻异常检测

带有可调光源、单目视觉的异常检测系统首先使用配准算法对电能表进行匹配，然后筛选异常常见区，再通过传统图像处理技术对此区域进行贴片电阻异常检测。本系统电能表模板图像与采样检测图像均由异常检测装置内置摄像头拍摄得到，但拍摄的图像受光照、角度、热噪声等因素的影响，所以在同一传感器下每次拍摄的图像存在一定差异，因此采样图与模板图的配准是电阻异常检测中的首要步骤。

电能表生产中存在元器件位置微量偏移、焊点外观形状不一致、印刷字符瑕疵等情况，使得待检测图与模板图在许多细节处相似性较低。当前效果较佳的特征点配准方法有FREAK、SURB、OBR等[15-16]，但在本研究应用场景中效果很差。针对此类复杂度较高的异常检测问题，文中选用具有良好稳定性、旋转不变性及纹理信息利用率高的特征点配准方法SIFT。经前期大量实验证实原SIFT配准算法在本应用场景中拥有较好的尺寸变化鲁棒性与大量的特征点数，效果如图2所示。

|  |
| --- |
|  |

图2 原始SIFT配准结果

Fig.2 SIFT algorithm registration result

考虑检测终端硬件运算性能有限，又需保证检测结果的精度，配准算法将K-D树与Ransac结合，筛选有效特征点进行匹配，大幅提高了配准速度与精度，效果见图2。假设每个特征点对应一个128维的特征向量，模板图中有*i*个特征向量，对应集合*A* = {*a*1, *a*2, …, *ai*}；检测图中有*j*个特征向量，对应集合*B* = {*b*1,*b*2,…, *bj*}，具体操作如下：

1. 将集合*A*作为输入，对*i*个128维向量建立K-D树，利用所建K-D树搜索集合*B*中每个特征向量在集合*A*中欧式距离最小的特征向量，欧式距离表达式如下：

 （1）

（2）选取检测图中与模板图中特征向量间最小欧式距离的一对特征向量，将其生成匹配对，对应集合*P* = {*p*1, *p*2, …, *pk*}，匹配对*pk*包含一个检测图特征向量*pk1*与一个模板图特征向量*pk2*。

（3）为保证配准精度，设置特征向量角度差阈值*V* = |*pk1*(*θ*) - *pk2*(*θ*)|，*θ*为主方向角度，剔除*V* > 50˚的匹配对，然后根据欧氏距离对保留的匹配对排序。

（4）建立透视变换模型，表达方程如下：

 （2）

其中(*x*, *y*)与(*x’*, *y’*)分别为匹配对*pk1*和*pk2*的坐标位置，*M*为模型变换矩阵。

（5）将步骤（3）得到的匹配对设置为候选集，从中随机抽取4个匹配对代入透视变换模型求解新矩阵*M*。

（6）遍历候选集中其余未被抽取的匹配对，依次代入新矩阵*M*计算在特征向量在模板图中坐标位置，设置内点集*C*和误差容忍度阈值*t*，若*t* < 10将当前匹配对数归为内点集。

（7）根据数据集上的测试结果，选择比例阈值*β=0.8*，迭代步骤（5）和（6）至内点集样本个数与候选集匹配对个数比值大于*β*为止，选取最终迭代次数对应的矩阵*M*作为较优结果模型，最后利用该模型经透视变换完成电能表的配准，匹配结果如图3所示。

|  |
| --- |
| (a) |
| (b) |

图3 文中方法特征点匹配图：(a) 正向匹配图; (b) 反向匹配图

Fig.3 Matching figure of the proposed method: (a) forward matching image; (b) reverse matching image

配准后的待检测图尺寸大，若直接对其进行异常检测将耗时久，不宜应用于本系统。异常检测算法预先根据电路原理及先验经验对模板图预设关键检测区域，同时对关键区内电阻信息进行标注，便于现场检测时无需识别可直接获取先验信息，使算法更具针对性地完成快速检测任务。不同的电能表间其关键区个数大相径庭，通常选择电阻密集区作为现场匹配的关键区，如图4框内区域所示。

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) (c) |

图4 不同电能表待检测图

Fig.4 Different energy meters image to be detected

采用相似度量以衡量模板和待匹配图像之间的相似程度[17]，实现关键区的匹配，具体操作如下：

（1）对模板图T设置关键区域，并在检测图I中寻找到与之相对应的位置。

（2）再根据平方差匹配法完成模板图与检测图的关键区匹配，并对匹配结果标准化，然后计算检测矩阵中最小值，该值越小代表匹配结果越相似，匹配结果如图5所示。

 （3）

（3）记录检测图中关键区的最佳位置坐标。

 图5 关键区域匹配结果

Fig.5 Key region match result

电阻异常分为两类，一类是电阻的缺失，另一类是电阻的替换。电阻异常检测过程首先需采用色值特征提取技术将检测图关键区图像映射至HSV色彩空间完成初步背景的分割，再配合差影法完成电阻可疑异常区域的检测，效果如图6所示。然后进一步对该区域采用深度学习的方法，比对模板图与检测图的阻值字符数值来确定异常类型。

传统OCR识别技术是针对单字符识别，而阻值字符通常由多字符构成，还需进一步处理。基于连通区域特征分割阻值字符的方法能够有效解决字符倾斜、背景复杂的问题。根据实际应用场景识别精度的需要、部署设备算力的限制，阻值字符识别采用轻量级卷积网络ShuffleNetV2[18]。贴片电阻数据集选取了数字字母混标法中的9种字母及12种数字字符，每种字符包含约100张来源不同角度、光照及电能表型号的样本；具体操作如下：

（1）将异常可疑电阻从复杂的背景中分离出来，将贴片电阻经形态学操作然后提取阈值范围内的连通区域作为字符。

（2）将电阻图像长宽比小于0.8的旋转90度。

（3）使用轻量级卷积网络ShuffleNetV2分类不同种类的阻值的字符，再将单个字符分类结果进行拼接完成贴片电阻阻值字符识别，识别结果如图7所示。

图6 电阻可疑异常区域检测结果

Fig.6 Results of suspicious abnormal resistance area

表1配准结果表明，原SIFT因元器件多为矩形，边缘非光滑，检测的特征点较多，经文中配准筛选算法，可大量减少模板图和采样测图特征点的数，缩短电能表配准运行时长，满足实际配准需求；表2字符识别结果表明，文中采用的方法在阻值字符识别拥有良好的性能，对于关键区处于边缘位置的电阻存在少量的漏检、误检的情况；

表1 配准结果比较

Tab.1 Comparison of registration results

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 模板图特  征点个数 | 检测图特  征点个数 | 正确特  征点对数 | 配准时间 |
| 原SIFT配准 | 2074 | 3097 | 1456 | 5.72s |
| 文中方法配准 | 97 | 122 | 84 | 1.32s |

表2 字符识别结果

Tab.2 Character recognition result

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 样本个数 | 错误个数 | 正检率% | 总耗时s |
| 阻值分割 | 425 | 12 | 97.17 | 0.06 |
| 阻值识别 | 312 | 14 | 95.55 | 0.08 |

同时为验证文中异常检测算法的有效性，选取指标：正检率（P）、召回率（R）及F1，计算公式如下。

 （4）

 （5）

 （6）



图7 贴片电阻阻值识别结果

Fig.7 Test results of Chip resistance value identification

表3 电阻异常检测结果

Tab.3 Resistance anomaly detection result

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 正检率% | 召回率% | F1% | 总耗时s |
| 电阻异常 | 95.28 | 96.04 | 95.65 | 1.52 |

综合表1、表2和表3可看出，电阻异常检测过程中配准耗时占具较大比率，正检率和实时性均可满足现场实际用需求。

## 1.3　焊点异常检测

在电能表异常中，一种常见手段是将电流输入区域的焊点短接，如图8所示。

|  |  |
| --- | --- |
| (a) | (b) |

图8 电能表焊点图像：(a)异常焊点短接图; (b)正常焊点模板图

Fig.8 Energy meter solder joint image: (a) abnormal solder joint short connection image; (b) Normal solder joint template image

李文静等采用传统机器视觉的方法检测焊点缺陷，但存在阈值选取困难、鲁棒性差等弊端[19]。邹文提出了一种深度学习焊点检测方法，对漏焊、桥接、正常的焊点图像进行分类，但其无法满足现场实时检测的要求[20]。

针对上述问题提出了一种基于显著性检测和连通域分析的快速焊点异常检测算法，检测步骤如下：

（1）将待检测图像转换至LAB色彩空间，计算L、A、B三个通道上的均值*L*μ、*A*μ、*B*μ。

（2）进行显著性检测获取显著图像，根据以下公式计算单通道显著图像的显著值。

 （7）

 （8）

 （9）

 （10）

其中S为单通道的显著图像，x、y为像素点的坐标；α、β、γ为超参数，根据300张焊点图像验证，取得最佳值分别为0.5、0.8、0.1。在图像中平均值通常表征背景信息，通过计算Lab各通道与其均值的差值的平方加权和，可以突出目标而弱化背景，达到检测显著区域的目的。

（3）对得到的显著图像进行二值化处理，根据显著图的特性采用最大类间方差法进行二值化可以实现较好的分割效果，接着使用形态学处理中的开运算来去除噪点和干扰线条，保留目标焊点的像素点簇。

（4）计算待测焊点分割图像中所有焊点目标的连通域*U*1,*U*2,*U*3,*U*4,*U*5…,*Um*；根据预标注的模板图像计算真实焊点目标的连通域*V*1,*V*2,*V*3,*V*4,*V*5…,*Vn*。遍历每个连通域*Ui* (*i*∈*m*)，计算与所有真实焊点连通域*Vj* (*j*=1,2,…,*n*)的交并比*IOU(i, j)*，计算公式如下：

 （11）

1. 对所有计算得到*n*个*IOU (i, j)*进行快速排序。若最大值max(*IOU (i, j)*)∈(0.8,1]则表明模板上存在真实焊点*Vj*与待测图上焊点*Ui*大致重合，可判定*U*i为正常焊点；若最大值max(*IOU (i, j)*)∈(0.1,0.8]则表明模板上存在真实焊点*Vj*与待测图上焊点*Ui*有部分重合但有较大差异，可判定为焊点桥接异常，并将*Vj*标记为已匹配；若最大值max(*IOU (i, j)*)∈[0,0.1]，则表明模板上不存在真实焊点*Vj*和待测图上焊点*U*i相对应，可判定为焊点新增异常；模板图上若存在其余未被标记的焊点*Vj*，可判定为焊点缺失异常。焊点异常检测算法过程图见图9。

焊点异常检测性能结果见表4，通过结合显著性检和连通域来判定焊点异常种类，检测精度高，可以满足实时检测的需求。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (a) | (b) |
|  |  |
| (c) | (d) |

图9 焊点异常检测过程图 (a)显著图; (b)二值化图; (c)滤波图; (d)检测结果图

Fig.9 Process figure of solder joint anomaly detection (a)Saliency image; (b)Binary image; (c)Filter image; (d)Test result image

表4 焊点检测结果

Tab.3 Resistance anomaly detection result

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 正检率% | 召回率% | F1% | 总耗时s |
| 焊点异常 | 96.74 | 96.85 | 96.79 | 0.74 |

# 2　系统设计与实现

## 2.1　硬件系统设计

设计了一款便携式电能表异常分析系统，通过建立电能表参数辨识数据库以及标准图像比对数据库，完成现场电能表异常分析，以及辅助完成反窃电排查以及举证一体化操作。

设备采用便携式手提箱形式，便于移动携带，内置平板电脑、2000W像素高清摄像头、RFID数据读取器、高精度万用表等设备。系统主要硬件包括：

（1）平板电脑：支持5G，WIFI等通信方式，可实现数据查询，样本比对等功能。

1. 高清摄像头：附带工业级光源，支持多角度拍摄，像素2000万。

（3）RFID数据读取器：实现电能表信息读取，便于电能表模板资料查询。

（4）高精度万用表：支持阻值，容值等数值测量，实现现场关键节点测量。

异常分析系统软硬件参数如下：

表5 异常检测分析系统软硬件参数

Tab.5 Software and hardware parameters of anomaly detection system

|  |  |
| --- | --- |
| 配置 | 型号 |
| 处理器 | Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 |
| 运行内存 | 16GB |
| 操作系统 | Window11 |
| 摄像头 | 工业相机MV-A3800CG000 2000W像素 |

电能表异常检测分析装置效果图和实物图如图10所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

图10 异常检测装置实物与效果图

Fig.10 Physical and effect drawing of anomaly detection device

## 2.2　软件系统设计

电能表异常分析系统软件的操作界面使用C#语言编写，用开源机器视觉软件库OpenCV和C++语言实现电能表异常分析的图像处理算法的开发。OPENCV的版本号为4.5.5。通过建立一个可扩展的电能表PCB电路板数据库，便于现场电能表关键节点的分析，支持电能表PCB远程专家评审。

软件系统主要包括异常检测、历史数据、参数设置、模板管理四个功能模块：

（1）异常检测模块：主要包括贴片电阻异常检测、焊点异常检测两部分。

（2）历史数据模块：主要包括异常结果的查询和显示。

（3）参数设置模块：主要包括相机IP地址和曝光时间的设置。

（4）模板管理模块：主要包括模板的增删和编辑。

异常检测界面见图11，异常结果分析界面见图12。

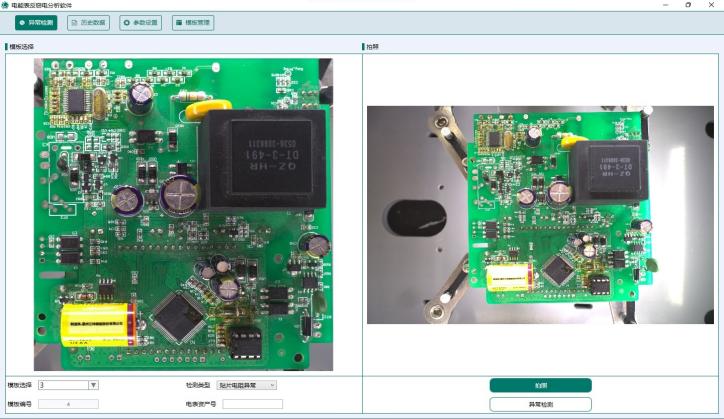


图11 异常检测界面

Fig.11 Anomaly detection interface

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |

图12 异常结果分析界面 (a)电阻异常分析; (b)焊点异常分析

Fig.12 Anomaly result analysis interface (a)Resistance anomaly analysis; (b)Solder joint anomaly analysis

## 2.3　系统工作流程

电能表异常分析系统操作流程如图13所示。



图13 异常分析系统操作流程

Fig.13 Operation process of anomaly detection system

主要包含以下四个步骤：

（1）设备开机。将便携式电能表异常检测系统开机，配置IP地址将高清摄像头与平板连接。

（2）电能表RFID信息识别。先通过RFID数据读取器将电能表信息读取，在数据库内找到相应正常电能表电路板数据，若RFID识别失败则手动输入电能表模板编号信息。

（3）开启摄像头和光源，将待测电能表PCB板放置在拍摄工位，调节摄像头至合适的高度，拍摄图像后通过异常检测算法进行比对。

（4）若检测结果存疑则交由专家用高精度万用表进行再次评审。

# 3　结束语

针对电能表更换元器件的异常方式查处，文中采用了图像处理和识别、机器视觉、深度学习等理论和技术，根据电力部门现场工作的特点和业务需求，通过对现场电能表PCB图像的采集，进行快速的图像特征提取、图像特征配准、贴点电阻与焊点异常判断等自动化分析检测。

开发了一套便携高效的电能表异常检测现场分析系统，提高了现场检测的效率，同时构建了电能表PCB图像数据库，将进一步推进电能表异常检测技术的研发。

本系统检测精度高，不需要附加的机械控制装置，成本低，操作简便，确保能在现场工作环境使用，实验结果表明该系统实时性好，检测准确率满足实际需求，具有实际的应用价值。

参 考 文 献

[1] 邓世江. 电子元器件缺陷检测技术研究与开发[J]. 电子测试, 2022(Z1): 35-37, 31.

Deng Shijiang. Research and development of defect detection technology for components[J]. Electronic Test, 2022(Z1): 35-37, 31.

[2] 阳弼国, 李理, 范幸. 精准反窃电的分析与研究[J]. 大众用电, 2021, 36(07): 14-16.

Yang Biguo. Analysis and Research on Accurate Anti-Stealing of Electricity[J]. Popular Utilization Of Electricity, 2019(Z1): 5-8, 56.

[3] 邢浩洁, 陈金涛, 陶青川. 手持终端智能电能表一致性检测系统[J]. 电子测试, 2019(Z1): 5-8, 56.

Xing Haojie, Chen Jintao, Tao Qingchuan. Smart energy meter consistency detection system mounted on handheld terminal[J]. Electronic Test, 2019(Z1): 5-8, 56.

[4] 崔婷. 电能表智能检定装置的设计[D]. 长春工业大学, 2015.

Cui Ting. The design of the electricity meter intelligent calibration device[D]. Changchun University of Technology, 2015.

[5] 赵敬佩. 基于图像识别技术的智能电表计量误差检测方法研究[D]. 华北电力大学, 2015.

Zhao Jingpei. Study on smart electric meter error detection methods based on image recognition technology[D]. North China Electric Power University, 2015.

[6] 杨娟. 基于数字图像处理的电能表图像识别技术研究与实现[D]. 南京理工大学, 2012.

Yang Juan. Research and realization of image recognition technology of electric energy meter based on digital image processing[D]. Nanjing university of science and technology, 2012.

[7] 邓桂平, 申莉, 田忠春, 杨建荣. 智能电能表质量一致性检测系统设计[J]. 电测与仪表, 2015, 52(S1): 124-129.

Deng Guiping, Shen Li，Tian Zhongchun, Yang Jianrong. Design of smart meter quality consistency inspection system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(S1): 124-129.

[8] 陆晓. PCB板元器件在线实时检测系统研究[D]. 浙江理工大学, 2020.

Lu Xiao. Research on online real-time detection system of PCB components[D]. Zhejiang university of science and technology, 2012.

[9] 阮春雷. 基于机器视觉的电能表检测系统研究[D].浙江工业大学, 2013.

Ruan Chunlei. Research of the energy meter detection system based on machine vision[D]. Zhejiang University of Technology, 2013.

[10]阮春雷, 姚明海, 黄磊. 基于计算机视觉的电能表检测系统[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(02): 57-60.

Ruan Chunlei. Power meter detection system based on computer vision[J]. Computer Systems & Applications, 2013, 22(02): 57-60.

[11]梁伟建. 智能电能表外观缺陷质量检验装置开发及关键技术研究[D]. 中国计量学院,2014.

Liang Weijian. Design and key technology research on appearance defect detection system for smart meter[D]. China Jiliang University, 2014.

[12]梁伟建, 洪涛, 林笃盛, 卢玉凤, 邓辉善. 基于机器视觉的智能电表外观缺陷检测系统设计[J]. 电测与仪表, 2013, 50(10): 64-68.

Liang Weijian, Hong Tao, Lin Dusheng, Lu Yufeng, Deng Huishan. Design of smart meter visual Inspection system based on machine vision[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013.

[13]李少腾, 姚力, 胡瑛俊, 吴幸, 楼轶. 智能电能表印刷电路板一致性检测系统的开发[J]. 浙江电力, 2013, 32(3): 1-4.

Li Shaoteng, Yao Li, Hu Yingjun, Wu Xing, Lou Yi. Development of consistency inspection system for pcb of smart electricity meter[J]. Zhejiang Electric Power, 2013, 32(3): 1-4.

[14]牛嘉申. 基于目标检测网络的表面贴装元件检测研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2021.

Niu Jiashen. Surface Mounted device detection research based on object detection[D]. Harbin Institute of Technology, 2021.

[15]吴彬彬, 朱雅魁, 葛云龙, 吕云彤. 结合模板匹配和深度神经网络的电能表信息识别[J/OL]. 电测与仪表: 1-9.

Wu Binbin, Zhu Yakui, Ge Yunlong, Lv Yuntong. Information recognition method for electricity meter using template match and deep neural network[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-9.

[16]陈思摇. PCB缺陷检测中的图像配准技术研究[D]. 武汉科技大学, 2021.

Chen Siyao. Research on image registration technology in PCB defect detection[D]. Wuhan University of Science Technology, 2021.

[17]王凯, 余振军, 何显辉, 夹尚丰, 孙洋, 孙林. 改进的多尺度形状模板匹配算法[J]. 激光杂志, 2022, 43(04): 82-87.

Wang Kai, Yu Zhenjun, He Xianhui, Jia Shangfeng, Sun Yang, Sun Lin. Improved multi-scale shape template matching algorithm[J]. Laser Journal, 2022, 43(04): 82-87.

[18]Ma N, Zhang X, Zheng H T, et al. Shufflenet v2: Practical guidelines for efficient cnn architecture design[C]. Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). 2018: 116-131.

[19]李文静, 张虎山, 焦键. 基于HALCON的贴片IC焊接缺陷检测算法研究[J].兵器装备工程学报, 2020, 41(08): 244-248.

Li Wenjing, Zhang Hushan, Jiao Jian. Welding defect detection algorithm for chip IC based on halcon[J]. Journal of ordnance equipment engineering, 2020，41(08): 244-248.

[20]邹文. 基于机器视觉的PCB贴片元器件焊点定位与缺陷检测[D].湖南大学, 2019.

Zou Wen. PCB solder joint location and defect detection based on machine vision [D]. Hunan University, 2019.

作者简介**：**



蒋超（1990—），男，工程师，主研电能计量及台区线损治理。Email：107633120@qq.com。

陈圣泽（1990—），男，工程师，主研电能计量。

张智晶（1989—），男，工程师，主研电能计量及反窃电。

李  蕊（1979—），女，高级工程师，主研电能计量。