

基于图像处理的指针式仪表读数识别

荆永菊¹ 薄树奎¹ 郝晓玉¹ 王亚宽¹
JING Yongju BO Shukui HAO Xiaoyu WANG Yakuan

摘要

针对传统图像处理技术实现指针式仪表读数识别中漏检率和误检率高的问题,文章提出一种基于数字检测的仪表读数识别方法。首先,基于霍夫变换检测仪表图像中的刻度线区域;然后,在刻度线检测的基础上,进一步检测和识别刻度线上的数字;最后,利用霍夫变换检测仪表指针,并基于识别出的数字得到仪表刻度量程,通过计算实现仪表指针读数识别。仪表刻度线检测相较于圆形表盘检测,增加了仪表目标识别的可靠性,而且与刻度线上的数字识别互相验证,进一步降低了误检率。针对变电站实际场景中的指针式仪表进行自动读数识别,实验结果表明,基于数字检测的仪表读数识别方法误检率低、识别精度高。

关键词

指针式仪表; 读数; 识别; 数字检测; 刻度线

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.12.005

0 引言

在工业生产过程中,各种仪器设备的安全运行都离不开工业仪表的实时监测,仪表也是工业信息化的数据来源。传统的指针式仪表具有可靠性高、成本低、抗电磁干扰能力强等优点,因此被广泛应用于各种工业环境,如电力系统的变电站^[1]。但传统的指针式仪表没有数字输出接口,无法完成测量数据的自动采集与传输,而通过人工读数则会影响工业信息化建设和生产效率。此外,如大规模地将传统的指针式仪表替换为数字仪表,会使企业成本大量增加,同时给企业的安全生产带来一定的隐患。

随着信息技术的发展及其在工业自动化生产中的深入应用,利用计算机代替人工进行仪表读数的读取成为该问题的一种解决方案^[2]。为此,研究者们提出了指针式仪表的自动读数方法,其中被广泛使用的基于机器视觉的指针式仪表读数识别,通过对指针式仪表进行图像采集和预处理,采用机器视觉技术进行仪表自动读取^[3]。在电力系统中,由于实际生产的安全需求和社会用电保障需要,对变压器的实时监测变得更加重要,电力巡检机器人也由此应运而生。为代替人工巡检,电力巡检机器人需要自动、准确地读取不同工况下仪表的示数^[4]。

指针式仪表读数的自动识别,首先要对仪表图像目标进行检测,在图像中定位出仪表目标区域。仪表图像目标检测方法主要包括基于模板匹配和霍夫变换的方法^[5]以及基于深度学习的方法等^[6]。针对不同大小的仪表图像,可使用图像

金字塔方法对原图进行缩放,然后用滑动窗口对缩放后的图像进行遍历,提取每个窗口图像的特征,检测出含有仪表的图像^[7]。基于深度学习的方法如文献[8],首先利用霍夫变换排除待检测图像中的非圆形区域,然后基于改进的预训练 MobileNetV2 网络模型对仪表区域进行识别,得到较低的模型参数数量和模型计算量,保证仪表目标检测的准确性。

在仪表目标检测的基础上,可以通过霍夫变换^[9]、深度学习的方法提取仪表指针^[10],如李金红等人^[11]提出的基于 Faster R-CNN 算法检测仪指针目标,然后根据得到的指针图像,结合霍夫变换提取指针直线,减少了定位指针中轴线所在直线过程中的干扰,使其具有较好的鲁棒性和准确性。检测出仪表指针后,可计算指针与仪表零刻度线的夹角,再根据仪表角度量程以及读数量程,通过等比例换算得到仪表的读数。这种方法直接利用直线的几何关系进行计算,简单且应用广泛,但是角度法中夹角的测量误差会导致读数误差较大,并且只能应用于均匀刻度的仪表读数。许丽等人^[12]在霍夫变换提取指针的基础上,推导出指针角度与仪表读数的函数关系,增加了指针中心线通过表计中心等约束条件,提高了指针角度提取的精度,降低了搜索数据量和搜索时间。

为了精确提取仪表指针和计算指针角度,需要对检测出的仪表目标图像进行预处理,包括光学和几何处理,即图像滤波、图像增强,以及图像的倾斜矫正等。如变电站场景中获取的仪表图像受室外现场环境的影响,有时会出现一定程度的畸变,文献[13]利用卷积神经网络提取以表盘刻度数字为中心的关键点,结合椭圆变换理论使用透视变换对仪表图像进行倾斜校正;再根据仪表竖直中轴线对

1. 郑州航空工业管理学院 河南郑州 450046

称的关键点计算仪表相对于水平方向的旋转角度,以拟合椭圆的几何中心为旋转中心,旋转仪表图像实现二次校正,效果良好。此外,指针式仪表自动读数的研究还有结合图像文本检测的方法、渐进式方法以及无先验知识的仪表检测与读数识别方法等^[14-17]。

在指针式仪表自动读数识别研究与应用中,基于传统图像处理的方法通用性较差,需要针对具体应用设计合适的方法。而深度学习方法对训练样本的数量要求较大,会消耗更多的计算资源^[18-19]。本文主要针对变电站的指针式仪表读数进行研究,基于图像处理技术提出一种可靠性强的仪表读数识别方法。

1 变电站指针式仪表读数识别方法

变电站中的仪表为圆形或方形,刻度均匀呈圆弧状分布,一般安装在距离地面大约 4~10 m 高度处,仪表表盘大多面向巡检路面一侧。变电站指针式仪表自动读数系统一般以巡检机器人作为平台,搭载可见光摄像机、红外传感器等多种传感器,按照规划路径和巡检拍摄点采集相应的仪表图像,并通过无线传输设备传送图像数据。仪表自动读数识别系统对传输过来的图像进行读数识别并保存,用于设备监控和数据分析。巡检机器人通过合理的路径规划,能够获得尺寸和清晰度较好的仪表正视图像。仪表图像经过预处理后,先后对表盘和仪表指针进行检测,然后计算仪表的读数。在现有指针读数识别中,大都是基于指针与零刻度线夹角的方法,这些方法依赖于零刻度线的精确定位,如果零刻度线定位错误,后续精度无法保证。而且,这些方法往往需要有仪表零刻度线和量程的先验知识,才能通过夹角计算出相对位置得到仪表读数。为此,本文从检测刻度线及刻度线上的数字两方面着手,采用数字和刻度线互相验证的方式进行指针读数识别,提高了变电站指针式仪表自动读数的稳定性和精确性,总体步骤如下:

(1) 基于霍夫变换检测仪表图像内刻度线所在的初始圆周,同时在初始圆周内、外侧检测一组同心圆以验证初始圆周检测的正确性,并实现一定宽度的刻度线区域检测。

(2) 基于刻度线同心圆圆心和半径,在图像空间以扫描的方式检测刻度线处的数字位置,并对检测出的数字区域进行图像抠取。

(3) 对抠取出的数字区域图像根据其在刻度线上的位置信息,计算每个数字原始位置相对于仪表图像纵坐标轴的倾斜角度,并对其进行相同角度的回正旋转,以实现对应数字倾斜的修正,然后采用模板匹配方法对旋转后的数字进行识别。

(4) 识别出数字后,将数字中心与刻度线同心圆圆心连线,记录与初始圆周交叉点坐标,并标记交叉点处的刻度值为该数字值,用于后面读数计算。

(5) 在刻度线区域检测和数字识别的基础上,在同心圆范围内提取表盘的指针区域,采用霍夫变换检测该区域内的直线,检测结果作为仪表指针识别结果。

(6) 根据已识别出的数字和指针位置计算仪表的指针读数:如果指针两侧均有识别出的数字,则采用折半法进行读数计算;如果某一侧没有识别出数字,则首先在初始圆周上补充相应的数字,再采用折半法进行指针读数计算。

1.1 表盘刻度线区域检测

由于指针式仪表表盘刻度区域具有圆周形状特征,故采用基于霍夫变换的圆周检测方法。基于霍夫变换圆形检测的原理,是利用圆的参数方程和 $y=b+r\cdot\sin(\theta)$, 其中 $\theta\in[0,2\pi)$, 将图像像素空间对应到参数空间,其中 (a,b) 为圆心坐标, r 为圆半径, θ 为参数, (x,y) 为圆经过点的坐标。设置角度 θ 和半径 r 的变化范围和步长,计算出 a 和 b 的值,如果 a 和 b 的值在合理的图像范围内,则对该位置计数累加,最后根据极大值找到圆心坐标与半径。

首先采用 Canny 算子对仪表图像进行边缘检测,由于变电站仪表的刻度线圆弧角度范围一般都在 180° 以内,设置角度参数范围为 $[0,\pi]$, 角度步长为 0.01, 半径参数范围为图像高度的 1/4 到 3/4, 半径增加步长为 1, 进行霍夫变换得到初始圆周的圆心 O 和半径 R 。同时以 O 为圆心, 半径 R 为初值, 分别以步长 +1、-1 进行循环搜索, 根据仪表的刻度线高度确定 R 的变化范围, 找到满足累加值在最大值的 1/6 到 1/2, 且累加值大小差值在 20% 以内的同心圆, 这些同心圆上的弧线组成的区域就是仪表刻度区域, 同心圆的数量代表了刻度区域的宽度, 如图 1(a) 中弧形掩模区域所示为检测出的仪表刻度区域在原始图像上的掩模显示结果。图 1(b) 中检测出多组同心圆, 但不能满足圆周累加值条件的被排除, 所以最终得到刻度线区域检测结果。如果同心圆在 R 的步长 +1 方向, 则表示刻度区域在初始圆周外侧, 否则在内侧。



(a) 仪表 1



(b) 仪表 2

图 1 仪表刻度线区域检测

1.2 数字位置检测

为保证仪表图像中检测出的刻度区域的可靠性,进一步在刻度线区域附近检测并识别出数字,二者互相验证能降低刻度线区域检测的误检率。在刻度线检测的基础上,数字和刻度区域在初始圆周的同一侧方向,根据数字的横向间隔分布特性,进行数字位置扫描搜索。首先通过扫描计算数字的

高度，在图像空间以 O 为圆心，半径大于刻度区域为初始值且步长为 1（假设数字在初始圆周外侧），从刻度区域的左侧边缘点以角度步长 0.01 扫描至右侧边缘，同时记录半径终端经过的弧线上边缘点数量，边缘点即边缘检测结果图像中的检测出的边缘像素。当一次扫描完成产生的边缘点数量不大于 5 时，认为已经到数字区域的顶端，停止扫描并记录扫描半径值，则数字的高度为扫描次数。然后，通过扫描获得数字的左右边界，在图像空间以 O 为圆心，从刻度区域的左侧边缘点以角度步长 0.01 扫描至右侧边缘，在每个角度上，以半径大于刻度区域为初始值、到数字区域的顶端为终值且步长为 1，进行径向扫描，同时记录半径终端在图像空间经过边缘点数量。根据所记录边缘点的数量和数字在图像中的大小比例，连续无边缘点说明是数字之间的空白区域，连续有边缘点说明是数字区域，由此得到数字的左右边界。数字的左右边界结合前面得到的数字高度，可以得到刻度线上的每个数字位置，并对每个数字区域在原始图像中进行抠取。如图 2 所示矩形掩模区域为原始仪表图像图 1（b）中标出的数字位置。

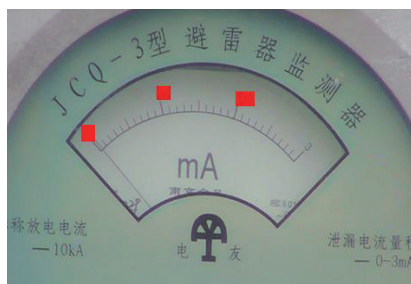


图 2 仪表数字区域检测

1.3 数字识别

检测出数字位置并对其进行抠取，根据数字在刻度线上的位置信息，计算每个数字的倾斜角度，也就是其位置点到圆心 O 的连线与图像空间中的垂线的夹角。对抠取的数字区域图像进行相同夹角的回正旋转，以实现对应数字倾斜的修正。对旋转后的数字图像做二值化和标准化，采用模板匹配方法识别数字。如图 3 所示为图 2 中检测出的数字，其中第一行为原仪表图像数字区域抠图，第二行为对应数字区域分别回正旋转 37°、15° 和 -10° 后的二值化图像。在模板匹配方法中，首先基于变电站仪表图像中的典型数字建立数字模板，为了提高匹配精度，在模板中加入了倾斜后回正的数字模板，以适应在旋转过程中产生的微小变形。



图 3 数字提取与旋转

基于旋转图像的模板匹配数字识别方法，一方面可以辅助仪表刻度数值的读取；另一方面，旋转后可读取的数字也说明了与其伴随的刻度弧线的存在，可以验证对刻度区域检测的正确性。根据仪表刻度线上的数字特征，应至少识别出两个数字，且左侧数值小于右侧数值。基于每个识别出数字的位置，从数字中心与同心圆圆心连线，计算该连线与初始圆周交叉点的图像坐标，并记录交叉点处的刻度值分别为已识别出数字值。

1.4 仪表指针检测

在识别出的刻度线区域内检测直线，缩小了检测范围，加上经过表盘的圆心限制条件，使得指针检测变得简单，而且提高了检测效率和准确性。基于圆心 O 和半径 R 的初始圆周选取指针检测区域，进行灰度化和二值化预处理操作，采用拉普拉斯算子进行边缘检测，如图 4 所示。最后采用霍夫变换检测并找到过圆心 O 且在刻度线区域范围内的直线，如果检测出两条相近的指针直线，采用最小二乘法进行合并，得到一条直线作为最终指针检测结果，如图 4 中直线段所示。

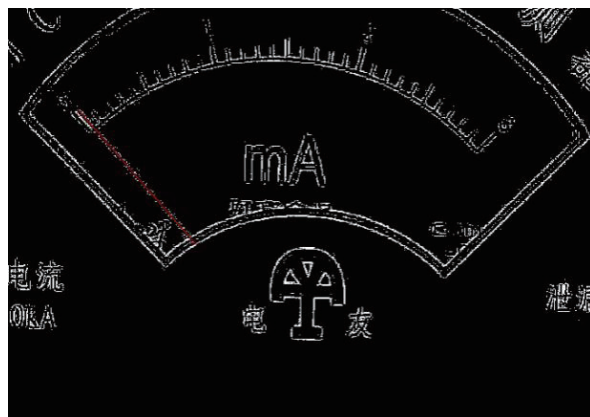


图 4 指针提取

1.5 仪表读数识别

在数字识别和指针检测结果的基础上进行仪表读数识别，分为两种情况。第一，如果指针直线两侧的刻度区域均有已识别出的刻度数字，采用“折半法”计算读数；第二，如果在指针某一侧的刻度区域没有识别出数字，则根据已有刻度数字采用“距离法”在另一侧进行补充，记录其在圆周上相应位置的坐标记录和对应的数值，然后采用“折半法”进行读数识别。

1.5.1 折半法计算读数

(1) 在指针检测的基础上，指针直线与初始圆周相交，记录交叉点坐标 $C(x, y)$ ，如图 5 所示，如果 C 与已识别出某个数字处的坐标相同（或在一定的阈值范围内），则指针读数 N 为该数字值，读数识别结束，转到 (6)；否则在指针

直线左右两个方向上搜索标记过的刻度读数, 设左侧读数 N_1 处的坐标为 (x_1, y_1) , 右侧读数 N_2 处的坐标为 (x_2, y_2) 。

(2) 取 N_1 、 N_2 二者的坐标均值(中点)为 $M(\frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2})$ 。

(3) 如果该均值 M 等于交叉点 C , 则指针读数为 $N = \frac{N_1+N_2}{2}$, 读数识别结束, 转到(6)。

(4) 如果所计算的坐标均值(中点) M 在交叉点 C 的左侧, 则赋值 $N_1 = \frac{N_1+N_2}{2}$, 且 N_1 处的坐标重新赋值为 M 与

表盘圆心所成直线与圆周的交叉点坐标, 循环执行(2)。

(5) 如果所计算的坐标均值(中点) M 在交叉点 C 的右侧, 则赋值 $N_2 = \frac{N_1+N_2}{2}$, 且 N_2 处的坐标重新赋值为 M 与

表盘圆心所成直线与圆周的交叉点坐标, 循环执行(2)。

(6) 输出指针读数 N 。

将上述折半法进行循环迭代, 计算指针读数, 图4中指针经过4次迭代计算后, 如图5中最终读数计算结果为0.031。

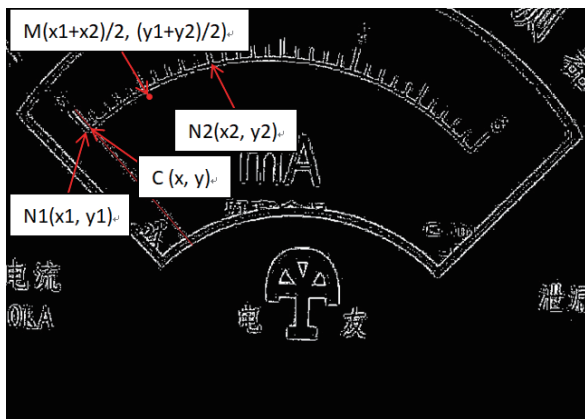


图5 折半法读数示意图

1.5.2 距离法补充数字

如果在指针某一侧的刻度线区域没有识别出数字, 则无法直接采用折半法计算, 在计算读数前需要对其进行补充。选择已识别出的刻度线区域左右两端的数字, 先计算两个数值之差, 再计算两个数字处的刻度之间在初始圆周的弧线长度, 得到刻度值与弧线长度的对应关系。根据弧线长度与刻度数值的对应关系, 基于已识别出的数字的位置信息, 向无刻度数字的方向沿初始圆周度量出相应的弧线段, 得到缺失的数字刻度值和其坐标位置, 弧线段长度应限制在刻度区域内。如图2中所示仪表图像中图数字3未检测出, 假如指针在刻度值2的右侧(实际是在左侧), 则需要根据已有数字0和2计算弧长和刻度位置的关系, 然后对右侧缺失的刻度值进行补充, 如图6所示。

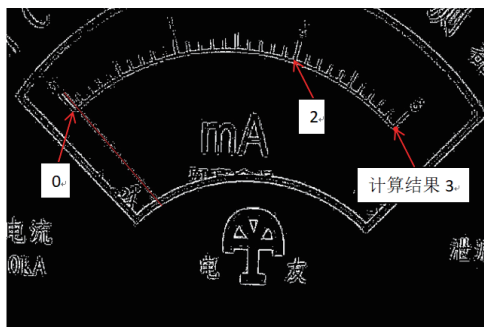


图6 数字补充示意图

2 实验结果

针对变电站实际场景中的指针式仪表, 采集100个仪表图像进行实验。变电站采集的仪表图像, 部分需要光学矫正和倾斜矫正, 仪表表盘大都位于图像正中, 因此可以直接检测刻度线区域, 然后完成指针的检测和读数识别。由于基于深度学习的表盘目标识别需要大量的训练样本, 本文方法只与同类型的基于霍夫变换表盘检测方法进行对比实验。图7所示为部分检测结果, 本文方法的刻度线检测等同于圆形表盘检测, 从误检率和漏检率两个方面评价检测性能, 结果如表1所示。



图7 变电站仪表部分实验结果

表1 仪表检测结果对比

方法	仪表数	误检数	误检率	漏检数	漏检率
霍夫变换	100	6	6%	3	3%
本文方法	100	1	1%	4	4%

采用刻度线检测及数字识别相互验证的方法具有误检率低的优势, 但由于部分图像数字难以识别, 使得漏检率比基于霍夫变换的方法高, 总体性能优于霍夫变换圆形表盘检测结果。

对检测出的仪表刻度线进行读数识别, 识别结果与人工读数(真值)进行比较, 采用绝对误差和引用误差评价指标, 引用误差是绝对误差与表盘量程的比值, 读数识别结果如表

2 所示,其中编号 05 的图像未能识别出数字,因而没有读数。从表 2 可以看出,实验中的变电站仪表读数识别的绝对误差大都在 0.1 以内,引用误差则大都低于 0.05,满足变电站应用场景中对设备监测的需求。

表 2 仪表读数识别结果

编号	真值	检测值	绝对误差	引用误差
01	0.01	0.102	0.052	0.017
02	0.55	0.650	0.100	0.050
03	0.50	0.562	0.062	0.021
04	0.30	0.280	-0.020	-0.010
05	0.60	—	—	—
06	0.60	0.660	0.060	0.012
07	0.50	0.500	0.000	0.000
08	0.50	0.600	0.100	0.050
09	0.00	0.005	0.005	0.003
10	0.50	0.600	0.100	0.033
11	0.70	0.750	0.050	0.017
12	0.70	0.782	0.082	0.041
13	0.08	0.065	-0.015	-0.005
14	0.02	0.018	-0.002	-0.001
15	0.40	0.386	-0.014	-0.007
16	2.60	2.508	-0.092	-0.031
17	2.50	2.650	0.150	0.050
18	0.50	0.602	0.102	0.034
19	0.50	0.553	0.053	0.027
20	0.42	0.586	0.166	0.166

3 结语

本文提出的指针式仪表读数识别方法,将刻度线检测和数字识别相结合,具有良好的可靠性。指针式仪表盘的刻度线和线上的数字共同组成了表盘的特征,将先后识别出的刻度线与数字互相验证,并基于图像像素坐标之间距离计算指针读数,保证了仪表读数的可靠性和精度。主要包括两个方面:一是检测出仪表盘刻度线后,在圆周附近探测数字区域,并对数字区域图像做相应旋转,对圆周上倾斜的数字回正后进行识别,识别出正常的仪表数字同时验证了前面刻度线检测的正确性,提高了识别的可靠性;二是在指针读数计算过程中,基于检测出的刻度线上的数字位置,利用像素坐标之间的距离计算指针直线与圆周交叉点处的刻度数值,实验表明,基于表盘圆周上两点之间距离的方法具有良好的计算精度。而且,该仪表读数识别方法可执行文件小,速度快,可方便部署在巡检机器人等终端设备或嵌入式系统。

参考文献:

[1] 邢浩强,杜志岐,苏波. 变电站指针式仪表检测与识别方法[J]. 仪器仪表学报,2017,38(11):2813-2821.

[2] 陈梦迟,黄文君,张阳阳,等. 基于机器视觉的工业仪表识别技术研究[J]. 控制工程,2020,27(11):1995-2001.

[3] 韩绍超,徐遵义,尹中川,等. 指针式仪表自动读数识别技术的研究现状与发展[J]. 计算机科学,2018,45(z1):54-57.

[4] 孙婷,马磊. 巡检机器人中指针式仪表表示数的自动识别方法[J]. 计算机应用,2019,39(1):287-291.

[5] 高建龙,郭亮,吕耀宇,等. 改进 ORB 和 Hough 变换的指针式仪表识读方法[J]. 计算机工程与应用,2018,54(23):252-258.

[6] 董云龙,刘行,袁烨,等. 基于细节注意力卷积神经网络的仪表自动化识别方法[J]. 中国科学(技术科学),2020,50(11):1437-1448.

[7] 李巍,王鸥,刚毅凝,等. 一种自动读取指针式仪表读数的方法[J]. 南京大学学报(自然科学版),2019,55(1):117-124.

[8] 李慧慧,闫坤,张李轩,等. 基于 MobileNetV2 的圆形指针式仪表识别系统[J]. 计算机应用,2021,41(4):1214-1220.

[9] 徐遵义,韩绍超. 基于相机标定和最大连通区域算法的指针式仪表读数识别[J]. 现代电子技术,2019,42(9):46-50.

[10] 夏臻康,李维刚,田志强. 基于 YOLOv5 的指针式仪表自动读数方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2023(6):44-51.

[11] 李金红,熊继平,陈泽辉,等. 基于卷积神经网络的指针式仪表识别[J]. 计算机系统应用,2021,30(9):85-91.

[12] 许丽,石伟,方甜. 巡检机器人中的指针式仪表读数识别系统[J]. 仪器仪表学报,2017,38(7):1782-1790.

[13] 周登科,杨颖,朱杰,等. 基于深度学习的指针式仪表倾斜校正方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2020,32(12):1976-1984.

[14] 徐发兵,吴怀宇,陈志环,等. 基于深度学习的指针式仪表检测与识别研究[J]. 高技术通讯,2019,29(12):1206-1215.

[15] 孙晓朋,侯立群,渠怀胜. 基于卷积神经网络的渐进式指针表自动读数方法[J]. 传感技术学报,2021,34(10):1326-1333.

[16] 董海,徐晓鹏,谢英红,等. 无先验知识的仪表自动检测与判读算法[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2):205-217.

[17] SUN J J, HUANG Z Q, ZHANG Y X. A novel automatic reading method of pointer meters based on deep learning[J]. Neural computing and applications,2023, 35(11):8357-8370.

[18] ZUO L, HE P L, ZHANG C H, et al. A robust approach to reading recognition of pointer meters based on improved mask-RCNN[J]. Neurocomputing, 2020,388(7):90-101.

[19] ZOU L, WANG K, WANG X F, et al. Automatic recognition reading method of pointer meter based on YOLOv5-MR model[J]. Sensors, 2023,23(14):6644.

【作者简介】

荆永菊(1978—),女,河南荥阳人,本科,研究方向:信息管理、图像处理。

薄树奎(1976—),通信作者(email:bsk586@163.com),男,河北丰南人,博士,教授,研究方向:图像处理、模式识别。

(收稿日期:2024-08-20)