

基于传感视觉增强的 SF6 在线仪表读数识别研究

叶城源¹ 李茂林¹ 石国志¹ 叶晓彤¹ 李剑斌¹

YE Chengyuan LI Maolin SHI Guozhi YE Xiaotong LI Jianbin

摘要

在 SF6 在线仪表读数识别过程中, 存在图像质量低劣、背景与目标对比度不足, 以及图像纹理特征模糊等问题, 导致传统图像处理方法难以准确提取仪表上的关键信息, 如指针位置和刻度标识, 进而影响读数的准确识别。因此, 提出了基于传感视觉增强的 SF6 在线仪表读数识别方法。利用高精度的 CCD 相机作为图像传感器, 精准捕捉并感知 SF6 在线仪表的实时图像。引入传感视觉增强技术, 对获取的图像进行深度处理, 显著增强图像中的目标特征, 特别是指针与刻度之间的对比度与清晰度。采用机器视觉技术, 提取出图像中的目标区域, 即 SF6 仪表的指针与刻度部分。通过对提取到的目标指针角度进行转换处理, 实现了对 SF6 仪表图像读数的自动识别。经实验证明, 设计方法错误率不超过 1%, 置信度不低于 0.9, 可以实现 SF6 在线仪表读数精准识别。

关键词

传感视觉增强; SF6; 仪表; 读数识别; CCD 相机; 机器视觉技术

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.11.026

0 引言

在电力工业中, 六氟化硫 (SF6) 作为一种优异的绝缘和灭弧介质, 被广泛应用于高压电气设备, 如气体绝缘开关 (GIS)、断路器、变压器等设备中。然而, 随着 SF6 在电力设备中的广泛应用, 其泄漏检测与监控变得尤为重要。SF6 的泄漏不仅会影响设备的绝缘性能, 还可能对环境造成污染, 因此, 对 SF6 浓度的实时监测与精准读数识别成为了电力运维领域亟待解决的重要问题。

在上述研究背景下, 文献 [1] 提出了基于不规则目标检测的识别方法, 利用边缘检测、轮廓提取等方法定位指针和表盘的不规则形状。根据指针与表盘中心或刻度线的相对位置, 计算指针的旋转角度。根据角度与仪表读数的对应关系, 实现读数的自动识别。该方法在理想环境下表现出较好的效果, 但在实际应用中, SF6 在线仪表往往处于复杂多变的环境中, 如光线变化、背景干扰等, 这些因素都可能影响边缘检测和轮廓提取的准确性, 进而降低读数识别的精度。文献 [2] 提出了基于 YOLOv8 和 DeepLabv3+ 的识别方法, 利用 YOLOv8 检测算法定位图像中的指针式仪表区域, 裁剪出仪表图像作为后续处理的输入。

采用 DeepLabv3+ 模型对裁剪后的仪表图像分割, 根据指针与刻度线的相对位置, 计算指针的旋转角度或指针所指的刻度值, 从而得出仪表的读数。尽管 DeepLabv3+ 在图像分割方面表现出色, 但在处理具有复杂形状和边界的指针和刻度线时, 仍存在一定的误差。这些误差可能累积并影响最终读数的准确性。

为此, 提出基于传感视觉增强的 SF6 在线仪表读数识别方法。

1 SF6 在线仪表图像感知

在 SF6 在线仪表读数识别的过程中, 面临着环境复杂性、图像质量波动以及同步精度要求高等难点问题。这些难点直接影响了读数识别的准确性和实时性。为了解决这些问题, 引入了利用高精度的 CCD 相机作为图像传感器的方法。高精度 CCD 相机以其卓越的成像能力和稳定性, 能够精准捕捉并感知 SF6 在线仪表的实时图像, 即使在光线不足、背景噪声等不利条件下也能保证图像质量, 为后续图像处理与读数识别提供了坚实的数据基础。

因此, 选用型号为 HIFA-A4FG78CCD 相机作为图像传感器, CCD 相机工作原理如图 1 所示。将图像传感器利用支架固定安装在 SF6 仪表正前方, 为了保证感知的图像质量, 为图像传感器配备了 LED 灯作为补充光源。根据实际情况对 CCD 相机分辨率、焦距、图像大小、采样率等参数设置, 采用串并联的方式将图像传感器接入到 SF6 仪表电源总线上, 实现二者同步运行。通过 USB 接口将图像传感器与无

1. 广东电网有限责任公司佛山顺德供电局 广东佛山 528300
[基金项目] 广东电网有限责任公司职工技术创新项目,
“基于智能图像识别算法的配网 SF6 仪表识别装置研究”
(030600KZ24030014)

线网络连接,将图像传感器拍摄的仪表图像发送到计算机上,实现对 SF6 仪表图像感知,用于后续图像处理和读数识别。

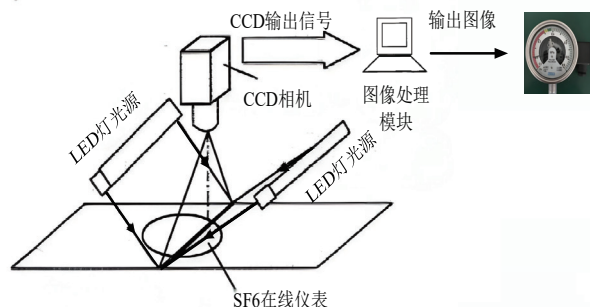


图 1 CCD 相机工作原理

2 基于传视觉增强的图像目标特征增强

由于环境光线变化、摄像头性能限制以及图像传输过程中的噪声干扰等因素,获取的图像往往存在模糊、噪声多、对比度低等问题,使得指针与刻度的识别变得困难。为了克服这些难点,引入传视觉增强技术显得尤为重要。

鉴于识别目标所处的背景区域与目标本身在纹理特征上存在显著差异,这一特性为通过调整图像的纹理特征来强化背景与目标之间的对比度提供了理论依据,进而实现传视觉增强的目标。因此利用颜色特征法来提取包含目标信息的传感图像特征。采用色彩直方图作为图像目标提取的工具^[3]。色彩直方图通过量化图像中颜色的分布情况,提供一种直观且量化的方式来描述图像中颜色的组成,反映图像中每种颜色所占的比例,即某一色彩在图像总颜色中的占比,其用公式表示为:

$$J(s) = e/P \quad (1)$$

式中: $J(s)$ 表示 SF6 在线仪表图像像素中某个颜色所占比例; e 表示特征对应的颜色在 SF6 在线仪表图像中像素数量; P 表示 SF6 在线仪表图像像素总数。

通过这一比例,了解到图像中颜色分布^[4]。结合提取到的目标颜色特征,利用灰度共生矩阵提取图像目标的纹理特征,灰度共生矩阵通过记录具有特定空间关系和灰度级组合的两个像素点共同出现的频率来构建^[5]。在实际操作中,为了计算这一矩阵,采用加窗法,在图像上滑动一个固定大小的窗口 ($i \times j$),并在每个窗口内统计满足特定位移和角度条件的像素对灰度共生情况,其用公式表示为:

$$M(n, m, w, k) = \{B, D, J(s)\} \in (i \times j)^2 \quad (2)$$

式中: $M(n, m, w, k)$ 表示 SF6 在线仪表图像灰度共生矩阵,即在给定位移和角度下,灰度级为 n 和 m 的两个像素对之间的相对频率; n 、 m 分别表示 SF6 在线仪表图像两个灰度级;

w 表示距离; k 表示角度; B 、 D 分别表示两个相邻的像素^[6]。

由于标准灰度图像通常具有 256 级灰度,直接计算其灰度共生矩阵将产生巨大的计算量(即 256×256 的矩阵)。为了提高效率,将灰度级降级至更小的数值,如 64 级或 32 级^[7]。同时,位移、角度以及窗口大小的选择也需根据图像的纹理复杂度和目标识别需求进行调整^[8]。在此基础上,利用灰度共生矩阵的相关性从灰度共生矩阵中提取出具有实际意义的纹理特征,这些特征反映了像素间灰度级的依赖程度,有助于区分目标与背景。其计算公式为:

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^{256} \sum_{m=1}^{256} (n - \gamma_x)(m - \gamma_y) M(n, m, w, k) \cdot \eta_x \eta_y \quad (3)$$

式中: ε 表示 SF6 在线仪表图像纹理特征,即像素间的灰度级依赖程度; γ_x 、 γ_y 分别表示 SF6 在线仪表图像水平方向灰度均值和垂直方向灰度均值; η_x 、 η_y 分别表示 SF6 在线仪表图像水平方向和垂直方向灰度标准方差^[9]。

基于上述提取的纹理特征,对每个像素点在其邻域内计算 $M(n, m, w, k)$,并利用相关性特征值映射回 256 级灰度空间,使每个像素点的新灰度值反映其周围区域的纹理特征 ε 。这一过程不仅增强了目标区域的纹理对比度,还提高了指针与刻度之间的清晰度,为后续 SF6 在线仪表的精确读数识别奠定了坚实的基础。

3 SF6 在线仪表读数识别

通过传视觉增强技术,对 SF6 在线仪表图像进行深度处理并显著增强目标特征后,尽管指针与刻度之间的对比度与清晰度得到了大幅提升,但如何准确且高效地从增强后的图像中提取出目标区域,即 SF6 仪表的指针与刻度部分。这一步骤的精确性直接影响到后续读数识别的准确性。因此,采用机器视觉技术,提取出指针与刻度的轮廓和位置信息。随后,对这些提取到的目标特征进行处理,并将其转换为相应的读数数值,从而实现对 SF6 仪表图像读数的自动识别。

利用机器视觉技术对识别仪表图像中的读数。人类视觉系统在审视图像时,自然而然地会将注意力聚焦于画面中央,这一自然现象被称为“中央先验”的视觉注意机制^[10]。因此首先借助先验知识构建显著图,锁定图像中仪表所在的区域。为了量化图像内各个区域的显著性,引入超像素节点显著度函数,该函数通过综合考量颜色特征的空间分布、像素节点的颜色平均值,以及节点与图像中心及区域质心的距离关系,来刻画每个超像素节点的显著程度^[11]。具体公式为:

$$C(t) = \omega \varepsilon f_\varepsilon + \frac{1}{X + H} \quad (4)$$

式中: $C(t)$ 表示增强后 SF6 在线仪表图像中超像素节点 t 的显著度; ω 表示权重系数; f_ε 表示超像素节点 t 在增强后 SF6

在线仪表图像中的像素平均值； X 表示超像素节点 t 到图像中心欧氏距离； H 表示超像素节点 t 到图像区域质心的欧氏距离^[12]。

通过设定阈值，从显著图中筛选出显著性较高的区域，即仪表所在区域^[13]。为了将这一区域的信息转化为可计算的读数，将显著图的三维空间坐标系统投影到二维平面坐标系中，并构建比例尺，以便测量^[14]。在此过程中，通过分析指针所在的具体象限，结合预设的象限与角度对应关系，计算出指针在当前象限内的角度值，利用以下公式将角度值转换为仪表读数：

$$b = \frac{(\alpha - \alpha_{\min}) \cdot (\max E - \min E)^{C(i)}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \quad (5)$$

式中： b 表示识别到的SF6在线仪表读数； α 表示映射到二维平面坐标系中指针在象限内的角度值； $\alpha_{\min}$ 、 $\alpha_{\max}$ 分别表示SF6仪表指针零刻度时对应的最小角度和最大角度； $\max E$ 、 $\min E$ 分别表示SF6仪表的最小量程和最大量程^[15]。

通过上述转换，能够读取SF6仪表的读数，实现基于传感视觉增强的SF6在线仪表读数识别。

4 实验论证

4.1 实验环境及数据集

对于检验所提出的基于传感视觉增强的SF6在线仪表读数识别方法的性能实验环境设计如下。

实验选用型号为HIFA-A4FG78CCD相机作为图像传感器，分辨率为1920×1080，确保能够捕捉到SF6在线仪表的清晰细节。采用均匀分布的LED光源，为图像采集提供稳定且充足的光照条件，减少阴影和反光对图像质量的影响。实验参数设置如下。

4.1.1 传感视觉增强参数

(1) 对比度增强系数：根据图像初始对比度自动调整，设置为2.0。

(2) 锐化滤波器强度：用于增强图像边缘细节，设置为0.3~0.5。

(3) 噪声抑制阈值：设为图像平均灰度值的10%。

4.1.2 机器视觉处理参数

(1) 显著图构建阈值：用于筛选显著性较高的区域，根据实验效果调整，设为0.6。

(2) 轮廓检测灵敏度：控制轮廓提取的精细程度，根据指针和刻度的具体特征调整，设为中等水平。

实验以某变电站SF6仪表为实验对象，SF6仪表型号为KHFA-A4F45，仪表配电输出24VDC，电压设置220V，具体如图2所示。



图2 SF6仪表设备图

在该变电站SF6仪表上安装CCD相机，感知图像上传数据库。实验数据来源于该变电站SF6仪表图像数据库，共计2000张仪表图像。按照以上对图像增强处理，并且通过分割，识别仪表读数，随机选取一个样本，其读数结果如图3所示。

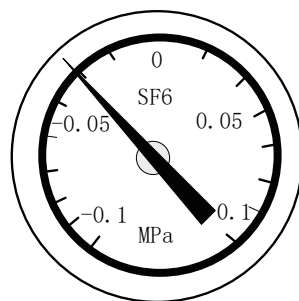


图3 识别结果

图3的实验结果充分展示了基于传感视觉增强的SF6仪表读数识别技术的成效。通过高精度CCD相机捕获的图像，经过深度增强处理后，指针与刻度的清晰度显著提升。随后，机器视觉算法准确分割出目标区域并识别出读数，结果清晰、准确，验证了该技术在复杂环境下的高效性和可靠性，为变电站自动化监测提供了坚实的技术支撑。

4.2 评价指标筛选

为了使此次研究具有一定的参考性和学术性价值，将所提方法与文献[1]提出的基于不规则目标检测的识别方法和文献[2]提出的基于YOLOv8和DeepLabv3+的识别方法对比，对比指标选择错误率和置信度。

在此次实验中将识别结果偏差超过0.1%的定义为错误；置信度可以表征识别结果的可信程度和可靠程度，置信度=95%置信区间样本数量/总识别样本数量，置信度越低，则表示识别精度越低。

4.3 实验结果与讨论

以识别样本数量为变量，图4统计了3种方法在不同识别样本数量下SF6在线仪表读数错误率。以信噪比为变量，图5统计了3种方法在不同信噪比水平下的置信度。

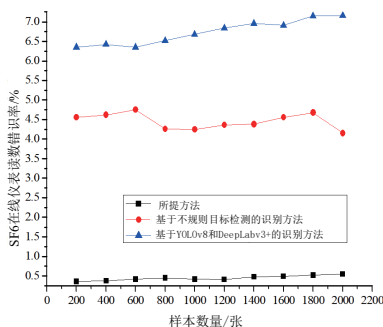


图4 不同方法的SF6在线仪表读数错误率

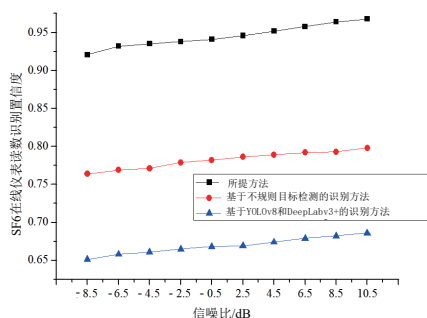


图5 不同方法的SF6在线仪表读数识别置信度

对比图4中数据可以看出，在此次实验中基于YOLOv8和DeepLabv3+的识别方法错误率最高，超过了6%，所提方法错误率最低，不超过1%，数值非常小，基本不存在错误识别问题。通过以上对比分析，证明设计方法更适用于SF6在线仪表读数识别，可以实现对SF6在线仪表读数的精准识别。

5 结语

针对SF6在线仪表读数识别中普遍存在的图像质量问题，提出了一种基于传视觉增强的识别方法。通过高精度CCD相机与传视觉增强技术的结合，显著提升了图像中指针与刻度的对比度与清晰度，克服了传统图像处理方法在复杂环境下的局限性。结合机器视觉技术，该方法能够精确提取并识别仪表图像中的关键信息，实现了对SF6仪表读数的自动化、精准识别。实验结果充分验证了其在实际应用中的有效性和可靠性，为工业自动化监测领域提供了一种高效、准确的解决方案。

参考文献:

- [1] 潘宇强,姚焱,张林,等.基于不规则目标检测的指针式仪表读数识别方法[J].仪表技术与传感器,2024(6):100-105.
- [2] 吴肖,赵洪泉,杨鹏,等.基于YOLOv8和DeepLabv3+的指针仪表读数识别[J].机电工程技术,2024,53(6):240-244.
- [3] 张鑫,李海荣,张国栋,等.基于树莓派的指针式仪表读数自动识别系统设计[J].数据通信,2024(2):12-17+38.

- [4] 张森,万吉林,王慧芳,等.基于注意力机制的卷积神经网络指针式仪表图像读数识别方法[J].电力自动化设备,2022,42(4):218-224.
- [5] 赵伟达,陈海文,郭陆阳,等.基于YOLO-E与改进OCRNet图像分割的变电站仪表读数自适应识别方法[J].电力建设,2023,44(11):75-85.
- [6] 刘林,马云飞,王荷生,等.基于对抗学习的指针仪表自适应读数识别算法[J].燕山大学学报,2024,48(2):165-170.
- [7] 陶金,林文伟,曾亮,等.基于YOLOv4-tiny和Hourglass的指针式仪表读数识别[J].电子测量与仪器学报,2023,37(5):1-10.
- [8] 张鹏程,吐松江·卡日,伊力哈木·亚尔买买提,等.基于YOLOv5与改进VGG-CTC的数字仪表自动读数方法[J].现代电子技术,2023,46(2):107-112.
- [9] 黄知坤,文炜,刘明,等.基于DQN和K-means聚类算法的天然气管站仪表智能识别研究[J].计算机测量与控制,2023,31(5):300-308.
- [10] 王进,简丽娜,孙涛,等.基于Coarse-to-fine注意力机制的指针式仪表读数识别[J].工业控制计算机,2022,35(12):1-3+6.
- [11] 卢佳佳,蔡坚勇.基于增强视觉质量的图像感兴趣区域检测研究[J].计算机仿真,2023,40(1):234-238.
- [12] 金爱萍,袁亮,周德勤,等.基于YOLOv5和U-net的指针式仪表读数识别方法[J].仪表技术与传感器,2022(11):29-33.
- [13] 王康,陆生华,陈潮,等.基于YOLOv5的指针式仪表检测与读数识别算法研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(6):42-47.
- [14] 何琦,张鑫,许晓平,等.基于SSD的数显仪表读数检测系统的字符识别研究[J].数据通信,2022(5):41-49.
- [15] 黄思远,樊绍胜,王子扬.基于CenterNet和DeepLabv3+的变电站指针式仪表读数识别方法[J].电力学报,2022,37(3):232-243.

【作者简介】

叶城源(1999—),男,广东江门人,本科,助理工程师,研究方向:电力设备运维。

李茂林(2000—),男,湖南长沙人,本科,研究方向:电力设备运维。

石国志(2000—),男,广东惠州人,本科,研究方向:电力设备运维。

叶晓彤(1995—),男,广东佛山人,本科,助理工程师,研究方向:电力设备运维。

李剑斌(1983—),男,广东佛山人,本科,工程师,研究方向:电力设备运维。

(收稿日期:2024-08-08)