

基于图像识别的隔离开关触头分合闸状态监测技术

张一茗, 李少华, 姚永其, 张文涛, 王子聪, 李得祥, 程艳杰

(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 随着变电站智能化改造的深入, 操作模式正逐步向高效、安全的“一键顺控”转变。然而, 实现这一模式的关键在于对隔离开关分合闸状态的精准判断。当前, 隔离开关分合闸状态的检测方法存在成本高、适用范围窄等问题。为解决这些挑战并推动变电站的智能化运维, 文中研究了图像识别技术中的模板匹配算法, 实现了隔离开关状态的快速、准确识别与检测。通过引入积分图和图像金字塔技术, 对归一化互相关模板匹配算法进行了加速, 使得单张图像的检测时间大幅缩短至 0.038 s, 同时保持了 98% 的高准确率。进一步, 提出了一种基于边缘特征的模板匹配算法, 将检测时间进一步压缩至 0.015 s, 且准确率稳定在 95% 以上。最终, 设计并实现了一套高效的隔离开关分合闸检测系统, 为变电站的智能化运维提供了有力支持。

关键词: 隔离开关状态检测; 模板匹配算法; 智能化运维

Monitoring Technology for Opening and Closing States of Disconnecter Contacts Based on Image Recognition

ZHANG Yiming, LI Shaohua, YAO Yongqi, ZHANG Wentao, WANG Zicong, LI Dexiang, CHENG Yanjie

(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: With the in-depth intelligent transformation of substations, the operation mode is gradually shifting towards the efficient and safe “one-click sequential control”. However, the key to achieving this mode lies in the precise determination of the open/closed status of disconnect switches. Currently, the detection methods for the open/closed status of disconnect switches suffer from issues such as high costs and a narrow scope of application. To address these challenges and promote intelligent operation and maintenance of substations, this paper investigates the template matching algorithm within image recognition technology, enabling rapid and accurate identification and detection of disconnect switch statuses. By incorporating integral image and image pyramid techniques, the normalized cross-correlation template matching algorithm is accelerated, significantly reducing the detection time for a single image to 0.038 seconds while maintaining a high accuracy rate of 98%. Furthermore, a template matching algorithm based on edge features is proposed, further compressing the detection time to 0.015 seconds with an accuracy rate consistently above 95%. Ultimately, an efficient detection system for the open/closed status of disconnect switches is designed and implemented, providing robust support for the intelligent operation and maintenance of substations.

Key words: disconnect switch status detection; template matching algorithm; intelligent operation and maintenance

0 引言

“一键顺控”通过一键操作, 实现变电站设备的顺序控制和操作, 可以提高操作效率, 减少人为错误, 确保设备的安全可靠运行^[1-3]。对隔离开关触头分合闸状态的准确判断是实现“一键顺控”的重要前提^[4], 但是目前主要还是依靠人工观察触头动作状况来判定分合闸是否到位, 这种方法受主观影响较大, 效率低下且判断结果不可靠。随着计算机视觉技术及图像识别技术的迅猛发展, 机器视觉算法的开发和相关软件与系统的设计越来越受到工业界的重视^[5]。模板匹配技术是机器视觉中的主要研究方向之一, 通过比较待识别图像和模板图像的

特征, 来寻找其中与模板图像相似性最大的区域^[6]。通过匹配模板图像寻找目标物的方法可以大大减少计算量, 提高工作效率。随着智能变电站的不断增多以及智能化改造的不断推进, 通过图像识别技术来实现对隔离开关分合闸状态的检测是未来发展的趋势, 具有重要的工程意义。

现有的隔离开关分合闸检测方法主要有光学感应法、基于压力传感器/姿态传感器的方法、基于辅助触点的方法以及图像识别方法^[7], 其中研究最为广泛的是基于传感器检测的方法, 具有最高的可靠性以及准确性^[8], 但是难以实现隔离开关触头状态的直观可视, 无法与运维检修人员形成较好的交互, 可行度相对较差^[9-11]。图像识别技术的快速发

展为隔离开关分合闸检测提供了更优的解决方案。目前图像识别技术在电力设备方面的应用已经不少。分合闸状态的图像识别在敞开式隔离开关中已有一些应用,但是可见光图像在光照不足、雾霾、雨雪等恶劣天气条件下质量大幅下降,导致特征提取困难,误检率显著升高^[12-14]。针对封闭式组合电器(GIS)内部的隔离开关,传统图像处理方法(如Canny算子、HOG+SVM)在复杂场景下对边缘和细节的处理能力有限,难以适应边缘模糊、噪声污染严重等场景下的处理要求^[15-16]。部分学者尝试将高压隔离开关红外和可见光图像融合起来进行状态识别,但依赖复杂分解网络或多层级联结构,导致计算复杂度高、模型体积大、检测速度慢^[17-18]。部分图像识别方法虽然在一定程度上提高了检测精度,但实时性较差,难以满足变电站对快速响应的需求^[19-20]。有研究利用特征提取及模板匹配算法,实现了对电力变压器的远程视频监控,可以判断设备是否过热,然而却无法自动识别设备的分合位置状态^[21]。也有学者通过树莓派将摄像头信息传给上位机,继而基于OpenCV的目标检测算法,跟踪当前隔离开关触点位置,确定当前的分合状态^[22]。针对隔离开关分合闸检测任务实时性高的要求,有必要研究一种能够兼顾实时性和准确性的方案来实现隔离开关分合闸状态的判断。

文中利用图像识别中的模板匹配技术对隔离开关状态识别与检测算法进行研究,并设计了隔离开关分合闸检测系统。首先,介绍了隔离开关分合闸图像预处理的四大技术,为模板匹配算法奠定基础。其次,采用积分图和图像金字塔对NCC(normalized cross correlation)模板匹配算法进行加速,并提出一种基于边缘特征的模板匹配算法,最终实现了毫秒级的检测。最后,对隔离开关分合闸检测整体算法进行了性能分析并设计了系统的软件界面。试验结果显示,单张图片检测时间仅需0.015 s,准确率达95%。

1 隔离开关分合闸监测装置与图像预处理

1.1 隔离开关分合闸监测装置

可见光监测装置采用OV2640可见光摄像头为传感器,采集隔离开关触头可见光图像信息。OV2640摄像头传感器为200万像素的1/4寸CMOS摄像头,装置与主控采用以太网通信,MCU选择STM32F429IGT6,168 MHz时钟频率保证更快的数据采集与处理速度,自带数字摄像头接口,可通过中断采集可见光摄像头图像数据,由于图像数据较大,外

扩SDRAM弥补内置RAM大小限制。研制的隔离开关分合闸监测装置及其安装方式见图1(装置集成了红外摄像头,本文不涉及故不作赘述)。

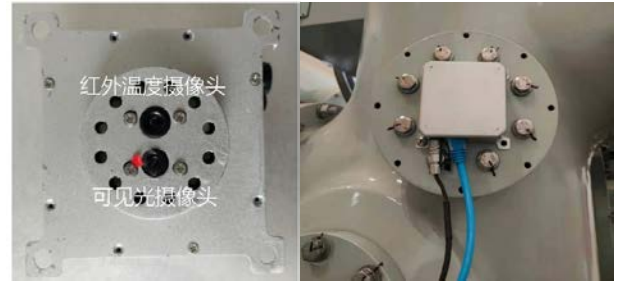


图1 隔离开关分合闸监测装置及其安装方式

Fig. 1 Monitoring device for opening and closing of disconnecter switches and its installation method

1.2 彩色图像灰度化

图像处理的第一步是彩色图像灰度化,节省存储空间的同时加快处理效率。灰度化的过程就是将三通道图像变成单通道图像。常用的灰度化算法有平均值法、加权平均值法、最大值法、最小值法、加权最大值法等。在对比不同算法对于隔离开关分合闸图像的实际处理效果后,发现加权平均值法的均方误差(MSE)最小,峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)最大。故选用该方法进行灰度化处理,处理效果见图2。该方法灰度值的计算公式见式(1)

$$Gray = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.144 \times B \quad (1)$$



(a) 分闸彩色图像

(b) 分闸灰度图像

图2 图像灰度化效果图

Fig. 2 Image graying effect diagram

1.3 滤波与直方图均衡化

图像滤波作为一种改善图像质量的图像增强方法,其利用噪声点像素与其周围像素差异较大的特点来处理图像。通过应用适当的滤波器,可以抑制图像中的噪声。普通工业相机在采集图片时主要是产生高斯噪声,采用取平均值的方式可以抵消高斯噪声的干扰。对比MSE、PSNR、SSIM三项指标,文中采用表现最好的加权均值滤波器 $kernel_3$ 进行消噪,计算公式见式(2),降噪效果见图3。

$$kernel_3 = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

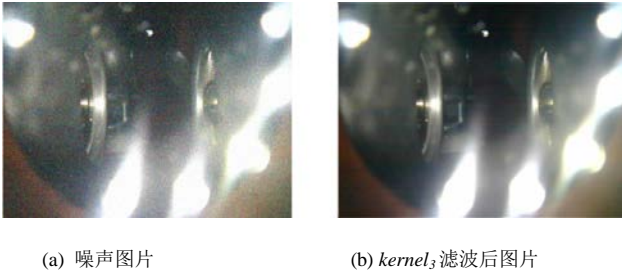


图3 图像滤波效果图

Fig. 3 Image filtering effect diagram

基于直方图的统计信息来重新分配图像像素的亮度值的技术称为直方图均衡化,可以增强图像的对比度,凸显图像细节。直方图均衡化效果见图4。

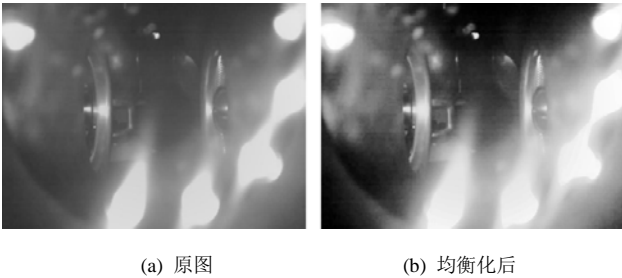


图4 图像直方图均衡化图

Fig. 4 Image histogram equalization diagram

1.4 边缘检测

边缘检测是指在数字图像处理中,通过识别图像中明显的灰度级变化区域来捕捉和突出图像中的边缘或轮廓。边缘检测算法的目标是找到图像中像素值剧烈变化的位置,以此来确定边缘的位置和方向。在隔离开关分合闸检测场景中,需要对边缘进行精确定位,因此,文中采用边缘检测精度较高 Canny 算子来探究基于边缘特征的模板匹配算法。其检测效果见图5。

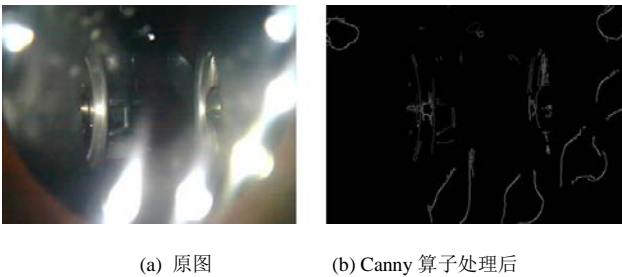


图5 Canny 边缘检测结果图

Fig. 5 Canny edge detection result map

2 模板匹配算法增强

2.1 基于积分图的 NCC 算法加速

归一化互相关(NCC)算法是一种常用于图像处理和计算机视觉中的相似性度量方法。它主要用于模板

匹配,能够评估两个图像或图像区域之间的相似性。NCC 算法通过将模板与待匹配图像的局部区域进行归一化处理,从而消除了光照变化和对比度变化等因素的影响,使得算法具有较好的鲁棒性,十分适合隔离开关分合闸状态监测。NCC 计算公式定义见式(3)。

$$NCC(I,T) = \frac{\sum(I(x,y) - \bar{I})(T(x,y) - \bar{T})}{\sqrt{\sum(I(x,y) - \bar{I})^2 \sum(T(x,y) - \bar{T})^2}} \quad (3)$$

式(3)中: I 为待匹配图像; T 为模板; \bar{I} 、 \bar{T} 分别为其均值。NCC 值的范围在-1 到 1 之间,值越接近 1 表示相似度越高,值接近-1 表示相似度越低。

积分图算法是一种图像处理中常用的算法,用于快速计算矩形区域内像素的总和、平均值、方差等统计量,可以实现 $O(1)$ 的计算复杂度。积分图通过对原始图像的像素值进行累加操作来构建。对于每个像素,积分图中的值等于其左边和上方像素的累积和加上自身的像素值。由图6 可以观察到积分图从上至下、从左至右亮度逐渐增加。



图6 积分图示意图

Fig. 6 Diagram of integral diagram

NCC 算法在计算待匹配图像和模板图像相似度时,大部分时间在求图像的均值和方差。如果采用积分图算法,将图像的均值和方差以积分图的形式保存起来,那么在需要用到这些数值的情况下便可以直接在图中特定位置取相应元素。以模板图像的大小为 100×100 为例,NCC 方法需要计算 1 万次求和运算,而采用积分图后可以减少为 3 次,从而大大提升匹配速度。

2.2 基于边缘特征的模板匹配

NCC 算法属于灰度值算法,虽然具有超高的准确度,但计算量过大,使其在隔离开关分合闸状态检测中的应用受限。为此,考虑采用基于特征的模板匹配方法,相比于像素点,图像特征点(如点、线、面等高级图像单元)的数量要少得多,从而可以大大减少匹配过程的计算量。边缘特征通过描述物体的轮廓及边缘结构来进行模板匹配,十分适合用于隔离开关分合闸状态检测。

基于边缘特征的模板匹配包括两个部分:边缘特征提取和边缘特征匹配。边缘特征提取采用预处理环

节的 Canny 算子；边缘特征匹配则综合 NCC 算法的思想，对方向向量进行归一化处理，从而消除任何光照变化对相似度度量的影响。

2.3 基于图像金字塔的加速匹配

2.1 节和 2.2 节的算法，在不添加其他逻辑的情况下，匹配速度只能达到秒级，依然达不到实时检测的要求。图像金字塔是一种在图像处理领域中使用的多分辨率图像解释方式。它将原始图像分解成一系列不同分辨率的图像，金字塔的顶部是原始图像的最小分辨率，而底部是最大分辨率。通过在金字塔的不同层级上进行分析，可以在不同尺度上获取图像的特征和细节信息。隔离开关的图像金字塔构建采样组图见图 7。

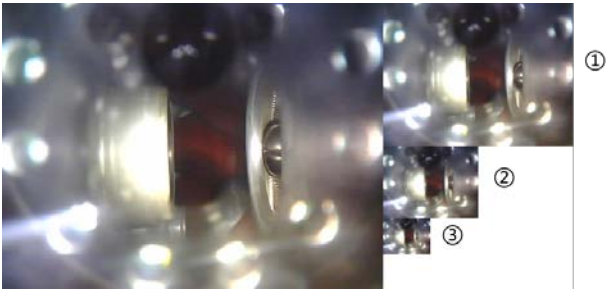


图 7 隔离开关下采样组图示意图

Fig. 7 The schematic diagram of the sampling group under the disconnecter switch

在模板匹配时，先从图像金字塔顶层进行匹配，得到顶层匹配结果后，根据图像金字塔层级之间的关系对顶层的最佳匹配点进行追踪，直到图像金字塔底层。该方法通过在低分辨率图像上进行初步搜索减少了待处理像素数量，降低了计算复杂度；在匹配过程中，金字塔的多层次特性允许逐步细化搜索，避免在高分辨率图像上直接进行耗时的全局搜索。在金字塔搜索策略的加速下，速度得到数量级的提升。

2.4 旋转不变的模板匹配

当目标与模板之间存在显著的角度差异时，匹配结果可能不正确。为了解决目标图像经历未知角度旋转的情况，通过对角度空间进行离散化，利用多个角度的旋转对象进行匹配。这种方法涉及将模板依次与每个旋转对象进行匹配，比较所得到的相似性度量，并确定最佳匹配区域。

在隔离开关分合闸状态检测系统中，为了增加算法的抗干扰性，需要使算法能够对有角度偏移的目标图像进行准确识别。因此，我们首先需要将预剪切的模板图像以多个角度进行旋转。最终旋转后的图像由于部分像素已经出了原始区域，见图 8(a)，这些像素会被舍弃掉，不利于模板的匹配。因此需要对旋转后的图像进行填充处理，见图 8(b)。之后

便以金字塔加速匹配的流程进行。

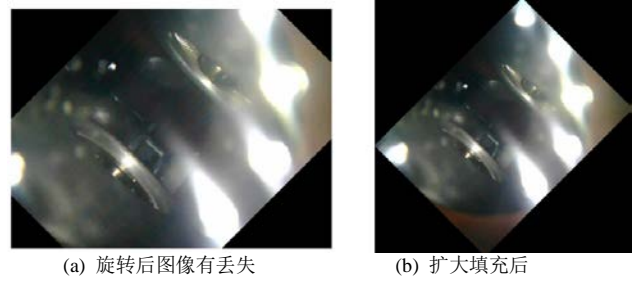


图 8 旋转后图像

Fig. 8 Rotating image

3 隔离开关分合闸检测整体方案

3.1 隔离开关分合闸检测算法设计

在隔离开关分合闸检测系统中，不仅仅只有一种状态，而是需要对分闸、合闸以及中间状态做出判断，而且实际使用中，会出现单相或者三相的情况，因此需要生成多个状态的模板，模板匹配也需要在这多个状态模板上匹配，根据匹配的结果再进行逻辑的判断，进而得到隔离开关的状态。

隔离开关分合闸检测整体算法的步骤如下：

- 1) 读取图像并进行图像预处理操作；
- 2) 使用图 9 所示算法进行模板匹配，得到最佳匹配坐标点和得分值；
- 3) 判断得分值是否大于阈值，如果得分值小于设定的阈值，就需要继续匹配下一个模板，最终实现逻辑判断。

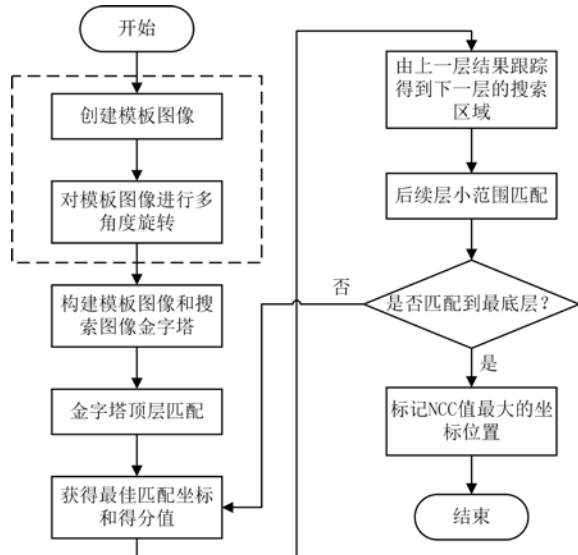


图 9 模板匹配算法流程

Fig. 9 The template matching algorithm process

3.2 实验检测及结果分析

算法的评价指标为匹配准确率和匹配时间。匹配的准确率定义为隔离开关分合闸状态准确识别的图片数量占总图片数量的比例，具体做法为在真实的

GIS 上用研制的图像检测装置收集 100 张隔离开关分合闸状态样本图片, 其中分闸 40 张、合闸 40 张以及中间状态 20 张。记录每张图片的检测结果, 并计算了准确识别的图片数量占总图片数量的比例。匹配时间定义为平均检测一张图片所需要的时间。本文在相同测试环境(处理器为 AMD Ryzen 7 4800H)下, 对 100 张样本图片进行检测。

由表 1 数据可知, 文中检测的所有算法准确率均高于 95%, 这得益于 NCC 算法的归一化思想。在积分图算法和金字塔匹配策略的加持下, NCC 算法能够明显加快匹配速度, 实现了毫秒级的检测。基于边缘特征的模板匹配算法因为不需要对模板图像中的每一个像素进行比较, 相比于 NCC 算法, 可以有效缩短匹配时间; 但由此带来的是图像边缘质量不好时的检测出错。

表 1 算法性能对比表

Table 1 Algorithm performance comparison table

匹配算法	匹配准确率/%	平均耗时/s	最大耗时/s	最小耗时/s
NCC	98	667.100	688.900	654.700
NCC+积分图	98	0.598	0.609	0.590
NCC+积分图+金字塔	98	0.038	0.039	0.038
边缘特征	95	0.243	0.391	0.129
边缘特征+金字塔	95	0.015	0.024	0.008

综上所述, 在追求极高的准确率的使用场景下, 可以考虑采用经积分图和图像金字塔加速的 NCC 算法; 在追求极致速度且图像的边缘较为规则的使用场景下, 可以考虑采用基于边缘特征的算法。在隔离开关分合闸检测系统中, 由于对准确率的要求极高, 故而采用经积分图和图像金字塔加速的 NCC 算法。

为了使得算法更能适应实际运行环境下的各种干扰, 文中在模板匹配算法上基础上配备了旋转不变的模板匹配。不同旋转角度的准确率见表 2。

表 2 不同旋转角度的准确率

Table 2 Accuracy of different rotation angles

旋转角度	传统 NCC 准确率/%	旋转不变 NCC 准确率/%
0°	98	98
1°	89	98
2°	85	98
5°	36	98
10°	34	98
20°	34	98

从表 2 可以看到, 当旋转角度来到 5°及以上时, 传统 NCC 准确率大幅下降, 最终下降到 33%左右, 这是因为样本图片中大约有三分之一的图片是中间状态的图片, 算法相当于做了排除法, 因此还是能够得到 33%左右的水平。反观旋转不变的 NCC, 能够抵抗角度的变化, 基本保持恒定的准确率。

3.3 隔离开关分合闸检测系统软件设计

隔离开关分合闸检测系统软件, 搭载基于 NCC 的模板匹配算法和基于边缘特征的模板匹配算法, 集图片上传、处理及检测于一体, 利用现有的通讯方式以及软件编程, 使得隔离开关图像能够得到在线检测, 为电力系统的自动化、智能化提供有效的辅助支撑, 提高运维人员的工作效率。界面总体设计功能框架图见图 10。

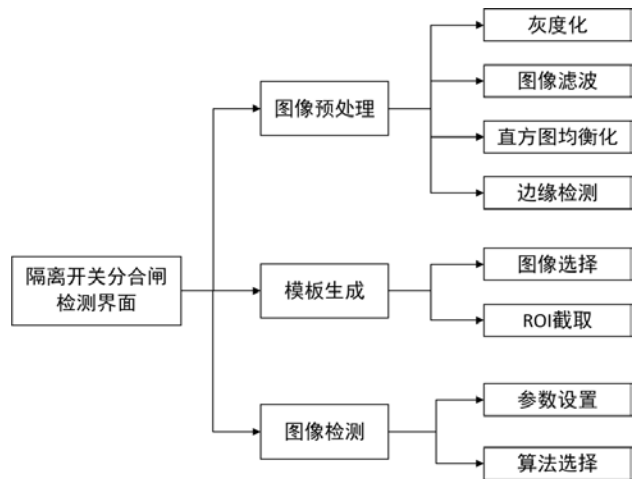


图 10 软件总体设计功能框架图

Fig. 10 Interface overall design function frame diagram

隔离开关分合闸检测系统模板生成界面见图 11(a), 可以辅助创建模板图像。隔离开关分合闸检测系统模板匹配界面见图 11(b), 可选取不同的模板匹配算法, 并调整相关参数。



(a) 隔离开关分合闸检测系统模板生成软件界面



(b) 隔离开关分合闸检测系统模板匹配软件界面

图 11 软件系统界面

Fig. 11 Soft system interface

4 结论

为了实现对隔离开关分合闸状态的准确判断，文中基于模板匹配技术对隔离开关状态识别与检测算法进行研究，并设计了隔离开关分合闸检测系统。文中通过研究得出以下结论：

1) 图像预处理技术能够提高隔离开关图像的质量以及图像识别的准确率。文中对隔离开关图像采取的图像预处理技术主要有图像灰度化、图像滤波、直方图均衡化以及边缘检测。

2) 通过采用积分图和图像金字塔对 NCC 算法进行加速，在不降低识别准确率的情况下，实现了毫秒级的检测速度，同时能够不受光照和角度变化的影响。

3) 通过提取隔离开关图像的边缘特征作为模板模型进行匹配，可以进一步提高模板匹配的速度。单张图片检测速度仅需 0.015 s，准确率达 95%。

参考文献：

- [1] XIONG Zaibao, GAN Xing, GAO Yu, et al. Study on application of one key sequence control in 750 kV substation[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). [S.l.]: IEEE, 2021: 269-274.
- [2] WANG Cheng, FU Zhixin, ZHANG Zheng, et al. Fault diagnosis of power transformer in one-key sequential control system of intelligent substation based on a transformer neural network model[J]. Processes, 2024, 12(4): 824.
- [3] ZHANG Mingming, HU Jin, GUO Hongwei. Design of digital one key sequential control method for disconnectors[C]//2023 3rd International Conference on

Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT). [S.l.]: IEEE, 2023: 502-507.

- [4] 侯永全, 马立方, 方涛, 等. 基于电磁感应原理的隔离开关分合到位判断方法[J]. 广东电力, 2023, 36(2): 1-9.

HOU Yongquan, MA Lifang, FANG Tao, et al. Judgment method of disconnecting switch in position based on electromagnetic induction principle[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(2): 1-9.

- [5] 肖苏华. 机器视觉技术基础 Halcon 版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.

XIAO Suhua. Machine vision technology Halcon version[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.

- [6] ZHANG Xuyao, LIU Chenglin, SUEN C Y. Towards robust pattern recognition: A review[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 894-922.

- [7] 毛文奇, 王舶仲, 蒋毅舟, 等. 高压隔离开关分合闸位置监测技术的研究综述及展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 112-119.

MAO Wenqi, WANG Bozhong, JIANG Yizhou, et al. Summary and prospect of breaking-closing position monitoring method for high voltage disconnecter[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 112-119.

- [8] 陈富国, 蔡敏, 尹军华, 等. 基于姿态传感器的隔离开关位置监测系统设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2019(3): 101-105.

CHEN Fuguo, CAI Min, YIN Junhua, et al. Design and implementation of disconnect switch position monitoring system based on attitude sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(3): 101-105.

- [9] 李可萌, 陈富国, 杨晖, 等. 基于姿态传感器的高压隔离开关机械故障智能诊断研究[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3781-3790.

LI Kemeng, CHEN Fuguo, YANG Hui, et al. Intelligent diagnosis for mechanical faults of high voltage disconnecter based on attitude sensor[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3781-3790.

- [10] 袁欢, 孙正可, 王露缙, 等. 基于姿态感知系统的隔离开关故障诊断[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 47-57.

YUAN Huan, SUN Zhengke, WANG Lujin, et al. Fault diagnosis of disconnecter based on attitude sensing system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 47-57.

- [11] 张晋波, 李可萌, 叶哲, 等. 基于姿态角与速度曲线的高压隔离开关故障诊断[J]. 高压电器, 2025, 61(6): 32-42.

- ZHANG Jinbo, LI Kemeng, YE Zhe, et al. Fault diagnosis of high voltage disconnecter based on attitude angle and speed curves[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(6): 32-42.
- [12]王德文. 变电站高压隔离开关分合异常状态 ASO 识别算法[J]. 西安邮电大学学报, 2025, 30(6): 77-84.
WANG Dewen. ASO recognition algorithm for abnormal opening and closing states of high-voltage isolation switches in substations[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2025, 30(6): 77-84.
- [13]申张亮, 陈旖旎, 杨 阳, 等. 基于多特征图谱和 CNN-BKA-LSSVM 的隔离开关故障诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(7): 710-720.
SHEN Zhangliang, CHEN Yini, YANG Yang, et al. Fault diagnosis method for disconnecter based on Multi-Characteristic map and CNN-BKA-LSSVM[J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(7): 710-720.
- [14]郭双权, 郝 欢, 王 阳. 基于 HOG 特征的隔离开关红外图像故障识别方法[J]. 红外技术, 2025, 47(2): 243-249.
GUO Shuangquan, HAO Huan, WANG Yang. Infrared image fault recognition method for disconnecter based on HOG features[J]. Infrared Technology, 2025, 47(2): 243-249.
- [15]肖中阳, 郭 旭, 秦若锋, 等. 基于 GIS-SegFormer 的 GIS 隔离开关状态监测应用[J]. 高压电器, 2025, 61(10): 71-81.
XIAO Zhongyang, GUO Xu, QIN Ruofeng, et al. Application of GIS disconnecter status monitoring based on GIS-SegFormer[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(10): 71-81.
- [16]王 昊, 邓福亮, 董晓崇, 等. 基于数学几何法的 GIS 设备故障图像检测的研究[J]. 电工技术, 2022(23): 72-75.
WANG Hao, DENG Fuliang, DONG Xiaodong, et al. Research on GIS equipment fault image detection based on mathematical geometry method[J]. Electric Engineering, 2022(23): 72-75.
- [17]张 平, 杨 天, 李志军. 基于图像融合的高压隔离开关状态识别技术研究[J]. 高压电器, 2025, 61(10): 139-148.
ZHANG Ping, YANG Tian, LI Zhijun. Research on state recognition technology of high-voltage disconnectors based on image fusion[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(10): 139-148.
- [18]张 靖, 单长吉, 周 丽, 等. 基于图像融合的高压隔离开关分合闸状态识别[J]. 红外技术, 2024, 46(5): 539-547.
ZHANG Jing, SHAN Changji, ZHOU Li, et al. Recognition of high-voltage isolation switch opening and closing state based on image fusion[J]. Infrared Technology, 2024, 46(5): 539-547.
- [19]刘善峰, 毛万登, 李苗苗, 等. 基于跨模态多层次特征融合的电力设备检测算法[J]. 红外技术, 2025, 47(7): 884-894.
LIU Shanfeng, MAO Wandeng, LI Miaomiao, et al. Cross-modal multilevel feature fusion-based algorithm for power-equipment detection[J]. Infrared Technology, 2025, 47(7): 884-894.
- [20]刘子元. 面向变电站电气设备检测的无监督图像融合网络研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2025.
LIU Ziyuan. Research on unsupervised image fusion networks for electrical equipment detection in substations[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2025.
- [21]唐芳莉. 图像识别技术在电力设备监测中的应用[J]. 通信电源技术, 2019, 36(1): 94-95.
TANG Fangli. Application of image recognition technology in power equipment monitoring[J]. Telecom Power Technologies, 2019, 36(1): 94-95.
- [22]ZHAO Wenhan, WEN Feng, HAN Chen, et al. Development of GIS switch state judgment system based on image recognition[J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2065(1): 012009.
- 张一茗(1983—), 男, 正高级工程师, 研究方向为高压开关设备智能化、数字孪生技术等 (E-mail: yiming0321@163.com)。
李少华(1985—), 男, 高级工程师, 通信作者, 研究方向为高压开关设备智能化技术研究及产品研制 (E-mail: lishaohua@163.com)。