

[开关设备]

基于图像处理的操动机构箱内异物检测方法

文/马栋良 张文涛 姚永其 张一茗 宋广民
平高集团有限公司

随着操动机构装置在高压开关设备中的广泛应用，装置的可靠性和稳定性越来越受到关注。针对机构箱状态评估依赖大量标注数据、难以工程应用等问题，提出了一种基于图像处理的机构箱底部异物检测方法。试验结果表明，方法在操动机构箱底部异物检测中的准确率为87.7%，具有较强的鲁棒性。

随着操动机构装置在柱式断路器、气体绝缘金属封闭开关设备（Gas Insulated Switchger, GIS）等高压开关设备中的广泛应用，其可靠性与安全性也引起了电网公司及设备厂家的广泛关注。现有的操动机构装置的监测系统大多是对操动机构箱振动数据或传动机构的编码器数据进行监测分析，这种监测装置及识别方法需要在断路器动作情况下进行数据采集及故障判别，并不能实现真正意义上的在线监测。正常情况下，挂网运行后操动机构动作很少，难以收集到足够的正常数据和故障数据来支撑相关诊断算法对操动机构真实情况的分析判断。

针对上述操动机构装置状态检测存在的问题，有文献提出了一种基于卷积神经网络的断路器机构箱内部锈蚀状态的检测方法。该方法虽然能够检测出机构箱内部关键零部件的锈蚀状态，但构建模型需要大量带有标注的机构箱内部锈蚀图像数据，因此在工程应用中实用性不强。还有一类基于图像处理的操动机构运动特性检测方法，该方法主要使用高速相机拍摄操动机构动作时关键零部件的运动情况并进行图像处理。这种方法虽然对操动机构故障的识别准确率很高，但因高速相机成本过高、安装

条件限制等因素很难推广使用。

在操动机构装置运行的过程中，机构箱内部会因为振动、故障等产生一定的异物掉落，通过检测机构箱内部是否有异物掉落反映装置的真实运行状态。目前还没有对机构箱底部异物进行自动检测的应用案例。为进一步满足操动机构箱状态全感知的应用需求，克服之前研究中的缺点，本文提出了一种机构箱底部异物识别算法。该算法能够自动提取弹簧操动机构箱内部图像的相关特征，然后利用连通域标记算法检测机构箱底部所有物体，最后通过不同连通域的面积筛选出是否有异物及异物的坐标位置。

检测算法整体结构

针对操动机构箱内部异物检测的问题，本文设计了一种机构箱底部异物检测算法。该算法主要由图像预处理、二值化图像分割以及标记连通域三部分组成。其总流程如图1所示。

检测算法的主要步骤：

1) 对得到的彩色图像进行灰度化，得到灰度图；进一步剪裁得到机构箱内部底部图像。

基金项目：平高集团有限公司科技项目 PGKJ2020-023

2) 对灰度图像进行自适应阈值分割, 得到二值化图像。

3) 对二值化图像进行腐蚀操作, 消除噪声以及小物体的干扰。

4) 标记所有图像中的连通域, 根据连通域的面积对所有连通域进行筛选, 判断是否有异物掉落。

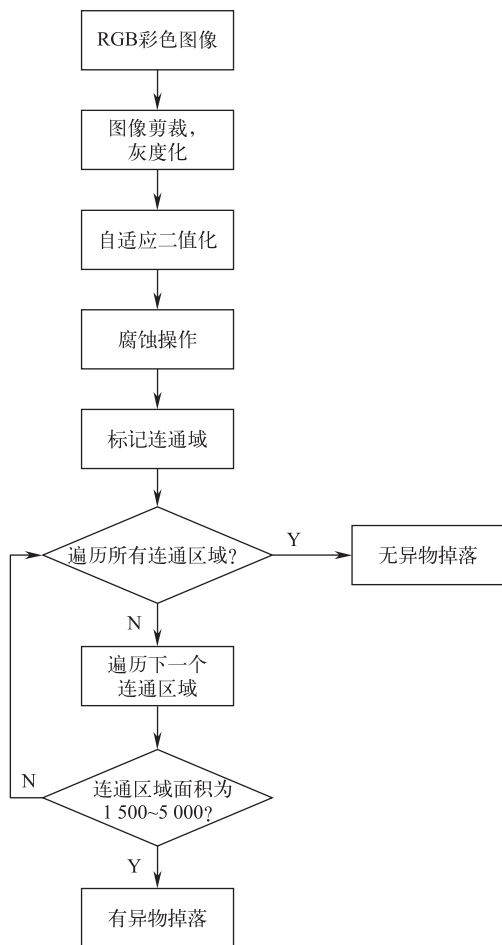


图1 算法总体流程图

机构箱底部图像分割算法

1. 图像与处理方法

对于机构箱底部异物检测而言, 算法更关注的是不同物体的轮廓及相对位置信息, 图像的彩色信息并不重要。因此首先将采集到的原始RGB图像灰度化。设采集到的原始图像中三个彩色通道的权重矩阵分别为 R 、 G 、 B , 灰度化之后的图像亮度矩阵为 F , 则图像中任意一点的灰度化公式为

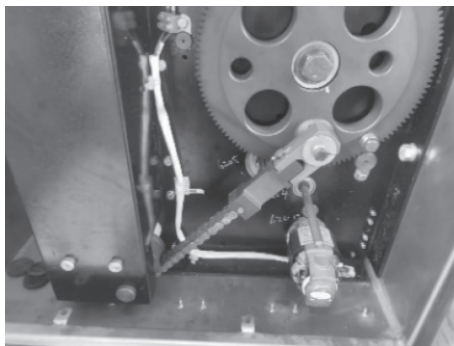
$$F(i, j) = 0.3R(i, j) + 0.59G(i, j) + 0.11B(i, j) \quad (1)$$

由于算法的目的是检测机构箱底部是否存在异

物, 图像上半部分包含的信息对算法后面的处理作用不大。为了进一步提高图像处理算法的准确率, 应先对图像进行剪裁, 只保留机构箱内底部的图像。经过灰度化及剪裁后的图像效果如图2所示。



原始采集图像



灰度化图像



剪裁图像

图2 图像灰度化及剪裁效果

2. 二值图像分割

弹簧操动机构箱内部机械结构非常复杂, 采集到的图像中同时包括储能电动机、传动机构、固定螺栓等。为了进一步区分弹簧操动机构箱内部本身的机械结构物体与因各类故障异常产生的异物, 需要先对剪裁后的灰度图像进行二值化分割。

灰度图像的二值化分割方法本质上都是阈值分割。设待分割的灰度图像为 F , 分割的阈值为 T_0 , 分割后的二值化图像为 I , 则对于灰度图像 F 的任意一个像素来说, 二值化分割方法的公式为

$$I(i, j) = \begin{cases} 0 & F(i, j) < T_0 \\ 255 & F(i, j) \geq T_0 \end{cases} \quad (2)$$

不同的二值化分割方法在于不同像素点上阈值

的选取方法不同。常用的图像处理方法有双峰法、P参数法、大津法等。大津法（OTSU）是一种确定图像二值化分割阈值的算法，由日本学者大津于1979年提出，该方法又称作最大类间方差法。大津法计算出的阈值使前景与背景图像类间方差最大，是一种效果很好的自适应阈值算法。大津法的主要流程如图3所示。

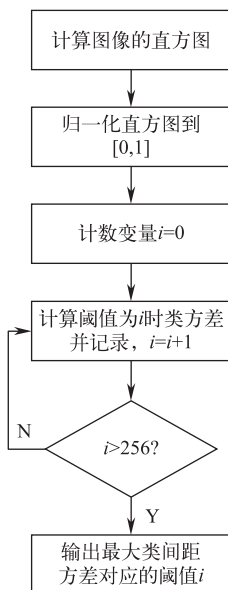


图3 大津法主要流程

首先计算灰度图像的直方图，然后将其归一化至[0,1]的区间内。通过遍历灰度图中的每个灰度等级，计算出不同分割阈值下灰度图像分割后的像素间类方差。最后通过计算像素间类方差的最大值即可得到最适合灰度图像的分割阈值。

使用大津法对剪裁后的灰度图像进行二值化分割，其效果如图4所示。



图4 阈值分割效果图

3. 图像腐蚀

由于弹簧操动机机构箱内部机械结构过于复杂，分割后的图像仍具有一些干扰区域。这些干扰区域

有可能会在后续图像处理中被当作异物处理，因此需要进一步消除这些干扰区域。腐蚀运算是图像处理中形态学运算的一个常用运算，其作用通常为缩小目标区域范围，去除无用的小目标及噪声。设 A 为待腐蚀的图像矩阵， B 是腐蚀模板，则图像腐蚀操作可以描述

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \in A\} \quad (3)$$

腐蚀方式有水平腐蚀、垂直腐蚀及全方向腐蚀三种。由于机构箱底部图像干扰来源较为复杂，为消除由于分割算法产生的小连通域及噪声，使用 5×5 全方向腐蚀的方式进行，其腐蚀矩阵为

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

使用全腐蚀方式对剪裁后的灰度图像进行处理，其效果如图5所示。

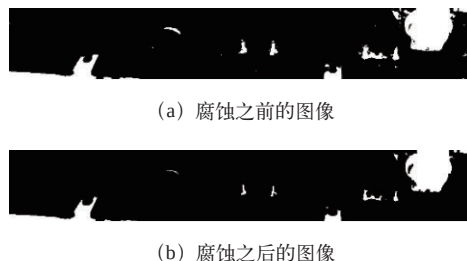


图5 图像腐蚀效果图

机构箱底部异物检测

通过对图像的二值化分割及腐蚀操作，已经初步对机构箱底部物体进行了分割。为了进一步对不同物体进行标记，区分机构箱中的正常物体与异物，算法对二值图像中所有的连通区域进行标记。连通域标记有4连通和8连通两种方式。4连通只能标记与中心点在同一条水平或竖直直线上的像素点，而8连通可以标注中心点周围的所有点。由于异物的形状不一定是规则物体，因此本算法采用8连通的方式进行连通域标记。通过连通域标记可以更准确地区分不同物体，同时将在图像上相邻但实际上不是一个物体的区域分离开。

使用不同颜色对图像中的连通域进行标记，其效果如图6所示。从图6可以看出，不同颜色标记的

连通域形状、面积均不相同。机构箱底部本身已有一些固体物体，经过观察这些物体，所占的面积都较大或是较小。因此，算法应查找面积介于中间值的连通域，如果有则说明有异物掉落，如没有则说明正常。经过程序实际验证证明，效果最好的判断异物的面积阈值定为1 500~5 000。



(a) 原始二值图像



(b) 连通域标记示意图

图6 连通域标记示意图

实验验证

1. 算法验证

本文将平高CT601-2型弹簧操动机构作为主要实验对象，使用OV5640摄像头作为图像采集的传感器，使用STM32F103作为主控芯片控制传感器进行拍照。实验现场布置如图7所示。



图7 现场实验布置图

实验中主要模拟了操动机构在实际运行过程中因振动等因素产生的异物掉落。由于正常运行过程中机构箱总体始终保持封闭状态，因此机构箱底部产生的异物绝大多数来源于机构箱内部的零件等异物掉落。因此，本文通过将机构箱传动结构中相同尺寸的螺栓（银色M12螺栓）放置在机构箱底部来模拟螺栓掉落这一典型操动机构故障场景。在机构箱底部有异物和没有异物的情况下算法的关键步骤效果如图8所示。通过中间结果的图像可以看出，本文提出的算法能够准确地识别出掉落在机构箱底部的螺栓。

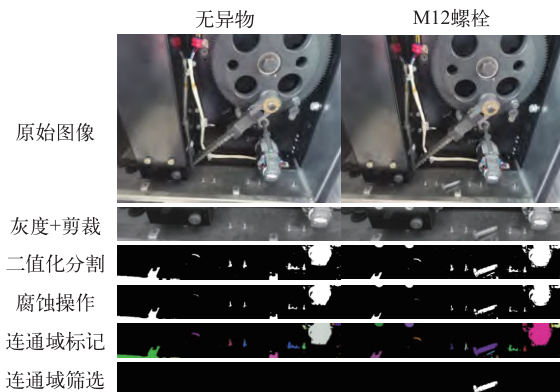


图8 异物检测算法关键步骤对比图

为进一步验证算法的鲁棒性，在实验中还在不同光照情况下模拟了黑色M6螺栓、M10螺母掉落至机构箱底部的场景，并使用本文提出的算法进行检测，其关键步骤效果如图9所示。

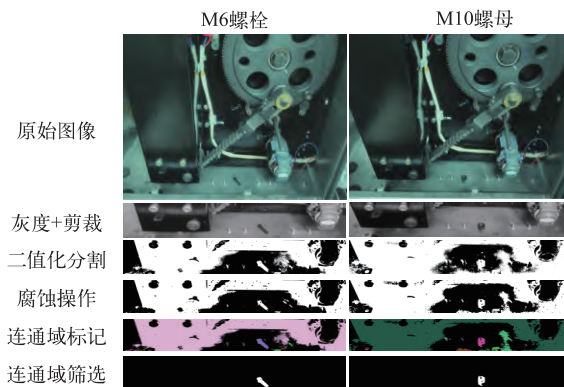


图9 不同实验场景算法关键步骤效果图

综合上述两类实验场景，算法的准确率统计结果见表1。实验结果表明该算法综合准确率能够达到87.7%。

表1 异物识别准确率结果

场景	M12螺栓	M6螺栓	M10螺母	无异物	总计
图像数量/张	25	28	21	7	81
正确识别的图像数量/张	23	24	18	6	71
识别准确率 (%)	92	89.3	81	85.7	87.7

2. 工程化应用

为进一步提高算法的可用性，更好地适用于工程应用，本文基于PyQt5设计了一套桌面软件，并将上面介绍的算法使用Python与OpenCV实现并嵌入至软件中。软件的操作界面如图10所示。



图10 算法软件效果图

该软件有历史图像数据分析及实时图像数据分析两种功能。在历史图像数据分析模式下，用户可以选择之前拍摄好的图像，算法会对其进行分析并输出对应的识别结果。在实时图像数据分析模式下，用户首先需要使用网线连接传感器主控板与软件运行的个人计算机（PC），当主控板采集图像数据后会通过RJ45接口上传至PC，软件会自动检测到有图像上传处理。经过现场运维、实验人员试用，该软件能够满足操动机构箱异物检测识别日常需求。

结束语

为进一步满足操动机构箱状态全感知的应用需求，实现高压开关设备的智能化、数字化，本文提出了一种基于图像处理的操动机构箱底部异物检测算法。该算法通过对分割后的二值图像进行连通域标记识别机构箱底部的不同物体，通过筛选出面积在指定范围内的连通域检查出机构箱底部是否存在异物。通过现场模拟不同尺寸螺栓、螺母掉落这一典型操动机构故障异物场景，验证了算法的有效性和鲁棒性。今后应进一步提高算法的普适性，争取将其应用在更多型号的操动机构箱上。EA

(收稿日期：2023-11-02)

参考文献

- [1] 郁鸿儒. 高压隔离开关操动机构状态检测技术的研究[D]. 南京：东南大学，2019.
- [2] 唐喜，叶志祥，任雁铭，等. 一种新型的高压开关综合在线监测IED设计与研制[J]. 高压电器，2019，55(2)：97-103.
- [3] Razi-Kazemi A A, NIAYESH K, NILCHI R. A probabilistic model-aided failure prediction approach for spring-type operating mechanism of high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4)：1280-1290.
- [4] 杨鼎革，丁彬，高健，等. 基于图像深度学习的高压断路器操动机构锈蚀状态评估[J]. 电工电能新技术，2022，41(5)：71-79.
- [5] 钟建英，刘煜，陈培军，等. 基于图像处理的操动机构运动特性检测[J]. 大连交通大学学报，2022，43(5)：76-81.
- [6] 段晓辉，王文博，陈培军，等. 基于LabVIEW的断路器操动机构运动速度检测[J]. 广东电力，2021，34(12)：74-79.
- [7] 胡学龙. 数字图像处理[M]. 4版. 武汉：电子工业出版社，2020.
- [8] 张洪超. 基于大津法和区域生长法结合的彩色图像分割方法研究[D]. 济南：山东师范大学，2016.
- [9] 任喜伟，何立风，宋安玲，等. 基于连通域标记的原油乳状液粒径检测算法[J]. 计算机应用与软件，2021，38(7)：196-201.
- [10] 沈建忠，孙雷. 基于图像识别的变电站核相验电操作机械臂研究[J]. 电气应用，2021，40(8)：48-55.

