

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107565

# 基于改进稀疏表示的变电站保护压板状态辨识\*

李镇翰 舒征宇 高 健 姚景岩  
(三峡大学 电气与新能源学院 宜昌 443002)

**摘要:** 鉴于保护屏柜柜门的镜面反射,导致通过图像识别压板状态准确率较低的问题。提出一种基于改进稀疏表示的变电站保护压板状态辨识方法,在消除高光干扰的基础上,实现压板状态辨识。针对高光干扰问题,首先利用二维最大类间方差法检测图像中的高光区域,然后改进稀疏表示修复算法,实现对图像中高光干扰的消除。对于修复后图像,再根据最小外接矩形法对保护压板进行状态辨识。最后,通过有无高光干扰的两组对照仿真分析检验了所提方法的有效性和准确性。其中,其中对无高光干扰的200个不同型号的压板样本进行状态辨识,最小外接矩形法的准确率为98.0%,优于倾角辨识法的83.5%,对存在高光干扰的240个图像样本采用改进稀疏表示算法进行状态辨识,其准确率可以达到97.92%。

**关键词:** 稀疏表示;压板;状态辨识;高光消除

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Status identification of substation protection plate based on improved sparse representation

Li Zhenhan Shu Zhengyu Gao Jian Yao Jingyan

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In view of the specular reflection of the protection panel and cabinet door, the accuracy of identifying the protection plate state through image is low. A state identification method of substation protection platen based on improved sparse representation is proposed. On the basis of eliminating high light interference, the platen state identification is realized. Aiming at the problem of highlight interference, firstly, the two-dimensional maximum interclass variance method is used to detect the highlight region in the image, and then the sparse representation repair algorithm is improved to eliminate the highlight interference in the image. For the repaired image, the state of the protective pressing plate is identified according to the minimum circumscribed rectangle method. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed method are verified by two groups of comparative simulation analysis with or without highlight interference. Among them, for 200 different types of platen samples without high light interference, the accuracy of the minimum external rectangle method is 98.0%, which is better than 83.5% of the inclination identification method. For 240 image samples with high light interference, the improved sparse representation algorithm is used for state identification, and the accuracy can reach 97.92%.

**Keywords:** sparse representation; plate; state identification; highlight elimination

## 0 引 言

随着电网智能化水平的不断提高,自动化设备和辅助设备的不断增多,国内外关于变电站智能巡检的相关研究也在不断深入,如何准确地对电气设备状态进行辨识成为了当前该领域的热点问题<sup>[1]</sup>。

按照研究对象进行分类,智能巡检的研究可以分为一

次设备和二次设备。一次设备巡检研究主要集中在红外图像的温度检测、设备外观的异常辨识,例如:绝缘子故障检测<sup>[2-3]</sup>、螺栓缺销检测等<sup>[4]</sup>;在二次设备巡检研究中,根据实现方式的不同,可以分为传感器监测<sup>[5]</sup>和基于图像识别的状态辨识。其中,文献[6]通过设计辅助触点监测压板状态;文献[7]通过终端装置采集实时开关量,并对比规则库完成压板的状态校核;文献[8]利用图像融合的思想,解决

收稿日期:2021-08-12

\* 基金项目:国家自然科学基金(61876097)项目资助

了拍摄角度偏移导致影响压板状态识别准确率的问题;文献[9]根据压板在不同工作状态下的形态特征,通过对图像进行二值化处理获取角度特征进而实现状态辨识;文献[10]提出一种排列分析算法,实现对保护压板图像的分割与辨识;文献[11]提出引入注意力机制,改进SSD算法,并通过训练压板样本,实现状态识别。综合以上,两种技术方案相较而言,传感器价格较高,且影响屏柜结构,适用于一次设备的监测,变电站中由于存在视频监控设备和巡检机器人,因此在二次设备巡检中,图像识别更为适用,而目前对保护压板的图像识别方法虽然都能在一定程度上实现状态辨识,但是较少考虑到保护屏柜柜门产生高光干扰导致的辨识结果准确率影响问题,在实际生产中仍然存在着局限性。

鉴于此,本文以图像处理技术为基础,针对保护图像中存在的高光干扰进行去噪优化,提出一种基于改进稀疏表示的保护压板状态辨识方法。首先通过二维最大类间方差法实现对采集图像中高光干扰区域的检测,其次引入Sobel算子改进稀疏表示算法修复图像中存在的高光干扰,然后利用最小外接矩形法完成压板运行状态的辨识,最终通过对照实验结果表明,所提方法能够有效消除高光干扰,提高对压板状态辨识的准确率。

## 1 基于Graham最小外接矩形的压板运行状态辨识

### 1.1 Graham算法原理

为了让压板的状态辨识更加准确,就要让图像中压板在不同状态下提取的特征差异最大化,因此选择最小外接矩形法:通过压板的最小外接矩形(MER)的面积来判断此时的工作状态,可以简化计算的同时,保证状态辨识的准确率。

如图1所示,Graham算法又称凸包算法<sup>[12]</sup>,这类算法因其求解时间短、求解结果准确而被广泛使用,该算法的步骤如下。

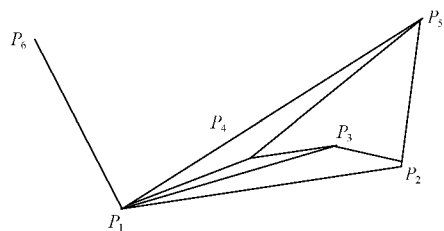


图1 Graham算法原理

1)在平面坐标中,最下方的点一定在凸包上,即纵坐标最小的点,即图中点 $P_1$ 。

2)以点 $P_1$ 为原点,计算其他所有点与 $P_1$ 在水平方向上的夹角,根据几何关系,角度最大的点和最小的点都在凸包上,即点 $P_2$ 和 $P_6$ ,并将 $P_1$ 、 $P_2$ 入栈,即凸包上最小的两个点。

3)连接原点 $P_1$ 和栈顶点,构成直线 $L$ ,若点 $P_i(i \geq 3)$ 在直线右侧,则执行步骤4),若在直线上或者左侧,则执行步骤5)。

4)栈顶元素不在凸包上,出栈,并回到步骤3)。

5)当前点在凸包上,压入栈中。

6)遍历所有点集直至最后一个元素。

### 1.2 基于Graham最小外接矩形的压板运行状态辨识

本文通过基于Graham的最小外接矩形的方法来检测对比压板开关运行时的最小外接矩形面积来判断压板的运行状态。其具体实现步骤如下。

步骤1:通过Canny算子得到压板图像的边缘轮廓点,并存入二维点集中。

步骤2:选取二维点集中任意一个没有被选取的边缘点集 $S_l(l=1, 2, \dots, p)$ ,通过Graham算法原理求出点集 $S_l$ 的凸包。

步骤3:以与最小外接矩形重合的边为凸包的起始边,并以该边的直线投影的正负方向上最远和距离最远确定矩形的三点。

步骤4:判断凸包上所有边是否都被计算,是则执行下一步,否则选择下一条边,转到步骤3。

步骤5:比较所有记录的矩形的面积,转到步骤2选取下一个未被选取过的边缘点集,直到所有边缘点集被选取。

步骤6:设置状态为投入的压板中的最大面积 $S_1$ 。压板不同工作状态如图2所示。

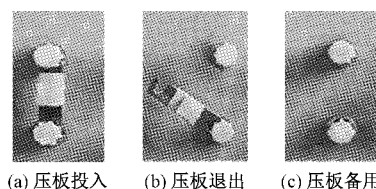


图2 保护压板图像

其中图2(a)为投入状态,(b)为退出状态,(c)为备用状态。根据凸包算法确定的矩形,计算出投入状态压板的矩形面积阈值为 $S_1$ ,根据图像特征,则备用压板的面积阈值为 $S_2 = 2/3 \cdot S_1$ 。判断此时压板的外接矩形面积 $S$ ,若 $S > S_1$ ,则判定压板的工作状态为退出;若 $S_2 < S \leq S_1$ ,则判定压板的工作状态为投入;若 $S \leq S_2$ ,则判定压板的状态为备用压板。

### 1.3 智能巡检中存在的高光干扰分析

在实际生产中,存放压板的保护柜大多是采用玻璃作为柜门,这样一方面可以较好的保护设备,另一方面可以方便运维人员在不打开柜门的情况下查看压板的投退状态,其目的是减少运维人员在检查设备运行状态时误动压板。但在开展智能巡检时,玻璃柜门受到室内光源、中控室玻璃反射光的照射影响极易产生镜面反射,从而使得采集到的图片中含有高光干扰,影响压板的运行状态辨识。存在高光干扰的压板图像如图3所示。

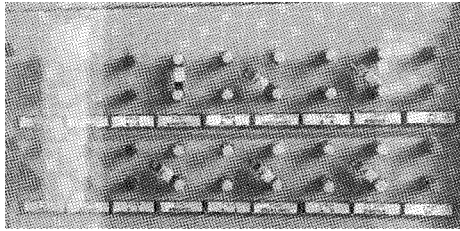


图 3 存在高光干扰的压板图像

对图 3 直接进行压板状态辨识,其辨识结果如图 4 所示。

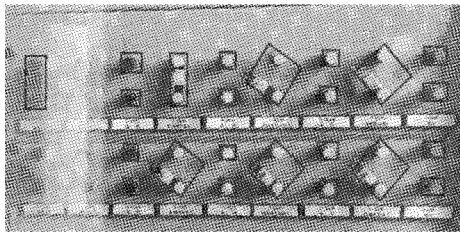


图 4 压板状态辨识结果

由图 4 可以看到,由于高光干扰对压板的纹理特征造成了遮挡,当要进一步对压板状态进行识别时,就会因此造成误差。为了减少此类干扰对压板状态识别的影响,提出利用图像修复的方法,对高光区域进行修复,尽可能地消除高光区域。

## 2 基于改进稀疏表示的图像高光消除与压板状态辨识

### 2.1 基于二维最大类间方差法的图像高光区域检测

图像修复即用图像中完整部分的信息去修复破损的区域<sup>[13]</sup>。用图像修复的方法去消除图像中的高光干扰,首先就要将图像中的高光区域检测出来,标记为待修复区域。因为高光干扰区域的灰度值比非高光区域明显要高,所以可以通过设置阈值对图像进行二值化,从而检测高光区域。

常用的阈值自适应计算方法为最大类间方差法(OTSU),该方法建立在图像的灰度直方图基础上<sup>[14]</sup>。OTSU 法一般是一维的,即只将图像中每个像素点各自的灰度值考虑在内,但实际上每个像素点之间都是相互关联的,为了更好地分割目标和背景,像素点的位置信息也要考虑在内,因此将最大类间方差法从一维升至二维<sup>[15]</sup>。

二维 OTSU,即像素点本身的灰度值和其领域的平均灰度值构成二维向量<sup>[16]</sup>。对于一幅  $M \times N$  的图像,设图像灰度级为  $L$ ,点  $(x, y)$  的灰度值为  $f(x, y)$ ,以  $(x, y)$  为中心,  $k \times k$  领域内的平均灰度值为  $g(x, y)$ ,则有:

$$g(x, y) = \frac{1}{k^2} \sum_{m=-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} \sum_{n=-\frac{k}{2}}^{\frac{k}{2}} f(x+m, y+n) \quad (1)$$

式中:  $0 < x+m < M, 0 < y+n < N$ 。

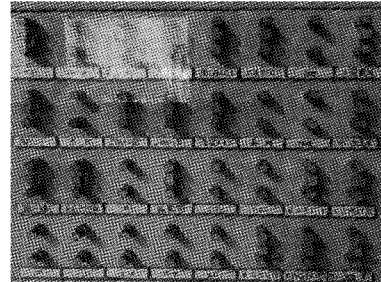
类似于二维最大类间方差法,最优阈值  $T$  的计算公

式为:

$$T = \operatorname{argmax} \{ P_o [(w_{oi} - w_{Ti})^2 + (w_{oj} - w_{Tj})^2] + P_l [(w_{li} - w_{Ti})^2 + (w_{lj} - w_{Tj})^2] \} \quad (2)$$

$w_T = P_o w_o + P_l w_l$ 。其中,  $P_o$  为被分为目标像素点的概率;  $P_l$  为被分为背景像素点的概率;  $w_o, w_l$  为两类相应的均值矢量;  $w_T$  为二维直方图上总的均值矢量。

将二维最大类间方差法应用于现场二次设备图像的二维化处理,其高光检测实验结果如图 5 所示。



(a) 存在高光干扰的图像



(b) 一维OTSU法高光检测



(c) 二维OTSU法高光检测

图 5 高光区域检测结果

图 5(b)、(c)中的白色部分为检测出来的高光区域,黑色部分为非高光区域。通过对比可以看到,二维 OTSU 法能够更加准确地检测高光区域。进一步地,以此图作为掩膜,对原图进行标记,利用图像修复的思想,消除高光干扰。

### 2.2 基于改进稀疏表示的高光干扰消除

在高光消除算法的研究中,文献[17]中给出了基于二次反射模式,通过将镜面反射分量与漫反射分量隔离,实现了去除高光的目的,但是该方法无法修复图像;文献[18]提出了一种基于逐行多级阈值和动态模板高光识别与去除方法,该方法只针对地面的大面积反光,对小面积的修复效果不好。

为了更好地满足对变电站中存在高光干扰的图像进行高光消除,这里选择基于稀疏表示的图像修复算法。稀疏表示用字典中元素的线性组合来表示测试样本<sup>[19]</sup>,其数学表达式为:

$$Y_i = D \times X_i \quad (3)$$

式中: $Y_i$ 表示的是第*i*个测试样本, $D$ 表示的是字典, $X_i$ 则为对应第*i*个测试样本的稀疏系数。

设 $\psi_p$ 是以点 $p$ 为中心的待修复 $k \times k$ 大小的窗口,点位于高光区域的边界上,以 $3 \times 3$ 的窗口为例,如图6所示。

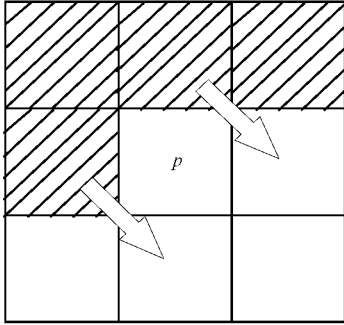


图6 中心点为 $p$ 的 $3 \times 3$ 窗口

白色部分为高光区域,即未知区域,阴影部分为非高光区域,即已知区域,修复方式如图中箭头所示,将位于未知区域的像素点标记为 $I$ ,则待修复的高光区域可以被稀疏表示为:

$$\hat{a} = \operatorname{argmin} \{ \|\psi_{p/I} - D_{/I}a\|_2^2 + \lambda \|a\|_1 \} \quad (4)$$

$$\hat{\psi}_p^i = \begin{cases} \psi_p^i, & i \notin I \\ D\hat{a}, & i \in I \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\psi_{p/I}$ 为图像块中的已知区域, $D_{/I}$ 为整幅图像中非高光区域所构成的字典,利用已知区域求解待修复区域的系数矩阵,然后重构待修复图像块 $\psi_p$ <sup>[20]</sup>。如式(5)所示,在待修复的区域中,已知区域,即非高光区域不改变,未知区域,即高光区域,利用系数矩阵进行修复。

传统的稀疏表示算法中,边界 $\partial\Omega$ 上像素点 $p$ 的优先度的计算方法为:

$$P(p) = |N_k(p) \cap \psi_{p/I}| / |N_k(p)| \quad (6)$$

式中: $P(p)$ 为 $p$ 的 $k \times k$ 窗口 $N_k(p)$ 内的非高光像素的比例<sup>[21]</sup>。

在实际计算中我们发现,由于边界点的随机性,可能存在多个点所在的窗口 $N_k(p)$ 中,非高光像素点所占比例相同,即优先权相同,当存在这些点时,图像修复的过程中由于同时修复几个区域,导致修复效果不佳。

为了优化修复效果,本文引入梯度来改进优先权的计算。图像梯度的计算常用到Sobel算子<sup>[22]</sup>,Sobel算子由 $x$ 、 $y$ 两个方向的滤波核组成,用Sobel算子对窗口区域进行卷积,即:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = S_x \otimes f, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = S_y \otimes f \quad (7)$$

则图像的梯度幅值为:

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (8)$$

梯度幅值越大,说明边界上图像的变化越大,反之,梯度幅值越小,边界上图像的变化也就越小,变化越小的点,应该被修复的优先程度越高。改进的优先权的计算公式如下:

$$P(p) = |N_k(p) \cap \psi_{p/I}| / |N_k(p)| + \frac{1}{\|\nabla f\|} \quad (9)$$

具体的计算流程如图7所示。

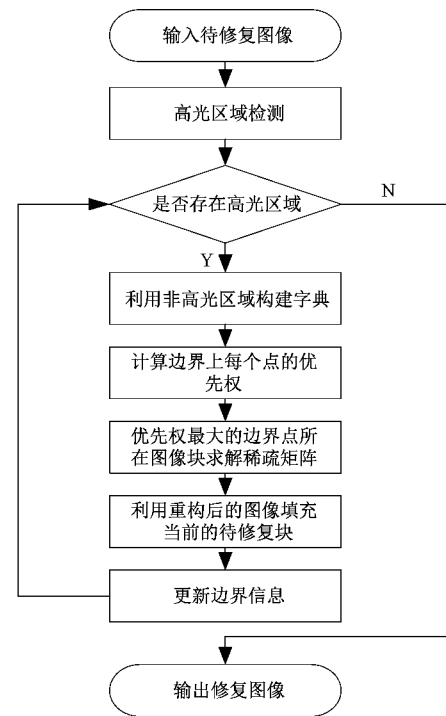


图7 高光消除算法流程

步骤1:高光区域检测;阈值分割得到二值化图像,利用二值化图像对原始图像进行标记。

步骤2:若存在高光区域,则利用非高光区域像素构建字典。

步骤3:利用改进后的优先权计算公式计算边界点上每个点的优先权。

步骤4:求解优先权最大的边界点为中心的 $k \times k$ 区域的稀疏矩阵。

步骤5:利用求解的稀疏矩阵修复图像块内的高光区域。

步骤6:更新边界信息,重复步骤2,直到高光区域不存在,输出修复后的图像。

### 2.3 基于图像修复的压板运行状态辨识

变电站中采集图像存在的高光干扰如图8所示。

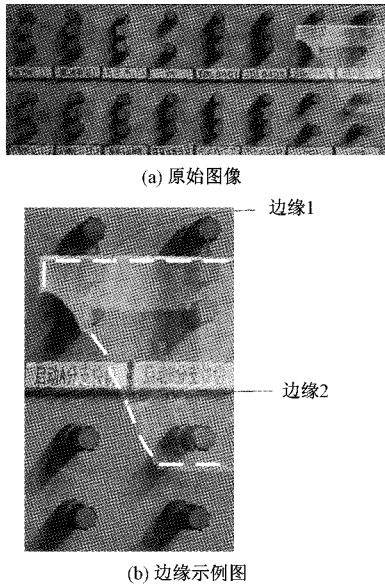


图 8 高光干扰修复实例图

由图 8(b) 可以看到, 边缘 1 处的变化程度是明显大于边缘 2 处的, 但是传统的优先权计算方法, 对修复像素点的优先权的计算仅仅考虑窗口  $N_s(p)$  内非高光像素的占比, 非高光像素占比越高, 默认为越容易被修复, 那么对于整个上边缘和下边缘的点都会同时进行修复, 最终的修复效果如图 9 所示。

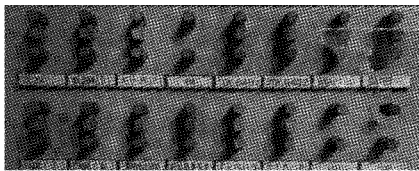


图 9 传统的稀疏表示修复结果

改进后的修复算法, 在传统稀疏表示算法的基础上, 由于从变化程度小的边缘处开始修复, 即优先修复图 8(b) 中的边缘 2 处。最终的修复效果如图 10(d) 所示。

图 10(a)~(c) 为修复过程, 可以明显看出, 高光区域是从弱干扰逐渐向强干扰区域修复的, 最终对压板的纹理特征修复的效果明显优于改进前的稀疏表示算法。

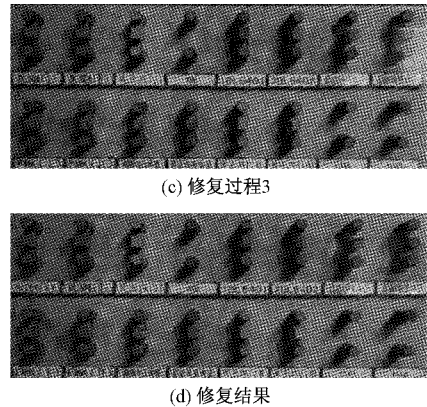
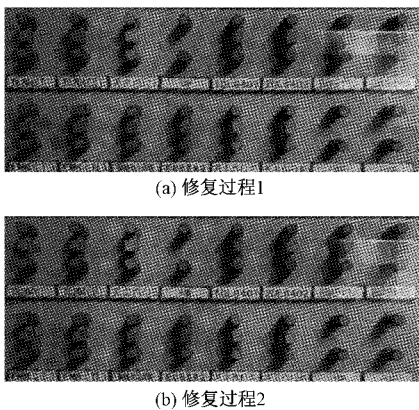


图 10 改进稀疏表示的修复结果

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 压板辨识准确率的测度指标

本文主要包括两个部分: 1) 针对保护压板不同工作状态下的形态特征, 提出利用最小外接矩形法进行状态辨识; 2) 考虑到作业现场中采集到的图片难免产生高光干扰, 影响状态辨识准确率, 对此利用图像修复的思想, 对高光区域进行消除。

为了更好地验证本文所提压板状态识别算法和高光消除算法的鲁棒性, 对辨识结果, 用准确率作为衡量算法优劣性的指标。压板状态辨识准确率的计算公式如下:

$$ACC = \left(1 - \frac{FP + FN}{total}\right) \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $FP$  为误检数, 即压板状态检测错误的数量;  $FN$  为漏检数, 即没有检测到压板的数量。

#### 3.2 无高光干扰的辨识结果分析

对如图 11(a) 所示的扭角式压板和插拔式压板两种无高光干扰的图片进行对比实验, 分别用文献[23]中所提的利用压板倾角进行运行状态辨识和本文所提的基于 Graham 最小外接矩形的压板运行状态辨识方法进行对比, 最终的压板状态检测结果如图 11(b)、(c) 所示。

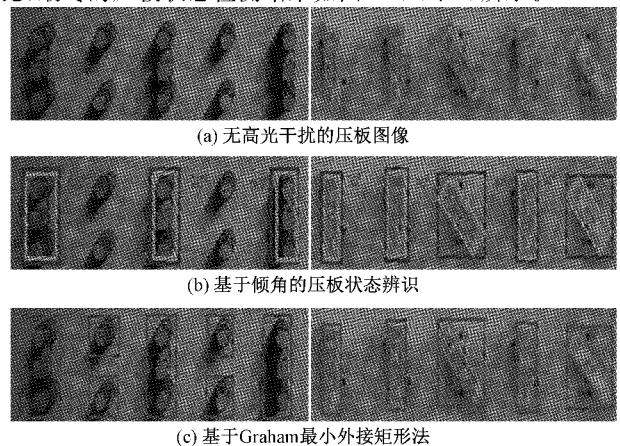


图 11 无高光干扰的图像与检测结果对比

由图 11 检测结果可得,因为扭角式压板处于备用状态时,角度特征并不明显,所以倾角辨识法对处于备用状态的扭角式压板无法辨识,而最小外接矩形法无论是对扭角式压板还是插拔式压板,均可以有效地进行状态辨识。

压板运行状态检测结果对比如表 1 所示。准确率对比如表 2 所示。

表 1 压板运行状态辨识结果对比

压板种类	压板编号	实际工作状态	倾角辨识法	外接矩形法
扭角式压板	1	投入	投入	投入
	2	备用	未识别	备用
	3	投入	投入	投入
	4	备用	未识别	备用
	5	投入	投入	投入
插拔式压板	1	投入	投入	投入
	2	投入	投入	投入
	3	退出	退出	退出
	4	投入	投入	投入
	5	退出	退出	退出

表 2 压板运行状态辨识准确率对比

算法	样本数量	误检数	漏检数	准确率/%
倾角辨识法	200	3	30	83.5
最小外接矩形法	200	1	3	98.0

### 3.3 存在高光干扰的辨识结果分析

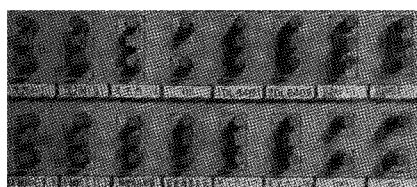
对比稀疏表示算法改进前后的压板工作状态的辨识,验证改进后高光消除算法的有效性,结果对比如图 12 所示。



(a) 无高光消除的压板状态辨识



(b) 改进前高光消除的压板状态辨识



(c) 改进后高光消除的压板状态辨识

图 12 状态辨识结果对比

由图 12 可得,在没有进行任何高光消除的情况下,直接利用最小外接矩形法进行压板状态辨识,导致原本为投入状态的压板被误检为备用压板;而改进前的稀疏表示算法,虽然相对于没有经过高光消除的原图,压板状态辨识准确率有所上升,但是由于高光消除的效果不够细腻,仍然产生了误差;改进后的高光消除算法,更加接近真实情况,压板的辨识也未出现误判。压板运行状态检测结果如表 3 所示。

表 3 改进修复算法前后辨识结果对比

压板排数	压板编号	实际工作状态	无高光消除	稀疏表示修复	改进修复算法
第 1 排	1	投入	投入	投入	投入
	2	投入	投入	投入	投入
	3	投入	投入	投入	投入
	4	备用	备用	备用	备用
	5	投入	投入	投入	投入
	6	投入	投入	投入	投入
	7	投入	备用	投入	投入
	8	投入	备用	退出	投入
第 2 排	1	投入	投入	投入	投入
	2	投入	投入	投入	投入
	3	投入	投入	投入	投入
	4	投入	投入	投入	投入
	5	投入	投入	投入	投入
	6	投入	投入	投入	投入
	7	备用	备用	备用	备用
	8	备用	备用	备用	备用

对含有高光干扰的照片,共 240 个不同工作状态下的压板样本进行对照实验,表 4 说明了改进前后稀疏表示算法对最终压板状态辨识准确率的影响。

表 4 改进修复算法前后辨识准确率对比

算法	样本数量	误检数	漏检数	准确率/%
改进前	240	9	8	92.917
改进后	240	2	3	97.920

## 4 结 论

本文结合智能变电站的生产实际,考虑到高光干扰的存在对压板状态辨识造成的不利,引入图像修复的方法,改进稀疏表示算法中优先权的计算,并利用基于 Graham 最小外接矩形法对压板的运行状态进行辨识,最后对修复前后的压板图像进行状态辨识对比,验证了高光消除算法的有效性。但是本文提出的方法仍然具有一定的局限性,当图像中出现强光干扰时,图像修复效果仍然不佳;由于图像

中压板阴影的干扰,采用外接矩形法对压板进行状态辨识时,此时选取的矩形面积会因此受到干扰,尤其是备用压板的识别,当上下的阴影连在一起时,也会产生误判。如何解决上述问题,同时提出针对变电站中各种二次设备图像的状态辨识方法是今后的研究和重点工作。

### 参考文献

- [1] 唐洪良,周荣亮,杨敏坤,等. 基于无人机巡检的输电线路自动测量技术[J]. 电子测量技术,2020,43(5):23-27.
- [2] ZHAI Y J, WANG D, ZHANG M L, et al. Fault detection of insulator based on saliency and adaptive morphology[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(9): 12051-12064.
- [3] 廖志伟,臧晓春,周可慧,等. 基于红外图像特征与BP神经网络的绝缘子串低零值故障和污秽故障识别方法[J]. 电瓷避雷器,2019(3):204-244.
- [4] 白洁音,赵瑞,谷丰强,等. 多目标检测和故障识别图像处理[J]. 高电压技术,2019,45(11):3504-3511.
- [5] 高旭,刘宏君,杜丽艳,等. 基于综合评价识别法的智能变电站虚回路在线状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(3):182-187.
- [6] 徐浩,欧阳帆,刘海峰,等. 基于外设辅助触点的变电站出口压板状态监测系统[J]. 湖南电力,2017,37(5):15-17.
- [7] 高元生,陈强,熊小伏,等. 继电保护压板的智能校核方法[J]. 重庆大学学报,2015,38(6):91-98.
- [8] 姚景岩,舒征宇,高健,等. 基于图像融合的保护压板运行状态辨识方法研究[J]. 电测与仪表,2021,58(8):88-96.
- [9] 付文龙,谭佳文,吴喜春,等. 基于图像处理与形态特征分析的智能变电站保护压板状态识别[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):203-207.
- [10] 邓应松,段秦刚,宋小松. 基于图像识别的保护压板投退状态辨识方法[J]. 智慧电力,2015,43(10):49-53.
- [11] 周克,杨倩文,王耀艺,等. 一种改进的压板状态识别SSD算法[J]. 电测与仪表,2021,58(1):69-76.
- [12] 王凯,支煜,陈浩,等. 一种基于Graham扫描算法的空间点云结构化算法研究[J]. 现代电子技术,2018,41(14):139-142.
- [13] 唐露新,张宇维,宋有聚,等. 基于形态和小波的低纹理图序列高光修复研究[J]. 中国测试,2019,45(4):109-115.
- [14] LIU X Y, MIAO X R, JIANG H, et al. Data analysis in visual power line inspection: An in-depth review of deep learning for component detection and fault diagnosis[J]. Annual Reviews in Control, 2020, 50: 253-277.
- [15] 纪姚林,黄慧明. 基于边缘信息的二维Otsu阈值分割算法的改进[J]. 信息技术,2017,41(11):43-45.
- [16] 颜薇. 改进的二维阈值图像分割方法[D]. 湘潭:湘潭大学,2016.
- [17] 汤一平,宗明理,吴立娟. 基于双色反射模型的彩色结构光颜色识别的研究[J]. 计算机学报,2013,36(9):1908-1916.
- [18] 全思博,李伟光. 移动高光对三维场景重建的影响与消除[J]. 光学精密工程,2017,25(7):1900-1908.
- [19] 角轮,李晖晖. 基于学习字典和稀疏约束的湍流退化图像盲复原[J]. 电子测量技术,2020,43(17):105-109.
- [20] 张少鹏. 基于稀疏表示的彩色图像修复方法[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2016.
- [21] 李明悦. 基于稀疏表示的人脸图像高光检测和消除[J]. 现代计算机,2019(19):41-45.
- [22] 沈德海,张龙昌,鄂旭. 一种基于Sobel算子梯度增强的边缘检测算法[J]. 电子设计工程,2015,23(10):162-165.
- [23] 黄序. 变电站智能巡检系统的图像识别及处理技术[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

### 作者简介

**李镇翰**, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统智能巡检。

E-mail:594745438@qq.com

**舒征宇**, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与调度控制, 智能电网等。

E-mail:ctgu\_shuzhengyu@163.com

**高健**, 硕士研究生, 主要研究方向为电网智能运维。

E-mail:wasdmxj@163.com

**姚景岩**, 硕士研究生, 主要研究方向为电网智能运维。

E-mail:991038046@qq.com