

# 基于紫外成像技术的高压电晕智能识别方法

侯强, 王璨, 单莹

(国网辽宁省电力有限公司铁岭供电公司, 辽宁 铁岭 112000)

**摘要:**以提升智能识别的准确率,缩短智能识别时间为目标,提出基于紫外成像技术的高压电晕智能识别方法。首先利用紫外成像仪获取紫外图像,采用图像灰度处理将彩色图像转换为灰度图像,然后利用阈值分割法将灰度图像变更成二值图像,引入中值滤波和均值滤波的组合滤波方法对二值图像进行去噪,最后利用Canny边缘检测器实现最终高压电晕位置智能识别。实验结果表明,所研究方法能够获取高质量的紫外图像,去噪效果好,智能识别准确率高,识别时间更快。

**关键词:**紫外成像;高压电晕;智能识别;去噪处理;边缘检测

中图分类号: TP391.44

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0075-05

## Intelligent recognition method of high voltage corona based on ultraviolet imaging technology

HOU Qiang, WANG Can, SHAN Ying

(Tieling Power Supply Company of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Tieling 112000, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of intelligent recognition and shorten the time of intelligent recognition, an intelligent recognition method of high voltage corona based on ultraviolet imaging technology is proposed. Firstly, the ultraviolet image is obtained by the ultraviolet imager, and the color image is converted into the gray image by the image gray processing. Then, the gray image is changed into a binary image by using the threshold segmentation method, and the binary image is denoised by the combined filtering method of median filter and mean filter. Finally, Canny edge detector is used to realize the intelligent recognition of the final high voltage corona position the experimental results show that, this method can obtain high-quality UV image; denoising effect is good; intelligent recognition accuracy is high, recognition time is faster.

**Keywords:** ultraviolet imaging; high voltage corona; intelligent identification; denoising; edge detection

### 0 引言

电力体系内应用的各种高压设备的损坏与故障日益增加,这就需要更高要求的预防措施<sup>[1]</sup>。输电线路和变电站等有关电器设备,均运行于室外环境,遇到某些特殊情况时,电器设备的绝缘能力会降低,导致电器设备结构形成缺陷,造成高压电晕现象<sup>[2]</sup>。及时检测电器设备高压电晕现象,能够实时掌控绝缘导致劣化的情况,并及时判断绝缘情况的危险程度,避免发生事故<sup>[3-4]</sup>。

有学者研究了基于压缩感知的高压直流电缆局部放电模式识别,通过训练以放电重复率为分类样本的集合,创建完善的字典,并且进一步测试样本在上述字典上投影的稀疏性来完成分类,同时根据1范数最小实施稀疏来判定分类完成,以此提升运算速度及识别率<sup>[5]</sup>。部分研究人员对高压电缆局部放电模式进行分析,利用卷积神经网络对放电模式的不同激活函数、网络层数以及不同池化方式进行研究,对比传统反向神经网络以及支持向量机算法,证明在高压电缆局部放电模式别精度方面卷积神经网络

效果更佳<sup>[6]</sup>。紫外成像技术属于一种有效的高压电晕检测方法,紫外成像技术具有可直观看到高压电晕现象与准确定位高压电晕位置的优势<sup>[7-8]</sup>。

针对当前识别方法存在的识别精度低和效率低问题,提出基于紫外成像技术的高压电晕智能识别方法,并对性能进行分析。

### 1 紫外成像技术的高压电晕智能识别方法

鉴于高压输电设备设施一般处于室外大气环境之中,易受到环境因素不利影响,导致设备绝缘性降低,产生电晕现象,从而造成闪络事故,导致供电终止<sup>[9]</sup>。采用基于紫外成像技术的高压电晕的智能识别方法,经图像灰度处理、图像阈值分割、滤波处理与图像边缘检测等步骤,智能识别利用紫外成像技术的紫外线成像仪获取的紫外图像中电晕部位,保证电力系统的安全运行。图1为紫外成像技术的高压电晕智能识别流程,具体为:通过紫外成像仪获取紫外图像;利用图像灰度处理将获取的彩色紫外图像变换为灰度图像;图像阈值分割是设置一个合理的阈值,将灰度图像改变成二值图像;利用结合中值滤波和均值滤

波对二值图像实施去噪;采用 Canny 边缘检测器分割出高压电晕位置;完成智能识别紫外图像内的高压电晕位置。

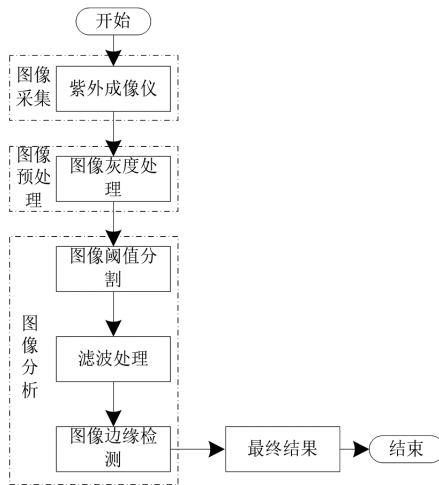


图1 智能识别流程

### 1.1 紫外成像仪

紫外成像仪是利用紫外光进行工作,其波长处于 10~400 nm,太阳光经过大气层后,被大气层臭氧吸收,所以地球表面的太阳光波长几乎都大于 290 nm。但是某些地区太阳光波长小于 280 nm,且辐射照度小于 10~13 W/m<sup>2</sup>,这种地区即称为日盲区。紫外成像仪正是利用日盲区波长来达到高压电晕识别的目的,可以完美避开可见光源的影响<sup>[10]</sup>。该光谱波长为 0.25~0.280 μm,用于白天电晕的检测,成像仪不受太阳光的影响。仪器完全为“太阳盲区”。双通道:可见光+UV,可合成一个视频图像,如图2所示。



图2 紫外成像仪

紫外成像仪由多个部分构成,主要包含光传感器、物镜体系、滤光片、控制分析体系以及图像显示等。其中,光传感器主要是完成光电转换电晕图像,滤光片则是过滤除掉高于日盲区的光波,物镜体系是负责目标成像;控制分析体系负责统计分析光的强度量,通过紫外光子脉冲计数率反映紫外光强度;图像显示体系负责整合与显示图像信息。图3为紫外成像仪检测原理。

设  $Z$  为点光源发光强度,  $A$  为其与接收面元  $ds$  距离,  $\beta$  为面元法线和入射光纤夹角,初始值为 0,  $d\Omega$  为  $ds$  所张立体角,则  $ds$  光通量的计算公式为

$$d\Phi = Zd\Omega = \frac{Zds\cos\beta}{A^2} = \frac{Z}{A^2}ds \quad (1)$$

通过式(1)计算光照强度,公式为

$$C = \frac{d\Phi}{ds} = \frac{Z}{A^2} \quad (2)$$

基于空气介质传播特征,对紫外光脉冲吸收与散射作用进行分析可以看出:随着社会介质深度的增加,光照强度逐渐减弱。在衰减过程中,将紫外光脉冲具体传播路径进行简化,可以拟定获得平行光路,其发光强度具体计算公式为

$$Z = Z_0 e^{-\alpha A} \quad (3)$$

式中,  $Z_0$  为  $A = 0$  位置发光强度,  $\alpha$  为紫外光脉冲被大气吸收系数。

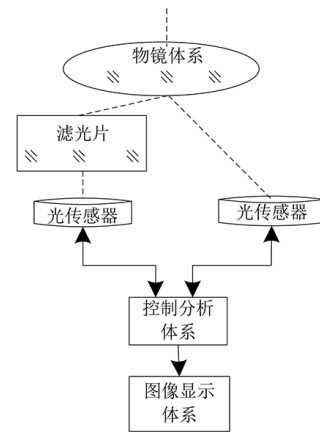


图3 紫外成像仪检测原理

联立式(2)和式(3),可以进一步得到测试点光照强度公式,具体为

$$C = \frac{Z_0}{A^2} e^{-\alpha A} \quad (4)$$

基于公式(4)可以看出,波长一致光在单位时间内穿过成像仪收到  $ds$  平均光子数与光照强度之间呈现正比关系。紫外光子数均值公式如下

$$N = \frac{N_0}{A^2} e^{-\alpha A} \quad (5)$$

根据式(5)可知,测试距离与紫外光子的计数率成反比,式(5)也是控制函数,可有效解决测试距离越远,导致测试结果难以控制的问题。

### 1.2 图像灰度处理

图像灰度处理是将紫外成像仪获取的彩色紫外图像变换成灰度图像,能够简化运算,灰度图像既能保留原图像结构特征与边缘,又不会失去颜色特征之外的图像特征,本文采用 RGM-UV4 紫外线强度检测仪对外界环境中的紫外线强度进行检测,根据检测结果对图像进行阈值划分。数字彩色图像基于 RGB 颜色空间对图像进行描述,即图像系统中 R(红色),G(绿色),B(蓝色)分量来构建颜色空间。灰度图像则只有灰度值一个量,其反映图像从黑到白之间变化的趋势,结合阈值划分结果,可以得到 RGB 图像变更成灰度图像算法公式为

$$V = 0.299(R) + 0.587(G) + 0.114(B) \quad (6)$$

式中,  $V$  是图像的亮度。

式(6)描述的是颜色空间 YUV 与 RGB 两者对应关系,基于相关关系,构建 R,G,B 三色分量与亮度分量 V 对应关系,将所获得亮度值当作像素点的灰度值。灰图内各个像素亮度 V 的取值是 [0,255],全黑与全白分别用 0 与 255 代表。

### 1.3 图像阈值分割

检测图像时,电晕区域属于需要识别区域,故而需要在图像内对识别区域进行有效分割,借助于灰度图系统分析。结果显示,电晕区域内,灰度值为 255 时,呈现出全白色,作为普通背景体系,其灰度值需要小于 255。利用阈值分割法,合理设置阈值,可以对灰度图像进行转变,使其成为更易十倍的二值图。图像描述使用 0 和 1 进行,具体分割公式为

$$B(x,y) = \begin{cases} 0, & V(x,y) \leq T_0 \\ 1, & V(x,y) > T_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $V(x,y)$  为各个像素点灰度值,其在矩阵内的对应位置为  $x$  与  $y$ ,阈值为  $T_0$ 。调整  $T_0$  可以在不同天气情况下获得最优效果。具体公式为

$$T_0 = \begin{cases} 220, & \text{雨天(阴天)} \\ 225, & \text{晴天(多云)} \end{cases} \quad (8)$$

### 1.4 滤波处理

在去噪处理二值图像中混合噪声时,滤波方法不仅需要有效去除图像中的噪声,还要保护图像中的边缘信息<sup>[11-13]</sup>。通过中值滤波和均值滤波的组合滤波方法去噪处理二值图像能够实现以上要求,去噪处理共分为两步,第一步是对椒盐图像当中存在的噪声进行去除;第二步是对图像中的高斯白噪声进行取材于,方法为均值滤波法。

#### 1.4.1 中值滤波去噪算法

在使用中值滤波前,通过一定的检测算法判断等待去噪的灰度图像像素是不是噪声,若不是噪声就可保留原始值,能够增强中值滤波的性能<sup>[14]</sup>。利用计算图像和中值滤波的差值方法,检测灰度图像中的椒盐噪声。待处理像素邻域窗口  $R$  大选取为  $(2k+1) \times (2k+1)$ ;窗口中心像素值为  $f(x,y)$ ;控制系数为  $k$ ,使用向量代表  $R$  的像素矩阵,公式为

$$L(x,y) = \{f(x-k,y-k), \dots, f(x+k,y+k)\} \quad (9)$$

选取窗口中值为

$$m(x,y) = \text{median}(L(x,y)) \quad (10)$$

$f(x,y)$  和中值的绝对差 (absolute deviations from the median, MAD) 如下

$$\text{MAD}(x,y) = |f(x,y) - m(x,y)| \quad (11)$$

引入阈值  $T_0$ , 噪声可如下式判断:

$$P(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{MAD}(x,y) > T_0 \\ 0, & \text{MAD}(x,y) \leq T_0 \end{cases} \quad (12)$$

在  $\text{MAD}(x,y)$  大于  $T_0$  的情况下,  $\text{MAD}(x,y) = 1$  时代表  $f(x,y)$  为噪声;在  $\text{MAD}(x,y)$  小于或等于  $T_0$  的情况下,  $\text{MAD}(x,y) = 0$  时代表  $f(x,y)$  不是噪声。

依据以上 MAD 结果,采用标准中值滤波器就能有效过滤噪声。图 4 是中值滤波的算法流程。

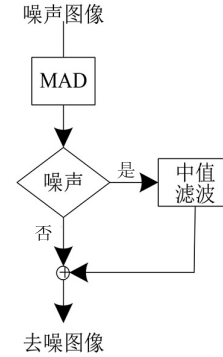


图 4 中值滤波的算法流程

利用 MAD 算法检测各个二值图像像素,获取  $p(x,y)$ 。若  $\text{MAD}(x,y)$  为 1 时,由中值滤波器的输出更换原来像素;若  $\text{MAD}(x,y)$  为 0 时,便保留原有灰度值<sup>[15]</sup>。

#### 1.4.2 均值滤波的去噪方法

本文图像去噪主要采用均值滤波,具体操作为选择体系内某点,以其灰度值均值作为输出值,根据图像特征,一般选择正方形邻域形状。比如  $3 \times 3$  的邻域,该邻域的中心为点  $(x,y)$ ,灰度值公式为

$$f'(x,y) = \frac{1}{9} \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 f(x+m,y+n) \quad (13)$$

假设在二值体系内,主要噪声为加性噪声,在其空间内,各个点之间不相关,噪声期望值为 0,方差为  $\delta^2$ ,没有噪声的二值图像为  $Q$ ,有噪声的图像为  $E$ ,利用均值滤波后可得

$$f'(x,y) = \frac{1}{R} \sum E(x,y) + \frac{1}{R} \sum n(x,y) \quad (14)$$

式中,邻域中像素点的数量是  $R$ ,  $f'(x,y)$  为滤波后二值图像内位于  $(x,y)$  点的灰度值; $m,n$  为邻域像素的横纵坐标。

### 1.5 图像边缘检测

使用 Canny 边缘检测器进行阶跃边缘的检测,主要目标是明确二值图像当中局部最大梯度值像素点,核心工作为对实际图像梯度数字逼近进行搜索。当获逼近可以对噪声效应进行抑制时,证明图像梯度有效。在检测当中,需要尽可能实现对边缘位置的有效检测。针对必须符合的要求,Canny 算子提取二值图像边缘的原理为

1) 二值图像滤波。去除噪声对图像边缘检测的影响,利用式(14)完成二值图像的滤波处理。

2) 梯度增幅与方向计算。利用 Canny 边缘检测算法,对  $2 \times 2$  领域一阶偏导有限差分进行计算,获得滤波处理后二值图像  $f'(x,y)$  梯度幅值以及对应方向,相关公式为

$$J(x,y) = \sqrt{g_x^2(x,y) + g_y^2(x,y)} \quad (15)$$

$$\theta(x,y) = \arctan \frac{g_y(x,y)}{g_x(x,y)} \quad (16)$$

$$f_x = \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ 1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \quad f_y = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中,  $J(x,y)$  为梯度幅值,  $\theta(x,y)$  为梯度方向,  $g_x(x,y)$  为原二值图像  $I(x,y)$  沿  $f_x$  行实施滤波处理后的结果,  $g_y(x,y)$  为原二值图像  $I(x,y)$  沿  $f_y$  列实施滤波处理后的结果。

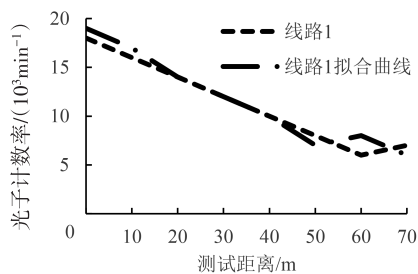
3) 非极大值抑制梯度二值图像。一般情况下, 幅值阵列的值跟其相应的二值图像梯度值存在一定的正相关关系, 但是无法以此来判断边缘位置, 进一步细化幅值二值图像的屋脊带才能准备判断边缘位置, 即采用非极大值抑制 (non-maxima suppression, NMS)。Canny 边缘检测算子在这个过程中的邻域大小为  $3 \times 3$ , 按照梯度方向, 将梯度幅值阵列  $J(x,y)$  的全部像素 (主要为 8 个方向邻域) 实施梯度幅值插值。对二值图像进行查看, 如果某像素灰度值不大于其梯度方向前后像素灰度值, 则将像素设置为 0。在这一过程当中,  $J(x,y)$  宽屋脊带可以进一步细化为一个像素宽, 保留梯度幅值。

4) 双阈值检测法以及连接边缘。在图像处理当中, 双阈值检测法主要是对高阈值与低阈值进行有效选择, 从而进行图像处理的一种方法。借助于这一方法, 可以获得高阈值和低阈值结果。将其与梯度图像灰度值进行比较, 保证灰度值需要大于高阈值, 此时, 属于边缘位置, 如果小于低阈值则图像不在边缘访问。在高阈值当中对其边缘轮廓进行连接, 使其衔接端点; 在低阈值当中, 进行弱边缘点进行搜索, 对高阈值获得的边缘缝隙进行补充, 实现最终的高压电晕智能识别。

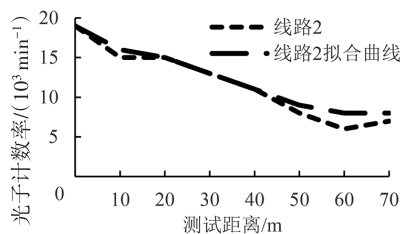
## 2 仿真实验

以某高压变电站为实验对象, 选取两条实验路线实施智能识别高压电晕情况, 实验场景布置中两条线路均是以高压电晕点的正下方为中心, 分别向南、向西实施智能识别, 测试点的间隔是 7 m, 向南到 55 m 的位置, 向西到 31 m 的位置。高压电晕的高度是 7.6 m, 使用紫外成像仪进行测试的位置具体高度为 1.6 m。对场景当中的不同测试点紫外光子进行计数, 连续记录超过 60 s, 选取平稳度数的均值作为计数率, 同时, 保证测试位置读数需要大于 5。电晕点光源的发光强度是 60 cd, 面元法线与入射光纤间的夹角是  $\beta = 15^\circ$ , 大气吸收紫外光脉冲的系数是 0.32。通过式 (5) 拟合两条测试线路, 验证本文方法图像采集的效果与测试距离的关系。图 5 主要描述的是两条线路检测距离与光子计数率之间的关系曲线。结合相关曲线可以看出, 当出现相同高压电晕的时候, 光子计数率随着测试距离的增加而呈现出下降趋势。通过与式 (5) 的拟合曲线可知, 采用本文方法的测试结果和常识理论基本一致, 二者呈现出较高的拟合度, 表明所提方法对光子计数率的计算是具有实际应

用价值的。这主要是因为所提方法通过控制函数, 实现了对计算结果的约束。实验证明本文方法可将光子计数率控制在 5 以上, 测试距离的不断加虽会影响识别结果, 但影响幅度较小, 识别结果仍处于可控范围以内, 提高了紫外成像仪获取高压电晕成像的质量。



(a) 线路 1 的关系曲线



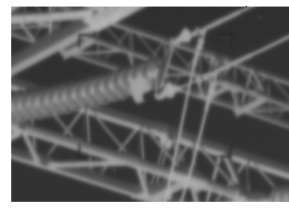
(b) 线路 2 的关系曲线

图 5 线路检测距离与光子计数率关系曲线

采用与文献[5]方法、文献[6]方法以及传统的 Canny 算法进行对比实验。图 6 为几种方法的数据采集效果对比图。根据图 6 可知, 由于本文方法利用紫外成像仪实施图像采集, 所以图像采集的清晰度高于其余 3 种方法, 其余 3 种方法仅能拍摄出高压电晕明显的位置, 对于不明显的高压电晕位置分辨率较低。实验证明: 本文方法的图像采集分辨率较高, 有效为后续智能识别提供清晰的图像数据。



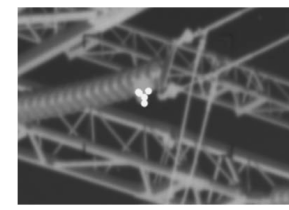
(a) 本文方法图像采集效果



(b) 文献[5]方法图像采集效果



(c) 文献[6]方法图像采集效果



(d) 传统 Canny 算法图像采集效果

图 6 四种方法图像采集效果图

表 1 为本文方法与文献[5]方法、文献[6]方法和传

统 Canny 算法对不同数量紫外图像实施去噪处理的准确率与时间对比结果。根据表 1 可知,本文方法的准确率高于对比方法,本文方法的平均去噪处理时间少于对比方法的。实验证明。本文方法能够有效对紫外图像进行去噪处理,噪处理时间更快,为后续智能识别提供有效数据支持。

表 1 四种方法去噪处理的准确率与时间

| 方法          | 准确率/% | 处理时间/s |
|-------------|-------|--------|
| 本文方法        | 99.7  | 2.0    |
| 文献[5]方法     | 95.7  | 2.4    |
| 文献[6]方法     | 96.2  | 2.5    |
| 传统 Canny 算法 | 95.6  | 2.3    |

选取 20 幅紫外图像测试本文方法智能识别高压电晕的准确率与时间。表 2 为本文方法智能识别高压电晕的测试结果。根据表 2 可知,本文方法能够有效识别出高压电晕,智能识别平均准确率高达 99.2%,平均识别时间为 4.5 s,大大节省了智能识别时间。实验证明。本文方法智能识别高压电晕的准确率高、识别时间快。

表 2 测试结果

| 紫外图像<br>编号 | 准确率/% | 识别<br>时间/s | 紫外图像<br>编号 | 准确率/% | 识别<br>时间/s |
|------------|-------|------------|------------|-------|------------|
| 1          | 100   | 5.2        | 11         | 98    | 5.6        |
| 2          | 98    | 3.5        | 12         | 100   | 3.8        |
| 3          | 98    | 5.1        | 13         | 99    | 5.0        |
| 4          | 99    | 5.5        | 14         | 99    | 3.3        |
| 5          | 100   | 3.4        | 15         | 100   | 3.4        |
| 6          | 100   | 3.2        | 16         | 97    | 5.5        |
| 7          | 99    | 4.8        | 17         | 99    | 5.1        |
| 8          | 100   | 5.0        | 18         | 100   | 4.4        |
| 9          | 99    | 4.9        | 19         | 100   | 3.7        |
| 10         | 100   | 3.0        | 20         | 98    | 5.9        |

### 3 结束语

电网设施是国民经济重要的内容之一,同时也是推动经济发展的关键设施,智能电网利用数字化来提高电网运行效率,确保安全性,极大提升了电网预防性维护水平,尤其是电气设备的高压电晕智能识别更为重要。所研究的基于紫外成像技术的高压电晕智能识别方法,可有效提升

图像采集的质量与清晰度,提高智能识别的准确率,节省智能识别时间,提高工作效率,可为电网安全与稳定的发展提供支撑。

### 参考文献

- [1] 林磊. 基于紫外成像的电晕放电检测技术改进研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(5):59-63.
- [2] 李勋, 张宏钊, 胡元潮, 等. 基于 C-V 模型的电晕放电紫外成像分割及特征量研究[J]. 高压电器, 2017, 53(8):123-128, 133.
- [3] 李炼炼, 孟刚, 邓慰, 等. 输变电设备电晕放电紫外图像量化参数提取[J]. 高压电器, 2017, 53(12):229-235.
- [4] 王雷, 楚明月, 王晓华, 等. 基于随机森林的智能变电站一次侧设备运行状态监测方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7):184-190.
- [5] 杨丰源, 许永鹏, 郑新龙, 等. 基于压缩感知的高压直流电缆局部放电模式识别[J]. 高电压技术, 2017, 43(2):446-452.
- [6] 杨帆, 王干军, 彭小圣, 等. 基于卷积神经网络的高压电缆局部放电模式识别[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5):123-128.
- [7] 王颖, 王璐子, 倪进园, 等. 日盲紫外波段电晕成像特性的仿真研究[J]. 红外技术, 2019, 41(11):1057-1064.
- [8] 魏健春, 任昂, 肖怀硕, 等. 紫外成像技术在 RTV 涂覆平板模型放电检测中的影响因素研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(5):69-73.
- [9] 顾燕, 吕扬, 杨锋, 等. 紫外成像仪的紫外可见光图像叠加精确度测试系统[J]. 红外技术, 2019, 41(8):695-698.
- [10] 张英华, 李昂, 谢品华, 等. 污染气体浓度二维空间分布的紫外成像方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5):1476-1480.
- [11] 李春锋, 方春华, 侯轩达, 等. 基于 K-means 高频局放 10 kV 避雷器快速带电检测方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7):191-196.
- [12] 宋涛. 图像中值滤波算法在智能采摘机器人中的应用[J]. 农机化研究, 2025, 47(7):245-250.
- [13] 刘干, 邵新杰. 基于小波变换的结构光光条图像去噪方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(11):1433-1437.
- [14] 周先春, 吴婷, 石兰芳, 等. 一种基于曲率变分正则化的小波变换图像去噪方法[J]. 电子学报, 2018, 46(3):621-628.
- [15] 牛彝, 慕晓冬, 陈长倩. 基于双树复小波和形态学的红外图像去噪方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(2):53-56, 65.

作者简介:侯强(1975—),男,本科,高级工程师,研究方向:电力系统。

(上接第 21 页)

[6] 曹华科, 戚志鹏, 李琳, 等. 考虑关断时间的瞬变电磁视电阻率计算及不同波形浅层分辨特征分析[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(4):1704-1716.

[7] 陈茜, 周运斌, 崔涵, 等. 分布式光伏接入对配网系统的暂态特性影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(6):28-37.

[8] 顾鑫磊, 顾志伟, 卫东, 等. 基于时间序列波形特征的光伏组串热斑故障诊断方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9):125-133.

[9] 王守相, 何汝训, 张春雨, 等. 基于 FPGA 考虑控制特性的光伏直流发电系统暂态实时仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10):50-56.

[10] 和敬涵, 王语然, 李猛, 等. 基于电流波形畸变特征的高比例光伏配电网故障方向判别原理[J]. 电网技术, 2023, 47(12):4856-4867.

[11] 谭卫斌, 吴浩波, 张志华, 等. 基于线路容流暂态信号能量流

向特征的小电流单相接地故障区段定位算法[J]. 现代电子技术, 2024, 47(2):121-126.

[12] 朱梦梦, 马御棠, 罗强, 等. 直接地极线路用电流互感器暂态特性现场试验与分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(6):2644-2651.

[13] 徐炳辉, 苏有斌, 白宏权, 等. 基于 BP 神经网络的铁轨上行人检测方法[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(5):76-79.

[14] 汤春林. 基于配点法的参数化暂态稳定性约束的电力最优潮流分析[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):38-41.

作者简介:刘单华(1989—),女,硕士,工程师,研究方向:用电信息采集技术,智能用电。