

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.021

基于C-V模型的电晕放电紫外成像分割及特征量研究

李 勋¹, 张宏钊¹, 胡元潮², 伊仁图太³

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

3. 深圳市同步银星电气有限公司, 深圳 518000)

摘要: 高压设备因绝缘缺陷发生电晕放电时,设备表面会辐射出紫外光,利用紫外成像技术可以检测电晕放电位置与放电强度并判断高压设备的绝缘缺陷。紫外成像仪利用“光子数”表征放电强度,由于环境噪声干扰,“光子数”特征量并不准确,有时甚至误差很大。为了更准确地描述电晕放电状态,文中提出基于C-V水平集模型提取图像特征量来表征电晕放电特性的新方法。首先引入C-V水平集模型对紫外图像进行分割处理,然后根据提取出的放电区域和区域边界点坐标,定义了光斑面积、边界周长、长轴、短轴等参数来评估放电状态,给出了干扰因素的修正方法。最后,通过变电站绝缘子外表面放电的紫外图像C-V模型运算实例,说明该计算方法能在不进行图像滤波预处理的情况下,精确分割出放电区域,自动化程度高,且对不同背景的紫外图像适应性较好。

关键词: 紫外成像; 电晕放电; 图像处理; C-V模型; 特征量

Ultraviolet Image Segmentation and Characteristic Quantities of Corona Discharge Based on C-V Model

LI Xun¹, ZHANG Hongzhao¹, HU Yuanchao², YIREN Tutai³

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. College of Electrical and Electric Engineering, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255000, China; 3. Shenzhen Synchronization Silver Star Electric Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: When corona discharge happens in high voltage equipment due to insulation defect, it generates ultraviolet (UV) light. So UV imaging technology can be employed to detect the position and intensity of corona discharge and to assess the insulation defects. UV imager provides UV photon number to indicate the discharge intensity. However, the photon number becomes inaccurate due to environmental disturbance. In this paper, the C-V level sets model is adopted to segment UV image to extract discharge characteristic quantities for the purpose of more accurate description of discharge characteristics in high-voltage equipment. Firstly, C-V level sets model is introduced to segment UV image to extract discharge facula region and coordinates of the region boundary points. Then, according to the extracted region and coordinates to determine such characteristic parameters as facular area, perimeter, major axis, and minor axis for evaluating discharge state, and the correction method of interference factors is given. Practical examples of processing UV discharge images of a substation insulator demonstrate that this C-V model based method can accurately segment the discharge area without filtering preprocess and with high automation, and it is adaptable to UV images with various backgrounds.

Key words: UV imaging; corona discharge; image processing; C-V model; characteristic quantity

0 引言

高压设备及输电线路的外绝缘如果存在损坏

缺陷,则在正常运行过程中会频繁发生电晕现象^[1]。电晕现象不仅带来严重的功率损耗,而且产生噪声和无线电干扰。随着电网电压等级的逐渐提高,高压设备及输电线路的电晕现象更为得到重视^[2-3]。及

收稿日期:2017-03-17; 修回日期:2017-05-21

时检测到设备表面电晕放电现象并判断严重程度是诊断外绝缘缺陷的重要途径,这对维护高压设备安全和提高电力系统运行可靠性有重要意义。

高压设备表面发生电晕放电时将辐射出大量紫外线,现有的日盲型紫外成像技术可以检测到电晕时的紫外线。利用紫外成像技术可以监测到电晕放电时辐射出的 240~280 nm 波段的紫外光,并以视频或图像形式直观表征^[4-6]。紫外成像技术有超声波检测、泄漏电流在线监测等传统局放检测技术无法比拟的优势,能够远距离、非接触、实时、快速地在带电情况下获取高压设备的电晕放电状态信息,并在二维图像中标识放电位置与放电强度,形象直观且非常稳定^[7-8]。实际运行经验表明,紫外成像技术在检测紫外光时,由于固有散粒噪声的存在,产生的紫外图像不仅包含放电区域,还附带许多白色噪声点,从而对设备表面的真实放电点的判断^[8-9]。而且这些噪声点也会被计入紫外成像仪提供的“光子数”中,令使用人员对放电强度的评估产生误差。所以,如何从拍摄的紫外视频或图像中分割出真实的放电区域、如何从分割出的放电区域中提取特征量来评估电晕放电状态有待进一步解决。

目前的紫外图像处理技术的主要思路是先对图像进行滤波处理以减弱噪声,然后对图像进行分割提取放电区域。文[10]中提出使用数学形态法分割放电区域,该方法能有效除去放电图像中的噪声点和弥补孔洞、裂纹。但形态法涉及到“结构元素”几何形状和尺寸的选取问题,其形状和尺寸不同,对同一图像的分割效果也会有不可忽视的差异,关于结构元素的变化策略尚待进一步研究。文[11-12]分别采用 Sobel 及 canny 边缘检测算子来检测图像的边缘,具有计算效率高、编程容易等优点,但所得到的图像边缘为离散点,难以直接进行后续计算。文[13]根据图像的像素灰度分布选择合适的阈值对其进行处理,即当图像的灰度值大于选择的阈值时保留图像元素,否则就消除图像元素。该方法原理简单,容易实现,但准确的阈值难以确定,此外易将远离放电点的具有高灰度值的噪声误记为放电区域。文[14]利用放电区域的灰度值之和来表征放电状态,但其研究对象仅针对含单个放电点的紫外图像,而实际上高压设备电晕放电可能同时有多个放电点。

综合以上研究成果,现行紫外成像放电区域提取方法仍不理想,已提出的放电区域特征量仍不足以全面地表征设备表面的放电特性。另外,上述方法的共同点是图像需要经过滤波预处理,且最终的

分割精确度与滤波的效果密切相关。文中引入基于 C-V 模型的绝缘放电紫外成像特征量提取方法,无需进行滤波预处理,可直接求取放电区域,自动化程度高,有很强的抗扰性,而且得到的边界为连续曲线,便于后续处理。通过定义放电区域面积、周长、长轴和短轴等参数来表征放电状态,可以充分利用紫外图像信息从而更有效地评估放电状态。最后,通过应用示例说明文中所述方法在高压设备电晕放电检测中具有较高的实际应用价值。

1 C-V 模型算法原理

活动轮廓模型在 1987 年由 Kass 等提出^[15],它通过不断的曲线演化,使曲线的能量方程达到最小,即曲线收敛于目标的边缘。在优化活动轮廓模型过程中,1988 年文[16]提出水平集方法,其构造原理是将封闭曲线的演化映射到更高维度空间的水平集函数曲线的演化,如图 1 所示的封闭曲线 Z 在 t_0 和 t_1 时刻分别由曲线集 C 在水平面 $Z=0$ 映射,从而表征封闭曲线 Z 的演化。水平集方法的优点是可以自然处理边界拓扑变化,数值求解稳定,适合任意维数。

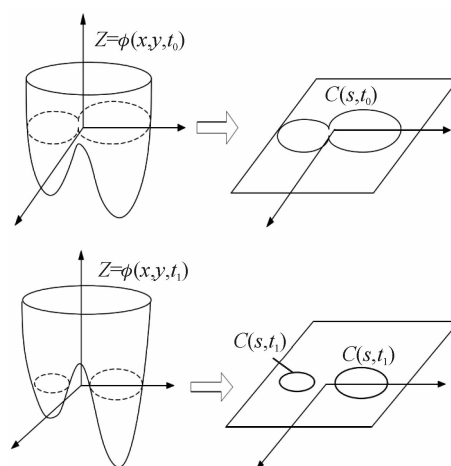


图 1 水平集表征封闭曲线 Z 在 t_0 和 t_1 时刻演化

Fig. 1 Evolution of closed curve Z at t_0 and t_1 time with level-set method

以水平集为理论基础,基于 Mumford-Shah 泛函能量方程的 Chan-Vese(C-V)模型^[17-18]开始提出并用于静止图像分割。由于 C-V 模型是一种基于区域信息的模型,并不使用基于梯度的边缘检测函数,故对于边缘模糊、强噪声的图像仍能良好地适应。

假设定义域为 $\Omega(\Omega \subset R_2)$ 的图像 $I(x,y)$ 被闭合轮廓曲线 C 划分为曲线内部区域 $inside(C)$ 和外部区域 $outside(C)$,则 C-V 模型的能量函数 $F^{[16]}$ 为

$$F(C, C_1, C_2) = \mu \cdot \text{Length}(C) +$$

$$\begin{aligned} & \eta \cdot \text{Area}(\text{inside}(C)) + \\ & \lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} |I - C_1| \, dx dy + \\ & \lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} |I - C_2| \, dx dy. \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: $\text{Length}(C)$ 是曲线 C 的周长; $\text{Area}(\text{inside}(C))$ 是 $\text{inside}(C)$ 的面积; $\mu, \eta \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 > 0$, 均为权重系数; C_1 和 C_2 分别为 $\text{inside}(C)$ 和 $\text{outside}(C)$ 的平均灰度值。前两项称为“光滑项”, 后两项称为“拟合项”。文[19]已证明当曲线 C 为真实轮廓时, 能量函数 F 达到最小。

引入水平集函数 Φ , 曲线 C 可通过式(2)隐含表达

$$\begin{cases} \text{inside}(C) = \{(x, y) | \Phi(x, y) > 0\} \\ C = \{(x, y) | \Phi(x, y) = 0\} \\ \text{outside}(C) = \{(x, y) | \Phi(x, y) < 0\} \end{cases} \quad (2)$$

同时引入 Heaviside 函数 H 和 Dirac 函数 δ , 其定义为

$$\begin{cases} H(z) = \begin{cases} 1 & \text{if } z \geq 0 \\ 0 & \text{if } z < 0 \end{cases} \\ \delta(z) = \frac{d}{dz} H(z) \end{cases} \quad (3)$$

Chan 等人参考了文[18]将式(1)改写为

$$\begin{aligned} F(\Phi, C_1, C_2) = & \mu \int_{\Omega} \delta(\Phi(x, y)) |\nabla \Phi(x, y)| \, dx dy + \\ & \eta \int_{\Omega} H(\Phi(x, y)) \, dx dy + \\ & \lambda_1 \int_{\Omega} |I(x, y) - C_1|^2 H(\Phi(x, y)) \, dx dy + \\ & \lambda_2 \int_{\Omega} |I(x, y) - C_2|^2 [1 - H(\Phi(x, y))] \, dx dy. \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中, ∇ 为梯度算子。

$$C_1(\Phi) = \frac{\int_{\Omega} I(x, y) H(\Phi(x, y)) \, dx dy}{\int_{\Omega} H(\Phi(x, y)) \, dx dy}; \quad (5)$$

$$C_2(\Phi) = \frac{\int_{\Omega} I(x, y) [1 - H(\Phi(x, y))] \, dx dy}{\int_{\Omega} [1 - H(\Phi(x, y))] \, dx dy}. \quad (6)$$

因为涉及到曲线演化问题, $\Phi(x, y)$ 要不停的演化, 记 $\Phi(t, x, y)$ 是 t 时刻 $\Phi(x, y)$ 的值。利用欧拉—拉格朗日方法推导出满足式(4)同时以水平集函数形式表达的偏微分方程

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \delta(\Phi) \left[\mu \cdot \text{div} \left(\frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \right) - \eta - \lambda_1 (I - C_1)^2 + \lambda_2 (I - C_2)^2 \right]. \quad (7)$$

式(7)中, $\text{div}(\nabla \Phi / |\nabla \Phi|)$ 表示水平集函数的单位曲率。

在计算过程中, 各自使用正则化函数(式(8))来

取代 $H(z)$ 和 $\delta(z)$, 这样可以令梯度下降流方程式(7)作用在所有的水平集上, 从而能够探测出目标区域内的孔洞, 并使能量函数达到全局最优解

$$\begin{cases} H_{\varepsilon}(z) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{z}{\varepsilon} \right) \right] \\ \delta_{\varepsilon}(z) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 + z^2} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, ε 一般取值在 $(0, 1]$ 区间。

C-V 模型在图像分割应用中有良好的效果, 它的收敛范围较大, 可有效应对拓扑结构变化, 待检测目标的边缘不需要通过梯度来定义, 所以对于较模糊的边缘也可以检测到, 具备较强的抗噪性。

2 紫外图像放电区域分割及特征量定义

2.1 基于 C-V 模型的紫外图像放电区域分割方法

使用 C-V 模型分割图像时, 权重系数的选择对式(1)中能量函数 F 表达式有影响, 需要根据不同的图像选择不同的权重系数。由于紫外成像仪拍摄的电晕放电图像都是标准化的, 可以将权重参数近似为固定值。由于式(4)中等号右边 3、4 项的性质和地位其实是相同的, 为方便起见, 置 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$; 另外, 根据几何上的等周不等式, 即曲线周长能控制其围成区域的面积, 所以取面积系数 $\eta = 0$, 仅保留长度项系数 μ 。

因为紫外图像中含有大量噪声干扰, 所以提取目标光斑边界时需要去除噪声的影响。根据式(4)的原理, 经过大量试验对比验证, 当 μ 值较大时, 相应的曲线长度对能量的影响加大, 适用于边界部分梯度较小的图像, 能较好地去除噪声影响; 当 μ 值较小时, 相应的曲线长度对能量的影响减小, 适用于边界部分梯度较大的图像, 有利于减少循环测试, 加快收敛速度。文中在利用 C-V 模型进行紫外图像分割时, 经过多次验证, 当 $\mu = 0.01/255^2$ 时, 在收敛速度较快的同时可以较好地抑制噪声的影响。

放电区域分割的数值计算主要步骤如下:

1) 选定初始曲线, 构造出初始水平集 Φ_0 。比如, 若选定初始曲线为圆形, 则 $\Phi_0(x, y)$ 的表达式为 $r - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, 其中 r 是圆半径, (x_0, y_0) 是圆心, (x, y) 是图像上任一点;

2) 计算 $C_1, C_2, |\nabla \Phi|$ 和 $\Delta \Phi$ 的值, 并根据有限差分法计算 $\partial \Phi / \partial t$;

3) 使用显示迭代法^[19]计算 $\Phi^{n+1} = \Phi^n + \Delta t \cdot L(\Phi^n)$, 其中 n 是迭代次数, Δt 是时间步长, $L(\Phi^n)$ 表示式(7)等号右边部分;

4) 检验演化是否收敛或迭代次数是否达到设定

的最大值。若收敛或迭代次数达到设定值,则停止;否则返回步骤3)。

2.2 紫外图像放电区域特征量定义

根据电晕放电的紫外图像进行放电状态评估时,需要针对图像区域进行量化参数处理。某玻璃绝缘子表面电晕放电时的紫外成像结果见图2。白色光斑是放电区域发出的紫外线成像形成的,矩形框是紫外成像仪计算光子数的区域。紫外图像携带大量放电特性的信息,如放电位置、放电区域的大致形状、放电点个数和放电区域的尺寸大小等,图像中的放电光斑具有明确的物理意义。为了尽可能高效率的利用紫外成像中丰富的物理信息,笔者从图2中提取4个特征量:光斑面积、边界周长、长轴、短轴。根据成像仪工作原理不难得知,真实放电区域越大,放电越强,辐射出的紫外线越多,光斑面积越大和边界周长越长;另外,考虑到放电区域不一定是圆形,很多情况下是细长型,所以文中还提取了长轴和短轴来表征放电区域形状。特征量定义示意图见图3。

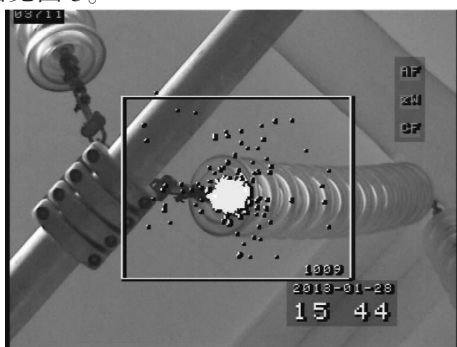


图2 悬挂绝缘子放电紫外图像

Fig. 2 UV image of suspension insulator corona discharge

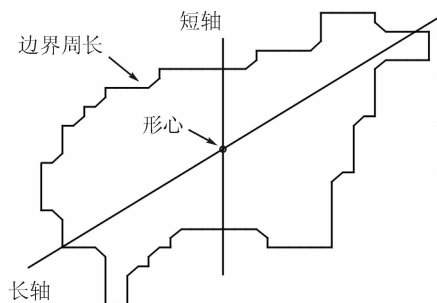


图3 特征量定义

Fig. 3 Definition of characteristic quantities

图3中所示特征量简述如下:

- 1)光斑面积。即光斑的大小,以组成光斑的像素点的个数之和来表示,单位是 pixel。
- 2)边界周长。光斑区域边界点上连续的像素点距离之和,单位是 pixel。
- 3)长轴和短轴。放电区域形状不一定是圆形,也

可能为细长型,只用面积和周长还不能很好表征放电状态,故文中提取了长轴和短轴。长轴:经过放电区域形心,边界上最远两点之间的距离。短轴:经过放电区域形心,边界上最近两点之间的距离,单位是 pixel。

3 应用示例

为了验证 C-V 模型的有效性,文中根据算法流程对多幅电晕放电紫外图像进行了放电区域分割试验。所取电晕放电紫外图像均是在某 220 kV 变电站,用南非 CoroCAM504 紫外成像仪拍下的高压设备放电紫外图像,像素为 768×576(文中分别选取代表性的单个和多个光斑电晕放电成像)。为了观察 C-V 模型的分割效果对初始轮廓设置情况的依赖性,文中设置 2 种初始轮廓,分别是圆形和矩形初始轮廓。计算模型的主要参数设置为: $\mu=0.01/255^2$, $\Delta t=0.1$, $\varepsilon=1$ 。

示例 1:单光斑分割试验。图2是悬挂绝缘子电晕放电紫外图像,肉眼可分辨出只有1个大的白色光斑,其余为噪声干扰,分割的目的是把真实的放电区域(即大光斑)从图像中分割出来。图2中白色的矩形框是紫外成像仪计算光子数的区域,为了便于观察,文中截取该矩形框作为模型输入图像,这不会影响图像分割效果,其他紫外图像也做相同处理,矩形框内像素是 387×305。示例 2:双光斑分割试验。支撑绝缘子电晕放电紫外图像见图4,像素是 387×305。肉眼可分辨出有2个大的白色光斑,其余为噪声干扰。采用 C-V 模型计算方法将真实的放电区域(即2个大光斑)从图像中分割出来。

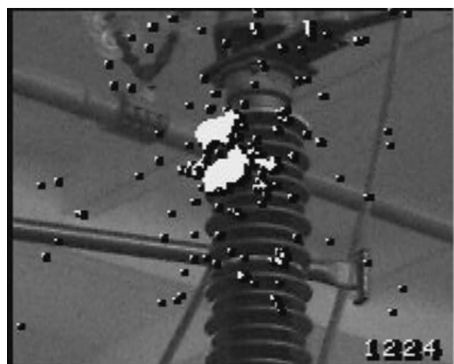


图4 支撑绝缘子放电紫外图像

Fig. 4 UV image of supporting insulator surface discharge

此外,根据图4的图像处理结果,结合图3所示的特征量定义,提取光斑面积、边界周长、长轴和短轴等特征量。结合肉眼观察以及现场断电检测结果来检验用这4个特征量来评估放电状态的可行性与有效性。

3.1 图像分割效果分析

示例 1: 示例 1 分割结果见图 5。通过比较可知, 分割单光斑时, C-V 模型对初始轮廓曲线的设置依赖性较小, 观察第 1、2 行可知, 初始轮廓设置为圆形或矩形时, 模型均能准确分割出放电光斑。

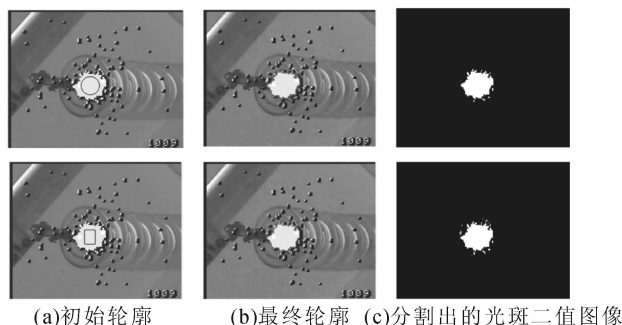


图 5 电晕放电紫外成像单光斑分割结果

Fig. 5 Segmentation results of insulator corona discharge UV images with single light spot

示例 2: 多个光斑紫外成像分割结果见图 6。通过比较可知, 无论初始轮廓是圆形还是矩形, C-V 模型均能较准确地分割出 2 个真实放电光斑。其中, 圆形初始轮廓包含的光斑数量多于矩形初始轮廓, 分割后的光斑总面积更大, 这主要是由于圆形初始轮廓所包含的初始斑点数量较后者更多, 但整体分割效果相差不大, 这也说明了该模型对初始轮廓设置情况的依赖性较小。

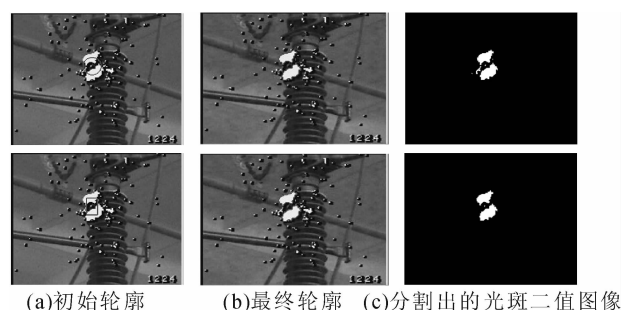


图 6 电晕放电紫外成像多光斑分割结果

Fig. 6 Segmentation results of insulator corona discharge UV images with multiple light spots

3.2 放电区域特征量提取结果分析

观察 2 个示例的分割结果可知, 除了准确分割出电晕放电光斑外, C-V 模型分割图像时会把少数噪声小光斑也分割出来。为了提取真实放电区域的特征量, 应尽可能地提高分割精确度, 剔除噪声光斑, 分离出真实放电光斑。

针对此问题, 文中在处理噪声点光斑时, 首先把光斑二值图像中所有光斑 (包括真实放电光斑和噪声光斑) 的面积计算出来, 对于单光斑图像, 认为面积最大的光斑即是真实放电光斑。实际情况中外绝

缘上可能有多个放电点, 对应多个主光斑, 为了使提取结果更具适用性, 认为与最大光斑的面积比值大于一定值的均为有效光斑, 这是因为在放电理论中, 光斑面积很小时是属于主放电外围程度很轻微的复合和反激励^[20], 对电晕放电特征提取来说无用, 其干扰可忽略不计。

以示例 2 为例说明上述处理方法, 提取 2 个真实光斑的特征量。当初始轮廓曲线分别设定为圆形和矩形时, 结果见表 1。

表 1 各放电区域特征量计算结果

Table 1 Calculation results of region parameters

初始轮廓	区域	光斑面积 / pixel	周长 / pixel	长轴 / pixel	短轴 / pixel
圆形	上方光斑	661	131	40	17
	下方光斑	848	144	43	19
矩形	上方光斑	665	134	40	17
	下方光斑	852	144	43	19

对比表 1 数据可知, 在圆形和矩形 2 种初始轮廓下, 分割出的光斑的特征量差异极小。根据上述对噪声斑点的处理方法, 圆形初始轮廓光斑面积的计算值略小于矩形初始轮廓, 对比图 6(c) 结果可知干扰光斑已经得到剔除, 对分割图像的修正是有效的。

此外, 分析表 1 参数易知, 绝缘子上有 2 处放电点。总体上来说, 2 处放电点的放电强度处于同一个数量等级, 下方放电点比上方放电点强度稍强。这个结论与肉眼直接观察紫外图像的定性结论是相符合的, 故表 1 中的 4 个特征量能较好地表征各放电点的放电状态。

之后通过断电检修发现这 2 处的平均等值盐密较高, 分别达 0.30 mg/cm^2 和 0.35 mg/cm^2 , 即污秽程度较高, 因此导致放电情况严重。检修人员及时清理了该绝缘子伞裙的污秽, 并涂覆了 PRTV 防污闪材料, 有效地消除了电晕放电现象。这一现场离线检测结果与文中的分析结果是相吻合的, 这更进一步表明了文中提出的基于 C-V 模型提取紫外图像电晕放电区域特征量方法的有效性和准确性。

4 结论

1) 由于变电站内高压设备众多, 其外绝缘电晕放电现象普遍, 故用紫外成像仪来检测某一具体设备的放电情况时, 会受到不可预测的噪声的干扰, 导致紫外成像仪提供的“光子数”这一参数常常不能准确地表征放电情况。而紫外图像携带大量关于设备放电特征的信息, 图像有着明确的物理意义, 因而提取紫外光斑特征参数来表征放电特性具有

可行性。

2)C-V模型在分割光斑区域时,无需事先对紫外图像进行滤波预处理,分割精度高,抗噪性能好,且人工干预度低。

3)C-V模型分割出的图像可能带有少量毛刺或噪声光斑,采用文中提出的剔除方法策略可以克服这个问题。根据光斑的边界点坐标,可以定义并计算出光斑面积、边界周长、长轴和短轴等参量,能够合理地描述放电状态,为后续进一步从图像的角度来研究电晕放电的强弱提供了一定基础。

4)文中方法有助于使有关从业人员不受噪声点的干扰,正确评估高压设备电晕放电位置和放电强度,为紫外成像仪的现场应用提供了新思路。

参考文献:

- [1] ILHAN S, OZDEMIR A. 380 kV corona ring optimization for AC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2): 408-417.
- [2] 李兵, 邓慰, 鄢哲, 等. 基于紫外成像的电晕放电环境影响因素的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 24-29.
LI Bing, DENG Wei, YAN Zhe, et al. Study on the environmental influencing factors of corona discharge based on UV image[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 24-29.
- [3] 杨晓琳, 李燕青, 刘云鹏, 等. 基于数学形态学的电力设备紫外图像放电区域提取[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 96-99.
YANG Xiaolin, LI Yanqing, LIU Yunpeng, et al. Ultraviolet image extraction of power equipment discharge region based on mathematical morphology[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 96-99.
- [4] 王胜辉, 李楠, 廖鹏. 放电日盲紫外成像检测图像参数提取方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(6): 40-45.
WANG Shenghui, LI Nan, LIAO Peng. Study on parameters extraction method of discharge based on solar-blind ultraviolet imaging detection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(6): 40-45.
- [5] 王胜辉, 郭文义, 律方成, 等. 电晕放电紫外成像图像参量变化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 16-20.
WANG Shenghui, GUO Wenyi, LYU Fangcheng, et al. Quantitative relation of ultraviolet imaging parameters of corona discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 16-20.
- [6] 王少华, 梅冰笑, 叶自强, 等. 紫外成像检测技术及其在电气设备电晕放电检测中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 92-97.
WANG Shaohua, MEI Bingxiao, YE Ziqiang, et al. Ultraviolet imaging detection technology and application in corona discharge detection of electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 92-97.
- [7] 何爽, 臧春艳, 何俊佳, 等. 污秽绝缘子的紫外成像检测[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 74-77.
HE Shuang, ZANG Chunyan, HE Junjia, et al. Detecting contaminated insulators by the UV imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 74-77.
- [8] 丁培, 马飞越, 高原, 等. 基于紫外图像相对光斑面积的绝缘子表面放电电量评估方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(2): 5-9.
DING Pei, MA Feiyue, GAO Yuan, et al. Study of insulator surface discharge quantitative evaluation method based on ultraviolet imaging relative spot area[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 5-9.
- [9] 耿江海, 霍亚男, 黄震宇, 等. 基于数学形态学的绝缘子闪络图像处理研究方法[J]. 电瓷避雷器, 2014(4): 21-25.
GENG Jianghai, HUO Yanan, HUANG Zhenyu, et al. Research on the image processing method of insulator flashover based on mathematical morphology[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(4): 21-25.
- [10] 闫丰, 于子江, 于晓, 等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 709-713.
YAN Feng, YU Zijiang, YU Xiao, et al. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 709-713.
- [11] 吴一全, 宋昱, 周怀春. 基于各向异性数学形态学的火焰图像边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1818-1825.
WU Yiquan, SONG Yu, ZHOU Huaichun. Edge detection of combustion flame images based on anisotropic mathematical morphology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1818-1825.
- [12] 张小琳, 景越峰, 刘军. 高能闪光照相中 Sobel 算子的边缘检测方法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1729-1733.
ZHANG Xiaolin, JING Yuefeng, LIU Jun. An improved edge detection method with Sobel operator in high-energy flash X-ray radiography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(11): 1729-1733.
- [13] 彭飞, 陈维荣, 冒波波, 等. 基于 Canny 边缘检测和聚合接续法的路轨边缘提取方法[J]. 铁道学报, 2012, 34(2): 52-57.
PENG Fei, CHEN Weirong, MAO Bobo, et al. Rail-frame-work abstraction based on canny edge detection and poly-connection[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(2): 52-57.
- [14] 胡召玲. 广义高斯模型及 KI 双阈值法的 SAR 图像非监督变化检测[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 116-122.
HU Zhaoling. An unsupervised change detection approach based on KI dual thresholds under the generalized gauss

(下转第 133 页)

- Chongqing University, 2012.
- [11] 黄兰英. 10 kV 配电线路防雷水平分析及提高方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- HUANG Lanying. Analysis on lightning protection level and study on method to improve lightening protection of 10 kV distribution line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University.
- [12] 行晋源, 李庆民, 丛浩熹, 等. 半波长输电线路潜供电弧多场耦合的动力学建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2351-2359.
- XING Jinyuan, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Research on multi-field coupled dynamic modeling of secondary arcs with half-wavelength transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2351-2359.
- [13] 章伟. 10 kV 架空配电线路防雷措施研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- ZHANG Wei. The research and application on lightning protection of 10 kV transmission lines[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [14] MEUNIER G, ABRI A. A model for the current interruption of an electric-arc[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, 20(5): 1956-1958.
- [15] TERZIJA V V, KOGLIN H F. On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1012-1017.
- [16] MOLIER C B. Numerical computing with MATLAB: Revised reprint[M]. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008.
- [17] 许颖. 3~35 kV 架空线路防雷保护[J]. 中国雷电与防护, 2003(3): 47.
- XU Ying. Lightning protection about 3~35 kV overhead line[J]. Lightning and Protection, 2003(3): 47.
- [18] LEE R E, FRITZ D E, STILLER P H, et al. Prevention of covered conductor burn down on distribution circuits-arcing protection devices[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(8): 2434-2438.
- [19] 张山, 陈维江, 李成榕, 等. 变电站 10 kV 进线保护段研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 71-74.
- ZHANG Shan, CHEN Weijiang, LI Chengrong, et al. Study on 10 kV lead-in line protection section in substations[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 71-74.
- [20] HEIER S. Grid integration of wind energy conversion system [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1998.

高源(1981—), 男, 工程师, 主要从事电力科技工作。

葛国伟(1987—), 男, 讲师, 主要从事串联真空开关技术、真空电弧基础理论与调控等研究。

廖敏夫(1975—), 男, 教授, 主要从事高电压与脉冲功率技术、高压智能电器、真空开关技术等研究。

(上接第 128 页)

- model assumption in SAR images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 116-122.
- [15] PINNANGUDI B, GORUR R S, KROESE A J. Quantification of corona discharges on nonceramic insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 513-523.
- [16] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: Active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1(4): 321-331.
- [17] OSHER S, SETHIAN J A. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on the Hamilton-Jacobi formulation[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12.
- [18] CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [19] MUMFORD D, SHAH J. Optimal approximation by piecewise smooth functions and associated variational problems[J]. Communication of Pure Applied Math, 1989, 42(5): 577.
- [20] 律方成. 基于活动轮廓模型的外绝缘紫外放电特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 967-974.
- LYU Fangcheng. External insulation ultraviolet discharge feature extraction based on active contour model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 967-974.
- 李勋(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事输变电新技术研究工作。
- 张宏钊(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事变电技术研究工作。
- 胡元潮(1988—), 男, 博士, 主要从事电力系统高压绝缘技术研究工作(通讯作者)。
- 伊图仁太(1985—), 男, 硕士, 主要从事变电技术研究工作。