

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.037

输变电设备电晕放电紫外图谱量化参数提取

李炼炼^{1,2}, 孟 刚^{1,2}, 邓 慰^{1,2}, 庄文兵³, 高 旭^{1,2}, 秦浩浩^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;
3. 国网新疆电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 日盲紫外成像是一种可视化的高压设备放电检测新方法, 为能量化分析放电, 利用 OpenCV 的图形处理功能, 对紫外图像进行数字图像处理并提取了放电区域相关参数。介绍了数字图像处理的相应算法原理和 OpenCV 中相关函数的使用方法; 利用 OpenCV 对紫外检测放电图像进行了图像灰度化、二值化、图像除噪及轮廓提取, 实现了对放电光斑面积、周长等参数的提取。最后利用对比试验方法, 通过紫外成像光斑面积和放电量之间的正相关关系, 验证了基于 OpenCV 紫外检测方法的合理性; 同时, 研究结果表明, 观测距离与紫外光斑面积近似呈现幂函数关系。文中的相关研究成果为今后电力系统中量化分析高压电气设备放电提供了一种新的方法。

关键词: 干式变压器; 温度场; 热点温度; 绕组; 负载率

Quantification Parameters Extraction from Ultraviolet Image of Corona Discharge of Power Transmission and Transformation Equipment

LI Lianlian^{1,2}, MENG Gang^{1,2}, DENG Wei^{1,2}, ZHUANG Wenbing³, GAO Xu^{1,2}, QIN Haohao^{1,2}

(1. State Grid Electric Power Research Institute, NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China;
2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
3. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumchi 830011, China)

Abstract: Solar blind ultraviolet imaging is a new method for detecting discharge of high voltage equipment visually. In order to analyze the discharge quantitatively, this study employs OpenCV image processing functions to deal with the UV images with digital image processing technology, hence the related parameters of the discharge area are extracted. The principle of corresponding digital image processing algorithms and the use of related functions in OpenCV are introduced. OpenCV is used to deal with the UV discharge image in terms of image graying, binarization, noise cancellation and contour extraction, so the extraction of discharge parameters, such as spot area and perimeter, are achieved. At last, contrast test is conducted to obtain the positive correlation between ultraviolet imaging spot area and discharge capacity, verifying the rationality of the OpenCV based ultraviolet detection method. In addition, this study also reveals that the UV discharge spot area and observation distance compose an approximate power function. This study may provide a new method for quantitatively analyzing the discharge strength of high voltage electrical equipment.

Key words: ultraviolet imaging; OpenCV; digital image processing; discharge spot area; observation distance

0 引言

现场运行的高压电气设备运行在恶劣的自然环境下, 其自身物理或者化学特性会受到影响, 绝缘性

能从而会逐步下降, 在一定条件下会发生放电甚至发生沿面闪络, 严重威胁电网的安全稳定运行。通过对放电进行检测有助于及时发现绝缘隐患, 提前采取相关预防性措施。应用于输变电设备的放电检测方法主要包括超声波法、脉冲电流法和超高频法等,

收稿日期: 2017-05-14; 修回日期: 2017-07-26

但上述方法无法精确定位放电位置,容易受到外界环境的干扰。

输变电设备电晕放电时还有紫外光对外辐射^[1],20 世纪 90 年代末,美国、南非和以色列等国家科学家研制了日盲型紫外成像仪,在电气设备电晕放电问题上得到了初步应用,具有一定的效果检测^[2],而国内的相关应用起步比较晚,大概在 2002 年^[3]。日盲紫外成像仪的工作原理见图 1。

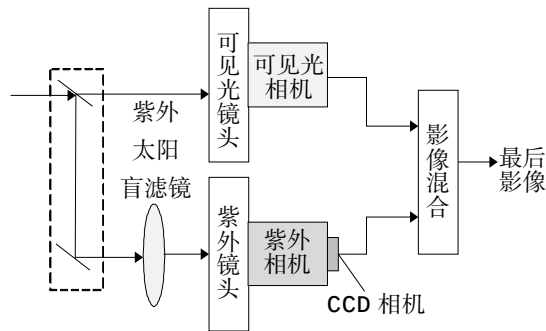


图 1 紫外成像原理图

Fig. 1 The principle diagram of the ultraviolet imager

紫外成像仪采用了双通道成像技术^[2-4],可见光通道对设备本体进行成像,紫外光通道采用了日盲滤光技术,仅探测 240~280 nm 波段紫外光信号。仪器采用了图像融合算法将紫外通—像上从而可定位放电位置,该图像为最终紫外图像。相对于传统的放电检测方法,紫外成像检测法具有在线监测、非接触、灵敏度高和精确定位的优点,且可直接获得放电所形成的图像,非常形象直观,因而近几年在电力系统中得到逐步的推广应用^[5-7]。

为将紫外成像法应用于放电的量化分析之中,需要相关的量化参数,目前工程中多采用“光子数”参数,但在实际使用中仍然有一定的局限性,如该参数与仪器的增益之间的关系很复杂,另外当现场存在较多的噪声放电点时,很难对该参数进行后期处理滤除噪声,从而导致测量误差较大,另外当紫外成像仪的视野内有多个放电区域时,其光子数为整个区域内所有放电点总的光子数,难以对各个放电点的放电强度进行量化分析。紫外成像仪输出的最直观信号为紫外图像,其图像中的放电光斑(放电在紫外图像中为一些白色区域,文中定义为光斑)区域大小与放电强弱有一定联系,基于此,文中提出了采用图像处理技术来量化表征放电强弱的新方法。论文首先利用 OpenCV 中的相关函数对放电图像进行了有效分割,然后提取了放电区域的面积、周长、等效长轴和等效短轴等参数^[6-7]。最后利用 VC++ 开发了紫外图像处理和参数提取软件,方便了工程应用。笔者的研究成果为量化分析高压设备的放电提

供了一种新方法。

1 OpenCV 简介

OpenCV(open source computer vision library)是一种开放源代码的计算机视觉库,提供了针对各种格式的视频图像的帧提取函数和多种标准图像处理算法,可以实现例如图像分割、运动分析与跟踪、特征检测以及三维重建等功能^[8]。

OpenCV 主要由 5 个大模块组成,包括 CV 模块,用于基本的图像处理与高级视屏处理;MLL 模块,用于分类、回归和数据的聚类;HighGUI 模块,用于用户交互;CXCORE 模块,用于提供 OpenCV 运行时一些基本的数据类,包括错误处理运算;CVAux 模块,用于存放一些即将被淘汰的和新出现的实验性的算法及函数^[9-10]。文中主要运用 CV 模块。OpenCV 具有以下几个优点^[11]:

- 1)可在具有 C/C++编译器系统下运行;
- 2)包含不受外部库影响的 500 多种函数,具有良好的独立性;
- 3)具备强大的图像和矩阵运算能力;
- 4)源代码公开,设计人员可以对其修改,实现自己想要的效果;
- 5)针对 Intel 的处理器进行了优化,运算速度快。

2 OpenCV 处理图像

在某变电站下雪前拍摄到的绝缘子放电紫外图像见图 2。

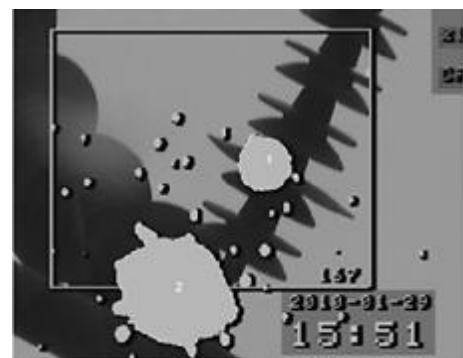


图 2 紫外检测图像

Fig. 2 The ultraviolet imager

通过图 2 可知,绝缘子上出现两个明显的放电点,但放电周围还存在多个白色的干扰点,同时图像上还存在白色取景框及时间信息,这些对象可看作干扰点,因此在提取参数之前需要对图像进行滤波,只保留放电区域。根据上述图像特点,论文提出的图像处理算法流程见图 3。

在图 3 中,首先对图像进行预处理,包括灰度化

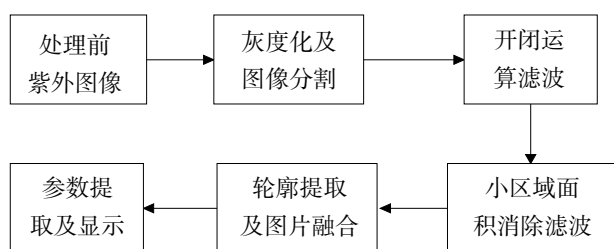


图3 图像处理流程图

Fig. 3 Image processing flow chart

及分割、形态学滤波、小区域面积消除和轮廓提取;然后计算各放电区域图像的面积、周长、长轴和短轴等参数。以图2为例,分别对上述图像处理算法和OpenCV的实现方法进行介绍。

2.1 图像预处理

2.1.1 图像灰度化及分割

1)图像灰度化。紫外成像仪输出图像为RGB彩色图像,为了提取放电区域,首先需对图像灰度化。彩色图像灰度化的原理是令彩色图像的 $R=G=B=Y$,此时彩色呈现出一种灰度颜色, Y 为灰度值,其范围为0~255。因此在进行图像灰度化前,要确定 Y 的取值,然后将 Y 值赋给 R 、 G 、 B ,一般计算 Y 值的方法有分量法、最大值法、平均值法及加权法。在OpenCV中 $cvCvtColor()$ 可以实现RGB颜色向灰度图像的转换,该函数运用的算法为加权法,其公式为

$$Y=0.299R+0.587G+0.114B. \quad (1)$$

2)图像分割。分割图像的方法很多,主要基于阈值、区域、边缘^[12]。文中采用基于阈值的方法,其原理为将灰度图的各像素在某特定值范围内赋予其为白色($Y=255$)或黑色($Y=0$),即图像的二值化,其数学模型为

$$g(x,y)=\begin{cases} 255 & f(x,y)\geq t \\ 0 & f(x,y)<t \end{cases}. \quad (2)$$

式(2)中: t 为阈值; $g(x,y)$ 为二值化后的灰度值; $f(x,y)$ 为二值化前的灰度值。

其中设定的阈值为255,处理后得到图4。

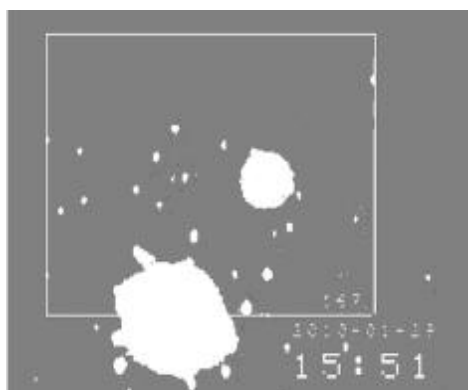


图4 处理后的二值图像

Fig. 4 The binary image processed

2.1.2 数学形态学滤波

图像经过二值化后虽然可以达到一定的去噪效果,但从图4可知,对于一些灰度值接近于放电区域的点经过二值化后仍无法去除,为了更准确地提取放电区域,采用数学形态学的开闭运算进行滤波。

1)形态学滤波的原理及方法。形态学基本运算包括腐蚀与膨胀。腐蚀运算指若某像素(值为255)邻域内只要有一个为黑(像素值为0),则该像素就由白变黑,其他保持不变。膨胀运算指若某像素邻域内只要有一个为白,则该像素就由黑变白,其他保持不变^[12]。邻域形状(结构元素)的不同会使处理结果不同。若用集合及向量位移运算表示腐蚀与膨胀运算即为^[13]

$$A \ominus B = \{x | (B+x) \subseteq A\}; \quad (3)$$

$$A \oplus B = \{x | (\bar{B}+x) \cap A \neq \emptyset\}. \quad (4)$$

式(3)表示若对结构元素 B 中每一点相对于对象 A 平移 x 后 B 中的所有点仍属于 A ,则这样的 x 所构成的集合为腐蚀运算;式(4)表示 B 的补集平移 x 后与 A 仍有交集,则这样的 x 所构成的集合为膨胀运算。

所以腐蚀运算会缩小对象轮廓,相反膨胀运算会扩大对象轮廓,若对图像单纯运用腐蚀或膨胀运算会影响后续的参数计算。但是两种运算并不互逆,因此可以级联运用,先腐蚀再膨胀为开运算,先膨胀再腐蚀为闭运算,开闭运算定义如下:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B; \quad (5)$$

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B. \quad (6)$$

式(3)、(4)中, $\circ$ 、 $\bullet$ 分别表示开运算与闭运算。

开运算可以用来消除比结构元素小的物体、在纤细点处分离物体、平滑较大物体的边界的同时并不明显改变其面积;闭运算可以用来填充物体内部比结构元素小的细小空洞、连接邻近物体、平滑其边界的同时并不明显改变其面积。考虑到放电区域通常呈圆形,因此选择的结构元素为圆形结构。

2)OpenCV实现形态学滤波。OpenCV可实现图像的开闭运算处理,见图5。图5与图4相比,消除了部分噪点,去除了细长的白色框架和数字信息。



图5 形态学处理后的图像

Fig. 5 Morphological image processed

2.1.3 小区域面积消除

从图 5 可知,采用数学形态滤波后,图像中仍然有部分未滤除干净的噪声点,采用小区域消除算法实现对噪声点的去除,步骤如下:

- 1)对图 5 采用划分区域的方法,统计各连通区域内所包含的像素点的个数;
- 2)设定一个阈值,确定各个点区域的像素值,高于阈值的设为 1,低于阈值的设为 0。

OpenCV 实现小区域面积消除求得各个光斑的面积,则经小区域消除算法处理后的图像见图 6。



图 6 小区域面积消除后的图像

Fig. 6 Small area filter image

2.1.4 轮廓提取

为计算各放电区域的面积、周长等参数,提取了个滤波后图像中的光斑区域边界轮廓点坐标。

1)二值图像轮廓提取的方法。对上述二值图,采用轮廓跟踪法提取了边界坐标,轮廓跟踪法采用连码跟踪技术^[14-15],将某一边界点定为中心点,以中心点的右水平相邻点为起始点,按逆时针标号依次为 0、1、2、3、4、5、6、7,每相邻的两个号码间的夹角为 45°,编号即为连码值,与中心点的相对位置即为连码的方向。

相对于当前边界点的 8 个连码的坐标偏移表及连码表的结构表分别见表 1、2。

表 1 坐标偏移表

Table 1 Coordinate offset table

连码值	Δx	Δy	连码值	Δx	Δy
0	1	0	4	-1	0
1	1	-1	5	-1	1
2	0	-1	6	0	1
3	-1	-1	7	1	1

表 2 连码表结构

Table 2 Even code table structure

索引号	存放内容	索引号	存放内容
0	x	4	B_1
1	y	5	B_2
2	n	...	...
3	B_0	$n+2$	B_{n-1}

通过表 1 可获取相邻点的坐标以确定相邻点像素值,以判断该中心点是否为边界点;表 2 中 0、1 存放的为跟踪起始点的 x、y 坐标;2 为边界上点的总数; B_x 为连码序列。

若连码值减小则意味着检索方向以顺时针旋转,所以连码可以控制检索的方向及对象。若在八个点中检测到边界点,则终止检测,将检测到的边界点定为当前边界点,并将其连码存入连码表,再进行检测,寻找下一个边界点。若没有检测到边界点,则将该点定义为孤点。当边界点回到跟踪起始点,且连码方向与整个边界的第一个连码的方向相同时,就得到了整个区域的边界,结束跟踪。

由于放电区域可能为多个,因此采用多区域跟踪,其步骤为:①对二值化图像进行设定,使放电区域的灰度值为 255 的点定为 1,背景点定为 0;②设置跟踪范围,在规定的范围内从左至右,从下至上的方式进行扫描,找到放电区域的一个边界点,定义为跟踪起始点;③从跟踪起始点开始进行单区域跟踪;④当某一区域跟踪完毕后,将该区域填充为背景色,以防重复跟踪;⑤重复上述步骤(除步骤①外),得到所有放电区域边界,和相关连码表。

2)OpenCV 实现轮廓提取。运用 OpenCV 实现边界提取,从二值图像中检索轮廓,并返回检测到的轮廓的个数。

得到各个区域的轮廓后,使其与原图像进行重合,同时将轮廓序列号显示在图像中。

该函数根据式(7)处理两幅图

$$dst = src_1 \times \alpha + src_2 \times \beta + \gamma. \quad (7)$$

式(7)中: α 为第 1 个图像数组的权值,定为 1; β 为第 2 个图像数组的权值,定为 0.8; γ 为常数项,定为 0.0。注意所有数组必须具有相同类型及相同的大小。运用上述方法处理后,效果见图 7。

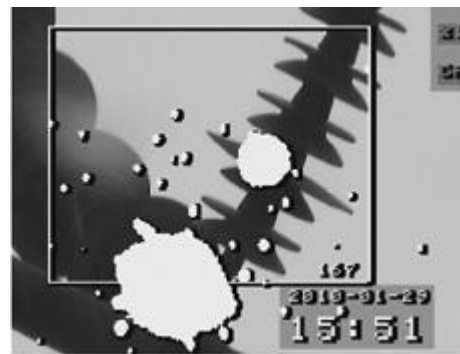


图 7 边界提取图

Fig. 7 Boundary extraction figure

从图 7 中可以看出,图像的边界与原图几乎重合,所以采用此处理方法可以有效地进行轮廓提取。

2.2 参数提取

经过轮廓提取后,会产生各区域的连码表,将连码表经线性变换可得到线段表,线段表内存有放电区域边界上各点坐标。因此通过连码表和线段表可以求出放电区域的面积参数。

区域面积的计算方法是指定区域内点的总数和。利用线段表可以很方便获取区域内部的灰度值,若将放电区域灰度值为 255 的点定义为 1,则面积为该区域中 1 的总数。计算式如下

$$S = \sum_{[x,y] \in A} f(x,y) \quad (8)$$

式(8)中,放电区域灰度值为 255 的点; $f(x,y)$ 定义为 1,其他情况下为 0; A 为某一放电区域。

3 对比试验

为验证基于 OpenCV 的紫外成像检测方法的准确性,将紫外成像的光斑面积与局部放电的放电电量进行对比研究,观测数据是否正相关。

3.1 试验方案

为了比较明显观测绝缘子的电晕放电,试验环境在湿度比较大的情况下进行,具体环境参数为:温度 28℃,湿度 85%;观测距离距离为 8 m。施加电压从零开始逐渐增大,至起始放电电压开始记录多组数据。

起始放电电压为 55 kV,终止电压为 120 kV, LDS-6 局放仪分别在不同的电压等级下记录放电数值,并通过 OpenCV 记录紫外光斑的大小,见图 8。为了减小误差,升压法及降压法各记录一次数据。

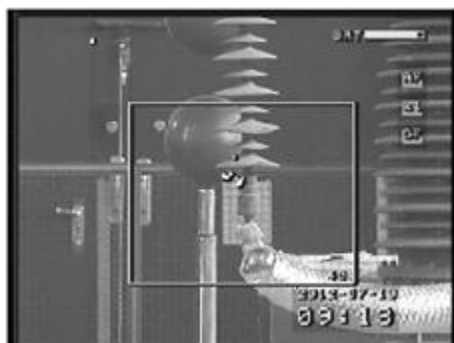


图 8 55 kV 下的加压环境下的紫外放电图

Fig. 8 UV discharge Figure under 55 kV

3.2 数据分析

经过数据分析可知,放电紫外图像光斑面积随着施加电压的增加而增加,两者之间具有较好相关性,可以用指数关系拟合。

$$S = A e^{bU} \quad (9)$$

式(9)中: S 为紫外光斑面积; U 为施加电压。拟

合后,关系曲线见图 9 中虚线所示,指数关系式为

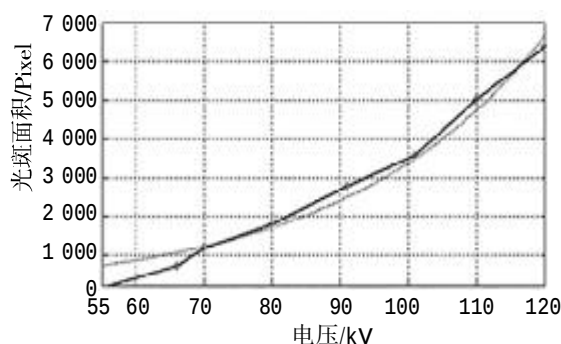


图 9 紫外光斑面积与施加电压的关系曲线

Fig. 9 Relation curve of facular area with applied voltage

$$S = 113.3 e^{0.03395U} \quad (10)$$

复合绝缘子放电量与电压的关系曲线以及紫外光斑面积与放电量的关系曲线分别见图 10、11。图 10、11 中可以看出,放电量与电压的关系曲线可以分为 3 个阶段,其原因放电形式的变化影响到放电量的大小。同样,紫外光斑面积随放电量的增加而增加,但是曲线由于放电形式的不同也明显分为几段。

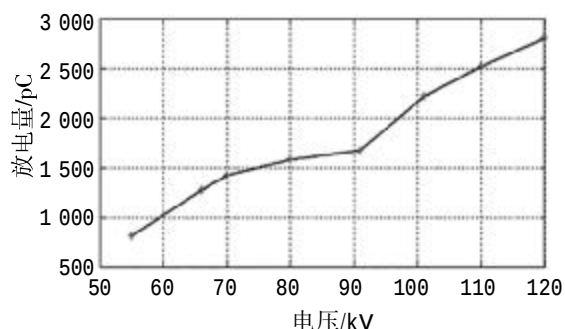


图 10 放电量与施加电压的关系曲线

Fig. 10 Relation curve of discharge quantity with applied voltage

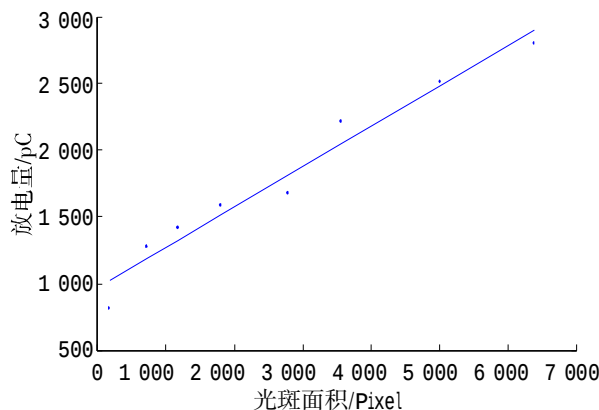


图 11 紫外光斑面积与放电量的关系曲线

Fig. 11 Relation curve of facular area with discharge quantity

对紫外光斑面积与放电电量之间的散点图采用最

小二乘直线拟合法进行分析,其表达式为

$$q=0.302s+967.5. \quad (11)$$

经过上述分析,因而可以利用紫外成像的光斑面积来估计高压绝缘子表面金具对纯空气间隙放电的放电量。

3.3 光斑面积与距离之间的关系

紫外成像仪的设计基于透镜成像原理,放电光斑面积与观测距离成反相关关系^[16-17]。当仪器增益为 70% 时,在 6 个观测距离(6、10、16、32、45、50 m)下,光斑面积随距离的变化曲线见图 12。

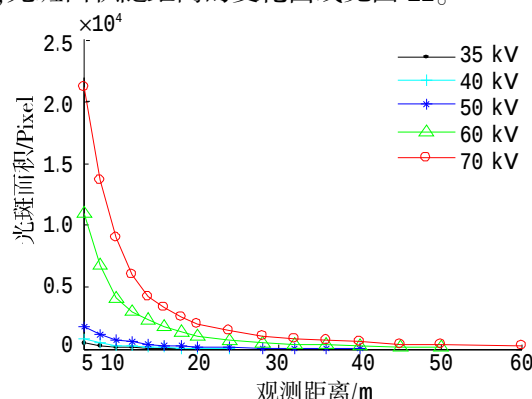


图 12 增益为 70% 时光斑面积随距离的变化曲线

Fig. 12 Relation curves of facular area with distance under 70 percent gain

由图 12 可知,随观测距离增加,光斑面积值逐渐减小,但其减小速度越慢。根据曲线的变化特征,基于幂函数对其进行拟合分析,拟合函数为

$$s(d)=Ad^{-n}. \quad (12)$$

式(12)中: A 为常量系数; d 为观测距离。不同电压等级下的拟合函数表达式见表 3。

表 3 拟合函数表达式和拟合优度

电压/kV	函数表达式	拟合优度 R
35	$s(d)=13\ 900d^{-1.854}$	0.997 7
40	$s(d)=19\ 740d^{-1.830}$	0.998 9
50	$s(d)=46\ 320d^{-1.832}$	0.998 0
60	$s(d)=303\ 400d^{-1.844}$	0.998 1
70	$s(d)=577\ 400d^{-1.833}$	0.996 5

分析可知,拟合优度 R 接近 1,幂函数对数据关系有着较高的拟合度,表明光斑面积与光斑距离近似满足幂函数关系,同时不同电压等级下的拟合函数幂指数较为接近,均值为 1.840 6。

经过进一步研究,在其他增益 50%、60% 和 80% 情况下,光斑面积随距离的变化曲线仍然近似满足式(12)所示的幂函数变化规律。

4 结语

针对高压设备表面放电的紫外图像特征,文中采用了数字图像处理算法对图像进行了灰度变换、阈值分割、形态学滤波、小区域面积消除及轮廓提取,介绍了 OpenCV 的相关图像处理函数,并实现了上述图像处理算法。

通过外施耐压的方法,记录局部放电量以及紫外光斑面积的大小,经过对比分析,验证了基于 OpenCV 的紫外成像检测方法适合于输变电设备的电晕放电。

在不同电压等级下,通过紫外成像仪观测距离与紫外光斑面积的研究,研究结果表明观测距离与紫外光斑面积近似呈现幂函数关系,且适用于不同的紫外成像仪增益。本结论为紫外光斑面积的归一化研究提供了依据,为后续不同环境条件下的紫外光斑面积研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 赵文华,张旭东,姜建国,等.尖板电晕放电光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析,2003,23(5):955-957.
ZHAO Wenhua,ZHANG Xudong,JIANG Jianguo,et al. Spectrum analysis of tip-plane corona discharges[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2003,23(5):955-957.
- [2] LINDERS M,ELSTEIN S,LINDERS P,et al.Daylight corona discharge imager[C]//Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering.London:IET,1999: 349-352.
- [3] 王胜辉. 基于紫外成像的污秽悬式绝缘子放电检测及评估[D]. 保定:华北电力大学,2011.
WANG Shenghui. Discharge detection and evaluation of filth suspension insulators based on ultraviolet imaging [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.
- [4] 张海峰,庞其昌,李洪,等.基于 UV 光谱技术的高压电晕放电检测[J]. 光子学报,2006,35(8):1162-1166.
ZHANG Haifeng,PANG Qichang,LI Hong,et al.Detection of high-voltage corona based on UV spectrum technology [J]. Acta Photonica Sinica,2006,35(8):1162-1166.
- [5] COSTA E G,FERREIRA T V.Characterization of polymeric insulator using thermal and UV imaging under laboratory condition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2009,16(4):985-992.
- [6] ZHOU W J,LI H,YI X,et al.A criterion for UV detection of AC corona inception in a rod-plane air gap[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011,18(1):232-237.

- [7] 肖孟, 文曾. 一种新型的绝缘子带电检测方法—紫外成像法[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 42-44.
XIAO Meng, WEN Zeng. New method to detect insulation on line-ultraviolet image method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 42-44.
- [8] 黎松, 平西建, 丁义洪. 开放源代码的计算机视觉类库 OpenCV 的应用[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(8): 134-136.
LI Song, PING Xijian, DING Yihong. Application of open source computer vision library[J]. Computer Applications and Software, 2005, 22(8): 134-136.
- [9] 秦小文, 温志芳, 乔维维. 基于 OpenCV 的图像处理[J]. 科技信息, 2009(32): 220.
QIN Xiaowen, WEN Zhifang, QIAO Weiwei. Image processing based on OpenCV[J]. Electronic Test, 2009(32): 220.
- [10] 马新明, 赵晓莉, 时雷, 等. 基于 OpenCV 的图像处理系统设计与实现[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(1): 87-90.
MA Xinming, ZHAO Xiaoli, SHI Lei, et al. OpenCV-based image processing system design and implementation[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48(1): 87-90.
- [11] 丁亮, 张永平, 张雪英. 图像分割方法性能评价综述[J]. 软件, 2010, 31(12): 78-83.
DING Liang, ZHANG Yongping, ZHANG Xueying. A survey of image segmentation techniques and performance evaluation[J]. Software, 2010, 31(12): 78-83.
- [12] 陈兵旗, 孙明. Visual C++ 实用图像处理专业教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 88-89.
CHEN Bingqi, SUN Ming. Visual C++ practical image processing professional course[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004: 88-89.
- [13] 武瑛. 形态学图像处理的应用[J]. 计算机与现代化, 2013, 289(5): 90-94.
WU Ying. Application of morphology in image processing[J]. Computer and Modernization, 2013, 289(5): 90-94.
- [14] 陆宗骐, 金登男. Visual C++ .NET 图像处理编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 260.
LU Zongqi, JIN Dengnan. Visual C++ .NET image processing programming[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 260.
- [15] 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.
- [16] 陈磊, 周仿荣, 马仪, 等. 悬式复合绝缘子电晕放电紫外图像光斑面积[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 60-67.
CHEN Lei, ZHOU Fangrong, MA Yi, et al. Ultraviolet image facular area vary characteristic and apparent discharge estimation of suspension composite insulator corona[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 60-67.
- [17] 王胜辉, 律方成, 李和明. 高压设备电晕紫外成像检测图像增强方法的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 15-19.
WANG Shenghui, LYU Fangcheng, LI Heming. Study on image enhancement method of high voltage equipment corona UV imaging detection[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 15-19.

李炼炼(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备高电压技术的试验研究工作(通信作者)。

(上接第 228 页)

- [15] 江汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 17-18.
JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high-voltage bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-18.
- [16] 杨坤松. 动车组车顶绝缘子湿污和内部缺陷条件下电场分布研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
YANG Kunsong. Research on electric field distribution of roof insulator on EMU under wetting contamination and internal defects conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [17] 罗勇芬, 韦加雄, 何立柱, 等. 内电极和均压环配置法优化复合绝缘子的沿面电场和电位分布[J]. 电瓷避雷器, 2009(1): 7-11.
LUO Yongfen, WEI Jiaxiong, HE Lizhu, et al. Optimization of electric-field and potential distribution along composite insulators based on configuration method of internal electrodes and grading ring[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(1): 7-11.
- [18] 王佳颖, 方春恩, 戴王松, 等. 35 kV 触头盒电场计算及优化设计[J]. 高电压技术, 2008, 33(12): 63-65.
WANG Jiaying, FANG Chun'en, DAI Wangsong, et al. Electric field calculation and optimal design of 35 kV contactor box[J]. High Voltage Engineering, 2008, 33(12): 63-65.
- [19] HARA M, NEGARA Y, SETOGUCHI M, et al. Particle-triggered pre-breakdown phenomena in atmospheric air gap under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 1071-1081.
- 杨定乾(1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力设备故障诊断及带电检测方面的工作。
- 陈赞(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网规划方面的工作。
- 丁杨(1990—), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事电网技术监督方面的工作。