

Morphological Filtering of UV Images in Smart Grid

Wen Yu, Qiqi Mao, Hong Wen

National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu

Email: 39497454@qq.com

Received: May 20th, 2014; revised: Jun. 21st, 2014; accepted: Jul. 2nd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In recent years, Smart Grid has been a research focus in the world. In Smart Grid environment, real-time observation on the corona discharge in high voltage electrical equipment through the UV imaging technology helps processing images, analyzing and warning the insulation defects in order to find the fault and deal with the defect in early time and guarantee the power system working normally. It's a systematic project to process the images. Morphology in image segmentation is studied and used to part off the corona discharge area, warning and analyzing through the equipment automatically to solve the problems about transmission lines in the odious environment which are hard for manual work. Thereby, guiding significance about maintain the power system is reached and automatic maintenance in Smart Grid is supported.

Keywords

Smart Grid, Imaging Processing, UV Imaging

智能电网中紫外图像的形态学滤波处理

喻文, 毛祺琦, 文红

电子科技大学, 通信抗干扰国家级重点实验室, 成都

Email: 39497454@qq.com

收稿日期: 2014年5月20日; 修回日期: 2014年6月21日; 录用日期: 2014年7月2日

摘要

近年来,智能电网已成为全球的研究热点。在智能电网环境中,通过紫外成像技术对高压电气设备电晕放电现象进行在线观测,对观测图像进行处理,对高压电气设备进行绝缘隐患检测分析并给出预警,实现在故障早期及时发现和处理这些隐患,保障电力运营工作正常进行。对观测图像进行处理是一个系统的工程,文章对图像分割技术中的形态学滤波处理进行了详细的研究,通过形态学滤波处理分割出电晕电弧放电区域,结合检测设备,能够自动化进行监测分析,并及时预警,解决输电线路处于恶劣复杂的自然环境中难以进行人工检测分析的问题。从而达到对电网系统进行检修维护的指导意义,为实现智能电网自动化维护提供支撑。

关键词

智能电网,图像处理,紫外成像

1. 引言

高压输电设备在大气环境中工作,会因某些原因导致绝缘性能下降,从而产生电晕和局部放电现象,继而引起闪络事故,造成供电中断。因此,准确及时地对高压电气设备进行绝缘放电检测,对保证电力系统的可靠运行具有和重要的意义。

传统的电晕放电检测方法主要有:观察法、超声波检测、泄露电流在线检测和红外成像仪观测等[1]。这些方法都有一定缺点。

紫外成像检测技术是近几年新兴的一种远距离检测交流高压线路、输变电设备外部绝缘状态的新技术,它能够发现引起电场异常的设备缺陷,精确定位放电位置、观察放电情况[2]。论文[3]对紫外成像仪产生的检测图像处理、分析架构进行了研究;对利用紫外成像技术获取的紫外图像进行有效的图像处理,能够辅助技术人员快速准确地识别和定位高压电气设备缺陷。因此,国内外研究人员近年来慢慢开始把研究的重点放在对紫外图像中放电信息进行识别和提取上,由于基于“日盲”理论的紫外成像技术近年来才开始逐步投入大规模应用,所以相对研究文献较少,仍处于探索阶段,这也是开展本课题研究的重要学术意义。

由于输电线路经常会处在恶劣复杂的自然环境下,再加上摄像头本身性能因素以及在采集中引入的噪声,会对线路本体特征的提取产生影响,因此必须进行图像的预处理以增强对比度、消减噪声影响和增强图像本体特征。常用的方法有灰度变换,直方图修正,小波变换等等。经过这些方法的处理,图像已有较好的表现。但由于形态学滤波在图像去噪中有着更加优秀的表现,本文将着重对其进行介绍。

形态学滤波处理用于对二值图像进行图像分割、细化、骨架抽取、边缘提取、形状分析,有利于改善紫外图像的分析质量,本论文在文献[3]的基础上,对紫外图像的形态学滤波处理进行了详细的研究,可以更准确得到电气设备表面电晕电弧放电的具体信息,对局部放电现象进行计算机的自动观察和监测,有助于在故障早期及时发现和排查这些隐患,保障企业生产、运营工作正常进行。

2. 紫外成像检测原理

电气设备如果出现绝缘缺陷,可能引起外部场强的变化,产生局部放电现象。放电引起空气分子电力,在带点质点复合的过程中,会产生电波、光波和电磁辐射等特征信号[4],如图1。紫外成像技术通过特殊的仪器接收放电产生的紫外线信号,经处理后成像并与可见光图像进行重叠获得双光谱图像,达

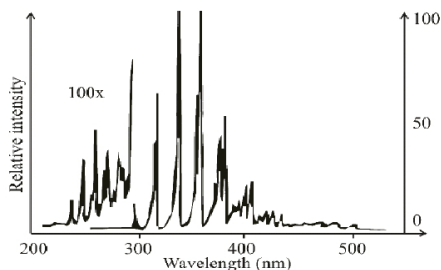


Figure 1. The corona spectra of high voltage distribution equipment

图 1. 高压电气设备电晕放电光谱分布图

到确定放电位置和强度的目的。

文献[3]构建了一个图像处理系统,对由紫外成像仪捕捉得到的紫外图像,采取图像灰度处理、图像分割、图像形态学滤波以及获取分割边缘等几个步骤识别和分割出电晕电弧放电部位,以达到自动对紫外图像进行分析判断的目的,如图2所示。

2.1. 紫外成像的技术发展

2.1.1. 国内外应用研究情况

前苏联的西伯利亚电力科学研究院于1984年左右开始将此项技术应用于电力系统的故障检测;美国电力科学研究院(EPRI)与其他公司合作,经过3年的研究探索,已经编写了1份架空线电晕现象的评估导则。此外,也有其他国家将紫外成像检测技术应用于输电线路放电检测、发电机线圈表面放电检测的报道。

国内的有关研究机构、电力公司等,近几年也开始了这方面的研究工作:武汉高压研究院在1000KV特高压基地的建设调试过程中,应用此项技术,准确地找到了放电点,解决了噪音干扰的问题;上海电力公司已经开始运用紫外检测技术指导带电水冲洗;河南、贵州、湖北、辽宁等省电力科研机构已开始了此方面的研究,并已取得了一定的进展[5]。

2.1.2. 紫外成像的技术特点

与传统的预防性试验和离线检测相比,紫外检测有以下技术特点:

- 1) 由于依靠紫外光辐射来获取设备运行技术状态和故障信息。所以,紫外检测时可以做 到不停电、不改变系统的运行状态,从而监测到设备在运行状态下的真实状态信息。
- 2) 由于紫外检测为被动检测,检测过程中不需要另备辅助信号源,因此,该检测方法具有检测手段单一、操作方便的特点。
- 3) 可实现大面积快速扫描成像。能够以图像的形式迅速、直观、形象地显示运行设备的故障位置。
- 4) 由于紫外检测仪的响应不受被测设备和检测仪器之间的相对速度的影响,因此可采用直升机巡逻,且较可靠。此举不仅能降低劳动强度,同时又可使检测不受地理环境条件的限制。
- 5) 根据紫外检测结果建立设备状态信息库,有利于实现电力设备的状态管理和向状态检修体制的过渡,并促进电网检修向智能化诊断方向发展。

2.1.3. 紫外成像在图像处理中的应用现状

1) 图像去噪

数字图像传感器在采集数据时会或多或少的产生噪声污染,这样使得图像的质量下降,对图像后续的操作,例如边缘检测,图像分割,图像融合等产生的很大的影响。所以在对图像分析和理解之前,对图像去噪处理是很有必要的。

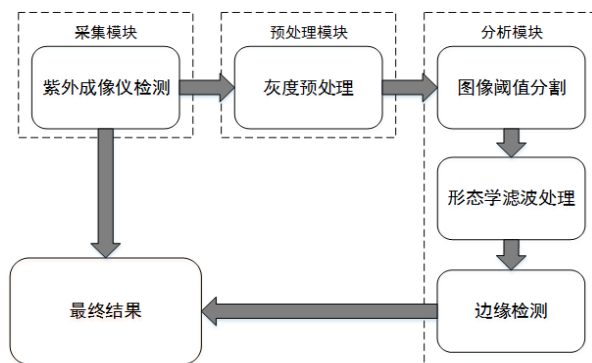


Figure 2. Image processing system

图 2. 图像处理系统

2) 图像配准

图像配准技术是图像处理与计算机视觉领域里应用广泛的技术，同时图像配准也在很多领域有着大量的应用。

3) 椭圆检测

在计算机视觉中，曲线与优势点和三角面片是三种广泛应用于图像的匹配、识别、分析与理解的图像描述基元，因此曲线提取在理论和实践上都有相当重要的作用。而椭圆是二次曲线型基元中最常用、最简单的从元和封闭曲线。因此，椭圆检测在图像处理领域中都是一个基础性的研究对象。

2.1.4. 紫外技术应用面临的问题

紫外成像检测技术作为一种输变电设备的新型检测手段，其全面应用仍有几个技术难题亟待解决：

1) 紫外光子标定问题

现有紫外检测设备，都以检测到的紫外光子数量多少来表征放电强度，但仪器显示的光子数与仪器自身的增益(可调)密切相关，而且与检测仪器与放电点的距离、空气湿度等环境因素有关，要准确反应放电强度，必须对仪器显示的光子数进行有效标定。

2) 放电强度的量化问题

以往利用紫外成像仪在现场进行电晕放电检测的过程中，是根据仪器所显示的单位时间内紫外光子数对电晕放电强度进行量化的。这种量化手段的特点是可以实时统计单位时间内目标电晕发生时带电粒子电离和复合过程中所发出的紫外光子，并以此为参量表征电晕放电的强度。但是这种手段没有客观比较的依据，即依据这样的参数，不能有效判断(电气设备)电晕放电处在什么阶段，是否存在即将发生闪络的危险，也不能有效判断(输电线路)电晕损失是否在正常的范围之内。

3) 对放电导致后果的评价问题

不同设备或同一设备不同部位的放电所导致的后果不同。如设备均压环上的放电，在一定时间段内不会影响设备的安全稳定运行，而绝缘套管表面的放电，则有可能导致系统事故。因而，正确评估放电后果，也是紫外成像检测技术在系统中应用亟需解决的一大问题。

尽管如此，紫外成像技术在输变电设备多种缺陷和故障的检测中具有简单高效、直观形象且不影响设备运行、安全方便等优点，值得推广应用和深入研究。

3. 紫外图像的处理

3.1. 图像灰度处理

彩色图像中的每个像素的颜色由 R, G, B 分量决定，而灰度图像是 R, G, B 分量相同的一种特殊的彩色

图像。

$$Gray = [0.299, 0.587, 0.114] \times [R, G, B]^T \quad (1)$$

式(1)是根据 RGB 和 YUV 颜色空间的变化关系建立亮度 Y 与 R, G, B 颜色分量的对应, 用此对应关系计算出来的亮度值代替图像的灰度值。

3.2. 图像的区域分割

在图像处理中, 图像区域区域分割技术是系统关键技术之一, 图像一旦被分割, 就可以进一步进行处理, 如基于内容的图像检索、分类及识别等。图像分割是指将图像中具有特殊意义的不同区域分开来, 并使这些区域相互不相交, 且每个区域应满足特定区域的一致性条件。在检测图像中, 放电区域是我们所感兴趣的区域, 因此需要在全图中将这一区域分割出来。

3.3. 形态学滤波处理

形态学滤波处理用于对二值图像进行图像分割、细化、骨架抽取、边缘提取、形状分析, 有利于改善紫外图像的分析质量, 本论文在文献[6]的基础上, 对紫外图像的形态学滤波处理进行了详细的研究,

数学形态学最开始的研究对象是二值图像, 称为二值数学形态学(Binary Morphology) [7]。它将二值图像看成是集合, 并用结构元素来探察。二值数学形态学是一种针对集合的处理过程, 算法简单, 适合于并行处理, 硬件实现简单, 适用于对二值图像进行图像分割、细化、骨架抽取、边缘提取、形状分析等处理。图 3 为检测图像及经灰度处理、图像的区域阈值分割之后的二值图。本节将就二值图的进一步处理进行详细的介绍。

3.3.1. 腐蚀运算和膨胀运算

对一个给定目标图像 X 和一个结构元素 S , 将 S 在图像上移动。在每一个当前位置 x , $S[x]$ 只可能有三种状态:

- 1) $S[x] \subseteq X$

这种情形表示 $S[x]$ 完全处于 X 的内部, 此时说明 $S[x]$ 与 X 相关最大;

- 2) $S[x] \subseteq X^c$

这种情形表示 $S[x]$ 在 X 的外部, 此时说明 $S[x]$ 与 X 完全不相关;

- 3) $S[x] \cap X, S[x] \cap X^c$ 均不为空

最后一种情况表示 $S[x]$ 部分在 X 的内部, 部分在 X 的外部, 此时说明 $S[x]$ 与 X 只是部分相关。因而满足第一种情况的点 x 的全体元素为图像 X 的最大相关点集。我们称这个最大相关点集为 S 对 X 的腐蚀运算, 简称腐蚀。

腐蚀在数学形态学运算中的作用是消除物体的边界, 如图 4 所示。腐蚀可以把小于结构元素的象素集合去除。如果两个物体之间有细小的连通, 那么当选择的结构元素适当时, 通过腐蚀运算就可以将两个物体分开。

腐蚀运算可以看作是将目标图像 X 中每一个与结构元素 s 全等的子集 $S[x]$ 收缩为点 x , 那么反之膨胀运算也可以将 x 中的每一个点 x 扩大为 $S[x]$ 。图 5 是膨胀运算示意图。膨胀运算在数学形态学中的作用是把图像周围的背景点合并到物体中, 同样, 如果两个物体之间距离比较近, 那么膨胀运算可能会把这两个物体连通在一起。

3.3.2. 开运算和闭运算

在腐蚀、膨胀这两个基本运算的基础上, 我们可以构造出形态学运算族, 上述两个运算的符合和集

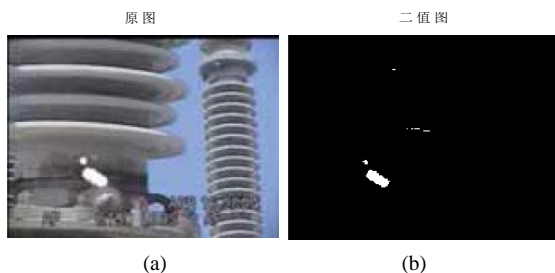


Figure 3. The original image and the binary image after threshold segmentation
图 3. 原图与转化过后的进行阈值分割后的二值图像

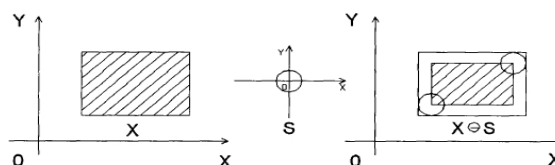


Figure 4. The sketch map of erosion operation
图 4. 腐蚀运算示意图

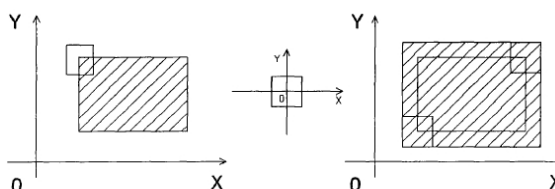


Figure 5. The sketch map of dilation operation
图 5. 膨胀运算示意图

合操作(交、并、补)组合成这个运算族所有运算构成。其中两个最重要的是组合运算是开运算和闭运算 [6]-[8]。

目标图像 X 经过一次开运算或一次闭运算，一般都会损失部分信息。根据这个特性，在图像处理的过程中，可以利用开、闭运算去除噪声，恢复图像特征。

从图 3(b)中可以看出分割图像中还有许多噪点，这些灰度值接近于放电区域的干扰点也被保留了下来，其中有些也是放电火花，但是我们重点关注的是由于绝缘损坏产生大量放电现象的部位，对于溅射到空中较远地方的少量火花不是特别关心。因此根据这些噪点的大小远小于放电集中区域的特征，采用数学形态学[9]的方法进行滤波去除噪声影响，并对图像边界进行一些平滑填充处理。图 6 为经过形态学滤波之后的分割图。

3.4. 边缘检测

图像的大部分主要信息都存在于图像的边缘中，主要表现为图像局部特征的不连续性，是图像中灰度变化比较剧烈的地方，也即是通常所说的信号发生奇异变化的地方。对一个边缘来说，有可能同时具有阶跃和线条边缘特性。由于边缘可能与场景中物体的重要特征对应，所以它是很重要的图像特征。

边缘检测如图 7 所示的实质是采用某种算法来提取出图像中对象与背景间的交界线。我们将边缘定义为图像中灰度发生急剧变化的区域边界。

滤波：边缘检测算法主要是基于图像强度的一阶和二阶导数，但导数的计算对噪声很敏感，因此必须使用滤波器来改善与噪声有关的边缘检测器的性能。需要指出，大多数滤波器在降低噪声的同时也导

形态学运算滤波

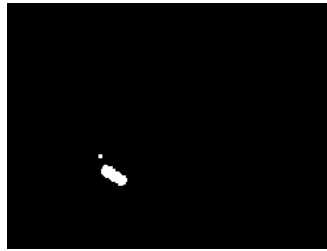


Figure 6. The segmented image after morphological filtering
图 6. 形态学滤波后的分割图像

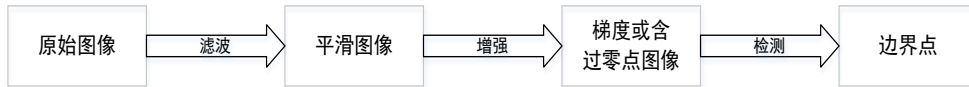


Figure 7. The process of edge detection
图 7. 边缘检测流程

致了边缘强度的损失，因此，增强边缘和降低噪声之间需要折衷。

增强：增强边缘的基础是确定图像各点邻域强度的变化值。增强算法可以将邻域(或局部)强度值有显著变化的点突显出来。边缘增强一般是通过计算梯度幅值来完成的。

检测：在图像中有许多点的梯度幅值比较大，而这些点在特定的应用领域中并不都是边缘，所以应该用某种方法来确定哪些点是边缘点。最简单的边缘检测判据是梯度幅值阈值判据。

边缘检测是检测图像局部显著变化的最基本运算。在一维情况下，阶跃边缘同图像的一阶导数局部峰值有关。梯度是函数变化的一种度量，而一幅图像可以看作是图像强度连续函数的取样点阵列。因此，同一维情况类似，图像灰度值的显著变化可用梯度的离散逼近函数来检测。梯度是一阶导数的二维等效式，定义为向量：

$$G(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

有两个重要的性质与梯度有关：

向量 $G(x, y)$ 的方向就是函数 $f(x, y)$ 增大时最大变化率方向

梯度的幅值由下式给出：

$$|G(x, y)| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

梯度的方向定义为

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1}(G_y/G_x) \quad (4)$$

其中 α 角是相对 x 轴的角度。

梯度的幅值实际上与边缘的方向无关，这样的算子成为各向同性算子。

根据以上的基本理论，在最近十几年发展了很多边缘检测器，现在就本文使用的 Canny 边缘检测器做一简介。

3.5. Canny 边缘检测器

Canny 检测阶跃边缘的基本思想是在图像中找出具有局部最大梯度幅值的像素点。检测阶跃边缘的大部分工作集中在寻找能够用于实际图像的梯度数字逼近。图像梯度逼近必须满足两个要求：

- 1) 逼近必须能够抑制噪声效应；
- 2) 必须尽量精确地确定边缘的位置。

基于以上两点，Canny 算子进行图像边缘提取的原理如下：

- 1) 图像滤波

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

其中梯度矢量为 $\nabla G = \begin{bmatrix} \partial G / \partial X \\ \partial G / \partial Y \end{bmatrix}$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial x} &= kx \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(x)h_2(y) \\ \frac{\partial G}{\partial y} &= ky \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(y)h_2(x) \end{aligned} \quad (6)$$

- 2) 计算梯度幅值和方向

Canny 算法采用 2×2 领域一阶偏导的有限差分来计算平滑后的图像 $I(x, y)$ 梯度幅值和方向：

$$G(x, y) = \sqrt{g_x^2(x, y) + g_y^2(x, y)} \quad (7)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{g_y(x, y)}{g_x(x, y)}\right) \quad (8)$$

$$f_x = \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ 1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \quad f_y = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中， $g_x(x, y)$ 和 $g_y(x, y)$ 分别为原图像 $I(x, y)$ 被滤波器 f_x 和 f_y 沿行，列作用的结果。

- 3) 对梯度图像进行非极大值抑制

幅值阵列的值越大，其对应的图像梯度值也越大，但这不足以确定边缘，为了精确定位边缘，必须细化幅值图像 $G(x, y)$ 的屋脊带，只保留幅值局部变化最大的点，这一过程就是非极大值抑制 NMS (non-maxima suppression)。Canny 算子在这个过程中使用 3×3 大小，包括 8 个方向的邻域对梯度幅值阵列 $G(x, y)$ 的所有像素沿梯度方向进行梯度幅值的插值。然后遍历图像，若某个像素的灰度值与其梯度方向上前后两个像素的灰度值相比不是最大的，那么将这个像素值置 0，这一过程把 $G(x, y)$ 宽屋脊带细化为一个像素宽，并且保留了屋脊的梯度幅值。

- 4) 双阈值方法检测和连接边缘

取阈值 Lth(低阈值)Hth(高阈值)，对梯度图像进行双阈值化处理，可得到一个高阈值检测结果和低阈值检测结果，凡是大于高阈值值的可以判断为边缘，小于低阈值的判断为非边缘。通过在前者中连接边缘轮廓，连接到端点时，到后者寻找弱边缘点，弥补前者的边缘间隙。

边缘检测算法通过图像平滑算子去除了噪声，但却增加了边缘定位的不确定性，所以，抑制噪声和边缘精确定位是无法同时得到满足的；反过来，若提高边缘检测算子对边缘的敏感性，对噪声的敏感性

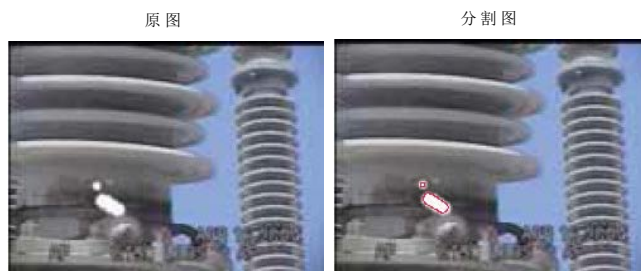


Figure 8. The original image and the final image after segmentation
图 8. 原图与最后的分割图

也同时提高了。有一种线性算子可以在抗噪声干扰和精确定位之间提供最佳折衷方案，它就是高斯函数的一阶导数。

图 8 得到的是在图 3(b)的二值图像基础上对分割图像采用；滤波、边缘检测等处理，并储存边缘像素点的位置信息，再改变原图中这些边缘点的颜色，就可以勾勒出分割区域。在本次实验中设定边缘像素为红色，图 8 为最终分割效果图。

4. 结语

本文对紫外成像技术的技术特点及其在智能电网中检测维护的情况进行了全面分析。并在文献[3]的基础上提出了对图形进行形态学滤波的方法对图像中的噪声进行抑制。这个方法体现了形态学的运算性质以及其灵活多变的特性。同时通过实验证明这个算法能有效地去除图像中的噪声，并且在电网图像的处理中有着不错的效果。有助于帮助计算机在对高压电器进行监测和预警，保障了电网的安全。

参考文献 (References)

- [1] 成永红 (2001) 电力设备绝缘检测与诊断. 中国电力出版社, 北京.
- [2] Turines, V., Archambault, C. and Hirschberger, B. (2003) UV-inspection of HV equipment. *IEEE of WSEMI Advanced Manufacturing Conference*, 225-230.
- [3] 毛祺琦, 喻文, 文红 (2014) 智能电网中的紫外成像图形分割. *智能电网*, 4, 47-52.
- [4] 冯允平 (1990) 高电压技术中的气体放电及其应用. 水利电力出版社, 北京.
- [5] 江志文, 叶会生 (2009) 紫外成像技术在电力设备故障检测中的应用初步研究. *湖南电力*, 29, 10-13.
- [6] 江萍 (2002) 基于数学形态学的图像分割及其在车牌分割中的应用. 合肥工业大学控制理论与控制工程现代控制理论及其应用, 合肥.
- [7] 蔡阳, 林再平, 周一宇 (2012) 基于形态学滤波的红外弱小目标背景抑制. *电子信息对抗技术*, 27, 38-42.
- [8] Wei, G., Qin, Y.S. and Min, D.C. (1990) Morphology and its application. *The Annual Report of the National Laboratory of Machine Perception of Peking University*, 1, 58-68.
- [9] 罗君辉, 冯平, 哈力旦等 (2005) MATLAB7.0 在图像处理中的应用. 机械工业出版社, 北京.