文章编号　2095-1531(2015)06-0926-07

微弱日盲紫外电晕自动实时检测方法

周　影[1],娄洪伟[1*],周　跃[1],毕　琳[2],张鑫磊[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 长春理工大学 计算机科学技术学院,吉林 长春 130022)

摘要:针对目前商用日盲紫外/可见光双谱段电晕探测仪对故障的判定效率低且容易受噪声干扰问题,本文提出了一种微弱日盲紫外电晕自动实时检测方法。在分析电晕目标和噪声时间域统计特性的基础上,该方法利用电晕目标在时间域连续的特点,首先完成灰度图像二值化、形态学膨胀等预处理,其次将 N 帧连续图像累加后阈值化,最后进行特征提取,获取电晕位置、面积等特征信息,实现电晕的自动实时检测。在完成设备辐射标定的基础上,可立即回溯得到故障的光子计数参考值。建立了该方法的探测概率、虚警率数学模型。将其在高速数字处理平台 TMS320DM642 上实现并输入测试视频,结果表明:在典型参数情况下该方法单次检测虚警概率为 2.85×10^{-5},处理时间小于 120 ms,可实现微弱日盲紫外电晕的实时检测。

关　键　词:日盲紫外;电晕探测;自动检测
中图分类号:TP394.1;TH691.9　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20150806.0926

Automatic real-time detection method of faint solar-blind ultraviolet corona

ZHOU Ying[1], LOU Hong-wei[1*], ZHOU Yue[1], BI Lin[2], ZHANG Xin-lei[1]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: louhw@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to enhance the corona detection efficiency of commercial SBUV/Visible double spectral corona detect systems and avoid the noise interference, an automatic real-time detection method detecting weak solar blind ultraviolet corona is proposed. Based on the analysis of statistical characteristics of the corona target and noise time-domain, utilizing corona characteristics in continuous time domain, the pretreatments like gray image binarization and morphological dilation are completed firstly, followed by accumulation of the N successive frames, then thresholding. At last the features of corona like location, size and so on are extracted. Upon completion of the calibration of radiation equipment, the corona's photon counting reference value can date

收稿日期:2015-06-15;**修订日期**:2015-07-08
基金项目:国家高技术发展研究计划(863 计划)资助项目(No. 2012AA03A707)
Supported by National High-tech R&D Program of China(No. 2012AA03A707)

back immediately. The mathematical model of detecting probability and false arm rate(FAR) is established. We implement the method and test on a high-speed digital processing platform TMS320DM642 using the video of corona, and the results show that its FAR is 2.85×10^{-5}, and the processing time is less than 120 ms, indicating that the weak corona can be detected in real-time.

Key words: solar-blind ultraviolet; corona detection; auto-detection

1　引　言

输电线路或变电器等高压电力设备由于绝缘性能的降低或表面污秽存在等因素影响,其绝缘表面的电场分布极不均匀,当电场强度增大到超过空气分子的游离强度后,会导致设备表面的空气局部被电离,这时可以听到“刺刺”的放电声,嗅到臭氧的气味,如在夜晚还可以看到蓝紫色荧光,这种现象称为“电晕放电”或简称“电晕”[1-3]。电晕的发生伴随着光、热、声等现象,导致电力设备表面腐蚀,其产生的脉冲电磁波对无线电和高频通信产生干扰,同时还是电力系统中重要的电能损耗原因之一[4-5]。因此,快速准确地检查出电晕放电的位置,可及时更换损坏的部件,减小能量损耗,保证高压电力系统可靠运行。

电晕放电过程中产生的辐射涵盖了紫外、可见和红外谱段。相对而言,在紫外谱段探测发现电晕时间早,且可工作在强烈的日光环境中,是目前主要的电晕探测手段之一。紫外电晕探测的工作谱段为 240 ~280 nm 的“太阳光谱盲区”,简称“日盲区”[6-7]。太阳在该谱段辐射被大气平流层中的臭氧强烈吸收,近地表这一谱段的辐射几乎不存在,为日盲紫外电晕探测提供极佳的背景[8-9]。为实现电晕精确检测,紫外电晕探测系统包括日盲紫外和可见两个工作通道,二者视场完全匹配。日盲紫外通道探测视场内的电晕信号,可见光通道辅助定位,实现电晕的精确探测。

目前,市场上的日盲紫外/可见光双通道电晕探测仪均无法实现对紫外电晕目标的自动检测,仅通过对特定 ROI(Region of Interst:感兴趣区)区域内的统计获取光子计数值,如以色列 Ofil 公司最新型号 Luminar 紫外电晕探测仪,判断效率低,操作人员容易疲劳。同时,在预先选定的 ROI(比目标实际占用区域要大得多)进行特征提取后回溯光子计数值的方法误差也比较大。因此,迫切需要一种可以自动检测视场内紫外电晕目标的方法。

相对于红外或可见图像处理,涉及日盲紫外成像目标检测领域的文献较少。借鉴红外和可见光图像处理方法,紫外图像处理的低通滤波[11]、多帧平均和时域递归滤波方法[12-13]仅适用于目标辐射较强,系统增益设置低的情况。闫丰[10]等人提出利用连续三帧图像(第 1 ~3 帧)进行累加再与后续三帧图像(第 2 ~4 帧)累加所得的图像进行相关运算的方法抑制 ICCD 的散弹噪声。该方法噪声抑制效果良好,而对目标的检测概率低。基于形态学的紫外目标提取算法[14-15]主要利用目标和散弹噪声点在形状上的差别实现二者的区分,要求电晕占用像素值较大,二者差别明显,方能有效剔除噪声。因此,目前文献中已提出的紫外图像处理算法仅适用于电晕紫外辐射较强时的检测,对于微弱的电晕信号检测概率低,极易将其作为干扰信号剔除,降低了高压电力设备早期探伤的概率。

针对紫外微弱电晕信号的自动实时检测,本文基于图像中散弹噪声和电晕信号在统计域分布的差别,提出了基于 MN 规则的电晕信号自动检测算法,可大幅抑制图像中随机出现的散弹噪声,实时自动检测并标示极为微弱的电晕信号,输出质心、面积等特征信息,自动回溯电晕目标的光子计数值,实现紫外电晕的自动检测及故障处理决策,应用前景良好。

2　日盲紫外 ICCD 的极微弱信号探测

由于电晕放电的日盲紫外辐射微弱,且近地表大气对日盲紫外谱段的强烈吸收或散射(根据 Modtran 模型,大气透明度为 0.2/km)。目前,唯一实用化的紫外通道面阵成像探测器件为二代日

盲紫外增强型电荷耦合器件(intensified charge coupled device,ICCD)。该器件基于外光电效应工作,典型结构如图1所示,它主要由入射窗、光电阴极、MCP(微通道板)、荧光屏、耦合光锥、可见光CCD组成。从入射窗入射的光子照射到光电阴极上,按一定的量子转换效率转化为光电子,在加速电场的作用下光电子进入MCP进行培增,然后聚焦到荧光屏激发出可见光,通过光纤光锥将图像耦合到可见光CCD上,最后由电子线路读出,完成从入射光到电子图像的转换。

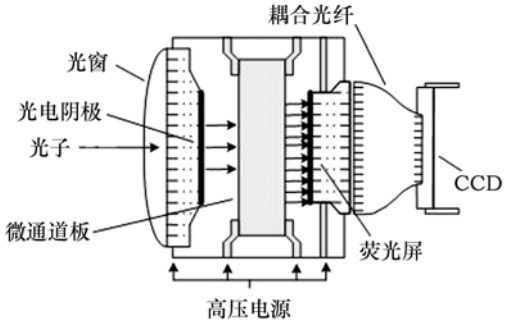


图1 日盲紫外ICCD结构原理图

Fig. 1 Structure diagram of solar-blind ultraviolet ICCD

为实现微弱电晕信号探测,日盲紫外ICCD内部的MCP一般为V形两级级联结构,可提供超过106的电子增益,具备光子计数探测能力[16]。日盲紫外极微弱信号探测时的目标和噪声在如此高增益作用下,其特征与常见的红外、可见图像差异非常明显。电晕系统中日盲紫外通道的主要噪声来源为环境中带外散射光子经光电阴极转换后的光电子倍增后的散弹噪声,表现为日盲紫外图像中随机分布的白色斑点,如图2所示。该图采用中国科学院长春光机所研发的日盲紫外/可见光双谱段电晕探测仪对晴朗天空拍摄,无目标。

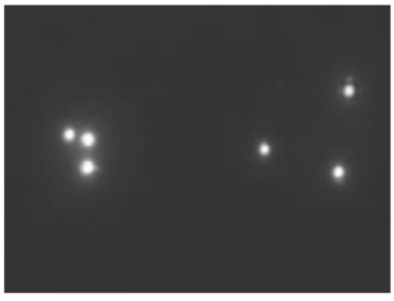


图2 日盲紫外ICCD的散射噪点

Fig. 2 Scattering noise of solar-blind ultraviolet ICCD

对电晕系统中散弹噪声的分析与建模是抑制噪声、设计目标检测算法的基础。在日盲紫外电晕探测中,微弱电晕信号的单帧图像与散弹噪声在面积、平均灰度等特征差别微小,并不能成为与二者区分的标志。二者唯一的差别在于时间和空间分布。

散弹噪声绝大部分是环境中的散射光子噪声,由于环境中光子的随机散射,图像中出现的散弹噪声理论上将在图像中随机分布,也即是说在二维平面上均匀随机分布。不过由于该分布与滤光片均匀性、光电阴极响应均匀性等因素有关,不同的探测系统差异较大。为获取散弹噪声位置分布,将电晕探测系统面向晴朗天空,分析记录了约2 h、7 200帧图像中的散弹噪声质心坐标(x,y),将二维平面划分为48×48个小块,统计质心落入其中的噪点数量,得到的分布如图3所示。可见其与二维均匀分布较为接近,可按照二维均匀分布建模。

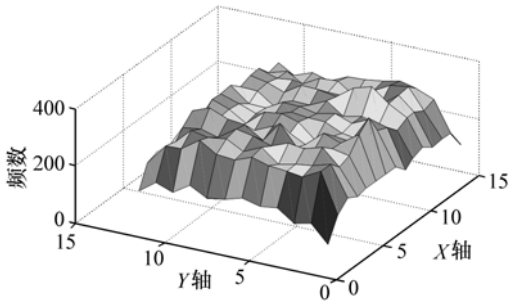


图3 散弹噪声位置统计分布

Fig. 3 Statistical distribution of shot noise's location

3 基于MN规则的电晕自动检测算法

3.1 基本思路

在探测微弱电晕信号时,由于信号微弱,高增益下单帧图像中目标与散弹噪声并无明显区别,仅在多帧连续图像中存在差别。散射噪点由于在二维图像中随机均匀分布,在某一位置持续出现的概率极低,而目标由于持续存在,其在图像中表

现为在某一位置连续多帧出现。利用上述特点,采用 MN 规则进行噪声抑制、目标检测是行之有效的方法。MN 规则多用于航迹起始或删除逻辑,在 N 次探测中目标出现次数超过 M 次,即认为是有效目标;否则认为是杂波,予以剔除。

如前所述,电晕探测系统为探测极微弱的电晕信号,增益设置较高,电晕信号和散弹噪声点均占有几十甚至数百个像素的面积,且由于系统采用凝视探测工作模式,在连续帧中电晕在序列图像中位置基本保持不变,而散弹噪声却随机分布。因此,可以将当前帧后面的 M 帧图像二值化后直接相加得到累加图像,然后逐个像素与 N 进行比较,再与当前图像相与后进行特征提取。由于目标具有一定的面积,且在某一位置持续出现,这样在相与图像后会留下一定面积的连通体,而噪声由于帧间相互独立,连续帧中在同一位置附近出现次数超过 N 次的概率极小,噪点在与图像中将不会再有连通体出现。这就是本文提出的基于 MN 规则的电晕自动检测算法的基本思路,如图 4 所示。

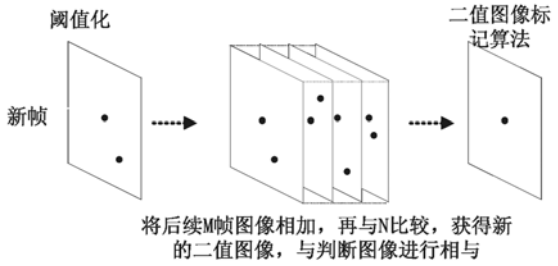


图 4　本文算法基本思路

Fig. 4　Basic idea of the algorithm in this paper

该算法将 MN 判断规则转化为连续帧图像的运算,利用高速图像处理 DSP 芯片的内部流水线优化处理。同时最终图像中绝大部分像素为零,能够以较快速度完成二值图像的标记运算,保证检测的实时性。

3.2　算法流程

电晕探测系统具有日盲紫外和可见两个工作通道,该算法将实时处理日盲紫外通道的实时视频,完成视场内电晕信号自动检测,标记后与可见光通道实现像素级融合,并输出至终端用户。结合与可见通道的融合,本算法流程如图 5 所示。

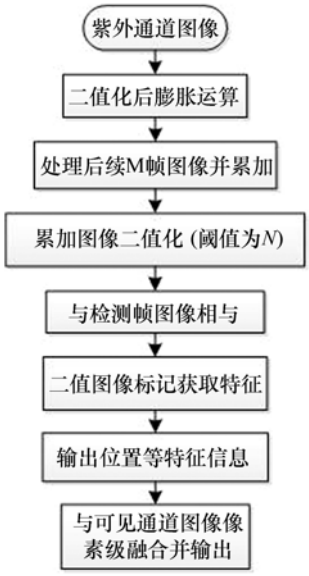


图 5　自动检测算法流程

Fig. 5　Flow diagram of algorithm in this paper

(1)紫外图像的预处理,包括灰度图像的二值化和形态学膨胀运算。根据图像特征分析,极微弱电晕探测中日盲紫外图像灰度级并不能提供更多信息,因此首先二值化有利于减小处理信息量,提高实时性。而形态学膨胀运算则可以减小因大气扰动或平台抖动带来的目标漂移,提升对目标的探测概率。

(2)二值图像累加。设预处理完成后的图像帧编号为 i,在某一位置 (x,y) 处连续 N 帧的像素值为 $X(x,y,i)$,$X(x,y,i+1)$,$\cdots X(x,y,i+N-1)$,则在累积图像中该像素值为:

$$CX(x,y) = \sum_{i=0}^{N-1} X(x,y,i) . \tag{1}$$

(3)MN 规则判断与特征提取,获得二值特征分析图像 Y,并进行二值图像特征提取,获取连通体的质心、面积等特征。判断规则如下:

$$Y(x,y) = \begin{cases} 1 & CX(x,y) \geqslant M \\ 0 & CX(x,y) < M \end{cases} . \tag{2}$$

(4)实现可见光与图像 Y 的像素级融合,并对检测到的连通体开窗跟踪,输出质心、面积、灰度等特征,如已完成标定,可直接回溯电晕光子计数值,供用户参考决策。设可见光图像为 V(颜色分量),电晕显示颜色为 K,则融合图像 F:

$$F(x,y) = \begin{cases} K\ Y(x,y) = 1 \\ V\ Y(x,y) = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

3.3 算法的性能与参数选择

对于日盲紫外图像中的电晕目标,在帧积分时间内系统收集到的能量服从泊松分布,对应到图像帧中是否出现可认为服从0~1分布,假设出现概率为P_S,则在M帧中出现次数为N实际上是服从二项分布,那么其通过MN规则,被判断为目标的概率为:

$$P = \sum_{j=N}^{M} C_M^j P_S^j (1 - P_S)^{M-j}. \quad (4)$$

上述公式对可疑电晕信号和散弹噪声均成立,所不同的仅仅是二者的单帧出现概率差别较大。根据散弹噪声在图像中随机均匀分布模型,散弹噪声的单帧出现概率要比目标小得多。设每帧散弹噪声点数量为K,噪声点所占面积为A,$S \cdot Q$为图像的分辨率,则每个散弹噪声在检测窗内出现的概率可以用下式近似表示:

$$P_{SN} = \frac{K \cdot A}{S \cdot Q}. \quad (5)$$

典型情况下,散弹噪声点为20 Counts/Frames,典型增益设置情况下噪声面积为8 pixel×8 pixel。设电晕信号由于能量微弱,单帧出现率仅为80%,如$M=3$,$N=2$,按照式(1)得到对目标的单次探测概率为89.6%,虚警概率为2.85×10^{-5},处理时间仅为120 ms,完全满足电晕信号自动定位的需求。该算法中M、N的选择可以用上述模型计算后择优选择,也可以根据所需性能参数以及场景中散弹噪声情况进行动态选择,以获取最佳性能。

4 算法应用与结果分析

将上述算法在TI公司以TDS320DM642为核心处理器的自研电子学硬件平台上实现,如图6所示。两个输入通道可同时输入紫外和可见的实时视频,输出通道则为标记完成后的融合视频,算法的核心代码已使用线性汇编语言大幅优化。

为检验算法性能,使用中国科学院长春光机所研制的日盲紫外/可见光双谱段电晕探测仪在陕西某330 kV电厂拍摄记录的紫外和可见序列图像为例说明该算法的工作流程。图像在日光条件下拍摄。

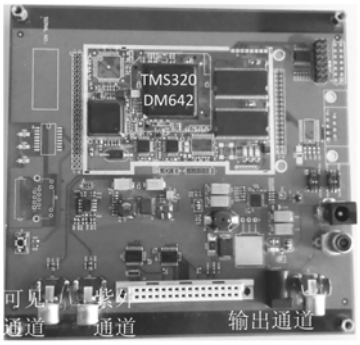


图6 电子学硬件平台

Fig. 6 Hardware platform of electronics

图7为4帧连续紫外图像,由图可知其电晕信号很微弱,第3帧出现了丢失。算法中参数选择为$M=3$,$N=2$。按照图5的流程,以第i帧为处理对象,将后续3帧预处理后累加再阈值化,最后与第i帧预处理后图像相与,得到的紫外通道最终处理图像为图8(a)所示。对该图像进行特征提取,得到电晕信号的位置为(181,133),对当前帧($i+3$)预处理后的图像在检测到的目标位置开窗,与可见图像进行像素级融合,如图8(b)所示,红色区域即为检测到的电晕信号,将检测到的

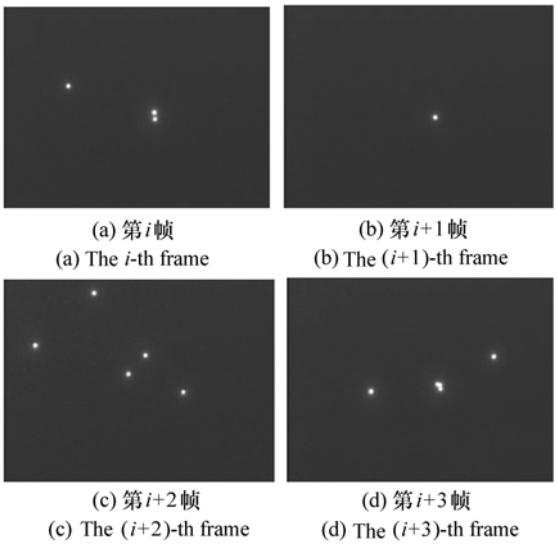


图7 日盲紫外序列帧

Fig. 7 Sequence frames of solar-blind ultraviolet image

(a) 紫外通道处理图像　(b) 融合图像
(a) Processed UV image　(b) Fusion image

图 8　算法处理结果

Fig. 8　Processing result by the algorithm in this paper

电晕信号使用青色方框标记,并检测电晕信号所占像素,表征电晕强度用于用户参考。为在野外环境下便于观察,紫外通道融合时采用了红色而非目前电晕系统中普遍采用的白色。

5　结　论

日盲紫外电晕探测由于目标能量微弱需工作在光子计数工作模式,其主要干扰信号为环境中的散弹噪声。本文分析了噪声来源,建立了统计分布模型。在此基础上,提出了基于 MN 规则的微弱日盲紫外电晕自动实时检测方法,并建立了该方法的探测概率与虚警概率数学模型。在典型参数情况下该方法单次检测虚警概率为 2.85×10^{-5},处理时间小于 120 ms。

该方法可解决目前各类紫外电力电晕探测系统中无法完成极微弱电晕信号自动检测的问题,对电晕信号检测概率高,且算法简单、实时性好,适用于电晕系统自动或人工巡线、监测等应用。

参考文献:

[1] 张海峰,庞其昌,陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表,2006,43(482):6-8.
ZHANG H F,PENG Q CH,CHEN X CH. The characteristics of high-voltage corona and its dectection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2006,43(482):6-8. (in Chinese)

[2] 尹立敏,张东建,陶玉忠. 基于数学形态学的电晕日盲紫外图像处理方法研究[J]. 东北电力大学学报,2013,33(1/2):148-151.
YIN L M,ZHANG D J,TAO Y ZH. Corona solar blind ultraviolet image detecting method[J]. *J. Northeast Dianli University*,2013,33(1/2):148-151. (in Chinese)

[3] 律方成,戴日俊,王胜辉,等. 极不均匀电场中电晕放电紫外成像图像参量变化特性研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(2):1-7.
LU F CH,DAI R J,WANG SH H,*et al*.. Study on the corona discharge ultraviolet image parameters characteristic in extremely uneven electric Field[J]. *J. North China Electric Power University*,2012,39(2):1-7. (in Chinese)

[4] 叶柏松,袁永刚,王继强,等. 一种便携式电晕检测紫外相机的设计[J]. 红外,2013,34(4):24-27.
YE B S,YUAN Y G, WANG J Q,*et al*.. Design of a portable UV camera for corona detection[J]. *Infrared*,2013,34(4):24-27. (in Chinese)

[5] 崔昊杨,陈琳,汤乃云,等. 紫外成像技术在电力设备局部放电探测中的应用[J]. 上海电力学院学报,2012,28(1):93-96.
CUI H Y,CHEN L, TANG N Y,*et al*.. The application of UV imagery technology in electrical equipment PD detection [J]. *J. Shanghai University of Electric Power*,2012,28(1):93-96. (in Chinese)

[6] SHONG K M,KIM Y S,KIM S G. Images detection and diagnosis of corona discharge on porcelain insulators at 22.9 kV D/L[J]. *IEEE*,2007,1062:462-466.

[7] YIN L M,ZHANG Y. Ultraviolet image processing method in corona detection[C]. WCSE'09. Second International Workshop on Computer Science and Engineering,Qingdao,China,28-30 Oct. 2009:327-331.

[8] 杨承,曾钦勇,朱大勇,等. 日盲型紫外探测系统中目标定位的研究[J]. 激光技术,2008,32(2):140-142.
YANG CH,ZENG Q Y,ZHU D Y,*et al*.. Study on the target location in solar blind ultraviolet detecting system[J]. *Laser Technology*,2008,32(2):140-142. (in Chinese)

[9] IVANOV O P,STEPANOV V E,SMIRNOV V S,*et al*.. Development of method for detection of alpha contamination with

using UV-camera "DayCor" by OFIL[M]. New York:IEEE Press,2011:2192-2194.

[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 F,YU Z J,YU X,*et al*.. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. *Opt. Precision Eng*.,2006,14(4):709-713. (in Chinese)

[11] 刘云鹏,马国明,刘肇鸥,等. 低通滤波在紫外成像降噪处理中的应用[J]. 高压电技术,2007,3(5):129-132.
LIU Y P,MA G M,LIU ZH O,*et al*.. Application of low pass filter technology in electric equipment UV detection[J]. *High Voltage Engineering*,2007,3(5):129-132. (in Chinese)

[12] 赵玉环,闫丰,隋永新,等. 紫外序列图像中目标的提取[J]. 光电工程,2007,34(11):10-13.
ZHAO Y H,YAN F,SUI Y X,*et al*.. Target extraction from the ultraviolet image sequences[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2007,34(11):10-13. (in Chinese)

[13] 赵玉环,闫丰,于子江,等. 日盲紫外图像的降噪[J]. 计算机工程与应用,2007,43(23):77-79.
ZHAO Y H,YAN F,YU Z J,*et al*.. Noise-reduction of solar blind ultraviolet image[J]. *Computer Engineering and Applications*,2007,43(23):77-79. (in Chinese)

[14] 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 X L,LI Y Q,LIU Y P,*et al*.. Ultraviolet image extraction of power equipment discharge region based on mathematical morphology[J]. *Power System Technology*,2008,32(7):96-99. (in Chinese)

[15] 赵玉环,王勤,张利伟,等. 数学形态学在紫外目标检测中的应用[J]. 计算机工程与应用,2009:45(29):220-222.
ZHAO Y H,WANG Q,ZHANG L W,*et al*.. Mathematical morphology application in real-time detection of target in solar blind ultraviolet image[J]. *Computer Engineering and Applications*,2009,45(29):220-222. (in Chinese)

[16] HE L F,CHAO Y Y,KENJIUZHUKI A. A linear-time two-scan labeling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*,2008,17(5):197-202.

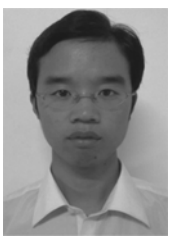
作者简介:

周 影(1986—),女,吉林松原人,硕士,工程师,主要从事信息处理、信息安全方面的研究。E-mail:zhouy@ ciomp.ac.cn

毕 琳(1984—),女,吉林松原人,博士研究生,讲师,主要从事计算机科学技术方面的研究。E-mail:bilin7080@163.com

娄洪伟(1980—),男,吉林长春人,硕士,副研究员,主要从事计算机网络、信息安全方面的研究。E-mail:louhw@ ciomp.ac.cn

张鑫磊(1986—),男,吉林公主岭人,硕士,工程师,主要从事计算机技术方面的研究。E-mail:zhangxl@ ciomp.ac.cn



周 跃(1983—),男 ,四川南充人,博士,副研究员,主要从事图像算法处理方面的研究。E-mail:zhouy385@ ciomp.ac.cn