

DOI: 10.7667/PSPC170283

基于颜色空间变量的输电线图像分类及特征提取

周 封, 任贵新

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对输电线图像背景复杂多变和单一图像处理方法难以有效处理各种背景类型输电线图像的问题, 提出一种基于颜色空间变量的输电线图像分类及特征提取方法。首先根据输电线图像各颜色空间的变量值与图像特征之间的关系对图像进行分类。然后根据不同类别图像特征选用适合的滤波方法通过两次滤波结合去噪, 并采用自适应直方图分段均衡化增强图像对比度。通过对 Otsu 算法得出的阈值进行线性变换确定 canny 边缘检测参数, 提取输电线路边缘。最后根据输电线形状特征和概率霍夫直线变换与形态学运算提出一种边缘优化方法, 较好地去除非输电线边缘。结果表明: 该方法可以有效处理各种背景类型图像, 为输电线路图像智能化处理提供了一种新的思路和方法。

关键词: 输电线; 颜色空间; 图像分类; 图像预处理; 边缘特征提取

Image classification and feature extraction of transmission line based on color space variable

ZHOU Feng, REN Guixin

(College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Considering the complicated and variable background of transmission line image, the single method of image processing is difficult to effectively deal with various background types of transmission line images, thus a method of image classification and feature extraction based on color space variable is proposed. Firstly, according to the relationship between the variable value of each color space and the image feature of the transmission line image, the image is classified. Then, the appropriate filtering method is selected according to the different image features. The noise is removed by combining two filtering, and the adaptive histogram segmentation equalization is used to enhance the image contrast. The parameters of the canny edge detection are determined by linear transformation of the threshold obtained by the Otsu algorithm to extract transmission line edge. Finally, according to the shape feature of transmission line and the probability Hough linear transformation and morphological operation, a method of edge optimization is proposed and the non-edge of transmission line is removed better. The results show that the method can effectively deal with various background types of images, providing a new idea and method for the intelligent processing of transmission line images.

This work is supported by Science and Technology Program of Heilongjiang Province (No. GZ11A213).

Key words: transmission line; color space; image classification; image pre-processing; edge feature extraction

0 引言

输电线路故障会严重影响电力系统运行的稳定性, 造成非常大的经济损失^[1-5]。利用智能视频对输电线路进行在线监测, 通过图像处理技术分析输电线路图像, 实时监测输电线路状态并在故障发生之前做出应对措施, 可以减少故障发生频率, 最大程度地减少损失^[6-9]。

输电线路图像处理包括图像灰度化、去噪、对比度增强、特征提取和特征匹配等步骤^[10-13]。目前, 输电线路图像处理方面的研究多集中于通过优化图像处理算法来提高算法性能并以此来增强图像处理效果。文献[14]基于输电线路直线几何特征提出一种局部滤波方法, 用来滤除图像中输电线之间的部分噪声。文献[15]将分类器和等矩取点配对机制与 Hough 变换算法融合, 以此提高算法的可靠性。文献[16]利用最大类间方差法确定 Canny 边缘检测阈值, 加强算法自适应性。但是, 不同背景类型图像其适合的处理方法不同, 即使是性能非常优越的算

基金项目: 黑龙江省科技计划项目 (GZ11A213); 黑龙江省教育厅科技及人才项目 (12541176)

法也不可能针对各种背景类型的输电线路图像都做出适当的处理^[7]。因此,根据图像特征对图像进行分类处理是解决问题的一种行之有效的方法。

本文根据输电线路图像不同颜色空间的变量值与其背景特征的关系,总结出了一种图像分类方法,并针对不同背景图像讨论适合的图像滤波方法,再进行自适应对比度增强处理。此外,还提出了一种边缘优化方法,能够较好地去除背景边缘,保留输电线边缘特征。

1 输电线路图像分类

输电线路图像拍摄的过程中,由于光照强度、所处环境和天气状况等不同因素的影响,导致所拍摄的输电线路图像背景各异。常见的背景类型有:背景偏暗、背景正常、背景偏亮、背景为湛蓝色的天空、背景为夕阳染成橘红色的天空、背景为白茫茫的雪地和背景为深绿色的山地等。如图 1 所示,六张输电线路图像背景各不相同,输电线边缘特征强度同样差别很大,因此有必要根据不同背景输电线路图像特征选用适合的图像处理方法对其进行处理。



图 1 不同背景下的输电线路图像

Fig. 1 Transmission line images under different background

理想状况下,比如光照正常时,如果图像背景简单,输电线特征较为突出,只需要对图像进行简单的滤波处理就可以进行边缘特征提取。但因为曝光过度或光照不足等其他因素的影响使输电线路图像特征较为模糊时,就需要对图像进行对比度增强

处理,而且其处理效果往往由于图像背景颜色分布的不同而不同。本文根据输电线路图像多个颜色空间中各变量值与图像特征之间的关系,将图像按背景特征分为如下几类:特殊颜色背景类图像、前景突出类图像、背景突出类图像、正常背景类图像和雪天类图像。

对于雪天类图像,因为覆雪,图像整体颜色过度统一,许多雪天类图像前景背景差别不明显,所以有必要对其进行分类处理。据统计,1000×1000 像素的非覆雪类图像或轻度覆雪类图像,其 RGB 空间三通道像素值都在 230~255 范围内的像素数量一般小于 5000 个,而覆雪图像满足条件的像素数量往往大于 10 000 个,有些图像满足条件的像素数量甚至可以达到十几万个。本文将阈值设为 10 000,规定输电线路图像中满足条件的像素数量 n 大于 10 000 时,将图像归类为雪天类图像。

正常颜色背景图像 RGB 三个通道的像素平均值都比较接近,据统计,当图像 RGB 三通道像素平均值之差的绝对值超过 20 时,输电线路图像特征表现为某一种颜色覆盖范围大,颜色较为明显突出,这种情况会严重影响图像的正常处理。本文将阈值设为 23,规定如果图像 RGB 三通道像素平均值之差的绝对值有一个超过设定阈值时,将图像归类为特殊颜色背景类图像。

通常我们把最大类间方差法求得的值作为前景背景分割阈值。本文规定,在前景背景分割阈值小于图像灰度平均值的条件下,如果图像灰度平均值大于 170 且像素灰度平均值与所求前景背景分割阈值之差的绝对值小于 40、和图像 RGB 三通道像素平均值之差的绝对值均小于 8 时,将图像归类为前景突出类图像;如果图像灰度平均值小于 120,且当灰度平均值与前景背景分割阈值之差的绝对值大于 40 时,将图像归类为背景突出类图像,否则将图像归类为正常背景类图像。

此外,光照强度也是影响图像背景特征的重要因素。本文以图像 HSV 空间中亮度通道的像素平均值 V 作为划分标准,当 V 值大于 190 时,将图像归类为光照强烈类图像; V 值小于 150 时,将图像归类为光照不足类图像; V 值介于二者之间时,将图像归类为正常光照类图像。如图 2 所示是对文中所列举的六张图像的各颜色空间变量值的统计图。

从图 2 中可以看出,雪天背景图像满足 RGB 空间三通道像素值都在 230~255 范围内的像素数量接近 20 000 个,非雪天背景图像满足条件的像素个数均小于 4000;背景颜色突出类图像(编号为 2、5、6)的 RGB 三通道像素平均值之差的绝对值均超过 20;

对于正常光照类图像, 随着光照强度减弱, 图像像素灰度平均值和亮度通道像素平均值均依次减小。按照文中所述方法对六张图像进行分类(按编号顺序排列), 分别为正常光照类图像、光照较强的特殊颜色背景类图像、光照不足类图像、光照不足类图像、光照较强的特殊颜色背景类图像和特殊颜色背景的雪天类图像。

1	2
<pre> 程序参数列表 符合雪的像素总值 2496 图像灰度平均值 172.036 r空间灰度平均值 164.579 g空间灰度平均值 173.79 b空间灰度平均值 183.148 rb空间灰度平均值绝对值 18.5696 rg空间灰度平均值绝对值 9.21176 gb空间灰度平均值绝对值 9.35785 亮度通道平均值 183.287 前景与背景分割阈值 152 otsu阈值与灰度值差值 20.036 第二次前景与背景分割阈值 100 </pre>	<pre> 程序参数列表 符合雪的像素总值 3205 图像灰度平均值 193.024 r空间灰度平均值 172.192 g空间灰度平均值 199.218 b空间灰度平均值 216.152 rb空间灰度平均值绝对值 43.9596 rg空间灰度平均值绝对值 27.026 gb空间灰度平均值绝对值 16.9336 亮度通道平均值 216.853 前景与背景分割阈值 196 otsu阈值与灰度值差值 2.97632 第二次前景与背景分割阈值 133 </pre>
3	4
<pre> 程序参数列表 符合雪的像素总值 553 图像灰度平均值 142.242 r空间灰度平均值 140.423 g空间灰度平均值 142.114 b空间灰度平均值 148.024 rb空间灰度平均值绝对值 7.6003 rg空间灰度平均值绝对值 1.6988 gb空间灰度平均值绝对值 5.9895 亮度通道平均值 148.085 前景与背景分割阈值 189 otsu阈值与灰度值差值 33.2415 第二次前景与背景分割阈值 75 </pre>	<pre> 程序参数列表 符合雪的像素总值 61 图像灰度平均值 142.702 r空间灰度平均值 144.888 g空间灰度平均值 141.931 b空间灰度平均值 149.901 rb空间灰度平均值绝对值 3.98714 rg空间灰度平均值绝对值 2.9576 gb空间灰度平均值绝对值 1.02954 亮度通道平均值 145.846 前景与背景分割阈值 186 otsu阈值与灰度值差值 36.7023 第二次前景与背景分割阈值 74 </pre>
5	6
<pre> 程序参数列表 符合雪的像素总值 118 图像灰度平均值 143.438 r空间灰度平均值 132.275 g空间灰度平均值 143.911 b空间灰度平均值 170.594 rb空间灰度平均值绝对值 38.3191 rg空间灰度平均值绝对值 11.6365 gb空间灰度平均值绝对值 26.6827 亮度通道平均值 176.793 前景与背景分割阈值 131 otsu阈值与灰度值差值 12.4378 第二次前景与背景分割阈值 91 </pre>	<pre> 程序参数列表 符合雪的像素总值 19928 图像灰度平均值 99.7912 r空间灰度平均值 66.0232 g空间灰度平均值 103.756 b空间灰度平均值 168.029 rb空间灰度平均值绝对值 102.006 rg空间灰度平均值绝对值 37.7326 gb空间灰度平均值绝对值 64.2731 亮度通道平均值 168.042 前景与背景分割阈值 67 otsu阈值与灰度值差值 32.7912 第二次前景与背景分割阈值 67 </pre>

图 2 输电线路图像变量参数图

Fig. 2 Image of transmission line image variable parameters

2 输电线路图像预处理

由于图像在拍摄传输过程中包含了大量噪声, 或者因为环境因素导致所拍摄图像细节特征不明显, 给图像特征提取带来了极大的干扰。图像预处理的目的是尽可能消除这些影响, 为下一步的图像特征提取分析做准备。本文图像预处理步骤包括: 图像灰度化、初次滤波、对比度增强和二次滤波。

2.1 图像滤波

图像滤波是在尽量保留图像细节特征的前提下去除目标图像噪声, 是图像预处理中不可缺少的操作环节, 其处理效果的好坏会影响后续图像处理分析的可靠性。本文介绍了均值滤波、高斯滤波、中值滤波和双边滤波四种滤波方法的原理及特点, 并根据不同背景类型输电线路图像特征分析了其适合

的滤波方法。

2.1.1 四种滤波方法原理及特点

2.1.1.1 均值滤波

均值滤波是一种线性滤波, 其基本原理是用一个模板逐个遍历像素, 并用模板所包括所有像素的平均灰度值来代替模板中央像素的像素灰度值, 又被称为邻域平均法, 数学表达式为

$$z(k,l) = \sum y(i,j)/n \quad (1)$$

式中: $(i,j) \in S$, S 代表模板大小; $y(i,j)$ 代表模板内的各像素灰度值; $z(k,l)$ 代表模块中央像素的像素灰度值; n 为模板包括的像素个数。

均值滤波能够去除随机噪声, 运算速度快, 但其在去噪的过程中容易破坏图像的细节部分而弱化边缘信息, 使图像变得更加模糊, 并且随着模板尺寸的增大, 模糊现象越严重。

2.1.1.2 高斯滤波

高斯滤波同样也是一种线性滤波, 其基本原理是用一个模板逐个遍历像素, 模板范围内每个像素对应一定的加权值, 用模板所包括像素的加权平均灰度值来代替模板中央像素的灰度值, 其数学表达式为

$$z(k,l) = \sum [a_{ij} \times y(i,j)]/n \quad (2)$$

式中: $(i,j) \in S$, S 代表模板大小; $y(i,j)$ 代表模板内的各像素灰度值; $z(k,l)$ 代表模块中央的像素灰度值; n 为模板包括的像素个数; a_{ij} 代表 (i,j) 坐标点处的加权值。

由于考虑了权重系数随距离的变化, 所以与均值滤波相比, 高斯滤波的平滑效果更加柔和, 而且边缘保留效果更好。

2.1.1.3 中值滤波

中值滤波是一种非线性滤波, 其基本原理是用模板逐个遍历像素, 并将模板所包括所有像素灰度值的中值代替模板中央像素灰度值^[18], 数学表达式为

$$z(k,l) = \text{median}\{y(i,j)\} \quad (3)$$

式中: $(i,j) \in S$, S 代表模板大小; $y(i,j)$ 代表模板内的各像素灰度值; $z(k,l)$ 代表模块中央的像素灰度值。

中值滤波运算较为简单, 去除孤立噪声点的能力强于均值滤波与双边滤波, 对于图像边缘的保持能力同样较强, 在图像去噪与边界性保持之间具有较好的平衡性。

2.1.1.4 双边滤波

双边滤波同样也是一种非线性滤波, 其原理与高斯滤波相似, 不过双边滤波不仅考虑像素之间的距离对权重因子的影响, 同时认为像素灰度值相差

越多,所占权重因子越小。数学表达式如式(4)。

$$g(i, j) = \frac{\sum_{k, l} (f(k, l)w(i, j, k, l))}{\sum_{k, l} w(i, j, k, l)} \quad (4)$$

式中: $g(i, j)$ 代表模块中央的像素灰度值; $f(k, l)$ 代表模板内的各像素灰度值, $(k, l) \in S$, S 代表模板大小; $w(i, j, k, l)$ 代表 (k, l) 坐标点处的权重因子, 计算公式如式(5)。

$$w(i, j, k, l) = \exp\left(-\frac{(i-k)^2 + (j-l)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{\|f(i, j) - f(k, l)\|^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (5)$$

双边滤波同时考虑图像的空间邻近度和像素值相似度,能够非常好地保存边缘。此外,双边滤波对于低频噪声滤波效果较好,对于高频噪声滤波效果不明显。

2.1.2 四种滤波方式的选择

本文中图像滤波分为初次滤波和二次滤波,初次滤波在对比度增强处理之前,二次滤波在对比度增强处理之后。由于对比度增强处理的同时容易产生噪声,而且不同背景图像对比度增强后产生噪声的程度不同,有些噪声甚至会严重损害图像细节,因此需要初次滤波和二次滤波相互配合去噪。进行初次滤波一方面是为了消除图像本身噪声,另一方面是为了减少对对比度增强处理可能产生的噪声;进行二次滤波则是为了消除图像对比度增强处理后所产生的噪声,为后续图像处理分析提供可靠而有效的保障。通过对各种滤波方法的原理和特点进行分析与多次图像处理实验,本文对不同背景类型图像所适用的滤波方法做出如下总结归纳。

如表1所示,对于特殊颜色背景类图像,光照不是特别弱时,规定 V 值大于 130 时,不进行对比度增强处理,通过高斯滤波方法平滑去噪;光照较弱时,规定 V 值小于等于 130 时,进行对比度增强处理,初次滤波用均值滤波处理,二次滤波用高斯滤波处理。

前景突出类图像,因为此类图像输电线特征较为明显,不容易出现曝光过度或因其他天气因素造成的输电线边缘模糊等状况,因此不对其进行对比度增强处理,只进行一次中值滤波;背景突出类图像,此类图像一般具有如建筑物或乌云等大块深色背景物,对其进行对比度增强处理后噪声明显,甚至会严重破坏输电线边缘细节,同样不适合进行对比度增强处理,这里只进行一次高斯滤波。

正常背景类图像,光照强烈时,规定 V 值大于等于 190 时,进行对比度增强处理,初次滤波与二

表 1 不同类型图像适合的滤波方式

Table 1 Suitable filtering methods of different type images			
图像种类	平均灰度值	初次滤波	二次滤波
特殊颜色背景类	$V \leq 130$	均值滤波	高斯滤波
	$V > 130$		高斯滤波
前景突出类	$V \in [0, 255]$		中值滤波
背景突出类	$V \in [0, 255]$		高斯滤波
正常背景类	$0 \leq V < 150$	双边滤波	双边滤波
	$150 \leq V < 190$		高斯滤波
	$190 \leq V < 255$	中值滤波	中值滤波
雪天类	$V \leq 130$	双边滤波	双边滤波
	$V > 130$		高斯滤波
特殊颜色雪天类	$V \in [0, 255]$		高斯滤波

次滤波都采用中值滤波处理,光照较弱时,规定 V 值小于 150 时,进行对比度增强处理,初次滤波与二次滤波都采用双边滤波处理;光照正常时,规定 V 值介于 150~190 时,不进行对比度增强处理,只进行一次高斯滤波。

雪天类图像(本文所述的雪天类图像指大雪将输电线和背景景物覆盖的情况),光照不是特别弱时,规定 V 值大于 130 时,不进行对比度增强处理,此时用高斯滤波方法平滑去噪;光照较弱时,规定 V 值小于等于 130 时,进行对比度增强处理,此时初次滤波与二次滤波均采用双边滤波平滑去噪;特殊背景的雪天图像,因为对比度增强处理容易破坏图像细节,不对其进行对比度增强处理,仅用高斯滤波方法平滑去噪。

根据上述分析,对文中所列举的六张图像进行滤波处理,自动选择滤波方法处理后的滤波结果如图3所示。从图3中可以看出,经过高斯滤波处理的图像(编号1、2、6)在去除噪声和保留图像边缘两方面较为平衡,双边滤波后的图像(编号3、4)边缘保留效果较好,边缘细节方面几乎没有变化,均值滤波后的图像(编号5)去噪情况较好,与原图像相比其边缘细节有些模糊。

2.2 输电线路对比度增强处理

对比度增强是指采用适当方法将灰度分布较窄的区间拉伸开,使其均匀分布,从而增大反差,使图像细节清晰,达到突出目标图像的效果。本文结合最大类间方差法所求得的最佳前景背景分割阈值与图像灰度平均值,对图像进行自适应分段直方图均衡化增强处理,能够根据不同类型图像特征自动变化直方图均衡化的分段区间和拉伸区间对图像进行适当的对比度增强处理。



图 3 初次滤波图像

Fig. 3 Initial filtering images

2.2.1 OTSU 算法

OTSU 法即最大类间方差法, 是目前求取前景背景分割阈值中最好的单阈值求取算法^[19-20]。基本原理是将图像分成前景和背景两部分, 选取适当灰度值 T , 将图像灰度值分为 $0 \sim T$ 和 $T \sim 255$ 两段, 使两段之间的灰度差异最大, 单个部分之间的灰度差异最小。

2.2.2 直方图均衡化

直方图均衡化就是对图像进行非线性拉伸并重新分配图像像素值, 把原始图像的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布。本文采用 Photoshop 算法中的对比度拉伸公式进行直方图均衡化。

$$C = (Level - Min) \times Scale = (Level - Min) \times 255 / (255 - Min) \quad (6)$$

式中: $Level = (n_i / N) \times 255$; $Min = (n_{min} / N) \times 255$; C 代表当前灰度级拉伸后的灰度级; n_i 为当前灰度级及该灰度级之前的像素数; n_{min} 为最小灰度级像素数; N 为像素总数。

2.2.3 自适应分段直方图均衡化增强处理

本文结合最大类间方差法所求得前景背景分割阈值 T 和图像灰度平均值 H , 采用自适应分段直方图均衡化对图像进行对比度增强。根据输电线路图像背景特征, 对光照较弱的特殊颜色背景类图像、光照较弱的雪天类图像、光照强烈的正常背景类图

像和光照较弱的正常背景类图像进行对比度增强处理。基本思想是根据所求得的前景背景分割阈值 T 将不同类型图像的灰度区间划分为差异较明显的两段, 再分别对这两段区间进行直方图均衡化, 其中灰度拉伸区间由图像灰度平均值经算术运算得出。

如表 2 所示, 对于光照强烈的正常背景类图像, 由于光照较强导致整体偏亮, 为了突出输电线, 我们规定当前景背景分割阈值 T 大于 120 时, 将其分为 $0 \sim (T-50)$ 和 $(T-50) \sim 255$ 两段, 拉伸区间为 $0 \sim H$ 和 $H \sim 255$; 当 $T < 120$ 时, 将其分为 $0 \sim (T-20)$ 和 $(T-20) \sim 255$ 两段, 拉伸区间为 $0 \sim (H-20)$ 和 $(H-20) \sim 255$ 。对于光照较弱的正常背景类图像, 因为光照较弱, 整体偏暗, 为了突出输电线, 我们将整个灰度区间分为 $0 \sim (T-10)$ 和 $(T-10) \sim 255$ 两段, 拉伸区间为 $0 \sim (H+30)$ 和 $(H+30) \sim 255$ 。对于光照较弱的特殊颜色背景类图像和光照较弱的雪天类图像, 由于图像特征较为特殊, 这里直接采用直方图均衡化对其进行对比度增强处理, 不进行区间划分。

表 2 不同类别图像直方图均衡化灰度分段及拉伸区间

Table 2 Histogram equalization's gray section and gray stretch interval of different categories of images

图像背景分类	阈值范围	灰度分段区间	灰度拉伸区间
光照较弱的特殊颜色背景类	$T \leq 120$	$0 \sim (T-20)$	$0 \sim (H-20)$
		$(T-20) \sim 255$	$(H-20) \sim 255$
光照较弱的雪天类	$T > 120$	$0 \sim (T-50)$	$0 \sim H$
		$(T-50) \sim 255$	$H \sim 255$
光照强烈的正常背景类	T	$0 \sim 255$	$0 \sim 255$
光照较弱的正常背景类	T	$0 \sim (T-10)$	$0 \sim (H+30)$
		$(T-10) \sim 255$	$(H+30) \sim 255$

图 4 所示为前文列举的六张图像经对比度增强处理和二次滤波后的效果图。从图 4 中可以看出, 经过对比度增强处理后, 输电线边缘特征明显增强。

3 输电线图像边缘特征提取及优化

输电线图像特征提取的目标是将输电线图像边缘特征最大限度地完整提取出来, 同时尽可能去除背景边缘。本文采用自适应阈值的 Canny 边缘检测算法检测输电线边缘特征^[21], 同时提出一种边缘优化方法, 结合概率霍夫直线变换和形态学运算与图像像素特征统计排除等方法完成输电线边缘特征提取及非目标边缘去除。

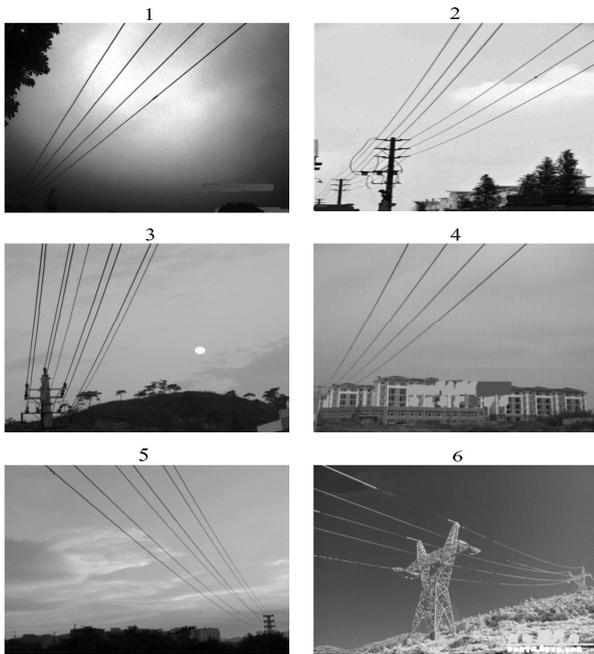


图 4 预处理后图像

Fig. 4 Preprocessing images

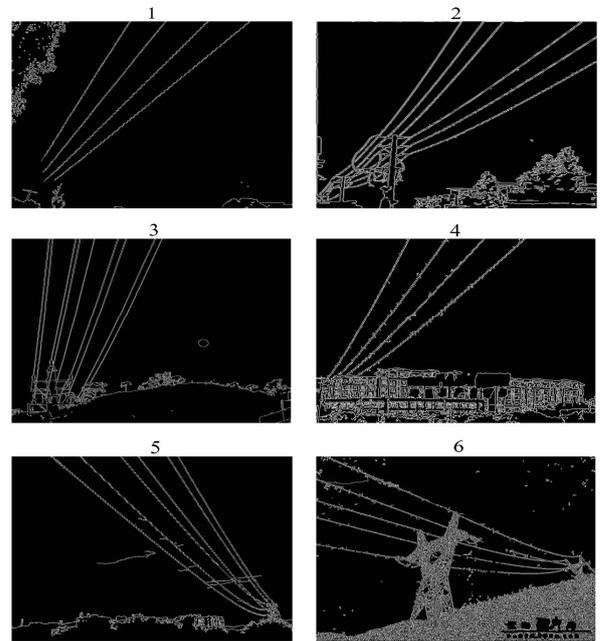


图 5 原图像边缘检测图

Fig. 5 Edge detection graph of original images

3.1 Canny 边缘检测

Canny 算法被誉为当今最优的边缘检测算法，在检测图像边缘特征方面有着巨大的优越性。其基本原理是通过在特定方向计算像素灰度值的梯度的幅值来确定边缘部位的灰度变化，从而检测出图像的边缘特征。Canny 算法使用高阈值和低阈值两个阈值来衡量计算出来的梯度幅值大小，判断是否保留该像素，一般推荐的高低阈值之比在 2:1 到 3:1 之间。

图 5 和图 6 分别为原图像直接进行边缘检测效果图和预处理后图像边缘检测效果图。

从图中可以看出，Canny 边缘检测能够较好地提取输电线路边缘特征，且经过预处理后的图像边缘特征比预处理之前的边缘特征有明显加强，图像噪声显著减少。

3.2 霍夫直线变换

霍夫直线变换是检测直线的经典算法^[22-23]，基本原理是通过坐标变换将图像坐标中的点转换为另一个坐标系中的直线或曲线，因为位于同一直线的点在另一坐标系中表示为多条直线或曲线的交点，所以可以通过判断交点个数来确定是否是一条直线。本文采用概率霍夫直线变换检测输电线路直线特征，其在霍夫直线变换的基础上额外定义了可以接受线段的最小长度和允许组成连续线段的最大像素间隔两个参数，性能更加优越。

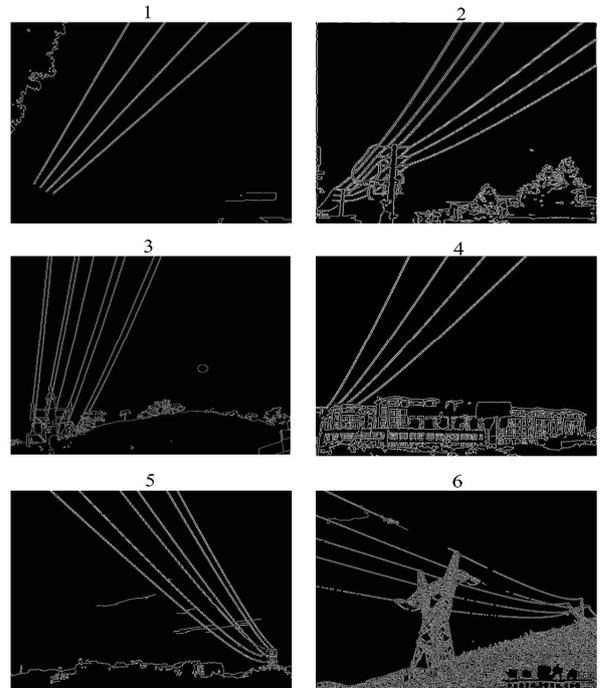


图 6 预处理后图像边缘检测图

Fig. 6 Edge detection graph of preprocessing images

3.3 形态学运算

腐蚀和膨胀是最基本的形态学运算，腐蚀用来消除小于结构元素的噪声点，膨胀则用来填补目标中的空洞。用基本的腐蚀和膨胀运算可以定义开运

算和闭运算^[24]。开运算是先腐蚀后膨胀的过程, 可以消除图像上细小的噪声, 并平滑物体边界; 闭运算是先膨胀后腐蚀的过程, 可以填充物体内部细小的孔洞, 并平滑物体边界。

3.4 复杂背景下的输电线图像特征提取

本文结合 canny 边缘检测、概率霍夫直线变换、形态学运算与图像像素特征统计排除等方法对输电线图像进行边缘特征提取及优化。首先, 图像预处理完成后, 对处理后的图像再次运用最大类间方差法求出前景背景分割阈值 T_2 , 并对其做适当的算术运算, 作为 Canny 边缘检测参数检测输电线路边缘特征, 具体阈值划分如表 3 所示。

表 3 Canny 边缘检测阈值

Table 3 Threshold of Canny edge detection

前背景分割阈值范围	低阈值	高阈值
$T_2 \leq 100$	$thresh/2$	$thresh$
$T_2 > 100$	$(thresh \times 0.7) / 2$	$thresh \times 0.7$

接着, 对 Canny 边缘检测后的图像进行形态学闭运算, 用 3×3 的模板填充掉比较细小的孔洞使图像更加平滑并突出边缘特征, 结果如图 7 所示。

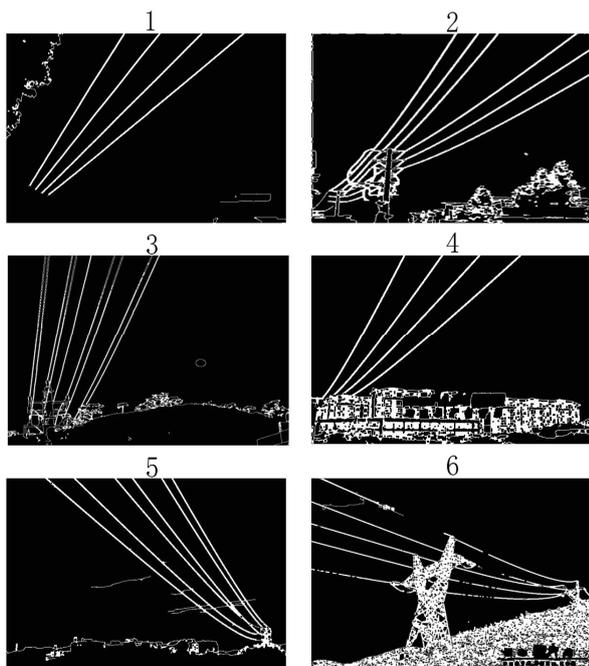


图 7 初次形态学处理后图像

Fig. 7 Images after initial morphological processing

然后根据输电线近似直线且并排分布的特征, 用如图 8 所示十字模板遍历边缘检测后像素值为 255 的像素(十字模板大小可以根据图像分辨率来调节), 当模板灰色部分所接触像素值为 0 的像素个数大于 6 时, 中心像素值保持 255 不变, 否则将中心

像素置 0, 图像处理结果如图 9 所示。

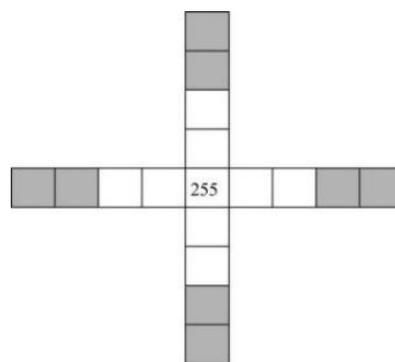


图 8 十字形图像像素处理模板

Fig. 8 Cross processing template of image pixels

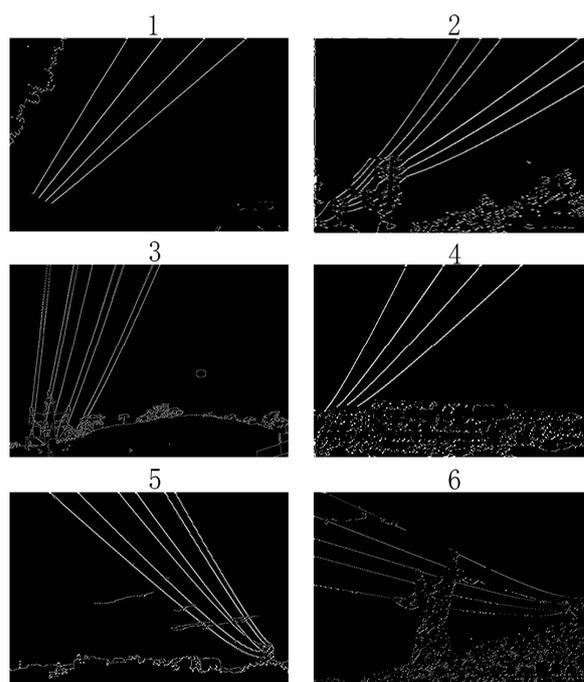


图 9 像素处理后图像

Fig. 9 Images after pixel processing

从图 9 中可以看出, 经过处理后去除了大量非输电线边缘像素, 使其边缘不再连续。接着对处理过后的图像进行概率霍夫直线检测, 结果如图 10 所示。

由图 10 中可以看到, 输电线边缘被概率霍夫直线算法检测到且连成一条直线, 非输电线边缘因为不连续所以没被检测出来, 从而被完全去除。最后对概率霍夫检测的直线以 9×9 的模板进行形态学膨胀运算, 再对膨胀后的图像与未经过形态学处理的 Canny 边缘检测后的图像进行与运算, 完成对输电线的边缘特征提取, 结果分别如图 11 和图 12 所示。

由图中可以看出, 最终图像处理结果只剩下所

需要的输电线路边缘，其他背景边缘皆被较好地去除。此外，可以通过边缘轮廓延伸得到完整的输电线路边缘并通过输电线近似平行排列的特点去除误检测的非输电线路边缘。

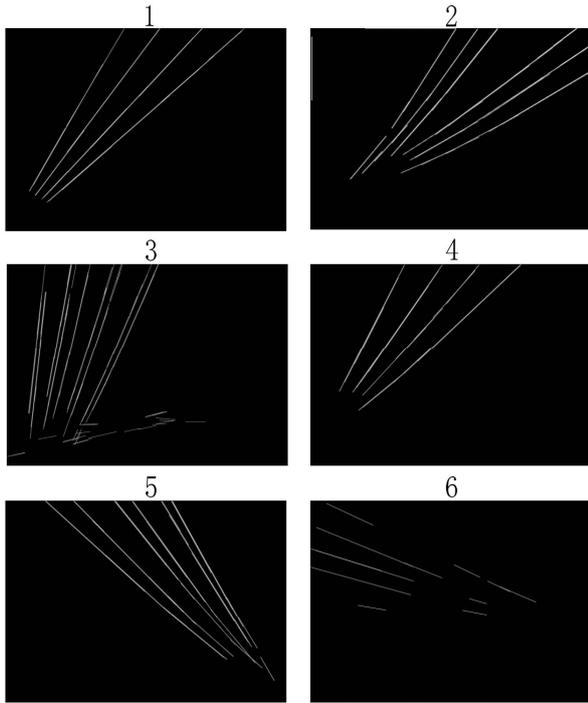


图 10 概率霍夫直线检测后图像

Fig. 10 Images after probabilistic Hof linear detection

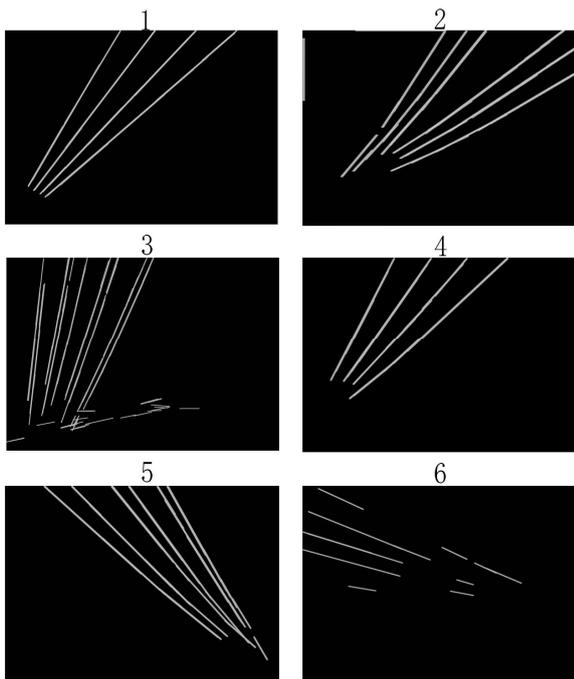


图 11 二次形态学处理后图像

Fig. 11 Images after the second morphological processing

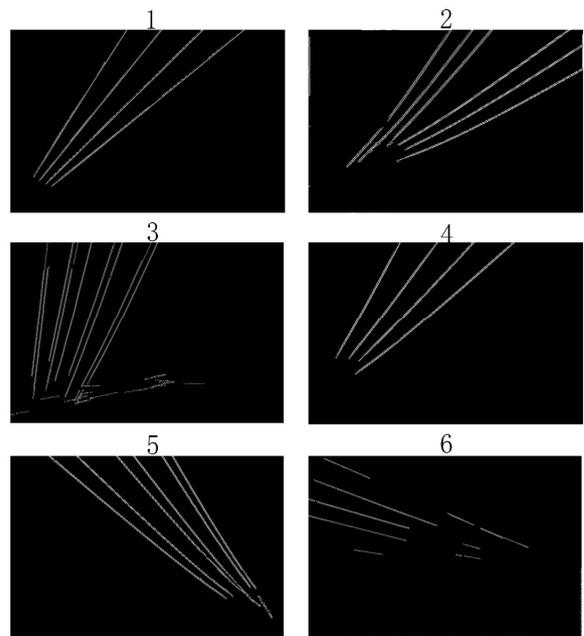


图 12 最终处理后图像

Fig. 12 Images after final processing

4 结论

本文根据输电线路图像背景特征和各颜色空间中不同变量值之间的关系，总结出了一种输电线路背景图像分类及边缘特征提取方法。该方法对输电线路图像进行分类，有针对性地针对不同背景类型图像进行处理，增强了图像处理的可靠性。选用合适的滤波方法，初次滤波和二次滤波相互结合，能够更好地去除图像噪声。采用自适应直方图分段均衡化方法增强图像对比度，能够自动根据图像颜色特征和灰度变化调整分段区间和拉伸区间，使对比度增强效果更好，鲁棒性更强。线性变换 Otsu 算法求得的阈值并将其作为 Canny 边缘检测参数，能够较好地提取图像边缘特征。根据输电线路形状特征提出了一种边缘优化方法，有效去除非输电线路边缘，使输电线路边缘特征更加明显。经过多次实验，证实了该方法的可行性，为实现输电线路图像智能化处理提供了一种新的思路和方法。

参考文献

[1] 黄宵宁, 许瑞, 许家浩. 南方山区线路覆冰在线监测数据特征分析与预测模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 111-116.
 HUANG Xiaoning, XU Rui, XU Jiahao. Analysis of the characteristics for on-line monitoring data and research of the forecast model of the line icing in southern mountain area[J]. Power System Protection and Control, 2015,

- 43(23): 111-116.
- [2] 李娟, 廖峥, 张陵, 等. 新疆强风沙尘环境下 750 kV 线路运维技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 123-130.
LI Juan, LIAO Zheng, ZHANG Ling, et al. Operation and maintenance techniques for 750 kV transmission lines under severe wind and sand-dust weather in Xinjiang[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 123-130.
- [3] 李震宇, 武国亮, 王志利, 等. 电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 125-131.
LI Zhenyu, WU Guoliang, WANG Zhili, et al. Windage yaw disaster monitoring and early warning technology based on power micrometeorological and system implementation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 125-131.
- [4] 张曠, 何青. 输电线路覆冰时导线表面形状对碰撞系数的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 209-217.
ZHANG Jian, HE Qing. Influence of conductor surface shape on collision coefficient during transmission line icing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 209-217.
- [5] 段杰, 王秀丽, 侯雨伸. 基于模糊专家系统的输电线路分段冰风荷载等效停运率模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 220-228.
DUAN Jie, WANG Xiuli, HOU Yushen. Piecewise equivalent model of ice disaster impact on outage rate of transmission lines using fuzzy expert system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 220-228.
- [6] 杨浩, 吴畏. 基于三维重建的输电线路覆冰在线监测方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 103-108.
YANG Hao, WU Wei. On-line monitoring method of icing transmission lines based on 3D reconstruction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 103-108.
- [7] 赵振兵, 徐磊, 戚银城, 等. 基于 Hough 检测和 C-V 模型的航拍绝缘子自动协同分割方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 395-403.
ZHAO Zhenbing, XU Lei, QI Yincheng, et al. Automatic co-segmentation method for aerial insulator based on Hough detection and C-V model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 395-403.
- [8] 张焯, 黄新波, 李菊清, 等. 视频图像处理在输电线路安防系统的应用[J]. 广东电力, 2016, 29(5): 102-107.
ZHANG Ye, HUANG Xinbo, LI Juqing, et al. Application of video and image processing in transmission line security system[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(5): 102-107.
- [9] 郑武略, 张富春, 翁珠奋, 等. 基于旋翼无人机的绝缘子憎水性检测[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 116-119, 124.
ZHENG Wulue, ZHANG Fuchun, WENG Zhufen, et al. Detection on hydrophobicity of insulator based on rotor unmanned aerial vehicle[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 116-119, 124.
- [10] 黄新波, 张晓霞, 李立涅, 等. 采用图像处理技术的输电线路导线弧垂测量[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1961-1966.
HUANG Xinbo, ZHANG Xiaoxia, LI Licheng, et al. Measurement of transmission lines conductor sag using image processing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1961-1966.
- [11] LI Dan, ZHANG Meng, TONG Zubing. Transmission line insulators detection based on KAZE algorithm[C] // The 2014 International Conference on Materials Science and Engineering Technology, Switzerland, 2014: 2184-2189.
- [12] 黄新波, 张焯, 程文飞, 等. 基于图像匹配的输电导线舞动监测方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 808-813.
HUANG Xinbo, ZHANG Ye, CHENG Wenfei, et al. Galloping monitoring method of transmission line based on image matching[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 808-813.
- [13] 全卫国, 苑津莎, 李宝树. 图像处理技术在直升机巡检输电线路中的应用综述[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 204-208.
TONG Weiguang, YUAN Jinsha, LI Baoshu. Application of image processing in patrol inspection of overhead transmission line by helicopter[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 204-208.
- [14] 金立军, 姚春羽, 闫书佳, 等. 基于航拍图像的输电线路异物识别[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 277-281.
JIN Lijun, YAO Chunyu, YAN Shujia, et al. Recognition of extra matters on transmission lines based on aerial images[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(2): 277-281.
- [15] 李俊, 钟幼平, 黄文娟, 等. 改进的 Hough 变换在覆冰厚度测量中的应用[J]. 现代电力, 2014, 31(3): 91-94.
LI Jun, ZHONG Youping, HUANG Wenjuan, et al. The application of improved Hough transform in icing thickness

- measuring[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(3): 91-94.
- [16] 谭磊, 王耀南, 沈春生. 输电线路除冰机器人障碍视觉检测识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2564-2571.
- TAN Lei, WANG Yaonan, SHEN Chensheng. Vision based obstacle detection and recognition algorithm for transmission line deicing robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(11): 2564-2571.
- [17] TONG W G, LI B S, YUAN J S, et al. Transmission line extraction and recognition from natural complex background[C] // Proceedings of the Eighth International Conference on Machine learning and Cybernetics. Baoding, China, 2009: 2473-2477.
- [18] 冯玲, 黄新波, 朱永灿. 基于图像处理的输电线路覆冰厚度测量[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 76-80.
- FENG Ling, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan. Transmission line icing thickness measuring based on image processing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 76-80.
- [19] 陆佳政, 张红先, 方针, 等. 自适应分割阈值在覆冰厚度识别中的应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 563-567.
- LU Jiazheng, ZHANG Hongxian, FANG Zhen, et al. Application of self-adaptive segmental threshold to ice thickness identification[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 563-567.
- [20] FANG M, YUE G X, YU Q C. The study on an application of Otsu method in canny operator[C] // Proceedings of the 2009 International Symposium on Information Processing, Huangshan, China, 2009: 109-112.
- [21] 金立军, 陈俊佑, 张文豪, 等. 基于图像处理技术的电力设备局部放电紫外成像检测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 43-48.
- JIN Lijun, CHEN Junyou, ZHANG Wenhao, et al. Partial discharge detection of power equipment by ultraviolet imaging based on image processing technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 43-48.
- [22] 郝艳捧, 刘国特, 薛艺为, 等. 输电线路覆冰厚度的小波分析图像识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 368-373.
- HAO Yanpeng, LIU Guote, XUE Yiwei, et al. Wavelet image recognition of ice thickness on transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 368-373.
- [23] LI Z R, LIU Y E, WALKER R, et al. Towards automatic power line detection for a UAV surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved Hough transform[J]. Machine Vision and Applications, 2010, 21: 677-686.
- [24] 罗朝祥, 万华舰, 罗文博, 等. 输电线路导线覆冰图像处理与识别技术[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 132-136.
- LUO Chaoxiang, WAN Huajian, LUO Wenbo, et al. Image processing and recognition technology for transmission line icing[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 132-136.

收稿日期: 2017-03-31; 修回日期: 2017-08-25

作者简介:

周 封(1970—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统智能视频在线监测技术、电机综合物理场仿真计算、工业设备节能控制与故障检测; E-mail: f.zhou@163.com

任贵新(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线智能视频在线监测技术。E-mail: 992194659@qq.com

(编辑 魏小丽)