

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211763

基于改进 Hough 变换的雾中绝缘子裂纹检测与研究^{*}

马聚超 舒征宇 张 洋 沈佶源 李世春

(三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443000)

摘要: 鉴于航拍雾中绝缘子图像出现颜色失真与裂纹检测效果不理想的问题,采用了一种改进 Hough 变换对雾中绝缘子定位与裂纹检测方法。针对颜色失真的弊端,通过大气光强度与暗通道之差的绝对值改进透视率计算公式,使之改善蓝天、白云等光亮区域去雾后颜色失真的情况。对于绝缘子定位与裂纹检测的障碍,提出了椭圆中心是此椭圆内外所有点到边缘最大长度最小的点这一特征,快速计算出圆心以此降低 Hough 参数维度与计算量,实现绝缘子在图像中的定位。最后采用 Hough 空间中峰值检测与置零法相结合,解决传统 Hough 变换检测直线算法耗时久与准确率低的短板。通过设定阈值减少伪裂纹与过连接的产生,快速并准确的检测出裂纹。通过仿真实验验证,文中所提的改进 Hough 变换相比传统 Hough 变换对雾中绝缘子裂纹检测速率提升了 1.4 倍,准确率提高了 5.5%。

关键词: 暗通道之差;颜色失真;边缘检测;Hough 变换

中图分类号: TM752 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Detection and research of insulator cracks in fog based on improved Hough transform

Ma Juchao Shu Zhengyu Zhang Yang Shen Jiyuan Li Shichun

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: In view of the problems of color distortion and unsatisfactory crack detection effect in aerial image of insulators in fog, an improved Hough transform method is adopted to locate and detect the cracks of insulators in fog. Aiming at the disadvantage of color distortion, the formula of perspective is improved by the absolute value of the difference between atmospheric light intensity and dark channel, so as to improve the color distortion of bright areas such as blue sky and white clouds after defogging. For the obstacle of insulator positioning and crack detection, the feature that the center of the ellipse is the point with the minimum maximum length to the edge of all points inside and outside the ellipse is proposed, and the center of the circle is calculated quickly to reduce the Hough parameter dimension and calculation amount, so as to realize insulator positioning in the image. Finally, the combination of peak detection and zeroing in Hough space is used to solve the problem of time-consuming and low accuracy of traditional Hough transform linear detection algorithm. By setting the threshold value, the generation of false cracks and over connections can be reduced, and the cracks can be detected quickly and accurately. The simulation results show that the improved Hough transform proposed in this paper improves the detection rate of insulator cracks in fog by 1.4 times and the accuracy rate by 5.5% compared with the traditional Hough transform.

Keywords: difference of dark channel; color distortion; edge detection; Hough transform

0 引 言

近年电网规模不断扩大,科技也在迅速发展,无人机对杆塔上雾中绝缘子的巡视已逐步走向智能化,其中瓷绝缘子是使用量最大的绝缘子之一。然而,瓷绝缘子长期运行在自然条件较恶劣环境中同时还要承受雷电过电压的影

响^[1],难免功能会出现退化。根据国际大电网会议(International Council on Large Electric Systems, CIGRE)的统计,瓷绝缘子的整体失效率在 0.01% 以下,而失效可能发生爆裂、掉线等事故^[2-9],足以对电力系统可靠性与稳定性造成威胁^[10-13]。于是,为了避免电力系统故障的发生,对雾中瓷绝缘子裂纹检测变得尤为重要。近几年,计算机视

收稿日期:2022-10-20

* 基金项目:国家自然科学基金(51907104)项目资助

觉在图像去雾^[14-15]、定位与提取目标特征方面有较深的造诣,将此技术应用到瓷式绝缘子图像裂纹检测中,可达到成本低且效率高的成果。

在现阶段研究中,绝缘子裂纹检测可分为两类,非图像方法与图像方法,非图像方法比较传统,有邓红雷等^[16]建立绝缘子模型并进行仿真实验通过超声波传导原理得到绝缘子多种裂缝的频散曲线,从而实现检测。此类方法投入的成本高、工作量较大,操作繁杂并耗时久。基于图像检测方法,有杨辉金^[17]采用大津 Otsu 算法将绝缘子目标与背景分割,获得绝缘子与裂纹两个边缘连通域,并计算两个几何周长与面积进行比较判断裂纹存在。此方法操作复杂并耗时久。孙晋^[18]对绝缘子图像预处理后进行边缘检测,而后使用 Petrou 斜坡模型^[19]原理对边缘检测后的二值绝缘子图像进行某一方向进行扫描从而实现裂纹辨识。该方法斜坡模型常数 ϵ 定义较为模糊导致准确率一般,也没有阐述伞裙与裂纹边缘像素点之间的区别。两种算法都有自身的缺陷并较难达到理想检测效果。

综上所述,当前对去雾后瓷式绝缘子出现颜色失真与裂纹的具体辨识研究并不成熟,本文提出了一种基于改进 Hough 变换对雾中瓷绝缘子定位与裂纹检测方法。首先对采集的绝缘子图像使用优化后的暗原色先验去雾算法,改善光亮区域的透射率并防止颜色失真,继而利用椭圆几何特征降低 Hough 参数维度对边缘检测后的二值图像中的绝缘子定位。最后采用 Hough 变换的峰值检测与置零法相结合,通过设定阈值减少伪裂纹与过连接的像素点,得以准确检测出裂纹。

1 暗原色先验单幅图像去雾原理

由于户外背景的复杂性,无人机航拍瓷式绝缘子图像过程中会受到不同程度的干扰。若拍摄绝缘子图像中有雾霾,则使用暗通道先验去雾算法恢复图像,而该算法对背景为蓝天、白云等明亮区域会出现颜色失真的情况,对后续的边缘、裂纹检测造成一定的影响,本文提出一种改进的去雾算法。

1.1 大气散射模型

在计算机处理雾天图像绝大多数用到大气散射模型为:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (1)$$

其中, x 为像素点的坐标、 $I(x)$ 为可观测的待去雾图像、 $J(x)$ 为去雾后的图像、 A 为全局大气光成分、 $t(x)$ 为透射率。

1.2 暗通道先验去雾原理

2009 年 He 等^[20]通过观察与分析大量无雾清晰图像得到了排除天空区域其他局部 R、G、B 3 个颜色通道至少有一个通道像素值接近于 0,称为暗原色,公式为:

$$J^{dark}(x) = \min_{c \in \{R,G,B\}} (\min_{x \in m_y} (J^c(x))) \rightarrow 0 \quad (2)$$

式中: J^{dark} 为 J 暗原色, m_y 是图像第 y 个局部区域, J^c 是

J 的 c 颜色通道强度。

为计算求出透射率 $t(x)$, 设全局大气光强度 A 是已知, A^c 为 A 的 c 颜色通道,把 $J^{dark}(x)$ 无限趋近于 0 代入式(1),可以粗略的估算透射率为:

$$t(x) = 1 - \omega_0 \min_{c \in \{R,G,B\}} (\min_{x \in m_y} (I^c(x)/A^c)) \quad (3)$$

为避免 $t(x)$ 接近 0,新增 ω_0 因子,范围 $(0 < \omega_0 < 1)$ 且一般取值为 0.95, ω_0 值越高去雾效果就越理想。

最后去雾后的图像强度为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (4)$$

为估算大气强度 A , 把图中 J^{dark} 像素点取最亮的前 1% 像素,对应原图 I 中最大值作为 A 值,式中分母不能为 0,所以 t_0 取值为 0.1。

1.3 改进的去雾算法

暗原色先验去雾算法是当前去雾效果最理想的方法之一,但也存在问题:在实际拍摄中绝缘子多数安装在输电线路路上,且图中瓷式绝缘子为亮白色,会使暗通道不存在或此区域暗通道值很高,导致透射率偏小颜色失真。通常图中光亮区域在有雾或无雾两种情况下,R、G、B 三通道的值都较高且相差微小,接近大气光强度 A 。暗原色先验原理在该区域很难成立,去雾后图中瓷式绝缘子由于颜色失真被掩盖较多的信息。

该亮白区域计算透射率时,鉴于 $t(x)$ 趋近于 0,所以 t_0 取 0.1。如若 A 大于 $I(x)$ 值,约等于 $I(x) - A$ 的差值被放大了进 10 倍,此时 $J(x)$ 值会非常小,导致恢复后图像中的瓷式绝缘子会出现颜色过饱和的情况,得到的透射率较低。

基于以上阐述通过分析全局大气光强度与暗通道之差的绝对值大小判断原图中是否存在光亮区域。若存在,则明亮区域的暗通道值会很大。与文献[20]利用软抠图优化透射率不同,本文设定一个阈值 Z , 衡量大气光强度 A 和暗通道之差的绝对值,来改变透射率函数。若大于阈值 Z , 则非光亮区域;若小于阈值 Z , 则是光亮区域,其公式如下:

$$t(x) = \begin{cases} 1 - \omega_0 \min_{c \in \{R,G,B\}} (\min_{x \in m_y} (I^c(x)/A^c)) & |A - I^{dark}(x)| > Z \\ \frac{Z}{|A - I^{dark}(x)|} (1 - \omega_0 \min_{c \in \{R,G,B\}} (\min_{x \in m_y} (I^c(x)/A^c))) & |A - I^{dark}(x)| < Z \end{cases} \quad (5)$$

2 基于改进 Hough 变换检测椭圆对绝缘子定位分析

2.1 基于改进的 Canny 算子对绝缘子的边缘检测

1) 绝缘子图像的预处理

图像预处理是增加去雾后图像中绝缘子与背景之间的

差异,凸显目标更多细节,进而提高后续边缘检测准确度。其具体步骤,如图 1 所示,效果如图 2 所示。

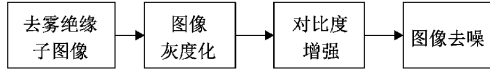


图 1 绝缘子图像预处理处理流程

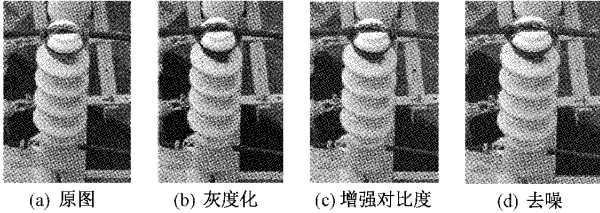


图 2 绝缘子预处理后的图像

2) 基于二维最大熵阈值优化 Canny 算子的边缘检测原理

图像中绝缘子边缘更好的提取是实现绝缘子裂纹识别与检测的重要前提^[21-23]。由于数字图像区域内的像素点的位置和灰度级关联性较强,而传统 Canny 算法疏忽了像素点的空间位置信息,并对于阈值的选取没有合理的计算方法,导致目标信息无法清晰的保留。因此,对传统 Canny 算法进行优化,将图像中像素点的自身灰度值和其 8 个邻域灰度平均值构成一个二维向量,计算出该二维向量最大值即为最佳阈值,致使得绝缘子的轮廓与裂纹边缘更加清晰。本文采用最大熵方法选取阈值可以有效优化阈值问题,将图像的灰度直方图分成各个独立的类,使得各类的熵之和最大,利用这个熵作为阈值分割图像可以获得最大的信息量。

以二维灰度函数表示图像为例,设该图像像素点共有 $N \times M$ 个,灰度值范围 L 个等级。第 1 步对图像灰度级求平均值,以 (i, j) 分别表示像素点的灰度值与其邻域灰度均值且为目标模板。设 $n_{i,j}$ 是灰度值为 (i, j) 像素点个数, $p_{i,j}$ 为概率密度,则公式为:

$$p_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{N \times M} \quad (6)$$

s, t 分别为 i, j 灰度值的阈值,小于阈值为目标 U 即 $i, j \in (1 \sim s, 1 \sim t)$, 大于阈值为背景 B 即 $i, j \in (s \sim L, t \sim L)$ 。为了使目标突出并与背景分离效果更加理想。对目标区域 U 和背景区域 B 的概率进行归一化处理,熵值具有可加性,则 U 区和 B 区的概率为:

$$P_U = \sum_i \sum_j p_{i,j}, P_B = \sum_i \sum_j p_{i,j} \quad (7)$$

对离散二维熵定义为:

$$H_U = - \sum_i \sum_j p_{i,j} \lg p_{i,j} \quad (8)$$

则就可得到 U 区的二维熵:

$$H(U) = \lg P_U + H_U / P_U \quad (9)$$

又因为:

$$H_B = - \sum_i \sum_j p_{i,j} \lg p_{i,j} \quad (10)$$

所以 B 区的二维熵为:

$$H(B) = \lg P_B + H_B / P_B$$

$$P_B = 1 - P_U, H_B = H_L - H_U \quad (11)$$

则: $H_B = \lg(1 - P_U) + (H_L - H_U) / (1 - P_U)$, 熵的判别函数定义为:

$$\varphi(s, t) = \lg[P_U(1 - P_U)] + H_U / P_U + (H_L - H_U) / (1 - P_U) \quad (12)$$

对此,选取的最佳阈值满足:

$$\theta(\hat{s}, \hat{t}) = \max\{\theta(s, t)\} \quad (13)$$

3) 绝缘子的边缘检测

改进后的 Canny 算子对去雾后的绝缘子图像进行边缘检测步骤如下:(1)运用无人机采集绝缘子原图,而后使用改进的去雾算法处理。(2)对去雾后的图像进行预处理,突出更多绝缘子前景特征。(3)使用优化后的 Canny 算子对去雾后的绝缘子图像边缘检测,能够得到更加清晰的轮廓特征。

在计算图像的二维最大熵的过程中,计算 $H_U(s, t)$ 和 $H_B(s, t)$ 是主要部分,对于每一个 (s, t) , 都要重新计算 $P_s(s, t)$ 和 $H_s(s, t)$, 会使计算复杂,耗时过长,而 $P_s(s, t+1)$ 和 $H_s(s, t+1)$ 可以利用以下递推公式:

$$P_s(s, t+1) = P_s(s, t) + P_s(t+1) \quad (14)$$

式中:

$$\begin{cases} P_s(t+1) = \sum_{i=1}^s p_{i,t-1} \\ H_s(s, t+1) = H_s(s, t) + H_s(t+1) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $H_s(t+1) = - \sum_{i=1}^s p_{i,t+1} \lg p_{i,t+1}$ 。

对于 s , 由于已经确定,所以当 t 取 $1 - L$ 时, $H(s, t)$ 不需要在进行重复计算,但 s 从 1 取到 L 时, $P_s(t+1)$ 和 $H_s(t+1)$ 存在重复计算。因此可以导出:

$$P_{s+1}(t+1) = H_s(t+1) - p_{s+1,t+1} \lg p_{s+1,t+1} \quad (16)$$

利用二维最大熵阈值分割算法得到的阈值 $H(s, t)$, 将其作为 Canny 算子中双阈值中的高阈值,在双阈值算法中, t_1 和 t_2 分别为低阈值和高阈值,且 $t_2 \approx 2t_1$, 从而可得到低阈值。

2.2 Hough 变换检测椭圆原理与分析

椭圆的一般表达方程有 5 个参数,如式(17)所示。

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey = -1 \quad (17)$$

本文提出:椭圆圆心是此椭圆内外所有点中到边缘最大长度最小的点这一特征,快速计算出圆心,可降低 Hough 参数空间的维度,减少计算量。

证明:设圆心与轴心重叠, x 轴为长轴,即 $a > b$, 方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, (a > b) \quad (18)$$

根据式(18)可知圆心 o 距椭圆上点的最大距离为长轴 a 。

如图 3 所示,在椭圆任取非 y 轴上点 h_1 , 对点 h_1 做水平线,交 y 轴于点 h_2 , 设 h_2 距椭圆上点最大距离的点为 h_3 , 形成钝角三角形 $\Delta h_1 h_2 h_3$, 设 $h_1 h_2$ 长度为 l_1 , $h_2 h_3$ 长度为 l_2 , $h_1 h_3$ 长度为 l_3 且 $\phi > 90^\circ$, 则 $l_3 > l_2 > a$, 证毕。

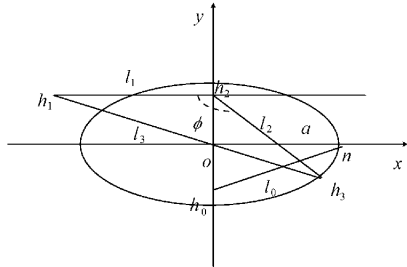


图 3 椭圆定律参考图

2.3 Hough 变换椭圆参数求解与定位绝缘子

本文所采用的 Hough 变换检测椭圆方法其性质为应用上述证明的几何原理,经过搜索距离椭圆上点最远距离最小的点找到圆心,且此上最小的最远距离为椭圆长轴长度 a 。经此计算后,可求出长、短轴、椭圆圆心坐标以及旋转角度 3 个参数。在二维参数空间上可统计出余下的 2 个参数,参数示意图如图 4 所示,即应用 Hough 变换检测直线的相同方法来检测椭圆了(即为 3.1 节述)。

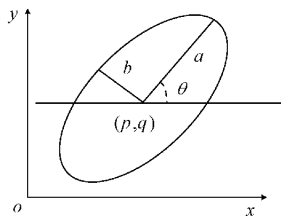


图 4 椭圆参数示意图

具体步骤如下:

- 1) 把检测出绝缘子二值图上的点存入数组 T 。
- 2) 计算出二维图中每一个点与第 1 步数组 T 中点的长度,得到其中最大距离。椭圆圆心 (p, q) 即为最远距离最小的点。
- 3) 将数组 T 中每一点的数值和计算出的 3 个椭圆参数 p, q, a 代入椭圆方程 E :

$$\frac{((x-p)\cos\theta + (y-p)\sin\theta)^2}{a^2} + \frac{(-(x-p)\sin\theta + (y-p)\cos\theta)^2}{b^2} = 1 \quad (19)$$

在二维参数空间上对参数 b, θ 进行统计,峰值超过一定阈值的一组参数即为椭圆。由于同一串上的绝缘子片的大小是相同的,且倾斜的角度也是一样的。根据这些条件可以剔除非绝缘子椭圆从而精准的检测与定位到图中绝缘子。

3 基于改进 Hough 变换对裂纹在图像中定位与检测

经过实验发现绝缘子二值图像中裂纹呈现无规则状态。文献[24]把裂纹分成横向、纵向、和斜向 3 种曲线,即为裂纹边缘与伞裙边缘存在夹角 β , 基于 β 角可将裂纹归纳为 3 种情况:1) 裂纹与伞裙边缘之间有交点且有斜率; 2) 裂纹与伞裙轮廓无交点但有斜率; 3) 裂纹平行于伞裙轮廓。本文采用改进后的 Hough 变换检测直线方法可以检测出斜率的裂纹像素点。

3.1 传统 Hough 变换原理

Hough 变换是一种检测、定位、解析曲线最有效的方法之一。本质上是把二值图变换到 Hough 二维参数空间中,在参数空间统计极值点来完成目标的检测与定位。

霍夫变换将图像坐标系中一条直线上的所有点转换到参数坐标系中,形成 E 条直线。鉴于一条直线上所有点的斜率和截距为定值,则它们会聚焦于同一点。再使用累加器累计每一个点且从中查找峰值,从而提取直线。这就把图像平面上的点对应到参数平面上的线,最后通过统计特性来解决问题。示意图如图 5 所示,直线方程式为:

$$y = kx + b \quad (20)$$

直线方程式中, k 是斜率, b 是截距, (x, y) 为直线上任意一点的坐标。

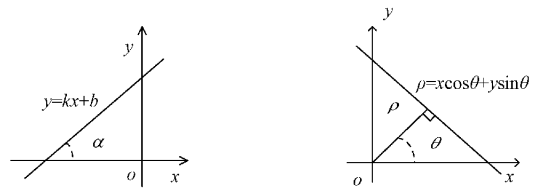


图 5 Hough 变换坐标示意图

当斜率趋近于无穷大时,将直角坐标系中的某一直线使用参数方程变换到极坐标系中。其中,极坐标方程为:

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \quad (21)$$

式中:极角 θ 是原点到直线的垂直线与 x 轴正方向的夹角, $\theta = [0^\circ, 180^\circ]$;极距 ρ 为从坐标系原点到直线的距离。

3.2 改进 Hough 变换对裂纹检测及定位

传统 Hough 变换检测直线原理是把图像空间的相关数据转换到 Hough 空间中,分别统计出某一个方向的局部最大值的数目进而确定参数提取直线。这样会导致仅能检测出共线的像素点,检测不出裂纹的两个端点,且处理速度和精确度一般。在实际应用中绝缘子二值图中会出现噪声和少量污秽边缘像素点,即使这些像素点不是连通的也会被误认为成裂纹曲线,而不考虑满足 (ρ, θ) 参数的像点是否都连接于实际的边缘直线,对于满足 (ρ, θ) 参数的像素点没有具体要求,则检测出的结果可能达不到理想的效果,出现过连接甚至检测到错误的直线参数。

针对 Hough 变换中存在的问题,为此,提出一种改进

的 Hough 变换直线检测方法,快速有效地检测出图像空间的裂纹直线边缘。基本思想是:充分利用好图像空间转换到霍夫参数空间的数据,在峰值检测统计过程中与置零法相结合。通过设置阈值消除过连接裂纹以及虚假裂纹直线的产生,以致检测出的裂纹是具有确定两个端点的裂纹直线,具体流程如图 6 所示。

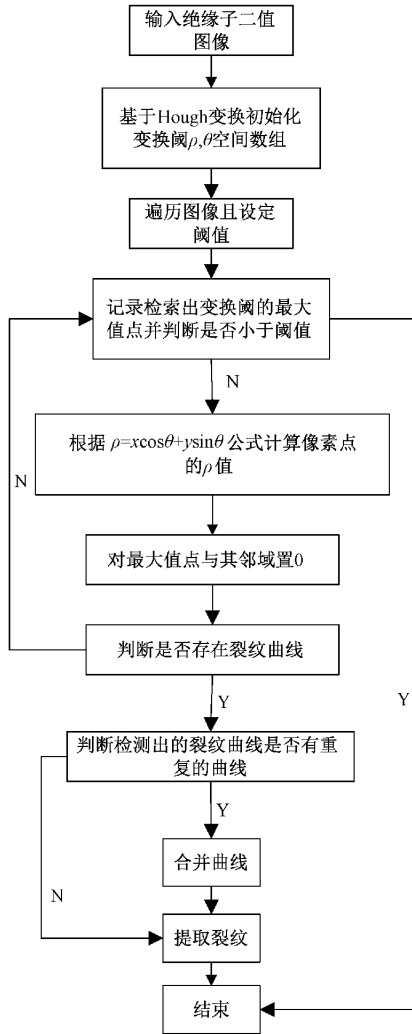


图 6 检测裂纹流程

改进 Hough 变换检测裂纹概括如下:

1) Hough 变换

在绝缘子二值化图像上,记录边缘像素点坐标,并保存到一个二维数组中。对数组中的边缘像素点按 $\rho = x \cos\theta + y \sin\theta$ 逐点进行 Hough 变换,得到参数空间矩阵 $[h, \rho, \theta]$, 其中: $-\sqrt{H^2 + L^2} \leq \rho \leq \sqrt{H^2 + L^2}$, $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, L 表示霍夫变换域的宽, H 表示霍夫变换域的高。

2) 峰值检测与置零法

首先在统计峰值点矩阵检测中,计算出霍夫空间最大峰值点和记录 ρ 值,继而将此峰值点及其小邻域内像素点的

位置 0,计算出霍夫空间中第 2 个最大值点并记录。循环至检测出所有满足条件的峰值像素点并记录。

3) 消除过连接直线与虚假直线

设置裂纹直线相连的最小间隔为 G_{min} 与所求裂纹直线的最小长度为 S_{min} 与最大长度 S_{max} , S_{max} 小于绝缘子伞裙半径。经过设置合适的 $G_{min}, S_{min}, S_{max}$ 值,可以消除较远的离散像素点或噪声导致过连接和排除伞裙边缘情况。以致检测出的裂纹直线有两个端点和确定的长度线段。

4) 合并、拟合直线

在实际工程中二值化绝缘子裂纹连通但不是同斜率的直线,相互之间存在夹角。采用最小二乘法拟合合并直线,改善 Hough 变换检测裂纹的精准度。用该方法求得的拟合直线满足所有输入点到直线的垂直距离的平方和最小,从而提高直线提取的精度。

4 实验结果与分析

4.1 去雾结果分析

文中绝缘子图像采集使用大疆 Tello 无人机航拍 200 张作为样本,单张分辨率 2592×1944 。为验证本文去雾算法的优越性,选取两幅雾中绝缘子图像作为实验对象,如图 7(a)所示,先后用暗通道先验原理与本文算法测试。实验硬件配置:CPU 为 AMD Ryzen7 4800U, GPU 为 NVIDIA GTX 1660Ti, RAM 16 G, 软件平台 MATLAB R2016b。

本文算法只对于暗通道处理,参数 Z 为固定值。根据仿真结果可知, $Z = 81$, 本文算法针对不同雾中绝缘子图像,都可实现较好的去雾效果并减少颜色失真的现象。

1) 峰值信噪比(PSNR)

峰值信噪比是衡量图像质量的参数,数值与质量成正比,其表达式为:

$$PSNR = 10 \cdot \lg\left(\frac{2^n - 1}{MSE}\right) \tag{22}$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} [I(x, y) - J(x, y)]^2$$

2) 结构相似性(SSIM)

SSIM 从 $L(I, J)$ 亮度、 $C(I, J)$ 对比度、 $S(I, J)$ 结构 3 个角度评估图像的相似性,取值范围 (0, 1), 其值与相似度成正比,表达式为:

$$SSIM = L(I, J) \cdot C(I, J) \cdot S(I, J) \tag{23}$$

对两组实验图进行峰值信噪比(PSNR)值与结构相似性(SSIM)值测试,结果如表 1 所示。

表 1 量化实验结果对比

算法/指标	峰值信噪比/dB	结构相似性/%
文献[20]	33.395	0.637
本文算法	35.719	0.778

文献[20]所提算法的去雾效果如图 7(b)所示,本文所

提方法的去雾效果如图 7(c)所示,两者对比可直观看出改进后的去雾算法对图像背景的光亮与颜色区域优化的效果更好。由表 1 可知,本文算法对比文献[20]的 PSNR 值与 SSIM 值分别提高了 2.324 与 0.141。验证本文算法对图像色彩复原较高与减少失真现象发生。

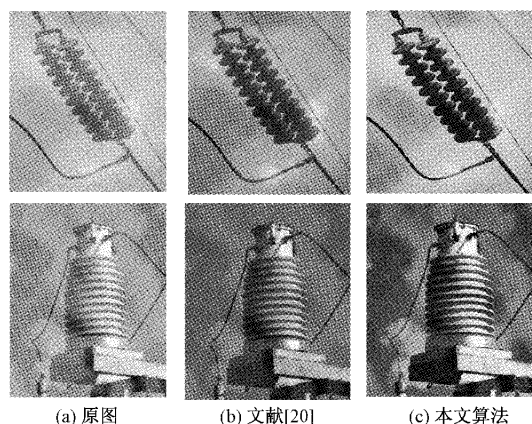


图 7 去雾结果对比

4.2 基于 Hough 变换对检测裂纹结果与分析

1) 边缘检测结果与分析

选取上一步采用本文算法去雾后绝缘子的灰度化图像作为边缘检测的样本如图 8(a)所示,传统 Canny 算法效果如图 8(b)所示,本文改进边缘检测算法结果如图 8(c)所示。实验结果验证了本文所提出的利用二维最大熵阈值优化的 Canny 算子的优越性,能够有效地提取出航拍绝缘子图像更多的边缘信息,为下一步裂纹检测的精确率提供保障。

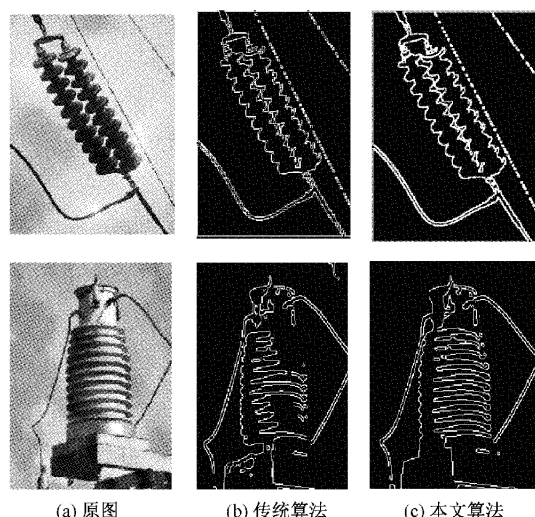


图 8 边缘检测结果对比

2) 斜率检测

首先对绝缘子二值化图中裂纹进行斜率检测,根据伞裙边缘规律排列的特征,若检测出斜率变化较大则可以证明裂纹的存在,最后利用改进 Hough 变换直线检测对裂纹检验。

二值化绝缘子图像呈现出较规律的形状,而裂纹像素点排列较为反常,因此遍历整个图像检测曲线的斜率 k 存在且波动较大则裂纹存在。首先设计有效的斜率计算公式为式(25)通过斜率变化辨识裂纹边缘特征点。本文为了尽可能减少离散边缘与噪点的干扰,采用多个斜率求平均值法实现检测。本文以图 9 为实验图,即用 4 个斜率的均值作为最终的斜率。

$$k_{f-8} = \frac{\sum_{g=2,4,6,8} \frac{y(f-g) - y(f+g)}{x(f+g) - x(f-g)}}{4} \quad (24)$$

式中: $f \geq 9$, $y(g)$ 表示轮廓上的数据点在图像中的列; $x(g)$ 表示对应的行位置。斜率如图 10 所示。

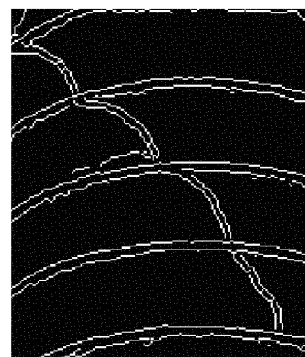


图 9 斜率实验图

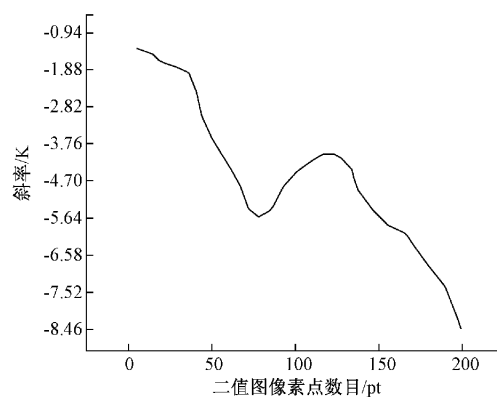


图 10 裂纹斜率变化图

3) 基于改进的 Hough 变换检测裂纹

取裂纹斜率 $k \leq 0$ 与 $\lim k = \infty$ 为实验样本,如图 11(a)所示,传统 Hough 变换无法区分伞裙与裂纹像素点之间的差异,检测结果会出现过连接与伪裂纹现象,如图 11(b)所示,本文改进的 Hough 变换算法是以设定阈值以致检测出的裂纹是具有确定两个端点的裂纹直线,消除过连接与伪裂纹的影响,即使平行于伞裙边缘的裂纹也能准确检验出来。对不规则裂纹曲线检测具有较好的鲁棒性,实验如图 11(c)所示。

通过以上 3 组实验图可以看出改进后的 Hough 变换通过设定阈值消除了过连接与虚假裂纹的产生。为验证本文所提的改进 Hough 变换对绝缘子裂纹检测的合理性和

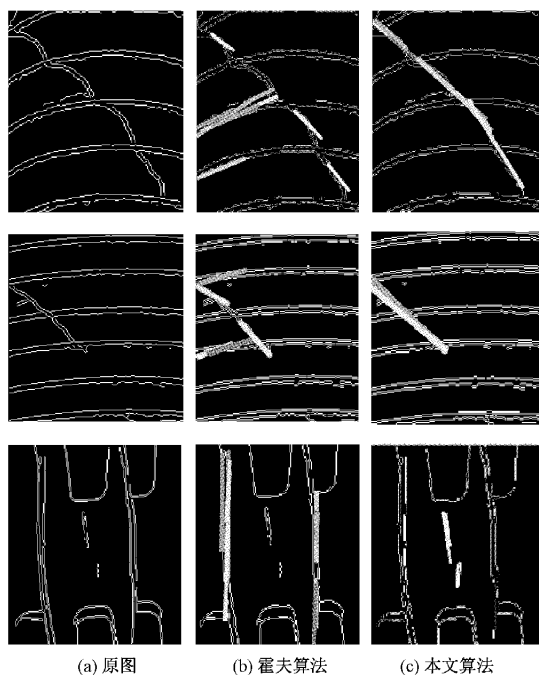


图 11 裂纹检测实验图

表 2 Canny 算子改进前后裂纹检测准确率与时间对比

分割方法	样本数目	传统 Canny 算子边缘检测图像			本文改进算法后边缘检测图像		
		时间/s	误检数目	精准度/%	时间/s	误检数目	精准度/%
文献[17]	200	65.95	21	89.5	61.23	13	93.5
传统 Hough 变换算法	200	39.17	25	87.5	36.53	19	90.5
本文算法	200	18.72	15	92.5	15.22	8	96.0

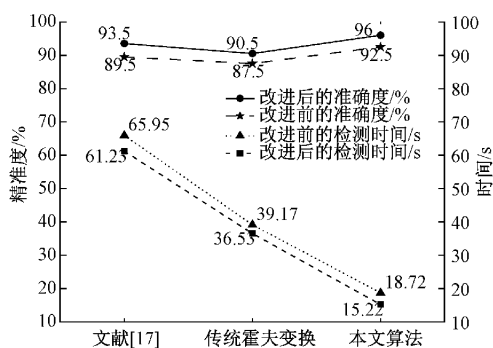


图 12 进算法前后准确率与时间对比

5 结 论

为了实现雾中绝缘子的裂纹检测,本文以实验为基础,提出了一种基于改进的 Hough 变换对雾中绝缘子的裂纹检测方法,比较传统暗原色先验算法,本文所提的算法对雾中绝缘子光亮区域出现颜色失真导致目标不清晰的问题,优化效果较好。利用绝缘子二值图伞裙与裂纹边缘像素点排列的差异,采用本文所提的改进 Hough 变换算法,在峰值检测统计过程中与置零法相结合,设定阈值以

优越性,首先使用改进 Canny 算子前后各自对采集的 200 张绝缘子裂纹图像样本进行边缘检测,之后分别采取本文方法、传统 Hough 变换方法与文献[17]所提方法对改进边缘检测前后两类二值图像实行裂纹检测实验对比,结果如表 2 所示。

从表 2 实验结果可以看出,本文所提的裂纹检测方法,在改进 Canny 算子边缘检测前后的运行时间同类最短分别为 18.72、15.22 s,比传统 Hough 变换各自加快了 20.45、21.31 s,准确度也是同类最高分别是 92.5%、95.5%,比传统 Hough 变换相对改善了 5%、5.5%,优化边缘检测算法前后对比用时少了 3.5 s 与准确度提高了 3%。相比可知,本文所提的裂纹检测算法在速率与准确率方面都有提升且完善 Canny 算子的必要性,对雾中绝缘子裂纹检测具有一定优势,如图 12 所示。

致减少裂纹过连接的影响,对于不同斜率的裂纹都有较好的检测效果,对雾中绝缘子裂纹检测应用上有着重要意义。

参考文献

- [1] 邱志斌,阮江军,黄道春,等. 输电线路悬式瓷绝缘子老化形式分析与试验研究[J]. 高电压技术,2016,42(4): 1259-1267.
- [2] 侯春萍,章衡光,张巍,等. 输电线路绝缘子自爆缺陷识别方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(6): 1-6.
- [3] 陈庆,闫斌,叶润,等. 航拍绝缘子卷积神经网络检测及自爆识别研究[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(6): 942-953.
- [4] 黄瑞平,田亮,刘世涛,等. 不同环境条件下特高压直流线路绝缘子长期积污特性研究[J]. 绝缘材料,2021, 54(3):60-67.
- [5] 沈新平,彭刚,袁志强. 基于霍夫变换和 RANSAC 算法的绝缘子定位方法[J]. 电子测量技术,2017,40(6): 132-137.
- [6] 王森,杜毅,张忠瑞. 无人机辅助巡视及绝缘子缺陷图

- 像识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1862-1869.
- [7] 商俊平, 李储欣, 陈亮. 基于视觉的绝缘子定位与自爆缺陷检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 844-849.
- [8] 姜浩然, 金立军, 闫书佳. 航拍图像中绝缘子的识别与故障诊断[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 274-278.
- [9] 马帅营, 安居白, 陈舫明. 基于区域定位的绝缘子图像分割[J]. 电力建设, 2010, 31(7): 14-17.
- [10] 金立军, 田治仁, 高凯, 等. 基于红外与可见光图像信息融合的绝缘子污秽等级识别[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3682-3691.
- [11] 乔路丽, 蔺雨桐, 李静, 等. 基于深度学习的绝缘子缺失检测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 44-50.
- [12] 郝帅, 马瑞泽, 赵新生, 等. 基于超分辨深度残差网络的玻璃绝缘子自爆故障检测算法[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1817-1825.
- [13] 徐建军, 黄立达, 闫丽梅, 等. 基于层次多任务深度学习的绝缘子自爆缺陷检测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1407-1415.
- [14] 张俊林, 石冬阳, 贾兵, 等. 暗通道先验理论的绝缘子图像去雾算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(7): 208-215.
- [15] 郭强, 浦世亮, 张世峰, 等. 适合跨域目标检测的雾霾图像增强[J]. 中国图象图形学报, 2022, 27(5): 1481-1492.
- [16] 邓红雷, 鲁强, 陈力, 等. 基于超声导波的复合绝缘子检测[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1236-1244.
- [17] 杨辉金. 基于图像处理的接触网绝缘子裂纹和定位支座检测[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [18] 孙晋. 基于边缘检测的绝缘子裂纹诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [19] PETROU M, KITTLER J. Optimal edge detectors for ramp edges[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1991, 13(5): 483-491.
- [20] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [21] 张希珍, 孙晓艳, 张立材. 在线式绝缘子图像采集与实时处理系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(16): 113-118.
- [22] 王晶晶, 杨俊杰. 改进 Canny 算法在绝缘子串红外图像边缘检测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2022(3): 179-185.
- [23] 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.
- [24] 王慧燕, 诸静. 基于小波变换的边缘检测及其在绝缘瓷瓶故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004(15): 76-79.

作者简介

马聚超(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

E-mail: 1015960385@qq.com

舒征宇, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制。

E-mail: 18702031@qq.com