

基于霍夫变换和 RANSAC 算法的绝缘子定位方法

沈新平¹ 彭刚¹ 袁志强²

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局试验研究所 惠州 516001;

2. 北京普锐电子有限公司技术部 北京 100070)

摘要: 对绝缘子进行定位是实现其非接触式爬电距离测量的前提条件,为此本文依据绝缘子自身所具有的形态和分布特点,提出一种基于霍夫变换和 RANSAC 算法的绝缘子定位方法。首先利用 Canny 边缘检测获取绝缘子的边缘特征,并依赖其形似圆的特点结合霍夫圆变换进行检测;接着依据其在串中间距大体相等且串似直线的特点,利用修正的 RANSAC 算法提取圆心构成直线;最后遍历直线用红色矩形框对其进行有效定位。实验结果表明,本定位方法可对绝缘子进行有效定位,为绝缘子爬电距离的计算等后续研究提供了基础。

关键词: 边缘检测;Canny 算子;霍夫变换;RANSAC 算法;绝缘子图像

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Insulator location method based on Hough transformation and RANSAC algorithm

Shen Xinping¹ Peng Gang¹ Yuan Zhiqiang²

(1. Test Research Institute of Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516001, China)

(2. Department of Technique, Beijing Purui Electronic Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Insulator location is a premise condition of non-contact creepage distance measurement. Dependent on the morphology and distribution characteristics of the insulator, we proposed a method of insulator localization based on Hough transformation and RANSAC algorithm. Firstly, we obtained the edge of the insulator image with Canny edge detection, and dependent on the characteristics of the insulator is shaped like a circle, we combined Hough-circle transformation to test. Secondly, according to the characteristics of the insulator spacing roughly equal and the insulator string like a straight line, we fitted the center points of the circles with the modified RANSAC algorithm. Finally, we traversed the straight line and located insulator with a red rectangular box. The experimental results have shown that this method can locate the insulator effectively, which provides the basis for the subsequent research of the insulator detection and so on.

Keywords: edge detection; Canny operator; Hough transformation; RANSAC algorithm; insulator image

1 引言

绝缘子的爬电距离是绝缘子重要的尺寸参数,在一定程度上表征了绝缘子的电气性能和经济性能。当前在运的变电设备绝缘子随着型号、生产厂家以及生产批次的不同,其爬电距离也各不相同,且设备数量很庞大,绝缘子爬电距离的排查任务非常繁重^[1]。

如何获取高精度的绝缘子爬电距离是目前尚未解决的难题,因设备带电无法在线测量,目前只能在每年短暂的停电检修时期,人工采用不会伸长的胶布带,在试品两电极间,沿绝缘件表面进行测量^[2]。图像处理技术可以为绝缘

子爬电距离提供一种高精度带电运行状态下的非接触测量方法。

绝缘子一般为轴对称图形,用图像处理技术测量爬电距离时,需先确定绝缘子在输电线路中的位置及形态,再通过测量绝缘子伞裙圆盘的周长及伞裙形状外轮廓对绝缘子爬电距离进行计算。由于实际拍摄的绝缘子图像背景信息一般较为复杂,因而定位成为实现绝缘子爬电距离测量的关键步骤。

目前已有研究人员提出通过图像处理技术对绝缘子进行定位的方法。文献[3]在图像的 S 空间中运用最佳熵阈值方法进行图像分割,但此方法在图像预处理过程中带入

大量噪声,不利于后期绝缘子轮廓的提取。文献[4]可以计算出其中绝缘子的数目,但只能提取图像中绝缘子的大致轮廓,不能确定绝缘子在图中的具体形态特性。文献[5]利用 NSCT 的灰熵模型对图像进行分割,并在二值图像的基础上进行绝缘子串定位,此方法只根据绝缘子串的大体形状进行定位,未表征出绝缘子串及其单体的结构特点。文献[6]提出一种基于活动轮廓模型的纹理分割法,可有效的对同质的航拍绝缘子图像进行分割,但对弱纹理的绝缘子效果不够理想。目前绝缘子定位尚不能精确和快速的主要原因是,只考虑了图像灰度信息的变化,未考虑绝缘子特有的结构信息,不能满足测量绝缘子爬电距离的需求,因此需要一种快速的分割识别绝缘子的方法做为爬电距离测量的基础。

针对绝缘子的形状特征和绝缘子串的结构特性,提出了一种基于霍夫变换和 RANSAC 算法的绝缘子定位方法。本文利用 Canny 边缘检测获取绝缘子的边缘特征,并结合霍夫变换对其进行圆检测;利用修正的 RANSAC 算法提取圆心点得到直线;最后遍历直线确定绝缘子的位置信息。本方法实现了对图像中的绝缘子目标的定位,为后续的绝缘子爬电距离的测量奠定了基础。

2 定位方案

根据绝缘子及其串的形状特性和结构特征对其进行分割定位,如图 1 所示。

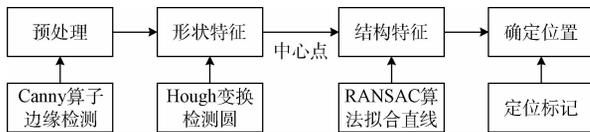


图 1 绝缘子定位方案

预处理主要是增强图像中边缘信息,Canny 算子边缘检测保留绝缘子边缘信息的同时能够抑制噪声;形状特征是根据绝缘子边缘具有明确的圆特征,利用霍夫变换进一步确定边缘信息中圆形特征;结构特征是根据绝缘子串的直线性特征,利用 RANSAC 算法去除其他结构圆心,确定其串圆心;最终以串为依据标记各绝缘子确定其位置。

3 图像预处理

预处理主要目的是增强图像中绝缘子边缘信息,特别是用以反映绝缘子外圆轮廓的边缘信息。

本文选取 Canny 算子对图像进行边缘检测。Canny 边缘检测的实质就是求取信号函数的极大值问题来判定图像边缘像素点^[7],采用高斯函数构造滤波器对原始图像 $I(x, y)$ 进行滤波平滑得到边缘图像 $g(x, y)$,再利用一阶偏导对图像进行差分运算,得到该像素的梯度方向 $\theta(i, j)$ 和梯度幅值 $S(i, j)$,对梯度图像进行非极大值抑制,并使用双阈值对梯度图像进行边缘检测和连接。

设双阈值为 T_h 和 T_l ,其中 T_h 为高阈值, T_l 为低阈值,

且 $T_l = 0.4 \times T_h$ 。对图像中的任一像素点 (i, j) 进行检测,根据其梯度幅值 $S(i, j)$ 判断该像素点是否为边缘点,即

$$I_{bc} = \begin{cases} 1, & S(i, j) > T_h \\ 0, & S(i, j) < T_l \\ \alpha, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

当 $I_{bc} = \alpha$ 时,需判断该像素的八邻域内是否存在高于 T_h 的像素点,若存在,判定该点为边缘点,即 $\alpha = 1$;否则判定为非边缘点,即 $\alpha = 0$ 。

根据文献[8],设原图像 $I(x, y)$ 尺寸为 $M \times N$,灰度级为 256, n_i 为像素灰度 i 的频数,则 i 出现的概率为

$$p_i(i) = \frac{n_i}{M \times N} \quad i = 0, 1, 2, \dots, 255 \quad (2)$$

图像边缘和背景的熵分别为:

$$H_b(t) = - \sum_{i=0}^t \frac{p_i}{\sum_{i=0}^t p_i} \ln \left(\frac{p_i}{\sum_{i=0}^t p_i} \right) \quad (3)$$

$$H_c(t) = - \sum_{i=t+1}^{255} \frac{p_i}{1 - \sum_{i=0}^t p_i} \ln \left(\frac{p_i}{1 - \sum_{i=0}^t p_i} \right) \quad (4)$$

式中: t 为边缘阈值。

高阈值 T_h 可由如式(5)计算得出:

$$T_h = \omega \times \frac{\operatorname{argmax}(H_b(t) + H_c(t))}{256} \quad (5)$$

其中,根据绝缘子图像特点增加权重系数 ω 线性调整熵,其取值范围为 $[1, 6]$, ω 过大会得到较多无效边缘, ω 过小得到的绝缘子边缘不够完整。本文 ω 取经验值 4.5。

以图 2(a)为例,图(b)为(a)的梯度直方图, x 轴表示图像灰度值梯度,为了便于观察, y 轴显示的为统计数目取对数的值。图中深色区域代表图中绝缘子区域的梯度直方图,图中梯度值在 T_l 之前统计数目波动较大,说明噪声比较强,除噪声较大区域外的统计数目峰值大致在梯度值 T_h 处。图中浅色区域代表原图像的梯度直方图,除噪声较大区域外的统计数目峰值大致在梯度值 T_l 处。

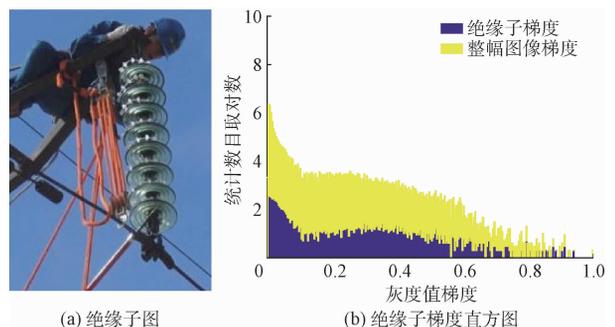


图 2 图像预处理

4 绝缘子定位

绝缘子定位分两部分工作:一是根据绝缘子的形状确

定可能的绝缘子；二是依据绝缘子串的结构特征确定最终的绝缘子。

4.1 霍夫变换检测圆

霍夫变换实现了图像空间到参数空间的映射,可将难解决的全局检测问题转化为较易解决的局部峰值检测问题。图像处理中,霍夫变换常被用来识别图像中的直线、曲线与圆^[9-10]。

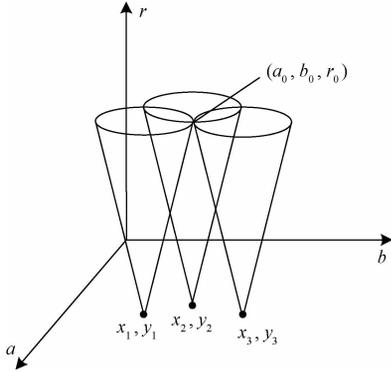


图 3 霍夫圆变换原理

如图 3 所示,图像上的点映射为一个三维空间中的圆锥面:

$$(a - x_i)^2 + (b - y_i)^2 = r^2 \tag{6}$$

在 xy 平面上的 3 个点若在一个圆上,它们对应的空间曲面相交于一点,这些点构成的边界接近一个圆形。

一般对图像空间中的圆进行检测之前,需对参数空间进行量化,得到一个三维累加器数组,累加器中各个方格对应 (a, b, r) 参数值。当对圆上所有点都完成变换后,对三维累加器中所有累加器进行峰值检验,累加器的峰值坐标值对应圆的半径值和圆心坐标。为降低算法复杂度,本文用二维累加器代替^[11]。

设原图像 $I(x, y)$ 尺寸为 $M \times N$, nonzero 像素点个数 Z , 对其边缘图像 $f(x, y)$ 中的 nonzero 像素点进行局部梯度计算; 根据已限定的圆的半径范围, 将半径在限定范围内的像素点在二维累加器 A 中进行累加, 此累加器用来求圆心。

对图像 nonzero 像素点 (a, b) 的局部梯度、向量角和所确定的累加点 (x_0, y_0) 的坐标计算公式分别为:

$$\nabla f = \text{grad}(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_a \\ g_b \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\theta = \arctan \frac{g_b}{g_a} \tag{8}$$

$$\begin{cases} x_0 = a - r \cos\left(\arctan \frac{g_b}{g_a}\right) \\ y_0 = b - r \cos\left(\arctan \frac{g_b}{g_a}\right) \end{cases} \tag{9}$$

其中, $r_{\min} < r < r_{\max}$, r_{\min} , r_{\max} 分别为限制半径参数的最小值和最大值, 称为搜索半径, 同时可使 (x_0, y_0) 的值为整数。

每一个非零点对应的累加矩阵 $G = [g_{x,y}]_{M \times N}$ 中的 $g(x, y)$ 可由如下公式求出:

$$g(x, y) = \begin{cases} x = \left[a - r \cos\left(\arctan \frac{g_b}{g_a}\right) \right] \text{ and} \\ 1, & y = \left[b - r \cos\left(\arctan \frac{g_b}{g_a}\right) \right] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{10}$$

二维累加器 $A_{x,y}$ 是 Z 个累加矩阵相加后的结果, 其计算公式如下:

$$A_{x,y} = \sum_{j=0}^{Z-1} G_j, a \leq j \leq Z-1 \tag{11}$$

确定了二维累加器 A 中的值后, 在 nz 数组中记录每一个 nonzero 像素点, 此数组用于求得与圆心对应的半径, 并可依据 $A_{x,y}$ 判断是否为圆心。

4.2 修正的 RANSAC 算法提取直线

由于绝缘子悬挂角度各异, 其图像中的绝缘子串不一定成标准的轴对称图形, 这使得根据霍夫圆心提取的直线与实际绝缘子状况会有差异。针对这个问题, 本文利用 RANSAC 算法提取圆心构成直线, 再对最终直线进行调整, 使得到的结果更加适用于绝缘子爬电距离的计算。

RANSAC 算法^[12] 用于提取直线时, 随机选择两点, 用这两点定义一条直线, 该线的支集由在一定距离内的点数来度量, 重复多次随机选择, 具有最大支集的线就认为是鲁棒拟合, 在距离阈值内的点称为内点, 其他则称为野值点。

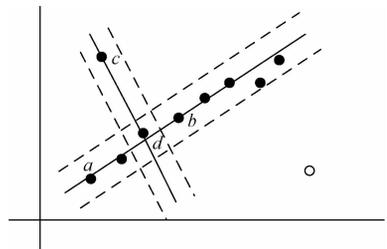


图 4 RANSAC 算法原理

采用 RANSAC 算法对线的支集打分, 如图 4 所示, 线 $\langle a, b \rangle$ 的支集有 8 个点, 而线 $\langle c, d \rangle$ 的支集是 2, 按照打分很容易就将 $\langle c, d \rangle$ 模型排除, 多次迭代支集打分后, 得到 $\langle a, b \rangle$ 支集就是最佳的模型, 剔除了野值点。

RANSAC 提取直线算法确定采样次数的方法如下: 其中 ϵ 为全部数据中野值点的比例, m 为模型估计是需要的最小数目, p 为置信概率, z 为采样次数。在置信概率 p 下, 应保证 z 组采样中至少有一组采样中的数据全是正确数据点, 则:

$$p = 1 - (1 - (1 - \epsilon)^m)^z \tag{12}$$

给定 m 和 p 时, 可以确定上式在不同 ϵ 下需要的采样次数 z 为:

$$z = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - \epsilon)^m)} \tag{13}$$

RANSAC算法提取直线时,通常在每次迭代时选取2个点,即模型估计最小数目 $m=2$;置信概率为 $p=0.99$;迭代次数的初始值为经验值 $z=50$ 。

设RANSAC提取到的直线方程为:

$$y = ax + b \quad (14)$$

为使所得直线更加贴合实际绝缘子串形态,使最终定位结果更加精确,需对直线做进一步处理。已知提取到的直线长度为 d ,有效圆心点个数为 K ,且绝缘子在其串中等间隔排列,则直线中每个绝缘子的间隔为 \bar{d} ,即

$$\bar{d} = \frac{\sum_{k=1}^K d_k}{K} \quad (15)$$

其中, $k=1,2,\dots,K$ 。

设从上至下第一个圆心坐标为 (x_1, y_1) ,则提取直线中第 k 个圆心 A 坐标 (x_k, y_k) 数值为:

$$\begin{cases} x_k = \frac{y_1 + k\bar{d} - b}{a} \\ y_k = y_1 + k\bar{d} \end{cases} \quad (16)$$

假设图像中绝缘子实际第 k 个圆心 B 坐标为 (x_{k1}, y_{k1}) ,则 A 和 B 之间距离为 d' ,即

$$d' = \sqrt{(y_k - y_{k1})^2 + (x_k - x_{k1})^2} \quad (17)$$

根据经验,当 $d' < \eta$ 个像素时,第 k 个绝缘子的定位圆心即为提取直线的圆心;否则,用实际圆心坐标替代提取直线中圆心坐标。根据上述规则遍历直线可得到更符合实际绝缘子形态的直线。

4.3 定位标记

根据上述方法可得到绝缘子在其串中间距与位置信息,用红色矩形框对其进行标注得到最终定位结果。

5 实验结果与分析

为验证本文算法的基本性能,对分辨率为 188×259 近似竖直的单串绝缘子图像图3(a)进行算法分析,绝缘子串中有8个绝缘子单体。

5.1 Canny边缘检测分析

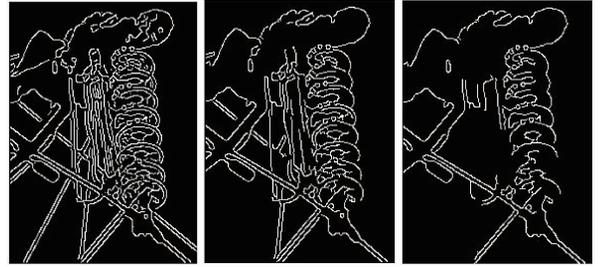
Canny算子的工程应用核心是合理的确定 T_h 和 T_l 。



图5 原始图像与边缘图像对比

根据式(1)~(5)可得出 $T_h=0.299$, $T_l=0.120$,其原始图像与边缘图像的对比如图5所示,并根据第3节所述

对阈值 T_h 和 T_l 的选取进行分析。



(a) 阈值过小

(b) 最佳阈值

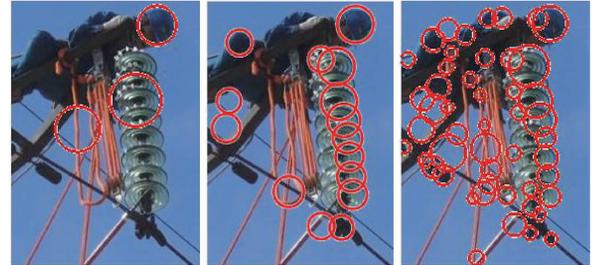
(c) 阈值过大

图6 边缘检测

图6为选取不同高阈值 T_h 时图2(a)的边缘检测结果。由图可见,当 T_h 取值过小为0.2时, $T_l=0.08$,如图6(a)所示,其检测的绝缘子串边缘丰富,但绝缘子反光边缘与噪声边缘也被检测出来,进而干扰后续的绝缘子定位;当 T_h 取值过大为0.5时, $T_l=0.2$,如图6(c)所示,其所检测的绝缘子串边缘稀疏,绝缘子边缘信息存在丢失,不利于后续的绝缘子定位;当 T_h 取值位于0.299时, $T_l=0.12$,如图6(b)所示,绝缘子的边缘信息较完整,绝缘子内部光斑噪声边缘较少,且图中输电线路其他部位只检测出了大致轮廓,很大程度上抑制了干扰项,是最佳绝缘子边缘检测图像。

5.2 霍夫变换分析

霍夫变换的工程应用中,搜索半径的选择影响定位的准确与速度,根据4.1节所述对搜索半径的选取进行分析。



(a) 搜索半径过大

(b) 搜索半径最佳

(c) 搜索半径过小

图7 霍夫圆检测

图7为选取不同搜索半径 r_{max} 和 r_{min} 时对图6(b)进行霍夫圆检测的结果。由图可见,当 r_{max} 为 h 的20%, r_{min} 为 h 的6%,即 $r_{max}=51.8$, $r_{min}=15.54$ 时,取值过大,如图7(a)所示,图中检测出的圆过少,绝缘子部分的圆没有很好地检测出,不利于后续的绝缘子定位;当 r_{max} 为 h 的8%, r_{min} 为 h 的2%,即 $r_{max}=20.72$, $r_{min}=5.18$,取值过小时,如图7(c)所示,图中检测出的圆的干扰项过多,不能与绝缘子很好的匹配,影响后续的绝缘子定位;当 r_{max} 为 h 的10%, r_{min} 为 h 的4%,即 $r_{max}=25.9$, $r_{min}=10.36$ 时,如图6(b)所示,可以较好地检测出图中绝缘子的圆,且没有过多检测到输电线路其他部分的圆,是最佳绝缘子霍夫圆检测结果。

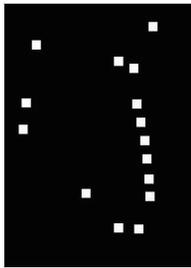


图 8 膨胀处理霍夫圆心



图 10 定位标注

为了便于后续对检测出的霍夫圆进行直线提取,对图 7(b)中圆心进行膨胀处理,结果如图 8 所示。

5.3 改进的 RANSAC 算法分析

对图 8 的圆心点进行 RANSAC 直线提取可以得到图 9(a)中的直线,根据式(15)~(17)其修正结果如图 9(b)所示,可以看出修正后的直线更加符合实际绝缘子及其串在图中的位置形态。

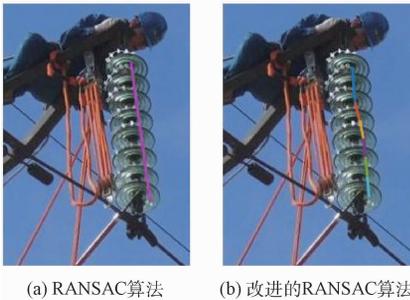


图 9 提取直线

5.4 定位结果分析

图 2(a)的最终定位结果如图 10 所示,算法参数设置为: $T_h=0.299, R_{max}=25.9, R_{min}=10.36, m=2, p=0.99, z=50, \eta=10$ 。

可以看出,由于原始图像图 2(a)成像较清晰且目标

较大,经过对比,图 5 可较好地还原其绝缘子的边缘信息。但由于原始图像背景较复杂,图 7(b)除绝缘子外输电线路中其他部位的个别霍夫圆也被检测出来,利用 RANSAC 算法对圆心进行直线提取可以有效的剔除杂项,并利用圆心对直线的校准最终对绝缘子目标实现精确定位。从图 10 中可以看出,本算法能够准确的将图中绝缘子串上的单个绝缘子进行有效定位。

5.5 算法通用性分析

为验证本文算法的通用性,用图 11(a)进行测试。图 11(a)是分辨率为 1082×617 近似水平的两串并列绝缘子图像,其中共有 48 个绝缘子,参数设置为: $T_h=0.457, R_{max}=74.04, R_{min}=6.17, m=2, p=0.99, z=50, \eta=10$ 。

从图 11 可以看出,因为原始图像 11(a)成像较模糊且目标占原图比例不大,得到的绝缘子边缘图像 11(b)有缺失,从绝缘子边缘图像与原始图像的对比图 11(c)可以看出边缘图像 11(b)不能完全还原原始图像 11(a)中绝缘子的边缘信息,因此 11(d)不能很完整的得到绝缘子的霍夫圆,且依然夹杂着除绝缘子以外背景中其他部位的个别霍夫圆。利用 RANSAC 算法对所得霍夫圆圆心进行直线提取得到图 11(f),并利用圆心对直线的校准得到图 11(g),可以看出,该部分算法能对霍夫圆缺失部分进行补偿并可以有效的忽略除绝缘子外的干扰项。图 11(h)是绝缘子最终定位图,其结果准确且完整。

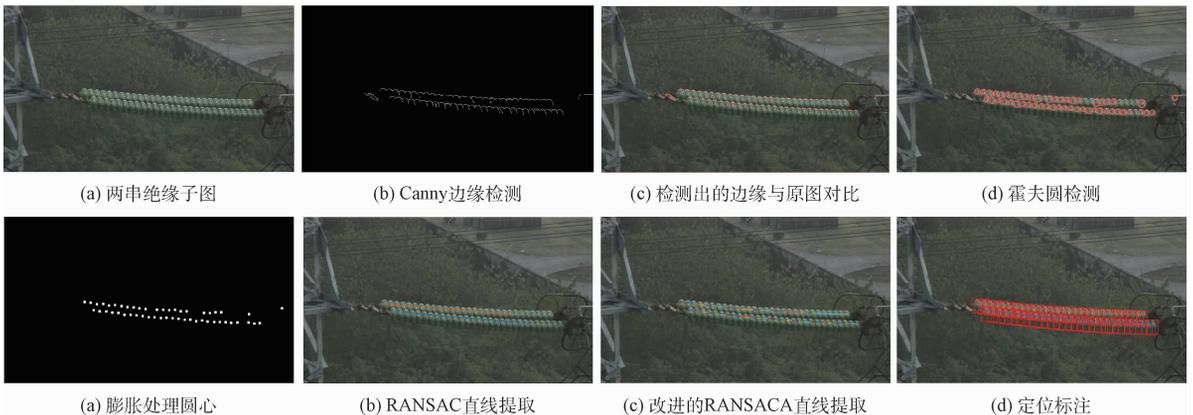


图 11 两串绝缘子定位结果

6 结 论

本文提出了一种基于霍夫变换和 RANSAC 算法的绝缘子定位方法,可以实现对不同背景不同形态下绝缘子的有效定位。依赖于绝缘子的形状特征和结构特性,先用 Canny 边缘检测获取绝缘子图像的边缘特征;再根据绝缘子形似圆的特点结合霍夫变换进行圆检测,然后依据绝缘子在串中等间隔排列且其串形似直线的特点使用修正的 RANSAC 算法得到直线关系图;最后遍历直线用红色矩形框对绝缘子进行标注。实验结果表明,本文定位算法在对不同场景、不同数量的绝缘子图像进行定位时效果良好,能够为绝缘子爬电距离测量等后续研究提供基础。

参考文献

- [1] 李晓武,刘卫东,王立德,等. 爬电距离带点检测新技术研究[J]. 高压电器,2013(1): 96-100.
- [2] GB/T 775.1—2006. 中华人民共和国国家标准—绝缘子试验方法第 1 部分:一般试验方法[S].
- [3] 姚春雨,金立军,闫书佳. 电网巡检图像中绝缘子的识别[J]. 系统仿真学报,2012(9): 1818-1822.
- [4] 方挺,董冲,胡兴柳,等. 航拍图像中绝缘子串的轮廓提取和故障检测[J]. 上海交通大学学报,2013,47(12): 1818-1822.
- [5] 赵振兵,王乐. 一种航拍绝缘子串图像自动定位方法[J]. 仪器仪表学报,2014,35(3): 558-565.
- [6] WU Q G, AN J B. An active contour model based on

texture distribution for extracting inhomogeneous insulators from aerial images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3613-3626.

- [7] 吉玲,杨亚,付珊珊,等. 一种改进的 Canny 边缘检测算法[J]. 微处理机,2015(1): 40-43.
- [8] 唐路路,张启灿,胡松,等. 一种自适应阈值的 Canny 边缘检测算法[J]. 光电工程,2011,38(5):127-132.
- [9] 赵明杰,闫连山,熊如刚,等. 基于 DSP 的直线特征快速提取算法研究[J]. 电子测量技术,2013,36(5): 68-71, 77.
- [10] 焦圣喜,肖德军,阚一凡,等. 霍夫变换算法在圆心视觉定位中的应用研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(14): 4089-4093.
- [11] 仲崇权,赵亮. 基于霍夫变换的工位点识别算法设计与实现[J]. 物联网技术,2016,6(8): 14-17.
- [12] 陈天飞,赵吉宾,王银灵,等. 基于射影变换圆阵靶标中心像点的计算[J]. 仪器仪表学报,2015,36(4): 895-902.

作者简介

沈新平,硕士,工程师,主要研究方向为电力安全生产技术、电力营销管理工作和电力信息处理技术。

彭刚,本科,高级工程师,主要研究方向为输变电设备运维管理。

袁志强,本科,工程师,主要研究方向为计算机视觉测量与电力系统检测技术。