

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.025

航拍图像中绝缘子的识别与故障诊断*

姜浩然^{1,2}, 金立军^{1,2*}, 闫书佳¹

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对输电线路绝缘子掉片故障问题,对绝缘子图像阈值分割、边缘检测、绝缘子识别、故障诊断等方面进行了研究,对航拍图像正常绝缘子、故障绝缘子以及背景区域特征进行了归纳,提出了一种基于航拍图像的绝缘子识别与故障诊断方法。利用最大类间方差法(OTSU)分割图像,小波模极大值法检测图像边缘,对 Hough 变换进行改进以快速检测不完整椭圆,根据椭圆参数设计分类决策条件以识别绝缘子串,最后基于绝缘子串的位置信息实现了绝缘子的故障诊断,并利用航拍图像对输电线路绝缘子识别与故障诊断方法进行了验证。研究结果表明,该方法能获得绝缘子串椭圆参数,能够实现航拍图像绝缘子边缘检测、绝缘子识别、掉片故障诊断等多项功能,算法响应迅速、准确率高。

关键词: 绝缘子; Hough 变换; 图像识别; 故障诊断

中图分类号: TM216; TP24 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)02-274-05

Recognition and fault diagnosis of insulator string in aerial images

JIANG Hao-ran^{1,2}, JIN Lin-jun^{1,2}, YAN Shu-jia¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the insulator sheds' dropping off, study on image threshold segmentation, edge detection, insulator recognition and fault diagnosis were carried out, characteristics of insulator and the background area were summarized, a new method to recognize and diagnose fault insulator was proposed. The OTSU was applied for image segmentation, and wavelet modulus maximum method for edge detection, Hough transform was improved to detect ellipsis quickly, ellipse parameters were used to design the classification standards and accurately recognize the insulator. Finally, fault diagnosis was realized based on location information. The method was verified using aerial images. The results indicate that ellipse parameters can be calculated, functions such as edge detection, insulator recognition, and fault diagnosis can be realized, and the algorithm responds quickly and accurately.

Key words: insulator; hough transform; image recognition; fault diagnose

0 引言

目前,我国输电线路的巡检基本采用地面目测法,但常规的基于人力的巡检劳动强度大,且效果不好^[1]。飞行控制、检测和图像处理技术的发展,为输电

线路的自动化检测提供了新的思路^[2]。架空输电线路及户外变电所使用的绝缘子的性能的好坏是决定电力输送系统可靠性的一个关键因素。作为输电线路中广泛使用的两类绝缘子,瓷绝缘子在机械、电气等作用下会破裂甚至发生掉片,而自然环境、机械载力、生产工艺等问题可能会引起玻璃绝缘子自爆,严重影

收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177109); 电力设备电气绝缘国家重点实验室资助项目(EIPE14211)

作者简介: 姜浩然(1990-),女,四川达州人,主要从事图像处理在故障诊断应用方面的研究。E-mail: jianghaoran@163.com

通信联系人: 金立军,男,教授,博士生导师。E-mail: jinlj@tongji.edu.cn

响了电网的正常运行。

目前,绝缘子运行状态的检测方法主要有超声波检测法、红外测温法、脉冲电流法等,这些方法大多存在操作复杂、成本高、危险性大、受气候影响大^[3]等缺点。近年来,随着计算机图像处理技术的发展和无人机巡检技术的日益成熟,绝缘子检测方法有了新的突破。基于可见光图像的输电线路绝缘子故障诊断受背景影响较大,问题复杂,成果较少。目前研究还处在发展阶段,其很大程度上依赖于输电线路绝缘子的准确识别。由于电网图像拍摄角度和拍摄距离的影响,绝缘子会表现出一定的特征。如何有效区分背景和绝缘子,从复杂背景图像中准确识别绝缘子成为检测工作的难点。

针对输电线路绝缘子掉片这一典型故障,本研究通过分析现场拍摄的输电线路绝缘子照片,基于数字图像处理技术与模式识别提出一种新的绝缘子缺陷诊断方法,并以绝缘子图像为例进行实验。

1 绝缘子故障诊断流程

为观察输电线路绝缘子特征,本研究将其从环境背景中区分出来,首先须对航拍绝缘子图像预处理。拍摄到的图像是彩色的,占据大量存储空间,影响计算速度;拍摄过程中混入的噪声也需要进一步的处理;将图像阈值分割后,通过选取适当的方法对得到的二值图像进行边缘检测,以获得连续清晰的轮廓。

根据绝缘子片呈椭圆这一特征,笔者利用改进的Hough变换来检测边缘图像中的不完整椭圆,并将参数空间降为一维,实现椭圆的快速准确检测。最后,根据得到的椭圆参数分类决策,准确识别绝缘子,并根据绝缘子统计信息判断绝缘子是否掉片。

本研究提出的绝缘子故障检测流程如图1所示。

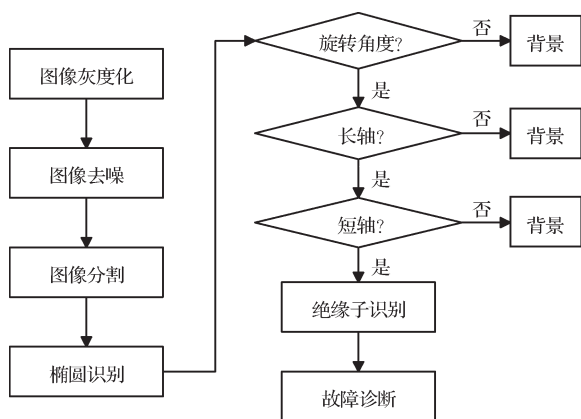


图1 绝缘子故障诊断流程图

2 绝缘子图像预处理

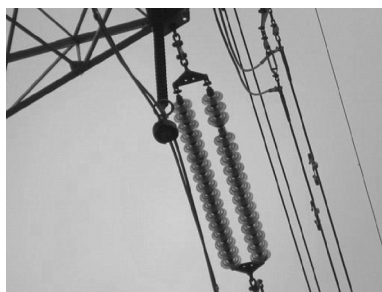
2.1 阈值分割

OTSU算法是一种动态阈值分割方法,其基本思路是:基于图像的灰度信息,通过遍历找到图像的最佳阈值,灰度值 t 将图像分为目标和背景两类,分别计算两类的方差,当类间方差为最大值时,就以这个灰度值为阈值分割图像^[4]。

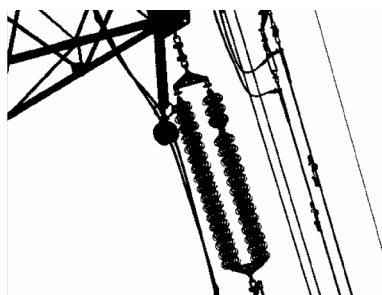
记 t 为分割阈值,将图像分为 C_0 、 C_1 两类。 C_0 、 C_1 类像素点占图像比例分别为 w_0 、 w_1 ,各类平均灰度分别为 u_0 、 u_1 ,则图像的总平均灰度 u 为:

$$u = w_0 \cdot u_0 + w_1 \cdot u_1 \quad (1)$$

在灰度范围内值遍历 t ,当 t 使得两类间方差 $g = w_0 \cdot (u_0 - u)^2 + w_1 \cdot (u_1 - u)^2$ 值最大时, t 即为分割阈值。原图与阈值分割结果如图2所示。



(a) 原图



(b) 二值图像

图2 阈值分割

2.2 边缘检测

通过小波变换将信号分解为不同的空间和尺度分量,信号的高频能量集中在小尺度区间,而低频能量集中在大尺度区间^[5],尺度的变换使得小波具有一定的频率分辨率。图像的边缘即信号的高频部分,利用小波变换的聚焦特性,可以用来实现图像的边缘检测。

设 $\theta(x,y)$ 是一适当光滑的二元函数,引入记号:

$$\theta_s(x,y) = \frac{1}{s_2} \theta\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (2)$$

式中: s —尺度。

则二维子波在尺度 s 下有如下定义:

$$\psi_s^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{s^2} \psi^1\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (3)$$

$$\psi_s^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{s^2} \psi^2\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (4)$$

对 $f(x, y)$ 进行卷积处理, 分别得到沿水平 x 方向的小波变换信号和沿垂直 y 方向的信号:

$$W_s^1 f(x, y) = f \cdot \psi_s^1(x, y) \quad (5)$$

$$W_s^2 f(x, y) = f \cdot \psi_s^2(x, y) \quad (6)$$

二维图像 $f(x, y)$ 在尺度 s 下小波变换模:

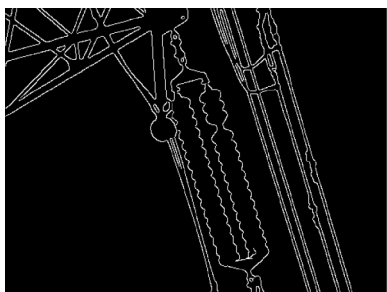
$$M_s f(x, y) = \sqrt{|W_s^1 f(x, y)|^2 + |W_s^2 f(x, y)|^2} \quad (7)$$

其模极大值的梯度方向:

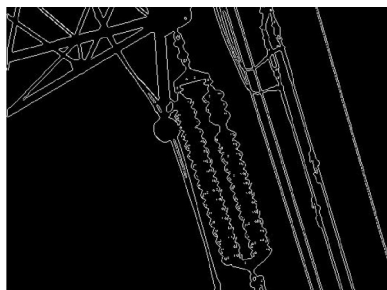
$$A_s f(x, y) = \arctan\left(\frac{W_s^1 f(x, y)}{W_s^2 f(x, y)}\right) \quad (8)$$

小波变换模取局部极大值时, 表示图像中点的灰度发生了剧烈变化, 其大小对应于该点的灰度强度; 梯度对应于模局部极大值点的方向。因此, 计算小波模极大值点便可得到图像的边缘点。

为了分析算法的有效性, 笔者对大量输电线路绝缘子图像进行了实验, 分别采用本研究方法和基于 Canny 算子的边缘检测方法进行比较^[6]。两种算法边缘检测结果如图3所示。



(a) Canny 算子法



(b) 小波模极大值法

图3 边缘检测

另外, 为了进一步评价小波模极大值法和 Canny 算子边缘检测方法的效果, 本研究采用两种评价标准对边缘检测结果进行了比较^[7]。

边缘连续性 R :

$$R = \frac{CEN}{TEN} \quad (9)$$

式中: CEN —连续边缘像素总数, TEN —边缘像素总数。

边缘有序度 M_e :

$$M_e = (1 - N)(1 - F) \quad (10)$$

式中: N —错检率; F —漏检率; M_e 越大, 则边缘图像的边缘有序性越好。

两种方法边缘检测结果的比较如表1所示。可见, 本研究方法的 R 与 M_e 均更高, 即小波模极大值法边缘连续性和有序度更好, 能得到较好的绝缘子边缘检测效果。

表1 两种方法边缘检测结果比较

检测方法	边缘连续性	边缘有序度
Canny 算子	0.938 7	0.802 3
小波模极大值	0.965 2	0.954 8

3 绝缘子识别与故障诊断

3.1 Hough 变换基本原理

Hough 变换定义了图像空间与参数空间的映射关系, 通过坐标变换把图像空间中的点映射为参数空间的曲线或曲面, 并采用投票表决的机制实现目标物体的检测与识别^[8]。首先需定义参数化方程, 之后利用该方程将图像空间中的信息变换到参数空间, 实现坐标变换。变换过程中同时对参数空间中的数据进行统计累加, 并寻找累加器峰值, 设定阈值, 并以此来判断原始空间是否存在检测目标。

3.2 基于改进 Hough 变换的椭圆识别

多数输电线路图像中绝缘子边缘轮廓呈椭圆状, 设定参数方程, Hough 变换可以实现对特定结构的检测。本研究通过改进 Hough 变换可以实现绝缘子的检测。椭圆包含 5 个参数: 椭圆中心 (x_0, y_0) ; 转角 α ; 长轴 $2a$; 短轴 $2b$ 。相比于直线的二维参数空间, 椭圆的参数是五维, 计算量急剧增大^[9]。通过将五维参数空间降为一维, 只需一维累加器累积椭圆短轴长度, 可以降低存储空间, 加快运算速度。同时, 由于拍摄角度, 绝缘子边缘图像中椭圆并不完整, 本研究利用椭圆的数学性质, 椭圆长轴的优势能加快绝缘子检测速度, 同时可实现不完整椭圆的检测。

椭圆几何模型如图4所示。设椭圆长轴的两端点分为是像素点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , 也可将其设为短轴端点, 但会增加像素点检测的复杂度, 耗时较长。

根据椭圆的数学模型, 可以推导出椭圆参数的计算公式:

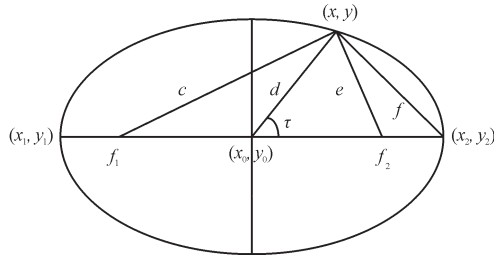


图4 椭圆几何模型

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (11)$$

$$y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (12)$$

$$a = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{2} \quad (13)$$

$$\alpha = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (14)$$

设点 (x, y) 为椭圆边缘上除 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 外的任意一点, f_1, f_2 —椭圆的焦点, τ 为点 (x, y) 、椭圆中心 (x_0, y_0) 连线与椭圆长轴的夹角。

根据椭圆的几何模型,可以看出点 (x, y) 与椭圆中心 (x_0, y_0) 的距离应小于椭圆长轴两端点 (x_1, y_1) 或 (x_2, y_2) 与 (x_0, y_0) 的距离。引入参数 d 为 (x, y) 与 (x_0, y_0) 的距离。可计算出椭圆参数 b :

$$b^2 = \frac{a^2 d^2 \sin^2 \tau}{a^2 - d^2 \cos^2 \tau} \quad (15)$$

$$\cos \tau = \frac{a^2 - d^2 - f^2}{2ad} \quad (16)$$

根据以上推导,可以得到椭圆的5个参数。本研究并对五维参数空间降维,仅建立一维累加器,实现对短轴一半即 b 值的统计。检测峰值并设定阈值,利用表决原理达到检测椭圆的目的。

改进 Hough 变换检测椭圆算法如下:

(1) 建立一维数组 A , 将二值图像中的所有边缘像素点存入其中,建立累加器并清零;

(2) 将数组中的边缘像素点按顺序赋予点 (x_1, y_1) , 并对每一点 (x_1, y_1) , 重复步骤(3)~(8);

(3) 寻找点 (x_2, y_2) , 使得点 (x_1, y_1) 与点 (x_2, y_2) 的距离大于阈值, 重复(4)~(8);

(4) 根据像素点 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) , 计算椭圆4参数: 椭圆中心 (x_0, y_0) 、转角 α 、长轴一半 a ;

(5) 寻找点 (x, y) , 使得 (x, y) 与 (x_0, y_0) 的距离大于阈值, 并小于 (x_1, y_1) 与 (x_0, y_0) 的距离。对所有可能点 (x, y) 计算椭圆参数 b , 累加器递增;

(6) 检测累积器的峰值, 如果超过阈值, 则为真实椭圆, 并将椭圆参数存入数组 B ;

(7) 从数组 A 中将检测到的真实椭圆所有像素点

移去, 累加器清零;

(8) 在边缘图像中标记检测到的椭圆;

(9) 结束。

本研究利用上述算法处理绝缘子边缘图像, 可实现不完整椭圆的检测, 并得到椭圆参数。其中可能有非绝缘子的椭圆, 绝缘子串具有一定的相似性, 可以进一步分类。同一绝缘子串的所有绝缘子片大小相近, 方向一致, 即转角、长轴、短轴相似。笔者统计所有椭圆的以上三参数并剔除差异较大的数据, 据此可从去除多余椭圆, 准确检测到绝缘子。

3.3 绝缘子故障诊断

本研究通过改进 Hough 变换实现了绝缘子识别。依据绝缘子对的参数信息, 可完成绝缘子掉片故障诊断。诊断算法如下:

(1) 确定绝缘子串。同一绝缘子串上的椭圆转角相同, 利用转角 α 及椭圆中心 (x_0, y_0) , 进行直线检测, 提取出两条直线, 并将直线上的椭圆中心分别存入两个数组。

(2) 统计绝缘子片数。选取同一电压等级同一区域的绝缘子串进行故障诊断时, 其绝缘子片数一定^[10]。此处区域拍摄的 220 kV 输电线路图像中单个绝缘子串片数为 17。统计(1)中数组的长度, 若数组长度为 17, 绝缘子串未发生掉片, 若数组长度小于 17, 则需进一步判断。

(3) 计算相邻绝缘子的间距信息。对每一数组, 从中取任意椭圆中心 (x_i, y_i) , 计算其他所有椭圆中心与其距离 d , 存为数组 D 。计算数组 D 中的次小值 d_2 与最小值 d_1 的比值 e (四舍五入取整), 并存入数组 E 。循环, 直到计算完每一椭圆中心 (x_i, y_i) 对应的 e 。

$$e = \left[\frac{d_2}{d_1} + 0.5 \right] \quad (17)$$

(4) 绝缘子故障诊断。对于正常绝缘子串, 两端 $e=2$, 其余绝缘子片 $e=1$, 否则, 有掉片故障。对于数组 E , 统计 $e=2$ 的数目 m , 若 $m=2$, 而其余 e 均为 1, 则绝缘子完好, 否则绝缘子有掉片发生。

本研究通过计算相邻绝缘子对的间距信息 e , 若掉片故障发生在绝缘子串中部, 无论拍摄的绝缘子串是否完整, 均能实现故障诊断。若掉片发生在绝缘子串两端, 会发生漏检, 不适于该算法的研究范围。

4 实验及结果分析

根据本研究提出的算法, 笔者对航拍绝缘子图像进行了实验。利用改进 Hough 变换检测绝缘子, 将得到所有椭圆的数学信息, 即椭圆的 5 个参数。笔者统

计检测到的所有椭圆的参数信息,并分别比较分类,其中短轴长度统计数据如图5所示。

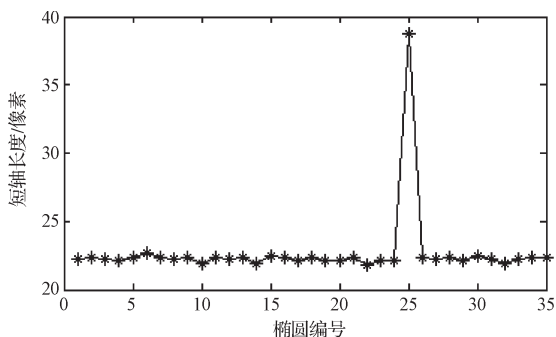


图5 椭圆短轴长度统计

本研究根据椭圆统计信息可找到突变点,即编号为25的椭圆,由此可去除干扰信息,将背景椭圆从图像中去掉,仅标记真实绝缘子,实现绝缘子准确识别,如图6所示。

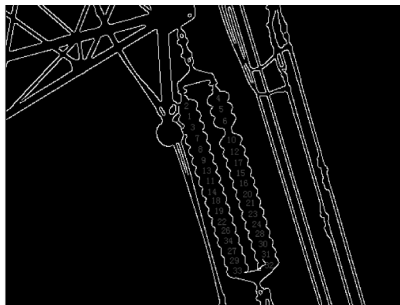


图6 绝缘子识别

笔者根据绝缘子故障诊断算法,统计绝缘子片数,其中一组片数不为17,继续计算相邻绝缘子的间距信息, $e=2$ 的数目为4,不满足条件,有掉片发生。

为了验证本研究故障诊断方法的准确性,笔者另对100幅绝缘子图像进行了实验。其中,正常绝缘子图像80幅,掉片图像20幅。笔者用本研究提出的算法处理输电线路绝缘子图像,成功检测绝缘子轮廓100幅,能找出19张故障图像,1张漏检,其原因为故障发生在绝缘子串顶端。绝缘子掉片故障诊断成功率为95%。

5 结束语

本研究提出一种基于改进Hough变换的输电线路绝缘子故障诊断方法,主要分为4步:

(1) 基于OTSU图像分割,减少图像细节与计算量,目标与背景区分度较好;

(2) 利用小波模极大值法检测图像边缘,获得连续性好有序度高的边缘图像;

(3) 利用改进Hough变换检测椭圆,加快检测速度,并能检测边缘不完整的椭圆,改善检测效果,设计分类条件去除背景;

(4) 基于绝缘子参数位置信息,设计算法以实现绝缘子故障诊断。

笔者通过对100幅绝缘子图像进行实验来验证本研究方法的稳定性。实验结果证明,本研究算法能准确检测电网巡检图像中的绝缘子轮廓并判断绝缘子掉片故障,具有较高的通用性和工程应用价值。该方法简单有效,为我国智能电网中绝缘子巡检提供了新的概念和技术手段。

参考文献(References):

- [1] 孔志增. 输电线路巡检机器人系统及控制软件研究[D]. 保定:华北电力大学机械电子工程,2008.
- [2] 陈立军,吴 谦,石 美,等. 输电线路覆冰检测技术发展综述[J]. 化工自动化及仪表,2011,38(2):129-152.
- [3] 梅红伟,赵晨龙,戴罕奇,等. 染污瓷和玻璃绝缘子的湿润特性研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(9):1471-1480.
- [4] 杨修国. 浅谈图像阈值分割技术[J]. 电子设计工程,2012,20(23):36-40.
- [5] 李亚标,王宝光,李温温. 基于小波变换的图像纹理特征提取方法及其应用[J]. 传感技术学报,2009,22(9):1308-1311.
- [6] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679-698.
- [7] 赵振兵,金思新,刘亚春,等. 基于NSCT的航拍绝缘子图像边缘提取方法[J]. 仪器仪表学报,2012(9):2045-2052.
- [8] KESIDIS A L, PAPAMARKOS N. On the inverse hough transform [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(12):1329-1343.
- [9] XIE Yong-hong, JI Qiang. A new efficient ellipse detection method[J]. *IEEE Computer Society*, 2002(2):957-960.
- [10] 葛永超. 瓷绝缘子状态检测方法的研究[D]. 河北:华北电力大学电子信息与电气工程学院,2013:45-52.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

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.

JIANG Hao-ran, JIN Lin-jun, YAN Shu-jia. Recognition and fault diagnosis of insulator string in aerial images[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(2):274-278.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>