

文章编号: 2095-4980(2013)04-0609-05

航拍图像中玻璃绝缘子自爆缺陷的检测及定位

张少平¹, 杨忠¹, 黄宵宁², 吴怀群¹, 顾元政¹

(1.南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2.南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 在分析输电线路无人机巡检系统航拍图像中绝缘子及其自爆缺陷特征的基础上, 提出一种玻璃绝缘子自爆缺陷的检测及定位方法。该方法首先在色调、色饱和度、亮度(HSI)颜色空间分别对 H(Hue)和 S(Saturation)分量运用最大类间方差法(OTSU)分割图像, 获取绝缘子前景连通域; 之后, 运用直方图方法对检测到的前景轮廓的倾角和面积分布进行统计, 准确识别绝缘子轮廓; 最后, 设计了一种特征检测算法, 检测并标记自爆绝缘子位置。实验证明该方法能从自然背景中准确检测并定位绝缘子自爆缺陷, 具有较好的工程应用价值。

关键词: 航拍图像; 绝缘子识别; 缺陷检测; 最大类间方差(天津)法

中图分类号: TN911.23; TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201304.0609

Defects detection and positioning for glass insulator from aerial images

ZHANG Shao-ping¹, YANG Zhong¹, HUANG Xiao-ning², WU Huai-qun¹, GU Yuan-zheng¹

(1.College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;

2.Department of Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu 211167, China)

Abstract: By analyzing the characteristics of the glass insulator and its defects in aerial images of the unmanned aerial vehicle inspection system, a method is presented to extract glass insulator and detect defects. The OTSU's thresholding method is applied to H and S components in Hue, Saturation, Intensity (HSI) color space for image segmentation; and then, the distribution of the contours' angle and area is calculated by using the histogram method to obtain the position of glass insulators accurately. Feature detection algorithm is proposed to detect the glass insulators and mark out the defects. Experimental results indicate that the method can mark the location of the defects accurately in the aerial images with natural background, which has a good practical value.

Key words: aerial image; insulators extraction; detect defects; maximal variance between clusters (OTUS) method

高压输电线路中的绝缘子是输电线路中非常重要的部件, 如果挂网绝缘子出现故障隐患, 将极大地威胁高压电网的安全, 且有可能造成难以估量的损失。由于暴露于大气中并长期工作在强电场、风雨雪雾、化学物质腐蚀等恶劣环境中, 再加上本身用料、制作工艺水平、人为破坏等因素, 绝缘子难以避免地会出现故障^[1]。玻璃绝缘子在江浙地区 500 kV 高压输电线路大量使用^[2], 其零值自爆是最为常见的故障, 此类故障虽目测即可发现, 但随着高压输电线路规模日益增大, 人工巡线和目测绝缘子故障的任务日益繁重。利用直升机进行输电线路巡检和维护能显著降低劳动强度并提高巡检效率, 该技术在发达国家已相对成熟^[3], 随着我国基于无人机的输电线路巡检技术的发展, 如何从背景复杂的高分辨率航空影像中自动精确地检测绝缘子并识别其故障, 成为一项关键技术问题。国内外对如何运用图像分割提取绝缘子有较多研究, 但涉及缺陷检测的研究较少。文献[4]提出了基于区域定位的方法, 文献[5]提出在 HSI 空间运用最大类间方差法进行图像分割的方法, 但两者都仅仅研究了蓝色绝缘子的提取, 未涉及缺陷检测。在绝缘子故障检测方面, 文献[6]提出基于直方图匹配判据的玻璃绝缘子缺陷诊断排除方法, 能快速排除大量正常玻璃绝缘子图片, 提高故障检测效率, 但该文并未对具体故障点的定位进行研究。文献[7]将绝缘子串修正到水平方向, 分成 10 小块, 分别计算各块的图像纹理特征值, 通过对比特征值的跃变判断绝缘子是否缺陷, 但该方法明显受到拍摄角度的限制, 且计算量较大。基于上述分析, 本文针对相互间

收稿日期: 2012-09-17; 修回日期: 2012-10-12

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20113218110013)

无遮挡情况的玻璃绝缘子航拍图像,首先在 HSI 颜色空间利用 OTSU 方法将绝缘子轮廓分割提取,之后依据绝缘子特征,设计基于绝缘子空间序列特征的检测算法,实现了绝缘子自爆缺陷的检测。

1 绝缘子特征及检测方法流程

典型的绝缘子自爆缺陷如图 1 中标记所示,考虑无人机巡检输电线路的实际情况,玻璃绝缘子在航拍图像中具备以下特征:

- 1) 单片绝缘子常呈现为椭圆形状,具有浅绿色、半透明特征;
- 2) 绝缘子一般成串出现,其数量依据输电线路电压等级而不同;
- 3) 绝缘子物理外形相同,在航拍图像中,尺寸基本一致,绝缘子串中各绝缘子等间距排列;
- 4) 当出现单片绝缘子自爆后,绝缘子串出现明显缺口,缺口长度大致相当于正常绝缘子片间距的 2 倍;

5) 图像清晰,分辨率高,但背景中的地表植被、浅绿色地表水等常对绝缘子检测造成干扰。

基于上述绝缘子特征,本文提出绝缘子识别及缺陷检测的方法,其流程图如图 2 所示。其中,每一部分的内容以及功能描述如下:

- 1) 颜色空间转换:将图像从 RGB 颜色空间转换到 HSI 颜色空间,利用色调和饱和度分量进行图像分割;
- 2) OTSU 分割:在 HSI 空间运用最大类间方法(OTSU)进行图像分割;
- 3) 轮廓检测:依据绝缘子特征,从前景图像中检测绝缘子轮廓;
- 4) 缺陷检测:依据绝缘子缺陷特点,检测并定位自爆绝缘子位置。

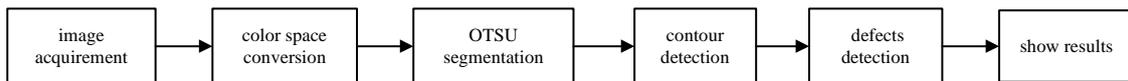


Fig.2 Flow of detection method
图 2 检测方法流程图



Fig.1 Explosive defect of typical insulator
图 1 典型绝缘子自爆缺陷

2 绝缘子识别

绝缘子识别主要包括颜色空间转换、OTSU 图像分割和轮廓检测 3 部分。

2.1 颜色空间转换

玻璃绝缘子一般为浅绿色、半透明状,在航拍图像中,其颜色与地表植被、泛绿的湖水相似,直接运用 RGB 模型中的 G 分量对绝缘子图像进行分割效果不佳^[8],可将图像从 RGB 色彩空间转换到 HSI 色彩空间进行处理;但由于受季节、天气变化以及无人机作业时间的影响,航拍图像受光照强度干扰明显,使绝缘子的统一色度在成像时存在一定的色散现象^[6],亦不可仅使用 H(色调)分量作为分割依据,因此,应同时利用 H 和 S 分量进行图像处理,忽略 I 分量,如此既能充分利用色彩信息,又能降低光照强度对分割效果的影响。将图 1 所示图像转换到 HSI 空间后, H,S,I 分量图像如图 3 所示。

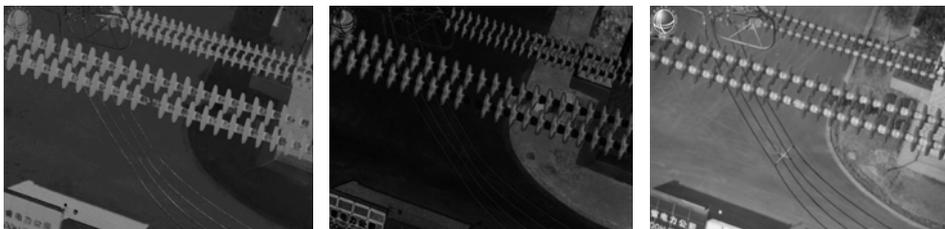


Fig.3 H,S,I component images in HSI space
图 3 HSI 空间 H,S,I 分量图像

2.2 OTSU 图像分割

最大类间方差法(OTSU 方法)^[9-10]是一种自适应阈值分割方法^[11],其按图像的灰度特性,将图像分成背景和

目标 2 部分,计算背景和背景之间的类间方差,方差越大,说明前景和背景的差别越大,即得到最优分割阈值。

运用该方法进行图像分割时,单独用 H 和 S 分量作为分割依据均存在较多的误分割,可分别对 H 和 S 两分

量进行分割, 再对分割结果求交集, 如此既可有效避免单独分割存在的误分割, 又充分利用色彩信息, 分割效果较好^[5]。运用 OTSU 方法对 H,S 分量图像进行分割的自适应阈值分别为 79 和 38, 分割效果及两图像交集如图 4。

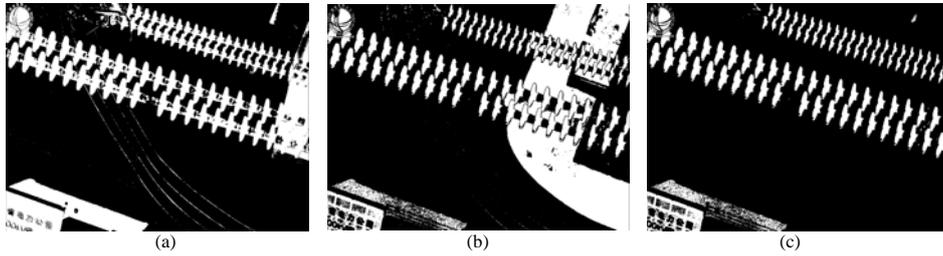


Fig.4 Image segmentation for H component (a); image segmentation for S component (b); and image intersection(c)
图 4 H 分量分割效果(a)、S 分量分割效果(b)和两通道前景图像交集(c)

2.3 轮廓检测

对分割得到的图像, 运用形态学操作方法将图像中的噪点滤除, 直接进行椭圆轮廓检测, 其效果如图 5 所示。对于图像中其他非绝缘子轮廓的椭圆, 必须进行剔除, 以利于实现自爆绝缘子的检测和定位。

如图 5, 前景图像中绝缘子与非绝缘子轮廓数量悬殊, 倾角及面积区别明显。统计前景图像中连通区域的倾角及面积如表 1。采用直方图方法分别统计图像中轮廓倾角和连通区域面积, 可得到图像中绝缘子轮廓的倾角分布区间和连通面积分布区间。若以 20°为步长, 将 0°~360°划分为 18 个区间, 遍历所有轮廓的倾角, 将当前倾角所在角度区域的累加值加 1, 直至遍历所有轮廓, 可得轮廓倾角的分布。遍历所有轮廓面积, 以面积最大值的 1/10 数值为步长, 分 10 个区间统计面积分布, 可得面积分布直方图。依据倾角和连通域面积分布直方图, 可将图 5 中大量非绝缘子轮廓滤除, 从而有效避免了其对前景图像的干扰。经筛选后的绝缘子轮廓如图 6 所示。

表 1 前景连通域倾角及面积数据
Table1 Angle and area of connected area

parameter	value								
angle	0	79.6	135.0	64.1	135.0	72.2	135.0	76.6	79.9
area	361.0	247.0	9.0	233.8	72.0	117.6	16.0	2 397.5	2 153.8
angle	76.0	76.6	72.9	77.7	82.9	74.7	79.1	75.3	77.5
area	2 101.2	2 189.1	2 312.0	2 276.4	2	2 218.2	1 876.8	1 641.5	2 165.2
angle	76.0	76.6	75.5	75.3	74.7	75.3	75.3	74.1	74.7
area	2 123.5	1 904.2	2 079.7	2 169.0	1	2 427.5	1 907.2	1 664.3	2 104.1
angle	74.5	75.1	76.8	73.3	0	76.0	76.8	74.1	74.1
area	1 884.6	2 127.2	1 989.6	2 166.9	49.0	2 013.2	2 140.5	2 017.5	2 130.1
angle	76.0	135.0	74.7	0	74.7	76.0	135.0	75.3	75.3
area	1 884.8	72.0	2 193.5	100.0	2	2 013.2	72.0	2 079.8	2 061.3
angle	75.4	135.0	135.0	76.0	78.1	76.6	74.1	135.0	135.0
area	2 260.0	72.0	72.0	2 376.5	2	2 544.9	2 245.8	100.0	84.5
angle	74.7	63.4	135.0	73.7	135.0	251.0	71.6	135.0	77.5
area	1 946.2	288.8	100.0	1 825.0	72.0	169.0	136.9	72.0	2 467.8
angle	68.2	0	0	135.0	180.0				
area	204.4	100.0	100.0	72.0	72.0				

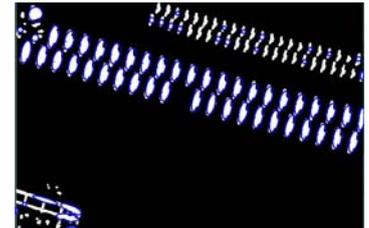


Fig.5 Ellipse detection
图 5 椭圆检测效果



Fig.6 Insulator detection
图 6 绝缘子检测效果

3 缺陷检测及定位

3.1 检测算法思路

在相邻绝缘子没有遮挡的情况下, 绝缘子串中部的单片绝缘子自爆缺陷在航拍图像中非常明显。依据相邻绝缘子对的间距信息, 可准确定位自爆绝缘子的位置, 设计算法思路为:

- 1) 确定绝缘子方向: 绝缘子成串排列, 倾角相似, 大致呈直线排列, 将检测得到的绝缘子轮廓中心点标记, 拟合出 1 条直线^[12], 其斜率代表绝缘子的排列方向;
- 2) 确定相邻绝缘子对: 按照轮廓序列的存储顺序, 每次考察一个绝缘子轮廓, 记为 A, 依次查找在绝缘子排列方向上与该绝缘子距离最近的绝缘子 B, 两轮廓组成一个绝缘子轮廓对, 计算间距, 将间距值和轮廓 B 在存储序列中的位置分别存储在 2 个数组中;
- 3) 确定自爆绝缘子的位置: 对经过筛选得到的绝缘子对轮廓的间距计算平均值, 若某绝缘子对间距约等于该均值的 2 倍, 则认为该轮廓对为自爆绝缘子的左右相邻绝缘子。取该绝缘子对中心点连线的中点为自爆绝缘子轮廓中心点, 倾角均值为自爆绝缘子轮廓倾角, 尺寸均值为自爆绝缘子轮廓尺寸, 则可以将自爆绝缘子位置在图像中标记出来。

3.2 检测算法实现

算法具体步骤如下：

- 1) 轮廓中心点拟合所得直线斜率记为 K ，对应倾角为 θ ，定义二维数组 $A[i][j]$ ；
- 2) 从轮廓序列 H 中取一个轮廓 C_i ，计算倾角差值 $dif_ \theta = |\theta_i - \theta|$ ，若 $dif_ \theta \leq \theta_{th}$ ，则继续，否则重新选取轮廓 C_i ， θ_{th} 经验值取 0.5；
- 3) 在 H 中取轮廓 C_j ，计算 C_i 和 C_j 中心点连线斜率 $K_i = \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j}$ 和差值 $dif_ K_i = |K_i - K|$ ，若 $dif_ K_i \leq K_{th}$ 则继续，否则，重选轮廓 C_j ；
- 4) 计算 $d_i = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ ，若 $A[i][0] = 0$ 或 $d_i < A[i][0]$ ，则在 $A[i][j]$ 中保存间距和 C_j 位置，即 $A[i][0] = d_i, A[i][1] = j$ ；
- 5) 重复步骤(3)至步骤(4)，直至遍历 C_i 的全部后续轮廓，则二维数组保存了与该轮廓距离最近轮廓的间距和位置；
- 6) 重复步骤 2)至步骤 5)，直至遍历所有轮廓，运用直方图方法，统计 $A[i][0]$ 分布，选取绝缘子间距分布区间 R ，计算均值 \bar{d} ；
- 7) 依次考察数组 $A[i][j]$ 中元素，若 $A[i][0]$ 不在区间 R 内，即 $A[i][0] \notin R$ ，且 $|A[i][0] - 2\bar{d}| \leq d_{th}$ ，则判定轮廓 C_i 和 C_j 为自爆绝缘子的前后邻接绝缘子，其中 $j = A[i][1]$ ， d_{th} 经验值取 0.2；
- 8) 依据轮廓 C_i 和 C_j 计算自爆绝缘子尺寸、倾角和中心位置，算法结束。

4 实验结果

对轮廓检测结果运用上述算法进行缺陷检测，算法实现的效果如图 7 所示，图中采用矩形框标记绝缘子自爆位置，图像尺寸为 756×498 ，自爆绝缘子位置信息为：倾角 75° ，中心点坐标为 $(358.3, 206.7)$ ，红色标记框宽 18.6 像素，高 45.9 像素。背景中包含大量绿色植被或角钢塔的航拍图像，绝缘子缺陷检测效果如图 8 所示。

该特征检测算法设计思路清晰，实现简单，其时间复杂度 $T(n) = O(n^2)$ ，其中 n 为图像中检测到的绝缘子轮廓数量。在处理器主频 2.2 GHz，内存为 2G 的 32 位操作系统上，对采集到的 50 幅绝缘子缺陷样本图像进行检测，其中 27 幅图像因拍摄角度限制，绝缘子相互遮挡，前景图像中整个绝缘子串呈现为近似圆角矩形的连通域，另有 10 幅图像，绝缘子相互并无遮挡，但自爆绝缘子位于绝缘子串的一端，不适于本算法的研究范围，均未检测到绝缘子缺陷。对 13 幅绝缘子间无遮挡、自爆绝缘子位于绝缘子串中部的航拍图像进行算法测试，成功检测绝缘子轮廓 12 幅，误检 1 幅，准确定位并标记自爆绝缘子位置 10 幅，误检 2 幅，其原因为 2 片相邻绝缘子的连接部分被误检为前景图像，绝缘子自爆缺陷的检测成功率为 76.9%，误检率 23.1%，算法处理单张图像平均耗时 306 ms。

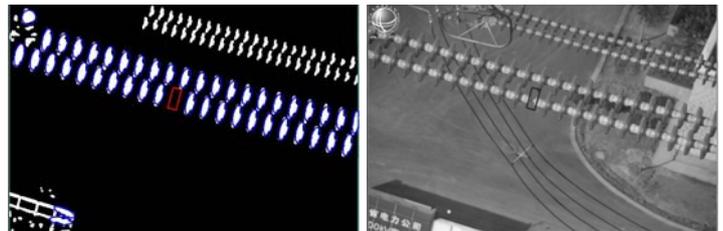


Fig.7 Defects detection
图 7 缺陷检测效果



Fig.8 Defects detection for aerial images with green vegetation or angle-steel tower background
图 8 绿色植被和角钢塔背景中绝缘子缺陷检测

5 结论

实验结果表明，在不同光照条件下，当无人机拍摄角度适当，绝缘子相互间无严重遮挡时，本文算法可以充分利用色彩信息，有效抑制光照干扰，有效避免对环境背景中颜色近似地物、植被的误检，完整准确识别绝缘子，

且能定位自爆绝缘子位置,但提高算法的通用性和降低误检率应为进一步的研究方向。该方法思路简洁,实时性良好,在电力线智能巡检相关领域内,国内外尚无相同或相似的研究成果,在直升机智能巡检系统和典型故障识别方面具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 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. (SUN Jin. Research on Crack Detection of Porcelain Insulators Based on Image Edge Detection[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2008.)
- [2] 吴健. 国产玻璃绝缘子在浙江 500 kV 电网中的运行情况[J]. 电网技术, 2006,30(8):97-98. (WU Jian. The General Situation of Domestic Glass Insulators Used on 500 kV Electrical System in Zhejiang Province[J]. Power System Technology, 2006,30(8):97-98.)
- [3] Whitworth C C,Duller A W G,Jones D I,et al. Aerial video inspection of overhead power lines[J]. Power Engineering Journal, 2001(2):25-32.
- [4] Ma Shuaiying,An Jubai,Chen Fangming,et al. Segmentation of the Blue Insulator Images Based on Region Location[J]. Electric Power Construction, 2010,31(7):14-17.
- [5] Ma Shuaiying,An Jubai,Chen Fangming,et al. Segmentation of Insulator Images Based on HSI Color Space[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2010,12(5):481-484.
- [6] 林聚财,韩军,陈舫明,等. 基于彩色图像的玻璃绝缘子缺陷诊断[J].电网技术, 2011,35(1):127-133. (LIN Jucui,HAN Jun,CHEN Fangming,et al. Defects Detection of Glass Insulator Based on Color Image[J]. Power System Technology, 2011,35(1):127-133.)
- [7] Zhang Xinye,An Jubai,Chen Fangming. A Method of Insulator Fault Detection from Airborne Images[C]// 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems. Wuhan:[s.n.], 2010:200-203.
- [8] Huang Xiaoning,Zhang Zhenliang. A method to extract insulator image from aerial image of helicopter patrol[J]. Power System Technology, 2010,34(1):194-197.
- [9] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979,9(1):62-66.
- [10] 齐丽娜,张博,王战凯. 最大类间方差法在图像处理中的应用[J]. 无线电工程, 2006,30(7):25-26. (QI Lina,ZHANG Bo,WANG Zhankai. Application of the OTSU Method in Image Processing[J]. Radio Engineering, 2006,30(7):25-26.)
- [11] 谭伟,方超,杜建洪. 基于形态学和窗口特征的快速文本提取[J]. 信息与电子工程, 2010,8(5):534-538. (TAN Wei, FANG Chao,DU Jianhong. Fast text extraction and its application based on morphology and window features[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(5):534-538.)
- [12] 王兵学,雍杨,黄自力. 基于直线空间结构特征的图像匹配方法[J]. 信息与电子工程, 2012,10(2):196-200. (WANG Bingxue,YONG Yang,Huang Zili. An image registration algorithm based on space structure features of line[J]. Information and Electronic Engineering, 2012,10(2):196-200.)

作者简介:



张少平(1987-),男,河南省卢氏市人,在读硕士研究生,研究方向为模式识别与智能系统.email:shaoping19@sina.com.

杨忠(1969-),男,南京市人,博士,副教授,研究方向为无人机智能控制与管理,机器视觉与故障诊断.

黄宵宁(1972-),男,南京市人,硕士,副教授,主要研究方向为多计算机视觉及虚拟仿真在电力系统中的应用.

吴怀群(1987-),男,江苏省建湖县人,在读博士研究生,主要研究方向为图像处理及计算机视觉.

顾元政(1985-),男,江苏省南通市人,在读博士研究生,主要研究方向为模式识别.