

基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性带电检测装置研究

董 军,李 博,翟洪达,陈 睿,覃思翔

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司天生桥局,贵州 兴义 562400)

摘 要:受酸雨、盐雾及覆冰灾害的影响,输电线路中复合绝缘子憎水性逐渐降低,需定期对绝缘子憎水性进行检测。在传统的人工检测方法中,由于其作业时间长、劳动强度大且风险系数高等问题使得难以按期对绝缘子进行检测。因此,该文提出一种基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性检测方法及其装置研究。装置包含六旋翼无人机、自动喷水系统、无线遥控系统、视频采集传输系统和憎水性检测系统。地面操作人员通过操控无人机带电作业,控制直流微型电子隔膜泵生成可调节散开型水流,均匀喷洒于目标复合绝缘子,此过程中相机的可视模式功能可辅助喷洒作业。同时,控制相机云台对目标复合绝缘子拍照,将目标绝缘子图像传输到地面并通过憎水性图像分析软件对目标绝缘子的憎水性进行分析。试验结果表明,在整个检测过程中,该方法及装置具有自动化、无人化以及远程化的优点,在绝缘子带电检测中能给予作业人员安全保障,并能准确判别绝缘子的憎水性。

关 键 词:复合绝缘子;憎水性;无人机;边缘识别

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.023 中图分类号:TM755 文章编号:1673-9140(2020)06-0171-09

Research on hydrophobic testing device of composite insulator based on the multi-rotor UAV

DONG Jun, LI Bo, ZHAI Hongda, CHEN Rui, QIN Sixiang

(Tianshengqiao Bureau of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guizhou 562400, China)

Abstract: Due to the influence of the acid rain, salt spray and ice hazard, the hydrophobicity of composite insulators would be reduced gradually. It is necessary to detect the hydrophobicity of insulators regularly. The periodic detections of insulators are difficult due to the problems as the long operation time, high labor intensity and high risk coefficients. Therefore, a hydrophobicity detection method of composite insulators based on the multi-rotor UAV (unmanned aerial vehicle) is proposed and the corresponding device is also developed in this paper. The device is composed by a six-rotor UAV, an automatic water spray system, a wireless remote control system, a video capture transmission system and a hydrophobicity detection system. The live working is carried out by controlling the DC microelectronic diaphragm pump to generate adjustable diffused water to spray on the target composite insulator evenly. During this process, the visual mode function of camera can be employed to assist the spraying operation. Then, pho-

收稿日期:2019-04-10;修回日期:2019-06-18

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(CGYKJXM20160074)

通信作者:董 军(1977-),男,工程师,主要从事超高压输电线路的运维管理研究;E-mail:82919823@qq.com。

tos of the target composite insulator are taken by the camera and then transmitted for hydrophobicity analysis. Finally, a test is included for verification. It is shown that the method and device have the advantages of automation, unmanned and remoteness in the whole detection process. The safety of operators can be guaranteed, and the hydrophobicity of composite insulators can be detected accurately.

Key words: composite insulator; hydrophobicity; unmanned aerial vehicle; edge recognition

随着电力工业的快速发展及电压等级的不断提高,电力系统对绝缘子的要求越来越高。复合绝缘子因具有重量轻、耐污闪电压高、憎水性强等优点,得到越来越广泛的应用。但是近年来酸雨、盐雾及覆冰灾害逐年增加,导致复合绝缘子的电气性能逐渐降低,对电力传输造成重大安全隐患,因此,对复合绝缘子绝缘性能进行带电检测显得至关重要^[1-3]。

目前,对复合绝缘子绝缘缺陷最常见的带电检测是绝缘子外观视觉检查,即用双桶望远镜在地面远距离观察复合绝缘子是否存在明显的表面缺陷,如:护套、伞裙、金具等部位有无开裂、电蚀损、粉化、漏电痕迹等,若发现这些现象就应立即更换绝缘子。但地面观察不够可靠,还需登塔检测,且难以发现内部故障如树状通道等。文献[4]介绍了红外测温法在盘悬式陶瓷绝缘子串故障检测中的应用,但是在对复合绝缘子进行红外热成像测温普查后,结果发现:凡是有明显局部过热的复合绝缘子,其过热点至绝缘子硅橡胶表面均已显著发黑、粉化、变脆,憎水性基本丧失。另一种检测方法是伞裙检查法,这种方法必须将每一串被测试复合绝缘子送到地面才可进行,无法在线检测,由于目前超高压输电线路复合绝缘子数量基数大,因此该方法效率较低^[5-6]。大量现场试验研究证明,复合绝缘子憎水性检测对其绝缘状态的评估具有良好的效果。目前主要采用人工方式检测绝缘子憎水性,但这种检测方式工作强度高、作业风险大。

文献[5-6]分别设计了基于无人机的绝缘子检测装置,但在光照环境发生变化和附水不均匀的情况下,其处理效果不够理想。因此,该文设计一种基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性带电检测装置。与文献[5-6]所研发的装置相比,该装置续航时间更长、悬停精度更高、拍摄图像更优,并且所设计

的憎水性判别软件可精确处理光照环境变化和喷水不均匀时的复合绝缘子图片。

1 检测装置主要功能及组成

基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性在线检测装置主要包括多旋翼无人机、挂载配重固定架、自动喷水装置、无线遥控装置和视频采集传输系统。该装置经搭载无人机飞至杆塔目标复合绝缘子处,自动喷水装置控制直流微型电子隔膜泵,生成可调节散开型水流,对目标复合绝缘子进行均匀喷洒,喷洒过程中由相机对目标复合绝缘子进行定位拍照,最后,通过憎水性图像分析软件对目标绝缘子憎水性进行分析,得出目标绝缘子憎水性检测结果。该检测装置在绝缘子带电检测作业中具有高度自动化、无人化以及远程化的优点。检测装置主要由5个功能模块构成。

1.1 多旋翼无人机

多旋翼无人机主要功能是搭载各检测部件,并将检测装置运送至目标位置。采用高平稳性的六旋翼无人机,其具有GPS定位、精确悬停等功能,并具有多项安全保护功能^[7-8],经第三方研究机构检测,具有合格的电磁兼容适应性和气候环境适应性,满足承载绝缘子憎水性检测装置及相关设备重量的要求。无人机如图1所示,其主要参数如表1所示。

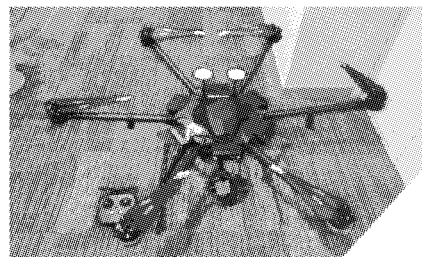


图1 装置搭载无人机

Figure 1 Device equipped with UAV

表 1 多旋翼无人机参数

名称	技术指标
最小载荷	≥ 6 kg
续航时间	32 min(无负载);18 min(负载 6 kg)
最大飞行速度	65 km/h(无风环境)
相对飞行高度	500 m
工作海拔	2 500 m(2170R 桨);4 500 m(2195 桨)
作业半径	5 km(FCC 模式);3.5 km(CE 模式)
抗风能力	最大可承受风速:10 m/s
支持云台	Ronin-MX,Zenmuse Z30,Zenmuse X3, Zenmuse X5/X5R

1.2 云台相机

云台相机最初选型时采用 ZENMUSE Z3 相机,但在研发过程中发现,ZENMUSE Z3 相机在高分辨时所拍摄的复合绝缘子表面水珠图像放大后效果较模糊,此类照片在运用后续憎水性判别软件处理时,判别准确率较低^[9]。而 ILCE-7R 相机在分辨率、对焦能力、cmos 传感器面积上均大幅优于 Z3,仅在 FOV 一项上略逊一筹;而且 Z3 相机为消费级相机,只有自动对焦功能,没有手动对焦功能,ILCE-7R 相机则可以手动设置对焦距离,配合项目中的激光测距设备,能保证对焦距离与物体距离一致。结合实际拍摄的图片效果,该文采用 ILCE-7R 相机作为复合绝缘子憎水性检测的图像采集设备,该相机的性能指标如表 2 所示。2 种相机在距离绝缘子 4 m 处拍摄效果的比较如图 2 所示。

表 2 ILCE-7R 相机性能

性能指标	详细数据
有效像素	3 640 万
最高分辨率	7 360×4 912
传感器	全画幅(35.9 mm×24 mm)
镜头型号	Sonnar T * FE 35mm F2.8 ZA
电池类型	锂电池
续航能力	约 270 张(取景器),约 340 张(LCD)
连拍功能	支持(最高约 4 张/s) 连拍模式下:最快约 1.5 张/s
快门速度	30~1/8 000 s,B 门,闪光同步速度:1/160 s



(a) Z3 拍摄效果

(b) ILCE-7R 拍摄效果

图 2 2 种相机拍摄效果的比较

Figure 2 Shooting effect comparison of two cameras

1.3 自动喷水装置

憎水性检测装置中的自动喷水装置为自主研发,具备遥控喷水、喷水频率设置和喷水装置工作状态检测等功能,喷水装置中的喷头拥有直头和弯头 2 种类型,可根据实际情况进行选择^[10-11]。自动喷水装置结构如图 3 所示,该喷水装置包含喷水设备、温湿度感应设备、测距设备、电池、天线和 3 个固定夹和连接板。

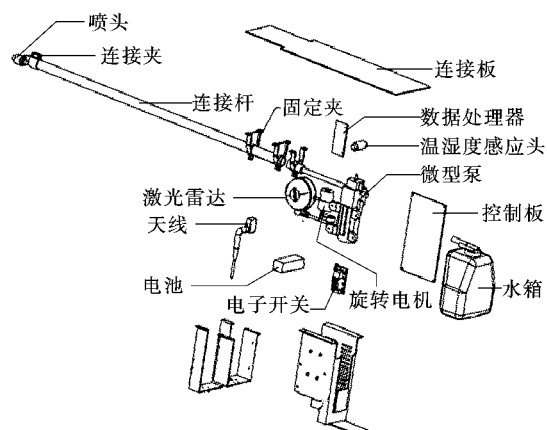


图 3 自动喷水装置主要结构

Figure 3 Main structure of automatic sprinkler

喷水设备由喷头、连接夹、连接杆、微型泵、水箱、电子开关和固定支架构成。微型泵和电子开关分别通过螺钉固定安装在固定支架内部并由固定支架包裹,水箱固定安装在固定支架的一侧并且与微型泵的吸水口连通,微型泵的出水口连通连接杆的一端,连接杆的另一端通过连接夹连接到喷头,连接杆中部设置有水流通通道,使水箱、微型泵、连接杆、连接夹和喷头依次连通形成一条完整的水流通通道,水箱中的水被微型泵抽出后经连接杆和连接夹后由喷头将水均匀喷洒在复合绝缘子上,在微型泵电性连接到电子开关后,电子开关再由电性连接到电池。

温湿度感应设备包括安装在固定支架上的温湿度感应头、数据处理器和控制板。温湿度感应头、数

据处理器和控制板相互电性连接,温湿度感应头实时检测环境数据,并将数据传输到数据处理器,数据处理器根据数据判断作业环境是否符合检测条件,然后将处理完的数据及判断结果反馈到控制板,再由控制板经天线将数据传输到地面控制系统。

测距设备包括激光雷达和旋转电机,旋转电机固定安装在固定支架上且其动力输出端传动连接到激光雷达,带动激光雷达转动,同时激光雷达和旋转电机分别电性连接到数据处理器,由数据处理器控制,激光雷达检测的数据经过数据处理器后由天线传输到地面控制系统。

电池和天线固定安装在固定支架上,电池连接到整个喷水装置各电子元件并提供电能;天线通信连接到数据处理器和控制板,并同时通信连接到地面控制系统;固定夹套接在连接杆上,并通过螺钉固定连接到连接板,连接板再通过螺钉固定连接到固定支架。自动喷水装置现场试验如图 4 所示。同时,喷水装置中的测距雷达在超过设置的安全距离时具备报警功能,采用最高测量频率以保证远距离测距精度^[12-14],经过优化算法设计,测量的距离半径为 8 m,保障了无人机与被检测绝缘子之间的安全距离。测距雷达现场模拟试验如图 5 所示,试验现场能够安全有效地进行绝缘子喷水作业,其喷水性能指标如表 3 所示。



图 4 自动喷水装置试验研究

Figure 4 Experimental study on automatic sprinkler



图 5 测距雷达模拟试验

Figure 5 Ranging radar simulation test

表 3 自动喷水装置性能指标

Table 3 Automatic sprinkler performance index	
性能指标	详细数据
额定功率	≤ 40 W
待机功耗	≤ 1.2 W
工作压力	0.4~0.6 MPa
喷水距离	≥ 4 m
满水箱(1 L)喷水持续时间	> 30 s
喷水装置满水质量	≤ 3.5 kg(含 1 L 水)

1.4 无线遥控装置

无线遥控装置由核心控制板、HMI 液晶显示屏、充电电池、薄膜按键和 433 无线传输模块^[15]组成。通信效率高、体积小,使用方便。无线传输模块如图 6 所示。

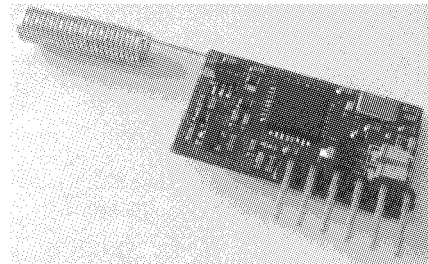


图 6 433 无线传输模块

Figure 6 433 wireless transmission module

1.5 视频采集传输装置

视频采集传输装置由无人机云台和图传系统组成。喷水装置将水雾喷射到输电线路上的复合绝缘子上,无人机云台拍摄复合绝缘子表面水珠覆着照片,通过憎水性检测软件处理得出检测报告。采用无人机搭载自动喷水装置,通过地面操控人员实现远程自动喷水和图像采集,利用先进的算法图像处理技术对复合绝缘子憎水性进行判定检测。

2 憎水性图像处理软件开发

目前,国内外学者对复合绝缘子憎水性识别算法的研究大多只对表面干净且背景均匀的绝缘子图样有效,而现实中绝缘子多在室外拍摄,其表面都会有不同程度的积污,或者存在光照不均匀的情况,而且水珠或水迹有很强的透明性,这些因素都会对图像检测的结果产生影响^[16]。因此,保证算法在不同

环境拍摄的图片下具有较好的稳定性是算法研究的主要核心。

2.1 喷水图像预处理

因为绝缘子的表面存在污垢,在绝缘子喷水之后形成水珠和水迹的过程中,污垢会将绝缘子的图像模糊化,所以有必要对复合绝缘子的喷水图像进行预处理^[16]。该文采用小波滤波的方式对绝缘子图像进行去噪处理,将图像分解为高频和低频,在高低频系数上进行相应的处理,最后经小波重构形成新的图像。进行预处理后将图像转换到 HSV 空间,提前图像对比度分布。

2.2 图像处理算法选择及优化

文献[5-6]中检测装置的图像处理软件采用的是二值化算法,即首先基于形态学的图像阈值分割把图像处理成二值化图像,阈值分割采用的是自定义的全局阈值分割^[17]。复合绝缘子均匀附水示意如图 7 所示,二值化处理后的水珠分布如图 8 所示,可以看出,在光照均匀且绝缘子表面附水均匀情况下,能准确识别附着的水珠,具有一定效果。绝缘子表面不均匀附水拍摄效果如图 9 所示,对光照不均匀的图片二值化处理后效果如图 10 所示。

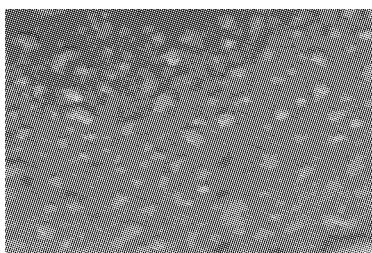


图 7 绝缘子表面均匀覆水时拍摄效果

Figure 7 Shooting effect of even water-covered insulator surface

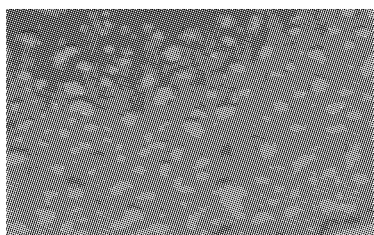


图 8 二值化处理后的水珠分布

Figure 8 Water droplet distribution after binarization

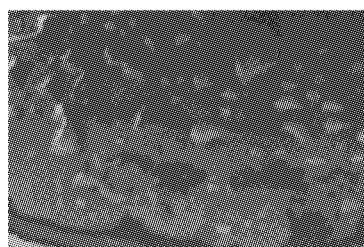


图 9 绝缘子表面不均匀覆水时拍摄效果

Figure 9 Shooting effect of uneven water-covered insulator surface

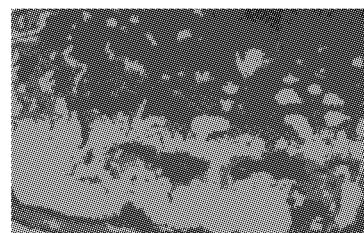


图 10 不均匀覆水时二值化处理结果

Figure 10 Binarization results of uneven water-covered surface

由图 10 可知,对于复合绝缘子表面附水不均匀的情况,二值化图像结果并不理想。该装置采用改进的 Canny 算法对图像进行边缘检测^[18],处理后不仅可以提高边缘检测的定位精度,而且也不会使边缘模糊。

Canny 的核心是把边缘检测问题转变为图像梯度局部极大值问题。判定边缘检测的 3 个准则为信噪比、定位精度和单边缘相应准则。基于这 3 个准则,采用泛函求导得到一个包含边缘定位精度和信噪比乘积的表达式^[19-20],其近似于 Gaussian 函数的一阶导数,故可采用 Gaussian 函数进行求导的方式作最佳逼近。

改进的 Canny 算法检测图像边缘步骤如下:

1)用高斯滤波器对图像进行平滑处理。对图像滤波窗口采用 5×5 邻域,并且计算出此区域的像素均值,分别用位于滤波窗口的所有像素值和均值进行比较,若其差值的绝对值都小于恰可分辨的色差阈值(一般取值为 6),则采用定义域核 $d(x, y)$ 对图像进行平滑,表示为

$$d(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} e^{-\left(\frac{x_i^2 + y_i^2}{2\sigma_1^2}\right)} \quad (1)$$

其中,标准差 σ_1 取 2.4; x_i, y_i 表示相对于滤波窗口中心的分距离。若滤波窗口区域内像素值与均值之

差的绝对值不小于可分辨的色差阈值,则将滤波窗口缩小到 3×3 ,重新计算新的滤波窗口内像素的均值;若新的滤波窗口区域内的像素值与该区域的均值之差的绝对值都小于可分辨的色差阈值,则采用 $\sigma_1 = 1.2$ 的定义域核滤波。否则,用像素相关核 $c(x, y)$ 与定义域核 $d(x, y)$ 计算出权值 $w(x, y)$,进行滤波。

$$c(x, y) = \frac{(f(x_0, y_0) - u)(f(x_i, y_i) - u)}{(f(x_0, y_0) - u)^2} \quad (2)$$

$$u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) \quad (3)$$

$$w(x, y) = c(x, y)d(x, y) \quad (4)$$

其中, $f(x_i, y_i)$ 为图像滤波窗口内像素, $f(x_0, y_0)$ 为图像滤波窗口中心像素。

通过计算 5×5 滤波窗口内像素的均值与中心像素的比较来确定图像的平滑区域和边缘区域,再由不同区域自适应选择合适的滤波,这样可以减少滤波给图像边缘带来的模糊。

2) 梯度的求解。在传统的 Canny 算法中,通过在 2×2 邻域内求有限差分来计算梯度,这种方法对噪声比较敏感,为了减少噪声和增强邻域内中间像素对梯度求值的影响,该文采用增强中间像素权值的 3×2 或 2×3 邻域内求有限差分来计算梯度,模板如图 11 所示。

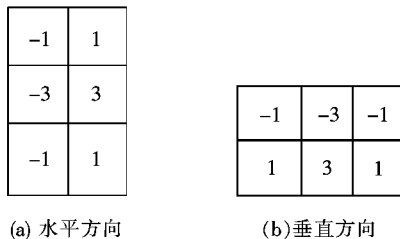


图 11 改进的模板

Figure 11 Improved template

3) 对梯度幅值进行非极大值抑制,只保留局部极大值。

4) 用高低双阈值检测和连接边缘。

重度不均匀覆水时拍摄效果如图 12 所示,经过边缘处理后的结果如图 13 所示。由图 12、13 可知,边缘识别相对二值化效果较好,但在复杂条件下,边缘识别仍旧无法完全识别水珠的全部边缘。因此,无法直接采用边缘识别的结果进行憎水性等级判定。

由于极小部分边缘在复杂条件下无法被准确识别,因此没有形成封闭的几何图形,需要对图片进行区域合并,进行区域合并后的最终判别如图 14 所示。

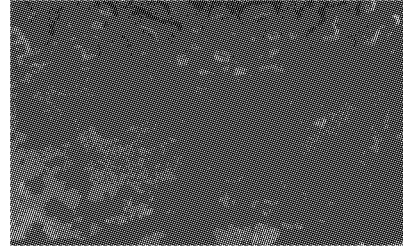


图 12 重度不均匀覆水时拍摄效果

Figure 12 Shooting effect of severely uneven water-covered condition

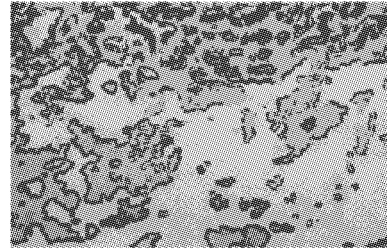


图 13 边缘识别结果

Figure 13 Edge recognition result

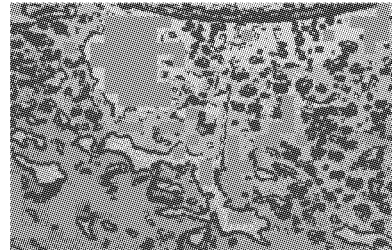


图 14 最终判别图片

Figure 14 Final discriminating picture

2.3 绝缘子憎水性等级判定

在获得区域合并后的图像后,通过计算连通区域的面积和周长,得出绝缘子图像最大水珠或水迹的面积和周长;通过水性指示函数改进的形状因子法算出绝缘子图像的特征量,进而对绝缘子憎水性的等级进行判定^[21]。计算式为

$$f_c = \frac{4\pi s}{l^2} \quad (5)$$

$$K = \frac{\text{最大水珠(水带)的面积}}{\text{图像总面积}} \times 100\% \quad (6)$$

其中, s 为水珠面积, l 为水珠周长,最大水珠(水带)的面积和图像总面积的单位均为像素。经过不同憎

水性等级的复合绝缘子喷水图像的特征值 K 和 f_c 的计算,得出复合绝缘子憎水性的分级,如表 4 所示。

结合二值化图像方法及改进的 Canny 边缘检测算法原理,项目中开发了 PC 端操作软件,软件具备批量导入照片功能,多张图片检测报告自动生成,报告中包含等级判断及处理意见,每次检测的数据可最终形成一份完整的 Excel 报表。在采集到喷水图像后,可利用该软件按照如图 15 所示的流程完成憎水性等级判定。

表 4 复合绝缘子憎水性分级

Table 4 Composite insulator hydrophobic scale

憎水性等级	K 与 f_c 参数特征
HC1	$K_1 \in [0,1\%]; f_c \in [0,1]$
HC2	$K_1 \in [1\%,4\%]; f_c \in [0,1]$
HC3	$K_1 \in [4\%,10\%]; f_c \in [0,1]$ 或 $K_2 \in [10\%,20\%]; f_c \in [0.5,1]$
HC4	$K_1 \in [10\%,20\%]; f_c \in [0,0.5]$ 或 $K_2 \in [20\%,40\%]; f_c \in [0,1]$
HC5	$K_1 \in [40\%,80\%]; f_c \in [0,1]$
HC6	$K_1 \in [80\%,95\%]; f_c \in [0,1]$
HC7	$K_1 \in [95\%,100\%]; f_c \in [0,1]$

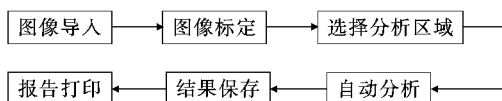


图 15 复合绝缘子憎水性图像自动识别软件流程

Figure 15 Software process of hydrophobicity image automatic identification for composite insulator

3 现场测试

根据现场环境光线,在地面端首先调好相机云台的曝光时间、对焦距离等参数,再开启激光雷达测距模块,连接地面测距软件,确认温湿度数据和激光雷达测距功能正常;调节喷水装置喷头的喷洒角度、雾化程度,远程遥控喷水装置试喷,确认功能正常。

飞行人员对现场环境进行判断,确认飞行方向与路线,开始安全飞行执行任务,在检测无人机靠近目标绝缘子的过程中,激光雷达测距能够精准测量无人机的安全距离(3 m),地面端测距软件会响应

报警声音,提示飞行器的有效安全距离,从而避免了无人机带电检测时带电线路对其装置的影响。

在相机云台实时传输的可视模式下,确认喷射方向进行喷水流程。无人机携带喷水装置喷水过程如图 16 所示。相机云台对复合绝缘子进行拍摄,并传输到地面。拍摄分析软件界面如图 17 所示。最后,利用憎水性图像分析软件得出最终判别图片,如图 18 所示。

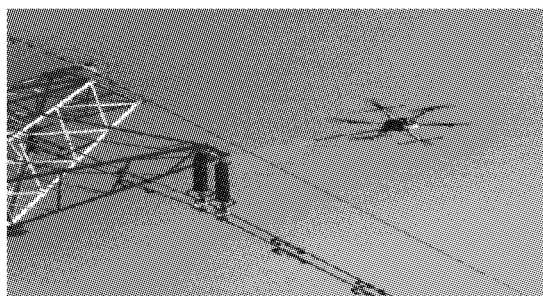


图 16 无人机携带喷水过程

Figure 16 Spray process of UAV

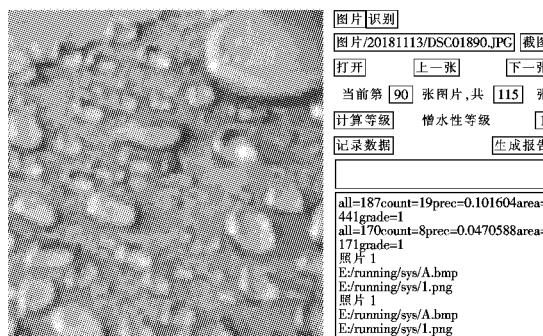


图 17 拍摄分析软件界面

Figure 17 Interface of shooting analysis software

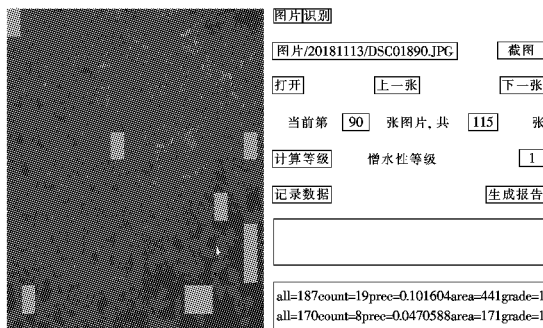


图 18 憎水性图像分析软件界面

Figure 18 Interface of hydrophobic image analysis software

现场试验表明,该装置只需两名工作人员进行操作。在检测过程中,该装置可以安全、有效地完成复合绝缘子憎水性检测工作。

4 结语

该文提出一种基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性检测方法及装置,通过地面操控,实现对目标复合绝缘子进行远程自动喷水和图像采集的检测作业,利用先进的憎水性检测图像处理技术对复合绝缘子憎水性进行判定检测,从而得出精确结果。与传统的人工方式手段相比,在利用基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性检测方法及装置进行检测时,所需检测人员、作业工具均减少,且作业时间缩短。该装置不受地理位置、杆塔高度的限制,作业人员只需在地面端控制无人机进行检测作业,避免了作业人员进入强电场进行带电检测作业所带来的风险,能够使运维人员安全并及时了解运行中绝缘子的憎水性情况,为电网的安全稳定运行提供了保障。

参考文献:

- [1] 彭向阳,黄振,张中浩,等.高湿热地区高温发热复合绝缘子分析[J].智慧电力,2019,47(8):83-90.
PENG Xiangyang, HUANG Zhen, ZHANG Zhonghao, et al. Analysis of high temperature heating composite insulators in hot and humid areas[J]. Smart Power, 2019,47(8):83-90.
- [2] 淡淑恒,吴娜,李昊东,等.基于有限元和神经网络方法对220 kV盆式绝缘子均压环结构优化设计[J].高压电器,2018,54(3):79-85.
DAN Shuheng, WU Na, LI Haodong, et al. Optimization design of grading ring for 220 kV basin-type insulator based on finite element method and neural network method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3):79-85.
- [3] 王娜,戴通令,刘吉成,等.影响GIL柱式环氧树脂复合绝缘子绝缘性能的因素[J].高压电器,2018,54(5):101-105+113.
WANG Na, DAI Tongling, LIU Jicheng, et al. Factors affecting insulation performance of GIL column epoxy resin composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(5):101-105+113.
- [4] 陈勇,郭俊峰,郭小均.基于红外测温的零值和污秽绝缘子快速检测试验研究[J].高压电器,2015,51(6):191-194+199.
CHEN Yong, GUO Junfeng, WU Xiaojun. Fast detection of zero insulator and polluted insulator based on infrared temperature measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(6):191-194+199.
- [5] 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):116-124.
ZHENG Wulue, ZHANG Fuchun, WENG Zhufeng, et al. Detection on hydrophobicity of insulator based on rotor unmanned aerial vehicle[J]. Guangdong Electric Power, 2016,29(8):116-124.
- [6] 凌健,杨洁,史俊祯.基于多旋翼无人机的500 kV架空输电线路巡视技术[J].湖北电力,2019,43(6):1-6.
LING Jian, YANG Jie, SHI Junyi. 500 kV overhead transmission line patrol technology based on multi-rotor UAV[J]. Hubei Electric Power, 2019,43(6):1-6.
- [7] 刘勇,陈海滨,刘方.基建现场巡检无人机智能感知系统的研究与应用[J].电力系统保护与控制,2018,46(15):155-161.
LIU Yong, CHEN Haibin, LIU Fang. Research and application of intelligent perception system for unmanned aerial vehicle inspection at construction site[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):155-161.
- [8] 曾懿辉,何通,郭圣,等.基于差分定位的输电线路多旋翼无人机智能巡检[J].中国电力,2019,52(7):24-30.
ZENG Yihui, HE Tong, GUO Sheng, et al. Research on multi-rotor UAV intelligent power line inspection based on differential positioning[J]. Electric Power, 2019, 52(7):24-30.
- [9] 李杰,周志成,高嵩,等.憎水性材料表面液滴面积分析方法[J].高电压技术,2017,43(5):1518-1526.
LI Jie, ZHOU Zhicheng, GAO Song, et al. Droplet area measurement method for hydrophobic state description[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5):1518-1526.
- [10] 彭向阳,陈驰,饶章权,等.基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断[J].高电压技术,2015,41(1):159-166.
PENG Xiangyang, CHEN Chi, RAO Zhangquan, et al. Safety inspection and intelligent diagnosis of transmission line based on unmanned helicopter of multi sensor data acquisition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 159-166.
- [11] 彭向阳,陈驰,徐晓刚,等.基于无人机激光扫描的输电通道安全距离诊断技术[J].电网技术,2014,38

- (11):3254-3259.
- PENG Xiangyang, CHEN Chi, XU Xiaogang, et al. Transmission corridor safety distance diagnosis based on point cloud and unmanned aerial vehicle loaded airborne laser scanning[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3254-3259.
- [12] 汤明文,戴礼豪,林朝辉,等. 无人机在电力线路巡视中的应用[J]. 中国电力,2013,46(3):35-38.
- TANG Mingwen, DAI Lihao, LIN Chaohui, et al. Application of unmanned aerial vehicle in inspecting transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 35-38.
- [13] 刘启兴,景海涛,董国涛. 无人机高分辨率遥感影像分类方法研究[J]. 计算机与数字工程,2019(3):638-642+727.
- LIU Qixing, JING Haitao, DONG Guotao. Research on high resolution remote sensing image classification method for UAV[J]. Computer and Digital Engineering, 2019(3):638-642+727.
- [14] 冯敏,罗旺,余磊,等. 适用于无人机巡检图像的输电线路螺栓检测方法[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(4):135-140.
- FENG Min, LUO Wang, YU Lei, et al. A bolt detection method for pictures captured from an unmanned aerial vehicle in power transmission line inspection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 135-140.
- [15] 刘强兵. 基于图像处理的复合绝缘子憎水性检测[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
- [16] 张倩,王建平,李帷韬. 基于反馈机制的卷积神经网络绝缘子状态检测方法[J]. 电工技术学报,2019,34(16):3311-3321.
- ZHANG Qian, WANG Jianping, LI Weitao. Insulator state detection of convolutional neural networks based on feedback mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3311-3321.
- [17] 夏云峰,宋新明,何建宗,等. 复合绝缘子用硅橡胶老化状态评估方法[J]. 电工技术学报,2019,34(Z1):440-448.
- XIA Yunfeng, SONG Xinming, HE Jianzong, et al. Evaluation method of aging for silicone rubber of composite insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 440-448.
- [18] 黄焯麒,叶蓓,潘景志,等. 基于二次插值粒子群算法的配电网多目标双阶段故障恢复策略[J]. 电网与清洁能源,2019,35(9):69-75.
- HUANG Chaoqi, YE Bei, PAN Jingzhi, et al. Multi-objective two-stage fault recovery strategy for distribution networks based on quadratic interpolation particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 69-75.
- [19] 司马文霞,冉锐,袁涛,等. 用数学形态学的弧光接地过电压识别方法[J]. 高电压技术,2010,36(4):835-841.
- SIMA Wenxia, RAN Rui, YUAN Tao, et al. Identification grounding over-voltage using mathematical morphology transform[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 835-841.
- [20] 姚境. 基于数学图像处理技术的复合绝缘子憎水性检测算法研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- [21] 唐波,覃乔,黄力. 基于色彩模型和纹理特征的输电线路绝缘子串航拍图像识别[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(4):13-19.
- TANG Bo, QIN Qiao, HUANG Li. Transmission line aerial image recognition of insulator strings based on color model and texture features[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 13-19.