

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306402

棒形复合绝缘子爬电距离图像测量方法研究*

张虎 聂霖 武文华 王昱晴 杨磊 徐偲达

(中国电力科学研究院有限公司武汉分院 武汉 430074)

摘要:棒形复合绝缘子的爬电距离是其质量管控中的重要关注点。针对现有测量方法依赖人工,效率较低且误差大,提出了一种基于机器视觉的复合棒形绝缘子爬电距离测量方法。首先,设计了棒形复合绝缘子图像采集平台,获得了其轴向连续图像。采用 SIFT 算法对获取到的连续图像进行拼接,通过 Canny 边缘检测算法构建识别模型,实现了棒形悬式复合绝缘子的爬电距离的自动测量。试验表明,图像测量方法的重复测量标准差约为传统方法的 5%~12%,且其测量效率较传统方法提高 6 倍以上,实现了棒形复合绝缘子爬电距离准确高效的测量。

关键词:绝缘子;爬电距离;机器视觉;图像拼接;自动测量

中图分类号: TP317.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Study on image measurement method of creepage distance of rod composite insulator

Zhang Hu Nie Lin Wu Wenhua Wang Yuqing Yang Lei Xu Sida

(China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Creepage distance of rod composite insulator is an important concern in its quality control. A new method based on machine vision for measuring creepage distance of composite rod insulator is proposed in this paper. Firstly, the image acquisition platform of rod composite insulator is designed, and its axial continuous images are obtained. The SIFT algorithm is used to splice the obtained continuous images, and the Canny edge detection algorithm is used to build the recognition model to realize the automatic measurement of the creepage distance of the rod suspension composite insulator. The test shows that the standard deviation of repeated measurement of image measurement method is about 5%~12% of that of traditional method, and its measurement efficiency is more than 6 times higher than that of traditional method. The accurate and efficient measurement of creepage distance of rod composite insulator is realized.

Keywords: insulator; creepage distance; machine vision; image mosaic; automatic measurement

0 引言

棒形复合绝缘子硅橡胶伞裙护套具有极佳的憎水性和憎水迁移性,相同的爬电距离下,比瓷、玻璃绝缘子具有更优异的防污闪性能,在各电压等级的输电线路中广泛应用^[1]。据统计,2016年8月66kV及以上交直流线路复合绝缘子用量占比45%,2021年复合绝缘子用量已超过 $1\ 000\times 10^4$ 支^[2]。爬电距离作为影响棒形复合绝缘子外绝缘性能的关键参数,已成为棒形复合绝缘子质量管控的中重要关注点。相关标准^[3-4]明确给出了棒形复

合绝缘子爬电距离的公差范围,并指出爬电距离应在整支绝缘子上测量,不应使用短段测量结果外推。此外,受原材料上涨及其他因素影响,少数企业在生产过程中偷工减料,造成绝缘子爬电距离实际偏小等问题。现有爬电距离测量方法主要包括皮卷尺测量法、纸胶带测量法和滚轮测距法^[5],这些方法分别采用皮卷尺、纸胶带和滚轮沿棒形复合绝缘子表面测量路径手动测量,不仅操作速度慢、效率较低,而且准确性依赖于测量人员的专业程度,费时费力。因此,为快速准确、便捷测量棒形复合绝缘子的爬电距离,需要一种新的方法。

近年来,随着图像识别技术的发展,机器视觉测量在

收稿日期: 2023-04-03 Received Date: 2023-04-03

* 基金项目: 中国电力科学研究院有限公司研究开发项目(SZ83-22-001)资助

电力行业、农业和机械工程行业领域已普遍应用,如文献[6-7]中的研究人员,采用图像识别的方法,实现了对电缆护套厚度高精度的测量和导体质量的高效检测。中国农业大学的研究人员利用机器视觉和图像处理技术实现了玉米果穗的穗长、穗粗、穗行数、行粒数和穗粒数等性状参数的测量,测量精度达到了95%以上^[8]。文献[9-10]中的研究人员,运用数字图像处理技术分别实现了光纤截面几何参数和直线轴承长度的测量,并通过试验验证了该方法的有效性和准确性。此外,机器视觉的测量方法还在轮胎花纹深度、墙面裂缝测量和压力容器无损检测及电力系统的输电线路舞动检测、风机叶片检测领域^[11-17]也实现了精度高和速度快的效果,这些都为机器视觉技术在复合绝缘子爬电距离的测量提供了参考。

文献[18]中的研究人员平面拍摄和几何近似法,实现了插座爬电距离和电气间隙的自动测量。文献[19]中采用一种基于结构光多重曝光的绝缘子自动化三维测量方法,实现盘形悬式瓷绝缘子的精确三维重建,从而获得其爬电距离等尺寸参数。对于尺寸较小的插座和盘形悬式绝缘子,二者均提高了其爬电距离测量的精度和效率,但对于具有尺寸较长、长宽比大特点的棒形悬式复合绝缘子,上述两种方法均较难实现。

基于此,本文提出了一种基于机器视觉技术的棒形复合绝缘子爬电距离测量的新方法,该方法结合棒形复合绝缘子形状特点,通过装设在滑轨上的高清摄像头,沿绝缘子轴向获得若干连续图像,采用 SIFT 算法对获取到的图像进行拼接,通过 Canny 边缘检测算法构建识别模型^[20],实现了棒形悬式复合绝缘子的爬电距离的自动测量,通过实例与传统的测量方法进行了对比分析,验证了该方法的有效性和准确性。研究结果可为棒形复合绝缘子生产厂家、检测单位和质量监管部门,对棒形复合绝缘子爬电距离高精度自动测量提供一种新的选择。

1 棒形复合绝缘子的结构和图像特征

1.1 棒形复合绝缘子的结构特点

棒形复合绝缘子一般由两端的金属附件、芯棒和硅橡胶伞裙组成,如图 1 所示。绝缘子的爬电距离是指两个金属附件之间沿硅橡胶伞裙表面的最短距离,如图 1 中虚线所示。它是影响绝缘子外绝缘特性的重要参数。随输电线路电压等级的升高,要求绝缘子的爬电距离也不断增大。例如,66 kV 棒形复合绝缘子的爬电距离接近 2 m,特高压棒形复合绝缘子的爬电距离更是超过 32 m。

1.2 棒形复合绝缘子的图像特征

棒形复合绝缘子整体长宽比较大,正视图像一次采

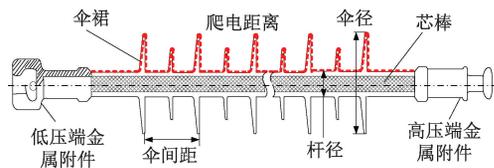


图 1 棒形复合绝缘子结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of rod composite insulator

集时无法兼顾样品细节清晰度和整体完整性。为了保证一次所采集图像包含完整样品,相机与样品之间的距离需足够大。但是相机分辨率固定,过大的物距必然导致绝缘子样品的细节模糊,伞裙边缘等特征不够清晰,爬电距离的测量将受到较大影响,棒形复合绝缘子的整体和局部照片如图 2 所示,正视视角下一次采集的图像如图 3 所示。

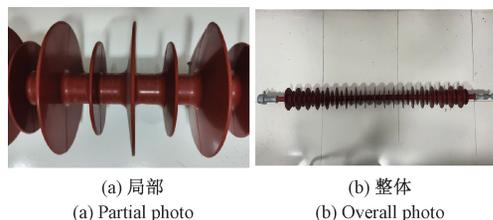


图 2 棒形复合绝缘子的局部和整体照片

Fig. 2 Partial and overall photos of rod composite insulator

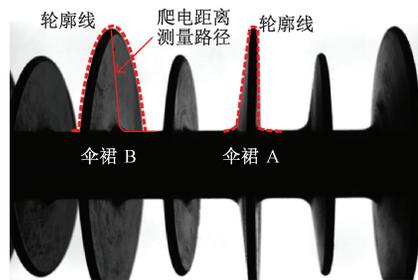


图 3 正视视角下一次采集的图像

Fig. 3 Images collected from an orthographic perspective

此外,成像过程中,三维空间信息转化为二维的平面信息,也会压缩了光轴方向的深度信息,进而会造成“远大近小”的透视投影误差^[21-22]。以图 3 中伞裙 A 与伞裙 B 为例,伞裙 A 图像位于相机正对中部位置,为绝缘子正视图,其轮廓形状接近伞裙竖向截面真实形状,伞裙 A 的爬电距离测量路径与所得到图像轮廓能够保持基本一致;伞裙 B 图像轮廓形状已发生变化,相比伞裙竖向截面形状具有较大差异。如果对采集的图像通过常规图像测量算法计算,则所测量的路径为图 3 中伞裙 B 虚线所示,而实际爬电距离测量路径为图 3 中伞裙 B 实线所示,二者之间发生较大偏差。

此现象所引起偏差程度由图像中部向两侧逐步增加,也会影响爬电距离测量的准确性。因此,为了能够准确地得到爬电距离测量路径,需要采取措施保证样品的每个伞裙部分在所采集的计算图像中均为正视状态。

2 棒形复合绝缘子爬电距离测量的实现

2.1 测量装置的构成及测量流程

本采集系统主要包含绝缘子安装支架、高清摄像头、滑轨、步进电机、LED 平面背光源及其他载物支撑部件等,如图 4 所示。待测悬式复合绝缘子固定在绝缘子安装支架上并施加一定拉伸负荷使其保持水平,工业相机安装在平行于绝缘子轴线的滑轨上,LED 平面背光源置于棒形复合绝缘子的后方。高清摄像头为 StingrayF-504 工业相机,分辨率为 2 542×2 056。相机采集到图片后,通过用采集卡接口传输到计算机内存中。

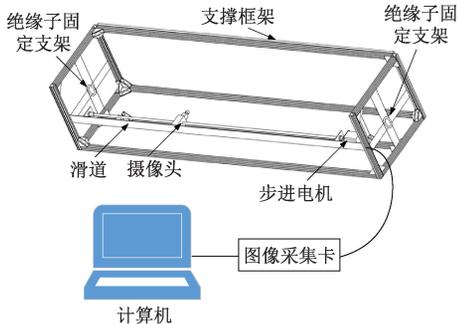


图 4 采集装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of acquisition device

本文设计了一种棒形复合绝缘子伞裙尺寸测量的方法,方法总体流程如图 5 所示。利用高清摄像头对于待测棒形复合绝缘子样品进行图像连续采集,然后对于所采集的图像序列切割后进行滤波处理,通过特征点检测与匹配,在图像变换与融合后进行拼接,得到完整样品的正视图像,最后采用针对整体正视图像进行二值化处理,利用边缘检测和轮廓提取算法进行完成棒形复合绝缘子尺寸参数的测量。

2.2 绝缘子正视图像的获得和尺寸标定

采用标定板来调整摄像头视角高度,以确保摄像头对于样品中轴线呈正视状态,同时计算图像尺寸和实际尺寸之间的转化比例,其中标定板为正方形结构,边长为 50 cm,正方形的四顶点和中心处均有一个边长为 8 cm 的正方形,整体标定板中图形在横、纵轴方向上均为轴对称图形。

采用标定板进行摄像头调整和标定过程如下:将定制标定板放置在被测样品竖向剖面同一平面位置,标定板中心点位于样品绝缘子轴线延长线上;将摄像头图像

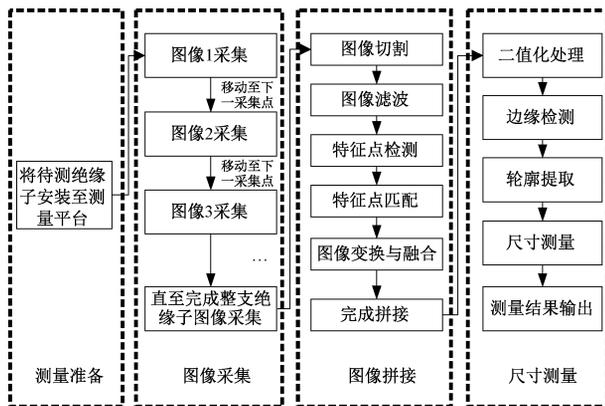


图 5 棒形复合绝缘子尺寸测量流程

Fig. 5 Process of creepage distance measurement method

中心对准标定板中心位置,测算图像中 4 个角上的正方形边长和周长值,调整摄像头位置,使四顶点处所测算正方形边长和周长值接近,即可认为该摄像头位置已处于正视状态;计算中心正方形边上和周长值,换算图像尺寸和实际尺寸之间的转化比例。

2.3 绝缘子图像的连续采集

图像连续采集主要通过固定在滑轨上的高清摄像头实现。将待测样品放置在样品托架上,调整相机与样品间距离,保证所采集图像中样品所占图像比例足够大。测量开始后,高清摄像头依靠滑轨和步进电机等运动装置沿样品轴向方向缓慢采集绝缘子的连续图像,测量结束后将所采集图像序列上传至上位机进行处理。

2.4 绝缘子图像的拼接

将图像连续采集过程中所得到的图像序列按照时间先后顺序进行排列,首先对第 1 张和第 2 张图像进行拼接处理,得到二者结合图像后,将该结合图像与第 3 张图像再次进行拼接处理,以此类推。当遍历完图像序列中全部图像后,拼接处理过程结束,所得到的图像结果即为包含完整样品的最终测量图像结果。图像拼接处理过程包含图像切割、图像滤波、特征点检测、特征点匹配、图像变换与融合 5 个步骤。

1) 图像切割

由前文分析可知,因透视投影误差的原因,图像中的样品绝缘子存在“近大远小”的视觉偏差,此偏差程度由图像中部向边缘逐渐加深。视觉偏差将在很大程度上影响测量准确性,因此需要尽可能排除。然而,经切割后所保留的图像面积不足时,图像间重叠面积较小,可能会导致图像拼接失败。经综合考虑及多次尝试得出,当切割后的图像内保留约 1 个伞裙时可达到较好的效果。

2) 图像滤波

受测量环境中灰尘、颗粒、相机自身数据稳定性等原因影响,图像中会存在的一些噪点,为提高特征点检测准

确性,防止因图像噪点引起误差,需要对切割后的原始图像进行滤波处理。为了能够消除该噪音影响,同时又不改变原有图像特征性质,中值滤波是一种常用的非线性滤波方式,其对图像降噪有很好的效果^[23]。本文采用 3×3 窗口中值滤波方式对于原始图像进行处理。

3) 特征点检测

特征点检测的准确性是图像成功拼接的基本保证。为了能够保证特征点检测过程具有较强的鲁棒性和抗干扰性,采用 SIFT 算法进行特征提取。SIFT 算法由 Lowe 提出,并在之后进行一系列改进,其因检测算法与影像大小、旋转无关,同时对于光线、噪声鲁棒性较高等优点^[20],广泛应用于各个机器视觉领域。

SIFT 特征提取算法实现步骤如下:

(1) 尺度空间极值检测

通过高斯函数对图像进行卷积计算可实现图像的模糊化,达到突出特征的目的。卷积计算如式(1)所示:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

式中: $L(x, y, \sigma)$ 为图像的高斯尺度空间,其中 $G(x, y, \sigma)$ 为高斯核如式(2)所示:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-m/2)^2 + (y-n/2)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中: σ 为尺度空间因子,其值影响图像的模糊程度。采用高斯差分计算提取不同尺度空间因子下存在的差异,如式(3)所示:

$$D(x, y, \sigma_1, \sigma_2) = [G(x, y, \sigma_1) - G(x, y, \sigma_2)] * I(x, y) \quad (3)$$

针对原始图像进行多次下采样,可得到多分辨率金字塔,对金字塔中每一层均进行上述高斯尺度空间计算和高斯差分计算得到高斯差分金字塔。高斯差分金字塔表征了不同分辨率、不同尺度下图像所具有的特征集合^[24],对其求取同一尺度及相邻尺度下的空间极值点作为候选极值点进行下一步运算。

(2) 删除不稳定极值点

第(1)节中的候选极值点虽然在一定程度上能够很好的体现图像特征,但在极值点选取过程中未考虑干扰因素的存在,鲁棒性较差,需要进行过滤处理。过滤方式包含对比度过滤和边缘极值点过滤两个步骤:对比度低的点极易受到噪声干扰而变得不稳定,影响特征点检测的准确性,需进行剔除;候选极值点中部分位于图像边缘位置的点存在较难定位,且易受噪声干扰而不稳定的特点,同样需进行剔除。

(3) 特征方向赋值

为了使所得特征点具有旋转不变性,需要对于保留的特征点赋予基本特征方向。按照式(1)得到每个保留特征点的高斯尺度图像,计算图像中以该特征点为圆心, $3 \times 1.5\sigma$ 为半径的圆形区域内各点梯度的大小和方向,梯

度大小、方向计算公式如式(4)、(5)所示:

$$m(x, y) = \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2} \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \quad (5)$$

将梯度方向进行分组,每组 10° ,统计所选圆形区域内各组梯度大小并作直方图,其中直方图峰值所在组代表的梯度方向即为该特征点的主方向。

(4) 特征点描述

针对所得到的特征点位置、尺度、方向信息,需要建立一个向量进行描述,使其不随各种变化而发生改变。特征点描述过程如下:以特征点为中心,首先将坐标轴旋转至特征点主方向上,旋转后的坐标如式(6)所示。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (6)$$

将特征点周围像素 16×16 的区域划分为4个 8×8 的区域,然后将每个 8×8 的区域划分为 2×2 的分组形式,即每个组中由 $4 \times 4 = 16$ pixels。对于组内像素进行8个方向的梯度直方图统计,结果即为本组内维度为8的描述向量。将各组、各区域结果进行合并,即可得出维度为128的描述向量。

4) 特征点匹配

(1) 匹配计算

已知特征点描述向量后,即可通过计算确认待拼接图像之间特征点的匹配关系。为了保证所得到匹配关系的准确性和完整性,采用穷举法,将待拼接的两幅图像中的所有特征点进行以欧氏距离作为判断依据的逐一对,当欧氏距离值最小时则可认为当前两个特征点具有匹配关系。欧氏距离计算如式(7)所示:

$$D(X, Y) = \sqrt{\sum_i^n (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

(2) 删除错误的匹配关系

尽管 SIFT 算法对于图像特征点的提取具有较高的准确性,同时以欧氏距离为判据进行穷举法寻找匹配关系的效果优良。但是,不可避免的在最终结果中会出现少量错误匹配的情况,对于后期的图像变换与融合过程将产生较大影响,需要进行剔除。

考虑到本方法中相机的运动轨迹可近似为一条直线,同时连续图像采样过程亦可近似看作为等时采样。因此,待拼接图像中真正相互匹配的特征点具有如下特点:特征点在相机运动方向上的坐标变化量近似相等;特征点在正交于相机运动方向上的坐标变化量均近似为0。遍历所有计算所得匹配特征点,当不具有以上任一特点时,则可判断此特征点的匹配关系是错误的,将其从匹配关系序列中删除。如此一来,即可得到正确的图像特征点匹配序列。

5) 图像变换与融合

图像间的变换关系满足式 (8) 中所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & t_x \\ a_3 & a_4 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, x', y' 为变换后坐标, x, y 为变换前坐标, $a_1 \sim a_4$ 代表旋转、缩放参数, t_x, t_y 代表平移参数。

因本方法中相机采样过程中仅存在轴向方向的移动, 可以认为变换矩阵中 $a_1 \sim a_4, t_y$ 参数很小, 可忽略不计, 而仅需要考虑 t_x 参数。为简化参数计算, 可直接求取各组匹配特征点在相机运动方向上的坐标变化值, 按大小进行排序, 取中位数作为图像变换参数 t_x 并进行图像融合。

当图像融合时, 若仅采用变换后的图像进行覆盖融合, 则在拼接结果图像中可能会出现明显的拼接缝, 影响整体效果。采用加权平均法替代直接融合法, 以达到平滑过渡。加权平均融合如式 (9) 所示, 其中 $pixelValue$ 代表融合后图像像素值, d_1 和 d_2 代表像素点距离重合区域左、右边界的距离, img_1 和 img_2 代表融合前图像像素值。

$$pixelValue = \frac{d_2}{d_1 + d_2}img_1 + \frac{d_1}{d_1 + d_2}img_2 \quad (9)$$

2.5 绝缘子爬电距离测量

在完成全部图像拼接处理过程后, 将得到一副包含完整清晰样品细节, 且无视觉偏差的测量图像。通过二值化处理、图像边缘检测、轮廓提取、特征量计算等步骤后可实现爬电距离的测量与计算。

其中图像边缘检测采用 Canny 边缘检测算法, 可在保证图像边缘精确定位的前提下, 具有一定的噪音干扰抑制效果^[20,25]。轮廓提取采用 8 邻域轮廓跟踪法, 从所得到的边缘信息中提取轮廓序列信息, 8 邻域位置示意图如图 6 所示。计算轮廓序列中相邻像素点之间距离之和, 即为样品尺寸信息的像素值表现形式, 将其与对应距离当量相乘, 即可得到棒形绝缘子相应尺寸的实际值。

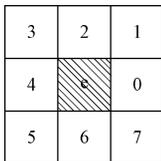


图 6 8 邻域位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the eight-neighborhood relationship

3 试验验证及结果分析

为验证本方法的可行性、准确性以及相对于其他测量方法的优越性, 首先对本测量方法中图像拼接过程和结果进行分析, 然后指定棒形绝缘子样品, 分别利用不同

测量方法完成爬电距离的测量, 对比分析得出结论。

3.1 拼接效果验证

拼接后整个绝缘子样品正视图像如图 7 所示。对比由图 7 测得拼接后图片中的伞径、杆径及伞间距等易测参数与实际产品的参数, 结果无明显差异, 表明整幅图像能够完整的展现棒形绝缘子样品形态, 并且尽可能多地保留了样品细节信息; 与图 3 相比较, 图 8 中整个绝缘子每片伞裙均呈正视状态, 图像的轮廓与绝缘子的实际表面趋于一致, 对图像的轮廓测量即为绝缘子爬电距离的测量路径, 如图 8 所示。

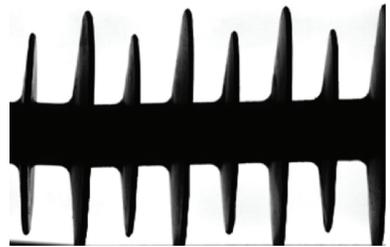


图 7 拼接后正视图像

Fig. 7 Image after stitching

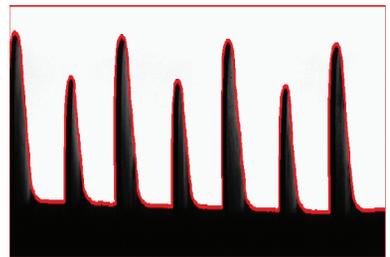


图 8 爬电距离的测量路径

Fig. 8 Image after stitching

3.2 测量试验结果分析

为验证测量系统的准确性和可靠性, 定制了一支爬电距离为 2 520 mm 的棒形复合绝缘子作为测试样品, 分别利用纸胶带法、滚轮测距法以及本文方法进行爬电距离的测量, 每个样品进行 10 次重复测量, 重复测量为动态测量, 即每次测量完成后拆除试品, 重新安装试品再测量。得到每种测量方法 10 次测量值的最大值、最小值、平均值和标准偏差, 并记录测试所用平均时间(安装完样品开始测量的总时间), 相关测量数据如表 1 所示。

通过对比表 1 中测量数据可知, 皮卷尺法 10 次测量的波动最大, 平均值的比实际值偏大约 16 mm, 标准差为 21.19 mm; 纸胶带法 10 次测量值的平均值也略大于实际值, 标准差为 8.84 mm; 滚轮测距法 10 次测量平均值略低于实际值, 约为 2 515 mm, 标准差为 9.29 mm; 本文方法 10 次重复测量值的波动最小, 标准差值仅为 1.07 mm, 远

表 1 测量结果
Table 1 Test results

测量方法	爬电距离测量值/mm		平均用时/ (s/次)
	平均值	标准差	
皮卷尺法	2 536. 0	21. 19	438
纸胶带法	2 523. 4	8. 84	596
滚轮测距法	2 515. 4	9. 29	524
本文方法	2 520. 4	1. 07	72
标准值	2 520. 0	-	-

低于另外两种传统方法,平均值也最为接近实际值。因此,相比之下本文提出的方法具有较高的准确性和稳定性,主要是因为测量过程中无人因素干扰。

此外,本文测量方法用时仅为 72 s,远低于传统方法的 438~596 s,其效率是现有方法的 6~8 倍,主要因为测量过程实现自动化,计算过程由计算机完成,耗时较短。

4 结 论

针对现有棒形复合绝缘子爬电距离测量存在效率低、误差大和费时费力等问题,本文提出了一种基于机器视觉技术的棒形复合绝缘子爬电距离测量的新方法,实现了棒形悬式复合绝缘子的爬电距离的自动测量,主要结论如下:

1) 棒形复合绝缘子整体长宽比较大,正视图像一次采集时无法兼顾样品细节清晰度和整体完整性,如果对采集的图像通过常规图像测量算法计算会产生较大误差。

2) 对待测样品进行图像连续采集,然后对所采集的图像经过处理后进行拼接,得到完整样品的正视图像,然后利用边缘检测和轮廓提取算法可实现棒形复合绝缘子爬电距离的测量。

3) 本文方法 10 次重复测量值最为接近实际值,其波动较小,标准差值仅为 1.07 mm,远低于传统方法,工作效率是现有方法的 6~8 倍。

参考文献

- [1] 梁曦东,高岩峰,王家福,等.中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J].高电压技术,2016,42(9):2888-2896.
LIANG X D, GAO Y F, WANG J F, et al. Rapid development of silicone rubber composite insulator in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2888-2896.
- [2] 陈原,薛文祥,刘云鹏,等.伞套硅橡胶含量对复合绝缘子运行寿命的影响[J].高电压技术,2022,48(2):736-752.
CHEN Y, XUE W X, LIU Y P, et al. Influence of

silicone rubber content of shed and sheath on composite insulator lifespan[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 736-752.

- [3] 中华人民共和国国家标准.架空线路绝缘子标称电压高于 1 000 V 交流系统用悬垂和耐张复合绝缘子定义、试验方法及接收准则:GB/T 19519—2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
National Standards of the People's Republic of China. Insulators for overhead lines-composite suspension and tension insulators for A. C. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V definitions, test methods and acceptance criteria: GB/T 19519-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [4] 中华人民共和国电力行业标准.标称电压高于 1 000 V 架空线路用绝缘子使用导则 第 3 部分:交流系统用棒形悬式复合绝缘子:DL/T 1000.3-2015[S].北京:中国电力出版社,2015.
Electric Power Industry Standards of the People's Republic of China. Application guide of insulators for overhead lines with a nominal voltage over 1000 V part 3: composite insulator for A. C. system: DL/T 1000.3-2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [5] 房子祎,刘世涛,杨凯,等.一种复合绝缘子爬电距离测量工具的研制与应用[J].宁夏电力,2019(6):52-55.
FANG Z W, LIU SH T, YANG K, et al. Development and application of a measuring tool for creepage distance of composite insulators[J]. Ningxia Electric Power, 2019(6): 52-55.
- [6] 阴法明,王康,赵力.电缆护套厚度灰度矩亚像素测量研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(10):128-133.
YIN F M, WANG K, ZHAO L. Sub-pixel edge detection algorithm based on gray-moment for thickness measurement of cable sheath material[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 128-133.
- [7] 董霏,侯北平,刘宇,等.基于机器视觉的线缆导体质量检测研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(6):144-153.
DONG F, HOU B P, LIU Y. Research on quality inspection of cable conductor based on machine vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 144-153.
- [8] 吴刚,吴云帆,陈度,等.基于机器视觉的玉米果穗性状参数测量方法研究[J].农业机械学报,2020,51(S2):364-372.

- WU G, WU Y F, CHEN D, et al. Measurement method of maize ear characters based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 364-372.
- [9] 陈晓荣, 刘亚茹, 石高辉. 基于机器视觉的光纤几何参数检测算法设计 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(6): 82-86.
- CHEN X R, LIU Y R, SHI G H. Design of optical fiber geometric parameter detection algorithm based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(6): 82-86.
- [10] 李纪强, 孔令华, 花海燕. 基于图像拼接的直线轴承长度测量方法 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 148-154.
- LI J Q, KONG L H, HUA H Y. Method of length measurement for linear bearing based on image mosaic [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 148-154.
- [11] 王希波, 李爱娟, 高金胜, 等. 基于机器视觉的轮胎花纹深度测量系统研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(4): 66-70.
- WANG X B, LI A I J, GAO J S H, et al. Study on tire tread depth measurement method based on machine vision [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(4): 66-70.
- [12] 刘伟, 周建行, 杨延西. 基于平行激光的便携式视觉裂缝测量系统 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 235-243.
- LIU W, ZHOU J X, YANG Y X. Portable vision crack measurement system based on parallel laser [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 235-243.
- [13] 杨晓, 黎琼炜, 殷春, 等. 应用于压力容器红外无损检测的SIFT图像拼接方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 31-40.
- YANG X, LI Q W, YIN C H, et al. SIFT image stitching method applied to infrared nondestructive testing of pressure vessels [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 31-40.
- [14] 张浩亚, 金永, 李海涛, 等. 基于机器视觉的输电线舞动检测方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 1-4.
- ZHANG H Y, JIN Y, LI H T, et al. Research on detection method of transmission line galloping based on machine vision [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(8): 1-4.
- [15] 何赞泽, 张帆, 刘昊, 等. 风机叶片无人机红外热图像拼接方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 44-53.
- HE Y Z, ZHANG F, LIU H, et al. Infrared image stitch method of wind turbine blade based on UAV [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 44-53.
- [16] LI W, HU B, SONG C, et al. An image stitching method for blades of wind turbine based on background removal preprocessing [C]. Proceeding of the 2020 5th International Conference on Communication, Image and Signal Processing, Chengdu, China: IEEE, 2020: 174-178.
- [17] GALLEGUILLOS C, ZORRILLA A, JIMENEZ A, et al. Thermographic non-destructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems [J]. Plastics, Rubber and Composites, 2015, 44(3): 98-103.
- [18] 刘自然, 李谦, 荣耀, 等. 插座爬电距离与电气间隙自动化测量系统研究 [J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(10): 1999-2003.
- LIU Z R, LI Q, RONG Y, et al. Automated measure system study of creepage distance and clearance of outlet [J]. Computer & Digital Engineering, 2018, 46(10): 1999-2003.
- [19] 武文华, 徐偲达, 杨磊, 等. 基于结构光的盘形悬式绝缘子三维测量技术研究 [J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 23-28.
- WU W H, XU S D, YANG L, et al. Research on 3D measurement technology of cap and pin insulator based on structured light [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 23-28.
- [20] 唐寒冰, 巢渊, 刘文汇, 等. 基于机器视觉的大尺寸零件测量方法研究综述 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 33-40.
- TANG H B, CHAO Y, LIU W H, et al. Review of measurement methods of lame-size parts based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(17): 33-40.
- [21] 孙钊, 许增朴, 王永强, 等. 机器视觉测量中透视投影误差分析控制与补偿 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(2): 266-270.
- SUN ZH, XU Z P, WANG Y Q, et al. Control and compensation of perspective projection error analysis in machine vision measurement [J]. Computer Engineer and Applications, 2018, 54(2): 266-270.
- [22] 支珊, 赵文珍, 段振云, 等. 视觉测量齿轮定位偏心对尺距测量精度的影响 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 205-212.

ZHI SH, ZHAO W ZH, DUAN ZH Y, et al. Influence of gear location eccentricity in visual measurement on gear measurement accuracy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 205-212.

- [23] 刘智嘉, 夏寅辉, 杨德振, 等. 基于中值滤波器的红外图像噪声处理的改进方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(3): 376-380.

LIU ZH J, XIA Y H, YANG D ZH, et al. An improved method for infrared image noise processing based on median filter [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(3): 376-380.

- [24] 姜靓, 詹永照. 基于高斯金字塔与差分法的多目标检测 and 跟踪算法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(11): 129-132.

JIANG L, ZHAN Y ZH. Multiple objects detection and tracking based on background subtraction and gaussian pyramid [J]. Microelectronics & Computer, 2011, 28(11): 129-132.

- [25] YONG W K, INNILA R J, KRISHNA A. A study on the effect of canny edge detection on downscaled images[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2020, 30(3): 372-381.

作者简介



张虎 (通信作者), 2017 年于武汉大学获得硕士学位, 现为中国电力科学研究院有限公司工程师, 主要研究方向为电力设备智能检测技术、机器视觉与图像处理技术。

E-mail: xine90@163.com

Zhang Hu (Corresponding author)

received his M. Sc. degree from Wuhan University in 2017. Now he is an engineer from China Electric Power Research Institute. His main research interests include intelligent detection technology for power equipment, machine vision and image processing technology.



聂霖, 2016 年于华中科技大学获得硕士学位, 现为中国电力科学研究院有限公司工程师, 主要研究方向为电力设备智能检测技术、机器视觉与图像处理技术。

E-mail: 276302037@qq.com

Nie Lin received his M. Sc. degree from

Huazhong University of Science and Technology in 2016. Now he is an engineer from China Electric Power Research Institute. His main research interests include intelligent detection technology for power equipment, machine vision and image processing technology.