

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306951

架空导线压接对边距的图像测量方法*

关华深¹ 张俊杰¹ 屈盛官² 孙国富¹ 邵徽图²

(1. 广东电网有限责任公司江门供电局 江门 529000; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510641)

摘要: 压接导线主要应用于架空线路建设, 其对边距对线路安全运行及服役期限起到重要作用。针对传统人工测量存在的可靠性差、效率低的缺点, 提出了一种基于图像处理的压接对边距测量方法。首先根据图像的累计灰度突变点自动裁剪被测区域并进行中值滤波, 然后基于改进 Otsu 阈值法获得边缘连续的二值图像; 再分别使用形态学处理和高斯曲线拟合法对边缘进行二次定位, 得到亚像素级边缘点; 最后采用基于随机抽样一致性 (random sample consensus, RANSAC) 的最小二乘拟合方法完成上下边缘点的曲线拟合, 实现压接对边距的测量。通过模拟试验表明了 RANSAC 拟合经过 10 次迭代后测量算法的效果较好, 测量误差小于 0.1 pixels; 而实际导线测量试验结果表明, 改进 Otsu 算法对光照强度具有适应性, 同时与人工测量相比, 图像测量方法的最大相对偏差为 1.82%, 重复标准差提高 60%, 平均耗时仅为人工测量的 1/10, 能够实现压接对边距高效可靠的测量。

关键词: 导线压接; 对边距; 二值化; 亚像素边缘; 图像测量

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

Image measurement of edge distance of the crimped overhead wire

Guan Huashen¹ Zhang Junjie¹ Qu Shengguan² Sun Guofu¹ Shao Huitu²

(1. Jiangmen Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company Limited, Jiangmen 529000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Crimped conductor is primarily used in constructing overhead lines, and its edge distance is crucial for ensuring safe operation and a long service life of the line. To address the limitations of poor reliability and low efficiency in traditional manual measurement, a novel method based on image processing was proposed. Firstly, the measured area was automatically cropped based on the cumulative grayscale mutation points of the image and then median filtered. Subsequently, a binary image with continuous edges was obtained based on the improved Otsu thresholding method. Then, the edges were located twice using morphological processing and the Gaussian curve fitting method, respectively, and sub-pixel level edge points were obtained. Finally, the upper and lower edge points were fitted using the least-squares fitting method based on RANSAC to achieve the measurement of crimped edge distance. The simulation test confirmed that the measurement algorithm produces better results after 10 iterations of RANSAC fitting, with a measurement error of less than 0.1 pixels. The actual wire measurement test results demonstrated that the improved Otsu algorithm is adaptable to changes in light intensity. Furthermore, when compared to manual measurement, the image measurement method has a maximum relative deviation of only 1.82%, a 60% increase in repeatable standard deviation, and consumes only 1/10 of the time. The efficient and reliable measurement of crimping edge distance is realized.

Keywords: wire crimping; edge distance; binarization; subpixel edge; image measurement

0 引言

随着我国综合国力的提高,各行业对电力的需求不断扩大,对电力的安全可靠运输提出更高的要求。导线压接作为运距离输电工程中的关键环节,起到远程传导电力、承受外部载荷的重要作用^[1]。压接工艺指对嵌入导线的电力金具施加液压力使其发生塑性变形,从而实现导线间的连接。受压区的变形量太小,会削弱连接的强度,影响电力的输送效率、线路的服役期限^[2-3]。而压接导线的对边距直接反映了塑性变形程度,对该参数的精确检测,是保证高质量压接的重要前提^[4]。由于压接工艺依赖人工操作,压接过程中可能发生划线不准、压力不足等问题,导致压接对边距偏大,降低连接强度。目前常采用游标卡尺和位移传感器进行检测,卡尺测量依赖于工人的主观因素和工作经验,测量过程耗时耗力,并且接触式测量会磨损量具,进一步降低测量结果的准确性;基于距离传感器的测量方式^[5-6]需要专门安装传感器支架且影响导线的自由取放,其实际应用较少。因此,为实现压接对边距高效精确的自动化测量,迫切需要一种新的测量方法。

近年来,图像处理技术发展迅速,基于图像的测量方法可以实现高效准确的非接触式测量,被广泛应用于机械、电力、纺织等行业。支珊等^[7]提出了基于统计误差类型的齿廓图像边缘失真修正算法,齿距累计偏差与齿轮测量中心的测量结果仅偏差 2.6 μm ;李纪强等^[8]利用 HALCON 图像软件对多幅直线轴承局部图像进行拼接,实现大长度直线轴承的测量,测量误差小于 0.1 mm,检测效率提高 88%。董霏等^[9]通过对导线截面图像进行处理,在消除刀痕的基础上进行导线根数分层检测,可避免人工漏检。陈晓荣等^[10]对光纤的几何参数进行图像测量,利用 Otsu 阈值化、Canny 边缘检测及边缘拟合等算法对光纤各层的直径、不圆度进行检测。胡立文等^[11]利用图像灰度特征值对机织物密度进行测量,以灰度曲线的波峰数目作为纱线根数,测量误差在 2% 以内。金守峰等^[12]通过高速 CCD 相机采集织物图像的纹理信息,再使用改进互相关算法计算出织物亚像素级运行速度,减少了滑转产生的误差。另外,图像测量方法也被应用于裂缝测量、三维检测、水位计算等领域^[13-18],上述研究为本文测量方法提供了参考。

虽然关于压接导线对边距相关的图像测量研究鲜少,但部分学者研究了类似尺寸的图像测量算法。张铁英等^[19]使用图像功率谱和灰度积分实现了倾斜直槽的宽度测量,但该方法适用于简单的直线边缘;李勇等^[20]通过中轴线梯度角搜索算法逐像素测量了超薄热管宽度,该方法需要高质量图像进行中线提取。二者都可以

实现目标宽度的精确测量,但对于大尺寸、小弯曲、干扰多的压接导线并不适用。

因此,本文提出了一种基于图像处理的压接对边距测量方法,该方法结合压接导线图像的特点,通过自适应裁剪使得图像有效信息占比最大,并对裁剪图像进行预处理,使用形态学处理和高斯曲线拟合法对边缘进行亚像素级检测,最后通过 RANSAC 算法进行曲线拟合,实现压接对边距的准确测量。通过模拟和实物测量试验,验证了本文测量方法的准确高效性和稳定可靠性。研究结果可为电力施工单位、检测部门提供一种高效可靠的架空导线压接对边距测量新方法。

1 压接对边距定义和图像采集

1.1 压接对边距的定义

压接工艺^[21]通过电力金具的形变完成导线间的紧固连接,电力金具截面由直径为 D 的圆形变形为六边形,而六边形对边之间的距离即为压接对边距 S 。本文使用的电力金具为耐张线夹,架空导线为钢芯铝绞线,压接导线如图 1 所示。耐张线夹需要对钢锚区和压接区进行压接,两区域的对边距均需进行测量。与钢锚区相比,压接区工作距离更长,包含了钢锚区的压接特征,其测量方法也适用于钢锚区。因此,本文将压接区作为试验对象,对其图像测量方法进行研究。

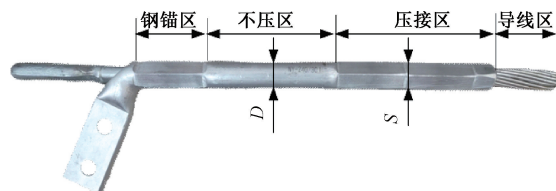


图 1 压接导线实物图

Fig. 1 Diagram of crimped wire

1.2 原始图像采集

为验证本文测量算法的准确性,搭建了光学图像采集平台。该采集平台主要由分辨率为 $5\,472 \times 3\,648$ 的 CMOS 工业相机、焦距为 12 mm 的定焦镜头、对称布置的两个 $300\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的条形 LED 光源构成,搭建的采集平台如图 2 所示,图中虚线为图像传输方向。

2 对边距测量算法

2.1 压接导线区域的获取

压接导线属于细长件,压接区长宽比一般大于 6,而采用的 CMOS 相机芯片长宽比为 3:2,从而导致采集的图像中压接导线占比较小,这会浪费存储空间和降低处

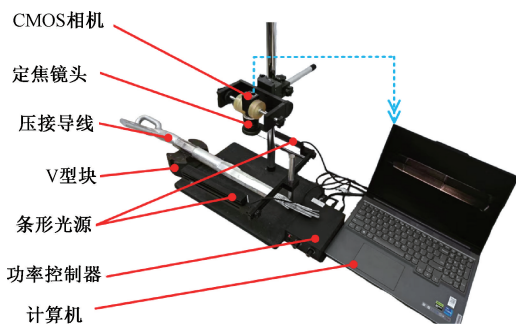


图 2 系统组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system components

理效率。因此,需要从原始图像中裁剪出待测区域。

根据图像中背景较暗的特点,通过分析列方向累计灰度偏导曲线,寻找导线区域的上下界线,从而以该区域作为被测图像。设图像 f 中 i 行 j 列处的像素点的灰度为 $f(i, j)$, 则第 i 行的累计灰度偏导值 $F(i)$ 为:

$$F(i) = \sum_{j=0}^{c-1} [f(i+1, j) - f(i, j)] \quad i \subseteq [0, r-2] \quad (1)$$

式中: c 为图像列数, r 为图像行数。图 3 为获取被测区域时确定上下边界的示意图, 右侧为原始图像, 左侧为累计灰度偏导曲线。从偏导曲线可以发现, 在行坐标为 $(0 \sim r/2)$ 时, 存在最大值, 该行可作为上边界; 在行坐标为 $(r/2 \sim r-1)$ 时, 存在最小值, 该行可作为下边界, 此方式可有效裁剪出导线区域。

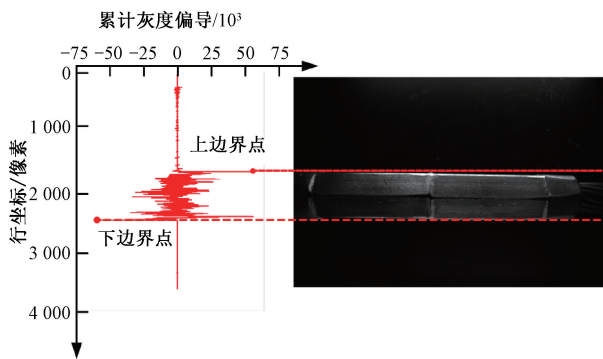


图 3 被测区域获取

Fig. 3 Acquisition of the measured area

2.2 图像预处理

对边距测量的关键是导线边缘的精确提取, 而通过图像去噪可以消除采集过程中引入的噪声, 改善图像质量, 提高检测精度。因此本文选用保持边缘特征和去噪效果较好的中值滤波^[22]作为测量区域的去噪方法。

在被测区域内, 为从背景中分割出压接导线边缘, 对 Otsu 算法进行优化并用于压接图像的阈值分割^[23]。Otsu 算法又名大津法, 该算法根据灰度阈值将像素点分

为背景点和前景点, 当两类像素点的类间灰度方差最大时, 认为分割效果最好。但该算法确定最佳阈值时需要对比所有灰度值的类间方差, 导致算法的时空复杂度过大。

针对传统 Otsu 算法的缺点, 对阈值选取方式进行优化, 基本思路是: 根据平均灰度确定起始阈值, 使用该阈值将图像像素分为前景和背景两类, 再分别计算两类像素的平均灰度, 以二者的加权平均值作为下一次的阈值, 若前后两次阈值化图像的类间方差相差小于 5 时停止迭代, 其具体步骤如下:

步骤 1) 计算图像的平均灰度 Z_m 并作为起始阈值 t_0 ;

步骤 2) 根据阈值从图像中分割出前景和背景, 分别计算两者的平均灰度 Z_f 和 Z_b , 则下一次阈值为 $t_1 = r_f Z_f + Z_b r_b$, 式中 r_f, r_b 为前景、背景像素所占比例;

步骤 3) 求出前后两次阈值化图像的类间方差 p_0, p_1 ;

步骤 4) 若 $|p_0 - p_1| \leq 5$ 则停止循环, 确定最终阈值 $t_e = t_1/2$; 否则转到步骤 2) 继续迭代计算。

为验证改进 Otsu 算法的有效性, 分别使用传统 Otsu、最大熵法和改进 Otsu 算法对被测区域进行处理后, 得到的阈值图像如图 4 所示。可以发现, 最大熵算法的阈值化效果最差, 下边缘基本不能提取。传统 Otsu 算法导致目标区域过度破碎, 而且去除了部分灰度较低的下边缘, 不利于后期测量。而本文的改进 Otsu 算法的阈值效果最好, 目标区域较为完整, 上下边缘显著。

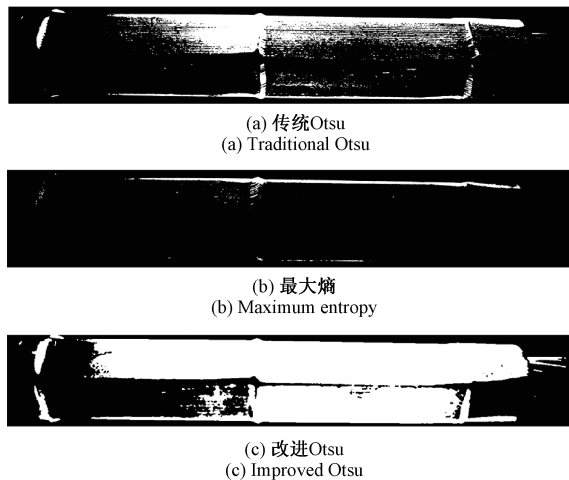


图 4 阈值化效果对比

Fig. 4 Comparison of thresholding effects

2.3 像素级边缘定位

数学形态学以集合来表示二值图像, 通过结构元对图像进行形态学处理。常见的形态学处理包括膨胀、腐蚀、开运算、闭运算 4 种基本方式^[24]。形态学边缘根据

处理算法可分为膨胀边缘和腐蚀边缘,其中膨胀边缘是膨胀图像和原图像之差,腐蚀边缘则是原图像与腐蚀图像之差。使用形态学处理提取边缘时不仅可以提取细节信息还抑制了噪声,获取的边缘图像质量较高^[25]。相较于膨胀边缘,腐蚀边缘更能代表实际边缘特征,检测精度更高。

在二维离散空间 Z^2 中定义数字图像为 $I(i, j)$, 结构元 $B(m, n)$ 为 $I(i, j)$ 的子集, 则形态学腐蚀的定义为:

$$(I \ominus B)(i, j) = \max[I(i + m, j + n) - B(m, m)] \quad (2)$$

因此提取的腐蚀边缘图像 $E(i, j)$ 为:

$$E(i, j) = I(i, j) - I \ominus B \quad (3)$$

形态学处理提取的单像素边缘如图 5(a) 所示。边缘图像中存在压接痕迹、表面纹理产生的干扰边缘, 需要对其进行过滤。首先对图像进行行扫描, 对于上边缘, 从上至下逐行扫描, 选取第 1 个灰度非 0 点作为上边缘点; 对于下边缘, 进行反向扫描, 选取第 1 个灰度非 0 点作为下边缘点, 依次提取各列的上下边缘点。图像两端分别为不压区和导线区, 会对拟合结果产生影响。因此为去除非压接区域, 选取列坐标为 $0.1c \sim 0.9c$ (c 为图像列数) 的边缘点作为提取的上下边缘像素点集。以如图 5(b) 所示的形态学边缘图像中的部分图像为例, 经过上述边缘过滤后的结果如图 5(c) 所示, 可以看出过滤结果显著, 压接导线表面的纹理、污渍等干扰边缘被有效剔除。

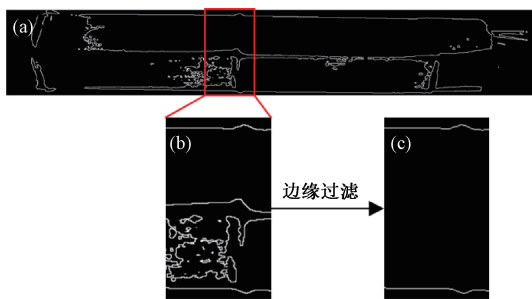


图 5 像素级边缘定位

Fig. 5 Pixel-level edge localization

2.4 亚像素级边缘检测

像素级边缘检测方法的精度较低, 不能满足压接对边距测量精度的需求。为提高测量精度, 采用亚像素边缘检测算法来提高测量系统的分辨率。该方法不需要使用高精度硬件, 使用条件要求低, 应用范围较为广泛^[26]。

根据方形孔径采样定理^[27], 数字图像上像素的灰度值是感光芯片上各部分光强综合作用的结果。经过光学元器件的处理后, 现实空间中变化剧烈的边缘转变为渐变形式。渐变式边缘的灰度分布符合高斯分布, 而高斯曲线极值点对应的位置即为实际边缘的位置^[28]。亚像

素拟合原理如图 6 所示, 其中 B 为像素级边缘点, A、C 为其梯度方向上的邻接点, 高斯曲线极值点对应的位置 V 为亚像素边缘位置 B', B 与 B' 的距离为 μ 。

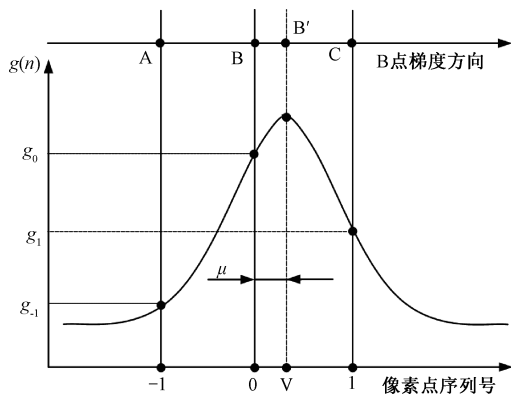


图 6 高斯曲线拟合示意图

Fig. 6 Diagram of Gaussian curve fitting

高斯曲线的表达式为:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中: μ 为均值, σ 为标准差, 通过已知点直接进行拟合十分困难。因此对表达式取对数, 得到式(5):

$$\ln(y) = -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} - \frac{\ln(2\pi\sigma)}{2} \quad (5)$$

该函数是关于 x 的二次方程, 以其作为拟合曲线可以极大地简化计算过程。假设对数高斯曲线为 $y' = a + bx + cx^2$, 则根据采样定理, 序号为 n 的像素点的输出灰度为:

$$g(n) = \int_{n-0.5}^{n+0.5} (a + bx + cx^2) dx \quad (6)$$

令 B' 点序号为 0, 则 A、C 点序号分别为 -1、1, 根据各点的灰度 g_0 、 g_{-1} 、 g_1 及式(6)联解可得 a 、 b 、 c 如下所示:

$$\begin{cases} a = \frac{13}{12}g_0 - \frac{1}{24}g_{-1} - \frac{1}{24}g_1 \\ b = \frac{1}{2}(g_1 - g_{-1}) \\ c = \frac{1}{2}(g_1 + g_{-1} - 2g_0) \end{cases} \quad (7)$$

二次曲线的极值点位置 $x = -\frac{b}{2c}$, 将 b 、 c 表达式代入,

可得极值点坐标为:

$$x = \frac{g_1 - g_{-1}}{2(g_0 - g_1 - g_{-1})} \quad (8)$$

此时求得的坐标为高斯曲线取对数后的极值点坐标, 还需对其取对数才能得到实际的偏移距离 μ :

$$\mu = \frac{\ln(g_1) - \ln(g_{-1})}{2(2\ln(g_0) - \ln(g_1) - \ln(g_{-1}))} \quad (9)$$

影响压接对边距测量精度的主要因素是边缘列方向坐标,因此选取像素级边缘点的列方向作为梯度方向,求出列方向距离差 μ_y ,对应的亚像素点 B' 坐标为 $(x_B, y_B + \mu_y)$ 。

2.5 对边距测量

在获得上下边缘的亚像素级点集后,利用离散点集拟合上下边缘曲线。之后,根据拟合曲线特征检测上下边缘点对,以点对间的直线距离作为对边距。

由于多次压接后导线会产生一定的偏转,图像采集时获得的上下边缘可能包括与边缘相邻的压接导线侧面的投影,即采集的上下边缘亚像素点中存在野点,会影响对边距的测量精度。因为最小二乘法对噪声敏感,会产生平方级的误差^[29],故本文采用抗干扰能力更强的 RANSAC 算法进行拟合,以忽略野点对拟合结果的影响。

压接边缘曲线近似二次曲线,以上边缘为例, RANSAC 算法拟合边缘的步骤如下:

步骤 1) 从亚像素点集 U 中选取 $0.1n$ 个边缘点作为样本集 S , n 为 U 中边缘点总数;

步骤 2) 使用最小二乘法对 S 中的边缘点进行拟合,得到二次曲线 C ;

步骤 3) 计算点集 U 中不属于 S 点集的边缘点 E ($E \in U, E \notin S$) 到二次曲线 C 的法向距离之和并作为该次拟合的得分;

步骤 4) 重复上述步骤 10 次,选取得分最小的点集 S 拟合的二次曲线作为最终结果。

对上下边缘亚像素点集进行 RANSAC 拟合,部分图像的拟合结果如图 7 上下曲线所示。

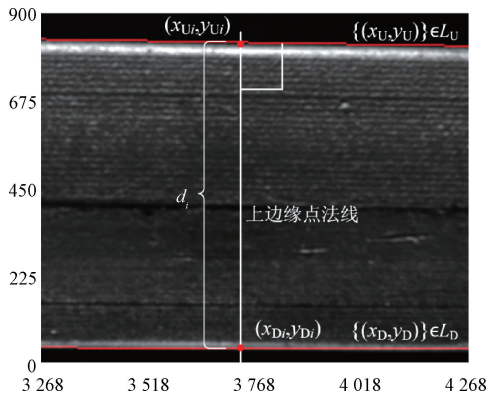


图 7 测量示意图

Fig. 7 Measurement schematic

从图 7 中可以看出拟合曲线与实际边缘相近,拟合效果较好。设上边缘拟合曲线的数学模型为: $L_U = A + Bx + Cx^2$, 则可得到拟合后的边缘像素点集合 $\{(x_U, y_U)\}$ 。

若在上边缘有 n 个像素点,则由拟合方程可得任一点 (x_{Ui}, y_{Ui}) 处的法线方程为 $y_i = y_{Ui} + (x_{Ui} - x) / (B + 2Cx_{Ui})$, 法线与下边缘曲线交于点 (x_{Di}, y_{Di}) , 以该两点作为对边距测量点对。根据对边距定义,两像素点间的距离即为压接对边距 $d_i = \sqrt{(x_{Ui} - x_{Di})^2 + (y_{Ui} - y_{Di})^2}$ 。

3 试验结果与分析

3.1 标准图像试验

本文提出的压接导线边缘检测算法,首先基于形态学处理获得的单像素宽边缘图像,然后利用高斯曲线拟合法检测亚像素边缘,最后采用 RANSAC 法得到边缘拟合曲线。其本质是要求离散边缘点集到理想曲线的法向距离平方和最小。

为验证压接边缘检测算法的精度,以已知对边距的生成图像作为试验对象。该生成图像包括上下两边缘,共同构成模拟压接区域。为适用于实际压接导线截面积范围 ($240 \sim 1\,440 \text{ mm}^2$), 根据实际像元尺寸 $2.4 \mu\text{m}$ 及镜头放大倍数 0.04 换算成图像对边距为 $520 \sim 1\,150 \text{ pixels}$, 选取 520、835、1 150 pixels 的对边距构造生成图像。为模拟渐变边缘,使用 3×3 的模板对其进行均值滤波。另外,压接时由于重力、液压力分布不均等原因,压接导线会有一定程度的弯曲,通常用径向变形量和压接长度的比值 C 表示,一般为 $0 \sim 2\%$, 选取 0、1%、2% 的弯曲度对生成图像进行弯曲化,最终测试图像如图 8 所示。

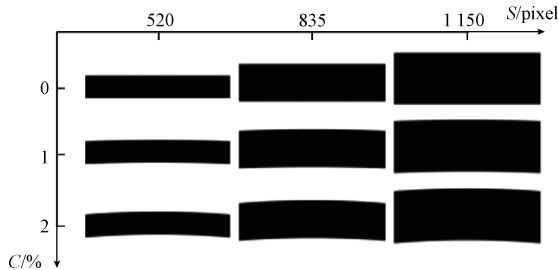


图 8 生成图像

Fig. 8 Generated images

对生成图像进行自动测量,以图像各列的对边距的平均值作为测量结果。当 RANSAC 算法迭代 10 次时,测量结果如表 1 所示。结果表明随着弯曲度增大,测量误差也随之增大。对边距为 1 150 pixels、弯曲度为 2% 时的测量误差最大,为 2.28 pixels。这是因为图像中的边缘点只能用整数表示,因此弯曲度越大,生成图像的边缘与设计曲线偏差越大,最终导致测量精度降低。因此,当偏差为 0 即弯曲度为 0 时,测量结果准确率为最大值 100%。同时,对于不同对边距间的测量误差的变化均保

持在测量精度允许的范围内,也表明该算法具有较强的适用性。

表 1 不同弯曲度的对边距测量结果

Table 1 Measured edge distance for different curvatures (pixel)			
弯曲度/%	对边距 520	对边距 835	对边距 1 150
0	520. 00	835. 00	1 150. 00
1	520. 29	835. 61	1 150. 69
2	521. 20	836. 71	1 152. 28

同时,为了研究 RANSAC 算法迭代次数对测量结果的影响,使用 4 种迭代次数对弯曲度为 1%的生成图像进行测量,测量数据如表 2 所示。由试验结果可知,虽然迭代次数会影响测量精度,但测量误差相差在 0. 1 pixels 内,表明迭代次数对测量精度的影响较小。为了减少计算时间和提高测量效率,本文选取 10 次作为 RANSAC 算法迭代次数。

表 2 不同的迭代次数的对边距测量结果

Table 2 Measured edge distance for different number of iterations (pixels)			
迭代次数	对边距 520	对边距 835	对边距 1 150
10	520. 42	835. 67	1 150. 77
40	520. 36	835. 57	1 150. 73
70	520. 39	835. 57	1 150. 74
100	520. 39	835. 58	1 150. 74

3. 2 实际压接导线试验

在对压接导线进行图像采集时,光照强度会影响图像质量从而影响阈值化效果。为进一步研究提出的改进 Otsu 算法的鲁棒性,对比了不同光照下的图像阈值化效果。利用功率控制器分别在 25%、50%、75%、100% 额定

功率的光照强度下对型号 NY-240/30 的耐张线夹和 LGJ-240/30 的钢芯铝绞线构成的压接导线进行图像采集,如图 9 所示。

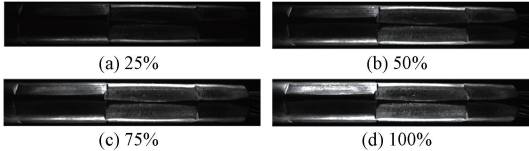


图 9 不同光照强度下的采集图像

Fig. 9 Acquired images at different light intensity

采用本文的改进 Otsu 算法对采集图像进行阈值化,结果如图 10 所示。从中可以发现,尽管不同光照下的采集图像存在较大差异,但使用本文的改进 Otsu 算法都可以自适应地获得较好的阈值化效果,压接导线的上下外边缘与背景对比明显,表明本文阈值方法具有较强的鲁棒性,能够适应不同的光照强度。



图 10 不同光照强度下的阈值图像

Fig. 10 Binary images at different light intensity

为验证本文算法测量实际对边距的精确性,对型号 NY-240/30、NY-800/70、NY-1440/100 的耐张线夹及相应的钢芯铝绞线构成的压接导线进行测试,测量位置分别距离耐张线夹端部 60、120、180 mm,以人工测量平均值作为实际对边距。使用研制的测量系统对压接导线进行图像采集并进行测量;人工使用游标卡尺进行测量,测量结果如表 3 所示。

表 3 实际对边距测量结果

Table 3 Measurement results of the actual edge distance									
压接导线类型	对边距/mm								
	距端部 60 mm			距端部 120 mm			距端部 180 mm		
	本文方法	人工测量	相对误差/%	本文方法	人工测量	相对误差/%	本文方法	人工测量	相对误差/%
NY-240/30	30. 53	30. 62	0. 29	30. 40	30. 94	1. 75	30. 71	31. 28	1. 82
NY-800/70	55. 82	55. 48	0. 61	55. 53	56. 16	1. 12	55. 67	55. 84	0. 30
NY-1440/100	68. 47	68. 86	0. 57	68. 35	68. 70	0. 51	68. 58	69. 08	0. 72

由表 3 的测量结果可知,基于图像的测量结果与人工测量结果具有很好的相关性,最大相对误差仅为 1. 82%,表明提出的测量方法可以准确表征导线压接状态。此外,本文方法平均耗时仅为 1. 58 s,远低于人工测量所需的 16 s,其效率提高 10 倍左右,测量效率提高显著。

为了验证本文方法测量结果的重复性,对 NY-240/30 型压接导线进行 10 次重复试验,测量位置距离耐张线夹端部 90 mm。针对图像测量,对同一放置位姿、光源强度下的压接导线采集 10 幅图像进行测量;针对人工测量,每次测量时都需要重新夹持,测量结果如图 11 所示。通过统计重复测量结果可得,人工测量的平均值为

30.68 mm,而本文方法的平均值为 30.43 mm,测量偏差仅为 0.25 mm,进一步表明基于图像的测量方法具有较高的准确度。同时,本文方法的测量标准差为 0.12 mm,相较于人工测量的 0.30 mm 提高了 60%。因此本文方法具有更好的稳定性和可靠性。

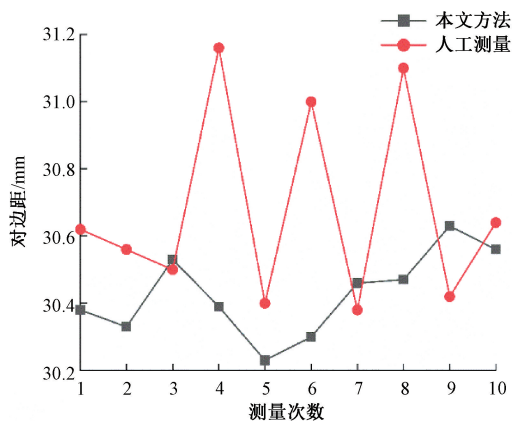


图 11 对边距测量结果

Fig. 11 Measurement results of edge distance

4 结 论

针对现有压接对边距手动测量的不足之处,本文提出了基于图像处理的自动测量方法。该方法不仅可以自动精确获取压接导线区域,而且通过阈值化和二次边缘检测可精确定位亚像素边缘。利用 RANSAC 算法拟合的压接导线边缘能够准确测量对边距。为验证本文方法的有效性,分别对标准图像和实际图像进行试验,结果表明,压接边缘二次定位精确,RANSAC 拟合次数为 10 时,测量效果较好。同时,本文方法适应于不同光照强度,与人工测量对比,图像测量效率提高了 10 倍,最大相对误差仅为 1.82%,测量重复性提高了 60%,具有较好的工程应用价值。

参考文献

[1] 韩增辉. 浅析架空高压输电线路工程设计及施工要点[J]. 石河子科技, 2023(2):41-43.
HAN Z H. Analysis of overhead high-voltage transmission line engineering design and construction [J]. Shihezi Science and Technology, 2023(2):41-43.

[2] 周念成, 兰雪珂, 莫复雪, 等. 计及线路接头温升约束的受端电网转供优化模型[J]. 电工技术学报, 2021,36(15):3237-3249.
ZHOU N CH, LAN X K, MO F X, et al. A power transfer optimization model of receiving-end power systems considering line joint temperature rise constraints [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,

36(15):3237-3249.

[3] 王浩洋, 余快, 龚景阳, 等. 输电线路耐张导线金具压接质量检测方法现状与展望[J]. 电气技术, 2023, 24(4):1-8.
WANG H Y, YU K, GONG J Y, et al. Expectation and current situation of testing methods for crimping quality of transmission line tension conductor fittings [J]. Electrical Engineering, 2023, 24(4):1-8.

[4] 周立宪, 孙涛, 顾建. 大截面导线用耐张线夹压接性能评价[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(S1):149-154.
ZHOU L X, SUN T, GU J. Evaluation of strain clamp crimping property for large cross-section conductor [J]. Proceedings of the SEE, 2020, 40(S1):149-154.

[5] 刘艳梅, 张东禹, 陈震, 等. 输电线路导线自动化压接系统设计[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2021, 38(3):53-60.
LIU Y M, ZHANG D Y, CHEN ZH, et al. A new design of automatic conductor crimping system of transmission line [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2021, 38(3):53-60.

[6] 刘洪正, 丁宝民, 吕念, 等. 基于 PLC 的特高压输变电导线智能压接控制系统设计[J]. 工业设计, 2017, 130(5):136-138.
LIU H ZH, DING B M, LYU N, et al. UHV transmission line based on PLC design of intelligent crimping control system [J]. Industrial Desing, 2017, 130(5):136-138.

[7] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 齿距视觉测量的齿廓图像边缘失真修正算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4):50-57.
ZHI SH, ZHAO W ZH, ZHAO W H, et al. Algorithm of tooth profile image with pitch measurement for edge distortion correction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4):50-57.

[8] 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.

[9] 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, et al. Research on quality inspection of cable conductor based on machine vision [J].

- Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 144-153.
- [10] 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, SHI G H. Design of optical fiber geometric parameter detection algorithm based on machine vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(6): 82-86.
- [11] 胡立文, 柯薇, 梁艺馨, 等. 基于图像灰度曲线特征值的机织物密度测量[J]. 毛纺科技, 2022, 50(2): 124-128.
- HU L W, KE W, LIANG Y X, et al. Density measurement of woven fabric based on characteristic value of image gray curve[J]. Wool Textile Journal, 2022, 50(2): 124-128.
- [12] 金守峰, 胡永彪. 基于图像的织物速度非接触测量方法[J]. 纺织学报, 2013, 34(4): 127-130.
- JIN SH F, HU Y B. Image-based non-contact measurement method of fabric moving speed[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(4): 127-130.
- [13] 薛倩, 罗其俊, 王岳. 基于图像分析的飞机蒙皮裂纹检测[J]. 计算机应用, 2019, 39(7): 2116-2120.
- XUE Q, LUO Q J, WANG Y. Crack detection for aircraft skin based on image analysis[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(7): 2116-2120.
- [14] 咸凯强, 庞静珠, 胡俊. 基于线结构光的核燃料棒表面裂缝尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 155-165.
- XIAN K Q, PANG J ZH, HU J. Surface crack size detection in nuclear fuel rods based on line structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 155-165.
- [15] 张理泽, 沈宽, 张博. 基于改进SIFCM和区域生长的三维CT图像缺陷体积测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 77-85.
- ZHANG L Z, SHEN K, ZHANG B. Defect volume measurement in 3D CT image based on improved SIFCM and region growing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6): 77-85.
- [16] 梅天灿, 肖尧, 毛索颖, 等. 基于线结构光的三维垂线位移测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 189-196.
- MEI T C, XIAO Y, MAO S Y, et al. A three dimension pendulum line displace measurement method based on linear structured light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 189-196.
- [17] 刘铭辉, 车国霖, 张衍, 等. 一种不定长水尺图像水位测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 250-258.
- LIU M H, CHE G L, ZHANG K, et al. A water level measurement method for indefinite water gauge image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 250-258.
- [18] 仲志远. 一种基于图像识别的水位测量算法[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(6): 96-99.
- ZHONG ZH Y. Method of water level data capturing based on video image recognition[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(6): 96-99.
- [19] 张铁英, 白福忠, 宋小燕, 等. 一种直边缘物体宽度的图像测量法[J]. 激光与红外, 2014, 44(2): 222-226.
- ZHANG T Y, BAI F ZH, SONG X Y, et al. Image measuring method for width of straight-edge object[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(2): 222-226.
- [20] 李勇, 余佩健, 欧其罐, 等. 基于机器视觉的不规则形状超薄热管宽度测量方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 46-55.
- LI Y, SHE P J, OU Q G, et al. Machine vision-based approach for width measurement of irregular ultra-thin heat pipe[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(4): 46-55.
- [21] 中华人民共和国电力行业标准. 输变电工程架空导线(800 mm²以下)及地线液压压接工艺规程: DLT 5285-2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- Electric Power Industry Standards of the people's Republic of China. Hydraulic crimping process specification for overhead conductor (below 800 mm²) and ground wire of transmission and transformation project construction: DL/T 5285-2018[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2018.
- [22] YANG G J, HUANG T S. The effect of median filtering on edge location estimation[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 15(3): 224-245.
- [23] 吴凤和. 基于计算机视觉测量技术的图像轮廓提取方法研究[J]. 计量学报, 2007, 28(1): 18-22.
- WU F H. A study on contour extraction method in computer Vision measurement technology[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(1): 18-22.
- [24] 沈同平, 王元茂, 方芳, 等. 基于灰度形态学的图像边缘特征提取算法研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2018, 32(2): 58-61.
- SHEN T P, WANG Y M, FANG F, et al. Edge feature extraction algorithm based on gray morphology[J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science

(Natural Sciences), 2018, 32(2):58-61.

- [25] MARAGOS P. Tutorial on advances in morphological image processing and analysis[J]. Optical Engineering, 1987, 26(7):623-632.
- [26] 杨凯华. 亚像素边缘检测及参数获取[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- YANG K H. Sub-pixel edge detection and parameter acquisition [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [27] ZHANG L, WU X L. An edge-guided image interpolation algorithm via directional filtering and data fusion[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2006, 15(8): 2226-2238.
- [28] 李景泓, 崔亮飞. 一种基于图像处理的测量人眼屈光度的方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(S1):246-253.
- LI J H, CUI L F. Measurement method of eye diopter based on images processing[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(S1):246-253.
- [29] 陆健. 最小二乘法及其应用[J]. 中国西部科技, 2007, 12(19):19-21.
- LU J. The least square method and its application[J]. Science and Technology of West China, 2007, 12(19): 19-21.

作者简介



关华深, 2005 年于东南大学获得硕士学位, 现为广东江门供电局教授级高级工程师, 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: guan56789@126.com

Guan Huashen received his M. Sc. degree from Southeast University in 2005. Now he is a professorial senior engineer from Jiangmen Power Supply Bureau in Guangdong. His main research interests include intelligent detection technology for power equipment, machine vision and image processing technology.



屈盛官(通信作者), 2005 年于华南理工大学获得博士学位, 现为华南理工大学教授。主要研究方向为高性能金属材料的制备、精密成形及其装备制造技术和外骨骼研发。

E-mail: qusg@scut.edu.cn

Qu Shengguan (Corresponding author) received his PhD degree from South China University of Technology in 2005. Now he is a professor from South China University of Technology. His main research interests include the preparation of high-performance metal materials, precision forming, equipment manufacturing technology, and exoskeleton development.