

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106931

# 光伏电池组位置偏差检测方法研究

黄环 傅强

(河海大学机电工程学院 常州 213022)

**摘要:** 针对光伏电池组因位置偏差而无法进行电致发光成像的问题,对电池组位置偏差的机器视觉检测法进行了研究。通过图像预处理获取电池组的边缘特征,并利用亚像素检测法对边缘进行细分从而获得精确的边缘点坐标。再对所得的亚像素边缘点使用迭代重加权最小二乘法(IRLS)进行拟合得到边缘直线的方程。通过对比基本最小二乘法的拟合结果,证明了该算法针对边缘上的离群点具有较强的鲁棒性。而后通过位置偏差的检测实验评估了算法的性能,结果表明此算法的检测误差约 1.792%,且平均检测耗时仅为 224.7 ms,因此能够满足实际应用的需求。最后通过对比实验,验证了该算法相比于传统方法有着更高的精度。

**关键词:** 光伏电池组;机器视觉;位置偏差;亚像素检测;迭代重加权最小二乘法

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Research on detection method of position deviation of photovoltaic module

Huang Huan Fu Qiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** To solve the problem that electroluminescence imaging cannot be performed due to the position deviation of photovoltaic (PV) modules, A machine vision inspection method for PV modules position deviation was studied. The edge features of the cell modules are obtained by image preprocessing, and the sub-pixel edge detection method is used to subdivide the edges to obtain the exact edge point coordinates. The subpixel edge points are then fitted using iterative reweighted least squares (IRLS) to obtain the equation of the edge lines. By comparing the fitting results with the basic least squares method, it is demonstrated that the algorithm is robust to outliers on the edges. The performance of the algorithm was then evaluated through position deviation detection experiments, and the results showed that the detection error of this algorithm is about 1.792%, and the average detection time is only 224.7 ms, so it can meet the requirements of practical applications. Finally, a comparison experiment was conducted to verify the higher accuracy of the algorithm compared with the traditional method.

**Keywords:** photovoltaic cells; machine vision; position deviation; subpixel detection; iterative reweighted least square method

## 0 引言

光伏电池在电致发光(EL)检测过程中,由于其在检测区域中的位置存在一定的偏差,而无法与电极准确接触,导致后续的EL成像过程无法正常进行。因此,光伏电池位置的检测与调整是EL检测前的必要环节。近年来,随着机器视觉的不断发展,该技术在工业领域当中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。相比于人工调整法,机器视觉检测法不仅能提高光伏电池位置偏差的检测速度与精度,而且降低了对于人工的依赖程度。

对于电池片的位置偏差的检测,传统的方法主要有

Hough变换法和最小二乘边缘拟合法等,文献[3]采用Hough变换法检测电池片的边缘与主栅线,从而获取电池片的位置信息以计算偏差值。文献[4]通过最小二乘法拟合电池片的边缘像素坐标,从而获取并计算其位置偏差的信息。然而这些方法所获取的只是整像素级的位置信息,因此其检测精度较低。文献[5-6]使用了基于插值法的亚像素细分算法来提取更精确的边缘点坐标,最后利用Hough变换法遍历亚像素点以获取边缘直线的方程,从而确定电池片的位置偏差。然而,该方法对抗噪声干扰的能力较弱,其鲁棒性与精度也有所不足。

本文以多张电池片串焊成的光伏电池组为检测对象,

由于电池组边缘带有的倒角以及破片缺陷等特征,采用上述方法检测的位置偏差结果带有较大的误差。故本文从边缘拟合的角度对光伏电池组的位置偏差检测方法进行了研究,针对图像处理获取的电池组边缘特征点坐标,使用迭代重加权最小二乘(IRLS)算法,降低了离群特征点引起的误差,同时与 Hough 变换法与基本最小二乘法的检测结果进行了对比实验,结果表明本文算法能够准确地检测出光伏电池组的位置偏差值。

## 1 图像预处理

在位置偏差检测之前,首先要对采集到的电池组图像进行预处理,以增强并提取图像中有效的特征信息。电池组图像的预处理过程主要包括图像滤波、阈值分割与边缘提取等步骤。

### 1.1 图像滤波

由于图像在采集与传输等过程当中难免会引入噪声,同时,电池组图像的表面带有栅线、焊点等无效的干扰因素,因此需要通过滤波的方法对这些因素进行抑制。本文所需提取的主要特征是电池组的边缘信息,因此在进行图像滤波时,应当避免对该特征的质量造成影响。双边滤波法能够在去噪时对图像的边缘起到较好的保护作用<sup>[7,9]</sup>,故本文采用了此方法来对电池组图像进行滤波,电池组原图与双边滤波处理后的结果分别如图 1(a)与(b)所示。

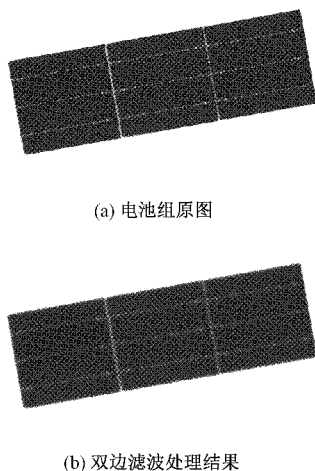


图 1 滤波处理前后对比

对比图 1(a)和(b)可以发现,双边滤波在抑制了图像中无效信息的同时,也对电池组的边界的清晰度进行了保护,从而保证了边缘提取结果的精度。

### 1.2 阈值分割

为了将图像中的电池组与背景进行分离,并提高对图像分析的效率,需要利用阈值分割技术对图像进行二值化。最大类间方差法(Otsu)是一种应用较为广泛的阈值分割法,它根据图像中前景与背景两部分方差的最大值来确定最佳的阈值,从而降低错误分割的概率<sup>[10,12]</sup>。Otsu 法针对不同亮度及对比度图像的分割都能展现出有效且稳定的性

能,因此本文将其用于对电池组图像进行处理。经 Otsu 阈值分割后的结果如图 2 所示,可以看出该方法不仅将电池组与背景进行了良好地分割,同时也去除了电池表面的栅线、焊点等无关特征,极大程度上简化了图像的信息。

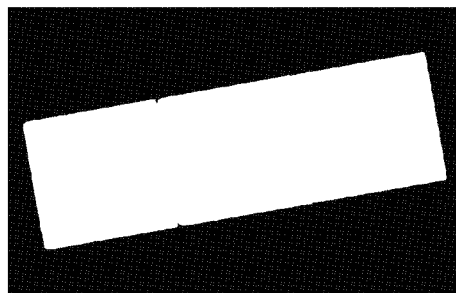


图 2 Otsu 阈值分割结果

### 1.3 电池组边缘提取

阈值分割的结果图中,电池组的边缘附近出现了明显的灰度阶跃,通过计算图像的梯度来捕捉边缘处的灰度阶跃,便可实现对边缘信息的提取。本文使用了 Canny 算子来提取电池组的边缘,该算子最大的特点便是利用了非极大值抑制法和迟滞阈值来准确地提取边缘,相比于其他的边缘检测算子,Canny 算子不仅拥有更强的降噪能力,且其提取的边缘具有更高的精度<sup>[13-15]</sup>。通过 Canny 算子提取的电池组边缘如图 3 所示。由图 3 可以看出 Canny 算子提取到了精细而又完整的电池组边缘,因此有利于后续的亚像素坐标的获取与位置偏差的计算。

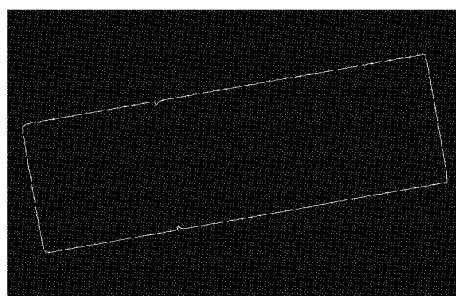


图 3 电池组边缘提取结果

## 2 亚像素检测与边缘直线拟合

经图像预处理后,初步获得了整像素级精度的电池组边缘信息,为了进一步提高边缘点坐标的精度,采用了基于多项式插值的亚像素检测法对上述边缘特征进行细分。该方法计算简单且运行速度较快<sup>[16]</sup>,易于在硬件系统中实现,因此适用于光伏电池组位置偏差的在线检测。

### 2.1 插值法亚像素边缘检测

基于多项式插值的亚像素边缘检测法,其基本原理是对边缘点的灰度值进行插值运算<sup>[17]</sup>,最后根据插值函数求解出边缘梯度的极值点来求解其亚像素坐标。多项式插值函数  $f(x)$  可表示为:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^n y_k \frac{(x-x_i)}{(x_k-x_i)} \quad (1)$$

式中:  $x_k$  为插值基点,  $y_k$  为  $x_k$  对应的函数值。

根据初步定位所得的边缘点坐标  $(m, n)$ , 在其梯度图像  $G(i, j)$  中的水平方向上以 1 pixel 的步长取得 3 点:  $G(m-1, n)$ 、 $G(m, n)$ 、 $G(m+1, n)$ 。以此 3 点的横坐标为插值基点, 并以其梯度幅值作为函数值, 分别代入式(1)以获得多项式插值函数  $f(m)$ 。令  $f(m)$  的导数为 0, 便能计算得到亚像素边缘点的  $x$  坐标。按同样的方式, 即可确定亚像素点的  $y$  坐标。最终推导的亚像素边缘点坐标的表达式为:

$$\begin{cases} x = m + \frac{G(m-1, n) - G(m+1, n)}{2 \cdot [G(m-1, n) - 2G(m, n) + G(m+1, n)]} \\ y = n + \frac{G(m, n-1) - G(m, n+1)}{2 \cdot [G(m, n-1) - 2G(m, n) + G(m, n+1)]} \end{cases} \quad (2)$$

## 2.2 边缘直线拟合

获得电池组边缘点的亚像素坐标后, 需要利用拟合法来获取边缘直线的方程, 以用于计算电池组的位置偏差量。

### 1) 最小二乘法直线拟合

最小二乘法是常用的直线拟合方法之一, 其原理是通过确定一条最优的直线, 使得所有拟合点与该直线上对应点之间距离的平方和最小。亚像素边缘点  $(x_i, y_i)$  与待拟合直线  $y = ax + b$  在  $Y$  方向上距离的平方和  $E$  可以表示为:

$$E = \sum_{i=1}^n [(ax_i + b) - y_i]^2 \quad (3)$$

由式(3)可知, 边缘直线拟合问题的实质便是求解参数  $a$  与  $b$  的最优取值, 使得  $E(a, b) = E_{\min}$ 。因此将式(3)分别对  $a$  和  $b$  进行偏导, 并且令偏导数为 0, 最终得到如下的推导结果:

$$\begin{cases} a = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2} \\ b = \bar{y} - a \cdot \bar{x} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ ,  $\overline{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i$ ,

$$\overline{x^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2。$$

将边缘亚像素点的坐标代入式(4), 便可获得对应的参数, 从而确定边缘直线的方程, 根据所得的直线方程即可计算电池组的位置信息。

然而, 由于电池片自身含有倒角, 同时部分电池片的边缘存在着破片等缺陷, 因此在取得的边缘点集合当中, 包含了一部分离群点, 而这些离群点的存在势必会影响拟合结果的精度, 从而导致最终检测出的位置偏差值不准确。对于含有破片缺陷的电池组, 采用基本最小二乘法对其边缘的拟合结果如图 4 所示。从图 4 中可以发现, 由于破片缺

陷的存在, 使得基本最小二乘法拟合出的直线偏离了电池组的实际边缘, 因此采用该方法检测出的电池组位置偏差量存在着一定的误差。

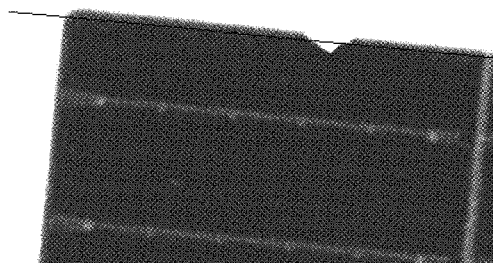


图 4 最小二乘法边缘直线拟合结果

### 2) IRLS 法直线拟合

由于基本最小二乘法针对离群点的鲁棒性较差, 为了降低电池组边缘缺陷引起的检测误差, 本文采用了 IRLS 算法来对电池组的边缘直线进行拟合。

IRLS 算法是在基本最小二乘法的基础上, 对各个拟合点引入了一个权重函数  $\omega$ , 通过降低离群点对应的权重值来减小直线拟合结果的误差<sup>[18]</sup>, 并进行多次迭代最终获得精确的直线方程。为了更好地降低离群点的影响, 使用了 Tukey 函数来设置权重值, 其表达式为:

$$\omega(\delta) = \begin{cases} 0, & |\delta| \geq \tau \\ [1 - (\delta/\tau)^2]^2, & |\delta| < \tau \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为拟合点到前一次拟合所得直线的距离;  $\tau$  为距离阈值, 用于判断拟合点是否离群。

由于边缘缺陷处的点到边缘直线的距离较大, 因此通过阈值  $\tau$  将其判定为离群点, 根据式(5)可知, 在 Tukey 函数作用下, 这些离群点对应的权重值都被设为了 0, 因此其对于拟合结果的影响完全被抑制。

首次迭代时, 令所有亚像素边缘点的权重都为 1, 即利用基本最小二乘法初步拟合获得边缘直线  $y = ax + b$ , 根据各边缘点与该直线的距离, 利用 Tukey 函数计算出相应的权重值  $\omega_i$ 。引入权重值后, 边缘点与直线在  $Y$  方向距离的平方之和为:

$$W = \sum_{i=1}^n \omega_i (ax_i + b - y_i)^2 \quad (6)$$

当  $W$  取最小值时, 所得的  $a, b$  便是当前迭代过程中边缘直线的最佳参数。令  $W$  对  $a$  与  $b$  偏导数为 0, 可获得如下方程:

$$\begin{bmatrix} \sum \omega_i x_i^2 & \sum \omega_i x_i \\ \sum \omega_i x_i & \sum \omega_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \omega_i x_i y_i \\ \sum \omega_i y_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过求解方程式(7)便可得到当前迭代过程的结果  $\xi$ , 并根据该结果进行下一次的迭代拟合过程, 从而不断地提高拟合直线的精度。迭代终止的判定方式为:

$$\|\xi^{(k)} - \xi^{(k-1)}\| \leq \epsilon \quad (8)$$

式中:  $\xi^{(k)}$  和  $\xi^{(k-1)}$  分别为第  $k$  次与第  $k-1$  次的迭代结果;

$\epsilon$  为迭代结果的误差限。当迭代结果满足式(8)的条件时,终止迭代并获得最终的边缘直线方程。

利用 IRLS 算法对图 4 中带缺陷的电池组边缘重新进行直线拟合,得到如图 5 所示的结果。根据图 5 可知,IRLS 算法拟合的直线与实际的边缘基本重合,故该方法很好地解决了离群点导致的拟合直线偏离问题,能够获得较为准确的边缘拟合结果。因此相比于基本最小二乘法,IRLS 算法具有更强的鲁棒性,通过该方法计算得到的电池组位置信息也更为准确。

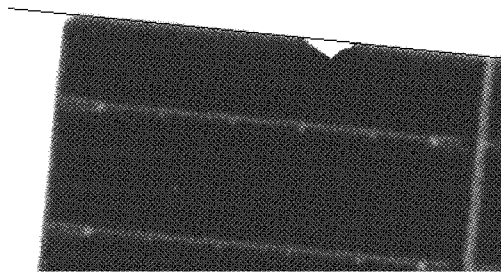


图 5 IRLS 法边缘直线拟合结果

### 3 试验与分析

本文从检测精度与速度两个方面来评估算法的性能。为了测试本文算法的性能,利用产线平台上采集的电池组的图像,进行了实验测试。将对电池组的图像利用本文所研究的算法进行位置偏差检测,并记录每一次检测的结果与耗费的时间。根据电池组位置偏差的人工实测值来计算该算法检测结果的相对误差,并以此对其测量的准确度进行评估。同时将算法检测的平均耗时与实际要求的耗时量进行对比,来评测算法的检测速度是否合格。

通过本文的算法对电池组图像进行处理,拟合得到电池组的 4 条边缘直线,最终的处理结果如图 6 所示。

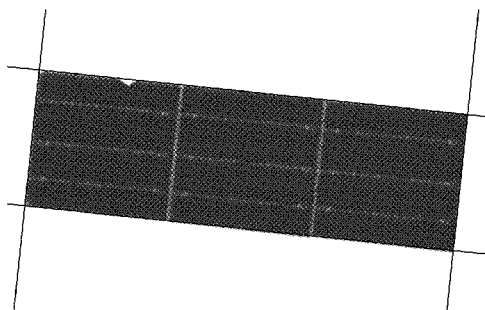


图 6 电池组图像最终处理结果

根据图 6 中边缘直线对应的方程可以计算得到电池组的偏转角与中线点位置。由于实际测量中,难以保证中心点位置测量的准确性,因此本文以电池组的偏转角作为实验的检测量。在实验中,对正常的电池组与带缺陷的电池组分别进行了检测,检测的结果如表 1 所示。

表 1 电池组偏转角检测结果

类型	实测值/ (°)	算法检测 结果/(°)	相对误差/ %	检测时间/ ms
正常	11.5	11.379	1.052	192
正常	23.7	24.014	1.325	185
正常	8.3	8.213	1.048	194
正常	16.4	16.554	0.939	203
正常	-20.5	-20.284	1.064	201
正常	9.0	9.076	0.844	187
带缺陷	-22.3	-21.778	2.340	246
带缺陷	-13.5	-12.620	2.812	261
带缺陷	25.7	25.115	2.276	268
带缺陷	31.4	30.454	3.013	249
带缺陷	-18.5	-18.033	2.524	257
带缺陷	9.3	9.511	2.269	253

实际检测中要求对电池组位置偏差的测量误差在 5% 以内,同时要求检测的速度为 500 ms/片。根据表 1 中实验测试的结果可知,对于正常以及带缺陷的电池片,本文算法测量的相对误差平均值分别为 1.045% 和 2.539%,检测误差和耗时量的总平均值分为 1.792% 和 224.7 ms,故该算法的测量精度与速度都能够满足实际的要求。

为了进一步验证本文算法在检测精度上的性能,分别采用基本最小二乘法与 Hough 变换法对上述两类电池组的偏转角进行了检测,同时记录下这两种方法对应的测量误差,最后与本文算法的检测误差进行对比。3 种方法检测误差的对比结果如表 2 所示。

表 2 不同方法检测误差对比结果

检测方法	平均误差/%	
	正常电池组	带缺陷电池组
最小二乘法	3.103	5.335
Hough 变换法	3.826	5.048
本文算法	1.045	2.539

根据表 2 的对比结果可知,传统的 Hough 变换法与最小二乘法针对带缺陷电池组的检测误差较大,不能满足实际检测的要求。而本文算法针对正常以及带缺陷电池组的偏转角检测误差,比起最小二乘法与 Hough 变换法都更低,因此本文算法相比于传统的方法有着更高的精度。

### 4 结 论

本文利用了视觉与图像处理的方法来检测光伏电池组的位置偏差。针对图像预处理与亚像素检测法获取的电池组边缘点坐标,使用 IRLS 算法进行直线拟合,从而消除了由于边缘上的离群特征所导致的误差,并能得到较为准确的边缘直线方程。在电池组的位置偏差检测实验中,本文算法在检测精度与速度方面都体现出了良好的性能,相比

于传统检测方式中所用的基本最小二乘法与 Hough 变换法,该算法的检测精度有了较大的提升。

由于本文在使用 IRLS 法进行直线拟合时,只考虑了拟合点在 Y 坐标上的误差,因此在后续研究中,还需对该方法进行改进,更加充分地考虑拟合点坐标的误差,从而进一步提升此算法的精度。

### 参考文献

- [1] 尹仕斌,任永杰,刘涛,等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报,2018,38(8):11-22.
- [2] 朱云,凌志刚,张雨强. 机器视觉技术研究进展及展望[J]. 图学学报,2020,41(6):871-890.
- [3] 居玲. 基于机器视觉的太阳能电池片位置误差检测[J]. 机械制造与自动化,2012,41(5):166-167,178.
- [4] 白生辉. 晶硅太阳能电池电致发光测试系统关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [5] 都胡平,刘光宇,薛安克. 基于机器视觉的光伏电池位置检测方法[J]. 工业控制计算机,2019,32(9):19-20,23.
- [6] 朱亚萍,刘康. 基于视觉的太阳能电池片位置检测[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版),2018,38(1):65-69.
- [7] 张雪利. 双边滤波加速研究及其应用[D]. 南京:南京理工大学,2019.
- [8] GAVASKAR R G, CHAUDHURY K N. Fast adaptive bilateral filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(2):779-790.
- [9] 童胜杰,江明,焦传佳. 一种改进工件边缘检测方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(1):128-134.
- [10] 孙俊,宋佳,武小红,等. 基于改进 Otsu 算法的生菜叶片图像分割方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2018,39(2):179-184.
- [11] CHEN B, ZHANG X, WANG R, et al. Detect concrete cracks based on OTSU algorithm with differential image[J]. The Journal of Engineering, 2019,2019(23):9088-9091.
- [12] SUNDARAM R, TAYARAMAN P, RANGARAJAN R, et al. Automated optic papilla segmentation approach using normalized Otsu thresholding [J]. Journal of Medical Imaging and Health Informatics, 2019, 9(7):1346-1353.
- [13] 刘端飞,单宝明. 改进的 Canny 算法在不锈钢板焊缝识别中的应用[J]. 电子测量技术,2019,42(14):127-130.
- [14] MITTAL M, VERMA A, KAUR I, et al. An efficient edge detection approach to provide better edge connectivity for image analysis [J]. IEEE Access, 2019 (7):33240-33255.
- [15] XU Q. A modified Canny edge detector based on weighted least squares [J]. Computational Statistics, 2021,36(6):641-659.
- [16] 陈亚军,丁圆圆,范彩霞,等. 基于图像分析的螺纹钢尺寸测量方法[J]. 传感技术学报,2021,34(3):311-318.
- [17] 包昊菁. 基于机器视觉的链轮径向跳动测量技术研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [18] SEO S. Image denoising and refinement based on an iteratively reweighted least squares filter [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2020,24(3):943-953.

### 作者简介

黄环,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉与图像处理。

E-mail:1239297827@qq.com