

文章编号: 1672-2892(2010)05-0539-05

基于近红外图像的硅太阳能电池故障检测方法

董 栋, 陈光梦

(复旦大学 电子工程系, 上海 200433)

摘 要: 太阳能光伏发电是现今具有远大发展前景的新能源领域, 先进高效的太阳能电池制造产业对于太阳能光伏发电具有重要意义, 因此生产制造过程中太阳能电池探伤技术具有巨大的应用价值。当前新发展出的利用近红外图像对太阳能电池探伤的技术, 对于检测太阳能电池故障比较有效, 但当前工业界所使用的后期处理较为简单。通过对太阳能电池近红外图像作一定图像处理, 可以较为快捷地分辨出太阳能电池的碎片、隐裂、断栅等故障。相对于已有的后期处理方法, 可检测的故障类型较为全面, 故障检测效率有较大提高, 可以显著降低太阳能电池生产中的太阳能电池故障率。

关键词: 太阳能电池; 近红外图像; 图像处理; 故障检测

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

A method of silicon solar cells defect detection based on near-infrared images

DONG Dong, CHEN Guang-meng

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Solar power is now the new energy which has huge development prospects, the advanced and efficient solar cell producing industry has great significance for solar power, so solar cells defect detection technology in the process of producing solar cell has huge application value. The new technology of using near-infrared imaging for solar cells defect detection shows high efficiency, however, the current industry only uses a relatively simple post-processing. Based on the near-infrared images of solar cell for some image processing, the defects of solar cells, such as debris, cracks, broken gate, etc., can be identified more quickly. Compared with the traditional methods, this new method can identify more detection fault types with higher efficiency, therefore can significantly reduce the failure in the production of solar cell.

Key words: solar cells; near-infrared images; image processing; defect detection

太阳能发电是近期发展起来的一种具有巨大潜力的新能源技术, 而太阳能电池是其中的核心。当电池单元出现各种问题或故障时, 就会大大减少其使用价值^[1], 因此太阳能电池故障检测的方法具有很大的实用价值。当前工业界对于太阳能电池的故障检测方法基本上还是生产线上的目视检测以及伏安特性曲线的检测^[2]。尽管已有文献报道了远红外图像处理^[3-4]、可见光图像处理^[5]等方法, 但这些方法都有检测速度慢或检测故障类型少等不足。近红外图像法检测太阳能电池是近年来新发展的一种快捷的太阳能电池检测手段, 其原理是利用硅太阳能电池在通电时发出波长 1 150 nm 的红外线, 利用近红外摄像方法得到太阳能电池图像。由于此近红外图像能够包含太阳能电池的全部细节, 故可据此探测太阳能电池故障情况。相比传统的方法, 它具有可检测的故障类型全面、检测速度快等优点。本文工作是使用图像识别的手段分析太阳能电池的近红外图像, 可以识别太阳能电池的碎片、隐裂、断栅、内阻差异等不同故障, 使太阳能电池的检测效率有了较大的提高。

1 太阳能电池常见故障和近红外检测法原理

在太阳能电池生产和组装过程中, 常见故障主要有碎片、隐裂、断栅等几种。这几种故障的存在降低了太阳能电池的发电效率与使用寿命, 造成了较大的经济损失。

由于硅晶片十分脆弱, 在受到外部应力等作用时, 会导致太阳能电池碎裂, 其裂纹分布方向与硅成晶方向有

关。存在碎片的太阳能电池由于其有效面积下降,导致发电功率降低。当碎裂晶片表面的导电栅未断裂时,表现为隐裂故障。此故障难以用肉眼直接观察到,也不会出现大面积的断电,但在使用过程中可能逐渐劣化成碎片,所以是一种很值得注意的故障。

在太阳能电池中,主导电栅为2条平行导体,导电栅则由低熔点金属印刷于硅片表面并垂直于主导电栅,将电池上硅晶片连通,并将所发电能导向主导电栅。若在印刷导电栅的过程中出现丝网堵塞等原因,则可能出现导电栅断裂即断栅故障,该故障由于太阳能电池导电栅部分开路而导致发电功率降低。

另外,在用近红外图像法检测太阳能电池组件时,可以发现同一个组件内不同电池单元的平均发光强度有时会出现明显的差异。这种差异可以认为是内阻差异。由于构成太阳能电池组件的电池单元一般都是串联应用的,所以具有内阻差异的太阳能电池串联可能引起整体发电效率降低。

传统检测方法中,目视检测只能检测碎片和断栅故障。伏安特性曲线的检测能够检测碎片、断栅和内阻差异等引起的发电效率下降,但是无法确定故障类型,在检测由多个电池单元构成的电池组件时也无法对故障单元定位。远红外检测^[3]对于碎片故障有较好效果,但由于图像分辨力的限制,对于其他故障基本无法检测。可见光图像处理^[5]对于碎片、断栅故障有较好效果,而对于隐裂故障则基本无法检测。文献[6]提出的近红外行扫描方法能够检测碎片、隐裂和断栅故障,但是无法将这3种故障区分开来。本文则致力于将这几种太阳能电池主要故障分类检测出来(图1为使用近红外 CCD 拍摄的太阳能电池组照片)。

硅太阳能电池是一个半导体 PN 结。当在 PN 结上施加正向电压时,由于电子在导带和价带之间的跃迁,会发射出一定频率的光波,其频率由半导体材料的禁带宽度决定。在硅太阳能电池中,其发射光波的波长为 1 150 nm 左右。近红外图像检测法是在硅太阳能电池上流过一定的正向电流,然后用近红外 CCD 照相机拍摄其 1 150 nm 波长的发射图像。由于 CCD 照相机具有很高的分辨力,所以得到的近红外太阳能电池图像十分清晰。当太阳能电池单元出现故障时,其近红外图像会出现各种与故障对应的异常图形。

图2是一些硅太阳能电池单元的典型远红外图像。碎片故障显示为电池单元内有不规则阴影,阴影内部与外部有较大的灰度差,边缘清晰;隐裂故障显示为电池单元内的细暗线;断栅故障则在图像上显示为断裂的导电栅部分的灰度较低。

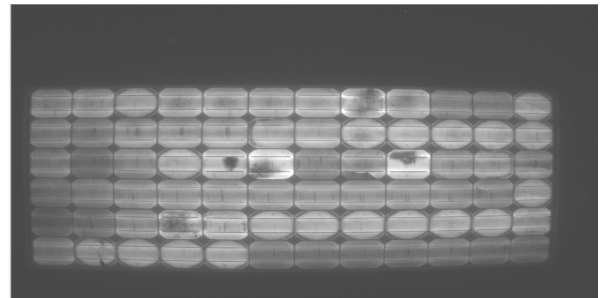


Fig.1 Silicon solar cell module of the near infrared image
图1 硅太阳能电池组件的近红外图像

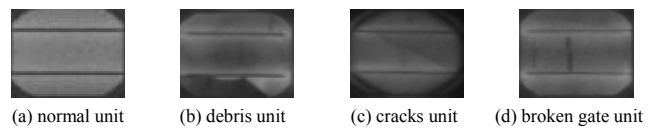


Fig.2 Typical near infrared image of silicon solar battery unit
图2 硅太阳能电池单元的典型近红外图像

2 故障检测算法

故障图像识别的算法流程为:1)对整幅图像的几何失真校正;2)对图像的边缘增强;3)使用模板进行电池单元的提取;4)使用边缘提取、方向滤波等方法对电池单元图像进行处理,并根据碎片、隐裂、断栅等故障不同的图像特征进行故障识别和定位;5)通过比较电池单元的平均亮度,定位存在内阻差异的电池单元;6)重复步骤3)~5),直至整块电池板上的所有电池单元识别完毕。由于步骤5)极为简单,下文不再对此进行阐述。

2.1 几何失真校正

由于拍摄太阳能电池红外图片时主要使用广角镜头,图片一般都存在桶形失真。本文在处理桶形失真时采用了多项式地址修正法^[7],计算完成后做 3×3 的中值滤波以消除空洞。

另外,在处理桶形失真时,图像往往会造成拉伸变形,为了后续步骤取得较好的结果,需要对图像对应的拉伸进行变形,使用对应点法^[8]来完成拉伸变换的校正。

2.2 电池单元的提取

实际太阳能电池板是由多个电池单元所组成。在故障分析中,要将电池单元分别取出。为了简化计算,本文中使用 SOBEL 滤波算子^[8]对图像进行边缘提取,其过程为:

$$S1 = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}, S2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

掩模 $S1$ 和 $S2$ 为 SOBEL 算子，由 $S1$ 和 $S2$ 对于原图像进行滤波得到的结果分别为 $G1$ 和 $G2$ ，最终的滤波结果为 $g = |G1| + |G2|$ 。经过滤波，电池单元的边缘得到增强。

由于构成太阳能电池板的电池单元通常只有圆形、正方形、准八角形等几种，所以滤波后的电池单元提取可以采用模板相关的方法进行。分割使用的模板可以根据太阳能电池的实际情况预先设定。本文分割使用的模板为准八角形。

设图 3 图像在空间域上为 $f(x,y)$ ，模板图像为 $h(x,y)$ ，使用傅里叶变换，转换为频率域上的 $F(u,v)$ 和 $H(u,v)$ ：

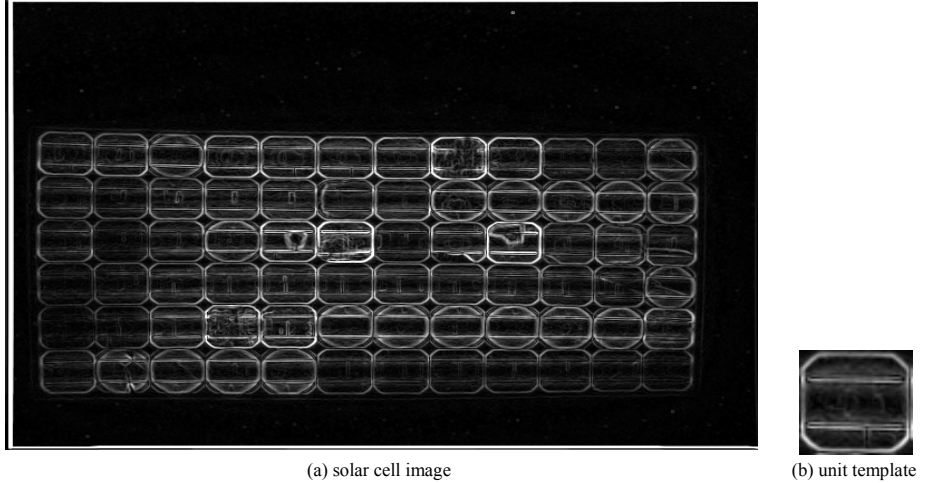


Fig.3 Edge operator enhanced image using the filter SOBEL
图 3 使用 SOBEL 算子滤波得到的电池边缘增强图像

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)}$$

$$H(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} h(x,y) e^{-j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)} \quad (2)$$

使用 $G(u,v) = F(u,v)H^*(u,v)$ 实现相关操作，将 $G(u,v)$ 反变换到空间域 $g(x,y)$ 上，其为原型图像和模板图像的互相关，在电池单元处得到最大响应，从而提取出电池单元。

2.3 碎片故障检测

具有碎片故障的太阳能电池单元图像见图 4(a)，阴影部分即为受外力破坏的碎片。阴影内部灰度值明显小于外部，且阴影边界过渡明显，阴影内部灰度分布较为均匀。



Fig.4 Debris fault detection process
图 4 碎片故障的检测过程

电池单元经边缘增强后的图像见图 4(b)。接下来使用文献[8]提出的边缘提取算法，对图像中所有像素及其相邻像素的灰度值取样，并进行分类，过程如下：

1) 高斯滤波。

2) 水平和垂直方向的每一行和每一列进行剖面分析。当行或列中出现一对连续的极值点(极大/极小值点对)，且这一对极值点之间未出现平坦点，则可以认为该对极值点之间为单调区间。当单调区间的梯度大于阈值 g ，同时单调区间长度小于阈值 L ，则可以认为单调区间中含边缘点。在本文中，根据经验取 g 在 256 位灰度下为 12， L 为 7。

3) 合并水平和垂直方向所检测出来的边缘点，得到边缘图像见图 4(c)，可以明显地看到整幅边缘图像分为 2 个分割的部分。

4) 为了寻找大碎片形成的连续边界，使用形态学^[9]寻找连续边缘的方法，进行封闭边缘提取，结果见图 4(d)。

5) 与无碎片的电池单元边缘图像(图 4(e))比较，以其中封闭区域的面积来判断是否存在碎片故障。

6) 为了与大面积断栅故障相区分，使用 SOBEL 纵向掩模对图 4(b)进行处理，图 4(f)为碎片故障的纵向梯度检测的响应。判断标准见 2.4 节。

2.4 断栅故障检测

由于近红外图像拍摄时一般以主导电栅方向为水平方向,所以断栅在近红外图像上一般为垂直方向的阴影见图 5(a),它的边缘增强图像见图 5(b)。使用文献[9]提出的边缘提取算法提取边缘,得到图 5(c)图像。再对图像使用 SOBEL 纵向掩模滤波得到图 5(d),掩模算子为:

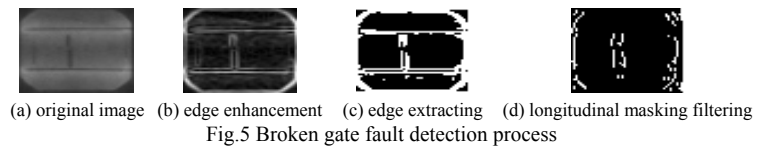


Fig.5 Broken gate fault detection process

图5 断栅故障的检测过程

$$S = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中心部分的断栅故障表现较为明显。在自动检测时忽略电池单元两边边缘的纵向纹理,检测到连续垂直纹理长度超过阈值 L ,即可判定存在断栅。本文中阈值 L 根据经验取为 15 个像素点(电池单元图像为 50×50 大小)。

一般情况下断栅都是单独存在,表现为上面所示细条纹。但在某些情况下断栅大面积出现,见图 6(a)。由于断栅大面积出现后连为一片,其边缘增强结果为图 6(b),容易检测为碎片故障,因此需要特别处理。

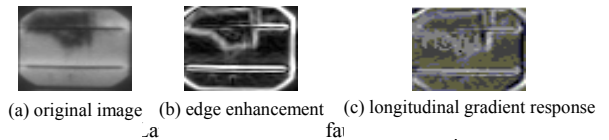


图6 大面积断栅故障的检测过程

大面积断栅与碎片的主要区别是沿着导电栅方向上的图像灰度梯度存在明显差异。由于断栅处硅片并未碎裂,故流过 PN 结的电流是逐渐变化的,图像灰度梯度较小,而碎片故障在沿着导电栅方向上的图像灰度梯度非常陡峭,故可对疑似大片断栅故障的图片提取沿着导电栅方向(在本文中为垂直方向)上的图像灰度梯度,以此判断故障类型。

使用式(3)所示的 SOBEL 纵向掩模算子对边缘增强图像图 6(b)进行处理,其纵向梯度响应为图 6(c)。比较 SOBEL 纵向掩模处理前后的图像,大面积断栅故障的为图 6(b)和图 6(c),碎片故障的为图 4(b)和图 4(f),可以发现两者存在显著差别。具体判别过程如下:

对纵向梯度处理前后的两幅电池单元图像逐点比较求差值,求得整幅图像的差值平均值 D 。以阈值 T 为界限,当 $D < T$ 时认为是碎片, $D > T$ 时认为是大面积断栅。本文中阈值 T 取经验值 39(电池单元图像为 256 位灰度图)。

2.5 隐裂故障检测

隐裂故障在近红外图像上表现为很细的线状条纹,条纹的两侧没有灰度差值或灰度差很小,见图 7(a)。条纹的分布方向与本批次太阳能电池硅晶片的成品方向有关,因此隐裂细条纹往往与主导电栅成一定角度而非水平或垂直方向,其角度在同一批次电池中都相同,因此可以作为给定条件使用。在本文例子中,电池隐裂方向与主导电栅成近似 -45° 。



Fig.7 Crack fault detection process

图7 隐裂故障的检测过程

隐裂故障图像边缘加强后为图 7(b)。文献[8]中的边缘提取方法对于水平和垂直方向上的边缘有较好效果,而对于其他方向上的边缘效果较差。为了加强在 -45° 上的边缘,使用 CANNY 滤波法^[10]边缘提取结果为图 7(c),太阳能电池中部的斜向裂纹边缘较为明显。

对图像使用 SOBEL 算子进行 -45° 滤波,结果为图 7(d),掩模算子为:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

图像有较大的噪声,使用平均滤波器降噪,并使用 3×3 单位阵进行膨胀后的结果为图 7(e),图像中心隐裂条纹十分明显。检测时,忽略右上和左下角纹理,只对中心的连续条纹进行识别,计算其像素数目,当像素数目大于阈值 T ,可以据此分辨出隐裂故障是否存在,在本文中 T 取经验值 17(电池单元图像为 50×50 大小)。

3 实验结果分析

实验中选取了3块含有各种典型缺陷的太阳能电池板进行了故障检测,其中每块太阳能电池板含72个电池单元,总共216个可检测电池单元。

在获取它们的近红外图像后,首先对图像以传统的目视检测方式进行故障数量统计以及定位,然后用本文的算法进行检测。检测结果见表1。

表1 故障检测结果
Table 1 Fault detection results

| fault type | debris unit | crack fault | broken gate fault | internal resistance fault |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------------|---------------------------|
| visual testing | 5 | 25 | 103 | 15 |
| the method in this paper | 5 | 21 | 97 | 15 |
| relevance ratio | 100% | 84% | 94% | 100% |

最后的实验结果表明:本文提出的方法对于碎片故障检测率最高,对于隐裂故障和断栅故障的检测效果稍差。然而考虑到现有的检测方法^[2-6]中,无论在检测效率还是故障分类、故障定位等方面,均无法达到本文的检测水平,所以本文的方法具有很大的实用价值。

4 结论

本文提出了一种新的基于近红外图像检测技术的太阳能电池故障识别方法,可以全面检测太阳能电池的碎片、隐裂和断栅故障。相对于传统检测方法,具有算法简单、检测故障全面、检测效率高优点,可以在实际的太阳能电池板生产线上使用。

参考文献:

- [1] Gasner S, Anspaugh B, Francis R, et al. The Effect of Low Energy Protons on Silicon Solar Cells with Simulated Coverglass Cracks[C]// Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Second IEEE 1991. Las Vegas:[s.n.], 1991,2:1457-1462.
- [2] 崔容强,王辰. 太阳能电池检测系统基本原理[J]. 阳光能源, 2008(3):36-40.
- [3] Breitenstein O, Rakotoniaina J P, Neve S, et al. Lock-in thermography investigation of shunts in screen-printed and PERL solar cells[C]// Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the 29th IEEE 2002. Piscataway:[s.n.], 2002:430-433.
- [4] Borg N J C M van der, Burgers A R. Thermography: Quality Control for Module Manufacturing[C]// The 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka:[s.n.], 2003,2:1946-1947.
- [5] Fu Zhuang, Zhao Yanzheng, Liu Yang, et al. Solar Cell Crack Inspection by Image Processing[C]// 2004 International Conference on Business of Electronic Product Reliability and Liability. New York: Cambridge University Press, 2004:77-80.
- [6] Takahashi Y, Kaji Y, Ogane A, et al. "Luminoscopy"-Novel Tool for the Diagnosis of Crystalline Silicon solar cells and Modules Utilizing Electroluminescence[C]// Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference. Waikoloa:[s.n.], 2006:924-927.
- [7] 王雷,郭健,陈英革,等. 图像桶形失真的一种校正方法[J]. 常熟理工学院学报:自然科学版, 2007,21(4):104-107.
- [8] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 2版. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [9] 阎平,江万寿. 一种基于灰度剖面分析的边缘提取新算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2005,30(6):518-520.
- [10] Canny John. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,PAMI-8(6):679-698.

作者简介:



董 栋(1982-),男,湖北省十堰市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电路与系统.email: 062021035@fudan.edu.cn.

陈光梦(1950-),男,上海市人,教授,正高级讲师,主要研究方向为模拟与数字电路系统、工业控制与自动化、高频电路系统。