

基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测研究 现状及展望

钱晓亮¹, 张鹤庆¹, 陈永信², 曾黎¹, 刁智华¹, 刘玉翠¹, 杨存祥¹

(1. 郑州轻工业学院电气信息工程学院, 郑州 450002; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 鉴于基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测方法具有操作简便、检测精度高的优势, 对此类方法所涉及的各个环节进行了综述。首先, 对太阳能电池片表面的各种成像方式和常见缺陷类型进行了归纳总结; 其次, 对现有的检测方法按照数学建模思路的不同进行了分类介绍和对比分析; 最后, 对内容进行了小结并对太阳能电池片表面缺陷检测方法的后续研究进行了展望。可以看出: 基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测方法已经取得了较大的发展, 但在特征提取算法设计方面仍有改进空间, 如基于深度神经网络的特征提取算法。

关键词: 太阳能电池片; 机器视觉; 表面缺陷; 成像

中图分类号: TP 391.4

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)01-0076-10

doi: 10.11936/bjutxb2016040063

Research Development and Prospect of Solar Cells Surface Defects Detection Based on Machine Vision

QIAN Xiaoliang¹, ZHANG Heqing¹, CHEN Yongxin², ZENG Li¹, DIAO Zhihua¹, LIU Yucui¹, YANG Cunxiang¹

(1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. Xuji Group Corporation, Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: Considering the advantages of simple operation and high detecting accuracy, all aspects involved in solar cell surface defect detection methods based on machine vision were reviewed in this paper. First of all, the various imaging techniques and common defect types of solar cells surface were summarized. Secondly, the existing detection methods were introduced and compared with each other according to the different idea of mathematical modeling. Finally, a brief summary of this article and perspective of future research are presented. It can be concluded that the solar cell surface defect detection methods based on machine vision have made great progress. However, there is still room for improvement in algorithm design of feature extraction, such as feature extraction algorithm based on deep neural networks.

Key words: solar cell; machine vision; surface defect; imaging

收稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61501407); 河南省高等学校重点科研项目(15A413006); 河南省科技厅重点科技攻关项目(132102110150)

作者简介: 钱晓亮(1982—), 男, 副教授, 主要从事模式识别与机器学习方面的研究, E-mail: qxl_sunshine@163.com

通信作者: 杨存祥(1966—), 男, 教授, 主要从事电气测量、智能控制和电气故障诊断方面的研究, E-mail: yangzha@126.com

社会的不断发展,对能源的需求有增无减,促使不可再生能源逐渐枯竭。同时由于人类对能源的不合理使用导致环境问题不断恶化,其中全球气候变暖问题尤为突出,已经严重威胁到人类的生存和发展。太阳能光伏发电由于清洁无污染、安全可靠、安装方便,且可以很好地与建筑物结合^[1],目前已成为发展新能源的重要方向之一。将太阳能转换成电能需要太阳能光伏阵列,太阳能光伏阵列由众多太阳能电池片组成,而太阳能电池片在生产过程中,其表面不可避免地会出现一些细微的缺陷,这将严重影响太阳能电池片发电的效率和使用寿命^[2-3],因此必须对太阳能电池片表面进行缺陷检测,并将含有缺陷的电池片剔除。

按照太阳能电池片制作材料的不同,可以分为单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池和非晶硅太阳能电池。根据检测手段的不同,结合电池片材质的特点,现有的太阳能电池片表面缺陷检测方法基本可以分为2种类型:人工物理方法和机器视觉方法。采用人工物理方法的代表性工作主要有:Tsuzuki等^[4]利用声波进行裂纹的检测,该方法使太阳能电池片产生适当共振继而产生声波,然后分析其声波的频率与标准频率(正常太阳能电池片)之间的差异,进而判断其表面是否存在裂纹;Esquivel^[5]利用增强对比度的照明方式检测裂纹,该方法通过增大太阳能电池片表面的光照强度,使裂痕和瑕疵可以反射到另一个平面,若出现图像变形,即可判断瑕疵的存在;Sawyer等^[6]利用激光扫描技术进行检测,该方法通过显示激光扫描正向偏置的晶硅中电阻的连续性,如果裂纹存在则会出现电阻的不连续性;Chen等^[7]基于噪声方式进行检测,该方法利用晶硅太阳能电池片的低频噪声与可靠性相关的性质,通过对比缺陷太阳能电池片的噪声和其非缺陷噪声的差异来判断是否有缺陷;Belyaev等^[8]、Byelyayev^[9]、Ostapenko等^[20]、Dallas等^[11]利用共振超声振动(resonance ultrasonic vibration, RUV)方法检测,该方法基于纵向超声波共振,根据晶片的频率响应曲线的偏差进行实时分析,并通过有限元分析确认裂纹的存在;Zhang等^[12]利用光学深能级瞬态谱分析(optical deep-level transient spectroscopy, ODLTS)方法检测,该方法用10万、13万、17万eV低能量的质子对3个样品进行照射,然后对几个水平照射的图像进行观察并计算模拟,继而判断裂纹的存在性;Duenas等^[2]和Istrov等^[3]利用电路相关理论,通过分析硅片中的多数载流子和

少数载流子的数量造成外部电压的不同,来判断太阳能电池片缺陷的存在性;Wen等^[13]利用电子散斑干涉分析法检测,采用电子散斑干涉图去绘制由热引起的样品平面变形,通过对比背景的散斑图即可判断裂纹的存在性。

基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测方法与上述检测方法相比有明显优势,它可实现实时监测、精准判断、检测装置一体化,凭借方便快捷的优势,此类方法已成为太阳能电池片表面缺陷检测的主要发展方向之一。

1 太阳能电池片表面成像方式

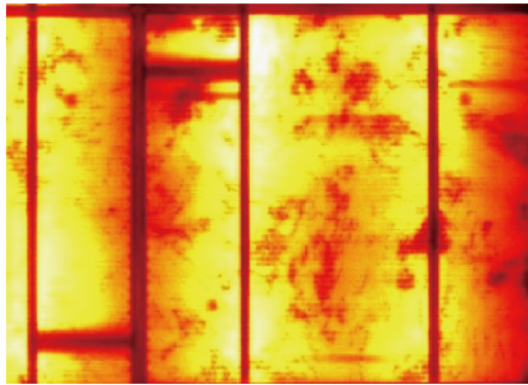
在计算机视觉的各类任务中,最常见的成像方式无疑是可见光成像,太阳能电池片表面常用的成像方式也是可见光成像,此处不再赘述。除此以外,常见的成像方式还有电致发光、光致发光和热红外成像,图1所示为3种成像方式的示例。下面分别进行介绍。

Fuyuki等^[14]、Xu等^[15]、Tsai等^[16]、Takahashi等^[17]、Gabor等^[18]和Chaturvedi等^[19]采用电致发光成像。在正向偏置条件下,太阳能电池如发光二极管一样,发出近红外光(波长为1000~1200nm),其发光强度除了正比于输入电流外,也和缺陷的密度有关:缺陷少的部分,发光强度较强;缺陷多的部分,发光强度较弱。因此通过观察电致发光图像,就可以检测产品中的缺陷,如图1(a)所示。

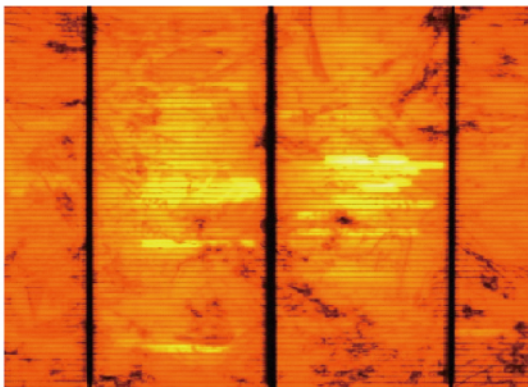
Demant等^[20]、Olsen等^[21]、Sun等^[22]采用光致发光成像。利用激光提供一定能量的光子,硅片处于基态的电子会吸收这些光子进入激发态,然后再回到基态,同时发出红外光的荧光。硅片中的缺陷区域由于少数载流子密度较小,发出的红外光荧光的强度也较弱,反之,无缺陷区域发出的荧光较强。因此,分析光致发光图像亮度的强弱即可检测产品中缺陷的位置,如图1(b)所示。

Chen等^[23]、Chiou等^[24]、Brooks等^[25]、Kim等^[26]、Mahdavi-pour等^[27]、Ko等^[28]、Teo等^[29]、董栋等^[30]和王楠等^[31]采用近红外光穿透成像。利用可调曝光单元的近红外光源对太阳能电池片进行照射,当红外线通过裂缝时会产生光散射,即在采集到的图像中有明暗对比,太阳能电池片中裂纹部分和边界会产生不同的散射,因此可以用来检测缺陷的存在性,如图1(c)所示。

Minkevicius等^[32]和Jen等^[33]采用太赫兹光谱成像。首先泵浦激光束通过膜束分离器分为2束



(a) 电致发光图像



(b) 光致发光图像

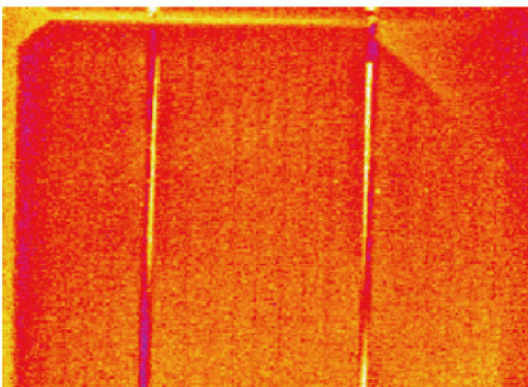
(c) 红外热成像^[31]

图1 太阳能电池的3种成像图像
Fig. 1 Three types of images of solar cells

光. 一类经由低延时线, 然后通过镜面反射引入探测器; 另一类经由快速延时线, 通过抛物型反射面集中在太阳能电池片, 其中太赫兹检测器的输出正比于太赫兹脉冲在短时间内产生的电场强度. 利用傅里叶变换得到太赫兹辐射电场波的幅频和相位图, 通过比较待检测电池片和无缺陷电池片的幅频和相位图来判断是否存在缺陷.

2 太阳能电池片表面缺陷类型

太阳能电池片在生产加工过程中, 可能由于操作不当造成太阳能电池片表面出现断栅、缺角、色差、脏污、裂纹等缺陷^[34], 从而使得太阳能电池片的使用寿命减少, 同时影响其工作效率^[35]. 本节将太阳能电池片表面缺陷的种类、视觉效果、造成原因进行总结, 如表1所示. 此外, 图2还展示了太阳能电池片表面较为常见的缺角、斑点、裂痕和隐裂缺陷.

3 基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测方法

基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测方法的大致流程可以简单概括为: 对太阳能电池片表面进行成像, 获取电池片表面基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测方法的大致流程可以简单概括为: 对太阳能电池片表面进行成像, 获取电池片表面图像数据, 然后采用各种机器视觉的方法检测图像的缺陷区域. 图3所示为基于机器视觉进行太阳能电池片表面缺陷的一个实例.

根据数学建模思路的不同, 现有基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测方法大致可分为: 基于梯度特征的检测方法、基于聚类的检测方法、基于频域分析的检测方法、基于矩阵分解的检测方法和基于机器学习的检测方法. 下面将对各类方法进行介绍和简要的对比分析.

表1 太阳能电池片表面常见缺陷^[36]

Table 1 Common defects of solar cell surface

缺陷类别	缺陷名称	视觉特点	成因
形状缺陷	缺角、破损、裂纹、断栅	与标准片相比, 形状上有缺损或者多余部分	误切割、碰撞、生产失误
颜色缺陷	颜色异常、不均匀, 边角区域颜色异常	与标准片相比, 大部分区域存在着颜色异常或者不均匀	镀膜时化学反应不均匀
纹理缺陷	斑点、指纹、轮印	与标准片相比, 存在过亮或者过暗区域, 有斑点状或指纹、轮印	人工操作不当、机器压力过大

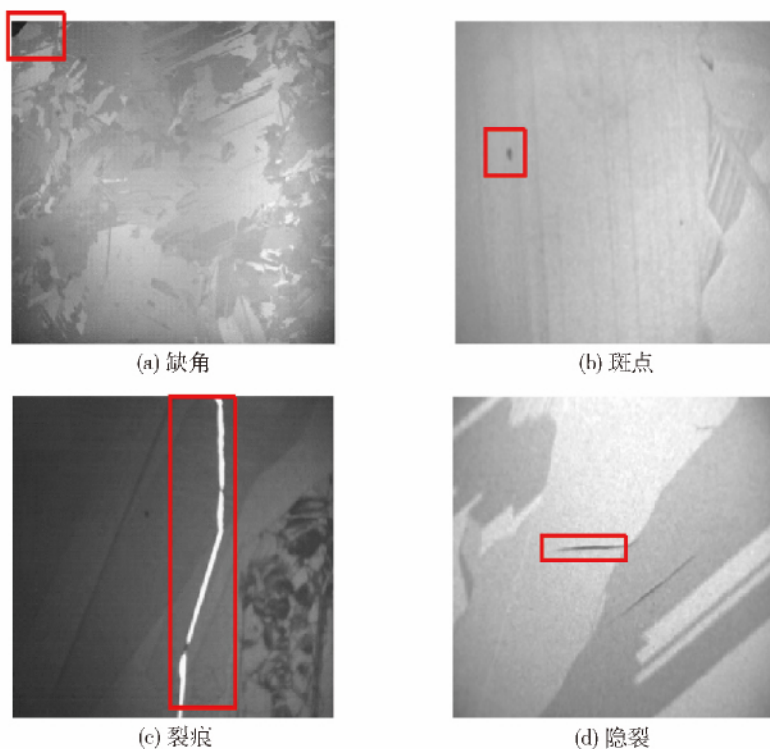


图 2 近红外成像各类缺陷示例^[31]

Fig. 2 Illustrations of various defects based on near infrared imaging

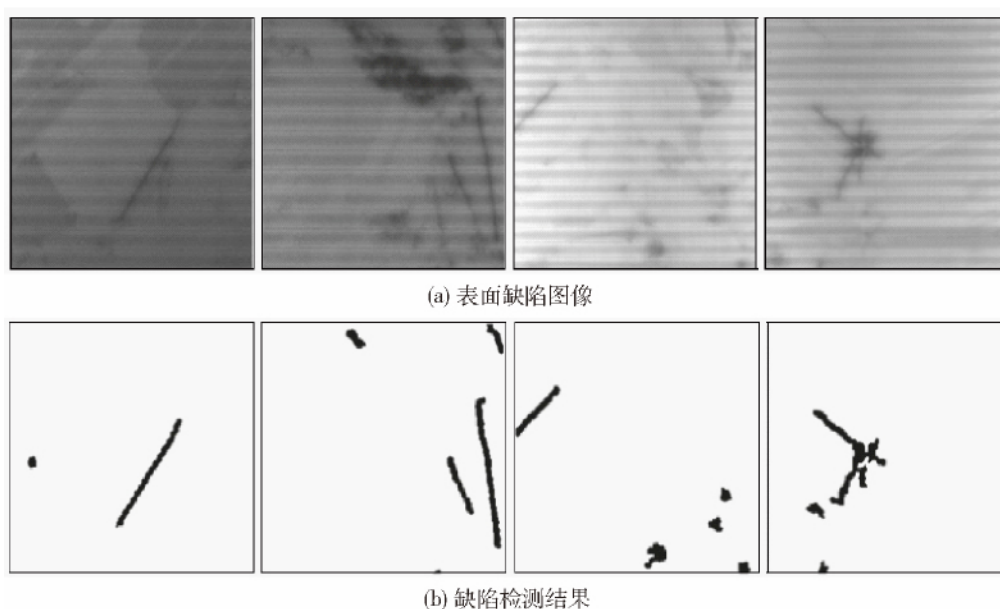


图 3 基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测示例

Fig. 3 Illustrations of solar cells surface defects detection based on machine vision

3.1 基于梯度特征的检测方法

此类方法的依据是: 太阳能电池片表面缺陷区域和其余部分的亮度有明显差异, 两者交界处具有较高的梯度. 下面对此类方法中的一些代表性工作进行概括性介绍.

Anwar 等^[37]、Tsai 等^[38]和 Bakalexis 等^[39]提出了将梯度特征和各向异性扩散相结合的检测方法. 即利用图像的梯度特征来对图像中不同梯度区域进行图像锐化和图像平滑, 由于缺陷边缘区域的梯度值较高, 先对瑕疵区域进行锐化处理, 而对梯度值较

低的无瑕疵区域采取平滑处理,因此运用此方法可在有效强化瑕疵的同时抑制噪声.该方法中的扩散模型以灰度和梯度为特征来调整扩散系数方程,这是一种自适应平滑的处理.只有缺陷区域低灰度和高梯度的像素会产生高的扩散系数,用该模型去平

滑疑似缺陷区域可以保留完整区域的原始灰度水平,通过从原始图像中减去扩散图像,可以得到微裂纹明显增强的差异图像,再通过简单的二进制阈值分割和形态学运算,即可分割出微裂纹.其算法框图如图4所示.

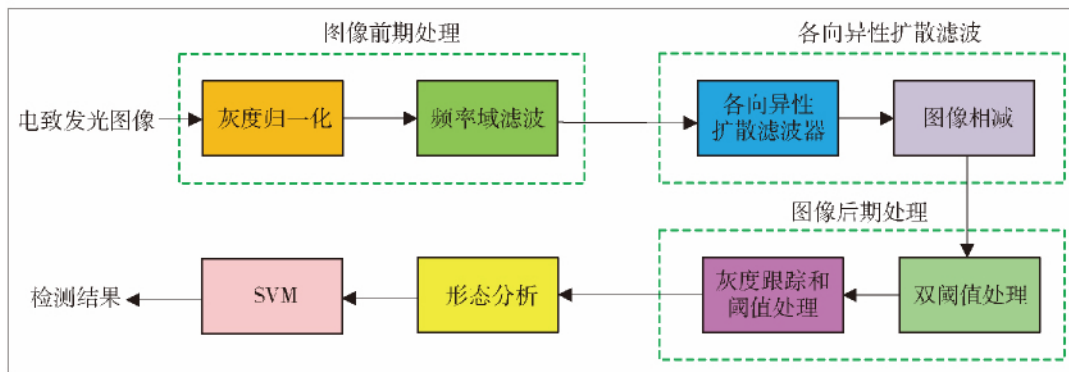


图4 Anwar等^[14]算法框图

Fig.4 Block diagram of Anwar etc.^[14]

Tsai等^[40]提出将梯度特征和均值漂移算法相结合.该方法首先对图像进行边缘检测,在太阳能电池片无缺陷区域,边缘的方向更为一致,而缺陷区域的边缘方向则呈现多样性,因此,在每个邻域窗口内计算梯度方向熵,从而将灰度图像转换成熵图像.随后,对熵图像进行均值漂移平滑处理,力争在保持边缘的同时抑制噪声.最后,对滤波后的熵图像进行自适应阈值处理,得到最终的检测结果图.

Aghamohammadi等^[41]、Kennedy等^[42]将梯度特征和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法相结合进行边缘检测,从而实现缺陷检测.该方法首先利用PSO算法进行边缘检测;再提取出裂纹和栅线的特征向量;然后从图像中分离出裂缝和栅线,其中裂缝区域是通过计算特征向量的梯度,将图像分成连接部分和非连接部分而得出;最后利用模糊逻辑推理系统依照栅线的位置对瑕疵产品和裂痕进行分类.该检测算法的优点是可用于带有噪声的图像,同时不需要使用任何滤波器.

3.2 基于聚类的检测方法

此类方法的核心思想是通过聚类算法将缺陷区域和无缺陷区域进行区分,最后采用阈值分割等算法得到仅包含缺陷区域的二值图像.下面对此类方法中的一些代表性工作进行概括性介绍.

Xu等^[15]和Fu等^[43]提出了基于最大类间方差的太阳能电池片表面缺陷检测方法.该方法首先用高斯滤波器对图像进行平滑预处理;其次,对图像进行边缘定位和图像分割,分离出单个电池块;然后,

采用最大类间方差法对图像进行阈值分割,将图像分为包含缺陷的前景部分和无缺陷的背景部分;最后,利用Hough变换对分割后的二值图像进行直线检测,并将结果图和经过平滑预处理的原图做差得出缺陷部分.

Tsai等^[44]提出了一种新的聚类算法用于太阳能电池片表面缺陷检测.该方法将无缺陷图像作为训练样本,在训练阶段,采用一种二叉树聚类算法对训练样本进行聚类.具体来说,提出一种基于主成分分析(principle component analysis, PCA)的一致性度量准则对各簇进行评估,若某簇的度量得分最低,则采用模糊C均值(fuzzy C-means, FCM)算法将该簇拆分成2个新簇.在测试阶段,计算输入数据和每簇中心的距离来度量输入数据是否包含缺陷.

3.3 基于频域分析的检测方法

这类方法的核心思想是将输入图像通过傅里叶变换或是小波变化等算法转换到频域中进行处理,然后再反变换回时域得到最终结果.下面对此类方法中的一些代表性工作进行概括性介绍.

Tsai等^[16]提出了基于傅里叶变换的表面缺陷检测方法.首先,将输入图像进行傅里叶变换,考虑到图像中的缺陷区域主要出现在“线”或“条形”形状中,通过设置“线”或“条形”形状缺陷的相关频率分量,并进行带通滤波,就能将可能存在的缺陷删除;随后,将处理后的频域图做反变换得到重建图像,将原始图像和重建图像做差,可以很容易地识别缺陷区域.

Li等^[45]提出了基于小波变换的非均匀纹理分析方法用于太阳能电池片表面缺陷的检测。该方法利用离散小波变换将输入图像进行多分辨率分解,将单个分辨率的小波系数作为特征,连续2个分辨率水平之间系数的差值作为权重,以此来区分局部缺陷和背景。Li等^[45]通过实验证明该方法可以有效地检测出刻痕裂纹、污点和手印等多种缺陷和污迹。

Wang等^[46]提出了一种基于自适应高频滤波的太阳能电池片表面缺陷检测方法。该方法首先提出了一种新式电池片栅线定位方法定位栅线;然后提出了一种自适应参数的高频滤波方法,在频域将栅线过滤掉;最后采用一种基于直方图的自适应阈值将图像瑕疵特征提取出来。此外,为了消除复杂背景的干扰,该方法将栅线附近像素值填充到栅线位置。

3.4 基于矩阵分解的检测方法

这类方法的核心思想是通过某种矩阵分解算法将输入图像分解为一个包含大量重复特征的矩阵和一个特征的矩阵,前者代表不含缺陷的“干净”图像,后者代表包含缺陷区域的图像。下面对此类方法中的一些代表性工作进行概括性介绍。

Lu等^[47]提出了基于矩阵奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的表面缺陷检测方法。该方法没有使用任何特征提取算法来提取图像特征,而是直接以图像的原始数据作为矩阵,然后对矩阵进行奇异值分解。Lu^[47]等认为不同的奇异值代表图像不同程度的细节,通过选择能代表背景纹理的奇异值来重建矩阵,可以得到仅包含背景的图像,最后重建的图像和原始图像做差即可得出图像中的缺陷区域。

姚明海等^[48]提出了基于鲁棒主分量分析(robust principal component analysis, RPCA)的太阳能电池片表面缺陷检测方法。该方法的核心思想是直接以输入图像的原始数据作为矩阵,将其分解成一个低秩矩阵和一个稀疏矩阵之和,2个矩阵分别代表无缺陷图像和包含缺陷的图像。姚明海等^[48]提出该方法的动机是:对于太阳能电池片表面图像,除缺陷区域之外,其他区域的纹理特征大都相似,在图像矩阵里表现为各行(列)之间线性相关,即:无缺陷图像代表的矩阵具有低秩性,而在图像中零散分布的缺陷区域可理解为稀疏矩阵里的非零元素。使用RPCA而不是PCA的原因则是PCA矩阵元素受到噪声严重污染时,即便被破坏的元素数量较少,分解出的低秩矩阵也会被严重破坏,而RPCA则无

此问题,前提是分解出的无缺陷矩阵确实具有低秩性,且只有很少一部分元素被严重破坏,即分解出另一个矩阵是稀疏的。

3.5 基于机器学习的检测方法

本节主要介绍基于机器学习的表面缺陷检测方法,其主要使用的机器学习方法包括:支持向量机(support vector machine, SVM)、独立成分分析和深度学习等方法。下面对此类方法中的一些代表性工作进行概括性介绍。

Demant等^[49]提出了基于支持向量机的太阳能电池片表面缺陷检测方法。训练模式下,该方法事先获取标记有裂纹和非裂纹的样本各一组,然后采用一组局部描述符对这些样本进行特征提取,以获取到的特征向量来代表样本,并将特征向量送入SVM进行训练。其中,裂纹样本中的裂纹宽度各不相同,使样本集更具代表性。在线检测时,采用相同的局部描述符来获得输入图像的特征向量,然后送入SVM确定是否有裂纹。算法流程框图如图5所示。

龚芳等^[50]、Tsai等^[51]、Jenssen等^[52]提出了基于独立成分分析(independent component analysis, ICA)的表面缺陷检测方法。训练模式下,该方法将无缺陷的电池片表面图像拆分成众多的图像块,然后采用ICA算法从这些图像块中学习出一个词典(包含多个基向量)。测试模式下,依旧将输入图像拆分成图像块(与训练模式下的图像块尺寸相同),然后采用学习出的词典对图像块进行特征提取,再根据这些特征向量和词典对图像块进行重构,如果重构误差较大,则说明该图像块所在的区域存在缺陷的概率较大。

王宪保等^[53]提出了基于深度学习的表面缺陷检测方法。该方法首先根据样本特征建立深度置信网络(deep belief networks, DBN),并训练获取网络的初始权值。然后通过BP算法微调网络参数,取得训练样本到无缺陷模板之间的映射关系;最后利用重构图像与缺陷图像之间的对比关系,实现测试样本的缺陷检测。该方法借助深度学习对输入样本数据强大的特征提取能力实现了缺陷的快速准确检测。

3.6 现有检测方法的对比分析

通过表2的比较可以发现,对于太阳能电池片表面的不同缺陷,梯度特征检测方法和聚类检测方法对裂纹和断栅的检测更加适用;基于频域分析和矩阵分解的检测方法是从图像整体区域进行处理,

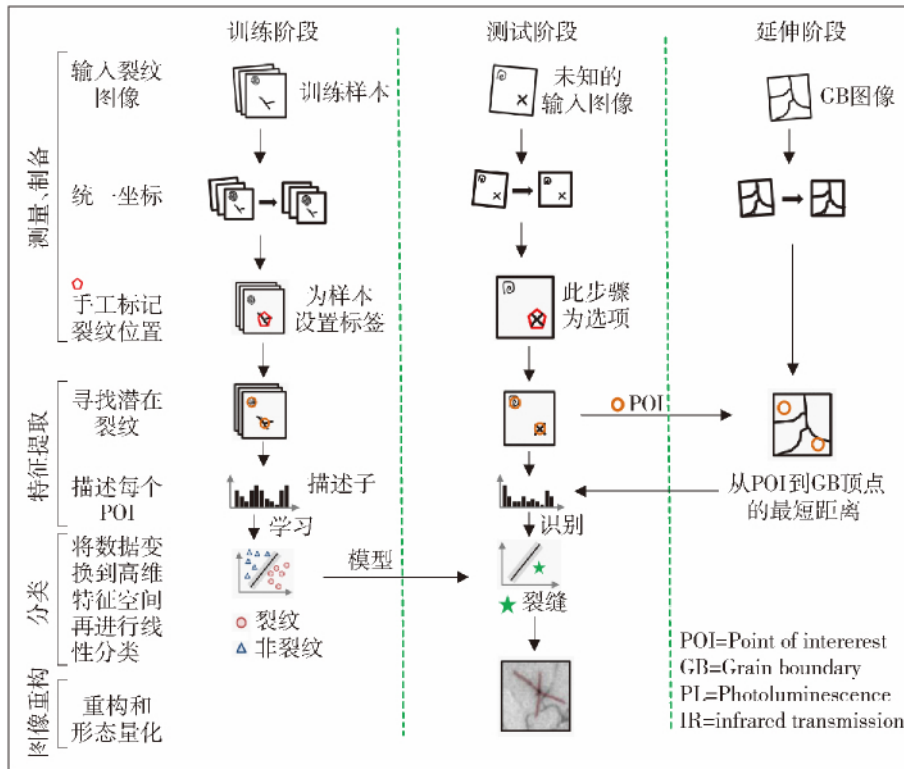
图5 Demant 等^[49]算法流程框图Fig. 5 Flow chart of Demant etc.^[49]

表2 各类检测方法的比较

Table 2 Comparison of various detection methods

类型	梯度特征的检测方法	聚类的检测方法	频域分析的检测方法	矩阵分解的检测方法	机器学习的检测方法
摘要	根据电池片的裂纹、断栅处和背景有明显亮度差异的特点,以梯度特征为核心进行缺陷检测	采用各种聚类算法将电池片表面分成缺陷集合和非缺陷集合,然后采用图像分割得到检测结果	将图像从空间域变换到频率域,通过设定合适的频率值做带通(带阻)滤波,实现预定目标的凸显(移出)	将电池片表面图像数据视作矩阵,通过某些矩阵分解算法分解出仅包含电池片缺陷区域的矩阵,将该矩阵适当处理后作为检测结果	分别收集无缺陷和有缺陷的图像作为训练样本,选择合适的机器学习算法学习分类模型,将测试图像代入该模型即得检测结果
特点	此类方法对裂纹和断栅等亮度对比度较强的缺陷类型检测效果较好	此类方法对不同类型的缺陷有较强的识别能力,但是聚类算法某些关键参数需要手工设定	此类方法复杂度低,实时性较好,对于检测斑点、断栅、裂纹有较好的效果	此类方法适用范围广,算法简洁有效,尤其适合对微小缺陷的检测	此类方法对训练样本中已收集的常见缺陷类型能够较好识别

对各类型的缺陷都有不错的识别能力,尤其对条状和分布较为分散的缺陷检测效果较好;基于机器学习的检测方法对样本库中收集的常见缺陷类型检测效果较好。

4 总结与展望

本文对基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷

检测方法所涉及的各个环节进行了系统总结,主要包括以下内容:

- 1) 对太阳能电池片表面常见的缺陷样式进行了简要介绍,主要包括表面裂纹、断栅、缺角、斑点等;
- 2) 简要论述了不同类型的成像方式,主要包括光致发光、电致发光、红外热成像及太赫兹成像等;

3) 根据采用数学模型的不同,将现有基于机器视觉的表面缺陷检测方法进行了分类介绍,主要包括基于梯度特征的检测方法、基于聚类的检测方法、基于频域分析的检测方法、基于矩阵分解的检测方法和基于机器学习的检测方法;

4) 对各类方法进行了简要的对比分析。

基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测主要用于工厂中的在线检测,因此要求算法在具有较高检测准确率的同时,还要有较低的算法复杂度,确保实时性。虽然基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测技术在近几年已经取得了较大的发展,但仍然存在一些技术性问题需要深入研究和突破,结合当前研究的热点和难点,本文对该领域未来的研究方向进行了展望:

1) 凭借强大的特征提取能力,基于深度学习的太阳能电池片表面缺陷检测已成为该领域的研究热点^[53-54],然而,现有方法由于人工标注样本数量较少,泛化能力相对不足,针对这个问题,未来采用弱标签样本(只标记是否包含缺陷或缺陷类型,但不知缺陷的具体位置,如此可降低人工标记的难度,便于增加样本数量)进行半监督学习可能会是下一步的研究方向。

2) 当前太阳能电池片表面缺陷检测的一个主要难点在于:当缺陷和背景区域的亮度差异较小时,检测效果相对较差。有针对性地进行细微缺陷特征提取算法的研究,或将基于深度神经网络的特征提取框架进行专门设计,可能会是未来的一个研究方向。

参考文献:

- [1] CARCIA P F, MCLEAN R S, HEGEDUS S. ALD moisture barrier for Cu(InGa)Se₂ solar cells [J]. *Ecs Transactions*, 2010, 33(2): 237-243.
- [2] DUENAS S, PEREZ E, CASTAN H, et al. The role of defects in solar cells: control and detection defects in solar cells [C] // *The Spanish 2013 Conference on Electron Devices (CDE)*. New York: IEEE, 2013: 301-304.
- [3] ISTROV A A, HIESLMAIR H, VYVENKO O F, et al. Defect recognition and impurity detection techniques in crystalline silicon for solar cells [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, 72(1): 441-451.
- [4] TSUZUKI K M, TSUTOMU Y, TAKEHIO T, et al. Inspection method and production method of solar cell module: US6271462B1 [P]. 2001-08-07.
- [5] ESQUIVEL O. Contrast imaging method for inspecting specular surface devices: US6433867B1 [P]. 2002-08-13.
- [6] SAWYER D E, KESSLER H K. Laser scanning of solar cells for the display of cell operating characteristics and detection of cell defects [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1980, 27(4): 864-872.
- [7] CHEN X Y, PEDERSEN A, HELLESØ O G, et al. Electrical noise of laser diodes measured over a wide range of bias currents [J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, 40(11): 1925-1928.
- [8] BELYAEV A, POLUPAN O, OSTAPENKO S, et al. Resonance ultrasonic vibration diagnostics of elastic stress in full-size silicon wafers [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, 21(3): 254.
- [9] BYELYAYEV A. Stress diagnostics and crack detection in full-size silicon wafers using resonance ultrasonic vibrations [D]. Tampa Bay: University of South Florida, 2005.
- [10] OSTAPENKO S, DALLAS W, HESS D, et al. Crack detection and analyses using resonance ultrasonic vibrations in crystalline silicon wafers [C] // *The 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. New York: IEEE, 2006: 920-923.
- [11] DALLAS W, POLUPAN O, OSTAPENKO S. Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers [J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18(3): 852-858.
- [12] ZHANG X, HU J, WU Y, et al. Direct observation of defects in triple-junction solar cell by optical deep-level transient spectroscopy [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(14): 145401-145405.
- [13] WEN T K, YIN C C. Crack detection in photovoltaic cells by interferometric analysis of electronic speckle patterns [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2011, 98(5): 216-223.
- [14] FUYUKI T, KITAYANAN A. Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence [J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2009, 96(1): 189-196.
- [15] XU P, ZHOU W J, FEI M R. Detection methods for micro-cracked defects of photovoltaic modules based on machine vision [C] // *The 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*. New York: IEEE, 2014: 609-613.
- [16] TSAI D M, WU S C, LI W C. Defect detection of solar cells in electroluminescence images using Fourier image reconstruction [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, 99(99): 250-262.
- [17] TAKAHASHI Y, KAJI Y, OGANE A, et al.

- “Luminoscopy”—novel tool for the diagnosis of crystalline silicon solar cells and modules utilizing electroluminescence [C] // The 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. New York: IEEE, 2006: 924-927.
- [18] GABOR A M, RALLI M, MONTMINY S, et al. Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules [C] // The 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. New York: IEEE, 2006: 4-8.
- [19] CHATURVEDI P, HOEX B, WALSH T M. Broken metal fingers in silicon wafer solar cells and PV modules [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2013, 108(1): 78-81.
- [20] DEMANT M R S, KRISCH J, SCHOENFELDER S, et al. Detection and analysis of micro-cracks in multi-crystalline silicon wafers during solar cell production [C] // The 2011 37th IEEE Conference on Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). New York: IEEE, 2011: 001641-001646.
- [21] OLSEN E, FL A S. Spectral and spatially resolved imaging of photoluminescence in multicrystalline silicon wafers [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(1): 011903-011903-3.
- [22] SUN Q, MELNIKOV A, MANDELIS A. Camera-based high frequency heterodyne lock-in carrierographic (frequency-domain photoluminescence) imaging of crystalline silicon wafers [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2016, 213(2): 405-411.
- [23] CHEN J T, KE S S, LIN K W, et al. High-performance inspecting system for detecting micro-crack defects of solar wafer [C] // The 2010 IEEE Conference on Sensors. New York: IEEE, 2010: 494-497.
- [24] CHIOU Y C, LIU J, LIANG Y T. Micro crack detection of multi-crystalline silicon solar wafer using machine vision techniques [J]. *Sensor Review*, 2011, 31(2): 154-165.
- [25] BROOKS W S M, LAMB D A, IRVINE S J C. IR reflectance imaging for crystalline Si solar cell crack detection [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, 5(5): 1271-1275.
- [26] KIM G B. Micro defect detection in solar cell wafer based on hybrid illumination and near-infrared optics [C] // The 2013 9th Asian Control Conference (ASCC). New York: IEEE, 2013: 1-5.
- [27] MAHDAVIPOUR Z, ABDULLAH M Z. Micro-crack detection of polycrystalline silicon solar wafer [J]. *Iete Technical Review*, 2015, 32(6): 1-7.
- [28] KO S S, LIU C S, LIN Y C. Optical inspection system with tunable exposure unit for micro-crack detection in solar wafers [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(124): 4030-4035.
- [29] TEO T W, MAHDAVIPOUR Z, ABDULLAH M Z. High-speed micro-crack detection of solar wafers with variable thickness [C] // The 2014 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). New York: IEEE, 2014: 237-241.
- [30] 董栋, 陈光梦. 基于近红外图像的硅太阳能电池故障检测方法 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2010, 8(5): 539-543.
- DONG D, CHEN G M. A method of silicon solar cells defect detection based on near-infrared images [J]. *Information & Electronic Engineering*, 2010, 8(5): 539-543. (in Chinese)
- [31] 王楠. 基于视觉的硅太阳能电池检测方法的研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- WANG N. Silicon solar cell based on visual detection method [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014. (in Chinese)
- [32] MINKEVIČIUS L, SUZANOVICĀIENĒ R, BALAKAUSKAS S, et al. Detection of tab wire soldering defects on silicon solar cells using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(15): 932-934.
- [33] JEN C Y, RICHTER C. Doping profile recognition applied to silicon photovoltaic cells using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(5): 560-567.
- [34] ABBOTT M, COUSINS P, CHEN F, et al. Laser-induced defects in crystalline silicon solar cells [C] // The Thirty-first IEEE Conference on Photovoltaic Specialists. New York: IEEE, 2005: 1241-1244.
- [35] KONTGES M, KUNZE I, KAIARI S S, et al. The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks [J]. *La Medicina Del Lavoro*, 2011, 95(4): 1131-1137.
- [36] 王晗. 多晶硅表面缺陷识别及软件检测系统设计与开发 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- WANG H. Polysilicon solar wafer surface defect detection and the design and development of software inspection system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [37] ANWAR S A, ABDULLAH M Z. Micro-crack detection of multicrystalline solar cells featuring an improved anisotropic diffusion filter and image segmentation technique [J]. *Eurasip Journal on Image & Video*

- Processing, 2014, 2014(1): 1-17.
- [38] TSAI D M. Micro-crack inspection in heterogeneously textured solar wafers using anisotropic diffusion [J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(3): 491 - 501.
- [39] BAKALEXIS S A, BOUTALIS Y S, MERTZIOS B G. Edge detection and image segmentation based on nonlinear anisotropic diffusion [C] // The 2002 14th International Conference on Digital Signal Processing. New York: IEEE, 2002: 1203-1206.
- [40] TSAI D M, LUO J Y. Mean shift-based defect detection in multicrystalline solar wafer surfaces [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(1): 125-135.
- [41] AGHAMOHAMMADI A H, PRABUWONO A S. Solar cell panel crack detection using particle swarm optimization algorithm [C] // The 2011 International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Robotics (ICPAIR). Putrajaya: IEEE, 2011: 160-164.
- [42] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // The IEEE International Conference on Neural Networks. New York: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [43] FU Z, ZHAO Y, LIU Y, et al. Solar cell crack inspection by image processing [C] // The 2004 International Conference on Business of Electronic Product Reliability and Liability. New York: IEEE, 2004: 77-80.
- [44] TSAI D M, LI G N, LI W C, et al. Defect detection in multi-crystal solar cells using clustering with uniformity measures [J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(3): 419-430.
- [45] LIW C, TSAI D M. Wavelet-based defect detection in solar wafer images with inhomogeneous texture [J]. Pattern Recognition, 2012, 45(2): 742-756.
- [46] WANG Z. Research on detection technology for solar cells multi-defects in complicated background [J]. Journal of Information & Computational Science, 2014, 11(2): 449-459.
- [47] LU C J, TSAI D M. Automatic defect inspection for LCDs using singular value decomposition [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(1): 53-61.
- [48] 姚明海, 李洁, 王宪保, 基于 RPCA 的太阳能电池片表面缺陷检测 [J]. 计算机学报, 2013, 36(9): 1943-1952.
- YAO M H, LI J, WANG X B. Solar cell surface defects detection using RPCA method [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(9): 1943-1952. (in Chinese)
- [49] DEMANT M, WELSCHHOLD T, OSWALD M, et al. Microcracks in silicon wafers I: inline detection and implications of crack morphology on wafer strength [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(1): 1-10.
- [50] 龚芳, 张学武, 孙浩. 基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测 [J]. 光学学报, 2012(4): 169-177.
- GONG F, ZHANG X W, SUN H. Detection system for solar module surface defects based on constrained ICA model and PSO method [J]. Acta Optica Sinica, 2012(4): 169-177. (in Chinese)
- [51] TSAI D M, WU S C, CHIU W Y. Defect detection in solar modules using ICA basis images [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 122-131.
- [52] JENSSEN R, ELTOFT T. Independent component analysis for texture segmentation [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(10): 2301-2315.
- [53] 王宪保, 李洁, 姚明海, 等. 基于深度学习的太阳能电池片表面缺陷检测方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(6): 517-523.
- WANG X B, LI J, YAO M H, et al. Solar cells surface defects detection based on deep learning [J]. PR&AI, 2014, 27(6): 517-523. (in Chinese)
- [54] ZHAO R, OUYANG W, LI H, et al. Saliency detection by multi-context deep learning [C] // The 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2015: 1265-1274.

(责任编辑 吕小红)