

基于信号突变点校正的太阳能电池片缺陷检测方法

范程华^{1,2,3,*}, 王群京^{1,2}, 曹欣远³, 陈兵兵³, 齐琦³

¹安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601;

²安徽大学教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230601;

³合肥师范学院电子信息系统仿真设计安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 针对太阳能电池片微弱缺陷难以检测的特点, 提出一种基于小波域信号突变点捕捉的缺陷检测法。该方法基于一维离散信号, 在小波域逐列对图像进行突变点检测, 实现了对信号突变点的捕捉, 并采用能量重心法对其进行校正, 获得了缺陷图像所对应的正常背景, 最后对原图像与恢复后的背景图像作简单的代数融合, 以凸显缺陷区域。实验表明, 该方法对太阳能电池片的多种表面缺陷检测具有有效性。

关键词 图像处理; 缺陷检测; 小波分解; 能量重心法; 信号突变点

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.061101

Defect Detection Method for Solar Cell Based on Signal Catastrophe-Points Correction

Fan Chenghua^{1,2,3,*}, Wang Qunjing^{1,2}, Cao Xinyuan³, Chen Bingbing³, Qi Qi³

¹School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Engineering Research Center of Power Quality, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

³Anhui Provincial Key Laboratory of Simulation and Design for Electronic Information System, Hefei Normal University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract A defect detection method based on wavelet domain signal catastrophe-points capture is proposed to address the difficulty of detecting minor defects on solar cell. The method, based on one-dimensional discrete signal, captures signal catastrophe-points through catastrophe-points detection on the image column by column in the wavelet domain, and corrects it with the energy centrobaric method so as to obtain the normal background of the defect image, which is finally fused with the original image by simple algebraic algorithm to highlight the defected area. Experiments show that the method is effective for detecting various defects on the surface of solar cells.

Key words image processing; defect detection; wavelet decomposition; energy centrobaric method; signal catastrophe-points

OCIS codes 100.3008; 110.2970; 110.2960; 100.7410

1 引言

太阳能电池片在生产加工过程中, 可能会出现隐裂、碎片、断栅、划痕、脏污等缺陷, 若含缺陷的电池片被光伏组件采用将会影响电池的光电转化效率

和寿命。因此, 在电池片串焊前, 检测并及时剔除不合格产品尤为重要。

基于机器视觉^[1]的太阳能电池片表面缺陷检测法逐渐成为研究热门, 各类算法, 如基于梯度特征的检测法^[2]、基于聚类的检测法^[3]、基于频域分析的检

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-07-29; 录用日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61701163)、安徽省自然科学基金(1808085MF167)、安徽省高等学校自然科学基金项目(KJ2018A0488, KJ2018ZD046, KJ2019A0716)、2017年度安徽省高校优秀青年人才支持计划(gxyq2017049)

* E-mail: fch79017@126.com

测法^[4]、基于矩阵分解的检测法^[5]和基于机器学习的检测法^[6],层出不穷。针对不同类型的缺陷检测,上述方法各具优劣性,普适性较差。如基于梯度特征的检测法主要针对电池片的电致发光(EL)图像进行检测,对裂纹和断栅等亮度对比较强的缺陷检测效果较好;采用傅里叶变换的频域分析法对线型缺陷的检测具有一定优势;而基于机器学习的检测法则需要大量的正常图像及缺陷图像作为训练样本。

2 基本原理

近年来,本课题组一直致力于研究谱峰搜索及小波变换算法,并提出了运算量小、计算精度高的针对信号峰值频率信息的快速提取算法^[7-8]。基于此,考虑到太阳能电池片图像具有周期性、背景值较单一的特点,若其某列出现缺陷时,对应的灰度值将会发生显著跳变,因此可将太阳能电池片数字图像所对应矩阵($A_{N \times M}$)的列看成一个一维离散信号,这样矩阵($A_{N \times M}$)就具有 M 个信号,每个信号具有 N 个幅值。正常图像的灰度值在每列上的变化不大,若将该列灰度值看成是离散信号,则它将是一个无跳变的正常信号。只要电池片存在划痕、污点等缺陷,某列中的部分灰度值就会偏离正常范围,即出现信号跳变点。根据小波变换检测信号突变^[9]原理及能量重心法^[10],信号跳变点可被准确捕捉并校正。

2.1 小波变换信号突变检测原理

选取一维高斯函数 $\theta(t)$ 为低通平滑函数,则其二次可导,即

$$\psi^{(1)}(t) = \frac{d\theta}{dt}, \quad (1)$$

$$\psi^{(2)}(t) = \frac{d^2\theta}{dt^2}. \quad (2)$$

定义 $\theta_s(t) = \theta(t/S)/S$, 其中 S 为尺度因子。由于小波变换就是将原信号 $f(t)$ 同伸缩小波卷积得到的,因此以 $\psi^{(1)}(t)$ 、 $\psi^{(2)}(t)$ 为小波函数定义的卷积小波变换为^[11-14]

$$W_s^{(1)}f(t) = f * \psi^{(1)}(t) = S \frac{d}{dt}(f * \theta_s)(t), \quad (3)$$

$$W_s^{(2)}f(t) = f * \psi^{(2)}(t) = S^2 \frac{d^2}{dt^2}(f * \theta_s)(t). \quad (4)$$

则以 $\psi^{(1)}(t)$ 、 $\psi^{(2)}(t)$ 为小波基,分别在信号 $f(t)$ 的突变点附近作内积或卷积的结果如图 1 所示。

从图 1 可以看到:当以一个平滑函数的一阶导数 $\psi^{(1)}(t)$ 为小波基时,信号模的局部极值点与信号

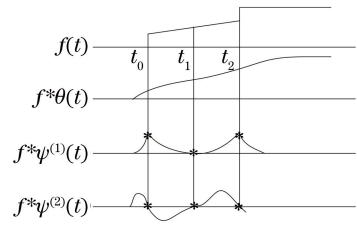


图 1 小波变换检测信号突变点的原理

Fig. 1 Principle of detecting the signal catastrophe-points with wavelet transform

的突变点相对应;当以一个平滑函数的二阶导数 $\psi^{(2)}(t)$ 为小波基时,信号的小波变换模的过零点与信号的突变点相对应,可借该结果确定信号突变发生的时刻和持续时间。

2.2 能量重心法

能量重心法^[15-17]的校正原理是对称窗函数功率谱的能量重心特性。该方法的频率校正值为

$$\hat{\delta} \approx \frac{\sum_{p=-M_1}^{M_2} Y(l_0 + p)(l_0 + p)}{\sum_{p=-M_1}^{M_2} Y(l_0 + p)}, \quad (5)$$

式中: l_0 为信号功率谱最大谱线值对应的谱线号; M_1 、 M_2 分别为与 l_0 相邻的起始标号; $Y(l_0 + p)$ 表示加窗后第 $(l_0 + p)$ 条谱线对应的功率谱。功率谱的最大谱线值为

$$Y(l_0) = \frac{A_0^2}{4} |W(-\delta)|^2, \quad (6)$$

式中: δ 表示频偏; $W(-\delta)$ 表示窗谱能量; A_0 为信号在最大谱线处的幅值。

由于频率校正精度与窗谱函数能量特性密切相关,故通常使用旁瓣较小且衰减较快的汉宁窗,选取三条谱线或者四条谱线,即三点法或四点法,进行离散频谱能量重心的校正。对于电池片的表面缺陷,若某列存在突变点,则该列能量分布不均匀,突变点部分的能量会远大于正常位置点的能量,因此可通过对称窗函数功率谱的能量重心特性实现突变点的能量校正。

3 缺陷检测原理及实验验证

选取图 2 所示太阳能电池片数字图像,根据第 2 节所述原理,设计太阳能电池片缺陷检测步骤,如图 3 所示。

太阳能电池片缺陷检测步骤如下。

1) 图像预处理。将图像矩阵($A_{N \times M}$)转化为 M 个信号,每个信号是具有 N 个频谱幅值的离散信号 $f'_i(t)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, M$ 。

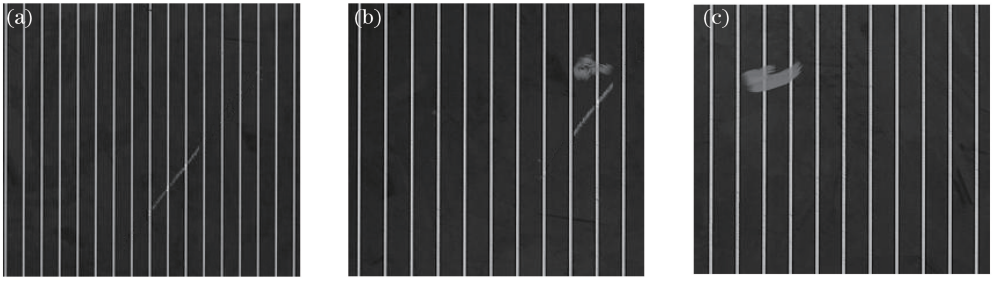


图2 太阳能电池片缺陷图像。(a)划痕缺陷;(b)划痕与点型缺陷;(c)擦伤型缺陷
Fig. 2 Defect images of solar cells. (a) Scratch; (b) scratch and spot; (c) abrasion

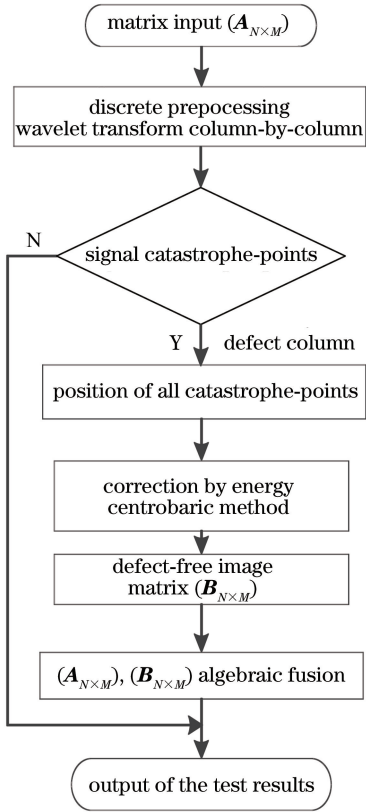


图3 算法流程图
Fig. 3 Flow chart of algorithm

2) 信号突变点捕捉。对步骤1)中的 $f'_i(t)$ 按小波变换信号突变检测原理进行小波多尺度分解, 获取各尺度突变点附近小波变换模的极大值 $|W_{sf}(t)|$, 以捕捉信号突变点。

在图2(b)中选取 $f'_i(t) = f'_{222}(t)$ 为离散信号进行小波多尺度分解, 以确定突变点发生时刻与持续时间, 结果如图4所示。流程如下: ①计算反映信号突变特征尺度(选取 $j=3$)上小波系数的模平方值; ②将计算得到的模平方值归一化; ③利用模平方值归一化图计算出突变点对应的时刻与持续时间。从图4可以看出, 该列信号 $f'_{222}(t)$ 具有明显的跳变部分, 通过确定流程可准确获取该列

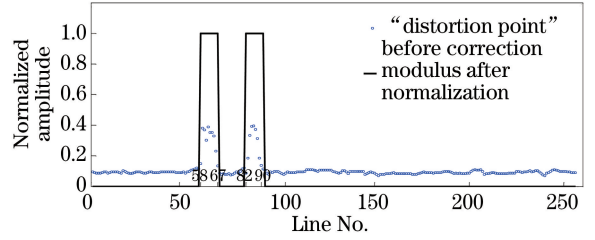


图4 信号突变点捕捉

Fig. 4 Capture of the signal catastrophe-points
信号在第58~67行、第82~90行突变发生的时刻与持续时间。

3) 信号突变点的校正。对于具有信号突变点的离散信号 $f'_i(t)$, 其中 $i=1, 2, \dots, M$, 通过步骤2)可确定信号突变点的起始位置及个数(即时域的发生时刻和持续时间), 从而可利用能量重心法对其进行校正。对于选取的图像离散信号, 根据其特点进行校正, 校正公式为

$$\begin{cases} \hat{l}_0 = a_4(l_{0-4}) + a_3(l_{0-3}) + \\ a_2(l_{0-2}) + a_1(l_{0-1}) + a_0(l_0), \\ a_4 + a_3 + a_2 + a_1 + a_0 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: l_0 为检测所得信号 $f'_i(t)$ 的第一个突变点; l_{0-1} 为 l_0 前一个正常值, 其余依此类推; \hat{l}_0 为校正后结果; a_i ($i=0, 1, 2, 3, 4$) 为根据 l_{0-i} ($i=1, 2, 3, 4$) 离 l_0 远近所取的权重值。

对图4中选取的列信号 $f'_{222}(t)$ 进行校正, 则其第一个跳变点(第58行)需选取第54~58行数据对应于(6)式中的 $l_{0-4}, l_{0-3}, l_{0-2}, l_{0-1}, l_0$ 进行校正, 依此类推校正列信号 $f'_{222}(t)$ 中的其余跳变点, 结果如图5所示, \circ 与 * 重叠部分表示不予校正的正常信号。

4) 按校正后的 $f'_i(t)$ 恢复图像矩阵 $B_{N \times M}$ 。原图像矩阵 $A_{N \times M}$ 与恢复后图像矩阵 $B_{N \times M}$ 的差别在于存在缺陷的那些列, 即步骤3)中具有信号突变点的 $f'_i(t)$ 。

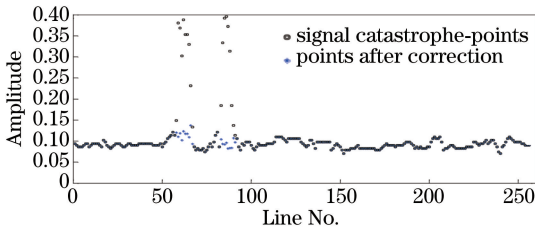


图 5 信号突变点校正

Fig. 5 Correction of the signal catastrophe-points

5) 缺陷检测结果。将原图像矩阵 $A_{N \times M}$ 与恢复后图像矩阵 $B_{N \times M}$ 作代数融合得到缺陷图像。

图 6 给出了图 2 所示缺陷图像的校正过程。在图 2 所示三种缺陷图像中分别选取一列, 将被选列看作离散信号。从图 6 可以看到, 信号经小波域多尺度分解后的重构结果可准确反映信号突变点, 能量重心法可有效校正信号突变点。为了区别, 在图中以 Stem1 表示原图像的列具有的信号突变点, 以 Curve2 表示小波域多尺度分解后重构结果, Stem3 为采用能量重心法得到的 Stem1 中突变点的校正结果。

根据太阳能电池片缺陷的检测步骤, 对图 2 所示含缺陷电池片图像进行实验验证, 图 7 为采用本文方法对含缺陷电池片图像(图 2)进行校正后所恢复的正常背景, 图 8 为按步骤 5) 进行代数融合后的缺陷图像。

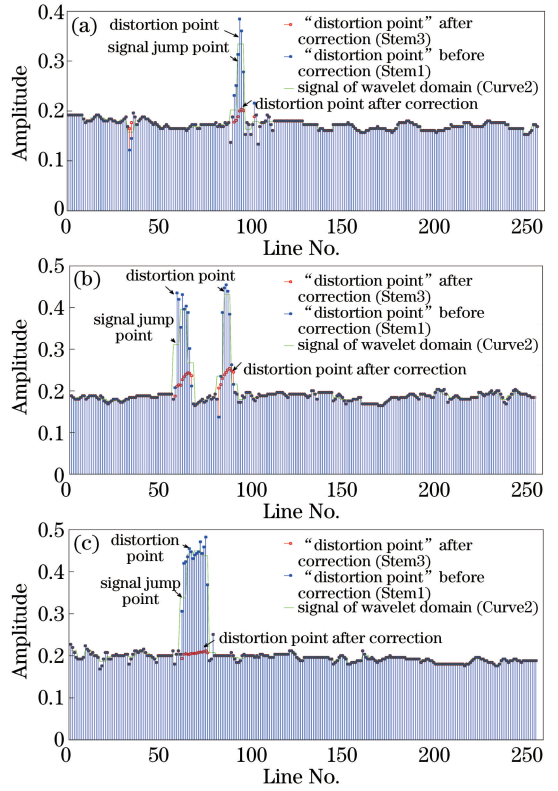


图 6 缺陷图像列信号校正过程。(a) 划痕缺陷第 200 列; (b) 划痕与点型缺陷第 222 列; (c) 擦伤型缺陷第 80 列
Fig. 6 Calibration process of column signal from defect images. (a) Scratch in the 200th column; (b) scratch and spot in the 222nd column; (c) abrasion in the 80th column

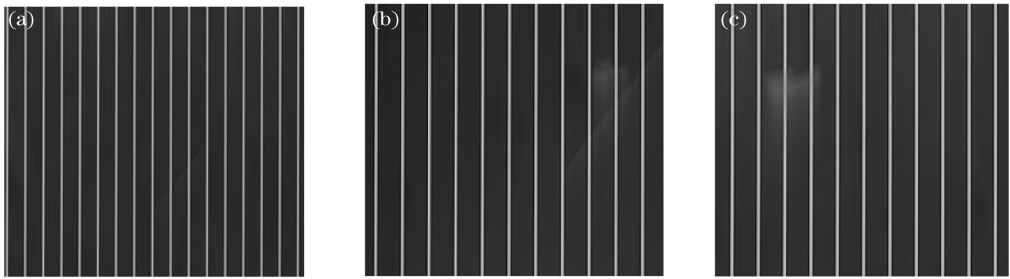


图 7 缺陷图像对应的背景。(a) 划痕缺陷; (b) 划痕与点型缺陷; (c) 擦伤型缺陷

Fig. 7 Background corresponding to the defect images. (a) Scratch; (b) scratch and spot; (c) abrasion

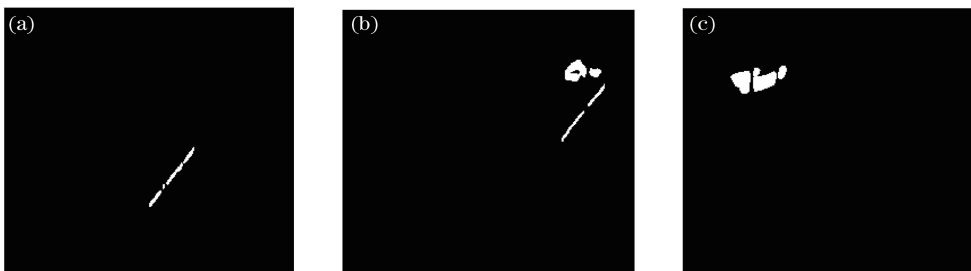


图 8 缺陷图像及其处理结果。(a) 划痕缺陷; (b) 划痕与点型缺陷; (c) 擦伤型缺陷

Fig. 8 Defect images and processing results. (a) Scratch; (b) scratch and spot; (c) abrasion

为了进一步验证本文方法的检测速度与缺陷检测的准确率,利用相同的 MATLAB 平台,选取图 2(a)(256 pixel \times 256 pixel)所示缺陷图像,将本文方法与文献[18]的算法进行比较。

1)利用文献[18]的方法对图像进行检测,检测时间约为1.25 s,而本文方法的检测时间约为1.1 s。图 2(a)是划痕与点型缺陷,跳变点相对较少,故运算速度较高。

2)在检测准确率或误判率方面,文献[18]方法的缺陷检测准确率为 90%~95%^[5],而文献[19]的缺陷检测准确率为 86.7%,误判率较高。本文采取的是信号跳变点检测,只要存在缺陷就有信号跳变,在背景光照均匀的条件下,表面缺陷检测准确率达 100%且不存在误判的情况。

4 结 论

提出了一种针对太阳能电池片表面缺陷的检测方法,并选取三种具有代表性的电池片缺陷数字图像进行了实验验证。实验结果表明,基于信号突变点检测及能量重心法突变点的校正方法对太阳能电池片表面多种缺陷检测具有一定的有效性,与传统方法相比准确率有所提高。然而,突变信号的校正并不彻底,恢复的背景与缺陷对应位置的灰度值仍有一定差异,这是由于能量重心法校正时选取的是固定参数,如何优化参数或采用动态参数校正为本课题组下一步的研究工作。

参 考 文 献

[1] Lu R S, Wu A, Zhang T D, et al. Review on automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815002.

卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815002.

[2] Min Y Z, Yue B, Ma H F, et al. Rail surface defects detection based on gray scale gradient characteristics of image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 220-229.

闵永智, 岳彪, 马宏锋, 等. 基于图像灰度梯度特征的钢轨表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 220-229.

[3] Khanmohammadi S, Adibeig N, Shanebandy S. An improved overlapping k-means clustering method for medical applications [J]. Expert Systems with

Applications, 2017, 67: 12-18.

[4] Ye S, Xiong W, Wang X Q, et al. Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0530001.

叶松, 熊伟, 王新强, 等. 基于频域分析的空间外差干涉图校正方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0530001.

[5] Yao M H, Li J, Wang X B. Solar cells surface defects detection using RPCA method [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(9): 1943-1952.

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.

[6] Wang X B, Li J, Yao M H, et al. Solar cells surface defects detection based on deep learning [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(6): 517-523.

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.

[7] Cao X Y, Chen M S, Wu X L, et al. Dual compressed sensing method for solving electromagnetic scattering problems by method of moments [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(2): 267-270.

曹 XY, 陈 MS, 吴 XL, 等. 双压缩感知方法求解电磁散射问题[J]. IEEE 天线与无线传播字母, 2018, 17(2): 267-270.

[8] Cao X Y, Chen M S, Wu X L, et al. Bilateral sparse transform for fast solving EM scattering problems by compressed sensing [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(14): 2049-2053.

曹 XY, 陈 MS, 吴 XL, 等. 基于小波变换的重叠光纤布拉格光栅信号峰值定位[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100604.

[10] Chen P, Wang J C, Wu X Y. Analysis and application of an improved FFT algorithm for energy centrobaric correction method [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(12): 1883-1889.

陈平, 王佳昌, 吴兴研. 能量重心法的改进 FFT 算法分析及应用研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(12): 1883-1889.

[11] Boyer-Provera E, Rossi A, Oriol L, et al. Wavelet-based decomposition of high resolution surface plasmon microscopy V(Z) curves at visible and near

- infrared wavelengths[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7456-7477.
- [12] Zeng J, Cheung G, Ortega A. Bipartite approximation for graph wavelet signal decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(20): 5466-5480.
- [13] Hachicha W, Kaaniche M, Beghdadi A, et al. No-reference stereo image quality assessment based on joint wavelet decomposition and statistical models[J]. Signal Processing: Image Communication, 2017, 54: 107-117.
- [14] Singh K R, Chaudhury S. Efficient technique for rice grain classification using back-propagation neural network and wavelet decomposition [J]. IET Computer Vision, 2016, 10(8): 780-787.
- [15] Yu X, Hong G L, Ling Y, et al. Energy centrobaric correction method applied in velocity accuracy enhancement in Doppler laser radar system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091201.
于啸, 洪光烈, 凌元, 等. 能量重心校正法在提高激光多普勒测速精度中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091201.
- [16] Kang D, Liqi J. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum [J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(3): 354-358.
- [17] Hou P W, Yang L, Yue W B. FFT-based high precision Frequency measurement algorithm for FM CW radar[J]. Process Automation Instrumentation, 2014, 35(3): 17-19.
侯盼卫, 杨录, 岳文豹. 应用 FFT 的高精度 FMCW 雷达频率测量算法[J]. 自动化仪表, 2014, 35(3): 17-19.
- [18] Zhao H Y. Research on surface defect inspection of solar cell based on machine vision[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011: 43-63.
赵慧阳. 基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011: 43-63.
- [19] Qian X L, Zhang H Q, Zhang H L, et al. Solar cell surface defect detection based on visual saliency[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1570-1578.
钱晓亮, 张鹤庆, 张焕龙, 等. 基于视觉显著性的太阳能电池片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1570-1578.