

锂电池极片涂布缺陷明暗场扫描成像检测技术

徐挺^{1*}, 万达航¹, 邹志庭², 潘银飞², 潘宗岭³

¹合肥米克光电技术有限公司, 安徽 合肥 230093;

²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

³安徽省计量科学研究院, 安徽 合肥 230051

摘要 提出了一种使用多线阵相机、双光源频闪照明成像和分布式并行图像处理技术的锂电池极片涂布涂层缺陷检测方法。该方法使用明、暗光源频闪交替照明, 两台高速线扫相机在同一个位置交替分别拍摄明场和暗场图像, 既提高了对缺陷的检测分辨能力, 也提高了检测效率。在处理环节, 该方法使用主从分布式处理架构, 使用两台子处理工控机多线程并行处理各自相机的图像数据, 并将获得的缺陷数据通过 TCP/IP 传输至上位处理工控机, 进行数据融合与缺陷分类处理。实验表明, 使用该方法的锂电池极片涂布检测系统可以实现在线检测, 具有极高的实用价值。

关键词 机器视觉; 数字图像处理; 图像检测系统; 并行处理

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1810006

Defect Inspection of Lithium Battery Electrode Coating via Bright and Dark Field Scanning Imaging Techniques

Xu Ting^{1*}, Wan Dahang¹, Zou Zhiting², Pan Yinfei², Pan Zongling³

¹Hefei Mick Photoelectric Technology Co., Ltd., Hefei 230093, Anhui, China;

²School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

³Anhui Institute of Metrology, Hefei 230051, Anhui, China

Abstract In this study, a defect detection approach for lithium battery electrode coating is proposed, which employs an imaging approach with multiple line-array cameras and double light source stroboscopic illumination, and distributed parallel image processing techniques. Especially, bright and dark light sources are employed for stroboscopic illumination in this approach, and two high-speed line scan cameras take the bright and dark field images alternately at the same position, which enhances not only the resolution for defect detection but also the detection efficiency. The master-slave distributed processing architecture is used in the image processing stage. Two industrial control computers process the image data coming from each camera in parallel, and the defect data obtained are sent to the host computer via TCP/IP for data fusion and defect classification. The experimental findings demonstrate that the lithium battery electrode coating detection system using this approach can achieve online detection and has a high practical value.

Key words machine vision; digital image processing; image detection system; parallel processing

1 引言

电池作为许多现代工业产品的基本组成部件, 被广泛应用于各个领域, 如家用电器、工业设备、电动汽车^[1]、自动化设施^[2]等。随着电子产品的日新月异, 多领域工业化、智能化的不断推进, 清洁能源的提倡与普及, 电池产品的种类与规格在不断变化, 但高性能、高质量、安全

性的要求始终如一。电池极片作为电池的主要元件, 其质量好坏决定着电池产品的优劣。但在极片涂布^[3]的生产过程中, 受材料性质和生产工艺的影响, 其表面涂层上容易出现多种缺陷, 如气泡、划痕、压痕、掉料、暗斑等^[4-5]。这些缺陷由于产生原因不同, 大小形态各异, 严重影响着电池的生产成本、使用寿命和使用安全, 因此极片涂布的缺陷检测在电池生产过程中是非常重要的

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-07-16; 录用日期: 2021-07-23

基金项目: 安徽省新能源汽车暨智能网联汽车创新工程项目

通信作者: *1073572275@qq.com

一环^[6]。人工检测很难满足越来越高的检测需求,而机器视觉检测由于不接触、无损伤的特点逐渐受到人们的关注^[7]。近年来越来越多的视觉检测技术成果应用到了电池极片检测领域,但如何高速高精度地检测大尺寸极片涂布的表面缺陷,依然是重点与难点之一。

由于工艺的不断进步,电池极片涂布的生产效率不断提高,推动电池极片生产线不断优化升级,与之对应的检测需求也在不断提高。汽车动力电池极片涂布宽度可达 650 mm,而对缺陷的检测分辨率要求达 50 μm,检测速度为 70 m/min 时,视觉检测系统的单视场数据量可达 280 Mbit/s 以上,同时使用明、暗视场成像时,数据量又将倍增。既要保证检测效率又要兼顾检测分辨率,这对视觉检测系统的图像采集和图像处理环节提出了更高的要求。

2 检测系统成像技术

2.1 成像原理

电池极片涂布视觉检测系统的图像采集部分由相机、镜头、光源、被测物体、传动系统等构成,为了保证不同类型缺陷的成像效果,检测系统需要同时使用明场成像和暗场成像^[8],成像原理如图 1 所示。

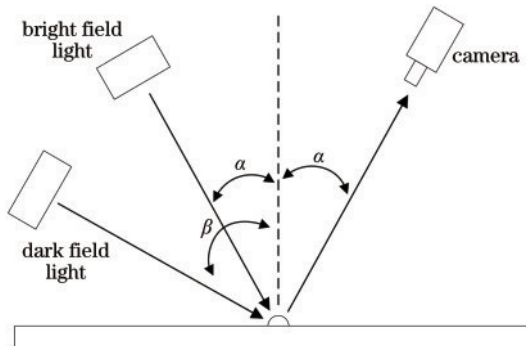


图 1 成像原理图

Fig. 1 Schematic of imaging principle

当相机拍摄角与光源照射角相同,一般选用 α=30°,即相机处于反射光路上时,为明场成像;反之当照射角大于拍摄角,一般取 β=60°,即相机不在反射光路上时,为暗场成像。

2.2 频闪照明成像

CCD 相机采集图像时所需的拍摄时间与检测物体的大小和运动速度有关^[9]。当视场宽度满足检测需求时,相机横向分辨率 D_H 满足

$$D_H = L_o / H_c, \quad (1)$$

式中: L_o 表示视场宽度; H_c 表示扫描单行像素数。在保证物体图像不发生形变的情况下,相机纵向分辨率 D_V 应满足

$$D_V = D_H. \quad (2)$$

当采集时间与物体运动时间同为 T 时,相机扫描速率 V_c 与检测物的运动速度 V_o 的关系为

$$V_o T = V_c T \times D_V. \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知,扫描相机连续成像时的扫描速率与物体的运动速率关系为

$$V_c = V_o H_c / L_o. \quad (4)$$

在检测系统中同时使用两种照明方式时,若分两次连续拍摄,则图像采集时间为两次拍摄时间的和。使用频闪交替照明技术^[10]时,在同一拍摄位置上光源切换一次,相机连续采集两行图像,即采集频率 $V_c' = 2V_c$,此时分别隔行读取相机图像,即可在一次拍摄中同时获得两种图像,使拍摄时间减少 50%。

2.3 多相机并行采集

相机与镜头的选择应当符合检测分辨率和拍摄物体大小的要求,当视场过大或检测分辨率要求较高时,单个相机视场往往无法完全覆盖整个检测区域。常用的成像方式可分为多次成像和多相机并行采集。多相机并行采集技术可以到达实时、高速、全覆盖的成像效果,在许多在线视觉检测中均得到了很好的应用^[11]。

待检极片涂布宽 650 mm,使用 8K 像元尺寸为 7.04 μm 的扫描相机,搭配 0.16 放大倍率镜头时,单个相机成像视场为 $(8192 \text{ pixel} \times 7.04 \mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1}) / 0.16$,约为 360 mm。使用双相机并行采集即可满足拍摄需要,其成像系统结构如图 2 所示,图 3 为所搭建的检测系统实物。

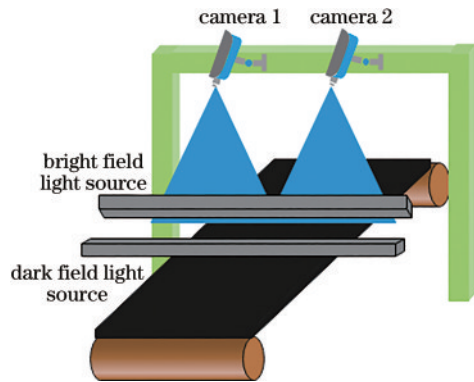


图 2 成像系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of imaging system

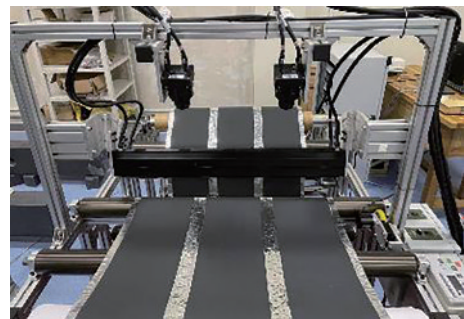


图 3 锂电池极片涂布缺陷检测系统实物图

Fig. 3 Physical picture of coating defect detection system for lithium battery electrode

3 检测系统图像处理技术

3.1 分布式处理架构

检测系统的图像处理能力有限是限制检测效率的关键因素之一,单个处理单元虽然也能完成复杂的图像处理工作,但由于处理能力有限,在面对大量图像数

据时,处理时间长且处理效率低。分布式处理技术可以在系统中集成多个处理单元,通过以太网连接,处理单元能够相互协作共同处理图像,从而大大提升检测效率,这种方法也被广泛应用于大幅面在线检测系统中。在锂电池极片涂布缺陷检测系统中,使用分布式处理方法搭建处理系统,其架构如图 4 所示。

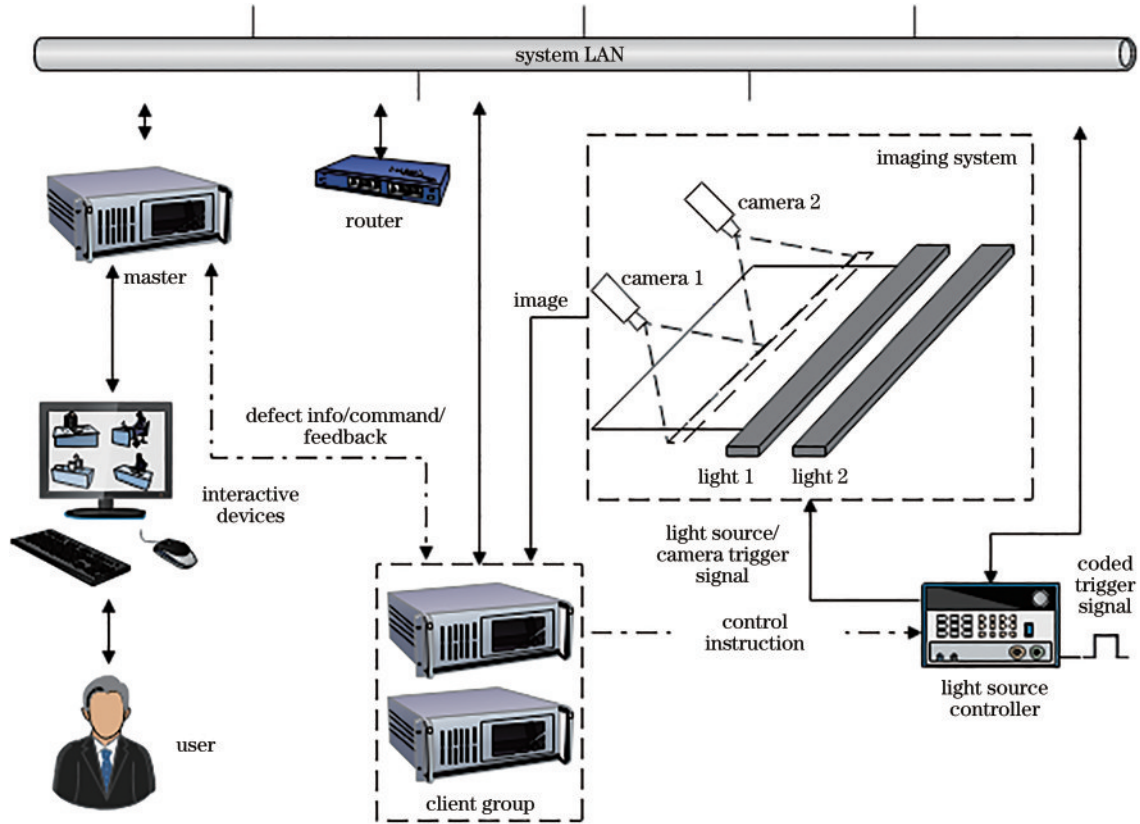


图 4 锂电池极片涂布缺陷检测系统分布式处理架构

Fig. 4 Distributed processing architecture of coating defect detection system for lithium battery electrode

在检测系统中,首先用两台子处理工控机分别接收和处理相机原始图像,从而将大量的图像数据分流,降低各处理单元的数据负载;然后将各子机的处理结果通过 TCP/IP 传输至上位机(总机)工控机,经过处理后的数据中只保留了缺陷感兴趣区域(ROI)图像数据和缺陷信息,因此总机需要处理的数据量将会明显降低,使总机能够空余足够的处理资源用于系统控制和交互显示等功能中。

3.2 处理流程设计

在电池极片涂布缺陷检测的图像处理环节,处理流程的设计和处理算法的选择应当与所检测的缺陷类型相适应,对图像进行针对性的处理才能保证缺陷识别的准确性。对于典型的几类缺陷,如划痕、掉料、暗纹等,成像图像缺陷区域的灰度特征与涂布背景有明显差异,可以通过二值化和形态学处理提取缺陷的参数信息^[12],并进行进一步判定。因此设计的图像处理流程如图 5 所示。

在下位机处理环节中,子处理工控机直接连接相

机,获得电池极片涂布表面的原始灰度图像,通过隔行取图分离明、暗场照明图像。为防止采集时序错乱导致的明、暗场图像采集顺序颠倒,对两种图像的灰度分布与事先标定的标准值进行比对,以确认图像的顺序关系,从而完成图像读取环节。此后,将明、暗场图像分别逐行与事先标定的灰度标准值比较,通过上下阈值分割缺陷,并对获得的缺陷点进行或运算汇总,以得到图像中的全部缺陷点。缺陷检测时,首先进行缺陷点的连通域分析,最后将得到的缺陷连通域信息和原始图像数据传输至上位机总机。

在上位机处理环节中,上位机首先接收两台子机传输的缺陷数据,通过缺陷位置对视场分割处和前后帧图像分割处的缺陷进行拼接,从而获得整个检测幅面上连续的缺陷 ROI 图像数据。在检出缺陷区域后,继续进行缺陷分类、筛选、自定义判定等后处理工作,按自定义规则分层次标记电池极片涂布表面检出的缺陷,同时将最终判定结果和缺陷信息上传至数据库中。

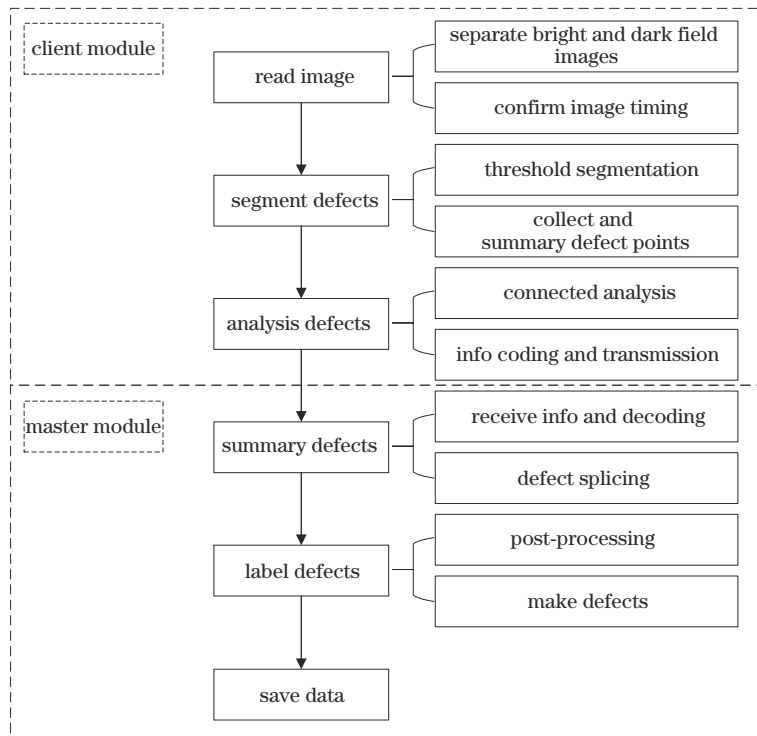


图 5 锂电池极片涂布缺陷检测图像处理流程

Fig. 5 Image processing flow of coating defect detection for lithium battery electrode

3.3 多线程并行处理

分布式系统的软件开发可以分为下位机软件与上位机软件两个部分。在电池极片涂布缺陷检测系统中,下位机软件指子机的图像处理软件,上位机软件指总机交互控制软件。一方面,两套软件均需要同时承担多种处理任务;另一方面,在所承担的处理任务中,均有复杂处理环节或数据量大的处理环节,顺序处理将会占用大量的时间。因此检测系统软件开发时需

要使用多线程并行处理技术来提高数据处理效率和软件使用流畅性。

检测系统的多线程处理结构如图 6 所示,在下位机子机处理软件中,为了保证控制和反馈的实时性,主线程应尽量减少数据处理任务,为图像处理工作开辟子线程。其中,单独开辟图像读取子线程用于实时接收图像数据,缺陷检测线程用于缺陷分割和连通域分析,网络通信线程用于传输缺陷信息。

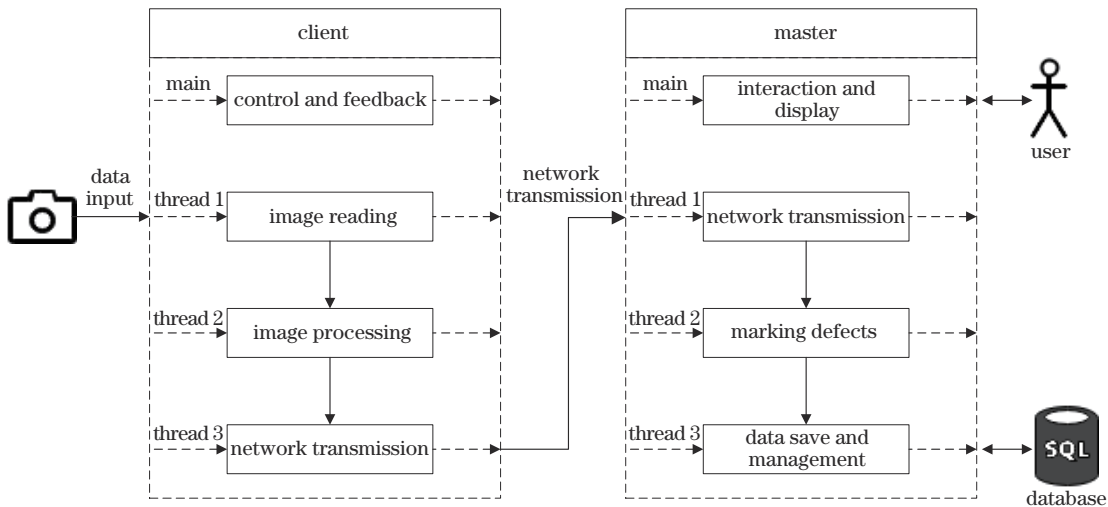


图 6 电池极片涂布缺陷检测软件多线程处理结构

Fig. 6 Multithread processing structure of battery electrode coating defect detection software

在上位机处理软件中,主线程用于人机交互和显示缺陷处理结果,同时为保证软件的运行流畅和提高处理效率,为缺陷信息的汇总和处理单独开辟子线程。

其中,网络通信线程用于接收缺陷信息,缺陷处理线程用于缺陷拼接、分类、判定和标记,数据存储线程用于上传检测结果至数据库以及查询数据记录。

4 实验与评价

4.1 性能测试

为验证使用所提检测技术的电池涂布缺陷检测系统的性能,评估检测分辨率、检测宽度、检测效率、数据处理效率等主要性能指标,设计如下测试实验。

1) 检测分辨率测试实验:拍摄标准 A2 分辨率板图像,根据分辨率板不同单元成像效果,判断可以清晰成像的最小分辨率,以此表示系统可以检测的对缺陷的最小精度。

2) 检测宽度测试实验:拍摄标准 1 m 钢直尺,根据拍摄到的区域,判断成像视场的有效宽度,视场有效宽度即为系统的检测宽度。

3) 检测效率测试实验:转速表测量主动轴转速,皮尺测量主动轴周长,由于成像系统受位移编码信号控制,在系统处理能力和相机最大扫描频率范围内,系统的检测速度等于极片涂布运动速度。

4) 数据处理效率测试实验:系统稳定检测时,实时获取左右相机行频,10 次行频取平均,根据相机扫描频率计算系统数据量,以此计算数据处理效率。

主要性能指标结果如表 1 所示。

表 1 锂电池极片涂布缺陷检测系统性能评价结果
Table 1 Performance evaluation results of coating defect detection system for lithium battery electrodes

Performance parameter	Conclusion
Detection resolution	50 μm
Detection width	661 mm
Detection efficiency	56.3 m/s
Data processing efficiency	734 Mbit/s

4.2 准确性测试

检测准确性作为检测系统关键技术的评价指标,其测试实验主要工作包括:对锂电池涂布上存在缺陷的指定区域进行三次重复检测,检测到的全部缺陷数据将自动记录于 SQL Server 2012 数据库中,根据缺陷特征和用户要求将需要检出的缺陷大致分为三类,即划痕、掉料、暗纹。设置的分类规则和检出规则如下。

1) 划痕缺陷是一种直线型缺陷,一般影响范围较大。划分规则为:若缺陷外接矩形面积较大,且对缺陷区域使用霍夫直线检测处理时,在阈值范围内可以匹配到至少一条直线,则标记为划痕缺陷,对该类型缺陷按照缺陷连通域面积大小进行判定,小于判定阈值则仅记录不检出,反之则检出并标记。

2) 掉料缺陷是由涂布表面涂层脱落产生的,其所在区域在明场成像中由于露出的底部金属薄片反光性能极佳,往往表现为明亮的亮缺陷区域,因此若明场成像图像中检测到的明缺陷的最大灰度高于判定阈值则将其标记为掉料缺陷,该类型缺陷需要全部检出。

3) 暗纹缺陷是指图像上区别于划痕缺陷的其他

暗缺陷,产生的原因包括:吸附的纤维或毛发、涂层不均匀、设备震动或其他原因造成的成像噪声等。对该类型的缺陷按照影响范围进行判定,即其最小外接矩形面积小于阈值则仅记录不检出,反之则检出并标记。

三次重复实验中检出的缺陷为 $n_i (i=1, 2, 3)$,将检出缺陷与人工标记出的实际缺陷 N 对比后,可判断出每次检测实验中正确检出的缺陷数为 c_i ,误检缺陷数为 e_i ,将 c_i 和 e_i 分别除以其均值,得到 c'_i 和 e'_i ,用于表示三次实验中两类数据波动情况。所述实验数据如表 2 所示。

表 2 锂电池极片涂布缺陷检测的准确性实验数据
Table 2 Accuracy experimental data of coating defect detection system for lithium battery electrodes

Experiment	c_i, c'_i	e_i, e'_i	n_i
$i=1$	114, 1.006	7, 0.84	121
$i=2$	113, 0.997	7, 0.84	120
$i=3$	113, 0.997	11, 1.3	124

缺陷平均检出率 D_r 、误检率 N_i 的计算方法为

$$D_r = \left(\sum_{i=1}^3 c_i / N \right) / 3, \quad (5)$$

$$N_i = \left(\sum_{i=1}^3 e_i / N \right) / 3. \quad (6)$$

该区域人工标识出的缺陷数量为 120 处,由此可计算出缺陷检出率为 94.44%,误检率为 6.94%。使用 ICC($C, 1$) 模型^[13]的组内相关系数检验方法分析 c'_i 和 e'_i 的一致性情况,可计算得 ICC₁ 组内相关系数为 0.964,大于 0.75,表明实验的一致性较好。

上述实验表明,所设计系统的各项检测性能达到现场生产对检测效率与检测精度的要求,具有非常好的实用价值。从图 7 可以看到,系统对涂布表面的划

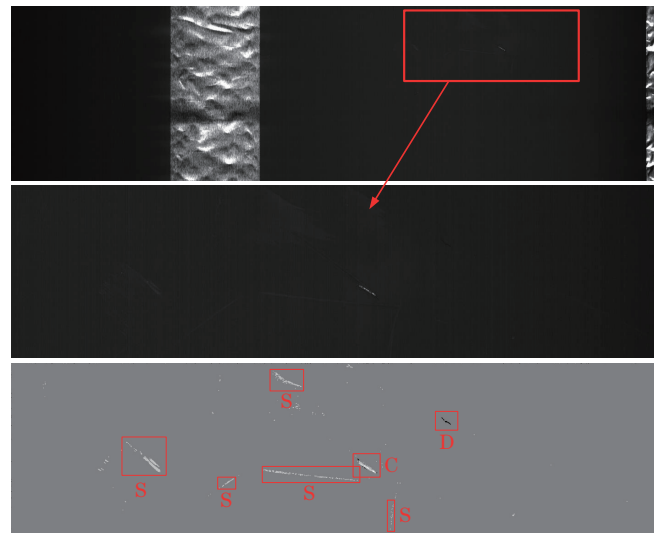


图 7 锂电池极片涂布关键缺陷检出效果
Fig. 7 Detection effect of key defects in electrode coating of lithium battery

痕(S)、掉料(C)、暗纹(D)等缺陷均有良好的检测效果。

5 结 论

针对电池极片涂布表面缺陷检测中存在的问题进行研究,提出了一种新的检测方法。使用明暗场频闪交替照明成像和多相机并行采集的方式,提高了检测系统的成像效率和检测范围;使用分布式处理架构和并行处理技术,有效降低了处理大量图像数据所需的时间;多线程软件系统的设计,增强了系统的实时性和流畅性,使其更加具有实用性。使用所提检测方法搭建的检测系统在实验环境下的多项测试实验中表现良好,达到现场生产对检测效率与检测精度的要求。在后续的工作中,将继续研究对各类极片涂布缺陷的处理算法,进一步提高检测准确性。

参 考 文 献

- [1] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.
Song Y H, Yang Y X, Hu Z C. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7.
- [2] 靳添絮. 动力锂离子电池现状浅谈[J]. 新材料产业, 2010(10): 72-74.
Jin T X. Current situation of power lithium ion battery[J]. Advanced Materials Industry, 2010(10): 72-74.
- [3] 赵伯元. 锂离子电池极片涂布技术和设备研究[J]. 电池, 2000, 30(2): 56-58.
Zhao B Y. Coating technology and equipment for lithium ion electrodes[J]. Battery Bimonthly, 2000, 30(2): 56-58.
- [4] 胡玥红. 基于机器视觉的锂电池极片缺陷检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Hu Y H. Research on defect detection of lithium battery electrode sheet based on machine vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [5] Han L, Lu W Z, Liu Y M, et al. A study and discussion on defects classification of electrode coating of Li-ion power battery[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 380/381/382/383/384: 4364-4367.
- [6] 杨冬进, 姜建安. 锂离子电池及其在线检测前沿与发展综述[J]. 电源技术, 2018, 42(9): 1402-1403, 1419.
Yang D J, Lou J N. Review of lithium ion battery and its online testing technologies[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(9): 1402-1403, 1419.
- [7] 王露. 基于机器视觉的锂电池极片缺陷检测与分类系统[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
Wang L. Defect detecting and classification system of the lithium battery pole piece based on machine vision[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [8] Davydova N V, Finders J, McNamara J, et al. Fundamental understanding and experimental verification of bright versus dark field imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11517: 115170P.
- [9] 张鸿禹, 刘爱东. 基于线阵 TDI-CCD 器件的扫描成像系统设计[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(3): 49-52.
Zhang H Y, Liu A D. Line-scan imaging system based on the linear array TDI-CCD camera[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(3): 49-52.
- [10] 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.
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.
- [11] 时长阔. 面向机器视觉的数字化 LED 光源控制器[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
Shi C K. Research on digital LED lighting controller in machine vision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [12] 李强, 曾曙光, 郑胜, 等. 基于机器视觉的陶瓷瓦表面裂纹检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081004.
Li Q, Zeng S G, Zheng S, et al. Machine vision based detection method for surface crack of ceramic tile[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081004.
- [13] Fleiss J L, Cohen J. The equivalence of weighted kappa and the intraclass correlation coefficient as measures of reliability[J]. Educational and Psychological Measurement, 1973, 33(3): 613-619.