

在线铝带材表面检测系统

黄秀琴¹, 罗新斌^{1,2}, 贾建昇¹, 邢青青¹, 王 龙¹

(1. 苏州有色金属研究院有限公司, 江苏 苏州 215026; 2. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘要: 设计了一种在线铝带材表面缺陷检测系统。为满足系统实时性和检测率, 构造了一个独特的架构和算法集合系统。图像预处理和缺陷分割在高速阵列处理的前端机上完成, 缺陷分类和显示在数据库服务器上实现。图像预处理中引进图像非均匀性校正以改善图像质量; 缺陷分割模块中融合几种分割方法的分割结果, 并设计了一种缺陷合并方法提高缺陷目标定位精度, 从而有效地进行后续缺陷特征计算和分类; 同时, 系统分类器中设有供用户操作的缺陷样本库, 样本库的完善能促进分类精度的提高。该系统已经在现场投入使用, 结果表明该系统是一个稳定可靠的实时表面缺陷检测系统。

关键词: 铝带材; 质量控制; 表面缺陷; 缺陷检测; 图像处理

中图分类号: TH7; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7235(2014)12-0040-06

An on-line surface inspection system for aluminum strip

HUANG Xiu-qin¹, LUO Xin-bin^{1,2}, JIA Jian-sheng¹, XING Qing-qing¹, WANG Long¹

(1. Suzhou Non-ferrous Metals Research Institute, Suzhou 215026, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An on-line surface inspection system is developed for aluminum strip. Considering the system requirements of its real-time and detection rate, a unique system architecture and a set of algorithms are designed to achieve good detection rate and performance in real time. Image preprocessing and defects segmentation are achieved in a high-speed array processor; defects classification and data display are achieved in the database server. Nonuniformity correction is introduced to image preprocessing to improve image quality, and segmentation results of several image segmentations are combined and a merger process is used to improve defect segmentation accuracy. Based on this framework, defect feature computation and defect classification are done effectively. Moreover, the system classifier has a defect sample library for users' operation, and classification accuracy can be improved by improving the sample library. The proposed inspection system has been put into application on sites, and the results show that it is a stable and reliable real-time surface defects detection system.

Key words: aluminum strip; quality control; surface defects; defects detection; image process

金属板带材, 如铝板、铜带或钢铁在连续轧制过程中极易产生各种缺陷。缺陷的数量、类别、严重程度、长度、宽度、在带材上的位置等, 决定着带材的后续处理。有色金属行业和钢铁行业对金属板带材表

度、长度、宽度、在带材上的位置等, 决定着带材的后续处理。有色金属行业和钢铁行业对金属板带材表

收稿日期: 2014-04-10

第一作者简介: 黄秀琴(1978-), 女, 安徽休宁人, 工程师。

面质量的要求越来越高,因此表面缺陷检测系统作为提高产品质量检测与控制水平的重要手段,以其绝对优于人工的检测能力进入了各带材加工企业,成为未来有色加工设备必配备之一^[1-2],并逐渐演变为企业在激烈市场竞争环境下的一个刚性需求。近些年以来,国内各大钢铁企业、铝加工以及铜加工企业都是通过引进国外的检测系统^[2-4]对产品进行在线检测,比如美国的 Congnex 检测系统,德国的 Parsytec 检测系统等。进口设备价格非常昂贵,投入的设备成本高,后期维护成本也相对较高。国内不少高校和少数大型企业也对该技术进行了深入研究^[5-11],并取得不少成果,为检测系统的研发提供了很好的借鉴和参考价值。但对于有色金属加工,由于其中一些技术难点依然没有得到彻底解决,即使是国际领先的研究机构或商家暂时也不一定有能力提供成熟稳定的技术产品来全面满足实际生产的需要。因此,中色科技苏州有色金属研究院进行了带材表面检测系统的研发。2011 年开始在某厂铝带拉弯矫直机上进行现场测试评估,而后系统经过不断完善和提升,陆续在铝带、铜带加工企业现场得到成功验证。

1 表面检测系统设计

金属板带材的轧制速度通常都很高,如铝板材或铝箔在轧辊上的运行速度能达 200 m/min ~ 800 m/min,而每一个板带材表面的图像除了缺陷还有其他的一些良性聚类目标,比如脏污、油斑,这些都增加了图像处理算法的负载。同时,还要获取足够的缺陷样本用于模式识别算法训练,从而系统能够对缺陷进行分类,为用户提供可靠的检测报告。面对这样的高速数据流和海量的数据处理以及多个任务处理,在线检测系统首先要保证实时性,其次要设计出有效的检测算法和分类方法,这决定了算法和硬件架构的设计体系。金属板带材表面缺陷表现形式多样,而带材表面图像的背景多呈现不一致性即非均匀性,有效快速的检测算法是系统有效性和实时性的保证。

光学自动表面检测系统的系统构成如图 1 所示,分别由光学图像采集、数字图像处理、数据分析与存储单元以及人机交互控制台几部分组成。

光学图像采集单元由 LED 线性光源、工业线阵相机(Dalsa Spyder3 S3-20-04k40)、编码器(OMRON E6C3、3600ppr)组成。为了获取高质量的高速带材表面图像,提高系统抗干扰能力,采用了高均匀的超

亮 LED 线性光源(OEETech HS-PBS1500LSW)。线扫相机具有高光电灵敏度、光谱响应范围宽、分辨率高、量子效率高、体积小、噪声低、实时传输等特点,已经广泛地应用于工业测量和图像采集多个领域。因为单个相机难以覆盖带材整个宽度,所以上下表面都使用了两个或多个线阵相机。所有图像采集通道涵盖了带材的上下表面,从而不会有漏检区。图像采集信号由编码器的脉冲信号给出,传输给每个相机的采集卡,从而实现多相机同步采集以及图像采集与带材线速度的同步。

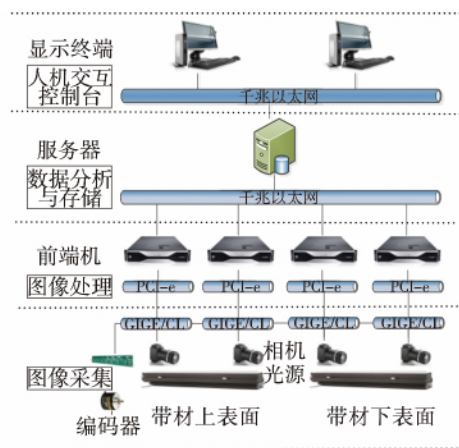


图 1 系统框架

Fig. 1 System framework

数字图像处理单元中,前端机处理程序对来自各采集通道的图像进行实时处理,负责缺陷分割、定位与特征计算,并将获取到的缺陷图像数据和特征数据在线传输至服务器。每个前端机处理其对应通道的相机图像。图像采集时并行独立同步的多个前端机对各通道图像的处理也是独立并行同步的,这样提高了整个系统的处理能力和速度。

数据分析与存储在服务器上进行,完成对数据的存储、分析、汇总和显示。服务器并行接收来自各前端机的图像处理结果,并存入数据库,同时服务器中的分类器对缺陷数据进行实时分类。分类器模块中设有一个缺陷样本库。用户可以根据自己的需要在样本库中设计缺陷样本类别,在类别中添加样本,一旦保存生效后,就用于后续的缺陷实时分类。当检测停止时,有关该卷料的所有信息都将存储到数据库中,供以后历史数据回顾。

人机交互控制台是操作显示终端,供用户进行检测操作控制、实时数据和历史数据查询,生成检测报告,以及分类器样本库整理。控制台的人机界面如图 2 所示。

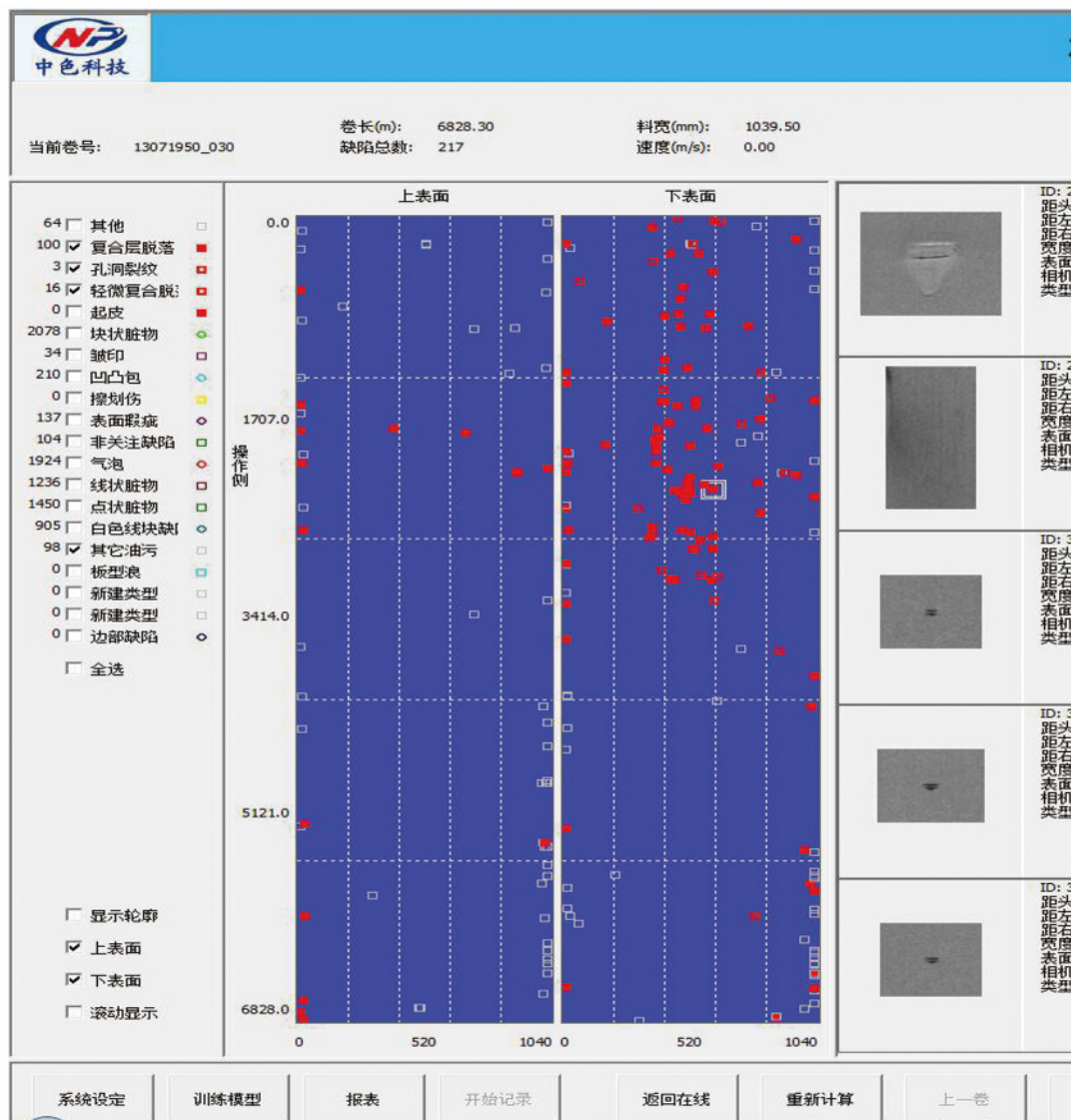


图2 系统界面

Fig. 2 Interface of the system

2 实时图像处理

线阵相机所采集的灰度水平为 255,灰度范围为 [0 255],图像分辨率为 4096 像素 × 2048 像素。相机采集的图像通常包含带材表面和辊面两部分:一部分背景是均匀的黑色,对应辊面;一部分是均匀的灰色,对应带材表面。在进行缺陷检测之前,通过边界检测方法,找到图像中辊面与带材表面的分界线,将图像中非带材表面部分去除,即去除图像中的辊面部分,然后对所得的新图像进行处理。整个图像处理的流程图如图 3 所示。图像预处理部分包含两个算法:图像去噪和非均匀性校正。采集到的原始图像含有噪声,会干扰目标缺陷的分割,通常在缺陷分

割前进行图像去噪;而线阵相机采集的带材表面图像存在非均匀性,即图像背景灰度分布不均,直接影响缺陷的检测,需要在缺陷分割前做适当的处理。



图3 图像处理流程

Fig. 3 Image processing flowchart

均匀的光照下,色泽均匀、光洁平整的金属带材的表面,理想情况是当相机对其成像时,所得图像所有像素的灰度值理论上应该相同,但实际感应芯片获取的带材表面图像存在非均匀性^[12-13],即图像背

景灰度分布不均。感应芯片的暗电流、量子效应、材质结构等局部差异性和各种噪声的存在,导致线扫相机本身对光源响应不一致,即对于相同的辐照度,像元产生的灰度值并不相同,甚至有一定的差异;而相机镜头边缘的 $\cos^4\theta$ 效应又减少了光通量传输,造成边缘图像的光照度远低于中心图像的^[14]。这些导致所采集的图像灰度分布不均匀,有明有暗,一般中间亮两边暗,有时会有明暗相间的条带,规律地分布在整个图像上。同时,外界环境中电机等的强电磁对感应芯片的性能产生的干扰,检测系统外界变化的光照(如厂房屋顶的灯光、外界的自然光等)对带材表面光照度的影响,以及带材本身不良板形,都会加重图像中的非均匀性。

在非均匀的图像背景下,无法设置一个合适的阈值来获取目标图像,增加了缺陷分割的难度。面对图像的非均匀性的影响,有很多专家提出了各种非均匀性校正算法^[12-14],但在宽幅金属板带材表面缺陷分割,更多的是没有引入非均匀性校正。有的专家采用边缘检测方法^[8]抑制背景的影响;有的针对不同的背景灰度,采用多个动态阈值分割法算法^[9];还有的根据一定的算法构建一个合适的背景参考图^[10-11],通过参考图像和原始图作差运算,即两幅图像相减,所得的图像称为两幅图的差分图,而后再在这个差分图像上进行缺陷阈值分割。为获取好的缺陷分割效果,本系统在借鉴以往的校正方法的基础上,提出了一种基于统计序列相关的在线自适应非均匀性校正方法,该方法根据线阵相机图像的统计序列特征,给定一个期望值,表示某一均匀光照场下,均匀表面成像的理想背景均值,再根据采集的历史图像信息和给定的期望值计算出图像的校正系数,最后根据金属带材表面呈现的非突变性给出校正包络曲线,将严重偏离图像正常灰度范围的像素校正到理想状态,得到一个灰度分布均匀,清晰度高的图像,提高了系统对于缺陷的检出率和工作的稳定性。因而在图像处理过程中,预处理模块中的图像去噪和非均匀性校正显得非常重要。

缺陷分割指缺陷目标的提取。基于卡曼滤波的缺陷探测方法为本系统提供了一种很好的思路^[15],也取得了很好的分割效果,但其实时性有待提高。由于不同带材表面的差异性和缺陷的多样性,往往一种缺陷分割方法不能对所有的图像都获取理想的分割结果,所以系统设置了三种方法:动态阈值方法,固定阈值方法和基于信息熵的分割方法^[16]。然后对各自的分割结果进行融合,得到最终的图像缺

陷目标。为了节省处理时间,提高实时性,对动态阈值方法设计了一种背景标定^[17]方法,为每一个图像动态设置两个恰当的阈值,进行图像缺陷分割。在阈值分割后所得的二值图中,可以很清楚地看到定位出的缺陷部分,然而也可以看到,分割后的目标缺陷可能不完整或者本来属于一个整体的缺陷被分成了多个。这直接影响后续缺陷的特征计算,从而极大影响分类精度;而缺陷数目的增加还加大了后续计算处理的负荷。为此根据缺陷的位置分布设计了一种缺陷合并方法^[18],以位置相邻度为主要判断依据,结合实际生产工艺需要与缺陷分布特点,按一定标准构成自动合并策略,将被分割成几部分的缺陷合并成完整的缺陷。图4为几个缺陷定位结果的例子,轮廓线所包含的部分为定位出的缺陷目标。

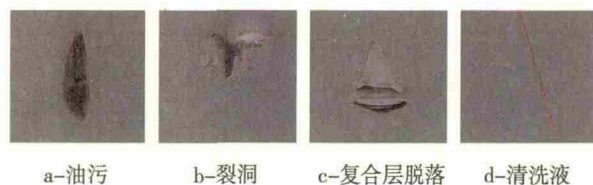


图4 缺陷提取结果

Fig. 4 Defects extraction results

然后计算缺陷目标在带材上的横向位置和纵向位置以及缺陷特征。缺陷特征包含几何特征、灰度特征和统计特征,总共有170多个特征。将目标缺陷图像和缺陷特征发送给系统的分类器,由分类器对缺陷进行实时分类。待分类的缺陷与分类器样本库中的样本进行相似度匹配,与哪类样本的相似度高,就标记为哪类缺陷。分类结果将实时显示到系统界面(图2)上,供用户在线查看表面质量。

3 现场应用

3.1 检测出的缺陷类别

图5为系统在拉弯矫直机组上的安装图。系统能检测出以下10多种缺陷:孔洞、复合层脱落、凹包、凸包、压痕、油斑、金属及非金属压入(如小虫、点状小东西)、非金属附着物、黑线、亮点、擦划伤、花纹等,如图6所示。

为了评估系统对缺陷的检测率,进行了很多现场实际数据测试。测试数据是已知缺陷状况的铝带料卷,这种缺陷是指用户所关注的缺陷比如复合层脱落、气泡等,因为每卷料上所谓的缺陷都是成千上万个,其实很多个缺陷并不是真正的缺陷,比如检测出带材上的虫子、脏污等,而有的缺陷比如凹凸包有

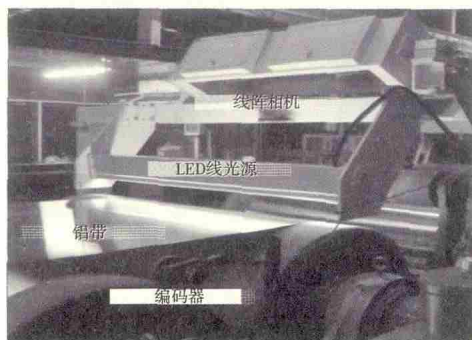


图5 检测系统现场安装图

Fig. 5 system setup

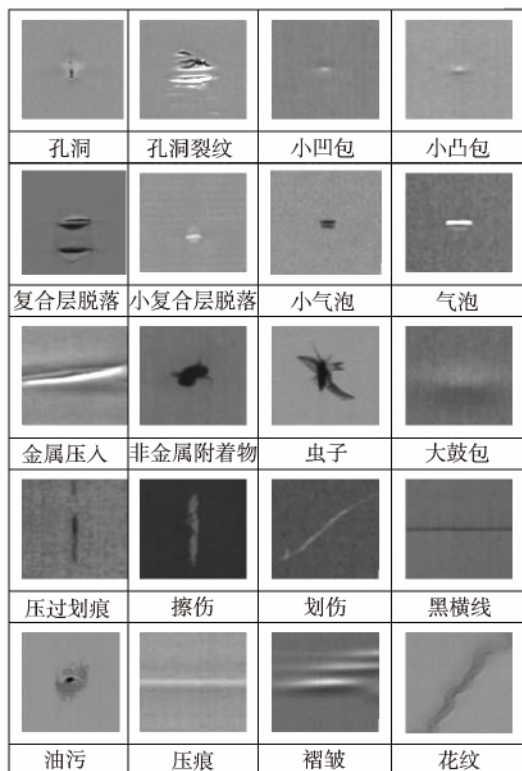


图6 检测出的缺陷图片

Fig. 6 Defects images of detection results

时上千个,但并不是用户所关注的。这种已知的用户所关注的缺陷状况是由国外引进的检测系统检出的结果,因为人工无法对料长4 km~8 km的带材进行扫描检测。测试的结果是,16卷带材上由国外系统检测出缺陷均被本系统检测出来,而且缺陷在带材上的横向位置和纵向位置均一一对应。本系统对另一卷带材的头部约70 m长部分的检测结果还与人工检测结果进行了对比。本系统对该段带材在线检测后,从该卷带材上将该段带材截取下来,由人工离线检测,核对本系统检测结果与实际是否相符。结果是,该段带材上的缺陷均被本系统实时检测出

来,而且系统计算出的缺陷在带材上的横向位置和纵向位置也与实际的一致。

3.2 检测精度

缺陷定位精度指缺陷在带材上的纵向精度和横向精度。缺陷在带材上的定位误差一般由两个因素组成:一个是缺陷在图像上的分割定位误差,一般在2个像素以内,可以忽略不计;另一个是将缺陷在图像上的位置(像素为单位)转换到在带材上的位置这一过程中产生的误差,该误差受带材长度和宽度计算误差的影响,而带材宽度和长度主要受检测时带材来料波动和图像分辨率的影响。图像中带材边界定位误差一般在2个像素以内,因而带材宽度误差主要受图像的横向分辨率影响;带材长度的计算是通过图像帧数和分辨率来计算的,主要受纵向分辨率的影响。误差是个线性累积过程,可引入一个增益因子来减小或修正该误差,该因子可以通过统计的方法获取。现场大量数据统计表明,本系统对带材宽度的计算精度为99.92%,对于带材宽度的计算而言,精度达到了99.92%以上,即是误差在0.08%以内,即对于实测宽度为1300 mm的带材,检测系统计算的值所属区间为[1299.2, 1300.8],平均误差为0.6 mm。带材宽度计算的精度直接保证了缺陷在宽度上的定位精度。缺陷在带材宽度方向上的定位误差不大于0.5 mm;其在带材长度方向的纵向定位误差不大于0.01%,完全满足实际生产需求。

分类器的分类精度与模型算法、特征选择以及样本库有关。样本库中的缺陷样本可以由用户根据带料的实际情况和自己的需求在其中设计缺陷样本类别,在类别中添加合适的样本,用于后续的缺陷实时分类。样本库的完善需要一定的时间,样本库中样本越完善,其分类精度越高。

3.3 统计报表

本检测系统可以提供三种报表。第一种是表面质量报表,对缺陷数据类型进行统计,并提供缺陷在整卷上的分布图。这种报表供选择的参数为缺陷类型和缺陷大小,质检人员可以根据需要设置这些参数,打印出所选缺陷的分布和统计结果形成对成品表面质量的一个整体评估,作为判定是否为合格品的一个重要依据。第二种是缺陷位置报表,提供所关注的缺陷在带材上横向和纵向位置,为后续剪切设备操作人员提供准确信息。第三种是缺陷工艺报告,为工艺技术人员提供缺陷的形状和属性,供工艺人员分析缺陷的形成机制,以便改进轧制工艺。

本系统于2011年第一套样机投入现场铝带拉

弯矫直机设备上运行,自2012年开始先后在铜带脱脂酸洗机组和铝带纵剪机上投入使用,至今已有两年多,其间系统在各方面的性能根据现场实际调试和用户的使用情况经过了多次升级,系统的性能越来越完善。

4 结束语

介绍了一种高速金属板带材表面缺陷检测系统,能自动在线检测和分类带材表面缺陷,并提供缺

陷的统计报表。目前该系统已在多个现场对铝板带和铜板带进行有效的表面检测,系统已稳定运行2年多,运行状态良好,为有色金属板材加工企业带来了良好的经济效益。随着本系统的应用推广,带来市场竞争效应,极大地拉低了国外进口设备对我国企业的售价。任何设备和系统的改进总是永无止境的,本系统的性能将在后续的市场竞争和现场的应用中不断升级。

参考文献:

- [1] 杨水山,何永辉,王振龙,等.带钢视觉检测系统的研究现状及展望[J].冶金自动化,2008,32(2):5-9.
- [2] 董梅,朱涛.表面检测技术在带钢生产线上的应用[J].安徽冶金,2004(1):28-31.
- [3] 白立东. Parsytec 表面检测仪在冷轧酸洗的应用[J]. 连钢科技与管理,2010(1):25-28.
- [4] 刘小军,李斌,顾晓琳,等. Cognex 表面检测仪在八钢 1750mm 热轧的应用[J]. 新疆钢铁,2010(115):11-13.
- [5] WU Guifang, KWAK Hoonsung, JANG Seyoung et al. Design of online surface inspection system of hot rolled strips [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics [C]. Qingdao, IEEE Press, 2008: 2291-2295.
- [6] ZHAO Jie, YANG YongMin, LI Ge. The cold rolling strip surface defect on-line inspection system based on machine vision [A]. 2010 Second Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System [C]. Beijing: IEEE Press, 2010: 402-405.
- [7] 王丹民,康勇.钢板表面质量机器视觉检测系统设计[J].自动化仪表,2011,32(3):44-46.
- [8] 易爱春,龙永红,黄晓清.一种基于视觉的表面质量检测方法[J].湖南工业大学学报,2008,22(6):46-49.
- [9] 艾矫健,李飞,朱立新,等.一种基于线扫描技术的带钢表面检测系统[J].首钢科技,2007(5):50-54.
- [10] 赵薇.带钢表面缺陷检测及分割技术研究[J].机械设计与制造,2010(10):224-226.
- [11] YANG Yanxi, LI Qi, CHEN Ping et al. Strip surface defect detection algorithm based on background difference [A]. 2010 second pacific-asia conference on circuits, communications and system (PACCS) [C]. 2010(2):23-26.
- [12] 程万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J].光学精密工程,2008,16(2):314-318.
- [13] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guohua et al. Scene based nonuniformity correction based on block ergodicity for infrared focal plane arrays [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(9): 833-840.
- [14] 徐树兴,王宝光,郑义忠.线阵 CCD 平场校正及 FPGA 实现的研究[J].宇航计测技术,2012,27(6):34-37.
- [15] ZHAI Ming, JING Zhongliang, FU Shan et al. Defect detection in aluminum foil by measurement-residual-based chi-square detector [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2011, 53: 661-667.
- [16] 罗新斌,黄秀琴,邢青青.一种在线铝带表面缺陷检测方法[J].有色金属加工,2013,42(5):44-47.
- [17] 邢青青,罗新斌,黄秀琴,等.铝板带表面检测缺陷自适应分割方法[J].有色金属加工,2012(6):42-44.
- [18] 罗新斌,傅山,黄秀琴,等.透射式高速铝箔针孔检测系统[J].冶金自动化,2013,38(2):53-59.