

基于 FPGA 的烟梗在线检测系统设计

席建平¹, 易浩¹, 刘斌¹, 毛伟俊¹, 胡国昌¹, 张辉¹, 吴文强¹, 杭建军², 杨勇²

1 湖南中烟工业有限责任公司技术研发中心, 长沙市雨花区劳动中路386号 410008;

2 深圳市格雷柏机械有限公司, 深圳市福田区天安数码城创新科技广场B1710室 518040

摘要: 为了实现烟片中烟梗的在线检测并剔除, 设计了一种以基于 FPGA 的高速图像处理设备为核心的烟梗在线检测系统。该系统采用 X 光源透射皮带上的烟叶以及烟梗, 探测器接收衰减的 X 射线, 形成数字图像并传送到高速图像处理设备, 在高速图像处理设备中采用图像处理算法进行烟梗图像识别, 再通过控制剔除子设备分离出烟片中的烟梗, 同时可通过工控机观察烟梗图像。实验结果表明该系统可以实现大部分烟梗的识别, 且剔除率可达到 90% 以上。

关键词: 烟梗; FPGA; 图像处理; 在线检测

引用本文: 席建平, 易浩, 刘斌, 等. 基于 FPGA 的烟梗在线检测系统设计 [J]. 中国烟草学报, 2016, 22 (5)

烟片原料的纯净度在很大程度上决定着烟支的品质, 烟片原料的纯净度越高, 生产出的烟支品质就越高, 而烟梗是影响烟片原料纯净度最大的因素, 因此去除烟片中的烟梗是烟支生产过程中一项重要工艺^[1-2]。目前, 行业对烟叶中含梗烟片剔除方式包括人工精选和自动化辅助两种模式。人工精选, 采用选叶工逐片筛选方式, 费时费力, 效率低下; 自动化辅助精选模式主要有两种, 第一种采用风选方法, 通过抛落抽风等方式将与烟片悬浮速度差异较大的含梗烟片剔除^[3-5]。其缺点是设备稳定性相对较差, 风分效率难以精确控制。第二种方法采用一定的自动化技术, 将大流量烟叶自动按照节拍分到多个皮带上, 皮带将烟叶传输至选叶工位前, 选叶工将含梗烟叶挑选出来并人工去除烟梗。这种模式效率相对有所提升, 速度可达到 20 公斤/小时/人。目前, 从国内外的相关文献报道来看, 国外尚没有一种自动化精确分离含梗叶片的设备, 国内通过图像处理技术检测剔除含梗叶片的相关研究相对也较少, 都无法应用于实际生产。为了解决以上问题, 采用 X 射线透射成像, 通过基于 FPGA 的图像处理识别烟叶中的含梗烟片并且剔除, 是一种有效的自动去除片烟中的烟梗的方法。FPGA 有如下特点: ①采用 FPGA 设计专用集成电路, 无需投片生产就可以得到合用的芯片; ②FPGA 内部有丰富的触发器和 I/O 引脚, 可以与 COMS, TTL 电平兼

容, 易于设计; ③FPGA 是专用集成电路中设计风险最小、开发费用最低、设计周期最短的器件之一。本文着重描述了以基于 FPGA 的高速图像处理设备为核心的烟梗 X 光透射在线检测剔除系统以及在线检测并剔除烟片中烟梗^[8-10]的应用效果。

1 系统总体架构及原理

在生产线上, 有烟梗的烟叶在传送带上进行传输, 烟梗在线检测属于动态检测, 因此对烟梗在线检测系统的要求很高。传统的工业检测系统通常用工控机作为系统的核心, 但由于工控机具有实时性差、稳定性差、成本高等缺点, 在工业环境下无法长期稳定运行。本系统是以基于 FPGA 的高速图像处理设备为烟梗图像数据的处理核心, 将工控机作为系统的用户交互控制中心, 系统的总体架构见图 1。



图 1 系统总体架构

Fig.1 Overall architecture

从系统架构图可以看出, 本系统以 X 射线探测器作为系统的图像源, 这是由于常用的图像光谱法很难找到烟梗和烟叶的显著的、稳定的区分特征, 尤其

作者简介: 席建平 (1975—), 本科, 高级工程师, 主要从事卷烟工艺研究, Tel: 0736-7299080, Email: xijp1005@hngytobacco.com

通讯作者: 易浩, 硕士, 研究员, Tel: 0731-85559171, Email: yih1114@hngytobacco.com

收稿日期: 2015-04-24

是当烟叶一定程度的层叠或相互遮盖时，烟梗检测几乎变得不可能。而烟叶与烟梗最大的物理特性差异在于密度差异，烟梗部分的密度远大于烟片的密度，因此采用 X 射线成像原理可得到烟梗的图像。将一定强度的 X 射线照射在含烟梗的烟叶上，会在放置于另一侧的 X 射线探测器上形成不同灰度的图像，烟叶区域只是淡淡的阴影，而烟梗则呈深色阴影。X 光源采用瑞士 comet 公司的金属陶瓷管，额定功率为 1500W，探测器采用德国 DT 公司的线扫描探测器，感应像元大小为 0.4mm*0.6mm，经过实验验证，X 光源的参数设定在电压 75kV，电流 2mA 时，射线的辐射强度为 30W/m²，此时烟梗图像最有利于软件对烟梗的识别，同时误识别的烟叶很少。因此，设备采用的 X 光源参数设定为电压 75kV，电流 2mA。

X 射线探测器采集到烟梗图像后，通过 Cameralink 接口将原始烟梗图像传输到基于 FPGA 的高速图像处理设备中，利用高速图像处理设备对原始烟梗图像进行进一步的烟梗检测分析，并生成烟梗的位置信息和剔除指令，通过 RS422 接口将剔除指令传输给系统中的剔除子设备，利用该设备将烟梗从烟叶流中分离出来，从而实现烟梗在线检测剔除的目的。

在本系统中，工控机仅仅作为用户与本系统的交互中心，并不进行图像数据的分析，用户只是通过工控机查看烟梗图像或设置系统参数，因此对于工控机的性能要求不高。另外，本系统使用千兆以太网作为高速图像处理设备与工控机之间的通信方式。

2 高速图像处理设备硬件设计

高速图像处理设备作为烟梗在线检测系统的数据处理核心，其硬件设计的质量直接影响着整个系统的工作性能，是本系统最重要的一部分。其硬件结构主要为 FPGA（现场可编程门阵列）系统。FPGA 有以下特点：1、采用 FPGA 设计专用集成电路，无需投片生产，就可以得到合用的芯片；2、FPGA 内部有丰富的触发器和 I/O 引脚，可以与 COMS 存储器，TTL（晶体管-晶体管逻辑电平）电平兼容，易于设计；3、FPGA 是专用集成电路中设计风险最小、开发费用最低、设计周期最短的器件之一。系统硬件部分主要包括以下部分：FPGA 主控模块，探测器图像输入模块，监视图像输出模块，剔除控制 IO 模块。高速图像处理设备硬件框图如图 2 所示。

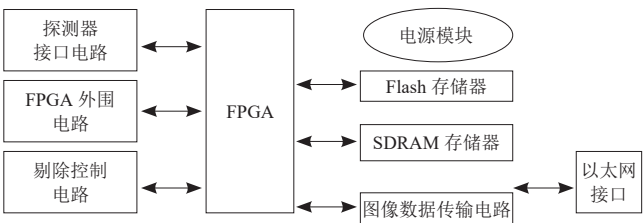


图 2 高速图像处理设备硬件框图

Fig.2 Diagram of high-speed image processing devices

X 射线探测器采用 Cameralink（一种标准高速接口）接口实现图像数据的传输，Cameralink 接口具有传输速度快，抗干扰性强的优点，是工业用相机最常用的传输接口。采用探测器图像输入模块实现 Cameralink 接口和 FPGA 的 IO 接口之间的转换。通过该电路，FPGA 即可接收到来自 X 射线探测器输出的图像。传统工控机使用了专门的图像采集卡实现 Cameralink 和工控机的 PCIE 总线的接口之间的转换。成本要远大于 FPGA 的制作成本。

FPGA 外围电路包括时钟电路和配置电路。其中时钟为 FPGA 内部数字逻辑提供同步信号。配置电路用于将编写好的程序加载到 FPGA 中，包括 JTAG 配置方式和快速被动并行配置方式。剔除控制电路用于将烟梗剔除指令传输给剔除子设备，使用 RS422 通信方式，该方式的传输信号采用差分信号，因此本部分电路同样也是用于实现差分信号和 TTL/COMS 单端信号之间的转换。如图 3 所示，图像上每个位置都有相应的气阀与之对应，一旦计算出有烟梗，FPGA 主控模块就会控制剔除，在相应的时间和位置打开相应的气阀。

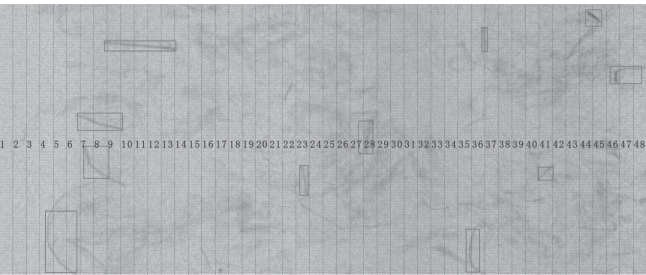


图 3 梗检测结果与气阀的位置关系

Fig. 3 Relationship between the location of the valve and detection results

图像数据传输电路用于实现高速图像处理设备与工控机之间的数据通信。系统配备了 FLASH 存储器，能够为整个控制系统存储一些需要保留的系统数据。由于图像处理速度较高，需要向监控工控机传输的图像数据也比较庞大，为了满足这一要求，系统使用了

千兆以太网, 传输图像数据以及系统控制指令。

3 软件设计以及图像算法

高速图像处理设备是系统中图像数据处理的核心, 其运行程序是本系统中的研究重点。高速图像处理设备运行程序工作流程如图 4 所示, 其中灰色模块是核心程序, 用于处理烟梗图像数据, 采用 Verilog 硬件描述性语言实现。

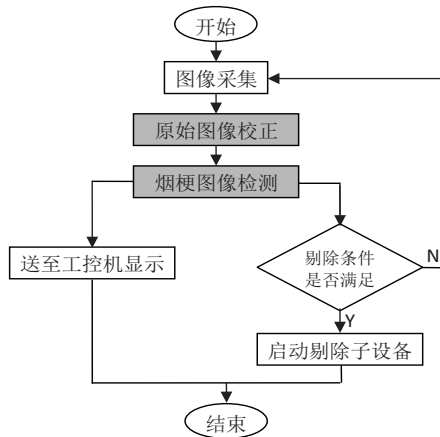


图 4 高速图像处理设备软件流程

Fig.4 Process diagram of high-speed image processing software

3.1 原始图像校正

在均匀射线强度照射下, 由于探测器中各个像元响应程度的不一致, 使得采集到的图像出现凹凸不平的现象, 必须采取算法对图像进行校正。图像校正的算法公式如下:

$$Gain = \frac{Y_H - Y_L}{\bar{X}(i,j) - \bar{X}_{no}(i,j)} \quad Offset = \bar{X}_{no}(i,j)$$

$$Z(i,j) = Gain * R(i,j) + Offset$$

其中 Y_H 表示白校正后图像灰度的最大值, Y_L 表示白校正后图像灰度的最小值, $\bar{X}(i,j)$ 表示在有软 X 射线均匀照射下的每个像元的响应平均值, $\bar{X}_{no}(i,j)$ 表示在无软 X 射线均匀照射下的每个像元的响应平均值。 $R(i,j)$ 为系统正常运行过程中采集到的原始图像, $Gain$ 表示图像白校正的增益, $Offset$ 表示图像白校正的偏差, $Z(i,j)$ 为通过白校正算法处理后的图像。

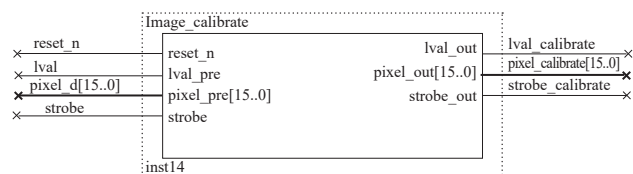


图 5 图像校正模块

Fig.5 Image correction module

图 5 中所示的是 Verilog 语言实现的图像校正模块原理图, 图中左边输入的是原始图像数据相关信号, 包括行有效、图像数据和锁存时钟, 右边输出的为经过算法校正后的图像数据相关信号。

3.2 烟梗图像检测

在校正后的图像中, 通过人眼能够明显地看到烟梗处的灰度比其他地方灰度更深, 烟梗的边缘十分明显, 因此采用基于边缘检测算子的方法来检测烟梗是可行的。本文综合目前常用的 Sobel、Roberts 和 Prewitt 边缘算子, 对烟梗边缘进行检测识别, 采用形态学算法对检测出的烟梗边缘进行初步过滤, 并利用连续性和边缘宽度对烟梗边缘进行进一步的判别, 使得真正的烟梗边缘被保留下来^[10]。

$$d_x = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad d_y = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$d_r = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad d_s = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

d_x 和 d_y 分别为 3×3 水平方向和垂直方向的烟梗检测算子, d_r 和 d_s 分别为 3×3 对角方向的烟梗检测算子, 用于位置不同方向上的烟梗。以水平方向为例, 其运算过程是: 将当前处于此 3×3 矩阵中的像素值分别与算子中的参数相乘, 再求出每行的和, 记为 $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$, 然后将事先设定好的阈值与 $L1+L2$ 和 $L3+L2$ 进行比较, 若其中一个满足阈值条件, 即说明该像素为烟梗并标记为 1, 否则标记为 0。垂直方向则计算列和, 再进行比较判断。

在试验过程中发现, 模板的阶数太小会导致无法识别较粗的烟梗, 改用 15×15 的算子可以满足大部分烟梗识别的要求。图 6 所示是烟梗检测部分的原理图。

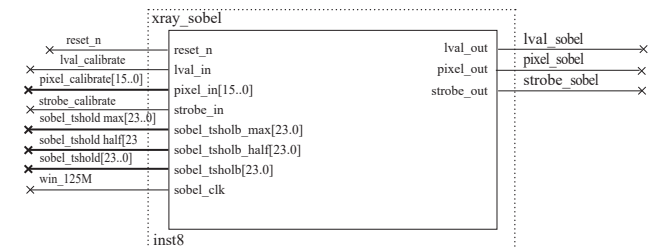


图 6 烟梗图像检测模块

Fig.6 Tobacco stem image detection module

4 设计验证

4.1 FPGA 采集图像的验证

将 X 射线探测器放置于 X 射线源正下方, 用于

传送烟片的传送带位于探测器和 X 射线源之间，剔除子设备位于传送带出口位置，并将系统中各个组件使用相应的接口线连接起来。当均匀铺洒在传送带上的烟片经过 X 射线扫描后，由探测器采集到的图像将传输到高速图像处理设备中进行烟梗识别检测，若检测到烟梗即产生剔除指令并传输到剔除子设备进行烟梗剔除，同时在高速图像处理设备中处理后的图像可传输到工控机显示。图 7 和图 8 分别为原始烟梗图像和烟梗识别后图像。从图中可看出 1.5mm 以上的烟梗均可识别出来，效果良好。

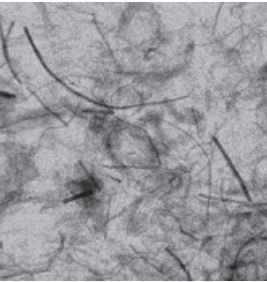


图 7 原始烟梗图像
Fig.7 Original image

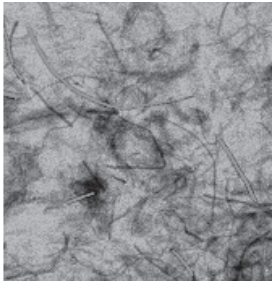


图 8 烟梗识别效果
Fig.8 Detection performance

4.2 FPGA 算法以及硬件时序的验证

选取 100 片烟梗直径在 1.5 mm 以上的含梗烟片和 100 片叶脉直径在 1.5 mm 以下的烟片，涂上不同的颜色加以区别。分别投入设备进行算法验证实验。经过多次实验取平均，烟梗直径 1.5 mm 以上的含梗烟片识别率在 91.1%，叶脉直径在 1.5 mm 以下的烟片被误识别为烟梗的比例为 8.2%，识别效果达到设计要求，被误识别为烟梗的烟片，大多数属于叶脉直径接近 1.5 mm，同时有部分折叠程度很高的烟片，也被识别成烟梗。总体来说，识别率和误识别率，都达到了设计要求。

将整个 X 光成像系统、FPGA 处理系统和剔除子系统连接之后，皮带以 2 m/s 的速度运行，投入 100 片烟梗直径 1.5 mm 以上的含梗烟片，进行时序验证。多次实验结果表明，投入的含梗烟片剔除率为 99.2%，这个实验表明，FPGA 的时序控制精度，已经能够满足传送速度为 1.2 m/s 的烟叶输送、检测、剔除要求。

5 FPGA 与工控机方式对比

5.1 图像采集方式的对比

FPGA 方式降低电压差分信号转化为 TTL/COMS 单端信号进行接受，工控机方式一般用图像采集卡进行采集。两种方式都比较稳定但后者成本较高。

5.2 图像处理能力的对比

工控机方式采用 I7-2600 的 CPU，4M 内存。

表 1 工控机方式与 FPGA 方式效果对比

Tab.1 Comparison between IPC and FPGA

	单幅图像处理 时间（1M）	图像最大 吞吐量	长时间工作 稳定性
工控机方式 （C 语言算法）	20.5ms	48.8M/S	一般
FPGA 方式	11ms	90.9M/s	较好

5.3 剔除控制的对比

工控机方式通过串口将剔除信号发送到单片机，由单片机及信号放大电路控制剔除气阀，无法采用硬件时序控制，存在时间误差。而 FPGA 方式可以通过电路，直接输出剔除信号，所有时序由硬件控制，确保剔除的稳定性和时间准确性，工控机方式在时序上，则有小幅的误差，同时容易受到环境信号的干扰。

5.4 成本对比

单个 FPGA 方式的开发成本高于工控机方式，而在批量的情况下 FPGA 方式的成本为工控机方式的 30%~60%。

5.5 开发周期与调试周期对比

FPGA 方式的开发过程相较于工控机方式较为复杂，对于要求工期较短，而算法又不成熟的项目，FPGA 方式不具有优势，而对于大批量的成熟项目，FPGA 方式则具有优势。

6 应用效果验证

为了验证上述烟梗检测剔除技术的可靠性，在湖南中烟公司利用某 A 类品牌进行了对比测试。采用多批次 A 类品牌不同等级的烟叶对样机进行了试验验证，考核单机的烟梗有效剔除率、误剔率这两项关键性能指标。指标计算方法如下：

烟梗有效剔除率 = $\frac{\text{剔除口收集的烟梗总重量}}{\text{原料中烟梗总重量}} \times 100\%$

误剔率 = $\frac{\text{剔除口叶梗总重量}}{\text{入口原料总重量}} \times 100\%$

在测试流量 300kg/h 下，皮带速度为 0.6m/s，烟叶占皮带面积的 80%，烟叶双层重叠部分约为 40%，采用 A 类品牌 X1、Y1、W6 等多等级多批次烟叶进行测试，剔除目标为直径 1.5mm 以上的烟梗。其剔除率和误剔率如图 9 所示，其中，X 坐标为三个品牌的多次测量，Y 坐标为剔除率以及误剔除率。

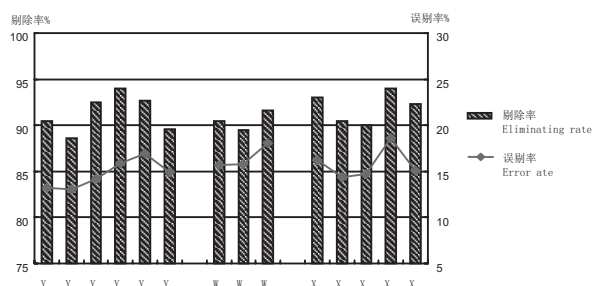


图9 多批次下的剔除率和误剔率测试数据

Fig.9 Eliminating rate and error rate of the test data between different batches

可以看出,在额定流量下,试验样机的烟梗剔除率基本都在90%以上,误剔率都在15%左右,均能满足检测剔除设计要求。

7 结语

以基于FPGA的高速图像处理设备为核心的烟梗识别系统具有速度快、体积小、易操作等特点。本系统可以快速从烟叶流中识别出烟梗,并将图像数据传输到工控机进行显示,结合形状判定因子控制剔除子设备分离出烟梗,从而实现烟叶流中含梗烟的在线检测识别。验证效果表明,通过该系统进行识别分离后的烟片流中含梗烟含量能够大大降低,输出的合格烟片纯净度能满足正常生产要求。在打叶复烤工序,对于剔除的烟梗和含梗叶片可以通过皮带传输到打叶机组进行再次打叶处理。在制丝工序,也可以配备小打叶机进行烟梗去除。

参考文献

- [1] 罗海燕,方文青,杨林波,等.叶中含梗率与相关打叶质量指标的关系[J].烟草科技,2005(07):11-13.
LUO Haiyan, FANG Wenqing, YANG Linbo, et al. Relationship between ration of stems to leaves and related leaf quality indicators [J]. Journal of tobacco science and technology, 2005 (7): 11-13.

- [2] 董斌,陈瑞,左季,等.基于FPGA的烟支检测系统的设计[J].电子元器件应用,2010,(12):7-11.
DONG Bin, CHEN Rui, ZUO Ji, et al. Detection system based on FPGA design [J]. Journal of electronic applications, 2010, (12): 7-11.
- [3] 张俊荣,李艳华,等.一种多功能烟叶风选除杂方法及设备[P].中国专利:2010106189466,2010-12-31.
ZHANG Junrong LI Yanhua, et al. A multi-functional winnowing impurities removal method device in leaf production line[P]. China patent: 20101061894662010-12-31.
- [4] 黄建彩,风选除杂技术在打叶生产线中的应用[J],龙岩学院学报,2007,25(6):68-70.
HUANG Jiancai. Winnowing subtraction technology application in the leaf production line [J], Journal of Longyan Institute, 2007, 25 (6): 68-70.
- [5] 马春丽,李纶,马仁刚.打叶复烤中非烟杂物剔除工艺[J],郑州轻工业学院学报,2007,22(4):26-28.
MA Chunli, LI Guan, Ma Rengang. Non-tobacco removal techniques in tobacco leaf redrying process[J], Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry, 2007, 22 (4): 26-28.
- [6] 南京大树科技股份有限公司,烟草异物剔除系统[P],中国专利:2010205779334,2010-10-27.
Nanjing Tree Technology Co., Ltd., Tobacco impurities removal system [P], China patent: 2010205779334, 2010-10-27.
- [7] 郭粉林,廖光军,王艺斌,光学烟叶杂物分选机的原理与结构[J],烟草科技,2002,3:22-24.
GUO Fenlin, LIAO Guangjun, WANG Yibin. Mechanism of optical sorting system for detection and removal of tobacco leave impurities [J], Tobacco Science and Technology, 2002, 3 22-24.
- [8] 于建军, CameraLink 在视频控制系统中的应用[J], 光机电信息, 2011, 28(5): 42-45.
YU Jianjun. Application of CameraLink in video control system [J], OME Information, 2011, 28 (5): 42-45.
- [9] (美)塞弗特.千兆以太网技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2000.
Seifert, R. Gigabit Ethernet technology and applications for high speed LANS[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2000.
- [10] 刘俊敏.工业X射线检测图像处理关键技术研究[D].重庆大学,2006.
LIU Junmin. Industrial X-ray detection key techniques of image processing [D]. Chongqing University, 2006.

Design of online tobacco stems detection system based on FPGA

XI Jianping¹, YI Hao¹, LIU Bin¹, MAO Weijun¹, HU Guochang¹, ZHANG Hui¹, WU Wenqiang¹, HANG Jianjun², YANG Yong²

¹ Research & Development Center, China Tobacco Hunan Industrial Co., Ltd., Changsha 410008, China;

² Shenzhen Greatpack Co., Ltd., Shenzhen 518040, China

Abstract: An online detection system with high-speed image processing computer based on FPGA was designed for removal of tobacco stems. X-ray detector was adopted to collect data, which was then sent to high-speed image processing computer with appropriate image processing algorithms used for detection of tobacco stems. A removing sub-device was then activated to separate tobacco stems from leave tobacco. Experimental results showed that the system can identify and remove most of the stems with removal rate up to 90%.

Keywords: tobacco stem; FPGA; image processing; online detection

Citation: XI Jianping, YI Hao, LIU Bin, et al. Design of online tobacco stems detection system based on FPGA [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(5)