

基于 FPGA 的水溶膜生产裂纹图像识别

吕常智¹, 景大智¹, 宋俊²

(1. 山东科技大学, 青岛 266590; 2. 青岛有屋科技有限公司, 青岛 266318)

摘要: **目的** 针对水溶膜(PVA)生产中出现的问题, 设计一种基于FPGA的水溶膜裂纹图像检测系统, 实现生产中产品质量的及时反馈。**方法** 结合FPGA自身的优点构建系统硬件组成, 设计与之相匹配的图像采集、数据存储、图像处理、图像显示等功能模块。对灰度变换、图像分割等传统图像处理算法进行优化, 利用Xilinx公司的ISE软件在SystemGenerator软件平台上对设计做仿真实验, 将采集到的水溶膜裂纹图像进行图像处理, 通过识别到的水溶膜质量缺陷来验证设计方案的可行性。**结果** 仿真及实验表明, FPGA可以利用高速的数据并行处理方式进行图像处理, 并应用于水溶膜裂纹图像识别。**结论** 该系统为水溶膜裂纹的自动识别提供了新的途径, 具有一定的市场价值。

关键词: FPGA; 图像识别系统; 图像处理

中图分类号: TB486⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)07-0091-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.07.017

The Image Recognition of PVA Crack in Production Based on FPGA

LYU Chang-zhi¹, JING Da-zhi¹, SONG Jun²

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Qingdao Eoroom Technology Co., Ltd., Qingdao 266318, China)

ABSTRACT: The work aims to design a PVA crack image detection system based on FPGA with respect to the problems in the production of PVA, to achieve the timely feedback of product quality in production. The hardware components of the system were built combined with the advantages of FPGA, and the functional modules matching with such components were designed, including image acquisition, data storage, image processing, image display and so on. By optimizing the gray level transformation, image segmentation and other traditional image processing algorithms, Xilinx ISE software was used to simulate the design on the SystemGenerator software platform. The collected PVA crack images were processed. The feasibility of the design scheme was verified by identifying the PVA quality defects. Simulation and experimental results showed that FPGA could use high-speed data parallel processing to perform image processing and apply to the image recognition of PVA crack. This system provides a new route for PVA crack automatic recognition and it has certain market value.

KEY WORDS: FPGA; image recognition system; image processing

水溶性塑料薄膜(以下统称为水溶膜)被国内外的环保部门誉为 21 世纪最成功的绿色环保包装材料。它作为新型环保包装材料越来越多地出现在人们日常生活中,但是受到现有的制造工艺和设备精度的限制,在生产过程中会产生带有划痕、裂纹的不合格产品。如何在生产中对质量缺陷进行识别是国内外水溶膜生产企业普遍存在的难点^[1-6]。

传统的无损检测主要依靠超声和射线,但 2 种检测方法会对产品和操作人员造成伤害,不适用于水溶膜的质量检测;新兴的声发射法也有成本和技术的限制^[7-9]。文中选用 FPGA 来建立图像处理系统,依靠其灵活性好、开发周期短、成本低的特点,采用数字图像处理检测法开发一套识别水溶膜质量缺陷的装置^[10-13]。

收稿日期: 2017-08-30

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2016EEP10); 国家科学基金青年基金(61703242)

作者简介: 吕常智(1971—),男,副教授,主要研究方向为检测技术及其自动化装置。

1 系统架构和硬件设计

图像检测系统主要进行对图像数据的采集、存储、处理和显示等操作。系统的硬件框架见图 1, 主要包括处理器、摄像模组、LCD 液晶屏显示和存储部分。摄像头采集到水溶膜图像, 经过存储模块缓存, 再传入图像处理模块中, 依据图像的特征信息, 执行预先设计的图像处理算法, 处理后通过液晶显示屏实时显示。

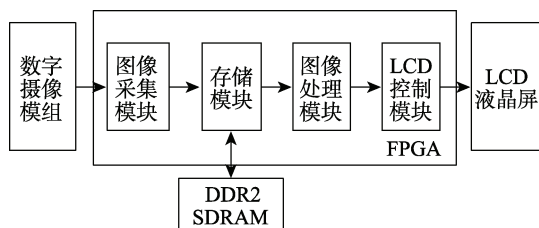


图 1 图像检测系统的硬件框图

Fig.1 Block diagram of image detection system hardware

选用 FPGA 作为主控芯片来搭建硬件架构, 对各主要模块的软件的设计进行了描述, 重点侧重于图像处理模块的算法分析以及仿真模型搭建, 通过硬件测试验证了该设计的可行性, 创新地将 FPGA 应用于水溶膜裂纹图像的识别。

2 裂纹图像识别的 FPGA 设计

2.1 软件设计的总体方案

软件的设计与仿真是在 Xilinx 公司的 ISE 软件和 SystemGenerator 软件平台上进行^[14-15]。系统软件设计的总体框图见图 2, 顶层模块定义了 FPGA 与外部设备的输入输出端口。Camera 模块负责从摄像头 OV5640 中采集图像信息, 上电延时模块产生相应的延迟来满足 OV5640 上电的要求。配置模块通过 I²C 与 OV5640 通信完成摄像模组的寄存器配置。DDR 读写模块调用 Xilinx 的 MIG IP 核实现对 DDR 数据的操作。图像处理模块用于裂纹的识别, 灰度变换采用查找表法, 图像分割模块实现阈值分割。LCD 模块实现 LCD 屏的图像显示。

1) 图像采集。该设计选用的 LCD 屏像素为 480×272, 对 OV5640 的操作要进行寄存器的配置, 使之输出的图像满足 LCD 屏的像素要求。OV5640 采样时序的要求见图 3。检测 VSYNC (场同步信号) 的上升沿, 拉高 HREF (行同步信号)。需注意的是, OV5640 输出的数据为 8 bit 的图像数据, 在读取第 8 位数据时产生 1 次 SRAM 的写操作, 用于后期基于查表法的灰度变换。

2) DDR 存储。DDR 读写控制模块主要实现 DDR 写请求信号的上升沿的检测、DDR 读请求信号的上

升沿的检测、DDR 写程序、DDR 读程序。调用 Xilinx 的 MIG IP 控制器对 DDR 中数据进行操作。MIG_37 控制器完成后, 就可以在 DDR 读写控制模块通过操作 MIG 控制器的命令 FIFO (First Input First Output), 读 FIFO 和写 FIFO 来读写 DDR 存储器中的数据, 其逻辑结构见图 4。

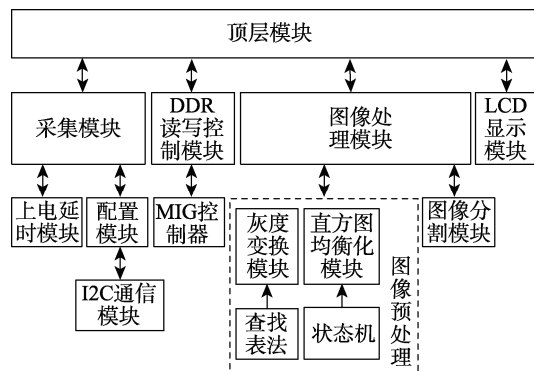


图 2 系统软件设计的总体框图

Fig.2 The general block diagram of the system software design

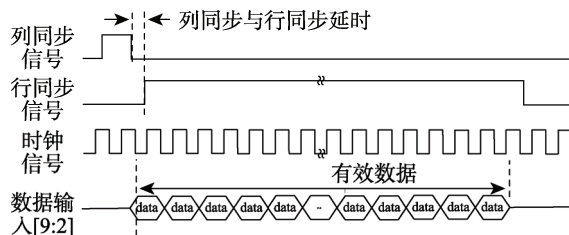


图 3 OV5640 的采样时序

Fig.3 The sampling sequence of OV5640

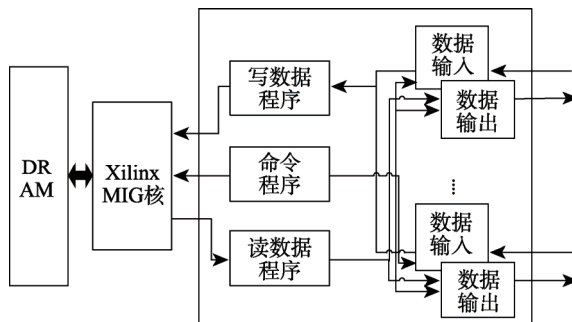


图 4 FIFO 逻辑结构

Fig.4 FIFO logical construction

3) LCD 显示。LCD 模块实现 LCD 屏从内存读取图像的显示, 按照 LCD 屏的 datasheet 产生行同步和列同步, DE 和图像数据信号的时序。每一帧图像显示完成后产生 DDR 读地址复位信号, 使的 DDR 的读地址回到存储图像的起始地址。64 位 DDR 图像数据转化为 4 个像素的 RGB 24 色的图像输出。每个像素的蓝色为 5 bit, 绿色为 6 bit, 红色为 5 bit。输出到 LCD 的时候需要把低位做颜色的补偿。LCD 屏的 DE 模式的显示时序要求见图 5。

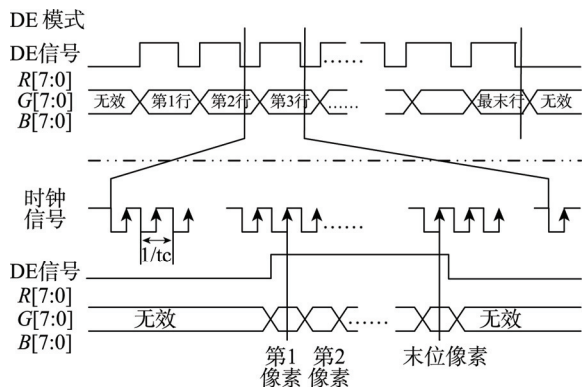


图 5 LCD DE 模式下的显示时序

Fig.5 The display timing sequence in LCD DE mode

2.2 图像处理主要模块设计

2.2.1 灰度变换与直方图均衡预处理

该设计选择处理效果好并且易于在硬件平台上实现的加权平均算法,将彩色图像中每个像素的颜色的 R 、 G 、 B 3 个分量以不同的权值进行加权平均。式 (1) 对 RGB 的 3 个分量进行加权平均能得到较合理的灰度图像。

$$Y = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (1)$$

式 (1) 中涉及大量的浮点运算,影响整个系统的实时性,因此对灰度变换的算法进行优化。式 (1) 优化为:

$$Y = (R \times 1224 + G \times 2404 + B \times 467) / 4096 \quad (2)$$

式中: $/4096$ 的除法是 2 的 12 次方,可以用移位操作代替,向右移 12 位就是进行除以 4096,优化后利用查找表法进行运算。在 Matlab 中调用 `rgb2gray` 函数,利用加权平均法将彩色图像转化为灰度图像。

直方图均衡化的算法为:

$$I_i = \frac{\sum_{j=0}^i n_j}{n} \times 255 \quad 0 < i < 255 \quad (3)$$

式中: i 为灰度值; I_i 为均衡化后的灰度值; n_j 为灰度值为 j 的像素个数; n 为总像素数。

直方图均衡化处理过程有 3 步:第 1 步将图像的不同灰度值的像素个数进行统计,得到统计个数;第 2 步累加运算;第 3 步将第 2 步所得结果乘以 255 后再除以像素总数 n 。

在 SystemGenerator 下搭建的图像预处理的模型见图 6。彩色图像的数据信号经过查找表法和相关的数学运算与移位操作得到灰度变换的计算结果。

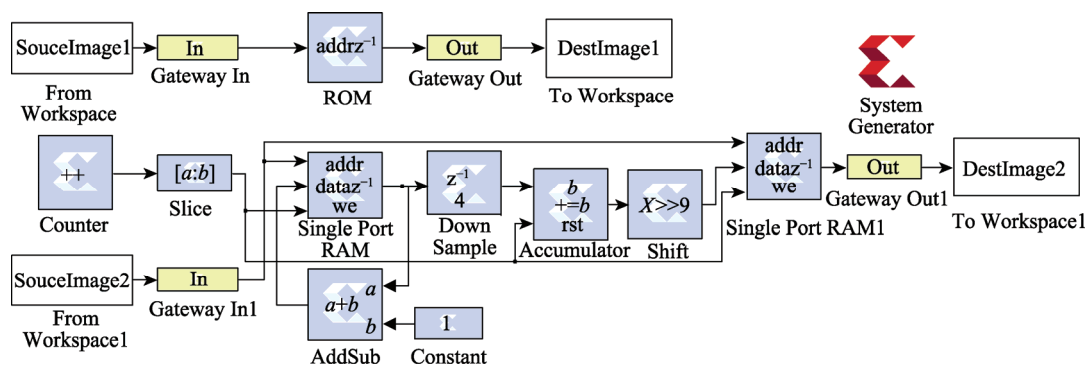


图 6 图像预处理模型

Fig.6 The model of image preprocessing

2) 图像分割。图像分割选用 OTSU 法,是一种使类间方差最大的自动确定阈值的方法,此法在灰度直方图的基础上利用最小二乘法推导出的。设图像像素总数为 n , 图像的灰度级为 L , 其中第 i 级像素为 n_i , 灰度变化范围为 $[0, L-1]$, 第 i 级出现的概率为 $P_i = \frac{n_i}{n}$ 。使用阈值 T 将灰度图像分为目标图像 A 和背景图像 B, A 由灰度值 $[0, T]$ 之间的像素组成, B 由灰度值 $[T+1, L-1]$ 之间的像素组成。阈值从 0 到 255 间不断的依次取值,使类间方差最大的值就是分割的最优阈值。其中,类间方差为:

$$\sigma_B^2 = w_0(u_0 - u_T)^2 + w_1(u_1 - u_T)^2 = w_0 w_1(u_0 - u_1)^2 \quad (4)$$

式中: u_T 为图像灰度总平均分布概率;

$u_0 = \sum_{i=0}^T i p_i / w_0$ 为图像 A 的平均灰度级; $w_0 = \sum_{i=0}^T P_i$ 为

图像 A 所有像素出现的总概率; $u_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} i p_i / w_1$ 为图像 B 的平均灰度级; $w_1 = 1 - w_0$ 为图像 B 所有像素出现的总概率。

令 $A_n = N = \sum_{i=0}^{L-1} n_i$, $B_n = \mu = \sum_{i=0}^{L-1} n_i \times (i+1)$, $0 \leq B_n \leq 256N$, $a = w(T) = \sum_{i=0}^T n_i$, $b = \mu(T) = \sum_{i=0}^T n_i \times (i+1)$, 类间方差 $\sigma^2(T)$ 可表示为:

$$\sigma^2(T) = a \times (A_n - a) \times (u - v)^2 \quad (5)$$

式中: $u = b/a$; $v = (B_n - b) / (A_n - a)$ 。

传统 OTSU 算法在运算过程中会使用 2 个除法运算。除法运算在 FPGA 中会消耗大量的时钟频率,所以对算法进行优化,由式 (5) 可得 $\sigma^2(T) =$

$(A_n \times b - a \times B_n)^2 / (a \times (A_n - a))$ 。设 $\sigma^2(T)$ 为灰度值为 j 时的类间方差, $\sigma_M^2(T)$ 为灰度值等于 K ($0 \leq K \leq j$) 时的类间方差 $\sigma_k^2(T)$ 中的最大值, A, B 分别为类间方差等于 $\sigma_M^2(T)$ 时的 a, b 的值, 因此选择最大类间方差等价于比较 $A \times (A_n - A) \times (A_n \times b_j - a_j \times B_n)^2$ 与 $a_j \times (A_n - a_j) \times (A_n \times B - A \times B_n)^2$ 之间的大小, 令:

$f = A \times (A_n - A) \times (A_n \times b_j - a_j \times B_n)^2, g = a_j \times (A_n - a_j) \times (A_n \times B - A \times B_n)^2$ 。优化后最大类间方差就等于比较 f 和 g 的大小, 有效避免除法结果的截取精度问题。

在 SystemGenerator 下搭建的图像分割的模型见图 7。输入为均衡化后的灰度图像, ThresholdGen 为阈值计算模块, 内部的结构见图 8。

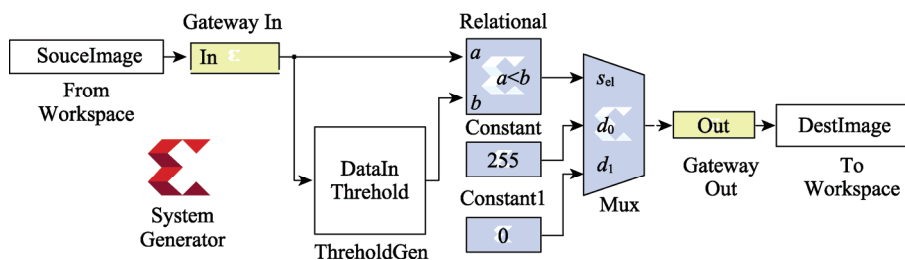


图 7 图像分割模型

Fig.7 The model of image segmentation

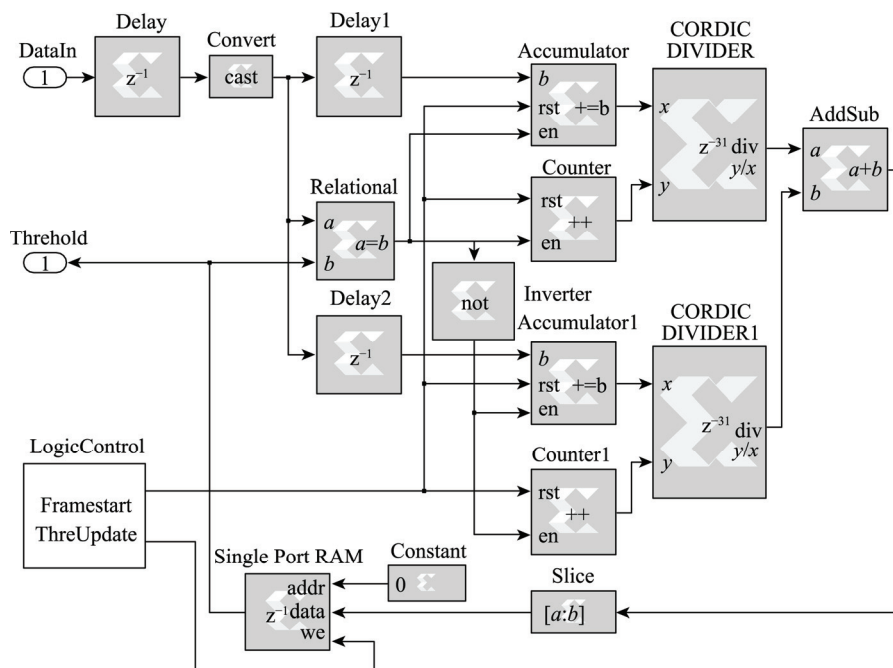


图 8 ThresholdGen 模块

Fig.8 ThresholdGen model

图 8 中 2 个 Counter 模块为累加模块, 2 个累加模块分别负责计算大于、小于设定阈值的像素灰度总值。NumLarger 与 Numless 模块为 2 个 Counter 模块, 负责统计大于和小于设定阈值的像素数目。RAM 模块负责存放二值化的阈值, 初值设为 1。

整个模型的所有模块的复位和写入等控制信号都由控制模块 LogicControl 模块提供。LogicControl 模块通过对图像的帧数和像素的计数, 得到 2 个逻辑信号 Framestart 信号和 ThreUpdate 信号, 分别表示帧开始和阈值更新。整个模型通过这 2 个信号进行阈值

的更新和计数器的清零。

3 实验结果

该设计的硬件测试选择 Xilinx 公司的低成本、低功耗的 FPGA 产品 Spartan-6 XC6SLX16 CSG324 作为系统的微处理器。图像采集模块选择 OV5640 摄像模组进行图像数据采集。为了调试方便, 能够更加直观地观察水溶膜的裂纹识别效果, 该设计的显示部分配备一块 4.3 英寸 (1 英寸=2.54 cm) 的天马 TFT-LCD 模块, 显示处理后的图像。硬件系统见图 9。

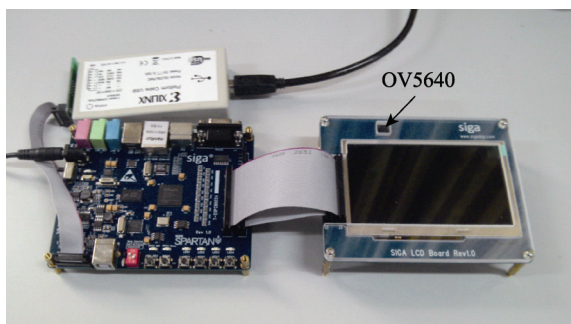


图 9 硬件测试平台

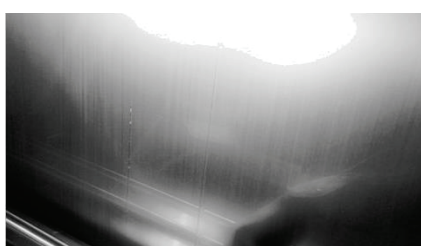
Fig.9 The hardware test platform

该测试只是检测摄像头能否采集图像和摄像头

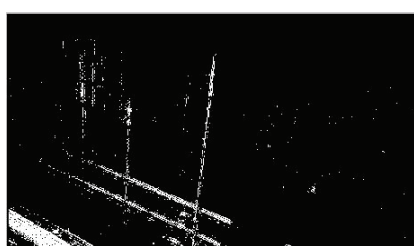
采集的图像信息是否能通过图像处理算法的计算进行图像的二值化。运行仿真后的效果见图 10。可以看出图像预处理能够较准确实现图像的灰度变换和直方图均衡化, 保证了对原图像特征信息的保留。图 10b 为水溶膜现场照片经过预处理后的图像, 由于水溶膜成型被拉伸出后表面有很多正常的“拉丝”状和裂纹混在一起。靠人眼难以识别出裂纹。裂纹识别结果见图 10c, 相比于现场直接采集到的照片, 能够较明显地看到水溶膜图像中的裂纹。表明摄像头能正常工作采集图像数据并将数据送到 FPGA 进行图像数据处理, 硬件系统可以正常运行进行图像的二值化分割, 实现了设计的功能。



a 采集图像



b 预处理后图像



c 分割后图像

图 10 图像处理仿真结果

Fig.10 The simulation results of the image processing

4 结语

设计了一种以 FPGA 为主控芯片的水溶膜裂纹识别系统, 配合图像处理算法的优化, 实现了图像的采集、传输、缓存、处理。经过试验证明, 处理后图像可以清晰显示出水溶膜的质量缺陷, 稳定性、实时性、应用性满足企业的生产要求, 给水溶膜质量检测提供了一种新的思路, 具有广阔的市场价值。

参考文献:

- [1] 史永勤, 周添红, 刘刚. 淀粉基可降解塑料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2014, 42(11): 81—84.
SHI Yong-qin, ZHOU Tian-hong, LIU Gang. Development of Starch-based Biodegradable Plastics[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(11): 81—84.
- [2] 林峰, 高建军, 张丽丽. 浅谈水溶膜生产设备的设计[J]. 机电技术, 2009, 32(2): 46—48.
LIN Feng, GAO Jian-Jun, ZHANG Li-li. Design of Water Soluble Membrane Production Equipment[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2009, 32(2): 46—48.
- [3] 郝喜海, 彭笑. 聚乙烯醇水溶性包装薄膜生物降解性研究[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 7—10.
HAO Xi-hai, PENG Xiao. Biodegradability of Water-soluble Polyvinyl(PVA) Alcohol Packaging Film[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 7—10.
- [4] 余华, 吴龙奇, 刘彩凤. 水溶性聚乙烯醇薄膜的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(S1): 412—414.
YU Hua, WU Long-qi, LIU Cai-feng. Research Progress of Water-soluble Polyvinyl Alcohol Films[J]. Materials Review, 2009, 23(S1): 412—414.
- [5] 陈志周, 牟建楼, 王林, 等. 聚乙烯醇水溶性薄膜生产工艺研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 247—250.
CHEN Zhi-zhou, MOU Jian-lou, WANG Lin, et al. Optimization of Filming Technology of Water-soluble PVA film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 247—250.
- [6] 刘建龙, 刘柱. 绿色低碳包装材料应用和发展对策研究[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 145—148.
LIU Jian-long, LIU Zhu. Application and Development Strategies of Green and Low-carbon Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 145—148.
- [7] 林莉, 李喜孟, 李继承. 超声无损表征薄层结构研究进展[C]// 2006 辽宁省无损检测学会学术年会, 2006.
LIN Li, LI Xi-meng, LI Ji-cheng. Research Progress in Ultrasonic Nondestructive Characterization of Thin Layer Structure[C]// 2006 The Annual Meeting of Liao Ning NDT Academic, 2006.
- [8] 姜传海, 叶长青, 周健威, 等. 用 X 射线应力仪无损检测薄膜材料厚度[J]. 无损检测, 2004, 26(2): 74—76.
JIANG Chuan-hai, YE Chang-qing, ZHOU Jian-wei, et al. Nondestructive Measurement of the Thickness of

- Film Material by X-RAY Analyzer[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(2): 74—76.
- [9] 吴燕婕, 郝超伟, 徐怡庄. 红外光谱法检验塑料垃圾袋[C]// 全国分子光谱学术报告会, 2008.
- WU Yan-jie, HAO Chao-wei, XU Yi-zhuang. FTIR in Studies of Plastic Garbage Bag[C]// National Academic Report on Molecular Spectroscopy, 2008.
- [10] CHAPLE G, DARUWALA R D. Design of Sobel Operator Based Image Edge Detection Algorithm on FPGA[C]// International Conference on Communications and Signal Processing, IEEE, 2014: 788—792.
- [11] BAYAR S, YURDAKUL A, TUKEL M. A Self-reconfigurable Platform for General Purpose Image Processing Systems on Low-cost Spartan-6 FPGAs[C]// International Workshop on Reconfigurable Communication-Centric Systems-On-Chip, IEEE Xplore, 2011: 1—9.
- [12] 樊博, 王延杰, 孙宏海, 等. FPGA 实现高速实时多端口图像处理系统的研究[J]. 液晶与显示. 2013. 28(4): 620—625.
- FAN Bo, WANG Yan-jie, SUN Hong-hai, et al. High Speed Real-Time Multiport Image Processing System Realized on FPGA[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals & Displays, 2013, 28(4): 620—625.
- [13] 李杏华, 刘宁, 张晶. 基于 FPGA 的图像实时处理系统的设计[J]. 半导体光电. 2014. 35(3): 563—566.
- LI Xing-hua, LIU Ning, ZHANG Jing. Design of Image Acquisition and Processing System Based on FPGA[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35 (3): 563—566.
- [14] YAO Nan, GUO Ya-juan, YU Jin. Development and Realization of System of Digital Image Processing Based on MATLAB Platform[J]. Journal of Digital Information Management, 2014, 12(6): 387—389.
- [15] YANG Guo-wei, XU Feng-chang. Research and Analysis of Image Edge Detection Algorithm Based on the MATLAB[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(1): 1313—1318.