

# 基于 ARM+FPGA 的微小陶瓷管 缺陷检测系统设计

陈浩<sup>1,2</sup>, 谭检成<sup>1,2</sup>, 李明鑫<sup>1,2</sup>, 吴定祥<sup>2,3</sup>, 唐立军<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学 物理与电子科学学院, 长沙 410114; 2. 近地空间电磁环境监测与建模湖南省普通高校重点实验室, 长沙 410114; 3. 长沙亿旭智能科技有限公司, 长沙 410000)

**摘要:** 针对微小陶瓷管难以实现微小尺寸缺陷检测问题, 提出了一种基于 ARM+FPGA 的微小陶瓷管缺陷检测系统; 该系统利用 ARM 存储空间大、运算速度快和 FPGA 并行运算能力强、稳定性好等优势, 采用小型工业摄像头 AR0134 实现陶瓷管图像采集, 通过 FPGA 完成陶瓷管图像的预处理, 借助 SPI 通信将预处理数据传送给 ARM STM32F4 处理后, 将检测结果通过以太网发送到 PC 上位机以及 OLED, 从而完成陶瓷管的缺陷检测; 研究结果表明, 该系统检测速度快, 漏检率低, 成本低廉, 稳定性高。

**关键词:** ARM+FPGA; 图像处理; 缺陷检测

## Design of Micro Ceramic Tube Defect Detection System Based on ARM + FPGA

Chen Hao<sup>1,2</sup>, Tan Jiancheng<sup>1,2</sup>, Li Mingxin<sup>1,2</sup>, Wu Dingxiang<sup>2,3</sup>, Tang Lijun<sup>1,2</sup>

(1. School of Physics and Electronic Sciences, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
2. Hunan Province Higher Education Key Laboratory of Modeling and Monitoring on Near-Earth Electromagnetic Environments, Changsha 410114, China;  
3. Changsha Billion set Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** A micro ceramic tube defect detection system based on ARM + FPGA is proposed to solve the problem of micro size defect detection. The system utilizes the advantages of ARM storage space, fast computing speed and strong parallel computing power and good stability. The small industrial camera AR0134 is used to realize the ceramic tube image acquisition, and the ceramic tube image preprocessing is completed by FPGA. Processing data sent to the ARM STM32F4 processing, the test results sent to the PC through the Ethernet PC and OLED, to complete the ceramic tube defect detection. The results show that the system has high detection speed, low leakage rate, low cost and high stability.

**Keywords:** ARM+FPGA; image processing; defect detection

## 0 引言

陶瓷材料是除金属和高聚物以外的一类无机非金属材料, 采用天然或人工合成化合物经过严格的成形和高温烧结而成, 是现代三大支柱材料之一, 其主要成分包括氮化硅, 陶瓷的断裂韧性一般很低, 是典型的脆性材料, 即使是微小的缺陷, 也容易在该处造成应力集中而破坏<sup>[1]</sup>。传统人工检测方法只能检测微小陶瓷管表面缺陷破损、气孔、裂纹等缺陷, 而且人工检测稳定性差、没有统一的标准等缺点, 基于 PC 平台的机器视觉系统多通道缺陷检测实现难度大、成本高、且体积大不易安装<sup>[3]</sup>。本文中针对 5.5 \* 2.1 \* 2.1 mm 左右方形微小陶瓷管尺寸, 探索一种微小陶瓷管缺陷检测方法, 设计实现成本相对较低、漏检率低、体积小、稳定性高的微小陶瓷管缺陷检测系

统, 采用 FPGA+STM32F429 的平台并且结合图像处理算法来完成陶瓷管缺陷检测系统的设计, 通过结合局部分块+面积的思想的方法, 简化了方形陶瓷管的检测过程, 同时也保证了检测正确率。

## 1 陶瓷管缺陷检测系统结构及原理

陶瓷管缺陷检测系统结构如图 1 所示。系统包括陶瓷管传送、检测和分选、剔除 4 个部分。传送部分由振动盘和传送带组成, 检测和分选部分由转盘、红外传感器、CMOS 工业相机、图像处理单元等组成, 剔除部分由定位控制模块和气泵组成。工作流程为振动盘中的待检测陶瓷管, 经过一定速度的匀速振动和转动, 使陶瓷管沿着振动盘的内壁滑动到传送带, 传送带将陶瓷管逐个送到转盘, 通过单相交流串励电机带动陶瓷管在转盘上转动<sup>[4]</sup>, 安装在转盘旁边的红外传感器检测到白色方形陶瓷管时, 开启高亮的白色 LED 灯进行曝光, 同时触发 CMOS 工业相机 AR0134 获取陶瓷管图像, 经过图像处理单元判断是否有缺陷, 并将结果输送到 PLC 执行机构, 实现对陶瓷管进行分选, 如果是正品则直接送入到收集箱, 碰到有缺陷的陶瓷管则开启气泵剔除。

整个系统主控制模块执行, 要求速度快, 体积小。根据 ARM 和 FPGA 的特点, 采用 ARM+FPGA 组成<sup>[5]</sup>, 由 FPGA

收稿日期: 2017-07-27; 修回日期: 2017-09-15。

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2014BAH28F04); 湖南省教育厅科学研究项目(17K004, 15K009)。

作者简介: 陈浩(1991-), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事信号检测与处理方向的研究。

通讯作者: 唐立军(1963-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 研究生导师, 主要从事信号检测与处理方向的研究。

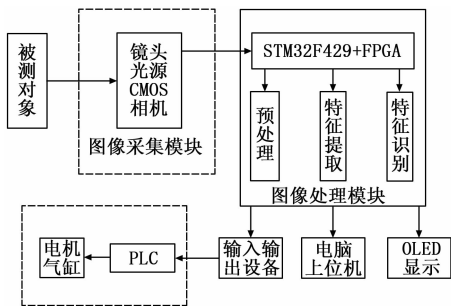


图 1 陶瓷管缺陷检测系统结构示意图

采集陶瓷管图像，并存储到 DDR 中，进行图像的预处理，预处理后的数据通过 SPI 总线传递给 ARM，ARM 对陶瓷管图像进行二值化以及形态学处理后，采用局部分块+面积的方法完成陶瓷管图像的缺陷检测<sup>[6]</sup>。

根据系统要求，采用 CMOS 工业摄像头捕捉陶瓷管图像，经过 FPGA 进行膨胀、腐蚀、开运算、闭运算等形态学的预处理，通过 SPI 将陶瓷管图像传送给 STM32F429ZIT6，对陶瓷管图像进行识别与处理，达到识别缺陷的目的。检测结果通过 LAN8742 发送到上位机显示。

## 2 硬件设计

基于 ARM+FPGA 的陶瓷管缺陷检测系统主要由以下几个部分组成，电源电路、图像数据采集电路、ARM 主控制电路、FPGA 主控制电路、SDRAM 数据缓冲电路等。

### 1) 电源电路。

电源电路设计如图 2 所示，由于陶瓷管缺陷检测系统芯片正常工作时需要供电，我们提供的是 +24 V 的输入电压，然后经过设计电源转换电路。电源转换电路的作用就是电平转换，把输入电压转换成系统正常工作时需要的电压。本设计中输入电压为 +24 V，输出电压的 +5 V 给 AR0134 摄像头模块提供电压、+3.3 V 电压输出给 STM32 供电和 +2.5 V 和 +1.2 V 给 FPGA 内核提供供电电压等，并且让输入电源经过流和过压保护电路<sup>[7]</sup>，当输入电压超过压敏电阻 36 V 的极限值时瞬间烧毁，当电流超过 500 mA 时保险丝瞬间熔断，降至 500 mA 以下时保险丝恢复功能，从而使电路实现了正常供电和异常保护功能，提高在工业的生产需求过程中对外界环境的抗干扰能力。

### 2) 图像数据采集电路。

图像数据采集电路采用具有 LVDS 接口与并行数据接口的全局 CMOS 工业摄像头来完成，能够使采集到的陶瓷管图像在传输的过程中具有高噪声抑制能力、保证可靠的信号传输等特点。这里选用 1 280 \* 960@45 fps 或者 1 280 \* 720@60 fps 的全局 CMOS 工业摄像头 AR0134 来采集陶瓷管缺陷系统图像，它通过全局快门的方式高速的获取图像，灵敏度为：6.1 V/lux·sec，意思就是单位光强照在传感器上一秒钟的话，传感器可以输出 6.1 V 的电压，能够在很暗的光线下获取清晰的图像。

### 3) ARM 主控制电路。

如图 3 所示，本缺陷检测系统选用 ARM STM32F429ZIT6 作为主处理器，在整个控制系统中处于核心地位，主要实现系统程序模块间的调度与协调，完成对通过 DMA 传送过来的陶瓷管预处理图像的采集，以及对陶瓷管图像进行特征的提取和

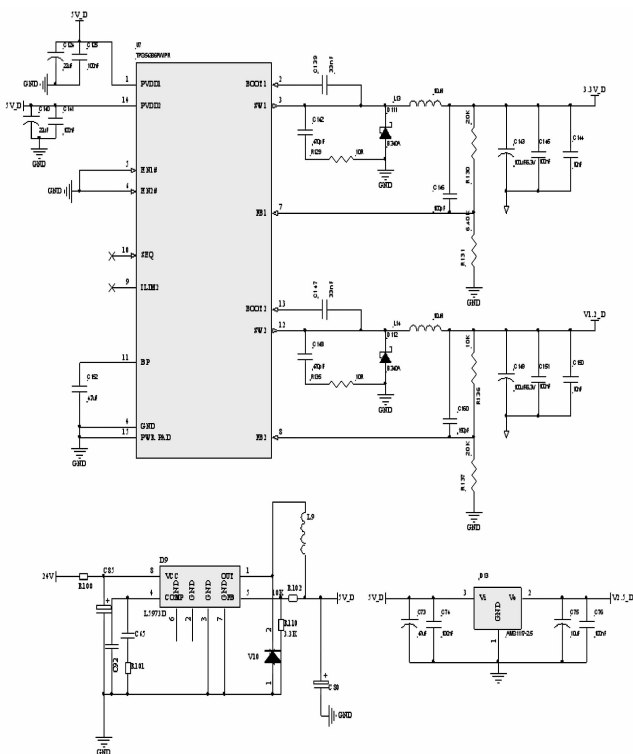


图 2 电源电路设计

识别等等，在系统的整体性能上起到了至关重要的作用。它具有低功耗、体积小、低成本、高可靠能，内部集成了 SDRAM 控制器和以太网控制器等等，能够很好的满足工业需求<sup>[8]</sup>。

### 4) FPGA 主控制电路。

采用 FPGA EP4CE22F17C8N 控制电路，灵活性很好，性能可靠，逻辑单元多大 20 000 多个，提供 RAM 存储块，这些存储块一般可以配置成单口 RAM、双口 RAM、FIFO、ROM 甚至移位寄存器等，拥有硬件乘法器，支持 LVDS I/O，兼容的 LVDS 通道达 120 多个，支持多种类型的 IP 核，如串口 IP 核、SPI 核、SDRAM IP 核等等<sup>[9]</sup>，在整个控制系统中 FPGA 将陶瓷管数据缓存到 DDR 中，以及完成陶瓷管图像的预处理，如二值化、形态学运算等等。

### 5) SDRAM 数据缓冲电路。

陶瓷管缺陷检测数据存储电路如图 3 所示，通过使用 STM32F429 内部集成的 FMC 控制器来控制 SDRAM，FMC 连接好外部的存储器并初始化后，就可以直接通过访问地址来读写数据，使用 FMC 外接存储器时，其存储单元是映射到 STM32 的内部寻址空间的；在程序里，定义一个指向这些地址的指针，然后就可以通过指针直接修改该存储单元的内容，FMC 外设会自动完成数据访问过程，读写命令之类的操作不需要程序控制<sup>[10]</sup>。

## 3 基于局部分块的陶瓷管缺陷识别算法

通过局部分块的思想来确定陶瓷管的缺陷所在的位置。局部分块的思路就是对陶瓷管图像进行目标区域的确定后，对目标区域按照一定的比例进行分块，把它们分成若干块，即直接在空间上将这些区域分成若干块，这种局部分块的思想能够使我们更好的寻找到缺陷的位置，达到缩小处理范围的目的，候志强、黄安奇等人针对目标跟踪过程中的目标表现变化等问

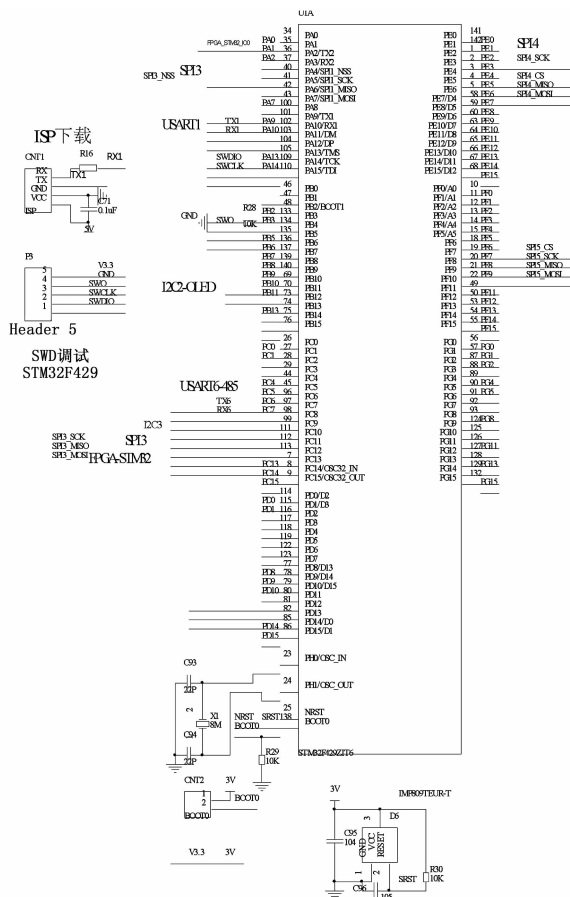


图 3 STM32F429 控制电路

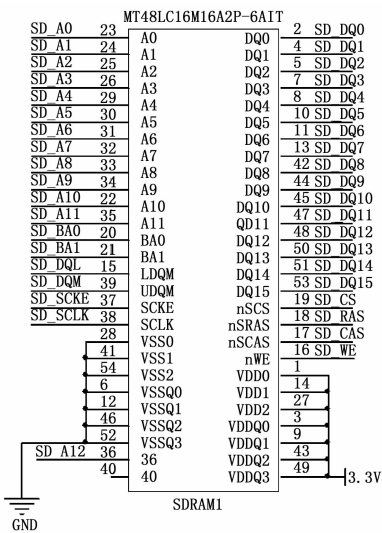


图 4 陶瓷管缺陷检测数据存储电路

题, 采取了局部分块和模型更新的视觉跟踪算法, 运用该算法在目标表现、遮挡情况等的处理能力都有所增强, 余旺盛、田孝华等人在处理视觉运动过程中目标出现鲁棒性的问题<sup>[11]</sup>, 运用了基于局部分块的加权算法来处理, 使跟踪的精度更高、成功率更高, 田孝华、查宇飞等人利用局部分块的模型, 并结合贝叶斯理论框架进行视觉跟踪, 达到了目标变化时的适应性

大大增强, 结果更加稳定的效果<sup>[12]</sup>。

针对长方形的目标区域来说, 进行局部分块的块数可以用多种多样的, 可以分为两块、四块、六块、八块等等, 如图 5 所示, 为八块局部分块示意图, 即将目标区域分为两行四列, 分块的大小可以按照自己的需求来设定。

如图所示的八块分块的思想一般用均匀分块, 这样操作方便, 但是这样分块会出现分块不必要的现象, 从而达不到很好的分块效果, 所以, 可以采用把目标区域分成九块的方法来分块, 九块的分块不需要均匀, 可以大小不一, 可根据具体需求来分块, 即把它分成 3 行 3 列的块, 这里把它分成了长方形块的四角、四边、中间一个块, 4 个角组成了 4 个块, 四条边组成了 4 个块, 然后中间的一个区域分成一块。对于中间的块来说, 如果中间区域出现了前景色的像素, 那么该陶瓷管就存在缺陷; 对于 4 个角构成的四块来说, 如果它们不构成字母“L”形状就判断为有缺陷; 对于四条边构成的 4 个块来说, 如果不在同一条直线上就表示图像存在缺陷。

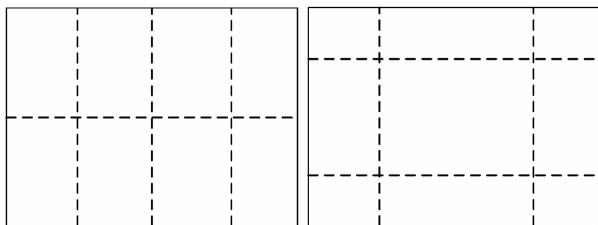


图 5 长方形轮廓分块示意图

### 4 基于面积思想的陶瓷管缺陷识别算法

通过处理后的陶瓷管缺陷边缘相对突出, 可以较快计算出目标的面积, 可以通过求出连通区域的面积来作为检测缺陷的重要指标, 面积可以很方便的衡量一个物体的总尺寸, 采取的最简单和有效的计算面积的方法就是计算连通区域包括边界在内的所有像素的总和, 在整幅陶瓷管图像中, 陶瓷管本身的大小相对整体图像占比很小, 因为其中包括了背景图像, 若要对缺陷面积检测需要开始找到其所在的位置, 对分割的图像确定目标区域的思路是, 首先从上往下开始扫描, 遇到像素点时停止扫描, 记录这个时候的行数 L1, 然后对图像从下面到上面做扫描, 当有像素点的时候记录此时的行数 L2, 按照同样的方法, 分别进行由左至右以及由右至左的像素点的扫描, 找到这个时候的列号分别为 C1, C2。这个时候由 (L1, C1), (L2, C2) 这两点确定的区域就是所找到的目标区域, 在目标区域内, 采用基于区域的统计方法来计算面积, 具体的思路如下:

- 1) 先进行从左到右, 从上到下对目标区域进行扫描。算出相同行不连通的行程然后对它们进行标号;
- 2) 然后从左上到右下对目标区域进行扫描, 相邻的行若出现像素值相同的情况, 那么就将下面行的标号修改成与上面的行的标号相同;
- 3) 最后从右下到左上对目标区域进行像素点的扫描, 相邻的行中若有像素值相同的情况, 那么就将上面行的标号修改成与下面的行的标号相同;
- 4) 最后对标过的号进行排序。在将目标区域标号后, 能达到检测不同连通区域面积的目的, 把相同点相加, 最后得到的总的像素点就是所求的连通区域的面积, 可以通过这种方法来计算缺陷的面积, 即使缺陷是没有规律的也可以通过用这种

方法来识别陶瓷管图像缺陷，通过计算多个不连通区域的面积，按照面积的大小来区分缺陷和噪声，所以这个方法可以对陶瓷管图像去噪，通过对目标区域图像进行标号后，获取不同检测目标的面积实现测量。

### 5 系统软件设计

本系统 ARM 采用的是 STM32F429ZIT6 芯片。ARM 芯片开发使用的是 Keil 公司开发的 ARM 开发工具 MDK。整个 ARM 芯片软件的开发过程可以分为 3 个步骤：编写 C 语言源程序，编译源程序，固化程序（烧制 Flash）<sup>[13]</sup>。ARM 芯片 STM32F429 的软件程序主要有 4 个任务：①通过 SPI 接受从 FPGA 传送过来的陶瓷管图像数据；②对陶瓷管图像进行数字图像处理运算；③将检测结果通过以太网发送到上位机进行显示，同时也可以通过 OLED 进行显示；

本系统 FPGA 采用的是 EP4CE22F17C8N 芯片。FPGA 芯片开发使用的是 Altera 公司开发的 Quartus II，主要有 3 个任务：①通过工业摄像头 AR0134 采集陶瓷管图像数据；②将陶瓷管图像缓存到 DDR MT46V32M16；③通过 SPI 将数据传送给 STM32F429 进行处理；

该系统的软件设计如图 6 所示，ARM 芯片 STM32F429ZIT6 首先进行初始化，包括串口、SDRAM、OLED 模块、定时器模块、以太网 LAN8742 模块等等<sup>[14]</sup>，当传感器检测到陶瓷管时，触发工业摄像头 AR0134 捕获陶瓷管图像，然后经过 FPGA 的预处理后，通过 SPI 将陶瓷管图像传送给 STM32F429ZIT6，它对陶瓷管图像进行识别与处理后，将检测结果通过 LAN8742 发送到上位机进行显示，同时也可以通过 OLED 进行显示<sup>[15]</sup>；

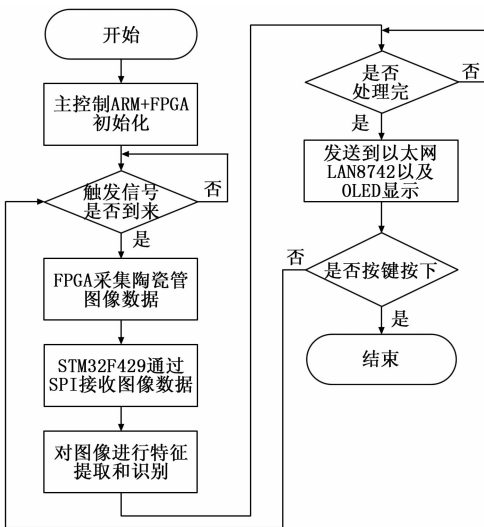


图 6 系统软件设计示意图

### 6 实验结果分析

实验结果如表 1 所示，通过检测从 5 000 到 50 000 之间间隔 5 000 的 10 种数量的陶瓷管，经过 ARM+FPGA 的陶瓷管缺陷检测系统检测后，相对于传统陶瓷管缺陷检测漏检率 10%来说，要远远低于它，漏检率一般低于 1%。由此可以看出，此系统代替传统陶瓷管缺陷检测，漏检率低。并且在检测的过程中，检测速度快，系统稳定性高，抗干扰能力强，从而提高了生产效率，有效的满足工业生产的需要。

表 1 陶瓷管缺陷检测结果表

陶瓷管数量/个	实际合格数/个	检测出合格数/个	漏检数/个	漏检率(%)
5 000	4 955	4 930	25	0.51
10 000	9 800	9 770	30	0.31
15 000	14 800	14 680	120	0.81
20 000	19 700	19 500	200	1.02
25 000	24 750	24 580	170	0.69
30 000	29 685	29 430	255	0.86
35 000	34 550	34 270	280	0.81
40 000	39 755	39 490	265	0.67
45 000	44 450	44 136	314	0.71
50 000	49 400	49 138	262	0.53

### 7 结论

采用 ARM+FPGA 来实现微小陶瓷管缺陷检测，利用 FPGA 来采集陶瓷管图像数据以及预处理，通过 STM32 进行图像处理运算，实现对陶瓷管缺陷在线检测系统检测算法的研究，包括对采集到实物图像做预处理，如进行灰度直方图，进行形态学的运算，如膨胀、腐蚀、开运算、闭运算等等，通过提取图像的感兴趣区域来对陶瓷管图像目标进行提取，利用局部分块和面积法结合的思想来确定陶瓷管的缺陷。实验结果表明，该微小陶瓷管缺陷检测系统检测速度快，稳定性高，抗干扰能力强，漏检率低，而且体积小、可靠性强、成本低，适用于批量微小陶瓷检测。

#### 参考文献：

- [1] 余文勇, 石 绘. 机器视觉自动检测技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] 沙翠翠. 基于机器视觉的陶瓷管缺陷识别技术研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [3] 程 佩, 房海华, 黄 蓝. 基于 FPGA+DSP 的数据采集系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016 (11): 148-150.
- [4] 陈 浩, 吴定祥, 康志远, 等. 单相交流串励电机调速系统设计 [J]. 机电工程, 2016, (12): 1483-1487.
- [5] 李 涛. 剑杆织机送经卷取运动的双控法研究, 测控技术 [J]. 2015, 34 (4): 67-70.
- [6] 余旺盛, 田孝华, 侯志强, 等. 基于局部分块学习的在线视觉跟踪 [J]. 电子学报, 2015, 43 (1): 74-68.
- [7] 李艳丽. 开关电源中保护电路的研究与设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [8] 葛文庆, 赖 华, 靳振宇, 等. 基于 Cortex-M3 内核的 STM32 微控制器研究与电路设计 [J]. 大庆师范学院学报, 2013 (6): 44-47.
- [9] 张永军. 基于 FPGA 的图像处理系统设计与算法实现研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [10] 李天旭, 陈广大, 王腾腾, 等. 基于 STM32 的恒温水浴温度检测与控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017 (6): 41-44.
- [11] 杨小明, 胡文军, 楼俊钢, 等. 局部分块的一类支持向量数据描述 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (4): 1026-1029.
- [12] 王 锋, 殷珍珍, 李 彬. 基于分块局部二值模式的图像检索研究 [J]. 微电子学与计算机, 2014, 31 (5): 21-23.
- [13] 龚 涛. 基于 FPGA 的图像采集处理系统 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [14] 韦喜波. DDR SDRAM 控制器的设计与验证 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [15] 杨凯斌, 吴定祥, 龚金成, 等. 圆环陶瓷检测算法研究 [J]. 中国陶瓷, 2017 (3): 39-44.