[自控·检测]
DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.01.012

基于 FPGA 和单片机的孔径测量系统

金珍珍[1]，梅武军[2*]，周卫华[1]，林海波[1]

(1. 台州职业技术学院 机电工程学院，浙江 台州 318000；2. 浙江大学 台州研究院，浙江 台州 318000)

摘 要:针对当前孔径测量系统检测速度不够高和不可灵活定制的不足,课题组提出了基于现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA)和单片机的孔径测量系统。课题组设计了孔径测量系统的硬件结构,介绍了该系统的核心模块控制原理;采用电荷耦合元件(charge-coupled device,CCD)线阵传感器实现了光电信号的转换,设计了激光信号产生模块、基于 FPGA 的时序驱动模块、AD 转换模块和电源管理模块;利用 STM 单片机实现算法优化及数据处理与显示;最后,设计了孔径测量系统的软件,并制作了样机。应用结果表明:该系统不仅具有精度高、成本低等特点,且可以模块化设计,易拓展,能有效提高孔径测量系统的检测速度,可根据实际生产需求灵活定制。

关 键 词:孔径测量系统;线阵电荷耦合元件;STM32 单片机;现场可编程逻辑门阵列

中图分类号:TP216;TH164 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2895(2022)01-0071-07

Aperture Measurement System Based on FPGA and MCU

JIN Zhenzhen[1], MEI Wujun[2*], ZHOU Weihua[1], LIN Haibo[1]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Taizhou Vocational & Technical College, Taizhou, Zhejiang 318000, China;
2. Research Institute of Zhejiang University-Taizhou, Taizhou, Zhejiang 318000, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of low detection speed and inflexible customization of the current aperture measurement system, an aperture measurement system based on FPGA and MCU was proposed. The hardware structure of the aperture measurement system was designed and the core module control principle of the system was introduced. The photoelectric signal conversion was achieved by CCD linear sensor, and the laser signal generation module, timing drive module based on FPGA, AD conversion module and power management module were designed. Finally, the algorithm optimization and the data processing and display were realized by STM MCU. The software of aperture measurement system was designed and a specific prototype was fabricated. The application results show that the system not only has the characteristics of high precision and low cost, but also can be modular designed and easy to expand. It can effectively improve the detection speed of the aperture measurement system and can be flexibly customized according to the actual production requirements.

Keywords: aperture measurement system; linear CCD (Charge-Coupled Device); STM32 MCU (Microcontroller Unit); FPGA (Field Programmable Gate Array)

随着先进制造业的迅速发展,工业生产中对线材孔径检测精度的要求也越来越高。目前,大多数线材都是通过自动化生产线生产的,为了实现产品高质量和高合格率,不仅要求生产设备生产速度快、效率高,还要求孔径检测精度高、分辨率高以及实现在线实时非接触测量[1]。当前国内外学者对零件尺寸的测量系统做了不少深入研究。吴海滨等[2]提出了基于面阵 CCD 的高速线材测径仿真系统的设计,但测量精度

收稿日期:2021-06-30;**修回日期**:2021-12-08

基金项目:2020 年浙江省教育厅访问工程师项目(FG2020225);2021 年浙江省教育厅一般科研项目(Y202147317);2020 年台州职业技术学院校级课题(2021YB06);浙江省公益技术研究计划资助项目(LGG20E050005)。

第一作者简介:金珍珍(1982),女,浙江台州人,硕士,讲师,主要研究方向为电气自动化技术。**通信作者**:梅武军(1984),男,浙江三门人,本科,高级工程师,主要研究方向为电气自动化及仪器仪表。E-mail:aw76@163.com

只能达到 20 μm,精度有待提高;邵伟业等[3]在刀具尺寸测量系统中应用了线阵 CCD 和 STM32 控制器进行了设计,精度有待提高;孟蔓菁等[4]提出了基于线阵 CCD 的激光投线仪检测技术,在 CCD 图像采集系统中采用 FPGA 来输出 CCD 驱动,并研究了如何提高图像采集精度的问题;胡刚[5]在线阵 CCD 和 STM32 控制器的有效结合上进一步优化了采集速度,图像数据实时处理有待提高;刘瑞兰[6]在选用线阵 CCD 的基础上利用 FPGA 和上位机相结合设计了光强自动采集系统。当前市场上针对线材的孔径测量系统也有相应的产品,但以国外产品居多,且价格昂贵,不可针对企业实际需求进行定制和拓展,给企业生产成本增加了不少压力。因此设计一款精度高、响应速度快、成本低且可定制的线材测径设备意义重大。

课题组设计线材孔径测量系统采用 FPGA 和单片机共同开发,采用线阵 CCD 传感器,利用硬件控制技术和软件算法进行优化控制,可实现检测精度高、响应速度快和成本低的要求。

1　总体设计方案

孔径测量系统以 FPGA 和 STM32 单片机为整个图像采集系统的核心,由激光产生电路发射准直光源通过光学镜头反射到测量对象上,通过线阵 CCD 图像传感器采集激光信号。线阵 CCD 传感器主要实现光信号到模拟电信号的转化,FPGA 主要负责线阵 CCD 驱动时序的生成,控制 A/D 转换器件对线阵 CCD 的输出信号进行 A/D 转换,同时读取 A/D 转换器的转换结果。数字信号需要在 FPGA 内部的 FIFO 中进行缓存,FPGA 内部将数据修正处理完毕后,缓存在内部 FIFO 存储器中。单片机通过 FSMC 通信调取 FPGA 中的数据,同时发布各种采集命令,经过算法检测得到理论数据,然后进行光学数据和环境数据修正,最后通过以太网串口传送测量结果到 LCD 显示,具体实现过程如图 1 所示。

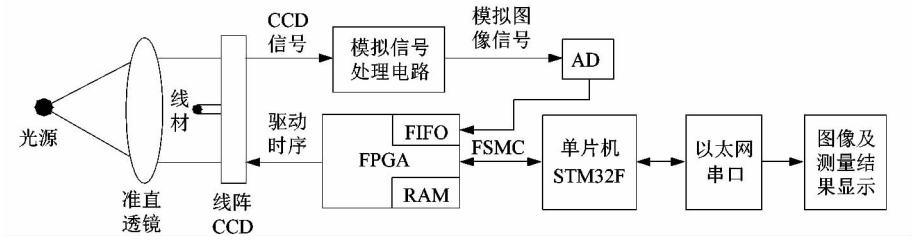


图 1　测径系统设计框图

Figure 1　Block diagram of aperture measurement system

1.1　激光产生电路结构

投影光源的质量可靠性是关系到测径精度的关键因素。投影光源的选择原则上首先应保证平行光的准直程度;其次,光源应有较好的光斑均匀性,以提高投影成像质量,减小其对边缘定位的影响[7]。因此光源产生电路设计主要包括激光器的选型、光路的设计和光学镜头的定制,为系统提供光路不发散,控制在水平方向 ±1°的准直光源。

图 2 中激光头选用型号为 HL6360MG,它是一种半导体激光器,具有穿透性好、光线均匀、转换效率高、使用寿命长和环境适应性强等优势[8]。透镜采用柱面镜,具有良好的速度特性和准直特性,保证了测径系统高精度的直径测量。激光头产生光源经过凸透镜反射后形成平行光源,当照射到被测线材时,被测线材挡住部分光源,成像到线阵 CCD 上,从而把光信号转化成电信号[9]。经过多次测试,可实现准直光源的投射。

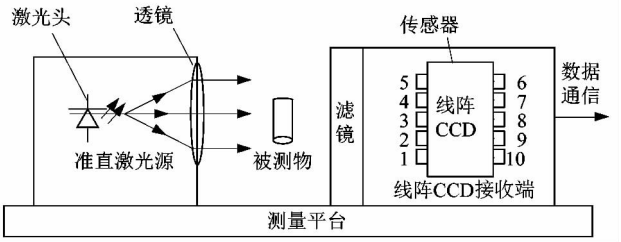


图 2　激光产生电路示意图

Figure 2　Schematic diagram of laser generation circuit

1.2　线阵 CCD 的工作原理及型号

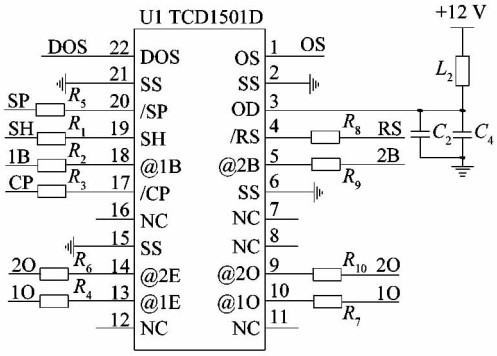
CCD 又称图像传感器,可把接收到的光学信号直接转换为模拟电流信号,并经过放大、模数转换,实现图像的获取、存储、传输、处理和复现。CCD 可分为 2 类:线阵 CCD 和面阵 CCD,它能够根据照射在其面上的光线产生相应的电荷信号,再通过模数转换芯片转换成“0”或“1”的数字信号,这种数字信号经过压缩和程序排列后,可由闪速存储器或硬盘卡保存,把光信号转换成计算机能识别的电子图像信号,可对被测物体进行准确测量、分析[9]。

考虑到设计要求中对线阵 CCD 的光谱灵敏度、转移效率和转移损失率、非线性度等要素的影响,本设计中采用 TCD1501D 型的线阵 CCD 作为图像传感器,它是一种高速、动态范围较大、灵敏度较高、暗电流低等特征的相单沟道型线阵 CCD 黑白图像传感器,像敏单元数为 5 000,适合尺寸测量[11]。每个像元的尺寸为 7 μm×7 μm,像元中心距为 7 μm;像元总长为 35 mm。TCD1501D 典型驱动频率为 2 MHz,最高驱动频率 12 MHz,工作时需要 6 路驱动脉冲。

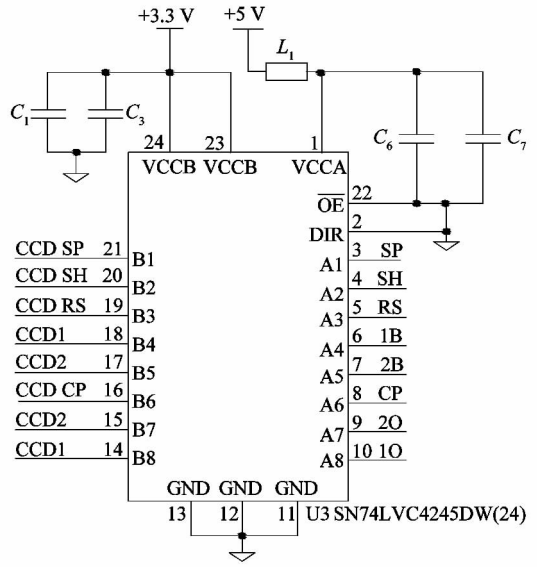
1.3　驱动电路

要使得线阵 CCD 工作稳定可靠,必须依靠控制器 FPGA 输出符合要求的驱动脉冲与线阵 CCD 相互配合[12]。设计采用的驱动电路如图 3 所示。

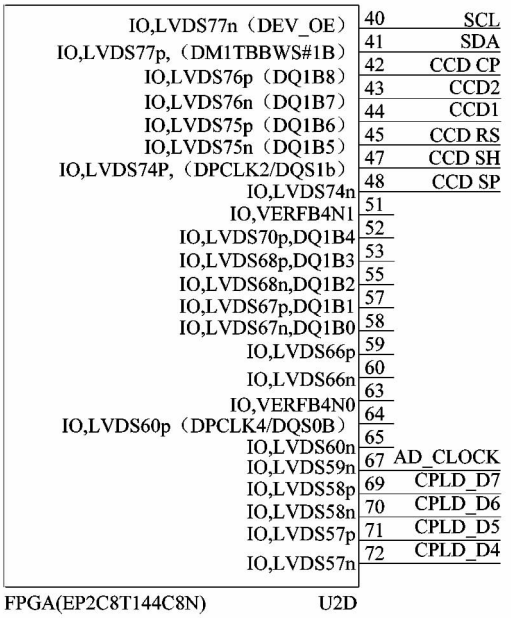
由于 TCD1501D 和 FPGA(EP2C8T144C8N)芯片的驱动脉冲电平分别为 5.0 和 3.3 V,因此 2 者之间需要连接 1 个 SN74LVC4245 电平转换芯片来实现 3.3 V 转 5.0 V 的电平转换,驱动电路如图 3(b)所示。SN74LVC4245 芯片具有 8 个转换通道,转换速率最高可达 100 MiB,最高驱动电流可达 50 mA,可满足驱动脉冲的要求[13]。



(a)线阵CCD的连接电路



(b)电平转换电路



(c)FPGA输出驱动电平电路

图 3　驱动电路原理图

Figure 3　Schematic diagram of driving circuit

1.4　A/D 转换电路

由于 TCD1501D 可输出最高频率为 12 MHz 的输出像素信号,输出每个像素信号至少需要采样 1 次,因此必须选择转换频率为 12 MHz 以上的 A/D 转换芯片[14]。结合输入信号幅度和供电电压等因素,本系统选用 TLC5510 模数转换芯片,具体电路如图 4 和图 5 所示。

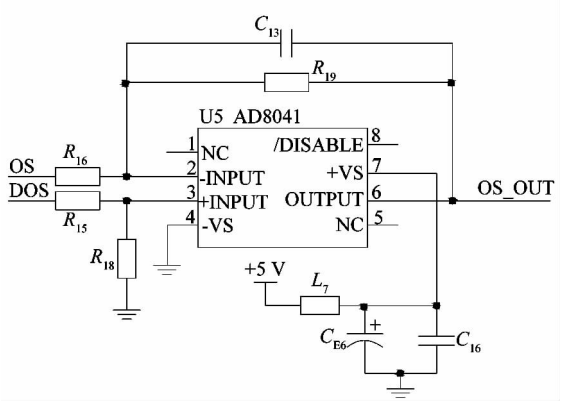


图 4　CCD 输出预处理电路

Figure 4　CCD output preprocessing circuit

为了消除线阵 CCD(TCD1501D)输出信号中一些无用信号的干扰,图 3 中将线阵 CCD 的 OS 输出信号和 DOS 补偿输出信号分别输入到运算放大器的输入端,通过 AD8041 为核心的差分运算放大器电路进行信号放大后输出到模数转换器 TLC5510 的模拟输入端,经过数模转化后通过 D1 ~ D8 输出,经过另一电平转换芯片 SN74LVC4245 接入到 FPGA 芯片的输入端[14]。

1.5　FPGA 与单片机的连接电路

电信号经过模数转化和 FPGA 的处理后,需要通过单片机进一步进行算法优化和数据输出显示,系统中通过单片机 STM32F417ZET6 来实现,FPGA 与单片机之间的连接如图 6 所示。

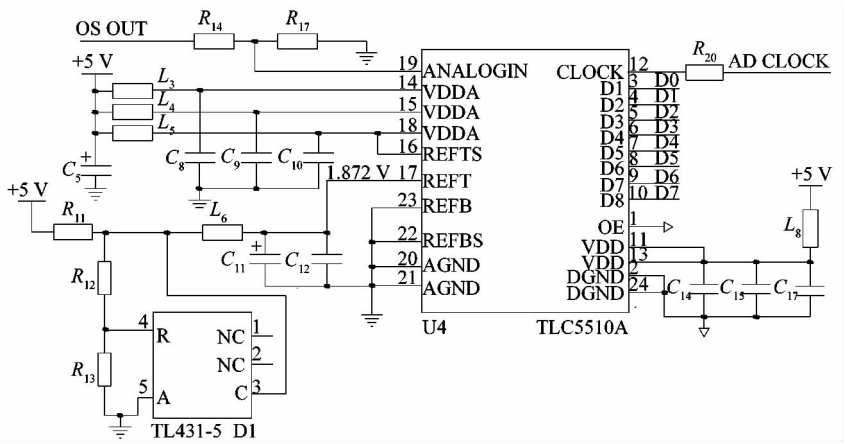
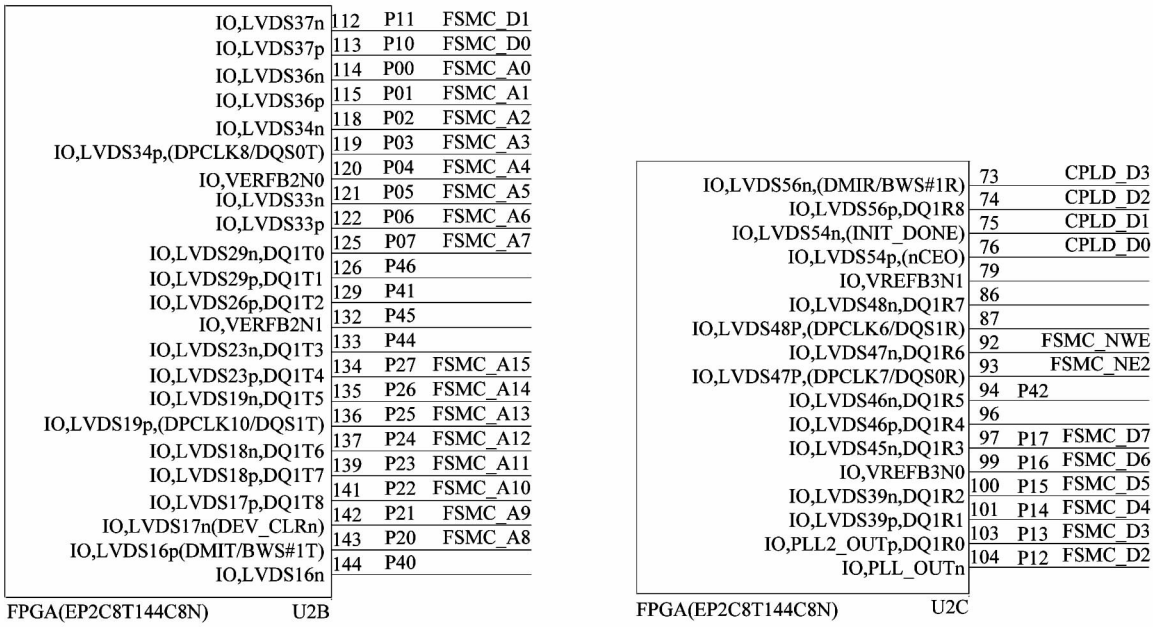
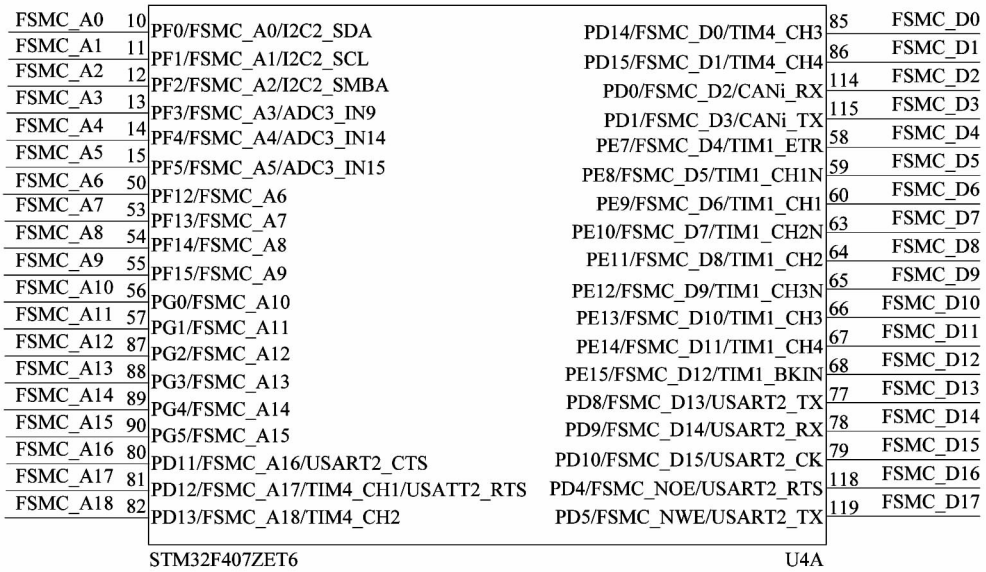


图 5　A/D 转换电路

Figure 5　A/D conversion circuit



(a) FPGA与单片机的连接1　　(b) FPGA与单片机的连接2



(c) 单片机连接电路

图 6　FPGA 和单片机连接电路图

Figure 6　FPGA and MCU connection circuit

1.6　电源电路

如图 3 ~ 6 所示,各模块的电源有不同的电压需求,分别为 12.0,5.0,3.3 和 1.2 V 等,因此在电源设计中需要把各电源进行有序管理。设计中先把交流电通过变压器 EPC12-5V 进行变压输出得到 12.0 和 6.0 V 的交流电压,再通过整流、滤波和稳压来得到相应电压输出,图 7 中各电源之间并联输出。

2　测径系统软件

2.1　FPGA 软件流程图

整个测径系统中,FPGA 的主要作用是为线阵 CCD 提供 6 路驱动脉冲来实现数据采集,并把 A/D 转化后的数据进行存储并输送给单片机进行算法处理,FPGA 的软件设计流程如图 8 所示。

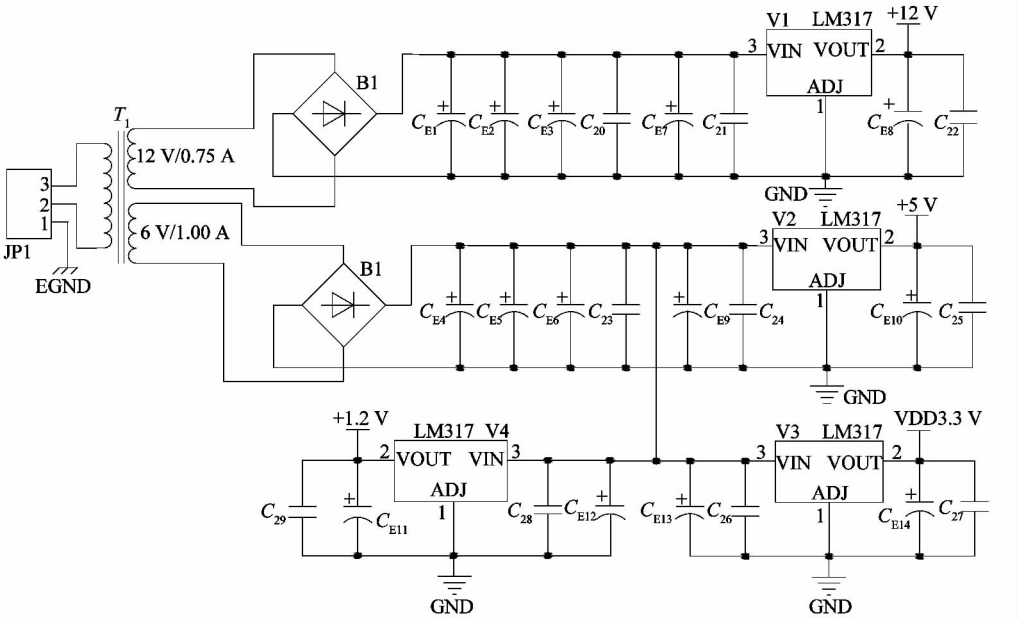


图 7　电源电路

Figure 7　Power circuit

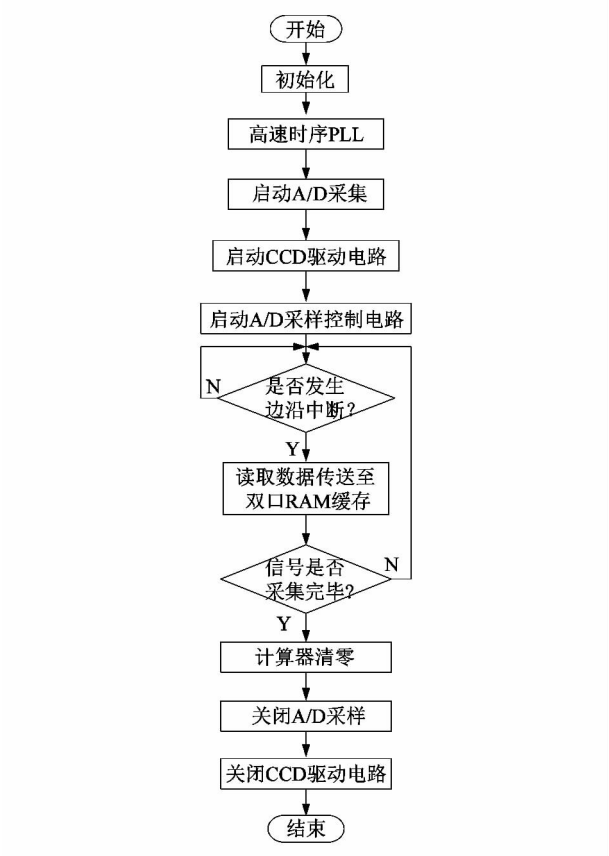


图 8　FPGA 软件流程图

Figure 8　Program execution flow chart of FPGA

2.2　单片机软件流程

STM32 单片机主要提取 FPGA 中存储的数据进行进一步的算法处理,得到更加精确的数据并输出,流程如图 9 所示。

3　系统测试

为了测试线材测径系统的可靠性,样机制作完成后对它进行了各项功能测试。

3.1　波形测试

经过测试设备检测,线阵 CCD 拾取到的光电转换后的波形如图 10 所示。从图 10 可以看出,波形中包含较多杂波,对信号检测存在较多干扰。

经过 1 次滤波后的波形如图 11 所示,可以看出 1 次滤波后干扰信号大大减少。

一阶低通滤波后所得波形如图 12 所示。

由图 13 可以看出,最后的输出波形平滑无杂波,可通过检测当前的波形幅值来计算孔径的大小,有效提高测量的精度。

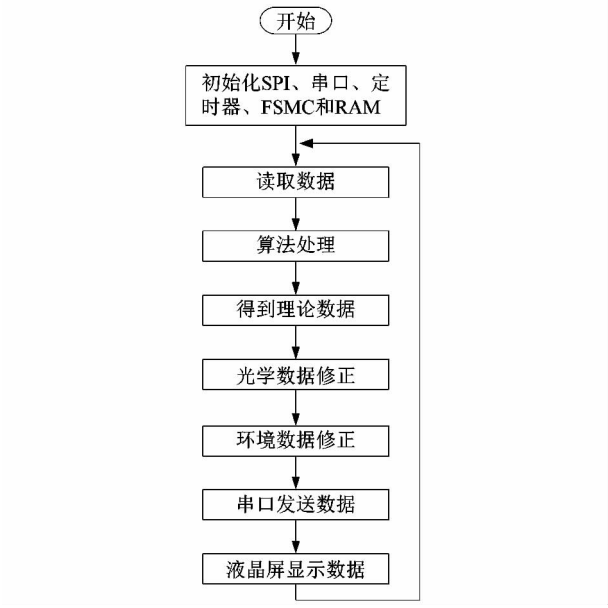


图 9　ARM 端软件流程图

Figure 9　Program execution flow chart of MCU

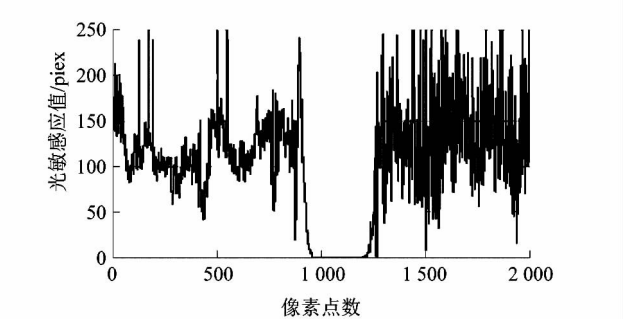


图 10　原始波形图

Figure 10　Original waveform

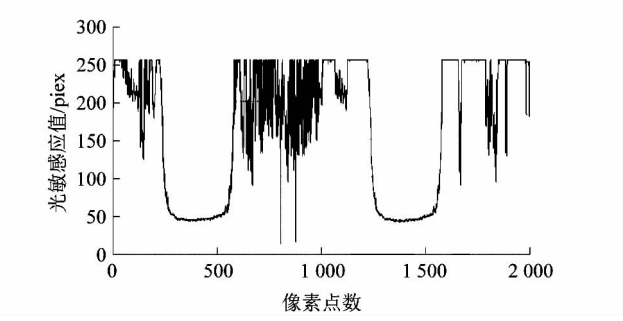


图 11　1 次滤波后所得波形

Figure 11　Waveform after one filtering

3.2　精度测试数据

常温条件下,通过使用样机对 1 ~ 5 mm 的常用线材孔径进行测量,得到测量数据如表 1 所示。

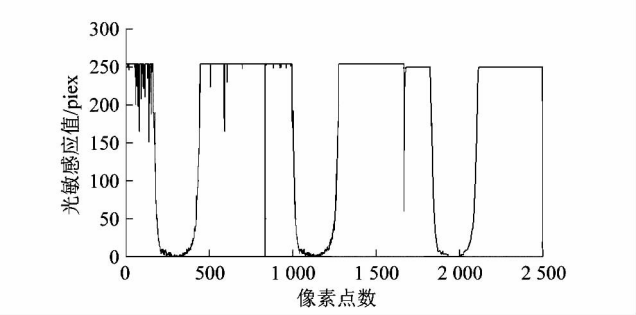


图 12　一阶低通滤波后所得波形

Figure 12　Waveform obtained by first-order low-pass filtering

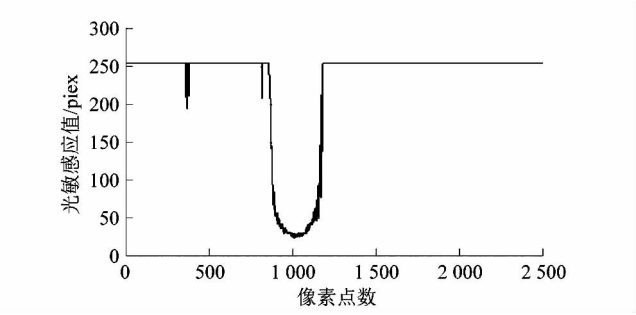


图 13　最终波形

Figure 13　Final waveform

表 1　孔径测量结果

Table 1　Aperture measurements

序号	实际孔径/mm	测量孔径/mm	误差/μm
1	2.886	2.887	1
2	2.500	2.504	4
3	1.800	1.797	3
4	3.000	3.003	3
5	2.000	1.998	2
6	4.000	4.002	2
7	2.886	2.885	1

从表 1 中数据可知,该测径系统针对测量范围内的孔径测量误差在 5 μm 以内,测量精度满足设计要求。

4　结语

课题组基于 FPGA 和 STM32 单片机设计了孔径测量系统。该系统以 STM32 单片机作为控制器,利用线阵 CCD 作为光信息采集系统,通过 FPGA 输出脉冲信号来驱动 CCD 采集光源信号。通过实际测试结果分析了测径控制系统的性能,验证了系统基本能够满足线材孔径测量的要求,线阵 CCD 数据采集频率可达到 1 kHz,测量误差控制在 5 μm 以内,可实现 1 ~ 25 mm 的线材孔径的测量。相比其他控制系统,该系统控制精度可靠、模块化设计、可定制、成本低,能够更好地实现企业对线材孔径测量的要求。但在今后工程应用中测量精度和采集速度还有进一步提高的空间,将在后续的研究中优化和完善。

参考文献:

[1]　黄健,张广鹏. 基于线阵 CCD 的直线位移测量仪的研究[J]. 光学技术,2019,45(6):678.

[2]　吴海滨,李梦楠,陈新兵,等. CCD 高速线材测径仿真系统的设计[J]. 大气与环境光学学报,2020,15(2):159.

[3]　邵伟业,梁睿君,黄敏凯,等. 基于线阵 CCD 的刀具尺寸测量系统设计[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(1):67.

[4]　孟蔓菁,邹彤,刘海波. 基于 FPGA 的线阵 CCD 激光采集系统设计[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(10):1096.

[5]　胡刚. 基于 STM32 的线阵 CCD 图像采集系统速度优化设计[D]. 衡阳:南华大学,2020:14.

[6]　刘瑞兰,林若愚. 基于 FPGA 的线阵 CCD 光强自动采集系统设计[J]. 传感技术学报,2017,30(1):152.

[7]　刘珍珍,汪涛,郑雪丽. 基于 STM32 的便携式线阵 CCD 测量系统设计[J]. 微型机与应用,2016,35(11):97.

[8]　周志. 基于 FPGA + ARM 的扫描式激光测径仪的研究[J]. 长沙:长沙理工大学,2016:17.

[9]　卢佳宝. 基于线阵 CCD 的精密尺寸测量系统[J]. 光电子激光,2019,30(9):936.

[10]　王毅博. 数字图像去马赛克 IP 设计与验证[D]. 西安:西安电子科技大学,2013:8.

[11]　夏真珍. 基于 FPGA 的 CCD 低噪声测量系统设计[J]. 传感器与微系统,2014,33(4):88.

[12]　廖平,任成,杨小雨. 基于线阵 CCD 的高精度位移传感器前端设计[J]. 光电工程,2017,44(5): 502.

[13]　王玉城. 基于线阵 CCD 图像传感器的投影测径系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016:15.

[14]　杨博雄,张晓华,傅辉清,等. 线阵 CCD 数据的高速采集与存储[J]. 大地测量与地球动力学,2004(2):126.