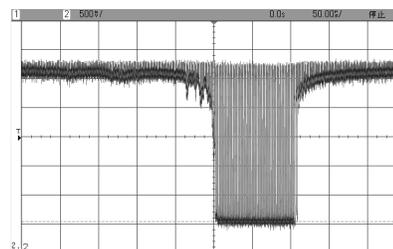




基于线阵 CCD 的高精度位移传感器前端设计

廖平, 任成, 杨小雨*

中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083



摘要: 为了实现对微小位移的高精度非接触测量, 设计了一种基于线阵 CCD 的高精度位移传感器前端模块。运用激光三角测量法设计了光学镜头, 利用 FPGA 产生线阵 CCD 所需的驱动时序, CCD 输出的一维视频信号经过前置电路处理后得到稳定的模拟信号, 供数字电路进行处理。系统具有结构简单、体积小、输出信号稳定、分辨率高、测量精度高等特点。实验测试表明, 该传感器前端模块输出模拟信号稳定, 干扰小, 计算得到最大量程为 ± 15 mm, 精度可达到 $20 \mu\text{m}$, 能广泛应用于微小位移的精密测量。

关键词: 位移传感器; 线阵 CCD; 激光三角法; 驱动时序; 信号处理

中图分类号: TH741

文献标志码: A

Front-end design of high precision displacement sensor based on linear array CCD

Ping Liao, Cheng Ren and Xiaoyu Yang*

State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: In order to achieve the high-precision non-contact measurement for tiny displacement, a high-precision displacement sensor front-end module is designed based on linear array CCD. An optical lens is designed using the principle of laser triangulation, and the system uses the FPGA to generate the drive timing required for the linear array CCD. The one-dimensional video signal output by CCD is handled to obtain a stable analog signal through the front circuit, and the signal is available for digital circuitry. The system has the characteristics of simple structure, small volume, stable output signal, high resolution and high precision. Experimental tests show that the sensor front-end module outputs are stable with small interference analog signal after calculation, the maximum range is ± 15 mm, and the accuracy can reach $20 \mu\text{m}$. The system can be widely used in the precise measurement of tiny displacement.

Keywords: displacement sensor; linear array CCD; laser triangulation; drive timing; signal processing

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.004

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(5): 498–504

1 引言

目前国内外用于微位移测量的传感器有机械式传感器, 电阻式、电容式等电学式传感器和干涉式、扫

描电镜式和激光三角法等光电式传感器^[1]。激光测位移系统在国内测量领域有着巨大的需求, 可惜目前市场上还是以国外的产品为主, 国内对基于 CCD 的位移测量系统的研究大都还停留在实验室阶段。对于激光测微位移系统的研究, 不仅能减少对国外技术的依赖, 同时带动其他相关技术和产业的发展。

电荷耦合器件(CCD)是一种广泛应用的光电检测

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-03-26

*E-mail: 992993632@qq.com

器件, 它能将入射到其光敏面上的光信号转换成电荷信号^[2,3], 在环境监测、无接触尺寸测量领域以及光谱分析等方面得到广泛应用^[4,5], 尤其应用场合对传感器尺寸和处理速度有较高要求时, 小尺寸线阵 CCD 不可替代^[6]。激光三角法高精度位移传感器是一种新型微位移传感器, 采用激光作为位移信号的传输介质, 激光的方向性好、光功率稳定, 因此传感器的分辨率高, 测量精度高, 稳定性好, 体积小^[1]。

本文设计制作了一种光学高精度位移测量传感器的前端模块。采用东芝公司的 TCD1252AP 作为光电传感器, 运用直射式激光三角测量原理设计了一款光学镜头, 使用 FPGA 产生相应的时序驱动 CCD, 并且设计了前置电路来处理 CCD 输出的一维视频信号。系统测试表明该线阵 CCD 位移传感器前端模块具有输出一维信号稳定、噪音小且激光探头体积小的特点, 测量量程为 ± 15 mm, 测量精度可达 20 μm 。该模块配合数字信号处理及光斑中心图像处理算法可以广泛用于微位移的精密测量。

2 测量原理与光学探头结构

2.1 直射式激光三角测量原理

激光三角法是一种非接触式测量方法^[7-8]。激光光源发出激光, 经过聚焦透镜进行准直和聚焦, 投射到被测物表面形成直径小于 1 mm 的点状光斑, 光斑经目标物漫反射后再由接收透镜聚焦, 成像于位置器件表面^[9]。因为半导体激光器的光轴垂直于待测物表面, 且光源光轴、成像透镜平面和待测物体参考平面构成一个三角形, 称为直射式激光三角测量, 系统结构如图 1 所示。

在直射式激光三角测距结构中, 入射光束垂直于被测表面, 只有一个准确的调焦位置, 而其余位置的像都处于不同程度的离焦状态, 从而引起像点的弥散, 使系统的测量产生较大误差。为提高系统的测量精度, 使光点所成的像在光电探测器线阵 CCD 接收面上每一点都能清晰成像, 入射光轴、成像物镜主平面和线阵 CCD 三者的延长线相交于一点^[7], 即满足“Scheimpflug”条件^[10], 如图 1 中的 M 点。其中 O 平面为基准平面, P 点为成像光斑的基准点, a 为物距, b 为像距, α 为工作角, β 为成像角, x 为光斑相对于基准点移动的距离, y 为被测表面相对于基准平面在激光光轴方向上移动的距离。由光的近轴成像原理、相似三角形定理可得物点位移 y 与光斑在线阵 CCD 上的位移 x

的关系为

$$y = \frac{ax \sin \beta}{b \sin \alpha \mp x \sin(\alpha + \beta)}, \quad (1)$$

式中: “-”表示被测平面向参考平面上方移动; “+”表示被测平面向参考平面下方移动。且在直射式激光三角法中需要满足“Scheimpflug”条件:

$$a \tan \alpha = b \tan \beta. \quad (2)$$

当系统光路确定以后, 即 a 、 b 、 α 、 β 和成像透镜的焦距 f 均为已知量时, 只要知道光斑在线阵 CCD 上的位移 x , 就能求出被测物表面在激光光轴方向上的位移 y 。

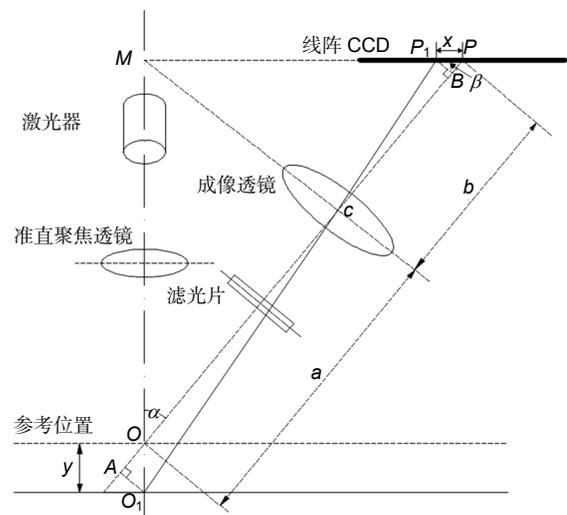


图 1 直射式激光三角法测量原理。

Fig. 1 Principle of direct type laser triangulation.

2.2 激光三角探头结构

根据直射式激光三角测量法和“Scheimpflug”条件设计了小型激光三角探头, 该探头结构简单, 体积小, 采用非接触式测量, 测量精度高, 其主要技术指标和结构参数如下。

探头外形尺寸: 100 mm × 100 mm × 36 mm

工作距离: 100 mm;

测量范围: ± 15 mm (85~115 mm);

分辨率: 20 μm ;

激光光源: 650 nm 半导体激光器;

光电传感器: 线阵 CCD (TCD1252AP);

入射光与成像透镜光轴之间的夹角: $\alpha=30^\circ$;

CCD 与成像光轴之间的夹角: $\beta=40^\circ$;

物距: $a=116.21$ mm;

像距: $b=80$ mm。

3 TCD1252AP 硬件电路设计

3.1 硬件电路整体方案设计

该方案用 FPGA 为线阵 CCD 提供驱动时序控制, 由于 FPGA 引脚输出的信号电压仅为 3.3 V, 驱动能力较弱, 用六反相器 TC74HC04AP 提高驱动信号的驱动能力; 在测量过程中, CCD 把光信号转换成电信号输出, 视频输出信号 OS 和补偿输出信号 DOS 经过射极跟随电路处理后, 选用高速、低噪声视频运算放大器 AD829JR 对两路信号进行反相差分放大处理, 并且用两级二阶低通滤波器对差分后的信号进行低通滤波。系统的硬件总体结构如图 2 所示。

3.2 基于 FPGA 的线阵 CCD 驱动电路设计

TCD1252AP 是日本东芝公司生产的高灵敏度低暗电流的线阵 CCD 产品, 具有 2700 个感光像元, 像元尺寸 $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$, 中心距为 $11\ \mu\text{m}$, 像元总长度为 $29.7\ \text{mm}$ ^[11]。

3.2.1 TCD1252AP 的工作原理和时序分析

TCD1252AP 的基本结构如图 3 所示, 它是由 2752 个光电二极管构成的光敏单元阵列, 其中前 40 个和后 12 个作为暗电流检测而被遮蔽, 中间 2700 个光电二

极管是曝光像敏单元, 用 $S_n(n=1,2,\dots,2700)$ 表示。光敏元两侧是存储光生电荷的转移栅, 转移栅两侧排列的是 CCD 模拟移位寄存器 1 和 2, 它的一维视频信号输出单元(2700 像元)从 OS 端口输出, 补偿输出单元从 DOS 端口输出。其工作电压为单一的 5 V, 是两相输出的线阵 CCD 器件。

TCD1252AP 的驱动时序如图 4 所示, 驱动信号有转移脉冲 SH, 两路互补的驱动脉冲 $\Phi 1$ 和 $\Phi 2$ 以及复位脉冲 RS, 其中转移脉冲 SH 控制转移栅电极。CCD 的一个工作周期分为两个阶段: 光积分阶段和电荷转移阶段^[12,13]。在电荷转移阶段, SH 为高电平, 转移栅下的势阱为深势阱, 它的势阱与模拟移位寄存器的深势阱沟通, 光敏区积累的电荷信号通过转移栅向模拟移位寄存器转移; 在光积分阶段, SH 为低电平, 转移栅下的势阱为浅势阱, 对于光敏区下的深势阱来说起到隔离的势垒作用, 不会使光敏区下积累的电荷信号向模拟移位寄存器转移。转移栅和模拟移位寄存器分别工作, 转移栅势阱进行光积分, 模拟移位寄存器在驱动脉冲 $\Phi 1$ 和 $\Phi 2$ 的作用下串行地转移电荷, 在复位脉冲 RS 的作用下, 并经过输出电路由 OS 电极输出, DOS 为 CCD 的补偿输出端, 该信号中含有复位脉冲



图 2 硬件总体结构。

Fig. 2 The overall structure of the hardware.

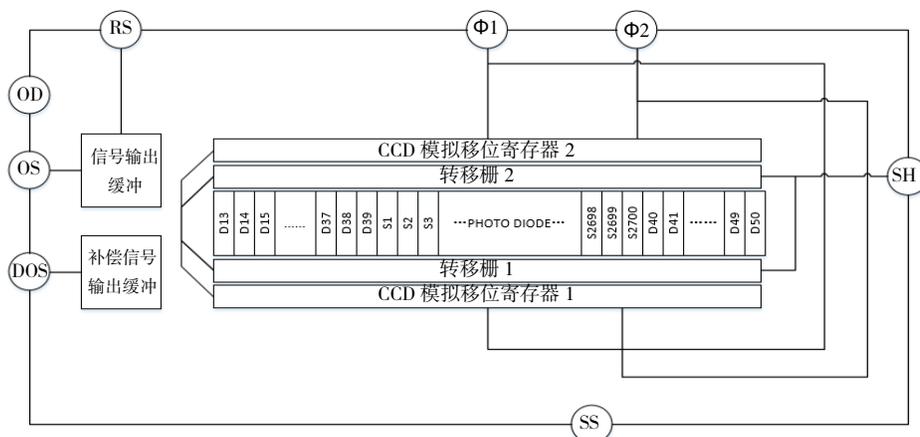


图 3 TCD1252AP 基本结构。

Fig. 3 Basic structure of TCD1252AP.

的影响。RS 信号为复位级的复位脉冲，复位脉冲用于清除模拟移位寄存器中的残留电荷并输出一个信号。

CCD 要完成信号电荷的产生、存储和传输，需要配合相应的时序，且必须满足时序要求，才能保证 TCD1252AP 的正常工作。由于结构上的设置，OS 首先输出 13 个虚设单元脉冲，再输出 27 个暗信号脉冲，然后才连续输出 S1 到 S2700 的有效像元信号，第 S2700 信号输出后，又输出 9 个暗信号，再输出 2 个奇偶校验信号，以后便是空驱动，空驱动的数目可以是任意的。由于该信号是两列并行传输，在一个光积分时间内，至少要有 1376 个 $\Phi 1$ 脉冲，即 $T_{SH} > 1376 T_{\Phi 1}$ ，且复位脉冲 RS 复位一次输出一个光脉冲信号。

3.2.2 基于 FPGA 的 TCD1252AP 驱动时序设计

TCD1252AP 的典型驱动频率为 1 MHz，根据 TCD1252AP 各路脉冲时序的相位要求，可以确定线阵 CCD 驱动信号 SH、 $\Phi 1$ 、 $\Phi 2$ 、RS 的参数。各路脉冲的参数如下：方波 $\Phi 1$ 、 $\Phi 2$ 的频率为 0.5 MHz，占空

比为 0.5；方波 RS 的频率为 1 MHz，占空比为 0.25；转移脉冲 SH 的脉宽为 2500 ns， $\Phi 1$ 、 $\Phi 2$ 在转移脉冲结束后，有一个脉宽大于 SH 为高电平的宽脉冲。脉宽设置为 4500 ns。

选用 Altera 公司的 Cyclone 系列的芯片 EP1C3T100C8 产生 TCD1252AP 所需的驱动时序，EP1C3T100C8 是一种高性能的 FPGA 芯片，多达 2910 个逻辑单元(LE)，提供 65 个可用的输入/输出引脚，可通过 JTAG 接口实现在线编程(ISP)功能。使用 Quartus II 11.0 作为开发平台，用硬件描述语言 Verilog HDL 编程。基于上述对驱动脉冲信号的分析，由于 FPGA 芯片的外部晶振频率为 40 MHz，所以选用外部晶振作为输入时钟，周期为 25 ns。使用仿真软件 Modelsim SE 对驱动程序进行模拟仿真，得到的时序波形 SH、B1($\Phi 1$)、B2($\Phi 2$)、RS 的对应关系如图 5 所示。将图 5 和图 4 中各脉冲波形对比，可得到仿真结果满足 TCD1252AP 的驱动时序要求。

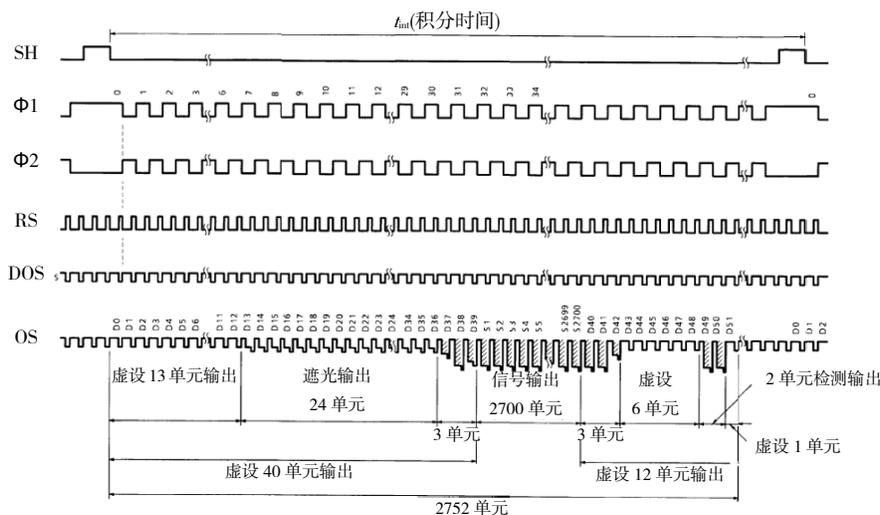


图 4 TCD1252AP 驱动脉冲波形图.

Fig. 4 Drive pulse waveform of TCD1252AP.

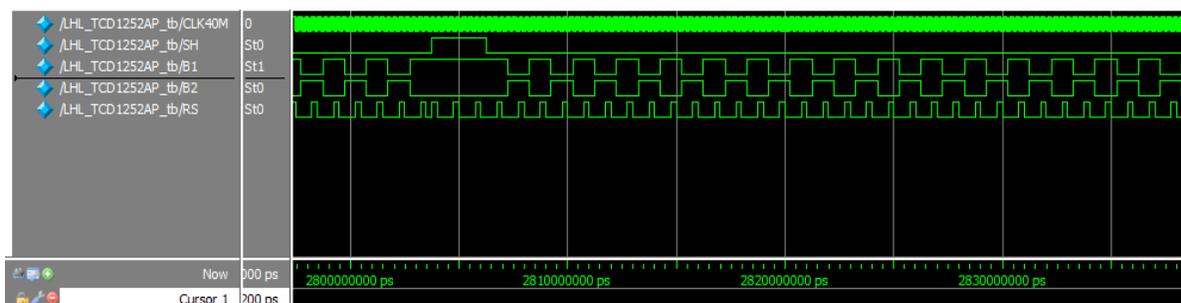


图 5 TCD1252AP 仿真时序图.

Fig. 5 Simulation timing diagram of TCD1252AP.

在设计时序驱动电路时,考虑到 FPGA 输出引脚电平值仅为 3.3 V,驱动能力比较弱,而 CCD 正常工作时的信号电平值为 5 V,因而在设计原理图时,必须考虑驱动能力和电平匹配的问题^[14],采用高速 CMOS 六反相器 TC74HC04AP 作为时序信号的输入驱动器,提高 CCD 驱动脉冲的驱动能力。

3.3 输出信号前置处理电路

CCD 的 OS 端口输出模拟信号,该输出信号具有负极性、有效信号幅值小以及周期性的复位脉冲串扰等影响^[11];DOS 为线阵 CCD 的补偿输出端,该信号含有复位脉冲 RS 的影响。由于 CCD 输出的一维视频信号中,常混杂有幅度较大的脉冲干扰和低频噪声,必须进行相应的处理,才能送进数字电路进行采样。因此前置电路应对信号进行极性处理,提高有效信号的幅值,消除复位脉冲串扰并进行滤波。CCD 输出信号前置处理电路如图 6 和图 7 所示。

如图 6 所示,三极管 TR1 和 TR2 构成的电路为射极跟随电路,对输入信号起缓冲作用,用于提高输入阻抗。由于输出的模拟信号 OS 含有复位信号 RS 的串

扰,OS 和补偿输出信号 DOS 是一组典型的共模电压较高、有效差模信号较低的差分信号,且像元脉冲的频率为 1 MHz,所以选用高速低噪声视频运算放大器 AD829JR 进行差分放大。分别将 OS 和 DOS 送至 AD829JR 的反相输入端-IN 和同向输入端+IN,构成差分运算放大电路,可抑制复位信号 RS 引入的共模干扰,最大限度的滤除暗电流和低噪声信号所带来的干扰,从运放的输出端得到的即是一维视频信号。

经过差分放大电路得到 CCD 的脉冲调幅信号,信号中仍有复位脉冲的干扰及其他高频干扰信号(主要是线阵 CCD 的内部噪声),需要设计滤波器尽量消除这些高频噪声和干扰,又不能损失输出信号的细节。由线阵 CCD 的工作原理可知,复位脉冲 RS 复位一次输出一个光脉冲信号,所以 OS 端信号的频率为 1 MHz,通常把视频通道的实际带宽限制在奈奎斯特的 70%~80%之间^[15],即截止频率在 700 kHz 左右。在本系统中,采用二阶有源低通滤波器,滤波器的截止频率设置为 750 kHz,既能有效的滤除高频噪声,也满足奈奎斯特采样定理,对测量精度影响较小。采用两

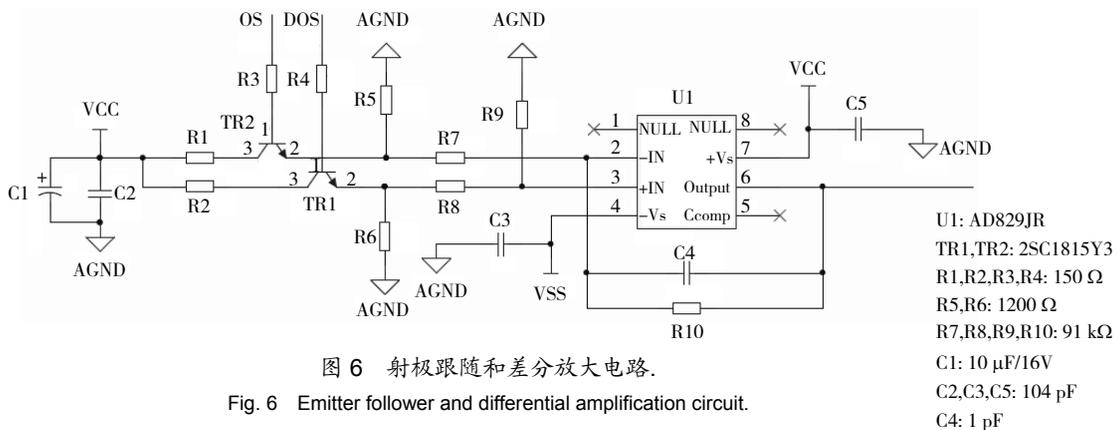


图 6 射极跟随和差分放大电路.

Fig. 6 Emitter follower and differential amplification circuit.

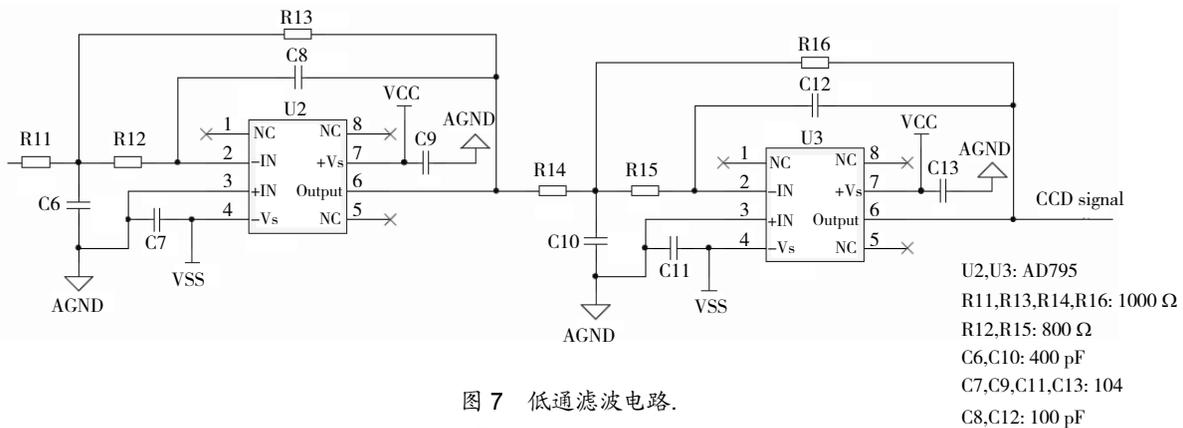


图 7 低通滤波电路.

Fig. 7 Low-pass filter circuit.

级二阶低通滤波器，增益下降斜率为 80 dB/十倍频，这样就有效防止了有用基频频带的损失，滤除了高频噪声。根据采样定理，若要求采样后的数字信号完整地保留原始信号中的信息，则要求采样频率大于信号中最高频率的 2 倍，一般取 2.56~4 倍信号最大频率。由于 CCD 视频输出信号的频率为 1 MHz，所以必须采用高速 A/D 转换器，为了提高对信号的采样精度，在此采用 14 位精度，10 M 转换频率的模数转换器。

4 实验结果和精度分析

将光学探头固定在可升降平台上，平台可以精确地标示出传感器下表面与被测表面的距离，设置工作距离为 100 mm，根据直射式激光三角测量原理，光斑恰好可以成像到 CCD 像元的基点位置。

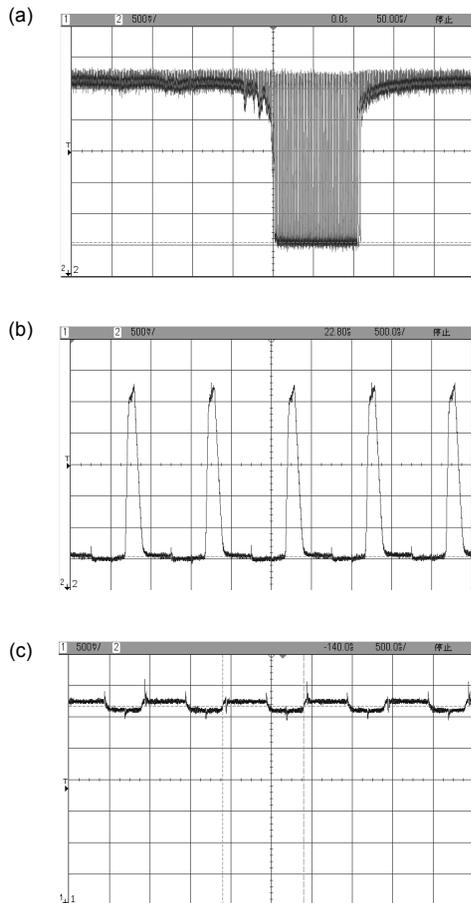


图 8 OS 和 DOS 输出信号波形。(a) 一个扫描周期 OS 端输出波形。(b) 光斑照射像元处信号波形。(c) DOS 端补偿信号输出波形。

Fig. 8 Output signal waveform of OS and DOS. (a) The OS output waveform of one scan cycle. (b) The signal waveform of pixels which spot illumination. (c) Compensation signal output waveform of DOS.

用示波器测得 TCD1252AP 输出信号 OS 和 DOS 的波形如图 8 所示，图 8(a)在一个扫描周期中，没有光照的像元输出电压被复位信号钳制在高电平，而光斑照射的像元输出电压则为负极性，输出低电平；由于复位脉冲的串扰，所以信号的噪音较大，毛刺较多；从图 8(b)可知，光斑照射的像元输出低电平，每一个周期都对应一个接收光照的像元。用示波器测得补偿输出端信号 DOS 的波形如图 8(c)所示，在一个扫描周期中，输出电压被复位信号钳制在高电平，有复位脉冲的串扰，含有和 OS 一样的共模信号。

经过反相差分滤波电路的视频信号的波形如图 9 所示，图 9(a)中上方的波形是反相差分后一个扫描周期的信号波形，下方的波形是低通滤波后的信号波形；图 9(b)中上方的波形是反相差分后光斑照射像元处信号波形，下方的波形是低通滤波后光斑照射像元处信号波形。

由实验结果可知，输出信号脉冲稳定，干扰小，经过数字电路采样就可以计算出正弦信号的个数，即接收光照的像元个数，根据 TCD1252AP 像元总数和基点的位置，从而求出光斑的大小和中心位置，当光斑中心移动时，正弦脉冲的中心也跟着移动，根据激光三角测量原理就能计算出位移。

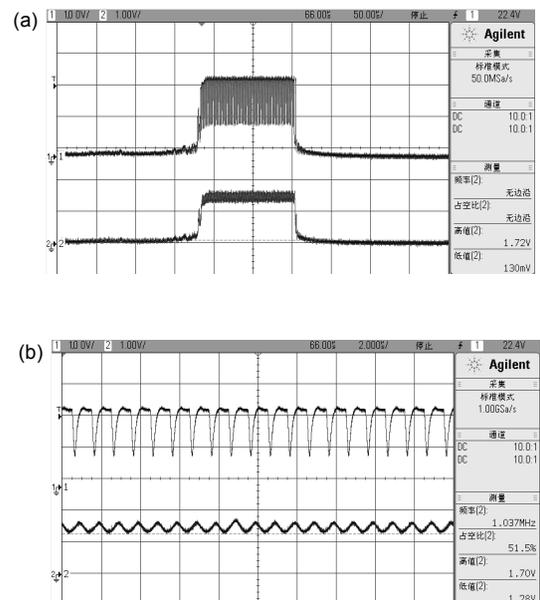


图 9 前置处理后信号波形。(a) 差分放大和滤波后信号输出波形。(b) 光斑照射像元处信号波形。
Fig. 9 The signal waveform after post-processing. (a) Output waveform after differential amplifier and filter. (b) The signal waveform of pixels which spot illuminates.

因为 TCD1252AP 的像素间距为 $11\ \mu\text{m}$, 像素的几何尺寸为 $11\ \mu\text{m}$, 当光斑在 CCD 上移动一个像元距离才会被 CCD 分辨出来, 所以 CCD 像元的分辨率为 $11\ \mu\text{m}$; 光学探头的基本参数已知, 当光斑位移 $x=11\ \mu\text{m}$ 时, 由式(1)可以得到被测表面位移 $y=20\ \mu\text{m}$, 因此当被测表面移动 $20\ \mu\text{m}$, 光斑才在 CCD 上移动一个像元, 所以光学探头的分辨率为 $20\ \mu\text{m}$ 。根据光学探头的结构以及线阵 CCD 的像元总长度 $29.7\ \text{mm}^{[1]}$, 由式(1)计算可得该传感器的量程可达 $\pm 15\ \text{mm}$ 。

5 结论

设计了一种基于线阵 CCD 的高精度位移测量传感器的前端模块。这个传感器前端模块设备体积小, 精度高, 采用非接触式无损测量, 使用灵活方便, 适合大部分对高精度位移测量的检测需要, 摆脱了位移测量对检测设备在成本精度使用环境等方面的限制。通过实验证明本测量模块具有较强的实用性, 未来还应在模拟信号的采集、A/D 转换、数字信号和图像处理等方面开展进一步的设计和进步, 使其能对位移做出完整精确的测量, 从而提高传感器的精度, 适合实际的应用。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51275535); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035706)。

参考文献

- Fang Ping, Ding Fan, Li Qipeng. Research on a novel micro-displacement sensor based on linear CCD[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(1): 74–77.
方平, 丁凡, 李其朋. 基于线阵 CCD 的新型微位移传感器的研究[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(1): 74–77.
- Zhao Youquan, Jiang Lei, He Feng, et al. Measurement and analysis of linear CCD nonlinear optical response characteristics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(7): 19–23.
赵友全, 江磊, 何峰, 等. 线阵 CCD 光电响应非线性特性测定与分析[J]. *光电工程*, 2015, **42**(7): 19–23.
- Ma Dengji, Zhu Shanan, Wang Changjun. Application of linear CCD in high precision diameter measuring system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, **14**(2): 175–176.
- Huang Tongjin, Zhu Yaoli, Chi Hanwen, et al. Design of a linear array CCD drive circle based on CPLD[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, **37**(7): 66–70.
黄彤津, 朱礼尧, 迟涵文, 等. 基于 CPLD 的线阵 CCD 驱动电路的设计[J]. *电子测量技术*, 2014, **37**(7): 66–70.
- Chi Hanwen, Zhu Liyao, Wu Tao, et al. Design and implementation of linear CCD driver module hardware based on MCU[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2015, **34**(11): 76–79.
迟涵文, 朱礼尧, 吴涛, 等. 基于单片机的线阵 CCD 驱动模块硬件设计与实现[J]. *国外电子测量技术*, 2015, **34**(11): 76–79.
- Chu Shichong, Xu Yaoliang, Zhou Qicong, et al. Optimization design of tricolour linear CCD high speed signal processing system[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, **38**(9): 107–111.
褚世冲, 徐耀良, 周奇聪, 等. 三色线阵 CCD 高速信号处理系统的优化设计[J]. *电子测量技术*, 2015, **38**(9): 107–111.
- Yan Jiajun, An Zhiyong, Gao Yuhan. The optical system design of a miniaturization laser triangulation probe[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, **35**(4): 38–41, 52.
闫加俊, 安志勇, 高琨舍. 小型激光三角探头光学系统设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, **35**(4): 38–41, 52.
- Smith K B, Zheng Y F. Accuracy Analysis of Point Laser Triangulation Probes Using Simulation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1998, **120**: 736–745.
- Chen Jiaying, Tao Wei, Yang Hongwei, et al. Optimized design of locating algorithm for laser triangulation displacement sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, **35**(9): 62–65.
陈家兴, 陶卫, 杨红伟, 等. 激光三角位移传感器定位算法优化设计[J]. *传感器与微系统*, 2016, **35**(9): 62–65.
- Wang Xiaojia, Gao Juan, Wang Lei. Survey on the laser triangulation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(S4): 601–604, 608.
王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(S4): 601–604, 608.
- TOSHIBA CCD LINEAR IMAGE CCD(Charge Coupled Device) TCD1252AP[K]. 1997.
- Huang Wenlin, Yang Guangyong, Hu Guoqing. The design of a high accuracy linear array CCD driving circuit based on CPLD and verilog[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, **12**(30): 8052–8057.
黄文林, 杨光永, 胡国清. 基于 CPLD 和 Verilog 的高精度线阵 CCD 驱动电路设计[J]. *科学技术与工程*, 2012, **12**(30): 8052–8057.
- Zhang Qi, Chen Huiming, Mao Yubing, et al. Design of linear CCD driving generator and signal acquisition system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010(2): 75–77.
章琦, 陈慧明, 毛玉兵, 等. 线阵 CCD 驱动时序及信号采集系统的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2010(2): 75–77.
- Zhao Shanshan, Zhang Hongmin, Jia Haiyan. Analog front end design based on linear CCD[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(4): 25–26, 31.
赵山山, 张红民, 贾海彦. 基于线阵 CCD 的模拟前端设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(4): 25–26, 31.
- Li Jieqiang. The design and research of micro displacement sensor base on linear CCD[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
李杰强. 基于线阵 CCD 的微位移传感器设计与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.