

基于 ZYNQ 的飞艇囊体应变在线监测系统设计

张晓荣^{1,2}, 王保成¹, 郝勇¹, 徐文宽¹, 秦慧娴^{1,2}, 袁明显^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学光电学院, 北京 100049)

摘要: 针对当前高空飞艇囊体的应变实时测量装置无法同时具备体积小和实时测量的工作属性, 创新性地用光学器件和感光元件配合, 对工作中飞艇囊体两个固定点的相对位移量进行测量, 提出了一种能够在线监测飞艇囊体应变的测量装置, 能够实现应变在线测量且测量精度高; 采用 TCD1500C 电荷耦合器件作为数据来源; 主芯片采用 ZYNQ 处理器, ZYNQ 能够具备 FPGA 的并行处理能力和 Cortex 的数据调度能力, 能够处理 CCD 高速数据; 通过自定义 IP 核, 使用 PS 端与 PL 端互联 AXI 协议, 实现了高速、大量数据传输; 为了得到应变信号, 采用了将应变信号转化为位移信号进行采集的方法, 之后将位移信号采集存储至 SD 卡中并周期性显示到上位机上, 实现地面对飞艇囊体应变的实时监控; 实现了飞艇囊体应变的实时测量并把测量精度提高至 0.1%。

关键词: ZYNQ 芯片; 应变测量; 实时监测; TCD1500C; 高空飞艇

A Real-time Monitoring System for Airship Capsule Strain Based on ZYNQ

ZHANG Xiaorong^{1,2}, WANG Baocheng¹, HAO Yong¹, XU Wenkuan¹,

QIN Huixian^{1,2}, YUAN Mingyu^{1,2}

(1. Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100094, China;

2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The current real-time strain measurement device of high-altitude airship capsule cannot have the working attributes of small size and real-time measurement at the same time. We have proposed a measuring device that can monitor the strain of the airship capsule on-line, which can realize on-line strain measurement with high measurement accuracy by measuring the relative displacement of the two fixed points of the airship capsule during work. This method innovatively uses optics and photosensitive elements to convert strain into displacement for measurement. The TCD1500C charge coupling device is used as the data source. The main chip uses ZYNQ processor, which can have the parallel processing capability of FPGA and the data scheduling capability of Cortex, as well as processing CCD high-speed data. By customizing an IP core and using the AXI interconnection protocol between the PS terminal and the PL terminal, it is capable of high-speed and large-scale data transmission. In order to obtain the strain signal, a method of transforming the strain signal into the displacement signal is adopted, and then the displacement signal is collected and stored in the SD card and periodically displayed on the host computer to realize the real-time monitoring of the airship capsule strain on the ground. In consequence, the real-time measurement of the strain of the airship capsule is enabled and the measurement accuracy is improved to 0.1%.

Keywords: ZYNQ chip; strain measurement; real-time monitoring; TCD1500C; high altitude airship

0 引言

平流层飞艇是一种轻于空气的飞行器, 主要由飞艇囊体、能源系统、推进系统、载荷舱构成。工作在临近空间, 主要依靠空气浮力实现驻空及可控飞行^[1]。在桥梁、飞行器、船舶等大型结构的健康监测中, 应变是能够反映材料或结构力学性能的重要参数, 应变同样是反应飞艇工作状态的重要参数^[2]。飞艇蒙皮的完整是飞艇系统正常工作的基本保证, 蒙皮材料是飞艇的核心结构。因此对飞艇囊体应变进行检测, 其研究目的在于能在线监视囊体的应变情

况。飞艇的主体结构是充气的球体, 飞艇主囊体采用柔性二维正交各向异性的性复合材料。在正常工作状态下的飞艇, 飞艇的蒙皮受到内外压差的作用, 会处于双向拉伸的状态, 由于飞艇囊体厚度远小于飞艇的长度, 整体结构在受载情况下容易发生较大的变形甚至破坏, 此时蒙皮的应变情况是蒙皮是否处于健康状态的重要指示, 同时也能够为飞艇的安全运行提供可靠数据保障^[3]。目前, 在对类似飞艇囊体的柔性应变的监测技术种类较少, 且测量精度和及时性不能同时满足, 所以针对这一待解决的问题提出了

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-08-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61733017)。

作者简介: 张晓荣(1997-), 女, 山西大同人, 硕士研究生在读, 主要从事 FPGA 测试及开发方向的研究。

通讯作者: 王保成(1974-), 男, 湖南岳阳人, 硕士生导师, 教授, 主要从事航空航天科学与工程、机械工业、自动化技术方向的研究。

引用格式: 张晓荣, 王保成, 郝勇, 等. 基于 ZYNQ 的飞艇囊体应变在线监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 51-56.

基于 ZYNQ 的应变在线监测系统设计方案以对工作状态的飞艇囊体进行实时监测。

针对大型结构应变的测量，一般分为接触式测量和非接触式测量^[4]，其中最传统的方法是使用电测法和光纤应变传感器测量方法^[5]，但是前者耗电，测量精度低，而且对使用环境要求高，易受电磁干扰。后者虽然可靠性高但是受温度敏感温度一应变交叉敏感性影响，应变测量灵敏度低，且不能满足实际工程应用环境中双参量测量的需求^[6-7]。基于以上测量方法，提出一种基于 ZYNQ 的应变测量方法，该方法灵敏度、分辨率高而且能够实现实时在线测量^[8]。应用范围可以推广至其他大型工程结构的健康检测或者位移的测量中，具有良好的普适性。

1 系统结构及原理

根据飞艇囊体设计分析和试验数据，囊体应变较大的区域是最大直径处（个别特殊应力集中点暂不考虑），且其环形应变远大于轴向应变。囊体超压通常也是沿经线撕裂。因此，飞艇囊体应变监测应重点监测囊体最大直径处的环形应变。浮空器中心研制了多个型号的飞艇，有长度从 30~100 m 的多个规格，且进行了多次应变测试试验，根据所在中心的试验报告可以得到，囊体最大直径处的环形应变不会超过 0.5%，考虑囊体设计安全系数，其破裂应变大约在 1% 左右。根据实验结果及数据可知整体的应变测量装置可以放置于经线方向。

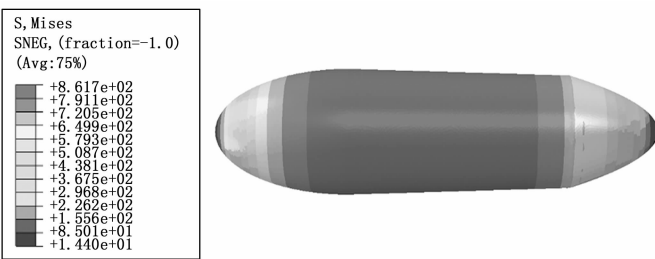


图 1 飞艇受力应变云图

根据薄壁圆筒理论，传统飞艇设计分析中纵向应力和环向应力可采用近似公式：

$$\sigma_a = \frac{pr(x)}{2t} \tag{1}$$

$$\sigma_r = \frac{pr(x)}{t} \tag{2}$$

其中： σ_a 为纵向应力， σ_r 为环向应力， p 为艇囊内外压差。 $r(x)$ 为艇囊截面曲率半径， t 为艇囊壁厚。设置厚度 0.1 cm，内压为 1 000 Pa。根据以上设置可得如图 1 所示的飞艇受力云图。根据飞艇受力应变云图可以看出，蒙皮受到的应力呈环状均匀变化，在飞艇轴向曲率最小的腹部，应力值达到极大值，在飞艇的鼻端应力分别达到极小值，这与实际结果也是相符合的^[9]。所以在应变测量过程中需要集中考虑囊体腹部沿经线方向的应变情况。之后设计的应变测量装置参考飞艇受力应变云图沿经线方向在飞艇腹部多点粘贴。

系统总体结构原理如图 2 所示，整个应变测量装置由两个粘贴片粘贴在飞艇囊体上，其中 CCD 线阵传感器和光源初始分别固定在囊体表面上相距一定距离位置，并且通过机械约束结构使得光照方向时刻与线阵 CCD 感光面保持垂直关系。两个粘贴片分别与光源和 CCD 传感器固定。当囊体受到拉力产生应变时，两个粘贴片的位置会随着囊体受力而发生相对位移 ΔL ，此时的光源和 CCD 线阵传感器的相对位置会发生变化，而其位置变化量也为 ΔL 。同时 CCD 线阵传感器实时感知并记录下光源相对 CCD 的移动，计算位移与两个粘贴点的原始距离之间的比值即得到应变 $\epsilon = \Delta L/L$ 。

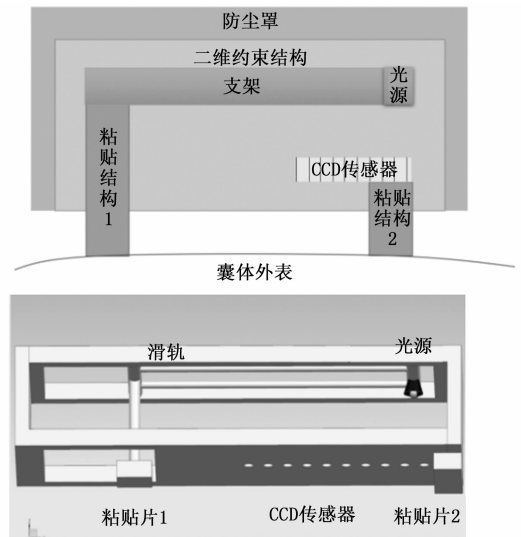


图 2 应变测量装置结构图

虽然囊体表面为弧形，需要在设计方案过程中要考虑消除曲率带来的影响，但是通常飞艇直径较大，而应变传感器尺寸较小，因此这种影响很小，在研究初期不纳入考虑范围^[10]。同时由于 CCD 作为光电传感器属于积分型元器件，灵敏度高所以采用单独光源，在机械结构设计、制作上需要保证整体结构密闭、避光、防尘、防射线，以保证 CCD 工作状态良好，不受外界环境干扰。

2 系统硬件设计

飞艇囊体的应变在线监测系统主要以 ZYNQ7020 为主控芯片，整体包含光源系统、电源系统、AD 采集模块、驱动控制模块、FIFO 数据缓存、串口传输模块、SD 存储卡模块。应变测量装置数据传输逻辑如图 3 所示，首先整体系统复位初始化，之后由 ZYNQ PL 端产生 TCD1500 以及 AD9238 的驱动信号，在光电作用下，TCD1500 将每个周期产生的 5 340 个包含光照信息的模拟电压值的数据传输至 AD9238 中进行模数转换，之后在模数转换中将包含位移信息的光强信息数值化。AD9238 将采集的信息传输至 ZYNQ 的 PL 端，PL 端将接收的数据传输至 FIFO 进行缓存，通过 ZYNQ 中的 AXI4 数据传输协议将数据传输至 PS 端的 DDR 中进行后处理，由于 CCD 的数据信息大且采样速率

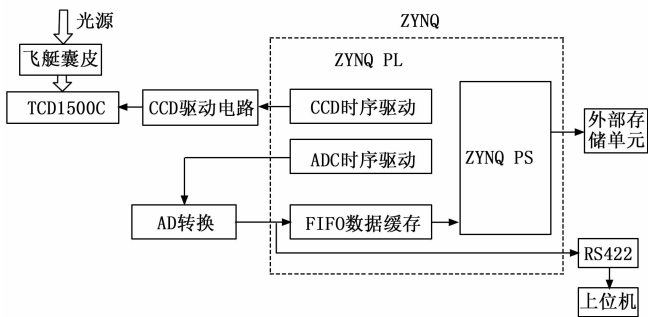


图 3 应变测量装置数据传输逻辑图

快, 这势必占据过多的资源, 而且从飞艇飞行状态监测来看, 需要传输的状态量很多, 并不需要根据应变数据进行姿态控制或操作, 所以将采用 1 次/s 的速率将实时信息通过串口传输至地面计算机上。同时为了保证每次飞行数据的完整性, 并且方便每次飞行后数据分析, 需要保证数据真实、完整、详细。所以将所有数据存入 SD 卡中。在经过多次飞行验证后也可以根据数据分析获得得到光照界限, 将精确的光照信号二值化, 转化为 0、1 二值信号, 使得传输更快捷、高效、直观。

本系统设计主要功能为在飞艇工作过程中实现飞艇囊体应变的实时监测, 所以对选用一维线性 CCD 器件对位移信息进行实时监测, 选用的 CCD 芯片为 TOSHIBA 公司的 TCD1500C, 包含 5 340 个像元, 每个像元尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$, 光敏区域包含高灵敏度且低暗电压信号的二极管, 并且采用 DIP22 的双列直插型的封装形式。TCD1500C 的小尺寸、低暗电流、高灵敏度的响应特点, 能够满足飞艇囊体的应变在线监测的测量精度、速度和稳定性的需求。同时由于 CCD 具有灵敏度高, 动态范围大、像素划分精度高等特点, 所以光源选择亮度和光源效率更高的发光二极管^[11]。

ZYNQ 是 Xilinx 公司推出的一款可扩展处理器平台, 性能高、功耗低, 包含一个可编程逻辑 (PL) 和两个 Cortex-A9 处理器 (PS), 通过 AXI 协议进行通信。在此设计中 ZYNQ 主要实现的功能为: 1) TCD1500C 以及 AD 提供驱动信号; 2) 采集数据并且存储; 3) 对接收的信息进行数据处理; 4) 将处理后

的信息传回地面计算机上以实现实时的监控。本设计选用 ZYNQ 芯片基于以下原因: 1) ZYNQ 芯片的 FPGA 能够为 TCD1500 和 AD9238 提供严格的时序驱动; 2) ZYNQ 的 Cortex 处理器支持 FATFS 文件系统模块, 能够大大缩短开发周期; 3) 在技术成熟后计划升级为面阵 CCD 元器件进行多向的应变监测, 在图像处理中, ZYNQ 的 PL 处理速度和能力配合 PS 的控制效果是单核 MCU 无法达到的; 4) 在后续开发中计划将其他检测模块集成, 例如温度、压差传感器及作动机构, 而且由于高空传输资源稀少, 可以在板上实现数据处理, 将处理结果简化发往地面。使得该设计逐渐完善成为成熟的健康监测模块。

2.1 TCD1500C 驱动电路设计

线阵 CCD 的驱动信号由主控芯片 ZYNQ 产生, TCD1500C 的供电电压的典型值为 12 V, 典型工作电压为 5 V。但是 ZYNQ 的 I/O 常规口为 3.3 V, 与 12 V 的工作电压不匹配, 若直接使用 ZYNQ I/O 口驱动将无法工作。所以在本设计中采用反相器 TC74HC04P, 将 TCD1500C 的输入信号进行取反并升压, 提高 ZYNQ 输出信号的驱动和负载能力, 使得输入电压满足 TCD1500C 工作电压。^[12] TCD1500 驱动电路如图 4 所示, 根据对 TC74HC04P 的手册分析可知, 当其供电电压大于 4.5 V 时, 反相器的输出电压大于 3.84 V, 满足 CCD 驱动电路要求^[13]。

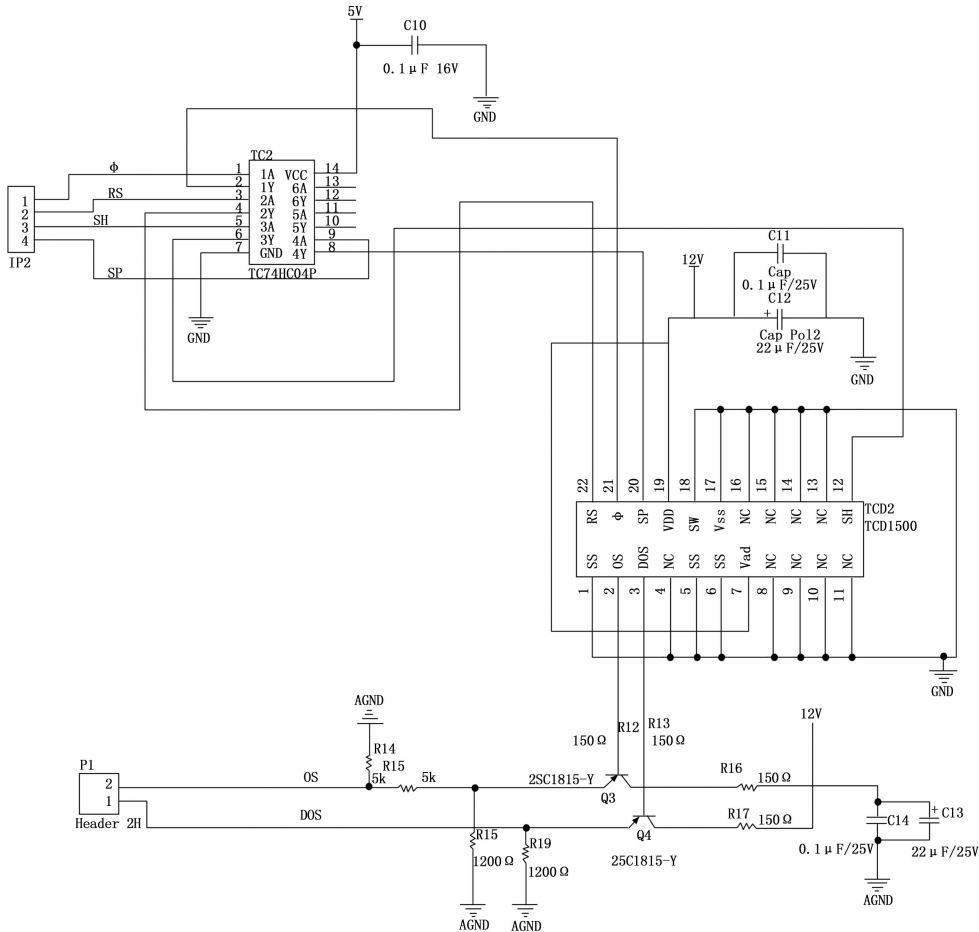


图 4 TCD1500 驱动电路

2.2 AD9238 外围电路设计

本设计选用 AD9238 进行模数转换，将 TCD1500 的模拟电压信号转化为精确的数字信号，AD9238 支持两路 AD 输入转换，可以实现一套应变装置同时测量两个点的应变信息，极大的降低了测量成本。AD9238 是 ADI 公司生产的 12 bit 模数转换器，该 AD 芯片采用 3.3 V 供电，采样速率为 40 MSPS，测量精度为 10 mV，工作方式为流水线式^[14]。符合本结构的设计精度。

AD9238 的驱动配置及供电电路如图 5 所示，每个通道的信号值通过两个 SMA 接口输入，根据电阻配置将输入的电电压配置为 -6~+6 V 的范围。将 AD 配置成 Offset Binary 模式，根据电路设计可知当输入为 -6 V 时，AD9238 的转换数值最小，当输入为 +6 V 时，转换的数字值最大。

2.3 电源电路设计

本设计中主要用到的电压有 4 种分别是 12 V，5 V，3.3 V，-5 V。其中 TCD1500C 信号采集部分采用 12 V 供电，之后将 12 V 转化为 5 V，采用 LM2596S 芯片转换。LM2596S 是一款电源管理单片集成电路的开关电压调节器，线性和负载调节特性良好。±5 V 采用 MC34063A 芯片进

行转换。该芯片是一种能够用以升压和降压的用于直流一直流转换控制的电源芯片，其中还包含有温度补偿带隙基准源。

2.4 数据传输模块设计

本设计选用串口协议将数据从 ZYNQ 中传入上位机进行实时监测。RS422 相比其他协议具有支持全双工差分传输优势，传输距离超长，且传输速率高，适合 TCD1500C 的视频信息传输^[15]。本结构主要使用 MAX3490 芯片作为电平转换芯片。使用的开源 FAT 文件系统模块来控制 SD 卡，FATFS 的编写遵循 ANSI C，因此不依赖于硬件平台，FATFS 为小型的嵌入式系统而设计，系统支持长文件名，支持两级文件夹。FATFS 系统主要包含 3 层，分别是：接口层、协议层、应用层。本设计通过调用 FATFS 来完成 SD 卡存储及缓存^[16]。

3 系统软件设计

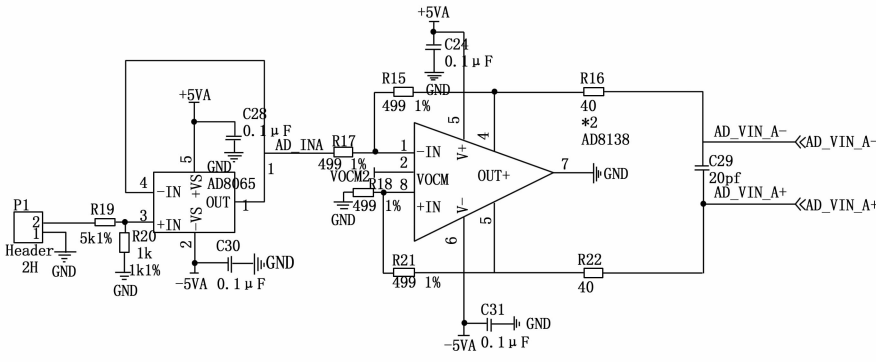
本次系统的软件设计主要采用 Verilog 和 C 两种语言，其中 Verilog 主要用于 ZYNQ 的 PL 端编程，主要包含 TCD1500C 的驱动时序设计、AD9238 的驱动和信号采集、

FIFO 数据缓存模块^[17]以及 RS422 串行数据驱动模块。C 语言主要用于外部存储单元读取、存储 DDR 数据以及上位机编写及控制。

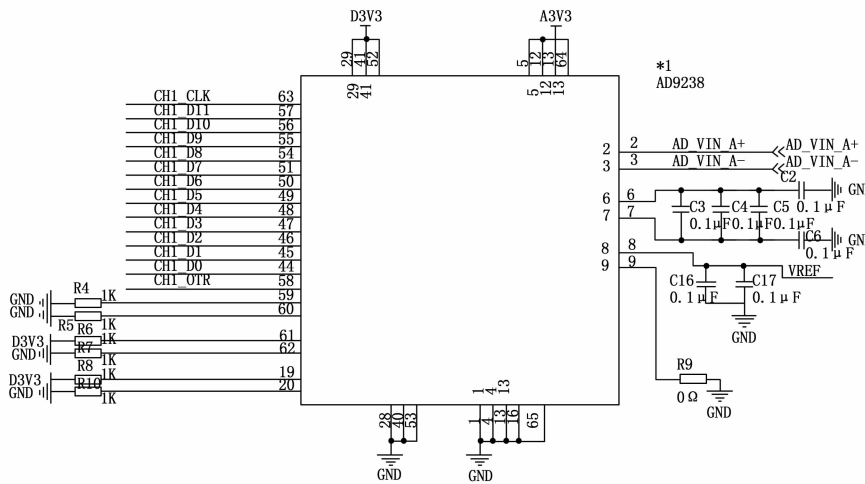
3.1 CCD 驱动脉冲时序设计

根据 CCD 的工作原理可知^[18]，TCD1500C 的正常工作需要四路驱动信号分别是：RS（复位脉冲）、SH（光积分脉冲）、SP（采样保持脉冲）、e1（驱动时钟脉冲）。TCD1500C 正常采集光信号的必备条件有：要有严苛的时序要求、满足工作电压、CCD 信号输出与 AD 采集同步。在 e1 信号的驱动脉冲信号作用下，实现光信号转化为的电荷的产生、储存以及转移，最后将所有电荷信号依次驱动导出至 OS 端口^[19]。

上述工作都是由驱动电路来完成，根据时序分析可知，e1 的时序为 0.5 MHz，占空比为 1:1，SP 的频率典型值为 1 MHz。采样保持脉冲 SP 的相位比 RS 慢 1 μs，输出复位脉冲 RS 为 1 MHz，占空比为 1:3^[20]。ZYNQ 在硬件语言 Verilog 的描述中提供 SH、e1、RS、SP 的四路时序信号。通过 vivado 的仿真功能可以得到如图 6 所示的 TCD1500 驱动时序图，可知完全符合 datasheet 的时序逻辑要求，且经硬件电路验证，以下信号时序符合 TCD1500 正常工作时序。



(a) AD9238驱动配置图



(b) AD9238供电电路

图 5 的 AD9238 相关电路图

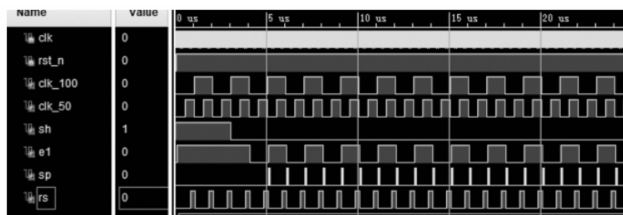


图 6 TCD 1500 驱动时序图

3.2 A/D 采集时序设计

AD9238 支持双通道的信号采集, 输出为 3.3 V 的 CMOS 的输出模式, 两路信号相互独立, 使用相互独立的时钟和数据通道。在时钟信号的上升沿, FPGA 采集信号^[21]。AD9238 驱动时序如图 7 所示。

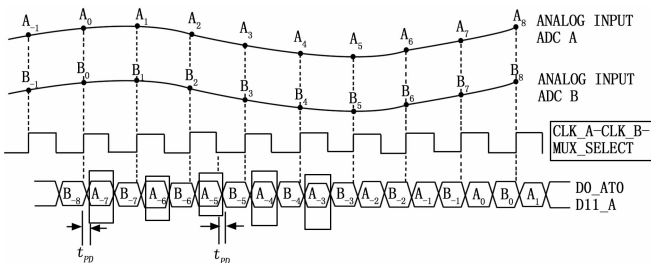


图 7 AD9238 驱动时序

3.3 数据读写模块设计

数据的读写模块指 ZYNQ 中 PL 与 PS 端基于 AXI4 的数据交互, 而基于 AXI4 的高速通信是 ZYNQ 的优势之一^[22]。

AXI 总线协议是 ARM 公司开发的一套 SOC 总线标准, 用于 SOC 设计时各个模块之间的互联操作。AXI4 协议是基于猝发机制的高带宽、高性能、低延时的总线。该协议主要包含有写地址、写数据、写响应、读数据、读响应 5 个部分组成。主机和从机之间通过互相发送 VAILD 和 READY 信号来完成握手。同时 AXI 的写响应通道实现从设备向主设备发出写交易的完成信号。由于 TCD1500C 信号传输频率高且信息量大, 无法将数据从 PL 端传入 PS 端, 所以使用 AXI HP 总线实现对内存 DDR 的读写访问^[23]。系统总体控制信号设计流程如图 8 所示。

在 vivado 中建立 bd 文件如图 9 所示, 根据系统 bd 框图可

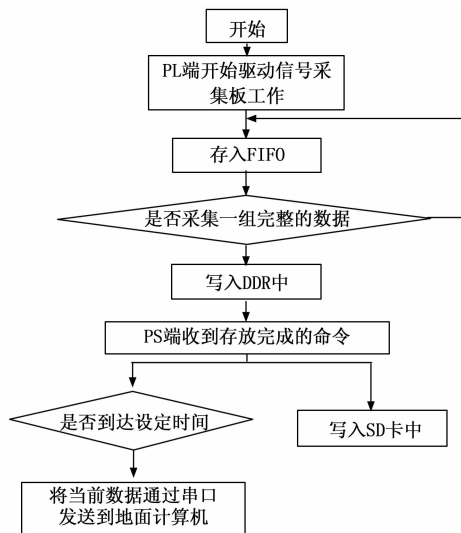
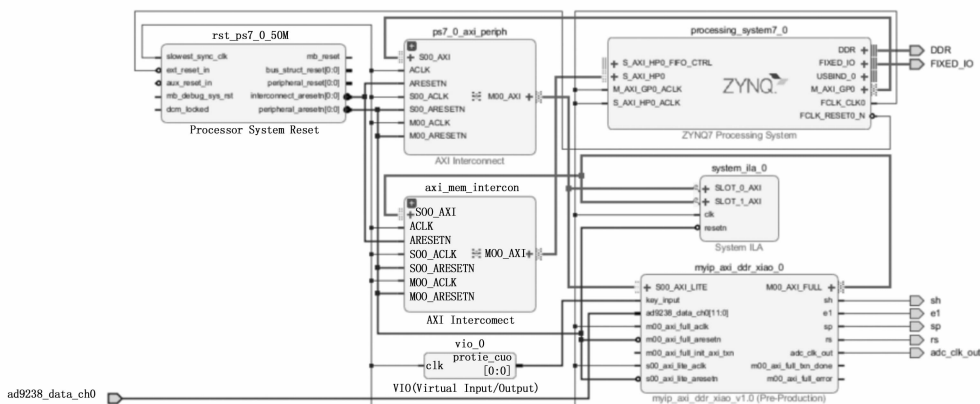
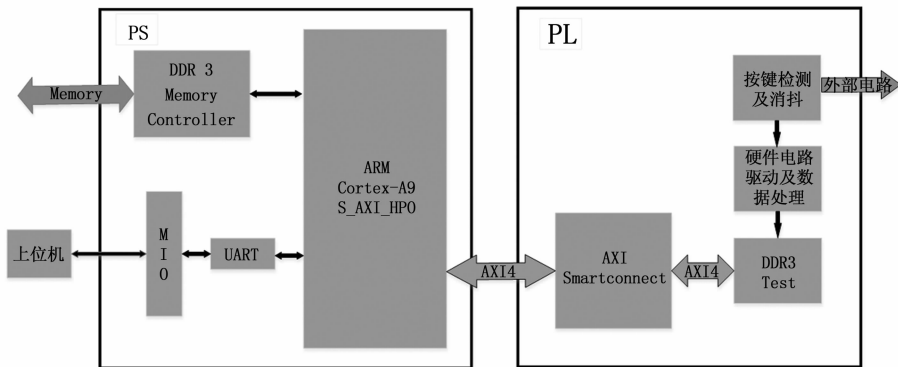


图 8 系统总体控制信号设计流程图

知: 系统中有一个 AXI_Interconnect 作为 PL 和 PS 接口。新建包含 AXI-Lite 和 AXI-Full 协议的 IP 核实现数据在 ARM 和 FPGA 中互传。使用该 IP 核可以传输大量数据, AXI_HP 可以访问 PS 端 DDR 内存, 此外通过 AXI-Lite 传输 PS 端对 PL 端的控制信息、突发长度等参数, 通过 AXI-Full 将大量数据存储至 DDR 中。AXI_GP 端口主要



(a) 系统总体block design



(b) 软件设计图

图 9 ZYNQ 总体及使用资源图

用作 ARM 处理器访问寄存器的通道。同时该 IP 核可以完成对外部硬件电路控制及驱动。

4 实验结果与分析

经过前期对电路的设计及测试,搭建实物连接如图 9 所示,主要包括 ZYNQ 开发套件、TCD1500 数据采集板、AD 模数转换模块。整体使用外部 12 V 供电,经调试可以完成上位机的收发及 SD 卡缓存。达到设计指标。数据信息可以通过 AXI 的 WRITE DATA 通道显示数据的近似模拟量来显示在 CCD 的数据采集实时信号,将数据处理为一维线性如图 10 所示。

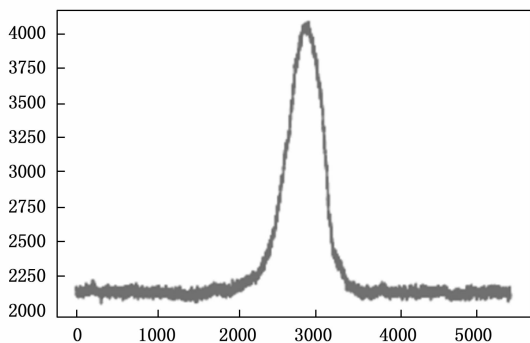


图 10 采集数据示意图

通过在 vivado 的 bd 设计中添加 system-ila 可以看到通过 AXI 协议将实时数据写入 DDR4 中,实现数据在 PL 与 PS 间的互传及 TCD1500 数据的实时传输及监测。

TCD1500C 的像元间距为 $7\ \mu\text{m}$,即尺寸分辨率为 $7\ \mu\text{m}$ 。像元数量为 5 000 左右,则总有效敏感总长度为 35 mm。因此,根据囊体最大应变 1% 的需求,两个粘贴点之间的最大间距为 $35\ \text{mm}/1\% = 3\ 500\ \text{mm}$ 。根据项目总体目标应变测量精度 0.1% 的要求,则两个粘贴点之间的最小间距为 $7\ \mu\text{m}/0.1\% = 7\ \text{mm}$ 。因此两个粘贴点之间的间距区间为 $7 \sim 3\ 500\ \text{mm}$ 。

5 结束语

根据 ZYNQ 采集 TCD1500 的前端数据源,将应变测量问题转化为位移的数据采集,针对高空飞艇的特殊应用环境,设计了一种用于高空飞艇囊体的应变在线监测系统。该系统采用 ARM+FPGA 的 SOC 技术,通过使用 AXI4 总线协议使得大量数据从 PL 端传入 PS 端从而实现数据传输至外部存储设备以及在上位机上的显示,系统具备体积小、功耗低、精度高、实时性、稳定性强的特点。满足囊体应变在线监测要求。

参考文献:

[1] 黄迪,赵海涛,邱野,等.平流层飞艇蒙皮强度建模与仿真研究[J].计算机仿真,2013,30(1):150-153.

- [2] 余鸿儒.基于应变测量的桥面板弯曲变形监测[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [3] 宋林,姜鲁华,张远平,等.飞艇囊体薄膜材料的双向拉伸试验及结构仿真[J].复合材料学报,2016,33(11):2543-2550.
- [4] 聂毓琴,孟广伟.材料力学[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [5] 戈嗣诚,陈国良.平流层飞艇的结构健康监测系统初探[J].航天返回与遥感,2007(3):62-65.
- [6] 徐文宽,王生.光纤布拉格光栅大应变传感器的设计和仿真[J].计算机仿真,2010,27(5):318-322.
- [7] 周雪芳,梁磊.粘贴式光纤光栅传感器应变传递规律研究[J].传感器世界,2007(8):14-18.
- [8] 王庆有.CCD应用技术[M].天津:天津大学出版社,2000.
- [9] 石泰百.囊体材料与囊体结构强度模型及试验研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [10] 王闯,屠晓伟.基于三线阵 CCD 的室内导航方法研究[J].燕山大学学报,2021,45(4):312-320.
- [11] 杨淋,周肇飞,张涛,等.线阵 CCD 在高精度测量系统中的照明选择[J].实用测试技术,2002(5):20-22.
- [12] 张坤,柴波,王晓洁,等.基于 ZYNQ 平台的测发控无线供电系统的设计与实现[J].计算机测量与控制,2020,28(8):102-106.
- [13] 李南.基于 USB2.0 的高分辨率线阵 CCD 图像采集系统[D].成都:电子科技大学,2009.
- [14] 刘册.基于 STM32 和 FPGA 联合构建的特种设备行业高精度数据采集系统[J].河北省科学院学报,2019,36(2):7-14.
- [15] 周兴云,陆文斌,张秋明,等.基于 CAN 和 RS422 实现 FPGA 远程调试与配置[J].无线电工程,2018,48(2):154-158.
- [16] 苏锐.基于 STM32 的脉冲激光器智能控制系统设计[D].合肥:中国科学技术大学,2019.
- [17] 陈标龙,王保成,周江华.基于 FPGA 和 FIFO 技术的多串口系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2013,21(10):2835-2837.
- [18] 于洋.CCD 数据采集系统及其 CDS 降噪技术的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2004.
- [19] 周雷.CCD 非接触几何量测量系统的设计与实现[D].大连:大连理工大学,2007.
- [20] 凌东瑞,李家泽.弱光同步探测中的 CCD 数据采集电路设计[J].光学技术,2000(6):548-551.
- [21] 苏锐.基于 FPGA 的高速 AD7903 驱动设计与实现[J].电子制作,2016(12):8-9.
- [22] 林振钰,张志杰,刘佳琪.基于 ZYNQ 的高清图像显示及检测系统设计[J].计算机测量与控制,2021,29(2):30-34.
- [23] 陈晋.基于 AXI 总线的 DDR 控制器性能分析研究[D].西安:西安电子科技大学,2020.