

基于 FPGA 的矿用环境采集传输系统设计

王 特¹, 李 杰¹, 胡陈君², 赵计贺¹, 薛 栋¹

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 太原 030051;

2. 苏州中盛纳米科技有限公司, 江苏 苏州 215123)

摘要: 随着煤炭产业开采从浅层往深层推进, 温度、压力和振动等环境条件都时刻需要检测, 防止威胁矿下人员安全和财产安全的现象发生, 因此一个实时性、稳定性良好的采集传输系统极为重要; 针对这一问题, 设计了一种基于 FPGA 多通道、数模混合的采集与实时发送系统; 在系统总体设计的基础上, 对系统的硬件电路和软件程序设计进行了相关介绍, 通过对程序的仿真, 验证了采集传输系统设计的可行性; 经实物试验验证, 采集传输系统可以正确有效地采集和传输 5 种传感器输出的信号, 各信号精度都满足要求, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 环境数据采集; 无线传输; 信号调理; FPGA; AD7616

Design of Acquisition and Transmission System of Mine Environment Based on FPGA

WANG Te¹, LI Jie¹, HU Chenjun², ZHAO Jihe¹, XUE Dong¹

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Suzhou Zhongsheng Nanotechnology Company, Suzhou 215123, China)

Abstract: As the coal mining industry advances from shallow to deep, environmental conditions such as temperature, pressure, and vibration need to be monitored at all times to prevent phenomena that threaten the safety of personnel and property in the mine. Therefore, a real-time, stable collection and transmission system extremely important. To solve this problem, a multi-channel, digital-analog hybrid acquisition and real-time transmission system based on FPGA is designed. On the basis of the overall design of the system, the hardware circuit and software program design of the system are introduced. Through the simulation of the program, the feasibility of the acquisition and transmission system design is verified. It has been verified by physical experiments that the acquisition and transmission system can correctly and effectively collect and transmit the signals output by the five sensors, and the accuracy of each signal meets the requirements, which has certain engineering practical value.

Keywords: environmental data acquisition; wireless transmission; signal conditioning; FPGA; AD7616

0 引言

煤炭产业一直是我国社会生产和经济发展重要物质保障, 由于近些年的不断开采, 容易开采的浅层矿层已经接近枯竭, 只能向更深的矿层开采, 而伴随着开采深度的增加, 危险源也随之到来, 如甲烷气体, 矿层坍塌等^[1-2]。为保障煤下的人员安全, 一套可靠的矿下环境监测显得尤为重要。而现如今我国的矿下的监测系统还存在采集传感器接口单一, 扩展性能差, 系统和分站之间布设电缆不易维护, 采集系统分析处理大量数据所需时间长等问题, 这些问题可能导致矿下安全监测中心不能及时地获取可靠的信息, 影响人们的生命和财产安全^[3-4]。

针对以往的矿用传感器采集系统存在的问题, 设计了一款基于 FPGA 的传感器采集传输系统, 相比于使用 ARM

或单片机来进行控制, 数据吞吐率更快、实时性更好、接口数量更多且易于实现。本设计相比其他以 FPGA 为控制核心的采集系统通道数量更多, 采样精度更高, 能够满足目前对采集系统的要求。

1 系统总体设计

采集系统设计的目标主要是为实现对于多通道、模拟量和数字量输出的传感器进行同步的采集和存储。系统构成分部分包括电源模块、信号调理模块、模数转换模块、FPGA 控制模块、无线传输模块等部分构成个部分, 系统总体框架如图 1 所示, 主要设计参数如表 1 所示。

系统的主要设计思路是首先对模拟输出的传感器信号进行适当的调理, 如放大滤波等^[5-6], 然后 FPGA 通过控制具有 16 bit 的高精度模数转换芯片 AD7616 对于 4 路的模拟

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-01-20。

作者简介: 王 特(1996-), 男, 陕西西安人, 在读硕士研究生, 主要从事传感器数据采集与微系统集成方向的研究。

通讯作者: 李 杰(1976-), 男, 山西吕梁人, 教授, 博士生导师, 主要从事微系统集成理论与技术、惯性感知与控制技术、组合导航理论等方向的研究。

引用格式: 王 特, 李 杰, 胡陈君, 等. 基于 FPGA 的矿用环境采集传输系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 202-205, 244.

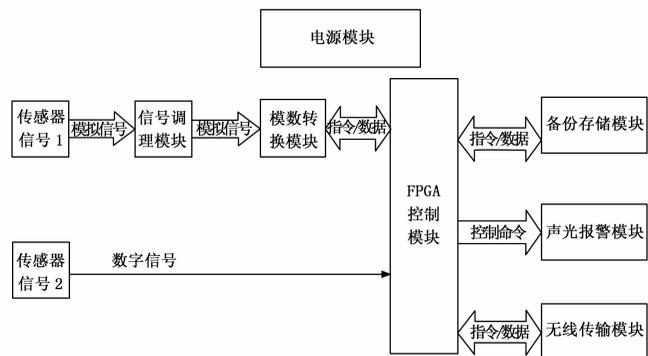


图 1 系统总体框图

表 1 信号主要设计参数表

信号类型	测量范围	阈值	输出类型
瓦斯浓度	0~4.00%	≥1.0%	模拟电压
氧气浓度	0~25%	≤18%	模拟电压
一氧化碳浓度	0~500 PPM	≥24 PPM	电流
温湿度	-5~100 °C 0~100%	≥30 °C	RS485
粉尘浓度	0~1 000 mg/m ³	≥10 mg/m ³	RS485

信号进行采样, 并将其转换为数字量。同时将 4 路输出数字量的传感器通过相应的转换输入到控制芯片中, 以实现同步采样。最后 FPGA 将采集到的数据进行相应的编帧, 然后发送到无线传输模块或存储到备份存储模块中。同时 FPGA 将采到的传感器数据进行判别, 程序中设定每种传感器的阈值当采集到的传感器数据达到各自设定的阈值时, 控制声光报警器开始报警。

2 硬件设计

硬件是整个前段采集系统的核心, 对于矿下采集系统而言确保采集到的信号的完整性和准确性, 以及将采集到的数据及时处理并发送到控制中心非常关键。同时由于矿下环境监测传感器种类较多, 输出类型也有所差别, 因此兼容性在设计时也应该考虑到。

2.1 电源模块

电源模块是保证系统正常工作的基础, 电源的质量直接影响系统的精度, 针对电源可能存在的不能响应负载电流的快速变化及供电电路阻抗引起的电压波动问题, 采用电源去耦来解决这一问题^[7-8]。去耦电容提供了一条低阻抗回路使高频分量从地释放, 从而减弱电源系统噪声对其供电器件的影响。考虑到有时模拟供电和数字供电可能由不同芯片提供, 为防止相互干扰将模拟供电和数字供电用 0 欧姆电阻单点相接。采集部分电压转换模块如图 2 所示。

对于 AD7616 而言, 为满足 A/D 芯片的精度要求, 供电噪声一定要小于其最低有效位,

计算公式为:

$$LSB = \frac{+FS - (-FS)}{2^N} \quad (1)$$

其中: LSB 为 A/D 芯片的最低有效位, FS 为 A/D 的输入电压最大值 5 V, N 为 A/D 的位数, 经计算 AD7616 最低有效位大小为 $152 \mu V$ 。电压转换模块采用 REG104-5 芯片, 输出噪声峰-峰值小于 $33 \mu V$, 噪声远小于 LSB 的值, 满足 A/D 芯片的供电要求。

2.2 信号调理和模数转换模块

在设计采集系统时, 信号调理模块的主要是根据系统对于模拟信号的要求, 将模拟信号进行放大、滤波, 同时隔离被测信号和采集电路的地线。通过隔离电路将电路的前后级地线相互隔离, 保证采集电路安全, 还可以用来增强输入信号的驱动能力^[10-11]。此外, 模拟输出的传感器有效信号的频率一般集中在 1 kHz 以下, 因此采用滤波器将输出信号集中在所需频段。

基于以上要求, 运放采用 OP4177ARUZ 作为调理前段的运放。由于模拟信号的输出电压在 $-5 \sim 5 V$ 之间, 满足 AD 的输入电压范围, 因此采用电压跟随方式。滤波器采用 MAX291, 作为集成的八阶巴特沃斯滤波器, 通过电容来调节信号的输出频率。

模数转换模块的作用是将传感器输出的模拟信号转换为可被处理器接收的数字信号^[12]。为满足设计的需要, 最终选用 AD7616 为模数转换芯片, 它是一款可以进行 16 个通道同步采样的高精度模数转换芯片。为防止信号输入端产生反射, 造成采到的传感器噪声过大, 因此需要阻抗匹配。计算阻抗的公式为:

$$LSB = \frac{V_{DD} \times Ripple}{\Delta I_{MAX}} \quad (2)$$

其中: V_{DD} 为供电电压 5 V, $Ripple$ 为供电电压波动范围的上限 10%, ΔI_{MAX} 为最大工作电流 65 mA, 得到阻抗为 7.692Ω 。为避免通道间的失调误差, 同时将输入电流限制在规定的范围内。

2.3 控制模块和无线传输模块

控制模块由 FPGA 与外围电路组成, 主要功能是控制

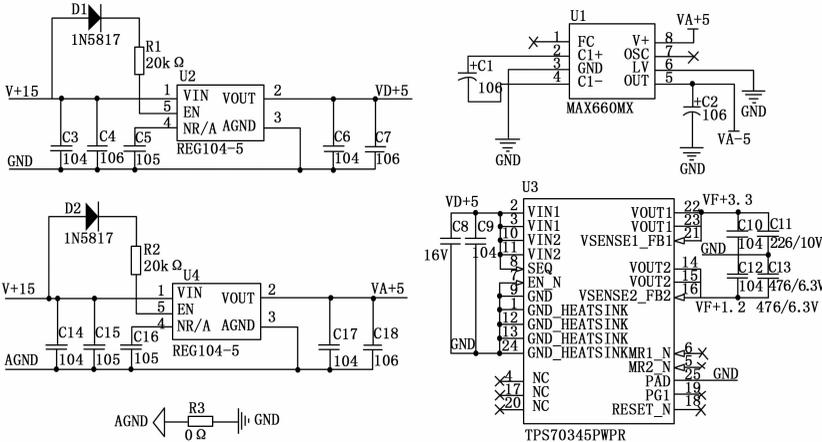


图 2 电压转换模块

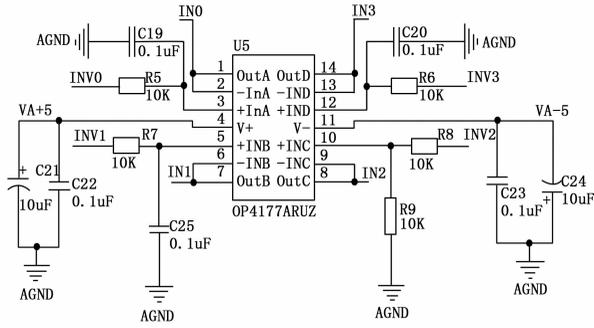


图 3 前端调理电路

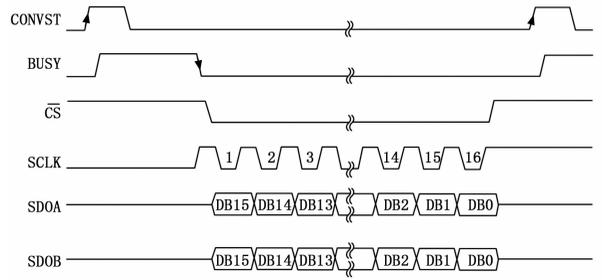


图 4 AD 工作时序图

ADC 的采样、还要控制数字量输出传感器的采集，并将相应的数据进行编帧处理后发送给无线传输模块或存储到备份存储模块无线传输模块主要是由 ZigBee 无线通信模块构成，采用 MESH 网络结构，支持多跳转发，为实现在矿下的无线传输在两采集模块或网关模块和采集模块之间加入若干路由节点，从而实现数据的多级转发。当信号某一传输路径损坏时，会自动寻找新的路径实现信息传输。

主控芯片采用 FPGA 是由于其工作稳定性好，拥有丰富的门阵列资源，非常适合进行复杂的逻辑控制，有丰富的 I/O 口资源，系统扩展性好，满足多通信接口的需要。选用 ZigBee 进行无线网络通信是由于矿井下巷道错综复杂，监测点数量如果增多，铺设线缆和维护时成本太高，采用 ZigBee 无线传输模块低成本、低功耗、延时短和安全性高。

3 软件控制程序设计

采集系统的软件设计主要是针对 FPGA 编写控制程序，其中主要包括了采集控制程序、FIFO 缓存程序、数据分析与预警程序和无线模块数据交互等部分。采集控制程序主要是 FPGA 控制 AD 进行模拟信号的转换和数字信息的采集。

FIFO 缓存程序是应对不同时钟的信号过来之后的时钟域转换问题。而数据分析与预警程序是将采集到的数据与设定的每个传感器阈值对比，控制声光报警器实现危险报警。FPGA 与无线模块数据交互是通过使用 I/O 口资源实现串口功能，通过串口将传感器整合后的数据传输到无线模块。

3.1 模拟信号采集

为了节省 FPGA 的 I/O 口的数量，减少对 PCB 板布局的影响，避免并行总线可能产生的串扰和反射，本文采用串行工作模式，时序如图 4 所示。为提高吞吐率，AD 工作在软件串行接口 2 线模式下，此时 V0A 到 V7A 通道的转换结果从 SDOA 引脚输出，V0B 到 V7B 通道的转换结果从 SDOB 引脚输出。

当转换信号从低电平变为高电平时，启动对输入模拟信号的转换。BUSY 信号为高电平表示转换正在进行，BUSY 信号从高电平变为低电平表示转换已完成，可以通过串行接口回读转换结果。为使数据输出线路 SDOA 和

SDOB 脱离三态 CS 必须为下降沿，此时转换后的最高有效位开始输出。时钟的上升沿时将随后的数据位逐个发到串行数据输出口。

AD 转换程序流程如图 5 所示。顶层程序定义了 FPGA 与 AD 模块之间信号的输出和输入。

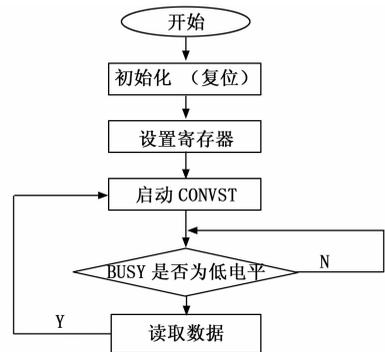


图 5 模拟量转换流程图

当系统上电时，FPGA 控制复位引脚完成对 AD7616 的初始化，然后发送启动转换的信号。当转换完成后 BUSY 变为低电平时，开始进行数据的读取，此时片选信号 CS 置低。在读取数据有效的时候将 16 通道的数据读到内部缓存中，此时一次的转换完成。这样不断循环实现模拟量的采集。

3.2 数字信号采集

对于数字量输出的传感器，它一般为 UART 串口输出。对于普通串口输出的传感器，它的接口电平为 LVTTTL 电平，对于这种类型的接口，可以直接通过 IO 接口读入 FPGA 中。对于输出接口是 RS422 或者 RS232 的传感器而言，就需要先将 422 或者 232 转换为 LVTTTL 电平，然后传输到 FPGA 中。FPGA 对读取到的数据进行编帧然后缓存到 FIFO 中。对于外部通过 IO 口接入 FPGA 的信号，一般对其先进行消抖处理，去除毛刺的干扰。

3.3 数据缓存程序

为解决跨时钟域的数据传输和不同位宽的数据匹配问题，本文采用在 FPGA 内部搭建 FIFO 缓存模块来解决这个问题。本文的 FIFO 模块共有 3 种，一种是针对模拟量通过 AD 转换过后，用于暂时存放转换过后整合的 32 位数据。还有对于数字信号经过相应处理后通过 IO 口输入数据，这

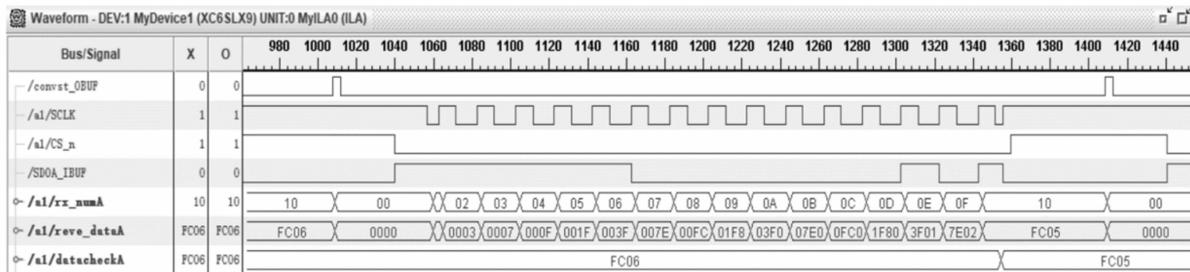


图 6 AD 转换时序仿真

个 8 位的数字量也要存入一个 FIFO 中。最后这个 FIFO 是用于实现 FPGA 到 FLASH 的接口转换功能。

模拟信号的采集速率往往大于数字量信号, 为实现对输入输出数据速率和位宽匹配的要求, 本文通过对 FIFO 模块读写操作来控制, 进而达到实时、高速采集的采集信号, 保证数据的完整性。

为方便之后对数据的判读和处理, 采用编帧方式来编码数据。将不同传感器的信息采用固定的帧格式编为一帧数据, 以采样率高的模拟量传感器为基准, 同时加上特定的帧头“EB 90”方便对于数据读取后的分析。数据编帧格式如表 2 所述。

表 2 编帧格式

帧头	帧计数	传感器数据	校验和
----	-----	-------	-----

帧头是为方便接收端在接收到数据后进行准确性的判断。帧计数是确保在读取数据后判断与前一帧数据是否连贯, 保证数据的连续性。传感器数据包括模拟量输出和数字量输出两种, 前面 32 字节为模拟量传感器输出, 后面 4 字节为数字量传感器输出。最后考虑到数据的传输和处理, 在帧尾加上校验和, 即前面所有数据和的低八位, 如果处理时发现校验和错误, 就丢弃此帧数据。

3.4 预警程序和无线交互程序

预警程序主要是控制声光报警器, 在检测到有危险时及时有效地提醒井下工作人员的目的, 主要满足灯光和响度的要求, 报警灯光要在井下 20 m 内清晰可见, 而响度要求不低于 80 db。程序在设计时考虑到井下环境的复杂性, 将危险等级分为两级, 当井下处于安全环境时, 亮绿灯, 蜂鸣器和红灯均不工作; 当采到的传感器数据处于第一个阈值时, 轻度危险报警, 绿灯亮蜂鸣器开始报警; 当采集到的传感器到达第二阈值时, 严重危险报警开始, 蜂鸣器和红色 LED 灯都工作, 绿灯不工作, 同时向控制中心开始发送报警信息。与无线模块交互程序是通过 FPGA 的 I/O 接口将处理后的传感器数据编帧处理后发送到无线模块, 同时接受无线模块发送的相关指令, 并将其存储到外部设备中。

4 时序仿真和实验验证

为验证所写程序的准确性和系统工作的可靠性, 在 ISE

中对 AD7616 转换程序进行编写、调试和仿真。为验证系统能否实现对于模拟信号和数字信号的同步采集, 将系统安装在三轴转台上转动一定的角度检测采集到的数据完整性和准确性。最后进行 ZigBee 模块的无障碍距离与采集到的传感器精度测试。图 6 为 AD7616 的时序仿真, 由 chipscope 的时序仿真确定 AD 转换程序的准确性。

由图 6 可以看出, 在 AD 串行输出的模式下, 当转换信号 convst_OBUF 来临后, 片选信号 CS_n 置地。当遇到时钟 SCLK 的上升沿时, 计数器 rx_numA 开始计数, 同时移位寄存器 reve_dataA 在每个时钟上升沿后左移一位, 当经过十六个时钟后得到一个 16 位转换后的值, 然后将 datacheckA 输入到 FIFO 之中, 此时完成一个通道的转换。当连续的 64 个时钟之后, 一次转换完成。

对于最终的实物而言, 系统时序上连续性与准确性, 以及采集传感器的精度是必须要检验的参数。为验证系统对于模拟信号和数字信号采集的同步性, 通过在三轴转台上采集数字量输出的传感器和模拟量输出的传感器来判读采集到数据的判读。采样率调整为 1 K, 将采集到的数据经过分离和处理, 得到数据如图 7 所示。

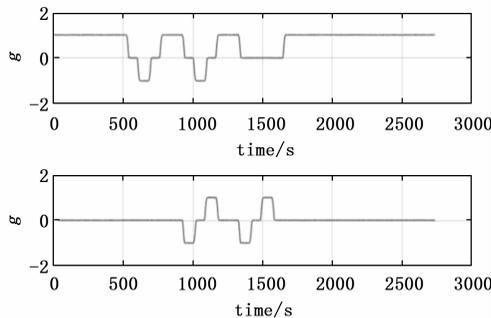


图 7 传感器输出测试

通过采集模拟量和数字量输出的加速度计的连续采样, 证实了系统在模拟与数字量采集上的时序上的同步性和连续性, 对比设定的位置与采集到的加速度信息, 可以证明系统能准确的采集到传感器的输出信号。同时为保证采集到的传感器的精度符合要求, 对采集电路的精度进行测试, 测试结果如图 8 所示。

图 8 为系统采集高精度电源输出的 2 V 电压, 其采集误 (下转第 244 页)