

## Design of Temperature Editing and Forwarding System Based on FPGA

HUO MingRui<sup>1</sup>, WEN Feng<sup>1,2\*</sup>, JIAO Xinquan<sup>1,2</sup>, ZHANG Kaihua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology of North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Science and Dynamic Testing of Education Key Laboratory Instrument of North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In the catapult test of missiles, the operating temperature of key equipments and other equipments played an important guiding role in assessing the working conditions of the equipment and improving the model. To this end, an FPGA-based high-precision multi-channel real-time temperature monitoring system was designed. The system mainly includes the acquisition and distribution repeater and the acquisition and editing device. The acquisition and editing device adopts the methods such as signal conditioning, analog-to-digital conversion, internal bus, and drawer structure on the hardware. The method of logically finding the ROM table and CAN bus can be used simultaneously. Monitoring 192 temperature signals, this system has the advantages of high precision, high reliability, and high inheritance.

**Key words:** Electronic circuit design; temperature acquisition and distribution system; FPGA; signal conditioning; ROM table; CAN bus

EEACC: 7320R

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.01.032

## 基于 FPGA 的温度采编转发系统设计

霍明瑞<sup>1</sup>, 文丰<sup>1,2\*</sup>, 焦新泉<sup>1,2</sup>, 张凯华<sup>1</sup>

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;  
2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 在飞行器的弹射试验中, 飞行器上关键仪器设备的工作温度, 对于评定设备工作情况、进行型号改进, 都具有重要的指导意义。为此设计了一种基于 FPGA 的高精度多通道实时温度监测系统。该系统主要包括采编转发装置和采编变换装置, 采编装置在硬件上采用信号调理、模数转换、内部总线和抽屉式结构等方法, 在逻辑上采用查找 ROM 表和 CAN 总线等方法, 使得可以同时监测 192 路温度信号, 此系统具有高精度、高可靠性、高继承性等优点。

**关键词:** 电子电路设计; 温度采编转发系统; FPGA; 信号调理; ROM 表; CAN 总线;

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)01-0168-05

目前, 实现温度采集的核心处理芯片主要是单片机, 基于单片机的测温装置虽然功耗低, 可靠性高, 但单片机的处理速度太慢, 无法满足对温度高精度多通道采集的要求, 系统综合性能较低<sup>[1]</sup>。为此设计了一种以 FPGA 为控制器的测温系统, 该系统具有内部时钟频率高、延时小、运行速度快、集成度高、功耗低、编程灵活、开发周期短等优点。因此采用 FPGA 为温度采集系统的控制器, 并使用热电偶传感器采集温度信号, 对温度信号进行采集、变换、放大、编码, 通过模数芯片进行模数转换, 供地面测试台进行分析处理, 并还原成温度参数<sup>[2]</sup>。该方法具有性能稳定、精度高、编程灵活、可拓展性

强、多通道实时显示强等优点, 完全满足对飞行器上环境温度的实时监测的需求。

### 1 系统整体设计

温度采编装置主要包括采编转发装置和采编变换装置, 两部分进行连接通讯, 主要对热电偶信号进行采集、变换、编码。其中, 采编转发装置通过 RS-422 接口将采编转发装置和采编变换装置采集的数据回传至地面测试台进行分析处理, 并接收测试台发出的副帧同步、字同步和移位脉冲信号指令, 两台装置采集的数据按约定帧格式编码发送到地面测试台。采编转发装置和采编变换装置之间通过

CAN 总线进行通讯, 并且都采用模块化分层设计, 按功能分为电源卡、主控卡和采集卡(3 块)。板卡之间通过内部连接器连接, 可以灵活地增减采集通道和改变结构大小, 系统具体结构如图 1 所示。

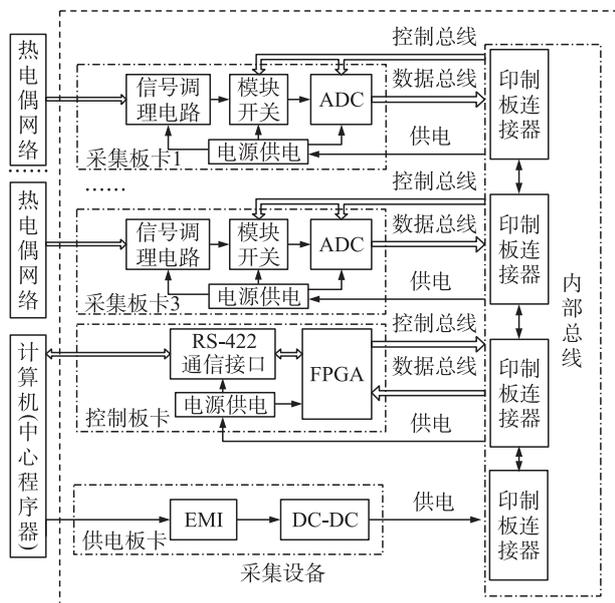


图 1 系统组成结构框图

## 2 硬件电路设计及优化

### 2.1 硬件调理电路设计

为了确保温度采编装置的实时采集精度, 对硬件调理电路进行了优化设计, 主要包括射频滤波、参考结点补偿、增益调整、二阶压控滤波、过压保护等优化设计, 采集调理电路的优化设计如图 2 所示。

采集模块中射频滤波电路, 主要是防止热电偶拾取大量高频噪声信号, 比如 800 MHz、2.1 GHz 等手机型噪声以及 5 GHz 的 WIFI 型噪声。为滤除这些高频噪声, 选择低频滤波器。一般情况下, 热电偶冷端是工作在 0 °C 的环境下进行测量的, 但对于绝大多数温度测量装置来说, 是无法实现的, 因此采用冷端补偿设计, 使热电偶参考结点的温度在额定范围内变化, 使其输出电压保持相对稳定。由于线路中存在串扰噪声, 所以设计了压控电压源二阶低通滤波电路, 选用 AD8608 用于电压跟随及缓冲, 与后续电路隔离。由于热电偶测量温度的升高, 调理电路的输出电压也会随之增大, 容易烧毁后续模拟开关等芯片, 因此采用稳压二极管设计了过压保护电路<sup>[3]</sup>。

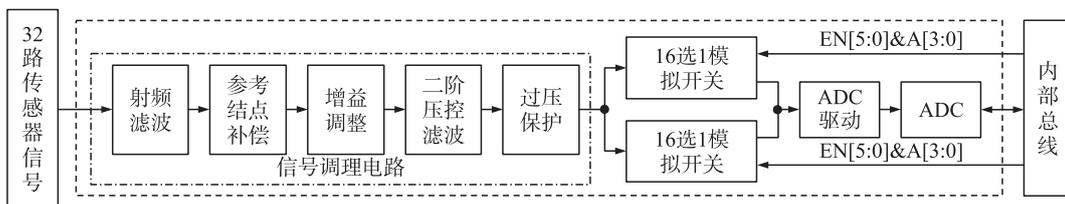


图 2 采集模块信号调理电路

### 2.2 信号采集控制设计

温度采编装置以 FPGA 为主控制器, 进行采样通道切换、模数转换、编帧、数据传输等控制, 采集控制电路如图 3 所示。通道地址控制信息存储于 FPGA 的内部 ROM 中。在采编装置接收到控制台

下发的副帧同步命令后, 加载通道地址控制信息, FPGA 通过内部总线控制模拟开关和模数转换器, 依次对每一通道信号进行采样。转换完成的数字信号经 RAM 缓存后, 通过 RS-422 数据传输链路传送至控制台<sup>[4]</sup>。

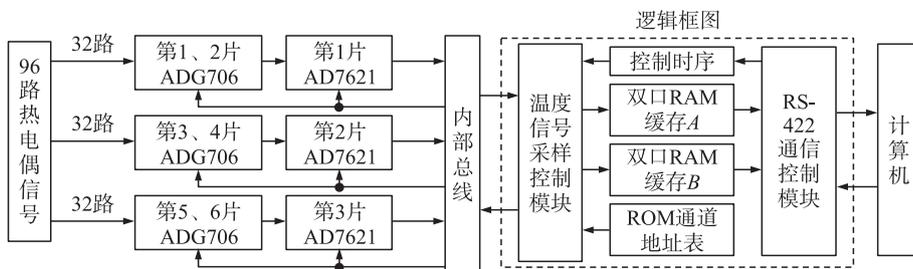


图 3 信号采集逻辑框图

## 3 信号采集逻辑设计

温度采编装置逻辑设计功能主要有模数转换、数据缓存、SPI 总线传输、FIFO 数据打包和 RS-422

数据发送功能。控制卡的原理图如图 4 所示。采编转发装置和采编变换装置之间通过 CAN 总线进行通讯, 下面主要介绍数据缓存、FIFO 数据打包、RS-422 数据发送和 CAN 总线设计。

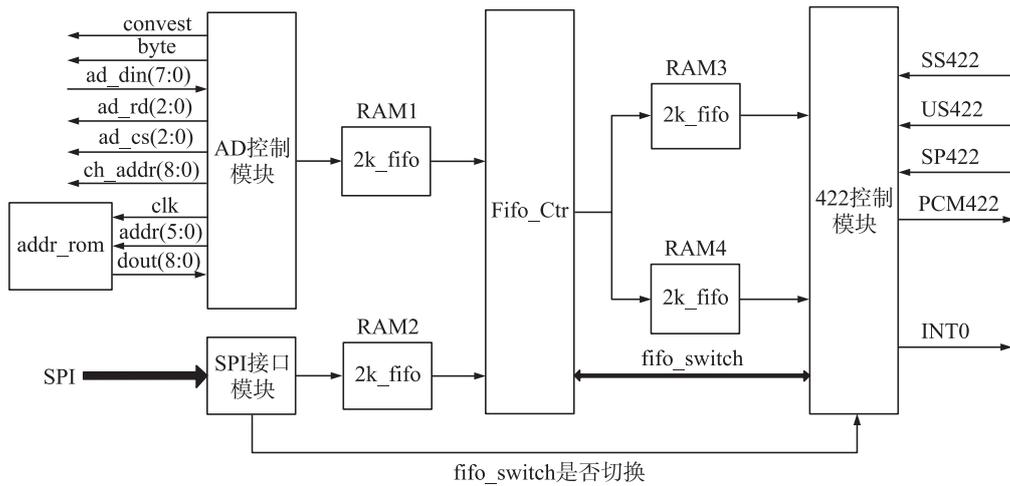


图 4 采编转发装置控制卡原理框图

### 3.1 缓存模块优化设计

由于设计的要求,每隔 25 ms 要发送一次副帧同步信号,用于采集一个通道的温度信号,由于采集通道过多,并且副帧同步信号与字同步信号、移位脉冲信号相互独立,在使用一个 RAM 或 FIFO 缓存模块时,很容易出现数据丢失、数据翻转或者数据移位的情况,从而影响每个通道数据的分析和读取<sup>[5]</sup>。出现丢数和多数的情况如图 5 所示。

针对这种问题,采集模块采用双口 RAM 核的方式进行缓存,其原理图设计如图 6 所示。

当进行采集时,switch 信号端会被初始化为 0,表示先将 RAM\_A 写满;当 RAM\_A 存满一帧数据后,令 switch=1,开始给 RAM\_B 写缓存数据,一直交替循环。

双口 RAM 的设计方法,简单可靠,避免了丢数和多数造成的数据错位的问题,提高了系统的稳定性<sup>[6]</sup>。

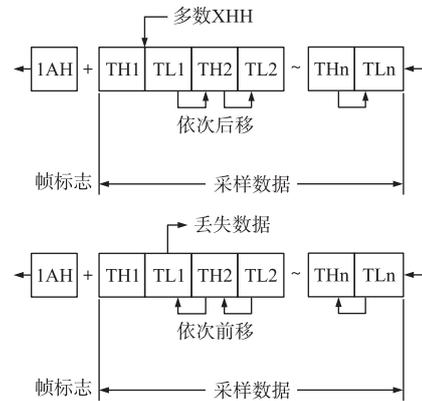


图 5 数据多数或丢失造成的数据移位

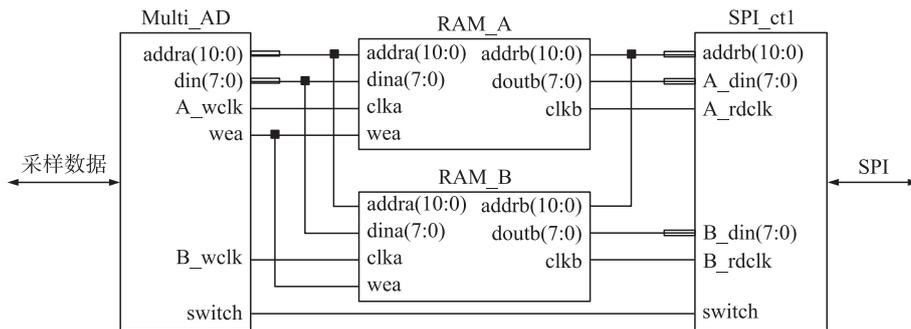


图 6 双口 RAM 缓存控制

### 3.2 FIFO 数据打包模块

FIFO 数据打包模块的主要功能,是将采编变换装置和采编转发装置采集到的数据进行编帧、打包,通过 RS-422 模块发送至控制台。具体实现方式是:在 FPGA 内部开辟 4 个 RAM 核,分别为 RAM1、RAM2、RAM3、RAM4。当 FPGA 控制 RS-422 模块接收到控制台发出的副帧同步上升沿信号后,RAM1 和 RAM2 的读、写地址清零,fifoswitch=0,当 RAM1 地址从 0 增加到 191 时,Fifo\_Ctr 开始按字节读取 RAM1 中的数据。

同时,每读取 1 byte,便将该字节写入到 RAM3 中。Fifo\_Ctr 读完 192 byte 后,等待 RAM2 地址从 0 增加到 191,开始读 RAM2 中的数据,每读取 1 byte,便将该字节写入到 RAM3 中,直到 Fifo\_Ctr 将 RAM2 的 192 byte 也写入到 RAM3 中,此时 RAM3 中存储了采编变换装置和采编转发装置采集到的数据,构成了完整的一帧数据,再切换 fifoswitch=1,重新读 RAM1 和 RAM2 中的数据,开始写 RAM4。如此循环,设计采用了双口 RAM 的方式,保证了数据传输的可靠性<sup>[7]</sup>。

### 3.3 RS-422 数据发送模块

当 RS-422 发送模块接收到副帧同步上升沿后准备发送数据,在第 1 个移位脉冲上升沿之前,将数据最高位  $D_7$  放置在总线上;并判断缓存中的数据,按照图 7 所示的时序约定给控制台发送数据。其中  $T_1 = 6.4T_s, T_2 \geq 8T_s$ , 移位脉冲周期  $T_s = \frac{1}{2} \times 10^{-6} \text{ s}$ ; 副帧同步信号独立于字同步信号与移位脉冲信号,其脉冲周期是 25 ms。

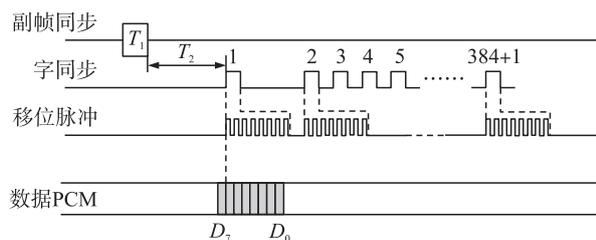


图 7 主控卡数据发送时序

### 3.4 CAN 总线设计

CAN 总线传输采用“点名-应答”的方式,在 CAN 总线上共设计两个节点,一个主节点,一个分节点,采编转发装置上为主节点,采编变换装置上为分节点,主节点点名分节点,分节点进行响应<sup>[8]</sup>。

设计采编转发装置的 CAN 为主节点, ID=1; 采编变换装置的 CAN 为分节点, ID=2, 针对以后可能对采集设备数量或通道数更改的需求,可以增加 ID=3、ID=4 等等,使得采集系统更加的灵活具有很强的继承性<sup>[9]</sup>。CAN 总线通讯采用 500 kbps 的传输波特率。在 CAN 总线数据帧中使用标识符来区分数据类型,具体定义如表 1 所示。

表 1 标识符分配表

ID 号码段	ID10~ID5	ID4	ID3~ID0
代表意义	包计数	点名/应答	节点 ID

当 ID4 为“0”是表示“命令帧”,当为“1”时表示“应答帧”。ID10~ID5 代表包计数范围从 0~64。ID3~ID0 用来区分每个节点的 ID 号。

采编转发装置给采编变换装置发送的点名指令如图 8 所示。图 8 中,“任意值”设为“00”。

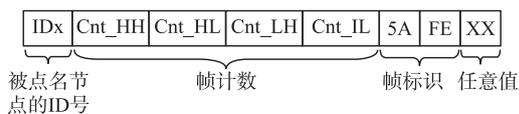


图 8 主节点发出的点名指令

采编变换装置接收到点名指令后,做出响应,发送数据,一帧共 200 byte,其中前 96 路数据为温度信号从  $T_1$  到  $T_{96}$ ,后 4 路为 IDH、IDL 帧计数,5AFE、5A54 帧标识。采编变换装置一帧共 200 byte 分连

续的 25 包数据发送给采编转发装置。发送数据的帧格式如图 9 所示。

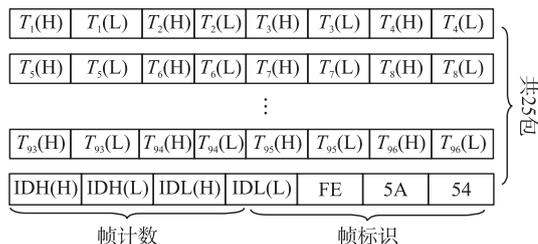


图 9 采编变换装置帧格式内容

## 4 系统可靠性验证

### 4.1 采集数据完整性测试

在采编转发装置和采编变换装置都调试完成后,需要对整个系统进行功能测试,采编转发装置将采集到的数据和接收到的数据,一起进行打包编帧发送给测试台进行分析和处理,按照帧格式为“帧标识 1AH+96 路采编转发装置的数据+96 路采编变换装置的数据”,测试台软件通过对帧标识的查找和判定,舍去错误的帧,而给正确的帧加上相应的规则进行数据解包。在对温度采编装置进行抗干扰测试后,进行数据分析,采集的部分数据如图 10 所示。由图 10 可见,数据完整连续,且没有错位和丢数的现象,说明系统稳定抗干扰能力强。

	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	10	BF	00	
0 0000:	1A	80 E0	80 E6	80 E5	80 EC	80 E3	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 00C1:	1A	80 E2	80 CF	80 E5	80 E7	80 E7	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 0182:	1A	80 CF	80 E6	80 E4	80 E9	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 0243:	1A	80 ED	80 E4	80 EA	80 EE	80 E7	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 0304:	1A	80 E6	80 E5	80 CF	80 EF	80 E7	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 03C5:	1A	80 E8	80 E6	80 E7	80 EC	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 0486:	1A	80 E7	80 EA	80 CF	80 E8	80 E4	80 CE	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA
0 0547:	1A	80 CF	80 E8	80 EF	80 E8	80 EA	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 0608:	帧标识	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	.....	$T_{96}$	.....	$T_{96}$	.....	$T_{96}$	.....	$T_{96}$	.....
0 06C9:	1A	80 E8	80 E4	80 EA	80 EF	80 E5	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E9	80 CF	80 EF	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5	80 E4	80 E5
0 078A:	1A	80 E3	80 E5	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA						
0 084B:	1A	80 E3	80 E5	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA	80 EC	80 EA						

图 10 采样数据

### 4.2 采集设备信噪比测试

信噪比指测量电压中有效信号与噪声信号的比值,一般用分贝表示。信噪比是衡量系统抗干扰能力的重要指标,信噪比越高,采集设备还原模拟信号的能力越强<sup>[10]</sup>。对温度采编装置分别进行 500 ℃、1 200 ℃、1 500 ℃ 测试,所选取标定的 3 个通道进行测试。

测试台软件把采集数据的平均值作为信号真值,最大噪声点是离中心最远的点,如表 2 所示为选定通道的信噪比,结果证明系统信噪比较高,工作性能稳定可靠,抗干扰能力强。

表 2 选定通道信噪比

通道	量程/℃	信号	噪声	满量程信噪比 SNR/dB
$T_1$	-30~1 200	63 467.14	23	68.82
$T_6$	-30~500	63 914.77	51	61.96
$T_{40}$	-30~1 500	62 536.67	57	60.81

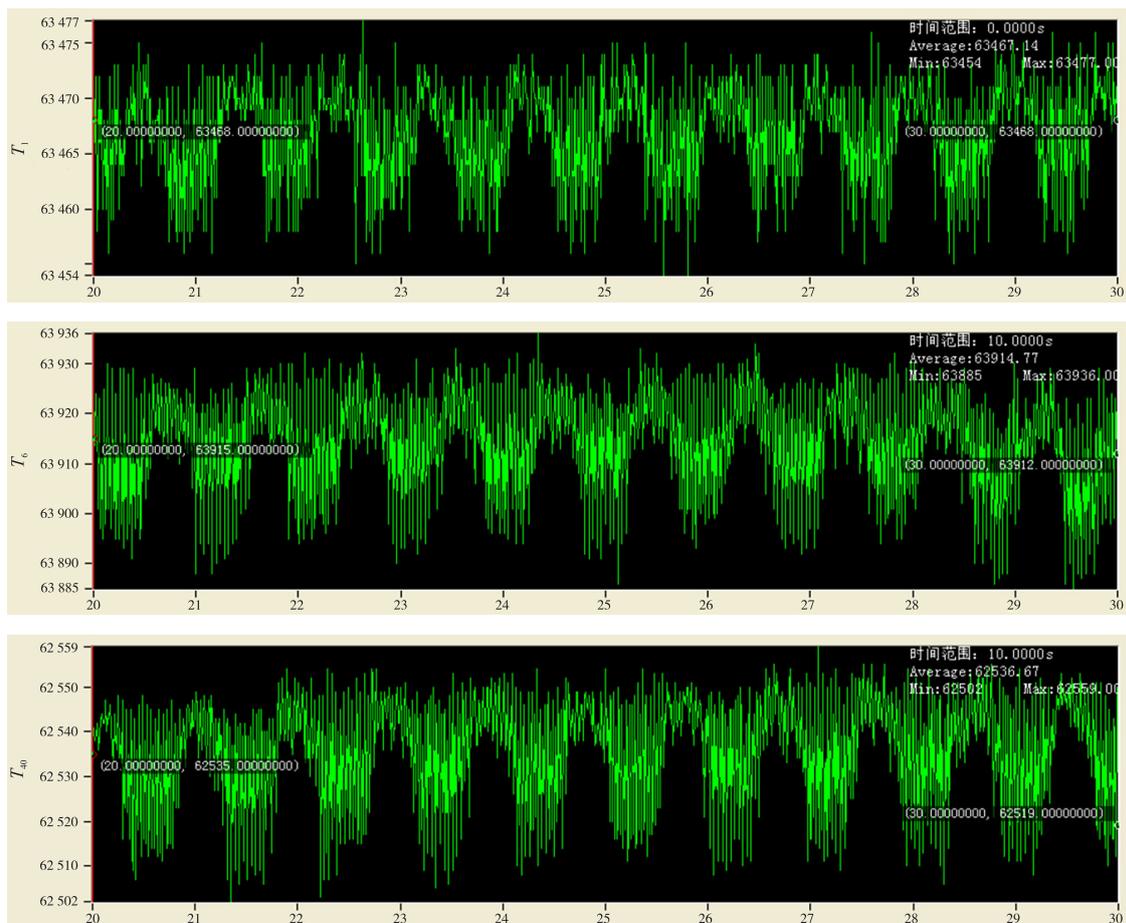


图 11 选定通道的满量程输入测试波形

## 5 总结

本文针对弹上环境温度监测的要求,设计了温度采编装置,设计符合弹上测试系统提出的技术指标,实现了对温度信号的采集、转发、编帧和打包,并可以进行实时显示的功能,经测试该系统数据传输稳定,无错位和丢数的现象,可靠性高,抗干扰能力强且具有很强的继承性,对其他采编设备有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 黄斌. 基于 ATmega16 单片机的温度监测系统设计与实现[J]. 电子设计工程, 2013, 21(2): 151-153.
- [2] 张旭. 带多接口的多通道数据采集记录仪研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [3] 侯卫周, 谷城. 压控电压源二阶低通有源滤波电路设计与仿真[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(10): 103-106.
- [4] 孔利东. 基于 FPGA 的数据采集与处理技术的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [5] 文常保, 党双欢, 朱博. 基于 WIFI 的无线声表面波传感器信号采集系统[J]. 传感技术学报, 2015, 28(10): 1552-1557.
- [6] 郭占社, 韩景轩, 樊尚春. 基于 FPGA 的谐振音叉高速信号采集装置的搭建[J]. 传感技术学报, 2014, 27(11): 1495-1499.
- [7] 周明娟, 逯迈. 基于高阶滤波的肌电信号采集电路设计[J]. 传

感技术学报 2018, 31(1): 54-60.

- [8] 魏巍, 闻利群, 邸丽霞. 基于 CAN 总线的行车记录仪设计[J]. 电子器件, 2017, 40(2): 500-505.
- [9] 孙秀玲, 孙海峰, 赵世萍. 基于 FPGA 的高速光谱数据处理系统设计及实现[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2): 319-322.
- [10] 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): 152-156.



霍明瑞(1993-), 男, 汉族, 黑龙江人, 中北大学电子科学与技术专业在读硕士研究生, 主要研究测试计量技术及仪器、电路与系统, 1932214844@qq.com;



文 丰(1977-), 男, 汉族, 四川人, 教授, 中北大学硕士生导师, 主要研究方向为高冲击测量技术、微系统集成技术、传感器测量技术, nucwenfeng@163.com.