

基于 MRAM 的无线弹载采集系统

李晋芳^{1,2} 马游春^{1,2} 李超杰^{1,2} 赵 阳^{1,2}

(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: 针对小型火箭弹研发试验中对膛内高过载数据的实时测量问题,提出了一种基于 MRAM 的无线弹载采集系统。该系统的硬件部分采用无线传输的方式实现了数据的实时接收,利用 MRAM 可靠性高的特点存储数据,使用数据回读的方法提高系统的可靠性;在软件部分采用连续阈值触发设计降低误触发概率,使用可编程的数字化调理模块为数据采集提供更好的线性、精度和温度稳定性。通过试验结果表明该系统可以在膛内恶劣情况下以 100 kHz 的采样率实现对过载数据的采集和存储,无线接收 900 m 内数据,且发射电流为 430 mA,不仅具有高可靠性的优势,还具有小型化和低功耗的特点。

关键词: FPGA;数据采集;记录仪;无线传输;过载测试

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Wireless missile-borne acquisition system based on MRAM

Li Jinfang^{1,2} Ma Youchun^{1,2} Li Chaojie^{1,2} Zhao Yang^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the high-overload data problem in the bore during the development and testing of small rockets, a wireless missile-borne acquisition system based on MRAM is proposed. The hardware part of the system uses wireless transmission to achieve real-time data reception, uses the high reliability of MRAM to store data, and uses data readback to improve the reliability of the system, the software part uses continuous threshold trigger design to reduce false triggers probability, using programmable digital conditioning modules to provide better linearity, accuracy and temperature stability for data acquisition. The test results show that the system can collect and store overload data at a sampling rate of 100 kHz under severe conditions in the bore. It can wirelessly receive data within 900 m, and the transmit current is 430 mA, which not only has the advantage of high reliability, It also has the characteristics of miniaturization and low power consumption.

Keywords: FPGA; data acquisition; recorder; wireless transmission; overload test

0 引 言

现代战争中,单兵作战成为各国现代化、科技化军队建设的目标之一,是世界各国竞争的领域。便携式火箭弹作为单兵武器系统中大杀伤力的一员,不仅要求精确打击,对火箭弹的稳定性和机动性也有着更高的要求,同时还需考虑作战人员的安全^[1]。弹丸所受到的膛内过载过大或者过小都有可能影响引信机构在发射过程中的可靠性,进而影响火炮发射过程的安全性,因此在研制期间需要进行膛内过载测试^[2-4]。

目前炮弹的膛内和侵彻过载测试大都通过弹载记录仪

实现^[5-6]。但是由于恶劣的弹丸测试环境(瞬间冲击可达到 10^4 g),经常会造成记录仪侵入损毁,无法成功回收数据,并且较低的回收效率,使得记录仪的性价比低。因此对小型弹箭测试系统,亟需提出一种具有高可靠性、无线传输的弹载采集系统。

针对上述问题,利用 MRAM 可靠性高的特点和低功耗 nRF24L01P 射频频芯片,提出一种基于 MRAM 的无线弹载记录仪。该记录仪使用无线传输^[7-8]的方式进行数据传输,MRAM 存储备份,解决了一旦记录仪损毁后,无法进行数据回收的问题。并且两种数据接收方式也可以进一步保证其数据的可靠性。

1 系统总体设计

该记录仪需实现对膛内过载数据进行采集、处理并存储在 MRAM 存储器中,最后实现无线传输的要求。系统主要由信号调理模块、A/D 转换模块、FPGA 主控模块、MRAM 存储模块、无线传输模块等组成。其系统框图如图 1 所示。

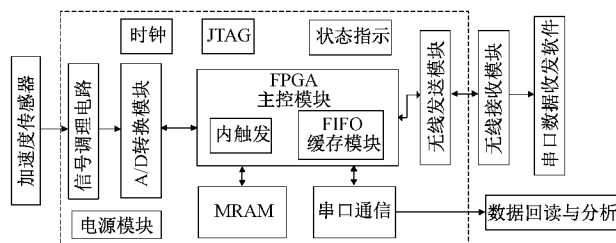


图1 系统总体框图

当记录仪上电后,加速度传感器开始采集数据,经调理电路对其进行处理放大后,FPGA 将数据处理并进行编帧,然后将帧数据写入 FIFO^[9],当阈值触发后,写入 MRAM 存储,并将其通过无线发送。试验后无线接收的数据与 MRAM 中的备份进行比较分析,以便进行进一步的优化。

2 硬件设计

2.1 数字调理电路模块

信号调理电路的主要功能是对加速度传感器采集到的信号进行滤波和放大。A/D 转换模块使用的是 Analog Device 公司的 AD7983 芯片,该芯片是一款低功耗、逐次逼近型的数模转换器,采样电压范围为 0~3 V,最高采样频率为 1.33 MS/s,由于在膛内的加速度信号为低频信号,一般不会超过 10 kHz,本系统使用的采样频率为 100 KS/s 完全能够满足需要。但是加速度传感器输出的电压范围仅为 ± 50 mV,远远小于 A/D 转换芯片的电压范围,因此需要对传感器信号进行调理放大。

传统信号调理模块的原理是利用电阻和运算放大器对信号进行放大,利用电容和电阻组成多级滤波电路对其进行滤波处理。但是这种方法必须提前计算信号放大倍数,并且电路不易修改。本模块使用数字调理模块代替传统调理电路,利用 FPGA 控制电位器阻值寄存器的变化对信号放大倍数和滤波电路截止频率进行更改,不仅配置方式更加便捷,而且具有更加良好的线性、精度和温度稳定性。如果需要更换其他型号的 A/D 转换模块,则无需更改电路便可以完成信号的调理。如图 2 所示,TPL0202 是一个具有 256 bit 的双通道数字电位器,端到端的阻值为 100 k Ω ,内部具有可用于存储寄存器的非易失性存储器(EEPROM),使用三线的 SPI 兼容接口同 FPGA 连接,FPGA 可以通过配置寄存器的参数来达到控制电位器阻值大小的目的。MAX4208 是具有出色的超低失调和漂移的放大器,CH1_N 和 CH1_P 与传感器直接相连。通过对寄存器的配置,使其

成为增益为 25 倍的信号放大器,放大范围为 ± 1.25 V。

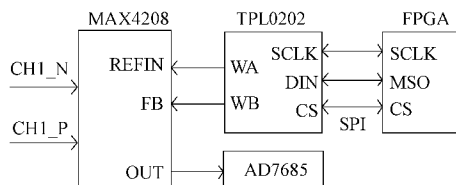


图2 信号调理模块的电路原理

2.2 存储模块

MRAM 模块是一款非易失性的磁性随机存储器,它有着 SRAM 的高速读写能力,也有 DRAM 的高集成度,从理论上来说可以无限次的重复写入。MRAM 存储模块主要用于记录弹丸膛内关键过载参数,由于膛内时间十分短暂,以 100 kHz 的采样率、膛内过载时间 50 ms 计算,有效数据的大小约为 10 KB,因此对其存储容量要求不大,反而是存储速度快和性能稳定性强等方面有着进一步的要求,考虑到记录仪的成本需求,多次筛选后,选择了 EVERSPIN 公司的 MR25H40 存储芯片,芯片容量为 512 KB,传输速率为 4 MB/s。而且其 SPI 接口更具有体积小、接口简单、使用方便的优点^[10],特别适合本系统紧凑的应用环境。

2.3 电源模块

电源模块使用锂电池进行供电,为了保证电源电压的稳定性和持续性,锂电池并联大电容,减小使用期间电压波动的影响。同时,电源模块加入充电电路,可以使用外部电源为锂电池充电。

2.4 主控模块

由于弹丸本身的大小限制,对于器件尺寸的选择有严格的要求,同时还要考虑到功耗问题,基于以上两点要求,主控模块选用 IGLOO 系列的 AGLN250V2-CS81 芯片,这是一款低功耗 FPGA,核心电压仅为 1.2~1.5 V,配有 71 个自定义 I/O 口,内部资源丰富,支持单电压系统运行,同时其尺寸仅为 5 mm \times 5 mm \times 0.8 mm,满足小型化的要求。

2.5 无线模块

无线模块使用 nRF24L01P 芯片,这是一款单片射频收发芯片,具有功耗小、成本低、体积小的优点,十分适合中短距离弹载记录仪的无线通信。该模块兼容 3.3 V 和 5 V 供电,支持空中速率 250 Kbit/s~2 Mbit/s;工作在 2.4~2.5 GHz 频段,最大发射功率 27 dBm;接口使用 4 线 SPI 进行通信,传输速率最高可达 8 MB/s,完全能够满足本系统的需求。

3 软件设计

本系统在对过载数据采集存储时,需要考虑到以下几个方面:1)MRAM 容量较小,必须要保证系统关键数据存储的完整性。2)由于在过载测试中环境恶劣,对信号的干扰比较严重,因此要进行触发检测设置,保证触发的准确性与可靠性。3)过载数据在进行无线传输时,需要进行多次

循环发送,保证数据的可靠性。数据采集和存储设计流程如图 3 所示。

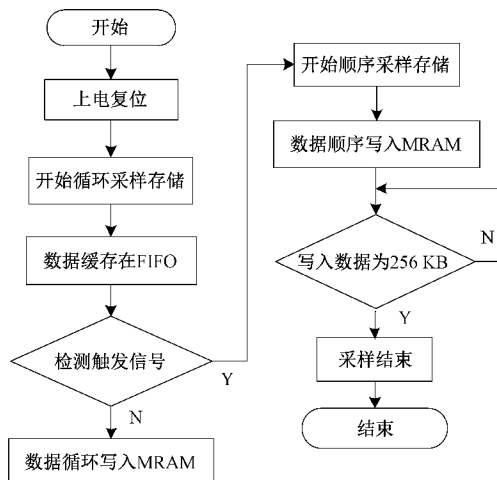


图 3 数据采集和存储设计流程

3.1 采样数据存储设计

传统 Flash 存储介质在数据存满后需要先进行数据的擦除,才可以重新存储数据^[11]。MRAM 作为磁性随机存储器,可以在存满后直接覆盖存储,这个特性可以有效提高数据存储的效率,同时也为关键数据的存储提供了一种思路。

由于 AD7983 芯片是一款单通道的 16 bit 逐次逼近型数模转换器,为了减小信号采集时由于位宽不同而形成噪声影响,通过设置寄存器将其转换为 8 bit 宽数值后存储。如图 4 所示,8 bit 采样数据连续的存储到 MRAM 中,并随着时间不断覆盖,此阶段的数据采样方式为循环采样;当阈值触发后,FPGA 内部使用计数器记录数据大小,在存储 256 KB 后停止记录,此阶段的数据采样方式为顺序采样。最后,MRAM 中存储的数据包括触发前采样数据、关键采样数据和触发后采样数据,保证过载时的关键数据完整保存在 MRAM 中。

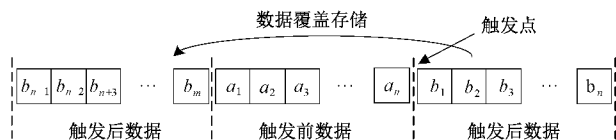


图 4 采样数据存储设计

数据存储时,MRAM 芯片的片选信号 CS 拉低,进入读取状态寄存器模式,读取寄存器命令“00 h”,进入快速写数据模式,此状态可以从初始地址连续数据,无需重复询问写入地址,从理论上来说没有写入延迟,实际数据写入响应时间仅为 2 ns。如图 5 所示,MRAM 持续写入数据,无需询问地址,仿真时序满足设计需求。

3.2 内触发设计

系统在上电完成初始化后,会根据设定的延迟时间进入低功耗的待机阶段,以保证电池电量;当延时结束后,系

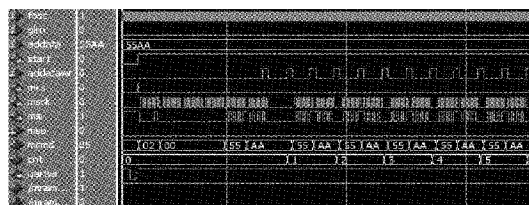


图 5 MRAM 数据写入仿真时序图

统开始循环采集数据并经过 FPGA 内部的一个 4 KB FIFO^[12]后存储在 MRAM 中,同时将采集到数据同阈值进行对比,如果采样数据大于阈值并连续计数超过 20 次,便认为满足内触发条件,后续采样数据均为有效数据,系统开始顺序采样;并且会将 FIFO 中的数据通过无线模块进行发送,同时保存在 MRAM 存储介质中进行备份。并设置触发计数次数为 20,触发脉宽变宽(约为 200 μ s),误触发的概率降低,保证内触发的准确性和数据采集的可靠性^[13]。

3.3 无线发送设计

系统在上电后,无线模块会进入低功耗的休眠模式,此阶段会不断检测唤醒信号。当阈值触发后,唤醒信号拉低,经过 2~3 ms 的延迟后,迅速唤醒外部 MCU,并进入预设的传输模式进行数据传输。过载数据经 FPGA 处理后,以单字节的形式连续写入无线芯片的内部缓冲区并以 134 Byte 为一包自动分包发送^[14]。单次传输完成后,无线模块会立即进入循环发送状态,具体设计流程如图 6 所示。

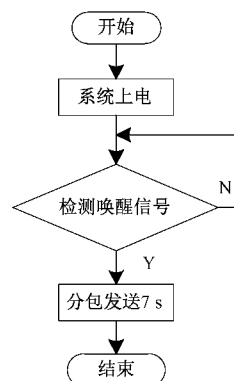


图 6 无线发送设计

4 试验验证

本设计通过模拟试验和实弹试验分别对记录仪的无线传输能力、阈值触发可靠性、电源充电设计和数据采集存储能力 4 方面进行验证。

4.1 无线传输的性能验证

马歇特锤击法原理是一种通过加速度获得高过载的装置。为了验证无线模块接收能力,拟利用马歇特锤击法原理对固定在高度为 3 m 的记录仪刚性面进行撞击,采集到的数据通过无线进行传输,从而验证无线传输的性能。

本系统发送与接收模块的射频发射功率参数都配置为

27 dBm、空中速率为 2 Mbit/s,为了传输距离更加理想,发送端使用增益为 3 dBi 柔性天线^[15]嵌于记录仪表面,数据被采集处理之后,通过无线发送到地面接收站,接收站天线使用增益为 8 dBi 的全向天线。表 1 为空阔环境、不同距离下接收 10 KB 数据的丢包率,经多次试验后验证了在 900 m 内,无线模块可以完整的接收数据,无严重丢包情况发生,同时测得在 3.3 V 供电下,发射电流为 430 mA,休眠电流为 550 μ A,无线模块的功耗可以得到保证。

表 1 数据丢包率

距离/m	接收字节/b	丢失字节/b	丢包率/%
700	10 240	0	0
800	10 240	0	0
900	10 240	0	0
1 000	10 213	27	0.26
1 100	9 656	584	5.70

4.2 阈值触发可靠性验证

数据接收成功后,将 MRAM 中存储的数据导出,上位机将过载数据解析,利用 origin 绘图软件将其图形画出,如图 7 所示,模拟试验中利用马歇特锤击法原理测得的峰值约为 330 g,脉宽约为 25 ms,数据无误码和乱码。验证了阈值连续触发的可靠性,确保不会发生误触发情况。并且与无线接收的数据进行对比后,二者数据一致,可靠性能得到保证。

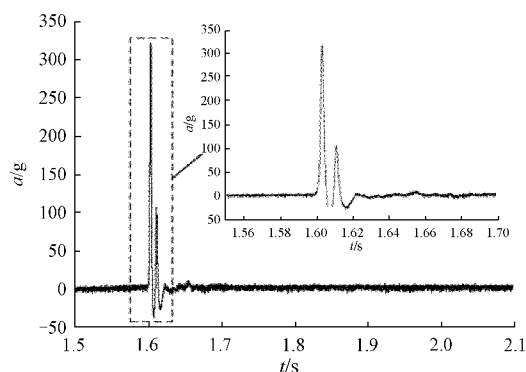


图 7 模拟试验数据

为了排除试验结果的偶然性,该试验进行了多次测试,其结果基本一致,因此可以证明此系统的动态特性较好,采集和存储的数据完整可靠。

4.3 电源充电设计验证

为了保证该系统供电足够支撑整个测试过程,验证了电源充电设计方案。锂电池完全充电后对系统进行手动上电,多次记录系统上电后的工作时间。试验表明该系统平均工作时间约 6 h,电源足够保证整个系统的持续供电。

4.4 实弹验证

实弹验证将记录仪安装在某型火箭弹底部测量膛内加

速度。试验后,将 MRAM 中的备份数据导出解析并绘制出如图 8 所示曲线,可以看出弹体在膛内受到较大的振动响应,这是由于膛内加速度和摩擦阻力的作用,峰值约为 1 300 g,过载曲线的脉宽约为 20 ms。将无线模块接收的数据解析后绘制出如图 9 所示曲线,可以观察到无线传输在 0.02 s 前和 0.08 s 后出现大量丢包现象,可能造成的原因:1)弹体在膛内时环境恶劣,天线处于遮挡状态,信号衰减严重;2)超出无线接收距离后接收能力差。在 0.04~0.08 s 波形显示较为良好,波形与图 8 较为相符,但仍存在一定的信号干扰,可以得出该记录仪能够准确的记录弹丸过载数据,但无线传输模块需要进一步的优化。

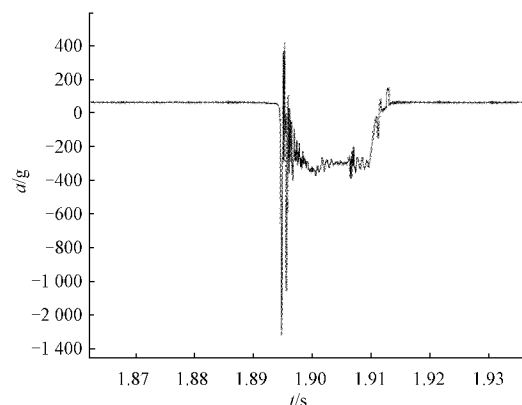


图 8 MRAM 备份数据

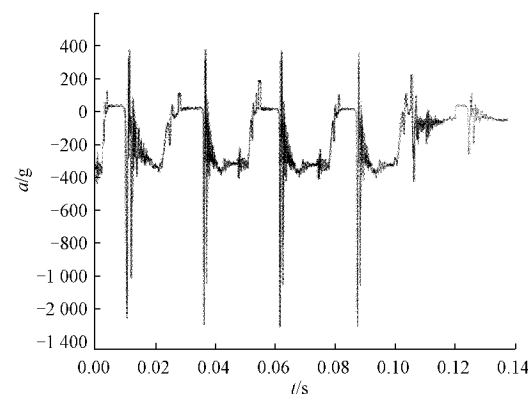


图 9 无线接收数据

5 结 论

本文提出的具有高性价比的无线记录仪,利用无线模块实现了过载数据的无线接收,使用数据回读的方式提高数据可靠性。并通过模拟试验和实弹试验对系统的无线传输、阈值连续触发和电源持续供电进行了验证,验证说明该系统的能够可靠、准确的记录过载数据。但是,无线传输需要进一步优化,选用更加合适的射频传输模块或者优化传输机制,增加数据的可靠性。

参考文献

- [1] 胡鹏,张志文,马超.多通道 CAN 总线数据采集系统设

- 计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(2): 61-65.
- [2] 周强, 贾方秀, 张天宇, 等. 低成本弹载侵彻过载测试系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(11): 54-57.
- [3] 周瑞卿, 贾云飞, 潘孝斌, 等. 火炮发射高过载信号存储测试系统设计[J]. 测控技术, 2017, 36(4): 43-47.
- [4] 赵煜华, 闫光虎, 梁磊, 等. 火炮发射过程中的弹丸过载测试方法[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(4): 62-65.
- [5] 王晓楠. 弹载多通道数据采集系统的研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [6] 樊雅静, 范锦彪, 王燕. 某弹丸无损回收装置长度设计与验证[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(1): 80-83.
- [7] 于波涛, 管雪元, 姜博文. 炮膛内高过载环境力测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(1): 59-62.
- [8] 华枝发, 张兰, 岳显昌, 等. 高频地波雷达无线数据传输系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 151-158.
- [9] 冯其涛, 耿艳峰, 郑重, 等. 基于钻井液的随钻声波数据传输技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 106-113.
- [10] 郝少帅, 杨玉华, 王淑琴. 基于FPGA的高精度采集系统的研究与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19): 154-158.
- [11] 赵海峰, 张亚, 李世中. 侵彻过载信号的欠定盲源分离与特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 208-218.
- [12] 方靖, 李少康, 王建华, 等. PSD 2.4 G 无线数据采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(23): 55-59.
- [13] 陶灿辉, 贾云飞, 兰洁. 某型火炮抗高过载内测控制器研究[J]. 中国测试, 2020, 46(11): 90-95.
- [14] 邢留洋, 何赞园, 汤红波, 等. 分布式 ATCA 设备数据监测系统的设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(24): 160-165.
- [15] 张莹, 陈娅莉, 宗卫华. 一种 2.4 GHz 新型紧凑型柔性低剖面可穿戴天线[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2020, 35(3): 33-36.

作者简介

李晋芳, 硕士研究生, 主要研究方向为测试计量技术及仪器、电路与系统。

E-mail: 1075455850@qq.com

马游春(通信作者), 副教授, 博士, 主要研究方向为微测试计量技术及仪器、光纤光栅传感技术。

E-mail: 798965939@qq.com