

膛内高过载环境力测量系统设计

于波涛 管雪元 姜博文

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210096)

摘要: 为了获取弹丸在膛内高过载情况下的加速度信号,设计了一种弹载数据采集系统。选用高性能的 Zynq-7000 系列 SoC 芯片作为控制核心,将采集到的加速度信号通过 A/D 转换芯片送入大容量 Nand Flash 存储器完成数据的采集。通过对成品电路板的全面灌封技术,提高了系统整体的抗冲击能力。通过对实测结果进行分析,表明此系统可以准确地获取弹丸的膛内加速度变化曲线。

关键词: 高 g 值加速度;弹载数据采集系统;膛内三轴加速度;抗过载

中图分类号: TN967.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Design of high overload environmental force measurement system in gun

Yu Botao Guan Xueyuan Jiang Bowen

(State Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to obtain the acceleration signal of the projectile under high overload conditions in the bore, a missile-borne data acquisition system was designed. The high-performance Zynq-7000 series SoC chip is selected as the control core, which combines with the programmable A/D conversion chip and large capacity Nand Flash memory, to complete the data acquisition. Through the comprehensive potting technology of the finished circuit board, the overall impact resistance of the system is improved. Through the analysis of the measured results, it is shown that the system can accurately obtain the change curves of the acceleration of the projectile.

Keywords: high-g acceleration; missile-borne data acquisition system; three-axis acceleration in bore; anti-overload

0 引言

弹丸的引信装置作为炮弹引爆最重要的部件之一,当弹丸在膛内运动时,引信一方面经受着高膛压引起的轴向高加速度的冲击作用,另一方面,由于弹丸与炮管间的剧烈震动所导致的径向载荷的作用^[1-3],容易对引信等部件的可靠性产生影响,为此需要进行弹道环境力的相关测试。由于弹丸在膛内所受到的环境力十分复杂,在膛内运动的完整加速度信号的获取一直是弹丸全弹道参数获取的难点课题。传统的膛内加速度测试方法采用硬线连接的方式将采集信号进行实时传输,这种方法由于需要引出导线传输信号,因此发射过程中的带电气体和干扰信号会在很大程度影响数据采集的准确性,具有数据捕获率低、可靠性不高等缺点^[4]。

本文主要设计了一种弹载数据采集系统^[5-8],介绍了数据采集系统的系统结构,硬件上选用抗高过载的电子器件、高强度的封灌技术,保证了设计电路在高过载情况下不会失效,并通过实验验证此系统可在高温、高过载的工作环境中获取加速度信号。

1 弹载数据采集系统设计

数据采集系统采用模块化的设计思想,通过将 3 片 Endevco 公司的 727-60K 单轴加速度计相互垂直安装,使其分别敏感于弹丸轴向、径向的加速度变化,作为传感器模块。由于加速度传感器的输出信噪比小,电压值低,可通过高共模抑制比、放大倍数可调的信号调理电路模块提高信号的质量,增强抗干扰的能力。A/D 模块用于采样放大后的电压信号,完成模拟量向数字量的转换。最后送入 Zynq-7000 系列 SoC 芯片的主控模块,完成对信号的处理。

1.1 弹载数据采集系统结构

弹载数据采集系统中的主控板负责数据的采集,协调各个模块的正常工作;电源模块为各个模块供电,NAND FLASH 用来存储记录下的飞行数据。这里选用 Xilinx 公司的 Zynq-7000 系列 XC7z010 SoC 芯片作为系统的控制芯片,三星公司的 K9MDG08U5M 型号的 Nand Flash 芯片作为存储芯片。NAND FLASH 芯片相较于 NOR FLASH

存储容量较大,用于存储经过处理后的各种数据,以便进行实验后进行回收,对数据进行进一步的分析与处理,系统结构原理如图 1 所示。

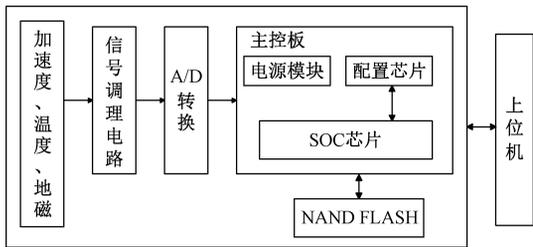


图 1 弹载数据采集系统原理

在系统上电之后,通过一个外部的芯片把程序配置到控制芯片里面去^[9]。在芯片的 PS 部分上,有专用的 SPI-FLASH 接口,可以用来连接配置芯片,本文采用 S25FL256S 型的 FLASH 作为配置芯片,这个配置芯片里面的程序掉电是不会消失的。

1.2 高 g 值加速度传感器的信号调理电路

弹丸在膛内发射阶段以及在侵彻靶目标的阶段中,由于高过载,造成了获取数据的难度增大,要求相关的控制电路、引信等具有较高的可靠度,因此,获得从炮弹发射到击中目标整个过程中的加速度变化情况就显得尤为重要。

Endevco 公司 727-60 K 系列是一种典型的单轴压阻加速度传感器,供电电压范围为 2~12 V,这里采用 5 V 电压供电,最大量程为 6 万 g 的加速度计。弹道测量装置安装在弹丸头部,采用 3 片单轴加速度计可测量全弹道飞行过程中的三轴加速度分量,为了准确获取弹丸飞行过程中的加速度变化情况,芯片的安装位置应保证加速度计分别敏感于轴向、径向的加速度分量。

由于传感器的输出电压低至毫伏甚至微伏级,不符合 A/D 模块的输入要求。需要通过调理电路,差分放大输入信号提高信号的信噪比。传感器的调理放大电路如图 2 所示,图 2 中采用 AD620 放大器,此仪表放大器内部为三运放结构,可以有效地抑制共模电压,并且可通过外部电阻进行增益调节,适合应用于精密的数据采集系统。

电路中的电压增益可由式(1)计算得到,调理电路的输出电压可由式(2)计算得到。

$$G = \left[1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_g} \right] \quad (1)$$

式中:G 为电压增益, R_g 为增益调节电阻。

$$V_{out} = V_{in} \cdot G + V_{ref} \quad (2)$$

式中: V_{in} 为调理电路的输入电压; V_{ref} 为参考电压值; V_{out} 为放大一定倍数后的输出电压。选用 $R_g = 420 \Omega$, $V_{ref} = 0 \text{ V}$, 由式(1)计算可得增益约为 120 倍。查阅 AD620 的数据手册可知,放大倍数 120 倍时,带宽为 100 kHz,满足高 g 值传感器的带宽要求。图 2 中的 C30、C31、C32、C33 为电源

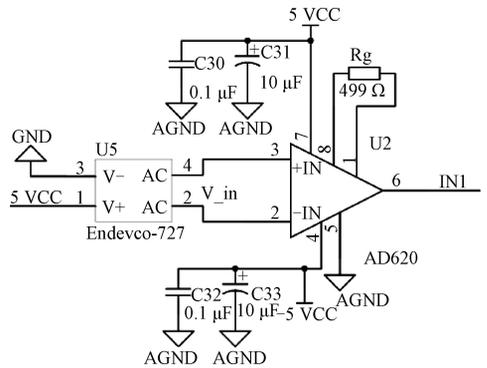


图 2 信号调理电路

的滤波电容,可以提高电源供电的稳定性,减小输出脉动和低频干扰。同时,也降低了由于负载电流瞬时变化引起的高频干扰。

模数转换电路采用 AD7606 芯片,AD7606 采用 5 V 电源供电,信号输入端为 IN1~IN8 共计 8 路模拟信号,通过将 $\overline{PAR/SER/BYTESEL}$ 引脚接地来设定 AD7606 的并行工作模式,RANG 引脚接地来设定 AD7606 的模拟输入通道的输入电压范围是 ±5 V,AD7606 的数据输出端 DB0~DB15 连接主控芯片 Zynq 的 PL 部分输入端,片选信号 \overline{CS} 、转换开始信号 CONVSTA 和 CONVSTB、数据读取信号 \overline{RD} 、复位信号 RESET、转换忙碌信号 BUSY 等输入端口与主控芯片 Zynq 的 PL 部分输出端信号相连。电路原理如图 3 所示。

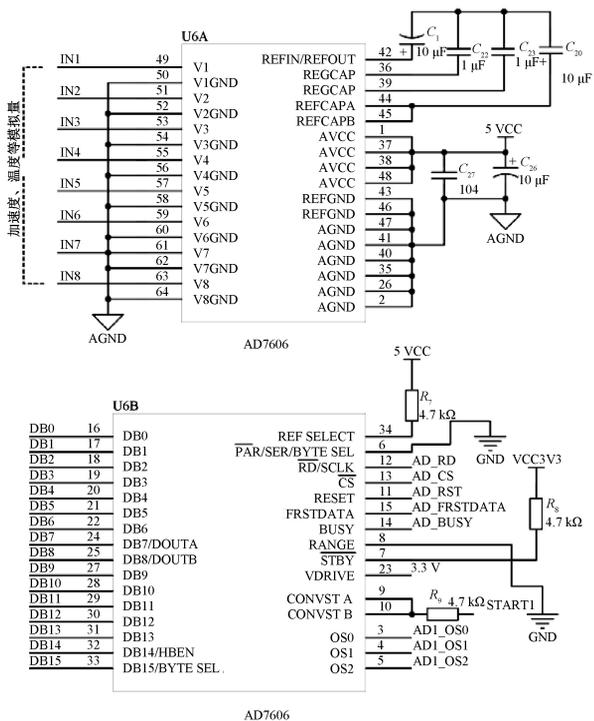


图 3 AD7606 模数转换电路

2 系统抗过载设计

对于弹载数据采集系统而言,弹体在发射以及侵彻的过程中承受着瞬时、高能的高过载冲击,弹体所受到的高过载可以达到上万 g,这样的强冲击可能会导致弹体内电路板的变形甚至是损坏,以至于数据不能够正常的回读出来。为了使系统在发射后仍能正常使用,必须要对其进行抗过载设计。在这里,本文从器件的选择和系统的灌封 2 方面来提升系统的抗过载能力^[10-11]。

2.1 器件的选择与设计

在相同密度和材料的情况下,随着系统体积的不断加大,其强度受到的不利影响就越来越大。在系统受到高过载的情况下,内部元器件所承受的惯性力要远大于该元器件自身的质量,这就是造成器件变形、损坏或者电路不能正常工作的原因。因此,在高过载情况下,对器件的选择以及设计应考虑以下因素^[12-13]:

- 1) 选择元器件时,尽量选用体积较小、抗冲击性能指标较好的元器件。
- 2) 器件的选型以及制板材料优先选择质量较轻的材料。
- 3) 器件与电路板之间要有充足的接触面积,以降低冲击过程中可能发生的偏移。
- 4) 合理安排器件位置,强度高或者不重要的元器件放置在装置底部,强度小或者非常重要的元件放置在装置顶部。均匀的分布器件,以免因为内部应力不平衡导致器件损坏。
- 5) 尽量减小系统体积,使系统能够实现微型化。

2.2 系统的灌封

除了在器件的选择和结构设计上提高系统抗过载能力,对系统的全面灌封也是一种十分有效的抗高过载方法。灌封实际上是在一定的温度条件下,利用流动性材料的特性,对内部电路进行严密的整体包装,使内部系统固化成一个整体^[14]。经过灌封后的系统,其抗冲击能力得到了很大提升,避免了内部电路元件、连接线等在高冲击作用下发生偏移,大大提高了系统的可靠性和稳定性^[15]。

在本设计中,选用了灌封材料特性较好的环氧树脂,并且在原有灌封的基础上,采用聚氨酯硬泡沫型泡沫灌封塑料来加强其抗冲击能力。在对系统的灌封过程中,要注意以下几个问题^[6-7]:

- 1) 在灌封过程中,彻底清除系统内部的灰尘和杂物,尤其是某些导电物,避免灌封后可能发生的短路现象。
- 2) 在环氧树脂搅拌均匀后抽真空脱气,以免环氧树脂内部的气泡对灌封系统造成不利影响。
- 3) 合理地掌控灌封温度和固化的时间。
- 4) 由于贴片器件的大量使用,为了防止贴片器件下表面出现灌封不严实,通过在器件贴面粘胶,加固器件和电路板间的吸合力度,以防止灌封过程中气压不平衡引起的局

部损坏。

5) 灌封结束后,要对系统进行退火处理,通过内部缓慢降温的过程,消除系统内部固化应力^[8]。

3 实验流程及结果分析

实验前,测量地面及高空气象条件,在射击前应注意弹体的保温。试射击 2~3 发制式弹,用于调整射向确定落点位置和合适射角。在测试弹中装配假引信,并将测试弹装填入膛,测试弹接通电源后必须在规定时间内发射完毕。在射击完毕后,必须确定测试弹落点的定位。实验结束,回收每发测试弹,进行数据读取和分析。

实验基于弹载数据采集系统获得弹丸整个飞行过程的三轴加速度,由图 4 所示内弹道轴向加速度曲线可以看出,在 7.48 ms 时,轴向加速度信号瞬时增大,达到了 93 440g。之后,轴向加速度出现了高频震荡,此过程中加速度值不断增加,在 13.4 ms 处达到了 15 910g。13.4~17.16 ms 过程中,弹丸加速度不断减小。由如图 5、图 6 所示径向加速度曲线可知,分别在 7.52 ms 与 7.64 ms 处有小幅震荡,在 9.48~15.72 ms 处有幅值较大的径向振动,最大值达到了 5 000g 以上。对比内弹道加速度变化情况,图 7 所示外弹道加速度值较小,波动峰值仅为 140g 左右,可见弹丸在飞出膛口后速度变化相对较小。

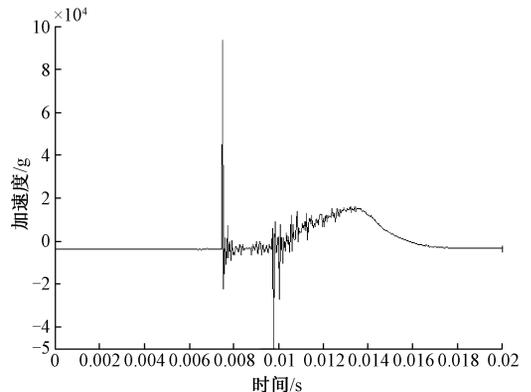


图 4 内弹道轴向加速度

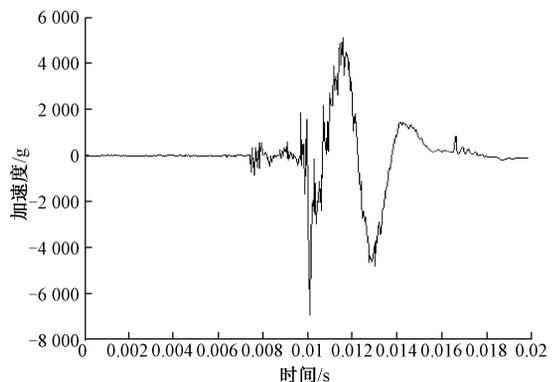


图 5 内弹道径向加速度 1

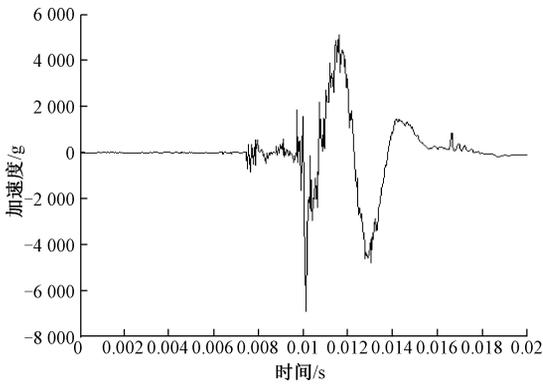


图 6 内弹道径向加速度 2

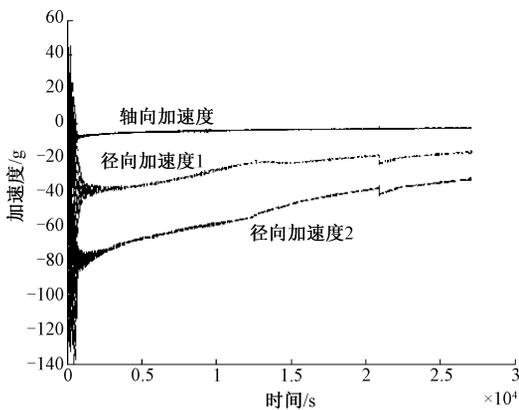


图 7 外弹道加速度

4 结 论

本文设计了基于 Zynq-7000 系列 SoC 芯片和 Endevco 公司的 727-60K 系列大量程加速度传感器的弹载加速度数据采集系统,通过高可靠度的器件、稳固的结构封灌等特点保证了采集系统能够在膛内、膛外恶劣的工作环境下获取到弹丸飞行的全弹道加速度变化情况,所获得的数据对于弹体设计、弹丸飞行轨迹的研究和故障分析有着重要的意义。

参考文献

[1] 沈大伟,裴东兴,祖静.引信膛内加速度信号测试与分析[J].中北大学学报(自然科学版),2009,30(3):292-295.

- [2] 董盛鹏.大口径旋转炮弹弹头机械触发引信弹道炸原因分析[D].南京:南京理工大学,2017.
- [3] 李乐,祖静,裴东兴.基于专用 ASIC 的引信动态参数存储测试系统设计[J].电子测量技术,2007,30(5):158-160.
- [4] 边玉亮,严晓龙,王康,等.引信膛内三轴加速度测试[J].阜阳师范学院学报(自然科学版),2017,34(3):40-43.
- [5] 石云波,赵锐,唐军,等.单片三轴大量程加速度传感器性能测试与分析[J].传感技术学报,2012,25(9):1236-1241.
- [6] 柯兴利.某型弹载数据采集系统的设计与实现[D].长沙:湘潭大学,2016.
- [7] 王敏涛.某弹载多参数采集存储装置的设计与实现[D].太原:中北大学,2010.
- [8] 时志云,王代华,张志杰.高精度 MEMS 传感器在弹载测试系统上的应用[J].传感器与微系统,2008(7):114-116,120.
- [9] 邓文博.基于 Zynq7010 的列车以太网交换机硬件设计及实现[D].大连:大连理工大学,2016.
- [10] 孟令军,赵盼盼.存储测试模块抗高冲击结构设计研究[J].弹箭与制导学报,2016,36(1):140-142.
- [11] 姬永强,李映辉,聂飞.弹载数据存储模块抗高过载防护技术研究[J].振动与冲击,2012,31(18):104-106.
- [12] 景鹏.高 g 值冲击测试关键技术研究[D].太原:中北大学,2009.
- [13] 李振伟.大威力炮弹弹载测量组件系统设计[D].南京:南京理工大学,2016.
- [14] 淡宏斌,周道建.双组份聚氨酯泡沫灌封料在电器产品中的应用[C].第八届全国绝缘材料与绝缘技术学术会议论文集,2002:372-374.
- [15] 赵小珍.电子记录系统的抗高过载设计及应用[D].太原:中北大学,2008.

作者简介

于波涛,硕士研究生,主要研究方向为测试技术与仪器。

管雪元,硕士、高级工程师,主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:njust_gxy@163.com