

doi: 10.7690/bgzdh.2018.07.019

## 模拟弹运动参数采集存储系统

陆卫东<sup>1</sup>, 黄强<sup>2</sup>, 王茂森<sup>1</sup>, 戴劲松<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;

2. 中国兵器工业集团西北机电工程研究所第八研究室, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 针对目前高速自动炮运动特性仿真结果经常与实际情况存在较大差距的问题, 提出一种基于惯性传感器的嵌入式测量存储系统。利用惯性器件采集到的模拟信号经 A/D 转换芯片和具有并行处理能力的现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 芯片进行多路信号的采集存储至 NAND FLASH, 测试完毕后通过上位机进行读取分析。试验结果表明: 该系统能还原弹丸运动特性, 具有较高的稳定性和测量精度, 为缩短高速自动炮研发周期提供数据支持。

**关键词:** 弹丸运动参数; 惯性器件; 嵌入式; FPGA; NAND FLASH

**中图分类号:** TJ306.1 **文献标志码:** A

## Simulated Bomb Motion Parameter Acquisition and Storage System

Lu Weidong<sup>1</sup>, Huang Qiang<sup>2</sup>, Wang Maosen<sup>1</sup>, Dai Jinsong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. No. 8 Research Room, Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Norinco Group, Xiayang 712000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the simulation results of high speed automatic gun are often different from the actual situation, an embedded measurement and storage system based on inertial sensor is proposed. The analog signal collected by the inertial device is stored in the NAND FLASH by the AD conversion chip and the Field Programmable Gate Array (FPGA) chip with parallel processing capability. After the test, through the host computer to read and analysis. The experimental results show that the system can restore the motion characteristics of the projectile and has high stability and measurement precision, which can provide data to shorten the development cycle of high speed automatic gun.

**Keywords:** projectile motion parameters; inertial device; embedded; FPGA; NAND FLASH

### 0 引言

小口径自动炮是广泛应用于陆、海、空多兵种的基础装备, 主要用于近程防御, 能够有效拦截低空近程巡航导弹、反舰导弹、精确制导炸弹等来袭武器, 也能对有效射程内的战斗机、直升机、无人机以及地面、水面的多种目标进行打击, 在我国常规武器建设中具有重要地位<sup>[1]</sup>。在其设计研发阶段, 为了研究高速自动炮的运动特性, 需要测量弹丸在供弹、输弹、进弹、闭锁、击发(非爆炸冲击)、开锁、后坐、抛壳和复进等高速动态过程中弹体的实际运动参数变化情况。目前主要依据是软件仿真结果和设计人员的经验, 然而利用这些手段得到的数据往往与真实情况存在一定差距<sup>[2]</sup>。针对此问题, 笔者提出了一种在弹丸药筒内部集成嵌入式测量存储模块的方法。

### 1 运动参数采集存储系统

由于中、小口径弹体内部结构紧凑, 空间狭小,

而且在供弹、输弹、进弹、闭锁、击发(非爆炸冲击)、开锁、后坐、抛壳和复进等过程中需要承受较大冲击, 为了便于测量, 且使测量数据真实, 笔者采用将惯性传感器、采集存储模块、电源及传输接口等集成设计成嵌入式模块, 嵌入炮弹的药筒之中, 通过加固填充, 不仅要使上述电路具有抗平台机械模拟运动冲击的能力, 而且要保证炮弹的质量、质心位置与对应真实型号的炮弹一致, 这样可以有效保证测量数据真实有效, 为研究高速自动炮运动特性提供数据基础。

#### 1.1 系统组成

运动参数采集存储系统主要完成弹丸在供弹机和自动机里一些运动参数的采集及存储工作。测试完毕后对测试装置通过专用数据通信接口进行数据回读, 再经过程序处理, 在上位机中显示采集到的信号。本测试存储系统采用“惯性器件+FPGA+NAND FLASH”的组合, 具体由惯性传感器(加速

收稿日期: 2018-03-25; 修回日期: 2018-04-25

作者简介: 陆卫东(1993—), 男, 江苏人, 硕士, 从事嵌入式传感与人机交互技术研究。

度计和陀螺仪)、信号调理电路、A/D 转换电路、微控制器、NAND FLASH 存储器、上位机通信接口电路、上位机和电源组成<sup>[3-5]</sup>。系统原理如图 1 所示。其中 FPGA 具有可编程、高集成度、高速和高可靠性等优点,提高了电路性能、设计的灵活性和效率,是整个测试存储系统的核心,控制着整个数据采集、存储、回读过程,同时 FPGA 高速并行的特点可以完成在同一时间点对多路数据的并行采集,以有效保障各路数据的实时性<sup>[6]</sup>。

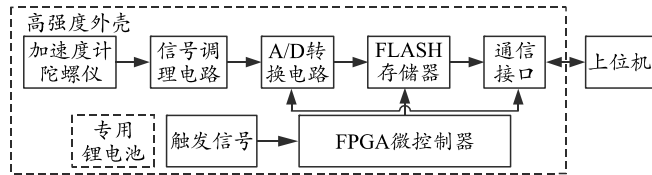


图 1 系统原理

### 1.2 系统触发存储方式

根据高速自动炮的运动特性可知:弹丸在运动过程中只有几秒钟的信号是有效信号,其他时间段里的信号对本测试系统没有实用价值。本系统采用两级触发的方式,即先边沿后阈值。因为弹丸是在既定轨迹里运动,每个过程都有明显的运动特征,具体阈值设定参考其运动特征来决定。这样可以确保采集到的数据是有效数据,为后续数据处理减轻压力。

### 1.3 硬件系统设计依据

运动参数采集存储系统的硬件电路主要设计指标有惯性器件的选型、采样频率、分辨率和存储容量等,其中惯性器件是整个系统的核心。

#### 1.3.1 惯性器件选型

根据对高速自动炮运动特性已有的认识,弹丸在整个运动过程中的三轴加速度和轴向角速度有较高的研究价值,对改善其运动特性很有帮助。通过了解动力学仿真结果得知:弹丸在供输弹机中的运

动特性是低速并伴有小幅振动、几乎不转动,自动机中是高速并伴有冲击、快速转动。而大量程的惯性传感器在小量程范围内往往测量精度较低,因本系统加速度计采用高低量程错开搭配的冗余设计来提高系统的测量精度。结合实验要求,陀螺仪和加速度计选型部分参数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 陀螺仪部分性能参数

| 量程/( $^{\circ}$ /s) | 轴数 | 灵敏度/(mV/( $^{\circ}$ /s)) | 设置带宽/Hz |
|---------------------|----|---------------------------|---------|
| $\pm 2\ 000$        | 1  | 0.75                      | 500     |

表 2 加速度计部分性能参数

| 量程         | 轴数 | 灵敏度/(mV/g) | 设置带宽/Hz |
|------------|----|------------|---------|
| $\pm 10g$  | 3  | 80         | 1 000   |
| $\pm 500g$ | 3  | 2.2        | 5 000   |

#### 1.3.2 采样频率和分辨率

根据采样定理,为了不失真地还原出信号,测试系统的采样频率 $f_s$ 应高于被采信号最高频率 $f_m$ 的 2 倍,即 $f_s \geq 2f_m$ ,一般取 $f_s=(5\sim 10)f_m$ ,根据其转管自动机的运动特性以及惯性器件的带宽并结合动力学仿真结果,本系统采样频率应不小于 10 kHz<sup>[7]</sup>。为了提高对信号的分辨率,结合惯性器件量程大、灵敏度较低的特点,笔者选用 16 bit 的 AD 芯片,对于基准电压为 3 V,16 bit 的 AD 芯片,其分辨率为 0.045 8 mV/bit,可以满足精度要求。

#### 1.3.3 存储容量

本系统为短时存储系统,若采样频率 20 kHz,六通道 16 bit AD 并行采样 10 s,会产生 $20\text{ kHz} \times 16\text{ bit} \times 7 \times 10\text{ s} = 22.4\text{ Mbit}$ ,大容量 NAND FLASH 完全可以满足要求,同时为后续系统扩展留有余量。

### 1.4 多通道并行采集存储程序设计

按照各通道独立采集,多通道协同存储的总体思路,笔者采用目前使用广泛的 Verilog HDL 硬件描述语言,根据模块化设计原则,设计了多通道并行采集存储程序<sup>[8]</sup>。系统软件流程如图 2 所示。

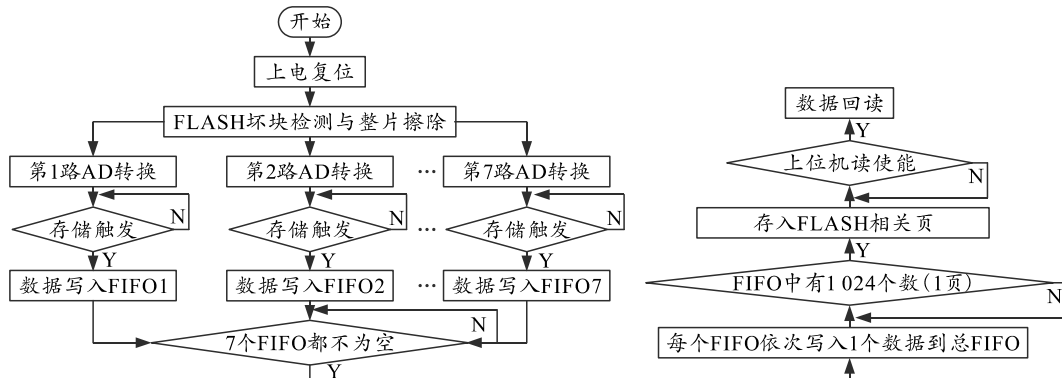


图 2 系统软件流程

## 2 系统测试分析

完成整个模拟弹运动参数采集存储系统硬件和软件设计、调试、仿真后，进行实验室现有条件的模拟测试，以验证运动采集存储系统能否准确描述模拟弹的真实运动状况。

### 2.1 系统静态测量存储实验

由于传感器固有噪声的存在，导致出现图 3、图 4 所示振荡信号，且该振幅大小与传感器设置的带宽有关。系统水平摆放，由于重力加速度的存在，故 Z 轴标准值应为 1 g。

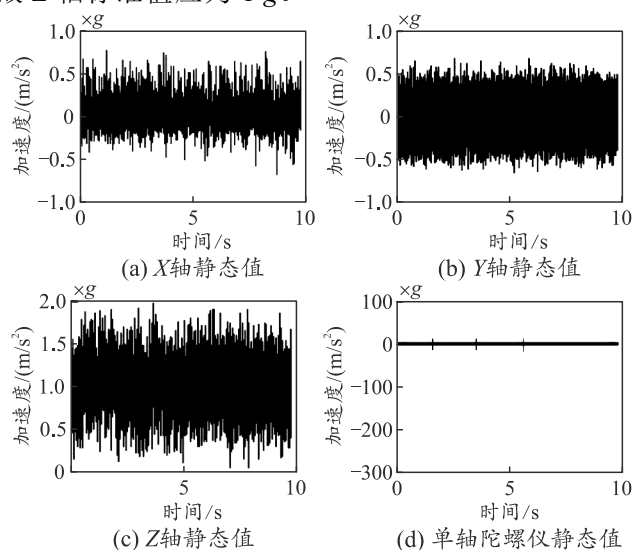


图 3 ±500g 量程加速度计 X,Y,Z 轴静态值及单轴陀螺仪静态值

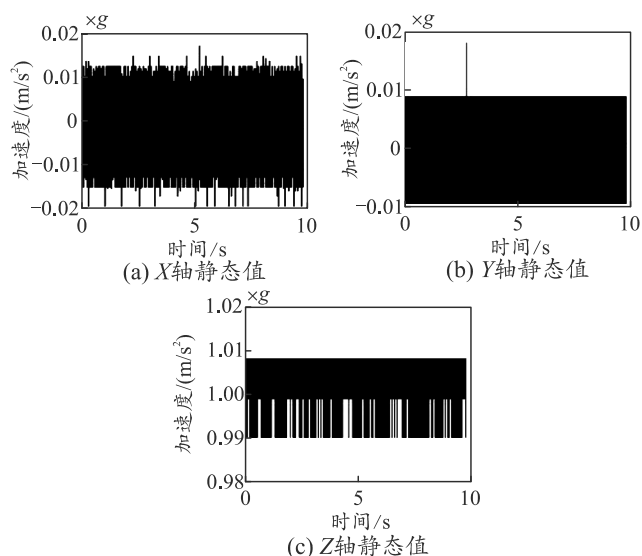


图 4 ±10g 量程加速度计 X,Y,Z 轴静态值

### 2.2 系统动态测量存储实验

使弹丸在水平方向上做距离为 40 cm 的往返运动 1 次。采集到的加速度经 1 次积分得到运动速度，

2 次积分得到运动位移，在上位机专用软件处理之后得到的如图 5 所示的具体运动信息。由于积分一定会存在累计误差问题，从图 5 可以看出，该系统可以较为准确地还原弹丸的运动信息，具有较高的精度。

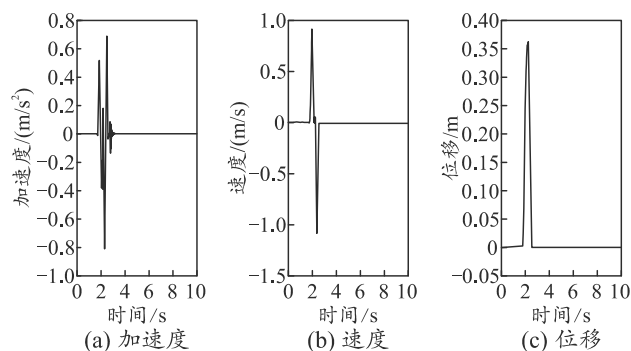


图 5 系统平移加速度、速度、位移波形

用电机带动弹丸做 300 r/min 的转动。由于实验室电机是开环控制，而且 300 r/min 对于电机来说算是低速转动，使得电机的实际转速并不稳定，但围绕 300 r/min 上下波动<sup>[9]</sup>，实验测得的数据如图 6 所示，可以看出数据具有可重复性，能够较为准确地还原弹丸的旋转状态。

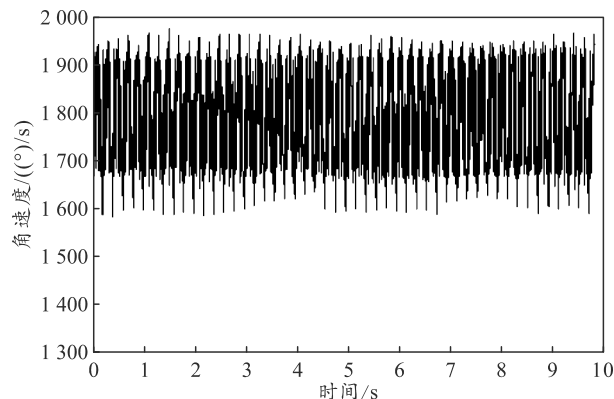


图 6 系统旋转运动波形

## 3 结论

基于惯性器件的模拟弹运动参数采集存储系统利用惯性器件作为前端采集器件，以高速并行为显著特点的 FPGA 作为主控制器，控制模数转换芯片进行数据采集和转换，并将采集转换的数据存入 NAND FLASH 中。实验结果表明：该系统在当前环境下具有较高的测量精度和稳定性，具备一定的工程实用价值。但由于目前条件限制，该系统在供输弹机、自动机这种复杂环境中的测量精度和稳定性有待进一步验证。下一步，笔者将从这方面着手，进一步验证整个系统的通用性和实用性。

的失效问题<sup>[6]</sup>。

2) 充分考虑产品的使用环境和储存环境温度, 在药块与壳体之间合理设计一定的间隙, 或在装药与壳体之间考虑加装缓冲层, 避免装药结构尺寸变形, 以解决装药由于温度急剧变化引起的热胀问题。

参考文献:

[1] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 6-83.

(上接第 91 页)

参考文献:

[1] 张相炎. 新概念火炮技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 1-4.

[2] 罗定. 某转管自动机动态特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 1-3.

[3] 文晓洲, 封锋, 陈军. 多管火箭炮射序优化[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 5-9.

[4] 徐鹏, 范锦彪, 祖静. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(11): 118-122.

[5] 沈碧云. 小型高速可编程多路数据采集存储系统的研

[2] 陈熙蓉, 许丽云, 陈书言, 等. 炸药特性与装药工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 198: 8-10.

[3] 陈国光, 董素荣. 弹药制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 286-287.

[4] 王义磊, 吴越. 一种圆弧杆式战斗部设计与飞散特性数值模拟[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 87-92.

[5] 《炸药理论》编写组. 炸药理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 57-62.

[6] 金韶华, 松全才. 炸药理论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 54-57.

\*\*\*\*\*

究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 8-9.

[6] 冯元伟, 冯宗明. 基于FPGA和单片机的多通道同步触发信号发生器[J]. 信息电子工程, 2012, 12(1): 111-113.

[7] 张亮, 张振海, 李科杰, 等. 基于三轴加速度传感器的弹载存储测量装置[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(2): 13-17.

[8] 王茂森, 李兴, 戴劲松. 基于现场可编程门阵列的高速多通道并行测量系统设计[J]. 测试技术学报, 2015, 29(4): 303-307.

[9] 史继刚, 易文俊, 管军, 等. 基于粒子群-牛顿算法的弹丸阻力系数辨识[J]. 兵器装备工程学报, 2017(2): 23-26.