

doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.008

# 基于并行 ARM 的弹载多通道高速测试系统

翟萌<sup>1</sup>, 殷婷婷<sup>2</sup>, 王甫<sup>1</sup>, 鞠莉娜<sup>1</sup>, 蒋鹏<sup>1</sup>

(1. 华东光电集成器件研究所 MEMS 工程中心, 江苏 苏州 215163;

2. 南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

**摘要:** 为了解决弹载环境下多通道数据实时采集存储及时序准确控制的问题, 采用并行 ARM 设计, 构建弹载多通道高速测试系统。根据弹丸飞行特性和高速采样要求, 采用模块化设计, 分别对电源管理、存储控制和高速存储进行算法设计, 通过霍普金森杆和飞行试验验证了系统时序管理和高速采集存储的正确性。试验结果表明: 该测试系统能够在工作时序范围内完成多通道数据的实时采集和存储, 满足可靠性和稳定性的要求。

**关键词:** 弹载测试; 时序控制; 高速采集; 并行 ARM

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** A

## Missile-borne Multi-channel High Speed Test System Based on Parallel ARM

Zhai Meng<sup>1</sup>, Yin Tingting<sup>2</sup>, Wang Fu<sup>1</sup>, Ju Li'na<sup>1</sup>, Jiang Peng<sup>1</sup>

(1. MEMS Engineering Center, East China Institute of Optoelectronic Integrated Device, Suzhou 215163, China;

2. Smart Ammunition of National Key Laboratory, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high-speed real-time acquisition and storage of multi-channel data in missile borne environment and accurate control of time sequence, a multi-channel high-speed testing system was constructed with parallel ARM. According to the flight characteristics and high-speed sampling requirements of the projectile, a high-speed data acquisition and storage system including storage control module, signal acquisition module and power management module are designed to realize high speed data storage. The correctness of timing management and high speed acquisition performance of the system are verified by Hopkinson bar test and flight test. The results show that the system can complete the real-time acquisition and storage of multi-channel data within the working time range, and can meet the requirements of reliability and stability.

**Keywords:** missile-borne test; sequential control; high speed acquisition; parallel ARM

## 0 引言

弹载记录仪主要承担炮弹各弹道阶段的关键参数的采集及记录任务, 为武器系统研制及改进提供测试数据与试验保障<sup>[1-2]</sup>。炮射武器具有高过载、高动态等特点, 测试环境恶劣, 测试系统需承受高过载、高温、高压的环境力作用<sup>[3]</sup>, 对记录仪体积、质量、采集存储技术提出了更高的要求<sup>[4]</sup>。

传统记录仪需要先擦除后写。擦写速度慢, 大大影响了系统的运行效率。单核设计的记录仪采用机械动作辅助完成上电操作, 系统工作有一定的机械延时, 会丢失一部分内弹道数据, 且在测试完成后无法完成自我断电保护。各通道模块全程上电, 在特殊弹道段不能起到断电保护作用, 不适用于全弹道测试<sup>[5-7]</sup>。

笔者以某型底部排气弹(简称底排弹)研制为背景, 根据测试需求, 通过并行 ARM 设计, 完成膛内三轴过载、底排药柱空中飞行阶段的燃烧温度及

底排装置内压力的采集。在内弹道高温高压环境下, 通过时序管理设计保护压力和温度传感器, 且在弹丸落地前断电保护采集系统。笔者设计了多通道高速存储测试系统, 基于实弹试验平台, 完成了全弹道分段多通道变采样测试, 为底排弹的后续研究提供了参考。

## 1 系统设计

如图 1 所示, 为了增强系统的通用性及适配性, 多通道测试系统采用模块化设计, 包含了信号采集模块、电源管理模块、存储控制模块。信号采集模块完成传感器信号的采集及调理, 将传感器输出的差分信号经过低通滤波放大及信号增强后传送给微控制器。电源管理模块以 STM8 为核心, 控制上电开关, 管理各个模块的上电时序。存储控制模块以 STM32 为核心, 完成多通道传感器信号采集及与上位机的通信。

收稿日期: 2019-04-21; 修回日期: 2019-05-30

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX01021-101-002)

作者简介: 翟萌(1991—), 女, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事智能弹药测试研究。E-mail: zhai\_m\_0305@163.com。

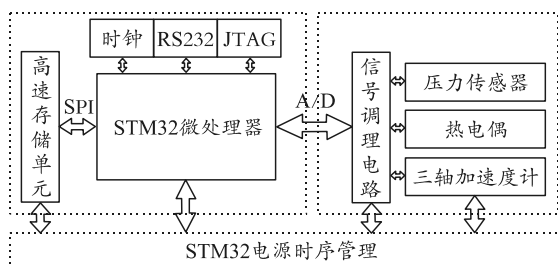


图 1 弹载多通道高速测试系统

由于弹载环境的高过载、高动态等特性，诸多传感器的应用受到了限制。在充分考虑传感器抗高过载以及温度范围的前提下，对传感器芯片进行选型。系统采用 PCB 公司的三轴高 G 值传感器，具有体积小、功耗低、易安装等特点；温度传感器采用钨铼热电偶，在 0~2 300 °C 能保持较高的线性度。压力传感器采用 ENDEVCO 公司的抗冲击传感器，能够承受 20 000g 的瞬间冲击。

由于弹上空间狭小，电池容量受到限制，系统需解决低功耗与高速多通道采集存储的矛盾。电池系统以低功耗 STM8 作为时序控制核心，控制弹丸各个阶段电源的工作状态。系统上电至弹丸发射阶段，电源只为 STM8 供电，电路功耗为 0.06 W，等待特定时间后，启动存储控制模块供电，等待触发信号。

存储控制模块以 STM32 为核心，以 STM32 处理器固有的 12 位 AD 转换模块作为媒介，实现对各传感器信号的采集及存储。采用铁电存储器快速读取和写入访问，在电源关掉后保留数据，使用时无需翻页及擦除，特别适用于高速存储。

系统以超硬航空铝为壳体设计材料，具有质量轻、强度高等特点。将记录仪设计为电池模块、传感器模块、电路模块，传感器信号采用航空接插件传递。其中电池模块和电路模块采用发泡胶灌封保护，可提升电路系统抗冲击过载能力。各模块结构独立，可重复使用及维修度高。系统结构安装如图 2 所示。

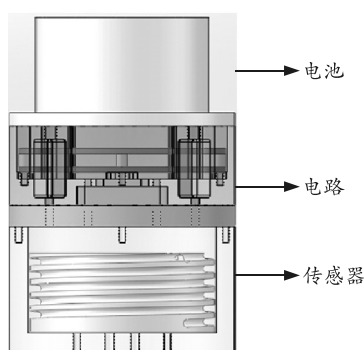


图 2 结构安装

## 2 算法设计

### 2.1 电源管理算法

系统采用软件触发的方式，通过采集得到的加速度与阈值进行判断是否触发，当检测到触发信号 1.1 s 后，开启压力和温度采集模块供电(开关 2)，同时关闭加速度传感器供电(开关 1)。在弹丸落地前，关闭整个存储控制模块电源(开关 3)，保护存储电路。当检测到 STM32 提供的触发信号后开始计时，控制各个开关。为防止尖峰脉冲形成误触发，采用延时判断，当间隔 100 ms 依然能检测到高电平信号时，则判定接收到触发信号。算法流程如图 3。

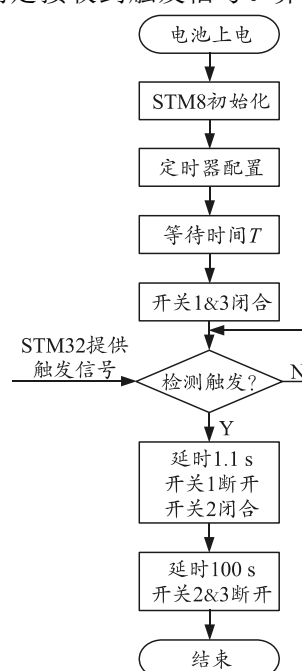


图 3 时序管理算法流程

为了测试验证电源管理时序的流程，发射准备阶段时间可由靶场试验准备经验设定，同时根据外弹道仿真设定系统空中飞行阶段的测试时间，从而在落地前进行断电保护。由于膛内压力远高于压力传感器的测试量程，以及底排药在点火瞬间造成的压力峰值超出几倍底排工作压力，在接收到触发信号后，延时 1.1 s，确保弹丸弹底泄压完全，保护压力传感器。在调试阶段，模拟整个上电时序过程，设定系统从上电到发射等待时间为 5 s，主系统上电，等待触发信号，确定触发 1.1 s 后主系统断电。通过示波器观测上电时序图，通道 1 为电池电源信号，通道 2 为主系统电源信号，在电源上电 5 s 后开始工作，通道 3 为触发信号，触发后加速度计测试模块断电，同时压力和温度模块供电。模拟弹上测试供电过程时序如图 4。

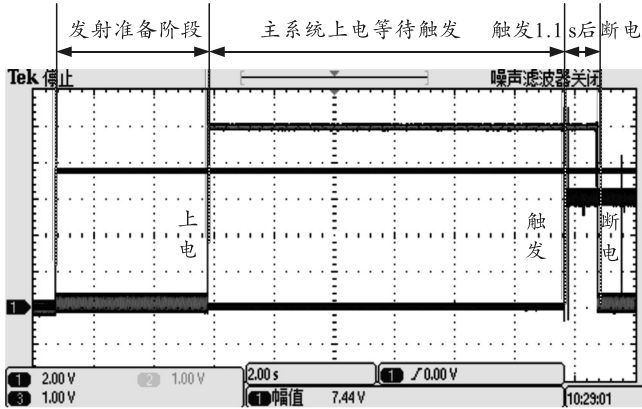


图 4 模拟发射上电时序

### 2.2 存储控制算法

系统存储时将 Flash 分为 4 段，分别用于存储状态标志、加速度计数据、温度数据、压力数据。上电后，首先读取状态标志位，判断是否已经触发采集并存储了数据，若 Flash 中存有触发数据，则关闭加速度计采集，进入等待串口指令状态。上位机通过发送读取指令，进入不同存储数据段，读取各个传感器数据，数据读取后发送擦除指令，清除存储标志位，将系统设置为待触发状态。系统触发采用软件触发，以弹体轴方向的加速度值作为触发信号。为防止搬运装填过程中的误触发，设置触发阈值为 3 000g，同时设置触发判断为连续  $N$  点大于阈值后确认触发。触发后定时采集存储三轴加速度数据，通过 I/O 口拉高提供给 STM8 一个触发信号。算法流程如图 5。

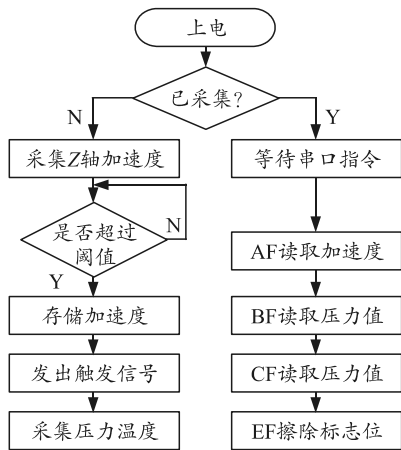


图 5 主控模块算法流程

### 2.3 高速存储算法

采用高采样率能够更加精确地还原信号，但同时会导致存储空间受限。分析测试信号，弹丸在膛内运动时间短，是个高动态过程，而空中压力及温度的变化相对平缓，系统采样 2 个定时器对这 2 类

信号进行变采样采集，从而解决采样率与存储空间之间的矛盾。采用定时器 1 以 100 kHz 完成对膛内三轴过载的采集。压力和温度采集时段相同，且变化速率相对较慢，采用定时器 2 以 200 Hz 采集。

弹上存储器空间有限，合理分配采集存储空间非常必要。在系统上电后，该时段数据为待触发状态，完全存储将会浪费大量存储空间。如图 6 所示，开辟一组缓存区，作为触发前的数据缓存，数据循环存入数组中，当数组存满后，从数组起始位置覆盖之前时刻的数据。在检测到触发后，跳出循环存储，进入触发采集，该阶段的数据全部保存。数据分析时，通过查询触发阈值，对触发缓存中的数据重新排序，还原真实信号时序。

传统 Flash 存储数据时需要翻页操作，以 W25Q32 为例测试，翻页需 0.7 ms，不适用于高采样环境。系统使用的铁电 Flash 数据传输速率能够达到 40 MHz，数据无需擦除和翻页，节省了采集存储时间。程序设定采取定量存储的方式，当采集到  $N$  组数据时，访问一次 Flash。存储时间若大于 10 ms，将会影响下一时刻的采集，从而降低了采样率。STM32 内置了 DMA 控制器管理外设，无需 CPU 直接控制传输，系统采用 DMA 访问存储器<sup>[8-9]</sup>，不影响主程序中中断的执行，提高存储效率，保证系统高采样率下的采集存储。

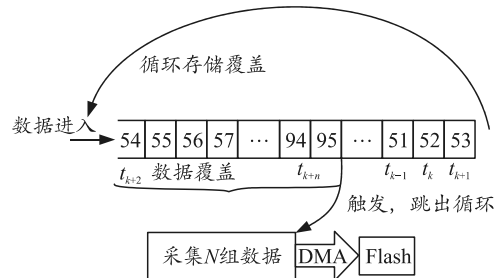


图 6 触发存储算法原理

## 3 试验验证

### 3.1 存储管理实时性试验

高采样率存在 2 个问题：数据存储空间不够；数据在存储过程与 Flash 频繁通信，影响程序进程，导致实际采样率达不到 100 kHz。存储空间可以通过定时采样解决，如本系统采集 20 ms 后就关闭过载测试通道。存储管理的实时性经过算法优化后，地面可通过采集一组方波进行试验验证。通过信号发生器生成一组频率为 200 Hz 的方波，利用测试系统触发存储方波信号，数据回读后得到一组离散的方波信号点如图 7。

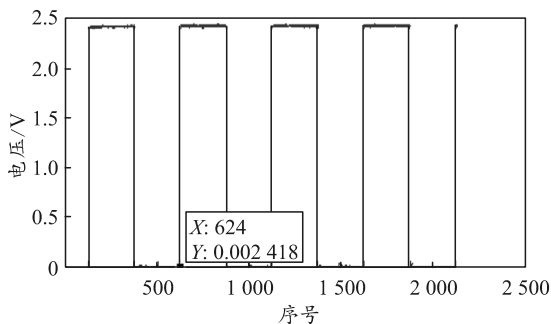


图 7 测试得到的方波信号

选取一个周期的方波，起始点坐标为(126, 2.428)，终点坐标为(624, 0.002 418)，得到一个周期的点数  $N=499$ ，则采样率可由下式计算：

$$f_{AD} = Nf_{方} \quad (1)$$

式中： $f_{方} = 200 \text{ Hz}$ ，计算得到  $f_{AD}=99.8 \text{ kHz}$ ，与理论设置值  $100 \text{ kHz}$  相差无几，数据采集存储满足实时性要求。

### 3.2 霍普金森杆试验

地面试验采用霍普金森杆验证系统的触发及存储功能，同时对加速度的采集结果进行标定。如图 8，将加速度计单独引出，固定在霍普金森杆上，信号线接入测试系统。

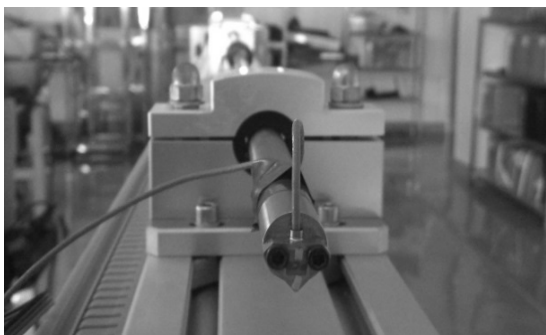


图 8 霍普金森杆测试

冲击前将系统设置为待触发的状态，通过霍普金森杆分别给出不同冲击值，得到一组过载数据如表 1，对比激光测试结果加速度计的测量误差在 6% 以内。

表 1 霍普金森杆标定

冲击值×g	测试值×g	测量误差/%
5 774	6101	5.66
7 812	8 011	2.55
8 317	8 619	3.63
14 744	15 566	5.58
18 167	18 749	3.20

图 9 为冲击 8 317g 测得的过载曲线，测试结果为 8 619g，测量误差为 3.63%。

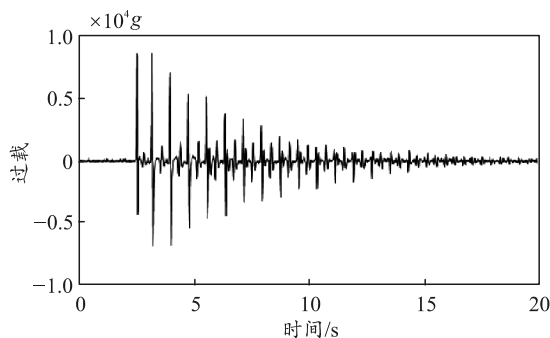


图 9 霍普金森杆 8 317g 测试曲线

### 3.3 飞行试验

为保证测试数据的准确性，压力与温度传感器应尽量靠近信号源，防止温度及压力传递的衰减。系统将传感器固定在底排装置上，测试点与温度场及压力场直接接触，信号线则通过集流环引入测试系统内。加速度计安装在测试系统内，采用刚性连接，Z 轴方向与弹尖方向平行。回收试验弹后，通过不同指令读取各通道数据，计算方法如下式：

$$x = \left( \frac{D \times 2^{12}}{V_{AD}} \times 2 - V_{ref} \right) / (G / S) \quad (2)$$

式中： $D$  为回读得到的数据； $V_{AD}$  为 A/D 基准电压； $V_{ref}$  为参考电压基准； $G$  为电路增益； $S$  为传感器灵敏度； $x$  为待测量。

得到一组飞行试验数据如图 10—12。

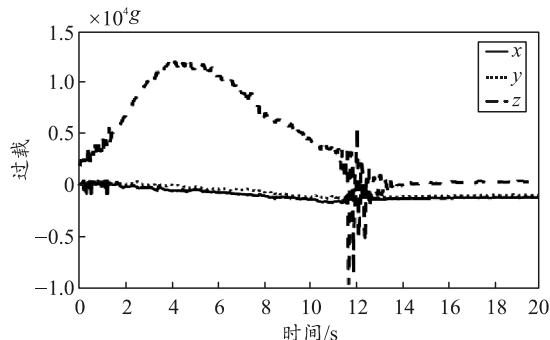


图 10 膛内三轴过载

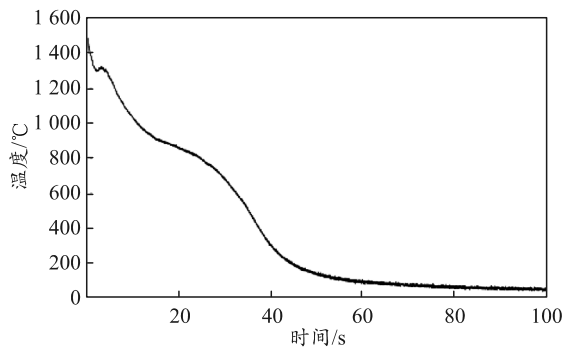


图 11 底排弹底温度

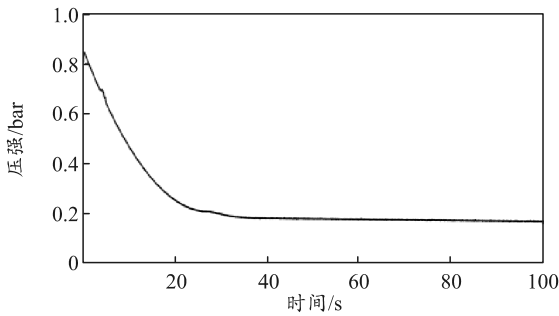


图 12 底排弹弹底压力

将试验结果与仿真结果对比，结果如表 2。

表 2 试验结果统计

测试项	z 向过载×g	(y/z)过载×g	温度/℃	压力/bar
仿真值	12 000	2 600	1 800	0.78
实测值	11 691	1 853	1 495	0.84
偏差率/%	2.58	28.73	16.94	7.69

测试结果表明，膛内横向过载值与温度峰值仿真值出入较大。在膛内仿真中引入了膛线模拟挤进的过程，而实际使用炮管膛线磨损严重，会导致测量值偏小。出炮口后底排药瞬间点燃，而测试启动在触发 1.1 s 后，错过其点火瞬间燃烧的峰值，所以实测值偏小。由于仿真参数设定依靠经验值选取，与实际试验条件有出入，仿真结果仅能用于趋势分析。如图 8 在出炮口瞬间，弹丸定心部脱离身管约束，摆动和俯仰加剧，弹轴方向受到反向峰值 9 742g 的过载，炮口扰动明显，符合弹丸运动规律。底排减阻阶段的压力与温度测试结果与仿真结果趋势一致，系统测量结果可信。

### 4 结论

笔者设计了一种基于并行 ARM 多通道高速测

试系统，完成对膛内三轴过载、飞行阶段弹底压力和温度的采集及存储，对硬件设计原理、软件算法进行了介绍和分析，设计了高动态下的多通道数据采集及存储算法。通过地面试验及飞行试验验证了系统功能，得到过载测试精度在 6% 以内，飞行结果与仿真结果对比趋势较为一致，验证了系统测试的可信度。

### 参考文献：

- [1] 张娇婷, 张颖龙, 朱怡, 等. 基于 ARM+FPGA 的通用导弹弹载记录仪的设计[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(2): 38-41.
- [2] ZHANG X, ZHAO Y, DUAN Z, et al. A high-g shock tester with one-level velocity amplifier[J]. Measurement & Technology, 2013, 24(4): 045901.
- [3] 马游春, 吴正洋, 姜德, 等. 基于 FPGA 的小型弹上三向过载记录仪[J]. 中国测试, 2017, 43(7): 83-87.
- [4] 张瑜, 祖静, 张红艳, 等. 基于存储测试技术的弹底压力测试技术[J]. 火力与指挥控制, 2014(1): 172-175.
- [5] 王琦, 杜力力, 李永红. 基于 DSP 的多通道弹载数据记录仪的设计[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(1): 244-246.
- [6] 刘雪飞, 马铁华, 刘廷辉, 等. 高速弹载记录仪存储技术研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(2): 25-30.
- [7] 雷建胜, 苏淑靖. 多通道数据采集存储器[J]. 仪表技术与传感器, 2013(1): 16-18.
- [8] KOBAYASHI T. Computer system having an I/O module directly connected to a main storage for DMA transfer: US[P], US 7716392 B2. 2010.
- [9] JIAO Y, HONGMIAN D U, PENG X U, et al. Muzzle Shock Wave Storage-testing Based on Multiple Triggers and Negative Delay Technology[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(1): 86-89.