

# 膛内惯性测速系统设计

温 鹏, 周诗超, 孙建港, 刘 威, 李 凯  
(中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 弹丸的膛内运动参数可以反映火炮工作状态特性, 针对常规火炮弹丸内弹道运动测速需求, 设计了基于 MEMS 加速度传感器和姿态传感器的膛内惯性测速系统; 采用 Kalman 滤波和四元数姿态解算算法对传感器数据进行 FPGA 片上处理, 实现了从弹丸挤进到出膛运动过程的时间记录, 成功获取弹丸内弹道运动过程中加速度、速度和位移变化; 实验结果表明, 相对激光区截测速方法, 该系统出膛速率测量误差小于 2.93%; 相对火炮身管原参数, 出膛位移测量误差小于 1.85%, 为内弹道过程弹丸运动参数测量获取提供了技术支持, 对火炮系统设计评估具有重要意义。

**关键词:** 内弹道; 测速; FPGA; MEMS; Kalman 滤波; 四元数

## Design of Inertial Velocity Measurement System in Bore

WEN Peng, ZHOU Shichao, SUN Jiangang, LIU Wei, LI Kai

(Shanxi Provincial Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University of China,  
Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The motion parameters of projectile in bore can reflect the working state characteristics of artillery. Aiming at the speed measurement requirements of interior ballistic motion for conventional artillery projectile, an inertial velocity measurement system in the bore based on MEMS acceleration sensor and attitude sensor is designed. Kalman filtering and quaternion attitude algorithm are used to process the sensor data on FPGA chip, and realize the time recording of the movement process from the projectile squeezing into the chamber exit, the acceleration, velocity and displacement changes of the projectile in the interior ballistic movement process are successfully obtained. The experimental results show that compared with the laser zone cut velocity measurement method, the measurement error of the exit velocity in the system is less than 2.93%; Compared with the original parameters of the gun barrel, the measurement error of the exit displacement is less than 1.85%, which provides technical support for the measurement and acquisition of the projectile motion parameters in the interior ballistic process, and it is of great significance to the design and evaluation of the gun system.

**Keywords:** interior ballistics; speed measurement; FPGA; MEMS; Kalman filtering; Quaternion

## 0 引言

近年来, 我国国防兵器事业的蓬勃发展为常规武器性能的进一步提升带来了新的机遇和挑战。火炮作为未来战争中必不可缺的常规武器之一, 在新的时代背景下也有了更高的发展目标<sup>[1]</sup>。对弹丸内弹道运动参数的实时测量和利用成为提升火炮性能的一个重要目标<sup>[2]</sup>。

内弹道运动探测主要研究弹丸从点火到离开发射器身管的运动规律。弹丸在膛内运动短促而复杂<sup>[3]</sup>, 探测内弹道运动过程参数变化可预测火炮战场实时使用性能, 并且对常规弹丸制导控制具有重要作用<sup>[4]</sup>。目前有关内弹道运动参数探测的方法主要是对速率的测量。

膛压测试法, 其基本原理是测量膛内压力变化后根据内弹道基本理论计算弹丸运动速度和位移变化。膛压测试

法可分为铜柱测压法和电子测压法, 文献 [5] 提出用铜柱测压法对火炮的膛压进行测试, 同时测得弹丸加速度, 并对实现的可能性进行了讨论。文献 [6] 应用放入式电子测压法对火炮的膛压进行了测试, 提出基于弹底压力变化的炮口速度解算方法, 测速结果与雷达测速仪测得的炮口速度误差在 0.38%~1.38% 之间。

区截靶测试法是目前主要的测试弹丸出膛速率的方法, 它以弹丸出膛通过炮口间隔靶的平均速度作为弹丸出膛速率<sup>[7]</sup>。区截靶测试法种类繁多, 文献 [8] 设计了一种可用于轻气炮弹速测量的新型激光测速系统, 改进了激光光路和光电转换电路, 与传统激光测速系统相比测速结果相对扩展不确定度为 0.73%。文献 [9] 提出了一种差分结构的新型测速线圈传感器, 测速信号相比常规线圈传感器提高 11.809 dB, 相对测速精度达到 0.15%, 对弹丸测速具有更

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2022-11-18。

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(20210302123058)。

作者简介: 温 鹏(1997-), 男, 山西大同人, 硕士, 主要从事信息探测与处理方向的研究。

通讯作者: 李 凯(1979-), 男, 山西太原人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事信号与信息处理、信息探测、电磁检测、导航与制导、传感器方向的研究。

引用格式: 温 鹏, 周诗超, 孙建港, 等. 膛内惯性测速系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 154-160.

好的抗噪性。文献 [10] 基于光幕靶测速方法提出小波分析法检测与识别弹丸信息, 寻找弹丸信号的奇异点, 获得同一组弹丸速度相对变化最大值与最小值差值小于 1.66 m/s, 提高了相对测速精度。

高速摄影成像法, 这种方法通过外部架设高速摄像机来记录弹丸的运动成帧时间和图像特征, 从而对弹丸速率和位置进行测量<sup>[11]</sup>。文献 [12] 应用高速摄影技术记录弹丸飞行过程, 设计了某型弹丸飞行速度的摄影测量方案, 与多普勒雷达测速结果对比相对测速差值小于 7 m/s。文献 [13] 利用高速摄像机、辅助光源等组成高速弹丸摄影系统, 采用弹丸目标模板匹配方法测算弹丸速度, 与激光测速结果对比相对误差小于 0.05 km/s。文献 [14] 提出一种火炮发射视频自动化测速方法, 利用计算机视觉得到炮弹的速度, 通过与传统方法比较试验, 验证了其真实火炮的测试结果。

多普勒雷达测试法根据电磁波波长与频移之间的关系解算出弹丸速率<sup>[15]</sup>。文献 [16] 设计了一种窄带多普勒信号实时处理系统, 使用信号频谱搬移后再处理的方法求出弹丸初速, 实测信号与给定信号频率误差小于 160 Hz, 计算时长小于 3 s。文献 [17] 提出基于 FFT 的快速小波变换和模的小波脊提取方法, 对多普勒雷达弹丸测速信号处理计算得到速度, 与激光测速系统相比误差优于 0.2%。文献 [18] 设计了一种可应用于内、外弹道参数测试的毫米波测速雷达, 采用谱分析和最小二乘法推算得到弹丸初速, 测试精度达 0.1%。

弹载存储测量法使用弹载惯性传感器测量弹丸加速度变化, 文献 [19] 利用单片机设计了一种弹载加速度信号采集存储系统, 文献 [20] 设计的测试仪能够记录弹体侵彻过程中的三维加速度数据, 得到的数据回收后, 再进行分析计算得到弹丸出膛速度。文献 [21] 进行了基于弹丸惯性力的加速度测量实验, 根据弹丸前沿加速度的变化计算得到弹丸速度。

现有测量弹丸速度的方法主要存在以下问题: 膛压测试法需要在身管上开孔破坏火炮身管结构, 测速数据不能实时用于制导炮弹处理器<sup>[22]</sup>; 区截靶测试法需要在炮口布设区截装置, 不同类型的区截靶适用环境不同, 不能获得内弹道全过程速度<sup>[23]</sup>; 高速摄影成像法也需要在外部安装设备, 设备对环境要求比较高, 也不能获得内弹道全过程速度<sup>[24]</sup>; 多普勒雷达测试法容易受到复杂电磁干扰导致频谱失真, 现有测速算法耗时长, 不能实时计算弹丸速度<sup>[25]</sup>; 弹载存储测量法可以获得内弹道全过程加速度变化, 但目前只是将数据获取回收后在电脑上分析计算, 未进行片上实时处理和利用<sup>[26]</sup>。

针对上述方法存在的问题, 本文基于 MEMS 加速度传感器和姿态传感器设计了膛内惯性测速系统, 通过分析弹载内弹道运动测量原理, 根据使用环境设计硬件系统, 在 FPGA 上设计 Kalman 滤波算法和四元数姿态算法, 对原始

信号处理计算得到内弹道过程弹丸加速度、速度和位移变化。既可以将测量结果存储到系统存储器中又可以将实时数据上传到制导炮弹处理器。

## 1 弹丸内弹道过程测量原理

### 1.1 弹丸运动加速度测量原理

弹丸在内弹道运动阶段主要经历坡膛挤进过程、膛内运动过程和出膛过程。在弹丸运动过程中采集一系列的加速度值, 根据式 (1) 和 (2), 采用数值积分的方法可以得到弹丸实时运动速度和位移:

$$v(n) = v(0) + \left[ \frac{2n-1}{2}a(0) + (n-1)a(1) + \cdots a(n-1) + \frac{1}{2}a(n) \right] \Delta t \quad (1)$$

$$s(n) = s(0) + nv(0)\Delta t + \left[ \frac{2n-1}{4}a(0) + (n-1)a(1) + \cdots a(n-1) + \frac{1}{4}a(n) \right] \Delta t \quad (2)$$

式中,  $v(0)$  为初始速度;  $a(0)$  为初始加速度;  $a(1) \sim a(n)$  为被采样的  $n$  个加速度点;  $s(0)$  为初始位移;  $s(n)$  为积分得到的位移信号;  $\Delta t$  为加速度信号采样间隔。

根据弹丸轴线运动速度由式可得弹丸转速:

$$N = \frac{v \tan \alpha}{2\pi r} \quad (3)$$

式中,  $N$  为弹丸转速, 单位为 rad/s,  $\alpha$  为膛线缠角,  $r$  为弹丸半径。

根据式 (4)、(5), 可以得到不同时刻弹丸的整体受力。

$$\vec{F} = m\vec{a}(n) \quad (4)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_{a1} + \vec{F}_{a2} + \vec{F}_{a3} \quad (5)$$

式中,  $\vec{F}$  为弹丸受力,  $m$  为弹丸质量,  $\vec{F}_{a1}$ 、 $\vec{F}_{a2}$ 、 $\vec{F}_{a3}$  为三个传感器方向的分力。

### 1.2 运动姿态测量原理

弹丸在内弹道运动阶段并不是理想的直线, 弹丸运动姿态测量一方面能够还原弹丸运动时振摆情况, 另一方面可以确定弹丸挤进时刻和出膛时刻。

弹丸运动时的姿态变化如图 1 所示, 以弹丸自身为参考系, 弹丸姿态变化体现在三个状态  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  的欧拉角变化, 当前状态变化以上一个状态参考, 设当前测得角速度变化为  $\vec{\omega}_{\text{Eb}} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ , 由四元数表示法得:

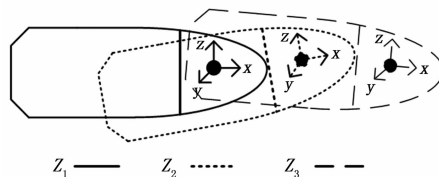


图 1 弹丸姿态变化示意图

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = \frac{1}{2}\vec{Q} \otimes \vec{\omega}_{\text{Eb}} \quad (6)$$

式中,  $\vec{Q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ , 通过迭代可以得到实时更新的四元数参数:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}_t + \frac{1}{2} \Delta t \begin{bmatrix} -\omega_x q_1 - \omega_y q_2 - \omega_z q_3 \\ \omega_x q_0 - \omega_y q_3 + \omega_z q_2 \\ \omega_x q_3 + \omega_y q_0 - \omega_z q_1 \\ -\omega_x q_2 + \omega_y q_1 + \omega_z q_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由四元数得到弹丸姿态变化角:

$$\begin{aligned} \gamma &= -\arcsin[2(q_1 q_3 - q_0 q_2)] \\ \theta &= \arctan\left[\frac{2(q_2 q_3 + q_0 q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right] \\ \psi &= \arctan\left[\frac{2(q_1 q_2 + q_0 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\gamma, \theta, \psi$  分别为弹丸相对上一次姿态的俯仰角、偏航角和滚动角。

### 1.3 挤进和出膛时刻判别原理

姿态加速度测量值在弹丸未受火药燃烧气压作用时的合加速度满足:

$$\vec{A}_x + \vec{A}_y + \vec{A}_z = -\vec{G} \quad (9)$$

式中,  $\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z$  分别为传感器三个正交方向的测量值,  $\vec{G}$  为地球重力加速度。

挤进时刻弹丸受力急剧增大, 合加速度满足:

$$|\vec{A}_x + \vec{A}_y + \vec{A}_z| \gg G \quad (10)$$

$$\vec{A}_x + \vec{A}_y + \vec{A}_z = \vec{A} \approx \vec{A}_x \quad (11)$$

忽略弹丸出膛后的空气阻力, 同理弹丸出膛后的受力满足式。弹丸姿态判别如图 2 所示。

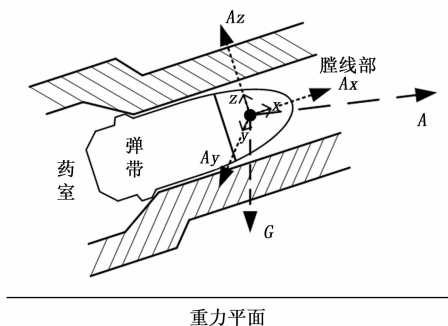


图 2 弹丸姿态判别示意图

### 1.4 Kalman 滤波原理

为了进一步提高测量精度, 应用 Kalman 滤波对传感器采集到的原始信号滤波, 式描述了状态量和观测量之间的关系。系统采集测量过程是一个动态系统, 存在测量噪声并且满足高斯分布特性,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k) &= \Phi \mathbf{X}(k-1) + \Gamma \mathbf{W}(k-1) \\ \mathbf{Y}(k) &= \mathbf{H} \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $k$  表示离散的时刻,  $\mathbf{X}(k)$  为系统在  $k$  时刻的状态估计值, 可由前一时刻的状态值  $\mathbf{X}(k-1)$  和两时刻间系统内的输入噪声  $\mathbf{W}(k-1)$  表示,  $\Phi$  为状态转移矩阵,  $\Gamma$  为噪声的驱动矩阵, 反映输入噪声的变化;  $\mathbf{Y}(k)$  为系统测量值,  $\mathbf{H}$  为观测矩阵, 反映系统中状态量与观测量之间的联系,  $\mathbf{V}(k)$

为观测过程中引入的噪声。

使用 Kalman 滤波算法处理单一加速度变量数据时, 需要经过式 (13) 统计中间量对式 (12) 迭代更新。

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \Phi \mathbf{P}(k|k) \Phi^T + \Gamma \mathbf{Q} \Gamma^T$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \Phi \hat{\mathbf{X}}(k|k)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(k+1) = \mathbf{Y}(k+1) - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}(k+1|k)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}(k+1|k) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1) \boldsymbol{\varepsilon}(k+1)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = [\mathbf{I}_n - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{H}] \mathbf{P}(k+1|k) \quad (13)$$

式 (13) 中,  $\mathbf{P}(k+1|k)$  表示前后相对时刻最优估计值方差,  $\mathbf{R}$  表示观测噪声的方差,  $\mathbf{I}_n$  为单位矩阵表示测量过程中的信号是一维信号,  $\boldsymbol{\varepsilon}(k+1)$  表示单位时刻的阶跃变化,  $\mathbf{Q}$  表示超参数矩阵,  $\mathbf{K}(k+1)$  表示卡尔曼增益。

## 2 系统硬件设计

根据弹丸在内弹道阶段的运动特点和应用背景, 设计系统结构如图 3 所示。为了不改变现有的火炮装备结构, 整个系统设计在一个直径 90 mm 的 PCB 上, 嵌入于 122 mm 口径火炮弹丸的引信区, PCB 平面与弹丸圆截面同心且平行。系统主要由 4 个传感器组成, 其中 MEMS 加速度传感器  $a_1, a_2, a_3$  相互正交安装,  $a_1$  测量弹丸在内弹道运动阶段沿弹丸轴线的前进加速度, 图示为  $x$  轴;  $a_2$  和  $a_3$  测量弹丸与膛线部的碰撞加速度, 图示分别为  $y$  轴和  $z$  轴; 传感器  $a_4$  为小量程 MEMS 六轴姿态传感器, 其三个测量方向与  $a_1, a_2, a_3$  同向, 用于弹丸运动的姿态测量判断。

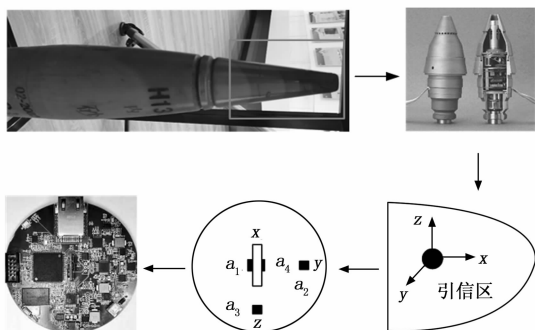


图 3 系统结构组成图

本系统硬件系统方案如图 4 所示, 主要由传感器、信号调理采集电路、FPGA 控制器、NAND FLASH 数据存储模块、数据通信模块和电源管理系统组成。选择用于炮弹惯性测量的大量程、高灵敏度、耐高温、可抗 10 000 g 过载的专用 MEMS 传感器。系统工作时, 传感器采集到信号后, 通过信号调理电路实现滤波、基准搬移, 经 A/D 转换电路将模拟信号转换为数字信号传输到 FPGA 控制器, FPGA 对数据进行处理计算、存储以及通过数据通信模块上传到具有制导功能炮弹的弹载处理器。

### 2.1 信号调理采集电路

所用 MEMS 传感器是模拟量输出型的传感器, 在实际情况中得到的信号中包含有许多噪声, 信号调理采集电路

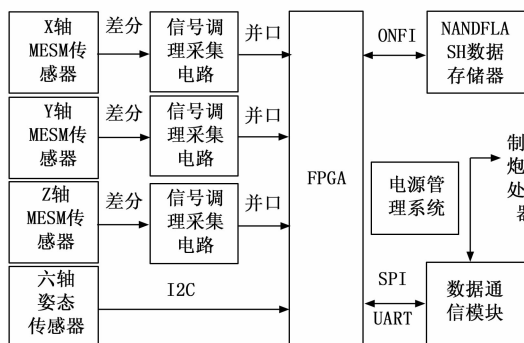


图4 系统硬件组成图

针对信号中含有的随机不平稳噪声设计具有高阻抗和高信噪比特性的有源滤波电路, 同时满足传感器输出带宽要求。

选用低失调电压运放 OP07 设计下限截止频率  $f_L = 0.2 \text{ Hz}$ , 上限截止频率  $f_H = 24 \text{ kHz}$  的巴特沃斯带通滤波器。其下限截止频率可以将原信号  $\frac{1}{2}V_{DD}$  基准直流分量滤除, 最大化利用 A/D 转换电路的采集位宽。

A/D 转换电路选择位宽为 16 bit, 采样率为 2.5 Msps 的 LTC2389 芯片设计, 考虑到高速采样环境下可能出现的共模噪声对采集的影响, 芯片设计为全差分模式将加速度信号输入到 FPGA 控制器。

## 2.2 FPGA 控制器

整个系统都以 FPGA 为核心的控制处理器进行, 为了快速执行系统功能和处理数据, 采用 XILINX 公司的 XC6SLX9-2TQG144C 芯片设计。系统在最高采样率时获取到大量数据, 为了能够及时处理这些数据, 使用 CMT 时钟管理单元的 IP 核实现系统处理时钟倍频, 从而实现大数据量下的及时处理功能。FPGA 控制处理器与系统其它各个部分连接, 所以设计的通信功能有与 A/D 转换芯片的 16 位并行数据线, 与六轴姿态传感器的 IIC 通信协议, 与数据存储器的 ONFI 通信协议, 与数据通信模块的 SPI 和 UART 双协议。

## 2.3 数据存储单元设计

为了将采集到的传感器数据存储起来, 同时能够做到掉电不丢失和数据回收, 数据存储单元设计采用镁光公司的大容量 NAND FLASH 芯片 MT29F1G16AAD。传感器数据获取速率为 2.5 Msps, 一般的炮弹弹丸在膛内运动时长是几毫秒到几十毫秒, 本系统试验在实验室环境中采用模拟击发的方式进行, 根据模拟弹丸在内弹道运动的时间长度计算单通道数据存储深度为 312 500 byte, 即 125 ms 的测量时长, 因此设计每 5 个存储块为一个单元, 其余未用到的块作为备用。

## 2.4 数据通信模块

数据通信模块用于实现系统和制导炮弹处理器的指令通信和数据上传。由于通信指令与数据相比简短且量少, 因此将这两个功能分别实现, 以减少系统资源消耗。所设

计的通信模块包括网口通信和串口通信:

1) 网口通信选用 W5300 芯片设计, 实现 100 M 以太网控制功能、MAC 和 TCP/IP 协议栈功能, 80 Mb/s 的最高通信速率, 满足数据存储单元中的数据和终端的实时大吞吐量快速上传, 节省数据读取时间, 为了增大计算机的访问冗余开发支持 8 个端口的外部访问功能。

2) 串口通信应用 CP2102 芯片设计, 实现与外部指令的交互功能, 将简短, 小数据量指令以高速低比特流的形式在制导处理器和本系统中传输, 可以不占用额外的通信带宽。

## 2.5 电源管理系统

本系统需要不同电压并且需要严格控制上电时序, 用 EA3059 芯片设计电源管理系统, EA3059 是一款 4 通道电源管理芯片, 具有多路电源输出功能, 系统供电使用 7.4 V 锂电池提供, 使其分别转化输出 1.2 V 的 FPGA 内核电压, 3.3 V 的 FPGA 引脚输入输出电压, 1.8 V 的六轴传感器供电电压, 5 V 的加速度传感器、信号调理模块、数据存储单元和数据通信模块供电电压。在设计时考虑到电源可能引入噪声, 故在电源输出端放置钽电容和陶瓷电容分别滤除电源上的高频干扰和低频干扰, 从而有效地降低电源噪声, 提升电源系统稳定性。

## 3 片上程序设计

### 3.1 程序功能

系统上电之后对各个部分初始化。弹丸击发时制导炮弹处理器将外部指令通过串口发送给本系统, 系统执行后续的不同功能程序。对于错误指令, 系统通过串口向制导炮弹处理器发送指令错误反馈。

膛内运动状态判断功能的实现利用姿态传感器原始数据经过四元数算法计算判断, 如果符合式 (1) 则表明着弹丸挤进膛壁, 从而实现挤进开始计时, FPGA 控制器根据 ADC 芯片设计的采样间隔计时。姿态传感器原始数据经过四元数算法再次满足式 (2) 的条件时, 表明弹丸出膛, 停止计时获得弹丸运动的时长。

根据算法原理特点四元数姿态解算过程可设计为顺序执行, 用 Kalman 算法对加速度信号中的线性高斯分布特性噪声滤波处理, 设计片上 Kalman 算法实现这个功能。数据管理功能主要实现运动参数的存储, 因此需要对数据存储单元擦除, 读取和写入。

### 3.2 数据存储控制

数据操作按照芯片的命令码完成, 主要实现数据擦除、数据读和数据写的功能。数据在被写入到存储器之前, 需要对存储器里的内容擦除, 擦除过程实现坏块识别, 数据写入时避开坏块, 根据 ECC 校验流程自行校验。数据基本操作的流程如图 5 所示。

### 3.3 片上 Kalman 滤波算法设计

Kalman 滤波原理含有多个过程, 为了使 Kalman 滤波算法在 FPGA 上实现, 利用 FPGA 的并行计算能力压缩运

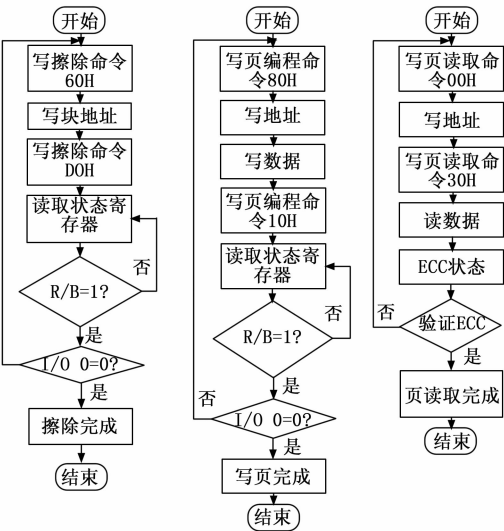


图 5 数据存储控制流程图

算流程, 提高程序实现功能的速度, 将式和 (13) 合为三个程序模块实现加速度数据 Kalman 滤波, 模块一和二产生的当前输出结果用于模块三输出结果的下次更新输入。Kalman 算法程序结构如图 6 所示。

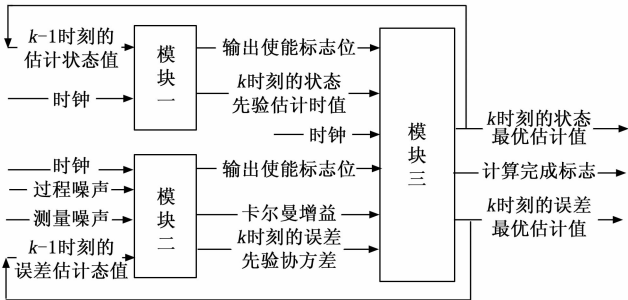


图 6 Kalman 滤波算程序结构图

软件架构采用三模块设计, 应用 Verilog HDL 硬件描述语言, 依据算法流程特性设计各个模块代码。模块一的功能是输入上一时刻的系统状态估计值, 运算得到当前  $k$  时刻的状态先验估计值  $X(k)$ , 并将输出值传送给模块三。模块二的功能是输入上一时刻误差的估计值以及过程噪声  $Q$ 、测量噪声  $R$ , 运算得到当前  $k$  时刻的误差先验协方差  $P(k+1|k)$  以及 Kalman 增益  $K(k+1)$ , 并将输出值发送给模块三。模块三分别输入模块一当前  $k$  时刻的状态先验估计值  $X(k)$  以及模块二当前  $k$  时刻的误差先验协方差  $P(k+1|k)$  与 Kalman 增益  $K(k+1)$ , 最终计算得到当前  $k$  时刻的滤波信号输出  $\hat{X}(k+1|k+1)$  和误差的最优估计值  $P(k+1|k+1)$ 。

3.4 片上四元数算法设计

片上四元数算法实现过程如图 7 所示, 单次获得姿态数据经过 Kalman 滤波后进行重力加速度归一化计算, 实现初始坐标参考系设定; 提取重力在各个轴向的分量, 求出姿态误差后对误差积分, 从而实现对迭代产生误差的互补

滤波; 求解四元数微分方程后对四元数归一化计算, 根据四元数计算欧拉角输出弹丸姿态角数据。

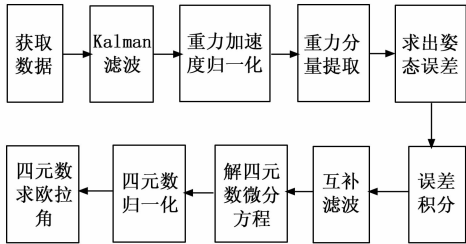


图 7 片上四元数算法实现过程图

4 试验验证

4.1 试验步骤和方法

试验采用长度为 3.451 m 的身管局部, 将质量块从一定高度, 以自由落体的方式产生势能从而带动测试系统装置运动, 模拟弹丸被击发的过程。在本模拟实验中为了更精确地获得弹丸姿态和运动状态判别, 使质量块从不同高度下落以满足弹丸测试装置获得不同的能量进行多次试验。在出膛口设置了两对间隔为 5 cm 的激光对管以区截靶的方式测试出膛速率。测试完毕后, 将系统中存储的读的数据上传到本地计算机并绘制可视图像, 将每次出膛速率与激光式区间截靶得到的速率对比, 将每次出膛位移与身管长度对比, 对弹丸姿态变化、速度变化和位移变化进行结果说明和分析。试验说明如图 8 所示, 试现场如图 9 所示。

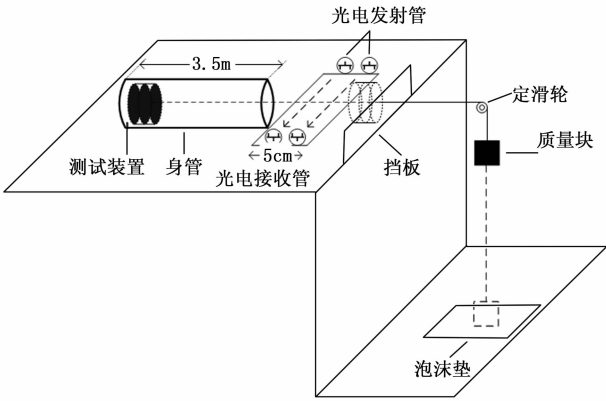


图 8 试验说明示意图

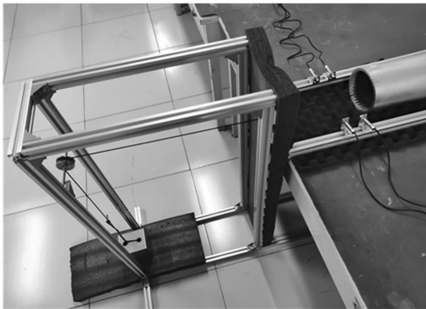


图 9 试验过程现场图

4.2 运动姿态测量结果

弹丸在膛内运动时的姿态角变化试验结果如图 10 所示, 测量结果显示弹丸的姿态角变化不大, 是因为模拟弹丸的击发过程试验采用的身管为缠度较小的等齐膛线, 所以测量结果符合实际。结果显示弹丸在膛内的整个运动过程中, 俯仰角在  $84^{\circ}$  上下波动, 偏航角基本在  $0^{\circ}$  上下变化, 翻滚角在  $112^{\circ}$  上下变化, 相比俯仰角和偏航角, 翻滚角变化范围较大。将弹丸的姿态变化导入三维姿态变化软件按照等时间抽取展示如曲线下方, 直观显示三维弹丸模型运动姿态程振摆式运动。

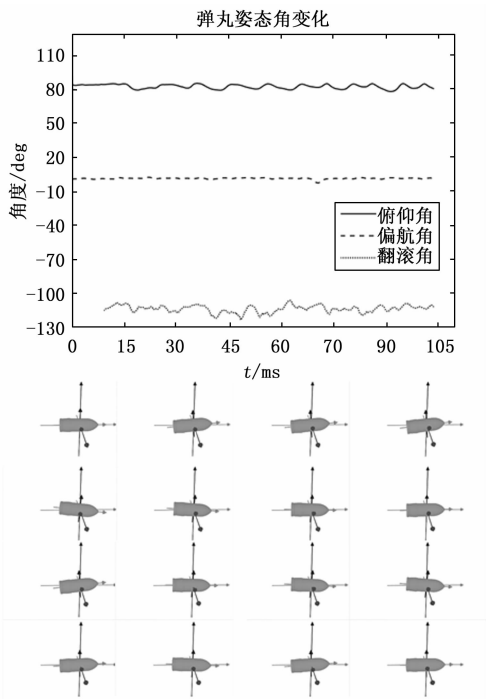


图 10 弹丸姿态变化图

姿态传感器测量到的加速度变化试验结果如图 11 所示, 可以看出弹丸在开始运动之前保持稳定, 整个弹体受地球重力加速度, 大小约  $1\text{ g}$ , 其  $y$  轴基本与重力方向同向,  $x$  轴、 $z$  轴由于与  $y$  轴正交, 获得的重力加速度基本为 0。弹丸开始运动时判定为弹丸挤进, 记弹丸开始运动的时刻为 0 时刻, 判定依据为弹丸  $z$  轴加速度突变增大,  $x$  轴、 $y$  轴由于  $z$  轴受到大加速度, 分量变小趋近于 0; 在  $0\sim 103.74\text{ ms}$  内, 弹丸在膛内运动, 判定依据为弹丸基本保持  $z$  轴满量程输出状态; 在  $103.74\text{ ms}$  时, 姿态加速度变化基本恢复到弹丸开始运动之前, 合加速度约等于重力加速度, 判定为弹丸出膛, 整个过程得到弹丸在膛内运动时间  $103.74\text{ ms}$ 。

4.3 运动速度测量结果

试验过程中弹丸出膛时经过光电对管的信号试验结果如图 12 所示, 结果显示弹丸通过两个光电对管的时间间隔为  $10.86\text{ ms}$ 。根据两对光电门间隔为  $5\text{ cm}$  计算出弹丸出膛速率约为  $4.604\text{ m/s}$ 。

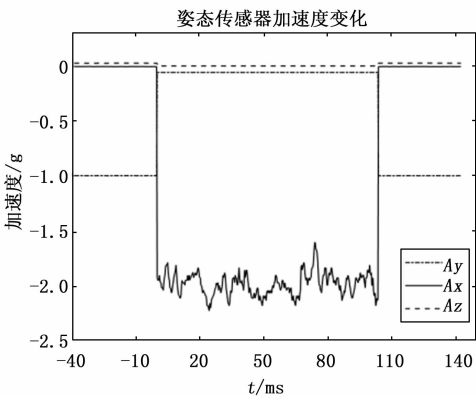


图 11 姿态加速度变化图

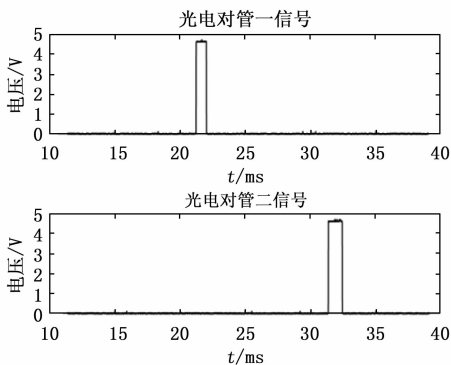


图 12 光电对管测时信号图

弹丸在身管内运动时的加速度随时间的变化试验结果如图 13 所示, 可以看到原始带有噪声的采集信号经过 Kalman 滤波后变得平滑。其中弹丸  $x$  轴加速度在弹丸开始运动后急剧增大,  $y$  轴  $z$  轴数据有波动但不大。对各轴的加速度片上积分得到速度和位移随时间变化曲线。由计算结果得到弹丸在  $x$  轴向运动了  $3.394\text{ m}$ , 出膛速率为  $4.469\text{ m/s}$ 。根据  $y$  轴  $z$  轴的结果显示弹丸在径向发生了相对振动运动,  $y$  轴累计位移在  $5\text{ cm}$  内, 振动速度在  $0.75\text{ m/s}$  内,  $z$  轴累计位移在  $2.5\text{ cm}$  内, 振动速度在  $0.75\text{ m/s}$  内。

表 1 为五次试验结果对比, 试验结果表明本系统测量得到的出膛速率与光电门式测量速率最大相对误差分别为  $2.93\%$ , 内弹道运动路程和身管长度对比最大相对误差为  $1.85\%$ 。

表 1 五次试验结果对比

试验 编号	本系统			光电门		速率 误差 /%	身管 长误 差 /%
	测量 时长 /ms	出膛 速率 /(m/s)	运动 路程 /m	时间 间隔 /ms	平均 速率 /(m/s)		
1	103.74	4.469	3.394	10.86	4.604	2.93	1.65
2	103.58	4.460	3.387	10.92	4.579	2.59	1.85
3	103.61	4.462	3.389	10.89	4.591	2.82	1.79
4	103.87	4.473	3.402	10.88	4.596	2.67	1.42
5	103.76	4.470	3.399	10.88	4.596	2.74	1.51

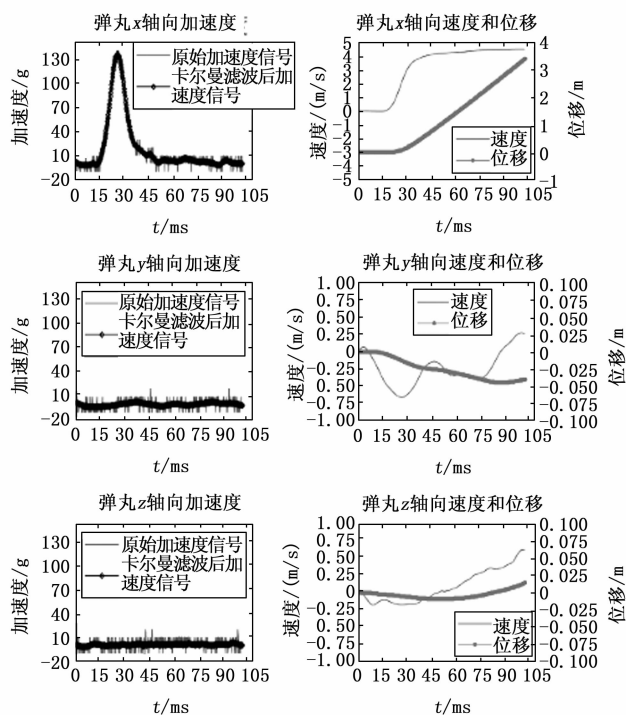


图 13 弹丸加速度、速度、位移变化图

## 5 结束语

本文设计了一种基于 MEMS 加速度传感器和六轴姿态传感器的膛内惯性测速系统, 实现了 FPGA 片上 Kalman 滤波算法和四元数姿态算法处理原始信号, 得到内弹道过程的运动参数变化。模拟试验表明, 速率和位移相对误差分别小于 2.93% 和 1.85%。与现有的测量方法相比, 本系统可实现弹丸内弹道全过程运动参数的获取, 可把运动数据实时提供给制导炮弹处理器, 具有准备过程简单, 空间适应能力强的特点。

## 参考文献:

- [1] 张卓, 矫庆丰, 盖敏慧, 等. 火炮信息化发展现状及关键技术分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39 (2): 91-94.
- [2] 周彦煌, 徐坚, 彭志国. 实时初速概念及内弹道学面临的问题 [J]. 火炮发射与控制学报, 2007 (2): 1-5.
- [3] 许耀峰, 单春来, 刘朋科, 等. 火炮身管寿终机理及寿命预测方法研究综述 [J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41 (3): 89-94, 101.
- [4] 刘国庆, 徐诚. 弹药参数及误差对弹头膛内运动的影响研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2017, 38 (1): 1-6.
- [5] 潘学文. 用铜柱法同时测弹丸运动最大加速度和弹底最大压力的方案 [J]. 兵工学报, 1992 (3): 85-87.
- [6] 沈静华, 裴东兴, 张瑜. 基于弹底压力的炮口速度解算方法 [J]. 探测与控制学报, 2017, 39 (5): 81-83, 90.
- [7] 武江鹏, 宋萍, 郝创博, 等. 带弹序的弹幕武器靶密集度测试 [J]. 光学精密工程, 2016, 24 (3): 600-608.
- [8] 段中兴, 杨琪凡, 李进, 等. 用于轻气炮弹速测量的新型高信噪比激光测速系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (5): 154-160.
- [9] 宋玉贵, 王永, 辛彬, 等. 一种测速用差分线圈传感器及其性能研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (12): 95-102.
- [10] 张龙飞, 倪晋平, 陈丁. 天幕靶灵敏度自适应控制技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 76-80.
- [11] 焦志刚, 杜宁, 范龙刚, 等. 弹丸脱靶量及速度测量的高速摄影试验 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42 (11): 191-194.
- [12] 汤雪志, 王志军, 尹建平, 等. 弹丸速度测量的高速摄影试验研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38 (12): 167-170.
- [13] 赵奇峰, 李进, 李运良, 等. 基于高速摄影图像的轻气炮弹速测量研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 132-136.
- [14] DECKER R J, KOELSCH M N, YAKIMENKO O A. An automated method for computer vision analysis of cannon-launched projectile video [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2014, 42 (5): 1248-1256.
- [15] 张建宏, 武锦辉, 刘吉, 等. 基于 FPGA 的多普勒雷达测速系统 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (12): 72-75.
- [16] 谭争光, 姚新涛, 李海蓉. 炮口测速装置测速精度影响因素分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41 (4): 59-62.
- [17] 张建宏, 武锦辉, 王高, 等. 多普勒雷达弹丸测速信号的速度重建方法 [J]. 中国测试, 2020, 46 (4): 31-35.
- [18] 马玲, 蔡征宇, 程风雷, 等. 毫米波测速雷达的测速原理 [J]. 弹道学报, 2003 (4): 87-91.
- [19] 张新磊, 卜雄洙, 赵伟钦, 等. 弹载加速度采集存储系统设计 [J]. 仪表技术, 2022 (4): 7-10, 16.
- [20] 陈宏亮, 马少杰, 张锦明. 弹载高冲击三维加速度存储测试仪 [J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39 (2): 41-45.
- [21] PADHY S, PANIGRAHI S. Measuring projectile velocity using shock wave pressure sensors [J]. Defence Science Journal, 2014, 64 (6): 499.
- [22] 余尚江, 杨吉祥, 陈显. 动高压测试技术研究综述 [J]. 防护工程, 2011 (4): 65-72.
- [23] 易春林, 赵传荣, 周岚, 等. 区截测速系统校准及测量不确定度的评定方法 [J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35 (5): 181-183.
- [24] 刘颖茜, 姚小明, 李碧波. 高速摄像在某强冲击试验中的试验弹速应用研究 [J/OL]. 机械科学与技术: 1-7 [2022-12-19]. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20220261.
- [25] 谭争光, 姚新涛, 李海蓉. 炮口测速装置测速精度影响因素分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41 (4): 59-62.
- [26] LIENNARD M, CHEVALIER O, LANGLET A, et al. An analysis of the accelerations of a projectile in a gun tube by direct measurements and telemetry of the data [J]. Mechanics & Industry, 2018, 19 (4): 406.