

doi: 10.7690/bgzd.2023.05.007

一种航炮运动参数采集系统

袁志龙, 管红根, 王茂森

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为获取某航炮供弹系统的运动学参数, 设计一款基于现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 和 FLASH 的运动感知系统。以 FPGA 为主控芯片, 控制多路 A/D 采集模块实现对三轴加速度传感器的实时数据采集, 采集数据写入 FLASH 存储单元; 实验结束后回收采集系统, 通过上位机软件对 FLASH 中数据进行回读, 并进行采集系统标定实验, 验证系统误差小于 3%。射击试验结果表明: 该系统能够完整地记录航炮运动参数, 满足可靠性和完整性的要求。

关键词: 运动学参数; 航炮; FPGA; FLASH

中图分类号: TJ392 **文献标志码:** A

Aircraft Gun Motion Parameter Acquisition System

Yuan Zhilong, Guan Honggen, Wang Maosen

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to obtain the kinematics parameters of the certain type aircraft gun feeding system, a motion perception system based on field programmable gate array (FPGA) and FLASH is designed. FPGA is used as the main control chip to control the multi-channel A/D acquisition module to realize the real-time data acquisition of the three-axis acceleration sensor, and the acquired data is written into the FLASH storage unit; after the experiment, the acquisition system is recovered, and the data in FLASH is read back by the host computer software, and then the acquisition system calibration experiment is carried out to verify that the system error is less than 3%. The firing test results show that the system can completely record the motion parameters of the aircraft gun and meet the requirements of reliability and integrity.

Keywords: kinematics parameter; aircraft gun; FPGA; FLASH

0 引言

近年来, 空空作战方式已经由近距离格斗发展到中距、远距拦截。在空战中, 由于各种电子干扰措施的存在, 使得中远距导弹攻击的机会和命中率受到很大影响, 而航炮具有射击精度高、不受外界干扰和使用灵活等特点, 目前仍然是战斗机近距离格斗的主战武器之一^[1]。

航炮供弹系统是高速且复杂的机电一体化系统, 航炮射击时其供弹系统可能会出现卡滞、停射等危险现象^[2]。为研究这种现象, 分析航炮在供弹系统内运动特性具有重要的意义。通过采集航炮在供弹系统内的加速度数据进而分析其运动特性, 提出基于现场可编程门阵列 (FPGA) 和 NAND FLASH 的运动采集方案^[3]。为实现对航炮运动数据的测量, 采用 FPGA 实现, FPGA 具有很强的自定义模块和并行处理能力, 能实现只采用硬件的方式采集大量数据^[4]。与传统的存储方式相比, NAND FLASH 具有低功耗、读写速度快、体积小等优点,

广泛应用于航天、航空、数码产品等领域。采用 FPGA 作为系统的控制核心, 采用 AD7680 采集模拟信号, 存储到 FLASH 中, 在 FLASH 中设计断电保护模块, 保证数据安全性, 最后使用 USB2.0 将数据传入上位机处理, 实现了仅用硬件的方式采集和传输数据。通过实验测试证明了系统的可靠性和安全性^[5]。

1 系统方案设计

1.1 系统总体结构设计

航炮自动机和供输弹机构是通过复杂的运动传递来完成各种规定的供输弹、推弹等动作, 并且在运动过程中需要承受较大冲击。为能够在航炮供输弹机构中完成运动参数测量实验, 基于 FPGA 的运动参数测量模块则需要嵌入与同口径弹外形尺寸相同的模拟弹中, 跟随模拟弹在供输弹机构中运动才能完成测试实验。同时, 为了避免运动测量记录模块被高速冲击而损坏, 将测量电路设计成内外壳

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-02-18

作者简介: 袁志龙(1997—), 男, 江西人, 硕士, 从事智能检测与控制技术研究。E-mail: 957548425@qq.com。

体，在壳体中填入环氧树脂进行整体灌封减震设计，可以起到加压保温作用，保证采集设备能够在高冲击下内部电路不损坏，可以完整地记录所需数据，在进行数据回收时可以正常使用上位机进行数据处理^[6-7]。

数据采集装置的完整内部结构如图 1 所示，测量装置实物如图 2 所示。

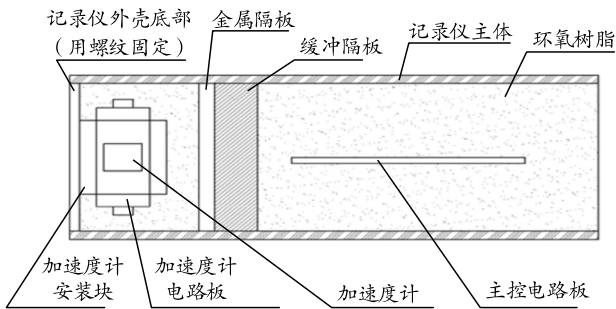


图 1 弹载测试系统结构



图 2 测量装置实物

1.2 系统的总体原理设计

数据采集装置主要分为 4 部分：电源控制模

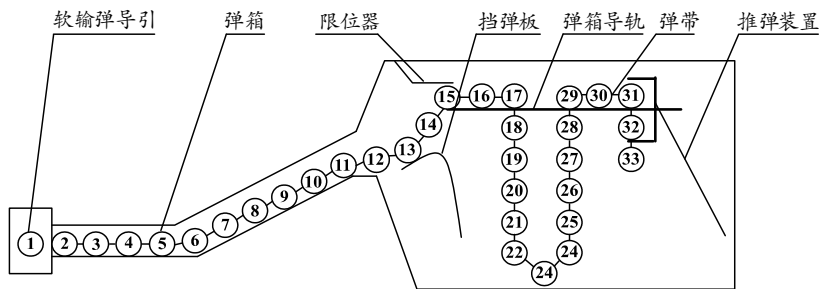


图 4 工作原理

2 硬件模块设计

2.1 电源管理模块设计

电源的作用是给整个机械运动测量装置各个功能模块供电。由于本运动测量装置的测量阶段是一个独立单元，也就是说只能使用内部电池来供电。加速度传感器和 A/D 的工作电压为 5 V，FLASH 和配置芯片的工作电压为 3.3 和 1.2 V；因此，需要相关的电压转换模块来给运动测量装置相关功能模块提供合适的电压。综合考虑下选用 SPX3819M5

块、传感器模块、FPGA 控制模块和 FLASH 存储控制模块^[8]。电源控制模块采用 7.4 V 电池供电方式；传感器模块包含传感器选型和信号调理电路设计；FPGA 控制模块主要功能是对各功能模块的配置和控制，同时完成数据存储和与上位机的通信。FPGA 控制模块接收到有效的采集信号，数据采集模块开始采集数据。采集好的数据通过配置好的二级 FIFO 存储到 FLASH 中，等到采集完毕，上位机通过 USB 进行数据回读，最后进行数据分析。数据采集仪的整体系统原理如图 3 所示。

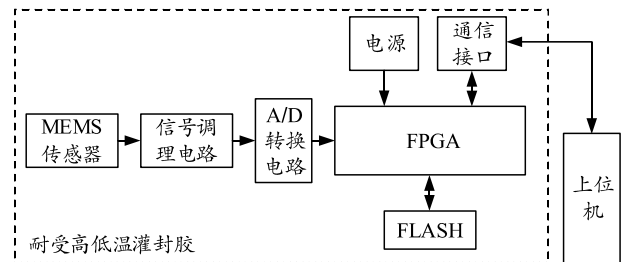
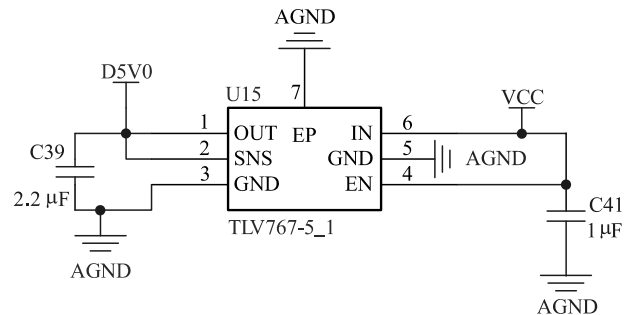


图 3 数据采集仪的整体系统原理

采集系统主要是研究航炮供输弹系统，航炮供输弹系统原理如图 4 所示。系统开始工作后由 1 号弹击发后带动弹带向着 X 轴方向运动，其余弹逐渐进膛。15 号和 17 号弹依次经过限位器和导轨，使 18 号至 22 号弹在重力作用下掉至弹箱左下部，同时推弹装置推动 32 号和 33 号弹向 X 轴方向运动，直到 29 号弹到达限位器附近，随后推弹装置复位。随着炮弹不断地击发重复上述运动。

系列稳压芯片来产生 5.0、3.3 和 1.2 V 3 种电压。具体的电路如图 5 所示。



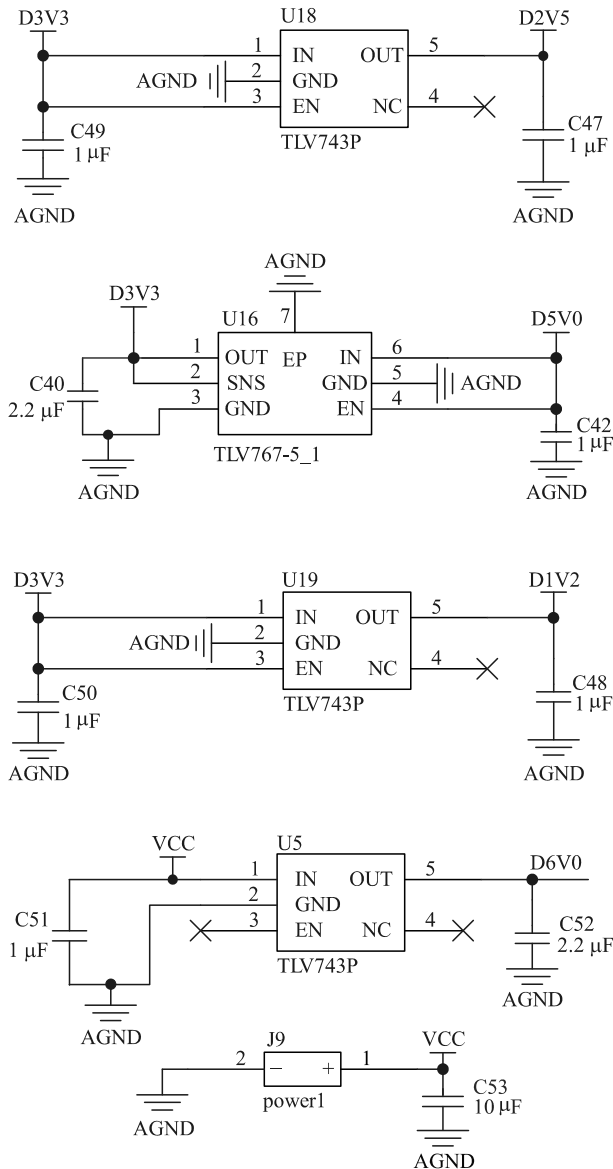


图 5 FPGA 电源管理模块

2.2 传感器模块设计

综合收集到的仿真数据和设计人员经验可知：航炮自动机加速度幅值不超过 $1\ 500\ \text{m/s}^2$ ，其余部分均在 $500\ \text{m/s}^2$ 范围内。结合动力学仿真结果、传感器成本以及测量精度等多方面因素考虑最终选定了 ADXL1004 加速度传感器，该传感器具有体积小、质量轻、谐振频率高、高线性度以及良好的频响特性等优点。

为使加速度计具有良好的输出特性，减少干扰信号对测量结果的影响，采取的措施是在加速度计的电源端口附近布置高低阈值错开的去耦电容，以达到消除电源噪声的目的。同时选用 RC 低通滤波将传感器带宽限制在 $10\ \text{kHz}$ ，具体电路如图 6 所示。

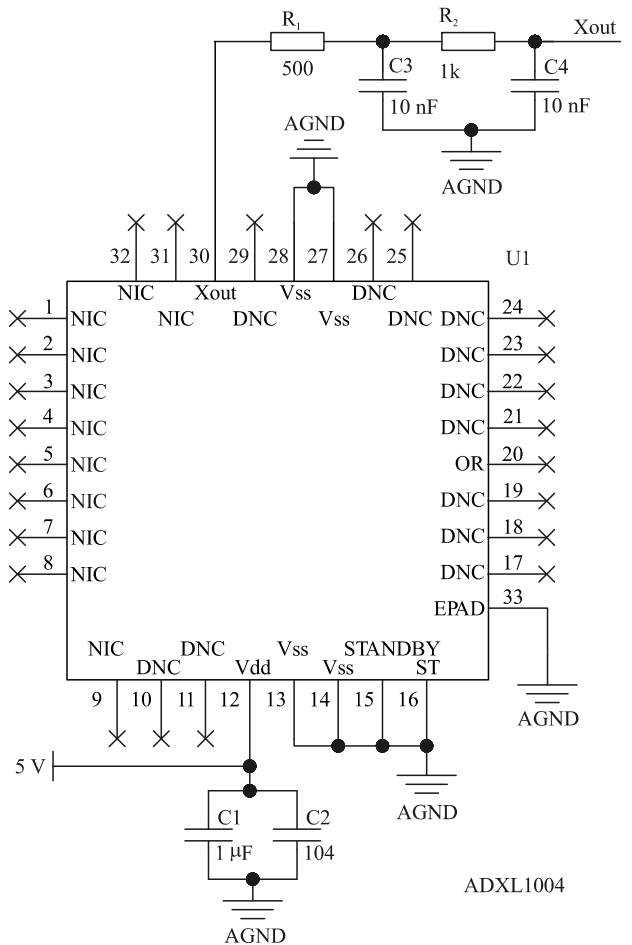


图 6 加速度计外围电路

2.3 存储模块设计

设计存储模块，首先要确定所用存储芯片的大小，由奈奎斯特定理知采样频率 f_s 必须大于被测信号最高频率 f_{max} 的 2 倍才能避免失真，一般取 $f_s = (8 \sim 10)f_{\text{max}}$ 。依据所选取的加速度传感器经过低通滤波后的信号最高频率为 $10\ \text{kHz}$ ，所以选择 $100\ \text{ksps}$ 采样速率、 $16\ \text{bits}$ 、单通道、电压 $5\ \text{V}$ 的 A/D 芯片符合条件。

本系统用来记录航炮整个发射过程的加速度变化，考虑到安装和设备拆卸需要的时间，设置的采样时间为 $30\ \text{min}$ 。同时 FLASH 数据位宽与 A/D 应当匹配，所以本文中存储芯片的容量大小为：

$$100\ \text{kHz} * 3 * 30 * 60 * 16 / 8\ \text{Byte} = 1\ 080\ \text{MB} \quad (1)$$

考虑到芯片坏块以及存储数据校验位等因素，存储芯片容量应该为 $2\ \text{GB}$ 及以上。

3 软件设计

本系统所采用的航炮运动参数采集系统软件模块设计主要包含 3 方面：1) 采集模块软件设计，基于选用的 ADC 芯片将整个数据转换周期设置为 25

个时钟周期，最先 4 个周期出来先导数据 0，其次便是 16 个周期的有效数据，接着 4 个周期是结尾数据 0，最后一个周期用于保证 ADC 的建立时间、保持时间和布局延时的时间余量。依据数据转换周期完成传感器数据采集软件设计。2) 存储模块软件设计，本系统采用 NAND FLASH 进行数据存储，它的应用主要是通过对 FLASH 的 I/O 口送入对应的命令、地址以及相应的数据完成的。其软件设计主要分为校验 ID、FLASH 擦除、FLASH 编程以及 FLASH 读取等部分。3) 控制模块软件设计，该部分通过 FPGA 内部资源实现。包括 RS232 数据通信模块实现与上位机之间的数据通信，触发同步模块实现系统的触发。

设计完成后确定系统工作流程：设备上电后根据配置程序进行初始化，在控制模块实现上位机与弹载采集系统的双向通信，上位机发送数据采集命令给采集系统，在精确时间统一下数据采集系统开始工作，等待触发信号的到来。一旦接收到触发指令后，采集模块开始接收由 FPGA 控制的 A/D 转换电路发送来的数字信号，存入存储模块当中。当所设置的记录时间结束后，控制模块发出结束信号，采集模块和存储模块停止各自工作，系统进入低功耗休眠状态，等待回收。待系统回收后通过接口电路连接至上位机，待上位机发出读取命令后开始读取 FLASH 存储器中的数据，通过上位机专用软件实现采集数据的相关算法处理及结果显示，然后对存储器做相应的擦除处理，等待下一次再使用。具体的工作流程如图 7 所示。

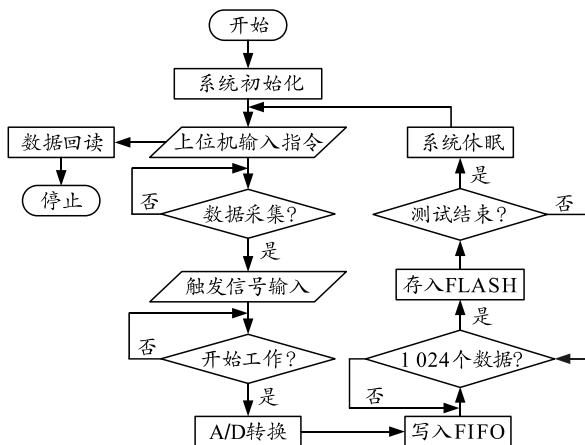


图 7 系统软件工作流程

4 系统测试与结果分析

4.1 测试系统标定

系统先用六位置法^[9]进行传感器标定，但是整

个系统用环氧树脂灌封，环氧树脂和电路板会对系统测量带来一定干扰，为进一步提升系统的可靠性，在振动测试台上进行系统标定。初步假定系统为线性的，则采集系统加速度输出模型为：

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a'_x \\ a'_y \\ a'_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： A_x, A_y, A_z 为系统输出值； K_x, K_y, K_z 为比例系数； a_x, a_y, a_z 为标准加速度值； a'_x, a'_y, a'_z 为零偏。为了求解比例系数将系统安装到具有固定频率和固定振幅的振动台上进行振动测试。振动台的参数设置为：振动台以振动频率 20 Hz、振动赋值 20 g 的参数振动，振动时长为 5 min，加速度采集时长为 10 s，3 个轴向每个轴向 3 次。以 X 轴为例，由于 10 s 的数据点过于密集，将截取其中 1 s 的数据图像进行转换展示，原始数据如图 8 所示。

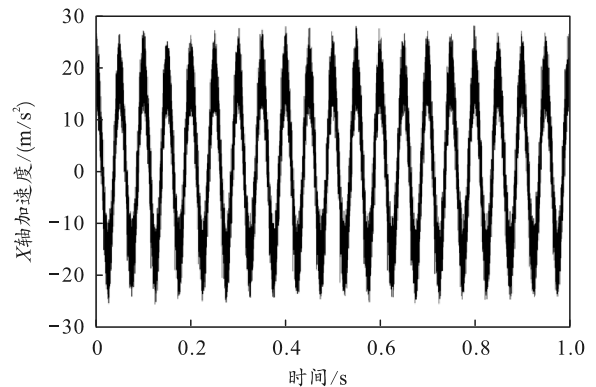


图 8 振动台部分 X 轴数据

将 X 轴的原始数据进行小波阈值去噪后，从处理后的数据中取出若干组，利用最小二乘法拟合，从而得到对应的 X 轴比例系数 K_x 和零偏 a'_x ，X 轴修正后与原始数据对比如图 9 所示。

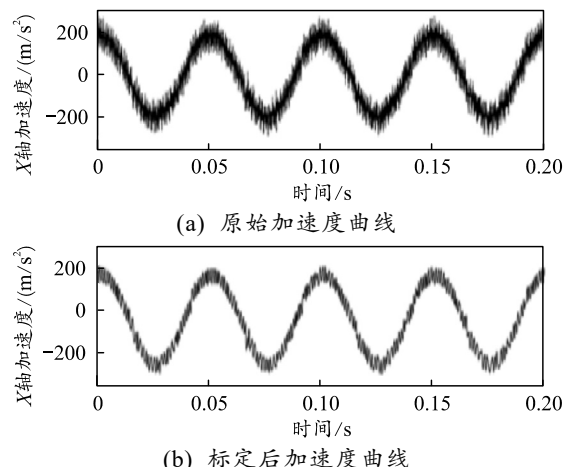


图 9 X 轴原始数据与修正后对比

Y 轴和 Z 轴求解类似。校正后，系统加速度的相对误差为 $(205-200)/200=2.5\%$ ，满足系统要求。

4.2 某型航炮加速度测试试验

将测试设备安装到设计好的模拟弹内，由图 4 的实验原理将弹带尾部第 33 发替换为研制的模拟弹。由于航炮固定在轨道上运动，所以实验时只测

量了 X 轴和 Y 轴的加速度值。试验过程中，设置采样频率为 5 kHz，采样时间为 1 h，一共进行了 3 次实验。为消除火炮在击发过程中存在的高频干扰以及获得清晰的加速度波形变化，对数据进行低通滤波分析。实验原始数据和滤波后数据如图 10 所示。

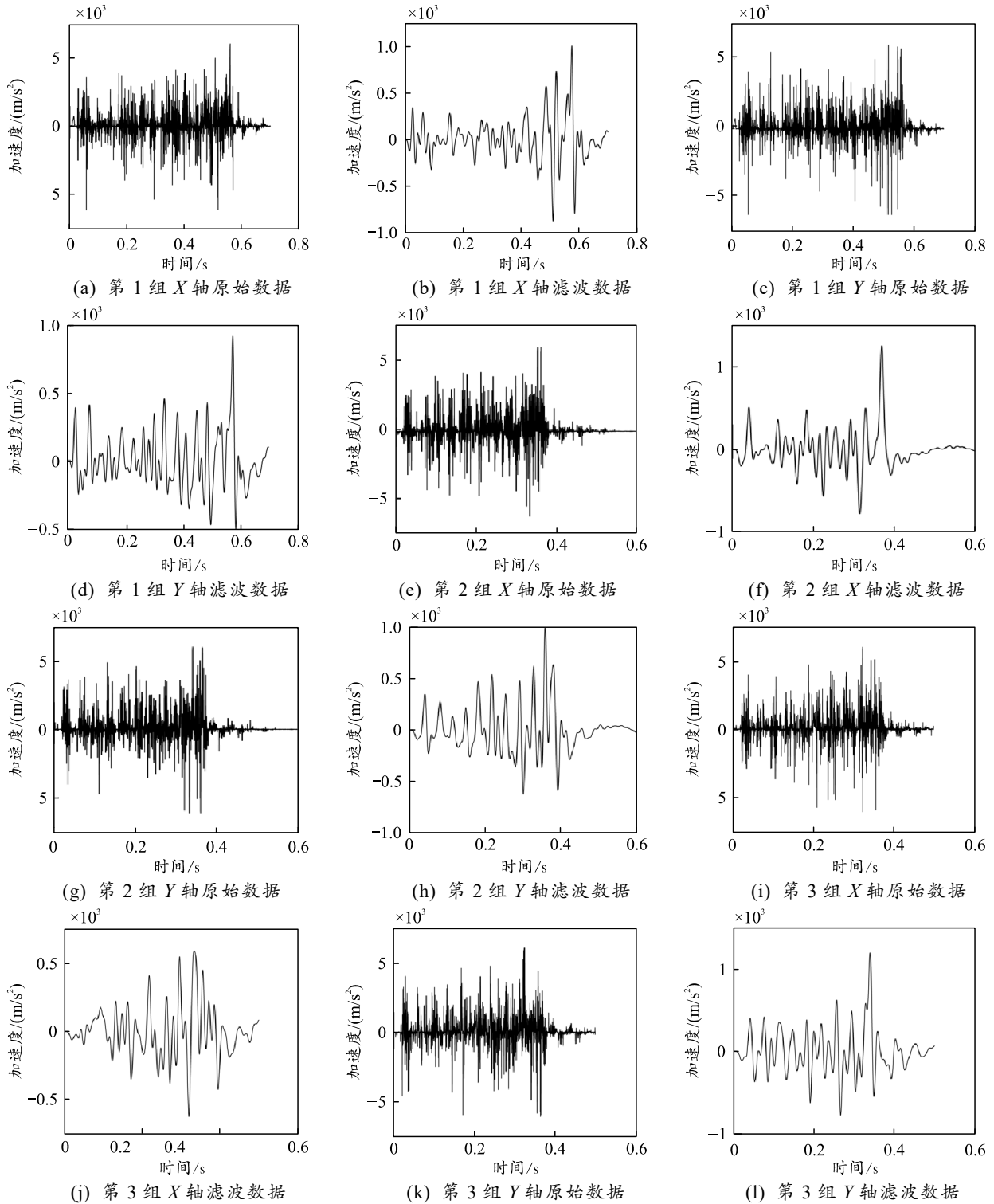


图 10 3 次实验 X 和 Y 轴数据

通过分析 3 组试验数据可知, 加速度峰值在航炮击发时为 $1\ 100\ \text{m/s}^2$ 左右, 紧接着是由于发射后坐力带来的负向加速度, 峰值在 $-800\ \text{m/s}^2$ 上下波动。加速度的波动范围与航炮设计值相同, 可以证明试验成功。同时每次试验频率与射击频率相吻合, 可以验证测试系统的正确性。整体加速度测试数据与火炮发射的经验数据以及软件仿真数据吻合, 印证了测试系统具有较高的精度。

5 结论

1) 基于 FPGA 和 FLASH 设计一款运动采集装置, 通过嵌入到弹体中来感知航炮供弹过程中加速度的变化, 并进行系统校正, 验证了系统的测量误差小于 3%。

2) 通过对某航炮的运动分析, 综合相关仿真数据和设计人员经验, 确定了航炮运动检测的实验方案, 并在靶场进行了连发射击试验, 试验结果符合设计要求。当通过多次试验, 不断地积累实验数据可为航炮的设计和改进提供重要参考。

3) 该装置目前只能进行数据的采集工作, 没有建立供输弹系统的状态参数监测系统, 这也是后期需进行改进的方向。

(上接第 29 页)

箱盒盘检功能主要用于检查库内箱盒是否都在正确的位置以及货架的倾斜程度。通过视觉系统读取当前箱盒位置的二维码身份信息和坐标数据, 再将结果上报主控管理软件记录结果。

5 结束语

该银行保管箱智能存管控制系统已经在多个银行保管箱设备上得到实施验证, 系统连续运行安全稳定, 故障率低, 可适用于多种场景, 系统可移植性高。相对于传统存储方式而言, 该系统真正实现了人库分离, 客户可在看物间内自助存取物品, 无需在工作人员的陪同下进入金库, 既能减少银行工作人员配置, 又增强了安全性和私密性。

该银行保管箱智能存管控制系统从安全性、可靠性、操作便捷性以及不同场景的扩展性等方面均有不同程度的创新, 涵盖了信息安全、环境私密、

参考文献:

- [1] 史华成. 航炮选用分析[J]. 洪都科技, 2009(3): 8-16.
- [2] 程刚. 高射频自动机及供输弹机构动态特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [3] 朱金瑞, 王代华, 苏尚恩, 等. 存储式弹载数据记录仪存储可靠性技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(1): 159-162.
- [4] 陈健伟, 陈鸿, 王晋祺, 等. 基于 MEMS 传感器的数据采集识别系统设计[J]. 电子器件, 2019, 42(2): 463-468.
- [5] 陆卫东, 黄强, 王茂森, 等. 模拟弹运动参数采集存储系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(7): 89-91, 96.
- [6] 汪守利, 刘海涛, 滕纲, 等. MEMS 惯组抗高 g 值冲击设计方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(3): 404-408.
- [7] SRIKAR V T, SENTURIA S D. The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(3): 206-214.
- [8] 沈阳. 基于 FPGA 的弹载存储测试系统研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [9] 向高林, 路永乐, 刘宇, 等. 基于改进六位置法的一种 MEMS 加速度计标定补偿方案[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(1): 62-67.

智能监控等三重安全保障, 在有信息安全要求以及保密性、私密性要求的智能仓储方面具有应用价值。

参考文献:

- [1] 徐荣波. 银行保管箱业务情况调查[J]. 现代金融 2012(12): 24-25.
- [2] 卢尧, 任晓明, 吴勇志, 等. 智能仓储控制系统的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2017, 38(2): 4.
- [3] 苏诚, 许朋刚, 代志良. 智能仓储系统设计与开发应用[J]. 机械, 2017, 44(10): 7.
- [4] 熊肖磊, 赵炯, 周奇才. 自动化立体仓库管理与控制系统的实现[J]. 制造业自动化, 2002(4): 4-19.
- [5] 中华人民共和国公共安全行业标准—银行保管箱: GA/T501—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [6] 张维君, 索世文, 牛军. PLC 在自动化立体仓库控制系统中的应用[J]. 机械设计与制造, 2004(2): 3.
- [7] 孙飞显. TCP/IP 网络编程技术与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 163-228.