

DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0721-07

基于 MEMS 压阻传感器的低功耗 高过载测试系统设计*

韩 帅^{1,2,3}, 马游春^{1,2}, 秦 丽^{1,2}, 王悦凯^{1,2}, 丁 宁^{1,2}

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 为了检验弹体在高冲击环境下的工作情况, 提出了一种基于压阻传感器的高过载、低功耗的测试系统设计方案。该系统可承受 $2 \times 10^5 g$ 的过载冲击测试, 且具有采样率高、体积小、功耗低的特点。通过打靶实验验证: 在过载测试过程中该系统具有承受高冲击的能力, 并能精确地采集到信号微弱变化, 保证了弹体在飞行中记录数据的准确性。

关键词: 爆炸力学; 低功耗弹测试系统; 高冲击; 压阻式微加速度计

中图分类号: O389; TJ713

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

随着信息时代的不断发展, 由科学技术引领的军事发展格外引人注目, 人工智能渐渐成为当今时代的主题。有人甚至预言“未来将是高技术战场, 谁能在人工智能领域中取胜, 谁就能取得未来战争的主导权”。因此, 各国军事专家开始在武器装备上朝着灵巧、简单、智能的方向发展, 不断推陈出新并在实际中应用, 例如小型无人机、水下小型潜艇等小型武器系统的出现^[1-2]。但随着系统尺寸趋于减小, 受到的限制也越来越大, 而系统功耗、可靠性等问题也就成了大家需要攻克的难题。

为了解决上述问题, 本文中提出一个基于 MEMS 压阻传感器的高过载、低功耗测试系统的研究方案^[3-8], 该系统具有精度高、体积小、功耗低、抗高过载等特点, 在实际应用中可以准确测量弹体运动时的相关参数, 为武器的研制、使用寿命、安全性能等方面研究提供重要科学的依据。

1 系统设计

过载测试系统的总体设计方案如图 1 所示, 主要由以下几部分组成: 压阻传感器、调理电路、数据采集电路、FPGA 控制单元以及存储单元。该系统的工作原理: 压阻传感器把采集的信号转变为电信号, 并以差分形式输出; 经调理电路再把电信号放大到 AD 可采集的范围内 ($0 \sim 2.5 V$); 最后, 由 FPGA 控制 Flash 单元存储采集到的测试数据。另外, 系统使用串口读数装置读取数据, 并通过上位机软件完成数据分析与处理。

为了体现系统低功耗、高过载的性能特点, 接下来将分别对系统使用的传感器与电源管理模块进行详细介绍, 以及对实验数据进行分析说明。

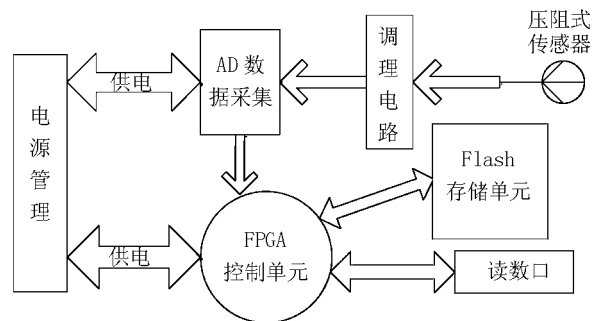


图 1 系统总体设计

Fig. 1 General layout of system design

* 收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(91123036, 61178058)

第一作者: 韩 帅(1987—), 男, 硕士, idyujinxiang@163.com。

1.1 压阻传感器

1.1.1 压阻传感器设计

由于压阻式传感器的制作工艺成熟、信号处理可行性高、数据测试相对简单,所以选用压阻式加速度传感器作为数据采集的前端。其工作原理如图2所示,图中 U_+ 为正向输出电压、 U_- 为反向输出电压、 U_i 为传感器的电压输入、GND为参考地、 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为可变电阻。根据惠斯通原理由4个电阻元件组成电桥,当传感器受到外部作用时,传感器输出的电压会随阻值的变化而变化。由于全桥差动电路构成的传感器的灵敏度是单一电阻变换的4倍,所以在设计时内部采用全桥差动电路。同时,为使4个变化的电阻阻值不相互抵消,设计时还需满足以下要求:相邻阻值变化相反,对邻阻值变化相同,具体公式为:

$$U_{out} = (U_+ - U_-) = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1)$$

令: $R_1 = R + \Delta R_1$, $R_2 = R - \Delta R_2$, $R_3 = R + \Delta R_3$, $R_4 = R - \Delta R_4$, 其中 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 为相应电阻增量,则化简公式(1)得到:

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) \quad (2)$$

式中: U_+ 为正向输出电压; U_- 为反向输出电压; U_{in} 为输入电压; U_{out} 输出电压;

由于 MEMS 工艺制作的压阻式微加速度计具有可靠性好、集成度高的特点,可以很好地完成高过载测试。所以,结合实验室现有 MEMS 工艺技术制作压阻式微加速度计,其结构主要由悬臂梁和质量块构成,如图3所示。当加速度计感知加速度变化时,悬臂梁就会发生形变从而改变梁上的应力分布,所以布置在悬臂梁根部的压敏电阻就会发生变化,压阻式微加速度计就会有电压输出。

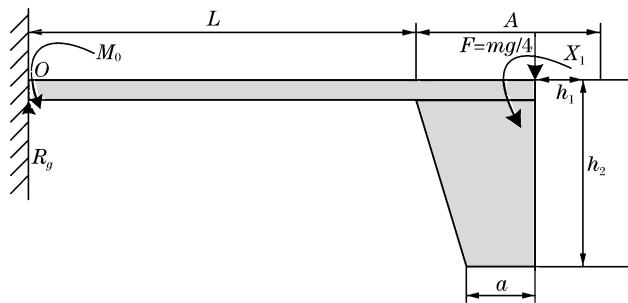


图3 压阻式微加速度计结构受力模型

Fig. 3 Structural force model of piezoresistive micro accelerometer

如图3所示,当系统受到加速度作用时,在悬臂梁上距根部为 X 的点的挠度为:

$$y(x) = -\frac{1}{6} \frac{Fx^2(3L-x)}{EI} + \frac{1}{4} \frac{Fx^2L}{EI} = -\frac{1}{12} \frac{Fx^2(3L-2x)}{EI} \quad (3)$$

在悬臂梁上距根部为 X 的点所受应力为:

$$\sigma(x) = -E \left(\frac{h_1}{2} \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \right) = -\frac{1}{4} \frac{h_1 F(2x-L)}{I} \quad (4)$$

式中: E 为杨氏模量, F 为承受的载荷, $I = \frac{wh_1^3}{12}$ 为梁的转动惯量, W 为梁的宽度, h_1 为梁的厚度, L 为梁的长度。

1.1.2 可靠性模拟

在进行高过载测试实验时传感器的瞬态受力非常大,且微加速度计的悬臂梁上各点受力强度也有所不同。因此,采用应力-强度随机变量模型进行模拟分析。

当微加速度计受到外部冲击时,根据冲击载荷振动方程

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = ma(t) \tag{5}$$

可以推导出加速度计的应力和应变方程,其表达式分别为:

$$y(x,t) = \sum_i [ch\beta_i x - \cos\beta_i x + \delta_i (sh\beta_i x - \sin\beta_i x)] \left[\frac{N\omega}{(\omega^2 - \omega_0^2)\omega_0} \sin\omega_0 t - \frac{N}{\omega^2 - \omega_0^2} \sin\omega t \right] \tag{6}$$

$$\sigma(x,t) = \frac{Eh}{2} \beta_i^2 \sum_i [ch\beta_i x - \cos\beta_i x + \delta_i (sh\beta_i x - \sin\beta_i x)] \left[\frac{N\omega}{(\omega^2 - \omega_0^2)\omega_0} \sin\omega_0 t - \frac{N}{\omega^2 - \omega_0^2} \sin\omega t \right] \tag{7}$$

并可得出以下结论:在脉冲时间的中点(即强迫振动阶段),微加速度计受到冲击的加速度的值达到最大,且微加速度计的悬臂梁所受应力最大,即梁的根部 $X=0$ 处。

为了分析微加速度计在高冲击的恶劣环境下的工作情况,采用 ANSYS 软件对传感器结构进行静态分析,预测加速度计的抗过载能力。在外形尺寸为:质量块边长 $300 \mu\text{m}$,梁长 $300 \mu\text{m}$,梁宽 $230 \mu\text{m}$ 的加速度计上施加 $2 \times 10^5 g$ 的冲击加速度载荷。微加速度计的应力、应变分布云图如图 4 所示。模拟结果显示:在 $2 \times 10^5 g$ 的冲击载荷作用下结构的最大应变为 $0.177 \mu\text{m}$ 、最大应力为 32.8 MPa 。

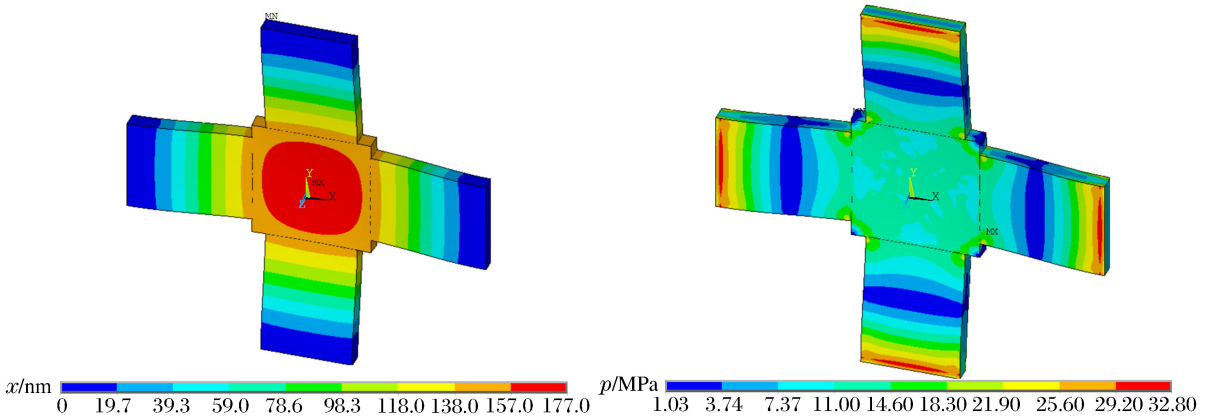


图 4 加速度计应力应变 ANSYS 模拟图

Fig. 4 ANSYS simulation diagram of accelerometer stress and strain

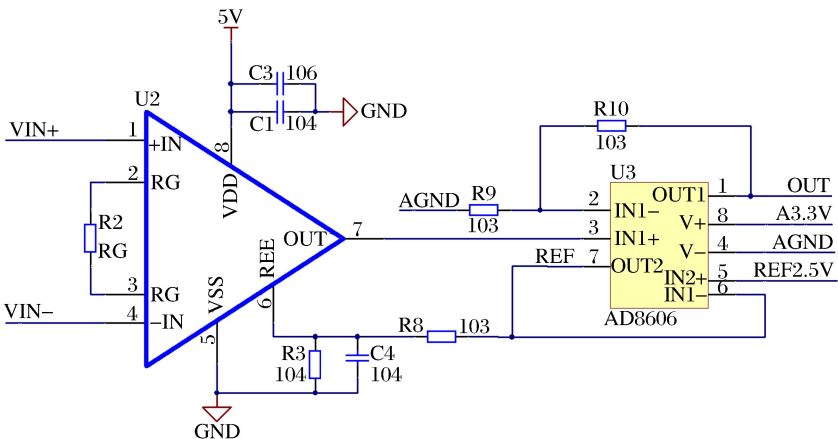


图 5 信号采集模块电路设计图

Fig. 5 Signal acquisition circuit

1.2 采集电路模块

由于传感器输出电压非常微弱,所以在进行 A/D 采集转换前,需要将信号进行放大处理,信号采集模块的电路设计如图 5 所示。系统采用宽电源电压、低噪声、外围电路简单的 AD8226 芯片进行前级精度放大,然后经过 AD8606 运放跟随最终输出给 A/D 芯片。电压放大倍数由下式给出:

$$G = 1 + \frac{49.4K\Omega}{R_G} \quad (8)$$

式中: G 为放大倍数, R_G 为增益电阻阻值。

虽然调理电路可以把电压信号放大,但是有些关键信号仍是毫伏级,若选用低精度 A/D 转换芯片,就不能区分转换误差与信号之间的差别。所以选用高精度 ADC 模数转换芯片进行处理,通过增加芯片寄存器的位数,从而提高 A/D 芯片的分辨率,最终实现提高采样精度目的。A/D 的分辨率计算公式如下:

$$F = \frac{U_{\max}}{2^N} \quad (9)$$

式中: U_{\max} 为 A/D 采集最高电压, N 为 A/D 采集精度, F 为 A/D 的分辨率。

通过上述两种方法的结合,可以提高采样精度,最终实现测量 100g 的加速度信号。

1.3 电源管理模块

为了保证测试数据的完整性,在传统的硬件设计中大多采用电源长期供电的方法,这种方法不仅使系统一直处于工作的状态,而且大大降低了电池的使用寿命、减少了系统的使用次数。同时,由于外形结构的限制,只能选用容量、体积小的锂电池作为系统供电。所以,为了达到降低系统功耗、智能上电的目的,本系统选用了 74HC74 作为 D 触发器控制器、74LX1G08 作为与门控制单元,其工作电路图如图 6 所示。

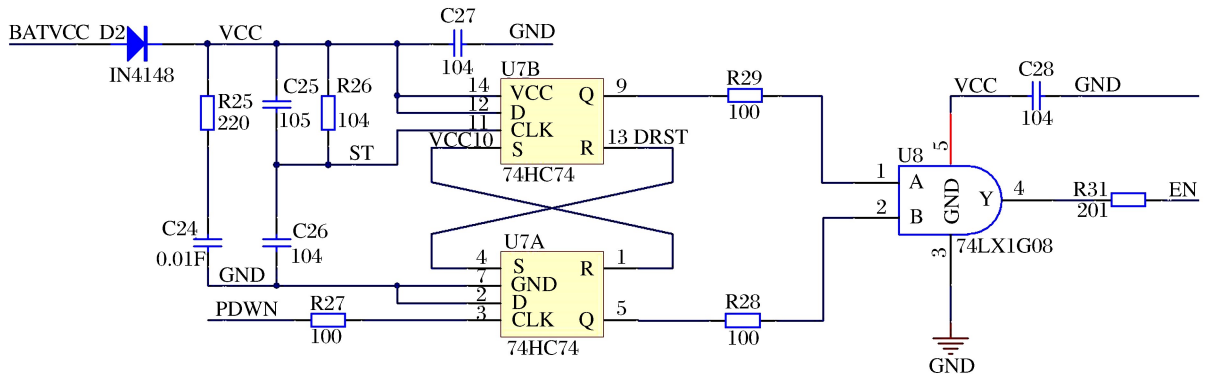


图 6 电源控制电路

Fig. 6 Circuit of power management

系统采用 D 触发器和与门组合的方法,灵活、便捷地实现了电源智能管理,达到降低系统电量损耗的目的,其工作原理如图 7 所示。工作前,先将触发信号线 ST 接地(即弹体),电源信号线 BATVCC 与锂电池正极相连,触发前电平状态如图 7(a)所示:D 触发器的管脚 5 为高电平、9 为低电平,电源使能信号线 EN 输出低电平,此时电源模块不供电;当弹体被射出瞬间外部连线断开,ST 触发时的电平状态如图 7(b)所示:ST 产生一个上升沿,D 触发器的管脚 5 为高电平、9 为高电平,EN 输出高电平,系统开始供电;当系统采集完数据后通过软件触发,FPGA 给出一个短暂的高电平,PDWN 触发时的电平状态如图 7(c)所示:PDWN 产生一个上升沿,D 触发器的管脚 5 为低电平、9 为高电平,EN 输出低电平,系统供电关闭;最后对系统进行复位,此时电平状态如图 7(d)所示,各管脚的电平恢复到初始态,(其中,黄线:ST 信号线,蓝线:PDWN 信号线,紫线:D 触发器 5 脚,绿线:D 触发器 9 脚)。

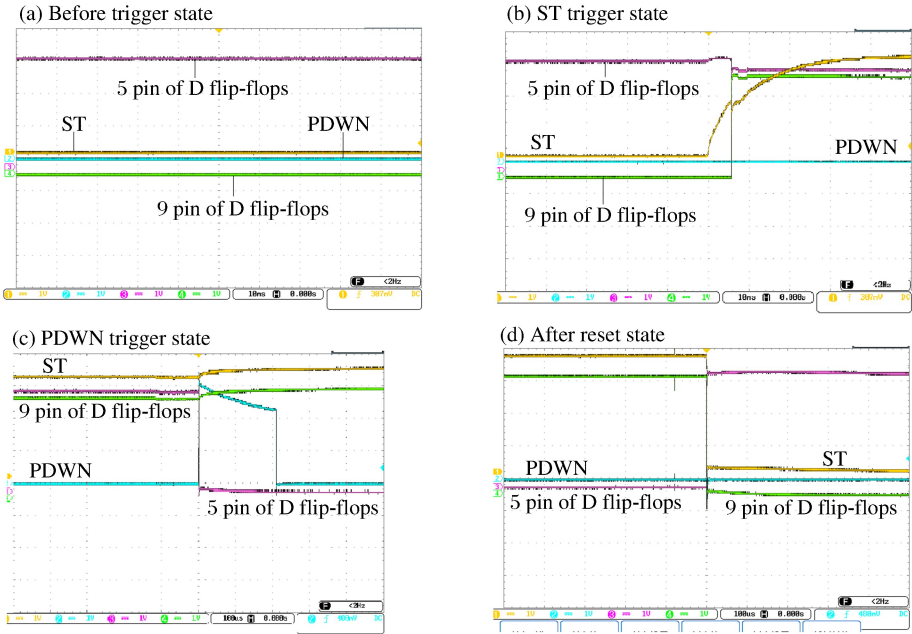


图 7 电源模块工作原理

Fig. 7 Working principle of power-supply module

2 系统工作

由于受到环境和尺寸的影响,所以选择 Actel 公司推出的 AGL030 芯片作为 FPGA^[9] 中心控制单元,该系列 FPGA 采用 Flash 架构,具有上电即运行、结构尺寸小的特点。系统工作原理如图 8 所示,首先,系统完成硬件连接,并进行初始化;当弹体出膛瞬间完成触发上电,系统开始进行数据采集并进行数据存储;其次,在数据采集完之后,由 FPGA 给出一个系统关闭信号结束数据采集。其中,为了避免误触发而采集的错误信号,在 FPGA 程序中写入阈值判断程序,连续完成 3 次有效判断后,方可打开 Flash 存储器进行数据存储。

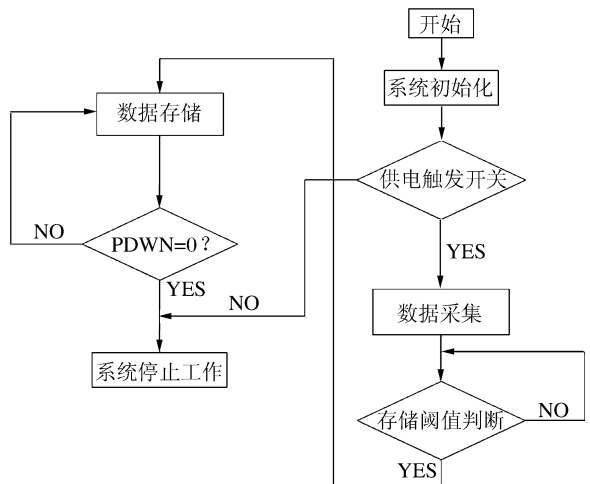


图 8 系统控制流程图

Fig. 8 Flow chart of system control

3 模拟与实践

为检测系统功能是否正常工作,在进行硬件功能调试时使用信号发生器模拟模拟信号。在传感器的输入端加入一个频率为 100 Hz,振幅为 80 mV 的正弦模拟信号,通过对比示波器抓取的输入信号(见图 9(a))与测试系统采集到的信号(见图 9(b)),可知:系统所采集的信号与示波器采集的信号基本一致,本测试系统可以准确地进行实验数据采集。

为了真正检测系统的可靠性,还需对系统进行实弹实验。在靶场测试前的系统实物如图 10 所示,在弹体飞行中为防止硬件电路的损坏,需在安装时进行防护处理。在传感器部分使用环氧树脂进行灌封保护,这样既能保证该部分的刚性,又能对传感器起到固定的作用。在进行过载测试时,使用聚氨酯

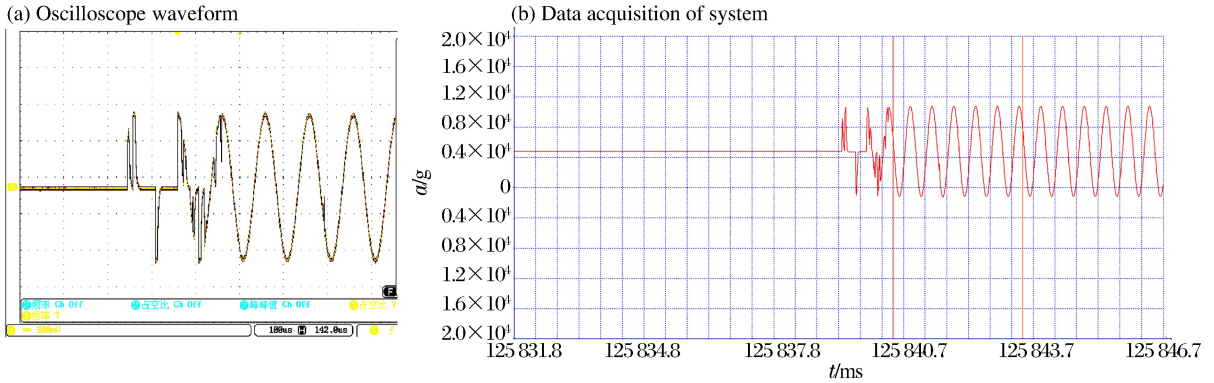


图9 模拟信号数据对比图

Fig. 9 Comparison chart of simulation signal data

或硅胶对采集电路进行保护,这样可以减少冲击力对电路的损害。

在靶场进行实弹实验时,需要过载测试系统加装在弹体后部,并且引出触发线。完成实弹发射后,使用串口读数装置读取实验数据,最后使用 MATLAB 软件绘制原始数据曲线。弹体的出膛过载数据曲线如图 11(a)所示和侵彻过载数据曲线如图 11(b)所示,通过数据曲线我们可以看出:弹体在出膛瞬间主要受到的过载加速度最高可以达 $4 \times 10^3 g$,而受到的外界空气阻力相对较小;弹体在侵彻的 20 ms 过程中受到靶壁的阻力逐渐减弱,最大可以受到 $1.5 \times 10^5 g$ 左右的过载冲击。

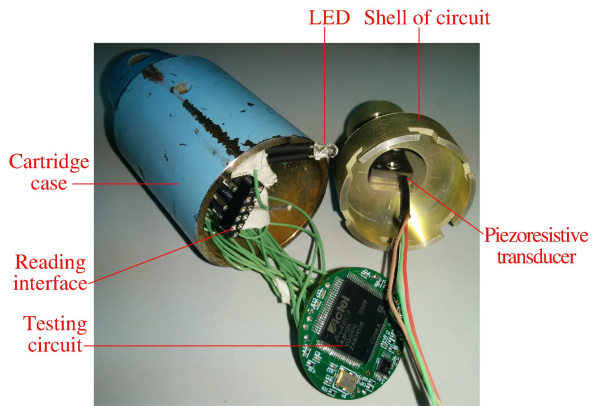


图10 系统实物图

Fig. 10 Image of actual model

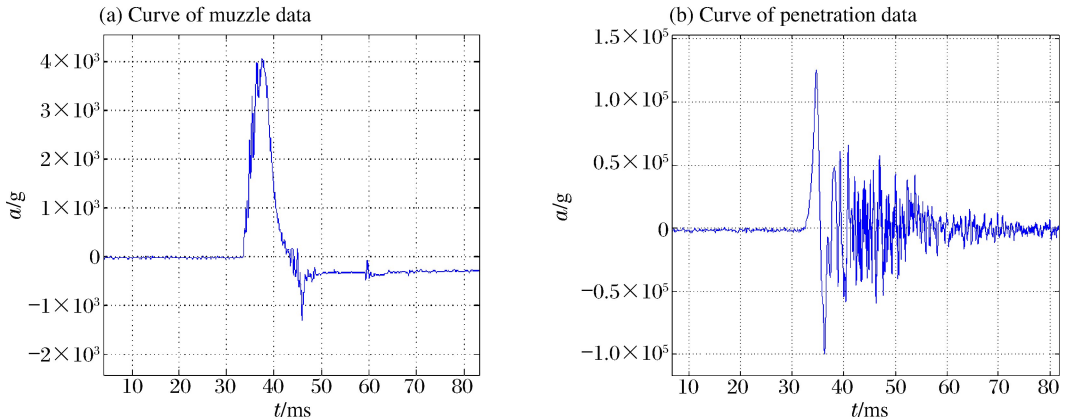


图11 系统测试数据曲线

Fig. 11 Curve of system test data

4 结论

设计出了一个基于 MEMS 压阻传感器的低功耗、高冲击过载测试系统,它可实现 $10^6 s^{-1}$ 的数据采样率、智能上电或掉电。通过实践证明:该系统具有采样精度高、抗过载能力强、功耗小等特点,能准确无误地完成数据采集,为武器系统的研究工作提供一个可靠的技术手段。

参考文献:

- [1] 徐鹏,祖静,李乐. CPLD芯片抗高 g 值冲击性能分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(1):148-150.
Xu Peng, Zu Jing, Li Le. Analysis of anti-multi- g -shock capability of a CPLD chip[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1):148-150.
- [2] 董胜飞,石云波,周智君,等. 差分式MEMS面内加速度计设计[J]. 传感技术学报, 2014, 27(7):893-897.
Dong Shengfei, Shi Yunbo, Zhou Zhijun, et al. Design of in-plane differential MEMS accelerometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(7):893-897.
- [3] 黄家蓉,刘瑞朝,何翔,等. 侵入过载测试信号的数据处理方法[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(5):555-560.
Huang Jiarong, Liu Ruichao, He Xiang, et al. A new data processing technique for measured penetration overloads[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5):555-560.
- [4] 鲍爱达,陈员娥,李长龙,等. 弹载加速度记录仪在冲击环境下的失效研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13):182-186.
Bao Aida, Chen Yuane, Li Changlong, et al. Failure study on a missile accelerometer recorder under shock environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(13):182-186.
- [5] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28:479-497.
- [6] 景鹏. 高 g 值冲击测试关键技术研究[D]. 太原:中北大学, 2008.
- [7] 朱仕永,祖静,范锦彪. 基于CPLD的弹载加速度存储测试仪[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(3):43-45.
Zhu Shiyong, Zu Jing, Fan Jinbiao. Missile-borne storage measurement and test instrument of acceleration based on CPLD[J]. Journal of Detection and Control, 2009, 31(3):43-45.
- [8] 徐浩,芮筱亭,王国平,等. 弹引系统膛内纵向过载测试与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(4):169-173.
Xu Hao, Rui Xiaoting, Wang Guoping, et al. Research of measurement and simulation for bullet-fuze system longitudinal overload in bore[J]. Fire Control and Command Control, 2013, 38(4):169-173.
- [9] 杨会. 基于ARM弹底压力测试及校准技术的探索性研究[D]. 太原:中北大学, 2012.

MEMS piezoresistive sensor based design of low-power consuming and high-overloaded testing system

Han Shuai^{1,2,3}, Ma Youchun^{1,2}, Qin Li^{1,2}, Wang Yuekai^{1,2}, Ding Ning^{1,2}

(1. National Key laboratory for Electronic Measurement Technology,
North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. Key laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

3. Beijing National Railway Research & Design Institute of Signal & Communication
Group Company Limited, Beijing 100070, China)

Abstract: To investigate the working conditions of a missile in a high-impact environment, this paper presents a design scheme for low-power consuming and high-overload testing system based on an MEMS piezoresistive sensor. The system is capable of withstanding tests with a $2 \times 10^5 g$ overloaded impact and possesses such characteristics as a high sampling rate, a small volume, and a low-power consumption. As validated by our targeting experiments, the system was able not only to withstand a high overloaded impact but also to accurately capture the slight variations of a weak signal, which ensures the accuracy of the data recorded by the missile in flight.

Key words: mechanics of explosion; low-power consumption with missile test system; high-impact; piezoresistive micro-accelerometer