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 $2\times10^5 g$ 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;低功耗随弹测试系统;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瞩目,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(0~2.5 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。

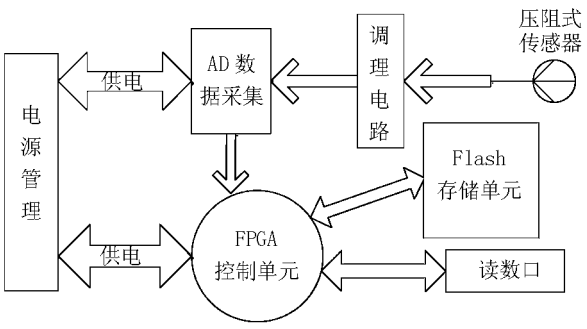

图 1 系统总体设计
Fig. 1 General layout of system design

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。

* **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：

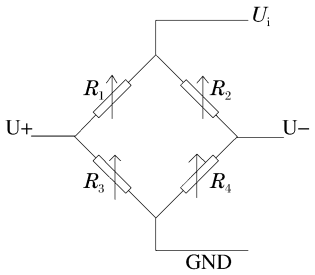

图 2 全桥差动电路

Fig. 2 Full-bridge differential circuit

$$U_{out}=(U_+-U_-)=U\frac{R_1R_3-R_2R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \tag{1}$$

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：

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

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。

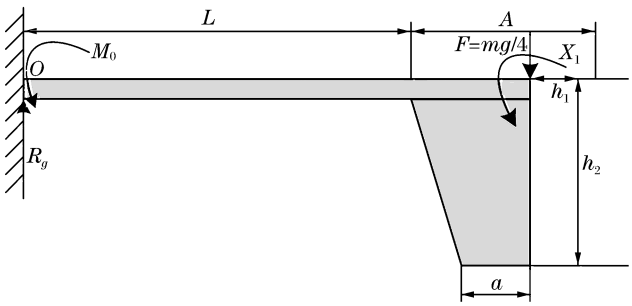

图 3 压阻式微加速度计结构受力模型

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：

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

在悬臂梁上距根部为 X 的点所受应力为：

$$\sigma(x)=-E\left(\frac{h_1}{2}\frac{d^2y(x)}{dx^2}\right)=-\frac{1}{4}\frac{h_1F(2x-L)}{I} \tag{4}$$

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：

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

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

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 μm，梁长 300 μm，梁宽 230 μm 的加速度计上施加 2×10^5 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 2×10^5 g 的冲击载荷作用下结构的最大应变为 0.177 μm、最大应力为 32.8 MPa。

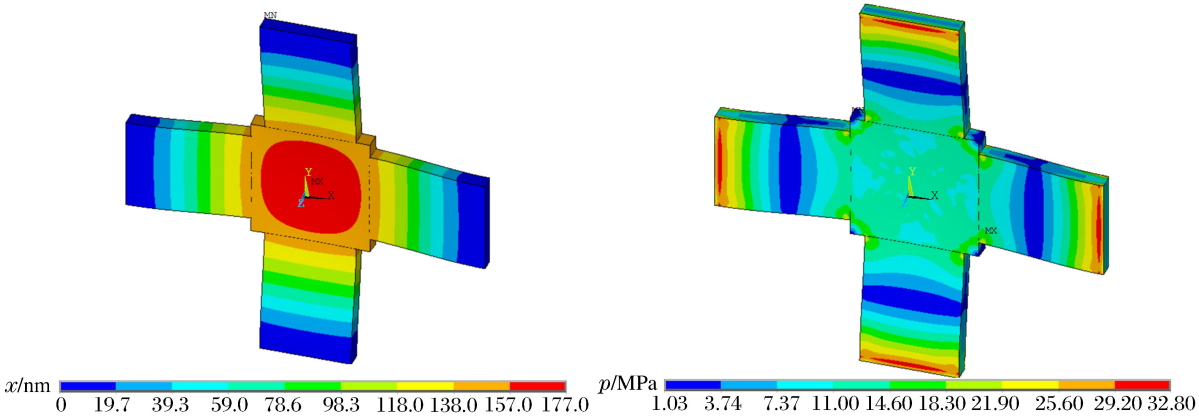

图 4　加速度计应力应变 ANSYS 模拟图

Fig. 4　ANSYS simulation diagram of accelerometer stress and strain

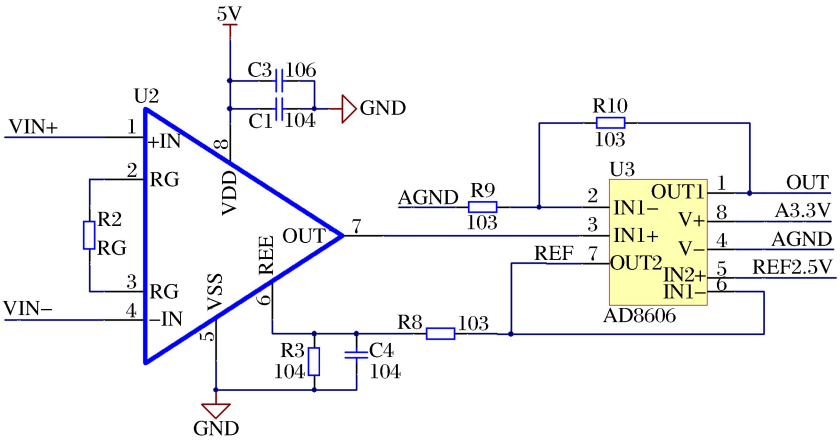

图 5　信号采集模块电路设计图

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：

$$G=1+\frac{49.4K\Omega}{R_G} \tag{8}$$

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：

$$F=\frac{U_{\max}}{2^N} \tag{9}$$

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。

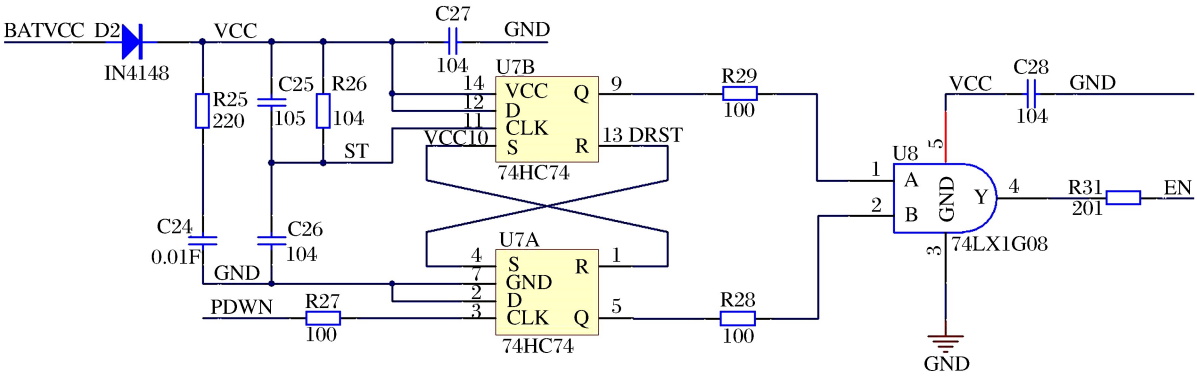

图 6 电源控制电路

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)。

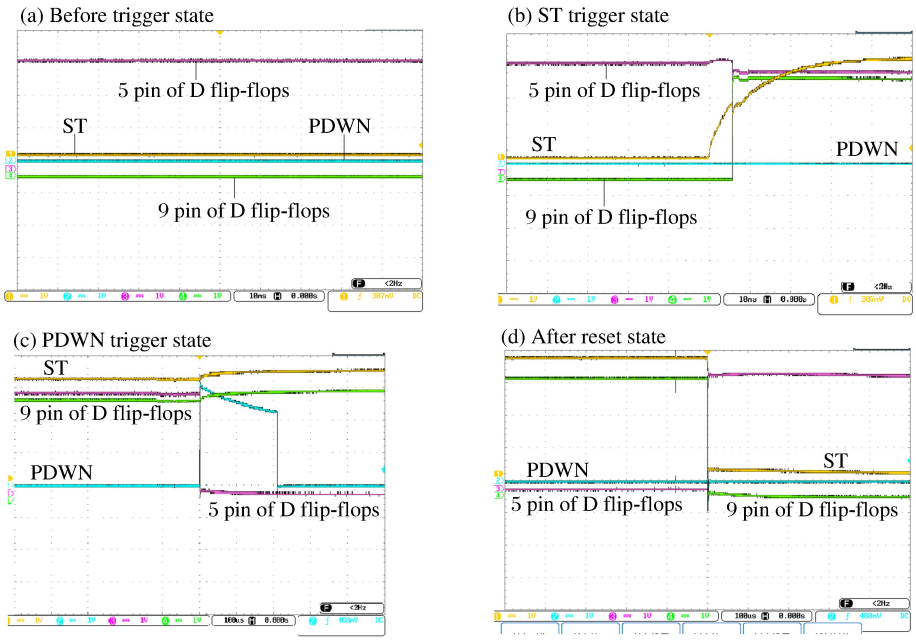

图 7　电源模块工作原理

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。

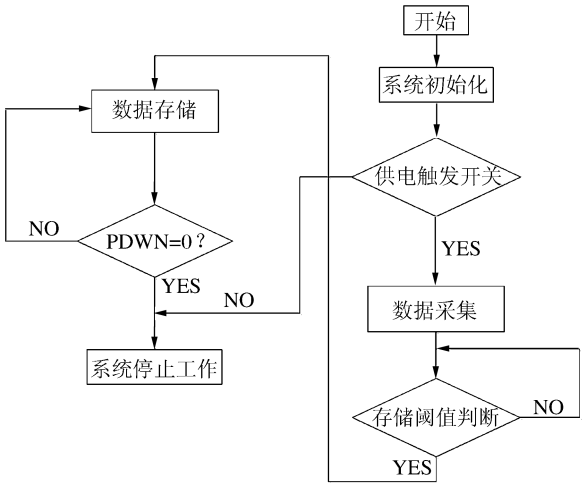

图 8　系统控制流程图

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

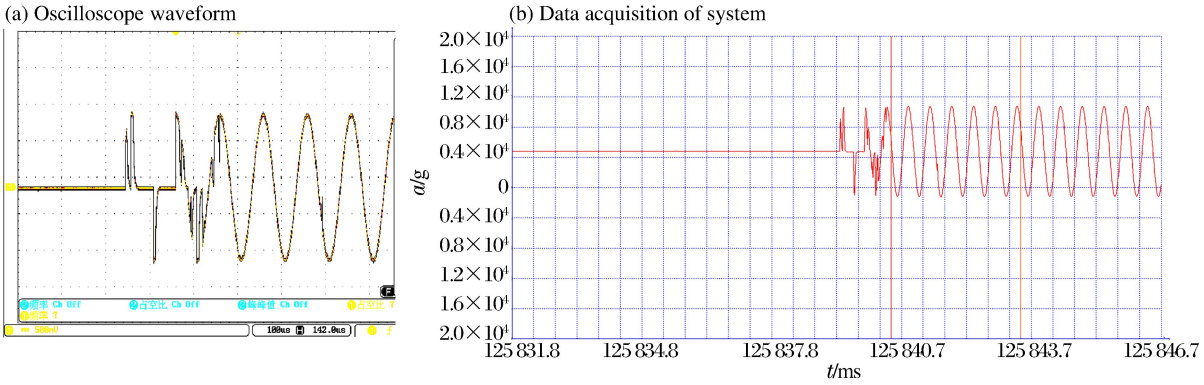

图 9 模拟信号数据对比图

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 $4\times10^3 g$，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 1.5×10^5 g 左右的过载冲击。

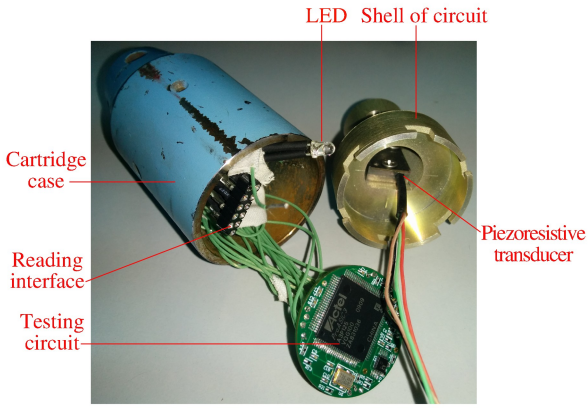

图 10 系统实物图

Fig. 10 Image of actual model

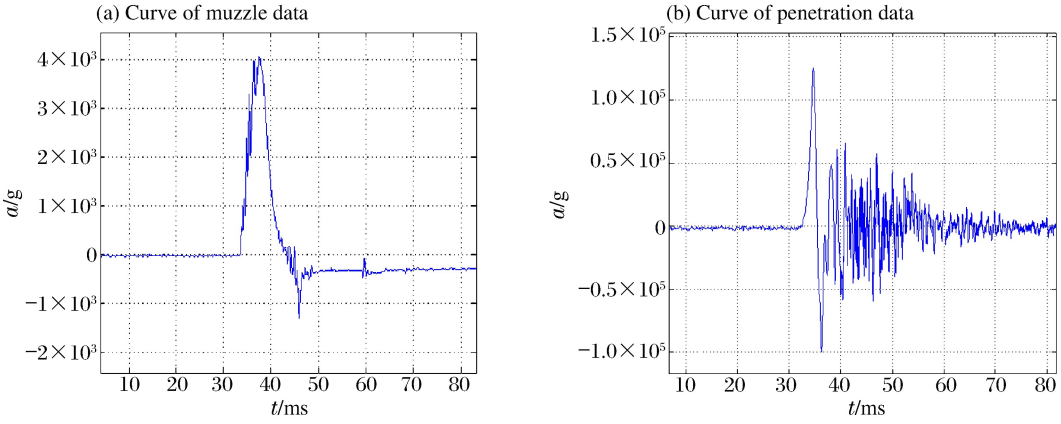

图 11 系统测试数据曲线

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. 侵彻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 apiezoresistive sensor. The system is capable of withstanding tests with a $2\times10^5 g$ 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

（责任编辑　曾月蓉）