

文章编号: 1001-1455(2013)03-0321-04

基于 MEMS 加速度计的倒置开关*

丁永红^{1,2}, 马铁华^{1,2}, 祖 静^{1,2}, 尤文斌^{1,2}

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
2. 中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 运用 MEMS 加速度计 MMA8453Q 和单片机 MSP430 设计了一种针对放入式电子测压器的倒置开关。利用加速度计方向检测功能, 单片机通过 I²C 接口读取加速度, 判断是否倒置。倒置开关经步进电机多次旋转倒置测试成功率达到 100%, 并利用霍普金森杆进行了抗过载测试。结果表明, 在受到 45 000g 冲击后仍能正常工作, 能满足火炮等高冲击场合的测试要求。

关键词: 爆炸力学; 倒置开关; MEMS 加速度计; 高冲击

中图分类号: O389 **国标学科代码:** 1303599 **文献标志码:** A

放入式电子测压器由于无外接引线^[1-2], 系统的上电是一个非常重要的环节。许多测试都在保温一定时间后进行, 而装置都在保温前放到被测物体中, 又由于测压器置于火炸药中, 外部有金属外壳的特殊环境, 就需要一种能在有限的狭小空间内、不需要直接接触操作而可靠启动存储测试系统的装置。倒置开关是一种理想的选择, 它避免了采用定时启动带来的时间限制。测压器常态为测压面向上(见图 1(a))或水平(见图 1(b)), 倒置开关使电源管理处于关闭状态, 当弹尖向下(见图 1(c))时, 认为倒置使系统上电。倒置开关设计难点有: (1) 微小体积, 此放入式电子测压器内部空间仅 16 cm³; (2) 超低功耗, 常态时处于断电状态, 非常态时处于通电状态, 这样就可使 50 mA·h 的电池只有在测试装置工作时才消耗能量; (3) 有效排除干扰引起错误工作, 必须具有高可靠性, 这直接关系到整个实验的成败。当前采用的水银倒置开关、双球倒置开关、干簧管式、电容式、光电式倒置开关^[3-5], 由于工艺限制, 存在体积大、低温下可靠性欠佳、抗冲击能力差的缺点。本文中, 针对该微型放入式电子测压器的特殊使用条件, 运用 MEMS 加速度计 MMA8453Q 设计一种小体积、低功耗、抗冲击、高可靠的微型倒置开关。

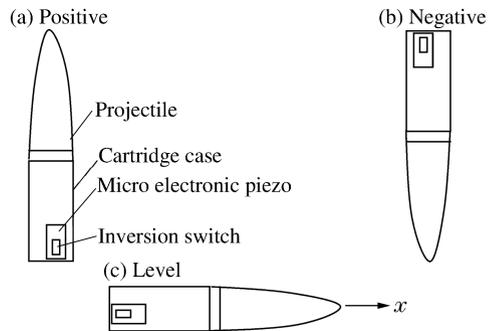


图 1 倒置开关示意图

Fig. 1 Inversion switch

1 设计

1.1 方向检测

MMA8453Q 的方向检测原理基于倾斜传感, 通过 3 个轴向重力加速度计算倾斜程度, 确定物体的方向。图 2 为从水平到垂直、从垂直到水平的跳变角定义,

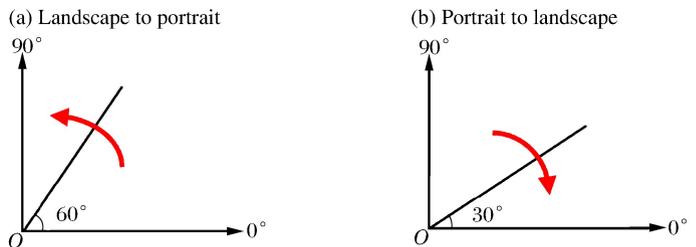


图 2 跳变角的设置

Fig. 2 Setting of the trip angle

* 收稿日期: 2011-12-16; 修回日期: 2012-08-13

基金项目: 国防基础科研计划项目(B3320080129)

作者简介: 丁永红(1980—), 女, 博士研究生, 讲师。

通过迟滞量减少方向检测频繁跳变。即使这样,高频抖动仍可能引起频繁跳变,去抖动计数器可确保方向改变至一个稳定的新位置。去抖计数器就是检测到跳变后,在设定计数时间内仅当跳变后的加速度连续保持大于要求值才认为有效方向改变。通过使能和配置方向检测中断源,利用内嵌的算法,2个中断管脚 INT1 或 INT2 通过电平改变作为方向改变的标志。

1.2 工作原理

倒置开关常态为 z 轴向上或水平,测试系统电源管理处于关闭状态。利用 MEMS 加速度计 MMA8453Q 的方向检测特性,当开关 z 轴角度发生改变到大于或等于设定的角度,并持续超过 30 s 后,传感器中断管脚输出高电平启动测试系统主电源。加速度计在由水平状态到向上或向下状态都能检测到由水平方向改变夹角的过程,但不能通过传感器中断输出确定传感器的方向改变。弹药运输过程中,车辆上下坡及颠簸不会造成弹药与水平方向长时间形成超过 45° 的夹角。因此, z 轴与水平的跳变夹角设定为 $\pm 60^\circ$,可有效保证倒置开关在弹药常态下不会误判。当响应加速度计输出中断后,单片机读取 z 轴加速度进行判断,仅当 z 轴加速度小于 $-0.867g$ 时,单片机才进入采样存储的全功耗状态。此后,直到取出装置重置前加速度计保持掉电态,而系统电源控制一直处于开状态,既实现了开关响应在一定角度内有效的要求,又避免了由于振动等造成短时间加速度的干扰,实现了开关的关状态和开状态的单向转换。

1.3 电路设计

MEMS 加速度计 MMA8453Q 和单片机 MSP430 的硬件连接如图 3 所示。二者通过 I²C 接口通信,加速度计角度变化输出管脚连接单片机外部中断管脚。单片机在自身初始化和配置完毕加速度计后处于休眠状态,等待加速度计中断唤醒。

单片机在检测倒置开关状态时选用内部 DCO 时钟,系统时钟低至 100 kHz,有效降低系统的功耗。加速度计的工作电流仅有 $6 \mu\text{A}$,整个测试系统上电前平均工作电流为约 $26 \mu\text{A}$,电池 $1 \text{ mA} \cdot \text{h}$ 能够让系统在该状态下工作 38 h;启动存储记录后,全工作状态时平均工作电流约 4.5 mA 。整个电路板面积为 $7 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,如图 4 所示。

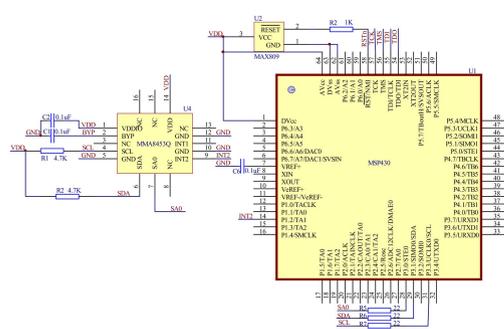


图 3 电路连接

Fig. 3 Circuit connection

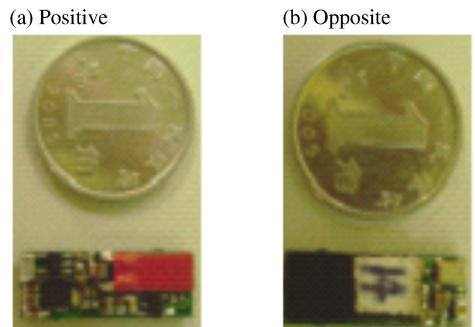


图 4 硬件实物图

Fig. 4 Real objects

2 性能测试

2.1 高低温实验

根据 GJB 2870-1997《放入式电子测压器规范》和具体实验的要求,测试前需要对弹药在低温和高温状态下保温 24 h,其中大口径弹药的达 72 h 以上,放入式电子测压器必须在弹药保温前装入药筒内,随弹药一起保温。在 -40°C 和 55°C 等 2 种极端条件下各保温 48 h 后,倒置开关经测试均能正常工作。

2.2 可靠性实验

为了测试倒置开关能否使测试系统可靠上电,通过步进电机进行了 100 次旋转倒置测试。每次由水平放置开始每旋转 1° 停留 40 s,旋转至与水平方向成 -90° 时停止。实验表明,在由水平旋转至与 z 轴负向成 $57^\circ \sim 63^\circ$,成功率达到 100%。

2.3 抗冲击实验

由于 MMA8453Q 的量程为 $\pm 8g$ ，而电子测压器在使用过程中往往要承受几千个重力加速度，设计的倒置开关能否承受高冲击是研制的关键。为了提高倒置开关的抗冲击性能，在真空条件下采用环氧树脂对电路板进行二次灌封。利用 Hopkinson 杆模拟火炮发射进行冲击测试，将倒置开关安装在 Hopkinson 杆的尾部，如图 5 所示。压缩空气发射子弹，同轴撞击 Hopkinson 杆的起始端，将会在 Hopkinson 杆中产生近似半正弦的压应变脉冲，并沿 Hopkinson 杆纵向传播^[6]。

当倒置开关受到冲击时，运动速度 $v(t)$ 和激光干涉系统的多普勒频移 $\Delta f(t)$ 之间，有

$$v(t) = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \Delta f(t) \tag{1}$$

式中： λ 为入射光波长， θ 为入射角。

测量方向与运动方向垂直，光栅的衍射公式为

$$2d\sin\theta = (m - n)\lambda \tag{2}$$

式中： d 为光栅常数， m, n 为光栅衍射级数。由式(1)~(2)，有

$$v(t) = \frac{d}{m - n} \Delta f(t) \tag{3}$$

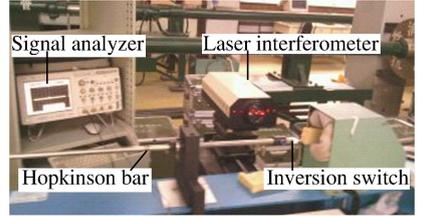


图 5 Hopkinson 杆实验装置
Fig. 5 Experimental facility of Hopkinson bar

因此，只要获得多普勒频移 $\Delta f(t)$ ，即可求出实时速度 $v(t)$ 。利用瞬时频率定义计算多普勒信号，进而求加速度。信号的瞬时频率定义为其解析信号相位对时间的导数。多普勒信号为 $x(t)$ ，其解析信号为 $x_c(t) = x(t) + j\hat{x}(t)$ ，实部 $x(t)$ 为原多普勒信号，虚部 $\hat{x}(t)$ 为多普勒信号的希尔伯特变换。 $x_c(t)$ 的瞬时相位为^[7]

$$\varphi(t) = \arctan[\hat{x}(t)/x(t)] \tag{4}$$

瞬时频率为

$$\Delta f(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{d\{\arctan[\hat{x}(t)/x(t)]\}}{dt} \tag{5}$$

对式(3)进行微分可得加速度

$$a(t) = \frac{1}{m - n} \frac{d[d\Delta f(t)]}{dt} \tag{6}$$

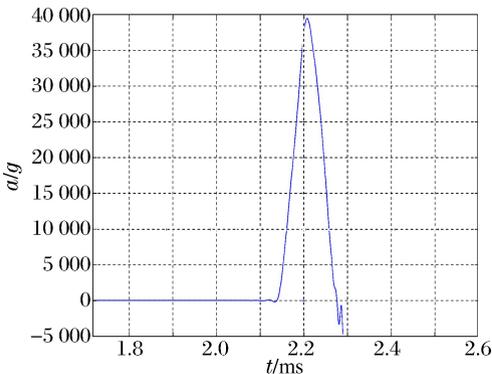


图 6 加速度曲线

Fig. 6 Accelerating curve

表 1 倒置开关抗过载能力实验结果

Table 1 Experiment results of overload ability of inversion switch			
p/kPa	a_1/g	a_2/g	a_3/g
30	4 783	5 033	4 689
40	13 161	14 149	11 922
50	18 947	20 112	16 965
60	24 217	27 806	23 561
70	32 667	33 350	30 131
80	39 475	40 126	26 916
90	44 105	48 505	45 886
100	50 441	52 127 ¹⁾	50 973 ¹⁾
120	55 862 ¹⁾		

1)不能正常工作

实验选用平头弹及合适的垫片以产生近似于半正弦的应变脉冲，对 3 个倒置开关进行了冲击实验。图 6 为其中 1 次实验测得多普勒信号经处理后的加速度曲线，其脉宽时间为 0.119 ms，峰值为 39 475g。测试结果如表 1 所示，其中 p 为气室中压缩空气的压力， a_1, a_2 和 a_3 为倒置开关受到的冲击加速度，在超过 45 000g 时部分倒置开关已不能正常工作。测试结果表明，该倒置开关具有 45 000g 的抗过载能力。

3 结 论

运用 MEMS 加速度计 MMA8453Q 设计了一种新型的倒置开关。通过高低温实验、步进电机旋转实验和冲击测试,表明该倒置开关具有低功耗、微小体积、温度范围宽、高可靠性、抗高冲击的性能,可广泛应用于存储测试领域。

参考文献:

- [1] 祖静,申湘南,张文栋. 存储测试技术[J]. 兵工学报,1994,4:30-34.
Zu Jing, Shen Xiang-nan, Zhang Wen-dong. Memorized testing and measurement technology[J]. Acta Armamentarii, 1994,4:30-34.
- [2] 马铁华. 存储测试技术的发展与应用及特种传感器技术研究[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [3] 常宽. 倒置开关的研究[D]. 太原:中北大学,2009.
- [4] 杨艳,祖静,张瑜. 光电倒置开关及其可靠性研究[J]. 电子测试,2011,1:73-77.
Yang Yan, Zu Jing, Zhang Yu. Research on reliability of electro-optical inversion switch[J]. Electronic Test, 2011,1:73-77.
- [5] 杨艳,祖静,张瑜. 微型脉冲供电式光电倒置开关[J]. 火炮发射与控制学报,2011,1:24-27.
Yang Yan, Zu Jing, Zhang Yu. Miniature pulse-powered electro-optical invert switch[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2011,1:24-27.
- [6] Ueda K, Umeda A. Characterization of shock accelerometers using Davies bar and laser interferometer[J]. Experimental Mechanics, 1995,35(3):216-223.
- [7] 王金贵. 气体炮原理及技术[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

Design of an inversion switch based on MEMS accelerometer^{*}

Ding Yong-hong^{1,2}, Ma Tie-hua^{1,2}, Zu Jing^{1,2}, You Wen-bin^{1,2}

- (1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;
2. Laboratory of Science and Technology on Electronic Test & Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: An inversion switch for internal electronic pressure gauges was designed by using MEMS accelerometer MMA8453Q and MSP430 MCU. Thereby, using the direction detection function of the accelerometer, MCU reads its acceleration through the I²C interface and judges whether the tested device is inverted. For the designed inversion switch, many inverse tests were carried out by the stepping motor and the success probability was 100%, and the impact resistance was tested by adopting a Hopkinson bar system. The results show that the inversion switch can still work after the impact of 45 000g. So the designed inversion switch can be applied on high-g impact occasions.

Key words: mechanics of explosion; inversion switch; MEMS accelerometer; high-g impact

^{*} Received 16 December 2011; Revised 13 August 2012

Corresponding author: Ding Yong-hong, dingyonghong@nuc.edu.cn