

文章编号: 1001-1455(2009)02-0221-04

高冲击随弹测试固态记录器的设计与应用*

文 丰,任勇峰,王 强

(中北大学电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051)

摘要: 为记录爆炸高冲击信号,设计了随弹测试固态记录器。该固态记录器以 FPGA 器件 XC2S30 为核心处理芯片,在其内部的 A/D 控制器、高速状态机、相位延迟时钟和闪存控制器的共同作用下,能够将高冲击信号转换成数字信号并存储到由闪存构成的主存储器中。利用设计的固体记录器并结合多层缓冲和双层护套保护结构,成功地记录了炮弹爆炸抛撒和炮击试验中的全程高冲击信号。

关键词: 爆炸力学;固态记录器;抛撒试验;高冲击

中图分类号: O384;TN409

国标学科代码: 130·3599

文献标志码: A

1 引言

高冲击测试在工程领域特别是军工领域有重要的作用。高冲击测试中一般采用压力传感器、二次仪表与瞬态波形记录仪(或计算机高速数据采集系统)组成的测试系统。这种方法存在的问题一是布置电缆引线费时费力;二是电起爆信号和爆炸产生的电磁干扰通过电缆引线耦合进入测试系统,常会造成误触发或带来很大的噪声。高冲击测试的另一种方法是采用高速摄影技术。高速摄影能够拍摄到一系列的波阵面图像,经过图像数据处理可以得到较准确的激波速度、粗略的峰值压力及其他信息。但该方法得不到特定点上压力随时间的变化规律,压力估算也不够准确。因此高速摄影与压力传感器电测法只能互为补充。随着微电子技术的快速发展,存储测试技术应运而生,高冲击随弹测试固态记录器采用恶劣环境下的存储测试技术,将压力传感器与数字化瞬态固态记录器直接装为一体,将固态记录器装配到弹体内部,随同弹体实时记录高冲击信号;测试完毕回收固态记录器后,通过地面检测台将数据上传到上位机。这种存储式高冲击测试方法克服了高速摄像和电缆引线测试方法的主要缺点^[1]。

2 总体方案设计

在爆炸抛撒和炮击试验中,随弹高冲击固态记录器电路模块通常承受着很高的加速度过载,例如弹体高速侵彻高标号混凝土靶体时,最大加速度(经过滤波)可达 $4 \times 10^4 g$ 以上。为了记录膛内、穿靶等几个过程的实时加速度和爆炸抛撒瞬间的实时加速度,必须对存储测试电路模块进行缓冲保护,以降低其承受的加速度幅值,使该值小于电路模块所能承受的冲击加速度极限值,从而增强电路模块在恶劣环境下的存活性,提高硬目标高速侵彻加速度测试试验中高冲击固态记录器的重复使用率和数据的捕获率。所以高冲击随弹测试固态记录器应具有以下几点:(1)固态记录器的壳体应尽可能地选取密度低、强度高的材料,并尽量减小系统的体积,使整个测试系统微型化;(2)固态记录器应在不改变被测对象状态条件下无失真地记录被测参数,并且不干扰炮弹系统的正常工作;(3)在结构一定的条件下,应将承压能力好(强度高的部件)或不重要的元器件放在测试装置底部,而将强度小和非常重要的元器件放在测试装置的上部,且尽量均匀分布器件,以免由于内部应力分布不平衡而造成断裂、变形等^[2]。

* 收稿日期: 2007-11-05; 修回日期: 2008-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50675213)

作者简介: 文 丰(1977—),男,硕士,讲师。

3 缓冲保护模块的设计

固态记录器的缓冲保护结构由 2 部分组成:缓冲结构和防变形保护结构,如图 1 所示。缓冲结构从下到上由毛毡、泡沫铝、特制橡胶、合成树脂构成。毛毡可以在侵彻多层介质硬目标时起缓冲作用;泡沫铝在侵彻单层硬目标时缓冲作用明显;钢壳和内胆钢壳之间的特制橡胶具有弹性好、变形恢复快等特点,在侵彻过程中一直对高过载冲击有缓冲作用;将电路模块灌封在内胆钢壳中的合成树脂,使电路模块和内胆成为一个整体,起到了缓冲和防止壳体变形的作用。

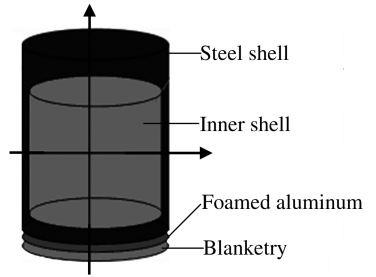


图 1 缓冲保护结构示意图

Fig. 1 Schematic of a shock-absorbing cushion structure

防变形结构由钢壳和内胆钢壳组成:钢壳为 6 mm 厚的特种钢,经过淬火和阳极氧化处理后,机械强度增大,在缓冲材料的保护下,炮射侵彻 3 层靶试验中机械结构几乎没有变形,起到了防变形的作用;内胆钢壳是电路模块的灌封容器,同时也具有防变形的作用^[3]。

4 电路模块的设计

4.1 电路模块工作原理

整个固态记录器的电路模块采用压电测量原理,由压电加速度传感器、电荷放大器、A/D 转换器、电源、读数接口、备用读数接口及中心逻辑控制器组成,如图 2 所示。压电加速度传感器将加速度信号转换成电荷信号,再经电荷放大器将电荷信号转变为适合 A/D 转换器转换的电压信号,A/D 转换器将电压信号转换成数字信号,数字信号经由中心控制器送入存储器,待测试过程完成后,计算机通过读数接口读取数据,再进行数据处理、打印,提供炮弹高冲击测试的有关参数。

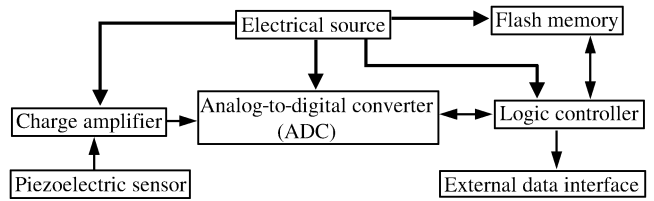


图 2 工作原理框图

Fig. 2 Structural scheme of work principle

4.2 电荷放大器电路的设计

为了提高信号增益,抑制零点漂移,满足 A/D 转换器对电压信号的要求,电荷放大器电路采用 2 级放大模式:第 1 级采用电荷放大器,第 2 级适当放大,其原理如图 3 所示^[4],其中 U_s 为传感器等效电源, C_a 为传感器固有电容, R_1 为放大器输入等效电阻, R_2 为放大器匹配电阻, C_f 为放大器反馈电容, R_f 为放大器反馈电阻, U_o 为放大器输出电压。

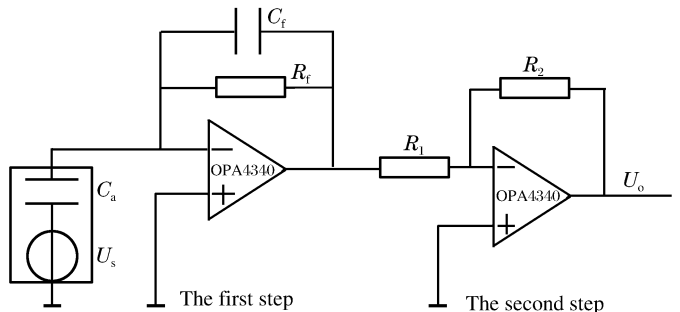


图 3 电荷放大器原理图

Fig. 3 Structural scheme of the charge amplifier

4.3 A/D 转换器及中心逻辑控制器

A/D 转换器采用 2 通道数模转换芯片,2 通道分别测量抛撒和落地 2 个方向的高冲击信号。中心逻辑控制器采用 Xilinx 公司 FPGA 器件 XC2S30,由 A/D 控制器、FIFO 和闪存控制器组成,见图 4。

A/D 控制器用来控制 A/D 转换器的通道转换和采样率,在实际应用中可以通过修改逻辑调整采样率,在抛撒试验中需要测试抛撒方向上的高冲击信号,采样率设置成 10^5 s^{-1} ,在炮击侵彻靶体的试验中需要测试炮击方向上的高冲击信号。FPGA 内部集成的 FIFO 由 2 个宽 4 bit、深 10 bit 的双口 RAM 构成,用来缓存闪存编程期间的 A/D 控制器传送过来的数据。闪存采用 K9F1G08UOA 芯片,该芯片

的容量为 128 MB,能够存储整个试验过程的高冲击数据。当试验完毕后,通过异步串行通信接口和地面检测台把闪存中的数据上传到上位机,以备分析处理^[5]。

5 试验结果及分析

5.1 抛撒试验及分析

把固态记录器装在炮弹中,炮弹装入模拟母弹中,在地面上通过抛撒药爆炸把炮弹抛出,测试在抛撒时的冲击过载。做了 2 发抛撒试验,测得的抛撒波形如图 5 所示,第 1 发试验抛撒的药量比第 2 发的小。测得的抛撒过载曲线表明:第 1 发峰值加速度过载为 $2.8 \times 10^4 g$, 过载峰值宽度为 $100 \mu s$;第 2 发的峰值加速度过载为 $3.2 \times 10^4 g$,过载峰值宽度为 $110 \mu s$,该结果与理论计算结果吻合很好。通过这 2 发弹的抛撒试验,获得了该型号子母弹抛撒过程中较完整的过载曲线,并使该过载值得到了量化。

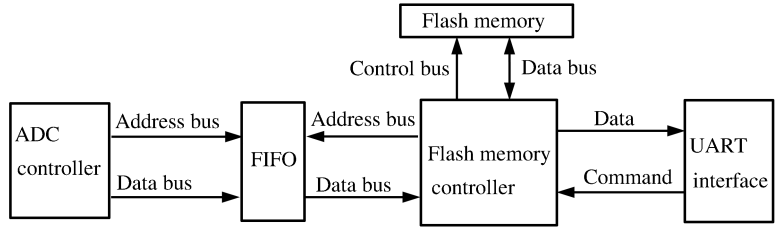


图 4 中心逻辑控制模块框图

Fig. 4 Structural scheme of center logic controller

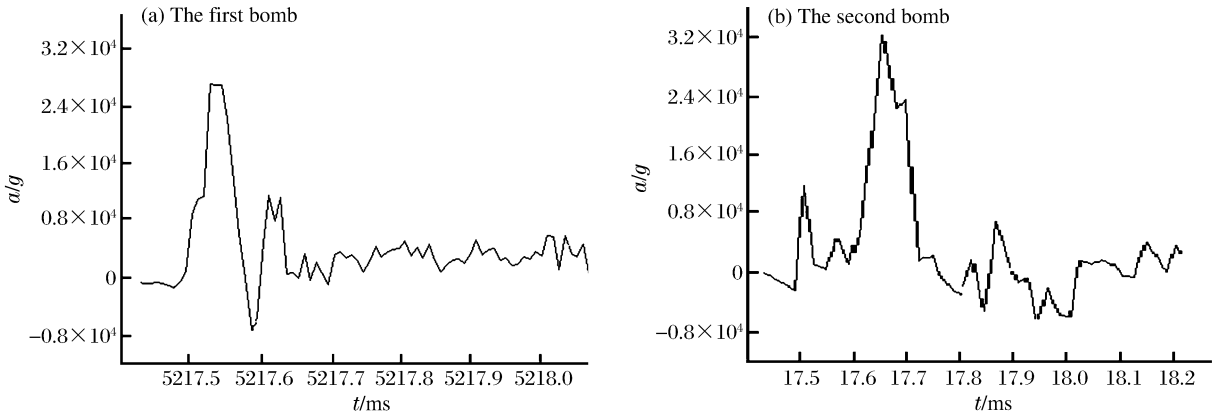


图 5 在抛撒试验中 2 发炮弹的加速度过载曲线

Fig. 5 Acceleration overload curves of the two bombs in the dispersal test

5.2 炮击试验及分析

地面炮击试验时把固态记录器装在炮弹中,采用 125 口径的榴弹炮发射,炮弹以 680 m/s 的速度着靶。靶板为复合介质:第 1 层靶为 8 cm 厚的木板,第 2 层靶为 5 m 厚的土和碎石子混合土靶,第 3 层靶为混凝土靶,靶外围有 4 cm 厚的钢圈。炮击试验中记录到了从发射炮弹到着靶全

整过程的过载信号,如图 6 所示, A 处近似半正弦的信号为炮弹在膛内的过载曲线,其峰值加速度过载为 $1.0 \times 10^4 g$,与理论和经验值吻合;B 处峰值曲线是炮弹撞击木板靶后入土靶时的曲线,峰值加速度为 $3.1 \times 10^4 g$;C 处峰值曲线是炮弹穿过 5 m 厚的土靶后撞击混凝土靶时的曲线,峰值加速度为 $3.1 \times 10^4 g$;D 处峰值曲线是炮弹破坏混凝土靶后把钢桶壁破坏时的曲线,峰值加速度为 $4.5 \times 10^4 g$ 。通过对炮击现场仔细观察和对试验记录波形几个特征点数据的分析可知,该次试验固态记录器准确地记录了整个炮击过程的冲击过载信号,试验结果与实际情况吻合。

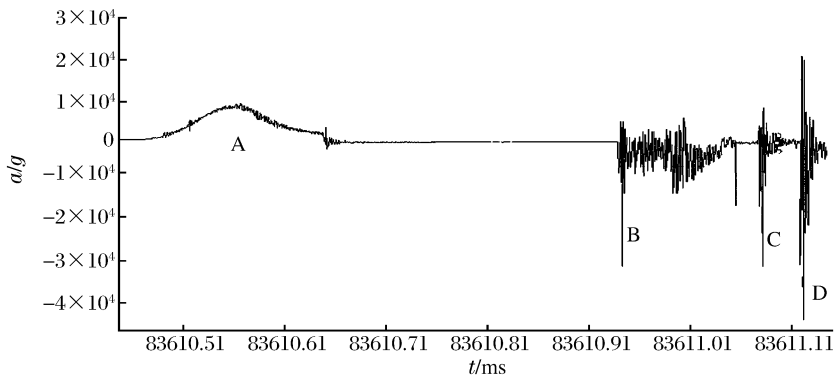


图 6 炮击试验全程过载曲线

Fig. 6 Acceleration overload curves for the whole gunfire test

6 结 论

以 FPGA 器件 XC2S30 为核心处理芯片,在高速状态机和相位延迟时钟以及闪存控制器的共同作用下,本文中设计的随弹测试固态记录器能够将转存到由双口 RAM 构成 FIFO 中的采集信号送至由闪存构成的主存储器中。利用该随弹测试固态记录器,并结合毛毡、泡沫铝、特制橡胶和合成树脂多层缓冲及其双层钢套保护结构,在炮弹爆炸抛撒模拟和木板、土质、碎石子混凝土、混凝土、钢圈复合靶炮击试验中成功地记录到了全程高冲击信号。试验表明,该随弹测试固态记录器使用方便、可靠,充分发挥了存测技术所具有的无需引线、抗电磁干扰的优点。高冲击随弹测试固态记录器有数据采集速度快、存储容量大、系统体积小、功耗低等特点,适用于恶劣环境中被测系统及不需要外部能量供应的低功耗应用场合,只要将程序稍加修改即可用于多种场合,还可对采集到的数据进行实时分析处理,从而使该系统成为智能型的数据采集与分析系统。

参考文献:

- [1] 王晓东,郝志航.大容量固态记录器技术[J].光学精密工程,2001,9(4):396-400.
WANG Xiao-dong, HAO Zhi-hang. Mass solid state recorder technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2001,9(4):396-400.
- [2] 李开明.航天高密度大容量数据存储技术的发展[J].空间电子技术,2000(4):45-48.
- [3] 刘树棠.基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M].第3版.西安:西安交通大学出版社,2004:2-350.
- [4] 华成英,童诗白.模拟电子技术基础[M].第4版.北京:高等教育出版社,2006:513-534.
- [5] 张文栋.存储测试系统的设计理论及其应用[M].北京:高等教育出版社,2002:9-20.

Design of a bomb-borne solid-state recorder for high-shock test and its application

WEN Feng, REN Yong-feng, WANG Qiang*

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China,
Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: A bomb-borne solid-state recorder was proposed to record the explosion-induced high-shock signals. In this solid-state recorder, the FPGA device XC2S30 is used as the core controlling chip. With the joint function of the A/D controller, the high-speed state machine, the phase-delayed clock and the flash memory controller working in the recorder, it can transform the high shock signals into digital ones and store them into the main memory which is made up of flash memory. With the multi-layer cushions and double-walled steel structures, the high-shock signals for the whole dispersal and gunfire tests were successfully recorded by applying the proposed solid-state recorder.

Key words: mechanics of explosion; solid-state recorder; dispersal test; high shock

* Corresponding author: WANG Qiang

E-mail address: wangqiang4585@126.com

Telephone: 86-351-3924960