2014年12月

文章编号: 2095-4980(2014)06-0813-04

侵彻过载高速存储测试的研究与实现

高进忠, 孙远程, 黄玉川, 苗江宏

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘 要:针对混合型单片机应用中数据捕获率不足问题,在分析其机理及原因基础上,采用 外置高速模数转换器(A/D)与单片机的串行通用接口(SPI)构成串行采集存储结构。利用单片机所提 供的时钟源将数据捕获率由 200 ksps 提高到 780 ksps,在此基础上提出了三轴过载测量总体方案。 研究结果表明,通过提高 SPI 总线时钟速率,可将数据捕获率进一步提高到 2.5 Msps,这将作为今 后的研究方向。

关键词:存储测试;侵彻过载;SPI串行总线 中图分类号:TN911.7 **文献标识码:**A **doi:**10.11805/TKYDA201406.0813

High-speed storage measurement of the projectile body penetration overload

GAO Jin-zhong, SUN Yuan-cheng, HUANG YU-chuan, MIAO Jiang-hong (Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For the disadvantages of the hybrid microcontroller application data capture, the serial acquisition storage structure is created by adopting external Analog to Digital(A/D) converter and the single chip microcomputer Serial Peripheral Interface(SPI) bus based on analyzing its mechanism and reason. The data capture rate is increased from 200 ksps to 780 ksps by using the clock source provided by single chip microcomputer. An overall scheme of the triaxial overload measurement is proposed based on this work. The results show that the capture rate can be increased to 2.5 Msps by improving the SPI bus clock rate, and it will serve as the future research direction.

Key words: storage measurement; penetration overload; Serial Peripheral Interface bus

存储测试技术是指在对被测对象无影响或影响在容许范围的条件下,在被测体内置入微型数据采集与存储测试记录仪,现场实时完成信息的快速采集与记录,事后回收记录仪,由计算机处理和再现测试信息的一种动态测试技术^[1]。弹体在侵彻靶体过程中所承受的负加速度通常称为弹体的侵彻过载^[2],目前国内外多采用存储测试技术实现弹体侵彻过载测量^[3-8]。经过多年的研究,高g值侵彻加速度现场测试技术已经基本解决了低速和中速条件下(800 m/s 以下)"测不着"的问题,正朝着提高高速侵彻条件下数据捕获率和进一步解决"测不准"问题的方向发展^[9],因而需进一步提高测试系统数据捕获率并实现三轴过载测量。本文介绍基于混合型单片机(mixed-signal microcontroller)提高数据捕获率的实现方法和在此基础上建立的三轴过载测量总体方案。

1 混合型单片机存储测试性能

研究与实验表明,弹载记录仪自身的惯性力是造成其结构在高过载环境下损伤的主要因素,实现弹载记录仪 微小型化是解决弹体侵彻过载存储测试"测不着"问题的技术关键。美国圣地亚国家重点实验室(SNL)致力于研制微小型的"MINPEN"记录仪^[5]、"MILLIPEN"记录仪^[10],以提高其在高过载环境的生存能力。到目前为止, 在通用器件范畴内与复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device, CPLD)、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)等可编程逻辑器件相比,基于 C8051 系列混合型单片机可实现的微小型化程度 最高。文献[11]中采用该系列单片机实现的弹载记录仪已成功通过弹速 1 161 m/s 的火炮试验考核。

受应力波等因素引起的弹体结构冲击响应影响,实测的弹体侵彻过载信号含有诸多高频成分,因而采样率越

高测量结果越真实,提高数据捕获率是进一步解决存储测试"测不准"问题的技术关键,结合到混合型单片机具体应用上主要取决于其内置的模数转换器(A/D)性能。

由图 1 所示的内置 A/D 采存结构可见, 弹体侵彻过载信号需经过单片机(Microcontroller, MCU)内部的模数 转换器(ADC)、特殊功能寄存器总线(Special Function Register Bus, SFR Bus)、串行通用接口(SPI)及其总线和外部的磁阻随机存储器(Magneto-resistive Random Access Memory, MRAM), 在 8051 内核(8051 Core)控制下完成数 据采集、转换、传输和存储。



以 C8051F311 为例,其内置的 10 位逐次逼近型(Successive Approximation Register, SAR)A/D 转换器 ADC0 的工作时序如图 2 所示,在软件置位其忙位(Write '1' to AD0 BUSY)时刻采样,或在跟踪模式下(AD0TM=1)延迟 3 个逐次逼近转换时钟(SAR Clocks)周期后采样,之后用 11 个 SAR Clocks 周期完成 10 位逐次逼近转换,限定 SAR Clocks 最高为 3 MHz,采样率最大为 200 ksps。图中的 SAR Clocks 是由单片机提供的系统时钟(System Clock, SYSCLK)分频所得,按系统时钟配置最高可为 24.5 MHz,采样率可达 2.2 Msps,表明 ADC0 内部的比较器、数模转换器的性能欠佳,致使系统时钟源未得到充分利用。

由图 2 可见, ADC0 的转换过程为串行转换, 可利用单片机的 SPI 总线外置高速串行 A/D 转换器将之替代, 使单片机内置的时钟源得到充分利用, 并可省略内置 A/D 采存结构中数据串转并、并转串的传输过程。

2 外置 A/D 存储测试性能

基于对存储测试"微小型化"影响较小,磁阻随机存储器最大时钟速率为 40 MHz,压阻式加速度传感器最高频响为 150 kHz,选用了 MAX11103 串行转换器作为单片机的外置 A/D 转换器,其为 3 Msps、12 位 SAR 型、3 mm × 3 mm TDFN 封装,按图 3 所示构成外置 A/D 采存结构,其工作时序如图 4 所示。



图 3 所示的外置 A/D 采存结构中,由单片机控制外置 ADC 的片选(Chip Select,CS),由 SPI 为 MRAM,ADC 提供串行输入(Serial Input, SI)、串行时钟(Serial Clock, SCK)、串行输出(Serial Output, SO)接口。

图 4 所示的外置 A/D 工作时序中, CS 变低时为 ADC 的采样时刻,之后在串行时钟(Serial Clock, SCLK)控制下,三态串行数据输出(Three-State Serial Data Output, DOUT)串行输出转换数据,需 16 个 SCLK 周期完成一次转换,允许在第 10 个 SCLK 周期后拉高 CS,为下一次转换做准备。

结合图 3、图 4 可见,将 SPI 的 SCK,SI 分别与外置 A/D 的 SCLK, DOUT 相连接,并将 SCK 空闲状态置 为高电平,即可通过 2次 SPI 读操作(或 写操作)控制外置 A/D,完成一次数据 转换。

由图 5 所示的磁阻随机存储器 (MRAM)写时序可见,其片选(CS)变低 后,在串行时钟(SCK)控制下按字节写 入指令、地址、数据,在 CS 变高之前 可连续写入数据。

结合图 3~图 5 可见,由外置 A/D





实现存储测试的具体过程可为: 在单片机控制下, 先拉低存储器的 CS, 通过 3 次 SPI 写操作完成存储器写操作 初始化(写指令、写地址); 之后拉低 A/D 转换器的 CS, 通过 2 次 SPI 读操作完成 1 次采样转换和 2 字节数据存储; 重复进行 A/D 转换器的 CS 高变低和 SPI 读操作,完成数据连续采集和存储,直到存储器存满时拉高存储器 和 A/D 转换器的 CS,结束数据转换存储。

C8051 系列单片机限制 SPI 的串行时钟(SCK)最大为系统时钟的一半(12.5 MHz),因而外置 A/D 转换器的采 样速率最高可达 780 ksps。

3 三轴过载测量总体方案

通常将弹体的轴向过载、2个正交径 向过载称为三轴过载。因弹体侵彻通常带 有攻角,因而存在三轴过载,测量上需三 轴同步采样。

由图 4 可见外置 A/D 是由其片选(CS) 控制采样,若由同一片选同时控制 3 个 A/D 即可实现三轴过载同步采样,因此按 图 6 所示构成三轴过载测量结构。图中的



Fig.6 Structure of the triaxial overload synchronous measurement 图 6 三轴过载同步测量结构

模拟开关(Analog Switches, AS)起隔离 3 个 ADC 串行输入(SI)的作用,因此 3 路 ADC,MRAM 通过 SI 相关联, 且又相互独立,在共同的 CS 作用下完成 3 路同步采样,在共同的串行时钟(SCK)作用下完成各自的数据转换与 存储。

由于 MRAM 在写数据前须先进行写使能、写指令、写地址这 3 项操作,这些操作通过单片机的 SI 发出,需通过 AS 到达 MRAM,因而 AS 的另一作用是完成 MRAM 写操作初始化,在 ADC 采样前完成。

结合图 4、图 5 可见实现三轴过载同步测量的具体过程为: 在单片机控制下, 先导通 AS 并同时或分别拉低 3 个 MRAM 的 CS, 通过 SPI 写操作完成存储器写操作初始化; 之后在断开 AS 后拉低 3 个 ADC 的 CS 完成 3 路 同步采样, 通过 2 次 SPI 读操作产生 16 位 SCK, 在 SCK 作用下, ADC 完成一次采样数据转换, MRAM 完成 2 字节数据存储; 重复进行 ADC 的 CS 高变低和 SPI 读操作完成 3 路数据的连续采集和存储, 直至 3 个存储器存 满时拉高 MRAM 和 ADC 的 CS, 结束数据转换和存储。

由于 SCK 频率最高为 12.5 MHz,因此各路 ADC 采样率最大为 780 ksps。

4 结论

本文针对混合型单片机在可编程专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)中微小型化程度 高、广泛应用于弹体侵彻过载存储测试中之现状和为进一步解决弹体侵彻过载"测不准"问题需提高数据捕获率 之需求,通过对单片机内置的 A/D 性能分析得出通过外置 A/D 采存结构可使其内置 A/D 数据捕获率不足问题得 到改善,利用单片机 SPI 总线提供的串行时钟可将数据捕获率由 200 ksps 提高到 780 ksps。按目前压阻式加速度 传感器最高频响为 150 kHz 考虑,可满足工程上测量要求。 由本文所介绍的外置 A/D 采存结构可见,数据的采集、存储过程完全受串行时钟(SCK)所控制,采样速率由 串行时钟频率所决定,在按目前磁阻随机存储器 MR25H40 所允许的最大串行时钟速率为 40 MHz 考虑,即串行 时钟频率可提高到 40 MHz,数据捕获率(即采样率)最高可达 2.5 Msps,可将压阻式加速度传感器的谐振频率(最 高 1.2 MHz)纳入测量范围,因此将进一步提高 SPI 总线的串行时钟速率作为今后的研究方向。

参考文献:

- [1] 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, 2001. (ZHANG Wen-dong. Design method of storage measurement and its application[M]. Beijing:Higher Education Press, 2001.)
- [2] 孙桂娟,张庆明,王幸,等. 高g值侵彻过载测试相关技术研究[J]. 科技导报, 2008,29(9):26-29.(SUN Gui-juan,ZHANG Qin-ming,WANG Xin, et al. Study on correlation the measurement of ultra-high g penetration overloads[J]. Science& Technology Review, 2008,29(9):26-29.)
- [3] ZHANG W D,CHEN L J,XIONG J J. Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(3):436-447.
- [4] 徐鹏,范锦彪,祖静. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术[J]. 振动与冲击, 2007,26(11):118-122. (XU Peng,FAN Jin-biao,ZU Jing. The acceleration measurement of projectile high velocity penetrating concrete target and acceleration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007,26(11):118-122.)
- [5] Franco R J,Platzbecker M R. Miniature penetrator(MINPEN) acceleration recorder development test[R]. USA:Sandia National Laboratories,Sand98-1172C.
- [6] 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.
- [7] Forrestal M J,Luk V K. Penetration into soil targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(3):427-444.
- [8] Booker P M, Cargile J D, Kistler B L. Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile impacts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(7):926-939.
- [9] 徐鹏,祖静,范锦彪. 高 g 值侵彻加速度测试及其相关技术研究进展[J]. 兵工学报, 2011,32(6):739-745. (XU Peng, ZU Jing,FAN Jin-biao. Research development of high g penetration acceleration test and its correlative technology[J]. Acta Armamentari, 2011,32(6):739-745.)
- [10] Rohwer T A. Miniature, single channel, memory-based, high acceleration recorder (MILLIPEN)[R]. USA: Sandia National Laboratories, Sand99-1392C.
- [11] GAO Jin-zhong, SUN Yuan-cheng, DU Lian-ming, et al. Present research and development on measurement technology of penetrating into hard target with hard recovery recorder[C]// 25th International Symposium on Ballistics. Beijing:[s.n.], 2010.

作者简介:



高进忠(1958-),男,河北省深县人,研究员,主要从事硬回收测量技术研究.email: dgjzh@163.com. **孙远程**(1967-),男,山东省单县人,博士, 副研究员,主要研究方向为高冲击压阻式加速度 传感器.

黄玉川(1971-),男,四川省昌西县人,硕士, 高级工程师,主要研究方向为信号处理.

苗江宏(1983-),男,四川省昌西县人,硕士, 主要研究方向为信号处理.