

## Design of Low-Consumption Transient Pressure Storage Test Instrument\*

MA Yingzhuo, ZU Jing\*, ZHANG Yu

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

**Abstract:** The measurement of chamber pressure of artillery is a key technical index. To obtain the accurate chamber pressure changing law, a transient pressure storage test instrument is designed base on dynamic storage test technology. The system's total consumption is reduced under high precision by selecting components reasonably, adopting multiple power management technology and clock switch skill, and improved the reliability. High strength potting process combined with buffer technology enhancing impact resistant ability of the instrument. The calibration test under simulating application environment shows that this test instrument can measure the maximum pressure of 600 MPa and the curve is complete within error's range. Providing important basis to the research of internal trajectory.

**Key words:** storage test instrument; low consumption; power management

EEACC: 7210; 7320V

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.01.026

## 低功耗瞬态火炮膛压存储测试仪设计\*

马英卓, 祖静\*, 张瑜

(中北大学电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 火炮膛压的测定是检验火炮强度的重要技术指标。为准确地获得火炮膛压的变化规律, 利用动态存储测试技术设计了瞬态火炮膛压存储测试仪。通过合理选择元器件、采用多种电源管理技术和时钟交换技术, 在保证高精度的前提下有效降低了系统整体功耗, 延长了工作时间, 且提高了工作可靠性。使用高强度真空灌封工艺结合缓冲技术增强了测试仪的抗冲击能力。经模拟应用环境下的校准试验, 该测试仪可测量高达 600 MPa 的压力, 所获膛压曲线完整, 误差满足国军标, 为研究火炮内弹道提供了重要依据。

**关键词:** 存储测试仪; 低功耗; 电源管理

中图分类号: TH823; TJ06; TN06

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)01-0128-05

火炮膛压数据是分析内弹道和装药结构合理性、炮弹各部件强度设计、炮架强度和刚度设计、炮弹外弹道初速预测以及发射药性能的基本依据。各种不同口径的火炮在完成整体装配和全火炮系统静态动态调试后, 都需在出厂前进行射击试验以检验其动态性能<sup>[1-2]</sup>。如何实时实况地获取火炮系统在发射过程中的动态参数, 是火炮研制单位和测试技术研究单位尤为关心的问题。目前国外已有几家公司研制出了放入式的电子测压器, 如奥地利 AVL 公司、HPI 公司等。进口的电子测压器可以满足中、小口径火炮膛压测试的要求, 但价格非常昂贵, 且其利用定时器倒计时时开启采样电路的设计对进行测试试验的现场组织性要求很高, 操作不够灵活, 不利于推广使用。

基于上述原因, 利用动态存储测试技术研制了一种低功耗、微小体积的内置式瞬态火炮膛压存储测试仪。此瞬态膛压存储测试仪可放入药室中随火炮的发射直接测量膛压变化信号, 无需改变炮弹的本身结构, 具有自供电, 掉电保持数据等特点, 测试精度高, 可重复使用, 并且设计了智能上电技术, 大大减小了系统功耗, 提高了保温试验中的使用可靠性, 广泛适用于大、中、小口径火炮的膛压测量。

### 1 瞬态膛压存储测试仪设计

#### 1.1 系统构成

瞬态膛压存储测试仪由壳体、压电式压力传感器、电路模块、智能倒置开关、电池、缓冲结构构成。

项目来源: 国家重点实验室基金项目(9140C120704070C12)

收稿日期: 2012-07-06 修改日期: 2012-11-13

压电传感器是在 Kistler 公司订制的石英高压传感器, 具有体积小、精度高、工作温度范围宽的优点, 能够测量 0 bar ~ 6000 bar 范围的压力。电路模块包括模拟适配电路、电源管理电路、外部高频晶振、控制电路、通信电路。其中控制电路以高集成度的 MSP430xG46x 单片机做核心, 包含 12 bit 的 ADC 和 116 kB 的内部 FLASH。智能倒置开关为系统上电控制器件。电池为专门订制的带过充、过放、过流保护功能的聚合物锂电池, 能够耐高低温、抗冲击和振动, 可重复多次使用。图 1 是瞬态膛压存储测试仪的系统构成示意图。

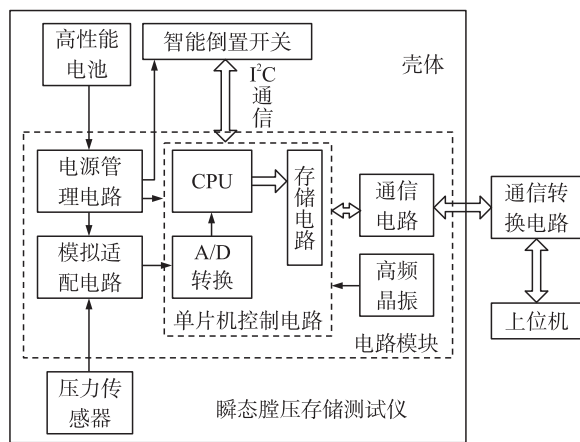


图 1 瞬态膛压存储测试仪系统构成示意图

## 1.2 工作原理

进行膛压测量时, 石英压电传感器通过感知压力变化输出相应的电荷信号; 模拟适配电路将电荷

信号转换成电压信号输入给单片机, 单片机内部的 OA 对微小电压信号进行放大, 放大倍数根据量程可选; ADC 对放大信号进行采集并存储到内置 FLASH 中, 记满 50KW 的膛压信号后停止采样。采样结束后, 通过红外通信接口或串转 USB 接口将数据传输给上位机进行数据分析。

此内置式存储测试仪完全采用无接触式控制, 采样量程、触发阈值、采样频率等工作参数的设置以及数据读取都采用红外通信技术, 并且仪器能够自动记录使用寿命, 实现了智能化控制和无接触式操作, 降低了用户的使用难度, 增强了仪器的可靠性。

## 2 系统低功耗设计

根据国军标和试验勤务的需要, 在进行火炮发射试验前, 常需要对弹药进行 2 ~ 3 天的保温, 内置式瞬态膛压存储测试仪需固封在药室中随弹进行保温, 并且测试仪的体积不能超过药室容积的 2.5%。严格的体积要求限制了电池容量, 为解决有限的电池容量和长久工作时间的矛盾, 必须降低系统的整体功耗, 以保证其能顺利完成火炮膛压的测量。

### 2.1 器件选择

选择低功耗的贴片器件是降低系统功耗、减小电路体积的有效措施。针对复杂的测试环境, 对存储测试系统的主要器件进行了筛选。表 1 列出了主要器件的电气参数和封装体积。器件的表贴封装结合印制电路板的合理布局, 电路模块体积可做到仅为 0.358 cm<sup>3</sup>。

表 1 主要器件筛选信息

器件	型号	典型功耗/ $\mu$ A	供电电压/V	温度范围/ $^{\circ}$ C	体积/ $\text{mm}^3$	功能
电池	订制	-	-	-40 ~ +55	640	提供电源
压电式压力传感器	订制	-	0	-50 ~ +200	1550	转换压力信号为电荷信号
加速度计	MMA845x	6 <sup>(1)</sup> /1.8 <sup>(2)</sup>	2.8	-40 ~ +85	9	智能倒置开关的主要部件
电荷放大器	OPA340	750	2.8	-40 ~ +85	13.27	转换电荷信号为电压信号
电源管理器	LP5996SD	1000 <sup>(1)</sup> /110 <sup>(2)</sup>	2.8	-40 ~ +125	7.2	提供两路额定稳压电源
外部晶振	SG310-SCF	1500 <sup>(1)</sup> /1.0 <sup>(2)</sup>	2.8	-40 ~ +85	8.40	高频晶振源
内置红外收发器	GP2W0116YPS	90	2.8	-40 ~ +85	36.63	通信接口
单片机	MSP430xG461x	400 <sup>(1)</sup> /0.22 <sup>(2)</sup>	2.8	-40 ~ +85	38.82	主控电路

注: 1. 器件工作时典型电流; 2. 器件低功耗待机时典型电流。

### 2.2 智能倒置开关

智能倒置开关是瞬态膛压存储测试仪中重要的电源控制器件, 是存储测试仪能够实现随弹保温试验的关键器件。此智能倒置开关以数字加速度计为核心器件, 可通过感知三轴重力值来判断方向的变

化, 从而控制系统上电。带有防抖动延时功能, 可通过 I<sup>2</sup>C 总线与控制电路进行数据传输。较传统倒置开关降低了 80% 的功耗, 减小了 97% 的体积, 将抗冲击能力提高在 10 000 g<sub>n</sub> 以上, 大大增强了存储测试仪的使用性能。

智能倒置开关内置于瞬态存储测试仪中,正式试验前随存储测试仪放入火炮药室中随弹保温。此时为节省能源关闭系统模拟电路、存储电路和通信电路,仅开启智能倒置开关,单片机进入超低功耗态。在火炮准备发射前 5 min,利用翻弹机旋转弹丸,使弹丸姿态处于非常规姿态(弹丸前端朝下) 0.5 min 以上,智能倒置开关判断 z 轴重力值在此连续时间内都小于  $-0.8g_n$ ,则发出开启命令使能各功能模块,使存储测试仪进入循环采样状态。

防抖动延时功能和智能判断功能可识别外界动作的类别,防止弹丸在运输过程中由于车辆颠簸或人为误操作导致的误上电现象。智能倒置开关的运用使膛压存储测试仪在连续保温 3 天后仍有足够的电量进行火炮发射时的膛压测量,提高了仪器的工作可靠性。图 2 显示了智能倒置开关 z 轴所受的重力值与摆放姿势的关系。

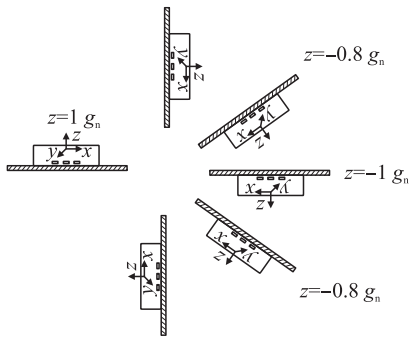


图 2 智能倒置开关 z 轴所受重力值与摆放姿势的关系示意图

### 2.3 电源管理设计

为保证供电可靠性和灵活性,瞬态膛压存储测试仪采用数字电路和模拟电路分别供电方式,由电源管理芯片 LP5996SD 提供两路独立、稳定的 2.8 V 电压。存储测试仪在值更状态仅为数字电路提供电源,并在采样状态开启模拟适配电路的电源。这种电源分支管理方法可消除无用的损耗,避免不用的器件一直消耗电量,降低功耗同时提高了工作的稳定性。

特别订制的聚合物锂离子电池不仅在体积上轻巧,还具有单体容量大、寿命长、工作温度范围宽等优点,为膛压存储测试仪在高温、常温、低温下正常工作提供了保障。

### 2.4 系统时钟选择

CMOS 电路中工作电压和时钟频率对系统整体功耗的影响较大<sup>[3-4]</sup>。在本系统中,时钟主要提供给单片机控制电路,MSP430 单片机功耗与时钟频率的关系如式(1):

$$I_{(AM)} = I_{(AM)} [1 \text{ MHz}] \times f_{(System)} [\text{MHz}]^{[5]} \quad (1)$$

由式(1)可知 MSP430 单片机系统选择最高 8M 时钟频率时的功耗是最低时钟频率时功耗的 8 倍以上。为降低晶振对电流的消耗,在系统对时钟要求不高的情况下选择 MSP430 内部的 DCO(数控振荡器)做系统时钟,在系统高速采样和通信的时候选择外部高频晶振做系统时钟<sup>[6]</sup>。图 3 是瞬态膛压存储测试仪系统时钟源随工作状态切换的示意图。

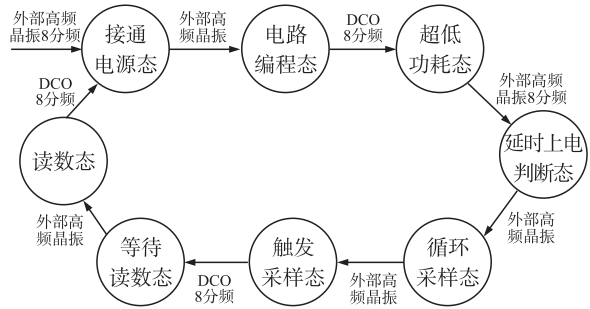


图 3 瞬态膛压存储测试仪工作状态与系统时钟源对照示意图

## 3 抗冲击设计

### 3.1 防护结构设计

瞬态膛压存储测试仪在测试环境中要承受高压、高冲击的作用,为保护内部电路和传感器等敏感元件,设计了国中国防护机构。即选用高强度材料做外部壳体,并用能很好分散受力的筒形钢壳单独保护核心电路模块。壳体材料选用超高强度的马氏体时效钢,具有两千兆帕以上的屈服强度和抗拉强度,并经过热处理达到额定强度,保护整体测试系统不受损坏。

### 3.2 护膛环设计

护膛环是具有高硬度的环形钢体,套在膛压存储测试仪最外部壳体的前、后端,车有螺纹,可灵活更换。在火炮发射时,膛压存储测试仪会受到气体的冲击而碰撞药室壁,护膛环阻挡了机械碰撞对传压端面的伤害,进而保护了压力传感器。图 4 是壳体外形设计的三维效果图。

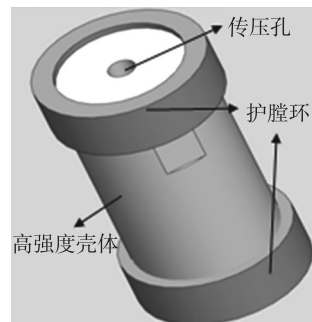


图 4 外形三维效果图

### 3.3 缓冲技术

环氧树脂凝固后具有高强度、高硬度、绝缘的特点,运用真空灌封工艺和环氧树脂将电路模块固封在内部筒形钢壳中,避免电路在高冲击过载作用下因灌封材料塑性变形造成的导线崩断、焊盘脱落等损害,还可以防止焊点之间的短路,能够大大增强电路的抗冲击能力<sup>[7-8]</sup>。同时在电路模块和传感器的不同部位放置缓冲垫和青稞纸,能够有效起到缓冲、隔热、绝缘的作用<sup>[9]</sup>。

## 4 模拟应用环境下的校准

为保证瞬态膛压存储测试仪的测试精度,需进行模拟应用环境下的准静态校准试验,得到膛压存储测试仪的动态灵敏度<sup>[10]</sup>。

模拟应用环境下的准静态校准系统由模拟膛压发生器、标准传感器、电荷放大器、多通道数据采集卡和数据处理系统构成。互相匹配的标准传感器和电荷放大器都经过兵器工业集团 204 所溯源。模拟膛压发生器能够产生幅值在 120 MPa ~ 800 MPa 的压力,可对膛压存储测试仪进行高温、常温、低温下的准静态校准试验。校准时,将被校准测试仪同标准传感器一同安置在模拟膛压发生器中,膛内压力同时作用在其上,采集卡将采集到的电压信号传输至计算机中进行处理,当标准测试系统两两间相关系数均在 0.999 7 以上,可认为标准测试系统受到同一压力源的激励<sup>[11]</sup>。当标准测试系统的标准偏差估计值不大于标准测试系统的误差判定值时,则认为试验压力值可做为灵敏度计算值。在同一温度环境下进行不同压力值的多次试验,利用最小二乘法拟合采集的数据,得到动态灵敏度直线方程  $y=ax+b$ 。

表 2 是常温下 3# 瞬态膛压存储测试仪动态灵敏度直线方程计算值与实测数据的对比。从表中可看出,动态灵敏度直线方程得到的压力值与实测值相差较小,在 0 MPa ~ 3 MPa 以内,瞬态膛压存储测试仪误差范围满足国军标要求。

表 2 3# 瞬态膛压存储测试仪动态灵敏度直线方程  
计算值与实测数据对比表(常温)

存储测试仪的 bit 值	灵敏度方程 计算值/MPa	实测压力值 /MPa	计算值与实测 值之差/MPa
1 180	197.058 8	199.178	-2.119 2
1 792	294.876 4	296.468	-1.591 6
2 181	365.978 2	367.235	-1.256 8
2 833	477.214 5	475.323	1.891 5
3 285	547.135 6	546.194	0.941 6

## 5 实测结果

### 5.1 实测功耗分析

根据国军标 GJB2973A—2008 的要求,膛压存储测试仪上电前等待的时间不小于 72 h; 循环采样、等待触发的时间在常温和高温下不小于 4 h, 在低温下不小于 1 h; 等待读数的时间不小于 1 h。对 20 个瞬态膛压存储测试仪进行不同温度环境下的静态测试并记录不同状态下的功耗, 根据式(2)

$$P_C = \sum_{i=1}^{20} P_{ci} t_{ci} \quad (2)$$

计算常温(25 ℃)、高温(+55 ℃)、低温(-40 ℃)下的系统总功耗  $P_C$ 、 $P_H$ 、 $P_L$  为:

$$\begin{cases} P_C = 18.944 1 \text{ mAh} \\ P_H = 18.884 7 \text{ mAh} \\ P_L = 7.443 3 \text{ mAh} \end{cases} \quad (3)$$

内置电池在常温和高温下容量为 45 mAh, 低温下容量为 33 mAh。由计算数据可以看出, 内置式瞬态膛压测试仪完全能够胜任不同温度下的保温试验。

### 5.2 实测膛压曲线

利用模拟膛压发生器对瞬态膛压存储测试仪进行动态测试。具体操作时, 将装配好的瞬态膛压存储测试仪与铜球测压器一同放入模拟膛压发生器中, 点燃黑火药引燃发射药, 产生模拟的膛压信号<sup>[12]</sup>。膛压存储测试仪采集并记录此压力信号后, 取出其与上位机相连, 读取数据可分析火药燃烧过程中压力的变化规律。图 5 是所测的压力曲线, 两条压力曲线的峰值分别是 384.6 MPa 和 423.8 MPa, 相应的铜球测压

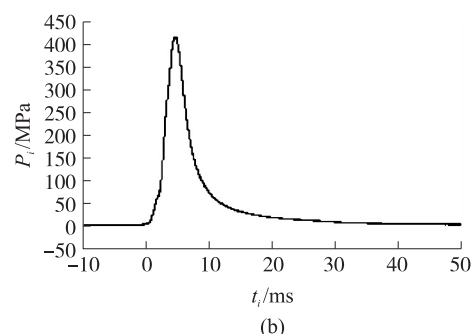
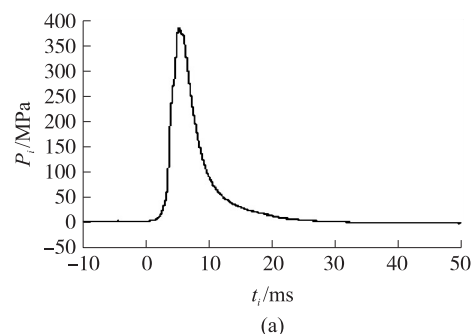


图 5 膛压测试曲线

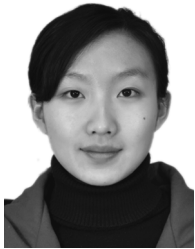
器所测压力分别为 386.8 MPa 和 425.2 MPa,两种方法测得的压力值具有较好的一致性。上升时间分别为 3.23 ms 和 3.87 ms,脉宽分别 26.8 ms 和 31.2 ms,从图中可看出:所测的膛压信号完整,曲线平滑,符合内弹道设计和国军标的要求。

## 6 结论

数据显示,通过对系统主要器件的合理选型,并运用多种电源管理技术和系统时钟交换方法,在保证测试精度和可靠性的前提下有效地降低了存储测试系统的整体功耗,很好地解决了存储测试仪工作时间短的瓶颈。此瞬态膛压存储测试仪体积小于 22 cm<sup>3</sup>,测压范围 0 MPa ~ 600 MPa,能够测试 57 mm 口径以上的火炮,使用灵活方便,对火炮内弹道研究、身管设计等提供了重要的参考价值。

### 参考文献:

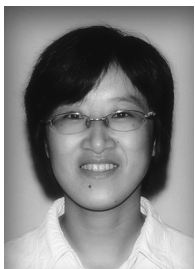
- [1] 孙强. 火炮膛压的测定方法[J]. 一重技术,2002(2):51-52.
- [2] 张相炎. 火炮设计理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005. 153-161.
- [3] 杨敬杰,杨骏. 探讨嵌入式系统中低功耗的设计理念[J]. 电脑编程技巧与维护,2011(2):82-84.
- [4] 靳孝峰,邢文生. 一款三轴磁检测系统低功耗设计与应用[J]. 传感技术学报,2008,21(11):1950-1953.
- [5] Texas Instruments. MSP430xG461x Data Sheet[EB/OL]. <http://www.ti.com>. 2009.
- [6] 黄学功,陈荷娟. 炮口感应装定引信电路低功耗设计[J]. 南京理工大学学报,2007,31(5):550-553.
- [7] 李芝华,谢科予,郑予樵. 磨碎玻璃纤维/聚氨酯/环氧灌封材料的形态结构与力学性能[J]. 中南大学学报(自然科学版),2007,38(1):51-55.
- [8] 叶丙睿. 电真空组件固体灌封材料及工艺研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.
- [9] 苏世明. 电子设备的抗震动抗冲击设计分析[C]//中国电子学会电子机械工程分会 2003 年论文集,2003:193-196.
- [10] ZU Jing, ZHANG Zhijie, CHEN Anshi. et al. New Concept Dynamic Testing and Calibration Techniques[C]//Proceeding of MSC, USA, 2006:1663-1666.
- [11] 王卿,祖静,张瑜. 基于加权数据融合和相关性的微型电子测压器改进的动态校准方法[J]. 传感技术学报,2010,23(9):1289-1292.
- [12] 邓欣伟. 内弹道的膛压检测方法研究[J]. 沈阳理工大学学报,2008,27(3):9-11.



马英卓(1987-),女,汉族,北京人,硕士研究生,研究方向为动态测试与智能仪器,txw\_2008@yahoo.com.cn;



祖静(1933-),男,汉族,北京人,教授,博士生导师,研究方向为仪器科学与技术,动态测试与智能仪器等,jingzu@publicity.sx.cn;



张瑜(1979-),女,汉族,博士研究生,讲师,研究方向为动态测试与智能仪器,snow-zhang@nuc.edu.cn。