

文章编号: 1671-7449(2024)03-0240-08

国产化低功耗嵌入式火炮压力测试系统设计

王浩达^{1,2}, 张领辉³, 丑修建^{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. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051; 3. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 针对当前国产化膛压测试系统存在的功耗较大问题, 设计了基于RISC-V开源指令集CH32V203微控制器的国产化低功耗火炮压力测试系统。为了降低待机功耗, 进行了低功耗芯片选型, 并通过多模块分电源使能管理的方法减少非工作态模块功耗; 利用倒置开关实现系统不同运行状态的感知, 同时进行了详细的系统运行状态机设计, 降低系统运行态功耗。经不同工况下的模拟应用测试, 测试系统具有良好的低功耗特性, 所设计的国产化火炮压力测试系统最低功耗为8.14 mAh, 能够满足国军标GJB2973A—2008的应用需求, 为国产化膛压测试系统的低功耗设计提供了参考方案, 推动了膛压测试系统的国产化替代进程。

关键词: 电子测压器; 火炮压力测试; 微型化; 低功耗

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024031

引用格式: 王浩达, 张领辉, 丑修建. 国产化低功耗嵌入式火炮压力测试系统设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 240-247.

WANG Haoda, ZHANG Linghui, CHOU Xiujian. Design of domestically low-consumption internal artillery chamber pressure test system[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(3): 240-247.

Design of Domestically Low-Consumption Internal Artillery Chamber Pressure Test System

WANG Haoda^{1,2}, ZHANG Linghui³, CHOU Xiujian^{1,2*}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to solve the problem of high power consumption in the domestic chamber pressure test system, a low power consumption chamber pressure test system based on RISC-V open source instruction set CH32V203 microcontroller is designed. In order to reduce the power consumption in standby mode, the low power chip is selected, and the multi-module power supply is used to reduce the power consumption in non-working mode, the perception of different running states of the system is realized by using the inverted switch, and the detailed design of the system running state machine is carried out. The test system has good low power consumption, and the minimum power consumption of the chamber pressure test system is 8.14 mAh, which can meet the application requirements of GB2973A—2008, it provides a reference for the Low-power electronics of domestic chamber pressure test systems, and promotes the process of domestic substitution of chamber pressure test system.

Key words: electronic manometer; artillery pressure test; miniaturization; lowpower consumption

收稿日期: 2023-09-30

作者简介: 王浩达(1998—),女,硕士生,主要从事动态测试与智能仪器研究。E-mail: s202106071@st.nuc.edu.cn。

* 通信作者: 丑修建(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能微纳器件与系统等研究。E-mail: chouxujian@nuc.edu.cn。

0 引言

火炮膛压是检测火炮强度的重要参数之一^[1]。火炮系统发射过程中可靠获取压力动态数据将对火炮设计及性能验证提供有力的数据支撑^[2]。进行火炮发射试验前,火炮压力测试系统需固封在药室中随弹进行 2~3 d 的保温实验,为了确保小体积微电源情况下系统仍能可靠工作,需要对测试系统进行细致的低功耗设计。

国外研制的嵌入式火炮压力测试系统主要使用定时器倒计时控制采样时间进行采样,成本高且灵活性差,因此,针对这些问题,国内进行了一系列压力测试系统设计,并针对压力测试系统的功耗问题,研制出了具有电源控制的嵌入式火炮压力测试系统,减小了系统工作功耗^[3-9]。目前国内嵌入式火炮压力测试系统微控制器(Micro Controller Unit, MCU)大部分采用 TI 公司的 MSP430 系列单片机。中北大学裴东兴等^[6]使用 MSP430 作为嵌入式火炮压力测试系统的 MCU,进行了嵌入式火炮膛压测试。南京理工大学苏艾^[7]同样使用 MSP430 系列的 MSP430F149 作为数字部分的控制芯片来进行膛压和炮口初速的测量。考虑到 ARM(Advanced RISC Machine)微控制器的高性能低成本,中北大学冯若晔^[8]研究了一种以 ARM7 为主控芯片的新型电路系统,选择 LPC2148 作为火炮压力测试系统的主控芯片。使用国外芯片作为控制系统的 MCU 存在数据安全问题^[9],RISC-V 内核开源,成本相对较低,安全可控,其指令集仅有 47 条,通过组合扩展可以生成模块化的指令集,这使得 RISC-V 开源内核易于实现低功耗运行^[10-12]。目前,国内 MCU 生产厂商均在积极开发 RISC-V 内核系列产品,国内研究人员也越来越多地将在 RISC-V 内核 MCU 应用在不同领域中^[13-15]。

考虑到火炮压力测试系统的安全需求,基于国产 RISC-V 微控制器 CH32V203 进行了火炮压力测试系统样机设计。为了降低测试系统功耗,有效延长系统工作时间,本设计采用低功耗国产器件,通过多模块分电源使能管理、倒置开关等技术实现系统的待机态与运行态低功耗设计,并对测试系统样机进行了环境功耗测试验证。

1 系统方案设计

火炮压力测试系统的测试环境特殊,系统需要在高温高压的环境中仍具有高可靠性,且火炮

压力测试系统在火炮发射前需随弹保温。针对火炮压力测试系统的工作环境,通过低功耗设计的电子测压器能够承受火炮燃烧的瞬时高温,电子测压器有 4 个采样通道,采样速率为 150 kHz,可编程设定触发压力值和采样速率。

1.1 系统工作原理

嵌入式火炮压力测试系统需要放置在弹药药室中应用。根据 GJB2973A—2008 火炮内弹道测试方法规定,火炮压力测试系统体积应小于所适用火炮药室容积的 2.5%^[16]。为了满足小体积、抗干扰等设计需求,将测试系统分为模拟模块、数字模块和电源模块三部分,系统整体框图如图 1 所示。

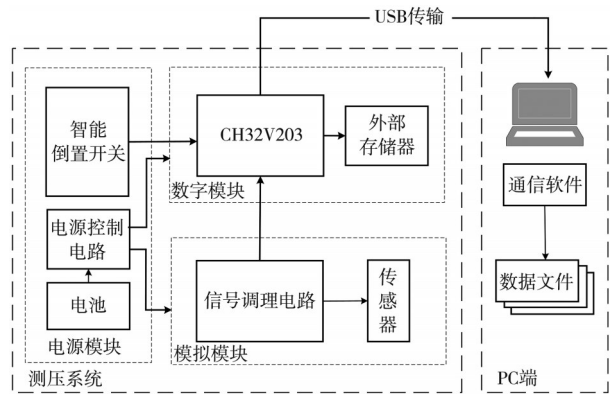


图1 火炮压力测试系统整体框图

Fig. 1 Overall block diagram of chamber pressure testing system

模拟模块将压力传感器采集到的压力信号通过信号调理电路传输给数字模块。数字模块选用 CH32V203 系列单片机处理采集到的数据并存储,且实现与上位机通信和上传数据文件功能。电源控制模块主要由电源控制电路、智能倒置开关和电池组成。电源控制模块使用倒置开关采集火炮压力测试系统的姿态信息,判断整个系统是否处于姿态异常状态,控制整个系统的电源状态。电池通过双路 LDO 降压稳压后,给数字模块和模拟模块供电。

1.2 系统低功耗设计机理

系统设计既要兼顾系统性能也要注意功耗问题。对于电路系统而言,系统功耗可分为待机态功耗和运行态功耗两种。

系统待机态功耗 P_s 可表示为

$$P_s = \sum_{i=1}^n I_{L_i} \cdot V_{DD} + V_{DD}^2 \cdot f_{CLK} \cdot \sum_{j=1}^m a_j \cdot c_j + V_{DD} \cdot \sum_{k=1}^n I_{SCK_k} \quad (1)$$

式中: m 为节点数; n 为器件总数; V_{DD} 为工作电

压; f_{CLK} 为时钟频率; I_{L} 为反向漏电流; I_{SC} 为瞬态短路电流; a_j 为节点充电率; c_j 为节点电容。

系统运行态功耗 P_{D} 可表示为

$$P_{\text{D}} = V_{\text{DD}}^2 \cdot f_{\text{CLK}} \cdot \alpha \cdot \sum_{k=1}^m c_k, \quad (2)$$

式中: m 为节点数; V_{DD} 为工作电压; f_{CLK} 为时钟频率; α 为活动因子; c_k 为节点负载电容。

因此, 系统总功耗 P_{T} 可表示为

$$P_{\text{T}} = P_{\text{S}} + P_{\text{D}}. \quad (3)$$

根据上述公式可以看出, 为了降低系统功耗, 需要降低系统待机态功耗与运行态功耗。待机态功耗与待机器件(节点)数量、工作电压、待机工作频率、器件性能(漏电流)等相关。运行态功耗则主要与运行时系统的节点数目、工作电压与工作频率相关。通过上述角度分析并采取相应的设计方案, 可以有效降低嵌入式火炮压力测试系统的总功耗。

2 待机态功耗设计

待机态功耗控制主要通过两个方法实现: 一是选择功耗相对较低的器件, 有效降低火炮压力测试系统中各个模块的静态功耗; 二是待机状态时, 选择性关断模块, 减少待机节点数目, 降低整个系统的静态功耗。

表1 MCU功耗分析

Tab. 1 MCU power consumption analysis

MCU型号	最高主频/MHz	运行模式/ $(\mu\text{A}\cdot\text{MHz}^{-1})$	睡眠模式/ $(\mu\text{A}\cdot\text{MHz}^{-1})$	停止模式/ μA	待机模式/ μA
STM32L05	32.00	140.00	37.00	0.40	0.27
GD32L233	64.00	66.00	36.00	1.70	0.44
CH32V203	144.00	52.4.00	20.80	12.15	0.50
MSP430	25.00	200.00	45.00	14.00	0.70
LPC2148	60.00	150.00	—	—	0.70

火炮压力测试系统中, 电荷放大电路中的运放耗电量占较大比重, 合理选取功耗较低的运放以及控制运放的工作时间会有效降低系统总功耗。运放选择圣邦微电子生产的型号为SGM723

2.1 器件选型

针对复杂的测试环境, 对火炮压力测试系统的主要器件进行了筛选, 选择低功耗器件降低系统整体功耗。

MCU选择沁恒微电子CH32V203G6U6微控制器, CH32V203G6U6基于32位RISC-V内核设计的工业级增强型低功耗通用微控制器, 高性能, 最高支持144 MHz系统主频, 低功耗, 运行功耗低至45 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 。采用QFN28封装形式, 能够满足系统小型化需求。芯片内置32 kB程序存储Flash和10 kB SRAM。支持硬件乘法, 能够有效减少运算时间。芯片内部集成2个12位ADC、1个SPI和1个IIC等丰富外设资源。

根据功耗的对比, CH32V203系列的MCU功耗同MSP430与ARM7-LPC2148相比更低, 且RISC-V开放的架构更利于产品开发。MSP430与CH32V203都属于低功耗的控制器, 但CH32V203系列为国产化芯片, 其成本低, 运算速度更快, 内部设备丰富, 兼容性高。在低功耗设计的需求下, 32位CH32V203的运算效率比16位MSP430更具优越性。MCU功耗分析表如表1所示。

的单电源轨至轨运算放大器, 供电电压为2.1~5.5 V, 静态电流1.2 mA, 在不工作时的漏电流仅为0.5 μA 。

表2列出了主要器件的相关信息。

表2 主要器件信息

Tab. 2 Main device information

器件	型号	功耗/ μA	供电/V	温度/ $^{\circ}\text{C}$
压力传感器	SAYL203Y	—	0	-40~150
倒置开关	自制	10 ⁽¹⁾ /20 ⁽²⁾	3	-40~85
电源管理器	SGM2022	190 ⁽¹⁾ /2 500 ⁽²⁾	3.7	-40~85
运算放大器	SGM723	0.5 ⁽¹⁾ /3 600 ⁽²⁾	3.3	-40~125
单片机	CH32V203	0.5 ⁽¹⁾ /4 400 ⁽²⁾	3	-40~85

注: (1) 器件待机态电流; (2) 器件正常工作电流。

2.2 电压待机态管理

整个系统采用数字模块和模拟模块分别供电

的方式, 避免暂时无需工作的模块耗电, 以有效降低系统待机态功耗, 确保火炮压力测试系统供电的稳定性和可靠性。本设计中选用电源芯片

SGM2022 提供两路独立的稳定电压，分别为 3.3 V 和 3 V。电源管理电路如图 2 所示。

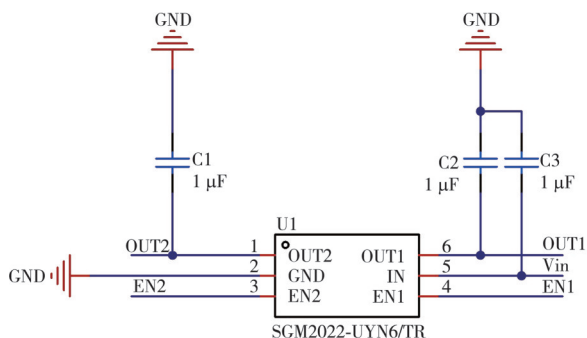


图 2 电源管理电路

Fig. 2 Power management circuit

通过对所设计的火炮压力测试系统进行初步待机态功耗测试，耗电较大的部分为数字模块。数字模块由 CH32V203G6U6、外部晶振、复位电路和 NAND FLASH 组成。数字电路以 CH32V203G6U6 微控制器为核心，使用 NAND FLASH 存储器保存数据，通过 USB 上传数据至上位机。数字模块硬件框图如图 3 所示。

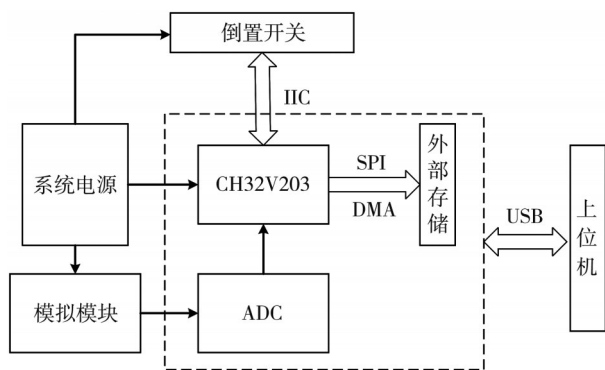


图 3 数字模块硬件框图

Fig. 3 Hardware block diagram of digital module

数字模块待机状态时功耗为 85.84 μA 。分析其初始设计，数字模块待机状态时，各外设并未进行选择关闭，从而使待机态功耗增大。因此，对数字模块待机态工作模式进行优化，减少功耗较大外设的运行时间，在无需工作时关闭外设，通过上述分析与设计，测得数字模块的待机态功耗为 78.53 μA ，数字模块在待机态降低了 8.55% 的功耗。

3 运行态低功耗设计

在低功耗设计中，不仅要求器件整体运行时低电流，还希望器件可以在特定情况下精确地开启或关闭某些功能，实现系统总功耗的智能管理。在火炮压力测试系统工作过程中，通过倒置开关动态控

制 MCU 的电源模式；并根据系统运行状态的不同，动态关断相关功能模块来实现系统运行态低功耗设计。

3.1 倒置开关

倒置开关是火炮压力测试系统关键的电源控制器件，能够实现保温试验过程中系统的运行态功耗控制。使用倒置开关控制 CH32V203G6U6 电源工作模式，使其内部集成的外设资源在程序固件控制下进入休眠状态。对 MCU 外设时钟进行控制，保证功能实现的同时对功耗优化。

CH32V203 的电源工作模式是通过模块化运行管理和 MCU 的工作状态相结合的方式支持系统低功耗的需求。MCU 内电源状态寄存器 PWR_CSR 中的 EWUP、PVD0、SBF、WUF 与功耗有关。CH32V203 芯片有 3 种低功耗模式，待机模式的功耗最低，进入待机模式后的芯片功耗可低至 0.5 μA 。图 4 为 CH32V203 在不同功耗模式下消耗电流的对比图。

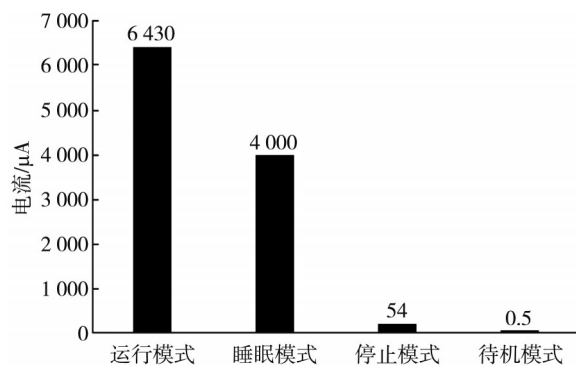


图 4 MCU 工作模式电流比较

Fig. 4 MCU operating mode current comparison

在系统运行全流程中，MCU 参与得越少越有助于降低功耗。由于系统有低功耗的需求，选择充分利用 MCU 的低功耗配置特性。系统根据需要使用软件将 MCU 设定到某一低功耗工作状态下，在需要使用时，通过中断将 MCU 从待机状态中唤醒，完成工作后进入待机状态。数字模块通过 IIC 总线获取倒置开关测得的数据，判断系统姿态的变化，以此来控制单片机电源工作模式。MCU 的中断输入引脚连接开关中断输出引脚，倒置开关在后台侦测物体动作期间，系统保持在低功耗模式。当侦测到中断事件时，MCU 从待机模式被唤醒，查看该中断是否需要处理。MCU 在处理中断过程中，关闭未用到的外设资源时钟或者降低时钟频率来降低系统动态功耗。通过实验测得，采用火炮压力测试系统倒置开关后可以降低 98.86% 的功耗，大幅增强了火炮

压力测试系统的整体性能。

3.2 系统状态设计

状态设计是根据系统的运动规律来确定系统组织结构的过程。通过对整个系统运行状态进行划分,可以更好地控制系统的功耗,图5为系统状态图。

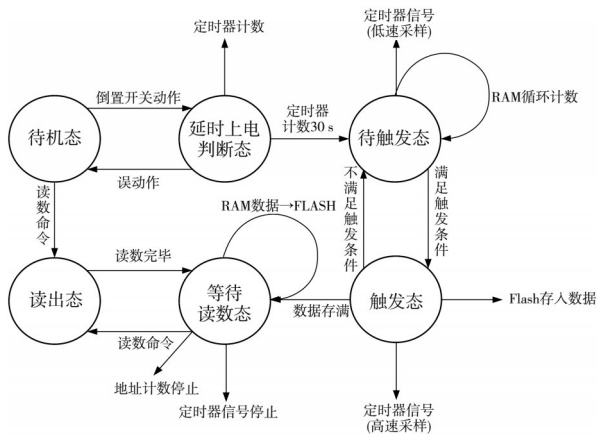


图5 系统状态图

Fig. 5 System state diagram

系统接通电源,初始化完成后进入待机态,此时,系统电流只有 $111.8\ \mu\text{A}$ 。如果倒置开关触发,系统进入延时上电判断态。倒置开关初始化为低功耗模式,选择 $1\ \text{kHz}$ 采样率,倒置开关 $1\ \text{s}$ 更新一次加速度计寄存器的数据信息,MCU每隔 $1\ \text{s}$ 读取一次寄存器中的数据,通过计算判断系统的姿态情况。若系统 $30\ \text{s}$ 内姿态一直处于倒置时,则认为上电成功,单片机退出待机模式,进入待触发态,使能所有的外设开始采样。延时上电判断可以避免人为或者运输中的误动作导致误上

电。系统在待触发态,主时钟频率将调整到 $48\ \text{MHz}$,同时进行低频循环采样,等待触发信号,此时功耗相对较大,系统的电流为 $25.1\ \text{mA}$ 。在待触发态测得压力信号的电压值会作为电压信号的基准值,压力信号与设定的基准值进行比较,连续3次高于设定值就进入到触发态。触发态下,系统处于高速采样阶段,功耗最大,此时系统电流可达 $51.22\ \text{mA}$ 。

系统把触发后的压力信号转换为电压信号缓存后存入FLASH中。在此,采用DMA(Direct Memory Access)传输数据,因为无需MCU内核介入,不仅可以提高数据传输效率,同时可以有效降低传输数据时的电能消耗。触发高速采样过程中,当存满预留存储区域,系统将退出触发态,退出前把待触发态下循环存储的压力数据转存到FLASH中,此时得到完整的压力数据,系统进入等待读数据态。系统在等待读数据态会关闭采样相关模块,主动降低系统功耗。如果在等待过程中识别到外部读数口连接信号,系统将进入读出态。此时,将根据上位机命令开始上传数据,数据传输完成后,系统回到待机态。

4 实际测验

4.1 系统功耗测试

根据式(1)、式(2)可知,提供给系统更低的工作电压和时钟频率可以降低系统的功耗。表3所示为在不同工作电压和时钟频率情况下测得的触发态和待机态的电流。

表3 不同工作电压和时钟频率的功耗实测

Tab. 3 Measurement of power consumption at different operating voltages and clock frequencies

数字系统/V	模拟系统/V	主时钟频率/MHz	触发态/mA	待机态/ μA
3.3	3.3	72	58.37	123.1
3.3	3.3	48	52.8	109.3
3	3.3	72	54.21	123.1
3	3.3	48	51.22	109.3

在主时钟频率为 $48\ \text{MHz}$ 的情况下,提供更低工作电压,触发态减小了 2.99% 的系统功耗;供电电压一致的情况下,降低时钟频率,触发态减小了 5.52% 的系统功耗,待机态减小了 9.18% 。表4所示系统主频为 $48\ \text{MHz}$,工作电压分别为 $3.3\ \text{V}$ 和 $3\ \text{V}$ 情况下的系统不同状态下的功耗实测。

计算得到的系统功耗最小为 $8.14\ \text{mAh}$ 。

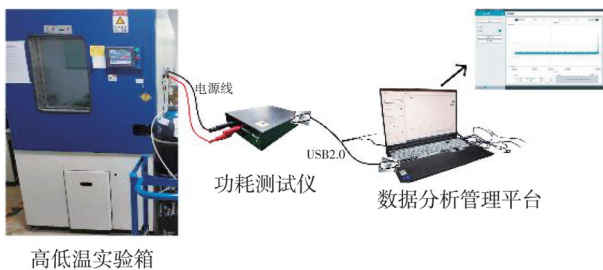
表4 不同状态的功耗实测

Tab. 4 Actual measurement of power consumption in different states

系统状态	工作时长	工作电流
待机态	72 h	$109.3\ \mu\text{A}$
延时上电判断态	30 s	$9.78\ \text{mA}$
待触发态	2 ms	$25.1\ \text{mA}$
触发态	100 ms	$51.22\ \text{mA}$

4.2 环境功耗测试

根据国军标 GJB2973A—2008 的实验要求,开展火炮压力测试系统样品实物环境功耗测试,低温贮存温度为-40℃,高温贮存温度为55℃,高低温箱内的环境调节到相应的温度,并在该条件下使产品温度达到稳定后,系统工作相应的时长。测试系统构成如图 6 所示。



高低温试验箱

图 6 火炮压力测试系统环境功耗测试

Fig. 6 Environmental power consumption testing of chamber pressure testing system

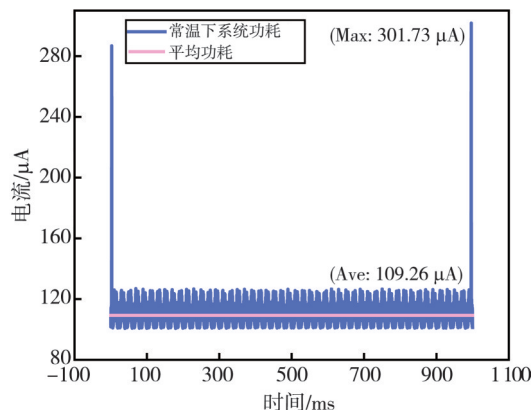
环境功耗试验是通过高低温试验箱(CTP705F)模拟高温、低温和常温环境实现的。在实验过程中,由于倒置开关 1 s 判断一次系统状态实现待机态系统低功耗控制的功能,功耗测试仪(BLU-100)可以验证待机态系统低功耗的可行性。火炮压力测试系统样机在待机态不同环境温度下的实际功耗曲线如图 7 所示。由图 7(a)可知,常温状态下,0 ms 时倒置开关进行判断系统响应电流为 286.74 μA,经过 1 000 ms 后,倒置开关再次判断系统响应电流为 301.73 μA,与理论设计的倒置开关 1 s 判断 1 次相符合。进一步测试的高温、低温环境下待机态的系统功耗响应(如图 7(b)、(c)所示),仍然符合倒置开关的理论设计。在环境功耗试验中,待机态下常温、高温和低温环境每秒的平均功耗电流分别为 109.16, 125.53 和 94.27 μA。由此可知,火炮压力测试系统满足国军标 GJB2973A—2008 的实验要求。

根据国军标 GJB2973A—2008 的要求,火炮压力测试系统在系统待机态的时间不小于 72 h;在高温与常温环境下,系统应该至少有 4 h 处于待触发态,低温环境下要求至少 1 h;等待读数态要求至少 1 h^[3]。基于上述需求,系统待机态功耗 P 可表示为

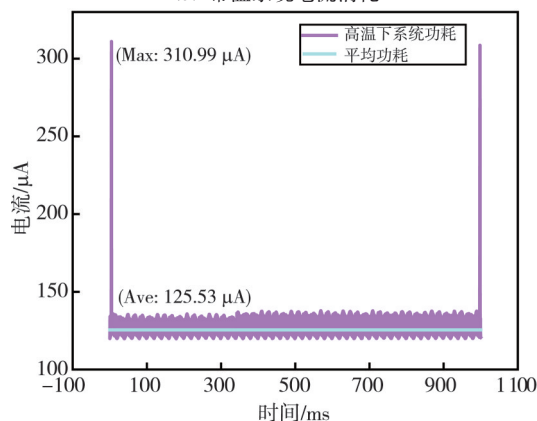
$$\begin{cases} P_C = p_{c1}t_{c1} + p_{c2}t_{c2} + p_{c3}t_{c3}, \\ P_H = p_{h1}t_{h1} + p_{h2}t_{h2} + p_{h3}t_{h3}, \\ P_L = p_{l1}t_{l1} + p_{l2}t_{l2} + p_{l3}t_{l3}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_C 为常温态功耗; p_{c1} 为常温下待机态功耗; p_{c2} 为常温下带触发态功耗; p_{c3} 为常温下等待

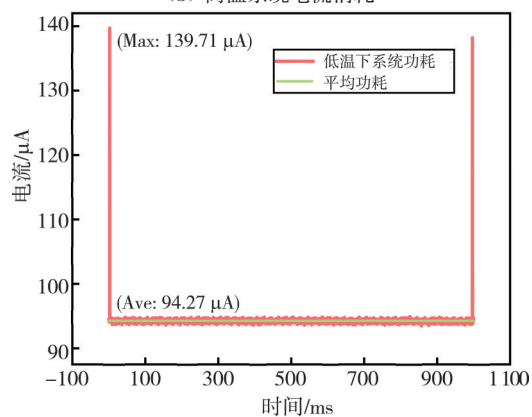
读数态功耗。同理可得,在高温及低温下的系统总功耗为 P_H 和 P_L 。



(a) 常温系统电流消耗



(b) 高温系统电流消耗



(c) 低温系统电流消耗

图 7 不同温度下的系统电流消耗曲线

Fig. 7 System current consumption curves at different temperatures

根据式(4)可以计算出系统常温下的功耗为 113.77 mAh,高温下的功耗为 114.94 mAh,低温下的功耗为 37.39 mAh。一般系统电源所用小型锂电池容量为 200 mAh,本文所设计的国产化火炮压力测试系统在 4 通道、150 kHz 采样频率、3.3 V 和 3 V 稳定供电的情况下,满足了系统压力

测试应用在国军标下的需求。

4.3 膛压测试实验

图8为火炮压力测试系统样机实物图,使用该样机进行了膛压信号测试。图9为某次系统压力测试信号曲线,从测试的压力信号可以看出峰值压力为242.76 MPa,脉宽为15.3 ms,上升时间为1.01 ms,电子压力测试系统符合系统的设计,具有可应用性。



图8 火炮压力测试系统样机实物图

Fig. 8 Physical diagram of artillery pressure testing system prototype

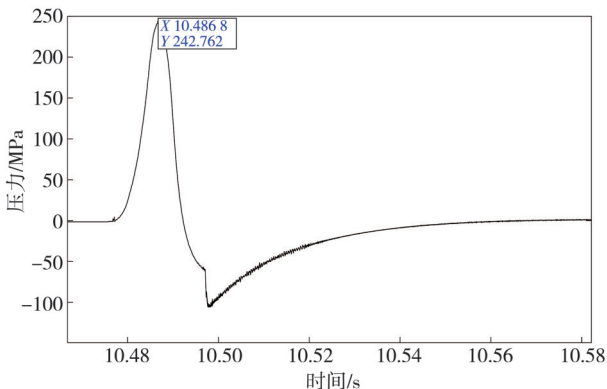


图9 系统压力测试信号曲线

Fig. 9 System pressure test signal curve

5 结论

针对现有火炮压力测试系统存在的应用安全与系统功耗设计问题,提出了一种基于RISC-V内核微控制器的国产化低功耗嵌入式火炮压力测试系统设计方法。该方法通过使用低功耗器件和设计电源管理电路实现了待机态低功耗;利用倒置开关设计和系统状态设计实现了运行态低功耗。经过低功耗设计后,系统整体功耗最小为8.14 mAh。通过系统环境试验功耗测试,该系统在不同环境温度下低功耗特性优越,其常温下的功耗为113.77 mAh,高温下的功耗为114.94 mAh,低温下的功耗为37.39 mAh,能够满足实际火炮压力测试需要。系统设计表明采用国产CH32V203系列微控制器的低

功耗嵌入式火炮压力测试系统方案可行。本系统设计有效提升了嵌入式火炮压力测试系统的应用安全性与低功耗性能。

参考文献:

- [1] 王宇,裴东兴,张瑜,等.小口径火炮弹底压力测试系统抗高过载研究[J].计测技术,2022,42(2):85-90.
WANG Yu, PEI Dongxing, ZHANG Yu, et al. Research on anti-high-overload of projectile bottom pressure test system for small caliber gun[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(2): 85-90. (in Chinese)
- [2] 程亚杰.电容式电子测压器的光触发技术和电源供电技术的研究[D].太原:中北大学,2019.
- [3] 张志杨,贾云飞,张佳庆.可水声定位的水下弹载测试系统设计[J].测试技术学报,2023,37(5):413-419.
ZHANG Zhiyang, JIA Yunfei, ZHANG Jiaqing. Design of underwater missile-borne test system with underwater acoustic positioning [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(5): 413-419. (in Chinese)
- [4] 马英卓,祖静,张瑜.低功耗瞬态火炮膛压存储测试仪设计[J].传感技术学报,2013,26(1):128-132.
MA Yingzhuo, ZU Jing, ZHANG Yu. Design of low-consumption transient pressure storage test instrument [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(1): 128-132. (in Chinese)
- [5] 赵彦凯.火炮膛内瞬态温度测试技术研究[D].太原:中北大学,2021.
- [6] 裴东兴,沈静华,张瑜,等.嵌入式火炮膛压测试技术研究[J].火炮发射与控制学报,2017,38(3):69-73.
PEI Dongxing, SHEN Jinghua, ZHANG Yu, et al. Internal artillery chamber pressure testing technology research[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2017, 38(3): 69-73. (in Chinese)
- [7] 苏艾.内嵌式信息系统与炮身的集成设计与分析[D].南京:南京理工大学,2016.
- [8] 冯若晔.基于ARM的弹底压力测试技术的研究[D].太原:中北大学,2011.
- [9] 李晓乐,朱梅,范舟,等.基于国产微控制器节水灌溉首部枢纽控制系统设计[J].中国农业大学学报,2022,27(3):211-216.
LI Xiaole, ZHU Mei, FAN Zhou, et al. Design of water-saving irrigation head hub control system based on domestic microcontroller[J]. Journal of China Agricul-

- tural University, 2022, 27(3): 211-216. (in Chinese)
- [10] 陈彦臻, 陈麒安, 赵振华, 等. 基于 RISC-V 微控制器与 FreeRTOS 红外耳温量测系统[J]. 中国集成电路, 2020, 29(S3): 55-62.
CHEN Yanzhen, CHEN Qian, ZHAO Zhenhua, et al. Infrared ear temperature measurement system based on RISC-V microcontroller and FreeRTOS[J]. China Integrated Circuit, 2020, 29(S3): 55-62. (in Chinese)
- [11] 刘培沛, 冀会辉, 曹嘉辉等. 基于 RISC-V 的雷达信号处理器设计[C]//中国电子学会数字信号处理专家委员会. 第十四届全国 DSP 应用技术学术会议论文集, 2022: 83-88.
- [12] SÁ B, MARTINS J, PINTO S. A first look at RISC-V virtualization from an embedded systems perspective [J]. IEEE Transactions on Computers, 2022, 71(9): 2177-2190.
- [13] 张志鑫, 裴晓芳, 丁雯丽. 基于 RISC-V 和云平台的智能低碳水族箱[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22(2): 8-10.
ZHANG Zhixin, PEI Xiaofang, DING Wenli. Intelligent low-carbon aquarium based on RISC-V and cloud platform[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2022, 22(2): 8-10. (in Chinese)
- [14] WATERMAN A. The RISC-V instruction set manual, Volume I: User-Level ISA, Version 2.1 [Z]. Berkeley: University of California, 2016.
- [15] 陈宏铭, 王宜怀, 杨勇, 等. 基于 RISC-V 处理器内核微控制器的智能教学平台[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(9): 50-56.
CHEN Hongming, WANG Yihuai, YANG Yong, et al. Intelligent teaching platform based on microcontroller with RISC-V processor core[J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(9): 50-56. (in Chinese)
- [16] 张鑫宇, 韩跃平, 张鹏, 等. 基于 FPGA 的片上多通道采集模块设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(4): 144-149.
ZHANG Xinyu, HAN Yueping, ZHANG Peng, et al. Design of FPGA-based on-chip multi-channel acquisition module[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 144-149. (in Chinese)