

# 光电瞄准镜电池监测系统研究

梁国龙,白晶,黄剑波,张明超,丁浩,张尧禹  
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)

**摘要:** 为了实现便携式光电瞄准镜电池信息监测,考虑到光电瞄准镜低功耗、小尺寸的要求,提出一种仅使用单片 FPGA 作为处理器的电池监测系统结构。系统对 2 个串联的 18650 电池进行实时状态监测,FPGA 对电池信息和图像信息进行同步融合叠加,在 OLED 屏上显示。显示屏上可以直观看到剩余电量、电池温度、电压、电流信息,当电池电量不足或者电流、电压异常时,通过字体颜色变红给出相应警示。经过多次反复系统实验,光电瞄准镜的电池监测系统具有精度高、稳定性高等特点,具有工程实用性。

**关键词:** 光电瞄准镜; FPGA; DS2438Z; OLED

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-4390.2021.04.029

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-4390(2021)04-0194-07

## Research on battery monitoring system of photoelectric sighting telescope

Liang Guolong, Bai Jing, Huang Jianbo, Zhang Mingchao, Ding Hao, Zhang Yaoyu

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to monitor the battery information of portable photoelectric sighting telescope, considering the requirement of low power consumption and small size of photoelectric sighting telescope, a structure of battery monitoring system using single-chip FPGA as processor is proposed in this paper. Two 18650 series battery packs are monitored in real time by the system. Battery information and image information are superimposed synchronously by FPGA, and displayed on OLED screen. Surplus electricity, battery temperature, voltage and current information can be seen intuitively on the display screen. When the battery capacity is insufficient or the current/voltage is abnormal, the corresponding warning is given by reddening the font color. After repeated system experiments, the battery monitoring system of photoelectric sighting telescope has the characteristics of high accuracy and stability, which has engineering practicability.

**Keywords:** photoelectric sighting telescope, FPGA, DS2438Z, OLED

### 0 引言

枪用瞄准镜<sup>[1-2]</sup>是保证各类型枪械在不同环境下精确瞄准的关键设备,属于单兵手持设备范畴,有功耗小、尺寸小、重量轻等特点。根据学科领域划分,枪用瞄准镜一般分为光学瞄准镜和光电瞄准镜<sup>[3]</sup>,光学瞄准镜利用复杂的光学原理,设计从物镜到目镜整个光路,搭配机械结构实现高精度瞄准;光电瞄准镜不仅需要光学和机械结构部分,还需要电子学技术作为关键支撑。光电瞄准镜利用像增强器、CCD/CMOS 等探测器实现光电转换,然后对转换的电信号进行处理、缓

存,再显示到显示屏上,整个过程都需要供电系统的维持。枪用瞄准镜属于便携式设备,有体积小、重量轻的特点,不可能采用大型的电池设备,一般选用 18650 等小型便携式充电电池,文中主要研究对工作于光电瞄准镜上的小型电池组监测。

一般光电瞄准镜具有防水、防腐蚀、抗振动冲击等性能,因此成型的瞄准镜外观完全被壳体包络,若想直观了解瞄准镜的工作状态,只能通过目镜的显示屏观察。电池相当于所有电子学模块的心脏,通过监测电池组<sup>[4]</sup>的实时状态,比如单位时间内电流、电压变化值等,就可以了解设备基本耗电情况,还可以对突然的高电量损耗进行危险警示,对可能的单元模块损坏进行

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605465)

预判,将电池状态信息<sup>[5-6]</sup>在显示屏上体现出来有重要意义。

### 1 系统组成

在光电瞄准镜里,电池检测系统包括处理器、电池硬件监测电路模块、显示屏、电池组以及附属器件,如图 1 所示。

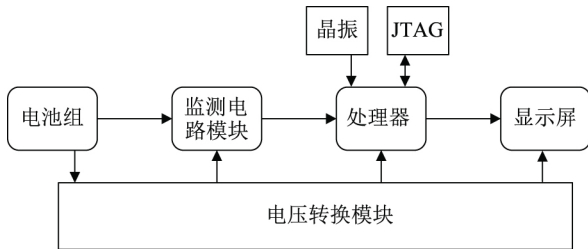


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure diagram

系统基本工作原理:图 1 的几个模块准备就绪,电池组配合电压转换模块给各个模块供电,处理器是整个系统的核心,通过指令交互的方式通知监测电路模块工作,指示监测电路模块采集电池组的各状态信息、存储或输出。处理器定时接收监测电路模块的状态信息,经过内部转换后,与光电瞄准镜的视频图像进行同步融合叠加,输出给显示屏。监测电路模块的状态信息在显示屏的某个区域显示出来,供使用者观察参考。

#### 1.1 处理器

目前应用成熟的处理器有单片机、ARM、DSP、GPU、FPGA 等,检索现有资料,如文献[7-8]都选用单片机作为核心处理器,实现功能相对单一。为了系统实现方便,根据各个处理器的优势可以选择多个处理器联合的方式,比如 FPGA+DSP、FPGA+ARM 等,便于编程,同时解决时序讯处理的问题。在光电瞄准镜系统中,系统需要尽可能满足低功耗要求,不允许有太多的耗电器件,因此经过多次方案论证,只选择单片的低功耗 FPGA 作为核心处理器<sup>[9]</sup>。单片 FPGA 要实现时序驱动、接口转换、图像处理、通讯控制、图像显示等多个问题,提高了程序开发难度,但可以简化电路设计,减少电子元器件使用量,有效降低系统功耗。

FPGA 选择某公司的 ARTIX-7 系列芯片 XC7A100T-2FGG484I<sup>[10-11]</sup>,芯片具有高速、低功耗、大容量特点,能够满足高速通信、大容量图像处理需求,芯片具体参数如表 1 所示。XC7A100T-2FGG484I 芯片供电需要多个电压:  $V_{CCINT} = 1.0\text{ V}$ 、 $V_{CCBRAM} = 1.0\text{ V}$ 、 $V_{CCAUX} = 1.8\text{ V}$ 、

$V_{CCO} = 3.3\text{ V}$ 、 $V_{MGTAVCC} = 1.0\text{ V}$ 、 $V_{MGTAVTT} = 1.2\text{ V}$ ,FPGA 需要多个电压有其上电顺序,先后顺序依次为:  $V_{CCINT}$ 、 $V_{CCBRAM}$ 、 $V_{CCAUX}$ 、 $V_{CCO}$ ,断电顺序相反。

表 1 芯片具体参数

Tab. 1 Specific parameters of chip

参数	指标
Logic Cells	101 440
Slices	15 850
DSP Slices	240
PCIe Gen2	1 个
XADC	12bit, 1Mbps AD
CLB flip-flops	126 800
BlockRAM	4 860 KB
GTP Transceiver	4 个, 6.6 Gbps( max)

FPGA 除了需要实现光电瞄准镜的 CMOS 探测器驱动、图像处理等功能外,文中重点描述在电池监测方面的研究。FPGA 作为核心逻辑处理器,定时与监测电路模块进行通信,通过命令寄存器的方式控制监测电路模块工作,指示监测电路模块实时获取电池组电压、电流等状态信息;FPGA 采集监测电路模块的寄存器,读取电池状态信息,将信息经过协议转换并缓存后,与光电瞄准镜的视频图像进行同步融合叠加,输出给显示屏。电池状态信息在显示屏的某个区域显示出来,完成电池状态信息显示,在电量低或者实时电流过大情况下信息在屏幕上改变字体颜色,具有警示功能。

#### 1.2 电池监测电路

电池监测电路模块是利用 A/D 采集芯片,设计相应的硬件电路,通过采集电池组的电流、电压信息完成电池监测功能。电池监测电路模块的重点是 A/D 采集芯片的选取,若选择通用的 A/D 转换芯片会增加电路设计复杂度,因此系统选择专用的电池监测芯片,国外某公司的 DS2438Z 芯片<sup>[12]</sup>,该芯片采用 SOIC 封装,对外只有 8 个引脚,与处理器之间的数字接口是单线式的,简化电路设计;片上集成电流累加器、用于检测电压电流的 A/D 转换器、40 字节的 EEPROM 存储器和温度传感器,图 2 是 DS2438Z 芯片的内部结构框图<sup>[13]</sup>,可以看出,内部集成了 A/D 转换器、晶振单元和多个寄存器。

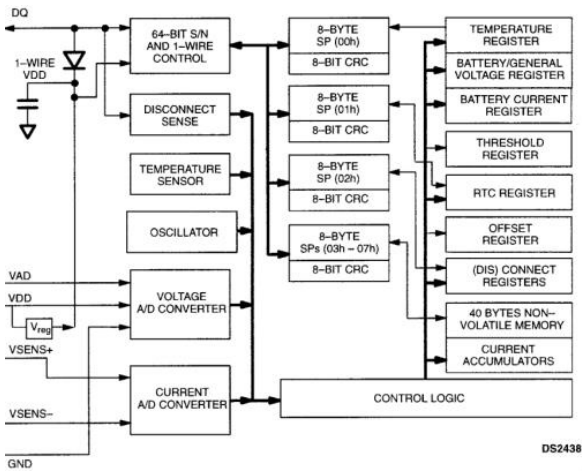


图 2 DS2438Z 芯片内部结构  
Fig. 2 DS2438Z internal structure

根据光电瞄准镜系统电路供电设计和机械结构设计,采用 2 个 18650 电池串联的方式给系统供电,分别对现有的 18650 电池组测试,在充满电时  $V_{MAX} \approx 8.4\text{ V}$ ,在光电瞄准镜无法工作时  $V_{MIN} \approx 5.2\text{ V}$ ,因此电池组电压保持在  $5.2\text{ V} \sim 8.4\text{ V}$  之间能保持系统正常工作。

基于 DS2438Z 的电池监测硬件电路如图 3 所示,DS2438Z 的 PIN5 是芯片的供电引脚 VDD,供电电压范围在  $2.4\text{ V} \sim 10\text{ V}$  之间,系统选用  $VDD = 3.3\text{ V}$ ; PIN4 是芯片的 A/D 转换引脚 VAD,主要用于电压监测,电压输入范围在  $1.5\text{ V} \sim 10\text{ V}$  之间,当 Status/Config 寄存器的 bit3 = 1 时,选择 VDD 作为采样电压值,否则选

择 VAD 作为采样电压值,文中选择 VAD 作为采样电压值; PIN8 是芯片的单线双向数字接口 DQ,与处理器连接完成数据交互,用上拉电阻保证不用时为高电平; PIN2 和 PIN3 之间连接一个小阻值的电阻  $R_{SENSE}$ ,通过测量  $R_{SENSE}$  两端的电压计算出流经  $R_{SENSE}$  的电流值,从而计算出电池累计消耗电量,电阻  $R_{SENSE}$  应该尽可能小,避免额外的电压损耗,但  $R_{SENSE}$  过小会导致测量精度下降,因此要慎重考虑  $R_{SENSE}$  的电阻值,系统选择  $R_{SENSE} = 0.2\ \Omega$ 。

### 1.3 显示屏模块

根据光电瞄准镜技术要求,在尺寸尽可能小、功耗尽可能低的前提下保证显示屏的成像质量。系统选用云南北方奥雷德公司的 SVGA050 OLED 显示屏<sup>[14]</sup>,SVGA050 屏是具有自主知识产权的 AMOLED 微型显示器,具有高分辨率、低功耗、小型化特点<sup>[15]</sup>。

SVGA050 显示屏屏幕尺寸 0.5 英寸,有效像元分辨率  $800 \times 600$ ,视频信号输入兼容 BT656 标准,支持 8 bit、16 bit、24 bit 带宽数字视频输入模式,若增加视频解码芯片,可以接收 PAL、HDMI 和 DVI 等视频信号。光电瞄准镜要求对外有 PAL 视频接口,为了兼顾 OLED 显示和对外 PAL 视频接口,SVGA050 显示屏采用增加视频解码芯片方式,芯片 CH7025<sup>[16]</sup> 用于实现 RGB 图像数据到 PAL 视频的转换,图 4 是 OLED 视频接口的电路原理图,电池状态信息被 FPGA 融合叠加到图像上后,再被输出到 OLED 视频接口模块中。

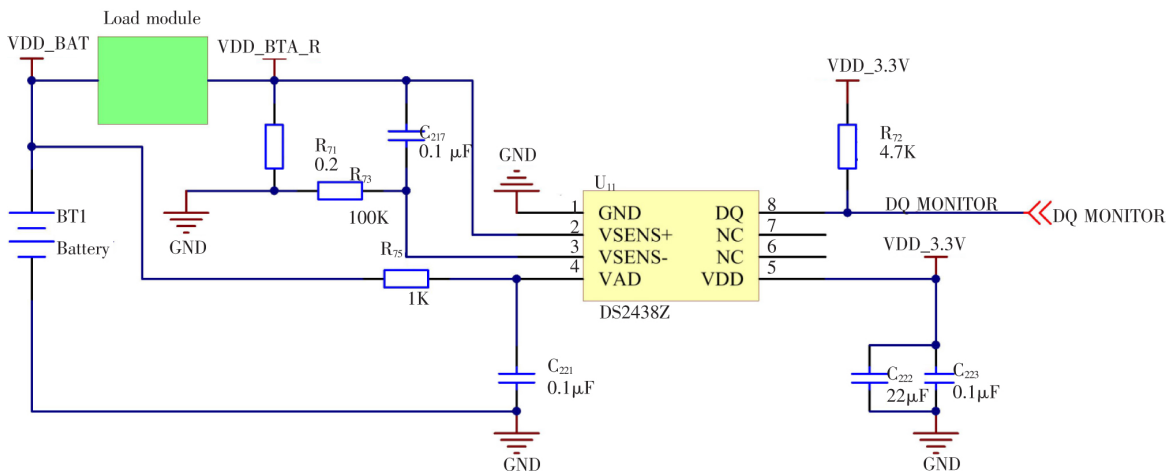


图 3 电池监测硬件电路  
Fig. 3 Battery monitoring hardware circuit

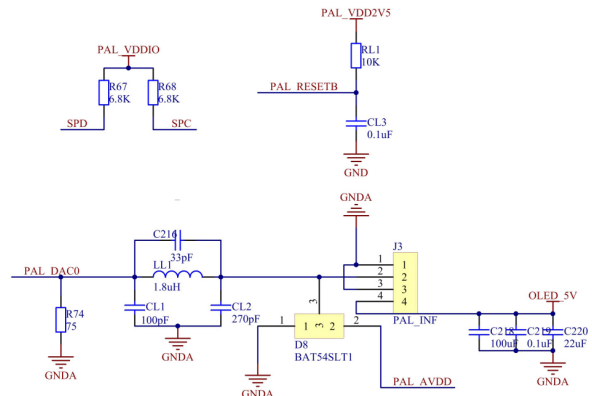
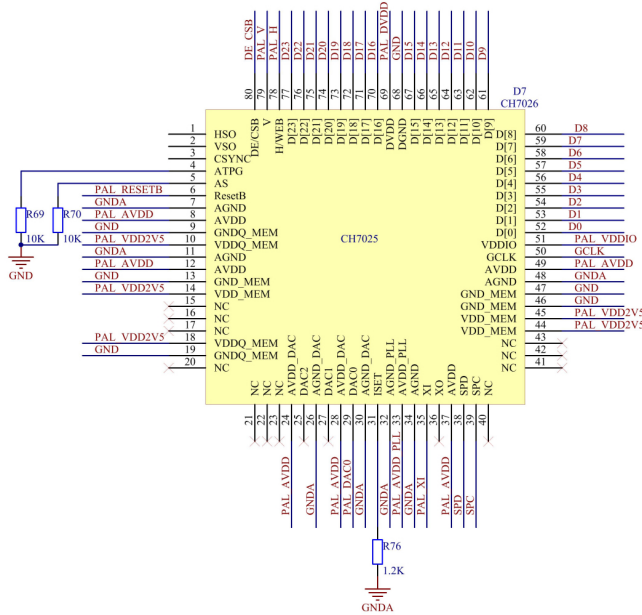


图 4 OLED 视频接口原理图

Fig. 4 Schematic diagram of OLED video interface

2 软件设计

光电瞄准镜涉及 CMOS 探测器驱动、LVDS 数据转换、图像增强、电池信息采集以及电池信息伴随视频输出等多个软件模块开发,针对电池监测,文章只分析并设计电池信息采集、信息显示输出软件模块。由于瞄准镜系统处理器是单片 FPGA,因此所有软件开发均通过硬件描述语言 VHDL 实现,具体语法请参见参考文献 [17-19]。

2.1 电池信息采集模块

利用 FPGA 的 IO 引脚与 DS2438Z 的 DQ 引脚相连,通过单线实现通信,因此软件编程必须采用串行通信方式。为保证数据传输的正确性,DS2438Z 要求严格的传输协议,主要包括复位脉冲、响应脉冲、写‘0’、写‘1’、读‘0’、读‘1’,所有的操作都通过单线时间槽实现的。图 5~图 7 分别是时间槽的复位响应脉冲、写时间槽和读时间槽时序图,在软件实现上必须满足各图下面标注的时间要求,如在图 5 中,FPGA 发送的复位时间必须  $\geq 480 \mu s$ ,然后释放总线,总线默认为高电平,然后等待 DS2438Z 的低电平响应,需要  $60 \mu s \sim 240 \mu s$  的时间。

软件具体操作流程是:首先芯片初始化(包括复位和应答),开启扫描 ROM 模式,启动内存函数命令,然后进行交互数据。根据时间槽的读写时序,按照表 2 的读写流程,可以很容易读出相应寄存器值,根据相应表格对比,得到真正的温度、电压值,电流值和剩余电

量值分别由式(1)和式(2)计算得到。

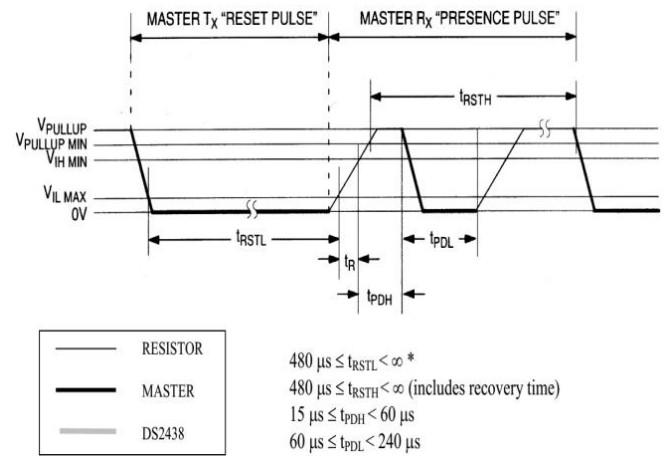


图 5 复位响应脉冲

Fig. 5 Reset response pulse

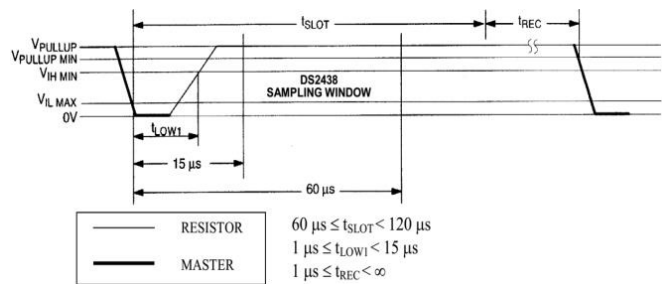


图 6 写时间槽

Fig. 6 Writing time slot



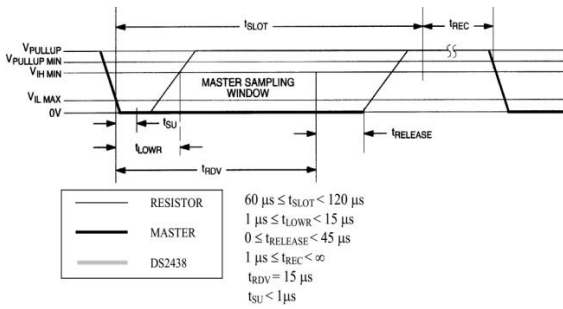


图 7 读时间槽

Fig. 7 Reading time slot

表 2 电池信息读写流程

Tab. 2 Battery information reading and writing process

FPGA 模式	数据(低位在前)	细节描述
发送 TX	复位	发送复位脉冲信号
接收 RX	响应	响应脉冲信号
发送 TX	CCh	扫描 ROM
发送 TX	00h 4Eh	写 00h
发送 TX	07h	控制配置状态值
发送 TX	复位	发送复位脉冲信号
接收 RX	响应	响应脉冲信号
发送 TX	CCh	扫描 ROM
发送 TX	44h	开启温度转换命令
发送 TX	复位	发送复位脉冲信号
接收 RX	响应	响应脉冲信号
发送 TX	CCh	扫描 ROM
发送 TX	B4h .	开启电压转换命令
发送 TX	复位	发送复位脉冲信号
接收 RX	响应	响应脉冲信号
发送 TX	CCh	扫描 ROM
发送 TX	00h B8h	重新访问 00h 页
发送 TX	复位	发送复位脉冲信号
接收 RX	响应	响应脉冲信号
发送 TX	CCh	扫描 ROM
发送 TX	00h BEh	启动读 00h 页数据
接收 RX	9 data bytes.	读数据
发送 TX	复位	发送复位脉冲信号
接收 RX	响应	响应脉冲信号
发送 TX	CCh	扫描 ROM
发送 TX	00h 48h	启动拷贝 00h 页命令
接收 RX	读状态	拷贝完成后, 回复 1
发送 TX	复位	发送复位脉冲信号
接收 RX	响应	响应脉冲信号

$$I = (CurrentRegister) / (4096 \times R_{SENS}) \quad (1)$$

$$RemainingCapacity = ICA / (2048 \times R_{SENS}) \quad (2)$$

由于篇幅关系,没有罗列 ICA、CCA、DCA 寄存器的读写情况,具体请参见参考文献 [13]。

软件采取 VHDL 语言编写,每 16 s 完成 1 次芯片访问,读取电池信息,具体 VHDL 软件原理框图如图 8 所示。

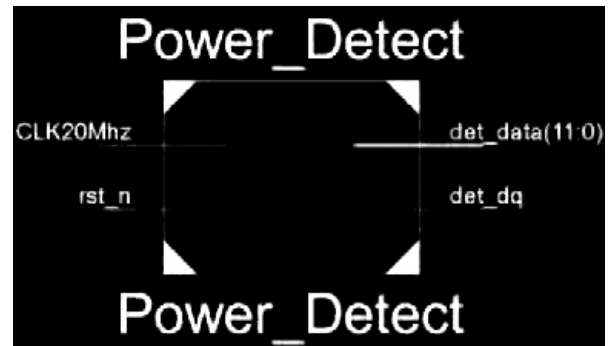


图 8 电量检测模块原理图

Fig. 8 Schematic diagram of electricity detection module

### 2.2 信息显示输出模块

若想电池状态信息直观的显示到 OLED 屏幕上,需要满足行场控制信号的要求。如图 9 所示,虚线框内是 FPGA 需要完成的工作,电池信息每 16 s 更新一次,更新后数据缓存到 FPGA 的内部 RAM 核中,当 FPGA 接收到图像数据,严格按照行场和时钟要求,找到对应的图像坐标,把缓存信息融合叠加到图像<sup>[20]</sup>的某个 x、y 坐标上,然后再整合图像时序以满足 CH7025 芯片要求,在系统初始化过程中,FPGA 需要通过 IIC 总线控制器发送寄存器信息给 CH7025 芯片。

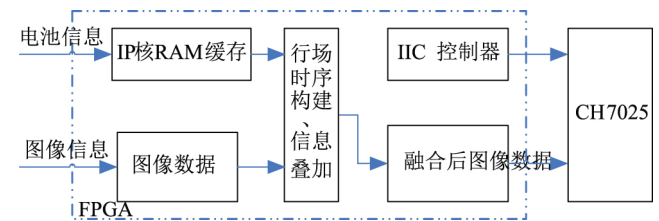


图 9 电池信息叠加显示

Fig. 9 Battery information superimposed display

图 10 是电池信息叠加到图像上的例化代码模块。

### 3 实验与分析

在实验室室温环境下,光电瞄准镜做成像实验,它的输出图像如图 11(a)、图 11(b) 所示。在图像的右上角显示电池的剩余电量、电池温度、电压、电流情况,在软件上分别设置几个参数的超限情况,当剩余电量

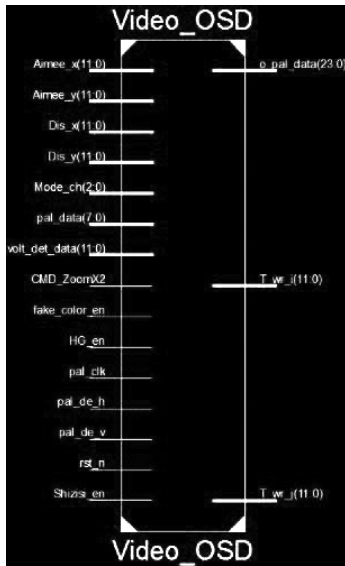
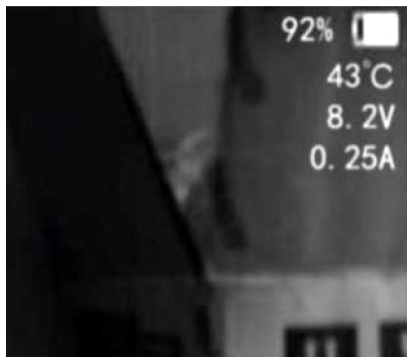


图 10 电池信息叠加模块原理图

Fig. 10 Schematic diagram of battery information "Video OSD" module

小于 20%、电池温度高于 70 °C、电压低于 5.5 V 或者电流高于 0.4 A 时,只要以上四种情况满足其一,相应字体变为红色,警示可能出现的问题。图 11(a) 显示剩余电量 92%, 电池组温度为 43 °C, 电压 8.2 V, 电流 0.25 A, 均没有超限,所以字体依然是白色;图 11(b) 显示剩余电量只有 2%, 电池组温度为 46 °C, 电压 5.7 V, 电流 0.27 A, 电量不足 20%, 字体变为红色, 警示用户需要更换电池或充电。

瞄准镜在图 11(a) 和图 11(b) 状态下快速取下电池, 经过万用表和红外温度计实测, 图 11(a) 状态下电池组温度为 43.6 °C, 电压 8.33 V, 电流 0.255 A; 图 11(b) 状态下电池组温度为 46.5 °C, 电压 5.75 V, 电流 0.272 A, 温度测量达到了 1.3% 的测量误差, 电压测量达到了 1.5% 的测量误差, 电流测量达到了 2% 的测量误差, 保证了瞄准镜的精度要求。



(a) 正常状态显示



(b) 超限状态显示

图 11 电池信息叠加到图像右上角

Fig. 11 Battery information superimposed on the upper right corner of the image

#### 4 结束语

文中设计一种用于光电瞄准镜的电池状态监测系统, 根据瞄准镜的功耗和体积要求, 仅使用单片 FPGA 芯片完成所有软件设计。系统对 2 个串联的 18650 电池进行实时状态监测, 采用专用 DS2438Z 芯片完成电池监测, 监测电池信息经过 FPGA 缓存后, 保持与图像信息同步, 保证在 OLED 显示屏图像上显示输出。通过试验, 在显示屏上可以直观看到剩余电量、电池温度、电压、电流情况, 在电池供电异常或不满足约束条件时, 会给出相应警示。利用万用表、示波器和红外温度计监测具体电池电压值、电流值、温度值, 结果与 OLED 显示数值基本一致, 表明文中电池监测系统具有精确性; 经过 20 次反复拆装电池试验, 电池监测显示数据一致、稳定可靠, 具有工程实用性。

#### 参考文献

- [1] 刘学泽. 枪用瞄准镜[J]. 四川兵工学报, 2008, (2): 29.  
Liu Xueze. Gun Sight [J]. Journal of Sichuan military engineering, 2008, (2): 29.
- [2] 白雪, 安志勇, 石利霞. 光学瞄准镜相对畸变测试技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(1): 46-48.  
Bai Xue, An Zhiyong, Shi Lixia. Research on measurement technology of relative distortion of optical sight [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology( Natural science), 2011, 34(1): 46-48.
- [3] 孙权. 微光瞄准镜检测设备中关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.  
Sun Quan. Research on the key technology of low light level sight detection equipment [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [4] 朱彬. 蓄电池电量检测系统的设计[J]. 信息技术与信息化, 2018, (11): 62-63, 69.  
Zhu Bin. Design of battery power detection system [J]. Information technology and information technology, 2018, (11): 62-63, 69.
- [5] 邵亦博, 吕玉祥, 孙胜男, 等. 锂离子电池荷电性能检测及健康状

- 况分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 113-116, 152.  
Shao Yibo, Lv Yuxiang, Sun Shengnan, et al. Measurement of charge performance and health status analysis of lithium ion battery [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 113-116, 152.
- [6] 张旭升. 基于 DC/DC 变换器的电池组主动双向均衡技术研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 117-122.  
Zhang Xusheng. Research on active bidirectional equalization technology of battery pack based on DC / DC converter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 117-122.
- [7] 田苗苗. 基于 ARM 的电车电池监测系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.  
Tian Miaomiao. Research on tram battery monitoring system based on arm [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [8] 柴爱平, 缙文博. 基于 DS2438 和 Labview 的铁路 UPS 蓄电池监测维护系统设计[J]. 电子世界, 2014, (6): 128-129.  
Chai Aiping, Gou Wenbo. Design of railway UPS battery monitoring and maintenance system based on DS2438 and LabVIEW [J]. Electronics World, 2014, (6): 128-129.
- [9] 魏淑稳, 杨玉华, 单彦虎, 等. 钴酸锂智能电池管理系统的 FPGA 实现[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 43-47.  
Wei Shuwen, Yang Yuhua, Shan Yanhu, et al. FPGA implementation of lithium cobalt oxide intelligent battery management system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 43-47.
- [10] All Programmable 7 Series Product Tables and Product Selection Guide [S]. Xilinx, 2015.
- [11] Artix-7 FPGAs Data Sheet: DC and Switching Characteristics [S]. Xilinx, 2013.
- [12] 王琢, 吴细秀, 魏洪涛, 等. 基于 DS2438 的电池剩余电量监测系统的实现[J]. 微型机与应用, 2012, 31(14): 24-26.  
Wang Zhuo, Wu Xixiu, Wei Hongtao, et al. Implementation of battery residual power monitoring system based on DS2438 [J]. Microcomputers and applications. 2012, 31(14): 24-26.
- [13] DS2438 Smart Battery Monitor [S]. Maxim Integrated Products, Inc. 2005.
- [14] SVGA050 系列低功耗主动式 OLED 微型显示器产品说明书 V1.0 [S]. 云南北方奥雷德光电科技有限公司, 2013.  
SVGA050 series low power active OLED micro display product manual v1.0 [S]. Yunnan North OLED Optoelectronic Technology Co., Ltd. 2013.
- [15] 孙美娇, 王劲松, 周旭阳, 等. OLED 数字化对准读数零位二次成像光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(2): 46-49.  
Sun Meijiao, Wang Jinsong, Zhou Xuyang, et al. Design of secondary imaging optical system for OLED digital alignment reading zero position instrument [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural science), 2017, 40(2): 46-49.
- [16] CH7025/CH7026 TV/VGA Encoder [S]. Chronitel. 2008.
- [17] 侯伯亨, 刘凯, 等. VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计(第三版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.  
Hou Boheng, Liu Kai, et al. VHDL hardware description language and digital logic circuit design (3rd Edition) [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2009.
- [18] 乔庐峰, 王志功, 等. VHDL 数字电路设计教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.  
Qiao Lufeng, Wang Zhigong, et al. VHDL digital circuit design course [M]. Beijing: electronics Industrial Press, 2013.
- [19] 吴厚航. 深入浅出玩转 FPGA(第二版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.  
Wu Houhang. Play with FPGA (Second Edition) [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2013.
- [20] 王永. SDI 视频的动态 OSD 功能设计与实现 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
Wang Yong. Design and implementation of dynamic OSD function for SDI Video [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

作者简介:



梁国龙(1983—)男,副研究员,博士,主要从事嵌入式系统开发,数字图像处理研究。  
Email: lianggl\_1984@sina.com

白晶(1977—)女,硕士,主要从事微光瞄准镜等单兵设备技术研究。  
黄剑波(1983—)男,副研究员,硕士,主要从事微光瞄准镜等单兵设备机械结构技术研究。  
张明超(1990—)男,本科,主要从事单兵设备机械结构技术研究。  
丁浩(1995—)男,本科,主要从事单兵设备硬件电路研究。  
张尧禹(1971—)男,研究员,主要从事光电测量设备技术研究。

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-07-22  
(王艳丽 编发)