

电测与仪表

Electrical Measurement & Instrumentation

ISSN 1001-1390, CN 23-1202/TH

《电测与仪表》网络首发论文

题目: 钴酸锂智能电池管理系统的 FPGA 实现
作者: 魏淑稳, 杨玉华, 单彦虎, 焦新泉
收稿日期: 2018-09-15
网络首发日期: 2018-12-28
引用格式: 魏淑稳, 杨玉华, 单彦虎, 焦新泉. 钴酸锂智能电池管理系统的 FPGA 实现 [J/OL]. 电测与仪表.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20181226.1631.025.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

钴酸锂智能电池管理系统的 FPGA 实现

魏淑稳，杨玉华，单彦虎，焦新泉*

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室，太原 030051; 2 中北大学 电子测试技术国家重点实验室，太原 030051)

摘要：针对飞行器地面控制设备锂离子电池组的智能管理系统实现复杂、可靠性差问题，研究了基于 FPGA 的结构简单、可靠性高的锂离子电池智能管理系统。该智能电池管理系统的被动平衡管理模块能自动处理电池过冲过放问题，提供精准的满电停充标志；采用改进的安时积分法进行 SOC 测量，充分考虑电池的老化情况。经试验测试，智能电池管理系统的 SOC 模块能够达到专业的电池管理芯片容量测算精度，平衡管理模块能够有效延长电池使用时间，有效抑制过冲。

关键词：锂离子电池组，智能电池管理系统，FPGA，被动平衡，安时积分法

中图法分类号：TM93; TP277

文献标识码：B

文章编号：1001-1390(2019)00-0000-00

FPGA implementation of LiCoO₂ smart battery management system

Wei Shuwen, Yang Yuhua, Shan Yanhu, Jiao Xinquan

(1. Science and Dynamic Testing of Education Key Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China. 2. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to resolve the implementation complexity and poor reliability problems for aircraft ground control equipment of Li-ion battery smart management system. This paper develops a simple structure, high reliability Li-ion battery smart management system based on the FPGA. The passive equilibrium control module of the smart battery management system can automatically deal with the problem of overcharge and over-discharge. And the module can provide accurate full charge stop sign also. The improved current integration method was used to measure SOC and the state of health for the battery was fully considered. After the test, SOC module of the smart battery management system can achieve professional battery management chip capacity measurement accuracy, balance management module can effectively prolong the life time of the battery, restrain the overcharge effectively.

Keywords: Li-ion battery, smart battery management system, FPGA, passive equilibrium control, current integration method

0 引言

随着电子技术的发展，便携式仪器在飞行器的地面控制设备中占的比重越来越大。稳定、可靠、便捷的电源供应是便携式仪器所必须的。相比于镍氢镍铬电池，在提供相同电压的情况下，使用锂离子电池的重量和体积都会较小。同时锂离子电池没有记忆效应不需要定期放电，能量也不会受损。大部分蓄电池都不能过冲，但是锂离子电池可以在充电过程中灵活选用定流模式或定压模式充电^[1]。基于这些优点使得锂离子电池广泛应用于便携式仪器，针对锂离子电池的智能管理系统的研究也变得十分必要。电池管理系统能充分发挥电池的性能，一定程度上能提高电池的使用寿命。目前，国内外对于电池管理系统的研究大都集中在电动汽车上，这些管理系统庞大复杂，不适用于便携式仪器^[1]。本文针对飞行器地面控制设备的特殊应用场合，提出了一种基于 FPGA 的电池管理系统，保证了地面便携式控制设备对飞行器信号的可靠监测，和对飞行器系统的关键信号的可靠控制。

1 总体设计方案

电池管理系统（BMS）的研究目的是更加安全地使用电池，安全就是保证电池不会发生爆炸或者漏液等十分危险的情况同时让电池正常、正确的被使用，最大化的利用电池的能量。一个电池管理系统至少应包含过压过冲保护，电池平衡，热管理，充放电管理等模块。智能电池管理系统（SBMS）至少还应该包括显示模块，通信模块^[2]。文中基于FPGA的锂离子智能电池组管理系统结构设计如图 1 所示主要包括电池组安全模块、容量模块、显示和报警模块等，整个便携式设备共用一个主控芯片保证电池信息及时被处理并且不需要通信模块，提高了可靠性。

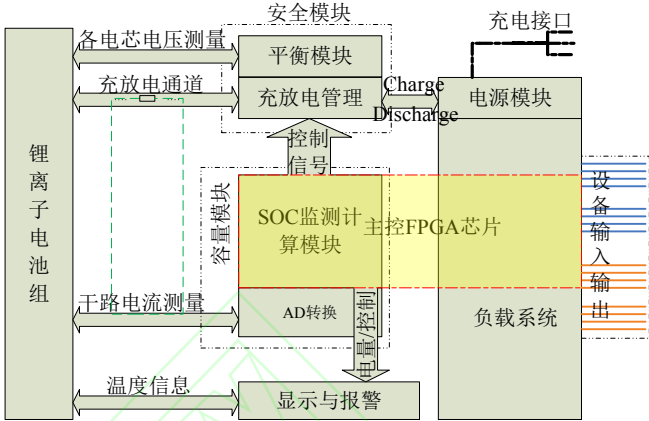


图 1 锂离子电池组管理系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of battery management system for Li-ion battery

电池组采用标称电压为 3.7 V 的钴酸锂离子电池，通过四节电池串联成组达到设备需求电压 16.8 V，每节电池由 3 个电芯并联达到 6 600 mAh 的电池容量，为了简化设计，文中认为并联的电芯相互之间无差异，平衡管理模块只负责四节电池之间的平衡。SBMS 主控芯片为 FPGA，平衡管理模块内部采用被动平衡，减小 FPGA 的负担；SOC 测算模块内部采用改进的安时积分法，将电池老化等因素整合到了安时积分法计算公式中^[3]；显示模块采用 7 段式数码管显示，显示精度 1%，报警模块采用蜂鸣器与发光二极管相结合的方式充分预警。

2 电池容量估算

电池剩余电量一直都是电池使用者关注的一个重要参数，TI 公司提出的一种基于阻抗跟踪的算法封装在自己的芯片系统内，给予用户的自主性较差。开路电压法是一种最为简单且易于实现的方法，但是误差较大，获取容量时需要电池静置较长的时间不适合工业场合应用。人工神经网络算法、模糊控制算法、卡尔曼滤波算法等经典的算法都可被应用于获取电池电量。人工神经网络和模糊控制算法可

以比较准确地检测电池电量，但是需要大量的实验数据和长时间的学习，这对于文中应用场合显然不太合适；对于卡尔曼滤波来说大量的计算则是其难以应用的根本原因^[2]。文中重点介绍的电量获取方法是安时积分法，安时积分法是一种原理简单应用广泛的电池电量获取方法，文中采用改进的安时积分法有效弥补了安时积分法本身精度差的问题。

改进的安时积分法计算电池荷电状态有：

$$SOC = \beta SOC_0 - \frac{1}{Q_N} \int_0^t \eta I dt \quad (1)$$

式中 SOC_0 为电池初始荷电状态，即初始容量，本设计中 SOC_0 由开路电压法测得； Q_N 为总容量，随温度、平均放电电流、充放电次数等因素变化而变化； η 为库伦效率，代表充放电循环内部的电量耗散，受平均放电电流等的影响； β 为修正因子，通过大量实验可得如式（2）所示修正因子 β 与充放电循环次数 N 的函数关系式^[3]：

$$\beta = \begin{cases} 1, & N \leq 500 \\ 0.98, & 500 < N < 1000 \\ 0.95, & N \geq 1000 \end{cases} \quad (2)$$

智能手机、笔记本电脑等常用便携式设备正常工作电流最大只有几百毫安，这种情况必须考虑到 SOC 测算模块的分流与功耗问题^[4]。应用于飞行器地面控制设备的工作电流可能达到几安以上，文中设计的负载输出信号瞬时电流值最大可到 2 A，工作时典型电流输出为 1 A。基于此，文中 SOC 测算模块自身电流对于输出到负载的电流可以忽略。

安时积分法电流测量原理如图 2 中红色虚线框所示，将一个电阻串联在电池回路中，当电池工作时由于电流的影响会在测压电阻 R 两端产生一个电压 U_R ，可以轻松地由 U_R 得出经过测压电阻 R 的电流，然后由 FPGA 内部算法软件可以算出此时电池的 SOC。

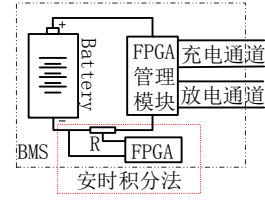


图 2 安时积分法电流测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of current measurement for current integration method

安时积分法的核心是干路电流的获取，由图 2 中方法可以简单实现，为了提高安时积分法的精度，测压电阻 R 必须选取高精度电阻器。电池输出的电流经过测压电阻 R 后转化的电压 U_R ，由模数转换芯片经过简单地后级调理后将转换得到的数字信号输入 FPGA。

3 安全模块设计

通过电芯并联得到的电池电压与单个电芯电压相同，电池容量增加为各个电芯容量之和；通过电芯串联得到的电池电压等于各个电芯电压相加，容量与单个电芯相同^[5]。单节锂离子电芯的电压一般为 3.7 V，容量一般为 2 000 mAh 左右，单节电芯难以满足大多数便携式仪器的用电需求，本文设计中使用的电池组由 4 节电压为 3.7 V，容量为 6 600 mAh 的电池构成，每节电池由均由三个电芯并联所得。由于电芯生产环境和保存环境的不同，很难保证两个不同的电芯之间电压容量等参数完全相同，根据木桶原理整个电池最终表现出来的各项参数和参数最差的那个电芯相同^[6]。所以在电池成组时会尽量使同一电池中不同电芯参数尽量相同，在电池组使用过程中造成的电池之间的差异可以靠电池组平衡管理来实现。本文的电池组管理系统不考虑单个电池内部电芯之间的差异，只考虑电池单体之间的差异。

安全模块包括电池组平衡管理模块和充放电管理模块。电池组平衡管理可以从两个不同的方面着手，一种是主动管理，通过电压监测或者 SOC 监测，实时的搬移能量充足电芯的能量至能量消耗过多的电芯，能量转移效率的低下和控制电路过多的能量

消耗使得这种主动管理的方法并不常用，而且实现方法相对复杂^[7-8]；另一种是图 3 中被称为被动管理的平衡管理方法。

如图 3 所示，如果存在单刀双掷开关 K1，当检测到电池 B1 的电压或者容量（文中认为电池电压与电池电量成正相关）达到过冲阈值，开关 K1 与图 3 中 B 触点闭合使 B1 通过 R1 快速放电；如果检测到电池 B1 存在过放，开关 K1 则与图 3 中 A 触点闭合通过充电模块对其预充电，其余三节电池与电池 B1 同理。

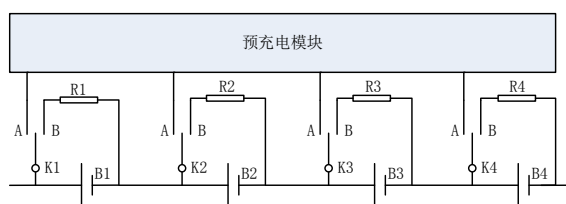


图 3 被动管理原理图

Fig.3 Schematic diagram of passive equilibrium control

4 FPGA 实现与系统测试

文中选择 XC3S400 作为电池管理系统的主控芯片，该电池管理系统主要针对由四节电压为 3.7 V，容量为 6 600 mAh 的电池串联而成的电池组，主要用于飞行器地面设备的自供电。该管理系统主要包括平衡模块，充电管理模块，电量测算模块，显示与报警模块。

4.1 电压监测

文中设计的电池组被动平衡管理模块中电压的监测主要按照图 4 的电路实现。

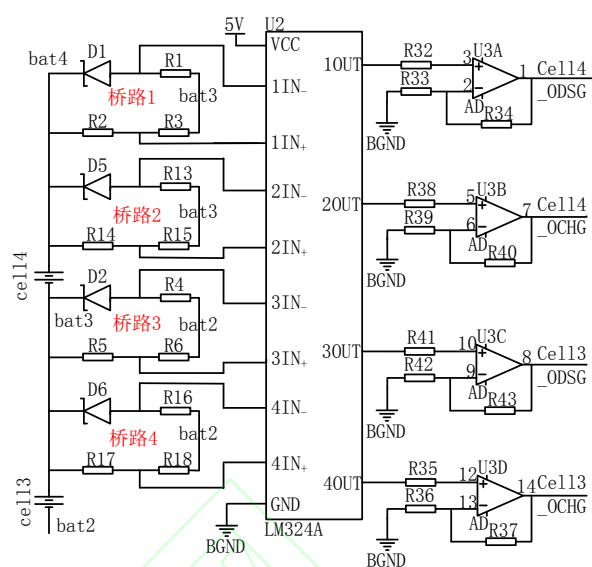


图 4 电池电压监测电路设计

Fig.4 Schematic diagram of battery voltage monitoring circuit

图 4 将惠斯通电桥中的待测电阻更换为稳压管。对电池 cell4 的测量由桥路 1、2 实现，其中桥路 1 为过放检测桥路，桥路 2 为过冲检测桥路^[9-10]。将过冲阈值电压设为 4.2 V，过放阈值电压设为 2.7 V，D1、D5 为稳压管，D1 的 U_Z 为 2.4 V，D5 的 U_Z 为 3.9 V。芯片 U2 为一个四通道的运放芯片，典型放大倍数为 100。运放通道 1 的 $1IN_+$ 处的电压 U_{1+} 计算公式如式(3)：

$$U_{1+} = \frac{U_{cell4}}{R_2 + R_3} R_3 \quad (3)$$

运放通道 1 的 $1IN_+$ 处的电压 U_{1+} 由稳压管参数可知为约为 0.3 V。取稳压管限流电阻为 510 Ω ，又有 $U_{1+} > U_{1-}$ ，可得分压支路上电阻 $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ， $R_3 = 1.3 \text{ k}\Omega$ 。运放通道 1 为过放检测通道，根据以上分析可得如果 $U_{cell4} \leq 2.7 \text{ V}$ 则运放通道 1 有输出，如果 $U_{cell4} \geq 2.7 \text{ V}$ 则运放通道 1 无输出。运放通道 1 和运放通道 2 原理类似，通道二为过冲检测通路，根据以上分析可得如果 $U_{cell3} \leq 4.2 \text{ V}$ 则通道 2 无输出，如果 $U_{cell3} \geq 4.2 \text{ V}$ 则通道 2 有输出。

4.2 被动平衡实现

实现电压的可靠监测后，由图 4 中 U2 的输出经

The schematic diagram shows a 2-to-1 multiplexer. It consists of two 3-input NAND gates, D3 and D4. The inputs to D3 are bat4, bat3, and the output of inverter Q1. The inputs to D4 are bat4, bat3, and the output of inverter Q2. The outputs of D3 and D4 are connected to bat4. The inputs to Q1 and Q2 are bat3 and bat4, respectively. The circuit is labeled CHG4.

Fig.5 Schematic diagram of battery cell4

Fig.6 Schematic diagram of pre-charge

文中模数转换芯片使用 AD7621，它的数据吞吐速率最高可达 3MSPS，假设划分的时间间隙足够小，此时可以假定电池输出电流为恒定^[11]，文中设定在 100 μ s 内电池输出的电流恒定，这就为模数转换通道的复用创造了可能。当设备在不同工作状态之间进行转换时，电流会发生突变，此时的电流值必须被采集并作为作为作为时积分法的电流，避免容量估算产生较大误差。基于此，文中设计了如图 7 所示的控制流程图，控制模数转换通道的可靠复用。

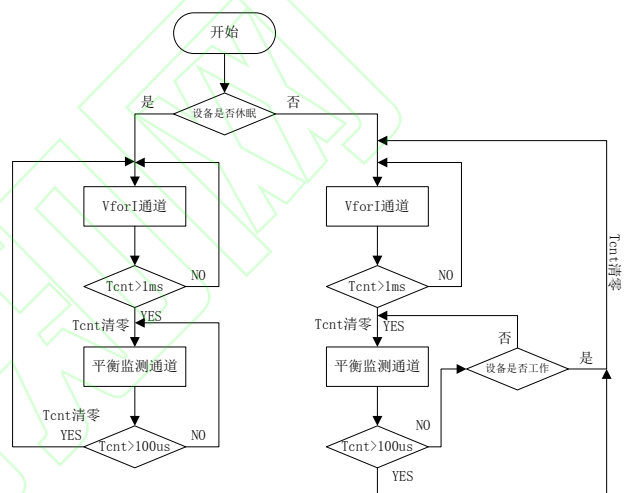


Fig.7 Control process for AD conversion channels

4.4 系统测试

将文中设计的智能电池管理系统搭建为一个测试平台,同时使用 TI 公司的 bq40z50-r1 按照文献 [12]中所述搭建相应电池管理系统平台作为标准系统对文中设计的基于 FPGA 的电池管理系统进行校准。使用两块相同的电池将电量耗尽,然后分别连接到两个测试平台上进行充放电循环实验,

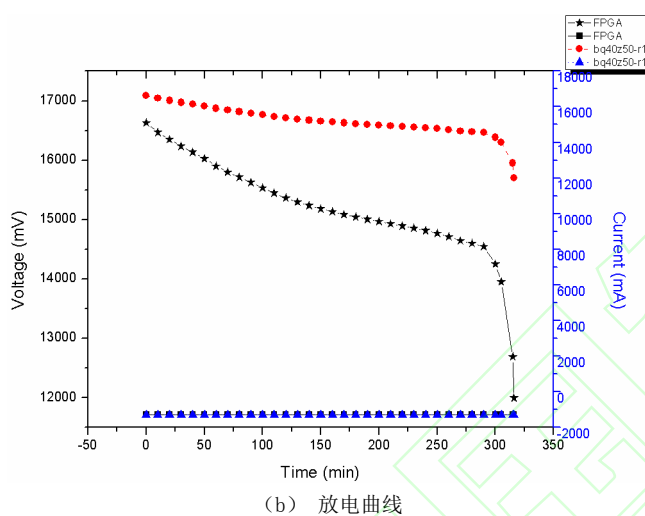
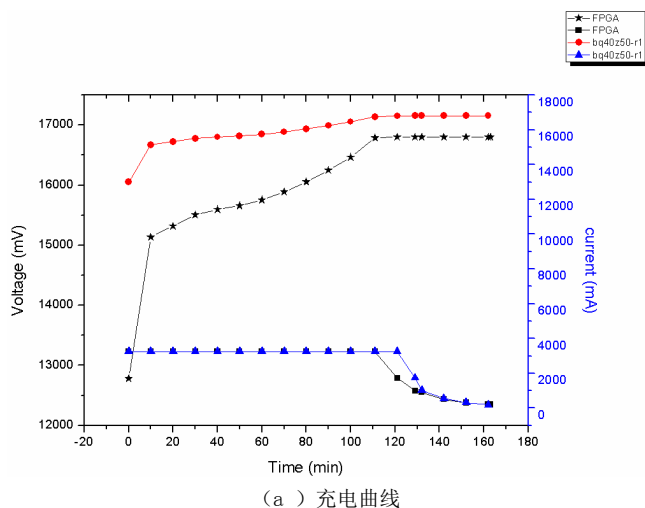


图 8 充放电曲线

Fig.8 Charge-discharge curves

得到图 8 中的充电放电曲线。由图 8 中 (a) 曲线可以看出充电过程中文中设计的电池管理系统对应电池电压上升较慢, 由图 8 中 (b) 曲线可以看出放电过程中电压相对下降较快, 最大误差 400mV 左右, 在设计允许范围内。造成这种现象的原因主要是标准系统集成在单一芯片上电量传输链路上压降小, 能量损耗相对较小。

实验过程中发现标准系统信号输出依靠 SMBus 总线, 输出的信号抖动较大时钟不稳时还会出现误码现象, 后续信号处理的工作量比较大, 文中设计的电池管理系统可以直接综合到设备的主控芯片 FPGA 内部, 不存在信号传输问题, 可靠性高。

5 结束语

根据飞行器地面控制设备的特殊使用场合, 和锂离子电池安全高效可靠的使用要求, 文中设计了一种基于 FPGA 的结构简单、可靠性高的电池管理系统, 具有过充保护过、过放保护、满电检测、电量检测等功能, 并且集成到设备主控芯片内可以对电池进行透明化控制。经过试验测试, 该系统满足设计预期。目前该系统已成功应用于实际系统中, 效果良好。

参考文献

- [1] 李婷, 王玮, 段金松, 等. 便携式仪器锂电池管理系统的设计与研制[J]. 世界核地质科学, 2018, 35(1): 41-45.
Li Ting, Wang Wei, Duan Jinsong, et al. Design and development of lithium battery management system for portable instrument[J]. World Nuclear Geoscience, 2018, 35(1): 41-45.
- [2] Zhu Fangfang, Liu Guoan, Tao Cai et al. Battery management system for Li-ion battery[J]. Journal of Engineering, v2017, n13, p 1437-1440, 2017.
- [3] 杨文荣, 朱赛飞, 陈阳, 等. 基于改进安时积分法估计锂离子电池组 SOC[J]. 电源技术, 2018, 42(2): 183-184, 246.
Yang Wenrong, Zhu Saifei, Chen Yang, et al. SOC estimation of lithium-ion battery based on improved ampere-hour integral method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(2): 183-184, 246.
- [4] Nagata Jun-Ichi, Kawasaki Kenichi, Nakamoto, Hiroyuki Source. A battery management system adapted for an energy harvester with a low-power state of charge monitoring method and a 24 microwatt intermittently enabled Coulomb counter[J]. Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC, v 2018-March, p 3556-3562, April 18, 2018, APEC 2018-33rd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.
- [5] 冯莉原, 宋凌琚, 周兴振, 等. 钴酸锂电池性能研究[J]. 电源技术, 2018, 42(3): 339-342.
Feng Liyuan, Song Lingjun, Zhou Xingzhen, et al. Study on performance of LiCoO₂ battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(3): 339-342.

[6] 张金龙, 佟微, 孙叶宁, 等. 锂电池健康状态估算方法综述[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 128-134.

Zhang Jinlong, Tong Wei, Sun Yening, et al. Review of state of health calculation method for lithium battery[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 128-134.

[7] 周英华, 蒋庆斌. 一种实用型电池均衡技术研究[J]. 电子器件, 2018, 41(1): 145-151.

Zhou Yinghua, Jiang Qingbin. A Practical Battery Equalization Technology Research[J]. Electronic Device, 2018, 41(1): 145-151.

[8] Xue Fangrong, Ling Zhi, Yang Yubing et al. Design and implementation of novel smart battery management system for FPGA based portable electronic devices[J]. Energies, v 10, n 3, 2017.

[9] 谢信奇, 秦会斌. 一种新型锂电池充电技术[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(4): 73-76.

Xie Xinqi, Qin Huibin. A new charging technology of lithium-ion batteries[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(4): 73-76.

[10] Badrinath Ashwin Srinivas, Udupa Sumukha V. Source. Protection circuitry and passive balancing for battery management systems part[C]. 6th International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2017, v 2018-January, p 510-515, February 9, 2018, 6th International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC, 2017.

[11] 李国洪, 凌牧. 基于 FPGA 的动力电池管理系统研究与开发[J]. 电子技术应用, 2011, 37(10): 120-122.

Li Guohong, Ling Mu. The research and development of battery management system based on FPGA[J]. Computer Technology and Its Applications, 2011, 37(10): 120-122.

[12] Texas Instruments Bq40z50-R1 1-Series, 2-Series, 3-Series, and 4-Series Li-Ion Battery Pack Manager [M]. 2015.

作者简介:



魏淑稳(1992—), 硕士研究生, 从事电路与系统、嵌入式开发研究。Email: weishuwen402@126.com

杨玉华(1977—), 女, 副教授, 主要研究维纳传感器器件。

焦新泉*(1978—), 男, 副教授, 主要研究方向为动态测试技术, 高速电路系统。Email: jiaoxinquan@nuc.edu.cn

收稿日期: 2018-09-15; 修回日期: 2018-11-20

(焦阳 编发)