

空间仪器锂离子电池管理控制器研究

徐拓奇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了满足实验类空间仪器对空间电源系统的低成本、高集成度、微型化的需求, 设计了以 C8051F040 芯片为控制核心的空间仪器电源控制器。该控制器与传统设计方式的最大区别是采用高集成度的锂离子电池控制芯片(bq77PL900)代替了原有的模拟电路。通过使用该芯片不仅大大降低了控制器所占体积, 减小了控制器的功耗, 而且提高了控制器的抗干扰能力。为了提高系统的可靠性, 该系统还采用在线 EEPROM 充注技术, 可以及时发现控制器内部被打翻的数据并进行恢复。通过实验证明该设计简单可靠, 而且能量转换效率也提高了 5% 左右。该设计可广泛应用于低成本的空间仪器的电源、微小型卫星的电源系统。

关键词: 空间仪器; bq77PL900; 锂离子电池

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0157-07

Controller for management of lithium-ion batteries for space instrumentation

Xu Tuoqi

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

Abstract: In order to meet the needs of low-cost, high integration space instruments for space power systems, a space-based instrument C8051F040 chip power controller was designed. The major difference between the controller and the traditional design approach is the use of highly integrated lithium-ion battery controller chip (bq77PL900) as an integrated controller chip instead of analog circuits. By employing the bq77PL900, the size of power controller is reduced and the energy of the power controller used is decreased, and the anti-jamming ability of the system is enhanced. To improve the reliability of the system, the system uses the online EEPROM re-injection technology, which can be used to discover the knocked data. This experiment proves that this design not only greatly simple and reliable, but also enhance the efficiency of the system by 5%. This design can wildly used in low-cost space instruments and small satellites.

Key words: space instrument; bq77PL900; lithium-ion battery

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-07

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z113)

作者简介: 徐拓奇(1980-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事卫星电源系统设计与优化方面的研究。Email: xutuqi@126.com

0 引言

空间仪器是星载一体化卫星的一种衍生类型。其内部具有星载一体卫星的全部特点，即载荷与卫星高度融合，但空间仪器又不同于传统意义的空间卫星，它一般采用搭载的方式进行发射。因此，空间仪器与传统小卫星相比，具有质量更轻、体积更小、成本更低、研制周期更短等特点。如果空间仪器沿用传统小卫星电源系统的设计方案，必然无法满足使用要求。

国内外传统的电源控制器一般采用 S3R 的模式^[1]，它主要由太阳能电池阵、S3R 顺序分流器、蓄电池充电调节器(BCR)、蓄电池放电调节器(BDR)、母线电压误差放大器(MEA)和蓄电池误差放大器(BEA)组成。其系统结构图如图 1 所示。

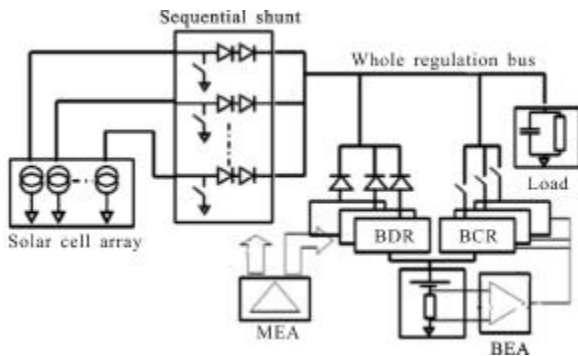


图 1 S3R 型功率控制系统结构图
Fig.1 Structure of S3R power system

S3R 系统的优点^[2]是相对于传统电源控制器易于实现模块化设计，缺点是大量使用模拟电路，使得设备的体积和质量较大。

为了适应空间仪器电源系统的需求，设计采用大量集成度更高的器件以保证电源系统体积和质量更小。这种方式与传统设计相比，更容易实现快速开发、快速集成、快速测试的要求。

文中以锂离子蓄电池集成管理芯片 bq77PL900 为核心设计电路，采用 C8051F040 作为外围控制芯片，除了实现空间电源系统充电控制、放电控制及电池均衡功能以外，实现了控制芯片在轨 EEPROM 重注技术，提高了锂离子蓄电池管理设备的可靠性^[3]。

1 空间蓄电池控制电路工作原理

锂离子蓄电池与传统蓄电池相比，具有单位体

积及质量下储存能量高、几乎没有记忆性等优点。但是如果处理不好则存在过充爆炸和过放失效的缺点。为了安全使用，必须对锂离子蓄电池进行充电保护、放电保护及电池均衡。

集成化充电放电控制器采用 EEPROM 来保存各种保护参数(充电电压阈值、放电电压阈值、过流保护阈值)。外太空存在空间单粒子效应，容易使某位存贮的数据发生错误。如果一旦发生单粒子效应，则整个控制器将面临崩溃。为了解决这个问题，充电放电控制器内部采用奇偶校验加在线重注技术，可以保护数据不会被损坏。

1.1 电池保护

锂离子蓄电池在空间工作过程中，需要对蓄电池各个参量进行状态采集。

1.1.1 单体电池电压采集

为了对锂离子蓄电池进行保护，必须先对各节单体电池的电压进行采集^[4]。充电放电控制器内部采用电压采集-保持电路，该电路使采集到的电压数据与内置的两个电压比较器进行比较，把比较低结果发送给逻辑控制端。整个采集系统的工作周期为 120 μs，采集时间为 50 ms，这样可以有效采集数据，为后续判断提供有效数据。该系统顺次为每节电池进行电压采集。具体采集电路如图 2 所示。

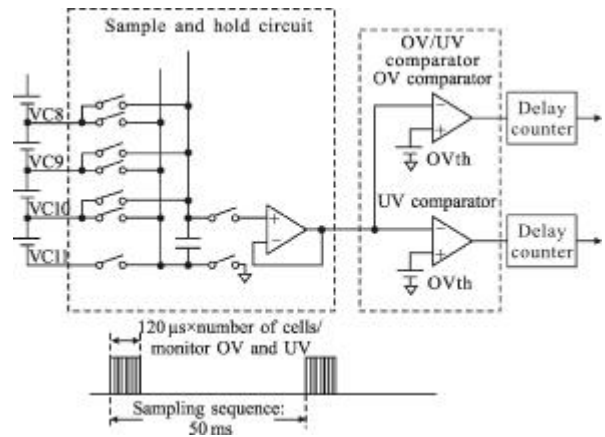


图 2 单体电压监测电路

Fig.2 Cell voltage monitoring circuit

1.1.2 蓄电池过压保护

在锂离子充电过程中，蓄电池的电压会随着充入的电量增加而升高。当锂离子蓄电池内部电压上升到某一阈值时，如果继续充电则会造成蓄电池爆炸或燃烧等事故^[5]。

蓄电池充电控制电路的电路图如图 3 所示。单体电池电压采集电路会采集各节单体电池的电压,当蓄电池充满后可测得各个单体的电压与 EEPROM 中设置的单体截止充电电压相等,充电控制 MOS 管被关闭。在此状态下蓄电池无法进行充电操作。

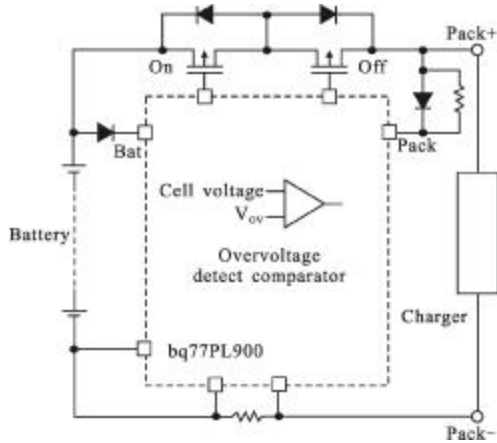


图 3 蓄电池过压保护模式

Fig.3 Overvoltage protection mode

充电放电控制器实时检测锂离子蓄电池组中各个单体的电压状态,当各个单体的电压低于EEPROM 中预设充电电压阈值时,逻辑电路判断蓄电池组过压状态消失。则充电控制 MOS 管自动恢复正常打开状态,可以实现充电功能。

1.1.3 蓄电池欠压保护

在锂离子放电过程中,蓄电池的电压会随着放出的电量增加而降低。当锂离子蓄电池内部电压下降到某一阈值时,如果继续放电则会造成蓄电池内部电解液的损坏,从而造成蓄电池不可逆的损坏^[6]。

蓄电池放电控制电路的电路图如图 4 所示。单

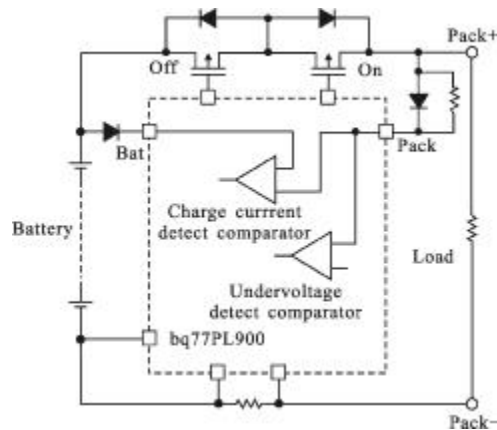


图 4 蓄电池欠压保护模式

Fig.4 Undervoltage protection mode

体电池电压采集电路会采集各节单体电池的电压,当整个蓄电池组的电压与 EEPROM 中设置的蓄电池组截止放电电压相等,此时放电控制 MOS 管被关闭。在此状态下蓄电池无法进行放电操作^[7]。

充电放电控制器实时检测锂离子蓄电池组中各个单体的电压状态,当蓄电池组的电压高于EEPROM 中预设放电电压阈值时,逻辑电路判断蓄电池组过放状态消失。则放电控制 MOS 管自动恢复正常打开状态,可以实现放电功能。

1.1.4 蓄电池过流及短路保护

当空间仪器负载发生短路或瞬间电流增大时,锂离子蓄电池组中各个单体电压会发生变化。充电放电控制器会通过此改变,发现出现蓄电池过流及短路故障时。

当出现短路故障或充放电电流异常时,充电及放电控制 MOS 管都将被关闭,此时蓄电池将无法向内充电也无法向外放电,具体如图 5 所示。

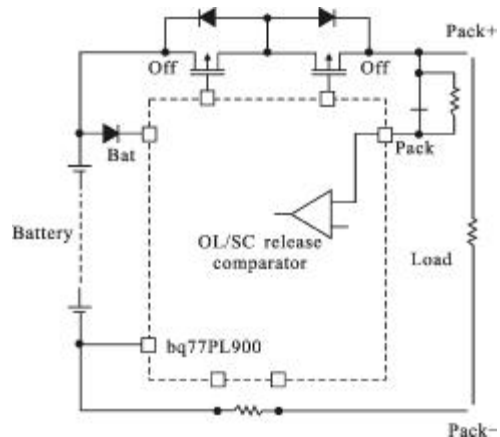


图 5 短路及过流保护模式

Fig.5 Overcurrent and short-circuit protection modes

当发生过流或短路保护后 12.8 s,系统再次检测,如果短路故障消失,系统自动恢复。

1.2 锂离子蓄电池均衡控制

锂离子蓄电池在制作过程中不可避免地存在个体差异。空间仪器在轨工作过程中,蓄电池各个单体原来较小的个体差异会随着电池工作时间的增加而增大。如果不对这种差异进行补偿,就会大大降低整组蓄电池的使用寿命。

充放电控制器内部设有电池均衡控制电路,通过智能控制该电路可以在充电过程中减小蓄电池组中各个电池单体之间的电压差。

在各个串联的单体电池旁并联一个均衡电阻(阻值在 500~1 000 Ω 之间) 及一个 MOS 管组成旁路均衡电路, 通过控制该旁路均衡电路中 MOS 管的开关状态, 实现该节单体电池的充电均衡。

工作模式如图 6 所示。当电池单体 A 达到压保护时, 旁路均衡电路工作, 使该电压下降而其他电池电压不变。当电压达到 EEPROM 设定的阈值时, 蓄电池组再次充电, 如此往复, 直到最后一节电池也达到过压保护电压后整个系统进入过压保护模式。

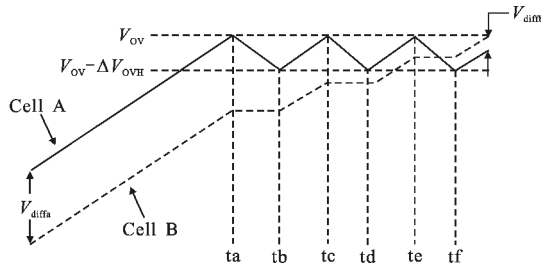


图 6 电池均衡时序图

Fig.6 Cell balancing timing chart

控制器在进行电池均衡的过程中采用远端均衡的均衡策略。具体来说, 如果有 1 号, 2 号和 5 号电池单体电压高于预设电压 (其中 1 号和 2 号毗邻, 5 号与 1 号和 2 号中间有电池间隔), 需要均衡。则首先对 1 号电池单体进行旁路均衡, 然后对 5 号电池单体进行旁路均衡, 最后对 2 号电池单体进行旁路均衡。

当电池出现保护信息, 如过流保护、过压保护和欠压保护等, 均衡将被自动停止。

1.3 空间防辐射保护

充电放电控制器芯片内部采用 EEPROM 存储充电放电控制参数, 另外 EEPROM 还被用于存储控制器内部中间计算数据。

为了保证安全, 充电放电控制器内部采用奇偶校验方式进行数据验证。控制器内部 RAM 寄存器有一位 (PFALT) 用于显示 EEPROM 的奇偶校验状态。如果有错误则该位写 1, 而且外部中断控制引脚 XALERT 为低电平, 充电和放电控制电路均关闭; 如果没有检验出错误, 则该位置 0 且外部中断控制引脚为高电平。

如果充放电控制器出现 EEPROM 奇偶校验错误, 必须通过上位机对其 EEPROM 进行重注, 重注后充电放电控制器将可以正常工作。

EEPROM 重注过程如图 7 所示。首先需要确保编程电压高于 20 V, 然后利用单片机通过 I2C 总线预写入设置数据, 通过 I2C 总线发送预写入命令, 确认写入数据, 发送写入命令, 等待 1 ms 后确认 VGOOD 位为高电平, 再设置 EEPROM 位为高电平, 等待 100 ms 后设置 EEPROM 位为低电平, 最后确认写入的数据。

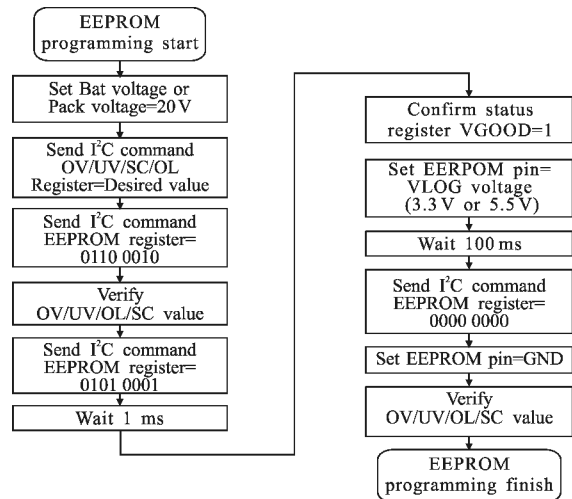


图 7 EEPROM 重注流程图

Fig.7 EEPROM re-injection flow chart in orbit

2 空间仪器蓄电池管理系统设计

2.1 总体框架

空间仪器蓄电池管理系统在结构上主要由电池控制模块和智能管理模块组成, 具体如图 8 所示。

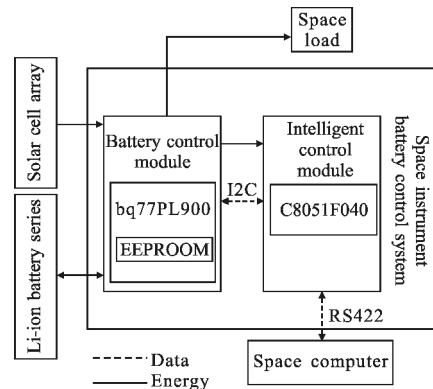


图 8 空间仪器蓄电池控制系统总体结构图

Fig.8 Overall structure of the power controller

电池控制模块的主要功能是对蓄电池进行充电控制、放电控制和电池均衡控制。该模块以 bq77PL900 芯片为核心, 通过 MOS 管及外围电路实现锂离子蓄

电池在空间的过压保护、过流保护及电池均衡等功能。实现锂离子电池的空间安全防护。

智能管理模块的主要功能一方面是与星载计算机进行通信,把电源控制器的工作状态及参数传递给上位机,另一方面是通过对 bq77PL900 芯片的访问控制功率采集模块和电池控制模块的工作、设置相应参数、读取相关信息。除此之外,智能管理模块的一个重要功能是为 bq77PL900 芯片内部的 EEPROM 提供在轨重注功能。

2.3 电池控制模块

电池控制模块采用 bq77PL900 作为核心控制芯片。该芯片可对 7 节锂离子蓄电池进行控制,包括充电控制和均衡控制,具体如图 9 所示。该芯片通过设置 MOS 管实现对蓄电池的充电控制,与芯片连接的旁路匹配电阻实现对蓄电池的均衡控制。

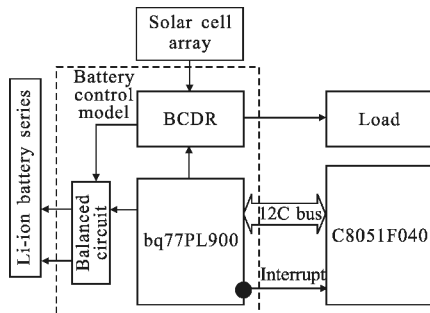


图 9 电池控制模块电路设计图

Fig.9 Battery control module circuit design

该芯片内置 I2C 总线,通过该总线的操作可以对充电及放电操作的各种参数进行设置,并可读取蓄电池电压、各个单体电池电压、控制芯片当前状态等信息。

2.4 智能管理模块

智能管理模块采用 C8051F040 芯片作为其核心控制芯片。该芯片是完全集成的混合信号片上系统型 MCU,具有 64 个数字 I/O 引脚,片内集成了一个 CAN2.0B 控制器。其内部采用高速、流水线结构的 8051 兼容的 CIP-51 内核 (可达 25 MIPS),芯片内有全速、非侵入式的在系统调试接口、真正 12 位 100 kpsps 的 ADC,带 8 通道模拟多路开关,64 KB 可在系统编程的 FLASH 存储器,4352(4K+256)字节的片内 RAM,硬件实现的 I2C 和两个 UART 串行接口,片内看门狗定时器、VDD 监视器和温度传感器。

该芯片通过外扩 DS26LV31 和 DS26LV32 实现 RS422 串口电平的转换,并通过其与中心计算机进行通信。LM2673 芯片与 ASM1117 芯片分别用于将 30 V 电源电压转换为 5 V 电源及 3.3 V 电源,为各个设备供电。具体电路图如图 10 所示。

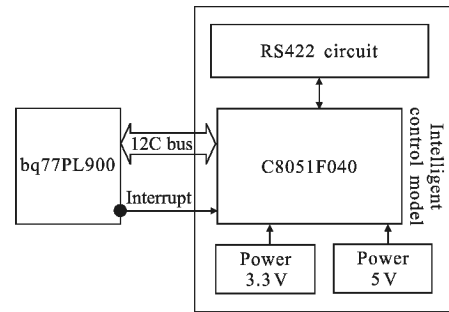


图 10 智能管理模块电路设计图

Fig.10 Intelligent management module circuit design

2.5 软件算法实现

空间仪器锂离子蓄电池管理系统在轨工作时,智能管理模块一直对整个系统进行控制,如果发现电池控制模块出现 EEPROM 被空间粒子打翻,则通过智能管理模块对该 EEPROM 进行重注。

系统首先进行初始化,配置相关寄存器与中断,然后读取蓄电池组的当前电压,判断是否需要 EEPROM 重注。如果需要重注,则首先判断是否结束重注,如果未完成则先发寄存器数据位,然后发送预写入命令,再发送写入命令,等待 1 ms 后写引脚置高位,等待 100 ms 后发送禁止写入命令,最后写引脚置低位,完成本次写入。然后判断是否需要重注,如果不需要则读取蓄电池当前状态,如果需要重注则如此循环。

如果蓄电池组电压低于设定阈值则说明蓄电池当前已经处于欠压状态,此时应关闭蓄电池放电的开关 MOS 管,使其无法放电。如果蓄电池组电压高于设定阈值则说明蓄电池目前工作正常,可以继续工作。然后向电源控制器向中心机发送指令,回报当前状态,等待中心机给出相应配套参数。之后根据中心机给出的参数优化配置功率采集模块的参数,优化配置电池配置模块的参数。然后读取中心计算机的命令,如果允许放电则控制开关蓄电池放电的 MOS 管进行放电操作,如果禁止放电则关闭放电的 MOS 管。之后系统延时 20 s 后再次读取蓄电池电

压。具体的程序流程图如图 11 所示。

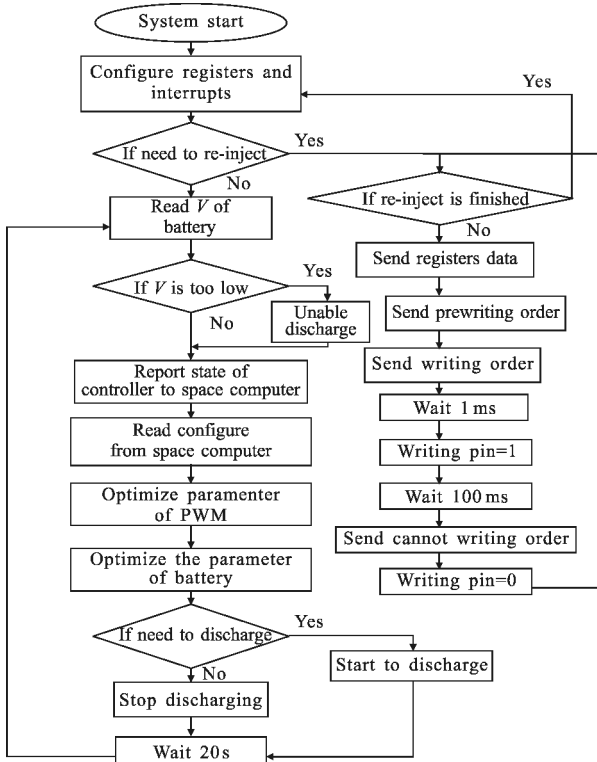


图 11 软件程序流程图

Fig.11 Flow chart of software program

2.3 实验与验证

为了保证空间仪器锂离子蓄电池管理系统的正常工作,需要对系统进行地面测试。

测试电池采用军用 2 Ah 锂离子蓄电池,用直流电源代替太阳电池阵,其限流值设为 1 A,用 5 只并联的 500 Ω、2 W 的功率电阻模拟空间负载。

在实验过程中,直流电源为蓄电池充电 30 min,然后蓄电池为系统及负载供电 30 min。在不同温度下对控制器进行测试,具体测试结果如表 1 所示。

表 1 不同温度下功率控制器实验记录

Tab.1 Power controller at different temperatures test record

No.	Working temperature /℃	Average charging current /A	Average charging voltage/V	Average discharging current/A	Average discharging voltage/V	Efficiency
1	30	0.334	30	0.31	27.8	86.5%
2	20	0.334	30	0.30	26.4	79.5%
3	10	0.334	30	0.29	25.8	75.1%
4	0	0.334	30	0.27	24.3	65.6%

从表 1 中可以看出,随着环境温度的下降,电源控制器转换效率有所下降。传统设计方案的转换效率约为 80%,此设计与原来传统设计相比提高了 5%左右(工作温度 30℃)。

电源控制器的体积与重量与传统设计相比都有大幅降低,具体体积、质量如图 12、图 13 所示。



图 12 电源控制器称重图

Fig.12 Power controller weighting picture

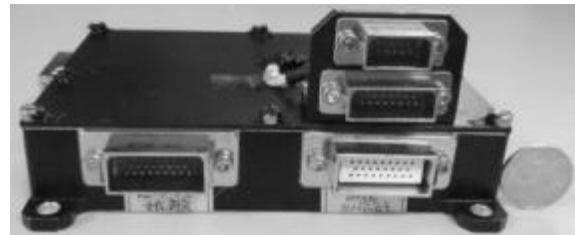


图 13 电源控制器外观图

Fig.13 Power controller surface picture

3 结论

文中对空间仪器电源系统中高集成度电源控制器进行了研究,首先介绍了空间电源控制器的工作原理,并分别对控制器的各个模块进行了设计,最后通过实验证明了该设备的有效性。

实验结果表明,该高集成度空间仪器锂离子蓄电池管理系统可靠性高,性能稳定,可广泛应用于空间仪器中。该设计不仅大大减小了电源控制器的体积和质量,提高了可靠性,而且能量转换效率也提高了 5%左右。

参考文献:

[1] Lee Seongjun, Kim Jonghoon, Lee Jaemoon, et al. State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge [J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(2): 1367-1373.

[2] M' Closkey R T, Vakakis A. Analysis of a microsensor

- automatic gain control loop [C]//Proceeding of the American Control Conference, 1999, 5: 3307-3307.
- [3] Li Lianbing, Cui Zhiqiang, Du Zhonggang, et al. Research on the calculation method of residual capacity available for Li-ion battery [J]. Chinese Battery Industry, 2010, 15(5): 259-262. (in Chinese)
李练兵, 崔志强, 杜仲刚, 等. 锂离子电池组可用剩余容量计算方法的研究[J]. 电池工业, 2010, 15(5): 259-262.
- [4] Zhong Shenglan, Zhang Yuping. A high-effect equalization circuit for high-capacity lithium-ion batteries [J]. Electronics Quality, 2010(10): 11-12. (in Chinese)
钟胜蓝, 张榆平. 大容量锂电池组的高效均衡电路设计[J]. 电子质量, 2010(10): 11-12.
- [5] Gao Wei, Jing Zhanrong, Du Yaofeng. Design of digital and intelligent charging system [J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(12): 2521-2524. (in Chinese)
高伟, 景占荣, 杜要锋. 数字化智能充电系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(12): 2521-2524.
- [6] Perol P. An efficient low cost modular power system for fully regulated bus in low earth orbit applications [C]// Proceeding of the Sixth European Space Power Conference, 2002: 375-382.
- [7] Yan Libing, Xu Di, Ge Aiming. Novel maximum power point tracking method under non-uniform isolation conditions [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2173-2180. (in Chinese)
严力秉, 徐迪, 葛爱明. 不均匀光照情况下太阳能最大功率跟踪算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2173-2180.