

一种用于锂离子蓄电池组的主动 均衡电路设计

赵旺彬 黄军 陈海涛

(上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘 要 针对大容量锂离子蓄电池组的均衡管理要求, 文章提出一种基于多绕组变压器的主动均衡拓扑电路, 采用固定占空比控制, 通过多绕组变压器将串联蓄电池组中电压较高单体的能量传输到电池组中, 从而实现单体之间的电压均衡。采用 Simulink 软件进行了仿真验证, 结果表明: 多绕组变压器均衡电路电池组可以实现大电流快速均衡。该方法可为卫星上大容量电池均衡设计提供参考。

关键词 锂离子电池组; 主动均衡; 固定占空比控制; 反激变压器

中图分类号: V442 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1673-8748.2018.04.010

An Active Balance Circuit Applied to Lithium Ion Battery Packs

ZHAO Wangbin HUANG Jun CHEN Haitao

(Shanghai Institute of Space Power-sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: In regard to the balance management for high capacity lithium-ion battery packs in space, an active balance circuit based on the topology of multi-winding transformer is proposed in the paper. The circuit can control the magnitude of the balance current by fixed duty cycle control, to achieve active balance function. The circuit can achieve battery voltage balance by multi-winding transformer, transmitting higher voltage battery energy to lower voltage battery. A Simulink model is built for the circuit, and the simulation results show multi-winding transformer balance circuit can achieve large current and fast balance. Meanwhile, the method could offer a design reference for high capacity Lithium-ion battery packs in the satellite.

Key words: lithium-ion battery packs; active balance; fixed duty cycle control; flyback transformer

锂离子蓄电池因其具有的高比能量、高电压、低的自放电率等优点, 得到了越来越广泛的应用, 已成为在镉镍蓄电池、氢镍蓄电池以后的第三代空间储能电源。由于锂离子蓄电池组不能过充或过放, 使用过程中若不进行均衡控制, 随着充放电循环次数增多, 各电池单体电压会出现分化, 极大地缩减电池组的使用寿命^[1-2]。因此, 锂离子蓄电池组在使用过

程中, 需要对各电池单体进行电压均衡处理, 均衡方式主要包括被动均衡和主动均衡。其中, 被动均衡多采用电池单体并联电阻进行分流, 控制简单, 已广泛用于空间锂离子蓄电池组均衡, 但随着卫星所使用蓄电池组容量不断增大, 要求增大均衡电流, 将给均衡电路散热带来问题^[3-4]。主动均衡通过电容、电感等储能元件实现能量从高压单体往低压单体或整

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-06-07

作者简介: 赵旺彬, 男, 硕士, 从事电池储能管理方面研究。Email: zhaowangbinjiayou@163.com。

组电池转移,可实现大电流均衡,且能量损耗小,非常适合于卫星大容量锂离子蓄电池组的均衡。常用的主动均衡电路包括电容均衡^[5-6]、电感均衡^[7]等。电容均衡随着各个电池单体之间电压差值的减小,均衡速度越来越慢,电感均衡需要能量的多次传输,并且均衡策略复杂。国外已经实现主动均衡在地球静止轨道(GEO)和低地球轨道(LEO)卫星上应用^[8],国内也对空间用主动均衡技术进行了研究,文献[2]和文献[8]介绍了一种锂离子电池非耗散型均衡方法,该方法控制简单,通过变压器实现均衡,但其均衡完后仍然存在 10 mA 左右的电池放电电流,不利于空间锂离子蓄电池组长寿命管理要求,且每节电池均衡单元使用独立变压器,无法实现集成优化。考虑到空间锂离子蓄电池组应用环境特殊,其均衡电路控制方式设计及元器件选用须考虑较多限制因素,客观上增加了主动均衡电路设计难度。因此,卫星大容量锂离子蓄电池组主动均衡技术引起了越来越多的关注。

综上所述,为了解决大容量锂离子蓄电池组均衡面临的快速均衡、电路可靠设计等难题,本文提出基于多绕组 DC/DC 变换技术和金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)的主动均衡电路,相比传统被动均衡方法,可以实现更大电流均衡,且电路损耗更

小,有利于均衡电路散热设计并节省空间有限能量,从而确保卫星大容量锂离子蓄电池组在轨安全工作。

1 多绕组变压器主动均衡原理

为了实现大容量锂离子蓄电池组单体之间的能量均衡,本文提出了一种基于多绕组 DC/DC 变换器的主动均衡电路,其特点在于利用多绕组变压器反激变换原理,实现电池组和单体之间能量的转移。图 1 给出了基于多绕组 DC/DC 变换器的主动均衡原理,通过合理设计,应用多个 DC/DC 变换器单元可实现对锂离子蓄电池组能量的转移。如图 1(a)所示,CELL_{*n*}代表第 *n* 节单体电池,多绕组 DC/DC 变换器的一边与 6 节电池分别连接,另一边与相对应的 12 串联电池组连接,其中一个变换器对应一个均衡模块,每两个相邻的均衡模块副边有 6 节公用电池单体,实现锂电池组所有均衡模块的联系。该均衡电路可以实现对不同模块内的多个电池单体同时均衡,以及多个均衡模块的级联,从而方便蓄电池组更大规模串联使用。所有的均衡模块可以同时进行均衡,这对均衡速度要求高的大容量锂离子蓄电池组非常有利。

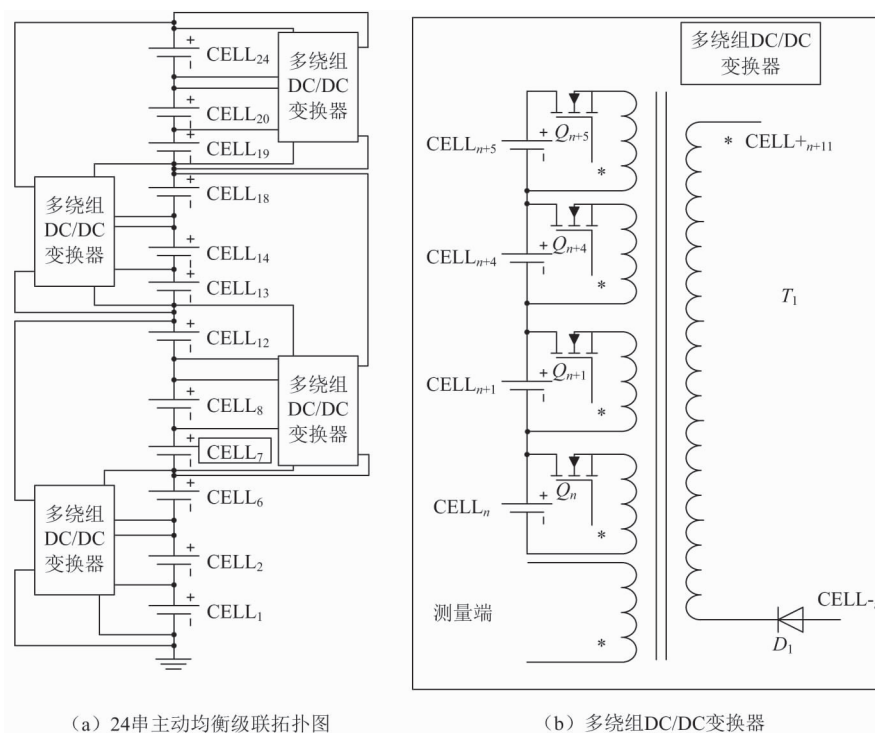


图 1 主动均衡原理

Fig 1 Active balance principle

如图1(b)所示,多绕组DC/DC变换器设计成反激变压器, Q_n 代表第 n 个开关管, D_1 为电路中串联的二极管, T_1 为一个多绕组变压器,CELL $_{-n}$ 对应第 n 节电池的负极,CELL $_{+n+1}$ 对应第 $n+1$ 节电池的正极。定义连接电池单体一侧为变压器的原边,连接电池组一侧为变压器的副边,变压器原边具有7个绕组,前6个绕组对应6节电池,测量端绕组用于进行均衡电流采样反馈,实现均衡开关过流保护,某单体电池均衡过程中,当检测到测量端绕组电流峰值过大时,关闭对应的MOSFET。变压器副边具有一个绕组,该绕组连接12节电池。定义上述多绕组DC/DC变换器为1个均衡模块,且可通过多个多绕组反激变压器串联,从而实现对均衡蓄电池组串数扩展。图1中,每个多绕组变压器的副边绕组都串联了一个二极管,实现副边绕组对整组电池组的充电续流。

大容量锂离子电池组在充电过程中,如果中央处理器(CPU)检测到某个电池单体的电压大于均

衡阈值,则CPU产生固定占空比的脉冲宽度调制(PWM)信号,控制并联在该电池单体上的均衡变压器的原边开关电路中的开关,以固定占空比工作,等效均衡示意如图2所示。以电池单体CELL $_1$ 为例,开关管导通期间,电池单体CELL $_1$ 对均衡变压器原边绕组放电,原边励磁电感存储能量,图2(a)中红色线条表示单体电池CELL $_1$ 放电电流流向;开关管关断期间,均衡变压器副边绕组通过二极管续流给对应的锂离子电池组(12节电池单体)充电,图2(b)中红色线条表示对电池组充电电流流向,如此循环,可以快速实现高电压失衡单体的均衡。均衡电流波形如图3所示,其中 T_{on} 为变压器原边导通时间, T_{off} 为变压器副边导通时间,变压器工作在断续模式,可以通过调节占空比的大小控制最大均衡电流。

图3中的 T_{on} 为 $8.57\mu s$, T_{off} 为 $0.8\mu s$,变压器原边峰值电流 $I_{pri-peak}$ 为10A,变压器副边峰值电流 $I_{sec-peak}$ 为10A。

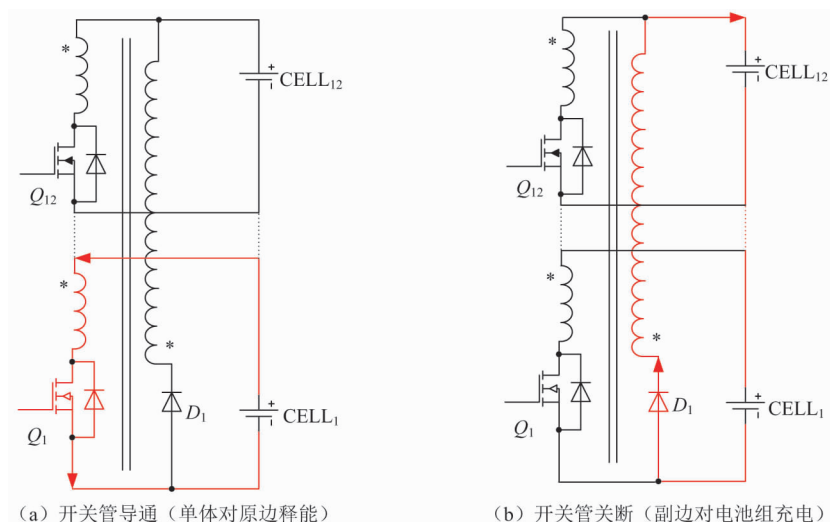


图2 均衡过程示意图

Fig 2 Balance process diagram

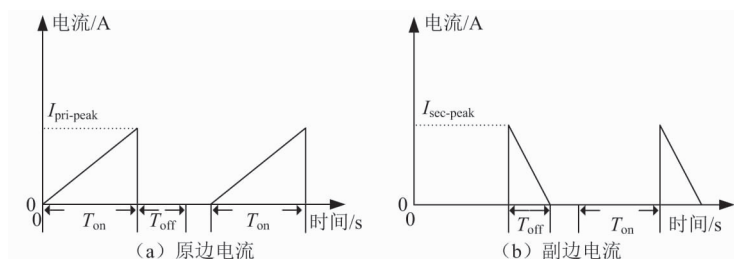


图3 均衡变压器原、副边电流

Fig 3 Current for primary and second of balance transformer

2 多绕组变压器主动均衡电路设计

基于多绕组 DC/DC 变换器主动均衡原理,考虑联蓄电池组的单体电压采样、均衡策略控制、隔离驱动等功能单元,设计了图 4 所示的主动均衡系统。在电池主动均衡过程中,模数转换器(AD)采样到每节电池电压,所有数据在 CPU 中处理,CPU 负责将电池电压与均衡阈值进行检测比较,根据均衡控制算法,产生相应的 PWM 驱动信号,驱动某节电池上并联的 MOSFET,直到所有电池电压的差值在均衡阈值范围内。

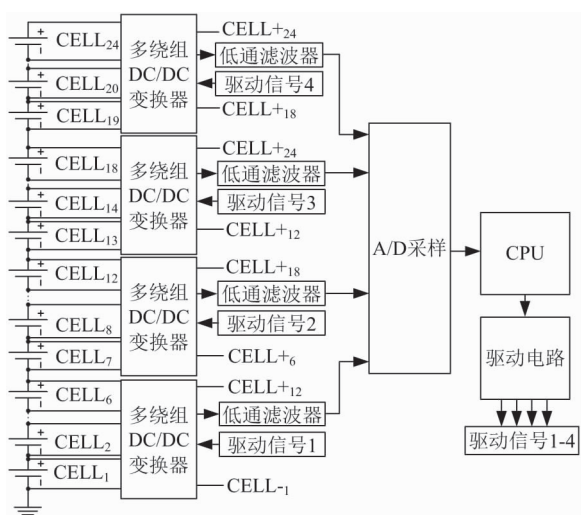


图 4 主动均衡系统图

Fig. 4 Active balance system

均衡电路可以分为功率电路和控制电路,功率电路由电池组单元、均衡模块组成,其中均衡模块包含均衡变压器、MOSFET、二极管,功率模块可以实现扩展,每节电池通过开关管与蓄电池组串联,采用固定占空比控制方式,实现对电池电压偏大的电池单体放电。控制电路包括 CPU 控制单元、AD 采样单元,每节电池电压信号经过一阶低通滤波器进入 AD 采样中,所有电池单体电压的 AD 采样信号经过处理进入 CPU,通过 CPU 内部的均衡算法实现电池组的均衡控制,开关管的开关周期与均衡变压器电流峰值的关系如下。

$$T_s = T_{on} + T_{off} = L_{pri} \frac{I_{pri-peak}}{U_{bat}} + L_{sec} \frac{I_{sec-peak}}{U_{off}} \quad (1)$$

式中: T_s 为开关周期, T_{on} 为开关导通时间, T_{off} 为开关关断时间, L_{pri} 为原边励磁电感, $I_{pri-peak}$ 为原边电流峰值, U_{bat} 为电池单体电压, L_{sec} 为副边励磁电感, $I_{sec-peak}$ 为副边峰值电流, U_{off} 为串联电池单体的总

电压。

均衡变压器设计是否合理关系到均衡系统的工作性能,因此要对变压器参数进行合理设计。在电池组充电过程中,均衡系统一旦监测到某个单体电压过高,即启动对应均衡开关对其放电,可得到均衡变压器初级侧电池单体放电的平均电流为

$$I_{pri-ave} = \frac{I_{pri-peak}}{2} \frac{m \times k}{m \times k + 1} \quad (2)$$

式中: m 为串联的电池单体数目, k 为变压器原边与副边的匝数比。

同理能够得到均衡变压器副边电池组充电平均电流为

$$I_{sec-ave} = \frac{I_{pri-peak}}{2} \frac{k}{m \times k + 1} \quad (3)$$

对式(1)~(3)进行分析,可以得出:采用固定占空比控制方式,均衡平均电流只和变压器原副边匝数比、电池串数以及电流峰值有关。

根据上述物理量关系,结合任务实际要求可计算得到均衡变压器的设计参数,从而为多绕组均衡变压器的优化设计提供指导。通过固定占空比控制,最大占空比为 50%,由于单个单体电池电压工作范围在 3.6~4.2 V 之间,因此能够得到在最大单体电压 4.2 V 下,变压器工作在 50% 占空比下的均衡电流,该电流为主动均衡系统最大均衡电流。

主动均衡电路均衡开关驱动电路如图 5 所示。图 5 中选用了一节电池,说明它的驱动方式,其中 VDD 为控制电路的工作电源,主动均衡电路的均衡开关需要采用浮地驱动方式,且需要重点考虑满足空间应用要求。为此,本文设计了图腾柱加变压器隔离的隔离驱动方式。图 5 中,图腾柱起到增大驱动电流的目的,同时采用了磁隔离的方式,该电路驱动的结构简单,能够满足空间领域应用的要求。

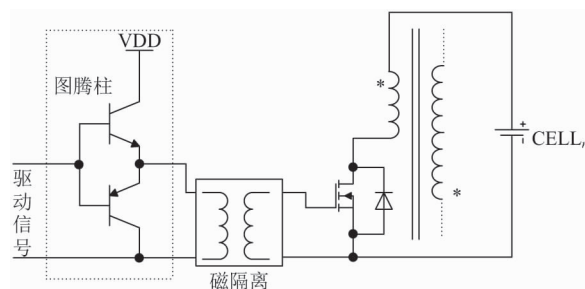


图 5 主动均衡驱动示意图

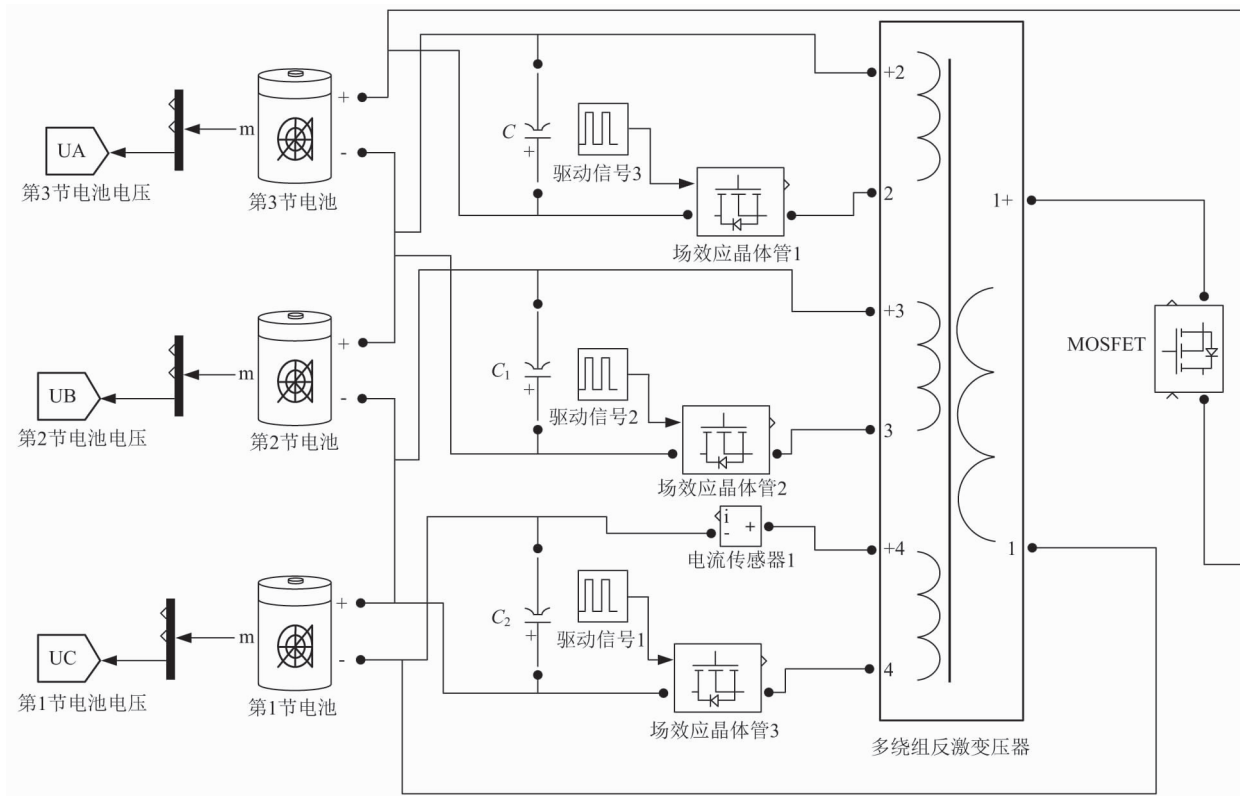
Fig. 5 Active balance drive diagram

3 仿真结果

为了验证基于多绕组变压器的充电均衡电路的均衡功能,基于 Simulink 仿真软件搭建了3节锂离子电池的充电均衡电路,Simulink 软件中自带了电池仿真模型,设置3节电池单体的容量分别为1.2 Ah,3节电池标准电压为3.6 V,分别设置3节电池单体的初始容量为20%、20%、80%,通过设置初始容量

的不同来设置初始电压的不同,给定固定占空比50%,开关频率设置为100 kHz。

如图6所示,通过 Simulink 仿真软件搭建了电池均衡模块,利用 Simulink 软件中现有的电池模型,变压器副边绕组串联二极管续流,采用了1个多绕组变压器,该变压器原边3个绕组,副边1个绕组,对最大电压的电池单体放电,实现电池单体之间的平衡状态。



注: C 、 C_1 、 C_2 为电容, m 为测量端。

图6 电池均衡模块 Simulink 仿真

Fig 6 Simulink for battery balance module

均衡电流波形如图7所示,给定固定50%占空比信号,变压器原边电流峰值最大可达20 A,变压器副边电流峰值最大可达15 A,变压器工作在断续模式,分析图7可以得出,该主动均衡方式能够以较大的电流对电池组实现均衡功能,电池单体均衡电流平均值可达5 A以上。

如图8所示,其中蓝线表示2节电池较低电压,初始容量为20%;黑线表示1节电池电压,初始容量为80%。3节电池初始电压最大相差100 mV以上,经过14 s左右的均衡过程,实现了3节电池电压

的平衡状态,3节电池电压相差很小,说明了该策略的可行性。

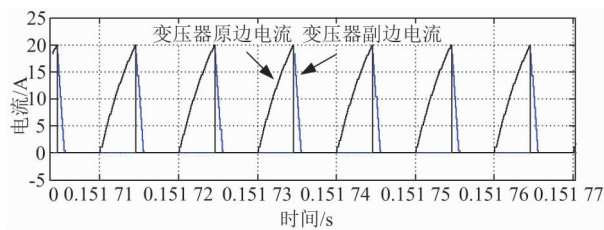


图7 电池均衡电流波形图

Fig 7 Chart of battery balance current

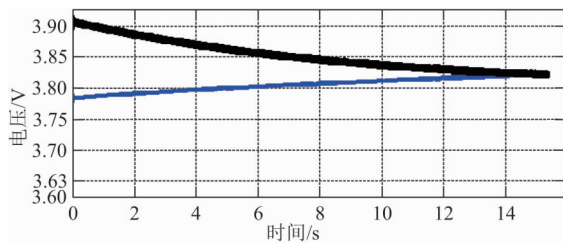


图 8 3 节电池电压波形图

Fig. 8 Three battery voltage waveform

4 结论

本文提出了一种可应用于卫星大容量锂离子蓄电池组的主动均衡电路,该均衡电路基于多绕组的均衡变压器设计,可实现锂离子电池组充电过程中的快速均衡。采用固定占空比控制,可以简化控制系统设计。新型均衡电路能够实现模块化设计并具备可扩展性。基于 Simulink 软件进行了仿真分析,验证了电路的基本原理和功能。需要注意的是该电路中每个均衡模块同一时间只能有一节电池均衡,不同均衡模块之间可以同时均衡,每两个相邻均衡模块之间副边有 6 节公用电池,实现不同模块之间能量的转移,可以得到基于多绕组变压器的均衡系统优势如下。

(1)主动均衡方式降低了均衡损耗,提高了均衡速度(均衡电流可达 5 A 以上),可更好满足大容量锂离子蓄电池组的均衡要求。

(2)均衡变压器采用了多绕组变压器,工作频率设计为 100 kHz 以上,有利于均衡电路高集成、轻量化设计。

(3)采用固定占空比的控制方式,控制策略简单,有利于满足卫星大容量锂离子蓄电池组均衡电路对可靠性设计的要求。

参考文献 (References)

[1] 张建琴.空间锂离子蓄电池充放电一体化供电技术研究[D].上海:上海交通大学,2012
Zhang Jianqin. Research on the technology of space-used LI-ION battery charge discharge shunt regulator module [D].Shang Hai: Shanghai Jiao Tong University,2012 (in Chinese)

[2] 宋鼎,牛跃华,王利然.一种空间锂离子电池非耗散型均衡方法[J].航天器工程,2014,23(4):57-59
Song Ding,Niu Yuehua,Wang Liran. Research on non-dissipative cell equalizer for space lithium-ion battery [J].Spacecraft Engineering,2014,23(4):57-59 (in Chinese)
[3] 李红林,余文涛,黄智.东方红四号卫星平台锂离子蓄电池在轨应用分析[J].航天器工程,2016,25(5):58-60
Li Honglin,Yu Wentao,Huang Zhi. Flight experience of lithium-ionbattery applied on DFH-4 platform [J]. Spacecraft Engineering,2016,25(5):58-60 (in Chinese)
[4] 刘赫名.空间锂离子蓄电池组均衡管理系统的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2013
Liu Heming. Design and implementation of space lithium ion battery equalization management system [D].Xi'an:University of Electronic Science and Technology,2013 (in Chinese)
[5] 何志刚,郑亚峰,孙文凯,等.采用容性电路的 BMS 主动均衡方法[J].重庆理工大学学报,2014,28(8):14-16
He Zhigang,Zheng Yafeng,Sun Wenkai,et al.Active e-equalization scheme in BMS base on capacitor circuit[J]. Journal of Chongqing University of Technology,2014,28(8):14-16 (in Chinese)
[6] P Hong Sun,K Chol Ho,P Ki Bum. Design of a charge equalization based on battery modularization [J].IEEE Transactions on Vehicular Technology,2009,58(5):3938-3946
[7] 曾辉.串联锂离子电池组电感主动均衡研究[D].大连:大连理工大学,2015:35-39
Zeng Hui. Research on active inductance balancing for series lithium-ion batteries [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2015:35-39 (in Chinese)
[8] George Altemose, Peter Hellermann, Thomas Mazz. Active cell balancing system using an isolated share bus for Li-ion battery management[C]//Systems, Application and Technology Conference (LISAT). New York: IEEE,2011:785-792

(编辑:李多)