

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108924

基于自适应选择主被动均衡拓扑的 机载锂电池电源能量均衡方法^{*}

刘 威,王友仁,许煜辰,陈则王

(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

摘 要:机载 28 V 串联蓄电池组内的不一致性会减小其能量利用率及寿命,严重时会导致飞行事故发生。本文提出了一种基于新型均衡拓扑的锂电池组能量均衡方法,以改善串联电池组的不一致性。该均衡拓扑利用结构简单的隔离型 DC-DC 变换器及功率电阻器实现蓄电池组内任一单体电池的“削峰”或“填谷”,相对于非集中式均衡拓扑减小了均衡元件的数量和系统体积。以荷电状态作为均衡变量,实现了机载 28 V 蓄电池组内各单体之间的能量快速转移。仿真及实验结果表明,所提出的新型均衡方法,相较于基于集中式 DC-DC 拓扑的均衡速度最高可提升 13.3%,均衡后电压极差最低降低至 32 mV, SOC 极差低于 0.4%,具有更快更好的均衡效果。

关键词:机载蓄电池组;自适应选择;主被动均衡;均衡控制方法;削峰;填谷

中图分类号: TM912 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40 510.10

An energy equalization method for airborne lithium battery power supply based on adaptive selection of active and passive equalization topology

Liu Wei, Wang Youren, Xu Yuchen, Chen Zewang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The inconsistency in airborne 28 V series battery group will reduce their energy utilization and life, which even leads to flight accident. In this article, an energy equalization method based on a new equalization topology is proposed to improve the inconsistency of airborne lithium series battery group. The equalization topology uses the isolated DC-DC converter with simple structure and resistor to realize “peak clipping” or “valley filling” of any single cell in the battery group. Compared with the non-centralized equalization topology, the number of equalization components and system volume are reduced. By using state of charge as the equalization variable, the energy transfer between cells in the airborne 28 V battery power supply is realized quickly. Compared with the centralized DC-DC topology, simulation and experimental results show that the proposed new equalization method can improve the equalization speed by 13.3%, reduce the voltage range to 32 mV and SOC range to less than 0.4%, and have faster and better equalization effect.

Keywords: airborne battery; adaptive selection; active and passive equalization; equilibrium control method; peak cutting; valley filling

0 引 言

在飞机主电源发生故障时,蓄电池组为飞机上重要的电气与电子设备供电,以保障飞机安全,是飞机应急和辅助电源的重要组成^[1]。其应用于飞机时,通常将多节单体串并联以满足需要,而各单体间的不一致会导致整个电池组能量利用率降低,同时也会降低电池组的循环寿命,甚至会发生安全事故^[2]。串联电池组比并联电池

组更容易受到单体不一致性的影响^[3]。使用有效的均衡系统能够改善电池组一致性,因此,开展机载串联蓄电池组能量均衡技术研究具有重要的研究意义与应用价值。

蓄电池组均衡技术研究内容包括均衡拓扑及控制策略。根据能量转移形式可分为被动均衡拓扑与主动均衡拓扑^[4]。常见的被动均衡是通过将需要均衡单体与电阻短接后使能量以热能形式耗散,结构及控制简单、低成本等均为其优点^[5],目前在市场上被广泛应用,其缺点为能量使用率较低。常见的主动均衡则是采用电容器、电感

器、变压器、DC-DC 等作为均衡器件来实现电量转移^[6]。基于开关电容的均衡拓扑^[7-8]体积小、控制简单,但均衡速度慢。基于电感的均衡拓扑^[9-10]均衡速度快,但一般需要多个电感,体积大。基于变压器的均衡拓扑^[11-12]可以在任何单体之间能量传递,效率较高,但有体积大、漏磁、扩展性差等问题^[13]。基于 DC-DC 的均衡拓可分为集中式^[14-15]与非集中式^[16-17],非集中式均衡速度快,但数量多、体积大、价格昂贵、不易拓展,集中式可使能量在任意单体间转移,结构简单、体积小、均衡效率高,但电池数量较多时,由于其往往只能对其中一节单体“填谷”,均衡速度会有所下降。均衡策略的研究主要涉及均衡变量的确定,荷电状态(state of charge, SOC)作为均衡变量相较于端电压更能表征电池整体性能。

针对基于集中式 DC-DC 的均衡拓扑在电池数量较多时只能对单一电池“填谷”从而导致均衡速度慢和在充电时无法对最高能量单体“削峰”从而可能导致充电结束前未达到均衡目标的问题,本文创新性地提出一种自适应选择主被动均衡拓扑,该拓扑能够实时根据均衡变量变化情况自适应选择均衡元件,从而选择对不同单体实现“削峰”和“填谷”,即需要将最高能量单体“削峰”时,选择电阻器作为均衡元件,采用被动均衡的方式将能量消耗,需要将最低能量单体“填谷”时,选择 DC-DC 作为均衡元件,采用主动均衡的方式将能量转移,在不降低均衡控制精度的前提下提高均衡速度。

1 均衡拓扑及其原理分析

1.1 均衡拓扑结构

针对机载 28 V 蓄电池组的整个充放电过程,为了最大化提高均衡电路均衡速度的同时不降低均衡精度,本文结合被动均衡电路与 DC-DC 主动均衡电路的优缺点,设计出一种新型的均衡拓扑,如图 1 所示。假设电池组中串联单体数量为 N ,则新型均衡拓扑包含 1 个功率电阻器、1 个隔离型 DC-DC 变换器、 $N+1$ 个开关 MOS 管(S_1 、 S_2 、 $\dots$ 、 S_{n+1})等。功率电阻器 R_1 为被动均衡元件,与 DC-DC 变换器一同用于能量的均衡。

由图 1 可知,新型均衡拓扑具有电阻器 R_1 和 DC-DC 变换器两种能量均衡元件,和目前常见的基于被动均衡的均衡拓扑和基于 DC-DC 变换器的均衡拓扑相比,具有如下特点:1)只需要 1 个电阻器和 1 个 DC-DC 变换器进行锂电池组能量均衡,对比于常见的非集中式被动均衡拓扑一般需要 N 个电阻器,常见的基于 DC-DC 的非集中式均衡拓扑需要 N 个 DC-DC 变换器,本均衡拓扑所需均衡器件少,属于双均衡元件、集中式均衡拓扑,相较于非集中式体积更小;2)选择均衡目标时只需要控制 2 个开关管使其导通,控制简单;3)可以根据最大单体间能量差

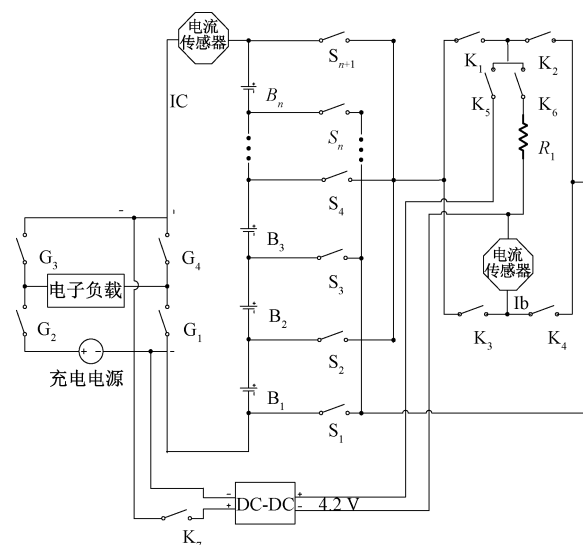


图 1 新型均衡拓扑

Fig. 1 New balancing circuit

异自适应选择不同的能量均衡元件,实现“填谷”和“削峰”,具有更快的均衡速度;4)均衡目标选择阵列只有 $N+1$ 组开关管,电路结构简单、体积小、成本低。

1.2 工作原理分析

为了便于分析整个均衡过程,做出以下假设:所有 MOS 管均为理想开关,可迅速切换通断状态,且无脉冲干扰。DC-DC 变换器在能量转移过程中无能量损耗。

以机载 28 V 蓄电池组为例,将蓄电池组内部所有并联电池看作一个单体电池,则共有 7 节个串联单体电池,此时设置 N 为 7。充电时, G_2 、 G_4 闭合, G_1 、 G_3 断开,放电时, G_1 、 G_3 闭合, G_2 、 G_4 断开,静置时, G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 均断开。参与均衡的单体主要通过 2 种均衡路径进行能量转移,以下根据不同均衡路径分别展开分析。当某一节单体能量过低时,能量均衡元件选择电路(由 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 、 K_6 、 K_7 组成)会根据均衡准则自适应选择 DC-DC 变换器作为均衡过程中能量均衡元件,采用主动均衡的方式将能量转移,从而达到“填谷”的目的;当某一节单体能量过高时,能量均衡元件选择电路会自适应选择电阻器 R_1 作为均衡过程中能量均衡元件,采用被动均衡的方式将能量耗散,从而达到“削峰”的目的。

设 B_7 电池能量最低,当满足均衡条件时,能量均衡元件选择电路选择 DC-DC 变换器作为能量均衡元件,即开关 S_7 、 S_8 、 K_1 、 K_4 、 K_5 、 K_7 导通,其余开关断开。此时均衡电路工作过程如图 2 所示,整个蓄电池组通过图 2 中回路 1 连接 DC-DC 变换器输入,DC-DC 变换器输出通过图 2 中回路 2 连接能量最低单体 B_7 ,将整个蓄电池组的能量快速均衡给 B_7 ,实现“填谷”的目的。

设 B_2 电池能量最高,当满足均衡条件时,能量均衡

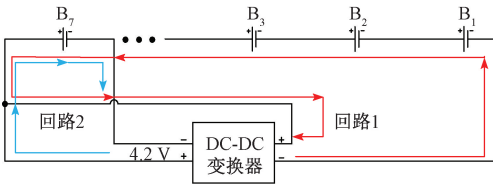
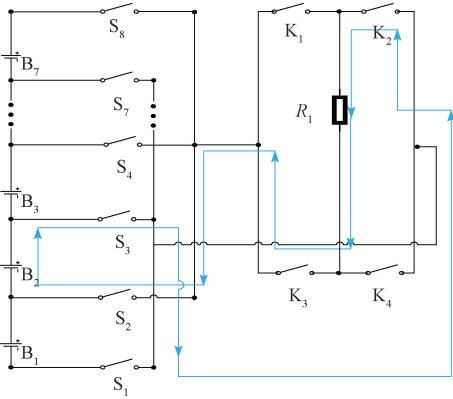


图2 DC-DC作为能量均衡元件时能量均衡过程

Fig. 2 Energy balancing process with DC-DC used as energy balancing element

元件选择电路选择电阻器 R_1 作为能量均衡元件,即开关 S_2 、 S_3 、 K_2 、 K_3 、 K_6 导通,其余开关断开。均衡电路工作过程如图3所示, B_2 电池直接与电阻器 R_1 相连组成均衡回路,实现“削峰”的目的。

图3 电阻器 R_1 作为能量均衡元件时等效电路及均衡过程Fig. 3 Resistor R_1 as energy equalizing element equivalent circuit and equalizing process

上述的 DC-DC 作为能量均衡元件及电阻器 R_1 作为能量均衡元件这两种情况,不会同时出现。在实际操作中,当需要切换能量均衡元件时,留有一段死区时间,死区时间过后开始下一阶段的均衡,以此保证均衡控开稳定性。根据均衡原理分析,本均衡拓扑相较于基于被动均衡或基于 DC-DC 主动均衡的均衡拓扑,能够同时“削峰”及“填谷”,拥有更快的均衡速度。

2 均衡控制策略

本文采用 SOC 作为均衡变量。采用基于扩展卡尔曼的 SOC 估计方法,以安时积分法所得结果作为标定,其估计结果绝对误差小于 3.5%。采用差值比较法,能够一定程度上减小因估计误差带来的影响。电池组能量均衡控制策略实现步骤如下:

1) 对每一节电池的状态进行检测,基于 EKF 方法在线估算各单体 SOC;

2) 查找组中 SOC 最大值 SOC_{max} 和最小值 SOC_{min} ,并

计算平均值 SOC_{ave} ;

3) 分别计算 SOC_{max} 、 SOC_{min} 与 SOC_{ave} 之间的差值,选择差值较大的作为偏差 ΔSOC 结果;

4) 若偏差 ΔSOC 超出 0.2%,将所需均衡单体电池接入均衡电路并自适应选择均衡元件进行均衡。

5) 1 s 后,循环步骤 1)~4)。

从均衡控制策略中可知,需要满足偏差 ΔSOC 低于 0.2%,即锂电池组内 SOC 极差低于 0.4% 条件时均衡停止,具有较高的控制精度,为保证这一控制精度的实现,在 SOC 估计时需要较高的估计分辨率。本文制定的均衡控制策略每 1 s 都会重新进行均衡条件判断,具有良好的实时性, SOC 估计的分辨率计算如下:

$$SOC \text{ 估计分辨率} = \frac{I \cdot \Delta t}{C_{now}} \cdot 100\% \quad (1)$$

其中, Δt 为检测时间间隔, C_{now} 为单体电池当前容量。以电池型号 IRC18650-22F 为例,设定其当前容量为 2.2 Ah,当前检测到的电流为 4.4 A (2 C),该电流值为该锂电池型号允许最大工作电流,则此时 SOC 估计分辨率为 0.06%,满足控制精度要求。

3 仿真结果分析

在 Simulink 环境下搭建基于新型均衡拓扑的均衡系统,并进行仿真验证。该环境包含单体蓄电池模型,可以根据电池类型设置相关参数,使仿真结果与实际情况相吻合。

电池组均衡电路模型如图4所示。其中电池类型选择三元锂电池,标称电压是 3.6 V,充电截止电压为 4.2 V,放电截止电压是 2.75 V,额定容量为 2.2 Ah。采用 7 节三元锂电池串联成组作为仿真实验对象。DC-DC 变换器用恒流源代替。设置 7 节单体电池 SOC 极差为 10%,电压极差为 0.064 V,具体各电池设置初始值如表 1 所示。

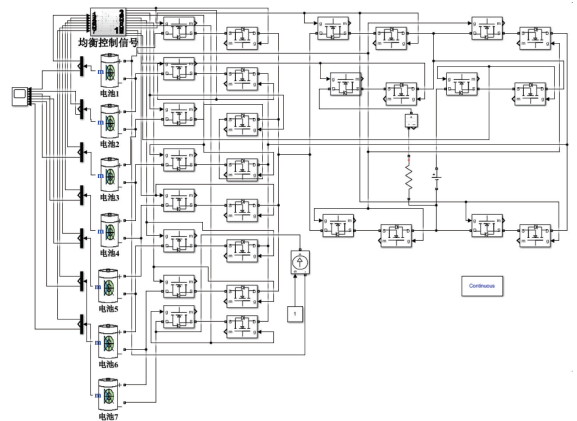


图4 主被动均衡电路仿真模型

Fig. 4 Active and passive equalization circuit

表 1 均衡仿真前设置初始值

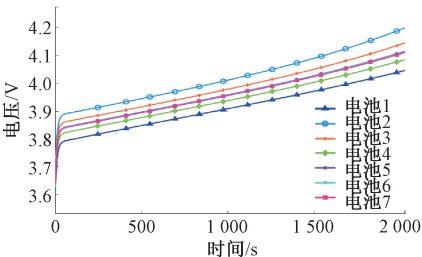
Table 1 The set initial value before balancing simulation

电池序号	SOC/%	电压/V
1	50	3.606
2	60	3.670
3	57	3.650
4	53	3.628
5	55.5	3.641
6	55	3.640
7	54.8	3.638
极差	10	0.064

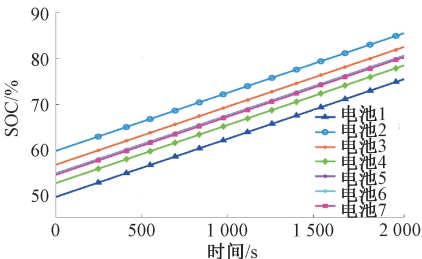
3.1 充电均衡仿真对比

设置蓄电池组充电电流为 0.5 C(1.1 A),在无均衡及有均衡两种情况下进行仿真对比,验证均衡效果。

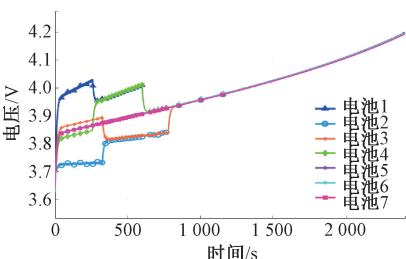
从图 5(a)、(b)可以看出,未均衡充电结束时(最高单体电池电压达到充电截止电压)电池组电压极差为 0.17 V,SOC 极差为 10%,充电时长为 2 050 s。从图 5(c)、(d)可以看出,到达停止均衡点时电压极差为 0.005 V,SOC 极差为 0.4%,充电时长为 2 480 s。



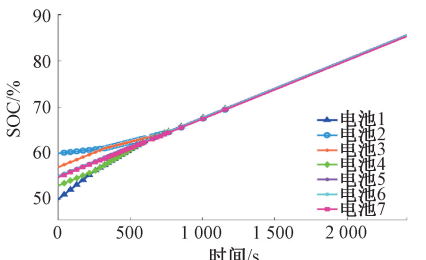
(a) 充电未均衡时电压变化曲线
(a) Voltage change curves with the un-balanced charging



(b) 充电未均衡时SOC变化曲线
(b) SOC change curves with the un-balanced charging



(c) 充电均衡时电压变化曲线
(c) Voltage change curves with the balanced charging



(d) 充电均衡时SOC变化曲线
(d) SOC change curves with the balanced charging

图 5 充电均衡仿真对比

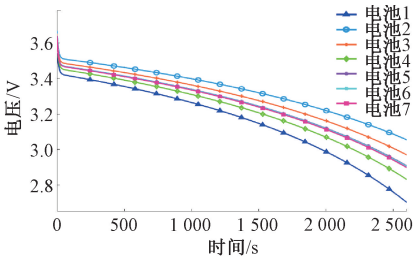
Fig. 5 Charging equalization simulation comparison

有均衡时,充电时长延长了 430 s,即蓄电池组可以充入更多的能量,且蓄电池组内各单体电池 SOC 及端电压极差明显小于未均衡时的极差,提高了蓄电池组内各单体电池的一致性。

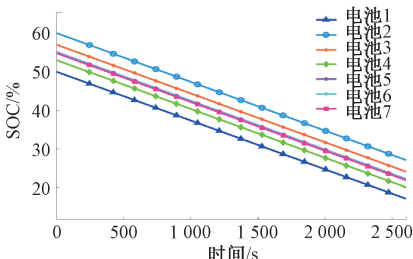
3.2 放电均衡仿真对比

设置蓄电池组放电电流为 0.5 C(1.1 A)在无均衡及有均衡两种情况下进行电池均衡仿真结果对比分析。

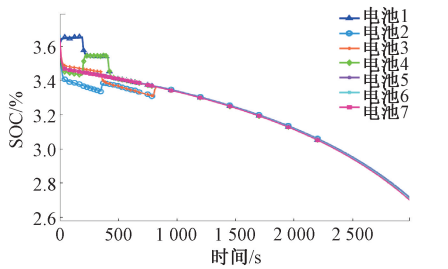
从图 6(a)、(b)可以看出,未均衡放电结束时,电压极差为 0.38 V,SOC 极差为 10%,蓄电池组 SOC 为 14.5%,放电时长为 2 660 s。从图 6(c)、(d)可以看出,到达停止均衡点时电压极差为 0.005 V,SOC 极差为 0.4%,蓄电池组整体 SOC 为 14.6%,放电时长为 2 990 s。有均衡时,放电时间延长了 330 s,即蓄电池组可以放出更多的能量,且蓄电池组内各单体电池 SOC 及端电压极差明显小于未均衡时的极差,提高了蓄电池组内各单体电池的一致性。



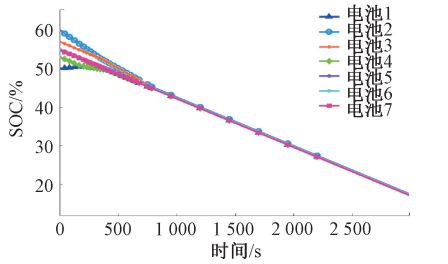
(a) 放电未均衡时电压变化曲线
(a) Voltage change curves with the un-balanced discharging



(b) 放电未均衡时SOC变化曲线
(b) SOC change curves with the un-balanced discharging



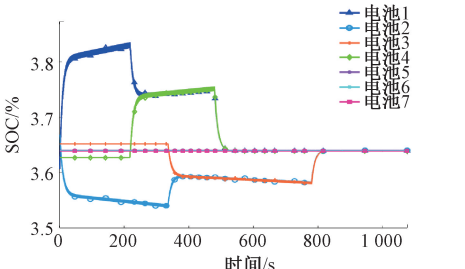
(c) Voltage change curves with the balanced discharging



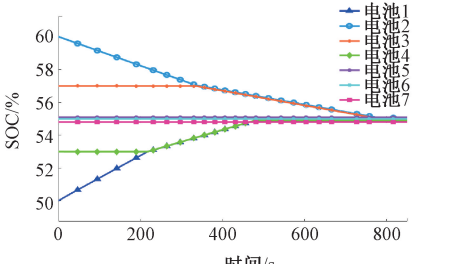
(d) SOC change curves with the balanced discharging

图 6 放电均衡仿真对比

Fig. 6 Discharging equalization simulation comparison



(c) Voltage change curves with equalization during static



(d) SOC change curves with equalization during static

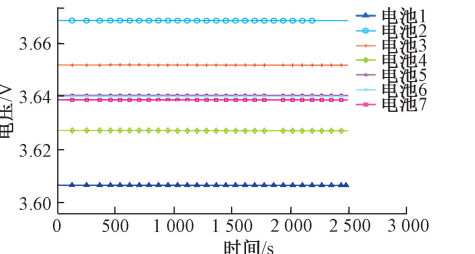
图 7 静置均衡仿真对比

Fig. 7 Static equalization simulation comparison

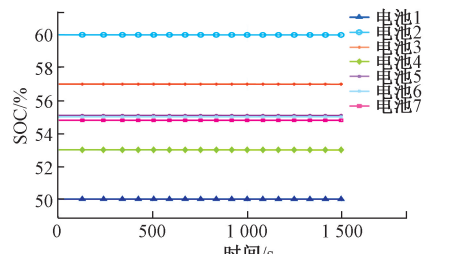
3.3 静置均衡仿真对比

设置蓄电池组处于静置状态,在无均衡及有均衡两种情况下进行仿真对比,验证均衡效果。

从图 7(a)、(b)可以看出,静置未均衡时,电池组电压极差为 0.064 V, SOC 极差为 10%, 蓄电池组整体 SOC 为 50%。从图 7(c)、(d)可以看出,静置均衡结束时电池组电压极差为 0.001 V, SOC 极差为 0.4%, 蓄电池组整体 SOC 为 54.8%。



(a) Voltage change curves without equalization during static



(b) SOC change curves without equalization during static

4 实验结果分析

4.1 实验平台介绍

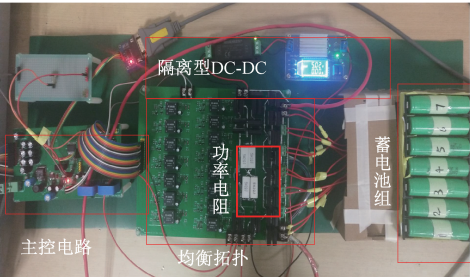
为了验证新型均衡拓扑的有效性,搭建了蓄电池组充放电实验平台。该平台能够对电池组充放电并记录实验数据,便于进行蓄电池组能量均衡控制系统的实验与测试结果分析。

实验平台如图 8(a)、(b)所示。均衡系统采用 STM32 作为 MCU,通过芯片 LTC6802 采集各单体电池端电压及环境温度,通过两个霍尔传感器采集电池充放电电流及均衡电流,获取相关参数后实时进行 SOC 估计及均衡控制;上位机通过串口获取总电压、充放电电流、单节电池电压、单节电池 SOC 等信息并重现历史数据及曲线,根据检测结果做出相关的控制、诊断预警及保护动作;充放电实验平台受上位机控制,进行整个蓄电池组的充放电操作。

本次实验对象为 28 V 锂电池组,电池型号及相关参数如表 2 所示。根据相关标准及要求,机载 28 V 线上电压浮动范围为 21~29 V,故选择待均衡的 7 节单体电池串联组成实验对象。各单体电池的当前容量值如图 9(a)所示,各单体 OCV-SOC 曲线如图 9(b)所示,采用多项式拟合方法,相关拟合系数见表 3。



(a) 锂电池充放电测试实验平台
(a) Lithium battery charging and discharging test platform



(b) 锂电池能量均衡控制系统
(b) Lithium battery energy balance control system

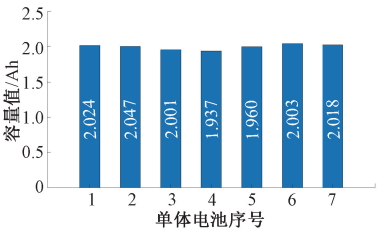
图 8 实验平台

Fig. 8 Experimental platform

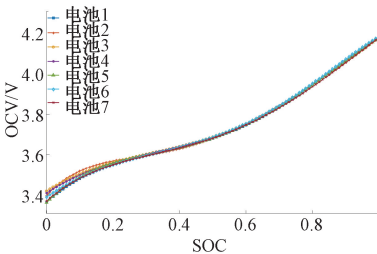
表 2 电池型号及参数

Table 2 Battery model and parameters

型号	ICR18650-22F
标称容量/Ah	2.2
标称电压/V	3.6
最大截止电压/V	4.1
最小截止电压/V	2.75
最大工作电流/A	4.4



(a) 各单体电池当前容量值
(a) The current capacity of each battery



(b) 各单体电池OCV-SOC曲线
(b) OCV-SOC curve of each battery

图 9 各单体电池当前容量及 OCV-SOC 曲线

Fig. 9 Current capacity and OCV-SOC curve of each battery

表 3 各单体电池 OCV-SOC 拟合曲线
Table 3 OCV-SOC fitting curve of each battery

序号	OCV-SOC 拟合曲线					
	$y=p_1x_5+p_2x_4+p_3x_3+p_4x_2+p_5x+p_6$					
	p1	p2	p3	p4	p5	p6
1	-0.92	0.05	3.72	-3.40	1.47	3.37
2	3.78	12.10	14.41	-7.09	1.79	3.40
3	-1.04	0.80	2.09	-2.14	1.05	3.42
4	-1.44	1.72	1.39	-1.99	1.07	3.41
5	0.513	-3.82	7.27	-4.81	1.68	3.36
6	-1.43	1.64	1.55	-2.11	1.15	3.39
7	0.20	-2.40	5.27	-3.70	1.44	3.37

排除其他因素干扰,初始极差越大,均衡用时越长。用每均衡 1%SOC 所需要用时来直观的体现均衡速度,有如下定义:

每 1%SOC 能量均衡用时 =

均衡时长 (s)

初始 SOC 极差 (%) - 结束 SOC 极差 (%)

(2)

其中,初始 SOC 极差为均衡开始前一刻最高单体 SOC 减去最低单体 SOC,结束 SOC 极差为均衡结束那一刻最高单体 SOC 减去最低单体 SOC。

4.2 基于新均衡拓扑的均衡实验结果及分析

基于本文设计的均衡方案,在放电、充电、静置 3 种情况下进行均衡实验。实验前后蓄电池组 SOC 极差、各单体电压极差及均衡用时如表 4 所示。

表 4 基于新均衡拓扑的各电池 SOC 极差、电压极差及均衡用时结果

Table 4 Results of SOC range, voltage range and equalization time of each battery based on the new equalization topology

极差及 用时	静置均衡		充电均衡		放电均衡	
	起始	结束	起始	结束	起始	结束
SOC 极差/%	23.9	0.4	8.6	0.4	7.1	0.4
电压极差/mV	283	41	120	32	112	67
用时/s	5 980		2 240		1 810	

图 10 为静置均衡实验过程中各单体 SOC 变化曲线。静置均衡实验前 SOC 极差为 23.9%,电压极差为 283 mV,经过了 5 980 s 的均衡后,各单体电池 SOC 极差减小到了 0.4%,电压极差减小到了 41 mV,根据式(2)可得每均衡 1%SOC 耗时 254 s,本文提出的均衡电路在静置时均衡效果明显。

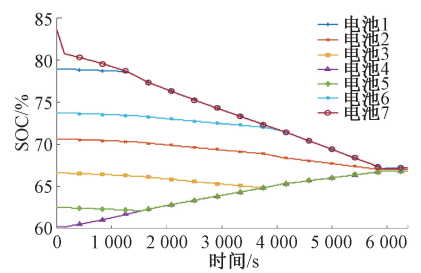


图 10 静置均衡控制下的锂电池单体电池电压及 SOC 变化
Fig. 10 Battery voltage and SOC change of lithium battery under static equalization control

图 11 为充电均衡实验中各单体的 SOC 变化曲线。充电均衡实验前电压极差为 120 mV, SOC 极差为 8.6%, 经过了 2 240 s 的均衡后, 各单体电池 SOC 极差减小到了 0.4%, 电压极差减小到了 32 mV, 达到了均衡目标, 根据式 (2) 可得每均衡 1% SOC 耗时 273 s, 本文提出的均衡电路在充电时均衡效果明显。

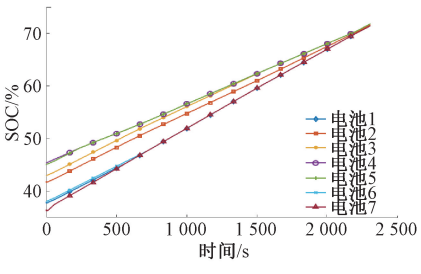


图 11 充电均衡控制下的锂电池单体电池电压及 SOC 变化
Fig. 11 Battery voltage and SOC change of lithium battery under charge equalization control

图 12 为放电均衡时 7 节单体电池的 SOC 变化曲线。放电均衡实验前 SOC 极差为 7.4%, 电压极差为 112 mV, 经过了 1 810 s 的均衡后, 各单体电池 SOC 极差减小到了 0.4%, 电压极差减小到了 67 mV, 根据式 (2) 可得每均衡 1% SOC 耗时 270 s, 本文提出的均衡电路在放电时均衡效果明显。

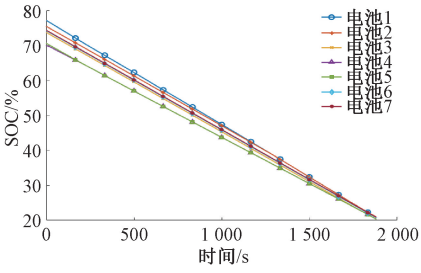


图 12 放电均衡控制下的单体电池电压及 SOC 变化
Fig. 12 Battery voltage and SOC change of lithium battery under static equalization control

4.3 与基于集中式 DCDC 均衡拓扑实验对比分析

对比实验分析本文提出的均衡拓扑相较于基于集中式 DC-DC 变换器的均衡拓扑具有均衡速度快、均衡精度高等优点, 主要参照的指标为每 1% SOC 均衡用时、均衡后 SOC 极差、均衡后电压极差, 用时越短、极差越小则说明均衡速度越快、均衡精度越高。基于集中式 DC-DC 变换器的均衡拓扑与新型均衡拓扑的主要区别在于新型均衡拓扑可自适应选择不同均衡元件, 提高均衡速度及均衡精度。为了免除其他因素干扰, 将开关 K_6 断开, K_5 闭合, 即一直选择 DC-DC 变换器作为均衡元件, 同时采用相同的均衡控制策略在不同条件下进行均衡实验。实验开始前后蓄电池组内 SOC 极差、电压极差及均衡用时如表 5 所示。

表 5 基于集中式 DC-DC 的均衡拓扑实验前后
各电池 SOC 极差、电压极差及均衡用时

极差及 用时	Table 5 SOC range, voltage range and equalization time of each battery before and after the DC-DC equalization topology experiment					
	静置均衡		充电均衡		放电均衡	
	起始	结束	起始	结束	起始	结束
SOC 极差/%	8.6	0.4	18.3	1.1	15.8	2.1
电压极差/mV	54	43	177	125	152	297
用时/s	2 270		5 430		1 980	

图 13 为基于集中式 DCDC 均衡拓扑静置时单体 SOC 变化曲线。静置均衡实验前电压极差为 54 mV, SOC 极差为 8.6%, 经过了 2 270 s 的均衡后, 各单体电池 SOC 极差减小到了 0.4%, 电压极差减小到了 43 mV。由于各单体电池受不同老化程度影响, 各单体 OCV-SOC 并不完全一致, 会出现 SOC 极差变小, 但电压极差反而变大的情况。但根据式 (2) 可得每均衡 1% SOC 耗时 277 s, 与本文提出的均衡电路在静置时均衡效果相比, 控制精度基本相同, 但控制速度明显下降了 8.3%。

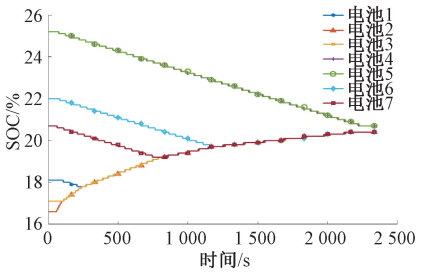


图 13 基于集中式 DC-DC 的均衡拓扑在静置
均衡控制下的电压及 SOC 变化曲线
Fig. 13 Change curves of voltage and SOC under static equalization control based on DC-DC

图 14 为基于集中式 DCDC 均衡充电拓扑时 7 节单体 SOC 变化曲线。实验前电压极差为 177 mV,SOC 极差为 18.3%,经过了 5 430 s 的均衡后,各单体电池 SOC 极差减小到了 1.1%,电压极差减小到了 125 mV,根据式(2)可得每均衡 1%SOC 耗时 315 s,由于其中一节电池到达了充电截止电压,故未达到均衡目标但均衡提前结束。与本文提出的均衡电路在静置时均衡效果相比,控制精度明显下降,控制速度下降了 13.3%。

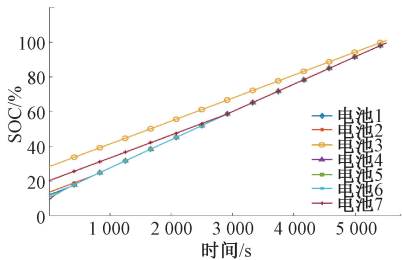


图 14 基于集中式 DC-DC 的均衡拓扑在充电均衡控制下的电压及 SOC 变化曲线

Fig. 14 Change curves of voltage and SOC under charge equalization control based on DC-DC

图 15 为基于集中式 DCDC 均衡拓扑放电均衡时 7 节单体 SOC 变化曲线。放电均衡实验前电压极差为 152 mV,SOC 极差为 15.8%,经过了 1 980 s 的均衡后,各单体电池 SOC 极差减小到了 2.1%,但电压极差增大到了 297 mV,原因在于均衡前各电池处于 OCV-SOC 曲线平台期,即使 SOC 极差较大,电压极差反而相对较小,在 7 号单体率先达到截止电压后,即处于 OCV-SOC 曲线剧烈变化期,放电均衡实验提前结束,且均衡尚未达到均衡目标,即使 SOC 极差较小,但电压极差反而增大。故与本文提出的均衡电路在静置时均衡效果相比,控制速度及控制精度明显下降。

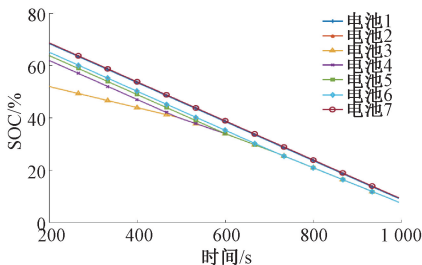


图 15 基于集中式 DC-DC 的均衡拓扑在放电均衡控制下的锂电池电压及 SOC 变化曲线

Fig. 15 Change curves of lithium battery voltage and SOC under discharge equalization control based on DC-DC equalization topology

采用文献[12]定义的每分钟均衡电压量($V \cdot \min^{-1}$)作为参考,每分钟均衡电压量越大,则均衡速度越快,各

均衡拓扑最大均衡速度对比如表 6 所示。

表 6 基于不同均衡拓扑时最大均衡速度对比	
Table 6 Balancing speed comparison based on different balancing topologies	
均衡拓扑	每分钟均衡电压量/($V \cdot \min^{-1}$)
文献[12]	0.002 17
基于新型均衡拓扑	0.002 43

5 结 论

本文提出了一种自适应选择主被动均衡拓扑电路,分析了新型均衡电路的两种均衡路径,以 SOC 作为均衡变量制定了均衡控制策略,设计制作了机载 28 V 蓄电池组的能量均衡系统,并进行了 28 V 蓄电池组在不同情况下的均衡对比实验。实验结果表明:基于自适应选择的主被动均衡电路相比于基于集中式 DC-DC 的均衡电路,均衡速度最高提升了 13.3%,电压极差缩小了 200 mV,电池组内各单体 SOC 极差低于 0.4%,能够更好地提高蓄电池组内各单体电池的一致性。由此,该均衡电路具有结构简单、容易控制、均衡速度快、均衡一致性好的特点。

参考文献

[1] 王友仁,梁嘉羿,黄薛,等.航空蓄电池能量均衡技术研究[J].航空学报,2017,38(5):216-225.
WANG Y R, LIANG J Y, HUANG X, et al. Research on energy equalization technology of aviation battery [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2017, 38(5): 216-225.

[2] 张凯,赵鹏,王友仁,等.基于荷电状态的锂离子电池组主动均衡控制[J].中国机械工程,2020,31(16):1931-1939.
ZHANG K, ZHAO P, WANG Y R, et al. Active equalization control of lithium ion battery pack based on state of charge[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(16): 1931-1939.

[3] 刘征宇,魏自红,许亚娟,等.基于自适应拓扑的电池动态分组均衡方法[J].中国机械工程,2020,31(6):714-721.
LIU ZH Y, WEI Z H, XU Y J, et al. Dynamic grouping equalization method for battery based on adaptive topology[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(6): 714-721.

[4] 蔡敏怡,张娥,林靖,等.串联锂离子电池组均衡拓扑综述[J].中国电机工程学报,2021,41(15):5294-5311.
CAI M Y, ZHANG E, LIN J, et al. Review on

- equalization topology of series lithium-ion battery [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5294-5311.
- [5] ZHANG Z, CHENG X, LU Z Y, et al. SOC estimation of lithium-ion battery pack considering balancing current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2216-2226.
- [6] 郭向伟, 耿佳豪, 刘震, 等. 基于反激变换器的双目标直接均衡方法[J]. 电工技术学报, 2020, 36(6): 1269-1278.
- GUO X W, GENG J H, LIU ZH, et al. The dual-objective direct balancing method based on flyback converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 36(6): 1269-1278.
- [7] SINGIRIKONDA S, OBULESU Y P. Active cell voltage balancing of electric vehicle batteries by using an optimized switched capacitor strategy [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102521.
- [8] DUAN J, DUAN M, ZHANG K, et al. Research on voltage equalization among multiple supercapacitor modules based on multiwinding transformer [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 120: 106031.
- [9] CHEN Y, LIU X, SHEN T, et al. An any-cell(s)-to-cell(s) equalization method with a single magnetic component for Lithium-ion battery pack [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102071.
- [10] 郭向伟, 刘震, 耿佳豪, 等. 基于 LC 储能的串联电池组主动均衡方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 242-251.
- GUO X W, LIU ZH, GENG J H, et al. Research on the active balancing method of series battery pack based on LC energy storage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 242-251.
- [11] 张娥, 徐成, 王康丽, 等. 电池组分段混合均衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 168-173.
- ZHANG E, XU CH, WANG K L, et al. Segmented hybrid equalization control strategy for battery packs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 168-173.
- [12] LIU Y, XIA CH Y, GU M, et al. A novel active equalizer for Li-ion battery pack in electric vehicles[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2649-2654.
- [13] 刘征宇, 夏登威, 姚利阳, 等. 基于耦合绕组的锂电池组主动均衡方案研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 54-64.
- LIU ZH Y, XIA D W, YAO L Y, et al. Research on active equalization scheme of lithium battery pack based on coupling winding[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2): 54-64.
- [14] SAMANTA A, CHOWDHURI S. Active cell balancing of lithium-ion battery pack using dual DC-DC converter and auxiliary lead-acid battery [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102109.
- [15] WU T, QI Y, LIAO L, et al. Research on equalization strategy of lithium-ion batteries based on fuzzy logic control [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102722.
- [16] 刘征宇, 武银行, 李鹏飞, 等. 基于 Cuk 斩波电路的电池组均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 233-241.
- LIU ZH Y, WU Y H, LI P F, et al. Battery equalization method based on Cuk chopper circuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 233-241.
- [17] HEIN T, ZIEGLER A, OESER D, et al. A capacity-based equalization method for aged lithium-ion batteries in electric vehicles [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191: 106898.

作者简介



刘威, 2019 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现于南京航空航天大学攻读硕士学位, 主要研究方向为锂电池组能量均衡管理与故障诊断。

E-mail: liu874176494@163.com

Liu Wei received his B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2019. He is currently a master student at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include energy balance management and fault diagnosis of lithium battery pack.



王友仁 (通信作者), 1996 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机测控技术与智能系统、传感器技术与信号处理等领域。

E-mail: wangyrc@nuaa.edu.cn

Wang Youren (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1996. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include computer measurement and control technology and intelligent system, sensor technology and signal processing etc.