

# 基于可重构电路的电池组充电均衡方法

任子豪<sup>1</sup>, 田恩刚<sup>1</sup>, 王立成<sup>1</sup>, 刘帅<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

**摘要:** 为缓解锂离子电池组在恒流充电结束后因压降导致的电池组电压不一致问题, 提出了一种改进型可重构均衡电路。在电池组充电过程中, 改进型可重构均衡电路可等效为传统可重构电路, 通过可重构电路控制各个电池充电状态, 使电池组在充电过程中达到均衡; 充电结束后并静置一段时间, 通过改进型可重构电路中的 Buck-Boost 电路进行再均衡。改进型可重构电路能够在保证充电均衡的基础上对因压降现象而造成的电池组电压不一致进行再均衡。最后, 通过搭建实物平台对该改进型可重构均衡电路进行验证, 并与传统可重构电路进行比较, 实验结果表明该均衡电路具有良好的性能。

**关键词:** 锂离子电池组; 可重构电路; 主动均衡; 压降

**中图分类号:** TM 912.9 **文献标志码:** A

## Battery pack charging equalization method based on reconfigurable circuit

REN Zihao<sup>1</sup>, TIAN Engang<sup>1</sup>, WANG Licheng<sup>1</sup>, LIU Shuai<sup>2</sup>

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** An improved reconfigurable equalization circuit was proposed to solve the problem of battery voltage inconsistency caused by voltage drop after constant current charging. During the charging process of the battery pack, the improved reconfigurable equalization circuit can be equivalent to the traditional reconfigurable circuit, which controls the charging status of each battery through the reconfigurable circuit to achieve equalization during charging. After charging was completed and a certain period elapses, the Buck-Boost circuit in the improved reconfigurable circuit was used for rebalancing. The improved reconfigurable circuit can rebalance the battery pack voltage inconsistency caused by voltage drop while ensuring charging balance. Finally, a physical platform was built to verify the performance of the improved reconfigurable equalization circuit and compared it with the traditional reconfigurable circuit. The experimental results show that the equalization circuit has good performance.

**Keywords:** lithium-ion battery pack; reconfigurable circuit; active equalization; voltage drop

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62173231, 62003213)

第一作者: 任子豪(1997-), 男, 硕士研究生。研究方向: 锂离子电池组均衡控制。E-mail: 1017805293@qq.com

通信作者: 王立成(1988-), 男, 讲师。研究方向: 控制理论、电池储能系统。E-mail: wanglicheng1217@163.com

锂离子电池作为一种新型储能元件,已经大规模应用在电动汽车、微电网以及各类电子产品中<sup>[1-2]</sup>。为了满足实际应用中对于能量和功率的需求,锂电池通常以串联的形式组成锂电池组。然而,电池会因为制作工艺、老化程度等因素的影响,导致其电压和容量的不同<sup>[3-4]</sup>。因此,在实际充放电时,电池组中各单体电池的电压、荷电状态(state of charge, SOC)等会不同,如果使用不当容易造成部分电池的过充或者过放,从而减少电池组的使用寿命<sup>[5-6]</sup>。为了解决这一问题,需要引入均衡电路对电池组进行均衡。电压参数因其相对于SOC、电池容量等参数而言更容易获取,已成为判断电池组是否达到一致的常用指标。

现有的锂电池组均衡电路可分为被动均衡和主动均衡两类<sup>[7]</sup>。被动均衡是通过在每个单体电池上并联一个分流电阻,消耗掉单体电池内的多余能量,从而实现单体电池间的均衡<sup>[8]</sup>。主动均衡是通过均衡电路将高能量单体电池中的能量转移到低能量单体电池中,从而减小单体电池间能量的差异<sup>[9-13]</sup>。文献[9-10]采用Buck-Boost电路作为均衡电路对电池组均衡,该电路简单可靠,易于扩展,可使相邻电池进行均衡。文献[11]对Buck-Boost电路进行了扩展,使之能够适应多种情形下电池组不均衡的情况。文献[12]提出了基于电压充电曲线的均衡策略,其假设电池组内所有电池的充电曲线相同,若出现不均衡的情况,通过平移曲线即可将其消除。文献[13]针对电池均衡提出了基于充电电池电压曲线的模糊逻辑算法,该算法可通过比较充电开始和结束时的电池电压来识别电池容量和SOC并进行均衡。需要指出的是,上述所提到的文献中其均衡电路拓扑都是固定不变的,如果串联在其中的单体电池发生故障,极有可能造成整个电池组失效。鉴于此,文献[14-17]提出了可重构均衡电路。这种电路能够根据需要动态重新排列电池,从而控制每个电池的充放电状态。相对于其他均衡拓扑,可重构电路具有灵活性高、容错性强、电路结构简单等优点,因其可以通过改变电池组拓扑结构来控制电池的充放电情况,可重构电路成为了主动均衡研究的热点之一<sup>[17]</sup>。

然而,目前基于电压的均衡电路的效果在充电结束时容易受到压降现象的影响。压降现象主要由锂电池的极化效应所引起,依据引起极化的因素不同,极化效应分为欧姆极化、浓差极化、

电化学极化三类<sup>[18]</sup>。由于锂电池制作工艺和原材料的差异,其本身特性如内阻等也会有不同。此外,因为锂电池在使用过程中会逐渐老化,导致其内阻等特性发生变化,且每个单体电池出现老化的程度有所不同,所以,充电结束后产生的压降导致的电压不一致将会更加明显,从而造成电池组再一次不均衡。虽然传统的恒流恒压充电方式能够缓解这一现象,但是却具有充电时间过长的缺点,不适合需要快速充电的应用场景,因此,针对快速充电场景可采用恒流充电方式加快充电速度。但是对电池组进行恒流充电时,由于电流过大,容易导致电池发热,若电池组中的单体电池同时充电,电池组可能会严重发热,影响电池寿命<sup>[19]</sup>,所以,需要尽量减少各个电池同时充电的时间。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于电压的均衡策略,以电池电压作为均衡指标,同时在可重构均衡电路的基础上加入Buck-Boost电路对可重构电路进行改进。在充电过程中使用图论表示电池组中各个单体电池间的关系,并采用基于一致性的均衡算法减小各个电池同时充电的时间,随后通过Buck-Boost电路对因压降现象导致的电池电压下降进行补偿,保证电池组电压的一致性。

## 1 锂电池建模及均衡电路拓扑

### 1.1 锂电池模型的建立

采用一阶RC(resistance-capacitance)模型对锂电池进行建模。它具有较高的建模精度和鲁棒性,同时能够很好地反映出电池内部的极化现象<sup>[20]</sup>。

电池模型如图1所示,一阶RC模型在结构上包括一个理想电压源,一个串联电阻 $R_0$ 和一个RC网络,其中理想电压源表示电池的开路电压(open circuit voltage, OCV),串联电阻表示电池的内阻,RC网络用来反映电池的化学极化现象。 $R_p$ 表示极化电阻, $C_p$ 表示极化电容。

充电时,电池端电压

$$U_t = U_{OCV} + U_p + I_0 R_0 \quad (1)$$

式中: $R_0$ 表示电池内部电阻; $I_0$ 是负载电流; $U_{OCV}$ 表示OCV; $U_p$ 表示化学极化电压。

### 1.2 可重构均衡电路

图2为传统的可重构电路原理图。该电路由

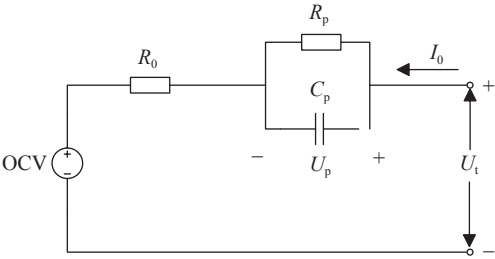


图1 锂离子电池一阶RC模型

Fig. 1 First-order RC model for lithium-ion batteries

开关和串联电池构成，其中， $B_1, B_2, \dots, B_n$ 表示锂电池。每个锂电池同时并联和串联一个开关，串联和并联的开关分别用 $S_{a,n}$ 和 $S_{b,n}$ 表示。当电池组进行充电时，控制器通过控制开关 $S_{a,n}, S_{b,n}$ 实

现对电池 $n$ 的充电控制。当电池 $n$ 需要充电时，闭合开关 $S_{a,n}$ ，断开开关 $S_{b,n}$ ；当电池 $n$ 不需要充电时，闭合开关 $S_{b,n}$ ，断开开关 $S_{a,n}$ 。 $S_{a,n}, S_{b,n}$ 取相反信号，即当 $S_{a,n}$ 闭合时， $S_{b,n}$ 就会断开，反之亦然。

以4节电池组成的电池组为例，如图3所示。若在充电过程中出现电池组电压不一致现象，如电池 $B_1$ 的电压略高于其余电池电压，需要通过可重构电路使每节电池电压保持一致。此时控制器会控制开关 $S_{a,1}$ 断开，控制 $S_{b,1}$ 闭合，此时充电电流绕过电池 $B_1$ 而向其余电池继续充电，直到其余电池电压等于电池 $B_1$ 的电压，此时每节电池电压基本相等，开关 $S_{a,1}$ 闭合， $S_{b,1}$ 断开，充电电源继续对整体电池组进行充电。

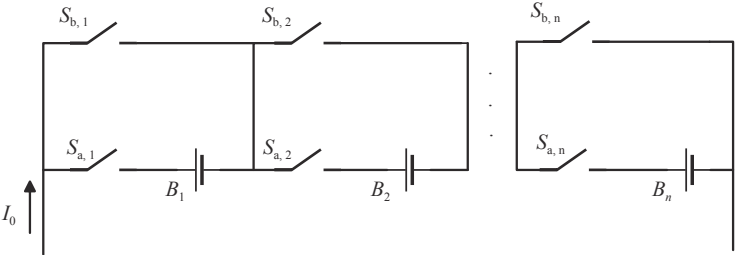


图2 可重构均衡电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of reconfigurable equalization circuit

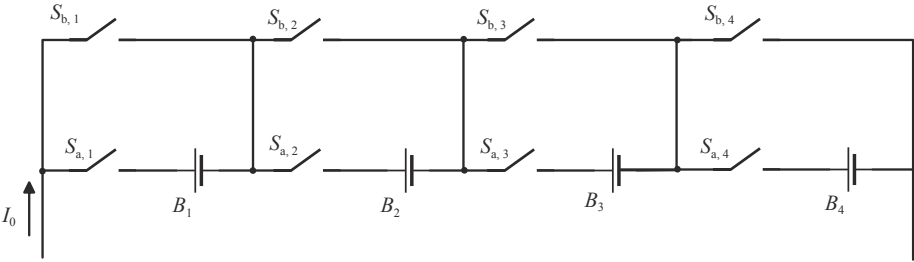


图3 可重构均衡电路

Fig.3 Reconfigurable equalization circuit

虽然可重构电路在充电过程中能够实现效果较好的均衡，但是忽略了充电结束后电池的压降现象引起的电压再次不一致，为此本文对可重构电路进行了改进，使之能够在电池组出现压降导致电压不一致后对电池组进行再均衡。

1.3 改进后的可重构均衡电路

图4为改进后的可重构均衡电路。为了减小压降造成的电池电压不一致，本文在可重构电路的基础上添加了 Buck-Boost 电路进行再均衡。Buck-Boost 电路由 2 个高频开关和 1 个电感以及电路内阻组成，如图5所示。

改进型可重构电路即在可重构电路的基础上

增加  $2(n-1)$  个高频开关以及  $n-1$  个电感。在电池组充电过程中使用可重构电路进行均衡，充电结束后使用 Buck-Boost 电路进行再均衡。

当充电结束后，经过一段时间的静置，每节电池的电压都会出现不同程度的下降，此时控制器会计算每节电池之间的电压差，若电压差大于所设定的阈值，则进行再均衡。假设电池 $B_2$ 与电池 $B_4$ 不需要进行再均衡，电池 $B_1$ 与电池 $B_3$ 之间的电压差超过阈值， $B_1$ 的电压高于 $B_3$ ，需要进行再均衡。首先闭合开关 $S_{a,2}, S_{a,3}, S_{a,4}$ ，随后闭合开关 $S_{k,1}$ ，电池 $B_1$ 向电感 $L_1$ 充电，接着断开开关 $S_{k,1}$ ，闭合开关 $S_{k,2}$ ，此时电感向电池 $B_2$ 充电，断开开关

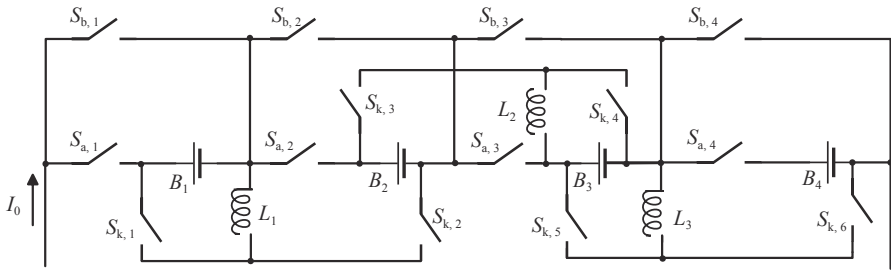


图 4 改进后的可重构电路

Fig.4 Improved reconfigurable circuit

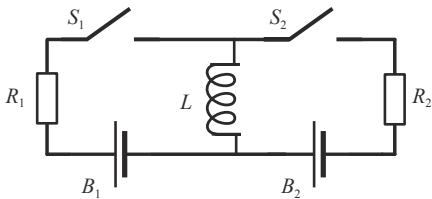


图 5 Buck-Boost 电路

Fig.5 Buck-Boost circuit

$S_{k,2}$ , 闭合开关  $S_{k,3}$ , 电池  $B_2$  向电感  $L_2$  充电, 随后断开开关  $S_{k,3}$ , 闭合开关  $S_{k,4}$ , 电感  $L_2$  向电池  $B_3$  充电, 重复上述步骤直至电池  $B_1$ ,  $B_3$  电压相等。

与原本的可重构电路相比, 改进型可重构电路可实现对因压降出现的电池电压不一致进行补偿的功能, 能够避免电池组出现再次不平衡的问题。

## 2 均衡策略

### 2.1 基于一致性的充电均衡方案

在电池组充电阶段采用基于一致性的充电方案, 该方案可使电池组电压在充电过程中达到一致, 并减小单体电池同时充电的时间。

本文基于一致性的充电方案结合图论的相关知识, 在充电过程中, 将电池组中的每节单体电池看作一个节点, 电池之间的通信链路用图论中的边来表征。如果电池  $i$  从电池  $j$  接收到信息, 则电池  $j$  被称作电池  $i$  的邻居, 反之亦然。如果电池  $j$  是电池  $i$  的邻居, 则邻接元素  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ 。用  $d_i$  表示电池  $i$  的邻居个数。邻接矩阵被定义为  $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ , 度矩阵被定义为  $A = \text{diag}(d_i)_n$ 。拉普拉斯矩阵被定义为

$$L = A - A \quad (2)$$

特别地, 本文设置了一个参考点, 用来表示参考电压。参考点与各节点之间的联系用牵制增益  $k_i$  来表示, 如果参考点与某个电池节点  $i$  相邻, 则  $k_i = 1$ , 否则  $k_i = 0$ 。牵制矩阵

$$K = \text{diag}(k_i)_n \quad (3)$$

为了保证所有的单体电池都能够与参考电压保持一致, 有以下两点要求:

- a. 参考点至少要与一个节点相连接。
- b. 与参考点相连的节点必须为生成树的根。

图 6 表示电池组的一种通信拓扑结构, 其中, 节点 0 为参考节点, 指向节点 1, 节点 1 作为生成树的根, 向其他节点传递信息。

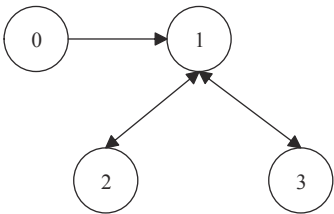


图 6 电池组通信拓扑图示

Fig.6 Battery pack communication topology diagram

本文设计了一个基于一致性的电压跟踪器<sup>[21]</sup>。

$$e_i = k_i(x_0 - x_i) + \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j - x_i) \quad (4)$$

式中:  $e_i$  为误差;  $x_0$  为参考电压;  $x_i$  为电池  $i$  的电压;  $x_j$  为电池  $i$  的邻居电压。

参考电压  $x_0$  仅根节点可知, 其他节点通过与根节点的通信来跟踪参考电压。电压跟踪器可以确保电池跟踪参考电压及其邻居的电压。

电池  $i$  的开关信号  $q_i$  可设计为

$$q_i = \text{sign}(e_i) \quad (5)$$

当  $q_i = 1$  时, 开关  $S_{a,i}$  断开,  $S_{b,i}$  闭合; 当  $q_i = 0$  时, 开关  $S_{a,i}$  闭合,  $S_{b,i}$  断开。

开关逻辑符号  $\text{sign}(\cdot)$  定义为

$$\text{sign}(e_i) = \begin{cases} 1, & \forall e_i \leq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

将  $x_0$ ,  $x_i$ ,  $e_i$  进行增广, 可得

$$X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \quad (7)$$

$$X_0 = [x_0 \ x_0 \ \cdots \ x_0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_n]^T \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X}_0$ ,  $\mathbf{E}$  为增广后的  $x_i$ ,  $x_0$ ,  $e_i$ 。

由式 (4) 可得

$$e_i = k_i x_0 - k_i x_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij} x_j - \sum_{j \in N_i} a_{ij} x_i = - (d_i + k_i) x_i + k_i x_0 + \sum_{j \in N_i} a_{ij} x_j \quad (10)$$

则误差的集合形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & -(\mathbf{A} + \mathbf{K})\mathbf{X} + \mathbf{K}\mathbf{X}_0 + \mathbf{A}\mathbf{X} = \\ & -(\mathbf{A} - \mathbf{A})\mathbf{X} + \mathbf{K}(\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}) = \\ & -\mathbf{L}\mathbf{X} + \mathbf{K}(\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}) \end{aligned} \quad (11)$$

由于拉普拉斯矩阵的行和为零, 即  $\mathbf{L}\mathbf{X}_0 = 0$ , 所以, 可得

$$\mathbf{E} = \mathbf{L}\mathbf{X}_0 - \mathbf{L}\mathbf{X} + \mathbf{K}(\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}) = (\mathbf{L} + \mathbf{K})(\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}) \quad (12)$$

有研究表明, 如果参考点指向至少一个节点, 即生成树的根, 则矩阵  $\mathbf{L} + \mathbf{K}$  是正定的<sup>[22]</sup>。

从式 (6) 中可以看到, 若  $e_i > 0$ , 则电池电压  $x_i$  始终小于参考电压, 电池  $i$  将会持续充电直到其电压达到参考电压, 根据式 (6) 可得,  $q_i = 1$ , 即  $S_{a,i}$  断开,  $S_{b,i}$  闭合, 此时电池将不会与充电电源相连接。当所有的电池都达到参考电压时, 整个电池组将不会与充电电源相连, 这意味着电压  $\mathbf{X}$  将会收敛到电压  $\mathbf{X}_0$ <sup>[21]</sup>。

## 2.2 充电结束后再均衡方案

由式 (1) 可知, 电池的端电压包括开路电压、欧姆极化电压以及化学极化电压。当充电结束时, 欧姆电压会立即消失, 随后随着电池的静置, 化学极化电压也会慢慢消失, 最终导致每个电池稳定后的端电压相比于刚刚充完时会有不同程度的下降, 所以, 需要对电池组进行再均衡, 保证其一致性。

目前大部分均衡电路都能够使电池组在充电过程中达到良好的均衡效果, 但是, 对于由压降现象引起的电池组不均衡却没有受到足够的重视。虽然传统的恒流恒压充电能够有效地缓解这一现象, 但是其具有充电速度缓慢的缺点, 容易导致充电时间过长, 不太适合快速充电的应用场景。采用恒流充电对电池组快充虽然会产生较大的压降现象, 但文献 [23] 的研究表明, 在充电速率为  $1 \sim 2\text{C}$  时, 其充入的电量与传统的恒流恒压充电方法相差不大, 且充电速度相较于恒流恒压充电有明显的提升。C 表示电池充放电能力倍率。所以, 本文采用恒流充电方式用以提高充电速

率, 同时对传统的可重构电路进行改进, 使之能够在保证充电速度的情况下并当电池组出现压降现象时对电池组进行再均衡, 保证电池组的一致性, 提高电池组的容量利用率。

图 4 为改进型可重构均衡电路。以 4 节电池组成的电池组为例, 在传统的可重构电路的基础上加装了电感使之能够进行主动均衡。在对电池充电至截止电压之前所采用的充电方法与前面介绍的基于一致性的充电方法相同。在电池达到截止电压后停止充电, 并静置 2 min, 观察电池压降现象并判断压降导致的电池组不一致的程度, 为再均衡作准备。为了使 Buck-Boost 电路能够工作, 开关  $S_{a,2}$ ,  $S_{a,3}$ ,  $S_{a,4}$  会处于闭合状态。根据压降现象造成的电压下降程度, 通过控制开关  $S_{c,1}$ ,  $S_{c,2}$ ,  $S_{d,2}$ ,  $S_{c,3}$  等的闭合与断开实现对电感充放电的控制, 起到均衡电池电压的作用。

为了加快均衡速度, Buck-Boost 电路通常工作在连续导通模式 (continuous conduction mode, CCM) 以获得更高的功率, 电感电流的波形如图 7 所示, 该波形表示在  $DT$  时间段内电池  $B_1$  向电感充电, 在  $(1-D)T$  时间段内, 电感向电池  $B_2$  放电。其中,  $T$  表示开关周期,  $D$  表示占空比。

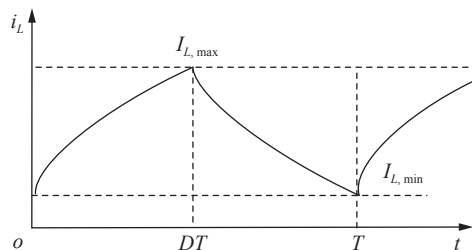


图 7 电感电流的波形

Fig.7 Operational waveforms of the inductor current

Buck-Boost 均衡电路 (图 5) 中,  $B_1$ ,  $B_2$  表示锂电池,  $S_1$ ,  $S_2$  表示开关,  $R_1$ ,  $R_2$  都包含了电池、开关和电路的内阻,  $L$  表示电感。假设电池  $B_1$  向电池  $B_2$  转移能量, 电池  $B_1$ ,  $B_2$  的电压可表示为  $U_{B_1}$ ,  $U_{B_2}$ , 流经电池  $B_1$  的电流为  $i_1(t)$ , 流经电池  $B_2$  的电流为  $i_2(t)$ 。

根据基尔霍夫电压定律可得:

$$L \frac{d i_1(t)}{d t} + i_1(t) R_1 = U_{B_1} \quad (13)$$

$$-L \frac{d i_2(t)}{d t} + i_2(t) R_2 = U_{B_2} \quad (14)$$

若 Buck-Boost 电路工作在 CCM 下, 在  $DT$  时刻, 电感电流达到最大值  $I_{L,max}$ , 在  $T$  时刻达到最

小值 $I_{L,\min}$ ,则可以得出:

$$I_{L,\max} = i_1(DT) \quad (15)$$

$$I_{L,\min} = i_2(T) \quad (16)$$

结合图5及式(13)~(16),可得

$$I_{L,\max} = \frac{U_{B1}R_2(1-\alpha) - U_{B2}R_1(\alpha - \alpha\beta)}{R_1R_2(1-\alpha\beta)} \quad (17)$$

$$I_{L,\min} = \frac{U_{B1}R_2(b-\alpha\beta) - U_{B2}R_1(1-\beta)}{R_1R_2(1-\alpha\beta)} \quad (18)$$

其中,  $\alpha = e^{-\frac{R_1}{L}DT}$ ,  $\beta = e^{-\frac{R_2}{L}(1-D)T}$ 。

为了计算方便,假设 $R_1$ 和 $R_2$ 都等于 $R$ 。若电路工作在CCM模式下,则 $I_{L,\min} > 0$ 。令 $I_{L,\min} = 0$ ,可得临界占空比

$$D_L = -\frac{L}{RT} \ln \frac{U_{B1} + U_{B2}}{U_{B1} + U_{B2}e^{\frac{RT}{L}}} \quad (19)$$

当 $D > D_L$ 时,电路将工作在CCM下。

### 3 实验验证

设计搭建了实物验证平台用以验证设计电路的可行性,所采用的实物验证平台如图8所示。



图8 实验验证平台

Fig.8 Experimental verification platform

该实验平台由4节锂电池、电压采集模块、均衡电路模块以及控制模块组成。其中,用于实验的锂电池为三星公司生产的ICR-18650-26F锂离子电池,其标称电压为3.6V,充电截止电压为4.2V,额定容量为3400mA·h,为了验证电池组内单体电池老化的程度不同,实验中所使用的4节电池的健康程度均有所不同。电压采集模块使用专用的电压采集电路板。控制电路板采用TMS320F28335作为主控芯片。实验均衡流程图如图9所示。

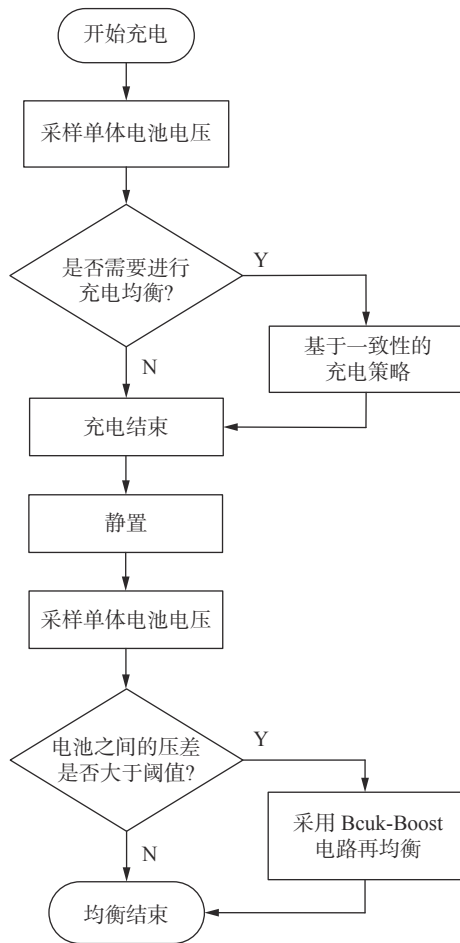


图9 均衡流程图

Fig.9 Equalization flowchart

为了验证改进电路与所用充电均衡算法的有效性,实验中每节电池的初始电压是不一致的,电池1,2,3,4的电压分别为3.541,2.992,3.375,2.674V。其中,电池3与电池4老化程度较高,电池1与电池2老化程度较低。因为电池固有特性的影响,在充电开始的瞬间电压会突然升高,突然升高的电压有可能会影响控制器对电池电压与其邻居电压之间误差的判断,所以在充电过程中各个电池之间的电压差被设置为0.15V,即误差为0.15V,充电结束后再均衡时的电压之间的误差被设置为0.01V,即当每个电池之间的电压差小于0.01V时便停止均衡。

图10为恒流充电过程中的电压变化曲线,充电速率为1C。表1为充电过程的均衡结果。从图10中可以看出,当充电开始时,只有电池4在进行充电,随后电池2,3,1接连进行充电,验证了可重构电路的功能。虽然在充电前期各个电池的电压保持一致,但是,由于各个电池的老化程度不同,导致其充电速率也受到影响,在充电

后期可以明显看出，老化程度较高的电池较快地达到截止电压，而老化程度较低的电池较慢地达到截止电压，并且在结束充电后，因极化效应产生的电压下降的程度也有所不同，老化程度较高的电池，电压下降幅度较大，老化程度低的电池，电压下降幅度较小。表 1 总结了恒流充电后各个电池电压的变化情况。从图 10 及表 1 中可以看到，虽然单体电池的电压在充电结束前达到了充电截止电压，但是，因极化效应导致的压降造成了再一次不平衡，对电池组的使用造成了较大的影响。

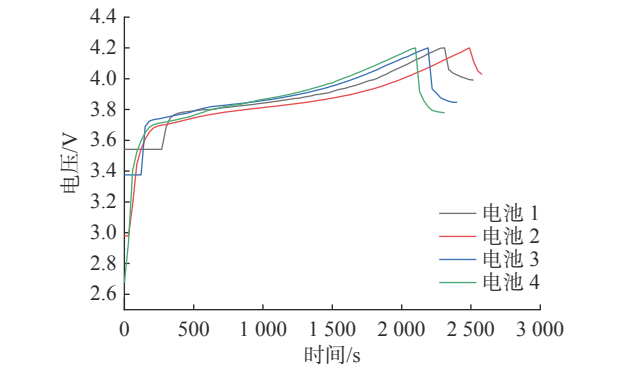


图 10 恒流充电过程电池电压变化曲线  
Fig.10 Battery voltage change curve during constant current charging

| 表 1 充电过程的均衡结果                                      |        |        |        |
|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Tab.1 Equalization results of the charging process |        |        |        |
| 锂电池                                                | 初始电压/V | 截止电压/V | 所用时间/s |
| 1                                                  | 3.541  | 3.990  | 2520   |
| 2                                                  | 2.979  | 4.027  | 2580   |
| 3                                                  | 3.375  | 3.848  | 2400   |
| 4                                                  | 2.674  | 3.779  | 2310   |

图 11 为通过改进电路中的 Buck-Boost 电路进行再均衡的结果。其中，Buck-Boost 电路的占空比为 0.511，在此占空比下，电路可工作在 CCM 工作模式，并获得较大的工作效率。

再均衡后的电池电压和均衡时间如表 2 所示。从实验结果可以看到，由压降引起的各单体电池电压不一致，通过 Buck-Boost 电路再均衡后近乎达到一致，有效地缓解了压降效应产生的负面影响。

虽然与可重构电路相比，本文提出的改进型可重构电路在均衡过程中会花费较长的时间，但它取得了较好的均衡效果，从而保证了电池组的

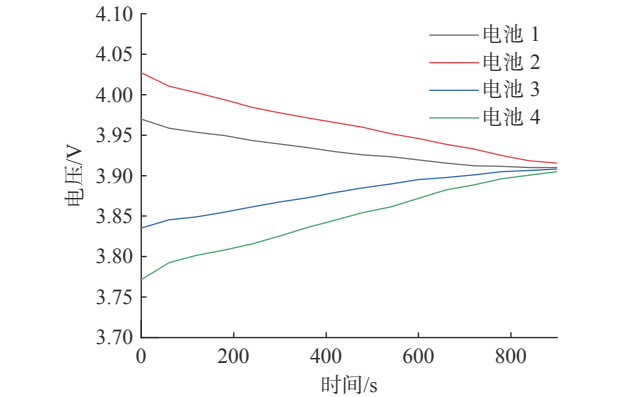


图 11 再均衡过程中电压变化曲线  
Fig. 11 Voltage variation curve during rebalance process

| 表 2 再均衡电池电压均衡结果                                    |        |        |        |
|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Tab.2 Rebalanced cell voltage equalization results |        |        |        |
| 锂电池                                                | 初始电压/V | 截止电压/V | 所用时间/s |
| 1                                                  | 4.021  | 3.915  | 900    |
| 2                                                  | 3.976  | 3.910  | 900    |
| 3                                                  | 3.841  | 3.908  | 900    |
| 4                                                  | 3.769  | 3.904  | 900    |

电压一致性。

为了进一步表明所设计电路的优越性，比较了改进电路和传统的可重构电路结合恒流恒压充电方法的均衡性能。图 12 为恒流恒压充电方式下电池组使用传统可重构电路时的充电电压变化曲线。实验时电池 1，2，3，4 的初始电压为 3.502，2.956，3.317，2.652 V。表 3 为恒流恒压充电模式下 4 节电池电压的变化情况。表 4 为 2 种充电均衡方法的充电时间比较。

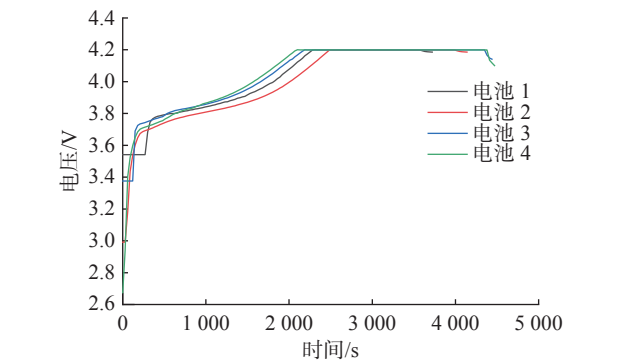


图 12 恒流恒压充电曲线  
Fig.12 Constant current and constant voltage charging curve

通过对比可以得出以下结论：相较于传统的恒流恒压充电方法，本文提出的充电方法的充电速度提升了约 32.4%。尽管恒流恒压充电方法能够

表 3 恒流恒压充电模式下充电时间

Tab.3 Charging time in constant current and constant voltage charging mode

| 锂电池 | 初始电压/V | 截止电压/V  | 所用时间/s |
|-----|--------|---------|--------|
| 1   | 3.502  | 4.185 2 | 3 720  |
| 2   | 2.956  | 4.185 8 | 4 140  |
| 3   | 3.317  | 4.141 2 | 4 440  |
| 4   | 2.652  | 4.066 5 | 4 530  |

表 4 充电方法所需时间对比

Tab.4 Comparison of the time required for charging methods

| 方法     | 时间/s  |
|--------|-------|
| CC-CV  | 4 530 |
| 本文所提方法 | 3 420 |

缓解电池极化效应的影响,但其均衡效果不如本文提出的方法,并且所需的均衡时间较长。此外,虽然本文提出的方法使电池组未能达到满电压状态,却能够实现电池组的快速充电并减缓压降对电池组的影响。综上所述,所有的实验结果证实了本文提出方法的可行性和优越性。

4 结 论

针对电池组充电结束后因压降导致的电池组电压不一致问题提出了一种改进型可重构均衡电路,该均衡电路既继承了可重构电路的优点,又能够对因压降造成的电压不一致进行再均衡。首先,阐述了该电路的拓扑结构以及工作原理。然后,采用了一种基于一致性的充电均衡算法。充电开始时,判断各个电池的电压差异性,充电过程中根据电压差异使用电路中的可重构电路进行电压均衡,在充电结束后对压降造成的电压不一致的程度进行判断,通过改进电路中的 Buck-Boost 电路进行再均衡,当电池之间的电压差小于 0.01 V 时均衡结束。最后,通过搭建实物验证平台进行验证,与传统方法比较后证明了所提出的改进型可重构均衡电路具有良好的性能。

参考文献:

[1] 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.

[2] 范辉,周晶晶,姚刚,等. 动力锂电池的混合均衡控制与

能量管理 [J]. 上海理工大学学报, 2018, 40(2): 191–200.

[3] SUN J L, MA Q, TANG C Y, et al. Research on optimization of charging strategy control for aged batteries[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14141–14149.

[4] KIM S, YI Z G, CHEN B R, et al. Rapid failure mode classification and quantification in batteries: a deep learning modeling framework[J]. Energy Storage Materials, 2022, 45: 1002–1011.

[5] YANG J F, HUANG W X, XIA B, et al. The improved open-circuit voltage characterization test using active polarization voltage reduction method[J]. Applied Energy, 2019, 237: 682–694.

[6] OUYANG Q, ZHANG Y M, GHAEMINEZHAD N, et al. Module-based active equalization for battery packs: a two-layer model predictive control strategy[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 149–159.

[7] LIU K L, YANG Z L, TANG X P, et al. Automotive battery equalizers based on joint switched-capacitor and buck-boost converters[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 12716–12724.

[8] HAIDAR A M, PALACIOS J L. A general model for passive balancing of supercritical shafts with experimental validation of friction and collision effects[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 384: 273–293.

[9] 陈益广,唐林,沈勇环. 基于 Boost-Buck 电路的锂离子电池组均衡充电方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(10): 56–60.

[10] 沈艳霞,周园. 串联锂离子电池组能量均衡策略的研究 [J]. 控制工程, 2013, 20(4): 773–777.

[11] WANG S C, YANG S Y, YANG W, et al. A new kind of balancing circuit with multiple equalization modes for serially connected battery pack[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2142–2150.

[12] SONG L J, LIANG T Y, LU L G, et al. Lithium-ion battery pack equalization based on charging voltage curves[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105516.

[13] ZHENG Y J, OUYANG M G, LU L G, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 2. Fuzzy logic equalization[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 460–466.

[14] KIM T, QIAO W, QU L Y. Series-connected self-reconfigurable multicell battery[C]//2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Fort Worth: IEEE, 2011: 1382–1387.

[15] JI F, LIAO L, WU T Z, et al. Self-reconfiguration batteries with stable voltage during the full cycle without the DC-

DC converter[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28: 101213.

[16] BOUCHHIMA N, SCHNIERLE M, SCHULTE S, et al. Optimal energy management strategy for self-reconfigurable batteries[J]. *Energy*, 2017, 122: 560–569.

[17] ZHANG Y, HUANG M M, WU T Z, et al. Reconfigurable equilibrium circuit with additional power supply[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2020, 15(1): 106–111.

[18] WANG Y, ZHANG C, CHEN Z, et al. A novel active equalization method for lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 2015, 145: 36–42.

[19] QU F, LUO Q, LIANG H, et al. Systematic overview of active battery equalization structures: mathematical modeling and performance evaluation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(3): 1685–

1703.

[20] LI X Y, WANG Z P, ZHANG L. Co-estimation of capacity and state-of-charge for lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. *Energy*, 2019, 174: 33–44.

[21] JIANG F, MENG Z Q, LI H, et al. Consensus-based cell balancing of reconfigurable supercapacitors[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(4): 4146–4154.

[22] QU Z H, WANG J, HULL R A. Cooperative control of dynamical systems with application to autonomous vehicles[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(4): 894–911.

[23] 李志农, 覃章锋. 基于降低极化电压磷酸铁锂电池充电方法研究 [J]. *汽车技术*, 2017(11): 24–29.

(编辑: 石 瑛)



[ 上接第 467 页 ]

[9] LIU C, AMEI B, YI Z, et al. Surrogate-based optimization and experiment validation of a fan-shaped film cooling hole with a large lateral space[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 207: 118145.

[10] ZHANG H, LI Y F, CHEN Z Y, et al. Multi-fidelity model based optimization of shaped film cooling hole and experimental validation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 132: 118–129.

[11] SUN Y B, MENG X Y, LONG T, et al. A fast optimal Latin hypercube design method using an improved translational propagation algorithm[J]. *Engineering Optimization*, 2020, 52(7): 1244–1260.

[12] 管俊俊, 张祎, 张也平, 等. 基于代理模型与参数敏感性分析的扇形气膜孔优化 [J]. *动力工程学报*, 2021, 41(9):

736–742, 757.

[13] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.

[14] 姜同川. 正交试验设计 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1985.

[15] BONANNI L, FACCHINI B, TARCHI L, et al. Heat transfer performance of fan-shaped film cooling holes: part I —experimental analysis[C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow: ASME, 2010: 1561–1571.

[16] 管俊俊, 陈榴, 戴韧. 离散孔气膜冷却效果的红外热像测量方法 [J]. *热能动力工程*, 2021, 36(3): 19–25, 54.

(编辑: 董 伟)