第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0191-05

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:廖　力, 纪　锋, 吴铁洲, 等. 基于单体电池动态供电方法的均衡电路[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 191—195
Liao Li, Ji Feng, Wu Tiezhou, et al. Balancing circuit based on single battery dynamic power supply method[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 191—195

基于单体电池动态供电方法的均衡电路

廖　力　纪　锋　吴铁洲　胡圣乔　郭　炅
(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室,武汉 430068)

摘　要　为较好地同时兼顾元器件使用数目、均衡转换效率、均衡速度以及可以较为方便地对电池组内任意单体电池进行均衡的需求,提出一种均衡电路。通过控制与每节单体电池以及附加电源相对应的继电器的动作状态,使需要被均衡的单体电池不对外放电,而同组中的其他单体电池处于正常工作状态,达到对电池组进行均衡的目的。详细阐述了均衡电路的工作原理,分析了均衡电路两种工作模式及工作特点,并采用此均衡电路对串联的 7 节具有不同初始荷电状态(state of charge,SOC)的 18650 电池进行了均衡实验。实验结果表明,所提出的均衡电路,能够较好地对单体电池进行均衡,使电池组达到设定的均衡状态,证实了该电路的可行性。

关键词　均衡电路　　SOC　　电池　　继电器
中图法分类号　TM912;　　**文献标志码**　A

锂离子电池因其优异的性能广泛应用于各种领域[1]。由于单体电池电压较低,容量较小,更多情况下需要将多节电池串并联以满足负载需求[2]。又因为在生产以及使用过程中无法保证锂离子电池的一致性,为提高电池组可用容量,降低单体电池处于过充或过放的风险,需要对锂离子电池组进行均衡[3—5]。

通过耗散电量达到均衡目的的被动均衡,虽然简单、经济、可靠,但受到多方面的限制[6]。传统的主动均衡方法很难同时兼顾使用少量元器件,均衡转换效率、均衡速度以及可以方便地对电池组内任意单体电池进行均衡的需求[7—9]。文献[10]将均衡器放在不同层中以提高均衡速度和均衡转换效率,但元器件使用数目较多。文献[11]使用 LC 谐振电路,均衡速度较快,但不方便对电池组内任意单体电池进行均衡。文献[12]使用双向反激变换器,能够较为方便地对电池组内单体电池进行均衡,但均衡速度较慢。文献[13]通过为每节电池分配不同的出力系数,进而对电池组内任意单体电池进行均衡,虽然在均衡转换效率,均衡速度方面表现不错,但由于需要大量 DC-DC 电路导致其使用元器件较多。

本文提出了一种新颖的均衡电路,并设计实验验证所提均衡电路能否较好地同时兼顾元器件使用数目、均衡转换效率、均衡速度及较为方便地对电池组内单体电池进行均衡的需求。

1　均衡电路

提出的均衡电路如图 1 所示。

图 1 中,电池 B 为附加电源,是 1 节与电池组所用电池同型号的电池。继电器 K1 与电池 B1 对应,

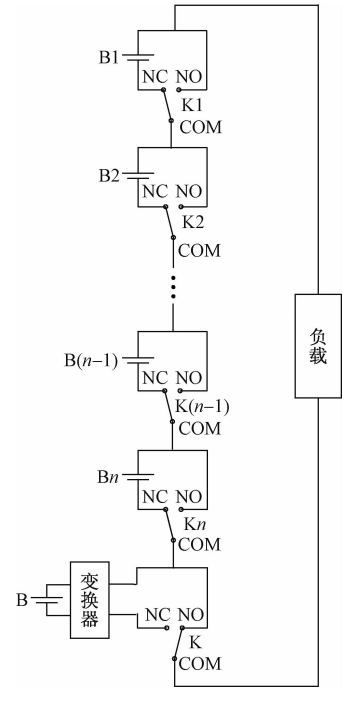

图 1　均衡电路
Fig. 1　Balance circuit

2018 年 6 月 20 日收到　　国家自然科学基金(51677058)和长江科学院开放研究基金(CKWV2017505/KY)资助
第一作者简介:廖　力(1979—),男,汉族,湖北武汉人,博士,副教授。E-mail:925423672@qq.com。

决定电池 B1 是否为负载供电,继电器 K2 与电池 B2 相对应,决定电池 B2 是否为负载供电,依此类推,其中电池 B1 ~ Bn 正常情况下均为负载供电。除继电器 K 外,其他所有继电器在没有收到动作命令时,公共端(common,COM)与常闭端(normal connected,NC)相连,当这些继电器收到动作命令后,COM 端才与常开端(normal open,NO)相连。而继电器 K 在正常情况下,其 COM 端与 NO 端相连,当收到动作命令后,其 COM 端才与 NC 端相连。

2 均衡电路分析

假设电池组中电池 B1 的 SOC 值较低,而其他电池的 SOC 值较高,此时需要对 B1 电池进行均衡。根据是否使用附加电源,可以分为不使用附加电源和使用附加电源两种不同的工作模式。

2.1 不使用附加电源工作模式分析

当处于不使用附加电源工作模式时,只需要改变与电池 B1 相对应的继电器 K1 的动作状态,使继电器 K1 的 COM 端与 NO 端相连,而继电器 K 的动作状态不做任何改变,如图 2 所示。

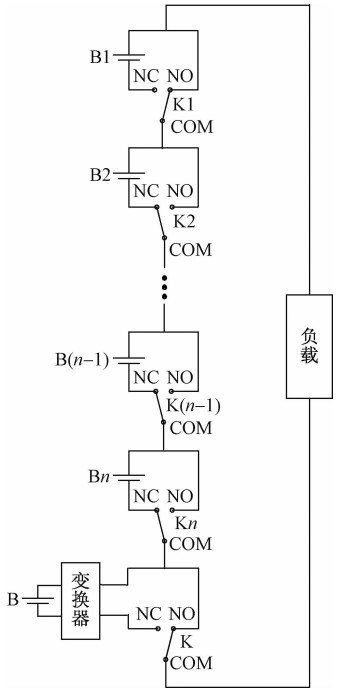

图 2 不使用附加电源时均衡示意图

Fig. 2 Equilibrium diagram without using balanced power supply

由图 2 可以看到,此时除 B1 和 B 电池以外的其他电池均为负载供电。在对 B1 电池均衡的这段时间内,B1 和 B 电池的 SOC 值不变而其他电池的 SOC 值逐渐下降。以 B2 电池为例,在 B1 电池处于均衡状态的时间段 0 ~ T 内,B2 电池的 SOC 值的变化量 ΔSOC_{B2} 如式(1)所示:

$$\Delta SOC_{B2} = \frac{1}{Q_{B2}}\int_0^T I_{out}\mathrm{d}t \tag{1}$$

式(1)中:I_{out} 为电池组为负载所提供的电流,A;Q_{B2} 为 B2 电池的容量,A·h;T 为均衡时间,h。此时 B2 电池的 SOC 值处于下降状态。即在 B1 电池处于均衡的时间段 0 ~ T 内,B2 电池的 SOC 值的变化量为 ΔSOC_{B2},而 B1 电池的 SOC 值的变化量为 0。反过来可以认为在 B1 电池处于均衡的时间段 0 ~ T 内,B2 电池的 SOC 值的变化量为 0,而 B1 电池的 SOC 值变化量 ΔSOC_{B1} 如式(2)所示:

$$\Delta SOC_{B1} = -\frac{Q_{B2}}{Q_{B1}}\Delta SOC_{B2} \tag{2}$$

式(2)中:Q_{B1} 为 B1 电池的容量,A·h。负号表示在 B1 电池处于均衡的时间段 0 ~ T 内,B1 电池的 SOC 值相较于 B2 电池,处于上升状态。可以理解为 B1 电池在被均衡的时间段 0 ~ T 内,其他电池处于不对外放电状态,而 B1 电池处于“充电”状态,从而实现对 B1 电池的均衡。

2.2 使用附加电源工作模式分析

当处于使用附加电源工作模式时,需要改变与电池 B1 相对应的继电器 K1 的动作状态,使继电器 K1 的 COM 端与 NO 端相连,并且继电器 K 的动作状态也要发生改变,使其 COM 端与 NO 端相连,如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,此时 B 电池通过变换器,

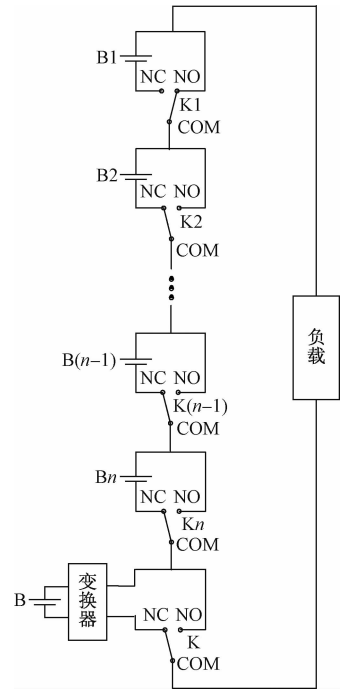

图 3 使用附加电源时均衡示意图

Fig. 3 Equilibrium diagram using balanced power supply

代替 B1 电池为负载供电。同样的,当在 0 时刻对 B1 电池进行均衡,直至 T 时刻均衡完毕。在这段时间内,B 电池的 SOC 值变化情况如式(3)所示:

$$\Delta SOC_{\mathrm{B}} = \frac{1}{Q_{\mathrm{B}}}\int_0^T I_{\mathrm{B}}\mathrm{d}t \tag{3}$$

式(3)中:Q_{B} 为 B 电池的容量,A·h;I_{B} 为 B 电池的放电电流,A。此时,ΔSOC_{B} 为负,表示电池 B 的 SOC 值处于下降状态。可以认为,本应是 B1 电池为负载提供的电量,此时由 B 电池提供,B 电池为 B1 电池所提供的电量 Q_{r} 如式(4)所示:

$$Q_r = -\Delta SOC_{\mathrm{B}} Q_{\mathrm{B}} \tag{4}$$

在不考虑损耗的情况下,可以理解为,B 电池在这段时间内,间接地对 B1 电池"充入"的电量为 Q_{r},B1 电池的 SOC 变化情况如式(5)所示:

$$\Delta SOC_{\mathrm{B1}} = \frac{Q_{\mathrm{r}}}{Q_{\mathrm{B1}}} \tag{5}$$

式(5)中:Q_{B1} 为 B1 电池的容量,A·h。ΔSOC_{B1} 为正,代表 B1 电池的 SOC 处于"上升"状态。即 B 电池通过代替 B1 电池,为负载供电,间接地提高了 B1 电池的 SOC 值,从而达到对 B1 电池均衡的目的。

2.3　两种工作模式对比

在负载端电压变化方面,当电池组处于正常工作状态时,即除 B 电池外,所有电池均为负载供电,此时电池组为负载所提供的电压如式(6)所示:

$$U_{\mathrm{out}} = \sum_{i=1}^{n} U_i \tag{6}$$

式(6)中:U_i 为第 i 节电池的电压,V。当对 B1 电池进行均衡时,若处于不使用附加电源工作模式,电池组为负载所提供的电压如式(7)所示:

$$U'_{\mathrm{out}} = \sum_{i=2}^{n} U_i \tag{7}$$

由式(7)可以看到,此时电池组为负载所提供的电压会有所相应的波动。当处于使用附加电源工作模式时,电池组为负载所提供的电压大小为

$$U''_{\mathrm{out}} = \sum_{i=2}^{n} U_i + aU_0 \tag{8}$$

式(8)中:U_0 为 B 电池的电压,V;a 为变换器的变比。考虑到变换器的实际情况,以及电池端电压会随着电池 SOC 的下降而下降,可以通过适当提高变换器的变比,增加电池组为负载供电电压。此时,负载端电压并不会出现较大波动。

在转换效率方面,由于不使用附加电源时,并不存在能量耗散,其均衡转换效率可以达到很高。而使用附加电源时,由于存在变换器的能量转换过程,其均衡转换效率会降低。

表 1 为两种工作模式的特点。

表 1　两种工作模式比较

Table 1　Comparison of two modes of work

参数	不使用附加电源	使用附加电源
负载端电压	波动大小取决于同时	几乎不会
变换情况	均衡电池的数目	出现波动
均衡转换效率	很高	较高

从表 1 中可以看到,两种工作模式各有优缺点,在对电池进行均衡的过程中,可以根据需求,选择不同模式对电池组进行均衡。

2.4　均衡电路特点

当电池组电量较低时,可以通过改变与附加电源相对应继电器的动作状态,使附加电源为负载供电,达到减轻其余电池供电压力的目的。同样地,当电池组中有电池因为出现故障,必须退出运行时,也可以通过让附加电源为负载供电,代替退出运行的电池,从而提高电路运行的可靠性。

通过对 B1 电池均衡过程的分析可知,首先,对 n 节电池进行均衡时,均衡电路只使用 $n+1$ 个继电器以及一个变换器和附加电源,所用元器件较少。其次,当工作在不使用附加电源模式下时,由于不存在能量的传递过程,其均衡转换效率可以达到传统主动均衡电路的理想值;工作在使用附加电源模式下时,由于变换器功率较小,其均衡转换效率也可以达到较高值。再者,在均衡速度方面,由于本电路的均衡电流即为电路工作电流的一半,当电路工作电流大于 2 A 时,电路均衡速度就可以与传统主动均衡电路均衡速度相媲美。最后,由于所提出的均衡电路是通过改变双掷继电器的动作状态,从而对相应单体电池进行均衡,很明显,该电路可以较为方便地对电池组内任意单体电池进行均衡。

3　实验验证

为证实所提出电路的可行性,设计实验进行验证,均衡实验如图 4 所示。

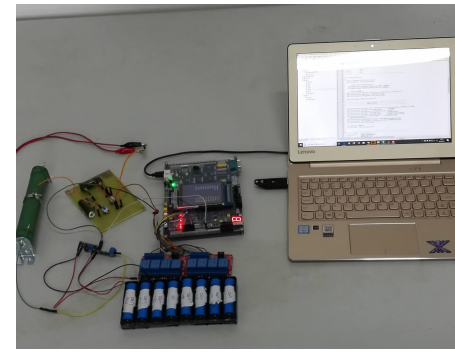

图 4　均衡实验装置

Fig. 4　Balance experiment

实验使用 8 节 3.7 V、标称容量为 1 200 mA·h 的18650 电池,分别记为 1 ~8 号,其中 8 号电池为附加电源。单片机型号为 STM32F103。使用安时积分法估算各节单体电池的 SOC 值。当电池组中最小单体电池的 SOC 值与最大单体电池的 SOC 值之差大于 1% 时,对 SOC 最小的单体电池进行均衡。考虑到两节电池的 SOC 值不可能完全相等,当被均衡单体电池的 SOC 值与电池组中最大电池的 SOC 值之差的绝对值小于 0.01% 时,均衡结束。表 2 为 8 节单体电池的初始 SOC。

表 2 电池初始 SOC

Table 2 Initial battery SOC

电池标号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号
SOC/%	79.9	80	79.8	78.9	79.7	78.8	79.9	79.5

从表 2 中可以看到,4 号和 6 号电池需要被均衡。对 4 号电池均衡时采用使用附加电源的工作模式,对 6 号电池进行均衡时采用不使用附加电源的工作模式。在均衡过程中,每隔 10 s 记录一次 8 节电池的 SOC 值,同时记录下电池组中被均衡电池开始和结束均衡时的时间以及此时 8 节电池的 SOC 值。8 节单体电池的 SOC 值的变化情况如图 5 所示。

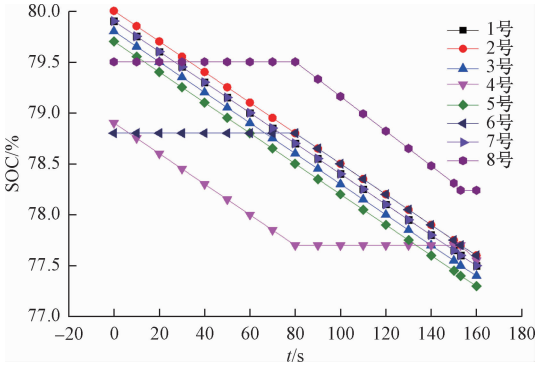

图 5 均衡过程中电池 SOC

Fig. 5 Battery SOC during equalization

从图 5 中可以看到,均衡刚开始时,6 号和 8 号电池均不参与放电过程,其 SOC 值并不发生变化,而其他电池的 SOC 处于下降状态。直至第 80 s,6 号电池达到设定的均衡状态,对 6 号电池的均衡过程结束。后期,4 号电池的 SOC 不发生变化,而 8 号电池经过变换器,代替 4 号电池为负载供电,直至第 153 s,4 号电池均衡完毕。此时,电池组已达到均衡状态,均衡结束。

在对 4 号电池进行均衡时,8 号电池的 SOC 值从 79.5% 下降到 78.24%,下降了 1.26%。而同组中 1 号电池的 SOC 值从 78.7% 下降到 77.6%,下降了 1.1%。此时相当于 8 号电池通过代替 4 号电池为负载供电,进而实现能量的传递,传递效率为 87.3%。

从实验结果可以看出,所提出的均衡电路仅使用 8 个继电器、一个变换器和附加电源,完成对 7 节串联电池的均衡目标。并且对单体电池的均衡较为方便,均衡速度较为理想,均衡转换效率较高,而且由于所使用元器件较少,不仅可以较好地控制元器件使用数目,而且还可以提高均衡电路工作的可靠性。

4 结论

提出了一种锂离子电池均衡电路,该电路主要通过控制继电器的动作状态,使部分电池不参与放电过程,进而达到电池组均衡的目的。分析了该电路两种工作模式,对比了两种工作模式的优缺点,并且通过设计实验,证实该均衡电路可以在同时兼顾元器件使用数目、均衡转换效率,均衡速度以及较为方便地对电池组内任意单体电池进行均衡的需求的前提下,完成对电池组均衡的任务,证明了该电路的可行性。

参 考 文 献

1 Cui X, Shen W, Zhang Y, *et al*. Novel active $LiFePO_4$, battery balancing method based on chargeable and dischargeable capacity. Computers & Chemical Engineering, 2017; 97:27—35

2 Kim M Y, Kim C H, Kim J H, *et al*. A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of lithium-ion batteries. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014; 61(8): 3989—3999

3 Chen Y, Liu X, Cui Y, *et al*. A multiwinding transformer cell-to-cell active equalization method for lithium-ion batteries with reduced number of driving circuits. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016; 31(7):4916—4929

4 Schmid A U, Eringer L, Lambidis I, *et al*. Electrochemical balancing of lithium-ion cells by nickel-based cells. Journal of Power Sources, 2017; 367:49—56

5 Gogoana R, Pinson M B, Bazant M Z, *et al*. Internal resistance matching for parallel-connected lithium-ion cells and impacts on battery pack cycle life. Journal of Power Sources, 2014; 252:8—13

6 Qi J, Lu D C. A preventive approach for solving battery imbalance issue by using a bidirectional multiple-input cuk converter working in DCVM. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017; 64(10):7780—7789

7 Chen H, Zhang L, Han Y. System-theoretic analysis of a class of battery equalization systems: Mathematical modeling and performance evaluation. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015; 64(4):1445—1457

8 Song C, Lin N, Wu D. Reconfigurable battery techniques and systems: A survey. IEEE Access, 2016; (4):1175—1189

9 Zheng X, Liu X, He Y, *et al*. Active vehicle battery equalization scheme in the condition of constant-voltage/current charging and discharging. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017; 66(5):3714—3723

10 Dong B, Li Y, Han Y. Parallel architecture for battery charge equalization. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015; 30(9):4906—4913

11 Shang Y, Zhang C, Cui N, *et al*. A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant lc converter and boost converter. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015; 30(7):3731—3747

12 Hannan M A, Hoque M M, Peng S E, *et al*. Lithiumion battery charge equalization algorithm for electric vehicle applications. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017; 53(3):2541—2549

13 Huang W, Qahouq J A A. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015; 62(5):2764—2776

Balancing Circuit Based on Single Battery Dynamic Power Supply Method

LIAO Li, JI Feng, WU Tie-zhou, HU Sheng-qiao, GUO Jiong

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

[**Abstract**] In order to balance the number of components use, conversion efficiency, equilibrium speed and balance each cell in battery pack easy, a balanced circuit is proposed. By controlling the action state of the relay that corresponds to each single cell and additional power supply, the balanced single cell is not discharged, while the other single cell in the same group is in normal working condition, to achieve target for the battery group. The working principle of the balanced circuit is described in detail, and the two operating modes of the balanced circuit and the working characteristics of the balanced circuit are analyzed. The balanced circuit is used to balance the 7 nodes with different initial state of charge (SOC) in series. The experimental results show that the proposed equalization circuit can better balance the battery and achieve the equilibrium state of the battery pack, confirmed the feasibility of the circuit.

[**Key words**] balance circuit　　SOC　　battery　　relay