[文章编号] 1003－4684(2025)01-0032-05

基于电感的复合型锂电池主动均衡研究

涂玲英，秦 宇，周意入，李 曦
（湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 为提高锂电池组均衡速率，降低均衡后的电压不一致性，提出了基于电感的复合型锂电池主动均衡拓扑。组内使用 Buck-boost 电路，组间使用单电感电路，同时结合相应的主动均衡策略，在 Matlab/Simulink 中建立了 9 节串联锂电池组模型，对比 Buck-boost、单电感电路以及复合型拓扑均衡实验表明：复合型主动均衡拓扑有效降低了均衡时间和电压离散度。

[关键词] 主动均衡；Buck-Boost 电路；单电感；复合型拓扑
[中图分类号] TM912 [文献标识码] A

锂电池因其高能量密度、自放电率低和对环境友好，被广泛应用于新能源汽车以及电池储能系统等领域[1-2]。锂电池串联成组后，由于电池间诸多因素存在差异，导致锂电池组在充放电循环中单体电池间的差异不断放大[2-5]，使得锂电池容量、寿命减少，严重时造成事故，故需要对锂电池组进行均衡处理[6]。

锂电池主动均衡原理为能量的传递。故多使用电容、电感以及变压器等电器元件。文献[7]利用 Buck-boost 电路双向转移相邻电池间的能量，该拓扑相对于传统单向均衡拓扑有效提高了均衡速率，同时易于实现，但随着均衡路径的增长，均衡速率明显降低。针对该问题，文献[8]联合双层多电感和单电容特性，很好地提高了整体均衡速率以及均衡后的电压一致性，但基于电容的锂电池均衡主要依据电压差特性，当电压差过小，可能出现不导通甚至是误导通的情况，具有一定的局限性[9]。文献[10]将反激变压器和电感结合，提高了均衡速度和效率，但依旧存在着电池组过长后变压器成本和体积增大的问题。

为提高均衡速率，降低均衡后电压离散程度，同时减少能量损耗，本文基于电感均衡拓扑，提出了一种将 Buck-boost 电路和单电感电路联合使用的新型主动均衡拓扑，将这两种拓扑分别置于组内和组间，同时又根据两种拓扑结构的特点，制定了相应的均衡策略，使两种基础拓扑很好完成各部分的均衡。建立 Simulink 实验模型，验证了该拓扑对提高均衡速率和电压一致性的有效性。

1 主动复合型均衡拓扑

主动均衡根据能量传递方式主要分为相邻单体间、任意单体间、单体与电池组间的均衡[11]。相邻单体间的均衡面对长线路会导致能量传递速率慢、损耗大等问题；任意单体间又存在着控制逻辑复杂难以实现的困难，同时线路的增长也会出现传输路径单一、能量传递速率变慢的问题；单体与电池组间的均衡大多数利用变压器来实现，而电池串过长会导致变压器绕组增多、体积增大、成本增高等问题。

复合型均衡拓扑将 9 节锂电池分为 3 个组，根据 Buck-boost 和单电感拓扑特点，分别置于组内和组间。该模型完成了组内电量的快速转移，实现了组间电量的任意转移，大大提升了均衡速率，且电压一致性高。均衡拓扑如图 1 所示。

图 1 中每三个电池为一组，分别为 BT_1、BT_2、BT_3，组内每两个电池之间由一个电感和两个 MOS 管构成，单电感、开关阵列、二极管和三个电池组构成组间均衡电路。MOS 开关的控制由 PWM 调制占空比完成。

1.1 组内 Buck-boost 电路

组内为 Buck-boost 电路，其等效电路如图 2 所示。传统 Buck-boost 电路随着电池数目的增加会导致均衡速率降低，能量损耗增大等问题，本文复合

[收稿日期] 2022－12－23
[基金项目] 国家自然科学基金(41601399)
[第一作者] 涂玲英(1963－)，女，湖北武汉人，湖北工业大学教授，研究方向为电子信息及嵌入式技术。
[通信作者] 秦 宇(1997－)，男，湖北荆州人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为锂电池均衡。

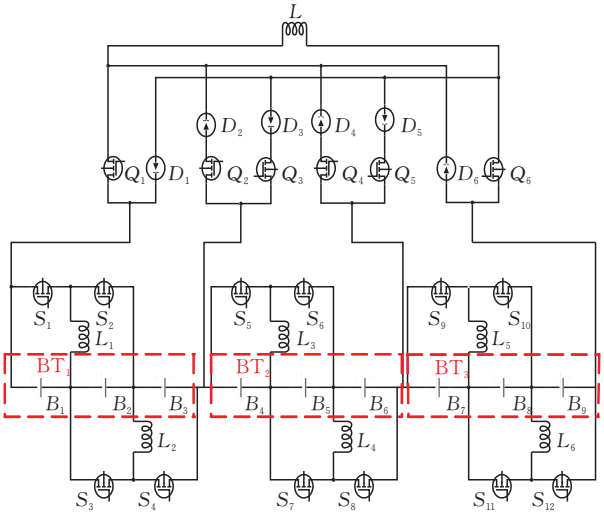
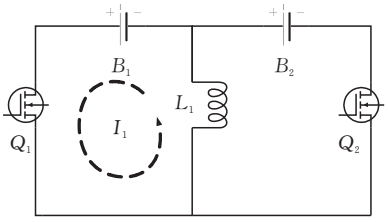


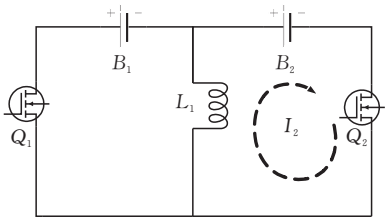
图 1　复合型主动均衡拓扑

型拓扑组内只有三个电池，减少了组内需要均衡的电池数目，从而提高了均衡速率。

如图 2a、2b 所示，代表了组内两种工作形式，Q_1 闭合，B_1 释能 L_1 储能。Q_1 关断，电感续能，L_1 释能 B_2 储能。



(a) B_1 向 L_1 传递能量



(b) L_1 向 B_2 传递能量

图 2　组内等效电路

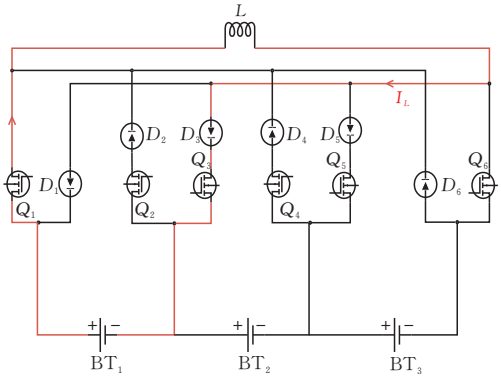
1.2　组间单电感电路

组间采用单电感电路。单电感电路可以将任意电池组能量转移到另一电池组，且由于只需要进行 3 个电池组间能量的传递，均衡路径大大减少，降低了均衡时间以及电压离散度。同时电感相对于电容具有更好的电压应力，并且有效解决了变压器体积和成本的问题。

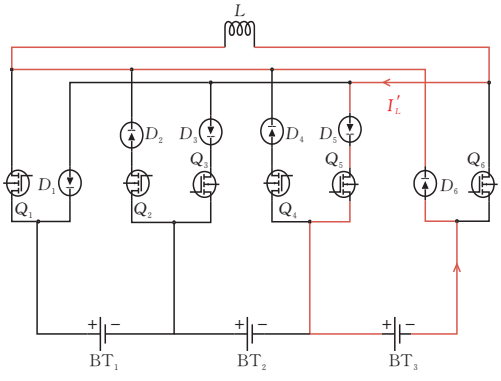
假设 $BT_1 > BT_2 > BT_3$，组间等效电路如图 3 所示。组间单电感两端电压波形如图 4 所示。

结合图 3 和图 4 对电感工作原理进行分析可知，一个周期脉冲信号代表着单电感两种工作形式。

阶段 1($0-T_{ON}$)：图 3a 为电池组 BT_1 在正半周期向电感 L 传递能量路线图，此时 Q_1，Q_3 闭合，



(a)电池组 BT_1 向电感释能



(b)电感向电池组 BT_3 释能

图 3　组间等效电路

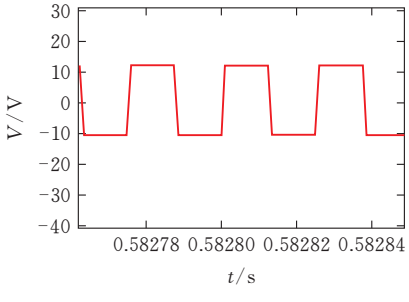


图 4　单电感电压波形

电感与电池组 BT_1 通过二极管 D_3 形成回路。此时对电感 L 有：

$$V_L(t) = V_{BT_1} \tag{1}$$

$$I_L(0) = I_0 \tag{2}$$

$$I_L(t) = I_L(0) + \frac{1}{L}\int_0^{T_{ON}} V_L \,\mathrm{d}t \tag{3}$$

阶段 2($T_{OFF}-T$)：图 3b 为负半周期电感 L 续能向电池组 BT_3 传递能量，此时 Q_3 闭合，电感 L 与电池组 BT_3 经二极管 D_5 形成回路。此时对电感 L 有：

$$V'_L(t) = -V_{BT_3} \tag{4}$$

$$I_L(T_{OFF}) = I_1 \tag{5}$$

$$I'_L(t) = I_L(T_{OFF}) + \frac{1}{L}\int_{T_{OFF}}^{T} V'_L(t)\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

根据电感安秒平衡原理，可以得到：

$$I_L(t)T_{OFF} = I_L(t)T_{ON} \tag{7}$$

则 I_L 和 I'_L 平均值为：

$$I_L = \frac{V_{BT_1}}{L}D^2T \tag{8}$$

$$I_L' = \frac{-V_{BT_1}}{L}(1-D)^2 T \tag{9}$$

2 均衡控制策略

组内根据相邻电池压差均衡;组间根据各组电压平均值差值均衡,以先组内后组间的均衡顺序完成整个电池串的均衡。

第一步:设置组内、组间的均衡阈值;

第二步:测量各电池单体电压并根据组内电池单体间差值确定需要均衡的电池,若差值超过设置值,则组内均衡开始,均衡完成后,返回第二步,直至组内单体电压差保持在阈值以内,进行下一步;

第三步:当组内均衡完成时,计算各组间平均电压值,并根据各组间的电压差值,确定需要均衡的电池组,若差值超过设置值,则组间均衡开始,优先使平均电压最大值对平均电压最小值进行能量传递,均衡完成后,返回第二步,直至组间平均电压差保持在阈值以内,进行下一步;

第四步:均衡过程结束。组内单体差阈值设置为 0.01 V,组间平均电压差阈值设置为 5 mV。考虑到整体的均衡速率,相对使组内均衡阈值大一些,提高组内均衡速率,组间均衡阈值小一些,由于其本身均衡速率快,使用小阈值使其均衡效果更加精确。

均衡控制流程如图 5 所示。

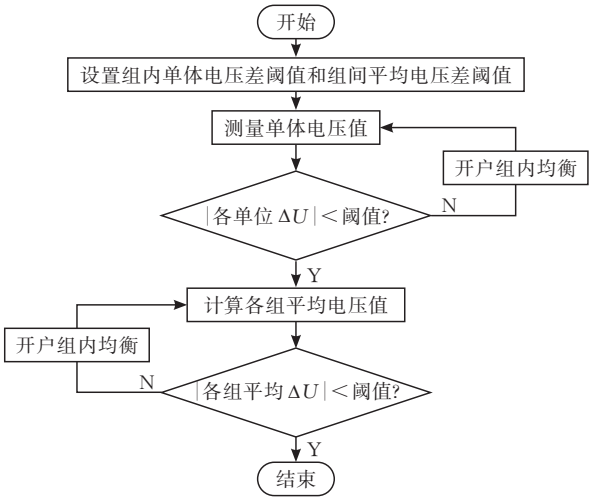


图 5 均衡控制流程

3 仿真分析

根据上述拓扑和策略,在 Simulink 中建立模型。其中锂电池模型直接使用 Simulink 自带的 Battery 模型,参数 U_N 为 4.2 V,最大充电电流为 1 C,即为 3.4 A,组间均衡由于是三个电池串联,其 U_N 为 12.4 V,最大充电电流为 2 C。分别单独将组内和组间均衡拓扑对 9 节串联电池组使用,最后使用本文复合型电路进行均衡实验。根据式(8)可得组内组间电感值:

$$L < \frac{V_{BT_1}}{I_L} D^2 T \tag{10}$$

3.1 模型建立及参数设置

如图 6 所示为组内控制模型。每三个电池构成一个电池组,电池组组内电感值为 15 μH。

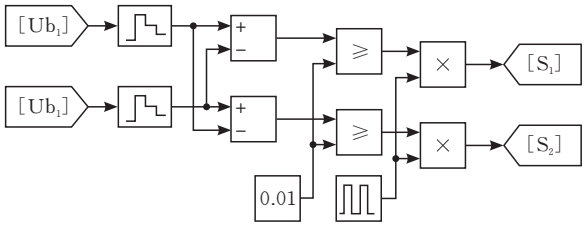


图 6 组内均衡控制模型

图 7 所示为组间控制模型。根据电池组的平均电压值,优先进行平均电压最高和最低电池组之间的能量转移。电池组组间电感值为 17 μH。

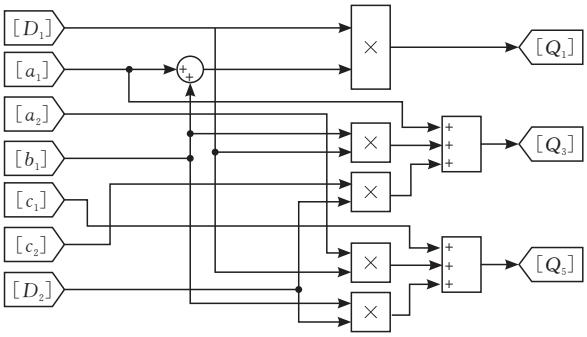


图 7 组间均衡控制模型

PWM 占空比均为 50%,组内和组间 MOS 管频率分别为 40 kHz 和 50 kHz。

表 1 为组间控制信号。

表 1 组间控制信号真值

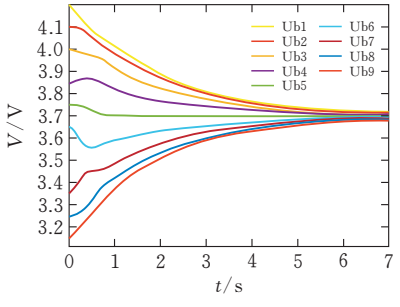
情况	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	对应值
$UM_1>UM_2$	D_1	0	1	D_2	0	0	a_1
$UM_1<UM_2$	0	1	0	0	D_1	0	a_2
$UM_1>UM_3$	D_1	0	D_1	0	D_2	0	b_1
$UM_1<UM_3$	0	D_2	0	D_1	0	D_1	b_2
$UM_2>UM_3$	0	D	0	0	1	0	c_1
$UM_2<UM_3$	0	0	D_2	1	0	D_1	c_2

3.2 不同均衡拓扑仿真结果

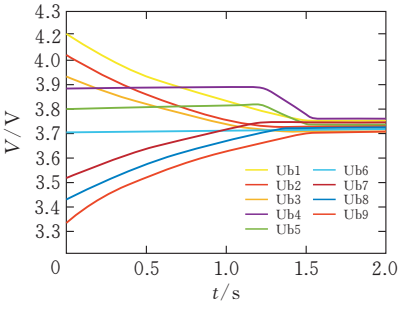
将 9 节电池串联,根据各组不同的平均电压值,大致分为 6 种工况,本文就一种工作情况进行研究,同时对比分析三种不同拓扑的实验结果。

各拓扑均衡时电压分布状况如图 8 所示。由图 8 可以很明显看到 9 节电池分别采用三种不同均衡拓扑之后均衡效果的差异性,对比两种单一型均衡拓扑,Buck-boost 均衡速率较慢,但均衡后的电压一致性却比单电感电路要好。而本文复合型均衡电路则将两种单一型均衡电路的优点相结合,既提高

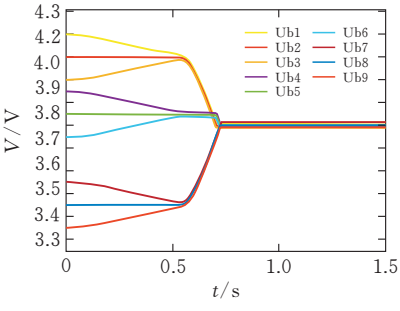
了均衡速率又提高了电压一致性。同样也可以看到复合型电路在均衡过程中优先将组内电池均衡，然后再进行组间的均衡，具有一定的层次性，并且由于组内和组间按顺序进行均衡，可以避免两者间互相干扰。



(a)传统 Buck-boost 均衡电路实验



(b)单电感均衡电路实验



(c)复合型均衡电路实验

图 8　对比均衡电路实验

考虑到均衡拓扑实际应用中可能涉及数十甚至成百串锂电池，故对三类均衡拓扑从元器件数量、电路控制难易程度、均衡效果、均衡速度等方面进行比较，综合考虑性价比问题，如表 2 所示。

表 2　三类均衡拓扑比较

类别	Buck-boost	单电感	复合型
开关	$2n-2$	$2n$	$2n$
电感	n	1	$2n/3+1$
二极管	0	0	$2n/3$
成本	高	低	中等
控制难度	易	难	较易
均衡效果	较好	差	好
均衡速度	慢	较快	快

n 为电池数量。

根据仿真实验，单电感拓扑需要通过一个电感完成 9 节电池的均衡，均衡路径单一，虽然对比 Buck-boost 拓扑有更好的均衡速度，但是随着电池数量的增加，其控制难度将相应增大，同时其均衡效果也将更加离散。

根据各元器件单价的不同，随着电池数量的增加，三类拓扑开关数量相差不多，而 Buck-boost 拓扑中，电感数量最多，故总体成本为 Buck-boost 拓扑＞复合型拓扑＞单电感拓扑；同时考虑到单电感拓扑均衡路径单一，控制难度大，均衡效果差；Buck-boost 拓扑均衡速度慢，成本最高，能量损失大。综合考虑，复合型均衡拓扑性价比最高。

三种不同拓扑各电池初始电压值一致，如表 3 所示。表 4 所示为实验完成后三种拓扑分别对应的电压值。

表 3　9 节电池初始电压值

电池电压	初始电压	电池电压	初始电压
Ub1	4.2	Ub6	3.65
Ub2	4.1	Ub7	3.55
Ub3	4	Ub8	3.25
Ub4	3.85	Ub9	3.15
Ub5	3.75		

表 4　各均衡拓扑完成均衡后的电池电压

均衡拓扑	电压								
	Ub1	Ub2	Ub3	Ub4	Ub5	Ub6	Ub7	Ub8	Ub9
Buck-boost 电路	3.712	3.709	3.707	3.705	3.701	3.698	3.697	3.696	3.696
单电感电路	3.809	3.801	3.799	3.791	3.785	3.775	3.771	3.766	3.761
复合型均衡电路	3.802	3.802	3.802	3.799	3.799	3.799	3.797	3.797	3.797

3.3　仿真结果分析

由仿真结果可以得到不同均衡拓扑下的均衡时间、电压一致性，对比数据如表 5 所示。

1)均衡速率。图 8a 传统 Buck-boost 电路和图 8b 单电感均衡电路完成均衡分别需要 7 s 和1.5 s。结合图 8c 和表 4 分析，本文复合型均衡拓扑 3 组电池组在 0.56 s 完成组内均衡，之后在 0.65 s 完成组

表 5　不同均衡拓扑仿真结果对比

均衡拓扑	均衡时间/s	电压标准差
Buck-boost 电路	7	0.017233
单电感电路	1.5	0.046679
复合型均衡电路	0.65	0.006165

间均衡。总体均衡速率对比单一型 Buck-boost 和单一型单电感电路分别提高了 91%和 57%。

2)电压一致性。电压一致性代表着电压离散程度,可根据电压标准差比较,离散程度越低,代表电压一致性越高,标准差越小。从表 4 可知,均衡完成时三种均衡拓扑各单体电池电压,此时通过计算,便可得到三种拓扑的电压标准差,本文复合型均衡拓扑电压一致性对比单一型 Buck-boost 和单一型单电感电路分别提高了 64%、87%。

由以上可知,本文复合型均衡拓扑相对于单一型均衡拓扑在均衡速率和电压一致性方面提升显著。

4 总结

本文介绍了以电感作为能量转移元件的均衡电路,组内 Buck-boost 均衡电路的应用使得组间单电感均衡路径变少,有效解决了单电感均衡速率过慢且均衡电压一致性差的缺点;同时,基于单电感的任意电池组均衡,有效解决了传统 Buck-boost 电路均衡速率有限和能量损耗的缺点。将 Buck-boost 电路传递速率快的特点,与单电感电路任意传递的特点相结合,对于各均衡拓扑合理化运用,较好发挥了各自的优势,并弥补了其各自的薄弱处。

在理论分析的基础上搭建了复合型、单一型 Buck-boost、单一型单电感均衡拓扑,并分别对 9 节锂电池进行仿真,通过对比分析三种拓扑均衡效果,验证了复合型均衡拓扑和策略的可行性,仿真结果表明复合型主动均衡拓扑均衡速率最快,电压一致性效果显著。

[参 考 文 献]

[1] 张博,刘皓明,张金波.基于 DC/DC 变换器的储能电站锂电池快速均衡策略[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 1-5.

[2] 周英华, 蒋庆斌. 一种实用型电池均衡技术研究[J]. 电子器件, 2018, 41(01): 145-151.

[3] 林鸿业, 康龙云, 卢楚生, 等. 基于电感储能的新型锂离子电池组 C2C 均衡电路[J]. 电力电子技术, 2020, 54(07): 39-41.

[4] 王维强, 李文杰, 乔雪, 等. 分布式电动汽车锂电池智能均衡系统设计[J]. 电源技术, 2019, 43(02): 312-314.

[5] 杜海忠, 骆滔, 宋浩谊, 等. 基于电压平衡的锂电池主动均衡电路及策略[J]. 电气工程学报, 2021, 16(03): 145-151.

[6] 段周敬, 任晓明, 陈道. 轨交储能锂电池主被动均衡策略的研究及应用[J]. 电源技术, 2019, 43(08): 1305-1308.

[7] 邹大中, 陈浩舟, 李勋, 等. 基于云端充电数据的锂电池组一致性评价方法[J]. 电网技术, 2022, 46(03): 1049-1064.

[8] 黄永红, 沈洋洋, 陈坤华, 等. 双向 DC/DC 变换器锂离子电池组主动均衡控制[J]. 电子器件, 2019, 42(01): 142-146.

[9] 王亮, 张亚, 罗双,等. 矿用单轨吊磷酸铁锂电池组复合式分层均衡电路[J]. 工矿自动化, 2020,46(01): 100-104.

[10] 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.

[11] 巫春玲, 程琰清, 刘智轩,等. 一种改进的储能锂电池主动均衡拓扑研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(03): 32-37.

[12] 裴世杰. 基于单体到组的锂电池组均衡策略研究及实现[D].绵阳:西南科技大学, 2018.

Research on Active Balancing of Composite Lithium Battery Based on Inductance

TU Lingying, QIN Yu, ZHOU Yiru, LI Xi

(*School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In order to improve the equalization rate of lithium battery pack and reduce the voltage inconsistency after equalization, this paper proposes an active balancing topology of composite lithium battery based on inductance. The Buck-boost circuit is used in the group, and the single inductor circuit is used between the groups. At the same time, combined with the corresponding active equalization strategy, a model of nine series lithium battery packs is established in Matlab/Simulink. Compared with the Buck-boost, single inductor and the composite topology equalization effect were designed in this paper. Experiments indicate that the composite active balancing topology in this paper effectively reduced equalization time and voltage dispersion.

Keywords: active balancing; Buck-boost circuit; single inductance; composite topology

[责任编校: 闫 品]