[文章编号] 1003－4684(2026)02-0019-06

基于模糊逻辑控制的串联锂离子电池组快速均衡技术研究

吴铁洲[1]，祝 磊[1]，张 敏[2]，王越洋[2]，李宜安[1]

(1 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，湖北 武汉 430068；
2 航宇伟创科技(北京)有限公司，北京 100097)

[摘 要] 为有效提高串联锂离子电池组的均衡速度，提出一种二级均衡拓扑，电池组内部采用 Cuk 电路结合双层选择开关的均衡拓扑，电池组之间使用 Buck-Boost 均衡拓扑。以 SOC 作为均衡变量，通过设计模糊逻辑控制算法，实现对均衡电流的动态调节，从而有效缩短均衡所需时间。以 9 节串联锂离子电池为例，建立模型并进行仿真。结果表明，在相同的静置和充放电条件下，与最值均衡方法相比，静置均衡时间减少约 13%，充电均衡时间减少约 9%，放电均衡时间减少约 11%，验证了均衡方案的可行性。

[关键词] Cuk；Buck-Boost；SOC；模糊逻辑控制

[中图分类号] TM911 [文献标识码] A

作为电动汽车的“心脏”，动力电池的性能直接决定了车辆的续航、安全与寿命。近几年锂离子电池被广泛应用于电动汽车，但是单节单体电池的电压等级无法满足电动汽车的使用需求，需要将大量单体电池串联成组来为电动汽车提供动力[1]。在电池生产和使用过程中，单体电池间的内阻和容量会产生一定的差异，这种不一致性会减少电池组的使用容量，缩短电池组寿命[2-3]，更严重的是，不一致性会引发某些单体过充或过放。过充可能导致电解质分解、产气、甚至热失控引发火灾；过放则会永久性损坏电池结构，带来严重的安全隐患。本文针对锂离子电池组不一致性所带来的影响对电池组均衡技术展开研究。

目前常用的最值均衡方法均衡速度慢，一定程度上影响电池组的性能[4]。本文提出一种两级均衡拓扑，克服传统单层拓扑均衡速度慢的问题，通过对电池进行分组，实现组内任意单体电池之间的能量传递。同时以 SOC 为均衡变量，设计模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control，FLC)算法实现电池组的快速均衡。通过 Matlab /Simulink 进行建模仿真实验，实验结果表明：与最值均衡方法相比，本文方法静置均衡时间减少约 13%，充电均衡时间减少约 9%，放电均衡时间减少约 11%。

1 两级均衡拓扑结构

本文提出一种如图 1 所示的二级均衡结构，该结构首先将电池组平均分为若干小组，确保每组包含相同数量的单体电池，并为每个电池组配置对应的均衡子电路。组内均衡拓扑如图 2 所示，采用 Cuk 电路拓扑结合双层开关，可以实现任意单体电池间的能量传递。组间均衡拓扑采用 Buck-Boost 电路拓扑，如图 3 所示。每两个相邻电池组之间的公共电阻器和储能电感器可以实现相邻电池组之间的能量传输[5]。

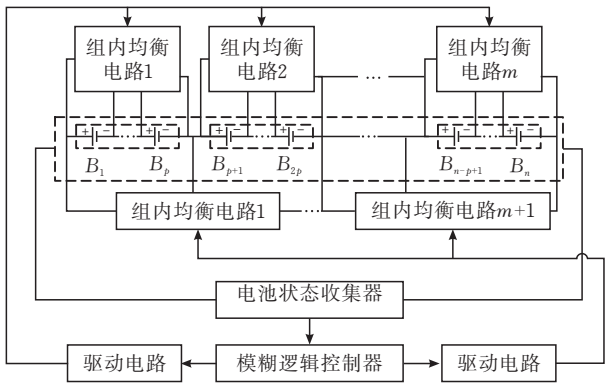


图 1 二级均衡结构

[收稿日期] 2023－05－06
[基金项目] 湖北省重大科技创新项目(2018AAA056)；国家自然科学基金(51677058)
[第一作者] 吴铁洲(1966－)，男，湖北天门人，工学博士，湖北工业大学教授，研究方向为储能/光伏发电技术。
[通信作者] 祝 磊(1995－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为电池均衡技术。

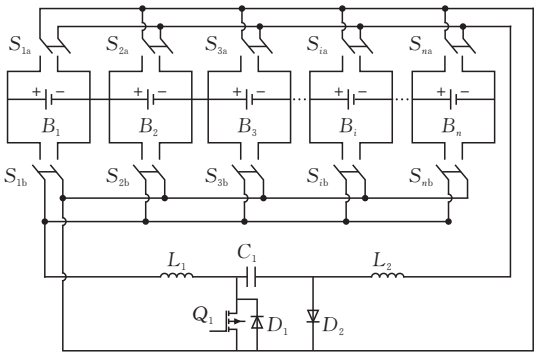


图 2 组内均衡拓扑

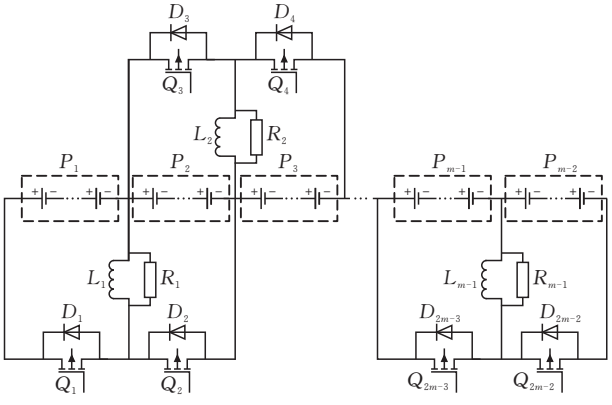


图 3 组间均衡拓扑

1.1 组内均衡拓扑

如图 2 所示，假设组内有 n 个串联的单体电池，每个单体电池对应一个上层开关和一个下层开关，上层开关（S_{1a}，S_{2a}，S_{3a}，…，S_{ia}，…，S_{na}）共有 n 个，下层开关（S_{1b}，S_{2b}，S_{3b}，…，S_{ib}，…，S_{nb}）共有 n 个。组内不均衡单体电池间的能量传递通过 *Cuk* 均衡电路来完成。*Cuk* 均衡电路包括两个电感（L_1、L_2）、一个电容 C_1、两个二极管（D_1、D_2）和一个开关管 Q_1。提出的改进 Cuk 电路均衡拓扑，通过双层选择开关共用一个 Cuk 均衡电路，虽然开关总数增加了，但电感和电容的数量成倍地减少，降低了硬件要求，节省了成本。

以电池 B_1 和电池 B_i 之间能量不均衡为例，其中电池 B_1 能量高于电池 B_i 能量，下层开关 S_{1b} 和上层开关 S_{ia} 闭合后，在一个信号周期内由于全控开关管 Q_1 的导通和关断使得均衡电路呈现出两种状态。开关管 Q_1 开通和关断时的电路状态分别如图 4 和图 5 所示。

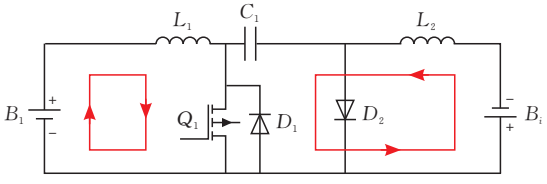


图 4 开关管 Q_1 导通时的电路状态

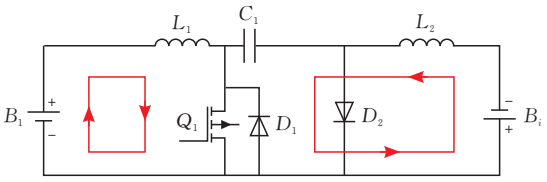


图 5 开关管 Q_1 断开时的电路状态

能量转移过程中的电感 L_1 电流 I_{L_1}、电感 L_2 电流 I_{L_2} 和电容电压 Vc 如式(1)至(3)所示：

$$I_{L_1} = 0.5Ts\left(\frac{V_{B1}}{L_1}D^2 + \frac{V_C - V_{B1}}{L_1}(1-D)^2\right) \tag{1}$$

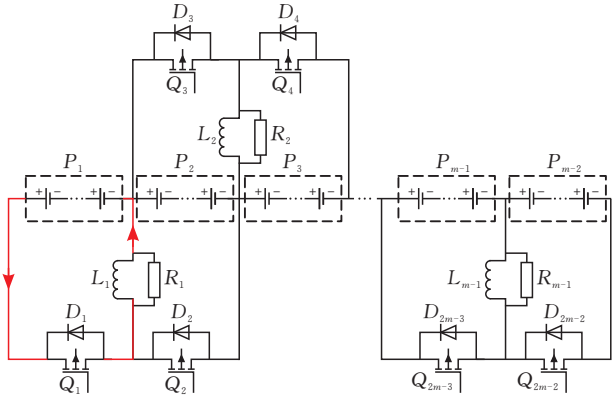
$$I_{L_2} = 0.5Ts\left(\frac{V_{Bi}}{L_1}(1-D)^2 + \frac{V_C - V_{Bi}}{L_1}D^2\right) \tag{2}$$

$$V_C = \frac{V_{B1}}{1-D} \tag{3}$$

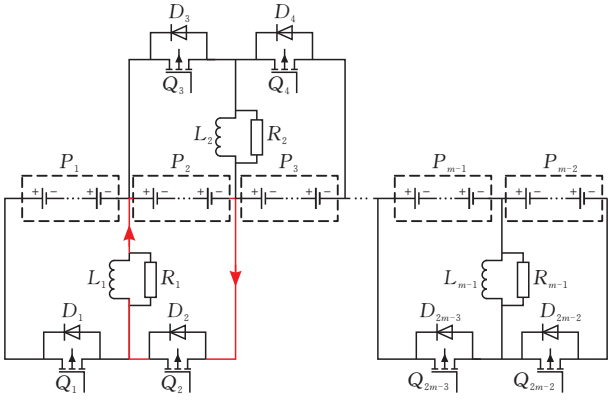
式(1)至(3)中 Ts 为开关周期；D 为占空比；V_{B1} 为电池 B_1 的电压；V_{Bi} 为电池 B_i 的电压。

1.2 组间均衡拓扑

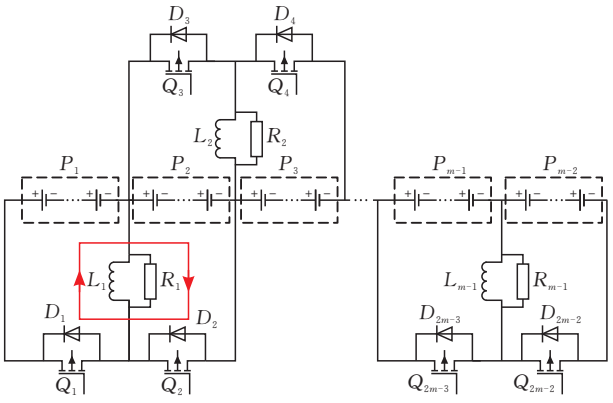
Buck-Boost 的升降压均衡电路可以用来均衡相邻的电池组，对电感进行充放电以实现电池组间的能量传输，以电池组 P_1 和 P_2 为例，假设电池组 P_1 的平均能量高于电池组 P_2 的平均能量，则组间均衡将在电池组 P_1 和 P_2 中进行。均衡过程主要分为以下三个步骤：P_1 放电、P_2 被充电和 L_1 消磁。电路状态如图 6 所示。



(a) P_1 放电



(b) P_2 被充电



(c) L_1 消磁

图 6　电池组 P_1 和 P_2 之间的电路状态

P_1 放电阶段如图 6a 所示，开关管 Q_1 导通，电感 L_1 电流 I_{L_1} 为：

$$I_{L1} = \frac{1}{L}\int_0^{DTs} U_{P1}\,dt \tag{4}$$

P2 被充电阶段如图 6b 所示，开关管 Q_2 导通，电池组 P_2、电感 L_1 和开关管 Q_2 构成回路，电感 L_1 存储的能量将释放给电池组 P_2。电感 L_1 电流 I_{L_1} 为：

$$I_{L1} = \frac{DTsU_1}{L} - \frac{1}{L}\int_0^{DTs} U_1\,dt \tag{5}$$

电感消磁阶段如图 6c 所示，在均衡结束时需要退磁。在这个过程中，电感 L_1 会通过 R_1 消耗掉剩余的能量。

2　基于模糊逻辑控制的均衡策略

由于电池是一个复杂的非线性系统，在建立数学模型时常常会出现模型精度不够的问题[6]。本文提出一种基于 SOC 的模糊逻辑控制器来调节均衡电流的方法。模糊逻辑控制不需要依赖精确的数学模型，可以很好地降低系统的复杂性[7]，本文采用模糊逻辑控制器的主要目的是调节均衡电流，根据电池状态调整均衡电流大小，提高均衡速度。模糊逻辑原理如图 7 所示，其工作原理是首先将输入量通过模糊化转化为模糊变量，然后将模糊量输入到推理机中，根据规则库所提供的模糊规则对模糊量进行处理，最后将推理结果进行去模糊化，再与实际值作比较调整控制开关信号的占空比，对开关进行控制。

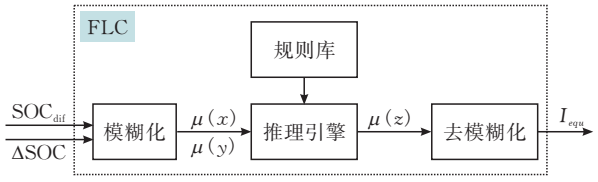


图 7　模糊逻辑控制原理

本文以均衡电流为控制目标，利用 FLC 算法，以电池 SOC 变化为依据，对均衡电流进行动态调整，在电池组不一致性很大时，输出大的均衡电流，缩短均衡时间，提高均衡速度；在电池组一致性高时，控制小的输出电流，防止电池出现过充过放现象，保证电池安全。

由于组内和组间 FLC 的规则库和隶属函数是相似的，现在以组内 FLC 为例，相关表达式如下：

$$\overline{SOC_m} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} SOC_k \tag{6}$$

$$\overline{SOC_w} = \frac{1}{2}(SOC_i + SOC_j) \tag{7}$$

$$SOC_{dif} = |\overline{SOC_m} - \overline{SOC_w}| \tag{8}$$

$$\Delta SOC = |SOC_i - SOC_j| \tag{9}$$

式(6)至(9)中，SOC_i 和 SOC_j 分别表示均衡过程中的两个单体电池的 SOC 值；$\overline{SOC_m}$ 表示电池组的 SOC 平均值；$\overline{SOC_w}$ 表示两个单体电池的 SOC 平均值；SOC_{dif} 表示电池充放电状态与电池组充放电状态的差异；ΔSOC 表示充放电状态的两个单体电池的 SOC 差值。

本文采用双输入和单输出设计模糊逻辑控制器。以 SOC_{dif}、ΔSOC 为输入变量，I_{equ} 为输出变量，构建一个二维 Mamdani 型模糊控制器就能实现电池均衡的功能。组内和组间的 FLC 输入量 SOC_{dif} 或 ΔSOC 取相同的模糊论域，SOC_{dif} 和 ΔSOC 的模糊论域分别设置为(0，20%)和(0，80%)。SOC_{dif} 和 ΔSOC 对应的模糊变量 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$ 分为五个模糊子集，可划分为：{非常小，小，中，大，非常大}={VS，S，M，L，VL}。FLC 输出量是均衡电流 I_{equ}，为保证电池在均衡过程中安全，将均衡电流的模糊论域设置为(0，5A)，对应于均衡电流 I_{equ} 的模糊变量 $\mu(z)$ 也划分为：{非常小，小，中，大，非常大}={VS，S，M，L，VL}。

常采用的隶属度函数有三角形、钟形、梯形、高斯型。考虑到控制性能好、运算简单等因素，本文选择大部分采用三角形，小部分采用梯形来设计隶属度函数，FLC 的两个输出量和一个输入量隶属度函数设计如图 8 至图 10 所示。

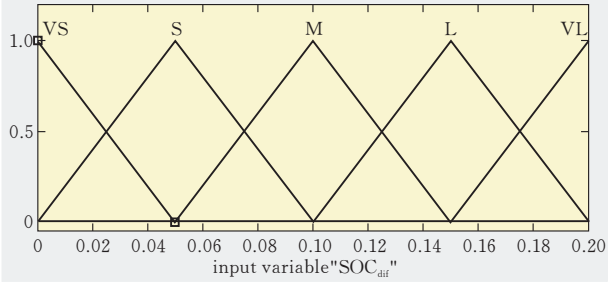


图 8　FLC 输入量 SOCdif 的隶属函数

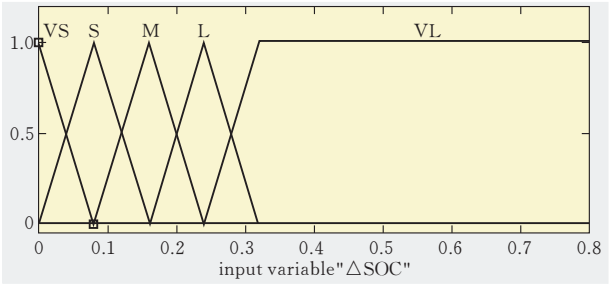


图 9 FLC 输入量△SOC 的隶属函数

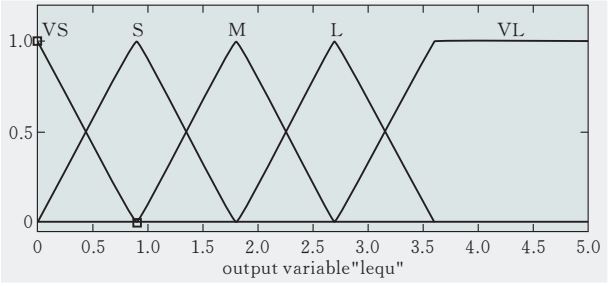


图 10 FLC 输出量 Iequ 的隶属函数

在均衡过程中，根据排列组合模糊控制规则共由 25 条 if-then 语句组成。在软件中建立输入与输出的逻辑关系，以基于 SOC 的模糊控制给出相应的模糊规则制定。本文利用 MATLAB 中模糊逻辑设计工具，根据上述的隶属度函数和模糊规则进行设计，得到如图 11 所示的三维关系图，当 SOC_{dif}、ΔSOC 较大时，输出电流也较大，以此来提高均衡速度，减少均衡时间；当 SOC_{dif}、ΔSOC 较小时，输出电流也较小，以防止电池过充过放，保证电池的安全。

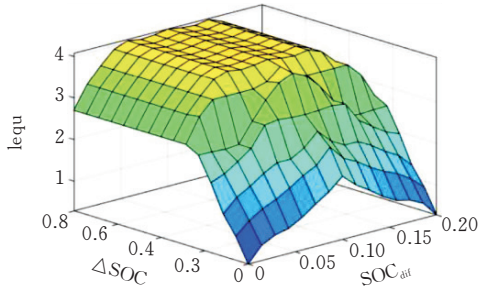


图 11 FLC 输入/输出三维曲面

通过推理机输出的是一个模糊集，而不是一个精确的量，不能够直接输出控制系统，所以需要将推理机输出的模糊集进行去模糊化，将模糊变量转化为精确变量。本文采用重心法(centroid)进行去模糊化，其表达式如式(10)所示。

$$I_{equ}=\frac{\int z\mu(z)\,\mathrm{d}z}{\int \mu(z)\,\mathrm{d}z} \tag{10}$$

式(10)中 $\mu(z)$ 是推理的模糊结果。

3 仿真实验与分析

本文使用 Matlab/Simulink 软件进行建模并仿真，各单体电池(B1～B9)的初始 SOC 值分别为 78%、74%、71%、67%、64%、62%、59%、57%、56%。本文将 9 个串联的锂离子电池分为 3 组，每组 3 个单体电池。为验证本文所设计的 FLC 算法的优越性，将其与最值法进行对比实验，实验分为静置均衡、充电均衡和放电均衡三种情况。

1)静置均衡 基于最值法和 FLC 算法的静置均衡的 SOC 变化曲线分别如图 12 和图 13 所示。采用最值法时，电池组均衡时间为 3786 s，采用 FLC 算法时，均衡时间为 3291 s。所以，使用 FLC 算法进行均衡后，与最值均衡方法相比，静置均衡时间减少约 13%，从而更快速地达到均衡。

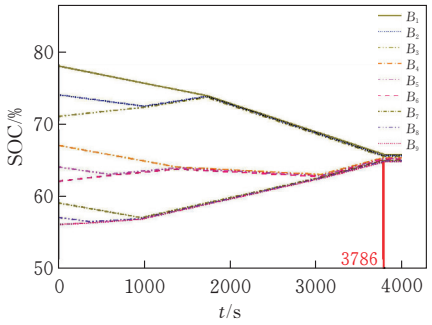


图 12 基于最值法的静置均衡

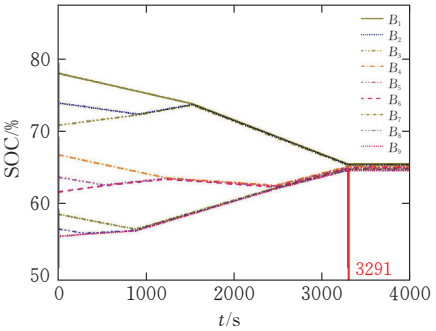


图 13 基于 FLC 的静置均衡

2)充电均衡 基于最值法和 FLC 算法的充电均衡的 SOC 变化曲线分别如图 14 和图 15 所示。采用最值法时，电池组均衡时间为 2993 s，采用 FLC 算法时，均衡时间为 2712 s。所以，使用 FLC 算法进行均衡后，与最值均衡方法相比，充电均衡时间减少约 9%，从而更快速地达到均衡。

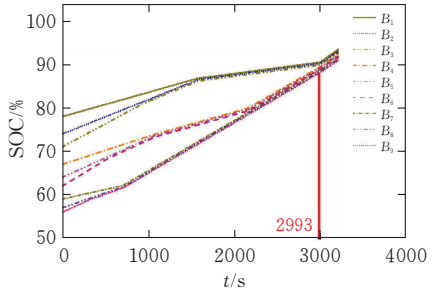


图 14 基于最值法的充电均衡

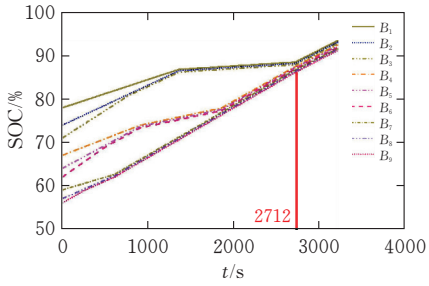


图 15　基于 FLC 的充电均衡

3)放电均衡　基于最值法和 FLC 算法的放电均衡的 SOC 变化曲线分别如图 16 和图 17 所示。采用最值法时，电池组均衡时间为 3474 s，采用 FLC 算法时，均衡时间为 3096 s。所以，使用 FLC 算法进行均衡后，与最值均衡方法相比，放电均衡时间减少约 11%，从而更快速地达到均衡。

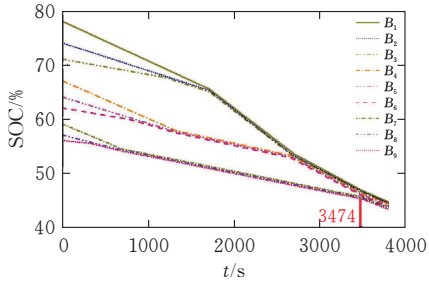


图 16　基于最值法的放电均衡

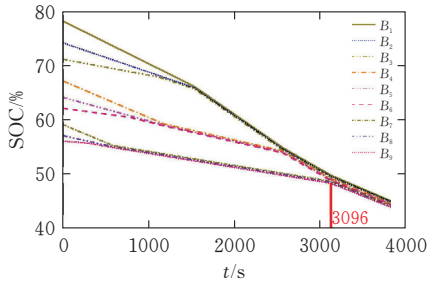


图 17　基于 FLC 的放电均衡

由图 12 至图 17 的均衡过程中 SOC 变化曲线可得如表 1 所示的数据。

表 1　3 种均衡状态下时间对比　　s

策略	静置均衡时间	充电均衡时间	放电均衡时间
最值法	3786	2993	3474
FLC 算法	3291	2712	3096

由表 1 可知，本文提出的基于 FLC 的策略在静置、充电和放电状态下能够减少电池均衡时间，提高时间效率，从而更快速地达到均衡。

4　结论

为提高锂离子电池组的均衡速度，本文提出一种两级均衡拓扑结构。电池组内部采用一种 Cuk 电路结合双层选择开关的均衡拓扑，可对组内任意单体电池进行均衡；电池组之间使用 Buck-Boost 均衡拓扑，可以均衡相邻的电池组。以 SOC 为均衡变量，用具有强非线性和容错能力的模糊逻辑控制策略进行电池均衡，不需要关注被控对象即锂离子电池的内部结构，而是把它当作“黑箱”处理，通过带有模糊性的、用自然语言表述的规则，实现对串联锂离子电池组均衡的有效控制。基于 FLC 的均衡控制策略在静置、充电和放电状态下能够减少电池均衡时间，从而更快速地达到均衡，在电池组均衡后，电池 SOC 的不一致性显著改善，避免电池最大容量差异的影响。

[参　考　文　献]

[1] SUN Q, LV H, WANG S, et al. Optimized state of charge estimation of lithium-ion battery in SMES /Battery hybrid energy storage system for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(08): 1-6.

[2] WANG H, WANG S, FENG X, et al. An experimental study on the thermal characteristics of the Cell-To-Pack system[J]. Energy, 2021, 227: 120338.

[3] WANG S, YANG S, 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, 2020, 68(03): 2142-2150.

[4] 于跃，林聪，张恒.基于荷电状态的锂离子电池主动均衡控制系统的研究与实现[J].电气技术，2019，20(08)：18-22.

[5] JI F, LIAO L, WU T, 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.

[6] SHEN M, GAO Q. A review on battery management system from the modeling efforts to its multiapplication and integration[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(10): 5042-5075.

[7] WU T, JI F, LIAO L, et al. Voltage-SOC balancing control scheme for series-connected lithium-ion battery packs[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100895.

（下转第 84 页）