

双层Buck-Boost电池主动均衡系统的模糊控制策略研究

张皓原¹, 杨燕红^{1,2*}

¹西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都

²西华大学宜宾校区研究院, 四川 宜宾

收稿日期: 2026年7月22日; 录用日期: 2026年9月2日; 发布日期: 2026年9月11日

摘要

针对锂离子电池串并联使用中的不一致性问题, 本文改进传统Buck-Boost电路以实现非相邻电池间能量转移, 提升了均衡灵活性与效率; 采用以SOC偏差和电感电流为输入的模糊控制策略替代传统均值差值法, 动态调节占空比。在MATLAB/Simulink中搭建了三种均衡方案进行对比仿真。结果表明, 双层Buck-Boost拓扑相较于传统单层拓扑均衡时间缩短约68.4%; 在相同双层拓扑下, 本文模糊控制法相较于均值差值法均衡时间进一步缩短约19.9%。

关键词

锂电池组, 主动均衡, 模糊控制, Buck-Boost

Research on Fuzzy Control Strategy for a Double-Layer Buck-Boost Battery Active Equalization System

Haoyuan Zhang¹, Yanhong Yang^{1,2*}

¹Vehicle Measurement, Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu Sichuan

²Research Institute of Yibin Campus of Xihua University, Yibin Sichuan

Received: July 22, 2026; accepted: September 2, 2026; published: September 11, 2026

Abstract

Regarding the inconsistency problem in series-parallel lithium-ion battery packs, this paper improves

*通讯作者。

文章引用: 张皓原, 杨燕红. 双层 Buck-Boost 电池主动均衡系统的模糊控制策略研究[J]. 人工智能与机器人研究, 2026, 15(5): 1213-1224. DOI: 10.12677/airr.2026.155110

the conventional Buck-Boost circuit to realize energy transfer between non-adjacent cells, enhancing equalization flexibility and efficiency. A fuzzy control strategy taking SOC deviation and inductor current as inputs is adopted to replace the traditional mean-difference method for dynamic duty-cycle adjustment. Three equalization schemes are built for comparative simulation in MATLAB/Simulink. The results show that the double-layer Buck-Boost topology reduces the equalization time by approximately 68.4% compared with the conventional single-layer topology. For the identical double-layer topology, the proposed fuzzy control method further cuts equalization time by about 19.9% relative to the mean-difference method.

Keywords

Lithium-Ion Battery Pack, Active Equalization, Fuzzy Control, Buck-Boost

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为满足动力电池系统和储能系统对输出电压等级的要求, 通常采用多个锂电池单体串联成组的方式构建电池包[1] [2]。然而, 由于电池在制造工艺、初始容量、内阻及使用环境等方面存在差异, 成组后的各单体之间不可避免地会产生不一致性[3]。这种不一致性会导致电池组可用容量下降、能量利用率降低、循环寿命缩短, 严重时甚至可能引发过充、过放及热失控等安全问题[4]。因此, 为改善串联电池组中各单体之间的不一致性, 必须采取有效的电池均衡方法。现有均衡技术主要分为被动均衡和主动均衡两类。被动均衡通过并联电阻消耗高能量电池的多余能量, 具有结构简单、成本低和易于实现等优点, 但存在能量损耗大、发热严重和均衡效率较低等缺陷。相比之下, 主动均衡利用电感、电容或功率变换器等储能元件作为能量传递媒介, 将高能量单体中的能量转移至低能量单体, 具有能量利用率高、均衡速度快和控制灵活等优点, 因此成为当前电池均衡技术的重要研究方向[5] [6]。Buck-Boost (降压 - 升压)型主动均衡拓扑因结构相对简单、易于实现双向能量传递而受到广泛关注[7]-[9], 但传统单层 Buck-Boost 均衡电路通常只能实现相邻电池之间的能量转移, 存在均衡路径受限、控制复杂以及非相邻单体均衡效率不高等问题。针对这一问题, 部分研究采用分层均衡、分组均衡或多级均衡结构, 以缩短能量传递路径, 提高非相邻单体之间的均衡效率[10]-[12]。此外, 传统均值 - 差值控制方法虽然实现较为简单, 但在均衡过程中难以兼顾系统的动态响应与控制精度[13]。相较而言, 模糊控制能够在不依赖精确数学模型的前提下, 根据荷电状态(State of Charge, SOC)偏差自适应调整控制量, 具有较强的非线性处理能力和鲁棒性[14] [15]。基于此, 本文采用了一种双层 Buck-Boost 主动均衡电路, 并引入以 SOC 偏差及电感电流为输入的模糊控制策略, 以提高非相邻单体间的能量传递能力和系统整体均衡效率。

2. 主动均衡电路设计

2.1. 均衡电路拓扑设计

传统单层 Buck-Boost 电路如图 1 所示, 其结构相对简单, 易于实现双向能量传输, 但该均衡拓扑只能实现相邻电池的能量传递, 均衡路径复杂且效率低下。为了改进上述缺点, 本文采用分层型均衡拓扑, 如图 2 所示, 以四节串联锂电池组为例。该电路拓扑将四节串联锂电池组分为两层, 两节电池组成一个

电池组, 第一层为组内均衡模块, 第二层为组间均衡模块。相较于传统单层型拓扑, 该分层型拓扑可缩短均衡路径, 实现不相邻电池的能量转移, 缩短整个电池组达到均衡的时间。

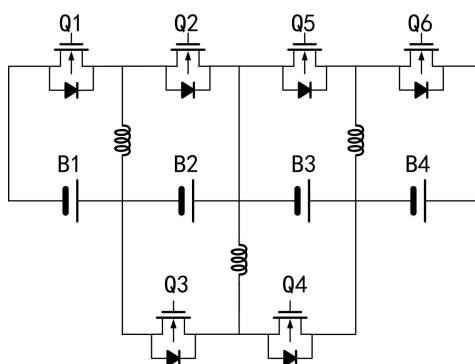


Figure 1. Conventional Buck-Boost equalization circuit

图 1. 传统 Buck-Boost 均衡电路

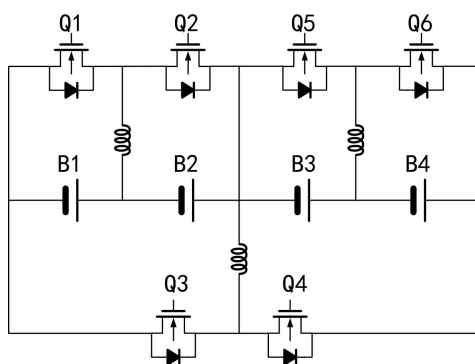


Figure 2. Hierarchical Buck-Boost equalization circuit

图 2. 分层 Buck-Boost 均衡电路

为提高均衡电流调节的连续性与稳定性, 本文均衡模块采用连续导通模式(CCM)工作。相比断续导通模式(DCM), 连续导通模式下电感电流变化更加平滑, 有利于提高模糊控制器对均衡过程的调节精度和动态响应性能。在此工作模式下, 电感电流在整个开关周期内始终大于零, 即满足:

$$i_{L,\min} > 0$$

设高电量电池电压为 V_H , 低电量电池电压为 V_L , 开关周期为 TS , 占空比为 D , 电感值为 L 。根据电感伏秒平衡原理, 稳态下有:

$$V_H D = V_{off} (1 - D)$$

因此, 电感电流纹波可表示为:

$$\Delta i_L = \frac{V_H}{L} D T_s$$

进一步地, 均衡电流与电感平均电流之间满足:

$$I_{eq} = (1 - D) I_{L,avg}$$

由此可见, 通过调节占空比即可实现对均衡电流的连续控制。

2.2. 组内均衡拓扑原理

组内均衡电路采用双向 Buck-Boost 拓扑构建。以单体电池 B1 和 B2 之间的均衡回路为例, 其拓扑结构见图 3。当系统判断 B1 的剩余电量高于 B2, 且满足设定的均衡触发阈值后, 控制模块会向开关驱动电路发送频率与占空比确定的 PWM 控制信号, 以控制 MOSFET 开关器件(Q)的工作状态。借助电感元件的储能与释能作用, 并利用双向 Buck-Boost 变换器能够实现能量双向传输的特性, 使能量从高电量电池传递至低电量电池, 进而提升电池组的一致性。该均衡过程主要包括以下三个阶段。

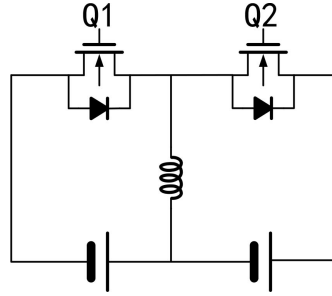


Figure 3. Intra-module equalization topology

图 3. 组内均衡拓扑

2.2.1. 第一阶段 B1 放电储能阶段

当 $0 < t < DT$ 时, 若单体电池 B1 的电量高于 B2, 且满足均衡启动条件, 则控制系统输出 PWM 信号使开关管 Q1 导通, Q2 关断。此时, 电池 B1 与电感 L 构成储能回路, 高电量电池 B1 对电感 L 充电, 电感电流 i_L 在该阶段持续上升, 电能以磁场能的形式储存在电感中。由于电感电流在连续导通模式下不会降为零, 因此该阶段开始时电感中仍存在上一周期残余电流。B1 放电如图 4 所示。

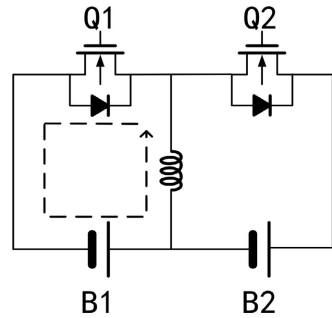


Figure 4. Operating circuit in Stage I

图 4. 第一阶段工作回路

在忽略开关管导通压降及寄生参数影响时, 电感 L 的电流变化可表示为:

$$i_L(t) = I_{L,\min} + \frac{V_{B1}}{L}t \quad (0 < t < DT)$$

式中, $I_{L,\min}$ 为电感电流在该周期开始时的最小值, V_{B1} 为电池 B1 的端电压, L 为电感值, D 为 PWM 信号占空比, T 为开关周期。当 $t = DT$ 时, 电感电流达到本周期最大值 $I_{L,\max}$, 即:

$$I_{L,\max} = I_{L,\min} + \frac{V_{B1}}{L}DT$$

2.2.2. 第二阶段电感放能及 B2 充电阶段

当 $DT < t < T$ 时, 开关管 Q1 关断, Q2 导通, 电感 L 中储存的能量开始向低电量电池 B2 转移。此时, 电感两端电压极性发生变化, 电感电流经相应回路流向电池 B2, 从而实现由高电量单体向低电量单体的能量传递。由于电感具有维持电流连续的特性, 在该阶段电流不会突变, 而是逐渐减小。B2 充电如图 5 所示。

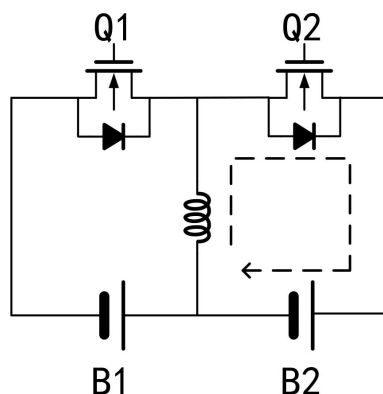


Figure 5. Operating circuit in Stage II

图 5. 第二阶段工作回路

忽略器件压降时, 该阶段电感电流可写为:

$$i_{L(t)} = I_{L,\max} - \frac{V_{B2}}{L}(t - DT)$$

在 $t = T$ 时, 电感电流减小到最小值 $I_{L,\min}$, 且满足:

$$I_{L,\min} > 0$$

2.2.3. 第三阶段连续导通过渡阶段

当 $t = T$ 时, 一个开关周期结束。由于电感电流最小值始终大于零, 电路不会进入断续工作状态, 而是直接进入下一周期。随着 PWM 信号持续作用, 电感反复完成储能与放能过程, 使电池 B1 中多余的能量连续转移至电池 B2。经过多个周期后, 两节电池之间的电量差逐渐减小, 从而实现组内均衡。

2.3. 组间均衡拓扑原理

组间均衡单元同样采用双向 Buck-Boost 变换器构建。设由两个单体电池组成一个子电池组, 其中 B1、B2 及 B3、B4 分别构成电池组, 其组间均衡拓扑如图 6 所示。组间均衡的基本思想与组内均衡一致, 当检测到电池组 B1、B2 的平均电量高于电池组 B3、B4 的平均电量, 且两者差值达到预设的组间均衡启动阈值时, 组间均衡模块开始工作。

在第一个阶段, 开关管 Q3 导通, 电流按照图 6 中的回路 1 流动, 此时电池组 B1、B2 向电感 L1 充电, 能量暂时存储在电感中。进入第二个阶段后, 开关管 Q3 关断, 电流经二极管 D4 构成续流回路, 具体路径如图 6 中的回路 2 所示, 此时电感 L1 将前一阶段储存的能量释放, 并传递给电池组 B3、B4, 从而完成组间能量转移。当电池组 B3、B4 的平均 SOC 高于 B1、B2 时, 均衡流程与上述过程相同, 仅能量转移方向相反(即 B3、B4 组经 L1 向 B1、B2 组转移), 此处不再赘述。

通过对开关器件导通与关断状态的周期性控制, 电感不断完成储能和放能过程, 使高电量电池组中

的能量逐步转移至低电量电池组, 实现不同电池组之间的均衡。其余电池组之间也可按照相同方式进行能量调配, 最终达到整串电池组整体均衡的目的。

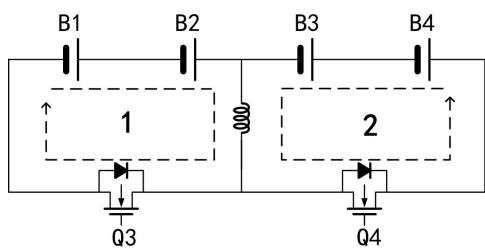


Figure 6. Inter-module equalization topology
图 6. 组间均衡拓扑

3. 基于模糊控制的主动均衡策略

3.1. 电池均衡流程图

均衡控制流程如图 7 所示。以电池组 B1、B2 为例, 当 SOC1 与 SOC2 差值的绝对值 ε 大于 0.5% 时, 开启组内均衡启动, 电池组 B3、B4 同理。并且同时计算电池组平均 SOC 以及其之间的差值, 当差值的绝对值 ε 大于 0.5% 时, 开启组间均衡。在满足均衡开启条件时, 组内均衡与组间均衡可以同时进行, 可提高整体均衡效率。

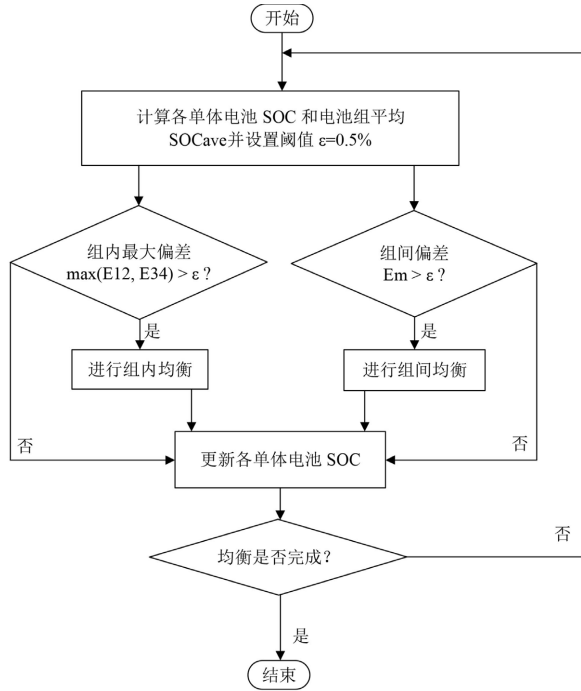


Figure 7. Flowchart of the equalization control
图 7. 均衡控制流程图

3.2. 模糊控制算法

模糊控制理论的核心在于将人工经验规则转化为计算机可执行的控制规则, 通过模糊化、规则推理

和解模糊等步骤, 实现对非线性系统的自适应调节。将模糊控制算法用于均衡电路通过对均衡电流的大小进行控制, 避免在均衡过程中产生过大电流, 对电池寿命产生影响, 甚至可能引发发热失控等危险事故。

模糊控制结构如图 8 所示, 电池组组内均衡和组间均衡方法均采用模糊控制算法。本文所设计的模糊控制器采用两输入单输出结构, 输入量选取电池单体间的荷电状态偏差 E 和均衡支路电感电流 I_{fn} , 输出变量为 PWM 占空比 D 。

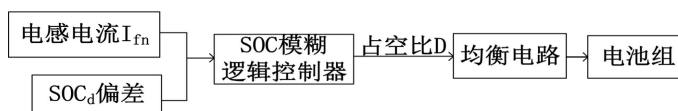


Figure 8. Flowchart of the fuzzy logic control scheme

图 8. 模糊控制流程图

3.2.1. 参数设置

以电池单体间的荷电状态偏差 E 和均衡支路滤波电流 I_{fn} 作为模糊控制器的输入量, 以 PWM 占空比 D 为模糊控制器的输出量。其中荷电状态偏差(E)的定义为:

$$E = |\text{SOC}_i - \text{SOC}_{i+1}|$$

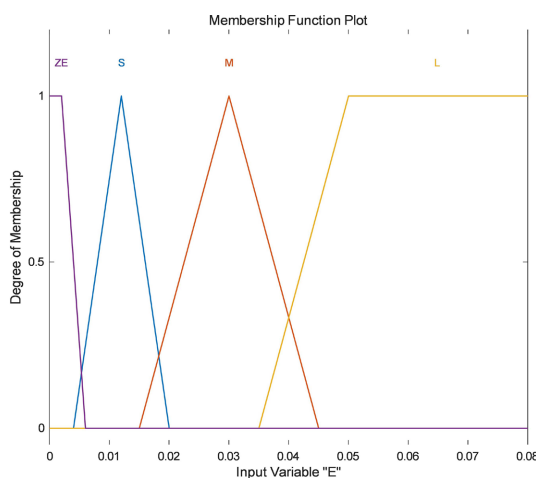
输入量 E 模糊变量的论域设为 $0 \sim 0.08$, 对应 $0\% \sim 8\%$ 的偏差范围, 并划分为 $[0, 0.006]$ 、 $[0.004, 0.020]$ 、 $[0.015, 0.045]$ 、 $[0.035, 0.080]$ 四个区间, 表示为零(ZE)、小(S)、中(M)、大(L)四个子集; 输入量 I_{fn} 模糊变量的论域区间设为 $0 \sim 1$, 并划分为 $[0, 0.18]$ 、 $[0.12, 0.48]$ 、 $[0.40, 0.78]$ 、 $[0.70, 1]$ 四个区间, 表示为零(Z)、小(S)、中(M)、大(H)。输出量模糊变量的论域区间设为 $0.12 \sim 0.45$, 并划分为 $[0.12, 0.21]$ 、 $[0.18, 0.32]$ 、 $[0.28, 0.41]$ 、 $[0.38, 0.45]$ 四个区间, 表示为低(LOW)、中(MID)、高(HIGH)、很高(VHIGH)四个模糊子集。

3.2.2. 隶属度函数选取

为兼顾论域边界处的覆盖完整性和中间区域控制输出的平滑性, 本文采用边界区间使用梯形隶属度函数、中间区间使用三角形隶属度函数的混合隶属度划分方式。输入量 E 与 I_{fn} 以及输出量 D 的隶属度函数图如图 9 所示。

3.2.3. 制定模糊控制规则

模糊规则的制定主要依据均衡控制目标和工程经验, 依据经验制定模糊控制规则表如表 1 所示。



(a) 输入量 E

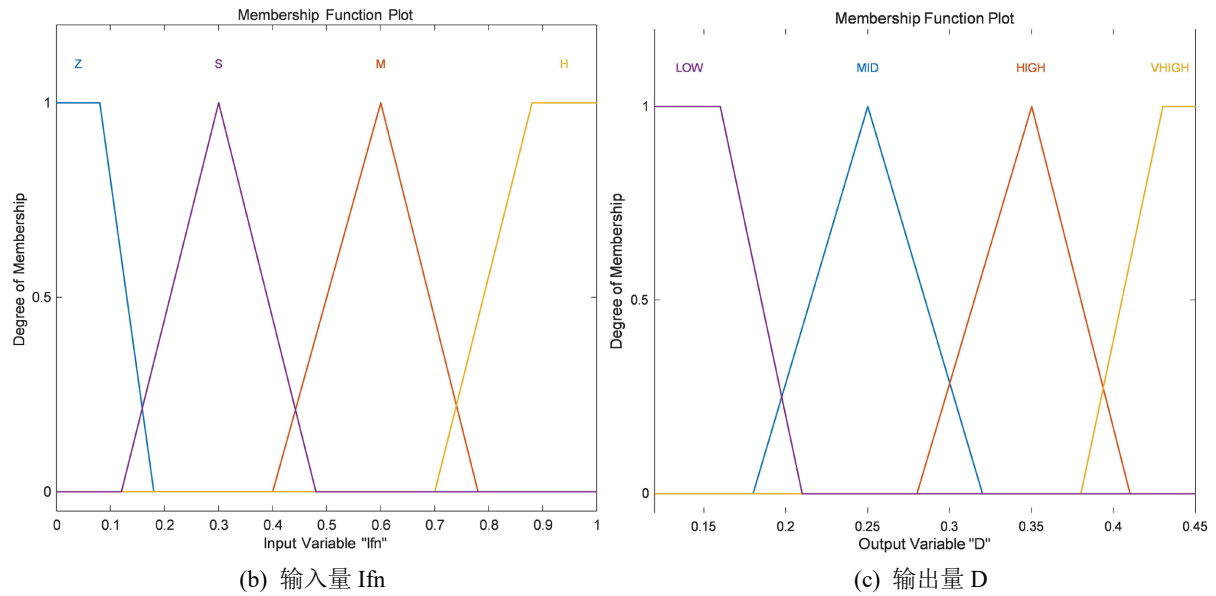


Figure 9. Membership functions of the input and output variables
图 9. 输入量、输出量隶属度函数

Table 1. Fuzzy control rule table
表 1. 模糊控制规则表

D		Ifn			
		Z	S	M	H
E	ZE	MID	LOW	LOW	LOW
	S	HIGH	MID	MID	LOW
	M	VHIGH	HIGH	MID	MID
	L	VHIGH	HIGH	HIGH	MID

- 由表 1 可得如下控制规律：
- 1) 当 E 较大且 Ifn 较小时，说明当前电池间不一致性明显且均衡电流仍有提升空间，此时输出较大占空比，以提高均衡速度。
 - 2) 当 E 较小但尚未低于停止阈值时，控制器仍输出 LOW 或 MID 级别占空比，而不是直接减小到极低值，从而保证均衡后期仍具备一定传能能力，防止后期均衡速度显著减慢。
 - 3) 当 Ifn 已处于较大区间时，即使 E 较大，输出占空比也会受到限制，以避免均衡支路电流过大。
 - 4) 当 E 和 Ifn 同时处于中间区间时，控制器输出 MID 或 HIGH 占空比，在均衡速度和系统稳定性之间取得折中。

3.2.4. 去模糊化

在模糊推理完成后，需要将模糊输出量转换为实际可用的占空比控制信号。本文采用重心法对模糊输出进行去模糊化处理，其表达式为：

$$D = \frac{\int z \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz}$$

式中, $\mu(z)$ 为模糊推理结果的输出隶属度函数。

经过去模糊化处理后, 模糊控制器能够根据输入变量 E 和 I_{fn} 的不同组合, 自适应生成对应的占空比 D , 如图 10 所示。然后将其与支路使能条件相乘, 得到实际进入 PWM 发生模块的控制量。由此, 模糊控制器实现了将电池 SOC 偏差与支路电流状态映射为占空比控制信号的过程, 从而完成对双层 Buck-Boost 主动均衡电路均衡强度的自适应调节。

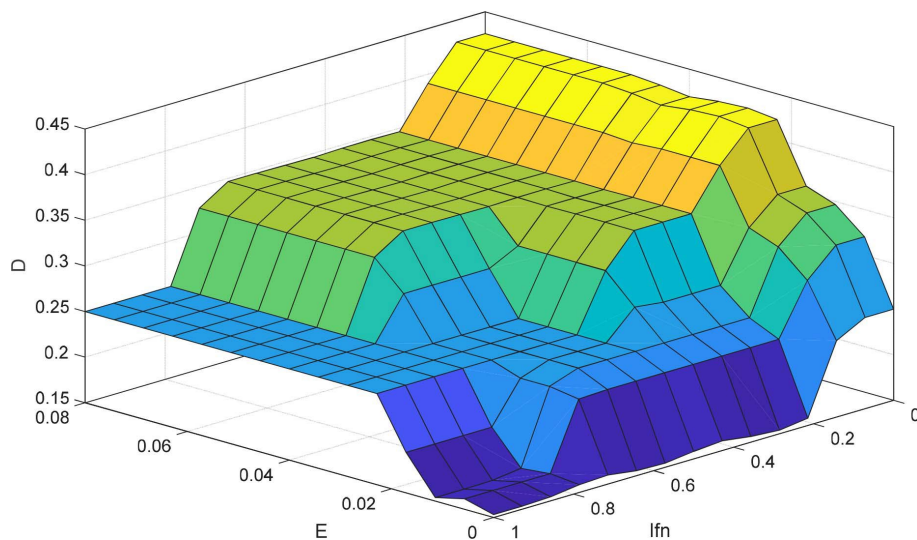
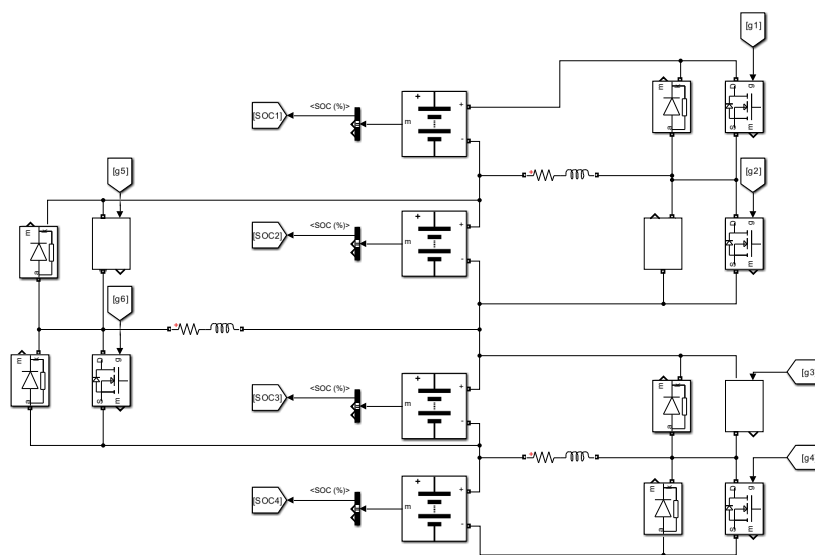


Figure 10. 3D output surface of the fuzzy logic rules

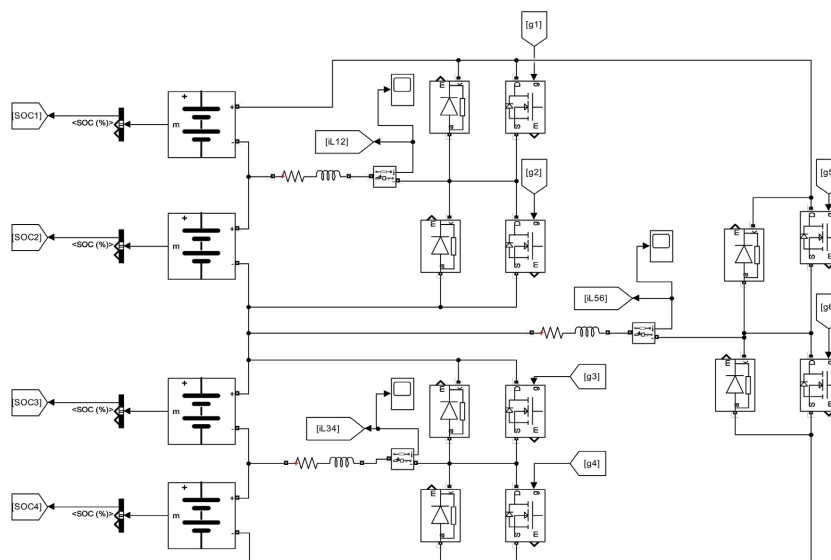
图 10. 模糊逻辑规则三维输出

4. 仿真实验及分析

为验证双层 Buck-Boost 主动均衡拓扑及模糊控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 平台上分别建立了传统单层及双层 Buck-Boost 电池主动均衡模型, 如图 11 所示。



(a) 传统 Buck-Boost 拓扑



(b) 双层 Buck-Boost 拓扑

Figure 11. Simulation diagram of the equalization experiment
图 11. 均衡仿真实验图

参与对比的均值差值法是电池主动均衡领域中最基本的控制策略之一。均值差值法以电池组内所有单体 SOC 的平均值为基准, 通过比较各单体 SOC 与均值的偏差, 判定能量转移的方向与强度, 其表达式为:

$$|\Delta \text{SOC}_i| = |\text{SOC}_i - \overline{\text{SOC}}| > \delta$$

其中, SOC_i 为单体电池的 SOC 值, $\overline{\text{SOC}}$ 为 SOC 均值, δ 为均衡启动阈值, 在本次实验中取值为 0.5%。同时均值差值法采用固定占空比, 取值为 $D = 0.3$ 。

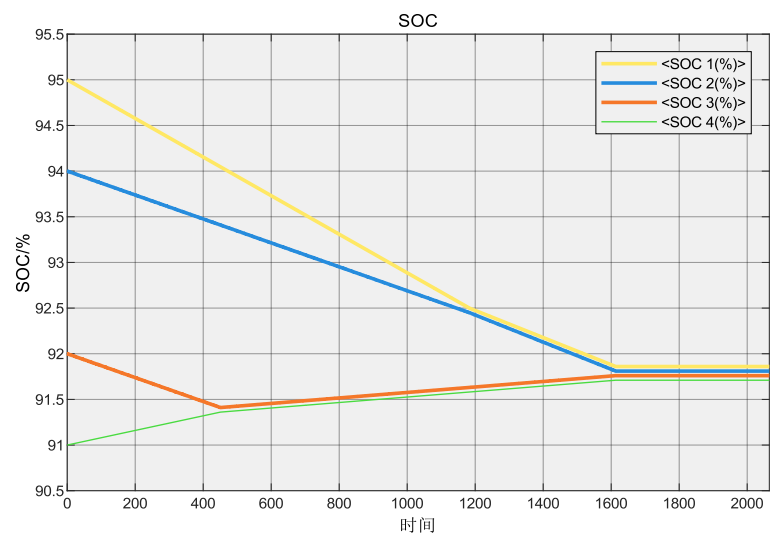
在传统 Buck-Boost 拓扑模型中采用了均值差值均衡法, 在双层 Buck-Boost 拓扑模型中分别使用了均值差值均衡法及模糊控制均衡法以验证模糊控制均衡法的有效性。仿真对象为四节串联锂电池组, 单体电池标称电压为 3.2 V, 额定容量为 10 Ah。控制策略中, 组内均衡和组间均衡采用并行判断、独立驱动方式, 当对应偏差超过设定阈值时支路启动。本文统一设置均衡启动阈值为 0.5%。四节锂电池分别记作 SOC1、SOC2、SOC3、SOC4, 串联电池组的初始 SOC 分别为 95%、94%、92%、91%。均衡电感为 3 mH, 开关频率为 10 kHz。

为了验证基于模糊控制的控制策略的有效性, 分别对均值差值均衡法和模糊控制均衡法进行静置均衡实验。图 12 分别为传统单层 Buck-Boost 电路使用均值差值均衡法、双层 Buck-Boost 电路使用均值差值均衡法和模糊控制均衡法在静置状态下 SOC 的变化曲线图。

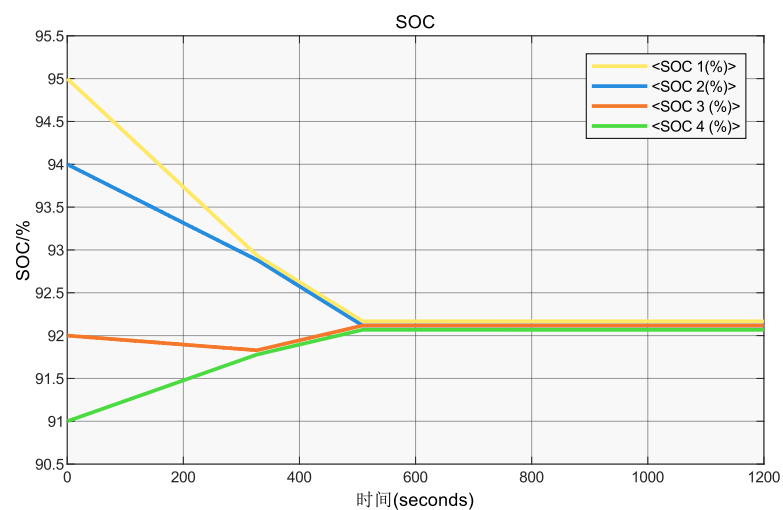
由图可知, 传统单层 Buck-Boost 均衡电路达到均衡状态需要约 1610 s; 双层 Buck-Boost 均衡电路使用传统均值差值法静置达到均衡状态需要约 508 s, 使用模糊控制法达到均衡状态需要约 407 s。双层 Buck-Boost 均衡电路相较于传统单层 Buck-Boost 均衡电路均衡时间缩短了约 68.4%; 双层 Buck-Boost 均衡电路使用模糊控制法相较于均值差值法均衡时间缩短了约 19.9%。

5. 结论

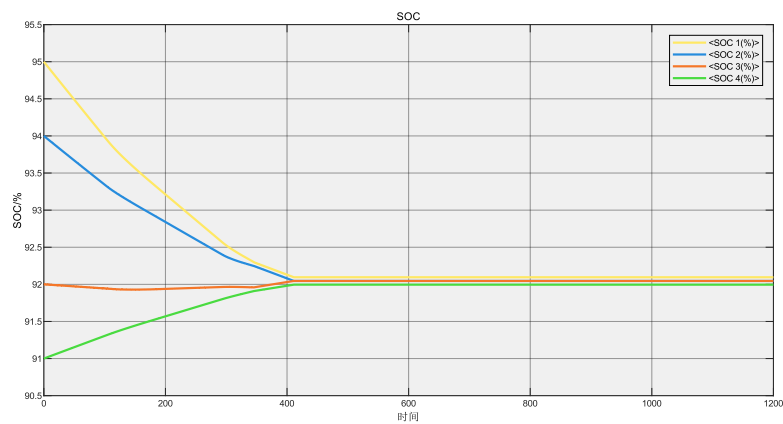
为了提高串联锂电池组主动均衡效率并缩短均衡时间, 本文针对传统 Buck-Boost 均衡路径单一、



(a) 传统 Buck-Boost 均值差值法



(b) 双层 Buck-Boost 均值差值法



(c) 双层 Buck-Boost 模糊控制法

Figure 12. Experimental result diagrams of the static equalization test for the battery pack
图 12. 电池组静置实验结果图

均衡速率较低以及后期均衡速度下降明显等问题, 采用了一种双层 Buck-Boost 主动均衡拓扑, 并设计了基于模糊控制的均衡策略。该策略以电池单体间 SOC 偏差和电感滤波电流为输入量, 以均衡支路导通占空比为输出量, 实现了组内均衡与组间均衡的并行判断和自适应调节。通过在 MATLAB/Simulink 中建立四节串联锂电池组模型, 并传统 Buck-Boost 拓扑以及均值 - 差值法进行对比仿真, 结果表明: 本文所采用的双层 Buck-Boost 均衡结构能够有效改善电池组不一致性问题, 模糊控制方法在保证均衡过程安全性的同时, 能够根据均衡状态实时调节均衡强度, 相较于同拓扑下传统均值 - 差值法(508 s)均衡时间约缩短 19.9%, 表现出更快的动态响应和更好的后期收敛能力。

综合分析可知, 双层 Buck-Boost 主动均衡拓扑与模糊控制策略的结合, 能够在兼顾均衡速度和电流约束的前提下, 提高电池组 SOC 一致性恢复效率, 验证了所提方案的可行性与有效性。后续研究可在本文工作的基础上, 进一步引入更精确的在线 SOC 估算方法、支路优先级调度机制以及电流闭环控制策略, 并结合实验平台开展硬件验证, 以进一步提升均衡控制精度、系统鲁棒性及工程应用价值。

基金项目

2025 年四川省高等学校创新性实验项目“汽车嵌入式系统设计系列创新实验”(川教函〔2025〕199 号); 西华大学 2025 年校级教育教学改革项目(产教融合专项)“基于产教融合的汽车构造类实验课教学改革”、“汽车嵌入式系统设计及应用 B”(西华行字〔2025〕86 号); 四川省本科高校应用型品牌课程“汽车嵌入式系统及应用 B”(川教函〔2025〕313 号)。

参考文献

- [1] 李佳娜. 基于电力调频的串联锂离子电池组均衡技术分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(3): 468-476.
- [2] Yuan, L., Ji, T. and Zhang, L. (2024) Active Methods for the Equalization of a Serially Connected Lithium-Ion Battery Pack: A Review. *Batteries*, **10**, Article 239. <https://doi.org/10.3390/batteries10070239>
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 杨扬, 谢长君, 朱文超. 退役锂电池梯次利用主动均衡方法研究[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(6): 51-56.
- [6] 任子豪, 田恩刚, 王立成, 等. 基于可重构电路的电池组充电均衡方法[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(5): 468-476.
- [7] 宋绍剑, 王志浩, 林小峰. 基于 SOC 的锂动力电池组双向主动均衡控制[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(3): 609-617.
- [8] 刘红锐, 杜广辉, 张浩. 基于双向 Buck-Boost 变换器的串联锂电池组均衡控制研究[J]. 电源技术, 2022, 46(6): 645-649.
- [9] Yang, Z. (2022) Development of an Active Equalizer for Lithium-Ion Batteries. *Electronics*, **11**, Article 2219. <https://doi.org/10.3390/electronics11142219>
- [10] 陈景文, 王磊, 张文娟. 基于模块化拓扑的串联锂离子电池组分层均衡方法[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(1): 75-82.
- [11] 郭永芳, 黄凯, 李志刚. 基于模糊逻辑控制的锂离子电池组均衡策略[J]. 电源技术, 2021, 45(12): 1580-1583.
- [12] Liao, L. and Chen, H. (2022) Research on Two-Stage Equalization Strategy Based on Fuzzy Logic Control for Lithium-Ion Battery Packs. *Journal of Energy Storage*, **50**, Article ID: 104321. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104321>
- [13] 王津, 王文斌. 基于 DC/DC 双向变换器的多电池主动均衡技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 41-45.
- [14] Cui, X., Shen, W., Zhang, Y. and Hu, C. (2017) A Fast Multi-Switched Inductor Balancing System Based on a Fuzzy Logic Controller for Lithium-Ion Battery Packs in Electric Vehicles. *Energies*, **10**, Article 1034. <https://doi.org/10.3390/en10071034>
- [15] Wu, T., Qi, Y., Liao, L., Ji, F. and Chen, H. (2021) Research on Equalization Strategy of Lithium-Ion Batteries Based on Fuzzy Logic Control. *Journal of Energy Storage*, **40**, Article ID: 102722. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102722>