



锂离子电池组分层均衡控制系统研究

李艳波¹, 赵一安¹, 卢盼², 常悦¹, 刘天喜³, 陈昊¹, 陈俊硕¹

(¹长安大学 能源与电气工程学院, 陕西 西安 710018; ²中铁长安重工有限公司, 陕西 西安 710032; ³河南交投新能源发展有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了解决传统的单层单电感均衡系统均衡效率低的问题, 提出了一种面向串联电池组的分层均衡系统。该系统基于开关电感型均衡拓扑构建内层均衡电路, 并在此基础上通过电感电容谐振电路实现组间各串联电池小组之间的能量转移, 同时借助电感缓冲电路减小开关管开断时对电池组的冲击。在此基础上以电池组中各电池的荷电状态作为均衡目标参数, 通过内、外层均衡电路分别进行电池组内和组间的均衡, 以实现各单体电池以及电池小组之间的均衡。通过Simulink进行仿真, 并与传统的单层单电感均衡系统进行对比。仿真结果表明, 分层均衡系统在电池组静置、充电和放电工况下的均衡效率分别提升了15.0%、14.5%和16.4%; 其中内层组内均衡方法可在3 s内完成小组内各单体电池的均衡, 而外层组间均衡方法在静置、充电及放电工况下, 针对电池组可在11 s内实现组间均衡。该系统能够有效实现电池组荷电状态的一致性均衡, 且有效地避免了传统单层单电感均衡系统在电池数量较大情况下均衡速度较慢的缺陷。

关键词: 锂离子电池; 不一致性; 主动均衡; 分层均衡; 荷电状态(SOC)

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0234

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-12

Research on layered equalization control system for lithium-ion battery packs

LI Yanbo¹, ZHAO Yian¹, LU Pan², CHANG Yue¹, LIU Tianxi³, CHEN Hao¹, CHEN Junshuo¹

(¹School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, Shannxi, China; ²China Railway ChangAn Heavy Industry CO., LTD, Xi'an 710032, Shannxi, China; ³Henan Jiaotou New Energy Development CO., Ltd, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: To address the low balancing efficiency of traditional single-layer single-inductor balancing systems, a hierarchical balancing system for series-connected battery packs is proposed. The system constructs an inner-layer balancing circuit based on a switched-inductor equalization topology. On this basis, an inductor-capacitor resonant circuit is adopted to achieve energy transfer among series-connected battery sub-modules, while an inductor buffer circuit is introduced to reduce the impact on the battery pack during switching transitions. Furthermore, with the state of charge (SOC) of individual batteries as the balancing target parameter, both the inner and outer balancing circuits perform intra-module

收稿日期: 2026-03-25; 修改稿日期: 2026-05-06。

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB1600200), 陕西省自然科学基金研究计划 (2025JC-YBMS-787), 河南交通投资集团有限公司科技项目 (HNJT2024-35) 和 (HNJT2024-36)。

第一作者: 李艳波 (1980—), 男, 博士, 教授, 从事交通能源融合, 智能微电网研究, E-mail: ybl@chd.edu.cn; 通信作者: 陈俊硕, 副教授, 从事电力计量仪表识别, 综合能源系统研究, E-mail: jsch@chd.edu.cn。

引用本文: 李艳波, 赵一安, 卢盼, 等. 锂离子电池组分层均衡控制系统研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.

Citation: LI Yanbo, ZHAO Yian, LU Pan, et al. Research on layered equalization control system for lithium-ion battery packs[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

and inter-module balancing, respectively, thereby achieving equilibrium among individual cells and battery sub-modules. Simulations were conducted in Simulink and compared with the conventional single-layer single-inductor balancing system. The results show that the hierarchical balancing system improves the balancing efficiency by 15.0%, 14.5%, and 16.4% under static, charging, and discharging conditions, respectively. Specifically, the inner-layer balancing method can complete the balancing of individual cells within a series-connected sub-module within 3 s, while the outer-layer inter-module balancing method achieves balancing within 11 s under static, charging, and discharging conditions. The proposed system effectively ensures SOC consistency across the battery pack and overcomes the slow balancing speed of traditional single-layer single-inductor systems when dealing with a large number of cells.

Keywords: lithium-ion battery; battery inconsistency; active equilibrium; hierarchical equalization; state of charge(SOC)

锂离子电池作为储能系统的核心能量载体,其单体电池因制造工艺、材料批次及工作环境差异而普遍存在不一致性问题,这一挑战在储能系统支撑电网调峰调频^[1]、可再生能源消纳^[2]和不间断电源^[3](UPS)等关键应用场景中尤为突出。这种不一致性主要体现在容量、电压、内阻以及老化速率等关键参数上^[4],不仅导致电池组可用容量迅速缩减、循环寿命大幅缩短,并在充放电过程中引发个别单体过充或过放,造成安全风险^[5],从而对电池管理系统^[6]的状态估计^[7]、均衡控制^[8]与热管理^[9-10]等提出了更高要求。

主动均衡技术^[11]通过电力电子器件实现电池间能量的精确转移,能有效提升系统性能和寿命,当前研究主要通过优化拓扑^[12]、简化控制^[13-14]以提升其速度与效率,并推动系统向集成化与智能化发展。传统均衡电路中电池组中的电池永久串联连接,只要有一个电池出现故障,就会导致整个电池组故障。为解决这一问题,Liu^[15]等人提出一种基于电感与反激变压器结合的退役锂电池分层均衡拓扑。该方案在组内通过改进Buck-Boost电路实现非相邻电池间直接均衡,组间利用变压器完成小组与整包能量交换,并采用LCD网络吸收网络抑制电压尖峰。研究同时引入考虑老化补偿的改进EKF算法及模糊逻辑控制,有效提升了均衡速度与精度。但该拓扑随电池数量增加时开关控制复杂度较高,且LCD参数设计对系统效率影响显著,实际应用时可能面临调试与成本压力。

Manjunath^[16]等提出一种基于改进Buck-Boost

变换器的内外双层模块化主动均衡拓扑该方案通过模块化结构降低开关电压应力,并利用较少元件同时均衡两个电池,有效提升了均衡速度。然而,其非相邻电池间均衡需分两步进行,一定程度上影响了均衡效率;且控制策略在应对复杂不一致性时可能面临适应性限制。实验表明,该拓扑可在约400秒内完成电池均衡,性能优于多种传统方案,但其电路结构与控制复杂度仍有优化空间。

因此为应对串联电池组不一致性问题,本文综合考虑电路复杂度、成本及均衡效率,提出一种分层主动均衡系统。该系统采用内外双层结构:内层基于电感实现电池小组内部的快速均衡;外层借助LC谐振电路进行小组间能量转移。并引入串联电感缓冲电路以提高可靠性。通过PWM控制开关通断,调节能量流动。此外,结合分时复用相邻开关的策略,增强了系统的可扩展性。

1 分层均衡电路的结构与运行方式

为了解决串联电池组因单体不一致所导致的性能衰减问题,本文在综合考虑电路复杂度、均衡效率等因素的基础上,提出了一种分层主动均衡系统。该系统针对串联锂离子电池组设计,采用内外双层均衡架构:内层均衡以电感作为储能元件,实现电池小组内部的快速均衡;外层均衡则基于LC谐振电路作为储能单元,完成电池小组之间的能量转移。为进一步提升系统可靠性,在电路中引入了串联电感缓冲电路。

系统通过PWM信号控制开关器件的通断,从

而调控电池小组内部及小组之间的能量流动。此外，通过采用分时复用模式控制相邻单体电池或电池小组之间的开关，有效减少了系统中开关元件的数量。这一设计不仅降低了均衡系统的硬件成本，也简化了控制逻辑，使电路结构更加简洁，并具有良好的可扩展性。

1.1 内层均衡电路的结构与工作原理

内层均衡电路采用开关电感型均衡拓扑，以单电感作为核心均衡单元。每个串联电池小组由 n 节单体电池构成。当进行组内均衡时，该电路通过电感的储能作用，能将荷电状态(SOC)较高的单体电池中的多余能量转移至SOC较低的单体电池。此拓扑结构支持任意两节单体电池之间的能量转移，从而有效提升了均衡效率。组内均衡电路的具体拓扑结构如图1(a)所示。

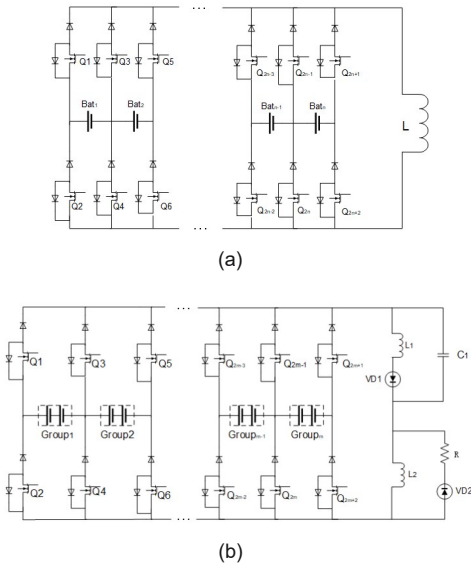


图1 内层和外层均衡拓扑: (a) 内层 (b) 外层
Fig. 1 Topology of the inner-layer and inter-group balancing circuit: (a) inner-layer (b) outer-layer

为便于描述，将串联电池小组中的单体电池依次标记为 Bat_1 、 Bat_2 、 $\dots$ 、 Bat_n 。为实现能量的双向转移，每个单体电池需配置4个MOSFET开关单元。通过采用分时复用模式复用相邻电池间的开关单元，可在确保均衡功能的前提下有效节约成本。因此，该均衡电路仅需使用 $2(n+1)$ 个MOSFET开关单元即可实现 n 节串联电池的均衡。这些开关单元依次标记为 Q_1 、 Q_2 、 $\dots$ 、 $Q_{2(n+1)}$ ，储能电感记为 L 。电路中集成的二极管提供续流路

径，防止开关关断时产生过电压，并确保能量转移的连续性。

本均衡电路以电池的荷电状态(SOC)作为均衡控制变量。通过实时监测并比较电池小组内各单体电池的SOC，系统产生PWM信号控制相应MOSFET开关单元快速导通与关断，从而实现能量从高SOC单体电池向低SOC单体电池的转移。

以一个由4节单体电池(Bat_1 至 Bat_4)构成的串联小组为例，假设其中 Bat_1 的SOC最低， Bat_4 的SOC最高。在此情形下，能量由 Bat_4 向 Bat_1 流动，其具体路径如图2所示。

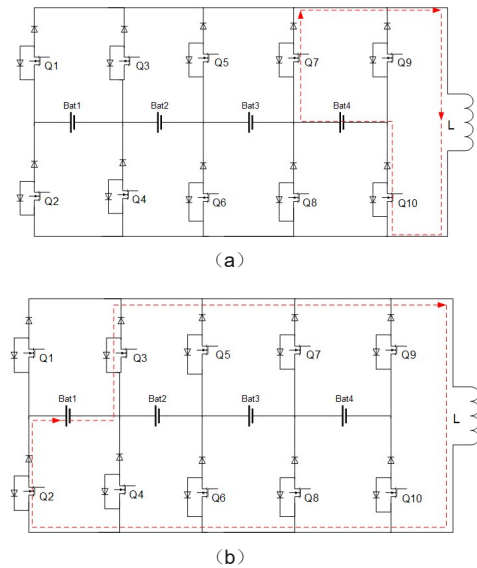


图2 组内均衡过程能量流动展示图: (a) Bat_4 放电阶段 (b) Bat_1 充电阶段

Fig. 2 Energy flow of the intra-group balancing process: (a) Discharge stage of BAT4 (b) Charge stage of BAT1

组内均衡过程包含 Bat_4 放电与 Bat_1 充电两个阶段。 Bat_4 放电阶段的能量流动如图2(a)所示。由于电池小组中 Bat_4 的SOC最高，控制开关单元 Q_7 与 Q_{10} 导通，使 Bat_4 向储能电感 L 放电，将部分能量储存于电感中。 Bat_1 充电阶段的能量流动如图2(b)所示。此时因 Bat_1 的SOC最低，导通开关单元 Q_2 与 Q_3 ，电感 L 中储存的能量通过开关电路向 Bat_1 转移，完成对其充电。当电池小组内最高SOC与最低SOC的差值低于设定阈值时，即判定组内均衡过程完成。

在 Bat_4 放电阶段，电感电流 i_L 从零开始呈线性增加，直至达到最大值 i_{Lmax} ，其表达式为：

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{B4}}{L} \quad (1)$$

$$i_{L\max} = \frac{V_{B4}}{L} DT \quad (2)$$

式中, D 为控制 MOSFET 开关单元的 PWM 控制信号的占空比, T 为 PWM 控制信号的周期, V_{B4} 为单体电池 Bat_4 的电压。

假设一个能量转移周期内 Bat_4 放电时间为 t_1 , 则在此期间电感电流 i_L 的增量 Δi_L 为:

$$\Delta i_L = \frac{V_{B4}}{L} t_1 \quad (3)$$

在 Bat_1 充电阶段, 电感电流 i_L 将从最大值开始呈线性减小, 直至电感电流 i_L 为 0, 此时一个组内均衡周期完成, 在此过程中电感 L 的电感电流 i_L 为 (式中, V_{B1} 为单体电池 Bat_1 的电压):

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_{B1}}{L} \quad (4)$$

1.2 外层均衡电路的结构与工作原理

外层均衡电路的储能电路由电感电容 (LC) 谐振电路与电感缓冲电路两部分构成。LC 谐振电路主要用于实现各串联电池小组之间的能量转移, 可将平均 SOC 较高的小组中多余能量转移至平均 SOC 较低的小组, 从而实现任意电池小组间的均衡。该电路中, 电容在 MOSFET 换流时为电感提供续流回路, 确保能量顺利转移。电感缓冲电路则用于抑制 MOSFET 开关切换时的电流突变, 减轻冲击电流对电池组的影响。组间均衡电路的整体拓扑如图 1(b) 所示。

将各串联电池小组依次标记为 $Group_1$ 、 $Group_2$ 、 $\dots$ 、 $Group_m$ 。与组内均衡类似, 每个小组需配置 4 个 MOSFET 开关单元以实现能量的双向传输。同样采用分时复用机制复用相邻小组之间的开关单元, 因此组间均衡电路仅需 $2(m+1)$ 个 MOSFET 开关即可完成 m 个小组间的均衡。为区别于第 1.1 节所述的组内均衡电路, 此处将组间均衡开关单元依次记为 M_1 、 M_2 、 $\dots$ 、 $M_{2(m+1)}$ 。其中, LC 谐振电路由电感 L_1 、电容 C_1 及二极管 VD_1 构成, 电感缓冲电路则由电感 L_2 、电阻 R 及二极管 VD_2 组成。

组间均衡以各串联电池小组的平均 SOC 作为均衡目标变量。系统实时监测每个单体电池的 SOC, 计算出各小组的平均 SOC 并进行比较。当平均 SOC 差值达到预设的均衡启动阈值时, 系统通过 PWM 信号控制相应 MOSFET 开关的导通与关

断, 实现能量从平均 SOC 最高的小组向平均 SOC 最低的小组转移。

以由 3 个串联电池小组构成的电池组为例, 假设 $Group_1$ 的平均 SOC 最低, $Group_3$ 的平均 SOC 最高。该情况下组间均衡的能量流动方向如图 3 所示。

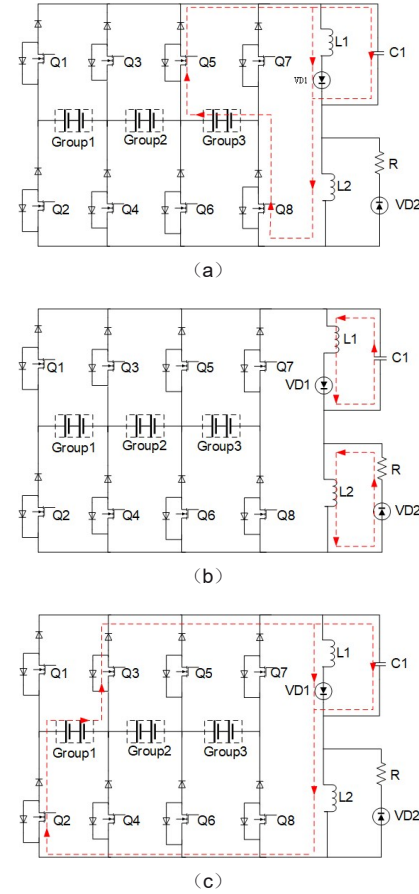


图3 外层均衡能量流动示意图:(a) $Group_3$ 的放电阶段 (b) 内部能量流动阶段 (c) $Group_1$ 的充电阶段

Fig. 3 Energy flow of the inter-group balancing process:(a)The discharge stage of $Group_3$ (b)Internal energy flow stage(c)The charging stage of $Group_1$

组间均衡过程分为三个阶段: $Group_3$ 放电阶段、储能电路内部能量流动阶段以及 $Group_1$ 充电阶段。

$Group_3$ 放电阶段的能量流动路径如图 4(a) 所示。由于 $Group_3$ 为平均 SOC 最高的电池小组, 此时导通开关单元 M_5 和 M_8 , 使 $Group_3$ 向储能电路释放能量, 同时电感 L_1 、 L_2 与电容 C_1 储存该部分能量。

储能电路内部能量流动阶段如图 4(b) 所示。此

阶段为开关切换的过渡过程，电容 C_1 为电感提供续流回路，维持能量连续传递；同时，缓冲电路有效抑制了 MOSFET 关断时引起的电流突变。

Group₁ 充电阶段的能量流动如图 4(c) 所示。Group₁ 作为平均 SOC 最低的电池小组，导通开关单元 M_2 和 M_3 后，电感 L_1 和 L_2 中储存的能量通过开关电路向 Group₁ 转移，完成对其充电。

当电池组内平均 SOC 最高与最低的电池小组之间的 SOC 差值低于设定阈值时，即判定组间均衡完成。

为在均衡过程中获得良好效果并避免电感磁饱和，电路应工作在电流断续模式。因此，需合理选择 PWM 占空比与电感峰值电流，以确保均衡电路高效运行，降低能量损耗。

当高能电池小组 Group_i 放电时，电感电流值增加，假设 MOSFET 开关单元均为理想开关，忽略导通内阻，电感峰值电流为：

$$I_{L,max} \approx \frac{DT \frac{L_1}{L_1 + L_2} U_i}{L_1} = \frac{DTU_i}{L_1 + L_2} \quad (5)$$

其中，由于电感缓冲电路与储能电路串联，两者共同分压。另外 L_1 与 L_2 分别为储能电感与缓冲电感。式(5)中， D 为驱动 MOSFET 开关的 PWM 信号占空比， T 为均衡控制周期， U_i 为电池小组 Group_i 的端电压，其计算方法如下：

$$U_i = \sum_{j=1}^n U_j \quad (7)$$

式中， U_j 为电池小组 Group_i 中第 j 个单体电池的电压。

在开关切换时间 t_s 内，缓冲电路通过电阻 R 与二极管 VD_2 构成续流回路。对该缓冲电路应用基尔霍夫定律可得：

$$L_2 \frac{dI_R}{dt} + I_R R = 0 \quad (8)$$

式中， I_R 为流过电阻 R 的电流。代入初始条件，求解该微分方程可得：

$$R = \frac{L_2}{t_s} \ln \frac{I_{L,max}}{I_R} \quad (9)$$

在对低能量电池小组进行充电的控制开关导通期间，电感电流呈线性下降，该段时间记为 Δt ，可近似表示为：

$$\Delta t \approx DT \quad (10)$$

低能量电池小组对应开关关断后存在一段死区时间 t_d 。为保障均衡电路工作在电流断续模式，需

满足：

$$T = DT + t_s + \Delta t + t_d \geq 2DT + \pi \sqrt{L_1 C_1} + t_d \quad (11)$$

综合上述分析，驱动 MOSFET 开关的 PWM 信号占空比最小值 D_{min} 为：

$$D_{min} = \frac{(1 - D)T - \pi \sqrt{L_1 C_1}}{T} \quad (12)$$

占空比最大值 D_{max} 为：

$$D_{max} = \frac{(1 - D)T - 2t_d}{T} \quad (13)$$

因此，驱动 MOSFET 开关的 PWM 信号占空比 D 应满足约束条件： $D_{min} < D < D_{max}$

2 分层主动均衡电路的控制策略

目前，国内外学者在均衡一致目标参数的选取上，主要围绕电池电压^[17]、荷电状态^[18] (SOC)、能量状态^[19] (SOE) 以及功能状态^[20] (SOF) 等展开研究。其中，SOE 与 SOF 的计算较为复杂，相关技术尚处于发展阶段；而电池电压虽易于直接测量，但其固有误差较大，不利于实现高精度均衡。综合考量计算复杂度与参数估计精度等因素，在内层组内均衡中选取电池 SOC 作为均衡一致目标参数。针对 SOC 的估计^[18]，采用扩展卡尔曼滤波^[21] (EKF) 算法，其中规定放电电流为电流正方向、充电电流为负方向^[22]，旨在保障估计准确度的同时，提升均衡系统的整体工作效率。

2.1 内层均衡控制策略

组内均衡控制采用极值均衡策略，其流程如图 4(a) 所示。首先设定组内均衡启动阈值 α ，实时采集各单体电池的电流与电压数据，并基于扩展卡尔曼滤波算法估计各单体电池的 SOC。将 SOC 最高的电池记为 Bat_{max} ，SOC 最低的电池记为 Bat_{min} 。比较二者 SOC 差值与阈值 α ，若差值大于 α ，则触发均衡过程：导通相应 MOSFET 开关，将 Bat_{max} 中的多余能量通过储能单元转移至 Bat_{min} 。该过程持续进行，直至所有单体电池的 SOC 差值均小于设定阈值，此时判定组内均衡完成。

2.2 外层均衡控制策略

组间均衡控制采用平均值-差值比较策略，具体流程如图 4(b) 所示。首先设定组间均衡阈值 β ，并采集各电池小组中单体电池的电流与电压数据。利用扩展卡尔曼滤波算法估计各单体电池的 SOC，进而计算各电池小组的平均 SOC。确定平均 SOC

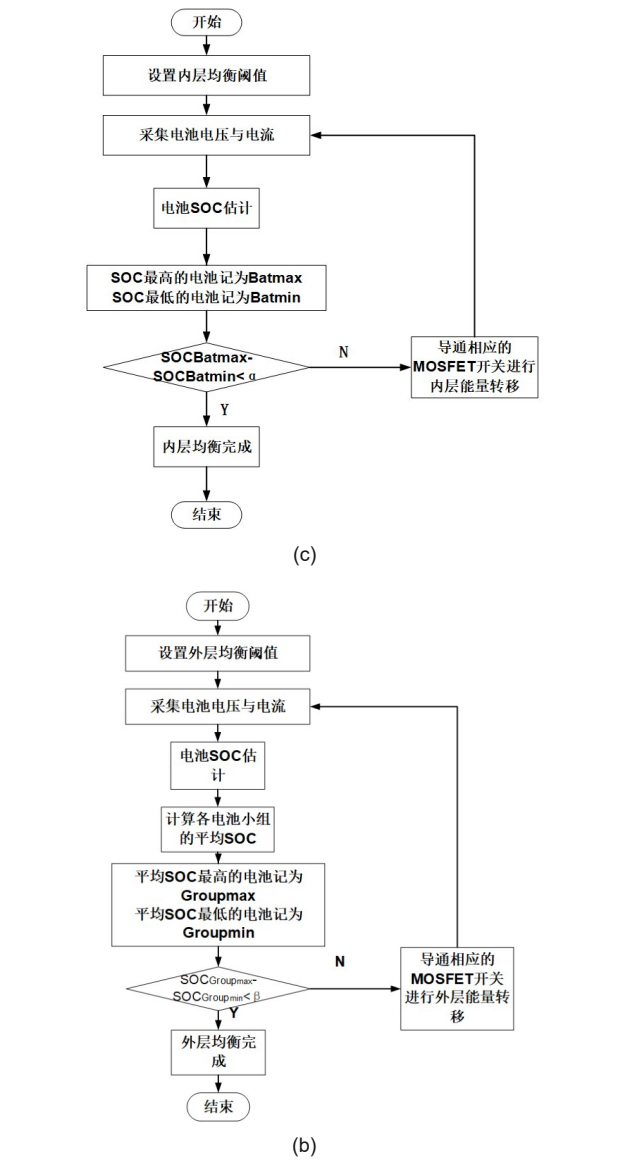


图4 内层和外层均衡控制策略流程图:(a)内层 (b)外层
Fig. 4 Flowchart of the intra-group and inter-group balancing control strategy:(a)inner-layer (b)outer-layer

最高的电池小组 $Group_{max}$ 和最低的电池小组 $Group_{min}$ 后, 比较二者平均 SOC 差值与阈值 β 。若该差值大于 β , 则触发均衡机制: 导通相应的

MOSFET 开关, 将 $Group_{max}$ 中的多余能量通过储能电路转移至 $Group_{min}$ 。该过程持续进行, 直至各电池小组间的平均 SOC 差值均低于设定阈值, 此时判定组间均衡完成。

电池小组的平均 SOC 是外层均衡的关键决策依据, 第 i 个电池小组由 n 个单体电池构成, 其平均 SOC 的计算公式为 (式中, SOC_i 为第 i 个电池小组中第 j 个单体电池的 SOC):

$$SOC_{avg,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n SOC_j \tag{15}$$

3 仿真实验与分析

为验证所提出的分层主动均衡方法的可行性, 在 Simulink 中搭建了仿真模型。模型由 12 节锂离子电池构成, 分为 3 个串联电池小组, 每组 4 节电池。

电池额定电压为 3.6 V, 额定容量为 2.4 A·h, MOSFET 开关频率设为 2 kHz。在仿真平台中, Powergui 模块设置为离散模式, 采样时间设为 1μs, 所有仿真起始时间均为 0, 结束时间根据各仿真场景的复杂度进行相应调整。求解器选用 VariableStepAuto。仿真验证模型的基本参数设置详见表 1。

为清晰标识电池, 将第 i 个电池小组中的第 j 节电池编号标记为 ij 。各单体电池的初始 SOC 状态如表 2 所示。

表1 仿真实验模型参数表

Table 1 Parameters of the simulation verification model

参数	数值	参数	数值
电池容量/A·h	2.4	电阻 R/mΩ	3
电池电压/V	3.6	内层均衡 PWM 占空比	0.5
内层储能电感 L/mH	250	外层均衡 PWM1、PWM2 占空比	0.3
外层电感 L_1 、 L_2 /mH	5	开关频率/kHz	2
电容 C_1 /μF	1	组内和组间均衡阈值 α 和 β	0.0001

表2 单体电池初始 SOC

Table 2 Initial SOC of individual battery cells

电池编号	11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	33	34
SOC/%	60.00	60.03	60.06	60.09	60.20	60.23	60.26	60.29	60.40	60.43	60.46	60.49

3.1 内层均衡电路仿真及其分析

设定内层均衡的 PWM 控制信号占空比为 0.5, 周期为 0.5 ms, 其波形如图 8(b)或图 9(b)所示。均

衡电路在高电平阶段执行高能量电池的放电过程, 在低电平阶段执行低能量电池的充电过程。

为验证系统极限性能, 设置组内均衡启动阈值

$\alpha=0.0001$ ，并以串联电池小组1在静置状态下的均衡过程为例，分析组内均衡的具体工作特性（在使用EKF算法估算SOC的过程中，规定放电电流为正）。该电池小组内各单体电池的SOC变化曲线如图5所示。

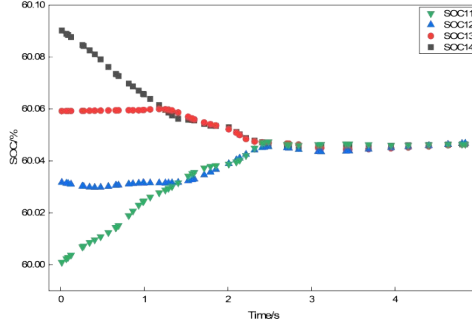


图5 串联电池小组的静置均衡
Fig. 5 SOC variations of individual battery cells during intra-group balancing

串联电池小组在静置状态下的均衡过程可分为以下四个阶段：

第1阶段 ($0 < t < 1.28 \text{ s}$)：在组内均衡初始阶段，SOC最高的单体电池Bat14向储能电感放电，将多余能量储存于电感中，随后转移至SOC最低的单体电池Bat11。此过程中，Bat14的SOC下降，Bat11的SOC上升。Bat12与Bat13在该阶段未参与均衡，其SOC保持不变。

第2阶段 ($t = 1.28 \text{ s}$)：此时，Bat14与Bat13之间的SOC差值、Bat11与Bat12之间的SOC差

值均低于设定的组内均衡阈值。小组内出现两个最高SOC电池 (Bat13、Bat14) 和两个最低SOC电池 (Bat11、Bat12)。系统同时导通相应的MOSFET开关，为多对电池间的能量转移做准备。

第3阶段 ($1.28 \text{ s} < t < 2.59 \text{ s}$)：所有单体电池均参与组内均衡。Bat13与Bat14作为SOC最高的电池同时向电感放电，储存的能量随后转移至SOC最低的电池Bat11和Bat12。该阶段中，Bat13与Bat14的SOC同步下降，Bat11与Bat12的SOC同步上升。

第4阶段 ($t = 2.59 \text{ s}$)：电池小组内所有单体电池的SOC极差降至设定阈值以下，达到均衡一致目标，组内均衡过程结束。

由于Bat11与Bat14在整个均衡过程中持续参与能量转移，其对应的MOSFET开关 Q_7 、 Q_{10} 与 Q_2 、 Q_3 始终呈现高低电平交替的PWM信号。当 $t = 2.59 \text{ s}$ 组内均衡完成后，上述开关均进入关断状态，控制信号维持低电平。

均衡电路设计为在高电平期间执行高能量电池的放电操作，在低电平期间执行低能量电池的充电操作，因此开关单元 Q_7 、 Q_{10} 与 Q_2 、 Q_3 的控制信号呈高低电平互补关系。具体而言，在前半个PWM周期内， Q_7 和 Q_{10} 处于高电平，完成电池14的放电过程；在后半个PWM周期内， Q_2 和 Q_3 切换至高电平，完成电池11的充电过程。该高低电平交替的开关规律适用于所有参与均衡的高SOC电池放电开关及低SOC电池充电开关。

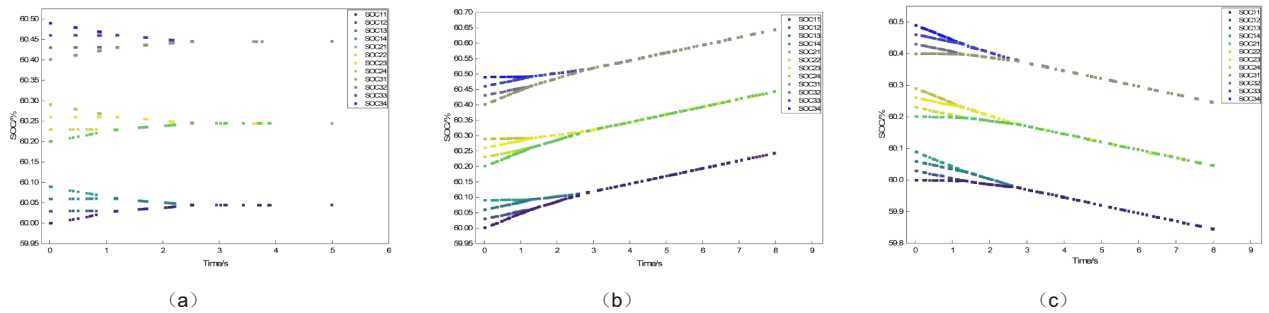


图6 内层均衡电路的多工况均衡:(a)静置均衡 (b)充电均衡 (c)放电均衡

Fig. 6 Multi-scenario balancing control of internal layer equalization circuit: (a)Static equilibrium (b)Charging equilibrium (c)Discharging equilibrium

为全面验证均衡性能，分别在静置、充电及放电三种工况下进行测试。三种状态下的组内均衡结果分别如图6所示。仿真结果表明，本文所提出的

内层组内均衡方法在静置、充电与放电状态下均能有效工作，可在3秒内高效完成串联电池小组内各单体电池的均衡。

3.2 外层均衡电路仿真及其分析

设定组间均衡启动阈值 $\beta=0.0001$ ，电池组各单体电池的初始SOC值仍采用表2所示数据。根据式(13)计算得到三个串联电池小组的平均SOC分

别为 $SOC_{avg,1}=60.045\%$ 、 $SOC_{avg,2}=60.245\%$ 、 $SOC_{avg,3}=60.445\%$ 。以电池组处于静置状态为例，对组间均衡过程进行具体分析。各串联电池小组平均SOC随时间的变化曲线如图7(a)所示。

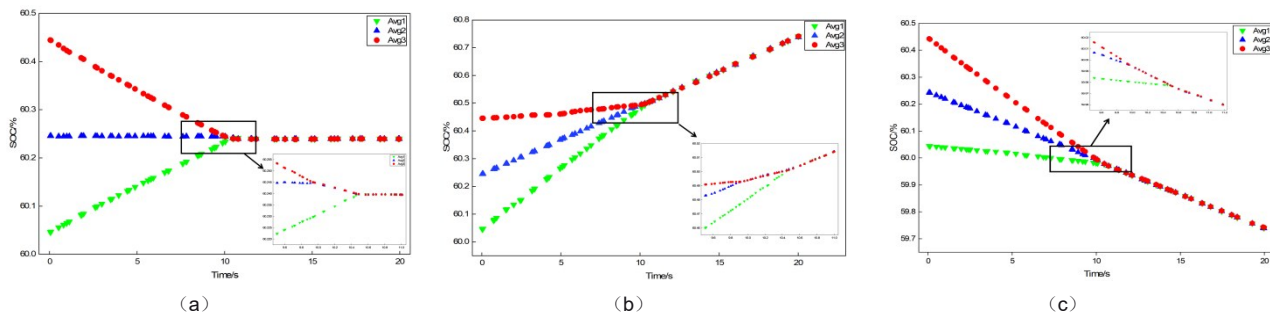


图7 外层均衡电路的多工况均衡:(a)静置均衡 (b)充电均衡 (c)放电均衡

Fig. 7 Multi-scenario balancing control of external layer equalization circuits:(a)Static equilibrium (b)Charging equilibrium (c)Discharging equilibrium

静置状态下，外层均衡过程可分为以下四个阶段：

第1阶段 ($0\text{ s} < t < 9.96\text{ s}$)：均衡初始阶段，平均SOC最高的电池小组 Group_3 向储能电路放电，多余能量经储能电路转移至平均SOC最低的电池小组 Group_1 。此过程中， Group_3 的平均SOC下降， Group_1 的平均SOC上升。电池小组 Group_2 在该阶段未参与均衡，其平均SOC保持不变。

第2阶段 ($t = 9.96\text{ s}$)：此时， Group_3 与 Group_2 的平均SOC差值已低于设定的组间均衡阈值，系统判定存在两个最高平均SOC小组 (Group_2 与 Group_3)。相应的MOSFET开关同时导通，为后续多组间能量转移做准备。

第3阶段 ($9.96\text{ s} < t < 10.49\text{ s}$)：所有电池小组均参与组间均衡。平均SOC最高的 Group_2 与 Group_3 同时向储能电路放电，所储存的能量转移至平均SOC最低的 Group_1 。该阶段中， Group_2 与 Group_3 的平均SOC同步下降， Group_1 的平均SOC持续上升。

第4阶段 ($t = 10.49\text{ s}$)：电池组中各串联电池小组的平均SOC极差降至设定阈值以下，达到均衡一致目标，组间均衡过程结束。

为进一步验证均衡性能，分别在充电状态与放电状态下进行外层均衡测试，其外层均衡结果分别如图7(b)与图7(c)所示。仿真结果表明，所提出的外层组间均衡方法在静置、充电及放电三种工况

下，均能有效实现电池组内各串联电池小组间的均衡。

3.3 分层均衡仿真结果分析

为验证本文所提出的分层均衡系统在正确性与高效性方面的表现，分别在静置、充电及放电三种工况下对该系统进行仿真验证，并与传统的单层单电感均衡系统进行对比。传统均衡系统采用最大值均衡策略，即直接将SOC最高的电池中的多余能量转移至SOC最低的电池。

以静置状态下的分层均衡系统为例，说明其均衡过程：各单体电池SOC的变化如图8(a)所示，各串联电池小组平均SOC的变化如图8(b)所示。

静置状态下的分层均衡过程可分为以下五个阶段：

第1阶段 ($0\text{ s} < t < 1.35\text{ s}$)：均衡开始时，电池组存在较显著的组间与组内不一致性。组间均衡方面，能量通过储能电路从平均SOC最高的 Group_3 转移至平均SOC最低的 Group_1 ，导致 Avg_3 下降、 Avg_1 上升， Group_2 暂未参与均衡， Avg_2 保持不变。组内均衡同步进行，各电池小组中SOC最高的单体电池（分别为Bat14、Bat24、Bat34）向同组SOC最低的电池（Bat11、Bat21、Bat31）转移能量。在内外均衡协同作用下，Bat34处于快速放电状态，Bat11处于快速充电状态。

第2阶段 ($1.35\text{ s} < t < 2.94\text{ s}$)：此时各电池小组内部相邻电池对（如Bat11与Bat12、Bat13与

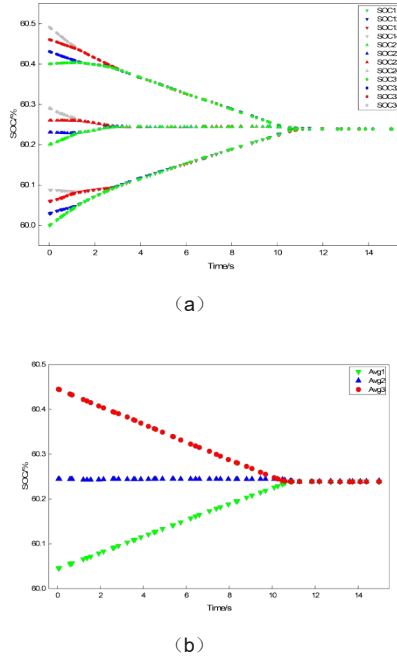


图8 分层均衡电路静置工况的多尺度均衡分析: (a) 单体电池视角 (b) 串联电池小组视角

Fig. 8 Multi-level balancing analysis of the hierarchical circuit under static condition: (a) Single-cell battery perspective (b) Perspective of the Series Battery Group

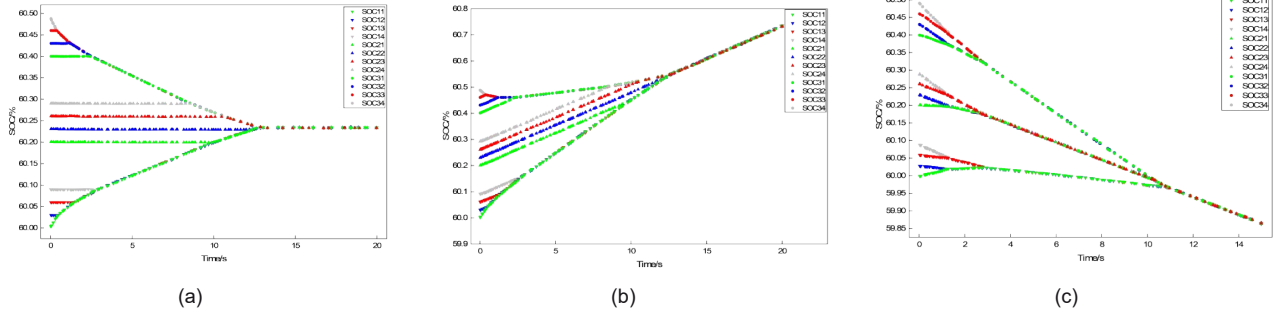


图9 传统单层均衡电路静置、充电和放电均衡: (a) 静置 (b) 充电 (c) 放电

Fig. 9 SOC variations of individual battery cells during traditional single-layer balancing under static, charging and discharging condition: (a) static (b) charging (c) discharging

在开关频率、初始SOC、采样时间等参数保持一致的前提下,传统单层单电感均衡系统在静置状态下完成电池组均衡所需时间为12.75 s,而本文提出的新型分层均衡系统仅需10.84 s即可完成均衡,均衡速度较传统方法提升了15.0%。分层均衡系统在充电状态下各单体电池SOC的变化曲线如图10(a)所示,各串联电池小组平均SOC的变化曲线如图10(b)所示。

Bat14等)的SOC差值均已低于组内均衡阈值,组内均衡模式切换为: Bat13与Bat14向Bat11与Bat12转移能量, Bat23与Bat24向Bat21与Bat22转移能量, Bat33与Bat34向Bat31与Bat32转移能量。组间均衡状态与上一阶段保持一致。

第3阶段 ($2.94\text{ s} < t < 10.26\text{ s}$): 所有电池小组内部单体电池SOC差值均低于组内均衡阈值,组内均衡结束。组间均衡继续进行, Group₁整体处于充电状态 (SOC上升), Group₃整体处于放电状态 (SOC下降), Group₂仍维持原有SOC不变。

第4阶段 ($10.26\text{ s} < t < 10.84\text{ s}$): Group₃与Group₂的平均SOC差值低于组间均衡阈值,此时组间均衡转为Group₂与Group₃共同向Group₁转移能量。Avg2与Avg3同步下降, Avg1持续上升,各小组内单体电池SOC也相应变化。

第5阶段 ($t = 10.84\text{ s}$): 所有串联电池小组的平均SOC差值均低于组间均衡阈值,组间均衡结束。此时电池组内各单体电池SOC差异均小于设定阈值,系统达到均衡一致目标。

传统单层单电感均衡系统在静置状态下的仿真结果如图9(a)所示。

由于组内均衡与组间均衡同步进行,串联电池小组Group₁的整体充电速度最快,其内部各单体电池的SOC上升速率也最高; Group₂次之; Group₃的充电速度最慢,相应单体电池SOC的上升速率也最低。在均衡初始阶段,单体电池34同时参与组内与组间放电过程,因此其SOC呈现下降趋势。

传统单层单电感均衡系统在充电状态下各单体

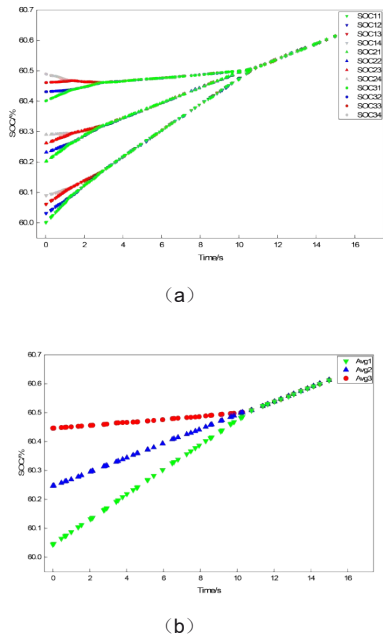


图10 分层均衡电路充电工况的多尺度均衡分析:(a) 单体电池视角 (b) 串联电池小组视角

Fig. 10 Multi-level balancing analysis of the hierarchical circuit under charging condition:(a) Single-cell battery perspective (b)Perspective of the Series Battery Group

电池 SOC 的变化情况如图 9(b)所示。在充电状态下，传统单层单电感均衡系统完成均衡所需时间为 12.67 s，而本文提出的分层均衡系统仅需 10.83 s，均衡速度较传统方法提升了 14.5%。

分层均衡系统在放电状态下各单体电池 SOC 的变化曲线如图 11(a)所示，各串联电池小组平均 SOC 的变化曲线如图 11(b)所示。

在放电均衡过程中，组内与组间均衡同时进行。各小组放电速度依次为 $\text{Group}_3>\text{Group}_2>\text{Group}_1$ ，其单体电池 SOC 下降速率亦相应递减。均衡初期，单体电池 11 同时参与组内与组间充电，因此其 SOC 呈现上升趋势。在此状态下，传统单层单电感均衡系统的均衡时间为 12.99 s（各单体 SOC 变化见图 9(c)），而本文提出的分层均衡系统仅需 10.86 s，均衡速度提升 16.4%。两种系统在三种状态下的均衡耗时及速度提升率汇总于表 3。

仿真结果表明，本文提出的分层均衡系统在单体与小组层面均表现出良好的均衡性能。内层组内均衡方法在静置、充电与放电工况下，均可在 3 秒内实现串联电池小组内各单体电池的快速均衡；外

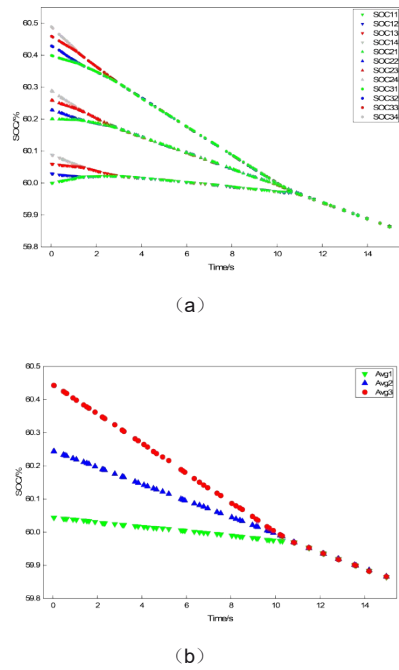


图11 分层均衡电路放电工况的多尺度均衡分析:(a) 单体电池视角 (b) 串联电池小组视角

Fig. 11 Multi-level balancing analysis of the hierarchical circuit under discharging condition:(a) Single-cell battery perspective (b)Perspective of the Series Battery Group

表3 仿真验证结果对比

Table 3 Comparison of simulation results

仿真条件	传统单层单电感均衡系统耗时/s	新型分层均衡系统耗时/s	速度提升率/%
静置	12.75	10.84	15.0
充电	12.67	10.83	14.5
放电	12.99	10.86	16.4

层组间均衡方法在相同工况下，可有效完成不同电池小组间的能量转移。如表 3 所示，与传统单层单电感系统相比，本系统在静置、充电及放电状态下的均衡时间分别缩短至 10.84 s、10.83 s 与 10.86 s，均衡速度相应提升了 15.0%、14.5% 与 16.4%，验证了所提系统在多种工况下的高效性与稳定性。

4 结论与未来展望

本文提出了一种面向串联电池组的分层均衡系统，该系统以荷电状态一致为目标，小组内电池单体 SOC 的极差作为内层均衡的启动条件、各电池小组平均 SOC 的极差作为外层均衡的启动条件，通过内层和外层均衡电路分别实现组内和组间均

衡，最终使各单体电池及电池小组之间均达到均衡。为验证系统性能，在 Simulink 上构建了仿真模型，并与传统单层单电感均衡系统进行对比。结果表明：该系统在静置、充电及放电工况下的均衡效率分别提升 15.0%、14.5% 和 16.4%。通过同步实现单体和电池小组层面的均衡，该系统在均衡效率与速度方面的性能得到了显著提升，为串联电池组的工程应用提供了有效技术支撑。

尽管本文提出的分层主动均衡拓扑及控制策略在仿真环境中验证了其在静置和恒流工况下的有效性，但在面向更广泛的工程应用时，仍有以下几个关键方向值得进一步深入研究：

(1) 考虑电池老化特性的自适应均衡策略研究：本文的均衡控制参数是基于电池全生命周期初期的特性设定的。然而，随着电池循环次数的增加，电池的单体容量衰减与内阻增大，会加剧电池组的不一致性，这将直接影响 SOC 估算精度及均衡效果。未来的研究将引入电池健康状态估算，建立老化参数与均衡阈值的动态映射关系。通过在线辨识电池老化状态，实时修正等效电路模型参数及均衡控制阈值，以确保系统在电池老化过程中的长期可靠性。

(2) 复杂动态工况与宽温域环境下的鲁棒性验证：本文的验证基于恒流充放电及静置工况，尚未涵盖实际应用中更为复杂的动态环境。未来的工作将重点考察系统在电流剧烈波动条件下的鲁棒性。此外，考虑到温度对电池电化学特性及功率器件性能的显著影响，后续研究计划构建电热耦合模型，并在高低温环境箱中开展实验，评估均衡系统在宽温度范围内的适应能力，以推动该均衡系统从理论仿真向实际工程应用的转化。

(3) 均衡阈值优化与多目标性能权衡研究：本文采用的均衡阈值 (0.01%) 主要面向算法收敛性验证，但在实际工程中，阈值的选择将直接影响均衡速度、能量损耗和均衡精度。未来研究将系统探究不同阈值对上述性能指标的定量影响规律。具体而言，将在硬件在环 (HIL) 测试平台上，结合实际电池管理系统的采样分辨率限制，量化分析阈值参数与均衡完成时间、累积能量损耗及 SOC 极差之间的关系。在此基础上，构建阈值自适应调节机制，实现均衡效率与精度的最佳折中，为工程化参数配置提供依据。

参考文献

- [1] MIMI S, BEN MAISSA Y, TAMTAOUI A. A Control Strategy for Peak Shaving and Frequency Regulation Considering Battery Degradation Under Time of Use Pricing[C]//2023 IEEE PES/IAS PowerAfrica. 2023: 1-5.
- [2] WU T H, KUO S W, HUNG C K. Research on Active Balancing Technology for Energy Distribution in Battery Energy Storage Systems[C]//2025 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). 2025: 1-3.
- [3] SUN Z, LI F, LI X, et al. An SOC Balancing Control Scheme for Parallel Modularized UPS Moduels Based on Partial Power Converter[C]//2025 International Conference on New Power System Technology (PowerCon). 2025: 1-5.
- [4] 刘帅邦, 叶佳俊, 李金翰, 等. 锂离子电池生产与服役过程缺陷问题研究综述[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(03).
Liu Shuaibang, Ye Jiajun, Li Jinhan, et al. A Review of Defect Issues in Lithium-Ion Battery Production and Service Process[J]. Global Energy Interconnection, 2025, 8(03).
- [5] 杨凯, 杨晓光, 王文伟, 等. 锂离子电池电化学-热-力多物理场耦合建模综述[J]. 电源技术, 2025, 49(05).
Yang Kai, Yang Xiaoguang, Wang Wenwei, et al. A Review of Electrochemical-Thermal-Mechanical Multiphysics Coupling Modeling for Lithium-Ion Batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(05).
- [6] XIA B, LI Y, ZHANG G, et al. A double-layer ring-structured equalizer for series-connected lithium-ion battery pack based on model predictive control[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 78: 110047.
- [7] Shreasth, OOI C A, KHAN N, et al. Active cell equalization for lithium-ion battery packs in electric vehicles using state of power estimation with convolutional neural network[J]. Energy Conversion and Management: X, 2025, 27: 101100.
- [8] GUO X, CHEN G, ZHAO L, et al. Systematic overview of equalization methods for battery energy storage systems[J]. Journal of Power Sources, 2025, 640(01): 236766.
- [9] ZHONG M, CHEN Y. A critical review of thermal management systems for lithium-ion batteries[J]. Ionics, 2025, 31(10): 10011-10031.
- [10] TOGUN H, BASEM A, JWEEG M J, et al. Sustainable cooling solutions for lithium-ion battery thermal management[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2025, 150(25): 20433-20479.
- [11] LI H, OOI C A, JIA Z, et al. A review of active cell balancing methods in electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management: X, 2025, 28: 101244.
- [12] LUO L, WANG J, ZHOU Y, 等. Topology, Modeling, and Optimization of Switched-Capacitor Equalizer Based on Multiplexing Technology for Multiple Battery Strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(8): 11452-11466.
- [13] CHATZINIKOLAOU E, ROGERS D J. Hierarchical Distributed Balancing Control for Large-Scale Reconfigurable AC Battery

- Packs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(7).
- [14] AL-SMADI M K, ABU QAHOUC J A. Evaluation of Current-Mode Controller for Active Battery Cells Balancing With Peak Efficiency Operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1610-1621.
- [15] LIU G, MA L, WANG Y, et al. Hierarchical equalization scheme for retired lithium-ion battery packs based on inductor-flyback transformer[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100: 113505.
- [16] MANJUNATH K, KALPANA R, SINGH B. A Two-Stage Module Based Cell-to-Cell Active Balancing Circuit for Series Connected Lithium-Ion Battery Packs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(04).
- [17] DIVYA T, Umayal C, VASAN PRABHU V. A hybrid GTOA-DRN approach based active cell voltage balancing of electric vehicle batteries using PID controller[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113095.
- [18] WANG S, JIN S, CAO Z, et al. Critical review of model-based and data-driven methods for accurate battery state of charge estimation in new energy vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2026, 679: 240163.
- [19] LI J, WANG X, TIAN D, et al. Multi-scale synergistic estimation of state of charge and state of energy for lithium-ion batteries via seasonal-trend decomposition and hybrid neural networks[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 159: 121723.
- [20] SHEN P, OUYANG M, LU L, et al. The Co-estimation of State of Charge, State of Health, and State of Function for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 92-103.
- [21] BREGLIO L, FIORELLISI A, GASPERINI G, et al. A Model-Based Strategy for Active Balancing and SoC and SoH Estimations of an Automotive Battery Management System[J]. Modelling, 2024, 5(3): 911-935.
- [22] KIM G, LEE S, CHUN S, et al. Analysis of battery lifespan improvement with SOC battery balancing technique[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 137: 118543.