

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614879

改进型 EKF 状态观测的锂电池组分层 模块化均衡控制策略研究*

周鹏程¹, 郑 永², 陈 艳¹, 郭 爽¹

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054; 2. 重庆理工大学机械工程学院 重庆 400054)

摘 要:针对锂电池组主动均衡过程中存在的状态观测精度不足与能量调度效率受限问题,提出一种改进扩展卡尔曼滤波(EKF)的分层模块化均衡控制策略。系统底层由改进型 Buck-Boost 多路径均衡电路构成模块内均衡网络,实现相邻及非相邻电池之间的直接能量传输;顶层由双向 Flyback 均衡电路及开关矩阵构成模块间均衡网络,实现模块与整组电池之间的能量交互;同时以 EKF 估计的荷电状态(SOC)为均衡判据,引入模糊比例-积分-微分调节器,实现模块内与模块间的分层并行协同控制,从而提升系统整体均衡效率。针对开路电压(OCV)-SOC 曲线在平台区灵敏度下降导致观测误差增大的问题,在 EKF 中引入平台修正系数 G ,对观测增益进行自适应调节,以提高 SOC 估计精度。实验结果表明,所提均衡策略的 SOC 估计最大误差为 2.9%,均方根误差为 0.86%,较传统 EKF 分别降低 35.7% 和 36.8%;与基于 Buck-Boost 及 Flyback 均衡电路的比例-积分-微分控制策略相比,静态工况下均衡时间缩短 37.1%,在 1C 充电与放电工况下分别缩短 58.66% 和 60%,动态响应性能显著提升。为兼顾实时性与工程可实现性,采用海市蜃楼优化算法对修正系数 G 进行离线优化并构建查找表,在 TMS320F28335 平台上通过查表方式实现在线计算,单次控制周期耗时 0.32 ms,仅占 10 ms 控制周期的 3.2%。所提策略在提高 SOC 估计精度的同时显著提升均衡效率,为锂电池管理系统测控一体化设计提供了一种具有工程应用价值的实现路径。

关键词: 扩展卡尔曼滤波;模糊 PID 控制;分层控制;锂电池组;主动均衡

中图分类号: TH-39 TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80 470.40

Hierarchical modular equalization control strategy for lithium-ion battery packs with improved EKF state observation

Zhou Pengcheng¹, Zheng Yong², Chen Yan¹, Guo Shuang¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: To address the issues of insufficient state observation accuracy and limited energy scheduling efficiency during the active equalization of lithium-ion battery packs, a hierarchical modular equalization control strategy based on an improved extended Kalman filter (EKF) is proposed. The system consists of an intra-module equalization network constructed from multiple improved Buck-Boost multi-path equalization circuits at the bottom layer, enabling direct energy transfer between adjacent and non-adjacent cells, and an inter-module equalization network formed by a bidirectional Flyback equalization circuit and a switch matrix at the top layer, facilitating energy exchange between modules and the entire battery pack. Taking the state of charge (SOC) estimated by the EKF as the equalization criterion, a fuzzy proportional-integral-derivative regulator is introduced to achieve hierarchical parallel coordinated control within and between modules, thereby improving the overall equalization efficiency of the system. To address the problem of increased observation errors caused by decreased sensitivity of the open-circuit voltage (OCV) - SOC curve in the plateau region, a plateau correction coefficient G is introduced into the EKF to adaptively adjust the observation gain, thereby enhancing SOC estimation accuracy. Experimental results show that the proposed equalization strategy achieves a maximum SOC estimation error of 2.9% and a root mean square error of 0.86%, which are 35.7% and 36.8% lower than those of the traditional EKF, respectively. Compared with the

收稿日期: 2026-01-21 Received Date: 2026-01-21

* 基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJZD-M202301104) 资助

proportional-integral-derivative control strategy based on Buck-Boost and Flyback equalization circuits, the equalization time under static conditions is reduced by 37.1%, and under 1C charging and discharging conditions, it is reduced by 58.66% and 60%, respectively, with significantly improved dynamic response performance. To balance real-time performance and engineering feasibility, the Fata Morgana algorithm is employed to optimize the correction coefficient G offline and construct a lookup table. Online computation is achieved through table lookup on the TMS320F28335 platform, with a single control cycle time of 0.32 ms, accounting for only 3.2% of the 10 ms control cycle. The proposed strategy significantly enhances equalization efficiency while enhancing SOC estimation accuracy, providing a viable implementation path with engineering application value for the integrated measurement and control design of lithium-ion battery management systems.

Keywords: extended Kalman filter; F-PID control; hierarchical control; lithium-ion battery pack; active equalization

0 引言

为抑制锂电池单体不一致性对系统性能的影响,需在电池管理系统中引入均衡机制。现有均衡技术主要包括被动均衡与主动均衡两大类。被动均衡通过电阻消耗多余能量以实现一致性,虽结构简单、成本较低,但能量利用率低且热损耗显著。主动均衡则借助电容、电感、变压器或 Buck-Boost、Ćuk、SEPIC 等变换器拓扑实现电池间能量转移^[1-14],可有效降低损耗并提升系统效率,更适用于高性能应用场景。在已有研究中,电容型均衡方法^[1-2]在电压差较小时均衡速率明显下降,动态响应能力受限;电感型均衡方案^[3-4]减少了磁性器件数量,但仍需额外开关器件实现电池与电感的切换;变压器型均衡结构^[7-8]因多绕组设计导致电路复杂且成本较高。其中,基于 Buck-Boost 变换器的均衡结构因拓扑对称、控制成熟而广泛应用于单体到单体的均衡场景^[9-10],但其能量交换路径受限,难以实现跨单体的直接传输。上述均衡方法在电池节数较多的长串系统中,扩展性与均衡效率均面临一定限制。为此,分层模块化均衡思想被引入,将长电池串划分为多个均衡模块,在模块内与模块间分别实施均衡控制。部分学者为每个模块配置独立变压器^[15],但存在体积与成本较高的问题;另有研究采用 LLC 变换器^[16],虽提升传输效率,却显著增加了控制系统的复杂度。

此外,在电池均衡控制过程中,电池荷电状态 (state of charge, SOC) 的准确估计是实现精准均衡调节的关键测量变量^[17]。若 SOC 估计误差较大,均衡控制策略将难以正确识别电池组内部的能量分布状态,从而降低均衡效率,甚至可能引起能量误调度问题。扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 凭借其对于非线性系统的高精度状态估计能力以及对测量噪声和外部扰动的鲁棒性,已在工业测控系统中得到广泛应用^[18-20]。因此,将 EKF 的 SOC 估计与均衡控制进行协同设计,对于提升电池管理系统的测量与控制性能具有重要意义。

为解决锂电池组主动均衡控制中状态观测精度不足与能量调度效率受限的问题,提出一种改进 EKF 状态观

测的分层模块化均衡控制策略。主要创新包括:1) 观测与控制融合,将 EKF 状态观测器与模糊比例-积分-微分 (fuzzy proportional-integral-derivative, F-PID) 控制器协同设计;2) 多路径能量调度,改进底层 Buck-Boost 电路,实现相邻及非相邻单体直接能量交换;3) 分层协同控制,构建底层多路径均衡与顶层双向 Flyback 相协同的并行控制架构;4) 工程优化,采用海市蜃楼算法 (fata morgana algorithm, FATA) 离线优化并构建查找表,通过数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 查表法实现实时计算。

1 电路结构及均衡原理

1.1 均衡电路结构

本文提出的分层模块化均衡电路如图 1 所示,由底层改进型 Buck-Boost 多路径模块内均衡电路和顶层双向 Flyback 模块间均衡电路构成。

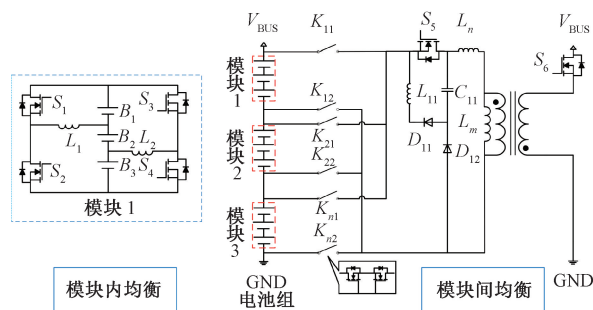


图1 分层模块化均衡电路

Fig. 1 Hierarchical modular equalization circuit

在底层,电池组被划分为 n 个电池模块,每个模块包含 3 节电池、2 个电感以及 4 个金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)。与传统 Buck-Boost 电路不同,本文通过优化电感连接方式和开关配置,使能量不仅可在相邻电池间传递,还可通过 L_1 或 L_2 实现非相邻电池间的直接能量交换,从而形成多路径能量传输网络。在顶层,模块间均衡电路由开关矩阵和双向 Flyback 变压器组成。开关矩

阵将需要均衡的模块连接至 Flyback 变压器的一次侧,二次侧则连接到整个电池组,实现模块与整组电池之间的双向能量传输。

1.2 改进型 Buck-Boost 多路径均衡原理

本文对传统 Buck-Boost 电路的关键改进为:通过双电感结构和优化的开关逻辑,使能量可在模块内任意两节电池之间直接传输,无论其是否相邻,都大幅缩短了均衡路径。

1) 相邻电池间的电荷转移,均衡工作原理分为 4 种不同的情况: $B_1 > B_2$ 且 $B_1 > B_3$ 、 $B_2 > B_1$ 且 $B_3 > B_1$ 、 $B_1 > B_3$ 且 $B_2 > B_3$ 和 $B_3 > B_1$ 且 $B_3 > B_2$ 。 V_{B_1} 、 V_{B_2} 和 V_{B_3} 分别为电池 B_1 、 B_2 和 B_3 的电压, L_1 和 L_2 为电感, i_{L_1} 和 i_{L_2} 为电感电流,通过比较 3 个电池电压,对电路进行分析。

当 $B_1 > B_2$ 且 $B_1 > B_3$,一个开关周期的均衡过程分为两个模式。

模式 1: S_1 导通,单体 B_1 对电感 L_1 放电,均衡电流回路如图 2(a)所示,初始时刻 L_1 电流为 0,充电电流逐渐增加,达到期望值时, S_1 断开,第 1 阶段结束;

设电池 B_1 放电过程对应的控制占空比为 D_1 ,电感 L_1 电流为:

$$i_{L_1}^+ = \frac{V_{B_1}}{L_1} t \quad (1)$$

一个控制周期内电感最大电流 $I_{L_1 \max}$ 为:

$$I_{L_1 \max} = \frac{V_{B_1}}{L_1} D_1 T \quad (2)$$

根据最大均衡电流与选定的开关频率可得电感 L_1 的取值为:

$$L_1 = \frac{V_{B_1}}{I_{L_1 \max} f} D_1 \quad (3)$$

模式 2:电感 L_1 对单体电池 B_2 、 B_3 充电,此过程无需控制任何开关管, L_1 通过 S_2 的续流二极管对 B_2 、 B_3 充电,均衡电流回路如图 2(b)所示, L_1 电流逐渐降低至 0,第 2 阶段结束。

设 $t = T_1$ 时电感电流降为 0,此阶段电感电流为:

$$i_{L_1}^- = \frac{V_{B_1}}{L_1} D_1 T - \frac{V_{B_2} + V_{B_3}}{L_1} (t - D_1 T), D_1 T \leq t \leq T_1 \quad (4)$$

为保证一个控制信号周期内电感能够复位,需要满足 $T_1 < T$,即:

$$\frac{V_{B_1}}{L_1} D_1 T - \frac{V_{B_2} + V_{B_3}}{L_1} (T - D_1 T) < 0 \quad (5)$$

进一步推导可得式(6),式(6)可作为占空比 D_1 的设计依据。

$$D_1 < \frac{V_{B_2} + V_{B_3}}{V_{B_1} + V_{B_2} + V_{B_3}} \quad (6)$$

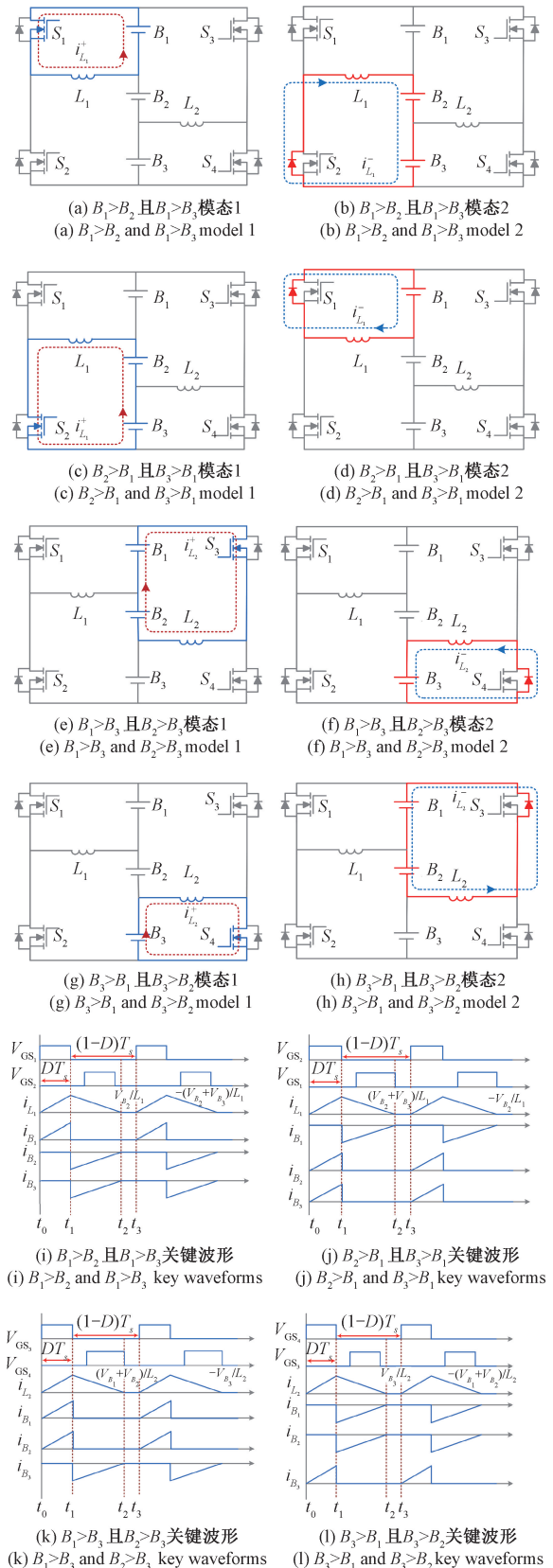


图2 模块内相邻电池均衡原理及关键波形图、均衡电流

Fig. 2 Principle of intra-module equalization for adjacent batteries, key waveforms, and equalization

类似地,在图2(c)~(1)中分别呈现了 $B_2 > B_1$ 且 $B_3 > B_1$ 、 $B_1 > B_3$ 且 $B_2 > B_3$ 和 $B_3 > B_1$ 且 $B_3 > B_2$,对应的均衡原理及关键波形。

2) 非相邻电池间的电荷转移,在这种情况下,分为 $B_2 > B_1$ 且 $B_2 > B_3$ 和 $B_1 > B_2$ 且 $B_3 > B_2$ 。

当 $B_2 > B_1$ 且 $B_2 > B_3$, B_2 放电均衡,一个开关周期的均衡过程分为两个模态。

模态1: B_1 、 B_2 向 L_1 充电, B_2 、 B_3 向 L_2 充电,初始时刻 L_1 、 L_2 电流为0,使 S_2 、 S_3 导通,均衡电流回路如图3(a)所示, L_1 、 L_2 电流逐渐增加,达到期望值时, S_2 、 S_3 断开,第1阶段结束。

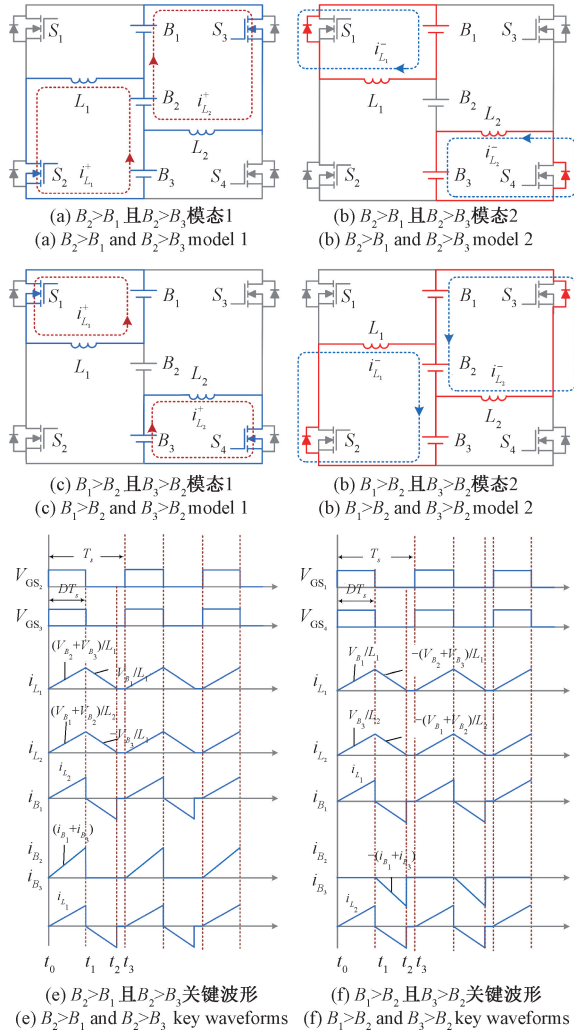


图3 模块内非相邻电池均衡原理及关键波形图、均衡电流
Fig. 3 Principle of intra-module equalization for non-adjacent batteries, key waveforms, and equalization

模态2: L_1 通过 S_1 的续流二极管对 B_1 充电, L_2 通过 S_4 的续流二极管对 B_3 充电,均衡电流回路如图3(b)所示, L_1 、 L_2 电流逐渐降至0,第2阶段结束。

设均衡电感充电过程对应的控制信号占空比为 D_5 ,则与式(4)同理可得:

$$\begin{cases} D_5 < \frac{V_{B_1}}{V_{B_1} + V_{B_2} + V_{B_3}} \\ D_5 < \frac{V_{B_3}}{V_{B_1} + V_{B_2} + V_{B_3}} \end{cases} \quad (7)$$

类似地,在图3(c)~(f)中分别呈现了 $B_2 > B_1$ 且 $B_2 > B_3$ 和 $B_1 > B_2$ 且 $B_3 > B_2$,对应的均衡原理及关键波形。

1.3 模块间均衡工作原理

模块间均衡电路通过双向反激变压器连接到电池模块和整个电池组。该电路结构简单,动态响应快,可实现电气隔离和双向能量传递。变压器采用单磁芯单原边绕组结构,并通过开关矩阵选择需要进行能量调节的目标模块。与同轴多绕组结构相比,该方案避免了不必要的副边绕组及其相关硬件配置,从而简化了磁性器件设计,提高了系统可靠性。

均衡过程可分为升压(Boost)模式和降压(Buck)模式两种工作状态。在Boost模式下,能量从平均SOC高于整组平均SOC的模块向电池组转移,其工作过程如图4(a)所示。当模块 B_{m_1} 的SOC较高时,开关 K_{11} 、 K_{12} 及 S_5 导通,励磁电感 L_m 开始储能;当 S_5 关断后, L_m 两端

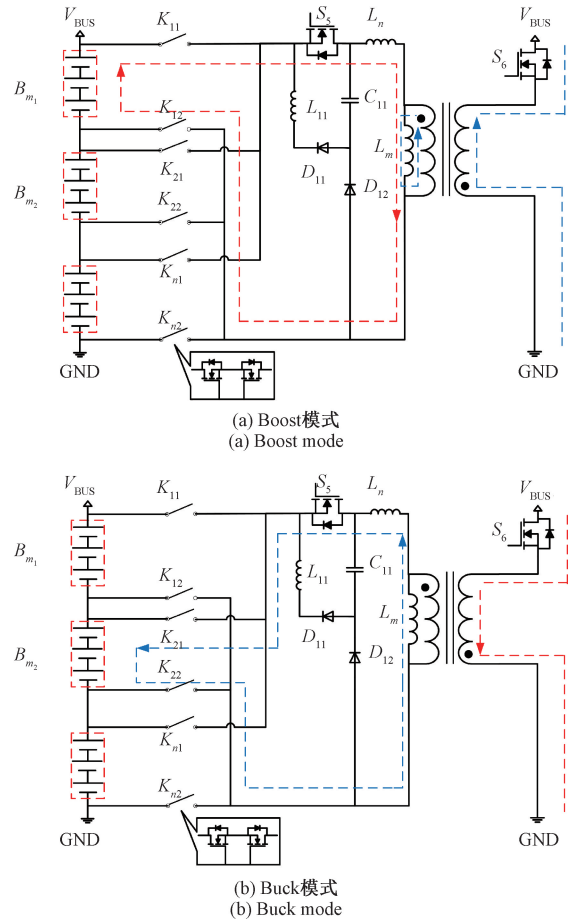


图4 模块间均衡电路

Fig. 4 Inter-module equalization circuit

电压极性反转,使 S_6 的体二极管导通,储存的能量经副边释放至电池组,实现模块向电池组的能量传输。

在 Buck 模式下(图 4(b)),由电池组向 SOC 较低的模块补偿能量。当 S_6 、 K_{21} 及 K_{22} 导通时,能量存储于副边励磁回路中;当 S_6 关断后,变压器感应电压使电流经 S_5 的体二极管流入目标模块,从而完成由电池组向模块的能量转移过程。

2 改进 EKF 的分层模块化均衡控制策略

2.1 基于改进 EKF 的 SOC 状态观测器

本文以锂电池 SOC 为被控变量,采用 EKF 实现 SOC 在线精确估计。针对电池在中高区间开路电压(open-circuit voltage,OCV)-SOC 曲线斜率减小导致观测灵敏度下降的问题,引入平台修正系数 G ,动态调节增益。改进 EKF 的状态更新方程可表示为后验形式:

$$\mathbf{x}(k|k) = \mathbf{x}(k|k-1) + \mathbf{G}\mathbf{K}(k)\mathbf{Z}(k) - \mathbf{G}\mathbf{K}(k)\mathbf{H}\mathbf{x}(k|k-1) \quad (8)$$

其中, G 为平台修正系数。当电池工作于非平台区时, $G=1$;在平台区内 $0<G<1$, G 会自适应调节以修正电压观测权重,从而提高 SOC 估计精度。不同 G 值下的 SOC 估计结果如图 5(a) 所示,对应估计误差如图 5(b) 所示。结果表明,当 $G=0.3$,可显著提升 SOC 估计性能。

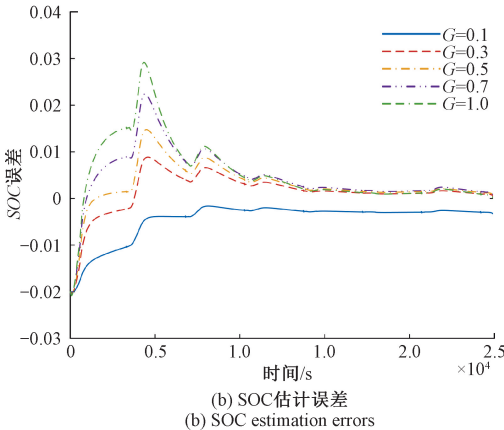
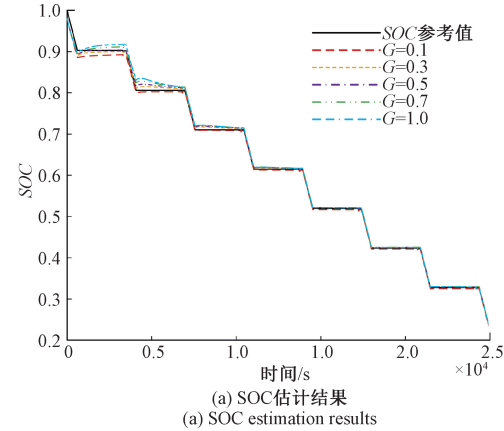


图 5 不同 G 取值条件下的对比结果
Fig. 5 Comparison under different values of G

此外,本文采用 FATA 算法对参数 G 进行自适应优化,与遗传算法和粒子群优化相比,FATA 在处理复杂非线性优化问题方面表现出更高的收敛能力与稳定性。为了验证所提 EKF 算法的有效性,在 MATLAB 和 Simulink 中建立了电池 SOC 估计模型。与传统 EKF 比较(图 6),改进 EKF 在整个电压平台区的估计结果更接近参考值,最大误差降低约 35.7%,均方根误差降低约 36.8%,显示出较好的精度与鲁棒性。

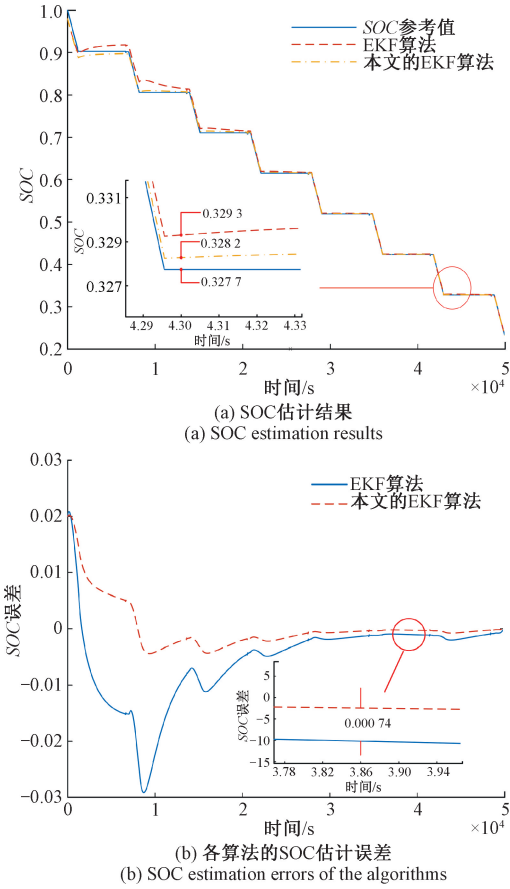


图 6 不同算法对比结果

Fig. 6 Comparison of different algorithms

2.2 分层控制策略

本文采用分层控制架构实现模块内与模块间的协同均衡,为简化锂电池组均衡控制并提升系统动态性能,本文在均衡控制中引入了 F-PID。以 EKF 估计的 SOC 偏差和平均值作为输入,输出脉宽调制(pulse width modulation,PWM) 占空比,驱动底层和顶层电路执行能量转移。

1) 分层控制逻辑

底层控制:当模块内 SOC 极差大于阈值 φ_1 时,触发模块内均衡。采用 F-PID 算法,根据各单体 SOC 偏差决策能量传输路径(相邻或非相邻)和 PWM 占空比,驱动对应 MOSFET 开关实现多路径能量转移。

顶层控制:当模块间平均 SOC 偏差大于阈值 φ_2 时,触发模块间均衡。根据模块平均 SOC 与整组平均 SOC 的偏差, F-PID 决策能量转移方向和强度,通过开关矩阵选通目标模块,由双向 Flyback 变换器执行能量传输。

2) 控制流程

本文提出的分层模块化均衡控制流程为:

(1) 采集各单体电池端电压 V_i 和电流 I_i 。

(2) 采用 EKF 算法在线估计各单体 SOC_i 。

(3) 计算模块的平均 $SOC_{ave,m}$ 及模块间的最值 $SOC_{max,m}$ 、 $SOC_{min,m}$, 各模块内平均 SOC_{ave} 以及模块内电池的最值 SOC_{max} 、 SOC_{min} 的值。

(4) 模块内和模块间均衡并行判断。检查各模块内 SOC 极差是否满足 $|SOC_{max} - SOC_{min}| \leq \varphi_1$; 检查各模块间 SOC 的偏差是否满足 $|SOC_{max,m} - SOC_{min,m}| \leq \varphi_2$ 。若同时满足上述两个条件,则认为电池组已达到一致状态,均衡结束;否则进入流程(5)。

(5) 若模块内判断不满足:对相应模块执行底层控制(模块内均衡)。F-PID 控制器根据各单体 SOC 偏差决策多路径能量调度方案(相邻直接传输或非相邻通过双电感传输),生成 PWM 信号驱动对应 MOSFET 开关。若模块间判断不满足:执行顶层控制(模块间均衡),通过开关矩阵选通目标模块, F-PID 控制器生成 PWM 信号驱动双向 Flyback 变换器执行能量传输。模块内均衡与模块间均衡可同时并行执行,互不干扰。

(6) 返回流程(1),进入下一控制周期。

(7) 当所有模块内和模块间偏差均在阈值范围内时,均衡过程结束。

3 实验验证

3.1 仿真与分析

为验证所提出分层多路径模块化均衡拓扑及其 SOC 控制策略的有效性,基于 MATLAB/Simulink 搭建由 9 节串联锂电池组成的电池组模型,选取 SOC 标准差 σ 和均衡时间 t 作为性能指标,其中较短的 t 表示更快的均衡速度,较小的 σ 表示电芯一致性更高:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SOC_i - SOC_{ave})^2} \quad (9)$$

其中, SOC_i 为第 i 个电芯的荷电状态, SOC_{ave} 为所有电芯的平均 SOC, n 为电芯总数。本文选取两组初始 SOC 分布进行比较,并在静态、充电和放电条件下,将所提的分层模块化均衡控制策略与近年来提出的基于底层 Buck-Boost、顶层双向 Flyback 均衡拓扑的 PID 控制均衡策略进行仿真对比。

在静态均衡测试中,如图 7 与表 1 所示,图 7 中曲线分别为 9 个电池的 SOC 随时间的变化情况。所提均衡策略

实现了模块内与模块间的完全均衡,总耗时约 303.2 s,平均 SOC 从 72% 调整至 71.02%,标准差由 5.16% 降至 0.8%。而对照均衡控制策略需 482.5 s 才能完成均衡,最终平均 SOC 为 71.16%,标准差为 1.4%。在相同条件下,所提均衡策略缩短均衡时间 37.1%,均衡收敛速度更快。这主要得益于本文改进型 Buck-Boost 电路采用 3 节电池构成模块,较对照策略的 2 节电池模块具有更高的底层均衡效率,减少了顶层所需均衡的模块数量,另外 F-PID 控制根据 SOC 偏差动态调节参数,响应更精准,进一步加快收敛,从而提升了整体均衡速度。

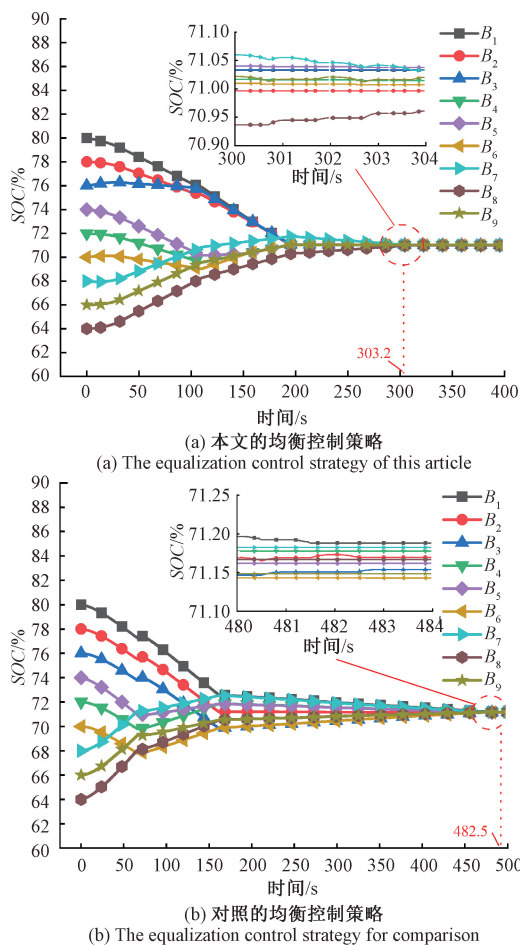


图 7 静态均衡过程中 SOC 变化情况

Fig. 7 SOC variation during static equalization

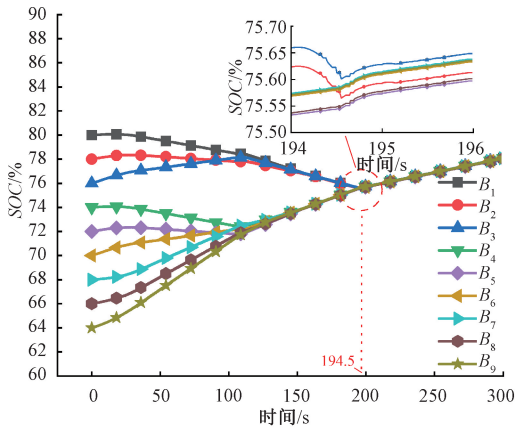
为进一步验证锂电池组分层模块化均衡控制策略,本文进行了 1C 充电均衡测试。如图 8 与表 2 所示,图 8 中曲线分别为 9 个电池的 SOC 随时间的变化情况。所提的均衡控制策略在 1C 条件下完成均衡所需时间为 194.5 s,平均 SOC 升至 75.59%,标准差降至 1.1%。相比之下,对照的均衡控制策略需 482.5 s,平均 SOC 为 82.22%,标准差为 2.1%。因此,所提的均衡控制策略更高效,总体均衡时间缩短 58.66%。

表 1 静态状态下各单体电池均衡前后 SOC 对比
Table 1 SOC before and after equalization of each cell in static state (%)

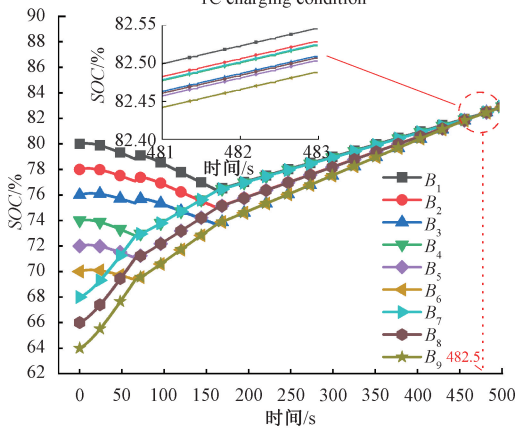
电池	初始 SOC	对照均衡后 SOC	本文均衡后 SOC
B_1	80	71.18	71.03
B_2	78	71.16	71.02
B_3	76	71.15	71.03
B_4	72	71.17	71.01
B_5	74	71.16	71.03
B_6	70	71.14	71.01
B_7	68	71.18	71.03
B_8	64	71.16	71.02
B_9	66	71.14	71.02
平均值	72	71.16	71.02
标准差	5.16	1.40	0.80

表 2 充电状态下各单体电池均衡前后 SOC 对比
Table 2 SOC before and after equalization of each cell in the charged state (%)

电池	初始 SOC	对照均衡后 SOC(1C)	本文均衡后 SOC(1C)
B_1	80	82.25	75.60
B_2	78	82.23	75.59
B_3	76	82.21	75.60
B_4	74	82.23	75.59
B_5	72	82.21	75.59
B_6	70	82.19	75.58
B_7	68	82.23	75.59
B_8	66	82.21	75.56
B_9	64	82.19	75.58
平均值	72	82.22	75.59
标准差	5.16	2.10	1.10



(a) 在1C充电条件下，本文的均衡控制策略
(a) The proposed equalization control strategy under 1C charging condition

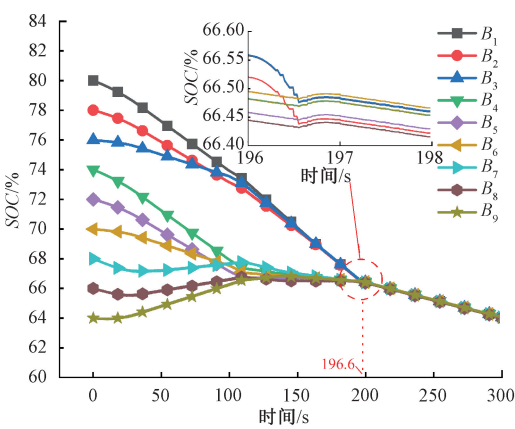


(b) 在1C充电条件下，对照的均衡控制策略
(b) The equalization control strategy for comparison under 1C charging condition

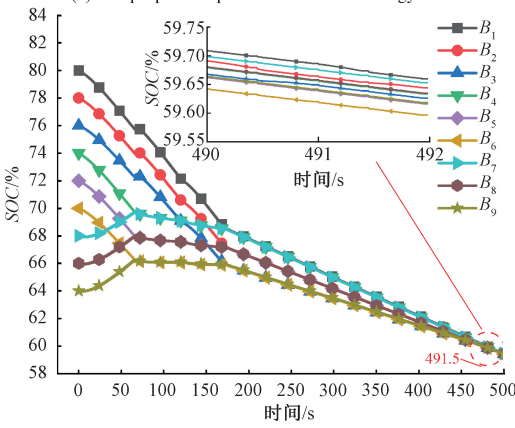
图 8 充电均衡过程中 SOC 变化情况

Fig. 8 SOC variation during charging equalization

在 1C 放电均衡中,如图 9 与表 3 所示,图 9 中曲线分别为 9 个电池的 SOC 随时间的变化情况。所提的均衡控制策略在 196.6 s 内完成均衡,平均 SOC 从 72%降



(a) 在1C放电条件下，本文的均衡控制策略
(a) The proposed equalization control strategy under 1C



(b) 在1C放电条件下，对照的均衡控制策略
(b) The equalization control strategy for comparison

图 9 放电均衡过程中 SOC 变化情况

Fig. 9 SOC variation during discharging equalization

至 66.47%,标准差降至 1%。而对照的均衡控制策略则需 491.5 s,平均 SOC 为 59.64%,标准差为 1.5%。在相同放电条件下,所提的均衡控制策略均衡时间缩短 60%,显示出更优的动态均衡能力和环稳定性。

表 3 放电状态下各单体电池均衡前后 SOC 对比
Table 3 SOC before and after equalization of each cell in the discharged state (%)

电池	初始 SOC	对照均衡后 SOC(1C)	本文均衡后 SOC(1C)
B_1	80	59.67	66.47
B_2	78	59.65	66.45
B_3	76	59.63	66.47
B_4	74	59.64	66.48
B_5	72	59.63	66.46
B_6	70	59.62	66.48
B_7	68	59.63	66.47
B_8	66	59.64	66.45
B_9	64	59.63	66.47
平均值	72	59.64	66.47
标准差	5.16	1.50	1.00

3.2 硬件实验验证

1) 实验平台搭建

为验证改进型 EKF 状态估计的锂电池组分层模块化均衡控制策略的工程可行性,构建了基于 TMS320F28335(主频 150 MHz)的主动均衡实验平台,如图 10 所示。该平台采用改进 EKF 离线参数辨识实现单体 SOC 在线估计,并通过分层控制策略与 PWM 驱动实现模块内及模块间均衡。实验采用 9 节额定容量 2.6 Ah 的锂电池串联,每 3 节构成一个均衡子模块。模块间双向 Flyback 变换器匝比设为 1 : 2,原边励磁电感 $L_p = 27\ \mu\text{H}$,副边电感 $L_s = 110\ \mu\text{H}$,原副边绕组均采用线径 2 mm 的铜线绕制。系统开关频率设定为 10 kHz,以满足磁性器件效率、控制实时性及多通道同步采样需求。考虑到改进 EKF 算法的理论可行性已通过仿真验证,结合

硬件成本与工程实施可行性,本文对平台修正系数 G 采取离线优化和在线查表的工程实现方案:在 MATLAB 环境中对不同 SOC 区间进行离线优化,构建 G 值查找表;在 DSP 中根据当前 SOC 实时查表获取 G 值。该方案在保证估计精度的同时,可有效满足实验平台的实时性要求。

2) 计算复杂度分析

对主要计算模块进行复杂度分析。搭建的 9 节电池系统,每个控制周期(100 Hz)需完成以下计算任务:16 通道数据采样与预处理约需 200 次浮点运算;EKF 状态观测器单次迭代约需 7 800 次浮点运算,主要包括状态预测、误差协方差预测、卡尔曼增益计算及状态更新;F-PID 控制约需 700 次浮点运算;均衡调度与逻辑判断约需 250 次浮点运算。单周期总计算量约为 8 950 次浮点运算。TMS320F28335 主频 150 MHz,浮点运算能力约 30~50 MFLOPS,理论执行时间 0.18~0.30 ms。实测单周期耗时 0.32 ms,与理论值基本吻合,远小于 10 ms 控制周期,充分证明 TMS320F28335 主控芯片满足算法计算要求。

3) 模块内均衡实验结果与分析

模块内均衡在不同初始 SOC 分布条件下,设置 6 种典型 SOC 组合进行实验验证,初始状态与均衡结果如图 11 所示。

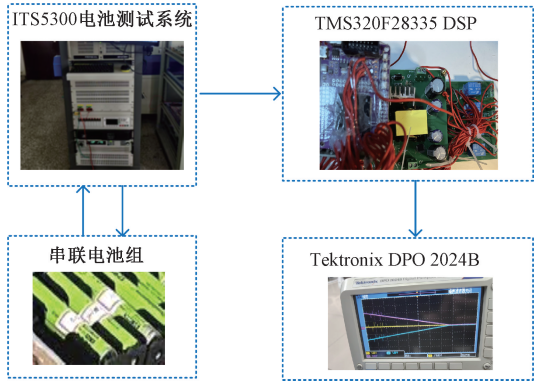
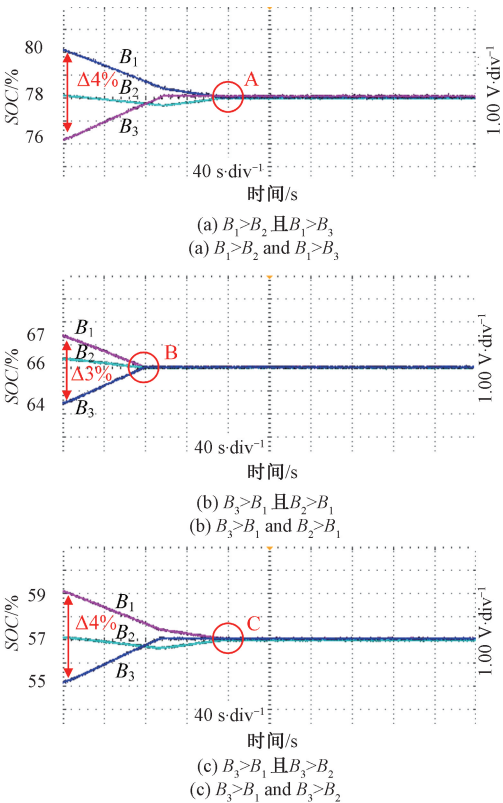


图 10 实验装置布置示意图
Fig. 10 Experimental setup



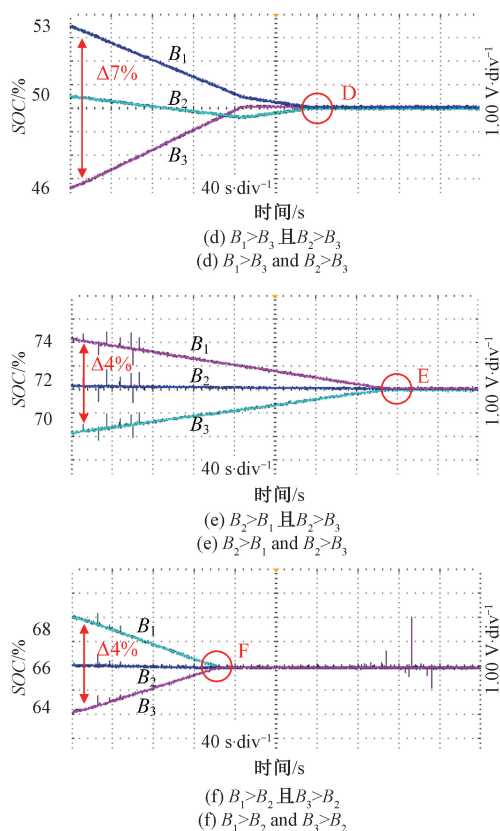


图11 模块内均衡实验结果

Fig. 11 Experimental results of the intra-module balancing

情况1: $B_1 > B_2$ 且 $B_1 > B_3$, 初始 SOC 极差为4%, B_1 同时向 B_2 与 B_3 传输能量, 在 A 点 $t = 154.65$ s 时 SOC 收敛至均衡, 如图 11(a) 所示。

情况2: $B_3 > B_1$ 且 $B_2 > B_1$, 初始 SOC 差为3%, B_2 与 B_3 共同对 B_1 进行能量补偿, 在 B 点 $t = 80.3$ s 时 SOC 收敛至均衡, 如图 11(b) 所示。

情况3: $B_3 > B_1$ 且 $B_3 > B_2$, 初始 SOC 差为4%, B_3 同时向 B_1 与 B_2 转移能量, 在 C 点 $t = 154.9$ s 时 SOC 收敛至均衡, 如图 11(c) 所示。

情况4: $B_1 > B_3$ 且 $B_2 > B_3$, 初始 SOC 差为7%, 电池 B_1 与 B_2 放电, 在 D 点 $t = 154.65$ s 时 SOC 收敛至均衡, 如图 11(d) 所示。

情况5: $B_2 > B_1$ 且 $B_2 > B_3$, 初始 SOC 差为4%, 电池 B_2 开始放电, 而电池 B_1 与 B_3 开始周期性充电, 在 E 点 $t = 144.5$ s 时 SOC 收敛至均衡。如图 11(e) 所示。

情况6: $B_1 > B_2$ 且 $B_3 > B_2$, 初始 SOC 差为4%, 电池 B_1 与 B_3 开始放电, 而电池 B_2 开始周期性充电, 在 F 点 $t = 308.8$ s 时 SOC 收敛至均衡, 如图 11(f) 所示。

4) 模块间均衡实验验证

进一步对分层策略的模块间均衡能力进行实验测

试。实验对象为由3个子模块, 共9节单体电池串联构成的电池组, 在静态工况下, 电池初始 SOC 值设定为80%、78%、76%、72%、74%、70%、66%、64%、68%, 重点验证模块间能量转移效果及分层控制策略的有效性, 如图12所示, 图中曲线分别为9个电池的 SOC 随时间的变化情况。

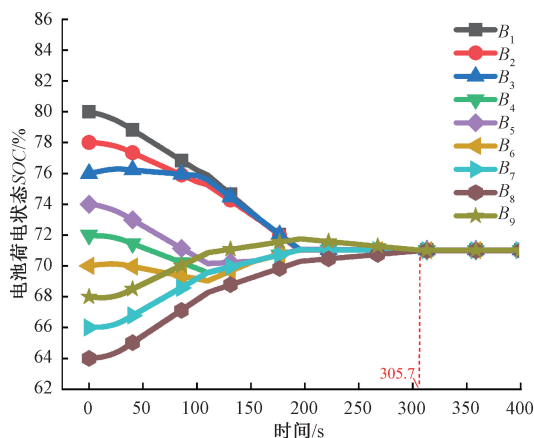


图12 模块间均衡实验结果

Fig. 12 Experimental results of the inter-module balancing

结果表明, 改进型 EKF 状态观测的锂电池组分层模块化均衡控制策略能够有效避免能量长期滞留于局部模块, 从而提升整组电池在长期运行过程中的容量利用率和一致性水平, 该结果与仿真阶段模块间均衡效果保持一致。

4 结 论

本文提出了改进型 EKF 状态观测的锂电池组分层模块化均衡控制策略, 并通过仿真与硬件实验对其有效性进行了验证。通过在 OCV-SOC 曲线斜率减小区引入敏感增益系数自适应调节 G 值, 从而提高了 SOC 估计精度。实验结果表明, 所提出方法的 SOC 最大估计误差为 2.9%, 均方根误差为 0.86%, 较 EKF 分别降低 35.7% 和 36.8%, 为均衡控制策略提供了可靠的状态估计基础。在均衡性能方面, 与对照均衡策略相比, 所提分层模块化均衡方法在静态均衡条件下可将总体均衡时间缩短 37.1%; 在 1C 充电工况下均衡时间缩短 58.66%; 在 1C 放电工况下均衡时间缩短 60%。实验结果表明, 该方法能够显著提升电池组的一致性收敛速度和均衡效率。未来工作将引入电池温度作为状态变量, 以进一步增强系统安全性并延长电池使用寿命。

参考文献

- [1] SHANG Y L, ZHANG CH H, CUI N X, 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 [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3731-3747.
- [2] ALVAREZ-DIACOMAS A, ESTÉVEZ-BÉN A A, RODRÍGUEZ-RESÉNDIZ J, et al. A high-efficiency capacitor-based battery equalizer for electric vehicles[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5009.
- [3] YARLAGADDA S, HARTLEY T T, HUSAIN I. A battery management system using an active charge equalization technique based on a DC/DC converter topology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(6): 2720-2729.
- [4] GUO X W, WU Q, XING CH, et al. An active equalization method for series-parallel battery pack based on an inductor[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107157.
- [5] KIM M, KIM C, KIM J, et al. A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of lithium-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3989-3999.
- [6] SUGUMARAN G, AMUTHA PRABHA N. A comprehensive review of various topologies and control techniques for DC-DC converter-based lithium-ion battery charge equalization [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2023, 2023(1): 3648488.
- [7] LI Y, XU J, MEI X S, et al. A unitized multiwinding transformer-based equalization method for series-connected battery strings [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11981-11989.
- [8] SUN J, DAI D. An equalization topology based on multiwinding transformer and flyback converter for series-connected lithium-ion battery packs [J]. Journal of Energy Storage, 2025, 125: 116963.
- [9] SUGUMARAN G, AMUTHA PRABHA N. A modularized active cell balancing of lithium-ion battery packs using buck-boost converter for electric vehicle applications[J]. Computers and Electrical Engineering, 2025, 128: 110736.
- [10] LIU X H, MA T Y, TIAN J Q, et al. A novel active equalization scheme for lithium-ion batteries using path planning[J]. Green Energy and Intelligent Transportation, 2026, 5(3): 100342.
- [11] WANG SH CH, YANG SH Y, 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, 2021, 68(3): 2142-2150.
- [12] DING X F, ZHANG D H, CHENG J W, et al. A novel active equalization topology for series-connected lithium-ion battery packs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6892-6903.
- [13] MA Y, DUAN P, SUN Y SH, et al. Equalization of lithium-ion battery pack based on fuzzy logic control in electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6762-6771.
- [14] YUAN L SH, JI T, ZHANG L J. Active methods for the equalization of a serially connected lithium-ion battery pack: A review[J]. Batteries, 2024, 10(7): 239.
- [15] FAN SH G, DUAN J D, SUN L, et al. A fast modularized multiwinding transformer balancing topology for series-connected super capacitors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3255-3268.
- [16] PENG F X, WANG H Y, WEI ZH Q. An LLC-based highly efficient S2M and C2C hybrid hierarchical battery equalizer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 5928-5937.
- [17] CUI ZH J, HU W H, ZHANG G ZH, et al. An extended Kalman filter based SOC estimation method for Li-ion battery[J]. Energy Reports, 2022, 8: 81-87.
- [18] 龙保鑫, 滕召胜, 孙彪, 等. 一种改进平稳小波去噪与扩展卡尔曼系统辨识的动态称量新方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 41-50.
- LONG B X, TENG ZH SH, SUN B, et al. A novel dynamic weighing method integrating improved stationary wavelet denoising and extended Kalman system identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 41-50.
- [19] 殷壮, 张坤, 亓玉浩, 等. 基于异构传感器双重滤波融合的掘进机位姿感知系统[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(10): 267-281.
- YIN ZH, ZHANG K, QI Y H, et al. Pose perception system of roadheader based on heterogeneous sensor dual-

filter fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(10): 267-281.

[20] 彭自然,杨肖阳,肖伸平. 基于 EKF-HInformer 模型估计汽车动力电池的 SOC&SOH[J]. 电子测量与仪器学报,2025,39(3):21-33.

PENG Z R, YANG X Y, XIAO SH P. SOC and SOH of the battery are estimated based on the EKF-HInformer model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(3): 21-33.

作者简介



周鹏程,2012 年于西南大学获得学士学位,现于重庆理工大学攻读硕士学位,主要研究方向为锂电池管理系统、主动均衡控制、状态估计算法。

E-mail:522653798@qq.com

Zhou Pengcheng received his B. Sc. degree from Southwest University in 2012. He is currently a master's student at

Chongqing University of Technology. His main research interests include lithium battery management systems, active balancing control and state estimation algorithms.



郑永(通信作者),2011 年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆理工大学机械工程学院副研究员,硕士生导师。主要研究方向传动精度检测与控制、智能位移传感器领域。

E-mail:sdzzzy@cqut.edu.cn

Zheng Yong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2011. He is currently an associate researcher and master's supervisor at the School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology. His main research interests include transmission accuracy detection and control, and intelligent displacement sensors.