

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614906

计及最优能量传输策略的电池组内快速主动均衡方法^{*}

郭 爽¹, 郑 永², 陈 艳¹, Ali Asif³, 程 杨⁴

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院 重庆 400054; 2. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054; 3. 巴基斯坦政府学院大学物理系 拉合尔 54000; 4. 清安储能技术(重庆)有限公司 重庆 401329)

摘 要:新能源汽车动力电池组中,由于单体电池在制造工艺、材料特性以及运行环境等方面存在差异,电池之间不可避免地会产生容量、内阻及荷电状态(SOC)不一致现象。随着充放电循环的持续进行,该不一致性会进一步累积并放大,导致电池组可用容量下降、能量利用率降低以及循环寿命缩短。因此,研究高效可靠的电池均衡技术对于提升新能源汽车动力电池系统性能与运行安全具有重要意义。针对动力电池在复杂工况及长期运行过程中出现的单体能量不均衡问题,提出了一种基于双向反激变换器拓扑的主动均衡方法。该方法以 SOC 作为均衡判据,构建面向目标设定值的充电均衡控制框架,并设计了一种兼顾均衡效率与开关损耗的最优能量传递策略,通过减少高 SOC 单体的无效充放电过程,实现均衡速度与系统能耗之间的协同优化。与此同时,为降低频繁开关动作对器件寿命及系统效率的不利影响,进一步将开关动作次数纳入控制策略优化过程,实现均衡路径的动态调度与能量传输方向优化。基于仿真模型并搭建实验平台对所提方法进行验证。仿真与实验结果表明,在不同充电电流、不同初始 SOC 分布以及不同目标 SOC 设定条件下,所提出的主动均衡方法均能够有效加快电池组均衡过程,降低高 SOC 单体的无效放电频率,提高低 SOC 单体的充电速度,从而提升整体充电效率与电池组一致性。

关键词: 电池管理系统; 荷电状态; 扩展卡尔曼滤波; 主动电池均衡; 最优能量传递; 锂离子电池

中图分类号: TM912 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470. 40 510. 10

Fast active equalization method in battery pack considering optimal energy transmission strategy

Guo Shuang¹, Zheng Yong², Chen Yan¹, Ali Asif³, Cheng Yang⁴

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Engineering Research Center of Mechanical Inspection Technology and Equipment Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. Department of Physics, Government College University Lahore, Lahore 54000, Pakistan; 4. Qingan Energy Storage Technology (Chongqing) Co., Ltd., Chongqing 401329, China)

Abstract: In new energy vehicle battery packs, inconsistencies in manufacturing processes, material characteristics, and operating conditions lead to differences in capacity, internal resistance, and state of charge (SOC) among cells. As charging and discharging cycles continue, these inconsistencies further accumulate and amplify, resulting in a decline in available capacity, reduced energy utilization, and a shortened cycle life of the battery pack. Therefore, researching efficient and reliable battery balancing technologies is of great significance for improving the performance and operational safety of new energy vehicles power battery systems. To address the cell energy imbalance problem under complex operating conditions and during long-term operation, an active balancing method based on a bidirectional flyback converter is proposed. This method utilizes SOC as the balancing criterion to construct a target-oriented charging balancing control framework. Furthermore, an optimal energy transfer strategy considering both balancing efficiency and switching losses is designed to reduce the ineffective charging and discharging processes of high SOC cells, thereby achieving collaborative optimization between balancing speed and system energy consumption. In addition, switching actions are incorporated into the optimization process to improve energy transfer efficiency and reduce device losses. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method effectively accelerates the balancing process, suppresses ineffective discharge of high-SOC cells, and improves charging efficiency and consistency under different charging currents, initial SOC distributions, and target SOC conditions.

收稿日期: 2026-01-28 Received Date: 2026-01-28

^{*} 基金项目: 重庆市教委项目 (KJZD-M202301104)、重庆市自然科学基金项目 (CSTB2023NSCQ-LZX0088)、重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202301161) 资助

Keywords: battery management system; state of charge; extended Kalman filter; active cell balancing; optimal energy transfer; lithium-ion batteries

0 引 言

随着储能系统与电动汽车技术的快速发展,其在缓解环境污染、提升可再生能源消纳能力等方面发挥着重要作用,并已获得多个国家和地区相关政策的大力支持。在实际工程应用中,储能系统及电动汽车对电源系统在能量密度、功率输出能力以及运行可靠性等方面提出了更高要求。锂离子电池凭借其能量密度高、自放电率低、循环寿命长以及无记忆效应等优势,已成为新能源汽车及储能系统中最具应用前景的能源形式^[1]。受限于单体锂离子电池的容量与电压等级,工程实践中通常采用串并联方式构建电池组以满足系统对能量和功率的需求。然而,随着电池组规模的不断扩大,单体电池间的参数不一致性问题日益突出。在充放电过程中,由于制造工艺差异及运行环境影响,电池单体在温度分布、内阻特性和自放电行为等方面存在差异,进而导致电池状态分布不均,造成电池组内部能量失衡。该失衡现象不仅限制了电池组整体容量的充分发挥,降低能量利用效率,还可能引发过充或过放风险,加速电池老化^[2],严重时甚至威胁系统运行的安全性与可靠性^[3]。因此,如何有效抑制电池组内部的非一致性并实现能量均衡,已成为提升锂离子电池系统性能与安全性的关键技术问题。

针对电池组内单体电池参数不一致所引发的能量失衡问题,引入合理的电池均衡策略并对均衡拓扑结构及其控制方法进行系统化设计,对于实现单体电池荷电状态的动态调节与整体一致性具有重要意义。根据均衡过程中是否通过能量耗散方式处理单体间差异,现有电池均衡方法通常可分为被动均衡与主动均衡两大类^[4]。被动均衡技术亦称无源均衡,其基本原理是通过外接电阻等耗能元件,将高荷电状态电池单体的多余能量以热能形式消耗,从而实现电池单体之间的电量平衡。相关研究表明,该类方法结构简单、控制实现容易,已在部分电池管理系统中得到应用^[5-6]。然而,由于均衡过程伴随显著的能量损耗,被动均衡方式在能量利用效率和系统热管理方面仍存在一定局限。相较之下,主动均衡技术通过引入电容、电感或变压器等储能与能量转换元件,在电池单体之间实现能量的双向或定向转移,可将高荷电状态电池的能量有效传递至低荷电状态电池,从而显著降低能量损失并提升均衡效率。现有研究表明,主动均衡方法在均衡速度、能量利用率及系统性能方面具有明显优势,因而在高性能电池管理系统中展现出更为广阔的应用前景^[7-9]。

基于上述研究背景,电池均衡领域的研究重点已逐渐由被动均衡转向主动均衡技术。围绕均衡控制策略与拓扑结构优化,国内外学者开展了大量研究。在控制方法方面,文献[10]提出了一种基于模型预测控制的锂离子电池组快速均衡方法,通过优化均衡电流及能量传递方向提升均衡性能,但其控制算法复杂、计算量较大,工程实现难度较高。文献[11]提出了一种基于自适应选择主被动均衡拓扑的机载锂电池能量均衡方法,通过构建包含电阻与隔离性 DC/DC 变换器的集中式均衡,通过开关阵列实现任意单体电池的能量调度,但拓扑切换控制的稳定性仍然存在挑战,在部分均衡场景中仍然存在能量损耗。文献[12]将深度强化学习引入主动均衡控制,通过调节 Buck-Boost 拓扑的脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 占空比实现自适应能量调节,但主要基于理想工况假设,未充分考虑能量损耗问题。文献[13]提出了一种基于双可控反激变换器的主动均衡方法,通过调节充电电流实现电池组均衡,但尚缺乏实际电路验证。

此外,文献[14]基于数据驱动方法,采用剩余充电容量作为均衡变量实现主动均衡,但其估算过程复杂且对数据依赖较强。文献[15]结合主动均衡与电池健康状态估计,实现荷电状态 (state of charge, SOC) 均衡与健康状态 (state of health, SOH) 优化的协同调控,但未充分考虑长期循环工况对电池组整体性能的影响。针对温度因素,文献[16]提出了一种考虑温差约束的主动均衡策略,在降低电池温差的同时牺牲了部分均衡效率。

在均衡拓扑结构方面,文献[17]基于合作博弈理论实现多电池协同能量调节,但计算复杂度较高。为降低系统复杂性与硬件成本,文献[18]将开关矩阵与单一 DC/DC 变换器相结合,减少了器件数量,但提高了变换器功率等级及系统损耗。文献[19]提出了一种基于移相策略的模块化锂电池均衡器,该方法采用半桥结构与多绕组变压器相结合,实现均衡器的模块化设计,但是控制策略依赖参数设计,变压器设计复杂。文献[20]提出了一种基于多绕组变压器的自驱动主动均衡拓扑,实现多电池能量共享,但未考虑磁饱和对均衡性能的影响。文献[21-22]分别从模糊控制和多端口变换器角度对主动均衡拓扑进行了改进。随着新型传输方式的发展,文献[23]提出了基于无线能量传输的主动均衡方案,而文献[24-25]通过拓扑优化实现非相邻或串并联电池单体间的能量转移,但其控制复杂度或均衡效果仍有进一步提升空间。

综上所述,现有主动均衡技术在提升电池组能量利

用效率和均衡速度方面已取得一定研究进展,但在控制策略复杂度、拓扑结构工程实现性、能量损耗以及多因素耦合影响等方面仍存在不足。现有均衡策略面临三重挑战:1)决策规则依赖经验设计,缺乏严格优化理论支撑;2)维度扩展性不足,状态空间随电池数指数增长;3)电路、控制协同设计缺失,能量传递与损耗未精确建模。

针对串联动力电池组在外部供电条件下存在的能量分布不一致问题,设计了一种基于双向反激变换器的主动能量传递电路。在此基础上,本文面对大量研究没有面向有限充电设定值状态下的均衡工况,做出如下创新工作:通过将均衡过程中的开关动作进行状态变量建模,构建含SOC动态约束的优化模型,实现“状态检测—优化决策—执行控制”的分级协同,显著降低计算复杂度。基于所提方法减缓高电量电池的重复充放电行为,降低其健康损耗,同时实现低电量电池的精准识别与快速补能,从而整体提升电池组均衡效率。

1 电路结构及均衡原理

1.1 均衡电路结构

隔离式均衡电路在开关导通与关断状态下分别完成能量储存与传递,实现电池单体与电池组之间的电气隔离,从而有效降低短路风险并提高系统运行的安全性与可靠性^[26-27]。基于上述特性,双向反激变换器适用于电池单体间的能量传递应用,并有助于简化电路结构设计。在反激变换器运行过程中,能量通过耦合电感以周期性储能与释能的方式实现传递。基于反激变换器的两节串联电池能量传递电路结构如图1所示,各电池单体均通过相应的均衡支路与能量传递单元相连。

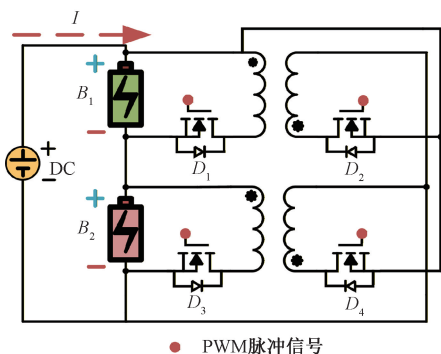


图1 均衡结构示意图

Fig.1 Balanced topology diagram

在外部供电条件下,所构建的均衡系统采用单体电池与能量传递单元并联的结构形式,以实现电池组充电过程中的主动能量均衡,并提升系统整体运行效率。对于由 n 节单体电池构成的串联电池组,该拓扑结构需配

置 $2n$ 个功率开关器件。以图1所示的两节电池系统为例,金属-氧化物-半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)器件 $D_1 \sim D_4$ 构成能量传递回路的核心控制单元,用于调节系统的工作状态与能量流向。

系统运行过程中,通过对单体电池电压与电流的在线采集实现荷电状态的实时估算,并计算电池组平均SOC作为均衡参考量。根据单体SOC与参考SOC之间的偏差关系,协调反激变换器初级侧与次级侧功率开关的驱动状态,在互补脉冲激励作用下实现能量传递路径的动态切换,从而引导能量在电池单体之间的合理分配。

所提出的均衡方法以多节串联电池组为研究对象,基于SOC偏差构建能量调度机制,在能量释放阶段通过比较单体SOC与参考SOC的大小关系确定能量传递方向。以图1所示结构为例,当满足能量传递判据时,单体电池 B_1 通过变压器初级侧向储能单元提供能量,随后经磁耦合传递至次级侧,并在后续驱动周期内释放至目标单体电池 B_2 ,实现单体电池之间的能量转移。该过程可有效减小电池单体间的SOC差异,从而完成电池组的均衡调节。

1.2 工作原理分析

1) 高能量单体电池的放电能量传递阶段

当单体电池 B_1 参与均衡过程时,其对应能量传递单元在互补PWM驱动信号作用下进入储能工作状态。此阶段中,变换器 W_1 的一次侧开关器件处于导通状态,而对应的互补开关保持关断,使一次侧电感处于能量积累模式。由于能量传递回路的建立,电池组输出电流相应发生变化,输入能量被暂时存储于电感中,为后续能量传递过程提供储能基础。此过程如图2所示。

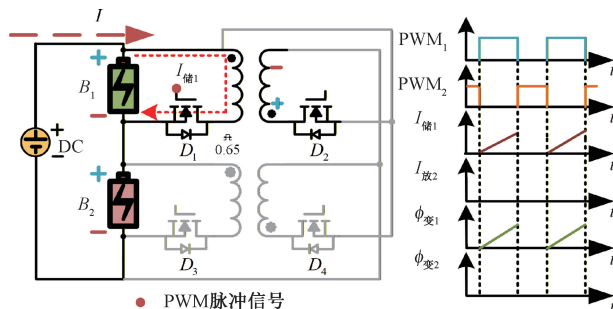


图2 高电量电池放能

Fig.2 High-energy battery energy release

根据电感电压伏秒平衡定律,变压器初次级电压关系为:

$$U_2 = \frac{D_{on}}{N(1 - D_{on})} U_1 \quad (1)$$

其中, U_1 为 B_1 电池电压, U_2 为变换器次级侧电压,

N 为变换器匝数比, D_{on} 为初次测导通占空比。从而将初级侧能量转移至次级侧, 在此过程中, 初级侧有能量传递有 L_1 为电感量, T 为周期, $I_{\text{储}1}$ 为 W_1 变换器初级侧的电流:

$$I_{\text{储}1} = \frac{U_1}{L_1} \times D_{on} \times T \quad (2)$$

在这个过程中原边电流使变压器铁芯被磁化, 变压器磁通量 $\Delta\phi_+$ 线性增加, 增加量为:

$$\Delta\phi_+ = \frac{U_1}{N_1} \times D_{on} \times T \quad (3)$$

2) 电池间能量传递过程

当储能阶段达到设定时刻后, D_1 侧 MOSFET 关断, D_2 与 D_4 侧 MOSFET 同步导通, W_1 电路次级侧中电压 U_2 逐渐降低, 并将前一阶段储存的能量经能量传递通道耦合至 B_2 电池对应的次级侧进行存储, 如图 3 所示。

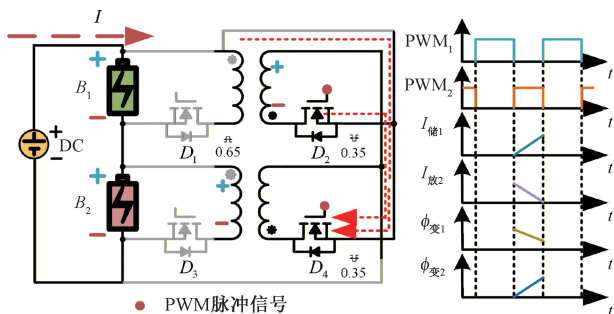


图3 能量转移过程

Fig. 3 Energy transfer process

此过程中, D_4 支路电流发生叠加, 导致其端电压 U_4 增大, 从而实现能量由高 SOC 单体电池向低 SOC 单体电池的有效转移。

此时 W_1 变换器二次侧电流下降, $I_{\text{放}1}$ 为 W_1 变换器二次侧下降电流:

$$I_{\text{放}1} = \frac{U_2}{L_2} \times (1 - D_{on}) \times T \quad (4)$$

此时变压器磁通量 $\Delta\phi_-$ 也将减少:

$$\Delta\phi_- = \frac{U_2}{N_2} \times (1 - D_{on}) \times T \quad (5)$$

与此同时, 能量将通过变换器向 W_2 的二次侧传递, 在二次侧回路中形成传递电流, 并对 W_2 二次侧电感进行储能。其中, $I_{\text{放}1}$ 表示 W_1 变换器的输出电流; 当 W_2 二次侧 MOSFET 导通后, 电源侧通过连接导线向二次侧回路提供的部分电流记为 $I_{\text{电源}}$ 。此过程有:

$$I_{\text{储}} = I_{\text{放}1} + I_{\text{电源}} \quad (6)$$

$$I_{\text{储}} = \frac{U_4}{L_4} \times (1 - D_{on}) \times T \quad (7)$$

同时磁通量也将增加:

$$\Delta\phi_+ = \frac{U_4}{N_2} \times (1 - D_{on}) \times T \quad (8)$$

3) 低电量电池储能

当达到预设的能量传递时间后, D_2 侧与 D_4 侧的 MOSFET 关断, D_1 侧与 D_3 侧的 MOSFET 导通, 前一工作周期中储存的能量被转移至电池 B_2 ; 在随后的工作周期内, 系统继续为电池 B_1 的能量传递支路完成能量储存, 其工作过程如图 4 所示。

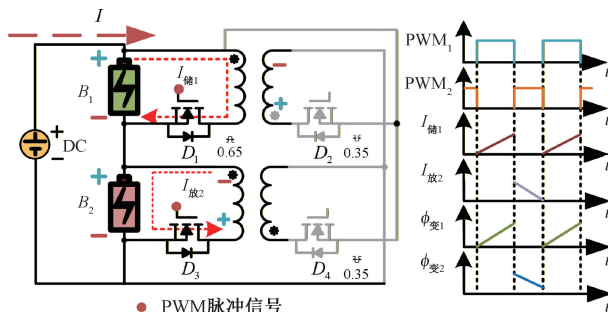


图4 低电量电池储能

Fig. 4 Low-energy battery energy storage

在这一过程中, 同样根据电感电压伏秒平衡定律有:

$$U_3 = \frac{1 - D_{on}}{ND_{on}} U_4 \quad (9)$$

其中, U_3 为 W_2 变换器次级侧电压, U_4 为变换器 W_2 初级侧电压, N 为变换器匝数比, D_{on} 为初级侧导通占空比。同时 W_2 变换器一次侧的电流增加, 从而加快了 B_2 电池的整体充电速度。

$$I_{\text{放}} = \frac{U_3}{L_3} \times D_{on} \times T \quad (10)$$

在均衡电路搭建与验证过程中, 分别设定电池电量为 50% 与 25%, 并采用双向反激变换器作为能量传递单元。考虑到双向反激变换器需在互补 PWM 信号驱动下实现能量的双向流动, 设置占空比为 0.65 和 0.35 的互补脉冲信号作为开关器件的控制信号。其 PWM 波形及对应实验结果如图 5(a) 和 (b) 所示。由实验结果可见, 两节电池的 SOC 变化趋势存在明显差异。高 SOC 电池的电量逐渐降低, 而低 SOC 电池的电量相应提高, 且 SOC 变化斜率较为显著。

在低 SOC 电池接受能量传递的过程中, 由于能量传递受 PWM 周期性控制, 其充电过程呈现出明显的脉冲特征; 而在 SOC 曲线斜率变化不明显的区段内, 表明该阶段低 SOC 电池未受到均衡脉冲影响。

即此时靠近电池侧的 MOSFET 管未导通。随着均衡过程的持续进行, 当两节电池的 SOC 差异逐渐减小并趋于一致时, 其荷电状态表现出同步上升的变化特征, 验证

了双向反激变换器在能量传递与均衡控制中的有效性。基于上述分析与实验验证,进一步构建了如图6所示的电池均衡电路结构。

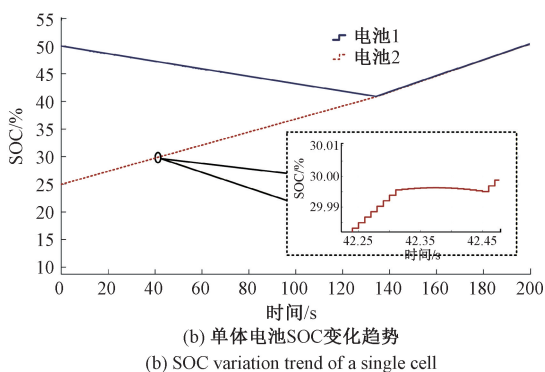
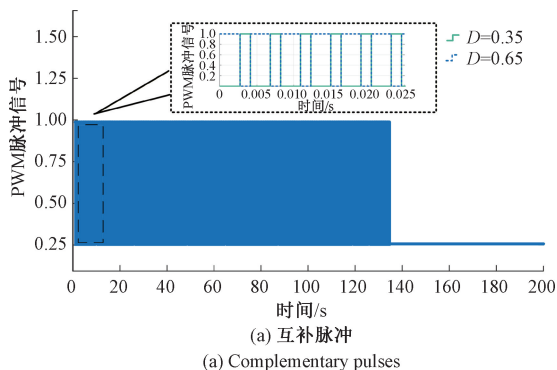


图5 互补 PWM 波

Fig. 5 Complementary PWM waveforms

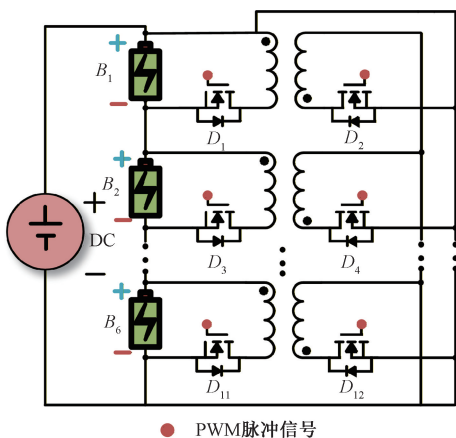


图6 均衡拓扑图

Fig. 6 balancing circuit topology diagram

2 均衡控制策略

本文选取电池 SOC 作为均衡量,其在数值上定义为剩余电量占电池容量的比值^[28]。由于 SOC 作为电池荷电状态无法直接测量,本文选取扩展卡尔曼滤波

(extended kalman filter, EKF) 算法对动态工况下电池进行 SOC 估计,为均衡控制提供准确的均衡量。

2.1 均衡量估算

电池是一个多复杂的模型,因此其许多特征值无法直接测得,需要通过电池建模来获取相应的特征值进行估算。本文采用如图7所示的二阶 RC 模型来表征单体电池的性能。

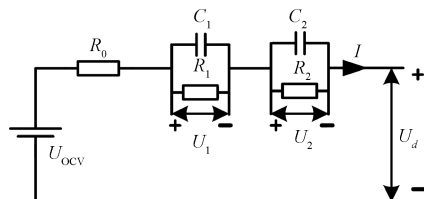


图7 电池二阶 RC 模型

Fig. 7 Battery second-order RC model

U_{OCV} 表示开路电压, R_1 、 R_2 、 C_1 、 C_2 分别代表电阻电容, U_1 和 U_2 分别的代表 R_1 和 R_2 处的电压, I 代表电流, U_d 代表端子电压。根据基尔霍夫定律,其状态方程和输出方程可以表示为:

$$\begin{cases} U_{ocv} = IR_0 + U_1 + U_2 + U_d \\ I = \frac{U_1}{R} + C_1 \frac{dU_1}{dt} \\ I = \frac{U_2}{R_2} + C_2 \frac{dU_2}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

SOC 可通过安时积分法测算得:

$$SOC_t = SOC_{t_0} - \frac{1}{Q} \int_{t_0}^t idt \quad (12)$$

其中, Q 代表电池的额定容量, SOC_{t_0} 代表电池起始时刻电量值 i 代表单体电池的充电电流。但在采用安时积分法进行 SOC 估算的过程中,由于电池容量和寿命随着循环而退化,该方法易受到累积误差影响,导致估算结果偏差较大,准确性难以保证。为提升 SOC 估算的精度,本文引入 EKF 算法。该算法具有良好的非线性系统建模与状态拟合能力,能有效抑制模型误差与测量噪声对估算结果的干扰^[29]。为构建和验证 SOC 估算模型,本文采用实验测试平台对锂离子电池进行数据采集。实验主要使用 ITS5300 电池充放电综合测试系统和 WD702 高温低温环境试验箱,所有测试均在恒温 25℃ 条件下进行。

根据 EKF 对状态方程进行离散后,方程进行推导, EKF 估算 SOC 流程如图8所示。

图8中 Δt 为采样间隔时间, η 为库伦效率, C_n 为电池最大容量, $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_2 = R_2 C_2$ 表示两个 RC 环的时间常数, U_{ocv} 是开路电压(open circuit voltage, OCV)与 SOC 的关系, W_k 和 V_k 分别代表 k 时刻的过程和测量噪声, I_{k-1} 代表 $k-1$ 时刻的电池电流。

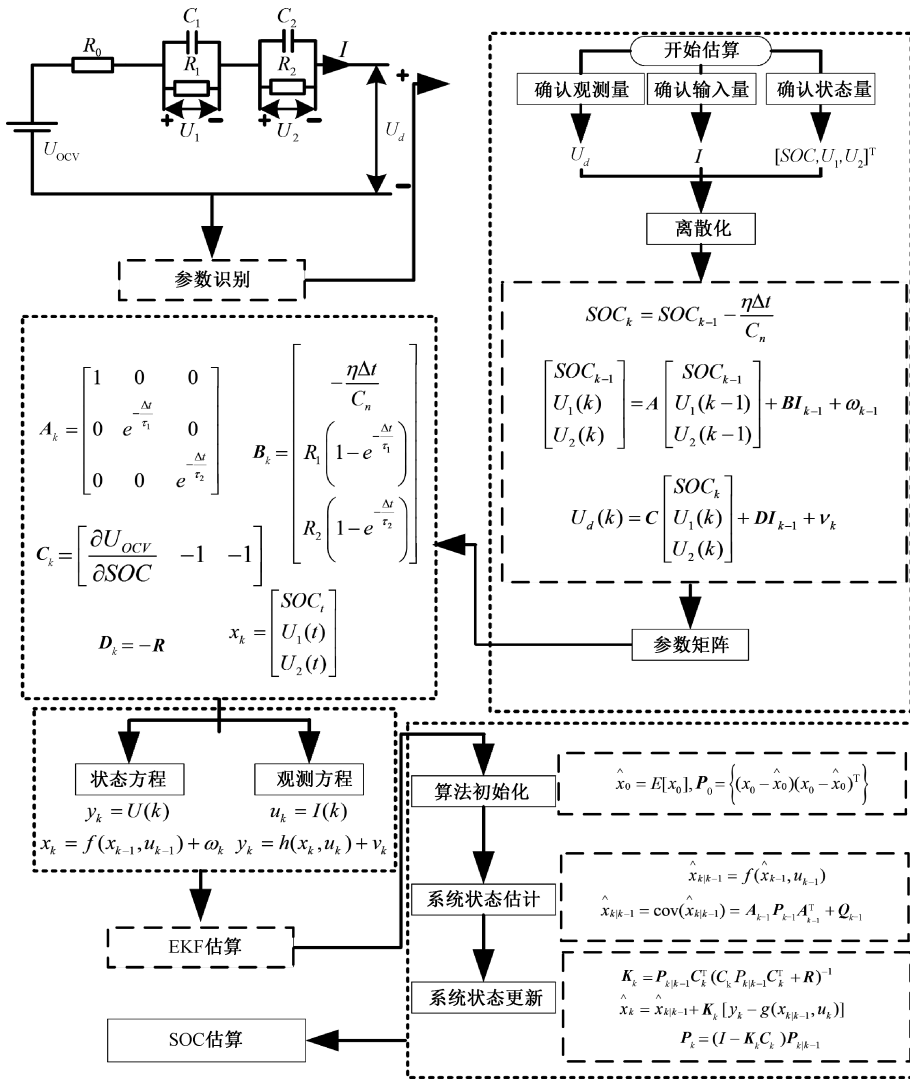


图8 EKF 估算流程

Fig. 8 Estimation procedure based on the extended kalman filter

为对 EKF 估算法对于电池 SOC 估算进行分析,在本文第3章均衡实验前将会针对北京动态应力工况 (Beijing dynamic stress test, BJDST) 与混合脉冲功率特性工况 (hybrid pulse power characterization, HPPC) 工况下对模型进行仿真验证。

2.2 均衡过程设计

最优能量传递算法是一种数学模型,用于描述有限个状态以及这些状态之间的转移和相应的动作。该模型通过将将一个过程划分为多个完整的状态,并通过每个状态的输入和输出进入下一个状态,体现了最优控制的思维。此外,事件的触发状态转移和动作的执行是该模型的重要组成部分但动作的执行并非必需,系统可以仅进行状态的转移,而不指定任何具体动作。这为电池组的均衡控制提供了一种有效的数学框架。混合整数规划 (mixed integer programming, MIP) 是数学规划领域中的重

要分支,能够有效建模和解决同时包含连续变量和离散变量的复杂优化问题。

MIP 的标准形式可表示为:

$$\begin{cases} \text{Max/Min: } c^T x + d^T y \\ A_1 x + A_2 y \leq b \text{ (线性不等式约束)} \\ A_3 x + A_4 y = b \text{ (线性等式约束)} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{目标} \begin{cases} x \geq 0 \text{ (线性变量非负约束)} \\ y \geq 0 \text{ (整数变量约束)} \\ y \in \mathbf{Z}^n \text{ (整数变量约束)} \end{cases} \quad (14)$$

其中, x 和 y 分别为连续变量与整数变量向量, c, d 为目标函数系数, A_1, A_2, A_3, A_4 为约束系数矩阵, b 为右端常数向量。这一形式能够灵活建模复杂系统中的混合决策问题。在收敛性上,初始 SOC 极差 $\Delta SOC(0) = \max_{SOC} - \min_{SOC}$, 在能量传输效率 $\eta \geq \eta_{\min}$ 时,存在迭代

步数:

$$K \leq \left[\frac{\Delta SOC_{(0)} \times c_{\min}}{\eta \times I_{eq} \Delta t} \right] \quad (15)$$

使得 $\Delta SOC(k) \leq \varepsilon$ 具有收敛性。当电池电量为满电情况下,调用 MIP 优化,否则当所有电池在充电状态时,进行最小开关策略。

锂电池组均衡系统为一个典型的多输入多输出模型。在均衡过程中,不同单体电池的状态会发生变换,因此本文采用状态空间表达式作为均衡系统模型,其状态式如下所示:一个有最优能量传递模型 M 可以用一个状态控制量来描述:

$$\begin{cases} M = (Q, X, Y, q_0, \delta, O) \\ Q_{x+1} = \delta(Q_x, X_x) \\ O_x = (Q_k, X_k) \\ X_{k+1} = X_k + Bu_k \\ Y_k = CX_k \end{cases} \quad (16)$$

其中, q_0 示系统的初始状态; Q 表示状态的有限集合,包括所有可数状态; X 表示输入集合,表示系统接

受的不同输入信息的集合; Y 表示输出集合,表示系统发送的不同输出信息的集合; δ 表示状态转移函数,它规定了系统接收到不同输入时状态跳变的规则; Y 表示输出函数,表示系统在当前状态和输入下的输出规则; Q_x 、 X_x 和 O_x 分别表示系统状态、输入信号和 X 时刻的输出信号。式(16)表示系统当前处于状态 Q_x ,输入信号为 X_x ,输出信号为 O_x ,状态转移函数决定系统将从状态 Q_x 转移到 Q_{x+1} 。算法的具体流程如图9所示。

通过6节电池的SOC值同最终设定状态进行对比,从而得到状态与输出信号以及电池SOC值。所提出的均衡拓扑并联在每节电池旁边,在进行均衡过程中,将以6节电池SOC量的平均值作为参考,同不同电池的SOC值进行比较,选择最优的开关器件进行控制,从而控制各单体电池的状态,以达到整体电池组的均衡。

$$SOC_x = SOC_{av}, N = \text{闭锁}, x = [1, 2, \dots, 6] \quad (17)$$

$$SOC_x \neq SOC_{av}, N = \text{动作}, x = [1, 2, \dots, 6] \quad (18)$$

同时,本节引入多目标混合整数规划框架,实现均衡速度 α 与开关损耗 β 的量化权衡耦合电池动力学方程

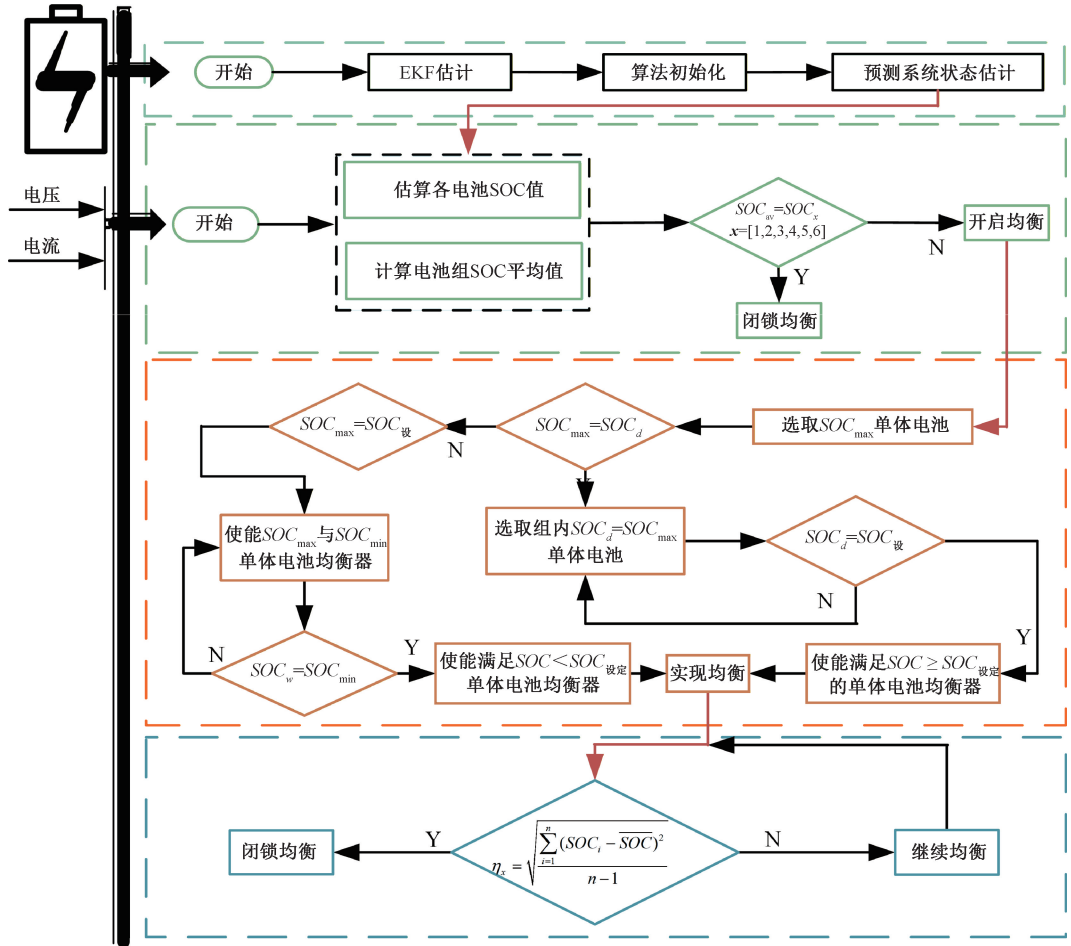


图9 最优能量传递算法流程

Fig. 9 Flowchart of the optimal energy transfer algorithm

与反激电路物理约束。具体为:

$$\begin{cases} \min \sum_{k=1}^N (\alpha \|SOC_k - SOC_{ref}\|_2 + \beta \|u_k\|_0) \\ \text{s. t. : } SOC_{k+1}^i = SOC_k^i + \frac{\eta_i \Delta t}{C_i} (I_{ch} - \sum_{j \neq i} u_k^{ij} I_{eq}) \\ \sum_{j \neq i} u_k^{ij} \leq 1, u_k^{ij} \in \{0, 1\} \\ I_{eq} = \frac{I_{eq} I_{eq} \Delta t}{2L_m (V_i + V_j)} D(1 - D) \\ SOC_{min} \leq SOC_k \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (19)$$

其中, V_i, V_j 表示 i, j 号电池电压, L_m 表示变压器磁化电感, D 为 PWM 占空比。

为保证电池组充电过程中的一致性,系统以目标电荷量为判据,对单体电池 SOC 进行实时监测。当单体 SOC 未达到设定目标时,均衡回路保持关闭,以实现与主充电回路的隔离;当部分单体 SOC 达到阈值后,控制算法使对应均衡电路投入运行,并优先调度 SOC 最低的单体参与能量分配,以加快其充电过程。系统在满足均衡使能条件后依据判定规则对其进行控制,实现能量的有序均衡:

$$SOC_{max} = SOC_{set}, M = 1 \quad (20)$$

$$SOC_{max} \neq SOC_{set}, M = 0 \quad (21)$$

其中, SOC_{max} 表示电池组内荷电状态最高的单体电池, SOC_{set} 为设定的充电目标值。参数 M 用于表征 SOC_{max} 与 SOC_{set} 之间的关系,当 $M=1$ 表示满足均衡使能条件, $N=0$ 时表示均衡功能被抑制。仅当判定条件 N 与 M 同时成立时,均衡电路才被投入运行。该判据设计在保证均衡效果的同时,有效降低了均衡回路的开关动作频率,从而减少功率器件的开关损耗。

当满足两个开关导通条件后,均衡过程认为电池组单体电池电量不同。为此,定义了以下状态量: $SOC_6 = SOC_{max}$ 为电池组电量最高电池, $SOC_1 = SOC_{min}$ 为电池组最低电池, SOC_{set} 为最终电池组充电设定值,其大于电池组内电池电量。 $SOC_5, SOC_4, SOC_3, SOC_2$ 依次从 SOC_{max} 减少荷电量直到 SOC_{min} 。此时,设定如式(22)、(23)所示。

$$SOC_5 < SOC_{set}, Q = 0 \quad (22)$$

$$SOC_5 = SOC_{set}, Q = 1 \quad (23)$$

其中, Q 定义为判定次高电量电池是否达到设定值的标志, $Q=1$, 认为次高电量电池达到设定值; $Q=0$ 认为,次高电量电池未达到设定值。

在电池组串联充电过程中,由于各单体电池初始 SOC 存在差异,若未启用均衡机制,各单体将以相同充电速率进行充电,从而导致高 SOC 单体率先达到设定阈值,并通过能量转移电路加快低 SOC 单体电池的充电速度。若此时次高 SOC 单体电池达到设定值,系统将同时对达到设定值电池与其余低 SOC 单体电池进行能量调

度,该过程中,各单体电池的 SOC 值与电池组平均 SOC 存在的偏差,将为均衡控制提供判定依据。

系统采用 6 个反激变换器作为能量传递单元,每个变换器由一对互补 PWM 信号驱动,其两路信号需满足互补导通条件。通过将 6 节单体电池的状态量作为控制输入,并生成对应的 12 路开关驱动信号,结合预设的状态转移规则,可实现能量在电池组内的有序分配与优化传递。

3 实验验证

3.1 EKF 估算 SOC 验证

为验证 EKF 算法对于电池 SOC 估算的准确性。需要对单体电池状态进行测试建模。

在 HPPC 测试条件下开展恒压恒流放电实验如图 10(a)所示,获取电池 SOC-OCV(开路电压)特性曲线在图 10(b)所示。随后以 10% 的 SOC 间隔为单位,对电池参数进行辨识与记录,以提高电池状态均衡控制所需的参数识别精度。该测试过程同时避免了电池在充放电过程中可能产生的过充或过放风险,具备较高的实验安全性与数据可信度。

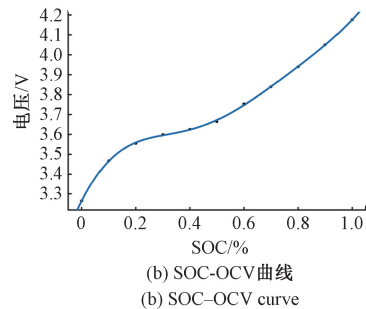
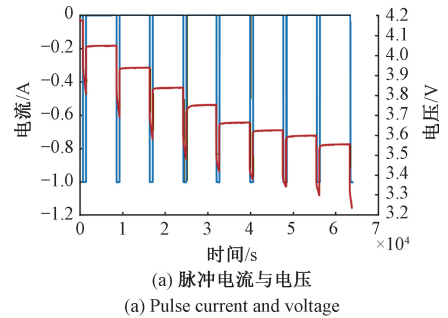


图 10 HPPC 工况下参数

Fig. 10 Battery parameters under HPPC conditions

在获取单体电池参数与特征状态后,在 BJDST 与 HPPC 工况下对模型进行仿真验证。

图 11 与 12 分别为 HPPC 工况下与 BJDST 工况下的估算 SOC 同参考值的比较与估算误差结果。可以看出,估算值同实际值误差较小,均方根误差均可保持在 0.03 以内,图中长虚曲线表示实验测得的 SOC 参考值,短虚

线则为 EKF 算法估算得到的 SOC 值,二者之间拟合度较高,验证了所构建模型的可靠性。

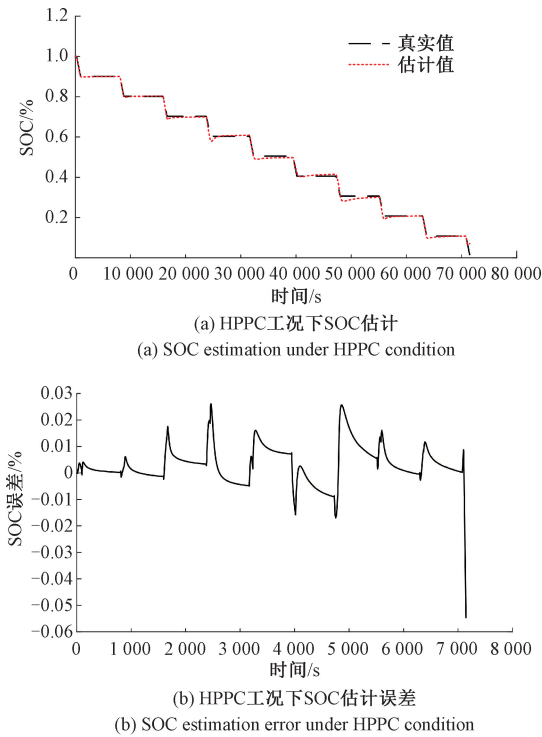


图 11 HPPC 工况下 SOC 估算与误差分析
Fig. 11 SOC estimation and error analysis under HPPC condition

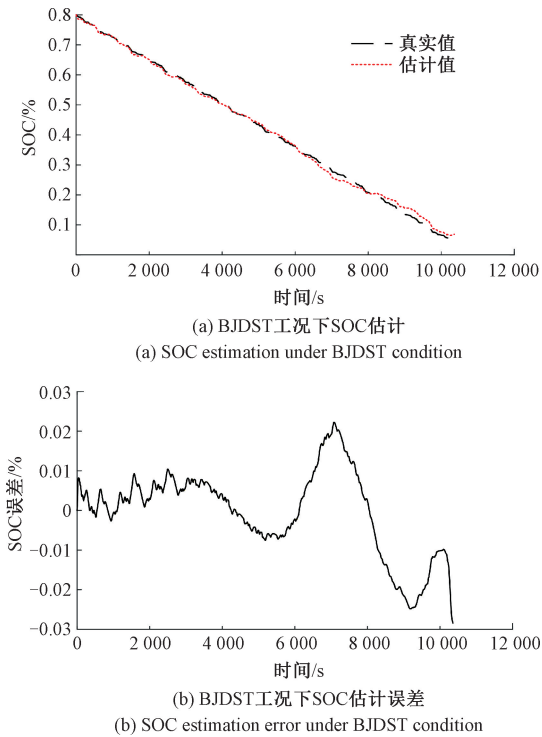


图 12 HPPC 工况下 SOC 估算与误差分析
Fig. 12 SOC estimation and error analysis under HPPC condition

可以看出,EKF 算法在复杂电流与电压情况下的 SOC 估算跟踪能力很强,均方根误差符合电池管理系统 (battery management system,BMS)对 SOC 估算的精度要求。

3.2 均衡仿真与分析

在 MATLAB/Simulink 平台建立了基于双向反激变换器的锂离子电池主动均衡仿真模型。依据前述分析,模型以单体电池 SOC 作为均衡判据。在仿真验证中针对两组不同的初始 SOC 分布条件开展对比测试,验证高差异与低差异单体电池组内均衡的适应性。其具体参数配置如下:

第 1 组(低 SOC 差异组): $SOC_6 = 45\%$, $SOC_5 = 42\%$, $SOC_4 = 39\%$, $SOC_3 = 36\%$, $SOC_2 = 33\%$, $SOC_1 = 30\%$ 。单体电池间的 SOC 差异较小,此组实验设定电池组目标 SOC 值为 48% 和 55%。

第 2 组(高 SOC 差异组): $SOC_6 = 50\%$, $SOC_5 = 45\%$, $SOC_4 = 40\%$, $SOC_3 = 35\%$, $SOC_2 = 30\%$, $SOC_1 = 25\%$ 。单体电池间的 SOC 差异较大,此组实验设定电池组目标 SOC 值为 51% 和 60%。

为验证所提出均衡策略在降低单体电池充放电次数及提升低 SOC 单体电池充电效率方面的有效性,设计了两组对比仿真实验。针对不同初始 SOC 分布及不同 SOC 目标设定的电池组开展均衡性能分析。通过对比未引入最优能量传递算法的传统均衡策略与所提出控制策略,系统评估该方法在不同充电电流、初始 SOC 差异及目标 SOC 设定条件下的均衡效果与性能优势。

在仿真初始化阶段,对各单体电池状态进行赋值并启动控制算法。控制系统基于实时采样的状态信息,比较单体电池 SOC 与电池组平均 SOC,动态调节 MOSFET 开关的导通状态,从而实现能量的有序传递与均衡控制。图 13 展示了在 SOC 初始分配为 $SOC_6 = 45\%$ 、 $SOC_5 = 42\%$ 、 $SOC_4 = 39\%$ 、 $SOC_3 = 36\%$ 、 $SOC_2 = 33\%$ 、 $SOC_1 = 30\%$ 并设置电池组 SOC 设定充电值分别为 48% 与 55%,各单体电池 SOC 在不同充电设定值下的结果。

从图 13 可以观察到,在未引入最优能量传递算法的情况下,较大充电设定值电池组相比较小充电设定值的电池组更慢达到均衡状态,这表明充电设定值的大小对均衡速度具有直接影响。然而,由于未采用最优能量传递算法,不同充电电流条件下的高电量电池仍经历了先放电再充电的过程,导致充放电次数的增加。在引入最优能量传递算法后,实验结果表明均衡效率得到了显著提升。电池组设定充电值为 48% 时,在 $t = 83.71\text{ s}$ 时已达到均衡,相较于未使用最优能量传递算法时的均衡时间减少了 17.6 s。在电池组设定充电值为 55% 时,均衡时间从 146.2 s 缩短至 129.63 s,同样显著提升了电池组达到目标 SOC 的充电速度。此外,无论在何种设定充电值条件下,该算法均有效减少了高电量电池的充放

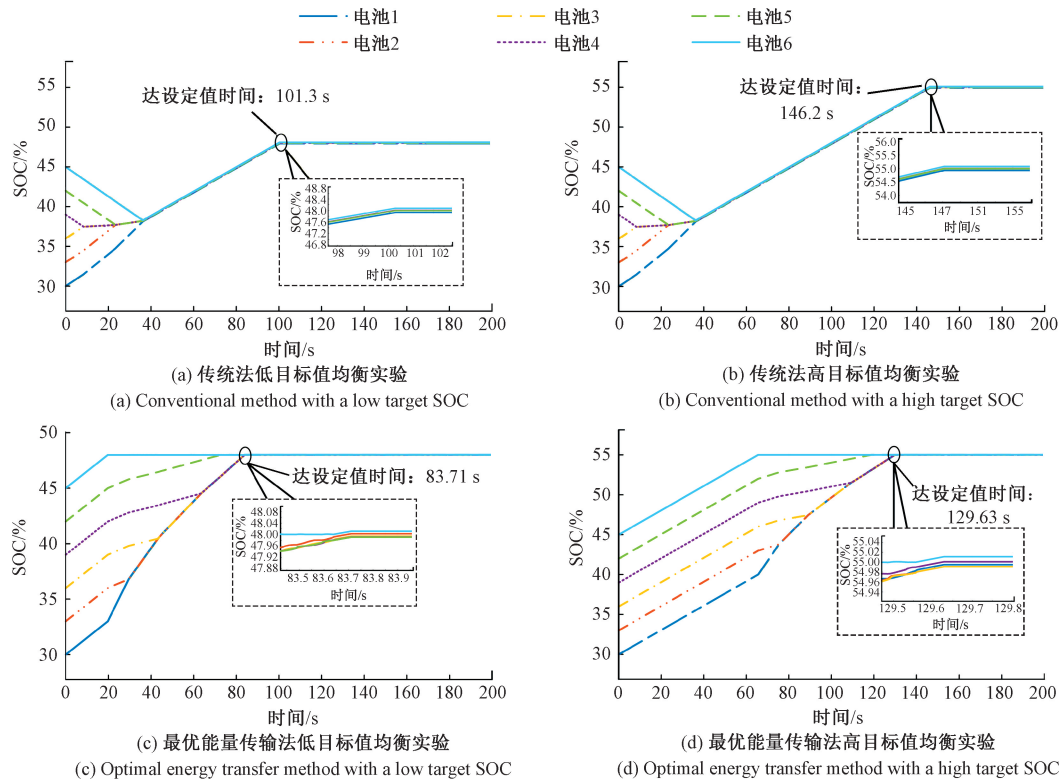
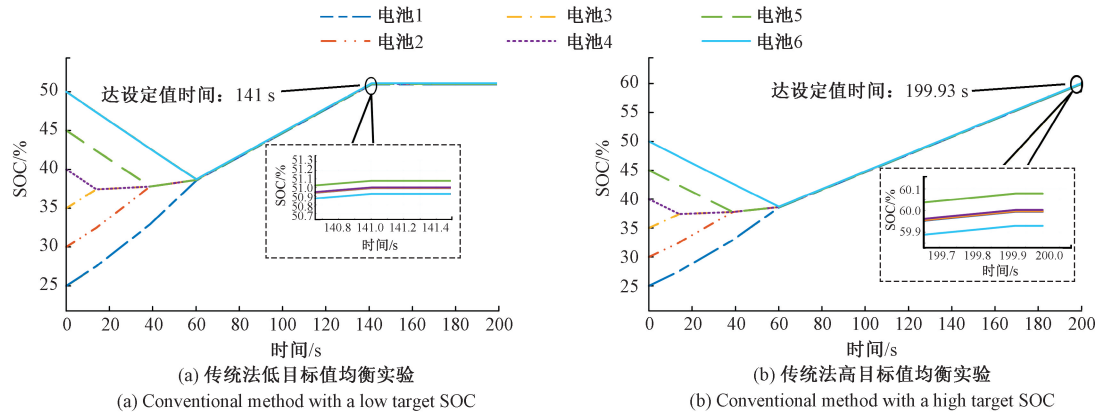


图 13 低差异电池组均衡实验
Fig. 13 Low difference balancing test

电次数,即高电量电池无需先放电至与其他电池 SOC 相同后再进行充电,从而减少了不必要的充放电循环。进一步分析最低 SOC 电池的充电情况可见,最低电量电池的 SOC 分别在 $t=20\text{ s}$ 以及 $t=67\text{ s}$ 时出现明显拐点,此刻最高电量电池也达到了电池组的充电设定值,通过能量转移电路将能量传递给最低电量的电池,同时电池组其他电池的充电电流有所下降,但随着最低电量电池同其他单体电池的电量趋于相同,整体电池组的充电速率还是得到了提升。

为进一步验证该算法的实用性,下面将对高 SOC 差异的电池组进行实验。图 14 为高差异 SOC 电池组的均

衡实验。从图 14 可以观察到,在相同充电电流的状态下,电池组充电设定值对充电时间起决定性作用。在未引入控制算法的情况下,较高的充电设定值令电池充电时间延长,引入最优能量传递算法后,均衡效率得到了明显提升。令电池组在 $t=172.42\text{ s}$ 时达到均衡,相较于未引入最优能量传递算法时均衡时间缩短了 27.51 s ;而在低充电设定值的情况下,均衡时间由原来的 141 s 缩短至 113.27 s ,提高了 27.73 s 。这表明,在高 SOC 差异及不同 SOC 设定值的条件下,最优能量传递算法仍能显著提高电池组的均衡效率,同时减少高电量电池的充放电次数,并加速低电量电池的充电过程。



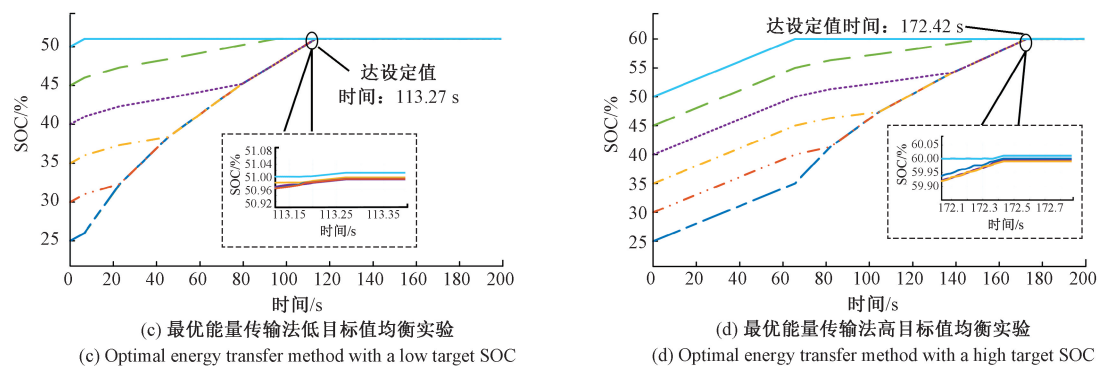


图 14 高差异低电流电池组均衡实验
Fig. 14 High SOC difference and low current balancing test

通过上述仿真实验,验证了最优能量传递算法在不同初始 SOC 值、设定 SOC 目标值及充电电流条件下的有效性。该算法成功解决了高电量电池因多次充放电导致的损耗问题,同时显著提升了低电量电池的充电速度。为了进一步评估该算法在实际应用中的工程可行性,下

一步将通过实物实验进行验证。

3.3 硬件实验验证

为验证所提出控制策略的正确性与工程可行性,构建了如图 15 所示的实验平台,实现基于最优能量传递算法的六单体锂离子电池主动均衡系统。



图 15 电池参数识别及主动均衡电路
Fig. 15 Battery parameter identification and active balancing circuit diagram

所有实验均在室温 25℃ 条件下进行。系统采用 LTC6804 作为 6 节电池的电压采集单元,完成单体电压检测后与微控制器 PIC18F47J53-L/ML 进行通信,实现电池状态获取与 SOC 估算;随后,控制器通过与 LTC6804 的数据交互向 LTC3300 均衡控制芯片发送控制指令,驱动相应变压器一次侧与二次侧开关器件的导通状态。

在均衡过程中,通过检测变压器初、次级侧电容的能量变化对能量传递量进行估算,并将相关信息反馈至 LTC3300,实现均衡过程的闭环控制。SOC 均衡控制算法在此过程中得以实现,同时对单体电池电压与能量传递状态进行实时监测,从而构建了具备基本保护功能的

电池管理系统,有效避免均衡过程中的过充与过放风险。实验过程中,各单体电池均接入 LTC6804 对应的检测通道,均衡运行期间持续采集电池端电压数据,为系统控制与安全保护提供可靠依据。

为验证算法的可靠性,将以同电池电荷量和充电电流进行验证,在通过恒流充电箱进行充电实验后,此时有 6 节电池的电量有 50%、45%、40%、35%、30% 和 25%,将通过模型预测法如图 16 (a) 所示、模糊控制法如图 16(b)所示、均值法如图 16(c) 所示同最优能量传递法如图 16(d) 所示进行对比试验,验证本文所使用的最优能量传递法的优异性。

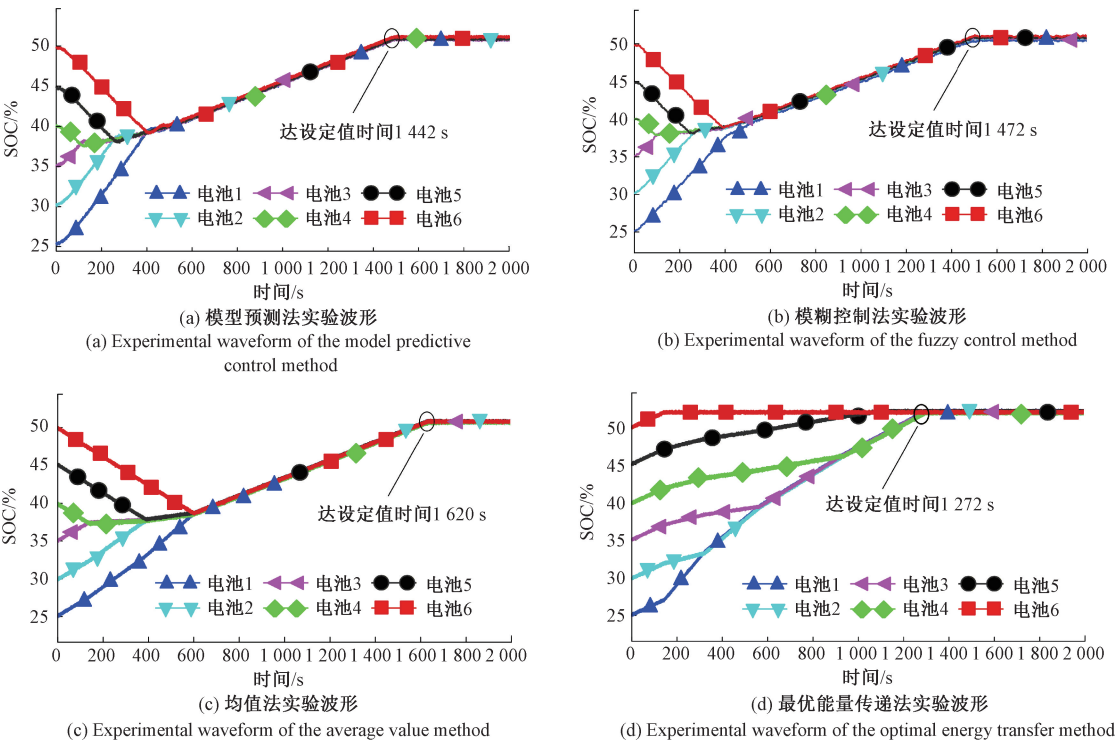


图 16 实物验证波形
Fig. 16 Experimental waveforms from physical validation

实验结果表明,所提出的控制算法相对于现有的其他 3 类方法在加快低 SOC 单体充电的同时,显著减少了高 SOC 单体的充放电频次,从而提升了整体均衡效率。相较于仿真结果,实验过程中均衡速度存在一定延迟,主要源于实际硬件系统中电磁能量转换过程具有非瞬时特性,但实验结果仍充分验证了所提方法的可行性与有效性。

4 结 论

本文提出一种融合 MIP 优化与分层决策的主动均衡方法,突破传统策略的局限:1) 数学严谨性,建立混合整数规划模型,量化均衡速度-损耗帕累托前沿;2) 维度扩展性,分层机制使计算复杂度降低,支持电池组实时控制。本文使用最优能量传递算法以及双向反激变换器作为均衡控制电路时,在电池组较大 SOC 差异与较小 SOC 差异的条件下,以及不同电流充电速率不同充电目标值下都可以实现主动均衡。本文以 6 节电池作为参考数进行试验,若需扩大电池数,需要在控制算法中加大状态变量数目,并在硬件电路中拓展电压检测芯片与信号导通芯片数量即可实现。在本文中,充电状态下,可以准确地将达到充电设定值的高电量电池能量转移至低电量电池中去,加快低电量电池的充电速度。通过信号检测控制

开通相应的变压器开关,保证能量的最优传输,即在加快最低电量电池的充电速度后,依次逐层控制相应开关管加快充电次数,并且降低了高电量电池的充放电次数,保护了高电量电池的健康程度。由于使用的是隔离式均衡控制电路,因此在电能与磁能的转换中,能量传递会出现损失,因此硬件电路达到设定值时间相对于仿真电路将会有所延迟。且通过检测电池电压与电流,作为保护电路,随时断开相应的能量均衡回路,保护单体电池乃至电池组。但由于在能量传输过程中,将更大的电流传递给低电量电池,可能会引起低电量电池的高压冲击,这在以后的研究中将给予改进。

参考文献

[1] 吴松,冯乾隆,谭玲玲. 新能源汽车换电模式研究及发展前景展望[J]. 汽车工业研究, 2022(4): 2-9.
WU S, FENG Q L, TAN L L. Research on battery swapping mode and development prospect of new energy vehicles[J]. Automotive Industry Research, 2022(4): 2-9.
[2] 金帅,董静. 基于数据驱动的锂离子电池健康状态估计研究进展综述[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 45-59.
JIN SH, DONG J. A review of data-driven methods for state of health estimation of lithium-ion batteries [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3):

- 45-59.
- [3] LUO Y F, CHEN GU J, LIU CH L, et al. An active bidirectional balancer with power distribution control strategy based on state of charge for lithium-ion battery pack[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124661.
- [4] CARTER J, FAN ZH, CAO J. Cell equalisation circuits: A review[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 448: 227489.
- [5] ZHANG SH ZH, PENG N, LU H B, et al. A systematic and low-complexity multi-state estimation framework for series-connected lithium-ion battery pack under passive balance control[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 48: 451-461.
- [6] SHANG Y L, ZHU CH, FU Y H, et al. An integrated heater equalizer for lithium-ion batteries of electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4398-4405.
- [7] LIU Y L, MENG J H, YANG F, et al. A switchable indicator for active balance of the lithium-ion battery pack using a bypass equalizer[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107696.
- [8] MANJUNATH K, KALPANA R, SINGH B. A modularized two-stage active cell balancing topology with reduced balancing time for series connected Li-ion battery string[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, 61(1): 502-514.
- [9] FAN T E, LIU S M, YANG H, et al. A fast active balancing strategy based on model predictive control for lithium-ion battery packs[J]. *Energy*, 2023, 279(15): 128028.
- [10] 张玉冕, 冬雷. 锂离子电池主动均衡拓扑研究综述[J]. *电子元件与材料*, 2026, 45(2): 134-144.
- ZHANG Y M, DONG L. Review of active balancing topologies for lithium-ion batteries[J]. *Electronic Components and Materials*, 2026, 45(2): 134-144.
- [11] 刘威, 王友仁, 许煜辰, 等. 基于自适应选择主被动均衡拓扑的机载锂电池电源能量均衡方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(2): 244-252.
- LIU W, WANG Y R, XU Y CH, et al. Energy equalization method for airborne lithium battery power supply based on adaptive selection of active and passive balancing topology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(2): 244-252.
- [12] XIA B ZH, DING F X, YUE SH X, et al. An intelligent active equalization control strategy based on deep reinforcement learning for lithium-ion battery pack[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 86: 111255.
- [13] YUN ZH H, QIN W H, SHI W P, et al. Research on active state of charge balance of battery pack based on two controllable flyback converters[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 57: 106183.
- [14] ZHANG SH ZH, WU SH J, CAO G L, et al. Active equalization for lithium-ion battery pack via data-driven residual charging capacity estimation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 422: 138583.
- [15] WANG CH SH, CAO M K, CAO Y. Battery aging estimation algorithm with active balancing control in battery system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 108: 115055.
- [16] YUE SH X, XIA B ZH, LIANG CH, et al. Temperature-considered active balancing strategy for lithium-ion battery packs with surrogate optimization algorithm[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 108: 115073.
- [17] CASPAR M, SCHÜRMANN T, ANNEKEN M, et al. Active balancing control for distributed battery systems based on cooperative game theory[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107585.
- [18] RAEER M, HEINZELMANN A, ABDESLAM D O. Analysis of an active charge balancing method based on a single nonisolated DC/DC converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(3): 2257-2265.
- [19] 靳炜, 吴云亚, 刘爱忠, 等. 基于移相策略的模块化锂电池均衡器[J]. *太阳能学报*, 2026, 47(2): 726-734.
- JIN W, WU Y Y, LIU AI ZH, et al. Modular lithium battery equalizer based on phase-shift control strategy[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2026, 47(2): 726-734.
- [20] YE Y M, WANG J P, WANG X L. A multi-winding transformer-based active cell equalizer with self-driven switches for series-connected lithium-ion batteries and super-capacitors[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 70: 107971.
- [21] CHEN L P, LAI ZH W, LOPES A M, et al. Modular balancing strategy for lithium battery pack based on adaptive fuzzy logic control and energy path optimization[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 91: 112073.
- [22] ZILIO A, FOGAGNOLO D, GALLO E, et al. A multiport converter for flexible active balancing in Li-ion batteries[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(7): 7085-7094.
- [23] LIU X H, MA T Y, TIAN J Q, et al. A novel double-

layer active equalization scheme for lithium-ion batteries combining wireless power transfer[J]. *Energy*, 2024, 291: 130335.

- [24] PANG H, NAN W ZH, LIU X F, et al. An active equalization strategy for series-connected lithium-ion battery packs based on a dual threshold trigger mechanism[J]. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2024, 3(3): 100206.
- [25] 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.
- [26] ALAM M A, MINAI A F, BAKHSH F I. Isolated bidirectional DC-DC converter: A topological review[J]. *e-Prime: Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024, 8: 100594.
- [27] YUE SH X, XIA B ZH, LIANG CH, et al. Temperature-considered active balancing strategy for lithium-ion battery packs with surrogate optimization algorithm[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 108: 115073.
- [28] 张振强, 马思乐, 姜向远, 等. 基于局部模型网络的锂电池 SOC 估计方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(7): 161-171.
- ZHANG ZH Q, MA S L, JIANG X Y, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries based on local model network[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(7): 161-171.
- [29] 高凤强, 王若宇, 曹光求, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的疏散行人密度预测算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 281-290.
- GAO F Q, WANG R Y, CAO G Q, et al. Research on pedestrian density prediction algorithm for evacuation based on extended Kalman filter[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 281-290.

作者简介



郭爽, 2022 年于中原工学院获得学士学位, 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: 1203016880@qq.com

Guo Shuang received his B.Sc. degree

from Zhongyuan University of Technology in 2022. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interests include lithium battery management systems, active balancing control and state estimation algorithms.



E-mail: sdzzy@cqut.edu.cn

Zheng Yong (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2005, his M.Sc. degree from Chongqing Institute of Technology in 2008, and his Ph.D. degree from Hefei University of Technology in 2011. He is currently an associate research fellow and a 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.



E-mail: aliasif@gcu.edu.pk

Ali Asif received his B.Sc. degree from Government College University Lahore in 1999, his M.Sc. degree from Government College University Lahore in 2003, and his Ph.D. degree from University of Stuttgart in 2011. He is currently an assistant professor at the Department of Physics, Government College University Lahore. His main research interests include embedded systems, nondestructive testing and evaluation (NDT&E), neural networks, sensors, and instrumentation technology.

程杨, 2014 年于重庆理工大学获得学士学位, 2017 年于西南大学获得硕士学位, 现为清安储能技术(重庆)有限公司研发工程师兼项目部经理, 主要研究方向为新能源及新型储能。

E-mail: yang.cheng@qaes.com.cn

Cheng Yang received his B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2014, and his M.Sc. degree from Southwest University in 2017. He is currently an R&D engineer and a project manager in Qingan Energy Storage Technology (Chongqing) Co., Ltd.. His main research interests include new energy and advanced energy storage technologies.