DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.185 **中图分类号**：TM34 **文献标志码**：A

可充放静多模式工作的模块化可重构均衡电路

吕 高，李 悦(中国电源学会学生会员)，杨 海，张嘉蕾
(山西大学电力与建筑学院，太原 030006)

摘要：随着锂离子电池在工业及生活中的广泛应用，针对目前电池组均衡过程中存在的能量利用率低、均衡时间长等问题，改进现有模块化和可重构电路，提出一种可充放静多模式工作的模块化可重构电池均衡电路。首先，对该均衡电路模块化处理和数学建模。模块内使用双向 Cuk 变换器均衡；在模块间，充电均衡采用可重构电路方法，放电和静置均衡采用双向 Buck-Boost 变换器实现均衡，并针对不同的均衡情况制定对应的控制策略。然后，构建所提均衡电路的仿真模型，与传统均衡电路进行对比，分析电路的均衡时间、均衡效率与能量损失比。最后，通过与半实物仿真平台 Typhoon 结合，搭建电池均衡电路，验证了所提均衡电路的有效性。

关键词：电池均衡；模块化；动态控制；可重构电路

Modular Reconfigurable Equalization Circuits with Multi-mode Operation of Charge, Discharge and Static State

LÜ Gao, LI Yue, *Student Member*, *CPSS*, YANG Hai, ZHANG Jialei
(School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: With the widespread application of lithium-ion batteries in industry and daily life, aiming at the existing problems of low energy utilization efficiency and long equalization time during battery pack equalization, the existing modular and reconfigurable circuits are improved, and a modular reconfigurable battery equalization circuit with multi-mode static charge-discharge operation is proposed. First, modularization processing and mathematical modeling of the equalization circuit are carried out. A bidirectional Cuk converter is used within the module; and a reconfigurable method is used for charging equalization between modules; discharge and static equalization dynamically modularize the battery pack with a bidirectional Buck-Boost converter. The battery equalization circuit is mathematically modeled, the working principle of the circuit is introduced, and the corresponding control strategies are developed for different equalization situations. Then, the simulation model of the proposed equalization circuit is constructed and compared with the traditional equalization circuit, and the equalization time, equalization efficiency and energy loss ratio of the circuit are analyzed. Finally, in combination with the hardware-in-the-loop simulation platform Typhoon, the battery equalization circuit is built, and the effectiveness of the proposed equalization circuit is verified.

Keywords: Battery equalization; modularization; dynamic control; reconfigurable circuits

近年来，随着能源需求的增长和电动汽车的普及，能源的储存与利用正受到越来越多的关注。锂离子电池以能量密度高、循环寿命长、无记忆等优点受到新能源领域的重视[1]，但其电压受限于材料的特性，一般为 2.5~4.2 V，无法满足实际应用中的工作要求。为了满足电动汽车的动力需求，锂离子电池常以电池组的形式出现，但由于生产工艺、自放电率、内阻和容量以及使用环境的不同，电池组能量不一致，影响了电池组的使用寿命和能量利用率[2]。电池均衡技术是解决电池组荷电状态 SOC(state of charge)不一致问题的关键技术，能有效提高电池组的综合性能，延长电池寿命[3]。

收稿日期：2024-12-18；**修回日期**：2025-02-09；**录用日期**：2025-02-23；**网络首发日期**：2025-03-28

因此，电池均衡方案已成为新能源汽车领域的研究热点[4-5]。

电池组由多个电池串联组成，每个电池的充放电电流相同[6-7]。由于电池组的“水桶效应”，当电池组中的电池出现 SOC 不一致时，电池必须在充满电时与外部电源断开连接，以防止电池过充；类似地，电池必须在放完电时与负载断开连接，以防止电池过放[8-9]。为了解决上述问题，均衡技术的研究主要从被动均衡和主动均衡 2 个方面开展[10-11]。被动均衡是耗能均衡，将单个电池与电阻并联，以热能的形式耗散高能量电池的多余能量，控制简单、成本低，但存在损耗大、均衡效率低等问题[12]。主动均衡是一种将高能量电池中的电能传递到低能量电池的均衡方式，主要利用电感、电容、变压器等储能元件作为能量传递介质，实现能量的均衡[13]。

然而，在现有的模块化均衡电路中，主要通过对电池进行分组均衡，模块内和模块间采用不同的均衡拓扑，达到提高均衡效率的目的[14-18]。文献[14]提出一种基于反激变换器的锂离子电池组双层均衡拓扑电路，模块内采用 Buck-Boost 电路均衡，模块间利用双向反激变压器进行均衡；文献[15]提出了一种模块间为改进型 Cuk 斩波电路，模块内为单电感均衡拓扑的双层拓扑结构；文献[16]提出了一种基于电压倍增器的电压均衡拓扑，模块内通过电压倍增器进行均衡，模块间采用 Buck-Boost 实现上下均衡。

在现有的可重构均衡电路[19-23]中，没有储能元件传递能量，主要通过控制电路中开关管的通/断实现充电/放电均衡，提高电池组的使用寿命。文献[19]将基于开关电感的 Buck-Boost 均衡电路和可重构均衡电路结合，设计了可重构 Buck-Boost 充电均衡拓扑；文献[20]提出了基于多智能体强化学习的可重构电池组串并联均衡方法，有效解决了串并联电池单体的均衡问题；文献[21]提出了一种新型均衡拓扑结构，内层采用可重构均衡电路，外层采用单个改进 Buck-Boost 电路均衡。

本文主要工作与现有工作区别如下：文献[14-16]是通过 MOSFET1 和电感元件进行模块化均衡，相比之下，本文引入 MOSFET2 和 MOSFET3，将模块化进行扩展，在不增加均衡电路的前提下，可实现相邻电池组传递式均衡和电池组充电可重构均衡；文献[19-21]是通过 MOSFET1 和 MOSFET3 实现充/放电的可重构均衡，相比之下，本文引入 MOSFET2 和电感元件，可实现电池组的充电/放电和静置均衡及模式切换，弥补了传统可重构电路无法实现静置均衡的缺陷。综上，本文提出了一种动态模块化与可重构相结合的均衡拓扑。首先，介绍了所提电路不同模式下的数学模型和工作原理，建立电池组 SOC、均衡电流及占空比之间的关联特性；其次，针对充电和放电/静置 2 类均衡模式，引入电池均衡控制策略；最后，搭建均衡电路的仿真模型和半实物模型，对所提拓扑进行了可行性分析。

1 均衡电路工作原理及性能指标

本文所提的模块化可重构均衡电路拓扑如图 1 所示，电池组被分为 m 个模块，每个模块包含 n 个

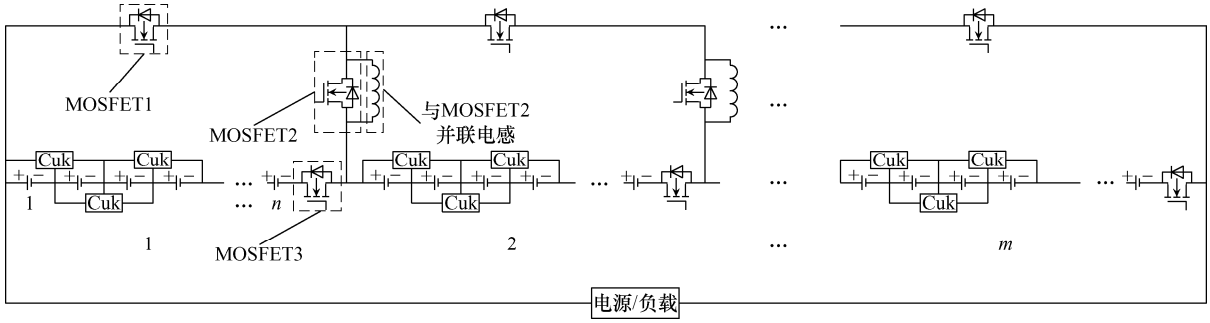


图 1 本文所提模块化可重构拓扑结构

Fig. 1 Topology of the proposed modular reconfigurable circuit

电池单体。模块内均衡电路是双向 Cuk 变换器，模块间均衡电路是 MOSFET2 和 MOSFET3 开通，形成充电和放电/静置模式下的均衡拓扑，具体见表 1，其中 PWM 为脉冲宽度调制(pulse width modulation)。充电模式下均衡拓扑是 MOSFET2 开通，将其并联电感短路，工作在可重构均衡拓扑状态；放电/静置模式下均衡拓扑是 MOSFET3 开通，形成 Buck-Boost 电路。

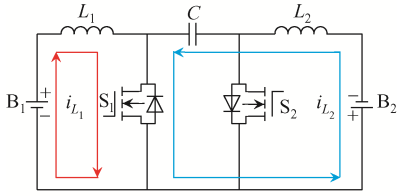
表 1　不同模式元件开断情况

Tab. 1 Different mode components open and close

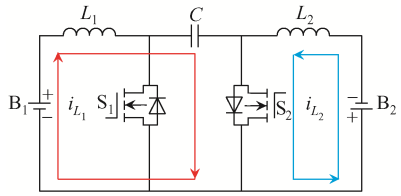
模块间	MOSFET1	MOSFET2	MOSFET3	均衡拓扑
充电	PWM	开通	PWM	可重构
放电/静置	PWM	PWM	开通	Buck-Boost

1.1 模块内均衡工作原理

对于双向 Cuk 变换器，它由电感 L_1 和 L_2、电容 C、开关管 S_1 和 S_2 组成，相邻电池之间的均衡，可通过控制 S_1 和 S_2 的通断来实现。假设 Cuk 变换器中的 S_1 和 S_2 具有理想特性，并且电池 B_1 的能量大于电池 B_2，此时均衡过程可分为 2 个阶段，如图 2 所示。图中：i_{L_1}、i_{L_2} 分别为流经 L_1、L_2 的电流；D 为 S_1 的占空比；T 为控制 Cuk 变换器运行的一个 PWM 周期。由于不同电感的大小不同，为了保证相邻电池均衡效果，可令 L_1=L_2=L，L 为等值电感。



(a) 第1阶段(0, DT]



(b) 第2阶段(DT, T]

图 2　双向 Cuk 变换器工作时的各阶段电路

Fig. 2 Circuits of each stage of the bidirectional Cuk converter

第 1 阶段(0, DT]：S_1 开通，S_2 关断，如图 2(a)所示。B_1 通过 L_1 放电，L_1 进行储能，i_{L_1} 增加。同时，C 释放能量为 B_2 和 L_2 充电，进行能量储存，i_{L_2} 增加。B_1 和 B_2 在此阶段的电压分别为

$$\begin{cases} U_{B_1} = L\dfrac{\mathrm{d}i'_{L_1}}{\mathrm{d}t} \\ U_{B_2} = U_C - L\dfrac{\mathrm{d}i'_{L_2}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \quad 0 < t \leqslant DT \tag{1}$$

式中：U_{B_1}、U_{B_2} 分别为 B_1、B_2 的电压；i'_{L_1} 为第 1 阶段流经 L_1 的电流；i'_{L_2} 为第 1 阶段流经 L_2 的电流。

第 2 阶段(DT, T]：当 t=DT 时，i_{L_1} 和 i_{L_2} 均达到最大值，此时 S_1 关断，S_2 的体二极管导通，如图 2(b)所示。B_1 和 L_1 向 C 释放能量，同时，L_2 释放能量，B_2 充电。B_1 和 B_2 在此阶段的电压分别为

$$\begin{cases} U_{B_1} = L\dfrac{\mathrm{d}i''_{L_1}}{\mathrm{d}t} + U_C \\ U_{B_2} = -L\dfrac{\mathrm{d}i''_{L_2}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \quad DT < t \leqslant T \tag{2}$$

式中：i''_{L_1} 为第 2 阶段流过 L_1 的电流；i''_{L_2} 为第 2 阶段流过 L_2 的电流；U_C 为 C 两端的电压。根据式(1)和式(2)可以推导出 i'_{L_1}、i'_{L_2}、i''_{L_1}、i''_{L_2} 的表达式分别为

$$\begin{cases} i'_{L_1} = \dfrac{U_{B_1}}{L}t \\ i'_{L_2} = \dfrac{U_C - U_{B_2}}{L}t \end{cases} \quad 0 < t \leqslant DT \tag{3}$$

$$\begin{cases} i''_{L_1} = \dfrac{U_{B_1}}{L}DT - \dfrac{(U_C - U_{B_1})}{L}(t - DT) \\ i''_{L_2} = \dfrac{U_C - U_{B_2}}{L}DT - \dfrac{U_{B_2}}{L}(t - DT) \\ DT < t \leqslant T \end{cases} \tag{4}$$

在 T 内，电感电流的变化均为 0，即电流的增、减相等，具体表达式为

$$\begin{cases} i'_{L_1} + i''_{L_1} = 0 \\ i'_{L_2} + i''_{L_2} = 0 \end{cases} \tag{5}$$

将式(5)代入式(3)和式(4)，推导可得 B_1、B_2 在 T 内释放的平均均衡电流 I_{L_1}、I_{L_2} 分别为

$$\begin{cases} I_{L_1}=\dfrac{U_{B_1}}{2L}DT \\ I_{L_2}=\dfrac{U_{B_2}}{2L}(1-D)T \end{cases} \tag{6}$$

当 B_1 的能量小于 B_2 时，分析过程类似，在此不再赘述。

每个模块包含 n 个电池单体和 $n-1$ 个双向 Cuk 变换器。双向 Cuk 变换器可以在相邻电池之间传递能量，均衡电流可表示为

$$\begin{cases} I_{\mathrm{cl}_{i,j}}=k_{i,j}\,\mathrm{sgn}(S_{\mathrm{SOC}_{i,j}}-S_{\mathrm{SOC}_{i,j+1}})I_{\mathrm{c}_{i,j}} \\ I_{\mathrm{cr}_{i,j+1}}=k'_{i,j}\,\mathrm{sgn}(S_{\mathrm{SOC}_{i,j}}-S_{\mathrm{SOC}_{i,j+1}})I_{\mathrm{c}_{i,j}} \\ k_{i,j}=1\,,\ k'_{i,j}=\alpha_{i,j} \qquad S_{\mathrm{SOC}_{i,j}}\geqslant S_{\mathrm{SOC}_{i,j+1}} \\ k_{i,j}=\alpha_{i,j}\,,\ k'_{i,j}=1 \qquad S_{\mathrm{SOC}_{i,j}}<S_{\mathrm{SOC}_{i,j+1}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：i 为模块序数，$1\leqslant i\leqslant m$；j 为电池单体序数，$1\leqslant j\leqslant n$；$I_{\mathrm{cl}_{i,j}}$ 和 $I_{\mathrm{cr}_{i,j+1}}$ 分别为通过电池单体 j 和 $j+1$ 的均衡电流；$k_{i,j}$ 和 $k'_{i,j}$ 分别为电池单体 j 和 $j+1$ 的电流分配系数；$S_{\mathrm{SOC}_{i,j}}$ 为第 i 个模块内第 j 个电池单体的 SOC；sgn(·)为符号函数，根据相邻 $S_{\mathrm{SOC}_{i,j}}$ 和 $S_{\mathrm{SOC}_{i,j+1}}$ 差值的正、负决定均衡电流的方向；$I_{\mathrm{c}_{i,j}}$ 和 $\alpha_{i,j}$ 分别为模块内均衡电流和能量传递效率。$B_{i,j}$ 为第 i 个模块内第 j 个电池单体，$I_{\mathrm{ce}_{i,j}}$ 为 $B_{i,j}$ 的总均衡电流，其表达式为

$$I_{\mathrm{ce}_{i,j}}=-I_{\mathrm{cr}_{i,j-1}}+I_{\mathrm{cl}_{i,j}} \tag{8}$$

由于在一个模块内，第 1 个和第 n 个电池单体只与 1 个双向 Cuk 变换器相连，而其他的电池单体与 2 个双向 Cuk 变换器相连，因此在式(8)中，1 个模块中的第 1 个电池单体对应的 $I_{\mathrm{cr}_{i,0}}$ 始终为 0，第 n 个电池单体对应的 $I_{\mathrm{cl}_{i,n}}$ 也始终为 0。将 Cuk 变换器中得到的电流代入式(8)，并考虑连接到不同位置单个电池的均衡器数量和位置不同，可以得出流经电池模块内不同电池的总均衡电流分别为

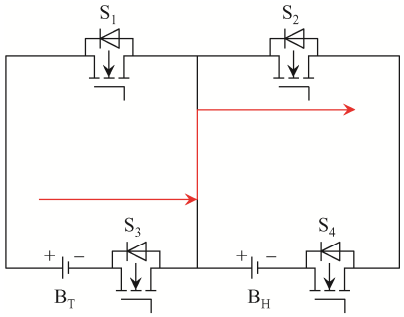
$$\begin{cases} I_{\mathrm{ce}_{i,1}}=\dfrac{U_{\mathrm{B}_{i,1}}T}{2L}D_{i,1} \\ I_{\mathrm{ce}_{i,j}}=\dfrac{U_{\mathrm{B}_{i,j}}T}{2L}[(1-D_{i,j-1})+D_{i,j}] \qquad 1<j<n \\ I_{\mathrm{ce}_{i,n}}=\dfrac{U_{\mathrm{B}_{i,n}}T}{2L}(1-D_{i,n}) \end{cases} \tag{9}$$

式中：$U_{\mathrm{B}_{i,1}}$、$U_{\mathrm{B}_{i,j}}$、$U_{\mathrm{B}_{i,n}}$ 分别为第 i 个模块内第 1 个、第 j 个、第 n 个电池单体的电压；$D_{i,1}$、$D_{i,j-1}$、$D_{i,n}$ 分别为第 i 个模块内，连接第 1 个与第 2 个电池单体之间、连接第 $j-1$ 个与第 j 个电池单体之间、连接第 $n-1$ 个与第 n 个电池单体之间的 Cuk 变换器的占空比。

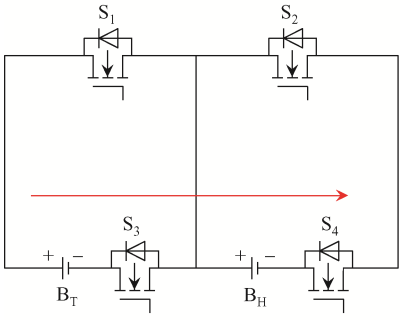
1.2 模块间均衡工作原理

1.2.1 充电均衡工作原理

在充电均衡拓扑下，模块之间没有储能元件，采用可重构均衡拓扑，对每个模块的电池组 SOC 进行比较，然后按照从小到大的顺序依次对电池模块充电。可重构电路工作时的各阶段电路如图 3 所示。



(a) 第1阶段



(b) 第2阶段

图 3 可重构电路工作时的各阶段电路

Fig. 3 Operation stages of the reconfigurable circuit

第 1 阶段：S_1 关断，S_3 开通；S_4 关断，S_2 开通，如图 3(a)所示。电池组 B_T 与 S_2、S_3 构成回路，当 B_T 的能量与电池组 B_H 相近时，进入第 2 阶段。

第 2 阶段：S_1 关断，S_3 开通；S_4 开通，S_2 关断，如图 3(b)所示。B_T、S_3、B_H 和 S_4 构成回路，此时，B_T 和 B_H 同时充电。

当 B_H 的能量小于 B_T 时，分析过程类似，在此

不再赘述。将上述分析延伸到 m 个电池模型中，可对电池组中任意电池进行分析。

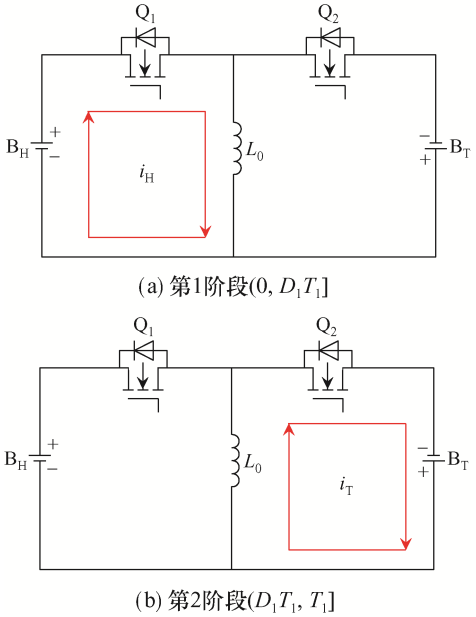
第 j 个电池单体的总充电电流由电池充电器提供的电流和来自邻近电池的均衡电流组成。结合可重构拓扑结构，每个电池模块依次与主电路相连。在不同模块内流经第 j 个电池的总电流为

$$\begin{cases} I_{\mathrm{B}_{i,1}} = I_{\mathrm{ce}_{i,1}} + I_{\mathrm{c}} \\ I_{\mathrm{B}_{i,j}} = I_{\mathrm{ce}_{i,j}} + I_{\mathrm{c}} \qquad 1 < j < n \\ I_{\mathrm{B}_{i,n}} = I_{\mathrm{ce}_{i,n}} + I_{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{10}$$

式中，$I_{\mathrm{B}_{i,j}}$ 和 I_{c} 分别为总充电电流和电池充电器提供的电流。

1.2.2　放电/静置均衡工作原理

在放电/静置 2 种模式下，模块内均衡方式与充电均衡相同，不同的是模块间的均衡拓扑，其主要采用双向 Buck-Boost 变换器进行均衡。对于任意双向 Buck-Boost 变换器，均由电感 L_0 和开关管 Q_1 及 Q_2 组成(假设开关管具有理想特性)，通过控制开关管的开通和关断，实现相邻电池组之间的能量均衡，其工作时的 2 个阶段电路如图 4 所示。图中：i_{H} 和 i_{T} 分别为流过 B_{H} 和 B_{T} 的电流；D_1 为开关管控制信号的占空比；T_1 为控制双向 Buck-Boost 变换器运行的一个 PWM 周期。



(a) 第1阶段(0, D_1T_1]

(b) 第2阶段(D_1T_1, T_1]

图 4　双向 Buck-Boost 变换器工作时的各阶段电路

Fig. 4 Circuit of each operation stage of the bidirectional Buck-Boost converter

第 1 阶段(0, D_1T_1]：Q_1 开通，Q_2 关断，如图 4(a)所示。Q_1、L_0 和 B_{H} 组成回路，B_{H} 通过 L_0 放电并储存能量，i_{H} 增加。B_{H} 电压 $U_{\mathrm{B}_{\mathrm{H}}}$ 的表达式为

$$U_{\mathrm{B}_{\mathrm{H}}} = L_0 \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{H}}}{\mathrm{d}t} \qquad 0 < t \leqslant D_1T_1 \tag{11}$$

第 2 阶段(D_1T_1, T_1]：Q_2 开通，Q_1 关断，如图 4(b)所示。Q_2、L_0 和 B_{T} 组成回路，B_{T} 通过 L_0 充电，L_0 释放能量。B_{T} 电压 $U_{\mathrm{B}_{\mathrm{T}}}$ 的表达式为

$$U_{\mathrm{B}_{\mathrm{T}}} = -L_0 \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{T}}}{\mathrm{d}t} \qquad D_1T_1 < t \leqslant T_1 \tag{12}$$

根据式(11)和式(12)，求解得电流表达式为

$$\begin{cases} i_{\mathrm{H}} = \dfrac{U_{\mathrm{B}_{\mathrm{H}}}}{L_0} t & 0 < t \leqslant D_1T_1 \\ i_{\mathrm{T}} = \dfrac{U_{\mathrm{B}_{\mathrm{H}}}}{L_0} D_1T_1 - \dfrac{U_{\mathrm{B}_{\mathrm{T}}}}{L_0} t & D_1T_1 < t \leqslant T_1 \end{cases} \tag{13}$$

此外在 T_1 内，流经 B_{H} 和 B_{T} 的平均均衡电流 I_{H} 和 I_{T} 分别为

$$\begin{cases} I_{\mathrm{H}} = \dfrac{U_{\mathrm{B}_{\mathrm{H}}}}{2L_0} D_1^2 T_1 \\ I_{\mathrm{T}} = \dfrac{U_{\mathrm{B}_{\mathrm{T}}}}{2L_0} D_1(1-D_1) T_1 \end{cases} \tag{14}$$

1.2.3　模块间均衡总括

与模块内分析过程类似，用于在相邻电池组 i 和 i+1 之间传递能量。均衡电流表示为

$$\begin{cases} I_{\mathrm{ml}_i} = k_{m_i} \operatorname{sgn}(S_{\mathrm{SOC}_i} - S_{\mathrm{SOC}_{i+1}}) I_{m_i} \\ I_{\mathrm{mr}_{i+1}} = k'_{m_i} \operatorname{sgn}(S_{\mathrm{SOC}_i} - S_{\mathrm{SOC}_{i+1}}) I_{m_i} \\ k_{m_i} = 1, k'_{m_i} = \beta_{m_i} \quad S_{\mathrm{SOC}_i} < S_{\mathrm{SOC}_{i+1}} \\ k_{m_i} = \beta_{m_i}, k'_{m_i} = 1 \quad S_{\mathrm{SOC}_i} < S_{\mathrm{SOC}_{i+1}} \end{cases} \tag{15}$$

式中：I_{ml_i} 和 $I_{\mathrm{mr}_{i+1}}$ 分别为通过模块间两侧电池组的第 i 个和第 i+1 个均衡电流；k_{m_i}、k'_{m_i} 分别为电池组 i、i+1 的电流分配系数；I_{m_i} 和 β_{m_i} 分别为模块间的均衡电流和能量传递效率。I_{em_i} 为电池模块的总均衡电流，表达式为

$$I_{\mathrm{em}_i} = -I_{\mathrm{mr}_{i-1}} + I_{\mathrm{ml}_i} \tag{16}$$

由于第 1 个和第 m 个电池组模块只与 1 个模

块间均衡拓扑连接，因此其相应的 I_{mr_0} 和 I_{ml_m} 总是设置为 0。将在 Buck-Boost 变换器中获得的电流代入式(16)，并考虑到与不同位置的电池组相连的模块间均衡拓扑的数量和位置差异，可以推导出流经电池组的电流为

$$\begin{cases} I_{m_1}=\dfrac{U_{\mathrm{B}m_1}T_1}{2L_1}D_{m_1}^2 \\ I_{m_i}=\dfrac{U_{\mathrm{B}m_i}T_1}{2L_1}[D_{m_{i-1}}(1-D_{m_{i-1}})+D_{m_i}^2 \qquad 1<i<m \\ I_{m_m}=\dfrac{U_{\mathrm{B}m_m}T_1}{2L_1}D_{m_{m-1}}(1-D_{m_{m-1}}) \end{cases} \tag{17}$$

式中：$U_{\mathrm{B}m_1}$、$U_{\mathrm{B}m_i}$、$U_{\mathrm{B}m_m}$ 分别为第 1 个、第 i 个、第 m 个电池组模块的电压；D_{m_1}、$D_{m_{i-1}}$、$D_{m_{m-1}}$ 分别为连接第 1 个与第 2 个电池组模块之间、连接第 i−1 个与第 i 个电池组模块之间、连接第 m−1 个与第 m 个电池组模块之间的占空比。

1.3 性能指标

为了对比能量损失，采取没有外界影响的静置均衡，得出均衡效率 α，即电池获得的电量总和与电池失去的电量总和的比值，可表示为

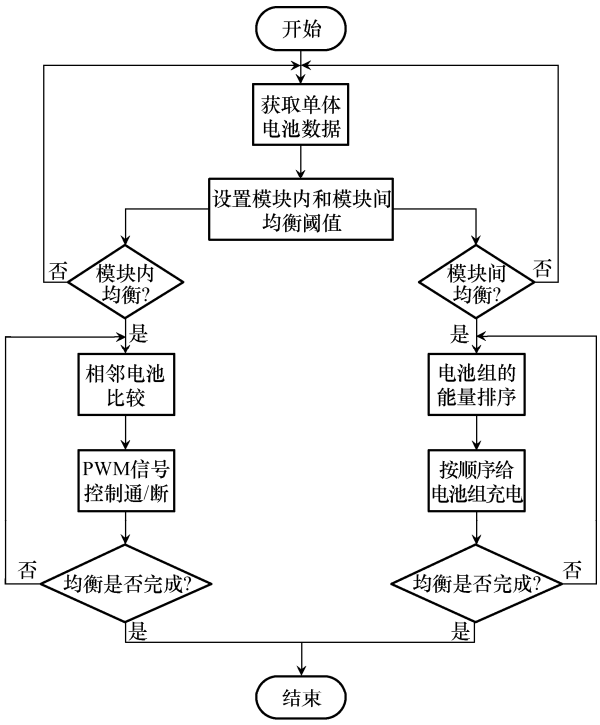
$$\alpha=\frac{\sum S_{\mathrm{SOC_{get}}}}{\sum S_{\mathrm{SOC_{loss}}}} \tag{18}$$

式中，$\sum S_{\mathrm{SOC_{get}}}$、$\sum S_{\mathrm{SOC_{loss}}}$ 分别为均衡结束时电池获得、失去的 SOC 总和。

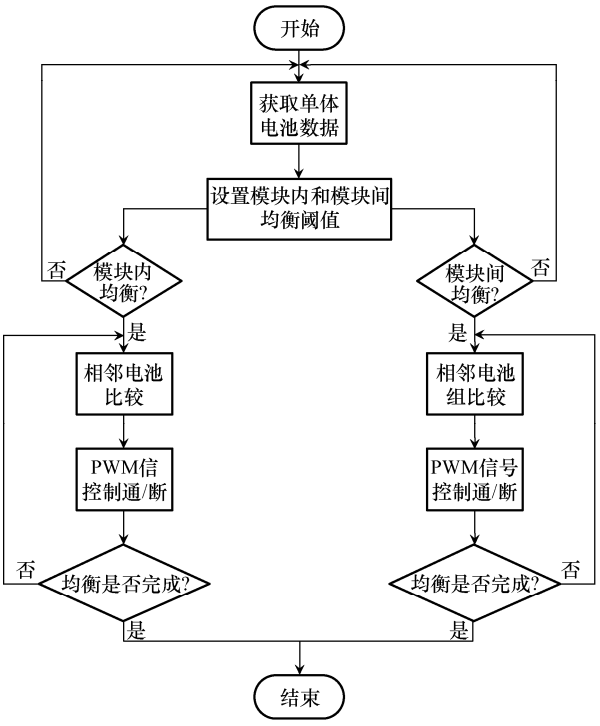
2 均衡控制策略

均衡控制策略主要通过对单个电池之间以及电池模块之间的能量状态进行比对，在满足均衡阈值的前提下，发出 PWM 信号控制均衡电路中 MOSFET 的通/断，最终实现均衡。均衡控制策略主要分为 3 个阶段，即均衡阈值设置、电池模块内均衡和电池模块间均衡，具体流程如图 5 所示。

阶段 1 均衡阈值设置：本文将电池 SOC 差值作为均衡阈值。在充电均衡策略中，分别设置模块内和模块间的电池均衡阈值为 3.0%和 1.5%；在静置/放电均衡策略中，分别设置模块内和模块间的电池均衡阈值为 3.0%和 5.0%。当模块内或模块间



(a) 充电均衡策略



(b) 静置/放电均衡策略

图 5 均衡策略流程

Fig. 5 Flow chart of equalization strategies

的电池间 SOC 差值超过阈值时，系统启动对应的均衡控制流程；若差值未超过阈值，则均衡控制流程保持关闭状态。

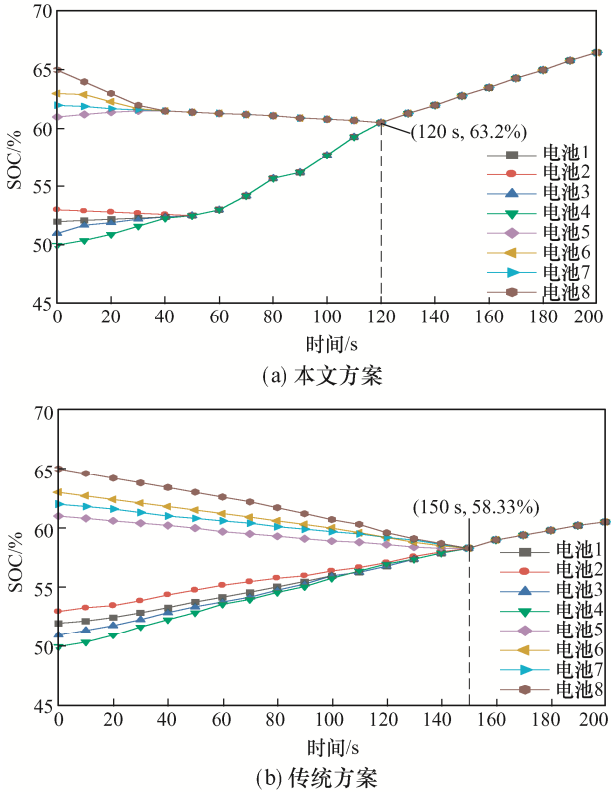
阶段 2 电池模块内均衡：3 种模式下，电池模块内均采用双向 Cuk 变换器进行均衡。比较相邻电池 SOC 大小，若超过模块内均衡阈值，则判定为需均衡状态，控制相应电池的 MOSFET 开通，形成能量传递通道，实现模块内电池单体的均衡；若未超过模块内均衡阈值，则保持当前状态，不进行能量转移。

阶段 3 电池模块间均衡：在充电模式下，模块间均衡运用可重构拓扑，按照各电池模块 SOC 从小到大的优先级，依次接入充电回路进行补电，直至所有模块的 SOC 差值小于模块间均衡阈值，均衡过程终止。在静置和放电模式下，模块间均衡与模块内均衡策略一致，通过比较相邻电池模块之间的 SOC 进行均衡。

3　仿真分析

为了验证本文所提均衡方案(本文方案)的可行性，在 MATLAB/ Simulink 仿真平台上建立了模型并进行了仿真。选择 8 块额定电压为 3.7 V、额定容量为 3.2 A·h 的锂离子电池组成的电池组作为均衡对象。均衡仿真模型由电池模块、双层选择开关、双向 Cuk 变换器、开关控制模块、充电均衡算法模块、静置/放电均衡算法模块和显示模块组成。分别采用本文提出的新型均衡电路和传统均衡电路[11]进行仿真验证和比较，观察电池在充电、静置和放电条件下的均衡效果。均衡充、放电是通过恒流充、放电来验证的。模拟前，将 8 块电池设置不同的初始 SOC，分别为 52%、53%、51%、50%、61%、63%、62%和 65%。

图 6(a)和(b)分别显示了在充电均衡实验中，本文方案和传统方案下各电池 SOC 的变化情况。在充电均衡过程中，使用本文方案和传统方案分别需要 120 s 和 150 s 达到均衡。均衡完成时，本文方案的 SOC 平均值为 63.20%，传统方案为 58.33%。由此可见，与传统方案相比，本文方案平均可为每个电池多充 4.87%的电量，提高了能量利用率，减少了平衡所需的时间，有利于减少大功率电池过充电现象的发生，降低充电过程中对电池的损坏。



(a) 本文方案

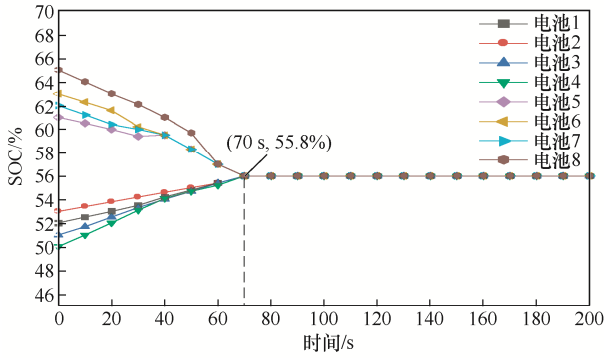
(b) 传统方案

图 6　充电模式下的本文方案和传统方案对比

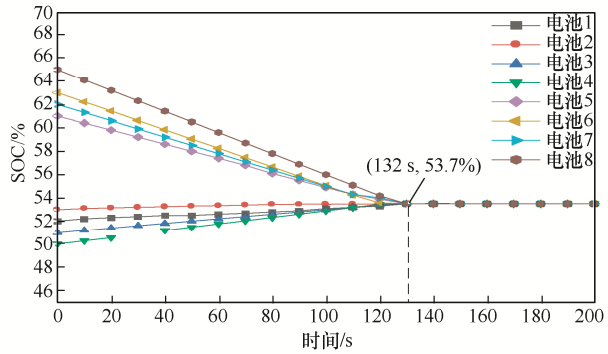
Fig. 6 Comparison of the proposed and conventional schemes under charging mode

图 7(a)和(b)分别显示了在静置均衡实验中，本文方案和传统方案下各电池的 SOC 变化情况。在静置均衡过程中，使用本文方案和传统方案达到均衡分别需要 70 s 和 132 s，本文方案的均衡速度比传统方案提高 46.97%。在传统方案中，电池要经过多次能量转移，损耗较大，而本文方案减少了均衡过程中的能量转移次数，降低了能量损耗，提高了均衡效率。

图 8(a)和(b)分别显示了在放电均衡实验中，本文方案和传统方案下各电池的 SOC 变化情况。在放电均衡过程中，使用本文方案和传统方案达到均衡分别需要 80 s 和 131 s，本文方案的均衡速度比传统方案提高 38.93%，可以大大减少电池组中低



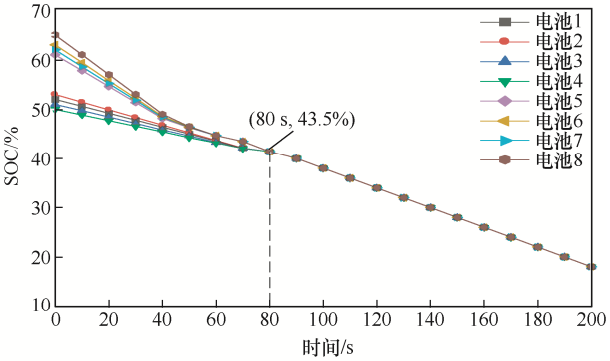
(a) 本文方案



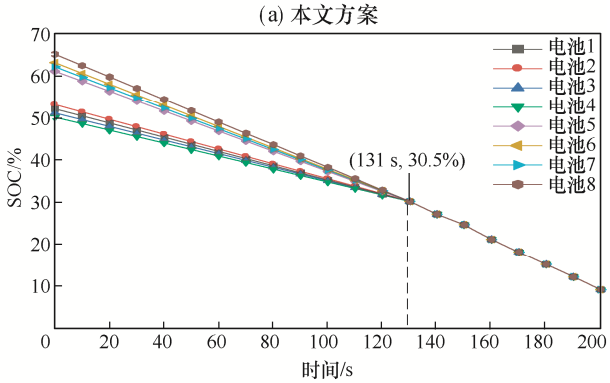
(b) 传统方案

图 7 静置模式下的本文方案和传统方案对比

Fig. 7 Comparison of the proposed and conventional schemes under static mode



(a) 本文方案



(b) 传统方案

图 8 放电模式下的本文方案和传统方案对比

Fig. 8 Comparison of the proposed and conventional schemes under discharging mode

功率电池单体在放电后期的过放电现象，减少电池损坏，延长电池寿命。

以图 7 所示的 8 个电池为例，在静置状态下进行分析，均衡对比结果见表 2，本文方案的均衡效率比传统方案高 37.57%，可以使转换过程中能量损失大大减少。

表 2 电池均衡效率

Tab. 2 Battery equalization efficiency

/%

均衡类型	本文方案		传统方案		均衡效率比较
	电池均衡时 SOC	均衡效率 α	电池均衡时 SOC	均衡效率 α	
静置	55.80	61.87	53.70	24.30	37.57↑

4 实验验证

为验证本文所提均衡方案的有效性，搭建了均衡实验平台，如图 9 所示，主要由实验电池、电源模块、均衡模块和 Typhoon 半实物平台组成。为减少开关管开通和关断时产生的损耗，系统频率不宜设置过高，选用 5 kHz 作为开关信号频率，选用型号为 NCR18650BD 的实验电池。该均衡电路的具体关键参数见表 3。

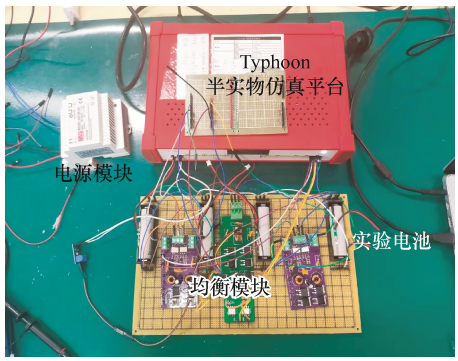


图 9 实验平台示例

Fig. 9 Example of experimental platform

若以 SOC 作为均衡目标，需要获取各电池单体准确可靠的 SOC。由于 SOC 的获取通常过于烦琐，而电池端电压的采集不仅方便快捷且精度较高，且通过 Typhoon 半实物仿真平台可快速获得电池电压，故实验中以电池端电压作为均衡目标变量。实验主要对电池组在充电、静置及放电状

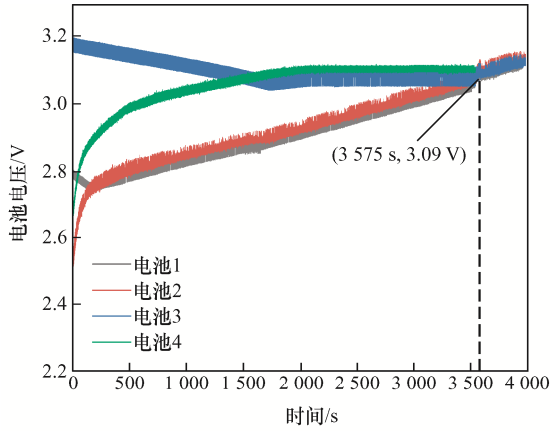
态下进行电池均衡研究。

表 3　实验参数

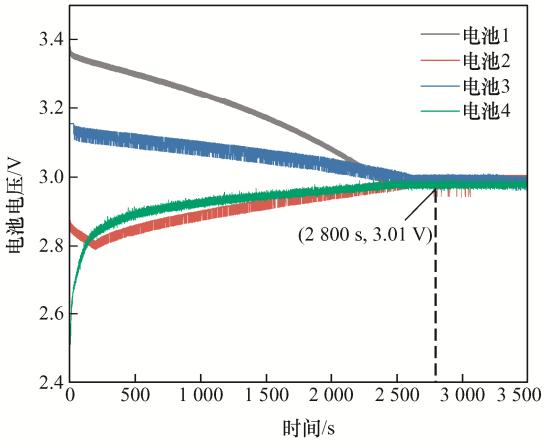
Tab. 3 Experimental parameters

参数	数值
电池容量/mA·h	3 200
开关频率/kHz	5
L_0/μH	22
L_1, L_2/μH	100, 100
C/μF	47

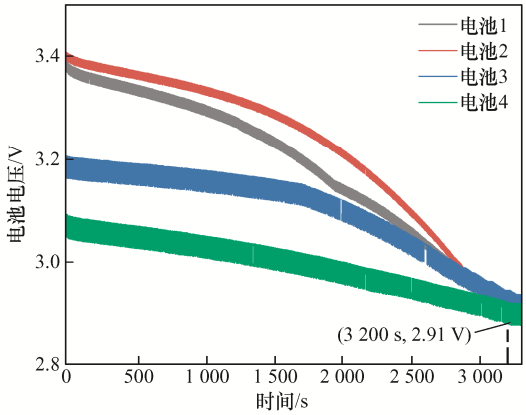
充电均衡实验中，4 块电池的初始电压分别为 2.81、2.34、3.20 和 2.47 V，最大压差为 860 mV，3 575 s 后，电池达到均衡；静置均衡实验中，4 块电池的初始电压分别为 3.38、2.87、3.16 和 2.51 V，最大压差为 868 mV，2 800 s 后，电池达到均衡；放电均衡实验中，设置放电电阻为 50 Ω，4 块电池的初始电压分别为 3.42、3.43、3.21 和 3.10 V，最大压差为 330 mV，3 200 s 后，电池达到均衡，实验结果如图 10 所示。



(a) 充电状态下



(b) 静置状态下



(c) 放电状态下

图 10　均衡结果

Fig. 10 Results of equilibrium

通过 4 块锂离子电池的均衡实验，验证了本文提出的均衡电路在 3 种状态下均衡时均具有良好的精度和均衡效率，有效解决了电池单体及电池组间的不一致性问题。

5　结语

基于电池均衡技术可有效降低串联电池组在使用过程中的不一致性，本文提出了一种基于模块化的可重构电池均衡拓扑电路。该电路结合了模块化拓扑和可重构拓扑的均衡优势，确保每个均衡模块均参与电池组的能量传递，增加了均衡电流，加快了均衡速度。首先，针对单个电池和电池组，分别建立了均衡电流与控制信号占空比之间的数学关系，设计了均衡策略。接着，分别在充电、放电和静置 3 种状态下，与传统均衡电路对比仿真验证，表明了本文方案均衡速度更快，均衡效果更好。最后，通过搭建半实物平台验证了本文所提均衡电路的可行性，证明了本文均衡方案的有效性。

参考文献：

[1] 刘红锐，李海瑞，韦向阳，等. 一种模块化的高性能蓄电池均衡器研究[J]. 电工技术学报，2023，38(17)：4574-4585.

Liu Hongrui, Li Hairui, Wei Xiangyang, et al. Research on a modular high performance battery equalizer [J]. Tran-

sactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (17): 4574-4585. (in Chinese)

[2] 郭向伟, 耿佳豪, 刘震, 等. 基于反激变换器的双目标直接均衡方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(6): 1269-1278.
Guo Xiangwei, Geng Jiahao, Liu Zhen, et al. The dual-objective direct balancing method based on flyback converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(6): 1269-1278. (in Chinese)

[3] 张娥, 徐成, 王晟, 等. 基于模糊逻辑控制器的液态金属电池组两级均衡系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 4024-4032.
Zhang E, Xu Cheng, Wang Sheng, et al. Two-stage equalizing system of liquid metal batteries based on fuzzy logic controller [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2020, 40(12): 4024-4032. (in Chinese)

[4] Ouyang Quan, Xu Guotuan, Fang Huazhen, et al. Fast charging control for battery packs with combined optimization of charger and equalizers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 11076-11086.

[5] Ouyang Quan, Han Weiji, Zou Changfu, et al. Cell balancing control for lithium-ion battery packs: A hierarchical optimal approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5065-5075.

[6] Shang Yunlong, Zhao Shuofeng, Fu Yuhong, et al. A lithium-ion battery balancing circuit based on synchronous rectification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1637-1648.

[7] Luo Shengyi, Qin Dongchen, Wu Hongxia, et al. Multi-cell-to-multi-cell battery equalization in series battery packs based on variable duty cycle [J]. Energies, 2022, 15(9): 3263.

[8] Sun Jinlei, Jiang Tao, Yang Guang, et al. A novel charging and active balancing system based on wireless power transfer for lithium-ion battery pack [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105741.

[9] Shang Yunlong, Zhang Qi, Cui Naxin, et al. Multicell-to-multicell equalizers based on matrix and half-bridge LC converters for series-connected battery strings [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1755-1766.

[10] Sun Jinlei, Liu Wei, Tang Chuanyu, et al. A novel active equalization method for series-connected battery packs based on clustering analysis with genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7853-7865.

[11] 郭向伟, 王晨, 钱伟, 等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4204-4225.
Guo Xiangwei, Wang Chen, Qian Wei, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225. (in Chinese)

[12] 蔡瑞佳, 马运东, 王鹏飞, 等. 基于双向半桥 CLLLC 谐振变换器的锂电池均衡电路[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4868-4882.
Cai Ruijia, Ma Yundong, Wang Pengfei, et al. Lithium-ion battery equalization circuit based on bidirectional half-bridge CLLLC resonant converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4868-4882. (in Chinese)

[13] Lu Chenlei, Chen Jianlong, Chen Cong, et al. An active equalization method for redundant battery based on deep reinforcement learning [J]. Measurement, 2023, 210: 112507.

[14] 张旭阳, 许锋, 周华, 等. 串联电池组模块化分层主动均衡方法研究[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 136-144.
Zhang Xuyang, Xu Feng, Zhou Hua, et al. Research on modular layered active equalization method for series battery pack [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 136-144. (in Chinese)

[15] 李艳波, 马海涛, 程绍峰, 等. 结合 Cuk 电路与单电感电路的电池均衡分层研究[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 199-206.
Li Yanbo, Ma Haitao, Cheng Shaofeng, et al. Balanced stratification of batteries combining Cuk circuit and single-inductor circuit [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 199-206. (in Chinese)

[16] 谭锡文, 陈渊睿, 廖武兵, 等. 基于倍压电路的混合储能系统电压均衡方法[J]. 仪器学报, 2023, 44(3): 163-171.
Tan Xiwen, Chen Yuanrui, Liao Wubing, et al. Voltage

equalization method for the hybrid energy storage system based on voltage multiplier circuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 163-171.

[17] 秦东晨, 赵鸿飞, 武红霞, 等. 基于可重构电路的串联电池动态分组主动均衡方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(2): 90-96, 110.
Qin Dongchen, Zhao Hongfei, Wu Hongxia, et al. Dynamic grouping active equalization method for series connected batteries based on reconfigurable circuits [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(2): 90-96, 110. (in Chinese)

[18] 叶泽雨, 尹靖元, 师长立, 等. 基于多智能体强化学习的可重构电池组串并联均衡方法[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(6): 68-72.
Ye Zeyu, Yin Jingyuan, Shi Changli, et al. Reconfigurable battery series and parallel equalization method based on multi agent reinforcement learning [J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(6): 68-72. (in Chinese)

[19] 李小龙, 徐顺刚, 许建平, 等. 一种单电感双向电池均衡电路[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 90-97.
Li Xiaolong, Xu Shungang, Xu Jianping, et al. Single-inductor bidirectional battery equalizer [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(4): 90-97. (in Chinese)

[20] 李艳波, 常悦, 陈圆媛, 等. 采用改进矩阵型可重构拓扑的锂离子电池均衡策略[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 174-185.
Li Yanbo, Chang Yue, Chen Yuanyuan, et al. A lithium-ion battery equalization strategy using improved matrix-type reconfigurable topology [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 174-185. (in Chinese)

[21] Zhao Zixiang, Liu Weiqun, Hua Chunrong, et al. Decoupled and modularized battery equalization circuit for equalization overlap issue [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 71: 108194.

[22] 郑征, 王肖帅, 李斌, 等. 基于三绕组变压器的电池组新型均衡拓扑[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 518-526.
Zheng Zheng, Wang Xiaoshuai, Li Bin, et al. New equalization topology for battery packs based on three-winding transformer [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9): 518-526. (in Chinese)

[23] 于仲安, 熊莹燕. 基于可重构电路的锂电池组充电均衡研究[J]. 汽车技术, 2022(6): 27-32.
Yu Zhongan, Xiong Yingyan. Research on charge equalization of lithium battery pack based on reconfigurable circuit [J]. Automobile Technology, 2022(6): 27-32. (in Chinese)



吕高

作者简介：

吕高(1975—　)，男，硕士，副教授。研究方向：电力物联网，电力电子在电力系统的应用。E-mail：lvgao@sxu.edu.cn。

李悦(1999—　)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电力电子在电力系统的应用。E-mail：2589176165@qq.com。

杨海(1997—　)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子在电力系统的应用。E-mail：598166743@qq.com。

张嘉蕾(1988—　)，女，通信作者，博士。研究方向：需求响应，新能源发电系统，电力变换器系统，储能系统。E-mail：zhangjialei@sxu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)