DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.254 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

基于改进型 Buck 变换器的电池组主动均衡方法研究

邵明玺[1]，张 浩[1,2]，陈 翔[3]，燕绍九[2,3]，王晓娟[1]，张 薇[1]
(1.青海大学机械工程学院，西宁 810016；2.北京石墨烯技术研究院有限公司，北京 100094；
3.北京航空材料研究院石墨烯能源材料研究中心，北京 100095)

摘要：均衡技术对于电池管理系统至关重要，广泛采用的被动均衡存在效率低、均衡时间长等缺点，而更高效的主动均衡存在控制复杂和成本高等问题。针对该情况，提出1种基于改进型Buck变换器的双层均衡拓扑电路，匹配性设计了其电路参数和均衡策略，详细分析了其工作原理，并对比分析了其经济成本，验证了该方案的可行性和经济性。MATLAB/Simulink模型仿真分析表明，该方案的均衡时间相比于传统相邻单体均衡系统减少了 40.4%。搭建的电池组均衡实验结果表明，该方案具有结构简单、控制简便的优点，可快速实现 26650 磷酸铁锂电池的均衡，将4串电池组最大压差从141 mV控制到50 mV以内仅需20.4 min。

关键词：锂离子电池组；主动均衡；改进型Buck电路；均衡时间

Research on Active Balancing Method for Battery Pack Based on Improved Buck Converter

SHAO Mingxi[1], ZHANG Hao[1,2], CHEN Xiang[3], YAN Shaojiu[2,3], WANG Xiaojuan[1], ZHANG Wei[1]
(1. College of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Beijing Graphene Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100094, China; 3. Graphene Energy Materials Research Center, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The balancing technology is important for battery management systems. However, the widely used passive balancing technology has disadvantages such as a low efficiency and a long balancing time, while the active balancing technology which is more efficient has problems such as complex control and high cost. In response to the status quo, a double-layer balancing topology circuit based on an improved Buck converter is proposed. Its circuit parameters and balancing strategy are designed by taking into account the issue of matching, its working principle is analyzed in detail, and its economic cost is compared and analyzed, so as to verify the feasibility and economy of the proposed scheme. The simulation analysis of a model based on MATLAB/Simulink shows that the balancing time of the proposed scheme is reduced by 40.4% compared with that of the traditional adjacent cell balancing system. The results of a battery pack balancing test show that this scheme has advantages of a simple structure and simple control. It can quickly realize the balancing of 26650 lithium iron phosphate battery, and it only took 20.4 min to reduce the maximum differential voltage of four battery packs in series from 141 mV to within 50 mV.

Keywords: Lithium-ion battery pack; active balancing; improved Buck circuit; balancing time

锂离子电池具有高能量密度、低自放电率和长周期寿命等特点，已经成为移动设备和电动车等领域的主要能源之一[1]。由于单体电池的电压无法满足设计要求，因此实际生产时往往将多个电池串并联组成电池组。然而，即使是同一型号和规格的电池，在制造的过程中也还会出现电压平台、容量和内阻等参数的不同[2]。这种差异加上数次充放电循

收稿日期：2024-06-06；**录用日期**：2024-08-12；**网络首发日期**：2025-01-07
基金项目：北京航空材料研究院基金资助项目(KJSC240307)
This work is supported by Foundation of Beijing Institute of Aeronautical Materials under the grant KJSC240307

环及温度等其他因素的影响，还会加剧电池的不一致性差异，进而影响电池组的使用寿命和安全性。为了解决这一问题，需要对电池组进行均衡处理[3-5]。

现有的均衡拓扑分为被动均衡与主动均衡[6]。被动均衡分为固定式与分流式 2 种类型，被动均衡是通过在电池两端并联电阻来实现均衡处理，当某个单体电池的电压高于设定的阈值时，通过电阻释放掉多余的能量，以改善整个电池组系统的一致性，其结构简单、成本低廉且具有良好的可靠性，但它只会将能量转化为热量，可能会增加电池组中热管理的风险[7]。文献[8]提出了 1 种基于电压的被动均衡维护方案，避免了均衡过程中对采集电压数据的影响，但其只能将多余的电量通过电阻以热能的形式进行释放，增加了系统的热管理风险；文献[9]提出的锂离子电池组被动均衡系统采用主从分布式架构，该系统的优点在于从控单元能够动态管理电池组中各单体电池的工作状态，从而实现各单体电池在浮充过程中的动态一致；其缺陷为需要设计复杂的主控与从控单元，在结构上增加了复杂度。

主动均衡通过采用电感、电容、变换器等储能元件将电池多余的能量进行转移以实现电池之间的均衡。相较于被动均衡系统，主动均衡具有速度快、能量利用率高等特点[10-13]。文献[14]提出了 1 种基于反激变换器的有源电池均衡器，采用低损耗的 MOS 管，利用 PWM 控制代替基于 MOS 管编码的开关脉冲，降低了控制逻辑的复杂性，然而反激变换器需要较大的输出电容来存储能量，导致系统成本和尺寸增加，尤其在复杂电池组系统中存在体积大、成本高的问题；文献[15]提出了 1 种快速均衡策略的模型预测控制 MPC(model predictive control)方法来解决锂离子电池组中单个电池的不一致性问题，通过最小化电池 SOC 的均衡时间来确定最优的均衡电流，从而减少了均衡计算的负担，但该均衡算法的性能受电池 SOC 估计的影响，准确估计需要耗费大量时间；文献[16]提出了 1 种基于三绕组变压器的任意单体间的新型拓扑电路，能够实现电压最高电池单体与电压最低电池单体之间的能量传输，该拓扑中只需要 1 个三绕组变压器，相较于多绕组变压器，其拓扑电路体积更小，但在设计中采用了 2 个 MOS 管反接组成的开关阵列单元，使得其控制复杂且容错性较低；文献[17]提出了 1 种基于电感的背接 MOS 管开关阵列电路，可以实现任意单体电池之间的均衡，该拓扑弥补了传统电感均衡电路只能在 2 个相邻电池之间进行均衡的缺点，但采用 2 个开关管背接的形式增加了控制的难度。

目前被动均衡存在热损失严重、效率低且均衡时间长的问题，而主动均衡控制复杂、成本相对较高。本文提出 1 种基于改进型 Buck 变换器的双层均衡电路，利用该电路可以在相邻单体电池和电池组之间实现能量传输，克服了传统均衡路径长、速度慢的问题，提高了均衡效率。改进型 Buck 变换器结构简单、成本低，随着单体电池的数量增加，只需要增加 MOS 管与电感，系统的控制与复杂度变化很小。

1　均衡拓扑电路及工作原理

1.1　双层均衡拓扑电路

基于改进型的 Buck 变换器的双层均衡拓扑电路如图 1 所示。电池组共有 $4n$ 节单体电池，其中每 4 节单体电池构成 1 个基本单元模块，每个单元模块内包含 24 个 MOS 管和 4 个电感。以 4 节单体电池构成的电池组进行后续分析，第一层均衡拓扑电路实现相邻单体电池间的能量转移，第二层均衡拓扑电路在第一层电路的基础上，以 2 块单体电池为 1 个单元实现电池组间的能量转移。

1.2　第一层均衡拓扑电路

以电池 B_1、B_2 为例，当相邻单体电池的压差超过设定的阈值时，通过控制 MOS 管的导通或关断状态实现均衡。整个均衡过程可分为电池 B_1 放电和电池 B_2 充电 2 个阶段，如图 2 所示。在本文的均衡拓扑电路中，忽略了 MOS 管的压降，并假设电池 B_1、B_2 的电压分别为 U_{B_1} 和 U_{B_2}，MOS 管的工作周期为 T_M，占空比为 d_1，充放电回路中的

总等效电阻为 R_{eq1}。

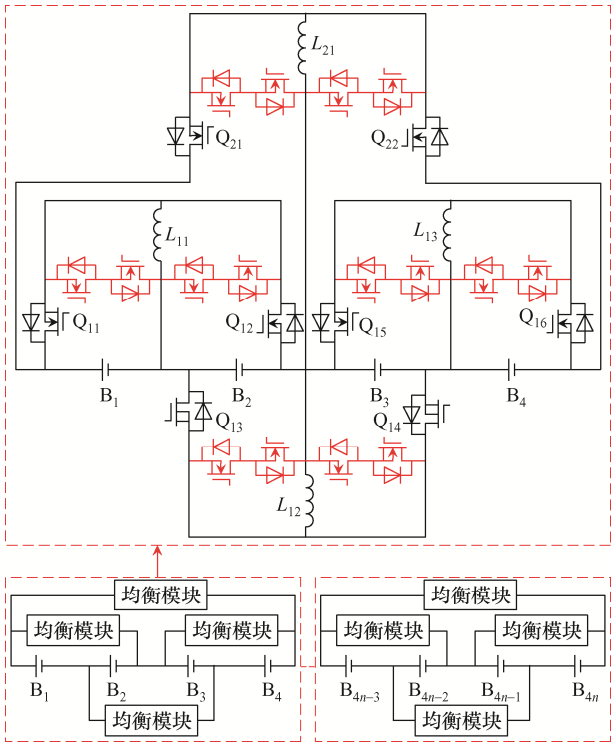
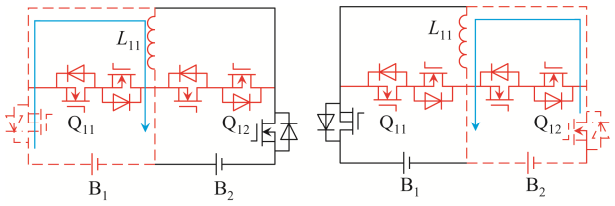


图 1 基于改进型的 Buck 变换器的双层均衡电路系统结构

Fig. 1 Structure of double-layer balancing circuit system based on improved Buck converter



(a)B_1放电阶段 (b)B_2充电阶段

图 2 相邻单体电池能量转移路径

Fig. 2 Energy transfer path between adjacent cells

1.2.1 电池 B_1 放电阶段

当$U_{B_1} > U_{B_2}$ 时，开关管 Q_{11} 导通，B_1 放电，电感 L_{11} 充电，其释放的电能以磁能的形式储存在 L_{11} 中，流过 L_{11} 的电流逐渐增大，如图 2(a)所示。当 B_1 与 B_2 的压差小于阈值时，Q_{11} 断开。此时，流过电感 L_{11} 的电流 $i_{1L_{11}}$ 可表示为

$$L_{11}\frac{\mathrm{d}i_{1L_{11}}}{\mathrm{d}t}+i_{1L_{11}}R_{eq1}=U_{B_1} \tag{1}$$

$$i_{1L_{11}}=\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq1}}{L_{11}}t}\left(i_{0L_{11}}-\frac{U_{B_1}}{R_{eq1}}\right)+\frac{U_{B_1}}{R_{eq1}} \quad 0\leqslant t\leqslant d_1T_M \tag{2}$$

式中，$i_{0L_{11}}$ 为 B_1 放电电流的初始值。

当 $t=d_1T_M$ 时，流过电感 L_{11} 的最大电流为

$$i_{1L_{11}\max}=\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq1}}{L_{11}}td_1T_M}\left(i_{0L_{11}}-\frac{U_{B_1}}{R_{eq1}}\right)+\frac{U_{B_1}}{R_{eq1}} \tag{3}$$

当 B_1 开始放电时，初始电流 $i_{0L_{11}}=0$，此时流过电感 L_{11} 的电流为

$$i_{1L_{11}}=\frac{U_{B_1}}{R_{eq1}}(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq1}}{L_{11}}t}) \quad 0\leqslant t\leqslant d_1T_M \tag{4}$$

1.2.2 电池 B_2 充电阶段

当 Q_{11} 断开、Q_{12} 导通时，电感 L_{11} 中储存的磁能转换为电能，使得流过 L_{11} 的电流逐渐减小，电感 L_{11} 的电压也不断减小，直到 L_{11} 的电压低于 B_2 的电压为止，如图 2(b)所示。当 $t=T_1$ 时，流过电感 L_{11} 的电流 $i_{2L_{11}}$ 下降为 0。为了避免电感饱和，在 1 个充放电均衡周期内需要满足 $d_1T_M<T_1$[17]。此时，流过电感 L_{11} 的电流 $i_{2L_{11}}$ 可表示为

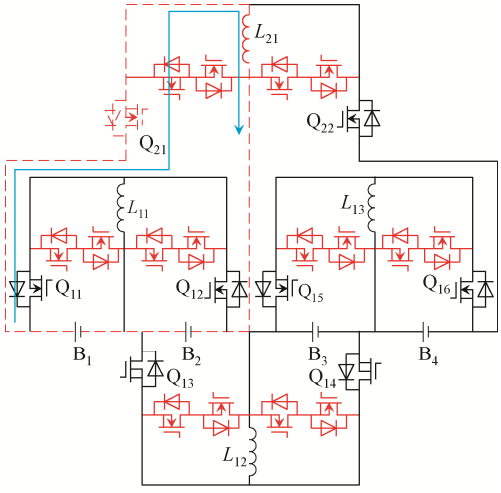
$$L_{11}\frac{\mathrm{d}i_{2L_{11}}}{\mathrm{d}t}+i_{2L_{11}}R_{eq1}+U_{B_2}=0 \tag{5}$$

$$i_{2L_{11}}=\frac{U_{B_1}(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq1}}{L_{11}}d_1T_M})+U_{B_2}}{R_{eq1}}\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq1}}{L_{11}}t}-\frac{U_{B_2}}{R_{eq1}}$$

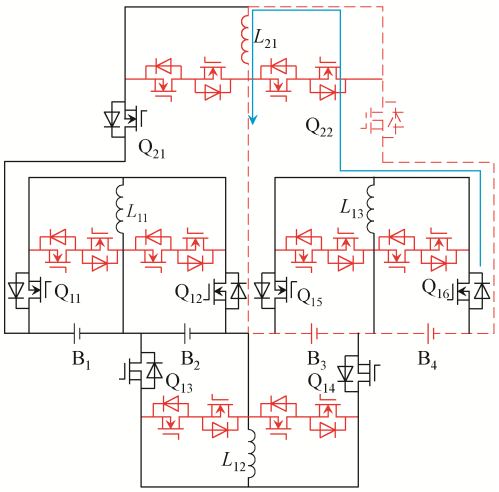
$$d_1T_M\leqslant t\leqslant T_1 \tag{6}$$

1.3 第二层均衡拓扑电路

由 B_1、B_2 与 B_3、B_4 组成电池组 1 与电池组 2。当电池组 1 的电压高于电池组 2 时，整个均衡过程可以分为电池组 1 放电与电池组 2 充电，如图 3 所示。假设 MOS 管的工作周期为 T_M，占空比为 d_2，



(a)电池组1放电阶段



(b)电池组2充电阶段

图 3　电池组间能量转移路径

Fig. 3 Energy transfer path between battery packs

充放电回路的等效电阻为 R_{eq2}。

1.3.1　电池组 1 放电阶段

当电池组 1 的电压高于电池组 2 时，Q_{21} 导通，电池组 1 放电，电感 L_{21} 充电，流过 L_{21} 的电流逐渐增大。当电池组间的压差小于阈值时，Q_{21} 断开，如图 3(a)所示。此时，流过电感 L_{21} 的电流 $i_{1L_{21}}$ 可表示为

$$L_{21}\frac{\mathrm{d}i_{1L_{21}}}{\mathrm{d}t}+i_{1L_{21}}R_{eq2}=U_{B_1}+U_{B_2} \tag{7}$$

$$i_{1L_{21}}=\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq2}}{L_{21}}t}\left(i_{0L_{21}}-\frac{U_{B_1}+U_{B_2}}{R_{eq2}}\right)+\frac{U_{B_1}+U_{B_2}}{R_{eq2}}$$

$$0<t<d_2T_M \tag{8}$$

式中，$i_{0L_{21}}$ 为电池组 1 放电电流的初始值。

当 $t=d_2T_M$ 时，流过电感 L_{21} 的最大电流为

$$i_{1L_{21}\max}=\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq2}}{L_{21}}d_2T_M}\left(i_{0L_{21}}-\frac{U_{B_1}+U_{B_2}}{R_{eq2}}\right)+\frac{U_{B_1}+U_{B_2}}{R_{eq2}} \tag{9}$$

当电池组 1 开始放电时，初始电流 $i_{0L_{21}}=0$，此时流过电感 L_{21} 的电流为

$$i_{1L_{21}}=\frac{U_{B_1}+U_{B_2}}{R_{eq2}}(1-\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq2}}{L_{21}}t}) \quad 0<t<d_2T_M \tag{10}$$

1.3.2　电池组 2 充电阶段

当 Q_{21} 断开、Q_{22} 导通时，电感 L_{21} 中储存的磁能转换为电能，使得流过电感 L_{21} 的电流逐渐减小，电感 L_{21} 的电压也逐渐减小，直到 L_{21} 的电压低于电池组 2 的电压，如图 3(b)所示。当 $t=T_2$ 时，流过电感 L_{21} 的电流 $i_{2L_{21}}$ 下降为 0，为了防止电感饱和，在 1 个充放电均衡周期内需要满足 $d_2T_M<T_2$。此时，流过电感 L_{21} 的电流 $i_{2L_{21}}$ 可表示为

$$L_{21}\frac{\mathrm{d}i_{2L_{21}}}{\mathrm{d}t}+i_{2L_{21}}R_{eq2}+U_{B_3}+U_{B_4}=0 \tag{11}$$

$$i_{2L_{21}}=\mathrm{e}^{-\frac{R_{eq2}}{L_{21}}t}\left(\frac{U_{B_3}+U_{B_4}}{R_{eq2}}+i_{1L_{21}\max}\right)-\frac{U_{B_3}+U_{B_4}}{R_{eq2}}$$

$$d_2T_M\leqslant t\leqslant T_2 \tag{12}$$

本文提出的均衡拓扑电路具有以下优点。

(1)采用分层方法，可以同时进行单体电池间的均衡和电池组之间的均衡。

(2)当电池组中单体电池的数量增加时，只需要增加 MOS 管与电感，均衡系统的结构简单、控制简便。

2　均衡策略的设计与成本

2.1　均衡变量的选择

在现有的研究中，电压、荷电状态 SOC(state of charge)、电池容量和内阻通常被作为均衡变量。电池电压是直接测量的物理量，能够快速反映电池状态，而 SOC 的估算则相对复杂且容易受外部环境和电池老化等因素影响。电池容量通常需要通过充放电循环测试得到，无法直接测量，因此在实时性和准确性上存在挑战[18-19]。

根据实际测试数据显示，电池的 SOC 值在区间 0%~10%与 90%~100%内电压变化较大，但在区间 10%~90%内电压变化较小，如图 4 所示。在 SOC 为 10%~90%时，电池电压变化较小但 SOC 变化较大，在这个区间内各单体电池的差异均在设定的阈值范围之内，一致性符合实际需求，因此主要围绕 SOC 值为 0%~10%与 90%~100%时进行均衡，利用电压作为电池组均衡的变量能够更好地实现对电池状态的实时监测和控制。

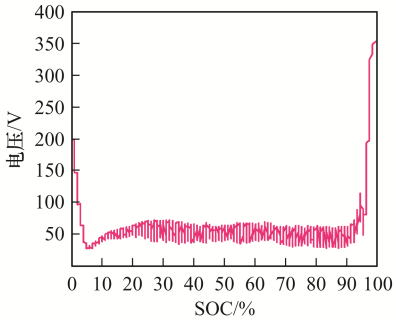


图 4 放电过程电池组压差波形

Fig. 4 Waveform of differential voltage of battery pack during discharging

2.2 均衡控制策略

根据本文均衡拓扑电路设计对应的双层均衡控制策略，第一层均衡控制主要针对相邻单体电池之间的均衡，判断相邻单体电池的压差是否超过设定阈值 V_1。第二层均衡控制主要针对电池组之间的均衡，判断电池组之间的电压差是否超过设定阈值 V_2。

首先判断最大与最小单体的压差是否超过 V_1 或 V_2，然后进行第一层和第二层均衡控制。第一层均衡拓扑的工作条件可表示为

$$\left|U_{B_i}-U_{B_{i+1}}\right|>V_1 \tag{13}$$

式中，i=1，2，3。

第二层均衡拓扑的工作条件可表示为

$$\left|(U_{B_1}+U_{B_2})-(U_{B_3}-U_{B_4})\right|>V_2 \tag{14}$$

2.3 均衡拓扑成本

对改进型 Buck 变换器的均衡拓扑与常见的主动均衡拓扑结构成本进行单价对比，见表 1。可以看出，相较于目前主流的主动均衡拓扑电路，本文改进型拓扑电路在成本上具有明显优势[17]。

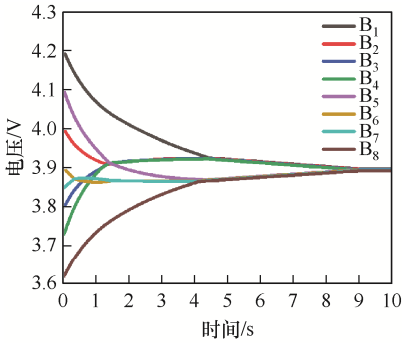
表 1 主动均衡拓扑电路单价对比

Tab. 1 Comparison of circuit unit price among different active balancing topologies

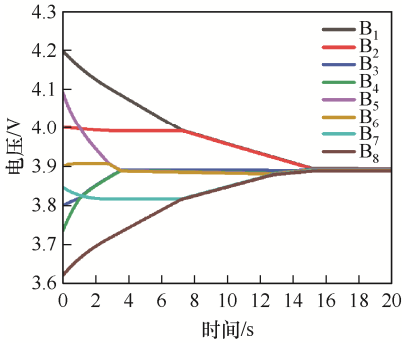
拓扑类型	单价/元
Cuk	8.142
双向 Cuk	6.460
正激 Forward	13.900
双有源桥 DAB	13.780
谐振 Resonant	10.174
斜坡 Ramp	16.150
推挽 Push-pull	10.430
反激 Flyback	11.390
多模式-多电平双向	6.224
多变压器	26.400
本文所提	6.000

3 仿真实验验证

通过在 MATLAB/Simulink 中建立传统相邻单体至单体的均衡拓扑与本文所提出的双层均衡拓扑方案的物理模型，验证系统设计的有效性和可行性。该系统由 8 节单体电池串联组成，分为 7 个第一层拓扑结构与 2 个第二层拓扑结构，每个模块含有 4 个单体电池。仿真均衡电路元器件参数与单体电池的初始电压均相同，各单体电池的初始值分别为 4.20、4.00、3.80、3.74、4.10、3.90、3.85、3.63 V。初始压差为 570 mV，满足均衡系统的启动条件，均衡电路启动。图 5 展示了传统均衡拓扑和双层均衡拓扑电路的均衡轨迹。双层均衡拓扑电路的均衡结束时间约为 9.3 s，如图 5(a)所示；传统均衡拓扑的均衡结束时间为 15.6 s，如图 5(b)所示。双层均衡拓扑电路的均衡时间减少了 40.4%，表明其均



(a)8串双层均衡电路



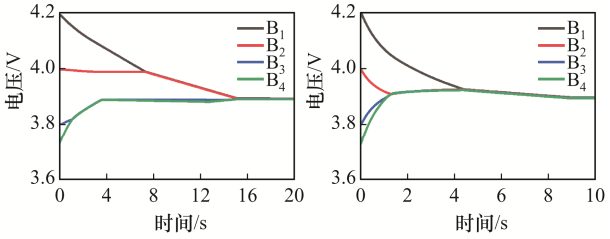
(b)8串传统相邻至单体均衡电路

图 5 传统均衡拓扑和双层均衡拓扑电路的均衡轨迹

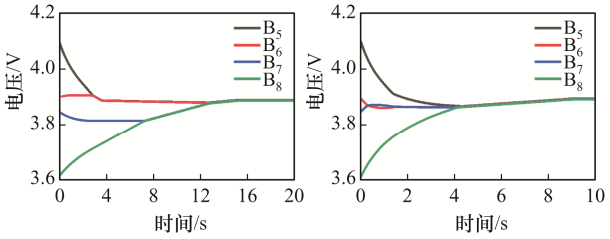
Fig. 5 Equalization trajectories of circuits in traditional and double-layer balancing topologies

衡速度更快。

对比 8 串电池组中各模块的均衡速度，结果如图 6 所示。传统均衡电路模块 1 的均衡时间为 15.2 s，如图 6(a)所示；双层均衡电路模块 1 的均衡时间为 4.8 s，如图 6(b)所示；均衡时间减少了 68.4%。传统均衡电路模块 2 的均衡时间为 12.9 s，如图 6(c)所示；双层均衡电路模块 2 的均衡时间为 4.4 s，如图 6(d)所示；均衡时间减少了 65.9%。由此可知，双层均衡拓扑相比传统均衡拓扑均衡时间明显缩短，证明了双层均衡电路具有更高的均衡速度。



(a)8串单层均衡模块1　(b)8串双层均衡模块1



(c)8串单层均衡模块2　(d)8串双层均衡模块2

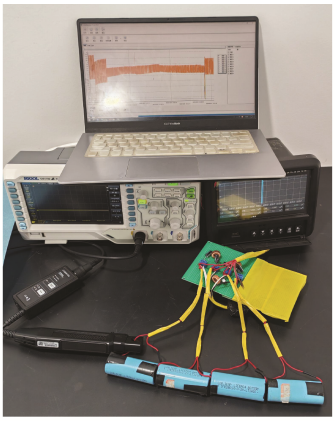
图 6　8 串电池组中各模块的均衡轨迹

Fig. 6 Balancing trajectories of each module in 8-string battery pack

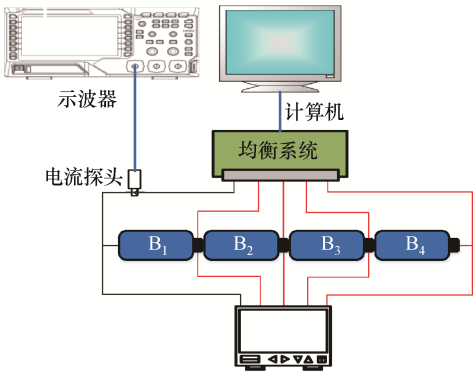
4　均衡实验验证

搭建如图 7 所示的均衡实验平台，验证该系统的均衡性能，该实验平台包括 4 串 26650 锂离子电池组、均衡系统、电流探头、示波器、计算机、电压监测器。实验过程中使用示波器连接电流探头，并通过恒仪无纸记录仪记录电池组中各单体电池的电压数据。

实验开始时，单体电池的初始电压分别为 3.377、3.576、3.518、3.438 V，初始压差为 141 mV。本文均衡系统的均衡轨迹如图 8(a)所示，结果表明，单体压差在 50 mV 以内需要 20.4 min，30 mV



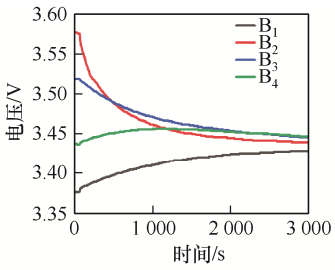
(a)4串电池组均衡实验台



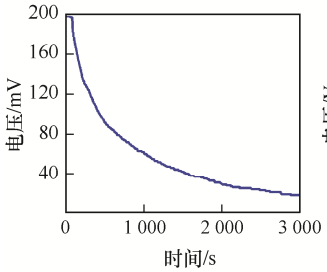
(b)均衡实验台示意图

图 7　均衡实验平台

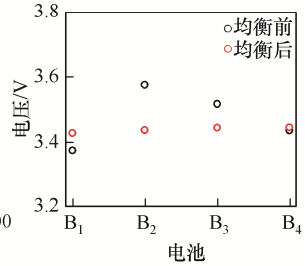
Fig. 7 Balancing test platform



(a)均衡过程中电池组电压



(b)均衡过程中电池组电压差的变化



(c)均衡前后电池组电压差的变化

图 8　均衡轨迹波形

Fig. 8 Waveforms of balancing trajectories

以内需要 33.3 min，20 mV 以内需要 45.7 min。相较于初始压差分别减小了 64.5%、78.7%、85.8%。图 8(b)展示了均衡过程中电池组压差的变化情况，图 8(c)展示了均衡前后各单体电池电压的变化情况。实验结果验证了该均衡电路的可行性，可快速实现磷酸铁锂电池的均衡。

5 结论

本文提出了 1 种基于改进型 Buck 变换器主动均衡电路，能够高效、快速地实现锂离子电池组的均衡管理，从而延缓电池组串间电性能不一致引起的性能衰减等问题，该方案具有结构简单、控制简便的优点，有望推动主动均衡技术的实用化。本文得出的主要结论如下。

(1)相较于传统的主动均衡电路，该拓扑电路结构简单且易于扩展，主要体现在当单体电池的数量增加时，只需增加开关管与电感，均衡系统的控制与电路拓扑的复杂度变化较小。

(2)该拓扑可以实现在相邻单体之间和电池组之间的能量传输，克服了传统相邻单体至单体均衡路径长、速度慢的缺点，相比于传统相邻单体至单体的均衡电路均衡时间缩短了 40.4%。

(3)将本文提出的改进型拓扑与其他常见的主动均衡拓扑结构进行对比，结果表明本文提出的拓扑在均衡速度、成本等方面均具有显著优势。搭建的电池组均衡实验结果表明，将 4 串电池组最大压差从 141 mV 控制到 50 mV 以内仅需 20.4 min，验证了本文提出的均衡电路在实际应用中能够显著改善串联电池组的一致性差异。

未来的均衡研究主要集中在如何在均衡过程中最大程度地减少能量损耗，提高系统能源利用率。同时，利用先进的智能控制算法和人工智能技术，不断提升均衡系统的自适应性和智能化程度，以满足不同规模、不同类型电池组的均衡需求。

参考文献：

[1] Lai Xin, Huang Yunfeng, Deng Cong, et al. Sorting, regrouping, and echelon utilization of the large-scale retired lithium batteries: A critical review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111162.

[2] 张宇, 邓杰, 吴铁洲, 等. 基于模糊控制的锂离子电池组两级均衡方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 9-16.
Zhang Yu, Deng Jie, Wu Tiezhou, et al. Two-level equalization method for lithium-ion battery pack based on fuzzy control [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 9-16. (in Chinese)

[3] Chen Wan, Liu Baolian, Nazir M S, et al. An energy storage assessment: Using frequency modulation approach to capture optimal coordination [J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8510.

[4] Wu Luping, Pang Kang, Zheng Yuejiu, et al. A multi-module equalization system for lithium-ion battery packs [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(3): 2771-2782.

[5] Du Guangjian, Zhang Guidong, Yu S S, et al. An any-unit-to-any-unit method for hybrid-structured voltage equalizer in series-connected battery/super-capacitor strings [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(6): 2016-2034.

[6] 谭喜文, 陈渊睿, 廖武兵, 等. 基于电压倍增器的混合储能系统电压均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 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. (in Chinese)

[7] Gallardo-Lozano J, Romero-Cadaval E, Milanes-Montero M I, et al. Battery equalization active methods [J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 934-949.

[8] 赵权, 周琰, 赵胜, 等. 三元锂电池电压被动均衡维护方案研究[J]. 船电技术, 2023, 43(9): 18-20.
Zhao Quan, Zhou Yan, Zhao Sheng, et al. Study on the passive voltage equalization maintenance for ternary lithium battery [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2023, 43(9): 18-20. (in Chinese)

[9] 袁阳, 蔡久青, 汪文涛, 等. 后备锂电池组被动均衡系统设计[J]. 船电技术, 2019, 39(12): 55-57, 61.
Yuan Yang, Cai Jiuqing, Wang Wentao, et al. Design of the passive equilibrium system for back-up lithium

batteries [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2019, 39(12): 55-57, 61. (in Chinese)

[10] Omariba Z B, Zhang Lijun, Sun Dongbai. Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles [J]. IEEE Access, 2019, 7: 129335-129352.

[11] Liu Lizhou, Sun Wenbing, Han Peibang, et al. Active balancing of lithium-ion battery cells using WPT as an energy carrier [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(10): 2578-2585.

[12] Habib A K M A, Hasan M K, Mahmud M, et al. A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application [J]. IET Power Electronics, 2021, 14(1): 1-13.

[13] Hoque M M, Hannan M A, Mohamed A, et al. Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75: 1363-1385.

[14] Pandey R, Singh B. A Cuk converter and resonant LLC converter based E-bike charger for wide output voltage variations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2682-2691.

[15] Fan Tian'e, Liu Songming, Yang Hao, et al. A fast active balancing strategy based on model predictive control for lithium-ion battery packs [J]. Energy, 2023, 279: 128028.

[16] 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)

[17] 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/OL]. 电源学报，2024: 1-12. (2024-04-26)[2024-05-26]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DYXB20240423003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
Zhang Xuyang, Xu Feng, Zhou Hua, et al. Modular layered active equalization method for series battery pack [J/OL]. Journal of Power Supply, 2024: 1-12. (2024-04-26)[2024-05-26]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DYXB20240423003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.(in Chinese)

[18] 赵莹莹，赵慧勇. 电动汽车电池系统主动均衡控制策略[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(3): 29-35.
Zhao Yingying, Zhao Huiyong. Electric car battery system active equalization control strategy [J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(3): 29-35. (in Chinese)

[19] 舒征宇，翟二杰，李镇翰，等. 基于 Dropout 优化算法和 LSTM 的铅酸蓄电池容量预测[J]. 电源学报，2023, 21(5): 173-181.
Shu Zhengyu, Zhai Erjie, Li Zhenhan, et al. Prediction of lead-acid battery capacity based on dropout optimization algorithm and LSTM [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 173-181. (in Chinese)



邵明玺

作者简介：

邵明玺(1980—　)，男，博士，副教授。研究方向：数控加工制造以及流体传动与控制。E-mail：nifengfeiyang@163.com。

张浩(1999—　)，男，硕士研究生。研究方向：电池均衡管理系统。E-mail：zh2872255318@163.com。

陈翔(1988—　)，男，通信作者，博士，高级工程师。研究方向：纳米复合材料，锂电材料研究及电源系统开发。E-mail：chenxiang9842@163.com。

燕绍九(1980—　)，男，博士，研究员。研究方向：石墨烯储能材料，石墨烯增强金属基纳米复合材料，磁性纳米材料和石墨烯信息材料的研制及应用。E-mail：shaojiuyan@126.com。

王晓娟(1974—　)，女，硕士研究生，副教授。研究方向：计算机辅助几何设计与制造，逆向工程，计算机图形学。E-mail：wx_juan@126.com。

张薇(1989—　)，女，硕士研究生，讲师。研究方向：农业机械装备，无损检测。E-mail：zhangwei89@nwafu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)