

反激变压器开关矩阵均衡电路及滑动窗口均衡策略研究

徐方旭*, 田恩刚

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年1月27日; 录用日期: 2025年2月20日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

传统均衡电路存在均衡速度慢, 均衡方式单一, 均衡效率低等问题, 为此设计了反激变压器开关矩阵均衡电路。该电路通过控制不同开关的打开与闭合, 实现了电池组内电池对电池, 电池组对电池, 电池对电池组多种均衡方式, 提高了均衡电路的灵活性。依据该均衡电路设计了滑动窗口均衡策略, 具有良好的性能。实验结果表明, 在相同的初始条件下, 滑动窗口均衡策略相较于传统设计, 在保证均衡效率的前提下, 均衡速度提高了38%, 均衡时间缩短了28%。

关键词

反激变压器, 开关矩阵, 均衡电路, 滑动窗口, 均衡时间, 均衡策略

Research on Flyback Transformer Equalization Circuit and Sliding Window Equalization Strategy

Fangxu Xu*, Engang Tian

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 27th, 2025; accepted: Feb. 20th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

Traditional equalization circuit has the problems of slow equalization speed, single equalization

*通讯作者。

文章引用: 徐方旭, 田恩刚. 反激变压器开关矩阵均衡电路及滑动窗口均衡策略研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(2): 521-531. DOI: 10.12677/mos.2025.142172

mode and low equalization efficiency, so a flyback transformer switch matrix equalization circuit is designed. By controlling the opening and closing of different switches, the circuit realizes a variety of equalization modes of cell to cell, cell to string, string to cell, and improves the flexibility of the equalization circuit. The sliding window equalization strategy is designed according to the equalization circuit, which has good performance. The experimental results show that under the same initial conditions, compared with the traditional design, the sliding window balancing strategy can improve the equalization speed by 38% and shorten the equalization time by 28% while ensuring the balancing efficiency.

Keywords

Flyback Transformer, Switch Matrix, Equalization Circuit, Sliding Window, Equalization Time, Equalization Strategy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锂电池具有能量密度高、充放电速度快、工作状态稳定等优势被广泛地应用在电动汽车、储能系统、无人机等领域[1]。然而,为满足负载设备的电压及容量需求,需要将多个电池串联成组以增加其电压和容量。但由于使用环境的差异,会导致电池组内部出现电池状态不一致的问题,这严重影响了电池组的性能并可能引发安全事故[2]。因此,确保电池组内电池一致性至关重要。

为解决电池组内部电池状态不一致的问题,采用电池组均衡管理方法是一种有效的策略。这一方法主要包含两个核心部分:均衡策略和均衡电路。均衡策略旨在确定每个电池所需的均衡电量,而均衡电路则负责将这部分电量通过特定的方式进行转移。目前,常见的均衡策略主要有基于电池电压的均衡策略[3]以及基于荷电状态 SOC (State of Charge)的均衡策略[4]。电池的电压、荷电状态都为电池的均衡指标,电池电压为电池外部特征,便于获取,但无法准确地反映电池内部的真实情况,荷电状态 SOC 为电池内部特征,虽然无法直接测量,但目前已有诸多算法辅助获取,常见的 SOC 估计方法包括电荷累计法、开路电压法等。电池组均衡电路的设计关键在于如何有效地转移需要均衡的电量来解决电池组内电池状态不一致的问题,主要分为被动均衡电路[5] [6]和主动均衡电路[7] [8]两种类型。被动均衡通过消耗电量高的电池中的电荷来实现均衡,如文献[9]通过分流电阻来耗散多余的电量,这种方法虽然均衡速度快,但会导致能量的浪费并产生热量,增加了电池组的安全风险。相比之下,主动均衡采用了特定的电路设计,通过电容或电感作为中介储能元件,将电荷从电量高的电池转移至电量低的电池中,有效避免了能量的损失。主动均衡电路通常使用 DC-DC 转换器,基于 DC-DC 转换器的均衡电路可根据均衡电流路径可分为电池对电池型(C2C, cell to cell)、电池对电池组型(C2S, cell to string)和电池组对电池对电池组(S2C, string to cell)型[10]。C2S/S2C 均衡器由于电流更大,均衡速度更快,而 C2C 均衡器结构更灵活、简单。如文章[11]采用单一电感对电池组进行均衡,文献[12]采用 Buck-Boost 电路(电感作为中间储能元件)对电池组进行均衡,能够实现电流在电池与电池之间传递,能量传递方式较为单一,由于需要考虑电感饱和和纹波电流,基于电感的均衡器[13]在结构和控制方面更为复杂。基于变压器的均衡器[14] [15]具有电气隔离特性、高安全性和高效率等优点。

为此,本文提出了反激变压器开关矩阵均衡电路,通过设计新型电路,实现均衡过程中灵活的切换

能量传输路径, 提高均衡效率, 其次基于该电路设计了滑动窗口均衡算法, 减少了均衡时间, 加快了均衡速度, 使得均衡效率进一步提升。

2. 均衡电路

2.1. 均衡电路设计

本文所提出的均衡器主要由开关矩阵单元和反激变压器均衡单元组成, 其电路结构如图 1 所示。图中电池组由 n 个电池串联组成, 均衡器的开关矩阵由 $4n$ 个开关连接在电池两侧, 其中开关 $S_{1,a}, S_{1,b}, S_{2,a}, S_{2,b}, \dots, S_{n,a}, S_{n,b}$ 用于选择电池组中需要放电的电池(剩余电量高的电池), 而开关 $S_{1,c}, S_{1,d}, S_{2,c}, S_{2,d}, \dots, S_{n,c}, S_{n,d}$ 用于选择选择电池组中需要充电的电池(剩余电量低的电池)。反激变压器均衡电路由 MOSFET(M)、二极管(D)和反激变压器组成, 利用变压器作为中间储能元件, 实现电池组内剩余电量高的电池的电荷转移至电量低的电池中。

该均衡器具有以下两个优点: (1) 与传统均衡电路拓扑结构不同, 该均衡器通过调整开关矩阵, 能够实现电池组中 m 个连续电池中的电荷转移到 n 个连续电池中。该均衡电路能够灵活地选择能量传递路径, 从而提高均衡效率。(2) 本均衡器采用模块化设计, 便于扩展, 即使电池组内电池数量增加, 也只需要增加必要数量的开关, 使其成为可扩展和灵活的解决方案。

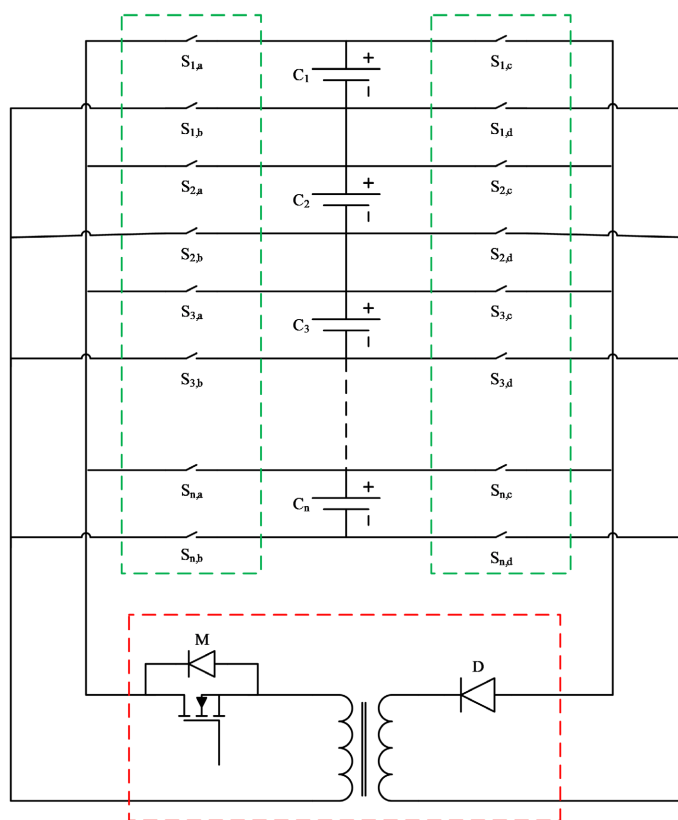


Figure 1. Flyback transformer switch matrix equalization circuit

图 1. 反激变压器开关矩阵均衡电路

2.2. 均衡电路工作原理

均衡电路工作原理是使用开关矩阵选择需要均衡的电池单元, 利用反激变压器将剩余电量高的电池

的电荷转移到剩余电量低的电池中, 实现电池组的均衡。假设电池 C_x-C_{x+m} 剩余电量高于电池组平均剩余电量, 而电池 C_y-C_{y+n} 低于平均剩余电量, 所以需要将电池 C_x-C_{x+m} 中多余的电荷转移到电池 C_y-C_{y+n} , 通过控制开关 $S_{x,a}$ 和 $S_{x+m,b}$ 闭合将电池 C_x-C_{x+m} 连接到均衡单元的左侧, 控制开关 $S_{y,c}$ 和 $S_{y+n,d}$ 闭合将电池 C_y-C_{y+n} 连接到均衡单元的右侧, 因此, 电池 C_x-C_{x+m} 、电池 C_y-C_{y+n} 和均衡单元形成一个完整的电路, 如图 2 所示。

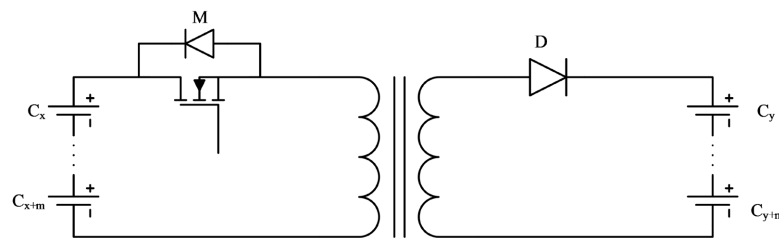


Figure 2. Equalizer equivalent circuit diagram
图 2. 均衡器等效电路图

MOSFET 的工作模式包括边界传导模式(BCM, Boundary Conduction Mode), 连续导通模式(CCM, Continuous Conduction Mode)和不连续导通模式(DCM, Discontinuous Conduction Mode)。BCM 模式在工作中能够降低开关损耗, 提高效率, 适应性强, 简单的控制电路等优点, 选择反激变压器均衡电路工作在 BCM 模式。均衡电路在 BCM 模式下工作通常包括两个阶段: MOSFET 导通时电池 C_x-C_{x+m} 放电对反激变压器充电阶段和 MOSFET 关断时变压器放电对电池 C_y-C_{y+n} 充电阶段。MOSFET 的导通与闭合通常用 PWM 波控制, PWM 波形图及流经反激变压器左侧、右侧绕组的电流变化如图 3 所示。

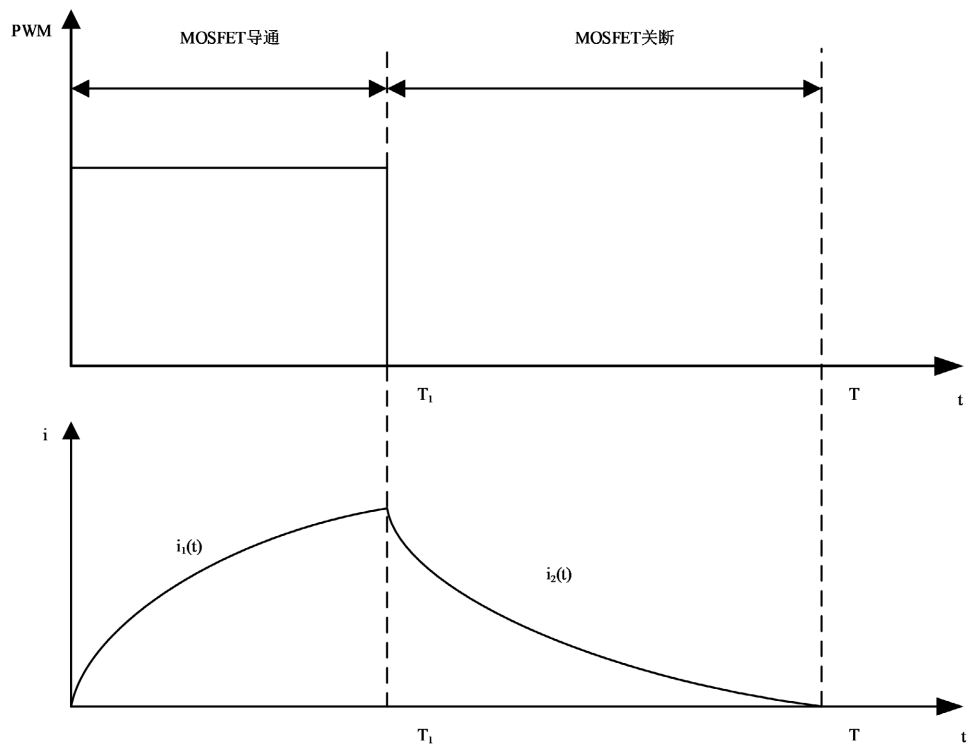


Figure 3. PWM waveform and corresponding current change
图 3. PWM 波形及相应电流变化

图 3 中, PWM 周期时间内 MOSFET 导通的持续时间 T_1 表示为:

$$T_1 = DT \quad (1)$$

其中, T 为控制 MOSFET(M) 的 PWM 信号的周期, D 为占空比。

第一阶段($0 \sim T_1$ 阶段), 在该阶段, MOSFET(M) 导通, 电池 $C_x \sim C_{x+m}$ 与反激变压器左侧绕组和 MOSFET(M) 形成回路, 电流流经变压器左侧绕组, 利用反激变压器原理对右侧绕组进行储能, 该阶段电流顺时针流通, 如图 4(a) 所示。由图可知, 流经左侧绕组的电流满足以下关系:

$$\frac{di_1(t)}{dt} = \frac{U_1}{L_1} \quad (2)$$

其中, $i_1(t)$ 如图 3 中所示 MOSFET 导通时流经左侧绕组的电流, U_1 为绕组两侧电压, L_1 为绕组等效电感。则在该阶段, 电流的变化量 ΔI_1 为:

$$\Delta I_1 = \int_0^{T_1} i_1(t) dt = \frac{U_1}{L_1} T_1 \quad (3)$$

第二阶段($T_1 \sim T$ 阶段), 在该阶段, MOSFET(M) 关断, 电池 $C_y \sim C_{y+n}$ 与二极管(D)和变压器右侧绕组形成回路。此时, 存储在右侧绕组中的电荷流经二极管 D 对电池 $C_y \sim C_{y+n}$ 充电, 该阶段电流流向也为顺时针, 如图 4(b) 所示。由图可知, 流经右侧绕组的电流满足以下关系:

$$\frac{di_2(t)}{dt} = \frac{U_2}{L_2} \quad (4)$$

其中, $i_2(t)$ 如图 3 中所示 MOSFET 关断时流经右侧绕组的电流, U_2 为绕组两侧电压, L_2 为绕组等效电感。则在该阶段, 电流的变化量 ΔI_2 为:

$$\Delta I_2 = \int_{T_1}^T i_2(t) dt = \frac{U_2}{L_2} (T - T_1) \quad (5)$$

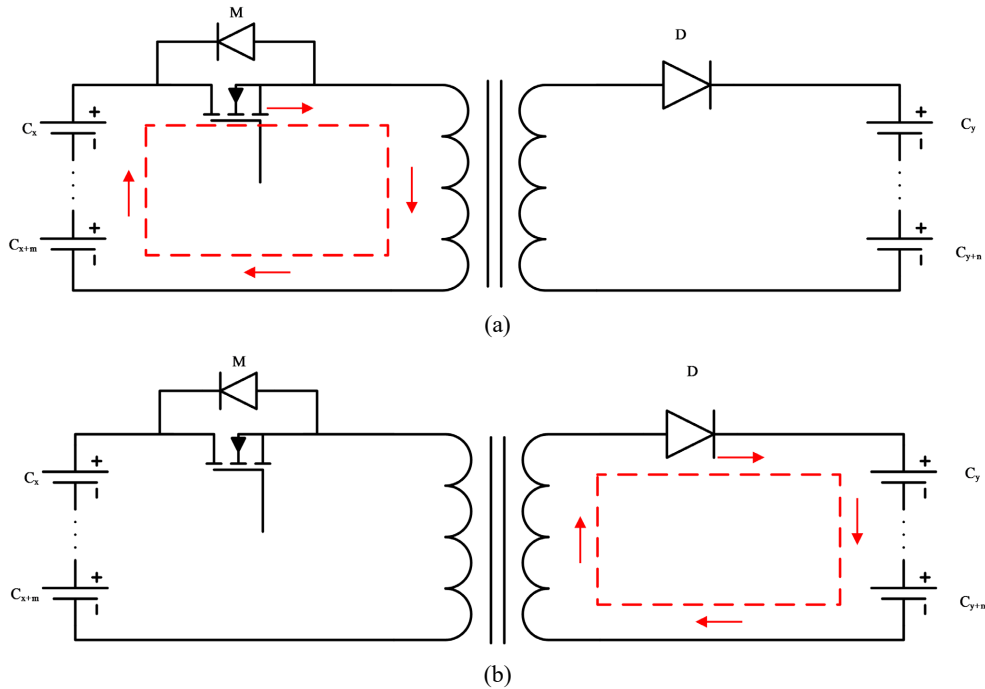


Figure 4. Current flow in equalizing process
图 4. 均衡过程电流流动示意图

变压器左侧、右侧绕组两侧电压满足以下关系:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

其中 N_1 、 N_2 分别为变压器左侧、右侧绕组的匝数。

若该反激变压器左侧绕组向右侧绕组传递能量的效率为 η , η 的取值范围为: $0 \leq \eta \leq 1$, 为确保电路工作在 BCM 模式下, 则需要右侧绕组在 $T_1 \sim T$ 阶段将左侧绕组在 $0 \sim T_1$ 阶段传输的电荷全部释放掉, 因此通过式(3)、(5)可得:

$$\eta \Delta I_1 N_1 = \Delta I_2 N_2 \quad (7)$$

通过以上分析, 为确保反激变压器均衡电路工作在 BCM 模式下, PWM 波的占空比 D 可设为:

$$D = \frac{L_1 N_2 U_2}{\eta L_2 N_1 U_1 + L_1 N_2 U_2} \quad (8)$$

关于反激变压的传递效率 η , 其定义为:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} * 100\% \quad (9)$$

其中 P_1 , P_2 分别表示变压器输入和输出功率, 其定义为:

$$\begin{cases} P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \\ P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\cos \varphi_1$ 和 $\cos \varphi_2$ 分别为变压器的输入功率因数和输出功率因数, 其值可用有功功率 P 和视在功率 S 的比值表示:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (11)$$

当负载为纯电阻时, 功率因数 $\cos \varphi$ 通常为 1, 当负载为感性负载或容性负载时, 功率因数 $\cos \varphi$ 通常小于 1, 本文中变压器的负载为动力电池, 电池作为被充电的负载时, 它属于“可充电的电化学负载”。从电学特性角度看, 电池在充电初期可以近似看作是一个可变电阻负载, 充电过程中发生化学反应, 将电能转化为化学能储存起来。这个过程涉及到离子的迁移和化学反应, 所以它又不完全等同于简单的电阻负载。从功率因数角度看, 在充电过程中, 电池一般呈现容性负载的特点。因为电池内部的电化学双电层结构类似于电容器, 会存储电荷, 导致电流超前于电压, 功率因数 $\cos \varphi$ 通常大于 0 小于 1。

3. 滑动窗口均衡算法设计

3.1. 均衡算法设计

本文提出的均衡控制策略是滑动窗口均衡算法, 该算法是基于电池组内电池的 SOC 与整个电池组平均 SOC 的关系所设立。当电池的 SOC 高于电池组平均 SOC, 则表明该电池需要将多余部分的电荷转移出去, 反之, 则需要流入相应的电荷。与传统均衡算法相比, 传统的均衡算法是将单个电池的电荷转移至单个电池, 或多个电池转移至多个电池, 均衡方式单一, 均衡效率低下, 具有一定的局限性。本文提出的滑动窗口均衡算法得益于所设计的矩阵开关均衡电路, 实现了电池对电池, 电池对电池组, 电池组对电池的能量传输, 具有较高的灵活性且均衡效率高。具体算法如下:

步骤 1: 采集电池组内电池的 SOC, 记为 $SOC_1, SOC_2, \dots, SOC_n$, 设立集合 A 用于存放电池组内各电池的 SOC, 则 $A = \{SOC_1, SOC_2, \dots, SOC_n\}$, 计算出电池组的平均 SOC, 记为 \overline{SOC} , 并进入步骤 2;

步骤 2: 设立滑动窗口 W_1 , W_2 , 设置放入滑动窗口 W_1 的条件为 $SOC_i > \overline{SOC}$, 且该元素在集合 A 中最大连续排列, 放入滑动窗口 W_2 的条件为在 $SOC_i < \overline{SOC}$, 且该元素在集合 A 中也最大连续排列, 当窗口 W_1 , W_2 内存在元素时, 进入步骤 3, 反之则均衡过程结束;

步骤 3: 关闭开关矩阵内相应的开关, 并设置相应的占空比 D 并进入步骤 4;

步骤 4: 监测滑动窗口 W_1 和 W_2 , 当窗内元素满足放入窗口的条件时, 进入步骤 5, 反之则断开步骤 4 中的开关, 并跳转至步骤 1;

步骤 5: 更新相应的占空比 D 并跳转至步骤 4。

3.2. 均衡算法示例

均衡算法过程如图 5 所示, 假设电池组初始状态为 SOC_1-SOC_3 连续小于 \overline{SOC} , SOC_i-SOC_{i+4} 连续大于 \overline{SOC} , 且电池组内其他电池 SOC 均为非连续大于或小于 \overline{SOC} , 此时初始滑动窗口 $W_1 = \{SOC_1, SOC_2, SOC_3\}$, $W_2 = \{SOC_i, SOC_{i+1}, SOC_{i+2}, SOC_{i+3}, SOC_{i+4}\}$, 随着均衡的进行, 电池组内电池 SOC 不断改变, 当滑动窗口 W_2 中的元素 SOC_1 不满足进入窗口的条件时, 跟新窗口中的元素后继续均衡, 此时窗口 W_2 中的元素更新为 SOC_2 和 SOC_3 , 循环这一过程, 直至窗口 W_1 和 W_2 中的元素个数为 0 时均衡结束。

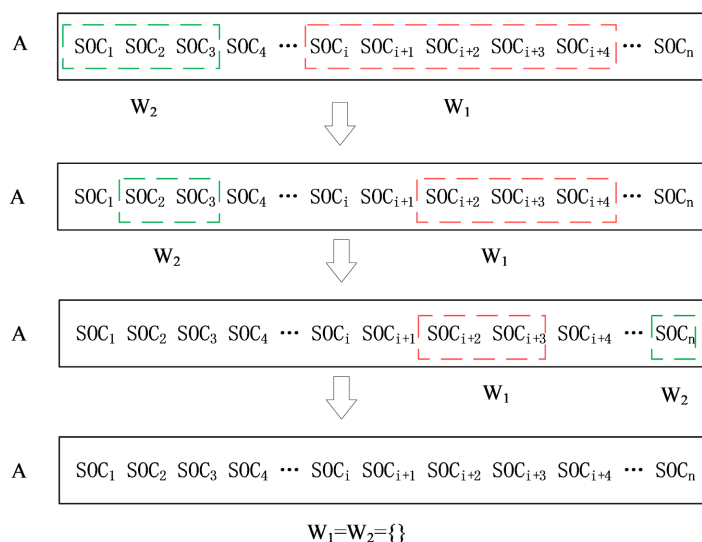


Figure 5. Equalization algorithm diagram

图 5. 均衡算法示意图

4. 实验验证

为验证本文提出的均衡电路和均衡策略的优越性, 在 MATLAB/Simulink 中构建了如图 6 所示模型进行仿真测试。

实验为了展现本文所提出策略的可行性及普遍性, 选用 6 节电池进行仿真实验, 电池选用 MATLAB/Simulink 中磷酸铁锂电池的典型模型, 电池的容量设置为 3400 mAh, 额定电压为 3.7 V。电池组内电池初始参数参照表 1 设定, 实验中设置 MOSFET 的控制频率为 10 kHz, 为确保均衡过程中电路工作在 BCM 模式下, 需要根据式(8)实时更新 PWM 信号的占空比 D , 并将电感电流作为反馈信号, 确保 MOSFET 在电感电流下降到零的时刻进行开关动作, 实现零电流开关。均衡电路采用的反激变压器左侧绕组和右侧绕组(图中分别为下方绕组和上方绕组)的电感分别为 100 uH 和 10 uH。

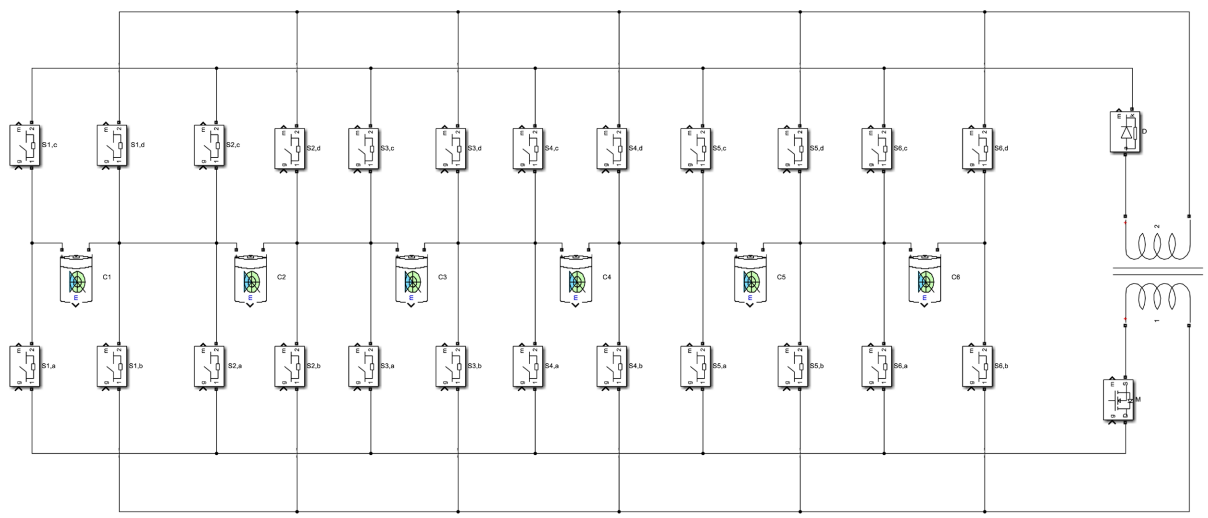


Figure 6. Simulation experiment platform
图 6. 仿真实验平台

Table 1. Initial battery condition
表 1. 电池初始状态

电池序号	初始 SOC/%	与平均 SOC 差值/%
1	70	+5
2	50	-15
3	40	-25
4	60	-5
5	80	+15
6	90	+25

应用本文所提出的滑动窗口均衡策略对电池组进行均衡, 由于在均衡过程中, SOC 为动态变化, 存在一定的抖动性, 所以均衡算法步骤二中进入窗口 W_1 的条件可以适当放宽, 这里选取 $SOC_i - \overline{SOC} \geq 2\%$ 即可, 其他条件不变; 同理, 进入窗口 W_2 的条件为 $SOC_i - \overline{SOC} \leq 2\%$ 。

为了验证滑动窗口均衡算法的优越性, 本文在相同的均衡电路上应用传统的均衡策略进行实验。传统均衡策略内容为每次选取 SOC 最大和最小的两个电池作为均衡对象, 直至所有电池的 SOC 为 \overline{SOC} 时停止均衡。滑动窗口均衡算法和传统均衡算法的实验结果如图 7(a), 图 7(b)所示。

图 7(a)为应用滑动窗口均衡策略对电池组均衡的实验结果图, 根据第三节所提出的策略, 首先需要确定滑动窗口 W_1 和 W_2 , 不难看出均衡第一阶段窗口 W_1 中的元素为 SOC_5 和 SOC_6 , 窗口 W_2 中的元素为 SOC_2 , SOC_3 , SOC_4 , 此时电池 C_5 , C_6 通过均衡电路对电池 C_2 , C_3 , C_4 进行充电, 图中大致为 0~600 s 阶段, 当 SOC_4 接近于电池组 \overline{SOC} , 窗口 W_2 中的元素跟新为 SOC_2 和 SOC_3 , 此时电池 C_5 , C_6 通过均衡电路对电池 C_2 , C_3 进行充电, 图中大致为 600 s~1200 s 阶段, 当 SOC_5 接近于电池组 \overline{SOC} , 窗口 W_1 中的元素跟新为 SOC_6 , 以此类推, 直至窗口 W_1 和 W_2 中的元素个数为 0 结束均衡, 整个均衡过程耗时约为 1800 s。图 7(b)中表示传统均衡策略的实验结果图, 图中显示同时只有两个电池进行点对点均衡, 满足传统均衡策略逻辑, 整个均衡过程耗时 2500 s。

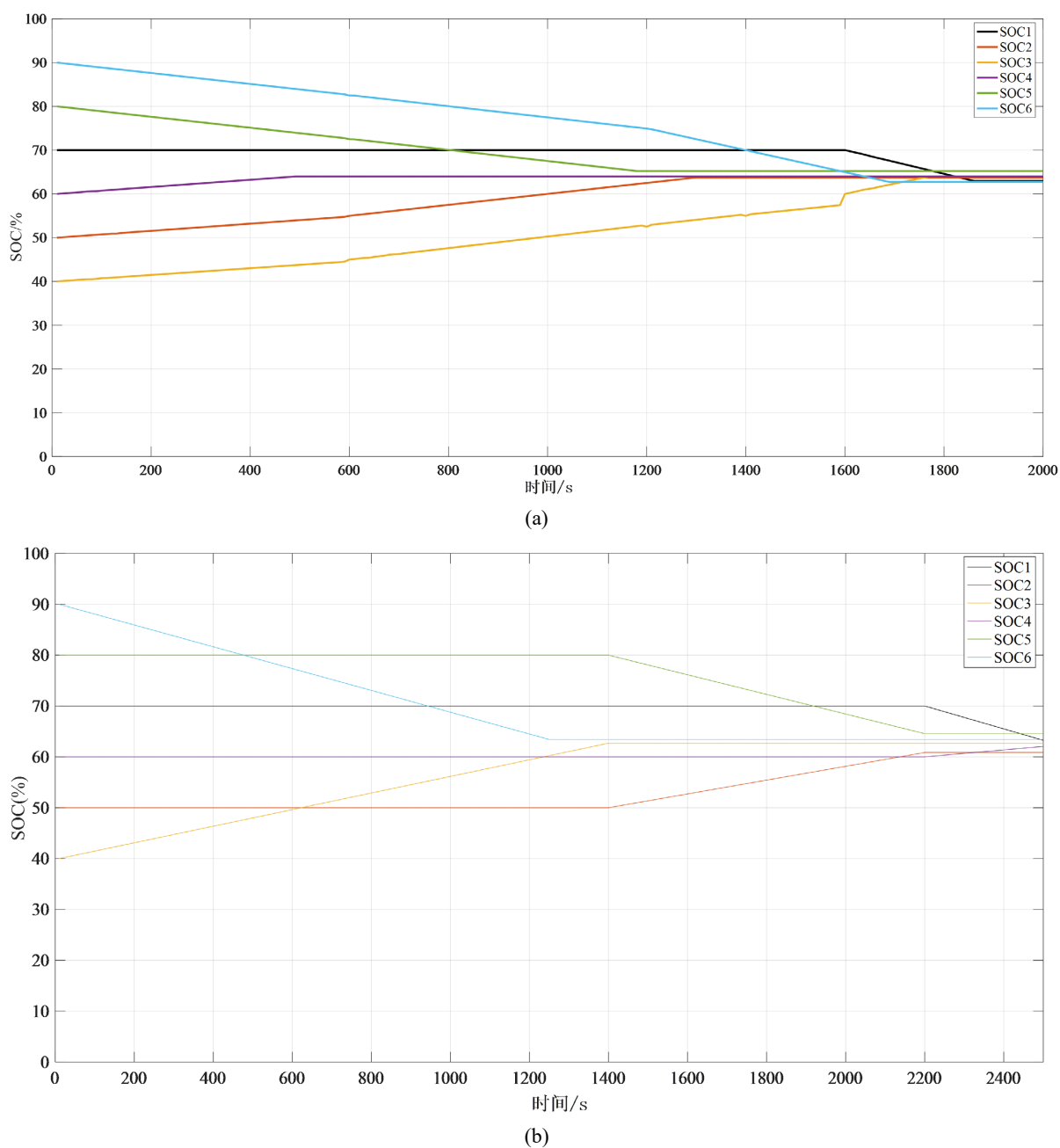


Figure 7. Experimental result

图 7. 实验结果

为体现滑动窗口均衡策略的优越性, 对实验结果进行详细的分析, 表 2 表示为应用滑动窗口均衡策略和传统均衡策略实验前后电池组内电池 SOC 的对比, 表中数据显示, 均衡前电池组平均 SOC 为 65%, 应用传统均衡策略对电池组均衡后电池组平均 SOC 为 62.85%, 应用滑动窗口均衡策略均衡后电池组的平均 SOC 达到了 63.76%。

表 2 中数据显示均衡前电池组内最大 SOC 差异为 50%, 应用滑动窗口均衡策略均衡后最大 SOC 差异为 2.5%, 均衡速度达到了 0.026%/s; 应用传统均衡策略均衡后最大 SOC 差异为 3.7%, 均衡速度为 0.019%/s, 相比较而言均衡速度提高了 37%。

综上所述, 在相同的初始条件下, 滑动窗口均衡算法相比于传统均衡算法, 均衡速度提高了 38%, 均衡时间减少了 28%, 均衡过程中能量损耗减少了 1%。

Table 2. Comparison of states before and after equilibrium
表 2. 均衡前后状态对比

电池序号	初始状态 SOC/%	滑动窗口均衡策略/%	传统均衡策略/%
1	70	62.97	63.25
2	50	63.76	60.86
3	40	63.96	62.69
4	60	63.97	62.05
5	80	65.21	64.56
6	90	62.72	63.42

5. 总结

本文通过设计均衡电路拓扑结构, 实现均衡过程中能量传输路径的灵活切换, 均衡方式多样; 均衡电路结构简单, 易于理解, 具有良好的性能。基于该均衡电路又提出滑动窗口均衡算法, 使得均衡速度进一步加快, 节约了均衡时间。

然而, 本文所设计的电路也存在一定的局限性, 例如开关矩阵需要大量的开关元件, 均衡电路体积较大; 其次, 若出现极端情况, 即电池组内所有的电池 SOC 均不连续大于或小于电池组 SOC, 则所提出的均衡算法相比于传统算法就毫无优势。

因此, 未来的研究将重点放在进一步改善电路结构和均衡策略上, 进一步提高均衡速度并缩短均衡时间。

基金项目

国家自然科学基金(62173231)。

参考文献

[1] 唐雁雁. 锂离子电池在电动汽车中的应用现状及发展综述[J]. 环境技术, 2023, 41(7): 94-100.

[2] Qu, F., Luo, Q., Liang, H., *et al.* (2022) Systematic Overview of Active Battery Equalization Structures: Mathematical Modeling and Performance Evaluation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **37**, 1685-1703. <https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3142818>

[3] 唐佳维, 吴冬春, 朱飞, 等. 基于双向 Cuk 变换器的电动汽车锂电池组均衡研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 2411-2420.

[4] Xia, B., Ding, F., Yue, S. and Li, Y. (2024) An Intelligent Active Equalization Control Strategy Based on Deep Reinforcement Learning for Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Energy Storage*, **86**, Article 111255. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111255>

[5] Xu, J., Mei, X., Wang, H., Shi, H., Sun, Z. and Zou, Z. (2022) A Model Based Balancing System for Battery Energy Storage Systems. *Journal of Energy Storage*, **49**, Article 104114. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104114>

[6] 阮观强, 曹金良, 符啸宇, 等. 主被动均衡电池管理系统设计[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 14609-14617.

[7] 孙秀娟, 姜宇, 王传江, 等. 基于 LTC6804 的电池组主动均衡实验设计[J]. 电气电子教学学报, 2024, 46(5): 209-213.

[8] 武小兰, 马彭杰, 白志峰, 等. 一种锂离子电池组智能 PID 双层主动均衡控制方法[J/OL]. 储能科学与技术, 1-14. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0839>, 2025-01-06.

-
- [9] Duraisamy, T. and Kaliyaperumal, D. (2021) Adaptive Passive Balancing in Battery Management System for E-Mobility. *International Journal of Energy Research*, **45**, 10752-10764. <https://doi.org/10.1002/er.6560>
- [10] Turksoy, A. and Teke, A. (2023) A Fast and Energy-Efficient Nonnegative Least Square-Based Optimal Active Battery Balancing Control Strategy for Electric Vehicle Applications. *Energy*, **262**, Article 125409. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125409>
- [11] 邢程. 动力电池组单电感单电容主动均衡方法研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- [12] 任子豪, 田恩刚, 王立成, 等. 基于可重构电路的电池组充电均衡方法[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(5): 468-476.
- [13] Chen, Y., Liu, X., Shen, T., Cheng, L., Wang, X., Yang, R., *et al.* (2021) An Any-Cell(s)-to-Cell(s) Equalization Method with a Single Magnetic Component for Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Energy Storage*, **33**, Article 102071. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102071>
- [14] Cao, J., Xia, B. and Zhou, J. (2021) An Active Equalization Method for Lithium-Ion Batteries Based on Flyback Transformer and Variable Step Size Generalized Predictive Control. *Energies*, **14**, Article 207. <https://doi.org/10.3390/en14010207>
- [15] Li, B., Wang, X., Zou, X., Zheng, Z. and Li, S. (2024) Hybrid Equalization Scheme for a Lithium-Ion Battery Pack Based on a Three-Winding Transformer. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, **52**, 3988-4006. <https://doi.org/10.1002/cta.3952>