

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314000

串联锂离子电池组两级均衡方案研究^{*}

廖力 李宏光 李厚佳 姜久春

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室 武汉 430068)

摘要: 针对串联锂离子电池组在均衡过程中出现均衡时间长、能量损耗大的问题,设计了一种两级均衡拓扑,并针对该拓扑设计了一种基于电池荷电状态的变论域模糊逻辑控制策略。所提拓扑在电池组内采用改进型 Buck-Boost 电路,优化了均衡路径;电池组间采用集中式的单电感均衡电路,可以实现任意电池组间的均衡。所提策略在模糊逻辑控制的基础上引入伸缩因子对输入论域灵活调节,通过对均衡电流的精准调整进一步提高均衡速度和能量利用率。最后搭建均衡系统进行验证,结果表明,本文拓扑比分组 Buck-Boost 拓扑减少了约 12.53% 的均衡时间。在相同的静置和充放电条件下,与 FLC 算法相比,本文策略不仅减少了约 20.98% 的均衡时间,且提高了约 7% 的能量利用率。验证了本文均衡方案的可行性。

关键词: 变论域模糊逻辑控制;伸缩因子;Buck-Boost 电路;两级均衡

中图分类号: TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Research on two-level equalization scheme of series lithium-ion battery pack

Liao Li Li Hongguang Li Houjia Jiang Jiuchun

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problems of long equalization time and large energy loss in the equalization process of series-connected lithium-ion battery packs, a two-level equalization topology is designed in this paper, and a variable universe fuzzy Logic control strategy based on battery state of charge is designed for this topology. The proposed topology adopts an improved Buck-Boost circuit within the battery pack to optimize the equalization path, and a centralized single-inductance equalization circuit is used between the battery packs, which can achieve equalization between any battery packs. The proposed strategy introduces a contraction-expansion factor on the basis of fuzzy logic control to flexibly regulate the input domain, which further improves the equalization speed and energy utilization by precisely adjusting the equalization current. Finally, the equalization system is built for validation, and the results show that the topology of this paper reduces the equalization time by about 12.53% compared to the grouped Buck-Boost topology. Under the same static and charging/discharging conditions, the strategy in this paper not only reduces the equalization time by about 20.98% but also improves the energy utilization by about 7% compared with the FLC algorithm. The feasibility of the equalization scheme in this paper is verified.

Keywords: variable universe fuzzy Logic control; contraction-expansion factor; Buck-Boost circuit; two-level equalization

0 引言

锂离子电池具有高能量密度、高充放电速度、长使用寿命和安全性等优异性能,是电动汽车和储能系统的主要动力源^[1-2]。受限于电池单体的电压较小,许多电池单体通常串联成组使用,从而为负载提供更高的电压和功率^[3-4]。然而,锂离子电池在实际生产过程中存在着生产工艺和材料

质量的差异,导致了锂离子电池组存在不一致性^[5-6]。这种不一致性会随着充放电次数的增加而恶化,从而降低电池组的实际可用容量,缩短电池组的使用寿命^[7-9]。因此,利用快速高效的均衡技术对电池组进行均衡管理是至关重要的。

电池均衡技术分为被动均衡和主动均衡^[10-11]。基于电阻的被动均衡方法简单、可靠且易于实现^[12],但是存在着

收稿日期:2023-06-30

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52177212)、湖北省教育厅科学研究计划(T2021005)项目资助

能量浪费、热管理较难的问题。相比之下,主动均衡更符合高效节能的发展趋势。根据所用电子元器件的不同,主动均衡可分为四种基本类型,即基于电容器、电感器、变换器以及变压器的均衡^[13-14]。在各类主动均衡拓扑中,Buck-Boost 电路因结构简单,均衡速度快而被广泛研究。文献[15]基于 Buck-Boost 电路对电池进行分组,组内可以同时实现均衡,提高了均衡效率。但是当组内电池较多时,增加了能量传递路径,进而增加了均衡时间和能量损耗。文献[16]提出一种基于 Buck-Boost 及变压器的环式均衡结构,实现了能量在相邻电池及首尾电池之间的双向环式转移,但当电池数量增多、均衡路径延长时,不相邻两电池之间依旧面临均衡时间长的问题。文献[17]提出一种基于 Buck-Boost 模块的分层均衡拓扑结构,该拓扑简单且易于集成,但是当所要均衡的电池数量较多时,均衡速度也会显著降低。

综合文献[15-17]中均衡拓扑的优缺点,本文对电池进行分组,设计了一种两级均衡拓扑。组内均衡对传统 Buck-Boost 电路进行结构改进,优化了均衡路径,提高了均衡速度。组间均衡通过双层开关选通待均衡电池组,双向式的均衡拓扑结构可以实现任意电池组间的均衡。因此,本文提出的两级均衡拓扑结构在均衡速度上有更好的表现。

均衡电路的良好工作需要一种有效的均衡策略。固定阈值法根据预先设定的阈值进行均衡,控制简单,但在均衡过程中无法动态调节不同差异电池的均衡力度,存在电池差异较大时不能及时均衡且电池差异较小时容易过度均衡的问题^[18]。模糊逻辑控制(fuzzy logic control, FLC)具有强非线性和容错能力,且不需要精确的数学模型,在电池均衡中通过动态调整均衡电流来改善电池组不一致性和优化均衡效率^[19-20]。文献[21-22]在均衡策略中均采用 FLC 动态调节均衡电流,以减少均衡时间、提高均衡效率,并有效降低了电池的 inconsistency。但是 FLC 存在初始论域固定的问题,在均衡过程中对均衡电流的调整能力会随着输入变量的减小而降低。在本文中,引入变论域的思想对 FLC 均衡策略进行改进,通过模糊推理的方式引入伸缩因子 α 并设计了变论域模糊逻辑控制(variable universe fuzzy logic control, VUFLC)策略以灵活调节输入论域,实现对均衡电流更精准的动态调整,进一步提高了均衡速度和能量利用率。

1 均衡电路分析

如图 1 所示为本文设计的两级均衡拓扑结构图,分为组内均衡和组间均衡。

组内均衡电路结构如图 2 所示。组内均衡以每 3 个相邻的电池单体为一组,采用改进型 Buck-Boost 均衡电路,可以快速实现相邻电池单体间的均衡。每个组内均衡电路由 3 个电池单体、2 个储能电感和 4 个 MOS 管组成。

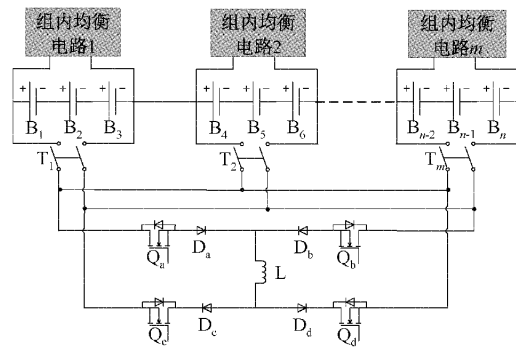


图 1 两级均衡拓扑结构图

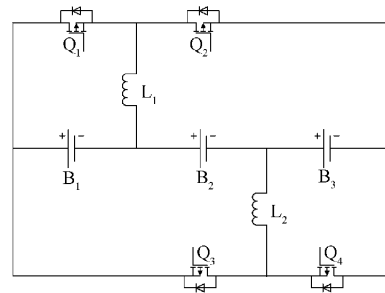


图 2 组内均衡电路结构

组间均衡采用集中式的单电感均衡电路,以实现任意电池组间的能量转移。组间均衡通过开关 T_i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) 选择待均衡电池组,组间均衡电路由 1 个储能电感、4 个 MOS 管和 4 个二极管组成。

1.1 组内均衡原理分析

传统 Buck-Boost 均衡电路如图 3 所示。该电路结构简单,利用电感作为储能元件,通过控制开关管的开通和关断实现相邻电池间的能量转移。但是该电路在实现不相邻电池间的能量转移时,需要的转移时间较长。以电池 B_1 向电池 B_3 能量转移为例($B_1 > B_2 > B_3$),能量转移路径为 B_1 - B_2 、 B_2 - B_3 ,电池 B_2 在这个过程中仅仅起到能量过渡作用。

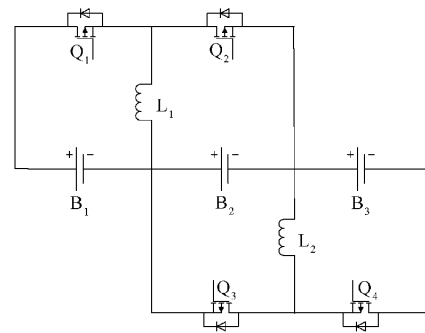


图 3 传统 Buck-Boost 均衡电路

因此,本文设计了一种结构改进型 Buck-Boost 均衡电路,使不相邻电池间进行能量转移时,带动原本仅起过渡作用的电池也参与到能量转移中,电路的能量转移路径为

$B_1-B_2B_3$ 、 $B_1B_2-B_3$ 。该电路增加了同一时刻参与能量转移的电池数量,一定程度上提高了均衡速度。考虑到传统 Buck-Boost 均衡电路在电池数量较多且不相邻电池间的距离较远时,能量的转移路径较长,增加了均衡时间和能量损耗,本文在分组时仅以 3 个电池为一组,可以有效避免此弊端。

下面以电池组 1 的组内均衡过程为例进行分析。假设电池组 1 内各电池单体能量大小 $B_1 > B_2 > B_3$, 则能量转移过程将分为 $B_1-B_2B_3$ 、 $B_1B_2-B_3$ 两个部分。其中, $B_1-B_2B_3$ 的能量转移过程在开关管 Q_1 的一个工作周期内分为开通和关断两个阶段, $B_1B_2-B_3$ 的能量转移过程在开关管 Q_3 的一个工作周期内分为开通和关断两个阶段。 $B_1-B_2B_3$ 的能量转移路径如图 4 所示。

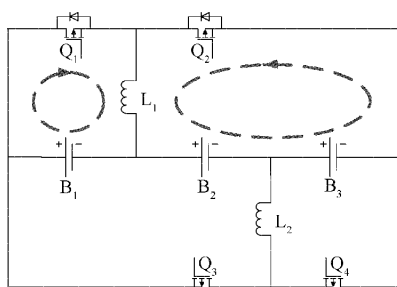


图 4 $B_1-B_2B_3$ 能量转移路径

对 Q_1 的开通和关断两个阶段的原理分析如下:

阶段 1) 开关管 Q_1 导通时, 电池 B_1 向电感 L_1 充电, 电感 L_1 储能。电感 L_1 中的电流线性上升:

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

其中, V_{B_1} 为电池 B_1 的端电压; t 为开关管 Q_1 的导通时间。电感 L_1 电流峰值为:

$$i_{L_1\max} = \frac{V_{B_1}}{L_1}DT \quad (2)$$

式中: D 为开关管 Q_1 的占空比; T 为开关管 Q_1 的周期。

阶段 2) 开关管 Q_1 关断时, 电感 L_1 经开关管 Q_2 的二极管与电池 B_2 和 B_3 构成回路, 并向电池 B_2 和 B_3 充电。电感 L_1 中的电流如式(3)所示:

$$i_{L_1}(t) = i_{L_1\max} - \frac{V_{B_2} + V_{B_3}}{L_1}(t - DT) \quad (3)$$

式中: V_{B_2} 和 V_{B_3} 分别为电池 B_2 和 B_3 的端电压。

$B_1B_2-B_3$ 的能量转移路径如图 5 所示, 此时由电池 B_1 和 B_2 向 B_3 进行能量转移, 分为 Q_3 的开通和关断两个阶段, 原理分析同 Q_1 的工作原理。

1.2 组间均衡原理分析

为了实现任意两个电池组间的均衡, 本文在组间均衡中采用了集中式的单电感均衡电路。该电路为双向式结构, 相比于通过单侧开关利用超级电容进行储能并转移, 减少了能量的过渡过程, 实现了更快的能量转移速度。本文

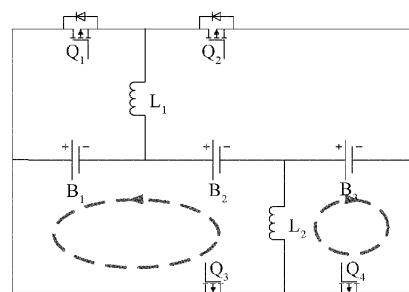
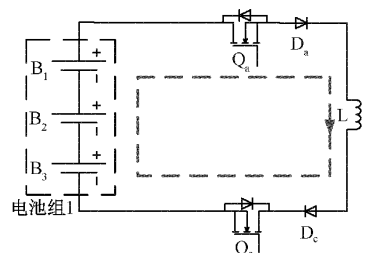
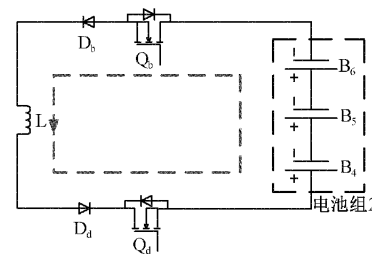


图 5 $B_1B_2-B_3$ 能量转移路径

以电池组 1 和电池组 2 为例进行组间均衡电路原理分析, 以每个电池组中各个电池单体的平均能量代表该电池组的能量。假设电池组 1 的能量高于电池组 2 的能量, 选通开关 T_1 和 T_2 , 则能量将从电池组 1 向电池组 2 转移。组间均衡电路工作时的能量转移路径如图 6 所示。



(a) 电池组1放电



(b) 电池组2充电

图 6 组间均衡能量转移路径

电池组 1 和电池组 2 的能量转移过程分为两个阶段。在阶段 1 时开关管 Q_a 和 Q_c 导通, 电池组 1 向电感 L 充电; 在阶段 2 时开关管 Q_b 和 Q_e 导通, 电感 L 向电池组 2 充电。组间的能量转移过程相当于通过一个双向 Buck-Boost 均衡电路实现, 原理分析同 1.1 节组内均衡。

2 变论域模糊逻辑控制均衡策略

2.1 均衡变量选择

均衡变量的选取对于均衡效率有着至关重要的影响。相比于电池电压、电池内阻等均衡变量, 电池荷电状态 (state of charge, SOC) 能够从本质上体现电池组的不一致性, 因此本文采用 SOC 作为均衡变量。电池 SOC 定义为一定温度和充放电倍率下电池当前容量和最大容量的比值, 如式(4)所示。

$$SOC = \frac{Q_t}{Q_{max}} \times 100\% \quad (4)$$

式中： Q_t 为电池当前时刻的容量； Q_{max} 为电池的最大容量。

2.2 均衡控制流程

根据本文设计的均衡拓扑结构,采用先组内均衡、后组间均衡的控制策略,各电池组内的均衡可同时进行,以提高电池组的整体均衡速度。均衡控制流程如图 7 所示。

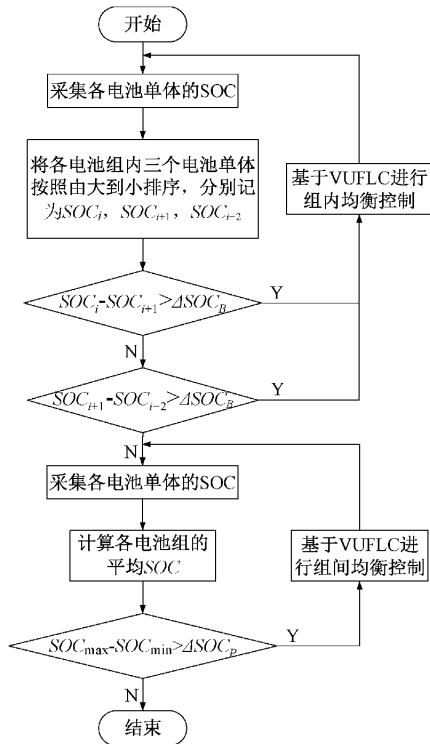


图 7 均衡控制流程图

在图 7 中, SOC_i 、 SOC_{i+1} 和 SOC_{i+2} 表示一个电池组内由大到小排序的 3 个电池单体的 SOC 值; SOC_{max} 和 SOC_{min} 表示电池组 SOC 的最大值和最小值; ΔSOC_B 和 ΔSOC_P 分别表示组内和组间的均衡阈值。

2.3 变论域模糊逻辑控制器结构

FLC 具有设计简单、控制性能优越、鲁棒性好的优点,因而在电池均衡技术中被广泛应用。FLC 的规则库由输入、输出变量及其初始论域和模糊规则组成,其控制精度取决于控制规则的数量。然而,在 FLC 中,输入输出变量的初始论域在确定之后无法改变。当初始论域取值范围较小时,对输入输出变量的调节会超出其初始论域的范围,无法达到理想控制效果;当初始论域取值范围较大时,则输入输出变量的模糊规则数量相对较少,会影响控制精度。因此,为了减少固定的初始论域对均衡结果的影响,本文引入伸缩因子 α 对输入变量的初始论域在均衡过程中灵活调节,相当于在 FLC 原有规则库的基础上增加或减少模糊规则的数量,使输入变量的论域随着输入变量的减少而收缩,或随着输入变量的增加而扩展,从而提高动态调整均衡电流

的能力,达到理想控制效果。论域的收缩和扩张原理如图 8 所示, α 为输入论域的伸缩因子。

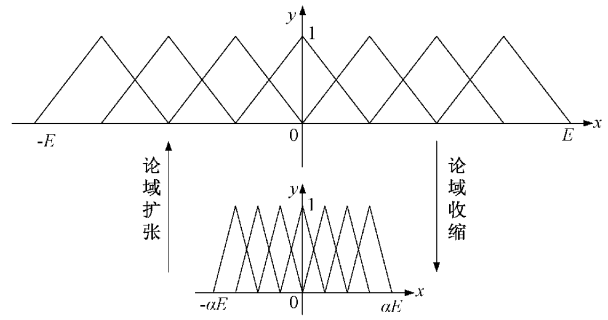


图 8 变论域基本原理图

本文设计的变论域模糊逻辑控制器结构框图如图 9 所示,包括均衡电流 I_{eq} 的 FLC 设计和伸缩因子 α 的设计,其中 FLC 由模糊器、规则库、推理机和去模糊器组成。变论域模糊逻辑控制器用于对均衡电流的动态调整。

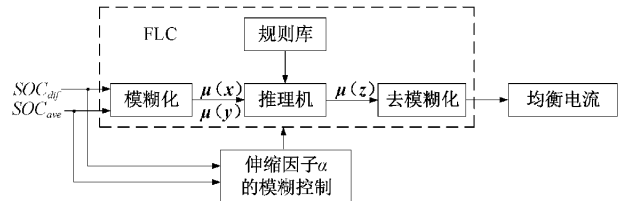


图 9 变论域逻辑模糊控制器结构框图

2.4 均衡电流 I_{eq} 的 FLC 设计

在本文的控制策略中,设计了组内和组间两种 FLC 来调整均衡电流,两种 FLC 的规则库和隶属度函数类似。现以组内的 FLC 为例,FLC 中的两个输入变量 SOC_{ave} 和 SOC_{dif} ,其表达式如下:

$$SOC_{dif} = |SOC_i - SOC_{i+1}| \quad (5)$$

$$SOC_{ave} = (SOC_i + SOC_{i+1})/2 \quad (6)$$

在式(5)和(6)中, SOC_i 和 SOC_{i+1} 为一个电池组内相邻两电池的 SOC; SOC_{dif} 为两电池的差值, SOC_{ave} 为两电池的平均值。

在 FLC 中,输入变量 SOC_{ave} 和 SOC_{dif} 经模糊化转换为 $\mu(x)$ 和 $\mu(y)$,其论域分别设为 $[0, 1]$ 、 $[0, 0.5]$ 。输出变量为均衡电流 I_{eq} ,模糊化转换为 $\mu(z)$ 。为保证均衡过程中电池安全,设其论域为 $[0, 5]$ 。将模糊化后的输入、输出变量分为 5 个模糊子集:非常小(VS)、小(S)、中等(M)、大(B)和非常大(VB)。三角形隶属度函数计算简单且控制性能良好,因此本文选用三角隶属函数。 I_{eq} 的隶属度函数如图 10 所示。

基于电池均衡技术的知识和经验,建立的模糊规则如表 1 所示。

- 1) 当 SOC_{dif} 和 SOC_{ave} 相对较小时,应使用小的 I_{eq} 来防止电池的过度放电;
- 2) 当 SOC_{dif} 相对较小且 SOC_{ave} 相对较大时,应使用

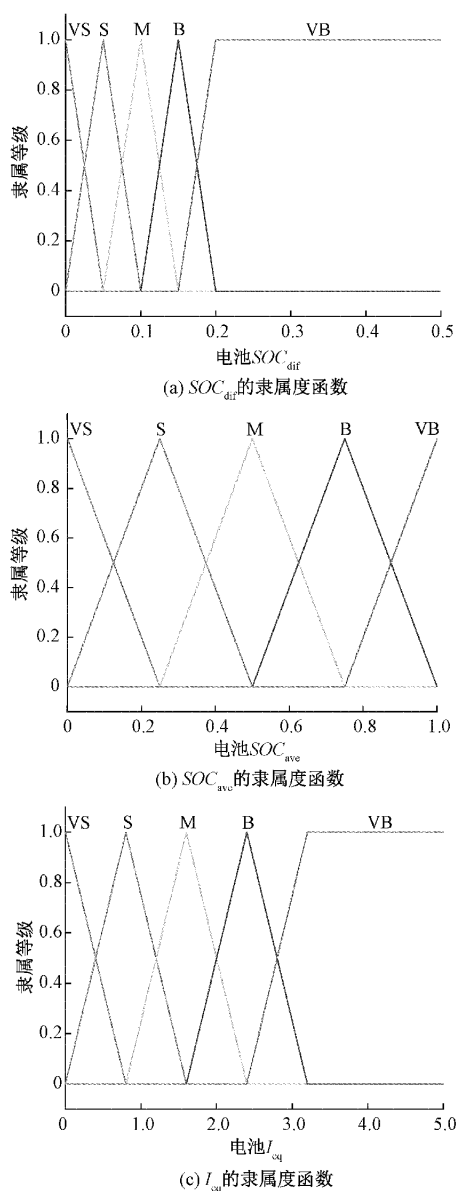


图10 I_{eq} 的隶属度函数图

表1 I_{eq} 的模糊规则表

I_{eq}	SOC_{dif}				
	VS	S	M	B	VB
VS	VS	S	M	B	B
S	S	M	B	B	VB
SOC_{ave}	M	M	B	VB	VB
B	S	M	B	B	VB
VB	VS	S	M	B	B

较小的 I_{eq} 来防止电池的过度充电;

3) 当 SOC_{dif} 相对较大时, 应使用大的 I_{eq} 来减少均衡时间;

4) 当 SOC_{dif} 和 SOC_{ave} 相对适中时, 应使用相对适中

的 I_{eq} 来提高均衡速度。

模糊逻辑控制器的输入输出曲面图如图11所示, 可以看出, 本文设计的均衡电流控制器的调节机制与模糊规则的设定推理一致。

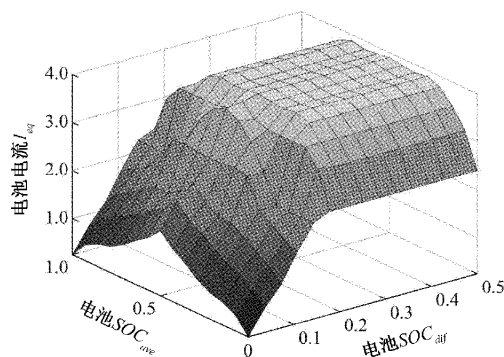


图11 均衡电流 I_{eq} 的输入输出曲面图

推理机得到的模糊结果不能作为信号直接控制开关管, 要对其进行去模糊化处理。本文选用重心法进行去模糊化, 其表达式如式(7)所示。

$$I_{eq} = \frac{\int z\varphi(z)dz}{\int \varphi(z)dz} \quad (7)$$

式中: $\varphi(z)$ 是推理的模糊结果。

2.5 伸缩因子 α 的设计

变论域模糊逻辑控制的关键在于如何确定合适的伸缩因子, 常用的方法有函数模型法和模糊推理法。函数模型法需要选择函数模型及其参数, 其输入论域伸缩因子的两种常见表达式如式(8)和(9)所示。

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau + \epsilon \quad (8)$$

$$\alpha(x) = 1 - \lambda \exp(-kx^2) \quad (9)$$

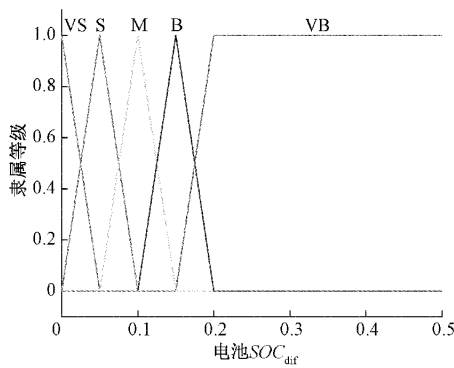
式(8)和(9)中, τ 为系数且 $0 < \tau < 1$; ϵ 为无穷小的正数; k 和 λ 均为系数, $k > 0, 0 < \lambda < 1$ 。

由式(8)和(9)可知, 在构建伸缩因子函数的过程中需要诸多参数的选择, 如果这些参数选择不当, 均衡系统的控制效果将会受到影响。但伸缩因子的收缩和扩张可以很容易用模糊语言来描述, 因此本文采用基于模糊推理的方法确定伸缩因子。

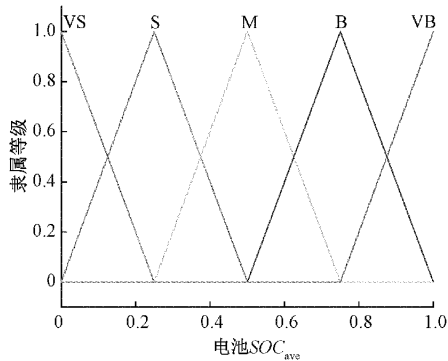
在均衡过程中, 输入变量 SOC_{dif} 逐渐减小到零。如果 SOC_{dif} 的隶属度函数是固定的, 那么其初始论域 $[0, 0.5]$ 对于逐渐减小的输入变量来说会太大, 这将导致控制性能的降低。因此, 伸缩因子的模糊推理旨在收缩 SOC_{dif} 的论域, 以实现更加精准的均衡电流调控。在伸缩因子 α 的模糊推理中, 两个输入变量为 SOC_{ave} 和 SOC_{dif} , 输出变量为伸缩因子 α , 其隶属度函数如图12所示。

伸缩因子 α 的模糊规则表如表2所示。

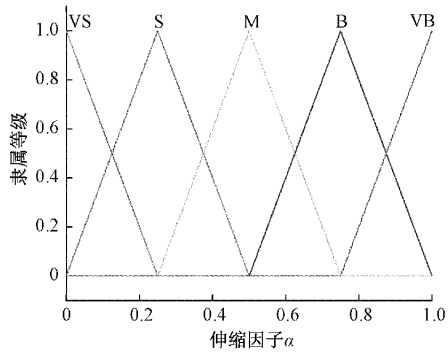
由表2可知, SOC_{dif} 的论域将随着 SOC_{dif} 相应的减少



(a) SOC_{diff} 的隶属度函数



(b) SOC_{ave} 的隶属度函数



(c) α 的隶属度函数

图 12 α 的隶属度函数图

表 2 α 的模糊规则表

α	SOC_{diff}				
	VS	S	M	B	VB
VS	VS	VS	S	S	S
S	S	M	M	M	B
SOC_{ave}	M	M	M	B	VB
B	S	M	M	M	B
VB	VS	VS	S	S	S

或增加而收缩或膨胀,模糊推理后新的 SOC_{diff} 论域为 $\alpha \times [0, 0.5]$ 。其输入输出关系如图 13 所示。

本文采用能量利用率 η 来量化电池的均衡效果,其定义如下:

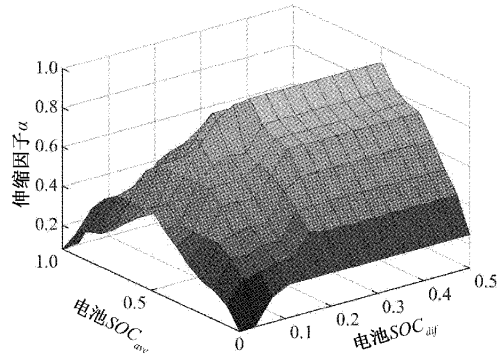


图 13 α 的输入输出曲面图

$$\eta = \frac{Q_{ch}}{Q_{dis}} \quad (10)$$

式中: Q_{ch} 和 Q_{dis} 分别表示电池充入和放出的能量。

3 实验结果分析

根据上述设计的均衡拓扑和均衡策略,本文以 6 节 18650 锂离子电池为实验对象,利用课题组实验条件搭建了如图 14 所示的小型均衡实验系统,用于验证本文所提均衡方案的性能。

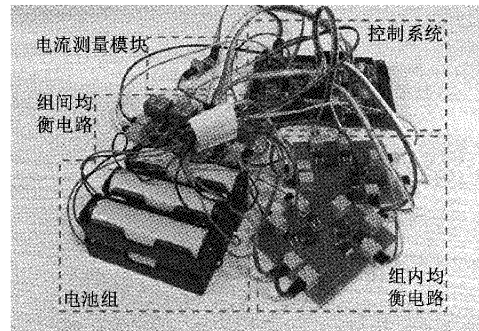


图 14 均衡实验系统

实验电路中各元器件主要参数如表 3 所示。

表 3 均衡电路参数

元器件	型号	参数
电池 B_1 - B_6	18650	3.7 V/3.4 Ah
开关 T	SRD-05VDC-SL-C	30 V/10 A
电感 L	CRDH104R	330 μ H
开关管 Q	NCE6050KA/TO-252-2	60 V/50 A
二极管 D	SS54	40 V/5 A

3.1 均衡拓扑对比

为了验证本文设计的均衡拓扑的优势,设计了两组对比实验进行验证。第 1 组为传统相邻电池间的 Buck-Boost 均衡拓扑与分组的 Buck-Boost 均衡拓扑进行对比,目的是验证分组均衡的优势。第 2 组为分组的 Buck-Boost 均衡

拓扑与本文设计的均衡拓扑进行对比,目的是验证本文均衡拓扑的优势。拓扑对比实验均采用固定阈值法且在静置状态下进行,3种均衡拓扑中各电池单体SOC变化曲线如图15(a)~(c)所示。

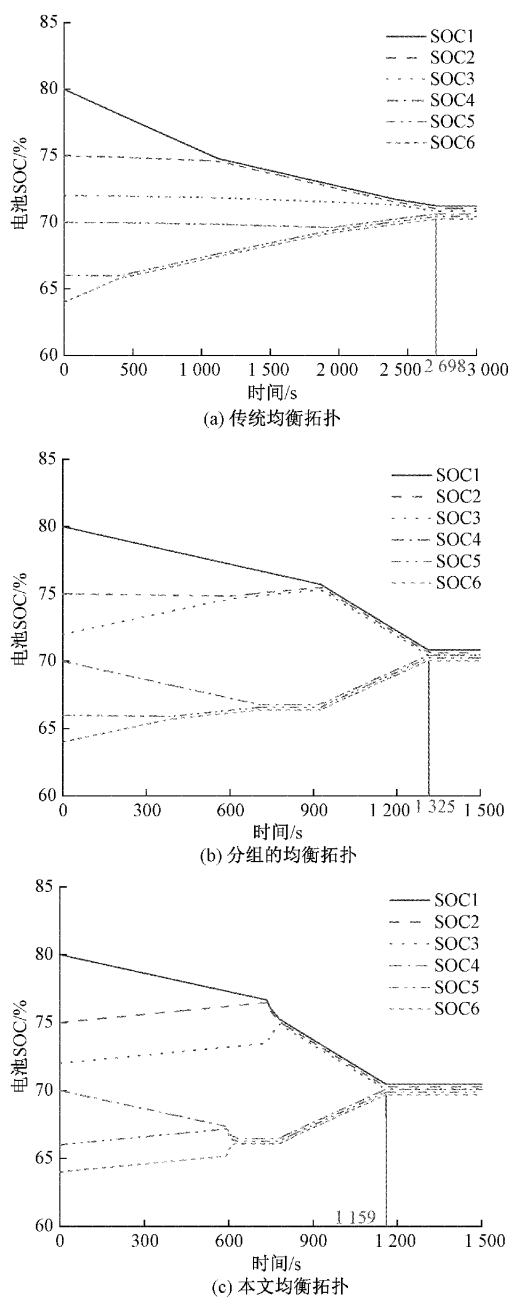


图15 均衡拓扑对比

如图15所示,在静置均衡状态下,传统相邻电池间的Buck-Boost均衡拓扑需要大约2698s完成均衡,分组的Buck-Boost均衡拓扑需要大约1325s完成均衡,而本文所提出的均衡拓扑需要大约1159s即可完成均衡。相比于传统相邻电池间的Buck-Boost均衡拓扑,分组的Buck-Boost均衡拓扑可以减少约50.89%的均衡时间;相比于分组的Buck-Boost均衡拓扑,本文均衡拓扑可以减少约

12.53%的均衡时间。由此可知,本文设计的均衡拓扑可以更有有效的提高均衡速度。3种均衡拓扑的对比如表4所示。

表4 均衡拓扑组成及性能对比

均衡拓扑	均衡时间/s	元器件类型			
		电感	MOSFET	二极管	开关
传统拓扑	2 698	5	10	0	0
分组拓扑	1 325	5	10	0	0
本文拓扑	1 159	5	12	4	2

由表4所示的对比信息可知,相比于传统相邻电池间的均衡拓扑和分组的均衡拓扑,本文设计的均衡拓扑在二极管和开关的数量上有所增加。但当电池数量增加时,本文均衡拓扑中电感和MOSFET管的数量将会少于另外两种均衡拓扑,在保证良好均衡性能的同时总体上还是降低了电路的成本。

3.2 均衡策略对比

为了验证本文设计的VUFLC均衡策略的有效性,与FLC算法分别在静置、放电和充电3种状态下进行对比实验。均衡充放电实验采用恒流充放电进行验证。

1) 静置均衡

静置状态下在FLC算法和VUFLC算法两种均衡策略控制下的各电池单体SOC变化曲线如图16(a)和(b)所示。

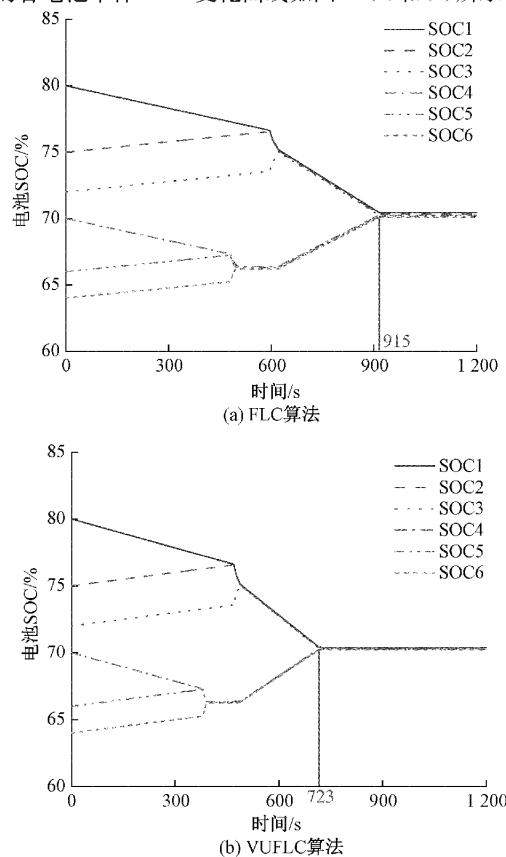


图16 静置均衡

如图 16 所示,在静置状态下,采用 FLC 算法时需要大约 915 s 完成均衡,而采用 VUFLC 算法时需要大约 723 s 完成均衡。相比于 FLC 算法,采用 VUFLC 算法减少了 20.98% 的均衡时间。可以看出,使用本文设计的均衡策略进行静置均衡时均衡速度更快。静置均衡前后各电池参数如表 5 所示。

表 5 静置均衡前后各电池参数 %

电池编号	均衡前	FLC 算法	VUFLC 算法
B ₁	80.00	70.83	70.90
B ₂	75.00	70.72	70.85
B ₃	72.00	70.60	70.79
B ₄	70.00	70.59	70.78
B ₅	66.00	70.49	70.72
B ₆	64.00	70.38	70.67
均值	71.17	70.60	70.79
极差	16.00	0.45	0.23

由表 5 所示的均衡实验数据可知,采用 FLC 算法进行均衡后电池组的平均 SOC 为 70.60%,电池组的极差为 0.45%;采用 VUFLC 算法进行均衡时电池组的平均 SOC 为 70.79%,电池组的极差为 0.23%。相比于 FLC 算法,采用 VUFLC 算法进行均衡时能量利用率提高了约 7%。本文设计的均衡方案可以有效提高能量利用率并改善电池组的不一致性。

2) 充电和放电均衡

充电状态下在 FLC 算法和 VUFLC 算法两种均衡策略控制下的各电池单体 SOC 变化曲线如图 17(a) 和 (b) 所示。

如图 17 所示,在充电状态下,采用 FLC 算法时需要大约 893 s 完成均衡,而采用 VUFLC 算法时需要大约 708 s 完成均衡。相比于 FLC 算法,采用 VUFLC 算法减少了 20.72% 的均衡时间。可以看出,使用本文设计的均衡策略进行充电均衡时均衡速度更快。充电均衡前后各电池参数如表 6 所示。

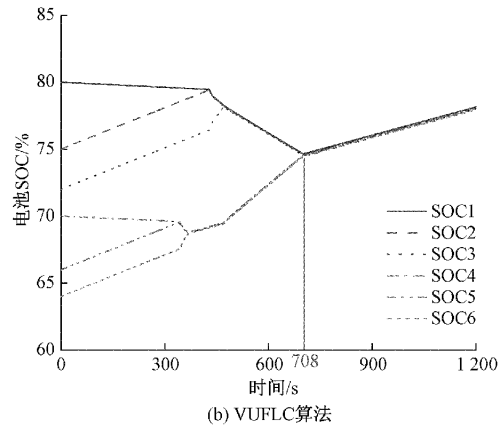
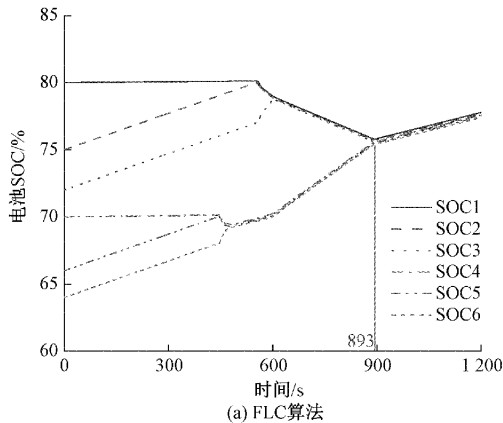


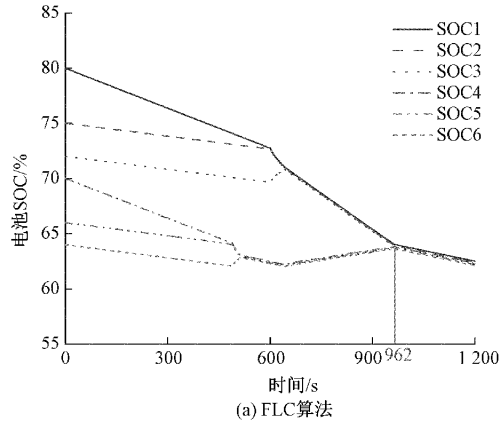
图 17 充电均衡

表 6 充电均衡前后各电池参数 %

电池编号	均衡前	FLC 算法	VUFLC 算法
B ₁	80.00	75.79	74.65
B ₂	75.00	75.69	74.60
B ₃	72.00	75.60	74.56
B ₄	70.00	75.59	74.55
B ₅	66.00	75.49	74.50
B ₆	64.00	75.40	74.45
均值	71.17	75.59	74.55
极差	16.00	0.39	0.20

放电状态下在 FLC 算法和 VUFLC 算法两种均衡策略控制下的各电池单体 SOC 变化曲线如图 18(a) 和 (b) 所示。

如图 18 所示,在放电状态下,采用 FLC 算法时需要大约 962 s 完成均衡,而采用 VUFLC 算法时需要大约 751 s 完成均衡。相比于 FLC 算法,采用 VUFLC 算法减少了 21.93% 的均衡时间。可以看出,使用本文设计的均衡策略进行放电均衡时均衡速度更快。放电均衡前后各电池参数如表 7 所示。



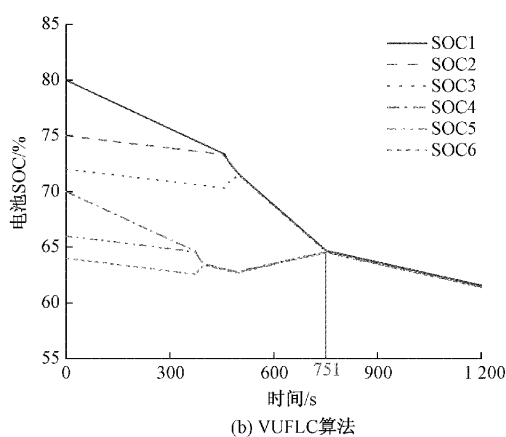


图18 放电均衡

表7 放电均衡前后各电池参数 %

电池编号	均衡前	FLC算法	VUFLC算法
B ₁	80.00	64.06	64.73
B ₂	75.00	63.96	64.68
B ₃	72.00	63.87	64.64
B ₄	70.00	63.82	64.58
B ₅	66.00	63.72	64.53
B ₆	64.00	63.63	64.49
均值	71.17	63.84	64.61
极差	16.00	0.43	0.24

结合表6和7所示的均衡实验数据可知,采用 FLC 算法进行充放电均衡后电池组的极差分别为 0.39% 和 0.43%;采用 VUFLC 算法进行充放电均衡后电池组的极差分别为 0.2% 和 0.24%,表明本文所提均衡方案不仅可以有效提高均衡速度和能量利用率,同时改善了电池组的不一致性问题。

4 结 论

针对串联锂离子电池组在均衡过程中出现均衡时间长、能量损耗大的问题,本文设计了一种两级均衡拓扑,分别进行组内均衡和组间均衡。电池组内通过改进型 Buck-Boost 均衡电路实现相邻电池间的快速均衡;电池组间通过集中式的单电感均衡电路实现任意电池组之间的均衡。实验结果表明,与分组的 Buck-Boost 均衡拓扑相比,本文均衡拓扑减少了 12.53% 的均衡时间,验证了本文均衡拓扑的有效性。在均衡策略方面,针对本文均衡拓扑,在 FLC 的基础上引入伸缩因子 α 设计了 VUFLC 均衡策略,通过更精准的均衡电流调控进一步减少了均衡时间并提高了能量利用率。为了验证本文设计均衡策略的有效性,分别在相同的静置和充放电条件下,设计了 FLC 算法和 VUFLC 算法的对比实验。实验结果表明,与 FLC 算法相比,采用本文设计的 VUFLC 算法,减少了 20.98% 的均衡

时间,并提高了约 7% 的能量利用率,说明本文所提均衡策略在均衡速度和能量利用率上均有更好的表现。

参考文献

- [1] 蔡敏怡,张娥,林靖,等. 串联锂离子电池组均衡拓扑综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(15):5294-5311.
- [2] 巫春玲,刘智轩,程琰清,等. 动力锂电池组均衡拓扑研究综述[J]. 电子测量技术,2021,44(15):7-14.
- [3] 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.
- [4] JI F, LIAO L, WU T, et al. Self-reconfiguration batteries with stable voltage during the full cycle without the DC-DC converter [J]. The Journal of Energy Storage, 2020, 28(2):101213.
- [5] 程俊,曲妍,李媛,等. 基于剩余电量估计的电池组充放电均衡策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(3):122-129.
- [6] 李泉,周云山,王建德,等. 基于双层准谐振开关电容的锂电池组均衡方法[J]. 电工技术学报,2017,32(21):9-15.
- [7] 刘俊,阚加荣,成乾,等. 改进型 Buck/Boost 锂电池均衡器研究[J]. 电力电子技术,2022,56(6):41-44.
- [8] 张娥,徐成,王康丽,等. 电池组分段混合均衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):168-173.
- [9] 刘征宇,夏登威,姚利阳,等. 基于耦合绕组的锂电池组主动均衡方案研究[J]. 电机与控制学报,2021,25(2):54-64.
- [10] 王鹿军,柯锦洋,詹敏,等. 基于四管双向变换器的退役电池组有源快速均衡方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(14):5254-5266.
- [11] GUO X, WU Q, XING C, et al. An active equalization method based on an inductor and a capacitor for series battery pack [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3):4040-4052.
- [12] 郭向伟,刘震,耿佳豪,等. 基于 LC 储能的串联电池组主动均衡方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(9):242-251.
- [13] 詹敏,柯锦洋,吴铁洲. 基于隔离型半桥变换器的退役电池组均衡方法[J]. 电子测量技术,2022,45(17):7-13.
- [14] 白喆,王琪,王晨. 基于模糊 PID 的级联式 Cuk 均衡技术研究[J]. 国外电子测量技术,2021,40(2):52-55.
- [15] MA Y, DUAN P, SUN Y, 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.
- [16] 王维强,张吉,张力,等. 基于 Buck-Boost 及变压器的环

- 式结构电池均衡器[J]. 电力电子技术, 2020, 54(4): 111-114.
- [17] 刘征宇, 许亚娟, 余超, 等. 基于 Buck-Boost 电路的分层均衡方案[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 87-94.
- [18] 宫明辉, 李凌峰, 乌江, 等. 变论域双模糊控制器在锂电池均衡策略仿真中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(11): 158-165.
- [19] 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): 4024-4033.
- [20] 齐火箭, 张新瑞, 王嘉宏等. 动力锂离子电池组均衡策略研究[J/OL]. 电源学报, 1-17[2024-01-15] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220215.0853.002.html>.
- [21] LIAO L, CHEN H. Research on two-stage equalization strategy based on fuzzy logic control for lithium-ion battery packs [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50(2): 104321.
- [22] WANG B, QIN F, ZHAO X, et al. Equalization of series connected lithium-ion batteries based on back propagation neural network and fuzzy logic control[J]. Energy Research, 2020, 44(6): 4812-4826.

作者简介

廖力, 博士, 副教授, 主要研究方向为储能技术、电动汽车电池管理系统。

E-mail: 1689685819@qq.com

李宏光(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为电池组均衡技术。

E-mail: 2928549594@qq.com

李厚佳, 硕士研究生, 主要研究方向为电池组均衡技术。

E-mail: 1157513188@qq.com

姜久春, 博士, 教授, 研究方向为电动汽车充电机、电池管理系统。

E-mail: 3401589320@qq.com