

文章编号:1671-6833(2025)02-0090-07

基于可重构电路的串联电池动态分组主动均衡方法

秦东晨, 赵鸿飞, 武红霞, 杨俊杰, 陈江义, 王婷婷

(郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对电池组中单体电池电量不一致问题,以串联电池组为研究对象,对电池主动均衡控制技术进行研究,研究内容包括均衡拓扑的改进和均衡控制策略的设计。首先,提出了一种新型均衡拓扑结构并对其进行验证;其次,建立均衡电路的数学模型,分析均衡过程中电压差和开关频率对均衡性能的影响,并根据电压差分析结果设计了基于可变占空比的多对多均衡控制策略,以提高电池组均衡速度和均衡一致性;最后,在 MATLABR2021b/Simulink 中进行均衡拓扑与均衡算法的联合仿真。结果表明:与固定分组均衡控制策略相比,所提均衡拓扑和控制策略能够提高电池组均衡速度和均衡一致性,均衡时间减少了 29.71%,电池荷电状态(SOC)方差降低了 16.13%,均衡过程中能量转移次数减少了 52.5%。

关键词:锂离子电池;主动均衡;可重构电路;动态分组;均衡拓扑

中图分类号: TM912

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2024.05.003

锂离子电池因具有能量密度高、自放电率低、体积小和循环寿命长等优点^[1-2],目前被广泛应用于包括电动汽车、储能系统在内的绿色能源行业^[3-4]。然而,由于制造技术和生产工艺的复杂性,在成组使用时单体电池间不可避免地会存在不一致性^[5-6]。为了确保电动汽车和其他由电池供电设备的运行稳定性,必须消除或降低电池之间的一致性,以提高电池组的整体可用容量^[7]。因此,需要有一种有效的电池均衡系统来实现电池组中不同单体电池电量的快速均衡控制。

被动均衡作为最传统的均衡方式,原理简单、易于实现,但由于其是通过均衡电路中的耗能元件消耗掉高能电池的能量来实现均衡^[8],因此,电池产热量增大,可能会加重电池热管理系统的负担。主动均衡是目前研究的主要方向^[9],其通过在电路中添加电感、电容类储能元件实现能量从高能电池转移到低能电池,最终实现均衡。但主动均衡电路的结构复杂度一般较高,另外其成本和均衡速度也是其使用场景受限的原因。

Daowd 等^[10]改进了多电容器均衡电路,并率先提出了单电容均衡结构,实现了任意单体电池之间

的能量传输。但在基于电容的均衡拓扑中,电压是唯一的均衡变量,且当电压差较小时均衡效率降低。基于变压器的均衡拓扑解决了电压差较小时均衡效率低下的问题^[11],但其体积大、成本高、扩展性差,难以应用到电池数量多的场合。

基于变换器的均衡拓扑结构较为灵活,适用性广。Das 等^[12]提出的 Buck-Boost 均衡拓扑实现了相邻电池之间的能量传输,但当需要均衡的电池相距较远时,其效率会大大降低。Wu 等^[13]提出了一种基于 Buck-Boost 变换器的分层均衡拓扑,将均衡过程分为多个不同层级同时进行,从而有效地加快了均衡速度。但其控制策略复杂,拓展性差。为了解决这个问题,郭向伟等^[14]提出一种基于 LC 储能的主动均衡电路,该电路使用单个电感电容可以实现任意单体电池间的直接均衡。Chen 等^[15]也提出一种基于单电感的双向主动均衡方法,同样允许均衡能量直接从任意电池传递到任意电池。

均衡能量转移效率也是评判均衡拓扑优劣的标准之一,为了减少能量损失, Ji 等^[16]提出了无须 DC-DC 转换器的可重构均衡拓扑,电池组的容量利用率达到了 99.8%。针对可重构电路在均衡过程中

收稿日期:2024-10-12;修订日期:2024-12-28

基金项目:国家重点研发项目(2018YFB0106204-03);河南省重大科技专项(221100240200)

作者简介:秦东晨(1965—),男,河南温县人,郑州大学教授,博士,主要从事机械强度及结构优化设计、虚拟样机、CAD/CAE/CAM 集成方面研究,E-mail:dcqin@zzu.edu.cn。

引用本文: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 D C, ZHAO H F, WU H X, 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.)

电压波动的问题,Zhang 等^[17]提出了一种具有额外电源的可重构电路,以稳定输出电压。但可重构电路只适用于电池充放电状态,不适用于电池的静置状态。

综上所述,目前有关主动均衡方法的研究主要针对的是单体电池对单体电池均衡、电池组与单体电池均衡以及相邻电池成组进行均衡,均衡拓扑存在均衡时间长、均衡路径灵活性差等问题,对不相邻电池成组均衡的研究较少,而实际使用过程中,电池包中电池的电量分布较为复杂,需要更加灵活的均衡路径来缩短均衡时间。因此,本文将 Buck-Boost 均衡电路与可重构电路相结合提出一种均衡电路,同时提出配套的均衡控制策略,由于增加了均衡路径,均衡时间和能量转移次数都有不同程度的减少。

1 新型拓扑结构及验证

1.1 均衡拓扑结构

本文将可重构电路与 Buck-Boost 电路相结合,提出了一种新型均衡拓扑结构和相应的控制策略。均衡拓扑如图 1 所示。均衡电路由电池模块、开关阵列和均衡单元组成。开关阵列包括电池正极开关($S_{11} \sim S_{n1}$)、电池负极开关($S_{12} \sim S_{n2}$)和与每个电池配对的一对互斥开关($K_{11} \sim K_{n1}$ 、 $K_{12} \sim K_{n2}$)。均衡电路采用非隔离的 Buck-Boost 电路,电路元件包括电感(L)和 MOSFET($Q_1 \sim Q_4$)。(在以下描述中,颜色用于表示不同的电池能量水平:红色表示低电量电池,黄色表示高电量电池,绿色表示正常电池。)

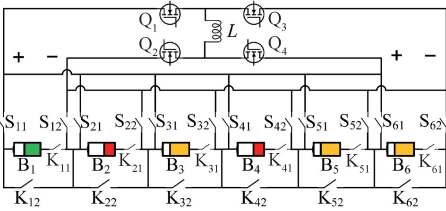


图 1 所提均衡拓扑结构

Figure 1 Proposed balanced topology

所提出的拓扑结构有 3 种工作模式,即任意单元到任意单元的平衡(模式 1)、多单元到任意单元的平衡(模式 2)和多单元到多单元的平衡(模式 3),且在进行多单元均衡时,可以实现不相邻电池成组。

所提均衡拓扑具有以下优点。

- (1) 可同时对多个电池进行均衡,大大缩短了均衡时间。
- (2) 可以将问题电池及时隔离出电路,提高电路安全性和均衡性能。

(3) 减少了均衡过程中的能量传递次数,有利于提高电池寿命。

1.2 电路模型验证

均衡电路在工作时主要包括两部分,即先由高能电池对电感进行充电,之后再由电感对低能电池进行充电。因此,为了验证均衡电路是否能按照预期进行工作,将均衡电路进行以下等效。高能电池所在的回路为放电回路,等效元件有高能电压源 E_1 、总内阻 R_1 以及开关 Q_1 ;低能电池所在的回路为充电回路,等效元件有低能电压源 E_2 、总内阻 R_2 ,以及开关 Q_2 。将计算结果与仿真结果进行比较,以验证模型是否正确。均衡拓扑等效电路如图 2 所示,MOSFET 驱动波形如图 3 所示。

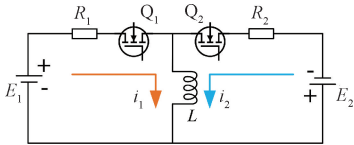


图 2 均衡拓扑等效电路模型

Figure 2 Balanced topology equivalent model

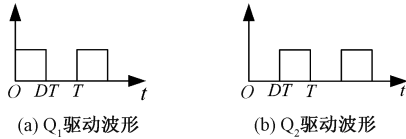


图 3 MOSFET 驱动波形

Figure 3 MOSFET driving waveform

假设所用开关和 MOSFET 的响应时间为 0,并且它们的内阻计入电路总内阻中。充电电路中的开关和组件的总内阻记为 R_1 ,放电电路中的开关和组件的总内阻记为 R_2 。假设 B_1 表示高能电池, B_2 表示低能电池,则均衡过程可分为以下 2 个步骤。

步骤 1 $0 \leq t \leq DT$ 时, Q_1 导通, Q_2 断开,形成放电回路。此时,高能电池 B_1 的电能为电感 L 的磁能。放电电流的方向如图 2 中的黄色箭头所示,放电电流 $i_1(t)$ 表示为^[18]

$$i_1(t) = i_L(t) = \frac{E_1}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1}{L}t} \right), \quad 0 \leq t \leq DT. \quad (1)$$

步骤 2 $DT < t \leq T$ 时, Q_1 断开, Q_2 导通,形成充电回路。此时,存储在电感 L 中的磁能转换为低能电池 B_2 的电。充电电流的方向如图 2 中的蓝色箭头所示,充电电流 $i_2(t)$ 表示为

$$i_2(t) = i_L(t) = \frac{E_1}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{R_1}{L}DT} \right) e^{-\frac{R_2}{L}(t-DT)} - \frac{E_2}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_2}{L}(t-DT)} \right), \quad DT < t \leq T. \quad (2)$$

$$T = 1/f. \quad (3)$$

式中: E_1 为高能电池 B_1 的电压, V; E_2 为低能电池 B_2 的电压, V; R_1 为放电回路的总电阻, Ω ; R_2 为充电回路的总电阻, Ω ; L 为电感值, H; D 为 PWM 信号的占空比; T 为开关晶体管的开关周期, s; f 为开关频率, Hz。

为了降低电感磁饱和的风险并提高能量传输效率, 在每个周期结束时让充电电流为零。将 $i_2(t) = 0$ 代入式(2), 可以简化得到方程(4)。

$$\frac{E_1 R_2}{E_2 R_1} = \frac{1 - e^{-\frac{R_2}{L}(1-D)T}}{(1 - e^{-\frac{R_1}{L}DT})e^{-\frac{R_2}{L}(1-D)T}} \quad (4)$$

假设高能电池 B_1 电压 $E_1 = 3.4$ V, 低能电池 B_2 电压 $E_2 = 3.2$ V, 电感值 $L = 100$ μ H, 开关频率 $f = 10$ kHz, 充放电回路内阻 $R_1 = R_2 = 0.2$ Ω 。将上述参数代入式(4)中可以得出占空比 $D = 0.51$ 。在进行均衡拓扑和控制策略的联合仿真时, 所选用的占空比应小于最大占空比 0.51。

电感电流的理论值可以通过将上述参数代入式(1)和式(2)计算得到。同时, 将上述参数代入等效电路的 Simulink 仿真模型中, 可以得到电感电流的仿真值。对比结果如图 4 所示。

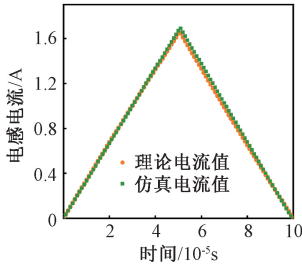


图 4 单个周期电感电流理论值与仿真值对比

Figure 4 Calculated and simulated values of inductance current in a single cycle

从图 4 可以看出, 在均衡过程中, 电感电流近似线性变化。计算得到的均衡电流理论最大值为 1.65 A, 出现在 $t = 5.1 \times 10^{-5}$ s 时。仿真得到的均衡电流的最大值为 1.69 A, 出现在 $t = 5.1 \times 10^{-5}$ s 时。它们之间的相对误差为 2.4%, 但是由于仿真时间步长设定所导致的, 并且误差在可接受范围。因此, 从图 4 可以清楚地看出, 仿真模型能够真实地表达均衡过程。

2 影响均衡性能的因素分析

目前用于确定均衡系统有效性的指标主要是均衡时间和均衡损耗。因此, 下文对所提拓扑的均衡电流和损耗进行了分析。根据上文推导的电路模型, 均衡过程中的平均电流计算如下:

$$\bar{i}_1 = \frac{\int_0^{DT} i_1(t) dt}{T} = \frac{E_1 D}{R_1} + \frac{LE_1}{R_1^2 T} (e^{-\frac{R_1}{L}DT} - 1); \quad (5)$$

$$\bar{i}_2 = \frac{\int_{DT}^T i_2(t) dt}{T} = \frac{LE_1(1 - e^{-\frac{R_1}{L}DT})(1 - e^{-\frac{R_2}{L}(1-D)T})}{R_1 R_2 T} + \frac{LE_2(1 - e^{-\frac{R_2}{L}(1-D)T})}{R_2^2 T} - \frac{E_2(1 - D)}{R_2} \quad (6)$$

热损失率可以由以下公式计算得出^[19]:

$$W_1 = \int_0^{DT} E_1 i_1(t) dt = \frac{E_1^2}{R_1^2} [R_1 DT + L(e^{-\frac{R_1}{L}DT} - 1)]; \quad (7)$$

$$W_{R_1} = \int_0^{DT} i_1^2(t) R_1 dt; \quad (8)$$

$$W_{R_2} = \int_{DT}^T i_2^2(t) R_2 dt; \quad (9)$$

$$\eta = (W_{R_1} + W_{R_2}) / W_1 \quad (10)$$

单个周期 T 内转移到低电量电池中的电荷量 Q 的表达式如下:

$$Q = \int_{DT}^T i_2(t) dt = \frac{LE_1(1 - e^{-\frac{R_1}{L}DT})(1 - e^{-\frac{R_2}{L}(1-D)T})}{R_1 R_2} + \frac{LE_2(1 - e^{-\frac{R_2}{L}(1-D)T})}{R_2^2} - \frac{E_2(1 - D)T}{R_2} \quad (11)$$

其中, 式(5)和式(6)为整个周期 T 内放电电流和充电电流的平均值; 式(7)为高能电池在一个周期内释放的总能量; 式(8)为由于放电回路的总电阻产生热量而损失的总能量; 式(9)为由于充电回路的总电阻产生热量而损失的总能量; 式(10)表示热损失率。式(5)中包括的参数是电池电压、开关频率和占空比, 其中, 电池电压、开关频率是自变量, 而占空比随这些参数变化而变化, 因此, 下文分析了电压差和开关频率对均衡性能的影响。

2.1 电池电压对均衡效果的影响

由于本文提出的均衡拓扑主要工作模式是多单元到多单元均衡, 因此在均衡过程中, 放电电池和充电电池数量会不断变化。 E_1 为高电量电池的电压, E_2 为低电量电池的电压。为了便于分析, 引入了电压差 ΔE , 如式(12)所示:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (12)$$

假设 $E_2 = 3.2$ V, 电感值 $L = 100$ μ H, 开关频率 $f = 10$ kHz, 充放电回路总电阻 $R_1 = R_2 = 0.2$ Ω 。首先, 根据式(5)来确定不同电压对应的占空比。随后, 将 D 、 E_1 、 E_2 、 L 、 R_1 、 R_2 、 f 等参数代入式(5)~(11)中进行计算。

电压差对均衡电流、热损失率和单个周期内转移电荷量的影响如图 5 所示。从图 5 可以看出,在均衡过程中,随着电压差的增加,一个周期内的平均

电流、热损失率和转移电荷量 Q 均呈上升趋势。以电压差 $\Delta E = 0$ 时的均衡数据为参考,具体数据如表 1 所示。

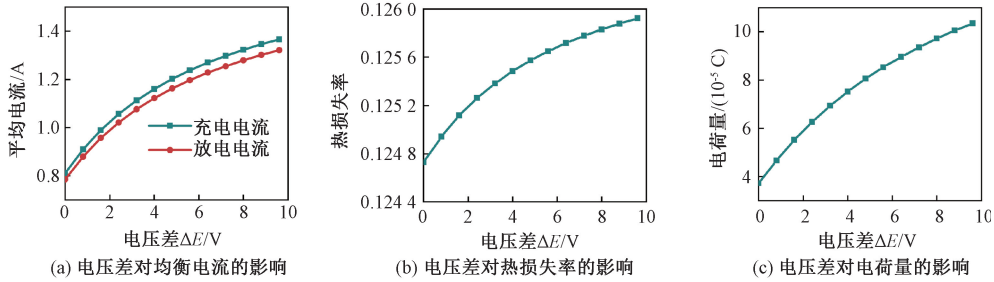


图 5 电压差对均衡效果的影响

Figure 5 Influence of battery voltage on the equalization effect

表 1 电压差对均衡效果的影响

Table 1 influence of battery voltage on the equalization effect				
电压差/V	放电电流增长率/%	充电电流增长率/%	热损失率增长率/%	电荷量增长率/%
0~3.2	37.15	27.07	0.53	85.89
0~6.4	56.55	56.50	0.80	140.71
0~9.6	68.50	68.40	0.96	177.70

从表 1 可以看出,平均电流和电荷量 Q 随着电压差的增加而大幅增加,最小增长率为 27.07%。

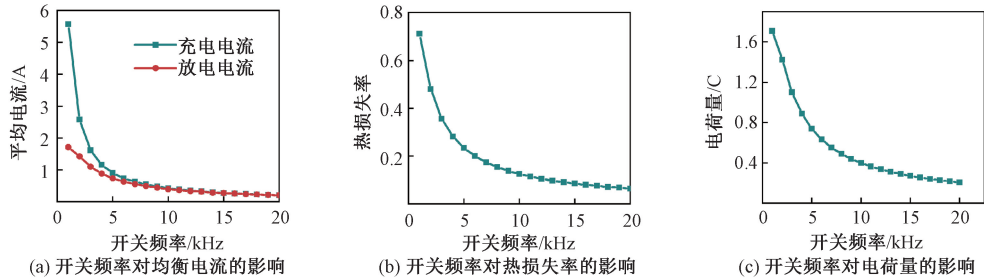


图 6 开关频率对均衡效果的影响

Figure 6 Influence of switching frequency on the equalization effect

从图 6 可以看出,在均衡过程中,随着开关频率的增加,一个周期内的平均电流、热损失率和电荷量 Q 均呈下降趋势。以开关频率 $f = 1$ kHz 时的均衡数据为参考,具体数据如表 2 所示。

表 2 开关频率对均衡效果的影响

Table 2 Influence of switching frequency on equalization effect				
开关频率/kHz	放电电流下降率/%	充电电流下降率/%	热损失率下降率/%	电荷量下降率/%
1~5	83.71	56.82	67.02	56.82
1~10	92.32	76.75	82.45	76.75
1~15	94.99	84.14	88.04	84.14
1~20	96.28	87.97	90.93	96.23

从表 2 可以看出,平均电流和电荷量 Q 随开关

这表明增加电压差可以有效地缩短均衡时间。同时,可以看出,当电压差由 0 V 变为 9.6 V 时,热损失率增长率为 0.96%。这表明热损失率没有随电压差增加而显著变化。因此,增加电压差可以提高均衡系统性能。

2.2 开关频率对均衡效果的影响

假设 $E_1 = 3.4$ V, $E_2 = 3.2$ V, 电感值 $L = 100$ μ H, 充放电回路的总电阻 $R_1 = R_2 = 0.2$ Ω , 开关频率对均衡电流、热损失率和单个周期内转移电荷量的影响如图 6 所示。

频率的增加而大幅下降,最小下降率为 56.82%。这表明,对于本文提出的拓扑结构,增加开关频率会导致均衡时间的增加。同时可以看出,随着开关频率的增加,热损失率有所降低。因此,开关频率不应该太大或太小,应选择中等的开关频率。在本文中,选择开关频率 $f = 10$ kHz。

3 仿真结果对比

3.1 均衡控制策略

电池组静置状态的均衡控制策略如图 7 所示,图 7 中, SOC_1 表示电量最高电池的 SOC , SOC_2 表示电量最低电池 SOC 。对于电池的静置状态,首先根据各电池初始荷电状态 SOC 计算高能电池和低能

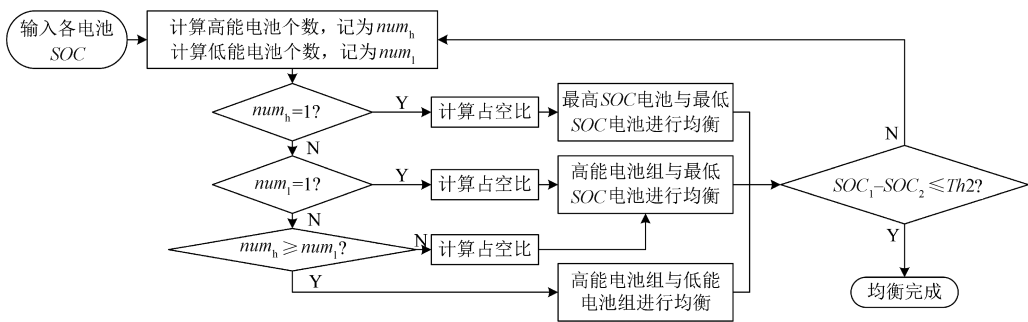


图 7 基于可变占空比的均衡控制策略

Figure 7 Balanced control strategy based on variable duty cycle

电池的个数,工况有以下 4 种(对应 3 种工作模式)。

- ①如果高能电池个数为 1,则进行单对单均衡;
- ②如果高能电池个数大于 1,但低能电池个数为 1,则进行多对单均衡;
- ③如果高能电池个数和低能电池个数均大于 1,但高能电池个数小于低能电池个数,则仍进行多对单均衡;
- ④如果高能电池数和低能电池数均大于 1,同时高能电池个数大于等于低能电池个数,此时进行多对多均衡。

文中选用 8 个串联电池进行模拟验证,但提出的均衡算法可以很方便地应用于更加复杂的电池组。在实际使用过程中,用户可以根据实际需求及成本预算,确定电路中具体元器件的参数,比如需要均衡的电池容量,所选电感可以承受的最大均衡电流。根据这些参数,结合电路的数学模型,即可求得在保证电路元件安全的情况下,均衡系统最多可承受多少电池同时参与均衡。例如:计算出电路元件可承受的最大均衡电流最高可满足 n 个高能电池对 n 个低能电池进行均衡,同时假设大规模电池组中的高低能量电池个数均大于 n ,那么只需在均衡算法中设置最大成组电池数为 n 即可,由高至低依次选择 n 个高能电池,由低至高依次选择 n 个低能电池进行均衡。

仿真采用 Simulink 的内置电池模型,每个锂离

子电池的额定电压为 3.2 V,额定容量为 2 Ah。在 MATLAB R2021b/Simulink 中建立拓扑仿真模型,模型包括电池模块、开关阵列、电池分组模块、占空比计算模块、开关控制模块和 Buck-Boost 均衡单元。选择 SOC 作为均衡变量。在本文中,均衡开始阈值 $Th1$ 为 3,终止阈值 $Th2$ 为 1。

3.2 电池静息状态仿真结果对比

均衡仿真结果对比如图 8 所示。SOC 为 0~100%,假设 8 节串联电池的 SOC 值分别为 46.5%、4.1%、45.9%、42.8%、45.5%、44.5%、43.1%、45.7%。定义若某电池 SOC 值满足 $SOC_i \geq SOC_{avg} + Th2/2$,则该电池为高能电池,用黄色表示;若某电池 SOC 值满足 $SOC_i \leq SOC_{avg} - Th2/2$, SOC_{avg} 为平均值,则该电池为低能电池,用红色表示;其余电池为正常电池,用绿色表示。绘制电池组初始能量状态分布如图 8(a)所示,仿真验证如图 8(b)和 8(c)所示。 Th_{high} 和 Th_{low} 为电量正常电池的 SOC 上、下限。

固定分组控制策略^[20]的仿真结果如图 8(b)所示。由于电池的初始 SOC 分布,相邻的电池无法形成电池组,因此,在均衡开始时,应采用任意单元到任意单元的均衡模式,直到相邻电池可以形成电池组,切换为多单元到多单元均衡模式。达到均衡时间为 464.528 s,均衡结束后电池组 SOC 的方差为 0.216 5。

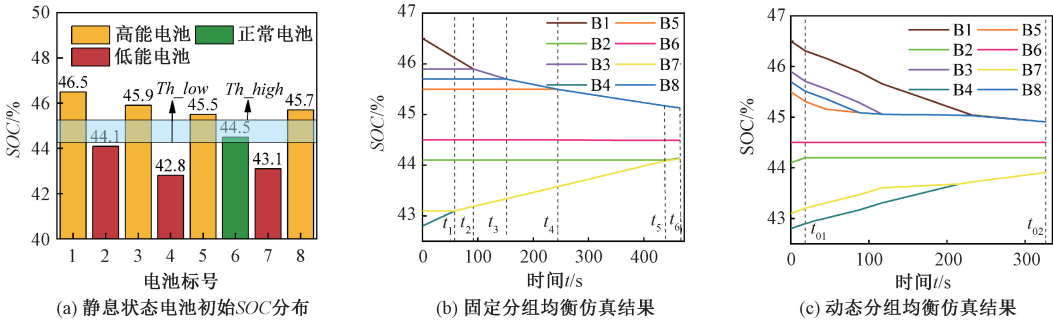


图 8 均衡仿真结果对比

Figure 8 Comparison of equalization Simulation Results

动态分组均衡控制策略的仿真结果如图 8(c) 所示。由于可重构电路的优点,无论电池 SOC 初始分布如何,均可实现多单元到多单元的均衡。因此,在均衡开始时,除了具有正常能量的电池 B6 之外,其余 7 个电池同时参与均衡。达到均衡时间为 326.53 s,均衡结束后电池组 SOC 的方差为 0.182。

两组均衡策略均衡后的具体数据如表 3 所示。由表 3 中数据可以得出,与固定分组控制策略相比,动态分组控制策略具有以下优点:可以有效地缩短均衡时间,均衡时间减少 29.71%;方差降低 16.13%。因此,动态分组控制策略相比固定分组控制策略具有显著的优势。

电池之间的能量转移次数会影响电池的循环寿

表 3 固定分组和动态分组控制策略的均衡结果

Table 3 Equalization results for fixed and dynamic control strategies

控制策略	SOC 极差/%	SOC 均值/%	SOC 方差	SOC 离散度	均衡 时间/s
固定分组	1	44.68	0.217	0.497	464.53
动态分组	1	44.75	0.182	0.456	326.53

命,为了从能量转移次数的角度定量分析动态分组的优势,以电池静息状态为例分析能量转移次数的差别。均衡过程可以根据 SOC 变化曲线分为几个阶段。假设在单个开关周期中,电感对低能量电池的充电被记录为一次均衡。接下来以此为基础分析能量转移次数。固定分组均衡次数如表 4 所示,动态分组均衡次数如表 5 所示。

表 4 固定分组均衡控制策略能量转移次数

Table 4 Number of energy transfers for fixed grouping control strategy

均衡阶段	参与均衡的 电池个数	参与均衡的 低能电池	低能电池获得 电荷量/C	电感单个周期释放 的电荷量/ 10^{-5} C	能量转移 次数/ 10^5
$0 \sim <t_1$	2	B4	21.60	3.73	5.79
$t_1 \sim <t_2$	3	B4、B7	12.96	3.17	4.09
$t_2 \sim <t_3$	4	B4、B7	21.60	7.46	2.90
$t_3 \sim <t_4$	5	B4、B7	34.56	11.00	3.14
$t_4 \sim <t_5$	6	B4、B7	73.44	13.90	5.28
$t_5 \sim t_6$	7	B2、B4、B7	9.36	14.90	0.63

表 5 动态分组均衡控制策略能量转移次数

Table 5 Number of energy transfers for dynamic grouping control strategy

均衡阶段	参与均衡的 电池个数	参与均衡的 低能电池	低能电池获得 电荷量/C	电感单个周期释 放的电荷量/ 10^{-4} C	能量转移 次数/ 10^5
$0 \sim <t_{01}$	7	B2、B4、B7	21.6	1.49	1.45
$t_{01} \sim t_{02}$	6	B4、B7	123.84	1.39	8.91

根据表 4 和表 5 中的数据绘制能量转移次数对比图如图 9 所示。

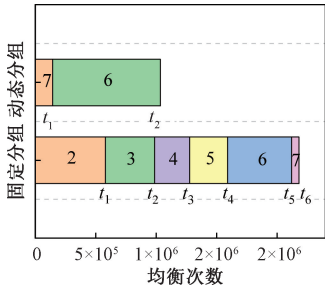


图 9 能量转移次数对比

Figure 9 Comparison of the number of balancing energy transfers

结合表 4、表 5 和图 9 可以看出,动态分组控制策略在减少能量转移次数方面具有显著优势,能量转移次数减少了 52.5%,可以达到提高电池寿命的目的。

4 结论

本文提出了一种实现串联电池动态分组的均衡拓扑结构和控制策略。分析了可重构 Buck-Boost 均衡电路的工作模式和工作原理,并对模型进行了验证。此外,还分析了影响均衡性能的因素。结果表明,开关频率与均衡电流呈正相关,与热损失率呈负相关。因此,综合考虑均衡时间和均衡损耗,选择中等的开关频率来提高均衡系统的性能。电压差对占空比的影响不容忽视,因此在均衡控制策略中增加了可变占空比。最后,选取 8 个电池建立仿真模型。仿真结果表明,与固定分组控制策略相比,动态分组控制策略具有以下优点:均衡时间减少 29.71%;方差降低 16.13%;均衡能量转移次数减少 52.5%。

参考文献:

- [1] 陈港欣, 孙现众, 张熊, 等. 高功率锂离子电池研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 612-624.
CHEN G X, SUN X Z, ZHANG X, et al. Progress of high-power lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 612-624.
- [2] LU L G, HAN X B, LI J Q, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 272-288.
- [3] 李节宾, 孟海军, 皮正杰, 等. 锂离子电池应用现状及发展趋势[J]. 电源技术, 2018, 42(5): 725-727.
LI J B, MENG H J, PI Z J, et al. Application status and development trends of the lithium primary batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(5): 725-727.
- [4] ZENG X Q, LI M, ABDEL-HADY D, et al. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles [J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(27): 1900161.
- [5] CUI H Y, WEI Z B, HE H W, et al. Novel reconfigurable topology-enabled hierarchical equalization of lithium-ion battery for maximum capacity utilization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 396-406.
- [6] FAN X Y, ZHANG W G, WANG Z G, et al. Simplified battery pack modeling considering inconsistency and evolution of current distribution[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(1): 630-639.
- [7] WU L, PANG K, ZHENG Y, et al. A multi-module equalization system for lithium-ion battery packs[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(3): 2771-2782.
- [8] 刘嘉林. 电动汽车电池组被动均衡策略与 SOC 估算研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
LIU J L. Research on passive equalization strategy and SOC estimation of electric vehicle battery pack [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [9] LI Y, XU J, MEI X S, et al. A unitized multiwinding transformer-based equalization method for series-connected battery strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11981-11989.
- [10] DAOWD M, ANTOINE M, OMAR N, et al. Single switched capacitor battery balancing system enhancements [J]. Energies, 2013, 6(4): 2149-2179.
- [11] SHANG Y L, CUI N X, ZHANG C H. An optimized any-cell-to-any-cell equalizer based on coupled half-bridge converters for series-connected battery strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8831-8841.
- [12] DAS U K, SHRIVASTAVA P, TEY K S, et al. Advancement of lithium-ion battery cells voltage equalization techniques: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110227.
- [13] WU X G, CUI Z H, LI X F, et al. Control strategy for active hierarchical equalization circuits of series battery packs[J]. Energies, 2019, 12(11): 2071.
- [14] 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.
GUO X W, LIU Z, GENG J H, et al. Research on the active balancing method of series battery pack based on LC energy storage[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 242-251.
- [15] CHEN Y, LIU X, SHEN T, et al. An any-cell(s)-to-cell(s) equalization method with a single magnetic component for lithium-ion battery pack[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 33(9): 102071.
- [16] JI F, LIAO L, WU T, et al. Self-reconfiguration batteries with stable voltage during the full cycle without the DC-DC converter[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101213.
- [17] ZHANG Y, HUANG M M, WU T Z, et al. Reconfigurable equilibrium circuit with additional power supply [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2020, 15(1): 106-111.
- [18] 熊永华, 杨艳, 李浩, 等. 基于 SOC 的锂动力电池多层双向自均衡方法[J]. 电子学报, 2014, 42(4): 766-773.
XIONG Y H, YANG Y, LI H, et al. Multi-level bi-directional active equalization method in lithium-ion power battery based on state-of-charge [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 766-773.
- [19] 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: 128028.
- [20] LUO S Y, QIN D C, WU H X, et al. Multi-cell-to-multi-cell battery equalization in series battery packs based on variable duty cycle[J]. Energies, 2022, 15(9): 3263.

(下转第 110 页)

Performance Analysis of Airfoil-like Spoiler Element Air Ejector Based on Topology Optimization

LIU Huadong, ZHANG Ya, HAO Qi, SUN Hao

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problem of low entrainment ratio of the traditional air ejector, the topology optimization method was used to optimize its structure. And an air ejector with airfoil-like spoiler element was proposed based on the topology optimization results and drag reduction mechanism analysis. The internal flow field of the ejector was studied by numerical simulation, and the influence of the height of the airfoil-like spoiler element and the distance between the element and the nozzle throat on the ejector performance was analyzed. The results showed that the secondary nozzle effect would occur after adding the spoiler element and the primary flow accelerated after flowing out of the nozzle, and the pressure was further reduced. The driving pressure difference of the primary flow was increased, the velocity difference between the two flows was reduced, and the entrainment ratio was significantly improved. The entrainment ratio increased as the height of the spoiler element increased, and the entrainment ratio increased first then decreased with the increase of the distance between the spoiler element and the nozzle throat. The entrainment ratio of the airfoil-like spoiler element ejector could increase by 146%~224% by changing the height of the airfoil-like spoiler element and the distance between the element and the nozzle throat. The entrainment ratio reached the optimal value of 2.07 when the height of the airfoil-like spoiler element was 3.3 mm and the distance between the spoiler element and the nozzle throat was 0.8 mm.

Keywords: airfoil-like spoiler element; topology optimization; air ejector; entrainment ratio; numerical simulation

(上接第 96 页)

Dynamic Grouping Active Equalization Method for Series Connected Batteries Based on Reconfigurable Circuits

QIN Dongchen, ZHAO Hongfei, WU Hongxia, YANG Junjie, CHEN Jiangyi, WANG Tingting

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the problem of inconsistent state of charge of single cells in battery pack, the active equalization control technology was studied with series connected battery pack as the research object. The research content included the improvement of the balancing topology and the design of the balancing control strategy. Firstly, a new topology was proposed and verified. Secondly, the mathematical model of equalization circuit was established, and the effects of voltage difference and switching frequency on equalization performance were analyzed. According to the results of voltage difference analysis, a multi-cell-to-multi-cell balancing control strategy based on variable duty cycle is designed to improve the equalization speed and consistency of battery pack. Finally, the joint simulation of equalization topology and equalization strategy was carried out in MATLABR2021b/Simulink. The results showed that, compared with the fixed group balancing control strategy, the proposed balancing topology and control strategy could improve the balancing speed and consistency of the battery pack, the time efficiency was increased by 29.71%, the battery SOC variance was reduced by 16.13% and the number of energy transfers was reduced by 52.5%.

Keywords: lithium-ion battery; active equalization; reconfigurable circuits; dynamic grouping; balancing topology