

# 锂离子电池组分层主动均衡研究

聂伟民, 陈自强

(上海交通大学 a.海洋工程国家重点实验室 b.高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**摘要:** **目的** 针对实际装备中使用的串联锂离子电池组的不一致性问题, 提出一种基于 Buck-Boost 电路和反激式变压器均衡电路的分层主动均衡构架。**方法** 以荷电状态 (SOC) 作为均衡标准, 制定均衡策略, 建立锂离子电池二阶等效电路模型以及开路电压 (OCV) 特性曲线来进行参数辨识与 SOC 估计。实现电池组内相邻电池单体间的能量转移以及电池组间任意模组到整体的能量双向传递。最后在 Matlab/Simulink 中搭建均衡模型进行仿真验证。**结果** 分层主动均衡构架相比传统单一相邻电池均衡构架具有更好的均衡结果, 其均衡效果提升了 43.04%, 均衡时间缩短了 24.4%, 均衡效率提高了 12.61%。**结论** 该分层主动均衡构架充分发挥了两种主动均衡的优点, 改善了电池组的不一致性问题, 并提高了整个电池组的充放电容量。

**关键词:** 锂离子电池组; 不一致性; 主动均衡; 均衡构架

中图分类号: TM912

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0077-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.013

## Study on the Hierarchical Active Equilibrium for Lithium-ion Batteries

NIE Wei-min, CHEN Zi-qiang

(a. State Key Laboratory of Ocean Engineering, b. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the inconsistency problem in series lithium-ion battery packs in actual equipment, a hierarchical active balancing architecture was proposed based on Buck-Boost circuit and flyback transformer equalization circuit. In this paper, the SOC was used as the equilibrium standard to formulate the equilibrium strategy. The second-order equivalent circuit model of the lithium-ion battery and the open circuit voltage (OCV) characteristic curve were established for parameter identification and SOC estimation. The energy transfer between adjacent battery cells in the battery pack and the energy transfer from any module to the whole battery pack were realized. Finally, the equilibrium model is built in Matlab/Simulink for simulation verification. The simulation results show that the hierarchical active balancing architecture has better balance results than traditional single adjacent battery balancing architecture. Its balancing effect has increased by 43.04%, balancing time has been shortened by 24.4%, and balancing efficiency has increased by 12.61%. The hierarchical active balancing architecture gave full play to the

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-05-18

Received: 2021-04-12; Revised: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51677119)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51677119)

作者简介: 聂伟民 (1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为电池管理系统。

Biography: NIE Wei-min (1995—), Male, Master's degree, Research focus: battery management system.

通讯作者: 陈自强 (1967—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为能源综合管理、智能控制、智能制造。

Corresponding author: CHEN Zi-qiang (1967—), Male, Ph. D., Researcher, Research focus: integrated energy management, intelligent control, intelligent manufacturing.

引文格式: 聂伟民, 陈自强. 锂离子电池组分层主动均衡研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 077-084.

NIE Wei-min, CHEN Zi-qiang. Study on the hierarchical active equilibrium for lithium-ion batteries[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 077-084.

advantages of the two active balancing methods, improved the inconsistency of the battery pack and increased the charge and discharge capacity of the entire battery pack.

**KEY WORDS:** lithium-ion batteries; inconsistency; active balancing; balancing architecture

锂离子电池因为具有能量密度高、可靠性强、循环寿命长、对环境污染小等优点,目前被广泛作为各类装备的主要能源<sup>[1-2]</sup>。为了满足各类装备电压要求,需将多节单体锂离子电池串联成组来使用<sup>[3]</sup>。由于锂离子电池的制造工艺、运行工况以及工作环境等存在一定的差异,导致成组后电池单体以不同的速率衰退,从而造成电池的内阻、容量以及电压产生不一致性,使得电池组整组性能差于组内单体电池性能总和,最终导致电池过快衰老、退役,并会对环境造成影响<sup>[4]</sup>。为了有效解决电池组不一致性问题,均衡控制是必不可少的手段,即在有效的均衡构架中,利用均衡拓扑电路和有效的控制策略来实现电池组均衡<sup>[5]</sup>。

主动均衡中常用的均衡构架包括<sup>[6]</sup>:相邻电池单体均衡构架、任意电池单体间均衡构架以及电池单体到电池组均衡构架等。基于相邻电池均衡构架,Rahimi A M<sup>[7]</sup>提出了基于开关电容转换器的均衡电路,该方法是借助相邻单体电池间的公共电容进行能量转移,其电路简单,但无法控制均衡电流,且只能以端电压作为均衡标准。Ye Y<sup>[8]</sup>和 Lee Y S<sup>[9]</sup>分别应用 Buck-Boost 和 Cuk 斩波均衡电路来进行相邻电池单体间的能量转移。这类电路在少量电池间使用效果显著,但是一旦电池数量增多,其效率会明显降低。Mestrallet F 等<sup>[10]</sup>提出了一种采用任意电池间均衡构架的电路,采用了多相桥式转换器,消除大量开关管网络,简化了电路,但是转换器中的 MOSFET 会承受高压应力,从而导致该电路高成本、低效率的缺点。在基于电池到电池组的均衡构架的研究中,Wei X Z 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于反激式变压器的均衡电路,它减少了电压传感器的数量,但变压器中存在的电流返回现象会造成能量损失,并且减少电池使用寿命。其中,相邻单体均衡构架的均衡效率最高,但针对大型装备中大量锂电池串联情况,其均衡速度会受到严重制约<sup>[12]</sup>。电池单体到电池组的均衡构架具有较快的均衡速度,但其能量损耗较大<sup>[13]</sup>。因此,文中对分层主动均衡构架展开研究,以 SOC 作为均衡标准制定均衡策略,并在 Matlab/Simulink 中搭建模型来验证其均衡效果。

## 1 动力电池建模及 SOC 估计

### 1.1 电池等效电路模型

采用二阶 RC 等效电路模型来建模,模型如图 1 所示。 $U_{ocv}$  和  $U_t$  表示开路电压和端电压; $R_0$  表示欧姆内阻; $R_p$  和  $C_p$  分别表示极化电阻和极化电容; $R_s$  和  $C_s$  分别表示扩散电阻和扩散电容<sup>[14]</sup>。假定电池组散热良好,忽略温度对电池模型参数的影响。

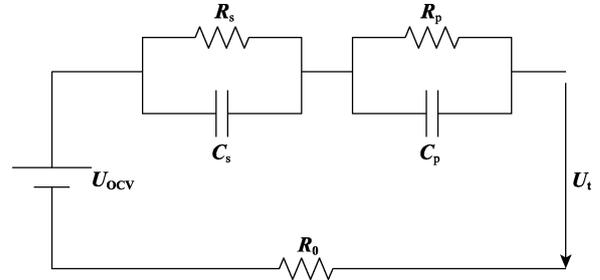


图 1 二阶 RC 等效电路模型

Fig.1 Second-order RC equivalent circuit model

SOC 定义为电池中剩余的可用电量占标称容量的比例,可以表示为:

$$SOC(t) = SOC(0) + \frac{\eta}{C_n} \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad (1)$$

式中: SOC(0) 表示初始 SOC 值;  $C_n$  为电池的额定容量;  $I$  为电池电流,这里规定放电时  $I$  为负数;  $\eta$  为充放电效率,在锂离子电池中可近似取 1。

SOC 对时间的导数表示为:

$$\dot{SOC}(t) = -\eta I(t) / C_n \quad (2)$$

采用放电静置测试获得在 25 °C 下的 OCV-SOC 数据,其拟合特性曲线如图 2 所示。

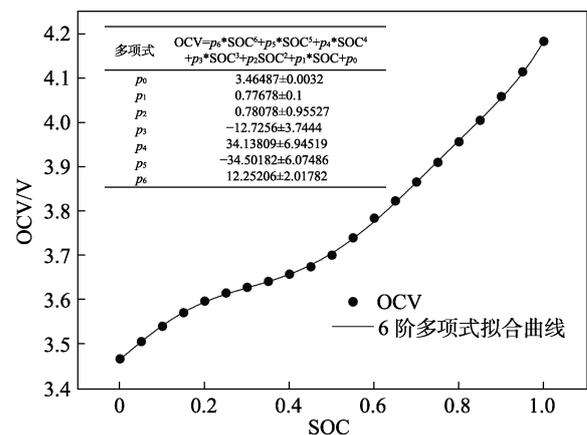


图 2 OCV-SOC 特性曲线

Fig.2 OCV-SOC characteristic curve

### 1.2 电池模型参数辨识

采用引入遗忘因子 (Forgetting Factor) 的递推最小二乘法 (RLS), 对电池模型进行参数辨识, 可以解决传统 RLS 算法中由于数据增长而引起的“数据饱和”现象<sup>[15]</sup>。

根据二阶 RC 等效电路模型, 可得电池模型的传递函数为:

$$G(s) = R_0 + \frac{R_s}{1+sR_sC_s} + \frac{R_p}{1+sR_pC_p} \quad (3)$$

基于双线性变换  $s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  对该式进行离散化, 可得离散传递函数:

$$G(z^{-1}) = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2}}{1 + \beta_1 z^{-1} + \beta_2 z^{-2}} \quad (4)$$

将式 (7) 离散后的差分方程为:

$$E_L(k) = \beta_1 E_L(k-1) + \beta_2 E_L(k-2) - \alpha_0 I(k) - \alpha_1 I(k-1) - \alpha_2 I(k-2) \quad (5)$$

式中:  $E_L(k) = U_i(k) - U_{OCV}(k)$ 。此时式 (5) 即为用于二阶 RC 等效电路模型中进行参数辨识的 ARMA 模型, 其中:

$$\begin{cases} \varphi(k) = \begin{bmatrix} E_L(k-1), E_L(k-2), I(k), \\ I(k-1), I(k-2) \end{bmatrix} \\ \theta = [\beta_1, \beta_2, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2]^T \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{-bT - 2a}{T^2 + bT + a} \\ \beta_2 = \frac{a}{T^2 + bT + a} \\ \alpha_0 = \frac{cT^2 + dT + aR_0}{T^2 + bT + a} \\ \alpha_1 = \frac{-dT - 2aR_0}{T^2 + bT + a} \\ \alpha_2 = \frac{aR_0}{T^2 + bT + a} \end{cases}, \begin{cases} \tau_s = R_s C_s \\ \tau_p = R_p C_p \\ a = \tau_s \tau_p \\ b = \tau_s + \tau_p \\ c = R_0 + R_s + R_p \\ d = R_s \tau_p + R_p \tau_s + R_0 b \end{cases} \quad (7)$$

### 1.3 电池状态估计

采用 FFRLS 和扩展 Kalman 滤波法来联合估算锂离子电池的 SOC, 流程见表 1。其中 EKF 法是将非线性函数展开成 Taylor 级数, 得到一个近似线性化模型后, 再利用 Kalman 滤波法进行估计<sup>[16]</sup>。系统的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}I_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \\ U_{t,k} = U_{ocv}(\text{SOC}) - U_{s,k} - U_{p,k} + v_k \end{cases} \quad (8)$$

式中: 状态向量  $\mathbf{x}_k = [\text{SOC}_k \ U_{s,k} \ U_{p,k}]^T$ ;  $\mathbf{w}_k$  与  $v_k$  分别为系统噪声和观测噪声。

该状态空间模型参数  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  以及 Jacobian 矩阵分别为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-T/\tau_s) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-T/\tau_p) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\eta T / C_n \\ R_s(1 - \exp(-T/\tau_s)) \\ R_p(1 - \exp(-T/\tau_p)) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial(U_{OCV}(\text{SOC}_k))}{\partial \text{SOC}_k} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $T$  为系统的采样周期。

表 1 锂离子电池 SOC 估算流程  
Tab.1 Lithium-ion battery SOC estimation process

步骤	操作
STEP 1	初始化电池模型参数 $R_0$ 、 $R_s$ 、 $C_s$ 、 $R_p$ 、 $C_p$
STEP 2	二阶 RC 等效电路模型的 ARMA 模型
STEP 3	测量 $k$ 时刻 $U(k)$ 、 $I(k)$ 得到观测量 $\varphi(k)$
STEP 4	设置初始参数 $P_0$ 、 $\theta_0$ 、 $FF = 0.9999$ RLS 参数辨识:
STEP 5	$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)(y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \\ K(k) = P(k-1)\varphi(k)(\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k))^{-1} \\ P(k) = \lambda^{-1}(I - K(k)\varphi^T(k))P(k-1) \end{cases}$
STEP 6	参数解耦得到 $k$ 时刻的 $R_0$ 、 $R_s$ 、 $C_s$ 、 $R_p$ 、 $C_p$
STEP 7	系统矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}_k$ 更新 EFK 估算锂离子电池 $k$ 时刻 SOC:
STEP 8	$\begin{cases} P^-_k = \mathbf{A}P_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \\ K_k = P^-_k H^T (H P^-_k H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + (z_k - H\hat{x}_k^-) \\ P_k = P^-_k - K_k H P^-_k \end{cases}$
STEP 9	测量 $k+1$ 时刻 $U(k+1)$ 、 $I(k+1)$ , 返回 STEP5

## 2 主动均衡构架及拓扑结构

### 2.1 分层主动均衡构架

文中提出一种复合主动均衡构架, 如图 3 所示。它是基于相邻电池主动均衡构架和单体电池到电池组主动均衡构架实现的。它将  $n$  块电池平均分为  $m$  组, 每组包含  $k$  块电池 ( $n=k \cdot m$ )。每组内包括  $k-1$  个组内均衡电路, 每组间包括  $m$  个组间均衡电路。

其中,  $m$  组锂离子电池组内, 均采用相邻电池主动均衡的构架, 即组内所有相邻单体电池间都有一个组内均衡电路对单体电池进行均衡, 该均衡行为称为组内均衡。另外, 将每一组中串联的  $k$  块单体电池视为一个整体电池子组, 将第一节电池的正极作为电池子组的正极, 第  $k$  节电池的负极作为电池子组的负极。同时, 这  $m$  个电池子组采用单体电池到电池组主动均衡构架来进行均衡, 该均衡行为称为组间均衡。电池的电流、电压、温度等信息由 BMS 采集获得, 并通过 CAN 总线传递。

### 2.2 分层主动均衡拓扑结构

#### 2.2.1 组内均衡拓扑结构

各个电池子组内的 Buck-Boost 均衡拓扑结构如图 4 所示。电流经过电感, 在电池单体间双向流动<sup>[17]</sup>, 并由 BMS 估算得到单体电池 SOC 来决策是否进行均衡, 再通过 PWM 波控制  $Q_1$ 、 $Q_2$  的通断来开启均衡。

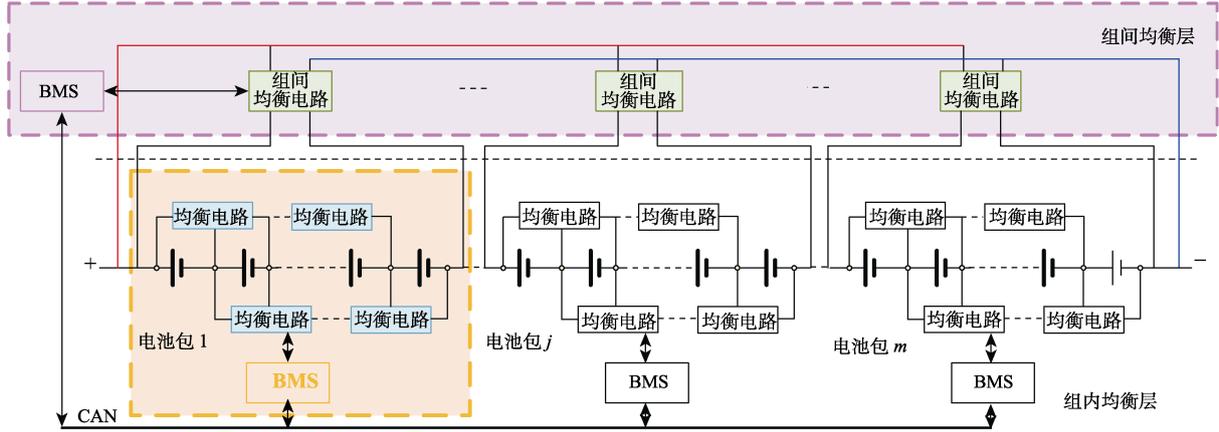


图3 分层主动均衡构架

Fig.3 Hierarchical active balancing architecture

当BMS检测到  $SOC_1 > SOC_2$  并开启均衡时，PWM波控制  $Q_1$ 。其具体均衡过程为：PWM向  $Q_1$  输入高电平信号， $Q_1$  导通，电流  $I$  从电池  $B_1$  流入到电感  $L_1$  中储存，此时的电流通路为： $B_1+ \rightarrow Q_1 \rightarrow L_1 \rightarrow B_1- \rightarrow B_1+$ ；PWM向  $Q_1$  输入低电平信号， $Q_1$  闭合，电感  $L_1$  产生反向电动势，且持续供流，二极管  $D_2$  导通，电感  $L_1$  将储存的能量向  $B_2$  转移，此时的电流通路为： $L_1 \rightarrow B_2+ \rightarrow B_2- \rightarrow D_2 \rightarrow L_1$ ，最终完成能量的转移。反之，若要使能量从  $B_2$  向  $B_1$  转移，只需对  $Q_2$  进行控制即可。

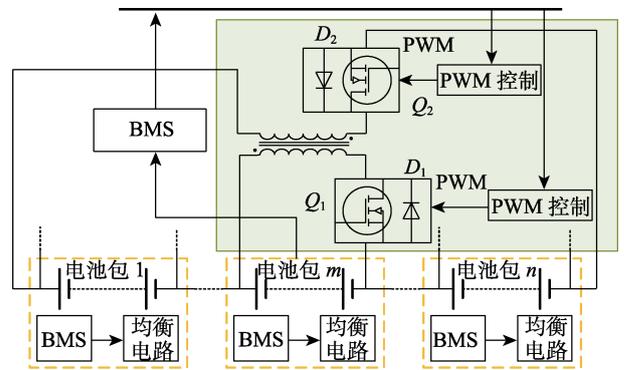


图5 基于反激式变压器的均衡拓扑结构

Fig.5 Balanced topology of flyback transformer

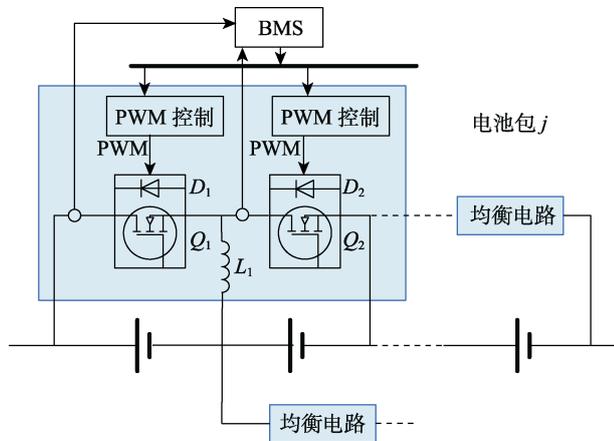


图4 Buck-Boost均衡拓扑结构

Fig.4 Buck-Boost balanced topology

### 2.2.2 组间均衡拓扑结构

电池子组间基于反激式变压器的均衡拓扑结构如图5所示。反激式变压器的原边绕组通过MOSFET与电池子组并接，副边绕组通过MOSFET连接至整个电池组，以反激式变压器为核心，通过磁场和电场的转换来实现能量在电池子组与电池组之间的转移<sup>[18]</sup>。由BMS估算电池子组的平均SOC，并决策是否进行均衡，再通过PWM波控制  $Q_1$  与  $Q_2$  的通断来开启均衡。

假设BMS检测到某一电池子组  $m$  的平均SOC值过高，并决策开启均衡时，PWM波控制  $Q_1$ 。具体过程分析如下：PWM向  $Q_1$  输入高电平信号， $Q_1$  导

通。电池子组  $m$  的电压  $U_1$  加到变压器的原边绕组  $N_1$  上，副边绕组  $N_2$  产生的感应电动势的大小为  $U_2$ 。由于二极管  $D_2$  反向截止，此时的原边绕组相当于一个电感  $L_1$  来储存电池子组  $m$  传递过来的能量。 $Q_1$  导通至  $t=T_0$  时，原边绕组的电流增加到最大值。该过程通过变压器完成了电能到磁能的转换，此时增加的磁通量为：

$$\Delta\Phi(+) = \frac{U_1}{N_1}DT \tag{11}$$

PWM向  $Q_1$  输入低平信号， $Q_1$  关闭。原边绕组无电流通过，副边绕组感应电动势，二极管  $D_2$  导通，能量由电感  $L_2$  释放，并转移至整个电池组。当  $t=T$  时，副边绕组的电流下降到最小值。该过程通过变压器完成了磁能到电能的转换，此时减少的磁通量为：

$$\Delta\Phi(-) = \frac{U_2}{N_2}(1-D)T \tag{12}$$

由变压器的工作原理可知  $\Delta\Phi(+) = \Delta\Phi(-)$ ，因此可得到：

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \frac{D}{1-D} U_1 \tag{13}$$

故副边绕组输出的电压值与反激式变压器原副边的匝数比、MOSFET的导通占空比以及原边电压值

的大小有关<sup>[19]</sup>。相反，控制  $Q_2$  则可实现电池组到电池子组的能量转移过程。

### 3 均衡策略

文中以电池 SOC 作为触发主动均衡的条件，此处采用放电均衡为例来说明其均衡策略。基于 SOC 的均衡策略的流程如图 6 所示。

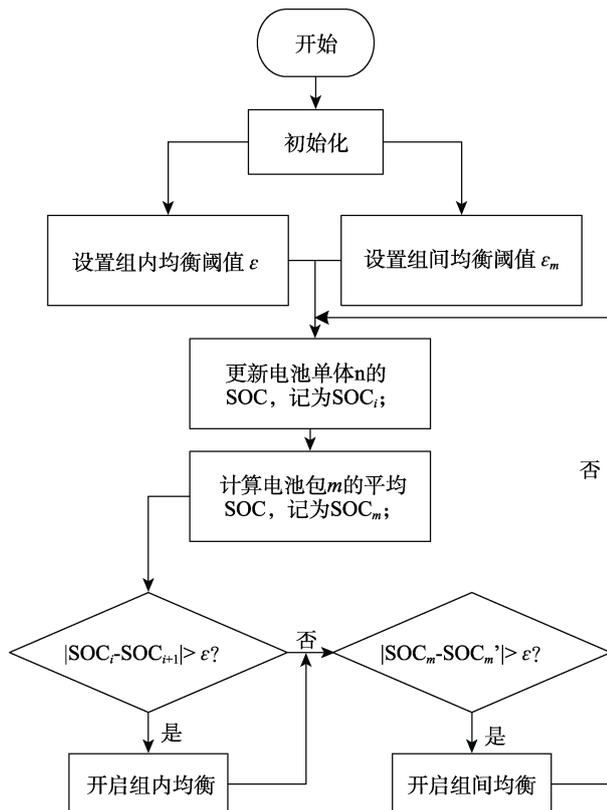


图 6 均衡策略流程  
Fig.6 Flow chart of balanced strategy

通过测得的电池端电压和电流来估算单体电池的 SOC，记为  $SOC_i$ 。根据电池子组内各个单体电池的 SOC 值，计算出该电池子组的平均 SOC，记为  $SOC_m$ 。首先将各个电池子组内单体电池的 SOC 与相邻单体电池的进行比较，当  $SOC_i$  与  $SOC_{i+1}$  之间的差值大于设定阈值时，开启组内均衡，组内均衡结束后，将电池子组的平均 SOC 与其他平均 SOC 最低电池子组进行比较。当  $SOC_m$  与  $SOC_{m'}$  的差值大于设定阈值时，BMS 将控制相应的开关管通断，通过反激式变压器来进行组间均衡。

### 4 实验与均衡仿真分析

实验装置由上位机、Neware BTS4000 电池测试平台 BLH-100 恒温实验箱构成。实验对象为三元锂离子电池，该电池具体参数见表 2。

表 2 三元锂离子电池参数  
Tab.2 The parameters of ternary lithium ion battery

参数名称	值
电池容量	10 Ah
额定电压	3.7 V
上/下截止电压	4.2 V/3.0 V
电池质量	200 g
电池密度	2430 kg/m <sup>2</sup>

#### 4.1 SOC 估计实验验证

##### 4.1.1 SOC 估算算法精度

为了验证 SOC 算法的准确性和有效性，以三元锂电池为实验对象进行 FUDS 工况（Federal Urban Driving Schedule，美国联邦城市运行工况）测试<sup>[20]</sup>，并保证环境温度为 25 °C 恒温。实验中的电压与电流值如图 7a 所示。采用该数据进行电池 SOC 的估计，并与真实值对比，如图 7b 所示。可以看出，SOC 估计值与真实值最大偏差不超过 1%，所以该算法有较强的精确性。

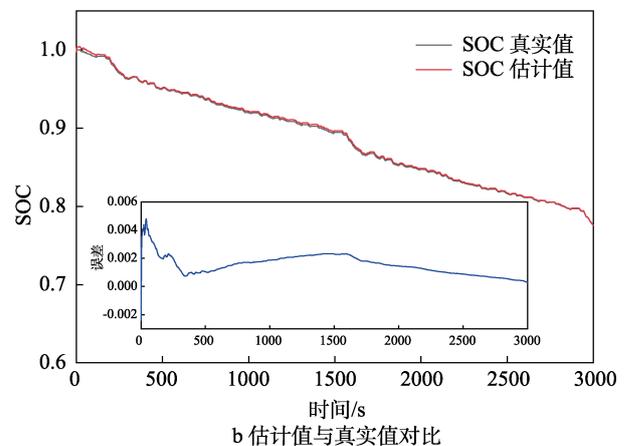
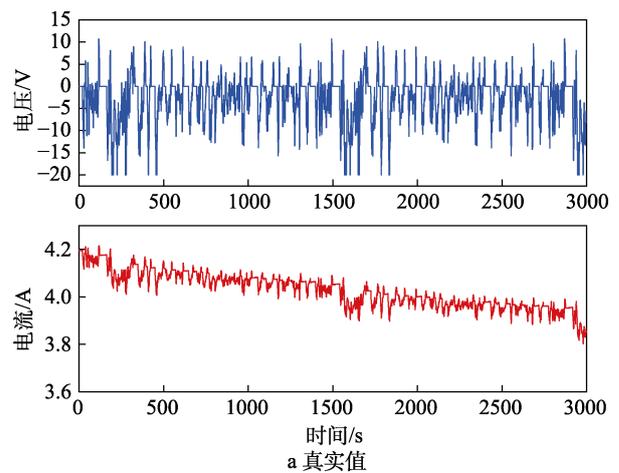


图 7 FUDS 工况下 SOC 估算结果  
Fig.7 SOC estimation results under FUDS conditions: a) real value; b) comparison between estimated value and real value

### 4.1.2 SOC 估计算法鲁棒性

设置电池初始 SOC 为 100%，测试时长为 1000 s。为了验证算法的收敛性，初始 SOC 分别取 100%、80%、60%、40%、20%、0%。SOC 的估计结果如图 8 所示。由图 8 可知，在该算法下 SOC 均能在 40 s 内快速收敛。

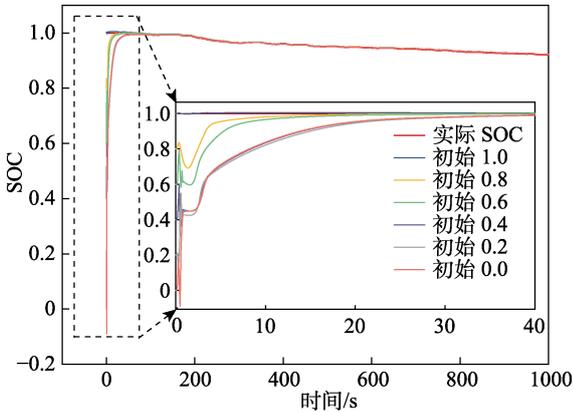


图 8 SOC 算法鲁棒性验证  
Fig.8 SOC algorithm robustness verification

## 4.3 仿真及结果分析

### 4.3.1 放电均衡仿真

电池子组 1 的单体电池初始 SOC 分别为：98%、96%、92%；电池子组 2 的单体电池初始 SOC 分别为：91%、90%、87%；电池子组 3 的单体电池初始 SOC 分别为：84%、82%、76%。电池组在 FUDS 工况下进行仿真实验，未进行均衡的仿真结果如图 9 所示。由于没有进行均衡控制，9 块电池均以相同的速率下降。经过 3000 s 后，它们的 SOC 下降了约 22.4%，如果继续放电，电池 B<sub>9</sub> 会最先放完电而导致电池组停止工作。

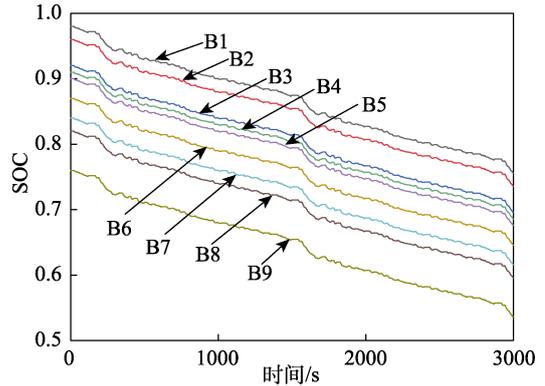


图 9 未加均衡结果  
Fig.9 Unbalanced simulation results

接下来采用分层主动均衡构架来进行均衡。分层主动均衡构架下的仿真结果如图 10a 所示。均衡开始前，电池组的初始 SOC 差值为 22%。由于组内单体初始 SOC 差异大于设定阈值，组内均衡开启。当 3 个电池子组的组内均衡全部完成后，比较电池子组间的平均 SOC 值，此时超过设定阈值，组间均衡开启，最终达到均衡进行时间为 922 s。从图 10a 中的均衡曲线可以看出，采用分层主动均衡构架时，各个单体间的 SOC 值不断接近，减小了不一致性带来的影响，最终单体 SOC 差异缩小至 0.454%。传统相邻主动均衡构架的均衡结果如图 10b 所示。各电池初始 SOC 相同。经过 1220 s 均衡后，电池组中 SOC 值的差值减小至 0.797%。比较两种均衡方式可知，文中提出的均衡构架在均衡效果上提升了 43.04%，均衡时间缩短了 24.4%。同时根据图 11 和图 12 可知，922 s 时未进行均衡控制的电池单体的最低 SOC 值低于均衡后的电池单体 SOC 值，此时电池组能放出更多的能量。

### 4.3.2 静置均衡仿真

为了更为直观地体现电池间能量转移的过程，设

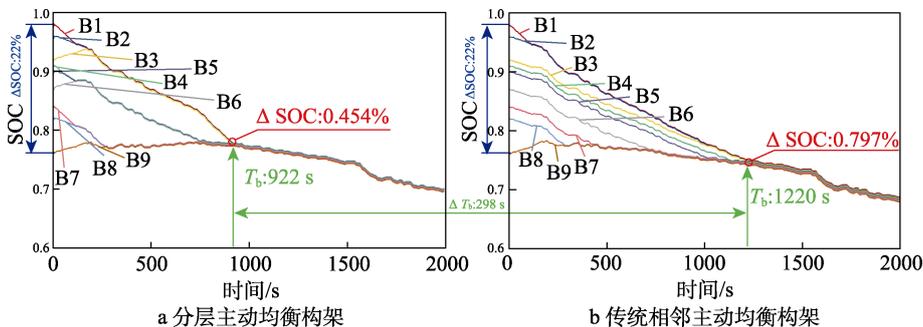


图 10 两种构架下的均衡效果

Fig.10 Balancing effect of two frameworks: a) layered active equalization architecture; b) traditional adjacent battery equalization architecture

置了静置均衡仿真。9 块电池的初始 SOC 值同样为：98%、96%、92%、91%、90%、87%、84%、82%、76%。静置均衡时各个电池 SOC 变化曲线如图 11 所

示。图 11a 为分层主动均衡构架下的静置均衡曲线，图 11b 为传统主动均衡构架下的静置均衡曲线。可以看出，分层均衡构架在均衡效率上也有明显优势。均

衡效率是指电池组中电池单体增加的能量之和与减少的能量之和的比值。从图 11 中可知，分层均衡方法最终平均 SOC 为 85.01%，传统均衡方法最终得到的平均 SOC 值为 83.61%。通过计算可得，分层均衡方法比传统方法的均衡效率高出了 12.61%。因此，分层主动均衡方式表现出了更好的均衡效果。

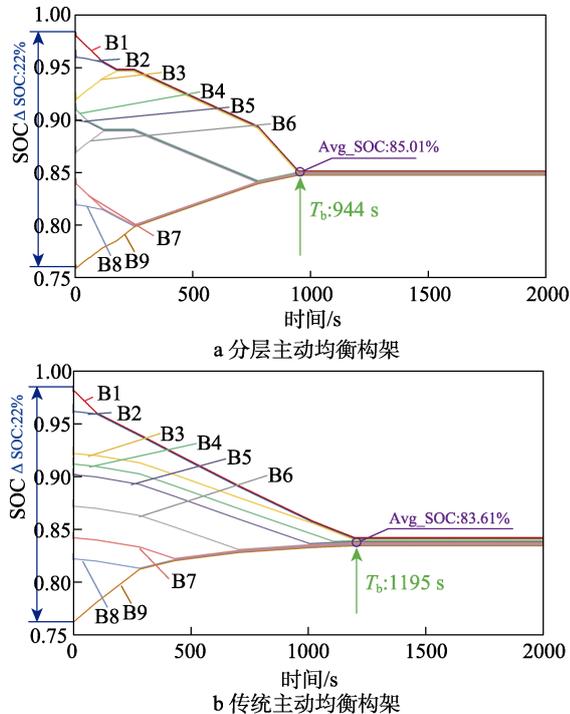


图 11 电池组静置均衡对比

Fig.11 Battery pack static balance comparison: a) hierarchical equalization method; b) traditional equilibrium method

## 5 结论

文中提出了一种用于锂离子电池组均衡系统的分层主动均衡构架，该构架将电池分为多组，其中组间采用基于 Buck-Boost 均衡拓扑电路的主动均衡，组内采用基于反激式变压器的主动均衡。该构架有效地解决了相邻单体电池间均衡由于电池数量多而造成均衡速度慢的问题。同时组间采用以反激式变压器为核心的主动均衡方式，可以进行任意电池子组到电池组间的能量转移，具有更好的灵活性。该分层式均衡构架可减少反激式变压器的使用数量，在减少电路体积的同时，也降低了成本。通过在 Matlab/Simulink 中搭建分层主动均衡模型，并采用先组内均衡、后组间均衡的策略来验证该构架的性能。均衡前后电池组 SOC 的最大差值从 22%降低至 0.454%。与单一的相邻电池单体均衡方式相比，其均衡效果提升了 43.04%，均衡时间缩短了 24.4%，均衡效率提高了 12.61%。因此，该分层主动均衡构架能够更好地应用于船舶或者汽车等具有大量锂离子电池串联的电池组均衡控制中。

## 参考文献：

- [1] 葛云龙, 陈自强, 郑昌文. UTSTF 锂离子电池时变参数估计与故障诊断[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(6): 1223-1230.  
GE Yun-long, CHEN Zi-qiang, ZHENG Chang-wen. Time-varying parameters estimation and fault diagnosis of Li-ion battery using UTSTF[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2018, 52(6): 1223-1230.
- [2] ZHAO Xiao-wei, CAI Yi-shan, YANG Lin, et al. State of charge estimation based on a new dual-polarization-resistance model for electric vehicles[J]. Energy, 2017, 135: 40-52.
- [3] 冯飞, 宋凯, 逯仁贵, 等. 磷酸铁锂电池组均衡控制策略及荷电状态估计算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 22-29.  
FENG Fei, SONG Kai, LU Ren-gui, et al. Equalization control strategy and SOC estimation for LiFePO<sub>4</sub> battery pack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 22-29.
- [4] REN Hong-bin, ZHAO Yu-zhuang, CHEN Si-zhong, et al. Design and implementation of a battery management system with active charge balance based on the SOC and SOH online estimation[J]. Energy, 2019, 166: 908-917.
- [5] 甘正飞, 胡社教. 动力电池组分组式均衡方案研究[J]. 电源技术, 2016, 40(7): 1434-1437.  
GAN Zheng-fei, HU She-jiao. Research on grouping equalization scheme of power battery pack[J]. Chinese journal of power sources, 2016, 40(7): 1434-1437.
- [6] 陈洋, 刘晓芳, 杨世彦, 等. 串联电池组有源均衡拓扑结构综述[J]. 电源学报, 2013, 11(5): 28-36.  
CHEN Yang, LIU Xiao-fang, YANG Shi-yan, et al. Overview of active equalization topologies for series connected batteries[J]. Journal of power supply, 2013, 11(5): 28-36.
- [7] RAHIMI A M. A lithium-ion battery charger for charging up to eight cells[C]//2005 IEEE vehicle power and propulsion conference. Chicago:IEEE, 2005.
- [8] YE Yuan-mao, CHENG K W E. Modeling and analysis of series-parallel switched-capacitor voltage equalizer for battery/supercapacitor strings[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2015, 3(4): 977-983.
- [9] LEE Y S, CHENG Ming-wang. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2005, 52(5): 1297-1307.
- [10] MESTRALLET F, KERACHEV L, CREBIER J C, et al. Multiphase interleaved converter for lithium battery active balancing[J]. IEEE transactions on power electronics, 2014, 29(6): 2874-2881.
- [11] WEI Xue-zhe, ZHAO Xiao-peng, DAI Hai-feng. The application of flyback DC/DC converter in Li-ion batteries active balancing[C]//2009 IEEE vehicle power and propulsion conference. Dearborn: IEEE, 2009.

- [12] 沈艳霞, 周园. 串联锂离子电池组能量均衡策略的研究[J]. 控制工程, 2013, 20(4): 773-777.  
SHEN Yan-xia, ZHOU Yuan. Research on energy equilibrium of Li-ion battery series[J]. Control engineering of China, 2013, 20(4): 773-777.
- [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] CHEN Yang, LIU Xiao-fang, CUI Yang-yi, et al. A MultiWinding transformer cell-to-cell active equalization method for lithium-ion batteries with reduced number of driving circuits[J]. IEEE transactions on power electronics, 2016, 31(7): 4916-4929.
- [15] 吴佳铭, 陈自强. 海洋平台不间断电源锂离子蓄电池故障诊断[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 35-39.  
WU Jia-ming, CHEN Zi-qiang. Fault diagnosis of lithium-ion battery for offshore platform UPS[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 35-39.
- [16] 黄德扬, 陈自强, 郑昌文. 时变温度环境下锂离子电池自适应 SOC 估计方法[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 28-34.  
HUANG De-yang, CHEN Zi-qiang, ZHENG Chang-wen. SOC adaptive estimation method for Li-ion battery applied in temperature-varying condition[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(12): 28-34.
- [17] WANG Yu-jie, ZHANG Chen-bin, CHEN Zong-hai, et al. A novel active equalization method for lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Applied energy, 2015, 145: 36-42.
- [18] ANNO T, KOIZUMI H. Double-input bidirectional DC/DC converter using cell-voltage equalizer with flyback transformer[J]. IEEE transactions on power electronics, 2015, 30(6): 2923-2934.
- [19] 荣德生, 陈淑涵, 李洪珠, 等. 一种新型双开关反激式电池串电压均衡方法[J]. 电源技术, 2015, 39(6): 1219-1221, 1322.  
RONG De-sheng, CHEN Shu-han, LI Hong-zhu, et al. A new voltage equalization method for bi-switch flyback battery string[J]. Chinese journal of power sources, 2015, 39(6): 1219-1221, 1322.
- [20] 高建平, 徐振海, 雷朝阳, 等. 采用安全态势评估的 PHEV 节能控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 108-117.  
GAO Jian-ping, XU Zhen-hai, LEI Zhao-yang, et al. Energy-saving control strategy for PHEV based on security situation estimation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong university, 2019, 53(7): 108-117.