第 52 卷 第 6 期：2665-2679 高电压技术 Vol.52, No.6: 2665-2679
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250800

基于耦合电感的电池奇偶次分组均衡控制方法

颜　宁，李嘉鹏，王晓龙，谷明远
（沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110870）

摘　要：动力电池是汽车上配置使用、可储存电能并再充电以驱动行驶的核心装置，其单体一致性直接影响电动汽车运行效果，而均衡控制是维持该一致性、保障动力电池稳定运行的关键。针对传统均衡策略均衡中均衡速率不高，以及均衡过程中单体电池间能量多次无效循环导致的能量利用效率不高的问题，提出了一种基于耦合电感的电池奇偶次分组均衡控制方法。首先，提出了基于耦合电感的电池组主动均衡拓扑结构，构建了耦合电感能量转移表征模型，详细分析了电池奇偶次分组均衡模式，同时基于图论理论阐述了电池组主动均衡的能量流动路径。然后，提出了电池奇偶次分组均衡控制方法及均衡流程，通过电池奇偶次分组的荷电状态(state of charge, SOC)均值确定奇偶次电池的充放电状态，并根据单体电池和电池模组均值的 SOC 比较确定单体电池是否参与均衡，实时调整均衡开关的工作状态以减少无效循环，从而提高能量利用率。最后，搭建了包含 6 只单体电池的电池组均衡仿真模型。结果表明，对比传统极值法均衡控制策略，该均衡控制方法在均衡速度上最高提高了 29.64%，在能量利用率上最高提高了 18.51%，证明了该均衡控制方法的先进性。

关键词：动力电池；电池模组；耦合电感；荷电状态；奇偶次分组；图论

A Control Method for Battery Odd-even Grouping Equalization Based on Coupled Inductor

YAN Ning, LI Jiapeng, WANG Xiaolong, GU Mingyuan
(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The power battery is a core device installed in automobiles for storing electrical energy and recharging to propel the vehicle. Its cell consistency directly impacts the operational performance of electrical vehicles, while equalization control is key to maintaining this consistency and ensuring stable battery operation. To address the issues of low equalization speed and inefficient energy utilization caused by repeated ineffective energy circulation among individual batteries in traditional equalization strategies, a battery odd-even grouping equalization control method based on coupled inductor was proposed. First, an active equalization topology for battery module utilizing coupled inductor is proposed. A characterization model for energy transfer via coupled inductor is established, and the odd-even grouping equalization mode is thoroughly analyzed. The energy flow paths for active battery module equalization are elucidated using graph theory. Subsequently, the odd-even grouping equalization control method and workflow are presented. By determining the charging/discharging states of odd-even grouped batteries based on their mean SOC values, and comparing individual battery SOC with the module average, the participation of individual batteries in the equalization process is dynamically adjusted. The real-time switching control minimizes ineffective energy circulation, thereby enhancing energy utilization efficiency. Finally, a simulation model of a battery module comprising six individual cells is developed. The results demonstrate that, compared to traditional extremum-based equalization strategies, the proposed method can be adopted to improve the equalization speed by up to 29.64% and energy utilization efficiency by up to 18.51%, validating the superiority of the proposed approach.

Key words: power battery; battery module; coupled inductor; state of charge(SOC); odd-even grouping; graph theory

0　引言

随着“双碳”目标(碳达峰、碳中和)的提出，我国加快推进能源结构转型，大力发展新能源产业[1-3]。电动汽车因温室气体排放量少于传统燃油汽车，推广率正逐年递增；在政策持续推动下，目前新能源汽车在国内总体乘用车的零售渗透率已超过 50%，并将成为新销售车辆的主流[4-5]。

电池储能具有调节速度快与布置灵活等诸多优点，在新型电力系统中发挥着重要作用[6-8]。作为电动汽车的核心动力来源，电池组的性能直接决定了车辆的续航能力、安全稳定性与使用寿命。而锂

基金资助项目：国家自然科学基金青年基金(52407248)。
Project supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (52407248).

离子动力电池凭借能量密度高、循环寿命长、快速充放电能力强的特性，已成为当前电动汽车电池组的主流选择[9-11]。此外，通过车网互动(vehicle to grid, V2G)技术，电动汽车电池组还可作为分布式储能资源，与电网互动，实现峰谷调节和能量优化，进一步增强储能系统的灵活性和效率[4]。

但实际中，电池组由大量单体串并联而成，受制造差异、环境波动等影响，单体间荷电状态、内阻等参数的不一致性会加剧。电池组长时间工作于这种不均衡状态引发的“木桶效应”会引发电池的过充与过放问题。一方面，过度充电的电池会导致电池组的老化加速，并增加电池热失控和电池故障的隐患；另一方面，充电不完全的电池又会直接影响到电池组的容量，降低电池组的储能能力，因此在电池组的规模化应用中还需解决寿命和安全性问题[12]。

针对动力电池组运行过程中存在的不一致性现象，电池均衡控制技术已成为电池储能技术优化领域的关键研究方向。目前主流的均衡策略主要划分为能耗型均衡和能量转移型均衡两大类别[13]。能耗型均衡采用电阻元件以热能耗散方式消除高能单体电池的能量差异，其虽具备拓扑结构简易的优势，但受制于能量效率低的缺陷；相较而言，能量转移型均衡依托储能元件对高能电池的能量暂存，实现向低能单体的能量调配，该方式能显著改善系统能效水平，因此在近年来获得广泛关注[14]。

目前的研究主要集中在主动均衡的拓扑与控制策略优化。均衡电路的搭建主要通过储能元件如电容、电感、变压器和变换器等实现，也有部分研究通过分组分层的方法搭建均衡电路，国内外已有研究如：文献[15]通过单电容实现了任意单体电池间的能量传递，但是一个电池需要匹配 4 个开关管，增加了硬件与控制成本。且电容型均衡易受到均衡目标电池压差的影响，其均衡精度较电感型较差[16]；文献[17]提出了一种基于 Flyback 的均衡电路，在单个均衡周期可以实现任意单体电池间的均衡，但每个单体需对应两个绕组，随电池数量增加，其扩展性受限；文献[18]采用三绕组变压器搭建均衡电路，可以实现单体-单体和全组-单体的均衡，有效地减少了硬件成本。通过均衡策略让电池组在两种模式下切换，有效提高了均衡速度，但是单体-全组的均衡中单体放出的能量在释放于全组时部分会回流到单体，这种无效循环会减少均衡的能量利用率；文献[19]利用耦合电感搭建新型均衡拓扑结构，并选取荷电状态(state of charge, SOC)和端电压双变量作为均衡目标，实现了电压与 SOC 双均衡。但实现均衡需要 4 个脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号，增加了控制的复杂度。

针对于分组分层的均衡电路通常需要匹配更复杂的控制算法。目前控制算法的研究有如聚类算法和智能算法的引入，如文献[20]对串联电池组进行分组，根据组内单体电池和组间电池组搭建双层均衡模型。通过改进的双层极值法实现电池组的均衡。但是均衡速率的提高是依靠多层电路的搭建，增加了电感的数量，且本质仍是极值均衡。在电池数量较多时均衡速率会受限；相较于文献[20]对串联电池组直接进行分组搭建双层均衡模型，文献[21]通过 K-means 算法基于电池的电压误差向量实时对电池分簇。通过分簇结果，首先针对非邻近单体电池实施能量调节，继而开展模块化电池单元集群的内部均衡操作，缩短了电池组的均衡时间。但是 K-means 算法的 K 簇中心点是随机选取的，可能导致电池簇的划分不合理，且需实时进行误差向量的计算以划分电池簇，增加了控制器的计算负担；文献[22]通过自适应模糊 PID 算法对开关管状态进行控制，均衡速度大幅增加，但能量利用率不如传统 buck-boost 电路。且隶属度函数的设计依靠经验和反复实验，实时模糊推理与代数计算相比消耗大量计算资源。综上所述，现有均衡拓扑及控制策略存在均衡速率低、扩展性受限及控制复杂度高等问题。

针对上述问题，本研究提出一种基于耦合电感的电池奇偶次分组均衡控制方法。本研究首先设计了一种耦合电感与 Flyback 变换器相结合的均衡架构，在保证能量传递效率的情况下减少耦合电感的绕组数量，提高均衡电路的经济性；其次，针对传统极值均衡控制方法的低效问题，引入电池奇偶次分组均衡控制策略，实现电池间的并行能量转移，从而缩短均衡时间并减少无效循环，提高均衡的能量利用率；最后，通过充放电及静置均衡仿真实验，系统验证所提方法的快速性与可行性，并与传统极值法进行对比分析。本研究旨在为大规模电池储能系统提供高效、低复杂度的均衡解决方案，助力新能源电力系统的安全稳定运行。

1 耦合电感均衡电路拓扑

1.1 耦合电感均衡电路

通过电池组和耦合电感搭建均衡电路，其拓扑

结构如图 1 所示。此均衡电路由一个 n 绕组的耦合电感、$2n$ 个单体电池和 $2n$ 个均衡开关单元构成。其中均衡开关单元由两个并联有防逆二极管的 MOS 管反串联组成，可以控制均衡电流的单向性。对单体电池依次标号为 1, 2, 3, …, $2n$−1, $2n$；n 为正整数。其中，编号为 1, 3, …, $2n$−1 的电池为奇次组，编号为 2, 4, …, $2n$ 的电池为偶次组。

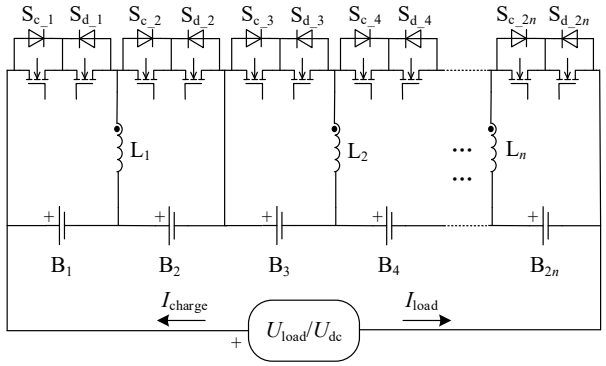


图 1　耦合电感均衡系统拓扑

Fig.1　Equalization system topology of coupled inductor

图 1 中：B_{2n} 为第 $2n$ 个单体电池；L_n 为耦合电感的第 n 绕组；S_{c_2n} 与 S_{d_2n} 分别为第 $2n$ 个开关单元的充电开关与放电开关；U_{load}/U_{dc} 为外电路负载或源；I_{charge} 与 I_{load} 分别为外电路充放电电流。

1.2　耦合电感充放电表征模型

耦合电感作为储能媒介参与电池均衡中能量转移的过程，是电路中能量传递的核心。由于使用的耦合电感各个绕组的绕线匝数相同且并绕于同一铁芯，故将各个绕组的自感统一规定为 L，任意两绕组间的互感规定为 M。

为提高均衡速度，使一个均衡周期内有更多的单体电池参与均衡过程，让耦合电感工作在多绕组同时放电或放电的过程。

若在一个均衡周期有 u 个电池参与放电，v 个电池参与充电，则要建立多电池与多电池间均衡的耦合电感充放电模型。绕组的铜耗正比于均衡电流的平方与绕组电阻的大小。考虑回路总电阻 R 较小[17]，且后文通过约束多绕组充放电状态下的占空比限制了均衡电路中电流峰值的大小。为简化分析，在忽略耦合电感的铜耗电阻的情况下，建立耦合电感多绕组均衡模型如图 2 所示。

图 2 中：B_{du} 为第 u 个放电电池；B_{cv} 为第 v 个充电电池；U_s 为开关管的导通管压降；i_{du} 为第 u 个放电电池的回路电流；i_{cv} 为第 v 个充电电池的回路电流。

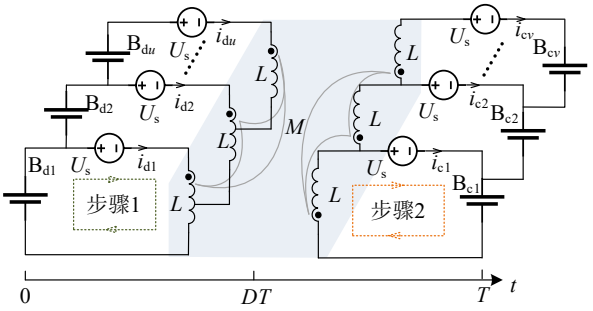


图 2　耦合电感充放电等效电路模型

Fig.2　Charge-discharge equivalent circuit model of coupled inductor

由图 2 可知，若一个均衡周期的时间为 T，放电电池工作时间的占空比为 D，则耦合电感多绕组充放电模型可分为如下两种状态：1）高能电池组 B_d 放电状态[0, DT]，高能电池组回路的开关管导通，高能电池组对耦合电感的原边绕组充电。2）低能电池组 B_c 充电状态[DT, T]，回路开关管导通，耦合电感的原边绕组通过磁耦合将能量传递给副边绕组，再由副边绕组对低能电池组充电。

对耦合电感工作的两种模式进行分析，根据基尔霍夫定律列写充放电回路的电压方程如下：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{d2} \\ \vdots \\ U_{du} \end{bmatrix} - U_s = \begin{bmatrix} L & M & \cdots & M \\ M & L & \cdots & M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M & M & \cdots & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_{d1}}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_{d2}}{\mathrm{d}t} \\ \vdots \\ \dfrac{\mathrm{d}i_{du}}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_{c1} \\ U_{c2} \\ \vdots \\ U_{cv} \end{bmatrix} + U_s = \begin{bmatrix} L & M & \cdots & M \\ M & L & \cdots & M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M & M & \cdots & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_{c1}}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_{c2}}{\mathrm{d}t} \\ \vdots \\ \dfrac{\mathrm{d}i_{cv}}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{1}$$

式中：t 为均衡时间。

通过式(1)求解可得到回路电流的变化率，在仅考虑耦合电感的自感与互感的情况下回路电流成线性变化，与各个回路电池的端电压有关。

电池的端电压与 SOC 存在正相关的关系，且奇偶次分组均衡控制策略中参与放电的电池的 SOC 均大于均值，参与充电的电池的 SOC 均低于均值，若电池并非处在接近满电或放电完全的情况下，则各回路端电压变化不大，各个放电回路电流变化率差别不大。为了简化分析，对放电电池组 B_d 与充电电池组 B_c 的端电压计算均值，代入式(1)求解回路电流。

则放电电池组与充电电池组的端电压均值为：

$$\begin{cases} U_{\mathrm{d_av}}=\dfrac{\sum_{i=1}^{u}U_{\mathrm{d}i}}{u} \\ U_{\mathrm{c_av}}=\dfrac{\sum_{i=1}^{v}U_{\mathrm{c}i}}{v} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$U_{\mathrm{d_av}}$为放电电池组的端电压均值；$U_{\mathrm{c_av}}$为充电电池组的端电压均值；$U_{\mathrm{d}i}$为第 i 个放电电池的端电压；$U_{\mathrm{c}i}$为第 i 个充电电池的端电压。

由于电流变化率成线性，乘均衡时间可得到放电回路的电流为：

$$i_{\mathrm{d}}=\frac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{(L+(u-1)M)}t\ ,\quad 0\le t<DT \tag{3}$$

式中：i_{d}为放电回路的电流。

由式(3)求得放电回路的电流峰值为：

$$i_{\mathrm{d_peak}}=\frac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{(L+(u-1)M)}DT \tag{4}$$

式中：$i_{\mathrm{d_peak}}$为放电回路的电流峰值。

根据磁通守恒原则，在开关管切换的前后，安匝数应该相同。可以得到：

$$i_{\mathrm{d_peak}}u=i_{\mathrm{c_peak}}v \tag{5}$$

式中：$i_{\mathrm{c_peak}}$为充电回路的电流峰值。

由式(4)、式(5)求得充电回路的电流峰值为：

$$i_{\mathrm{c_peak}}=\frac{u}{v}\cdot\frac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{(L+(u-1)M)}DT \tag{6}$$

联立式(1)、式(6)求得充电回路的电流为：

$$\begin{aligned} i_{\mathrm{c}}=&\frac{u}{v}\cdot\frac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{(L+(u-1)M)}DT-\\ &\frac{U_{\mathrm{c_av}}+U_{\mathrm{s}}}{(L+(v-1)M)}(t-DT),\quad DT\le t<T \end{aligned} \tag{7}$$

式中：i_{c}为充电回路的电流。

通过磁通是否复位，可将耦合电感电路的工作模式分为两种：电流连续模式(continuous current mode, CCM)和电流断续模式(discontinuous current mode, DCM)。两种工作模式下的开关管 PWM 和电流磁通波形见附录 A 图 A1。

在 CCM 工作模式下，耦合电感绕组的电流始终存在直流分量，增加均衡电路的发热。铁芯磁通也始终存在剩磁，在经过多次循环下会造成铁芯的饱和。为了避免出现电感磁饱和的现象并减少均衡电路的发热，通过减小占空比，调节均衡模块工作在电流断续模式(DCM)[23]。

由于耦合电感工作在 DCM 模式，铁芯中不存在剩磁，故在一个均衡周期内，放电电流需减小到零。于是可以得到式(8)。

$$\begin{cases} \dfrac{u}{v}\cdot\dfrac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{(L+(u-1)M)}DT-\dfrac{U_{\mathrm{c_av}}+U_{\mathrm{s}}}{(L+(v-1)M)}(t_{\mathrm{e}}-DT)=0 \\ t_{\mathrm{e}}\le T \end{cases} \tag{8}$$

式中：t_{e}为一个均衡周期内放电电流减少到 0 时的均衡时间。

通过式(8)可以求得工作在 DCM 模式下占空比的约束条件为：

$$D\le\frac{1}{1+\dfrac{u}{v}\cdot\dfrac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{c_av}}+U_{\mathrm{s}}}\cdot\dfrac{L+(v-1)M}{L+(u-1)M}} \tag{9}$$

与传统极值法的一个放电绕组与一个充电绕组的模式进行对比分析。将 u=1、v=1 代入式(9)计算可得单绕组充放电工作在 DCM 模式下占空比的约束为：

$$D_{\mathrm{1}}\le\frac{U_{\mathrm{c1}}+U_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{d1}}+U_{\mathrm{c1}}} \tag{10}$$

式中：D_{1}为单绕组充放电的占空比。为保证工作在 DCM 模式下，取 D_{1}=45%。

多绕组充放电在单位均衡周期内使更多的电池参与到均衡过程，但是放电电池数目的增加与充电电池数目的减小会使回路电流峰值变大。均衡电流的增加会使均衡回路的有功损耗增加，导致均衡能量利用率的减小，并与耦合电感均衡电路的铜耗简化条件冲突。且均衡电流的峰值受限于均衡电路，因此需要通过调整占空比限制峰值电流。

由式(4)可得，放电电流峰值随放电电池个数 u 的增大而减小，故只需约束充电回路的电流峰值。于是可以得到峰值约束，如式(11)所示。

$$\begin{cases} i_{\mathrm{c_peak1}}=\dfrac{U_{\mathrm{d1}}-U_{\mathrm{s}}}{L}D_{\mathrm{1}}T \\ i_{\mathrm{c_peak}}\le i_{\mathrm{c_peak1}} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$i_{\mathrm{c_peak1}}$为单绕组充放电工作状态的充电回路电流峰值。

由式(11)可以求得满足峰值电流的占空比约束为：

$$D\le\frac{U_{\mathrm{d1}}-U_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}\cdot\frac{L+(u-1)M}{L}\cdot\frac{v}{u}\cdot D_{\mathrm{1}} \tag{12}$$

结合式(9)与式(12)可得，多绕组充放电的占空比约束为：

$$D=\min\left\{\begin{array}{l}\dfrac{U_{\mathrm{d1}}-U_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}\cdot\dfrac{L+(u-1)M}{L}\cdot\dfrac{v}{u}D_{1},\\ \dfrac{1}{1+\dfrac{u}{v}\cdot\dfrac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{c_av}}+U_{\mathrm{s}}}\cdot\dfrac{L+(v-1)M}{L+(u-1)M}}\end{array}\right\} \tag{13}$$

由式(13)可知，均衡电路中占空比的设定与耦合电感的电感值和单体电池的端电压相关。本文采取定电流控制，通过控制单个均衡周期的占空比，保持开关周期内的最大电流不变[7]。电路中的最大均衡电流决定于均衡电路的硬件。若均衡电流的峰值小于均衡电路的最大限流 i_{peak}，通过式(11)可计算出匹配的电感值，本文采用单绕组为 2 mH 的耦合电感。在开关频率不变的情况下，若待均衡电池电压较高或 i_{peak} 较小，则应选用更大的电感以满足均衡要求。

由图 A1 可得，在一个均衡周期内，放电电池组总输出的能量 W_{o} 与充电电池组总输入的能量 W_{i} 为：

$$\left\{\begin{array}{l}W_{\mathrm{o}}=uU_{\mathrm{d_av}}\dfrac{i_{\mathrm{d_peak}}}{2}DT\\ W_{\mathrm{i}}=vU_{\mathrm{c_av}}\dfrac{i_{\mathrm{c_peak}}}{2}\left(t_{\mathrm{e}}-DT\right)\end{array}\right. \tag{14}$$

由式(14)可得，在一个均衡周期里的计算效率 η_{cal} 为：

$$\eta_{\mathrm{cal}}=\frac{W_{\mathrm{i}}}{W_{\mathrm{o}}}=\frac{u}{v}\cdot\frac{U_{\mathrm{d_av}}-U_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{c_av}}+U_{\mathrm{s}}}\cdot\frac{L+(v-1)M}{L+(u-1)M}\cdot\frac{U_{\mathrm{c_av}}}{U_{\mathrm{d_av}}} \tag{15}$$

1.3　均衡工作模式

耦合电感作为均衡电路的核心能量传递元件，其拓扑特性决定了能量传递的方向性与关联性。本系统采用的多绕组耦合电感为共磁芯结构，各绕组通过磁链耦合实现能量转移。由于耦合电感均衡电路的拓扑特性，能量传递受限于绕组的耦合关系，无法直接实现编号奇偶性相同的电池间能量转移。

为此，本文根据电池编号的奇偶性，设计了两种均衡模式以实现任意两个单体电池间的均衡。这种奇偶次分组工作模式不仅提高了均衡的并行性，还减少了能量在电池间的无效循环。根据两个单体电池均衡单位能量所需的均衡周期，分为 2 种均衡模式。

为清楚展示能量流通路径，以一个均衡周期中单电池与单电池均衡的单绕组充放电模式分析，具体如图 3 所示。模式 1 为编号奇偶性不同的单体电池的均衡。模式 1 通过耦合电感的自感或磁耦合互感实现。以高能单体电池 B_5 对低能单体电池 B_4 充电为例，首先用 PWM 信号控制 S_{d_5} 的导通，单体电池 B_5 将能量传递给耦合电感，待充电完毕，关断 S_{d_5} 并闭合 S_{c_4}，将耦合电感的能量传递给低能单体电池 B_4，从而实现奇偶性不同的单体电池的均衡。

模式 2 为编号奇偶性相同的单体电池的均衡。模式 2 通过运行两次模式 1 实现，先将高能单体电池中的能量传递到与其编号奇偶不同的媒介单体电池，再将储存在媒介单体电池的能量传递给低能单体电池。以高能单体电池 B_5 对低能单体电池 B_3 充电为例，首先用 PWM 信号控制 S_{d_5} 的导通，单体电池 B_5 将能量传递给耦合电感，待充电完毕，关断

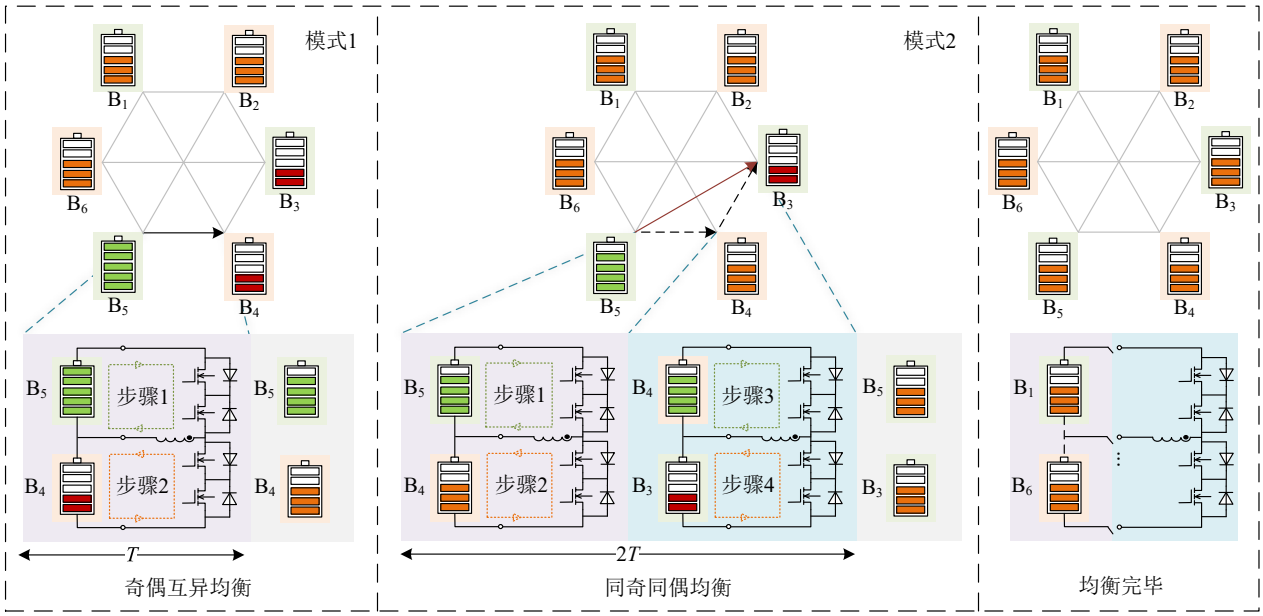


图 3　两种均衡模式的导通逻辑图

Fig.3　Logic diagram of the two equalization modes

S_{d_5}并闭合 S_{c_4}，将耦合电感的能量传递给与高能电池编号奇偶不同的媒介单体电池 B_4。再控制 S_{d_4}的导通，媒介单体电池 B_4将能量传递给耦合电感，待充电完毕，关断 S_{d_4}并闭合 S_{c_3}，耦合电感将能量传递给低能单体电池 B_3，从而实现奇偶性相同的单体电池的均衡。

由图 3 可得，两种模式的均衡效率为：

$$\begin{cases}\eta_{\mathrm{md1}}=\eta_{\mathrm{cal}}\\ \eta_{\mathrm{md2}}=\eta_{\mathrm{cal}}\cdot\eta_{\mathrm{cal}}=\eta_{\mathrm{cal}}^2\end{cases} \tag{16}$$

式中：η_{md1}为模式 1 下两电池传递单位能量的效率；η_{md2}为模式 2 下两电池传递单位能量的效率。

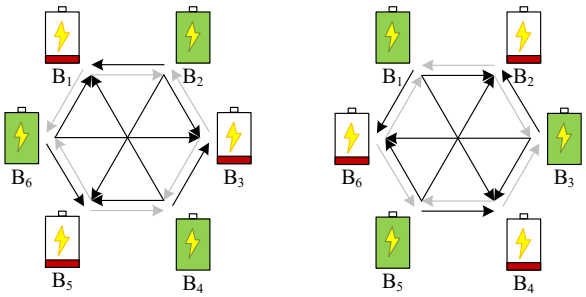
模式 1 的能量传递路径直接，能够在单个周期内高效完成能量转移，在单体电池差异较大的情况下，可快速减小奇偶次分组电池的不一致性。模式 2 通过媒介电池实现奇偶性相同的电池间均衡，增强了均衡策略的灵活性。虽然效率略低于模式 1，但它在保证了电池组内任意两个电池实现均衡的条件下，减少了电池组所需的耦合电感的绕组数量。

1.4 均衡通路的图论建模

以上的分析对单绕组的充放电能量流通路径的电路原理进行了解释，而奇偶次分组均衡控制策略的耦合电感工作在多绕组充放电模式，即在一个均衡周期开启对耦合电感磁通同向增磁的待均衡路径，以提高均衡速率。两者传递的能量不同而能量流通路径相似。

为简化分析，用图的图形关系来表示电池组各单体的通信拓扑结构关系，即用到图中各顶点与各条边的关系来表征单体与邻居单体之间的单均衡周期的均衡通路[24]。用图的各结点表示一个单体电池，用单向箭头表示单均衡周期的能量流动方向。在单个均衡周期内，仅有奇偶互异的电池能完成能量传递。以 6 只电池构成的电池组表征本文均衡电路的能量流通路径如图 4 所示。

由图 4 可知，基于电感电流不可突变的特性，单周期均衡过程中放电电池组与充电电池组具有相反的奇偶性特征。系统包含两种交替工作状态：(a)偶次电池组向奇次电池组充电；(b)奇次电池组向偶次电池组充电。通过控制策略在每个均衡周期初始选定单一工作状态，并在下一周期依据均衡策略进行状态切换，确保各周期仅存在一种能量转移模式。通过对均衡拓扑的图论建模对电池组的通信拓扑提供了严格的数学表征。



(a) 偶次电池组向奇次电池组充电　(b) 奇次电池组向偶次电池组充电

图 4　能量流通路径图

Fig.4　Diagram of energy flow path

由图 4、图 A2 可知，若电池组由 $2n$ 个单体电池串联组成，则在同一均衡周期，本文提出的电路至多有 n^2 条能量流通路径。已有的所构建的电路中，在同一均衡周期，至多有 $2n(2n-1)/2$ 条能量流通路径。相比于所需 $4n$ 个绕组的耦合电感，本文电路需要 n 个绕组的耦合电感，得到每绕组的能量流通路径数为：

$$\begin{cases}n_{\mathrm{um_1}}=\dfrac{n^2}{n}=n\\ n_{\mathrm{um_ref}}=\dfrac{2n(2n-1)}{2}\dfrac{1}{4n}=\dfrac{2n-1}{4}\end{cases} \tag{17}$$

式中：$n_{\mathrm{um_1}}$为本文电路中每绕组构建的能量流通路径数；$n_{\mathrm{um_ref}}$为目前电路中每绕组构建的能量流通路径数。

由式(17)可得，本文构建的电路的耦合电感的利用率更高。主动均衡电路的本质是通过储能元件的使用来构建所有单体电池间的能量通信网络。电路是通过模式 2 的两次均衡代偿来实现各个电池间路径的遍历，从而减少了耦合电感的绕组需求。但是由于模式 2 的能量利用率要低于模式 1，因此需要控制方法的约束来减少均衡过程中执行模式 2 的比重。考虑到电池拓扑位置对均衡效果的影响，设计电池奇偶次分组均衡控制方法来对参与均衡的电池进行准确筛选，从而选择合适的均衡路径来减少模式 2 的比重。

2　电池奇偶次分组均衡控制方法

均衡控制策略在均衡电路的基础上，负责协调电路中开关管的导通/关断来实现电池间能量流动[25]。传统极值法均衡控制策略在一个均衡周期内只有两个单体电池参与到能量传递过程，均衡速率低。且本电路在极值电池编号奇偶相同时，需要通

过模式 2 来完成均衡，存在能量在媒介电池内反复循环充放电现象，造成能量利用率低的问题[26]。

均衡控制策略既是对均衡路径的筛选。为保证在同一均衡中尽可能多的电池得到均衡，并减少无效循环次数。本文设计了电池奇偶次分组均衡控制方法。以 SOC 为均衡变量，通过 SOC 极差值判断是否开启均衡，并通过 SOC 的奇偶次分组均值对参与均衡的单体电池与其均衡状态进行筛选，实时调整均衡开关的工作状态以减少无效循环，从而提高能量利用率。具体实施控制过程如图 5 所示。由图 5 可知，实施过程包括模型搭建，控制策略的实现和均衡策略的高效性验证。

首先，进行模型搭建。通过耦合电感搭建均衡拓扑电路，并根据耦合电感模型表征均衡过程中的能量传递模型。在均衡电路的基础上构建两种均衡模式以实现所有单体电池的均衡。通过对均衡电路的图论模型表征电路的均衡路径。

其次，实现奇偶次均衡控制策略。本文设计的均衡控制策略具体分为 3 个阶段：

1）通过 BMS 获取所有单体电池的荷电状态，根据式(18)计算电池模组的 SOC 极差值，并基于式(19)确定是否开启均衡电路。

$$\begin{cases} S_{\mathrm{OC_max}}(k)=\max\{S_{\mathrm{OC_1}}(k),S_{\mathrm{OC_2}}(k),\cdots,S_{\mathrm{OC_2}n}(k)\} \\ S_{\mathrm{OC_min}}(k)=\min\{S_{\mathrm{OC_1}}(k),S_{\mathrm{OC_2}}(k),\cdots,S_{\mathrm{OC_2}n}(k)\} \\ \Delta_{\mathrm{_all}}(k)=S_{\mathrm{oc_max}}(k)-S_{\mathrm{oc_min}}(k) \end{cases} \tag{18}$$

式中：$S_{\mathrm{OC_max}}(k)$为 k 时刻电池模组中单体电池 SOC 的最大值；$S_{\mathrm{OC_min}}(k)$为 k 时刻电池模组中单体电池 SOC 的最小值；$S_{\mathrm{OC_}i}(k)$为 k 时刻编号为 i 的单体电池的荷电状态；$\Delta_{\mathrm{_all}}(k)$为 k 时刻均衡参考值。

$$\begin{cases} \Delta_{\mathrm{_all}}(k)>\alpha，\ \text{启动均衡} \\ \Delta_{\mathrm{_all}}(k)\le\alpha，\ \text{停止均衡} \end{cases} \tag{19}$$

式中：α为均衡启动阈值。

2）均衡路径的选择

由图 3 可知，在一个均衡周期中，充放电电池的奇偶性不同，且模式 1 的均衡速度与能量利用率优于模式 2，所以均衡策略需要考虑电池拓扑位置的影响。

因此在电路搭建完毕时，对电池进行奇偶编号，并引入三均值以作为判断电池充放电状态的筛选条件。均衡路径筛选的三均值条件的计算如式(20)所示。

$$\begin{cases} M_{\mathrm{_all}}(k)=\dfrac{\sum_{i=1}^{2n}S_{\mathrm{OC_}i}(k)}{2n}, & i=1,2,3,\cdots \\ M_{\mathrm{_odd}}(k)=\dfrac{\sum_{i=1}^{2n-1}S_{\mathrm{OC_}i}(k)}{n}, & i=1,3,5,\cdots \\ M_{\mathrm{_even}}(k)=\dfrac{\sum_{i=2}^{2n}S_{\mathrm{OC_}i}(k)}{n}, & i=2,4,6,\cdots \end{cases} \tag{20}$$

式中：$2n$ 为单体电池的总数；$M_{\mathrm{_all}}(k)$为电池模组的所有单体电池的实时 SOC 均值；$M_{\mathrm{_odd}}(k)$为所有奇数编号单体电池的实时 SOC 均值；$M_{\mathrm{_even}}(k)$为所有

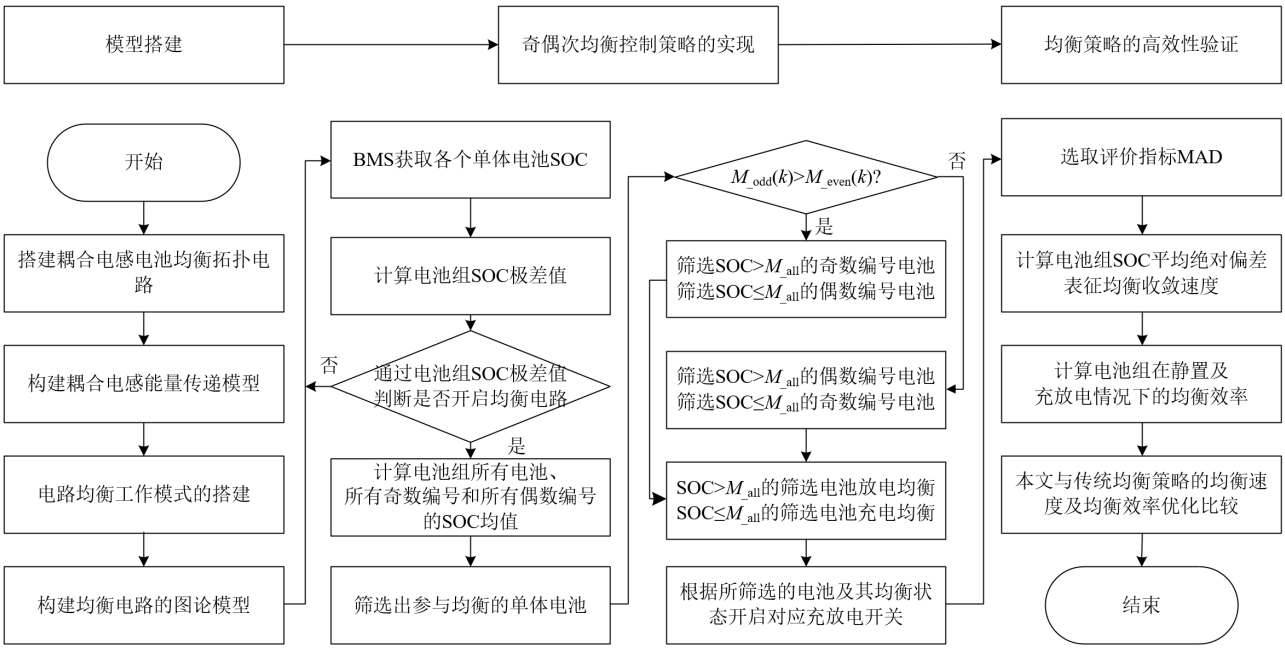


图 5　均衡方法流程图

Fig.5　Equalization method flowchart

偶数编号单体电池的实时 SOC 均值。

在均衡之初，所有奇次编号的电池的平均 SOC 与所有偶次编号的电池的平均 SOC 不同。奇偶两组平均 SOC 的差异可以利用模式 1 快速减小。因此引入奇偶电池组的均值约束，通过比较奇偶次电池组的均值来确定在一个均衡周期中奇次编号电池组和偶次编号电池组是处于充电还是放电状态。奇偶次电池组的充放电约束如式(21)所示。

$$\begin{cases} M_{_\mathrm{odd}}(k) > M_{_\mathrm{even}}(k), \\ \quad \text{奇次编号电池参与放电\&} \\ \quad \text{偶次编号电池参与充电} \\ M_{_\mathrm{odd}}(k) < M_{_\mathrm{even}}(k), \\ \quad \text{偶次编号电池参与放电\&} \\ \quad \text{奇次编号电池参与充电} \end{cases} \tag{21}$$

通过式(21)，可以判断奇偶次电池组中平均 SOC 较高的作为放电组，但是放电组中并不是所有电池都处于高能状态，同理充电组也不是所有电池都处于低能状态。为了减少无效循环，引入所有单体电池的均值来确定参与充放电组中真正参与均衡的电池，设定参与均衡的约束如式(22)所示。

$$\begin{cases} S_{\mathrm{OC}_i}(k) > M_{_\mathrm{all}}(k), & \text{放电均衡} \\ S_{\mathrm{OC}_i}(k) \le M_{_\mathrm{all}}(k), & \text{充电均衡} \end{cases} \tag{22}$$

联立式(21)与式(22)，取交集可得，奇偶次分组均衡控制策略的均衡路径选择方法为：

$$\begin{cases} M_{_\mathrm{odd}}(k) > M_{_\mathrm{even}}(k), \\ \quad \begin{cases} S_{\mathrm{OC}_i}(k) > M_{_\mathrm{all}}(k) \begin{cases} i\text{为奇数}, & \text{放电均衡} \\ i\text{为偶数}, & \text{不均衡} \end{cases} \\ S_{\mathrm{OC}_i}(k) \le M_{_\mathrm{all}}(k) \begin{cases} i\text{为奇数}, & \text{不均衡} \\ i\text{为偶数}, & \text{充电均衡} \end{cases} \end{cases} \\ M_{_\mathrm{odd}}(k) < M_{_\mathrm{even}}(k), \\ \quad \begin{cases} S_{\mathrm{OC}_i}(k) > M_{_\mathrm{all}}(k) \begin{cases} i\text{为奇数}, & \text{不均衡} \\ i\text{为偶数}, & \text{放电均衡} \end{cases} \\ S_{\mathrm{OC}_i}(k) \le M_{_\mathrm{all}}(k) \begin{cases} i\text{为奇数}, & \text{充电均衡} \\ i\text{为偶数}, & \text{不均衡} \end{cases} \end{cases} \end{cases} \tag{23}$$

3）控制相应 MOS 管的通断，形成能量传递通路，对筛选出参与均衡的单体电池进行 SOC 均衡。若筛选出采取放电均衡的单体电池共 u 个，且其编号为 u_1、u_2、…、u_u，采取充电均衡的单体电池共 v 个，且其编号为 v_1、v_2、…、v_v，则均衡开关单元的工作状态为：

$$\begin{cases} S_{\mathrm{d}_u_1、u_2、\cdots、u_u} = 1, & 0 \le t < DT \\ S_{\mathrm{c}_v_1、v_2、\cdots、v_v} = 1, & DT \le t \le T \end{cases} \tag{24}$$

式中：$S_{\mathrm{d}_u_1、u_2、\cdots、u_u}$ 为满足放电均衡的所有单体电池的放电开关；$S_{\mathrm{c}_v_1、v_2、\cdots、v_v}$ 为满足充电均衡的所有单体电池的充电开关。

奇偶分组均衡控制策略通过筛选均衡路径，首先采用模式 1 快速高效的降低奇次组与偶次组电池的不一致性；当任意单组(奇数或偶数)完成均衡后，切换至模式 2 实现跨组协同均衡。

3 仿真分析

3.1 均衡效果评价方法

最后，进行均衡策略的高效性验证。在静置与充放电 3 种工况下，通过对比传统极值法均衡与奇偶次分组均衡控制方法的均衡速度和能量利用率验证奇偶次分组均衡控制方法的高效性。

在评估电池组均衡性能的稳态特性时，需建立量化评价指标以表征系统收敛速率。为确保评价指标与电池组的荷电状态保持量纲一致性，同时准确表征电池组整体的 SOC 离散特性，选取平均绝对偏差(mean absolute deviation, MAD)作为量化评价指标。将均衡前后的组间 SOC 平均绝对偏差的差值与均衡时间之比作为电池组均衡速度 V，其表达式可表述为式(25)。

$$\begin{cases} S_{\mathrm{OC_MAD}}(k) = \dfrac{1}{2n}\displaystyle\sum_{i=1}^{2n}\left|S_{\mathrm{OC}_i}(k) - M_{_\mathrm{all}}(k)\right|, \ i\text{为正整数} \\ \Delta S_{\mathrm{OC_MAD}} = S_{\mathrm{OC_MAD}}(t_{_\mathrm{s}}) - S_{\mathrm{OC_MAD}}(t_{_\mathrm{e}}) \\ V = \dfrac{\Delta S_{\mathrm{OC_MAD}}}{(t_{_\mathrm{e}} - t_{_\mathrm{s}})/3\,600} \end{cases} \tag{25}$$

式中：$S_{\mathrm{OC_MAD}}(k)$是 k 时刻的电池组的 SOC 平均绝对偏差；$t_{_\mathrm{s}}$是均衡开始时刻；$t_{_\mathrm{e}}$是均衡结束时刻；$\Delta S_{\mathrm{OC_MAD}}$ 为电池组均衡前后的平均绝对偏差值的差值；V 为电池组均衡速度。

除了均衡速度，均衡过程的能量利用率也是均衡过程的重要评定指标。在静置均衡状态下，通过比较均衡前后的 SOC 均值来计算。在充电均衡状态下，不仅会有均衡过程的能量损耗，还会有外加电源的能量输入。在放电均衡状态下，不仅会有均衡过程的能量损耗，还会有电池组对外加负载的能量输出。因此，在充放电情况下计算能量利用率应相应增减去外加电源能量输入或外加负载的能量输出。在忽略电池组充放电的能量损耗下，均衡过程中的能量利用率为：

$$\begin{cases}\eta=\dfrac{M_{_\mathrm{all}}(t_{_\mathrm{e}})}{M_{_\mathrm{all}}(t_{_\mathrm{s}})}\\ \eta_{_\mathrm{c}}=\dfrac{CM_{_\mathrm{all}}(t_{_\mathrm{e}})-\int_{t_{_\mathrm{s}}}^{t_{_\mathrm{e}}}I(k)\mathrm{d}t}{CM_{_\mathrm{all}}(t_{_\mathrm{s}})}\\ \eta_{_\mathrm{d}}=\dfrac{CM_{_\mathrm{all}}(t_{_\mathrm{e}})+\int_{t_{_\mathrm{s}}}^{t_{_\mathrm{e}}}\left|I(k)\right|\mathrm{d}t}{CM_{_\mathrm{all}}(t_{_\mathrm{s}})}\end{cases}\tag{26}$$

式中：η是静置均衡的能量利用率；$\eta_{_\mathrm{c}}$是充电均衡的能量利用率；$\eta_{_\mathrm{d}}$是放电均衡的能量利用率；C是单体电池的容量；$I(k)$是k时刻的充放电电流，规定充电电流为正方向。

3.2　仿真实验验证

为验证所提出的电池奇偶次分组均衡控制策略的性能优势，基于耦合电感均衡拓扑构建了MATLAB/Simulink仿真模型。通过设计对照实验，分别在静置、恒流充电及放电3种典型工况下，与传统极值均衡法进行性能分析。选取均衡速度和能量利用率两个重要指标进行量化对比。具体仿真参数配置详见附录B表B1。

3.2.1　静置均衡仿真

在静置条件下，电池组既不对负载供电，也不被外电源充电。静置均衡时，各单体电池初始SOC与传统极值均衡法和奇偶次分组均衡控制方法均衡结束时的SOC见附录B表B2。在静置状态下，奇偶次分组均衡控制策略在完成均衡时的荷电状态高于传统极值法约5%，有效的提高了能量利用率。

在静置工况下，传统极值法的均衡过程是识别电池组内的极值单体，通过能量转移使中间单体逐步向极值边界收敛，最终实现全组均衡。由于能量需经多级传递且存在路径损耗，其均衡耗时较长为1 800 s。且效率随单体数量增加显著下降。这一特性表明极值法适用于小规模电池组，但对大规模系统的适应性有限，具体如图A3。

在静置均衡工况下，奇偶次分组均衡控制方法的均衡效果如图6所示。

由图6可知，均衡开始时，奇次电池组的平均SOC较高，其中能量较高的B_1、B_3对偶次电池组中能量较低的B_4、B_6充电，其余电池不参与均衡。此过程执行模式1。

在200 s时，奇偶电池组的均值相同，两电池组在每个均衡周期结束后交换充放电状态，交替作为高能电池组对另一电池组进行放电，此过程虽然是奇偶电池组互相放电，但是能量都是从一个电池组传递到与其奇偶性不同的电池组中且不再传出，故此过程仍是执行模式1。直至1 094 s时，偶次电池组中的所有单体电池都达到了均衡状态。此时仅奇数电池组内存在待均衡电池，将偶次电池组作为媒介电池实现奇次电池组中高能电池向低能电池间的能量传递，此过程为模式2。再到1 500 s时所有单体电池均达到均衡状态，均衡电路停止工作。分析可知，奇偶次分组均衡控制方法只有在奇次或偶次任一电池组中的所有单体电池都达到均衡状态才会执行模式2，有效的限制了模式2的比重。

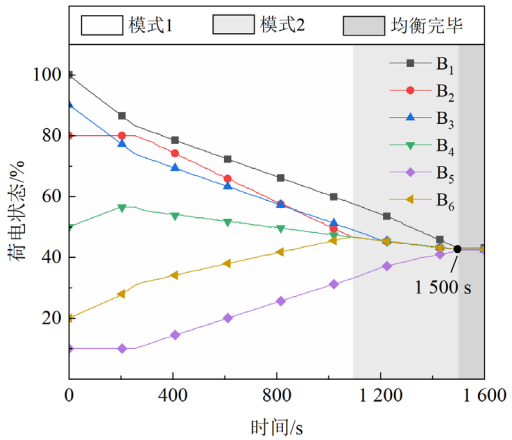


图6　奇偶次分组方法静置均衡

Fig.6　Odd-even grouping method static equalization

传统极值法在静置均衡的工况下，完成均衡耗时1 800 s，$S_{\mathrm{OC_MAD}}$降低了31.46%，通过式(25)计算可得其静置均衡速度$V_{_1}$为62.93%/h。由式(26)得其静置能量利用率为63.86%；静置均衡时，奇偶次分组均衡控制方法耗时1 500 s，电池组内的$S_{\mathrm{OC_MAD}}$降低了31.51%，计算得静置均衡速度$V_{_2}$为75.6%/h，其静置能量利用率为73.05%。奇偶次分组均衡控制方法在静置过程中的均衡速度相较于传统极值法提高了约20.18%，均衡能量利用率提高了14.39%。

3.2.2　充电均衡仿真

充电均衡时，除了均衡电路进行工作，外电源同时对电池组进行充电。采用1C充电速率对电池组进行充电均衡。各单体电池初始SOC与传统极值均衡法和奇偶次分组均衡控制方法均衡结束时的SOC见附录B表B3。

在充电均衡工况下，传统极值法的均衡效果如图A4，在大约500 s时，电池组完成了两簇极值均衡，再向均衡目标收敛。在872 s时，电池组内各

单体电池达到均衡状态，并随着外加电源的激励同步充电。

奇偶次分组均衡控制方法充电均衡结果如图 7 所示。在 620 s 时，偶次电池组完成对均衡目标的收敛，并在 680 s 时，所有电池完成了均衡。

在充电均衡的工况下，传统极值法均衡策略耗时 872 s，S_{OC_MAD} 降低了 16.53%，根据式(25)计算可得，其充电均衡速度 V_{c_1} 为 68.26%/h。本文奇偶次分组均衡策略耗时 680 s，S_{OC_MAD} 降低了 16.54%，得充电均衡速度 V_{c_2} 为 87.59%/h。通过式(26)计算可得，传统极值法和奇偶次分组均衡控制方法的能量利用率分别为 62.71%和 74.32%。比较可得，奇偶次分组均衡控制方法在充电均衡的速度上提高了 28.35%，均衡能量利用率提高了 18.51%。

3.2.3 放电均衡仿真

放电均衡时，除了均衡电路进行工作，电池组同时带负载运行。在 1C 的放电速率下均衡时，各单体电池初始 SOC 与传统极值均衡法和奇偶次分组均衡控制方法均衡结束时的 SOC 见附录 B 表 B4。由于奇偶次分组均衡控制方法的耗时短，所以电池组在均衡开始到完毕的这段过程中对负载的供电少于传统极值法均衡，完成均衡时的荷电状态高于传统极值法约 9%。

在放电均衡的工况下，电池组在 380 s 左右完成了双极值的收敛，在 912 s 时，电池组内各单体电池达到均衡状态，并对外加负载同步放电。传统极值法的均衡结果如图 A5 所示。

在放电均衡的工况下，奇偶次分组均衡控制方法的均衡结果如图 8 所示。

在 516 s 时，所有奇次电池组完成均衡，并换用模式 2 进行均衡，在 700 s 时，电路实现均衡状态。在放电均衡的工况下，传统极值法均衡策略耗时 912 s，S_{OC_MAD} 降低了 16.54%，根据式(25)计算可得，其放电均衡速度 V_{d_1} 为 65.27%/h。本文奇偶次分组均衡策略耗时 700 s，S_{OC_MAD} 降低了 16.45%，得放电均衡速度 V_{d_2} 为 84.60%/h。通过式(26)计算可得，传统极值法和奇偶次分组均衡控制方法的能量利用率分别为 83.97%和 89.62%。比较可得，奇偶次分组均衡控制方法在放电均衡的速度上提高了 29.64%，均衡能量利用率提高了 6.73%。

3.3 3 种工况均衡效果综合评价

上述用均衡速度 V 讨论为整个均衡过程的达到稳态的平均均衡速率。为表征均衡过程的动态均衡速率，并同时比较 3 种均衡工况的均衡效果，分别以各工况传统极值法完成均衡所用的时间为基值，作平均绝对偏差值关于均衡时间标幺值的图像如图 9 所示。

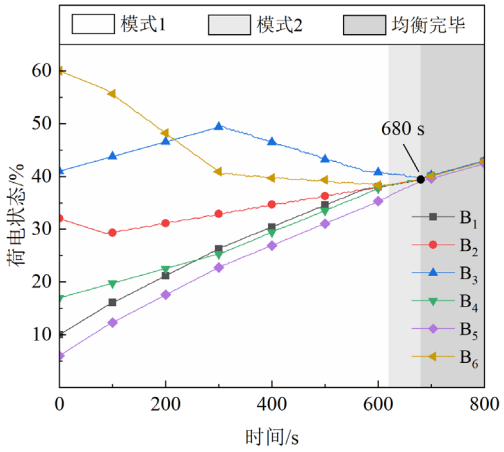


图 7 奇偶次分组方法充电均衡

Fig.7 Odd-even grouping method charge equalization

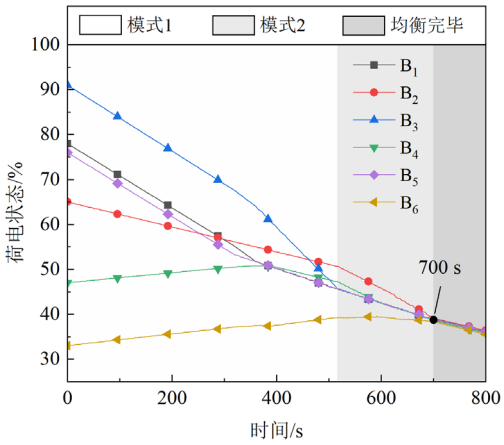


图 8 奇偶次分组方法放电均衡

Fig.8 Odd-even grouping method discharge equalization

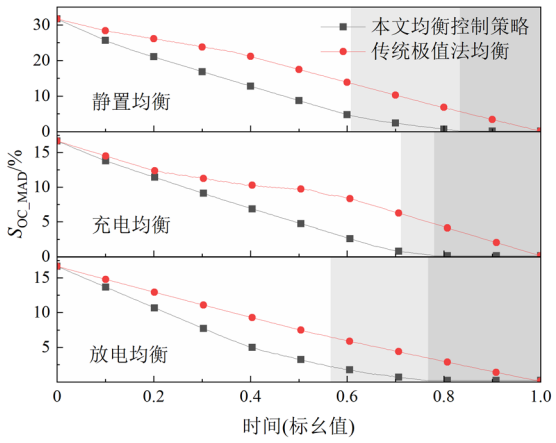


图 9 3 种均衡模式对比图

Fig.9 Comparison diagram of three equalization modes

由图 9 可知，传统极值法均衡速率相对稳定。而奇偶分组均衡的速度呈现先快后慢的趋势，其采用两阶段策略：初期以模式 1 实现奇偶组内快速并行均衡，当任一组完成后切换模式 2 跨组协同。通过“三均值”的准确筛选，关断已均衡单体的均衡通路，从而减少无效循环。最终在减少耦合电感绕组的同时，实现均衡效率与能量利用率双重提升。

对奇偶次分组均衡控制方法和传统极值法均衡在 3 种工况的均衡结果进行详细的对比，结果如表 1 所示。

通过表 1 均衡仿真数据可知：奇偶次分组均衡控制策略在 3 种均衡状态下的放电均衡的均衡速度最快，提升了 29.64%；在充电均衡的能量利用率最高，提高了 18.51%。奇偶次分组均衡控制方法极大地缩短了均衡时间，并有效的提高了能量利用率，减少了单体电池间的不一致性。

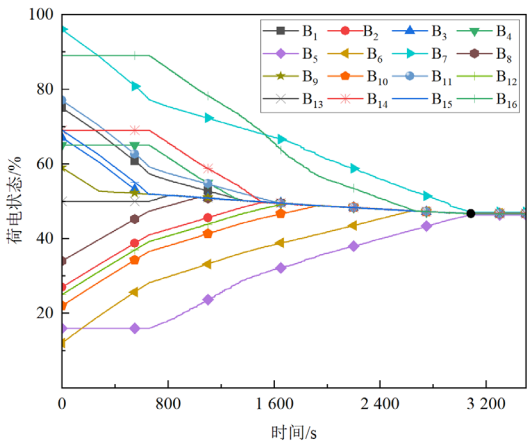
3.4　3 种均衡工况的拓展性分析

通过以上分析验证了电池奇偶次分组均衡控制方法的快速性和高效性。为验证奇偶次分组均衡控制方法在多节电池串联的电池组的拓展性，进一步搭建了 16 节串联电池组模型，并在静置、充电和放电 3 种工况下进行分析。各单体电池的初始 SOC 见附录 B 表 B5。

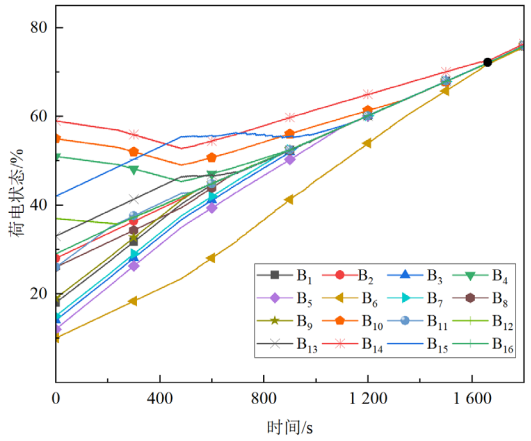
对 3 种工况下 16 只单体电池进行仿真，充放电状态仍采用 1C 的电流倍率。16 只单体电池在 3 种工况下的奇偶次分组均衡结果如图 10 所示。由图 10 可知，在 16 只电池组中，静置均衡、充电均衡与放电均衡分别在 3 082 s、1 658 s 和 1 904 s 达到均衡状态。奇偶次分组均衡控制方法在多单体电池组中仍有较好的均衡效果，对多单体电池组仍有普适性。

4　结论

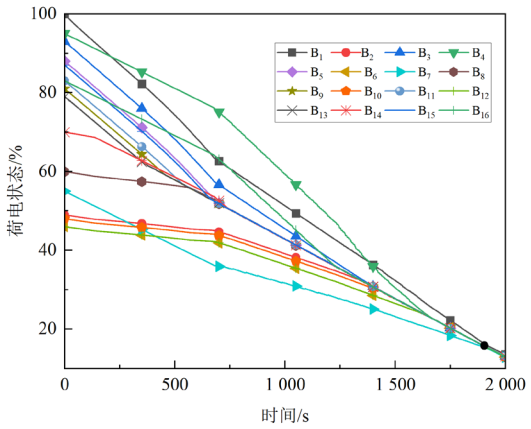
本文提出基于耦合电感的电池奇偶次分组均衡控制方法。基于奇偶次分组均衡控制方法和传统极值法的仿真实验对比分析，得出如下结论：



(a) 静置状态



(b) 充电状态



(c) 放电状态

图 10　奇偶次分组均衡的 3 种工况

Fig.10　Odd-even grouping method of three equalization modes

表 1　电池组均衡对比

Table 1　Comparison of battery pack equalization

均衡类型	奇偶次均衡控制方法				传统极值均衡方法				均衡速率提升比率/%	能量利用率提升比率/%
	ΔS_{OC_MAD}/%	时间/s	速度/(%·h^{-1})	能量利用率/%	ΔS_{OC_MAD}/%	时间/s	速度/(%·h^{-1})	能量利用率/%		
静置	31.51	1 500	75.6	73.05	31.46	1 800	62.93	63.86	20.18	14.39
充电	16.54	680	87.59	74.32	16.53	872	68.26	62.71	28.35	18.51
放电	16.45	700	84.6	89.62	16.54	912	65.27	83.97	29.64	6.73

1）本文提出的均衡方法通过电池的并行均衡显著提高了均衡速度。在静置、充电以及放电 3 种工况下对比传统极值法可得，均衡速度分别提升了 20.18%，28.35%，29.64%，验证了奇偶次分组均衡策略的快速性。

2）提出的均衡方法通过动态路径规划显著减少冗余循环。与传统极值法相比，所提方法在静置、充电及放电工况下的能量利用率分别提升 14.39%、18.51%和 6.73%，验证了奇偶次分组均衡控制方法在均衡过程中的高效性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 高红均，郭明浩，刘挺坚，等. 新型电力系统电力电量平衡分析研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2683-2696.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Tingjian, et al. Review on electric power and energy balance analysis of new-generation power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2683-2696.

[2] 余洋，陈东阳，吴玉威，等. 风电波动平抑下考虑 SOC 均衡及收益的电池储能功率分配策略[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1714-1723.
YU Yang, CHEN Dongyang, WU Yuwei, et al. Power allocation strategy considering SOC balance and income for battery energy storage in smoothing wind power fluctuations[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1714-1723.

[3] 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)：5294-5310.
CAI Minyi, ZHANG E, LIN Jing, et al. Review on balancing topology of lithium-ion battery pack[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5294-5310.

[4] 李亚伦，欧阳明高，赵争鸣. 电动汽车车能互动的充电机理、系统构型与推广路径[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6920-6939.
LI Yalun, OUYANG Minggao, ZHAO Zhengming. Charging mechanism, system configuration and promotion pathway of vehicle to grid for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6920-6939.

[5] 黄珍瑶，程诺，江岳文. 考虑 EV 调峰需求响应可靠性的 V2G 聚合商多时间尺度调度策略[J]. 高电压技术，2025，51(1)：401-411.
HUANG Zhenyao, CHENG Nuo, JIANG Yuewen. Multi-time-scale scheduling strategy of V2G aggregators considering EV peak regulating demand response reliability[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 401-411.

[6] 张文昕，赵志勇，于华龙，等. 适用于直流链式储能的电池簇荷电状态自均衡控制策略[J]. 电力系统自动化，2024，48(2)：159-166.
ZHANG Wenxin, ZHAO Zhiyong, YU Hualong, et al. Self-equalizing control strategy for state of charge of battery cluster in DC cascaded H-bridge converter-battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 159-166.

[7] 郭向伟，王晨，钱伟，等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J]. 电工技术学报，2024，39(13)：4204-4225.
GUO Xiangwei, WANG Chen, QIAN Wei, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225.

[8] 缪平，姚祯，LEMMON J，等. 电池储能技术研究进展及展望[J]. 储能科学与技术，2020，9(3)：670-678.
MIAO Ping, YAO Zhen, LEMMON J, et al. Current situations and prospects of energy storage batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 670-678.

[9] 徐俊，郭喆晨，谢延敏，等. 储能锂电池系统综合管理研究进展[J]. 西安交通大学学报，2024，58(10)：1-23.
XU Jun, GUO Zhechen, XIE Yanmin, et al. Review of research progress in integrated management for energy storage lithium battery systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(10): 1-23.

[10] JIA C Y, TIAN Y K, SHI Y H, et al. State of health prediction of lithium-ion batteries based on bidirectional gated recurrent unit and transformer[J]. Energy, 2023, 285: 129401.

[11] 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.
CHENG Jun, QU Yan, LI Yuan, et al. Charge and discharge equalization strategy for battery packs based on remaining capacity estimation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 122-129.

[12] 任大伟，侯金鸣，肖晋宇，等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2751-2759.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2751-2759.

[13] 李建林，李雅欣，黄碧斌，等. 退役动力电池一致性评估及均衡策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(12)：1-7.
LI Jianlin, LI Yaxin, HUANG Bibin, et al. Research on consistency evaluation and control strategy of a retired power battery[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 1-7.

[14] 郭向伟，吴齐，邢程，等. 串联电池组电感电容储能主动均衡方法[J]. 电机与控制学报，2023，27(5)：128-137.
GUO Xiangwei, WU Qi, XING Cheng, et al. Active balancing method with inductor-capacitor energy storage for series battery pack[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 128-137.

[15] LA P H, CHOI S J. Direct cell-to-cell equalizer for series battery string using switch-matrix single-capacitor equalizer and optimal pairing algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 8625-8639.

[16] SUN J, DAI D. An equalization topology based on multi-winding transformer and flyback converter for series-connected lithium-ion battery packs[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 125: 116963.

[17] CAO Y L, LI K, LU M. Balancing method based on flyback converter for series-connected cells[J]. IEEE Access, 2021, 9: 52393-52403.

[18] 郑征，王肖帅，李斌，等. 基于三绕组变压器的锂电池组自适应交错控制均衡方案[J]. 储能科学与技术，2022，11(4)：1131-1140.
ZHENG Zheng, WANG Xiaoshuai, LI Bin, et al. Adaptive interleaved control equalization for lithium-ion battery packs based on three-winding transformers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(4): 1131-1140.

[19] 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.
LIU Zhengyu, XIA Dengwei, YAO Liyang, et al. Research on active balancing scheme of lithium battery pack based on coupled winding[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2): 54-64.

[20] 颜宁，张骞，李相俊，等. 基于荷电状态一致性的电池组双层动态均衡方法[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2410-2423.
YAN Ning, ZHANG Qian, LI Xiangjun, et al. A two-layer dynamic

equalization method for battery modules based on state of charge[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2410-2423.

[21] 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)：5254-5265.
WANG Lujun, KE Jinyang, ZHAN Min, et al. Active fast equalization method for retired battery pack based on four switch bidirectional converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5254-5265.

[22] 吴文进，郭海婷，苏建徽，等. 基于自适应模糊 PID 算法的锂电池组双层均衡控制[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(2)：111-117.
WU Wenjin, GUO Haiting, SU Jianhui, et al. Dual-layer equalization control of lithium batteries based on an adaptive fuzzy PID algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 111-117.

[23] 李春生，王生春，宋驰，等. 基于多状态耦合的退役动力电池模组双阶段分选方法[J]. 储能科学与技术，2025，14(2)：822-830.
LI Chunsheng, WANG Shengchun, SONG Chi, et al. The two-stage sorting method for retired power battery modules based on multistate coupling[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(2): 822-830.

[24] 魏芃，蔡涛，朝泽云，等. 电池均衡系统的分布式协同一致性控制策略[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：908-920.
WEI Peng, CAI Tao, CHAO Zeyun, et al. Distributed cooperative consensus control strategy for battery equalization system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 908-920.

[25] WANG Y X, ZHONG H, LI J W, et al. Adaptive estimation-based hierarchical model predictive control methodology for battery active equalization topologies: Part I–balancing strategy[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103235.

[26] 王鹿军，单恩泽. 基于动态式双阈值的锂电池组主被动均衡策略[J]. 电机与控制学报，2022，26(1)：126-136.
WANG Lujun, SHAN Enze. Active passive equalization strategy for lithium battery pack based on dynamic dual threshold[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 126-136.



颜　宁
1988—，女，博士，副教授，博导
主要从事储能电池的均衡控制、综合能源系统优化调度的研究工作
E-mail: yanning@sut.edu.cn

YAN Ning
Ph.D.
Associate professor



李嘉鹏(通信作者)
2004—，男
主要从事电池均衡研究的工作
E-mail: LeeJiapeng@smail.sut.edu.cn

LI Jiapeng
Corresponding author

收稿日期　2025-05-30　在线出版日期　2025-09-22　编辑　陈　蔓

附录 A

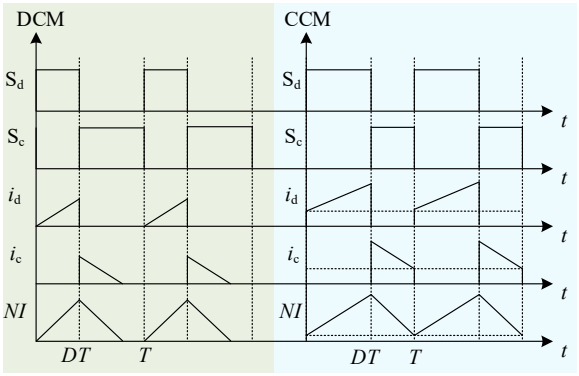


图 A1　两种电流工作模式的波形图

Fig.A1　Waveform diagram of two operating modes of current

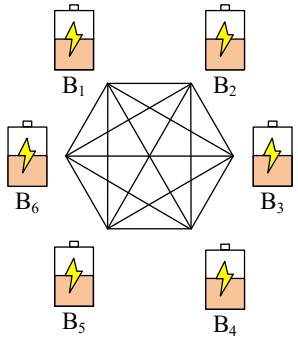


图 A2　经典能量流通路径图

Fig.A2　Diagram of classical energy flow path

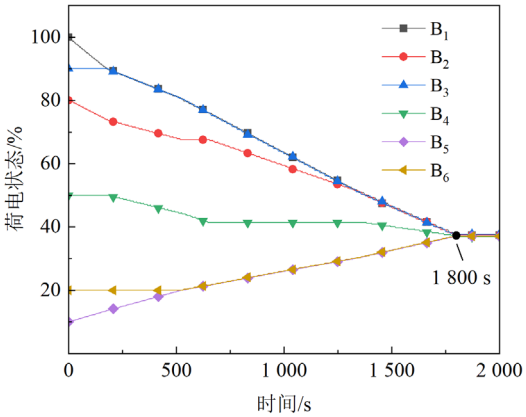


图 A3　传统方法静置均衡

Fig.A3　Conventional method static equalization

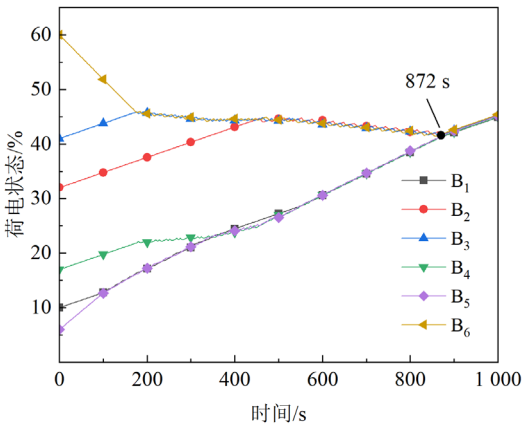


图 A4　传统方法充电均衡

Fig.A4　Conventional method charge equalization

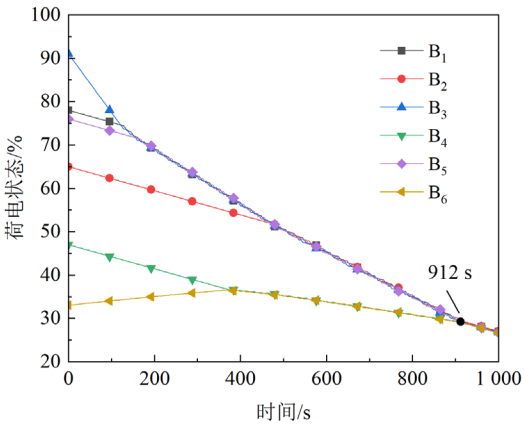


图 A5　传统方法放电均衡

Fig.A5　Conventional method discharge equalization

附录 B

表 B1　仿真参数设置

Table B1　Simulation parameter setting

参数	数值
频率 f/kHz	5
占空比 D_1/%	45
绕组电感 L/mH	2
充、放电电流 I/A	1.3
开关管导通压降 Us/V	0.4
均衡阈值 α/%	0.8
电池模组单体电池数	6
单体电池额定电压/V	3.7
单体电池额定容量/Ah	1.3

表 B2　静置状态各单体电池 SOC

Table B2　SOC for quiescent state

电池编号	初始 SOC/%	均衡结束 SOC/%	
		极值法	本文方法
1	100	37.37	43.02
2	80	37.44	42.63
3	90	37.58	42.43
4	50	36.96	42.65
5	10	37.09	42.31
6	20	37.08	42.64

表 B3　充电状态各单体电池 SOC

Table B3　SOC for charging state

电池编号	初始 SOC/%	均衡结束 SOC/%	
		极值法	本文方法
1	10	41.34	39.48
2	32	41.59	39.49
3	41	41.68	39.65
4	17	41.4	39.52
5	6	41.6	39.07
6	60	41.82	39.49

表 B4　放电状态各单体电池 SOC

Table B4　SOC for discharging state

电池编号	初始 SOC/%	均衡结束 SOC/%	
		极值法	本文方法
1	78	29.41	38.86
2	65	29.49	39.15
3	91	29.22	38.97
4	47	29.17	38.63
5	76	29.13	38.91
6	33	29.07	38.35

表 B5　3 工况电池初始荷电状态

Table B5　Initial SOC for three equalization modes

均衡工况	电池编号	SOC/%
静置均衡		75，27，67，65
		16，12，96，34
		59，22，77，25
		50，69，69，89
充电均衡	B_1，B_2，B_3，B_4	18，28，14 ，51
	B_5，B_6，B_7，B_8	12，10，15，26
	B_9，B_{10}，B_{11}，B_{12}	19，55，26，37
	B_{13}，B_{14}，B_{15}，B_{16}	33，59，42，29
放电均衡		100，49，93，95
		88，46，55，60
		81，48，83，46
		79，70，87，83