

DOI: 10.3901/JME.2022.24.145

锂离子电池系统均衡策略研究进展*

钱广俊¹ 韩雪冰² 卢兰光² 孙跃东¹ 郑岳久¹

(1. 上海理工大学机械工程学院 上海 200093;

2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 相比电池单体, 成组后电池系统的容量、寿命和安全性均会大幅度下降, 其原因在于内部参数和外部环境导致的不一致性问题。因此, 需要均衡管理系统保障电池的一致性, 其中均衡策略是关键之一。从均衡动机、均衡目标、均衡算法和均衡策略评价四方面, 对国内外电池均衡策略研究进展进行了综述。首先深入分析电池组一致性影响因素, 确定均衡动机。其次, 从均衡目标出发, 总结了电池组、电路和多目标融合三方面研究进展。再次, 根据不同的算法分类详细阐述均衡算法。之后, 对均衡策略的评价进行总结并提出一种新的评价方法。最后, 系统梳理了目前亟待解决的均衡技术关键问题, 对未来均衡策略的研究进行了展望。

关键词: 均衡策略; 均衡动机; 均衡目标; 均衡算法; 均衡策略评价

中图分类号: TM912

Advances in Lithium-ion Battery System Equalization Strategy Research

QIAN Guangjun¹ HAN Xuebing² LU Languang² SUN Yuedong¹ ZHENG Yuejiu¹

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Compared to battery cells, the capacity, life and safety of the battery system will be significantly reduced after forming a group, which is due to the inconsistency problem caused by internal parameters and external environment. Therefore, an equalization management system is needed to guarantee the consistency of the battery, of which the equalization strategy is one of the keys. The research progress of battery equalization strategy at home and abroad is reviewed from four aspects: equalization motivations, equalization objectives, equalization algorithms and equalization strategies evaluation. Firstly, the battery pack consistency influencing factors are analyzed in depth to determine the equalization motivations. Secondly, from the equalization objectives, three research advances in battery pack, circuit and multi-objective fusion are summarized. Again, the equalization algorithms are elaborated according to different algorithm classifications. After that, the evaluation of the equalization strategies are summarized and a new evaluation method is proposed. Finally, the key problems of the current equalization technology that need to be solved are systematically sorted out, and the next research on equalization strategies are prospected.

Key words: equalization strategies; equalization motivations; equalization objectives; equalization algorithms; evaluation of equalization strategies

0 前言

近年来, 为应对日益严苛的气候变化及环境问题, 各个国家相继开启碳中和行动, 逐步构建清洁

低碳、绿色环保的能源体系以替代传统化石能源^[1]。锂离子电池具有高能量密度、高循环寿命及低环境污染等优点被广泛应用于绿色能源相关领域^[2-3]。此外, 随着制造技术的日益完善和成本的不断降低, 锂离子电池已成为电动汽车储能系统最主流的选择^[4]。然而, 由于其正负极材料特性的限制, 电池单体的电压有限^[5], 通常都在 2.5~4.2 V, 无法满足电动汽车对能量和功率的需求^[6]。因此, 需要将成

* 国家自然科学基金资助项目(51877138)。20220422 收到初稿, 20220902 收到修改稿

百上千枚电池单体串联或并联成电池系统^[7]。但是,受目前锂离子电池制造工艺水平限制,电池单体在出厂时,其容量、内阻、自放电率等参数存在不一致性的问题^[8-9]。在实车使用过程中,由于温度、分流等不同,单体间不一致性还会被进一步放大,可能导致电池单体过充电和过放电^[10-11]。甚至可能引发电池组寿命急速下降^[12]。为了提高电池组一致性,增加电池组的使用容量,延长其循环寿命^[13],需要均衡管理系统(Equalization management system, EMS)对电池组进行均衡。

EMS 一般可由硬件均衡电路和软件均衡策略构成。然而,目前文献中尚无比较全面的均衡技术分类。本文以均衡电路和均衡策略这两类为基础,对电池组均衡技术分类进行全面总结。均衡电路依据电路中是否有能量耗散可分为能量耗散型和非能量耗散型(也称为能量转移型)^[14-19]。主动均衡也称为能量转移型均衡,通常由储能元件和其他激励电路构型构成^[20-23]。被动均衡为能量耗散型均衡,本质是通过控制开关的通断,使得某些单体放出额外的电量^[24]。被动均衡可分为三种类型:基于固定分流电阻、基于可控分流电阻和基于分流晶体管^[25]。非能量耗散型按照能量转移的形式可分为单体间、单体到模组、模组到单体和单体到模组到单体等^[26-28]。而按照电路中使用元件的类型又可分为基于电容器、基于电感器、基于变压器和基于转换器^[29-32]。

然而,相对于均衡电路较为系统的分类,EMS 在软件层面上的均衡策略分类研究较少。FENG 等^[33]认为均衡策略可分别从均衡变量、均衡目标和均衡算法三方面分类。YANG 等^[34]则认为可从均衡变量和均衡算法两方面分类。本文结合上述研究对均衡技术的分类进行总结,如图 1 所示。

目前,国内外学者已对均衡电路拓扑进行了深入的总结^[20, 31, 35-44],而在均衡策略方面总结很少。均衡电路拓扑固然影响很大,但高效可靠的均衡策略更为重要,直接影响了均衡的效果和性能。相反,基于特定构型开发可用的均衡策略显得更为实际。因此,本文从均衡动机、均衡目标、均衡算法和均衡策略评价四方面系统总结近 3 年电池系统均衡技术中所使用的均衡策略。首先深入分析电池组一致性影响因素,确定均衡动机。其次,从均衡目标出发,总结了电池组、电路和多目标融合三方面研究进展。再次,根据不同的算法分类详细阐述均衡算法。之后,对均衡策略的评价进行总结并提出一种新的评价方法。最后,系统梳理了目前亟待解决的均衡技术关键问题,对未来均衡策略的研究进行了

展望。

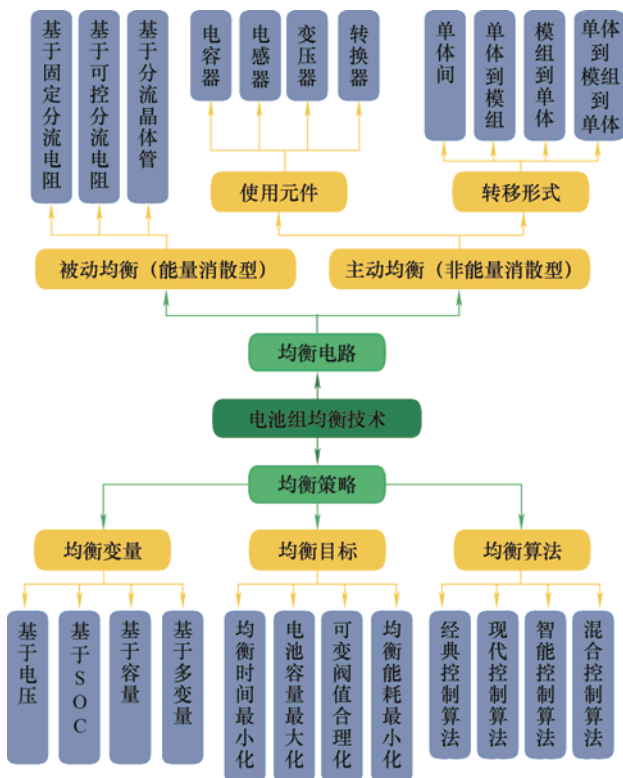
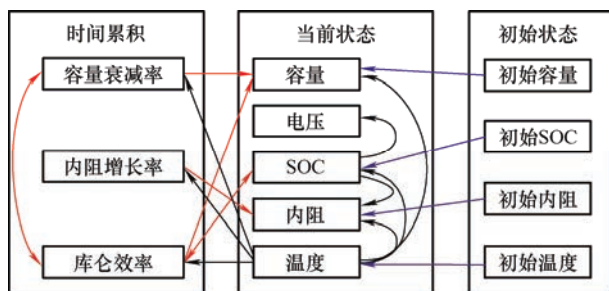


图 1 均衡技术分类总结

1 均衡动机

为消除电池单体间的一致性,必须探究影响电池组一致性的因素^[45]。电池单体间的不一致性通常体现在电压、荷电状态(Stage of charge, SOC)、容量、内阻和温度等因素上。但这些参数仅能表现单体当前状态的不一致性,并不能代表全部的情况^[46]。此外,单体的库仑效率、容量衰减和内阻老化等随时间累积体现在当前状态不一致性上。

因此,单体参数分为三类:初始状态量、当前状态量和时间累积量,它们之间相互影响的关系如图 2 所示^[47]。可以看到电池单体间的各个不一致性参数相互影响,形成一个复杂的关系网。其中,初始状态的容量、SOC、内阻和温度决定了当前电池组的状态。而当前状态中 SOC 一致性会影响电压和内阻。随着电池组使用次数的增加,电池单体表现出容量衰减、内阻增长和库仑效率的不一致性。并且容量衰减和库仑效率之间也会相互影响,反作用于容量和 SOC。同时,内阻增长也会影响单体当前状态。然而,温度不一致性因素是关键,几乎影响到电池的各种参数。这种相互影响的复杂网络,使电池组内在的不一致性机理变得难以解释。

图2 单体参数的影响关系^[47]

电池成组前需要对初始状态的一致性进行筛选，一致性好的电池组在短时间内不会对电池组当前状态产生较大影响。而电池组的不一致性通常用当前状态的不一致性来表达。其中，SOC 和容量影响能量输出，内阻影响功率输出。电压和温度由于其易于测量的特性在实际的一致性分析中得到了广泛的应用。实际上，时间累积对电池组长期的一致性影响比初始状态更大^[48]。但时间累积参数的筛选难度大，实际中进行筛选的可能性较小。

综上，电池组的一致性影响因素在实际应用中主要考虑三个方面：① 由初始容量和初始 SOC 的不一致性带来的成组后能量密度下降问题；② 由初始内阻的不一致性带来的功率密度下降问题；③ 由时间累积参数容量衰减率和库仑效率带来的电池组使用寿命短的问题。

2 均衡目标

2.1 电池组均衡目标

在实际应用中为了改善电池单体间的一致性，电池组均衡策略的目标通常包括基于电压一致、基于 SOC 一致和基于容量一致。

2.1.1 基于电压一致

电压作为电池的外部参数，易于测量。因此，基于电压一致的基本原理是通过比较各单体间的电压差和预设电压阈值来确定是否需要执行均衡，如图 3 所示。

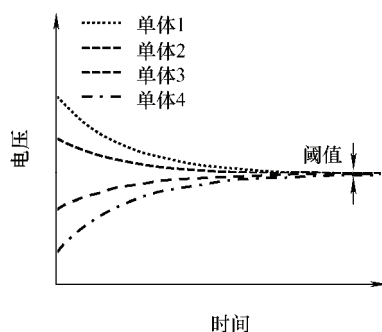


图3 基于电压一致的均衡目标原理示意图

SUN 等^[49]通过一对互补的脉宽调制信号交替控制 MOSFET，使能量可以直接从最高电压的电池单体输送到其他较低电压的电池单体。结果表明即使在不同的初始电压下，所提出的开关电容均衡器拓扑结构在均衡速度上有明显的改善。YANG 等^[50]提出一种基于解析模型的方法。通过设置电压均衡器的最佳参数配置，以减小电池单体间的电压不一致性，并仿真验证了该方法的可行性。虽然基于电压一致的均衡目标很简单，但其均衡电路构型有时却很复杂。UNO 等^[29]基于电压一致的均衡目标提出了一种使用双相移(Dual phase-shift, DPS)控制的电容隔离双有源桥(Capacitively isolated dual active bridge, CIDAB)转换器的模块化均衡系统。该系统实现了单体到单体均衡的同时，通过配置模块间的 CIDAB 转换器来均衡电压。此外，利用 DPS 控制，使单体和模组电压得到了充分的均衡，证明了均衡系统的性能。WANG 等^[51]研究了一种基于降压-升压转换器的主动均衡电路，通过控制电感器的状态，可以在相邻电池或几个相邻电池模组之间构建许多种降压-升压转换器。并且该电路具有多种均衡模式，路径灵活，不同均衡过程可以同时发生，缩短了均衡时间。WU 等^[52]提出了一种新型的电池组多模块协同均衡系统。该系统结合了主动均衡和被动均衡，拥有功率电阻器均衡模块的快速放电功能。试验结果表明该均衡器在不同的一致性情况下表现出良好的性能。此外，磷酸铁锂(LiFePO₄, LFP)电池由于其充放电曲线中存在平台段的情况，平台期的电压微小差距会对应较大的 SOC 差异。SU 等^[53]基于 LFP 电池采用电压补偿方法，对每个电池单体电压的数据进行精确估算。使用电池系统的最高和最低单体电压数据进行粗略估计，结果发现得到的数值不比真实数值大。

基于电压一致的均衡目标在电池组均衡策略中被广泛使用，具有以下优点：① 电压属于电池的外部参数，测量方便；② 相对于其他均衡目标，计算简单，数据来源可靠；③ 电压可以提供清晰的电池组充放电安全边界，避免过度充放电；④ 便于开发高能效和时效的电路拓扑，具有较强的扩展性。然而，其缺点包括：① 电压为电池外部参数，易受电池内部参数影响，如内阻；② 电池使用环境和所处状态也对电压有影响，如温度和老化；③ 对于磷酸铁锂电池而言，

其电压平台期跨度宽,微小的电压波动可能会造成较大 SOC 变化;④以电压一致的均衡电路拓扑有些结构复杂,成本高;⑤无法达到高电池组容量利用率。总之,将电压一致作为均衡目标非常容易,同时也容易受外部和内部因素影响,并不能实现最大化利用电池组容量。

2.1.2 基于 SOC 一致

基于 SOC 一致的均衡目标需要对电池 SOC 进行估计,并使用合适的电路拓扑确保每个单体的 SOC 差异在一定的范围内。为方便理解基于 SOC 一致的均衡目标原理,采用容量-电量散点图来说明,以放电均衡为例^[46]。如图 4a 所示,红色实线点表示未均衡的单体,其均衡原理是要找到单体最低的 SOC,之后将其他单体都均衡到相同的 SOC 处。绿色虚线点是均衡后单体的状态。图 4b 所示则为实时 SOC 一致的均衡目标原理。与静态 SOC 不同,电池组开始时各单体状态如绿色实线点所示。随着电池组放电的进行,单体将变为红色实线点状态。此时对实时 SOC 一致均衡而言,处于非均衡的状态,因此需要进行均衡,这会导致反复均衡的情况出现。

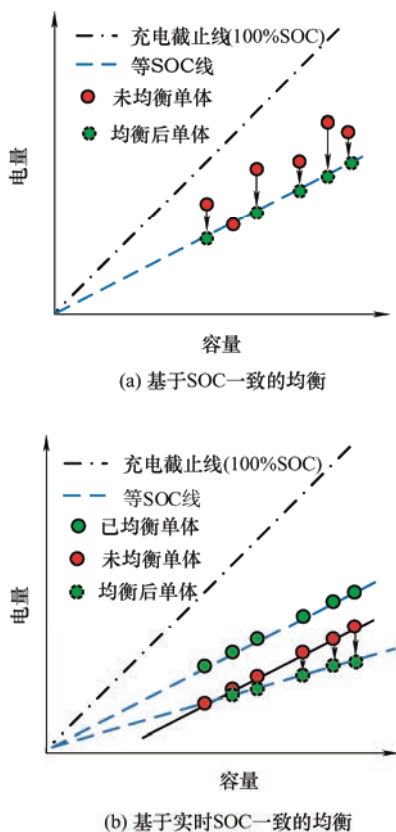


图 4 基于 SOC 一致的均衡目标原理示意图^[46]

开路电压(Open-circuit voltage, OCV)-SOC 关系是最常用的 SOC 估计方法。QI 等^[54]研究了一种低组件数集中式均衡系统,以实现串联电池组的均衡。同时,基于 OCV-SOC 关系来估计 SOC,通过试验验证表明所提出基于 SOC 一致的均衡系统能够高效和高精度地实现快速均衡。ZHANG 等^[25]提出了一种基于 SOC 均值的锂离子电池组充放电主动均衡方法。当电池组充电时,执行充电均衡策略,其中 SOC 高于电池组 SOC 均值的电池单体被均衡,以增加整个电池组的充电容量。当电池组放电或静止时,执行放电均衡策略,其中 SOC 低于电池组 SOC 均值的电池单体被均衡,以增加整个电池组的放电容量。试验结果表明,所提出的主动均衡方法可以减少电池单体间剩余电量的不一致性,提高锂离子电池组的充放电容量。DONG 等^[55]同样利用 OCV-SOC 关系提出了一种电池 SOC 观测器。并使用一种受均衡约束的 A-star 算法找到最短路径,对应最有效的 SOC 均衡。虽然使用 OCV-SOC 关系来估计 SOC 算法较为简单,但大部分研究内容集中在均衡电路拓扑上。CAO 等^[28]提出了一种多绕组输入和输出双向均衡拓扑。它可以实现任意单体对单体的均衡,具有路径灵活的优点。仿真试验结果表明提出的均衡方法具有更快的均衡速度和更高的均衡能量传输效率。QI 等^[56]提出了一种集成级联结构的隔离双向 DC-DC 变换器,用于集中式电荷均衡系统,并详细分析了变换器的理论推导和软开关实现的条件。对不同的集中式均衡器进行了全面的定量比较,验证了该均衡器的优越性。WAN 等^[57]以 LFP 电池为研究对象针对电压作为均衡目标的准确性有待提高的问题,选择电池的 SOC 作为均衡目标,设计了一种电感式主动均衡电路。仿真结果表明,通过设置均衡阈值,可提高均衡效率。然而,该文献中并未对 LFP 电池 OCV-SOC 曲线的长平台阶段导致 SOC 估计不准确的问题进行优化。除了 OCV-SOC 关系估计 SOC 的方法,一些研究人员对其他 SOC 估计方法进行了探究。JIAQIANG 等^[58]提出了基于安培-小时积分和开路电压的扩展卡尔曼滤波算法来估计 SOC。并通过试验验证 SOC 估计精度。此外,基于电池 SOC 不一致性规律,提出了电池均衡控制策略。最后,通过试验验证了该均衡策略的有效性。基于实时

SOC 一致的均衡目标方面也有研究人员给出了方法。SEE 等^[59]使用渐消卡尔曼滤波器对串联的 24 个单体进行 SOC 估计。使用双向反激变换器作为均衡器电路拓扑。结果表明,该算法适用于 EMS 中电池组的实时均衡。VAN 等^[60]提出了一种改进的两相邻单体 SOC 均衡电路。对 7 个串联的三星电池进行了试验测试。在 MATLAB 中编写了最佳 SOC 均衡控制和 SOC 估计算法,并将其嵌入 LabVIEW 中,以实时控制 SOC。测试结果表明,采用所提出的最优 SOC 均衡控制策略,电池 SOC 之间的差异收敛到期望范围。相比静态 SOC 一致,实时 SOC 一致需要反复均衡。其均衡效果更好,但计算量和复杂性也更高。

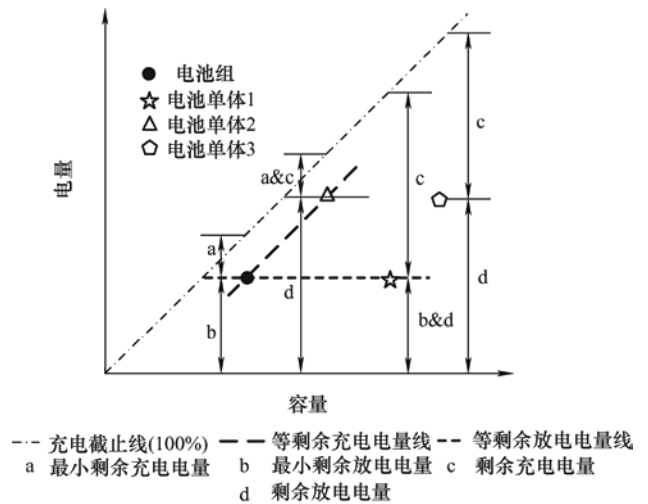
使用 OCV-SOC 关系来估计 SOC 并作为均衡目标有以下优点:① 计算相对其他 SOC 估计方法简单,不需要占用太多 EMS 计算资源;② 可以准确反应电池内部状态;③ 不会受到电压极化等因素影响,更加稳定。当然,也有以下缺点:① 由于电池制造过程中的不一致性,各个电池单体之间的 OCV-SOC 曲线并不完全相同;② OCV 具有滞后特性,即使单体具有相同的 OCV 也可能有不同剩余电量;③ 应用场景有限,仅适用于处于静置的单体;④ LFP 电池的 OCV-SOC 曲线中间部分有明显的平台段,导致 SOC 估计不准确;⑤ 不同状态电池 OCV 曲线也有差异,如老化电池。其他 SOC 估计方法也有其缺点:① 按时积分需要精确的初始 SOC;② 累积误差大;③ 卡尔曼滤波算法计算量大;④ 低 SOC 和高 SOC 区的近似误差会增大。

将 SOC 一致作为均衡目标整体具有以下优点:① 针对电池组中单体容量差异不大的情况,可以实现电池组容量充分利用,延长了电池组使用寿命;② 具有更强的鲁棒性。当然,也有以下缺点:① 复杂的 SOC 估计会增加计算量,难以在线应用;② 考虑其他因素影响情况下,如老化影响,准确估计 SOC 相对困难;③ 电路构型以主动均衡为主,复杂性和成本高。

2.1.3 基于容量一致

为了更好地理解电池组容量演化,继续使用容量-电量散点图来讨论。假设电池组分别由单体 1、2 和 3 组成,其容量和电量如图 5 所示。容量-电量散点图的横坐标为单体容量,纵坐标

为单体电量。其中,五角星实线点代表单体 1,三角形实线点代表单体 2,五边形实线点代表单体 3。c 和 d 分别表示各单体的剩余充电电量与剩余放电电量。a 跟 b 分别表示电池组中最小的剩余充电电量与最小的剩余放电电量。稀疏和密集的虚线则分别表示等剩余充电电量线与等剩余放电电量线。那么,两虚线的交点黑色实心点则表示整个电池组的容量与电量状态。



对于未完全放空的电池组,其放出的电量为最小的单体剩余可用电量。其充入电量为最小的单体可充电电量。因此,电池组容量为组内单体最小剩余电量与最小可充电电量之和,其计算表达式为^[46]。

$$C_{\text{Pack}} = \min(\text{SOC} \cdot C) + \min((1 - \text{SOC}) \cdot C) \quad (1)$$

式中, C_{Pack} 为电池组容量; SOC 为由电池组内全体单体 SOC 构成的向量; C 为由电池组内全体单体容量构成的向量; 运算符 $\min()$ 代表对向量内的元素求最小值; 运算符 \cdot 代表向量间元素的对应相乘。

充分理解电池组容量演化之后,图 6a 所示为基于容量一致的均衡目标原理。当单体处于绿色区域内时,单体都已是均衡后的状态。此时,最小单体容量与电池组容量相同。相比其他均衡目标,基于容量一致的均衡目标约束最宽。因此,其他的均衡目标可以视为是基于容量一致的特例。例如图 6a 所示的基于单点 SOC 的均衡算法等。而图 6b 所示基于剩余充电电量一致均衡也为基于容量一致的均衡目标的一个特例。

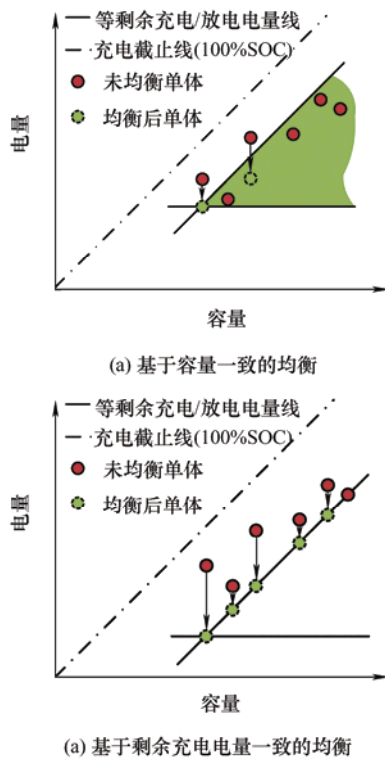


图6 基于容量一致的均衡目标原理示意图^[46]

基于容量一致的均衡目标又可分为基于剩余充电容量一致和基于剩余放电容量一致两种。其原理相似，关键是对容量的估计。HEIN等^[61]提出了一种基于容量的主动均衡方法。该算法的主要目标是预测每个电池的充电均衡容量。预测的容量在循环开始时被均衡，并且只有当电池的参数发生变化时，才执行进一步的均衡。仿真结果表明，所提出的均衡方法可以提高老化电池的利用率。上述研究对容量的估计很复杂，并且使用了主动均衡，电路构型成本高，很难在线应用。那么，在被动均衡方面，ZHENG等^[62]通过试验发现利用充电结束前的单体电压曲线可以在线实现对单体剩余充电容量的近似估计，进一步提出了基于剩余充电容量观测器的均衡算法。通过建立8节单体串联的电池组模型，仿真接近理想的到接近真实的电池组模型。结果表明基于剩余充电容量估计的均衡算法可以实现电池组的在线均衡，同时不产生过均衡的现象。进一步ZHENG等^[63]提出了基于单体充电电压的模糊逻辑均衡算法，该方法通过比较单体在充电初期和充电结束前的电压对电池组内各单体的容量和SOC进行判断。通过改进自适应模糊逻辑控制(Fuzzy logic control, FLC)均衡算法，解决了额定

均衡电流选择不当可能导致的过均衡或均衡能力不足的问题。仿真结果表明，改进的适应模糊逻辑均衡算法相比基于剩余充电电量估计算法的电池组容量更接近电池组耗散均衡下理论容量，且更为迅速地结束成组初期阶段，而同时也不会产生均衡能力不足或过均衡等问题，是一种可以应用于纯电动汽车电池组的在线均衡的低成本且有效的均衡算法。上述研究提供了基于容量一致的在线均衡方法，并且计算量不大，电路构型简单。但都是基于仿真试验开展的工作，无法直接应用在实际EMS上。接着，SONG等^[64]同样基于恒流充电电池电压曲线假设，使用了与ZHENG等相同的方法，试验分析了采样电压间隔的稳定性和均衡的收敛性。最后，仿真和试验结果均表明，该均衡策略不仅能最大限度地提高分组容量，而且能适应不同的一致性场景。重要的是，该均衡策略具有较高的精度且计算量较低，适用于电动汽车的在线均衡。虽然进行了试验验证，但距离实际应用还有待优化，比如老化之后充放电电压曲线发生变化及温度的影响。

基于容量一致的均衡目标具有以下优点：① 相比于其他均衡目标，其均衡约束条件宽泛；② 可以实现电池组容量利用最大化；③ 延长电池组使用寿命，减缓老化。同时，也具有以下缺点：① 在线SOC和容量估计很困难且需要稳定、精确的计算资源，这对硬件要求很高；② 对主动均衡而言，均衡电流需要额外计算。

2.2 电路均衡目标

均衡电路是由不同的拓扑结构组成，其电路元件和连接方式对均衡电路的性能都有影响。理想的均衡电路构型应具备以下特点：均衡时间少、均衡能耗低、均衡路径合理、算法复杂度低、散热性能好和可靠性强等。因此，电路均衡策略的目标应考虑上述因素。对被动均衡而言，因其特殊的耗散型均衡模式，均衡时间最小化是基本的电路均衡目标。而主动均衡则是均衡时间最小化和能耗最小化为基本的电路均衡目标。其他的均衡目标：算法复杂度低、散热性能好和可靠性强等更多关系到实际的应用。在目前大多数研究中，面向实际应用开发的均衡电路拓扑很少，本文从

均衡时间最小化和均衡能耗最小化两方面进行电路均衡目标的总结与分析。

2.2.1 均衡时间最小化

均衡时间指的是均衡过程的持续时间。它跟均衡结束阈值选择、电池组容量、电路构型和均衡算法等等都有关。在均衡算法方面, HAN 等^[65]通过电池单体和模组重新配置来最小化电池充电均衡时间。所提出的基于模组的完全重构算法可以实现与 GA 相似的优化。此外, 与穷举搜索和 GA 算法相比, 该算法所需的计算时间更少。通过试验证明了所提出的算法最优性和计算效率。WU 等^[66]采用了一种基于 Buck-Boost 模块的分层均衡电路拓扑结构。试验证明, 所提出的均衡策略在均衡速度和均衡时间方面具有明显的优势, 能够在单体和模组之间同时实现均衡。OUYANG 等^[67]提出一种分层均衡控制方法。所设计的分层结构显著降低了计算负担。仿真结果表明, 与分散均衡控制相比, 均衡时间可减少 29.8%。在电路构型方面, LEE 等^[68]提出了一种新的反激开关模式来改进均衡操作的方法。通过减少特定电池条件下的能量传输路径来提高电池均衡速度。DING 等^[69]基于传统 Buck-Boost 电路, 提出了一种新型的非耗散两级均衡电路拓扑结构, 以实现高效率、低成本的串联锂离子电池组均衡。该拓扑结构在不增加额外设备的情况下实现了锂离子电池组的高效均衡。仿真和试验结果表明, 所提出的拓扑结构均衡速度很快。YANG 等^[70]研究了一种分层双向主动均衡拓扑。试验结果表明, 所提出的均衡方法可以减小退役电池之间的 SOC 差异, 有效地改善退役电池组的不一致性, 均衡速度更快。LU 等^[71]提出了一种用于集中式电荷均衡系统的准谐振零电压开关隔离双向 DC-DC 变换器。与集中式电荷均衡系统中使用的现有变换器相比, 该变换器具有更少的元件。仿真结果验证了该变换器的有效性, 并表明该均衡器在均衡速度和效率方面取得了良好的性能。

以均衡时间作为均衡目标, 其优点包括: ① 时间易于测量; ② 对被动均衡而言, 缩短均衡时间意味着有更少的能耗。具有以下缺点: ① 受多个因素影响; ② 对主动均衡而言, 缩短均衡时间意味着有

更高的能耗。

2.2.2 均衡能耗最小化

以均衡能耗最小化为电路均衡目标可以降低均衡过程中能量消耗。被动均衡由于其能量耗散的特殊形式, 其能耗最大。然而, LA 等^[72]提出了一种用于并联电池配置的动态电阻均衡器, 并且发现一种使功率损耗和均衡时间最小化的优化设计方法。试验结果表明, 该方法比固定电阻均衡器损耗小。当综合考虑总损耗和均衡性能时, 随着串联连接数的增加, 该方法的优点更加突出。在主动均衡电路构型方面, HSIEH 等^[73]提出了一种新颖的串联电池充电均衡电路。该电路由中间谐振储能器和选择开关组成。通过正确激活相关的选择开关, 多个相邻电池可以作为任何一侧的电荷转移方。此外, 通过谐振槽, 可以实现零电流开关, 从而显著降低传输损耗。WANG 等^[74]提出了一种新型单体均衡电路。其可以在经典的 Buck-Boost 模式和具有灵活控制的谐振开关电容模式之间切换, 以满足不同场景下的均衡要求。试验结果表明, 均衡速度多样, 能量损失低。在均衡算法方面, LI 等^[75]提出了一种基于集群交换的功率分配策略。目标函数包括两个方面: 最小化电池能量损失和最大化 SOC 一致性。通过仿真和试验表明功率分配策略可以减少电池能量损失, 防止过充和过放电, 延长电池寿命。

使用均衡能耗最小化作为电路均衡目标具有以下优点: 提高能量利用率; 其缺点包括: ① 有些均衡能耗数据很难获得; ② 跟电池组容量大小有关。

2.3 多目标融合

显然, 单个均衡目标都有不可避免的问题。因此, 基于多目标融合的均衡策略应运而生。通过充分利用每个均衡目标的优点, 得到最佳均衡效果^[76]。其中, 基于 SOC 和电压融合有较多的研究。WANG 等^[77]设计了一种改进的 Buck-Boost 均衡电路。将电压和 SOC 作为均衡目标, 采用二阶 RC 等效电路模型和反向传播神经网络对锂离子电池的 SOC 进行估计。并且运用 FLC 动态调整均衡电流, 缩短均衡时间, 提高效率。仿真结果表明, 与传统的 Buck-Boost 均衡电路和改

进的 Buck-Boost 均衡电路相比, 后者的均衡时间缩短了 34%。与均值差分算法相比, 在静态和充放电条件下, FLC 的均衡时间缩短了 49%, 能量效率提高了 4.88%。此外, 所提出的均衡方案将最大 SOC 偏差降低到 0.39%, 有效地减少了电池的不一致性。整个 SOC 估计算法和电路构型设计使得均衡系统复杂度很高, 并且计算量很大, 实用性不强。LIAO 等^[78]提出了电池均衡系统的网络物理模型, 对其中物理层对电路元件进行建模。通过人工势场建立虚拟力函数, 将每个电池的电压和 SOC 均衡到阈值。通过反馈控制, 合理分配电池的充电电流, 实现电池间的快速均衡。试验结果验证了该方法的有效性。WU 等^[79]利用电池组的电压和 SOC 差, 实现从电压均衡控制方案到 SOC 均衡控制方案的过渡。试验表明, 两个电池的 SOC 差值估计误差分别为 0.24%、5.3%、-5% 和 0.8%, 证明了电压和 SOC 均衡控制方案的优良性能。上述研究提供相对简单的电路构型同样实现了基于电压和 SOC 融合的均衡目标。在容量和 SOC 融合方面, ZHANG 等^[80]提出了一种基于储能元件的主动均衡方法。将储能元件添加到多个电池组中。根据电池组中串联电池的容量和 SOC, 其中一个电池在一定时间段内与储能元件并联。一方面, 能量在储能元件和均衡电池之间传输。另一方面, 在充电或放电过程中, 储能元件充当电源, 从而降低均衡电池的电流。通过调整储能元件和串联电池并联的时间长度, 可以达到电池均衡的目的。与其他主动均衡方法相比, 该方法采用储能元件作为均衡电路的主要元件。它不仅具有均衡电路简单、均衡电流大的优点, 而且具有较高的电池组能量密度。虽然简化了电路, 但是增加了额外的元件, 均衡效率也未做出说明。并且同时估计 SOC 和容量, 计算量很大, 实际在线应用很困难。

不同的均衡电路可能会导致均衡过程中传输的能量不同。能量传输的越多, 均衡过程消耗的能量和时间就越多。因此, 不能只是优化均衡时间, 关键是要考虑均衡过程中的能耗。

ZHANG 等^[81]从均衡过程能耗最小化的角度出发引入两步均衡的方法。该方法可以简化均衡系统的模块化设计, 在最大化均衡电流的同时保证快速充电系统的安全性能。CAO 等^[30]设计了一种双向反激变压均衡器。该均衡器由脉冲宽度调制控制器控制, 以输出指定的均衡电流。为了缩短均衡时间, 降低均衡过程中的能耗, 提出了一种基于变步长广义预测控制的均衡策略。试验结果表明, 均衡时间和能耗分别降低了 8.3% 和 16.5%。CHEN 等^[82]提出了一种基于交换网络的均衡能量管理策略。试验结果表明, 所提出的策略能够在满足车辆正常运行功率需求的同时, 改善串联锂电池组的不一致性。它可以提高系统的安全性和耐久性, 减少均衡时间。此外, 它具有良好的扩展性。LI 等^[83]提出了一种用于串联锂离子电池/超级电容器的模块化非隔离双开关单体均衡器。该均衡器由一个非隔离的前端 DC-DC 转换器和一个全波电压倍增电路组成。与使用半波电压倍增器的传统非隔离均衡器相比, 它具有更快的均衡速度和更低的均衡损耗。多均衡目标虽然能使整个均衡系统性能更加优越, 但其控制优化算法和电路构型相对复杂。更多的需要考虑多均衡目标之间的权衡问题。

多目标融合具有以下优点: ① 可以弥补单个均衡目标的缺点; ② 提供均衡速度和改善均衡效果。其缺点包括: ① 需要进行 SOC 或容量估计, 计算量大的问题仍然存在; ② 由于需要控制更多均衡目标, 使得均衡电路更加复杂。

2.4 小结

本节首先介绍了电池组均衡目标, 从电池组一致性影响因素切入, 引出电池组均衡目标, 包括: 基于电压一致、基于 SOC 一致和基于容量一致。其次, 在电路拓扑结构方面阐明电路均衡目标, 主要从均衡时间最小化和均衡能耗最小化两方面展开。之后, 对多目标融合做出详细的分析。最后, 对每种均衡目标的原理、优点和缺点进行了全面的总结, 如表 1 所示。

表 1 均衡目标的原理、优点和缺点

均衡目标	原理	优点	缺点
基于电压一致		1. 简单, 测量方便 2. 数据来源可靠 3. 充放电边界清晰 4. 扩展性强	1. 易受电池内部参数影响 2. 温度和老化对其有影响 3. LFP 电池电压有平台 4. 有些均衡电路构型复杂, 成本高 5. 低容量利用率
基于 SOC 一致		OCV-SOC 估计 1. 占用计算资源少 2. 准确反应电池内部状态 3. 更加稳定 安时法 SOC 估计 1. 需要精确初始 SOC 卡尔曼滤波 SOC 估计 1. 计算量大 整体 1. 电池组容量增大 2. 鲁棒性强	OCV-SOC 1. 一致性影响曲线形状 2. 滞后特性 3. 静置的单体 4. 老化影响 5. LFP 电池电压平台 安时法 SOC 估计 1. 累积误差大 卡尔曼滤波 SOC 估计 1. 高和低 SOC 区间误差大 整体 1. 计算量大且复杂 2. 老化影响 3. 主动均衡电路构型复杂
基于容量一致		1. 约束条件宽泛 2. 电池组容量最大化利用 3. 延长电池组使用寿命, 减缓老化	1. 需要稳定、精确的计算资源 2. 主动均衡的均衡电流需要额外计算
均衡时间最小化	减少均衡过程的持续时间	1. 时间易于测量 2. 对被动均衡而言, 缩短均衡时间意味着有更高的效率	1. 受多个因素影响 2. 对主动均衡而言, 缩短均衡时间意味着有更高的能耗
均衡能耗最小化	降低元件传输过程能量损耗	1. 提高能量利用率	1. 有些均衡能耗数据很难获得 2. 跟电池组容量大小有关
多目标融合	多个均衡目标同时控制	1. 弥补单个均衡目标的缺点 2. 改善均衡速度和均衡效果	1. 计算量大且复杂 2. 电路更加复杂、成本高

3 均衡算法

基于不同的均衡目标选择合适的均衡算法, 可以避免电池过度均衡和重复均衡。现有均衡算法可大致分为经典控制算法、现代控制算法、智能控制算法和混合控制算法等。

3.1 经典控制算法

经典算法通常包括经典代数值(极值、均值等)和比例积分微分(Proportion integration differentiation, PID)等。

经典代数值算法由于计算灵活、适用性强等优点, 近几十年来在电动汽车 BMS 控制算法中得到了广泛的应用。WU 等^[52]研究了一种以最佳均衡时间为目标的均衡算法。试验结果表明, 所提出的控制策略和优化均衡算法在不同的一致性情况下表现出良好的性能。DONG 等^[55]基于 SOC 观测器提出了一种受均衡约束的 A-star 算法。试验结果表明, 该观测器的稳态误差小于 2%。与均值法相比, A-star 算法可使均衡过程中的均衡时间和能量损失分别减少 9.59% 和 19.5%。然而, 均衡效率和均衡时间可能会受到所选代数值的影 响, 应根据具体情况慎重

考虑。

PID 控制由于其结构简单、闭环稳定、可靠、调节方便等优点,被广泛应用于工业控制领域。LI 等^[84]提出了一种改进的基于 SOC 的多智能体系统下垂控制,以实现多个储能电池系统(Battery energy storage system, BESS)单体的 SOC 均衡。加入一个使用 SOC 均值的 PI 调整项,以调节储能电池系统的充放电功率。建立了包含所有 BESS 单体的完整小信号状态空间模型,对其进行了分析,以选择合适的控制参数。通过不同案例的仿真验证了该策略的有效性。然而, PID 控制器设计需要选择合适的比例、积分和微分系数。参数选择好之后就固定了,当扰动较小时,稳定性较好。一旦发生突变,系统就无法快速稳定。

3.2 现代控制算法

现代控制算法包括最优控制(Optimal control, OC)、模型预测控制(Model predictive control, MPC)等。

OC 算法是在给定条件下寻找受控系统的控制规律,根据目标函数寻找指定的性能指标的最优解。其优点是适用于复杂均衡电路。ROY 等^[85]提出了一个用于主动均衡的最优调度框架。该框架采用了由两个连续阶段组成的混合优化技术。在第一阶段,解决了一个混合整数线性规划问题,以确定实现电荷均衡所需的时间最优电荷转移集。在第二阶段,基于获得的电荷转移构造一个冲突图,并对其应用最小顶点着色算法来合成最小长度调度。结果表明,所提出的最优调度框架可以将电荷均衡时间减少 50%以上。YANG 等^[70]提出了基于“划分”思想和路由优化的底层均衡算法。试验表明,所提出的均衡方法可以减小退役电池之间的 SOC 差异。WEI 等^[86]发现了一种开关阵列直流均衡电路。并考虑了电池老化影响。通过在每次迭代中更新开关控制矩阵来优化能量传输路径。因此,它可以避免电池重复充电和放电,也可以减少快速均衡过程中的能量损失。但是,OC 算法通常用于非线性系统的近似求解,系统很复杂时其模型建立很困难。

MPC 是一种基于对受控对象进行预测的控制方法。根据测量信息在每个采样时间在线解决有限时域中的开环优化问题。并将获得的控制序列的第一个元素应用于受控对象,并在下一个采样时刻用新的测量值重复该过程。能够进行多参数控制的灵活技术,简单、高效且可扩展性强。PIROOZ 等^[87]使用 MPC 算法处理直流侧电压均衡,并在单个控制块中进行开关电压损耗建模。试验和仿真结果验证了该方法的可行性。但是, MPC 需要根据已知的

运行条件进行预测,而不同 EMS 之间的差异很大,会导致建模的工作非常复杂。

3.3 智能控制算法

智能控制算法有很多种,这里只列出了其中的几种,包括蚁群(Ant colony, AC)算法、遗传算法(Genetic algorithm, GA)、粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法和 FLC 算法。

AC 算法是一种用来寻找优化路径的概率型算法。采用正反馈机制,使得搜索过程不断收敛,最终逼近最优解。CHEN 等^[88]提出了一种基于 AC 算法的串联电池路径规划策略。采用图形模型来表示不同电池单体之间的均衡路径,分别基于最佳效率和最佳速度构建两个优化模型。利用 AC 算法对这两个模型进行求解。以 13 串联电池均衡系统试验验证了该路径规划策略的有效性。虽然 AC 算法在很多领域都有广泛应用,但是参数选择更多是依赖经验和试错,不恰当的初始参数会减弱算法的寻优能力。

GA 属于进化算法的一种,它通过模仿自然界的選擇与遗传的机理来寻找最优解。具有高度可扩展性与鲁棒性,更合适求解复杂的优化问题。SUN 等^[89]提出了一种基于聚类分析和 GA 的均衡策略。引入聚类分析来识别待均衡的目标单体。为了提高均衡过程的速度,采用 GA 算法对分类结果进行优化。在实际电池组试验中,均衡后电池组容量提高了 16.84%,均衡时间缩短了 23.8%。李军等^[90]采用 K 最近邻 GA 实现电池组的均衡控制,与均值均衡策略进行对比。在 MATLAB/Simulink 中完成自均衡、充电和放电 3 种均衡工况的仿真试验。结果表明,3 种工况下的均衡速度分别提高 26.70%、22.70%、24.80%。减少开关动作次数降低了电池组的能量损耗,能量转化率提高了 5.06%。然而,遗传算法也存在收敛速度慢、局部搜索能力差和控制变量多等问题。

PSO 算法同 GA 类似,是一种基于迭代的优化算法。其优势在于简单,需调整的参数少。HOQUE 等^[91]提出了一种锂离子基于 PSO 算法的电池充放电控制器。利用 PSO 算法对 PI 控制器参数进行优化。优化结果以最小的误差指标生成 PI 控制器参数的理想值,从而调节反激变换器 MOSFET 开关驱动器的脉宽调制,并提升电池充电性能以实现充电均衡。但是, PSO 算法的局部寻优能力较差。FLC 算法可以分为四个部分:模糊化、去模糊化、模糊规则库和推理引擎^[63]。规则库用于收集电池均衡的知识和经验。一些研究人员已经将 FLC 应用于均衡电流。WU 等^[92]根据开路电压-充电状态曲线的特点,

采用分段均衡法，以电压和 SOC 为均衡变量，设计了 FLC 算法。动态调整均衡电流，减少均衡时间和能量损失。此外，与均值差分算法相比，FLC 算法在静态和充放电条件下的时间效率提高了 30% 以上，能量效率提高了 11% 左右，证明了均衡方案的可行性。此外，FLC 算法具有鲁棒性强、实时性好、不需要精确的数学模型、电流可动态调整、容错性好等优点，可大大提高均衡效率。然而，由于模糊规则的制定依赖于均衡策略的知识和经验，可能导致输出振荡，精度下降等问题。不同类型锂离子电池的 FLC 设计规则不同。因此，应用程序的灵活性和可移植性较差。

3.4 混合控制算法

不同均衡算法有不同的优缺点。将不同算法运用到均衡过程的不同阶段，便可实现多目标控制。因此，BARRERAS 等^[15]提出了一种基于多智能体

共识算法的均衡系统多目标分布式控制算法。该算法卓越的有效性、可扩展性、灵活性、易于实现和调整。除了分布式体系结构之外，它与其他算法相比具有关键优势。① 与基 MPC 模型算法相比，不需要预测未来变量，也不需要系统模型；② 与机器学习算法相比，不需要任何数据进行训练和验证，并且对内存和计算的要求极低；③ 与 FLC 算法相比，提供了一种系统的实现方法。研究结果表明，该算法可以提高电池的性能。然而，该算法的稳定性有待实际验证，并且算法结构复杂，集成困难。

3.5 小结

本节列出了常用的均衡算法，分为 4 类：经典控制算法、现代控制算法、智能控制算法和混合控制算法。并对各种算法分类展开，分析了其优缺点，如表 2 所示。

表 2 均衡算法的原理和优缺点

均衡算法	原理	优点	缺点
经典代数值			
经典控制算法	使用经典算术运算的结果，例如极值、均值等作为均衡标准	1.计算灵活 2.适用性强	1.均衡时间受影响 2.均衡效率受影响
	比例系数、积分系数和微分系数	PID	
		1.结构简单 2.稳定可靠 3.调节方便	1.需要选取合适的参数 2.突变之后无法快速稳定
现代控制算法	在给条件下寻找受控系统的控制规律，根据目标函数寻找指定的性能指标的最优解	OC	
	根据测量信息在每个采样时间在线解决有限时域中的开环优化问题	1.适用于复杂系统 2.指定性能最优解	1.近似求解 2.复杂系统建模困难
		MPC	
		1.控制多参数 2.简单高效 3.可拓展性强	1.运行条件要已知 2.有时建模复杂
	一种用来寻找优化路径的概率型算法	AC	
智能控制算法	属于进化算法的一种,它通过模仿自然界的 选择与遗传的机理来寻找最优解	1.应用广泛 2.正反馈逼近最优解	1.经验选择参数
		GA	
		1.复杂优化问题求解 2.高度可拓展性 3.鲁棒性强	1.收敛速度慢 2.局部搜索能力差 3.控制变量多
	基于迭代的优化算法	PSO	
		1.简单、调整的参数少	1.局部寻优能力较差
	混合控制算法	FLC	
1.鲁棒性强 2.实时性好 3.容错性好		1.规则定制依赖经验 2.灵活性差 3.可移植性差	
分布式控制			
基于多智能体共识算法的均衡系统多目标 分布式控制		1.扩展性和灵活性好 2.易于实现和调整 3.不需要系统模型	1.稳定性有待验证 2.算法结构复杂 3.集成困难

4 均衡策略评价

使用合适的均衡算法最终目的是保证均衡策略能快速、稳定和高效的进行,并且延长电池组寿命。如何评价各个均衡策略的效果和性能是个很重要的问题。IMTIAZ 等^[93]提出了一种用于插电式混合动力汽车电压均衡器电路。这种拓扑具有更少的元件,便于应用。并且比较了 10 种均衡拓扑结构,分别从电路元件数量、成本、效率、均衡速度、均衡路径、控制算法复杂性和实际应用性方面对每种均衡拓扑进行评价。然而,从实际应用角度而言,电路拓扑的成本更为重要。为此,LIU 等^[94]提出了一种基于 Buck-Boost 和开关电容转换器的集成均衡器。在不增加任何 MOSFET 和驱动器实现任意单体到单体的均衡模式。在电路元件数量、尺寸、成本、效率、构型、均衡电流和速度方面将 7 种主动均衡拓扑进行对比评价。从而验证所提出的均衡拓扑优越性。虽然此项研究考虑了电路尺寸及成本,但并没有提及重要的算法复杂性和可靠性。SHANG 等^[95]提出了两种基于矩阵 LC 变换器和半桥 LC 变换器的直接多单体到多单体均衡拓扑,实现了从连续多个单体能量转移,显著提高了均衡速度和效率。并且从电路元件数量、尺寸、成本、效率、均衡速度、均衡路径、控制算法复杂性和可靠性方面评价 11 个均衡电路拓扑。此外,温度变化对整个 EMS

硬件电路也有很大影响,必须引起关注^[14,47]。DUR AISAMY 等^[14]认为在电池组达到均衡时,主动均衡系统中电池温度低于 1 ℃,而在被动均衡系统中约为 3 ℃。被动均衡系统简单,实施成本低,但热管理系统投资高。虽然主动均衡系统更复杂、更昂贵,但可以减少热管理问题,同时提供更高的能效。

目前大多数文献都在各种指标中进行定性分析,定量的评价研究很少。WANG 等^[96]提出一种用于电池组均衡模型的定量评价体系。以均衡结构成本、均衡时间、可用 SOC 以及平均热功率作为评价指标,以均衡结构和均衡策略所组成的均衡模型作为评价对象。通过计算以及建模仿真得到评价指标的具体数值,对数值进行归一化处理,使用雷达图对比分析不同模型的优缺点,计算综合性能值对比分析不同模型的综合表现。该定量评价体系可快速、有效地对多种电池组均衡模型进行多维度及综合性能的评价。但在实际应用中,应更多考虑控制算法复杂性和可靠性等方面。

因此,本文提出一种定性和定量结合的均衡策略评价方法。从而更加综合的去评价均衡策略的效果和性能。其中,定性评价指标包括:均衡路径、控制算法复杂性、均衡能耗、实用性和拓展性。定量指标包括:均衡电流、均衡时间、成本、温度和电池组容量利用率。具体评价指标见表 3。

表 3 定性和定量结合的均衡策略评价方法

评价方法	评价指标	说明	评价等级(单位)
定性评价	均衡路径	能量转移路径的简洁性评价	复杂、适中、简单
	复杂性	均衡算法复杂性评价	复杂、适中、简单
	实用性	均衡算法实际应用性评价	好、中、差
	拓展性	均衡算法的内存占用评价	大、中、小
	均衡能耗	均衡能耗大小评价	大、中、小
定量评价	均衡电流	均衡电流大小评价	单位: A
	均衡时间	均衡持续时间大小评价	单位: s
	成本	EMS 硬件成本大小评价	单位: \$
	温度	EMS 整体温度大小评价	单位: ℃
	电池组容量利用率	电池组容量与最小电池单体容量比值评价	单位: %

5 挑战与展望

目前,均衡策略的研究已经取得了一定的进展。然而,在电池组均衡目标的提取、电路均衡目标的

制定、均衡算法的选择和均衡策略的综合评价方面仍然存在一些问题。本部分从均衡目标和均衡算法两个方面介绍当前面临的挑战和未来展望。

5.1 均衡目标

基于电压一致的均衡目标,由于测量环境和精

度的影响, 很难保证其测量的准确性和可靠性。同时, LFP 电池特殊的电压平台特性, 更需要高精度电压采样数据。因此, 开发高精度、高可靠性和低成本的先进传感技术是当前的研究重点和挑战。此外, 电压并不能准确表示电池单体当前的剩余容量, 电池极化特性也可能导致基于电压一致的均衡出现误均衡问题。同时, 基于电压一致的均衡电路拓扑研究众多, 复杂的构型很难应用于实际。基于特定构型的算法研究很少, 迫切需要开发面向 EMS 实际使用场景的算法优化, 重点解决稳定性、扩展性和数据存储等问题。基于 SOC 和容量一致的均衡目标, 容易受到电流、温度和老化等因素影响。其精度和稳定性很难满足实际 EMS 应用的要求。此外, 大量的电池单体串联增加了 SOC 和容量在线估计的复杂性。因此, 需要寻找高精度而低计算复杂度的均衡算法。目前的研究都集中在电池单体当前状态参数的不一致性, 如电压、SOC 和容量。其实, 时间累积对电池组一致性影响更大。因此, 有必要建立热-电-老化多维耦合和多状态联合参数估计模型, 以解决电池全生命周期状态估计的准确性和稳定性问题^[97]。此外, 分析电池组在不同外应力、内阻、SOC 和 SOH 下的不一致特性, 形成更加综合的电池组不一致性评估体系, 都是未来研究的方向。

然而, 单个指标作为均衡目标存在诸多问题, 如表 1 总结。此外, 多个均衡目标并不能同时满足。但均衡系统应用场景复杂多样, 如何合理均衡各目标指标是一项挑战。因此, 需要设置合理的约束和控制目标, 同时考虑到均衡系统在全生命周期内的输入和输出, 开发多约束均衡策略。

5.2 均衡算法

经典控制算法和现代控制算法是基于精确的系统建模, 如何建立准确表达电池非线性系统特性且计算复杂度低的模型存在巨大挑战。此外, 也存在噪声干扰和采样误差等因素造成的误均衡问题。智能控制算法需要大量有效的数据, 如何建立标准电池数据库也是一个挑战。此外, 智能控制算法往往复杂度高, 在 EMS 算力和内存有限的情况下, 难以在线应用。同时, 如何根据实际应用场景和硬件成本选择合适的控制算法更是难点。考虑多算法之间优势互补, 开发合理的混合均衡算法将是一个研究方向。然而, 随着通信技术的进步和互联自动化车辆技术的发展, 基于大数据与人工智能技术的发展, 新的智能算法有望成为未来的研究课题。

6 结论

本文主要回顾了近 3 年电池组均衡策略的最新文献。在均衡电路拓扑和均衡策略两方面对均衡技术的分类进行总结。并从均衡动机、均衡目标、均衡算法和均衡策略的评价四方面介绍了均衡策略。

通过对电池组一致性影响因素的分析发现电池组初始状态的不一致性和时间累积都会对电池组当前状态产生影响。因此, 改善电池组参数的一致性就是均衡策略的动机。均衡目标可分为电池组均衡目标和电路均衡目标。电池组均衡目标包括电压一致、SOC 一致和容量一致。基于电压一致的电池组均衡目标具有获取方便、数据来源可靠、计算复杂度低等优点。但其也有易受电池内部和外部参数影响和低容量利用率等缺点。而基于 SOC 和容量一致的均衡目标容易受到外部环境和老化的影响, 很难保证算法的准确性、稳定性和计算复杂性。电路均衡目标包括均衡时间最小化和能耗最小化。它们都具有提高均衡策略的性能的优点。然而, 单个均衡目标无法满足均衡系统综合性能要求, 需要考虑多目标融合的均衡策略。它必须具有单个均衡目标的缺点, 同时提供更加良好的均衡性能。

均衡算法中经典控制算法和现代控制算法具有成熟度高、模型参考多、计算复杂度适中等优点。而智能控制算法适用于复杂问题求解, 鲁棒性更好。

均衡策略的评价在目前的研究中, 存在评价指标不全面的情况。无法综合的评价均衡策略的效果和性能。因此, 提出一种定性和定量结合的方法来分别评价均衡策略的效果和性能。然而, 如何权衡多场景不同电池系统和均衡策略的定量指标还有待进一步探索。

参 考 文 献

- [1] LI B, HANEKLAUS N. The role of clean energy, fossil fuel consumption and trade openness for carbon neutrality in China[J]. Energy Reports, 2022, 8(4): 1090-1098.
- [2] WANG X, WEI X, ZHU J, et al. A review of modeling, acquisition, and application of lithium-ion battery impedance for onboard battery management[J]. eTransportation, 2021, 7: 100093.
- [3] WANG Y, WANG L, LI M, et al. A review of key issues

- for control and management in battery and ultra-capacitor hybrid energy storage systems[J]. *eTransportation*, 2020, 4: 100064.
- [4] HALES A, PROSSER R, BRAVO DIAZ L, et al. The cell cooling coefficient as a design tool to optimise thermal management of lithium-ion cells in battery packs[J]. *eTransportation*, 2020, 6: 100089.
- [5] ZHOU Z, CUI Y, KONG X, et al. A fast capacity estimation method based on open circuit voltage estimation for $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}$ battery assessing in electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101830.
- [6] LIU J, WANG Z, HOU Y, et al. Data-driven energy management and velocity prediction for four-wheel-independent-driving electric vehicles[J]. *eTransportation*, 2021, 9: 100119.
- [7] SONG Z, YANG X G, YANG N, et al. A study of cell-to-cell variation of capacity in parallel-connected lithium-ion battery cells[J]. *eTransportation*, 2021, 7: 100091.
- [8] WANG X, FANG Q, DAI H, et al. Investigation on cell performance and inconsistency evolution of series and parallel lithium-ion battery modules[J]. *Energy Technology*, 2021, 9(7): 2100072.
- [9] NAGUIB M, KOLLMAYER P, EMADI A. Lithium-ion battery pack robust state of charge estimation, cell inconsistency, and balancing: review[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 50570-50582.
- [10] FENG X, ZHANG X, XIANG Y. An inconsistency assessment method for backup battery packs based on time-series clustering[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101666.
- [11] ZHENG Y, GAO W, OUYANG M, et al. State-of-charge inconsistency estimation of lithium-ion battery pack using mean-difference model and extended Kalman filter[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 383: 50-58.
- [12] ZHANG Y, PENG Z, GUAN Y, et al. Prognostics of battery cycle life in the early-cycle stage based on hybrid model[J]. *Energy*, 2021, 221: 119901.
- [13] 刘春辉, 任宏斌. 基于 SOC 的动力电池组主动均衡研究[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(2): 667-672.
- LIU Chunhui, REN Hongbin. Research on soc-based active balancing of power battery packs[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(2): 667-672.
- [14] DURASAMY T, DEEPA K. Evaluation and comparative study of cell balancing methods for lithium-ion batteries used in electric vehicles[J]. *International Journal of Renewable Energy Development*, 2021, 10(3): 471-479.
- [15] BARRERAS J V, DE CASTRO R, WAN Y, et al. A consensus algorithm for multi-objective battery balancing[J]. *Energies*, 2021, 14(14): 4279.
- [16] ZUN C Y, PARK S U, MOK H S. New cell balancing charging system research for lithium-ion batteries[J]. *Energies*, 2020, 13(6): 1393.
- [17] HUI X, SONG D W, SHI F D, et al. Novel voltage equalisation circuit of the lithium battery pack based on bidirectional flyback converter[J]. *IET Power Electronics*, 2020, 13(11): 2194-2200.
- [18] NARAYANASWAMY S, STEINHORST S, LUKASIEWYCZ M, et al. Optimal dimensioning and control of active cell balancing architectures[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10): 9632-9646.
- [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 equalization scheme of lithium battery pack based on coupling winding[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(2): 54-64.
- [20] HABIB A, HASAN M K, MAHMUD M, et al. A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application[J]. *IET Power Electronics*, 2021, 14(1): 1-13.
- [21] DAM S K, JOHN V. Low-frequency selection switch based cell-to-cell battery voltage equalizer with reduced switch count[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(4): 3842-3851.
- [22] PENG F X, WANG H Y, YU L. Analysis and design considerations of efficiency enhanced hierarchical battery equalizer based on bipolar ccm buck-boost units[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(4): 4053-4063.
- [23] 郭向伟, 刘震, 康龙云, 等. 一种单电感串并联电池组均衡方法[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(12): 87-95.
- GUO Xiangwei, LIU Zhen, KANG Longyun, et al. A single inductor series-parallel battery pack equalization method[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(12): 87-95.
- [24] KOSEOGLOU M, TSIOMAS E, JABBOUR N, et al. Highly effective cell equalization in a lithium-ion battery management system[J]. *IEEE Transactions on Power*

- Electronics, 2020, 35(2): 2088-2099.
- [25] ZHANG Z Y, ZHANG L Z, HU L, et al. Active cell balancing of lithium-ion battery pack based on average state of charge[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(4): 2535-2548.
- [26] WU Q X, GAO M Y, LIN H P, et al. A bimodal multichannel battery pack equalizer based on a quasi-resonant two-transistor forward converter[J]. Energies, 2021, 14(4): 1112.
- [27] GHAEMINEZHAD N, OUYANG Q, HU X S, et al. Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9119-9135.
- [28] CAO Y L, LI K, LU M. Balancing method based on flyback converter for series-connected cells[J]. IEEE Access, 2021, 9: 52393-52403.
- [29] UNO M, YOSHINO K. Modular equalization system using dual phase-shift-controlled capacitively isolated dual active bridge converters to equalize cells and modules in series-connected lithium-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2983-2995.
- [30] CAO J W, XIA B Z, ZHOU J. An active equalization method for lithium-ion batteries based on flyback transformer and variable step size generalized predictive control[J]. Energies, 2021, 14(1): 207.
- [31] 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.
- [32] 华旻, 周思达, 何璐, 等. 车用锂离子动力电池组均衡管理系统研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 73-84.
- HUA Yang, ZHOU Sida, HE Rong, et al. Research progress on the balanced management system of automotive lithium-ion power battery pack[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 73-84.
- [33] FENG F, HU X, LIU J, et al. A review of equalization strategies for series battery packs: variables, objectives, and algorithms[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 116: 109464.
- [34] YANG H, ZHOU S D, CUI H G, et al. A comprehensive review on inconsistency and equalization technology of lithium-ion battery for electric vehicles[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(14): 11059-11087.
- [35] 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.
- CAI Minyi, ZHANG E, LIN Jing, et al. A review of series lithium-ion battery pack equalization topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5294-5311.
- [36] LV J, SONG W J, FENG Z P, et al. Performance and comparison of equalization methods for lithium ion batteries in series[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(3): 4669-4680.
- [37] DAI S, ZHANG F, ZHAO X. Series-connected battery equalization system: A systematic review on variables, topologies, and modular methods[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(14): 19709-19728.
- [38] TURKSOY A, TEKE A, ALKAYA A. A comprehensive overview of the dc-dc converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 133: 110274.
- [39] CARTER J, FAN Z, CAO J. Cell equalisation circuits: A review[J]. Journal of Power Sources, 2020, 448: 227489.
- [40] ALVAREZ-DIAZCOMAS A, ESTEVEZ-BEN A A, RODRIGUEZ-RESENDIZ J, et al. A review of battery equalizer circuits for electric vehicle applications[J]. Energies, 2020, 13(21): 5688.
- [41] OMARIBA Z B, ZHANG L J, SUN D B. Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 129335-129352.
- [42] GALLARDO-LOZANO J, ROMERO-CADAVAL E, MILANES-MONTERO M I, et al. Battery equalization active methods[J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 934-949.
- [43] YANG R, GAO L, WU T, et al. Comparative study on equalization technology of lithium battery packs for electric vehicle[C/CD]// 2019 5th International Conference on Energy Equipment Science and Engineering (ICEESE), November 29 - December, 1, 2019, Harbin, China. Earth and Environmental Science, 2020.
- [44] 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.
- [45] ZHENG Y, OUYANG M, LU L, et al. Understanding aging mechanisms in lithium-ion battery packs: From cell capacity loss to pack capacity evolution[J]. Journal of

- Power Sources, 2015, 278: 287-295.
- [46] 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): 908-921.
- WEI Peng, CAI Tao, CHAO Zeyun, et al. Distributed cooperative consistency control strategy for battery equalization system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 908-921.
- [47] 郑岳久. 车用锂离子动力电池组的一致性研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- ZHENG Yuejiu. Consistency study of lithium-ion power battery packs for vehicles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [48] 汪宜秀, 魏学哲, 房乔华, 等. 面向整组寿命最大化的电动汽车电池一致性变化规律及其均衡策略[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22): 176-183.
- WANG Yixiu, WEI Xuezhe, FANG Qiaohua, et al. Battery consistency variation law and its equalization strategy for electric vehicles with a view to maximizing the whole pack life[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 176-183.
- [49] SUN W B, LI Y L, LIU L Z, et al. A switched-capacitor battery equalization method for improving balancing speed[J]. IET Electric Power Applications, 2021, 15(5): 555-569.
- [50] YANG X G, XI L G, GAO Z, et al. Analysis and design of a voltage equalizer based on boost full-bridge inverter and symmetrical voltage multiplier for series-connected batteries[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3828-3840.
- [51] WANG S C, YANG S Y, YANG W, et al. A new kind of balancing circuit with multiple equalization modes for serially connected battery pack[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2142-2150.
- [52] WU L, PANG K, ZHENG Y, et al. A multi-module equalization system for lithium-ion battery packs[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 46(3): 2771-2782.
- [53] SU L, WANG Z P, REN Y H. A novel two-steps method for estimation of the capacity imbalance among in-pack cells[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 26: 101031.
- [54] QI X, WANG Y, FANG M, et al. A reduced-component-count centralized equalization system for series-connected battery packs based on a novel integrated cascade topology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 6105-6116.
- [55] DONG G Z, YANG F F, TSUI K L, et al. Active balancing of lithium-ion batteries using graph theory and a-star search algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(4): 2587-2599.
- [56] QI X B, WANG Y, FANG M Z. An integrated cascade structure-based isolated bidirectional DC-DC converter for battery charge equalization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12003-12021.
- [57] WAN L, CHEN Y, ZHOU Y, et al. Design of balanced charging circuit for lithium ion battery[C]// 38th Chinese Control Conference (CCC), July 27-30, 2019, Guangzhou, China, IEEE, 2019: 6476-6480.
- [58] JIAQIANG E J, ZHANG B, ZENG Y, et al. Effects analysis on active equalization control of lithium-ion batteries based on intelligent estimation of the state-of-charge[J]. Energy, 2022, 238: 121822.
- [59] SEE K, LIM K C, BATTERNALLY S, et al. Charge based self-equalization for imbalance battery pack in an energy storage management system developing a time-based equalization algorithm[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2019, 8(2): 16-21.
- [60] VAN C N, VINH T N, NGO M-D, et al. Optimal soc balancing control for lithium-ion battery cells connected in series[J]. Energies, 2021, 14(10): 2875.
- [61] HEIN T, ZIEGLER A, OESER D, et al. A capacity-based equalization method for aged lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191: 106898.
- [62] ZHENG Y, OUYANG M, LU L, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 1. Equalization based on remaining charging capacity estimation[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 676-686.
- [63] ZHENG Y, OUYANG M, LU L, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 2. Fuzzy logic equalization[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 460-466.
- [64] SONG L J, LIANG T Y, LU L G, et al. Lithium-ion battery pack equalization based on charging voltage curves[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105516.
- [65] HAN W J, ZOU C F, ZHANG L, et al. Near-fastest battery balancing by cell/module reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6954-6964.
- [66] 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.
- [67] OUYANG Q, HAN W J, ZOU C F, et al. Cell balancing control for lithium-ion battery packs: A hierarchical optimal approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(8): 5065-5075.
- [68] LEE S, KIM M, BAEK J W, et al. Enhanced switching pattern to improve cell balancing performance in active cell balancing circuit using multi-winding transformer[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 149544-149554.
- [69] DING X F, ZHANG D H, CHENG J W, et al. A novel active equalization topology for series-connected lithium-ion battery packs[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(6): 6892-6903.
- [70] YANG Y, ZHU W C, XIE C J, et al. A layered bidirectional active equalization method for retired power lithium-ion batteries for energy storage applications[J]. *Energies*, 2020, 13(4): 832.
- [71] LU J L, WANG Y, LI X. Isolated bidirectional DC-DC converter with quasi-resonant zero-voltage switching for battery charge equalization[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(5): 4388-4406.
- [72] LA P H, CHOI S J. Novel dynamic resistance equalizer for parallel-connected battery configurations[J]. *Energies*, 2020, 13(13): 3315.
- [73] HSIEH Y C, HUANG Y C, CHUANG P C. A charge-equalization circuit with an intermediate resonant energy tank[J]. *Energies*, 2020, 13(24): 6566.
- [74] WANG X L, CHENG K W E, FONG Y C. Zero current switching switched-capacitors balancing circuit for energy storage cell equalization and its associated hybrid circuit with classical buck-boost[J]. *Energies*, 2019, 12(14): 2726.
- [75] LI X, LYU L, GENG G, et al. Power allocation strategy for battery energy storage system based on cluster switching[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(4): 3700-3710.
- [76] KHALID A, HERNANDEZ A, SUNDARARAJAN A, et al. Simulation-based analysis of equalization algorithms on active balancing battery topologies for electric vehicles[M/OL]. Cham: Springer, 2020 [2022-06-28]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-32520-6_52#chapter-info.
- [77] WANG B, QIN F F, ZHAO X B, et al. Equalization of series connected lithium-ion batteries based on back propagation neural network and fuzzy logic control[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(6): 4812-4826.
- [78] LIAO H T, JIANG F, JIN C, et al. Lithium-ion battery soc equilibrium: an artificial potential field-based method[J]. *Energies*, 2020, 13(21): 5691.
- [79] WU T Z, JI F, LIAO L, et al. Voltage-soc balancing control scheme for series-connected lithium-ion battery packs[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 25: 100895.
- [80] ZHANG H K, WANG Y F, QI H, et al. Active battery equalization method based on redundant battery for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 7531-7543.
- [81] ZHANG Y L, HONG Y, CHOI K. Optimal energy-dissipation control for SOC based balancing in series connected Lithium-ion battery packs[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(23-24): 15923-15944.
- [82] CHEN X, HU G D, GUO F, et al. Switched energy management strategy for fuel cell hybrid vehicle based on switch network[J]. *Energies*, 2020, 13(1): 247.
- [83] LI X L, XU J P, XU S G, et al. Modularised non-isolated two-switch equaliser using full-wave voltage multiplier for series-connected battery/super-capacitor[J]. *IET Power Electronics*, 2019, 12(4): 869-877.
- [84] LI D M, WU Z J, ZHAO B, et al. An improved droop control for balancing state of charge of battery energy storage systems in ac microgrid[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 71917-71929.
- [85] ROY D, NARAYANASWAMY S, PROBSTL A, et al. Optimal scheduling for active cell balancing[C]// 2019 IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS), December 03-06, 2019, IEEE, 2020: 120-132.
- [86] WEI Y, DAI S, WANG J, et al. Switch matrix algorithm for series lithium battery pack equilibrium based on derived acceleration information Gauss-Seidel[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019: 5159497.
- [87] PIROOZ A, FIROUZ Y, BERECIBAR M, et al. Battery voltage equalisation using single-phase cascaded H-bridge converters[J]. *IET Power Electronics*, 2020, 13(18): 4158-4167.
- [88] CHEN Y, SHEN T, YANG S Y, et al. A path planning strategy with ant colony algorithm for series connected batteries[J]. *Electronics*, 2020, 9(11): 1816.
- [89] SUN J L, LIU W, TANG C Y, et al. A novel active equalization method for series-connected battery packs based on clustering analysis with genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7):

- 7853-7865.
- [90] 李军, 黄志祥, 唐爽. 基于 K 最近邻遗传算法的电池均衡策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(4): 525-530. LI Jun, HUANG Zhixiang, TANG Shuang. Battery equalization strategy based on K-nearest neighbor genetic algorithm[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2019, 10(4): 525-530.
- [91] HOQUE M M, HANNAN M A, MOHAMED A. Charging and discharging model of lithium-ion battery for charge equalization control using particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2016, 8(6): 065701.
- [92] WU T, QI Y, LIAO L, et al. Research on equalization strategy of lithium-ion batteries based on fuzzy logic control[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102722.
- [93] IMTIAZ A M, KHAN F H. "Time Shared Flyback Converter" Based regenerative cell balancing technique for series connected li-ion battery strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5960-5975.
- [94] LIU K L, YANG Z L, TANG X P, et al. Automotive battery equalizers based on joint switched-capacitor and buck-boost converters[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 12716-12724.
- [95] SHANG Y L, ZHANG Q, CUL N X, et al. Multicell-to-multicell equalizers based on matrix and half-bridge LC converters for series-connected battery strings[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1755-1766.
- [96] 王敏旺, 吴华伟, 刘祯. 一种面向电池组均衡模型的定量评价体系[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(1): 271-279. WANG Minwang, WU Huawei, LIU Zhen. A quantitative evaluation system for battery pack equilibrium model[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(1): 271-279.
- [97] LAI X, CHEN Q, TANG X, et al. Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective[J]. eTransportation, 2022, 12: 100169.

作者简介: 钱广俊, 男, 1992 年出生。主要研究方向为锂离子电池组均衡算法和电化学阻抗谱。

E-mail: qguangjun@163.com

郑岳久(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能电池管理、电池老化与故障诊断。

E-mail: yuejiu_zheng@163.com