DOI: 10.3901/JME.2020.22.176

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^{*}

汪宜秀¹ 魏学哲¹ 房乔华¹ 朱建功^{1,2} 戴海峰¹

(1. 同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804;

2. 卡尔斯鲁厄理工学院 卡尔斯鲁厄 76344 德国)

摘要: 串联电池组的一致性问题是电池成组使用的关键问题之一, 常通过电池均衡技术进行干预调节。但现有均衡策略多着重于单次循环容量和能量的最大利用, 忽视了长时间尺度下电池组的一致性演变。为实现长时间尺度下的电池组寿命最优, 试验研究了工作区间对电池老化的影响, 讨论了传统顶部均衡和底部均衡下的电池组一致性演变, 提出了优化最差单体工作区间的寿命均衡策略。研究发现使用的三元锂电池在高荷电状态区间循环时存在较快的容量衰减, 增加循环放电深度同样会加速容量衰减; 顶部均衡和底部均衡虽然可以最大化电池组单次性能, 但容量一致性依旧持续变差, 表明了寿命均衡的必要性; 提出的寿命均衡策略使最差单体循环在较低的荷电状态区间, 减小其容量衰减速率, 进而有效地提高电池整组的累计放电量; 最后, 设计的试验证实了所提出的均衡策略可以显著提高电池组的容量一致性, 并设计了相应的系统实现方案。提出的寿命均衡策略也为未来电池组的均衡研究提供了新的方向。

关键词: 串联电池组; 工作区间; 容量衰减; 一致性; 寿命均衡

中图分类号: U464

Consistency Variation Law and Equalization Strategy of Electric Vehicle Battery for Maximizing the Life of the Battery Pack

WANG Yixiu¹ WEI Xuezhe¹ FANG Qiaohua¹ ZHU Jiangong^{1,2} DAI Haifeng¹

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804;

2. Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe 76344 Germany)

Abstract: The cell inconsistency of series battery pack is one of the key issues in the group application of Li-ion batteries, which is currently often regulated by intervention of battery equalization techniques. However, existing equalization strategies mostly focus on the maximum utilization of single cycle capacity and energy, ignoring the consistent evolution of the battery pack over a long-time scale. In an attempt to achieve better battery pack cycle life, the influence of cycling state of charge ranges on battery aging is studied experimentally, the consistency evolution of battery pack under traditional top and bottom equalization is also discussed, and the life equalization strategy aiming to optimize the worst cell working range is proposed. It is discovered that the used Li-ion batteries have faster capacity fade when cycling under higher state of charge range and higher depth of discharge. Although the top equalization and bottom equalization can maximize the single cycle performance of the battery pack, the consistency continues to deteriorate, indicating the need for the life equalization. The proposed life equalization strategy allows the worst cell to cycle at the lowest working range, reducing its capacity decay rate, thus effectively increasing the accumulated discharge of the battery pack. Finally, experiments have confirmed that the proposed strategy can significantly improve the capacity consistency of battery pack, and a corresponding system implementation plan is designed. The life equalization strategy proposed also provides a new direction for future battery pack equalization research.

Key words: series battery pack; state of charge range; capacity fade; capacity consistency; life equalization

^{*} 国家自然科学基金资助项目(U1764256)。20191211 收到初稿, 20200415 收到修改稿

0 前言

锂离子电池具有工作电压高、比能量高、循环寿命长等优良特性，被认为是未来几年车用电源的重要发展方向^[1]。然而，锂离子电池单体的电压仅为 2.5~4.2 V，车用动力电池系统往往借助电池成组技术，即将几十乃至成百上千节电池串并联成电池组来匹配汽车的动力系统^[2]。电池数量级的不断提高，不可避免会产生个体差异，这种电池组的一致性会影响着成组使用的性能和使用寿命，进一步影响电动汽车的续驶里程和使用安全^[3]。

动力电池组的一致性问题的主要表现在两个方面：一是单体电池性能参数的差异，包括电池容量和内阻等的差异；二是电池工作状态的差异，主要是指电池荷电状态和工作电压的差异。通常而言，电池组各单体电池的初始性能差异难以避免，这就造成了在相同电流激励的情况下各单体的实际工作状态的差异，而这种工作状态的差异又进一步引起了其性能差异的加剧，长此以往，逐步形成正反馈效应，这就是串联电池组的“恶化循环”^[4]。此外，对串联电池组而言，当某个单体性能较差时，该单体在充电时更容易充满，在放电时也更容易放空，这样会严重制约整个电池组的性能及使用率，同时该最差单体的容量衰减至 80% 也意味着整个串联电池组的寿命终结，这就是所谓的“短板效应”。“恶化循环”和“短板效应”的共同作用使得串联会降低电池单体成组后的性能和使用寿命。

电池成组所带来的一致性问题的不可避免，但可以通过电池均衡技术进行干预调节。对串联电池组而言，当各单体之间存在差异时，电池组的容量由电量最低单体的剩余电量和电量最高单体的可充电量决定的，这直接导致实际电池组容量一般小于电池组中任意单体的容量^[5]。若使得各单体电池的电压、荷电状态(State of charge, SOC)等状态量趋于一致，则可保证容量最小的单体容量得到最大的利用，这就是电池性能均衡策略的基本思想^[6-7]。郭宏榆等^[8]进一步从能量利用的角度，提出充电结束时，各单体电池都被充满电可以使整组电池的能量最大化。从均衡技术的具体实现而言，通常将电池均分为基于电压^[9-10]、SOC^[11]和容量^[12]的均衡三类，其中由于单体电压可以直接测量得到，因而基于电压的均衡是普遍采用的方法。

然而，目前对电池均衡的研究目标多在于实现电池单次循环容量和能量的最大利用，忽视了长时

间尺度下电池组的容量一致性演变和整组循环寿命的提高。因此，从实现电池组整组寿命最优的角度出发，本文试验研究了工作区间对电池老化的影响以及传统性能均衡策略下电池组的一致性演变，进而尝试由单体电池的老化规律出发，提出一种能改善电池组一致性的寿命均衡策略，并对所提均衡策略进行试验验证。

1 研究对象

以 18650 型三元锂电池为研究对象，电池单体的基本参数如表 1 所示。试验分别选用 Chroma 和 Neware 充放电加载测试设备对电池进行性能标定和充放电循环，并以 Partner 恒温箱控制试验温度为常温(25 ℃)，排除温度对老化结果的影响。

表 1 电池单体的基本参数

类别	参数
电池类型	18650 型柱状商用电池
负极材料	石墨
正极材料	镍钴锰酸锂+镍钴铝酸锂(Li(NiCoMnAl)O ₂)
电解液	六氟磷酸锂溶液(LiPF ₆)
标称电压/V	3.6
充电截止电压/V	4.2
放电截止电压/V	2.55
标称容量/(A·h)	2.5
制造商	三星(Samsung)

2 工作区间对电池老化的影响

2.1 试验测试矩阵

单体存在不一致的串联电池组使用过程中，电池在实际循环中很难有完全充放电的情况出现，因而试验研究部分区间运行时电池的老化就显得至关重要。电池工作区间，即循环时的 SOC 区间，可由放电深度(Depth of discharge, Δ DOD)和 SOC 均值共同表示，其中研究不同 Δ DOD 下的电池老化规律时，分别选择电池循环在 20%、40% 和 60% Δ DOD 下；研究 SOC 均值对老化的影响时，为了防止电池在循环过程中出现过充或过放，设计试验方案时避开 0~5% SOC 区间和 95%~100% SOC 区间，尽可能涵盖 5%~95% SOC 区间的所有情况，具体试验测试矩阵如表 2 所示。

表 2 中，数字编号为试验用单体电池编号，电池均选自同一批次新电池。工作区间由 Δ DOD 与 SOC 均值共同决定，其中 SOC 均值为算术平均

值,如#1 电池循环时 ΔDOD 为 20%、SOC 均值为 85% 代表其循环在 95%~75% SOC 区间。试验过程中,为了模拟串联电池组各单体在循环过程中电流和过电量的一致,将相同 ΔDOD 的单体以串联电池组的形式循环,充放电电流倍率依据标称容量而定,即 1 C 对应电流为 2.5 A。同时,各单体不同工作区间是通过控制成组循环前各单体 SOC 实现的,各单体初始 SOC 也是基于标称容量得到,即通过在特定的时间内以一定的速率将电池从满充状态放电来获得预期的 SOC。例如,将电池从满充状态以 1 C 放电 3 min 得到 95% SOC 后,再与其他单体串联成组。

表 2 单体电池老化试验测试矩阵

放电深度 ΔDOD (%)	SOC 均值(%)								电流 I/A
	85	75	65	55	45	35	25	15	
20	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	2.5
40		#9	#10	#11	#12	#13	#14		
60			#15	#16	#17	#18			

2.2 循环老化过程中电池容量变化趋势

试验中每隔 50 次等效循环对电池进行一次容量标定,以此讨论电池的性能随循环次数增加的变化规律。容量标定方法为,将待测电池在 25 °C 下先以 1 C 的恒定电流充电至截止电压 4.2 V,再保持 4.2 V 恒压充电直到达到截止电流 C/25,定义此时为满充状态,随后将电池静置 10 min 后以 1 C 电流放电至截止电压 2.55 V,记录所放出的电量;重复此步骤两次,若差异不大则选取第二次放电量作为此时电池的容量,若差异较大则重新标定。

考虑到不同单体电池的实际初始容量的细微差别会导致不便比较容量衰减率,同时也便于试验结论向不同标称容量电池扩展,以电池的初始标定容量为基准,给出量纲一化放电容量随等效循环次数的变化曲线如图 1 所示,结果以百分比形式展示。

从图 1 可知,不同工作区间循环的电池,容量衰减速率大为不同,且电池在高 SOC 区间工作时容量衰减更快,循环在 95%~75% 和 85%~65% SOC 区间的单体 600 次循环已衰减了近 9%,是低 SOC 区间循环的单体的 2~3 倍。不过,循环在 55%~15% 和 75%~15% SOC 区间的单体容量衰减最慢,揭示了在中部偏低 SOC 区间循环有最慢的老化速率,而不是在最低 SOC 区间循环。此外,综合对比 3 张图中相同等效循环次数时的数据,电池容量衰减随 ΔDOD 的增加而加快。

(a) 20% ΔDOD 试验结果

(b) 40% ΔDOD 试验结果

(c) 60% ΔDOD 试验结果

图 1 各单体电池容量变化趋势

3 传统均衡策略对串联电池组一致性演变的影响

3.1 串联电池组一致性评价指标

容量一致性,有时也称不一致性,衡量的是电池组中各单体电池容量的离散程度。在概率统计中,常常使用标准差来量化一个数据集的离散程度,标准差越大,代表大部分数据与其平均值之间的差距较大,数据集越分散;反之,一个较小的标准差则代表样本数据较接近平均值,数据离散程度小。

然而, 实际使用中, 由于标准差是数值的绝对量, 无法规避数据量级的影响, 所以这些统计量往往需要结合均值或中位数才能有效评定数据集的离散情况。具体说来, 同样标准差的数据集, 如果数据量级较大可能反映的波动是较小的, 但对于数据量级较小的数据集来说波动可能是巨大的。例如, 有{1, 2, 3, 4}和{0.1, 0.5, 1, 3}两个数据集, 虽然两者的标准差分别为 1.118 0 和 1.114 7, 相差不大, 但明显后者有更大的数据波动。为了修正这个弊端, 概率统计中又提出采用变异系数这个量纲一的量来衡量数据集离散程度, 容量一致性的定义也基于此, 计算公式为

$$\Delta C = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}}{\bar{C}} \quad (1)$$

式中, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ 为串联电池组内各单体电池的容量集合, N 为串联的单体电池数量, $\bar{C}$ 为各单体容量的平均值, 所得变异系数 ΔC 代表了串联电池组容量离散度, 可用此来评价串联电池组容量一致性。基于此一致性定义, 以下讨论两种常用的以电池组单次放电电量最大化为目标的均衡策略对电池组一致性演变的影响, 即短时间尺度上的性能均衡策略, 分别定义为顶部均衡和底部均衡。

3.2 顶部均衡下电池组一致性演变

顶部均衡, 即控制电池组内各单体电池有相同的充电截止点, 所有电池在充电末期达到状态一致的均衡策略。试验操作方法为: 将各单体电池充满电后串联成组, 随后开始一个预循环, 分别记录电池 1 C 放电至有单体达到 2.55 V 时的整组电压和 1 C 充电至有单体到达 4.3 V 时的整组电压, 以此作为循环截止条件。其中, 充电截止电压设为 4.3 V 是为了补偿满充过程中恒压阶段的充电电量, 且通过累计电量计算, 实际电池的充电截止点 SOC 低于 100%, 电池未发生过充。试验中每隔 50 次循环进行一次电池容量标定并重新调整充放电截止电压, 表 3 给出了顶部均衡试验所用 4 串电池组初始容量分布。

表 3 串联电池组初始容量分布(顶部均衡)

电池编号	#19	#20	#21	#22	一致性
容量 $C/(A \cdot h)$	2.461 6	2.389 7	2.333 5	2.307 0	0.025 0

图 2 所示是顶部均衡下串联电池组一致性演变的试验结果。从图 2 中可以看出, 顶部均衡下, 较差单体由于实际 ΔDOD 相对较大因而容量衰减更快, 电池组的容量一致性随循环次数的增加持续变

图 2 顶部均衡下电池组一致性演变的试验结果

差, 从最初的 0.025 0 增大到 0.038 1, 这体现了“恶化循环”的影响。

3.3 底部均衡下电池组一致性演变

与顶部均衡相对, 底部均衡, 即控制电池组内各单体电池有相同的放电截止点, 所有电池在放电末期达到状态一致的均衡策略。试验操作方法为: 将各单体电池放空电后串联成组, 随后开始一个预循环, 分别记录电池 1 C 充电至有单体达到 4.3 V 时的整组电压和 1 C 放电至有单体到达 2.55 V 时的整组电压, 以此作为循环截止条件。试验中同样每隔 50 次循环进行一次电池容量标定并重新调整充放电截止电压, 表 4 给出了底部均衡试验所用 4 串电池组初始容量分布。

表 4 串联电池组初始容量分布(底部均衡)

电池编号	#23	#24	#25	#26	一致性
容量 $C/(A \cdot h)$	2.474 6	2.406 6	2.347 8	2.308 7	0.026 3

图 3 所示是底部均衡下串联电池组一致性演变的试验结果。从图中可以看出, 与顶部均衡结果相似, 电池组的容量一致性随循环次数的增加持续变差, 从 0.026 3 升至 0.042 8, 说明了传统均衡策略没有打破电池组内的“恶化循环”效应, 无法改善串联电池组的容量一致性, 这主要是由于上述策略使得电池组内的寿命状态最差的单体始终工作在循

环衰减速率最快的工作区间内,而其余单体的容量衰减速率相对较慢。

对比顶部均衡和底部均衡的试验结果,发现顶部均衡的容量一致性变化要优于底部均衡。究其原因,两种均衡策略下最差单体的工作区间相同,而顶部均衡策略下其余单体的工作区间劣于底部均衡,因而与最差单体之间的差距扩大也较慢,表现为容量一致性变差的速率小于底部均衡,这暗示了通过合理设置各单体工作区间可以改善电池组容量一致性演变。

图3 底部均衡下电池组一致性演变的试验结果

4 串联电池组寿命均衡策略讨论及试验验证

4.1 面向电池组全生命周期最优的寿命均衡策略

区别于着眼于单次最优的电池组传统性能均衡策略,寿命均衡的目的在于最大化电池组全生命周期使用性能,即使得电池组在接下来的循环中有最大的累计放电量,获得最大的剩余使用寿命。

从串联电池组的角度来看,流过各单体电池的电流始终保持一致,则循环时各单体电池的放电量也应相同。由于“短板效应”,最差单体的放电量即为电池组的放电量,则为了实现整组电池的放电量的最大化,最差单体的应始终处于最优工作区

间,保证电池单体放电量最大化。对于串联电池组的其他单体,理论上它们可以循环在任意区间,但考虑到电池循环时 SOC 越高,输出电压和输出能量越大,因而为了充分发挥电池组性能,提出将其余所有单体从 100% SOC 开始放电,这样其余单体由于 SOC 循环区间高也有最快的衰减速度,可使整组在最短时间内达到一致,实现“均衡”效果。

实际中,为了实施寿命均衡策略,需要各单体的 SOC 循环区间可以自由配置,即电池在循环过程中的 ΔDOD 应低于 100%。为此,我们获取了 50 辆某款电动汽车在一年内的运行数据,通过数据分析得到了电动汽车实际运行过程中不同 ΔDOD 出现的频率,如图 4 所示。从图中统计数据可以看出,电动汽车在运行过程中出现高 ΔDOD 的频率不高, ΔDOD 低于 80% 的情况出现的频率高达 90.19%,为了综合考虑电动汽车的单次续航里程和寿命均衡的可调控 SOC 范围,本文选定 80% ΔDOD 为 ΔDOD 的控制下限,即放电起点 SOC 有 20% 的调控范围。

图4 实车运行中不同 ΔDOD 出现频率

讨论单体电池最优工作区间时,电池在整个生命周期有最大的放电量要求电池在放出相同的电量时,有最小的容量衰减。第 2 节的试验结果展示了工作区间对电池容量衰减的影响,为直观展示试验结果,现对数据做简单处理。

一般认为,锂离子电池容量的损失与等效循环次数之间的函数关系呈幂函数形式,可表示为

$$NDC = 100 - F_C \cdot EFC^b \quad (2)$$

式中, NDC 为老化过程中的归一化放电容量(Normalized discharge capacity),表征循环过程中的电池容量衰减; F_C 表示容量衰减系数,是循环过程中各因素对容量衰减速率影响的集中函数,本文中可表征工作区间对容量衰减的影响; EFC 为等效循环次数(Equivalent full cycles)。

参考 SCHMALSTIEG 等^[13]提出的三元锂电池容量衰减模型表达式, 取 $b = 0.5$, 根据试验数据可拟合得到不同工作区间循环时的容量衰减系数 F_C , 如图 5 所示。

从图中可知, 高 SOC 均值时有更大的容量衰减系数 F_C , 且 F_C 随 ΔDOD 的增加而加大, 对应试验结果中高 SOC 区间循环和高 ΔDOD 循环时容量衰减较快。考虑到已设定 ΔDOD 控制下限为 80% 时, SOC 均值不低于 40%, 则单体电池最优工作区间应由 40% SOC 均值和 80% ΔDOD 组成, 即要求电池循环在最低 SOC 区间。

图 5 容量衰减系数 F_C 与工作区间关系

综上所述, 本文基于不同工作区间电池老化速率不同, 提出的面向电池组全生命周期放电量最大化寿命均衡策略为: 在每次循环开始前, 保证容量最差单体的放电起点 SOC 在 80% 处, 而其余单体则保证在 100% SOC; 在循环充放电过程中, 确保最差单体的 SOC 不超过 80%, 而当某一节单体的容量达到或接近最差单体容量时, 同样通过均衡的手段调整该单体的放电起点 SOC 在 80% 处, 使得其容量衰减速率不慢于最差单体, 从而确保电池组累计放电量最大, 且组内各单体电池趋于一致。

4.2 寿命均衡策略对一致性演变影响的试验验证

本文对 4 串电池组进行寿命均衡策略的试验验证, 主要讨论电池组一致性演变的改善, 即侧重于是否达到“均衡”效果。试验共计 2 组, 表 5 给出了试验所用 4 串电池组初始容量分布。其中, 第一组模拟最差单体与其余单体有明显区别的情况, 研究寿命均衡是否能够将最差单体均衡至和次最差单体一致; 第二组为梯度分布情况, 研究寿命均衡是否能够将 4 节单体均衡至一致。

第一组寿命均衡试验中, 电池组共循环 150 次, 每隔 50 次循环进行一次电池容量标定, 图 6 所示是各单体电池的容量随循环次数变化曲线。从图

中可以看出, 到 150 次循环时, #29 和 #30 电池的容量已基本均衡至一致, 电池组容量一致性也从 0.007 5 降至 0.002 7, 一致性明显改善, 均衡效果显著。

表 5 寿命均衡试验各单体初始容量

组别	单体 1	单体 2	单体 3	单体 4	容量一致性
1	#27, 2.490 6 A·h	#28, 2.484 4 A·h	#29, 2.471 3 A·h	#30, 2.442 3 A·h	0.007 5
2	#31, 2.457 5 A·h	#32, 2.444 2 A·h	#33, 2.425 8 A·h	#34, 2.417 2 A·h	0.006 4

图 6 寿命均衡第一组试验结果

电池组实际应用中, 并不是所有情况下都存在某一节单体的容量相比于其余单体有着显著更好或者更差, 可能存在某几节电池的容量较为接近, 并且较其余单体的容量较差的情况, 另外考虑到电池容量的估计存在误差, 因此在实际应用过程中, 可以模糊处理电池之间的容量差异, 将一定范围内的单体均视为最差单体, 而将电池组分为“最差单体”组和“其余单体”组, 即最差单体的概念扩大到电池模组上, 从而以组为单位, 控制“最差单体”组的放电起点 SOC 在 80%, 而“其余单体”组的放电起点 SOC 则为 100%。

由于第二组电池的容量比较分散, 因此该组采用动态变化的寿命均衡策略, 即根据容量实时调整各单体是属于“最差单体”组, 还是“其余单体”

组,从而实现整组电池在长时间尺度上趋于一致。需要说明的是,这种做法是由于试验中每隔 50 次循环标定一次容量,间隔时间过长,容量出现过均衡,即无法在刚好达到一致时调整单体的工作区间。图 7 所示是试验过程中,各单体电池的容量随循环次数变化曲线,共循环 250 次。从图中可知,电池组一致性呈现改善趋势,到 250 次循环时,各单体电池的容量已较为接近,容量一致性也从 0.006 4 降至 0.001 3,均衡效果显著。

图 7 寿命均衡第二组试验结果

综上所述,试验结果表明本文所提寿命均衡策略能够在长时间尺度上改善串联电池组容量的一致性,即寿命均衡策略是有效的。该策略通过牺牲电池组单次循环内的性能的方法,打破了电池组内存在的“恶化循环”,保证电池组在全生命周期的累计放电量得到最大化的利用。

4.3 系统实现方案设计

为了在线实施寿命均衡策略,一方面需要获得串联电池组内各单体的容量,另一方面也需要相应的均衡电路实施各单体 SOC 调整。因此,一个完整的系统应由容量在线估计、寿命均衡策略和均衡电路三个模块组成,如图 8 所示。

图 8 中,容量在线估计模块根据均衡电路采集到的电压信息估计电池组内各单体容量,以此作为寿命均衡策略的输入。近年来,锂电池容量估计的研究

图 8 系统架构

一直是一个研究热点,相关学者提出了很多有效的方法^[14]。亚琛工业大学的 WAAG 等^[15]通过提出一种新的电动势估计方法,实现了电池容量在线估计,其最大估计误差为 2%。同济大学的 FANG 等^[16]通过研究静置电压曲线,提出了一种基于松弛过程的电池容量快速估计方案,给定老化状态下最大估计误差仅为 1.8%,可用于寿命均衡过程中的容量在线估计。

无论采用何种均衡算法,都必须配有相应的均衡电路来在线实施。具体说来,均衡电路模块主要负责基于均衡策略来调整电池组内各单体 SOC,同时采集各单体电压辅助完成容量在线估计。对于纯电动汽车电池组的均衡,目前通常认为被动均衡方法效率低下且均衡速度缓慢,因而需要开发均衡电流大、能量利用率高的主动均衡电路。在之前的研究中^[17],笔者设计了一种基于变压器的主动均衡系统,该系统可以实现电池组和单体之间的双向能量传递,配合相应的 SOC 估计方法,可实现对各单体静态工作点的调节,为寿命均衡的实施提供了可能。

5 结论

(1) 针对某款三元锂离子动力电池,试验表明电池在不同的工作区间进行循环时容量衰减速率不同,表现为高 SOC 区间循环和高 ΔDOD 循环时容量衰减较快。

(2) 提出以变异系数来衡量串联电池组的容量一致性,电池组循环老化试验证实顶部均衡和底部均衡策略无法改善电池组的容量一致性。

(3) 基于电池在不同工作区间的老化速率不同的特性,提出了一种改善电池组一致性的寿命均衡策略。针对该款动力电池具有高 SOC 区间循环会加速容量衰减的特性,提出了优化单体电池工作区间的寿命均衡策略,即最差单体循环于最低 SOC 区间,其余单体循环于最高 SOC 区间。通过两组试验,证实了所提寿命均衡策略可以改善电池组容量一致性。这种以短时间尺度上单体状态不一致来

得到长时间尺度上容量趋于一致的寿命均衡策略, 也为未来电池组的均衡研究提供了新的方向。

参 考 文 献

- [1] 蔡松, 霍伟强. 纯电动汽车用动力电池分类及应用探讨[J]. 湖北电力, 2012, 36(2): 70-72.
CAI Song, HUO Weiqiang. Application and classification of EV power battery[J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(2): 70-72.
- [2] 王代壮. 电动汽车锂离子动力电池组均衡方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
WANG Daizhuang. Research on equalization method of lithium-ion battery pack for electric vehicle[D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [3] 杨莹莹. 锂离子电池组一致性变化规律研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.
YANG Yingying. A Study of consistency change in lithium-ion battery packs[D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [4] 戴海峰, 王楠, 魏学哲, 等. 车用动力锂离子电池单体不一致性问题研究综述[J]. 汽车工程, 2014, 36(2): 181-188, 203.
DAI Haifeng, WANG Nan, WEI Xuezhe, et al. A research review on the cell inconsistency of li-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(2): 181-188, 203.
- [5] ZHENG Yuejiu, LU Languang, HAN Xuebing, et al. LiFePO₄ battery pack capacity estimation for electric vehicles based on charging cell voltage curve transformation[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 33-41.
- [6] KIM C H, KIM M Y, PARK H S, et al. A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3764-3774.
- [7] QUINN D D, HARTLEY T T. Design of novel charge balancing networks in battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 26-32.
- [8] 郭宏榆, 姜久春, 文锋, 等. 基于能量最大化的磷酸亚铁锂电池组均衡策略研究[J]. 高技术通讯, 2011, 21(11): 1201-1205.
GUO Hongyu, JIANG Jiuchun, WEN Feng, et al. Research on an equalization strategy for LiFePO₄ battery-packs based on energy maximization[J]. High Technology Letters, 2011, 21(11): 1201-1205.
- [9] BAUGHMAN A C, FERDOWSI M. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2277-2285.
- [10] 戴海峰, 魏学哲, 孙泽昌, 等. 电动汽车用锂离子动力电池电感主动均衡系统[J]. 同济大学学报, 2013, 41(10): 1547-1553.
DAI Haifeng, WEI Xuezhe, SUN Zechang, et al. Inductance-based active balancing of lithium-ion batteries for EV applications[J]. Journal of Tongji University, 2013, 41(10): 1547-1553.
- [11] 蒋新华. 锂离子电池组管理系统研究[D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2007.
JIANG Xinhua. Study on battery management system of lithium-ion batteries[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, 2007.
- [12] LU Languang, HAN Xuebing, LI Jianqiu, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 272-288.
- [13] SCHMALSTIEG J, KÄBITZ S, ECKER M, et al. A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2014, 257: 325-334.
- [14] FARMANN A, WAAG W, MARONGIU A, et al. Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2015, 281: 114-130.
- [15] WAAG W, SAUER D U. Adaptive estimation of the electromotive force of the lithium-ion battery after current interruption for an accurate state-of-charge and capacity determination[J]. Applied Energy, 2013, 111: 416-427.
- [16] FANG Qiaohua, WEI Xuezhe, LU Tianyi, et al. A state of health estimation method for lithium-ion batteries based on voltage relaxation model[J]. Energies, 2019, 12(7): 1-18.
- [17] WANG Yixiu, WEI Xuezhe, FANG Qiaohua, et al. Bi-directional equalization system for li-ion battery pack based on fly-back transformer[C]// 2018 SAE World Congress Experience. SAE Technical Paper 2018-01-04. Detroit, MI, United States: SAE International, 2018: 1-6. DOI: 10.4271/2018-01-0442.

作者简介: 汪宜秀, 男, 1995 年出生。主要研究方向为车载锂离子电池管理系统。

E-mail: yixiu.wang.tj@gmail.com

魏学哲(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车电子及新能源汽车储能电源系统, 尤其是车载锂离子电池管理系统。

E-mail: weixzh@tongji.edu.cn