

被动均衡锂电池管理系统端压容差自愈控制研究

罗乐 柏淑红 刘家溢 李鹏雨

成都工业学院, 四川成都, 611730;

摘要: 随着电动汽车的广泛应用, 锂电池不一致性产生的各种问题严重制约这动力电池产业的健康发展, 并由此衍生的安全问题也日益突出。本文提出的被动全均衡技术可在每次充电时保证每节单体电池都充满电, 消除端压容差, 达到电池组中各单体电池端压一致, 有效避免电池组放电时的“木桶效应”而降低续航里程, 从而实现电池组寿命与单体电芯寿命相匹配, 延长了电池组使用寿命, 在兼顾安全性和经济性的同时, 助推了锂离子动力电池发展与应用。

关键词: 均衡; 自愈控制; 容差; 热失控

DOI: 10.64216/3080-1508.26.01.038

前言

近年来, 电动汽车作为新能源汽车的主体获得到前所未有的发展, 锂离子电池(以下简称“锂电池”)作为电动汽车的核心部件具有能量密度高、质量轻、自放电率小以及使用寿命长等诸多优势, 是目前电动汽车最具实用价值的储能方式。另外, 锂电池储能技术的应用在很大程度上缓解了新能源发电的间歇性和随机性问题, 提高现有电网设备利用率和运行效率。因此, 锂电池的集成应用无论是在电动汽车动力储能方面还是在电力系统调峰储能领域都具有十分广阔前景^[1-2]。

但锂电池集成应用中面临的问题主要变现在: 一是锂电池的不一致性导致存在电池端压容差。在实际应用中, 由于单体锂电池的电压和容量有限, 通常需要将多个单体电池通过串并联方式组合使用, 以适应不同电压和容量的应用场景。然而, 由于生产制造工艺的限制, 单体锂电池在出厂时的电压、内阻、初始容量及自放电率等参数存在一定差异。二是锂电池端压容差极易造成锂电池过充和热失控。目前, 电动汽车频繁发生的电池热失控事故使消费者对其安全性产生疑虑, 进而影响了整个产业的推广进程。锂电池热失控的诱发因素主要可归结为两个方面。其一, 电池本体在材料选取或生产工艺环节存在缺陷; 其二, 电池在实际应用过程中出现了相关问题^[3]。电池过充电及内部短路是导致锂电池热失控最常见的原因, 因此, 电池热管理系统需具备精确的故障诊断和预测本领, 在电池运行期间实施实时在线诊断, 一旦检测到潜在问题, 能够迅速发出预警信号。在这一过程中, 要高度重视避免因电池状态估计偏差、电池受到干扰等因素导致的错误判断和错误报警, 以确保故障诊断与预警的准确性和可靠性^[4]。

1 均衡技术

为了避免电池过充或过放, 现有被动均衡方案无法把电池组中所有单体电池均衡到相同状态。由于锂电池不可过充或过放, 为了保证电池系统的稳定性与安全性, 目前的被动均衡方案是在充电时, 单体电池电压达到设定电压点后, 开启对应的均衡电路, 此时充电器还是按照恒流、恒压模式充电, 那么充电电流将远远大于均衡电流, 此节电池电压将很快升至过充电压点, 随即停止充电, 但此时其它电池电压并没有达到设定电压点。全均衡造成了大量可用容量的浪费, 降低了续航里程^[5]。根据均衡过程中能量耗散情况不同, 均衡技术分为被动均衡和主动均衡两大类, 被动均衡是能量耗散型均衡电路, 而主动均衡是非耗散型均衡。

1.1 被动均衡

被动均衡技术的工作原理是让电量较高的电池单独放电, 把多余的电量转化为热能并消耗掉, 从而解决电池组中各个单体电池在电压和电量方面存在的不一致问题。开关分流电阻式均衡电路借助可控开关来控制耗能元件是否接入电路。当均衡电阻被接入电路时, 电池的一部分能量会通过均衡电阻转化为热量并消耗掉。而均衡电阻消耗能量的功率, 是遵循焦耳定律所规定的特定规律的。在现代工业里, 被动均衡是颇受欢迎的均衡形式。尽管它存在均衡电流较小、热效应明显等不足, 但在设计上具有结构简单的优势, 成本较为低廉, 而且电路体积小, 控制起来也相对容易^[6]。

1.2 主动均衡

主动均衡技术的工作原理是借助对开关器件或变换器的调控, 精准识别出需要进行均衡操作的电池单体或电池组。在确定目标后, 该技术会把电池组中不均衡的能量提取出来, 暂时存放在电感、电容这类储能介质

里。待能量存储完成，再把这些能量重新分配到其他电池单体或电池组中，以此实现电池组能量的均衡分布。根据单体电池与电池组之间能量的流动方向，主动均衡电路架构大致可分为两大类：一类是单体电池之间（C2C）进行的能量均衡，另一类是单体电池与电池组之间（C2P&P2C）进行的能量均衡。

在C2C型均衡电路架构中，会针对电池组里的每两个相邻单体电池，在它们的两端分别连接一个均衡电路，进而实现这两个相邻单体电池之间的能量传递。举例来说，若单体电池B1的能量比单体电池B2的能量高，那么电路1就会把B1的一部分能量转移给B2，进而让各个单体电池的能量维持一致。该均衡架构下其具体拓扑结构可分为开关电容型、电感型以及谐振型三种形式。C2C均衡架构具有均衡电路结构简单、器件电压应力低以及易于模块化设计的特点；缺点在于仅相邻电池之间进行均衡，均衡速度较慢、效率低且控制较复杂。

C2P&P2C型均衡电路架构的显著特征在于能够实现能量在单体电池与电池组之间的双向转移，既可以把单体电池的能量输送到电池组，也能将电池组的能量分配给特定的单体电池。在C2C型均衡电路架构中，均衡电路的连接方式较为直接，其一端与单体电池相连，另一端则连接至电池组。在该架构里，均衡电路被接入电池组中每两个相邻的单体电池两端。通过这样的连接设置，能够实现相邻单体电池之间的能量传递。不过，当电池组里串联的单体电池数量较多时，均衡电路的两端会出现较大的电压差。为应对这一情况，通常会借助隔离变压器来解决。根据拓扑结构的差异，被动均衡具体有两种实现方式，分别是多变压器法和多绕组变压器法。在多变压器法里，开关管与变压器原边相互串联，每一个单体电池都和该串联结构中的原边并联。同时，变压器的副边连接到电池组，如此便构建出了隔离DC/DC变换

器。不过，这种方式存在一定局限性，其均衡电路体积较大，成本也相对较高，所以更适合应用于大功率的场合^[7]。

2 端压容差自愈控制

均衡控制策略的核心目标是基于所选定的均衡变量，运用特定的算法精准控制均衡操作的开启与关闭，以此保证电池电量的一致性处于合理范围之内。该策略的研究方向主要聚焦于均衡变量的筛选以及均衡控制算法的设计。在设计均衡控制策略时，必须综合考虑多个关键因素，比如信号采样的精确程度、系统的响应特性、系统的鲁棒性以及迟滞效应等。一旦均衡控制策略制定得不够科学合理，极有可能造成系统出现误均衡和过均衡的状况。这不仅会导致系统产生不必要的电能损耗，缩短电池的使用寿命，还可能引发热失控问题，给整车的安全带来严重威胁。所以，要想提升均衡管理系统的性能，关键在于科学、慎重地选择均衡变量，并制定与之相匹配的均衡策略。

2.1 电池组被动全均衡电路设计及控制策略

首先设计单节电池均衡电路，使用电源管理IC对单节电池电压进行实时监测，当单体电池电压大于等于预设电压时，开启与单体电池并联的均衡模块对充电电流进行分流，同时改变充电模式为脉冲充电，此时充电电流等于均衡电流，该电池等效充电电流为零；当均衡开启时，MCU采样到该节电池的均衡信号。

将单个被动均衡模块整合形成被动全均衡系统框架如图1所示，当MCU通过均衡信号发送模块采集到有电池电压达到预设电压后，即控制双向开关，以脉冲宽度调制来实现充电电流调节，当MCU所有采集到所有单体电池的均衡信号后，即所有电池均充满电，电池组结束充电。

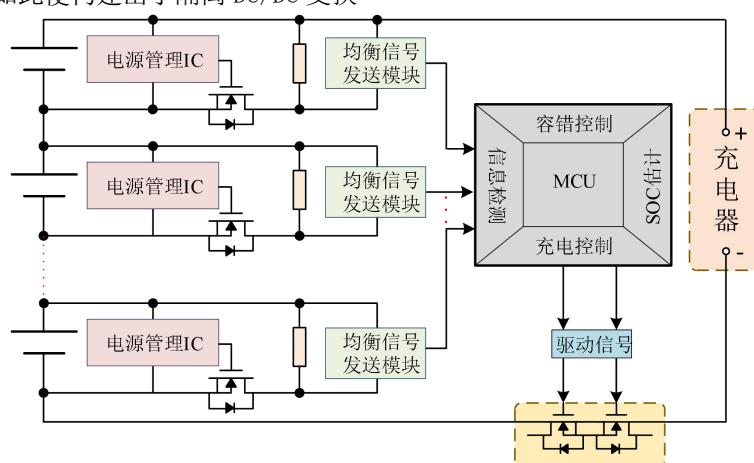


图1 被动全均衡系统框架

完成被动全均衡系统实验样机制作, 将实验样机与电池组相连进行充电, 通过监测电池电压及电流状态来判断被动全均衡系统的运行状态, 使用所有电池充满电后的电压来检验均衡效果^[9]。

2.2 容错判断保护机制

图 2 为电池管理系统容错判断处理保护机制框图, 首先确定电池系统保护类型, 主要有欠/过压、过流、

过温等保护信号, 当 DSP 检测到上述保护信号后根据信号类型采用软件延时或计次查询确保信号的可靠性。接收到保护信号后, 将保护信号与系统当前运行状态比对, 判定该保护信号是否匹配当前系统运行状态, 根据匹配结果分别采取不同处理方式。例如放电时检测到过压信号, 则判定该信号为错误信号, 并继续监测该信号, 直至该信号消失; 如判定该信号符合当前状态, 则采取保护措施, 控制对应 MOS 以保护电池组^[10-11]。

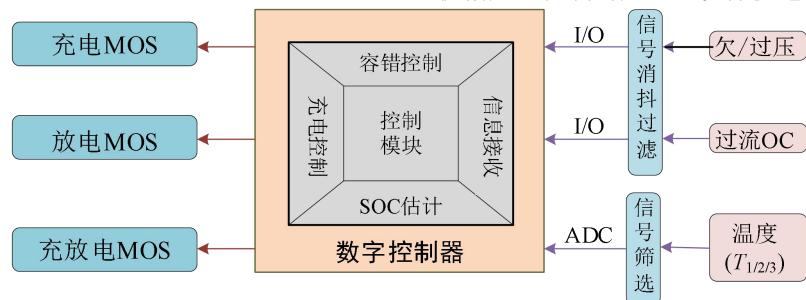


图 2 容错判断处理框图

2.3 电量实时在线估计算法开发

通过混合脉冲功率特性测试技术, 获得在不同温度下电池组 OCV-SOC-Temperature 之间的函数关系, 同时建立多维表格。

SOC 初值获取: 当电池静置时间超过 1 小时, 使用 OCV-SOC-Temperature 表格对电池组 SOC 进行校正, 如果没有超过 1 小时, 则使用之前保留的 SOC 值作为初始值。

充电时使用分段估计算法如图 3 所示, 在 SOC 低于

90% 时充电模式为恒流模式, 电流较为稳定, 使用查表法估计 SOC; 当电量超过 90% 后, 电池组充电模式会调整为恒压模式或脉冲充电模式, 电流明显变换, 则使用安时积分法估计 SOC。

放电时使用分段估计算法如图 3 所示, 在满电状态下进行放电, 当电量大于 80% 时, 电压变换较为明显, 使用查表法估计 SOC; 在电量为 80%~20% 区间, 由于电压平显著, 使用积分法与开路电压法综合估计 SOC; 当电量低于 20% 时, 电压变换较为明显, 使用查表法估计 SOC。

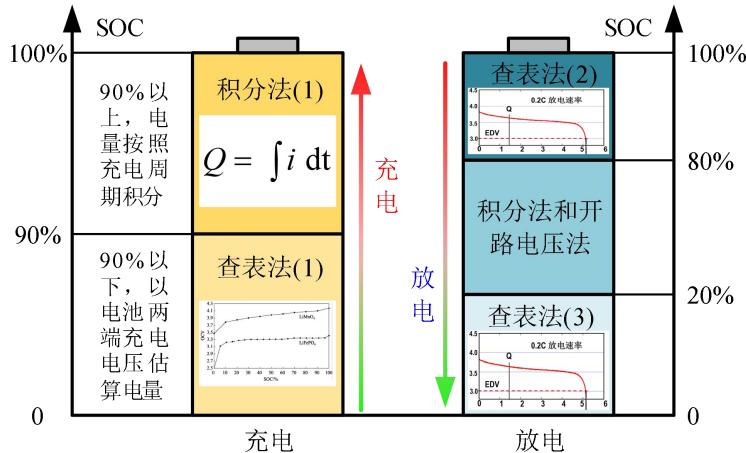


图 3 SOC 分段估算法

3 结语

实验表明,以电池组中单体电池实现全均衡为目标,在充电均衡时使用脉冲充电方式,使被均衡单体电池等效充电电量为零,从而实现电池组中所有电池全均衡。不直接使用保护芯片信号控制电池组保护开关,当电池保护芯片监测到电池有过充或过放时,对主控芯片发出保护信号,由主控芯片通过电流、电压、电量变化等信号综合判断保护信号是否有效,从而控制是否断开电池组使用。此方法在均衡过程中,避免了电压高的电池发生过充,同时在均衡时降低了充电电流,尽可能的避免了热失控的发生。

参考文献

- [1] 新能源汽车产业发展规划(2021-2035年). 国务院办公厅, 2020. 11.
- [2] 中国新能源汽车行业白皮书 2020 年[C]//艾瑞咨询系列研究报告 (2020 年第 12 期) . [出版者不详], 2020: 571-627.
- [3] 章治国, 徐堂意, 向林朋, 等. 多相交错并联自均流高增益 DC/DC 变换器及其控制策略[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(01): 27-37.
- [4] 华旸, 周思达, 何瑢, 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.
- [5] Zhiguo Zhang, Mingyu Liao, Dongrong Jiang, Xiaobin Yang, Shan Li. High Step-Up Isolated Forward-Flyback DC/DC Converter Based on Resonance with Pulse Frequency Modulation, Journal of Power Electronics, 2021, 21(2): 483-493.

- [6] Huihui Xiao, Tangyi Xu, Linpeng Xiang, Zhiguo Zhang*, Shiyun Xie, Dong Liu. A Variable Phase-Shift Control Scheme for Extended-Duty-Ratio Boost Converter with Automatic Current Sharing in High Step-up High Current Application, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 21(2): 483-493.
- [7] 华旸, 周思达, 何瑢, 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.
- [8] 汪宜秀, 魏学哲, 房乔华, 朱建功, 戴海峰. 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.
- [9] 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(03): 908-921.
- [10] 刘红锐, 张开翔, 郭奕旋, 等. 一种串联蓄电池系统多重多状态能量均衡器及其控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 652-660.
- [11] 曾俊. 基于大容量单体电池的集中式主动均衡系统及策略研究[D]. 重庆理工大学, 2021.

基金项目: 四川省大学生创新训练项目“智能陪护机器人”(202511116047);
成都工业学院大学生创新训练项目“被动均衡锂电池管理系统端压容差自愈控制研究”(QM2025002)。