

锂离子电池主动均衡电路设计与性能测试

赵晶

中天储能科技有限公司, 江苏南通, 226000;

摘要: 随着新能源汽车、储能系统等领域发展, 锂离子电池组应用广泛, 但电池单体不一致性影响性能, 被动均衡电路存在能量损耗大、效率低等问题。本文设计基于电感式双向拓扑的锂离子电池主动均衡电路, 确定适配 3.0-4.2V 单节电池、均衡电流 0-5A、效率 $\geq 85\%$ 的核心指标, 选用 STM32F103 为主控芯片, 搭配电感、MOS 管等元器件, 设计基于电压-SOC 联合判断的控制策略。搭建测试平台进行测试, 结果显示, 该电路均衡效率最高达 89.2%, 能在 40min 内将电池组单体电压差从 0.3V 降至 0.05V 以下, 在充放电及低温工况下性能稳定, 有效改善电池组一致性, 为锂离子电池组高效应用提供可靠方案。

关键词: 锂离子电池; 主动均衡电路; 电感式拓扑; 性能测试

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.053

引言

在全球能源清洁化、电气化转型背景下, 锂离子电池因能量密度高、循环寿命长等优势, 成为新能源汽车、便携式电子设备及大规模储能系统的核心储能元件。然而, 电池制造参数差异、使用中温度不均和充放电电流波动, 使电池组内各单体电池参数逐渐不一致, 会导致“过充”或“过放”, 降低电池组实际容量、缩短循环寿命, 甚至引发安全事故。为解决此问题, 均衡电路应运而生, 其核心功能是让电池组内各单体状态趋于一致。目前, 均衡电路主要分为被动均衡与主动均衡两类: 被动均衡通过并联电阻耗散电能, 结构简单、成本低, 但能量损耗大、效率低, 不适用于大功率、长续航场景; 主动均衡通过储能元件转移能量, 可回收利用, 效率显著提升, 是高要求场景的主流选择。

1 锂离子电池主动均衡电路相关理论

1.1 电池不一致性的产生与危害

锂离子电池组不一致性存在于制造、使用及老化全程。制造阶段, 正负极材料颗粒度、电极涂层厚度等差异, 使各单体初始容量、内阻有差别; 使用阶段, 电池组内温度梯度是加剧不一致性的关键, 温度差异扩大单体间容量与电压差距, 充放电倍率波动也会影响不一致性。电池不一致性危害具累积性与传导性, 短期会使电池组可用容量下降, 长期会加速电池老化, 还可能引发短路、增加热失控风险。

1.2 主动均衡电路的工作原理与优势

主动均衡电路核心是用储能元件构建能量转移通

道, 实现电池组能量重新分配。根据储能元件不同, 主动均衡拓扑分电感式、电容式、变压器式三类。电感式适用于中大功率场景; 电容式适用于小容量、多单体电池组; 变压器式隔离性好、抗干扰能力强, 但不适用于大规模电池组。与被动均衡相比, 主动均衡电路优势明显: 一是能量利用率高, 可大幅减少电能浪费; 二是均衡速度快, 能快速缓解电池组不一致性; 三是温度控制好, 可维持电池组在适宜工作温度范围, 延长电池寿命。

2 锂离子电池主动均衡电路设计

2.1 设计指标确定

结合新能源汽车低压辅助电池组(通常 12V, 由 3 节 3.7V 锂离子电池串联组成)应用场景, 确定主动均衡电路核心设计指标。电压适配方面, 单节锂离子电池工作电压 3.0-4.2V, 电路需支持该单体电压均衡, 适配 3 节串联电池组(总电压 9.0-12.6V); 均衡电流方面, 考虑辅助电池组充放电电流 1-3A, 均衡电流设为 0-5A 可调, 确保快速均衡; 能量效率方面, 要求均衡电路能量转换效率 $\geq 85\%$, 常用工况(均衡电流 2-3A)时效率 $\geq 88\%$; 可靠性与安全性方面, 电路需具备过流、过温、短路保护功能, 避免电池损坏; 此外, 电路体积控制在 $50\text{mm} \times 30\text{mm} \times 15\text{mm}$ 以内, 工作温度范围 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$, 满足汽车使用需求。

2.2 拓扑结构选择

对比电感式、电容式、变压器式三种主流拓扑特性, 结合设计指标与应用场景, 选择电感式双向均衡拓扑。电容式拓扑均衡速度快, 但会增加电路体积与成本, 且

均衡效率不稳定;变压器式拓扑隔离性好,但体积大、设计复杂度高;电感式双向拓扑结构简单、体积小、双向能量转移能力强。具体拓扑结构:以3节串联电池组(B1、B2、B3)为例,电感L作为储能元件,不同MOS管组合构成各电池与电感的充放电回路,主控芯片通过PWM信号控制MOS管导通与关断,实现能量双向转移。例如,B1电压高于B3时,按特定顺序控制MOS管导通,完成B1到B3的能量转移;反之则反向控制,实现能量从B3到B1的转移。

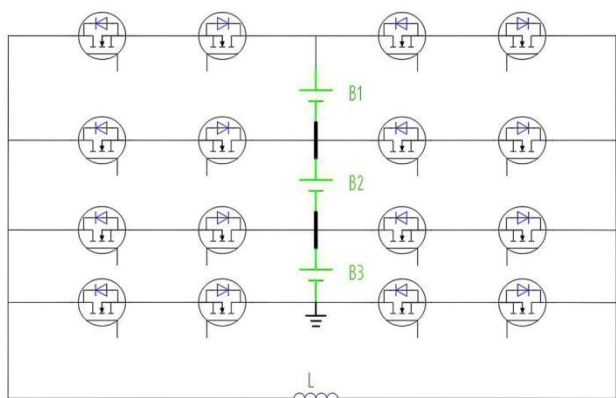


图1 电路拓补简图

2.3 关键元器件选型

关键元器件选型影响均衡电路性能与可靠性,需依设计指标筛选。主控芯片选STM32F103C8T6单片机,它是32位ARMCortex-M3内核,主频72MHz,有12位ADC模块可采集8路模拟信号,能满足电池电压、电感电流、MOS管温度采集需求;内置定时器可生成PWM信号控制MOS管导通时间,GPIO引脚能处理保护信号,成本低、稳定性高,符合设计需求。电感选型按均衡电流与100kHz工作频率,用公式 $L=U \times D / (I \times f)$ 计算,当 $U=0.3V$ 、 $D=50\%$ 、 $I=5A$ 、 $f=100kHz$ 时,电感值 $\geq 3\mu H$;选屏蔽式功率电感CDRH127-4.7 μH ,饱和电流6.5A,屏蔽结构可减少电磁干扰。MOS管选低导通电阻、高耐压的N沟道MOS管AOD4184,导通电阻8m Ω ,耐压30V,最大drain电流12A,SOT-23封装利于电路小型化。采样与保护元器件方面,电压采样用分压电阻,电流采样用分流电阻,温度采样用NTC热敏电阻;过流、短路保护通过STM32的ADC模块采集电流信号,超阈值关断MOS管PWM信号,过温保护通过NTC电阻采集温度信号,超阈值暂停均衡,温度下降后恢复。

2.4 控制策略设计

为实现高效稳定均衡控制,设计基于电压-SOC联合判断的控制策略,避免单一电压判断误差。控制策略核心流程如下:首先,STM32经ADC模块以10Hz频率实时采集各节电池电压、均衡电流及MOS管温度,保证数据实时性。接着,结合提前标定的电池OCV-SOC曲线,根据采集电压值计算各单体SOC值。然后,判断电池组是否需均衡,当任意两个单体的电压差 $\Delta V \geq 0.05V$ 或SOC差 $\Delta SOC \geq 2\%$ 时,触发均衡功能,否则待机。在均衡执行阶段,依据电压与SOC联合判断确定能量转移方向,避免因电压波动导致错误转移。同时,通过PWM信号调节MOS管占空比控制均衡电流, ΔV 或 ΔSOC 较大时,占空比设为50%,均衡电流达3-5A;较小时,占空比降至20%-30%,均衡电流降至1-2A,避免电池损伤。均衡中实时监测均衡电流与MOS管温度,若电流 $>6A$ 或温度 $>85^\circ C$,关断PWM信号暂停均衡,故障解除后恢复。最后,当所有单体的电压差 $\Delta V < 0.05V$ 且SOC差 $\Delta SOC < 2\%$ 时,停止均衡,返回待机。此外,在 $-20^\circ C$ - $0^\circ C$ 环境下,适当提高均衡电流,确保均衡效率不低于80%。

3 锂离子电池主动均衡电路性能测试

3.1 测试平台搭建

为验证主动均衡电路性能,搭建含电池组、主动均衡电路、数据采集模块、负载模拟器及上位机的测试平台。电池组用3节18650锂离子电池,经老化实验制造不一致性。主动均衡电路为电感式双向均衡电路,实现能量转移。数据采集模块用NIUSB-6211数据采集卡,采集电池电压等数据并传输至上位机。负载模拟器用IT8511可编程直流电子负载,模拟新能源汽车低压辅助电池组负载。此外,将平台置于高低温试验箱内,控制温度在 $-20^\circ C$ - $60^\circ C$,模拟不同环境温度场景。

3.2 测试项目与方法

测试项目有均衡效率、速度、不同工况适应性及可靠性测试。均衡效率测试:常温($25^\circ C$)下,设电池组初始状态,启动均衡使能量从B1转至B3,记录能量算效率,重复3次取均值;测均衡电流为1-5A时效率,分析电流影响。均衡速度测试:常温下,设初始状态,启动均衡,记录到单体电压差 $\leq 0.05V$ 且SOC差 $\leq 2\%$ 的时间,测初始电压差为0.1-0.3V时的均衡时间,分析

初始不一致程度影响。不同工况适应性测试: 包括充电、放电及低温工况测试, 充电、放电时以 1C 电流进行并启动均衡, 记录电压变化; 低温时设试验箱为 -20°C 、 -10°C 、 0°C , 测效率与速度。可靠性测试: 循环充放电 100 次, 每次启动均衡, 结束后测容量衰减率及单体电压差。

3.3 测试结果与分析

3.3.1 均衡效率测试结果

常温 25°C 时, 均衡效率测试结果: 均衡电流为 1A 时, 效率 86.3%; 2A 时, 升至 88.5%; 3A 时, 达最高 89.2%; 4A 时, 降至 87.8%; 5A 时, 进一步降至 85.6%。结果表明, 均衡效率随电流先升后降, 2-3A 常用电流范围内, 效率超 88%, 满足设计指标 ($\geq 85\%$)。效率变化原因是: 电流较小时 (1A), 电感磁芯损耗与 MOS 管开关损耗占比大, 效率低; 电流增大 (2-3A), 导通损耗占比提升。损耗稳定时效率升高; 电流超 3A, MOS 管导通损耗 (与电流平方成正比) 和电感饱和损耗增加, 致效率下降。总体而言, 电路在常用电流范围效率佳、损耗小。

表一 均衡效率测试结果

均衡电流 (A)	1	2	3	4	5
均衡效率 (%)	86.3	88.5	89.2	87.8	85.6

3.3.2 均衡速度测试结果

均衡速度测试结果如表 2 所示 (常温 25°C , 均衡电流 3A): 当初始电压差为 0.1V 时, 均衡时间为 15min; 初始电压差为 0.2V 时, 均衡时间为 28min; 初始电压差为 0.3V 时, 均衡时间为 40min。结果表明, 均衡时间与初始电压差呈近似线性关系, 初始不一致程度越大, 均衡时间越长, 但即使在初始电压差 0.3V 的严重不一致状态下, 也能在 40min 内将电压差降至 0.05V 以下, 满足快速均衡的需求。对比被动均衡电路 (同等初始电压差下需 120-150min), 本文设计的主动均衡电路均衡速度提升约 3 倍, 显著改善了电池组一致性的恢复效率。

表 2 均衡速度测试结果

初始电压差 (V)	0.1	0.2	0.3
均衡时间 (min)	15	28	40

3.3.3 不同工况适应性测试结果

充电工况测试: 未启动均衡, 电池组充至 4.0V 时, B1 达 4.2V 有过充风险, B3 仅 3.8V, 电压差扩至 0.4V;

启动均衡, 充电中各单体电压差控制在 0.05V 内, 充至 4.2V 时所有单体同步达截止电压, 无过充, 表明均衡电路可抑制充电电压差扩大。放电工况测试: 未启动均衡, 放至 3.2V 时, B3 降至 3.0V 过放, B1 为 3.4V, 电压差 0.4V; 启动均衡, 放电中电压差 $\leq 0.05\text{V}$, 放至 3.0V 时所有单体同步达截止电压, 无过放, 验证了放电均衡有效性。低温工况测试: -20°C 时, 均衡效率降至 80.5%, 均衡时间 (初始电压差 0.3V) 延至 55min; -10°C 时, 效率升至 83.2%, 均衡时间 48min; 0°C 时, 效率升至 86.1%, 均衡时间 42min。虽低温下效率与速度下降, 但均满足设计要求 (-20°C 时效率 $\geq 80\%$), 原因是低温使电池内阻和 MOS 管导通电阻增大致效率下降。通过“低温提高占空比”优化, 缓解了低温性能衰减, 确保低温基本均衡功能。

3.3.4 可靠性测试结果

100 次循环充放电后, 电池组的容量衰减率为 5.2%, 而未使用均衡电路的对照组 (相同电池组) 容量衰减率为 12.8%, 说明均衡电路能显著减缓电池组的容量衰减; 循环后, 使用均衡电路的电池组单体电压差为 0.03V, 而对照组电压差为 0.28V, 进一步验证了均衡电路长期使用的可靠性, 能持续维持电池组的一致性。此外, 整个可靠性测试过程中, 均衡电路未出现过流、过温保护误触发现象, MOS 管、电感等元器件无损坏, 电路稳定性良好。

4 结语

本文针对锂离子电池组不一致性问题, 设计基于电感式双向拓扑的主动均衡电路。经理论分析、元器件选型与控制策略优化, 实现高效稳定均衡功能, 经性能测试验证电路可行。测试显示, 该电路常温均衡效率最高达 89.2%, 40min 内可将 0.3V 初始电压差降至 0.05V 以下, 在充放电及 -20°C 低温工况性能良好, 100 次循环后电池组容量衰减率仅 5.2%, 显著优于无均衡电路对照组。该设计为新能源汽车低压辅助电池组、便携式储能设备等提供可靠均衡方案, 实用价值高。

参考文献

- [1] 王明. 锂离子电池材料的合成与性能研究[J]. 化学学报, 2020, 48 (9): 1101-1110.
- [2] 李华, 张强. 电池结构工程对锂离子电池性能的影响研究[J]. 电池技术, 2019, 25 (4): 321-330.