

# 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 50mm  $\times$  30mm  $\times$  15mm 以内，工作温度范围 -20°C-60°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。

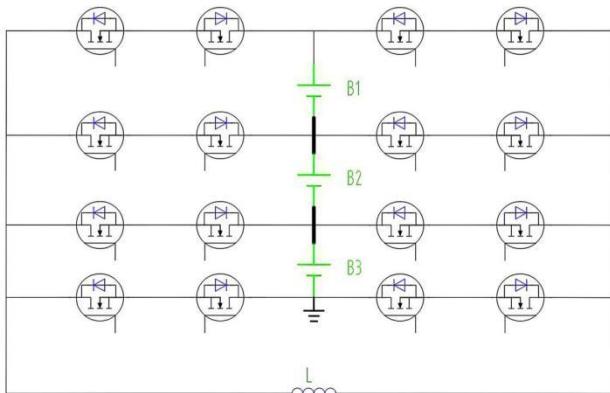


图1 电路拓补简图

### 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ARM Cortex-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 $\mu H$ ，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 $8m\Omega$ ，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， $\Delta V$ 或 $\Delta SOC$ 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℃、-10℃、0℃，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℃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（≥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℃，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 ≤ 0.05V，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℃时，均衡效率降至 80.5%，均衡时间（初始电压差 0.3V）延至 55min；-10℃时，效率升至 83.2%，均衡时间 48min；0℃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℃时效率 ≥ 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℃ 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.