

锂离子电池组均衡电路设计与仿真

朱浩, 廖红辉, 鄂加强, 邓元望

(湖南大学机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 在储能电站和纯电动汽车等应用场景中, 电池单体以串并联的方式集成在电池包内部, 电池组在使用的时候会产生相互间不一致的现象, 这种不一致会影响电池寿命与续航里程。为此, 设计了电池模块内部与模块之间的均衡拓扑电路, 并对所设计电路均衡原理进行分析; 在 Simulink/Simpowersystem 系统中搭建了能量转移模型及模块内均衡模型, 对均衡拓扑结构进行了仿真。结果表明, 所设计的均衡系统能够实现电池能量均衡。

关键词: 锂离子电池; 电池管理系统; 均衡电路; 能量均衡

中图分类号: TM912.1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1008-0198(2022)04-0028-05

Design and Simulation of Equalization Circuit for Lithium-Ion Battery

ZHU Hao, LIAO Honghui, E Jiaqiang, DENG Yuanwang

(College of Mechanical and Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In applications such as energy storage plants and pure electric vehicles, cell units are integrated in the battery pack in series and parallel, the battery packs may not be consistent with each other when in use, and this inconsistency can affect battery life and range. Aiming at this phenomenon, the paper designs the balanced topology circuit between the module and the module, analyzes the balanced principle of the designed circuit, builds the energy transfer model and the module internal balanced model in the Simulink/Simpowersystem, and simulates the equilibrium topology. The results show that the designed equalization system can realize the energy equalization of the battery.

Key words: lithium-ion battery; battery manage system; equalization circuit; energy equalization

0 引言

在电池使用的过程中, 特别是储能电站和电动汽车等复杂工况下, 电池组被频繁充电、放电, 影响了电池的使用性能^[1-6]。同样, 非正常温度变化也恶化了电池稳定性, 造成电池产生不均衡现象^[7-10]。均衡电路的设计需要考虑均衡效率、功耗、电池数量等多个方面的因素^[11-13]。作为车载电池包均衡系统, 除了要保证良好的均衡效果, 还需要从整车集成的角度出发, 尽量减少电池包所占用的几何空间^[14-15]。本文以电池模块作为研究对

象, 设计模块内部电池均衡电路与模块间均衡电路。

1 均衡电路总体设计

均衡电路的主要性能包括均衡的有效性分析、均衡能量损失大小估算、均衡时间及均衡效率等几个方面。合理的设计电路能有效提高串联动力电池的一致性, 对电池包的整体使用性能有比较大的提高^[16]。以纯电动汽车电池包为研究对象, 将电池包划分为若干个电池模块, 每个电池模块含有六个单体电池, 分别设计模块内部均衡拓扑电路及模块

之间均衡拓扑电路。

如图 1 所示，一块 BQ76PL536 芯片与 6 块单体电池构成一个电池模块，各个电池模块之间电池保持串联，BQ76PL536 芯片保持上下相互连接的方式，通过 SPI 通信方式传递信息。最底层模块与主控芯片之间设计有隔离电路，用来防止强电危害。主控板通过串口通信将数据反馈到上位机进行显示。设计的均衡控制系统具有以下特征：设计的系统采用主动均衡方式；以 12 块磷酸铁锂电池作为研究对象，额定电压为 40 V；设计的均衡系统能在充电时间范围以内完成对所有电池的均衡；控制策略可以对单体电池电压或者电池荷电状态进行均衡；电池组中部分单体发生异常情况，控制电路能对其进行保护，防止电池组进一步被破坏；所设计系统各个数据采集板能与主控板进行实时通信，保证均衡的及时性与有效性；模块化设计，一个模块发生故障不会对其他模块造成影响。

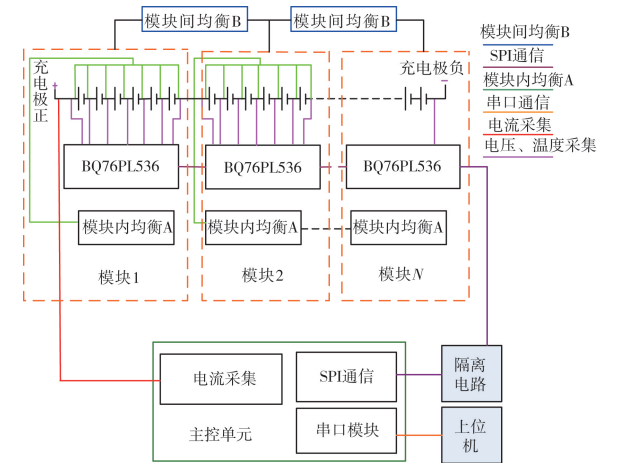


图 1 均衡设计总体框图

1.1 均衡电路拓扑结构

以 6 个单体电池为一个模块，模块内部采用 BQ76PL536 控制芯片采集各个单体电池的电压及温度信号。该芯片内部集成有均衡控制模块，当电池电压值达到所设定的阈值时，相应的芯片引脚输出高电平，促发 MOSFET 开关，对应电池进入均衡状态。当相应电池放电到电池极限阈值，会触发另外一个 MOSFET 开关，将储能元件上的能量转移到对应电池上，实现模块内部均衡控制。

结合对单体电池与电感储能元件之间能量交换的分析，对电池模块内部 6 块电池之间均衡电路的拓扑结构原理如图 2 所示。电池以串联的方式连接在模块内部，在电池两侧对称分布数字开关（M1，M2，…，M14），这些开关的控制信号来自数据采集及均衡控制芯片 BQ76PL536，由其引脚输出相

应的控制信号。

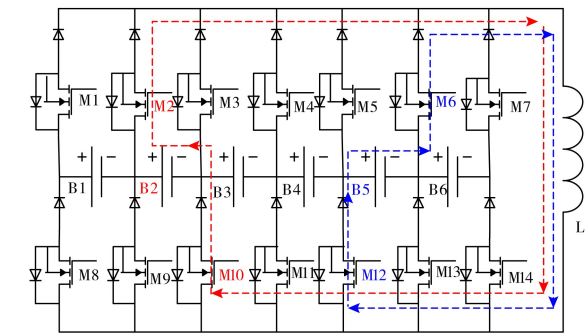


图 2 电池模块内部均衡原理

图 2 中，假设电池 B2 处于过充电状态，B5 为 6 个电池中电压值最小的电池。BQ76PL536 按照设定的时间间隔巡检内部 6 块电池，一旦检测到 B2 电池电压超过系统设定的门限电压，则触发 M2 和 M10 导通，依据此时电池电压与电池平均值之间差值的大小程度，控制 M2 和 M10 导通设定的时间，电池 B2 给电感元件 L 充电。电池 B5 电压在模块内部电压值最小，需要得到过充电池能量，从而使自身加快充电速度。由模块内部均衡控制芯片触发充电 MOSFET 开关，对 B5 充电时，M6 和 M12 导通，电池 B5 与电感构成通路，此时电感内部含有 B2 的能量，在与 B5 连接时可以将这部分能量转移到 B5 中，实现模块内部电池的均衡。

本文选用的电池为标称电压 3.2 V 的磷酸铁锂电池、其标称容量为 25 A · h。设计均衡电流的最大值为 0.04 C，即 1 A，所以均衡电路中电感的峰值电流为 1 A。为了能量的充分转移，均衡电路将工作在电流不定期关断与打开模式，所以在均衡电流流经电感之前，其内部是没有电流通过的，即零能量。根据最大均衡电流 V_B 和电感上的电流 i_L 变化公式：

$$i_L = \frac{V_B}{L}t$$

(1)

得到电感上流过的最大电流为：

$$i_{L_Max} = \frac{V_B}{L}DT$$

(2)

式中， D 为 MOSFET 占空比的大小； T 为开关周期。由于 MOSFET 是全开或者全关模式，所以占空比为 1，假设工作频率为 10 kHz，可以得到电感值大小为 320 μH。考虑到实际应用中电感的损耗、PCB 板的布置、价格等因素，选择的电感元件体

积应尽量小，选用大小为 470 μH 的 CDH125 电感元件其为贴片电感，能通过最大电流值为 2~3 A，满足设计需要。

1.2 模块间均衡电路

对于模块之间的均衡，由于其内部电压范围、状态与单体电池存在很大差异，不能采用单体电池的电池模型进行分析，设计另外一种均衡控制电路实现不同电池模块之间的均衡，如图 3 所示。

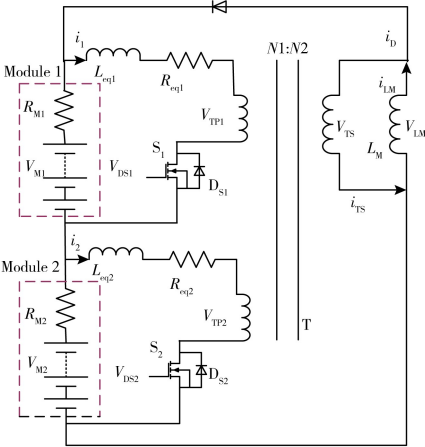


图 3 模块间均衡电路

在图 3 中，每一个电池组模块连接一个 MOSFET 开关、绕组原边、由 6 个电池组成的电池模块（对应内阻为 R_{MX} ，电压值大小为 V_{MX} ）。变压器 T 与电感元件 L_M 连接在一起，转换比率为 $N1:N2=1:1$ 。 R_{MX} 表示电池模块的内阻， R_{eqx} 表示寄生电阻，包括 MOSFET 开关电阻及跟踪电阻， L_{eqx} 为寄生电感元件，包括变压器 T 的漏感及跟踪电感。

假设上述电路中： $V_{M1} > V_{ave} = \frac{(V_{M1} + V_{M2})}{2} > V_{M2}$ 则主要均衡方法由以下几个步骤构成。

1) t_0-t_1 期间：在 t_0 时刻，由 BQ76PL536 测得各个模块的电池电压数值，分别求得各个模块总电压大小，及两个模块的平均电压值。假设 $V_{M1} > V_{M2}$ ，于是在开始时刻开启模块 1 的 MOSFET 开关 S_1 ，将 Module 1 的能量转移到副边电感中。此时，变压器原边的回路中，由电路原理可得：

$$V_{TPX} = V_{MX} - L_{eqx} \frac{dI_x}{dt} - R_{eqx} I_x \tag{3}$$

式中， I_x 为每个均衡子回路对应的均衡电流大小。

通过副边电感 L_M 的电压及电流可表示为：

$$i_{LM} = i_1 \tag{4}$$

$$V_{LM} = L_M \frac{di_{LM}}{dt} \tag{5}$$

2) t_1-t_2 期间：在 t_1 时刻，关闭两个回路的 MOSFET 开关，副边二极管开始传导电感电流，电流由外接线路传递到两个电池模块，同时给两个电池模块充电。一段时间之后，副边电感的电压变为 0 V，则关断均衡电路。由于电池在充放电的过程中，电池内部发生了剧烈的化学反应，电池的温度及电压值处于不稳定状态，于是此时关闭均衡电路，将电池模块静置 30 min。

静置过后，重新读取 BQ76PL536 测得的电池电压状态，判定电池模块电压值大小，开启新一轮模块间均衡。上述电路中，寄生电阻及电感在均衡过程中起到了一定的作用。

2 均衡电路仿真

在均衡电路设计的基础上，对设计的均衡拓扑电路进行 Simulink 模型仿真，验证均衡拓扑电路的可行性。在可行性的基础上，仿真模块内部均衡电路的效率。

2.1 能量转移方式仿真

为了验证设计的 470 μH 电感均衡方式是否能够作为中间储能元件在电池之间传递能量，在 Simulink 中搭建两块电池的均衡仿真模型。如图 4 所示，将整个电池模型封装成名叫 Battery 的子系统模块，模块有四个端口，电源正负极、电池电压与 SOC 值。

两个电池之间均衡的算法为：利用模拟前端估算两个单体电池的 SOC 状态值，将两个电池模型的 SOC 值相减，再求绝对值，所得到结果与常数 0.005 进行比较。如果大于 0.005，则继续对两个电池进行均衡；如果小于 0.005，则仿真结束。常数 0.005 为均衡仿真设定的两个电池之间均衡的阈值，只要两个电池 SOC 差异小于该值，则认为电池一致性良好，均衡结束。否则，两个电池之间继续进行能量的相互转换。

模型中，Subsystem 为两个电池之间 SOC 比较函数。Subsystem 的输入端为两个电池模型的 SOC 状态值，将输入信号进行大小比较，若 SOC_1 大于 SOC_2，则输出为 Out1，反之输出 Out2。该设计用来触发对应的 MOSFET 开关的通断，从而决定对应电池是进行充电均衡还是放电均衡。Subsystem 的内部原型如图 5 所示。

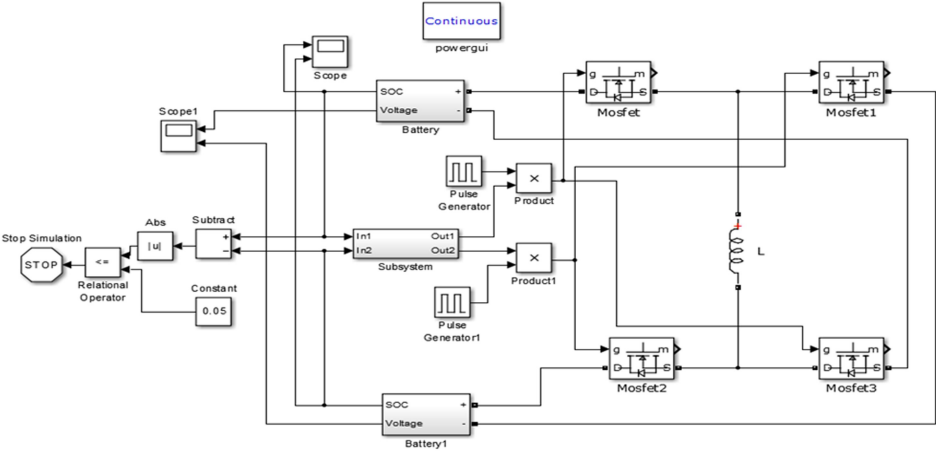


图 4 两电池之间能量转移仿真

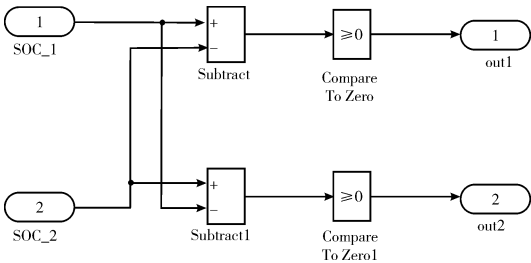


图 5 Subsystem 仿真原理

图 4 中，设定其中一块电池的电压值为 3.1 V，容量为 80%，另外一块电池电压为 2.7 V，容量为 60%。选择电感大小 $L = 470\ \mu\text{H}$ ，MOSFET 占空比 $D = 50\%$ ，开关频率 $f = 4\ \text{kHz}$ 。该模型的仿真结果如图 6 所示。

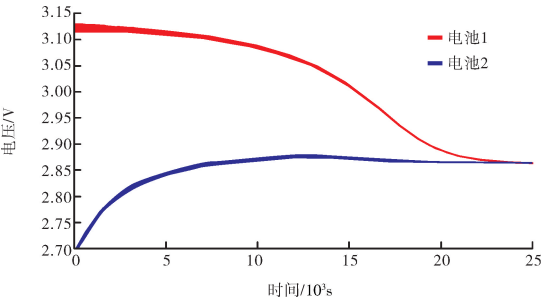


图 6 能量转移仿真结果

从仿真结果可以看出，在均衡开始阶段，高电压电池电压跳变比较大，均衡电感被较大电压反复充电，内部存储容量达到满载。随着时间推移，两个电池之间压差逐渐减少，均衡电感所接收到的充电电压减少，所以均衡曲线变窄。最后两条曲线重合，表示两个电池电压差值在 0.005 以内，所搭建的电感均衡电路能够实现不同电池之间电量的交换。

2.2 模块均衡仿真

2.2.1 非均衡仿真

在 Simulink 中搭建 6 个电池充电模块，设置各个电池的电压值与 SOC 梯度分布。按照电池实际充电方式，首先对串联电池组进行恒流充电，待电压值达到 3.6 V，再采用恒压充电方式。同样，放电过程中，串联电池两端接一个负载为 $20\ \Omega$ 的电阻，用 Scope 记录电池电压与 SOC 变化曲线。仿真结果如图 7、8 所示。

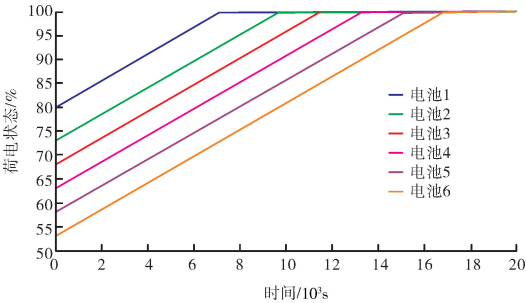


图 7 电池模块非均衡充电 SOC 仿真结果

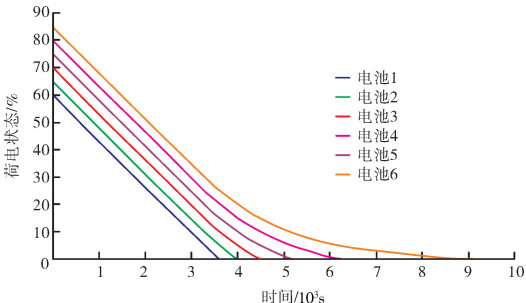


图 8 电池模块非均衡放电 SOC 仿真结果

在没有加入均衡系统的情况下各个电池的 SOC 值随充放电时间变化呈现出规律的线性关系。充电过程中，各个电池从设定的初始值增加到 100% 满

电量状态的 SOC 曲线呈直线。放电过程中，各电池 SOC 从初始值呈直线下降到 0，表明充放电过程中各个电池得到与释放出来的能量是一致的，各个电池之间没有能量转换。但是，以上仿真是在理想状态下进行的，实际使用时电池组存在不一致，SOC 变化曲线并不会呈现良好的线性关系。

2.2.2 均衡系统仿真

在非均衡模型的基础上，建立模块内部均衡仿真模型，验证模块内部 6 个电池的均衡仿真效果。该仿真主要是验证电池组在静置状态下电池之间电量的转移情况。仿真中，具体参数设置值见表 1。

表 1 均衡仿真参数

项目	占空比/	开关频	初始电池荷电状态/%					
	%	率/kHz	电池 1	电池 2	电池 3	电池 4	电池 5	电池 6
数值	50	4	92	90	60	48	32	28

依据表 1 中的设置参数，得到的仿真结果如图 9 所示。

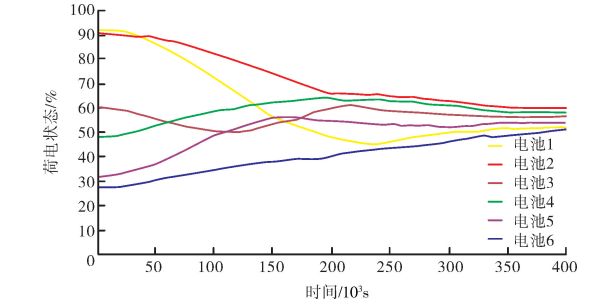


图 9 模块内部均衡 (SOC) 仿真结果

不同初始状态的锂电池在均衡系统开启之后，各个电池之间按照设定的算法，相互之间进行能量交换。荷电状态高的单体电池电量降低，将能量转移到荷电状态低的电池内部。在第 200 ks 左右，SOC 曲线开始向中间聚集，表现出较好的一致性。

与前面电池之间能量转移相比较，两个电池能量交换仿真用时 25 ks，电池之间表现出良好的均衡效果。而 6 个电池之间均衡总用时达 400 ks，时间远大于两电池均衡。原因是两电池之间算法简单，只需要在两个数值之间比较大小，而 6 个电池之间均衡需要求取 SOC 最值所对应电池，再对该两个电池进行均衡。反复运行，直到电池组各个电池的 SOC 值在设定的范围以内。仿真结果表明，设计的均衡拓扑电路能够实现电池模块的均衡，电池之间在一定范围内一致性良好。

3 结语

本文提出均衡设计的总体设计方案，综合考虑

电池组均衡电路的均衡效率与电池成组等因素，设计模块内部电池均衡电路与模块之间的电池均衡电路。在 Simulink 环境中搭建模块内部均衡仿真模型以及电池之间能量转移模型，仿真结果表明，所设计的均衡拓扑电路能够实现电池模块的均衡，电池之间在一定范围内一致性良好。

参 考 文 献

[1] 张剑波, 卢兰光, 李哲. 车用动力电池系统的关键技术与学科前沿 [J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3 (2): 87-104.

[2] 史瑞祥. 电动汽车锂离子动力电池安全性问题的分析 [J]. 汽车电器, 2013 (12): 51-53.

[3] 孙延帅. 基于荷电状态估计的电动汽车动力电池组均衡控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.

[4] 王博. 电动汽车动力电池管理系统 (BMS) 设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.

[5] 郭向伟. 电动汽车电池荷电状态估计及均衡技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.

[6] Osswald P. J., Erhard S. V., Rheinfeld A., et al. Temperature dependency of state of charge inhomogeneities and their equalization in cylindrical lithium-ion cells [J]. Journal of Power Sources, 2016 (329): 546-552.

[7] 伍元发, 吴三毛, 裴锋, 等. 锂离子电池组均衡电路及其均衡策略研究 [J]. 电气应用, 2014, 33 (11): 50-54.

[8] 张谦, 唐飞, 刘涤尘, 等. 计及电动汽车充电和负荷波动极限的电力系统静态电压稳定性评估方案 [J]. 电网技术, 2017, 41 (6): 1888-1895.

[9] 宋珂, 张涛, 牛文旭, 等. 燃料电池汽车能量管理动态规划算法的误差累积问题及解决方法 [J]. 汽车工程, 2017, 39 (3): 249-255.

[10] Shili S., Hijazi A., Sari A., et al. Balancing Circuit New Control for Supercapacitor Storage System Lifetime Maximization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (6): 4939-4948.

[11] 柏吉宽. 锂离子电池组能量均衡研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2014 (19): 60-64.

[12] Javier Gallardo-Lozano, Enrique Romero-Cadaval, M-isabel Milanes-Montero, et al. Battery equalization active methods [J]. Journal of Power Sources, 2014 (246): 934-949.

[13] 马泽宇, 姜久春, 文锋, 等. 用于储能系统的梯次利用锂电池组均衡策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (3): 106-111, 117.

[14] 简文宇, 周金治, 张惠玲. 一种基于开关技术的锂电池组均衡方法及实现 [J]. 电源技术, 2014, 38 (4): 644-646.

[15] Jiuchun Jiang, Yan Liang, Qun Ju, et al. An Equivalent Circuit Model for Lithium-Sulfur Batteries [J]. Energy Procedia, 2017 (105): 3533-3538.

[16] W. D. Widanage, Anup. Barai, Gael Chouchelamane, et al. Design and use of multisine signals for Li-ion battery equivalent circuit modelling. Part 2: Model estimation [J]. Journal of Power Sources, 2016 (324): 61-69.