

# 电池管理系统均衡控制策略研究

汪琦<sup>1</sup>, 吴长水<sup>2</sup>

(1.上海市南湖职业学校, 上海 200439;  
2.上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)  
✉610847238@qq.com; wuchangshui@sues.edu.cn



**摘要:** 针对电动汽车串联电池在电路中的不一致性问题, 对钛酸锂电池组不一致性的原因和均衡方法进行了详细分析, 通过对比研究主动均衡和被动均衡, 并结合具体需求, 设计了基于电压的被动均衡控制策略, 采用Matlab/Simulink对电池组均衡策略进行模型的搭建, 并进行仿真验证。通过实验测试验证均衡控制策略的有效性。

**关键词:** 电池管理系统; Matlab/Simulink; 被动均衡; 控制策略

**中图分类号:** TP319 **文献标识码:** A

## Research on Equilibrium Control Strategy of Battery Management System

WANG Qi<sup>1</sup>, WU Changshui<sup>2</sup>

(1. Shanghai Nanhu Vocational School, Shanghai 200439, China;  
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Technology, Shanghai 201620, China)  
✉610847238@qq.com; wuchangshui@sues.edu.cn

**Abstract:** Aiming at the inconsistency of electric vehicle series batteries in the circuit, this paper first elaborates the causes of inconsistency of the lithium titanate battery pack and the equalization method. Then, through a comparative study of active and passive equalization, a voltage-based passive equilibrium control strategy is designed based on specific needs, using the tool of Matlab / Simulink to build a model of battery equilibrium strategy. Finally, the follow-up simulation experiment verifies the effectiveness of the proposed equilibrium control strategy.

**Keywords:** battery management system; Matlab / Simulink; passive equalization; control strategy

## 1 引言(Introduction)

电池单体串联组成电池包。由于各个单体电池在生产和使用过程中不可能做到完全一致, 随着时间积累便产生差异性。于是电池均衡是电池串联成组应用技术的核心之一<sup>[1]</sup>。其目的是通过电压或者容量均衡的方式, 使各个单体趋于一致, 从而使电池包整体的最大可用容量提高。本文通过对钛酸锂电池组不一致性的原因和均衡方法进行了详细分析, 通过对比研究主动均衡和被动均衡, 并结合具体需求, 设计了基于电压的被动均衡控制策略, 采用Matlab/Simulink对电池组均衡策略进行模型的搭建, 并进行仿真验证<sup>[2]</sup>。通过实验测试验证均衡控制策略的有效性。

## 2 电池均衡方法分析(Analysis of battery equalization methods)

### 2.1 电池的不一致性分析

由于电池不一致性对电动汽车的影响, 在电池的使用过程中, 保证电池组中的单体电池的稳定性平衡性尤为重要。为了解决电池不一致性, 首先要分析电池的不一致性产生的原因。根据其产生的原因制定电池均衡系统, 电池均衡又分为两类: 主动均衡和被动均衡。这两种均衡方式也被叫作非能耗均衡和能耗均衡。主动均衡是将多余的能量重新分布, 具备较高的能量效率。主动均衡中采用无源器件电感或电容作为储能元件, 用于单体电池之间的能量传递。在电路

中对储能元件进行切换,从而保证电池电压的一致性。被动均衡的优点是电路构造相对简单,适用领域广,成本相对较低,并且易于实现。但被动均衡存在着明显的缺点,电池放电均衡将会增加很多功耗,尤其当电池组中单体电池数目较多时,电池的可用电量将会大大减少,导致电池的利用率降低。

在生产过程中,即使是同一型号、同一批次的钛酸锂电池也会有个体的初始差异,其中电池原料的不一致性以及生产工艺等因素会造成这种差异性的存在。如图1所示为钛酸锂电池的生产工艺流程图,其生产工艺详细步骤包括配料、卷绕、包装以及外包装等等环节。在每一个步骤中的每一个细微的差异经过多重步骤的叠加都会造成钛酸锂电池差异性变大。目前来说,由电池原材料和生产过程中所引起的不一致性,还没有好的解决办法,只能通过慢慢提高电池设备精度。

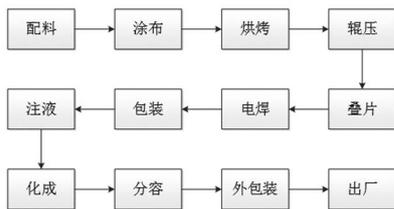


图1 钛酸锂电池的生产工艺流程图

Fig.1 Production process flow chart of lithium titanate battery

另一方面,即使在生产时使电池组具有较高的一致性,但由于不同使用条件下的差异,也会引起电池组的不一致性<sup>[3]</sup>。电池组在使用过程中所产生的差异会受到多种因素的影响。首先是温度,钛酸锂电池的工作温度将影响其固有特性,我们知道电池发生化学反应时会伴随着发热现象,从而导致工作温度的变化。同时单体电池安放的位置以及电池组的散热方位的不同也都会影响模组局部温度的不一致性。这种不一致性差异将进一步影响电池组的容量以及内部化学反应的进程,从而形成一个恶性循环造成电池的不一致性继续加大。然后是电池的过充过放,电池过度充电会造成钛酸锂电池动力电池正极物质氧化分解,从而降低电池的输出功率;电池过度放电会使钛酸锂电池的正极金属阳离子被还原,从而降低了动力电池的容量。以上表明,电池的过充过放都会给电池的性能寿命造成不同程度的不可修复的破坏,进而恶化电池的不一致性。

目前提高钛酸锂电池组一致性的方法主要分为电池分选技术和电池均衡技术。电池的分选技术主要是利用电池单体电压、容量等重要参数为指标,将参数相近的单体电池组成一个模组,这种方法可避免工艺不一致性给电池带来的干扰。电池均衡技术是基于完善的电池管理系统之下,在使用电池时所采取的措施,主要分为主动均衡和被动均衡两类,下面对这两大类均衡进行阐述并选取。

### 2.2 主动均衡

主动均衡的原理是将能量从较高的单体电池转移到较低的单体电池内,实现单体电池间的均衡。它的优点在于效率高,并且产热不显著,下面阐述几种常用的主动均衡方法。

#### (1)开关电容(电感)均衡

开关电容(电感)均衡的原理是把电容(或者电感)当作一种储备能量的容器,将模组中能量较高的单体能量放在容器

中,而能量低的单体从中取出,最终实现单体间的能量一致性。在此处以电容均衡进行讲解,如图2所示。在充放电或者电池组静置的时候,当发现单体不一致性较大时,在控制策略中对电容开关开断处理,使单体间能量通过电容元件再次分配,从而保证电池模组中单体电池的能量尽量趋于一致,从而改善电池组的整体性能。这种均衡方式的优势在于均衡过程中不消耗能量。

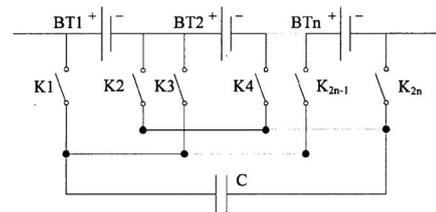


图2 开关电容的主动均衡

Fig.2 Switched capacitor active equalization

#### (2)变压器均衡

变压器均衡法是将多个绕组变压器串联在模组中,如图3所示,在变压器均衡过程中,当检测到压差大于一定阀值时,均衡开启。当电池组的电流流入变压器的初级线圈时,其次级线圈中会立刻感应出相应的电流。如果单体电池中的电压比较低,根据电压比是反比于电流,则可知相应感应出的电流会较大,使用这种方式得出的均衡电流与SOC成反比。由于整流元件需要安装在每一个次级线圈上,所以其均衡方式有其致命的缺点,即电路较为复杂,电子元件太多导致成本高昂。

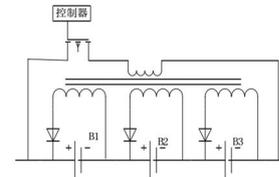


图3 变压器的主动均衡

Fig.3 Active equalization of transformers

### 2.3 被动均衡

被动均衡又叫作耗能均衡,它的均衡原理是将能量较高的电池的能量通过耗能的方式释放出来,从而改善单体电池间的一致性。其中电阻均衡法,如图4所示。它的工作原理是,当模组中某一编号单体电池满足均衡开启的条件时,与之对应的开关闭合,从而形成一个放电通路。它因结构简单,成本低廉,而被广泛应用于电池管理系统的均衡体系中。这种均衡方式缺点在于电池放电会产生大量能量浪费掉,以及产生热量造成升温。

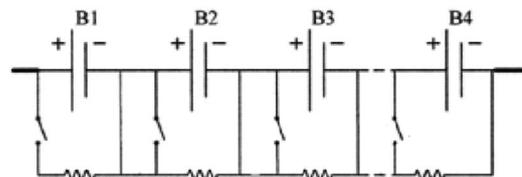


图4 电阻式的被动均衡

Fig.4 Resistive passive equalization

## 3 硬件研究分析(Hardware research and analysis)

在本项目中,所采用的硬件为MC33771芯片,通过采集电压,温度等物理量作为输入。采用多节钛酸锂电池串联成

组的形式，实物图如图5所示。由上一小节可知每种均衡技术既有优点，又有缺点，经过对本课题项目的需求分析、试验环境、成本预算以及实现的难易程度，在均衡方式上目前最常用的被动均衡方案，来对钛酸锂动力电池组一致性进行改善。在硬件上，这里通过在每个钛酸锂单体电池上并联一个电阻，并在每个回路中添加一个模拟开关来实现的。其原理是当满足被动均衡条件时，能量较高的电池通过电阻放电，从而降低单个电源电池的电压，直到满足推出均衡设置的阈值条件范围内为止或者满足整车的其他预设条件。下面结合具体的被动均衡控制策略进行研究<sup>[4]</sup>。首先选取均衡的变量，在此基础上，进行设置均衡的阈值，然后开始放电均衡，最终达到单体电池一致性得到改善，提高电池组的整体寿命。



图5 钛酸锂电池模组实物图

Fig.5 Physical picture of lithium titanate battery module

## 4 电池均衡策略设计(Cell balancing strategy design)

### 4.1 均衡变量的选取

在搭建被动均衡模型之前，首先需要选取合适的均衡指标，也就是均衡变量。只有合理选取均衡指标才能保证对具体电池组进行管理，目前广泛被采用的均衡指标有三种分别为：SOC、剩余可用容量、开路电压。下面对这三种方式进行阐述，并选取适合钛酸锂电池组的均衡变量。

#### (1)以SOC作为均衡变量

将钛酸锂单体电池的SOC作为均衡开启的条件时，在均衡后电池组内单体电池之间的容量基本一致，在此后若进行电池模组的充放电时所有单体电池均可以达到充放电截止电压，最大限度地保证了电池组容量得到充分利用。同时采用SOC作为指标均衡后也预示着钛酸锂模组中的每个单体电池都可以工作在相同的放电深度环境下，这样有利于延缓单体电池的老化速度。

但是以SOC为均衡指标也有其局限性和缺点。首先是如果SOC的估算精度较大时，在充放电、静置或者上电初期SOC差异较小，此时无法识别的话，到后期差异越来越大时对均衡管理的压力就会比较大，甚至无法充分达到均衡效果。再者均衡时的电流也会对SOC估算产生影响，在当前的估算方法中还没有将这一因素考虑进来。而较高精度的SOC算法，比如卡尔曼算法，神经网络算法，这些算法一般计算量都很大，且需要对电池组中的每节单体电池同时进行实时估算，这就要求硬件处理器具有足够的运算能力，才能保证这些要求，而实现这些也会造成成本随之提高。

#### (2)以剩余可用容量作为均衡变量

与第一种均衡指标SOC相比较，用当前剩余可用容量作为均衡指标，从本质上也是从容量的角度上对电池组进行均衡，这样也能避免容量较低的单体电池所造成的“木桶效

应”，从而发挥出电池组的最大能力。根据前人研究表明，在电池组内如果电池老化程度区别不明显时使用以上两种均衡变量基本上是一致的，但是当电池组内单体电池老化程度区别较大时，即使某一时刻的每个单体电池SOC是一致的，但由于不同单体电池间的剩余电量变化速率的差异性，每进行一步长或者下一周期又会出现不一致，研究结果表明如果把剩余可用容量作为均衡变量，则后面基本上不会在产生不一致性问题<sup>[5]</sup>。用剩余可用容量作为均衡指标缺点在于需要对动力电池的容量进行实时估算，而当前对容量的估算方法大多停留在离线估算上，而且估算的精度无法保证。

#### (3)以电压作为均衡变量

第三种是用电压为均衡变量，在数据采集时，动力电池的电压是一个可被采集到的物理量。由于电压可以被观测，同时开路电压与SOC是有着某种关系的，这一点已经给出了相关测试和图表结论。当每个动力电池开路电压都大致相当时，也说明了此时电池组的SOC一致性也比较良好，因此在电池组处于搁置状态时以开路电压作为均衡变量可以在一定程度上改善电池组不一致性状态。同时以电压为均衡变量，其思想简单并且实现较容易，对硬件处理器的开销也较低。

综合以上对三种均衡变量的分析，并结合实际，对均衡变量本文采用易于实现的电压判据作为指标，下面对基于电压的被动均衡策略进行分析并建模。

### 4.2 电池均衡策略分析及建模

基于电压的均衡在实际工程中应用较为普遍，它可以衡量电池组的不一致性<sup>[6]</sup>。当钛酸锂电池成组一致性良好时，则电池均衡主要考虑在使用过程中，在使用过程中，使用电压作为均衡的判据，此时电压会出现三种分布情况：第一种是模组中大多数单体电池电压差极小，只有少量单体电池的电压比较高；第二种是模组中大多数单体电池电压差极小，只有少量单体电池的电压比较低；第三种是模组中大多数单体电池的电压差极小，一部分单体电池的电压比较低，一部分单体电池的电压比较高；但无论是哪一种情况，大多单体电池的电压都是在均值电压的附近徘徊。针对这种情况，在以电压为均衡变量的策略中，在此会引入数学参数来反映出电池组单体电压的差异。常用的数学参量有电压的均值，极差以及方差三种，计算公式如式(1)一式(3)所示。

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1)$$

$$\delta^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad (2)$$

$$r = \max\{v_i\} - \min\{v_j\} \quad (3)$$

其中，式(1)为均值的数学表达式，它反映了电池组电压的整体情况；式(2)为方差的数学表达式，它反映了电池组中每个单体电池与均值电压的偏离程度；式(3)为极差的数学表达式，它反映了电池组中的最高与最低电压的差值。这三种参量都可以衡量电池组的不一致性状态，若以方差作为均衡的判据，虽然理论上是这三种方式中最好的，但是若要考虑到每个单体电池的实际电压分布状态，我们只需要考虑最大、最小电压进行均衡操作，因此以方差作为判据本文不采用。均值电压是目前均衡判据中最常用的方式，但是如果电池组电压范围最大，这种方式均衡会增加过多的能耗，因此以均

值电压作为判据本文不采用。而以极差作为判据，虽然只是比较两节单体电池的电压，但是此种方式能进一步的缩小整个电池组电压的不一致性，因而本文采用以极差电压作为判据来改善电池模组的不一致性。

被动均衡按不同的工作状态，又可分为充电状态时的被动均衡，放电状态时的被动均衡以及搁置状态时的被动均衡，在实际均衡过程中，在充放电状态下的均衡，对于混合动力汽车来说也即是行车时，这两种状态下的均衡效果并不理想，且耗能比较大。因此本文此处讨论静置状态(车处于停车状态)时，对钛酸锂电池模组进行均衡。基于极差电压的均衡策略流程为：首先识别模组的工作状态，当整车下电，BMS处于静置状态(即模组既不充电也不放电)时，然后为钛酸锂电池模组单体按电压大小从小到大排序并进行编号(从编号1到编号19)，并找出最大、最小单体电池的电压作差为U1，与设置的阈值电压U2进行对比，若差值大于阈值(50 mV)且温度低于均衡温度阈值时，当前状态开启均衡。在均衡时，考虑到电池温升问题，在本文策略中每次开启最高的5节单体电池进行均衡，当均衡完毕后退出均衡。均衡的流程图如图6所示。

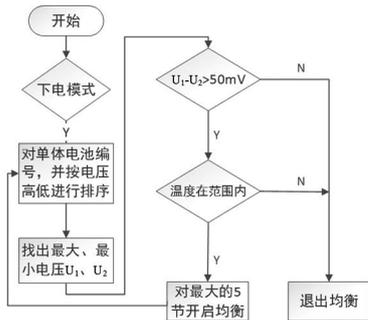


图6 电阻式的被动均衡

Fig.6 Resistive passive equalization

在单体的均衡过程中，设置三种状态：均衡关闭、均衡开启和均衡休眠。基于有限状态机理论，在Simulink/Stateflow环境下搭建具体的均衡模型，首先将电压差值与设置的进行比较，同时电池组的温度在一定范围内方可开启均衡，同时采用脉冲均衡，即设置一个占空比均衡，若满足退出均衡条件或者均衡完毕后结束均衡管理，具体实施如图7所示。

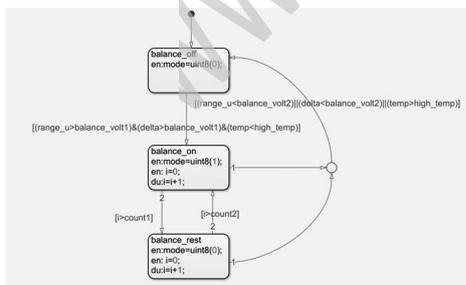


图7 钛酸锂电池模组均衡状态切换

Fig.7 Lithium titanate battery module equilibrium state switching

本文为同时对最大的5节单体电池进行均衡处理，当每一步均衡后，将对应编号的电池电压放置到对应原来位置，最终输出每一时刻钛酸锂电池组中每节电池的电压，为下一步均衡判断和均衡迭代做准备。建模如图8所示。

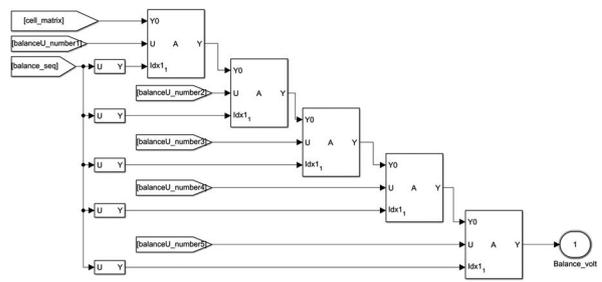


图8 钛酸锂电池模组电压实时输出模型

Fig.8 Real-time voltage output model of lithium titanate battery module

设置钛酸锂单体电池的电压，令其中5节单体电池电压偏高，以均衡阈值为50 mV为例，均衡电流为90 mA，脉冲均衡的占空比为75%，开始进行均衡，均衡仿真图如图9所示。由图可知，当电池组处于静置状态时，满足均衡条件后，开始对相对应的单体电池进行脉冲均衡，最终达到改善单体电池间的一致性的目的，从而验证了所搭建的均衡控制策略的逻辑准确性。

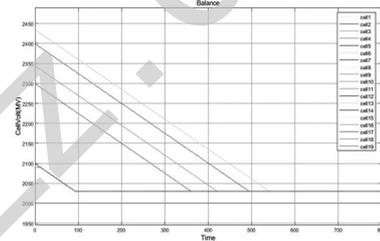


图9 电池组均衡仿真图

Fig.9 Battery pack balancing simulation diagram

### 5 结论(Conclusion)

本文首先对钛酸锂电池组不一致性的原因和均衡方法进行了详细分析，通过对比研究主动均衡和被动均衡，并结合项目需求，设计了基于电压的被动均衡控制策略，采用Matlab/Simulink对电池组均衡策略进行模型的搭建。通过实验测试验证均衡控制策略的有效性。

### 参考文献(References)

- [1] 谢绍伟.电动汽车池管理系统(BMS)及其验证系统的开发 [D].华中科技大学,2015:9-10.
- [2] 于洋.动力电池荷状态估计策略的研究 [D].天津理工大学,2012:19.
- [3] 乔波强,侯振义.蓄电池剩余容量预测技术现状及发展[J].电源世界,2012(02):21-26.
- [4] 杨飞.磷酸铁锂动力电池管理系统的研究[D].重庆大学,2010:35-37
- [5] 刘浩.基于EKF的电动汽车用锂离子的电动汽车用锂离子池SOC估算方法研究 [D].北京交通大学,2010:50.
- [6] GARCIA P, FERNANDEZ L M, GARCIA C A, et al. Energy Management System of Fuel-Cell-Battery Hybrid Tramway[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 4103-4104.

### 作者简介:

汪琦(1982-),男,本科,讲师.研究领域:汽车技术,新能源汽车。  
吴长水(1978-),男,博士,副教授.研究领域:发动机电控,新能源汽车。