

# 锂电池组均衡方式的研究现状

李志扬, 陈雨飞, 吕帅帅, 鲁文凡, 倪红军  
(南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 电池组均衡技术是电池管理系统关键技术之一, 良好的均衡方式对克服电池组的不一致性及提高锂电池组的使用寿命具有重大意义。综述了锂电池组的主要均衡方式, 评述了国内外均衡方式的研究现状, 比较了各种均衡方式的优缺点, 总结了电池组均衡方式的研究发展方向。

**关键词:** 不一致性; 均衡方式; 主动均衡; 被动均衡

**中图分类号:** TM912.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-087X(2018)09-1404-04

## Research status of equalization methods of Li-ion battery pack

LI Zhi-yang, CHEN Yu-fei, LV Shuai-shuai, LU Wen-fan, NI Hong-jun

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

**Abstract:** The battery equalization technology is one of the key technologies of the battery management system. A well-balanced method is of great significance to overcome the inconsistency of the battery pack and improve the service life of the lithium battery pack. This paper reviews the main equilibrium methods of lithium battery packs, reviews the research status of domestic and international balanced methods, compares the advantages and disadvantages of various balanced methods, and summarizes research and development directions of battery pack balanced methods.

**Key words:** inconsistency; equalization; active equalization; passive equalization

近年来, 新能源汽车行业处于一个蓬勃发展的阶段。尤其锂电池因为比能量大, 体积小, 热效应小, 无记忆性, 寿命长等方面优点, 成为电动汽车动力电池的首选。

伴随着汽车操作系统功能越来越多, 安全性能的要求越来越高, 对锂电池组的要求也越来越高, 锂电池组由单体锂电池串联而成, 由于锂电池生产加工工艺的制约, 单体锂电池之间存在着电压、电阻、容量等差异, 造成电池组使用时的不一致性的存在, 从而对锂电池使用的寿命和容量产生影响, 并且随着使用的时间越长, 寿命和容量越低。解决锂电池组不一致的问题, 除在生产工艺中控制外, 另外有效的方法就是研究电池组的均衡方式, 通过有效的均衡方式, 改善电池组的不一致性现象, 提高锂电池组的使用寿命。

## 1 均衡方式

当前的主要均衡方式有主动均衡型和被动均衡型<sup>[1]</sup>。被动均衡是通过消耗能量来实现均衡, 也称能耗均衡或者无损均衡; 主动均衡通过电容、电感、变换器从高电压的单体电池中转移能量到低电压的单体电池中, 从而实现电池组的均衡, 也

称非能耗均衡或者无损均衡。

### 1.1 被动均衡型

被动均衡型, 采用电阻等耗能元件并联在单体电池电路中, 对电压过高的单体电池的电量以热量形式进行消耗, 也可以对多节单体电池同时进行均衡。因为将电能转变成热量耗散, 所以均衡电流是一个非常关键的因素, 若均衡电流大, 产生的热量则大, 就需要解决散热问题; 若均衡电流小, 则在大容量电池组中进行均衡的效率很低, 需要完成电池组均衡所需的时间较长。

每个锂电池单体上并联一个耗能电阻和通断开关。通断开关的控制由单片机系统软件进行控制, 耗能电阻的选型应该建立在考虑热量消耗和均衡效率等基础上。该方式应用灵活, 操作简单, 成本低, 目前被广泛应用于锂电池组中, 但因为消耗能量产生的热量但因为耗能电阻的选型问题, 一般选择于均衡充电过程中, 适用于小容量电池。Jae-Won K 等<sup>[2]</sup>在其专利中提出根据 OCV-SOC 曲线变化, 利用电阻进行被动均衡的方法, 图 1 为这种方式的均衡原理图, DR1、2、3 为消耗电阻, OCV-SOC 曲线斜率小的阶段, 暂停均衡, 曲线斜率大的阶段, 进行均衡。

### 1.2 主动均衡型

#### 1.2.1 旁路法均衡

这种方法适用于静置的充电过程。在充放电过程中, 当单体电池的电压达到阈值时, 通过控制开关使电路中的充电电流不流通该单体电池, 即把该单体电池从整个电池组中暂时

收稿日期: 2018-02-04

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目[苏政办发(2014)37号]; 南通市应用研究计划项目(BK2014053); 南通市应用基础研究项目(GY12016045、GY12016054)

作者简介: 李志扬(1964—), 男, 江苏省人, 教授, 硕士, 主要研究方向为新能源汽车和燃料电池。

通信作者: 倪红军(1965—), 男, 江苏省人, 教授, 博士, 主要研究方向为新能源汽车和燃料电池。

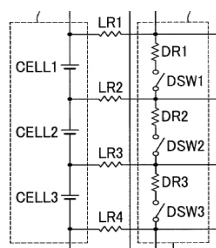


图1 通断分流电阻均衡电路图

旁路掉,依此类推,电压值达到限制值的电池全部被旁路掉,直至所有电池同时充满。这种方法的优点是电池组充电速度非常快,而且简便易行。但是该方案的缺点是充电过程中开关管承受的电流过大,充电效率低,损耗大;放电过程中由于旁路掉一部分电池导致电池组整体电压降低,功率下降,影响电动汽车的使用。

Manenti A 等<sup>[3]</sup>基于旁路法提出一种在电池组中可逆断开实现均衡的方法,针对损坏单体电池通过旁路开关动态断开技术达到最佳平衡目的,但这种方法结构适用于低功率汽车应用。针对 Manenti A 等研究的一个开关控制一个单体电池进行旁路的问题,Baronti F 等提出一种电池组重新配置的均衡方式,电池模块之间以串联方式连接,利用双向开关的设计来连接或旁路电池模块进行均衡,相比前者,大大减少开关的数量,并可用于大电流应用。

### 1.2.2 开关电容均衡

比较各单体电池电压的大小,控制相邻单体电池间的开关,利用电容储存的电量传递不平衡电量,实现锂电池组的单体电池之间的平衡(如图2所示)。开关由单片机系统软件进行控制,由于电池组中串联的单体电池较多,故电容控制也较多,该方式虽然容易控制和实现,但电容传递电量的效率较低,需要较长的时间进行均衡。

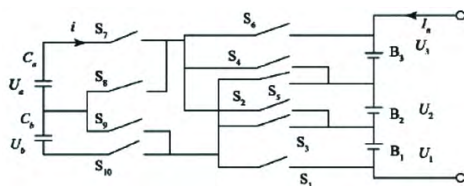


图2 开关电容均衡电路图

Yuanmao Ye 等<sup>[4]</sup>提出基于开关电容器技术的均衡技术,通过具有恒定开关频率和固定占空比的一对互补脉冲信号来控制电路中的开关,自动实现电量从电压高的单体电池传递到电压低的单体电池中。李超等<sup>[5]</sup>基于超级电容器的技术上提出一种电压均衡的控制策略,在采用开关分流电压均衡法,改变每个超级电容器的能量流动,较少无效的能量流动。

上述均衡方式相比较传统开关电容均衡方式,提高了均衡效率,前者操作简单,但开关太多,结构较复杂;后者利用 MOSFET 开关,能有效减小分散性引起的电压不平衡,提高了系统的可靠性;且两者都不能将电量从最高电压的单体电池直接传递到最低电压的单体电池中。

### 1.2.3 开关电感均衡

这种方式与开关电容均衡方式类似,在此方式中,将电感

视为储能元件,在电路中传递电量。这种方法结构简单,控制方便,使用成本较低,容易实现,但在对多节单体电池进行均衡时,电感均衡效率较低。

Guo X 等<sup>[6]</sup>提出一种利用功率电感可以实现降压和升压的双向无损均衡方法。这种方法可以动态调整均衡路径和均衡阈值,均衡电路可以在充电期间降低较高电压单元的充电电流,并且在放电期间减少较低电压单元的放电电流。该电路可以在充电之后对处于暂停状态的较高电压单元进行放电,并且在放电之后对处于暂停状态的较低电压单元进行充电,可满足较大均衡电流,实现快速平衡。Lukasiewicz M 等利用电感和 MOSFET 设计一种自动合成均衡结构的主动均衡方法,可以实现非相邻之间的电池单体实现均衡。

赵立勇等<sup>[7]</sup>提出在电感电流断续模式下,使用电池自身的电压作为驱动的外部电源,无需专用的驱动芯片控制开关的开通和关断,完成相邻单体电池间的均衡。优点有:这种均衡方法体积小,成本低,由于光耦的原因,使得只有在均衡的情况下,均衡电路本身才会产生损耗,具有效率高特点。

Guo X 等从电感入手,可以对不同的单体电池的状态进行不同的充放电均衡电流选择;Lukasiewicz M 等研究电感和 MOSFET 开关相结合的均衡方式,通过控制开关,将电池单体组成不同的结构进行均衡;赵立勇等的电感均衡方式思路是利用光耦电路,采用电池自身的电压作为驱动的外部电源进行电感均衡,相比较其他两者方式,会产生部分的损耗,但三者相比较传统方式,均提高了均衡效率。

### 1.2.4 DC-DC 变换器均衡

DC-DC 变换器均衡的电路可以分为集中式和分布式。变换器可用于在电池之间传输能量,快速均衡速度和非相邻电荷转移是基于变换器的主动均衡方式的主要优点,但这种均衡方式需要较多的磁性元件,导致成本提高,在单体电池较多的串联电池组中,控制比较复杂。

#### (1)集中式均衡

集中式均衡电路通过多输出的变换器,在电池组内实现能量的转移,将能量从电压高的单体电池中转移到电压最低的电池中。形式有:反激式均衡电路结构(如图3所示)和正激式均衡电路结构(如图4所示)。

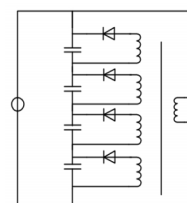


图3 反激式电路图

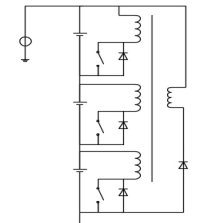


图4 正激式电路图

针对传统反激式电压均衡电路开关管电压应力大, 拓扑结构复杂等问题, 荣德生等<sup>[8]</sup>提出一种基于双开关反激式串联电池组电压均衡方式, 在结构上减少有源元件的数量, 通过仿真和实验验证, 结果表明采用该方案可将开关电压应力由传统方案的 100 V 降低到 20 V。

Imtiaz A M 等<sup>[9]</sup>提出一种基于时间共享反激式转换器的均衡方式。该拓扑具有较少的无源元件, 降低结构的复杂性。该结构中的每个单元在由低功率微控制器分配的时隙期间共享单个转换器。利用时隙的动态分配来实现较快的单元平衡, 并且电路以再生方式在单元之间动态地分配电荷。

蒋玮栋等<sup>[10]</sup>设计一种基于反激式变换器的快速无损电池组均衡电路, 从高压电池抽取电流返回整个电池组, 采用多环式分层结构与峰值电流控制策略提高均衡速度, 缩短均衡时间。

上述研究的目的是要降低结构的复杂性。荣德生等利用双开关并减少有源元件使用, Imtiaz A M 等采用微控制器在时隙阶段进行均衡, 蒋玮栋等则是通过控制高压电池中的电流, 返回到整个电池组回路中进行均衡。

正激式均衡电路中存在的变换器的寄生电感, 特别是漏感, 对能量的传递影响较大。杨文荣等<sup>[11]</sup>提出基于正激式变换器的均衡方法, 利用变换器次级绕组和双向开关并联的结构实现电池组的均衡, 可以减少变换器的使用数量。

集中式均衡方式具有较高的均衡效率, 需要控制的开关较少, 但由于输出绕组匹配较难, 均衡过程容易出现偏差, 导致可靠性不稳定。在集中式均衡过程中, 电量直接从过充电电池传递到过放电池中, 节省路径。

## (2) 分布式均衡

分布式均衡电路结构复杂,  $n$  个单体电池需要  $n-1$  个均衡模块。相邻的单体电池通过两电池之间的均衡器进行操作, 从而实现整个电池组的均衡。常见结构有 Buck-Boost 电路(如图 5 所示)和 Cuk 电路(如图 6 所示)。

DC-DC 均衡方法目前研究也较多, 但受制于该方法所需

表 1 各种均衡方式的比较

种类	通断分流电阻法	旁路法均衡	开关电容均衡	开关电感均衡	反激式均衡	正激式均衡	Buck-Boost 均衡	Cuk 均衡
均衡结构	简单	简单	简单	简单	较复杂	较复杂	较复杂	较复杂
均衡速度	快	快	慢	慢	快	快	快	快
均衡方向	单向	单向	单向	双向	双向	双向	双向	双向
成本	低	低	中	中	高	高	高	高

薛力升等<sup>[14]</sup>设计采用两级混合均衡方法, 第一级采用的是电感均衡电路, 通过储能电感转移能量; 第二级采用的是独立变换器并联均衡电路, 这种方法的优点有均衡时间短、效率高、等优点。

林小峰等<sup>[15]</sup>提出一种双层结构的主动均衡控制方法, 分别控制底层双向 Buck-Boost 电路和顶层反激式变换器电路的开关通断, 实现能量的转移从而达到均衡。由实验结果分析可知, 该方法解决单层均衡结构由于均衡路径长而引起的均衡时间过久的问题, 提高均衡效率。

以上研究者分别将主动均衡和被动均衡、电感均衡和变

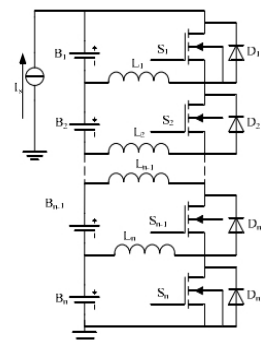


图 5 Buck-Boost 均衡电路图

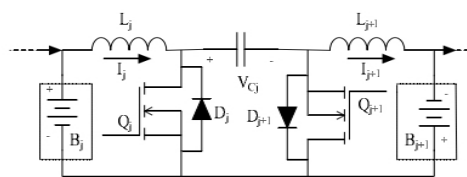


图 6 Cuk 均衡电路图

较大的装置空间要求, 二极管数量较多, 可能导致部分电量的消失, 使得均衡的效率提升变得困难。

针对效率的问题, 吕航等<sup>[12]</sup>在 Buck-Boost 均衡电路的基础上, 提出一种通过减少开关数量的拓扑结构, 利用开关电感, 实现非相邻单体电池间的电量转移, 通过电感模块中的开关继电器, 改变 Buck-Boost 电路的均衡子电路, 减少电荷转移步数。通过实验验证, 优化后的这种均衡方式提高 27% 的均衡速度。

## 1.3 混合均衡方法

目前, 表 1 为各种均衡方式的优缺点, 将几种均衡法结合起来是目前研究的一个趋势, 集合各个均衡方式的优势, 提高锂电池组的均衡速度和效率。

朱浩等<sup>[13]</sup>提出一种结合单体电池间被动均衡、电池组间利用储能电感进行主动均衡的均衡策略, 既能向低于平均值电压的电池组转移能量, 又能从高于平均值电压的电池包转出能量, 使其电压值向平均值靠拢, 实现动态双向无损均衡。

换器均衡、变换器集中式均衡和分布式均衡进行混合均衡, 可以实现双向均衡, 提高均衡效率。

## 2 总结

(1) 多种均衡方式组合, 利用各种方法的优点, 减小元器件数量, 优化结构, 提高均衡的效率和速度; (2) 在均衡系统中提供辅助电源, 对压差不大的单体电池进行独立的充放电, 实现快速均衡, 提高均衡效率, 减小均衡时间; (3) 利用均衡结构和电路将各个电池组快速重新自动组合进行均衡, 识别电池组和单体电池, 将单体电池重新分组, 组成电池组, 实现不同状态下的快速均衡; (4) 芯片等电子元器件的发展, 随着科技水平



的提高,这些元器件体积将更小,功能更多,这些将促进均衡方式精细化,从而实现大容量电池的均衡。

## 参考文献:

- [1] BOUCHHIMA N, SCHNIERLE M, SCHULTE S, et al. Active model-based balancing strategy for self-reconfigurable batteries[J]. Journal of Power Sources, 2016, 322: 129-137.
- [2] JAE WON K. Balancing method and balancing system of battery pack :US, 8994337B2[P]. 2015-03-31.
- [3] MANENTI A, ABBA A, MERATI A, et al. A new BMS architecture based on cell redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4314-4322.
- [4] YE Y, CHENG K. An automatic switched-capacitor cell balancing circuit for series-connected battery strings[J]. Energies, 2016, 9(3): 138.
- [5] 李超, 胡国文, 林萍, 等. 一种新型可串联的超级电容电压均衡特性研究[J]. 电源技术, 2016, 40(4): 799-802.
- [6] GUO X, KANG L, HUANG Z, et al. Research on a novel power inductor-based bidirectional lossless equalization circuit for series-connected battery packs[J]. Energies, 2015, 8(6): 5555-5576.
- [7] 赵立勇, 王艳, 吕立召. 能量转移型锂电池组均衡电路的设计与研究[J]. 电源技术, 2015, 39(2): 265-267.
- [8] 荣德生, 陈淑涵, 李洪珠, 等. 一种新型双开关反激式电池串电压均衡方法[J]. 电源技术, 2015, 39(6): 1219-1221.
- [9] IMTIAZ A M, KHAN F H. "Time shared flyback converter" based regenerative cell balancing technique for series connected Li-ion battery strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5960-5975.
- [10] 蒋玮栋, 梁光胜, 文亚凤, 等. 基于峰值电流控制的快速电池均衡电路[J]. 科学与技术工程, 2014, 14(25): 234-238.
- [11] 杨文荣, 李露露, 李志洲, 等. 新型电动汽车锂电池组电量均衡电路设计[J]. 电源技术, 2014, 38(1): 100-102.
- [12] 吕航, 刘承志. 电动汽车磷酸铁锂电池组均衡电路设计[J]. 电源学报, 2016, 14(1): 95-101.
- [13] 朱浩, 赵策, 刘云峰, 等. 一种新型动力电池组能量均衡系统研究[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2387-2390.
- [14] 薛力升, 朱赛飞, 吴浩. 新型电动汽车锂电池组混合均衡电路的设计[J]. 工业控制计算机, 2015(4): 147-149.
- [15] 林小峰, 王志浩, 宋绍剑. 基于双层结构的锂电池主动均衡控制系统[J]. 电子技术应用, 2016, 42(1): 119-122.

(上接第 1375 页)

方法是将电池从电路取出或者断开直接进行测量,但这样会对电路正常工作造成影响,在一些需要电路不间断供电的场合不允许出现这种情况;也可以使用相应的库仑计数芯片对电池的电量进行精准的测量,但由于这种芯片需要和相应的单片机进行通信才能准确读出电池的电量,在一些不需要使用单片机的场合缺乏实用性,且增加一块芯片会加大电路的功耗和设计难度,对于一些只需要粗略估计电量的应用场合就显得多余。

由此本文提出一种利用电池电压来了解电池电量的方法。由于电池在充放电过程中起电压会随着电量的变化而呈现非线性变化,当电池荷电状态为 0%~10%和 90%~100%时电压变化剧烈,而在 10%~90%时呈平缓的线性关系,基本维持在 3.2 V 左右。由此通过读取电池的电压即可了解电池所处的电荷状态,并根据需要进行相应的处理。

为了能够相对准确地获得电池的电压减轻 3.6 V 的 BAT 充电引脚对电压测量的影响,可以串接一个小电阻,利用电阻的分压作用,将充电引脚与电池的正极隔离。同时两个电容分别与电池和小电阻进行并联,将电压取出,既可以充当电路的滤波电容又可方便地读出电池电压,电容值与电阻值的大小可根据实际应用场景进行选择。其拓扑结构如图 5(a)所示(以 1  $\Omega$  的电阻为例),电路仿真结果如图 5(b)所示。

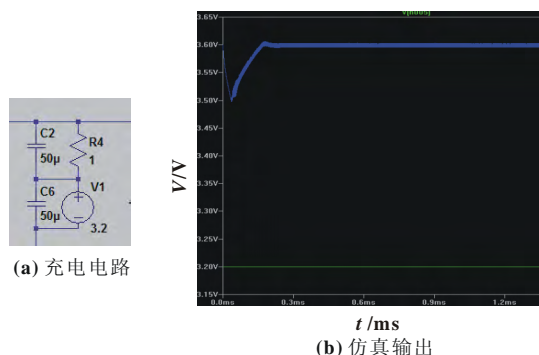


图 5 改进电路

由图 5(b)所示仿真结果可见,改进电路可以减轻充电引脚 BAT 与电池正极之间的影响,是一种有效的改进方法。

由于在实际应用时,电池往往处于 20%~80%的荷电状态,即电池工作正常时正极电压应基本而稳定在 3.2 V 左右。若电池电压大幅低于 3.2 V,说明电量过低,大幅超过 3.2 V 说明电池处于过充或损坏,以上两种情况均要处理。本文利用电阻对电池正极和充电引脚进行了有效的隔离。该改进电路通过相对准确地获得电压从而了解电池的工作状态。通过改进电路,改善了原来基础电路中电池状态获取困难的问题,也避免了使用电量测量芯片带来的功耗和成本上升问题。

## 2 小结

本文提出了一种基于 LT3652 的太阳能收集电路结构和改进措施,并制作了相应的演示电路。该模块的立方体结构既有助于进一步缩小体积又实现了全向的太阳能收集,不论模块以何种角度放置都能输出稳定的功率,且具有较高的比能量,到达了 32 mWh/g。同时提出了相应改进措施,可以实时监控电池工作状态,读取电池电压在 3.2 V,即说明电池工作正常。该模块高效便携,达到了设计目标,是一种较为理想的基于太阳能的微能源系统解决方案,实现了微型化太阳电池的高效利用,在对于需要不间断供电的应用场合中有着广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 何建良,丁建宁,马春红,等.微热光电系统中光电池的述评[J].传感器与微系统, 2008, 27(2): 11-13.
- [2] 陈建明,梁妍,陈德惠.基于太阳能的微能源收获技术[J].华北水利水电学院学报, 2012, 33(2): 79-81.
- [3] 陈建明,徐吉,陈利平,等.一种高效光电微能源系统设计[J].电源技术, 2013, 37(2): 289-291.
- [4] LI Y Q, YU H Y, SU B, et al. Hybrid micropower source for wireless sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(6): 678-681.
- [5] 肖丽仙,何永泰,刘晋豪.能量暂存式集成光电微能源能量管理及系统设计研究[J].电测与仪表, 2015, 52(7): 46-50.
- [6] 方奖,朱建新.磷酸铁锂电池 SOC 的电流脉冲探测[J].电池, 2011, 41(5): 268-271.
- [7] 汪涵,郑燕萍,蒋元广,等.实用型磷酸铁锂电池 SOC 高精度算法研究[J].电源技术, 2011, 35(10): 1198-1207.