

梯次利用车用磷酸铁锂电池成组与管理技术研究

从二次电池成组技术和电池管理系统技术两个方面来研究如何高效、稳定地梯次利用车用磷酸铁锂电池。首先从一种新的角度对退运车用磷酸铁锂电池成组技术进行了研究,使用电池箱各种采集参数,并结合相对应的各类离散数据对电池箱进行成组,而不是使用效率低的单电池配组方法,其可快速有效地保证梯次利用退运电池初期的一致性;其次主要研究了新型的电池管理均衡技术,该技术最多可同时对四节电池进行均衡,并通过实验验证了有效性,可保证成组后电池更好的运行,延长电池使用寿命,使价值达到最大化。

伍发元 吴三毛 裴 锋/国网江西省电力科学研究院
郑 益 王 浩/杭州高特电子设备有限公司

0 引言

当前经济高速发展,社会也越来越重视环境问题,电动汽车^[1-3]与储能技术越来越得到重视。锂离子电池^[4]的放电平台电压高、高温性能良好及充电效率高,因此锂电池已经成为电动汽车动力电池、储能动力电池的首选。但因其价格偏高,限制了在电动汽车中的推广。

一般来说,当电池容量衰减至额定容量的80%时,认为电池已经不适合继续在电动汽车上使用,但是其剩余的容量仍存在较大的使用价值,经过筛选和重新配组,可应用于工况相对良好,对电池性能要求相对较低的场合如储能领域,实现动力电池的梯次利用。通过梯次利用车用电池,电池价值将大大挖掘,相对有效降低了电池的成本,同时也还有利于节能减排。

本文从二次电池成组技术和电池管理系统技术两个方面来研究如何高效、稳定地梯次利用车用磷酸铁锂电池。成

组技术可保证梯次利用退运电池初期的一致性;电池管理系统技术可保证成组后电池更好地运行,延长电池使用寿命,使价值达到最大化。

1 二次电池成组技术

目前电动汽车使用的锂电池模块,即多节锂电池单体所组成的模块,均已经过配组。这是由于在一个锂电池模块中,其寿命主要取决于模块中性能最差的锂电池,性能差的锂电池会影响其他锂电池,所以需要组合一致性比较高的多节锂电池,来提高一个锂电池模块中各节锂电池的寿命。

本文研究主要对象是对电动汽车动力电池实现梯次利用,当电动汽车电池退运的时候对其使用。不论是新电池还是旧电池,均需要配组才可以投运使用。对于使用过的电池,更需要对这类电池进行配组。故如何利用这类电池就有以下两种方式:一种是对所有单体电池进行重新配置;一种是对电池箱进行重新配置。

对单体的配组目前研究了很多^[5-7],例如采用BP神经网络、模糊识别和波形识别等算法进行分选。不论采用何种算法,电池配组的重点在于选取的特征,一般会选取电池开路电压、电池容量、充放电曲线、电池温度和电压平台等。由于是退运电池,每个电池箱的状态肯定是不一样的,而且电池箱采用的BMS也不尽相同,不同的厂家SOC/SOH计算也不一样,也存在误差。这就做不到统



伍发元/高级工程师

关键词/Keywords

梯次利用·
电动汽车·
锂电池·
成组管理·

一,无法简单地获得上面描述的电池特征。所以至少需要对电池或电池箱进行一个充放电操作,获取电池的信息,如:充放电容量、充放电曲线等。电池单体和电池箱配组比较如表1所示。

表1 电动汽车电池单体和电池箱配组比较

方案	单体配组	电池箱配组
优势	可以知道每节电池的情况,如:放电容量、放电曲线以及满容量后的开路电压等	可以知道电池箱的组端数据,也能知道每节电池的数据,工作量较小
缺点	工程量大,操作复杂	只能通过预估大部分电池的容量

从表1可以看出,要对每个单体进行配组,基本上要通过电池厂家对退运的电池进行拆解后,通过化成设备对每节电池进行充放电操作。但是,电池箱的充放电完全可以使用换电站中的充放电设备进行操作。

对单体电池配组中所使用的数学方法已经存在很多,本文不再进行特别研究,主要研究锂电池模块的配组中所需要的特征数据,对锂电池模块的多个技术参数及数据曲线进行比较分析,将一致性较高的锂电池模块成组梯次利用于储能电站中。

为解决上述问题,主要包括针对锂电池模块的采集数据部分和计算数据部分两个方面。

采集数据部分主要包括组端及单体电池电压、内阻/电导、容量和温度等数据,并可以得到相应的数据曲线。

对于锂电池模块,每个模块中均有很多电池,若仅仅是借用单体电池的配组方法是不合适的。例如,分别有两组电池,每组三节电池串联使用,一组电压为3.1 V、3.2 V和3.3 V,组端电压为9.6 V;一组电压为3.2 V、3.2 V、3.2 V,组端电压为9.6 V。若通过单体电池配组方法,其模块电压均为9.6 V,会认为可以配组使用;但两个模块自身一致性并不一样,显而易见不能一起使用。

通过上述采集的各个单体数据计算出电池模块相对应的各种离散度,如电压离散度、内阻/电导离散度、容量离散度和温度离散度等。一般可用

来表征变量值之间差异程度、离散程度的指标有很多,在统计分析推断中主要有极差、平均差、标准差和标准偏差等。本文中推荐采用标准偏差进行计算模块的离散情况,如式(1)所示;相应的配组方法可以采用相关系数和欧式距离的方式,如式(2)、式(3)所示。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

式中, α 可以分别为电压、内阻/电导、容量或温度的离散度; x_i 为锂电池模块内第*i*节电池的电压、内阻/电导、容量或温度; n 为锂电池模块内含有电池单体的节数。

$$G_1\{V(t_j), U(t_j)\} = \frac{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \{|[V(t_j) - \overline{V(t_j)}]| \cdot |[U(t_j) - \overline{U(t_j)}]|\}}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [V(t_j) - \overline{V(t_j)}]^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [U(t_j) - \overline{U(t_j)}]^2}} \quad (2)$$

欧氏距离计算公式为

$$G_2\{V(t_j), U(t_j)\} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [V(t_j) - U(t_j)]^2} \quad (3)$$

式中, $V(t_j)$ 、 $U(t_j)$ 为两条曲线; $\overline{V(t_j)}$ 、 $\overline{U(t_j)}$ 分别为上述曲线的均值; t_j 为曲线第*j*点的时间; m 为曲线数据点数, $1 \leq j \leq m$ 。

实际应用中,对电池模块使用初期配组可以使用以下步骤:第一步可以对模块电压、内阻/电导、容量和温度等各项指标数据进行配组,对选取的各个因素分别进行归一化处理,得到原始数据矩阵 X

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

分别计算各参数向量 x_m 与 x_n 的距离,如欧式距离矩阵 D

$$D = \begin{pmatrix} 0 & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

选定设定一个阈值 d ，遍历矩阵 D 的上三角或者下三角部分，当 $d_{ij} < d$ ，则第 i 、 j 个电池模块可归为一类；当 $d_{ij} < d$ ， $d_{jk} < d$ ，又可归为一类；依次类推。

第二步，对上述各个选出类中，分别再选择需要配组的数据或者曲线向量，根据第一步中的方法，进一步对电池模块分类，如图1所示，最终可以得到一致性最佳的电池模块。

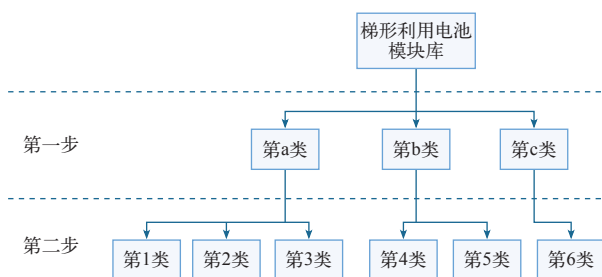


图1 电池模块分类示意图

另外在电池模块使用中，当模块内部个别电池出现问题进行替换时，此时就需要在可用单体电池库中寻找电池。

2 电池管理技术研究

考虑到是梯次利用车用电池，且为退运电池，其一致性程度要差于新电池，一般的电池管理系统内均衡功能已不再满足需求，因此需要设计新的均衡方式，也会需要外置的均衡装置来辅助电池的管理。本文中提到的均衡装置为杭州高特电子有限公司生产，主要参数为48路均衡模块，每路均衡电流为5/10 A。电池管理方式如图2所示。

梯次利用电动汽车动力电池可采用以下几种方式：其一，电池箱经过配组后，如图2中的a，使用电池箱以及本身自带的电池管理模块（BMS），把采集的数据上传到后台统一进行相关的处理，再使用外置均衡装置进行手动均衡；其二，电池箱经过配组后，如图2中的b，使用电池箱以及本身自带的BMS并有一定的均衡功能，

把采集的数据上传到后台统一进行相关的处理，结合使用外置均衡装置进行手动均衡；其三，通过单体配组或者电池箱配组后，如图2中的c，使用新设计的BMS并有一定的均衡功能，把采集的数据上传到后台统一进行相关的处理，结合使用外置均衡装置进行手动均衡。

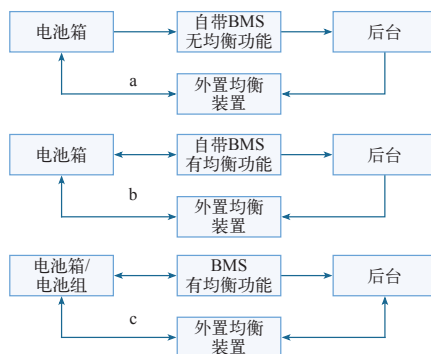


图2 梯次利用电动汽车电池管理方式

2.1 均衡设计

电池管理系统（BMS）均衡种类很多^[8-11]，一般可划分为能量消耗和无损均衡两种。前者主要使用电阻放电均衡，是目前在电动汽车上使用最广的一种均衡电路，控制简单，成本低廉、可靠性高。后者一般通过储能元器件实现能量传递，能量利用率高，结构复杂，成本高，对系统的安全性及可靠性要求高，使用并不广泛。所以，梯次利用车用电池建议采用图2中c的方式进行，需要实现一种新的BMS均衡充电系统。

电动汽车一般采用24节电池为一个电池箱，所以该BMS也主要针对24节电池，主要结构如图3所示。

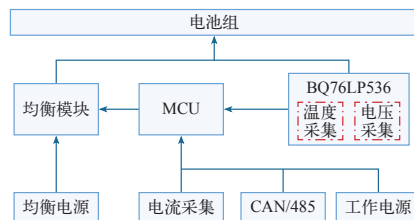


图3 BMS结构图

在储能电站，电池信息采集需要抗干扰高、准确度高及采集快，所以选择了TI公司的BQ76PL536采集模块，且具有二次硬件保护功能，符合设计要求，MCU采用ATMEL的AVR系列

中的ATmega64，是一款高性能、低功耗的8位微处理器。

从统计学上，生产与科学实验中很多随机变量的概率分布都可以近似地用正态分布来描述，故猜测电池箱的24节电池中一般需要均衡的电池可能为1~8节，均衡子模块结构设计如图4所示。

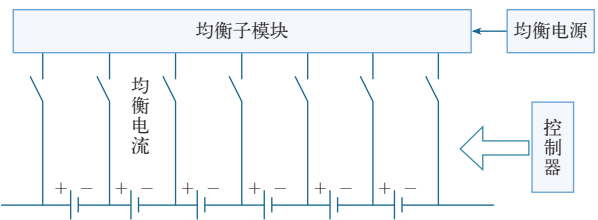


图4 均衡子模块结构图

该系统采用电压采集模块与均衡模块独立的方式，采集线与均衡线分开，保证了均衡时采集的准确度。均衡模块中主要部分在于均衡子模块以及均衡算法模型。均衡子模块是一个小型的单体电池恒流充电器，电流可以达到2 A，通过均衡算法来控制均衡子模块与电池之间的开关控制，达到均衡某节电池的目的，使电池的电压具有一致性。

多节电池放电曲线如图5所示。通过研究磷酸铁锂电池的充电曲线与放电曲线，很容易发现相同容量电池的曲线两端变化大于中间的变化。所以根据电池充放电曲线的区间，设置不同电压阈值，可使均衡效果更高效如表2所示。

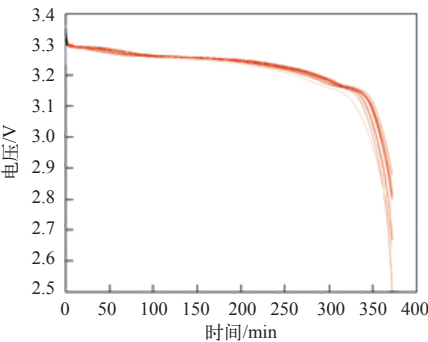


图5 多节电池放电曲线

在充电开始后，计算各均衡模块中各单体电池的平均电压。当平均电压在各充电电压区间中，计算各单体电池与平均电压的差值，超过每个区间相应阈值，即起动充电均衡。

表2 均衡控制表

充电电压 区间/V	[3.65 3.50)	[3.50 3.40)	[3.40 3.30)	[3.30 3.20)	[3.20 2.80]
相对应 阈值/V	0.20	0.10	0.05	0.10	0.20

采用某电池箱（含24节电池）测试均衡装置均衡效果。在整组放电过程中，分别对电池01[#]使用1 Ω放电、07[#]使用2 Ω放电、13[#]使用1 Ω放电、17[#]使用1 Ω放电，结束后静置4 h，记录开路电压。通过对充电的电量进行放电，放电结束后静置4 h以上，记录开路电压，循环三次。表3为均衡前后数据的比较，数据表明：经过三次均衡后，最大最小电压差从原来的781 mV变成38 mV，具有很大的改善。

表3 均衡前后数据比较

测试 次数	均衡前			均衡后			前后电压 差异的比较 /V
	最小 电压/V	最大 电压/V	电压 差异/V	最小 电压/V	最大 电压/V	电压 差异/V	
01	2.436	3.217	0.781	2.875	3.235	0.360	-0.421
02	2.875	3.235	0.360	3.099	3.253	0.154	-0.206
03	3.099	3.253	0.154	3.211	3.249	0.038	-0.116

2.2 电池剩余容量（SOC）计算

当前较多的SOC计算方法均涉及到开路电压法和安时积分法^[12-13]，但电池开路电压需较长时间才稳定，在实际电动汽车或储能电站运行过程中，一般较难得到稳定的开路电压，因此导致SOC计算值准确度不高。

经过研究，可以利用电池放电或充电后开路电压回升或下降的短时变化来判定。选取电池箱不同的SOC（10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%和90%）值，建立放电后不同SOC下开路电压回升的短时变化曲线，如图6所示。根据当前的开路变化曲线和上述标准数据进行对比，得出电池的SOC数据进行修正。

上述方法结合开路电压计算SOC以及安时积分法，并在充放电过程中符合特定条件时，如：在电池SOC两端（SOC>90%，SOC<20%），电池电压均会快速上升，此时修正单体电池SOC准确度

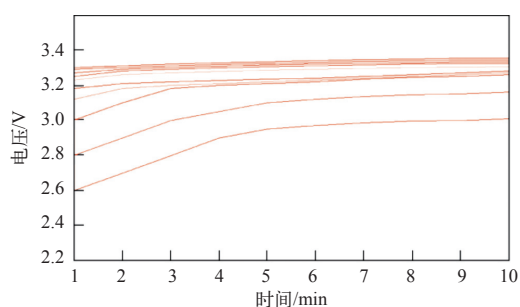


图6 放电至不同SOC后开路电压的变化曲线

较高。

3 展望

二次电池成组技术需要研究的内容很多，如可以在电动汽车管理系统内增加GPRS模块，使电动汽车电池所有的信息都能被联网并保存下来，结合工况情况、电池循环数据和充放电数据等，通过强大的后台分析能力，不需进行充放电操作的情况下，直接对退运电池进行分组。整个方案的具体实现过程描述如图7所示。

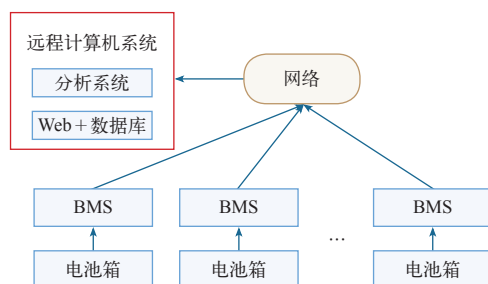


图7 BMS数据网络传输结构

4 结束语

对于研制适用于二次动力锂电池特点的管理模式，提升电池组运行时间和使用效率，相对降低电池成本，特别需要在均衡管理方面进行深入研究。包括：研究均衡系统的新型电路结构；研究效率更高更加小型化的均衡电路；提高SOC预估算法的准确度，结合研究SOC/SOH预估算法进行均衡算法的研究，使其达到最优的效果等。

参考文献

[1] 白木，周艳琼．世界电动汽车发展现状 [J]．世界

汽车，2001，11 (3)：25-28．

[2] 毕道治．混合动力车电池的开发与展望 [J]．电池工业，2003，10 (8)：195-199．

[3] 李红林，孙缝春，史建军．Digatron电动车辆电池测试系统 [J]．电源技术，2004，28 (4)：245-250．

[4] 郭炳焜，徐徽，王先友，等．锂离子电池 [M]．长沙：中南大学出版社，2002．

[5] 武云丽，李革臣，陈松林．BP神经网络在电池分选中的应用 [J]．哈尔滨理工大学学报，2001，6 (5)：10-13．

[6] 多智华，李革臣．模糊论在电池分类器中的应用 [J]．电池，1998，28 (3)：117-119．

[7] 游林儒，张晋格，王炎．基于数据融合理论的MH-Ni电池分类方法 [J]．电源技术，2000，24 (3)：149-152．

[8] Cao Jian, Schofield Nigel, Emadi Ali. Battery balancing methods: a comprehensive review [C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008.

[9] Pascual C, Krein P T. Switched capacitor system for automatic series battery equalization [C]. 12th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, Atlanta, 1997, 848-854.

[10] Sakamoto H, Murata K, Sakai E, et al. Balanced charging of series connected battery cells [C]. Telecommunications energy conference (INTELEC), San Francisco, 1998, 311-315.

[11] Nasser H Kutkut, Herman L N Wiegman, Deepak M Divan, et al. Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35 (1)：28-35.

[12] 乔国艳．电动汽车电池管理系统的研究与设计 [D]．武汉：武汉理工大学，2006．

[13] Zhu Chunbo, Wang Tiecheng. A new state of charge determination method for battery [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 11 (6) .

(收稿日期：2015-09-20) **EA**