

一种基于聚类算法的梯次利用 电池串联成组方法

纯电动车车载锂离子动力电池均是成组应用, 电池单体之间存在容量、内阻和电压等多个参数的差异, 如何筛选成组成为一个关键性问题。对世博会大巴车退运电池进行了容量、内阻等测试, 随后使用聚类算法对退运电池串联成组, 其中电池筛选指标采用了最大可用容量、欧姆内阻、极化内阻和平台电压。由于各指标之间的非相关性, 使用定性与定量相结合的层次分析法计算出各个指标之间的权重。对相关数据归一化并加权处理后, 使用 K 均值(K -means)聚类方法进行聚类分组, 对选定电池进行重新成组。使用实物试验的方式对成组后的模组进行测试, 采用容量利用率评价模组的一致性, 验证了成组方法的可行性和有效性。

徐 刚¹ 陈海燕² 龚敏明³/1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 2. 河南职业技术学院汽车工程系 3. 北京交通大学电气工程学院

0 引言

电动汽车的发展和推广对于减少废气排放和节省汽油开销有非常重要的意义, 但电动汽车高昂的成本和售价依然成为限制发展的重要因素, 其中重要原因是动力锂离子电池成本较高且技术革新带来的成本下降速度较慢。此外, 动力电池如何回收处理也是尚未解决的矛盾之一。随着目前电动汽车生产和销售数量的急剧增加, 电池回收问题将越来越突出。预计在未来几年, 将会产生大量需要回收处理的车用淘汰动力电池, 若没有规范的回收和再利用体系, 在造成浪费的同时也会对环境产生危害^[1]。

动力电池梯次利用指的是电池从电动汽车上退役后, 经过一定工序的处理, 应用于其他对电池要求较低的领

域, 从而实现电池剩余价值的方法。根据电动汽车行业内的共识, 车用电池当衰退老化到最大容量的70%~80%时, 将不能在电动汽车上继续使用, 但此时电池还拥有比较高的容量和价值。退运电池的应用领域一般为对电池性能要求比较低场合, 如电动自动车或景区游览车、商业大厦的储能、智能电网的削峰填谷和充换电站储能等^[2]。电池梯次利用的意义, 最重要的是分摊车企和消费者的电池成本, 从而推动电动汽车成本的降低^[3]。同时, 充分发挥锂电池价值, 减少资源的浪费, 缓解未来几年大量电池进入电池回收系统的压力。

同时, 动力电池梯次利用目前还面临着一些问题。梯次利用从理论上讲可行且经济, 但在实际操作中还有很多难题需要克服。不同于新电池有明确的退运时间和条件, 电池二次利用的寿命和淘汰条件还没有定论。实际使用的成本和收益问题依然不明朗, 虽有多篇文献分析梯次利用的收益, 但仍处于假设和理想化的层面上。其次, 电池梯次利用还存在多种检测、成组等技术问题^[4], 电池在老化情况下的安全性也有一定的下降, 因此也需要相应的技术来提高其安全性和可靠性。此外, 动力电池梯次利用还可能涉及到电池所有权、二次利用的售后及责任承担等问题。本课题基于动力电池梯次利用中电池拆解后重新成组问题的研究, 提出了一种有效地确保电池一致性、延长二次使用寿命的成组



徐 刚/工程师

关键词/Keywords

锂离子动力电池 ·
梯次利用 ·
串联成组 ·
层次分析法 ·
聚类算法 ·

国家科技支撑计划项目(2013BAG24B02)。

方法,具有重要意义。

1 电池成组的评价指标及参数数据

1.1 电池成组的评价指标

如图1所示,在电池Thevenin等效电路模型中, U_{ocv} 为电池单体的开路电压; C_p 、 R_p 和 U_p 分别为极化电容、极化内阻和极化电压; R_0 、 V_R 为直流欧姆内阻和直流欧姆电压降; I 为工作电流; U_L 为外电压。

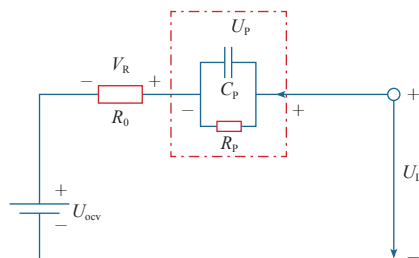


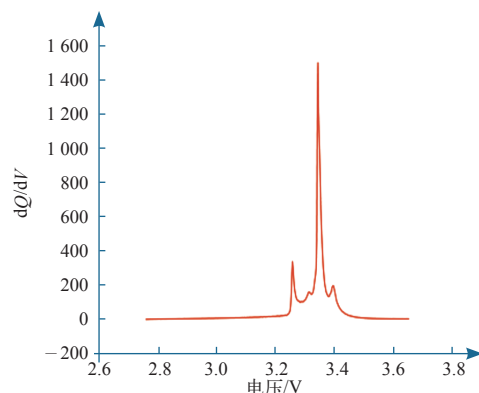
图1 锂离子电池Thevenin模型

从图1中可以看出,电池的外电压 U_L 与欧姆电压降 V_R 、极化电压 U_p 及开路电压 U_{ocv} 密切相关,而 U_{ocv} 与电池所处的SOC和最大可用容量 Q_{max} 密切相关。电池SOC可通过电池的充放电来调节,在电池组中也可通过均衡等技术得到改善^[5-7]。因此,电池之间的固有差异性体现在最大可用容量、欧姆内阻和极化内阻三个参数的差异上。因此将容量、欧姆内阻和极化内阻三个参数作为体现一致性的三个指标参与聚类成组。

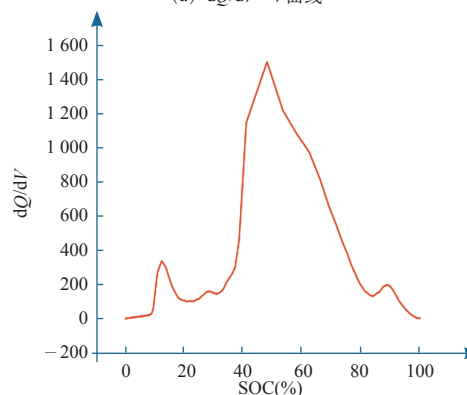
除此三个参数以外,磷酸铁锂电池的外电压也是电池的一个重要参数,电压一致性是电池模组一致性的重要内容。因此,考虑将综合反映电池电压水平的平台电压加入到成组参数中。

锂离子电池的充放电过程中,有很长一段时间,电压变化较为缓慢,被称为锂电池的电压平台。锂电池的电压即为正、负极之间的电势差,其由电池内部锂离子的迁移和外部电子迁移共同决定。在平台期,正、负极之间的锂离子浓差和外部电子的传输速率维持在一定的水平上,因此电压相对稳定。然而在平台期内,电池外电压仍然缓慢变化。若要将其作为成组的一个指标,则必须找出一个代表电压平台的值。磷酸铁锂电池

充电过程 $dQ/dV-V$ 和 $dQ/dV-SOC$ 曲线如图2所示。从图2中可以看出,平台期内容量随电压的变化速度非常快,且其中容量随电压变化最快的点,即ICA曲线的最高峰对应的SOC为50%。因此,定义电池充放电过程中50%SOC处的外电压为平台电压,其是单体电池电压水平的综合反映。这样就得到了平台电压的值。



(a) $dQ/dV-V$ 曲线



(b) $dQ/dV-SOC$ 曲线

图2 磷酸铁锂电池ICA曲线

1.2 电池各参数数据

使用八通道宁波拜特电池测试设备测试一箱世博会大巴车退运磷酸铁锂电池。根据测试规范^[8],单体电池的容量测试方法采用恒流恒压充电、恒流放电的方式,循环三次,以最后一次放电容量作为单体电池容量值。

单体电池的直流内阻,采用复合脉冲电流法来测试。具体地,用测试设备将电流阶跃信号(ΔI)输入给电池,测定相应的电压变化值(ΔU),使用欧姆定律($r=\Delta U/\Delta I$)求得电池的直流内阻。电池的内阻包括欧姆内阻和极化内阻

两部分, 当将一个放电脉冲施加给电池后, 电池两端电压会产生一个瞬间电压降, 此瞬间电压降体现了电池欧姆内阻的影响。由欧姆内阻引起的电压变化一般只会维持较短时间。欧姆内阻引起电压突降之后电压开始缓慢下降, 这主要是由电池进行电化学反应时离子浓度造成的, 其数值与电流强度和检测时间有关。此阶段的电压下降在短时间内体现了电池的极化作用而产生的电压降。

由于欧姆内阻和极化内阻在不同SOC点处的值不同, 因此选取最具代表性的50%SOC处的欧姆和极化内阻值参与聚类成组。分别选取100 ms时和10 s时的电压和电流作为欧姆内阻和10 s内阻的数据, 求得各单体电池的欧姆内阻和10 s内阻, 其中10 s内阻可近似当作欧姆内阻和极化内阻的总和。因此, 10 s内阻和欧姆内阻之差即为极化内阻的值。

根据1.1节内磷酸铁锂电池平台电压的定义, 选取电池恒流放电过程中50%SOC处的电压数值作为平台电压的值参与聚类成组。因此, 得到容量、欧姆内阻、极化内阻和平台电压的数据。

世博会大巴车新单体电池容量为15 A·h, 当前平均容量为10.85 A·h, 容量约衰退到新电池的70%。电池各参数差异性较大, 各电池不一致性明显。

2 各成组指标的权重分析

已经确定了最大容量、欧姆内阻、极化内阻和平台电压作为成组的指标和依据, 但各个指标在成组过程中的重要程度理应是不同的^[9], 即各个指标在聚类过程中的权重是不同的。由于各个量的物理意义、数据级和单位等都不同, 很难从物理方面通过明确的公式来计算出各个指标的权重。虽然只考虑容量一致性来分组的方法是不可取的, 但容量在成组时的权重应该相对较高, 其他指标权重相对较低而且各有不同。有学者提出可对变量加权的聚类算法, 用给出的公式对要聚类的数据指标进行权重的计算^[10-11]。但此类方法均为纯数学方法, 无法考虑实际的物理意义, 对于本课题中电池的分组并不适合。本文最终

选择了定量与定性分析相结合的层次分析法^[12] (AHP), 以此来分析各个参数的权重。

本研究中的层次分析法不需要解决复杂的层级关系, 而只需要将四种变量的权重算出即可。针对本研究的层次分析法步骤如表1所示。

表1 本课题中层次分析法计算权重步骤

步骤	操作过程
1	确定指标构成
2	确定两两之间比重
3	构造判断矩阵
4	一致性判断
5	计算特征向量
6	得到指标权重

对表中列出的步骤给予必要说明。步骤3构造判断矩阵中, 矩阵元素由式(1)、式(2)得出, 即

$$a_{ij} = C_i : C_j \quad (1)$$

$$A = (a_{ij})_{n \times n}, a_{ij} > 0, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (2)$$

针对本研究, 首先通过参考文献、个人理解与经验, 以及与指导教师等专家的沟通、交流, 确定两两之间的权重, 即

$$\begin{aligned} \eta_q : \eta_u &= 3 \\ \eta_q : \eta_\Omega &= 5 \\ \eta_q : \eta_p &= 5 \\ \eta_u : \eta_\Omega &= 3 \\ \eta_u : \eta_p &= 3 \\ \eta_\Omega : \eta_p &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, η_q 、 η_u 、 η_Ω 和 η_p 分别为容量、平台电压、欧姆内阻和极化内阻在成组中的权重。

求得矩阵最大特征根和对应于最大特征根的特征向量为

$$\lambda = 0.0145, \omega = (0.555, 0.252, 0.1, 0.1)^T \quad (4)$$

因此, 取近似得容量、平台电压、欧姆内阻和极化内阻的指标权重为

$$\eta_q : \eta_u : \eta_\Omega : \eta_p = 11 : 5 : 2 : 2 \quad (5)$$

3 基于聚类算法的电池串联成组

磷酸铁锂电池在梯次利用重新成组时, 目

的是为了使同一组内的电池具有更好的一致性，且在分组过程中无任何参考，根据聚类分析的描述，本课题适合使用聚类的方法来对电池进行分组。聚类的方法有很多，本题中选择最常用的 K 均值算法。

在测得20只退运电池的容量、平台电压、欧姆内阻和极化内阻后，使用中间值法将数据归一化。中间值法归一化具体操作方法如式(6)、式(7)所示，用此方法可将数据归一化到 $[-1,1]$ 内

$$x_{\text{mid}} = \frac{\max[x(n)] + \min[x(n)]}{2} \quad k=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$y(k) = \frac{2[x(k) - x_{\text{mid}}]}{\max[x(n)] - \min[x(n)]} \quad k=1,2,\dots,n \quad (7)$$

将数据归一化后的结果分别与式(5)的权重比例相乘，即得到各电池参数的加权数据，作为聚类算法的原始数据。

在Matlab环境中运行 K 均值聚类程序，将20只电池的容量、欧姆内阻、极化内阻和平台电压数据输入聚类程序，运行得到聚类结果如图3所示，其中横轴和纵轴分别表示权重较大的容量系数和平台电压系数，每个数据点代表一只单体电池，相同形状的电池表示聚为一类。

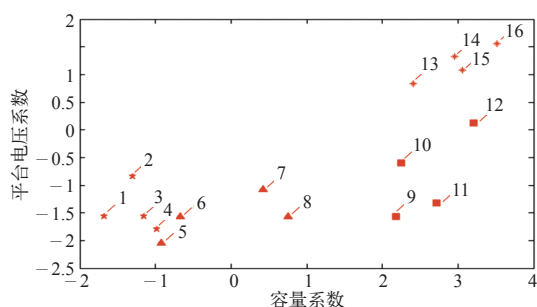


图3 聚类结果

4 成组方法的验证

对于串联电池组的一致性评价方法有很多，目前还没有定论哪种方法最有效或最全面。本文对于新成组方法的评价，采用容量利用率的方法。将电池串联连接后与Arbin电池测试设备连接，同时使用多通道万用表监视各电池电压，运行容量测试程序。电池连接状态如图4所示。

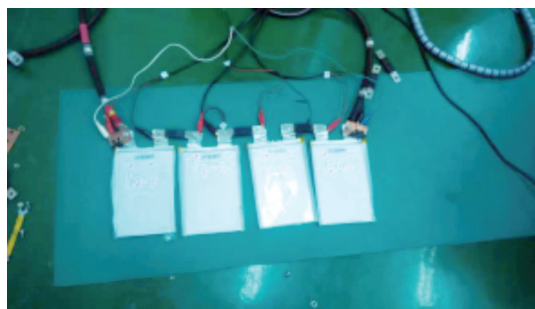


图4 串联电池组试验连接图

当容量最小的单只电池不能首先充满电和放完电时，电池组的容量就没有得到充分的利用，用容量利用率作为评价电池组性能的指标。定义 n 只电池串联形成的电池组的容量利用率为电池组的最大可用容量 Q_{module} 与组内容量最小的单体电池的可用容量 $\min\{Q_{\text{cell}}\}$ 之比，即

$$\eta = \frac{Q_{\text{module}}}{\min\{Q_{\text{cell}}\}} \quad (8)$$

找出相关电池数据，代入式(8)，得到各串联模块的容量利用率如表2所示。

表2 各串联模组容量利用率

模组号	1	2	3	4
放电容量/A·h	9.964	10.012	10.073	10.362
单体最小容量/A·h	10.684	10.743	10.986	11.004
容量利用率(%)	93.30	93.20	91.70	94.20

表2显示了四个电池模组的容量利用率，由于采用实物试验，与仿真试验相比结果稍差，四个电池组的容量利用率均为90%以上，认为容量利用率满足要求。

5 结束语

主要研究了梯次利用电池筛选成组方法。由于动力电池本身制作工艺和使用过程中所处电动汽车位置的不一致，导致电动汽车退运动力电池特性不一致性。考虑安全性和电池组性能要求，需在电池梯次利用前对其筛选并重新成组。

通过电池的Thevenin等效电路模型分析筛选指标，得出直流欧姆内阻、极化内阻和最大可用容量作为电池筛选指标。同时考虑磷酸铁锂电池电压特性，将最能反映电池电压综合水平的平台电

压也加入为成组指标。

使用层次分析法构建判断矩阵, 计算得出容量、欧姆内阻、极化内阻和平台电压的权重比例。使用 K 均值聚类算法作为分组方法对电池进行聚类。最后用实物试验的方法, 通过容量利用率评价模组的一致性, 验证方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 方海峰, 黎宇科, 黄永和. 电动汽车废旧动力电池的回收利用技术及发展 [J]. 汽车与配件, 2011 (11): 27-29.
- [2] 沈晓彦, 黄钟琪, 周建新, 等. 锂电池在风光发电储能系统中的应用分析 [J]. 电源技术, 2011, 35 (5): 602-604.
- [3] Gladwin D T, Gould C R, Stone D A, et al. Viability of "second-life" use of electric and hybridelectric vehicle battery packs [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013—39th Annual Conference of the IEEE, 2013: 1922-1927.
- [4] 韩路, 贺狄龙. 动力电池梯次利用研究进展 [J]. 电源技术, 2014, 38 (3): 548-550.
- [5] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究 [J]. 软件学报, 2008, 19 (1): 48-61.
- [6] 李腾, 林成涛, 陈全世. 磷酸铁锂电池组成组过程的不一致性分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52 (7): 1001-1006.
- [7] 戴海峰, 王楠, 魏学哲, 等. 车用动力锂离子电池单体不一致性问题研究综述 [J]. 汽车工程, 2014, 36 (2): 181-188.
- [8] QC/T 743—2006 电动汽车用锂离子蓄电池测试规范 [S].
- [9] 陈强, 李香龙, 李雪, 等. 单体参数差异对串联电池组性能影响研究 [J]. 电源技术, 2013, 37 (11): 1947-1950.
- [10] 李晓明. K -means类型变量加权聚类算法的研究与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 李洁, 高新波, 焦李成. 基于特征加权的模糊聚类新算法 [J]. 电子学报, 2006, 34 (1): 89-92.
- [12] 孙宏才, 田平, 王莲芬. 网络层次分析法与决策科学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

(收稿日期: 2016-01-25) **EA**

(上接第36页)

- [8] 王冰, 王清璞, 孙优良. 换流变压器阀侧绕组端部极性反转瞬态电场的计算与分析 [J]. 变压器, 2007, 44 (6): 11-22.
- [9] Wen K C, Zhou Y B, Fu J, et al. A calculation method and some features of transient field under polarity reversal voltage in HVDC insulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (1): 223-230.
- [10] 王永红, 魏新劳. 极性反转电压下油纸复合绝缘的特性 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (19): 161-168.
- [11] 魏新劳, 聂洪岩, 陈庆国, 等. 极性反转电压下油纸绝缘系统中电场分布 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (11): 27-30.
- [12] 丁中尼, 李光范. 极性反转时典型油纸复合绝缘的电场特性 [J]. 电网技术, 2008, 32 (23): 82-85.
- [13] 李季, 罗隆福, 许加柱, 等. 换流变压器阀侧绝缘电场特性研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (9): 121-124.
- [14] 李岩, 朱立勋. 电力变压器主绝缘电场计算与分析软件 [J]. 变压器, 2013, 50 (6): 52-56.
- [15] 刘刚, 李琳, 李文平, 等. 换流变压器极性反转非线性电场分析 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (2): 451-456.
- [16] 关键昕. 油纸绝缘电导非线性特性对阀侧出线绝缘裕度的影响研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014.

(收稿日期: 2015-11-03) **EA**