

锂电池 SOC 拐点修正安时积分实时估算方法

刘东¹, 黄碧雄², 王一全, 严晓, 王影

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海市松江区, 201620; 中国)

摘要: 对 18650 及 26650 磷酸铁锂电池的充放电电流、电压等数据分析表明: 在电池循环老化过程中, 虽然容量电压曲线两端曲率最大(拐点)处的 SOC 值有所变化, 但是其电压保持不变。因此在估算 SOC 过程中, 当放电电压达到拐点电压时, 将此时的 SOC 修正为对应的拐点 SOC, 可以一定程度上优化安时积分法由于初始 SOC 而估算不准的问题。在此基础上提出一种新型的拐点修正安时积分算法, 综合考虑温度、充放倍率、循环老化等因素对 SOC 估算精度的影响, 引入充放电曲线拐点概念, 建立 SOC 实时估算数学模型, 减小消除安时积分法存在的累计误差问题。对比传统安时积分法估算精度, 结果表明: SOC 拐点修正安时积分实时估算方法的误差在 3%, 说明该方法在实际工况中具有可行性, 并且估算精度较高, 可为 SOC 实时估算与检测提供重要参考。

关键词: 荷电状态 SOC; 拐点修正安时积分法; 实时估算

中图分类号: TM912.9 **文献标志:** A

Inflection point Ahh-total Integration Method for real-time integration to correct lithium battery SOC

LIU Dong¹, HUANG Bixiong², WANG Yiquan, YAN Xiao, WANG Ying

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Songjiang District in Shanghai, 201620, China)

Abstract: The data of charge and discharge current and voltage of 18650 and 26650 lithium iron phosphate batteries show that during the cycle aging of the battery, although the SOC value at the maximum curvature (inflection point) of the capacity voltage curve changes, the voltage remains unchanged. Therefore, in the process of estimating SOC, when the discharge voltage reaches the inflection point voltage, modifying the SOC to the corresponding inflection point SOC can optimize the estimation of the ampere-hour integration method because of the initial SOC to a certain extent. Based on this, a new inflection point correction chronograph integration algorithm is proposed. The effects of temperature, charge and discharge ratio, cycle aging and other factors on the accuracy of SOC estimation are considered. The concept of inflection point of charge and discharge curve is introduced to establish a mathematical model for real-time estimation of SOC. Reduce Eliminate the cumulative error problem of the ampere-time integral method. Compared with the traditional An-time integral method, the error is 3%, which indicates that the method is feasible in actual conditions, and the estimation accuracy is high, which can provide an important reference for real-time estimation and detection of SOC.

Key words: state of charge SOC; inflection point correction ampere-time integral method; real-time estimation

电池管理系统 (BMS) 是电动汽车非常重要的一部分, 电动汽车锂离子电池状态主要包括电池的荷电状态 SOC (State Of Charge) 和健康状态 SOH (State Of Health)^[1-3]。

基金项目: 上海市科委项目: 车用动力电池的测试、控制和评估 (15110501100)

¹第一作者: 刘东 (1995—), 男, 在读研究生, 研究方向为新能源汽车动力电池 SOC 算法, E-mail:1826481519@qq.com

²通讯作者: 黄碧雄 (1983—), 男, 硕士, 实验师, 研究方向为新能源汽车动力电池, E-mail:hbzxc@hotmail.com

电池荷电状态 (State of Charge, 简称 SOC), 是指电池剩余容量占总容量的比值^[4]。SOC 的定义较多, 目前在国际上比较统一的是从容量角度出发, 即电池剩余容量。SOC 是电池最重要的参数之一, 它反映了电池当前的能量, 是电池当前工作状态的重要参数, 同时, SOC 也是表征 SOH 的重要参数, 是电池寿命状态的重要表征参数。此外, SOC 的预测与计算的准确与否直接关乎到锂离子电池使用过程中的使用效率及安全问题, 但影响 SOC 估算精度的因素很多: 原始电流的测量精度、环境温度、电芯的寿命衰减、充放电电流倍率、电芯一致性等^[5]。目前常用的 SOC 估算方法有: 开路电压法^[6]、内阻法^[7]、神经网络法^[8]、卡尔曼滤波法^[9]、安时积分法^[10]等。开路电压法简单易行, 但是需要电池达到稳定的状态, 这个过程需要很长时间, 会对试验测试造成很大的困难, 开路电压法的估算在充电初期和末期有很好的效果, 通常与安时积分法共同使用^[11]; 内阻法由于电池内阻和电池剩余容量之间的关系极为复杂, 且以交流充放电时, 电池产生的温度会影响电池内阻变化, 而且变化是非线性的, 从而会影响 SOC 的估算; 神经网络法适用于各种电池, 能够快速准确的估算 SOC, 但该方法需要对大量的参考数据进行训练, 必须建立在大量的试验数据基础上, 而且受训练数据和训练方法的影响很大; 卡尔曼滤波等复杂算法目前尚未成熟, 系统设置困难, 在实际应用中成本较高; 安时积分法是以电池电流等外部特征作为估算依据, 相对安全可靠, 可以实时动态估算 SOC, 不过 SOC₀ (初始 SOC) 对 SOC 估算影响最为显著。传统方法利用开路电压法测量 SOC₀, 但此种方法需要对电池进行长时间静置, 不能实现在线预估, 另一方面安时积分法容易受到自放电、电池老化、库伦效率、充放电倍率、温度等因素的影响^[12]。

本文在传统安时积分法基础上对容量进行温度修正、倍率修正、循环老化修正, 并引入充放电曲线拐点概念, 建立 SOC 实时估算数学模型, 减小消除安时积分法判定 SOC 所引起的累计误差问题, 进一步提高 SOC 估算精度。

1 拐点修正安时积分法

1.1 修正安时积分法

传统安时积分法的工作原理如下:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C} \int_0^t Idt \quad (1)$$

其中 SOC₀ 为充放电初始时刻的 SOC, C 为电池额定容量, I 为电流。

相对于传统安时积分法, 目前使用最为广泛的是在传统安时积分法基础上进行改进的修正安时积分法, 修正安时积分法的工作原理如下:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{\eta \lambda \mu C} \int_0^t Idt \quad (2)$$

其中 η 为温度系数， λ 为循环系数， μ 为倍率系数。

从公式可看出安时积分法不研究相对复杂的化学反应，而是利用电池电流、额定容量来估算电池剩余容量。由于电池在使用过程中额定容量会受到循环老化、温度、倍率的影响，从而影响 SOC 估算精度，因此修正安时积分法在传统安时积分基础上对容量进行了修正，从而提高 SOC 估算精度。

1.2 拐点修正安时积分法

本文将锂离子电池恒流放电时容量电压曲线两端曲率变化最大的点称为拐点，在判定拐点时，根据 SOC-V 曲线，建立数学模型，采用最小二乘法多项式拟合实际容量电压曲线，并且求得曲线各点曲率。在建立模型时为了解决如何选取多项式拟合次数的问题，引入了机器学习中的 10 折交叉验证方法确定拟合阶数：将 SOC 和电压数据集分为十份，轮流将其中九份作为训练数据，一份作为测试数据。选取不同拟合阶数在训练集中拟合出 SOC-V 曲线，将测试集 SOC 数据代入拟合出的曲线求出预测值电压，定义预测值电压与测试集电压残差平方和为误差，交叉验证十次后，十次误差的均值即为估计泛化误差，比较不同阶数的估计泛化误差，其最小对应的拟合阶数即为最优拟合阶数。本文实验数据在使用该模型时选取的拟合阶数范围在 1-10 阶，确定的最佳拟合阶数为 6 阶。曲率在数学上表示曲线在某一弯曲程度的数值，曲率越大，表示曲线的弯曲程度越大。通过曲线各点的曲率，对照 SOC-V 曲线可知充放电时电压平台的两端端点的弯曲程度最大，因此定义曲率最大的点即为拐点。如图 1 所示：黑色直线表示放电电压曲线，黑色虚线代表放电电压曲率曲线，曲率曲线出现的两个峰值所对应的电压曲线上的点即为拐点。

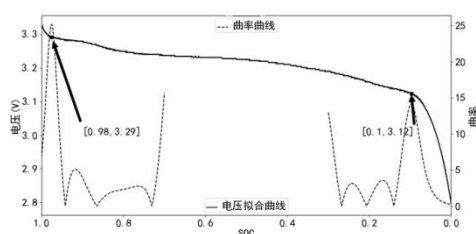


图 1 放电电压曲线及曲率曲线

Fig.1 Discharge voltage curve and curvature curve

为了得到拐点电压与对应拐点 SOC 的规律，本文采用 3 个 18650 磷酸铁锂电池进行循环工况实验，来研究拐点电压及 SOC 与循环老化的关系。对拐点电压分析结果如图 2、表 1、

表 2 所示：在循环老化实验中，3 个电池的拐点电压随循环次数的增加基本保持不变，拐点实际电压与平均电压最大相差 0.020V。

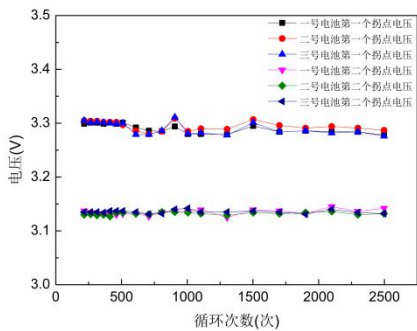


图 2 APR18650M1A 单体循环-拐点电压

Fig. 2 APR18650M1A’s monomer cycle versus inflection point voltage

表 1 放电曲线第一个拐点电压分析

Table 1 Analysis of the first inflection point voltage of the discharge curve

单体电池序号	第一个拐点平均电压/V	实际电压与平均电压最大误差/V
1 号	3.290	0.020
2 号	3.290	0.010
3 号	3.295	0.005

表 2 放电曲线第二个拐点电压分析

Table 2 Analysis of the second inflection point voltage of the discharge curve

单体电池序号	第二个拐点平均电压/V	实际电压与平均电压最大误差/V
1 号	3.134	0.010
2 号	3.130	0.005
3 号	3.135	0.007

对拐点 SOC 分析结果如图 3、图 4 所示：电池在循环老化过程中，随着电池老化越来越严重，放电曲线中第一个拐点会向更低 SOC 靠近，第二个拐点会向更高 SOC 靠近，即两个拐点会向中间靠拢，意味着充放电电压平台随着电池老化逐渐变短。

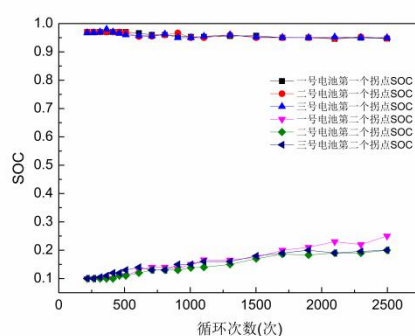


图3 APR18650M1A 单体循环-拐点 SOC

Fig. 3 APR18650M1A's monomer cycle versus inflection point SOC

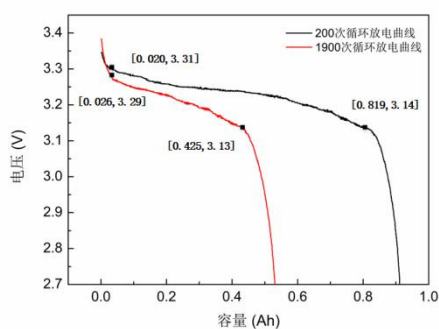


图4 APR18650M1A 单体循环对比

Fig. 4 APR18650M1A's monomer cycle comparison

为了对 18650 电池电压实验数据分析结果进行验证, 本文采用 4 个 3.2v/2.4Ah 26650 磷酸铁锂电池进行循环老化实验, 并且在原有基础上研究不同倍率下拐点电压的变化情况, 在室温 25℃下分别进行 0.5C、1C、1.5C、2C 倍率放电, 分析实验数据结果如图 5、表 3、表 4 所示: 不同放电倍率下, 拐点电压值有所不同, 倍率越大, 拐点电压值越小, 不过在同一倍率下, 拐点电压值仍保持不变的规律。表 3、表 4 看出第一个拐点在不同倍率下平均电压与实际电压最大相差 0.004V, 第二个拐点在不同倍率下平均电压与实际电压最大相差 0.007V。

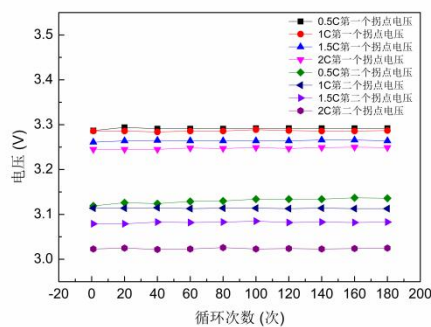


图 5 不同倍率下拐点电压随循环次数的变化

Fig. 5 The change of the knee voltage with the number of cycles at different magnifications

表 3 放电曲线第一个拐点电压分析

Table 3 Analysis of the first inflection point voltage of the discharge curve

电流倍率 (C)	第一个拐点平均电压 (V)	实际电压与平均电压最大误差 (V)
0.5	3.291	0.004
1	3.286	0.002
1.5	3.264	0.002
2	3.247	0.002

表 4 放电曲线第二个拐点电压分析

Table 4 Analysis of the second inflection point voltage of the discharge curve

电流倍率 (C)	第二个拐点平均电压 (V)	实际电压与平均电压最大误差 (V)
0.5	3.130	0.007
1	3.114	0.002
1.5	3.082	0.003
2	3.024	0.003

利用拐点电压不变的规律，一方面可以在电池充放电过程中将其设置为充放电截止电压，保证电池在充放电电压平台上进行充放，防止过充过放对电池造成不良影响，在对电池安全性要求较高的领域或者在对退役电池进行梯次利用时，拐点电压作为截止电压具有一定的实用性。另一方面就是本文研究的拐点修正安时积分法，在估算 SOC 过程中利用两个拐点来修正传统安时积分算法中的 SOC_0 ，可以一定程度上克服开路电压法需要对电池进行长时间静置，不能实现在线预估的问题，从而提高 SOC 估算精度。

拐点修正安时积分法是基于修正安时积分法且引入拐点概念提出的一种新型安时积分法。

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{\eta \lambda \mu C} \int_0^t Idt \quad (3)$$

对于修正安时积分法 SOC 修正系数的获取，是建立在大量试验基础上的，本文主要以某公司退役成组电池作为实验对象，分别得到对容量进行的温度、循环老化、倍率等修正系数。

首先分析温度对磷酸铁锂电池容量的影响，温度的变化会引起锂离子电池内部例子、电子的迁移率以及电池正负极材料性能的变化。温度的适当提高会增强材料活性，但温度过高

会加速电解液分解加速老化，因此必须考虑温度对电池容量的影响。通过对不同温度下实验数据进行拟合分析，得到温度系数公式：

$$\eta = -7.731 \times 10^{-5} T^2 + 0.007668 T + 0.8675 \quad (4)$$

其次分析循环老化对容量的影响，锂离子电池在充放电循环老化过程中除了在正负极发生氧化还原反应之外，还存在大量的副反应。这些副反应将会导致锂离子电池循环寿命的衰减，对电池额定容量产生影响，从而影响安时积分法估算精度。通过对循环实验数据进行拟合分析，得到循环系数公式：

$$\lambda = 9.946 \times 10^{-6} x^3 - 0.0002031 x^2 + 0.0002423 x + 0.9805 \quad (5)$$

最后分析充放电倍率对额定容量的影响，充放电倍率是指电池在规定时间内放出其额定容量是所需要的电流值，它在数值上是电池额定容量的倍数。锂离子电池的充放电倍率，决定了以多快的速度将一定的能量储存到电池里面，或者以多快的速度，将电池里面的能量释放出来。大倍率充放电时，锂离子无法充分脱嵌，容易在表面形成枝晶，另一方面大倍率充电时极化内阻增大，很快到达充放电截止电压。因此在使用安时积分法估算 SOC 时要充分考虑充放电倍率对额定容量的影响，从而提高精度。为了得到倍率系数，在 25℃ 情况下分别做了 0.25C、0.5C、0.75C、1C 倍率的充放电试验，通过对实验数据进行拟合分析，得到倍率系数公式：

$$\mu = -0.07914x^2 + 0.0422x + 0.9955 \quad (6)$$

在修正安时积分法的基础上引入拐点概念，即在安时积分算法估算 SOC 过程中，当电压达到拐点电压时，SOC 修正为对应的拐点 SOC，因此在应用时要充分考虑影响拐点电压以及 SOC 的因素。

通过充放电实验数据分析得出拐点电压受温度、倍率影响，即：

$$V_{(\text{拐})} = \kappa \tau V_0 \quad (7)$$

κ 为温度系数， τ 为倍率系数， V_0 为 25℃、倍率为 0.5C 时拐点电压。

通过拟合曲线得出温度系数(0.5C 倍率下)与倍率系数(25℃下)分别为：

$$\kappa = 1.015 \times 10^{-7} x^3 - 2.734 \times 10^{-5} x^2 + 0.001722 x + 0.973 \quad (8)$$

$$\tau = 0.004874 x^2 - 0.0368 x + 1.017 \quad (9)$$

虽然拐点的电压不会受到循环老化的影响，但拐点 SOC 会受到循环次数的影响，即：

$$SOC_{(左)} = \alpha SOC_{(初)} \quad (10)$$

$$SOC_{(右)} = \beta SOC_{(初)} \quad (11)$$

α 为第一个拐点 SOC 循环系数， β 为第二个拐点 SOC 循环系数。

通过对成组电池循环充放实验数据分析，分别得到 α 、 β 为：

$$\alpha = -1.19 * 10^{-5} * x + 0.9037 \quad (12)$$

$$\beta = 4.236 * 10^{-5} * x + 0.13603 \quad (13)$$

进一步对成组电池的数据分析发现，拐点 SOC 在同一循环次数下同样受温度、倍率的影响，即：

$$SOC_{(拐)} = \rho \gamma SOC_0 \quad (14)$$

ρ 为温度系数， γ 为倍率系数， SOC_0 为 25℃、倍率为 0.5C 时拐点 SOC。

通过拟合曲线分析得出温度系数(0.5C 倍率下)与倍率系数(25℃下)分别为：

$$\rho = -1.165 * 10^{-5} x^2 + 0.001061 x + 0.983 \quad (15)$$

$$\gamma = 0.04255 x^2 - 0.04894 x + 1.019 \quad (16)$$

2 拐点修正安时积分法应用

正常情况下成组电池包在使用过程中符合短板效应，即应该以 Min_Cell(最低荷电态单体)的 SOC 为准。但在充电过程中当 Max_Cell(最高荷电状态单体)至 100%SOC 时充电停止，而此时成组系统中其他电芯 SOC 未到 100%。如果以 Max_Cell 的 SOC 为准，那么将可能出现还有 10%电量的情况下突然失去电池系统的功率输出的情况。如果以电池系统所有电池的平均 SOC 为准，那上述两个问题将同时存在。如图 6 所示：

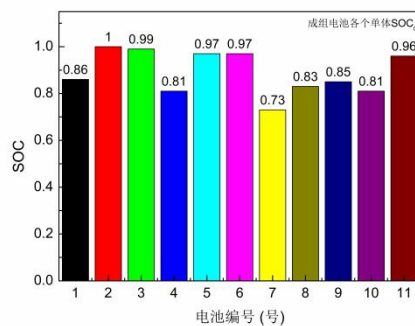


图 6 电池不一致性

Fig. 6 Battery inconsistency

为了精确估算成组电池的 SOC，减少电池不一致性的影响，保证用户使用的平顺性，可以通过权重系数调节 SOC 的选取倾向，即当电池系统整体荷电态较高时偏重 Max_Cell，反之偏重 Min_Cell ($SOC = Max_Cell * SOC + Min_Cell * (1 - SOC)$)，如图 7 所示：

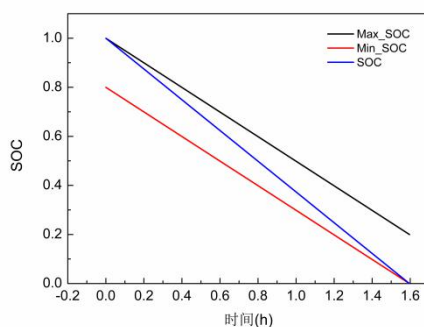


图 7 利用权重系数修正成组电池 SOC

Fig. 7 Using the weight coefficient to correct the group battery SOC

在此理论上应用拐点修正安时积分法，具体工作流程图如图 8：

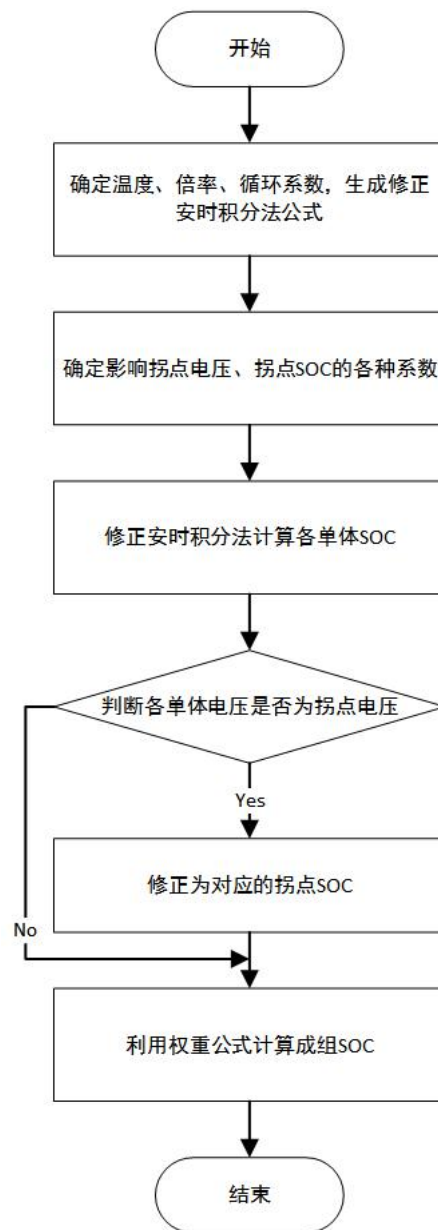


图 8 拐点修正安时积分法工作流程图

Fig.8 working point flow chart of the inflection point correction

运用拐点安时积分法对成组电池进行分析，与传统安时积分法进行比较，结果如图 9、图 10 所示：蓝色线表示实际情况下成组电池的 SOC 曲线，红色线为传统安时积分法下的成组电池 SOC 变化曲线，黑色线表示拐点修正安时积分法成组电池 SOC 的变化曲线，可以明显看到拐点修正安时积分法更加符合实际情况，拐点修正安时积分法估算的 SOC 与实际成组电池的 SOC 的最大误差为 3%。

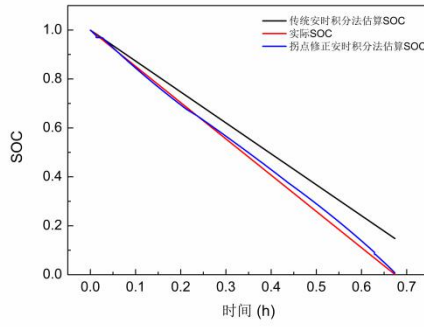


图 9 拐点修正安时积分法与传统安时积分法的比较（成组电池）

Fig. 9 Comparison between Inflection point improved ampere-time integral method and traditional ampere-time integral method(group battery)

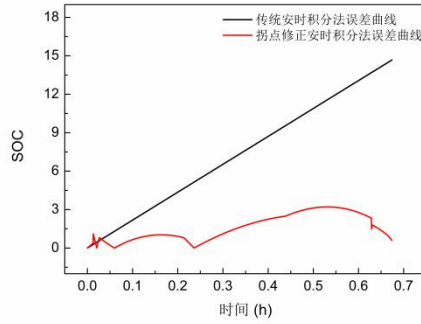


图 10 拐点修正安时积分法与传统安时积分法的误差比较（成组电池）

Fig. 10 Comparison of errors between Inflection point improved ampere-time integral method and traditional ampere-time integral method(group battery)

3 结论

对 18650 及 26650 磷酸铁锂电池的充放电电流、电压等数据分析表明：在电池循环老化过程中，虽然容量电压曲线两端曲率最大（拐点）处的 SOC 值有所变化，但是其电压保持不变。此外，在电池循环老化过程中，放电曲线中第一个拐点会向更低 SOC 靠近，第二个拐点会向更高 SOC 靠近，充放电电压平台两端端点即拐点向中间靠拢，意味着随着电池的循环老化，充放电电压平台变短。

本文在此基础上提出一种新型的拐点修正安时积分算法，综合考虑温度、充放倍率、循环老化等因素对 SOC 估算精度的影响，引入充放电曲线拐点概念，建立 SOC 实时估算数学模型，减小消除安时积分法存在的累计误差问题。对比传统安时积分法估算精度，结果表明：SOC 拐点修正安时积分实时估算法的误差在 3%，说明该方法在实际工况中具有可行性，并

且估算精度较高, 可为 SOC 实时估算与检测提供重要参考。在对电池安全性要求较高的领域或者在对退役电池进行梯次利用时, 将其设置为充放电截止电压, 可以保证电池在充放电电压平台上进行充放, 防止过充过放对电池造成不良影响, 拐点电压作为截止电压具有一定的实用性。

参 考 文 献

- [1]Gregory L. Plett. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs[J]. Journal of Power Sources,2004,134(2).
- [2]Eberhard Meissner, Gerolf Richter. The challenge to the automotive battery industry: the battery has to become an increasingly integrated component within the vehicle electric power system[J]. Journal of Power Sources,2004,144(2).
- [3] Ng K S, Moo C S, Chen Y P, et al. Enhanced Coulomb Counting Method for Estimating State-of-Charge and State-of-Health of Lithium-Ion Batteries [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1506—1511.
- [4] 邓涛, 孙欢. 锂离子电池新型 SOC 安时积分实时估算方法[J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2015, 29 (01) :101-106.
DENG Tao, SUN Huan. Research on Real Time Estimation Method of New SOC Ampere Hours Integral for Lithium Ion [J]. Journal of Chongqing University of Technology (NATURAL SCIENCE), 2015, 29 (01): 101-106.
- [5] 邓青, 刘成武. 电池管理系统关键技术 SOC 估算的研究[J]. 福建工程学院学报, 2017, 15 (06) : 519-522+534.
DENG Qing, LIU Chengwu. Research on SOC estimation of key Technology of Battery Management system [J]. Journal of Fujian Institute of Engineering, 2017,15 (06): 519-522 +534.
- [6]Fangdan Zheng, Yinjiao Xing, Jiuchun Jiang, Bingxiang Sun, Jonghoon Kim, Michael Pecht. Influence of different open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries[J]. Applied Energy,2016,183.
- [7] 曹贵华, 陈智家, 王卓. 镍氢动力电池 SOC 估算方法[J]. 汽车工程师, 2009 (9) : 41-44.
CAO Guihua, CHEN Zhijia, WANG Zhuo. Estimation method of SOC for Ni-MH power cells [J]. Automotive engineer, 2009 (9): 41-44.
- [8] YATSUI M W, BAI H. Kalman filter based state- of -charge estimation for lithium-ion batteries in hybrid electric vehicles using pulse charging [C] // Vehicle Power and Propulsion Conference. [S.L.] :IEEE, 2011:1-5.
- [9] CORNO M, BHATT N, SAVARESI S M, et al. Electrochemical Model- Based state of charge estimation for Li-ion cells [J] . IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23 (1) : 117-127.
- [10] 林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车 SOC 估算方法原理与应用[J]. 电池, 2004, 34 (5) : 376-378.
LIN Chengtao, WANG Junping, CHEN Quanshi. Principle and Application of SOC estimation method for Electric vehicles [J]. Battery, 2004, 34 (5): 376 - 378.
- [11] 付浪, 杜明星, 刘斌, 等. 基于开路电压法与卡尔曼滤波法相结合的锂离子电池 SOC 估算[J]. 天津理工大学学报, 2015, 31 (6) : 9-13.
FU Lang, DU Mingxing, LIU Bin, et al. SOC estimation of lithium ion battery based on open circuit voltage method and Kalman filter method [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2015, 31 (6): 9 - 13.
- [12] 孙悦, 刘桥. 锂离子电池 SOC 估算算法的研究[J]. 通信电源技术, 2017, 34 (1) : 45~47.
SUN Yue, LIU Qiao. Study on SOC estimation algorithm for Lithium Ion Battery [J]. Communication Power Technology, 2017, 34 (1):

