

基于充电方式的锂电池SOC校准和估计方法

陈宗海, 钟良, 何耀, 张陈斌

(中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027)

摘要: 荷电状态(SOC)是动力锂电池的重要参数. 针对安时法估计锂电池SOC存在累积误差, 其他估计算法复杂度较高的问题, 提出一种工程实用的SOC估计方法. 该方法通过分析电池特性并结合安时法, 建立了SOC初始值、总容量和累积误差的校准方法. 通过建立终端电压与SOC之间的映射关系, 利用恒流、恒压不同充电阶段的电池特性, 实现了电池系统在一个放电周期内的SOC高精度估计. 实验表明, 该方法能够使得SOC的估计误差在5%以内.

关键词: 锂电池; 荷电状态; 工程估计; 校准; 充电方式

中图分类号: TM912.9

文献标志码: A

Method to calibrate and estimate Li-ion battery state of charge based on charging method

CHEN Zong-hai, ZHONG Liang, HE Yao, ZHANG Chen-bin

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China. Correspondent: CHEN Zong-hai, E-mail: chenzh@ustc.edu.cn)

Abstract: The state of charge(SOC) is an important parameter of the power Li-ion battery. As there exists accumulation errors in the current integration method to estimate the SOC and some other methods are usually very complicated, a practical engineering method to calibrate the estimation of battery SOC is proposed. With the analysis of battery characteristics, some methods are established to calibrate the SOC initial value, the total capacity and the accumulated error by combining the current integration method. By establishing the relationship of the battery terminal voltage and SOC, the battery characteristics is analyzed in the different charging phase of the constant current and the constant voltage to obtain a high-precision estimation of the battery SOC in a discharging cycle. The experiment results show that an accurate estimation can be obtained and the estimation error is below 5%.

Key words: Li-ion battery; state of charge(SOC); practical estimation; calibration; charging method

0 引言

SOC是电动汽车动力电池组的重要参数, 反映了动力电池剩余容量的相对大小. 准确估计电池的SOC对汽车的可行驶距离估计和延长电池的使用寿命具有重要意义, 是电动汽车推广过程中需要解决的关键问题之一.

目前SOC估计方法主要有神经网络法^[1]、模糊控制法^[2]、基于模型的方法^[3-6]和安时法^[7]. 神经网络方法通过建立合理的网络达到准确估计, 然而网络参数的训练需要大量数据而且很难收敛. 模糊控制的方法采用模糊逻辑的方法进行估计, 模糊规则通常不易确定而且隶属度函数具有一定的主观性, 从而导致

误差较大. 基于模型的方法通常是通过建立合理的电池模型, 然后利用数学方法EKF(extended Kalman filter)^[3]、UPF(unscented particle filter)^[4]等进行滤波估计. 基于准确的电池模型时, 这种方法估计精度较高, 但由于电池组系统的非线性以及使用环境的不确定性, 建立精确的电池模型非常困难; 另一方面, 在综合平衡电池管理系统(BMS)成本和性能的实际应用中, 较为复杂的建模方法和算法难以工程实现.

安时法通过电流积分实现估计, 具有简单易于实现的优点, 在工程上使用较多. 然而由于存在累积误差和初始值不易确定等问题^[8], 使得安时法在实际使用过程中常常需要采用一些校准方法来减小估计

收稿日期: 2013-04-17; 修回日期: 2013-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61075073); 国家863计划项目(2009AA11A113).

作者简介: 陈宗海(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模仿真与控制、信息获取与控制、机器人与智能系统等研究; 钟良(1989-), 男, 硕士生, 从事新能源汽车、电池管理的研究.

误差. 目前主要是通过电池运行在极端情况下(如过充或过放)时, 对电池的SOC分别校准为0%或100%. 过充和过放对电池性能不利, 会降低电池的使用寿命, 因此这种校准方法不能时时触发, 导致误差不能及时进行校准. 鉴于此, 本文提出一种基于充电方式的校准方法, 利用电池每个循环必须充电的特点对电池SOC估计进行校准, 能够实现及时校准, 以减少累积误差的影响. 在分析安时法误差特点的基础上, 提出了初始值校准和总容量校准方法, 从而可以实现电池在一个放电周期内的SOC估计均在一个合理的范围. 最后通过实验对这种校准方法进行了比较分析, 实验结果表明该方法能够实现较准确的估计, 使得电动汽车SOC估计误差在5%范围内.

1 安时法误差分析

电池SOC反映了当前电池剩余容量的相对大小, 将其定义为当前剩余容量与电池总容量的比值^[9], 即

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(0) + \frac{\eta_c \int_0^t i(\tau) d\tau}{C_N} \quad (1)$$

其中: $\text{SOC}(0)$ 为电池SOC的初始值; η_c 为库伦效率; $i(\tau)$ 为电流值, 充电时为正值, 放电时为负值; C_N 为电池总容量.

安时法是直接利用电池SOC定义进行估计的方法, 该方法受到以下几个因素影响:

1) 初始值 $\text{SOC}(0)$ 不准确.

利用式(1)估计电池SOC, 首先需要确定 $\text{SOC}(0)$ 的值, 该值的不准确将会使电池的SOC估计出现误差.

2) 总容量 C_N 变化.

电池的总容量会随电池老化以及外部环境的改变发生变化. 若不及时校准, 将使得式(1)计算不准确.

3) 电流值 $i(\tau)$ 不精确.

在电动汽车动力电池管理系统中, 用于电流检测的传感器主要有分流器和霍尔传感器. 对于电动汽车而言, 霍尔传感器具有便于安装的特点, 因此使用较多. 目前使用的电流传感器检测精度约为1%(如LEM公司DHAB S/14型号以及北京森社的CHB-100SF型号). 由于检测误差的存在, 如果不及时进行校准, 则积分累积误差将会逐渐增加.

为了减少系统误差, 本文拟从初始值、总容量和累积误差3个方面进行校准, 使得SOC的估计误差降低到一个合理的水平.

2 SOC初始值的校准

当BMS首次管理电池时不知电池荷电状态, 因此需对其进行确定. 常用的方法主要有: 1) 通过BMS手动配置电池的SOC值. 这种方法主观性较强, 误

差较大. 2) 首次使用时, 深放电, 使得电池出现过放现象, 此时电池的SOC校准为0%. 类似地, 也可对电池进行深充电, 使得电池出现过充现象, 此时电池的SOC校准为100%. 3) 当电池静置较长时间时, 开路电压(OCV)、温度和SOC存在较为确定的关系, 从而可以利用开路电压和温度值校准SOC. 电动汽车常常夜间停车, 电池会静置较长时间, 此处将详细分析第3种方法.

对于磷酸铁锂电池, 当SOC在20%~90%之间时, 开路电压变化较小(如图1所示), 此时电压的波动会导致对应的SOC变化较大, 因此需要分析电压检测误差对校准的影响.

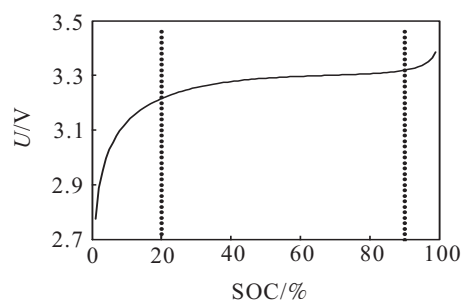


图1 磷酸铁锂电池开路电压与SOC之间的关系

假设电压检测的误差为 $\pm k$, 为了保证SOC的估计误差在 $n\%$ 内, 电压变化的差值需满足如下关系:

$$V(\text{SOC} + n\%) - V(\text{SOC}) > 2k, \quad (2)$$

即在OCV-SOC曲线不是很平坦区间内, 利用电压估计SOC能消除由于电压检测误差带来的校准误差.

BMS对电池电压的检测误差约为 $\pm 5 \text{ mV}$ (如安徽力高技术有限公司生产的EK-FT-21型BMS). 为了保证SOC的估计误差在 $n\%$ 以内, 需SOC在满足下式时才进行校准:

$$V(\text{SOC} + n\%) - V(\text{SOC}) > 10 \text{ mV}. \quad (3)$$

图2给出了误差 $n\%$ 取不同值时, 式(3)中的电压差值与SOC之间的关系. 可见, 当SOC在较低区间和较高区间时满足式(3) (记低区间为 S_1 , 高区间为 S_2), 此时SOC变化引起的电压差值较大, 适合校准.

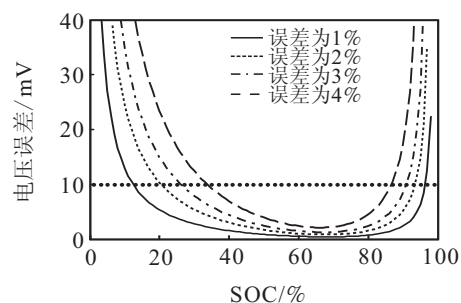


图2 电池SOC与电压差值之间的关系

通过上述分析, 在静置状态, 为了保证OCV估计SOC在合理的误差范围, 其校准算法如图3所示. 首

先判断电池是否达到静置状态, 然后根据误差需求, 判断 SOC 是否在满足式 (3) 的合适区间 $S = S_1 \cup S_2$ 内, 如果满足, 则利用 OCV 估计 SOC 的值, 从而实现校准.

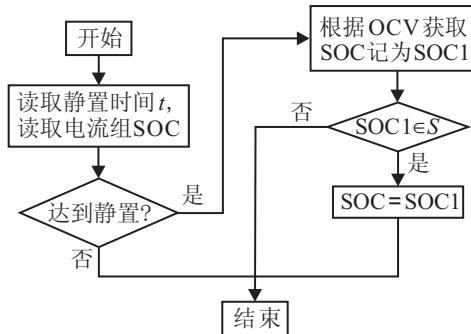


图 3 静置时系统校准方法

3 总容量校准

假设电池组初始为静置状态, 开路状态电压为 OCV1 时, SOC 位于低区间 S_1 内, 则可依据图 4 校准方法得出此时电池荷电状态为 SOC1. 电池经过充电后, 利用电流积分方法得出充入容量为 Q_{in} , 静置一段时间得到 OCV2. 假设此时 SOC 位于高区间 S_2 内, 类似可得荷电状态为 SOC2. 在保证前后温度相同时, 利用上述参数可得出电池组的总容量为^[10]

$$Q_{max} = \frac{Q_{in}}{SOC2 - SOC1}. \quad (4)$$

利用充电阶段工况相对稳定, 电流积分计算容量误差相对较小的特点, 实现了总容量的校准, 使得 SOC 的估计更加准确.



图 4 总容量的校准

4 充电校准法

4.1 充电方式

对锂离子电池进行充电, 主要有脉冲充电法和恒流转恒压法. 脉冲充电方法具有双向电流的特点, 即此时充电机既能充电也能放电, 可以利用反向电流消除极化作用, 但需要更加复杂的硬件支持, 增加了成本^[11]. 目前使用较广泛的是恒流转恒压充电过程, 这种方法也是行业标准^[12]默认的充电方式. 如图 5 所示, 充电过程先以恒流对电池进行充电, 当电池电压达到某一电压时, 再对电池进行恒压充电, 此时充电电流逐渐减小, 当电流减小到某一值时, 充电结束. 此处的校准方法主要利用恒流转恒压方式中恒流阶段电流相对固定的特点.

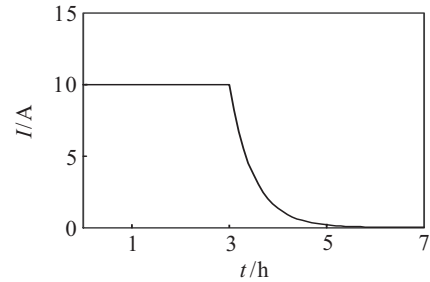


图 5 恒流转恒压充电方式

4.2 累积误差的校准

在运行过程中, 电池终端电压由开路电压、极化电压和内阻引起的电压组成^[13], 即

$$V = V_{oc} + V_p + iR. \quad (5)$$

其中: V 为电池终端电压, V_{oc} 为电池开路电压, V_p 为极化电压, i 为电流值, R 为电池内阻.

极化电压与历史电流和温度有关^[12], 当电池静置一段时间后极化作用将会消失, 此时终端电压为开路电压. 由上述特点可知: 在 $0 \sim t$ 时间内, 极化电压

$$V_p = \int_0^t f(i(\tau), T(\tau))w(t - \tau)d\tau. \quad (6)$$

其中: $f(i(\tau), T(\tau))$ 表示 τ 时刻电流 $i(\tau)$ 和温度 $T(\tau)$ 对极化电压的影响, $w(t - \tau)$ 为 τ 时刻电流引起极化作用的影响因子, t 为当前时刻. τ 时刻电流 $i(\tau)$ 引起的极化作用随着时间的增加慢慢减小, 因此影响因子随 $(t - \tau)$ 的增加而逐渐减小, 最终为零.

式 (6) 表明, 极化电压与电池运行的工况有关. 电动车运行阶段的电流上下波动较大, 极化电压难以确定, 从而使得在运行过程中很难直接通过电池的终端电压确定 SOC 的值.

对于电动汽车而言, 电池运行状态分为运行阶段和充电阶段. 假设电动汽车在 $0 \sim t_1$ 为运行阶段, $t_1 \sim t$ 为恒流充电阶段, $t \sim t_2$ 为恒压充电阶段. 设电流满足如下关系 (I 为恒流充电电流):

$$i(\tau) = \begin{cases} i_1(\tau), & 0 < \tau < t_1; \\ I, & t_1 \leq \tau < t; \\ i_2(\tau), & t \leq \tau < t_2. \end{cases} \quad (7)$$

电池在 $0 \sim t$ 过程中, 极化电压可表示为

$$V_p = \int_0^t f(i(\tau), T(\tau))w(t - \tau)d\tau = \int_0^{t_1} f(i_1(\tau), T(\tau))w(t - \tau)d\tau + \int_{t_1}^t f(I, T(\tau))w(t - \tau)d\tau. \quad (8)$$

假设电流在 $0 \sim t$ 过程中都为恒流充电, 此时极化电压可表示为

$$V_p' = \int_0^t f(i(\tau), T(\tau))w(t - \tau)d\tau = \int_0^{t_1} f(I, T(\tau))w(t - \tau)d\tau + \int_{t_1}^t f(I, T(\tau))w(t - \tau)d\tau. \quad (9)$$

对式(8)和式(9)进行比较分析,假设充电温度相同,则有

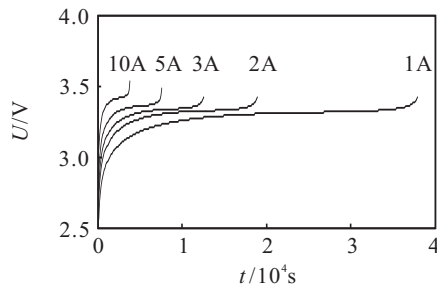
$$|V_p - V'_p| = \left| \int_0^{t_1} (f(i(\tau), T(\tau)) - f(I, T(\tau)))w(t - \tau)d\tau \right| \leq \int_0^{t_1} |f(i(\tau), T(\tau)) - f(I, T(\tau))|w(t - t_1)d\tau = w(t - t_1) \int_0^{t_1} |f(i(\tau), T(\tau)) - f(I, T(\tau))|d\tau = w(t - t_1)\beta. \tag{10}$$

其中: $\beta = \int_0^{t_1} |f(i(\tau), T) - f(I, T)|d\tau$ 为有限值; $w(t - t_1)$ 为影响因子,当 $t \gg t_1$ 时, $w(t - t_1) \rightarrow 0$. 因此式(10)也将趋近于0.

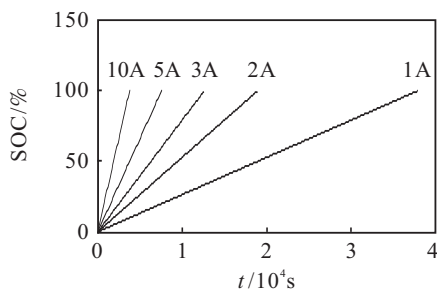
由式(8)~(10)可知,在 $t \gg t_1$,即在恒流充电时间较长时,实际运行工况下的电池终端电压在恒流充电末期与一直以恒定电流充电的电池终端电压相同,即

$$V = V_{oc} + V_p + iR = V_{oc} + V'_p + iR. \tag{11}$$

因此,在较长的恒流充电条件下,运行阶段电流对极化电压的影响可忽略.通过实验方法可建立在恒定充电电流条件下电池终端电压与SOC的关系,由式(11)可知,实际工况下电池在充电末期可利用终端电压进行SOC校准,从而实现基于恒流转恒压充电方式的SOC校准.图6为在不同恒流充电阶段电池终端电压的变化情况.



(a) 电压



(b) SOC

图6 不同恒流充电条件下, SOC和电池终端电压的变化

5 实验与分析

为了验证本文提出的校准方法的合理性,选取3.2V/10Ah IFP1865140电池进行实验分析.系统在运行过程中分为系统静置阶段、运行阶段和充电阶

段.为了分析方法的有效性,对传统的安时法和本文的校准方法进行了比较.

先对其进行放电,再利用恒流转恒压方式对其进行充电.利用安时法对其进行估计,初始值为设定值,假设误差为2%,总容量误差为5%,电流传感器采用北京森社的CHB-10AS,检测误差为 $\pm 1\%$.此时系统的运行情况如图7所示.利用初始值校准、总容量校准和累积误差校准,可得系统SOC估计曲线.图7为真实值、安时法和校准之后的方法比较.图8为两种方法的误差比较,从图中可以看出,传统的方法随着循环次数的增加,累积误差在每一个循环周期内将会逐渐增加.而通过本文方法中的初始值校准,将使得初始值误差校准为1%,利用恒流区间对电池进行校准将使得均方根误差为3.2605%.整个运行过程中的误差如表1所示,校准后的最大误差为4.3302%,安时法的最大误差为9.2517%.

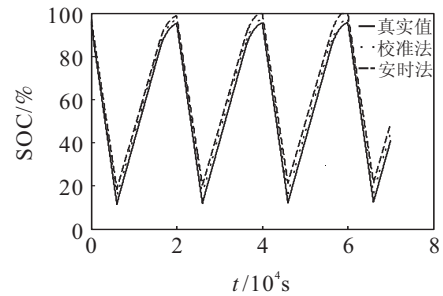


图7 两种SOC估计方法比较

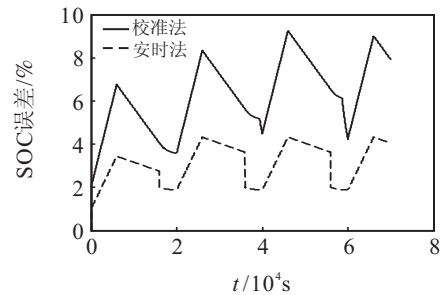


图8 两种估计方法SOC估计误差比较

表1 两种估计方法SOC估计误差比较 %

算法	最大绝对误差	均方根误差
安时法	9.2517	6.4760
校准法	4.3302	3.2605

6 结论

本文提出一种面向工程应用的动力锂电池SOC估计的校准方法.通过分析电池特性以及安时法的误差来源,建立了SOC初始值、总容量和累积误差的校准方法.而通过分析极化效应,利用恒流转恒压的充电方式,在恒流区间建立终端电压与SOC之间的关系,从而可以通过终端电压校准SOC,实现在非过充条件下的校准.这种方法避免了复杂的电池模型以及大量的计算资源需求,是一种工程实用的方法.

本文最后通过仿真实验比较了使用安时法和校准法对 SOC 进行估计的误差, 结果表明, 校准法减少了系统的误差, 并具有较好的精度.

参考文献(References)

- [1] 刘秋丽, 马晓军, 袁东, 等. 粒子群优化神经网络在 SOC 估算中的应用[J]. 计算机工程, 2012, 38(12): 143-145.
(Liu Q L, Ma X J, Yuan D, et al. Application of particle swarm optimization neural network in state of charge estimation[J]. Computer Engineering, 2012, 38(12): 143-145.)
- [2] Chau K T, Wu K C, Chan C C. A new battery capacity indicator for lithium-ion battery powered electric vehicles using adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(11): 1681-1692.
- [3] Andre D, Appel C, Soczka-Guth T, et al. Advanced mathematical methods of SOC and SOH estimation for lithium-ion batteries[J]. J of Power Sources, 2013, 224(2): 20-26.
- [4] He Y, Liu X, Zhang C, et al. A new model for state-of-charge(SOC) estimation for high-power Li-ion batteries[J]. Applied Energy, 2013, 101: 808-814.
- [5] Liu L, Wang L Y, Chen Z, et al. Integrated system identification and state-of-charge estimation of battery systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2013, 28(1): 12-23.
- [6] He H, Xiong R, Guo H. Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO₄ batteries in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 413-420.
- [7] 林成涛, 陈全世, 王军平, 等. 用改进的安时计量法估计电动汽车动力电池 SOC[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(2): 247-251.
(Lin C T, Chen Q S, Wang J P, et al. Improved Ah counting method for state of charge estimation of electric vehicle batteries[J]. J of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(2): 247-251.)
- [8] Tang X, Mao X, Lin J, et al. Li-ion battery parameter estimation for state of charge[C]. 2011 American Control Conf. San Francisco, 2011: 941-946.
- [9] 刘新天, 刘兴涛, 何耀, 等. 基于 V_{\min} -EKF 的动力锂电池组 SOC 估计[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 445-448.
(Liu X T, Liu X T, He Y, et al. Based- V_{\min} -EKF SOC estimation for power Li-ion battery pack[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 445-448.)
- [10] 何耀, 张陈斌, 刘兴涛, 等. 基于信息融合的 LiFePO₄ 动力电池组 SOC 估计[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 189-192.
(He Y, Zhang C B, Liu X T, et al. SOC estimation for LiFePO₄ high-power batteries based on the information fusion[J]. Control and Decision, 2014, 29(1): 189-192.)
- [11] Hussein H A H, Batarseh I. A review of charging algorithms for Nickel and Lithium battery chargers[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 830-838.
- [12] QC/T 743-2006. 电动汽车用锂离子蓄电池[S]. 2006.
(QC/T 743-2006. Lithium-ion batteries for electric vehicles[S]. 2006.)
- [13] David Linden T B R. Handbook of batteries[M]. 3rd ed. McGraw-Hill, 2002.

(责任编辑: 孙艺红)