

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2017.06.003

# 电池管理系统关键技术 SOC 估算的研究

邓青, 刘成武

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 在大量先验数据的基础上,根据电池管理系统的采样数据,结合安时积分法和开路电压法,对电池 SOC 进行估算,同时考虑温度及单体电池的不一致性对电池性能的影响,根据不同温度与电池 SOC 之间的修正数据关系对上述算法进行高低端修正,实验结果表明此方法能够降低安时积分法估计电池 SOC 的累积误差,准确估算电池 SOC,且具有较强的实用性和可靠性。

**关键词:** 荷电状态; 安时积分法; 修正

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)06-0519-04

## Estimation of SOC as the key technology in battery management system

Deng Qing, Liu Chengwu

(School of Mechanical & Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** On the basis of a large number of prior data, the battery SOC was estimated according to the sampling data of the battery management system, with the combination of the ampere-hour integral method and the open-circuit voltage method. Meanwhile, considering the effects of temperature and difference of single batteries on the performance of the battery, a high-and-low-end correction of the above algorithm was based on the correction data relationship between different temperatures and battery SOC. Experimental results show that the method could reduce the cumulative error of ampere-hour integral method in estimating the battery SOC, so it can accurately estimate the SOC of the battery. In addition, this method has strong applicability and reliability.

**Keywords:** SOC(state of charge); ampere-hour integral method; correction

随着能源危机问题的出现,节能和环保是未来电动汽车的发展方向。作为电动汽车能量管理系统的重要组成部分,电池管理系统(BMS)能够实时监测和管理电池的工作状态<sup>[1]</sup>,准确的估算电池荷电状态(SOC)对电池高效管理和整车性能有着重要的作用。由于电池的动态非线性,锂电池在使用过程中受充放电倍率、温度、电池充放电循环次数等诸多因素影响,国内外研究人员对SOC估算进行了大量的研究,常见的SOC估算算法有安时积分(Ah)法<sup>[2-3]</sup>、开路电压(OCV)法<sup>[4]</sup>、等效电路模型法<sup>[5]</sup>、卡尔曼滤波算法<sup>[6]</sup>、神经网络算法<sup>[7]</sup>,在上述算法中,开路电压法简单易行,其缺点是不能实时在线测量;卡尔曼滤波算法基于准确的电池数学模型与滤波器参数,通过电池数学模型端电压的实测值与估算值,对电池SOC进行修正,这种方法对系统处理器要求较高,成本较大;神经网络法算法复杂,且需要大量先验数据;安时积分法原理简单,易于实现,由于初始SOC值的获取及充放电效率引起的累积误差会逐渐增大,常与其他方法一起配合使用,最为常见的就是与开路电压法一起使用,文献[8]通过对安时积分法中的相关参数进行了修正,减少了

收稿日期: 2017-05-04;修回日期: 2017-11-22  
通讯作者: 刘成武(1964-),男,安徽安庆人,教授,博士,研究方向:汽车振动与噪声 NVH。

SOC 估算误差,文献[9]中通过大量试验表明影响锂电池 SOC 估算的因素主要为温度。

本文在大量先验数据的基础上,根据电池管理系统的采样数据,结合安时积分法和开路电压法,对电池 SOC 进行估算,同时考虑温度及单体电池的不一致性对电池性能的影响,根据不同温度与电池 SOC 之间的修正数据关系对上述算法进行高低端修正,从而实现电池 SOC 的准确估算。

1 SOC 的定义

电池核电状态(SOC)是电池管理系统中非常重要的一个参数,目前对 SOC 比较经典的定义为电池剩余能量占总容量的百分比<sup>[2]</sup>,它常用如下公式表示:

$$\text{SOC} = \frac{Q_c}{C_i} \tag{1}$$

式中,  $C_i$  为电池总容量,  $Q_c$  为电池剩余的电量。

由于 SOC 的估算受诸多因素的影响<sup>[10]</sup>,在工程应用中常用式(2)表示,其中  $C_n$  是额定容量;  $i$  为电池电流;  $\eta$  为库伦效率,主要包括放电倍率系数、温度影响系数、和老化系数。

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{\eta \int i dt}{C_n} \tag{2}$$

论文选取的是电芯规格为3.6 V/2.4 A·h,电池规格为 324 V/115.2 A·h 的磷酸铁锂电池,由于采用的是全新电池,影响电池 SOC 估算的老化系数为 1,充放电倍率取 0.96,

2 温度的修正

为了实现电池高精度估算,需要考虑温度对电池性能的影响,本论文选取-40、-25、0、25、45、55 ℃ 分别对电池进行充放电实验。首先将温箱温度调到-20 ℃,然后放置电池,将电池以标准充电规程充满电,然后以 1 C 放电一段时间使 SOC 下降到下一个 SOC 点,其中 SOC 实验点分别为 1、0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1。同理将温箱温度依次调到-10、0、25、35、45、55 ℃ 对电池进行充放电实验,得到的实验结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,不同环境温度对电池剩余电量的影响不同,在极端温度-40 ℃ 和 55 ℃ 时,两条 SOC 曲线与 25 ℃ 的曲线距离较远,在 0 ℃

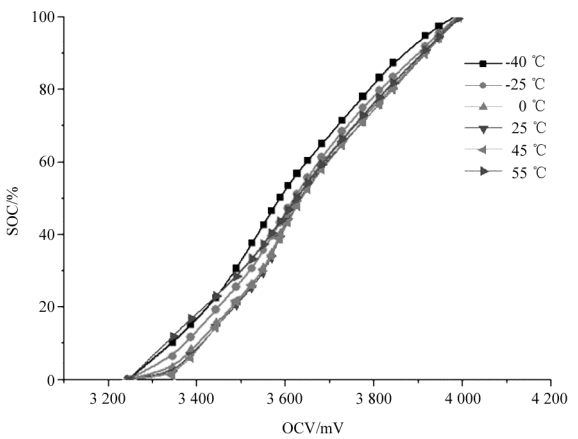


图 1 不同温度下 SOC-OCV 关系曲线  
Fig.1 SOC-OCV relationship curve at different temperatures

和 45 ℃ 时,两条 SOC 曲线与 25 ℃ 曲线距离较近,由此得出结论,在温度过高或过低于常温 25 ℃ 时,电池的性能随温度变化比较大,高温或低温性能不稳定。因此,如果在不同温度下使用相同的电池参数进行 SOC 估算,那么必需考虑温度对电池端电压的影响。以 25 ℃ 下电池 SOC 为基准,得到不同温度与 SOC 之间的校正数据关系如表 1 所示。

表 1 不同温度与 SOC 之间的校正数据关系  
Tab.1 Correction data relationship between different temperatures and SOC

$t/^\circ\text{C}$	-40	-30	-20	-10	0	10	20
SOC/%	0	1	2.5	5	20	50	50
$t/^\circ\text{C}$	25	30	35	40	45	50	60
SOC/%	100	100	100	100	100	100	100

3 SOC 的估算

3.1 单体电池 SOC 的估算

由于电池的不一致性,电池组在使用过程中受到温度等外界因素的影响,会出现单体电压不一致的现象,而这种不一致性会逐渐放大,影响电池组的使用寿命。本文考虑了温度及单体电池的不一致性对电池性能的影响,根据不同温度与电池 SOC 之间的修正数据关系对安时积分法进行高低端修正,即首先根据系统下电静置时间确定电池初始 SOC 值,然后系统根据温度、电压及电流等数据对电池组进行安时积分计算,然后得到

单体电池当前最大  $SOC_{\max}$ 、最小  $SOC_{\min}$ 、平均  $SOC_{\text{avg}}$  值,同时根据系统设定的修正条件判断是否对当前估算的 SOC 值进行修正,从而实现单体电池 SOC 的准确估算。具体实施步骤如下:

(1) 首先根据实验数据设置开路电压 OCV 与 SOC 的对应表,简称 OCV-SOC 表,当系统本次上电时间与上次下电时间间隔超过 2 h,则根据开路电压法查表得到初始  $SOC_0$  值,否则选取最近一次开关断开时的 SOC 作为初始  $SOC_0$  值,然后对电池组进行安时积分计算,并根据不同温度与电池 SOC 之间的校正数据关系对上述算法进行校正,即

$$\begin{aligned} & \text{当 } SOC_{\min} > SOC_{\text{ocv}/\min} \text{ 时,} \\ & SOC_{\min\_c} = (SOC_{\min} - SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\min})_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\min} < SOC_{\text{ocv}/\min} \text{ 时,} \\ & SOC_{\min\_c} = (SOC_{\min} + SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\min})_{\min} \end{aligned}$$

其中  $SOC_{\min\_c}$  为当前修正的最小单体电池 SOC 值,  $SOC_{\min}$  为当前计算得到的最小单体电池 SOC 值,  $SOC_{\text{ocv}/\min}$  为开路电压法得到的当前最小单体电池 SOC 值,  $SOC_c$  为温度修正值,查 T-SOC 表即可得到。

$$\begin{aligned} & \text{当 } SOC_{\text{avg}} > SOC_{\text{ocv}/\text{avg}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\text{avg}_c} = (SOC_{\text{avg}} - SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\text{avg}})_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\text{avg}} < SOC_{\text{ocv}/\text{avg}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\text{avg}_c} = (SOC_{\text{avg}} + SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\text{avg}})_{\min} \end{aligned}$$

其中  $SOC_{\text{avg}_c}$  为当前修正的平均单体电池 SOC 值,  $SOC_{\text{avg}}$  为当前计算得到的平均单体电池 SOC 值,  $SOC_{\text{ocv}/\text{avg}}$  为开路电压法得到的当前平均单体电池 SOC 值。

$$\begin{aligned} & \text{当 } SOC_{\max} > SOC_{\text{ocv}/\max} \text{ 时,} \\ & SOC_{\max\_c} = (SOC_{\max} - SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\max})_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\max} < SOC_{\text{ocv}/\max} \text{ 时,} \\ & SOC_{\max\_c} = (SOC_{\max} + SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\max})_{\min} \end{aligned}$$

其中  $SOC_{\max\_c}$  为当前修正的最大单体电池 SOC 值,  $SOC_{\max}$  为当前计算得到的最大单体电池 SOC 值,  $SOC_{\text{ocv}/\max}$  为开路电压法得到的当前最大单体电池 SOC 值。

(2) 由于电池工作的历史电流对电池当前的电压有很大的影响<sup>[11]</sup>,因此需要根据电池历史电流大小对当前电池 SOC 进行修正。当电池组平均电流绝对值小于 1 C 时,由于此时电池工作电流很小,电池内阻比较小,可以考虑对当前估算的单体电池最大  $SOC_{\max}$ 、最小  $SOC_{\min}$ 、平均  $SOC_{\text{avg}}$

值进行低端校正,即

$$\begin{aligned} & \text{当 } SOC_{\min} \geq SOC_{\min/\text{low}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\min\_c} = (SOC_{\min} - SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\min})_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\min} < SOC_{\min/\text{low}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\min\_c} = (SOC_{\min} + SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\min})_{\min} \end{aligned}$$

其中  $SOC_{\min/\text{low}}$  为低端修正时,当前计算得到的最小单体电池 SOC 值,取最低修正阈值  $SOC_{\text{Low}_c}$  的值为 3%,其计算公式如下,

$$\begin{aligned} & SOC_{\min/\text{low}} = [(SOC_{\text{ocv}/\min} + SOC_{\text{Low}_c}, SOC_{\min})_{\min}, \\ & (SOC_{\text{ocv}/\min} - SOC_{\text{Low}_c})]_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\text{avg}} \geq SOC_{\text{avg}/\text{low}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\text{avg}_c} = (SOC_{\text{avg}} - SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\text{avg}})_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\text{avg}} < SOC_{\text{avg}/\text{low}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\text{avg}_c} = (SOC_{\text{avg}} + SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\text{avg}})_{\min} \end{aligned}$$

其中  $SOC_{\text{avg}/\text{low}}$  为低端修正时,当前计算得到的平均单体电池 SOC 值,其计算公式如下,

$$\begin{aligned} & SOC_{\text{avg}/\text{low}} = [(SOC_{\text{ocv}/\text{avg}} + SOC_{\text{Low}_c}, SOC_{\text{avg}})_{\min}, \\ & (SOC_{\text{ocv}/\text{avg}} - SOC_{\text{Low}_c})]_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\max} \geq SOC_{\max/\text{low}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\max\_c} = (SOC_{\max} - SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\max})_{\max} \\ & \text{当 } SOC_{\max} < SOC_{\max/\text{low}} \text{ 时,} \\ & SOC_{\max\_c} = (SOC_{\max} + SOC_c, SOC_{\text{ocv}/\max})_{\min} \end{aligned}$$

其中  $SOC_{\max/\text{low}}$  为低端修正时,当前计算得到的最大单体电池 SOC 值,其计算公式如下,

$$\begin{aligned} & SOC_{\max/\text{low}} = [(SOC_{\text{ocv}/\text{avg}} + SOC_{\text{Low}_c}, SOC_{\max})_{\min}, \\ & (SOC_{\text{ocv}/\max} - SOC_{\text{Low}_c})]_{\max} \end{aligned}$$

(3) 当电池组平均电流的绝对值不超过 5 C 时,同理可对当前估算的单体电池最大  $SOC_{\max}$ 、最小  $SOC_{\min}$ 、平均  $SOC_{\text{avg}}$  值进行高端校正。

### 3.2 电池组 SOC 的估算

当电池组的初始  $SOC_0$  值确定以后,充放电时,通过对电池进行安时积分,得到电池组当前最大  $SOC_{\max}$ 、最小  $SOC_{\min}$ 、平均  $SOC_{\text{avg}}$  值,然后做进一步计算得到电池组的最终 SOC 值,其计算方法如下:当  $SOC_{\max}$  大于系统设定 SOC 最高阈值  $SOC_{\text{HighLim}}$ ,则电池当前显示 SOC 值等于 100%;当  $SOC_{\min}$  小于系统设定 SOC 最低阈值  $SOC_{\text{LowLim}}$ ,则电池当前显示 SOC 值等于 0;当单体 SOC 处于系统  $SOC_{\text{LowLim}}$  与  $SOC_{\text{HighLim}}$  之间,则对电池当前显示 SOC 值进行线性化处理,如下式(3):

$$SOC = \left[ \frac{SOC_p - SOC_{\text{LowLim}}}{SOC_{\text{HighLim}} - SOC_{\text{LowLim}}} \right] \times 100 \quad (3)$$

其中,电池组  $SOC_p$  的计算流程如图 2 所示,其

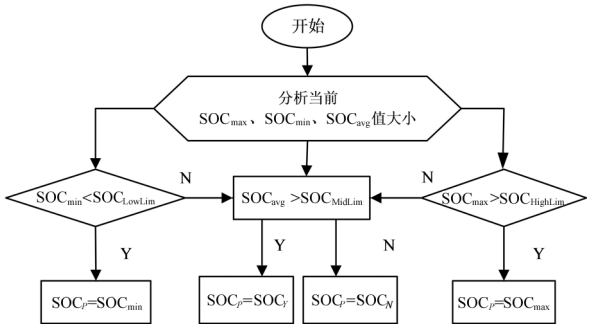


图 2 Pack\_SOC 的计算流程图  
Fig.2 Calculation flow chart of Pack\_SOC

中,  $SOC_{MidLim}$  为 SOC 中间阈值,其计算公式为

$$SOC_{MidLim} = \frac{SOC_{LowLim} + SOC_{HighLim}}{2}$$
$$SOC_N = \left[ \frac{SOC_{MidLim} - SOC_{avg}}{SOC_{MidLim} - SOC_{LowLim}} \right] \times SOC_{LowLim} + \left[ \frac{SOC_{avg} - SOC_{LowLim}}{SOC_{MidLim} - SOC_{LowLim}} \right] \times SOC_{avg}$$
$$SOC_Y = \left[ \frac{SOC_{HighLim} - SOC_{avg}}{SOC_{HighLim} - SOC_{MidLim}} \right] \times SOC_{avg} + \left[ \frac{SOC_{avg} - SOC_{MidLim}}{SOC_{HighLim} - SOC_{MidLim}} \right] \times SOC_{HighLim}$$

其中,  $SOC_Y$  为  $SOC_{avg}$  大于  $SOC_{MidLim}$  时的电池组 SOC,  $SOC_N$  为  $SOC_{avg}$  小于  $SOC_{MidLim}$  时的电池组 SOC。

4 实验分析

通过采用硬件在环测试,可以在比较真实的环境下对 SOC 进行功能测试,本文通过上位机监控界面对电池参数进行设定,并显示和存储电池

的各种状态信息,其硬件在环实物图如图 3 所示, SOC 估算结果对比如表 2 所示,结果表明修正后的 SOC 估算方法具有较好的估算精度。

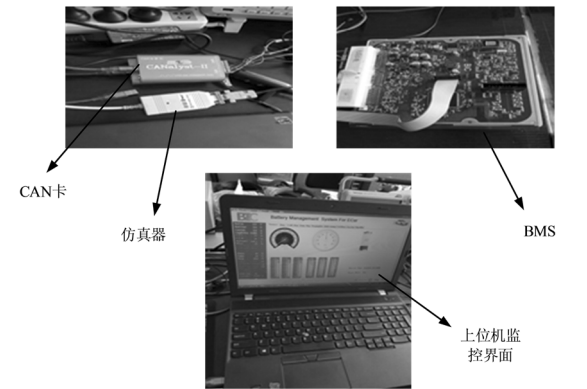


图 3 硬件在环测试实物图  
Fig.3 Pictures of hardware in loop test

表 2 SOC 估算结果对比

Tab.2 Comparison of SOC estimation results		
SOC 真实值	SOC 估算值	误差
0.27	0.26	0.037
0.30	0.29	0.033
0.35	0.36	0.029
0.45	0.48	0.044
0.55	0.57	0.036

5 结语

本文考虑了温度及单体电池的不一致性对电池性能的影响,根据电池管理系统采集的电压、电流、温度等数据,采用修正的 OCV-Ah 法对电池 SOC 进行估算,根据不同温度与电池 SOC 之间的修正数据关系对算法进行高低端修正,实验结果表明,该算法降低了安时积分法估算电池 SOC 的累积误差,且易于工程实现。

参考文献:

[1] 周翔,赵韩,江昊.基于 EKF 算法的磷酸铁锂电池在线 SOC 估算[J]. 合肥工业大学学报,2013,36(4):385-388.  
[2] 李洪宇,张晓强,张卫平.大容量锂离子电池 SOC 估算原理及应用[J].电源技术,2015,39(5):1100-1102.  
[3] Chen X K, Sun D. Modeling and state of charge estimation of lithium-ion battery[J].Advances in Manufacturing,2015, 3(3):202-211.  
[4] Weng C, Sun J, Peng H. A unified open-circuit-voltage model of lithium-ion batteries for state-of-charge estimation and state-of-health monitoring[J]. Journal of Power Sources,2014,258:228-237.

能耗急剧下降,加工时间主导了能量消耗,即使在较高负荷的情况下,总能耗也会降低。因此从减小切削能耗的角度分析,在满足加工质量的前提下,钻削灰铸铁时应优先选择较大的进给量和切削速度更有利于节能降耗。

参考文献:

[1] He Y, Liu B, Zhang X, et al. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 23(1): 167-174.

[2] Sangwan K S, Kant G, Deshpande A, et al. Modeling of Stresses and Temperature in Turning Using Finite Element Method [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 307: 174-177.

[3] 谢东,陈国荣,施金良,等.基于 BP 神经网络数控机床切削能耗的研究[J].机床与液压,2012,40(1):54-57.

[4] 陈薇薇,张华,向琴,等.基于支持向量机数控机床切削能耗预测方法研究[J].机械设计与制造,2014(11):54-56.

[5] Zeng Y R, Zeng Y, Choi B, et al. Multifactor-Influenced Energy Consumption Forecasting Using Enhanced Back-propagation Neural Network [J]. Energy, 2017, 127: 381-396.

[6] 邱行.工件加工过程切削能耗的预测方法研究及应用系统开发[D].重庆:重庆大学,2016.

[7] Kant G, Sangwan K S. Predictive Modeling for Energy Consumption in Machining Using Artificial Neural Network [J]. Procedia Cirp, 2015, 37: 205-210.

[8] 胡伍生.神经网络理论及其工程应用[M].北京:测绘出版社,2006:63-76.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 522 页)

[5] Sun Y, Ma Z, Tang G, et al. Estimation method of state-of-charge for lithium-ion battery used in hybrid electric vehicles based on variable structure extended kalman filter [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(4): 717-726.

[6] Gregory L P. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs; Part 3. State and parameter estimation [J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(2): 277-292.

[7] Jayasinghe J, Nadishan K. Neural network based state of charge (SOC) estimation of electric vehicle batteries [J]. University of Moratuwa, 2014, 4(12): 1-4.

[8] 鲍慧,于洋.基于安时积分法的电池 SOC 估算误差校正[J].计算机仿真,2013,30(11):148-151.

[9] Liu X, Wu J, Zhang C. et al. A method for state of energy estimation of lithium-ion batteries at dynamic currents and temperatures [J]. Journal of Power Sources, 2014, 270: 151-157.

[10] 李哲,卢兰光,欧阳明高.提高安时积分法估算电池 SOC 精度的方法比较[J].清华大学学报,2010,50(8): 1293-1296.

[11] 赵昂,成勇,杨晓军,等.一种电池 SOC 的检测方法及装置:106154176A [P]. 2016-11-23.

(特约编辑:黄家瑜)