

电动汽车动力电池剩余电量在线测量

程艳青 高明煜 徐杰 徐洪峰

(杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了精确可靠估算以蓄电池为动力的电动汽车所用电池的剩余电量, 在讨论目前一些蓄电池剩余电量估算方法的基础上, 以聚合物锂离子电池组为研究对象, 将电池荷电状态作为系统的状态, 建立了单变量的锂电池组的状态空间模型, 采用了开路电压法和卡尔曼滤波递推算法相结合的方法。经试验这种方法能够获得蓄电池组精确和可靠的荷电状态预测值。

关键字: 聚合物锂离子电池组; 卡尔曼滤波; 电动汽车; 荷电状态

中图分类号: TM91 **文献标识码:** A

The Estimation of the State of Charge of Storage Battery Based on the Kalman Filtering Theory for Electric Vehicle

Cheng Yanqing Gao Mingyu Xu Jie Xu Hongfeng

(School of Electronics Information, Hang Zhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: To estimate residual capacity of traction battery in electric vehicle accurately and reliably, the paper chooses a lithium-ion polymer battery pack as a research object, takes the SOC (State of charge) as the state of the system, and builds the battery's state space model with single state, and then develops a method combining open circuit voltage method and Kalman filtering recursive algorithm method, based on some methods of residual capacity estimation of battery often used at present. The experiments proved that accurate and reliable battery SOC estimation of battery could be obtained by adopting the new method.

Keywords: Lithium-Ion Polymer Battery ; Kalman Filter; Electric Vehicle; State-of-charge

蓄电池是各类电动汽车中最常用的储能元件, 其剩余电量的精确测量在电动汽车的发展中一直是一个非常关键的问题^[1], 因为只有对电池剩余电量进行精确测量才能使驾驶员及时掌握正确的信息, 预测自己的后续行驶里程, 并及时进行充电。蓄电池荷电状态SOC(State of charge)描述蓄电池的剩余电量, 其大小直接反映了电池所处的状态, 是电池使用过程中最重要的参数之一。

1 SOC 定义

蓄电池的荷电状态SOC被用来反映电池的剩余容量情况, 这是目前国内外比较统一的认识, 其数值上定义为为蓄电池所剩电量占电池总容量的比值:

$$SOC = [Q_m - Q(I_n)] / Q_m \quad (1)$$

$$Q(I_n) = t \int I_n dt \quad (2)$$

式中: Q_m 为蓄电池最大放电容量, 指的是在室温条件下, 电池从完全充电后开始工作一直到电池完全放电为止, 其所能放出的最大安时数值, 表示为标准放电电流和放电时间的乘积; $Q(I_n)$ 为标准放电电流 I_n 下 t 时间蓄电池释放的电量。

公式 1 还可以表示为:

$$SOC = 1 - Q(I_n) / Q_m \quad (3)$$

式中: SOC=1 表示电池为充满电状态, SOC=0 则表示电池已处于全放电状态。

由于电池所放出的电量受自放电率、充放电倍率、电池温度、电池充放电循环次数等影响, 表示电池容量状态的SOC也必然与这些因素有关。在放电电流变化的情况下, 上述定义就会出现不适应性, 得到矛盾的结果, 因此实际使用中要对SOC的定义进行调整, 不同电动汽车对SOC定义的使用形式不一致, 最常用的定义为:

国家自然科学基金项目, 60871088

$$SOC = SOC_0 - \int_0^t \frac{\eta_i i(\tau_i)}{C_n} d\tau \quad (4)$$

其中, SOC_0 为充放电起始状态; C_n 为电池的额定容量; $i(t)$ 为电池的瞬时电流 (放电状态为正, 充电状态为负); η_i 为库伦效率系数, 是电池充电放电全过程的平均库伦效率^[2]。

2 SOC 检测方法 with 可用性分析

传统的电池电量测试方法有开路电压法、密度法、内阻法和安时法等。近年来又相继研发出许多对电池SOC估算的新型算法, 例如自适应神经模糊推断模型^[3]、模糊逻辑算法模型^[4]、线性模型法、阻抗光谱法^[5]和卡尔曼滤波估计模型算法^[6]等。

开路电压法的基础是根据电解液密度与电池电势, 因此根据电池电势可以估算电池电流。该方法适用于测试稳定状态下的电池 SOC, 但电动汽车在行驶过程中很少处于开路状态, 故不宜单独使用, 通常用作其它算法的补充; 密度法通过对测量电解液的密度值来间接估算蓄电池的剩余电量, 已不适用于目前大量使用的密封式电池, 而且也不适于实时测量; 内阻法是根据蓄电池的内阻与 SOC 之间的联系来预测 SOC, 但电池的内阻很容易到各方面的干扰, 使得测量结果不够准确; 安时法比较简单易行, 在短时间内具有较高精度, 但长时间工作时会有较大的累积误差^[7]。各种智能算法和新型算法由于还不是很成熟, 有些复杂算法在中低端单片机系统上难以实现, 所以在实际应用中还不多见, 但这是未来发展的方向。

本文以聚合物锂离子电池组为研究对象, 采用开路电压法和卡尔曼滤波递推算法相结合的方法对SOC进行估算。该方法适用于各种电池, 与其他方法相比, 尤其适合于电流波动比较剧烈的电动汽车动力电池SOC的估计, 它不仅给出了SOC的估计值, 还给出了SOC的估计误差。该方法并不需要一个精确的SOC初值, 因为随着时间的增加, 其结果会迅速接近最优值, 因此使用起来更加方便。

3 开路电压-卡尔曼滤波具体算法

首先, 根据开路电压法, 得到SOC估计的初始值 SOC_0 , 然后根据卡尔曼滤波递推算法进行递推估算得到实时的SOC值。

卡尔曼滤波算法是一个最优化自回归数据处理算法, 其核心思想是对动力系统的状态做出最小方差意义上的最优估计^[8]。卡尔曼滤波器用于初始SOC估计时, 可将电池描述为由状态方程和测量方程组成的系统, 如图1所示。SOC是系统状态 z_k 的分量, A_k 为系统矩阵, B_k 为控制输入矩阵, C_k 为测量矩阵, 它们描述的是系统的动态特性, 并且可能是时变的。系统的输入向量 u_k 中, 通常包含电池电流、温度、剩余容量和内阻等参数, 系统的输出 y_k 通常为电池的工作电压, 电池SOC包含在系统的状态量 z_k 中。 w_k 为系统噪声, v_k 为量测噪声, 它们均为高斯型白噪声, 协方差分别为 Q 和 D 。

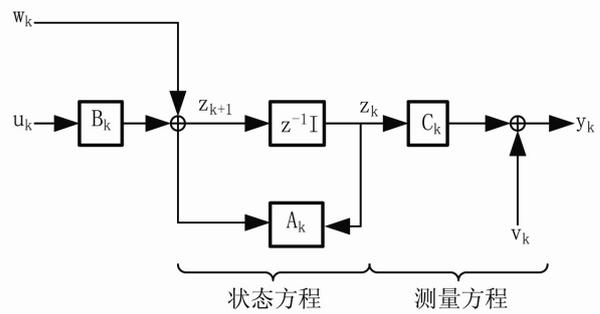


图 1 卡尔曼滤波结构图

估计 SOC 算法的核心, 是一套包括 SOC 估计值和反映估计误差的、协方差矩阵的递归方程, 协方差矩阵用来给出估计误差范围。这一方程是在在电池模型状态方程中, 将 SOC (用 z_k 表示) 描述为状态矢量的依据, 即对(4)进行零阶保持采样离散化后得到系统状态方程:

$$z_{k+1} = z_k - \left(\frac{\eta_i \Delta t}{C_n} \right) i_k \quad (5)$$

有了SOC作为电池模型状态量的一部分, 就可以用许多不同的方法预测端电压。常用的测量模型有Shepherd模型、Unnewehr通用模型和 Nernst模型等。将这些模型的形式组合起来构建一个联合模型, 比任何单独的模型性能要好, 并且还有“参数线性化”的优势, 即在输出方程中未知参量呈线性化出现^[6], 如(6)所示:

$$y_k = K_0 - Ri_k - \frac{K_1}{z_k} - K_2 z_k + K_3 \ln(z_k) + K_4 \ln(1 - z_k) + v_k \quad (6)$$

其中, y_k 为用电池模型算得的电池的负载电压, i_k 为负载电流, R 是电池内阻, K_0, K_1, K_2, K_3 和 K_4 是模型系数, 用以使模型更好的与数据相匹配, v_k 为测量噪声, 方差为 Q 。

由公式(6)可得到

$$C_k = \frac{\partial y_k}{\partial z_k} = K_1 / z_k^2 - K_2 + (K_3 / z_k) - K_4 / (1 - z_k) \quad (7)$$

由公式(5)算得 $A_k = 1$ 。

系统状态的卡尔曼滤波最优化估计算法^[9]的递推过程归纳如下:

$$\begin{cases} z_{0|0} = SOC_0, P_{0|0} = var(z_0), \\ z_{k|k-1} = z_{k-1|k-1} - \eta_i i_{k-1} \Delta t / C_n, \\ P_{k|k} = A_{k-1} P_{k-1|k-1} A_{k-1}^T + Q, \\ Y_{k-1} = K_0 - R i_{k-1} - K_1 / z_{k|k-1} - K_2 z_{k|k-1} + K_3 \ln z_{k|k-1} + K_4 \ln (1 - z_{k|k-1}), \\ L_{k-1} = P_{k|k-1} C_k^T (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R)^{-1}, \\ z_{k|k} = z_{k|k-1} + L_{k-1} (U_{k-1} - y_{k-1}), \\ P_{k|k} = (I - L_{k-1} C_k) P_{k|k-1}, \\ k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (8)$$

其中: P 为滤波误差协方差矩阵, L 为滤波增益矩阵, I 为单位矩阵, U_k 为 k 时刻测量的电池的负载电压, n 为计算步数。

4 验证试验与模型参数辨识

4.1 验证试验设计

为检验上述方法的实时性和准确性, 本文采用使用联邦城市行驶工况(FUDS)^[2]试验方法对电池组进行充放电试验。FUDS(Federal Urban Driving Schedule)是典型的电动汽车行驶工况, 全长 1372s。这一变功率放电机制是汽车工业一个标准的用于城市行驶的汽车比功率—时间表, 并且已经成为电动车辆性能试验的标准之一, 把这一比功率相对时间变化的表变成电池功率随时间变化的表即可用于电池组的循环充放电。采用万向电动汽车有限公司的聚合物锂离子电池组为试验对象, 电池组由 10 节锂电池串联而成, 额定容量为 15.5A·h, 额定电压为 32V。试验前用 0.33C 向电池组净充入 12.31A·h 电量, 试验完成了 7.82 个循环, 历时 10725s, 采样间隔为 1s。试验后用 0.33C 放出 3.29A·h 电量。电

池组充放电所采用的 FUDS 循环实验功率序列如图 2 所示, 正值是放电功率, 负值为充电功率。电池组工作时采集到的电压、电流信号分别如图 3、4 所示。

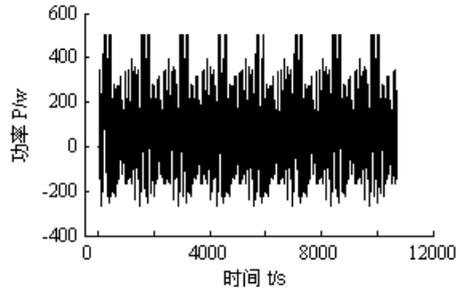


图 2 FUDS 试验功率序列曲线

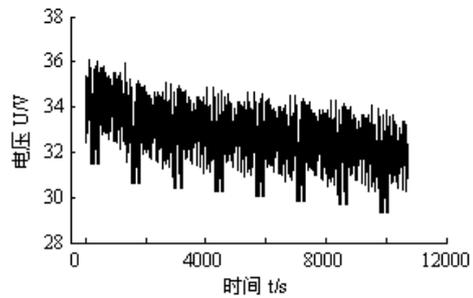


图 3 测量电压曲线

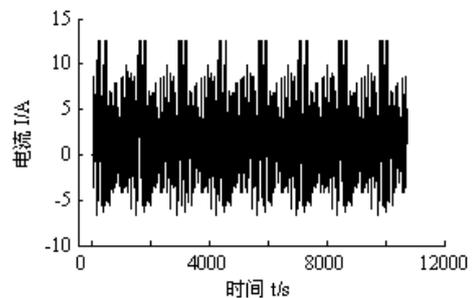


图 4 测量电流曲线

4.2 模型参数辨识

取 P_0 为 0.5, Q 为电压测量误差 0.01V, 取 R 为 0, 根据不同电流下的放电曲线和电池容量与负载电压曲线, 用最小二乘法确定电池组的模型中各参数值如表 1 所示。

表 1 电池联合模型参数

| 参数 | K_0 | R^+ | R^- | K_1 |
|----|---------|--------|---------|--------|
| 数值 | 85.704 | 0.037 | 0.032 | -3.461 |
| 参数 | K_2 | K_3 | K_4 | -- |
| 数值 | 100.406 | 31.307 | -26.602 | |

依据表 2 所示聚合物锂离子电池组 SOC 与开

路电压的对应关系,用开路电压法算得 FUDS 试验的 SOC₀ 为 0.794,根据公式(8)中所列的卡尔曼滤波算法递推公式,可以得到 SOC 估计输出曲线如图 5 所示。

表 2 锂电池组 SOC 与开路电压的对应关系

| | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| SOC | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| OCV | 27.2 | 30.6 | 31.8 | 32.5 | 32.9 | 33.1 |
| SOC | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 | |
| OCV | 33.3 | 33.6 | 34.2 | 35.3 | 36.6 | |

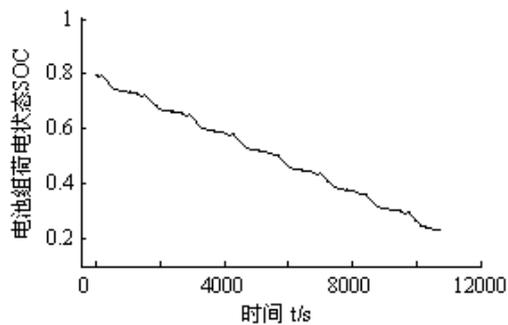


图 5 基于卡尔曼滤波算法的 SOC 估计输出

通过变功率的工况循环试验验证,用卡尔曼滤波算法估算的 SOC 比较精确,实时性好,最大相对误差为 3.2%,小于国家“十五”“八六三”燃料电池城市客车对电池 SOC 估计的精度要求 8%,很适合于电流波动比较剧烈的电动汽车电池 SOC 的估计。

5 结论

从以上试验结果可以看出,本文利用开路电压与卡尔曼滤波递推算算法相结合的方法,对聚合物锂离子蓄电池组的荷电状态 SOC 进行实时估计是有效的,并且这种估计方法使估计误差的均方值达到最小,实现了最优化估计。此方法可用于任何类型的电池,有很强的可操作性和实用性。

参考文献:

- [1] 辛克伟,周宗祥,卢国良. 国内外电动汽车发展及前景预测[J]. 电力需求侧管理, 2008, 10 (1): 75-77.
- [2] Argonne National Laboratory, Idaho National Engineering Laboratory, Sandia National Laboratories. USABC Electric Vehicle Battery Test Procedure Manual[DB/OL]. Revision 2, DOE/ID-10479,1996.

http://avt.inl.gov/battery/pdf/usabc_manual_rev2.pdf.

- [3] Cai C.H., Du D., Liu Z.Y.. Battery State-of-Charge (SOC) Estimation Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System [C].The IEEE International Conference on Fuzzy Systems, ST. LOUIS MO, USA, 2003, (2): 1068 - 1073
- [4] Singh, Pritpal (ECE Department, Villanova University); Fennie Jr., Craig, Reisner, David. Fuzzy Logic Modelling of State-of-charge and Available Capacity of Nickel/metal Hydride Batteries [C]. Journal of Power Sources, 2004,136 (2) : 322-333.
- [5] Piller S., Perrin M., Jossen A. Methods for State-of-charge Determination and Their Applications [C]. Journal of Power Sources, 2001, 96 (1) : 113-120.
- [6] G. Plett, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 2. Modeling and identification, J. Power Sources, 2004, 134 (2): 262-276.
- [7] 杨朔,何莉萍,钟志华. 电动汽车蓄电池荷电状态的卡尔曼滤波估计[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2004, (2): 99-102.
- [8] 史宗科. 最优估计的计算方法[M]. 北京: 科学出版社,2001.
- [9] 邓自立.卡尔曼滤波与维纳滤波[M].哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

作者简介:

程艳青: 1982年出生, 硕士研究生, 从事汽车电子技术研究。

高明煜: 1964年出生, 毕业于浙江大学, 硕士生导师, 从事汽车电子技术及系统集成研究。

徐杰: 1984年出生, 硕士研究生, 从事汽车电子技术研究。

徐洪峰: 1985年出生, 硕士研究生, 从事汽车电子技术研究。