

基于卡尔曼滤波的锂离子蓄电池组 SOC 估算方法研究

Lithium-ion Battery Pack SOC Estimation Method Study Based on Kalman Filter

蔡飞, 王顺利

西南科技大学信息工程学院 (四川, 绵阳, 621010)

Cai Fei, Wang Shunli

School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology (Mianyang, Sichuan, 621010, China)

摘要: 针对电动汽车锂离子蓄电池组 SOC 估算精度问题, 采用卡尔曼滤波算法进行估算。建立电池组的状态空间模型, 根据实际工况进行模型参数辨识, 并实时校正电池组实际容量和库伦效率, 通过仿真验证此模型的可行性和精度。仿真结果表明, 该方法能够实时估算电池组 SOC, 最大误差仅为 1.8%。卡尔曼滤波算法能够大大提高电池组 SOC 估算精度, 通过改进此算法将能够适应电动汽车复杂行驶工况的安全保障要求。

关键词: 电动汽车 剩余电量 卡尔曼滤波 锂离子蓄电池组

Abstract: Using Kalman filter to estimate Lithium-ion battery pack SOC, aiming to improve the SOC estimation accuracy. Establishing the state space model for the battery pack, according to the actual working conditions to identify model parameters, correcting the battery pack actual capacity and coulombic efficiency in real time, and verifying the feasibility and accuracy of the model through the simulation. The simulation results show that this method can estimate battery pack SOC in real time, and the maximum error is only 1.8%. Kalman filter can greatly improve the battery pack SOC estimation precision, and improving Kalman filter will be able to adapt to the requirements of electric vehicle complex running conditions and security.

Keywords: Electric vehicle, SOC, Kalman filter, Lithium-ion battery pack

[中图分类号] T M912.9 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 06-0039-03

0 引言

锂离子蓄电池具有比能量高、循环寿命长、工作温度范围宽、快充电能力、高放电能力和高功率放电能力等优点, 广泛用作电动汽车动力电池。当把单体电池组成电池组后, 电池管理系统 (BMS) 应能提供过充电和过放电保护, 防止电池组损坏, 同时应能提供剩余电量 (SOC) 显示功能。因此, SOC 估算将影响到电动汽车的安全性和续航能力, 必须保证足够的精度。本文针对 SOC 估算精度问题, 考虑 SOC 估算影响因素, 进行卡尔曼滤波估算锂离子蓄电池组 SOC。最后, 通过在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型, 验证此方法的可行性和精度。

1 理论分析

1.1 卡尔曼滤波原理

卡尔曼滤波器基于动态系统的状态空间模型 (这里不考虑系统控制信号的作用):

$$x(t+1) = \Phi x(t) + \Gamma w(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Hx(t) + v(t) \quad (2)$$

其中: t 为离散时间间隔, $x(t)$ 为系统的状态变量, $y(t)$ 为对状态的观测值, $w(t)$ 为输入噪声, $v(t)$ 为观测噪声, 且 $w(t)$ 和 $v(t)$ 是零均值、协方差矩阵各为 Q 和 R 的不相关白噪声。

其滤波过程为:

$$\text{获得初值: } \hat{x}(0|0) = \mu_0, P(0|0) = P_0 \quad (3)$$

$$\text{预报估值: } \hat{x}(t|t-1) = \Phi x(t-1|t-1) \quad (4)$$

读测量值 $y(t)$, 计算新息:

$$\varepsilon(t) = y(t) - H\hat{x}(t|t-1) \quad (5)$$

计算预报估值误差协方差:

$$P(t|t-1) = \Phi P(t-1|t-1) \Phi^T + \Gamma Q \Gamma^T \quad (6)$$

计算卡尔曼增益:

$$K(t) = P(t|t-1) H^T [H P(t|t-1) H^T + R]^{-1} \quad (7)$$

$$\text{状态更新: } \hat{x}(t|t) = x(t|t-1) + K(t) \varepsilon(t) \quad (8)$$

误差协方差阵更新 (I 表示单位阵):

$$P(t|t) = [I - K(t)H] P(t|t-1) \quad (9)$$

1.2 SOC 估算影响因素

(1) 温度

温度变化将影响到电池的极化和内阻, 其容量一般也会随着电池温度的上升而增加, 但温度过高将加快自放电, 造成容量损失。

(2) 放电电流

放电电流的增加将导致欧姆压降增加和极化影响增大, 从而降低电池实际容量。

(3) 放电模式

放电模式将影响到电池的实际性能, 因此, 测试电池时应采用与实际情况相同的放电模式。

1.3 电池组的状态空间模型

采用卡尔曼滤波法估算 SOC, 首先需要建立描述 SOC 变化的状态方程和对 SOC 进行观测的观测方程。

1.3.1 状态方程的建立

SOC 即荷电状态, 描述的是电池的剩余容量, 按时积分法将 t 时刻的 SOC 值表示为:

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q_N} \int_0^t \eta i(\tau) d\tau \quad (10)$$

其中: $SOC(0)$ 为初始荷电状态; Q_N 为电池额定容量; $i(\tau)$ 为 τ 时刻充放电电流, 放电时为正, 充电时为负; η 为库伦效应, 主要受电流和温度的影响。

$$\text{将式 (10) 离散化: } x_k = x_{k-1} - (\eta \Delta t / Q_N) i_k \quad (11)$$

$$\text{考虑误差: } x_k = x_{k-1} - (\eta \Delta t / Q_N) i_k + w(t) \quad (12)$$

其中: x_k 为 k 时刻电池组的 SOC 值, Δt 为离散时间间隔, i_k 为离散电流, $w(t)$ 为零均值、误差方差为 Q 的正态白噪声。

状态方程描述动态系统相邻时刻状态的变化规律, 因此, 可将式 (12) 作为电池组 SOC 估算的状态方程。

1.3.2 观测方程的建立

蓄电池端电压与 SOC 存在对应关系, 端电压不能够直接测量, 需要建立电池模型来间接测量。目前, 广泛采用的是以下模型:

$$y_k = E_0 - R i_k - K_1 / x_k - K_2 x_k + K_3 \ln x_k + K_4 \ln(1 - x_k) + v \quad (13)$$

其中: y_k 为电池组端电压, E_0 为电池组初始端电压, R 为电池组充放电内阻, v 为零均值、误差方差为 R 的观测白噪声, K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为模型参数。

观测方程描述的是对状态进行观测的信号, 因此, 可将式 (13) 作为电池组 SOC 估算的观测方程。

1.3.3 模型参数辨识

设计合适的电池试验来确定模型参数是建立模型的关键。本文采用模拟电动汽车实际功率需求的联邦城市行驶工况 (FUDS), 对电池组进行充放电实验, 通过最小二乘法估计得到电池组模型参数, 以及库伦效应 η 和额定容量 Q_N 的校正系数。

2 实验结果与分析

设置电池组初始 SOC 值为 0.6 (不含噪声), 测量值为 0.8 (不含噪声), 得到 SOC 估算曲线如图 1 所示, 其误差曲线如图 2 所示。

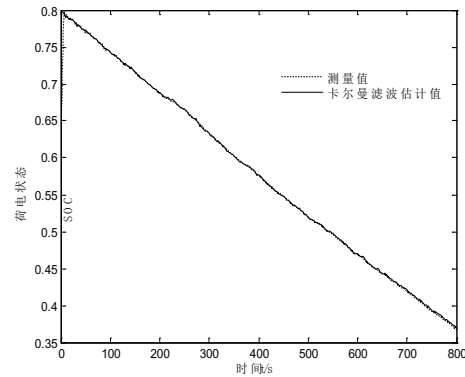


图 1 SOC 估算结果

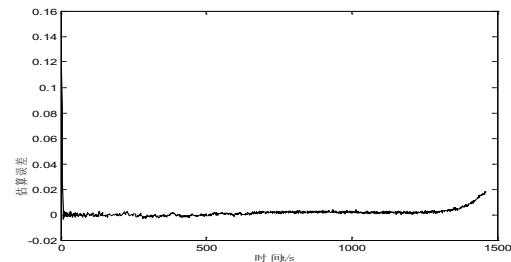


图 2 卡尔曼滤波误差曲线

仿真结果表明, 卡尔曼滤波算法对初始 SOC 值的要求不高, 能够快速收敛到真实值附近。并且精度非常高, 仅仅在 SOC 值比较低时的误差较大, 收敛以后的最大误差为 1.8%。

3 结语

本文基于卡尔曼滤波算法建立了单变量锂离子蓄电池组的状态空间模型，并根据电池组实际工作情况，对模型参数进行辨识，以及对库伦效应和电池组实际容量进行校正。模型选取电池组放电电流和工作温度等作为输入量，通过在 MATLAB/Simulink 中进行仿真分析，验证了此方法的可行性。分析结果表明，此模型仅在荷电状态低于 0.1 时误差较大，这是该方法需要进一步改善的地方。

参考文献

- [1] 毛华夫, 万国春, 汪镭. 基于卡尔曼滤波修正算法的电池 SOC 估算 [J]. 电源技术. 2014(02): 298-302.
- [2] M.Mastali, J. Vazquez-Arenas, R. Fraser.

Battery state of charge estimation using Kalman filtering [J]. Journal of Power Sources. 2013(239): 294-307.

附注

基金项目：四川省创新训练项目 (201410619004)。

作者简介

蔡飞 (1992-), 男, 四川省绵阳市, 西南科技大学, 信息工程学院。

王顺利 (1985-), 男, 四川省绵阳市, 博士生, 讲师, 检测技术及应用, 通信作者。

四大要素推动亚洲新能源市场发展

未来在亚洲，新能源市场将成为该区域最具吸引力的市场。

一、亚洲 GDP 的快速增长和庞大的人口规模决定着未来新能源市场规模将十分庞大。

当前市场经济学家对全球 GDP 的预测，亚洲主要经济体的 GDP 增长速度在未来几年内将高于欧美发达国家。从整体上看，2015 年至 2017 年，美国 GDP 增长预期低于 3%，欧元区 GDP 增长率低于 2%，日本则低于 1.5%。相比之下，亚洲的一些主要经济体如印度、马来西亚和菲律宾的 GDP 增速更让人感到惊喜。而占世界人口总数 61% 的亚洲，相对应的市场规模之大，可想而知。

二、亚洲地区新能源市场起点低，低起点有利于市场的迅速扩张。

众所周知，亚洲地区的人均装机发电量和用电量远低于发达国家或较发达地区的水平。低起点意味着高增长，据国际能源署 (IEA) 预测，2011 年至 2035 年东南亚地区总发电量的年复合增长率将为 4.2% 左右；

三、亚洲国家正把能源发展的重点逐渐转移到新能源方面。

为了实现电力多元化发展和提升能源安全的考量，亚洲国家正把能源发展的重点逐渐转移到新能源方面。据 IEA 预测，2011 年至 2035 年，亚洲的东南亚地区的可再生能源装机总量将以每年 10.6% 的速度逐年递增，2011 年装机量为 30 亿瓦，而到 2035 年将达到 380 亿瓦。可再生能源占总发电装机容量的比例在 2011 年为 1.7%，到 2035 年将攀升至 8.3%。

四、逐渐开放的电力市场和由此产生的亚洲国家政府对新能源发电的补贴吸引着全球参与亚洲新能源市场。

在亚洲，至少有 6 大市场正处于电力市场放开或改革的不同阶段，包括中国、日本、新西兰、新加坡和菲律宾。未来亚洲地区其他国家如马来西亚或泰国也可能陆续效仿。与此同时，可再生能源发电成本和传统燃料发电成本间的差价在短期内将一直存在，这些市场至少短期内还不会实现电网平价，政府提供的补贴将在相当长的一段时间内成为制造商参与新能源市场的重要原因之一。

总而言之，结合经济增长、人口规模、能源发展目标转移到新能源以及政府支持等有利条件，从中长期来看，亚洲新能源市场将是最具吸引力的可增长的市场。