

# 基于贝叶斯次优解的锂电池 SOC 初值追踪研究

高金辉<sup>1</sup>, 巴雁远<sup>1</sup>, 郑晓彦<sup>2</sup>

(1.河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007;2.河南广播电视大学,郑州 450008)

**摘要:**在使用循环算法的剩余电量(state of charge, SOC)估算的理论研究中,通常都是设定已知的初始值,无法完全论证算法的各项性能指标.在研究剩余电量估算问题时,则重点针对不确定的初始赋值,使用一种贝叶斯次优解法——粒子滤波(PF),基于 SOC 动态观测模型,研究其收敛到真值的情况,并辅以 MATLAB 仿真实验.结果显示在非平台期 PF 可快速追踪初值,而在平台区由于自身算法的缺陷,无法追踪初值,应根据此区域的电压特性,更换为另一种次优解算法.论证了在解决锂电池初值追踪问题上,两种次优解算法的结合使用可以得到理想结果.

**关键词:**剩余电量;贝叶斯滤波;平台期;SOC 动态观测模型

**中图分类号:**TM912

**文献标志码:**A

在使用循环算法的剩余电量估算的理论研究中,通常都是设定已知的初始值,这并不符合实际应用,所以不能完全论证算法的各项性能指标<sup>[1]</sup>.本文在研究剩余电量估算问题时,则重点针对不确定的初始赋值,研究磷酸铁锂电池收敛到真值的情况.这种研究对闭环算法的鲁棒性测验十分有意义.

## 1 平台期

锂离子电池,尤其是磷酸铁锂电池,开路电压曲线在一些区域十分平缓<sup>[2]</sup>.这种现象可以用吉布斯相律<sup>[3]</sup>

$$F = C - P + n$$

来解释,其中,  $F$  为自由度;  $C$  为独立组分数;  $P$  为相态数目;  $n$  为外界因素.在对电极材料的研究中,  $n = 0$ ; 在磷酸铁锂电池内部反应系统中,可认为是二元系,即  $C = 2$ .磷酸铁锂电池放电过程中产生相变,  $P = 2$ .代入上式得到  $F = 0$ . 两相反应时自由度为 0,化学势不变,则电压曲线水平.在实际应用中,由于电池本身材料、电池内部环境变化等原因,电压曲线不可能是绝对水平.但在剩余电量(State of charge, SOC)50%~70%这一阶段,20%的 SOC 变动才对应约 0.01 V 的电压变化,曲线几乎达到了完全的水平,在文章中定义此阶段为平台期.

## 2 电池模型

文章用一种相对复杂的动态模型——SOC 动态观测模型<sup>[4]</sup>.此模型为 Shepherd 模型<sup>[5]</sup>、Unnewehr universal 模型和 Neenst 模型<sup>[6]</sup>的组合,且性能优于各个单个模型.

动态观测模型的开路电压与 SOC 关系为:

$$V_i = K_0 - RI(t) - K_1/S_i - K_2S_i + K_3\ln(S_i) + K_4\ln(1 - S_i),$$

收稿日期:2017-03-29;修回日期:2017-08-16.

基金项目:河南省重点科技攻关项目(142102210055)

作者简介:高金辉(1962-),男,河南南阳人,河南师范大学教授,主要研究方向为电路系统设计及新能源研究,E-mail: gaojinhui282@sina.com.

通信作者:巴雁远(1992-),男,河南新乡人,主要研究方向为电路系统设计及新能源研究,E-mail:744955667@qq.com.

式中,  $V_t$  为  $t$  时刻的负载电压;  $I(t)$  为  $t$  时刻的瞬时电流;  $R$  是电池内阻;  $S_t$  为  $t$  时刻的瞬时 SOC;  $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$  为待辨识的电池模型参数, 可以表征锂电池的极化内阻. 为了表征温度及充放电倍率对 SOC 估计的干扰, 对  $S_t$  作如下定义:

$$S_t = S_0 - \int_0^t \frac{nI(\tau)}{C(T, m, t)} d\tau,$$

式中,  $S_t$  为电池  $t$  时刻的 SOC;  $T$  为温度;  $n$  为充放电效率;  $C_n$  为常温下电池的标称容量;  $m$  为充放电倍率;  $C(T, m, t)$  为在不同温度、不同充放电倍率下的电池可用容量.

$K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$  为待辨识的电池模型参数, 这组参数对于 SOC 估算的准确性十分重要, 它的辨识需要经历一个电池从完全满充状态以标准放电速率放电至完全放电状态的过程. 文章所使用的测试电池为环宇赛尔新能源科技有限公司生产的型号为电动乘用车 EV-HPPF70173248 的磷酸铁锂电池, 标称电压 3.2 V, 额定容量 20 Ah, 充电截止电压 3.6 V, 放电截止电压 2.0 V, 放电工作温度  $-20 \sim 60$  °C. 通过记录放电过程中电池电压、电流和对应的 SOC 值, 采用最小二乘法拟合可得到模型参数.

### 3 初值追踪方法

现阶段 SOC 估算主要有两大类, 无模型 SOC 算法和基于模型的 SOC 算法. 无模型 SOC 算法包括安时积分法、开路电压法、内阻法<sup>[7]</sup>等. 无模型算法主要依赖传感器对电压的监测, 而在平台期, OCV-SOC 曲线水平, 这使得此类算法无法进行 SOC 初值追踪.

相较于无模型 SOC 算法, 基于模型的 SOC 算法因其具有闭环回路的特色, 可以在计算中自我修正、消除干扰, 具有更高的准度, 如贝叶斯滤波<sup>[8]</sup>. 粒子滤波(PF)作为贝叶斯滤波的一种次优解算法, 是一种随机性采样算法, 可在非线性系统中应用, 无须服从高斯分布, 在以往解决工程中数值追踪问题有优异的表现. 无卡尔曼滤波(UKF)<sup>[9]</sup>也是一种贝叶斯滤波的次优算法, 属于确定性采样, 采样粒子是按一定规则在原来状态分布中选取的一些点, 虽精准性不如 PF, 但也被广泛应用到各种工程问题上.

SOC 估算问题上, 在已知初值的情况下使用 PF 进行循环运算, 可得到很好的准度和鲁棒性<sup>[10]</sup>. 但是在初值未知的情况下进行 SOC 初值追踪研究, 尤其是对于像锂电池这种存在电压平台期的电池进行追踪, 能否获得理想的效果还是未知, 毕竟有段区域电压曲线几乎完全水平, 追踪难度急剧增大. 文章主要使用 PF 对磷酸铁锂电池进行 SOC 初值追踪, 通过仿真试验来探索这种算法在此类电池上是否可行.

PF 的状态空间模型记为:  $x_k = f(x_{k+1}) + u_k, y_k = h(x_k) + v_k$ , 式中,  $f(x)$  代表状态空间的状态转移方程,  $h(x)$  代表状态空间的测量方程,  $x_k$  表示在  $k$  时刻系统的状态,  $y_k$  表示在  $k$  时刻的测量值,  $u_k$  和  $v_k$  为噪声. PF 分为两个阶段: 第一阶段利用动态电池模型预测状态的先验概率密度; 第二阶段则是使用已测值对先验概率密度实行优化, 从而得到后验概率密度. 其运算过程如下.

初始化:

— 从重要性概率密度函数  $\pi(x_0)$  中取  $N_s$  个重采样粒子  $\{x_0^i\}_{i=1}^{N_s}$ .

— 设置权值, 每个重采样粒子的权值为  $1/N_s$ , 权值之和为 1.

对于  $k = 1, 2, \dots, n$ .

— 预测

从重要性概率密度函数  $\pi(x_0)$  中取新粒子  $x_k^i \sim \pi(x_k | x_{k-1}^i), i = 1, 2, \dots, N_s$ .

— 更新

通过公式  $\tilde{\omega}_k^i \propto \tilde{\omega}_{k-1}^i \cdot p(z_k | x_k^i) p(x_k^i | x_{k-1}^i) / \pi(x_k^i | x_{0,k-1}^i, z_{1,k})$  更新权值.

通过公式  $\tilde{\omega}_k^i = \omega_k^i / \sum_{i=1}^{N_s} \omega_k^i$  归一化权值.

通过公式  $x_k = \int_{-\infty}^{\infty} x_k p(x_k | z_{1,k}) dx_k \approx \sum_{i=1}^{N_s} \tilde{\omega}_k^i x_k^i$  进行状态更新.

— 监测退化程度

有效粒子数目  $\hat{N}_{eff} = 1 / \sum_{i=1}^{N_s} (\omega_k^i)^2$ , 当  $\hat{N}_{eff}$  小于设定阈值时, 启动重采样.

$$-k \leftarrow k + 1.$$

### 4 仿真试验和结果分析

SOC 的真值难以确定,而放电试验法测量结果较为精确,但仅限于实验室使用,本文基于放电试验法,结合修正安培时间法得到 SOC“真值”,并与本文的仿真结果进行比较,采样间隔为 10 s.图 1 为试验中放电电流的波形.

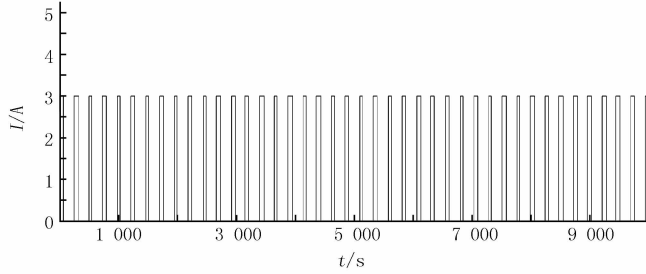


图 1 放电过程电流波形

状态方程  $x_k = f(x_{k-1}, I_k) + u_k = x_{k-1} - \frac{nI_k \Delta t}{C(T, m, t)} + u_k$ , 观测方程  $y_k = h(x_k, I_k) + v_k = E_o - RI_k - \frac{K_1}{x_k} - K_2 x_k + K_3 \ln(x_k) + K_4 \ln(1 - x_k) + v_k$ , 式中:  $u_k$  为系统噪声,  $v_k$  为观测噪声,它们均为零均值的高斯白噪声;系统噪声和观测噪声的方差  $Q$  和  $S$  分别设置成  $10^{-5}$  和  $10^{-2}$ ,试验温度  $24\text{ }^\circ\text{C}$ .

粒子滤波的准确性与选取的粒子数有关,理论上来说,选择粒子数越多,估算越准确,但相应的计算量越大.文章设定粒子数  $N$  为 100,此时估算准确度较高,计算时间较短.

用 PF 对 SOC 真值分别为 40%、60%、80% 的 EV-HPPF70173248 磷酸铁锂电池进行初值追踪,设定猜测初始值为 70%,MATLAB 仿真结果如图 2~4 所示.

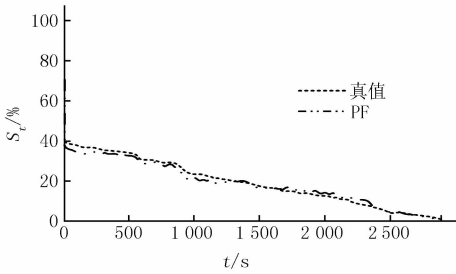


图 2  $S_0=40\%$  的追踪仿真图

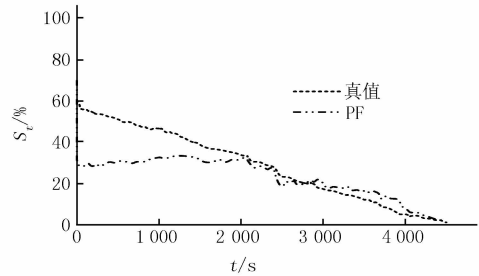


图 3  $S_0=60\%$  的追踪仿真图

使用 PF 对锂电池进行初值追踪,在非平台区,PF 可以快速追踪到初值,同时其准确度和鲁棒性表现也都很优秀.但在平台区曲线长时间难以收敛到真值,无法追踪初值.

原因:1)平台期重要性采样在近似抽样过程中,大量复制同一个粒子,失去了多样性,使这一区域粒子权值几乎都相同;2)文章使用瞬时电流的状态转移函数作为重要性概率密度函数,而此时的预测先验与似然函数之间重叠部分较少,产生偏差很大.

针对上述出现的问题,在平台期使用另一种贝叶斯次优算法,通过选定的 sigma 点来精确估计随机变量经非线性变换后的均值和方差,来更好的近似状态的概率密度函数,即无际卡尔曼滤波(UKF).在各种参数设置与外部环境与图 3 仿真相同的情况下,进行新的仿真,结果如图 5 所示.使用 UKF 可以在平台期快速追踪到 SOC 真实初始值.

## 5 结束语

粒子滤波作为贝叶斯滤波的一种次优解算法,在解决数值追踪问题中有很优异的表现,在SOC初值追踪问题上,在非电压平台期能快速到达初值;但在电压平台期,由于其自身算法的缺陷性,无法得到满意的答案.在以后的研究工作中,可根据放电过程中电压的变化特性进行分区,不同区域使用不同的算法,在非电压平台期使用粒子滤波,在电压平台期,针对粒子滤波的缺陷,更换成UKF进行初值追踪.

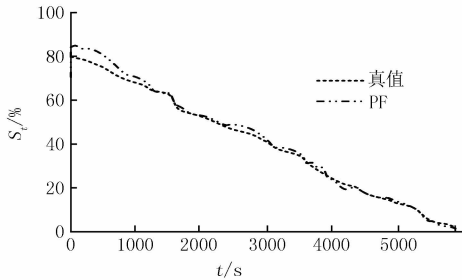


图4  $S_0=80\%$  的追踪仿真图

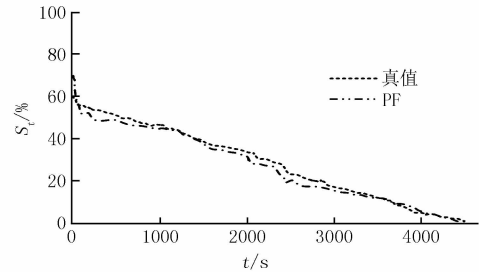


图5  $S_0=60\%$  的追踪仿真图

## 参 考 文 献

- [1] 张逸,林焱,吴丹岳.电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J].电力系统保护与控制,2015(2):138-147.
- [2] 谭晓军.电动汽车动力电池管理系统设计[M].广州:中山大学出版社,2011:2-3.
- [3] 彭匡鼎,陈善娜.热力学参量组完备性法则及其应用[J].云南大学学报(自然科学版),1996,18(3):241-244.
- [4] Gregory L P.Extended Kalman Filtering for Battery Management System of LiPB-based HEV Battery Packs[J].Power Sources,2004,134:252-292.
- [5] 马晓峰,稽伟.混合动力汽车镍氢电池的建模分析[J].机电元件,2012,32(3):48-52.
- [6] 毕军,康燕琼,邵塞.纯电动汽车动力锂电池 Nernst 模型参数辨识[J].汽车工程,2015,37(6):725-730.
- [7] 谢涛,曹军威,高田,等.基于滑动最小二乘算法和电池荷电状态的储能系统平滑控制策略[J].电力系统保护与控制,2015,43(5):1-7.
- [8] 高金辉,张兰杰.一种配电网 ZbUS 潮流算法[J].河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(1):42-45.
- [9] 高金辉,杜浩.电动汽车锂电池组的新型双向均衡法[J].河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(6):53-56.
- [10] Shao S,Bi J,Yang F,et al. On-line estimation of state-of-charge of Li-ion batteries in electric vehicle using the resampling particle filter[J].Transportation Research Part D: Transport and Environment,2014(32):207-217.

## Lithium-ion Batteries SOC Initial Value Tracking Based on Suboptimal Solutions of Bayesian Filter

Gao Jinhui<sup>1</sup>, Ba Yanyuan<sup>1</sup>, Zheng Xiaoyan<sup>2</sup>

(1.College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2.Henan Radio & Television University,Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** In the theoretical study of the loop algorithm for estimating state of charge(SOC), it is usually set the initial value that is known and cannot fully demonstrate the performance indexes of the algorithm.While this paper aims at the problem about uncertain initial assignment and studies its convergence to the true value based on dynamic observation model using particle filter, supplemented by MATLAB simulation.The results show that satisfactory results are obtained only in the area where is out plateau.We can not track the initial value in plateau because of the flaw of algorithm. Another suboptimal solution should be used based on the voltage characteristic in this area.It demonstrates that two suboptimal solutions should be combined to obtain the ideal results.

**Keywords:** state of charge; Bayesian filter; plateau period; SOC dynamic observation model