

基于卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算*

张菁

(池州职业技术学院, 安徽 池州 247000)

摘要: 针对卡尔曼滤波估算电池 SOC 中存在精度不高、忽略实际环境噪声等问题, 文章提出了一种基于卡尔曼滤波法来估算电池 SOC。建立电池的一阶戴维南模型, 基于卡尔曼滤波法对系统模型的非线性函数做一阶泰勒级数展开, 得到线性化的方程, 同时将噪声加入方程, 最后通过实验验证了该方法的有效性。

关键词: 卡尔曼滤波; 锂电池模型; SOC

中图分类号: TM911

文献标志码: A

文章编号: 1672-3872 (2020) 12-0141-03

近年来, 随着能源短缺、空气污染等问题的日益加重, 采用新能源的电动汽车正在逐渐取代传统的燃油汽车。早期一般选用铅蓄电池作为电动汽车的动力来源, 随着电池技术的提升, 具有能量密度高、循环寿命长的锂电池在电动汽车中得到推广与使用。然而, 锂电池存在着过充和过放的问题, 甚至可能产生爆炸, 严重影响锂电池的推广与应用。因此, 为了提高产品可靠性与安全性, 对锂电池的电荷状态进行精确估算是必不可少的。

电池管理系统控制动力电池使其能安全运行并且具有长久的使用寿命, 对电池电荷状态进行精确估算是 BMS 的主要功能之一, 通过检测电压、电流、温度、充放电功率等实时数据可以对 SOC 进行估算, 锂电池 SOC 的值越精确, 那么 BMS 就能依据该值对动力电池进行合理有效管理, 发挥电池的最佳性能, 同时有效地防止过充、过放等现象。然而, 由于锂电池内部复杂的化学反应和物理变化, SOC 不能被直接测量, 此外, 许多因素如噪声、电池老化也在考虑范围之内, 当锂电池在工作时如何对其 SOC 进行有效估算是一个亟需解决的问题^[1]。

动力电池的 SOC 估算方法主要有安时积分法^[2]、开路电压法^[3]、卡尔曼滤波法^[4]和基于机器学习^[5]的预测方法等, 如图 1 所示。各种方法具有各自的优缺点, 如表 1 所示, 在实际应用中通常是将几种不同方法结合起来。

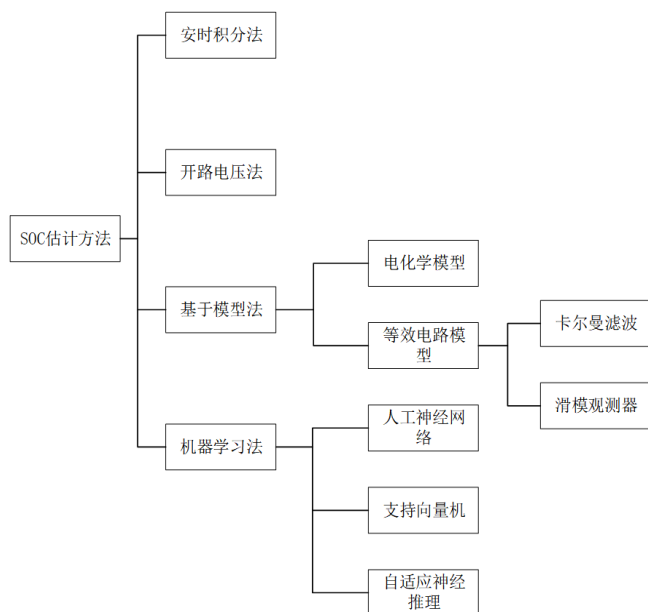


图 1 电池 SOC 估算方法分类

基金项目: 安徽省优秀青年人才支持计划“基于深度学习神经网络的锂离子电池 SOC 估算”(gxyqZD2019132); 安徽省省级质量工程项目“计算机应用技术专业教师教学创新团队”(2019cxt045)

作者简介: 张菁 (1984—), 女, 安徽池州人, 硕士, 讲师, 研究方向: 算法研究, 数据挖掘, 网络应用, 云计算。

表 1 几种常用的 SOC 估算方法比较

方法	优点	缺点
安时积分法	原理简单, 支持在线计算	存在累计误差
开路电压法	精度高	无法动态估算
外电压法	原理简单, 容易测量	精度低
神经网络法	精度高	需要大量训练数据
卡尔曼滤波法	鲁棒性好、抗扰动力强	依赖合理电池模型

从表 1 可知, 基于卡尔曼滤波的 SOC 估算具有鲁棒性好、抗扰动力强的优点。相较于其他方法, 这些良好的特性对于处于实际复杂工作环境中的锂电池更合适, 但是标准的卡尔曼滤波法只适用于线性系统。因此, 为了将该方法应用于非线性时变的电池系统中, 需要采用扩展的卡尔曼滤波法。EKF 的主要原理是利用泰勒展开将动力电池模型线性化, 但会造成计算复杂、忽略高阶项等问题, 造成 SOC 估算误差, 因此, 基于卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算还需要进一步研究^[6]。

基于上述分析, 文章提出了一种基于一阶锂电池模型的扩展卡尔曼滤波法。通过实验得到锂电池中 SOC 和开路电压之间的关系, 确认锂电池模型参数锂电池系统 SOC 及电池极化端电压为系统状态变量, 接着以电池系统的电压回路为观测方程, 利用扩展的卡尔曼滤波法来对锂电池 SOC 估计, 从而解决当前基于卡尔曼滤波法估算 SOC 过程中存在的问题。

1 电池模型

电池模型的建立是利用卡尔曼滤波法估算电池 SOC 的关键, 通过将电池内部的化学反应和外在的性能参数表示成相关数学模型, 使得电池模型与同等输入条件下的输出特性表现一致, 那么可以认为该模型与实际电池等效。电池模型的准确建立直接影响着 SOC 的估算精度, 目前关于锂电池模型主要有三种: 电化学模型、神经网络模型和等效电路模型。等效电路模型是利用电阻、电容、电感等元器件来表示电路网络, 相比较其他两种模型具有计算量相对较简单、模型精度高的优点^[7], 文章选取等效电路模型作为描述电池的数学模型。

戴维南 (Thevenin) 模型是在一种在工程应用中用途广泛的等效电路模型, 该模型主要由理想电压源、电阻和一个并联 RC 网络组成, 可以较好地描述电池的动态特性进行描述, 且模型参数具有易识别性, 如图 2 所示。

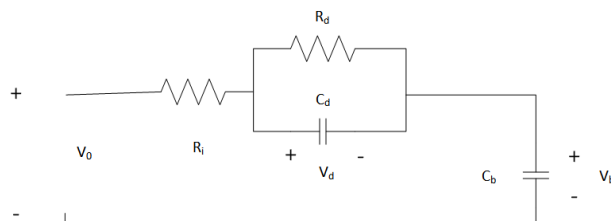


图 2 戴维南等效电路模型

在图2中, RC网络用来模拟电池的极化现象, 其中 R_d 表示电池的极化电阻, C_d 表示电池的极化电容, R_i 表示电池的直流电阻, I 表示电池充电和放电时的电流, V_0 电池内部电压, V_d 表示开路电压, 这样就可以利用戴维南模型来准确描述脉冲放电时电压的突变特性和渐变特性。根据基尔霍夫电压电流定律和电容电压变化及电流关系, 戴维南模型的空间状态方程可以表示如下:

$$\dot{V}_b = \frac{I}{C_b} \quad (1)$$

$$\dot{V}_d = -\frac{I}{R_d C_d} V_d + \frac{I}{C_d} \quad (2)$$

$$V_0 = V_b + V_d + IR_i \quad (3)$$

锂电池中开路电压和 SOC 的关系不是线性的, 其中电容 C_b 两端之间的电压 V_b 与 SOC 之间的关系可以表示如下:

$$V_b = k \times SOC + d \quad (4)$$

基于以上方程, 可以推导出以下等式:

$$\left(\frac{SOC}{V_d} \right) = \left(\frac{\frac{I}{kC_b}}{-\frac{I}{R_d C_d} V_d + \frac{I}{C_d}} \right) \quad (5)$$

$$V_0 = k \times SOC + V_d + IR_i + d \quad (6)$$

式(5)和(6)分别是锂电池模型的状态更新方程和观测方程, 对上述连续型方程的离散化处理 and SOC 的计算将在下一章节进行阐述。

2 基于扩展卡尔曼滤波的 SOC 估算

根据上一章节建立的一阶戴维南电池模型基础上, 本章节开展基于该模型的卡尔曼滤波的 SOC 估算方法研究。卡尔曼滤波法的本质是一个不断的“预测—修正”过程, 如图3所示。

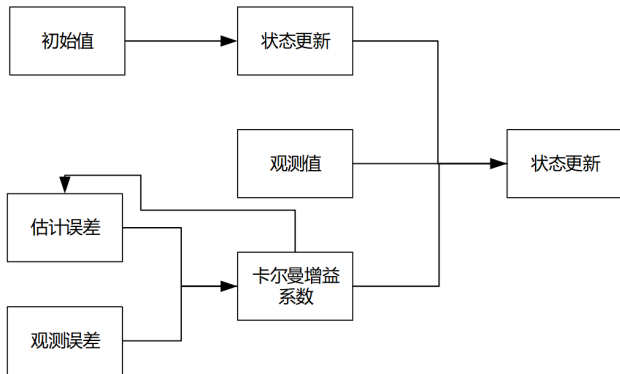


图3 卡尔曼滤波法计算过程

当系统的状态方程是非线性的, 那么卡尔曼滤波就不能直接使用, 锂电池就是这样一个非线性系统, 要在锂电池模型上使用卡尔曼滤波法就需要对电池系统进行线性化处理, 这种对非线性方程离散化处理也叫作扩展卡尔曼滤波。基于式(5)和(6), 系统的状态方程可以表示如下:

$$x = [x_1 \ x_2]^T, \quad x_1(t) = SOC, \quad x_2(t) = V_d \quad (7)$$

其中系统的输入定义为 $u(t) = 1$, 输出定义为 $y(t) = V_0$, 那么电池模型就可以表示如下:

$$\dot{x} = f(x, u) + w \quad (8)$$

$$\dot{y} = g(x, u) + v \quad (9)$$

基于上述所示, 可以得到:

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{u}{kC_b} \\ -\frac{I}{R_d C_d} x_2 + \frac{1}{C_d} u \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$g(x, u) = kx_1 + x_2 + R_i u + d \quad (11)$$

在上述方程中, w 和 v 代表系统中存在的噪音和测量中存

在的噪音。对式(8)和(9)的泰勒级数展开式是需要线性化处理的, 电池模型结果线性化处理后可以表示如下:

$$\dot{x} = A_f * x + B_f * u + w \quad (12)$$

$$\dot{y} = C_f * x + D_f * u + v \quad (13)$$

分别对上述方程中的 A_f , B_f , C_f , D_f 求偏导, 可以得到:

$$A_f = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} |_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{I}{R_d C_d} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B_f = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} |_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{kC_b} \\ \frac{1}{C_d} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C_f = \frac{\partial g(x, u)}{\partial x} |_{x(t), u(t)} = [k \quad 1] \quad (16)$$

$$D_f = \frac{\partial g(x, u)}{\partial u} |_{x(t), u(t)} = R_i \quad (17)$$

经过离散化处理之后, 电池模型可以表示如下:

$$x_{k+1} = A_k * x_k + B_k * u_k + w_k \quad (18)$$

$$y_k = C_k * x_k + D_k * u_k + v_k \quad (19)$$

经过近似化的线性系统可以利用卡尔曼滤波法进行计算, 其方法步骤与线性卡尔曼滤波类似, 具体如下步骤所示。

1) 对扩展卡尔曼滤波方程进行初始化: 让 $k=0$, 设置初始条件 $x \times k$, 误差协方差矩阵 P^* 和噪声协方差矩阵 Q^* 。

2) 对 k 的值进行迭代计算, 根据误差的协方差和观测误差的协方差计算当 $k=1, 2, 3, \dots$ 时的卡尔曼增益系数。

3) 对状态估计与误差协方差进行更新:

$$\hat{x}_{k|k-1} = A_{k-1}^* \hat{x}_{k-1} + B_{k-1}^* u_{k-1} + w_{k-1} \quad (20)$$

$$P_{k|k-1}^* = A_{k-1}^* P_{k-1}^* A_{k-1}^{*T} + Q^* \quad (21)$$

4) 计算卡尔曼增益矩阵:

$$L_k = P_{k|k-1}^* C_k^{*T} (C_k^* P_{k|k-1}^* C_k^{*T})^{-1} \quad (22)$$

5) 状态估计与测量值更新:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + L_k [y_k^* - (C_k^* \hat{x}_{k|k-1} + D_k^* u_k + v_k)] \quad (23)$$

6) 误差协方差的更新:

$$P_k^* = (I - L_k C_k^*) P_{k|k-1}^* \quad (24)$$

上述扩展卡尔曼滤波法的计算步骤与卡尔曼滤波基本一致, 区别在于对状态进行更新时使用线性系统的观测值。扩展卡尔曼滤波法的核心原理将预测值与测量值进行比较, 根据误差大小不断地调整卡尔曼增益, 在经过一定迭代次数后使得 SOC 收敛至真值附近。

3 实验结果

为了验证扩展卡尔曼滤波法的有效性, 文章在 MATLAB 中实现该算法, 算法模块的输入值是放电实验是所测量的电流值和电压值, SOC 值通过实验数据记录的放电电量计算得到, 同时将该 SOC 值与基于扩展卡尔曼滤波法估算得到的 SOC 值进行比较。其中, 文章开展的 SOC 估算选用的是 26650 型电池, 该电池容量为 2200mah, 最高电压为 3.65V, 放电时最低电压为 2.84V, $k=4.38$, $d=23.74$ 。误差和噪声协方差矩阵的值分别为 $P = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$ 和 $R = \begin{bmatrix} 0.005 & 0 \\ 0 & 0.02 \end{bmatrix}$ 。

为了模拟锂电池在实际使用当中的充放电现象和验证基于扩展卡尔曼滤波的有效性, 将 SOC 初始值设定为 0.3, 在 1C 充电和放电时电流和电压相关数据输入模型, 就可以得到基于卡尔曼滤波 SOC 曲线与基于安时积分法的 SOC 曲线, 如图4、图5所示。

从图5可以看出, 当 SOC 设置为 0.3 时, 该模型在 1C 横流充放电情况下的 SOC 经过一段时间后能收敛到真值附近, 曲线拟合较好, 具有较高的精度。

4 结论

针对目前卡尔曼滤波估算电池 SOC 中存在着精度不高、

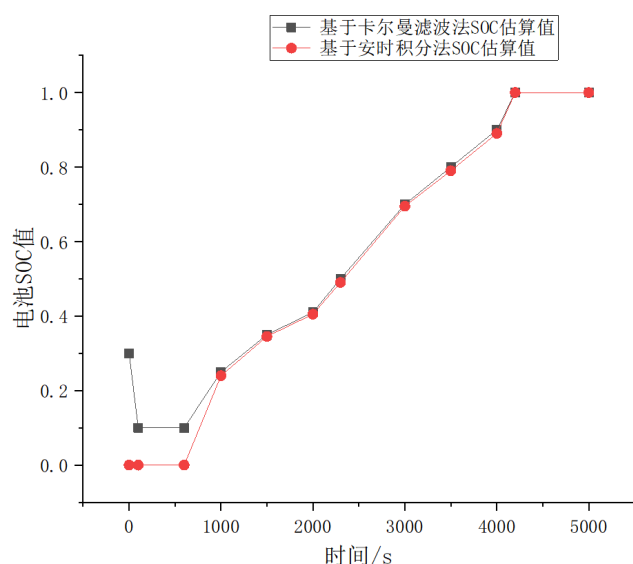


图4 充电时SOC收敛过程

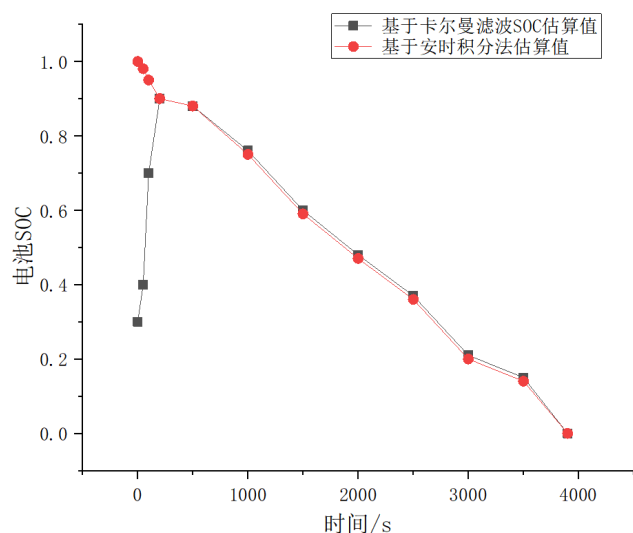


图5 放电时SOC收敛过程

忽略实际环境中存在的噪声等问题,本文提出了一种基于扩展卡尔曼滤波法来估算电池SOC。首先建立电池的一阶戴维南模型,确定模型中各项参数,将这些参数代入模型状态方程和观测方程;接着基于卡尔曼滤波法对系统的非线性函数做一阶泰勒级数展开,得到线性化的系统方程,同时将噪声加入方程中;最后在实验仿真中观测在充放电情况下比较卡尔曼滤波法的SOC估算值与安时积分法SOC估算值,证明该方法的有效性。但该方法在实验中收敛时间偏长,需要考虑运用相关优化算法来加速收敛过程,这也是下一步的研究方向^[8]。

参考文献:

- [1] 张易航,王鼎,肖国,等.锂离子电池SOC估算方法概况及难点分析[J].电源技术,2019,43(11):1894-1896+1904.
- [2] 陈继永,吴兆宏,李金喜.矿用机车防爆锂电池SOC估算算法[J].煤矿安全,2019,50(12):102-105.
- [3] 申彩英,左凯.基于开路电压法的磷酸铁锂电池SOC估算研究[J].电源技术,2019,43(11):1789-1791.
- [4] 陈继永,吴兆宏,李金喜.基于容量增量法的防爆锂电池老化指标分析[J].工矿自动化,2019,45(12):29-34.
- [5] 贾海峰,李聪.基于BP神经网络的锂电池组SOC估算[J].农业装备与车辆工程,2020(1):1-6.
- [6] 王清宇,李军.锂电池荷电状态估算方法研究[J].装备机械,2019(4):30-34.
- [7] 陈元丽,赵振东,陈素娟,等.动力电池SOC估算方法综述[J].汽车科技,2019(5):65-69.
- [8] 葛东东,赵俊,张庆,等.电动汽车电池管理系统SOC估计方法分析[J].南方农机,2019,50(23):30+34.

(收稿日期:2020-5-8)

(上接第118页)主义现代化建设和整体教育水平提高的重要意义。其可以从三个方面入手。第一,要将对“三农”意识的培养纳入日常思政教学水平评估。第二,要重点引进一些具备构建“三农”教学体系专业知识和实践能力的教学人员,将培养学生“三农”意识教学能力纳入学校选拔思政教师的标准。第三,要加强对学校思政教师有关“三农”意识培养的培训,因为教师是学生接受教育的第一媒介,只有加强教师自身的素质,才能为培养学生的“三农”意识打好坚实的基础^[4]。

2.4 完善对“三农”意识体系构建的规范标准

据考察,国内学校对培养学生“三农”意识方面的教学标准并不统一,且欠缺一定的科学性,这样的现状会使得学校在部署具体培养学生“三农”意识工作时缺乏必要的科学指引。应该统一评判学校培养“三农”意识方面的规范和标准,建立一套统一且科学的指引规范,只有这样,才能令学校的思政教学在培养学生“三农”意识方面的教学有章法可依,有方向可循^[5]。

3 结束语

随着我国对“三农”的重视程度的不断提高,教育界对培养学生“三农”意识的程度也越来越大。步入21世纪以后,

更大院校都在大力推行构建学生“三农”意识相关的思想政治教育体系。虽然在“三农”的教育方面国内教育界已经取得了一定的成就,但仍然有很多细枝末节的地方需要做更深入的探讨。对一名适应现代化教育潮流的教师而言,不断思考优化培养学生“三农”意识的思政教学体系是非常有必要的。

参考文献:

- [1] 刘玮,袁向东.思政课教学中大学生服务“三农”意识培养体系的构建[J].江西电力职业技术学院学报,2014,27(3):66-68.
- [2] 刘笑萍.服务“三农”政策的电商专业创新创业人才培养课程体系构建:以浙江农林大学电子商务专业为例[J].教育教学论坛,2013(26):92-93.
- [3] 张平.“乡村振兴”背景下农业高职跨专业选修课程体系构建与教学[J].教育科学论坛,2018,432(18):40-43.
- [4] 石骏,耿方梅.高职涉农专业学生服务“三农”意识的培养研究[J].科技经济导刊,2016(35):88.
- [5] 周涛.农科大学生服务“三农”职业理想的分层及其实现研究[D].合肥:安徽农业大学,2011.

(收稿日期:2020-4-27)