

# 基于扩展卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估计方法

唐中信, 叶今禄\*, 易健彬, 邵帅, 陆一, 姚彤禹, 谭先琳

广西大学机械工程学院, 广西 南宁 530004

**摘要:**针对卡尔曼滤波方法估计锂离子电池荷电状态(state of charge, SOC)误差较大的问题,基于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法,建立锂离子电池二阶电阻电容(resistor capacitance, RC)电路模型,使用泰勒级数对非线性函数进行线性展开,采用MATLAB仿真估算动态应力测试、城市循环、混合脉冲功率、脉冲工况4种不同工况对应的动力电池SOC曲线,并与安时积分法估算的SOC曲线进行对比分析。仿真结果表明:采用EKF算法估算锂离子电池SOC时,动态应力测试出现最大误差为0.015,4种工况均方差均在0.003 2以内;误差分布更稳定,曲线更可靠,采用EKF算法估算锂离子电池SOC的有效性与精确性更高。

**关键词:**EKF;动力电池;SOC;仿真模拟

**中图分类号:**TM912

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2024)01-0094-05

**引用格式:**唐中信,叶今禄,易健彬,等.基于扩展卡尔曼滤波的动力电池SOC估计方法[J].内燃机与动力装置,2024,41(1):94-98.

TANG Zhongxin, YE Jinlu, YI Jianbin, et al. SOC estimation of power battery based on extended Kalman filter[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(1):94-98.

## 0 引言

随着对环境保护和可持续交通发展要求的逐渐提高,电动汽车和混合动力汽车成为汽车行业发展的主要方向之一。动力电池是电动汽车和混合动力汽车的能量存储装置,也是当前的研究热点。电池荷电状态(state of charge, SOC)指电池中可用电荷与总电荷的比,反映电池的状态变化,是动力电池的一个重要指标,准确测量SOC对实现能源高效利用、延长电池寿命、确保设备正常运行非常重要。

动力电池SOC估算方法主要有安时积分法、开路电压法、卡尔曼滤波法等预测方法。文献[1]通过搭建SOC估算系统,基于MATLAB-Simulink平台仿真结果表明不同工况下SOC的仿真误差不超过2.5%;文献[2]通过改变混合脉冲功率性能测试(hybrid pulse power characteristic, HPPC)参数辨识时域,使恒流放电工况SOC平均相对误差从1.49%降低到0.55%,提高了不同温度下的模型精度。目前监测电池电量常用的方法是安时积分法,通过对电流实时积分得到电池的充入电量和放出电量,可长时间监测和记录,并给出任意时刻的电池电量。安时积分法简单易行,受电池性能的影响小,宜发挥微机监测的优点,但有干扰时积分产生偏差,需采取有效的滤波措施,提高电流测量精度。卡尔曼滤波法稳定性高、抗扰动能力强,但计算量大。

本文中基于卡尔曼滤波法算法,利用离线参数、在线参数辨识搭建二阶电阻电容(resistor

**收稿日期:**2023-09-07

**基金项目:**广西大学大学生创新创业训练计划项目(202110593212)

**第一作者简介:**唐中信(2003—),男,湖南岳阳人,主要研究方向为电动车动力电池SOC估计,E-mail:2458077522@qq.com。

\* **通信作者简介:**叶今禄(1998—),男,贵州贵阳人,硕士研究生,主要研究方向为电池管理系统,E-mail:yjlgxu@163.com。

capacitance, RC) 等效电路模型,在动态应力测试(dynamic stress test, DST)、城市循环(urban dynamometer driving schedule, UDDS)、混合脉冲功率(hybrid pulse power characterization, HPPC)、脉冲工况 4 种工况下与安时积分法估算的 SOC 结果进行对比,验证算法的可行性、可靠性及准确性。

## 1 基于 EKF 算法的 SOC 估计模型

### 1.1 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法是美国数学家卡尔曼(Kalman)于 19 世纪 60 年代提出的基于最小方差用于线性系统分析的一种最优估计方法。卡尔曼滤波算法将估计变量作为系统状态变量,测量变量作为观测变量,采用递推方式滤除噪声,利用卡尔曼增益对估计变量和测量变量赋予不同置信度,直至估计变量收敛于真实变量<sup>[3]</sup>。

### 1.2 扩展卡尔曼滤波算法

实际研究中大部分系统是非线性的,无法直接使用卡尔曼滤波算法做最优估计。部分学者在卡尔曼滤波算法的基础上提出了扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法,通过泰勒级数展开式将非线性系统的数学模型进行线性处理,并使用卡尔曼滤波算法对分段近似后的线性系统等效状态进行最优估计<sup>[4]</sup>。

EKF 算法的非线性状态空间方程<sup>[5-6]</sup>为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = f(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k) + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Y}_k = g(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k) + \mathbf{V}_k \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}_k$  为系统状态变量矩阵; $\mathbf{U}_k$  为系统输入变量矩阵; $\mathbf{W}_k$ 、 $\mathbf{V}_k$  分别为过程噪声、观测噪声; $\mathbf{Y}_k$  为系统观测变量矩阵; $k$  为迭代次数, $k=0,1,2,3\cdots$ ;对应的 $f(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k)$ 、 $g(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k)$  分别为非线性系统转移函数和观测函数,其对应的协方差矩阵为:

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_k = E(\mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^T) \\ \mathbf{R}_k = E(\mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^T) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $E$  为期望矩阵函数。用泰勒级数展开非线性函数 $f(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k)$ 、 $g(\mathbf{X}_k, \mathbf{U}_k)$ ,只保留对应参数的一阶项,系统线性状态空间方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{X}_{k-1} + [f(\hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \mathbf{U}_k) - \mathbf{A}_{k-1} \hat{\mathbf{X}}_k] + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{X}_k + [g(\hat{\mathbf{X}}_k, \mathbf{U}_k) - \mathbf{C}_k \hat{\mathbf{X}}_k] + \mathbf{V}_k \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}_k$  为系统状态转移矩阵, $\mathbf{C}_k$  为系统输出矩阵, $\hat{\mathbf{X}}_k$  为最佳估计矩阵。

由式(3)得锂离子电池模型离散化方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1} \mathbf{U}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{D}_k \mathbf{U}_k + \mathbf{V}_k \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{B}_k$  为系统输入矩阵, $\mathbf{D}_k$  为系统前馈矩阵。

### 1.3 SOC 估计模型

基于 EKF 算法的锂离子电池 SOC 估计逻辑图如图 1 所示。初始设定  $k=0$ ,输入当前电池状态对应的电流、测量端电压、极化电容、极化内阻等初始参数,将系统控制信号和测量参数代入程序进行状态预估和信息更新,同时将初值输入协方差矩阵计算当前状态的卡尔曼增益,将卡尔曼增益返回,进行状态预测更新及误差协方差矩阵更新,输出锂离子电池 SOC 估计值  $Q_{\text{soc}}$ ,  $Q_{\text{soc}}$  返回初值设定更新下一时刻的电池参数,重复以上

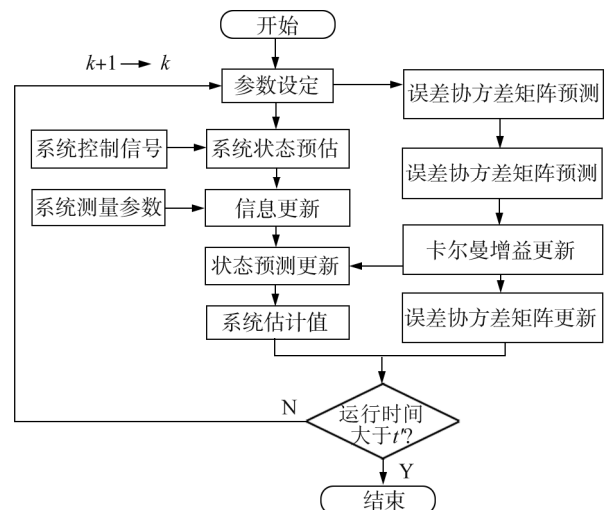


图 1 SOC 估计逻辑图

循环,直至运行时间大于设定时间 $t'$ 。通过 $k$ 的不断迭代, $Q_{\text{soc}}$ 逐渐收敛于SOC真实状态<sup>[7-8]</sup>。

## 2 锂离子电池等效电路模型

### 2.1 锂离子电池二阶 RC 电路模型

在系统设计初期建立精确的电池模型,可减少估算模型的计算冗余及运行中出现的问题。以锂离子电池为例,建立 RC 电路模型进行估算。

结合文献[9]分析电路模型,随电阻电容的阶数增加,模型输出精度提高,运算速度降低。通过对比二阶、三阶及以上的等效电路的输出精度,发现二阶等效电路模型可精确模拟电池动态特性,且计算量适中,三阶及以上电路模型输出精度提高不明显<sup>[10-12]</sup>。

二阶等效电路模型锂离子电池充放电电流<sup>[13]</sup>

$$I = U_1/R_1 + C_1 dU_1/dt = U_2/R_2 + C_2 dU_2/dt, \quad (5)$$

式中: $U_1$ 、 $U_2$ 为 RC 电路中的电压, $C_1$ 和 $C_2$ 为极化电容, $R_1$ 和 $R_2$ 为极化内阻, $t$ 为运行时间。

二阶等效电路模型锂离子电池端电压

$$U_L = U_{oc} - IR_0 - U_1 - U_2, \quad (6)$$

式中: $U_{oc}$ 为开路电压; $R_0$ 为电池内阻,表示锂离子电池在充放电时产生的欧姆损耗。

二阶 RC 电路如图 2 所示。由图 2 可知:电阻 $R_1$ 与电容 $C_1$ 组成的并联回路表征锂离子电池的电化学极化现象,电阻 $R_2$ 与电容 $C_2$ 组成的并联回路表征锂离子电池的浓度差极化现象。

将式(5)在迭代次数为 $k$ 时进行离散化,得到:

$$\begin{cases} U_1(k) = \left(1 - \frac{t}{\tau_1}\right) U_1(k-1) - \frac{t}{C_1} I(k-1) \\ U_2(k) = \left(1 - \frac{t}{\tau_2}\right) U_2(k-1) - \frac{t}{C_2} I(k-1) \\ U_L(k) = U_{oc}(k) - U_1(k) - U_2(k) - R_0 I(k) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 为 RC 网络时间常数。

### 2.2 SOC 估计算法 EKF 仿真分析

本文中锂离子电池容量 $C_n = 20.160 \text{ A} \cdot \text{h}$ , $R_0 = 0.0123 \Omega$ , $R_1 = 0.0106 \Omega$ , $R_2 = 0.0180 \Omega$ , $C_1 = 6 \text{ F}$ , $C_2 = 8 \text{ F}$ ,采用 MATLAB 仿真分析不同工况下 $Q_{\text{soc}}$ ,并与安时积分法进行拟合及计算误差(EKF 算法估算 $Q_{\text{soc}}$ 与安时积分法估算 $Q_{\text{soc}}$ 的差)对比分析。

#### 2.2.1 DST 工况的 $Q_{\text{soc}}$ 及误差

DST 工况指电气设备正常运行时,测试设备所需的稳定电流,用于计算动力电池正常运行时的 $Q_{\text{soc}}$ 。DST 工况下,安时积分法及 EKF 算法对应的 $Q_{\text{soc}}$ 及误差曲线如图 3 所示。

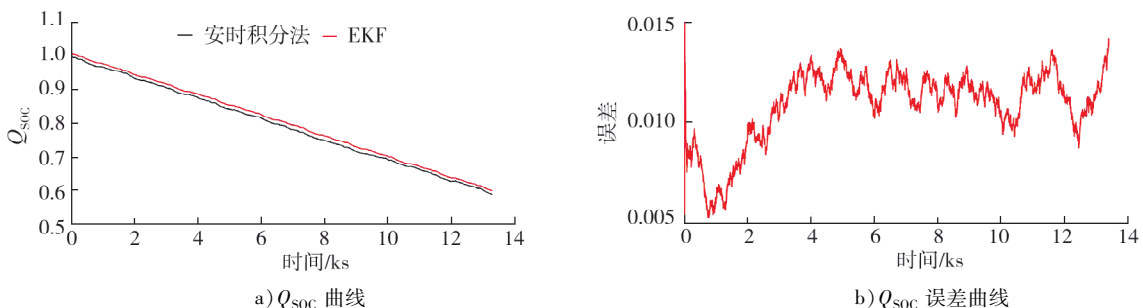
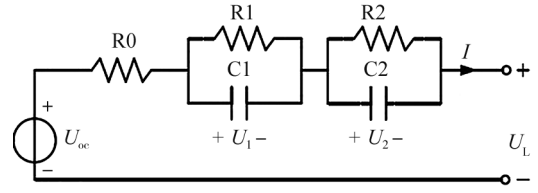


图 3 DST 工况安时积分法及 EKF 算法对应的 $Q_{\text{soc}}$ 及误差曲线



注:图中所示箭头方向为放电电流,反方向为充电电流。

图 2 二阶 RC 电路图

由图 3 可知:DST 工况下,安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  曲线趋势大致拟合,且无较大变动;最大误差为 0.015,估算稳定。

### 2.2.2 UDSS 工况的 $Q_{soc}$ 及误差

UDSS 工况是电动汽车电池测试中常用工况之一,结合电压、电流、温度、时间等参数评估电池在路况复杂、整车制动频繁下的性能和寿命<sup>[14]</sup>。UDSS 工况下,安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  及误差曲线如图 4 所示。由图 4 可知:UDSS 工况下,安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  曲线趋势几乎一致; $t=0$  时误差极小,持续运行后误差控制在 0.010 内, $Q_{soc}$  精度较高。

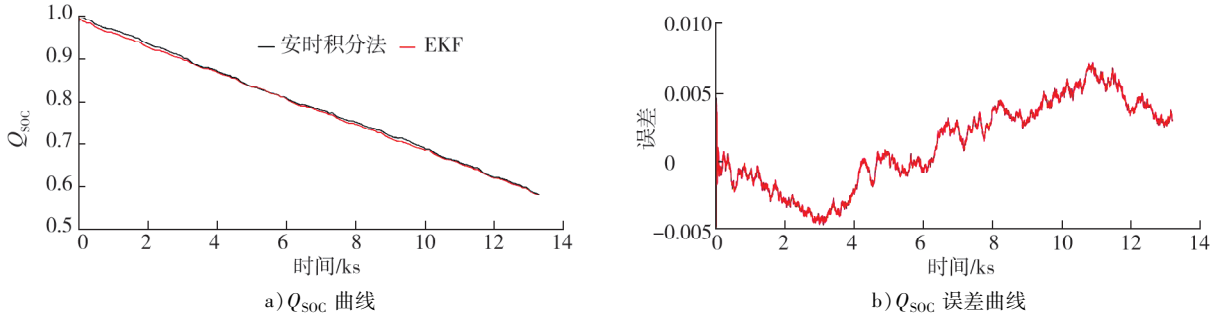


图 4 UDSS 工况安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  及误差曲线

### 2.2.3 HPPC 工况的 $Q_{soc}$ 及误差

HPPC 工况是动力电池脉冲充放电时的一种特征工况<sup>[15]</sup>,采用专用电池检测设备确定电池包在电流脉冲工况中的动态功率。HPPC 工况下,安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  及误差曲线如图 5 所示。

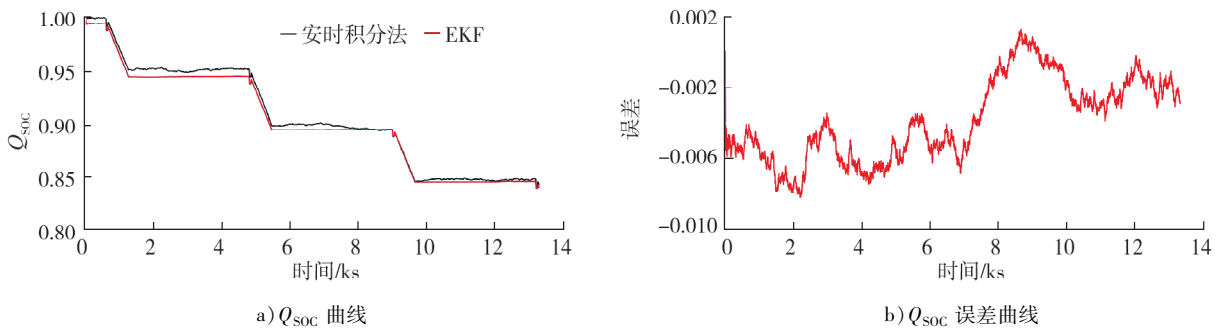


图 5 HPPC 工况安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  及误差曲线

由图 5 可知:HPPC 工况下,安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  曲线在前 8 000 s 产生部分误差,但随着时间的增加逐渐拟合;误差不超过 0.010,误差整体波动较低。

### 2.2.4 脉冲工况的 $Q_{soc}$ 及误差

脉冲工况指周期性的给电池一种类似脉搏的短暂起伏的电流信号<sup>[16-18]</sup>,脉冲工况下,安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  及误差曲线如图 6 所示。

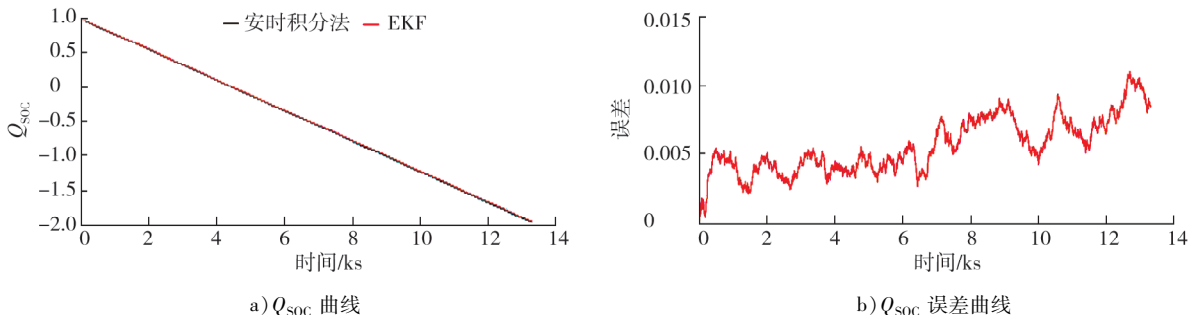


图 6 脉冲工况安时积分法及 EKF 算法对应的  $Q_{soc}$  及误差曲线

由图6可知:脉冲工况下,安时积分法及EKF算法对应的 $Q_{SOC}$ 曲线精度较高;误差基本保持在0.010以下,估算精度较高。

### 2.3 数据误差分析

4种工况 $Q_{SOC}$ 误差分析如表1所示。由表1可知:采用EKF计算 $Q_{SOC}$ 时,DST工况下出现最大误差为0.015,其余工况均不超过0.010,4种工况均方差均在0.0032以内。采用EKF方法的有效性 with 精确性较高,误差分布更稳定,曲线更可靠,应用范围更广。

表1 4种工况下 $Q_{SOC}$ 误差分析

| 工况类别 | 估算误差区间       | 均方差    |
|------|--------------|--------|
| DST  | 0.005~0.015  | 0.0032 |
| UDDS | -0.005~0.008 | 0.0019 |
| HPPC | -0.009~0.001 | 0.0017 |
| 脉冲   | 0~0.010      | 0.0028 |

## 3 结论

1)采用扩展卡尔曼滤波算法可在各种复杂工况下估算动力电池SOC,且算法模型稳定、可靠,准确度高,能准确判断电池性能及寿命,广泛应用于动力电池管理系统。

2)随电阻电容的阶数增加,模型输出精度提高,运算速度降低,但对比二阶等效电路模型,三阶及以上电路模型输出精度提高不明显。

3)安时积分法鲁棒性不强,并且存在误差累计;EKF算法鲁棒性较强,具有稳定性高、抗扰动能力强等优势,但算法比较复杂。

### 参考文献:

- [1] 韦仲爽,侯巍,赵彦,等.基于扩展卡尔曼滤波算法的磷酸铁锂电池荷电状态估计[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),2023,62(5):92-100.
- [2] 赵秀亮,赵明明,杨政宇,等.HPPC参数辨识时间域对电池模型精度影响的研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(2):1-11.
- [3] 彭丁聪.卡尔曼滤波的基本原理及应用[J].软件导刊,2009,8(11):32-34.
- [4] 罗乐乐.基于迭代扩展卡尔曼滤波的锂离子电池SOC估算[J].蓄电池,2023,60(2):72-76.
- [5] 雷克兵,陈自强.基于改进多新息扩展卡尔曼滤波的电池SOC估计[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(10):1978-1985.
- [6] 张吉星.纯电动汽车动力锂离子电池SOC估计算法研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [7] 李畅.电动汽车动力电池建模与SOC估计研究[D].西安:西安工业大学,2024.
- [8] LIU Yongjie, HUANG Zhiwu, WU Yue, et al. An online hybrid estimation method for core temperature of Lithium-ion battery with model noise compensation[J]. Applied Energy, 2022, 327(1): 1-13.
- [9] 曲智伟,孙化阳,竺玉强,等.基于气液动力学电池模型和CKF算法的SOC估测[J].电源技术,2022,46(12):1412-1416.
- [10] 吕丹亚.基于卡尔曼滤波的新能源汽车动力锂离子电池SOC估算方法[J].绵阳师范学院学报,2023,42(5):25-32.
- [11] 王玉让.锂离子电池模型参数辨识与荷电状态估计方法研究[D].长春:吉林大学,2023.
- [12] 谭必蓉,杜建华,叶祥虎,等.基于模型的锂离子电池SOC估计方法综述[J].储能科学与技术,2023,12(6):1995-2010.
- [13] 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.
- [14] 吴冠文.基于自适应卡尔曼滤波的锂电池SOC估计[D].重庆:重庆理工大学,2023.
- [15] 丁镇涛,邓涛,李志飞,等.基于安时积分和无迹卡尔曼滤波的锂离子电池SOC估算方法研究[J].中国机械工程,2020,31(15):1823-1830.
- [16] 高洁,张军.脉冲输入工况下的汽车平顺性影响因素分析[J].大连交通大学学报,2021,42(2):50-54.
- [17] 徐立友,马可,杨晴霞,等.基于卡尔曼滤波的动力电池SOC估算[J].江苏大学学报(自然科学版),2024,45(1):24-29.

(下转第104页)