

一种锂电池在线荷电状态估计算法

李文番¹, 杨骥², 马海峰¹, 王垚雄¹, 王军雄¹

(1. 西北机电工程研究所, 712000, 陕西咸阳; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对三元锂电池的在线荷电状态估计问题,提出了一种基于开路电压在线计算和查表法的锂电池在线荷电状态估计算法。首先,对锂电池进行一阶戴维南等效建模,通过等效电路模型,推导并化简得到端口电压、端口电流和开路电压之间的关系;然后,利用递归最小二乘法完成了开路电压的在线求解,通过锂电池工作中的端口电压、电流参数实现了开路电压近似值的实时计算;最后,介绍了所提出在线荷电状态估算算法的实现流程,并通过典型数据集对所提出算法的估计精度、运算量等性能进行了对比分析和实验验证。实验结果表明:所提出的在线荷电状态估计算法的估算误差低于15%,运算速度是改进卡尔曼滤波法的2.5倍,表明所提在线荷电状态估计算法精度较高且运算速度较快,适合用于在线荷电状态估算。

关键词: 锂电池;等效电路模型;开路电压计算;在线荷电状态估计;低运算量;参数估计

中图分类号: TM93 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202409016 **文章编号:** 0253-987X(2024)09-0164-09

An Online State of Charge Estimation Algorithm for Lithium Batteries

LI Wenfan¹, YANG Kun², MA Haifeng¹, WANG Yaoxiong¹, WANG Junxiong¹

(1. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang, Shaanxi 712000, China;

2. School of Electrical engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An online state of charge estimation algorithm for ternary lithium batteries is proposed based on online calculation of open circuit voltage and table lookup method. Firstly, the first-order Thevenin equivalent model is applied to the lithium battery, and the relationship between port voltage, port current, and open circuit voltage is derived through the equivalent circuit model. Then, the recursive least squares method is used to solve the open circuit voltage online, and real-time calculation of the approximate open circuit voltage is achieved through the port voltage and current parameters during the operation of the lithium battery. Finally, the implementation process of the proposed online state of charge estimation algorithm is introduced, and the estimation accuracy, computational complexity, and other performance of the proposed algorithm are compared, analyzed, and experimentally verified using typical datasets. The experimental results show that the estimation error of the proposed online state of charge estimation algorithm is less than 15%, and the computational speed is 2.5 times that of the extended Kalman filter method. This indicates that the proposed online state of charge estimation

algorithm has high accuracy and low computational complexity, which make it suitable for online state of charge estimation.

Keywords: lithium battery; equivalent circuit model; open circuit voltage calculation; online state of charge estimation; low computational burden; parameter estimation

三元锂离子电池具有储能密度高、功率密度大、自放电率低、使用寿命长等特点^[1-3],近年来在电动汽车、电网等储能系统中取得了广泛应用^[4-5]。荷电状态是电池剩余电量的直接评估指标,是电池管理系统中的关键参数,对锂电池的均衡控制、充放电控制、效率管理和安全运行等有至关重要的作用^[6-9]。

类似于汽车的油表,荷电状态无法直接测量得到,必须采用相关手段进行估算。根据相关文献报道,目前主要的荷电状态估计算法包括数据驱动算法^[10-12]、直接算法^[8,13-15]和模型算法^[16-22]。基于数据驱动的荷电状态估计算法需要大量实验数据对算法进行训练,不仅估计结果取决于实验数据的数量和质量,且运算量较大,因此目前尚未在工业中广泛应用。

直接算法通过数学或者算法对荷电状态进行直接求解,其中安时积分法是主要的荷电状态直接算法之一。安时积分法通过对电流的累计计数实现剩余电量的估计,表达式如下

$$S_t = S_0 - \int_{t_0}^t \frac{i(\tau)}{C_t} d\tau, 0 \leq S_t \leq 1 \quad (1)$$

式中: S_t 为荷电状态在 t 时刻的值; S_0 为荷电状态初值; C_t 为电池的容量; i 为电池端电流; τ 为时间积分变量。 S_t 为 0 表示电池电量全部释放完,剩余电量为 0; S_t 为 1 表示电池为满电状态,剩余电量为 100%。安时积分法原理简单,运算量小,仅通过式(1)就可实现荷电状态的在线估算,是传统广泛应用的荷电状态估计算法之一。但该算法的计算结果受初始值影响,初始误差无法消除,且电流传感、采样和数据计算等不可避免地存在一定误差,导致计算结果会有累积误差。虽然学者针对该算法进行了大量的改进和研究,但初始误差和累积误差始终是限制安时积分法估计精度的两大难题。

三元锂电池的荷电状态 S 与开路电压 V 之间存在较为稳定的数学关系式,因此开路电压也可以用于荷电状态的估算^[23-26]。首先,通过实验标定出荷电状态-开路电压表达式(记为 $S-V$);然后,测量并记录电池的开路电压;最后,通过查表或 $S-V$ 表达式计算出对应的荷电状态值。然而,电池的开路电压并不等于端口电压,无法直接在输出端测量,必

须在电池停止使用并静置数小时之后,才可以用端口电压测量值来近似开路电压,因此开路电压法多用于离线荷电状态估计应用场合。

基于模型的荷电状态估计算法研究和应用较多,主要模型包括电化学模型^[5,16,27-28]、等效电路模型(ECM)^[9,18,29-31]等。电化学模型根据电池内部的化学反应过程进行建模,计算结果比较精确,但电化学模型包含复杂的数学方程,求解运算量很大,难以应用到在线荷电状态估计领域。等效电路模型在建模复杂度和荷电状态估计精度方面做了权衡,结合改进卡尔曼滤波(EKF)等相关算法,实现了较为精确的荷电状态在线估计,但 EKF 法的运算量仍然较大,对处理器的性能要求较高。

本文提出一种开路电压在线求解的方法,对荷电状态在线估计问题进行研究,并结合 $S-V$ 曲线,通过查表法实现荷电状态值的在线求解。

1 基于等效电路模型的在线开路电压计算

通常情况下,开路电压测量需要在电池停止工作的状态下进行,而且通常需要将电池静置数小时后测量才能得到较为精确的开路电压,因此无法借助 $S-V$ 曲线通过查表法实现在线荷电状态计算。本文介绍一种基于 ECM 的开路电压在线算法,通过电池工作时的端电压、端电流数据即可实现开路电压的在线求解,进而可以利用 $S-V$ 曲线,借助查表法实现在线荷电状态求解。该方法实现过程简单,运算量小,可以基于数字信号处理器实现在线荷电状态计算。

1.1 开路电压与电池端电压、端电流的数学关系

采用一阶 ECM 对锂电池进行建模等效,其等效电路如图 1 所示。 u_{ocv} 用于表征锂离子电池的开路电压, R_1 用于表征锂电池的欧姆内阻, R_2 、 C_2 分别为锂离子电池的极化电阻和极化电容, u 、 i 分别为电池工作时的端电压和端电流。 u_{ocv} 、欧姆内阻、极化电阻、极化电容均为与电池荷电状态、温度 T 、充放电次数 k 等相关的时变量。

根据基尔霍夫电压定律、基尔霍夫电流定律,可以得到 ECM 的基本方程如下

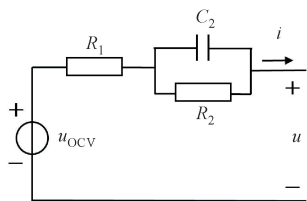


图1 锂电池一阶等效电路模型

Fig. 1 First-order equivalent circuit model for lithium batteries

$$\begin{cases} u(t) = u_{OCV}(t) - i(t)R_1(t) - u_C(t) \\ i(t) = C_2(t)\dot{u}_C(t) + u_C(t)/R_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_C(t)$ 、 $u_{OCV}(t)$ 分别为 t 时刻的极化电容电压、电池开路电压。

方程中包含的未知参数有: $u_{OCV}(t)$ 、 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $C_2(t)$ 、 $u_C(t)$ 。其中, $u_C(t)$ 可以通过其他参数表示, 并非独立变量, 因此可以将其消去。对式(2)两端求导, 有

$$\dot{u}(t) = \dot{u}_{OCV}(t) - \dot{i}(t)R_1(t) - i(t)\dot{R}_1(t) - \dot{u}_C(t) \quad (3)$$

因为 u_{OCV} 、 $R_1(t)$ 、 $u_C(t)$ 随着电池的荷电状态 S 、温度 T 、充放电次数 k 的变化而变化, 所以 $\dot{u}_{OCV}(t)$ 可以表示为 S 、 T 、 k 的偏导数形式

$$\dot{u}_{OCV}(t) = \left[\frac{\partial u_{OCV}(t)}{\partial S} \quad \frac{\partial u_{OCV}(t)}{\partial T} \quad \frac{\partial u_{OCV}(t)}{\partial k} \right] \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial t} \\ \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial k}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

同理, 可将欧姆内阻 $\dot{R}_1(t)$ 表示为偏导数的形式

$$\dot{R}_1(t) = \left[\frac{\partial R_1(t)}{\partial S} \quad \frac{\partial R_1(t)}{\partial T} \quad \frac{\partial R_1(t)}{\partial k} \right] \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial t} \\ \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial k}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设电池进行 1 C 放电工作, 荷电状态从 1 减小到 0 的理论时间为 3 600 s, $\partial S/\partial t \approx 3 \times 10^{-4}$, 大倍率电池的放电倍率通常也只能达到 10 C 左右, 因此可近似认为荷电状态的时间导数为 0。一方面, 电池对温度 T 较为敏感, 因此电池管理系统会对电池温度进行严格的监控, 确保其工作在正常温度范围内; 另一方面, 正常工作时, 电池的温度变化非常缓慢, 因此 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 的值可以近似为 0。充放电一次的时间

包括充电时间和放电时间。假设电池以 1 C 放电、1 C 充电, 则 $\partial k/\partial t \approx 1.4 \times 10^{-4}$, 可近似认为等于 0。综上所述, 式(4)可以简化为

$$\dot{u}(t) \approx -\dot{i}(t)R_1(t) - \dot{u}_C(t) \quad (6)$$

由式(2)~(4)消去 $u_C(t)$ 、 $\dot{u}_C(t)$ 可得

$$\dot{u}(t) \approx -R_1(t)\dot{i}(t) - \frac{R_2(t) + R_1(t)}{R_2(t)C_2(t)}i(t) - \frac{1}{R_2(t)C_2(t)}u(t) + \frac{u_{OCV}(t)}{R_2(t)C_2(t)} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, $u_{OCV}(t)$ 可以通过电池端电压、端电流以及等效电路参数计算得到。端电压、端电流在电池工作时可以直接测得, 因此前面介绍的开路电压在线求解问题可以转化为等效电路参数在线辨识问题。

1.2 开路电压在线计算

为了便于推导, 将式(7)中的系数用 a_i ($i=1, 2, 3, 4$) 表示, 表达式为

$$\begin{cases} a_1 = -R_1(t) \\ a_2 = -\frac{R_2(t) + R_1(t)}{R_2(t)C_2(t)} \\ a_3 = -\frac{1}{R_2(t)C_2(t)} \\ a_4 = \frac{u_{OCV}(t)}{R_2(t)C_2(t)} \end{cases} \quad (8)$$

则式(7)可以改写为

$$\dot{u}(t) \approx a_1\dot{i}(t) + a_2i(t) + a_3u(t) + a_4 \quad (9)$$

式(9)为时间连续域中的表达形式, 在开路电压计算中, 需要对其进行离散化处理。设采样周期为 T_s , 令 $\dot{x}(t) = (x_{n+1} - x_n)/T_s$, $x(t) = x_n$, x 可取 u 或 i , 则可将式(9)整理为如下的离散化形式

$$u_{n+1} = b_1i_{n+1} + b_2i_n + b_3u_n + b_4T_s \quad (10)$$

式中: $b_1 = a_1$; $b_2 = a_2T_s - a_1$; $b_3 = a_3T_s + 1$; $b_4 = a_4$ 。

观察式(10)发现, 该式中的各个参数可以通过经典的递归最小二乘法进行求解。首先利用电池端电压、端电流的在线监测数据求出 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 , 进而间接求得 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 , 最后求得 $u_{OCV}(t)$ 的值为 $u_{OCV}(t) = -a_4/a_3$, $u_{OCV}(t)$ 即为在线求解得到的开路电压。需要说明的是, 若有其他计算需要, $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $C_2(t)$ 也可同时求得。

必须指出, 虽然本文提出的方法能够实现开路电压的在线计算, 但该方法也有一定的局限性。式(9)包含电池输出端口电压和端口电流的导数 $\dot{u}(t)$ 、 $\dot{i}(t)$, 因此, 当输出电流为恒定值或者变换非常缓慢时, $\dot{i}(t)$ 近似为 0, 此时式(9)可以简化为

$$\dot{u}(t) \approx a_2i(t) + a_3u(t) + a_4 \quad (11)$$

式(11)只有 3 个待求参数,即 a_2 、 a_3 、 a_4 ,而锂电池的等效电路模型包含 $u_{OCV}(t)$ 、 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $C_2(t)$ 共 4 个待求参数,式(8)中待求参数数量大于方程数量,无法对电池等效电路模型的参数进行求解,因此这种情况下该算法将不再适用。此外,连续系统的离散化处理涉及采样频率、测量噪声等因素,也可能引起相应的分析误差。在将式(9)离散化的过程中,涉及采样频率 f_s ,当采样频率过低时,会由于采样周期太大而引入分析误差。采样频率越高,离散化系统越能够真实地反映原时域系统的特性。通常,在锂电池状态监测中采用的采样频率不低于 1 Hz,以确保离散化处理时的计算精度。在一些测量环境比较恶劣的工况下,较大的测量噪声也会引入一定的分析误差。针对这种情况,可以结合具体应用情况进行噪声分析,在数据输入端加入适当的滤波处理,以提高分析精度。

2 在线荷电状态计算

本文提出的基于开路电压实时估算的在线荷电状态估计算法的关键在于获取准确的开路电压,在线得到开路电压之后,利用锂电池开路电压与剩余电量荷电状态之间的非线性对应关系,通过查表法就可以得到荷电状态。

本文所提出的基于开路电压实时估算的在线荷电状态估计算法主要包括离线标定和在线计算两部分。当环境温度不同时,电池的 S - V 曲线不同,因此,实际中需要以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为步长,对工作环境温度区间内的参数进行标定。本文以室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例对所提出的方法进行介绍。

首先,需要离线标定 S - V 曲线,具体流程如图 2 所示。对锂电池而言,充电、放电过程对应的 S - V 曲线不完全相同,因此,为了提高荷电状态估算精度,需要分别对充放电过程的 S - V 曲线进行实验标定。混合脉冲功率特性(HPPC)实验是常用的电池测试方法,通过 HPPC 实验数据可以得到一系列荷电状态及其对应的开路电压,然后结合曲线拟合的数学手段,可以得到 S - V 曲线表达式,进而可以得到充放电过程中的 S - V 数据表。实际工程应用中,可以将 S - V 数据表存储在 FLASH 中,供在线荷电状态估计算法查表使用。

锂电池在线工作时的荷电状态估计流程如图 3 所示,图中 I_{th} 表示系统启动阈值电流。工作中以 T_s 为采样周期,对电池输出电压、电流数据进行采集,并根据采集的电流数据判定电池是否处于充电/

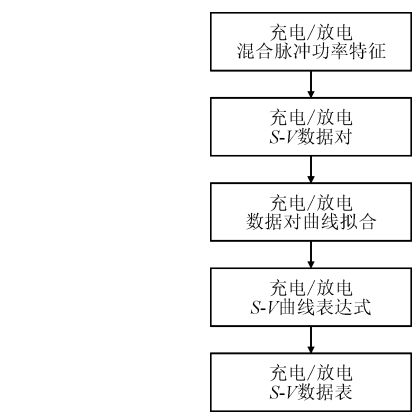


图 2 锂电池 S - V 数据表离线标定流程

Fig. 2 Offline calibration process for S - V data table of lithium battery

放电状态。当检测到电池端电流大于设定阈值时,表示电池处于工作状态,通过前面介绍的在线开路电压求解方法可计算得到实时开路电压参数。当端电流流出电池时,表示电池处于放电状态,根据离线标定得到的放电曲线查表得到对应的荷电状态;当端电流流入电池时,表示电池处于充电状态,根据离线标定得到的充电曲线查表得到对应的荷电状态。通过上述流程,即可在线得到开路电压和对应的荷电状态,实现电池剩余电量的在线估计。

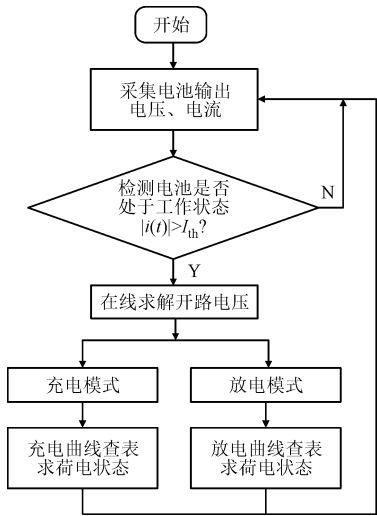


图 3 在线荷电状态估计流程

Fig. 3 Online state of charge estimation process

各部分相应的实现流程详述如下。

(1)离线标定。①在不同环境温度下,测试电池充放电过程的 S - V 曲线数据;②通过数据拟合方法得到电池充放电过程的 S - V 表达式;③根据曲线表达式,将荷电状态、开路电压数据对保存至 FLASH,供在线查表使用。

(2)在线计算。①对电池端电压、端电流进行周期采样,采样周期通常设置为1 s;②判断电池是否处于充放电状态:如果端电流远小于工作电流,表明电池未工作,跳至①;如果端电流大于设定阈值,表明电池进入工作状态,跳至③;③通过采样数据计算开路电压;④根据电池充放电状态,选择充放电S-V数据表,查表得到对应的荷电状态,跳至①。

电池管理系统必须时刻对电池电压、电流进行监测,当检测到电池进入充放电状态时,启动荷电状态在线计算算法;当检测到电池停止工作时,停止荷电状态在线计算算法。

3 实验验证

以电动汽车电池测试中常用的室温条件下城市道路循环(UDDS)工况、混合脉冲工况为例,对所提出的在线荷电状态估计算法进行实验验证。实验数据来源于麦克马斯特大学开源数据集,电池型号为LG HG2 18650,额定电压为3.7 V,额定容量为3 A·h。数据集包含整个充放电过程中荷电状态实际值,可以用于算法估计结果的评估分析。

在进行在线荷电状态估计之前,根据离线标定流程得到锂电池放电过程的S-V曲线表达式,以0.01荷电状态为步长对荷电状态进行取样,并计算相应的开路电压,并将开路电压与荷电状态数据对保存至存储器,以便进行在线荷电状态估算时查表使用。

3.1 城市道路循环工况

通常情况下,电池荷电状态控制在0.9~0.1的范围内,下面针对该电池荷电状态从0.9下降至0.1的过程进行在线荷电状态估算。电池端电压、端电流的采集频率为10 Hz,采集到的电压和电流波形如图4所示。

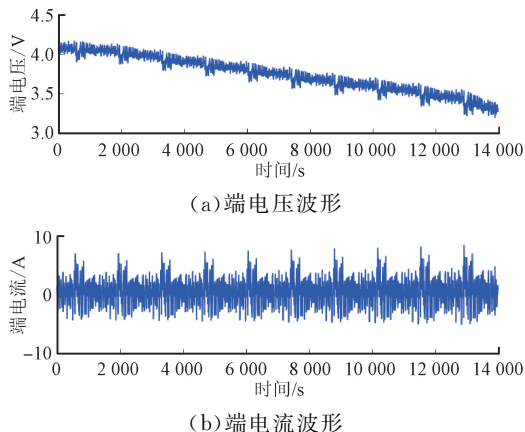


图4 城市道路循环工况端电压、端电流波形

Fig. 4 Waveforms of terminal voltage and current under urban dynamometer driving schedule condition

从图4可以看出,在UDDS工况下,电池端电压随着放电时间的增加不断降低。定义电流流出电池为负方向,放电过程中的电流有正有负,但总趋势以流出电池的放电状态为主。采用本文所提出的在线开路电压计算方法,利用端电压、端电流参数对实时开路电压参数进行在线计算。为了对开路电压计算精度进行分析,利用S-V曲线得到了放电过程中开路电压的理论值。计算值与理论值的对比结果及误差定量分析如图5所示。

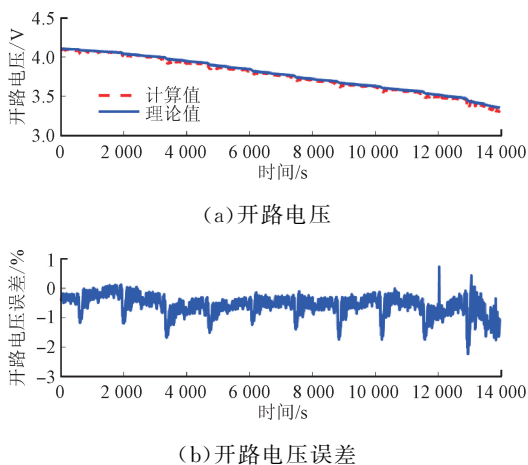
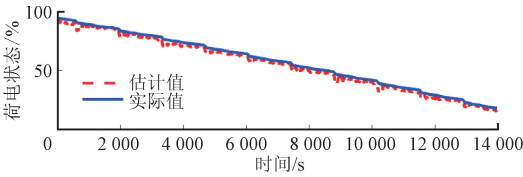


图5 开路电压理论值与计算值对比及误差定量分析
Fig. 5 Comparison between theoretical and calculated values of open circuit voltage and quantitative analysis of errors

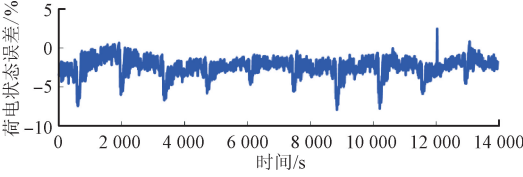
图5(a)中,红色点划线表示根据本文所提算法实时计算得到的开路电压,蓝色实线表示根据实验荷电状态数据和S-V之间的关系得到的开路电压理论值;图5(b)为针对开路电压实时计算值进行的误差定量分析。可以看出,通过本文所提算法计算得到的开路电压与通过S-V曲线得到的开路电压理论基本吻合,估计误差低于2.5%,说明所提出的基于电池端电压、端电流的在线开路电压计算方法效果良好。

在线计算得到开路电压之后,通过查表法即可得到实时荷电状态估计值。荷电状态估计值与实际值的对比及误差定量分析如图6。

图6(a)中,红色点划线表示根据本文算法得到的实时荷电状态估计值,蓝色实线表示UDDS实验得到的荷电状态实际值;图6(b)为针对本文荷电状态在线估计算法进行的误差定量分析。从波形可以看出,在电池放电实验中,荷电状态逐渐降低,整个过程中,利用本文所提出方法估计得到的荷电状态与实际值基本一致,其误差低于8%。



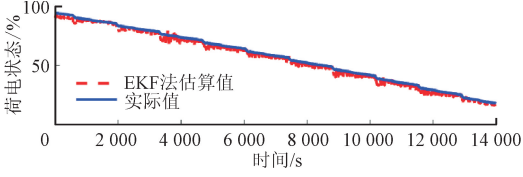
(a) 荷电状态估计结果



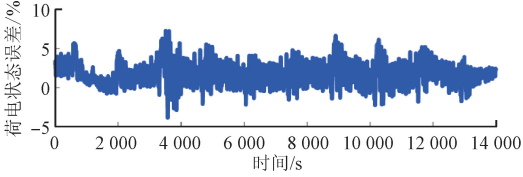
(b) 荷电状态估计误差

图 6 荷电状态估计值与实际值对比及误差定量分析
Fig. 6 Comparison between theoretical and estimated values of state of charge and quantitative analysis of errors

为了进一步对本文所提出荷电状态在线估计算法进行评估,采用 EKF 法对同样的数据进行分析,得到的荷电状态及其误差如图 7 所示。



(a) 荷电状态估计结果



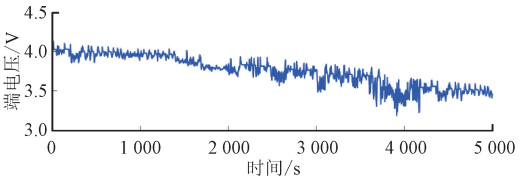
(b) 荷电状态估计误差

图 7 EKF 法得到的荷电状态在线估计结果及误差
Fig. 7 Results and errors of online state of charge estimation based on extended Kalman filter method

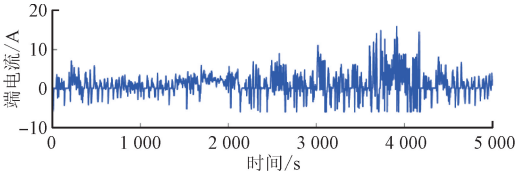
图 7(a)中,红色点划线表示根据 EKF 法得到的实时荷电状态估算值,蓝色实线表示 UDDS 实验得到的荷电状态实际值;图 7(b)为针对 EKF 法进行的荷电状态估计误差定量分析。可以看出,EKF 法得到的荷电状态估计值误差低于 8%,与本文所提出的方法相近。

3.2 混合脉冲工况

采用数据集中混合充放电工况下的数据对在线荷电状态估计算法进行性能验证,验证流程与 UDDS 工况类似。混合充放电工况下,电池端电压、端电流的采集频率为 10 Hz,采集到的电压和电流波形如图 8 所示。



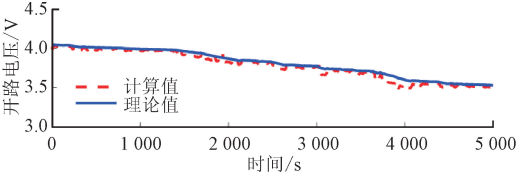
(a) 端电压波形



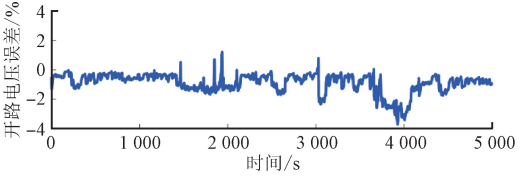
(b) 端电流波形

图 8 混合脉冲工况下的端电压和端电流波形
Fig. 8 Waveforms of terminal voltage and current under mixed pulse condition

图 8(a)为端口电压波形,图 8(b)为端口电流波形。在混合脉冲工况下,电流时正时负,但电池端电压逐渐波动减小,整个过程以放电为主。通过所提出的在线开路电压计算方法,根据端口电压、电流进行开路电压在线估计,并分析其估计误差,结果如图 9 所示。



(a) 开路电压



(b) 开路电压误差

图 9 开路电压估计结果及误差
Fig. 9 Estimation results and errors of open circuit voltage

图 9(a)中,红色点划线表示估计得到的开路电压,蓝色实线表示根据实验荷电状态数据和 S-V 曲线得到的开路电压理论值;图 9(b)是开路电压实时估计误差。可以看出,通过本文所提算法计算得到的开路电压与通过 S-V 曲线得到的开路电压理论值基本吻合,估计误差低于 4%,说明本文提出的基于电池端电压、端电流的在线开路电压计算方法效果良好。

在线估计出开路电压之后,通过查表法得到实时荷电状态估计值,如图 10 所示。

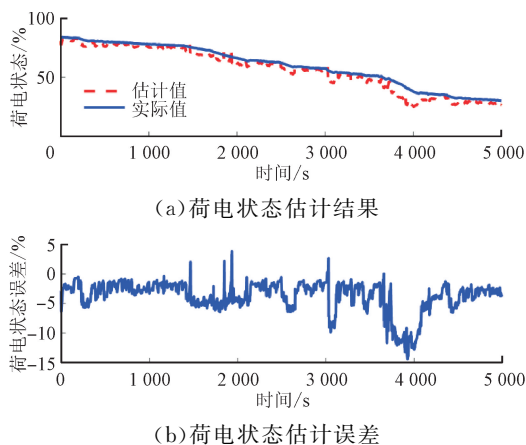


图 10 混合脉冲工况下荷电状态估计值与实际值对比

Fig. 10 Comparison between theoretical and estimated values of state of charge and quantitative analysis of errors under mixed pulse condition

图 10(a)中,红色点划线表示本文算法得到的荷电状态估算值,蓝色实线表示荷电状态实际值;图 10(b)为对本文荷电状态估计算法的误差。从波形可以看出,在电池放电实验中,荷电状态值渐降低,整个过程中,本文算法估计得到的荷电状态与实际值基本一致,其误差低于 15%。

同理,为了进一步对本文所提出的荷电状态在线估计算法进行评估,采用 EKF 法对同样的数据进行了分析,得到的荷电状态及其误差如图 11 所示。

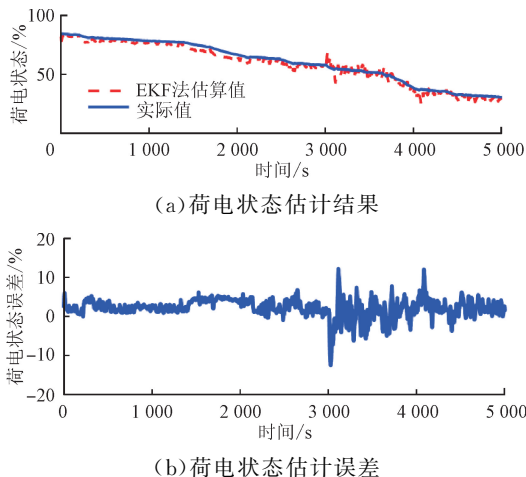


图 11 混合脉冲工况下 EKF 法荷电状态估计值与实际值对比

Fig. 11 Comparison between the estimated and actual values of the state of charge using the EKF method and quantitative analysis of errors under mixed pulse condition

图 11(a)中,红色点划线表示根据 EKF 法得到的实时荷电状态估计值,蓝色实线表示 UDDS 实验

得到的荷电状态实际值;图 11(b)为 EKF 法进行荷电状态估计的误差。可以看出,EKF 法得到的荷电状态估计值误差在 15%以内,与本文所提出的在线荷电状态估计算法相近。

为了充分验证本文算法的有效性,针对其他多种工况也进行了相应的验证实验,限于篇幅原因,这里不再介绍。必须指出的是,本文算法不适用于恒流及电流变化速率很低的工况,否则会引入很大的误差。在电流变化速率较低的工况下,可考虑与安时积分法结合使用,以实现较高的估计精度。

3.3 运算速度对比

为了分析本文所提算法的运算速度,采用本文算法和 EKF 法分别对 15 000 组端电压、端电流采集数据进行分析,并计算两种算法对每组数据的处理时间。这相当于用两种算法进行 15 000 次数据处理,分析其每次数据处理的平均时间。采用的计算机处理器参数为 Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80 GHz 2.80 GHz。结果显示,本文所提算法对每组数据的平均处理时间约为 15.5 μ s, EKF 法对每组数据的平均处理时间约为 39 μ s,约为本文算法的 2.5 倍,说明本文所提出的在线荷电状态估计算法的运算速度较 EKF 法快 2.5 倍,具有运算速度快的特点。

4 结 论

本文针对三元锂电池的荷电状态估计问题进行了相关研究,对三元锂电池工作时端口电压、端口电流与开路电压开路电压之间的数学表达式进行了推导,并通过最小二乘法实现了开路电压的在线实时计算;结合锂电池固有的荷电状态-开路电压特性曲线,利用在线开路电压计算和查表法实现了荷电状态在线估计;对所提出荷电状态估计算法的实现流程进行了详细介绍,并通过典型实验数据对所提出荷电状态估计算法进行了实验验证;采用 EKF 法对所提出的算法进行了性能、运算速度的对比分析。结果表明:所提出的在线荷电状态估计算法能够实现较为精确的荷电状态在线估计,且运算速度较快。必须指出的是,该算法不适用于恒流或电流变换非常缓慢的工况,否则会引入较大的分析误差。

参考文献:

- [1] DENG Zhongwei, HU Xiaosong, LIN Xianke, et al. Data-driven state of charge estimation for lithium-ion

- battery packs based on Gaussian process regression [J]. *Energy*, 2020, 205: 118000.
- [2] HUANG Zexin, BEST M, KNOWLES J, et al. Adaptive piecewise equivalent circuit model with SOC/SOH estimation based on extended Kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023, 38(2): 959-970.
- [3] FARMANN A, WAAG W, MARONGIU A, et al. Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 281: 114-130.
- [4] VENNAM G, SAHOO A. A dynamic SOH-coupled lithium-ion cell model for state and parameter estimation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023, 38(2): 1186-1196.
- [5] LIU Yuntian, MA Rui, PANG Shengzhao, et al. A nonlinear observer SOC estimation method based on electrochemical model for lithium-ion battery [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(1): 1094-1104.
- [6] DONG Guangzhong, XU Yan, WEI Zhongbao. A hierarchical approach for finite-time $h-\infty$ state-of-charge observer and probabilistic lifetime prediction of lithium-ion batteries [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(1): 718-728.
- [7] SHEN Jiani, SHEN Jiajin, HE Yijun, et al. Accurate state of charge estimation with model mismatch for Li ion batteries: a joint moving horizon estimation approach [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(5): 4329-4342.
- [8] XIE Jiale, MA Jiachen, BAI Kun. Enhanced coulomb counting method for state-of-charge estimation of lithium-ion batteries based on Peukert's law and Coulombic efficiency [J]. *Journal of Power Electronics*, 2018, 18(3): 910-922.
- [9] XIONG Rui, HE Hongwen, SUN Fengchun, et al. Evaluation on state of charge estimation of batteries with adaptive extended Kalman filter by experiment approach [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(1): 108-117.
- [10] LI Yi, LIU Kailong, FOLEY A M, et al. Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109254.
- [11] YANG Fangfang, LI Weihua, LI Chuan, et al. State-of-charge estimation of lithium-ion batteries based on gated recurrent neural network [J]. *Energy*, 2019, 175: 66-75.
- [12] JIAO Meng, WANG Dongqing. The Savitzky-Golay filter based bidirectional long short-term memory network for SOC estimation [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(13): 19467-19480.
- [13] CHENG M W, LEE Y S, LIU Min, et al. State-of-charge estimation with aging effect and correction for lithium-ion battery [J]. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2015, 5(2): 70-76.
- [14] QAYS M O, BUSWIG Y, HOSSAIN M L, et al. Recent progress and future trends on the state of charge estimation methods to improve battery-storage efficiency: a review [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8(1): 105-114.
- [15] FOTOUHI A, AUGER D J, PROPP K, et al. Lithium-sulfur battery state-of-charge observability analysis and estimation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(7): 5847-5859.
- [16] DENG Zhongwei, HU Xiaosong, LIN Xianke, et al. A reduced-order electrochemical model for all-solid-state batteries [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(2): 464-473.
- [17] HE Hongwen, XIONG Rui, ZHANG Xiaowei, et al. State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved Thevenin model [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1461-1469.
- [18] HOSSAIN M, HAQUE M E, ARIF M T. Online model parameter and state of charge estimation of lithium battery using unscented Kalman filter considering effects of temperatures and C-rates [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(4): 2498-2511.
- [19] 庞辉, 郭龙, 武龙星, 等. 考虑环境温度影响的锂离子电池改进双极化模型及其荷电状态估算 [J]. *电工技术学报*, 2021, 36(10): 2178-2189.
- PANG Hui, GUO Long, WU Longxing, et al. An improved dual polarization model of li-ion battery and its state of charge estimation considering ambient temperature [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(10): 2178-2189.
- [20] SHRIVASTAVA P, SOON T K, IDRIS M Y I B, et al. Overview of model-based online state-of-charge estimation using Kalman filter family for lithium-ion batteries [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109233.
- [21] 宫明辉, 乌江, 焦朝勇. 基于模糊自适应扩展卡尔曼滤波器的锂电池 SOC 估算方法 [J]. *电工技术学报*,

2020, 35(18): 3972-3978.

GONG Minghui, WU Jiang, JIAO Zhaoyong. SOC estimation method of lithium battery based on fuzzy adaptive extended Kalman filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(18): 3972-3978.

- [22] 刘芳, 马杰, 苏卫星, 等. 基于自适应回归扩展卡尔曼滤波的电动汽车动力电池全生命周期的荷电状态估算方法 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 698-707.

LIU Fang, MA Jie, SU Weixing, et al. State of charge estimation method of electric vehicle power battery life cycle based on auto regression extended Kalman filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 698-707.

- [23] YAO Qi, LU D D C, LEI Gang. Rapid open-circuit voltage measurement method for lithium-ion batteries using one-cycle bipolar-current pulse [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2021, 2(2): 132-141.

- [24] MENG Jinhao, STROE D I, RICCO M, et al. A novel multiple correction approach for fast open circuit voltage prediction of lithium-ion battery [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 1115-1123.

- [25] LI Yuan, GUO Hao, QI Fei, et al. Comparative study of the influence of open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries [J]. IEEE Access, 2020, 8: 17535-17547.

- [26] KADEM O, KIM J. Real-time state of charge-open circuit voltage curve construction for battery state of

charge estimation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 8613-8622.

- [27] SUN Xiaodong, CHEN Qi, ZHENG Linfeng, et al. Joint estimation of state-of-health and state-of-charge for lithium-ion battery based on electrochemical model optimized by neural network [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2023, 4(1): 168-177.

- [28] 武龙星, 庞辉, 晋佳敏, 等. 基于电化学模型的锂离子电池荷电状态估计方法综述 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1703-1725.

WU Longxing, PANG Hui, JIN Jiamin, et al. A review of SOC estimation methods for lithium-ion batteries based on electrochemical model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1703-1725.

- [29] SANGWAN V, KUMAR R, KUMAR RATHORE A. state-of-charge estimation of Li-ion battery at different temperatures using particle filter [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(18): 5320-5324.

- [30] MISYRIS G S, DOUKAS D I, PAPADOPOULOS T A, et al. State-of-charge estimation for Li-ion batteries: a more accurate hybrid approach [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 109-119.

- [31] HE Hongwen, XIONG Rui, GUO Hongqiang. Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO_4 batteries in electric vehicles [J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 413-420.

(编辑 亢列梅)