

# 基于扩展卡尔曼滤波算法的磷酸铁锂电池 荷电状态估计\*

韦仲爽<sup>1</sup>, 侯巍<sup>2</sup>, 赵彦<sup>3</sup>, 郑寿森<sup>1</sup>, 付青<sup>1</sup>

1. 中山大学物理学院, 广东 广州 510275
2. 安徽南瑞继远电网技术有限公司, 安徽 合肥 230088
3. 珠海银河耐吉科技有限公司, 广东 珠海 519085

**摘要:** 电池的荷电状态(SoC, state of charge)是锂离子电池最基本的参数之一, 不能直接测量得到。本文基于二阶 Thevenin 模型对磷酸铁锂电池进行建模分析, 通过混合脉冲功率特性(HPPC, hybrid pulse power characteristic)实验对不同 SoC 处的模型参数进行识别。基于 MATLAB/Simulink 平台, 搭建了变参数二阶 Thevenin 模型与扩展卡尔曼滤波(EKF, extended Kalman filter)算法相结合的估算系统。仿真结果表明, 估算系统在不同工况下的仿真误差不超过 2.5%, 为锂离子电池管理系统的搭建提供了支持。

**关键词:** 磷酸铁锂电池; 荷电状态; 二阶 Thevenin 电路模型; 参数识别; 扩展卡尔曼滤波算法

**中图分类号:** TM912.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)05-0092-09

## State of charge estimation of lithium-iron batteries based on extended Kalman filter

WEI Zhongshuang<sup>1</sup>, HOU Wei<sup>2</sup>, ZHAO Yan<sup>3</sup>, ZHENG Shousen<sup>1</sup>, FU Qing<sup>1</sup>

1. School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China
2. Anhui NARI Jiyuan Electric Power System Technology Company Limited, Hefei 230088, China
3. Zhuhai Inhenergy Technology Company Limited, Zhuhai 519085, China

**Abstract:** The state of charge of the battery is one of the fundamental parameters of the lithium-ion battery, which can't be measured directly. In this paper, the second-order Thevenin model is used to analyze the characteristics of lithium-iron phosphate battery, and the model parameters at different SoC are identified through the hybrid pulse power characteristic (HPPC) experiment. Based on MATLAB/Simulink platform, an estimation system combining variable parameter second-order Thevenin model and extended Kalman filter (EKF) algorithm is built. The simulation results show that the simulation error of the estimation system is less than 2.5% under different working conditions, which provides support for the development of lithium-ion battery management system.

**Key words:** lithium-iron phosphate battery; SoC; the second-order Thevenin model; parameter identify; EKF algorithm

\* 收稿日期: 2023-03-26

录用日期: 2023-04-04

网络首发日期: 2023-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(61871410)

作者简介: 韦仲爽(1996年生), 男; 研究方向: 电力电子与电力传动; E-mail: weizhsh3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 郑寿森(1963年生), 男; 研究方向: 嵌入式系统控制; E-mail: zhengshs@mail.sysu.edu.cn

2020年9月,我国明确提出了2030年“碳达峰”以及2060年“碳中和”的目标。其中,重要举措就是实现燃油汽车向电动汽车的转变。电动汽车的电池体系历经了铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池四代。其中,锂离子电池是比能量密度与能量效率最高的二次电池体系(贺林等, 2021),具有开路电压高、自放电率小、循环寿命长、无记忆效应、环境友好等特点。

电池管理系统(BMS, battery management system)的作用是对电池状态、能量控制管理、电池信息等进行监控(谭晓军, 2021)。其中,荷电状态是最基本的参数。SoC不是直接测量量,只能通过开路电压法、安时积分法、神经网络法和卡尔曼滤波法等估算得到。刘海东等(2022)提出了一种离线式锂离子电池开路电压快速估计方法;高进等(2022)使用开路电压法估计初始荷电状态,在恒流放电末期利用负载电压法在线实时修正安时积分法 SoC 的累计误差;刘昊天(2020)提出一种 CNN-GRU 神经网络估算方法,对电池的 SoC 进行了估算;张连德(2018)通过电池的电化学阻抗谱分析,对三元锂电池的 SoC 进行了估算;王浩(2022)提出考虑电池迟滞特性的自适应遗忘因子递推最小二乘联合 EKF 算法,实现了磷酸铁锂电池 SoC 在线实时联合估算。

开路电压法不适于对 SoC 进行实时估计;安时积分法容易产生累积误差;神经网络法精度高,但依赖于样本数据,计算复杂;而卡尔曼滤波的估计结果只受到上一时刻的系统状态和当前时刻的观测值影响,即使初值误差很大,卡尔曼滤波也能在几次迭代之内迅速收敛到真实值附近,具有收敛快、精度高、不受初值误差影响的优点(王海龙等, 2021; 黄小平等, 2022)。经典的卡尔曼滤波适用于线性系统,当用于非线性系统时,需要围绕滤波值将非线性函数展开成 Taylor 级数并略去二阶及以上项,得到一个近似的线性化模型,即扩展卡尔曼滤波方法。赵佳美(2018)对比了一阶、二阶扩展卡尔曼滤波算法对电池 SoC 估计的影响;晏晓锋(2022)将自适应渐消扩展卡尔曼(AFEKF)算法应用于电池 SoC 估算,提高了估算精度。本文从电池的外部电路特性出发,基于等效电路模型对电池进行建模分析,并结合扩展卡尔曼滤波算法对电池 SoC 进行估算。

## 1 电池模型的选择

电池的原理性模型主要分为电化学模型和等效电路模型两大类。电化学模型注重电池内部电化学反应机理,依据电池反应的本征特性建立模型,以对电池状态进行估计(张照妮等, 2021),常见的电池电化学模型有 Unnewehr Universal 模型、Nerst 模型等(Chun et al., 2019)。电化学模型可以充分反映电池内部的电极特性、电解液浓度变化等特征,但参数辨识十分复杂,计算量极大,且不利于进行电池外部特性的电路分析(马骁, 2020)。等效电路模型注重描述电池的外部电学特性,利用电容、电阻等元件搭建其电路网络,通过分析电路来分析电池在不同条件下的响应。比较常用的电路模型有  $R_{int}$  模型(Nemes et al., 2019), Thevenin 模型, PNGV 模型(Zhang et al., 2017)。等效电路模型的特点如表 1 所示。

表 1 不同等效电路模型的特点

Table 1 Characteristics of different equivalent circuit models

模型类型	参数辨识难度	模型精度
$R_{int}$ 模型	简单	差
一阶 Thevenin 模型	复杂	一般
二阶 Thevenin 模型	非常复杂	高
PNGV 模型	极其复杂	高

$R_{int}$  模型使用一个欧姆内阻来模拟电压的瞬态响应。Thevenin 模型在  $R_{int}$  模型的基础上,增加了 RC 并联网络,用以描述电池内部的电化学反应极化和浓差极化,使电池的动静态特性得到体现,模型精度显著提高(凤良, 2021)。PNGV 模型在 Thevenin 模型的基础上新串联一个电容,用以表征开路电压与负载电流的时间积分关系(贾玉健等, 2011)。因此, PNGV 模型对电池动态响应的描述更精确,但在恒流工况下容易产生误差。本实验基于二阶 Thevenin 模型对电池系统进行建模分析。二阶 Thevenin 模型如图 1 所示。

## 2 模型参数识别

### 2.1 电池特性测试

实验使用的是 48173125-100Ah 型可充电磷酸铁锂电池,电池额定容量为 100 Ah。测试设备是新威 CT4001 高性能电池检测系统(5V1000A)。电池的标准充电流程为恒流恒压充电,先以 0.5 C 倍率恒流充电至截止电压为 3.65 V,再以 3.65 V 恒压

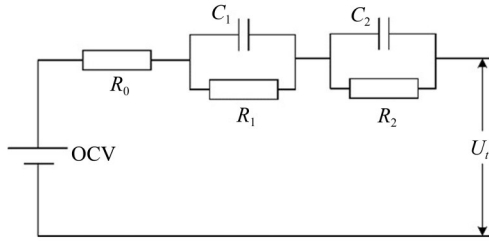


图1 二阶 Thevenin 等效电路模型

Fig. 1 The second-order Thevenin equivalent circuit model

充电至截止电流  $0.05 C$ 。

以电池的放电过程为研究目标, 对本批次的锂离子电池进行分组。三个电池为一组, 每组电池单体的编号为1号、2号、3号, 以标准充电流程充满电, 再以 20、40、60 A 做恒流放电测试, 测试锂离子电池容量, 结果如表 2 所示。

表2 不同放电倍率下的锂离子电池放电容量

Table 2 Capacity of lithium-ion batteries at different discharge rates

单体	20 A 放电容量	40 A 放电容量	60 A 放电容量
1号	105.35	105.22	104.87
2号	105.71	105.20	105.06
3号	105.38	105.16	104.90

从表 2 可知, 三支锂离子电池的平均容量均在 105 Ah 左右。为使后面的实验与锂离子电池的实际情况更贴合, 将电池的额定容量更正为 105 Ah。图 2 是三支锂离子电池单体在 40 A 恒流放电工况下的放电曲线。图 2 中, 三支锂离子电池单体的放电时间均在 160 min 左右, 放电平台在 3.0~3.3 V, 且具有很强的 consistency。在放电初始时刻, 电池的端电压均向下突降; 放电末期, 电池的端电压再次急剧下降, 直至截止电压 2.5 V。

## 2.2 模型参数识别

根据基尔霍夫定律, 图 1 所示的二阶 Thevenin 等效电路模型可表述为

$$\begin{cases} U_i = OCV - IR_0 - U_1 - U_2, \\ U_1 = IR_1 - C_1 R_1 \frac{dU_1}{dt}, \\ U_2 = IR_2 - C_2 R_2 \frac{dU_2}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $U_i$  表示  $t$  时刻锂离子电池的端电压;  $OCV$  表示当前 SoC 处锂离子电池的开路电压;  $R_0$  表示锂离子电池的欧姆内阻;  $U_1$  和  $U_2$  分别表示两个 RC 回路的电压, 用以描述锂离子电池内部的极化反应。

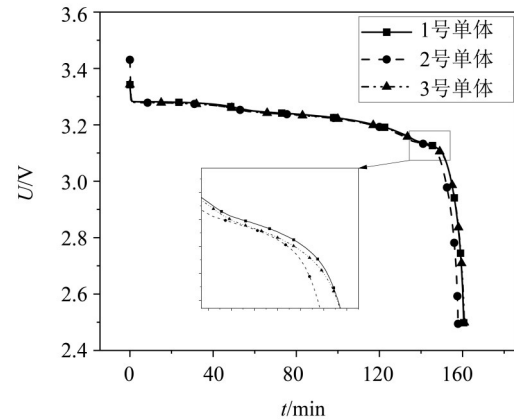


图2 40 A 恒流放电工况下的放电曲线

Fig. 2 Discharge curve under constant discharge condition of 40 A

为了提高不同 SoC 点处的模型参数的准确性, 本文将采用变参数的二阶 Thevenin 模型, 即模型参数随着电池 SoC 而变化。因此, 需要对不同 SoC 处的  $OCV$ ,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  进行如下识别:

(1) 对电池放电, 使 SoC 发生固定变化, 通过静置测量 OCV;

(2) 分析电池电压的瞬态响应, 识别等效内阻  $R_0$ ;

(3) 分析电池电压的回弹特性, 识别  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 。

基于以上分析, 利用《FreedomCar 功率辅助型电池测试手册》中的混合脉冲功率特性测试方法对电池进行测试。HPPC 测试通过在特殊的 SoC 点对电池进行 10 s 的放电脉冲、充电脉冲实验和 40 s 的静置, 以获得电压的瞬态响应及回弹特性。放电脉冲电流选用产品规格书中所允许的最大电流; 充电脉冲电流设置为放电脉冲电流的 0.75 倍作为能量补偿。即在  $SoC > 20\%$  时, 允许最大放电脉冲电流为 200 A, 对应的充电脉冲电流为 150 A; 在  $SoC \leq 20\%$ , 允许最大放电脉冲电流为 100 A, 对应的充电脉冲电流为 75 A。

为了使 HPPC 脉冲测试与特定的 SoC 点相对应, 实验中先按标准充电流程对电池充满电, 此时电池的 SoC 为 100%。之后以 1 C 放电 6 min, 使 SoC 下降 10%。每次 SoC 发生改变后, 立刻进行 2 h 静置, 读取此时的开路电压。本实验对 SoC 为 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10% 的点进行 HPPC 实验, 其步骤为: (1) 标准充电流程充满, 静置 2 h; (2) 1 C 放电 6 min, 静置 2 h; (3) 单个 HPPC 脉冲测试; (4) 重复步骤

2~3, 重复次数为9次; (5) 0.5 C放电至截止电压2.5 V。每次工步(2)结束后, 可以测得电池的开路电压, 如图3所示。

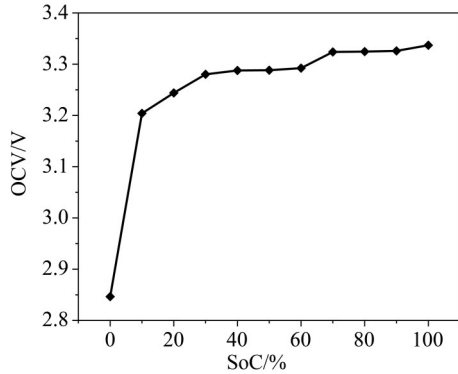


图3 OCV-SoC关系图

Fig. 3 OCV-SoC curve

得到OCV和SoC之间的关系后, 利用MATLAB的cftool工具箱, 对其进行七阶多项式拟合得

$$\begin{aligned} \text{OCV}(\text{SoC}) = & 121.9 \times \text{SoC}^7 - 450.6 \times \text{SoC}^6 \\ & + 673 \times \text{SoC}^5 - 522.9 \times \text{SoC}^4 + 227.3 \times \text{SoC}^3 \\ & - 55.45 \times \text{SoC}^2 + 7.266 \times \text{SoC} + 2.847. \quad (2) \end{aligned}$$

据公式(2)可近似表达任意SoC点处锂离子电池的开路电压OCV。为了识别其他的参数, 对SoC=90%处的HPPC测试数据进行分析。该HPPC测试过程如图4所示。

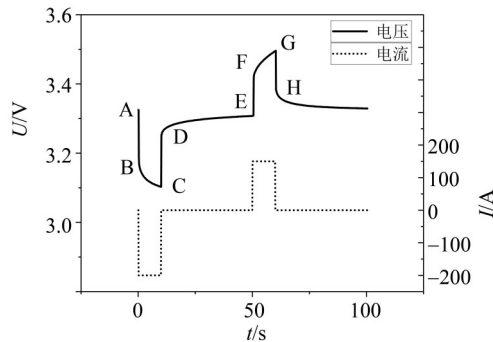


图4 SoC=90%处的HPPC测试

Fig. 4 The HPPC test at SoC=90%

在图4中, 电池的端电压分别出现了四次突变, 分别是AB段、CD段、EF段和GH段, 这四处突变都与电池的欧姆内阻相关。《FreedomCar功率辅助型电池测试手册》中, 欧姆内阻为

$$R_0 = \frac{U_D - U_C}{2|I_{\text{dis}}|} + \frac{U_G - U_H}{2|I_{\text{cha}}|}, \quad (3)$$

其中 $U_C$ ,  $U_D$ ,  $U_G$ ,  $U_H$ 分别为该点处的端电压,  $I_{\text{dis}}$ 为放电脉冲电流,  $I_{\text{cha}}$ 为充电脉冲电流, 因为内阻不可能为负, 所以公式中 $I_{\text{dis}}$ 和 $I_{\text{cha}}$ 都取绝对值。

观察图4中的DE段, 此时没有电流, 端电压的变化是电池内部极化反应的外部表现。将DE段看作是系统的零输入响应, 用二阶Thevenin等效电路模型的两个RC回路来模拟其内部的极化反应。结合公式(1), DE段的端电压可表示为

$$U_t = \text{OCV} - IR_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - IR_2 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}. \quad (4)$$

利用MATLAB的cftool工具箱, 对DE段的响应进行自定义函数拟合得

$$f(x) = \text{OCV}(\text{SoC}) - be^{-xc} - de^{-xe}. \quad (5)$$

通过对比公式(4)和(5), 可得

$$R_1 = \frac{b}{I}, \quad R_2 = \frac{d}{I}, \quad C_1 = \frac{1}{R_1 c}, \quad C_2 = \frac{1}{R_2 e}. \quad (6)$$

电流 $I$ 取放电脉冲电流的绝对值。通过分析, 可得不同SoC点处的 $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 的值, 如表3所示。令 $\tau_1 = R_1 C_1$ ,  $\tau_2 = R_2 C_2$ 分别为两个RC回路的时间常数, 其结果如表4所示。

### 3 扩展卡尔曼滤波

#### 3.1 卡尔曼滤波步骤

根据建立的二阶Thevenin等效电路和公式(1), 可以列出模型的状态空间方程:

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1}, \\ z_k = Hx_k + v_k, \end{cases} \quad (7)$$

其中 $x$ 为系统的状态变量,  $A$ 为状态矩阵,  $B$ 为输入矩阵,  $u$ 表示系统的输入,  $w$ 为系统的过程噪声, 且有 $P(w) \sim (0, Q)$ ;  $z$ 为系统的测量结果,  $H$ 为观测矩阵,  $v$ 为测量噪声, 且 $P(v) \sim (0, R)$ 。根据状态空间方程, 使用卡尔曼滤波可对系统的状态( $k$ 时刻的状态变量)进行估计。具体步骤如下:

(1) 计算 $x_k$ 的先验估计值 $\hat{x}_k^-$ :  $\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}^- + Bu_{k-1}$ ;

(2) 计算先验误差协方差矩阵 $P_k^-$ :  $P_k^- = AP_{k-1}^- A^T + Q$ ;

(3) 计算卡尔曼增益 $K_k$ :  $K_k = \frac{P_k^- H^T}{HP_k^- H^T + R}$ ;

(4) 计算 $x_k$ 的后验估计值 $\hat{x}_k$ :  $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k -$

表3 参数辨识结果  
Table 3 Results of parameter identification

SoC	$R_0/\Omega$	$R_1/\Omega$	$C_1/F$	$R_2/\Omega$	$C_2/F$
0.9	0.000 662 75	0.000 131 00	3.434 065 440	0.000 208 60	46.511 627 53
0.8	0.000 665 00	0.000 143 50	3.537 318 050	0.000 234 70	46.750 817 72
0.7	0.000 665 00	0.000 151 30	3.534 817 361	0.000 255 35	48.947 625 28
0.6	0.000 671 00	0.000 134 55	3.361 344 246	0.000 219 40	48.030 738 65
0.5	0.000 670 50	0.000 138 35	3.198 975 739	0.000 225 95	45.495 904 67
0.4	0.000 675 00	0.000 148 95	3.129 890 819	0.000 243 50	48.520 136 29
0.3	0.000 701 75	0.000 164 55	2.951 594 234	0.000 267 40	51.440 328 95
0.2	0.000 688 00	0.000 267 00	3.207 185 310	0.000 369 80	46.403 713 25
0.1	0.000 699 50	0.000 313 50	3.114 293 325	0.000 474 20	53.361 792 39

表4  $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 辨识结果  
Table 4 Identification results of  $\tau_1, \tau_2$

SoC	$\tau_1$	$\tau_2$
0.9	3.434 065 440	46.511 627 53
0.8	3.537 318 050	46.750 817 72
0.7	3.534 817 361	48.947 625 28
0.6	3.361 344 246	48.030 738 65
0.5	3.198 975 739	45.495 904 67
0.4	3.129 890 819	48.520 136 29
0.3	2.951 594 234	51.440 328 95
0.2	3.207 185 310	46.403 713 25
0.1	3.114 293 325	53.361 792 39

$H\hat{x}_k$ );

(5) 更新误差协方差矩阵  $P_k$ :  $P_k = (I - K_k H)P_k^-$ .

卡尔曼滤波先是忽略了系统的过程噪声, 通过前一时刻的状态  $x_{k-1}$  和输入  $u_{k-1}$  计算得到一个先验估计值  $\hat{x}_k^-$ ; 然后通过分析过程噪声的协方差矩阵  $Q$  和观测噪声的协方差矩阵  $R$ , 判断先验估计值  $\hat{x}_k^-$  和观测值  $z_k$  哪一个值更值得信任。因此卡尔曼增益  $K_k$  的范围应该在  $[0, 1]$  之内, 当  $K_k=0$  时, 则完全信任先验估计值  $\hat{x}_k^-$ ; 当  $K_k=1$  时, 则完全信任观测值  $z_k$ . 卡尔曼滤波的流程如图 5 所示。

### 3.2 系统状态空间方程

公式(1)给出了二阶 Thevenin 模型的电路方程。将电流  $I$  定为输入, 将端电压  $U_t$  定为观测量, 并选取  $x = [\text{SoC} \ U_1 \ U_2]^T$  为系统的状态变量, 其中 SoC 为待估算的量, 列出状态方程和输出方程:

$$\begin{bmatrix} \text{SoC} \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SoC} \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_n} \\ \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} I, \quad (8)$$

$$U_t = [1 \ -1 \ -1] \begin{bmatrix} \text{OCV}(\text{SoC}) \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} - R_0 I. \quad (9)$$

SoC 的变化可以表示为

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{\eta I(t)}{C_n} dt, \quad (10)$$

其中  $\text{SoC}(t)$  表示  $t$  时刻的 SoC 值;  $\text{SoC}(t_0)$  表示初始时刻的 SoC 值, 通常由初始条件给出;  $\eta$  表示库伦效率,  $I(t)$  表示瞬时充放电电流, 以充电为正电流, 放电为负电流;  $C_n$  表示电池的额定容量。

公式(2)表明 OCV 与 SoC 为非线性关系, 因此

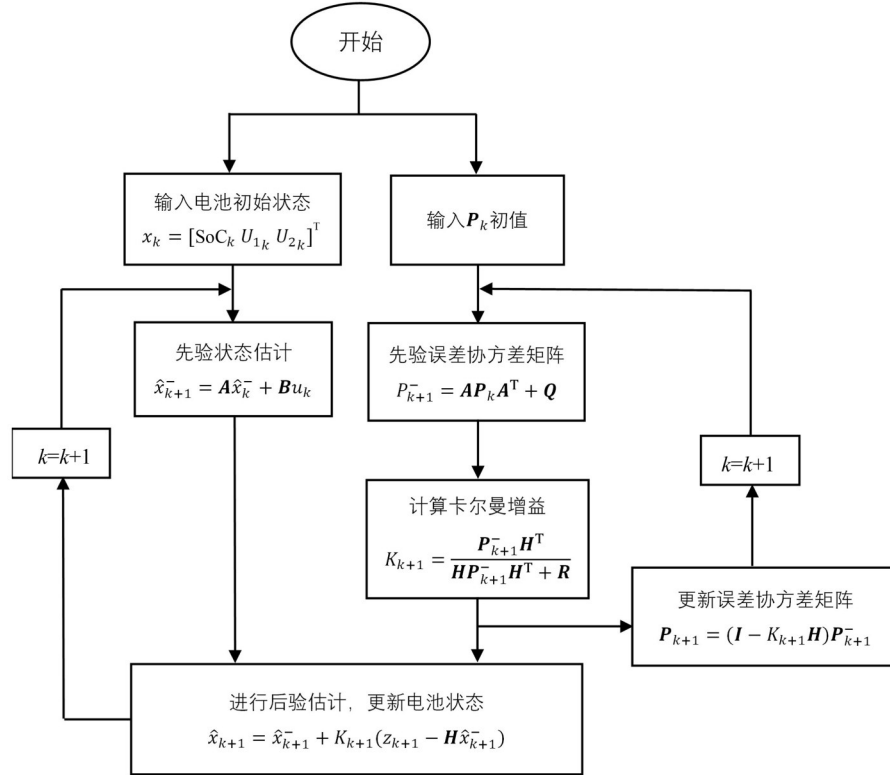


图 5 卡尔曼滤波流程

Fig. 5 Flow chart of Kalman filter

需要将状态空间方程进行泰勒展开处理后再运用经典卡尔曼方法进行估算。对方程进行离散化处理, 得到离散后的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \text{SoC}_{k+1} \\ U_{1,k+1} \\ U_{2,k+1} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \text{SoC}_k \\ U_{1k} \\ U_{2k} \end{bmatrix} + \mathbf{B}i_k + w_k, \quad (11)$$

其中采样间隔时间  $\Delta t = 1 \text{ s}$ ,  $[\text{SoC}_{k+1} \ U_{1,k+1} \ U_{2,k+1}]^T$  表示  $k + 1$  时刻系统的状态;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\Delta t/\tau_1} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\Delta t/\tau_2} \end{bmatrix}$$

为系统的状态矩阵;

$$\mathbf{B} = \left[ -\frac{\eta \Delta t}{C_n} \quad R_1(1 - e^{-\Delta t/\tau_1}) \quad R_2(1 - e^{-\Delta t/\tau_2}) \right]^T$$

为系统的控制矩阵;  $i_k$  为  $k$  时刻的电流, 是系统的输入, 规定放电为负, 充电为正;  $w_k$  为系统的过程噪声, 且  $P(w_k) \sim (0, \mathbf{Q})$ , 即  $w_k$  的期望为 0, 协方差矩阵为  $\mathbf{Q}$ 。将前面参数识别得到的参数值代入就可以确定具体时刻的  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  矩阵的值。

同理, 可以得到离散化后的系统的观测方程:

$$U_{t,k+1} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \text{SoC}_{k+1} \\ U_{1,k+1} \\ U_{2,k+1} \end{bmatrix} - R_0 i_k + v_k, \quad (12)$$

其中  $\mathbf{C} = \left[ \frac{\partial(\text{OCV}_{k+1})}{\partial(\text{SoC})} \quad -1 \quad -1 \right]$  为观测矩阵;  $v_k$  为系统的观测噪声, 且  $P(v_k) \sim (0, \mathbf{R})$ 。

公式 (11) 和 (12) 即为二阶 Thevenin 等效电路分析模型离散化后的状态空间方程。将不同 SoC 处的参数 OCV,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  代入, 便可以确定各个矩阵的值。变参数二阶 Thevenin 模型与扩展卡尔曼滤波相结合的 SoC 估算系统, 如图 6 所示。

## 4 仿真结果分析

通过对 SoC 初值及输入电流进行设定, 可以使安时积分法具有极高的准确性。因此, 以安时积分法计算得到的电池 SoC 值为标准值, 验证仿真结果的准确性。结果如图 7 所示。

### 4.1 恒流放电工况的仿真结果

取 20、60、100 A 的放电数据为模型的输入, 得到的 EKF 估计值如图 8 所示。定义误差 =  $\text{SoC}_{\text{EKF 值}} - \text{SoC}_{\text{标准值}}$ , 则 20、60、100 A 恒流放电工况

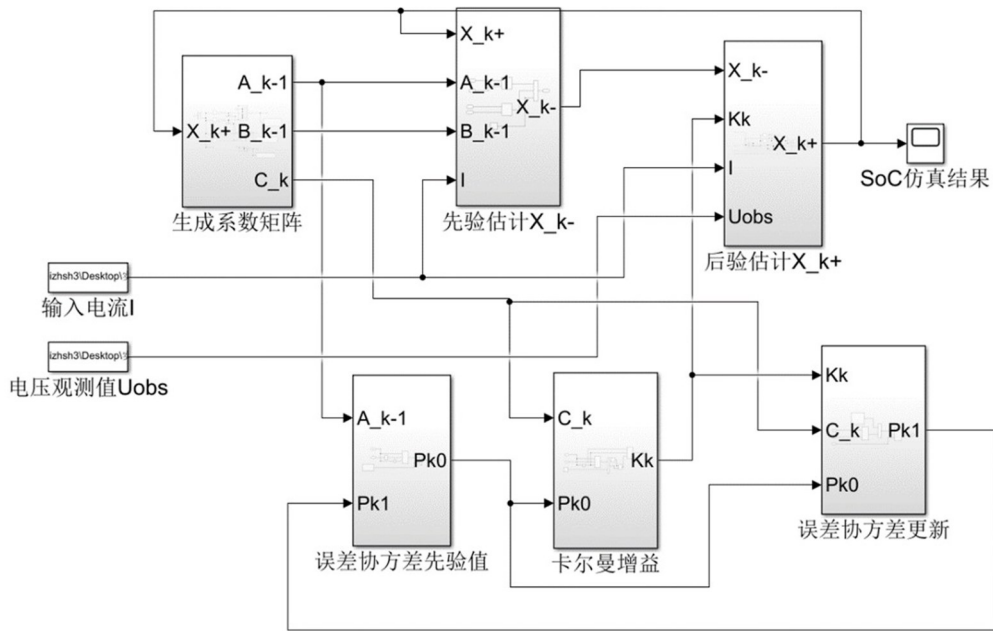


图 6 变参数二阶 Thevenin 模型的 EKF 估算系统

Fig. 6 Variable parameter second-order Thevenin model EKF estimation system

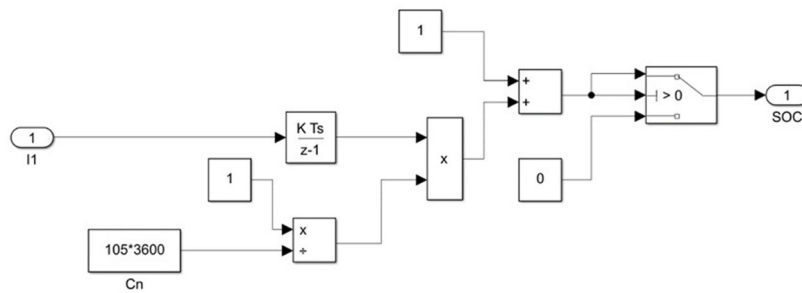


图 7 安时积分法仿真

Fig. 7 Simulation of Ampere-hour integration method

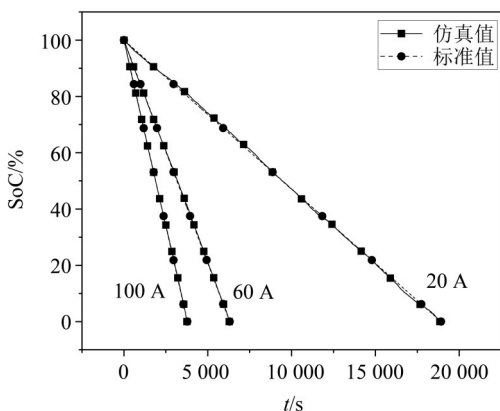


图 8 20、60 和 100 A 放电仿真结果

Fig. 8 Simulation results of discharge at 20, 60 and 100 A

的仿真误差如图 9 所示。

通过仿真对比结果图和误差图可以看出, EKF 得到的 SoC 估算值与标准值相比, 最大误差不超

过 1.5%SoC, 是一个高精度的估算结果。在  $SoC \leq 20\%$  时, 误差有稍微变大。但对于恒流放电工况而言, EKF 估算值在整个放电过程都能与标准值高度一致, 验证了模型的准确性。

#### 4.2 循环放电工况的仿真结果

为了进一步验证模型的准确性, 根据 GB/T 31484-2015 中的电动商用车用能量型蓄电池循环放电工况试验对模型进行测试。实验步骤和电流示意图如表 5 和图 10 所示。

实验过程中让锂离子电池循环进行主放电工况测试, 每一个循环 SoC 的变化为  $-0.572\%$ , 故而循环次数为  $\frac{100}{0.572} = 174.8$  次。同样, 将放电工况的电流数据输入到 EKF 估算系统和安时积分法估算系统中, 仿真结果和误差如图 11-12 所示。

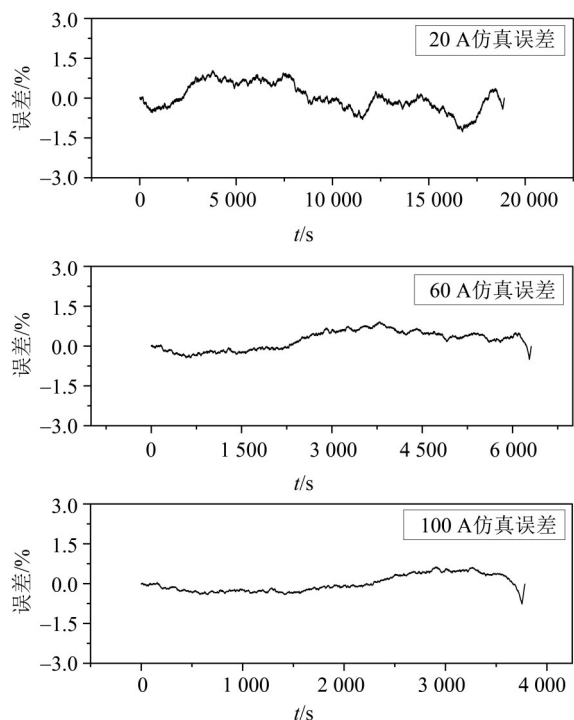


图9 恒流放电工况的仿真误差  
Fig. 9 Simulation error under constant current discharge condition

表5 蓄电池循环放电工况

工步号	工步内容	倍率	持续时间/s	$\Delta\text{SoC}/\%$
1	恒流放电	1 C	23	-0.639
2	恒流放电	1/3 C	8	-0.713
3	恒流充电	1/3 C	23	-0.500
4	恒流放电	0.1 C	26	-0.572

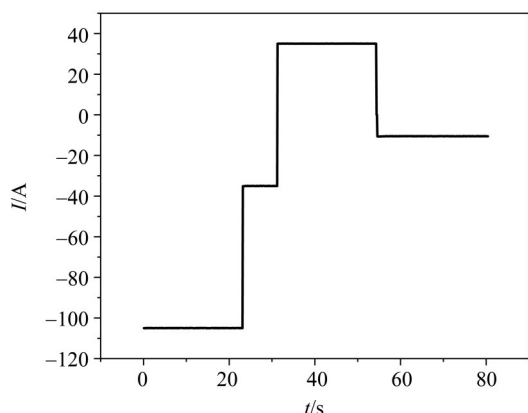


图10 循环放电工况电流示意图  
Fig. 10 The current in the cycle discharge condition

从图11-12可知,  $\text{SoC} > 20\%$ 时, EKF估算得到的仿真值与标准值是非常接近的, 误差基本保持在1%以内。但当  $\text{SoC} \leq 20\%$ 时, 仿真值开始偏

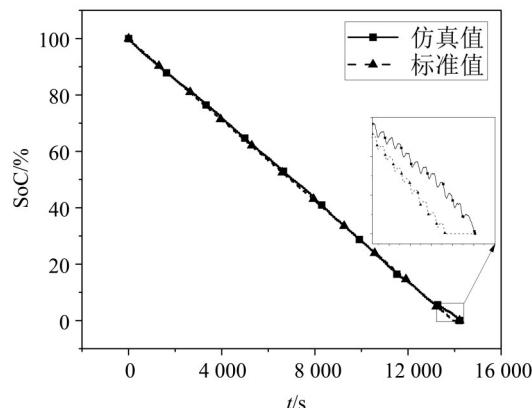


图11 循环放电工况的仿真结果  
Fig. 11 Simulation results of cyclic discharge condition

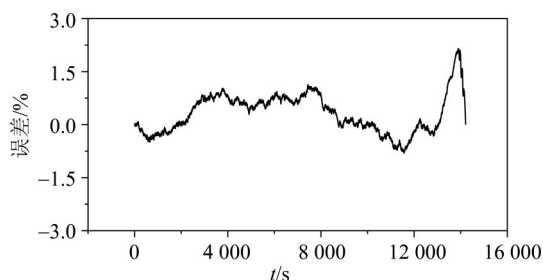


图12 循环放电工况的估算误差  
Fig. 12 Estimation error of cyclic discharge condition

离标准值, 在放电末期的误差超过了2%且

(1) 通过 HPPC 实验进行参数识别时, 每隔 10%SoC 会进行一次脉冲实验。在  $\text{SoC} > 20\%$  时, 电池采用的放电脉冲是 200 A; 在  $\text{SoC} \leq 20\%$  时, 由于电池规格书的说明, 最大放电脉冲电流只能取 100 A, 脉冲电流小, 模型参数的识别误差变大, 导致模型精度有所下降。

(2) 通过电池的放电曲线可以看出, 在  $\text{SoC} \leq 20\%$  时, 电池的端电压的变化非常剧烈, 从放电平台的 3.2 V 左右迅速下降到截止电压 2.5 V。相应地, 脉冲实验的间隔应该缩小, 以捕获更多的模型特征参数。

为了再进一步分析误差, 将仿真过程中计算得到的电池端电压与实际测量得到的端电压进行对比, 二者的误差如图13所示。

可以发现, 在  $\text{SoC} > 20\%$  的阶段, 端电压的仿真误差非常小 (在  $\pm 0.1\text{ V}$  之间), 说明模型极准确地模拟了端电压的变化。当  $\text{SoC} \leq 20\%$  时, 电压误差开始增大, 达到了 0.2 V。对卡尔曼滤波而言, 仿真电压是一个先验估计值, 卡尔曼增益需要在仿真值与实测值之间进行权衡, 由于模

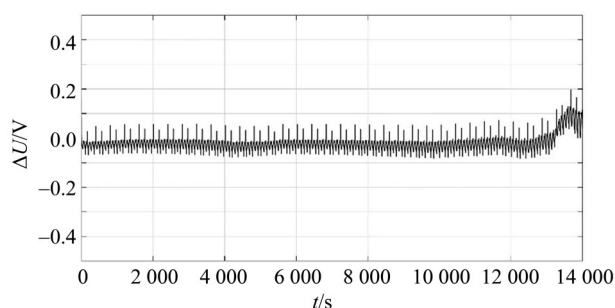


图 13 循环放电工况的端电压误差

Fig. 13 Simulation error of terminal voltage in cyclic discharge condition

型在  $\text{SoC} \leq 20$  时精度不够,影响了仿真值的精度,从而影响了  $\text{SoC}$  的计算。

### 参考文献:

- 凤良, 2021. 基于二阶 RC 模型的磷酸铁锂电池的荷电状态估计[D]. 南京: 南京邮电大学.
- 高进, 胡红顶, 姚胜华, 2022. 基于改进安时积分法的锂离子电池组 SOC 估算[J]. 湖北汽车工业学院学报, 36(4): 56-60.
- 贺林, 石琴, 2021. 动力电池[M]. 北京: 机械工业出版社.
- 黄小平, 王岩, 2022. 卡尔曼滤波原理及应用 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社.
- 贾玉健, 解大, 顾羽洁, 等, 2011. 电动汽车电池等效电路模型分类和特点[J]. 电力与能源, 32(6): 516-521.
- 刘海东, 周萍, 周正, 等, 2022. 锂离子电池开路电压快速估计研究[J]. 机械工程学报, 58(8): 227-235+243.
- 刘昊天, 2020. 基于深度学习的锂离子电池 SOC 及 SOH 估算方法研究[D]. 天津: 天津大学.
- 马骁, 2020. 自适应电动汽车电池 SOC 估算方法及均衡技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学.
- 谭晓军, 2021. 电动汽车智能电池管理系统技术[M]. 广州: 中山大学出版社.
- 王浩, 2022. 考虑迟滞特性与模型时变参数的磷酸铁锂电池 SOC 估算[D]. 南京: 南京林业大学.
- 王海龙, 左付山, 张营, 2021. 车用锂离子电池 SOC 估算研究[J]. 自动化仪表, 42(6): 72-76.

## 5 结论

本文基于二阶 Thevenin 电路模型, 建立了锂离子电池的分析模型, 并通过 HPPC 测试对不同 SoC 处的模型参数 OCV,  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  进行了识别。基于 MATLAB/Simulink 平台, 搭建了变参数二阶 Thevenin 模型与扩展卡尔曼滤波相结合的 SoC 估算系统, 并对锂离子电池恒流放电工况及电动商用车用能量型蓄电池主放电工况进行了仿真。仿真结果表明, 变参数 SoC 估算系统的估算误差与理想状态下的安时积分法计算的标准值相比, 误差不超过 2.5%, 说明模型能够较好地模拟锂离子电池的动静态特性, 为电池管理系统传递准确的状态信息。

- 晏晓锋, 2022. 基于卡尔曼滤波的三元锂电池 SOC 估算研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学.
- 赵佳美, 2018. 基于二阶 EKF 的锂离子电池 SOC 估计的建模与仿真[D]. 西安: 西安科技大学.
- 张照妮, 郭天滋, 高明裕, 等, 2021. 电动汽车锂离子电池荷电状态估算方法研究综述[J]. 电子与信息学报, 43(7): 1803-1815.
- 张连德, 2018. 基于电化学阻抗谱的三元锂离子电池状态估计研究[D]. 长春: 吉林大学.
- CHUN H Y, KIM J S, HAN S H, 2019. Parameter identification of an electrochemical lithium-ion battery model with convolutional neural network[J]. IFAC Papers OnLine, 52(4): 129-134.
- NEMES R, CIORNEI S, RUBA M, et al, 2019. Modeling and simulation of first-order Li-ion battery cell with experimental validation[C]// The 8th International Conference on Modern Power Systems.
- ZHANG X, LU J L, YUAN S F, et al, 2017. A novel method for identification of lithium-ion battery equivalent circuit model parameters considering electrochemical properties[J]. Journal of Power Sources, 345: 21-29.

(责任编辑 王海蓉)