

DOI: 10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.6.08

## 基于复合模型动力蓄电池 SOC 估算

高顺荣, 谢慕君\*

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 采用安时计量法、开路电压法和卡尔曼滤波法相结合估计磷酸铁锂电池初始荷电状态(SOC)。为了修正电池容量特性对 SOC 的影响,在安时计量法中引入等效电流系数和温度系数,对修正后的安时计量法离散化处理,建立了电池的非线性复合模型的状态方程;结合 Shepherd 模型、Unnewehr universal 模型和 Nernst 模型获得复合模型的观测方程。建立了基于电池复合模型的扩展卡尔曼滤波法(EKF)来估计 SOC。通过 Matlab 进行了实验研究,经过与实验室测量出的 SOC 数据对比,EKF 收敛很快,设计的估算方法可行实用。

**关键词:** 磷酸铁锂电池; 复合模型; 安时计量法; 开路电压法; 扩展卡尔曼滤波法

**中图分类号:** TM 912.1; TP 202.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2017)06-0560-06

## SOC estimation of power storage battery based on compound model

GAO Shunrong, XIE Mujun\*

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Ah counting method combined with open circuit voltage method and Kalman filter is used to estimate the state of charge (SOC) of Lithium Iron Phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ) battery. To correct the influence of the battery capacity, equivalent current coefficient and temperature coefficient are introduced into the Ah counting method to modify the discretized Ah counting for establishing the state equation of the nonlinear composite model of the battery. With Shepherd, Unnewehr universal and Nernst models, Extended Kalman filter (EKF) based on battery compound model is applied to predict the SOC. Experimental results compared with that of the simulation indicate that the EKF is feasible with fast convergence.

**Key words:** Lithium Iron Phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ) battery; compound model; Ah counting method; open circuit voltage method; extended Kalman filter method.

收稿日期: 2017-07-25

基金项目: 吉林省科技计划基金资助项目(20150203003sf)

作者简介: 高顺荣(1989—),男,汉族,山西临县人,长春工业大学硕士研究生,主要从事智能控制方向研究,E-mail:shunrong\_gao@163.com. \* 通讯作者: 谢慕君(1969—),女,汉族,吉林长春人,长春工业大学教授,博士,主要从事智能机械方向研究,E-mail:1551852633@qq.com.

## 0 引言

蓄电池是电动汽车的心脏,需要对其管理和研究。在实际生活中用的很普遍的就是磷酸铁锂电池,因为它有很多其它电池不具备的优势。荷电状态(SOC)是蓄电池的一个重要指标,为了提升蓄电池的使用功效,有必要得到确切的SOC估测值。实际情况中对电池的使用有很多种要求,这就促使人们用许多不同的方式来获得确切的SOC,如安时计量法<sup>[1]</sup>、开路电压法<sup>[2]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[3]</sup>等;文中针对安时计量法不能估算电池初始状态及存在积累误差的问题,应用安时计量法、开路电压法及扩展卡尔曼滤波法相结合对电池SOC进行估计。通过安时计量法表达式离散化获得电池状态方程,引入电流系数及温度系数,获得电池的复合模型,再采用EKF估算磷酸铁锂电池的SOC。

## 1 基本原理

### 1.1 蓄电池SOC的概念

SOC定义为蓄电池目前剩余电量与在同样的放电前提下100%的电池能放出总容量的比值:

$$\text{SOC} = \frac{C_d}{C_i} \times 100\% = \frac{C_i - C_R}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_d$ ——剩余电量;

$C_i$ ——电池能放出的总容量;

$C_R$ ——电池放出的电量。

### 1.2 安时计量法

安时计量法来计算SOC,不需要考虑磷酸铁锂电池里面的化学反应和结构变化,只需通过对电流的积分就能知道SOC。安时计量法表示如下:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t i\eta d\tau}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\text{SOC}(t)$ ——电池在 $t$ 时的SOC;

$\text{SOC}(t_0)$ ——电池在 $t_0$ 时的SOC;

$C_0$ ——电池的额定容量;

$i$ —— $t$ 时的电流;

$\eta$ —— $i$ 对应的充放电效率。

安时计量法在现实使用中存在问题:

1)SOC( $t_0$ )不容易获得,假如SOC( $t_0$ )计算不精确的话,最后计算出的值也会有些偏差;

2)由于电池的容量特征,电流 $i$ 和温度 $T$ 都会影响到电池的实际释放容量。

因此,为了获得确切的SOC,就要解决这两方面的问题。

### 1.3 开路电压法

电池停止工作以后,里面的电化学反应也会稳定下来,它的电压会逐渐达到一个恒定值,其中这个不变的电压就是电池的等效电动势( $E$ ),再根据 $E$ -SOC关系就能知道SOC( $t_0$ )的值。

### 1.4 卡尔曼滤波法

KF能确切地估计SOC,在SOC的估算中,把电流和温度作为输入量,电池的端电压作为输出量,SOC作为状态变量<sup>[4]</sup>。磷酸铁锂电池是非线性系统,因此,采用EKF来估测SOC,EKF所使用的系统状态空间模型为<sup>[5]</sup>:

状态方程:

$$x_{j+1} = h(x_j, u_j) + \omega_j \quad (3)$$

观测方程:

$$y_j = g(x_j, u_j) + v_j \quad (4)$$

式中: $h(x_j, u_j)$ 、 $g(x_j, u_j)$ ——分别为状态转移函数和观测函数;

$\omega_j$ ——系统的状态噪声;

$v_j$ ——系统的测量噪声。

## 2 复合模型的建立

在安时计量法中,为了考虑放电电流的大小和温度对电池实际释放容量的影响<sup>[6]</sup>,引入等效电流系数和温度系数,表达式如下:

$$\text{SOC} = \frac{C(t_0) - \int_{t_0}^t i\eta d\tau}{C_0} \times 100\% = \text{SOC}(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t i\eta_i \eta_T d\tau}{C_0} \times 100\% \quad (5)$$

### 2.1 等效电流系数 $\eta_i$

因为电池容量特征对SOC估测的干扰,把等效电流系数代入安时计量法中;1897年Peukert总结出公式,也称为Peukert方程,它主要是关于蓄电池恒流放电电流和持续时间<sup>[7]</sup>的关系:

$$i^n t = \text{Const} \quad (6)$$

式中: $i$ ——放电电流;

$t$ ——充满的电池持续放电到截至电压的时间;

$n$ ——与电池类型有关的常数,取 $n = 0.98925$ <sup>[8]</sup>;

Const ——和电池活性物质有关的固定值。

$C_i = it$  表示电流为  $i$  时的可用容量,将它代入式(6),得:

$$C_i = \text{Const} \times i^{1-n} \quad (7)$$

采用理论放电电流  $i_a$  (其中,理论放电倍率为  $\frac{C}{30}$ ) 和真实放电电流  $i_b$  进行测试,得:

$$i_a^n t_a = \text{Const} \quad (8)$$

$$i_b^n t_b = \text{Const} \quad (9)$$

联合式(8)和式(9)可以解得:

$$n = \frac{\lg t_b - \lg t_a}{\lg i_a - \lg i_b} \quad (10)$$

再结合式(7)可求得等效电流系数  $\eta_i$ :

$$\eta_i = \frac{C_a}{C_b} = \frac{i_a^{1-n}}{i_b^{1-n}} \quad (11)$$

## 2.2 温度系数 $\eta_T$

环境温度对电池容量也有干扰,一般来讲,随着周围温度的上升,电池释放的容量会有所增加,现在经常采用经验公式来描述温度与容量的关系<sup>[9]</sup>。

$$C_T = C_{20} [1 + m_T (T - 20)] \quad (12)$$

式中:  $C_T$  ——  $T$  时的容量;

$C_{20}$  —— 20 °C 时刻的容量;

$m_T$  —— 常数,通常为 0.006~0.008。

设

$$\eta_T = [1 + m_T (T - 20)]^{-1}$$

则有

$$C_T = \frac{C_{20}}{\eta_T}$$

若以 20 °C 为标准,则  $C_{20}$  就是额定容量  $C_0$ 。

## 2.3 模型建立

使用 EKF 估测电池 SOC 时,需要采用电池模型。把修正后的安时计量法式(5)用泰勒级数展开<sup>[10]</sup>,得:

$$\begin{aligned} x_{j+1} &= x_0 - \sum_{m=0}^j \frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{C_0} i_m = \\ & \left( x_0 - \sum_{m=0}^{j-1} \frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{C_0} i_m \right) - \frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{C_0} i_j = \\ & x_j - \frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{C_0} i_j \end{aligned} \quad (13)$$

其中,SOC 是状态变量  $x_j$ ,得到了复合模型的状态方程:

$$x_{j+1} = x_j - \left( \frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{C_0} \right) i_j \quad (14)$$

复合模型的观测方程是由三种简单的电化学

模型组合得到。

Shepherd 模型:

$$y_g = E_0 - Ri_g - \frac{K_i}{x_g} \quad (15)$$

Unnewehr universal 模型:

$$y_g = E_0 - Ri_g - K_i x_g \quad (16)$$

Nernst 模型:

$$y_g = E_0 - Ri_g + K_2 \ln x_g + K_3 \ln(1 - x_g) \quad (17)$$

将 Shepherd 模型、Unnewehr universal 模型和 Nernst 模型的模型函数多项式进行相加,统一模型参数,得复合模型的观测方程:

$$\begin{aligned} y_j &= K_0 - Ri_j - \frac{K_1}{x_j} - K_2 x_j + \\ & K_3 \ln x_j + K_4 \ln(1 - x_j) \end{aligned} \quad (18)$$

式中:  $i_j$  ——  $j$  时刻的电流;

$y_j$  —— 端电压;

$R$  —— 固定阻值;

$K_0$  —— 磷酸铁锂的开路电压;

$K_1, K_2, K_3, K_4$  —— 磷酸铁锂的模型参数,依据实验数据,再通过最小方差法计算获得涉及到的参数值。

## 3 估测电池 SOC

根据上述过程创立模型,设计复合模型的卡尔曼滤波算法获得 SOC<sup>[11]</sup>。

### 3.1 模型的选择

考虑环境温度  $T$  和电流  $i$  因素以后,得到修正后的电池复合模型的状态方程和观测方程如下:

$$\begin{aligned} x_{j+1} &= h(x_j, u_j) + \omega_j = \\ & x_j - \left( \frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{C_0} \right) i_j + \omega_j \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} y_j &= g(x_j, u_j) + v_j = \\ & K_0 - Ri_j - \frac{K_1}{x_j} - K_2 x_j + \\ & K_3 \ln x_j + K_4 \ln(1 - x_j) + v_j \end{aligned} \quad (20)$$

### 3.2 系统动态特性匹配系数的确定

把电池模型的状态方程和观测方程用 Taylor 级数展开,并利用 Jacobin 矩阵求解得到模型匹配系数。状态方程里面的系数值为:

$$A_j = \frac{\partial h(x_j, u_j)}{\partial x_j} = 1 \quad (21)$$

$$B_j = \frac{\partial h(x_j, u_j)}{\partial u_j} = -\frac{\eta_i \eta_T \Delta t}{C_0} \quad (22)$$

观测方程的动态匹配系数为:

$$C_j = \frac{\partial g(x_j, u_j)}{\partial x_j} = \frac{K_1}{(x_j^-)^2} - K_2 + \frac{K_3}{x_j^-} - \frac{K_4}{1-x_j^-} \quad (23)$$

$$D_j = \frac{\partial g(x_j, u_j)}{\partial u_j} = -R \quad (24)$$

另外, 系统输入的求解表达式为:

$$u_j = i_j \quad (25)$$

通过上述推导可知状态方程:

$$x_{j+1} = A_j x_j + B_j u_j + \omega_j \quad (26)$$

观测方程为:

$$y_j = C_j x_j + D_j u_j + v_j \quad (27)$$

在具体过程中用  $D_\omega$  表示过程噪声误差,  $D_v$  是观测噪声误差, EKF 执行过程如图 1 所示。

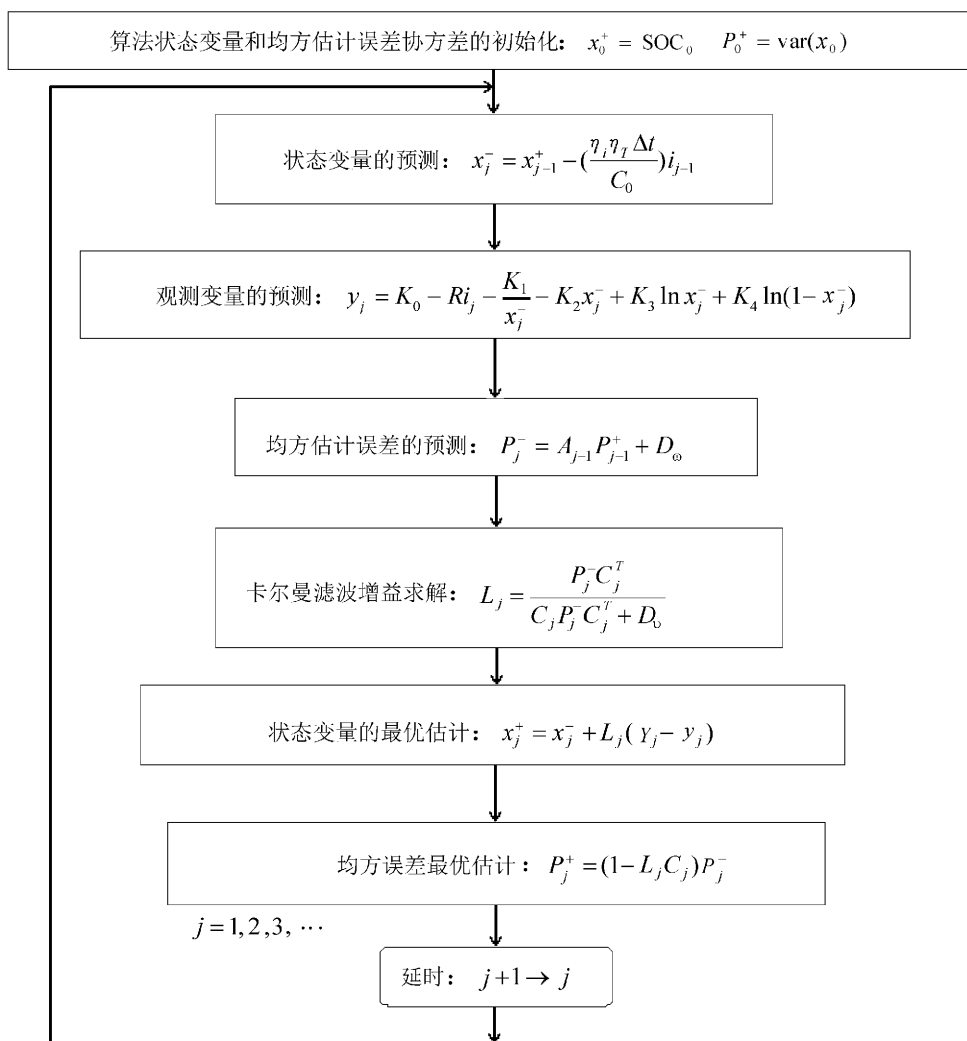


图 1 EKF 的流程图

### 4 方法验证与分析

为了检验基于复合模型的 EKF, 可以很好地计算磷酸铁锂电池组的 SOC, 用实验室的磷酸铁

锂电池组测量电池的 SOC, 历时 600 s, 采样间隔 3 s, 得到 SOC 的变化值。间隔 30 s 的部分实验数据见表 1。

表 1 部分实验数据

时刻	电池 电流/A	电池组 电压/V	温度/°C	电池 SOC
9:21:42	28.3	76.2	23.510	0.815 2
9:22:12	28.3	76.2	23.571	0.797 4
9:22:42	28.3	76.2	23.623	0.779 3
9:23:12	28.4	76.1	23.669	0.761 2
9:23:42	28.3	76.2	23.712	0.743 1
9:24:12	28.3	76.2	23.768	0.725 0
9:24:42	28.2	76.3	23.814	0.706 9
9:25:12	28.3	76.2	23.875	0.688 8
9:25:42	28.3	76.2	23.936	0.670 7
9:26:12	28.4	76.1	23.991	0.652 6
9:26:42	28.4	76.1	24.054	0.634 5
9:27:12	28.4	76.1	24.135	0.616 4
9:27:42	28.4	76.2	24.196	0.598 3
9:28:12	28.4	76.1	24.276	0.580 2
9:28:42	28.4	76.1	24.437	0.562 1
9:29:12	28.3	76.1	24.579	0.544 0
9:29:42	28.4	76.2	24.643	0.525 9
9:30:12	28.4	76.1	24.780	0.507 8
9:30:42	28.4	76.0	24.931	0.489 7
9:31:12	28.5	76.1	25.081	0.471 6
9:31:42	28.5	76.0	25.237	0.451 2

针对观测方程式(18)中的参数,令参数向量

$$\boldsymbol{\rho} = [K_0, R, K_1, K_2, K_3, K_4]^T$$

矩阵

$$\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_N]$$

矩阵  $\mathbf{E}$  的列向量

$$e_j = \left[ 1, -i_j, -\frac{1}{x_j}, -x_j, \ln(x_j), \ln(1-x_j) \right]$$

定义向量

$$\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]$$

模型观测方程可等效为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{E}\boldsymbol{\rho}$$

因此,利用已知的  $\mathbf{Y}$  和  $\mathbf{E}$  就可以求出参数向量  $\boldsymbol{\rho}$ , 即

$$\boldsymbol{\rho} = (\mathbf{E}^T \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^T \mathbf{Y}$$

其中,磷酸铁锂电池组的模型参数计算值<sup>[12]</sup>见表 2。

表 2 模型参数

参数	数值
$K_0$	3.391
$R$	0.004 8
$K_1$	-0.000 268
$K_2$	0.149 5
$K_3$	0.111
$K_4$	-0.019 55

在 SOC 理论算法推导的基础上,采用 Matlab 进行仿真实验,检验基于复合模型的 EKF 能很好地计算磷酸铁锂电池组的 SOC。从仿真实验看出,采用 EKF 估算出复合模型的 SOC 值,根据时间的变化可以很快地逼近测量值,如图 2 所示。

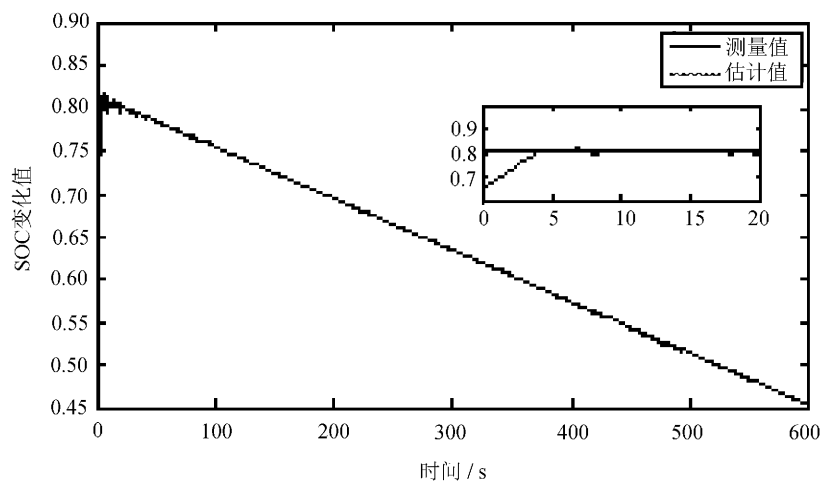


图 2 SOC 计算值与实验值的对比

将复合模型计算的SOC仿真结果与实验室的测量值进行对比,误差刚开始还有点明显,但减小的非常迅速,这在一定程度上也表明,基于复合

模型的卡尔曼滤波算法具有很好的初值收敛性,误差曲线如图3所示。

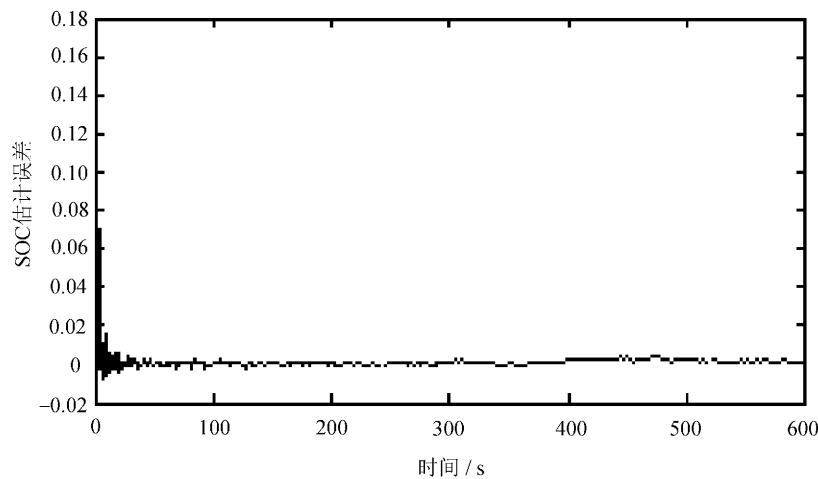


图3 SOC误差曲线

## 5 结 语

通过安时计量法表达式离散化获得了磷酸铁锂电池组的状态方程,引入等效电流系数和温度系数实现电池容量的修正,建立了电池组的非线性复合模型,应用扩展卡尔曼滤波法估计电池SOC,解决了安时计量法不能估算电池初始状态和存在累积误差的问题。仿真实验表明,该方法能很好地逼近实验室电池组SOC测量值,且可行有效。

### 参考文献:

[1] 詹世安.磷酸铁锂电池荷电状态估算方法研究[J].电源技术,2015(8):1620-1622.  
 [2] X Zhang, X Wang, W Zhang, et al. A simplified lithium battery SOC estimating method[J]. Transaction on Electrical & Electric Materials, 2016, 17(1): 13-17.  
 [3] 李慧,肖伟,骆万博.电池剩余电量SOC估计[J].长春工业大学学报,2017,38(1):73-78.  
 [4] L Gregory. Plett. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134:

252-292.

[5] A Jossen, V Spath, H Doring, et al. Reliable battery operation—a challenge for the battery management systems[J]. Journal of Power Sources, 1999, 84: 283-286.  
 [6] 张金龙.动力电池组SOC估算及均衡控制方法研究[D].天津:天津大学,2011.  
 [7] 崔立丰,高飞,王永武,等.磷酸铁锂动力电池Peukert方程修正模型的研究[C]//第六届中国智能交通年会暨第七届国际节能与新能源汽车创新发展论坛,2011.  
 [8] 仝猛,卢兰光,欧阳明高,等. Peuker方程的适用性分析及基于二阶段放电法的Peukert模型修正[J].机械工程学报,2010,46(10):121-125.  
 [9] 齐国光,李建民,郑航,等.电动汽车电量计量技术的研究[J].清华大学学报:自然科学版,1997,37(3):46-49.  
 [10] 朱敏.基于电动车电池组SOC估计方法的研究[D].郑州:河南师范大学,2014.  
 [11] 何灵娜.基于卡尔曼滤波的动力电池SOC估计算法设计[D].杭州:浙江工业大学,2014.  
 [12] 徐杰.基于卡尔曼滤波的动力电池组SOC精确估计[D].杭州:杭州电子科技大学,2009.