

文章编号:1671-251X(2013)02-0043-05

王沙沙, 娄高峰, 唐霞, 等. 基于扩展卡尔曼滤波法的矿用可移动救生舱蓄电池有电状态估计[J]. 工矿自动化, 2013, 39(2): 43-47.

# 基于扩展卡尔曼滤波法的矿用可移动救生舱 蓄电池荷电状态估计

王沙沙, 娄高峰, 唐霞, 史丽萍, 张恩锋

(中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**针对基于安时计量法的矿用可移动救生舱蓄电池荷电状态 SOC 估计在环境温度或放电电流波动较大的情况下精度较低的问题,提出了一种基于扩展卡尔曼滤波法的矿用可移动救生舱蓄电池 SOC 估计方法。该方法在安时计量法的基础上,把影响蓄电池 SOC 估计的环境温度和放电电流因素作为蓄电池系统的噪声,采用扩展卡尔曼滤波法的优化估计递推算法对蓄电池 SOC 进行实时滤波与估计,从而提高了蓄电池 SOC 的估计精度。实验结果表明,该方法的蓄电池 SOC 估计结果与实测值基本一致,可用于矿用可移动救生舱蓄电池管理系统中。

**关键词:**矿用可移动救生舱; 蓄电池荷电状态; SOC 估计; 扩展卡尔曼滤波法; 安时计量法

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

State of charge estimation of battery in mine-used movable lifesaving cabin  
based on extended Kalman filtering method

WANG Sha-sha, LOU Gao-feng, TANG Xia, SHI Li-ping, ZHANG En-feng

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,  
Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** In view of problem of low precision in SOC estimation of battery in mine-used movable lifesaving cabin based on ampere hour method under condition of higher fluctuation of environment temperature or discharge current, the paper proposed a SOC estimation method of battery in mine-used movable lifesaving cabin based on extended Kalman filtering method. The method is basis on ampere hour method, takes factors of environment temperature and discharge current influencing estimation of SOC of battery as noises of battery system and uses optimal estimation recursive algorithm of extended Kalman filtering method to make real-time filtering and estimation for SOC of battery, which can improve estimation precision of SOC of battery. The experiment result showed that estimation result of SOC of battery used by the method is consistent with measured values and the method can applied to battery management system of mine-used movable lifesaving cabin.

**Key words:** mine-used movable lifesaving cabin; state of charge of battery; SOC estimation; extended Kalman filtering method; ampere hour method

收稿日期:2012-10-17。

基金项目:教育部科学技术研究重大项目(311021)。

作者简介:王沙沙(1987—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为矿用可移动救生舱监控系统设计,E-mail:xiangcaotang4567@163.com。

## 0 引言

蓄电池作为矿用可移动救生舱的重要组成部分,其荷电状态(SOC)估计的准确与否对避难人员能否脱险具有重要作用。国内外主要把蓄电池的剩余电量用蓄电池 SOC 来反映。目前,用于蓄电池 SOC 估计的方法主要有安时计量法、开路电压法、内阻测量法和神经网络法等。开路电压法进行蓄电池 SOC 估计时,蓄电池必须静止较长时间以达到稳定状态,而且只适用于蓄电池电流非剧烈变化状态下的 SOC 估计,不能满足在线检测要求<sup>[1]</sup>。内阻测量法需要精确地测量蓄电池内阻,对测量设备的要求较高,难以在实际中应用。神经网络法输入变量的选择是否合适、数量是否恰当直接影响模型的计算量和准确性,如果网络训练数据不准确或者不全会对结果产生很大的影响。安时计量法则在环境温度或电流波动较剧烈的情况下难以实现较高的测量精度。

鉴于此,本文在安时计量法的基础上,把影响蓄电池 SOC 估计的环境温度和放电电流因素作为蓄电池系统噪声,在噪声环境中采用扩展卡尔曼滤波法对蓄电池 SOC 进行实时滤波与估计,从而提高蓄电池 SOC 的估计精度。

## 1 蓄电池 SOC 估计模型

蓄电池 SOC 表达式为<sup>[2-3]</sup>

$$C_s = \frac{Q_{\text{res}}}{Q_i} = 1 - \frac{Q}{Q_i} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{res}}$ 为蓄电池当前的剩余容量; $Q_i$ 为在恒定电流  $I$  放电的条件下,蓄电池所具有的额定容量; $Q$ 为已经放出的电量。

### 1.1 安时计量法在蓄电池 SOC 估计中的应用

安时计量法是指通过计算蓄电池在一定时间内累积放出电量来估计蓄电池 SOC 的方法。如果规定蓄电池放电的初始状态为  $C_{s0}$ ,那么蓄电池当前的剩余电量为

$$C_{\text{Sres}} = C_{s0} - \frac{1}{Q_n} \int_1^t \eta_i dt \quad (2)$$

式中: $Q_n$ 为额定容量; $i$ 为蓄电池充放电电流,充电时为正,放电时为负; $\eta$ 为蓄电池的效率系数,它主要包括充放电倍率系数  $\eta_i$  和温度影响系数  $\eta_T$ 。

矿用可移动救生舱蓄电池是一个非线性的动态系统,蓄电池 SOC 受到工作环境温度、工作电压及充放电倍率等因素的影响。本文在安时计量法的基

础上,采用扩展卡尔曼滤波算法对蓄电池 SOC 进行估计。

采用扩展卡尔曼滤波法估计蓄电池剩余电量时,需要将安时计量法的表达式进行离散化:

$$C_{Sk+1} = C_{Sk} - \frac{\eta \Delta t}{Q_n} i_k \quad (3)$$

式中: $\Delta t$ 为离散时间间隔。

### 1.2 影响蓄电池 SOC 估计的噪声因素

#### 1.2.1 温度因素

蓄电池 SOC 估计容易受到环境温度的影响,环境温度的变化不仅会导致蓄电池电量呈现非线性变化,而且会影响蓄电池的工作性能及使用寿命。矿用可移动救生舱使用一段时间后温度会升高,因此,对救生舱蓄电池 SOC 的估计不可忽略温度这一重要因素。本文以单体  $\text{LiFePO}_4$  锂电池为研究对象,环境温度分别选取为 0、10、20、30、40、50  $^{\circ}\text{C}$ ,在  $\text{LiFePO}_4$  充满电的状态下,用放电倍率为  $C/30$  的放电电流对  $\text{LiFePO}_4$  进行完全放电,得到  $\text{LiFePO}_4$  实际容量与环境温度的关系曲线,如图 1 所示。

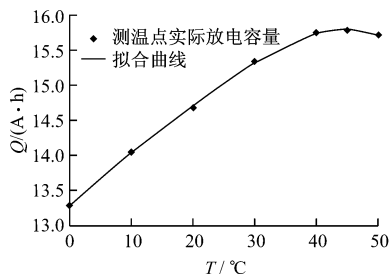


图 1  $\text{LiFePO}_4$  实际放电容量与环境温度的关系曲线

由图 1 可知,在电池允许工作范围内,电池工作温度越高,放电容量越高。采用 Matlab 函数对图 1 进行拟合,得到温度影响系数  $\eta_T$  的多项式方程为

$$\eta_T = -0.000\ 003\ 6T^4 + 0.000\ 35T^3 - 0.013\ 6T^2 + 0.63T + 88.71 \quad (4)$$

式中: $T$ 为电池的实际工作温度。

#### 1.2.2 放电电流因素

同环境温度一样,放电电流也是影响蓄电池 SOC 估计的一个重要因素。当蓄电池以大的放电倍率进行放电时,释放出的总容量较小,以小的放电倍率放电时,释放出的总容量较大,关系如下:

$$Q_{di} = \eta_i Q_{ii} = \int_0^t \eta_i d\tau \quad (5)$$

式中: $Q_{di}$ 为折算后标准放电倍率下的总电量; $Q_{ii}$ 为实际倍率下所得到的总电量。

通过对  $\text{LiFePO}_4$  锂电池进行放电,得到该电池放电电流与放电总电量的关系曲线,如图 2 所示。

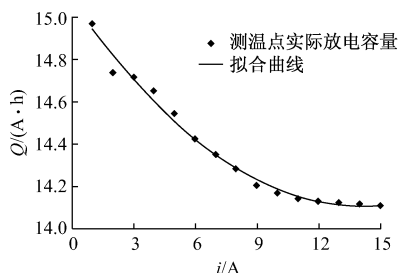


图 2 LiFePO<sub>4</sub> 放电电流与实际放电容量的关系曲线

由图 2 可知,电池的实际放电容量与电池放电倍率成反比关系,当电池放电倍率增加时,电池的实际放电容量减小,当电池放电倍率减小时,电池的实际放电容量增大。采用 Matlab 函数对图 2 进行拟合,得到  $\eta_i$  的多项式方程为

$$\eta_i = \frac{14.967}{0.0046i^2 - 0.1388i + 15.091} \quad (6)$$

式中: $i$  为实际放电电流。

基于以上分析,如果不考虑环境温度和放电电流对蓄电池的影响,蓄电池 SOC 的估计精度会较低。本文采用基于扩展卡尔曼滤波法的蓄电池 SOC 估计方法,在模拟救生舱内温度及蓄电池供电过程中的放电电流情况下进行试验,在 SOC 估算过程中将环境温度、放电电流作为系统噪声输入的一部分,将两者对蓄电池放电容量的影响考虑在内,从而可有效提高估计精度。

### 1.3 观测模型

扩展卡尔曼滤波法采用的蓄电池模型可以分为负荷模型、简化模型、极化效应修正模型和滞后效应模型<sup>[4-5]</sup>。本文采用复合模型。

复合模型是由以下 3 种蓄电池模型组合得到的<sup>[6]</sup>:

#### (1) Nernst 模型

$$y_k = E_0 - Ri_k + K_1 \ln x_k + K_2 \ln(1 - x_k) \quad (7)$$

#### (2) Unnewehr universal 模型

$$y_k = E_0 - Ri_k - K_i x_k \quad (8)$$

#### (3) Shepherd 模型

$$y_k = E_0 - Ri_k - K_i / x_k \quad (9)$$

式中: $y_k$  为蓄电池端电压; $E_0$  为蓄电池初始电压; $R$  为蓄电池内阻,它与蓄电池 SOC 值有关,会随着蓄电池 SOC 值的变化而变化; $i_k$  与蓄电池的充放电状态有关,当蓄电池充电时, $i_k$  为负值,当蓄电池放电时, $i_k$  为正值; $K_1$ 、 $K_2$  为模型匹配系数; $x_k$  为蓄电池 SOC 值; $K_i$  为蓄电池极化电阻。

复合模型的表达式如下:

状态方程为

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\eta_i \Delta t}{\eta_T Q_n} i_k \quad (10)$$

输出方程为

$$y_k = K_0 - Ri_k - \frac{K_1}{x_k} - K_2 x_k + K_3 \ln x_k + K_4 \ln(1 - x_k) \quad (11)$$

式中: $\eta_T$ 、 $\eta_i$  可由式(4)、式(5)求得; $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $R$  均为未知量,可以通过最小方差原理计算得到。

## 2 基于扩展卡尔曼滤波法的蓄电池 SOC 估计

### 2.1 扩展卡尔曼滤波法

矿用可移动救生舱用蓄电池作为一个非线性系统,扩展卡尔曼滤波法先将其进行线性化,再根据标准卡尔曼滤波法的最优估计对状态变量进行估算。扩展卡尔曼滤波法的状态空间模型如下:

状态方程为

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (12)$$

输出方程为

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad (13)$$

式中: $f(x_k, u_k)$  为非线性系统的状态转移函数; $g(x_k, u_k)$  为非线性系统的测量函数; $w_k$ 、 $v_k$  为互不关联的系统噪声。

非线性离散时间状态空间模型如图 3 所示,扩展卡尔曼滤波法计算流程如图 4 所示( $A$  为系统矩阵, $C$  为测量矩阵, $L$  为滤波增益矩阵, $P$  为滤波误差协方差矩阵, $D_w$  为过程噪声误差, $D_v$  为观测噪声误差, $y_k$  为实测值, $y_k^-$  为初步预测值),初始值经状态变量预测估计、均方误差预测估计、卡尔曼增益计算及状态变量最优估计的循环迭代,实现对蓄电池 SOC 的最优预测。

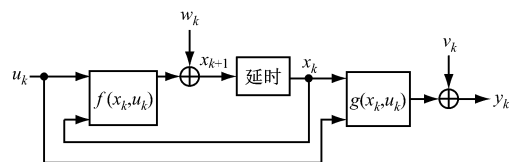


图 3 非线性离散时间状态空间模型

### 2.2 蓄电池 SOC 估计

#### (1) 选择模型

状态方程如式(10)所示,输出方程如式(11)所示。

#### (2) 系统参数的确定

将上述非线性模型在  $(x_k, u_k)$  附近进行泰勒展开,并令

$$A_{k-1} = \left. \frac{\partial f(x_{k-1}, u_{k-1})}{\partial x_{k-1}} \right|_{x_{k-1} = x_{k-1}^+} = 1 \quad (14)$$

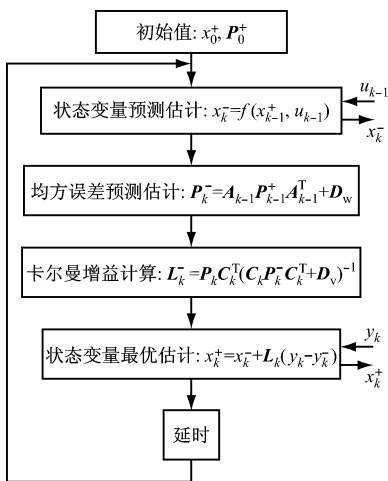


图 4 扩展卡尔曼滤波法计算流程

$$C_k = \frac{\partial y_k}{\partial x_k} \Big|_{x_k = x_k^-} = K_1 / (x_k^-)^2 - K_2 + K_3 / x_k^- - K_4 / (1 - x_k^-) \quad (15)$$

### (3) 状态量的初始化

$$x_0^+ = C_{S0} \quad (16)$$

$$P_0^+ = \text{var}(x_0) \quad (17)$$

### (4) 扩展卡尔曼滤波法的最优化估计递推算算法过程

$$\begin{cases} x_k^- = x_{k-1}^+ - \frac{\eta_i \Delta t}{\eta_T Q_n} i_{k-1} \\ y_k = K_0 - Ri_k - \frac{K_1}{x_k^-} - K_2 x_k^- + K_3 \ln x_k^- + K_4 \ln (1 - x_k^-) \\ P_k^- = A_{k-1} P_{k-1}^+ A_{k-1}^T + D_w \\ L_k = \frac{P_k^- C_k^T}{C_k P_k^- C_k^T + D_v} \\ x_k^+ = x_k^- + L_k (y_k - y_k^-) \\ P_k^+ = (1 - L_k C_k) P_k^- \end{cases} \quad (18)$$

状态量初始值  $C_{S0}$  可以根据当前开路电压值和前一次蓄电池充放电的剩余电量计算得到, 蓄电池的类型性能、数据采集系统与均方误差初始值  $P_0^+$ 、过程噪声误差  $D_w$ 、观测噪声误差  $D_v$  相关, 蓄电池运行工况和蓄电池充放电倍率决定数据的采样周期。

## 3 实验分析

根据矿用可移动救生舱 400 W 的功率需求, 供电时间应为 96 h, 采用 1.2 倍的安全系数要求, 计算得出的安时需求为 46 080 W · h。实验采用单体电池为 0.064 V/(A · h) 的 LiFePO<sub>4</sub> 锂电池, 并用 8 串组成一个电池组, 将 10 组电池单元组并联得到 0.048 V/(A · h) 的蓄电池组, 每个蓄电池组能提

供的安时需求为 12 000 W · h, 蓄电池系统由 4 组蓄电池组成。实验数据由 LiFePO<sub>4</sub> 锂电池实验平台获得, 将整个实验平台分为电源模块、电池组模块、用户人机界面模块、数据采集模块及主控模块等。将数据采集模块采集到的电流数据导入 Matlab, 得到蓄电池放电电流波形, 如图 5 所示。同时, 在放电过程中, 通过模拟救生舱内温度环境, 计算蓄电池在一小段时间间隔内放电到该阶段规定截止电压时所释放的总电量, 然后以上一时刻的总电量为基准减去该间隔内蓄电池放出的电量便可计算得到 SOC 实测值。另外, 本实验利用采集到的电流采用安时计量法估计了蓄电池 SOC 值, 将实测值、安时计量法估计值和扩展卡尔曼滤波法估计值放于同一坐标中进行比较, 如图 6 所示。从图 6 可看出, 扩展卡尔曼滤波法估计值与实测值基本一致, 精度高于安时计量法估计值, 符合矿用可移动救生舱蓄电池管理系统的要求。

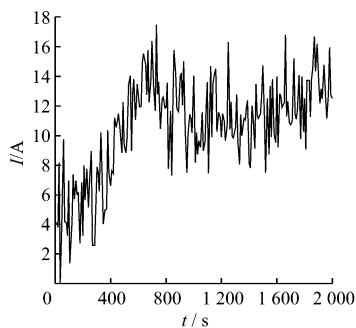


图 5 蓄电池放电电流波形

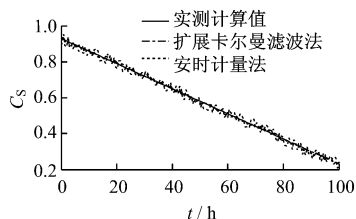


图 6 蓄电池 SOC 估计实验结果

## 4 结语

详细介绍了扩展卡尔曼滤波法在矿用可移动救生舱蓄电池 SOC 估计中的应用原理, 并根据救生舱实时工作环境的要求建立了合适的蓄电池模型。实验结果表明, 该方法所得到的蓄电池 SOC 估计结果与实测值基本一致, 可用于矿用可移动救生舱蓄电池管理系统中。

### 参考文献:

[1] 黄文华, 韩晓东, 陈全世, 等. 电动汽车 SOC 估计算法

- 与电池管理系统的研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(3): 198-202.
- [2] 高明煜, 何志伟, 徐杰. 基于采样点卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2011, 26 (11): 161-167.
- [3] Thermo Analytics Inc. Battery modeling for HEV simulation by Thermo Analytic Inc[EB/OL]. [2012-10-09] <http://www.thermoanalytics.com/support/publications/battery-modelsdoc.html>.
- [4] XU Jie, GAO Mingyu, HE Zhiwei. State of charge estimation online based on EKF-Ah method for lithium-ion power battery[C]// IEEE International Congress on Image and Signal Processing, Tianjin, 2009.
- [5] ZHANG Fei, LIU Guangjun, FANG Lijin. A battery state of charge estimation method with extend Kalman filter [C]// IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Xī'an, 2008.
- [6] 戴海峰, 魏学哲, 孙泽昌. 基于扩展卡尔曼滤波算法的燃料电池车用锂离子动力电池荷电状态估计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 92-95.