

# 基于改进 EKF 的飞机蓄电池在线 SOC 估计方法\*

刘泽元 王友仁 陈则王 崔江 裴莹

(南京航空航天大学自动化学院测试系 南京 210016)

**摘要:** 蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)是电池管理系统最为重要的参数之一,由于飞机蓄电池工作环境恶劣复杂,具有较强的非线性,给蓄电池的在线 SOC 估计带来较大的困难。以提高复杂应力条件下飞机蓄电池在线 SOC 估计精度为目的,采用性能测试实验对蓄电池性能参数的温度、放电率特性进行研究,并提出递推最小二乘法与扩展卡尔曼滤波算法结合的改进 EKF 方法,实现蓄电池等效电路模型参数的在线辨识以及蓄电池在线 SOC 的估计。上述方法通过物理实验进行了验证,实验结果表明,改进后 EKF 方法的 SOC 估计误差小于 0.5%,估计精度获得明显提高。

**关键词:** 荷电状态; 递推最小二乘法; 改进 EKF 算法; 在线 SOC 估计

**中图分类号:** TM912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Method of aircraft battery on-line SOC estimation based on improved EKF algorithm

Liu Zeyuan Wang Youren Chen Zewang Cui Jiang Pei Ying

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** State of charge (SOC) is one of the most important parameters for the battery management system. Due to the aircraft battery complex working conditions and strong nonlinear, it brings difficulties for the battery online SOC estimation. In order to improve the aircraft battery online SOC estimation accuracy under complicated stress condition, the temperature and discharge rate characteristics of battery performance parameters were researched. Then, this paper puts forward a improved EKF method which combine EKF algorithm with RLS algorithm. This method not only can realize online identification of the equivalent circuit model parameter, but also can realize the on-line SOC estimation. This method was physical verified through experimental, and the experimental results show that the improved EKF method can enhance the online SOC estimation obviously, the accuracy can reach above 0.5%.

**Keywords:** state of charge; recursive least squares; improved EKF algorithm; online SOC estimation

### 1 引言

随着现代飞机先进性的不断提高以及多、全电飞机的迅速发展,飞机电源系统重要性提高到了新的高度。飞机蓄电池常作为飞机应急和辅助电源,在飞机主电源发生故障时,保证飞机安全飞行与着陆。荷电状态(state of charge, SOC)是蓄电池管理系统最为重要的状态参数之一,准确的 SOC 估计值能够使飞行员和地勤人员获得实时的蓄电池状态信息。然而,飞机蓄电池工作、环境应力的复杂多变,不可避免增加了蓄电池在线 SOC 估计的难度。

目前,国内外文献给出了多种 SOC 估计方法<sup>[1-2]</sup>,可大致分为直接计算法、智能拟合法和参数建模法 3 类。直接计

算法也称安时计量法,是最为简单易行的 SOC 估计方法,但该方法需已知蓄电池 SOC 初始值,会由于电流测量噪声产生积累误差<sup>[3]</sup>;智能拟合法即采用智能算法<sup>[4]</sup>建立蓄电池工作状态信号或性能参数与 SOC 之间的拟合模型,间接估算蓄电池 SOC。该类方法原理简单,但过于依赖历史数据的数量和准确性,对复杂应力条件的鲁棒性较差<sup>[5-6]</sup>。

为解决上述方法存在的问题,参数建模法成为目前国内、外蓄电池在线 SOC 估计方法的热点研究方向<sup>[7]</sup>。该方法把蓄电池视为一个动力系统,将蓄电池 SOC 估计问题转化为动力系统状态最优估计问题。参数建模法的关键在于蓄电池模型与最优估计器的选取,选用戴维南等效电路模型,并基于 RLS 算法进行蓄电池模型参数的在线辨识,实

现 SOC 估计状态空间模型的实时更新,然后结合扩展卡尔曼滤波算法,实现蓄电池在线 SOC 的准确估计。

## 2 蓄电池模型的建立与参数辨识

### 2.1 蓄电池模型选择与建立

选用三星 ICR18650-22FM 锂离子动力蓄电池作为研究对象,蓄电池等效电路模型选用 Thevenin 模型<sup>[8]</sup>,如图 1 所示。图 1 中  $R_o$  表示蓄电池欧姆内阻, $R_p$  和  $C_p$  分别为蓄电池的极化内阻和极化电容, $I$  为蓄电池工作电流(以放电方向为正方向), $V$  为蓄电池端电压, $V_p$  为蓄电池极化电压; $E$  表示蓄电池电动势也即开路电压。该模型物理意义清晰,能够较好的描述蓄电池的静态及动态特性,且 RC 阶数较少,模型参数容易辨识<sup>[9]</sup>。模型电路方程如式(1)所示。

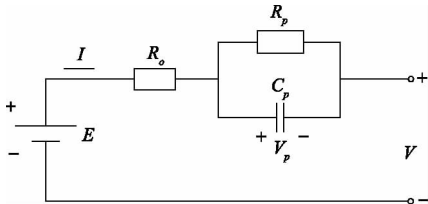


图 1 蓄电池 Thevenin 等效电路模型原理

$$\begin{cases} V = E - V_p - IR_o \\ I = C_p \dot{V}_p + V_p/R_p \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 蓄电池性能特性分析

蓄电池关键性能参数包括容量、开路电压(open circuit voltage,OCV)与 SOC 对应关系等<sup>[10]</sup>,采用性能特性实验,并按照表 1 设定实验应力条件,对蓄电池性能参数的温度、放电率特性进行研究,并为后续蓄电池等效电路模型的建立提供数据支持。

表 1 蓄电池性能特性实验应力因素及其水平

因素	水平				
放电率	0.2C	0.5C	1C	1.5C	2C
环境温度	25℃	35℃	45℃	55℃	

蓄电池容量特性的研究采用恒流放电实验方法,通过

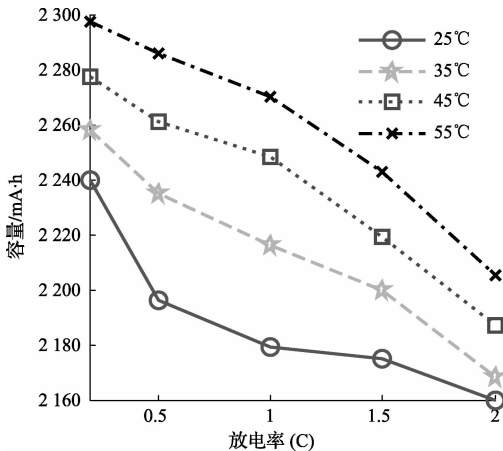


图 2 单体蓄电池容量特性曲线

对放电电流的时间积分得到蓄电池放电电量,也即该应力条件相对应的蓄电池实际容量,容量测试结果如图 2 所示。

蓄电池 OCV-SOC 对应关系模型采用脉冲充放电实验方法获得。以 35℃、1.0C 的应力条件为例,对蓄电池充电和放电过程中相同 SOC 处的 OCV 求和平均,并采用 MATLAB 软件对 SOC 与 OCV 平均值的对应关系进行曲线拟合,拟合曲线如图 3 所示,上述方法可有效消除蓄电池在充放电过程中由迟滞效应引起的回程误差<sup>[10]</sup>。

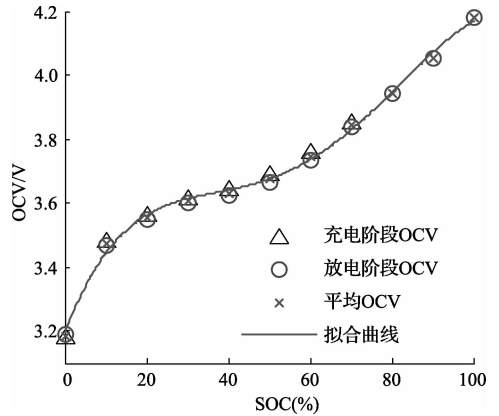


图 3 35℃、1.0C 应力条件下蓄电池 OCV-SOC 对应关系曲线

### 2.3 蓄电池等效模型参数在线辨识

为及时跟踪蓄电池模型参数的动态变化,采用一种基于递归最小二乘法(recursive least squares,RLS)的模型参数在线辨识方法,该方法通过建立相应的递推模型,以蓄电池端电压、电流等数据为驱动信号,结合 RLS 算法实现蓄电池等效电路模型参数的在线辨识。

首先结合蓄电池 Thevenin 模型对蓄电池电气关系式进行线性离散化,可得:

$$V_{p,k+1} = V_{p,k} \exp(-T/\tau) + i_k R_p (1 - \exp(-T/\tau)) \quad (2)$$

$$V_{k+1} = E_{k+1} - V_{p,k+1} - i_{k+1} R_o \quad (3)$$

式中: $V_{p,k}$  为第  $k$  步蓄电池极化电压, $V_{k+1}$  为第  $k+1$  步蓄电池端电压, $i_k$  为第  $k$  步蓄电池工作电流, $E_{k+1}$  为第  $k+1$  步蓄电池开路电压, $\tau = R_p * C_p$ , $T$  为状态信号采样间隔时间。

定义  $W_{k+1} = V_{k+1} - E_{k+1}$ ,结合式(2)~(3)可推导出模型系统的差分方程也即模型参数在线辨识的基本递推公式:

$$W_{k+1} = \exp(-T/\tau)W_k + (-R_o)i_{k+1} + (R_o \exp(-T/\tau) - R_p(1 - \exp(-T/\tau)))i_k \quad (4)$$

为便于应用 RLS 算法,将递推式(4)化简为:

$$W_{k+1} = \alpha_1 W_k + \alpha_2 i_{k+1} + \alpha_3 i_k \quad (5)$$

式中: $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为递推式的系数:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \exp(-T/\tau) \\ \alpha_2 = -R_o \\ \alpha_3 = R_o \exp(-T/\tau) - R_p [1 - \exp(-T/\tau)] \end{cases} \quad (6)$$

基于式(5)与 RLS 算法原理的结合,定义第  $k+1$  步的观测向量  $\boldsymbol{\varphi}_{k+1} = [W_k, i_{k+1}, i_k]^T$ 、参数向量  $\boldsymbol{\theta}_{k+1} = [\alpha_{1,k+1}, \alpha_{1,k+1}, \alpha_{1,k+1}]^T$ ,则式(5)可变换为:

$$W_{k+1} = \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \boldsymbol{\theta}_{k+1} \quad (7)$$

上述蓄电池模型参数在线辨识递推关系式的 RLS 算法流程为:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{k+1} = \frac{P_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1}}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T P_k \boldsymbol{\varphi}_{k+1}} \\ \mathbf{P}_{k+1} = \frac{P_k - \mathbf{K}_{k+1} \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T P_k}{\lambda} \\ e_{k+1} = W_{k+1} - \boldsymbol{\varphi}_{k+1}^T \boldsymbol{\theta}_k \\ \boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k + \mathbf{K}_{k+1} e_{k+1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{K}_{k+1}$  为第  $k+1$  步 RLS 算法的增益矩阵, $\mathbf{P}_k$  为第  $k$  步观测向量的协方差矩阵, $e_{k+1}$  是第  $k+1$  步端电压的估计误差, $\lambda$  为 RLS 算法的遗忘因子(一般取 1)。设定参数向量初始值  $\boldsymbol{\theta}_1$ ,观测向量  $\boldsymbol{\varphi}_{k+1}$  可根据采集到的蓄电池状态信号得到,通过式(8)的 RLS 算法流程可得到第  $k+1$  步的参数向量  $\boldsymbol{\theta}_{k+1}$ ,然后采用式(6)的逆推式(9)得到模型参数  $R_o, R_p, C_p$  的值。

$$\begin{cases} C_p = \frac{-T(\alpha_1 - 1)}{(\alpha_3 + \alpha_1 \alpha_2) \ln \alpha_1} \\ R_o = -\alpha_2 \\ R_p = \frac{\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_3}{\alpha_1 - 1} \end{cases} \quad (9)$$

### 3 蓄电池 SOC 估计方法

#### 3.1 EKF 算法原理

卡尔曼滤波器主要用于估计线性时变模型,而蓄电池是一个非线性动态系统,需采用扩展卡尔曼滤波器(extended kalman filter, EKF),将非线性系统状态空间模型进行线性化处理,以提高蓄电池在线 SOC 的估计精度, EKF 状态空间模型如式(10)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = A_k \mathbf{X}_k + B U_k + W_k \\ \mathbf{Y}_{k+1} = C_{k+1} \mathbf{X}_{k+1} + D_{k+1} U_{k+1} + H_{k+1} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $A_k, B_k, C_k, D_k$  分别为状态空间模型系数,  $\mathbf{X}_k$  为状态向

量,  $\mathbf{Y}_k$  为观测向量,  $U_k$  为控制向量, 系统过程噪声  $W_k$  和观测噪声  $H_k$  为互不相关的高斯白噪声。EKF 算法的基本流程如式(11)~(15)所示。

1) 时间更新

$$\mathbf{X}_{k+1}^- = A_k \mathbf{X}_k^- + B_k U_k \quad (11)$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k^- A_k^T + Q \quad (12)$$

2) 观测更新

$$H_{k+1} = P_{k+1}^- C_{k+1}^T (C_{k+1} P_{k+1}^- C_{k+1}^T + R)^{-1} \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_{k+1}^+ = \mathbf{X}_{k+1}^- + H_{k+1} (\mathbf{Y}_{k+1} - C_{k+1} \mathbf{X}_{k+1}^- - D_{k+1} U_{k+1}) \quad (14)$$

$$P_{k+1}^+ = (1 - H_{k+1} C_{k+1}) P_{k+1}^- \quad (15)$$

#### 3.2 基于改进 EKF 的 SOC 估计

在采用 EKF 算法实现蓄电池在线 SOC 估计前,需建立蓄电池状态空间模型。首先基于安时计量法得到蓄电池 SOC 的离散化递推公式:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - i_k \Delta t / Q_k \quad (16)$$

式中: $SOC_k, SOC_{k+1}$  分别为  $k, k+1$  时刻蓄电池的 SOC,  $\Delta t$  为离散周期,  $Q_k$  为  $k$  时刻蓄电池实际容量。

然后对蓄电池的 Thevenin 等效电路模型的电路方程(1)进行离散化处理,可得:

$$V_{k+1} = f(SOC_{k+1}) - V_{p,k+1} - R_o i_{k+1} \quad (17)$$

$$V_{p,k+1} = V_{p,k} \exp(-\Delta t / \tau) + R_p i_k [1 - \exp(-\Delta t / \tau)] \quad (18)$$

式中: $f(SOC)$  为  $k+1$  时刻蓄电池 OCV-SOC 对应关系的拟合函数。

根据式(16)~(18)可得到蓄电池 SOC 估计的状态空间模型,如式(19)所示。

结合式(10)、式(19)可知:蓄电池 SOC 估计状态空间模型的状态向量  $\mathbf{X}_k$  为  $[SOC_k, V_{p,k}]^T$ ,控制输入量  $U_k$  为蓄电池的工作电流  $i_k$ ,观测向量为蓄电池端电压  $V_{k+1}$ ,也可相应得到状态空间模型系数  $A_k, B_k, C_k, D_k$ 。基于状态空间模型(19),并结合 EKF 算法的递推式(11)~(15),可实现基于标准 EKF 算法的在线 SOC 估计。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ V_{p,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-\Delta t / \tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{p,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta t / Q \\ R_p (1 - \exp(-\Delta t / \tau)) \end{bmatrix} i_k + \begin{bmatrix} \omega_{SOC_k} \\ \omega_{V_{p,k}} \end{bmatrix} \\ V_{k+1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(SOC_{k+1})}{\partial SOC_{k+1}}, -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ V_{p,k+1} \end{bmatrix} - R_o i_{k+1} + h_{k+1} \end{cases} \quad (19)$$

然而,由于飞机蓄电池工作环境复杂恶劣,当飞机蓄电池在不同的温度和充放电率下工作时,其等效电路模型参数的变化会造成 SOC 估计状态空间模型参数的变化,从而影响状态空间模型的准确性。

为提高蓄电池 SOC 估计方法对复杂环境和工作应力条件的鲁棒性,本文对标准 EKF 算法进行改进,在每个 EKF 算法循环过程中,首先根据环境和工作应力条件,结合蓄电

池性能特性研究的数据基础,对性能参数进行实时查询与更新;然后采用 RLS 算法对蓄电池等效电路模型参数进行在线辨识,以此实现 EKF 算法状态空间模型系数值的更新,本文将上述方法称为基于改进 EKF 算法的 SOC 估计方法,改进后 SOC 估计算法的流程如图 4 所示。该考虑了环境与工作应力条件对蓄电池 SOC 估计方法的影响,可提高蓄电池在线 SOC 估计方法准确性和鲁棒性<sup>[7]</sup>。

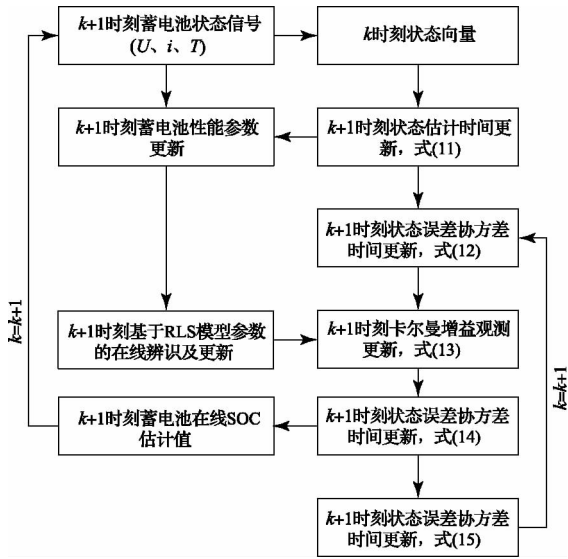


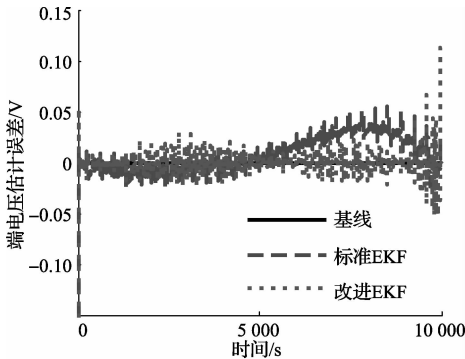
图 4 基于改进 EKF 的 SOC 估计算法流程

### 4 实验验证与结果分析

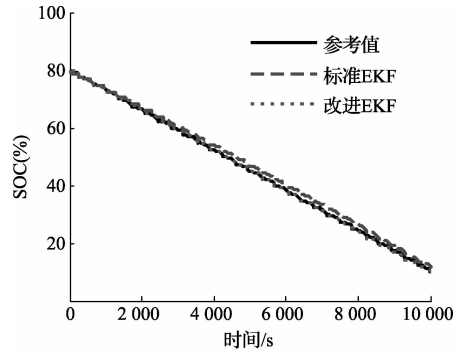
为验证改进后基于 EKF 的 SOC 估计方法的准确性和鲁棒性,采用蓄电池测试平台对 ICR18650-22FM 锂离子电池单体进行模拟工况循环实验,测试平台能够记录蓄电池实验过程中充放电电流、端电压、环境温度、时间等数据,采集频率为 1 Hz。由于目前国内外暂无飞机蓄电池模拟工况标准,本文选择《USABC 电动汽车电池试验手册》中动态应力测试工况 DST(dynamic stress test)。

在获得工况实验数据后,首先采用 MATLAB 软件实现该文所研究 SOC 估计算法,然后基于实验数据进行 SOC 估计方法的仿真,并根据蓄电池端电压和 SOC 的估计结果,分析蓄电池模型参数在线辨识方法和 SOC 估计方法的准确性和鲁棒性。

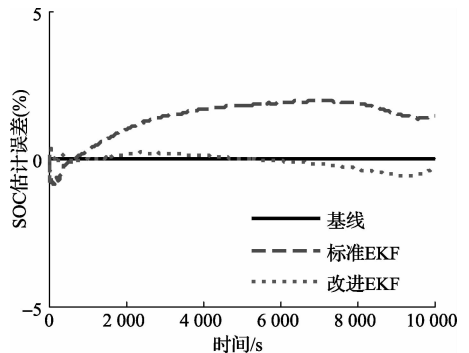
1)为验证本文所研究 SOC 估计方法的准确性,首先对蓄电池进行 25℃ 环境条件下的 DST 模拟工况循环实验,设定 SOC 估计初始值为 80%,与真实初始值相同,以按时计量法得到的 SOC 的参考值,当 SOC 值到达 10%时终止估计,估计结果如图 5 所示。



(a) 正确 SOC 初始值时蓄电池端电压估计误差



(b) 正确 SOC 初始值时蓄电池 SOC 估计值



(c) 正确 SOC 初始值时蓄电池 SOC 估计误差

图 5 DST 模拟工况下正确 SOC 初始值时的估计结果

由图 5(a)可知,蓄电池端电压估计误差绝对值基本小于 0.05 V,端电压估计值能够较好的跟踪观测值,由此说明基于 RLS 的模型参数在线辨识方法能够得到准确的模型参数,将蓄电池端电压估计误差最小化;从图 5(b)、(c)的 SOC 估计结果可知,未考虑模型参数随温度、放电率等因素变化的标准 EKF 法的 SOC 估计误差绝对值均小于 3%,平均相对误差为 1.48%,而基于改进 EKF 的 SOC 估计方法的估计误差绝对值均小于 0.8%,平均绝对误差仅为 0.3%,估计精度大大提高,这说明基于改进 EKF 的 SOC 估计方法对复杂工作应力条件仍具有较好的准确性。

2)为验证基于改进 EKF 的 SOC 估计方法对错误的 SOC 初始值和不同环境应力的鲁棒性,在 45℃ 环境应力条

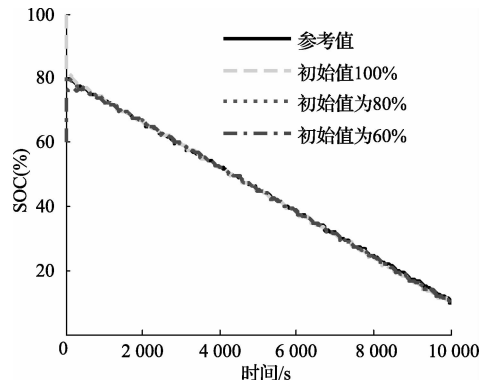


图 6 DST 模拟工况下不同 SOC 初始值时的估计结果误差

件下对蓄电池进行 DST 模拟工况循环实验。蓄电池 SOC 真实初始值为 80%，而 SOC 估计初始值分别设定为 100%、80%、60%，SOC 估计结果如图 6 所示。

从图 6 可得到，在不同的 SOC 初始值情况下，蓄电池 SOC 值均能在较短的时间内快速收敛到 SOC 参考值附近。除去开始自修复期间，3 种 SOC 初始值情况下蓄电池 SOC 估计绝对误差均小于 1%，平均绝对误差均小于 0.4%，由此可知基于改进 EKF 的 SOC 估计方法能够快速修正 SOC 初始值偏差，对不同的 SOC 初始值均表现出较好鲁棒性。同时，通过对图 5 和 6 中 2 种温度条件下的 SOC 估计结果的横向对比分析，得出基于改进 EKF 的 SOC 估计方法对不同环境应力条件也具有较好的适用性。

## 5 结 论

针对飞机蓄电池在复杂工作和环境应力下 SOC 估计精度较低的问题，考虑了充放电率、温度对蓄电池等效电路模型参数的动态影响，提出了基于 RLS 模型参数在线辨识与 EKF 方法相结合的改进 EKF 算法的 SOC 估计方法，并采用物理和仿真实验对上述方法进行了验证，实验结果表明该方法不仅大大提高了蓄电池在线 SOC 的估计精度，而且对不同工作应力、环境应力和错误 SOC 初始值均表现出较好的鲁棒性，完全能够满足飞机蓄电池在高空复杂环境条件下蓄电池在线 SOC 准确估计的要求。

## 参考文献

- [1] LU L, HAN X, LI J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226(0): 272-288.
- [2] WLADISLAW W, CHRISTIAN F, DIRK U S. Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2014, 258(0): 321-339.

- [3] NG K S, MOO C, CHEN Y, et al. Enhanced coulomb counting method for estimating state of charge and state of health of lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1506-1511.
- [4] WANG Z, XU J, WANG T. The online monitoring system software design and the SOC estimation algorithm research for power battery[C]. Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 89-92.
- [5] 尹安东, 张万兴, 赵韩, 等. 基于神经网络的磷酸铁锂电池 SOC 预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(5): 433-437.
- [6] ROS M AN, ASSF J, BOH O S. Detection of Utilizable Capacity Deterioration in Battery Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 98-103.
- [7] HE W, WIL N, CHEN C, et al. State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering [J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(6): 840-847.
- [8] 王笑天, 杨志家, 王英男, 等. 双卡尔曼滤波算法在锂电池 SOC 估算中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1732-1738.
- [9] 魏克新, 陈峭岩. 基于多模型自适应卡尔曼滤波器的电动汽车电池荷电状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 19-26.
- [10] 张国安. 锂离子电池特性研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 41-45.

## 作者简介

刘泽元, 硕士研究生, 主要研究方向为飞机蓄电池管理技术、计算机测控技术等。

E-mail: zeyuannuaa@163.com