

基于 EKF 的船舶动力锂电池剩余容量估算

雷津¹ 邓磊² 李小谦² 姚川²

(1. 海军驻 719 所军事代表处 武汉 430205; 2. 武汉第二船舶设计研究所 武汉 430064)

摘要: 在船舶锂电池储能系统 (RESS) 应用中, 准确估计剩余容量 (SOC) 是储能系统安全充放电的基础, SOC 无法直接测量, 只能通过测量电池外电压电流, 根据电池特性进行计算得到。目前, 传统 SOC 估计算法精度低, 现流行的算法存在计算复杂的问题, 并对依赖于 SOC 初始值精度, 在运用中问题重重, 难以保证船舶 RESS 的安全、寿命和容量利用率。为提高 SOC 估算精度, 对锂电池的等效电路 PNGV 模型进行试验及参数辨识, 并结合扩展卡尔曼滤波 (EKF) 算法, 测量锂电池电压及电流, 综合进行 SOC 的估算, 经试验, SOC 估算精度相比传统算法得到了提高, 并解决了 SOC 估计对初值的要求高的问题, 由此证明了 PNGV 模型结合扩展卡尔曼滤波算法精确估计 SOC 的可行性。

关键词: 动力锂电池; 测量; EKF 算法; SOC 估计

中图分类号: TP830 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4130

Accurate SOC estimation of the power Li-ion battery based on EKF

Lei Jin¹ Deng Lei² Li Xiaoqian² Yao Chuan²

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: Accurate SOC estimation is difficult to traditional algorithm, so that the battery management system (BMS) can't works as better as we want. To solve this problem, we used PNGV model and identified its parameters, and estimated the SOC estimation using extended Kalman filter (EKF) with the improved PNGV. After the experiments and simulations, it's clear that the method meets the requirements.

Keywords: power Li-ion battery; PNGV model; extended kalman filter; accurate SOC estimation

1 引言

锂电池作为常用的动力电池, 在船舶储能领域发展迅速, 相比铅酸电池, 具有充放电倍率大、比能量密度大、寿命长、安全性好、自放电系数低、无记忆效应、环保等优点, 是船舶锂电池储能系统 (RESS) 的发展趋势。

锂电池荷电状态 (state of charge, SOC) 即电池剩余容量, SOC 估计是船舶锂电池能量管理系统的核心技术, 精确估计 SOC 具有重大的意义, 可提高电池利用率, 避免过充过放、造成自然自爆的危险。SOC 无法直接测量, 只能根据锂电池特性, 测量充放电过程中的电池端电压、电流、温度等数据, 结合相应算法, 计算得到 SOC 的估计值。为了得到准确的 SOC 估计值, 测量锂电池充放电过程中的电压、电流、温度值的精度是首要条件, 利用电池特性结合智能算法是提高 SOC 估算精度的关键所在。

锂离子电池剩余容量 SOC 为锂电池剩余电量与锂电池额定容量的比值, 如式 (1) 所示。

$$SOC = \frac{C_{res}}{C_n} \quad (1)$$

式中: C_{res} 为锂电池剩余的电量, C_n 为在标准放电工况下满电锂电池放电总电量, 理想情况下等于锂电池的额定容量。

锂电池的充放电时内部进行着一个非常复杂的化学反应, 电池的 SOC 受温度、充放电倍率、电池老化程度和自放电等因素的共同影响。目前 SOC 估计的方法主要有^[1]: 安时积分法、开路电压法、阻抗测试法、电动势法等。安时积分法的精度取决于高精度的电流测量和准确的 SOC 初始值, 在实际应用中难以保证初值及电流测量精度; 开路电压 (OCV) 法^[2] 是测量电池长时间静置后端电压, 根据 OCV 与 SOC 有对应的特定关系来计算 SOC, 实际应用场合无法保证长时间的静置; 阻抗测试法^[3-4] 是根据测电池内部阻抗来计算 SOC, 通过测量电流阶跃变化时电池端电压的变化值, 计算电压变化值与电流变化值的比值得到内阻值, 由于电池阻抗在 SOC 值区间变化小, 导致该方法误差较大; 电动势法是根据电池的辨识得到的等效模型和当前测得的电流值、端电压值、温度等进行计算得到电动势 (等效为开路电压 OCV), 根据等效开路电势与 SOC 的特定关系计算得到 SOC 值, 该方法的精度依赖 SOC 初始值、模型精度和测

量值精度。本文介绍的 SOC 估计算法的本质是电动势法，但加入了扩展卡尔曼滤波(EKF)算法，结合精度较高的 PNGV 等效电路模型，由于 PNGV 电池模型与电池特性^[5-6]更贴近、更真实，扩展卡尔曼滤波算法可以减小测量误差和模型参数误差的影响，并自动跟随真实值，该算法计算量较小，精度高，在锂电池剩余容量的测量和估算的实际应用中具有指导意义。

2 电池模型

等效电路模型^[7]是用电路元件组成，描述电池的工作特性，元器件参数呈非线性，该模型物理意义明晰。磷酸铁锂电池的充放电倍相比铅酸电池非常大率^[8-9]，PNGV 模型的瞬态响应好，可体现出磷酸铁锂电池的大充放电倍率，因此该模型准确性较好。模型结构如图 1 所示，模型中 E 是理想电压源，表示开路电压(OCV)，电容 C_b 描述电流累积引起的开路电压的增减， E 和 C_b 共同表示开路电压 U_{ocv} ； R_0 为欧姆内阻， R_p 为极化内阻， C_p 为极化电容， R_p 和 C_p 并联，用来模拟电池充放电过程中的极化效应。 I_p 为电池内部的充放电电流， U_L 为电池端电压。

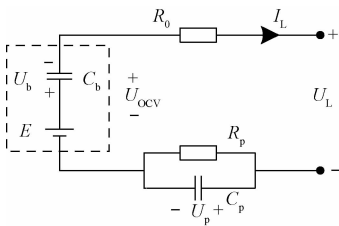


图 1 电池 PNGV 模型

3 模型参数辨识

本文选用 26650 型号磷酸铁锂电池试验，该电池充放电倍率大。根据《Freedom CAR 电池实验手册》进行 HPPC 试验^[10]，在 SOC 为 0.1~0.9 均匀分布的 9 个点上进行正负电流脉冲试验。图 2 为 HPPC 正负电流脉冲实验电池电压电流示意图。

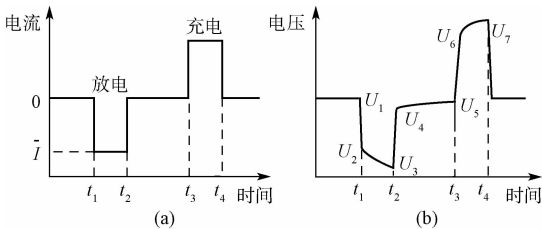


图 2 HPPC 脉冲电流示意图和电压反应曲线示意图

从 HPPC 试验电压反应曲线，提取出如下特征：

- 1) 根据 t_1 时端电压下降可推算出内阻： $R_0 = \Delta U / I = (U_1 - U_2) / I$
- 2) 电池放电前后的电压差，是由于电容 C_b 放电引起；

$$\Delta Q U_{ocv} = \frac{1}{2} C_b [(U_{ocv} + \Delta U_{ocv})^2 - U_{ocv}^2] \quad (2)$$

$$C_b = \frac{\Delta Q}{\Delta U_{ocv}} = \frac{\Delta Q}{U_1 - U_5} \quad (3)$$

3) 放电结束后电压缓慢上升是电池的极化效应，如式(4)，实为 RC 电路的零输入响应， τ 为 RC 并联环节的时间常数， $\tau = C_p R_p$ ， U_p 为串联电压之和， U_0 为初始极化电压，根据实验数据使用 MATLAB 工具箱 curve fitting 以该式作为目标式进行曲线拟合， U_0 、 τ 作为待定参数代入，得到时间常数 τ ；

$$U_p = U_0 \exp(-t/\tau) \quad (4)$$

4) 放电时电压缓慢下降是电池极化效应中 RC 电路的零状态响应，如式(5)，将已得到的 C_b 和时间常数 τ 代入计算，得到极化电阻，由时间常数公式可得到极化电容参数 C_p ；

$$U = U' - \frac{1}{C_b} \int Idt - IR_{p1}(1 - \exp(-t/\tau_1)) - IR_{p2}(1 - \exp(-t/\tau_2)) \quad (5)$$

经辨识得到 9 个 SOC 点的改进 PNGV 模型参数，各个参数通过拟合得到参数关于 SOC 的连续函数。OCV 关于 SOC 的特征曲线是通过 0.02C 的极小电流循环充放电实验获取，将充放电两条曲线取中值即为 OCV 曲线。

4 扩展卡尔曼滤波

4.1 扩展卡尔曼滤波介绍

船舶用动力锂电池工况复杂且非线性，故采用扩展卡尔曼滤波^[11-12](EKF)算法进行 SOC 估计。结合 PNGV 模型进行 EKF 推导过程如下，离散非线性系统状态方程和观测方程如下式(6)、(7)所示。

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (6)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + v_k \quad (7)$$

式中： $f()$ 、 $g()$ 为非线性函数，其中， w_k 和 v_k 为系统噪声和观测噪声， x_k 为状态变量， y_k 为输出观测量， u_k 为输入量^[13-15]。将该非线性模型在 (x_k, u_k) 处进行一级泰勒展开，可得到：

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(\bar{x}_k, u_k) + \frac{\partial f}{\partial x_k} [x_k - \bar{x}_k] \\ y_k = g(\bar{x}_k, u_k) + \frac{\partial g}{\partial x_k} [x_k - \bar{x}_k] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + [f(\bar{x}_k, u_k) - A_k \bar{x}_k] + w_k \\ y_k = C_k x_k + [g(\bar{x}_k, u_k) - C_k \bar{x}_k] + v_k \end{cases} \quad (9)$$

其中，令 $A_k = \frac{\partial f}{\partial x_k} |_{x = \hat{x}_k^+}$ ， $C_k = \frac{\partial g}{\partial x_k} |_{x = \hat{x}_k^-}$ 。

扩展卡尔曼滤波算法递推步骤如下：首先，状态初始化，如式(10)所示。

$$\begin{cases} x_{0/0} = E[x(0)] \\ P_{0/0} = E\{[x(0) - E[x(0)]] [x(0) - E[x(0)]]^T\} \end{cases} \quad (10)$$

然后,更新状态预测值、计算误差协方差矩阵及卡尔曼增益,如式(11)所示:

$$\begin{cases} \bar{x}_{k/k-1} = f(\bar{x}_{k-1/k-1}, u_{k-1}) \\ P_{k/k-1} = A_{k-1}P_{k-1/k-1}A_{k-1}^T + Q_{k-1} \\ K_k = P_{k/k-1}C_k^T(C_kP_{k/k-1}C_k^T + R_k)^{-1} \end{cases} \quad (11)$$

之后,修正状态预测值值和误差协方差矩阵,如式(12)所示:

$$\begin{cases} \bar{x}_{k/k} = \bar{x}_{k/k-1} + K_k(y_k - g(\bar{x}_{k/k-1}, u_k)) \\ P_{k/k} = (I - K_kC_k)P_{k/k-1} \end{cases} \quad (12)$$

进入下一时刻的递推,更新状态预测值、计算误差协方差矩阵及卡尔曼增益,再修正状态预测值值和误差协方差矩阵,如此递推计算。

4.2 基于 EKF 的 SOC 估计

在使用 EKF 算法进行电池 SOC 估计时,将 SOC 作和极化电压为系统的状态变量,此时系统的输入为电池电流 i_k ,系统的输出为电池端电压 U 。根据改进 PNGV 模型状态方程,令

$$x_k = (S_k, U_p^k)^T \quad (13)$$

$$f(x_k, i_k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-\Delta t/\tau) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_k \\ U_p^k \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{\eta\Delta t}{Q} \\ R_p(1 - \exp(-\Delta t/\tau)) \end{pmatrix} i_k \quad (14)$$

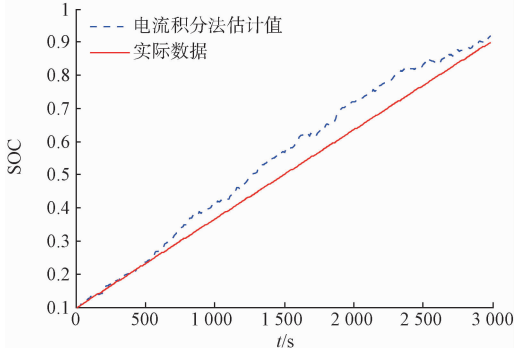
$$g(x_k, i_k) = U_{ocv}(S_k) - i_kR_0 - U_p^k \quad (15)$$

式中: R_p 、 C_p 、 R_0 和 U_{ocv} 为模型辨识的参数曲线。 η 为库仑系数,充电时 $\eta=1$,放电时 $\eta<1$, i_k 为 k 时刻的电流,充电为正,放电为负, Q 为电池容量,单位为 Ah,通过实验测得, S_k 为电池荷电状态,即剩余容量 SOC, Δt 为采样周期, U_p^k 为采样点时刻 k 处 R_p 上的电压估计值, $U_{p,k}$ 为采样点时刻 k 处 R_p 上的电压估计值, τ 为模型 RC 环节的时间常数, A_k 、 C_k 矩阵根据定义:

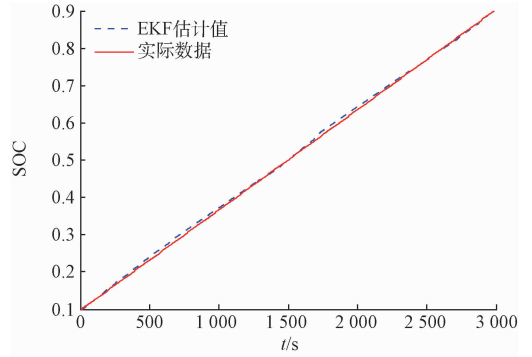
$$A_k = \frac{\partial f}{\partial x_k} \Big|_{x=x_i+} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-\Delta t/\tau) \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$C_k = \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{x=x_i-} = \left(\frac{dU_{ocv}(S)}{dS} \Big|_{S=S_i}, -1, -1 \right) \quad (17)$$

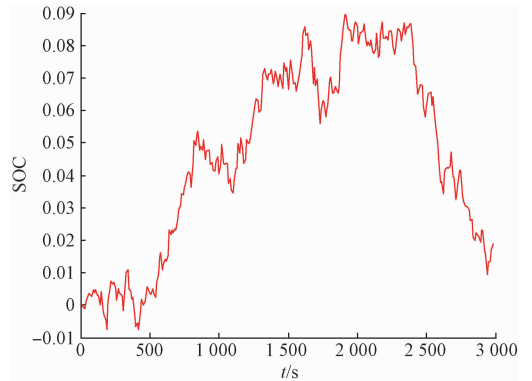
仿真结果如图 3 所示,传统安时积分法估计由于测量误差累计和噪声干扰的存在,SOC 估计的最大误差高达 9%。



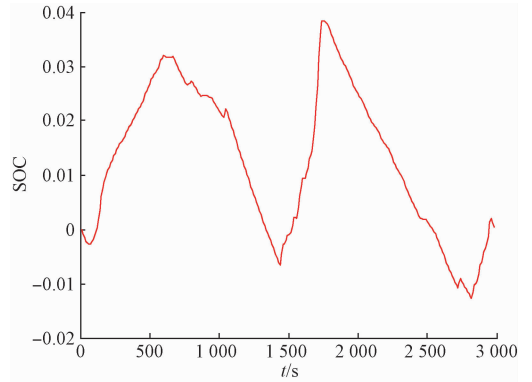
(a) 1C 充电电流积分法 SOC 估计



(b) 1C 充电扩展卡尔曼滤波 SOC 估计



(c) 1C 充电电流积分法 SOC 估计误差



(d) 1C 充电扩展卡尔曼滤波 SOC 估计误差

图 3 EKF 算法 SOC 估计和安时积分 SOC 估计仿真结果

扩展卡尔曼滤波法最大误差为 4%,平均误差为 1.3%。

在状态初始化时,故意将 SOC 赋值为错误值 0.2,准确值应为 0.1,仿真结果如图 4 所示,从图中可以看出,拓展卡尔曼滤波在初值错误的状态下进行自适应调整,最终 SOC 估计值逐渐接近标准值。

5 结论

从 SOC 估算结果看出, PNGV 模型结合 EKF 法进行 SOC 估计相比传统安时积分法,不仅提高了 SOC 估计的精度,而且减小测量误差和模型误差的影响,从而降低了 SOC 估计对初值的要求。在船舶储能领域,本文所述新型

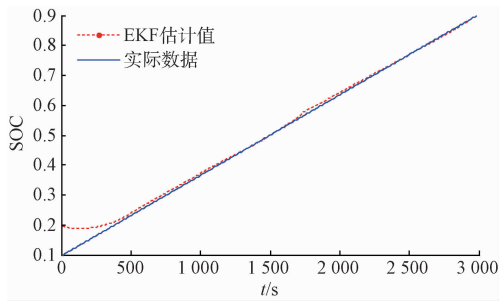


图 4 EKF 算法 SOC 估计在初值错误的情况下的自适应调整

的 SOC 估算算法将改善锂电池剩余容量的测量和计算现状,有效解决了锂电池使用中剩余容量精度差的缺点,促进锂电技术在船舶储能上应用推广,对于船舶锂电池状态的测量和计算具有较强的指导意义。

参考文献

- [1] 时玮,姜久春,李索宇,等. 磷酸铁锂电池 SOC 估算方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(8): 769-774.
- [2] SPOTNITZ, ROBERT. Modeling Lithium-ion batteries [J]. Developed exclusively for IEEE eLearning Library, 2013, 1-4673-3205-4.
- [3] 程宇菡. 锂电池电量检测系统设计[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- [4] 张晓敏. 高精度锂电池电量监测策略及采集电路的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- [5] 李哲. 纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究[D]. 北京:清华大学, 2011.
- [6] 邓淑贤. 电动汽车大容量锂电池管理系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(9): 34-37.
- [7] 张利,张庆,常成,等. 用于电动汽车 SOC 估计的等效电路模型研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1161-1168.
- [8] 李哲,全猛,卢兰光,等. 动力型铅酸电池及 LiFePO_4 锂离子电池的容量特性[J]. 电池, 2009, 39(1): 30-32.
- [9] 闫石,沈爱第,高迪驹. 锂电池在混合动力船舶制动能量回收中的应用研究[J]. 中国水运, 2014(11): 173-175.
- [10] 姜久春,文锋,温家鹏,等. 纯电动汽车用锂离子电池的建模和模型参数识别[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(1): 67-74.
- [11] 刘艳莉,戴胜,程泽,等. 基于有限差分扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2014(1): 221-228.
- [12] 袁学庆,张阳,赵林,等. 基于 EKF 的锂电池 SOC 估算与试验研究[J]. 电源技术, 2015(12): 2587-2589, 2615.
- [13] 石璞,董再励. 基于 EKF 的 AMR 锂电池 SOC 动态估计研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 1-3.
- [14] 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.
- [15] 王杰,郑逸武,王雨晨. 工程应用 EKF 的动力锂电池 SOC 估算[J]. 通信电源技术, 2015(4): 84-87.

作者简介

雷津(通讯作者), 1980 年出生, 工学硕士, 工程师, 研究方向为船舶电气研究设计工作。

E-mail: 17655070@qq.com

邓磊, 1989 年出生, 硕士, 研究方向为锂电池组管理技术。

李小谦, 1989 年出生, 硕士, 研究方向为电气测量技术。

姚川, 1989 年出生, 博士, 研究方向为算法设计。