

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801552

基于 AMESim 的锂电池健康状态估计模型实验研究

孙 俏 张晓宇

(冀北电力有限公司管理培训中心 北京 102401)

摘要: 新能源汽车动力电池健康状态(state of health,SOH)是一个表征电池性能优良的重要评价指标。针对准确估计 18650 锂电池健康状态这一目标需求,在锂电池单体数学模型的基础上,通过其等效电路模型分析影响锂电池健康状态的因素,采用通用非线性模型(gneral nonlinear model,GNL)电池等效电路和扩展卡尔曼滤波算法,在 AMESim 仿真环境下搭建了锂电池 SOH 估计模型,并对 18650 锂电池进行充放电循环实验,将采集到的数据集导入 AMESim 估计模型的数据模块中进行算法仿真。仿真实验结果表明,SOH 估算误差小于 8%,建立的锂电池 SOH 估计模型满足估算精度高,响应速度快的目标需求。

关键词: 电池健康状态;等效电路模型;卡尔曼滤波算法;AMESim;充放电循环实验

中图分类号: TN701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Experimental study on estimation model of health state of lithium battery based on AMESim

Sun Qiao Zhang Xiaoyu

(State Grid JiBei Electric Power Company Limited Management Training Center, Beijing 102401, China)

Abstract: State of health (SOH) is an important indicator of good battery performanceNew energy vehicle. Aiming at the target requirement of accurately estimating the health status of 18650 lithium battery, based on the mathematical model of lithium battery cell, the equivalent circuit model is used to analyze the factors affecting the health status of lithium battery, and the universal nonlinear battery equivalent circuit model is adopted. Gneral nonlinear model (GNL) and extended Kalman filter algorithm, the SOH estimation model of lithium battery was built in AMESim simulation environment, and the charge and discharge cycle experiment of 18650 lithium battery was carried out. The collected data set was imported into the data module of AMESim estimation model. The simulation results show that the SOH estimation error is less than 8%, and the established lithium battery SOH estimation model meets the target demand for High estimation accuracy and fast response.

Keywords: state of health; equivalent circuit model; extend Kalman filter algorithm; AMESim; charge-discharge cycle experiments

0 引 言

广泛应用于各行各业,比如机械动力装置、新能源汽车等,锂电池是否具有优良的性能至关重要,表征电池性能的参数指标有电池荷电状态、电池的容量、电池的健康状态等,其中,锂离子电池的健康状况(state of health,SOH)是指在一定条件下,电池所能充入或放出电量与电池标称容量的百分比^[1]。通过其定义能看出电池 SOH 表明了电池在充放电过程中的保有容量,电池的健康状态直接影响到电池的使用寿命以及以电池为载体的动力装置的续航。

由此可见,对锂电池 SOH 进行精确地估计是为锂电池

的使用寿命和安全保驾护航的一项重要研究工作,国内外对电池 SOH 估计投入了大量的研究,也取得了大量的研究成果,研究方法主要在建立电池 SOH 模型、电池内部相关参数辨识、估算算法优化等方面。其中,Plett^[2]利用电池等效电路模型,采用双卡尔曼滤波算法来估计电池健康状态;Mohammd 等^[3]以单体电池容量作为训练样本,采用神经网络来预估电池 SOH;Marco 等^[4]采用测量法,摒弃电池的电化学模型,利用模糊算法和神经网络算法来估算电池 SOH;文献[5]中利用电池等效电路模型,建立了模糊神经网络估算模型,通过参数识别来估算电池健康状态。上述研究方法一方面存在样本训练精度不足的缺陷,另一方面存在算法实

现难度大,实际的工程应用实现成本高的问题。

针对上述问题以及精确估计电池 SOH 这一目标需求,本文在电池等效电路模型基础上,建立了基于扩展卡尔曼滤波算法的锂电池 SOH 估算模型,对 18650 锂电池进行充放电循环实验,将采集充放电数据集导入 AMEsim 模型数据集进行仿真估算,在仿真过程中忽略电池温度对电池内阻的影响,从而对 SOH 估算精度的影响,将 AMEsim 电池模块的外部变量温度设置为恒值,仿真结果表明建立的 AMEsim 估计模型 SOH 估计精度高,模型有很强的适用性。

1 模型描述

锂电池在频繁的充放电过程中,电池会由于自身和大电流充电原因出现极化现象,造成浓度差异、电极表面晶形发生变化,进而影响电池的容量和健康状态,极化现象如图 1 所示。

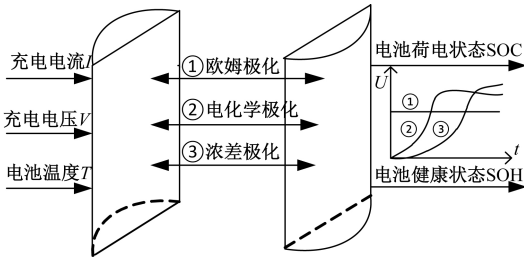


图 1 锂电池极化现象

本文采用通用非线性模型 (general nolinear model, GNL) 等效电路,模型在考虑电池自放电和过充电影响的基础上,对锂电池的欧姆极化、电化学极化和浓差极化分别建模,GNL 等效电路模型及模型参数如图 2 和表 1 所示。

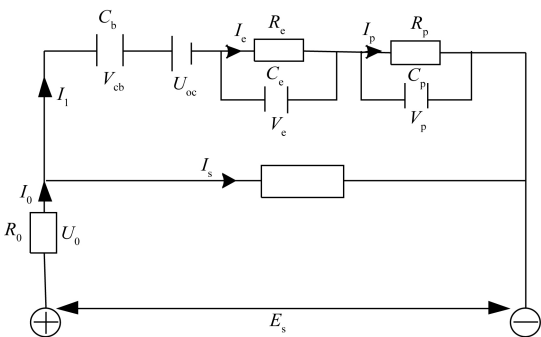


图 2 GNL 等效电路模型

根据 GNL 等效电路模型的电路结构和基尔霍夫定律可知:

$$\begin{cases} I_0 = I_1 + I_1 \\ I_e = I_1 - \dot{V}_e C_e \\ I_p = I_1 - \dot{V}_e C_e \\ I_1 = \dot{V}_e C_e \\ E_s - I_s R_s - U_0 \end{cases} \quad (1)$$

表 1 等效电路模型参数

参数	定义	参数	定义
E_s	端电压	R_p	浓差极化内阻
U_{oc}	开路电压	C_e	电化学极化电容
R_s	自放电电阻	C_p	浓差极化电容
C_b	储能电容	V_{cb}	储能电容电压
R_e	电化学极化内阻	Q_{Max}	当前最大容量
R_0	欧姆极化内阻	Q_N	额定容量

由式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} V_e \\ V_p \\ V_{cb} \end{bmatrix} = [I_0 - I_s] \begin{bmatrix} \frac{1}{C_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_b} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_e \\ I_p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

SOH 可以定义为当前最大容量与额定容量的比值^[6],表达式如下:

$$SOH = \frac{Q_{Max}}{Q_N} \times 100\% \quad (3)$$

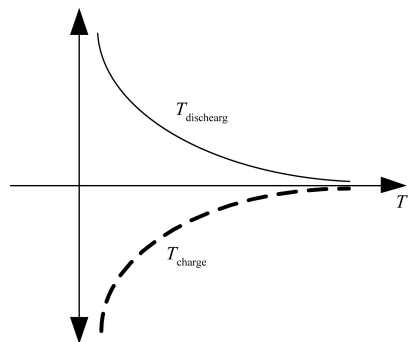


图 3 电池温度

从 GNL 等效电路模型数学描述以及 SOH 计算公式能形象地描述出在电池频繁的充放电过程中的容量损耗以及内阻对电池健康状态的影响,在锂电池搁置的过程中存在自放电现象,电池的内部温度呈现非线性变化,对内阻和容量存在一定的影响,在电池散热系统工作过程中,可以将电池温度趋近于环境温度,便于模型参数辨识也即:

$$\begin{cases} R_0 = R_0(SOH, T) \\ R_e = R_e(SOH, T) \\ R_p = R_p(SOH, T) \\ Q_{Max} = Q_{Max}(SOH, T) \end{cases} \quad (4)$$

2 SOH 估计方法

锂电池 SOH 估计是一个对非线性多参数系统的估计过程,卡尔曼滤波算法能很好地估计非线性系统的状态,其中基于卡尔曼滤波理论,对非线性系统状态估计的方法有扩展卡尔曼滤波 (extend kalman filtering, EKF)^[7]、自适应

无迹卡尔曼滤波(unscented kalman filtering, UKF)^[8]、双卡尔曼滤波(dual-extend kalman filtering, D-EKF)^[9]等。本文采用 EKF 算法估计锂电池的健康状态,锂电池在充放电过程中容量会发生衰减,衰减的过程是非线性的,加上在对非线性系统 SOH 估算中考虑外部扰动产生的噪声,估算锂电池的可用额定容量这一重要参数对于减小锂电池健康状态估计误差显得更为重要。由文献[10]可知,利用 EKF 算法对电池的当前容量进行估计,进而准确地估算锂电池 SOH,由卡尔曼滤波原理构造 SOH 估计的状态方程和观测方程,如下:

$$\begin{cases} Q_{k+1} = A_k Q_k + B_k u_k + w_k \\ D_k = H_k Q_k + C_k u_k \end{cases} \quad (5)$$

其中: $H_k = [0, 0, 1]$

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{C_e R_e} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{1}{C_p R_p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_b R_b} \end{bmatrix} \quad B_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_e} \\ \frac{1}{C_p} \\ \frac{1}{C_b} \end{bmatrix}$$

$$C_k = -\frac{\eta i_{k+1} \Delta t}{Q_k^2} \quad w_k = \frac{R_e}{R_p} (1 - e^{-\frac{\eta C_e}{R_e}})$$

在上述的数学描述中, Q_{k+1}, Q_k 分别表示 $K+1$ 时刻、 K 时刻电池容量; A_k, B_k, H_k, C_k 分别表示系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵以及传递矩阵; w_k 表示非线性扰动; Δt 表示采样时间; i_{k+1} 表示 $K+1$ 时刻充放电电流, η 为库仑效率。

扩展卡尔曼滤波 SOH 估计算法描述了在扰动噪声和非线性估计状态下,将锂电池的健康状态估计转换为对电池容量的估计,通过建立的状态方程和观测方程对当前电池的容量进行估算,由于考虑到锂电池的自放电和温度带来的干扰,在对 SOH 估计公式中引入拉格朗日函数,对参数进行优化,利用极小值原理,构造基于 EKF 算法的锂电池 SOH 估算求解器。循环过程中,容量的损失或衰减是不可避免的^[11]。在 SOH 估算过程中,面对锂电池容量衰减这一非线性缓慢变化的动态过程,无法在极短的采样时间内测量电池的当前容量,也没法完整地捕捉电池的衰减信息,为了打破这一局限,可以通过增加电池充放电的循环次数,取得更为详细的锂电池充放电信息,更好地分析电池的性能,从而精确地估算锂电池的健康状态,为此需要将实验所得电池的数据集导入 SOH 估计模型中。

3 SOH 估计模型

AMESim 作为非常优秀的仿真软件,为流体、机械、控制、电磁等工程系统提供了一个较为完善的总和仿真环境和解决方案^[12]。在 AMESim 仿真环境下有草图模式、子模型模式、参数模式以及仿真模式。在 AMESim 仿真平台草图模式中搭建了锂电池健康状态估计模型,在参数模式中设置模块的参数。锂电池健康状态估计模型主要包括单体

电池模块、EKF 算法模块、数据处理模块。EKF 算法模块用来精确估计电池当前容量;在数据处理模块中,将实验采集的数据导入到数据集中,整个 SOH 估计模型会通过接口自动调用数据集中的单体电池电压、开路电压等数据,其中 AMESim 模块库中电池模块有 4 个外部变量接口,温度为恒值,设置为 25 °C;利用 AMESim 的常规模块搭建了 EKF 算法模型,整体如图 4 所示。

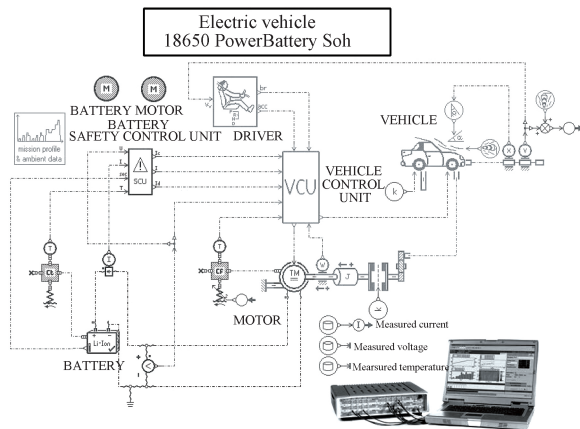


图 4 SOH 估计模型

4 实验平台以及实验结果

为了获得更为精准的估计结果,在 NewAre 高精度多通道多点独立控制的实验平台上搭建了 18650 锂电池循环充放电实验环境,如图 5 所示。利用灵活的工步编辑器实现了锂电池在不同的充放电环境中进行循环充放电,在工步编辑过程中,充分利用恒流充电^[13]、恒阻放电^[14]、搁置、循环等方式,其中,18650 锂电池充电末端时采用涓流充电^[15]、恒压充电的方式,防止充电末端对电池的冲击过大。工步编辑内容如表 2 所示。实验用 18650 锂电池单体数量为 4 个,18650 锂电池单体初始参数如表 3 所示。

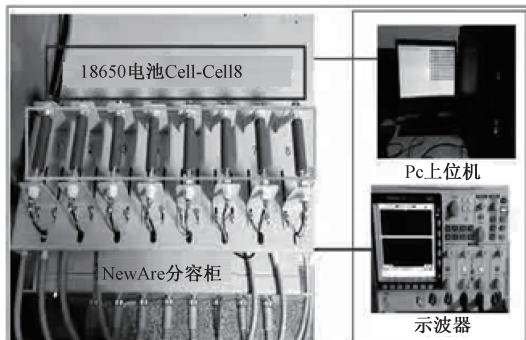


图 5 循环充放电实验平台

搭建好了循环充放电实验平台后,实验设备按编辑好的工步开始执行,由电池的特性,在循环充放电实验中一定要保证电池的电压处于其工作电压范围内(2.6~4.2 V),

表 2 工步编辑

工步	内容
1	2 C 恒流充电
2	恒压(涓流)充电
3	恒阻放电
4	搁置
5	循环 1~4

表 3 18650 电池初始参数

单体	初始电压/ mV	内阻/ mΩ	标称容量/ mAh	初始 SOH/ %
Cell1	3 696	7.47	2 000	94.4
Cell2	3 733	8.05	2 000	104.7
Cell3	3 698	7.65	2 000	92.8
Cell4	3 711	8.17	2 000	89.47

充电电流应小于 2 000 mA。在充放电循环实验过程中设置采样周期为 0.1 s, 实时采集电池的电压数据如图 6 所示。

如图 6、7 所示, 在 18650 电池循环充放电过程中是按照编辑好的工步内容执行的, 电池的截止电压小于 4.2 V, 表明在 AMESim 仿真平台搭建的锂电池健康状态估计模型的估算误差都小于 8%, 采用扩展卡尔曼滤波算法, 4 个实验用 18650 电池单体的健康状况估算速度快且误差小, 满足精确估计的目标需求。

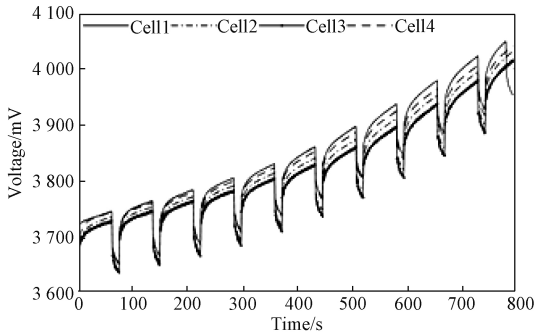


图 6 电池单体电压

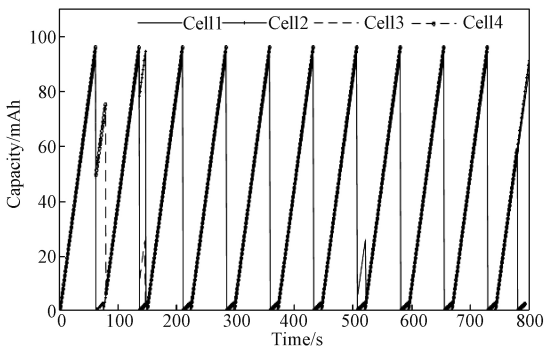


图 7 电池放电容量

5 结 论

SOH 是锂电池性能优良的一个重要表征参数, 本文在电池的 GNL 等效电路模型基础上, 分析了电池内阻和容量衰减对锂电池健康状态的影响, 在 AMESim 仿真环境下搭建了基于 EKF 算法的 SOH 估计模型, 对已取得的充放电实验数据编制成电池内阻与开路电压曲线图, 导入到 AMESim 估计模型数据集模块中进行仿真计算。仿真结果表明, 在以实时估计电池当前最大容量为转换关系基础上, AMESim 仿真环境下搭建的锂电池健康状态估计模型的 4 个单体估算误差都小于 8%, 满足精确估计的目标要求, 对更为复杂的充放电环境下以及将模型加载在实时工况整车模型中提供了指导。

参考文献

- [1] 汪秋婷, 姜银珠, 陆赞豪. 基于 UKF 的 18650 锂离子电池健康状况估计[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 543-546.
- [2] PLETT G L. Extended Kalman filtering for battery management system of LiPB-base HEV battery packs, Part3. state and parameter estimation[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(2): 277-292.
- [3] MOHAMMD R, MOHAMMD A, SEUNGCHUL L, et al. A comparative analysis of techniques for electric vehicle battery prognostics and health management (PHM)[J]. Applied Energy, 2014, 135: 247-260.
- [4] MARCO L, GEORGE G. Measurement techniques for online battery state of health estimation in vehicle-to-grid applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(5): 1224-1234.
- [5] 韩丽, 戴广剑, 李宁. 基于 GA-Elman 神经网络的电池劣化程度预测研究[J]. 电源技术, 2013, 37(2): 249-250, 309.
- [6] BARRE A, DEGUILHEM B, GROLLEAU S, et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 680-689.
- [7] 刘艳丽, 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, 29(1): 221-228.
- [8] 魏克新, 陈峭岩. 基于自适应无迹卡尔曼滤波算法的锂离子电池状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 445-452.
- [9] 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.
- [10] 李然. 锂动力电池健康度评价与估算方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.

- [11] 杨鹏,巢亚军,渠冰,等.锂离子电池容量衰减研究[J].电源技术,2015,39(5):1083-1087.
- [12] 张增猛,周华,孙健,等.基于压差控制的蓄能器压力调节方法及其 AMESim 仿真[J].机床与液压,2017,35(6):99-101.
- [13] 刘伟,吴海桑,何志超,等.一种均衡考虑锂电池内部能量损耗和充电多速度的多段恒流充电方法[J].电工技术学报,2017,32(9):112-120.
- [14] 王力臻,谷书华,朱刚,等.碱性锌锰电池恒阻恒流放电中的若干关系[J].电池工业,2000(3):113-116.
- [15] 汪治华,张献东.氢镍电池组充电控制技术研究[J].电源技术,2013,37(3):390-392.

作者简介

孙俏,硕士,培训师,主要研究方向为新能源发电技术、财务管理。

E-mail: sunqiao1991@126.com