锂离子电池模型参数辨识研究

朱启煌1,陈伊韵2,张 爽2,舒开鑫1,方 宇1

¹扬州大学信息工程学院(人工智能学院), 江苏 扬州 ²扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2023年4月30日; 录用日期: 2023年5月31日; 发布日期: 2023年6月8日

摘要

由于汽车工况的变化,汽车动力电池组的结构系数也相应出现了非线性改变。为对此类非线性电池组件 实现高效控制,本文选用了二阶RC模型作为电池的等效电路模型,并采用了电池的恒流充放电试验、开 路电压和荷电状态的标定试验来获得电池的相关数据,在MATLAB中辨识二阶RC模型的相关参数。该模 型利用放电电流、开路电压等物理量,辨识出电池的内部结构参数、荷电状态等特性,方便对电池组进 行管理。通过MATLAB/Simulink软件中搭建模型进行仿真,验证了等效电路模型可以精确模拟实际电 池。

关键词

参数辨识,二阶RC模型,锂电池,荷电状态估计

Research on Model Parameter Identification of Lithium Ion Battery

Qihuang Zhu¹, Yiyun Chen², Shuang Zhang², Kaixin Shu¹, Yu Fang¹

¹College of Information Engineering (College of Artificial Intelligence), Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu ²College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: Apr. 30th, 2023; accepted: May 31st, 2023; published: Jun. 8th, 2023

Abstract

Due to the change in automobile working conditions, the structure coefficient of automobile power battery pack also appears to nonlinear change. In order to realize efficient control of such nonlinear battery components, this paper chooses the second-order RC model as the equivalent circuit model of the battery, and uses the constant current charge-discharge test of the battery, the calibration test of open circuit voltage and charge state to obtain the relevant data of the battery, and identifies the relevant parameters of the second-order RC model in MATLAB. The model uses discharge current, open circuit voltage and other physical quantities to identify the internal structural parameters of the battery, the state of charge and other characteristics, so as to facilitate the management of the battery pack. Through the simulation of the model built in MATLAB/Simulink software, it is verified that the equivalent circuit model can accurately simulate the actual battery.

Keywords

Parameter Identification, Second-Order RC Model, Lithium Battery, Estimation of State of Charge

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

锂离子动力电池具有使用寿命长、自放电率低以及能量密度高等优点,目前被广泛应用于新能源电 动汽车、光伏储能、铁路基建等领域[1],为了合理地利用动力电池,从而最大程度地延长动力电池生命 周期,必须随时准确获取动力电池的真实状况,而动力电池的真实状况无法直接测量得到,只能通过动 力电池管理系统(Battery Management System, BMS)中的动力电池模型的仿真估算[2] [3]。

锂电池的内部反应非常复杂,因此一般利用电压、电流、温度等这些外界特性,来推测电池荷电状况(State of Charge, SOC)、电池健康状态(State of Health, SOH)等。常用的电池模型,按照不同的形成机制包括电化学模型、等效电路模型以及神经网络模型。电化学模型着重分析电池在使用过程中的化学反应,模型复杂但准确度高[4];等效电路模型通过电阻电容等常用元件经过串联和并联方式组成电路[5];神经网络模型通过神经网络训练数量可观的实验样本,建立多个电池内外特性关系,模型精确但所需数据庞大且建立时间长[6]。应用于实际中时,一般会使用等效电路模型来辨识电池参数。相比于另外两种电池模型,等效电路模型的模型搭建较简单、参数辨识较容易且便于验证模型精确度。

在考虑仿真准确性和识别复杂性后,本文选择拥有两个 RC 回路和一个欧姆内阻的二阶 RC 模型作为 电池等效电路模型(如图 1),两个 RC 回路分别代表了电池的电化学极化和浓度差极化,欧姆内阻表示了 电池的内阻特性,该模型相较于其他模型具有更高的模拟精度,参数辨识也较其他模型更为方便准确[7]。





由基尔霍夫定律可得二阶 RC 模型的电压和电流的关系式如下,式中 U1 和 U2 为两个 RC 回路的电压:

$$U_{oc} = IR_0 + U_1 + U_2 + U_1$$
$$I = \frac{U_1}{R_1} + C_1 \frac{dU_1}{dt}$$
$$I = \frac{U_2}{R_2} + C_2 \frac{dU_2}{dt}$$

2. 锂离子电池特性

本文用于试验的电池是由深圳市威可力有限公司的 LFP7570260 锂离子电池,该电池规格参数如表 1 所示。

项目	规格
标称容量	10 Ah
标称电压	3.6 V
内阻	3~8 mΩ
重量	350 ± 6 g
最高充电电压	$4.2\pm0.05~\mathrm{V}$
放电终止电压	$2.75\pm0.05~\mathrm{V}$
充电电流	10 A
最大放电电流	30 A
工作温度范围	0°C~45°C

Table 1. Specifications of battery LFP7570260 表 1. 电池 LFP7570260 的规格参数

OCV-SOC 关系标定实验

锂离子电池特性实验有助于确定电池性能,为锂电池参数辨识模型的建立提供基本的实验数据。

电池开路电压(Open Circuit Voltage, OCV)是指电池在不接入回路情况下端电压的稳定值,是判断电池状态的主要依据之一。因为电池的 OCV 值会随着 SOC 的下降而减小,所以可以通过电池的 OCV 值来 评价电池状态、标定电池 SOC。电池可以在充放电过程中,通过充分静置的方式避免迟滞效应带来的影响,从而获取较准确的 OCV 值并用于对电池模型的仿真验证[8] [9] [10]。

具体实验步骤如下[11]:

- 1) 以 0.5 C 电流(即 5 A 电流)恒流充电,当电池端电压为截止电压 4.2 V 时停止充电;
- 2) 将电池静置 2 分钟;
- 3) 再以 4.2 V 电压对电池恒压充电, 当电池充电电流小于 0.02 A 时停止充电;
- 4) 将电池静置 4 小时,测量电池的端电压,近似于开路电压;
- 5) 以 0.2 C 电流(即 2 A 电流)恒流放电半小时,此时 SOC 值降低 10%;
- 6) 将电池静置 4 小时,测量电池的端电压;
- 7) 重复步骤 5)~6);
- 通过上述实验所得的资料,采用描点做图得到了 OCV-SOC 的拟合曲线,如图 2 所示。



Figure 2. OCV-SOC fitting curve 图 2. OCV-SOC 拟合曲线

3. 电池模型参数辨识及验证

3.1. 参数辨识模型

本文搭建的二阶 RC 等效电路模型的待辨识的参数有 *E_m、R₀、R₁、C₁、R₂、C₂, 该电池模型如图 3 所示,将在室温环境下采集的电池电压、电流数据导入到参数辨识模型中,辨识函数为:*

$$U(t) = U_{OC} - IR_0 - IR_1 \left(1 - e^{-t/R_1 C_1} \right) - IR_2 \left(1 - e^{-t/R_2 C_2} \right)$$

其中, U(t)是电池在 t 时刻的端电压, I 是回路电流。



Figure 3. Identification model of second-order RC parameters for lithium batteries 图 3. 锂电池二阶 RC 参数辨识模型

3.2. 参数辨识算法

最小二乘法(LS)是以函数模型模拟系统的过程中找出一组参数,使模拟输出电压与实际输出电压之间的偏差平方和达到最小值。

最小二乘法的估计值为: $\hat{\theta} = (\phi^{T} \phi)^{-1} \phi^{T} Y, \phi$ 为数据矩阵, Y为输出数据向量。 由于 LS 的计算工作量随着数据的增加而明显上升, 文献[12]采用了递推最小二乘法(RLS), 在每一次有新的观测数据时,利用新数据对上一时刻的 LS 估算结果再加以调整得出本次的估算结果, 而不是再次重新计算最小二乘法的估计值。相较于 LS 简化了计算, 内存资源消耗减小。

递推最小二乘的公式为:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) \Big[y(k) - \varphi^{\mathsf{T}}(k) \hat{\theta}(k-1) \Big]$$
$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)\varphi(k)}$$
$$P(k) = \Big[I - K(k)\varphi^{\mathsf{T}}(k) \Big] P(k-1)$$

其中, $\hat{\theta}(k-1)$ 为系统上一时刻估计值, $\varphi^{T}(k)\hat{\theta}(k-1)$ 为系统当前时刻理论观测值, y(k)为实际观测值, K(k)为系统的增益矩阵, 实际观测值与理论观测值相减作为系统的预测误差, 再与增益相乘即可得到此刻预测值得校正, 然后再加上系统上一时刻的估计值便能得到当前时刻估计值。

然而, RLS 辨识算法在数据逐渐增加时, 更容易产生"数据饱和"现象, 新信息也易于被淹没。为 了解决此缺陷, 可以添加遗忘因子 λ, 削弱对原有数据的权重, 从而使得新数据的作用增强, 这便是遗 忘因子递推最小二乘法(FFRLS) [13]。

遗忘因子递推最小二乘法的具体公式为:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) \left[y(k) - \varphi^{\mathsf{T}}(k) \hat{\theta}(k-1) \right]$$
$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^{\mathsf{T}}(k)P(k-1)\varphi(k)}$$
$$P(k) = \frac{1}{2} \left[I - K(k)\varphi^{\mathsf{T}}(k) \right] P(k-1)$$

式中,遗忘因子 λ 取值范围在 0~1,一般取 0.9~1。

因为对电池模型采集的原始数据较多,为简化算法的计算,本文决定采用带遗忘因子的递推最小二 乘法, *λ*取 0.95。

3.3. 参数辨识过程

采用 GH 1 kW/1.5 kW Series 可编程电源系统 GH600-2.6,使电池按照电流脉冲工况运行,得到的电池放电电流、电压曲线如下图 4、图 5 所示。







图 5. 电池外特性电压曲线

参数辨识过程:首先向辨识模型输入参数的初始值,电池模型在给定的电流工况下输出电压值,然 后采用遗忘因子最小二乘法对参数加以修正,得到使当前输出电压值与当前实际电压值误差最小的参数, 在不同时刻逐步地对模型的参数加以优化后得到最终的辨识参数[14]。

图 6~11 是参数辨识过程中的脉冲段 1、5 和 10 的端电压仿真结果与测量结果的波形对比,可以看出: 优化后的仿真电压与实际电压间误差相比于优化前明显减小,表明电池模型的参数越来越精确。



Figure 6. The simulated and measured terminal voltage before optimization of pulse segment 1

图 6. 脉冲段1的优化前端电压仿真值与测量值



Figure 7. The simulated and measured terminal voltage after optimization of pulse segment 1 图 7. 脉冲段 1 的优化后端电压仿真值与测量值









Figure 9. The simulated and measured terminal voltage after optimization of pulse segment 5





Figure 10. The simulated and measured terminal voltage before optimization of pulse segment 10

图 10. 脉冲段 10 的优化前端电压仿真值与测量值



Figure 11. The simulated and measured terminal voltage after optimization of pulse segment 10

图 11. 脉冲段 10 的优化后端电压仿真值与测量值

电池充放电数据辨识出的电池模型参数如图 12~17 所示。







Figure 13. *R*₀ identification results 图 13. *R*₀辨识结果



Figure 14. *R*₁ identification results **图 14.** *R*₁辨识结果







Figure 16. R₂ identification results 图 16. R₂辨识结果



Figure 17. C₂ identification results 图 17. C₂辨识结果

3.4. 参数辨识结果验证

在计算机中,将参数辨识结果代入到二阶 RC 电路模型(图 18)中,将验证工况电流值输入,模型的输出电压和实际电压对比结果如图 19 所示,最大误差小于 4%,表明辨识的模型参数可信,验证所建立的二阶 RC 等效电路模型基本可以满足仿真需求。在放电末期误差相对增大,是因为电池在这个阶段极化现象严重,电压变化剧烈,同时化学反应更加复杂,得到的实验数据误差较大[15]。







Figure 19. Comparison of model output voltage and actual voltage 图 19. 模型输出电压与实际电压对比

4. 结语

本文选择了使用较为普遍、参数识别有效且辨识误差较小的二阶 RC 等效电路模型,通过 OCV-SOC 关系标定实验、恒流充放电实验得到电池的相关数据,辨识电池等效模型中的有关参数,研究了一种动

态调节电池模型参数的辨识方式,该辨识方式的工作量较少,且更新频次小,对电池管理精度高。通过 对比电池实际电压值和模型输出电压值,表明其构建的电池等效模型可以模拟电池自身在恒流状态下的 运行情况,表明该电池模型参数辨识方法可靠有效,但在放电末期模型误差增大,后续考虑增加 RC 模 型阶数并优化辨识算法,提升电池模型辨识精度。

基金项目

江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22_1713)、国家自然科学基金(61873346)、镇江市科技 计划项目 - 产业前瞻与共性关键技术(GY2021017)。

参考文献

- [1] 崔宇, 刘文江. 新能源汽车锂离子动力电池技术发展现状及前景分析[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(2): 41-48. https://doi.org/10.19718/j.issn.1005-2992.2022-02-0041-10
- [2] 周娟, 化毅恒, 刘凯, 等. 一种高精度锂离子电池建模方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6394-6403. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.182306
- [3] 王振,李保国,罗权权,等. 电动汽车锂离子电池热管理系统研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 232-238. https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.035
- [4] 谢奕展, 程夕明. 锂离子电池简化电化学模型理论误差分析研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 37-55.
- [5] 郭向伟,司阳,高岩,等.动力锂电池最优等效电路模型研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(1):48-55. https://doi.org/10.13382/j.jemi.B2003351
- [6] 陈峥, 李金元, 舒星, 等. 基于混合神经网络的锂离子电池健康状态估算[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(3): 87-95. <u>https://doi.org/10.16112/j.cnki.53-1223/n.2022.03.451</u>
- [7] 杨曦, 李昕. 关于二阶 RC 锂电池模型的仿真研究[J]. 电子质量, 2022(10): 158-162.
- [8] 郭宝甫, 张鹏, 王卫星, 等. 基于 OCV-SOC 曲线簇的磷酸铁锂电池 SOC 估算研究[J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1125-1128+1139.
- [9] 谭必蓉, 杜建华, 叶祥虎, 等. 基于模型的锂离子电池 SOC 估计方法综述[J/OL]. 储能科学与技术: 1-15. https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0016, 2023-03-08.
- [10] 付诗意, 吕桃林, 闵凡奇, 等. 电动汽车用锂离子电池 SOC 估算方法综述[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 1127-1136. <u>https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0013</u>
- [11] 李礼夫, 张东羽. 磷酸铁锂电池充电后静置的电压预测方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(5): 109-113.
- [12] 李家铮, 张禹, 赵文川, 等. 基于递推最小二乘法的 SCARA 机器人动力学参数辨识研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(6): 22-26.
- [13] 方桂花, 王鹤川, 高旭. 基于动态遗忘因子递推最小二乘法的永磁同步电机参数辨识算法[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(1): 280-283.
- [14] 华国邑. 推广的最小二乘法辨识及比较[J]. 科学技术创新, 2023(4): 14-17.
- [15] 李田丰, 易映萍. 电动汽车用锂离子电池模型参数辨识研究[J]. 软件导刊, 2021, 20(10): 117-123.