

基于 Thevenin 的锂离子动力电池建模实验研究

于 跃¹, 李 昊², 杨燕霞¹, 徐今强¹

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088;

2. 河南工学院 电气工程系, 河南 新乡 453003)

摘要: 为了准确估算锂电池的荷电状态 (SOC), 对其等效电路模型进行了研究; 通过充放电实验研究锂电池的电特性, 利用充放电电压、电流数据辨识其欧姆电阻、极化电阻和极化电容参数, 建立了较为精确的锂电池戴维宁模型; 建立实验用磷酸铁锂电池的离散状态空间模型, 在 Matlab/Simulink 环境下建立了该电池的仿真模型, 并设计了放电实验; 实验证明, 建立的锂电池模型仿真数据与实测数据误差小于 0.1 V, 且随着充放电的进行误差逐渐减小, 较好地跟随电池电压的变化, 模型精度较高。

关键词: 锂电池; 电特性; 戴维宁模型; 混合脉冲功率试验

Experimental Research on Modeling of Lithium Power Battery Based on Thevenin

Yu Yue¹, Li Hao², Yang Yanxia¹, Xu Jinqiang¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Department of Electrical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: To accurately estimate the state of charge (SOC) of lithium battery, the equivalent circuit model was studied. Through experimental study on the electrical characteristics of lithium-ion batteries to charge and discharge, use of charging and discharging voltage and current data to identify the Ohm internal resistance, polarization resistance and capacitance parameter, more precise lithium battery Thevenin model was established. In this paper, a discrete state space model of lithium iron phosphate battery was established and the simulation model of the battery was established in Matlab/Simulink environment, and the discharge experiment was designed. Experiments show that the mathematical models of lithium batteries simulation data and the measured data error is less than 0.1 V, and the error decreases as the charge and discharge, better to follow the change of the battery voltage, the model precision is higher.

Keywords: lithium battery; electrical characteristics; Thevenin model; hybrid pulse power characterization test

0 引言

锂电池荷电状态^[1] (state of charge, SOC) 是动力电池组工作时的重要参数, 可以为电池管理系统提供控制依据, 其估计精度制约着系统优劣。但是 SOC 不能直接测量, 由于电池本身是密闭的电化学反应, 且电池组工作时电流变化剧烈, 使得锂电池系统具有很强的非线性而难以精确建模。目前的锂离子电池模型^[2] 以纯数学模型、电化机理模型、等效电路模型等为主, 其中最常用的为等效电路模型。等效电路模型很好地描述了锂离子电池的电化学反应过程, 其表达式简单, 且等效电路模型非常容易转换为状态空间模型, 可以应用于各种 SOC 估算算法, 因此应用最为广泛。

锂电池充放电过程中电池内部发生着剧烈的电化学反应, 温度、电流、使用次数等各种因素均会影响电池的各种指标。作为电池的重要参数, SOC 有着多而复杂的影响因素, 根据当今广泛认可的分类方法, 可以分为可恢复性因素和不可恢复性因素两大类^[3]。其中不可恢复因素对 SOC 造成的影响是不可逆的, 这些因素和电池的制造工艺及是否使用恰当有关, 不

能通过后期保护修正, 文中着重研究可恢复因素对 SOC 的影响, 电解液密度的变化会导致锂电池开路电压 (open circuit voltage, OCV) 的规律性变化, 且其最直观的表现就是电池内部的欧姆电阻和极性电阻值发生的变化; 温度变化可以影响电池的化学反应, 当温度在正常工作范围内升高时, 可以使电池输出更多的能量, 而锂电池工作温度过低, 将停止释放能量。文中将实验用电池的工作温度稳定在 20°左右, 主要研究充放电电流对 SOC 的影响。

1 锂电池电特性分析

1.1 锂电池的开路电压特性

OCV 是电池完全静置情况下正负极之间的电势差, OCV 取决于电池的生产制造工艺, 不受电池的尺寸、结构等因素影响。实验表明, 当温度为恒定值时, 锂离子电池的 OCV 与 SOC 有着直接对应的关系^[4]。要分析锂电池的特性以及模型所需的各项参数就必须对电池进行充放电实验。表 1 给出了实验用锂电池的各项参数。实验用电池为磷酸铁锂, 额定容量为 10 Ah。

表 1 电池参数表

电池参数	数值
额定容量	10 Ah
额定电压	3.2 V
完全充电电压	3.65 V
放电截止电压	2.5 V
标称放电电流	3.3 A

收稿日期: 2017-08-23; 修回日期: 2017-10-06。

基金项目: 国家自然科学基金 (61563006); 河南省教育厅重点科研项目 (16A413005); 新乡市科技攻关项目 (ZG14032); 河南省教育厅重点科研项目 (13GY05); 广东海洋大学“创新强校工程”项目 (Q14580)。

作者简介: 于 跃 (1991-), 女, 吉林梅河口人, 硕士, 助教, 主要从事电力电子技术、新能源储能技术方向的研究。

在保障温度的前提下，设置脉冲放电电流为 1 C (10 A)，以 1 C 电流对锂电池充电 360 s，使 SOC=40% 增加至 SOC=50%，静置一段时间后测量其 OCV；再以 1 C 电流将锂电池充电 360 s，使 SOC=50% 增加至 SOC=60%，静置后测其 SOC；循环充电、静置，直至将电池充至满电。根据静置时间的长短得到静置 15 分钟，静置 30 分钟，静置 45 分钟后的单体磷酸铁锂电池的 SOC 与 OCV 关系如图 1 所示。

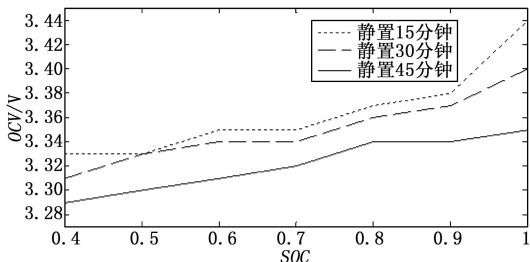


图 1 电池 SOC 与 OCV 关系图

由图 1 可以看出，在单体电池充电过程中，SOC 与 OCV 间确实存在着直接对应的关系。从这三条曲线可以看出，当静置时间延长，同一 SOC 下的 OCV 有所下降，这是因为随着静置时间的增加，锂离子电池内部的电化学反应逐渐平缓，使得 OCV 逐渐下降。实验证明，通常要静置一个半小时左右才能测得准确的 OCV，实验选取的静置时间为一个小时。

1.2 锂电池的内阻特性

电流通过电池时，在电池的正负两端会有一定的压降，这是由电池内阻产生的，锂离子电池的内阻是电池建模的一个重要指标，电池的内阻由欧姆内阻和极化内阻组成^[5]，其中欧姆内阻受电池内部化学反应的影响较小，而极化内阻是由电池内部化学反应时产生的极化现象形成，内阻的表示如下：

$$R_0 = R_\Omega + R_p \tag{1}$$

其中： R_Ω 为欧姆内阻， R_p 为极化内阻， R_Ω 和 R_p 的数值由系统参数辨识求得。

在保障温度的前提下，以 1 C 电流对实验用锂离子电池充电，每次充电 10%，使其 SOC 从 40% 逐步充至 100%。在充电停止的瞬间端电压变化类似阶跃响应原理，其中电压的瞬间下降由欧姆内阻产生；而其端电压变化产生曲线由电池的极化现象导致，记录电池端电压的恢复过程，利用一阶 RC 曲线可以辨识得到 R_Ω 与 R_p 随 SOC 的变化如图 2 所示。

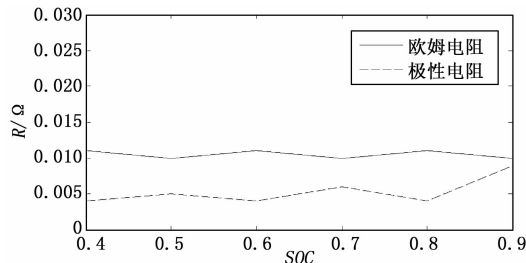


图 2 R_Ω 与 R_p 随 SOC 变化曲线

从图 2 可以看出，在设置温度恒定的前提下， R_Ω 变化较小，而 R_p 变化剧烈，这是因为 R_Ω 受电解液浓度影响，而电池工作过程中电解液浓度变化不大，仅是随着 SOC 的增加而略有增加。 R_p 也会随着 SOC 的增加有所增加，然而其受化学反应的极化程度影响更大，因此整个充放电过程中， R_p 变化更为

剧烈。论文探讨开路电压和内阻随 SOC 的变化情况，辨识得到实验电池的开路电压和内阻值，为后面建立电池的 Thevenin 模型打下基础。

2 锂电池模型的建立

戴维宁 (Thevenin) 模型^[6] 是最有代表性的等效电路模型，Thevenin 模型的设计中将电池内部化学反应中的极化现象等效为极化电阻与极化电容，较好地实现了对电池动静态特性的模拟，其电路结构如图 3 所示。

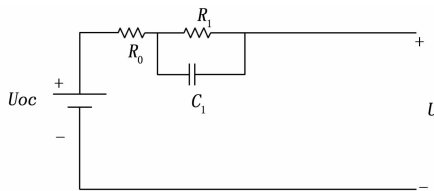


图 3 戴维宁模型

在图 3 中， U_{oc} 是电池的 OCV， R_0 是其欧姆电阻， R_1 和 C_1 分别是其极化电阻和极化电容， U 是锂电池的端电压。

基于上面的 Thevenin 模型，建立实验用磷酸铁锂电池的状态空间模型，以锂电池的 SOC 和 R_1 、 C_1 并联电路的极化电压 U_1 作为系统的状态变量，以电路中的电流 i_k 为系统的输入，电路的工作电压 (端电压) U 为系统的输出，得到的离散状态空间模型的状态方程为：

$$\begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ U_1^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T}{\tau}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_1^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\eta T}{C} \\ r_1(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \end{bmatrix} i_k + \omega_k \tag{2}$$

式中， T 为参数的采样周期，实验中设置为 1 s， U_1^k 为时刻 k 处的极化电阻 R_1 上的极化电压估值， $\tau = R_1 C_1$ 为时间常数，由极化电阻和极化电容相乘得到， C 为实验用磷酸铁锂电池的额定容量，实验用电池容量为 10 Ah，转换为通用单位为 36 000 As， η 为电池的放电效率， η 一般取 0.95。

得到的锂电池 Thevenin 模型的输出观测方程为：

$$U_k = f(SOC_k) - i_k r_o - U_1^k + v_k \tag{3}$$

式中， $f(SOC_k)$ 表示的是由实验数据拟合得到的开路电压 OCV 与 SOC 的关系，其中实验数据由脉冲放电实验测得， $f(SOC_k)$ 可以通过非线性最小二乘法拟合得到。

3 仿真实验的设计与分析

在建立 Thevenin 模型的状态空间的基础上，通过参数辨识进一步建立磷酸铁锂电池的 Thevenin 模型，以负载电压为系统输出，通过输出电压校验模型精度，并给出模型误差。

3.1 OCV 与 SOC 关系的辨识

锂电池开路电压与荷电状态的关系辨识通过脉冲放电实验数据来实现，用 1 C 电流对电池进行放电，将电池的荷电状态由 100% 放电至 10%，每次放电容量间隔为 10%，同时每次放电结束后要使电池静置一个小时，以此时的电压为 OCV，实验用电池为 10 Ah 磷酸铁锂电池。OCV 与 SOC 之间为非线性关系，利用非线性最小二乘拟合方法可以得到其对应关系，以 Matlab 中的 cftool 为工具，拟合得到的曲线如图 4 所示。

Matlab 拟合结果如下：

Linear model Poly7:

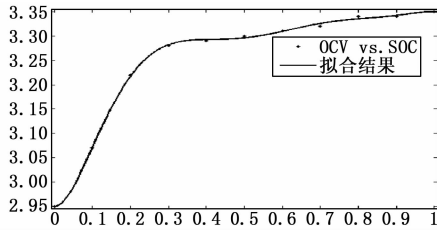


图 4 OCV 与 SOC 拟合结果

$$f(x) = p1 * x^7 + p2 * x^6 + p3 * x^5 + p4 * x^4 + p5 * x^3 + p6 * x^2 + p7 * x + p8$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

- p1 = -51.94 (-125.3, 21.39)
- p2 = 210 (-47.09, 467.2)
- p3 = -339.9 (-696.4, 16.6)
- p4 = 277.4 (29.76, 525.1)
- p5 = -116.5 (-206.3, -26.66)
- p6 = 21.21 (5.316, 37.11)
- p7 = 0.01348 (-1.075, 1.102)
- p8 = 2.95 (2.932, 2.968)

Goodness of fit:

SSE: 9.62e-005

R-square: 0.9994

Adjusted R-square: 0.998

RMSE: 0.005663

该拟合结果给出了拟合曲线的均方误差以及标准差, 数据表明该拟合方法得到的 SOC 与 OCV 的曲线与实际曲线精确度较高。

3.2 RC 参数辨识

电池模型中对应的电阻和电容参数值的辨识是通过混合脉冲功率 (hybird pulse power characterization, HPPC) 试验^[7]来实现, 辨识得到模型的欧姆电阻参数、极性电阻参数和极性电容参数。由于模型中的各个参数在不同 SOC 下的值变化不大, 所以将 Thevenin 模型中的电路参数辨识为常数。利用一阶 RC 曲线辨识得到的 Thevenin 电路模型的参数值如表 2 所示。

表 2 RC 参数表

SOC/%	R ₀ /Ω	R ₁ /Ω	C ₁ /F
10	0.012	0.009	321
20	0.011	0.006	446
30	0.011	0.005	546
40	0.011	0.004	678
50	0.01	0.005	565
60	0.011	0.004	729
70	0.01	0.006	537
80	0.011	0.004	590
90	0.01	0.009	603

表 2 中可以看出模型中各个参数在不同 SOC 下变化不大, 所以后面模型中各参数值均选取的是锂电池 SOC 为 50% 时的实验数据。

数据拟合得到的对比结果如图 5 所示。

图 5 中绘制了实测的端电压值, 根据测量数据拟合得到的端电压值, 以及将拟合端电压和实测端电压对比得到的拟合误

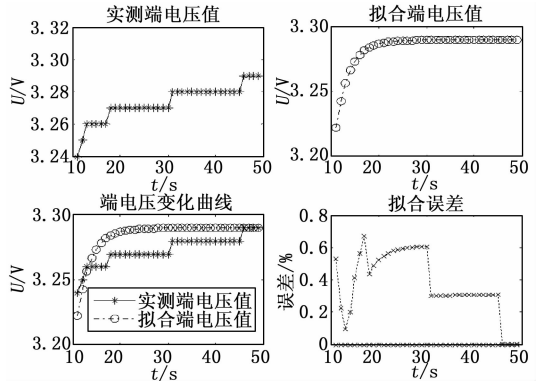


图 5 RC 参数辨识结果

差。可以看出, 辨识得到的 RC 参数误差不大于 0.7%, 较好的跟随了端电压变化曲线, 表 2 中 RC 参数值有效。

3.3 验证实验设计

通过参数辨识与数据拟合可以得到单体磷酸铁锂电池的 Thevenin 模型的各个参数, 根据 Thevenin 模型的状态空间方程, 在 Matlab/Simulink 中建立单体磷酸铁锂电池的结构如图 6 所示。

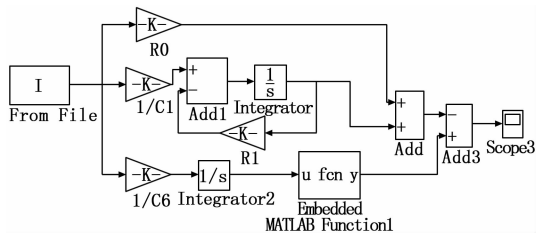


图 6 Thevenin 模型框图

图 6 中模型包含了实验用磷酸铁锂电池的状态空间模型。模拟电池工作过程, 放电全程 3 000 s, 先以 10 A 的电流恒流放电, 随后当电池 SOC 降低输出电流随着减小。将实验测得的放电电压、电流数据为输入量导入图 6 所示的状态空间模型, 再将得到的模型输出与实验获得的端电压进行比较, 得到的误差曲线如图 7 所示。

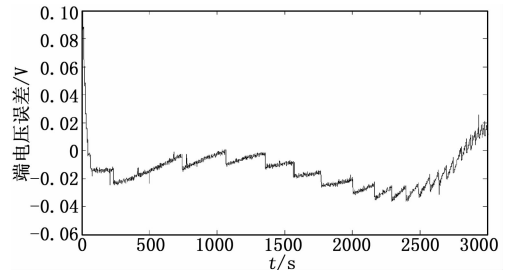


图 7 误差曲线

通过图 7 对比分析可知, 本文建立的磷酸铁锂单体电池的 Thevenin 模型, 初期误差较大, 最大值为 0.1 V, 随着放电的进行, 误差逐渐降低, 不超过 0.04 V。初期误差大主要是由于 Thevenin 模型将状态空间模型参数辨识为常数, 在放电初期不能很好跟随电压的变化, 后期实验中可以增加变量以进一步提高模型精度。但总体来看, 所建立的电池模型参数辨识合理, 精度较高。

(下转第 163 页)