

锂离子蓄电池 PNGV 等效电路模型构建方法研究

Lithium-ion Battery PNGV Equivalent Circuit Model Construction Method Study

寇睿媛, 王顺利, 屈维

西南科技大学信息工程学院 (四川, 绵阳, 621010)

Kou Ruiyuan, Wang Shunli, Qu Wei

School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology (Mianyang, 621010, Sichuan, China)

摘要: 针对锂电池研究中几种等效电路模型, 确定一种最优的模型。通过理论分析和公式推导, 对几种等效电路模型进行比较, 然后再通过建模仿真验证, 最终得出锂电池 PNGV 等效电路模型, 能最精确的表征锂电池放电过程中任意时刻的动态响应, 确定其是最佳模型。锂电池等效电路模型, 将电池的性能与各参数进行联系, 最佳模型的确定有助于对电池各方面研究更加精确。

关键词: 锂电池 等效电路模型 PNGV 建模仿真

Abstract: For several kinds of equivalent circuit of lithium battery model, determining an optimal model. Compare several equivalent circuit models by theoretical analysis and formula deduction, and then verifying it by modeling and simulation. Eventually determine that lithium battery PNGV equivalent circuit model is the best due to that it can characterize the dynamic response of arbitrary moment during lithium battery discharge process most accurately. Parameters contact with the performance of the battery through equivalent circuit model, so determine the best model can help for all aspects of the battery research more precise.

Keywords: Lithium battery, Equivalent circuit model, PNGV, Modeling and simulation

中图分类号: TM912.9 **文献标识码** A **文章编号:** 1561-0349 (2015) 07-0041-04

0 引言

环境和交通能源问题是目前全球面临的重大挑战, 同时也制约着各个交通运输行业的可持续发展。在汽车领域, 电动汽车的出现在一定程度上缓解了这些问题, 锂电池由于在性能上的优越性成为电动汽车的首选电池。它具有重量轻、储能大、功率大、无污染、也无二次污染、寿命长、自放电系数小、温度适应范围宽等优点。目前, 锂离子电池处于高速发展阶段, 在诸如日产 Leaf、丰田普锐斯 plug-in、特斯拉 Model S、通用 Volt、福特 Focus EV 以及宝马 i3 等新能源汽车上, 都采用锂离子电池。在航空领域, 锂离子电池也逐步代替镍镉电池, 作为航空领域应急供能和点火, 如美国军用 A10、MQ-9、AH64 等战机和无人机, 已由使用 Eagle-Picher 公司的镍镉电池转为锂离子电池。然而, 锂电池在各个领域的应用都还有或多或少的问题, 没有得到很好地解决。比如, 精确估算 SOC(state of charge) 就是电动汽车研究和电池研究中

最重要的问题之一。对电池 SOC 的精确估算, 能够使动力汽车的性能得到最好的发挥, 这样不仅能够避免电池的过充电和过放电, 使电池的使用年限拉长, 从而使电池的成本减少, 而且还可以使电池的利用能量效率大幅度增长。在航空领域, 锂电池主要存在的问题是安全问题, 美国国家可再生能源室和莱登能源公司、英国利兹大学及日本 Noboru Sato 和东芝公司等单位, 都在投入大量精力研究其安全问题, 在材料、工艺、添加剂、管理系统等方面进行了系列研究。国内一些单位和学校也在致力于研究这些问题, 希望找出解决方法。部分研究成果应用于生产实践并取得了一定成效, 但仍没有安全保障的有效解决方案。锂电池组起火、燃烧的隐患, 目前仍无法完全消除。这些问题的研究, 都需要锂电池等效电路模型作为基础。本课题针对这些问题, 对诸多锂电池等效电路模型进行比较与分析, 确定 PNGV 模型的最优性, 而且通过构建 PNGV 等效电路模型, 研究其关键影响因素, 对该问题解

决起到有益推动作用。

1 锂电池等效电路模型

电池模型按照性能分为：电化学模型，等效电路模型和神经网络模型。其中，等效电路模型应用最多，因为它将电池的特性与各参数相联系，在研究中，用来模拟电池的动态特性。

常见的等效电路模型有以下几种，分别为：内阻模型（Rint模型），RC模型，戴维南模型以及 PNGV 模型。

1.1 内阻模型

内阻模型中，电池的开路电压用理想电压源来定义，如图 1 所示。电阻 R_0 和开路电压 U_{OC} 都是关于 SOC 和温度的函数。 I_L 为正，表示放电过程中的负载电流； I_L 为负，表示在充电过程中的负载电流。 U_L 是端电压。其表示式为：

$$U_{OC} = U_L + I_L \times R_0 \quad (1)$$

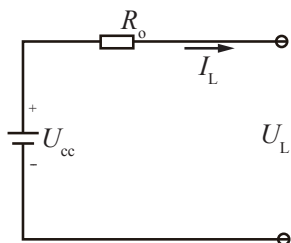


图 1 锂电池内阻模型

1.2 RC 模型

锂电池 RC 模型如图 2 所示。此模型是由 3 个电阻和 2 个电容构成， C_b 为一大电容，可用来描述电池的容量。 C_c 为小电容，是用来描述电池的表面效应。

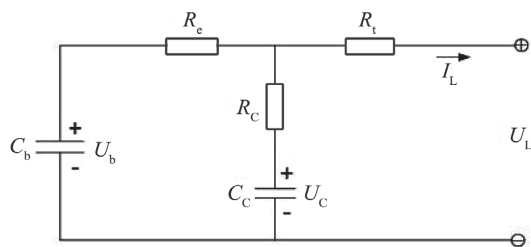


图 2 锂电池 RC 模型

设流过 R_e 的电流为 I_e ，流过 R_c 的电流为 I_c ，则由基尔霍夫电流定律 (KCL) 可得：

$$I_L = I_e + I_c \quad (2)$$

在回路中，由基尔霍夫定律 (KVL) 可得：

$$U_b = U_c + I_e \times R_e - I_c \times R_c \quad (3)$$

$$U_c = I_c \times R_c + I_L \times R_t + U_L \quad (4)$$

而

$$U_b = \frac{1}{C_b} \left(\int I_e dt \right) \quad (5)$$

$$U_b = \frac{1}{C_c} \left(\int I_c dt \right) \quad (6)$$

1.3 戴维南模型

锂电池戴维南模型 (Thevenin 模型) 如图 3 所示。由图可知，该模型是在内阻模型的基础上再串联 1 个并联的 RC 网络。图中的 U_{OC} 仍然是用理想电压源来代替开路电压。图中串联的 RC 网络具有超前性，可以预测某一 SOC 下电池对负载的响应，从这一点来说该模型比内阻模型要精确一点。电路方程如下：

$$U_{OC} = R_0 \times I_L + U_L + U_{Th} \quad (7)$$

$$U_{Th} = \frac{1}{C_{Th}} \left(\int I_{Th} dt \right) = R_{Th} \times (I_L - I_{Th}) \quad (8)$$

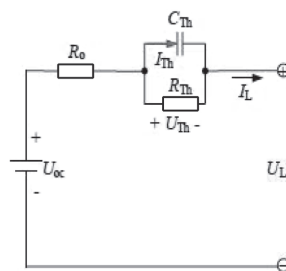


图 3 锂电池戴维南模型

1.4 PNGV 模型

锂电池的 PNGV 模型如图 4 所示。该模型是 2001 年《PNGV 电池测试手册》中提出的。该模型在戴维南模型的基础上多串联了一个电容 C_b ， U_{OC} 是开路电压， R_0 是欧姆内阻， R_p 是极化内阻， C_p 是极化电容， I_L 是负载电流， U_L 是端电压。电池在充放电过程中，电容 C_b 会随之放电和充电，这就会引起负载电流的变化，电池 SOC 也会随着变化。而对于戴维南模型，电池 SOC 不会随着变化，就是说戴维南模型只可以描述当 SOC 为某一定值的时候电池的响应，就是瞬间的静态反应，而不能表征动态响应。所以，据此可见，PNGV 是相对来说能最精确描述锂电池的等效电路模型。

由基尔霍夫定律 (KVL) 得：

$$U_{OC} = U_L + \frac{1}{C_b} \left(\int I_L dt \right) + R_p I_p + R_0 I_L \quad (9)$$

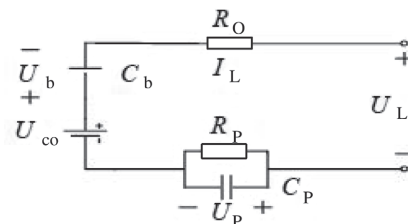


图 4 锂电池 PNGV 模型

2 PNGV 等效电路模型的建模与仿真

PNGV 等效电路模型已经给出，而要使 PNGV 模型为我

们研究所用，就必须通过建模与仿真，我们选择在 MATLAB 的 SIMULINK 中进行建模。

2.1 PNGV 等效电路模型状态方程

离散电流积分计算公式^[1]如下：

$$I_{p,i} = \left\{ 1 - \frac{\left[1 - e^{-\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} \right]}{\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} \right\} \times I_{L,i} + \left\{ \frac{\left[1 - e^{-\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} \right]}{\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} - e^{-\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} \right\} \times I_{L,i-1} + \left\{ e^{-\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} \right\} \times I_{p,i-1} \quad (10)$$

式中： τ 为时间常数， $\tau = C_p R_p$ ， $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ 。

将式 (9) 进行离散化，然后变形成式 (11)：

$$U_{L,i} = U_{OC} - \frac{1}{C_b} \times (\sum I_L \Delta t)_i - I_{L,i} \times R_0 - I_{p,i} \times R_p \quad (11)$$

端电流与极化电流的关系式为：

$$\frac{dI_p}{dt} = \frac{(I_L - I_p)}{\tau} \quad (12)$$

则：

$$I_p = I_L - \tau \times \frac{dI_p}{dt} \quad (13)$$

2.2 SIMULINK 建模与仿真

在 MATLAB 软件中，对 PNGV 等效电路进行建模与仿真。为了便于验证仿真结果的正确性，假设在 170s 变电流放电条件下进行。负载电流与时间的关系如图 5 所示。

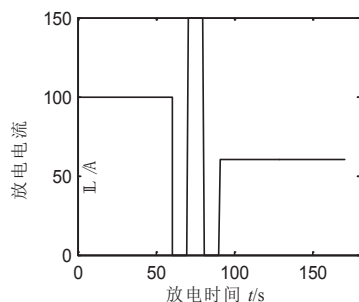


图 5 170s 变电流放电电流曲线

建模数据参考常温 (20°) 下 PNGV 等效电路模型参数^[1]，见表 1。

In.mat 中存放的是当前 SOC 值条件下，随着时间变化的 I_L 的值。将模型中的参数分别设置成从 SOC=0.1 到 SOC=0.9 的各参数，然后在 MATLAB 中进行仿真，得到的 SOC=0.1, SOC=0.5 和 SOC=0.9 的端电流图形，分别如图 7，图 8，图 9 所示，为放电过程中 SOC 变化的端电压曲线。

式 (11) 可以变形为：

$$U_L = U_{OC} - \frac{1}{C_b} \sum I_L \cdot \Delta t - I_L (R_0 + R_p) + \tau \frac{dI_p}{dt} R_p \quad (14)$$

如式 (14) 所示，随着 I_L 的增大， U_L 会减小；相反，随着 I_L 的减小， U_L 会增大。将图 7、图 8、图 9 和图 5 中 I_L 的波形对比来看， U_L 是按上述规律变化的。SOC 从 0.1 到 0.9 变化过程中，通过 PNGV 模型仿真得到的 U_L 一直随着 I_L 的增大而减小，随 I_L 的减小而增大。

表 1 常温 (20℃) 下 PNGV 等效电路模型参数

SOC	τ /s	U_{OC} /V	R_0 /m Ω	R_p /m Ω	C_b /F
0.1	37.34	2.981	1.13	0.4	378.8
0.2	37.98	3.116	1.14	0.34	381.8
0.3	31.93	3.167	1.15	0.32	384.8
0.4	31.53	3.201	1.12	0.27	385.7
0.5	31.93	3.238	1.06	0.26	386.1
0.6	32.88	3.266	1.11	0.23	386.9
0.7	32.88	3.298	0.97	0.24	389.4
0.8	31.42	3.336	0.95	0.21	390.4
0.9	34.93	3.364	0.99	0.3	390.6

利用式 (11) 和式 (13)，在 SIMULINK 中进行建模，如图 6。

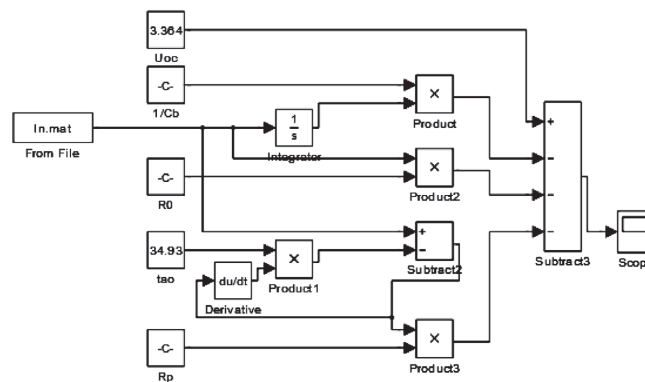


图 6 PNGV 模型静态建模

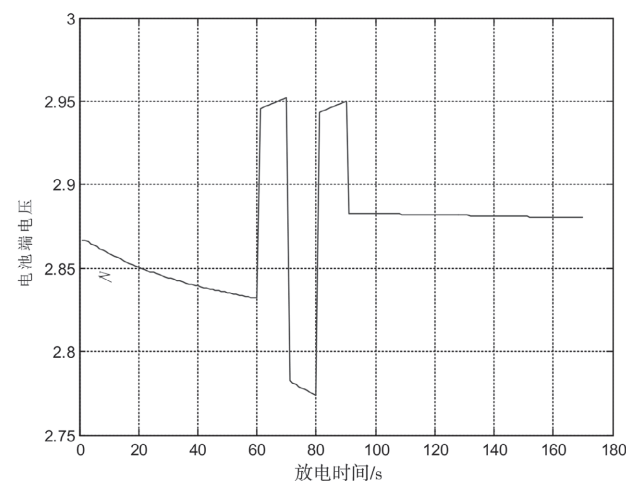


图 7 170s 变电流放电端电压曲线 (SOC=0.1)

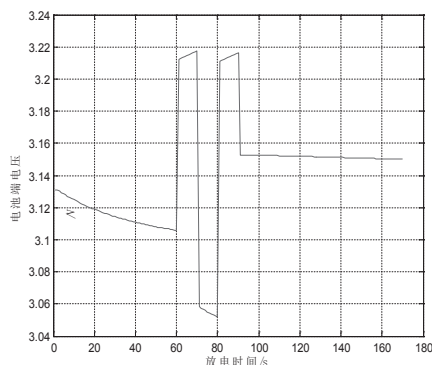


图8 170s 变电流放电端电压曲线 (SOC=0.5)

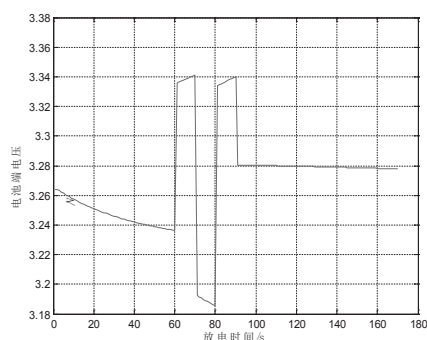


图9 170s 变电流放电端电压曲线 (SOC=0.9)

3 结束语

本文给出了4种锂电池等效电路模型,并通过对内阻模型(Rint模型)、RC模型、戴维南模型(Thevenin模型)以及PNGV模型4种模型比较分析,确定了PNGV是最优的模型。该模型比其他几种模型更为精确,此外,更重要的是,内阻模型和戴维南模型只能描述SOC值为一恒定值时电池的响应,而PNGV模型中各参数可以随着SOC变化而相应的变化,即可以描述电池随SOC变化的动态响应。通过在MATLAB/SIMULINK中进行建模和仿真,验证当SOC变化时,PNGV

等效电路模型能够有效表征锂离子电池内部的反应过程,为锂离子电池动力应用提供安全保障。

参考文献

- [1] 杨阳,汤桃峰,秦大同,胡明辉.电动汽车锂电池PNGV等效电路模型与SOC估算方法[J].系统仿真学报,2012,04:938-942.
- [2] 陈全世,林成涛.电动汽车用电池性能模型研究综述[J].汽车技术,2005,03:0001-05.
- [3] 林成涛,仇斌,陈全世.电动汽车电池非线性等效电路模型的研究[J].汽车工程,2006,01:38-42.
- [4] 张宾,郭连兑,李宏义,陈全世,崔忠彬.电动汽车用磷酸铁锂离子电池的PNGV模型分析[J].电源技术,2009,05:417-421.
- [5] 韩宗奇,刘吉良,朱洪波,王立强,杨璐.典型温度下磷酸铁锂电池PNGV模型研究[J].燕山大学学报,2012,03:248-253.
- [6] 贾玉健,解大,顾羽洁,艾芊,金之检,顾洁.电动汽车电池等效电路模型的分类和特点[J].电力与能源,2011,06:516-521.

基金项目

四川省创新训练项目(201410619004),实验室开放基金(14xnkf09)。

作者简介

寇睿媛(1994-),女,四川省绵阳市,西南科技大学,信息工程学院;

王顺利(1985-),男,四川省绵阳市,博士生,讲师,检测技术及应用,通信作者

(上接第51页)

阻表面局部化学镀制造良好欧姆接触电极方法.中国专利,CN101429655B.2010-11-17

[11] 吴子健,吴朝军,曾克里,王全胜.热喷涂技术与应用.北京:机械工业出版社,2006年

[12] 表面工程,第四章,热喷涂. <http://wenkm.baidu.com/view/a48565255901020207409c48.html###>

[13] 隆科电子(惠阳)有限公司.一种电子陶瓷元件的卑金属电极及其制备方法.中国专利,CN103247362A.2013-08-14

[14] 李耿,周勇,薛飒,王洪铎.冷喷涂技术.热处理技术

与装备,第30卷4期,2009年8月,11~14,21页

[15] 卜恒勇,卢晨.冷喷涂技术的研究现状及进展.材料工程,2010年1期,94~98页

[16] 周禹,李京龙,李文亚.冷喷涂技术最新进展及其航空航天领域的应用展望.航空制造技术,2009年第9期,68~70页

[17] 吴杰,刘志文,金花子,刘星,熊天英.用冷喷涂法制备PTC陶瓷的Al电极.表面技术,第31卷第5期,2002年10月,4~7页