

电动汽车动力电池充放电模型建立及仿真

能源和环境已经成为世界最为关注的话题，世界上许多国家考虑发展电动汽车作为解决能源和环境问题的方法，因此非常有必要研究电动汽车充放电对电网的影响。首先必须建立一个电动汽车动力电池模型。本文通过实验仿真研究建立了一个PNGL和戴维南仿真模型，并与真实的测量数据进行了对比，结果证明这两种方法的仿真模型是合适的，因此模型搭建比较合理。

马龙飞 宫成 焦然 张宝群 曾爽 陈艳霞 时锐/国网北京电科院



马龙飞/工程师

关键词/Keywords

电池 ·
仿真 ·
PNGL ·
戴维南模型 ·

0 引言

能源与环境已成为当前全球最为关注的问题之一，以电动汽车为代表的新一代节能与环保汽车是汽车工业发展的必然趋势已经成为普遍共识。电池是电动汽车的关键部件，对整车动力性、燃料经济性和安全性都有重大影响。为了更好地掌握北京地区的电动汽车电池特性、相应的接入电网充电的控制策略及数字实时仿真方法，揭示电动汽车充电对电网的影响，研究动力电池的模型建立并进行仿真计算非常有必要。

电池单体模型的建立，对于电池充电仿真至关重要。而电池模型选择是否恰当，也直接影响着仿真结果与实际的符合程度。电池的模型有多种，常见的模型有：对电池工作中热量生成、热量传导研究的热模型；研究电池中化学反应，使用非线性方程描述的电化学模型；使用电容电阻等电路参数，描述电池工作外部特性的等效电路模型^[1]。

1 研究现状

电池的等效模型是本文的研究重点。该模型避免了电化学模型中复杂的非线性方程的数学描述，能够直观地反映电池充放电过程中由于极化效应等作用引起的端电压变化，在电气工程领域有很广泛的应用。电池单体的等效模型主要有以下几种：内阻模型、Thevenin 模型、阻容模型、PNGV (The Partnership for a New Generation of Vehicles) 模型和通用型非线性模型 (General nonlinear model, GNL)。其中，内阻模型只能体现充放电过程中电池内阻的影响，对电池性能描述较为粗略，准确度较低。Thevenin 模型能够对电池充放电性能做出预测，体现电池内阻的影响，但是不能体现电池的极化效应^[2]。阻容模型加入了 RC 环节，能够体现出充放电过程中电池内阻的区别，但是该模型无法体现电池的极化效应对电池充放电过程的影响^[3]。对 Thevenin 模型进行改进，可以得到 PNGV 模型与 GNL 模型。PNGV 电池模型是美国爱德华州国家工程实验室 2001 年《PNGV 电池试验手册》中提出的电池模型，在 2003 年的《FreedomCAR 功率辅助型电池试验手册》中被沿用。PNGV 模型在阻容电路模型的基础上增加一个电容，能够体现电流随时间积累产生的电池端电压的变化。GNL 模型基于电化机理，对欧姆极化、电化学计划和浓度差极化分别描述，准确度最高。但是，由于引入了多个阻容环节和非线性环节，在参数识别方面非常复杂。

2 仿真分析

2.1 模型研究

电池的等效模型也有多种，不同的模型复杂程度、仿真准确度不同。一般根据应用场合要求来确定选用哪种模型进行电池建模。

图 1 为内阻模型电路。这种模型仅仅体现了接入负载之后电池端电压的变化，无法体现充放电过程中电池内阻的差异性。该模型比较简单，并不能很准确地描述电池的外特性，一般用于其他模型的分析基础。

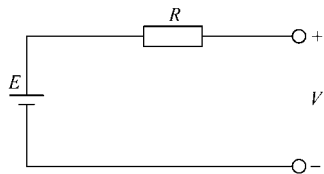


图 1 内阻模型

图 2 为戴维宁（Thevenin）电路模型，这种模型加入了 RC 环节，能够表现电池极化效应带来的影响。但是有时电池充放电过程中极化效应复杂，一个阻容环节不能够很好地体现电池的极化效应。

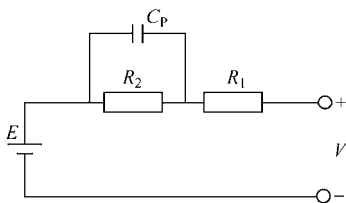


图 2 戴维宁电路模型

图 3 为 PNGV 电池模型。该模型由爱达荷州国家工程实验室 2001 年在《PNGV 电池测试手册》当中提出。该模型在阻容电路模型的基础上增加一个电容，能够体现电流随时间积累产生的电池端电压的变化。该模型物理意义清晰，准确度较高，被广泛采用。该模型在动态工况分析的仿真当中准确度较高，但是不适合较长时间恒流充电的情况。

图 4 为通用非线性模型（General Nonlinear, GNL），该模型将电池的极化效应细分为欧姆极化、电化学极化和浓度差极化。该模型引入了大量的非线性环节，导致参数识别过程变得非常复杂。但另一方面，该模型准确度较高，能够很好

反映出电池充放电暂态过程。并且，能够对电池长时间静置的自放电效应、充放电内阻不相等现象进行很好的描述。

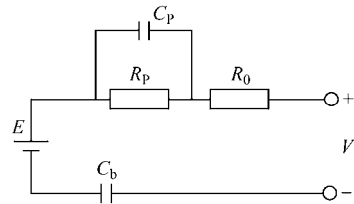


图 3 PNGV 电路模型

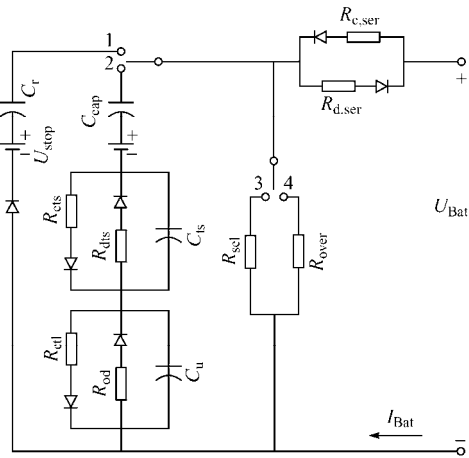


图 4 通用非线性电路模型

总体来讲，电池的各种等效电路模型复杂程度不一，仿真准确度也不相同。GNL 模型能够对电池进行最为精准的建模，但是电路拓扑过于复杂，对电池测试、参数识别提出了很高的要求，不适合本文应用场合。电池内阻模型又过于简单，不能体现电池极化效应在模型中作出反映。综合考虑，选定 Thevenin 模型作为恒流充电仿真模型，PNGV 模型作为动态工况仿真模型。

2.2 电池单体参数识别原理

图 3 为一个典型的 PNGV 电池模型电路图。其中，理想电压源 U_o 表示电池的电极电势；极化内阻 R_p 和极化电容 C_p 并联的阻容环节体现了电池极化效应引起的暂态过程，包括动态电流响应的暂态过程，以及充放电结束电池的恢复效应；欧姆电阻 R_o 是电池的内阻；串联电容 C_b 体现了电池充放电过程中电池端电压随时间的偏移。

根据基本电路原理，可以写出描述 PNGV 模型的微分方程为

$$\begin{cases} \frac{dU_b}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_p R_p} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_b} \\ \frac{1}{C_p} \end{bmatrix} [I_L] \\ [U_L] = [-1, -1] \begin{bmatrix} U_b \\ U_p \end{bmatrix} + [-R_o][I_L] + [U_{OC}] \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)进行求解,假定在充电或放电过程前,电池经过足够长时间的静置,即串联电容 C_b 和极化电容 C_p 上的初始电荷量为0。

$$\bar{U}_{L,i} = U_{OCV} - \frac{1}{C_b} \sum (I_L \Delta t)_i - R_o I_{L,i} - R_p I_{p,i} \quad (2)$$

$$\sum (I_L \Delta t)_i = \sum (I_L \Delta t)_{i-1} + \frac{I_{L,i} + I_{L,i-1}}{2} \Delta t \quad (3)$$

$$I_{p,i} = \left(1 - \frac{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}}{\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \times I_{L,i} + \left(\frac{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}}{\frac{\Delta t}{\tau}} - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \times I_{L,i-1} + e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \times I_{p,i-1} \quad (4)$$

从式(2)中,可以看到测量电池端电压 U_L 电流 I_L 以及可以通过式(3)和式(4)计算得到的 I_p 为已知量,待求量 C_b , R_o , R_p 可以看作线性方程系数。这样,整个方程可以看做一个系数待求的线性方程组,而未知的系数,可以通过线性回归得到。

在式(3)及式(4)中,还有一项未知,即阻容环节的时间常数 τ 。根据《PNGV 电池试验手册》当中推荐的方法,先对时间常数 τ 的大小做出估计,然后进行多元线性回归,当相关系数大于0.995即可认为该时间常数符合预期。实际操作的过程中,可能有多个时间常数符合这一点,可以选择相关系数最大的一个。

2.3 动力电池参数实际测量

电池测试采用5 V 100 A新威锂电池倍率放电测试柜进行。该测试仪器能够进行最大100 A的充放电测试,适合锂聚合物、锂离子、镍氢、镍镉和铅酸电池的综合性能测试以及电池材料研究。测试仪器如图5所示,测试结果在后面仿真结果呈现。

根据电路基本原理,电池输出端电压计算公式为



图5 5 V 100 A新威锂电池倍率放电测试柜

$$\bar{U}_{L,i} = U_{OCV} - \frac{1}{C_b} \sum (I_L \Delta t)_i - R_o I_{L,i} - R_p I_{p,i} \quad (5)$$

$$i_p = \frac{Q_p}{C_p R_p} \quad (6)$$

$$Q_p = \int (i_L - i_p) dt \quad (7)$$

对式(5)、式(6)和式(7)进行离散化处理,得到

$$U_L = U_{OC} - \frac{1}{C_b} \sum i_L \Delta t - R_p i_L - R_p i_p \quad (8)$$

$$i_{p,i} = \frac{Q_{p,i}}{C_p R_p} \quad (9)$$

$$Q_{p,i} = \sum (i_{L,i} - i_{p,i}) \Delta t \quad (10)$$

2.4 电池单体的模型仿真结果

在式(8)、式(9)的基础上,在Simulink和LabView平台上搭建电池单体的仿真模型。首先,采用HPPC测试数据对电池的PNGV模型进行仿真验证。HPPC测试的仿模型在Simulink平台上搭建。

图6为PNGV模型在Simulink平台上的截图。该模型可以很好地对变电流情况下的电池仿真做出仿真结果。仿真模型的输入变量是电流,输出是电池的端电压。电池模型中的参数 C_b , R_o , R_p 与电池荷电状态相关,是随着SOC变化而变化的量。仿真结果和实际测试结果的对比图为图7。该图是PNGV模型在SOC为0.5情况下的仿真数据与实际数据的对比。可以看到,仿真结果和实际测试结果符合得很好。

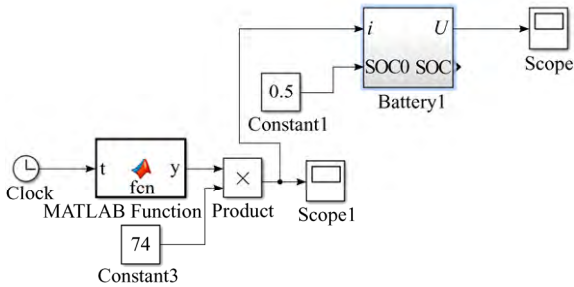


图 6 PNGV 模型图

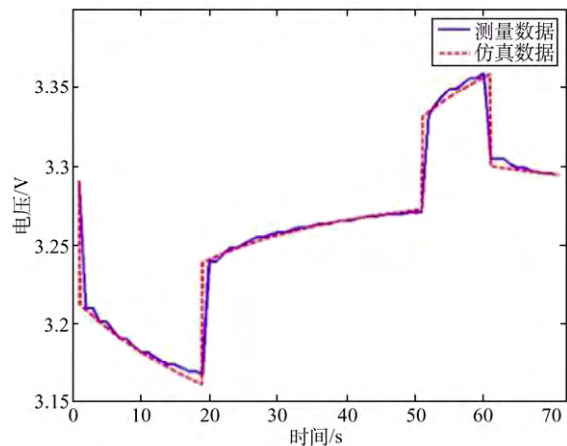


图 7 HPPC 测试仿真结果比较

在式 (8)、式 (9) 的基础上，在 Simulink 上搭建了电池单体的恒流充电情况下的仿真模型。

电池模型首先通过积分，计算流入或流出电池单体的电荷量，从而得到当前电池单体的 SOC。通过查表，得到当前 SOC 下的电池参数值。电池参数确定之后，即可通过式 (8)、式 (9) 计算当前电池的端电压值。仿真流程如图 8 所示。

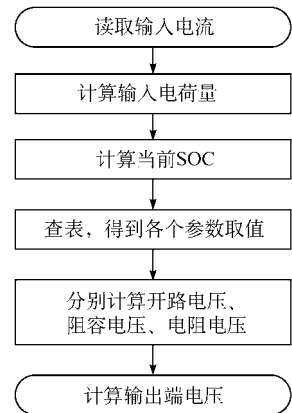


图 8 电池单体模型仿真流程图

电池单体的恒流充放电仿真在 Thevenin 模型基础上搭建。Thevenin 模型与 PNGV 模型仿

真原理类似，只是去掉了串联电容。Thevenin 模型的电路方程很容易由 PNGV 模型方程改写得到，这里不再赘述，只给出仿真结果。

电池单体的恒流充放电仿真结果如图 9 所示。可以看到，在整个充电过程中，仿真模型和实际测量数据符合很好，尤其是刚开始的暂态过程以及放电平台这段符合程度很高。

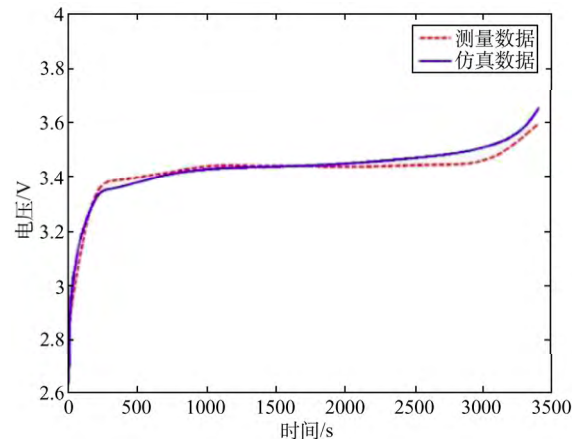


图 9 电池单体恒流充电仿真结果

3 结束语

本文搭建了基于参数识别基础的动力电池的戴维南模型和 PNGV 模型，然后又仿真了动力电池恒流充放电和脉冲充入电特性。通过仿真结果波形和实测结果波形对比发现，它们的波形吻合很好，因此用戴维南模型表述恒流充电仿真模型和 PNGV 模型描述脉冲动态仿真模型是合理的。

参考文献

[1] 余文正. 动力电池模型分析及其快速充放电策略研究[D]. 成都：电子科技大学，2010.

[2] 侯幽明. 纯电动汽车用磷酸铁锂电池 SOC 估算的研究[D]. 芜湖：安徽工程大学，2011.

[3] 李超. 电动汽车用镍氢电池模型参数辨识和 SOC 估算研究[D]. 天津：天津大学，2007.

(收稿日期：2015-12-10) EA

作者简介

马龙飞 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事电动汽车与电能质量控制技术方面研究。

(收稿日期：2015-12-10) EA

(编辑：史海疆)