

# 基于 AIC 准则的锂离子电池变阶 RC 等效电路模型研究

商云龙 张奇 崔纳新 张承慧  
(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

**摘要** 提出一种变阶 RC 等效电路模型, 并基于赤池信息量准则 (AIC) 辨识不同 SOC 处 RC 模型的最优阶数, 兼顾了模型的准确度和实用性。通过脉冲充放电、恒流充放电以及自定义 UDDS 循环工况实验验证了该模型的有效性。变阶 RC 模型通过略增加模型的复杂度, 能更加准确地描述锂离子电池两端陡、中间平的非线性电压特性, 相对误差在 1% 以内, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 电动汽车 动力电池 电池管理系统 变阶 RC 模型 赤池信息量准则 (AIC)

**中图分类号:** TM912

## Research on Variable-order RC Equivalent Circuit Model for Lithium-Ion Battery Based on the AIC Criterion

Shang Yunlong Zhang Qi Cui Naxin Zhang Chenghui

(School of Control Science and Engineering Shandong University Jinan 250061 China)

**Abstract** A variable-order RC equivalent circuit model based on the Akaike information criterion (AIC) is proposed to identify the optimal RC model order with different state of charge (SOC), which considers both the accuracy and the practicability of the model. The validity of the proposed model is verified under the working conditions of pulse charging/discharging, constant current charging/discharging, and urban dynamometer driving schedule (UDDS) test cycles. By slightly increasing the model's complexity, the proposed variable-order RC equivalent circuit model can precisely simulate the lithium-ion battery's nonlinear characteristics, steep-at-the-edge and flat-in-the-middle, with less than 1% relative error. Thus the model has high application value.

**Keywords:** Electric vehicles, power batteries, battery management systems, variable-order RC model, Akaike information criterion (AIC)

## 0 引言

为了应对能源危机和环境污染, 电动汽车应运而生, 并成为全世界关注的焦点<sup>[1,2]</sup>。车载动力电池作为电动汽车的关键部件, 其性能对整车的动力性、经济性和安全性至关重要, 是制约电动汽车规模化发展的关键因素。锂离子电池具有能量密度高、使用寿命长、性价比高和单体电压高等优点, 被认为是最具希望的电动汽车动力电池。我国“十二五”规划提出以车用能量型动力电池为主要发展方向, 兼顾功

率型动力电池的发展。

精确、实用的电池模型对车载动力电池的合理设计和安全运行具有重要意义。电池模型是开展电极反应特性研究、电池动态特性研究、电池设计以及电池管理系统设计 (特别是 SOC (State of Charge)、SOH (State of Health) 估计和均衡控制) 的基础<sup>[3,4]</sup>, 是分析大规模电动汽车接入对电网影响的前提条件<sup>[5-9]</sup>。然而, 建立一个精确且结构简单的电池模型绝非易事, 这是因为锂离子电池内部的化学反应是一个对环境敏感且极其复杂的非线性过程, 其性能参数易受 SOC、电流倍率、温度、寿命及自放电等众多因素的影响, 如电池端电压与 SOC 呈两端陡、中间平的非线性变化趋势, 电池可用容量随放电电流增大而减

少, 电池内阻随电池温度降低而增大等。

目前, 常用的电池模型按建模机理的不同可分为5类: ①电化学模型; ②分析模型; ③随机模型; ④神经网络模型; ⑤等效电路模型<sup>[10,11]</sup>。电化学模型使用复杂的非线性微分方程描述电池内部的化学过程。该模型虽然精确, 但因其太抽象而不能表征电池的电气性能参数(如内阻、端电压等), 不适宜于电气设计、仿真及控制<sup>[12]</sup>。分析模型是简化的电化学模型, 它用一个降阶方程表征电池的非线性容量效应及运行时间, 但不能描述电池的  $I-V$  特性<sup>[13]</sup>。随机模型主要关注电池的恢复特性, 它将电池的行为描述为一个马尔科夫过程。随机模型能很好地描述电池的脉冲放电特性, 但不适合变电流负载的情况<sup>[14]</sup>。神经网络模型具有非线性特性、并行结构和学习能力等优点, 但需要大量实验数据训练, 且模型误差易受训练数据和训练方法的影响。因此, 神经网络模型更适用于批量生产的成熟产品<sup>[15]</sup>。等效电路模型是指根据电池的物理特性使用不同物理元器件(如电压源、电流源、电容和电阻等)构成等效电路模型来模拟电池的  $I-V$  特性, 适用于锂离子电池、镍氢电池和铅酸电池等多种电池。等效电路模型因具有简单直观的形式以及适宜于电气设计与仿真等优点而被广泛应用。目前主要有 Rint 模型<sup>[16]</sup>、Thevenin 模型<sup>[17]</sup>、一阶 RC 模型<sup>[17]</sup>、PNGV 模型<sup>[18]</sup>、简化的 Massimo Ceraolo 模型<sup>[17]</sup>(即二阶 RC 模型)以及 GNL 模型<sup>[19]</sup>。文献[20]提出了分布参数等效电路模型, 为从电池外特性分析电池内部情况提供了一种有效方法。文献[21]提出了一种 KiBaM 模型与二阶 RC 模型的混合电池模型, 能同时描述电池的外动态特性和恢复效应。在等效电路模型方面, 取得了大量研究成果, 但鲜有既准确度高又实用的电池模型。特别是, 上述定结构等效电路模型难以描述锂离子电池两端陡、中间平的非线性电压特性, 不能解决模型准确性和实用性之间的矛盾。

本文提出一种根据 SOC 变阶的 RC 等效电路模型, 以期在电池电压变化较为剧烈的指数区, 切换为高阶的 RC 模型, 以保证模型的准确度; 在电池电压变化较为缓慢的平台区, 则切换为低阶的 RC 模型, 以尽量降低模型的复杂度。但电池实际系统的阶数往往是未知的, 如果模型阶数过高, 不但会增加计算量, 还会产生大量的冗余项, 导致模型的实用性较差; 如果模型阶数过低, 会造成重要数据丢失, 不能很好地拟合实际系统, 导致模型的准确度降低。因此, 不同 SOC 处的模型阶数的合理选取是变阶 RC 模型的一个难点。赤池信息量准则 (Araike Information Criterion,

AIC) 因同时兼顾了模型的准确度和实用性, 成为衡量模型优良性的一种有效方法。

## 1 变阶 RC 等效电路模型

电动汽车动力电池 SOC 和 SOH 的精确估计依赖于一个精确且易实现的电池模型。一般来说, 一个好的电池模型应具备两点: ①能够准确描述电池的动、静态特性; ②模型本身的复杂度较低, 易于工程实现。事实上, 电池内部的化学反应是一个对环境敏感且极其复杂的非线性过程。用传统定阶的电池模型(如二阶 RC 模型<sup>[17]</sup>)难以解决模型准确度和实用性之间的矛盾。因此, 本文提出一种根据 SOC 变阶的 RC 等效电路模型, 如图 1 所示。

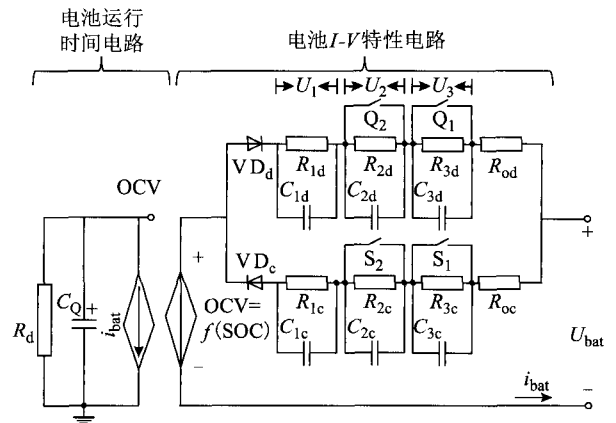


图1 变阶 RC 等效电路模型

Fig. 1 The proposed variable-order RC equivalent circuit model

图 1 所示变阶 RC 等效电路模型包括运行时间电路和  $I-V$  特性电路两部分。其中,  $U_{bat}$  为电池的端电压;  $i_{bat}$  为电池的端电流;  $R_d$  为电池的自放电电阻;  $C_Q$  为电池的可用容量;  $R_o$  为欧姆内阻;  $R_1$  为电化学极化内阻;  $C_1$  为电化学极化电容;  $R_2$  为浓差极化内阻;  $C_2$  为浓差极化电容;  $R_3$  为变阶内阻;  $C_3$  为变阶电容;  $Q_1$ 、 $S_1$ 、 $Q_2$ 、 $S_2$  为变阶 RC 模型的切换开关; OCV 为电池的开路电压, 是 SOC 的函数; 下标 d 表示放电, c 表示充电。下面分别从 4 方面描述变阶 RC 模型的工作原理。

### 1.1 可用容量

如图 1 左半部分所示, 电池的可用容量可由一个大电容  $C_Q$  表示

$$C_Q = 3\,600 \cdot Capacity \cdot f_1(Cycle) \cdot f_2(Temp) \quad (1)$$

式中:  $Capacity$  为电池的标准容量, Ah;  $f_1(Cycle)$  和  $f_2(Temp)$  分别为电池循环寿命和温度的修正因子, 通常设置为恒值 1。自放电电阻  $R_d$  用来模拟电池存储一段时间后的自放电特性。理论上,  $R_d$  是 SOC、温度和

循环次数的函数,但在实际应用中,一般将其简化成一个大电阻或忽略不计。

## 1.2 开路电压 (OCV) 模型

电池的开路电压 OCV 与 SOC 存在较强的非线性关系,现有文献中一般采用多项式描述 OCV 与 SOC 间的非线性关系。多项式阶数和变量数量的选取是否合适,直接影响模型的准确度和计算量。因此,为了能够更加准确地描述 OCV 与 SOC 之间的关系,可参考几种电池的简化电化学模型<sup>[11]</sup>: Shepherd、Unnewehr 和 Nernst 模型。将这些模型结合起来,可获得一种较理想的开路电压模型

$$\text{OCV} = a_1 + a_2 \ln \text{SOC} + a_3 \ln(1 - \text{SOC}) + \frac{a_4}{\text{SOC}} + a_5 \text{SOC} \quad (2)$$

式中  $a_1 \sim a_5$  为待定常数,可根据实验数据基于最小二乘法辨识得到。

## 1.3 状态空间模型

电池放电结束后,端电压呈指数规律变化,可由 RC 网络模拟,其零输入响应可表述为<sup>[22]</sup>

$$R_i C_i \frac{dU_i(t)}{dt} + U_i(t) = 0 \Rightarrow U_i(t) = U_i(0+)e^{-t/\tau_i} \quad (3)$$

式中:下标  $i$  为 RC 网络标号,其值为 1、2 或 3;  $\tau_i$  为第  $i$  个 RC 网络的时间常数,即  $\tau_i = R_i C_i$ ;  $U_i(t)$  为第  $i$  个 RC 网络的支路电压;  $U_i(0+)$  为电池放电结束瞬间  $R_i C_i$  支路的端电压初值,其值可表述为

$$U_i(0+) = R_i i_{\text{bat}} \quad (4)$$

式中  $R_i$  为第  $i$  个 RC 网络中并联的电阻。

式 (3) 中支路电压  $U_i(t)$  随着时间的增长而逐渐减小,当  $t \rightarrow \infty$  时,  $U_i(t)$  趋于 0,此时电池端电压等于电池的 OCV。因此,放电结束后电池端电压的变化过程可表述为

$$U'_{\text{bat}}(t) = \text{OCV} - \sum_{i=1}^n R_i i_{\text{bat}} e^{-t/\tau_i} \quad (5)$$

式中:  $n$  为 RC 网络的阶数,其值为 1、2 或 3;  $U'_{\text{bat}}(t)$  为电池模型输出值。

电池放电过程中电池端电压的零状态响应可表述为

$$U'_{\text{bat}}(t) = \text{OCV} - i_{\text{bat}} R_o - \sum_{i=1}^n R_i i_{\text{bat}} (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (6)$$

式中  $R_o$  为电池的欧姆内阻。

根据式 (3) ~ 式 (6),并选取 RC 网络中电容电

压作为状态变量,可得到系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} U_1(k+1) \\ U_2(k+1) \\ U_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-T/\tau_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-T/\tau_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-T/\tau_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(k) \\ U_2(k) \\ U_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1(1 - e^{-T/\tau_1}) \\ R_2(1 - e^{-T/\tau_2}) \\ R_3(1 - e^{-T/\tau_3}) \end{bmatrix} i_{\text{bat}}(k+1) \quad (7)$$

式中  $k$  为采样时刻。

如图 1 所示,系统的观测方程为

$$U'_{\text{bat}}(k+1) = \text{OCV}(k+1) + R_o(k+1)i_{\text{bat}}(k+1) + \sum_{i=1}^n U_i(k+1) \quad (8)$$

## 1.4 模型状态切换

通过控制开关  $Q_1$ 、 $S_1$  和  $Q_2$ 、 $S_2$  的状态可实现一阶、二阶和三阶 RC 模型的按需切换。表 1 为模型阶数与开关状态的对应关系,其中状态 1 表示开关闭合,0 表示开关断开。图 2 为模型状态切换框图。

表 1 模型阶数与开关状态的对应关系

Tab. 1 The corresponding relationships between the model order number and the switch state

模型阶数	( $Q_1/S_1, Q_2/S_2$ )
一阶	(1, 1)
二阶	(1, 0)
三阶	(0, 0)

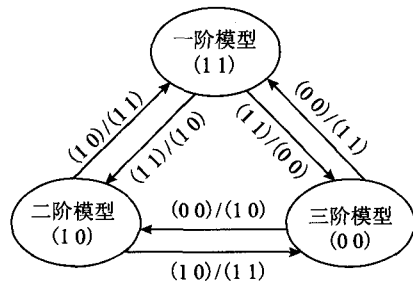


图 2 模型状态切换

Fig. 2 Model state switching

通过控制切换开关的状态,变阶 RC 模型能实现在电池电压变化较为剧烈的指数区,切换为高阶 RC 模型,以保证模型的准确度;在电池电压变化较为缓慢的平台区,切换为低阶 RC 模型,以尽量降低模型的复杂度。

## 2 基于 AIC 准则的模型阶数辨识

AIC 准则是衡量模型优良性的一种标准,建立在熵的概念基础上,同时兼顾了模型的准确度和实用性。

AIC 的一般形式可表述为<sup>[23,24]</sup>

$$AIC = \ln\left(\frac{SSE}{T}\right) + \frac{2m}{T} \quad (9)$$

式中:  $T$  为实验数据数量;  $m$  为模型未知参数数量; SSE (Sum of Squares for Error) 为残差平方和, 表述为

$$SSE = \sum_{j=1}^T (y_j - y'_j)^2 \quad (10)$$

式中  $y_j$  和  $y'_j$  分别为第  $j$  个实验数据的真值和估计值。

式 (9) 中  $\ln\left(\frac{SSE}{T}\right)$  表示模型拟合的优良性, 其

值越小模型越精确;  $\frac{2m}{T}$  表示对模型过度拟合的惩罚,

其值越小模型越简洁。显而易见, 当模型变得更加复

杂时,  $\ln\left(\frac{SSE}{T}\right)$  将变得更小, 但  $\frac{2m}{T}$  由于模型参数的增

加将变得更大。AIC 鼓励数据拟合的优良性, 但尽量避免出现过度拟合的情况。所以, 最佳模型应是 AIC 值最小的那一个。

当实验数据数量  $T$  较大时,  $\frac{2m}{T}$  对模型过度拟合的惩罚力度将变小。因此, 为了在大实验数据下也能保证模型准确度和实用性的平衡, 文献[24]将 AIC 准则改进为

$$AIC = \ln\left(\frac{SSE}{T}\right) + \frac{2m^d}{T} \quad (11)$$

式中指数  $d$  的引进增加了对模型过度拟合的惩罚力度, 其为大于 1 的恒值, 本文取  $d=4$ 。

根据式 (5), RC 模型的阶数  $n$  与模型未知参数  $m$  之间的关系可表述为

$$m = 2n + 1 \quad (12)$$

将式 (5) 和式 (12) 分别代入式 (11), 可得到 RC 阶数选择的 AIC 准则

$$AIC = \ln\left\{\frac{\sum_{t=1}^T [U_{\text{bat}}(t) - \text{OCV} + \sum_{i=1}^n (R_i i_{\text{bat}} e^{-t/\tau_i})]^2}{T}\right\} + \frac{2(2n+1)^d}{T} \quad (13)$$

式中  $U_{\text{bat}}(t)$  为实验中获得的电池端电压。

基于 AIC 准则辨识不同 SOC 处的最优模型阶数, 兼顾了模型的准确度和实用性, 为本文提出的变阶 RC 模型阶数的合理选取提供了理论依据。

## 3 仿真及实验验证

本文研究对象为 16 并 16 串圆柱型 26650 磷酸铁锂动力电池组, 标称容量为 50 Ah, 标称电压为 51.2 V。如图 3 所示, 电池测试平台由 AVL 电池模拟/测试柜、AVL 控制柜、电池高低温箱以及 AVL Lynx 软件组成。实验记录电池的端电压、电流和 SOC 等工况值, 记录频率为 1 Hz。

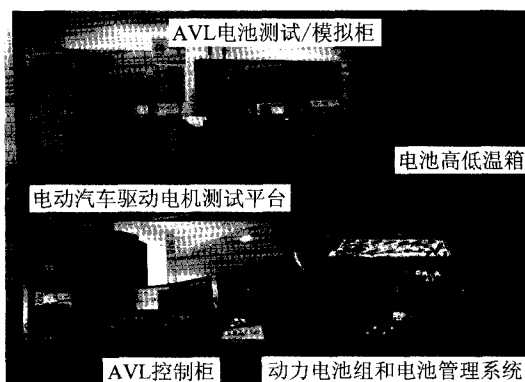


图 3 动力电池测试平台

Fig. 3 The power battery test platforms

为了搭建电池模型, 参考《FreedomCAR 电池实验手册》中的混合脉冲实验 (Hybrid Pulse Power Characterization Test, HPPC)<sup>[25]</sup>, 将其改为脉冲充电和脉冲放电实验。所谓脉冲放电, 即在室温  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  下, 将充满电的电池以  $1/3C$  电流放电至 SOC 为 90% 时, 停止放电并静置 1 h, 然后以同样电流放电至 SOC 为 80%, 以此类推, 直至 SOC 为 10% 时结束。脉冲充电与脉冲放电类似。为了验证模型的有效性, 还需要进行恒流充、放电和自定义 UDDS 工况放电实验。

### 3.1 模型阶数辨识

图 4 为电池放电方向和充电方向上不同阶数的 RC 模型对应的 AIC 值。根据 AIC 的“齐畜原理”, 最佳模型应是 AIC 值最小的那一个。当 SOC 为 10% 和 90% 时, 应选三阶 RC 模型; 当 SOC 为 20%、30%、...、80% 时, 应选二阶 RC 模型。显然, 当  $10\% < \text{SOC} < 20\%$  或  $80\% < \text{SOC} < 90\%$  时, 会找到一个 SOC 点使得二阶和三阶 RC 模型的 AIC 值相等, 即模型切换的最优点, 但实际应用中很难找到该 SOC 点。因此, 为了保证模型的准确度, 在  $0 \leq \text{SOC} < 20\%$  和  $80\% < \text{SOC} \leq 100\%$  时, 本文采用三阶 RC 模型; 在  $20\% \leq \text{SOC} \leq 80\%$  时, 则采用二阶 RC 模型。

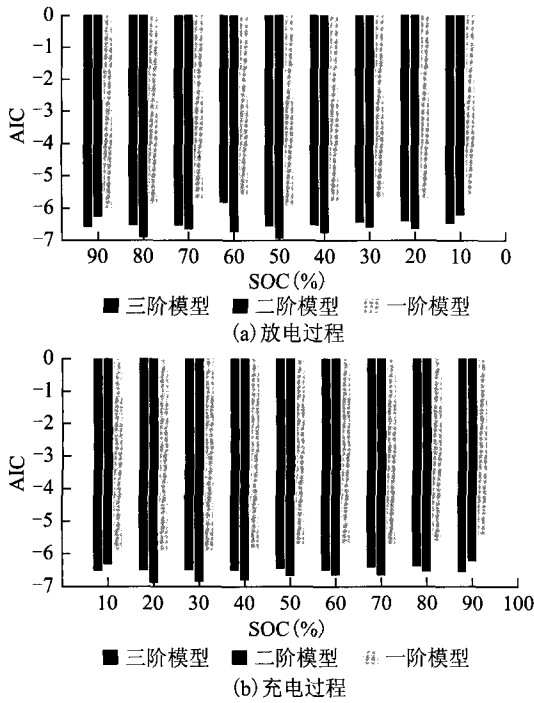


图4 不同阶数的RC模型对应的AIC值  
Fig. 4 The AIC values of different order RC models

为验证上述模型阶数选择的合理性,图5给出了一阶、二阶和三阶RC网络在不同SOC处模拟电池电压恢复特性的曲线。显然,RC网络的阶数越高,拟合的就越越好。当SOC为10%或90%时,一阶和二阶RC网络模拟误差较大,而三阶RC网络模拟准确度较高,因此应选择三阶RC模型;但当SOC为50%时,从二阶RC网络到三阶RC网络,其拟合准确度变化不大,但模型复杂度却增加了,因此应选择二阶RC模

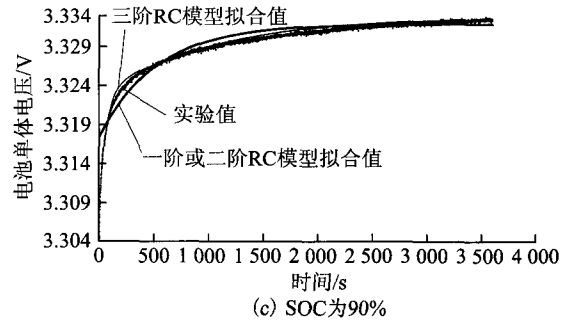


图5 脉冲放电后磷酸铁锂离子电池的电压恢复特性及使用不同阶RC网络的拟合结果

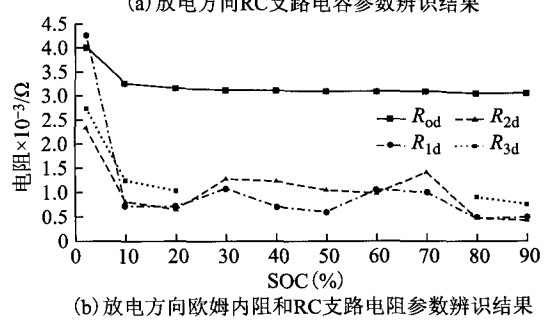
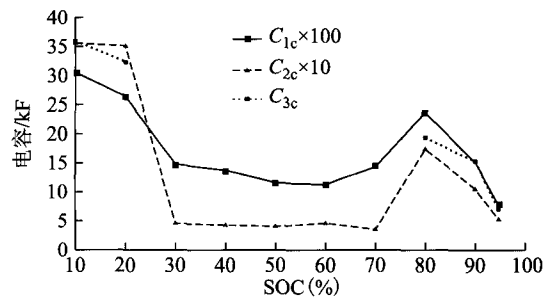
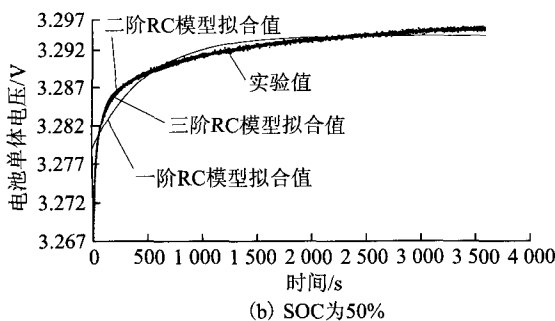
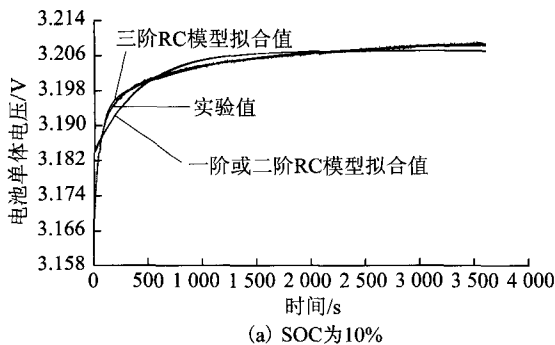
Fig. 5 The voltage-recovery characteristic of lithium-ion battery after pulse discharge and the fitting result using different order RC network

型。由此可见,基于AIC准则选择电池模型阶数合理有效,兼顾了模型的准确度和实用性。

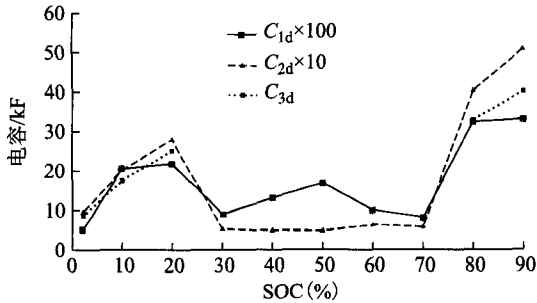
### 3.2 模型参数辨识

图6为变阶RC等效电路模型的充放电方向参数辨识结果,其中下标d表示放电,下标c表示充电。根据3.1节基于AIC准则的阶数辨识结果,当 $0 \leq SOC < 20\%$ 和 $80\% < SOC \leq 100\%$ 时,采用三阶RC模型,需要辨识3个RC支路中 $R_1$ 、 $C_1$ 、 $R_2$ 、 $C_2$ 、 $R_3$ 和 $C_3$ 的值;而当 $20 \leq SOC \leq 80\%$ 时,采用二阶RC模型,只需辨识前两个RC支路中 $R_1$ 、 $C_1$ 、 $R_2$ 和 $C_2$ 的值。

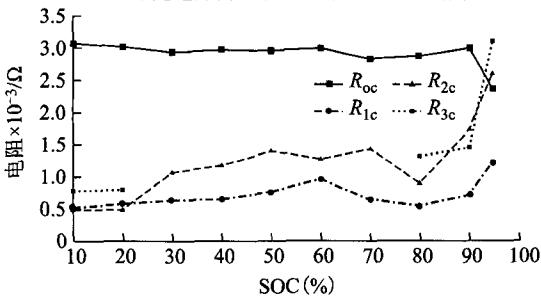
考虑电池的磁滞效应,分别在不同SOC处(即10%、20%、...、90% SOC)辨识电池的充电OCV和放电OCV,然后求取平均值,得到电池的平均OCV,将平均OCV及其对应的SOC代入式(2),基于最小二乘法辨识参数 $a_1 \sim a_5$ ,并统计于表2中。图7给出



了充电 OCV、放电 OCV、平均 OCV 以及基于最小二乘法拟合的 OCV 与 SOC 的关系曲线。



(c) 充电方向 RC 支路电容参数辨识结果



(d) 充电方向欧姆内阻和 RC 支路电阻参数辨识结果

图 6 变阶 RC 模型充、放电方向参数辨识结果

Fig. 6 Parameter identification of variable-order RC model under charge and discharge

表 2 OCV 模型参数

Tab. 2 The parameters of the OCV model

参数	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
数值	3.377	$6.551 \times 10^{-2}$	$-3.050 \times 10^{-4}$	$3.468 \times 10^{-6}$	$-3.636 \times 10^{-2}$

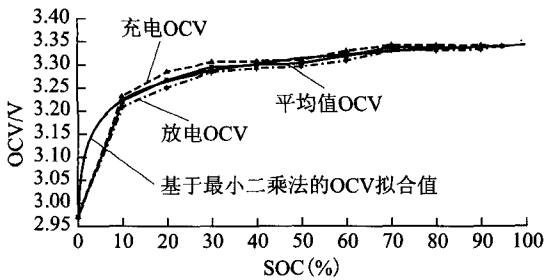


图 7 开路电压 OCV 与 SOC 的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between OCV and SOC

### 3.3 实验结果分析

图 8、图 9 分别为脉冲充放电条件下基于 AIC 准则的变阶 RC 模型与传统二阶 RC 模型的对比结果。在电池静置阶段，变阶 RC 模型的输出值比二阶 RC 模型的输出值更接近实验值，且几乎与真值重合，这说明变阶 RC 模型能更好地描述电池电压的回弹特性；在电池充放电阶段，变阶 RC 模型的准确度也明显高于二阶 RC 模型。如图 8、图 9 放大部分所示，当 SOC 低于 20% 或高于 80% 时，变阶 RC 模型将由二阶模型

切换为三阶模型，由于模型参数和结构的突变，模型输出瞬间出现波动，但随后很快收敛到实验值附近，并未影响到模型总体准确度。总体来看，通过略增加模型复杂度，变阶 RC 模型的准确度高达 0.68%，明显高于传统二阶 RC 模型的准确度 1.87%，证明了基于 AIC 准则的变阶 RC 模型的优越性。

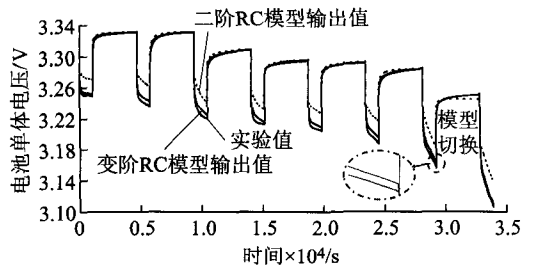


图 8 脉冲放电下变阶数 RC 模型与二阶 RC 模型输出电压对比

Fig. 8 An output voltage comparison between the variable-order RC model and two-order RC model under pulse discharge

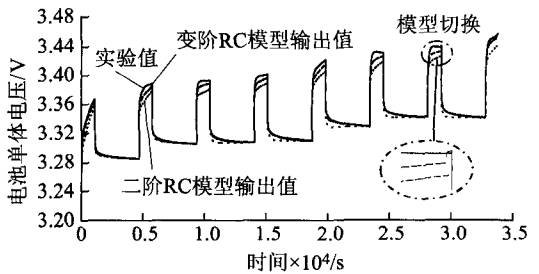


图 9 脉冲充电下变阶 RC 模型与二阶 RC 模型输出电压对比

Fig. 9 An output voltage comparison between the variable-order RC model and two-order RC model under pulse charge

图 10、图 11 分别为在恒流充、放电工况下变阶 RC 模型与传统二阶 RC 模型的对比结果。总体来看，在充放电初期的模型误差略大于在中间平台区的模型误差，进一步验证了锂离子电池两端陡、中间平的非线性电压特性。如图 10、图 11 中放大部分所示，当 SOC 穿越 20% 或 80% 时，变阶 RC 模型发生状态切换，模型输出瞬间突变，但很快收敛到实验真值附近，其最大相对误差为 0.67%；而二阶 RC 模型虽然不会发生突变，但总体准确度仍低于变阶 RC 模型，其最大相对误差为 1.85%。

为进一步验证变阶 RC 模型的适用性，图 12 给出了自定义 UDDS 循环工况下变阶 RC 模型输出值与二阶 RC 模型输出值和实验值的对比结果及误差曲线。如图 12 中放大部分所示，当 SOC 穿越 20% 或 80% 时，变阶 RC 模型输出发生突变，但很快收敛到实验真值附近。与恒流充、放电工况相比，UDDS 循环工况下，由于负载电流变化非常剧烈，模型状态切换对模型输

出造成的影响可基本忽略。总体来看,变阶 RC 模型输出值与实验值之间的一致性较好,小电流充放电和静置阶段的模型误差较小,在高倍率放电时,模型误差有所增加,主要原因是模型参数随电流的变化发生了改变。如误差曲线所示,变阶 RC 模型的最大相对误差在 1% 以内,实用价值较高。

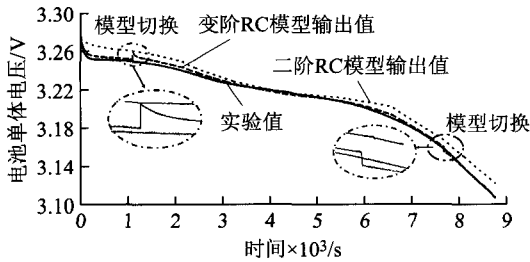


图 10 恒流放电下变阶 RC 模型与二阶 RC 模型输出电压对比  
Fig. 10 An output voltage comparison between the variable-order RC model and two-order RC model under constant-current discharge

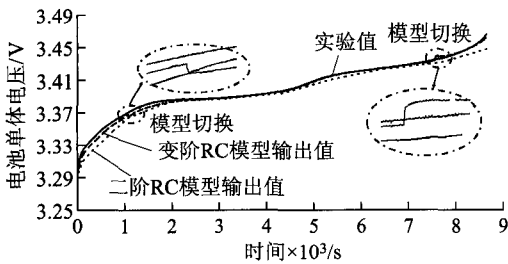


图 11 恒流充电下变阶 RC 模型与二阶 RC 模型输出电压对比  
Fig. 11 An output voltage comparison between the variable-order RC model and two-order RC model under constant-current charge

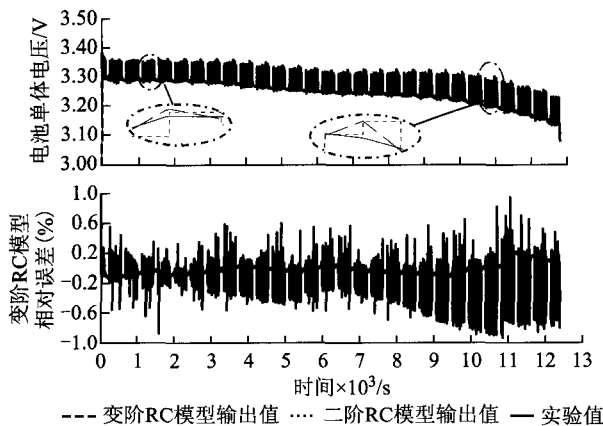


图 12 UDDS 动态工况下变阶 RC 模型与二阶 RC 模型输出电压对比

Fig. 12 An output voltage comparison between the variable-order RC model and two-order RC model under UDDS test cycles

通过以上对比可知,本文提出的变阶 RC 等效电路模型虽然在状态切换时输出会出现瞬间波动,但其

误差仍小于二阶 RC 模型的误差,并随后很快收敛到实验值附近,基本未影响模型的性能。可见,变阶 RC 模型的准确度优于传统的二阶 RC 模型,模型复杂度却远低于三阶 RC 模型,有效克服了模型精确性和实用性之间的矛盾。该模型适用于动力电池的恒流充放电、脉冲充放电及 UDDS 循环工况。

#### 4 结论

本文提出了一种基于 AIC 准则的锂离子电池变阶 RC 等效电路模型,阐述了变阶 RC 模型的工作原理和模型阶数的辨识方法,并通过恒流充放电、脉冲充放电和 UDDS 循环工况实验验证了模型的优越性。仿真和实验结果表明:基于 AIC 准则的变阶 RC 等效电路模型通过略增加模型的复杂度,能更加准确地描述锂离子电池两端陡、中间平的非线性电压特性,模型相对误差在 1% 以内,有效克服了模型准确度和实用性之间的矛盾,具有较高的实用价值。基于 AIC 准则的变阶 RC 等效电路模型能够用于电池管理系统设计、电池模拟器研发和电动汽车及其配套能源供给设施建设等领域,具有广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 谭晓军. 电动汽车动力电池管理系统设计[M]. 广州: 中山大学出版社, 2011.
- [2] 李相哲, 苏芳, 林道勇. 电动汽车动力电源系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [3] 高明煜, 何志伟, 徐杰. 基于采样点卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 161-167.  
Gao Mingyu, He Zhiwei, Xu Jie. Sigma point kalman filter based SOC estimation for power supply battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 161-167.
- [4] Shang Y, Zhang C, Cui N, et al. A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant LC converter and boost converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3731-3747.
- [5] Shang Y, Zhang C, Cui N, et al. A crossed pack-to-cell equalizer based on quasi-resonant LC converter with adaptive fuzzy logic equalization control for series-connected lithium-ion battery strings[C]. The 30<sup>th</sup> IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), Charlotte, NC, USA, 2015: 1685-1692.
- [6] 肖湘宁, 陈征, 刘念. 可再生能源与电动汽车充电设施在微电网中的集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-14.  
Xiao Xiangning, Chen Zheng, Liu Nian. Integrated

- mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-14.
- [7] 张明霞, 田立亭. 一种基于需求分析的电动汽车有序充电实施架构[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 118-122.  
Zhang Mingxia, Tian Liting. A method to organize the charging of electric vehicle based on demand analysis [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 118-122.
- [8] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.  
Ma Lingling, Yang Jun, Fu Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [9] 薛志英, 周明, 李庚银. 大规模风电接入电力系统备用决策评述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 148-155.  
Xue Zhiying, Zhou Ming, Li Gengyin. Survey on reserve decision of power systems with large scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 148-155.
- [10] Johnson V H. Battery performance models in ADVISOR [J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 321-329.
- [11] 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(3): 1-5.  
Chen Quanshi, Lin Chengtao. Summarization of studies on performance models of batteries for electric vehicle [J]. Automobile Technology, 2005(3): 1-5.
- [12] Doyle M, Fuller T F, Newman J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(6): 1526-1533.
- [13] Rakhmatov D N, Vruthula S B K. An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems[C]. Proceedings of the 2001 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, San Jose, CA, USA, 2001: 488-493.
- [14] Navet N, Kumar A, Singhal G, et al. Battery model for embedded systems[C]. Proceedings of the 18th International Conference on VLSI Design, Kolkata, India, 2005: 105-110.
- [15] Bhatikar S R, Mahajan R L, Wipke K, et al. Artificial neural network based energy storage system modeling for hybrid electric vehicles[R]. Proceeding of the Future Car Congress, 2000.
- [16] Johnson V H, Pesaran A A, Sack T. Temperature-dependent Battery Models for High-power Lithium-ion Batteries[M]. City of Golden; National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [17] Chen M, Rincon-Mora G A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and  $I$ - $V$  performance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 504-511.
- [18] DOE/ID-10597, PNGV Battery Test Manual[S].
- [19] 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, 28(1): 38-42.  
Lin Chengtao, Qiu Bin, Chen Quanshi. A study on nonlinear equivalent circuit model for battery of electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(1): 38-42.
- [20] 陈大分, 姜久春, 王占国, 等. 动力锂离子电池分布参数等效电路模型研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 169-176.  
Chen Dafen, Jiang Jiuchun, Wang Zhanguo, et al. Research on distribution parameters equivalent-circuit model of power lithium-ion batteries[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 169-176.
- [21] Kim T, Qiao W. A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1172-1180.
- [22] 胡国珍, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于模型参数拟合的锂离子电池充电电源控制性能[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 146-152.  
Hu Guozhen, Duan Shanxu, Cai Tao, et al. Control performance analysis of lithium-ion battery charger based on model parameter fitting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 146-152.
- [23] Burnham K P, Anderson D R, Huyvaert K P. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons [J]. Behavioral Ecology and Sociobiology, 2011, 65(1): 23-35.
- [24] Qi M, Zhang G P. An investigation of model selection criteria for neural network time series forecasting[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 132(3): 666-680.
- [25] DOE/ID-11069, Freedom CAR. Battery Test Manual for Power-Assist Hybrid Electric Vehicles[S].

#### 作者简介

高云龙 男, 1984年生, 博士, 研究方向为电动汽车动力电池建模、状态估计和均衡控制等。

张奇 男, 1987年生, 助理实验师, 研究方向为电动汽车、控制理论与应用、实验技术等。