

锂离子电容器的建模及参数辨识方法

姜俊杰^{1,2}, 陈昕彤^{1,3}, 张 熊^{1,2}, 宋 爽^{1,2}, 孙现众^{1,2}, 霍群海^{1,2},
韩立博¹, 韦统振^{1,2}, 邹敏敏³, 马衍伟^{1,2}
(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京石油化工学院, 北京 102617)

摘要: 本文分析了锂离子电容器的一种建模及参数辨识方法, 首先对锂离子电容器的工作机理进行了分析; 然后根据锂离子电容器的正负极特性的不同, 分别对其正极和负极单独建模, 再由正负极模型得到锂离子电容器的总模型结构; 随后讨论了锂离子电容器模型的参数辨识方法, 先采用参比电极测出单电极的充放电曲线, 再根据实验曲线并结合电路模型的工作原理, 推导出参数的辨识方法; 最后结合实验数据和仿真, 验证了所建立的模型结构的准确性。
关键词: 锂离子电容器; 参数辨识; 正负极模型; 参比电极
DOI: 10.12067/ATEEE1808035 **文章编号:** 1003-3076(2019)10-0067-07 **中图分类号:** TM53

1 引言

随着人类社会的发展, 能源消耗和环境污染越来越严重, 为了尽可能地减少能源消耗, 提高能源的利用率, 科学家们发明了很多新型的能量转换和储能器件, 如锂离子电池、燃料电池、超级电容器等, 这些新型的储能器件在多个领域得到了广泛的应用。其中, 超级电容器, 也称电化学电容器, 是介于常规电容器和传统电池之间的一种储能器件。近些年来, 超级电容器发展十分迅速, 它的脉冲充放电性能优良, 功率密度、能量密度和充放电速率都比较高, 寿命能达到百万次以上, 而且能在比较宽的温度范围内工作^[1]。超级电容器的这些优良性能使其在众多领域得到了广泛的应用, 如新能源汽车^[2]、城市轨道交通^[3]、智能电网^[4]、电源^[5]等领域。

目前, 超级电容器主要分为双电层电容器、赝电容器和混合型电容器三类。双电层电容器在充放电时只有电荷的储存和转移, 因此有很长的充放电循环寿命。赝电容器是在电吸附过程中伴随氧化还原反应的发生, 所以工作机理不同于传统的双电层电容器。混合型电容器是一种新型的超级电容器, 它

综合了双电层电容器和赝电容器的优点, 具有较高的能量密度和功率密度^[6], 具有良好的市场前景。

混合型超级电容器的一个电极采用具有双电层电容的电极材料, 另一个电极采用具有法拉第赝电容或传统电池的电极材料, 由于电极材料不同, 因此混合型超级电容器也被称为非对称型超级电容器^[7]。其中, 根据所使用的电解液的不同, 混合型超级电容器又可以分为混合型水系超级电容器和混合型有机系超级电容器^[8]。而锂离子电容器是混合型有机系超级电容器中的一种, 和传统的超级电容器相比, 它具有很高的功率密度和能量密度, 循环寿命也很高, 具有良好的应用前景。

建立超级电容器的等效模型是一个研究热点, 在超级电容器实际应用中, 建立合理的超级电容器的等效模型对实际系统的分析、设计、仿真等工作具有重要意义。目前, 对超级电容器的建模研究大多集中在传统的双电层电容器和赝电容器上^[9-13], 而对混合型超级电容器特别是混合型有机系超级电容器的建模研究却很少。为此, 本文对混合型有机系超级电容器中锂离子电容器的建模方法进行了研究。

收稿日期: 2018-08-17
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA21050302)
作者简介: 姜俊杰(1992-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为超级电容器建模仿真;
张 熊(1981-), 男, 湖南籍, 研究员, 博士, 研究方向为超级电容器储能技术(通讯作者)。

2 锂离子电容器建模

2.1 锂离子电容器原理

论文以实验室制作的锂离子电容器为研究对象,正极采用活性炭材料(可乐丽 YP50F),负极采用软碳材料(日本日立化成),电解液为 1mol/L 的 LiPF_6 (EC:DEC:DMC = 1:1:1) 电解液。采用新威电池测试系统对锂离子电容器进行预嵌锂和充放电测试。采用电化学工作站(瑞士 Metrohm)测试锂离子电容器的交流阻抗谱,此测试装置可以对器件施加幅值为 5mV 频率从 $10^5 \sim 0.1\text{Hz}$ 的交流扰动信号,由此可以测得器件的频率响应。锂离子电容器的工作原理如图 1 所示。

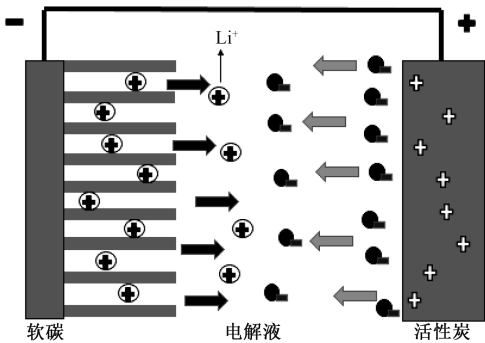


图 1 锂离子电容器的原理图

Fig.1 Schematic diagram of lithium-ion capacitor

由图 1 可知,锂离子电容器的正极和负极工作原理不同。在充放电过程中,正极发生的是纯物理吸脱附过程,不发生化学反应。在正极工作过程中,由于固液两相的电化学势不同,正极表面的电荷由于静电作用会吸引溶液中的极性相反的电荷,从而在正极表面形成两个电荷层,一层在溶液一侧,一层在电极一侧,构成一个双电层。当正极放电时,电荷从电极表面释放,从而放出能量。负极采用的是能预嵌锂的碳材料,充放电时都与电解液中的锂离子发生氧化还原反应来储存能量,此方式也成为了法拉第赝电容储能^[13]。因此,锂离子电容器的工作原理可描述为:充电时,电解液中的 Li^+ 嵌入到嵌锂材料中形成嵌锂化合物,同时电解液中的阴离子则吸附在活性炭的正极表面形成双电层;放电过程与充电过程相反, Li^+ 从嵌锂材料中脱出,阴离子也从活性炭表面脱附回到本体电解液^[14]。从中可以看出,锂离子电容器综合了双电层电容和赝电容的工作机理。

2.2 锂离子电容器建模

目前,对超级电容器的电学特性的建模模型主

要分为黑箱模型、等效电路模型和电化学机理模型三大类^[15]。黑箱建模方法不需要过多了解对象细节,根据外加激励和系统响应就可以建立起等效模型结构,但是这种模型缺乏实际的物理意义。等效电路模型是根据对象的工作原理和实际物理结构,采用电阻、电容、恒压源等电路元件组成电路网络来模拟对象的宏观外特性。这类模型是集中参数模型,通常含有相对较少的参数。电化学机理模型是从对象内部的反映机理出发,建立对象的微观模型,这种模型能较好地反应对象的宏观和微观的特性,但是由于内部结构往往比较复杂,在建立模型的过程中需要较多的参数辨识,因此建立一个好的电化学机理模型有一定的难度。

本文通过建立锂离子电容器的等效电路模型来描述其宏观外特性,采用机理分析法作为建模手段,即结合锂离子电容器的工作原理和实际物理结构来建立模型。锂离子电容器的物理结构可以看成是由电极、电极集流体和电解液等单元串联组成。因此,可以结合单元的特性分别对每一个单元进行单独建模,然后再串联形成最终的等效电路模型结构^[16]。

2.2.1 正极电路模型

锂离子电容器的正极是双电层结构,因此根据对称型超级电容器的经典等效电路模型,把正极模型建模成 RC 串联电路模型^[17],如图 2 所示。 R_{s1} 是等效串联电阻, C_{dl1} 是理想电容。其中, R_{s1} 代表了锂离子电容器的正极充放电时的发热损耗,而且会随着充放电电流的大小产生不同的电压降。

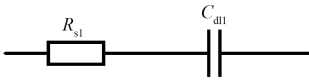


图 2 正极等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model for positive electrode

2.2.2 负极电路模型

锂离子电容器负极发生锂离子的嵌入和脱出,反应机理和电池反应类似,属于氧化还原反应,由此根据文献赝电容等效电路模型^[18],综合得到锂离子电容器负极模型,如图 3 所示。模型中的参数分别为赝电容 C_F 、溶液电阻 R_{s2} 、双电层电容 C_{dl2} 以及感应电阻 R_F 。

2.2.3 整体模型

根据上述分析,把锂离子电容器的正负极模型结构串联起来就可以得到锂离子电容器的整体模型,如图 4 所示。

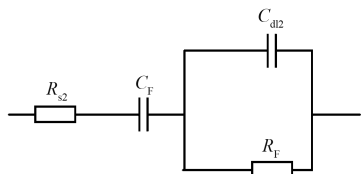


图3 负极等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model for negative electrode

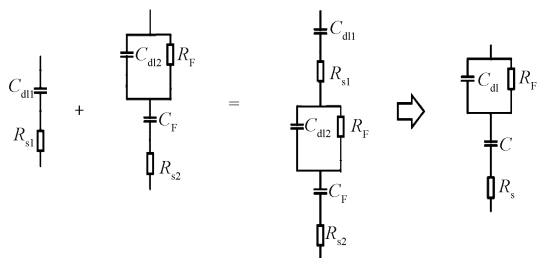


图4 锂离子电容器建模过程

Fig.4 Forming of equivalent circuit model of lithium-ion capacitor

值得注意的是,锂离子电容器的工作电压和双电层超级电容器不同,本文研究对象的工作电压范围为2~4V。因此,锂离子电容器的等效电路模型应该包含一个直流偏置电压源 DC 来等效其最低工作电压,如图5所示。

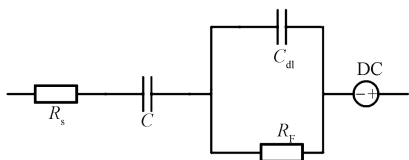


图5 锂离子电容器等效电路模型

Fig.5 Equivalent circuit model for lithium-ion capacitor

3 锂离子电容器模型参数辨识

目前对超级电容器的模型参数辨识方法主要有电路分析法和阻抗谱分析法。电路分析法是利用恒流实验数据和欧姆定律进行模型参数求解,但是求解过程往往需要大量的公式来进行迭代,计算比较繁琐。阻抗分析法是通过对超级电容器的频域特性进行拟合来求解模型参数,但是其辨识结果不十分准确。本文结合了电路分析法和阻抗谱分析法,简化了锂离子电容器的参数辨识方法。

本文采用具有参比电极的三电极体系锂离子电容器,在给锂离子电容器充放电过程中利用参比电极分别记录下正负极的电势。锂离子电容器模型参数辨识过程如下:首先,给锂离子电容器以电流 I 恒

流充电至4V,充电到最大电压值后把锂离子电容器静置5s,然后以电流 I 恒流放电至2.0V,同时记录下正负极充放电时的电势。

3.1 正极电路模型参数辨识

正极电路模型中的电阻 R_{s1} 是根据锂离子电容器刚开始充电时正极电势的突变量得到^[19],如下:

$$R_{s1} = \frac{\Delta V_1}{I} \quad (1)$$

式中, ΔV_1 为锂离子电容器刚开始充电时正极电势的突变量; I 为恒流充电的电流值。正极模型中 C_{dl1} 可以根据电容充电时 C_{dl1} 两端的电势变化 V_2 计算得到^[20],如下:

$$C_{dl1} = \frac{It}{V_2} \quad (2)$$

式中, V_2 为电容 C_{dl1} 的电势变化差值; t 为充电时间。锂离子电容器正极的充放电曲线如图6所示。

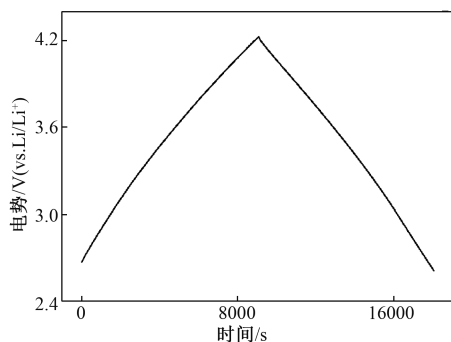


图6 正极的充放电曲线

Fig.6 Charge-discharge curve of positive electrode

3.2 负极电路模型参数辨识

负极模型电路中的电阻 R_{s2} 的确定可通过充电开始瞬间测量负极上的电势突变量来得到,如下:

$$R_{s2} = \frac{\Delta U}{I} \quad (3)$$

式中, ΔU 为充电开始瞬间负极电势的突变量。锂离子电容器负极的充放电曲线如图7所示。

通过测量锂离子电容器的交流阻抗谱来进行支路 $R_F C_{dl2}$ 的参数辨识,锂离子电容器的交流阻抗谱如图8所示。由于复合元件(RC)在交流阻抗谱中的轨迹是一个半圆^[21],因此可以结合复合元件(RC)的这一特性来识别负极模型中支路 $R_F C_{dl2}$ 的参数。具体的方法是在中高频段取三个点拟合出圆弧,这样可以由电化学工作站的 NOVA 软件直接得到 R_F 、 C_{dl2} 的参数。

模型中参数 C_F 的辨识:实验分为三个阶段,先

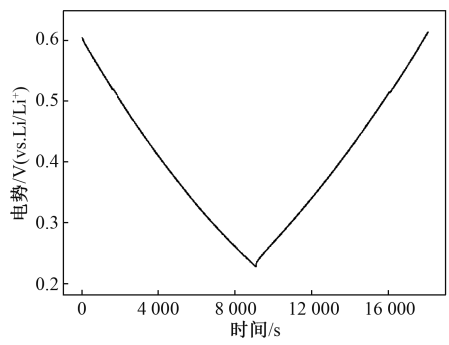


图 7 负极的充放电曲线

Fig.7 Charge-discharge curve of negative electrode

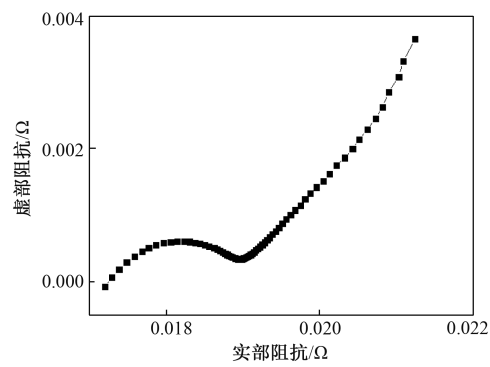


图 8 锂离子电容器的交流阻抗谱

Fig.8 Nyquist plot of lithium-ion capacitor

对锂离子电容器进行充电,然后静置一段时间,最后放电,设充电阶段时间为 t_1 。

设支路 $R_{\text{F}}C_{\text{dl}2}$ 的时间常数为 τ ,可得:

$$\tau = R_{\text{F}}C_{\text{dl}2} \tag{4}$$

对于 $R_{\text{F}}C_{\text{dl}2}$ 支路,根据 KCL 定律列出支路方程,可得:

$$C_{\text{dl}2} \frac{dV_t}{dt} = I - \frac{V_t}{R_{\text{F}}} \tag{5}$$

式中, V_t 为 $R_{\text{F}}C_{\text{dl}2}$ 支路的电压,对式(5)进行积分变换可得:

$$V_t = \frac{I\tau}{C_{\text{dl}2}} + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \tag{6}$$

式中, A 为常数,刚开始充电时, $R_{\text{F}}C_{\text{dl}2}$ 上的电压是零,可得:

$$A = -\frac{I\tau}{C_{\text{dl}2}} \tag{7}$$

当锂离子电容器的负极充电到最小电势时,经历的时间为 t_1 ,由式(6)可得:

$$V_{t1} = \frac{I\tau}{C_{\text{dl}2}}(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}) \tag{8}$$

根据电路的电压电流关系,结合式(8),可得:

$$U_{t1} = IR_{s2} + \frac{It_1}{C_{\text{F}}} + \frac{I\tau}{C_{\text{dl}2}}(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}) + U_{t0} \tag{9}$$

式中, U_{t1} 为 t_1 时刻负极的电势; U_{t0} 为刚开始充电时负极的电势;电流 I 取充电电流的负值。通过求解式(9),可得 C_{F} 的值。

最后,把正极模型和负极模型串联起来就可以得到锂离子电容器的总模型,如图 4 所示。总模型参数值计算如下:

$$\begin{cases} C = \frac{C_{\text{dl}1}C_{\text{F}}}{C_{\text{dl}1} + C_{\text{F}}} \\ R_{\text{s}} = R_{\text{s}1} + R_{\text{s}2} \\ C_{\text{dl}} = C_{\text{dl}2} \end{cases} \tag{10}$$

4 锂离子电容器模型实验验证

为了验证建立的锂离子电容器模型的准确性,需要利用锂离子电容器的实测数据对模型参数进行辨识,然后结合辨识的参数和建模的模型,用软件对模型进行仿真,通过比较仿真波形来验证模型的准确性。模型验证的流程图如图 9 所示。

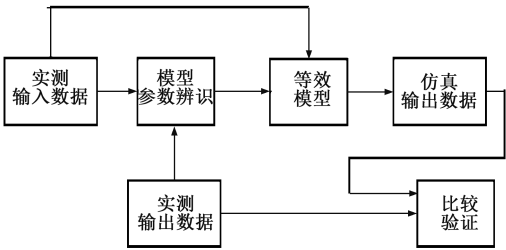


图 9 参数辨识与模型验证流程图

Fig.9 Flow chart of parameter identification and model confirmation

本文将实验室制作的 90F 锂离子电容器作为实验对象,具体的操作是利用新威电池检测系统将锂离子电容器以 20mA 的电流恒流充电,冲到最大电压值 4V 后停止充电,静置 5s 后,再以 20mA 的电流恒流放电至 2V,同时记录下正负极充放电时的电势;利用电化学工作站(瑞士 Metrohm)测试了锂离子电容器的交流阻抗谱。结合前面给出的锂离子电容器的参数辨识方法,经过计算得到的参数值见表 1。

然后采用 PSIM 软件对建立的锂离子电容器模型进行模拟仿真,图 10 给出了锂离子电容器两端的实测电压曲线与仿真电压曲线的对比图。

表 1 90F 锂离子电容器模型参数值

Tab.1 Circuit model parameters of the 90F

lithium-ion capacitor					
参数	正极电路		负极电路		
	R_{s1}/Ω	C_{dl1}/F	R_{s2}/Ω	$R_F/m\Omega$	C_{dl2}/F C_F/F
数值	0.06	111.58	0.085	1.726	0.5724 490

总模型			
参数	C/F	R_s/Ω	$R_F/m\Omega$
数值	90	0.145	1.725

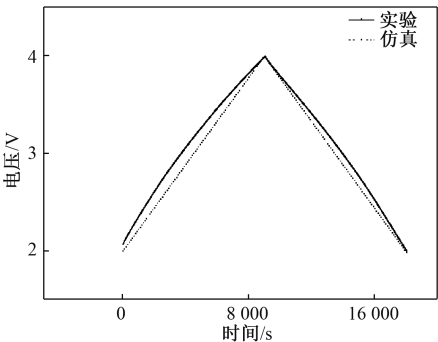


图 10 实验曲线和仿真曲线对比图

Fig.10 Comparison between experimental and simulation charge-discharge curves

从图 10 可以看出,锂离子电容器的实验曲线和仿真曲线十分接近,但是存在一定的误差,与仿真曲线相比,实验曲线呈现一定的非线性,而本文采用的锂离子电容器的等效电路模型是时不变的,仿真曲线的线性度比较大,从而导致锂离子电容器的实验曲线和仿真曲线存在一定误差。

为了进行更直观地对比,图 11 给出了实验和仿真曲线的相对误差图。从图 11 可以看出,仿真电压和实测电压的最大相对误差为 6.5%,对应的绝对误差不超过 0.18V。仿真结果表明该模型可以比较准确地反映锂离子电容器在工作过程中的外特性,但是今后还需要对模型和参数辨识方法进行进一步地改进。

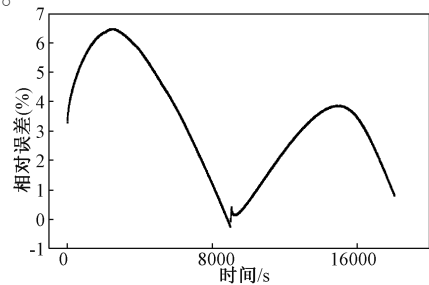


图 11 实验曲线和仿真曲线相对误差图

Fig.11 Relative error between experimental and simulation charge-discharge curve

5 结论

本文研究了锂离子电容器的建模方法,提出并建立了一种比较简单的可描述其外特性和工作原理的等效电路模型。建模过程是先分别对锂离子电容器的正负极建模,再根据交流阻抗谱分析方法和锂离子电容器电极充电过程中的电路特性,对锂离子超级电容器的参数识别方法进行了简化。论文最后结合实验和仿真验证了该模型的准确性和辨识方法的有效性。

参考文献 (References):

[1] 黄晓斌,张熊,韦统振,等 (Huang Xiaobin, Zhang Xiong, Wei Tongzhen, et al.). 超级电容器的发展及应用现状 (Development and applications status of supercapacitors) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (11): 63-70.

[2] 从晶,宋坤,鲁海威,等 (Cong Jing, Song Kun, Lu Haiwei, et al.). 新能源电力系统中的储能技术研究综述 (Review of energy storage technology for new energy power system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (3): 53-59.

[3] 邓哲,周峰武,吕征宇 (Deng Zhe, Zhou Fengwu, Lv Zhengyu). 基于超级电容储能与电压型变流器的电梯能量回收系统效率优化控制策略 (Optimal efficiency control strategy of elevator energy recovery system based on super capacitor storage and VSC) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (2): 22-28.

[4] 董博,李永东,郑治雪 (Dong Bo, Li Yongdong, Zheng Zhixue). 分布式新能源发电中储能系统能量管理 (Energy management of hybrid storage in distributed generation system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (1): 22-25, 96.

[5] 唐西胜,齐智平 (Tang Xisheng, Qi Zhiping). 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究 (Study on an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2006, 25 (3): 37-41, 67.

[6] 孙现众,张熊,王凯,等 (Sun Xianzhong, Zhang Xiong, Wang Kai, et al.). 高能量密度的锂离子混合型电容器 (Lithium ion hybrid capacitor with high energy

- density) [J]. 电化学 (Journal of Electrochemistry), 2017, 23 (5): 586-603.
- [7] 张熊, 孙现众, 马衍伟 (Zhang Xiong, Sun Xianzhong, Ma Yanwei). 高比能超级电容器的研究进展 (Research of supercapacitors with high energy density) [J]. 中国科学: 化学 (Scientia Sinica Chimica), 2014, 44 (7): 1081-1096.
- [8] 姜海静, 邱平达, 赵雪, 等 (Jiang Haijing, Qiu Pingda, Zhao Xue, et al.). 混合型电容器研究进展 (Research progress of hybrid capacitor) [J]. 渤海大学学报 (Journal of Bohai University), 2014, 35 (3): 289-293, 306.
- [9] 鲍爱达, 关新锋, 郭茂香, 等 (Bao Aida, Guan Xinfeng, Guo Maoxiang, et al.). 基于 Pspice 的超级电容器宏模型建立及仿真分析 (Supercapacitor schematic model establishment and simulation analysis based on Pspice) [J]. 太原理工大学学报 (Journal of Taiyuan University of Technology), 2013, 44 (1): 1-4.
- [10] 梁海泉, 谢维达, 孙家南, 等 (Liang Haiquan, Xie Weida, Sun Jianan, et al.). 超级电容器时变等效电路模型参数辨识与仿真 (Parameter identification and simulation of time-varying equivalent circuit model of supercapacitor) [J]. 同济大学学报 (Journal of Tongji University), 2012, 40 (6): 949-954.
- [11] 孙家南, 赵洋, 韦莉, 等 (Sun Jianan, Zhao Yang, Wei Li, et al.). 基于系统辨识的电化学超级电容器建模 (Modeling of electrochemical supercapacitor based on system identification) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2012, 48 (9): 16-21, 26.
- [12] 单金生, 吴立锋, 关永, 等 (Shan Jinsheng, Wu Lifeng, Guan Yong, et al.). 超级电容建模现状及展望 (Review and expectation of modeling research on supercapacitor) [J]. 电子元件与材料 (Electronic Components and Materials), 2013, 32 (8): 5-10.
- [13] 安仲勋, 颜亮亮, 夏恒恒, 等 (An Zhongxun, Yan Liangliang, Xia Hengheng, et al.). 锂离子电容器研究进展及示范应用 (Research progress and pilot application of lithium-ion capacitor) [J]. 中国材料进展 (Materials China), 2016, 35 (7): 528-536, 544.
- [14] Sun Xianzhong, Zhang Xiong, Liu Wenjie, et al. Electrochemical performances and capacity fading behaviors of activated carbon/hard carbon lithium ion capacitor [J]. Electrochimica Acta, 2017, 235: 158-166.
- [15] 胡晓松, 唐小林 (Hu Xiaosong, Tang Xiaolin). 电动汽车锂离子动力电池建模方法综述 (Review of modeling techniques for lithium-ion traction batteries in electric vehicles) [J]. 机械工程学报 (Journal of Mechanical Engineering), 2017, 53 (16): 20-31.
- [16] 赵洋, 张逸成, 孙家男, 等 (Zhao Yang, Zhang Yicheng, Sun Jianan, et al.). 混合型水系超级电容器建模及其参数辨识 (Modeling of hybrid supercapacitor with aqueous electrolyte and its parameter identification) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (5): 186-191.
- [17] Spyker R L, Nelms R M. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36 (3): 829-836.
- [18] 张宾, 郭连兑, 李宏义, 等 (Zhang Bin, Guo Lianhui, Li Hongyi, et al.). 电动汽车用磷酸铁锂离子电池的 PNGV 模型分析 (PNGV model analysis of LiFePO₄ Li-ion battery for electric vehicle) [J]. 电源技术 (Journal of Power Sources), 2009, 33 (5): 417-421.
- [19] Qi Xinchun, Qi Zhiping, Li Haidong. Asymmetric hybrid supercapacitor (AHS)'s modeling based on physical reasoning [A]. 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies [C]. Nanjing, China, 2008. 2682-2685.
- [20] 祁新春 (Qi Xinchun). 超级电容器建模及热性能研究 (Research on supercapacitor model and its thermal performance) [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences), 2010.
- [21] 曹楚南, 张鉴清 (Cao Chunan, Zhang Jianqing). 电化学阻抗谱导论 (An introduction to electrochemical impedance spectroscopy) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2002.

Modeling and parameter identification of lithium-ion capacitor

JIANG Jun-jie^{1,2}, CHEN Xin-tong^{1,3}, ZHANG Xiong^{1,2}, SONG Shuang^{1,2}, SUN Xian-zhong^{1,2},
HUO Qun-hai^{1,2}, HAN Li-bo¹, WEI Tong-zhen^{1,2}, ZOU Min-min³, MA Yan-wei^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: This paper analyzes the modeling and parameter identification of lithium-ion capacitor. Firstly, the basic working principle of lithium-ion capacitor is deeply analyzed. Then the positive and negative electrodes are separately modeled based on their different features. The model of lithium-ion capacitor is achieved by combining the positive model and the negative model. Furthermore, the paper discusses the method of parameter identification. According to the working principle of the circuit model and the charge-discharge curves of the electrodes measured by the reference electrode, the parameter identification method is deduced. Finally, combined with the experimental data and simulation, the accuracy of the model structure is verified.

Key words: lithium-ion capacitor; parameter identification; positive and negative model; reference electrode