

# 基于新电源模型的电力锂电池荷电状态估计研究

高金辉,朱迎正

(河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007)

**摘要:**锂电池的等效电路模型与电池内部电化学反应不一致,对电池状态的估计不可避免地存在很大误差。基于算法的补偿不能从根本上解决问题,故提出一种基于电池内部电化学反应和电池的外部特性关系的电源模型。经实验测试,该电池模型与现有的电池模型相比精度较高。

**关键词:**等效电路模型;双电源模型;剩余电量估计

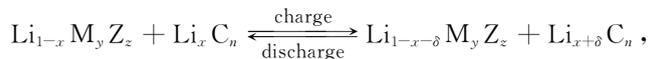
**中图分类号:**TM912

**文献标志码:**A

锂离子电池作为一种新型供能源,其应用领域越来越广。锂离子电池荷电状态的预测是其应用和维护的基础,而动力电池的等效模型也是电池管理技术的核心。锂离子动力电池模型种类很多,等效电路模型已经作为研究电池 SOC 的首选,通常使用内阻模型,戴维宁模型,和 PNGV 模型等<sup>[1-2]</sup>。但这些等效电路模型并不能在管理系统中全面描述电池内部电化学反应的实时状态,导致预测错误。而这种错误仅仅通过算法补偿并不能消除<sup>[3-5]</sup>。在分析了电池内部电化学反应后,提出了一种基于等效电路模型的双电源动力电池模型。经过参数识别和实验测试,验证了该新电源模型更加简单精确。

## 1 电池特性和内部反应分析

不同锂电池具有相似的工作机理,锂电池的充放电总反应式可表示为



其中, M 代表金属离子, Z 代表阴离子。

在正常环境下,  $\text{Li}^+$  通过正负极间的电解液重复嵌入和流出于负极的碳层微孔, 在反应中的电解液仅提供  $\text{Li}^+$  的迁移通道,  $\text{Li}^+$  并不参与化学反应, 也不破坏正、负极之间的材料的结构,  $\text{Li}^+$  只是嵌入这些空间结构中<sup>[6-15]</sup>。但并不是所有正、负极材料中的  $\text{Li}^+$  都在做这种迁移运动, 不同的力决定了  $\text{Li}^+$  位置和数量, 也就是说材料本身的性质是决定电池容量的关键。这可以总结为: 从理论上讲, 电池的容量是固定的。

通过循环放电实验获取的不同放电电流条件下的电压变化率曲线, 如图 1 中所示。在实际应用中, 当放电倍率  $B$  改变时电池的容量将发生改变。表 1 给出了不同放电倍率条件下电池的放电时间。

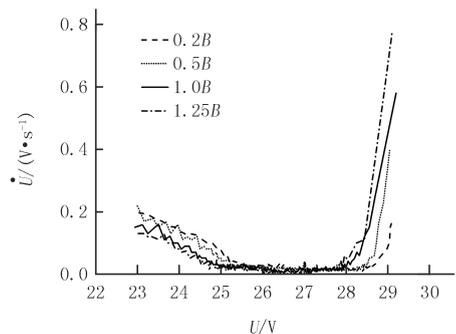


图 1 不同放电电流下截止电压变化率曲线  
Fig.1 Rate curve of terminal voltage in different current

收稿日期:2018-01-29;修回日期:2018-11-24.

基金项目:河南省重点科技攻关项目(132102210043)

作者简介(通信作者):高金辉(1962-),男,河南南阳人,河南师范大学教授,主要研究方向为电路系统设计及新能源研究, E-mail:gaojinhui282@sina.com.

对电池进行充分静态放电测试,放电起始时刻为 0,在实验测试中,1B 下放电时为  $t_1$ ;2.5B 下放电时间为  $t_2$ ;多次实验测得  $t_1$ 、 $t_2$  均值分别为: $t_1 = 6\ 310\ \text{s}$ 、 $t_2 = 2\ 315\ \text{s}$ . 对实验数据进行分析发现不同放电倍率下电池容量之间的对比关系

$$i_{2.5B}t_2 < i_{1B}t_1.$$

当锂电池工作在截止电压变化率较大的状态时电池释放的功率就越少.在这种在放电不稳定阶段,假设有处于特殊位置的  $\text{Li}^+$  在运动,并且一直持续到放电结束.而且放电初始阶段和放电结束阶段的特殊位置是不同的.可以推测电池放电后期的不稳定阶段是由于电池能量减少造成的.放电初始时期的不稳定阶段是由于电池具有足够的能量造成的.同时也说明了,在不稳定的放电阶段,这些处于特殊位置的  $\text{Li}^+$  逐渐增加,也导致了处于正常状态下的  $\text{Li}^+$  逐渐减少.

## 2 双电源供给模型的建立

在分析电池处于放电状态时的外部特性和内部状态后,本文提出一种基于 Thevenin 模型改进的双电源模型.该模型从根源上修正了由于传统模型将电池工作状态分为 2 个阶段带来的错误状态;同时该模型仅增加 2 个参数,并未增加参数识别的难度,因此具有较高的实用性.模型如图 2 所示.  $u_0 = u_1$  是电池的开路电压;  $u_s$  是非线性电压控制电压源,可以在放电快结束阶段进行放电;  $Q_0$  和  $Q_1$  是 2 个电压源的功率;  $i$  是电池的总电流;  $i_0$  和  $i_1$  分别代表流经 2 分支的电流;  $r$  是电池内阻;  $U_L$  是负载电压;  $R$  是极化电阻;  $C$  是极化电容.

该模型工作过程分为 2 个阶段,首先,电池工作在稳定放电阶段:电压源  $u_0$  可以看作不工作.其次,在非稳定放电阶段,  $u_0$  和  $u_1$  同时工作.在双电源模型中,电压源  $u_1$  可以看作是主电源,  $u_0$  可以看作是副电源.

由图 2 中电源模型可以得到电池能量消耗公式.

稳定放电阶段

$$Q_s = \eta \int i dt, a \leq m, \quad (1)$$

非稳定放电阶段

$$\begin{cases} Q_{ns} = Q'_1 + Q_0, \\ Q_0 = \alpha \eta \int i dt, \\ Q'_1 = (1 - \alpha) \eta \int i dt, \end{cases} a \leq m, \quad (2)$$

$u_1$  的总电量

$$Q_t = \eta \int i dt + (1 - \alpha) \eta \int i dt = N, \quad (3)$$

电池总发电量

$$Q_T = Q_{ns} + Q_s, \quad (4)$$

其中:  $\alpha$  是  $i_0$  在总电流  $i$  中所占的比例,  $N$  是主电压源,  $\eta$  是放电系数,  $Q'_1$  是电压源  $u_1$  非稳定放电量,  $Q_{ns}$  是电压源  $u_0$  非稳定区放电量,  $a$  放电电流变化率,  $m$  为放电电流变化率稳定阈值.

当 2 个电压源同时工作时,放电电流  $u_0$  和  $u_1$  的大小不同,考虑到相似的截止电压变化曲线,锂电池稳定放电阶段的内部反应,和锂电池放电截止电压特性,  $Q_1$  电量完全释放并且设定其最大值为  $Q$ ;考虑到电池实际停止放电后电池内部仍存在剩余能量  $Q_0$ ,则  $Q_0$  能量的大小则由电流大小和放电时间决定.

放电电流为时电池的放电量  $Q_t = \eta \int i dt$ . 通过(4)式中  $Q_T - Q_t$  的总电量可以得到电池的剩余电量.

按照图 2 中所示电池模型,等效电路可以进行描述.当放电电流为 0 时,  $u_0 = u_1$ ; 当放电电流不为 0 时,  $u_0 = u_1 + u_s$ ,  $u_t = u_1 - ri - u_c$ ,  $u_s = \beta i$ ,  $i = i_1 + i_0$ , 其中,  $\beta$  受控源非线性变化控制系数,  $i$  是工作电流,  $t$  是放电时间.

表 1 不同放电倍率下电池放电时间

Tab.1 Battery discharge time under different rate

$i/\text{A}$	$t/\text{s}$
1B	6 361
2.5B	2 315

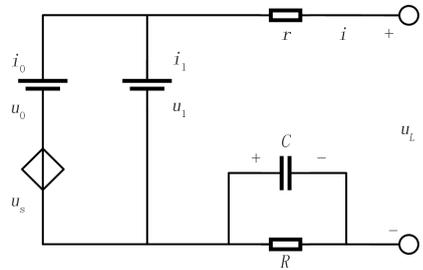


图 2 双电源模型

Fig.2 Equivalent circuit mode

通过分析电池模型的电路关系可以发现电池在放电电压达到截止电压时停止供电,此时放电电流为 0,受控源中电压为 0,因此  $u_0 > u_1$  成立,相应的  $Q_0$  中仍有能量, $Q_1$  为 0.这反映出电池电压与电池容量之间的关系.同时  $u_0$  开始以小电流充电到  $u_1$ .这也就解释了当电池首次达到截止电压后经过一段时间仍可使用短暂时间.这是因为  $u_0$  和  $u_1$  之间的差值非常小,所以在实际应用中并不能以这样的方式持续使用.

### 3 双电源供给模型的参数识别

本文提出的双电源模型是基于 Thevenin 模型基础上增加了参数识别相关系数  $\alpha$  和电池  $u_1$  在非稳定阶段的总电量  $Q$ .这 2 个新增参数的识别用的是结合截止电压变化率曲线和经验数据,(1) 式和(2)式中的  $m$  取值为 0.01.将不同放电倍率下的经验数据带入(1)~(4)式中即可求得  $Q = 64 \text{ Ah}$ ,  $\alpha = 0.304$ .

表 2 电池不同放电率下的经验数据

Tab.2 Experimental data of different discharge rate of the battery

$i/A$	稳定阶段持续时间/s	非稳定阶段持续时间/s	电量/(Ah)
0.2B	8 639	7 025	6.951
1B	1 908	1 187	6.878
1.25B	1 425	1 045	6.861

### 4 实验结果分析

为了验证本文提出模型的 SOC 估计方法的精确度,验证试验在室温下进行,选用具有 7 个电池片的一组电池,额定容量为 8 Ah,每个电池片的额定电压为 3.7 V,电池组额定电压为 25.9 V,电池组的放电截止电压为 22.4 V.单体电池电压用 LTC6802 芯片,当有单个电池片的截止电压为 3.2 V 时电池组停止放电,电流传感器收集电流信息并传送到 PIC 控制器用于 SOC 估计,其框路图如图 3 所示.

#### 4.1 恒定电流放电

室温下,对电池组进行恒定电流为 4 A 的放电实验.从图 4 和图 5 可以看到,当电池组恒电流放电进行 SOC 预测时电压误差不超过 0.15 V,并且误差小于整个电压范围的 2.5%.

#### 4.2 非恒定电流放电

在电池组的实际使用过程中,电流的改变是不可避免,因此对电池组在非恒定电流放电条件下进行放电试验.从图 6 和图 7 中可以看出 SOC 预测时,电压误差小于 0.4 V,并且只有在放电起始阶段才有较大的误差,相应的电压变化率也越大.电压误差不大于 0.25 V,并且总误差不大于 4.5%,这个实验结果可以满足实际使用的要求.

### 5 结 论

通过电池的经验数据分析了锂电池的放电特性,提出了双电源等效电路模型,通过电压变化率曲线将电

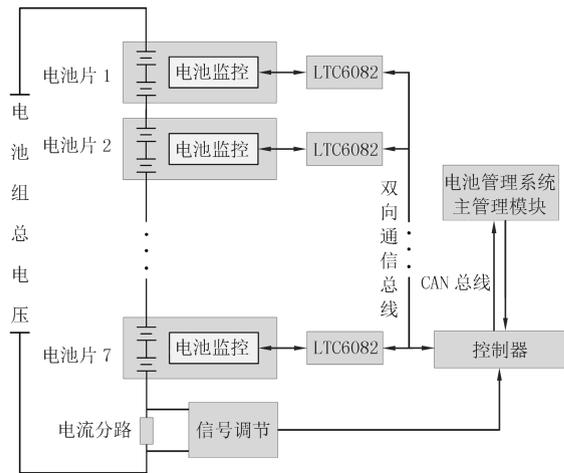


图 3 电池管理系统电源方案部分框路图

Fig.3 Schematic diagram of battery management system

池放电过程分为 2 个阶段,建立了一个非线性控制电压源的双电源等效电路模型,最后模型的参数通过实验数据进行识别,该模型的可行性得到了验证,该模型在恒电流放电条件下和变电流放电条件下均具有较高的精度。

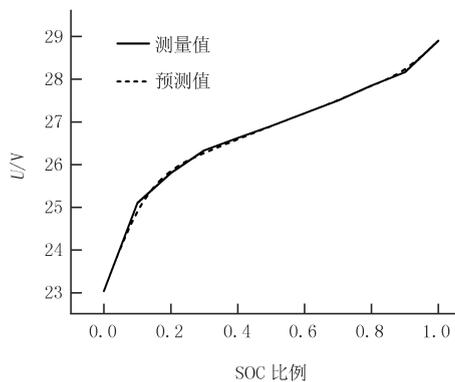


图 4 恒定小电流放电条件下 SOC 曲线

Fig.4 The curve of SOC under a low discharge current

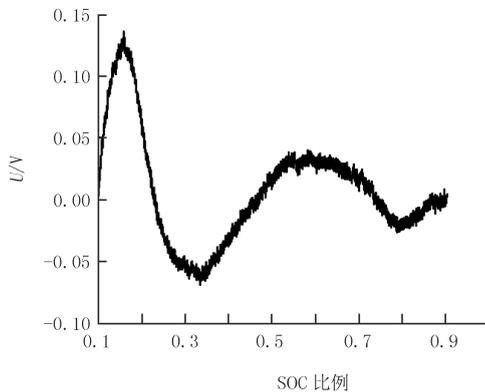


图 5 恒定小电流放电条件下模型 SOC 预测误差

Fig.5 The tolerance of SOC for model prediction under a low discharge current

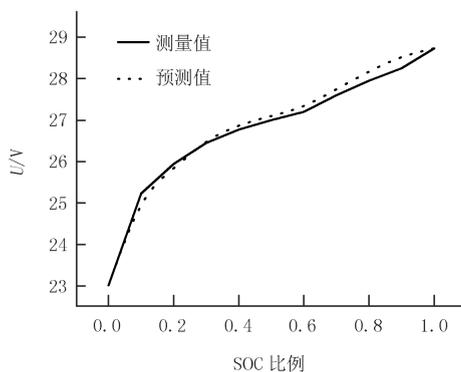


图 6 变电流测试条件下 SOC 曲线

Fig.6 The curve of SOC under variable discharge current

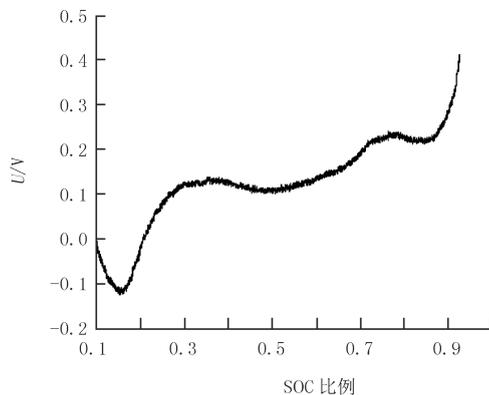


图 7 变电流测试条件下模型 SOC 预测误差

Fig.7 The tolerance of SOC for model prediction under variable discharge current

## 参 考 文 献

- [1] 贾玉健.电动汽车电池等效电路模型的分类和特点[J].电力与电源,2011,32(16):516-521.
- [2] 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,2011:2-3.
- [3] Caumont O, Le M P, Rombaut C, et al. Energy gauge for lead-acid batteries in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(3): 354-360.
- [4] 高金辉, 杜浩. 电动汽车锂电池组的新型双向均衡法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 53-56.
- [5] 高金辉, 朱元培, 刘永. 用一种新的优化算法估计电动汽车电池 SOC[J]. 电源技术, 2014, 38(1): 75-77.
- [6] 管志成, 丁晓群, 张木银. 考虑时序特性含电动汽车配电网分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017(18): 24-31.
- [7] Karden E, Mauracher P, Schöpe F. Electrochemical modelling of lead/acid batteries under operating conditions of electric vehicles[J]. Journal of power sources, 1997, 64(1/2): 175-180.
- [8] Zheng M, Qi B, Du X. Dynamic model for characteristics of li-ion battery on electric vehicle[C]// IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications. Piscataway: IEEE Press, 2009: 2867-2871.
- [9] Abu-Sharkh S, Doerffel D. Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2004, 130(1/2): 266-274.

- [15] Xia X H, Xia X P, Huo W R, et al. Toxic effects of imidacloprid on adult loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. *Environmental Toxicology & Pharmacology*, 2016, 45: 132-139.
- [16] Bonnail E, Buruaem L M, Araujo G S, et al. Multiple Biomarker Responses in *Corbicula fluminea* Exposed to Copper in Laboratory Toxicity Tests [J]. *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, 2016, 71(2): 1-8.
- [17] 刘晓麒, 曹恩华. 脂质过氧化引起的 DNA 损伤研究进展 [J]. *生物化学与生物物理进展*, 1994, 21(3): 218-222.
- [18] 余永新, 格桑顿珠, 杨小梅, 等. 氟中毒鸡血液中 SOD 和 LPO 含量的变化 [J]. *西南农业学报*, 2002, 15(2): 114-116.
- [19] 李效宇, 曾师虎, 张伟红, 等. 离子液体溴化 1-辛基-3-甲基咪唑对太行隆肛蛙蝌蚪的毒性及其抗氧化系统的影响 [J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 138-141.

## Oxidative damage effect of ionic liquids [C<sub>8</sub>mim]Cl on the liver of loach

Du Qiyang, Wang Yaxing, Nan Ping, Chang Zhongjie

(College of Life Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** In this paper, we studied oxidative damage effect of the ionic liquid 1-octyl-3-methyl imidazole chloride ([C<sub>8</sub>mim]Cl) on the loach livers. Results showed that compared with control group: Reactive oxygen species (ROS) content significantly increased, and the highest level was at 1 d. Compared with control group, content of lipid peroxide (LPO) at 1 d significantly increased. With increasing exposures time, the content of LPO level decreased and was lower than the control group in 4 d or 8 d. Compared with control group, the content of GPT, were significantly decreased at 1 d, 4 d and 8 d after exposed to Ionic Liquids. Glutathione reductase (GR) activity showed a significant declining trend, and the lowest level was at 8 d. These results showed that the ionic liquid [C<sub>8</sub>mim]Cl had obvious oxidative damage effects on the liver of loach. The results of this paper have important reference for people to properly understand the safety and correct use of the "green solvent" ionic liquid.

**Keywords:** ionic liquid; loach; oxidative damage; liver

[责任编辑 王凤产]

(上接第 61 页)

- [10] 高金辉, 朱元培, 刘永. 基于灰色理论的电动汽车充电均衡控制 [J]. *电源技术*, 2015, 39(6): 1286-1288.
- [11] 王俊霞, 陈志刚, 郭葳, 等. 电动汽车换电智能监控系统的改进 [J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(10): 81-87.
- [12] Gao J, Jia L, Li Y, et al. The design of a non-energy-consuming balance system for lithium-ion batteries [C] // *International Conference on Electrical & Control Engineering*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 4403-4405.
- [13] 王彪, 尹霞. 实时电价下含 V2G 功能的电动汽车理性充放电模型及其分析 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 90-96.
- [14] 高金辉, 巴雁远. OCV 处于平台期的汽车锂电池 SOC 估算的研究 [J]. *现代电子技术*, 2017, 40(10): 175-177.
- [15] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划 [J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(3): 43-50.

## Study on state estimation of power lithium battery based on new power supply model

Gao Jinhui, Zhu Yingzheng

(College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** The equivalent circuit model of lithium battery is not consistent with the internal electrochemical state of the battery. The estimation of the state of the battery has great errors inevitably, and the compensation based on the algorithm can not solve the problem completely. A new equivalent circuit model is proposed. This model is based on the relationship between the electrochemical reaction inside the battery and the external characteristics of the battery. The model was verified by experimental test. Its accuracy is higher than the existing battery model.

**Keywords:** equivalent circuit model; dual-power model; state of charge estimation

[责任编辑 杨浦]