

· 机械电子工程 ·

## 圆柱18650锂离子动力电池放电及温度特性

钟其水<sup>1,2,3</sup>, 李树军<sup>2</sup>, 黄波<sup>2,3</sup>, 马建华<sup>3</sup>, 李辉<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学航空航天学院 成都 611731; 2. 东莞市振华新能源科技有限公司 广东 东莞 523696;  
3. 中国振华电子集团有限公司 贵阳 550018)

**【摘要】**能耗和环境问题促使电动汽车快速发展, 锂离子电池在电动汽车储能系统中具有重要的作用。锂离子电池的特性与环境温度紧密相关, 倍率放电容量特性、荷电状态-开路电压曲线是反映电池基本性能的重要特性指标, 也是电池管理系统设计需要参考的重要参数。该文对圆柱18650三元锂离子电池进行了相关的性能试验, 研究了单体和电池组开路电压变化规律、不同放电倍率下的电池容量和不同温度下的电池容量, 为荷电状态估算方法的研究及电池管理系统设计积累了数据。

**关键词** 开路电压; 锂离子电池; 荷电状态; 温度特性

中图分类号 TN86

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.02.030

## Discharge and Temperature Characteristics of Li-Ion Batteries

ZHONG Qi-shui<sup>1,2,3</sup>, LI Shu-jun<sup>2</sup>, HUANG Bo<sup>2,3</sup>, MA Jian-hua<sup>3</sup>, and LI Hui<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Sinowatt Dongguan Limited Dongguan Guangdong 523696; 3. China Zhenhua Electronic Group Co. Ltd. Guiyang 550018)

**Abstract** Electric vehicles (EVs) are developed rapidly due to the energy problem and the environment problem, and lithium-ion batteries play an important role in energy storage system of EVs. The characteristics of power lithium-ion batteries are closely connected to ambient temperature. The discharge capacity characteristic and the state of charge—open circuit voltage (SOC-OCV) curve are important parameters to represent the performance of power batteries and to design battery management systems (BMS). The experiments of 18650 cells and packs are carried out for the laws between SOC and OCV, also for the discharge capacity with different rates and ambient temperatures.

**Key words** charge-open circuit voltage(COV); Li-ion battery; state of charge; temperature characteristics

### 1 锂离子电池应用现状分析

高速发展的汽车工业在带给人们便利的同时, 其尾气成为城市大气污染的罪魁祸首。另一方面, 石油、天然气作为不可再生能源, 消耗量逐步攀升, 在不久的将来终会枯竭。节能和环保已成为十分突出的社会问题<sup>[1-4]</sup>。

电动汽车(electric vehicle, EV)、混合动力电动汽车(hybrid electric vehicle, HEV)是为了减少燃油汽车的能源消耗和所引起的污染这两个问题而产生的。电动汽车目前采用的先进动力电池主要有镍氢

动力电池和锂离子动力电池<sup>[5-7]</sup>。锂离子电池的比能量高、寿命长、比功率大, 随着成本的降低将逐步取代目前的镍氢电池, 作为电动车的主要储能系统<sup>[8-9]</sup>。HEV及EV在市场竞争中能否生存, 它的经济性是一个很重要的方面, 实时、准确地估算电池的荷电状态(state of charge, SOC)对混合动力汽车的经济性有重要的影响<sup>[10-11]</sup>。动力电池SOC估算一般需要对单体电池及电池组进行建模<sup>[12]</sup>, 其模型参数的确定必须经过对电池进行充放电试验、温度特性试验, 以获取足够的电池试验数据。常用的锂离子电池模型有Thevenin模型、RC模型等<sup>[13]</sup>, 如图1所

收稿日期: 2012-12-25; 修回日期: 2013-11-10

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M521683); 部级预研基金; 贵州省省长基金(黔省专合字(2012)5号); 四川省科技计划(2014GZ0079)

作者简介: 钟其水(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事复杂非线性系统检测、分析及控制等方面的研究。

示。

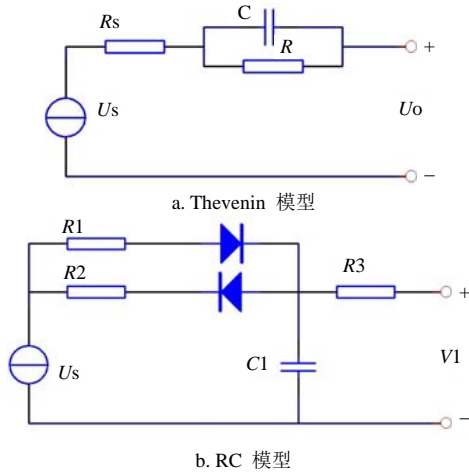


图1 两种常用的电池模型

锂离子动力电池的正极材料主要有锰酸锂、磷酸铁锂和镍钴锰酸锂三元材料<sup>[14-16]</sup>, 3种材料的比较如表1所示。

表1 3种动力电池正极材料的性能比较

	安全性能	循环性能	平台电压/V	克比容量/ $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$	压实密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	单位价格/ $\text{元}\cdot\text{kg}^{-1}$
三元材料	好	好	3.6	145~155	3.2~3.7	$\leq 170$
锰酸锂	很好	好	3.7	90~100	2.7~3.0	$\leq 110$
磷酸铁锂	很好	很好	3.2	120~140	2.0~2.3	$\leq 170$

与其他两种正极材料相比, 三元材料具有更高的平台电压、克比容量和压实密度, 这3个指标决定了使用该种正极材料电池的能量密度。如能在一定程度上提升三元锂离子电池安全性能, 则其在电动汽车及动力储能系统中将有很大的应用空间。

## 2 测试对象及测试平台

本文以东莞振华新能源公司生产的圆柱18650三元锂离子电池为试验对象进行测试, 获取其基本特性。该单体电池基本参数为: 标称容量2.0 Ah, 标称电压3.7 V, 质量41 g。

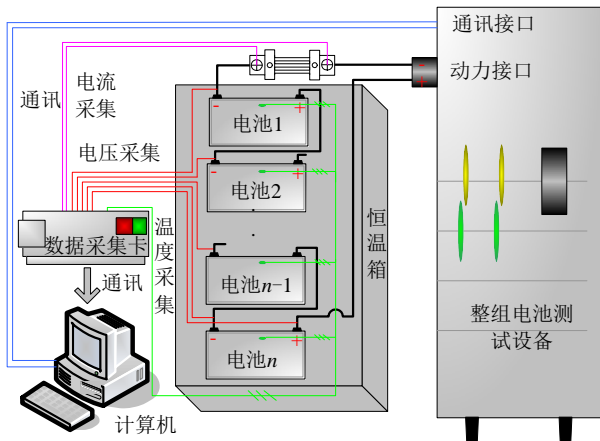


图2 电池测试平台简图

电池单体及模块测试平台可以模拟车辆运行工况, 获取模块充放电过程中的实验数据, 从而验证模块结构设计和BMS设计的有效性。测试平台的基本结构如图2所示。

测试平台分为电池充放电设备、恒温箱、电池数据采集卡、电池数据记录分析及控制计算机、待测电池模块5部分。其中计算机通过与数据采集卡的数据交互获取并记录电池信息(电压、温度、电流), 通过嵌入电池模型的数据分析软件分析电池状态和对应的充电方法, 并据此控制充放电机的输出。恒温箱为电池试验提供温度场条件, 充放电机电为电池提供动力源和负载。

## 3 SOC与开路电压测试

### 3.1 单体电池测试

电池开路电压(open circuit voltage, OCV)可用于电池荷电状态估算时的校准, 对于提升SOC估算精度具有重要的作用。选用圆柱18650动力锂离子单体电池9只进行SOC和OCV测试。测试过程为: 锂离子电池充满电, 并静止放置到电池稳定; 在恒定电流下放电, 保证每次放出的电量对应的SOC为0.05, 每两次放电间隔1 h, 保证电池到稳定状态, 同时记录电池组的开路电压。这样就得到了SOC从1、0.95、0.90、0.85、0.80、...、0.10、0.05、0的21个SOC状态的开路电压, 其中单只电池的测试曲线如图3所示。通过对9只单体圆柱电池分别测试, 获得其SOC-OCV关系曲线如图4所示。

由实验可知, 该18650单体SOC和OCV的关系近似成线性, 一致性较好, 因此可利用开路电压估计电池的荷电状态, 尤其在电动车辆驻车一段时间后, 用开路电压估计动力电池的初始荷电状态具有良好的效果。

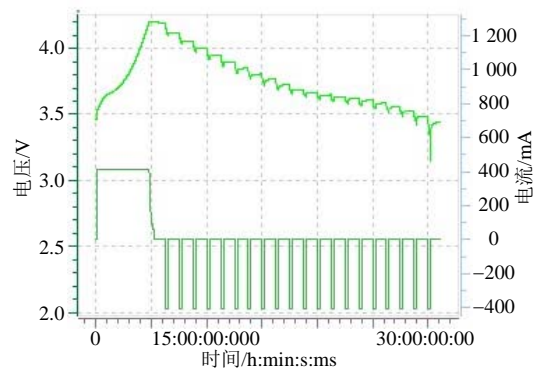


图3 SOC与OCV测试

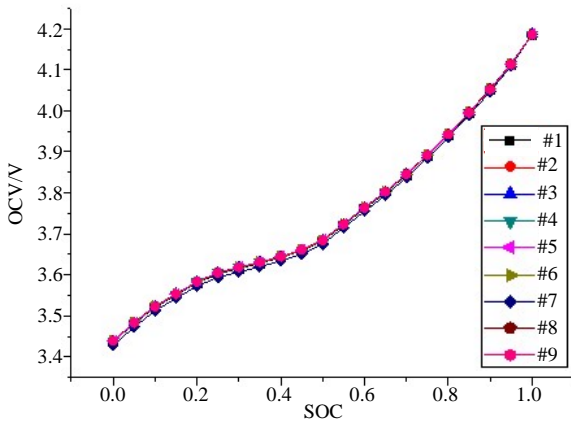


图4 9只电池SOC与OCV测试结果

### 3.2 电池组测试

选用18650电芯通过5并10串组成两组, 进行荷电状态和开路电压关系测试, 测试过程和单体电池测试一致。测试结果如图5所示。由于单体一致性较好, 且经过选择配组后, 电池组也能保持较好的一致性。

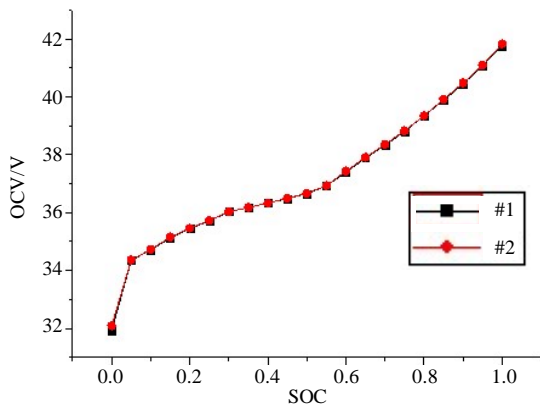


图5 电池组SOC与OCV关系

## 4 不同放电倍率下单体电池容量

由于电动汽车在爬坡、启动、加速时都要求动力电池能够提供较大的比功率, 即足够大的电流放电以提供足够的动力。本文对锂离子电池进行了0.1 C、0.5 C、1 C倍率的放电试验, 试验结果如表2所示, 其中放电容量单位为mAh, 放电时间单位为s。

表2 不同倍率放电容量

电芯编号	0.1 C=207.5 mA		0.5 C=1 037.5 mA		1 C=2 075 mA	
	放电容量/mAh	放电时间/s	放电容量/mAh	放电时间/s	放电容量/mAh	放电时间/s
#1	2 093.5	608	1 964.80	113	1 898.90	54
#2	2 077.7	603	1 956.10	113	1 894.80	54
#3	2 096.5	608	1 980.50	114	1 925.30	55
#4	2 077.4	602	1 967.70	113	1 908.90	55
#5	2 097.2	611	1 975.50	114	1 914.20	55
#6	2 082.6	601	1 976.20	114	1 921.30	55
#7	2 113.5	615	1 994.00	115	1 932.90	55
#8	2 100.7	614	1 976.90	114	1 918.50	55
#9	2 077	602	1 966.50	113	1 910.20	55
平均值	2 090.68	607.11	1 973.13	113.67	1 913.89	54.78

从试验结果中可知, 随着电池放电电流的增大, 蓄电池的放电容量下降, 这是由于锂随着放电电流的增大, 电池内的浓差极化增大, 电池固有内阻所引起的电压降也增大, 从而使电池的放电容量相应下降。

## 5 不同温度0.5C放电倍率下电池容量

由于汽车工作工况变化很大, 所以本文对锂离子电池进行了在-30、-20、-10、0、10、30、45、55 °C温度相关的0.5C放电试验, 分别如表3和图6所示。从试验结果中可知, 随着电池工作温度的升高, 放电容量明显上升。这是由于低温下锂离子在电池内的扩散速度较慢, 随着温度升高电池活性增强的结果。但是保温时间增长后电池整体温度上升, 使离子活动逐步趋于紊乱, 导致内阻上升, 放电容量变化减小。

表3 不同温度放电容量

温度/°C	0.5 C放电容量/mAh			
	电芯#1	电芯#2	电芯#3	平均值
55	2 163.6	2 163.6	2 172.3	2 166.5
45	2 127.4	2 123.3	2 122.3	2 124.3
30	2 048.9	2 060.2	2 069.8	2 059.6
10	1 816.9	1 814.3	1 832.2	1 821.1
0	1 590.7	1 602.2	1 591.0	1 594.6
-10	1 378.9	1 393.9	1 398.9	1 390.6
-20	1 030.4	1 009.4	1 027.7	1 022.5
-30	335.6	377.6	332.2	348.5

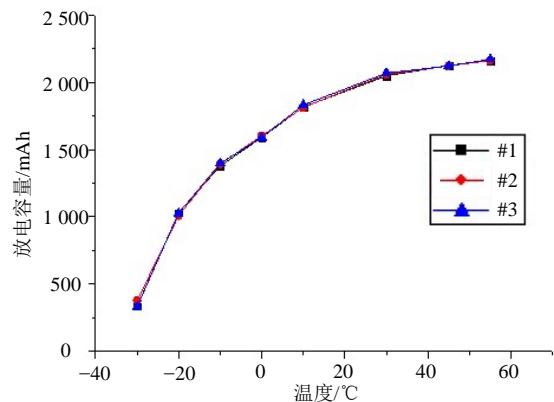


图6 不同温度下电池容量

## 6 结束语

本文考察了三元锂电池荷电状态与开路电压、放电倍率与容量、容量与温度的关系, 得到了荷电状态与开路电压规律, 不同放电倍率下单体容量规律, 以及容量与温度的规律。

1) 所测试的圆柱18650单体锂电池单体一致性较好, 荷电状态与开路电压近似成直线关系, 可用开路电压估计荷电状态。在动力电池停用时间采用开路电压估计荷电状态, 充放电时采用其他的估算

方法(如安时积分、卡尔曼滤波等),可以提升SOC估算精度。

2) 随着放电电流的增大,电池内的浓差极化增大,锂电池固有内阻所引起的电压降也增大,因此随放电倍率的加大,电池放电容量下降。

3) 低温下锂离子在电池内的扩散速度较慢,随着温度升高电池活性增强,放电容量上升。

在动力电池荷电状态的估算中,一般采用电池等效电路模型建模,而模型中的未知参数需要进行辨识。本文对锂离子电池进行的实验研究获取了三元锂离子动力电池性能数据,为电池模型未知参数辨识提供了基础数据。

### 参 考 文 献

- [1] 廖晓军, 何莉萍, 钟志华, 等. 电池管理系统国内外现状及其未来发展趋势[J]. 汽车工程, 2006, 28(10): 961-964.  
LIAO Xiao-jun, HE Li-ping, ZHONG Zhi-hua, et al. A review of battery management system[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(10): 961-964.
- [2] BHANGU B S, STONE D A, BINGHAM C M. Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 783-794.
- [3] PLETT G. Extended Kalman filtering for battery management system of LiPB based HEV battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(2): 277-292.
- [4] 廖波, 肖福仁. 热处理节能与环保技术进展[J]. 金属热处理, 2009, 34(11): 1-6.  
LIAO Bo, XIAO Fu-ren. Progress of energy conservation and environment protection technologies in heat treatment[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(11): 1-6.
- [5] 朱浩, 钱承, 谢煜冰, 等. 混合动力镍氢动力电池参数辨识[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(8): 19-23.  
ZHU Hao, QIAN Cheng, XIE Yu-bing, et al. Parameter identification of MH/Ni power battery in hybrid electric vehicle[J]. Journal of Hunan University( Natural Sciences), 2011, 38(8): 19-23.
- [6] LU Lan-guang, HAN Xue-bing LI Jian-qiu, et al. A review on the key issues for li-ion battery management in electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013(226): 272-288.
- [7] LEE Tae-Kyung, KIM Young-ki, STEFANOPOULOU A, et al. Hybrid electric vehicle supervisory control design reflecting estimated li-ion battery electrochemical dynamics [C]//American Control Conference (ACC)San Francisco. USA: [s.n.], 2011: 388-395.
- [8] KATIYAR R K, RAHUL S, KARINA A R, et al. High voltage spinel cathode materials for high energy density and high rate capability Li ion rechargeable batteries[J]. Journal of Power Sources, 2009(194): 526-530.
- [9] 张宾, 何勇灵, 陈全世. 电动汽车用锂离子电池的能量功率特性分析[J]. 电源技术, 2010, 34(10): 1076-1079.  
ZHANG Bin, HE Yong-ling, CHEN Quan-shi. Energy and power characteristics analysis of li-ion battery for electric vehicle[J]. Power Supply Technology, 2010, 34(10): 1076-1079.
- [10] CHENG K W E, DIVAKAR B P, WU Hong-jie, et al. Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 76-88.
- [11] HE Hong-wen, XIONG Rui, ZHANG Xiao-wei, et al. State-of-charge estimation of the li-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved thevenin model[J]. IEEE Trans on Vehicle Technology, 2011, 60(4): 1461-1469.
- [12] SMITH K A, RAHN C D, WANG Chao-yang. Model-based electrochemical estimation and constraint management for pulse operation of li-ion batteries[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 654-663.
- [13] DU Jia-ni, LIU Zhi-tao, CHEN Can, et al. Li-ion battery SOC estimation using EKF based on a model proposed by extreme learning machine[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapore: IEEE, 2012: 1651-1656.
- [14] 赵铭妹, 翟玉春, 田彦文. 锂离子电池正极材料锰酸锂合成的动力学[J]. 物理化学学报, 2002, 18(2): 188-192.  
ZHAO Ming-shu, ZHAI Yu-chun, TIAN Yan-wen. Study on Kinetics of synthesizing spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  for li-ion battery cathode[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2002, 18(2): 188-192.
- [15] YIM Chae-ho, BARANOVA E A, ABU-LEBDEH Y, et al. Highly ordered  $\text{LiFePO}_4$  cathode material for Li-ion batteries templated by surfactant-modified polystyrene colloidal crystals[J]. Journal of Power Sources, 2012(205): 414-419.
- [16] KOSOVA N V, DEVYATKINA E T, KAICHEV V V. Optimization of  $\text{Ni}_2+\text{Ni}_3+$  ratio in layered  $\text{Li}(\text{Ni},\text{Mn},\text{Co})\text{O}_2$  cathodes for better electrochemistry[J]. Journal of Power Sources, 2007(174): 965-969.

编辑 黄 莘