

# 一种锂离子电池低温 SOC 估计算法

冯 飞 逯仁贵 朱春波

(哈尔滨工业大学电气工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要** 电动汽车在低温地区工作运行, 电池组的性能会下降, 低温对电池组充放电容量的影响比较大。为了使电动汽车在低温地区能够正常工作, 低温下准确的 SOC 估计是必不可少的条件。本文提出了一种改进安时计量法适用于不同温度条件的电池 SOC 估计算法, 该算法主要考虑了不同温度下电池实际可用容量的变化对 SOC 估计的影响, 并且可以对不同温度下估算的 SOC 进行换算。通过平台实验验证, 该算法在不同的温度环境下具有较高的精度。

**关键词:** 磷酸铁锂电池 SOC 估算 低温 安时法

**中图分类号:** TM912.6

## State of Charge Estimation of Li-Ion Battery at Low Temperature

Feng Fei Lu Rengui Zhu Chunbo

(Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China)

**Abstract** When the EVs work in the low temperature areas, the performance of battery pack will decline. Low temperature has a big impact on the charge/discharge capacity of battery pack. In order to ensure the EVs can work normally in low temperature areas, accurate SOC estimation is essential. In this paper, an improved ampere-hour counting method which is suitable for different temperature conditions is proposed. This algorithm mainly considers the available capacity variation of battery at different temperature impacts on SOC estimation. In addition, SOC can be converted at different temperatures. Through the platform experimental verification, this algorithm has high accuracy in different temperature environment.

**Keywords:** Lithium-ion battery, state of charge(SOC) estimation, low temperature, ampere-hour counting method

## 1 引言

在中国有很多地区冬季温度能够达到  $0^{\circ}\text{C}$  以下, 在高纬度高寒地区冬季最低温度甚至可以达到  $-40^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ , 为了使电动汽车在这些地区冬季能够正常使用, 其关键零部件的低温特性应该满足使用要求。锂离子电池由于其高比能量、长循环寿命和较高的安全性, 因此是电动汽车储能系统的最佳选择之一<sup>[1]</sup>。目前已经有很多制造商开始致力于锂离子电池的低温性能研究, 并已经取得了一些成果。但是, 锂离子电池的低温性能相比于常温还是会下降, 尤其在容量和对电荷的接受能力下降得比

较明显<sup>[2]</sup>。

电池的荷电状态 (State of Charge, SOC) 是电动汽车整车控制的重要参数之一, 准确的 SOC 估计同时也是电池管理系统 (Battery Management System, BMS) 的重要任务之一<sup>[3,4]</sup>。目前正在研究的 SOC 估计算法有很多<sup>[5-10]</sup>, 安时积分法、开路电压法以及考虑参数修正的安时积分和开路电压法, 还有一些先进的算法也被提出, 例如基于卡尔曼滤波的 SOC 估计算法、人工神经网络算法、模糊逻辑算法等。安时积分法简单并且易于实用, 但是该方法由于电流测量存在误差, 随着时间累积误差逐渐增大, 且该方法无法给出初始 SOC 值<sup>[6]</sup>。电池的初始 SOC 可以通过 SOC-OCV 关系来确定<sup>[8]</sup>。通过采用高精度的电流传感器可以减小累积误差<sup>[3]</sup>。然而, 实际可用容量将会影响安时计量法的精度, 而且实际可

用容量受温度的影响比较大<sup>[5]</sup>。本文提出了一种改进安时计量法适用于不同温度条件的电池 SOC 估计算法，该算法考虑了不同温度下电池实际可用容量的变化，并且可以对不同温度下估算的 SOC 进行换算。

2 锂离子电池低温充放电性能

本文实验对象为 3.2V/100Ah 磷酸铁锂动力电池单体（洛阳产）。实验平台由一台 Arbin 牌 BT2000 电池实验台（输出电流范围 0~100A，输出电压范围 0~18V，精度（0.02%~0.05%）FSR 和 GCT 牌低温实验箱（最低温度-40℃，精度±0.5℃）组成。实验数据通过 RS-232 传输到电脑中并保存，如图 1 所示。

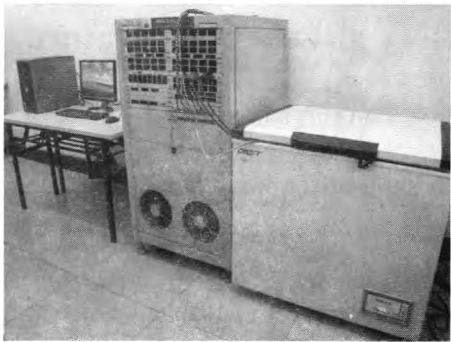


图 1 实验平台

Fig.1 Experimental set

图 2 所示为锂离子电池在不同温度下充电曲线，其中-20~0℃的充电截止电压为 3.65V，10~20℃的截止电压为 3.6V。从该图中可以看出，在-20~20℃，锂离子电池的充电电量依次为 75Ah、79Ah、95Ah、97Ah、103Ah，分别相当于 20℃充电容量的 73%、77%、92%、94%、100%。图 3 所示为锂离子电池在不同温度下放电曲线，放电截止电压为 2.5V。从该图中可以看出，在-20~20℃，锂离子电池的放电电量依次为 78Ah、84Ah、94Ah、

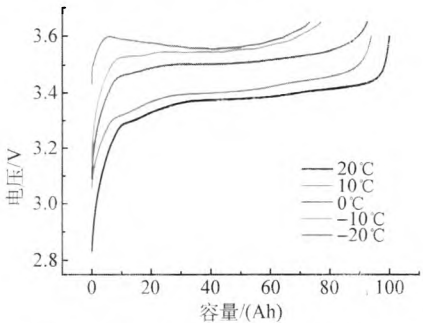


图 2 不同温度下充电电压曲线

Fig.2 Charging voltage curves at different temperatures

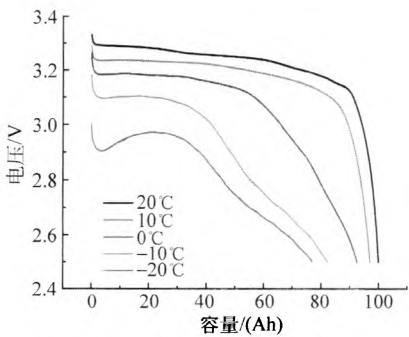


图 3 不同温度下放电电压曲线

Fig.3 Discharging voltage curves at different temperatures 99Ah、102Ah，分别相当于 20℃放电容量的 77%、82%、92%、97%、100%。从上述分析可知，随着温度的降低，锂离子电池的充电和放电容量均有所下降，尤其当温度为-20℃时，电池的充电容量和放电容量下降较快。

3 实际可用容量的测量

前文所测得的电池在不同温度下的充放电容量，实验前的准备实验均是在室温下进行的，这种方式测量的充放电容量与实际车载温度环境存在差别。车载电池在没有加热系统的使用条件下，其工作温度随环境温度变化而变化，图 4 所示为国内某城市冬季一天气温变化，从该图可以看出一天当中最高气温为-6℃，而最低气温为-13℃，平均气温为-8.8℃，因此该车电池的充放电过程均在低温环境下进行。

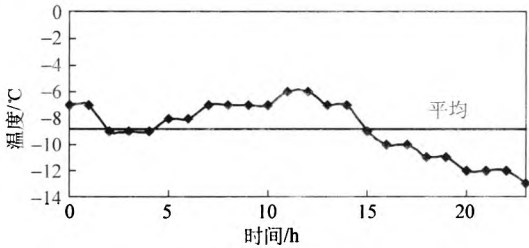


图 4 国内某城市冬季一天气温曲线

Fig.4 One day temperature in winter of some city in China

通过上述分析，本文所提出的不同温度下实际可用容量测量方法如下：①将电池在常温下放电到下限截止电压；②将电池放置在低温环境下 24h；③电池在低温环境下以恒流（Constant Current, CC）充电方式充电到上限截止电压（低温上限截止电压适当高于常温上限截止电压），静止 1h；④以恒流将电池放电到下限截止电压，静止 1h。如此循环 3 次，取 3 次容量的均值作为该温度下的实际可用容量。表 1 所示为不同温度下的实际可用容量测量结果。

表 1 不同温度下实际可用容量测量结果

Tab.1 Available capacity at different temperatures				
温度/ ℃	第一次/ (Ah)	第二次/ (Ah)	第三次/ (Ah)	平均/ (Ah)
20	103	103	102	103
10	98	98	98	98
0	88	87	88	88
-10	58	56	56	57
-20	55	54	55	55

4 实际可用容量的测量

通过前面的分析，电池在不同温度下实际可用容量是不同的，因此在 SOC 计算的过程中需要根据温度来调整实际可用容量。然而，电池工作在变化的温度环境下，由于相同剩余电量在不同温度下所对应的 SOC 是不同的，仅仅调整实际可用容量还是不能准确估计 SOC，还需要根据不同温度下实际可用容量的使用范围，对不同温度下的 SOC 进行换算。

4.1 低温下可用容量的损失

前面介绍了低温下实际可用容量的测量方法，不同温度下电池的满充电量和满放电量是不同的，本文所提出的方法可以计算出两个温度下，充满电时的电量差（Loss-of-Full-Charge,  $LFC_{T1-T2}$ ），以及两个温度下满放电时的电量差（Loss-of-Full-Discharge,  $LFD_{T1-T2}$ ）。整个测试过程如图 5 所示：①电池在室温下（ $T1$ ）充满电；②低温下（ $T2$ ）放置 24h，以 CC 放电的方式将电池放电到下限截止电压，记录放电电量  $DisAh_{T2}$ ；③低温下（ $T2$ ）静止 1h，以 CC 充电的方式将电池充满，记录充电电量  $ChaAh_{T2}$ ；④室温下放置 24h，以 CC 放电的方式将电池放电到下限截止电压，记录放电电量  $DisAh_{T1}$ 。满充容量损失的计算如下：

$$LFC_{T1-T2} = DisAh_{T2} - ChaAh_{T2} \tag{1}$$

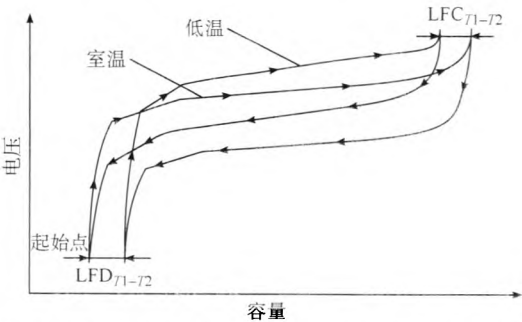


图 5 不同温度下实际可用容量变化的测量过程  
Fig.5 The measurement process of available capacity variation at different temperatures

满放容量损失的计算如下：

$$LFD_{T1-T2} = DisAh_{T1} - ChaAh_{T2} \tag{2}$$

图 6 所示为-10℃可用容量损失测量过程的电压曲线，图中-10℃放电电量  $DisAh_{-10℃}=82Ah$ ，-10℃充电电量  $ChaAh_{-10℃}=57Ah$ ，20℃放电电量  $DisAh_{20℃}=78Ah$ 。-10℃实际可用容量为 57Ah，满充损失  $LFC_{-10℃-20℃}=25Ah$ ，满放损失  $LFD_{-10℃-20℃}=21Ah$ 。表 2 列出了不同温度下的实际可用容量以及满充和满放损失，通过该表可以看出同一温度下满充和满放损失是不同的，满充损失要大于满放损失。

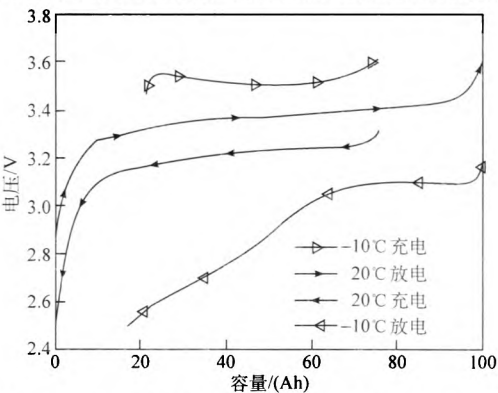


图 6 -10℃可用容量损失测量过程的电压曲线  
Fig.6 The voltage curves of measurement process of capacity loss at -10℃

表 2 不同温度下满充和满放损失

Tab.2 LFC and LFD at different temperatures			
温度/ ℃	满放损失/ (Ah)	可用容量/ (Ah)	满充损失/ (Ah)
20	0	103	0
10	2	98	3
0	7	88	8
-10	21	57	25
-20	23	55	25

图 7 所示为不同温度下实际可用容量与常温实际可用容量百分比，该图显示了从-20~10℃电池实际可用容量与 20℃实际可用容量百分比，并且给出了不同温度下满充损失和满放损失的百分比。

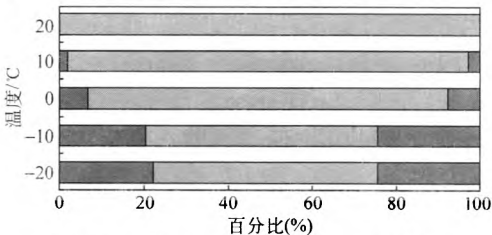


图 7 不同温度下实际可用容量与常温实际可用容量百分比  
Fig.7 The percentage of the available capacity at different temperatures and room temperatures

### 4.2 不同温度下 SOC 的计算

改进的安时计量法考虑到不同温度下实际可用容量  $C_T$  随温度的变化, 以及上一时刻温度下的 SOC 到当前温度下 SOC 的换算, 如下式

$$SOC(t) = SOC_T(t-1) + \eta \int_0^1 \frac{I}{C_T} dt \quad (3)$$

式中,  $SOC(t)$  为当前温度下的 SOC;  $SOC_T(t-1)$  为上一时刻 SOC 换算到当前温度的 SOC;  $C_T$  为不同温度下实际可用容量;  $\eta$  为库伦效率。

同一节电池在具有相同电量状态下由于温度不同其 SOC 也不相同, 因此不同温度下的 SOC 需要相互换算。如图 8 所示, 电池在温度  $T_1$  和  $T_2$  下的 SOC 分别为  $SOC_{T_1}$  和  $SOC_{T_2}$ , 实际可用容量分别为  $C_{T_1}$  和  $C_{T_2}$ , 满放容量损失为  $LFD_{T_1-T_2}$ 。在  $T_1$  温度下, 电池的剩余电量为

$$Ah_{T_1} = SOC_{T_1} C_{T_1} \quad (4)$$

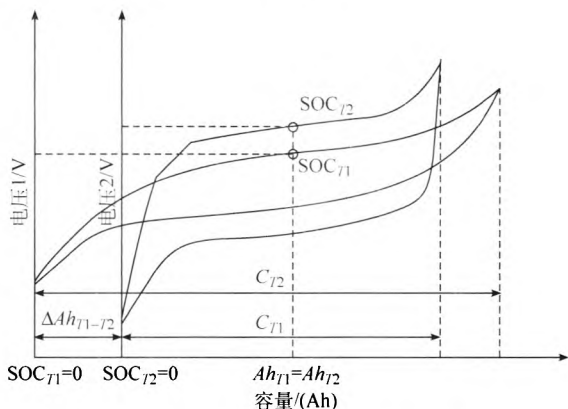


图 8 不同温度下 SOC 的换算过程

Fig.8. The SOC conversion process at different temperatures

在  $T_2$  温度下, 电池的剩余电量为

$$Ah_{T_2} = SOC_{T_2} C_{T_2} + LFD_{T_1-T_2} \quad (5)$$

因为电池在  $T_1$  和  $T_2$  处的剩余电量相同, 即  $Ah_{T_1} = Ah_{T_2}$ , 则有

$$SOC_{T_1} C_{T_1} = SOC_{T_2} C_{T_2} + LFD_{T_1-T_2} \quad (6)$$

当电池的温度由  $T_1$  变化到  $T_2$ , 这时电池的  $SOC_{T_2}$  为

$$SOC_{T_2} = \frac{SOC_{T_1} C_{T_1} - LFD_{T_1-T_2}}{C_{T_2}} \quad (7)$$

当电池的温度由  $T_2$  变化到  $T_1$ , 这时电池的  $SOC_{T_1}$  为

$$SOC_{T_1} = \frac{SOC_{T_2} C_{T_2} + LFD_{T_1-T_2}}{C_{T_1}} \quad (8)$$

## 5 实验验证

为了验证本文所提出的方法, 分别在恒定温度环境下和变化温度环境下进行了实验。充放电测试工况为 USABC 测试手册中的 FUDS 工况<sup>[7]</sup>, FUDS 工况的电流曲线如图 9 所示。

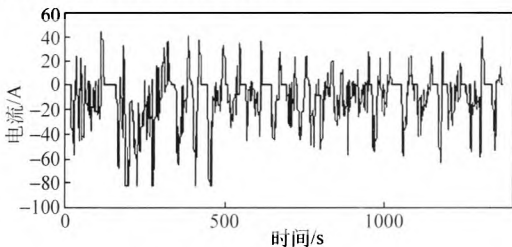


图 9 FUDS 工况电流曲线

Fig.9 Current profile of FUDS

### 5.1 恒温验证

恒温测试是为了验证电池在不同大小恒定温度下工况循环实验的 SOC 估算精度。本文分别选取  $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$  和  $20^{\circ}\text{C}$  温度环境下进行验证。 $20^{\circ}\text{C}$  循环工况实验中, 先将电池充电到  $SOC=70\%$ , 静止 1h, 循环 9 次 FUDS 工况最后以  $C/3$  电流将电池放电到下限截止电压;  $0^{\circ}\text{C}$  循环工况实验中, 先将电池在  $20^{\circ}\text{C}$  环境下充电到  $SOC=70\%$ , 在  $0^{\circ}\text{C}$  环境下搁置 24h, 循环 9 次 FUDS 工况最后以  $C/3$  电流将电池放电到下限截止电压;  $-10^{\circ}\text{C}$  循环工况实验过程与  $0^{\circ}\text{C}$  循环工况实验相同。

$-10^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$  和  $20^{\circ}\text{C}$  温度环境下的三次循环工况实验的电压曲线如图 10a 所示, 从该图可以看出即使在循环工况前充入电池的电量相同, 由于低温环境下电池的实际可用容量低于室温环境下实际可用容量, 因此  $-10^{\circ}\text{C}$  和  $0^{\circ}\text{C}$  的放电电量要小于  $20^{\circ}\text{C}$  的放电电量。图 10c 所示为  $-10^{\circ}\text{C}$  环境下工况实验电池极柱温度, 通过该图可以看出电池在循工况过程中温度是不断变化的, 最低温度为  $-8.5^{\circ}\text{C}$  而最高温度为  $-4^{\circ}\text{C}$ , 因此在 SOC 计算的过程中需要根据温度对 SOC 实时换算。图 10b 所示为三次循环工况实验的 SOC 曲线, 在循环实验开始时,  $-10^{\circ}\text{C}$  的 SOC 由式 (4) 可以计算出来为  $89\%$ , 而  $0^{\circ}\text{C}$  的 SOC 为  $74\%$ 。由于  $-10^{\circ}\text{C}$  和  $0^{\circ}\text{C}$  的实际可用容量小于  $20^{\circ}\text{C}$  的实际可用容量, 因此 SOC 下降的要快。三次循环工况实验后, 均采用  $C/3$  恒流放电实验法验证算法的精度。当电池电压达到下限截止电压时, SOC 均为  $0\%$ , 因此验证了该方法的准确性。

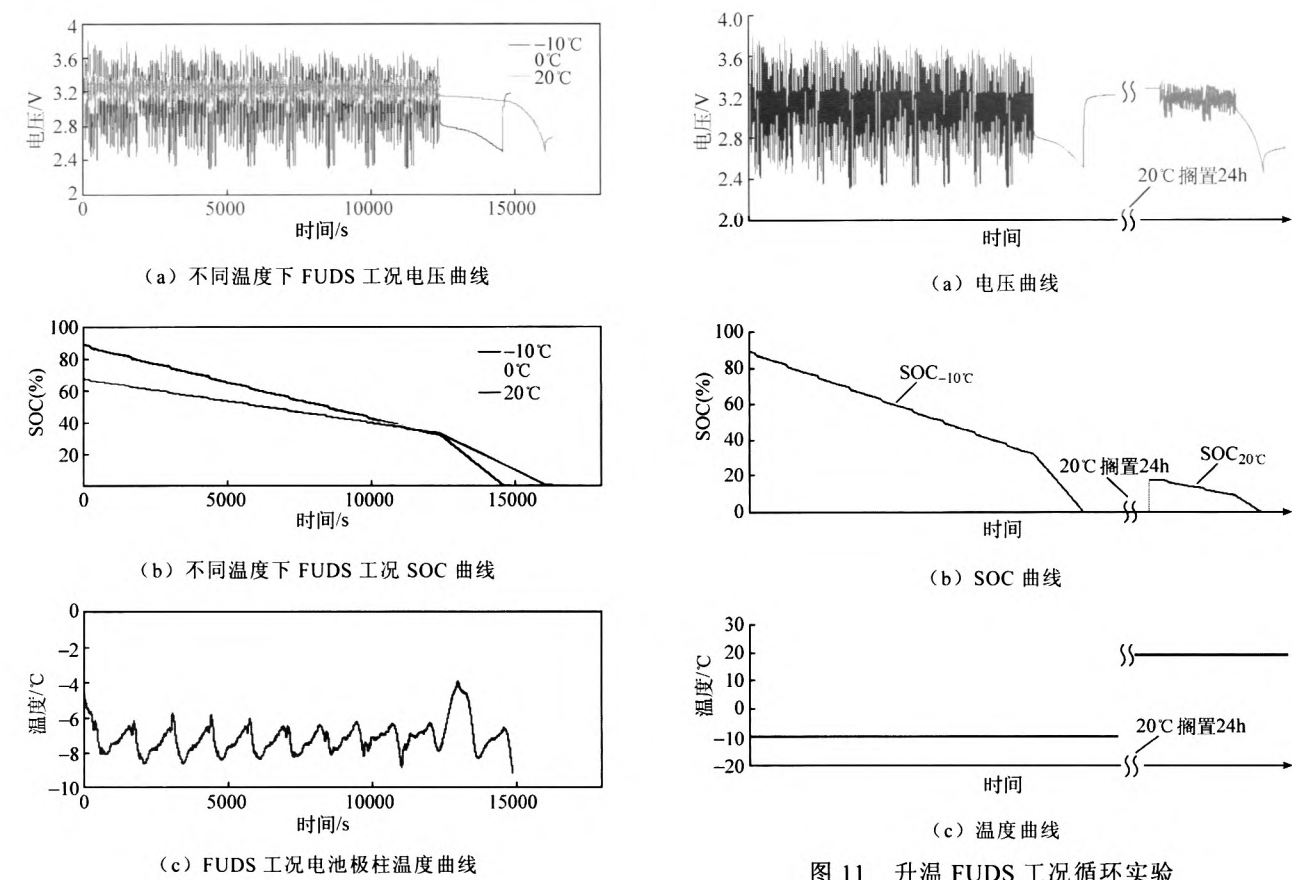


图 10 恒温 FUDS 工况循环实验

Fig.10 FUDS cycle test at constant temperature

5.2 变温验证

变温测试是为了验证电池在变化温度下工况循环实验的 SOC 估算精度,其中包含升温实验和降温实验。在升温实验中,先将电池在 20℃ 环境下充电到 SOC=70%,在-10℃ 环境下搁置 24h,循环 9 次 FUDS 工况最后以 C/3 电流将电池放电到下限截止电压。再将电池在 20℃ 环境下搁置 24h,循环 2 次 FUDS 工况最后以 C/3 电流将电池放电到下限截止电压。

图 11a 所示为整个升温实验过程的电压曲线,在-10℃ 环境下电池放电到下限截止电压时在此温度下对应的  $SOC_{-10^{\circ}\text{C}}=0\%$ 。整个实验过程中环境温度变化如图 11c 所示,但是电池在使用过程中其内部以及极柱温度要高于环境温度,如图 10c 所示,因此在由式 (8) 计算  $SOC_{20^{\circ}\text{C}}$  时,取  $T_2=-8^{\circ}\text{C}$ ,得到  $SOC_{20^{\circ}\text{C}}(0)=16.6\%$ 。再进行两次 FUDS 工况实验后,采用 C/3 恒流放电实验法验证算法在的精度。当电池放电到下限截止电压时,此时  $SOC_{20^{\circ}\text{C}}=0\%$ ,如图 11b 所示,因此验证了该方法在升温过程的准确性。

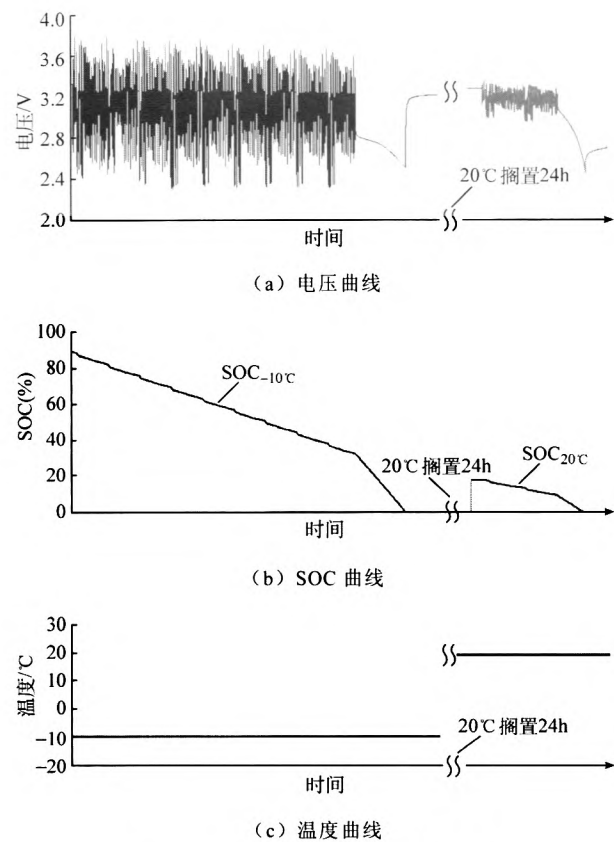
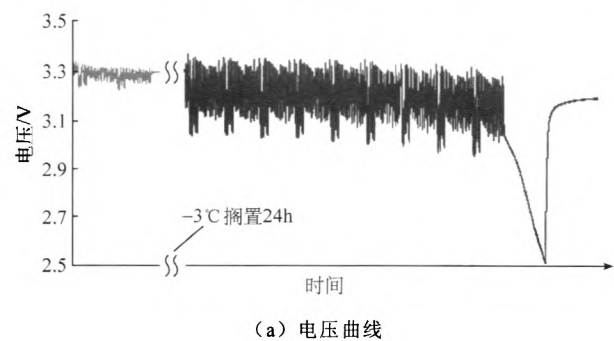


图 11 升温 FUDS 工况循环实验

Fig.11 FUDS cycle test during warming up

在降温实验中,先将电池在 20℃ 环境下充电到 SOC=70%,循环 2 次 FUDS 工况后,在-3℃ 环境下搁置 24h,循环 9 次 FUDS 工况,最后以 C/3 电流将电池放电到下限截止电压。

图 12a 所示为整个降温实验过程的电压曲线,在 20℃ 环境下,循环 2 次 FUDS 工况后,此时的  $SOC_{20^{\circ}\text{C}}=62\%$ 。在-3℃ 环境下搁置 24h,由式 (7) 计算出  $SOC_{-3^{\circ}\text{C}}=65\%$ ,再进行 9 次 FUDS 工况实验后,采用 C/3 恒流放电实验法验证算法的精度。当电池放电到下限截止电压时,此时  $SOC_{-3^{\circ}\text{C}}=0\%$ ,如图 12b 所示,因此验证了该方法在降温过程的准确性。整个实验过程中环境温度变化如图 12c 所示。



(a) 电压曲线



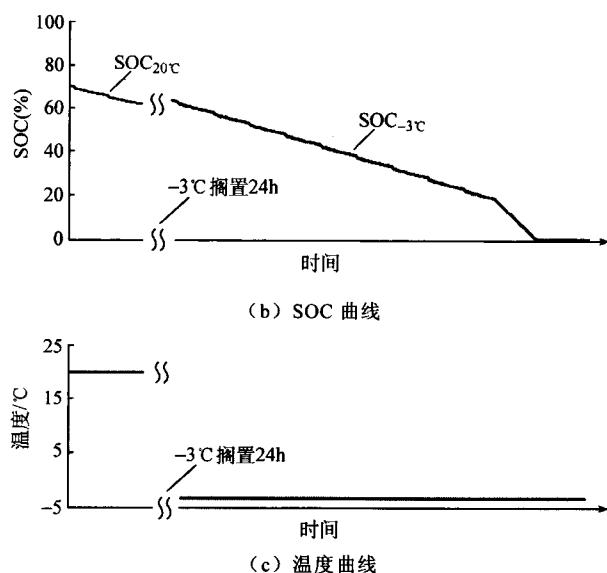


图 12 降温 FUDS 工况循环实验

Fig.12 FUDS cycle test during cooling down

## 6 结论

本文提出了一种改进安时计量法适用于不同温度条件的电池 SOC 估计算法,该算法主要考虑了不同温度下电池实际可用容量的变化对 SOC 估计的影响,并且可以对不同温度下估算的 SOC 进行换算。通过平台实验分别在恒温 and 变温环境下对该算法进行了验证,该算法在不同的温度环境下具有较高的精度。

## 参考文献

- [1] Hong Sun Park, Chong Eun Kim, Chol Ho Kim, et al. A modularized charge equalization converter for a hybrid electric vehicle lithium-ion battery stack[J]. Journal of Power Electronics, 2007(7): 343-352.
- [2] 李哲, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. 机械工程学报, 2011(18): 115-120.  
Li Zhe, Han Xuebing, Lu Languang, et al. Temperature characteristics of power LiFePO<sub>4</sub> batteries[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011(18): 115-120.
- [3] 于海芳, 逯仁贵, 朱春波, 等. 基于安时法的镍氢电池 SOC 估计误差校正[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 12-18.  
Yu Haifang, Lu Rengui, Zhu Chunbo, et al. State of charge estimation calibration for Ni-MH battery based

on ampere-hour method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 12-18.

- [4] 李哲, 卢兰光, 欧阳明高. 提高安时积分法估算电池 SOC 精度的方法比较[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1293-1296.  
Li Zhe, Lu Languang, Ouyang Minggao. Comparison of methods for improving SOC estimation accuracy through an ampere-hour integration approach[J]. Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2010, 50(8): 1293-1296.
- [5] Eberhard Meissner, Gerolf Richter. Battery monitoring and electrical energy management precondition for future vehicle electric power systems[J]. Journal of Power Sources, 2003, 116(1-2): 79-98.
- [6] Srdjan M Lukic, Jian Cao, Ramesh C Bansal, et al. Energy storage systems for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2258-2267.
- [7] Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen. Methods for state-of-charge determination and their application [J]. Journal of Power Sources, 2001, 96(1): 113-120.
- [8] Seongjun Lee, Jonghoon Kim, Jaemoon Lee, et al. State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(2): 1367-1373.
- [9] Gregory L Plett. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs part 1. background[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(2): 252-261.
- [10] Wu Guoliang, Lu Rengui, Zhu Chunbo, et al. An improved ampere-hour method for battery state of charge estimation based on temperature, coulomb efficiency model and capacity loss model[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010: 1-4.
- [11] Battery Test Manual For Plug-In Hybrid Electric Vehicles, 2008: 4-5.

## 作者简介

冯 飞 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要研究方向为动力电池测试技术、电动汽车电池管理技术。

逯仁贵 男, 1967 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能测试与控制、电动汽车电源管理等技术。