

# 锂离子电池健康状态估计方法

冯能莲<sup>1</sup>, 陈龙科<sup>1</sup>, 汤杰<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 安徽吴方机电股份有限公司, 安徽 蚌埠 233010)

**摘要:** 为研究动力锂离子电池的健康状态 (state of health, SOH) 根据 SOH 和荷电状态 (state of charge, SOC) 的定义以及电池的二阶电阻电容 (resistance-capacitance, RC) 等效电路模型, 建立了基于恒流充电阶段电池电压曲线的 SOH 估计模型. 通过分析电池循环寿命测试数据, 利用恒流充电阶段电池电压曲线对 SOH 进行估计, 并与试验数据进行了对比, 在 SOH 值衰减至 80% 之前, SOH 估计的相对误差均在  $\pm 2\%$  范围内, 能较好地吻合试验结果. 结果表明: 所提出的估计方法具有可行性和精确性.

**关键词:** 锂离子电池; SOH 估计; 电压曲线

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)11-1750-06

doi: 10.11936/bjtxb2016010065

## Methods for SOH Estimation of Li-ion Battery

FENG Nenglian<sup>1</sup>, CHEN Longke<sup>1</sup>, TANG Jie<sup>2</sup>

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Anhui Haofang Mechanical and Electrical Stock Company Limited, Bengbu 233010, Anhui, China)

**Abstract:** To study lithium ion battery state of health (SOH), according to the definitions of SOH and state of charge (SOC) and 2RC (resistance-capacitance) battery equivalent circuit model, the SOH estimation model of the battery voltage curve based on the constant current charging stage was established. Based on the analysis of the battery cycle life test data, the SOH was estimated by the battery voltage curve of the constant current charging stage and compared to the testing data. The relative error of SOH estimation was in the range of 2% before the SOH value was reduced to 80%, which was well consistent with the experimental results. The results show that the proposed method is feasible and accurate.

**Key words:** lithium ion battery; state of health (SOH) estimation; voltage curve

电池状态监控技术是电动汽车电池管理系统 (battery management system, BMS) 的核心技术之一<sup>[1]</sup>. 快速、准确地监测和控制电池的参数及状态也是衡量 BMS 研发及生产者实力的最直接的指标<sup>[2]</sup>. 目前, 电池健康状态 (state of health, SOH) 估计研究是其相对薄弱的环节, 而对 SOH 进行精准地监测和预测, 能够提高荷电状态 (state of charge, SOC) 估计精度, 以防止过充/过放、预测状态的演变

以及估计其他性能状态. 此外, 对于能量管理系统任务决策、减少安全隐患、防止灾难事故的发生也具有重要意义.

锂离子电池 SOH 估计的主要方法有直接放电法、内阻法、电化学阻抗分析法、模型法、电压曲线模型法<sup>[3-5]</sup>. 其中, 直接放电法是目前唯一公认利用负载对单体电池 SOH 评价的可靠方法, 但该方法需要离线测试电池的 SOH, 对车用动力电池来说实现困

收稿日期: 2016-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075010); 北京市教育委员会重点资助项目(KZ200910005007)

作者简介: 冯能莲(1962—), 男, 教授, 主要从事新能源汽车、智能车辆、汽车电子方面的研究, E-mail: fengnl@bjut.edu.cn

难,另外,测试负载较笨重,操作不方便;内阻法主要通过建立内阻与 SOH 之间的关系来估算 SOH,由于电池内阻比较小,准确测量比较困难,这种方法还没有得到实际的应用;电化学阻抗分析法的主要思想是向电池施加多个正弦信号,然后运用模糊理论对已采集到的数据信息分析,预测电池的当前性能,需要做大量的数据采集与分析才能获取此款电池的特性,另外,还依赖诸多阻抗及阻抗谱的理论知识,性价比较低;模型法是分析电池内部所发生的化学反应,以此为基础建立电池模型,进而计算电池容量的衰减,得到电池的 SOH,这种方法需要对电池内部的化学反应进行详尽分析,并需知道电池的有关参数,而且需要做大量关于电池寿命的试验,难度较大,耗时较长。相对而言,电压曲线模型法建模简单,不需要电池的固有参数和做大量的试验,成本低,估算精确高。

本文基于恒流充电阶段电池电压曲线并结合二阶 RC 等效电路模型,给出了一种对单体锂离子电池 SOH 的估计方法,并通过试验数据验证了该估计方法的合理性和有效性。

## 1 锂离子电池测试条件和数据获取

试验用电池的额定容量为  $1.1 \text{ A}\cdot\text{h}$ ,正极为含有少量锰的钴酸锂材料,电池质量为  $21.1 \text{ g}$ ,长、宽、高分别为  $50.0$ 、 $33.8$ 、 $6.6 \text{ mm}$ ,基于该锂离子电池的循环寿命测试试验,建立了数据库以备分析<sup>[6-8]</sup>。在循环寿命测试中,环境温度常温,充电方式均为恒流-恒压(CC-CV)方式,即以  $0.5 \text{ C}$  恒流充电,直至电池电压达到充电截止电压  $4.2 \text{ V}$ ,之后继续维持以  $4.2 \text{ V}$  恒压充电,直至充电电流减小至  $0.05 \text{ A}$  时停止充电,此时视电池已充满;以  $0.5 \text{ C}$  恒流放电,放电截止电压为  $2.7 \text{ V}$ 。

## 2 锂离子电池 SOH 估计

### 2.1 SOH 定义

对于纯电动汽车,通常当动力电池容量下降至额定容量的  $80\%$  时,功率依旧可以达到一定的性能要求;而当电池的容量下降至额定容量的  $80\%$  之后,认为动力电池的寿命终止。因此,在纯电动汽车动力电池的 SOH 估计中,一般只将容量作为其评价指标。定义<sup>[9]</sup>如下:

$$\text{SOH} = \frac{C_{\text{now}}}{C_{\text{rate}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{rate}}$  表示额定容量;  $C_{\text{now}}$  表示电池当前最大可

用容量,它可以是在额定条件下所测得的,或是在当前使用条件下所测得的,而由于可逆容量的存在,当前测试条件改变时所测得的  $C_{\text{now}}$  值一般并不相等,进而导致所得 SOH 的值也不相同。

电池的 SOC 用来表示当前的剩余可用电量占最大可用电量的百分比<sup>[10]</sup>。通过以容量评价 SOH 的定义,可以得到 SOC 定义的形式如下:

$$\text{SOC} = \frac{Q_{\text{nowrc}}}{Q_{\text{now}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $Q_{\text{now}}$  为当前最大可用电量,对应于当前  $C_{\text{now}}$ ;  $Q_{\text{nowrc}}$  为当前的剩余可用电量,对应于当前  $C_{\text{now}}$  中所剩余的电量。

### 2.2 SOH 估计模型建立

电池在不同 SOH 下,通过  $0.5 \text{ C}$  恒流恒压充电方式进行充电,  $0.5 \text{ C}$  恒流放电,对应的恒流充电阶段的电池电压曲线如图 1 所示。

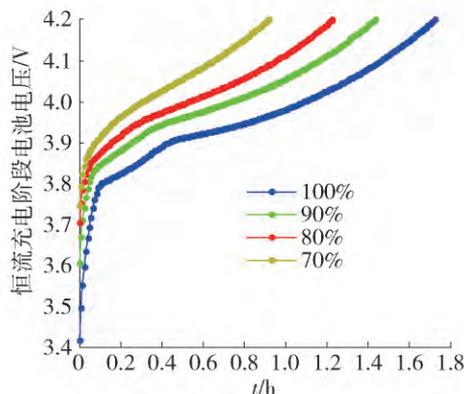


图 1 不同 SOH 下充电电压曲线

Fig. 1 Charging profile under different SOH

从图 1 中可以发现: 每一条恒流充电阶段电池电压曲线都非常相似,即电池在逐渐的老化过程中,相对应的恒流阶段的充电曲线逐渐向左上方缩移,充电的时间不断缩短,而电压“平台”也在渐渐地上升。

从外特性角度看,电池的 SOC(或电压)主要受其内部参数以及初始状态等影响,其中容量影响最为显著<sup>[11-12]</sup>。因此,对电池内部参数及状态的研究为基于电压曲线的电池状态估计提供了可靠依据。基于以上认识,通过对恒流恒压充电方式下恒流阶段电压曲线的规律性现象的研究,以完成 SOH 估计。

在建立电池模型时,不仅要求模型能够真实反映电池的动态特性,同时也要考虑模型的复杂程度以及实时性等,以满足工程实际应用的要求。常用的电池模型包括简化的电化模型、等效电路模型、

神经网络模型和特定因素模型等,其中,因等效电路模型的物理意义清晰、便于数学分析和进行参数辨识等特点而得到广泛应用<sup>[13]</sup>.常见的等效电路模型主要有线性模型、戴维南模型、PNGV(partnership for a new generation of vehicles)模型、四阶动态电路模型、二阶RC电路模型.其中,线性模型属于理想模型,并没有考虑外界因素对电池的影响;戴维南模型由于没有考虑到外界温度对电池内阻的影响,对电池SOH估算的实时性和准确性不高;PNGV模型的内阻参数和电池直流内阻较为准确,但在不同温度环境下的表现却不尽人意;四阶动态电路模型具有较高的阶数和精确度,但工程实现上很难,运算要求也很难实现;二阶RC电路模型虽然相较于一阶模型有较大的计算量,但是模型精确度能够大大提高<sup>[14]</sup>.相对于精度而言,锂离子电池的SOH估算对实时性的要求不敏感.经过对多个模型的分析,本文采用等效电路模型中二阶RC模型,如图2所示.

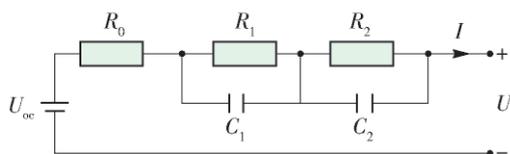


图2 二阶RC模型等效电路

Fig.2 Equivalent circuit model with double RC

二阶RC模型电路结构包括:理想电压源 $U_{oc}$ 表示电池的开路电压,描述正负两极稳定电位之差;电阻 $R_0$ 表示电池动力学行为的动态物理阻抗效应,对应于充放电过程的欧姆内阻;2个并联RC电路的串联,分别用来描述电池不同时间常数的极化现象阻抗效应,其中,电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 分别表示时间常数较长和较短的极化电阻; $C_1$ 和 $C_2$ 则表示对应的极化电容;电流 $I$ 表示流经欧姆内阻 $R_0$ 的电流;电压 $U$ 表示有负载时的输出电压或端电压,并规定放电电流符号取正,充电电流符号取负.

基于图2所示的二阶RC模型,根据基尔霍夫定律可以得到锂离子电池的充电特性,即输出电压 $U$ 与输入电流 $I$ 的数学关系为

$$U = U_{oc} - U_1 - U_2 + IR_0 \quad (3)$$

式中 $U_1$ 、 $U_2$ 为初始的极化电压,所有变量取正值.

由于等效电路模型能够很好地描述动力电池的外部特性,同时根据开路电压 $U_{oc}$ 与SOC的关系并结合式(3)可以得到

$$U(\text{SOC}, t) = U_{oc}(\text{SOC}) - U_1 \exp^{-\frac{t}{\tau_1}} + IR_1(1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_1}}) - U_2 \exp^{-\frac{t}{\tau_2}} +$$

$$IR_2(1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_2}}) + IR_0 \quad (4)$$

整理可得

$$U(\text{SOC}, t) = U_{oc}(\text{SOC}) - (U_1 + IR_1) \exp^{-\frac{t}{\tau_1}} - (U_2 + IR_2) \exp^{-\frac{t}{\tau_2}} - I(R_0 + R_1 + R_2) \quad (5)$$

式中 $U_{oc}(\text{SOC})$ 表示开路电压是SOC的函数,随着SOC的增加 $U_{oc}(\text{SOC})$ 呈现非线性、单调增加的趋势.

根据式(2),同一块电池在不同的老化状态,相同的SOC下可以得到关系式

$$\text{SOC} = \text{SOC}' = \frac{It' + C_s'}{C_u'} = \frac{It + C_s}{C_u} \quad (6)$$

易得

$$t = \frac{C_u \text{SOC} - C_s}{I} \quad (7)$$

$$t' = \frac{C_u' \text{SOC}' - C_s'}{I} \quad (8)$$

式中: $C_s$ 为剩余可用电量; $C_u$ 为最大可用容量; $t'$ 表示对应于 $t$ 在不同老化状态下SOC相同时的值. $\text{SOC}'$ 、 $C_s'$ 、 $C_u'$ 则分别对应于SOC、 $C_s$ 、 $C_u$ 在不同老化状态时的值.

由式(5)~(8)可以得到如下形式的方程:

$$U(\text{SOC}) = U_{oc}(\text{SOC}) - (U_1 + IR_1) \exp^{-\frac{C_u \text{SOC} - C_s}{\tau_1 I}} \exp^{\frac{C_s}{\tau_1 I}} - (U_2 + IR_2) \exp^{-\frac{C_u \text{SOC} - C_s}{\tau_2 I}} \exp^{\frac{C_s}{\tau_2 I}} + I(R_0 + R_1 + R_2) \quad (9)$$

$$U(\text{SOC}) = U_{oc}'(\text{SOC}) - (U_1' + IR_1') \exp^{-\frac{C_u' \text{SOC}' - C_s'}{\tau_1' I'}} \exp^{\frac{C_s'}{\tau_1' I'}} - (U_2' + IR_2') \exp^{-\frac{C_u' \text{SOC}' - C_s'}{\tau_2' I'}} \exp^{\frac{C_s'}{\tau_2' I'}} + I(R_0' + R_1' + R_2') \quad (10)$$

式中 $R_0'$ 、 $R_1'$ 、 $R_2'$ 、 $U_1'$ 、 $U_2'$ 、 $\tau_1'$ 、 $\tau_2'$ 、 $U_{oc}'(\text{SOC})$ 分别表示对应于 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $u_{oc}(\text{SOC})$ 在不同老化状态时的值.

根据文献[15],在一定的误差范围内,可认为开路电压 $U_{oc}(\text{SOC})$ 只随SOC的变化而变化.实际上,影响开路电压的因素还有:构成电池两极体系的性质、电极材料、溶液组成与质量浓度、温度、电极界面状态、工艺配方及工艺过程等<sup>[16]</sup>.因此,对于同一块电池,在温度变化不大、老化不严重的情况下,认为电池开路电压在老化过程中基本不变;并且认为 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 在恒流充电阶段为定值,仅随循环次数的增加而改变.即

$$U_{oc}(\text{SOC}) = U_{oc}'(\text{SOC}) \quad (11)$$

由式(8)~(10)可以得到,在不同老化状态下,

充电时电池电压与 SOC 的关系表达式为

$$\begin{aligned}
 U'(SOC) - U(SOC) = & (U_1 + IR_1) \exp^{-\frac{C_u}{\tau_1} SOC} \exp^{\frac{C_s}{\tau_1 t}} + \\
 & (U_2 + IR_2) \exp^{-\frac{C_u}{\tau_2} SOC} \exp^{\frac{C_s}{\tau_2 t}} - \\
 & (U'_1 + IR'_1) \exp^{-\frac{C'_u}{\tau'_1} SOC} \exp^{\frac{C'_s}{\tau'_1 t}} - \\
 & (U'_2 + IR'_2) \exp^{-\frac{C'_u}{\tau'_2} SOC} \exp^{\frac{C'_s}{\tau'_2 t}} + \\
 & I(R'_0 + R'_1 + R'_2 - R_0 - R_1 - R_2) \quad (12)
 \end{aligned}$$

由式(4)(5)可以进一步得到

$$t = \frac{C_u}{C'_u} \left( t' + \frac{C'_s}{I} \right) - \frac{C_s}{I} \quad (13)$$

由式(6)(12)(13)可以得到

$$\begin{aligned}
 U'(t) = & U(t) + (U_1 + IR_1) \exp^{-\frac{1}{\tau_1} t} + \\
 & (U_2 + IR_2) \exp^{-\frac{1}{\tau_2} t} - \\
 & (U'_1 + IR'_1) \exp^{-\frac{1}{\tau'_1} t} - \\
 & (U'_2 + IR'_2) \exp^{-\frac{1}{\tau'_2} t} + \\
 & I(R'_0 + R'_1 + R'_2 - R_0 - R_1 - R_2) \quad (14)
 \end{aligned}$$

一般以第 1 次充放电循环中恒流充电阶段的电压曲线  $U(t)$  作为基准, 并且电池可用容量已知. 在恒流充电获取  $U(t)$  曲线前, 应使初始电池的 SOC 尽量小, 即  $C_s \approx 0$ . 为方便 SOH 的估计, 令

$$\begin{aligned}
 a_1 = & U_1 + IR_1; b_1 = -\frac{1}{\tau_1}; c_1 = U'_1 + IR'_1 \\
 a_2 = & U_2 + IR_2; b_2 = -\frac{1}{\tau_2}; c_2 = U'_2 + IR'_2 \\
 d_1 = & -\frac{1}{\tau'_1}; d_2 = -\frac{1}{\tau'_2}; \Delta t = \frac{C'_s}{I}; k = \frac{C_u}{C'_u} \\
 e = & I(R'_0 + R'_1 + R'_2 - R_0 - R_1 - R_2) \quad (15)
 \end{aligned}$$

由此可以得到, 在不同老化程度下, 恒流充电阶段电池电压曲线的数学模型为

$$\begin{aligned}
 U'(t) = & U(k(t' + \Delta t)) + a_1 \exp^{b_1 k(t' + \Delta t)} + \\
 & a_2 \exp^{b_2 k(t' + \Delta t)} - c_1 \exp^{d_1 t'} - c_2 \exp^{d_2 t'} + e \quad (16)
 \end{aligned}$$

由于在一次恒流阶段充电过程中, 式中  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, e, \Delta t, k$  均视为常数且可以通过数值计算的方法辨识得到, 因此, 能够估计出电池 SOH 的值, 即  $1/k$ .

### 2.3 估计模型参数辨识

通过对 SOH 在 100% 时的恒流充电阶段的电池电压数据进行处理, 可以得到一条恒流阶段电池电压曲线, 并以此作为模型的基准线, 如图 3 所示. 本文提出的基准曲线的选取方法, 比传统的通过归一化处理电池电压曲线包围坐标轴的面积来选取所需的基准曲线的方法<sup>[17]</sup>更加简单且易于实现实车动

力电池 SOH 估计.

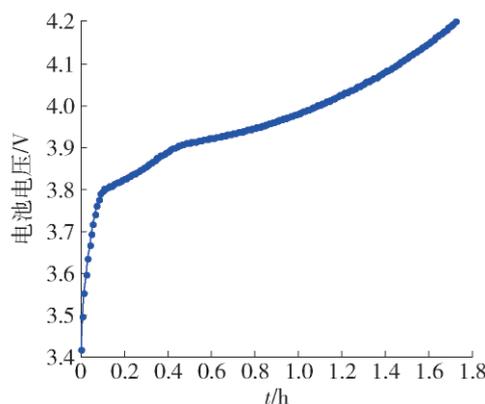


图 3 基准充电电压曲线

Fig. 3 Benchmark charging profile

根据文献[18]中的方法, 可以得到基准线的电压  $U(t)$  与时间  $t$  的函数关系

$$\begin{aligned}
 U(t) = & -0.34 \exp^{-30.81 t} - 0.11 \exp^{1.46 t} + \\
 & 0.36 t^3 - 0.45 t^2 + 0.68 t + 3.86 \quad (17)
 \end{aligned}$$

将式(17)带入方程(16)中对基准电压曲线进行拟合, 此时  $k, e, \Delta t$  应该同时满足以下条件:

$$\begin{cases} k \rightarrow 1 \\ \Delta t \rightarrow 0 \\ e \rightarrow 0 \end{cases}$$

同时, 当  $a_1 \approx c_1, b_1 \approx d_1, a_2 \approx c_2, b_2 \approx d_2$  也满足时, 便可以辨识出  $a_1, a_2, b_1, b_2$  的值并带入方程(16), 可得到恒流充电阶段电池电压曲线的数学模型, 其一般形式为

$$\begin{aligned}
 U'(t) = & -0.34 \exp^{-30.81 k(t' + \Delta t)} - 0.11 \exp^{1.46 k(t' + \Delta t)} + \\
 & 0.36 k^3 (t' + \Delta t)^3 - 0.45 k^2 (t' + \Delta t)^2 + \\
 & 0.68 t + 3.86 - 40.44 \exp^{-19.29 k(t' + \Delta t)} - \\
 & c_1 \exp^{d_1 t'} + 94.36 \exp^{-20.79 k(t' + \Delta t)} - c_2 \exp^{d_2 t'} + e \quad (18)
 \end{aligned}$$

从上述分析可以看出, 本文所采用的二阶 RC 电路模型, 不需要开路电压、剩余电量或阻抗等难以准确获得的参数, 也无需大量试验数据进行训练, 甚至不受使用工况影响.

### 3 估计结果与分析

对不同老化程度下的恒流充电阶段电池电压数据进行拟合, 其结果如图 4 所示.

进一步地, 基于 SOH 估计模型, 图 5、表 1 给出了电池在不同老化程度下, 对应的 SOH 实测值与估计值以及相对误差. 可以看到: 在 SOH 值衰减至 80% 之前, SOH 的估算精度较为准确, 相对误差均

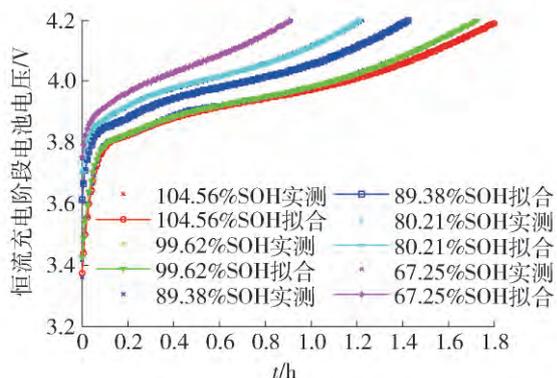


图4 不同SOH下的实测电压拟合曲线图

Fig. 4 Voltage curve fitting under different SOH

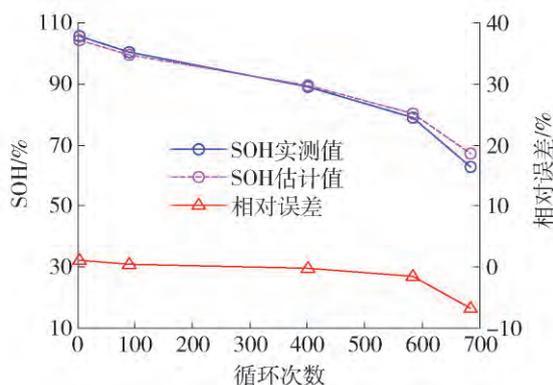


图5 SOH 实测值与估计值以及相对误差

Fig. 5 Comparison of real and estimated values of SOH

表1 SOH 实测值与估计值

Table 1 SOH real and estimated values %

SOH 实测值	SOH 估计值	估计相对误差
104.56	105.76	1.14
99.62	100.49	0.34
89.38	89.10	-0.31
80.21	78.87	-1.67
67.25	62.59	-6.93

在 $\pm 2\%$ 范围内,而文献[17]中的传统电压曲线拟合估计SOH精度的相对误差最大达到7%,加入自适应算法的电压曲线拟合的估算精度最大也达到了2.17%;而在SOH值衰减至80%之后,作为电动汽车用动力电池的寿命终止,因此不进行讨论。这表明,在电池容量衰减至80%之前,恒流充电阶段电池电压曲线变化趋势非常相近,从而验证了SOH估计结果的精确性。由于老化严重,在容量衰减至80%之后,温度、内阻等各种因素使恒流充电阶段电池电压曲线在变化趋势上发生了较大改变,规律性

变弱,造成估计波动较大。为此可以考虑对基准线进行修正,以期更好地估计精度。

以上SOH估计所使用的循环寿命测试数据为每次采集数据时第2次循环测试数据,而从SOH估计结果来看,该方法并不受SOH值与循环次数关系曲线上“峰值”现象的影响,即该方法不受循环次数和使用历史的影响,也反映了电池端电压及状态的综合表现,进一步验证了估计模型的精确性和估计方法的合理性和有效性。

## 4 结论

1) 基于单体电池二阶RC模型的SOH估计模型复杂程度适中,既可以反映电池的动态特性,又能满足电池管理系统的使用要求。

2) 在SOH值衰减至80%之前,所推导出的估计模型是适用且准确的,所用的估计方法可行且有效。利用不同老化程度下恒流充电阶段电池电压曲线并结合二阶RC电路模型,既不需要开路电压、剩余电量或阻抗等实际工程上难以准确获得的参数,也无需大量实验数据进行训练,甚至不受使用工况影响。

3) 本文所用方法对其他类型电池的SOH估计及工程应用具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 张剑波,卢兰光,李哲. 车用动力电池系统的关键技术与学科前沿[J]. 汽车安全与节能学报,2012,3(2): 87-104.  
ZHANG J B, LU L G, LI Z. Key technologies and fundamental academic issues for traction battery systems [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3 (2): 87-104. (in Chinese)
- [2] LU L, HAN X, LI J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2013, 226(6): 272-288.
- [3] DAI H F, WEI X Z, SUN Z C. A new SOH prediction concept for the power lithium-ion battery used on HEVs [C] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. New Jersey: Piscataway, 2009: 1649-1653.
- [4] 徐文静. 纯电动汽车锂电池健康状态估算方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 11-13.  
XU W J. Study on state of health estimation algorithm for lithium power battery used on pure electric vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2012: 11-13. (in Chinese)
- [5] 戴海峰,王楠,魏学哲,等. 车用动力锂离子电池单体不一致性问题研究综述[J]. 汽车工程, 2014, 36(2):

- 181-188.
- DAI H F, WANG N, WEI X Z, et al. A research review on the cell inconsistency of Li-ion traction batteries in electric vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36 (2): 181-188. (in Chinese)
- [6] XING Y, MA E W M, TSUI K L, et al. Battery management systems in electric and hybrid vehicles [J]. *Energies*, 2011, 4(12): 1840-1857.
- [7] WILLIARD N, HE W, HENDRICKS C, et al. Lessons learned from the 787 dreamliner issue on lithium-ion battery reliability [J]. *Energies*, 2013, 6(9): 4682-4695.
- [8] XING Y, HE W, PECHT M, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 106-115.
- [9] 李勇, 王丽芳, 廖承林. 电动车锂离子电池健康状态模型研究进展 [J]. *电源技术*, 2013, 37(5): 863-866.
- LI Y, WANG L F, LIAO C L. Advances of state of health modeling of lithium-ion battery for electric vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 37(5): 863-866. (in Chinese)
- [10] 薛辉. 动力锂离子电池组 SOH 估计方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013: 2-3.
- XUE H. Theresearch on the method of power lithium-ion battery pack state of health estimation [D]. Changchun: Jilin University, 2013: 2-3. (in Chinese)
- [11] 陈强, 李香龙, 李雪, 等. 单体参数差异对串联电池组性能影响研究 [J]. *电源技术*, 2013, 37(11): 1947-1950.
- CHEN Q, LI X L, LI X, et al. Influence of cell parameter differences upon series battery packs [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 37(11): 1947-1950. (in Chinese)
- [12] 孙万成, 张建忠, 杨清欣, 等. 容量差对电动工具用锂离子电池组性能的影响 [J]. *电源技术*, 2013, 37(4): 552-554.
- SUN W C, ZHANG J Z, YANG Q X, et al. Effect of capacity difference on performance of lithium ion battery pack for electric tools [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 37(4): 552-554. (in Chinese)
- [13] 张利, 朱雅俊, 刘征宇. 锂离子电池 SOC 与模型参数联合估算研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(4): 320-324.
- ZHANG L, ZHU Y J, LIU Z Y. Research on joint estimation for SOC and model parameters of Li-ion battery [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(4): 320-324. (in Chinese)
- [14] 彭飞. 锂离子电池状态估算方法研究与实现 [D]. 西安: 电子科技大学, 2014: 14-16.
- PENG F. Research and realization of state estimation for lithium-ion batteries [D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 14-16. (in Chinese)
- [15] 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): 266-274.
- [16] 王力臻, 项民, 谷书华, 等. 开路电压及其影响因素 [J]. *电池*, 1999, 29(4): 157-160.
- WANG L Z, XIANG M, GU S H, et al. Opencircuit voltage and its effect factors [J]. *Battery Bimonthly*, 1999, 29(4): 157-160. (in Chinese)
- [17] 张剑楠. 锂离子动力电池健康状态估计算法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015: 32-33.
- ZHANG J N. Study on state of health estimation of the lithium-ion battery [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 32-33. (in Chinese)
- [18] 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.

(责任编辑 梁洁)