

# 镍氢电池组的荷电状态估计方法研究\*

王军平

(西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

陈全世 林成涛

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要：采用联邦城市行驶工况(FUDS)对电池组进行充放电试验，建立了单变量的镍氢电池组的状态空间模型。将电池荷电状态(State of charge, SOC)作为系统的状态，基于卡尔曼滤波进行SOC的估计，估计结果的最大相对误差为2.15%。该方法适合于电池工作为动态的混合动力汽车，也同样适用于那些电池状态变化不剧烈的场合，并且具有较小的计算量。

关键词：镍氢电池组 荷电状态 卡尔曼滤波

中图分类号：TM912.1

## 0 前言

如何合理使用电池，充分利用电池组中的能量，延长电池的使用寿命是电动汽车及混合动力汽车进一步发展中必须解决的问题。电池荷电状态(State of charge, SOC)估计对于电动汽车的作用就像油量计对于内燃机汽车的作用。与内燃机汽车油箱不同的是，电池功率提供能力随着电池SOC的变小而发生衰减；电池放电倍率越大，放出电量越少；在判断电池是否充满和放空时，没有像油量计那样清晰的判据；电池的容量随着温度、循环工作次数发生变化；过充和过放会极大损害电池性能，所以电池SOC估计远比油量计复杂。对于电动汽车动力电池SOC的估计，目前国内外采用的方法主要有<sup>[1]</sup>：放电试验法、Ah计量法、开路电压法、负载电压法、电化学阻抗频谱法、内阻法、线性模型法、神经网络法和卡尔曼滤波法等。

放电试验法在试验室中经常使用，适用于所有的电池，但它有两个显著缺点：需要大量时间；电池进行的工作要被迫中断。Ah计量法是最通用的SOC估计方法。但应用中存在三个主要问题：电流测量不准确将增大误差，长时积累误差会越来越大。必须考虑电流充放的损失。在高温、低温状态和电流波动很大的情况下误差较大。开路电压法的显著缺点是需要长时间静置电池以使电压稳定，该方法只适于电动汽车驻车状态，而不能连续

提供SOC的估计值。电化学阻抗频谱法很少实际用于SOC的估计。神经网络能够模拟电池的复杂动态特性，这为估计电池SOC提供了新方法，而神经网络方法的误差受训练数据和训练方法的影响很大，而工程中所存在的噪声干扰影响网络的学习与应用。卡尔曼滤波法<sup>[2,3]</sup>尤其适合于电流变化比较剧烈的混合动力汽车电池SOC的估计，卡尔曼滤波法不仅给出了SOC的估计值，还给出了SOC的估计误差。由于卡尔曼滤波涉及大量的矩阵运算，该方法的缺点在于对电池模型准确性和计算能力要求高，参考文献[2]研究了基于卡尔曼滤波的锂离子电池单体的SOC估计方法，但由于大量的矩阵运算对于电池管理系统的运算能力要求很高。研究了镍氢电池组的SOC估计方法，更适用于整车应用，利用单状态模型也大大减小了计算量，不会增加现有的电池管理系统的难度，台架试验表明该方法具有较高的估计精度。

## 1 基于卡尔曼滤波的SOC估计原理

SOC是个相对量，表示电池目前的净充电量与电池额定容量的比值。电池的净充电量是指电池在后续时间能放出的最大电量，要从电池上一次以额定容量完全充满的状态算起，可表示为

$$S_c(t) = S_c(0) - \int_0^t \frac{h(i(t))i(t)}{C} dt \quad (1)$$

式中  $C$  —— 电池标称容量

$i(t)$  —— 电池在  $t$  时刻的电流

$h$  —— 库仑效率

离散化的  $S_c$  关系式为

\* 国家863计划(2003AA501100)和汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KF2005-006)资助项目。20050210收到初稿，20050715收到修改稿

$$S_{ck+1} = S_{ck} - \frac{h(i_k) i_k \Delta t}{C} \quad (2)$$

卡尔曼滤波需要的电池模型的一般形式为

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \\ y_k = g(x_k, u_k) + v_k \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $x_k$  是在  $k$  时刻系统的状态变量,  $u_k$  是系统  $k$  时刻的输入, 系统的输出  $y_k$  是电池的工作电压,  $f$  和  $g$  都是由电池模型定义的非线性方程, 系统的输入矢量  $u_k$  中通常包含电池的瞬时电流  $i_k$ , 电池温度  $T_k$ , 电池容量  $C$  和内阻  $R_k$  等,  $w_k, v_k$  分别为系统噪声和量测噪声。

将电池的 SOC 作为系统的一个状态  $x_k$ , 利用扩展卡尔曼滤波估计方法<sup>[4]</sup>即可实时地估计电池的 SOC。在混和动力电动汽车上, 电池组电流的变化范围很大, 电流波动是一个动态过程。卡尔曼滤波适合于电池工作为动态的混合动力汽车, 也同样适用于那些电池状态变化不剧烈的场合。

## 2 电池组试验及状态空间模型

为了预测电池性能, 已经建立了许多种不同的电池模型。但是至今还没有能完全准确预测电池性能的模型, 也没有包括了所有电池性能影响因素的电池模型。影响电池性能的主要因素有: 电池荷电状态( $S_c$ )、电池容量、充放电倍率、温度和工作时间等。最简单的模型是以电化学理论为唯一建模基础的模型, 这样的模型能够预测电池能量的储存量。这里仅利用 SOC 作为电池组的状态方程, Nernst 和 Shepherd 的综合电池模型作为量测方程而建立了电池组的状态空间模型。

Nernst 和 Shepherd 是基于铅酸电池的电化学机理所建模型。这些模型都是电化学机理的基础上的简化模型, 不是具体到特定的化学反应以及内部材料和外部特性的关系建模, 而是重点反映了电池容量和外部特性的关系。这些多用于进行容量估计的电池模型, 也适用于其他电池, 只是具体的参数需要通过试验来确定。参考文献[2,3]都采用该模型应用于锂离子电池建模, 这里也采用它作为镍氢电池的模型, 经过测试该模型能反映镍氢电池动态特性。

电池组的状态方程如下, 令  $x_k = S_{ck}$

$$x_{k+1} = x_k + h i_k \Delta t / C \quad (4)$$

电池组的量测方程如下

$$y(k) = f(i_k, x_k) + n_k = K_0 - R i_k - K_1 / x_k - K_2 x_k + K_3 \ln x_k + K_4 \ln(1 - x_k) + n_k \quad (5)$$

式中  $R$  ——电池内阻

$K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$  ——拟合常数

$n_k$  ——量测噪声, 方差为  $Q$

因此设计电池试验来确定这几个常数便是建立模型的关键。这里采用联邦城市行驶工况(FUDS)对电池组进行充放电试验。这一变功率放电机制能够最好地模拟对电动车的实际功率需求。如果考虑高功率峰值的发生频率和最大再生充电功率与放电功率的比值, 它应该是一个十分苛刻的工况。FUDS 是汽车工业一个标准的用于城市行驶的车辆时间—车速表, 并且用于电动车辆性能试验已经好几年了。把这一 FUDS 车速—时间表变成电池功率—时间表即可用于电池组的循环充放电。图 1 为电池组充放电所采用的功率时间表, 即 FUDS 循环。图 2、3 分别为镍氢电池组采用 FUDS 循环时采集到的电压、电流信号。

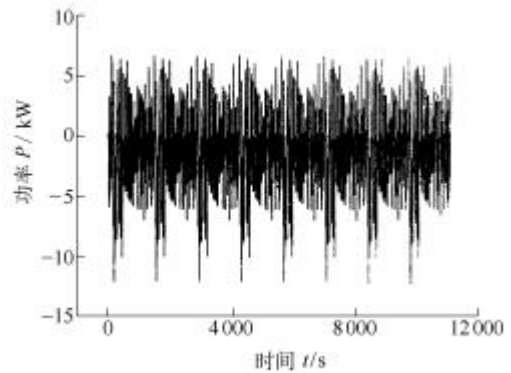


图 1 FUDS 试验功率序列

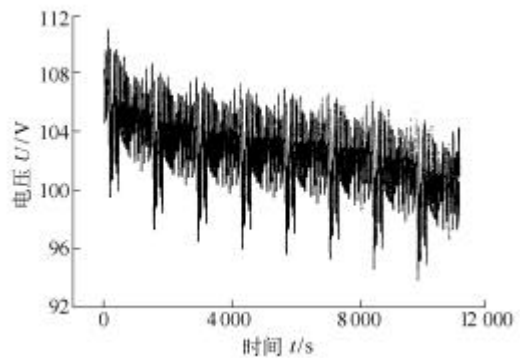


图 2 FUDS 试验所采集的电压信号

利用试验数据, 采用最小二乘法<sup>[3]</sup>即可估计得到电池组的模型参数, 即

$$\hat{\theta} = [K_0, R^+, R^-, K_1, K_2, K_3, K_4]^T =$$

$$(H^T H)^{-1} H^T Y \quad (6)$$

式中  $R^+$  ——充电时的电池内阻

$R^-$  ——放电时的电池内阻

$Y$ ——所测的电压序列

$$Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]$$

$$H = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_N]^T$$

$$h_j = [1, i_j^+, i_j^-, 1/x_j, x_j, \ln(x_j), \ln(1-x_j)]$$

$i_j^+$ ——充电电流

$i_j^-$ ——放电电流

$N$ ——采样数据对的个数

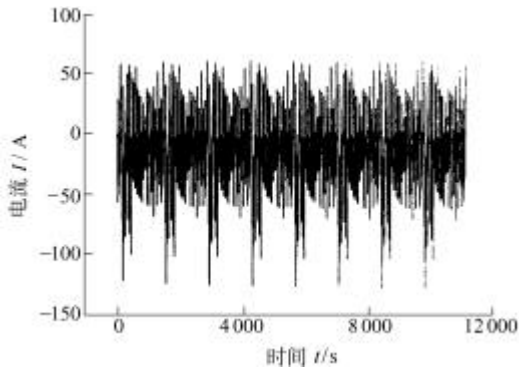


图 3 FUDS 试验所采集的电流信号

通过 FUDS 循环试验计算得到的镍氢电池组的模型参数为

$$h = 0.95$$

$$? = [261.873, 0.057, 0.065, 12.646, -331.240, 109.864, -84.480]^T$$

### 3 SOC 估计

利用式(4)、(5)的电池组模型,基于扩展卡尔曼滤波进行 SOC 估计。因为该模型是单变量的,所以扩展卡尔曼滤波方程大大简化,一组滤波方程如下。

状态预测如下

$$x_{k/k-1} = x_{k-1/k-1} + h i_{k-1} \Delta t / C \quad (7)$$

量测阵如下

$$C_k = \left. \frac{\partial g(i_k, x_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = x_{k/k-1}} = K_1 / (x_{k/k-1})^2 - K_2 + K_3 / x_{k/k-1} - K_4 / (1 - x_{k/k-1}) \quad (8)$$

滤波增益如下

$$K_k = P_{k/k-1} C_k^T [C_k P_{k/k-1} C_k^T + Q]^{-1} \quad (9)$$

预测均方差如下

$$P_{k/k-1} = P_{k-1/k-1} \quad (10)$$

估计均方差如下

$$P_{k/k} = (I - K_k C_k) P_{k/k-1} \quad (11)$$

状态估计如下

$$x_{k/k} = x_{k/k-1} + K_k [y_k - f(i_k, x_{k/k-1})] = S_{ck} \quad (12)$$

式(7)~(12)给出了 SOC 估计的卡尔曼滤波算

法。图 4 给出了利用该算法的 SOC 估计结果,其中计算值表示利用算法估计的结果,测量值表示利用 AV900 试验台进行测试的结果。由于 SOC 的真值难于确定,这里利用 AV900 试验台采用充放电试验确定电池初始状态时的 SOC 和放电终止时的电池 SOC。充放电试验法得到这两点的值比较精确,在比较精确的 SOC 初值基础上用考虑库仑效率的 Ah 计量法计算,并利用放电试验法的终值 SOC 值对 Ah 计量法修正,从而得到图 4 中的测量值。充放电试验比较精确但仅限于实验室使用,因此用该方法确定的测量值作为真值和这里方法进行对比。结果表明文中所采用的基于卡尔曼滤波的 SOC 估计方法是适用于镍氢电池组的动态 SOC 估计的,通过变功率的工况循环试验验证,估计结果的最大相对误差为 2.15%。

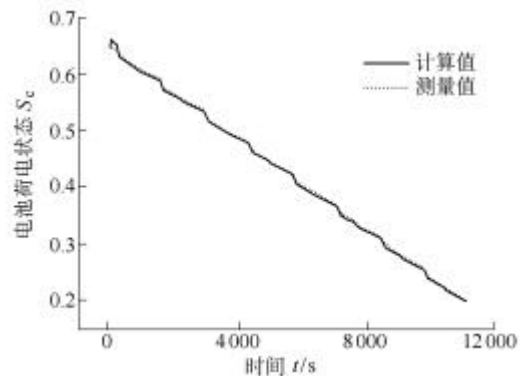


图 4 SOC 估计结果

### 4 结论

(1) 利用单变量的镍氢电池组状态空间模型,基于卡尔曼滤波进行 SOC 估计适合于电池工作为动态的混合动力汽车,也同样适用于那些电池状态变化不剧烈的场合。并且该方法具有较小的计算量,可直接应用于现有的电池管理系统而不需要提高硬件指标。

(2) 研究电池组的 SOC 估计方法更适用于整车应用。电池单体之间的不均匀性问题会影响 SOC 的估计精度,当对电池组进行整体建模时单体之间的不均匀性反映不出来,因此需要研究单体模型和整个电池组之间的差异,以及考虑温度变化等因素的影响,这是该方法需要进一步改进的地方。

### 参 考 文 献

- 1 Piller S, Perrin M, Jossen A. Methods for state of charge determination and their application. J. Power Sources, 2001,

- 96 : 113 ~ 120
- 2 Gregory L P. Kalman-Filter SOC Estimation for LiPB HEV Cells, EVS19, 2002
  - 3 Gregory L P. LiPB Dynamic Cell Models for Kalman-Filter SOC Estimation, EVS19, 2002
  - 4 邓自立 . 卡尔曼滤波与维纳滤波 . 黑龙江 : 哈尔滨工业大学出版社 , 2001

## STUDY ON ESTIMATING OF THE STATE OF CHARGE OF NI/MH BATTERY PACK FOR ELECTRIC VEHICLE

*Wang Junping*

*(School of Mechanical Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)*

*Chen Quanshi Lin Chengtao*

*(State Key Laboratory of Automobile Safety & Energy  
Conservation, Tsinghua University, Beijing 100084)*

**Abstract :** The FUDS is used to charge and discharge the Ni/MH battery pack and the battery's state space model with single state is built. Take the SOC as the state of the system the estimating SOC based on Kalman-filtering method is studied. The max relatively error of the estimating results is 2.15%. This method is suit for the HEV where the batteries working in dynamic state or silent state. This method has less computation burden and is suitable for application.

**Key words :** Ni/MH battery pack State of charge  
Kalman filtering method

作者简介：王军平，男，1974 年出生，博士后。主要研究方向为智能控制和电动汽车等。

E-mail : wangjunping@tsinghua.org.cn