

# 辅助混合动力电动汽车技术研究(Ⅶ) ——混合动力电动汽车电池荷电状态估计

张彦琴, 周大森

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 为了对混合动力电动汽车用电池组荷电状态进行精确估计, 减少电量累积方法前期试验的工作量和运行中的误差累积, 研究和应用了卡尔曼滤波法. 在电池等效电路模型的基础上, 建立了电池组系统的状态方程和测量方程, 根据汽车运行时对电池电流和电压的实时检测数据, 通过滤波算法估计模型中的开路电压, 并由此计算电池组的荷电状态. 实验表明, 卡尔曼滤波在电动汽车电池组荷电状态估计方面具有应用潜力.

**关键词:** 荷电状态; 等效电路模型; 开路电压; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** U 469.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2007)03-0311-04

电池组的荷电状态(state of charge, 简称为 SOC, 其值计为  $S$ )是混合动力电动汽车电池管理系统制定控制策略的重要依据. 美国先进电池联合会对电池荷电状态的定义为电池中的剩余容量(A·h)与在相同放电率条件下电池的额定容量之比<sup>[1]</sup>. 假定一块完全充满的电池在放电过程已放出容量为  $\int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$ , 电池的额定容量为  $Q_0$ , 则此时电池的荷电状态表示为

$$S = \frac{Q_0 - \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau}{Q_0} \quad (1)$$

铅酸电池的荷电状态和开路电压都是  $H_2SO_4$  溶液浓度的函数, 可以通过估计电池的开路电压来确定电池的荷电状态, 表示为

$$\begin{aligned} U_o(t) &= a \cdot S(t) + b \\ S(t) &= \frac{U_o(t) - b}{a} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $U_o(t)$ 为电池的开路电压(V);  $S(t)$ 为电池荷电状态(%);  $b$ 为荷电状态为0(%)时的电池开路电压(V);  $a$ 可以通过荷电状态为0和100%的电池开路电压之差求得.

在电动汽车用电池荷电状态估计中, 目前广泛使用的方法是开路电压方法结合电量累积方法<sup>[2-3]</sup>: 先通过检测电池组在无负载开路条件下的端电压, 根据开路电压与荷电状态的对应关系确定电池初始容量; 在汽车运行中, 将通过电池的电流对时间进行积分累加起来计量已用容量, 剩余容量是初始容量与已用容量之差. 由于电池的放电电流、电解液温度和电池的循环寿命对容量有较大影响, 已用容量的计算要考虑上述因素的影响, 一般要通过大量的稳态试验, 包括从经验公式中获得各种影响因素与容量间的近似数量关系<sup>[4]</sup>. 这种方法在混合动力电动汽车使用过程中, 由于长时间无法使算法重置, 会造成较大的累积误差.

卡尔曼滤波可最优地利用系统的测量值, 估计系统中无法直接测量的内部状态参数. 目前已有文献将这一技术应用于电池荷电状态估计<sup>[5-7]</sup>. 本文在建立电池等效电路模型的基础上, 基于卡尔曼滤波估计电池的开路电压, 从而实现了对电池荷电状态的估计.

收稿日期: 2006-06-23.

基金项目: 北京市教委重点项目(P050501-02).

作者简介: 张彦琴(1971-), 女, 山西侯马人, 讲师.

## 1 电池电路模型及状态方程

卡尔曼滤波利用系统的观测数据去找到最小均方误差的状态向量的估计值。其原理在于,用系统模型仿真实际系统的运行,在相同的系统输入条件下,用实际系统输出与模型输出比较,其差异为输出误差,用该误差与卡尔曼增益矩阵相乘,以调整系统状态估计值使其更接近于系统状态。

基于卡尔曼滤波的电池荷电状态估计,首先要建立系统的模型,这个模型要能仿真真实系统的运行情况,描述系统状态参数和输入、输出之间的关系。本文采用了电池的等效电路模型<sup>[5]</sup>,如图1所示,模型既可应用于单体电池,也可应用于电池组。等效电路中的电动势在数值上等于电池的开路电压  $U_o$ ,  $C$  代表极化电容,  $R_d$ ,  $R_c$  分别代表放电和充电过程的电阻,  $R_b$  代表欧姆电阻,这些值在充放电过程会随着电池荷电状态变化而变化。

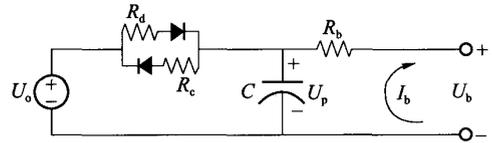


图1 电池的等效电路模型

Fig.1 The equivalent circuit model of batteries

上述模型对系统在放电过程的状态变化的描述可表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_p = -\frac{1}{R_d C} U_p + \frac{1}{R_d C} U_o - \frac{I_b}{C} \\ U_b = U_p - I_b R_b \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $U_p$  为电容电压;  $U_b$  为电池端电压;  $I_b$  为电池负载电流,规定放电时为正。

## 2 卡尔曼滤波估计算法及试验

### 2.1 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波是一种递推滤波,因此要建立系统状态的递推关系为

$$\mathbf{x}(k) = \Phi(k-1)\mathbf{x}(k-1) + \omega(k-1) \quad (4)$$

建立系统的观测方程为

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (5)$$

其中  $\mathbf{x}(k)$  为系统状态向量序列,  $\mathbf{z}(k)$  为系统观测向量序列,  $\omega_k$ ,  $\mathbf{v}_k$  为互不相关零均值白噪声序列,其协方差矩阵分别为  $\mathbf{Q}_k$ ,  $\mathbf{R}_k$ , 即,  $\omega_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k)$ ,  $\mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k)$ , 且对所有  $j, k$ , 有  $E[\omega_k \mathbf{v}_j^T] = 0$ <sup>[8]</sup>。

为此,对式(3)进行变换,设系统状态分量为

$$\chi_1 = U_p, \chi_2 = \frac{1}{R_d C}, \chi_3 = \frac{U_o}{R_d C}, \chi_4 = \frac{1}{C}, \chi_5 = R_b \quad (6)$$

假设状态分量为—阶马可夫有色噪声,则

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1 = -\chi_1 \chi_2 + \chi_3 - I_b \chi_4 + \omega_1 \\ \dot{\chi}_2 = \alpha_2 + \omega_2 \\ \dot{\chi}_3 = \alpha_3 + \omega_3 \\ \dot{\chi}_4 = \alpha_4 + \omega_4 \\ \dot{\chi}_5 = \alpha_5 + \omega_5 \\ V_b = \chi_1 - I_b \chi_5 + v \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\omega_i$ ,  $v$  为互不相关白噪声过程,这样将系统状态方程变换为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + v(t) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中, } \mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} -\chi_2(t) & 0 & 1 & -I_b(t) & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -I_b(t)].$$

考虑微分方程(8)的解为

$$\mathbf{x}(t) = \Phi(t, t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) \boldsymbol{\omega}(\tau) d\tau \tag{9}$$

式中  $\Phi(t, t_0)$  为系统转移矩阵. 假设系统是平稳的, 在采样间隔  $T$  内,  $\mathbf{F}$  矩阵是定常的, 将上述连续方程离散化得

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k) = \Phi(k-1)\mathbf{x}(k-1) + \boldsymbol{\omega}_d(k-1) \\ z(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + v(k) \end{cases} \tag{10}$$

其中  $\Phi(k) = e^{\mathbf{F}_k T}$ .

### 2.2 系统参数试验及初始化

混合动力电动汽车上电池组由 18 块额定电压为 12 V 的水平铅酸电池串联而成, 按照开路电压与荷电状态的试验结果, 电池组稳定开路电压为 234 V 时,  $S = 100\%$ ; 电池组电压为 210 V 时,  $S = 0$ .

算法初始化内容包括状态向量初值、影响状态向量噪声的协方差矩阵、影响输出的噪声协方差及状态向量误差的协方差.

影响输出的噪声为  $v$ , 称为观测噪声, 可认为由传感器引起, 并认为是零均值的白噪声.

影响状态向量的动态噪声为  $\boldsymbol{\omega}$ , 反映了扰动对系统状态的影响, 对于  $n$  维向量, 其噪声的协方差矩阵应为  $n \times n$  阶矩阵, 假设噪声的扰动分量互不相关, 这样就可将噪声的协方差矩阵变换为对角矩阵, 再分别确定对各自分量扰动的协方差.

状态向量误差的协方差矩阵也应给出, 虽然无法获知所给初值的估计误差, 但考虑程序的要求, 只要给出非 0 矩阵即可, 其值不影响程序的收敛过程和收敛值. 在程序运行中, 系统可自行修改确定.

状态向量的初值可以按照经验值给定, 只要数量级正确即可, 因为算法可以根据输入和输出关系将取值向系统正常值收敛. 图 2(a) 中, 当给定的初值偏离正常电压值时, 算法在 1 min 内将开路电压收敛至正常范围.

### 2.3 试验结果及分析

对混合动力电动汽车用电池组进行了荷电状态算法试验, 汽车运行中, 对动力电池组的电压和电流进

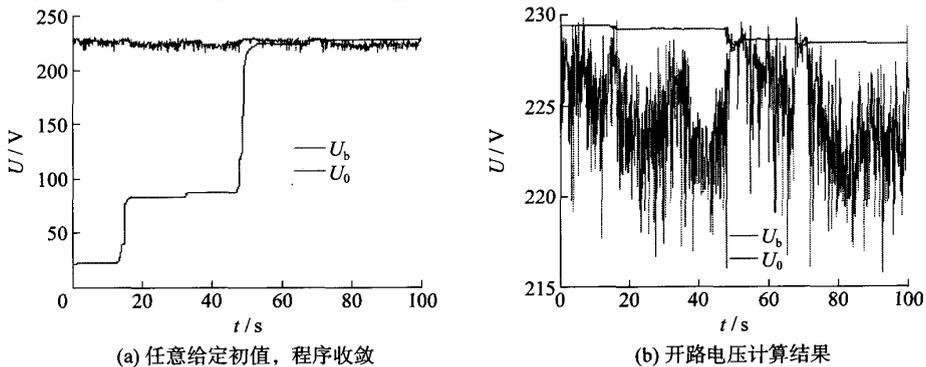


图 2 卡尔曼滤波试验结果

Fig.2 Estimating result of Kalman filter algorithm

行实时检测,输出频率为 10 Hz,对试验数据运用卡尔曼滤波算法对电池组开路电压进行预测,程序收敛,并给出了开路电压的预测值,如图 2(b)所示。

道路试验结束后,对电池组在静置过程中电压的恢复进行试验检测,并认为电池组静置后的稳定电压为电池组开路电压。与计算值比较,电压预测值的绝对误差为 2.05 V,相对误差为 8.54%。

### 3 结束语

在电池等效电路模型的基础上应用卡尔曼滤波对模型中电动势进行辨识,可以实现对电池组开路电压的估计,在此基础上可以预测电池组荷电状态。数值试验表明,该算法可以将开路电压很快收敛至真值附近,且状态向量初值的设定不影响系统估值。

#### 参考文献:

- [1] USABC. Electric vehicle battery test procedures manual[M/OL]. [2003-08-10]. [http://avt.inl.gov/battery/pdf/usabc\\_manual\\_rev2.pdf](http://avt.inl.gov/battery/pdf/usabc_manual_rev2.pdf) 2.
- [2] SUN Feng-chun, ZHANG Cheng-ning, GUO Hai-tao. Battery management system with state of charge indicator for electric vehicles[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1998, 7(2): 166-171.
- [3] 林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车 SOC 估计方法原理与应用[J]. 电池, 2004, 34(5): 376-378.  
LIN Cheng-tao, WANG Jun-ping, CHEN Quan-shi. Methods for state of charge estimation of EV batteries and their application[J]. Battery Bimonthly, 2004, 34(5): 376-378. (in Chinese)
- [4] 张彦琴, 周大森, 冯能莲, 等. 辅助混和动力电动汽车技术研究(IV)[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(9): 825-828.  
ZHANG Yan-qin, ZHOU Da-sen, FENG Neng-lian, et al. Study on the technology of auxiliary-hybrid electric vehicles(IV)[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(9): 825-828. (in Chinese)
- [5] SHUO Pang, JAY F, JIE Du. Battery state-of-charge estimation[C]//Proceedings of the American Control Conference. Arlington: VA, 2001: 1644-1649.
- [6] SABINE P, MARION P, ANDRESS J. Methods for state-of-charge determination and their applications[J]. Journal of Power Source, 2001, 96: 113-120.
- [7] PLETT G L. Extended kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1 background[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134: 252-261.
- [8] 盖尔布 A. 应用最优估计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 57-179.

## Study on the Technology of Auxiliary-hybrid Electric Vehicle(VII): Estimating the State of Charge of Battery Pack in Hybrid Electric Vehicles

ZHANG Yan-qin, ZHOU Da-sen

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** To accurately estimate the state-of-charge of battery pack in hybrid electric vehicles, to reduce the experimental work before application of the Ampere hour counting method, and to eliminate the accumulation of errors, the Kalman filter is developed to application. Based on the equivalent circuit model of the battery pack, the dynamic state and measurement equations are established, by processing the data collected from the current and voltage of battery pack in real vehicle testing. The algorithm developed by using Kalman filter can estimate the open circuit voltage of battery pack, then state of charge can be calculated. It indicates that Kalman filter has potential for estimating state of charge of batteries in electric vehicles.

**Key words:** state of charge; equivalent circuit model; open circuit voltage; Kalman filter