

锂离子电池荷电状态估计: 非线性观测器方法

张云, 张承慧, 崔纳新

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 电池荷电状态(state of charge, SOC)的准确估计是电动汽车有效实施能量管理的基本前提和安全高效运行的重要保障. 为降低电池系统因迟滞效应和非线性因素对SOC估计产生的不利影响, 本文基于Lipschitz非线性系统观测器设计理论, 提出了一类电池SOC估计新方法. 基于该方法设计的观测器具有结构简单, 估计性能好等优点. 首先根据电池等价电路模型给出电池系统的数学描述, 进而利用脉冲放电实验数据计算出电池系统各参数值, 然后利用线性矩阵不等式方法求解出观测器增益矩阵, 最后利用城市道路循环(urban dynamometer driving schedule, UDDS)工况测试验证了观测器系统具有良好的跟踪性能.

关键词: 锂离子电池; 状态估计; 非线性观测器; 电池模型

中图分类号: TP20 **文献标识码:** A

Estimation of state-of-charge of lithium-ion battery: nonlinear observer method

ZHANG Yun, ZHANG Cheng-hui, CUI Na-xin

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

Abstract: The accurate estimation of the state-of-charge (SOC) in battery is the basic premise for the effective energy management and the important guarantee for safe and efficient operation for electric vehicles. To lower the adverse effects of the battery system due to hysteresis, nonlinearity and other factors on battery SOC estimation, we propose a new observer based on Lipschitz nonlinear system observer design theory. This new observer is advantageous in structure and estimate performance. The mathematical description of the battery system is derived based on the equivalent circuit model, the parameters of which are calculated by using the pulse discharge experiment data. The observer gain matrix is obtained by solving a linear matrix inequality. The desirable tracking performance of the observer is validated by the urban dynamometer driving schedule (UDDS) test.

Key words: lithium-ion battery; state estimation; nonlinear observer; battery model

1 引言(Introduction)

随着能源短缺与环境污染问题的日趋严重, 电动汽车作为极具发展潜力的“绿色”产业, 受到空前的关注. 众所周知, 电池是电动汽车的主要储能元件, 其技术瓶颈严重制约着电动汽车的规模发展. 延长电池寿命, 提高电池安全性对于电动汽车的使用成本、节能和安全性至关重要. 电池内部化学反应复杂, 电池特性很难预测. 与电池特性相关的参数有几种, 其中最关键的参数是电池荷电状态^[1].

准确获取电池SOC信息, 能够防止电池的过充与过放, 避免对电池造成不可逆的损坏; 能够提供给电池管理系统信息, 有效提高电池的使用寿命; 还可以给混合动力车辆控制单元提供信息, 提高车辆的燃油经济性. 这充分说明了电池SOC估计研究的重要性.

电池SOC是电池内部化学状态, 无法直接测量得到. 它必须借助于一些物理测量比如电池电压, 电流等信号来进行估计. 近些年来, 电池的SOC估计问题和电池管理技术逐渐引起了人们的广泛关注, 各种估算方法被相继提出. 如安时计量法^[2]、开路电压法等. Kitagawa等研究了安时计量法, 该方法通过累计流入或者流出电池的电量来估计电池的剩余电量. 它以安培小时简单计算出从蓄电池输出的电量或者输入蓄电池的电量. 如果充放电起始状态为SOC₀那么当前状态的SOC为

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t \eta i d\tau,$$

其中: C_N 为额定容量, η 为库仑效率. 公式中的电流符号规定为放电为正, 否则为负. 目前车上基本采用安时计量法, 它在短时间内可以实现剩余电量的

准确估计,但是随着累积误差的增加,精度会越来越差,因此常与其他方法结合使用^[3]. 开路电压法是利用电池负载电流为零时的开路电压来近似估计电池剩余电量. 因为电池开路电压与电池SOC成很好的线性关系^[4],该方法能够比较准确的估计电池剩余电量. 但是在测量电池开路电压时,必须将电池静止一段时间,所以该方法无法实现SOC的在线实时估计^[5].

针对上述估计方法的种种缺陷,人们又相继提出一些处理非线性能力较强的神经网络、模糊逻辑、支持向量机等智能方法^[6-8]. 该类方法建立了输入输出数据的一种非线性关系,能获得较高的估计精度,但缺陷是对训练样本数据依赖性强,当电池参数发生变化时估计误差会变大.

最近几年新兴的基于电路模型的卡尔曼滤波法、滑模观测器法等方法,因其闭环可以在线实时估计等优点,成为最近几年的研究热点^[9-11],其中卡尔曼滤波法最受关注. 卡尔曼滤波法是一种递推线性最小方差估计技术,它能够仅与部分状态相关的测量进行处理,得出从某种统计意义上讲误差最小的更多状态的估值. 但是该方法只能用于噪声服从高斯分布情况,一旦研究对象非线性特性稍强或者噪声特性不满足高斯分布时,卡尔曼滤波法估计性能会降低. 滑模观测器法假设系统未建模项上界已知,选取的切换增益 ρ 需在最坏情况下保证观测误差的收敛性,这样因切换增益过大而不可避免地引起抖振,使得SOC估计精度降低.

本文所提出的基于非线性观测器估计电池SOC的新方法能够克服上述方法的缺陷,有效克服电池迟滞效应给电池SOC估计带来的影响. 本文剩余部分组织如下: 第2节给出了电池系统模型和结构,提出了将要研究的问题及目标; 第3节给出了所引进观测器设计过程; 第4节给出了基于实验数据得到的模型参数及观测器增益矩阵,并通过UDDS循环工况测试比较本文方法、滑模观测器法在电池SOC估计方面的效果优劣; 第5节对本文做了进一步的概括和总结.

2 电池建模(Battery modeling)

精确估计电池SOC的重要前提和关键是建立一个有效的等效电池模型. 这里采用电动汽车仿真软件ADVISOR中的RC模型^[12]. 该模型将电池等效为阻容电路结构如图1所示,其中: 大电容 C_B 描述电池的储能能力,小电容 C_C 描述电池电极的表面效应; 3个电阻分别是端电阻 R_T 、容性电阻 R_C 及终止电阻 R_E ; V_B 表示电容 C_B 上的电压; V_C 表示电容 C_C 上的电压; V_t 表示电池端电压; I 表示电池端电流(充电为正,放电为负); I_E, I_C 为两支路电流.

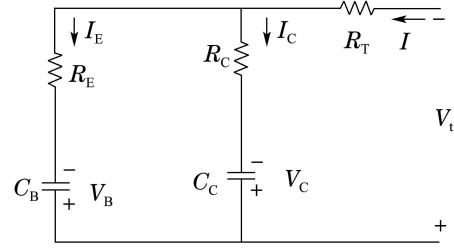


图1 电池模型

Fig. 1 Battery model

由基尔霍夫定律,电池端电压可分别表示为如下两种形式:

$$V_t = IR_T + I_C R_C + V_C, \quad (1)$$

$$V_t = IR_T + I_E R_E + V_B, \quad (2)$$

其中: I 为瞬时电流(充电为正,放电为负), $I_C = \dot{V}_C C_C$, $I_E = \dot{V}_B C_B$.

由图1可知 $I = I_C + I_E$, 又 $I_E = \dot{V}_B C_B$, 那么由式(1)和式(2)可得大电容 C_B 上的电压变化率为

$$\dot{V}_B = -\frac{V_B}{C_B(R_E + R_C)} + \frac{V_C}{C_B(R_E + R_C)} + \frac{IR_C}{C_B(R_E + R_C)}. \quad (3)$$

同理可得极化电容 C_C 上的电压变化率为

$$\dot{V}_C = -\frac{V_C}{C_C(R_E + R_C)} + \frac{V_B}{C_C(R_E + R_C)} + \frac{IR_E}{C_C(R_E + R_C)}. \quad (4)$$

为了便于判断电池系统的可观性,将端电压 V_t 表示为端电流 I 的函数,并将其纳入系统的状态变量中. 由式(1)和式(2)可得

$$V_t = \frac{R_C}{R_E + R_C} V_B + \frac{R_E}{R_E + R_C} V_C + \left(R_T + \frac{R_C R_E}{R_E + R_C}\right) I, \quad (5)$$

并由式(5)可得端电压 V_t 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_t = & \frac{R_C}{R_E + R_C} \dot{V}_B + \frac{R_E}{R_E + R_C} \dot{V}_C = \\ & \left[\frac{R_C}{C_B R_E (R_E + R_C)} - \frac{1}{C_C (R_E + R_C)} \right] V_t + \\ & \left[-\frac{R_C}{C_B (R_E + R_C)^2} + \frac{R_E}{C_C (R_E + R_C)^2} - \right. \\ & \left. \frac{R_C^2}{C_B R_E (R_E + R_C)^2} + \frac{R_C}{C_C (R_E + R_C)^2} \right] V_B + \\ & \left[\frac{R_E^2}{C_C (R_E + R_C)^2} - \frac{R_C R_T}{C_B R_E (R_E + R_C)} + \right. \\ & \left. \frac{R_T}{C_C (R_E + R_C)} + \frac{R_C R_E}{C_C (R_E + R_C)^2} \right] I. \quad (6) \end{aligned}$$

若令系统状态为 $x_1 = V_B, x_2 = V_C, x_3 = V_t$, 则

系统输入为 $u = I$ (流入为正, 流出为负), 输出为 $y = V_t$. 此时, 由式(3)–(4)(6)可以得到下列描述电池模型的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t), \\ y = \tilde{C}x(t), \end{cases} \quad (7)$$

这里:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_B(R_E+R_C)} & \frac{1}{C_B(R_E+R_C)} & 0 \\ \frac{1}{C_C(R_E+R_C)} & -\frac{1}{C_C(R_E+R_C)} & 0 \\ \tilde{A}_{31} & 0 & \tilde{A}_{33} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} \frac{R_C}{C_B(R_E+R_C)} \\ \frac{R_E}{C_C(R_E+R_C)} \\ \tilde{B}_{31} \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix},$$

其中:

$$\begin{cases} \tilde{A}_{31} = -\frac{R_C}{C_B(R_E+R_C)^2} + \frac{R_E}{C_C(R_E+R_C)^2} - \frac{R_C^2}{C_B R_E (R_E+R_C)^2} + \frac{R_C}{C_C(R_E+R_C)^2}, \\ \tilde{A}_{33} = \frac{R_C}{C_B R_E (R_E+R_C)} - \frac{1}{C_C(R_E+R_C)}, \\ \tilde{B}_{31} = \frac{R_E^2}{C_C(R_E+R_C)^2} - \frac{R_C R_T}{C_B R_E (R_E+R_C)} + \frac{R_T}{C_C(R_E+R_C)} + \frac{R_C R_E}{C_C(R_E+R_C)^2}. \end{cases} \quad (8)$$

由此可得系统的观测矩阵如下:

$$O_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \tilde{A}_{31} & 0 & \tilde{A}_{33} \\ O_{31} & \frac{\tilde{A}_{31}}{C_B(R_E+R_C)} & \tilde{A}_{33}^2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

这里: $O_{31} = \frac{-\tilde{A}_{31}}{C_B(R_E+R_C)} + \tilde{A}_{31} \cdot \tilde{A}_{33}$, 且 $\tilde{A}_{31}, \tilde{A}_{33}$ 同式(8); 显然, O_b 总是满秩的, 即系统可观.

由于存在建模误差及噪声干扰, 状态方程(7)未必能够精确地刻画电池的动态特性(如因迟滞效应产生的非线性特性等), 因此在电池状态模型中加入非线性未建模动态 $\Delta\tilde{\Phi}(x)$ 以弥补建模误差. 如此, 一类描述电池特性的新动态方程可表示如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t) + \Delta\tilde{\Phi}(x), \\ y = \tilde{C}x(t). \end{cases} \quad (10)$$

电池系统在充放电过程中内部存在电化学反应, 电化学反应系统普遍存在迟滞效应^[13-14], 进而引起类三角函数非线性. 具体地讲, 电池在充电过程中所测得的端电压高于电池静止足够长时间同一SOC值

对应的电池真实端电压; 电池在放电过程中所测得的端电压低于电池静止足够长时间后同一SOC值对应的电池真实端电压. 混合动力电动汽车用电池始终处于频繁的充放电状态下, 实时采集到的电池端电压有时高于真实值, 有时低于真实值, 电压误差随SOC变化成近似三角函数分布, 故假定电池系统非线性部分满足关于 x 的局部Lipschitz条件

$$\|\Delta\tilde{\Phi}(x_1) - \Delta\tilde{\Phi}(x_2)\| \leq \Delta\tilde{\gamma}\|x_1 - x_2\|, \quad (11)$$

这里 $\Delta\tilde{\gamma} \in \mathbb{R}^+$ 是不依赖于 x 的Lipschitz常数.

电池模型给出后, 需寻求适合于电池系统的理论方法, 以准确估计电池SOC. 下一节将给出针对该类系统所提出估计方法的详细理论背景与设计过程.

3 非线性观测器设计(Nonlinear observer design)

非线性系统不同于线性系统, 其观测器设计没有统一的方法, 是按照系统分类进行的. 早在1973年Thau等人就开始了对于Lipschitz非线性系统观测器设计的研究并得到观测器存在的充分条件^[15]. 随后Raghavan等人于1992年、1994年相继给出观测器设计过程^[16-17], 但都没有给出保证观测器稳定观测器增益必须满足的条件. 随后, Rajamani完善了该理论, 给出了保证观测器渐近稳定的充分必要条件, 并形成了基于最优化方法的观测器设计过程. 国内也有许多学者致力于该类系统的观测器设计研究, 并取得了一定的成果^[18-19]. 本文引进了参考文献[20]中该类非线性观测器设计技术, 具体如下:

考虑如下形式的非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \Gamma(y, u, t) + \Phi(x), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (12)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态; $u \in \mathbb{R}^m$ 和 $y \in \mathbb{R}^p$ 分别是系统输入和输出; $\Gamma: \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^m \times [t_0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^n$ 是已知的连续函数; A 和 C 为适当维数矩阵; Φ 满足关于 x 的局部Lipschitz条件 $\|\Phi(x_1) - \Phi(x_2)\| \leq \gamma\|x_1 - x_2\|$, 其中 $\gamma \in \mathbb{R}^+$ 是与 x 无关的Lipschitz常数.

对系统(12), 设计如下形式的观测器:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + \Gamma(y, u, t) + \Phi(\hat{x}) + L(y - \hat{y}), \quad (13)$$

这里 $L \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 为待定的增益矩阵.

若令 $e = x - \hat{x}$, 则由式(12)和式(13)可得到观测器的误差方程

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + \Phi(x) - \Phi(\hat{x}). \quad (14)$$

以下定理(参见文献[20])旨在找到一个能使误差系统渐近稳定的增益矩阵 L .

定理 1 考虑非线性系统(12)及观测器(13). 若存在常数 $\epsilon > 0$ 与 $\xi > 0$ 以及适当维数矩阵 $P > 0$ 与

F 使得如下线性矩阵不等式最优问题有解:

$$\min(\xi),$$

$$\text{s.t. } A^T P + PA - C^T F^T - FC < -I_n - \epsilon I_n, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2}\xi I_n & P \\ P & \frac{1}{2}\xi I_n \end{bmatrix} > 0, \quad (16)$$

则观测误差动态(14)是渐近稳定的,并能找到观测器增益矩阵及最大容许Lipschitz常数分别为

$$\begin{cases} L = P^{-1}F, \\ \gamma^* = \max(\gamma) = \xi^{-1}. \end{cases} \quad (17)$$

证明见文献[20].

推论 1 假定实际取系统Lipschitz常数为 γ ,利用定理1求得系统的最大Lipschitz常数为 γ^* ,则所设计的观测器(13)可以容许任意Lipschitz常数小于等于 $\gamma^* - \gamma$ 的非线性不确定性 $\Delta\Phi(x)$ 的存在.

证 假设非线性不确定性 $\Delta\Phi(x)$ 满足条件 $\|\Delta\Phi(x_1) - \Delta\Phi(x_2)\| \leq \Delta\gamma\|x_1 - x_2\|$,因为

$$\begin{aligned} & \|\Phi(x_1) + \Delta\Phi(x_1) - \Phi(x_2) - \Delta\Phi(x_2)\| \leq \\ & \|\Phi(x_1) - \Phi(x_2)\| + \|\Delta\Phi(x_1) - \Delta\Phi(x_2)\| \leq \\ & \gamma\|x_1 - x_2\| + \Delta\gamma\|x_1 - x_2\| = \\ & (\gamma + \Delta\gamma)\|x_1 - x_2\|, \end{aligned} \quad (18)$$

所以由参考文献[15]中定理知, $\Phi(x) + \Delta\Phi(x)$ 可以是Lipschitz常数小于等于 γ^* 的任意非线性项,即

$$\gamma + \Delta\gamma \leq \gamma^* \Rightarrow \Delta\gamma \leq \gamma^* - \gamma. \quad (19)$$

证毕.

4 实验与UDDS循环工况测试结果(Experiment and UDDS driving cycle test results)

本节旨在通过实验和UDDS循环工况测试两小节评价本文设计估计器在估计电池SOC方面的性能.

4.1 实验结果(Experiment results)

为得到模型参数,这里选择深圳环宇达电池科技有限公司的磷酸铁锂电池(PTI-48 V/10Ah-1)作为研究对象.电池组由16节电池单体串联,其标称电压为48 V,额定容量为10 Ah.

4.1.1 脉冲放电实验(Pulse discharge experiment)

脉冲放电实验的目的是为了计算电池系统模型参数及系统(10)中的系数矩阵,同时基于第3节非线性系统观测器设计方法求解系统(10)观测器增益矩阵.

主要过程如下:

1) 以8安(0.8C)进行脉冲放电,同时监测电池端

电压(见图2),获取实验数据并基于如下公式^[21]计算各电池参数:

$$\begin{cases} Z_{\text{bulk}} = \frac{V_3 - V_2}{I_d} = 0.35 \Omega, \\ R = \frac{Z_{\text{bulk}}}{1.244} = 0.28135 \Omega, \\ R_T = R = 0.28135 \Omega, \\ R_E = \frac{R}{1.1} = 0.25454 \Omega, \\ R_C = \frac{R}{3} = 0.0938 \Omega, \\ C_B = \frac{2\text{Rated}(\text{ampere} \cdot \text{sec}) \cdot V_{100\% \text{SOC}}}{V_{100\% \text{SOC}}^2 - V_{0\% \text{SOC}}^2} = \\ 4786.32F, \\ C_C = -\frac{\delta t}{(R_E + R_C)\ln(1 - \frac{V_4 - V_3}{V_1 - V_3})} = 69.76F, \end{cases} \quad (20)$$

式中: Z_{bulk} 是电池组的阶跃电流阻抗, R 为计算过程的中间变量,Rated(ampere · sec)为电池的标称容量, $V_{100\% \text{SOC}}$ 为SOC = 1时电池开路电压值, $V_{0\% \text{SOC}}$ 为SOC = 0时电池开路电压值.

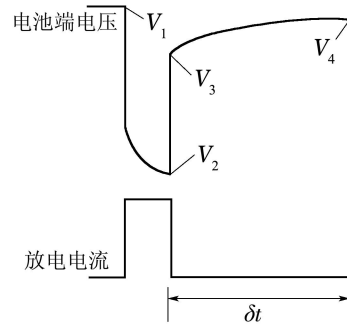


图2 8安放电电池端电压

Fig. 2 Cell terminal voltage when discharge of a current 8A

2) 利用模型参数 C_B, C_C, R_E, R_C, R_T 求出系统(10)中的矩阵

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -0.0006 & 0.0006 & 0 \\ 0.0411 & -0.0411 & 0 \\ 0.04086 & 0 & -0.04109 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0105 \\ 0.0220 \end{bmatrix}, \tilde{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T,$$

并基于第3节非线性观测器设计方法求解系统(10)的观测器增益矩阵 \tilde{L} 可得

$$P = \begin{bmatrix} 2671.8 & -598.4 & -1146.9 \\ -598.4 & 2866.5 & -544.5 \\ -1146.9 & -544.5 & 2626.1 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 132.7 \\ 44.1 \\ 1959.4 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{L} = [0.5870 \ 0.3418 \ 1.0734]^T, \gamma^* = 0.0142.$$

4.1.2 恒流放电实验(Constant discharge experiment)

恒流放电的目的是为了得出开路电压与SOC的对应关系及验证所设计观测器的有效性. 具体过程如下:

1) 将电池满充, 以2安(0.2C)进行恒流放电, 每次放出标称容量的10%并静止足够长的时间, 记录静止后的电池端电压, 如此循环得出开路电压 V_{oc} 与SOC的对应关系:

$$V_{oc} = 1.173 \times SOC^2 + 2.0803 \times SOC + 50.2607.$$

2) 将测量电流和电压分别作用于电池模型和观测器, 验证设计观测器有效性如图3、图4所示.

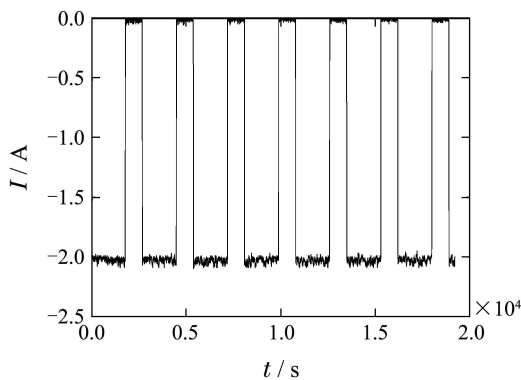


图3 放电电流

Fig. 3 Discharge current

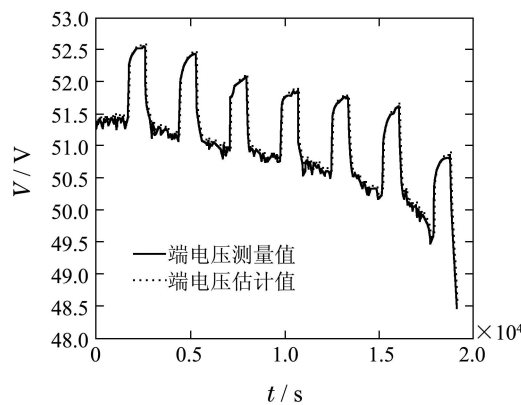


图4 电池端电压

Fig. 4 Battery terminal voltage

4.2 UDDS循环工况测试结果(UDDS driving cycle test results)

在基于电路模型的SOC估计方法中, 选取可以处理含有未建模非线性系统的滑模观测器方法^[9]对比验证本文方法的有效性. 取5个UDDS循环工况下的数据并测试各估计器性能, 结果如图5至图7所示. 从图7可以看到, 本文方法估计误差迅速收敛到1%内, 滑模观测器方法由于切换增益引起的抖振, 估计误差最后稳定在2%内, 测试结果充分验证了本文方法的有效性.

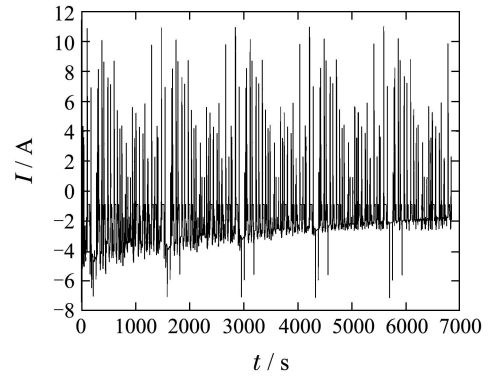


图5 UDDS测试电流

Fig. 5 UDDS test current

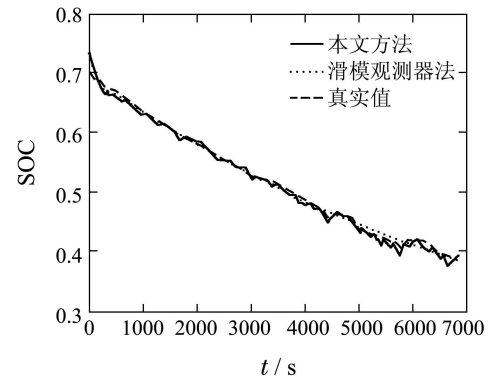


图6 SOC真值及估计输出

Fig. 6 The true and estimation SOC outputs

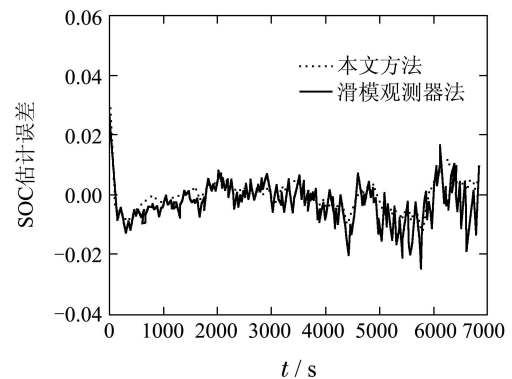


图7 SOC估计误差

Fig. 7 Estimate error of SOC

5 结论(Conclusions)

基于Lipschitz非线性系统观测器设计理论, 本文提出了一种电池SOC估计新方法. 基于新方法设计的估计器用于UDDS循环工况测试, 并与滑模观测器法对比, 结果充分验证了基于本文方法所设计的观测器具有更好的鲁棒性和更高的估计精度.

参考文献(References):

[1] CHENG K W E, DIVAKAR B P, WU H J, et al. Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(1): 76 – 88.

- [2] ALZIEU J, SMIMITE H, GLAIZE D. Improvement of intelligent battery controller: state-of-charge indicator and associated functions [J]. *Journal of Power Sources*, 1997, 67(1/2): 157 – 161.
- [3] BHANGU B S, BENTLEY P, STONE D A, et al. Observer techniques for estimating the state of charge and state of health of VR-LABs for hybrid electric vehicles [C] // *IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion*. Chicago: IEEE, 2005: 780 – 789.
- [4] PANG S, FARRELL J, DU J, et al. Battery state-of-charge estimation [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Arlington: IEEE, 2001, 2: 1644 – 1649.
- [5] PILLER S, PERRIN M, JOSSEN A. Methods for state-of-charge determination and their applications [J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 96(1): 113 – 120.
- [6] CHAN C C, LO E W C, SHEN W X. The available capacity computation model based on artificial neural network for lead-acid batteries in electric vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2000, 87(1/2): 201 – 204.
- [7] MALKHANDI S. Fuzzy logic-based learning system and estimation of state-of-charge of lead-acid battery [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2006, 19(5): 479 – 485.
- [8] SHI Q S, ZHANG C H, CUI N X. Estimation of battery state-of-charge using v-support vector regression algorithm [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2008, 9(6): 759 – 764.
- [9] KIM I S. Nonlinear state of charge estimation for hybrid electric vehicle battery [J]. *IEEE Transactions of Power Electronics*, 2008, 23(4): 2027 – 2034.
- [10] HAN J, KIM D, SUNWOO M. State-of-charge estimation of lead-acid batteries using an adaptive extended Kalman filter. [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 188(2): 606 – 612.
- [11] HE H W, XIONG R, ZHANG X W, et al. State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended kalman filter based on an improved thevenin model [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1461 – 1469.
- [12] JOHNSON V H. Battery performance models in ADVISOR [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 321 – 329.
- [13] PLETT G L. Extended kalman filtering for battery management system of LiPB-based HEV battery packs, part 2: modeling and identification [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 134(2): 262 – 276.
- [14] SRINIVASAN V, WEIDNER J W, NEWMAN J. Hysteresis during cycling of nickel hydroxide active material [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148(9): A969 – A980.
- [15] THAU F E. Observing the state of non-linear dynamic systems [J]. *International Journal of Control*, 1973, 17(3): 471 – 479.
- [16] RAGHAVAN S. *Observers and compensators for nonlinear systems with application to flexible joint robots* [D]. San Francisco: University of California Berkeley, 1992.
- [17] RAGHAVAN S, HEDRICK J K. Observer design for a class of nonlinear systems [J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(2): 515 – 528.
- [18] 张宪福, 程兆林. 非线性时滞系统的观测器设计 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 795 – 799.
(ZHANG Xianfu, CHENG Zhaolin. Observer design for nonlinear time-delay systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 795 – 799.)
- [19] 刘艳红, 李春文, 王玉振, 等. Lipschitz广义非线性系统观测器设计 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(2): 205 – 209.
(LIU Yanhong, LI Chunwen, WANG Yuzhen, et al. Observer design for lipschitz nonlinear singular systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(2): 205 – 209.)
- [20] ABBASZADEH M, MARQUEZ H J. A robust observer design method for continuous-time lipschitz nonlinear systems [C] // *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. Manchester: IEEE, 2006: 3795 – 3800.
- [21] 林成涛, 仇斌, 陈全世. 电动汽车电池功率输入等效电路模型的比较研究 [J]. 汽车工程, 2006, 28(3): 229–234.
(LIN Chengtao, CHOU Bin, CHEN Quanshi. A comparative study on power input equivalent circuit model for electric vehicle battery [J]. *Automotive Engineering*, 2006, 28(3): 229 – 234.)

作者简介:

张云 (1980–), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电池荷电状态估计与电池管理技术、控制理论与应用等, E-mail: xiaoyun9335@163.com;

张承慧 (1963–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电动汽车、工程优化控制、智能控制、控制理论与应用等, E-mail: zchui@sdu.edu.cn;

崔纳新 (1968–), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电动汽车、工程优化控制、电力电子与电力传动等, E-mail: cuinx@sdu.edu.cn.