



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110795851 A

(43)申请公布日 2020.02.14

(21)申请号 201911046731.9

(22)申请日 2019.10.30

(71)申请人 西安理工大学

地址 710048 陕西省西安市金花南路5号

(72)发明人 庞辉 牟联晶 郭龙 武龙星

晋佳敏

(74)专利代理机构 北京国昊天诚知识产权代理

有限公司 11315

代理人 杨洲

(51) Int. Cl.

G06F 30/20(2020.01)

G01R 31/367(2019.01)

G01R 31/387(2019.01)

权利要求书3页 说明书9页 附图7页

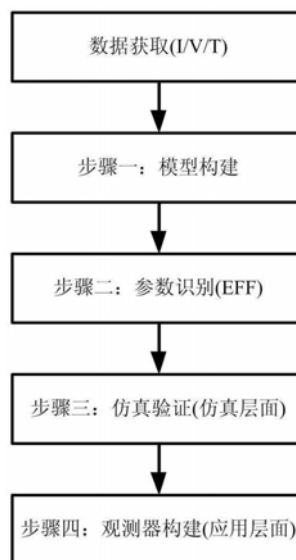
## (54)发明名称

一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法

## (57)摘要

本发明公开了一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,包括以下步骤:步骤1,构建考虑环境温度的锂离子电池等效电路模型;步骤2,模型参数的识别;步骤3,结合不同工况步骤1建立的模型进行仿真层面验证;步骤4,构建考虑环境温度的状态观测器对步骤1建立的模型进行应用层面验证。本发明方法能够最终实现更宽温度范围的电池荷电状态估计,对电动车辆电池管理系统的状态估算和能量管理具有重大意义,解决了由不同环境温度引起的模型不准确而导致的状态估算误差较大等问题,有效提高了动力电池组的利用效率、保证了电池组的使用寿命。在电动汽车中,对保护蓄电池、提高整车性能、降低对动力电池的要求、提高经济性都起着重大作用。

CN 110795851 A



1. 一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1,构建考虑环境温度的锂离子电池等效电路模型;

步骤2,模型参数的识别;

步骤3,结合不同工况步骤1建立的模型进行仿真层面验证;

步骤4,构建考虑环境温度的状态观测器对步骤1建立的模型进行应用层面验证。

2. 根据权利要求1所述的考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,其特征在于,步骤1中构建的模型的数学关系式为:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{I_t}{C_1} - \frac{U_1}{R_1 C_1} \\ \dot{U}_2 = \frac{I_t}{C_2} - \frac{U_2}{R_2 C_2} \\ U_t = U_{OC}(SOC, T) - U_1 - U_2 - I_t R_0 - I_t R_{temp} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $U_t$ 为电池端电压; $U_{OC}(SOC, T)$ 表示开路电压(Open Circuit Voltage, OCV); $R_0$ 为欧姆内阻; $R_1$ 和 $C_1$ 分别为电化学极化电阻和电化学极化分数阶电容; $R_2$ 和 $C_2$ 分别为浓度极化电阻和浓度极化分数阶电容; $R_{temp}$ 表示随环境温度的变化导致的电池内阻的变化量; $I_t$ 表示负载电流; $U_1$ 和 $U_2$ 分别表示电化学极化电压和浓度极化电压。

3. 根据权利要求2所述的考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,其特征在于,步骤2中模型的参数识别采用指数函数拟合法(Exponential Function Fitting, EFF)对模型参数进行辨识,分别得到不同环境温度下充电和放电条件下的模型参数,具体公式:

$$\begin{cases} R_{0, Disc} = \left| \frac{U_A - U_B}{I_t} \right| \\ R_{0, Cha} = \left| \frac{U_C - U_D}{I_t} \right| \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} U_t &= U_{OC}(SOC, T) - R_1 I_t e^{-t/\tau_1} - R_2 I_t e^{-t/\tau_2} - I_t R_0 - I_t R_{temp} \\ &= m_0 - m_1 e^{-\lambda_1 t} - m_2 e^{-\lambda_2 t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_1 = \frac{m_1}{I_t}, C_1 = \frac{1}{\lambda_1 R_1} \\ R_2 = \frac{m_2}{I_t}, C_2 = \frac{1}{\lambda_2 R_2} \\ R_{temp} = \frac{U_{OC}(SOC, T) - I_t R_0 - m_0}{I_t} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $R_{0, Disc}$ 和 $R_{0, Cha}$ 分别表示放电条件下和充电条件下的内阻;当停止给电池放电瞬间,电势降落,电势差表示为 $U_A - U_B$ ,当开始给电池充电瞬间,电势升高,电势差表示为 $U_C - U_D$ , $\tau_1 = R_1 C_1$ , $\tau_2 = R_2 C_2$ ;  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 为方程系数。

4. 根据权利要求3所述的考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,其特征在于,步骤3中结合不同工况对步骤1建立的模型进行仿真层面验证,具体为:

在MATLAB/Simulink环境下,搭建考虑环境温度影响的锂离子电池等效电路模型,其中

输入包括电流、温度,输出为电压;分别使用混合脉冲功率特性曲线工况 (Hybrid Pulse Power Characterization, HPPC) 和US06工况 (StandardUS06 Driving Cycle, US06) 分别在四种不同环境温度下进行验证,并得到相应的平均绝对值误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和均方根误差 (RootMean Squared Error, RMSE)。

5. 根据权利要求4所述的考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,其特征在于,步骤4中构建考虑环境温度的状态观测器对步骤1建立的模型进行应用层面验证,具体为:

步骤4.1、建立电池系统离散的状态空间模型:

根据模型的数学方程式,联合电池安时积分法原理,将电池的SOC与模型的电化学极化电压和浓度极化电压作为状态变量,选取测量的电池端电压 $U_t$ 作为观测量,建立状态预测方程与观测方程(5)所示,

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} SOC(k+1) \\ U_1(k+1) \\ U_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s \eta}{C_{cap}} \\ R_1(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_2}}) \end{bmatrix} I(k) \\ U_t(k) = \begin{bmatrix} \frac{dU_{oc}(SOC)}{dSOC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + [-R_0 + R_{temp}] I(k) \end{cases} \quad (5)$$

首先,定义系统状态矩阵 $x_k$ ,定义系统输出 $y_k$ 和系统输入 $u_k$ :

$$\begin{cases} x_k = [SOC_k \quad U_{1,k} \quad U_{2,k}] \\ y_k = U_{t,k} \\ u_k = I_{t,k} \end{cases} \quad (6)$$

$$SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{I_{t,k} \eta T_s}{C_{cap}} \quad (7)$$

具体算法公式:

$$\begin{cases} x_k = F_{k-1} x_{k-1} + B_{k-1} u_{k-1} + \omega_{k-1} \\ y_k = H_k x_k + D_k u_k + v_k \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \hat{x}_k^- = x_{k-1} + \dot{x}_{k-1} T_s \\ P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_{k-1} \\ K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k)^{-1} \\ e_k = y_k - (H_k \hat{x}_k^- + D_k u_k) \\ \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k e_k \\ P_k^+ = (I_k - K_k H_k) P_k^- \end{cases} \quad (9)$$

式中, $u$ 为系统输入, $\omega$ 为系统白噪声,均值为0,协方差为 $Q$ , $v$ 为测量白噪声,均值为0,

协方差为V,TS为采样周期,P<sup>-</sup>和P<sup>+</sup>分别为状态估计协方差先验估计和后验估计,K为卡尔曼增益,e为新息矩阵,I为单位矩阵,

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-T_s/\tau_1) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-T_s/\tau_2) \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} \frac{T_s \eta}{C_{\text{cap}}} \\ R_1(1 - \exp(-T_s/\tau_1)) \\ R_2(1 - \exp(-T_s/\tau_2)) \end{bmatrix}, \quad H_k = \begin{bmatrix} \frac{dU_{\text{oc}}(\text{SOC})}{d\text{SOC}} & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad D_k =$$

$[-(R_0 + R_{\text{temp}})]$ ,  $\eta$ 为库仑效率,并假设充电时为1,放电时为0.98, $C_{\text{cap}}$ 为电池额定容量;

步骤4.2、针对步骤4.1所构建模型,使用EKF算法进行SOC估计的具体估算过程:

1) 初始化:

在 $t_0$ 时刻,即 $k=0$ 时,设置状态观测器的初始值: $x_0, P_0, Q_0, R_0$ ;

2) 先验估计-预测:时间更新[状态从时间 $(k-1)^+$ 到时间 $(k)^-$ 的推算]

对于 $k=1, 2, \dots$ ,完成下面的先验估计(时间更新)操作,将状态和协方差估计从前一时刻 $(k-1)^+$ 推算到当前时刻 $(k)^-$ ,自适应扩展卡尔曼滤波器的时间更新方程表示如下:

系统状态预估:

$$\hat{x}_k^- = f(x_{k-1}, u_{k-1}) \quad (10)$$

误差协方差预估:

$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (11)$$

其中, $f(x_{k-1}, u_{k-1})$ 表示系统状态方程函数;

3) 后验估计-修正:测量更新[状态从时间 $(k)^-$ 到时间 $(k)^+$ 的推算]

此步骤用 $k$ 时刻的测量值 $y_k$ 校正状态估计和协方差估计,估计结果分别用 $\hat{x}_k^+$ 和 $P_k^+$ 表示,自适应扩展卡尔曼滤波器的测量更新方程表示如下:

新息矩阵:

$$e_k = y_k - (H_k \hat{x}_k^- + D_k u_k) \quad (12)$$

卡尔曼增益矩阵:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_{k-1})^{-1} \quad (13)$$

系统状态修正:

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k e_k \quad (14)$$

误差协方差修正:

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (15)$$

4) 时间尺度更新

将时刻 $(k)^+$ 的状态和协方差矩阵作为输出,准备 $(k+1)$ 时刻的状态估计。

## 一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于锂离子电池技术领域,具体地说,涉及一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,锂离子电池因其高比能量、高比功率、无记忆效应以及长循环寿命,在电动车领域得到了广泛的应用。为了确保电池组的安全可靠运行,必须通过电池管理系统提供准确和迅速的电池状态信息,如终端输出电压和荷电状态。此外,应该注意的是,由于电动汽车的工作条件可变,特别是在较高或较低的环境温度下,电池容量,内阻以及其他参数会发生相应地变化,从而对精确预测电池内部状态以及荷电状态的预估带来技术上的挑战。

[0003] 为了估算电池荷电状态,国内外许多学者开发了多种模型,其中应用最广泛的有电化学模型和等效电路模型。其中,电化学模型是基于第一性原理提出的,它描述了电池内部的微反应,各个参数有着具体的物理意义。然而,表述该模型的偏微分方程非常繁多且复杂,难以在实际应用中直接应用,多数情况下需要对模型进行简化。不同于电化学模型,等效电路模型已在动力电池管理系统得到了广泛应用,其建模简单、参数少以及对后续的状态计算、和能量管理都将会带来方便,实现起来也特别的容易,技术上也已经逐渐迈向成熟。

[0004] 尽管以上模型很早就提出,但电动汽车在实际工作中,所面临的环境温度也千差万别,一系列由环境温度影响的问题也随之而来。其中就包括环境温度对电池内阻的影响和对OCV-SOC的影响。且根据国内外许多文献指出,随着环境温度的增高,电池内阻会明显减少,而随着环境温度的降低,电池的开路电压也会提前到达放电截止电压。

[0005] 综上所述,提出一种能够在不同环境温度下都能够很好的预估电池状态的电池模型是目前动力电池管理系统技术领域中亟需解决的问题。对防止过充过放电、保护电池、提高整车性能、降低对动力电池的要求以及提高经济性具有重大意义。

### 发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明的目的是提供一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,克服了传统等效电路模型只适用于某一特定温度范围的局限性,极大程度上提高了BMS状态计算和能量管理在宽温度范围内的适应性。

[0007] 为了解决上述技术问题,本发明公开了一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1,构建考虑环境温度的锂离子电池等效电路模型;

[0009] 步骤2,模型参数的识别;

[0010] 步骤3,结合不同工况步骤1建立的模型进行仿真层面验证;

[0011] 步骤4,构建考虑环境温度的状态观测器对步骤1建立的模型进行应用层面验证。

[0012] 进一步地,步骤1中构建的模型的数学关系式为:

$$[0013] \begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{I_t}{C_1} - \frac{U_1}{R_1 C_1} \\ \dot{U}_2 = \frac{I_t}{C_2} - \frac{U_2}{R_2 C_2} \\ U_t = U_{OC}(SOC, T) - U_1 - U_2 - I_t R_0 - I_t R_{temp} \end{cases} \quad (1)$$

[0014] 式(1)中, $U_t$ 为电池端电压; $U_{OC}(SOC, T)$ 表示开路电压(Open Circuit Voltage, OCV); $R_0$ 为欧姆内阻; $R_1$ 和 $C_1$ 分别为电化学反应电阻和电化学反应分数阶电容; $R_2$ 和 $C_2$ 分别为浓度极化电阻和浓度极化分数阶电容; $R_{temp}$ 表示随环境温度的变化导致的电池内阻的变化量; $I_t$ 表示负载电流; $U_1$ 和 $U_2$ 分别表示电化学反应电压和浓度极化电压。

[0015] 进一步地,步骤2中模型的参数识别采用指数函数拟合法(Exponential Function Fitting, EFF)对模型参数进行辨识,分别得到不同环境温度下充电和放电条件下的模型参数,具体公式:

$$[0016] \begin{cases} R_{0,Disc} = \left| \frac{U_A - U_B}{I_t} \right| \\ R_{0,Cha} = \left| \frac{U_C - U_D}{I_t} \right| \end{cases} \quad (2)$$

$$[0017] \begin{aligned} U_t &= U_{OC}(SOC, T) - R_1 I_t e^{-t/\tau_1} - R_2 I_t e^{-t/\tau_2} - I_t R_0 - I_t R_{temp} \\ &= m_0 - m_1 e^{-\lambda_1 t} - m_2 e^{-\lambda_2 t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$[0018] \begin{cases} R_1 = \frac{m_1}{I_t}, C_1 = \frac{1}{\lambda_1 R_1} \\ R_2 = \frac{m_2}{I_t}, C_2 = \frac{1}{\lambda_2 R_2} \\ R_{temp} = \frac{U_{OC}(SOC, T) - I_t R_0 - m_0}{I_t} \end{cases} \quad (4)$$

[0019] 式中, $R_{0,Disc}$ 和 $R_{0,Cha}$ 分别表示放电条件下和充电条件下的内阻;当停止给电池放电瞬间,电势降落,电势差表示为 $U_A - U_B$ ,当开始给电池充电瞬间,电势升高,电势差表示为 $U_C - U_D$ , $\tau_1 = R_1 C_1$ , $\tau_2 = R_2 C_2$ ;  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 为方程系数。

[0020] 进一步地,步骤3中结合不同工况对步骤1建立的模型进行仿真层面验证,具体为:

[0021] 在MATLAB/Simulink环境下,搭建考虑环境温度影响的锂离子电池等效电路模型,其中输入包括电流、温度,输出为电压;分别使用混合脉冲功率特性曲线工况(Hybrid Pulse Power Characterization, HPPC)和US06工况(Standard US06 Driving Cycle, US06)分别在四种不同环境温度下进行验证,并得到相应的平均绝对值误差(Mean Absolute Error, MAE)和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)。

[0022] 进一步地,步骤4中构建考虑环境温度的状态观测器对步骤1建立的模型进行应用层面验证,具体为:

[0023] 步骤4.1、建立电池系统离散的状态空间模型:

[0024] 根据模型的数学方程式,联合电池安时积分法原理,将电池的SOC与模型的电化

极化电压和浓度极化电压作为状态变量,选取测量的电池端电压 $U_t$ 作为观测量,建立状态预测方程与观测方程(5)所示,

$$[0025] \quad \begin{cases} \begin{bmatrix} SOC(k+1) \\ U_1(k+1) \\ U_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s \eta}{C_{cap}} \\ R_1(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_2}}) \end{bmatrix} I(k) \\ U_t(k) = \begin{bmatrix} \frac{dU_{oc}(SOC)}{dSOC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + [-R_0 + R_{temp}] I(k) \end{cases} \quad (5)$$

[0026] 首先,定义系统状态矩阵 $x_k$ ,定义系统输出 $y_k$ 和系统输入 $u_k$ :

$$[0027] \quad \begin{cases} x_k = [SOC_k \quad U_{1,k} \quad U_{2,k}] \\ y_k = U_{t,k} \\ u_k = I_{t,k} \end{cases} \quad (6)$$

$$[0028] \quad SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{I_{t,k} \eta T_s}{C_{cap}} \quad (7)$$

[0029] 具体算法公式:

$$[0030] \quad \begin{cases} x_k = F_{k-1} x_{k-1} + B_{k-1} u_{k-1} + \omega_{k-1} \\ y_k = H_k x_k + D_k u_k + v_k \end{cases} \quad (8)$$

$$[0031] \quad \begin{cases} \hat{x}_k^- = x_{k-1} + \dot{x}_{k-1} T_s \\ P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_{k-1} \\ K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k)^{-1} \\ e_k = y_k - (H_k \hat{x}_k^- + D_k u_k) \\ \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k e_k \\ P_k^+ = (I_k - K_k H_k) P_k^- \end{cases} \quad (9)$$

[0032] 式中, $u$ 为系统输入, $\omega$ 为系统白噪声,均值为0,协方差为 $Q$ , $v$ 为测量白噪声,均值为0,协方差为 $V$ , $T_s$ 为采样周期, $P^-$ 和 $P^+$ 分别为状态估计协方差先验估计和后验估计, $K$ 为卡尔曼增益, $e$ 为新息矩阵, $I$ 为单位矩阵,

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-T_s/\tau_1) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-T_s/\tau_2) \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} \frac{T_s \eta}{C_{cap}} \\ R_1(1 - \exp(-T_s/\tau_1)) \\ R_2(1 - \exp(-T_s/\tau_2)) \end{bmatrix}, \quad H_k = \begin{bmatrix} \frac{dU_{oc}(SOC)}{dSOC} & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad D_k =$$

$[-(R_0 + R_{temp})]$ , $\eta$ 为库仑效率,并假设充电时为1,放电时为0.98, $C_{cap}$ 为电池额定容量;

[0033] 步骤4.2、针对步骤4.1所构建模型,使用EKF算法进行SOC估计的具体估算过程:

[0034] 1) 初始化:

[0035] 在 $t_0$ 时刻,即 $k=0$ 时,设置状态观测器的初始值: $x_0, P_0, Q_0, R_0$ ;

[0036] 2) 先验估计-预测:时间更新[状态从时间 $(k-1)^+$ 到时间 $(k)^-$ 的推算]

[0037] 对于 $k=1, 2, \dots$ ,完成下面的先验估计(时间更新)操作,将状态和协方差估计从前一时刻 $(k-1)^+$ 推算到当前时刻 $(k)^-$ ,自适应扩展卡尔曼滤波器的时间更新方程表示如下:

[0038] 系统状态预估:

$$[0039] \quad \hat{x}_k^- = f(x_{k-1}, u_{k-1}) \quad (10)$$

[0040] 误差协方差预估:

$$[0041] \quad P_k^- = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (11)$$

[0042] 其中, $f(x_{k-1}, u_{k-1})$ 表示系统状态方程函数;

[0043] 3) 后验估计-修正:测量更新[状态从时间 $(k)^-$ 到时间 $(k)^+$ 的推算]

[0044] 此步骤用 $k$ 时刻的测量值 $y_k$ 校正状态估计和协方差估计,估计结果分别用 $\hat{x}_k^+$ 和 $P_k^+$ 表示,自适应扩展卡尔曼滤波器的测量更新方程表示如下:

[0045] 新息矩阵:

$$[0046] \quad e_k = y_k - (H_k \hat{x}_k^- + D_k u_k) \quad (12)$$

[0047] 卡尔曼增益矩阵:

$$[0048] \quad K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_{k-1})^{-1} \quad (13)$$

[0049] 系统状态修正:

$$[0050] \quad \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k e_k \quad (14)$$

[0051] 误差协方差修正:

$$[0052] \quad P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (15)$$

[0053] 4) 时间尺度更新

[0054] 将时刻 $(k)^+$ 的状态和协方差矩阵作为输出,准备 $(k+1)$ 时刻的状态估计。

[0055] 与现有技术相比,本发明可以获得包括以下技术效果:本发明提出了一种考虑环境因素影响的锂离子电池模型,克服了传统模型只适用于某一特定温度范围的局限性,极大地提高了电池BMS在状态计算和能量管理中在宽温度范围的适用性。本发明建模方法,能更加准确地描述动力电池的外特性对提高电池管理系统BMS中的状态计算和能量管理以及后续的电池热管理和安全管理都起着积极的意义。因此,本发明所提出的考虑环境因素影响的锂离子电池模型在BMS和工程中具有很好的实用性和应用价值。

[0056] 本发明方法能够最终实现更宽温度范围的电池荷电状态(State of Charge, SOC)估计,对电动车辆电池管理系统(Battery Management System, BMS)的状态估算和能量管理具有重大意义,解决了由不同环境温度引起的模型不准确而导致的状态估算误差较大等问题,有效提高了动力电池组的利用效率、保证了电池组的使用寿命。在电动汽车中,对保护蓄电池、提高整车性能、降低对动力电池的要求、提高经济性都起着重大作用。



### 附图说明

[0057] 此处所说明的附图用来提供对本发明的进一步理解,构成本发明的一部分,本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明,并不构成对本发明的不当限定。在附图中:

- [0058] 图1为本发明中建模方法的具体实施步骤图;  
 [0059] 图2为本发明建模方法构建的电池模型示意图;  
 [0060] 图3为本发明的HPPC工况下电池电流变化示意图;  
 [0061] 图4为本发明的HPPC工况下电池端电压变化示意图;  
 [0062] 图5为本发明的HPPC工况下单个脉冲电池电压变化曲线示意图;  
 [0063] 图6为本发明中卡尔曼滤波算法流程示意图;  
 [0064] 图7为本发明的实测HPPC端电压与仿真电压对比曲线示意图;  
 [0065] 图8为本发明的实测US06端电压与仿真电压对比曲线示意图;  
 [0066] 图9为本发明的实测HPPC端电压与仿真电压误差曲线示意图;  
 [0067] 图10为本发明的实测US06端电压与仿真电压误差曲线示意图;  
 [0068] 图11为本发明的HPPC工况下实际SOC与SOC算法估计曲线示意图;  
 [0069] 图12为本发明的US06工况下实际SOC与SOC算法估计曲线示意图;  
 [0070] 图13为本发明的HPPC工况下实际SOC与SOC算法估计的误差曲线示意图;  
 [0071] 图14为本发明的US06工况下实际SOC与SOC算法估计的误差曲线示意图。

### 具体实施方式

[0072] 以下将配合实施例来详细说明本发明的实施方式,藉此对本发明如何应用技术手段来解决技术问题并达成技术功效的实现过程能充分理解并据以实施。

[0073] 本发明公开了一种考虑环境温度影响的锂离子电池建模方法,如图1所示,具体包括以下步骤:

[0074] 步骤1,构建考虑环境温度的锂离子电池等效电路模型;

[0075] 不同于通用的二阶RC等效电路模型,本发明一方面考虑到环境温度对电池阻抗的影响,增加了电池 $R_{temp}$ 来描述随着环境温度的变化导致电池阻抗的变化量;另一方面,还考虑到不同环境温度下OCV-SOC关系的差异,增加了对OCV-SOC的考虑,建立了OCV-SOC-T关系,其模型结构如图2所示,构建的模型的数学关系式为:

$$[0076] \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{I_t}{C_1} - \frac{U_1}{R_1 C_1} \\ \dot{U}_2 = \frac{I_t}{C_2} - \frac{U_2}{R_2 C_2} \\ U_t = U_{OC}(SOC, T) - U_1 - U_2 - I_t R_0 - I_t R_{temp} \end{cases} \quad (1)$$

[0077] 式(1)中, $U_t$ 为电池端电压; $U_{OC}(SOC, T)$ 表示开路电压(Open Circuit Voltage, OCV); $R_0$ 为欧姆内阻; $R_1$ 和 $C_1$ 分别为电化学反应电阻和电化学反应分数阶电容; $R_2$ 和 $C_2$ 分别为浓度极化电阻和浓度极化分数阶电容; $R_{temp}$ 表示随环境温度的变化导致的电池内阻的变化量; $I_t$ 表示负载电流; $U_1$ 和 $U_2$ 分别表示电化学反应电压和浓度极化电压。

[0078] 步骤2,模型参数的识别;

[0079] 本发明步骤2中模型的参数识别采用指数函数拟合法 (Exponential Function Fitting, EFF) 对模型参数进行辨识, 模型参数辨识方法参考的是FreedomCAR Test Manual in the U.S中提到的HPPC动态工况实验如图3和4所示, 对电池分不同间隔SOC点进行实验, 如图5所示, 表示HPPC曲线的第一个电压脉冲曲线, 整个过程共100s, 首先是10s的1C脉冲放电, 然后静置40s, 再进行10s的1C脉冲充电, 最后静置40s, 其中HPPC实验的SOC点分别包括放电 (1.00、0.8973、0.7945、0.6917、0.5889、0.4861、0.3833、0.2805、0.1777) 和充电 (0.9889、0.8862、0.7833、0.6806、0.5778、0.4750、0.3722、0.2694、0.1666) 然后根据电池实验采集的数据, 采用指数函数拟合法对模型参数进行辨识, 分别得到不同环境温度下充电和放电条件下的模型参数, 具体公式:

$$[0080] \quad \begin{cases} R_{0,Disc} = \left| \frac{U_A - U_B}{I_t} \right| \\ R_{0,Cha} = \left| \frac{U_C - U_D}{I_t} \right| \end{cases} \quad (2)$$

$$[0081] \quad \begin{aligned} U_t &= U_{OC}(SOC, T) - R_1 I_t e^{-t/\tau_1} - R_2 I_t e^{-t/\tau_2} - I_t R_0 - I_t R_{temp} \\ &= m_0 - m_1 e^{-\lambda_1 t} - m_2 e^{-\lambda_2 t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$[0082] \quad \begin{cases} R_1 = \frac{m_1}{I_t}, \quad C_1 = \frac{1}{\lambda_1 R_1} \\ R_2 = \frac{m_2}{I_t}, \quad C_2 = \frac{1}{\lambda_2 R_2} \\ R_{temp} = \frac{U_{OC}(SOC, T) - I_t R_0 - m_0}{I_t} \end{cases} \quad (4)$$

[0083] 式中,  $R_{0,Disc}$  和  $R_{0,Cha}$  分别表示放电条件下和充电条件下的内阻; 当停止给电池放电瞬间, 电势降落, 电势差表示为  $U_A - U_B$ , 当开始给电池充电瞬间, 电势升高, 电势差表示为  $U_C - U_D$ ,  $\tau_1 = R_1 C_1$ ,  $\tau_2 = R_2 C_2$ ;  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为方程系数。

[0084] 步骤3, 结合不同工况步骤1建立的模型进行仿真层面验证, 具体为:

[0085] 通过步骤2的参数识别分别可以得到充电和放电条件下的参数  $R_0$ 、 $R_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $R_{temp}$  的数值。然后, 在MATLAB/Simulink环境下, 搭建考虑环境温度影响的锂离子电池等效电路模型, 其中输入包括电流、温度, 输出为电压; 分别使用混合脉冲功率特性曲线工况 (Hybrid Pulse Power Characterization, HPPC) 和US06工况 (Standard US06 Driving Cycle, US06) 分别在四种不同环境温度下进行验证, 并得到相应的平均绝对值误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE)。其中对HPPC工况的详细描述见步骤2, 对于US06工况选择了4个连续的US06周期用于测试验证, 其中每个周期为600s, 输入为温度和电流, 输出为电压。

[0086] 步骤4, 构建考虑环境温度的状态观测器对步骤1建立的模型进行应用层面验证, 具体为:

[0087] 步骤4.1、建立电池系统离散的状态空间模型:

[0088] 根据二阶RC等效电路模型参数的数学方程式, 联合电池安时积分法原理, 将电池的SOC与二阶RC等效电路模型的电化学极化电压和浓度极化电压作为状态变量, 选取测量

的电池端电压 $U_t$ 作为观测量,建立状态预测方程与观测方程(5)所示,

$$[0089] \quad \begin{cases} \begin{bmatrix} SOC(k+1) \\ U_1(k+1) \\ U_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{T_s}{\tau_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s \eta}{C_{cap}} \\ R_1(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}) \\ R_2(1 - e^{-\frac{T_s}{\tau_2}}) \end{bmatrix} I(k) \\ U_t(k) = \begin{bmatrix} \frac{dU_{oc}(SOC)}{dSOC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_1(k) \\ U_2(k) \end{bmatrix} + [-R_0 + R_{temp}] I(k) \end{cases} \quad (5)$$

[0090] 首先,定义系统状态矩阵 $x_k$ ,定义系统输出 $y_k$ 和系统输入 $u_k$ :

[0091] 令

$$[0092] \quad \begin{cases} x_k = [SOC_k \quad U_{1,k} \quad U_{2,k}] \\ y_k = U_{t,k} \\ u_k = I_{t,k} \end{cases} \quad (6)$$

$$[0093] \quad SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{I_{t,k} \eta T_s}{C_{cap}} \quad (7)$$

[0094] 具体算法公式:

$$[0095] \quad \begin{cases} x_k = F_{k-1} x_{k-1} + B_{k-1} u_{k-1} + \omega_{k-1} \\ y_k = H_k x_k + D_k u_k + v_k \end{cases} \quad (8)$$

$$[0096] \quad \begin{cases} \hat{x}_k^- = x_{k-1} + \dot{x}_{k-1} T_s \\ P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_{k-1} \\ K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k)^{-1} \\ e_k = y_k - (H_k \hat{x}_k^- + D_k u_k) \\ \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k e_k \\ P_k^+ = (I_k - K_k H_k) P_k^- \end{cases} \quad (9)$$

[0097] 式中, $u$ 为系统输入, $\omega$ 为系统白噪声,均值为0,协方差为 $Q$ , $v$ 为测量白噪声,均值为0,协方差为 $V$ , $T_s$ 为采样周期, $P^-$ 和 $P^+$ 分别为状态估计协方差先验估计和后验估计, $K$ 为卡尔曼增益, $e$ 为新息矩阵, $I$ 为单位矩阵,其中,

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-T_s/\tau_1) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-T_s/\tau_2) \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} \frac{T_s \eta}{C_{cap}} \\ R_1(1 - \exp(-T_s/\tau_1)) \\ R_2(1 - \exp(-T_s/\tau_2)) \end{bmatrix}, \quad H_k = \begin{bmatrix} \frac{dU_{oc}(SOC)}{dSOC} & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad D_k =$$

$[-(R_0 + R_{temp})]$ , $\eta$ 为库仑效率,并假设充电时为1,放电时为0.98, $C_{cap}$ 为电池额定容量;

[0098] 步骤4.2、针对步骤4.1所构建模型,使用卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)算法进行SOC估计的具体估算,具体算法流程如图6所示,

[0099] 1) 初始化:

[0100] 在 $t_0$ 时刻,即 $k=0$ 时,设置状态观测器的初始值: $x_0, P_0, Q_0, R_0$ ;

[0101] 2) 先验估计-预测:时间更新[状态从时间 $(k-1)^+$ 到时间 $(k)^-$ 的推算]

[0102] 对于 $k=1, 2, \dots$ ,完成下面的先验估计(时间更新)操作,将状态和协方差估计从前一时刻 $(k-1)^+$ 推算到当前时刻 $(k)^-$ ,自适应扩展卡尔曼滤波器的时间更新方程表示如下:

[0103] 系统状态预估:

$$[0104] \quad \hat{x}_k^- = f(x_{k-1}, u_{k-1}) \quad (10)$$

[0105] 误差协方差预估:

$$[0106] \quad P_k^- = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (11)$$

[0107] 其中, $f(x_{k-1}, u_{k-1})$ 表示系统状态方程函数;

[0108] 3) 后验估计-修正:测量更新[状态从时间 $(k)^-$ 到时间 $(k)^+$ 的推算]

[0109] 此步骤用 $k$ 时刻的测量值 $y_k$ 校正状态估计和协方差估计,估计结果分别用 $\hat{x}_k^+$ 和 $P_k^+$ 表示,自适应扩展卡尔曼滤波器的测量更新方程表示如下:

[0110] 新息矩阵:

$$[0111] \quad e_k = y_k - (H_k \hat{x}_k^- + D_k u_k) \quad (12)$$

[0112] 卡尔曼增益矩阵:

$$[0113] \quad K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_{k-1})^{-1} \quad (13)$$

[0114] 系统状态修正:

$$[0115] \quad \hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k e_k \quad (14)$$

[0116] 误差协方差修正:

$$[0117] \quad P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (15)$$

[0118] 4) 时间尺度更新

[0119] 将时刻 $(k)^+$ 的状态和协方差矩阵作为输出,准备 $(k+1)$ 时刻的状态估计。

[0120] 本发明为了验证所建立电池模型的准确性,首先在MATLAB/Simulink环境下建立了考虑环境温度影响的二阶RC等效电路模型。其次,通过HPPC测试用于对模型参数识别,并通过HPPC工况和US06工况对提出的建模方法进行仿真层面的验证,利用实验测量所得的HPPC动态工况实验数据和US06动态工况实验数据与模型仿真所得到的仿真数据对比,分别如图7和8所示,其误差由图9和10所示。可以得到HPPC工况下平均绝对误差和均方根误差分别在 $5^\circ\text{C}$ 下为0.0119和0.0213; $25^\circ\text{C}$ 下为0.0072和0.0126; $30^\circ\text{C}$ 下为0.0066和0.0113; $45^\circ\text{C}$ 下为0.0070和0.0132;得到US06工况下平均绝对误差和均方根误差分别在 $5^\circ\text{C}$ 下为0.0184和0.0310; $25^\circ\text{C}$ 下为0.0103和0.0156; $30^\circ\text{C}$ 下为0.0088和0.0142; $45^\circ\text{C}$ 下为0.0096和0.0170。最后,在构建SOC状态观测器应用层面,分别在HPPC和US06两种工况条件下通过安时积分法所得到的实验SOC与EKF所估算得到的SOC对比,分别如图11和12所示,误差分别如图13和14所示。其中,在HPPC工况下,误差范围在 $5^\circ\text{C}$ 下为0%-2.10%,在 $25^\circ\text{C}$ 下误差范围

为-1.43%-0.15%，在45℃下误差范围为0.38%-3.12%；在US06工况下，误差范围在5℃下为-0.38%-0.11%，在25℃下误差范围为-0.87%-0.04%，在45℃下误差范围为0.08%-0.13%。从而，证实了本发明的建模方法的可适用性，对应用与BMS状态估计和能量管理具有重大意义。

[0121] 通过仿真和应用层面的数据表明，本发明中提出的建模方法在输出电压和SOC估算中均能控制在较小的误差范围，验证了本发明的建模方法的有效性和精确性，提高了电动汽车在宽温度范围的应用，解决了由不同环境温度引起的模型不准确而导致的状态估算误差较大等问题，对应用于电动汽车电池管理系统的状态估算和能量管理具有重大意义；对动力电池组的利用效率、使用寿命，整车性能都起着重大作用。

[0122] 上述说明示出并描述了发明的若干优选实施例，但如前所述，应当理解发明并非局限于本文所披露的形式，不应看作是对其他实施例的排除，而可用于各种其他组合、修改和环境，并能够在本文所述发明构想范围内，通过上述教导或相关领域的技术或知识进行改动。而本领域人员所进行的改动和变化不脱离发明的精神和范围，则都应在发明所附权利要求的保护范围内。

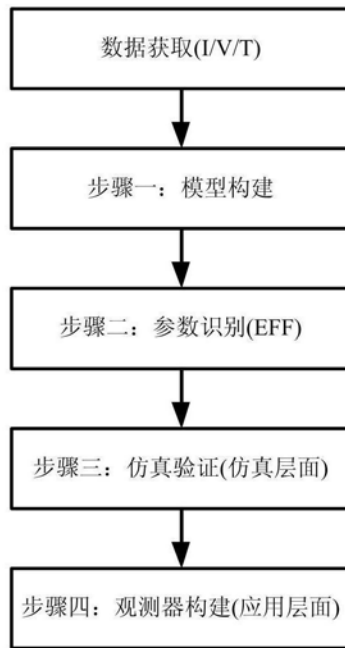


图1

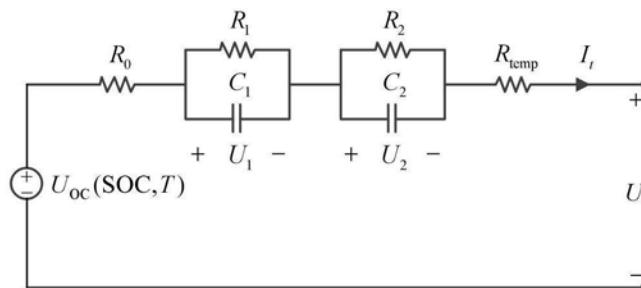


图2

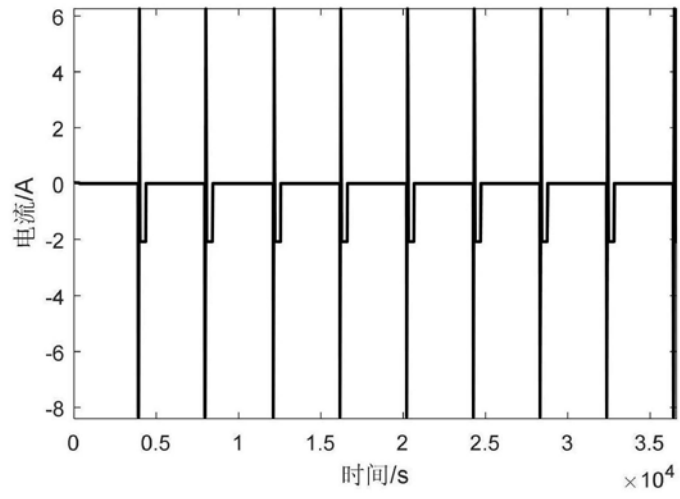


图3

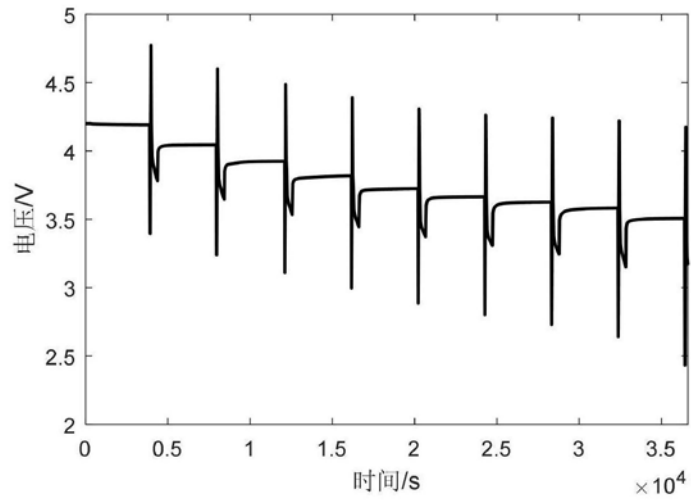


图4

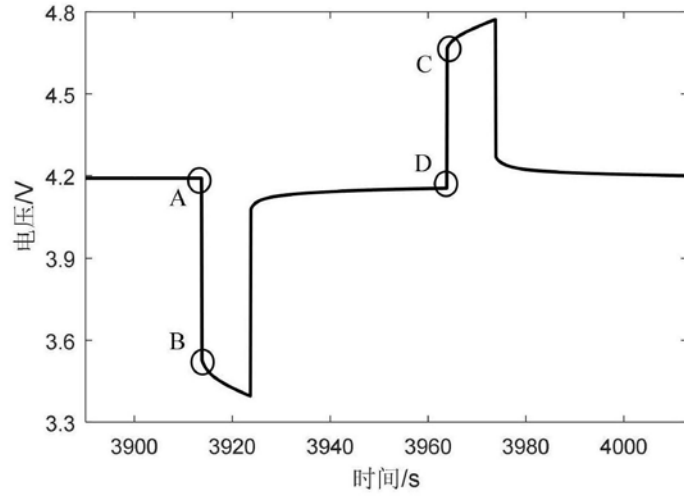


图5

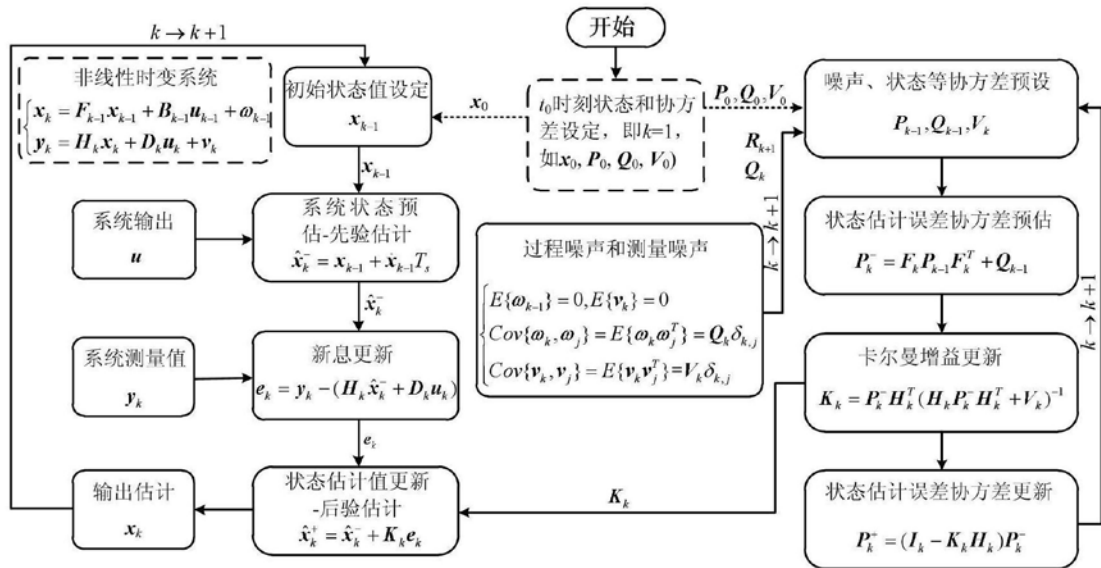


图6



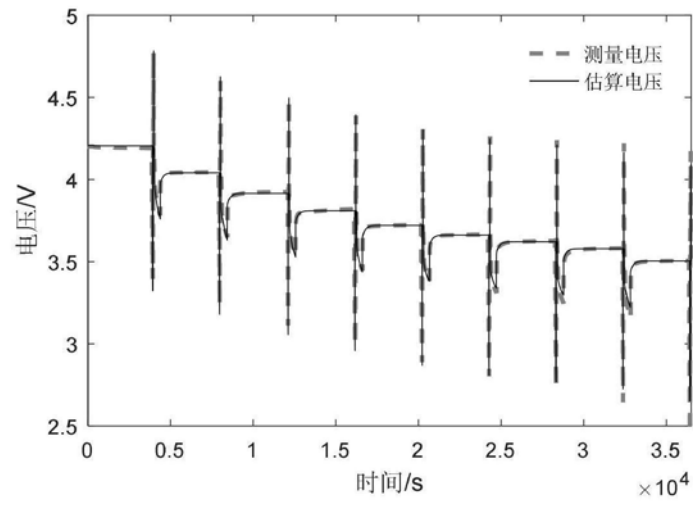


图7

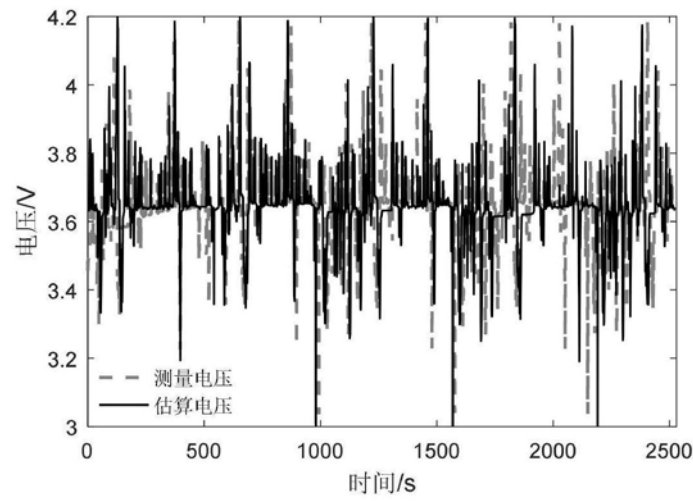


图8

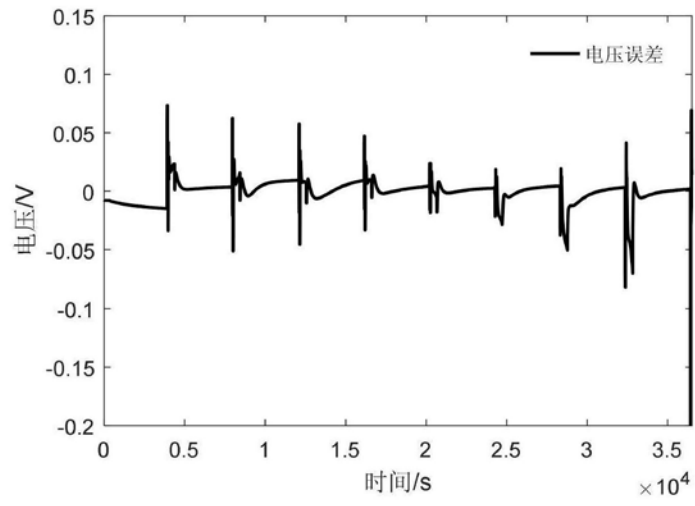


图9

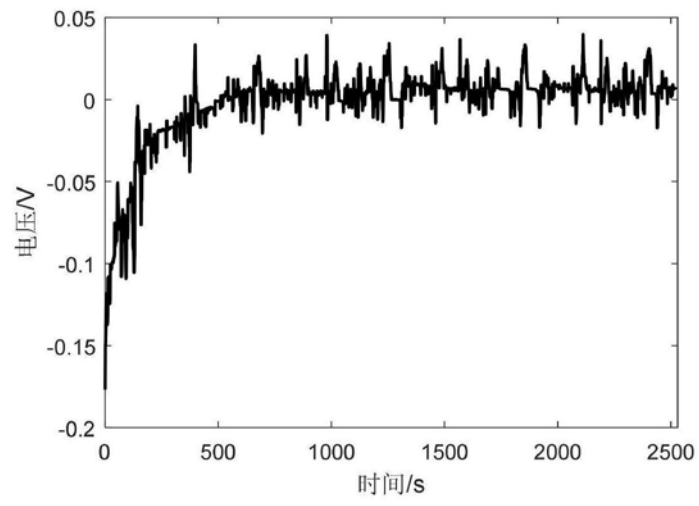


图10

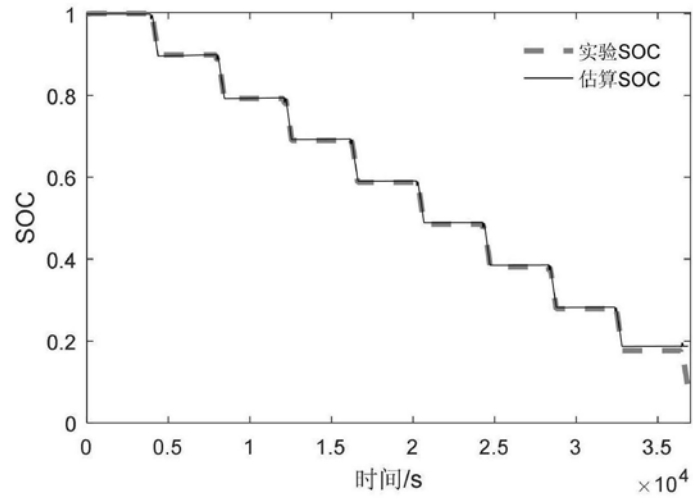


图11

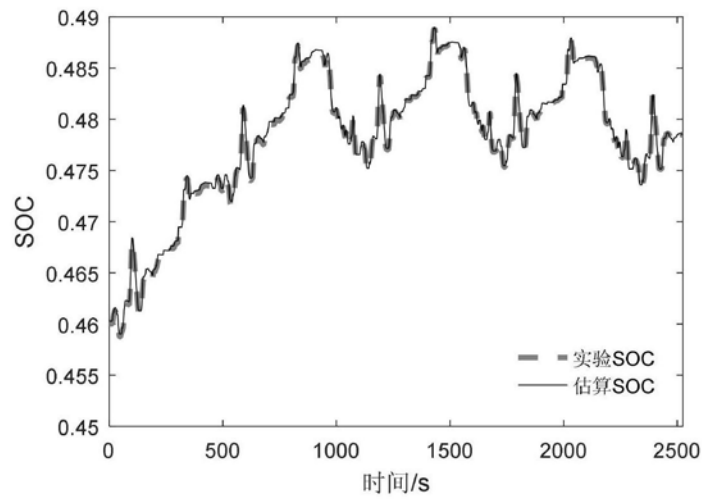


图12

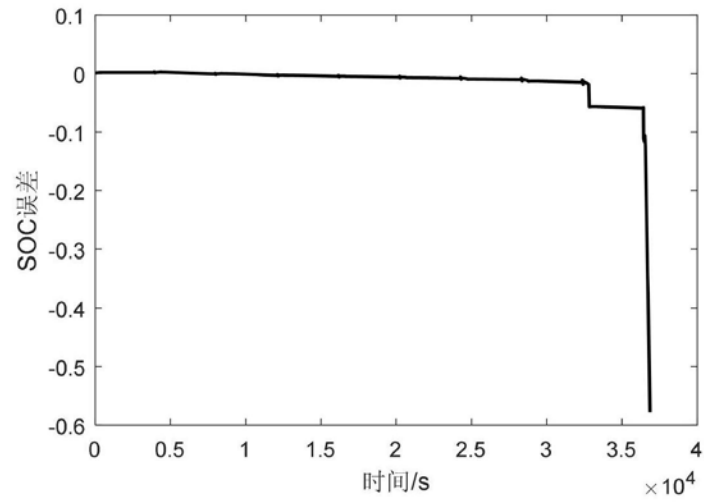


图13

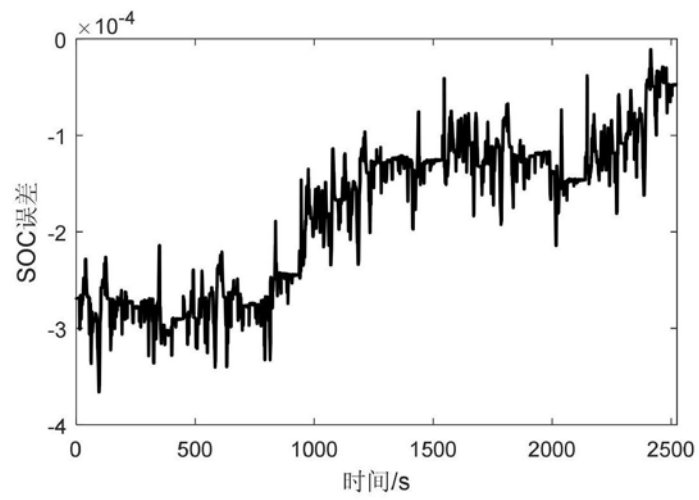


图14