

文章编号: 1673-3193(2018)05-0595-07

基于热电耦合模型的锂电池内核温度估计

马 彦^{1,2}, 高肖璟¹

- (1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 吉林大学 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 电池温度直接影响电池性能, 且电池内核温度与表面温度存在差异. 针对电池内核温度难以测量的现状, 建立了电池热电耦合模型来估计电池内核温度. 电池热电耦合模型由等效电路模型及热模型组成, 通过电池充放电实验辨识等效电路模型参数, 采用最小二乘法辨识热模型参数. 在给定工况下, 运用等效电路模型计算电池生热量并传递给热模型, 热模型估计得到电池内核温度. 采用新欧洲驾驶循环(New European Driving Cycle, NEDC)工况来验证提出的热电耦合模型精度, 实验结果表明, 提出的热电耦合模型可以准确估计电池内核温度变化, 估计误差在 1 °C 以内.

关键词: 锂电池; 温度估计; 等效电路模型; 热模型; 热电耦合模型

中图分类号: TJ303.4

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2018.05.019

Li-Ion Battery Core Temperature Estimation Based on Thermal-Electro Coupled Model

MA Yan^{1,2}, GAO Xiao-jing²

- (1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The battery temperature directly affects battery performance, and there is a difference between the battery core temperature and the battery surface temperature. Based on the fact that the battery core temperature is hard to measure, a thermal-electro coupled model of battery was developed to estimate the battery core temperature. The thermal-electro coupled model was composed of an equivalent circuit model and a thermal model. The equivalent circuit model parameters were identified through charge and discharge experiments. The thermal model parameters were identified by least squares method. When work operation was given, the battery heat generation was calculated by the equivalent circuit model and delivered to the thermal model. The thermal model estimated the battery core temperature. The accuracy of thermal-electro coupled model was verified under the new european driving cycle (NEDC) condition. The results show that the proposed thermal-electro coupled model accurately estimates the battery core temperature with an error within 1 °C.

Key words: Li-ion battery; temperature estimation; equivalent circuit model; thermal model; thermal-electro coupled model

收稿日期: 2018-06-24

基金项目: 吉林省发展改革委项目(2018C035-2)

作者简介: 马 彦(1970—), 女, 教授, 博士, 主要从事电动汽车动力电池管理系统(BMS)、SOC 估计、电池热管理及控制系统性能评价研究.

0 引 言

全球能源短缺和环境污染问题日渐严重,由于清洁、能源利用率高的优点,电动汽车被广泛推广. 电池是电动汽车的动力来源,对汽车性能有重要影响. 锂电池由于能量密度高,自放电率低等优点,被广泛用于电动汽车中^[1]. 温度直接影响着锂电池的功率、寿命等性能. 锂电池适宜的工作温度为 15~35 ℃,当工作在高温环境中,大量热积聚在电池内部,锂电池可能会发生热失控甚至是爆炸^[2-3]. 实时估计电池温度,可以为之后的电池热管理提供重要依据,进而提高电池性能,保证电池安全.

为了估计电池温度,多种电池热模型已经被提出. 电化学-热耦合模型可以详细描述电池内部化学反应过程,并准确模拟电池温度. 但电化学-热耦合模型由多个微分方程组成,参数辨识困难,计算量大,不适合在线估计电池温度^[4-5]. 为了降低计算量, Rajib Mahamud 等人把电池看成一个整体,但电池模型被过度简化,认为整个电池的温度是一致的^[6-7]. 实际上,电池内核温度与表面温度存在差异,在持续性大电流放电的情况下,电池内核温度可以比表面温度高 10 ℃ 以上^[8]. 在电动汽车行驶过程中,无法实时测得电池的内核温度,为了提高电池性能,并保证电池安全,实时估计电池内核温度是十分必要的. 文献[9-10]将电池等效为电池内核和外壳两部分,建立了两状态的热-电耦合模型,可同时估计得到电池表面及内核温度,但在电池生热部分忽略了熵变因素对生热的影响,且电池热电耦合模型参数辨识复杂,计算量大.

针对上述问题,本文建立由一阶 RC 等效电路模型与两状态的热模型组成的热电耦合模型,分别通过充放电实验离线辨识等效电路模型参数,采用最小二乘法离线辨识热模型参数来简化模型参数辨识过程,降低计算量,以实现电池内核温度的实时估计,并在电池生热部分考虑熵变因素对生热的影响来提高模型的精度.

1 电池热电耦合模型

本文提出的电池热电耦合模型由等效电路模型及两状态热模型组成,等效电路模型用来描述电池的电特性,热模型用来估计电池表面和内核温度.

1.1 等效电路模型

由于简单性和普适性,等效电路模型被广泛用于电池特性研究. 在之前的研究中,常采用的电池模型包括 Rint 模型、一阶 RC 等效电路模型、二阶 RC 等效电路模型及多阶 RC 等效电路模型^[11]. 综合考虑模型精度和模型参数辨识复杂度,本文选取一阶 RC 等效电路模型,如图 1 所示.

图 1 中 V_{OCV} 为开路电压, V_T 为端电压, R_s 为欧姆内阻, R_1 为极化内阻, C_1 为极化电容. V_1 表示由 RC 环造成的极化电压. I 代表电流,方向如图 1 所示.

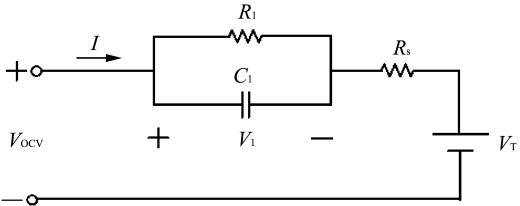


图 1 一阶 RC 等效电路模型

Fig. 1 One order RC equivalent circuit

根据基尔霍夫定律^[12],极化电压可以表示为

$$\dot{V}_1 = -\frac{V_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1}. \tag{1}$$

端电压 V_T 可以表示为

$$V_T = V_{OCV} - V_1 - IR_s, \tag{2}$$

V_{OCV} 可以表示为电池荷电状态(SOC)的非线性函数. SOC 用库仑定律计算可得

$$SOC = -\frac{1}{C_{bat}} I, \tag{3}$$

式中: C_{bat} 代表电池容量.

根据 Bernardi 公式^[13],考虑熵变因数对电池生热的影响,电池生热 Q 为

$$Q = I(V_{OCV} - V_T) - IT \frac{dV_{OCV}}{dT}, \tag{4}$$

式中: $\frac{dV_{OCV}}{dT}$ 为熵变因数曲线,主要受 SOC 影响.

一阶 RC 等效电路模型的输入为电流 I 及电池内核温度 T_c ,输出为电池生热 Q 及端电压 V_{OCV} ,需要辨识的参数为 R_s , R_1 , C_1 , V_{OCV} -SOC 及 $\frac{dV_{OCV}}{dT}$ -SOC.

1.2 热模型

由于电池径向导热阻是纵向导热阻的

20 倍之多^[6], 因此可以只考虑电池的径向热传导, 忽略电池纵向热传导, 将电池等效为电池内核与电池外壳两部分, 如图 2 所示。

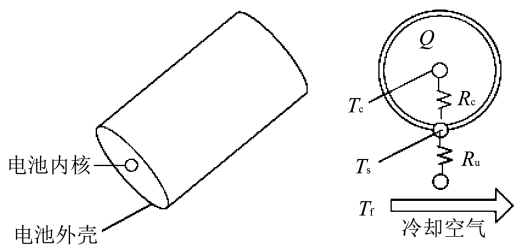


图 2 热模型示意图

Fig. 2 Schematic of the thermal model

假设电池表面温度一致; 电池生热只来源于电池内部化学反应生热; 由于电池热辐射较为微弱, 电池传热只考虑电池内部热传导及电池表面热对流散热。基于以上假设, 可建立两状态热电耦合模型。

$$\begin{aligned} C_c \dot{T}_c &= Q + \frac{T_s - T_c}{R_c}, \\ C_s \dot{T}_s &= \frac{T_f - T_s}{R_u} - \frac{T_s - T_c}{R_c}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: C_c 为电池内核集中热容; T_c 为电池内核温度; Q 为电池生热; T_s 为电池表面温度; C_s 为电池外壳集中热容; R_c 为电池内核和外壳之间的等效导热热阻; T_f 为冷却空气温度; R_u 为电池表面与冷却气流之间的等效对流热阻。热模型输入为 Q , 输出为 T_s 与 T_c 。

1.3 热电耦合模型

等效电路模型与热模型通过参数传递, 进行耦合, 如图 3 所示。首先, 基于给定的 I , 结合内核温度 T_c , 可以确定等效电路模型参数 R_s, R_1, C_1 , 进而计算得到 SOC, 开路电压 V_T , 再分别根据 $V_{OCV}-SOC$ 及 $\frac{dV_{OCV}}{dT}-SOC$ 曲线, 可以确定 V_{OCV} 及 $\frac{dV_{OCV}}{dT}$, 最终根据式(4)计算得到电池的生热 Q , 并传递给热模型。基于电池生热 Q 及冷却空气温度 T_f , 通过热模型可计算得到表面温度 T_s 及内核温度 T_c , 内核温度 T_c 传递给等效电路模型, 决定等效电路模型中与温度相关的参数。在文献[7, 9-10]中, 热模型参数通过实时测量电池表面温度 T_s , 在线拟合模型参数, 但若在参数拟合过程中, 电池温度发生改变, 与温度相关的参数随之改变, 影响了参数拟合精度, 复杂了参数辨识过程。针

对这个问题, 本文采用等效电路模型与热模型参数分别辨识的方法, 降低了模型参数辨识难度。等效电路模型参数通过充放电实验离线辨识。热模型参数采用易测量的电流 I , 表面温度 T_s 和冷却空气温度 T_f , 通过最小二乘法辨识得到。

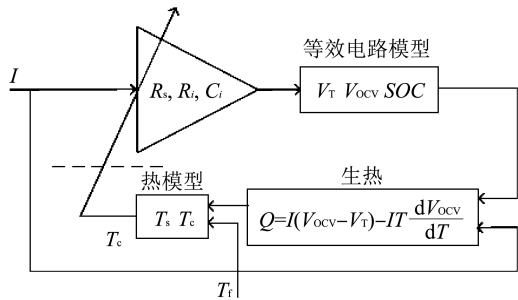


图 3 热电耦合模型示意图

Fig. 3 Coupling between the electrical and the thermal models

2 模型参数辨识

通过电池充放电实验辨识等效电路模型参数, 采用最小二乘法辨识热模型参数。

2.1 等效电路模型参数辨识

为了辨识等效电路模型参数, 采用恒温恒湿箱及充放电机等搭建了温度可控的电池测试平台。通过一系列电池充放电实验, 辨识电池开路电压 V_{OCV} , 电池的熵变因数 $\frac{dV_{OCV}}{dT}$, 电池容量 C_{bat} , 欧姆内阻 R_s , 极化电阻 R_1 和极化电容 C_1 。电池充放电实验装置如图 4 所示。恒温恒湿箱可以控制电池充放电测试实验过程中的环境温度。充放电机电可以控制电池的运行工况。电脑中装有上位机软件, 实时记录电池运行过程中的电流、电压和温度数据。电池的表与内核均放置有热电偶来测量电池表面及内核温度。

本文采用 A123 26650 LiFePO₄ 电池, 在标定开路电压和 SOC 关系的实验中, 首先以 0.05 C 恒流充电至截止电压 3.7 V, 然后恒压充电至截止电流 0.01 C 为止。再以 0.01 C 恒流放电至截止电压 2.0 V。由于电池存在迟滞特性^[14], 本文将充电和放电电压曲线的平均值当作开路电压。最终得到开路电压与 SOC 的特性曲线如图 5(a) 所示。恒压充电结束后, 电池 SOC 为 100%, 恒流放电结束后, 电池 SOC 为 0%。在 100%~0% SOC 之间, 将放电电流对时间积分, 可以得到电池的总容量。本文实际测得的电池容量 C_{bat} 为

2.1 Ah. 熵变生热占电池生热中重要的一部分, 本文采用文献[8]中的方法标定熵变因数与 SOC 的关系, 如图 5(b) 所示.

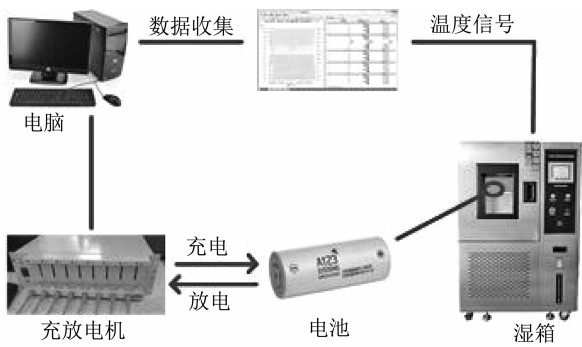


图 4 实验原理图

Fig. 4 The diagram of experiment principle

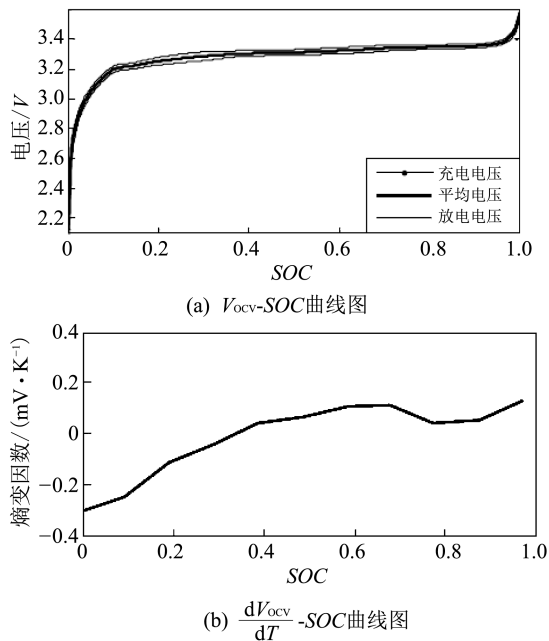


图 5 V_{OCV} -SOC 及 $\frac{dV_{OCV}}{dT}$ -SOC 曲线图

Fig. 5 The relation curve of V_{OCV} -SOC and $\frac{dV_{OCV}}{dT}$ -SOC

在等效电路模型参数 R_s , R_1 , C_1 辨识方面, 本文主要考虑了电池温度及电流方向对参数的影响. 分别进行充电和放电下的实验, 现以放电为例说明. 首先电池以 0.05 C 恒流充电至截止电压 3.7 V, 然后恒压充电至截止电流 0.01 C 为止, 此时电池 SOC 为 100%. 将电池静置 3 h, 再以 1 C 放电至 90% SOC, 再将电池静置 3 h, 记录静置过程中的电池电压变化用于辨识 RC 参数. 重复这个过程, 直到电池电压降到电池截止电压. 在整个实验过程中, 电池被放置在恒温恒湿箱中, 保持温度不变. 为了获得参数对温度的依赖性, 本

文分别在 5, 15, 25, 35, 45 °C 下重复进行实验. 脉冲充放电实验中电流和电压变化如图 6(a) 所示.

在脉冲充放电实验过程中, 温度是固定的, 因此, 电阻 R_s 很容易被辨识. 在每个脉冲的上边沿和下边沿, 记录下电压的变化 ΔV_{sc} 和 ΔV_{sd} , I_c 和 I_d 分别代表充、放电电流. 通过欧姆定律, 充电、放电时的欧姆内阻 R_{sc} , R_{sd} 可以由式(6)和(7)计算得到.

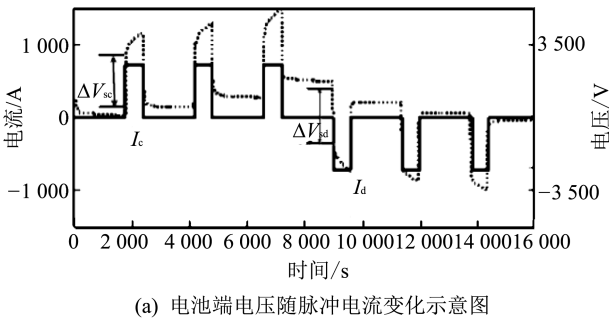
$$R_{sc} = \frac{\Delta V_{sc}}{I_c}, \tag{6}$$

$$R_{sd} = \frac{\Delta V_{sd}}{I_d}, \tag{7}$$

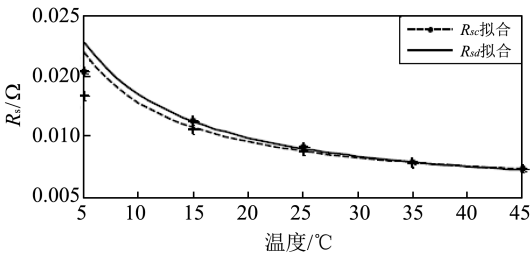
R_1 , C_1 的辨识需要用到静置状态下电池的端电压 V_T . 假设整个静置过程中有 k 个采样点, 那么问题等价于选取合适的 R_1 , C_1 , 使得目标函数最小化. 目标函数如公式(8)所示.

$$f(R_1, C_1) = \sum_{i=0}^{k-1} [V_T(t) - V_{OCV}(SOC) - IR_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}], \tag{8}$$

式中: I 代表在电池静置之前的恒流阶段的电流, $V_{OCV}(SOC)$ 代表在该 SOC 下电池的开路电压, 值得注意的是, 静置阶段电池的开路电压是不会改变的. 在每个温度下重复实验, 采集辨识需要的电池端电压、开路电压、电流数据后, 采用最小二乘方法进行该温度下的 RC 参数辨识. 内部电阻 R_s , 极化电容 C_1 , 极化电阻 R_1 的辨识结果如图 6 所示.



(a) 电池端电压随脉冲电流变化示意图



(b) 不同温度及电流方向下的 R

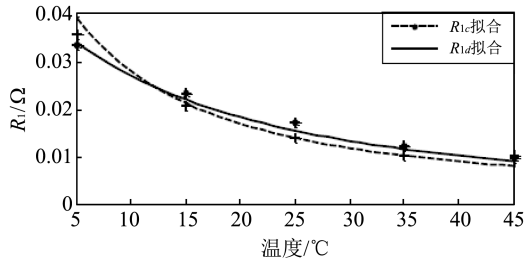
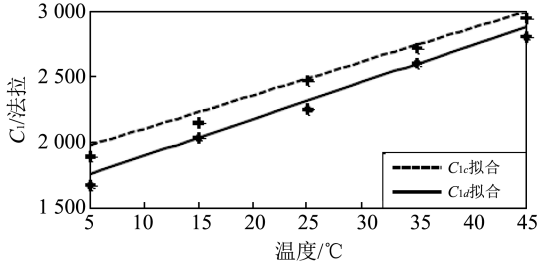
(c) 不同温度及电流方向下的 R_1 (d) 不同温度及电流方向下的 C_1

图 6 等效电路模型参数辨识结果图

Fig. 6 Identification result of equivalent circuit model

图 6(b)~图 6(d) 分别为 R_s , R_1 , C_1 的辨识结果. R_s 与温度及电流方向的关系可拟合为

$$R_s = \begin{cases} R_{sd} = 0.0048 * \exp\left(\frac{31.05}{T_c + 15.33}\right) & (\text{放电}), \\ R_{sc} = 0.0055 * \exp\left(\frac{22.24}{T_c + 11.60}\right) & (\text{充电}). \end{cases} \quad (9)$$

R_1 与温度及电流方向的关系可拟合为

$$R_1 = \begin{cases} R_{1d} = 5.52e - 4 * \exp\left(\frac{347.5}{T_c + 79.6}\right) & (\text{放电}), \\ R_{1c} = 1.125e - 3 * \exp\left(\frac{159.3}{T_c + 41.5}\right) & (\text{充电}). \end{cases} \quad (10)$$

C_1 与温度及电流方向的关系可拟合为

$$C_1 = \begin{cases} C_{1d} = 1590.7 + 31.57T_c & (\text{放电}), \\ C_{1c} = 1842.84 + 25.71T_c & (\text{充电}). \end{cases} \quad (11)$$

2.2 热模型参数辨识

需要辨识的热模型参数包括传导热阻 R_c , 对流热阻 R_u , 电池内核热容 C_c 和表面热容 C_s . 由于内核温度 T_c 很难测量, 只通过容易测量的电流 I , 表面温度 T_s 和冷却空气温度 T_f , 采用最小二乘法辨识热模型参数.

对于一个离散模型

$$Z(k) = \theta^T \phi(k). \quad (12)$$

递归最小二乘算法可表示为^[15]

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P(k)\phi(k)\varepsilon(k),$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)\phi(k)\phi^T(k)P(k-1)}{1 + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)},$$

$$\varepsilon(k) = z(k) - \hat{\theta}(k-1)\phi(k), \quad (13)$$

式中: k 代表时间常数; Z 代表需要观测的量; θ 是需要辨识的参数; ϕ 代表回归量.

为采用最小二乘法辨识热模型参数, 将电池热模型(5)写作

$$\begin{aligned} T_c(k) &= T_c(k-1) + \frac{Q(k-1)}{C_c}\Delta t + \\ &\quad \frac{T_s(k-1) - T_c(k-1)}{R_c C_c}\Delta t, \\ T_s(k) &= T_s(k-1) + \frac{T_f(k-1) - T_s(k-1)}{C_s R_u}\Delta t - \\ &\quad \frac{T_s(k-1) - T_c(k-1)}{C_s R_c}\Delta t. \end{aligned} \quad (14)$$

将难测量的电池内核温度 T_c 用容易测量的电流 I , 表面温度 T_s , 和冷却空气温度 T_f 代替, 式(14)可写作

$$\begin{aligned} T_s(k+2) &= \left(2 - \frac{\Delta t}{C_s R_c} - \frac{\Delta t}{C_c R_c} - \frac{\Delta t}{C_s R_u}\right), \\ T_s(k+1) &+ \left(\frac{\Delta t}{C_s R_c} + \frac{\Delta t}{C_c R_c} + \frac{\Delta t}{C_s R_u} - \right. \\ &\quad \left. \frac{\Delta t^2}{C_c R_c C_s R_u} - 1\right)T_s(k) + \frac{\Delta t}{C_s R_u}T_f(k+1) + \\ &\quad \left(\frac{\Delta t^2}{C_c R_c R_u} - \frac{\Delta t}{C_s R_u}\right)T_f(k) + \frac{\Delta t^2}{C_c R_c C_s}Q(k). \end{aligned} \quad (15)$$

在实验过程中, 冷却空气温度 T_f 一直被控制在一个定值, 即 $T_f(k) = T_f(k+1)$, 式(15)可以化简为

$$\begin{aligned} T_s(k+2) &= \frac{\Delta t^2}{C_c R_c R_u}T_f(k) + \frac{\Delta t^2}{C_c R_c C_s}Q(k) + \\ &\quad \left(2 - \frac{\Delta t}{C_s R_c} - \frac{\Delta t}{C_c R_c} - \frac{\Delta t}{C_s R_u}\right)T_s(k+1) + \\ &\quad \left(\frac{\Delta t}{C_s R_c} + \frac{\Delta t}{C_c R_c} + \frac{\Delta t}{C_s R_u} - \frac{\Delta t^2}{C_c R_c C_s R_u} - 1\right)T_s(k). \end{aligned} \quad (16)$$

进一步地, 式(16)可以表达为

$$\begin{aligned} T_s(k+2) - T_s(k+1) &= \alpha \Delta t^2 Q(k) + \\ &\quad \beta \Delta t^2 (T_f(k) - T_s(k)) + (1 + \gamma \Delta t)(T_s(k+1) - \\ &\quad T_s(k)). \end{aligned} \quad (17)$$

定义

$$\theta = [\alpha \quad \beta \quad \gamma]^T,$$

$$Z(k) = T_s(k+2) - T_s(k+1),$$

$$\phi(k) = [Q(k)T_f(k) - T_s(k)T_s(k+1) - T_s(k)]. \quad (18)$$

观测值 Z 和回归值 ϕ 都能够通过容易测量的电流 I , 表面温度 T_s 和冷却空气温度 T_f 得到,

其中

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{1}{C_c C_s R_c}, \\ \beta &= \frac{1}{C_c C_s R_c R_u}, \\ \gamma &= -\left(\frac{C_c + C_s}{C_c C_s R_c} + \frac{1}{C_s R_u}\right).\end{aligned}\tag{19}$$

参数 α, β, γ 可以被辨识得到. 值得注意的是, 通过式(19), R_c, R_u, C_c, C_s , 四个参数中只能计算得到其中三个参数. 由于电池外壳材质为铝, 可以根据电池外壳铝的热容及尺寸计算得到外壳热容 C_s . 其余三个参数 R_c, R_u, C_c 可表示为

$$\begin{aligned}R_u &= \frac{\alpha}{\beta}, \\ R_c &= \frac{1}{\beta C_c C_s R_u}, \\ C_c &= \frac{C_s R_c R_u \gamma + R_u + C_s}{-C_s R_u},\end{aligned}\tag{20}$$

R_c, C_c, C_s 几乎不会随着电池物理性质的改变而变化, 因此辨识为常数. R_u 主要受风速影响, 在本文的实验中, 风速被控制在2.5 m/s, 因此 R_u 可辨识为常数. 参数辨识在高速(High Speed/Load Transient Control Cycle, US06)工况下进行, US06工况电流, 冷却空气温度, 以及该工况下电池表面温度如图7所示. 在热模型参数辨识实验过程中, 电池初始温度设为25℃, 冷却空气温度一直被控制在25℃, 风速被控制在2.5 m/s. 参数辨识结果如表1所示.

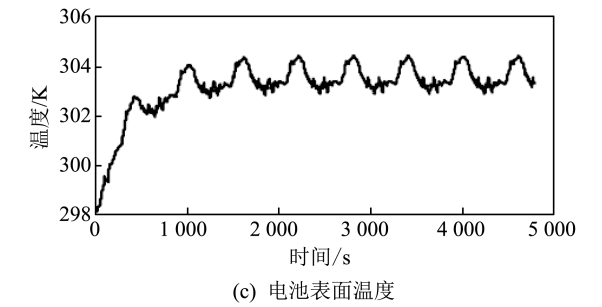
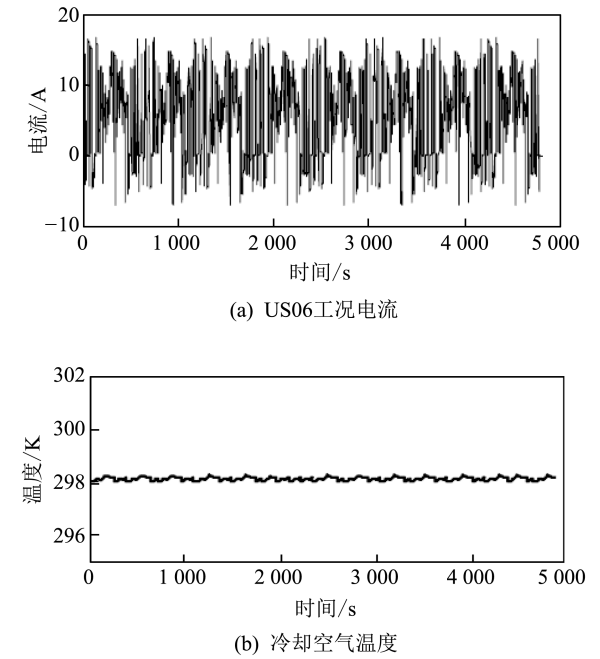


图7 US06工况下的电流、电池表面温度及冷却空气温度

Fig. 7 Measured current, battery surface and flow temperatures under US06 condition

表1 热模型参数辨识	
Tab. 1 Identification of thermal model parameters	
参数	值
电池外壳热容 $C_s/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	4.5
电池核心热容 $C_c/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	63.5
传导热阻 $R_c/(\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	1.98
对流热阻 $R_u/(\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	1.718

3 模型验证结果

在Matlab/Simulink中搭建电池热电耦合模型, 在新欧洲驾驶循环(New European Driving Cycle, NEDC)工况下验证热电耦合模型精度, NEDC工况电流如图8(a)所示, 电池的初始温度为25℃, 冷却空气温度被维持在25℃, 风速被控制在2.5 m/s.

热电耦合模型输出的电压与在NEDC工况下实际测得的电池电压如图8(b)所示. 热电耦合模型估计得到的电池内核温度 T_c , 表面温度 T_s 与实际测得的 T_c, T_s 如图8(c)所示. 从图8(b)可以看出, 热电耦合模型输出的电压大体上可以很好地跟踪实际测量电压, 最大的误差保持在6 mV以内. 从图8(c)可以看出, 在开始小电流放电时, 电池内核温度 T_c 与表面温度 T_s 差距很小, 当持续大电流放电时, 电池内核温度 T_c 与表面温度 T_s 差异变大. 热电耦合模型估计得到的电池表面温度 T_s 与实际测得的 T_s 相差不大. 当大电流充放电时, 热电耦合模型估计得到的电池内核温度 T_c 与实际测得的 T_c 差异变大, 但误差维持在1℃以内. 通过仿真实验, 验证了本文建立的热电耦合模型可以很好地跟踪电池的电压特性及准确地估计电池的内核温度 T_c 与表面温度 T_s , 内核温度估计误差保持在1℃以内.

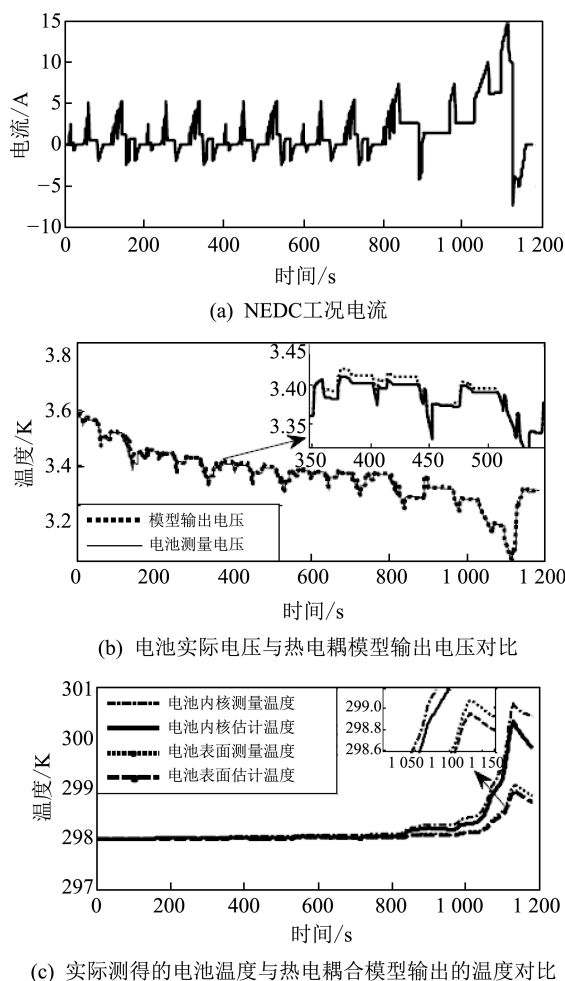


图 8 热电耦合模型验证

Fig. 8 Validation of thermal-electro coupled model

4 结 论

本文将一阶等效电路模型与热模型结合起来,建立了电池的热电耦合模型.分别离线辨识一阶等效电路模型与热模型的参数,然后通过电池生热及电池内核温度数据的传递将两个模型耦合起来.与实验测得的开路电压及电池温度数据相比,验证了本文建立的热电耦合模型可以准确地估计电池内核温度,估计误差在 1°C 以内.但本文只研究了单体电池内核温度的估计,下一步将在考虑电池组中电池间相互影响的基础上,建立电池组的热电耦合模型,估计电池组内核温度.

参考文献:

[1] Zhao R, Gu J, Liu J. Optimization of a phase change material based internal cooling system for cylindrical Li-ion battery pack and a hybrid cooling design[J]. Energy, 2017, 135: 811-822.

[2] Xia G, Cao L, Bi G. A review on battery thermal management in electric vehicle application[J]. Journal of Power Sources, 2017, 367: 90-105.

[3] Situ W, Zhang G, Li X, et al. A thermal management system for rectangular LiFePO_4 battery module using novel double copper mesh-enhanced phase change material plates[J]. Energy, 2017, 141: 613-623.

[4] Basu S, Hariharan K S, Kolake S M, et al. Coupled electrochemical thermal modeling of a novel Li-ion battery pack thermal management system[J]. Applied Energy, 2016, 181: 1-13.

[5] Liaw B Y, Bethune K P, Xiao G Y. Advanced integrated battery testing and simulation[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110: 330-340.

[6] Mahamud R, Park C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196: 5685-5696.

[7] Li X, He F, Ma L. Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation[J]. Journal of Power Sources, 2013, 238: 395-402.

[8] Forgez C, Do D V, Friedrich G, et al. Thermal modeling of a cylindrical/graphite lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195: 2961-2968.

[9] Fan H, Lin M. Thermal management of batteries employing active temperature control and reciprocating cooling flow[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 83: 164-172.

[10] Lin X, Perez H E, Siegel J B, et al. Online parameterization of lumped thermal dynamics in cylindrical lithium ion batteries for core temperature estimation and health monitoring[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21: 1745-1755.

[11] Gao L, Liu S, Dougal R. Dynamic lithium-ion battery model for system simulation[J]. IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies, 2002, 25: 495-505.

[12] 张卫平, 雷歌阳, 张晓强. 锂离子电池等效电路模型的研究[J]. 电源技术, 2016, 40: 1135-1138.

Zhang Weiping, Lei Geyang, Zhang Xiaoqiang. Study on Li-ion battery equivalent circuit models[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40: 1135-1138. (in Chinese)

[13] Newman, Bernardi, Pawlikowski. A general energy-balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132.

terfacial and electrical characterization of HfO₂ gate dielectric film with a blocking layer of Al₂O₃ [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2): 189-192. (in Chinese)

[8] 汤振杰, 殷江, 朱信华, 等. 多层 HfO₂/Al₂O₃ 薄膜基电荷陷阱存储器件的存储特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(12): 1347-1351.
Tang Zhenjie, Yin Jiang, Zhu Xinhua. Characterization of charge-trap memory chip of HfO₂/Al₂O₃ multilayers[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(12): 1347-1351. (in Chinese)

[9] Zheng L, Cheng X, Cao D, et al. Improvement of Al₂O₃ films on graphene grown by atomic layer deposition with pre-H₂O treatment[J]. Acs Appl mater interfaces, 2014, 6(10): 7014-7019.

[10] Iatsunskiy I, Kempinski M, Jancelewicz M, et al. Structural and XPS characterization of ALD Al₂O₃ coated porous silicon [J]. Vacuum, 2015, 113: 52-58.

[11] Renault O, Gosset L G, Rouchon D, et al. Angle-resolved x-ray photoelectron spectroscopy of ultrathin Al₂O₃ films grown by atomic layer deposition[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A Vacuum Surfaces and Films, 2002, 20(6): 1867-1876.

[12] 张文强. Nd₂O₃ 掺杂 HfO₂ 高 *k* 栅介质薄膜的 ALD 制备及性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2017.

[13] Cho M, Hong B P, Park J, et al. Thermal annealing effects on the structural and electrical properties of HfO₂/Al₂O₃ gate dielectric stacks grown by atomic layer deposition on Si substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 237(4): 261-268.

[14] Wang J, Li H P, Stevens R. Hafnia and hafnia-toughened ceramics[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(20): 5397-5430.

[15] Park P K, Kang S W. Enhancement of dielectric constant in HfO₂ thin films by the addition of Al₂O₃[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(19): 247-340.

[16] Yang H Y, Niimi H, Lucovsky G. Tunneling currents through ultrathin oxide/nitride dual layer gate dielectrics for advanced microelectronic devices[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83 (4): 2327-2337.

[17] Kwak H Y, Kwon H M, Kwon S K, et al. Characterization of Al₂O₃-HfO₂-Al₂O₃, sandwiched MIM capacitor under DC and AC stresses[J]. Solid State Electronics, 2013, 79(1): 218-222.

[18] Lan X, Ou X, Cao Y, et al. The effect of thermal treatment induced inter-diffusion at the interfaces on the charge trapping performance of HfO₂/Al₂O₃ nanolaminate-based memory devices[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(4): 044104-1-044104-7.

(上接第 601 页)

[14] Verbrugge M, Tate E. Adaptive state of charge algorithm for nickel metal hydride batteries including hysteresis phenomena[J]. Journal of Power Sources, 2004, 126: 236-249.

[15] 荀倩, 王培良, 李祖欣, 等. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31: 161-169.
Xun Qian, Wang Peiliang, Li Zuxin, et. al. PMSM parameters identification based on recursive least square method [J]. Transactions of china electro technical society, 2016, 31: 161-169. (in Chinese)

(上接第 614 页)

[10] Ham B D, Lockwood S. National needs assessment for ensuring transportation infrastructure security [R]. Vienna: Aashto Transportation Security Task Force, 2002.

[11] 孔立新, 金丰年, 蒋美荣. 恐怖爆炸袭击方式及规模分析[J]. 爆破, 2007, 24(3):88-92.
Kong Lixin, Jin Fengnian, Jiang Meirong. Analysis of way and scale of terroristic raid [J]. Blasting, 2007, 24(3): 88-92. (in Chinese)

[12] 北京工业学院. 爆炸及其作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1957.

[13] 周霖, 张向荣. 炸药爆炸能量转换原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

[14] 炸药理论编写组. 炸药理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.