

不同温度下磷酸铁锂电池的模型参数敏感性分析

王明珠, 肖占龙, 郑岳久

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 为实现电池的高精度状态估计, 对磷酸铁锂电池进行了 4 个不同温度下的基础性能实验, 同时设计了一种变温工况下获得全荷电状态 (SOC) 范围的开路电压实验方法, 为建立考虑温度因素的二阶 RC 电池模型以及参数敏感性分析提供数据支持。此外, 利用不同温度下的混合功率脉冲测试数据, 基于粒子群优化算法辨识得到了不同温度下准确的模型参数。最后, 基于单次单因子法对已建立的电池模型中各个参数进行敏感性分析, 分析结果对考虑温度的参数辨识和状态估计工作具有借鉴意义。

关键词: 不同温度; 磷酸铁锂电池; 等效电路模型; 参数辨识; 敏感性分析

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

Sensitivity analysis of model parameters of LiFePO_4 battery at different temperatures

WANG Mingzhu, XIAO Zhanlong, ZHENG Yuejiu

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to realize the high precision state estimation of battery, the basic performance experiments of LiFePO_4 battery were carried out at four different temperatures. At the same time, an experimental method is designed to obtain the open circuit voltage of the full state of charge (SOC) range under variable temperature conditions, which provided data support for the establishment of the second-order RC battery model considering temperature factors and the parameter sensitivity analysis. In addition, using the test data of hybrid pulse power characterization at different temperatures, the accurate model parameters at different temperatures were identified based on the particle swarm optimization algorithm. Finally, the sensitivity analysis of each parameter in the established battery model was carried out based on the one factor of a time method. The analysis results can be used for reference for parameter identification and state estimation considering temperature.

Keywords: different temperatures; LiFePO_4 battery; equivalent circuit model; parameter identification; sensitivity analysis

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52277222); 上海市自然科学基金资助项目 (22ZR1444500)

第一作者: 王明珠 (1999-), 女, 硕士研究生。研究方向: 锂电池状态估计。E-mail: wangmingzhu412@163.com

通信作者: 郑岳久 (1986-), 男, 教授。研究方向: 锂电池管理系统。E-mail: yuejiu.zheng@usst.edu.cn

作为新能源汽车的动力源，锂离子电池凭借其高能量密度、低自放电率和高使用寿命的优点占据了市场主导地位，其中，磷酸铁锂电池由于其安全性高和性价比高而更受青睐，成为了电动汽车的主要动力选择^[1-4]。选择合适的电池模型并进行分析是研究电池管理系统的基础，电池模型分为：等效电路模型^[5](equivalent circuit model, ECM)、电化学机理模型和数据驱动模型^[6-7]。ECM通过电子元件建立等效电路模拟电池的外特性，例如一阶RC、二阶RC等，模型的阶数越高精度越好，但不可避免地会增加计算量。Jiang等^[7]就采用一阶RC模型来描述电池的动态特性，进行了状态估计研究；Hu等^[8]比较了12种常用的ECM的精度、复杂度和鲁棒性，认为磷酸铁锂电池使用一阶RC模型加上单状态的滞回量就可达到端电压估计精度；Feng等^[9]对ECM进行了改进研究，但没有考虑温度对参数的影响；Johnson等^[10]使用Rint模型描述电池的动态特性，开路电压和欧姆内阻都是荷电状态(state of charge, SOC)和温度的函数，但该模型缺少RC环节，无法描述电池内部的极化现象。

电池模型的参数辨识工作一般通过遗传算法、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法等智能优化算法来实现，在设定合理的参数上下限范围内寻找最优参数^[11-12]。选择一个复杂度不高且精度较高的电池模型是非常关键的。既要保证模型精度，又要减少不必要的参数，最小化计算成本，就需要对模型参数进行敏感性分析，识别到敏感参数，进而减少对非敏感参数的关注，防止浪费时间细化输出不敏感的参数。目前，大多数研究都是集中在电化学模型参数的简化上^[13]，此外，夏国栋等^[14]研究了燃料电池的参数敏感性；匡柯等^[15]对电化学机理模型进行参数敏感性分析从而改进建模方法，提高了模型精度；钟文京^[16]对锂离子电池的温度敏感性做了分析，但是忽略了对参数的研究。他们都没有对ECM进行敏感性分析，然而，ECM是应用最多的电池模型之一，其参数是时变的，一般是SOC、温度等参数的函数，所以，有必要对ECM进行敏感性分析来提高计算效率。

因此，本文首先研究了磷酸铁锂电池的温度特性，以此作为模型研究和敏感性分析的数据基础，选用考虑温度因素的二阶RC模型，利用PSO算法辨识出不同温度下的模型参数组合。最后，

基于单次单因子法(one factor of a time, OFAT)对建立好的电池模型各参数进行敏感性分析，在保证模型精度的同时降低不敏感参数的识别频率。

1 研究方法

1.1 温度特性实验

1.1.1 不同温度的基础性能实验

选用天津力神电池公司的磷酸铁锂电池作为实验对象，实验时将电池单体置于高低温交变的试验箱内，采用新威电池测试系统进行不同温度与不同搁置时间的变温实验。电池的基本性能参数如表1所示。

表 1 实验用电池基本性能参数
Tab.1 Basic performance parameters of the battery used in the experiment

参数	数值
标称容量/Ah	20
标称电压/V	3.2
充电截止电压/V	3.65±0.5
放电截止电压/V	2.0
标准充放电电流/A	1/3C
充电温度/℃	0~45
放电温度/℃	-20~60

为了研究磷酸铁锂电池的温度特性，首先进行不同温度下的标准容量测试，得到不同温度下的标准容量，并做容量特性分析。实验中调整温箱温度至4个不同温度45，25，5，-15℃，并分别设置不同的搁置时间3，3，4，5h，使电池达到稳态。

其次，进行不同温度的混合功率脉冲特性(hybrid pulse power characterization, HPPC)测试，以获得不同温度下电池的开路电压和内阻。分别在4个温度点进行恒温下的HPPC测试，以此得到相应温度下的开路电压和欧姆内阻，同上述容量实验中的搁置时间，在每个恒流放电结束后设计不同的搁置时间。此外，需要利用不同温度下的新欧洲标准行驶循环(new european driving cycle, NEDC)放电工况实验为敏感性分析提供数据基础，温箱温度被调整至4个温度分别进行放电循环，具体步骤在此不赘述。

1.1.2 变温下开路电压实验

因不同温度下电池可放电能力的差异，导致

电池的 SOC 在较低温度下都没有放电至 0%, 所以采用上述 HPPC 实验方法无法得到低温下全 SOC 区间的电池开路电压。因此本文设计了一种变温开路电压实验, 电池所处的环境温度分别为 45, 25, 5, -15 °C。具体实验步骤如下:

a. 以 1/3C 恒流恒压充电将电池充满电;

b. 将电池搁置在 45 °C 温度条件下足够长的时间, 此时测得的端电压可作为电池的开路电压。再由 45 °C 逐次降温至 25, 5, -15 °C, 分别都搁置一定时间, 由此得到电池在该 SOC 点下各个温度点的开路电压;

c. 搁置结束后, 将温度调节至 25 °C, 搁置足够长的时间, 以 1/3C 的电流对电池恒流放电至下一个 SOC 点, 静置。再次执行步骤 b, 得到电池在该 SOC 点下各个温度点的开路电压;

d. 重复循环步骤 b 与步骤 c, 持续放电到截止电压。

为了得到各个温度点的开路电压, 需要搁置足够长的时间, 但是, 随着温度的下降, 电池内部极化反应缓慢, 搁置时间应该逐渐延长。所以, 在 45 °C 时搁置 3 h, 在 25 °C 时搁置 3 h, 在 5 °C 时搁置 4 h, 在 -15 °C 时搁置 5 h, 图 1 为变温开路电压实验流程图。

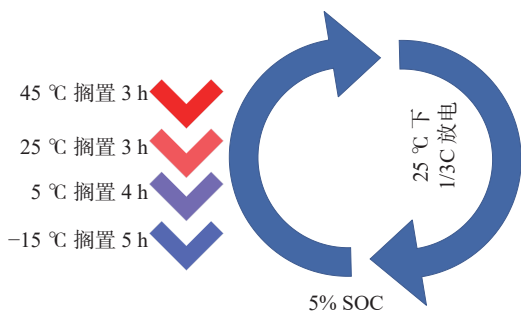


图 1 变温开路电压实验流程图

Fig.1 Flow chart of variable temperature open circuit voltage experiment

1.2 电池模型及参数辨识方法

准确选择电池模型是实现电池高精度状态估计的前提, 综合考虑模型的复杂度、精确度、实施便利性和实用价值后, 一般选用 RC 等效电路模型, 其中 RC 阶数越高, 精确度越高, 但复杂度也越高, 同时由于需要考虑参数随温度的变化, 故选用考虑温度因素的二阶 RC 模型来模拟磷酸铁锂电池特性, 模型如图 2 所示。

上述模型中: U_o 代表电池的开路电压; I 是电池的充放电电流; U_i 表示电池的端电压; R_o 表示

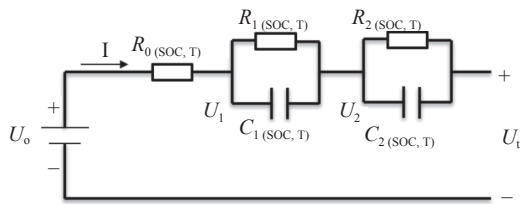


图 2 考虑温度因素的二阶 RC 模型

Fig.2 Second-order RC model considering temperature

欧姆内阻。电化学极化内阻 R_1 和浓差极化内阻 R_2 分别与极化电容 C_1 和 C_2 并联组成两个 RC 结构, U_1 和 U_2 分别是两个 RC 结构端的电压, 这两个电压被用来仿真出电池极化时的电压升降特点。

建立了考虑温度的电路模型之后, 由于模型中的各个参数不能直接测量得到, 需要根据电池在实际工况下的实验数据对模型中的未知参数进行参数辨识。本文选用计算速度快、编程简单的 PSO 算法进行参数辨识, 模型待辨识参数如下:

$$\theta = [R_c, R_d, R_1, \tau_1, R_2, \tau_2] \quad (1)$$

式中: R_c 表示充电欧姆内阻; R_d 表示放电欧姆内阻; τ_1 和 τ_2 分别表示电化学时间常数和浓差时间常数; $\tau_1 = R_1 C_1$, $\tau_2 = R_2 C_2$ 。本文使用模型端电压与电池实验的实测端电压之间的均方根误差 (rooted mean squared error, RMSE) 评估电池模型的精度, 因此, PSO 算法的适应性函数为

$$\hat{F}(\hat{\theta}_k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (U_k - \hat{U}_k(\hat{\theta}_k))^2} \quad (2)$$

式中: $\hat{F}(\hat{\theta}_k)$ 为模型在 k 时刻的 RMSE; N 为数据点的个数; U_k 和 $\hat{U}_k$ 分别表示在 k 时刻的电池实测端电压和模型估计的端电压; $\hat{\theta}_k$ 为模型中各个参数的估计值。

参数辨识过程如图 3 所示。输入实验测得的电流, 电池模型会根据输入由上述介绍公式输出模型模拟出的端电压, 将输出端电压与真实端电压做差, 得到电池模型的电压误差。PSO 算法会根据上一刻各种模型参数组合的模型误差代入到适应性目标函数中, 再迭代产生下一刻的模型参数, 形成闭环, 如此进行不断的迭代更新, 直到找到一个令适应性目标函数达到最小值的参数组合, 此时就得到最优的模型参数, 即最优解。

1.3 敏感性分析方法

在整个 SOC 范围和温度范围内分析 ECM 的敏感性, 以阐明参数变化对模型输出的影响。通过研究每个参数的敏感性来确定具有高敏感度的

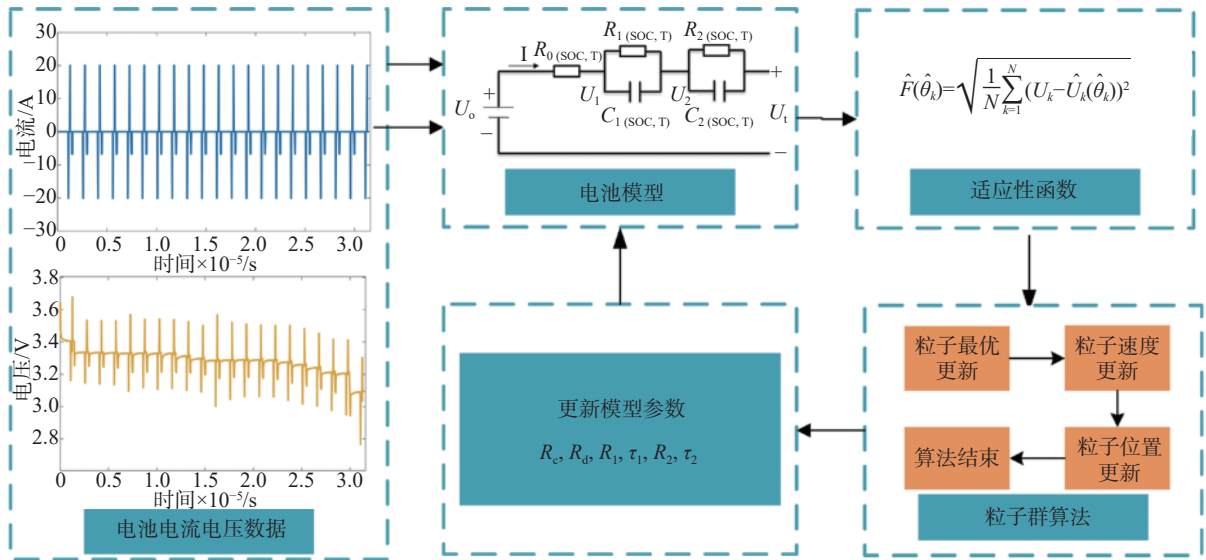


图3 电池模型参数辨识过程

Fig.3 Battery model parameter identification process

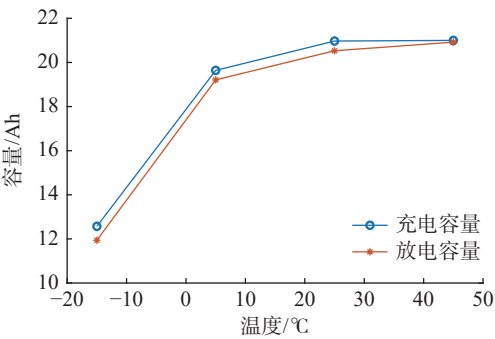
关键参数，以避免在不敏感参数上浪费时间，即在保证模型精度的同时最小化计算成本。模型参数敏感性分析是研究模型输入的不确定性对模型输出的干扰程度，这个过程有利于理解模型对其参数变化的敏感性，而且还可以根据每个参数对模型输出不确定性的贡献对其进行排序。敏感性分析中最常用的局部方法是 OFAT 法，该方法的基本原理是在改变一个模型输入因子时，同时保持其他因子的标称值，计算模型输出响应。OFAT 法的优点是可以简单而快速地确定输入因子的变化对模型输出的影响。

利用 PSO 算法辨识得到 4 个温度下全 SOC 范围的模型的各个参数，根据参数辨识的结果分析模型中全部 SOC 范围内每个参数的敏感度。使用 OFAT 方法分析参数敏感性，即在分析一个参数的敏感度时，该参数值被更改为该参数的 0.5~1.5 倍，同时保留其他参数的值，然后在模型中依次替换该参数的值，并获得相应的模型误差，模型误差的波动反映了参数敏感性。利用 RMSE 表示模型误差，即 RMSE 值波动越大，该参数敏感性越强。

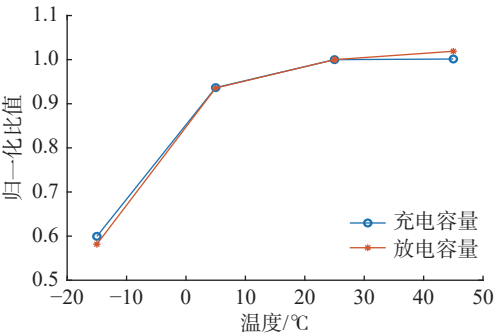
2 温度特性分析

2.1 容量特性分析

基于磷酸铁锂电池在不同温度下的容量实验，利用安时积分法计算得到了电池在不同环境温度下的标准充放电容量，并基于 25℃ 对电池的



(a) 充放电容量



(b) 容量归一化

图4 不同温度下的容量和容量归一化

Fig.4 Capacities and capacity normalization at different temperatures

充放电容量都做了归一化比较，结果如图4所示。

由图4(a)可以看出，当温度降低时，电池的两种容量都逐渐减小，尤其在 0℃ 以下时，可充放电容量大幅度减小。如图4(b)所示，在 -15℃ 时，磷酸铁锂电池的充放电容量较 25℃ 时分别减小了 40.06%，41.84%。相同的温差下，电池低温

时的可充放容量变化要大于高温时的容量变化。

2.2 内阻特性分析

环境温度与电池的充放电内阻有很强的关联性, 尤其是低温环境下, 电池内部电阻会迅速增加。由不同环境温度下的 HPPC 测试, 得到不同环境温度下的总内阻。充放电内阻与 SOC 和环境温度的关系如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 环境温度越低, 电池的充放电内阻都越大, 5℃ 与 -15℃ 时的充放电内阻明显高于 25℃ 的充放电内阻。在高温时, 电池的内阻变化几乎可以忽略不计。从容量和内阻随温度的变化情况来看, 磷酸铁锂电池的参数受温度影响较大。

2.3 开路电压特性分析

磷酸铁锂电池变温下的开路电压如图 6 所示。由于都是在 25℃ 下对电池放电来调整电池的 SOC, 此时, 电池的内阻是固定的, 这样能真实地表现出不同温度下电池的开路电压随 SOC 变化的趋势。由图 6(b) 可以看出, 各个温度下的开路电压与 25℃ 的开路电压差值并不大, 因此, 本文认为在整个 SOC 范围内, 不同温度下的开路电压

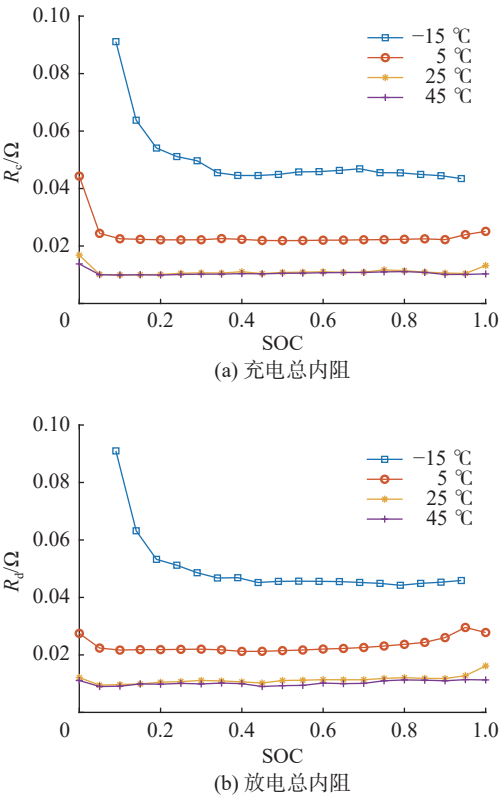


图 5 磷酸铁锂电池在不同温度下的总内阻

Fig. 5 Total internal resistance of LiFePO₄ battery at different temperatures

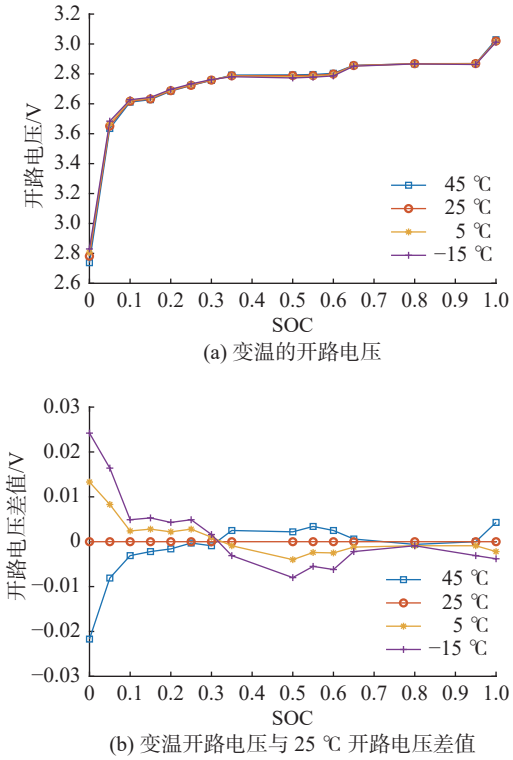


图 6 不同温度下的开路电压与差值

Fig. 6 Open circuit voltages and difference at different temperatures

基本是相同的。

3 模型参数辨识结果分析

为了获得上文建立的模型在不同温度下的精确参数, 利用 PSO 算法参数辨识得到不同温度下的模型参数如图 7 所示。根据辨识结果可以看出, 模型中的充放电欧姆内阻, 两个极化内阻以及两个时间常数都是受温度和 SOC 影响的参数, 只是对温度表现出的敏感度不同。

在得出不同温度下的模型参数后, 利用不同温度下 NEDC 放电工况实验数据, 验证了由上述模型参数组合形成的电池模型的精度, 以 45℃ 的模型端电压与实测端电压的曲线以及误差曲线为例, 结果如图 8 所示。

在 45℃ 时, 模型电压的平均误差为 0.004 V, 相对误差为 0.125%。在低 SOC 时, 由于电池内部的极化反应会加剧, 此时误差才比较大, 电压最大误差为 0.091 V, 最大相对误差为 2.84%, 模型的总均方根误差为 0.018 V。可见, 基于 PSO 算法辨识得到的模型参数组成的模型可以很好地模拟出电池的端电压。

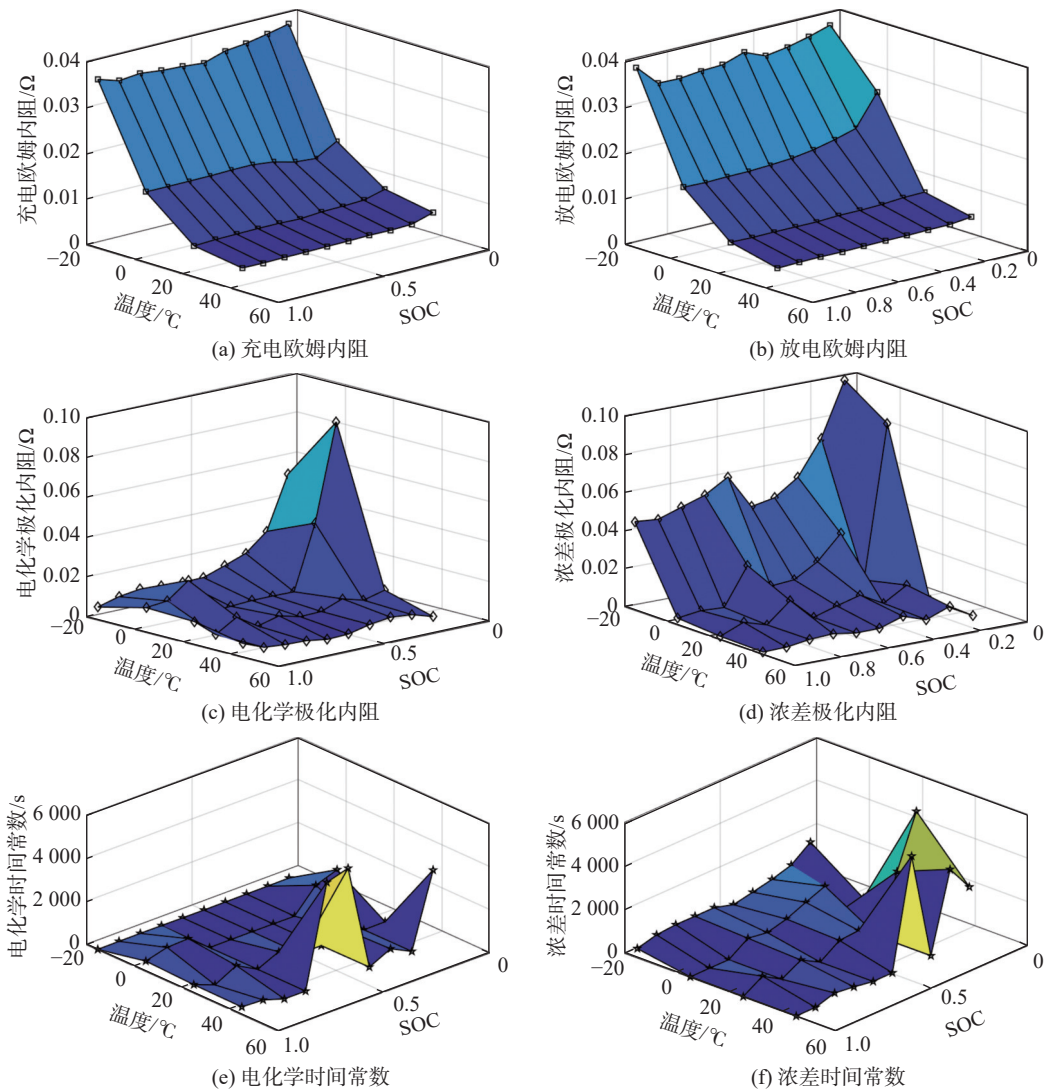


图 7 不同温度下模型参数辨识结果

Fig.7 Identification results of model parameters at different temperatures

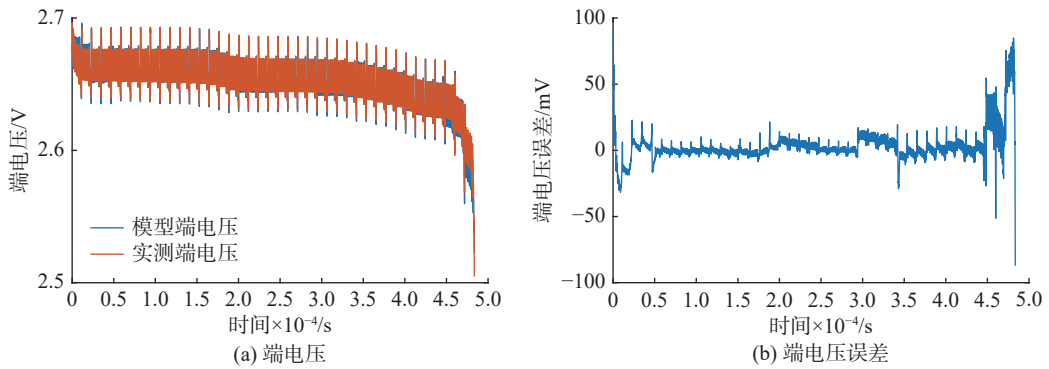


图 8 45 °C 时的模型端电压和电压误差

Fig.8 Model terminal voltage and voltage error at 45 °C

4 模型参数敏感性分析

4.1 整个 SOC 范围内的参数敏感性分析

根据参数辨识的结果分析模型中全部 SOC 范围内每个参数的敏感度，使用 OFAT 方法分析参

数敏感性，模型误差采用 RMSE 进行衡量，即 RMSE 值波动越大，该参数敏感性越强。基于上述方法，利用 25 °C 的 NEDC 放电工况数据获得了磷酸铁锂电池模型的模型参数敏感度，图 9 展示了电池模型的每个参数在整个 SOC 范围内的敏感

度。其中 K 是模型参数改变之后与参数改变之前的比值，用来表示模型参数的偏差程度， d_r 是 $K=1.5$ 与 $K=1.0$ 的均方根误差之比，它动态反映了参数敏感度的稳定性，描述了电池模型参数敏感度的变化率。从图中可以观察到充放电欧姆内阻的敏感度最大，并且 R_d 比 R_c 更敏感，其次是 R_1 和 R_2 ，而 τ_1 和 τ_2 敏感性最低。

通过以上分析可以得出：对于考虑温度因素的磷酸铁锂电池模型来说，电池各内阻的敏感度

远高于时间常数的敏感度，以此指出了模型中的关键参数，因而可以重点辨识敏感度高的参数，适当降低敏感度较低的模型参数的识别频率，进而来提高效率和降低计算成本。

4.2 不同温度下的参数敏感性分析

利用磷酸铁锂电池不同温度下的 NEDC 放电工况实验数据，研究了不同环境温度下 ECM 模型参数的敏感性，图 10 给出了磷酸铁锂电池在不同环境温度下的模型参数敏感度。

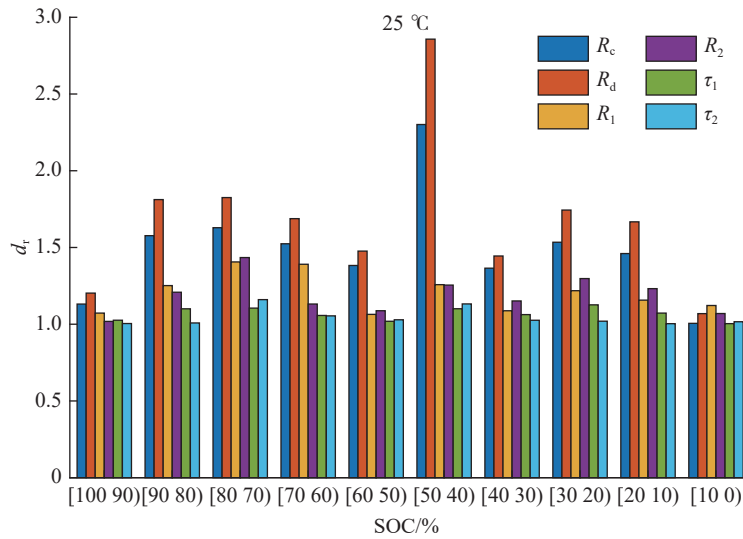


图 9 整个 SOC 范围内的参数敏感度变化率

Fig.9 The rate of change of parameter sensitivity over the SOC range

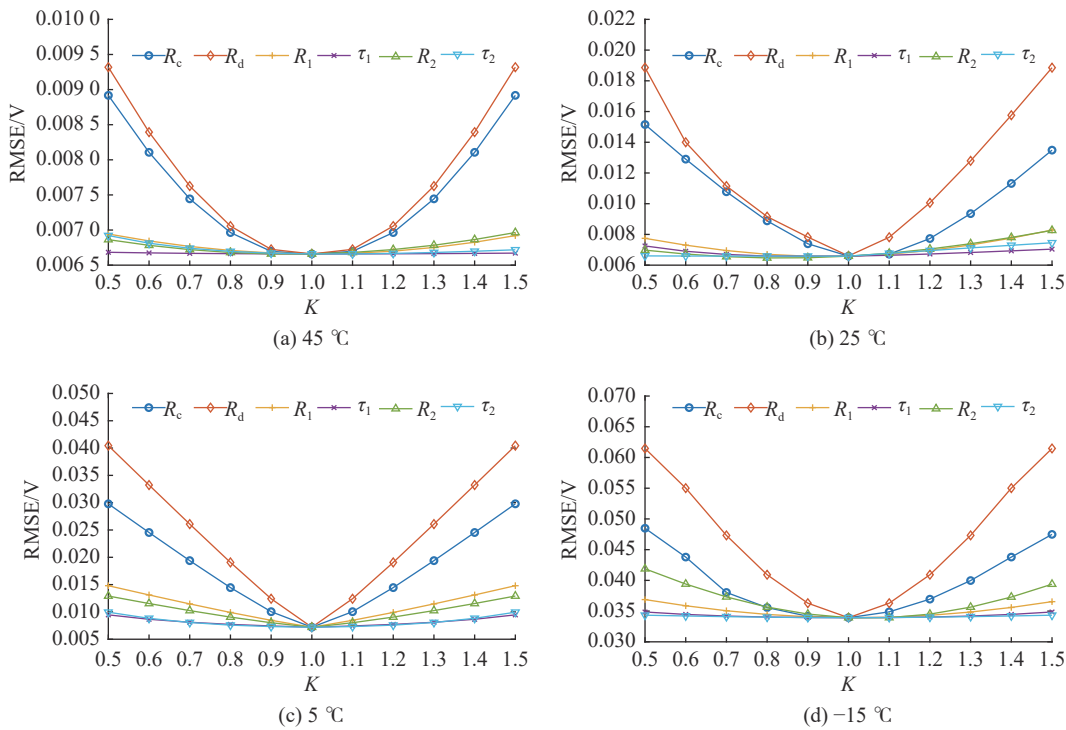


图 10 磷酸铁锂电池在不同温度下的参数敏感度 (50%SOC)

Fig.10 Parameter sensitivity of LiFePO₄ battery at different temperatures (50%SOC)

由图 10 可以看出,所有参数的敏感度随环境温度的变化而变化,一般来说,在不同的环境温度下, R_c 和 R_d 都具有很高的敏感度, R_1 和 R_2 敏感度次之。随着环境温度的降低,电池各内阻的敏感度逐步升高。当温度为 45℃、 $K=1.5$ 时, R_1 和 R_2 的偏置引起的 RMSE 值约为 1 mV,而当温度为-15℃、 $K=1.5$ 时,该值增加为约 7 mV,其他参数的敏感度基本保持不变。

5 结 论

在不同温度下的磷酸铁锂电池性能实验的基础上,设计了一种变温工况下获得全 SOC 范围的开路电压的实验方法,更加准确地研究了磷酸铁锂电池的开路电压特性。其次利用不同温度下的 HPPC 测试数据,基于粒子群优化算法辨识得到了不同温度下的模型参数。最后基于上述实验数据,在不同温度下进行了参数敏感性分析。研究表明:电池的充放电内阻的敏感度最高,极化内阻的敏感度较高,时间常数的敏感性最低;随着温度的降低,充放电内阻的敏感性有所提升,而时间常数的敏感度基本不变。该结论一方面表明:不敏感参数在不同温度下对模型的精度影响不变,且识别到 ECM 的敏感参数可以减少对其非敏感参数准确性的关注;另一方面,可以在电池状态估计工作中给予借鉴意义,比如进行电池在不同环境温度下的状态估计研究工作时,应持续识别和校正敏感度高的参数,降低敏感度低的参数的识别频率。

参考文献:

- [1] LU L G, HAN X B, LI J Q, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 226: 272–288.
- [2] 李哲. 纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [3] ZHANG X, WANG B Y, ZHAO S, et al. Oxygen anionic redox activated high-energy cathodes: status and prospects[J]. *eTransportation*, 2021, 8: 100118.
- [4] QIN P, SUN J H, YANG X L, et al. Battery thermal management system based on the forced-air convection: a review[J]. *eTransportation*, 2021, 7: 100097.
- [5] TANG X P, WANG Y J, ZOU C F, et al. A novel framework for Lithium-ion battery modeling considering uncertainties of temperature and aging[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 162–170.
- [6] SU L S, WU M C, LI Z, et al. Cycle life prediction of lithium-ion batteries based on data-driven methods[J]. *eTransportation*, 2021, 10: 100137.
- [7] JIANG B, DAI H F, WEI X Z, et al. Online reliable peak charge/discharge power estimation of series-connected lithium-ion battery packs[J]. *Energies*, 2017, 10(3): 390.
- [8] HU X S, LI S B, PENG H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 198: 359–367.
- [9] FENG T H, YANG L, ZHAO X W, et al. Online identification of lithium-ion battery parameters based on an improved equivalent-circuit model and its implementation on battery state-of-power prediction[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 281: 192–203.
- [10] JOHNSON V H. Battery performance models in ADVISOR[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 321–329.
- [11] HE H W, XIONG R, FAN J X. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach[J]. *Energies*, 2011, 4(4): 582–598.
- [12] DAI H F, XU T J, ZHU L T, et al. Adaptive model parameter identification for large capacity Li-ion batteries on separated time scales[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 119–131.
- [13] EDOUARD C, PETIT M, FORGEZ C, et al. Parameter sensitivity analysis of a simplified electrochemical and thermal model for Li-ion batteries aging[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 325: 482–494.
- [14] 夏国栋, 张晓亚, 马丹丹, 等. 质子交换膜燃料电池参数敏感性分析 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 493–499.
- [15] 匡柯, 孙跃东, 任东生, 等. 车用锂离子电池电化学-热耦合高效建模方法 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 10–22.
- [16] 钟文京. 电动汽车用锂离子电池的温度敏感性分析研究 [J]. 电子测试, 2015(24): 64–65, 144.

(编辑: 董 伟)