DOI: 10.3901/JME.2020.14.146

基于双卡尔曼滤波算法的动力电池 内部温度估计*

熊 瑞 李幸港

(北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081)

摘要: 准确的内部温度估计对提高动力电池使用安全和可靠性极为重要, 然而, 受限于传感器和测试手段等因素, 内部温度难以实时获取。通过融合 Bernardi 电池生热模型与热路传热模型, 应用状态方程分析法实施了电池内外温度的表达, 建立了温度的离散时间系统; 利用双扩展卡尔曼滤波, 建立电池内部温度和环境参数的实时估计模型, 实现了电池内部温度在线估计。基于内置温度传感器的动力电池测试验证表明, 该方法能在线估算锂离子动力电池的内部温度, 估计误差小于 1 °C, 为动力电池的实时安全监控提供了有力保障。

关键词: 电动汽车; 动力电池; 内部温度估计; 双扩展卡尔曼滤波

中图分类号: TP912

Battery Internal Temperature Estimation Method through Double Extended Kalman Filtering Algorithm

XIONG Rui LI Xinggang

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Accurate battery internal temperature is very important to improve the safety and reliability of battery applications. However, due to many factors such as sensors and testing methods, its internal temperature is difficult to measure online. After integrating the Bernardi battery heat generation model and heat transfer model, the internal and external temperature of the battery is expressed using the equation of state analysis to obtain a discrete-time system of temperature; the double extended Kalman filter is used to establish the real-time temperature and environmental parameters of the battery. The estimation model realizes online estimation of the internal temperature of the battery. Results of the battery through the built-in temperature sensor show that the method can estimate the internal temperature of online with an error of <1 °C and high accuracy.

Key words: electric vehicle; battery; internal temperature estimation; double extended Kalman filter

0 前言

近年来, 随着电动车辆技术的迅速发展, 动力电池因其高比功率、高比能量等诸多优点得到广泛应用^[1-2]。但作为燃油代替品, 实际使用中潜在的着火、冒烟和漏液等安全问题仍然严重阻碍着电动车辆的规模化应用^[3]。因此, 动力电池的热管理, 尤其是其内部温度的精准监测成为当前研究重点, 也是长寿高安全运行的核心与关键^[4-5]。

动力电池结构复杂、生热时变性强与应用环境复杂、易变等特点导致其温度分布不均匀、环境依赖性强与内部温度偏高, 而且电池结构封闭、长时间内置传感器严重影响使用安全, 造成动力电池温度, 尤其是内部温度的精准测量困难。因此, 通常应用热模型方法推算温度。现有的电池热模型包括集总热模型、偏微分方程插值热模型、有限元模型等^[6-7]。集总热模型, 亦称零维模型, 是将电池看作集中参数的点单元开展计算, 1995 年, PALS^[8]通过建立电池生热的零维模型, 模拟预测了锂聚合物电池的温度。KIM 等^[9]通过求解一维偏微分方程的方法, 建立了电池的一维生热模型, 可获得电池的

* 北京市科技计划高可靠性全气候电池工程化技术开发资助项目 (2181100004318005)。20200124 收到初稿, 20200503 收到修改稿

径向温度分布。TORCHIO 等^[10]通过有限体积法建立准二维锂离子电池模型,并实现了电池温度的仿真模拟。MEI 等^[11]利用有限元仿真软件,完成对锂电池三维模型的温度场计算并提出了安全性设计建议。

通常针对不同的工程应用环境,使用与其匹配的模型进行温度场求解,而实车应用中,对模型的要求极为苛刻,需要在满足电池管理系统硬件计算量的同时,实现内部温度的实时计算,且能对复杂多变的散热环境保持较好的适应性。集总模型虽然计算量小,但能够提供的温度信息极其有限,且精度较差。有限元模型具有较好的准确度,与之带来的巨大计算量使其无法适用于在线管理中。热路模型为电池内部温度的实时估计提供了一种解决途径。在电池温度场研究中,将其离散为网络,使用热源、热阻和温度来描述热现象,并将分布的真实热源和热阻等效为少量的集中热源和等效热阻^[11]。其中,假设集中热源和热阻不随热流的大小而改变,根据传热学和电路理论,可为热传递过程建立等效热路模型,并利用已经成熟的电路理论,实现对热路模型的分析求解。

本文通过试验获取动力电池的熵热系数建立精准的生热模型;基于简化后的热路模型对其内部温度与环境参数量进行在线估计;采用内置温度传

感器的动力电池开展温度测量与算法验证,结果表明该模型能够实现多工况复杂电流下的内部温度实时计算,鲁棒性较好、适应性强。

1 电池温度估计模型

1.1 热路模型

为了求解动力电池内部温度,本研究基于以下假设建立 18650 圆柱形电池热模型:① 电池内部是一个均匀的产热源;② 电池沿轴向温度均匀分布;③ 热量仅通过径向方向向外传递^[12]。图 1 是该动力电池热路模型的示意图,将电池分别沿轴向方向与径向方向 n 等分,各单元都存在自身的热阻与热容。在轴向方向上,半径相等处的单元热阻与热容为并联关系,而在径向方向上,不同半径处单元的热阻与热容为先并后串关系。考虑到试验只能测量电池中心与表面的两点温度,此处取 $n_r=1$ 。并将并联的电阻与电容分别合并简化得到最终模型。简化后的 Q_{cell} 为电池集中产热源; C_{cell} 为电池的热容; R_{cell} 为电池内部与表面之间的热阻; R_{air} 为电池表面与接触空气之间的热阻(可视作散热表征参数); C_{air} 为接触空气的热容; T_c 、 T_s 和 T_{air} 则分别代表电池内部中心温度、电池表面温度和电池周围环境温度。

图 1 动力电池热路模型示意图

1.2 生热模型

本质为化学系统的锂离子动力电池工作时由于不同的充放电倍率将引起时变的产热速率,从而导致电池内外温度的差异。因此,对电池热源的计算与分析是获取其内部温度的基础。电池产热受到温度、老化、荷电状态(State of charge, SOC)和充放电

电流的影响;BERNARDI 根据热力学第一定律推导出了电池的产热表达式^[13]

$$Q_{\text{cell}} = I \left[(E - U_t) - T \frac{dE}{dT} \right] \quad (1)$$

式中, I 为动力电池充放电电流; E 为动力电池开路电压; U_t 为动力电池端电压; T 为动力电池温度(开

尔文温度); dE/dT 为电池的熵热系数。

动力电池的熵热系数是指电池电压对温度的导数,其数值在不同 SOC 下存在显著差异。电池内部化学反应,是导致充电与放电过程中生热规律相异的原因,熵热系数用于计算电池的化学反应产热,是影响生热模型准确性的关键参数。为保证模型的准确性与可靠性,本次研究设计取变化 11 处不同 SOC (间隔 10%SOC) 下电池温度,观察并记录其电压变化值。最终获取的熵热系数结果如图 2 所示。

图2 电池熵热系数-SOC 曲线

2 基于双卡尔曼滤波的温度计算

2.1 热路模型的求解

基于热路模型理论,分别使用电容和电阻描述热容和热阻;将热源视为电路中的直流源;而温度则等效为该点处的电势。由此,结合电路模型的基尔霍夫定律,推导得到动力电池的热路模型的求解方程

$$Q_{\text{cell}} = C_{\text{cell}} \frac{dT_c}{dt} + \frac{T_c - T_s}{R_{\text{cell}}} \quad (2)$$

$$\frac{T_c - T_s}{R_{\text{cell}}} = C_{\text{air}} \frac{d(T_s - T_{\text{air}})}{dt} + \frac{T_s - T_{\text{air}}}{R_{\text{air}}} \quad (3)$$

整理即可得到

$$C_{\text{cell}} T_c = Q_{\text{cell}} - \frac{T_c - T_s}{R_{\text{cell}}} \quad (4)$$

$$C_{\text{air}} T_s = \frac{T_c - T_s}{R_{\text{cell}}} - \frac{T_s - T_{\text{air}}}{R_{\text{air}}} \quad (5)$$

$$\text{令 } \mathbf{x} = (T_c \ T_s)^T, \ \mathbf{y} = T_s, \ \mathbf{u} = (Q_{\text{cell}} \ T_{\text{air}})^T,$$

则有

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{R_{\text{cell}}C_{\text{cell}}} & \frac{1}{R_{\text{cell}}C_{\text{cell}}} \\ \frac{1}{R_{\text{cell}}C_{\text{air}}} & -\frac{1}{C_{\text{air}}}\left(\frac{1}{R_{\text{cell}}} + \frac{1}{R_{\text{air}}}\right) \end{pmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{R_{\text{cell}}}{C_{\text{cell}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{\text{air}}C_{\text{air}}} \end{pmatrix} \\ \mathbf{C} = (0 \ 1) \\ \mathbf{D} = (0 \ 0) \end{cases} \quad (7)$$

2.2 双扩展卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)基于已知模型状态空间方程及噪声特性,以最小均方差为准则,结合上一时刻估计值与当前时刻的观测值进行修正,完成当前状态更新。而双扩展卡尔曼滤波(Dual EKF, DEKF) 融合了两个 EKF 同时运算,协同状态估计与参数估计,结合参数估计器得到的反馈修正系数、实时调整状态估计器中的参数值,最终实现状态与参数的协同在线估计。DEKF 的实施流程如图 3 所示。

图3 DEKF 计算流程图

协方差矩阵初始化

$$\mathbf{P}_0^x \ \mathbf{P}_0^\theta \ \mathbf{Q}_0^x \ \mathbf{Q}_0^\theta \ \mathbf{R}_0^x \ \mathbf{R}_0^\theta \quad (8)$$

参数观测器的时间更新

$$\theta_k^- = \theta_{k-1}^+ \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_k^{\theta,-} = \mathbf{P}_{k-1}^{\theta,+} + \mathbf{Q}_{k-1}^\theta \quad (10)$$

状态观测器的时间更新

$$\mathbf{x}_k^- = \mathbf{A}_{k-1}\mathbf{x}_{k-1}^+ + \mathbf{B}_{k-1}\mathbf{u}_{k-1} \quad (11)$$

$$P_k^{x,-} = A_{k-1} P_{k-1}^{x,+} A_{k-1}^T + Q_{k-1}^x \quad (12)$$

状态观测器的测量更新

$$K_k^x = P_k^{x,-} (C_k^x)^T (C_k^x P_k^{x,-} (C_k^x)^T + R_k^x)^{-1} \quad (13)$$

$$x_k^+ = x_k^- + K_k^x [y_k - C_k^x x_k^- - D u_k] \quad (14)$$

$$P_k^{x,+} = (I - K_k^x C_k^x) P_k^{x,-} \quad (15)$$

参数观测器的测量更新

$$K_k^\theta = P_k^{\theta,-} (C_k^\theta)^T (C_k^\theta P_k^{\theta,-} (C_k^\theta)^T + R_k^\theta)^{-1} \quad (16)$$

$$\theta_k^+ = \theta_k^- + K_k^\theta [y_k - C_k^\theta x_k^+ - D u_k] \quad (17)$$

$$P_k^{\theta,+} = (I - K_k^\theta C_k^\theta) P_k^{\theta,-} \quad (18)$$

热路模型的热物性参数包括四个: C_{cell} 、 R_{cell} 、 C_{air} 和 R_{air} 。考虑到热容 C_{cell} 和 C_{air} 代表物体的储热能力, R_{cell} 代表物体的导热能力, 取决于动力电池的材料属性, 为定值, 无需实时估计。而 R_{air} 则反映动力电池热量传递到空气中的快慢能力, 是影响动力电池温度响应结果的主要参数, 其数值大小主要与环境散热条件(散热流体属性、流速等)有关, 且无法预先进行准确获取。因此, DEKF 算法参数估计中仅更新散热表征参数 R_{air} 。

3 试验与验证

3.1 内部温度的试验获取

为验证该模型内部温度估计结果的准确性, 本次研究基于内置温度传感器的动力电池开展试验测量内部温度。试验前使用小型钻床对电池负极中心打孔, 将热电偶温度传感器放置于电池芯轴内部, 同时使用环氧树脂封闭钻孔防止电解液泄漏。将电池放置在温箱中确保环境温度与散热条件稳定, 并使用专用夹具连接动力电池与充放电设备进行充放电, 该试验流程如图 4 所示。

图 4 电池内部温度测量试验

基于上述试验平台, 共开展了 7 组充放电下的内外温度测量试验, 分别为 1C 充电、1C 放电、2C 充电、2C 放电、3C 充电、3C 放电与动态应力工况测试工况(Dynamic stress test, DST), 以验证模型在不同试验条件下的适应性。

3.2 仿真结果验证与分析

针对七组试验数据, 以动力电池外部温度作为双扩展卡尔曼滤波算法的观测量进行内部温度与散热表征参数 R_{air} 的估计, 所得试验结果与仿真估计结果如图 5~8 所示。

参考图 5~7 中的试验结果, 该动力电池在充放电过程中存在较大内部温度温升, 其中 1C 充放电下动力电池内部最大温升在 10~15 °C 附近, 而在

图 5a 1C 充电的内部温度及散热表征参数估计结果

图 5b 1C 放电的内部温度及散热表征参数估计结果

最大许用电流 3C 下放电时, 其内部最大温升高达 45 °C。该结果进一步表明了动力电池内部温度在线估计的必要性。

由上述七组数据估计结果可知, 热路模型对恒流充放电和复杂多变的动态应力工况, 均具有良好的适应性, 估计误差小于 1 °C。温度估计误差的大小与充放电电流倍率成正比, 其主要原因在于大电流温升较高, 对应的误差也略有增加。需要注意的是, 图 5~7 中温度下降阶段是电池充放电结束后的静止阶段, 该过程中无产热的输入, 模型仍能保持

稳定的估计能力。

图 6a 2C 充电的内部温度及散热表征参数估计结果

图 6b 2C 放电的内部温度及散热表征参数估计结果

另外,分析模型对参数的估计结果可知,不同工况下散热表征参数 R_{air} 的收敛结果基本相同,最终均稳定在 $10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 附近。这是因为在试验测试中,动力电池全程被置于恒温温箱内,基本处于相同且稳定的散热环境,散热表征参数 R_{air} 的值本应相近。另一方面也说明该模型对不同工况的适应性较好,既具有稳定的内部温度估计能力,也能保证参数估算结果的合理性与真实性。

图 7a 3C 充电的内部温度及散热表征参数估计结果

3.3 鲁棒性分析

由于模型中的散热表征参数 R_{air} 无法提前预知,输入系统的初值往往存在较大偏差,因此,需要进

图 7b 3C 放电的内部温度及散热表征参数估计结果

图 8 DST 工况中内部温度及散热表征参数估计结果

一步分析模型对初值的鲁棒性。图 9 与图 10 表示 3C 放电时,不同 R_{air} 初始值下温度估计误差结果与 R_{air} 的变化曲线。分别将其设为 $1\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C/W}$,观察模型结果的稳定性与收敛性。

图 9 温度估计误差在不同 R_{air} 初始值下的变化曲线

可见,散热表征参数初值发生变化时,内部温度最大估计误差会随之变化,偏移程度主要受 R_{air} 初值偏离程度影响,且最大误差均发生在计算初始阶段,随着数据量的增加, R_{air} 逐渐稳定收敛到真实值 $10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 附近,内部温度估计误差也随之降低。参数与误差的收敛速度虽然受初始偏移量的影响,但最终均可收敛至相同值。由此可见,模型具有较好的鲁棒性,参数准确辨识与内部温度的精确估计不受未知散热表征参数影响。

图10 R_{air} 在不同初始值下的变化规律

4 结论

针对锂离子动力电池内部温度难以测量的问题, 本文建立了等效热路模型, 结合电路理论对温度场进行离散化表达, 应用双扩展卡尔曼滤波算法, 建立了内部温度估算模型, 提出了动力电池内部温度的在线估算方法。通过将温度传感器内置于动力电池内部, 实现多个工况下的内部温度测量与试验验证。结果表明, 该方法能够准确估算电池的内部温度, 并具有良好的适应性与鲁棒性。针对不同复杂工况与不确定初值条件下均可实现精确的计算内部温度估计, 估计误差基本小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 实用性强, 实现了内部温度的自适应、精确估计。动力电池内部温度估计方法为其热失控预警与防护安全管理等提供了理论支撑。

参 考 文 献

- [1] 熊瑞. 动力电池管理系统核心算法[M]. 1版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
XIONG Rui. Core algorithm of battery management system for electric vehicles[M]. 1st ed. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [2] 牛英凯. 中国电动汽车产业政策演变的分期[J]. 广西民族大学学报, 2015, 21(3): 29-34.
NIU Yingkai. On the evolution staging of the Chinese new energy vehicle industrial policy[J]. Journal of Guangxi University for Nationalities, 2015, 21(3): 29-34.
- [3] 陈泽宇, 熊瑞, 孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 93-104, 116.
CHEN Zeyu, XIONG Rui, SUN Fengchun. Analysis and research status of electric vehicle battery safety accidents[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 93-104, 116.
- [4] 张剑波, 卢兰光, 李哲. 车用动力电池系统的关键技术与学科前沿[J]. 汽车安全与节能学报, 2012(2): 87-104.
ZHANG Jianbo, LU Languang, LI Zhe. Key technologies

and fundamental academic issues for traction battery systems[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012(2): 87-104.

- [5] 李平, 安富强, 张剑波, 等. 电动汽车用锂离子电池的温度敏感性研究综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2014(3): 224-237.
LI Ping, AN Fuqiang, ZHANG Jianbo, et al. Temperature sensitivity of lithium-ion battery: A review[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014(3): 224-237.
- [6] QIAN W. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 106-128.
- [7] AN Z, JIA L, DING Y, et al. A review on lithium-ion power battery thermal management technologies and thermal safety[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(5): 391-412.
- [8] PALS C R. Thermal modeling of the lithium/polymer battery[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1994, 142(10): 3274-3281.
- [9] KIM Y, MOHAN S, SIEGEL J B, et al. The estimation of radial temperature distribution in cylindrical battery cells under unknown cooling conditions[C/CD]// Decision & Control. IEEE, 2014.
- [10] TORCHIO M, MAGNI L, GDPALUNI R B, et al. LIONSIMBA: A Matlab framework based on a finite volume model suitable for Li-ion battery design, simulation and control[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2016, 163(7): A1192-A1205.
- [11] MEI W, CHEN H, SUN J, et al. Numerical study on tab dimension optimization of lithium-ion battery from the thermal safety perspective[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 148-165.
- [12] K&K Associates. Thermal network modeling handbook[M]. New Delhi: K&K Associates, 1999.
- [13] 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(5): 1745-1755.
- [14] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy-balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.

作者简介: 熊瑞(通信作者) 男, 1985年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动载运工具电源系统管理与综合控制。

E-mail: rxiong@bit.edu.cn

李幸港, 男, 1994年出生, 博士研究生。主要研究方向为电动车辆动力电池管理。