基于热平衡法的方壳电池电芯温度预测模型

吕乔,周萍,郑岳久,沈凯

(上海理工大学,上海 200093)

摘 要:据不完全统计,电动汽车大多在充电过程中发生自燃,如何在热失控前通过温度进行预警显得尤为重要。针对 方形锂离子电池,构建了适用于嵌入式应用的电芯温度预测模型。通过试验精准测量电池各项热物性参数,对电池表面 和电池卷芯分别进行热平衡分析,建立不同的能量守恒方程,对电池进行网格划分,进一步构建电池三维温度预测模 型。仿真结果表明,热平衡模型不仅能够预测出电池每一部分的温度,而且预测的电芯温度误差不超过0.35 ℃,对快充 条件下的电池温度预测有重要意义。

关键词: 锂离子电池; 温度预测模型; 热平衡法; 电芯温度

中图分类号: TM912.4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.04.17

Temperature Prediction Model for Square-Case Battery Cells Based on Thermal Equilibrium Method

LYU Qiao, ZHOU Ping, ZHENG Yuejiu, SHEN Kai

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

Abstract: According to incomplete statistics, spontaneous combustion of electric vehicles most likely occurred during the charging process, and therefore early warning of temperature rise before thermal runaway is particularly important. A cell temperature prediction model for square lithium-ion batteries was constructed for embedded applications. Based on the experimental measurement of thermal physical parameters for the battery, the thermal equilibrium analysis of the surface and interior of the battery was carried out separately. Energy conservation equations were established and the meshing of the battery module was conducted to further construct a three-dimensional temperature prediction model. The simulation results show that the thermal equilibrium model can predict the temperature of each part of the battery, and the error of the predicted cell temperature does not exceed 0.35 $^{\circ}$ C, which is important for the battery temperature prediction under fast charging conditions.

Keywords: lithium-ion battery; temperature prediction model; thermal balance method; the cell temperature

随着电动汽车数量不断上升,各类电动汽车安 全事故也呈现多发态势,尤其是电动汽车自燃事故 报道越来越多,据不完全统计,电动汽车大多在充 电过程中发生自燃^[1]。因此,对充电过程电池的温



吕乔,周萍,郑岳久,等.基于热平衡法的方壳电池电芯温度预测模型[J].汽车工程学报,2022,12(4):538-545. LYU Qiao, ZHOU Ping, ZHENG Yuejiu, et al. Temperature Prediction Model for Square-Case Battery Cells Based on Thermal Equilibrium Method[J].Chinese Journal of Automotive Engineering,2022,12(4):538-545.(in Chinese)

收稿日期:2022-01-28 改稿日期:2022-02-22 基金项目:国家自然科学基金项目(51877138)

参考文献引用格式:

度预测显得尤为重要,建立准确的电池热模型具有 十分重要的意义。

研究电池热模型是研究锂离子电池热行为的最 有效的方法之一。BERNARDI等^[2]提出了具有普 适性的电池系统能量平衡方程来描述电池的产热特 性,被广泛应用在电池热性能的研究中。HALLAJ 等^[3]使用带有集总参数的一维简化模型,对Sony US18650电池内部温度进行模拟,在低倍率放电 下,仿真结果与试验结果出现较大误差。CHEN 等^[4]搭建出具有分层结构的三维热模型,成功预 测了电池内部温度分布的差异。

现有文献主要通过搭建热模型来预测低倍率充 电情况下的电池内部温度,但是较少有文献研究高 倍率充电情况下电池内部的温度变化,以及充电过 程中电池内部与表面的温度变化,也较少有估计电 池内部和表面温度的热模型得到充分的验证。

本文面向1C与2C充电场景,通过以下几方 面的工作建立了热平衡法温度预测模型:

(1)进行了内置热电偶试验,采用内置热电偶的方法来测量电池内部温度,解决了大容量方形电池内部温度难以获取的问题。

(2)采用试验测量的方法,获取电池热模型输入的各项关键参数,主要包括直流内阻、比热容、 各项导热系数和熵系数等参数,准确测量的热模型 参数,保证了电池热模型计算的精度。

(3)基于热平衡法分别对电池表面和电池卷芯 建立能量守恒方程,建立电池三维温度预测模型, 实现对电芯温度精准预测以及电池各部分温度预测。

1 试验

1.1 内置热电偶试验

试验所用电池为三元锂电池,电池相关参数 见表1。

为获取充放电过程中电池的核心温度,本文选 用了一种内置热电偶的方法。在内置前,先将电池 放电到0%SOC,标注电池侧面的中心点,确定打

电池类型	尺寸/mm	容量 C/Ah	质量 <i>m</i> /kg	额定电压 <i>U</i> /V
三元锂电池	147×26×91	37	0.771	3.7

孔位置,然后用电钻打出一个直径5mm左右的孔 洞,用一根钢针探入电池内部,将卷芯之间分离出 一条间隙,将铠装K型热电偶包裹后塞入电池内部 中心位置,用一小块聚酰亚胺胶带铺在开孔处的卷 芯上,防止胶水进入卷芯,将无机胶涂入孔洞内, 再将胶均匀涂抹在孔洞表面,竖直静置12h,试验 过程如图1所示。



记录内置热电偶之后电池的电压,并与内置前 的电压进行比较,测得电压差小于0.1V,并在静 置12h后再次测量电压,测得电压差仍小于0.1V, 则认为内置热电偶成功,对内置热电偶电池进行标 准容量测试,测得容量损失不超过3%,因此,认 为内置热电偶后的电池是有效的。

1.2 电池等效内阻测试

本文采用混合动力脉冲能力特性(Hybrid Pulse Power Characteristic, HPPC)试验测试电池 等效内阻^[5]。在25°C环境下对内置热电偶电池进行了1C、2C充电倍率的HPPC测试,每隔10% SOC对电池施加一次脉冲,所测等效内阻如图2 所示。



1.3 电池比热容测试

电池的比热容是电池热模型中十分重要的参数 之一,采用内置加热片的方式对比热容进行测 试^[6]。首先在干燥的房间中拆解电池,在加热片中 心处粘贴一个热电偶*T*₁,在电池卷芯表面中心处布 置一个热电偶*T*₂,将加热片放入两卷芯之间,用铝 塑膜重新封装电池,然后在电池表面中心处布置一 个热电偶*T*₃,如图3所示。将电池置于绝热环境 中,对加热片进行加热并开启温度数据采集仪,试 验过程中分别记录下加热片表面、卷芯表面和铝塑 膜表面3个热电偶处的温度数据。试验需假设在加 热过程中加热片产生的热量全部被卷芯吸收,加热 片传递给两侧卷芯的热量是相等的,且电池在绝热 环境中无热量散失。



图3 比热容测试试验电池

根据能量守恒定律,可由式(1)和式(2)来 计算电芯的比热容:

$$MC_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{U^2}{R} \ . \tag{1}$$

$$C_{p} = \frac{1}{3} \left(C_{p1} + C_{p2} + C_{p3} \right)_{\circ}$$
(2)

式中: M为电池卷芯质量; C_p 为电池卷芯比热容; ΔT 为温度差值; Δt 为时间差值; C_{p1} 、 C_{p2} 和 C_{p3} 分 别代表3个测温点处计算的电池卷芯比热容。

由式(1)计算可得3个测温点处的比热容, 由式(2)计算可得3个结果的平均值,计算结果 见表2。

表2 比热容计算结果

T_1 比热容/	T_2 比热容/	<i>T</i> ₃ 比热容/	卷芯比热容/
[J· (kg·K) ⁻¹]	[J・(kg・K) ⁻¹]	[J・ (kg⋅K) ⁻¹]	[J•(kg•K) ⁻¹]
1 122.8	1 109.3	1 113.6	

1.4 电池各向导热系数测试

导热系数是电池材料的重要热物理性能参数之 一,严重影响着锂离子电池的各种特性^[7]。试验首 先在干房中拆解电池,内置陶瓷加热片于两个卷心 中间,在陶瓷加热片中心布置一个K型热电偶*T*_{in1}, 在水平方向每隔22 mm等距离布置两个K型热电偶 *T*_{in2}和*T*_{in3},电池卷芯表面的对应位置也分别布置3 个热电偶*T*_{out1}、*T*_{out2}和*T*_{out3},将安装好热电偶的电池 用铝塑膜重新封装,再用隔热石棉包裹起来,如图4 所示。对电池进行加热并分别记录下3个热电偶处 的温度数据。



图4 导热系数测试试验电池

为了模拟导热系数测试试验过程,在Comsol 中建立一个三维传热模型,对电池3个方向的导热 系数进行计算。由于电池的两块卷芯是对称的,所 以只需要建立一侧的卷芯传热模型进行计算,可减 少一半的计算量。所建立的卷芯模型尺寸为:长 146.0 mm, 高85.0 mm, 厚12.5 mm, 如图5所示。



图5 卷芯三维传热模型

根据试验过程中布置的热电偶测得的温度与所 建立的三维传热模型计算出的温度差值,确立优化 目标函数如式(3)所示:

$$S = \sum_{i=1}^{3} \int_{t_0}^{t_1} (X_i - T_i)^2_{\circ}$$
(3)

式中: X_i 为三维传热模型的计算数据; T_i 为试验过 程中测得的数据,优化的各向导热系数: 电池厚度 方向导热系数 λ_z 、电池展向导热系数 λ_x 和 λ_y ,并认 为 $\lambda_x = \lambda_{yo}$

导热系数计算结果如图6所示,其中虚线是模型计算结果,实线是试验结果,试验测得温度与模型计算温度较匹配,通过模型优化后的导热系数 见表3。



1.5 电池熵热系数测试

为了求得电池热模型中可逆热部分,需要对熵 系数进行测试^[8],将电池放置在高低温箱中,分别

表3	导热系数优化结果

x向导热系数λ _x	y向导热系数λ _y	z向导热系数λ _z
/ [W・(m・K) ⁻¹]	/ [W・(m・K) ⁻¹]	/ [W•(m•K) ⁻¹]
15.20	15.20	0.65

在荷电状态为100%、90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%、0%时,按照25 °C、55 °C、25 °C、0 °C、-20 °C、25 °C的温度变化进行充分静置,每个温度阶段静置3h,记录电池开路电压的变化^[9],通过计算 $T\frac{\partial E_{ovv}}{\partial T}$,求得电池在不同温度和不同SOC下的熵系数,进一步拟合得到的结果如图7所示。





2.1 热平衡法模型搭建

热平衡法温度预测模型考虑电池的温度梯度变 化,利用有限元的思想,把电池划分成相同等份的 方块。为了准确预测电池正中心温度,以奇数为单 元进行网格划分,如果选择以电池整个卷芯为一个 小块无法反映出电池内部温度梯度,如果选择125 个小块模型,则较复杂且计算时间成指数倍增加, 因此,选定划分27个小块,既保证中心温度估计 准确性,又能实现温度的实时估计,如图8所示。 基于内节点法,以每一个小方块的中心点为目标 点,分别对电池卷芯和电池表面应用能量守恒定 律,建立热平衡方程,计算每一个方块的温度,也 就可以获得电池每一部分的实时温度,具体流程如 图9所示。

电池由内部的卷芯和金属外壳组成, 两者的能



图9 热平衡法原理

量增加与消散过程不同^[10],电池内部卷芯存在热 传导,电池外壳不仅存在热传导,也与空气接触产 生热对流,因此,需要建立不同的热平衡方程。以 电池一顶角所在的点为原点建立空间坐标,*x*轴、*y* 轴和*z*轴的方向如图10所示。



图 10 电池能量传递示意图

电池产热量由电池的焦耳热、极化热及化学反应引起的熵热组成^[11],方程为:

$$q = I^2 R - IT \frac{\partial E_{ocv}}{\partial T} \,_{\circ} \tag{4}$$

式中: I为工作电流; R为直流内阻; T为电池实时 温度; $\frac{\partial E_{oev}}{\partial T}$ 为熵系数。

电池内部卷芯不与外界接触,因此,只考虑电 池内部产热与热传导,根据能量守恒定律,建立电 池内部卷芯的瞬态三维传热方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z} + q_{\circ} \qquad (5)$$

式中: ρ 为电池内部密度; C_p 为电池内部比热容; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别代表电池在x, y, z三个坐标系方向 的导热系数;q为电池的产热量。将 $\rho, C_p Q \lambda$ 用一 个新的参数a表示,即 $a = \lambda/\rho \cdot C_p$,称为热扩散率或 热扩散系数,则电池内部温度计算公式为:

$$T_{ck+1} = T_{ck} + a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dt + a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dt + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dt + \frac{dt}{\rho C_p} q_{-0}$$
(6)

式中: T_{ck+1} 为电池内部电芯温度预测值; T_{ck} 为k时刻电池内部电芯温度值;dt为单位时间。

电池铝外壳与周围空气产生热量传递,并且受 到来自电池内部卷芯传递的热量,电池铝外壳在*x* 轴方向的瞬态三维传热方程为:

$$\rho_l C_{pl} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_l \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_l \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + A_{yz} h \Delta T_{\circ} \quad (7)$$

式中: ρ_i 为电池铝外壳密度; C_{ρ_i} 为电池铝外壳比热 容; λ_x 为电池在x坐标系方向的导热系数; λ_i 为电 池铝外壳的导热系数; A_{μ} 为一个小方块的对流换热 面积;h为对流换热系数; ΔT 为电池表面与周围空 气的温差,将上式展开并进一步整理,可得电池外 壳的温度计算公式为:

$$T_{sk+1} = T_{sk} + \frac{\lambda_x}{\rho_l C_{pl}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dt + a_l \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dt + a_l \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dt + \frac{A_{yz} h}{\rho_l C_{pl}} (T_{abt} - T_{sk}) dt_{\circ}$$
(8)

式中: T_{sk+1} 为电池外壳温度预测值; T_{sk} 为k时刻 电池外壳温度值; a_i 为电池外壳的热扩散系数; T_{abt} 为环境温度。

按照上述方法同样可求得电池金属外壳在y轴 与z轴方向的温度计算公式。将x轴、y轴和z轴3 个方向的电芯温度与表面温度计算公式分别列出, 即可获得每一时刻电池不同位置的温度。

2.2 电池温升试验

为了获取电池在大倍率充电情况下的温度状态,本文在自然对流条件下,对电池进行了1C及

2C倍率的充电试验,并记录了电池在充电过程中 表面的温度变化及电芯的温度变化,温升试验测试 系统如图11所示。



图 11 温升试验测试系统

试验所测得的1C及2C倍率充电过程电池温 升如图12所示。其中,在1C充电过程中,先将电 池恒流充电到2000s左右,再进行恒压充电,电池 的温度先逐渐升高,到2000s左右时,温升速率开 始快速下降,在恒压阶段,电池的温度几乎不再上 升,维持在最高温度30℃左右。

试验结果表明,在自然对流条件下,1C及2C 倍率充电时电芯温度与电池表面温度均在充电结束 时达到最高。其中在1C充电过程中,电芯温度从 23.1 ℃上升到30 ℃,表面温度从23.1 ℃上升到 28.7 ℃,最大温升为6.9 ℃;在2C充电过程中,电 芯温度从23.2 ℃上升到37.1 ℃,表面温度从23.2 ℃ 上升到34.5 ℃,最大温升为13.9 ℃,见表4。

3 热平衡法温度预测模型结果及验证

利用有限元的思想搭建热平衡电池温度估计模型,首先将电池划分成相同的小方块,针对电池内部卷芯和电池铝外壳构建不同的热平衡方程,通过推导得到最终电池温度预测公式。本文利用所搭建的热平衡法温度估计模型,预测了1C、2C充电条件下电池内部各部分的温度与电池表面金属外壳温度,结果如图13所示。

由模型预测结果可以看出,1C充电过程中电 池卷芯整体温度差异不超过1℃,2C充电过程中



表4 1C、2C倍率充电电池温度变化

充电倍率/ C	起始温 度/℃	电芯最高 温度/℃	表面最高 温度/℃	最大温 升/℃	内外温 差/℃
1	23.1	30.0	28.7	6.9	1.3
2	23.2	37.1	34.5	13.9	3.6

电池卷芯整体温度差异明显,最大超过2℃。2C 充电过程电池卷芯与外壳温差明显小于1C充电, 电池整体温度分布均匀。

将仿真模型所预测的电芯温度和表面温度与试验所测得的真实数据作对比,结果如图14所示。

从模型的计算结果可以看到,当SOC在25% 附近时,1C倍率充电的电池温升速率变化较明显, 而2C倍率充电在25%SOC附近时,电池温升速率 变化幅度很小。这是因为电池在不同充电倍率下的 充电热特性不同,1C充电时由熵变引起的热量变 化是主要原因,在不同SOC时电池熵热系数不同,





参考文献 (References)■

 [1] 王淮斌,李阳,王钦正,等.电动汽车事故致灾机理及 调查方法[J].储能科学与技术,2021,10(2):544-557.
 WANG Huaibin, LI Yang, WANG Qinzheng, et al. Mechanisms Causing Thermal Runaway-Related Electric Vehicle Accidents and Accident Investigation Strategies 引起的温升速率变化较显著,而2C充电时焦耳热 是热量变化的主导因素,所以充电过程中电池温升 速率变化不明显。

由仿真结果可知,1C充电所预测的电芯温度 误差为0.33 ℃,表面温度误差为0.5 ℃,2C充电 所预测的电芯温度误差为0.35 ℃,表面温度误差为 0.7 ℃,见表5,模型预测最大误差不超过1℃,可 见其预测结果准确。

表5 热平衡法模型温度预测误差

充电倍率/C	电芯温度误差/℃	表面温度误差/℃
1	0.33	0.50
2	0.35	0.70

4 结论

本文针对方形锂离子电池建立了热平衡法温度 预测模型,将电池划分成等份的小块,计算出电池 每一小块的温度,通过贴在电池表面和内置于电池 内部的温度传感器,实现不同充电倍率下温度的测 量与验证。热平衡法温度预测模型有以下优点:

(1)可以观测到电池空间温度分布细节,反映 电池的温度梯度变化,所预测的电芯温度及表面温 度最大误差不超过0.7℃,实现了电池整体温度的 精确估计。

(2) 合理的模型分割使热平衡法模型在5s内 能够预测出结果,计算速度快且能够随测量温度实 时预测电池温度,具有较强的实用性。

(3)针对不同倍率充电条件均可实现精确的电芯与表面温度预测,且能准确预测高倍率充电情况下的温度,对于快充条件下电池的温度预测有明显优势。

[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 544–557.(in Chinese)

[2] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A General Energy-Balance for Battery Systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1):5–12.

- [3] HALLAJ S A, MALEKI H, HONG J S, et al. Thermal Modeling and Design Considerations of Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 1999, 83 (1) : 1-8.
- [4] CHEN S C, WAN C C, WANG Y Y, et al. Thermal Analysis of Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 140(1): 111–124.
- YANG Xiaolong, GAO Xiaolin, ZHANG Futao, et al. Experimental Study on Temperature Difference Between the Interior and Surface of Li [Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}] O₂ Prismatic Lithium-Ion Batteries at Natural Convection and Adiabatic Condition[J].Applied Thermal Engineering, 2021,190:116746.
- [6] 陈大分.动力锂离子电池系统热管理研究[D].北京: 北京交通大学, 2017.
 CHEN Dafen. Research on Thermal Management of Traction Lithium Ion Battery Systems [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.(in Chinese)
- [7] 段永康.车用动力电池热特性分析及液冷方式的热蔓 延抑制研究[D].长沙:湖南大学,2019.
 DUAN Yongkang. Thermal Characteristics Analysis of Vehicle Power Battery and Thermal Runaway Propogation Suppression of Liquid Cooling Method [D]. Changsha: Hunan University, 2019.(in Chinese)
- [8] 李军求,吴朴恩,张承宁.电动汽车动力电池热管理技术的研究与实现[J].汽车工程,2016,38(1):22-27,35.

LI Junqiu, WU Puen, ZHANG Chengning. Study and Implementation of Thermal Management Technology for the Power Batteries of Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2016, 38(1): 22–27, 35.(in Chinese)

[9] 陈尚瑞.动力电池热管理系统研究[D].西安:西安科 技大学,2020.

CHEN Shangrui. Research on Power Battery Thermal Management System [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.(in Chinese)

[10] 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.

KUANG Ke, SUN Yuedong, REN Dongsheng, et al. Efficient Approach for Electrochemical-Thermal Coupled Modeling of Large-Format Lithium-Ion Power Battery [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 10-22.(in Chinese)

[11] 叶建平,朱建新,周兴叶,等.基于温度在线预测的氢
 镍动力电池热管理系统[J].电源技术,2018,42(1):
 93-96.

YE Jianping, ZHU Jianxin, ZHOU Xingye, et al. Thermal Management System for Ni-MH Battery Based on Online Prediction of Internal Temperature[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42 (1) : 93–96. (in Chinese)

作者简介



吕乔 (1996-), 女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为纯电动汽车电池热管理。 Tel: 13122502231 E-mail: 826486801@qq.com