

锂离子动力电池生热模型综述

何川, 郑金奎, 李茂德

同济大学机械与能源工程学院, 上海
Email: limaoe@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021年2月9日; 录用日期: 2021年4月12日; 发布日期: 2021年4月19日

摘要

锂离子动力电池的生热模型对于电池组乃至电池系统的热管理至关重要。本文综述了近年来国内外相关的电池热模型, 包括集总模型、纽曼模型、异构模型、等效电路模型及各个空间维度的模型, 阐述了模型的应用场景及各模型的优缺点, 可以为电池传热模型深入研究及电池热管理系统更加完善提供研究依据。

关键词

锂离子动力电池, 温度, 电池模型, 生热模型, 等效电路模型

Review of Thermal Models for Single Power Battery

Chuan He, Jinkui Zheng, Maode Li

School of Mechanical and Power Engineering Tongji University, Shanghai
Email: limaoe@tongji.edu.cn

Received: Feb. 9th, 2021; accepted: Apr. 12th, 2021; published: Apr. 19th, 2021

Abstract

The thermal model of single power battery is very important for the construction of battery pack and even the thermal management of battery. In this paper, the related battery thermal models at home and abroad in recent years are reviewed, including lumped model, Newman model, heterogeneous model, equivalent circuit model and various spatial dimension models. The application scenarios of the models and the advantages and disadvantages of each model are described, which provides a reference for the further development of battery thermal model and the perfection of battery thermal management system.

Keywords

Power Battery, Temperature, Battery Model, Thermal Model, Equivalent Circuit Model

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

新能源电动车的核心技术在电机、电池、电控这三大件上。目前，市场上对新能源电动车往往存在续航低、充电速度慢、安全性差等诟病。而以上问题主要集中在电池的技术是否能够进一步突破上。续航低主要是由于电池的能量密度低，充电慢是由于考虑电池的寿命和安全性选择相对安全的充电倍率，而安全性与电池的使用环境和电池温度的控制有着直接关系。如今，电池能量密度的提高主要依赖于正极材料的优化，但考虑成本等因素目前已经处于瓶颈阶段。另一种提高能量密度的方式是优化电池的物理结构，如 18,650 电池升级为 21,700 电池，它们只是尺寸不同。通过节约电池模组的空间，提高比能量，但电池内部结构基本一致。

考虑实际使用过程中，如低温下电池若不进行处理，电池效率就会低下。同时电池在充放电过程中不可避免地会发热，想对电池的发热进行控制，就需要引入电池管理系统，来监管电池并对其进行降温。而实际的情况只是在电池表面加上热电偶以此来判断电池的温度，其实这样是不准确的，电池的内部温度与外表面温度可能相差甚大，这样也就谈不上能对电池做到合理的温度控制。电池的温度不但直接影响电池的性能、循环寿命，更影响电池的使用安全。

由于无法直接测量电池内部的温度，为此引入电池热模型，它可以根据电池的端电压、电流、电池表面温度等参数，模拟电池实时内部的温度分布状态，从而给电池管理系统提供温度输入，进而提供合理的温度控制。同时，给电池设计人员提供了设计参考，也给电池热管理提供了基础支持。

本文主要根据电池的发热原理，对单电池在充放电过程中的性能进行机理分析，对国内外现有的电池热模型，包括理论计算模型、试验导出的经验模型、等效电路模型及物理模型进行阐述。

2. 电池热的计算方程

在分析电池的生热原理，首先我们要了解电池的内部结构。电池主要是由正极集流体、正极、隔膜、负极、负极集流体、电池外壳、极耳等这几部分构成。涉及到的反应热如下：反应热、极化热、焦耳热、副反应热，伴随着电池循环次数的增加，电池的内部锂的沉积、SEI 膜的分解等造成的副反应相对于整个电池发热来说可以忽略，故此处只讨论反应热、焦耳热、极化热。

电池产热方程[1]：反应热 Q_1 为电池工作过程中内部进行的化学反应产生的热，在放电时为正值，充电时为负值。

$$Q_1 = Q/F * 3600 * I = 0.0104QI \quad (1)$$

$$Q_2 = I^2 R_p \quad (2)$$

$$Q_3 = I^2 R_e \quad (3)$$

$$Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (4)$$

锂离子电池正常工作时的发热量主要由极化热和焦耳热组成。

$$Q_s = I^2 R_i = Q_2 + Q_3 \quad (5)$$

$$R_t = R_p + R_e \quad (6)$$

$$q_v = I^2 R_t / V \quad (7)$$

式中： Q 为化学反应中热量的代数和，kJ/mol。 I 为放电电流，A。 F 为法拉第常数，96,484.5 C/mol。 Q_1 为反应热，kJ/mol。 Q_2 为极化热：电池在工作会发生极化，产生了极化电阻，电流经过电阻产生了热量，kJ/mol。该热量均为正值。 Q_3 为焦耳热：电池在工作过程中，由于电池内部的电阻产生的热，该热量均为正值，kJ/mol。 R_p 为极化内阻， Ω 。 R_e 为电子流动中的内阻， Ω 。 R_t 为电池放电过程中总内阻， Ω 。 q_v 为单位体积电池自身发热功率 W/m^3 。 V 为单体电池上发热体体积， m^3 。

电池传热方程[2]：电池的热传递包括：电池内部物质的热传导、电池内部电解质的热对流、电池外表面与空气存在对流换热、电池表面对外界的热辐射。电池内部各种物质，它们之间存在热传导，由于电解液在电池内流动很小，我们可以忽略电解液的对流运动，电池产热量的守恒方程为：

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = q_{gen} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (8)$$

电池表面作为电池和外界空气热传递的边界条件，方程可表示为：

$$\lambda \nabla T = h(T_{amb} - T_{surf}) \quad (9)$$

电池沿圆柱长度方向的导热系数的计算公式为：

$$k_{T,ang} = \frac{\sum L_i k_{T,i}}{\sum L_i} \quad (10)$$

电池径向导热系数计算公式为：

$$k_{T,r} = \frac{\sum L_i}{\sum L_i / k_{T,i}} \quad (11)$$

电池密度和比热容同样可经过计算得到：

$$\rho_{batt} = \frac{\sum L_i \rho_i}{\sum L_i} \quad (12)$$

$$C_{p,batt} = \frac{\sum L_i C_{p,i}}{\sum L_i} \quad (13)$$

式中， ρ 为密度， ρ_{batt} 为电池密度， ρ_i 为电池单元不同材料密度， kg/m^3 。 C_p 为比热容， $C_{p,batt}$ 为电池比热容， $C_{p,i}$ 为电池单元不同材料比热容， $J/(kg \cdot K)$ 。 λ 为导热系数， W/m^2 。 q_{gen} 为总产热率，kJ/mol。 h 为传热系数(取自然对流 $h = 7 W/m^2 \cdot K$)， T_{amb} 为环境温度， T_{surf} 为电池表面温度，K。 L_i 为一个电池单元不同层的厚度，m。 $k_{T,ang}$ 为圆柱长度方向的导热系数， $k_{T,i}$ 是构成电池单元层的材料导热系数， $k_{T,r}$ 为圆柱径向导热系数， W/m^2 。

3. 动力电池模型现状

3.1. 集总模型

在不需要知道电池的材料、内部结构及电池的具体参数，只需要电池的电流电压曲线，就可以拟合出集总模型里需求的参数等。这些参数可以用来设计 BMS (Battery Management System)，设计热管理系统。

集总参数模型[3] [4]一个电热模型捕获电池 SOC (State of Charge)，电压，表面与核心温度。提出了

一种方便的参数化方法，可以分别识别两个子模型。用电化学阻抗谱法验证所识别的模型，考虑了热效应和容量衰减效应的锂离子电池电热循环寿命模型，可以进行全面的模型校准和验证。

Noboru Sato 等人[5]根据锂离子电池的发热特性，采取绝缘材料包裹电动汽车进行试验，将试验与模拟进行对比，试验结果与模拟基本一致，但在 DOD (Depth of Discharge)为 70%时存在数据波动，如图 1。

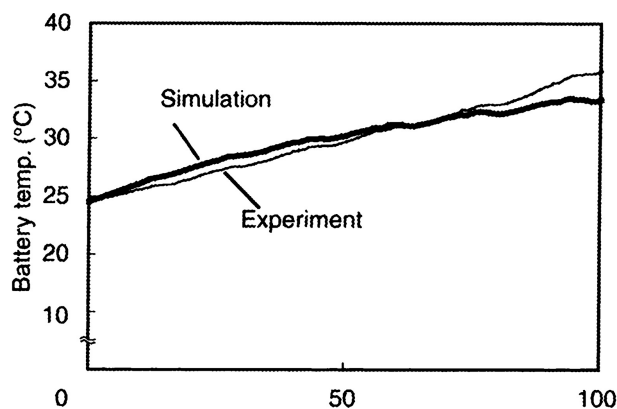


Figure 1. Comparison of experimental and simulated data
图 1. 试验与模拟数据的对比图

2002 年，Atsuhiko Funahashi 等人[6]使用 Kanari 的方法计算，研究了 2 Wh 的小电池和 250 Wh 的大电池的发热情况，对比两者试验与模拟在不同放电深度的温度差。研究表明，模拟方法可以有效的估算大容量和小容量电池的热特性。

3.2. 多孔电极法(P2D 模型)

基于纽曼模型，可以描述和预测放电、充电等瞬态过程的电池电压和电流密度，研究导致电池老化和失效的机理，以及不同材料特性和设计参数对电池性能的影响。

该模型是对锂离子电池进行高保真建模的主要模型。该模型基于 Maxwell-Stefan 方程，模拟了以锂离子高度紧密结合的形式形成的高浓度二元电解质中离子的传输。基于该理论，可以将电极材料和孔隙内的电解质视为一个均质的“平板”，建立均质电极模型。

2013 年，Meng Guo 等人[7]建立了锂离子电池模块的物理模型，该模块由三个电池单元通过母线串联而成。该模型可用于预测电池内电势和温度的三维分布。采用多孔电极 P2D (Pseudo-Two-Dimensions) 模型预测电池的电化学行为，并通过线性近似方法简化 P2D 模型与电/热方程之间的耦合。在这种 5 C 的放电倍率下，减少了计算时间，如图 2。

3.3. 异构模型

Jason B 等人[8]研究发现锂离子电池材料在锂离子插层过程中的膨胀是影响锂离子电池循环寿命和性能的一个重要问题。电极与石墨粒子在充放电过程中膨胀的比例不同，势必会造成粒子的体积大小不规则，P2D 模型不再适用，需要针对每个粒子进行建模。

由仿真软件 Comsol 提供的一种建立电池模型的手段，绘制出多孔电极的几何，显示地表示电极颗粒，采用异构模型，如图 3，描述出多孔电极的几何结构细节，对于多孔电极区域分别对电极相和电解液相建模，固相电极颗粒中的锂扩散也是在同一纬度下建模。把具体的粒子模型做出来，把周围包含的电解质也描述出来，试验中考虑锂离子在嵌入和脱出的过程引起电极体积的变化情况。这样可以更加的微观，更加的贴近实际的模型状态，但是它的计算量也就越大，适用于基础研究。

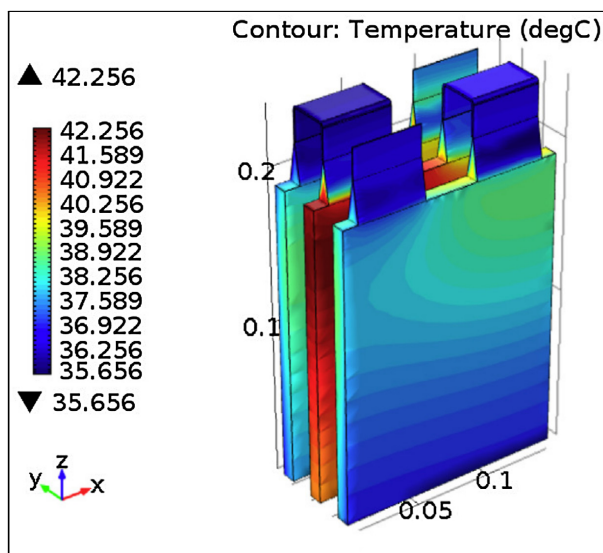


Figure 2. Temperature distribution of the battery module at 5.0 C discharge

图 2. 在 5.0 C 放电下，电池模块的温度分布

参考 Comsol 案例手册，研究电池放电过程中粒子的状态变化，由图 4 可以看出放电 90 s 后粒子中的固态锂浓度分布情况，反映出电极表面电荷转移的情况。

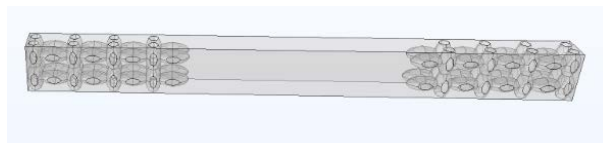


Figure 3. Heterogeneous model (ellipsoids are particles with positive/negative electrodes, and the cube is filled with electrolyte)

图 3. 异构模型(椭球是正/负电极的颗粒，立方体内部充满电解液)

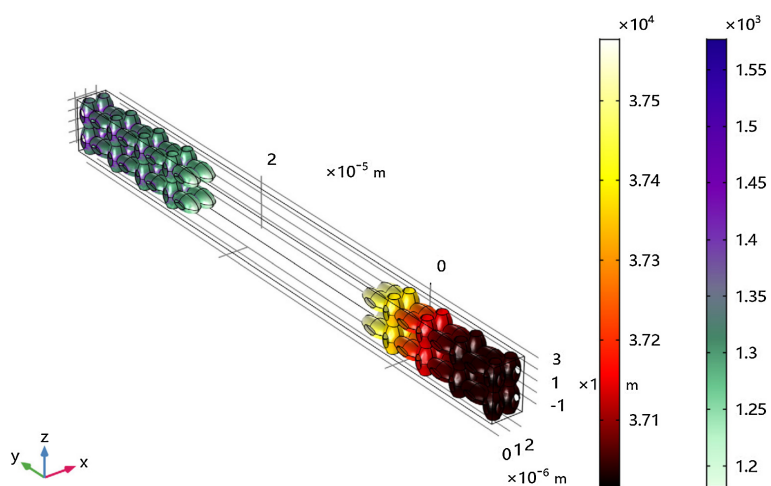


Figure 4. Surface concentration of solid lithium on the surface of electrode particles

图 4. 电极粒子表面固态锂的表面浓度

3.4. 等效电路模型[9]

R_{int} 模型是由美国爱达荷国家实验室设计的。其中包括电池开路电压 U_{oc} 和电池内阻 R_{ser} 由于该模型没有考虑电池的极化特性, 因此模型精度较低, 如图 5。

Thevenin 模型在 R_{int} 的基础上增加了电池极化的因素考虑, 在该模型中 U_{Bat} 为端电压, R_{ser} 为电池的串联电阻, RC (Resistor-Capacitance circuit) 并网络预测瞬时负载的响应, 如图 6。

PNGV 模型在 Thevenin 的基础上增加了负载电流对电池影响的考虑。在该模型中 U_{oc} 用来表示电池的理想开路电压, C_{cap} 为开路电压与负载电流的变化情况, R_{ser} 为电池的欧姆内阻, R_{tran} 为电池的极化内阻, C_{tran} 为极化电容, 如图 7。

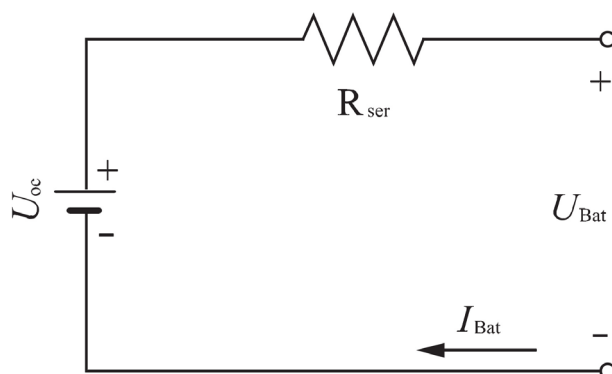


Figure 5. R_{int} model
图 5. R_{int} 模型

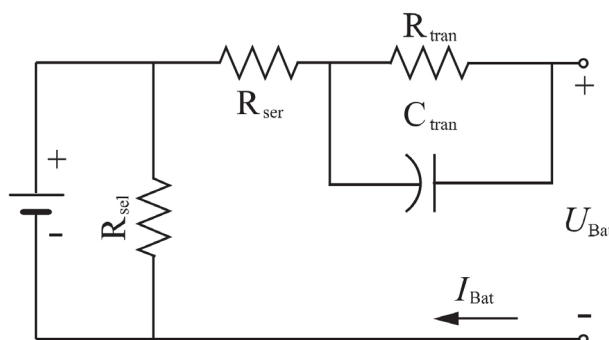


Figure 6. Thevenin model
图 6. Thevenin 模型

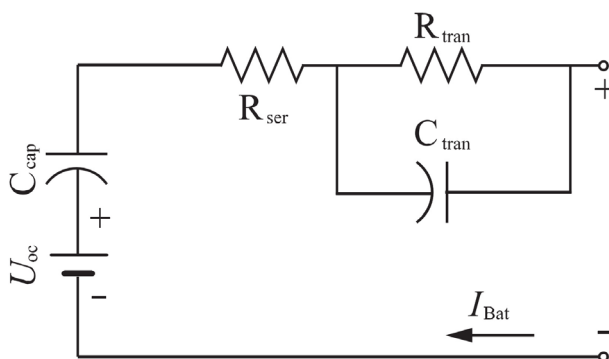


Figure 7. PNGV model
图 7. PNGV 模型

为使得模型拟合出的曲线与真实电压曲线匹配程度更高，GNL 模型是在 PNGV 模型上进行改进，可以在曲线拟合过程中实现更好的匹配程度，模型中： U_{bat} 为负载电压， U_{oc} 为开路电压， C_{cap} 为储能大电容描述充放电的累积造成开路电压变化， I_{bat} 为负载电流， R_{ser} 为串联电阻， R_{ts} 和 R_{tl} 分别为较短和较长时间极化内阻，如图 8。

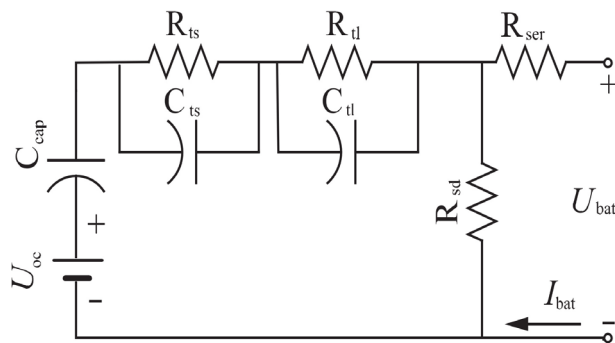


Figure 8. GNL model
图 8. GNL 模型

3.5. 一维模型

1999 年，Hallaj S.等人[10]采用简化的一维集总参数热数学模型模拟锂离子电池内部的温度分布。该模型利用索尼(US18650)电池实验建立的热产生参数。结果表明，冷却速率对所有放电速率的电池温度有强烈的影响。只有在较高的冷却速率下，电池内才会出现显著的温度梯度。

2006 年，Kazuo Onda 等人[11]使用一维模型估算螺旋缠绕圆筒电池在快速充放电循环过程中的温度分布，计算了径向温度分布。在充放电过程中计算模型与试验基本温度曲线重合，如图 9。

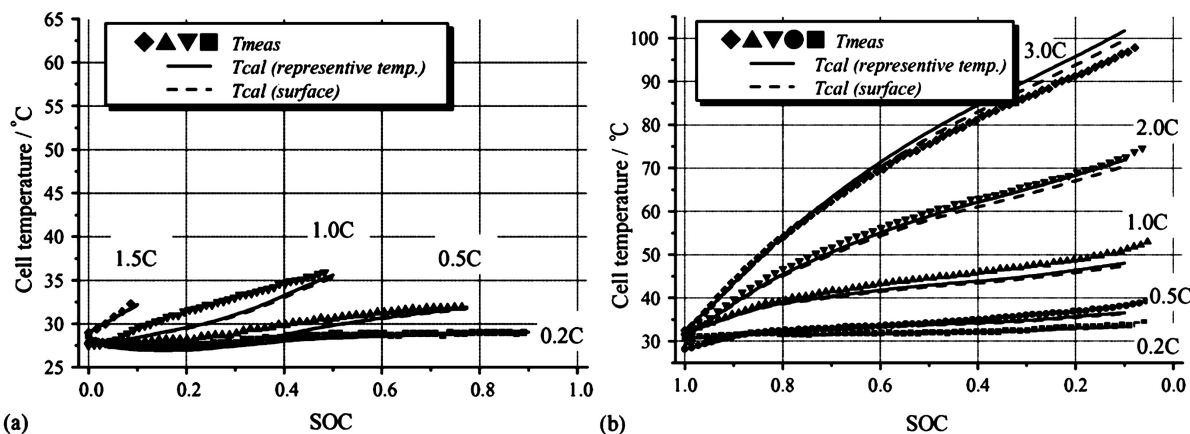


Figure 9. Comparison of calculated and measured temperatures: (a) charging; (b) discharging
图 9. 计算温度和测量温度的比较：(a)充电；(b)放电

3.6. 二维模型

Srinivasan V.等人[12]试图利用先前开发的二维热电化学建模方法来更好地理解锂离子电池的热行为。该模型包含了基体相和溶液相中可逆、不可逆和欧姆热，以及基于表达式的各种运输、动力学和质量传递参数的温度依赖性。模拟是用来估计热性能、电能与活性材料利用率的关系，以了解温度对电化学的影响。

2020年,彭敏等人[13]使用 Comsol 进行二维热模拟研究,针对层叠式锂离子单体电池,发现电池充放电过程中电位分布不均匀,由此导致电池的温度分布也不均。研究表明电池模型在低放电倍率正确性较好,在大倍率放电下尤其放电深度在 50%以上时,偏差较大,如图 10。

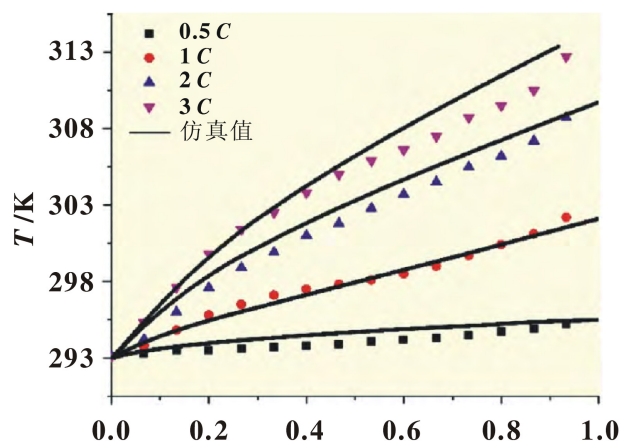


Figure 10. Comparison of the maximum surface temperature measured by constant discharge battery experiments at different rates with the simulation results

图 10. 电池以不同倍率恒流放电试验测得最高表面温度数据与仿真结果比较

3.7. 三维模型

采用三维模型,考虑到隔膜厚度一般在 $10\ \mu\text{m}$,网格大小设置在 $2\ \mu\text{m}$ 较为适宜,但若仿真 18,650 电池划分网格数过大,一般的计算机无法进行此量级的仿真。一般采取先用一维模型计算求解该 5 层的发热情况,换算出该厚度发热的平均值,从而建立一个发热源。再建立一个三维模型,引入一维模型的发热源,这样从而间接的建立电池的三维发热模型。模型相比于一维、二维模型更加精确,相比于集总模型也不至于把电池考虑成一个均匀体,更有助于电池热量的研究。但不足之处在于,无法具体判断电池每层的发热情况,电池热分布无法细致的了解。

Pesaran 团队[14][15]提出了一个通用的多尺度多物理的锂离子电池模型框架,即多尺度多维模型。该模型引入多个耦合计算域,以解决不同长度尺度下锂离子电池物理相互作用的问题。当特征时间尺度或特征长度尺度分离时,物理化学过程相互作用的模型几何解耦和区域分离是有效的。该模型的模块化层次结构提供了一个灵活可扩展的框架,便于对锂离子电池系统的多物理行为进行建模。构建了多尺度多维模型,并将其应用于解决大型叠层棱柱状电池设计中电化学、电、热耦合物理问题的模型分析。

为了进一步研究电池的热特性,2012年,Chacko 等[16]基于有限体积法实现了全耦合三维瞬态电热模型。为了验证模型的准确性和可信度,对高能量密度锂离子软包电池在不同充放电速率下的电负荷循环进行了温度试验,模型预测结果与实验数据吻合较好。在电动汽车上,车在正常的行驶中,相对于车辆的加速、减速,随之而来的电池温度的变化,但电池温度的变化不但影响车辆的性能而且影响到车辆的安全,这就需要有一个电池热管理系统来起到对电池进行监控和调节的作用。

2020年,韩甜等人[17]建立 18,650 单体电池三维电化学-热耦合模型,将电池内部结构从微米级跨越到厘米级,并且进行了分层计算,仿真计算出电池的温度场,模型与试验对比如图 11,表面温度分布如图 12 所示。

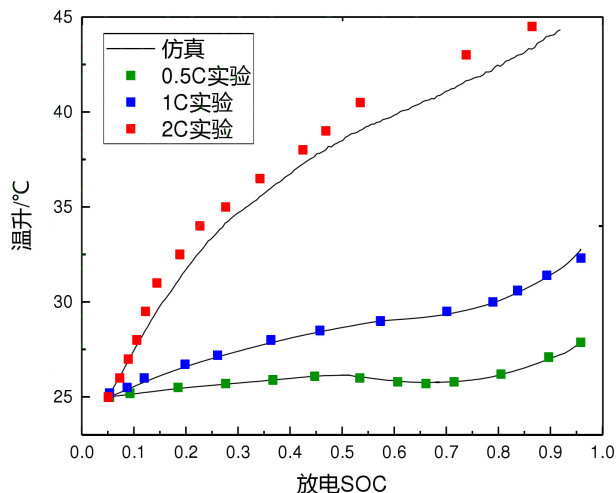


Figure 11. Comparison and verification of temperature rise at different discharge rates

图 11. 不同放电倍率温升对比与验证

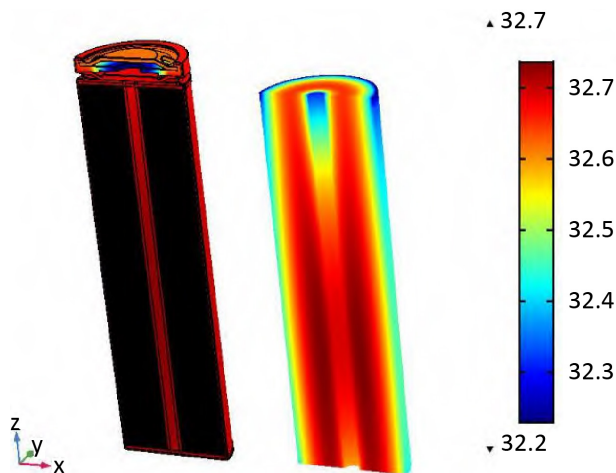


Figure 12. Battery temperature distribution at different times under 1C discharge

图 12. 1C 放电下不同时刻电池温度分布图

4. 电池模型的不足之处及建议

现有的电池热模型在计算电池发热表现，都有各自存在的意义。1) 集总模型需要采集的电池参数较少，便可以获得电池的发热数据，适用于整车厂的大规模电池模块热量的计算。缺点就是测得的数据并不是十分精确，电池内部的温度分布也并不清楚。2) 纽曼模型可以很好的计算电池的发热情况，保证了数据准确性的同时考虑了计算量相对适中，目前使用比较普遍。但某些现象还是不能被考虑到，比如当电极颗粒形状不规则的时候。3) 异构模型能从微观粒子的角度来计算粒子的运动，仿真反应过程，适用于基础性质的研究。但庞大的数据计算量，也是目前无法接受的，只能简化为某一小块区域的仿真研究。4) 等效电路模型可以方便的集成进电池管理系统，但简化近似模型，不涉及电池内部反应的具体过程，是抽象的模型，使用范围受到限制，模拟计算的物理量也是有限制的。5) 各个维度的物理模型仿真，三维更加精确，但网格划分量太大，难以计算。低维度的模型由存在精度不够和温度场不能直观展现的问题。

综上所述，基于现有的模型可以进一步深入研究：

1) 建立 1:1 的电池三维模型，将电池每层进行分层处理构建卷绕式结构，符合实际电池的发热和传热的实际情况。电极采用多孔电极，考虑电池材料的物理性质可容纳的锂离子浓度的最大值、最小值，以及电池实际工作中的初始锂离子浓度和最终浓度变化对电池容量和电压的影响。图 13 是 18,650 电池的横截面图，如图 13，由于电池的结构存在热的各向异性，截面方向网格大小的划分涉及到隔膜的实际厚度的限制，无法进行尺寸的简化。但在电池轴向上，电池的材料一致，可以把单元网格在轴向上的长度放大，如图 14。

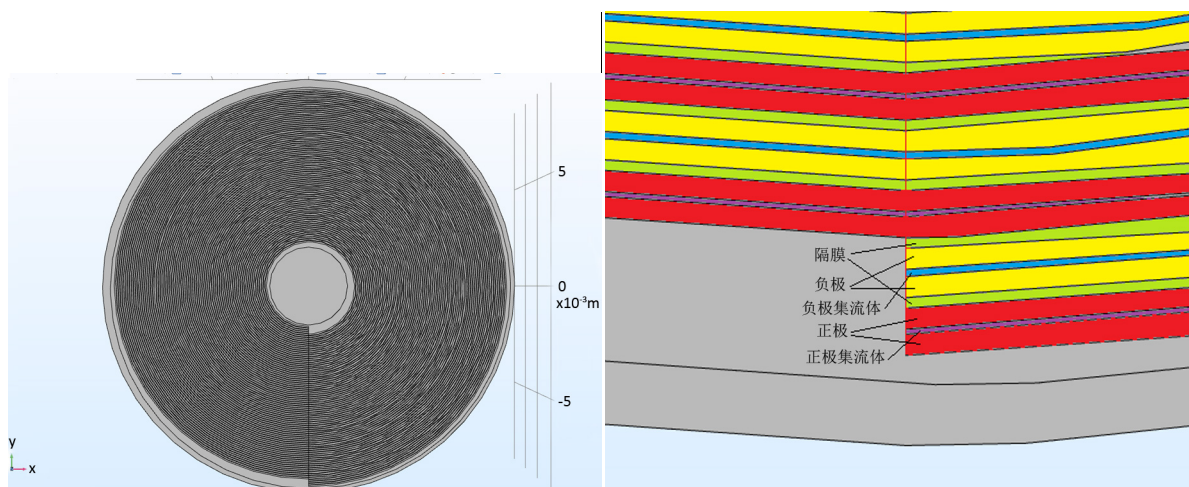


Figure 13. 18650 battery winding structure cross section

图 13. 18650 电池卷绕结构截面图

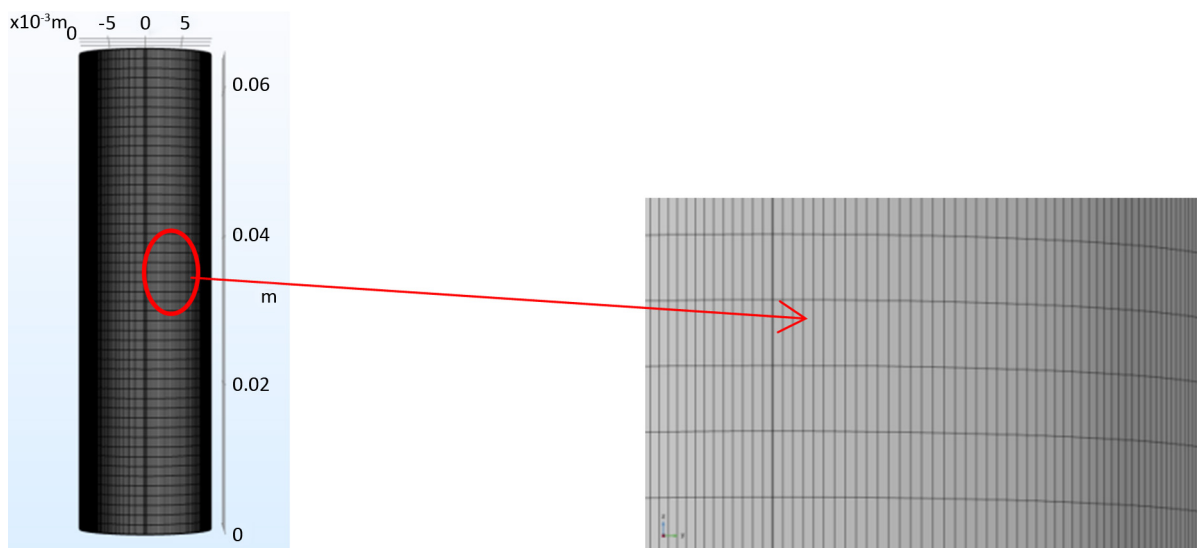


Figure 14. 18650 battery axial mesh division

图 14. 18650 电池轴向上的网格划分

2) 目前使用的 Thevenin 模型存在精度不高的问题，可以通过使用更阶等效电路模型进行研究[18]。2019 年，王维强等人设计的三阶 RC 模型，如图 15，利用变电压进行仿真分析，对比 Thevenin 模型，三阶 RC 电池模型仿真误差在 ± 0.01 V 相比于 Thevenin 模型的 ± 0.06 V，更加精确，如图 16、图 17，更好

的反映电池的实际情况。若考虑将自放电因素、滞回特性等都通过电路的形式表达出来，使用三阶及以上模型，精确更高。而且上述模型没有加入电池发热方面的研究，模型可以进一步完善。

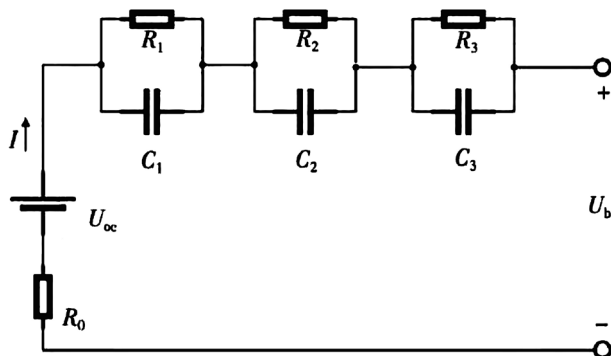


Figure 15. Equivalent circuit model of third-order RC network
图 15. 三阶 RC 网络等效电路模型

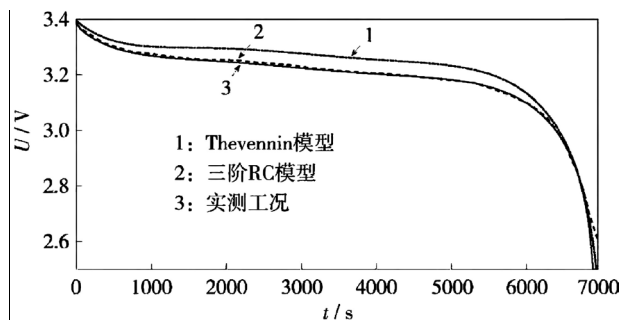


Figure 16. Measured voltage and simulated voltage
图 16. 实测电压与仿真电压

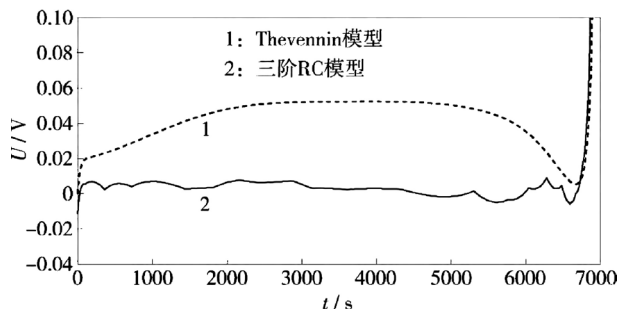


Figure 17. Simulation voltage relative error
图 17. 仿真电压相对误差

图 16 中： U_{oc} 为开路电压， U_b 为端电压，V。 R_0 为电池固定阻值的欧姆内阻， R_1 为欧姆极化电阻， R_2 为电化学极化内阻， R_3 为浓度差极化内阻， Ω 。 C_1 为欧姆极化电容， C_2 为电化学极化电容， C_3 为浓度差极化电容，F。 I 为内部电流，A。

3) 电池模型在使用等效电路模型中将电池简化为电容和电阻构成的电路模型，但电池在工作过程中电阻会随着外电路的负载而发生变化，且电池的电阻也热存在耦合关系，在构建等效电路需要先试验测出电池内阻变化的物性参数编制 UDF (User Defined Function) 文件导入软件中计算。我们或许可以采用复合模型的方式，通过 P2D 模型测出电池各种热的变化情况，将输出的参数直接导入等效电路模型，实现

等效电路模型的前处理的简化。同时，将两种模型的计算结构进行互相修正，如图 18。

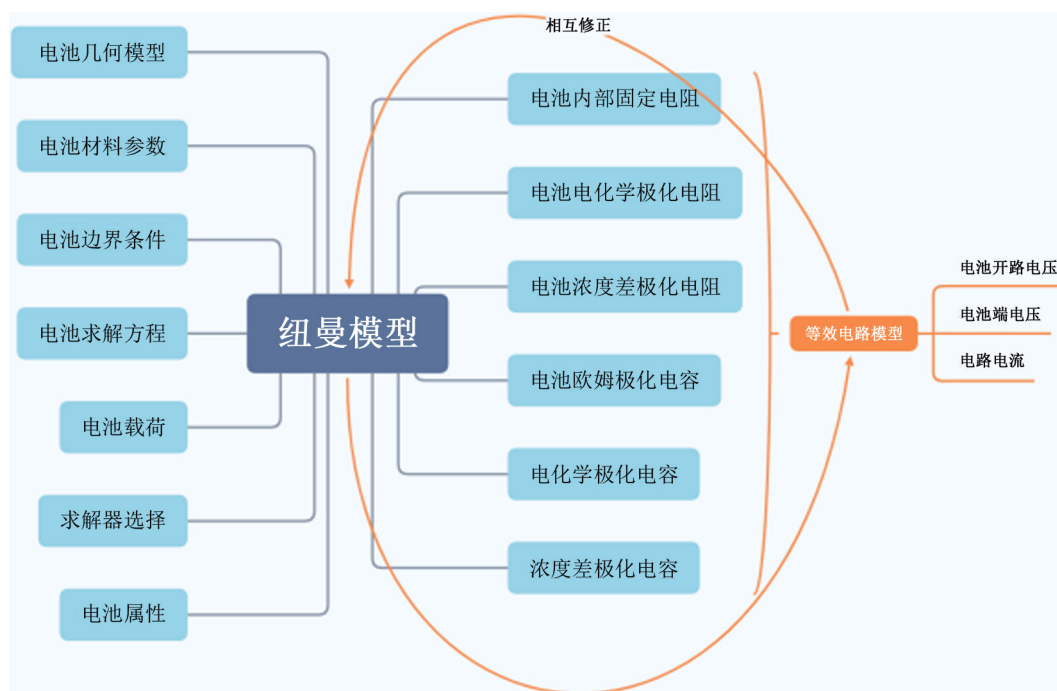


Figure 18. Composite structure of P2D model and equivalent circuit model

图 18. P2D 模型与等效电路模型的复合结构

5. 小结

近年来，动力电池的模型就在不断地演化发展，随着人们对电池的基础试验越来越细致，电池的物性参数越来越清晰，在无形中也提升了电池模型的准确性，也拓展了电池模型的使用范围。从最初的集总模型发展到纽曼模型，维度从一维发展到三维模型，从单一的电化学模型、电模型、热模型，在 Comsol 等多维度软件的加持下，进阶到电化学 - 热耦合模型、电 - 热耦合模型。在不同的领域，同时考虑时间、金钱成本，根据研究的目的，选用最合适的模型。电池模型不仅包括电池的热模型还涵盖了电池 SOC 的估算、电池热滥用等，这些都是构成电池热管理模型不可或缺的一环，为电池的性能和安全性保驾护航。

参考文献

- [1] 张志杰, 李茂德. 锂离子动力电池温升特性的研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(4): 320-321.
- [2] Onda, K., Kameyama, H., Hanamoto, T. and Ito, K. (2003) Experimental Study on Heat Generation Behavior of Small Lithium-Ion Secondary Batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, **150**, A285-A291. <https://doi.org/10.1149/1.1543947>
- [3] Lin, X., Perez, H.E., Mohan, S., Siegel, J.B., Stefanopoulou, A.G., Ding, Y., *et al.* (2014) A Lumped-Parameter Electro-Thermal Model for Cylindrical Batteries. *Journal of Power Sources*, **257**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.097>
- [4] Ye, Y., Shi, Y. and Tay, A.A.O. (2012) Electro-Thermal Cycle Life Model for Lithium Iron Phosphate Battery. *Journal of Power Sources*, **217**, 509-518. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.055>
- [5] Sato, N. (2001) Thermal Behavior Analysis of Lithium-Ion Batteries for Electric and Hybrid Vehicles. *Journal of Power Sources*, **99**, 70-77. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00478-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00478-5)
- [6] Funahashi, A., Kida, Y., Yanagida, K., Nohma, T. and Yonezu, I. (2002) Thermal Simulation of Large-Scale Lithium Secondary Batteries Using a Graphite-Coke Hybrid Carbon Negative Electrode and $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$ Positive Electrode.

- Journal of Power Sources*, **104**, 248-252. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00958-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00958-2)
- [7] Guo, M., Kim, G.H. and White, R.E. (2013) A Three-Dimensional Multi-Physics Model for a Li-Ion Battery. *Journal of Power Sources*, **240**, 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.170>
- [8] Siegel, J.B., Stefanopoulou, A.G., Hagans, P., Ding, Y. and Gorsich, D. (2013) Expansion of Lithium Ion Pouch Cell Batteries: Observations from Neutron Imaging. *Journal of the Electrochemical Society*, **160**, A1031-A1038. <https://doi.org/10.1149/2.011308jes>
- [9] 贾玉健, 解大, 顾羽洁, 艾芊, 金之检, 顾洁. 电动汽车电池等效电路模型的分类和特点[J]. 电力与能源, 2011, 32(6): 516-521.
- [10] Al Hallaj, S., Maleki, H., Hong, J.S. and Selman, J.R. (1999) Thermal Modeling and Design Considerations of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **83**, 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00178-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00178-0)
- [11] Onda, K., Ohshima, T., Nakayama, M., Fukuda, K. and Araki, T. (2006) Thermal Behavior of Small Lithium-Ion Battery during Rapid Charge and Discharge Cycles. *Journal of Power Sources*, **158**, 535-542. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.08.049>
- [12] Srinivasan, V. and Wang, C.Y. (2003) Analysis of Electrochemical and Thermal Behavior of Li-Ion Cells. *Journal of the Electrochemical Society*, **150**, A98-A106. <https://doi.org/10.1149/1.1526512>
- [13] 彭敏, 申文静, 罗兆东. 层叠式锂离子电池二维热模型研究[J]. 电源技术, 2018, 42(9): 1312-1315.
- [14] Kim, G., Smith, K., Lee, K., Santhanagopalan, S. and Pesaran, A. (2011) Multi-Domain Modeling of Lithium-Ion Batteries Encompassing Multi-Physics in Varied Length Scales. *Journal of the Electrochemical Society*, **158**, A955-A969. <https://doi.org/10.1149/1.3597614>
- [15] Lee, K., Smith, K., Pesaran, A. and Kim, G.-H. (2013) Three Dimensional Thermal-, Electrical-, and Electrochemical-Coupled Model for Cylindrical Wound Large Format Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **241**, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.007>
- [16] Chacko, S. and Chung, Y.M. (2012) Thermal Modelling of Li-Ion Polymer Battery for Electric Vehicle Drive Cycles. *Journal of Power Sources*, **213**, 296-303. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.04.015>
- [17] 韩甜, 时玮, 赵杨梅. 圆柱型锂离子电池三维分层热耦合模型研究[J/OL]. 电源学报, 2020: 1-13. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20201123.1643.002.html>
- [18] 王维强, 张吉, 张力, 严运兵. 基于三阶 RC 网络的等效电路电池模型[J]. 电池, 2019, 49(3): 212-216.