

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230547

# 计及动态非均匀热特性的储能软包锂电池充放电热路模型

李航洋<sup>1,2</sup>, 阳同光<sup>1,2</sup>

(1. 智慧城市能源感知与边缘计算湖南省重点实验室(湖南城市学院), 湖南 益阳 413000;  
2. 湖南省智慧城市能源感知与低碳制造科普基地(湖南城市学院), 湖南 益阳 413000)

**摘要:** 当前锂离子电池热行为解析模型与仿真模型在储能应用中面临效率或精度挑战。提出一种计及动态非均匀热特性的软包锂电池热分析方法, 为储能系统提供电池状态在线评估工具。首先, 构建热路模型和解析偏微分方程组, 以捕捉充放电过程中电池动态非均匀热特性。其次, 建立迭代机制确定求解参数, 发展一种兼顾精度和效率的求解算法。将热解析模型和算法应用于商用储能锂电池温度评估。多种充放电工况下的实验结果表明, 所提方法具有毫秒级计算成本和小于 3% 的温度误差, 参数标定、迭代机制增强了该方法的工程适用性。该方法对储能电池管理系统展现出良好的应用潜力。

**关键词:** 储能锂电池; 动态非均匀特性; 解析方法; 充放电热模型; 温度模拟

## A charging/discharging thermal circuit model for energy storage pouch lithium batteries considering dynamic and non-uniform characteristics

LI Hangyang<sup>1,2</sup>, YANG Tongguang<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Energy Monitoring and Edge Computing for Smart City (Hunan City University), Yiyang 413000, China; 2. Smart City Energy Monitoring and Low Carbon Manufacturing Science Popularization Base of Hunan Province (Hunan City University), Yiyang 413000, China)

**Abstract:** Existing analytical and simulation models for lithium-ion battery thermal behavior encounter efficiency or accuracy challenges in energy storage applications. This paper proposes a thermal analysis method for pouch lithium batteries considering dynamic and non-uniform thermal characteristics, providing an online state evaluation tool for energy storage systems. First, a thermal circuit model and analytical partial differential equations are created to capture the dynamic and non-uniform thermal characteristics during charge and discharge. Second, an iteration mechanism is formulated to determine the solving parameters, and a solution algorithm with balancing accuracy and efficiency is proposed. The proposed model and algorithm are applied to the temperature evaluation of commercial energy storage lithium batteries. Experimental results under various charging/discharging conditions show that the proposed method has a millisecond computational cost and less than 3% temperature error. The parameter calibration and iteration mechanisms enhance the engineering applicability. Thus, it demonstrates good application potential for the battery management system of energy storage.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China “Key Project of Intergovernmental Scientific and Technological Innovation Cooperation” (No. 2019YFE0114700).

**Key words:** lithium-ion energy storage; dynamic non-uniformity characteristics; analytical method; charging/discharging thermal model; temperature simulation

## 0 引言

储能系统有效提高了可再生能源的利用效率。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助“政府间国际科技创新合作重点专项”(2019YFE0114700); 湖南省自然科学基金项目资助(2023JJ50343); 湖南省教育厅重点/一般课题项目资助(21A0503, 21C0662)

通过调节能量采集和消纳, 消除了发电功率时间和空间上的不连续性, 广泛用于电网的“削峰填谷”<sup>[1-2]</sup>。储能类型主要包括热能、机械能和电化学储能<sup>[3]</sup>。电网应用中, 锂电池储能正快速取代飞轮、压缩空气等机械储能<sup>[4-6]</sup>。混合储能中, 锂电池和超级电容器的结合在平滑功率波动方面展现出显著的优势<sup>[7-8]</sup>。截止 2022 年底, 锂电池在全球电化学储能领域的规模达到 94.2%<sup>[9]</sup>。然而, 锂电池热失控引起的安全

问题始终存在<sup>[10-11]</sup>。充放电过程中锂电池内部生热而提升了电芯温度, 快速放电条件下的局部温度可能会升高几十度<sup>[12]</sup>。当电芯温度达到短路临界值, 将触发电池热失控。储能系统包含大规模的串/并联电池单体, 单体热失控释放的热量迅速加热毗邻电池而诱发热失控传播, 可能导致燃烧、爆炸事故<sup>[13]</sup>。解决热失控的根本在于开发先进电池材料, 以消除电化学反应产热或提升材料的热稳定性<sup>[14]</sup>。然而, 开发高能量密度且热性能稳定的电池材料深具挑战, 新型电池材料大多处于理论探索阶段。现有商用储能系统极少使用基于新型材料的电池<sup>[15]</sup>。建立安全稳定的储能系统必须依赖电池管理系统, 关键在于提出高效高精度的锂电池充放电热分析方法。

为了预测锂电池热行为演化, 国内外学者开发了充放电和热滥用工况下的电化学/热耦合模型, 分为一维、二维和三维模型<sup>[16]</sup>。一维/二维模型通常将放热反应和传热方程相结合, 推导出表征电池热状态的偏微分方程组。此类简化热模型忽略非均匀热特性, 仅计算了一个方向的平均热性能。如文献[17]从电路内阻和能量耗散两个视角建立了一维模型, 数值和实验结果表明两种模型均可以准确预测电池极耳处的温度。文献[18]将软包锂电池生热、产气、传热、膨胀等热行为构建为一维模型, 假设电池由均匀层叠单元组成, 每一单元具有均匀的生热率和温度响应。文献[19]耦合质量、电荷和能量守恒以及电动力学方程, 构建了圆柱形锂电池的二维模型, 揭示了电势分布对反应速率的影响机理。文献[20]融合 Bernardi 生热和热路传热模型模拟电池横截面的温度分布, 利用双扩展卡尔曼滤波算法实现高效求解, 为圆柱形锂电池在线温度估计提供了分析工具。三维模型通常基于多物理场耦合仿真, 理论上可得到高精度分析结果<sup>[21]</sup>。但求解仿真模型非常耗时, 效率远低于一维/二维解析模型。

储能锂电池包含不同形式的阳极材料(如 LCO、NCM 和 NCA)和封装结构(如圆柱形、棱柱形)。锂电池选型显著影响储能系统设计及其热性能<sup>[22]</sup>。与圆柱形电池相比, 软包电池组成可实现更紧凑的电池组布局和更高能量密度, 因而为储能系统所青睐<sup>[23-24]</sup>。制造商倾向使用易于堆叠的大容量软包锂电池, 最大限度地提高了空间利用率<sup>[25]</sup>。全球电池装机容量排名前十的企业, 如宁德时代、LGES、比亚迪均采用软包锂电池技术路线, 采用软包电池构建的动力系统和储能系统占比呈现显著上升趋势<sup>[26]</sup>。

然而, 极耳附近的欧姆热和电池内部的反应热导致不均匀的温度分布和锂电池热失控隐患<sup>[27]</sup>。与圆柱形电池(例如 18650 型)相比, 软包锂电池具有

更大的结构尺寸和更显著的各向异性热行为, 导致更严重的温度不均<sup>[28]</sup>。此外, 操作电压和反应热依赖于电池荷电状态(state of charge, SOC), 因此具有动态特性<sup>[20]</sup>。电池动态温度分布评估为储能电池热管理提供依据, 因此有必要开发一种高效高精度评估方法以确保储能系统安全。

软包锂电池热模型沿袭了从解析方法到仿真方法的发展路径, 现出现一系列有效的热分析方法。文献[29]开发了一维电化学/热耦合模型, 模拟软包电池在恒流放电中的动态热行为。结果表明, 法向热导率显著低于切向导热率, 电芯温度在法向上呈抛物线形分布。文献[30]构建了大尺寸软包锂电池的二维动态生热模型和三维热仿真模型, 发现切向导热率对温度梯度存在显著影响。温度分布不均主要源于充放电过程中极耳附近的欧姆热。文献[31]基于质量/电荷/能量守恒方程建立了法向一维单元, 并将其扩展成三维有限元模型, 阐明了非均匀电流分布对局部反应速率和温度响应的影响。文献[32]提出了软包锂电池电化学/热耦合有限元模型, 基于集电端子处电流密度和欧姆热实现温度梯度优化。文献[33]对大尺寸软包电池建立了高保真三维热模型, 结果表明电芯中心和表面之间的温差在 1.7 °C 以内。文献[34]集成电芯和集电端子的生热方程, 建立了计及非均匀热特性的有限元模型, 预测了不同环境温度和放电速率下的软包电池温度分布。文献[35]构建了一个基于层叠结构的多物理耦合仿真模型, 分析软包电池电流密度分布, 指出极耳与电极连接处具有最大的电流密度和温度梯度。上述文献表明, 软包锂电池的动态非均匀热特性引起了广泛关注。然而, 现有研究集中在电化学/热耦合仿真领域, 少量解析热模型仍停留在一维建模阶段。前者需要数小时的计算耗时, 后者难以描述软包锂电池的非均匀热特性。将这些模型应用于储能电池管理系统, 面临效率和精度上的挑战。

本文提出一种计及动态非均匀热特性的软包锂电池热路模型, 用于评估充放电过程中的电池温度分布。首先阐明动态非均匀热特性的形成机理; 其次, 建立热路模型和解析偏微分方程组, 以捕捉动态非均匀热特性; 再次, 建立迭代机制以确定求解参数, 实现高效高精度求解; 最后通过对商用软包锂电池的计算和实验, 验证本文方法的有效性。该方法有望解决软包锂电池的在线热状态分析难题, 为储能电池热管理提供一种潜在的计算工具。

## 1 锂电池动态非均匀热特性

如图 1 所示, 软包锂电池封装由可变形的铝塑

膜制成, 电池电芯由剪切后的层叠结构绕卷而成。层叠结构包括正负电极层和集流层, 以及用于绝缘的隔膜层。两个极耳从正负电极层引出, 用以充放电电流的输入/输出。

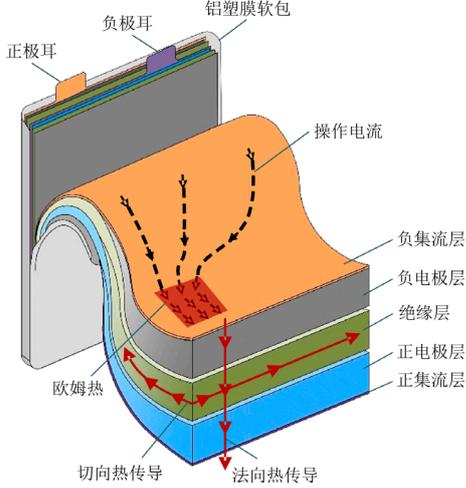


图1 软包锂电池的层叠结构与非均匀热特性

Fig. 1 Laminated structure and non-uniform thermal characteristics of pouch lithium cells

充放电过程中, 锂电池生热包含极耳局部的欧姆热和电芯内分布的反应热。欧姆热由充放电电流和内阻效应导致, 与电池 SOC 实时相关。电化学反应速率随电芯温度变化, 故反应热动态变化<sup>[36]</sup>。并且, 电芯内的热传递面临各向异性热导率。在层叠切向, 热量在连续导热介质中传递。而法向上的热传递须穿越多个介质层, 层间接触热阻远大于介质材料热阻。简言之, 锂电池层叠法向热阻显著高于切向热阻<sup>[28]</sup>。极耳欧姆热和各向异性热导率是导致方形锂电池动态非均匀温度分布的主要原因。过高的温度加速锂电池老化<sup>[30]</sup>。如局部温度超过短路临界值可能诱发热失控, 导致锂电池起火、爆炸<sup>[10]</sup>。

## 2 热路模型的构建与求解

充放电中的软包锂电池热行为包含生热、传热耦合过程。热源是欧姆热和反应热, 它导致电芯温度逐渐升高, 电芯温度又决定电化学反应的生热速率。多物理场耦合仿真是分析锂电池热行为的有效方法。对层叠结构及非均匀热特性进行高保真建模, 仿真方法可实现高精度求解, 但耗时较长。以长宽高为 80 mm × 60 mm × 5 mm 的软包锂电池为例, 给定有限元单元最小网格化尺寸 0.5 mm。该有限元模型包含 192 000 个八节点六面体单元, 每一节点有六空间、一温度构成的七个自由度。每次有限元分析需计算一 10 752 000 规模的方程组, 常规计算机

求解需耗时数小时, 计算效率难以满足储能系统锂电池热状态在线评估需求。为此, 本节提出一种高效锂电池充放电热状态分析方法, 先构建计及动态非均匀热特性的三维热路模型, 再给出解析偏微分方程组及求解流程。

### 2.1 热路模型

热路模型使用直流源、电容、电阻和电势分别描述热源、热容、热阻和温度<sup>[37]</sup>。建模原则如下: (1) 热源由欧姆热和反应热组成, 与 SOC 实时相关。(2) 锂电池具有均匀的比热容。(3) 热交换依赖于传导和对流。层叠结构的法向和切向热导率不同。对流换热系数均匀分布于电池表面。(4) 软包锂电池在层叠切向上被划分为  $m \times n$  个等分区块。长度方向上有  $m$  个分区, 宽度方向上有  $n$  个分区。在厚度方向(即法向), 所有区块共享同一层叠结构。考虑法向对称性, 建立半高热路模型 ( $H/2$ ), 如图 2 所示。其中  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别代表长度、宽度和厚度方向;  $R_X$ 、 $R_Y$ 、 $R_Z$  分别表示  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的热阻;  $L$ 、 $W$ 、 $H$  分别表示锂电池的长、宽、高。每一区块具有相同的比热容和各向异性热导率, 且区块的质量、体积、面积相等。所以, 所有区块的热容、对流热阻、传导热阻向量相同, 写成  $C_{\text{cel}}$ 、 $R_{\text{sur}}$ 、 $\mathbf{R}_{\text{cel}} = (R_X, R_Y, R_Z)$ 。  $T_{\text{air}}$  表示环境温度;  $Q_0$  表示欧姆热率。

上标  $(i, j)$  表示  $X$  方向上第  $i$  个、 $Y$  方向上第  $j$  个区块,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $Q_R^{(i,j)}$ 、 $O_C^{(i,j)}$ 、 $T_{\text{cor}}^{(i,j)}$ 、 $T_{\text{sur}}^{(i,j)}$  表示区块  $(i, j)$  的反应热率、容纳热率、电芯温度和表面温度;  $O_X^{(i,j)}$ 、 $O_Y^{(i,j)}$ 、 $O_Z^{(i,j)}$  表示区块  $(i, j)$  沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的输出热率;  $I_X^{(i,j)}$  表示区块  $(i, j)$  沿  $X$  方向的输入热率;  $I_Y^{(i,j)}$  表示区块  $(i, j)$  沿  $Y$  方向的输入热率。

### 2.2 偏微分方程组

根据基尔霍夫定律<sup>[38]</sup>, 建立热平衡方程。对于每一区块, 输入热量等于输出热量, 写成

$$Q_R^{(i,j)} + I_X^{(i,j)} + I_Y^{(i,j)} = O_C^{(i,j)} + O_X^{(i,j)} + O_Y^{(i,j)} + O_Z^{(i,j)} \quad (1)$$

若正极耳处于区块  $(1,0)$  中, 其在  $X$  方向的输入热量为欧姆热, 其余区块的  $I_X^{(i,j)}$  来自前一区块。由此,  $I_X^{(i,j)}$  推导为

$$I_X^{(i,j)} = \begin{cases} 0, & i = 1 \& j \neq 0 \\ Q_0, & i = 1 \& j = 0 \\ O_X^{(i-1,j)}, & i \neq 1 \& j \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Bernardi 等基于热力学第一定律提出了通用的锂电池充放电生热模型。该模型综合考虑了电化学反应、相变以及阻抗效应<sup>[20]</sup>。应用于该热路模型,  $Q_0$  写为式(3)。

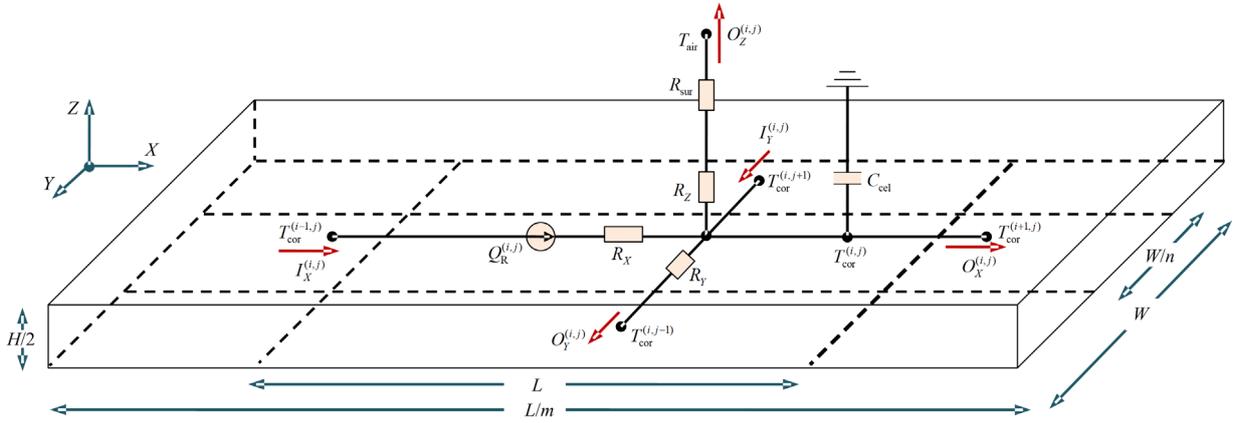


图2 本文的热路模型

Fig. 2 The proposed thermal circuit model

$$Q_o = 0.5 \cdot I_c \cdot (U_o - U_c) \quad (3)$$

式中:  $I_c$ 、 $U_c$  表示充放电过程的操作电流和电压, 可通过电池管理系统在线获得;  $U_o$  表示开路电压。电化学反应热率写成

$$Q_R^{(i,j)} = \frac{c_E}{2 \cdot m \cdot n} \cdot I_c \cdot T_{cor}^{(i,j)} \quad (4)$$

式中,  $c_E$  表示熵系数, 属于电池固有特性, 与 SOC 有关。

式(1)中的容纳热率为

$$O_C^{(i,j)} = \frac{1}{2 \cdot m \cdot n} \cdot M_{cel} \cdot c_{cel} \cdot \dot{T}_{cor}^{(i,j)} \quad (5)$$

式中:  $\frac{1}{2 \cdot m \cdot n} \cdot M_{cel}$  表示区块质量;  $c_{cel}$  表示电池的比热容, 二者相乘即为区块热容。

热量  $O_X^{(i,j)}$ 、 $O_Y^{(i,j)}$  由毗邻区块的温度差导致, 构建为

$$O_X^{(i,j)} = \begin{cases} \frac{T_{cor}^{(i,j)} - T_{cor}^{(i+1,j)}}{R_X}, & i \neq m \\ 0, & i = m \end{cases} \quad (6)$$

$$O_Y^{(i,j)} = \begin{cases} \frac{T_{cor}^{(i,j)} - T_{cor}^{(i,j+1)}}{R_Y}, & j \neq n \\ 0, & j = n \end{cases}$$

Z 方向上的热阻包含传导热阻和对流热阻, 输出热率  $O_Z^{(i,j)}$  推导为

$$O_Z^{(i,j)} = \frac{T_{cor}^{(i,j)} - T_{air}}{R_{sur} + R_Z} \quad (7)$$

$T_{cor}^{(i,j)}$ 、 $T_{sur}^{(i,j)}$  和  $T_{air}$  之间的关系为

$$\frac{T_{cor}^{(i,j)} - T_{sur}^{(i,j)}}{R_Z} = \frac{T_{sur}^{(i,j)} - T_{air}}{R_{sur}} \quad (8)$$

传导热阻取决于传热距离  $\delta$ 、热交换面积  $A$ 、导热率  $K$ , 写成  $\frac{\delta}{K \cdot A}$ 。每一区块的尺寸为  $\frac{L}{m} \times \frac{W}{n} \times \frac{H}{2}$ , 3 个方向的热阻被推导为

$$\begin{cases} R_X = \frac{2 \cdot n \cdot L}{K_X \cdot W \cdot H \cdot m} \\ R_Y = \frac{2 \cdot m \cdot W}{K_Y \cdot L \cdot H} \\ R_Z = \frac{m \cdot n \cdot H}{2 \cdot K_Z \cdot L \cdot W} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $K_X$ 、 $K_Y$ 、 $K_Z$  表示 X、Y、Z 方向的导热率。根据牛顿冷却定律<sup>[39]</sup>,  $R_{sur}$  由对流换热系数  $h_{sur}$  和热交换面积乘积的倒数, 推导为

$$R_{sur} = \frac{m \cdot n}{h_{sur} \cdot W \cdot L} \quad (10)$$

式中,  $h_{sur}$  表示区块表面与环境之间的对流换热系数, 与空气流速等散热工况有关。比热容、导热率、换热系数可通过试验标定<sup>[40-42]</sup>。

式(1)一式(10)组成的偏微分方程组是本文热路模型的解析表达式。输入参数包括结构尺寸 ( $L, W, Z$ )、固有属性 ( $U_o, c_E, M_{cel}, c_{cel}, K_X, K_Y, K_Z$ )、操作工况 ( $T_{air}, I_c, U_c, h_{sur}$ )、分区数 ( $m, n$ )。输出结果是每一区块的电芯温度  $T_{cor}^{(i,j)}$  和表面温度  $T_{sur}^{(i,j)}$ 。 $U_o$ 、 $c_E$ 、 $U_c$  随 SOC 变化,  $I_c$ 、 $T_{air}$ 、 $h_{sur}$  随工况变化, 具有动态特性。 $K_X$ 、 $K_Y$ 、 $K_Z$  表征锂电池的非均匀热特性。输出结果能够反映锂电池的三维动态温度响应。由此形成计及动态非均匀特性的锂电池充放电热模型。

### 2.3 求解流程

给定分区数  $(m, n)$ ，本文解析方程组可被商用数值分析软件求解。该解析方程组的求解耗时不到 1 ms，效率远高于有限元方法。 $m$ 、 $n$  的取值对计算精度有显著影响，不能随意给定。大分区数更易抓取锂电池非均匀温度响应，但引入了更高计算成本。为兼顾效率和精度，本节对分区数建立迭代机制。在工程应用中，电池管理系统通常在正极耳附近建立温度监测点。该点的电芯温度响应  $T_{ref}$  被用于建立收敛标准， $m$ 、 $n$  的优化模型被构建为

$$\begin{cases} \min_{m, n \in N^+} f(m, n) = \frac{m}{W} + \frac{n}{L} \\ \text{s.t.} \left| \frac{T_{ref}(m, n) - T_{ref}(m-1, n)}{T_{air}} \right| \leq \varepsilon \\ \left| \frac{T_{ref}(m, n) - T_{ref}(m, n-1)}{T_{air}} \right| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

式中： $N^+$  表示正整数集； $\varepsilon$  是给定的收敛限； $\frac{m}{W}$ 、

$\frac{n}{L}$  表示对  $m$ 、 $n$  归一化处理后的最小化函数，二者同权重结合形成目标函数  $f(m, n)$ ，旨在实现分区数最小化；两个约束表示温度响应在  $X$ 、 $Y$  方向上实现分区数收敛。监测点落在区块  $(i, j)$  中，该区块电芯温度为  $T_{cor}^{(i, j)}$ ，该区块中心点坐标为  $(X_i, Y_j)$ 。基于该点，通过二维线性插值即可得到监测点温度  $T_{ref}$ 。

式(11)是二维整数规划问题，可采用直接搜索法求解。即从  $(m, n) = (2, 2)$  始构建交叉组合逐一尝试，直至收敛。采用直接搜索法的原因在于：(1) 储能电池管理系统仅需要搜索一次分区数；(2) 单次求解该解析方程组的计算成本微小；(3) 直接搜索法对于工程师来说易于理解和编程。

与电化学-热耦合有限元仿真不同，本文方法仅求解微分方程组，毫秒级耗时能够满足储能系统对锂电池单体状态在线监控需求。该热路模型的计算精度在第 3 节中通过试验验证。

## 3 工程应用与试验验证

为研究本文方法的性能，本节给出了商用软包锂电池的计算与试验结果。偏微分方程组数值求解步长设置为 10 s，通过试验获取真实建模参数和分析基准。

### 3.1 试验框架

一款商用软包锂电池被用作分析样本。电池负极材料为石墨，正极材料为  $\text{LiCoO}_2$ 。电解液含有 15% 的  $\text{LiPF}_6$ 、75% 的碳酸盐和丙酸盐溶剂、10% 的添加剂。供应商提供的具体规格如表 1 所示。设计两组试验，分别为标定试验和验证试验。试验设备主要包括温度试验箱(型号：BTL-D2-408CT)和充放电设备(型号：CT-4008T-5V12A-204N)，如图 3 所示。每次试验随机选择 3 个电池样本，取平均测量值以排除操作误差。标定试验用以获取开路电压  $U_0$ 、熵热系数  $c_E$ 、SOC、操作时间  $t$  等试验数据。验证试验用以建立常温、恒温 and 升温工况下的分析基准。



图 3 3 个电池样本悬置于温度试验箱

Fig. 3 Three samples suspended in the chamber during each experiment

表 1 电池规格和操作工况

Table 1 Battery specifications and operating parameters

规格/工况	外形尺寸	重量	电荷容量	电压范围	最大电流	比热容	X 向导热率	Y 向导热率	Z 向导热率	换热系数
符号	$L, W, H$	$M_{cel}$	$100\% \cdot S_{OC}$	$U_C^{min}, U_C^{max}$	$I_C^{max}$	$c_{cel}$	$K_X$	$K_Y$	$K_Z$	$h_{sur}$
单位	mm	g	Ah	V	A	J/(g·K)	W/(mm·K)	W/(mm·K)	W/(mm·K)	W/(mm <sup>2</sup> ·K)
数值	112, 61, 5	76.9	5.0	3.0, 4.5	2C	1.05	0.015	0.015	0.0039	$5 \times 10^{-5}$

注：1C 是指 1 h 内对 SOC 为 100% 的锂电池放电的恒电流，对于该电池样本，1C 放电的电流为 6.25 A。

标定试验的步骤如下：(1) 将样本与充放电设备连接，恒流充电至 SOC 为 100%。(2) 将样本放置于温度试验箱中，设定其温度为  $T_{air}^{(1)} = 25^\circ\text{C}$ ，保持 1 h，记录开路电压。(3) 对样本 1C 恒流放电

10%SOC，保持 1 h，记录开路电压和放电时长。(4) 重复步骤(3)，直至 SOC 为 0%。将试验箱温度修改为  $T_{air}^{(2)} = 50^\circ\text{C}$ ，再次执行标定试验。熵热系数根据试验结果计算得到<sup>[20]</sup>，标定试验结果如表

2 所示。 $c_E$  的计算式为  $c_E = [U_o(T_{air}^{(II)}) - U_o(T_{air}^{(I)})] / (T_{air}^{(II)} - T_{air}^{(I)})$ 。

表 2 标定试验结果

Table 2 Results of the calibration experiments

$T_{air}/^{\circ}\text{C}$	$S_{oc}/\%$	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	$t/s$	0	360	720	1080	1440	1800	2160	2520	2880	3240	3600
25	$U_o/V$	4.55	4.43	4.33	4.24	4.11	4.02	3.95	3.92	3.86	3.81	3.74
50		4.40	4.30	4.19	4.10	3.97	3.86	3.78	3.77	3.70	3.64	3.57
$c_E/V$		$61.2 \times 10^{-4}$	$53.6 \times 10^{-4}$	$55.2 \times 10^{-4}$	$55.2 \times 10^{-4}$	$55.6 \times 10^{-4}$	$62.4 \times 10^{-4}$	$67.6 \times 10^{-4}$	$59.6 \times 10^{-4}$	$63.2 \times 10^{-4}$	$66.8 \times 10^{-4}$	$68.8 \times 10^{-4}$

验证试验执行 3 种工况：常温  $T_{air}^{(I)} = 25^{\circ}\text{C}$ 、高温  $T_{air}^{(II)} = 50^{\circ}\text{C}$ 、升温  $T_{air}(t) = T_{air}^{(I)} + t/120$ ， $T_{air}(t) \leq 85^{\circ}\text{C}$ 。常温工况下的试验步骤如下：(1) 如图 4 所示，在满充样本表面的监测点位置布置温度传感器(型号：MiniSens-Pt100-1/5-IEC)，并连接至充放电设备。(2) 设置试验箱温度为  $T_{air}^{(I)}$ ，静置 1 h。(3) 以恒流 1C 放电至 SOC 为 0% 后充电至 SOC 为 100%。(4) 保持试验箱温度 15 min，使监测点温度趋于稳定。其他两种工况的试验步骤类似。试验过程中，充放电设备和温度传感器每 60 s 在线输出操作电压  $U_C$  和监测点温度  $T_{ref}$ 。验证试验结果如表 3 所示，其中  $T_{ref}^{\alpha}$ 、 $T_{ref}^{\beta}$  分别为监测点  $\alpha$ 、 $\beta$  的温度。

### 3.2 温度分析与试验结果

为便于求解式(11)，须对试验数据进行参数化处理：建立开路电压  $U_o$ 、熵热系数  $c_E$ 、操作电压  $U_C$  对时间的一元参数化方程。高阶多项式拟合可在 3% 收敛限下准确表征二维数据表。

表 3 验证试验结果

Table 3 Results of the verification experiments

工况	$t/s$	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000	6600	7200	7800
$T_{air}^{(I)}$	$U_C/V$	4.29	4.13	3.93	3.77	3.66	3.58	3.50	3.74	3.89	3.98	4.14	4.37	4.48	4.48
	$T_{ref}^{\alpha}/^{\circ}\text{C}$	25.0	44.1	44.6	44.6	44.6	45.1	44.3	42.6	39.2	37.4	37.6	38.3	38.8	32.8
	$T_{ref}^{\beta}/^{\circ}\text{C}$	25.0	32.9	33.5	32.6	32.1	33.2	34.5	33.9	32.3	32.1	33.1	33.3	32.7	32.8
$T_{air}^{(II)}$	$U_C/V$	4.36	4.20	3.99	3.84	3.73	3.64	3.49	3.75	3.83	3.89	4.05	4.23	4.48	4.48
	$T_{ref}^{\alpha}/^{\circ}\text{C}$	50.0	65.7	65.9	65.6	65.8	66.9	66.8	65.9	63.7	63.1	64.2	65.1	63.3	57.0
	$T_{ref}^{\beta}/^{\circ}\text{C}$	50.0	57.1	57.5	56.7	56.3	57.3	58.4	57.9	56.5	56.4	57.3	57.4	56.8	56.9
$T_{air}(t)$	$U_C/V$	4.31	4.12	3.97	3.82	3.71	3.66	3.50	3.72	3.75	3.82	3.95	4.10	4.48	4.48
	$T_{ref}^{\alpha}/^{\circ}\text{C}$	25.0	46.1	50.7	54.8	59.8	65.8	71.1	75.7	79.3	84.6	91.9	98.1	99.0	92.7
	$T_{ref}^{\beta}/^{\circ}\text{C}$	25.0	35.7	41.1	45.5	50.2	56.2	62.6	67.1	70.7	75.7	81.8	87.0	91.5	92.7

表 4 开路电压和熵热系数的参数化表达

Table 4 Parametric expressions for the open circuit voltage and temperature-entropy coefficient

动态参数	解析表达式
$S_{oc}(t)$	$S_{oc}(t \leq 3600) = 1 - t/3600$ , $S_{oc}(3600 < t \leq 7200) = t/3600 - 1$ , $S_{oc}(t > 7200) = 1$
$U_o(S_{oc})$	$0.50S_{oc}^2 + 0.31S_{oc} + 3.76$
$c_E(S_{oc})$	$-0.16S_{oc}^6 + 0.52S_{oc}^5 - 0.58S_{oc}^4 + 0.27S_{oc}^3 - 0.041S_{oc}^2 - 0.0031S_{oc} + 0.071$

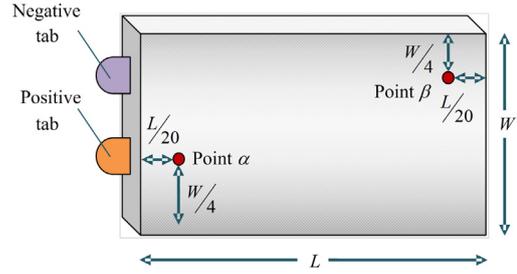


图 4 验证实验中的温度传感器布置

Fig. 4 Layout of temperature sensors in validation experiments

基于表 2 得到电池样本的  $S_{oc}(t)$ 、 $U_o(S_{oc})$ 、 $c_E(S_{oc})$  的参数化方程，根据表 3 得到  $U_C(t)$  的参数化方程，如表 4 和表 5 所示。

将建模参数(如表 1 和表 4)代入式(11)，求解锂电池样品在常温  $T_{air}^{(I)}$ 、高温  $T_{air}^{(II)}$  和升温  $T_{air}(t)$  等工况下的温度响应。经过几次或十几次迭代，均收敛出稳定的解。迭代过程如图 5 所示。3 次求解过程均耗

表 5 3 种工况下操作电压的参数化表达

Table 5 Parametric expressions for the operating voltage under three conditions

工况	操作电压解析表达式
$T_{\text{air}}^{(I)}$	$U_c(t) = 1.64 \times 10^{-22} t^6 - 3.09 \times 10^{-18} t^5 + 1.78 \times 10^{-14} t^4 - 2.08 \times 10^{-11} t^3 - 2.05 \times 10^{-8} t^2 - 2.61 \times 10^{-4} t + 4.29$
$T_{\text{air}}^{(II)}$	$U_c(t) = 3.04 \times 10^{-22} t^6 - 5.87 \times 10^{-18} t^5 + 3.92 \times 10^{-14} t^4 - 9.99 \times 10^{-11} t^3 + 1.08 \times 10^{-7} t^2 - 3.32 \times 10^{-4} t + 4.36$
$T_{\text{air}}(t)$	$U_c(t) = 4.52 \times 10^{-22} t^6 - 8.90 \times 10^{-18} t^5 + 6.38 \times 10^{-14} t^4 - 1.99 \times 10^{-10} t^3 + 2.97 \times 10^{-7} t^2 - 4.44 \times 10^{-4} t + 4.31$

时不到 3 ms。3 种工况下的电池温度随位置的变化如图 6 所示。监测点  $\alpha$  温度演化的计算值和测量值对比如图 7—图 9 所示，图中  $T_{\alpha}^{\text{com}}$  和  $T_{\alpha}^{\text{exp}}$  分别表示计算值和测量值。表 6 列出了充电结束时 ( $t = 7200$  s) 的温度计算值和测量值。

具有极显著的效率优势。相比于常规的二维解析方法<sup>[16-17]</sup>，效率上也处于同等水平，毫秒级效率能够满足储能系统电芯级在线热管理需求。

精度方面，图 7—图 9 表明 3 种工况下计算值与测量值呈现出相近的曲线，每一时刻上的结果也

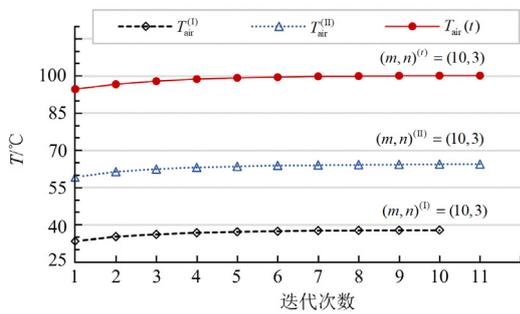


图 5 3 种工况下的迭代过程

Fig. 5 Iteration procedures under the three conditions

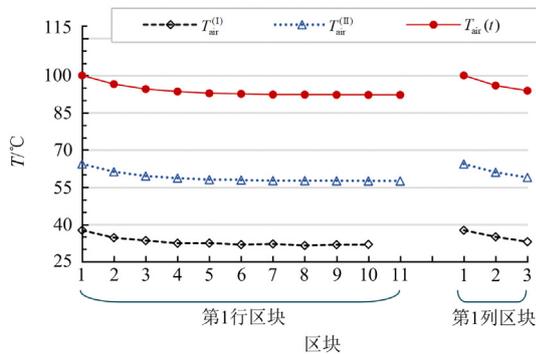


图 6 3 种工况下充电结束时刻的温度分布

Fig. 6 Temperature over location at the end of charging under three conditions

### 3.3 结果讨论

从效率、精度、适用性、局限性 4 方面讨论本文方法的性能。效率方面，本文方法的 3 次求解过程耗时均小于 3 ms，其得益于两个方面。首先是分区数求解的收敛性。如图 5 所示，3 种工况下分区数迭代次数分别是 11、11 和 10。这表明如式(11)的优化模型能够高效收敛出  $X$  和  $Y$  方向的最优分区数  $(m, n)$ 。其次，本文方法仅须计算偏微分方程组，与多物理耦合仿真的小时级耗时相比(见第 2 节)，

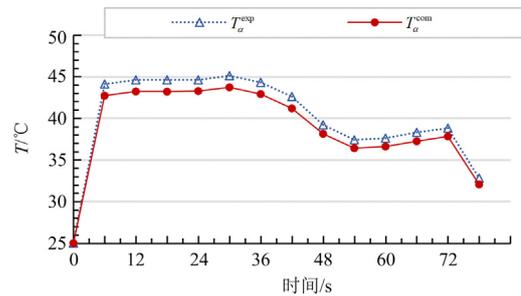


图 7 常温工况下监测点  $\alpha$  的温度演化

Fig. 7 Temperature over time at the monitoring point  $\alpha$  under the room temperature condition

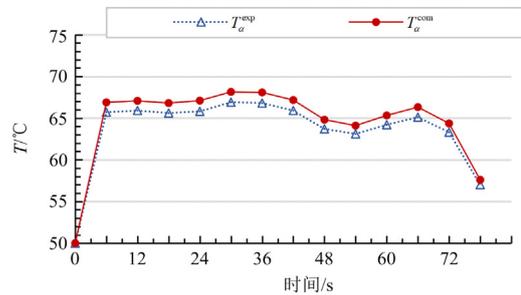


图 8 高温工况下监测点  $\alpha$  的温度演化

Fig. 8 Temperature over time at the monitoring point  $\alpha$  under the high temperature condition

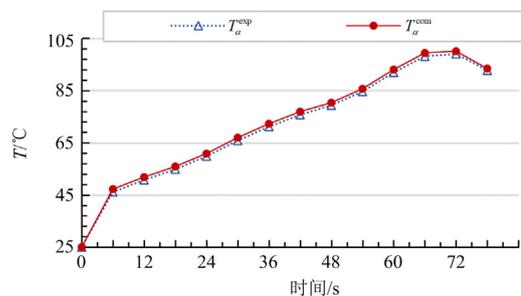


图 9 升温工况下监测点  $\alpha$  的温度演化

Fig. 9 Temperature over time at the monitoring point  $\alpha$  under the rising temperature condition

表 6 3 种工况下计算与试验结果  
Table 6 Computational and experimental results  
under the three conditions

工况	监测点	计算值/°C	测量值/°C	误差/%
$T_{\text{air}}^{(I)}$	$\alpha$	37.8	38.8	2.58
	$\beta$	31.9	32.7	2.45
$T_{\text{air}}^{(II)}$	$\alpha$	64.4	63.3	1.74
	$\beta$	57.5	56.8	1.23
$T_{\text{air}}(t)$	$\alpha$	100.6	99.0	1.62
	$\beta$	92.2	91.5	0.77

很接近。如表 6 所示, 在充电结束时刻 ( $t = 7200 \text{ s}$ ), 温度计算的最大绝对误差为  $1.6 \text{ }^\circ\text{C}$  (升温工况下的  $\alpha$  点), 最大相对误差为  $2.58\%$  (升温工况下的  $\alpha$  点)。文献[35]提出了一种面向大尺寸软包锂电池的电化学-热耦合仿真模型, 用以模拟 48 个电极层的非均匀温度分布。该模型应用于磷酸铁锂电池 (容量:  $20 \text{ Ah}$ 、尺寸:  $20 \text{ mm} \times 151 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$ ), 在  $1\text{C}$  充电工况下温度计算的相对误差为  $3\%$ , 放电工况下相对误差为  $4\%$ 。该研究在样品规格和试验工况上与本文研究相似, 因此用作对比基准, 表明本文方法的精度与高保真仿真方法相当。相对误差小于  $3\%$  的温度计算精度在储能系统应用中通常是可以接受的。

适用性方面, 与现有一维/二维解析模型不同<sup>[17-18]</sup>, 本文方法考虑了软包锂电池的动态非均匀热特性, 包括与时间相关的参数 ( $U_c, U_o, c_E, T_{\text{air}}$ ) 和与空间相关的参数 ( $K_x, K_y, K_z$ )。计算结果反映了不同充放电工况下的电池动态温度分布 (见图 6 和图 7)。对于求解参数 ( $m, n$ ), 给出了迭代机制以兼顾精度和效率, 并为工程应用阐明了参数选择方法。并且, 第 3.1 节描述了建模参数的详细标定过程。由此, 本文方法在捕捉动态非均匀热特性、参数标定、迭代机制方面的性能表明了其在电池管理系统中的应用潜力。

本文方法的局限性在于生热模型和法向分区。生热模型是基于热力学第一定律推导的 Bernardi 模型, 它考虑了一般锂电池充放电过程中的电化学反应、相变以及阻抗效应<sup>[20]</sup>。该模型仅适用于  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  以下的工况, 更高温度下应考虑析锂/嵌锂反应生热<sup>[18]</sup>。法向分区方面, 对于较大厚宽比 ( $\geq 0.2$ ) 的软包锂电池, 本文方法的法向二分区不足以捕捉厚度方向上的非均匀热特性, 应采用与切向上类似的分区数迭代求解策略。

## 4 结论

针对锂电池热模型在储能应用中遭遇的效率、

精度挑战, 本文提出了一种计及动态非均匀热特性的软包锂电池热状态分析方法, 可计算充放电工况下电池动态温度分布。首先, 建立了热路模型和解析偏微分方程组, 以捕捉电池的动态非均匀热特性。其次, 给出求解参数的迭代机制, 并提供了一种兼顾效率和精度的求解算法。通过对商用软包锂电池实施热分析与试验验证, 得到如下结论:

1) 本文方法只求解微分方程组, 计算耗时为毫秒级, 效率等同于二维解析方法, 能够满足储能系统电池状态在线评估需求。

2) 常温、高温、升温 3 种工况下的计算值与试验值对比可知, 锂电池温度最大计算误差为  $2.58\%$ , 精度类似于高保真有限元仿真方法的精度 (小于  $3\%$ ), 能够满足储能应用的精度需求。

因此, 本文方法有望解决软包锂电池在线温度评估问题, 为储能系统电池管理提供一种潜在的计算工具。未来, 将深入研究极端工况下 (如  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  以上的高温环境、强振动冲击工况等) 的锂电池在线评估方法。

## 参考文献

- [1] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 183-193.
- [2] 时帅, 吴慧娟, 黄冬梅, 等. 考虑复杂海洋气候条件影响的海上风电场储能容量配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 172-179.  
SHI Shuai, WU Huixian, HUANG Dongmei, et al. Energy storage capacity configuration of an offshore wind farm considering the influence of complex ocean climate conditions[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 172-179.
- [3] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 47-53.  
JIANG Kai, LI Haomiao, LI Wei, et al. On several battery technologies for power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 47-53.
- [4] PENG Xiongbin, MA Chong, GARG A, et al. Thermal performance investigation of an air-cooled lithium-ion battery pack considering the inconsistency of battery cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 596-603.
- [5] 王义军, 左雪. 锂离子电池荷电状态估算方法及其应用场景综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 193-207.  
WANG Yijun, ZUO Xue. Review on estimation methods for state of charge of lithium-ion battery and their application scenarios[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2022, 46(14): 193-207.
- [6] 尚彦赞, 宋红为, 杨照光, 等. 基于二阶 RC 模型的锂电池充放电特性分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 87-94. SHANG Yanyun, SONG Hongwei, YANG Zhaoguang, et al. Charge and discharge characteristics analysis of lithium battery based on second-order RC model[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 87-94.
- [7] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152. ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [8] 胡治国, 张磊冲, 司少康, 等. 基于电压下垂法的独立直流微网混合储能系统控制策略改进[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 39-44. HU Zhiguo, ZHANG Leichong, SI Shaokang, et al. Improvement of hybrid energy storage system control strategy of independent DC microgrid based on voltage sag method[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 39-44.
- [9] 霍丽萍, 栾伟玲, 庄子贤. 锂离子电池储能安全技术的发展态势——从全球专利数据分析我国的发展现状[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2671-2680. HUO Liping, LUAN Weiling, ZHUANG Zixian. Development trend of lithium-ion battery safety technology for energy storage—analysis of China's development status from global patent data[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2671-2680.
- [10] 朱晓庆, 王震坡, 王聪, 等. 锂离子动力电池热失控与安全管理研究综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 91-118. ZHU Xiaoqing, WANG Zhenpo, WANG Cong, et al. Review of thermal runaway and safety management for lithium-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 91-118.
- [11] XU Bin, LEE J, KWON D, et al. Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111437.
- [12] 蔡涛, 张钊诚, 袁奥特, 等. 锂离子电池储能安全管理中的机器学习方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 178-187. CAI Tao, ZHANG Zhaocheng, YUAN Aote, et al. Review of machine learning for safety management of Li-ion battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 178-187.
- [13] FENG Xuning, SUN Jin, OUYANG Minggao, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module[J]. Journal of Power Sources, 2015, 275: 261-273.
- [14] LIU Kai, LIU Yayuan, LIN Dingchang, et al. Materials for lithium-ion battery safety[J]. Science Advances, 2018, 4(6): 9820.
- [15] LIU Yayuan, ZHU Yangying, CUI Yi. Challenges and opportunities towards fast-charging battery materials[J]. Nature Energy, 2019, 4(7): 540-550.
- [16] HU Xiaosong, LIU Wenxue, LIN Xianke, et al. A comparative study of control-oriented thermal models for cylindrical Li-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 1237-1253.
- [17] MEVALLA A, PANCHAL S, TRAN M K, et al. One dimensional fast computational partial differential model for heat transfer in lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 37: 102471.
- [18] 黄志亮, 王怀兴, 阳同光, 等. 储能锂离子电池包单体内温度压力模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 138-146. HUANG Zhiliang, WANG Huaixing, YANG Tongguang, et al. Simulation of internal temperature and pressure for cells in an energy storage lithium-ion battery[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 138-146.
- [19] XU Meng, ZHANG Zhuqian, WANG Xia, et al. Two-dimensional electrochemical-thermal coupled modelling of cylindrical LiFePO<sub>4</sub> batteries[J]. Journal of Power Sources, 2014, 256: 233-243.
- [20] 熊瑞, 李幸港. 基于双卡尔曼滤波算法的动力电池内部温度估计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 146-151. XIONG Rui, LI Xinggang. Battery internal temperature estimation method through double extended Kalman filtering algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 146-151.
- [21] DONG H J, SEUNG M B. Thermal modelling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 52(8-9): 2973-2981.
- [22] 刘建军, 邓洁清, 郭世雄, 等. 基于知识学习的储能电站健康监测与预警[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 64-71. LIU Jianjun, DENG Jieqing, GUO Shixiong, et al. Health monitoring and early warning of an energy storage plant based on knowledge learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 64-71.
- [23] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42. LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.
- [24] HU Xiaosong, LIU Wenxue, LIN Xianke, et al. A control-oriented electrothermal model for pouch-type

- electric vehicle batteries[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5530-5544.
- [25] XU Jing, CHEN Zhaoliang, QIN Jiang, et al. A lightweight and low-cost liquid-cooled thermal management solution for high energy density prismatic lithium-ion battery packs[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117871.
- [26] 徐雅慧, 陈思琦, 黄冉军, 等. 软包电池在纯电动汽车中应用的机遇与挑战[J]. 电源技术, 2022, 46(6): 585-590.
- XU Huiya, CHEN Siqu, HUANG Ranjun, et al. Opportunities and challenges of pouch cell applied in electric vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(6): 585-590.
- [27] LI Shen, KIRKALDY N, ZHANG Cheng, et al. Optimal cell tab design and cooling strategy for cylindrical lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2021, 492: 229594.
- [28] AL-ZAREER M, DA SILVA C, AMON C H. Predicting anisotropic thermophysical properties and spatially distributed heat generation rates in pouch lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2021, 510: 230362.
- [29] AN Zhoujian, JIA Li, WEI Liting, et al. Investigation on lithium-ion battery electrochemical and thermal characteristic based on electrochemical-thermal coupled model[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 792-807.
- [30] WU Bin, LI Zhe, ZHANG Jianbo. Thermal design for the pouch-type large-format lithium-ion batteries: I thermo-electrical modelling and origins of temperature non-uniformity[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2014, 162(1): 181.
- [31] XU Meng, ZHANG Zhuqian, WANG Xia, et al. A pseudo three-dimensional electrochemical-thermal model of a prismatic LiFePO<sub>4</sub> battery during discharge process[J]. Energy, 2015, 80: 303-317.
- [32] ZHANG Xiaokun, CHANG Xiaohuan, SHEN Yingdong, et al. Electrochemical-electrical-thermal modelling of a pouch-type lithium ion battery: an application to optimize temperature distribution[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 11: 249-257.
- [33] MASTALI M, FOREMAN E, MODJTAHEDI A, et al. Electrochemical-thermal modelling and experimental validation of commercial graphite/LiFePO<sub>4</sub> pouch lithium-ion batteries[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 129: 218-230.
- [34] XIE Yi, HE Xiaojing, HU Xiaosong, et al. An improved resistance-based thermal model for a pouch lithium-ion battery considering heat generation of posts[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114455.
- [35] MEI Wenxin, LIANG Chen, SUN Jiahua, et al. Three-dimensional layered electrochemical-thermal model for a lithium-ion pouch cell[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(11): 8919-8935.
- [36] LIN Xinfan, 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, 2012, 21(5): 1745-1755.
- [37] RAMOTAR L, ROHRAUER G, FILION R, et al. Experimental verification of a thermal equivalent circuit dynamic model on an extended range electric vehicle battery pack[J]. Journal of Power Sources, 2017, 343: 383-394.
- [38] BAGNALL K R, MUZYCHKA Y S, WANG E N. Application of the Kirchhoff transform to thermal spreading problems with convection boundary conditions[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 4(3): 408-420.
- [39] MONDOL A, GUPTA R, SHANTANU D, et al. An insight into Newton's cooling law using fractional calculus[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(6): 064901.
- [40] 吴青余, 张恒运, 李俊伟. 校准量热法测量锂电池比热容和生热率[J]. 汽车工程, 2020, 42(1): 59-65.
- WU Qingyu, ZHANG Hengyun, LI Junwei. Calibrated calorimetry for measuring the specific heat capacity and heat generation rate of lithium-ion battery[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 59-65.
- [41] 徐佩琛, 黄建, 王培勇. 18650 锂电池轴向导热系数测量[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(1): 151-157.
- XU Peichen, HUANG Jian, WANG Peiyong. Axial thermal conductivity measurement of 18650 lithium battery[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(1): 151-157.
- [42] 张延蕾, 佟维. 对流换热系数的反求方法[J]. 大连交通大学学报, 2005, 26(4): 25-28.
- ZHANG Yanlei, TONG Wei. A method of inverse evaluation for convection heat transfer coefficient[J]. Journal of Dalian Railway Institute, 2005, 26(4): 25-28.

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-08-22

作者简介:

李航洋(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为储能系统优化控制; E-mail: lihangyang\_cn@163.com

阳同光(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统故障诊断。E-mail: yangtongguang1@163.com

(编辑 周金梅)