

DOI: 10.3901/JME.2022.12.168

风冷并联电池模组的建模方法与不一致性研究^{*}

李长龙¹ 崔纳新¹ 常 龙^{1,2} 张承慧¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院 济南 250061;

2. 山东科技大学机械电子工程学院 青岛 266590)

摘要: 锂离子电池通常串并联成组使用以满足实际的功率和能量需求。然而运行过程中的产热积累和单体间的放电不一致性会影响电池模组的寿命与性能,严重时甚至引发安全事故。为此,以强制风冷条件下的并联电池模组为对象,研究其建模方法和不一致特性。首先建立模组的多物理场耦合模型,该模型可以描述电池模组中各单体的电化学特性、单体间的电流不均分布,以及风冷条件下电池的散热特性;然后开展电池单体和并联模组的放电试验,验证各子模型及其耦合关系的可靠性;进一步,基于该模型对风冷并联电池模组进行1C恒流放电仿真,分析放电过程中单体间电流、温度和荷电状态的不一致性;最后开展参数化研究,分析入口风速、电池间距和连接电阻等因素对模组特性的影响规律。研究为动力电池模组提供了系统的建模和分析框架,对其优化设计具有指导意义。

关键词: 锂离子电池; 强制风冷; 并联电池模组; 多物理场模型; 不一致性

中图分类号: TG156

Modeling and Inconsistency Analysis of Parallel-connected Battery Module with Forced-air Cooling

LI Changlong¹ CUI Naxin¹ CHANG Long^{1,2} ZHANG Chenghui¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590)

Abstract: Lithium-ion batteries are usually connected in series and parallel to meet the power and energy requirements in practical. However, heat accumulation and cell-to-cell inconsistency can be arisen in the battery modules, and therefore affect the module longevity and performance, or even cause safety problem. Herein, the current research focuses on the modeling and inconsistency analysis of a parallel-connected battery module with forced-air cooling strategy. First, a multi-physics model is established for the battery module, which describes the electrochemical characteristics, current distribution and heat transfer within the module. The sub-models and their coupling relationships are then verified by the constant discharge experiments at both single cell and battery module levels. Next, constant discharge with the current of 1C is carried out using the well-validated model, and the cell-to-cell inconsistencies of current, temperature and state of charge are analyzed based on the simulation data. Finally, the parametric study is conducted by which the influences of air inlet velocity, cell spacing and interconnect resistance on the module performance are further analyzed. The research provides a systematic modelling and analysis framework for the power battery modules, which is of guidance for the module optimization design.

Key words: lithium-ion battery; forced-air cooling; parallel-connected battery module; multi-physics model; inconsistency

^{*} 国家自然科学基金(61633015, U1864205, U1864202, U1964207, 62103242)和山东省重点研发计划(2019JZZY020814)资助项目。20210926 收到初稿, 20220107 收到修改稿

0 前言

动力电池作为电动汽车的核心部件,决定着未来电动汽车的发展水平和方向^[1-2]。锂离子电池因其高能量密度、低自放电率及长循环寿命等优点,备受各大车企青睐^[3]。为满足电动车辆的功率和能量需求,常将成百上千节电池单体串并联成组使用。比如,特斯拉 Model S 的电池系统由 96 个模组串联而成,每个模组包括 74 节并联的 18 650 电池单体^[4]。然而,大量电池的累积产热易引发热安全问题,且并联电池模组内单体间的参数差异会导致放电不一致,这无疑会影响电池模组的安全运行和使用寿命。

为保证电池组工作在最佳温度区间(20~40 °C)内,设计有效的电池热管理系统至关重要^[5],精准的电池生热模型可以为其设计提供可靠依据^[6-7]。按照计算维度划分,电池热模型可以分为集总参数模型、一维模型、二维模型和三维模型。模型维度越高,其计算越复杂,但精度越高。按照反应机制则可划分为电-热模型,电化学-热模型和热失控模型。其中,前两者用来描述电池正常工作状态下的热行为,且电化学-热模型较电-热模型具有更高的精度;后者则用于仿真电池的滥用状态。通常,此类模型只适用于描述电池单体在自然散热条件下的特性。作为改进,文献[8]借助计算流体动力学分析,并结合电-集总参数热模型,设计了一种基于往复式流动的风冷方案;同样地,文献[9]将计算流体动力学分析与电化学-二维热模型相结合,分析了不同单体排布方式下的电池模组性能。然而,此类模型建模过程复杂、计算量大,且未考虑电池单体间的放电不一致性。

除控制电池组工作温度外,热管理系统还应具备良好的均温能力。一般而言,车用电池组内的最大温差不应超过 5 °C^[5]。温度的不均匀分布会导致电池组内部单体间的参数差异,从而引起并联模组充放电过程中单体间电流和荷电状态(State of charge, SOC)的不一致^[10-11]。文献[12]分析了两节并联 LiFePO₄ 电池由于温差引起的放电和老化不一致现象,结果表明温度较高的电池单体平均放电电流和老化速率更大,且放电和老化的不一致性随温差的增大而更加明显;文献[13]中也开展了类似的工作,并进一步指出电流的不均匀分布是由单体的开路电压(Open circuit voltage, OCV)和内阻共同决定的。值得说明的是,上述研究中电池单体间的温差

是由温控箱或特制夹具来提供的。而实际应用中,电池模组的温度分布受热管理系统控制;且由于电池间连接电阻的存在,影响单体间不一致性的因素会更加复杂。

基于以上分析,本文首先建立了强制风冷条件下并联锂离子电池模组的多物理场耦合模型,并对各子模型及其耦合关系进行了试验验证;然后,仿真分析了恒流放电过程中电池模组内温度、电流和 SOC 的不一致分布;最后,讨论了热管理系统入口风速、电池间距和单体间连接电阻对电池模组性能的影响规律。

1 风冷并联电池模组结构

本文以如图 1 所示的风冷并联电池模组为研究对象。18 650 圆柱形电池以“顺排”方式排布在箱体内部;电池模组采用串行式强制风冷系统,低温空气从模组左侧流入,空气在从左向右流经电池时不断被加热,加热后的空气最终从模组右侧流出。图中, S_L 和 S_T 分别表示电池在空气流向和垂向上相邻电池的中心间距,在本文中有 $S_L = S_T$; D 为电池直径。由于模组结构的对称性,为简化建模过程,在此可取任意一排电池作为建模对象。

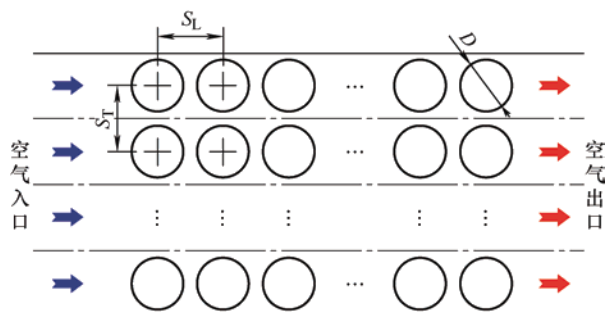


图 1 电池单体排布结构示意图

图 2 为所研究模组中单排电池的并联连接结构,正极端子和负极端子均由靠近空气入口端的电池直接引出。值得注意的是,不同于现有其他研究,该连接结构还考虑了电池间连接片电阻的影响。在此,假设各连接电阻阻值一致,并对各单体电池从左向右编号为 1 到 N 。

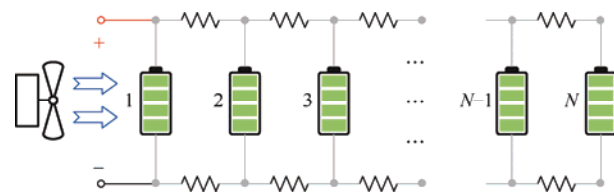


图 2 模组中单排电池的并联连接结构示意图

2 风冷并联电池模组多物理场建模

2.1 电池单体简化电化学模型

传统电化学模型包括多个耦合的偏微分方程和非线性代数方程^[14], 具有较高的精度, 但其计算复杂, 不适合快速仿真应用。本文采用前期工作中建立的简化电化学模型来描述电池单体特征^[15-16], 其结构如图 3 所示。该模型的建模区域包括负极、隔膜和正极三部分, 可准确描述发生在电池内部的固相扩散、液相扩散、电荷传递反应以及欧姆效应等物理化学过程。尤其对于正负极部分, 该模型忽略了电极内部电荷传递反应的不均匀性, 将每个电极由单个活性颗粒代替。为保证文章结构完整性, 对模型简单介绍如下。

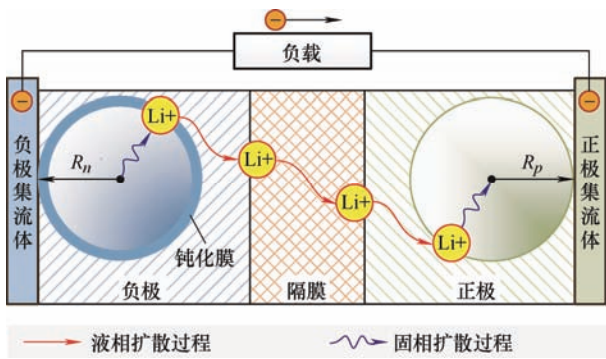


图 3 简化电化学模型结构示意图

2.1.1 开路电压

开路电压即电池稳定状态下两电极之间的电势差, 表示为

$$U_{oc} = U_p(\theta_p^{avg}) - U_n(\theta_n^{avg}) \quad (1)$$

式中, U_{oc} 为电池开路电压; θ_p^{avg} 和 θ_n^{avg} 分别为正负电极中平均锂离子浓度与饱和锂离子浓度的比值, 即锂离子平均化学当量; U_p 和 U_n 分别为电池正极和负极开路电势(Open circuit potential, OCP), 其值为电极中锂离子化学当量的函数。电极中锂离子平均化学当量与电池 SOC 之间的关系表示为

$$\begin{cases} \theta_i^{avg} = (\theta_i^1 - \theta_i^0)SOC + \theta_i^0 \\ \frac{dSOC}{dt} = -\frac{I_{cell}}{3600Q_{cell}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $i = p, n$ 表示电池的正极或负极; θ_i^1 和 θ_i^0 分别表示电池 SOC 为 1 和 0 时电极中的平均锂离子化学当量; I_{cell} 为电池负载电流; Q_{cell} 为电池额定容量。

此外, 考虑温度对开路电压的影响, 式(1)中电

极开路电势根据 Nernst 方程表示为

$$U_i = U_{ref,i} + (T_{cell} - T_{ref}) \frac{\partial U_i}{\partial T} \quad (3)$$

式中, T_{cell} 为电池温度; T_{ref} 为参考温度; $U_{ref,i}$ 为参考温度下的电极开路电势; $\frac{\partial U_i}{\partial T}$ 为电极熵热系数。

2.1.2 固相扩散过电势

电池的充放电依赖于锂离子在电极材料中的嵌入和脱出, 即固相扩散过程。从机理上讲, 固相扩散过程受锂离子浓度梯度驱动, 固相颗粒中锂离子浓度 c_s 的分布遵循 Fick 第二定律, 其控制方程表示为

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} - D_s \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) = 0 \quad (4)$$

式中, r 为固相颗粒半径方向的坐标; D_s 为固相中锂离子扩散系数。

采用文献[17]中提出的多项式近似方法, 将式(4)简化为如下形式

$$\begin{cases} \frac{dc_s^{diff}}{dt} = -\frac{30D_s}{R^2} c_s^{diff} - \frac{6}{R} j \\ c_s^{diff} = c_s^{surf} - c_s^{avg} \end{cases} \quad (5)$$

式中, c_s^{surf} 和 c_s^{avg} 分别为固相颗粒的表面和平均锂离子浓度; R 为固相颗粒半径; j 为锂离子孔壁流量。由于 c_s^{surf} 和 c_s^{avg} 直接决定了固相扩散过电势的大小, 式(5)只关注对二者之间关系的描述。

将式(5)两边同时除以固相饱和锂离子浓度, 并基于单颗粒假设进一步推导, 可得颗粒表面和平均锂离子化学当量与电流之间的关系为

$$\begin{cases} \frac{d\theta_i^{diff}}{dt} = -\frac{1}{\tau_{s,i}} \theta_i^{diff} + \frac{1}{C_{s,i}} I_{cell} \\ \theta_i^{diff} = \theta_i^{surf} - \theta_i^{avg} \end{cases} \quad (6)$$

式中, θ_i^{surf} 为电极颗粒表面的锂离子化学当量; θ_i^{diff} 为电极颗粒表面锂离子化学当量与平均值之差;

$\tau_{s,i} = \frac{R_{s,i}^2}{30D_{s,i}}$ 为固相扩散时间常数; $C_{s,i} = \frac{1800Q_{cell}}{\theta_i^0 - \theta_i^1}$

为固相扩散等效极化电容。值得注意的是, $\tau_{s,i}$ 是由固相扩散系数表达的集总参数。 $D_{s,i}$ 的值受电极颗粒表面热力学性能影响, 具体表示为

$$D_{s,i} = -\frac{F}{R_g T_{cell}} \theta_i^{surf} (1 - \theta_i^{surf}) \left. \frac{dU_i}{d\theta_i} \right|_{\theta_i^{surf}} D_{s,i} \quad (7)$$

式中, F 为法拉第常数; R_g 为理想气体常数; $\frac{dU_i}{d\theta_i}$ 为电极开路电势随锂离子化学当量变化的梯度;

$D_{s,i}$ 为二元固相扩散系数, 等温条件下为常数。进一步, $\tau_{s,i}$ 表示为

$$\tau_{s,i} = \frac{-R_g T_{\text{cell}}}{F \theta_i^{\text{surf}} \left(1 - \theta_i^{\text{surf}}\right) \left. \frac{dU_i}{d\theta_i} \right|_{\theta_i^{\text{surf}}}} T_{s,i} \quad (8)$$

式中, $T_{s,i} = \frac{R_{s,i}^2}{30D_{s,i}}$ 为二元固相扩散时间常数。

表面锂离子化学当量的变化对应着表面电势的变化, 从而产生固相扩散过电势。单个电极的固相扩散过电势表示为

$$\eta_{s,i} = U_i(\theta_i^{\text{surf}}) - U_i(\theta_i^{\text{avg}}) \quad (9)$$

进而, 正负两电极固相扩散产生的总过电势表示为

$$\eta_{s,\text{tot}} = \eta_{s,p} - \eta_{s,n} \quad (10)$$

2.1.3 液相扩散过电势

液相扩散指锂离子在电解液中的扩散现象。电解液中锂离子浓度 c_e 和液相电势 ϕ_e 的分布分别符合式(11)和(12)

$$\varepsilon_e \frac{\partial c_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{\text{eff}} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + a(1 - t_+^0) j \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_e^{\text{eff}} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_D^{\text{eff}} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} \right) = -Faj \quad (12)$$

式中, ε_e 为电极中的液相体积分分数; D_e^{eff} 为电解液的有效锂离子扩散系数; a 为电极中活性材料的比表面积; t_+^0 为锂离子迁移数; κ_e^{eff} 为电解液的有效离子电导率; κ_D^{eff} 为电解液的有效离子扩散电导率。

基于前期工作中提出的多项式近似和计算域分解方法^[15], 将式(11)简化为

$$\begin{cases} \frac{dc_{e,n/c}^{\text{diff}}}{dt} = \frac{D_e^{\text{eff}}}{P} c_{e,n/c}^{\text{diff}} + \frac{1-t_+^0}{FAPQ_1} I_{\text{cell}} \\ \frac{dc_{e,p/c}^{\text{diff}}}{dt} = \frac{D_e^{\text{eff}}}{P} c_{e,p/c}^{\text{diff}} - \frac{1-t_+^0}{FAPQ_2} I_{\text{cell}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $c_e^{\text{diff}} = c_e - c_e^0$ 为电解液中锂离子浓度与初始浓度之差; 下标 “p/c” 和 “n/c” 分别表示正极-集流体交界位置和负极-集流体交界位置; A 为电极的极板面积; P 、 Q_1 和 Q_2 均为由电极几何参数表示的集总参数。

定义 Δc_e 为两个电极-集流体交界位置处的液相浓度之差, 即 $\Delta c_e = c_{e,p/c}^{\text{diff}} - c_{e,n/c}^{\text{diff}}$ 。将式(13)中的上下两式相减, 可将 Δc_e 表示为

$$\frac{d\Delta c_e}{dt} = \frac{D_e^{\text{eff}}}{P} \Delta c_e - \frac{1-t_+^0}{FAP} \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) I_{\text{cell}} \quad (14)$$

液相扩散过电势 η_e 由两电极-集流体交界位置的液相锂离子浓度直接决定, 其值可由式(12)解析求得。进一步, 利用一阶泰勒展开简化解析结果, 将 η_e 表示为

$$\eta_e = -\frac{\kappa_D^{\text{eff}}}{\kappa_e^{\text{eff}}} \ln \frac{c_{e,p/c}^{\text{diff}} + c_e^0}{c_{e,n/c}^{\text{diff}} + c_e^0} \approx -\frac{\kappa_D^{\text{eff}}}{\kappa_e^{\text{eff}}} \Delta c_e \quad (15)$$

将式(15)代入式(14), 液相扩散过电势与电流之间的关系表示为

$$\frac{d\eta_e}{dt} = -\frac{1}{\tau_e} \eta_e + \frac{1}{C_e} I_{\text{cell}} \quad (16)$$

式中, $\tau_e = -\frac{P}{D_e^{\text{eff}}}$ 为液相扩散的时间常数;

$C_e = \frac{FAPc_e^0 \kappa_e^{\text{eff}} Q_1 Q_2}{\kappa_D^{\text{eff}} (1-t_+^0)(Q_1+Q_2)}$ 为液相扩散的极化电容。

2.1.4 电荷传递过电势

电荷传递反应发生在固相电极颗粒和电解液交界面, 其产生的过电势可由重新推导的 Butler-Volmer 方程表示为

$$\eta_{ct,i} = \frac{2R_g T_{\text{cell}}}{F} \arcsin \frac{K_i I_{\text{cell}}}{\sqrt{(1 - \theta_i^{\text{surf}}) \theta_i^{\text{surf}}}} \quad (17)$$

式中, $\eta_{ct,i}$ 为某电极的电荷传递过电势; K_i 为集总电极反应常数。

正负两电极电荷传递产生的总过电势表示为

$$\eta_{ct,\text{tot}} = \eta_{ct,p} - \eta_{ct,n} \quad (18)$$

2.1.5 欧姆过电势

电池内部的欧姆过电势表示为

$$\eta_{\text{ohm}} = -R_{\text{ohm}} I_{\text{cell}} \quad (19)$$

式中, R_{ohm} 为总欧姆内阻, 主要由电解液、钝化膜和接触电阻组成。

结合以上分析, 电池单体端电压表示为

$$V_{\text{cell}} = U_{\text{oc}} + \eta_{s,\text{tot}} + \eta_e + \eta_{ct,\text{tot}} + \eta_{\text{ohm}} \quad (20)$$

对上述电池单体简化电化学模型的控制方程和待辨识参数总结见表 1。

表 1 简化电化学模型的控制方程和待辨识参数

物理过程	控制方程	待辨识参数
开路电压	式(1)、(2)	$\theta_n^0, \theta_n^0, \theta_p^0, \theta_p^0$
固相扩散过电势	式(6)、(8)、(9)	$T_{s,n}, T_{s,p}$
液相扩散过电势	式(16)	τ_e, C_e
电荷传递过电势	式(17)	K_n, K_p
欧姆过电势	式(19)	R_{ohm}
端电压	式(20)	—

2.2 电池单体集总参数热模型

电池的生热功率主要由可逆热和不可逆热组成, 可由 Bernardi 生热功率公式计算如下

$$\begin{cases} Q_{\text{gen}} = Q_r + Q_{\text{ir}} \\ Q_r = -I_{\text{cell}} T_{\text{cell}} \left(\frac{\partial U_p}{\partial T} \bigg|_{\theta_p^{\text{avg}}} - \frac{\partial U_n}{\partial T} \bigg|_{\theta_n^{\text{avg}}} \right) \\ Q_{\text{ir}} = I_{\text{cell}} (U_{\text{oc}} - V_{\text{cell}}) \end{cases} \quad (21)$$

式中, Q_{gen} 为电池生热功率; Q_r 和 Q_{ir} 分别表示可逆热和不可逆生热功率。

由于 18 650 圆柱形电池尺寸较小, 在正常工作状态下, 其单体内外温差不大, 因此本文采用集总参数热模型来描述其热特性^[18-19]。根据能量守恒定律, 电池单体的温度变化速率表示为

$$\frac{d}{dt} T_{\text{cell}} = \frac{Q_{\text{gen}} - Q_{\text{con}}}{C_{\text{th}}} \quad (22)$$

式中, C_{th} 为电池热容; Q_{con} 为电池表面散热功率。

2.3 并联模组电路模型

电池并联后, 参数差异及连接电阻的存在会引起电流的不均衡分布。在实际应用中, 并联电池模组通常被当作一个“大电池”来管理, 电池管理系统能直接测得的电信息只包括模组输出电压和总电流, 而为每一个电池单体配置电流传感器会极大增加系统成本和复杂度^[20]。

本文中建立了并联模组的电路模型, 如图 4 所示, 其中包含模组内支路电流的分布情况。可以看出, 图中有且仅有 N 个同时包含负载和一节电池单体的闭合回路。由基尔霍夫电压定律可以得到如式(23)所示的 N 个回路电压方程

$$V_{\text{load}} = V_{\text{cell},k} - 2R_{\text{inter}} \sum_{j=2}^k \sum_{i=j}^N I_{\text{cell},i} \quad k=1,2,\dots,N \quad (23)$$

式中, V_{load} 为电池模组输出电压; R_{inter} 为电池间连

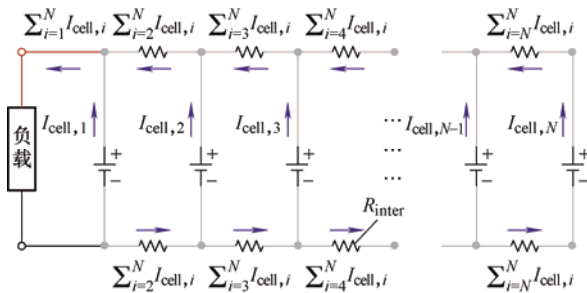


图 4 并联电池模组的电路模型

接电阻; 电池端电压 V_{cell} 可由电池电化学模型求得。式中存在 $N+1$ 个未知数, 分别为模组输出电压 V_{load} 和 N 节电池单体的负载电流。在此, 基于基尔霍夫电流定律引入电流方程如下

$$I_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^N I_{\text{cell},i} \quad (24)$$

式中, I_{tot} 为电池模组的负载电流。通过联合求解式(23)和(24), 即可求得电池模组输出电压和各电池负载电流。

2.4 风冷系统散热模型

为提高计算效率, 本文采用热阻网络模型来描述模组中各电池单体和空气流之间的传热现象, 如图 5 所示。以电池 1 为例, 其生热功率 $Q_{\text{gen},1}$ 的一部分, 即散热功率 $Q_{\text{con},1}$, 通过对流传热的方式传递给流经电池 1 的入口空气; 与此同时, 吸收热量的空气流动至下一个节点, 继续对电池 2 进行冷却。

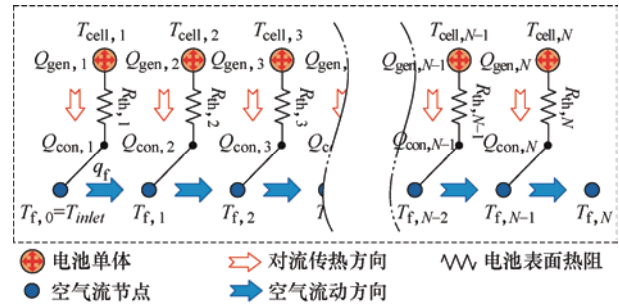


图 5 电池模组风冷系统的热阻网络模型

2.4.1 电池表面热阻的计算

根据传热学理论, 电池表面热阻 R_{th} 表示为

$$\begin{cases} R_{\text{th}} = \frac{1}{hA_{\text{con}}} \\ h = \frac{Nu_f k_f}{D} \end{cases} \quad (25)$$

式中, h 为电池表面的对流传热系数; A_{con} 为电池表面散热面积; D 为圆柱形电池的半径; k_f 为空气导热系数; Nu_f 为空气流体的努塞尔数。空气在不同流动状态下的努塞尔数可根据式(26)所示的 Zhukauskas 经验关联式^[21]求得

$$Nu_f = \begin{cases} 0.9Re_f^{0.4} Pr_f^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25} & Re_f \in (1, 10^2) \\ 0.52Re_f^{0.5} Pr_f^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25} & Re_f \in (10^2, 10^3) \\ 0.27Re_f^{0.63} Pr_f^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25} & Re_f \in (10^3, 2 \times 10^5) \\ 0.033Re_f^{0.8} Pr_f^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25} & Re_f \in (2 \times 10^5, 2 \times 10^6) \end{cases} \quad (26)$$

式中, Pr_f 和 Pr_w 分别为按空气流温度和电池表面温度确定的空气普朗特数。 Re_f 为按流场内最小截面处流速计算的雷诺数, 表示为

$$\begin{cases} Re_f = \frac{\rho_f v_{\max} D}{\mu_f} \\ v_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} v_{\text{inlet}} \end{cases} \quad (27)$$

式中, v_{\max} 为模组流场内最小截面处的流速, 即最大流速; ρ_f 为空气密度; μ_f 为空气的动力粘度; v_{inlet} 为电池模组的入口风速。

值得注意的是, 式(26)计算得到的努塞尔数仅适用于空气流动方向上电池数目大于 15 的情况。当电池数目小于或等于 15 时, 需将式(26)所求结果乘以某小于 1 的系数进行适当修正。后文研究了横向电池数目为 11 的电池模组, 对应的修正系数为 0.983^[21]。

2.4.2 电池表面散热功率的计算

电池单体表面的散热功率由表面温差和热阻决定, 表示为

$$Q_{\text{con},i} = \frac{T_{\text{cell},i} - T_{f,i-1}}{R_{\text{th},i}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

式中, $T_{f,i-1}$ 为空气流经电池 $i-1$ 后的温度。

此外, 电池单体散出的热量被流经的空气介质吸收, 根据能量守恒定律有

$$Q_{\text{con},i} = \rho_f q_f c_{p,f} (T_{f,i} - T_{f,i-1}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

式中, q_f 和 $c_{p,f}$ 分别为空气的体积流量和比热容。

求解式(28)和(29)组成的线性代数方程组, 可得各电池单体的散热功率和不同位置的空气流温度。

2.5 模型耦合关系

在 Matlab 中搭建上述多物理场模型, 并利用向前差分法求解模型中常微分方程的数值解。各子模型之间的相互耦合关系如图 6 所示。

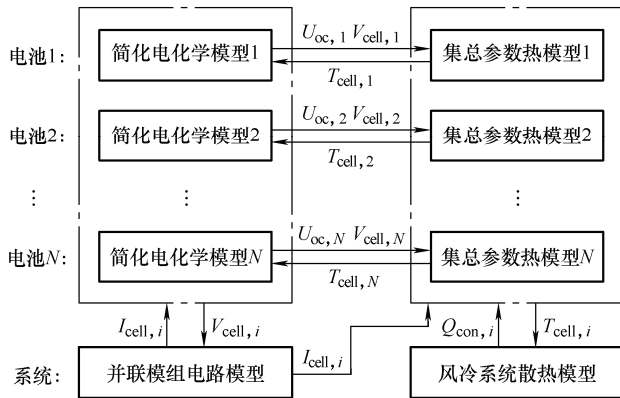


图 6 多物理场模型中各子模型之间的耦合关系

3 模型验证

在对风冷并联电池模组进行系统仿真分析之前, 需先验证所建立模型中各子模型及其之间的耦合关系。选用 18 650 三元锂离子电池, 其规格参数如表 2 所示; 电池电化学模型参数由文献[16]中所提出的辨识方法获得, 其参数值见表 3。分别在电池单体和并联模组两个层面上验证模型, 采用测试设备 Arbin BT-5HC 进行充放电测试; 并联模组的支路电流由霍尔传感器测得; 环境温度由温控箱控制。温度传感器配置在电池表面轴向的中间位置; 所测得的端电压、总电流、支路电流和温度等数据由上位机记录。

表 2 电池规格参数

序号	项目	参数
1	电池类型	Li(Ni _x Co _y Mn _z)O ₂
2	几何尺寸/mm	Φ18×65
3	标称容量/(A·h)	2.5
4	标称电压/V	3.7
5	充电截止电压/V	4.2
6	放电截止电压/V	3
7	充电截止电流/C-rate	1/20

表 3 电池参数辨识结果

名称	数值
θ_n^1	0.809
θ_n^0	0.008
θ_p^1	0.112
θ_p^0	0.875
$T_{s,n}/s$	$8.54 \times 10^{-4} \exp(4077.7/T_{\text{cell}})$
$T_{s,p}/s$	$0.734 \times \exp(2189.8/T_{\text{cell}})$
τ_e/s	$0.206 \times \exp(1112.9/T_{\text{cell}}) - 4426.95$
C_e/F	
K_n/A^{-1}	$1.56 \times 10^{-18} \exp(10659.2/T_{\text{cell}})$
K_p/A^{-1}	$-4.42 \times 10^{-19} \exp(10998.8/T_{\text{cell}})$
R_{ohm}/Ω	$(4.55 \times 10^{-3} T_{\text{cell}} + 0.803)/(T_{\text{cell}} - 246.7)$
U_n/V	$0.1493 + 0.8493 \exp(-61.79\theta) + 0.3824 \exp(-665.8\theta) - \exp(39.42\theta - 41.92) - 0.0313 \tanh(25.59\theta - 4.099) - 0.009434 \tanh(32.49\theta - 15.74)$
U_p/V	$10.25\theta^7 - 56.59\theta^6 + 8.561\theta^5 + 79.69\theta^4 - 2.77\theta^3 + 6.736\theta^2 - 1.598\theta + 4.486$
$\frac{\partial U_n}{\partial T_{\text{cell}}} / (V/K)$	$0.1776\theta^7 - 0.688\theta^6 + 1.072\theta^5 - 0.852\theta^4 + 0.357\theta^3 - 7.197 \times 10^{-2} \theta^2 + 4.452 \times 10^{-3} \theta - 5.37 \times 10^{-5}$
$\frac{\partial U_p}{\partial T_{\text{cell}}} / (V/K)$	$1.117\theta^7 - 3.618\theta^6 + 4.486\theta^5 - 2.657\theta^4 + 0.769\theta^3 - 0.102\theta^2 + 4.929 \times 10^{-3} \theta - 3.008 \times 10^{-4}$

3.1 电池单体层面的模型验证

在 25 °C 的环境温度下对电池单体进行不同倍率的恒流放电测试, 并与所建立模型的仿真结果进

行对比。如图7所示,图7a和7b中分别给出了电池在不同放电倍率(0.5C、1C、1.5C和2C)下的端电压和温度变化情况。可以看出,仿真结果和试验结果呈相似的变化趋势,电压和温度的均方根误差分别为20.3 mV和0.58 °C,具有较高的一致性,验证了电池单体电化学和热模型的准确性。

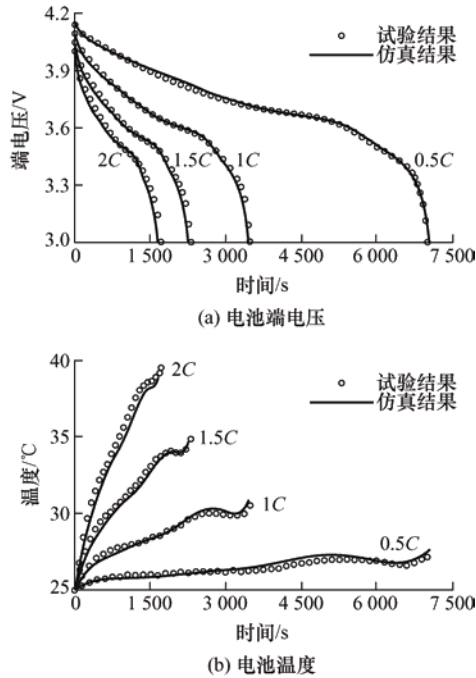
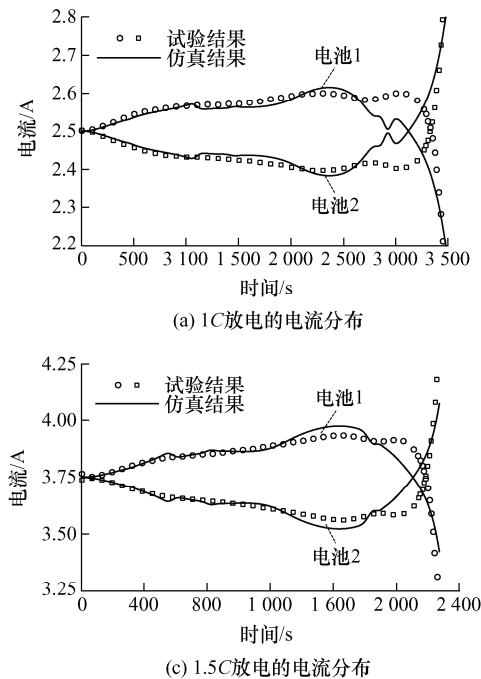


图7 电池单体的仿真和试验结果

3.2 并联模组层面的模型验证

在25 °C的环境温度下对电池模组恒流放电,



(c) 1.5C放电的电流分布

以验证所建立模型预测模组不一致性的能力。本文设计了两组验证试验,分别如图8a和8b所示。并联模组#1旨在验证由不同散热条件引起的不一致性,如图8a所示,为了给两并联电池提供不同的热条件,1号电池被包裹在隔热层中,2号电池则由强制空气冷却。并联模组#2旨在验证由连接电阻引起的不一致性,如图8b所示,四节电池并联,每两个相邻的并联分支之间配置一个7 mΩ的连接电阻。值得注意的是,所有测试电池均来自同一生产批次,且在仿真中忽略了电池间的初始参数差异。

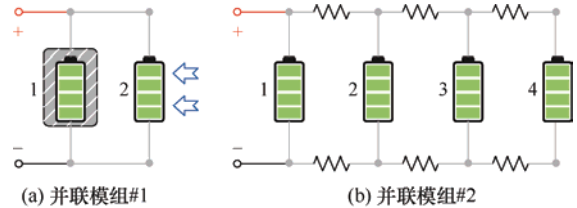
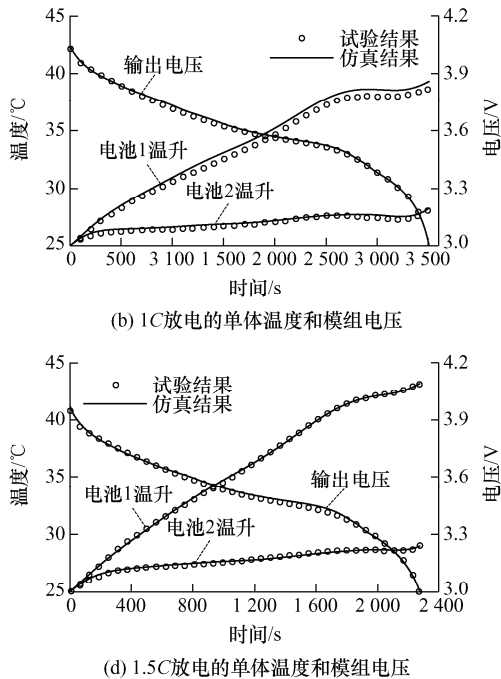


图8 并联模组试验示意图

3.2.1 并联模组#1

并联模组#1在1C和1.5C恒流放电工况下的模型验证结果如图9所示,图中给出了电流分布、单体温度和模组电压的对比情况。从图9a和9c中的试验结果可以看出,由于初始放电时刻单体间参数的一致性,两电池上的支路电流基本相等;随着放电过程的持续进行,电池1较大的温升导致其内阻低于电池2,因此电池1的支路电流更大;在放电后期,电流不一致性的累积导致两电池SOC的差异,此时电池1的OCV明显低于电池2,从而使电



(d) 1.5C放电的单体温度和模组电压

图9 并联模组#1的仿真和试验结果

池 1 的电流快速降低。仿真结果和试验结果具有同样的趋势，仅在放电末段产生了较大的误差，这是由电池放电末段 OCV 的快速变化和不稳定的极化现象造成的。从图 9b 和 9d 可以看出，所建立模型也可以准确预测各电池单体温度和模组输出电压。

3.2.2 并联模组#2

图 10a 和 10b 分别为 0.5C 和 1C 恒流放电时，模组#2 的电流分布结果。可以看出，所建立模型准

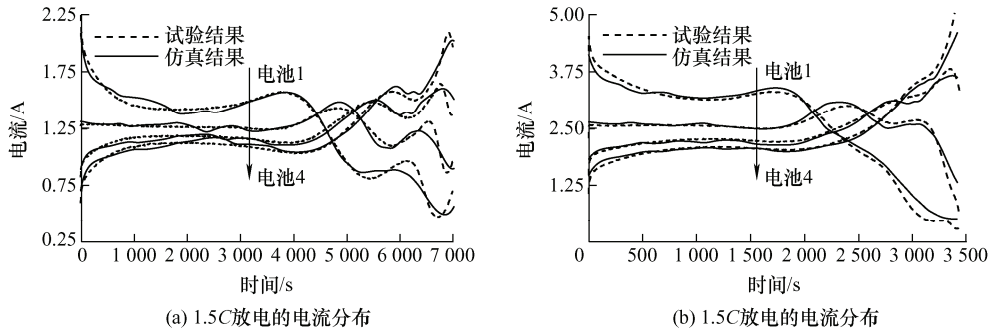


图 10 并联模组#2 的仿真和试验结果

此外，文中风冷热管理系统子模型的建立基于 Zhukauskas 顺排横掠管束经验公式，其在现有研究中已经得到了较全面的验证^[22-23]，本文中不再给出其验证过程。

4 系统研究与分析

本节基于前述多物理场耦合模型开展风冷并联电池模组的不一致性和参数化分析。值得一提的是，除放电过程中模组内的最高温度和最大温差外，本节还分析了现有研究中很少关注的单体间电流和 SOC 的不一致性。以图 1 和 2 所示的风冷并联电池模组为研究对象，考虑横向电池数目为 11 的情况，从左向右将电池单体编号为 1 到 11，进行 25℃ 下的 1C 恒流放电仿真，模组初始配置参数见表 4。

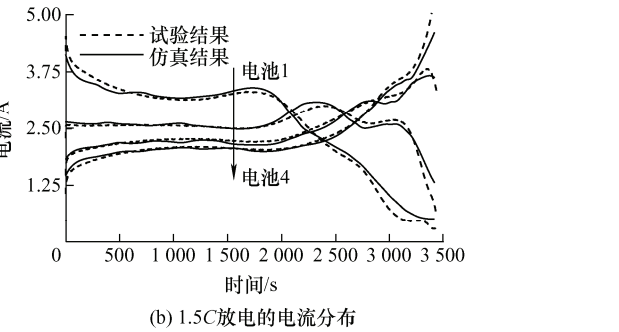
表 4 风冷并联电池模组初始配置参数

序号	参数	数值
1	横向电池数目	11
2	环境温度/℃	25
3	入口风速/(m/s)	1.5
4	电池间距/mm	25
5	连接电阻/mΩ	0.2

4.1 初始配置下的不一致性分析

在初始配置下，对电池模组进行 1C 放电仿真，结果如图 11 所示。图 11a 为模组放电过程中的电流

分布情况。可以看出，在放电初期，靠近模组电极的电池 1 具有最大的支路电流。且在远离电极端子处，相邻两电池间的电流差异更小。这是由于连接电阻离电极端子越远，其负载电流过越小，分压越低。前期的电流不一致现象会导致靠近电极端子的电池放电量、SOC 降低更快，因此具有更小的 OCV；此外，温差和 SOC 的变化也会导致电池间内阻的不一致，进而与 OCV 共同影响着放电中期的电流分布。在放电末期，OCV 占据主导因素，此时，距离电极较近的电池最先到达较低的 SOC，对应的 OCV 快速降低，从而使其支路电流减小。



分布情况。可以看出，在放电初期，靠近模组电极的电池 1 具有最大的支路电流。且在远离电极端子处，相邻两电池间的电流差异更小。这是由于连接电阻离电极端子越远，其负载电流过越小，分压越低。前期的电流不一致现象会导致靠近电极端子的电池放电量、SOC 降低更快，因此具有更小的 OCV；此外，温差和 SOC 的变化也会导致电池间内阻的不一致，进而与 OCV 共同影响着放电中期的电流分布。在放电末期，OCV 占据主导因素，此时，距离电极较近的电池最先到达较低的 SOC，对应的 OCV 快速降低，从而使其支路电流减小。

图 11b 为模组放电过程中各电池的温度变化情况。整体来看，受风冷系统结构影响，距离空气入口最近的电池 1 温度最低，且随着电池与空气入口之间距离的增加，电池温度逐渐升高。然而，在模组放电初始约 200 s 内，电池 1 的温度却最高。这是由于此时电池与空气间的温差很小，散热现象不明显，起主导作用的是电流的不一致分布，电池 1 的电流最大，具有最高的产热功率，因此温度最高。另一个有趣的现象是：在放电末段，模组内温度的分布呈发散趋势。这是由于在放电末段，温度低的电池具有较小的负载电流，导致低温电池的生热功率也较小。

图 11c 为模组放电过程中电池单体 SOC 的变化情况。可以看出，由于靠近模组电极的电池平均电流较大，导致其 SOC 在放电过程中较低。SOC 分

布呈先扩张后收缩的趋势。在该放电过程中, SOC 极差(即电池模组任意时刻最大和最小单体 SOC 之

差)最高可达 8.47%; 放电结束时刻, SOC 极差为 1.94%。

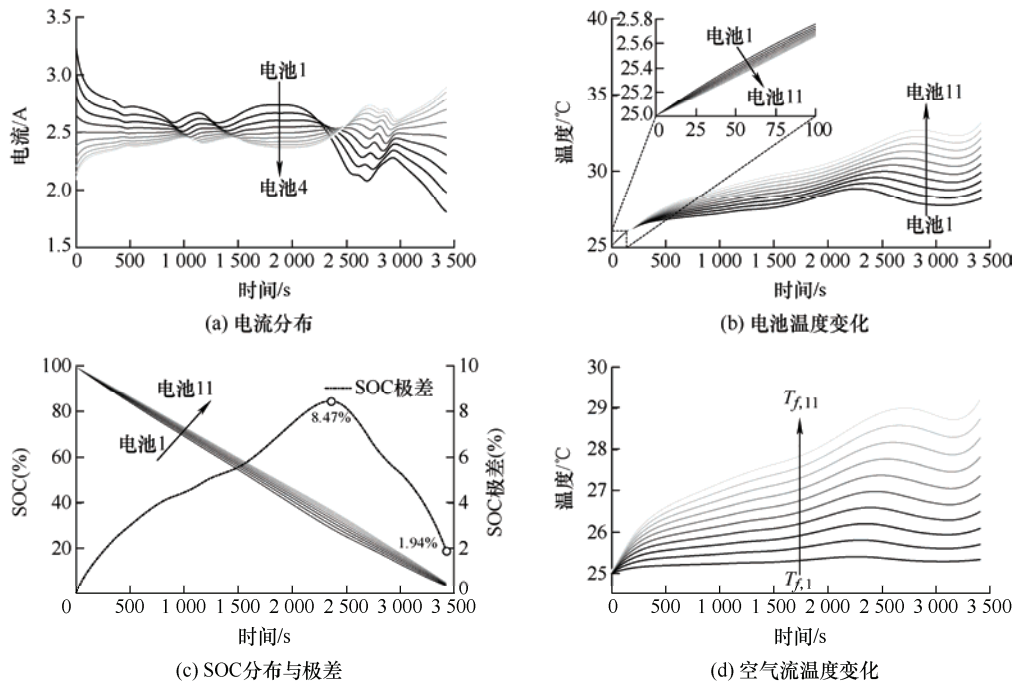


图 11 模组在初始配置下的仿真结果

图 11d 为模组放电过程中, 其内部不同位置空气流温度的变化情况。图中 $T_{f,i}$ 表示空气流经电池 i 后的温度。可以看出, 空气流经电池数目越多, 其温升越高。在放电前 2 500 s 左右, 由于电池持续产热, 不同位置的空气流温度几乎呈稳定上升趋势。在放电末段, 电池单体产热特性发生波动(从图 7b 可以看出)。此时, 空气流温度受到影响, 且由于流经单体数量的增加, 靠近出口端位置的空气流温度波动更大。

4.2 模组性能的参数化研究

以表 4 所示的模型初始配置为基础, 分别调节入口风速、电池间距和连接电阻, 开展风冷并联电池模组的参数化研究。提取 1C 恒流放电仿真结果中的 4 种特征参数来量化模组性能, 分别为: 最高温度、最大温差、平均电流极差(即放电不同时刻电流分布极差的平均值)和结束时刻 SOC 极差。其中, 前两者表示模组温度特性, 后两者表示其放电一致性。各特征参数值越低, 表示模组性能越好。值得注意的是, 在此选择放电结束时刻 SOC 极差而非放电过程中最大 SOC 极差作为指标之一, 是由于其最能反映电池单体的过放程度。

4.2.1 入口风速对模组性能的影响

调节入口风速分别为 0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s 和 3.0 m/s, 进行 1C 恒流放电仿真。图 12 为不同特征参数随入口风速的变化。入口风速

升高时, 电池表面热阻降低且空气体积流量增大, 使放电过程的最高温度和最大温差均降低, 如图 12a 所示; 此外, 两者的降低趋势均随入口风速的增加有所减缓, 这意味着当入口风速超过一定值时, 持续提高风速对降温 and 均温效果的改善会变得不明显。图 12b 表明, 平均电流极差随入口风速的升高而降低, 这是因为: 随着入口风速的升高, 温度因

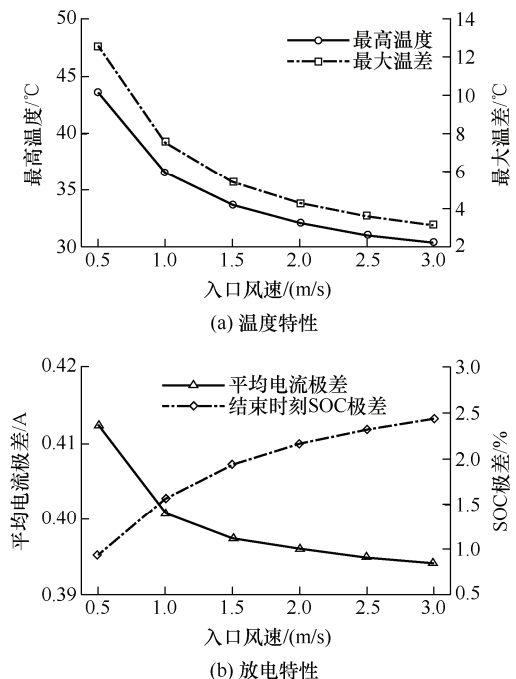


图 12 不同入口风速下的模组特征参数

素导致的单体内阻差异抵消了更多由连接电阻引起的电流不一致性；反之，放电结束时刻 SOC 极差与入口风速呈负相关，这可能是由于模组温度的整体降低缩短了其放电时长，进而限制了 SOC 差异在放电后期的回复现象。

4.2.2 电池间距对模组性能的影响

调节电池间距分别为 19 mm、22 mm、25 mm、28 mm、31 mm 和 34 mm，进行 1C 恒流放电仿真。图 13 为不同特征参数随电池间距的变化。从图 13a 可以看出，放电过程中的最高温度随着电池间距的增加而升高。这是由于入口风速不变，电池间距增大时，空气流雷诺数降低，电池表面热阻增加^[24]。此外，由于流速保持不变，增加电池间距会增加空气的体积流量，因此最大温差随着电池间距的增加而降低。平均电流极差和结束时刻 SOC 极差均随电池间距的增加而升高，如图 13b 所示，这种现象是由最高温度和最大温差的变化导致的。理论上讲，不一致的温度分布会引起电池单体间的内阻差异，且单体内阻值沿空气流向(也是远离模组电极的方向)降低；这种内阻分布会从一定程度上减弱连接电阻引起的放电不一致现象。因此，当最高温度升高且最大温差降低时，单体内阻差异变小，内阻分布对连接电阻的“抵消”现象变弱，使得平均电流极差和结束时刻 SOC 极差增大。

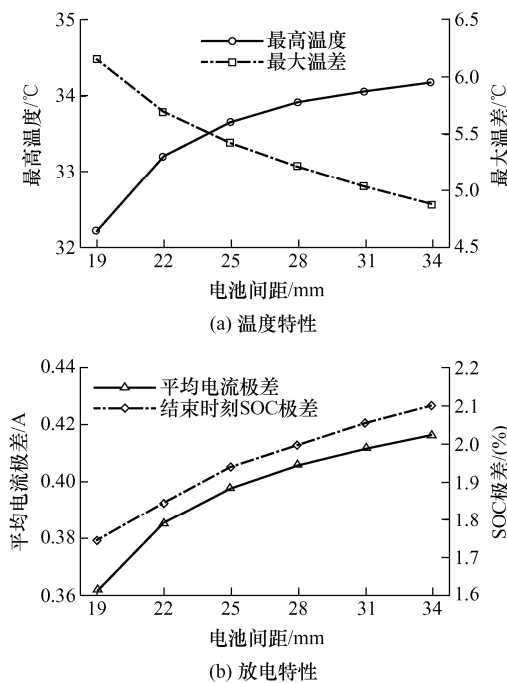


图 13 不同电池间距下的模组特征参数

4.2.3 连接电阻对模组性能的影响

实际应用中采用的焊接技术对连接电阻有显著影响。文献[25-26]中测量了电阻点焊、激光束焊接、

超声波焊接等焊接技术引起连接电阻的大小。结果显示，不同焊接技术产生的连接电阻大小都在零点几毫欧的数量级。因此，在连接电阻的参数化仿真中，调节阻值分别为 0.1 mΩ、0.2 mΩ、0.3 mΩ、0.4 mΩ、0.5 mΩ 和 0.6 mΩ，进行 1C 恒流放电仿真。图 14 为不同特征参数随连接电阻的变化。如图 14 所示，最高温度、最大温差、平均电流极差和结束时刻 SOC 极差均随连接电阻的增加呈递增趋势；且在所研究参数范围内，前三者随连接电阻的变化呈近似线性关系。这是由于随着连接电阻的增加，电流在放电末段的不一致程度加剧，不均匀的生热功率使放电末段的温度分布的发散趋势更加明显，使得最高温度和最大温差升高。因此，在实际应用中，应尽量降低连接电阻的大小，以保证模组的温度和放电特性。

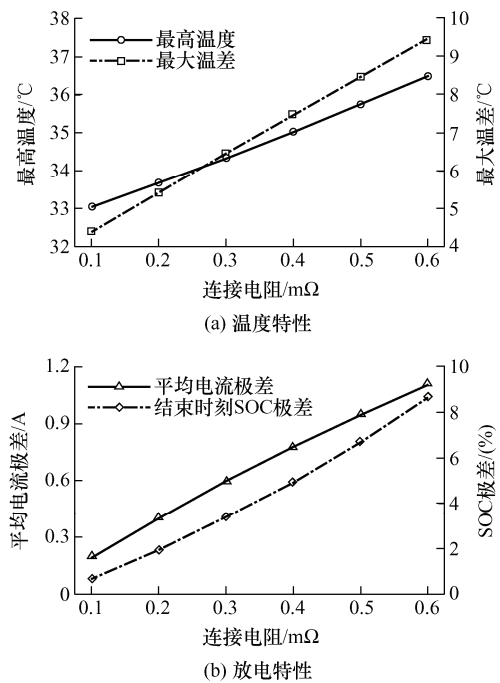


图 14 不同连接电阻下的模组特征参数

5 结论

(1) 针对串行强制风冷条件下的并联锂离子电池模组，建立了其多物理场耦合模型。该模型由描述单体或模组中电、电化学和热等物理特性的多个子模型组成。通过开展单体和模组层面的放电试验，验证了该模型的有效性和准确性。

(2) 基于所建立的模型，分析了电池模组在 1C 恒流放电下单体间电流、温度和 SOC 的不一致分布现象。结果表明，靠近模组电极的电池在初始阶段负载电流最大，在放电末段则最小；放电末段的电

流不均匀性使温度分布发散; SOC 的不一致分布呈先增后减趋势。

(3) 开展了不同入口风速、电池间距和连接电阻下的模组参数化研究。结果表明, 增加入口风速会降低模组放电过程中的最大温升、最大温差和平均电流极差, 但会导致放电结束时刻 SOC 极差更大; 增加电池间距会减小模组内的最大温差, 但会使最高温度升高并加剧放电不一致性; 减小连接电阻则能够同时提升模组温度特性和放电一致性。

(4) 本文重点研究热管理和连接电阻双重因素影响下并联电池模组的不一致特性, 单体间的参数差异并未作为考察重点。但需要说明的是, 通过配置不同单体参数, 文中建立的模型架构也可以用于研究单体参数差异对模组不一致性的影响, 并为电池系统设计提供指导。

参 考 文 献

- [1] 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. Research status and analysis for battery safety accidents in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 93-104, 116.
- [2] DU J, OUYANG D. Progress of Chinese electric vehicles industrialization in 2015: A review[J]. Applied Energy, 2017, 188: 529-546.
- [3] NITTA N, WU F, LEE J T, et al. Li-ion battery materials: present and future[J]. Materials Today, 2015, 18(5): 252-264.
- [4] FILL A, KOCH S, BIRKE K P. Algorithm for the detection of a single cell contact loss within parallel-connected cells based on continuous resistance ratio estimation[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101049.
- [5] RAO Z, WANG S. A review of power battery thermal energy management[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4554-4571.
- [6] XIE Y, LI W, HU X, et al. Novel mesoscale electrothermal modeling for lithium-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(3): 2595-2614.
- [7] 胡晓松, 唐小林. 电动车辆锂离子动力电池建模方法综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 20-31.
HU Xiaosong, TANG Xiaolin. Review of modeling techniques for lithium-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 20-31.
- [8] MAHAMUD R, PARK C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(13): 5685-5696.
- [9] YANG N, ZHANG X, LI G, et al. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 55-65.
- [10] CHANG L, ZHANG C, WANG T, et al. Correlations of cell-to-cell parameter variations on current and state-of-charge distributions within parallel-connected lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2019, 437: 226869.
- [11] GONG X, XIONG R, MI C C. Study of the characteristics of battery packs in electric vehicles with parallel-connected lithium-ion battery cells[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 51(2): 1872-1879.
- [12] YANG N, ZHANG X, SHANG B B, et al. Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with parallel combination[J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 733-741.
- [13] KLEIN M P, PARK J W. Current distribution measurements in parallel-connected lithium-ion cylindrical cells under non-uniform temperature conditions[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164(9): A1893.
- [14] XIONG R, LI L, LI Z, et al. An electrochemical model based degradation state identification method of Lithium-ion battery for all-climate electric vehicles application[J]. Applied Energy, 2018, 219: 264-275.
- [15] LI C, CUI N, WANG C, et al. Reduced-order electrochemical model for lithium-ion battery with domain decomposition and polynomial approximation methods[J]. Energy, 2021, 221: 119662.
- [16] LI C, CUI N, WANG C, et al. Simplified electrochemical lithium-ion battery model with variable solid-phase diffusion and parameter identification over wide temperature range[J]. Journal of Power Sources, 2021, 497: 229900.
- [17] SUBRAMANIAN V R, DIWAKAR V D, TAPRIYAL D. Efficient macro-micro scale coupled modeling of

- batteries[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2005, 152(10): A2002.
- [18] 王春雨, 崔纳新, 李长龙, 等. 基于电热耦合模型和多参数约束的动力电池峰值功率预测[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 28-35.
- WANG Chunyu, CUI Naxin, LI Changlong, et al. State of power prediction based on electro-thermal battery model and multi-parameter constraints for lithium-ion battery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 28-35.
- [19] ZHU J, KNAPP M, DARMA M S D, et al. An improved electro-thermal battery model complemented by current dependent parameters for vehicular low temperature application[J]. Applied Energy, 2019, 248: 149-161.
- [20] YANG R, XIONG R, MA S, et al. Characterization of external short circuit faults in electric vehicle Li-ion battery packs and prediction using artificial neural networks[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114253.
- [21] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [22] LI X, HE F, MA L. Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation[J]. Journal of Power Sources, 2013, 238: 395-402.
- [23] ZHAO J, RAO Z, HUO Y, et al. Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2015(85): 33-43.
- [24] LU Z, YU X, WEI L, et al. Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 28-40.
- [25] BRAND M J, SCHMIDT P A, ZAEH M F, et al. Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances[J]. Journal of Energy Storage, 2015(1): 7-14.
- [26] BRAND M J, KOLP E I, BERG P, et al. Electrical resistances of soldered battery cell connections[J]. Journal of Energy Storage, 2017(12): 45-54.
-
- 作者简介: 李长龙, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为新能源汽车动力电池系统的建模及管理。
E-mail: lcl_ecust@163.com
- 崔纳新(通信作者), 女, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车驱动系统优化控制、能量管理及电池管理系统等。
E-mail: cuinx@sdu.edu.cn
- 常龙, 男, 1987 年出生, 博士。主要研究方向为新能源汽车动力电池系统建模、优化配组及管理系统等。
E-mail: lchang@sdust.edu.cn
- 张承慧, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为动力电池测试与模拟技术、新能源及储能控制、工程优化控制等。
E-mail: zchui@sdu.edu.cn