

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.10.015

动力电池包局部复式模组热均匀性分析*

梁宏毅¹, 黄朴², 刘万里¹, 陈吉清², 莫丙达¹

(1. 广汽本田汽车有限公司, 广州 510700; 2. 华南理工大学, 广东省汽车工程重点实验室, 广州 510640)

[摘要] 乘用车动力电池包的模组布置方式通常具有单层布置、复式布置和局部复式布置3种不同的形式。局部复式布置结合了其他两种方式的特点,应用较为广泛。然而,通过对电动汽车火灾事故的研究发现,采用局部复式布置的电池包在自燃事故中所占比例较高,这表明该布置方式可能会对电池模组的热均匀性产生不利影响。鉴于此,本文选取了一款采用局部复式布置的电动汽车电池包作为研究对象,建立了电池包三维数值模型,并通过实验数据与仿真结果进行比较,验证了模型的准确性。利用经验证的模型,通过数值计算方法分析了电池包在快充及3种放电速率下的模组温度分布特征,揭示了局部复式布置模组在这些工况下的热均匀性,尤其是局部复式模组中双层模组的温度差异比单层模组更大。此外,探讨了冷却液入口温度和流速分别对模组热均匀性的影响。研究发现:试图降低冷却液入口温度来改善模组热均匀性的效果有限;而增大冷却液入口流速只能在高放电速率工况下减小模组温度差异,在低放电速率工况下的影响不明显。本研究为局部复式模组的电池热管理系统开发和设计提供了有意义的参考。

关键词: 热均匀性; 冷却液入口温度; 冷却液入口流速; 模组放电速率

Thermal Uniformity Analysis of Local Duplex Module for Power Battery Packs

Liang Hongyi¹, Huang Pu², Liu Wanli¹, Chen Jiqing² & Mo Bingda¹

1. Guangqi Honda Automobile Company Limited, Guangzhou 510700;

2. South China University of Technology, Guangdong Provincial Automobile Engineering Key Laboratory, Guangzhou 510640

[Abstract] The module arrangement of passenger car power battery packs usually has three different forms: single-layer arrangement, duplex arrangement and local duplex arrangement. The local duplex arrangement, which combines the characteristics of the other two methods, is more widely used. However, the study of electric vehicle fire accidents shows that battery packs with local duplex arrangement account for a higher proportion of spontaneous combustion accidents, which indicates that this arrangement may adversely affect the thermal uniformity of the battery module. In view of this, in this paper taking an electric vehicle battery pack with local duplex arrangement as the research object, a three-dimensional numerical model of the battery pack is established and the accuracy of the model is verified by comparing the experimental data with the simulation results. Using the validated model, the module temperature distribution characteristics of the battery pack under fast charging and three discharge rates are analyzed by numerical calculation methods, revealing the thermal uniformity of the local duplex arrangement of the modules under these conditions, especially the with the temperature difference of the double-layer module in the local duplex module larger than that of the single-layer module. In addition, the effect of coolant inlet temperature and flow rate on the thermal uniformity of the modules is explored respectively. It is found that attempting to reduce the coolant inlet temperature to improve the thermal uniformity of the module has limited effect, while increasing the coolant inlet flow rate can only reduce the temperature difference of the module under high discharge rate conditions, without obvious effect under low discharge rate conditions. This study provides a meaningful reference for the

* 国家车辆事故深度调查体系(NAIS)和新能源汽车事故调查协作网资助。

原稿收到日期为2024年02月26日,修改稿收到日期为2024年04月25日。

通信作者:陈吉清,教授,博士,E-mail:chjq@scut.edu.cn。

development and design of the battery thermal management system with local duplex modules.

Keywords: thermal uniformity; coolant inlet temperature; coolant inlet flow rate; module discharge rate

前言

电池模组的局部复式布置结构在电动汽车中应用广泛。模组为局部复式布置的电动汽车,其车内空间通常比完全为单层布置的更大。这是由于在电池单体数量和整包水平面积相等的前提下,完全为单层布置的模组会提升整块地板的高度;而局部复式布置的模组同时存在单层和双层两种布置形式,在某些可利用位置如后排座椅底部可将模组双层布置,其余位置为单层布置,这样既不会提升座椅坐垫高度,保证乘员有足够的头部活动空间,又可以减小单层部分的厚度,增大乘员舱内空间,如图1和图2所示。然而,在对新能源汽车火灾事故的调查过程中,遇到了较多采用局部复式布置的电池包。且经过对新能源汽车协作网数据库的统计后,发现采用局部复式布置的电池包发生自燃事故所占比例较大。这种布置方式的模组结构或电池热管理系统可能存在某种缺陷,从而对电池模组的热均匀性产生不利影响。图3为我国广东及海南地区一年中引起关注的4个模组为局部复式布置的新能源汽车热失控案例,因此有必要对其进行更深层的研究。

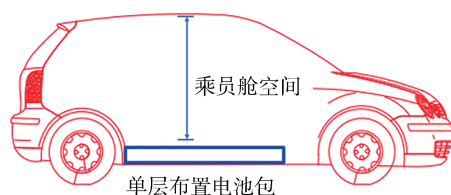


图1 模组单层布置的电动汽车简图

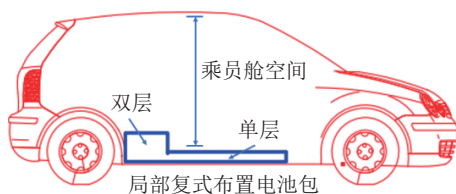


图2 模组局部复式布置的电动汽车简图

锂离子电池的性能受温度影响显著,其最佳工作温度区间相对狭窄。在较高的温度环境下,电池

会迅速老化;而在低温条件下,电池的功率和能量输出会显著下降,从而限制了其行驶范围和整体性能^[1]。由于电池包内部环境的复杂性,锂离子电池在充放电过程中,各个单体或模组之间的温度分布往往呈现出不均匀的特性。目前,对模组热管理的研究主要集中在降低峰值温度上,而对电池组温度均匀性的研究则较少。实际上,当峰值温度在一定范围内非常接近时,锂电池组的温度均匀性对锂电池系统的性能和寿命意义重大^[2],温度分布不均匀容易导致单体电池之间的性能不匹配,使某个电池单体过充或者过放,甚至引发电动汽车安全事故。温度均匀性一般用最大温差来衡量^[3]。杨亚联等^[4]研究表明,当温差为5、10、15℃时,相同充电条件下电池组的荷电状态分别下降10%、15%、20%。

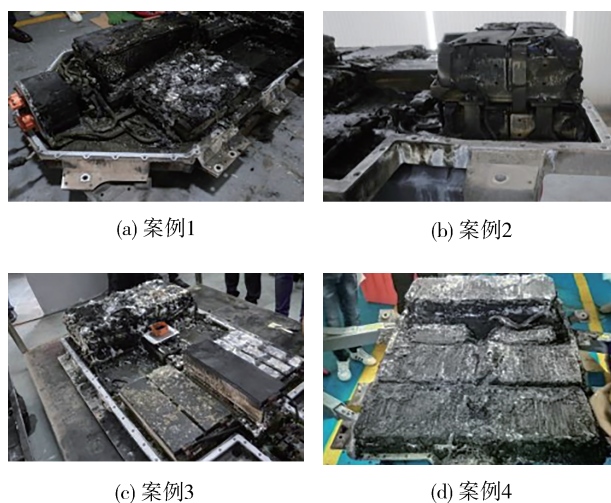


图3 局部复式布置电池包自燃案例

模组的热均匀性通常与模组结构相关。局部复式布置结构比单层布置更加复杂,在水平面积有限的情况下,叠放模组的方式虽然可以有效地提升汽车续航,但是会使电池包内部线束布置和液冷回路设计的难度加大,提高了生产成本。此外,由于局部复式布置的电池包同时存在双层和单层布置的模组,其热量传递方式将比完全为单层布置的模组更为复杂。Zhao等^[5-6]分别对电池包进液流量和空气域的存在对电池包双层模组温度分布的影响进行了研究,结果表明,在相同的放电率和进液流量下,双

层电池组上部模块的温度高于下部模块;空气域的存在不会对液冷双层电池包上下层模组温度分布产生影响,但可以降低上下层模组间的温差。蒋中洲等^[7]对双层布置的电池模组的低温性能进行了研究,通过在上下层模组之间增加隔热结构、同时对下箱体增加保温层措施能有效改善模组温差。李斌等^[8]对某SUV型车辆电池包的双层模组进行热管理性能测试,结果表明该双层模组存在温差过大的问题。刘霏霏^[9]对电池模块的热一致性进行了研究,发现电池模块的温度场并非通过将电池单体温度场进行简单叠加,将电池单体组合起来形成的电池模块的最大温差明显高于单体电池的最大温差。

模组热均匀性还与模组工况和液冷系统的冷却性能相关。当模组处于大功率充放电等工况时,模组生热量大,热量容易在某处堆积从而导致该点温度过高,使模组热均匀性变差。而较多的真实案例证明电池处于快充工况更容易诱发热失控。因此如何合理设计电池包液冷系统,确保电池模组在任何工况均获得充分有效的冷却是维持电池模组温度均衡的重要保障。目前国内外对电池包液冷系统已有大量研究,Qian等^[10]采用了一种基于微型通道冷板的液体冷却方法,分析了通道数量、入口质量流量、流向和通道宽度对电池组热性能的影响。结果表明,微型通道冷板热管理系统在控制5C放电时的电池温度方面具有良好的冷却效率。Jarrett等^[11]对蛇形通道冷却板进行了参数建模,发现通过优化通道宽度和位置可同时满足压力和平均温度的要求,但会牺牲温度均匀性。Lan等^[12]为电池热管理系统开发了新的微通道冷却设计,可使在放电速率为1C时,电池的最高温度低于 27.8°C ,在流速为 0.20 L/min 时,电池两端的温差低于 0.80°C ,同时需要消耗的泵功率也较小。Tang等^[13]通过在液冷板上增加鳍片的方式对动力电池液冷系统进行了优化,结果表明,优化分流后的并联液冷系统可将电池系统的温差维持在 3°C 以下。傅家麒^[14]采用了在液冷板流道内添加分流片的方式,使电池模组在3C放电速率下各电芯最大平均温差与无分流片时相比下降了43.5%,有效地提高了电池模组的热均衡性。

在上述讨论的基础上,以某款电动汽车的动力电池包为研究对象,通过数值计算的方式分析该电池包在快充和3种放电速率工况下模组的温度分布特点和变化规律,研究冷却液入口流速和温度对模组热均匀性的影响,最后对改善局部复式布置模组的热均匀性给出参考建议。

1 研究对象及方法

目前国内外学者对电动汽车电池包的研究局限于电池模组和热管理系统,所建立和使用的模型仅为“模组+冷却板”的模式,实验测量都是在接近环境温度的低充放电率条件下对小型电池组进行的,因此针对整个电池组的独立热模型可能不足以准确预测热行为^[15]。事实上,电池包内部环境复杂,其内部温湿度除了与模组和冷却板有关外,还与壳体材料、防水透气阀透气率、外部环境等因素相关。因此,该模式与电池包在真实环境下的工作状态还有不少差距。为了充分模拟电池包的的实际使用工况,为某款电动汽车的电池包建立了一个三维CFD数值分析模型。

1.1 研究对象

图4和图5分别为某款局部复式布置电池包的外壳图和内部结构图及其对应的几何模型。该电池包为三元锂离子电池包,标称电压为 346.56 V ,电池容量为 $177\text{ A}\cdot\text{h}$,质量为 $368\pm 6\text{ kg}$ 。电池包主要由上下壳体、模组、液冷回路、BMU(电池管理控制器)、S-box(继电器控制器)、防水透气阀及线束等构成。其中模组有24个,为方便后续描述将24个模组分为4部分,分别是前部模组、中部模组、后部上层模组和后部下层模组。其中前部模组和中部模组都是单层结构,分别有8个和6个模组,而后部模组分上下两层,每层5个模组。模组是电池包内的主要热源。

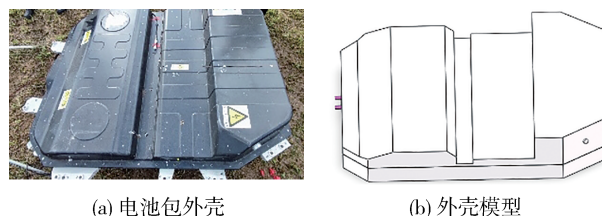


图4 某款电池包的外壳及对应的模型

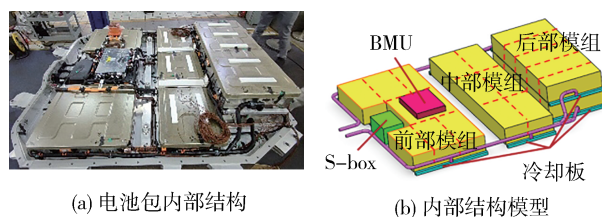


图5 某款电池包的内部结构及对应的模型

每层模组下均布置有冷却板,冷却板为片状横向排布,紧密贴合在模组下表面。此电池包冷却管路的结构为并联式结构^[16],如图6所示。相对于串联式,并联式能够显著降低压降,缺点是每条支路的冷却液流速并不一致,越靠近入口的支路冷却液流速通常越大。该电池包采用两级并联的模式,在冷却水管下先分出4条支路到各部分模组,然后在每条支路下再分出数条流道(即冷却板),分别是前部模组6条,中部模组4条,后部模组每层4条。冷却板与冷却水管共同构成了电池包的液冷回路。

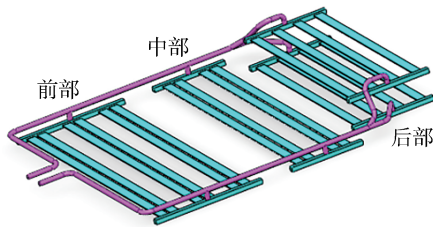


图6 电池包液冷回路

在上壳体的两侧安装有防水透气阀,其主要作用是防水防尘同时平衡电池包的内外气压,不过当外界湿气浓度较高时,水蒸气依然能够透过防水透气阀中的防水透气膜进入电池包内部,因此防水透气阀也是电池包与外界环境的唯一传质路径。

1.2 数值方法

参考上述电池包的结构特点,利用COMSOL Multiphysics软件为其建立了CFD数值分析三维模型。为了提高计算速度,该模型与原来的电池包相比,简化了壳体的部分圆角及条纹,去除了内部的线束,把防水透气阀简化为防水透气膜边界。除此之外,其结构与尺寸和原来的电池包相差无几。

1.2.1 网格划分及材料参数

由于冷却回路与上下壳体都是薄层结构,划分网格比较困难且会增大计算难度,因此用热薄层边界对其进行定义。热薄层仅考虑切向热通量而忽略跨层厚度的温差和热通量,这种方法适合导热系数比周围几何体大的层,而电池包的上下壳体和冷却铝板的导热系数都较高,因此用热薄层去模拟是合理的。假设每个单体在相同放电速率下的放热功率相同,模组简化为均匀发热的六面体。这一处理方法的优势在于简化了网格划分过程,降低了模型计算的复杂性,从而提高了计算效率。然而这一简化也带来了相应的局限性,即计算得出的电芯温度与实际工况存在一定差别。特别是电芯的最低温度并

非电芯内部的最低温度,而是更接近于模组外壳的温度,因此模型所测温度相比实际温度整体偏低^[17]。尽管存在这一误差,但研究的重点为模组热均匀性,主要关注模组温差的变化,因此该误差并不影响后续的分析工作。选择自由四面体网格对电池包模型进行网格划分,各部位网格划分结果及总数如图7和表1所示,整个模型由1 208 252个四面体单元组成,其中模组部分作为后续分析的核心对象,对计算精度的要求较高,因此对其网格进行了精细化处理,以提高其网格的平均单元质量。另一方面,冷却板部分为扁平长方体与棍状长方体的组合体,组合界面形状复杂,为整个模型中网格划分难度最大的部分,网格数量也最多。

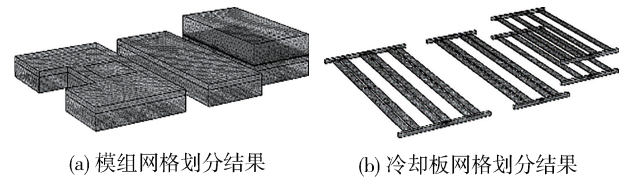


图7 网格划分结果

表1 电池包各部位网格划分结果

部位	网格数量	平均单元质量
模组	275 647	0.650 4
冷却水管	67 898	0.666 0
冷却板	451 826	0.624 3
BMU	794	0.683 8
S-box	3 373	0.638 5
空气域	402 952	0.640 6
整体	1 208 252	0.638 2

1.2.2 边界条件

电池包壳体为电池包与外环境对流换热的主要媒介,而防水透气膜则是电池包与外环境湿气传递的主要媒介,可以用水分迁移系数 β 反映其湿气传递能力强弱,此处 β 取 $8 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[18]。对于冷却板内冷却液的流动状态,须利用雷诺数去进行定义,其公式为

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

冷却液的最高温度一般不超过 30°C , 30°C 时50%乙二醇的动力黏度为 $2.94 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,而冷却液的最大流速设定为 $20 \text{ L}/\text{min}$,因此得到的雷诺数最大值为15.7,远小于临界雷诺数,冷却板内的液体流动应为层流,选择层流物理场。

把模组、BMU、S-box部分定义为固体,把整个冷却回路定义为流体,其余为湿空气。在模型中设置“固体和流体传热”物理场去定义模型各部分之间的产热及传热机制。设置上下壳体、冷却回路边界为热薄层,其中上下壳体的厚度为30 mm,液冷回路的厚度为1 mm。由于在模组与冷却板之间布置有导热材料,因此在模型中忽略接触热阻。定义整个电池包的初始温度与环境温度一致,并将防水透气阀的外表面定义为开放边界与外环境接触。由于电池包处于室外的自然环境中,设置其外壳与环境的热交换方式为自然对流。由文献[18]及已知的材料特性参数可知30℃环境下电池包各材料的热物性参数如表2所示。

表2 电池包各材料热物性参数

结构	材料	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	恒压热容 J/(kg·K)
上壳体	SMC复合材料	1 800	0. 698	1 260
下壳体、冷却板	6061铝合金	2 730	160	1 050
冷却液	50%乙二醇	1 068. 75	0. 387	3 319
电池模组	均质材料	2 218	$k_x=23. 4$ $k_y=5. 3$ $k_z=17. 2$	1 060
冷却水管	塑料	2 000	5	395
BMU	复合材料	1 900	0. 3	1 369
防水透气膜	PTFE	2 200	0. 24	1 050

电池在不同工况下的生热率可用式(2)表示^[19]。

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{jou}} + \dot{Q}_{\text{re}} = I(U_{\text{ocv}} - U_t) - IT_{\text{abs}} \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T} \quad (2)$$

式中: \dot{Q} 为电池生热率; \dot{Q}_{jou} 为焦耳热; \dot{Q}_{re} 为电池反应热; I 为电流; U_{ocv} 为电池开路电压; U_t 为电池端电压; T_{abs} 为绝对温度; T 为电池温度。由于电池反应热 \dot{Q}_{re} 在整个生热率 \dot{Q} 中所占比例很小,因此公式右边的第2项可以忽略,电池生热率 \dot{Q} 可用焦耳热 \dot{Q}_{jou} 表示。通过对电池单体进行充放电测试后计算出整个电池模组在不同放电速率下的放热功率如表3所示。此计算结果是基于理想状态下的假设,即假设在相同放电速率下,每个电池单体的放热量均保持一致。然而,在实际应用场景中,由于制作工艺的精度限制以及电池服役环境的差异,各个电池单体之间实际的产热量难免会存在一定的波动。尽管这种差异存在,但经过评估后,认为其影响相对较小,不会对整体仿真结果的准确性和可靠性产生显著影响。

表3 不同放电速率下的模组放热功率

放电速率	放热功率/W
1/3C	288. 00
1C	1 003. 80
2C	2 463. 84

2 数值验证

为了验证上述模型传热的准确性,对该款电池包进行温度测量实验,并通过实验数据与数值计算结果的对比去验证模型。

将该款电池包搁置在室外露天环境中,在电池包内部布置4个热电偶温度传感器,分别位于S-box、BMU、中部模组、后部模组上方表面,用于测量电池包内部对应部分的实时温度,如图8所示。同时为了使电池包更接近实际装车运动状态,防止雨淋和太阳光直射对实际状态造成影响,在电池包上方放置一遮阳板,如图9所示。实验时间数据截取为2022年5月1日0:00~24:00,每5 min记录一次数据。



图8 实验中4个热电偶温度传感器布点



图9 自然环境实验台下的电池包

把室外搁置实验的环境温度作为模型的环境温度导入到模型中,并在上述测量实验中4个温度传感器的对应位置在模型中设置如图10所示的4个域

点探针,以收集模型计算过程中这4个点的温度。设置这4个点的初始温度与上述实验所对应的4个点的初始温度一致。本研究的目的是对不同部分模组的温度变化分布趋势进行分析,为简化计算量,设置采样时间步长为5 min,总时长为24 h。

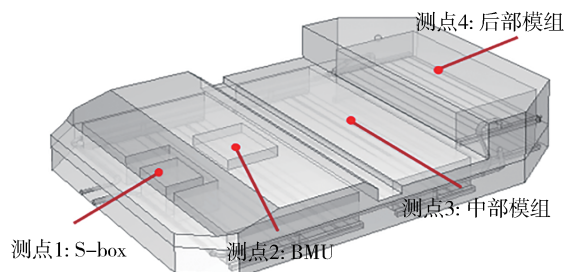


图10 模型中4个温度探针

整理实验数据与仿真计算结果如图11和表4所示,其中 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_1^* 、 T_2^* 、 T_3^* 、 T_4^* 分别是S-box、BMU、中间模组、后部模组的实验温度和数值计算温度, T_5 为环境温度。由图11可知,电池包内部4个测点之间的初始温度并不一致,且与环境温度有所差别。这是由于电池包并非处于室内较均衡的实验室环境,而是处于更接近实际行驶工况的室外自然环境。自然环境下电池包可能受风向、雨水、阳光照射方向等因素的影响,电池包内部热量传递处于不稳

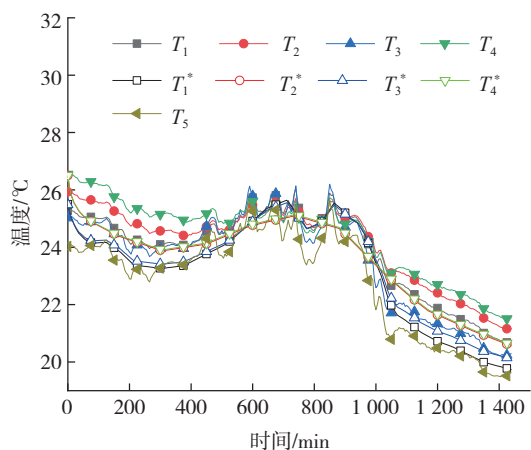


图11 实验数据与仿真结果对比

表4 实验与仿真的误差值

测点	最大绝对误差/°C	最大相对误差/%	误差均值/°C
S-box	1.21	5.53	0.65
BMU	1.06	4.21	0.56
中间模组	1.32	5.06	0.39
后部模组	1.55	5.92	0.79

定的波动状态,从而使各点的温度有所不同。但是通过实验与仿真的结果对比可知,在外环境温度变化的作用下,得到的各测量点的实验结果和仿真结果都十分接近,而且模型能够准确预测到温度升高和下降的时刻,仿真和实验的各点温度变化趋势一致。其中误差最大的点为后部模组,最大绝对误差为1.55 °C,最大误差时刻为125 min,最大相对误差为5.92%。后部模组紧邻防水透气阀,而该阀具有一定的热通量特性。然而,在现有模型中,防水透气阀被理想化地视为完全隔热体,进而忽视了其所产生的热量传递。尽管如此,这一被忽略的热量对整个电池包温度场的影响实为微不足道。因此该模型具有较高的准确性和可靠性,可利用该模型进行后续的仿真分析工作。

3 结果与分析

3.1 快充工况下电池包内部温度分布特点和热传递模式

通过整理发生自燃事故车辆的后台数据发现,大部分事故车辆发生热失控的时刻都处于快充期间或快充结束不久后的某段时间内,因此热失控可能是快速充电导致模组热均匀性较差所致,有必要对处于快充期间的电池包进行更深层的热分析。

当模组处于1C的快充工况时,定义27 °C以下的区域为低温区,33 °C以上的区域为高温区。分别充电20、40和60 min后电池包内部温度分布如图12~图14所示,可知高温区一般出现在模组的左上方,中部模组和后部上层模组的高温区范围较大。而低温区则出现在各模组的右下方,后部下层模组的低温区范围较大,模组整体温度呈左高右低的趋势,这是由于冷却液的流动方向为右进左出,越靠近出口的冷却液吸收的热量越多,温度越高。

从20到60 min的转变可知,随着充电过程的进行,模组的高温区域逐渐变大,而低温区域的变化并不单一。后部下层模组的低温区域越来越大,而其余模组的低温区域则变小。这说明各模组受到的冷却强度并不一致,特别是双层布置的后部模组。后部下层模组同时受到上、下两块冷却板的作用,而后部上层模组只受到下方一块冷却板的作用,且该冷却板为上下两层模组所共用,使得上层模组受到的冷却强度较小而下层模组受到的冷却强度较大,这会导致随着充电时间延长,上下两层模组的温差将会越来越大。

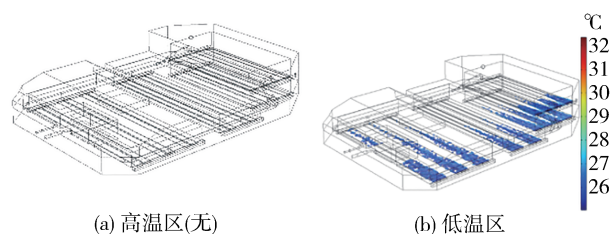


图12 充电20 min时电池包内部温度分布

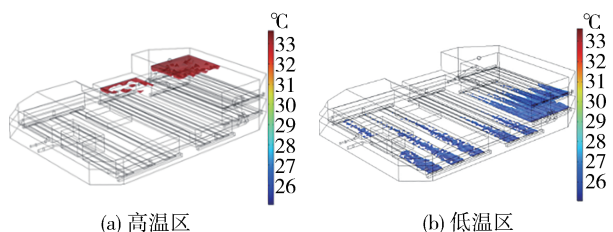


图13 充电40 min时电池包内部温度分布

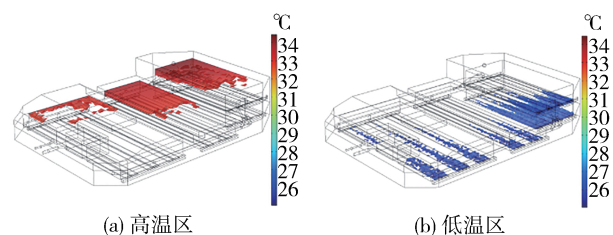


图14 充电60 min时电池包内部温度分布

模组的热通量传递方向如图15所示(箭头方向代表热量传递方向,箭头大小代表热通量大小),由于后部下层模组受到上下两层冷却板同时冷却的缘故,故热量从模组内有上下两个向外传递的方向,冷却速度快。而其余模组只受到底部一层冷却板的作用,其热量只能从上往下传递,因此冷却效果并不理想。特别是后部上层模组,其唯一的冷却板夹在后部两层模组之间,导致部分本属于上层模组的冷却效力被下层模组抢占,因此上层模组所得到的冷却效力为所有模组中最少,其温度也是所有模组中最高。因此,复式布置的模组会出现上层温度高而下层温度低的现象。这与文献[14]中的研究结果一致。

3.2 不同放电速率下电池模组热均匀性瞬态分析

当汽车持续行驶一定时间,模组放出的热量不断积聚,模组温度达到阈值后,温度较低的冷却液便会被泵进电池包并在冷却液板内流动,通过对流换热带走从模组散发出的热量。通常模组放电速率越大,其可持续放电的时间便越短。假设模组在初始

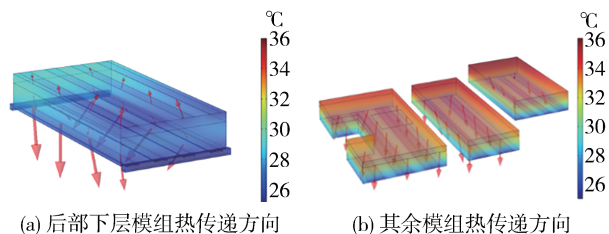


图15 模组热量传递方向

状态下所含的能量都是相同的,且不计放电过程中的能量损耗,则放电速率为1/3C、1C和2C的模组,其可持续放电的最大时长分别为3、1和0.5 h。为研究模组在不同放电速率下的瞬态热行为,设计以下仿真计算。

选取3种放电速率(1/3C、1C和2C)的模组为研究对象,假设所有模组初始SOC(荷电状态)均为100%,所以其最长放电时间分别为3、1和0.5 h,放热功率分别为288、1 003.8和2 463.84 W。在实际工况中,冷却液进入电池包的时刻通常由BMS(电池管理系统)决定,BMS可通过温度传感器实时监测模组的温度信息,当模组温度达到一定阈值时,BMS可控制压缩机和水泵向电池包内输入相应温度和流量的冷却液。该过程可利用模型中的隐式事件接口简化替代,设置一个总域探针实时监测全部模组的最高温度,设定事件的条件为:当模组最高温度超过35℃时冷却液开始进入电池包;当模组最高温度低于30℃时冷却液停止进入电池包。冷却液入口温度和速率分别设置为25℃和10 L/min,模组初始温度为30℃,与环境温度一致。另外,在4个模组处各设置一个域探针实时探测放电过程中各模组的平均温度,得到的数值计算结果如图16~图18所示。

对于放电速率为1/3C、1C、2C的模组,冷却液流入电池包的时刻大概分别是 $t_1=130$ min、 $t_3=35$ min、 $t_5=15$ min。冷却液的流入虽可降低模组的平均温度,但由于各模组受到的冷却强度不均匀,模组间的温差会迅速增大,特别是后部下层模组,其温度下降速度比其余模组明显更快。冷却液进入电池包后,各模组温度由低到高分别是后部下层、前部、中部和后部上层。

当模组放电结束后,模组不再产热,但由于模组温度仍然较高,冷却液持续进入电池包,直到模组最高温度低于30℃才停止。由图16~图18可知,放电速率为1/3C、1C和2C的模组冷却液停止进入电池包的时刻大概分别为 $t_2=215$ min、 $t_4=125$ min和 $t_6=110$ min,

冷却液被持续泵入电池包时长则分别约为85、90和95 min。因此放电速率越大的模组,冷却液开始进入电池包的时刻越早,停止进入电池包的时刻也越早,不过持续时间却越长。所以对于含电量相同的

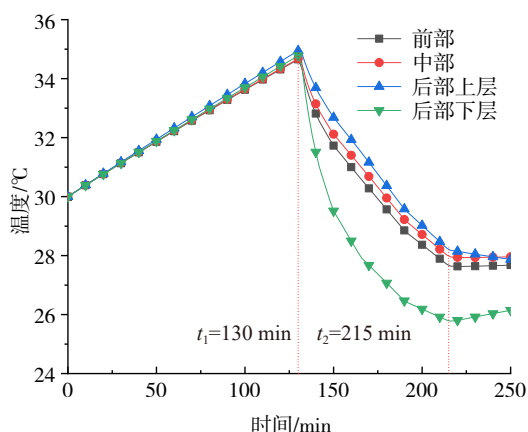


图16 放电速率为1/3C时各模组温度

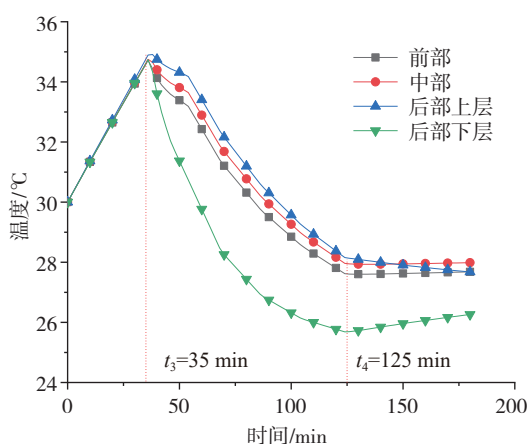


图17 放电速率为1C时各模组温度

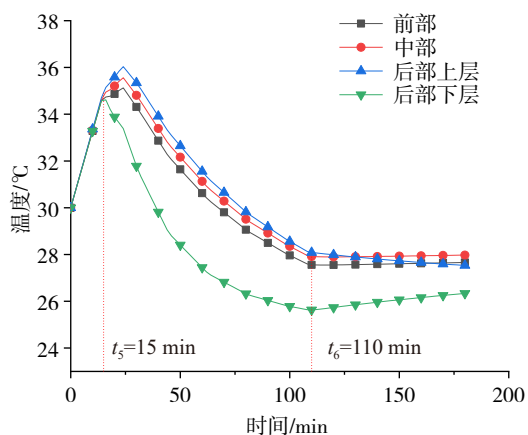


图18 放电速率为2C时各模组温度

模组,加快其放电速率,在假设水泵和压缩机的功率不变的前提下(对应冷却液入口流速和温度设定为固定值),水泵和压缩机的工作时间变长,因此总耗能增大。冷却液停止进入电池包后,模组温差开始缓慢缩小。

3.3 液冷系统对模组热均匀性的影响

由3.1和3.2节可知,两个液冷系统参数即冷却液入口温度和流速分别固定为25 °C和10 L/min时,该款局部复式布置结构的电池包在快充和3种放电速率工况下均呈现出模组热均匀性较差的状况,考虑到通过改变冷却液入口温度和流速可能会改善模组的热均匀性,故作以下研究。

3.3.1 冷却液入口温度对模组热均匀性的影响

冷却液的作用是在电池模组温度过高时吸收其放出的热量,冷却液温度过高会导致冷却液与模组的温差过小,所能吸收的热量有限,难以得到理想的冷却效果。而冷却液温度过低,不仅会使压缩机能耗增大,而且可能导致部分模组过冷,削弱了电池单体的性能并使模组间的温差增大。工程上电池包的冷却液入口温度通常选取在20 °C附近,某些电池包处于超级快充或最大放电速率的极端工况下其冷却液入口温度或会降低至15 °C,因此选取冷却液入口温度研究范围为15~25 °C,每隔2 °C采样一次,冷却液流速设置为10 L/min,模组放电速率为1C。得到的计算结果如图19所示。

可见模组的最高温度 T_{\max} 与冷却液入口温度呈线性关系,当冷却液入口温度从25 °C降至15 °C时,前部、中部、后部上层和后部下层模组的平均温度分别下降了9.82、9.65、9.79和9.91 °C,亦下降了10 °C左右,表明了模组的平均温度与冷却液入口温度之间存在较强的相关性,降低冷却液入口温度可以有效地限制模组温升。与此相反的是,模组温差 ΔT 对冷却液入口温度的变化并不敏感,当冷却液入口温度下降10 °C时,模组温差 ΔT 只降低了0.32 °C。不同冷却液入口温度下的电池包内部各点温度如图20所示,可见随着冷却液入口温度的提高,模组最高温度和最低温度都在上升,因此,降低冷却液入口温度并非减小模组温差的可行方法。综上,降低冷却液入口温度对限制模组温升有显著的效果,而对减小模组温差,改善模组的热均匀性作用不大。

3.3.2 冷却液入口流速对模组热均匀性的影响

在工程实践中,冷却液流速的选取对于电池包的温度控制至关重要。通常,标准工作条件下的冷

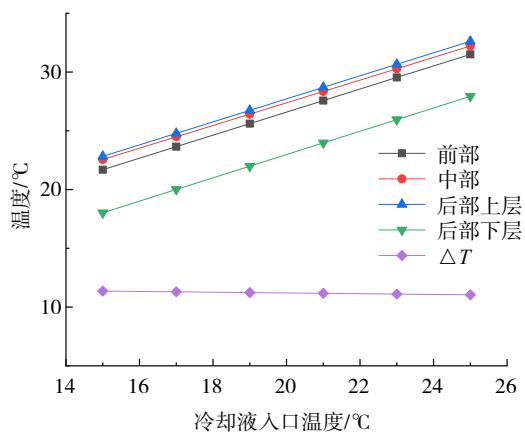


图19 不同冷却液入口温度下的模组最高温度及温差

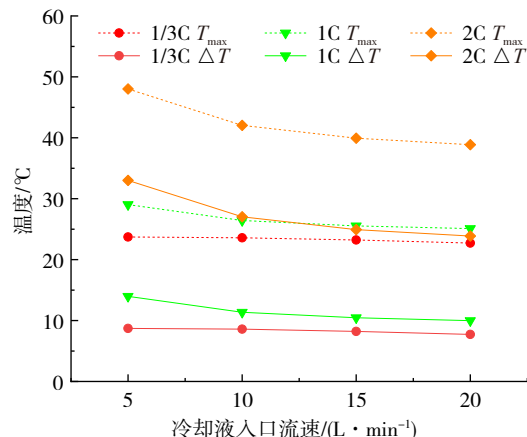


图21 不同冷却液入口流速下的模组最高温度和温差

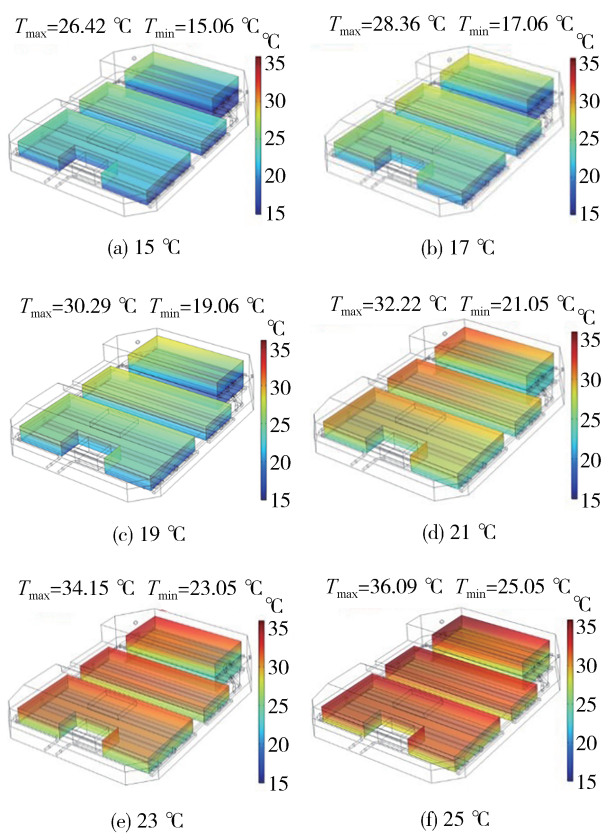


图20 不同冷却液入口温度下的电池包内部温度

组最高温度 T_{max} 还是模组温差 ΔT , 都随着冷却液入口流速的提高而下降, 但下降的幅度均变得越来越小, 冷却液入口流速从 5 L/min 开始, 每提升 5 L/min, 最高温度 T_{max} 分别下降了 5.98、2.1 和 1.06 °C, 曲线最终在 20 L/min 附近趋于水平。此时模组在不同冷却液入口流速下的温度如图 22 所示, 可见随着冷却液入口流速的提高, 模组的高温区域(40 °C 以上)明显减小, 而其余部分的温度并无明显变化, 最高温度 T_{max} 逐渐下降, 但下降幅度越来越小, 最低温度 T_{min} 几乎不变。而对于处于低放电速率如 1/3C 的模组, 无论是最高温度 T_{max} 曲线还是温差 ΔT 曲线都几乎不随冷却液流速的增大而发生变化, 接近水平直线。因此这时提升冷却液入口流速对模组温度无明显影响。

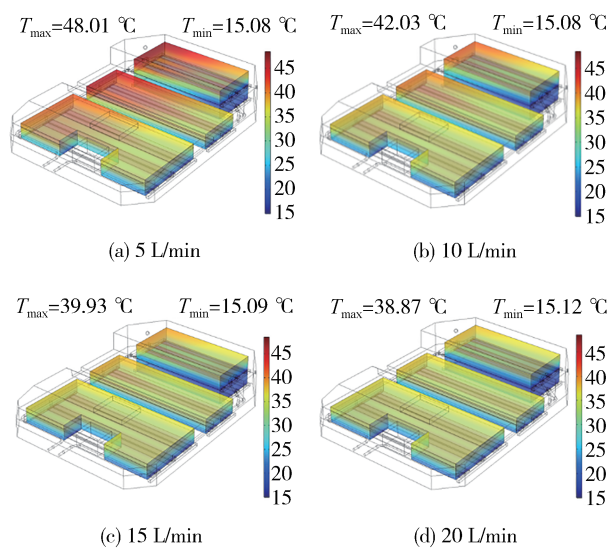


图22 不同冷却液入口流速下的电池包内部温度

却液流速一般设定为 10 L/min 左右, 以满足电池包在日常使用中的散热需求。然而, 在快充及超级快充模式下, 由于电池产生的热量剧增, 因此冷却液流速需要进行相应的调整, 此时的冷却液流速可能达到了 15 甚至 20 L/min。为了对照仿真结果并验证其准确性, 选取 4 种具有代表性的冷却液流速作为研究变量, 分别是 5、10、15、20 L/min, 得到的计算结果如图 21 所示。对于放电速率为 2C 模组, 无论是模

由此可得:模组的放电速率越大,其受冷却液入口流速的影响越大;对于高放电速率的模组,提升冷却液入口流速可降低模组最高温度并减少模组温差,但随着冷却液入口流速越来越大,该作用将变得不明显并最终趋于饱和;而对于低放电速率的模组,提升冷却液入口流速对冷却模组的作用有限,并不能产生明显影响。

4 结论

本文利用数值计算方法,对快充和3种放电速率工况下局部复式布置模组的温度分布和变化规律进行了分析,并探究了冷却液入口温度和流速对模组热均匀性的影响,得出了以下结论。

(1)在快充过程中,由于冷却液的单向流动性,该局部复式布置模组展现出明显的温度分布不均现象,具体表现为模组整体温度左高右低。对于采用双层布置的后部模组,由于上下两层模组所接受的冷却强度存在差异,上层模组温度显著高于下层模组。更为关键的是,随着充电时间的持续延长,上下双层模组之间的温差将呈现逐渐扩大的趋势。这一现象不仅影响了电池包的整体散热性能,还可能对电池的安全性和稳定性构成潜在威胁。因此,优化冷却液的流动设计,确保各层模组冷却强度的均匀性,是提升电池包性能和安全性的重要方向。

(2)在局部复式模组放电过程中,模组温度分布呈现规律性变化,其中后部下层模组温度最低,前部、中部次之,后部上层模组温度最高。冷却液的流入虽然有效降低了模组整体温度,但同时也导致了模组间温差的增大。对于荷电状态相同的模组,放电速率越快,水泵和压缩机为维持模组温度稳定所消耗的能量亦随之增加,进而使得机械效率降低。值得注意的是,当冷却液停止流入电池包后,模组间的温差逐渐缩小,这一现象对于电池包温度管理的优化具有重要指导意义。

(3)关于局部复式模组的温度管理,模组的最高温度与冷却液入口温度之间存在显著的相关性。通过降低冷却液入口温度,可以有效地抑制模组的温升。然而,模组温差 ΔT 对于冷却液入口温度的变化并不敏感。换言之,单纯降低冷却液入口温度并不能有效改善模组内部的温度均匀性。

(4)对于局部复式模组而言,增大冷却液入口流速可降低高放电速率下的模组最高温度并减少模组

温差,但是当冷却液入口流速超过15 L/min时,增大冷却液入口流速所能产生的作用将越来越小,且增大冷却液入口流速对低放电速率的模组影响甚微。因此通过改变冷却液入口流速和温度难以彻底改善该局部复式布置电池包热均匀性较差的状况。

(5)关于冷却液单向流动导致的模组整体温度左高右低的现象,尽管已有研究尝试通过改变流道结构来均衡模组温度,但这种方式并未改变冷却液流动方向固定的状况。因此,靠近冷却液入口的模组温度仍然明显比靠近冷却液出口的模组低,这一问题并未得到有效改善。针对这种情况,可以通过改变冷却液的出入口位置和数量的方式,增加冷却液的流动方向和路径,使得冷却液能够更加均匀地分布到模组的各个部分,从而有效改善模组温度的分布不均问题。此外,加装电子节流阀,定期改变冷却液的流动方向也是一个值得考虑的方案。冷却液的往复流动可以进一步均衡冷却液出入口附近的模组温度,提高电池包的整体散热效果。

(6)双层模组温度呈现出上高下低的分布格局,主要归因于上下两层模组所受到的冷却强度存在显著差异。为确保冷却效力在模组间合理分配,避免上层模组冷却效果的减弱,提出以下优化措施:首先,在下层模组顶部贴附绝热膜,此举旨在隔绝下层模组热量向上层冷却板的传递,确保上层冷却板的冷却资源能够专注于对上层模组的散热;其次,通过调整管路直径,实现对上下两层冷却板进液量的精准控制,进而平衡两层模组所受到的冷却强度,达到优化模组温度分布的目的。

参考文献

- [1] PANCHAL S, DINCER I, AGELIN-CHAAB M, et al. Experimental and theoretical investigation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 99.
- [2] LI M G L. Optimization for liquid cooling cylindrical battery thermal management system based on gaussian process model [J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications: Transactions of the ASME*, 2021, 13(2).
- [3] XU H, ZHANG X, XIANG G, et al. Optimization of liquid cooling and heat dissipation system of lithium-ion battery packs of automobile [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26(1): 101012.
- [4] 杨亚联, 张昕, 李隆键, 等. 混合动力汽车用镍氢电池的散热结构分析[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(4): 415-419.
YANG Y L, ZHANG X, LI J L, et al. Analysis of the thermal structure of nickel-metal hydride batteries for hybrid vehicles [J].

- Journal of Chongqing University, 2009, 32(4): 415-419.
- [5] ZHAO L, ZHU M, XU X, et al. Heat dissipation analysis of double-layer battery pack under coupling heat transfer of air, liquid, and solid [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42.
- [6] 赵磊, 朱茂桃, 徐晓明, 等. 空气域与流体域耦合作用下双层电池包散热特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 200-211.
- ZHAO L, ZHU M T, XU X M, et al. Heat dissipation characteristics of double-layer battery packs under the coupling of air and fluid domains [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 200-211.
- [7] 蒋中洲, 何超兰, 刘聪. 双层布置结构动力电池低温性能研究[J]. 大众科技, 2022, 24(11): 57-60.
- JIANG Z Z, HE C L, LIU C. Research on low-temperature performance of power battery with double-layer arrangement structure[J]. Mass Technology, 2022, 24(11): 57-60.
- [8] 李斌, 游道亮, 汤桃峰. 双层模组动力电池包热管理设计与优化[J]. 南方农机, 2023, 54(2): 129-133.
- LI B, YOU D L, YANG T F. Thermal management design and optimisation of double-layer module power battery packs[J]. Southern Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 129-133.
- [9] 刘霏霏. 微热管在电动汽车电池热管理系统中应用关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
- LIU F F. Research on key technology of micro heat pipe application in electric vehicle battery thermal management system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [10] QIAN Z, LI Y, RAO Z. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 126.
- [11] JARRETT A, KIM Y I. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23).
- [12] LAN C, XU J, QIAO Y, et al. Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101.
- [13] TANG W, DING H, XU X, et al. Research on battery liquid-cooled system based on the parallel connection of cold plates [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2020, 12(4): 045701.
- [14] 傅家麒. 电动汽车高功率动力电池液冷系统热均衡性能研究[D]. 镇江:江苏大学, 2020.
- FU J Q. Thermal equalisation performance study of liquid cooling system for high power power battery in electric vehicles [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [15] WANG Q, JIANG B, LI B, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64.
- [16] 刘志清. 方形动力电池模组并联式液冷热管理结构设计及多目标优化[D]. 合肥:合肥工业大学, 2023.
- LIU Z Q. Structural design and multi-objective optimisation of parallel liquid cooling thermal management for square power battery module [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [17] 郭巧嫣. 车用动力电池多内热源生热模型和电热不一致性研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- GUO Q Y. Study on heat generation model and electro-thermal inconsistency of automotive power battery with multiple internal heat sources [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [18] 陶洪达. 动力电池包内部温湿特性影响因素分析[D]. 广州:华南理工大学, 2022.
- TAO H D. Analysis of the influence factors of temperature and humidity characteristics inside power battery packs [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [19] 刘光明. 面向电动汽车续航里程估计的电池剩余放电能量预测研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- LIU G M. Residual battery discharge energy prediction for electric vehicle range estimation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.