

# 电动汽车大功率直流充电热管理系统设计

叶立<sup>1</sup>, 时安宁<sup>1</sup>, 贺军成<sup>2</sup>, 张凤<sup>1</sup>, 任恒宇<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海燃料电池汽车动力系统有限公司, 上海 201804)

**摘要:** 为提高动力电池在大功率直流充电状况下的充电效率, 提出一种基于充电桩热泵系统的电池热管理系统。以某款电动汽车的动力电池为例, 研究该热管理系统在-20, -10, 0, 20 和 40 °C 工况下大功率直流充电的温度特性和充电时长问题。使用数值仿真软件对系统进行建模并分析, 结果表明, 电桩式电池热管理系统响应快、效率高, 且最高温度可控制在 50 °C 以下。在低温 0, -10 和 -20 °C 工况下, 相较于原车载式电池热管理系统, 可分别为动力电池节约 10.6%, 17.9% 和 24.6% 的充电时间; 在 20 和 40 °C 工况下可节省 1.4% 和 6.0% 的充电时间; 对比动力电池各阶段所用的充电时间, 所提出的系统主要比原系统减少了电量 0~20% 范围内的充电时间。

**关键词:** 电动汽车; 大功率充电; 电池热管理; 充电时间

中图分类号: U 469.7; TM 912 文献标志码: A

## Design of high-power DC charging thermal management system for electric vehicles

YE Li<sup>1</sup>, SHI Anning<sup>1</sup>, HE Juncheng<sup>2</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, REN Hengyu<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Shanghai Fuel Cell Vehicle Power System Co., Ltd., Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to improve the charging efficiency of power battery under the condition of high-power DC charging, a battery thermal management system based on heat pump for charging stations was proposed. Taking the power battery of an electric vehicle as an example, the temperature characteristics and charging time of the thermal management system under the condition of high-power DC charging at five different conditions of -20, -10, 0, 20 and 40 °C were analyzed. The two system models were modeled using numerical simulation software for analysis, and the results show that the proposed system has fast response, high efficiency, and can maintain the maximum temperature

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51736007, 51306122)

通信作者: 叶立(1977-), 女, 副教授。研究方向: 新能源汽车热管理系统、过程装备集成与优化、涡流强化传热传质。E-mail: yeli@usst.edu.cn

引文格式: 叶立, 时安宁, 贺军成, 等. 电动汽车大功率直流充电热管理系统设计[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(6): 629-637.

Citation: YE Li, SHI Anning, HE Juncheng, et al. Design of high-power DC charging thermal management system for electric vehicles[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(6): 629-637.

below 50 °C. Compared with the original system, the proposed system reduces the charging time of the power battery by 10.6%, 17.9%, and 24.6% at 0, -10 and -20 °C operating conditions, respectively. It also saves 1.4% and 6.0% of the charging time at 20 and 40°C operating conditions, respectively. Comparing the charging time for the power battery at each stage, the proposed system mainly reduces the charging time in the range of 0~20% of the battery state of charge compared to the original system.

**Keywords:** *electric vehicle; high-power charging; battery thermal management; charging time*

随着环境污染和能源短缺的问题日益严重,各传统燃油汽车厂商开始转型将目光聚焦于新能源汽车,其中纯电动汽车由于节能环保、技术成熟而成为重点发展对象<sup>[1-2]</sup>。在纯电动汽车的续航里程方面,为动力电池提供快速充电将会是解决整车续航问题的有效途径,许多学者对动力电池快充策略进行研究。刘伟等<sup>[3]</sup>提出一种均衡考虑锂电池能量损耗和充电时间的多段恒流充电方法,相比于已有的充电策略,该方法可减小所需预做实验量,提高充电效率,降低锂电池温度。Khan等<sup>[4]</sup>提出了一种基于锂电池RC模型的多级恒流充电方法,无需预先进行实验。叶剑晓等<sup>[5]</sup>提出了一种多段恒流结合脉冲充电方法,实验证明,与其他充电方法相比,该方法能够显著减弱电池极化效应,缩短充电时间,提高充电效率。Li等<sup>[6]</sup>利用粒子群优化提出了自适应多级恒流恒压充电方法,相较于传统的恒流恒压充电方法,新方法在充电时间和电池退化方面具有良好的应用前景。Wang等<sup>[7]</sup>提出了一种基于热模型的非线性模型预测控制充电方法,相较于其他多级恒流充电方法,该方法能够有效平衡电池充电时间、能量损失和内部温升。

在动力电池大功率直流充电过程中,除了优化充电策略以提高充电效率并控制充电温度外,还应结合考虑热管理系统。根据不同的冷却方案,电池组热管理系统可采用空气冷却、液体冷却、相变材料冷却和热管冷却等技术<sup>[8]</sup>。在液冷式冷却方案中,液冷板流道结构的优化和冷却控制策略的设计是国内外学者研究的重点对象。Huo等<sup>[9]</sup>设计出了一种平行流微通道液冷板系统,研究各种参数对矩形液冷板封装热性能的影响。结果表明电池组最高温度随流道数和进口质量流量的增加而减小,冷却液流向对冷却效果的影响也减小。Tang等<sup>[10]</sup>对基于铝微通道液冷板的冷却系统进行了优化研究,为大容量方形电池的冷却结

构设计了3种方案。研究结果表明,在电池组底部和侧面各布置一块冷板的方案,对电池组具有较好的冷却效果。Shang等<sup>[11]</sup>对电池组与液冷系统的接触面之间进行了可变的设计,对质量流量、入口温度和冷却板的宽度进行了优化,研究发现质量流量在0.21 kg/s时电池组具有最佳的冷却效果。Nieto等<sup>[12]</sup>将液冷板流道设计成蛇形,当乙二醇-水混合物的冷却液对电池组进行热管理时,电池组的最高温度低于35 °C且最大温差也低于5 °C。

本文以电动汽车大功率直流充电时的动力电池热管理系统为研究对象,综合考虑充电策略与热管理系统,为缩短动力电池在高低温工况下充电的冷却和预热时间,以缩短充电时间,设计了一种基于充电桩热泵系统的电池热管理系统(以下简称桩式热管理系统)。对动力电池热管理系统进行建模,通过AMESim仿真分析,研究该热管理系统在不同高低温工况下大功率直流充电的温度特性和充电时长问题。

## 1 电池热管理系统设计

现阶段车载式电池热管理系统如图1(a)所示,由车载热泵回路与电池回路组成。电池回路中冷却液的冷热源来自空气源热泵系统。其中车载热泵系统由四通换向阀切换制冷与制热模式,通过两个回路的换热器间耦合后进行热量交换,以此达到给电池组冷却和预热的目的。

本文设计的桩式电池热管理系统如图1(b)所示,由充电桩热泵回路、水箱回路以及电池回路组成。相较于车载式电池热管理系统,本设计增加了水箱回路。水箱回路通过换热器间的耦合与热泵系统进行热量的交换,旨在利用充电桩的热泵系统将水箱中的冷却液预热或冷却到预定温度,以维持电池高倍率充电温度。当汽车使用充

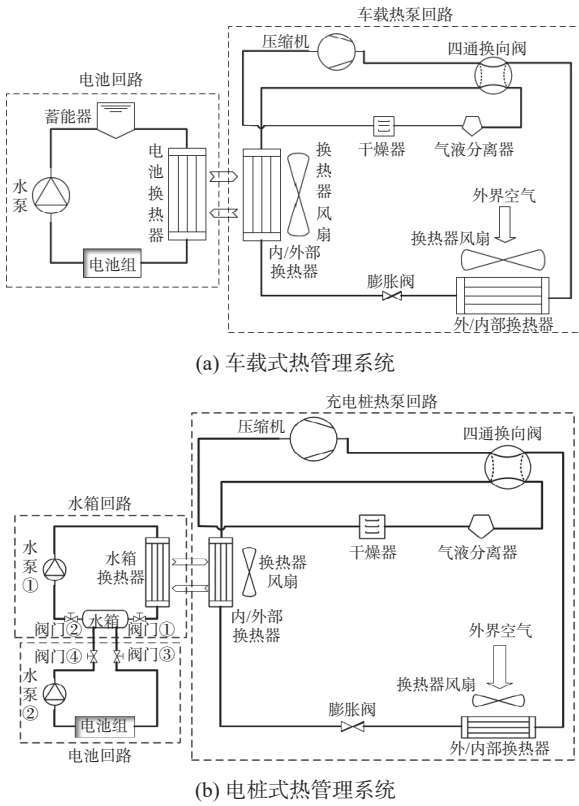


图 1 电池热管理系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of battery thermal management system

充电桩充电时, 阀门①②关闭, 而阀门③④开启, 水箱中的冷却液通过特定接口与动力电池接通形成闭合回路, 直接将水箱中最适宜温度的冷却液以合适流量通入电池底部冷板, 从而快速实现动力电池达到高倍率充电的温度, 缩短整车动力电池的充电时长。

## 2 动力电池模型

### 2.1 锂电池热特性分析

锂离子电池在充放电过程中的温度变化是由于热量的产生和传热。在锂离子电池的充电过程中, 由于电池本身存在内阻和活性物质转移, 部分能量在充电过程中转化为热能<sup>[13]</sup>。其中, 部分热能由于电池的热容量而储存在电池内部, 部分热能由于与外界环境存在温度梯度而消散到环境中, 冷却液的循环也会在加入液体冷却装置后带走部分热量。描述这一过程的热平衡方程<sup>[14-15]</sup>为

$$c_p m \frac{dT}{dt} = Q - h_s A (T - T_f) \pm Q_w \quad (1)$$

式中:  $c_p$  为电池的平均比热容;  $m$  为电池质量;

$T$  为电池温度;  $t$  为时间;  $Q$  为电池总生热量;  $h_s$  为电池表面对流换热系数;  $A$  为电池表面换热面积;  $T_f$  为环境温度;  $Q_w$  为电池的内热源。

根据锂电池的工作原理可知, 电池的充放电其实是一种电化学反应过程, 锂离子不停的在正负极之间进行嵌入和脱离, 发生一系列化学反应同时伴随着热量的产生。Bernardi 等<sup>[16]</sup>对总生热量公式进行了推导简化, 提出了电池工作状态下的生热速率模型公式, 并被广泛应用在电池充放电的温度特性模拟中, 电池总生热量  $Q$  计算公式为

$$Q = I \left[ (U_{ocv} - U) \pm T \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \right] \quad (2)$$

式中:  $I$  为电流;  $U_{ocv}$  为锂电池开路电压;  $U$  为锂电池端电压;  $T$  为锂电池温度; “+”、“-”分别代表充电、放电;  $\frac{\partial U_{ocv}}{\partial T}$  为熵系数;  $V$  为锂电池体积。

由于电池电阻,  $U_{ocv}$  和  $U$  之间的差异可以用  $IR$  代替。为了简化计算, 可以写成:

$$Q = I^2 R \pm IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (3)$$

在式(2)中, 电池的内阻  $R$  是一个未知量, 因此必须通过实验来测量。采用混合脉冲功率表征 (HPPC) 电池内阻测试方法测量电池在不同温度下的内阻。测得的内阻  $R$  与电池的电量 (SOC) 之间的关系如图 2 所示。

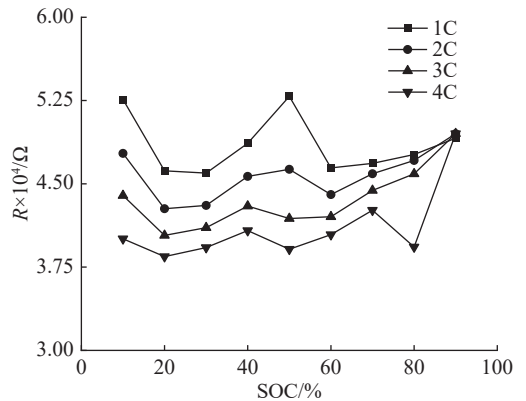


图 2 电池内阻曲线

Fig.2 Curves of the batteries internal resistance

动力电池组快充研究的过程中,  $U_{ocv}$ -SOC (开路电压-荷电状态) 的关系曲线不仅能反映电池开路电压的特性, 而且也是辨识电池其它重要参数的关键。电池的开路电压又称静置后的电动势, 在保持温度一定的情况下, 可通过对电池长时间

的静置, 测算出电池的  $U_{ocv}$  与 SOC 之间的曲线关系, 如图 3 所示。

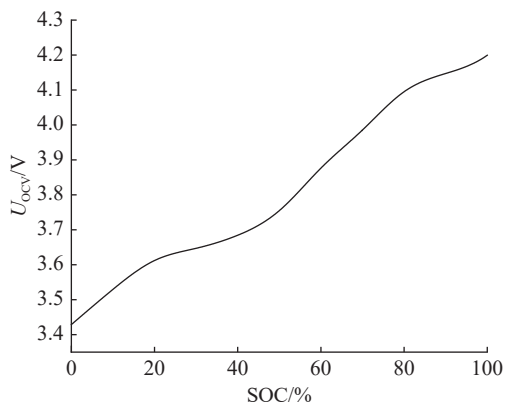


图 3 充电过程  $U_{ocv}$ -SOC 关系曲线

Fig.3 The u-s relationship curve during the charging process

动力电池的传热方式是将冷却板布置在底部, 锂电池充放电时通过热传导将热量传递到冷板, 然后冷却液在冷板内部通道中通过对流热交换带走热量。计算公式为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为电池平均密度;  $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向的导热系数。

满足边界条件

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_f) \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为电池的导热系数;  $n$  为垂直于边界表面的方向;  $h$  为对流换热系数。

## 2.2 锂电池热物性参数

密度不随质量和体积的变化而发生变化, 其只随物态温度和压强的变化而变化。锂电池的密度计算公式为

$$\rho = \frac{\sum_i \rho_i V_i}{\sum_i V_i} \quad (6)$$

式中:  $\rho_i$  为电池内部材料密度;  $V_i$  为电池内部材料体积。

锂电池内部由多种材料组成, 因此各种类电池的比热容也是存在一定的差异, 同时电池的比热容与电池的 SOC 及环境温度等有关, 采用质量加权平均的计算公式对电池比热容进行理论计算, 具体计算公式为

$$c_p = \frac{\sum_i \rho_i C_i V_i}{\rho \sum_i V_i} \quad (7)$$

式中,  $C_i$  为电池内部各材料比热容。

热传导率是衡量材料直接传导热量的能力。由于锂电池内部是层叠结构, 并且各层所用材料的热物性参数不同, 故其导热系数在长宽高方向上具有各向异性的特征。Chen 等<sup>[17]</sup> 根据传热学中热阻的串并联原理, 对锂离子电池各方向导热系数进行了加权平均计算。

$$\lambda_x = \lambda_y = \frac{\sum_i \lambda_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (8)$$

$$\lambda_z = \frac{\sum_i \lambda_i L_i}{\sum_i L_i / \lambda_i} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_i$  为电池内部各层导热系数;  $A_i$  为各层并联热阻的截面积;  $L_i$  为各层串联热阻的层厚。

## 2.3 模型验证

由于锂离子电池内部结构复杂, 其电极, 电解液、隔膜等材料性能不一, 影响电池的热特性, 因此提出以下假设来简化计算模型: 锂离子电池内部材料均匀分布, 而且材料的密度、导热率和比热容不受温度和 SOC 影响; 忽略电池内部电解液的对流换热, 电池内部只存在导热; 电池内部电流密度均匀一致; 忽略电池的辐射换热。

为了验证电池热模型的准确性, 根据文献 [18] 验证实际电池的自然散热实验。电池的材料密度为  $2720 \text{ kg/m}^3$ , 比热容为  $1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ , 导热系数为  $\lambda_x=1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、 $\lambda_y=1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、 $\lambda_z=29.8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , 对流传热系数取  $5 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , 单节电池的质量为  $45 \text{ g}$ , 初始温度为  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 电池的初始 SOC 为 100。在  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  恒定外部温度下分析电池在 0.5, 1, 2, 3 C 放电倍率下的温升。

如图 4 所示, 计算结果与实验数据基本一

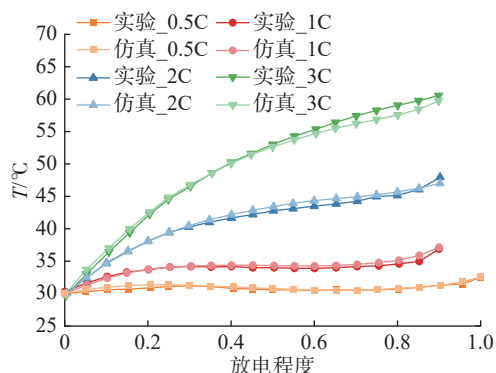


图 4 不同放电速率下测得温度变化曲线

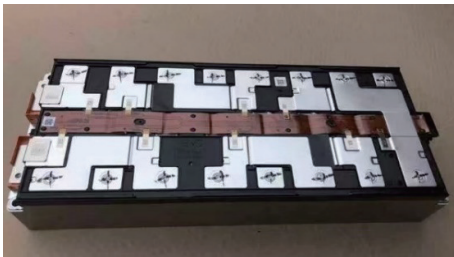
Fig.4 The temperature variation curves measured at different discharge rates

致。其中, 0.5 C 放电倍率下最大误差为 1.77%, 1C 放电倍率时最大误差为 2.64%, 2 C 放电倍率时最大误差为 1.95%, 3 C 放电倍率下最大误差为 2.54%, 均符合工况要求。因此, 所建立的热模型可以应用于电池的性能分析和预测研究。

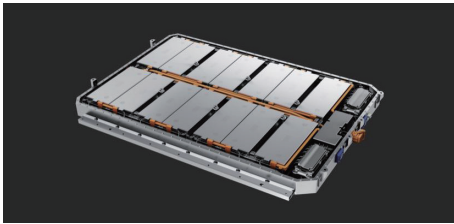
### 3 电池热管理系统仿真模型

#### 3.1 整车电池包物理参数

以三元锂离子 NCM 方壳电芯为例, 单体电芯尺寸: 长 220 mm、宽 66 mm、高 102 mm, 整车动力电池有 96 个电芯, 每 8 个电芯串联组成一个标准 VDA590 模组, 模组尺寸: 长 528 mm、宽 220 mm、高 102 mm, 共 12 个模组以两排并列的方式组成, 如图 5 所示。整车电池包参数如表 1 所示。



(a) VDA 标准 590 模组



(b) 模组布置结构图

图 5 整车动力电池示意图

Fig.5 Schematic diagram of the power battery in the vehicle

#### 3.2 整车电池包热管理

纯电动汽车液冷式电池热管理系统中, 液冷板是电池的性能和安全保障的关键部分, 可通过其流道内的冷却液流动来平衡电池组工作温度。本文选择管壁薄重量轻的吹胀式铝材液冷板, 以某品牌的电动汽车液冷板布置为例, 将液冷板布置在各模组底部, 在宽 220 mm 的模组底部设置壁厚 1 mm, 进口流道截面为 180 mm×3 mm 且与模组等长的 528 mm 液冷板, 如图 6 所示。

#### 3.3 充电策略

充电策略选取多级恒流充电法, 通过查询类似阶梯状的电流 MAP 表, 确定其电流输入值, 每

表 1 整车电池包参数表

Tab.1 The parameters of the vehicle battery pack

名称	参数
单体电芯	三元锂离子
电芯形状	方壳
电芯尺寸/mm <sup>3</sup>	220×66×102(长·宽·高)
正极材料	NCM(层状)
负极材料	石墨
电解质	六氟磷酸锂
隔离膜材料	聚合物
电解液溶液	碳酸乙烯酯(EC)
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2000
比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1 138
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\lambda_x=19, \lambda_y=9.8, \lambda_z=5.9$
电芯容量/Ah	155
标称电压/V	3.7
充电终止电压/V	4.2
工作温度/°C	-30~60
模组电压/V	29.6(1×8串联)
电池包电压/V	355(2×6串联)
总容量/kWh	55

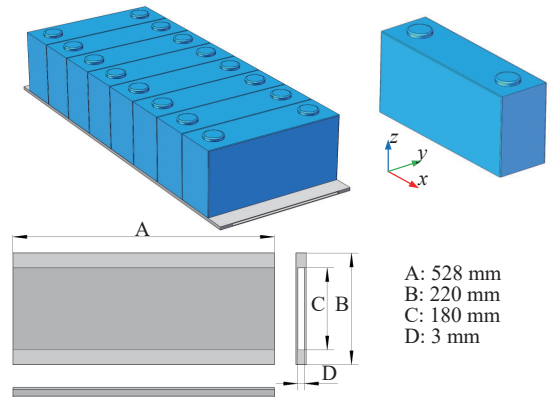


图 6 液冷板流道模型

Fig.6 The model of flow channel in the liquid cooling plate

个阶段的电流值对应一个截止电压。此控制策略中, 电流 MAP 表对电池的性能进行了最大化的利用。电池在充电过程中, 电池的热管理系统通过检测电池自身温度  $T$  和电量 SOC, 调取充电电流 MAP 图, 辨别各阶段区间充电倍率, 给予电池最大能力的充电电流并反馈电压值, 从而实时监测并计算电池的产热功率, 充电电流 MAP 图如图 7 所示。

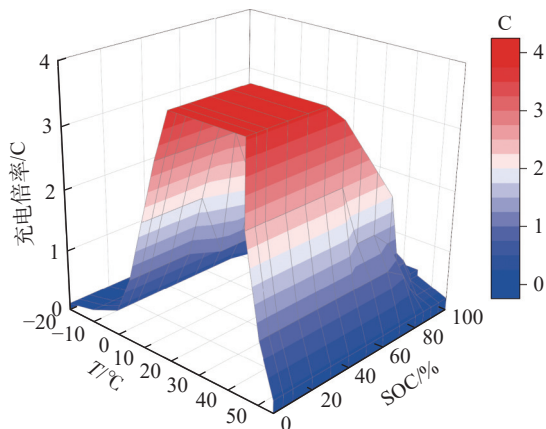


图7 充电电流 MAP 图

Fig.7 Charging current MAP graph

### 3.4 仿真模型的建立

以单模组为例在 AMESim 软件中建立动力电池电热耦合模型, 如图 8 所示。其中充电桩式与车

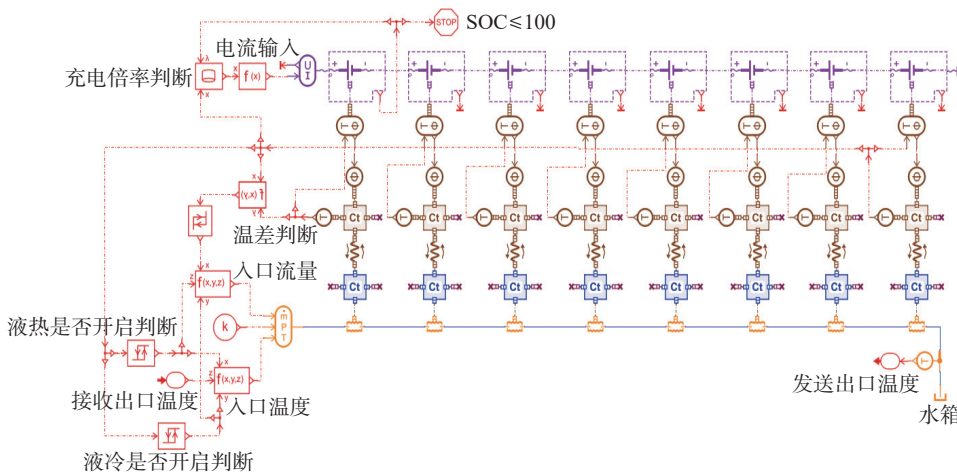


图8 模组电热模型耦合设计

Fig.8 Coupling design of electric heating model in the module

## 4.1 动力电池充电时温升与倍率关系

### 4.1.1 低温工况

图 9 为电池在低温工况下充电时的温升与倍率关系曲线。在  $-20, -10, 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  3 个不同低温工况下, 通过两类热管理系统的预热措施, 动力电池温度逐步升高。充电桩式热管理系统相对于车载式预热效果更好, 使得动力电池的温升速率更快, 有利于更快地进入高倍率充电状态 ( $3.8\text{ C}$ )。随着环境温度的降低, 充电桩式预热效果更为明显, 在  $-20, -10, 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  工况下, 预热时间分别缩短了 45.75%, 40.14% 和 33.71% 以达到适宜温度 ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 并进入高倍率充电状态。随着持续的高倍率充电, 动力电池内部产生大量热量, 导致电池温度

载式电池热管理系统对动力电池充电时的本质区别在于冷却液的入口温度。车载式中动力电池冷却液温度变化是循序渐进的, 为此动力电池温度达到高倍率充电的时间将会较长, 而充电桩式则会在水箱中预存  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  的预热水或  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冷却水, 以待直接通入动力电池液冷板中进行热交换。在动力电池热管理系统中, 控制模块可通过检测各区域的温度数值作为是否通入冷却液的判断依据。

## 4 热管理系统仿真及结果分析

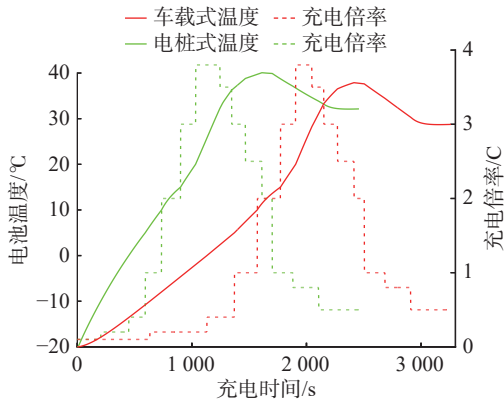
依据上述建立的动力电池热管理模型, 针对国内南北方冬夏季温度差别较大的特性, 设定  $-20, -10, 0, 20, 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  5 种不同工况, 对充电桩式与车载式两种电池热管理系统在上述工况下快速充电的热特性和充电时长进行仿真分析。

升高。电池管理系统会相应降低充电倍率, 并提供冷却措施以确保电池温度安全。充电完成后, 动力电池的整体温度将维持在约  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

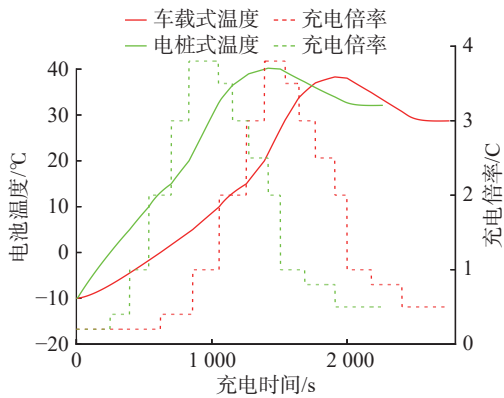
### 4.1.2 常温及高温工况

图 10 为电池在常温工况下充电时的温升与倍率关系曲线。在适宜温度  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  工况下, 初始低电量的动力电池直接进入  $3.8\text{ C}$  高倍率充电状态, 其温升主要由充电时自生热引起, 且两系统的变化趋势一致。随着电池温度的持续升高, 电池管理系统将降低充电倍率以减小产生的热量, 并发出冷却指令对电池进行冷却。两种热管理系统均能将动力电池最高温度控制在  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。

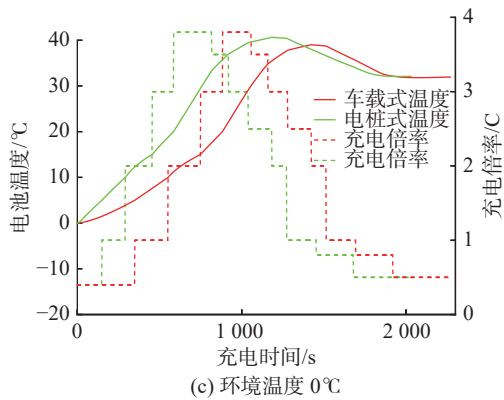
图 11 为电池在高温工况下充电时的温升与倍



(a) 环境温度 -20°C



(b) 环境温度 -10°C



(c) 环境温度 0°C

图 9 低温工况下电池充电温升与倍率关系

Fig.9 The relationship between battery temperature and rate under low-temperature conditions

率关系曲线。在高温 40 °C 工况下, 低电量动力电池初始阶段以 3.8 C 的高倍率充电, 但很快进入阶梯式降倍率阶段。这是因为高温和高倍率充电会迅速导致电池温度达到 45 °C 阈值, 从而降低充电倍率以减小内部自生热量, 并开启热管理系统的冷却措施。在电桩式热管理系统下, 动力电池最高温度达到 46 °C, 而车载式则为 49.5 °C。电桩式热管理系统能够较快地将动力电池冷却至 45 °C 以下, 使得充电倍率在下降至 1.5 C 后能较

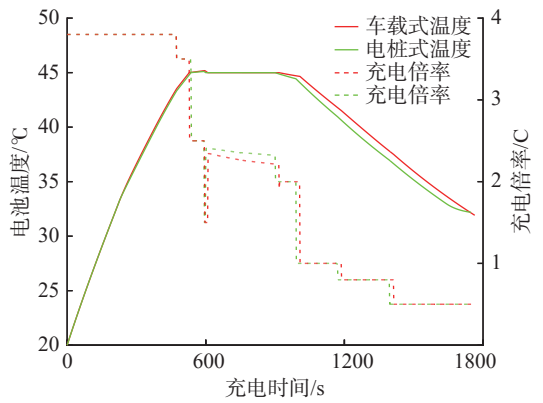


图 10 常温工况下电池充电温升与倍率关系

Fig.10 The relationship between battery temperature and rate under normal temperature conditions

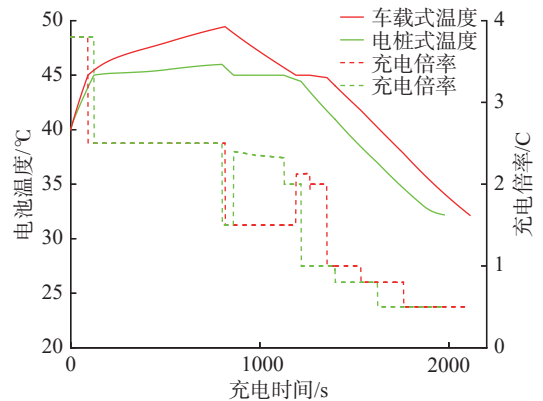


图 11 高温工况下电池充电温升与倍率关系

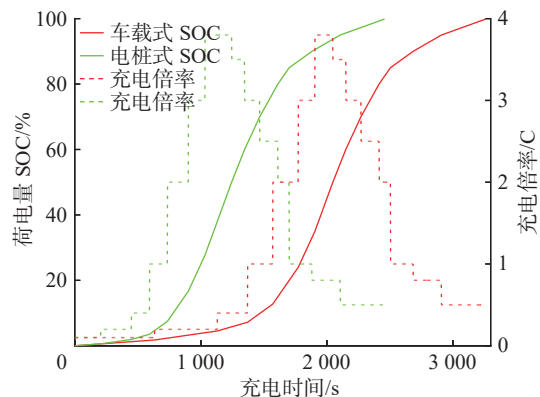
Fig.11 The relationship between battery temperature and rate under high-temperature conditions

快地再次上升至 2.3 C。而车载式热管理由于冷却响应较慢, 动力电池温度存在较长时间的高温状态, 导致充电倍率在下降至 1.5 C 后维持直至电池温度降低。最终, 随着充电的持续, 电池充满电量, 充电倍率呈阶梯式下降趋势, 电池以涓流充电形式充满, 在动力电池低倍率充电自生热量不高的同时, 开启的冷却管理系统降低动力电池温度, 并稳定在 33 °C 左右的安全范围内。总体而言, 电桩式热管理系统的冷却效果较优, 动力电池的降温更为明显。

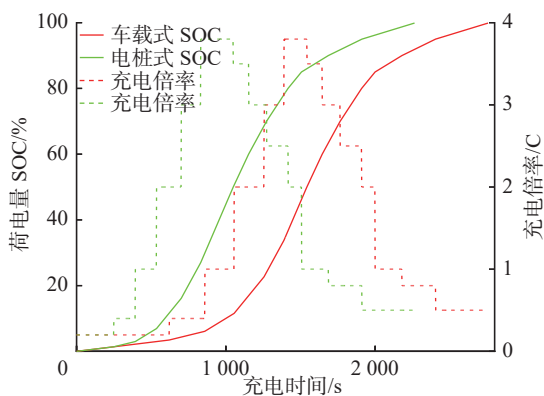
### 4.2 动力电池充电时长对比

#### 4.2.1 低温工况

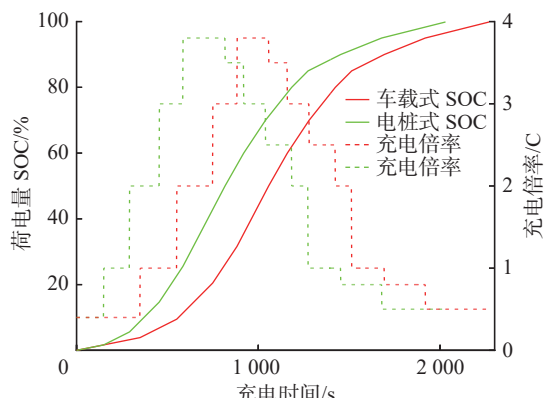
图 12 为低温工况时动力电池在两种热管理系统下充电过程电量和充电倍率随时间的变化曲线。由于电桩式可为其持续提供 40 °C 的预热水, 相对于车载式具有预热响应快和预热效果明显的优势。因此动力电池在电桩式热管理系统下充电, 其进入高倍率充电状态明显快于车载式, 可



(a) -20°C 充电时长对比



(b) -10°C 充电时长对比



(c) 0°C 充电时长对比

图 12 低温工况下充电时长对比曲线

Fig.12 Comparison curves of charging duration under low-temperature conditions

分别为动力电池在 0, -10, -20 °C 温度下节约 4.0, 8.2, 13.4 min 的充电时长, 即缩短 10.6%, 17.9%, 24.6% 的充电时长。

### 4.2.2 常温及高温工况

图 13 为常温工况下动力电池充电时电量和充电倍率随时间的变化曲线图。在适宜温度 20 °C 工况下, 动力电池可以直接进入 3.8 C 的高倍率充电状态, 因此电池电量上升迅速。随着电池内部自生热的温度升高以及电量接近满载的限制, 动力

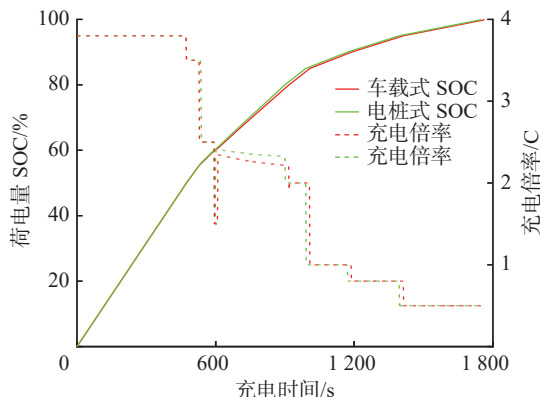


图 13 常温工况下充电速度对比曲线

Fig.13 Comparison curves of charging duration under normal temperature conditions

电池的充电倍率逐渐减小, 最终以涓流方式完成充电。在 20 °C 的适宜温度下, 两种热管理系统下动力电池充电时长差异不大, 仅相差 0.4 min。

图 14 为高温工况下动力电池充电时电量和充电倍率随时间的变化曲线图。在高温 40 °C 工况下, 动力电池在极短时间内进行高倍率充电, 高温和高倍率的充电使得动力电池温度迅速上升。为确保电池温度安全性, 降低充电倍率并提供冷却措施是必要的。在高温工况下, 动力电池的充电倍率存在阶跃上升的情况。这是因为充电倍率受电池温度和电量两者的影响。当电池温度过高时, 即使电量低, 热管理系统也会限制充电倍率以确保电池温度安全。相反, 当温度下降到适宜温度时, 充电倍率会上升。由于电桩式冷却效果优于车载式, 所以其充电倍率的阶跃上升时间早于车载式且维持的时间更长, 因此电桩式热管理系统下充电可为动力电池节约 2.1 min 的充电时长, 即相对前者缩短了 6.0% 的充电时长。

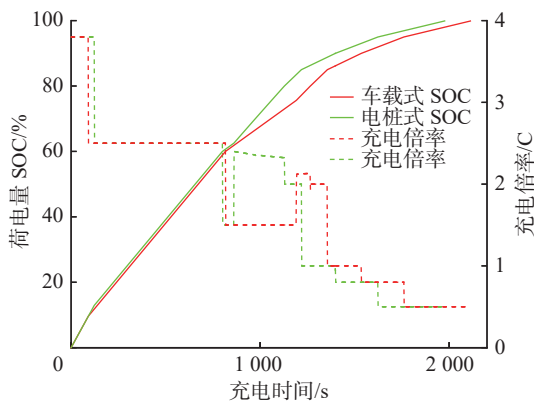


图 14 高温工况下充电速度对比曲线

Fig.14 Comparison curves of charging duration under high-temperature conditions



### 4.2.3 各阶段充电时长对比

通过上述对动力电池在不同工况下的充电状况对比分析,汇总两种热管理系统在 $-20$ 、 $-10$ 、 $0$ 、 $20$ 和 $40$ ℃5个不同工况下,对动力电池大功率直流充电时长的对比数据如表2所示。

表2 两类热泵技术热管理系统下动力电池充电时长对比

Tab.2 Comparison of charging duration under two types of thermal management systems

工况		不同SOC的充电时间/min				时间缩短 (%)
		0~20%	20%~80%	80%~100%	0~100%	
$-20$ ℃	车载式	28.4	11.8	14.2	54.4	24.6
	电桩式	15.7	11.2	14.1	41.0	
$-10$ ℃	车载式	20.1	11.7	14.1	45.9	17.9
	电桩式	12.4	11.2	14.1	37.7	
$0$ ℃	车载式	12.3	11.4	14.1	37.8	10.6
	电桩式	8.7	11.0	14.1	33.8	
$20$ ℃	车载式	3.2	12.2	14.0	29.4	1.4
	电桩式	3.2	11.8	14.0	29.0	
$40$ ℃	车载式	4.0	17.1	14.0	35.1	6.0
	电桩式	3.8	15.0	14.2	33.0	

由表2可知,低温 $0$ ℃工况时,动力电池在车载式热管理系统下充满电需要 $37.8$  min,而电桩式仅需要 $33.8$  min,相对于车载式可缩短充电时长 $10.6\%$ ;随着环境温度的下降,电桩式热管理系统对动力电池充电时长的优势越明显,在环境温度 $-10$ ℃和 $-20$ ℃两个低温工况下,电桩式热管理系统可分别为其缩短 $17.9\%$ 和 $24.6\%$ 的充电时长。当在适宜温度 $20$ ℃工况下,动力电池充电阶段无需预热措施,两类电池热管理系统下充电时长趋于一致仅有 $1.4\%$ 的差距。在高温 $40$ ℃工况下充电时,因电桩式热管理系统具有较好的冷却效果,故相对于车载式可减少 $6\%$ 的充电时长。

从动力电池各阶段充电时长可知,电桩式热管理系统相较于车载式缩短动力电池的充电时间主要集中在电量 $0\sim 20\%$ 阶段,主要原因是电桩式热管理系统中,动力电池液冷板进水温度适宜且响应时间快,因而其预热或冷却效果好于车载式热管理系统,故可在动力电池充电的起始阶段为其缩短充电时长。

## 5 结论

本文为提高动力电池在大功率直流充电状况

下的充电效率,设计了一种电桩式热泵技术的电池热管理系统,通过分析该电池热管理系统大功率直流充电时的温度特性和充电时长问题得出如下结论:

a. 在低温工况下,动力电池充电时的最高温度都在 $40$ ℃以下。电桩式相对于车载式热管理系统预热效果明显,且环境温度越低,电桩式对动力电池的预热效果越明显,可分别为动力电池在 $0$ 、 $-10$ 和 $-20$ ℃温度下缩短 $10.6\%$ 、 $17.9\%$ 和 $24.6\%$ 的充电时长。

b. 在常温工况下较适宜锂电池充电,两种热管理系统均能将动力电池最高温度控制在 $45$ ℃以下。电桩式热管理系统可为动力电池在 $20$ ℃温度下节约 $1.4\%$ 的充电时间。

c. 在高温工况下,电桩式热管理系统可以将动力电池最高温度控制在 $46$ ℃以下,而车载式则达到了 $49.5$ ℃,电桩式热管理系统的冷却效果较优,动力电池的温降明显,可为动力电池在 $40$ ℃温度下缩短 $6\%$ 的充电时长。

d. 通过对比动力电池各阶段充电时长,电桩式热管理系统相较于车载式热管理系统,缩短动力电池的充电时间主要集中在电量 $0\sim 20\%$ 阶段。

### 参考文献:

- [1] 周嫣. 三元锂电池在新能源汽车上的设计与应用[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2020, 19(4): 4-9.
- [2] 张长煦, 倪子潇. 车用三元锂电池与磷酸铁锂电池对比分析[J]. 汽车实用技术, 2019, (23): 28-29,65.
- [3] 刘伟, 吴海桑, 何志超, 等. 一种均衡考虑锂电池内部能量损耗和充电速度的多段恒流充电方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 112-120.
- [4] KHAN A B, CHOI W. Optimal charge pattern for the high-performance multistage constant current charge method for the li-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1132-1140.
- [5] 叶剑晓, 于春梅, 梁奇. 电动汽车用锂电池快速充电技术研究[J]. 电气传动, 2018, 48(6): 93-96.
- [6] LI Y J, LI K N, XIE Y, et al. Optimized charging of lithium-ion battery for electric vehicles: adaptive multistage constant current-constant voltage charging strategy[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 2688-2699.
- [7] WANG Y J, ZHOU C J, CHEN Z H. Optimization of battery charging strategy based on nonlinear model predictive control[J]. Energy, 2022, 241: 122877.

(下转第 658 页)

- Measurement Science and Technology, 2019, 30(12): 125905.
- [13] 朱文博, 夏林聪, 陈龙, 等. 基于改进YOLOv5的O型密封圈缺陷检测方法[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(5): 440–448.
- [14] HUANG Z H, XIAO H, ZHANG R Y, et al. Multi-scale feature pair based R-CNN method for defect detection[C]//2019 International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). Atlanta: IEEE, 2019: 46–51.
- [15] DING R W, DAI L H, LI G P, et al. TDD-net: A tiny defect detection network for printed circuit boards[J]. CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2019, 4(2): 110–116.
- [16] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision. Munich: Springer, 2018: 3–19.
- [17] DAI J F, QI H Z, XIONG Y W, et al. Deformable convolutional networks[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice: IEEE, 2017: 764–773.
- [18] HE Y, SONG K C, MENG Q G, et al. An end-to-end steel surface defect detection approach via fusing multiple hierarchical features[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1493–1504.
- [19] GE Z, LIU S T, WANG F, et al. YOLOx: exceeding YOLO series in 2021[DB/OL]. [2022-04-05]. <http://arxiv.org/abs/2107.08430>.
- [20] DENG C F, WANG M M, LIU L, et al. Extended feature pyramid network for small object detection[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2022, 24: 1968–1979.

(编辑: 黄娟)

(上接第637页)

- [8] 蔡飞龙, 许思传, 常国峰. 纯电动汽车用锂离子电池热管理综述[J]. 电源技术, 2012, 36(9): 1410–1413.
- [9] HUO Y T, RAO Z H, LIU X J, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 387–395.
- [10] TANG A K, LI J M, LOU L S, et al. Optimization design and numerical study on water cooling structure for power lithium battery pack[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113760.
- [11] SHANG Z Z, QI H Z, LIU X T, et al. Structural optimization of lithium-ion battery for improving thermal performance based on a liquid cooling system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 33–41.
- [12] NIETO N, DÍAZ L, GASTELURRUTIA J, et al. Novel thermal management system design methodology for power lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2014, 272: 291–302.
- [13] 杨莹莹, 魏学哲, 刘耀锋, 等. 车用锂离子电池交流加热研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(7): 901–908.
- [14] SHENG L, SU L, ZHANG H Y, et al. An improved calorimetric method for characterizations of the specific heat and the heat generation rate in a prismatic lithium ion battery cell[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 724–732.
- [15] SAW L H, SOMASUNDARAM K, YE Y, et al. Electro-thermal analysis of lithium iron phosphate battery for electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2014, 249: 231–238.
- [16] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5–12.
- [17] CHEN S C, WAN C C, WANG Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 140(1): 111–124.
- [18] 杨锋. 电动汽车用锂离子电池液冷散热仿真分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.

(编辑: 黄娟)