

耦合乘员舱空调的电池直冷热管理系统高温快充控制策略分析

冯燕燕^{1,2} 何煜³ 黄文姣⁴ 李义林²

(1. 重庆大学, 重庆 400044; 2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400023; 3. 亚普汽车部件股份有限公司, 扬州 225009; 4. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

【摘要】为分析耦合乘员舱空调的电池直冷热管理系统性能, 基于AMESim软件建立动力电池热管理系统模型, 比较典型液冷与直冷热管理系统在高温快充工况下的充电时长, 结果表明, 相同电池快充MAP条件下, 相较于液冷系统, 直冷系统充电时间缩短7.6%。进一步耦合乘员舱空调与电池热管理系统, 设计了以控制乘员舱温度和电芯最高温度为目标的热管理控制策略, 分析发现, 相比未耦合系统, 采用耦合系统时电池顶面最大温差增大2.9℃, 但充电时长缩短4.9%。

关键词: 动力电池 热管理 快充 直冷 系统耦合

中图分类号: TM912; TB61+1; U469.72 **文献标志码:** A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240119

Analysis of High Temperature Fast Charging Control Strategy for Battery Direct Cooling and Heating Management System Coupled with Passenger Cabin Air Conditioning

Feng Yanyan^{1,2}, He Yu³, Huang Wenjiao⁴, Li Yilin²

(1. Chongqing University, Chongqing 400044; 2. Chongqing Chang'an Automobile Co., Ltd., Chongqing 400023; 3. YAPP Automotive Parts Co., Ltd., Yangzhou 225009; 4. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122)

【Abstract】To analyze the performance of the battery direct cooling and heating management system coupled with passenger cabin air conditioning, a power battery thermal management system model is established based on AMESim software. The charging time of typical liquid cooling and direct cooling and heating management systems under high-temperature fast charging conditions is compared. The results show that under the same fast charging MAP, the charging time of the direct cooling system is shortened by 7.6% compared with the liquid cooling system. The passenger cabin air conditioning and battery thermal management system is further coupled, and a thermal management control strategy is designed with the goal of controlling the temperature of the passenger cabin and the maximum temperature of the battery cells. Results show that compared with the uncoupled system, the maximum temperature difference on the top of the battery increases by 2.9℃ when using the coupled system, but the charging time is shortened by 4.9%.

Key words: Power battery, Thermal management, Fast charging, Direct cooling, System coupling

【引用格式】冯燕燕, 何煜, 黄文姣, 等. 耦合乘员舱空调的电池直冷热管理系统高温快充控制策略分析[J]. 汽车工程师, 2024(11): 7-12.

FENG Y Y, HE Y, HUANG W J, et al. Analysis of High Temperature Fast Charging Control Strategy for Battery Direct Cooling and Heating Management System Coupled with Passenger Cabin Air Conditioning[J]. Automotive Engineer, 2024(11): 7-12.

1 前言

电池热管理系统以动力电池的温度控制为目标,目前以液冷系统为主^[1]。直冷系统使用冷媒作为介质进行直接换热,相比于液冷系统的间接换热,具有更高的换热效率、更轻的系统质量、更小的系统体积。随着电池能量密度的提高与快充技术的发展,直冷系统逐渐成为动力电池热管理领域的研究热点。

电池快充技术可在安全健康的前提下缩短充电时长,众多学者对其进行了研究。锂电池充电过程受到荷电状态(State of Charge, SOC)、健康状态(State of Health, SOH)、温度与充电电流等因素影响,且这些因素具有强耦合性^[2]。提高充电电流倍率可缩短充电时间,但电流倍率受到温度、充电量与SOC影响,温度越高,充电量越小,电池的SOC越低,可以接受的充电电流越大,反之则越小。为了在不影响电池寿命与安全的前提下缩短充电时长,众多学者改进了充电策略,主要可分为以下3种类型^[3]:改变充电电流波形或电压模型^[4-7],通过优化恒流恒压充电策略、台阶充电策略、脉冲充电策略等方法缩短充电时间;结合热模型与等效电路模型或电化学模型,给定最高温度的限制条件来限制最大充电电流,从而缩短充电时间^[8-9];通过先加热电池改变电芯化学反应速率,从而消除大倍率电流带来的影响^[10-11]。然而,以上研究以电池单体作为研究对象,未考虑电池包与电池热管理系统、乘员舱空调系统的耦合作用。

本文基于AMESim软件建立电池与热管理系统模型,分析典型液冷、直冷系统的电池高温快充过程,最后提出一种耦合乘员舱空调系统与电池直冷热管理系统的管理控制策略。

2 模型建立

2.1 电池模型

本文研究的锂电池参数如表1所示。

表1 锂电池主要参数

参数	取值
电池容量/A·h	163.5
额定电压/V	360.24
串并数	1P114S
密度/kg·m ⁻³	2 159
比热容/J·(kg·K) ⁻¹	965
导热系数/W·(kg·K) ⁻¹	X向3.7,Y向10.4,Z向7.2

在AMESim中使用等效电路模型建立电池一维模型,将电池简化为电阻、电容与电压源模块所形成的闭合电路。如图1所示,考虑电芯在竖直方向上的温度梯度,将单个电芯分成3个单元,每个单元占1/3体积,分别设置电阻、电容元件,使用信号复制器(Signal Duplicator)将单一信号复制给3个电芯单元。电池产热使用贝尔纳迪(Bernadi)方程^[12]计算,将获得的平均温度代入等效电路模型,从而得到电压随时间的变化数据。具体方程可参考文献[13]。

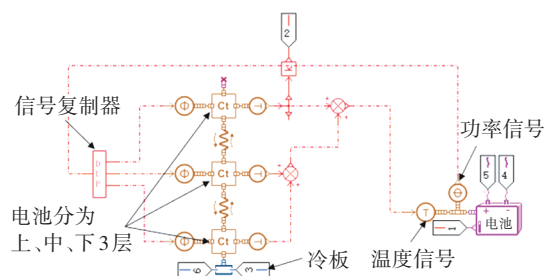


图1 电池模型

2.2 电池包模型

图2展示了直冷板流道与电芯的相对位置和流道结构。流道主要分为4个支路,采用并联设计,根据流道与电芯的相对位置,将电池包简化为如图3所示的模型。模型的输入变量为制冷剂压力、温度、流量和电池充电电流,使用节流孔模拟冷板支路流道的阻力,通过对标一维与三维仿真的流道制冷剂流量与电芯温度,调整模型流道阻力系数,图中 m 为冷媒质量流量, ρ 为冷媒密度, P 为冷媒压力, K 为输入值,为常数。

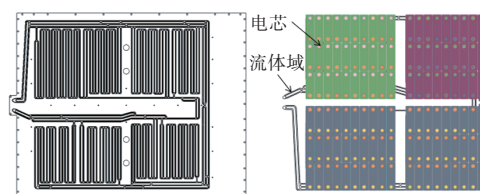


图2 直冷板结构

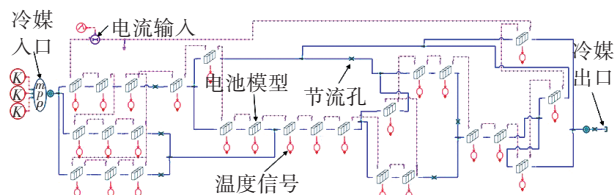


图3 电池包模型

2.3 耦合乘员舱空调的直冷系统模型

图4所示为耦合乘员舱空调的直冷系统模型,电池直冷板与乘员舱板式换热器并联,分别由2个电子膨胀阀控制。系统执行部件为压缩机、电子膨

胀阀和电子风扇,电池包为信号发出部件。

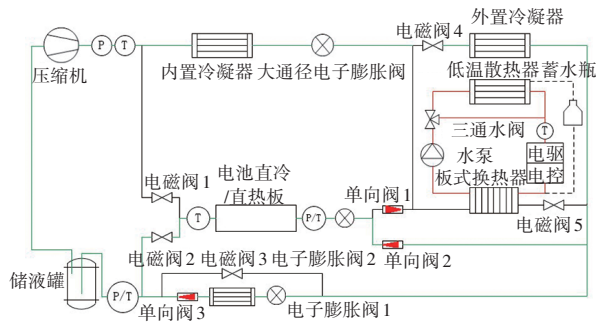


图4 耦合空调系统的直冷系统电池包热管理模型

2.4 边界条件

直冷系统的边界条件为耦合乘员舱空调系统后的典型工况,并非系统最大制冷能力,液冷系统的边界条件参考行业典型系统工况,如表2所示。

表2 边界条件

冷却方式	直冷	液冷
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	40	40
介质	R1234yf	50%体积分数的乙二醇水溶液
制冷剂流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.025	
冷却液流量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$		20
冷媒进口焓值/ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	268.06	
制冷剂、冷却液进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	21	25

电池充电MAP如图5所示,电池最大充电电流由电池温度与SOC决定,最大充电电流随SOC的增大而减小,随温度上升先增大后减小,允许的最大充电电流为245 A。建模时将MAP图转化为以温度和SOC为坐标轴的二维图,输入AMESim电池模型中,温度步长为 5°C ,SOC步长为10%,通过插值方法获得中间值。仿真过程中电池温度与SOC决定充电电流,从而影响电池产热速率。

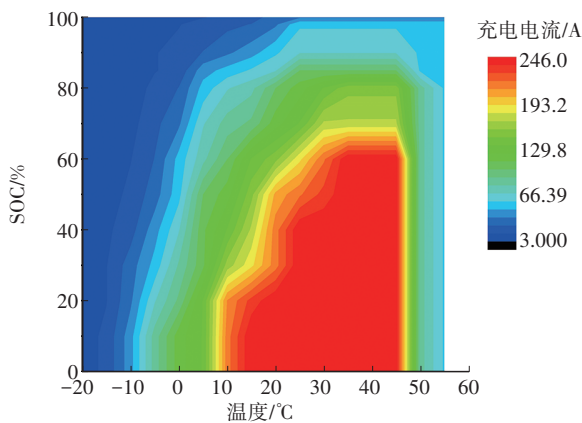


图5 电池快充MAP图

2.5 耦合控制策略

2.5.1 控制目标

在直冷电池热管理系统基础上耦合乘员舱空调系统,压缩机转速响应电芯顶部最高温度、最大温差与乘员舱温度,系统控制目标如表3所示。

表3 系统控制目标 $^{\circ}\text{C}$

策略项	目标值	策略项	目标值
冷板出口过热度	1	电芯顶部最大温差	≤ 7
冷板蒸发温度	21	乘员舱目标温度	22
电芯顶部最高温度	≤ 47		

2.5.2 控制策略

系统控制部件为压缩机和电子膨胀阀。电池目标温度采用查表方式控制,通过电芯顶面温差与顶面最高温度对响应制冷等级;在电池与乘员舱需同时制冷的情况下,采用耦合方式定义控制策略。

2.5.2.1 直冷板控制策略

电池制冷需求等级与电池温度的关系如表4所示。

表4 电池制冷需求等级

顶面最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	顶面温差/ $^{\circ}\text{C}$			
	< 7	$7 \sim 8$	$8 \sim 10$	≥ 10
≤ 35	6	4	2	2
$> 35 \sim 47$	7	7	7	7
> 47	8	8	8	8

表5所示为电池制冷需求等级与压缩机转速的对应关系,制冷需求等级越高,压缩机转速越大。

表5 电池制冷需求等级对应的压缩机转速

请求制冷等级	压缩机转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	请求制冷等级	压缩机转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
0	0	5	4 000
1	2 000	6	5 000
2	2 500	7	5 500
3	3 000	8	6 500
4	3 500		

2.5.2.2 乘员舱控制策略

乘员舱控制方式较为复杂,且非本文研究的重点,采用PID控制方式对目标温度进行控制,目标温度为 22°C ,温度小于目标温度时断开支路。

2.5.2.3 耦合控制策略

当乘员舱与电池同时存在制冷需求时,需要对两者进行控制策略的耦合,耦合策略制冷等级定义如表6所示,与表5电池制冷等级需求相比,耦合策

略制冷等级的数量减少,且制冷需求在3级及以上时具有更高的压缩机转速。

表6 耦合策略下电池制冷需求等级对应的压缩机转速

请求制冷等级	压缩机转速 /r·min ⁻¹	请求制冷等级	压缩机转速 /r·min ⁻¹
0	0	4	5 000
1	2 000	5	5 500
2	2 500	6	6 500
3	4 000		

2.5.2.4 电子膨胀阀控制策略

电子膨胀阀用可变节流孔元件建模,直冷板支路电子膨胀阀控制策略为:开度采用PID控制,目标冷板出口过热度为1℃。乘员舱蒸发器支路电子膨胀阀控制策略为:开度采用PID控制,比例系数 $P=2$ 、积分系数 $I=0.1$ 、微分系数 $D=0$ 。目标蒸发器出口过热度为3℃。

2.5.2.5 电子风扇控制策略

用软件元件简化建模,快充模式下保证风量最大,从而保证空气侧的换热能力处于最佳状态,风扇风量设为2 396 m³/h。

3 仿真结果与讨论

3.1 直冷与液冷系统对比

图6所示为直冷与液冷系统电芯顶面最高温度变化情况:直冷条件下,顶部最高温度出现在第1 102 s,为46.3℃,然后迅速降低;液冷条件下,顶面温度先上升后下降,温度下降速率较直冷系统小,顶面最高温度在第662~3 025 s时段内均大于46℃,最大值为46.5℃。液冷系统温度下降速率低于直冷系统,主要原因是:冷却液与制冷剂的进口温度分别为25℃和21℃,液冷系统的传热温差较直冷系统小;直冷系统通过冷媒汽化潜热降温,且控制冷板出口过热度为1℃,使冷媒温度始终接近蒸发温度,而液冷系统中随着冷却液吸收电池热量,温度不断升高,降低了传热温差。图7所示为直冷与液冷系统电芯顶面最大温差变化情况:直冷条件下,最大温差值出现在第1 993 s,为3.8℃,然后逐渐降低;液冷条件下,最大温差持续上升,结束时为4.3℃。在给定快充条件下,直冷系统在最大温差与最高温度控制方面均优于液冷系统。

图8所示为电池SOC变化情况,初始阶段,2个系统SOC上升速率相同,在第16 min,直冷系统充电

速率明显较液冷系统快,直冷和液冷系统高温快充充满时间分别为3 923 s、4 246 s,直冷系统比液冷系统时间缩短了7.6%。图9所示为充电电流随时间的变化情况,直冷条件下,电芯温度超过45℃后,迅速冷却到45℃以下,从而能以较高电流倍率继续充电过程,而液冷系统与直冷系统相比,换热温差更小、效率更低,无法快速降低电芯温度,电流倍率受限,增加了充电时长。

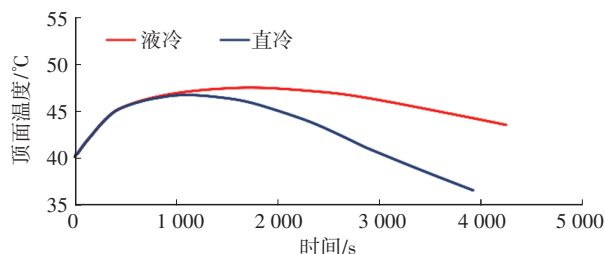


图6 直冷与液冷系统电芯顶面最高温度

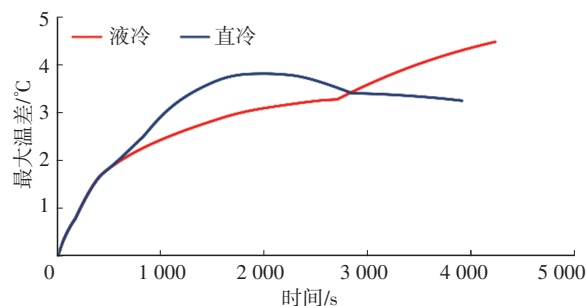


图7 直冷与液冷系统电芯顶面最大温差

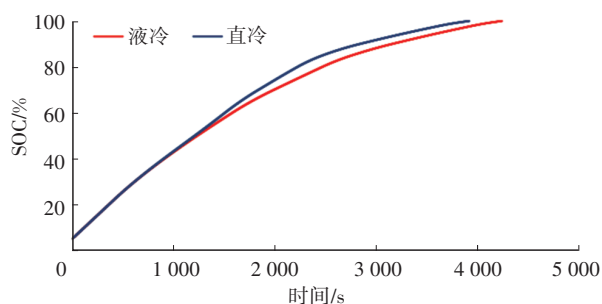


图8 直冷与液冷系统电池SOC

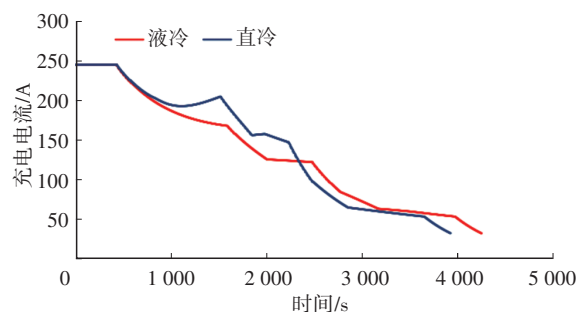


图9 直冷与液冷系统充电电流

3.2 耦合空调系统仿真结果

图10所示为耦合与未耦合工况下电芯顶面最

高温度变化情况,耦合乘员舱空调策略相比未耦合策略,由于制冷剂流量增加,电芯顶部温度更快下降。耦合策略控制下电芯顶部最高温度出现在第1 118 s,最高温度为45.3 °C,满足最高温度要求。图11所示为耦合与未耦合策略控制下电芯顶部最大温差变化情况:耦合策略控制初期,由于制冷剂流量较大,冷板局部区域温度迅速下降,电池温差增大,最大温差达到6.7 °C;随着冷板、电池水平方向的热传导,温差逐渐下降;第3 100 s后,由于最高温度低于35 °C,压缩机转速下降,制冷剂流量减小,导致温差上升。

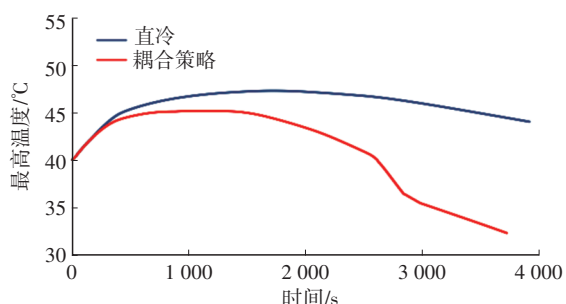


图10 耦合与未耦合策略控制下电芯顶部最高温度

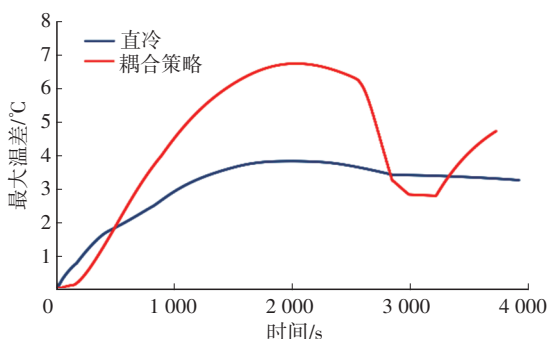


图11 耦合与未耦合策略控制下电芯顶部最大温差

图12所示为电池SOC随时间变化情况,采用耦合策略控制相比于采用未耦合策略控制时,充电时间缩短194 s。图13所示为充电电流随时间变化情况,充电电流差别主要在第500~1 500 s的时间段,耦合策略控制下电芯顶部温度达到45 °C后迅速下降,因此可以保持较大充电电流。

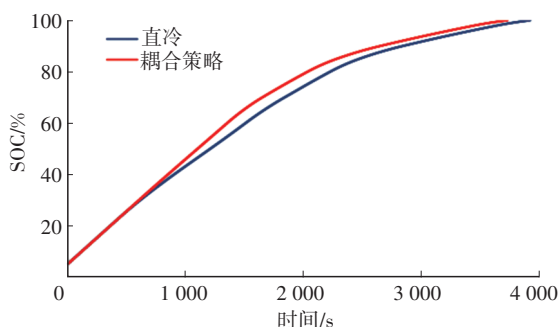


图12 耦合与未耦合策略控制下电池SOC变化情况

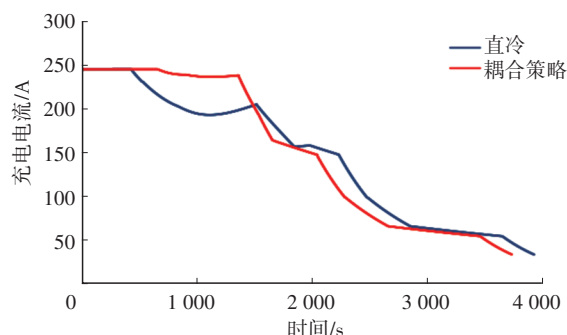


图13 耦合与未耦合策略控制下充电电流变化情况

4 结束语

本文基于AMESim软件建模,分析了直冷与液冷系统在电池高温快充工况下的性能表现,进一步耦合直冷系统与乘员舱空调系统,设计了以控制乘员舱温度和电芯最高温度为目标的热管理策略并分析系统性能,主要结论如下:

a. 40 °C高温快充工况下,直冷与液冷电池热管理系统均可满足电池最高温度与最大温差要求,且直冷系统相比液冷系统可缩短充电时长7.6%以上。

b. 耦合乘员舱空调系统的直冷热管理系统因制冷剂流量增加而具有更大的电池降温速率,充电时长可缩短4.9%。耦合带来的制冷剂流量波动导致电池最大温差从3.8 °C上升至6.7 °C。

参考文献

- [1] ZOU D Q, LIU X S, HE R J, et al. Preparation of a Novel Composite Phase Change Material (PCM) and Its Locally Enhanced Heat Transfer for Power Battery Module[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 1196-1202.
- [2] 张志刚, 张涛, 汤爱华, 等. 车用锂电池健康状态下快充方法研究综述[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 194-206.
ZHANG Z G, ZHANG T, TANG A H, et al. Methods of Fast Charging EVs Lithium-Ion Power Battery in Healthy State: A Research Review[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(2): 194-206.
- [3] 邓林旺, 冯天宇, 舒时伟, 等. 锂离子电池快充策略技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2879-2890.
DENG L W, FENG T Y, SHU S W, et al. Review of a Fast-Charging Strategy and Technology for Lithium-Ion Batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2879-2890.
- [4] CHEN L R, HSU R C, LIU C S. A Design of a Grey-Predicted Li-Ion Battery Charge System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3692-

- 3701.
- [5] SIKHA G, RAMADASS P, HARAN B S, et al. Comparison of the Capacity Fade of Sony US 18650 Cells Charged with Different Protocols[J]. Journal of Power Sources, 2003, 122(1): 67-76.
- [6] WANG S C, LIU Y H. A PSO-Based Fuzzy-Controlled Searching for the Optimal Charge Pattern of Li-Ion Batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2983-2993.
- [7] CHEN L R. A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Varied Technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 398-405.
- [8] INOA E, WANG J. PHEV Charging Strategies for Maximized Energy Saving[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(7): 2978-2986.
- [9] CHU Z Y, FENG X N, LU L G, et al. Non-Destructive Fast Charging Algorithm of Lithium-Ion Batteries Based on the Control-Oriented Electrochemical Model[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1240-1250.
- [10] YANG X G, LIU T, GAO Y, et al. Asymmetric Temperature Modulation for Extreme Fast Charging of Lithium-Ion Batteries[J]. Joule, 2019, 3(12): 3002-3019.
- [11] YANG X G, LIU T, WANG C Y, et al. Thermally Modulated Lithium Iron Phosphate Batteries for Mass-Market Electric Vehicles[J]. Nature Energy, 2021, 6(2): 176-185.
- [12] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A General Energy Balance for Battery Systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5.
- [13] 高帅, 王俊博, 朱佳慧, 等. 制冷剂相态变化对动力电池直冷系统温控性能的影响分析[J]. 制冷学报, 2023, 44(3): 58-66+80.
- GAO S, WANG J B, ZHU J H, et al. Influence of Refrigerant Phase Change on Temperature Control Performance of Direct Cooling System for Power Batteries[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(3): 58-66+80.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2024年5月8日。

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、Scopus数据库收录期刊、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心(EuroPub)数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
4. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
6. 请勿一稿多投;
7. 本刊使用网站投稿,请先登陆网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”,

网址: <http://qcjs.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》编辑部