

同行专家业内评价意见书编号：20250858211

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名：张逸飞

学号：22260081

申报工程师职称专业类别（领域）：能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年03月12日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

作为一名硕士研究生，在电子信息方面，我主要掌握了嵌入式开发工程师的基本知识理论和专业技术。在嵌入式软硬件开发领域，我系统掌握了扎实的理论基础与丰富的实践经验。在专业课程方面，我完成了《嵌入式系统设计》《计算机体系结构》《实时操作系统原理》等核心课程，深入理解微处理器架构以及嵌入式软件开发流程。在总线与接口技术方面，熟练运用I2C、SPI、UART、CAN等通信协议，并基于STM32、ARM Cortex-M系列平台完成多节点数据交互系统的设计与调试。

硬件开发层面，我具备完整的嵌入式硬件设计能力，熟练使用Altium Designer进行原理图设计与PCB布局，并掌握ADC/DAC、PWM、GPIO等外设驱动开发技术。在嵌入式操作系统领域，基于FreeRTOS完成过具有任务调度、内存管理功能的实时控制系统，同时具备Linux嵌入式开发经验，熟悉设备树配置、内核裁剪及字符设备驱动开发流程。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

针对基于新型制冷剂的电动汽车热管理系统原理图，搭建原理样机实验台架，并开发应用于台架的电控系统控制器，以实现原理样机的正常稳定运行并顺利完成实验。本人设计了基于R290的电动汽车间接换热式整车热管理系统，根据原理图购买各部件，人工搭建原理样机实验台架，实现原理方案的落地。相应地，针对实验台架，使用云途公司生产的车规级芯片YTM32B13作为主控MCU，在厂商SDK基础上开发驱动程序，移植freeRTOS操作系统，设计开发下位机程序与台架元器件进行通讯及控制。同时开发在PC端运行的上位机程序通过串口与下位机通讯，获取元件控制信息，实现操作员根据实验需求在PC上位机上控制实验台架的运行。完成电控系统下位机控制板及上位机软件的程序编写与测试、台架电控系统的接线工作。在项目实践期间，成功完成下位机和上位机软件的设计和编写，并完成了相应的控制、通讯测试工作，协助热管理研究团队完成了台架的搭建。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

在参与基于R290制冷剂的电动汽车间接换热式热管理系统开发项目中，我主导了实验台架电控系统的设计与调试工作。该项目旨在验证新型制冷剂在整车热管理场景下的性能，需通过嵌入式软硬件协同开发实现高精度控制与实时数据交互。整个开发流程从系统需求分析切入，首先结合热力学原理图梳理出实验台架的核心部件，包括压缩机、电子膨胀阀、换热器、多路温度/压力传感器及水泵等。硬件设计上选用云途YTM32B1L车规级MCU作为主控芯片，其ARM Cortex-M33内核与多总线接口特性可满足车规级可靠性要求。围绕该芯片搭建了包含信号调理、功率驱动、通信模块的硬件系统。在嵌入式软件开发中，基于厂商SDK完成了ADC多通道扫描、PWM波形生成及Modbus协议栈移植，并将FreeRTOS实时操作系统引入控制逻辑，通过任务优先级划分确保压缩机紧急停机保护的响应时间小于10ms。上位机端则采用C#开发了具备数据可视化、指令下发与历史存储功能的控制软件，通过RS485与下位机建立通信链路。系统联调阶段，通过硬件信号质量检测、协议一致性测试及闭环控制验证，最终实现台架在-20℃至60℃环境下的稳定运行。

在项目推进过程中，我多次运用跨学科知识解决复杂工程问题。例如在上下位机Modbus通信调试阶段，初期频繁出现指令无响应现象。通过逻辑分析仪抓取RS485信号发现波形存在振铃与上升沿延迟问题，进一步用示波器测量总线阻抗与终端电阻，发现3米长的通信线缆因

分布电容导致信号完整性恶化。为此，我重新设计硬件接口电路，在MAX3485收发器的A/B线间并联100pF电容以吸收高频噪声，并将总线长度缩短至1.5米；软件层面则优化Modbus帧间隔时间，将字符间超时从3.5倍延长至4倍，同时增加数据包CRC校验失败后的自动重发机制，最终使通信成功率从70%提升至99.9%。另一个典型问题是传感器数据大小端解析错误导致上位机显示异常。例如下位机发送的温度值25.6°C在上位机显示为6425.0°C，经逐字节分析发现原始数据采用小端模式传输，而上位机误按大端模式解析。为解决这一问题，我重构了数据传输协议，在下位机代码中调用__REV()函数强制统一为大端格式，并通过联合体(union)将浮点数据拆解为4字节传输，上位机端则依据IEEE754标准重组数据，同时将温度值放大10倍后以整型传输，既避免了浮点精度损失，又消除了端序歧义。

在硬件控制环节，

LIN总线通信故障的排查过程极具代表性。部分电子膨胀阀节点频繁离线，示波器测得LIN总线电压峰峰值仅8V，低于9-

18V的标准范围。通过分阶段断线检测，发现主节点驱动能力不足，当连接3个负载时总电流达45mA，逼近芯片极限值。我在主节点增加TI

TJA1021缓冲芯片提升驱动能力至100mA，并修改LIN控制寄存器将Break字段从13位扩展至22位以满足协议要求，同时优化调度表重试机制，使通信成功率从65%提升至99.8%。

该项目最终实现了热管理系统的精确控制，温度调节误差稳定在±0.3°C以内，压缩机保护响应时间缩短至20ms，上位机数据刷新率达到10Hz。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
《基于 R290 的电动汽车热管理系统制热性能研究》	核心期刊	2024年12月23日	《现代机械》	1/4	录用

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况

课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 87 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.5 年(要求1年及以上) 考核成绩： 88 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！	
申报人签名：张逸飞	

浙江大学研究生院
攻读硕士学位研究生成绩表

学号: 22260081	姓名: 张逸飞	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 能源动力	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 26.0学分		已获得: 29.0学分		入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:		授予学位:						
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	83	专业学位课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	85	公共学位课
2022-2023学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	92	公共学位课	2022-2023学年春季学期	数学建模		2.0	85	专业选修课
2022-2023学年冬季学期	车辆控制理论与技术		3.0	90	专业学位课	2022-2023学年春季学期	电气装备健康管理		2.0	94	专业选修课
2022-2023学年冬季学期	车辆信息传感与通信技术		3.0	92	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	工程伦理		2.0	92	公共学位课
2022-2023学年秋冬季学期	高阶工程认知实践		3.0	83	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课
2022-2023学年秋冬季学期	研究生论文写作指导		1.0	93	专业学位课	2022-2023学年夏季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	综合能源系统集成优化		2.0	85	跨专业课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	88	专业学位课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。
2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-03-20



论文录用通知

张逸飞, 温敏, 罗梓豪, 熊树生作者:

您于2024年11月向《现代机械》投稿, 编号: 2024—0331
题目: 基于R290的电动汽车热管理系统制热性能研究, 经有关专家审定后可以在本刊发表。此稿暂定于2025年第6期(或2026年第1期)刊用, 2025年12月28日(或2026年2月28日)出刊; 需交纳版面费1200元, 版面费按最下方说明支付给编辑部。

请注意核对以下事项:

1. 如须刊登, 请及时缴费并请在缴费时一定备注文章编号和第一作者姓名, 在投稿系统中将缴费有关信息和需要开发票的有关信息详细填写(因出具的发票不能进行更换, 请慎重填写确认无误)。
2. 请一定添加微信, 微信号: xdjx85951755。
3. 缴费方式: 银行汇款(包括手机银行): 名称: 贵州省机电研究设计院 账号: 133000156748 开户行: 中国银行贵阳市瑞金支行。

请仔细阅读并感谢您的合作。

联系电话: 0851-85951755

<http://xdjx.cbpt.cnki.net>

《现代机械》编辑部
2024年12月24日

编辑部

基于 R290 的电动汽车热管理系统制热性能研究

张逸飞¹², 温敏³, 罗梓豪¹, 熊树生^{12*}

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310012

2. 全省新能源车辆热管理重点实验室 浙江 龙泉 323700

3. 安徽江淮汽车集团股份有限公司 安徽 合肥 230601)

摘要: 针对法规逐步淘汰氢氟碳化物 (HFC) 制冷剂的现状, 本文基于新型冷媒 R290 设计了一套电动汽车热管理系统, 并通过实验和仿真的研究方法对该系统的制热性能进行了研究。研究表明, R290 在室外温度 0°C、-7°C、-20°C 时的制热量、COP、HVAC 出风温度表现均好于 R134a, 在 0°C 时 R290 系统的制热量能够达到 8152W, HVAC 出风温度能够达到 68.1°C。实验研究还表明了压缩机转速对系统制热性能的影响, 在满足系统的制热需求下应选择较低转速以获得更大的制热效率。并通过实验数据验证了仿真模型的准确性, 可以用于系统的系统的研究。最后通过 PID 算法调节压缩机转速控制 HVAC 出风温度稳定在 25°C, 在三个温度工况下均获得了良好的表现, 在-20°C 时仅需 332s 即可稳定在目标温度。研究证明该基于 R290 的电动汽车热管理系统具有较好的制热性能, 具有应用于实车的潜力。

关键词: R290 电动汽车 整车热管理 空调系统

中图分类号: U469.72 文献标识码: A

Research on Heating Performance of Electric Vehicle Thermal Management System Based on R290

Abstract: In response to the current situation of gradually phasing out hydrofluorocarbon (HFC) refrigerants in regulations, this paper designs an electric vehicle thermal management system based on the new refrigerant R290, and studies the heating performance of the system through experimental and simulation research methods. Research has shown that R290 performs better than R134a in terms of heating capacity, COP, and HVAC outlet temperature at outdoor temperatures of 0 °C, -7 °C, and -20 °C. At 0 °C, the heating capacity of R290 system can reach 8152W, and the HVAC outlet temperature can reach 68.1 °C. Experimental studies have also shown the influence of compressor speed on the heating performance of the system, and lower

speeds should be selected to achieve greater heating efficiency while meeting the heating requirements of the system. And the accuracy of the simulation model was verified through experimental data, which can be used for the study of the system. Finally, the PID algorithm was used to adjust the compressor speed and control the HVAC outlet temperature to stabilize at 25 °C. Good performance was achieved in all three temperature conditions, and it only took 332 seconds to stabilize at the target temperature at -20 °C. Research has shown that the R290 based electric vehicle thermal management system has good heating performance and has the potential to be applied to actual vehicles.

Keywords: R290, electric vehicle, vehicle thermal management, air conditioning system

0 引言

电动汽车整车热管理关注车辆热量的分配和控制,管理对象主要包括乘员舱热管理、电池热管理和驱动电机热管理,热管理系统对电动汽车的安全性能和续航里程产生深远影响。作为电动汽车的动力源,电池的最佳工作范围在 15°C至 35°C之间,超出此范围将导致效率降低和容量损失,缩短电池寿命,甚至引发电池起火或爆炸^{错误!未找到引用源。}。通过电池热管理系统维持适宜的温度范围,提高电池的性能和寿命,从而延长续航里程。由于不再有发动机废热,低温下电动汽车座舱热管理的方法与内燃机汽车有很大不同,目前大多数电动汽车都使用 PTC 加热,其发热效率较低,会造成最高 50% 以上的行驶里程衰减^{1.1.1 [1]}。

另一方面,我国生态环境部、国家发改委在 2021 年发布的《中国受控消耗臭氧层物质清单》文件中也指出,为履行《保护臭氧层维也纳公约》及相应修订案,到 2030 年实现除维修和特殊用途以外的 R22 等氢氟碳化物(HFCs)制冷剂完全淘汰^{1.1.1 [4]}。因此,研究人员正在进行当前常用制冷剂 R134a 的替代制冷剂应用研究。

R290 作为一种性能优越的自然工质,已经被广泛应用于家用电器(空调、冰箱等)^{1.1.1 [6]},但在电动汽车上的应用还处于起步阶段。赵东鹏等^{1.1.1 [7]}人提出了一种适用于 R290 的集成式热管理系统,使用热力学分析方法研究了其在夏季和冬季常见工况下的运行参数,验证了技术方案的可行性。黄广燕等^{1.1.1 [8]}人研究了带回热器的纯电动汽车用 R290 热泵空调系统的性能,实验证明系统在低温

环境下具有显著供热优势。

综合以上分析，本文基于 R290 冷媒设计了一套用于电动汽车的整车热管理系统，并通过台架实验和仿真分析与 R134a 冷媒对比研究二者制热性能。在此基础上搭建、完善了电动汽车整车热管理仿真模型，在特定工况下仿真分析了该基于 R290 冷媒的电动汽车整车热管理系统的有效性。

1 热管理系统及其实验台架

1.1 热管理系统架构及制热工作模式

本文的热管理系统核心使用热泵技术通过外部的电能输入驱动循环工质通过逆卡诺循环将低温热源的热量传递至高温热源。其中，热泵冷媒使用环保工质 R290（丙烷， $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$ ），其 GWP 等于 0，ODP 小于 20，在相同温度下具有比 R22 大一倍左右的汽化潜热，然而 R290 具有易燃特性。为解决 R290 的易燃问题，使用冷却液通过板式换热器与循环工质进行“液-液”的二次换热，将升温或降温后的冷却液用于系统中其他关键部件的制热或制冷。由于系统需要在低温工况下运行，冷却液使用具有防冻性能的 50:50 乙二醇水溶液。

如图 1 所示，系统由热泵工质循环回路、制热二次换热主干路、制冷二次换热主干路、电池系统热交换支路、HVAC 热交换支路、电机系统热交换支路、前端散热器热交换支路相配合，针对不同的车辆工况形成若干运行模式，以实现了对乘员舱、电池系统、电机系统进行制冷或制热，最终满足车辆热管理的需求。其中通过两个四通阀（图中的 4 号和 5 号四通阀）进行制热和制冷模式的切换。由于本文的研究内容是系统的制热性能，4 号四通阀调节至模式一，即 4-1 与 4-4 连通，4-2 与 4-3 连通，将 5 号三通阀调节至模式二，即 5-1 与 5-2 连通，5-3 与 5-4 连通。

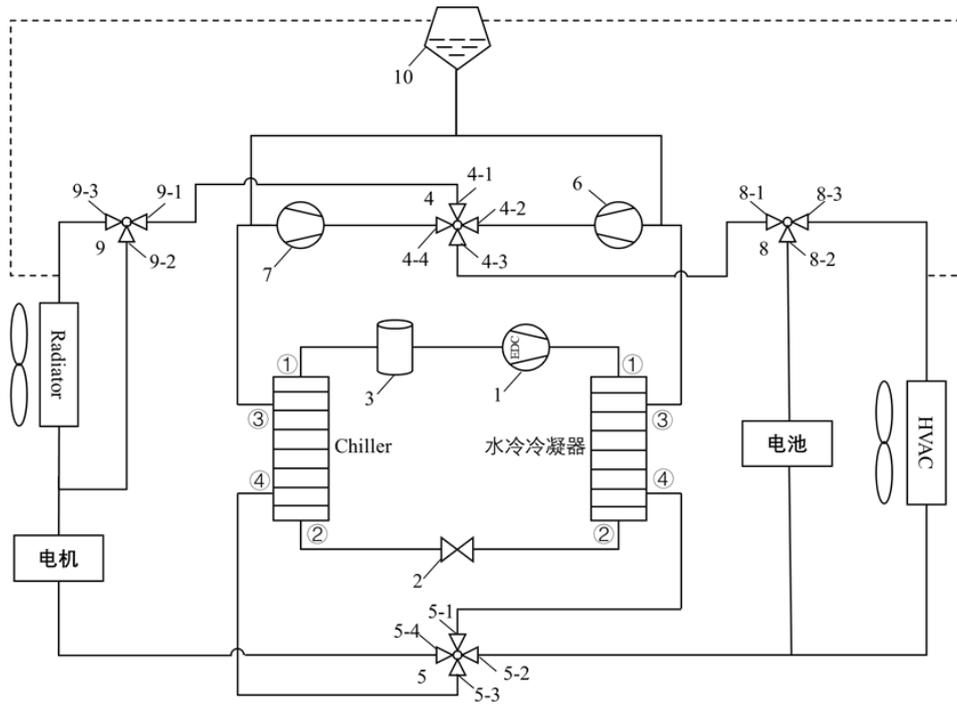


图 1 热管理系统架构示意图

如图 2 所示系统在制热状态下的 6 种运行工况。图 2-(a)和图 2-(b)表示乘员舱采暖、电池无需求、电机散热或无需求时的运行状态，此时 8 号三通阀为模式一（8-1 口与 8-3 口连通），电池回路被旁通，冷却液全部流经 HVAC 回路。通过将 9 号三通阀切换为模式一（9-1 口与 9-3 口连通）或模式二（9-1 口与 9-2 口连通）决定使用环境和电机双重热源或仅使用电机热源。图 2-(c)和图 2-(d)表示乘员舱无需求、电池加热、电机散热或无需求时的运行状态，此时 8 号三通阀为模式二（8-1 口与 8-2 口连通），HVAC 回路被旁通，冷却液全部流经电池回路。相同地，9 号三通阀的模式决定使用的热源。图 2-(e)和图 2-(f)表示乘员舱采暖、电池加热、电机散热或无需求时的运行状态，此时 8 号三通阀为模式三（比例开度），冷却液根据三通阀比例开度流经 HVAC 回路和电池回路，加热两条支路上的元件。相同地，9 号三通阀的模式决定使用的热源。

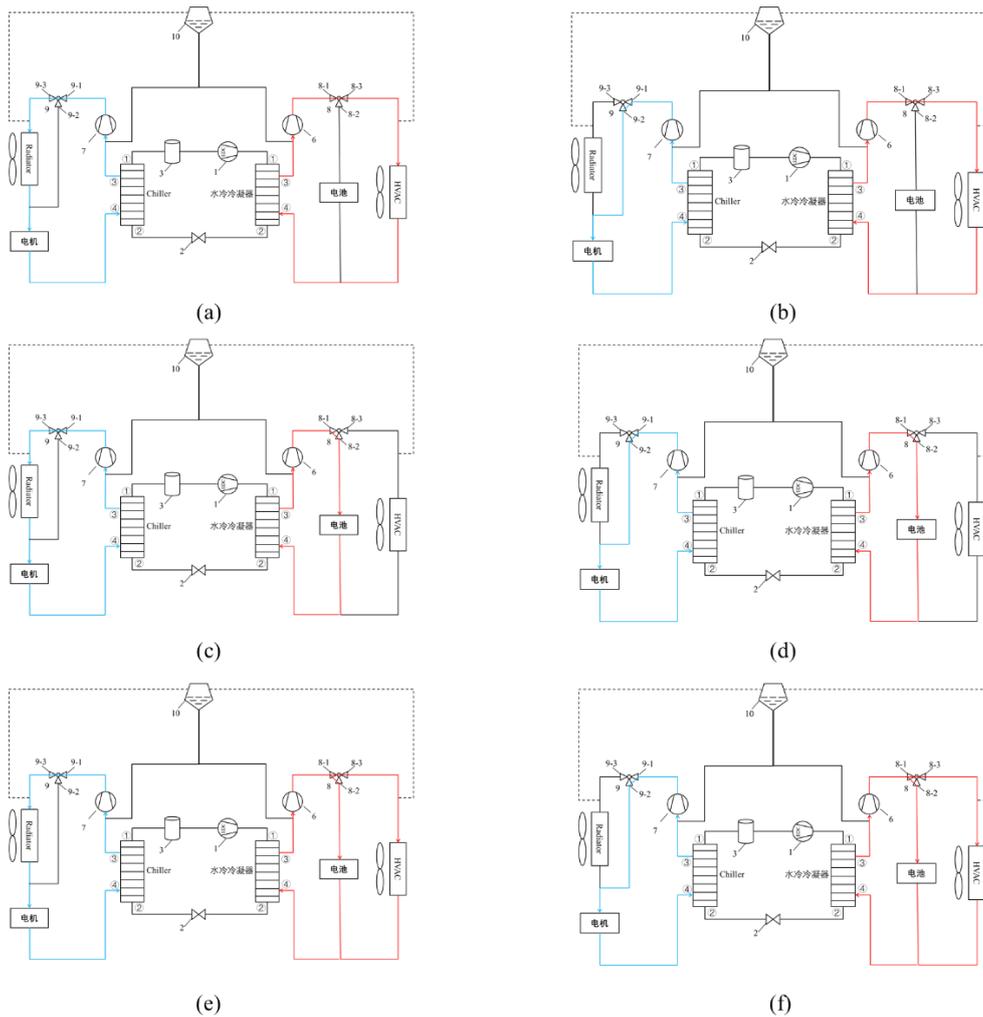


图 2 制热工况系统架构示意图

1.2 热管理实验台架及实验环境

为实现电源、信号、控制与部件的互相分离，热管理实验台架主要由四个部分组成：热管理部件系统台、电源箱、信号箱、控制器箱。热管理部件系统台如图 3 所示，由 38cc 排量压缩机、电子膨胀阀、Chiller、冷凝板式换热器、气液分离器等部件组成。在实验过程中需要进行数据采集，实验台架安装有温度压力传感器、空气温湿度传感器、流量传感器、风速传感器等。传感器连接到图 4 中的传感器接收信号箱，再通过串口传输至上位机进行显示和保存。

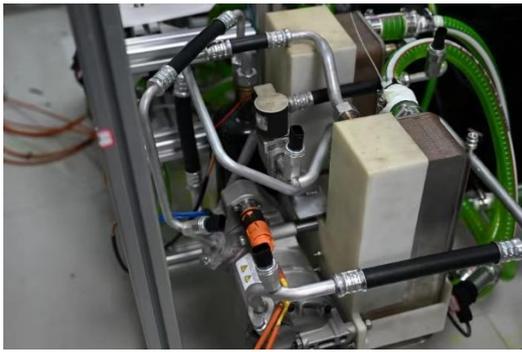


图 3 热管理部件系统台

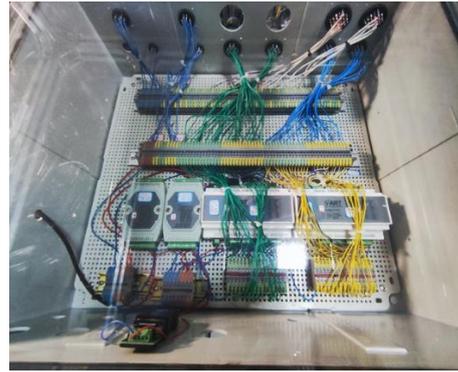


图 4 传感器接受信号箱

实验环境如图 5 所示，使用两个可控温湿度环境箱分别模拟车内温度与室外环境温度，将 HVAC 空调箱台架置于模拟车内环境的环境箱中，将热泵循环回路集成模块、除 HVAC 外其他冷却液回路、控制器箱、信号箱等其他台架均置于模拟室外环境的环境箱中，两环境箱通过管路连接，做好保温措施。

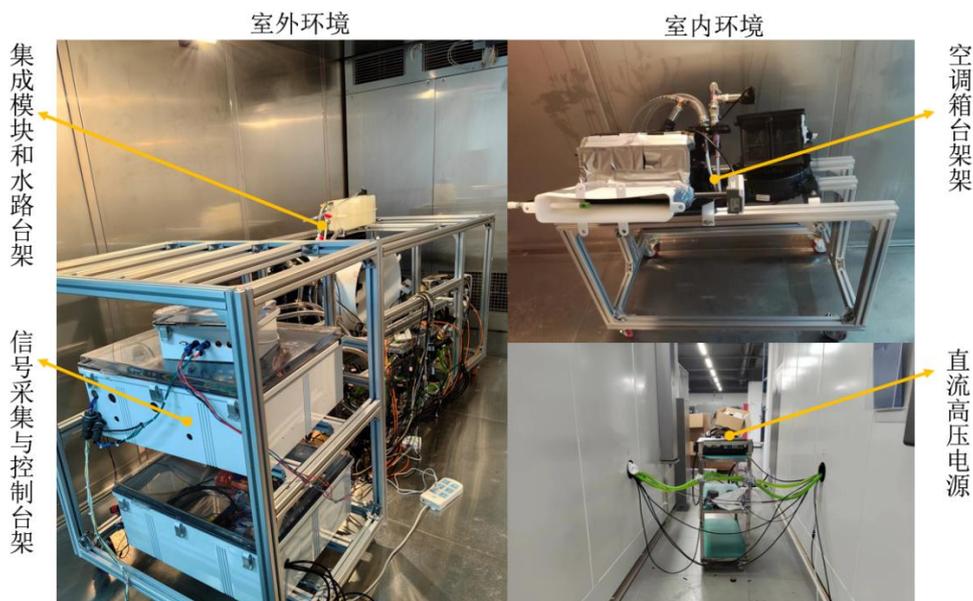


图 5 实验环境台架布局

2 热管理系统仿真建模

本文根据 Simcenter Amesim 平台基于各部件的数学模型和能量守恒定律等建立了台架的仿真模型，通过部件实验的数据对重要部件进行了标定。并在此基础上扩展动力电池、驱动电机、整车动力系统等，搭建了整车热管理系统模型。

2.1 系统关键部件参数

热管理系统的关键部件决定了系统的性能和运行表现，本文的热管理系统的

关键部件的参数如表 1 所示，后文的模型搭建也基于该参数。

表 1 系统关键部件参数

组件	关键参数
压缩机	转速范围 800-8500rpm、最大制冷量 7.8kW、容积效率 92%、等熵效率 75%、机械效率 90%、排量为 38CC 的涡旋式压缩机
冷凝器板式换热器	板片数 76，水流量 20L/min，初始设计需求为制热量>18kW
Chiller 板式换热器	板片数 50，冷媒侧流量 0.2kg/s，初始设计需求为制冷量>10kW
电子膨胀阀	阀口直径为 1.65mm，脉冲数为 0 - 480pulse
散热器	翅片间距：10 mm 翅片/板接触长度：2.2 mm 板间距：40 mm 翅片长度：42.69 mm

2.2 系统建模及标定

2.2.1 压缩机

根据压缩机厂家给出的设计及实验数据，压缩机的排量为 38cc，容积效率为 0.92，等熵效率为 0.75，机械效率为 0.9。

容积效率用于质量流量的计算：

$$dm_2 = \eta_v \cdot \rho_{suc} \cdot N \cdot disp$$

其中：

η_v 是压缩机的容积效率，Null； ρ_{suc} 是吸气密度，kg/m³；N 是压缩机的转速，rev/s； $disp$ 是压缩机的排量，m³。

等熵效率用于计算焓流量：

$$\eta_{is} = \frac{h_{dis} - h_s}{h_d - h_s}$$

其中：

η_{is} 是等熵效率，Null； h_{dis} 是等熵排气比焓，J/kg； h_s 是吸入比焓，J/kg； h_d 是排气比焓，J/kg。

通过机械效率计算扭矩：

$$\eta_{mech} = \frac{dm_2 \cdot h_{inc}}{\tau_3 \cdot N}$$

其中：

η_{mech} 是机械效率，Null； dm_2 是压缩机质量流量，kg/s； h_{inc} 是压缩机焓增，

J/kg; τ_3 是扭矩, Nm; N 是压缩机转速, rad/s。

2.2.2 板式换热器

板式换热器在系统中起到制冷剂 and 冷却液的换热作用。一般的板换有四个端口, 两个端口为一组, 分别作为冷却液和制冷剂的流动进出口, 在板换内制冷剂和冷却液通过波纹板片分隔开。

冷却液侧换热使用努塞尔数 Nu 进行计算, 其中层流努塞尔数 Nu_{Lam} 和湍流努塞尔数 Nu_{Turb} 使用不同的效用公式计算, 强制对流努塞尔数 Nu_{forced} 根据雷诺数 Re 选择使用 Nu_{Lam} 还是 Nu_{Turb} , 下临界雷诺数为 2300, 上临界雷诺数为 10000, 其中 Nu_{Turb} 的参数通过实验标定得到。

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_{free}^3 + Nu_{forced}^3}$$

$$Nu_{forced} = \begin{cases} Nu_{Lam} & , Re < ReTrans1 \\ Nu_{Turb} & , Re > ReTrans2 \end{cases}$$

$$Nu_{Lam} = MAX(0.5 \cdot Re^{0.2} \cdot Pr^{0.4}, 0.0001)$$

$$Nu_{Turb} = 0.5 \cdot Re^{0.2} \cdot Pr^{0.4}$$

$$Nu_{free} = 0.53 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}$$

其中:

Nu_{free} 是自然对流努塞尔数, Null; Nu_{forced} 是强制对流努塞尔数, Null; Nu_{Lam} 是层流努塞尔数, Null; Nu_{Turb} 是湍流努塞尔数, Null; Re 是雷诺数, Null; Pr 是普朗特数, Null; Gr 是格拉斯霍夫数, Null。

根据厂家得到的数据对换热器进行标定, 得到的结果如图 6 和图 7 所示, 最大压降误差为 3.9735%, 平均压降误差为 2.1499%, 最大换热量误差为 1.1993%, 平均换热量误差为 0.7507%。

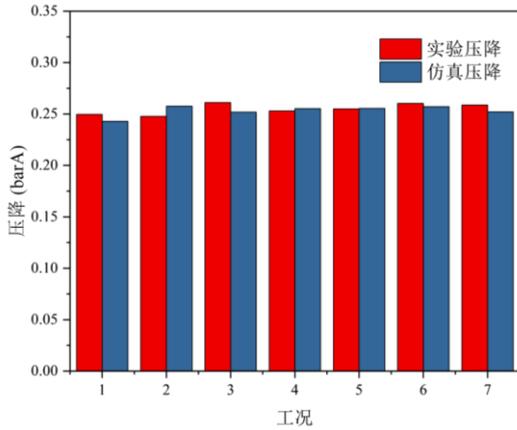


图 6 换热器压降标定结果

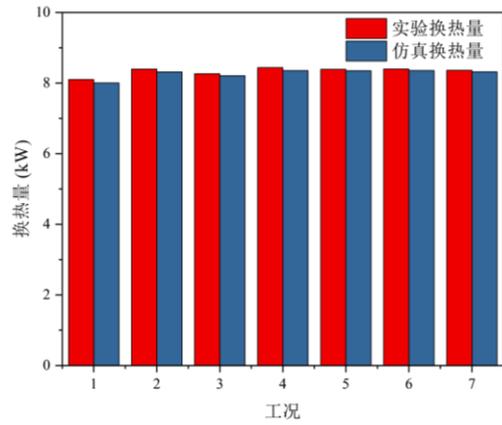


图 7 换热器换热量标定结果

2.2.3 电子膨胀阀

一般认为节流过程是绝热膨胀等焓过程，即进出口焓值不变，在 AMESim 中一般可以使用非对称可变孔板阀来仿真。

根据厂家提供的数据，电子膨胀阀部件的临界雷诺数为 700，最大开度的水力直径为 3 mm，最大开度横截面积为 $\pi \cdot (3/2)^2 \text{ mm}^2$ 。电子膨胀阀在室温进气压力 0.1Mpa 下的流量特性曲线为如图 8 所示。

2.2.4 水泵

水泵作为水泵在冷却液回路中作为动力元件驱动经板换换热后的冷却液流过其他部件。

$$P_{mech} = \frac{Q \cdot \Delta p}{f_{eff}}$$

其中：

P_{mech} 表示水泵的功率，W； Q 表示体积流量，L/min； $\Delta p = p_{out} - p_{in}$ 表示水泵进出口的压降 bar； f_{eff} 表示水泵的效率。

根据厂家提供的的数据，泵的直径为 76.6 mm，参考转速 1000 rev/min，参考流体密度 1071.11 kg/m³，效率设置为 0.8，流量和压差的关系通过实验数据得到，如图 9 所示。

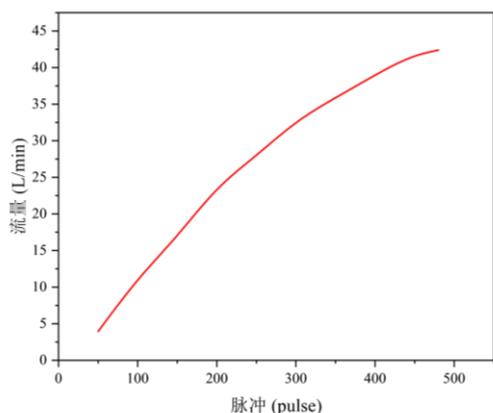


图 8 电子膨胀阀流量特性曲线

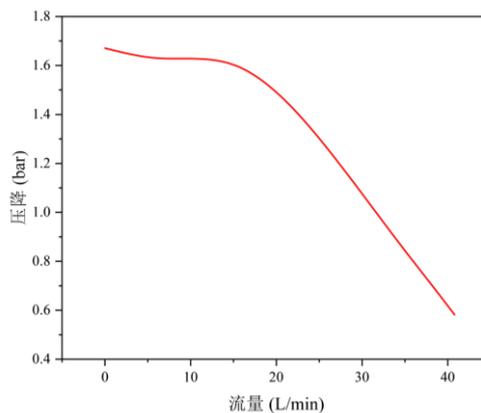


图 9 水泵流量压降特性曲线

2.3 热管理系统台架仿真模型

在 AMESim 上搭建的仿真模型如图 10 所示，其中包含了热泵系统、HVAC 支路、电池支路、电机支路、散热器支路。由于本文研究的是系统的制热性能，故而电池支路和电机支路使用的是 WTPC 模拟电机和电池的发热，在后续的研究中将搭建更接近真实电动汽车的电机和电池系统。

Simulation model of electric vehicle thermal management experimental bench based on R290

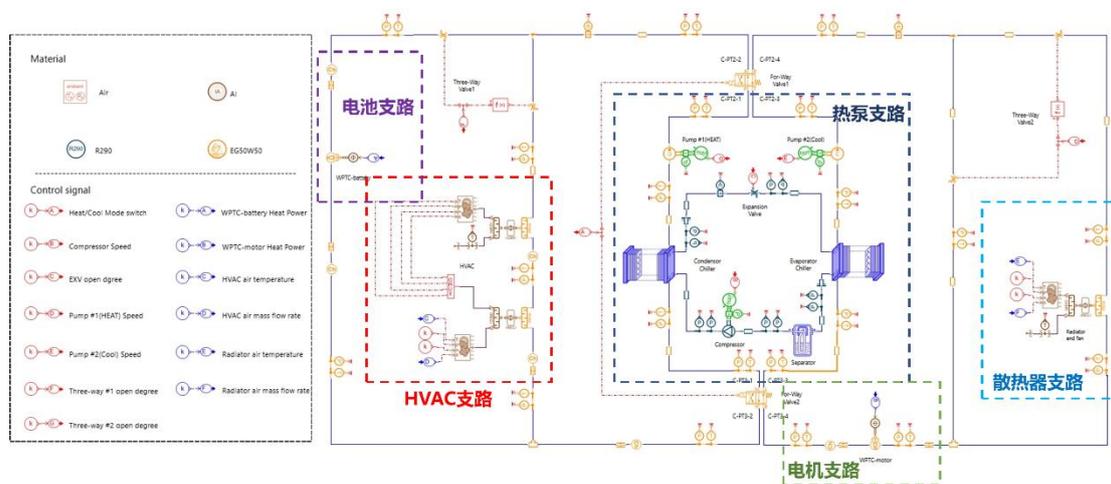


图 10 热管理系统台架仿真模型

3 制热性能仿真和实验结果分析

本节基于上文搭建的 AMESim 仿真模型和实验台架对系统的制热性能进行了研究，并通过实验数据验证了仿真模型的准确性和有效性，最后通过 PID 控制在不同的工况下控制了乘员舱的出风温度。

3.1 不同压缩机转速下的系统制热性能分析

压缩机对系统的运行和性能有较大的影响,本文在表 2 的工况下在实验台架进行实验获取数据,对系统的制热量 Q 和 COP 进行分析,其中压缩机的转速逐步增加,分别为 3000rpm、5000rpm、7000rpm、8500rpm。

表 2 实验及仿真工况

R290 充注量/g	室外温度/°C	舱内温度/°C	电子膨胀阀开度/%	电机模拟功率/W	电池模拟功率/W	水泵 1 转速/%	水泵 2 转速/%	HVAC 风扇转速/%	散热器风扇转速/%
450	-7	5	35	700	0	100	100	100	100

压缩机消耗电功率通过读取电源显示数据获取;通过冷却液侧冷凝器板换进出口温度压力传感器和流量传感器数据查表计算出冷却液进出口焓值与质量流量,计算得到系统制热量 Q :

$$Q = \dot{m}(h_{out} - h_{in})$$

其中:

\dot{m} 表示质量流量, kg/s; h_{out} 表示出口比焓, J/kg; h_{in} 表示进口比焓, J/kg; Q 表示制热量, W。

通过系统制热量与压缩机消耗的电功率计算得到系统的 COP:

$$COP = \frac{Q}{W_{comp}}$$

其中:

Q 表示制热量, W; W_{comp} 表示压缩机电功率, W; COP 表示能效系数。

进行台架实验得到的实验结果如图 11 所示。在室外温度为-7°C和舱内温度为 5°C时,随着压缩机转速的升高,系统制热量和压缩机电功率均在上升,制热量从 3000rpm 时的 3742W 增大到 8500 转时的 7468W,同时压缩机电功率也从 1363W 增加到 5340W。这是由于压缩机转速的提高增大了热泵系统内工质的质量流量,使得单位时间内的换热量增大,同时也增大了压缩机的运行功率。然而随着转速的增大,单位压缩机电功率增大所换取的换热量逐渐降低,体现在系统制热 COP 的降低,从 3000rpm 时的 2.74 降低至 8500rpm 时的 1.39。这也说明在满足系统制热量需求的前提下,应当选择较小的压缩机转速以获得较高的制热效率。

图 12 中显示了相同工况下通过台架实验得到的实验数据与仿真模型的数据的对比。从图中可以看出，通过零部件的数据标定，仿真模型得到的数据与实验结果无较大的差异，其中最低误差为压缩机转速为 5000rpm 时的 4.5%，最大误差为压缩机转速为 7000rpm 时的 5.3%，验证了仿真模型的准确性和有效性，可以通过仿真模型进一步研究该系统的性能。

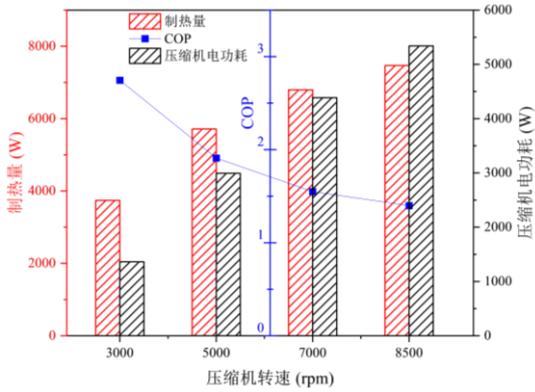


图 11 不同压缩机转速下系统制热量、COP 和压缩机功耗

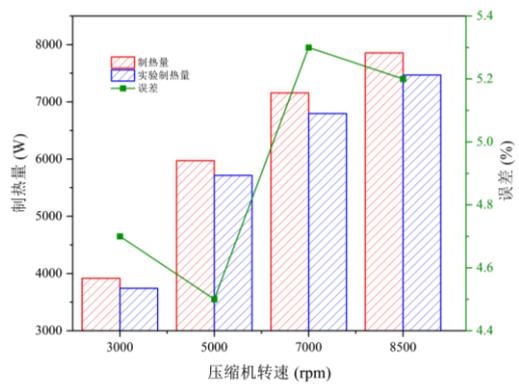


图 12 相同工况实验数据与仿真数据对比

3.2 不同温度下的系统制热性能分析

为对比 R290 冷媒与 R134a 冷媒的制热性能，本文在表 3 的工况下对系统不同冷媒的制热量和 COP 进行了实验分析，其中选择三个环境工况组合：①室外温度 0℃、舱内温度 10℃；②室外温度-7℃、舱内温度 5℃；③室外温度-20℃、舱内温度 0℃。

表 3 实验工况

冷媒充注量/g	压缩机转速/rpm	电子膨胀阀开度/%	电机模拟功率/W	电池模拟功率/W	水泵 1 转速/%	水泵 2 转速/%	HVAC 风扇转速/%	散热器风扇转速/%
450	8000	35	700	0	100	100	100	100

实验结果如图所示 13 所示，在三个工况下 R290 的制热量、COP、HVAC 均优于 R134a。在三个工况下 R290 冷媒的制热量都远远超过 R134a 冷媒，R290 的制热量最大达到 8152W，R134a 的制热量最大为 3287W。这是两者的物理性质决定的，单位质量的 R290 相变潜热远大于单位质量 R134a 的相变潜热，在同样的质量流量下，R290 的换热量远大于 R134a。在环境温度为 0℃，舱内温度为 10℃的工况，系统达到稳定时 R290 的蒸发压力为 2.9bar，蒸发温度为-15.1℃，与环境温度有较大的温差。另外，R134a 的制热量变化不大的原因可能是在充注

量仅有 450g 的情况下已经达到了 R134a 的制热量极限。制热量的差异同样体现在 HVAC 出风温度上，在 0℃ 不加温度控制时，R290 冷媒的 HVAC 出风温度达到了 68.1℃，R134a 冷媒的 HVAC 出风温度仅达到 37.4℃；在 -20℃ 不加温度控制时，R134a 冷媒的 HVAC 出风温度仅达到 22.9℃，无法满足乘员舱的制热需求。另外，在压缩机高转速工况下，R134a 和 R290 的制热效率 COP 均为 1.5 左右。

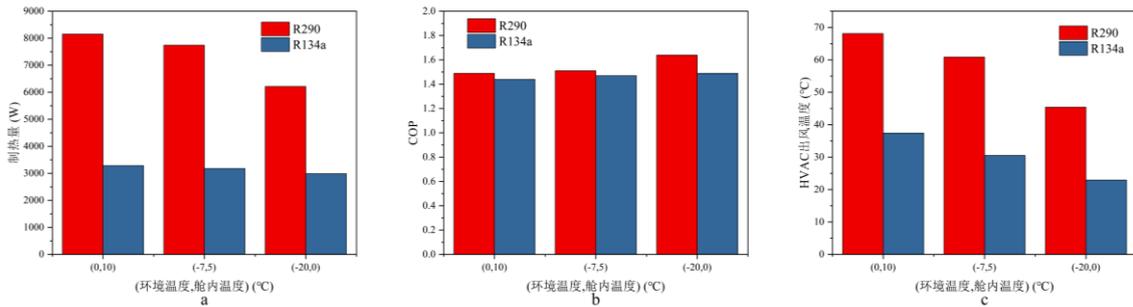


图 13 不同环境温度下 R290 和 R134a 的制热性能
(a)制热量 (b)COP (c)HVAC 出风温度

进一步地，本文在 R290 冷媒热管理系统仿真模型的基础上，使用 PID 算法通过调节压缩机转速对乘员舱的出风温度进行了控制，仿真效果如图 14 所示。在室外温度为 0℃、-7℃、-20℃ 时，HVAC 出风温度分别在 72s、174s、332s 时达到 25℃，并恒温保持在 25℃，这说明 R290 系统在 -20℃ 时依然有较好的制热能力，PID 控制能够较好地控制乘员舱的出风温度。HVAC 出风温度在开始的数十秒内有一个向下的过程，这是由于在启动过程中从外界吸入低温的新风混合，而压缩机刚刚启动未能提供稳定的热量。

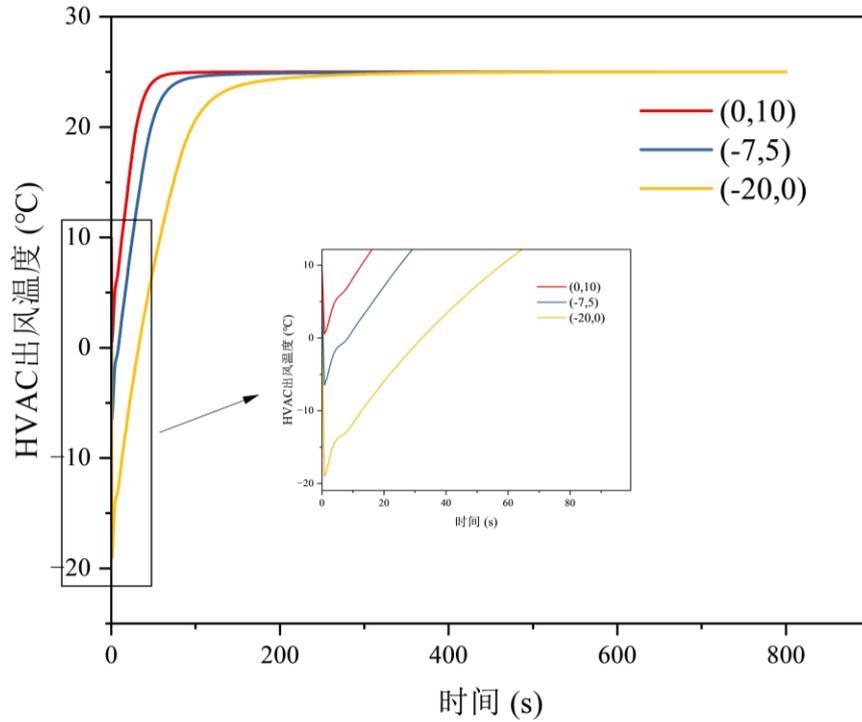


图 14 不同工况下 HVAC 出风温度变化图

4 结束语

根据电动汽车热管理实际需求，本文设计了一种基于 R290 冷媒的电动汽车热管理系统，系统具备制热和制冷切换功能，具有多种运行模式，本文针对其制热性能进行了分析。

通过搭建热管理系统实验台架和 AMESim 仿真模型对系统的制热性能进行分析。实验数据表明随着压缩机转速的上升，系统制热量与压缩机电功率均增大，系统制热效率 COP 下降。同时通过实验数据验证了仿真模型的有效性和准确性，能够用于后续对系统的进一步研究。另外研究了 R290 和 R134a 在不同温度的下的制热性能表现，R290 在各个工况下的表现都优于 R134a。最后在仿真模型中测试了 PID 控制压缩机转速对 HVAC 出风温度的调节，在 -20°C 的低温下能够获得较好的表现。

作者简介: 张逸飞 (2000-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为: 汽车工程及其智能化。

通讯作者: 熊树生 (1971-), 男, 福建周宁县人, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为: 机器换人及物联网相关研发、清洁能源与新能源车船优化设计及控制、新能源汽车热管理系统、生物质的资源化利用。

参考文献

- [1] Liu H , Wei Z , He W ,et al.Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review[J].Energy Conversion and Management, 2017, 150(oct.):304-330.DOI:10.1016/j.enconman.2017.08.016.
- [2] Zhaogang,Qi.Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review[J].Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014.DOI:10.1016/j.rser.2014.07.038.
- [3] He H , Yan M , Sun C ,et al.Predictive air-conditioner control for electric buses with passenger amount variation forecast☆[J].Applied Energy, 2018, 227:249-261.DOI:10.1016/j.apenergy.2017.08.181.
- [4] 联合国环境规划署.达成基加利修正案后,我们下一步该怎么做?[EB/OL][2017-10-15].http://www.chinarefac.com/refrigerant_show.aspx?id=2469.
- [5] 中华人民共和国生态环境部.关于发布《中国受控消耗臭氧层物质清单》的公告[EB/OL][2021-10-08]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202110/t20211011_956086.html
- [6] 吴国强,马国远,许树学.R290 变频热泵空调器性能的实验研究[J].北京工业大学学报,2023,49(03):379-385+394.
- [7] 赵东鹏,徐磊,席椿富,等.采用 R290 的集成式热管理系统热力学分析[C]//中国汽车工程学会汽车空气动力学分会.2024 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集.中国汽车工程研究院股份有限公司;天津大学机械工程学院;,2024:11.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.023248.

-
- [8] 黄广燕,邹慧明,唐明生,等.R290 电动汽车热泵空调性能实验研究[J].制冷学报, 2020,41(06):40-46.