

文章编号: 0253-4339(2026)02-0051-10
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20241107003

电动汽车低温工况下余热回收节能潜力分析

王天英^{1,2} 李建龙² 龚智方² 李春彤¹ 陆冰清¹ 陈江平¹ 施骏业¹

(1 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240; 2 智己汽车科技有限公司 上海 201804)

摘要 随着电动汽车的普及,其热管理系统的效率直接影响车辆的能耗和续航里程。本文提出一种新的集成式热管理热泵系统和配置的控制策略,并深入分析了其在低温环境下余热回收系统的性能。通过设计不同功率的实验,证实了通过六通阀控制余热回收条件的策略能够显著降低系统能耗。此外,在 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下进行实车测试,配备余热回收系统的测试车辆前 1 h 能耗分别降低了 24% 和 35%。余热回收系统在验证实际应用的节能潜力中,电动汽车在城市工况下续航里程提升了 22.95%,高速工况下提升了 37.29%。

关键词 热管理系统;电动汽车;余热回收;能耗分析

中图分类号: TB61¹;U469.72;U463.85¹

文献标识码: A

Energy Saving Potential Analysis of Waste Heat Recovery for Electric Vehicles under Low Temperature Operating Conditions

Wang Tianying^{1,2} Li Jianlong² Gong Zhifang² Li Chunlong¹ Lu Bingqing¹
Chen Jiangping¹ Shi Junye¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. IM Motors, Shanghai, 201804, China)

Abstract Efficiency of the thermal management system directly affects the energy consumption and driving range of a vehicle. This article proposes a new integrated thermal management heat pump system and develops its control strategy. The study analyzed its performance at low temperatures for waste heat recovery. The experiments were conducted under different powers, which verified that the strategy of controlling the waste heat recovery conditions using a six-way valve can reduce the system energy consumption. In addition, in real vehicle tests at $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, the 1-hour energy consumption of the test vehicles equipped with the waste heat recovery system was reduced by 24% and 35%, respectively. The waste heat recovery system for verifying the energy-saving potential of the application increased the driving range of the electric vehicles by 22.95% under urban conditions and 37.29% under high-speed conditions.

Keywords thermal management system; electric vehicle; waste heat recovery; energy consumption analysis

电动汽车逐渐成为解决全球温室气体排放问题的关键方案之一,纯电动汽车未来发展潜力巨大,其以零排放的特点开始逐步取代传统燃油汽车。电动汽车的种类包括混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池电动汽车^[1]。电动汽车在运行过程中几乎不排放有害气体,噪声污染也大幅减少。同时,电动汽车的多元化发展对能源方面有着积极影响,以电力作为推进能量的载体,为多种初级能源替代石油创造了可能,有助于保障能源供应安全,促进可再生能源的广泛应用。而随着电动汽车的普及,热管理作为

关键技术受到了广泛关注^[2]。电动汽车的热管理系统影响车辆的续航里程和乘客的舒适度,空调系统对客舱的制冷、供暖和通风起着关键作用,是控制汽车内部热环境(温度、相对湿度和风速)以及确保能见度(除雾和除冰)安全的必要条件^[3-4]。

电动汽车热管理系统主要由空调系统、电池热管理系统和驱动电机热管理系统组成^[5]。近年来,为了满足电动汽车在极端气候条件下制热和制冷的需求,很多研究人员重点关注高效的热管理系统的开发。传统汽车中约 70% 燃料能量以废热的形式散

基金项目:国家重点研发计划(2020YFA0711500)和国家自然科学基金(52306104)资助项目。(The project was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFA0711500) and National Natural Science Foundation of China (No. 52306104).)

收稿日期:2024-11-07;修回日期:2024-12-02;录用日期:2024-12-11

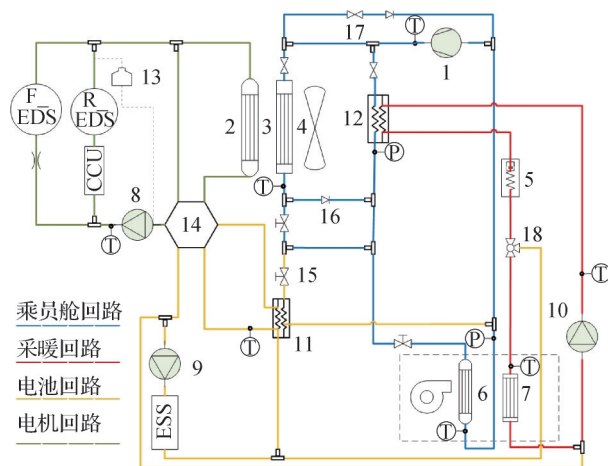
失,空调系统通过加热器核心利用废热传递给车内空气,冷却剂由泵输送至发动机周围并收集废热,加热后分配至车内^[6-8]。因此,较好的热管理系统不仅可以提高车辆的能量利用效率,还可以延长重要部件的使用寿命^[9-11]。J. Hong等^[12]提出了一种集成式热管理系统,该系统能够在电动汽车中实现热能储存和废热回收,他们研究了电动汽车热管理系统的性能,利用热能储存和废热回收,计算了电池电负荷下的发热量,有效提高了热能利用效率。Guo Rong等^[13]针对低温条件下电动汽车的座舱和电池加热问题,提出了一种增程式电动汽车的集成式热管理拓扑结构,将增程式车和电驱动系统产生的余热进行回收,用于加热电池和驾驶室。此外,优化了系统的工作模式和切换规则,提高了电池加热效率和客舱舒适度。于天蝉等^[14]建立了热泵空调系统数学模型,定量分析了不同空气循环模式时热泵系统能耗,结果表明寒冷地区及夏热冬暖地区的冬季工况下,舱外空气循环的运行能耗较舱内分别高34.4%和17.1%。He Liange等^[15]提出了一种新型带废热回收系统的纯电动汽车集成式热管理系统,该系统能够有效降低电机和电机控制器的温度,同时利用余热对客舱和电池进行加热,有效降低了系统加热能耗并延长了车辆的续航里程。Hu Zhiwei等^[16]提出了一种新能源汽车多回路集成式热管理系统,通过四通换向阀和电磁阀实现车厢热交换器与蓄电池冷水器的不同耦合关系,并研究了不同工况条件对热管理性能影响,证实该系统有效提高了能源效率。S. Hemmati等^[17]提出了客舱加热、动力总成和排气后处理系统的协同优化操作,创建了一个基于模型的客舱加热和动力系统优化平台并进行大量实验测试,利用连接信息的协同最优控制策略,以实现寒冷环境下客舱供暖节能。Li Kang等^[18]提出了一种新的热管理系统评价方法,使系统组件可以调节多种模式,并通过改变系统的工作模式来适应环境的变化。Li Dongjun等^[19]建立了汽车热管理系统电驱动的2种冷却回路框架,通过联合仿真对比了2种框架在高温稳态和瞬态工况下的冷却性能和能耗,大幅提高了泵效率。相比于制冷剂侧的直接冷却形式,研究人员证实了提高冷却剂回路布置方案的灵活性在热管理系统性能方面具有优势^[20-21]。余热回收(recovery waste heat, RWH)技术的应用不仅能够提高车辆的能量利用效率,还能够延长重要部件的使用寿命,从而为电动汽车的可持续发展提供了强有力的技术支持。

本文旨在通过实验研究和实车测试,验证并分析提出的电动汽车热管理策略在低温工况下余热回

收系统节能潜力。通过对比不同工况下COP(性能系数, coefficient of performance)和能耗数据,验证了回路及控制策略在提高电动汽车能效方面的有效性,并将其应用于实车测试中,研究能耗及续航里程,为电动汽车热管理系统的设计和优化提供了重要的理论和实验依据。

1 热泵热管理系统回路设计

本研究考虑了电动汽车热管理系统中乘客舱、驱动电机和动力电池的冷却,提出的集成式热管理架构如图1所示。为了在低温环境下表现出更好的性能,系统中设置了水冷冷凝器可与室外换热器共同切换并联和串联2种模式,在制冷工况下降低高压流阻以及减少空调箱漏热导致的温升。此外,设置了双芯体空调箱,通过箱内暖风芯体收集热泵系统的热量实现对乘客舱加热。系统中包含制冷剂回路及冷却液回路,在系统制冷剂回路中采用比例三通阀将冷却液按比例分配给乘客舱和电池回路,在系统冷却液回路中使用六通阀实现驱动电机冷却回路和动力电池冷却回路的串联和并联运行,并旁通驱动电机回路的低温散热器以及动力电池。其中系统制冷剂回路中使用R134a,冷却液回路中使用水和乙二醇的混合物。



1 压缩机; 2 低温散热器; 3 室内换热器; 4 风扇; 5 PTC加热器; 6 蒸发器; 7 暖风芯体; 8 电机水泵; 9 电池水泵; 10 暖风回路水泵; 11 电池冷却器(Chiller); 12 水冷冷凝器; 13 水箱; 14 六通阀; 15 电子膨胀阀; 16 截止阀; 17 单向阀; 18 三通阀。

图1 热管理系统架构图

Fig.1 Architecture diagram of thermal management system

制冷剂状态、流向及各主要零部件状态如图2所示,并对其模式流程详细介绍。

乘客舱制冷模式:压缩机→室外换热器→放热冷凝→蒸发器电子膨胀阀→蒸发器→气液分离器→

压缩机。

电池冷却模式:压缩机→室外换热器→放热冷凝→Chiller 电子膨胀阀→Chiller→气液分离器→压缩机。

双蒸制冷(电池优先)模式:压缩机→室外换热器→放热冷凝→蒸发器电子膨胀阀→Chiller 电子膨胀阀→蒸发器→Chiller→吸热蒸发→气液分离器→压缩机。

制冷除湿模式:压缩机→室外换热器→水冷冷

凝器→放热冷凝→蒸发器电子膨胀阀→蒸发器→放热析出冷凝水除湿→气液分离器→压缩机。

制热除湿模式:压缩机→水冷冷凝器→放热冷凝后→制热电子膨胀阀→蒸发器电子膨胀阀→室外换热器(蒸发)→蒸发器→放热析出冷凝水除湿→气液分离器→压缩机。

热泵制热模式:压缩机→水冷冷凝器→放热冷凝→制热电子膨胀阀节流→室外换热器(蒸发)→气液分离器→压缩机。

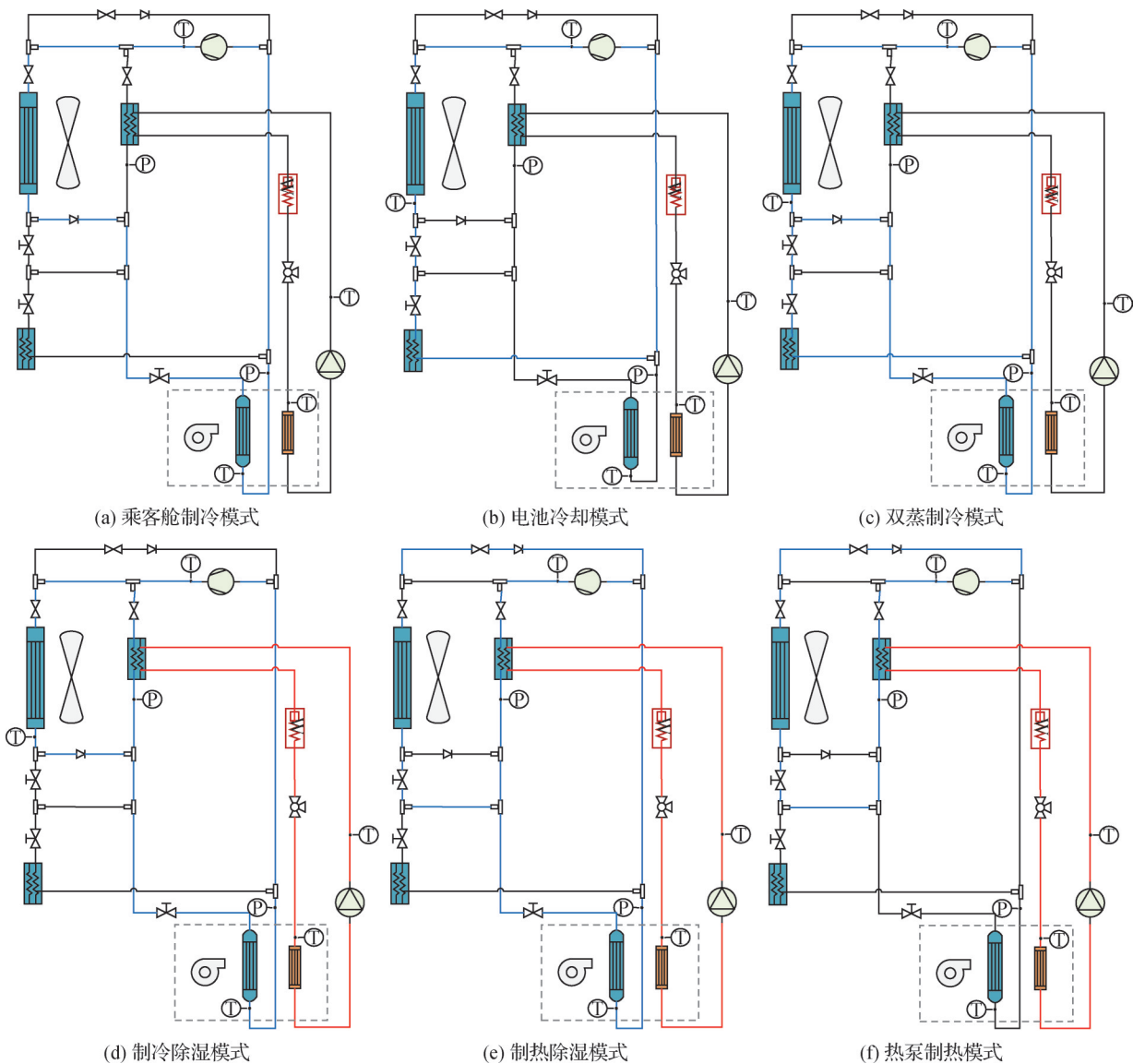


图 2 冷却剂回路流程

Fig.2 Coolant circuit process

热管理系统可实现 5 种不同的冷却液回路模式,如图 3 所示,以实现高效的热管理。模式 A 采用并联冷却方式,其中电池通过电池冷却器行冷却,电机通过低温散热器进行冷却。调节三通阀来控制流向电池的热水流量给其加热,实现精确的温度控制。模

式 B 采用串联冷却方式,电机和电池为同一冷却回路,并通过低温散热器进行加热。该设计简化了系统结构,降低了能耗。模式 C 利用热泵回收电机余热并加热电池,提高了能源的利用效率。模式 D 结合了电机余热利用和热敏电阻(positive temperature

coefficient, PTC), 以适应不同的环境温度和需求, 电机余热直接用于电池加热, PTC在极端低温条件下同时加热电机和电池。模式E为电驱电控蓄热模式, 允

许电池和电机根据需要进行冷却或加热, 以维持或调节温度。

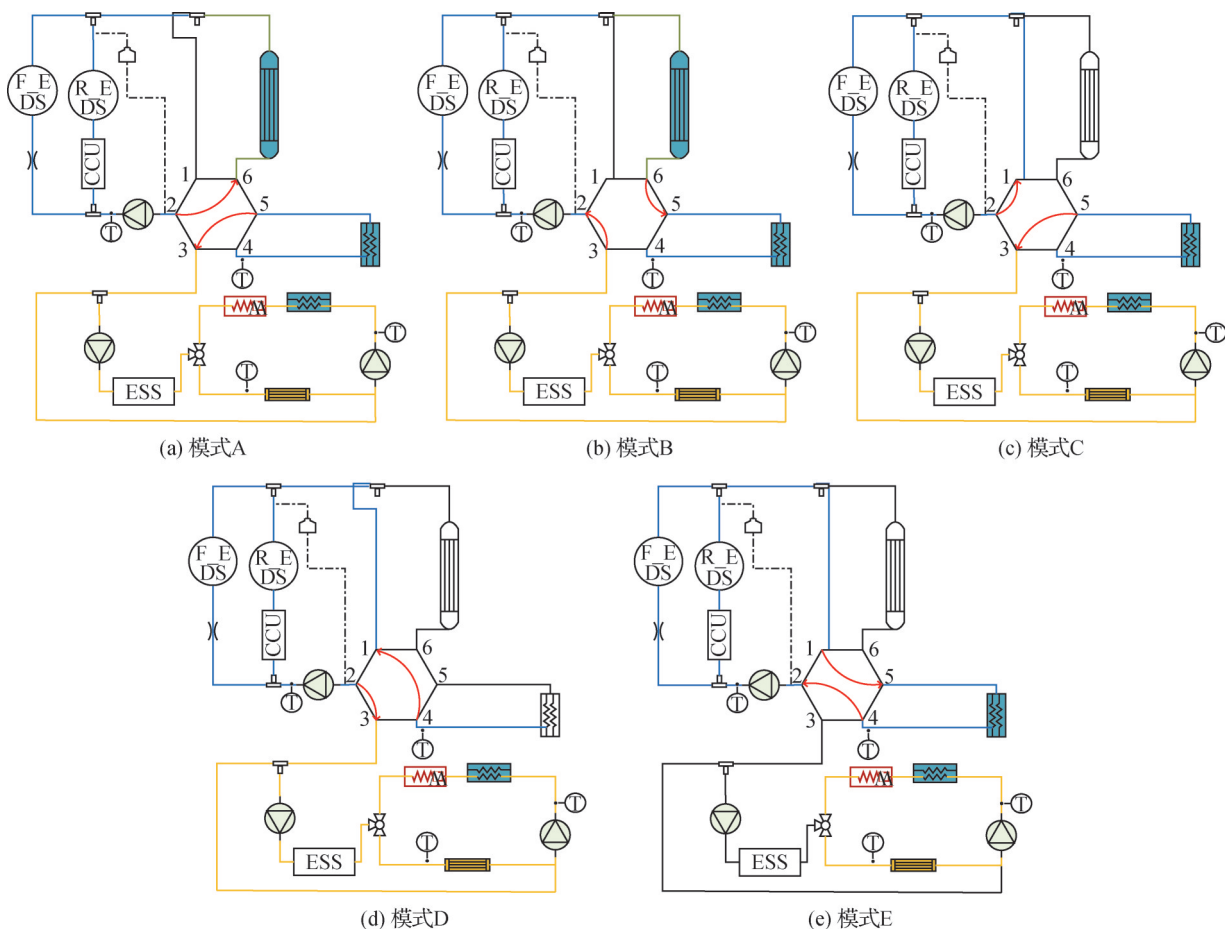


图3 水路回路流程

Fig.3 Water circuit process

2 实验方案及控制策略

2.1 装置介绍

搭建了能耗测试实验台, 用来测试集成式热管理系统性能, 图4(a)所示为实验的环境舱模拟实验室和装置布局, 用来提供高低温交变湿热环境, 模拟真实车辆条件。装置包括热交换器、PTC单元、水箱、水泵等部件, 信息处理系统如图4(b)所示。通过系统模拟验证满足设计要求的热管理系统组件, 并将其组合为一个整体的车辆热管理系统, 以测试热管理性能。数据采集和处理采用自行开发的计算机软件进行。屏幕用于显示空气侧中室外换热器、制冷剂侧中压缩机、冷却液侧中电池和电机及换热器等参数。实验采用测试电压为24~1 000 V, 测试电流为-200~300 A, 最大输出功率为100 kW的动力电池对综合性能测试系统进行充放电测试, 三元锂电池容量为73.5 kW·h、重量为447 kg, 以1P08S方式成组。

精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的K型热电偶分别连接在每个部件表面中心和冷却板的入口和出口及冷却液水温。

2.2 实验工况

为了提升低温环境下热管理系统的升温效果, 针对有无余热回收系统进行实验, 对比了不同功率余热回收效果。因此, 实验设定车辆压缩机以最大6 500 r/min的转速(n)运行, 自然风速和环境湿度分别为2 m/s和50%, 室内目标环境温度为24 $^{\circ}\text{C}$, 空调箱风量设定在340 m^3/h , 分别在环境温度 T_a 为-5、-10、-15 $^{\circ}\text{C}$ 时进行有无余热回收的工况对比。根据余热回收功率将分为4种情况, 工况如表1所示。

2.3 控制策略

在电动汽车的热管理系统中, 水温的控制对于电池性能和乘客舒适度有直接影响, 针对不同环境温度和电池需求采取不同的热管理措施。控制策略如图5所示。当环境温度高于-10 $^{\circ}\text{C}$, Chiller入口温度与环境温度差值小于0 $^{\circ}\text{C}$ 时进入电机串联Chiller



图 4 热管理系统实验

Fig.4 Thermal management system experiment

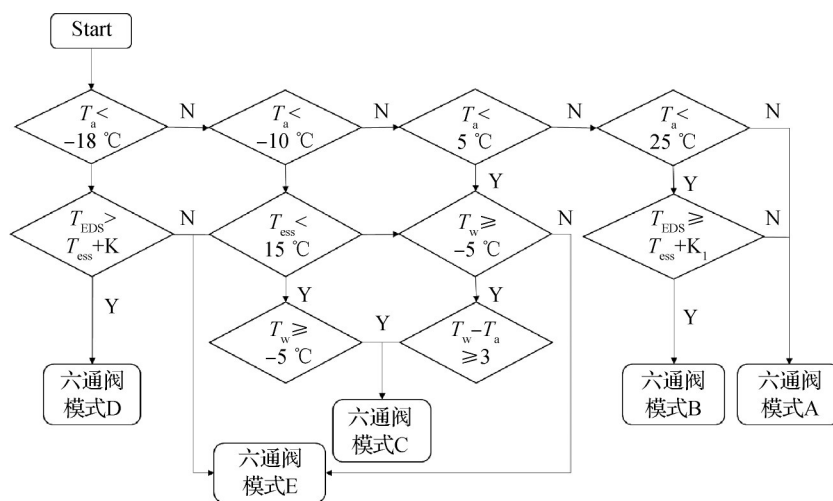
表 1 余热回收实验工况

Tab.1 Experimental conditions for RHW

名称	热泵工作模式
工况 A	热泵 + PTC
工况 B	热泵 + PTC + RWH 500 W
工况 C	热泵 + PTC + RWH 1 000 W
工况 D	热泵 + PTC + RWH 1 500 W

蓄热模式,温差大于 5 °C 优先考虑电池的余热回收, 0~5 °C 则采用双开模式。当环境温度在 -20~-10 °C,

Chiller 入口温度高于 -5 °C 时,优先电机余热加热电池并自身蓄热,当电机水温超过较高的电芯温度加上一个设定的偏移量时,系统采用电机余热加热电池模式,此时乘客舱使用 PTC 加热,当电机水温低于电芯的最低温度(设定为 -10 °C)时,系统退出加热模式,进入蓄热模式。通过这些策略,电动汽车的热管理系统能够在不同的环境条件下,有效地管理电池和电机的温度,从而提高整车的性能和乘客的舒适度。这些措施不仅有助于提高电池的使用寿命,还能在寒冷环境下保证乘客舱的温暖,体现了电动汽车热管理设计的复杂性和精细性。



T_a 环境温度; T_{EDS} 电驱进口水温; T_{ess} 电芯最低温度; T_w Chiller 入口水温。

图 5 控制策略逻辑图

Fig.5 Control strategy logic diagram

3 实验研究

3.1 余热回收系统的影响

不同 RWH 工况实验结果如图 6 所示。由图 6(a)

可知,环境温度为 -5 °C 时,无余热回收的工况 A 的 PTC 功率需求最高,表明需要较大 PTC 功率来补充热量。然而,相比于仅使用 PTC 供热方式,使用热泵系统及带有余热回收功能存在较小的总功率,且随着

余热回收功率的增加,热管理系统总消耗功率减少。此外,PTC功率需求也降低,其中余热回收设定功率越高,如1500W功率余热回收工况D的PTC功率最低。图6(b)和图6(c)所示分别为环境温度 -10°C 与 -15°C 的压缩机和PTC功率消耗对比,可以看出PTC功率和压缩机功率的变化趋势与 -5°C 环境相似,工况D的PTC功率依然最低,显示了较高余热回收对节能的贡献,而PTC功率需求随着环境温度的降低进一步增加,特别是无余热回收的工况A。然而,随着余热回收功率的增加,PTC功率的降低更加显著,显示出余热回收在低温条件下的重要性。此外,较低的环境温度存在较高的总功率需求,这是由于较低环境温度下达到相同目标的舱内温度需要较高PTC功率,增加余热回收功率可能会增加压缩机的负担,因为系统需要处理更多的热量。

COP由制冷量以及压缩机功耗之比确定,不同工况的COP及压缩机与PTC功率之和(P_{sum})的变化如图6(d)所示,随着余热回收水平的提高,系统COP显著提高。这一趋势在所有测试的环境温度 -5°C 、 -10°C 和 -15°C 下都很明显。特别是在 -5°C 环境下,余热回收使系统能够更有效地利用能源,从而显著提高了COP。这表明,通过优化余热回收策略,可以显著提高电动汽车热管理系统的能效。然而,COP增幅是随着余热回收功率的增加而降低的,说明余热回收功率达到一定数值后再增加,系统效果将不显著。此外,随着环境温度的降低,热泵系统的效率降低,导致COP下降,这说明在极端低温条件下对热管理系统设计的特殊需求。为了确保在不同环境温度下都能有效地管理车内温度,热管理系统需要能够适应不同的余热回收水平。这意味着系统设计需要足够的灵活性,以便在不同的操作条件下调整其性能。

3.2 有无余热回收实车测试

在电动汽车的低温环境下,余热回收系统的效能对于能耗优化具有显著影响。本文将车辆在环境温度为 -7°C 和 -18°C 条件下进行实车测试并严格使用2.3节中控制策略,以评估余热回收系统在低温及恶劣工况下的性能。实验车辆以80 km/h的速度行驶60 min。空调温度设置在 25°C , -7°C 工况使用空气热泵和带余热回收的热泵, -18°C 工况使用单PTC加热和带余热回收的热泵。

图7所示为测试车辆在环境温度为 -18°C 与 -7°C 时PTC及余热回收模式的耗电量。当环境温度为 -18°C 采用PTC加热时,前10 min的制热能耗为

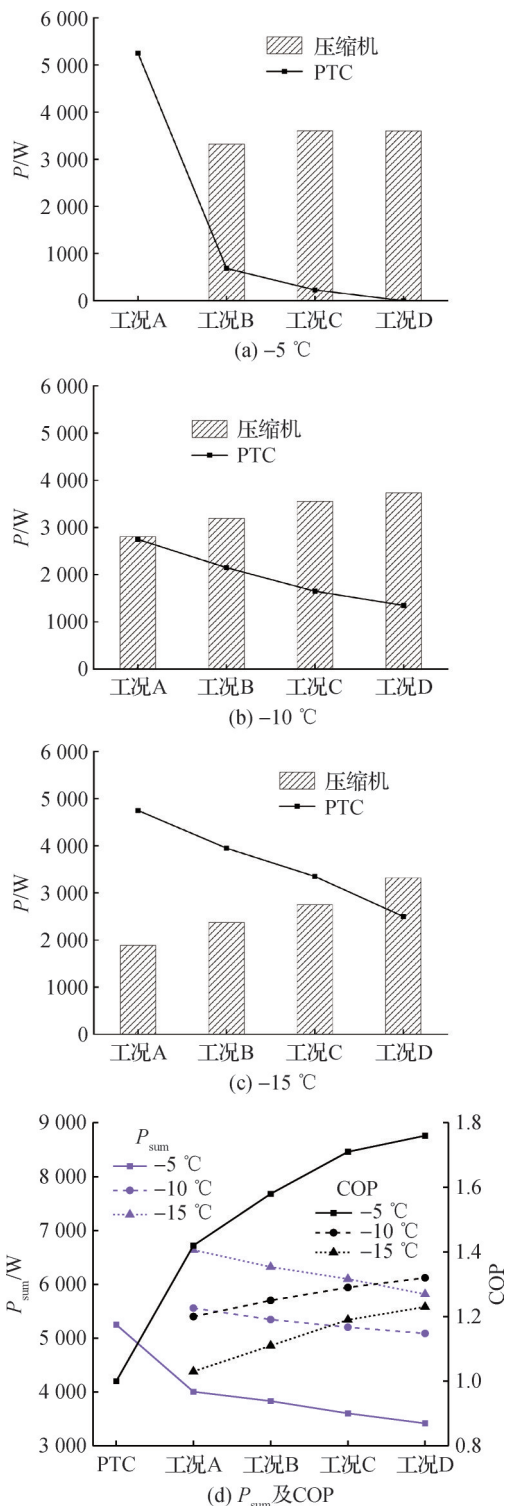


图6 不同RWH工况实验结果

Fig.6 Experimental results of different RWH conditions

0.97 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 而带电驱余热回收系统的能耗降至0.56 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 降幅为42%。在1 h的行驶中,制热能耗从4.04 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 降至2.6 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 降幅为35%。环境温度为 -7°C 则在10 min及1 h的能耗降幅分别为33%和24%。此外, -7°C 的环境温度下余热回收期间主动进气格栅(active grille shutter, AGS)及风扇关闭,后

续关闭可导致高速风阻进而增加能耗。因此,余热回收系统在低温环境下均显著降低了电动汽车的能耗。减少使用 AGS 的开启时间也可进一步降低能耗,这对提高电动汽车在低温环境下的能效和续航里程具有重要作用。

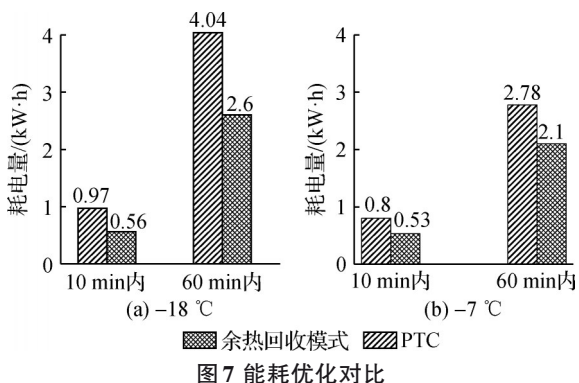


Fig.7 Comparison of energy consumption optimization

选取有无余热回收系统在环境温度为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的运行过程如图 8 所示。前 19 min 内系统主要依赖电机储热来维持乘客舱的温度,可以观察到 Chiller 进水温度(T_w)以约 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率上升,电机在运行过程中产生的热量被收集并存储,减少了对额外能源的需求,从而提高了系统的整体能效。19 min 后系统转入余热回收模式,电机产生的热量被转移至乘客舱以满足加热需求,这对于维持乘客的舒适度和电池性能的稳定至关重要。根据计算 PTC 加热模式与余热回收模式的续航里程分别为 250.60 km 及 338.65 km 。此外,余热回收模式下风扇和电子控制节温器(electrostatic discharge, EDS)被关闭,该措施进一步降低了系统的能耗,风扇的关闭减少了空气流动带来的能量损失,而 EDS 的关闭则减少了冷却液循环的能耗。相比于纯热泵模式,压缩机的转速下降约 $1\text{ }350\text{ r}/\text{min}$,这表明提出的余热回收控制策略有效降低了对压缩机工作的需求,从而减少了系统的能耗,同时保证了乘客舱的舒适度和电池性能的稳定。

3.3 不同工况实车测试

在电动汽车的性能评估中,不同工况下的能耗表现是衡量其效率和实用性的关键指标。通过实车测试,对比分析了环境温度为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电动汽车在城市工况循环(China light-duty vehicle test cycle, CLTC)和高速工况下的性能差异,特别关注了空调能耗和 EDS 能耗的变化。

图 9 所示为车辆在城市工况与高速工况下呼吸点温度(T_b)、电芯最低温度(T_{ess})及电驱进口水温

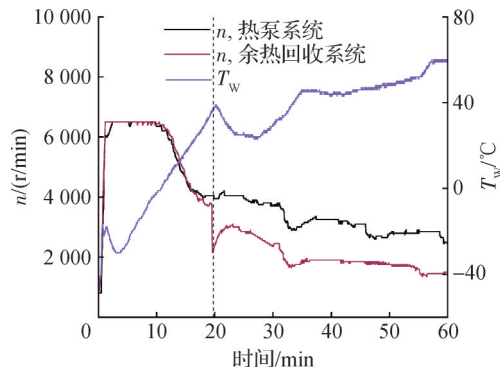
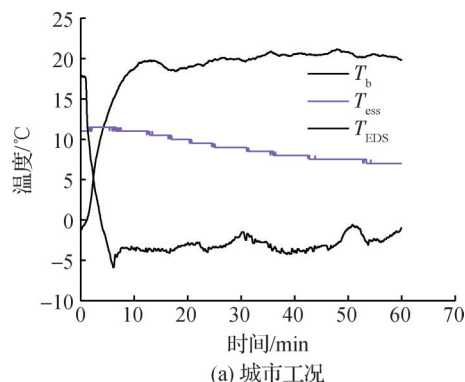


图 8 EAC 转速及 T_w 随时间的变化

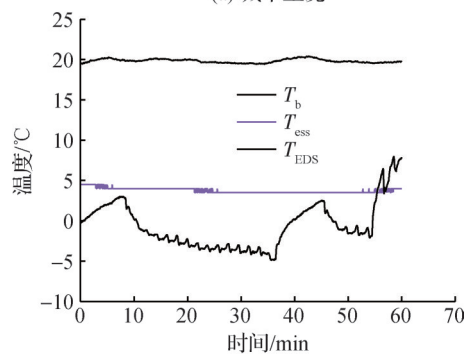
Fig.8 Variations of n and T_w with time

(T_{EDS})在 1 h 内的变化情况。图 9(a)中城市工况模拟日常驾驶中频繁的启停和低速行驶,可以看出呼吸点温度在 15 min 后趋于稳定,电驱的进口水温随着工况的特性不规律性变化。图 9(b)显示了高速工况时呼吸点温度保持稳定,电驱持续规律运转。相比于城市工况,高速工况的电芯温度较低,这是由于持续高速为相对稳定状态。图 10 所示为 2 种工况下 1 h 内空调功率变化,高速工况存在较低功率以维持舱内温度,2 处高功率跳动代表正处于运行阶段。城市工况下空调总功率包含水泵、风扇、鼓风机低压电耗,随着工况的稳定有所降低。

图 11 所示为不同工况下 EDS 的功率和能耗变化。城市工况功率输出在 $0\sim 60\text{ kW}$ 波动,这反映城市



(a) 城市工况



(b) 高速工况

图 9 2 种工况各温度变化

Fig.9 Temperature variations under two conditions

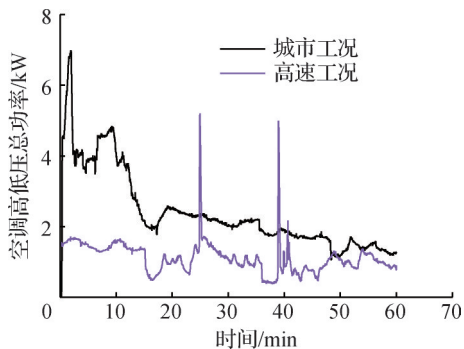
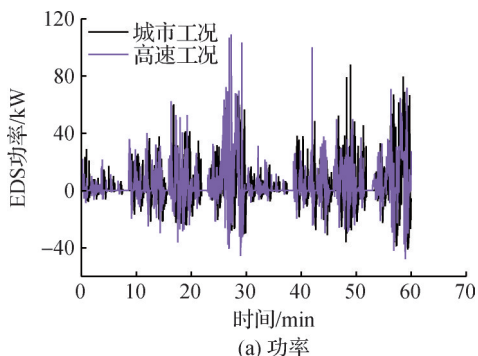
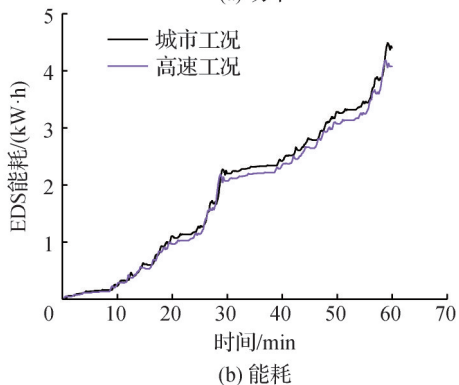


图 10 不同工况下空调总功率变化

Fig.10 Variation in total power of air conditioning under different operating conditions



(a) 功率



(b) 能耗

图 11 2 种工况下 EDS 实验结果

Fig.11 EDS experimental results under two conditions

驾驶中频繁地加速和减速,需要 EDS 提供不同的功率来应对不同的驾驶需求,同时过程中存在能量损失,能耗较高。而高速工况的功率输出在 $-20\sim 40$ kW 波动,这可能意味着在高速行驶时,EDS 的功率输出更加稳定,但也可能因为高速行驶时的阻力较大,需要更多的能量来克服空气阻力,然而在高速行驶时能耗相对较低,这是因为高速行驶时车辆的空气动力学效率较高,减少了能量损失。

表 2 所示为城市工况下的能耗分布,在城市工况冷/热启动阶段,环境温度为 -7 °C 时电驱电耗为 4.4 kW·h,空调高低压电耗为 2.39 kW·h,其他低压电耗为 0.11 kW·h,电池总放电量为 6.9 kW·h。计算可知,电驱电耗占比高达 63.77% ,而空调高低压电

耗占比为 34.64% 。这说明在冷启动条件下,电驱系统是主要能耗来源,而空调系统随着温度的升高而能耗增加。对应表 2 中电驱电耗为 4.09 kW·h,空调高低压电耗为 1.12 kW·h,其他低压电耗为 0.36 kW·h,电池总放电量为 5.57 kW·h。电驱电耗占比为 73.43% ,空调高低压电耗占比降至 20.11% 。电驱系统较城市工况增加了 9.66% ,但空调系统的能耗占比显著降低了 14.53% 。这可能是由于高速行驶时车辆的空气动力学特性改善减少了冷却需求,从而降低了空调系统的能耗。此外,城市工况和高速工况的续航里程分别为 399.61 km 和 325.10 km,相较于 PTC 模式提高了 22.95% 和 37.29% 。因此,电动汽车在不同工况下的性能表现存在显著差异。城市工况下,空调系统的能耗占比较高,而高速工况下,电驱系统的能耗占比增加。

表 2 各部件能耗

Tab.2 Energy consumption of each component kW·h

工况	电驱电耗	空调高低压电耗	其他低压电耗	电池总电量
城市工况	4.40	2.39	0.11	6.90
高速工况	4.09	1.12	0.36	5.57

4 结论

余热回收系统在电动汽车热管理中的应用,不仅提高了能源的利用效率,还延长了重要部件的使用寿命,本文提出一种新的余热回收热管理系统和配置的控制策略,并对其在电动汽车低温工况的实验和实车测试进行研究,得到如下结论:

1)随着余热回收功率的增加,系统的总能耗降低,COP 提高,尤其在极端低温条件下本方案对电动汽车的热管理系统具有显著的节能效果。

2)实车测试证实了在不同环境温度下,余热回收系统在低温工况与极低温工况能耗分别降低了 24% 与 35% ,显著提高了系统能效。

3)本研究提出的热管理系统设计,通过灵活的控制策略,能够适应不同的环境温度和电池需求,有效地管理电池和电机的温度,从而提高整车的性能和乘客的舒适度。

4)实验和实车测试结果表明,电动汽车在不同工况下的性能表现存在显著差异。城市工况下,空调系统的能耗占比为 34.64% ,电驱电耗占比为 63.77% ,续航里程在此工况下提高了 22.95% 。而高速工况下, 73.43% 能耗占比的电驱系统为主要影响因素,续航里程提升了 37.29% 。这说明在设计热管

理系统时,需要考虑不同工况下的能量需求和消耗特性。

参考文献

- [1] HE Liange, JING Haodong, ZHANG Yan, et al. Review of thermal management system for battery electric vehicle [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 59: 106443.
- [2] 李万勇, 刘雨声, 施骏业, 等. 电动汽车热泵空调系统低温制热性能及优化[J]. *制冷学报*, 2020, 41(6): 31-39. (LI Wanyong, LIU Yusheng, SHI Junye, et al. Low-temperature heating performance and optimization of electric vehicle heat pump air-conditioning system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(6): 31-39.)
- [3] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20: 82-102.
- [4] QI Zhaogang. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles - a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 754-764.
- [5] WAWZYNIAK M, WIEBELT A. Thermal management for electrified vehicles [J]. *MTZ Worldwide*, 2016, 77(5): 38-43.
- [6] BAGHERI S, HUANG Y, WALKER P D, et al. Strategies for improving the emission performance of hybrid electric vehicles [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 771: 144901.
- [7] CHIU C C, TSAI N C, LIN C. Near-optimal order-reduced control for A/C (air-conditioning) system of EVs (electric vehicles)[J]. *Energy*, 2014, 66: 342-353.
- [8] KAUSTHUBHARAM, KOORATA P K, PANCHAL S, et al. Combined influence of concentration-dependent properties, local deformation and boundary confinement on the migration of Li-ions in low-expansion electrode particle during lithiation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104908.
- [9] YOKOYAMA A, OSAKA T, IMANISHI Y, et al. Thermal management system for electric vehicles [J]. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 4(1): 1277-1285.
- [10] WANG Yueqi, DAN Dan, ZHANG Yangjun, et al. A novel heat dissipation structure based on flat heat pipe for battery thermal management system [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(11): 15961-15980.
- [11] 何家文, 张欣, 李欣林, 等. 纯电动乘用车电驱动系统余热回收特性研究[J]. *汽车工程学报*, 2024, 14(5): 848-857. (HE Jiawen, ZHANG Xin, LI Xinlin, et al. Characterization of waste heat recovery in electric drive system of battery electric passenger vehicle [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2024, 14(5): 848-857.)
- [12] HONG J, SONG J, HAN U, et al. Performance investigation of electric vehicle thermal management system with thermal energy storage and waste heat recovery systems[J]. *eTransportation*, 2024, 20: 100317.
- [13] GUO Rong, LI Lu, SUN Ziyi, et al. An integrated thermal management strategy for cabin and battery heating in range-extended electric vehicles under low-temperature conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 228: 120502.
- [14] 于天蝉, 石文星, 李先庭, 等. 电动汽车热泵空调系统冬季运行策略研究[J]. *制冷学报*, 2023, 44(4): 75-84. (YU Tianchan, SHI Wenxing, LI Xianting, et al. Operation strategy of heat pump air conditioning system for electric vehicles in winter [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(4): 75-84.)
- [15] HE Liange, JING Haodong, ZHANG Yan, et al. Performance research of integrated thermal management system for battery electric vehicles with motor waste heat recovery [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84: 110893.
- [16] HU Zhiwei, QIU Doudou, ZHAO Jun, et al. Integrated design of multi-circuit thermal management system with battery waste heat utilization for new energy vehicle and performance assessment [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 312: 118566.
- [17] HEMMATI S, DOSHI N, HANOVER D, et al. Integrated cabin heating and powertrain thermal energy management for a connected hybrid electric vehicle [J]. *Applied Energy*, 2021, 283: 116353.
- [18] LI Kang, CHEN Hongming, XIA Dingyu, et al. Assessment method of the integrated thermal management system for electric vehicles with related experimental validation [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 276: 116571.
- [19] LI Dongjun, ZHANG Caizhi, FAN Ruijia, et al. An innovative thermal management method for cooling loop of electric driving system for durable and high efficiency electric vehicle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117176.
- [20] MA Jing, SUN Yongfei, ZHANG Shiang. Experimental investigation on energy consumption of power battery integrated thermal management system [J]. *Energy*, 2023, 270: 126860.
- [21] ZHANG Zhenying, WANG Jiayu, FENG Xu, et al. The solutions to electric vehicle air conditioning systems: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 443-463.

通信作者简介

施骏业,男,专职科研,博士,上海交通大学机械与动力工程学院,021-34206775,E-mail:jyshi@sjtu.edu.cn。研究方向:新能源汽车热管理系统、微通道换热器技术等。

About the corresponding author

Shi Junye, male, full-time researcher, Ph. D., School of

Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 86-21-34206775, E-mail: jyshi@sjtu.edu.cn. Research fields: thermal management system for new energy vehicles, microchannel heat exchanger technology, etc.