

基于能量流方法的纯电动汽车低温续驶里程提升研究

王福坚, 谢信宏, 邵杰, 蔡家康, 唐逵

(上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西, 柳州 545007)

摘要: 以某带热泵系统的微小型纯电动乘用车为对象, 开展低温CLTC-P循环工况下的续驶里程测试, 通过综合研究测试数据并分解整车能量流, 探讨提升续驶里程的潜在方向。基于AMESim平台建立包含热管理系统的整车动力经济性模型, 经校准后仿真对比不同优化方案, 制定组合优化方案。试验验证结果显示, 组合优化方案可将低温续驶里程提升12.6%, 其中热管理系统优化方案的贡献显著优于整车阻力优化方案和控制策略优化方案。为提升纯电动乘用车低温环境下的续驶里程提供参考思路和方法。

关键词: 纯电动车; 能量流建模; 低温续驶里程; 热管理系统优化

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.03.20

Research on Improving the Low-Temperature Driving Range of Pure Electric Vehicles Based on the Energy Flow Method

WANG Fujian, XIE Jihong, SHAO Jie, CAI Jiakang, TANG Kui

(SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, Guangxi, China)

Abstract: This study focuses on a small-sized electric passenger vehicle equipped with a heat pump system, conducting a driving range test under low-temperature CLTC-P cycle conditions. By comprehensively examining the test data and analyzing the vehicle's energy flow, potential avenues for improving the driving range are explored. A comprehensive model of vehicle dynamics and economics, including the thermal management system, is established on the Amesim platform. After calibration, different optimization schemes are simulated and compared to develop a combined optimization scheme. Experimental results show that the combined optimization scheme can improve the low-temperature driving range by 12.6%. Among them, the contribution of the thermal management system optimization scheme significantly surpasses that of the vehicle resistance optimization scheme and the control strategy optimization scheme. This study provides reference ideas and methods for improving the driving range of pure electric passenger vehicles under low-temperature environments.

Keywords: pure electric vehicle; energy flow modeling; low temperature driving range; thermal management system optimization

收稿日期: 2024-01-19 改稿日期: 2024-03-27

基金项目: 广西新能源汽车实验室专项(桂科AA23062086)

参考文献引用格式:

王福坚, 谢信宏, 邵杰, 等. 基于能量流方法的纯电动汽车低温续驶里程提升研究[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(3): 531-543.

WANG Fujian, XIE Jihong, SHAO Jie, et al. Research on Improving the Low-Temperature Driving Range of Pure Electric Vehicles Based on the Energy Flow Method[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(3): 531-543. (in Chinese)



世界汽车工业的快速发展在促进社会进步和经济发展的同时也带来了如温室效应、环境污染和能源危机等诸多严峻考验。纯电动汽车因其零排放、噪声小、能源利用率高的优势而成为新能源汽车中的主流,但其动力电池成本较高、电池容量和续航里程受限等因素也制约着其更大规模的发展。为了满足精细化的整车开发需求,以整车能量流测试、分析与仿真为支撑的整车能量管理技术应运而生。通过整车能量流测试,全面了解整车在不同工况下各系统与各部件的能量消耗及占比,从而对其节能潜力进行剖析和挖掘,提出可行的优化方案,最终达到节能减排和提升续航里程的目的^[1]。

国内外学者对纯电动汽车能耗改善或续航里程提升进行了大量的研究。MRUZEK等^[2]基于Matlab/Simulink软件研究了设计参数对纯电动汽车能耗方面的影响,发现整车质量和动力电池容量是影响纯电动汽车续航里程的重要因素。HOMAN等^[3]通过研究纯电动汽车的传动类型和传动比对整体效率的影响,发现通过优化换挡策略及降低主传动比可提高整体效率,最大节能达6%。KYOUNG等^[4]提出通过改变电机中的绕组连接提高电机效率,从而将电动汽车的经济性提升了3.8%。黄伟等^[5]设计了一种纯电动汽车能量流优化方案,使NEDC工况下整车的电耗降低13.78%。王斌等^[6]通过NEDC工况的分析,提出了基于循环工况的驱动电机参数优化方法,提升了纯电动汽车8.9 km的续航里程。盛继新等^[7]和彭鹏峰等^[8]就纯电动汽车传动系统分别提出了两挡机械式自动变速器传动系统方案和汽车3挡变速方案,优化后分别能提升NEDC工况下的续航里程5.85%及9.2%。郑锦汤等^[9]提出了两挡电控机械式自动变速器纯电动汽车模型和动力系统优化数学模型,构建两挡AMT纯电动汽车联合优化仿真流程及平台,优化后能改善NEDC工况下3.78%的经济性,缩短2.23%的百公里加速时间。伍健等^[10]在Simulink上搭建了针对纯电动汽车热管理系统的控制算法,通过调整控制策略中的参数阈值来进行优化,优化后

的控制策略能使电动汽车续驶里程增加15%以上。周光辉等^[11]发现在低温环境下通过补气技术可以提升纯电动客车热泵空调系统的COP。黄炯等^[12]通过采用四通阀集成式热管理技术和高效热泵空调节能技术,有效提升了纯电动车型冬季续驶表现。

现有研究中,纯电动汽车续航里程提升的方案集中于常温的标准循环工况,且多为局部或单项改进措施,如优化动力系统、调整传动比以及改善电池性能等。这些研究虽然在各自领域取得了一定的成果,然而在实际应用中,由于缺乏系统的集成与耦合,导致未在系统层面上提出较完整可行的优化方案。在低温环境下,纯电动汽车的续航里程问题尤为突出,按照现有研究,优化效果受到限制。

本文旨在深入这一研究方向,以某带热泵系统的微小型纯电动乘用车为研究对象,以能量流测试和仿真分析为主要手段,从整车系统、控制策略、热管理3个方面,对动力电池、电驱系统、半轴、热管理系统、DC/DC以及低压附件系统的能量流进行分析,结合整车能量流的集成耦合优化方法,综合性地提升其在低温环境下的续航里程。

本研究不仅为纯电动汽车能量流分析提供了新的思路和方法,还通过系统层面的集成耦合,对纯电动汽车在低温环境下的续航里程提升提出了综合性的解决方案。

1 整车能量流测试方法及设备

1.1 整车能量流测试原理概述

车辆在行驶过程中,纯电动汽车的能量流如图1所示,驱动能量流分布路径:动力电池-电机控制器-电机-减速器-半轴;热管理能量流分布路径:动力电池PDU-DCDC/热管理系统-低压附件。

通过测试能量从产生到耗散的各种路径,然后计算能量通过不同部件时的效率,可以对测试结果进行分析评价,并与对标车辆进行统计比较,从而快速识别能耗优化点,提升纯电动汽车的续航里程。

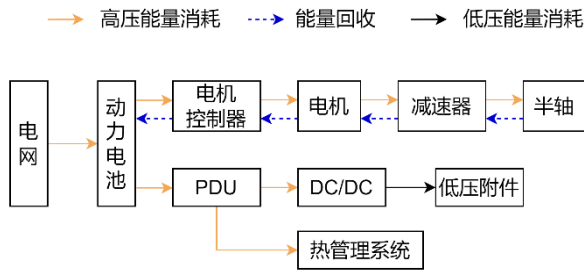


图1 整车能量传递路径

1.2 整车能量流测试方案设计

1.2.1 车辆基本信息

试验样车为一辆带热泵系统的微小型纯电动乘用车，整车包括热泵空调系统的架构如图2所示。

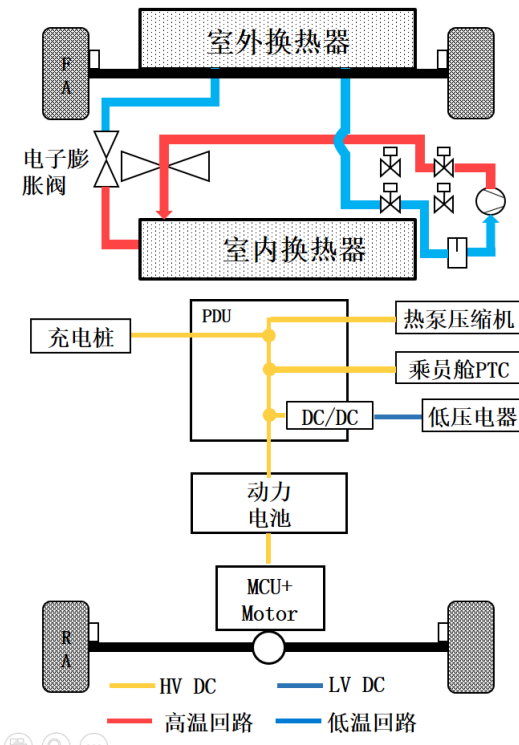


图2 整车构架及热管理工作模式

整车各部件基本信息见表1。

1.2.2 测试设备基本信息

能量流测试在带环境仓的底盘测功机上进行，试验设备主要包括底盘测功机、鼓风机、轴流风扇、灯光系统、空调系统等，具体的试验装置如图3所示。其中，转鼓用于模拟车辆在实际道路上的运行状态，空调系统和轴流风扇用于模拟环境温度和整车的进风情况，而各类传感器（包括温度传感器、

表1 样车详细参数

部件	参数	值/规格
整车	整备质量/kg	948
	空气阻力系数	0.396
	迎风面积/m ²	2.244
	滚动阻力系数/‰	7.5
	滚动半径/mm	247
减速器	传动系统结构	单减速器
	传动比	6.736
电机	类型	永磁同步电机
	峰值扭矩/Nm	110
	峰值功率/kW	29
电池	类型	磷酸铁锂蓄电池
	容量/Ah	113
	额定电压/V	115

电压传感器、电流传感器等) 则记录着测试过程中车辆的各种信息。



图3 转鼓上的待测试车辆

1.2.3 测试方案设计

根据项目要求，参考标准 GB/T 18386.1—2021 《电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法》^[13] 开展整车能量流测试。此次测试在-7℃的低温环境下连续开展CLTC-P (China Light-Duty Vehicle Test Cycle—Passenger) 工况的试验。较NEDC而言，CLTC-P 工况增加了范围更广的路况信息，但高速部分所占的时间更少，最高车速、平均车速更低，更适合纯电动汽车进行测试。

整车测试前需要把各种传感器安装在试验样车上，并进行调试，传感器的布局方案如图5所示。

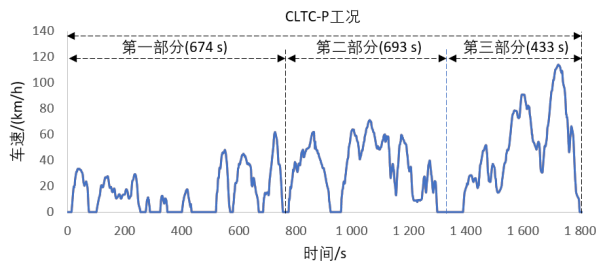


图4 CLTC-P工况

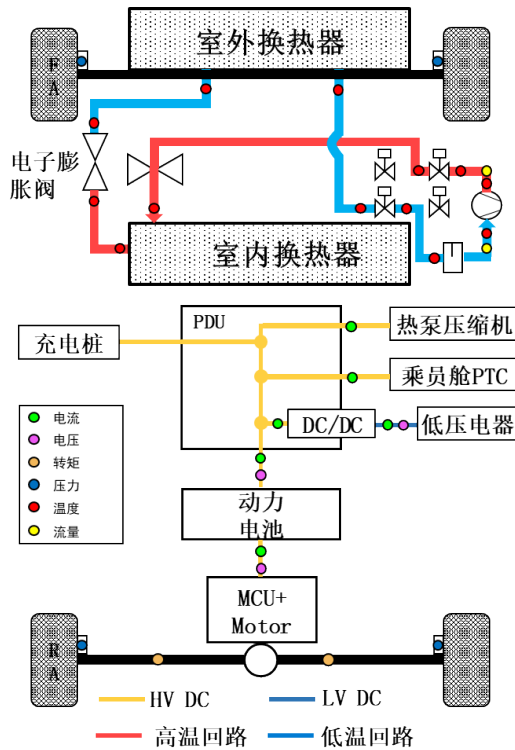


图5 传感器布置方案

2 测试数据分析

2.1 整车系统

2.1.1 滑行阻力数据分析

纯电动汽车的滑行阻力主要包括空气阻力、滚动阻力、加速阻力以及汽车内部阻力，通常呈现阻力随车速二次方形式增长，为了方便地表示车辆滑行阻力随速度的变化，通常采用如式(1)所示的阻力随速度变化的一元二次曲线来描述。

$$y = A + Bv + Cv^2 \quad (1)$$

式中： y 为滑行阻力，单位N； v 为车速，单位km/h； A 、 B 、 C 是通过实际滑行试验结果拟合而来，滑行阻力的具体计算方法来源于国标GB/T 12536—2017《汽车滑行试验方法》^[14]，在此不再赘述。

考虑到环境温度特别是低温对滑行阻力有一定的影响，需要对低温下的滑行阻力进行一定的补偿，根据GB/T 18386.1—2021《电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法第1部分：轻型汽车》要求，可以先通过道路滑行试验得到常温下（23℃）车辆的滑行阻力，再将已获得的滑行阻力的滑行时间减少10%，计算得到的阻力作为设定用替代的道路滑行阻力，试验样车的滑行阻力曲线如图6所示。

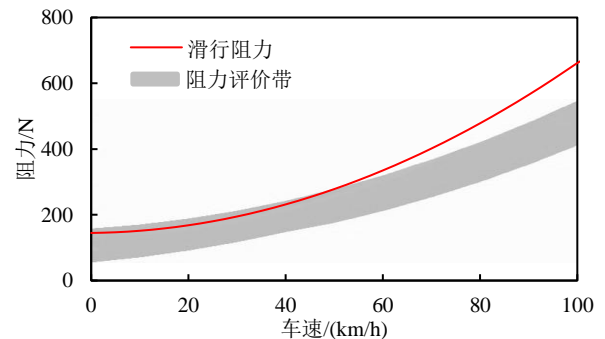


图6 整车滑行阻力曲线

图6中灰色部分为试验样车同级别质量、同类型的对标车滑行阻力评价带，可以看出，此次样车的滑行阻力处于偏大水平，特别是中高速段；因此，样车的滑行阻力特别是中高速段还有一定的提升空间。

2.1.2 整车能量流数据分析

低温CLTC-P工况能量流测试结果显示，试验样车的行驶里程为113 km，百公里电耗为19.97 kWh/100 km。对测试数据进行汇总分析，可获得各系统或零部件能量输入、输出情况。汇总情况见表2~3。

根据上述测试得到电动汽车在CLTC-P工况下的能量流情况，对系统或零部件效率进行计算，得到各系统或零部件的能量传递效率，见表4。

对样车CLTC-P工况下各系统或零部件能量流动效率的分析，指明了能量利用效率的优化方向。

2.2 热管理系统

2.2.1 电池温升特性分析

由于电池温度场分布不均匀，需要考虑其温度场的最高温度、最低温度与平均温度，如图7所

表 2 驱动状态下能量输入、输出情况 单位：kWh

系统/部件	项目名称	值
动力电池	总输出能量	19.91
	总回收能量	0.89
	净输出能量	19.02
电驱系统	输出能量	14.88
	回收能量	1.13
半轴	输出能量	12.58
	回收能量	1.32
空调系统	输出能量	4.08
DC/DC	输出能量	0.95

表 3 充电状态下能量输入、输出情况 单位：kWh

系统/部件	项目名称	值
充电桩	充电电量	22.55
动力电池	充电电量	20.73
DC/DC	输出能量	0.398 4

表 4 各系统/零部件能量传递效率 单位：%

分类	参数	值	评价
整车	能量利用率	63.18	较差
	能量回收效率	67.42	平均
	能量回收比例	4.47	较差
动力电池	电池充放电效率	91.75	较差
	OBC 充电效率	91.93	略差
电驱系统	驱动效率	84.54	平均
	制动效率	85.61	平均
	综合效率	85.07	平均

示，动力电池温度随循环均匀升高，被动风冷动力电池无法主动调节电池温度，电池温度上升的热量主要来源于电池充放电时的内阻产热。在低温环境下，电池温升较缓慢。

由图 7 可知，动力电池充放电功率与电池最低温度直接相关，动力电池充电功率随着电池温度的升高而逐渐增加。在电池最低温度低于 0℃时，根据电池特性，电池管理系统不支持能量回馈充电。在第 3 个 CLTC-P 循环，电池温度 > 0℃后，才被允许回馈充电，此时动力电池 SOC 大概为 75%，初步评估有优化空间。

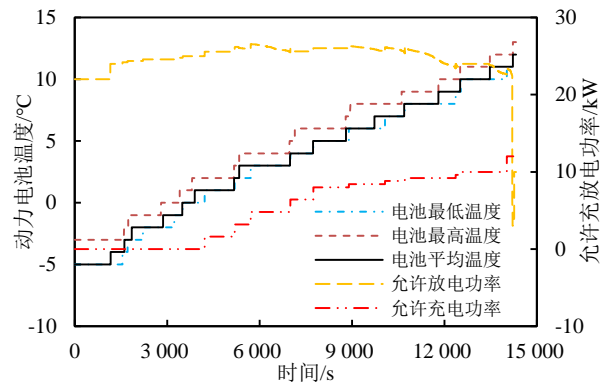


图 7 动力电池温度与充放电功率变化情况

2.2.2 电机温升特性分析

由图 8 可知，电机温度从刚开始的低温环境温度 (-7℃) 随着电机工作逐步升高，直到第 6 个循环电机温度才保持相对稳定，电机温升速度缓慢，这是因为车上没有配备电机预热系统，产生温升的热量来源主要为电机工作时的铜损、铁损以及摩擦生热。

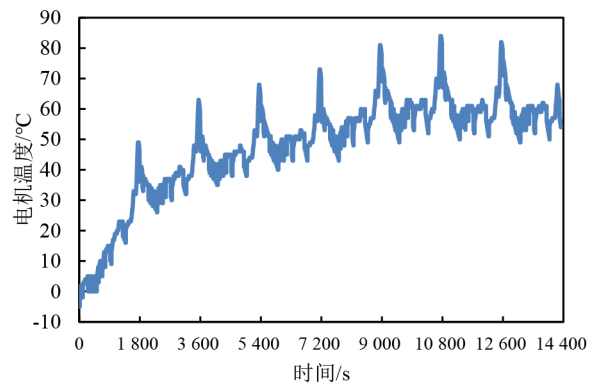


图 8 电机温度

电机的效率与电机的工作温度密切相关，驱动电机的最佳工作温度为 50~70℃之间。如图 9 所示，红色曲线为各循环电机的平均温度，黑色曲线为各循环电机的整体效率，可以发现，随着电机平均温度的升高，电机的效率也在逐步增加，直到电机温度处于最佳工作温度区间，电机效率保持相对平稳。由此可知，对于在低温下工作的电动汽车，在工作之初，可以尽快通过预热等手段来提高电机的温度使其达到最佳工作温度，从而让电机更快进入高效工作区间，达到降低损失、延长续驶里程的目的。

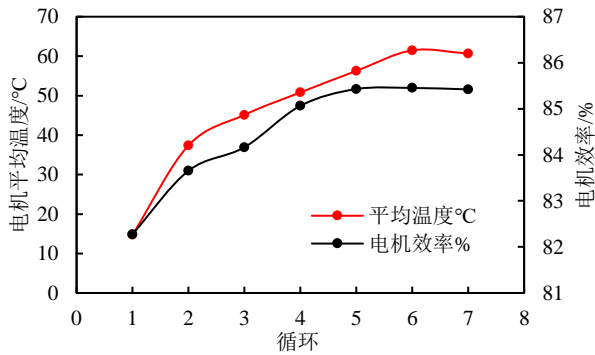


图9 各循环电机温度与电机效率

2.2.3 热泵系统能效分析

如图 10 所示，热泵系统在-7 °C低温环境下启动，压缩机出口温度稳定在 100 °C左右，进口温度稳定在 0 °C左右。除去人为误操作，压缩机高压压力整体建立过程慢，一方面是因为系统中室外换热器换热能力不足，另一方面是前期压缩机转速不够所导致，可作为潜在优化方向。

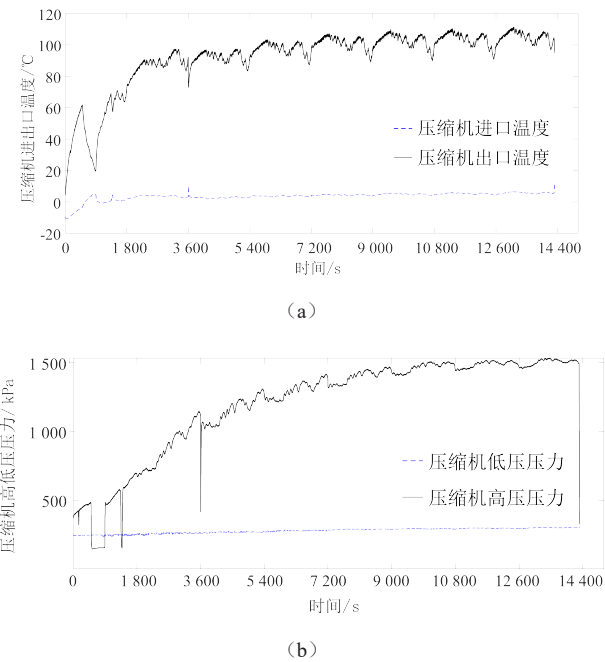


图 10 压缩机进出口温度及高低压力

根据测试数据进行计算，绘制如图 11 所示的热泵性能参数图，在系统压力稳定建立后，其能耗比 COP 在 1 左右（COP 计算公式： $COP = \text{制热量} / \text{压缩机电功率}$ ，理论 $COP > 1$ ），通过分析发现，COP 偏低的潜在原因是压缩机的机电转化效率低和室内

换热器测试温度、流量误差，这表示系统的制热效率较低，可作为潜在优化方向。

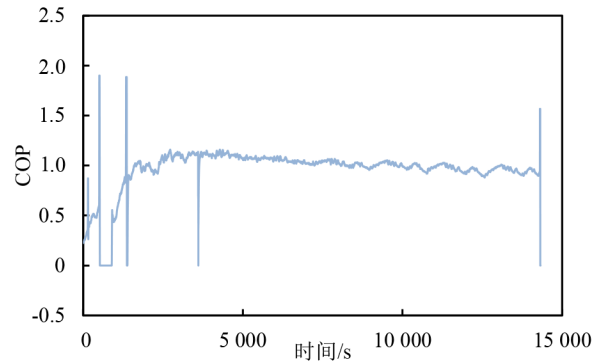


图 11 热泵性能系数

3 仿真模型搭建及校核

基于 AMESim 平台进行仿真模型的搭建。如图 12 所示，首先搭建电池系统、电机及传动系统、空调和热泵系统等子系统模型，以及相关的控制耦合、电能耦合和热能耦合模型，然后将子系统模型和耦合模型集成，最终形成整车仿真模型。

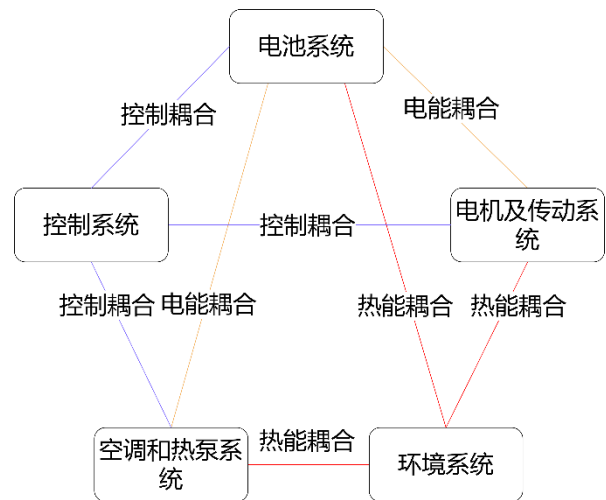


图 12 整车仿真模型框架

收集仿真输入参数，除了表 1 的样车主要参数之外，还要收集热泵、换热器、风机、管路、电子膨胀阀对应不同工作挡位的状态数据，以及换热器和乘员舱的几何数据，见表 5。

最终 AMESim 整车仿真模型如图 13 所示。

为了验证仿真模型的有效性和可信度，需要对

表5 仿真输入参数

分类	参数
整车	质量 (整备质量、总质量)
	空气阻力 (空气阻力系数、迎风面积)
底盘	轮胎 (滚动半径、滚动阻力系数)
	减速器 (传动比、传动效率)
动力	电池 (电量、SOC窗口、放电功率)
	电驱 (外特性、效率MAP、惯量)
	控制策略 (驱动策略、回馈策略)
空调和热泵系统	热泵 (转速、流量、压力、温度、功率、控制策略)
	换热器 (外形、流量、压力、温度)
	电子膨胀阀 (流通面积)
	管路 (长度、内径、壁厚、材料)
	风机 (压力、温度、直径、转速、流量)
	乘员舱 (容积、面积、风口尺寸)

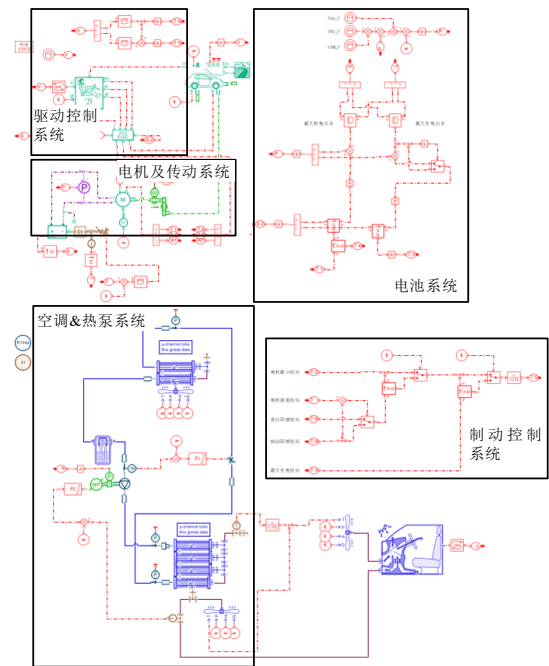


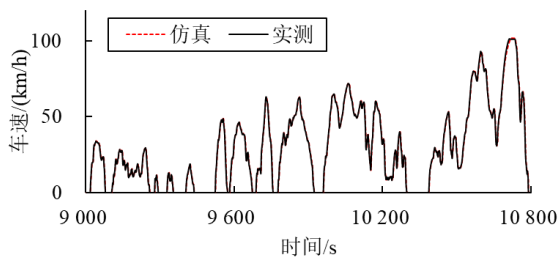
图13 整车与热管理集成仿真模型

整车能量流仿真模型进行校核，校核基准是整车能量流测试数据，以标准CLTC-P循环工况为仿真目

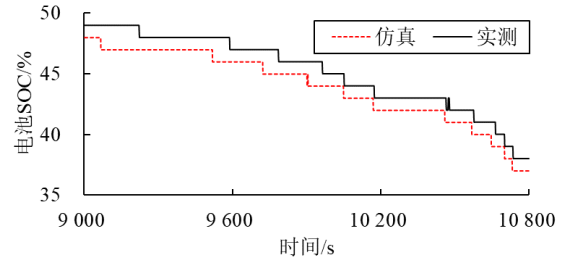
标运行模型，校核结果见表6和图14~15。

表6 基准方案仿真结果

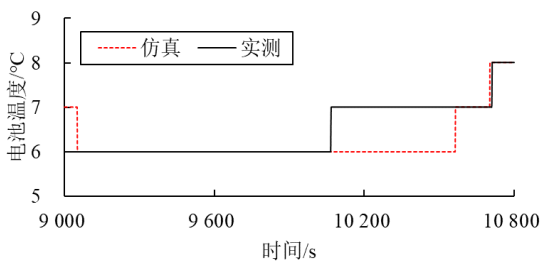
校核指标	里程/km	电池 (放) /kWh	轮边 (驱) /kWh	电机 (回收) /kWh	压缩机/kWh
实测	113.0	19.910	12.580	1.130	4.080
仿真	113.2	19.120	12.921	1.270	4.047
偏差	0.2%	-4.0%	2.7%	12.4%	-0.8%



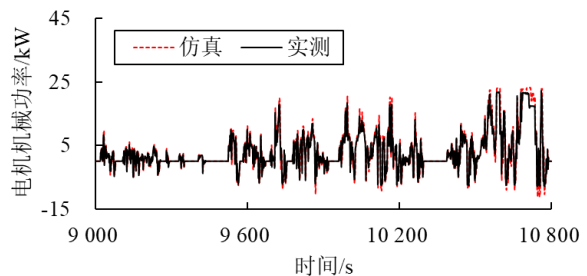
(a) 车速



(b) 电池SOC



(c) 电池温度



(d) 电机功率

图14 动力系统仿真校核数据

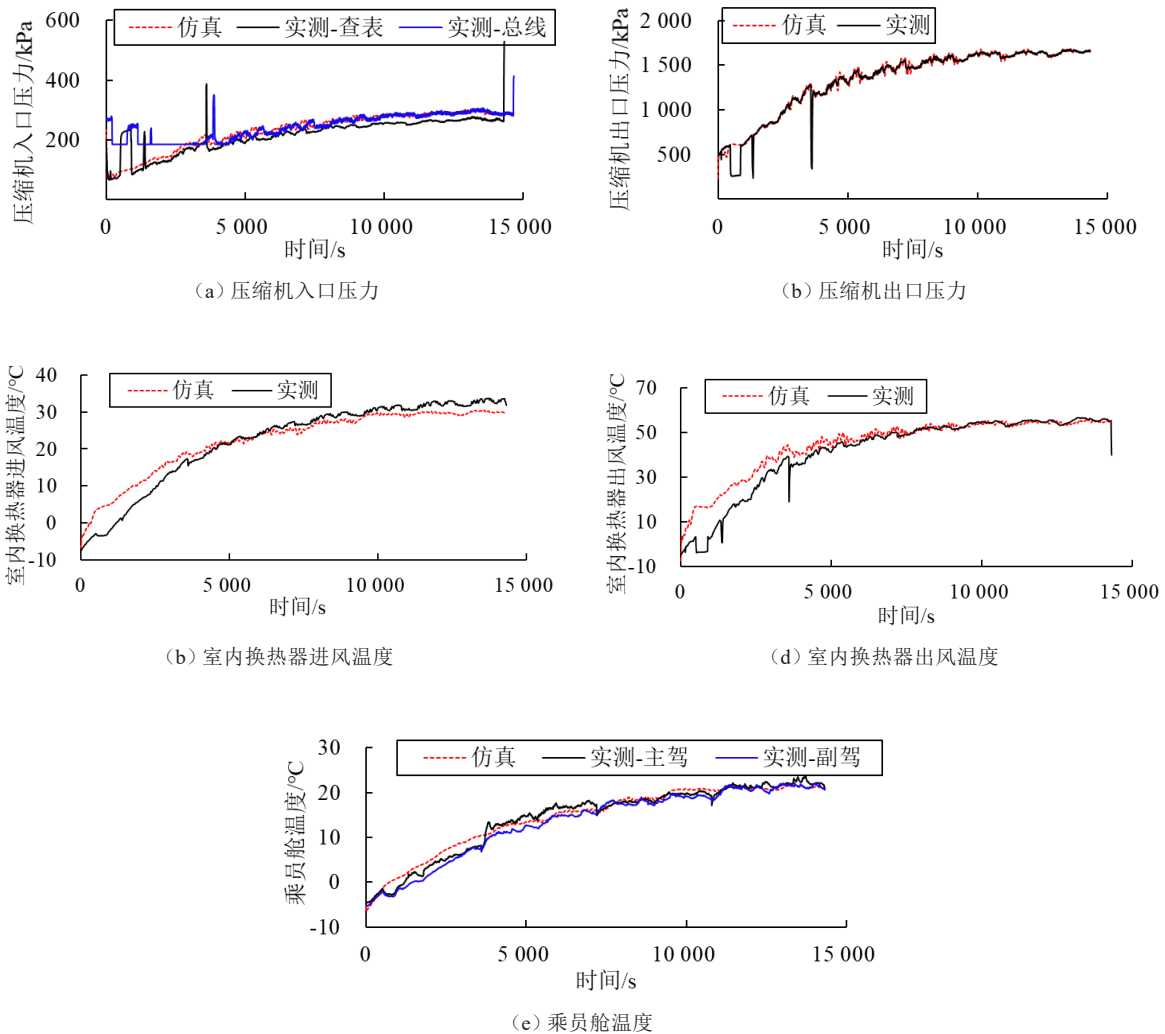


图 15 热管理系统仿真校核数据

结果显示：仿真结束时电池 SOC 的仿真值与测试值对比，结果误差 $<1\%$ ；电池温度仿真值与测试值偏差最大 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，对比结果基本一致；热管理系统指标的趋势和实测接近。以上结果表明，模型准确度较高，满足研究要求。

整车集成模型校核后，可作为基准方案，并在其基础上评估进一步的优化方案。

4 优化方案及仿真结果

4.1 优化整车阻力

由上文的能量流测试分析可知，此次样车的滑行阻力处于偏大水平，特别是中高速段；进一步分解滑行阻力，其空气阻力、车辆内部阻力与轮胎滚

动阻力在数据库里也属于较差水平，存在一定的优化空间。考虑到整车构造已经定型，空气阻力系数无法再进行进一步优化，针对车辆内部阻力和轮胎滚动阻力水平较差的问题，制定了降低制定卡钳拖滞力、降低轮胎滚动阻力、整车轻量化等 3 个方案，具体优化措施见表 7。

图 16 为优化前后内部阻力与滚动阻力水平的对比情况，优化后试验样车的内部阻力与滚动阻力水平降低至数据库评价带的优秀区间。

图 17 为优化前后的阻力曲线对比。调整模型中整车滑行阻力，其他参数及设置不变，代入基准方案模型中进行计算，见表 8，优化后的整车续航里程相比基准方案提升了 2.28% 。

表 7 整车阻力优化措施汇总

技术方案	措施	现状	优化	降阻贡献/N
降低制动卡钳拖滞力	应用低拖滞卡钳	1.5 Nm	1.0 Nm	-8
降低轮胎滚阻	应用低滚阻轮胎	7.5 ‰	6.5 ‰	-9
整车轻量化	车身、电池减重	948 kg	912 kg	-2

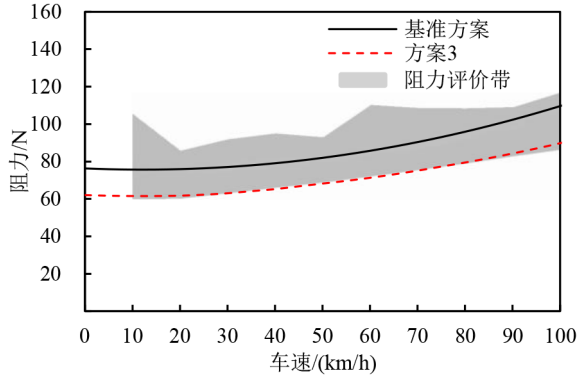


图 16 优化前后内部阻力+滚动阻力对比

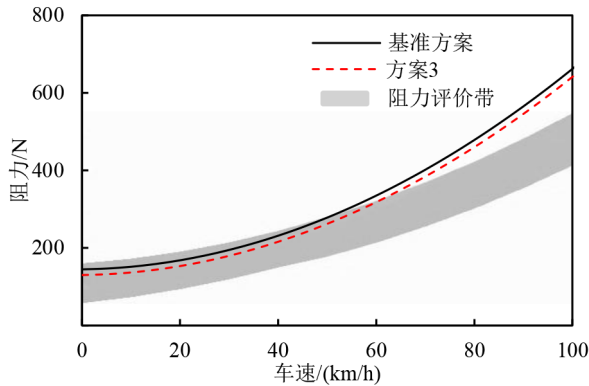


图 17 优化前后拟合总阻力对比

4.2 优化制动能量回收策略

根据整车能量流测试分析，整车的制动能量回收比例仅占 4%~5%，一般纯电动汽车在 CLTC-P 工况下的制动能量回收比例可达 16% 左右，存在较大的提升空间，进一步分析制动回收策略，发现制动回馈转矩未解耦，回馈转矩受到较大限制，同时

发现电池在温度小于 0 °C 时，充电功率为 0，只有在电池温度大于 0 °C 时，才可以进行充电。为了提高整车的制动能量回收比例，对现有的制动能量回收策略进行两方面的改进：

- 1) 增加 Eboost 电子助力制动，将制动回馈策略电液解耦，以电机峰值扭矩为电机的最大回馈转矩，解除原转矩的限制；
- 2) 通过加热膜在充电时对电池进行加热^[15]，加快电池温升，以提升电池的充电功率。

图 18 的对比结果显示，优化后的整车制动能量回收策略以最大的能力回收。调整制动回馈策略，并新增电池加热策略，其他参数及设置不变，代入基准方案模型中计算，其电机回收累计回收电量由 1.270 kWh 提高到 2.784 kWh，回收优化效果显著，图 19 展示了优化前后电机累计回收电量对比，最终结果见表 9，续驶里程提升 4.38%。

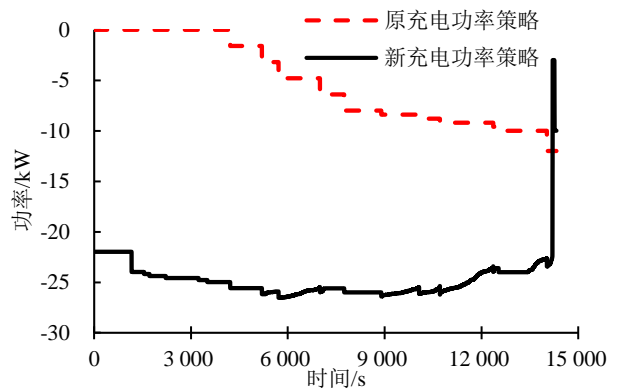


图 18 优化前后充电功率边界对比

表 8 阻力优化仿真结果

校核指标	里程/km	电池（放）/kWh	轮边（驱）/kWh	PDU/kWh	压缩机/kWh
基准方案	113.205	19.120	12.921	4.978	4.047
方案 1	115.787	19.156	12.896	5.039	4.109
变化	2.28%	0.19%	-0.20%	1.22%	1.51%

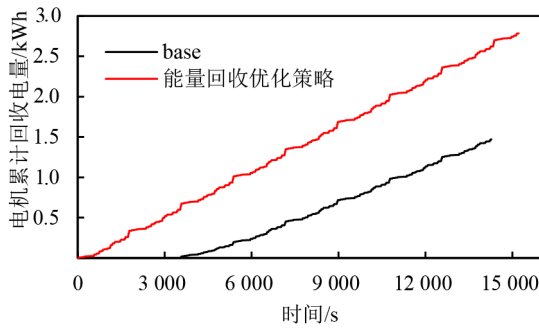


图 19 优化前后电机累计回收电量对比

4.3 优化热泵系统

根据整车能量流测试分析结果可知，热泵系统能耗比 COP 在 1 左右，理论 COP 应该大于 1。针对此问题，从以下几个角度提高室外换热器换热能力从而提高热泵系统换热效率：

- 1) 延长风机工作时间，风速参考测试数据；
- 2) 根据乘员舱温度调整压缩机转速，提高乘员舱的升温速率；
- 3) 降低低压压力，从而降低室外换热器冷媒温度，提高室外换热器换热能力。

对热泵系统室外换热器及控制进行优化，其他参数及设置不变，再次进行仿真计算，见表 10。优化后，压缩机能耗降低 1.596 kWh，风扇能耗增加 0.583 kWh，续航里程提升 7.858 km，约 6.94%。

优化前后乘员舱的温升过程曲线如图 20 所示，优化后的乘员舱温升过程要比优化前更快达到目标温度，并且稳定在目标温度上下波动。其优化后的系统能耗比 COP 稳定在 1.9 左右，比优化前高出一倍，如图 21 所示，优化效果明显。

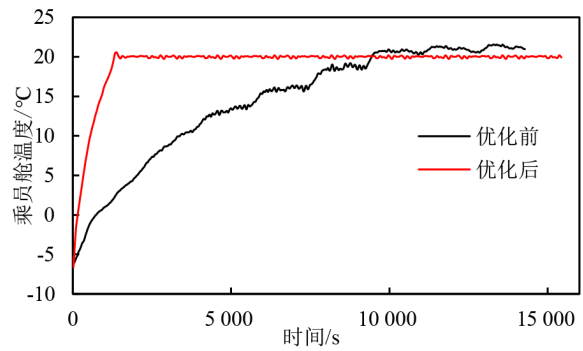


图 20 优化前后乘员舱温度

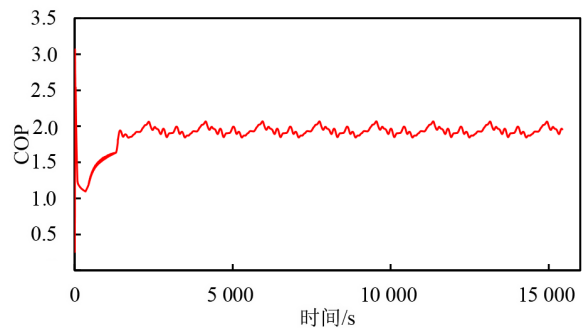


图 21 优化后热泵性能系数

表 9 制动回馈策略优化仿真结果

校核指标	里程/km	电池 (放) /kWh	轮边 (驱) /kWh	电机 (回收) /kWh	压缩机/kWh
基准方案	113.200	19.120	12.921	1.270	4.047
方案 2 和方案 3	118.161	20.087	13.521	2.784	4.344
变化	4.38%	5.06%	4.64%	124.7%	7.33%

表 10 热泵优化仿真结果

校核指标	里程/km	电池 (放) /kWh	轮边 (驱) /kWh	PDU/kWh	压缩机/kWh	风扇/kWh
基准方案	113.205	19.120	12.921	4.978	4.047	0.053
方案 4	121.063	19.335	13.837	4.02	2.451	0.636
变化	6.94%	1.12%	7.09%	-19.26%	-39.44%	1 093%

4.4 增加回热管

由于冷凝器出口温度较高，余热可利用空间较大，考虑从优化热泵系统架构的角度来提高系统换热能力。可在系统回路中增加回热管，利用节流前

的冷媒余热加热压缩机入口冷媒，提高节流前的过冷度和压缩机入口冷媒过热度，进而改善换热效率。优化前后的模型对比如图 22 所示。

模型增加回热管之后，其他参数及设置不变，

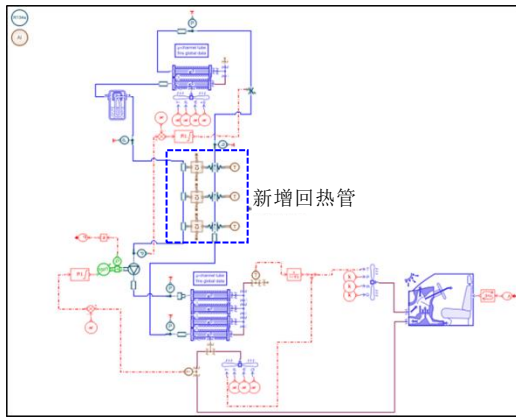


图 22 增加回热管方案

再次进行仿真计算，见表 11。优化后，压缩机能耗降低 1.726 kWh，风扇能耗增加 0.586 kWh，续驶里程提升 8.912 km，约 7.87%。

综合比较整车阻力、制动回馈策略和热管理系统三方面的优化效果，热管理优化效果更佳，可结合方案 1~5，尝试不同组合对续驶里程的影响，得出不同方案及优化组合的仿真计算结果，见表 12。

结果显示，方案 1、2、3、5 组合具备理论最大优化潜力，能提升整车 18.14% 的续驶里程。

5 优化方案验证

根据仿真优化分析结果，在试验样车上实施上

述方案 1、2、3、5，并按照第 1 节的方法重测能量流。

能量流测试数据见表 13~15。

能量流数据显示，实施优化措施后，试验样车在低温环境的空调系统耗电从 4.08 kWh 降低到 2.45 kWh，且能量回收比例从 4.47% 显著提升到 9.89%，样车的低温续驶里程得到明显提升。对应试验样车的低温 CLTC-P 工况续驶里程提升 129.28 km，里程提升幅度为 12.6%，实施方案后的车辆里程变化趋势与仿真一致，仿真与实测的偏差，主要原因是理论参数和实际的差异，以及实际测试过程中如环境、车辆状态和人员操作等影响因素较多。

6 结论

通过开展整车能量流测试分析与仿真研究，得到以下结论。

1) 通过对纯电动汽车能量流试验数据进行分析，发现整车的制动能量回收比例仅占 4%~5%，低于正常水平，原因为制动回馈转矩未解耦，受到较大的回收限制，且动力电池温度在 0℃ 以下时无法充电。

表 11 增加回热管优化仿真结果

校核指标	里程/km	电池(放)/kWh	轮边(驱)/kWh	PDU/kWh	压缩机/kWh	风扇/kWh
基准方案	113.205	19.120	12.921	4.978	4.047	0.053
方案 5	122.117	19.343	13.945	3.897	2.322	0.639
变化	7.87%	1.17%	7.92%	-21.72%	-42.63%	1 098%

表 12 优化组合仿真结果

序号	方案	仿真里程/km	里程提升/km	提升比例/%
1	基准方案	113.205		
2	方案 1: 优化整车阻力	115.787	2.582	2.28
3	方案 2: 制动回馈解耦	113.791	0.586	0.52
4	方案 3: 提升电池充电功率	114.707	1.502	1.33
5	方案 4: 优化热泵控制策略	121.063	7.858	6.94
6	方案 5: 增加热泵回热管	122.117	8.912	7.87
7	方案 1、2、3、4	132.368	19.163	16.93
8	方案 1、2、3、5	133.737	20.532	18.14

表 13 驱动状态下能量输入、输出情况 单位: kWh

系统/部件	项目名称	值
动力电池	总输出能量	22.54
	总回收能量	2.23
	净输出能量	20.31
电驱系统	输出能量	16.83
	回收能量	2.84
半轴	输出能量	14.6
	回收能量	3.2
空调系统	输出能量	2.45
DC/DC	输出能量	0.67

表 14 充电状态下能量输入、输出情况 单位: kWh

系统/部件	项目名称	值
充电桩	充电电量	24.16
动力电池	充电电量	22.25
DC/DC	输出能量	0.38

2) 仿真分析发现, 热管理系统优化方案对于

表 15 各系统/零部件能量传递效率 单位: %

分类	参数	值
整车	能量利用率	64.76
	能量回收效率	69.70
	能量回收比例	9.89
动力电池	电池充放电效率	91.30
	OBC 充电效率	92.10
电驱系统	驱动效率	86.77
	制动效率	88.87
	综合效率	87.82

纯电动汽车低温续航里程的贡献度可达到 7.87%, 相对于整车阻力优化方案和控制策略优化方案的贡献度更大。

3) 优化后的电驱动总成效率、整车能量回收比例和续航里程得到明显的提升, 组合优化方案经验证提升了 12.6% 的低温续航里程, 达到 129.28 km, 显著改善了整车低温下的续航能力。

参考文献 (References)

- [1] 冯仁华, 陈昆阳, 赵智超, 等. 混合动力商用车能量流测试研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(2): 77-85.
FENG Renhua, CHEN Kunyang, ZHAO Zhichao, et al. Experimental Study on Energy Flow of a Hybrid Commercial Vehicle [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(2): 77-85. (in Chinese)
- [2] MRUZEK M, GAJDÁČ I, KUČERA E, et al. Analysis of Parameters Influencing Electric Vehicle Range [J]. Procedia Engineering, 2016, 134(1): 165-174.
- [3] HOMAN T, DAI C H. Energy Efficiency Analysis and Comparison of Transmission Technologies for an Electric Vehicle [C]//2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sept. 1-3, 2010, Lille, France. Piscataway NJ: IEEE, c2010: 1-6.
- [4] CHA K, KIM D, JUNG Y, et al. Wound Field Synchronous Motor with Hybrid Circuit for Neighborhood Electric Vehicle Traction Improving Fuel Economy [J]. Applied Energy, 2020, 263: 114618.1-114618.13.
- [5] 黄伟, 张桂连, 周登辉, 等. 基于能量流分析的纯电动汽车电耗优化研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(2): 171-180.
HUANG Wei, ZHANG Guilian, ZHOU Denghui, et al. Research on Optimization of Power Consumption of Pure Electric Vehicle Based on Energy Flow Analysis [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(2): 171-180. (in Chinese)
- [6] 王斌, 林鑫焱, 陈辛波, 等. 基于循环工况的纯电动汽车驱动电机参数优化[J]. 汽车工程学报, 2015, 5(3): 165-171.
WANG Bin, LIN Xinyan, CHEN Xinbo, et al. Parameter Optimization for Pure Electric Vehicle Drive Motors Based on Driving Cycle [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2015, 5(3): 165-171. (in Chinese)
- [7] 盛继新, 张邦基, 朱波, 等. 两挡纯电动汽车传动系统参数优化和试验对比[J]. 中国机械工程, 2019, 30(7): 763-770, 776.
SHENG Jixin, ZHANG Bangji, ZHU Bo, et al. Parameter Optimization and Experimental Comparison of Two-Speed Pure Electric Vehicle Transmission Systems [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(7): 763-770, 776. (in Chinese)
- [8] 彭鹏峰, 许新权, 曾洁琼. 基于电机效率的纯电动汽车传动系统参数匹配研究[J]. 机械设计与制造, 2021, (6): 39-44.
PENG Pengfeng, XU Xinquan, ZENG Jieqiong. Research

- on Parameter Matching of the Electric Vehicle Transmission System Based on Motor Efficiency[J].Machinery Design & Manufacture, 2021, (6):39-44. (in Chinese)
- [9] 郑锦汤,陈吉清.纯电动汽车动力系统速比优化设计[J].机械传动,2019,43(4):79-82,93.
ZHENG Jintang CHEN Jiqing. Optimization Design of Pure Electric Vehicle Power System Speed Ratio[J].Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(4):79-82, 93. (in Chinese)
- [10] 伍健,邹姚辉,韦杰宏.纯电动汽车热管理系统动态仿真及控制策略优化研究[J].装备制造技术,2021(3):119-123,155.
WU Jian, ZOU Yaohui, WEI Jiehong. Dynamic Simulation and Control Strategy Optimization on the Electric Vehicle Thermal Management System[J].Equipment Manufacturing Technology, 2021(3):119-123, 155. (in Chinese)
- [11] 周光辉,白军琴,李海军,等.低温环境下纯电动客车热泵空调系统制热性能试验研究[J].流体机械,2021,49(9):13-19.
ZHOU Guanghui, BAI Junqin, LI Haijun, et al. Experimental Study on Heating Performance of Pure Electric Bus Heat Pump Air Conditioning System Under Low Temperature Environment[J].Fluid Machinery, 2021, 49(9):13-19. (in Chinese)
- [12] 黄炯,陈瑶,高少俊,等.纯电动汽车冬季续航优化技术[J].时代汽车,2021(4):85-86.
HUANG Jiong, CHEN Yao, GAO Shaojun, et al. Winter Battery Life Optimization Technology for Pure Electric Vehicles[J].Auto Time, 2021(4):85-86. (in Chinese)
- [13] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.电动汽车能量消耗量和续驶里程试验方法第1部分:轻型汽车:GB/T 18386.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Test Methods for Energy Consumption and Range of Electric Vehicles—Part 1: Light-Duty Vehicles: GB/T 18386.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [14] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.汽车滑行试验方法:GB/T 12536—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Coastdown Test Method of Motor Vehicles: GB/T 12536—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [15] 栗晓杰,高雅,郭凤刚,等.车用动力电池系统低温充电加热方法研究[J].时代汽车,2021(19):97-98.
LI Xiaojie, GAO Ya, GUO Fenggang, et al. Research on Low Temperature Charging and Heating Method of Vehicle Power Battery System[J].Auto Time, 2021(19):97-98. (in Chinese)

作者简介



王福坚(1984-),男,广西南宁人,学士,高级工程师,主要研究方向为电动汽车系统集成、性能仿真与测试。
Tel: 0772-2651544
E-mail: fujian.wang@sgmw.com

通信作者



谢佶宏(1984-),男,广西河池人,学士,高级工程师,主要研究方向为新能源汽车系统集成。
Tel: 0772-2651551
E-mail: jihong.xie@sgmw.com.cn