

## 某纯电动车型的余热热源与空气源热泵控制策略研究

董哲明, 强健伟, 施睿, 王小碧, 王伟民, 付静, 唐禹, 傅小嘉, 贺其富

(东风汽车集团有限公司技术中心, 武汉 430058)

**摘要:** 随着纯电动汽车市场的进一步拓展, 为了满足北方客户在寒冷天气下的采暖需求, 并缓解低温环境下纯电动汽车续航里程的衰减, 需要对纯电动汽车在低温下的整车热管理控制策略进行更加贴合使用场景的优化。通过针对某纯电动车型在低温环境下不同使用场景中余热热泵与空气源热泵热管理控制策略的研究与实车验证, 将热泵热管理系统的有效使用环境温度下限从 $-15^{\circ}\text{C}$ 拓展到了 $-20^{\circ}\text{C}$ , 并且实现了该车型在 $-7^{\circ}\text{C}$ 低温环境下CLTC工况续航里程衰减率达到31.2%的优秀水平。

**关键词:** 整车热管理系统; 纯电动汽车; 余热热泵; 空气源热泵; 低温环境; 控制策略

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.01.08

## Research on Control Strategies for Waste Heat Source and Air Source Heat Pumps for Battery Electric Vehicles

DONG Zheming, QIANG Jianwei, SHI Rui, WANG Xiaobi, WANG Weimin, FU Jing,  
TANG Yu, FU Xiaojia, HE Qifu

(Technology Center of Dongfeng Motor Group Corporation, Wuhan 430058, China)

**Abstract:** With the continued expansion of the pure electric vehicle market, it is necessary to optimize the overall thermal management control strategy for BEVs in low temperatures. The optimization is crucial to better suit the application scenarios, particularly to meet the growing demands of customers in northern cold regions and to alleviate the decline in driving range of BEVs in low-temperature environments. Based on research and real-vehicle validation of the thermal management control strategies for waste heat source heat pumps and air source heat pumps in different low-temperature scenarios for a BEV model, the paper has extended the effective operating lower temperature limit of the heat pump-based thermal management system from  $-15^{\circ}\text{C}$  to  $-20^{\circ}\text{C}$ . Moreover, the attenuation rate of driving range has been significantly reduced to 31.2% under the CLTC driving condition at  $-7^{\circ}\text{C}$ .

**Keywords:** thermal management system; battery electric vehicle; waste heat source heat pump; air source heat pump; low-temperature environment; control strategy

收稿日期: 2023-10-08 改稿日期: 2023-11-01

参考文献引用格式:

董哲明, 强健伟, 施睿, 等. 某纯电动车型的余热热源与空气源热泵控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(1): 83-93.

DONG Zheming, QIANG Jianwei, SHI Rui, et al. Research on Control Strategies for Waste Heat Source and Air Source Heat Pumps for Battery Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(1): 83-93. (in Chinese)



目前,国家“双碳”目标为我国汽车行业发展重新定义了绿色低碳转型的目标路径与可持续发展的使命愿景,以纯电动汽车为代表的新能源汽车因其具备低能耗、零排放的优势<sup>[1]</sup>,其技术突破势在必行。在政府政策和市场趋势的双重驱动下,各汽车主机厂和造车新势力企业加大投资和研发力度,纯电动汽车性能显著提高,销量快速上升。其中,相比于普通非热泵型纯电动汽车整车热管理系统,热泵型纯电动汽车整车热管理系统因其在采暖工况下具备更高的COP值,且在低温环境中能拥有更好的续驶里程综合表现,受到了北方汽车消费者的青睐,成为最主要的纯电动汽车消费选项之一。

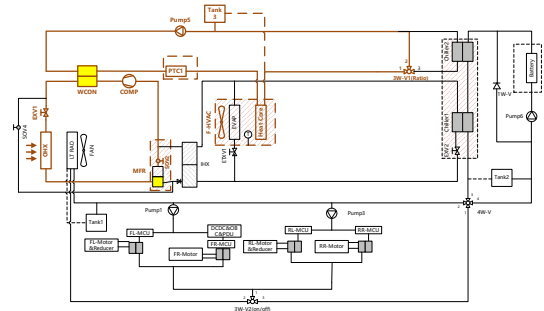
虽然热泵型整车热管理系统以其高效节能的优点已经在纯电动汽车上得到了广泛的研究与应用,但由于目前产业化的车用热泵热管理系统主要采用与普通家用空调相同的R134a冷媒介质,一般仅能在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的环境温度取得较好的使用效果,然而在冬季最低气温能达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的北方地区,单一空气源热泵的热管理系统在此气温下的能源效率比性能会显著下降。为了使车用热泵热管理系统在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的低温环境下依然能有较好的COP值,废热回收联合热泵热管理系统概念被提出:纯电动汽车在极低温环境下可以通过利用电池、电机和电机控制器的冷却水废热来提高热泵热管理系统的能源效率和自身的续驶里程<sup>[2]</sup>。对于纯电动汽车的热泵型热管理系统而言,当余热热源与空气源热源相组合时,由于两种热源的获取位置及方式不同,所以在低温环境下,不同的用户使用场景下可以有不同的控制策略来提升加热性能与能耗效率<sup>[3]</sup>,从而进一步提升车辆的续驶里程。

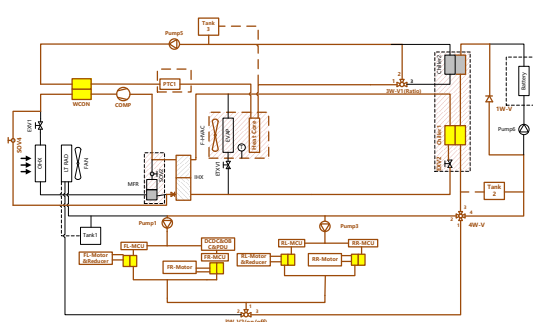
## 1 空气源热泵与余热热泵模式特点分析

在制热模式下,车用热泵型热管理系统按照热源不同可分为空气源热泵模式和余热热泵模式:以空气为热源通过室外换热器进行热量交换的称为空气源热泵模式;利用电池、电机和电机控制器等车用电设备的冷却水废热作热源,将低品位热能转化为用于供热的高品位热能的热泵称为余热热泵。

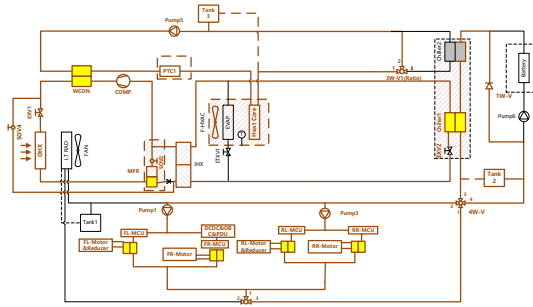
### 1.1 空气源热泵模式

热泵型热管理系统的空气源热泵制热工作原理与家用空调热泵制热原理相同,通过压缩机将高温低压的气态冷媒压缩为高温高压的液态冷媒,再通过车内换热器完成冷凝,与车内空气进行热交换,车内空气温度上升,冷媒温度下降,成为低温高压的液态冷媒;低温高压的液态冷媒再通过电子膨胀阀,成为低温低压的气态冷媒,通过室外换热器,与车外气体热交换,车外空气温度降低,冷媒温度升高,成为高温低压的气态冷媒,进入下一轮制热循环。如此往复,实现车外热量交换至车内制热的效果,工作原理如图1所示。





(a) 单电驱动系统余热回收的热源模式



(b) 空气源热泵与余热热泵的混合热源模式

图 2 多热源热泵实现乘员舱采暖

电机、电机控制器等高压电气件的废热，在车辆长时间运行时，单余热热泵模式下整车热管理系统的 COP 效率受环境温度的影响会比较小。通过针对不同环境温度下车辆不同使用场景的热管理控制策略的有效应对，相同性能目标下整车热管理系统的综合能耗效率将得到有效提升，整车综合能量也能得到整体优化<sup>[5]</sup>，这将有效缓解极低温环境下纯电动汽车的续航里程衰减。

## 2 热管理系统架构建立与功能模式实现

### 2.1 热管理系统架构建立

考虑到热管理系统架构的平台性开发特征，为了满足同一架构下不同车型的功能和性能带宽的需求，整车热管理系统架构回路结构需同时满足高继承性和可包容性，并利用热管理系统架构的可拓展性，通过型式基本不变的核心零部件（空调箱、压缩机、PTC 和水冷电池包等）来配置不同车型类型和尺寸的差异化设计，确保平台内各车型整车热管理系统核心零部件可最大程度地通用，功能与性能达标<sup>[6]</sup>。针对平台在研车型的商企定位和性能目标带宽，目标车型整车热管理系统架构在满足空气源

热泵模式与余热热泵模式的功能需求外，还需同时满足车型内性能拓展与车型间的特征改变，从而有效地缩短架构平台内包括 REEV 与 PHEV 的衍生车型的热管理系统开发周期，最大程度地节省系统产品成本和开发成本，如图 3 所示。

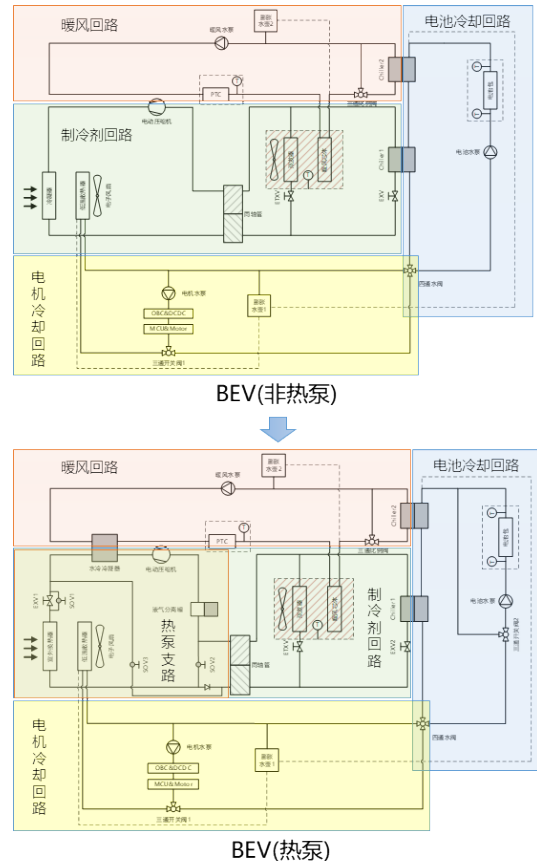


图 3 热管理系统架构设计时需同时满足通用性与继承性

### 2.2 热管理功能模式定义

区别于一般 BEV 车型的整车热管理系统功能需求，该在研 BEV 车型整车热管理系统除了需要满足完整的整车热管理系统应该具备表 1 所示的 9 种基本的功能模式<sup>[7]</sup>外，还需要根据该车型商企定位的越野需求，组成满足适用于不同环境温度（极低温、低温、常温、高温、极高温）、不同车辆行驶状态（快充、爬坡、高速巡航、蠕行）、不同的越野模式（草原、沙漠、泥泞、岩石、维修）下的 30 多种（表 2 所示为部分代表性工况）组合功能模式，用于满足该车型从城市通勤到户外越野的全使用场景整车热管理需求覆盖。

同时，不同于单空气源热泵热管理系统仅需考

表 1 BEV 整车热管理系统基本功能需求

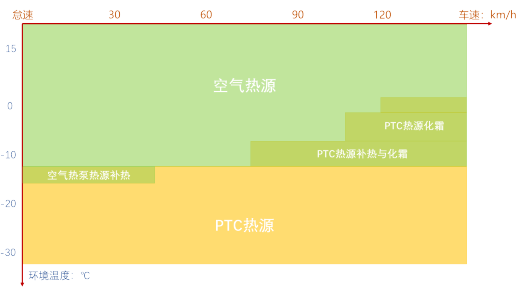
序号	功能要求
1	电驱动冷却
2	电驱动余热利用
3	电池冷却
4	电池加热
5	电池余热利用
6	乘员舱冷却
7	乘员舱加热
8	乘员舱除霜/除雾
9	室外换热器化霜

表 2 在研 BEV 车型整车热管理系统的部分功能拓展

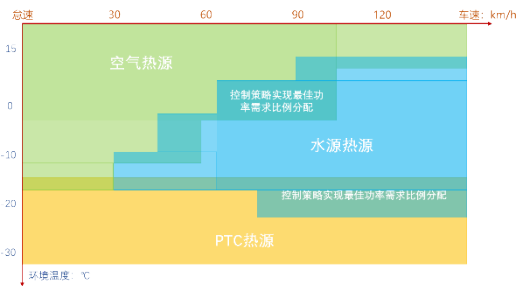
序号	项目				
	温度	车辆状态	乘员舱	电池	电驱动
1	常温	快充	×	○	×
2	常温	行驶	×	×	○
3	常温	行驶	×	○	○
4	高温	快充	×	○	×
5	高温	快充	○	○	×
6	高温	行驶	○	×	
7	高温	行驶	○	○	○
9	低温	快充	×	○	×
10	低温	快充	○	○	×
11	低温	行驶	○	○	×
12	低温	行驶	○	○	×
13	极低温	行驶	○	×	×
14	极低温	行驶	○	×	×
15	中温	行驶	○	×	×
	... ..				

注:○表示系统有响应应对;×表示系统无响应应对

考虑空气源热泵与 PTC 热源间的切换与协同边界策略,该在研 BEV 车型在采暖模式下同时拥有室外空气、驱动系统废热两个热泵热源和 PTC 一个非热泵热源可供选择。考虑到热源供热特性,采暖模式在进行控制策略制定时,需针对不同环境温度和行车工况选择合适的热源模式配合方式,并能在模式间实现无感知切换,以达到在满足乘员舱热舒适性需求的前提下,实现整车热管理系统的最佳能耗,如图 4 所示。



(a) 单空气源热泵+PTC 系统



(b) 空气源与余热热泵+PTC 热管理系统

图 4 不同热泵热管理系统的稳态工况采暖模式策略区间

### 2.3 热管理系统控制软件开发

#### 2.3.1 系统控制软件概要

该 BEV 车型的热管理系统控制软件功能执行需要根据控制功能规范的要求,实现电池热管理回路、电驱动(电机和电控)热管理回路和乘客舱空调回路的运行控制,相关功能模式协调与切换要根据不同使用场景三者的需求权重完成综合判定。整车热管理控制系统在运行过程中,接收电池管理系统发出的电池热管理请求、空调发出的乘客舱需求,以及电驱动系统发出的热管理请求,通过判断车辆充电状态、车速信息、环境温度等辅助信号,综合判断确定当前的热管理功能模式状态,再把控制信号发送给热管理系统各个受控零部件,零部件执行相应的控制策略发出的指令信息,最终实现所需的热管理功能模式表达,如图 5 所示。

为了满足该 BEV 车型的越野需求,整车热管理控制系统需要在某些越野工况下实现快速响应,这需要尽可能地减少上层指令在整车各个控制器间的信号传递与不必要的逻辑判断。综合考虑该 BEV 车型整车热管理控制系统的执行元器件与服务对象属性,并满足该 BEV 车型软件与电气架构管理需求,整车功能架构将热管理控制软件集成在动力域控制器,乘员舱自动空调的控制软件集成在车身域

控制器中，不再使用独立的整车热管理和自动空调的控制器硬件，如图6所示。

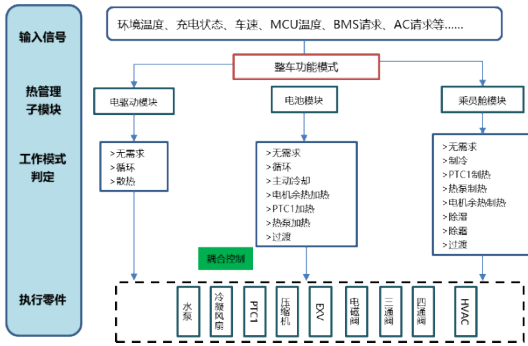


图5 BEV车型整车热管理系统控制软件通信接口

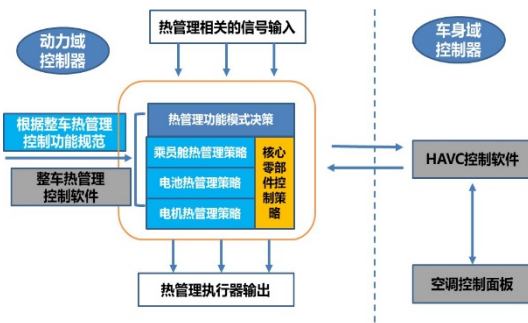


图6 BEV整车热管理控制系统通信架构

该BEV车型的热管理控制软件底层为动力域控制器（Power Domain Controller Unit, PDCU）控制软件，软件架构分为4层。如图7所示，第1层为热管理软件架构主体；第2层分为通讯信号处理模块、模式状态控制模块、制冷剂系统控制模块、水系统控制模块和软件故障诊断模块；第3层是第2层的细节策略执行逻辑；第4层则是各个传感器和执行器在诊断模块下的内部诊断程序。

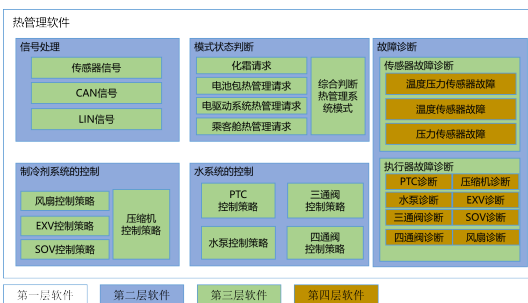
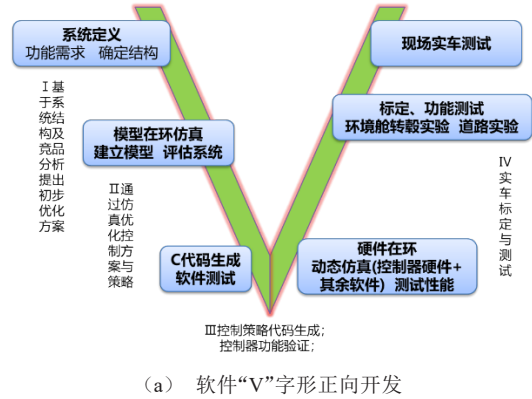


图7 整车热管理系统控制软件架构层级

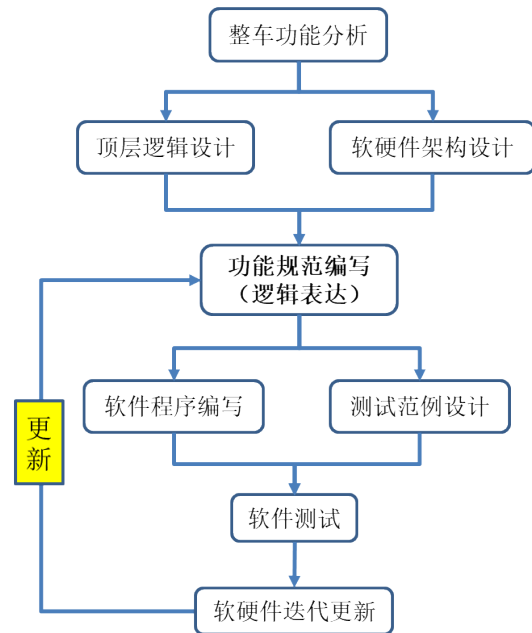
### 2.3.2 热管理控制系统软件正向开发

由于该BEV车型的整车热管理系统控制软件为自主正向白盒开发，如图8所示，为了有效缩短

开发周期，实现软件开发过程版本能满足车型开发不同节点的整车热管理系统功能与性能达成的需求，通过“V”字形软件开发流程，在提高软件开发的协作和更新速度的同时，将软件功能实现和性能验证有机地结合起来。通过整车热管理系统控制功能规范合理的版本迭代，保证较高的软件开发质量并缩短整车热管理系统开发周期。



(a) 软件“V”字形正向开发



(b) 控制功能规范迭代更新流程

图8 整车热管理系统控制软件自主正向白盒开发

### 2.3.3 热管理控制系统软件硬件在环动态测试

初版热管理控制软件开发完成后，为检验软件能完全实现设计前期所定义的功能模式，确保热管理系统各核心零部件能根据控制功能规范所要求的指令正确动作，需搭建功能测试台架对控制软件进行硬件在环动态测试，如图9所示。

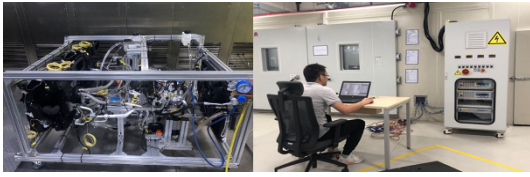


图9 软件功能测试台架(左)与硬件在环动态测试(右)

以极低温环境下电驱动余热热泵对乘员舱和电池进行混合加热模式为例,在功能台架硬件在环动态测试过程中可以看到,通过对电子膨胀阀EXV1的步数调节,乘员舱暖风回路水温根据控制功能规范要求实现了上升,如图10所示,从而证明该功能在软件逻辑层面上得到了实现。

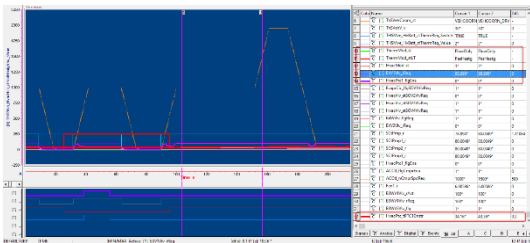


图10 HIL测试中对EXV1阀动作实现乘员舱回路水温上升

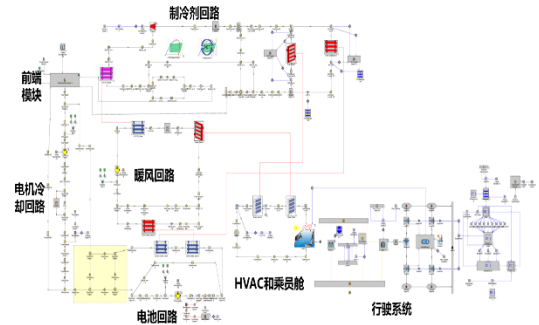
### 3 整车热管理系统性能一维仿真

#### 3.1 一维仿真模型建立

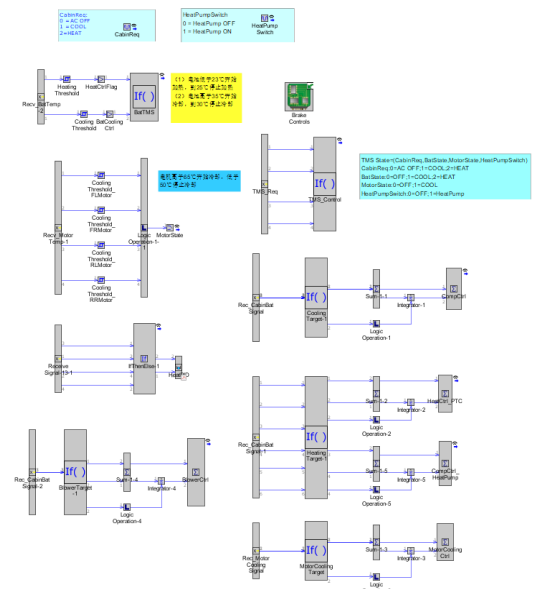
车型热管理系统开发前期,为了检验核心系统零部件的匹配选型合理性,并进一步预测各整车热管理系统功能模式下的性能目标达成,需要通过一维仿真来评估系统方案的目标达成。不同于传统燃油汽车,纯电动汽车热管理系统高度耦合,一维仿真需要将各系统进行联合建模,并且随着车型开发阶段的推进,一维仿真模型的复杂程度、参数的固化度也随之提升。为了保证特定工况下的仿真精度,该工况场景下的热管理系统控制策略也需要在仿真过程中体现。

以单空气源热泵制热模式为例,在系统功能台架与性能台架验证前,需先通过一维仿真来验证相关核心零部件的选型和热管理控制策略的合理性。随着车型开发的推进与整车热管理控制功能规范的迭代,控制策略与系统软件功能逐渐成熟,为了在实车功能与性能阶段性验证前评估该时期热管理控制策略的合理性,需搭建整车一维仿真模型,并输

入待验证的控制策略,完成阶段性整车热管理系统功能与性能达成仿真验证,如图11所示。



(a) 整车热管理系统一维仿真模型



(b) 整车热管理系统控制模型

图11 BEV车型热管理系统一维仿真

#### 3.2 整车一维仿真性能达成试验

BEV车型的整车一维仿真除了要评估整车热管理系统最大性能达成外,还需要评估特定使用工况下以性能达成为前提的相应控制策略是否能有效实现能耗的最佳能效比<sup>[8]</sup>,并且为后续热管理系统控制策略的进一步优化提供参考依据。

以-7℃环境温度下CLTC工况循环为例,为了实现该BEV车型整车低温性能在CCRT评价体系<sup>[9]</sup>中达到优秀水平,车型开发前期需要通过整车一维仿真,初步评估在满足整车采暖性能目标下不同制热模式的COP效率,以确定在该考核工况下制热模式的控制策略制定方向。

考虑到PTC的制热COP小于1,所以在制定整

车一维仿真规划时可直接排除 PTC 长期参与的制热模式，最终需要进行整车一维仿真的采暖模式、考核工况需求及对应的仿真结果见表 3。仿真结果显示，该 BEV 车型在  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境温度下进行 CLTC 工

况循环，单余热热泵模式下热管理系统的制热 COP 最高，所以在阶段性控制策略制定中，针对  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的 CLTC 工况循环，如果乘员舱发出采暖请求，热管理系统优先选择单余热热泵模式进行制热。

表 3 BEV 车型低温 CLTC 工况循环制热模式整车一维仿真结果

序号	采暖模式	考核工况	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	乘员舱头部目标温度/ $^{\circ}\text{C}$	电池初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	COP 计算公式	压缩机平均转速/ (r/min)	COP 仿真值
1	单空气源热泵制热						1 750	2.00
2	单余热热泵制热	CLTC	-7	21	2	$\frac{P_{\text{WCON}}}{P_{\text{压缩机}}}$	1 900	2.95
3	空气+余热热泵制热						2 050	2.86

#### 4 整车热管理性能达成试验验证

纯电动汽车热泵型整车热管理系统在面向平台的正向开发过程中，需要先进行热泵系统性能台架验证，接着进行整车热管理系统环模标定和道路标定，最后进行整车高低温性能验收，最终实现对该 BEV 车型的整车热管理系统性能达标的考核。

##### 4.1 性能台架标定与测试验证

由于在研 BEV 车型的热管理系统考核工况种类较多，且涉及到各类越野工况等复杂使用场景，系统台架具备较大的局限性。所以在车型开发前

期，主要利用性能台架来验证热泵系统的最大性能达成和核心零部件的选型合理性，并对在研 BEV 车型的整车热管理系统完成初级标定，为后续的软件实车联调做准备。

同样以单空气源热泵制热模式为例，根据考核工况目标需求，其性能台架试验条件见表 4，性能台架测试结果见表 5。性能台架测试表明该 BEV 车型的压缩机、室外换热器、水冷冷凝器、暖风芯体等核心零部件选型规格满足整车性能要求，且热管理系统控制策略合理性。

表 4 单空气源热泵性能台架试验条件

序号	对应整车工况	环境			模式	前 HVAC			压缩机	WCON	
		环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	环境湿度/ %	前端风速/ (m/s)		进风量/ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	进风温度/ $^{\circ}\text{C}$	进风湿度/ %	转速/ (r/min)	进水量/ (L/min)	进水温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	CLTC 循环	-7	50	1.6	全热 吹脚	200	4.2	15	2 000 (可调)	10	自平衡
2	120 km/h 高速巡航	-7	50	3.2		350	4.2	15	4 500 (可调)		

表 5 单空气源热泵性能台架测试结果

序号	对应整车工况	验收项			测试结果				判定
		HVAC 换热量/ kW	暖芯进水温/ $^{\circ}\text{C}$	COP	HVAC 换热量/ kW	暖芯进水温/ $^{\circ}\text{C}$	输入功耗/ kW	COP	
1	CLTC 循环	2.68	45	1.91	2.69 (3 000 r/min)	46.4	1.40	1.92	达成
2	120 km/h 高速巡航	3.31	45		3.51 (4 500 r/min)	62.1	2.56		达成

##### 4.2 实车标定与性能达成验证

完成台架标定与测试验证后，该 BEV 车型的

整车热管理系统需在试验样车上完成进一步的性能测试。考虑到车型在不同开发阶段的试验样车其装

车方案与车型正式方案的差异性较大,基于不同阶段试验样车的整车热管理系统实车验证计划需明确试验目的,充分识别该BEV车型各整车级考核指标在该阶段试验样车上测试结果的参考性与代表性。

#### 4.2.1 实车环境模拟标定

对于车型开发早期的试验样车,由于代表性不

足,在进行整车热管理系统环模标定时,仅需对包括系统的最大降温、最大升温、各个重要标定量进行线性扫描标定,并对整车一般使用工况下的热管理系统能耗进行初步摸底,见表6。但对于对乘员舱升降温、电池包加热冷却、除霜除雾、电池乘员舱同时加热或制冷的控制策略则需要进行比较详细的标定和验证。

表6 纯电动汽车整车环模标定部分工况<sup>[10]</sup>

项目	具体标定工作	环境温度/°C
制热工况下空调各目标值参数标定	压缩机目标高压控制PID参数标定	-5
	压缩机目标高压控制PID参数标定	-10
	WCON出口测目标过冷度PID参数标定	-10
	暖风芯体目标水温DHT_HeatPump参数标定	-5
	暖风芯体目标水温DHT_HeatPump参数标定	-10
	暖风芯体目标水温DHT_PTC参数标定	-18
	电池加热DCT_PTC参数标定	-10
乘员舱升温标定	依据企业标准测试乘员舱内的升温曲线,确保乘员舱升温满足要求	-20
低温续航里程衰减率测试	参考EV-test对整车低温续航里程进行验证,并优化热管理控制策略	-7
高温续航里程衰减率测试	参考EV-test对整车高温续航里程进行验证,并优化热管理控制策略	35
低温快充试验延长率测试	参考EV-test对整车低温快充时间进行验证,并优化热管理控制策略	-10
高温快充试验延长率测试	对整车高温快充时间进行验证,并优化热管理控制策略	40

#### 4.2.2 实车最大性能验证

整车热管理系统最大性能实车测试,是在BEV车型研发中期对其整车热管理系统硬件架构性能最大能力的综合验证。对于在研BEV车型,需尽可能早地完成其整车热管理系统最大性能达成验证(整车热管理最大性能体系见表7),该验证的完成是整车热管理系统核心零部件选型方案固化的首要前置条件,更是在研BEV车型最终量产方案整车高低温性能目标达成的基础。

#### 4.2.3 实车道路标定

经过充分的环境模拟标定验证和系统最大性能达成验证后,在研BEV车型除了需要进行常规性的寒区、热区及春、秋季的道路适应性标定外,还需要针对草地、岩石、泥泞、沙漠等特殊越野路况进行针对性的标定,以此确保该在研BEV车型的整车热管理系统满足商企对越野场景的使用要求。

相比于实车环境模拟标定,道路标定更加贴合

表7 纯电动汽车整车热管理系统最大性能体系

序号	试验项目	考核工况	判定标准
1	空调系统最大升温	怠速	企业标准
		低速行车 高速行车	
2	空调系统最大降温	行车工况	企业标准
3	整车热平衡	越野行驶	
		低速爬坡	
		高速爬坡 高速循环	
4	低温快充	电池加热 电池+乘员舱混合加热	企业标准
5	高温快充	电池冷却 电池+乘员舱混合制冷	
6	高低温续航衰减	35 °C下CLTC循环工况 -7 °C下CLTC循环工况	CCRT评分

真实的用户使用场景,并且具备环境模拟实验室不具备的随机性与突发性,测试过程更加考验整车热

管理系统的鲁棒性以及控制策略的可靠性与稳定性。例如，为应对-7℃环境温度下CLTC工况循环，在研BEV车型早期试验样车在同样环境温度下，以单空气源热泵制热模式进行CLTC工况循环测试。测试过程中发现，由于该在研BEV车型正式方案未配置AGS主动进气格栅，高速行驶过程中室外换热器容易结霜，并且如果行车化霜模式不启动PTC进行补热，化霜时间将相对较长<sup>[11]</sup>，直接影响乘员舱热舒适性与低温环境下的整车能耗，如图12所示。

基于本次试验结果并结合前期整车一维仿真，对-7℃环境温度下CLTC工况循环整车制热模式进行策略优化，通过多次道路标定验证，最终形成了一版以余热热泵模式为主的采暖控制策略。该控制策略因充分利用车辆行驶过程中驱动系统所产生的废热为热泵热源，几乎不再需要室外换热器与空气源进行热交换，所以有效避免了行车化霜模式所带来乘员舱采暖性能的下降，并间接提升了-7℃环境温度下CLTC工况循环整车热管理系统的综合能量能效比。

#### 4.2.4 实车热泵制热模式低温边界

业内普遍认为，对于空气源热泵，环境温度低于-10℃后，其COP值将严重衰减<sup>[12]</sup>。环境温度低于-15℃以后，在高水温目标条件下，由于系统高压被水温反向提升，导致压缩机压比增加，压缩机工作效率大幅下降，整体COP反而将低于单PTC模式。但对于余热热泵，当BEV车型长时间稳定行驶后，驱动系统所产生的发热量将比较充足，理想的冷却水温度能满足热泵系统在更低的环境温度下具备高效的制热能力。



(a) 行车化霜模式启动初始状态



(b) 5 min内只完成了约80%面积化霜

图12 在研BEV车型单空气源热泵制热模式下行车化霜效果

动态实车标定过程中，当行驶工况稳定后，得益于该在研BEV为四驱多电机车型，电驱动热源充足，冷却水废热能保证热泵系统在-20℃环境温度下制热效率依然高于单PTC制热模式。基于标定结果，该BEV车型的热泵制热模式温度下限在控制策略中得到了进一步的拓展。不过，需要注意的是，当系统水温过高时，热泵的工作效率可能会比单PTC制热模式更低，因此，需要对热泵工作的目标水温范围进行限制，见表8。

表8 不同环境温度下余热热泵制热模式下的性能达成

制热模式	平均车速/ (km/h)	环境温度/ ℃	电驱动初始水温/ ℃	系统目标水温/ ℃	实际暖风水温/ ℃	相较单PTC工况功耗变化/ kW
PTC升温+余热热泵保温	70	-20	-17	70	69	-0.15
单PTC					69	
PTC升温+余热热泵保温	70	-20	-17	75	76	+0.38
单PTC					76	

#### 4.2.5 整车低温性能综合目标达成验证

通过不同研发阶段测试样车的多轮标定验证，

该在研BEV车型在整车热管理系统方案固化阶段已形成了一版既能满足整车热管理系统性能需求又

同时具备能耗高效性的热泵制热控制策略（优化效果见表9），为其量产方案的整车低温性能在CCRT评价体系中达到优秀水平打下了良好的基础。截至目前，该BEV车型具备量产方案代表性的试验样

车已完成基于CCRT低温续驶项目测试方法的续驶里程衰减率测试，参照中汽中心汽车测评官网数据<sup>[13]</sup>，该测试结果处于行业上游水平，如图13所示。

表9 基于同开发阶段热泵制热模式下的压缩机平均功率输出

环境温度：-7℃ 考核工况：CLTC工况循环 乘员舱采暖目标：平均温度21℃				
控制策略版本	V0	V1	V2	V3
压缩机平均输出功率	≥1.4 kW	1.35 kW	1.23 kW	0.9 kW
数据来源	性能目标分解	一维仿真	早期试验样车实测	具备量产方案代表性的试验样车实测
绝对优化效果		3.57%	12.14%	35.71%

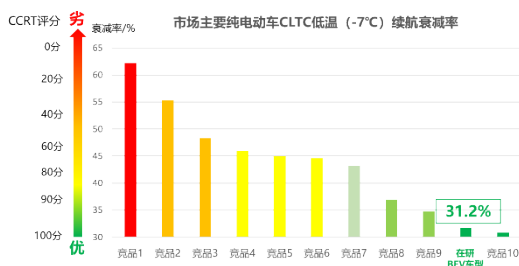


图13 中国市场主要纯电动车CLTC低温(-7℃)续驶里程衰减率排名

## 5 结论

本文结合某BEV车型的整车热管理系统的正向开发过程，深入研究了该车型整车热管理系统在制热模式下余热热泵与空气源热泵控制策略的开发与优化对其整车低温性能的提升。通过对该车型的整车热管理系统基于空气源与余热热源不同热泵模式下的功能和性能的试验验证，得出以下结论。

(1) 纯电动汽车驱动系统的冷却液废热可作为其热泵系统的高效热源来源，特别是对于拥有多电机的四驱车型，在整车热管理控制策略制定时，需

针对使用场景特点合理制定不同热泵模式间的控制策略。

(2) 相比于空气源热泵效率受环境温度影响较大，余热热泵效率更多取决于驱动系统的冷却水水温；通过基于特定用户使用场景的热管理控制策略的合理制定，同时具备空气热源和余热热源的纯电动汽车，其热泵模式能满足更低环境温度下的乘员舱采暖需求。

(3) 通过热管理控制策略对动态行驶车辆实现不同制热模式的合理切换与协调，整车能量效率能得到优化，纯电动汽车的低温性能效果得到了提升，低温续驶里程衰减率达到了行业领先水平。

随着整车热管理系统的高度耦合化，集成化和智能化要求进一步提升，整车热管理系统控制策略需对包括余热热源在内的多热源热泵下的制热模式进行更深入的统筹考虑。针对一定环境温度下的特定用户使用场景，更加高效地实现热管理系统性能目标达成，这对进一步提升纯电动汽车整车热管理系统低温性能具有重大意义。

## 参考文献 (References)

- [1] LI Zhi, LU Yiji, HUANG Rui, et al. Applications and Technological Challenges for Heat Recovery, Storage and Utilisation with Latent Thermal Energy Storage [J]. Applied Energy, 2021, 283: 116277.1-116277.23.
- [2] YU Xiaoli, JIANG Ruicheng, LU Guodong, et al. A Novel Energy-Economic-Environmental Evaluation Model for Heat Pump Air Conditioners Integrated with Waste Heat Recovery in Electric Vehicles[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 41: 102605.1-102605.19.
- [3] MOTA-BABILONI A, BARBOSA J R, MAKHNATCH P, et al. Assessment of the Utilization of Equivalent Warming Impact Metrics in Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump Systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 129: 109929.1-109929.15.

- [4] 蒋绿林, 罗迎宾, 徐丽. 寒冷气候条件下耦合双级热泵制热性能实测与分析[J]. 能源研究与利用, 2007(1): 23-26.  
JIANG Lulin, LUO Yingbin, XU Li. Measurement and Analysis of Thermal Performance of Coupled Two-Stage Heat Pump in Cold Climate [J]. Energy Research and Utilization, 2007(1): 23-26. (in Chinese)
- [5] 汪琳琳, 焦鹏飞, 王伟, 等. 新能源电动汽车低温热泵型空调系统研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(12): 1744-1750, 1757.  
WANG Linlin, JIAO Pengfei, WANG Wei, et al. Research on Low Temperature Heat Pump Air Conditioning System of New Energy Electric Vehicle [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(12): 1744-1750, 1757. (in Chinese).
- [6] 王伟民, 王小碧, 施睿, 等. 汽车架构开发中的整车热管理系统开发方法研究[C]//2021 中国汽车工程学会年会论文集(4). 北京: 机械工业出版社, 2021: 476-479.  
WANG Weimin, WANG Xiaobi, SHI Rui, et al. Research on the Development Method of Vehicle Thermal Management System in Vehicle Architecture Development [C]//2021 China Automotive Engineering Society Annual Conference Proceedings(4). Beijing: China Machine Press, 2021: 476-479. (in Chinese)
- [7] 王伟民, 王小碧, 徐人鹤, 等. 纯电动汽车热泵型整车热管理系统开发技术研究[J]. 汽车工程学报, 2021, 11(6): 434-441.  
WANG Weimin, WANG Xiaobi, XU Renhe, et al. Research on the Development Technology of Heat Pump Thermal Management System for Pure Electric Vehicle [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(6): 434-441. (in Chinese)
- [8] YANG Minbo, LI Ting, FENG Xiao, et al. A Simulation-Based Targeting Method for Heat Pump Placements in Heat Exchanger Networks [J]. Energy, 2020, 203: 117907.1-117907.9.
- [9] 2020 年度 CCRT 第一批车型评价结果正式发布[J]. 世界汽车, 2020(8): 100-101.  
The Evaluation Results of the First Batch of CCRT Vehicle Models in 2020 [J]. World of Car, 2020(8): 100-101. (in Chinese)
- [10] 中国汽车技术研究中心有限公司. EV-TEST(电动汽车测评)管理规则(2019 版)[Z]. 2019.  
China Automotive Technology Research Center Co., Ltd. EV-TEST (Electric Vehicle Evaluation) Management Rules [Z]. 2019. (in Chinese)
- [11] 强健伟, 王伟民, 王小碧, 等. 纯电动汽车热泵型整车热管理系统标定与试验技术研究[C]//2022 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集——热管理分会场. 2022: 163-171.  
QIANG Jianwei, WANG Weimin, WANG Xiaobi, et al. Research on Calibration and Test Technology of Heat Pump Thermal Management System for Pure Electric Vehicle [C]//2022 China Automotive Engineering Society Annual Conference Proceedings—Branch of Thermal Management. 2022: 163-171. (in Chinese)
- [12] LEE S W, CHUNG Y, KIM S J, et al. Investigation on the Performance Enhancement of Electric Vehicle Thermal Management System Utilizing Floating Loop with Finite Heat Exchanger Size [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 255: 115265.1-115265.15.
- [13] C-NCAP 最新测评车型 [EB/OL] (2023-01-13) <http://www.c-ncap.org.cn/>.  
C-NCAP Latest Evaluation Vehicle Model [EB/OL] (2023-01-13) <http://www.c-ncap.org.cn/>. (in Chinese)

## 作者简介



董哲明 (1989-), 男, 湖北十堰人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为整车热管理系统开发与性能管控。

Tel: 18162741267

E-mail: dongzheming@dfmc.com.cn

## 通信作者



强健伟 (1993-), 男, 安徽合肥人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为整车热管理系统开发与标定。

Tel: 18186615247

E-mail: qiangjw@dfmc.com.cn