·2026中国汽车工程学会年会优秀论文(选登)·

汽车空调热管理系统控制策略与物理模型耦合仿真及验证

谭涵　葛怡晴　余冰　熊勇　范波

（比亚迪汽车工业有限公司,深圳 518118）

【摘要】针对纯电动汽车空调热管理系统策略变更成本高、周期长的问题,基于Modelica语言开展物理机理模型与控制策略的协同建模与耦合仿真研究。通过构建涵盖车用空调、乘员舱和控制策略等关键部分的高保真白盒物理模型,实现了热-流体-控制的全耦合闭环仿真,同时,以冬季采暖除湿工况为研究对象进行实车验证。试验结果表明:在独立仿真中,物理系统稳态温度误差控制在±2 ℃,阀体开度与压缩机转速响应数据与实测数据一致;在耦合仿真中,压缩机转速稳态偏差低于2%,排气压力偏差低于6%,管道温度稳态误差控制在2 ℃内,瞬态响应趋势与实车数据具有良好的一致性。

主题词:空调热管理　耦合仿真　Modelica　虚拟验证

中图分类号:U469.72　　**文献标志码:**A　　**DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20260504

Coupled Simulation and Validation of Control Strategy and Physical Model for Automotive Air Conditioning Thermal Management System

Tan Han, Ge Yiqing, Yu Bing, Xiong Yong, Fan Bo

(BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 518118)

【**Abstract**】To address the issues of high modification cost and long development cycles associated with control strategy changes in the thermal management system of battery electric vehicle air conditioning, a collaborative modeling and coupled simulation study of physical mechanism models and control strategies is conducted based on the Modelica language. A high-fidelity white-box physical model is constructed, which covered key components: vehicle air conditioning, passenger cabin, and control strategies. Through a unified Modelica simulation architecture, a fully coupled closed-loop simulation is achieved, integrating thermal, fluid, and control domains. The model is validated using real vehicle test data under a winter heating and dehumidification condition. Results show that in the independent simulation, steady-state temperature errors of the physical system are within ±2 ℃. The responses of valve opening and compressor speed agreed with measured data. In the coupled simulation, the steady-state deviation of compressor speed is below 2%, and the discharge pressure deviation is less than 6%. The steady-state error of pipeline temperature is within 2 ℃. The transient response trend agreed well with the real vehicle data.

Key words: Air conditioning thermal management, Coupled simulation, Modelica, Virtual validation

【引用格式】谭涵, 葛怡晴, 余冰, 等. 汽车空调热管理系统控制策略与物理模型耦合仿真及验证[J]. 汽车技术, 2026(10): 8-14.

TAN H, GE Y Q, YU B, et al. Coupled Simulation and Validation of Control Strategy and Physical Model for Automotive Air Conditioning Thermal Management System[J]. Automobile Technology, 2026(10): 8-14.

1　前言

汽车空调热管理系统是制约纯电动汽车续驶里程问题的关键因素,在低温环境下,空调系统的能耗约占整车总能耗的20%,不利于车辆的续航表现[1-2]。因此,优化空调热管理策略、提升热管理效率,已成为提高纯电动汽车低温续航能力的重要研究方向。

传统基于物理样机的设计-试验-验证模式周期长、成本高,难以适应快速迭代的需求。热管理系统前期仿真设计环节面临多物理场耦合仿真、控制系统与物理系统协同仿真,以及模型精度与仿真效率间平衡等问题。基于模型的数字工程(Model-Based Digital

Engineering，MBDE）采用全流程数字模型的设计与验证，解决了因系统复杂性增加引发的系列问题[3-5]。MBDE延伸的数字孪生、多学科协同仿真、模型驱动设计等技术，通过构建高保真物理系统模型，实现了对真实系统的精准映射与行为预测[6-8]。在热管理系统开发中，黑盒模型依赖于试验数据拟合，而白盒模型利用能量守恒、质量守恒等原理，能够更准确地反映系统内部各部件间的耦合关系与动态特性，为控制策略的开发和验证提供可靠的仿真基础[9-12]。

对于汽车空调热管理仿真，基于Modelica语言的白盒建模研究尚处于探索阶段，该语言具有通用模型描述能力，适用于构建多物理场耦合的热管理系统模型[13-14]。Sara等[15]基于Modelica动态模型框架，建立一种配备蓄热式换热器的可逆式热泵空调系统模型，评估车内湿度舒适性的同时，分析了系统对车辆日常通勤续航的影响。Alosi等[16]设计了热气除霜的可逆式CO_2热泵系统瞬态仿真模型，模拟外部换热器的结霜和除霜过程，从而评估不同除霜启动时间对系统性能的影响。Ivan等[17]使用Dymola/Modelica平台搭建多物理场HVAC系统模型，利用遗传算法对进气温度、风扇和泵转速等多执行器控制输入进行优化分配，在考虑过热温度维持等约束条件下，验证了热泵模式下的控制系统性能。

以往研究多关注特定部件或工况下的性能分析，缺乏对完整热管理系统及其控制策略的耦合仿真研究。为此，本文基于Modelica语言对汽车空调物理系统及控制策略进行建模与耦合仿真，建立包含空调系统、乘员舱系统和控制策略模型的汽车热管理系统集成模型。重点研究热管理系统策略与物理模型的耦合仿真应用，旨在提升空调系统的开发效率、改善整车热管理效能。

2　热管理系统分析及建模

本文以某纯电动汽车冬季乘员舱采暖除湿工况为研究对象，汽车空调热管理系统冬季运行示意如图1所示。

与传统冬季供暖方式不同，该工况下湿空气先存储在内循环管道中，经过蒸发器冷却结露；降低含湿量后，流经冷凝器加热；最后，送入乘员舱以达到降低舱内湿度的作用。

2.1　系统元件模型

空调系统的换热器模型使用汽车领域中常用的板式换热器，包含冷凝器、蒸发器和水冷型换热器。为简化计算，空气与冷媒均可视为一维流动，同时忽略各扁管间的导热。

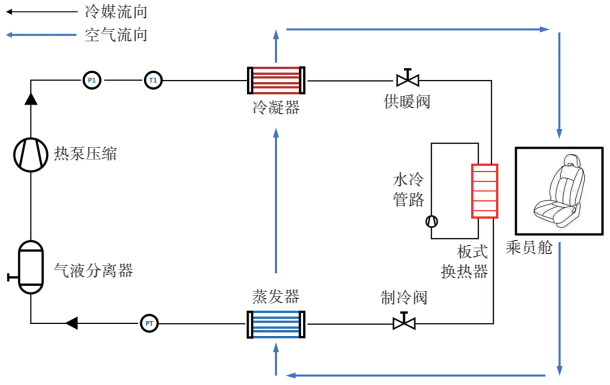


图1　汽车热管理系统冬季运行原理示意

根据一维非定常流动的可压缩流体纳维-斯托克斯（Navier Stokes，NS）方程，其两相流部分的扁管沿程阻力损失系数采用Yang-Webb关联式[18-19]：

$$f_r = 0.453R_r^{0.12} f_{r,l} \tag{1}$$

式中：$f_{r,l}$为液态摩擦因子，R_r为当量雷诺数。

两相区扁管沿程阻力的压降为：

$$\Delta P_{r,l} = 4f_r \frac{R_r^2 \mu_{r,l}^2}{2\rho_{r,l}} \cdot \frac{\Delta L}{D_r^3} \tag{2}$$

式中：$\mu_{r,l}$为动力黏度，$\rho_{r,l}$为液相制冷剂密度，ΔL为扁管长度，D_r为水力直径。

冷凝器需在空气侧模型中额外考虑湿空气冷凝的影响。换热器模型的各元模型如图2所示，空气侧模型并联接入空气接口，分别通过壁面模型与对应的冷媒侧模型相连，遵循实际物理逻辑。

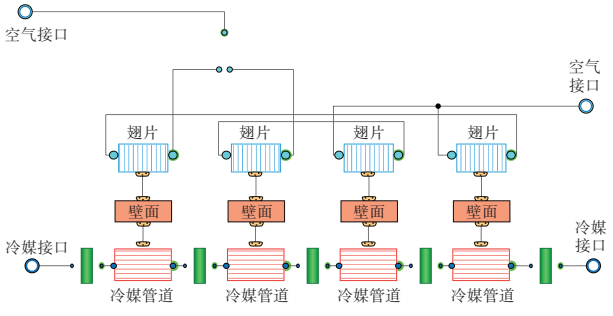


图2　多流程换热器Modelica模型

系统中，压缩机模型经过简化，采用查表得容积效率与总效率。可根据转速和压比查找效率，兼容单级往复式与螺杆式2种结构，在排量、等熵效率、容积效率、转速、压比等多维度进行参数化。针对电子膨胀阀、气液分离器、储液罐等关键元件建立白盒模型，简化内部状态变化过程，主要关注内部压降及其流量变化。

2.2　乘员舱系统模型

乘员舱模型负责计算整车座舱内热量传递和人体热负荷，同时评估空调系统的能耗与性能，如图3所示。模型的结构元件为玻璃部件和车身部件，可根据仿真精度需求设置前、后排出风口，并对前后风窗玻璃、侧窗玻

璃及车顶区域展开细化计算；模型的热学元件包含阳光辐射及环境模型、车身/车内热容模型、车内自然/强制对流换热模型及车内分区容积模型，可根据计算精度要求部分或全部启用。

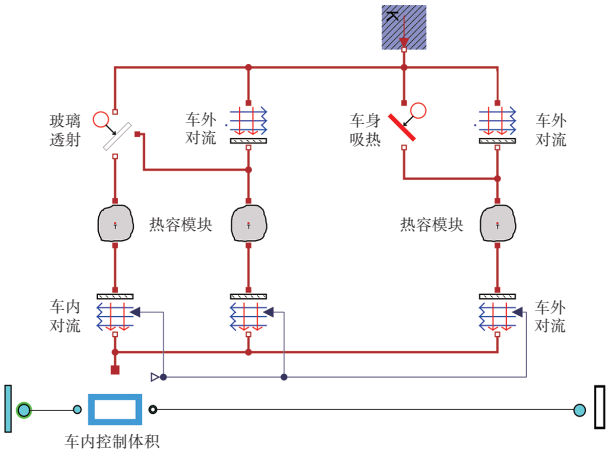


图3　乘员舱Modelica模型

基于定容积、湿空气可压缩的前提，舱内质量守恒方程可简化为：

$$C_V\frac{d\rho}{dt}=\dot{m}_{in}-\dot{m}_{out} \tag{3}$$

式中：C_V为舱内容积，$\dot{m}_{in}$、$\dot{m}_{out}$分别为入口和出口湿空气质量流量。

考虑到强制对流换热，由于车内气体为湿空气，舱内能量守恒方程可以表示为：

$$\rho C_V C_p\frac{dT}{dt}=(\dot{H}_{in}-\dot{H}_{out})+\dot{Q}_f+P_t+m_w(h_{wv}-h_{da}) \tag{4}$$

式中：C_p为湿空气定压比热，$\dot{H}_{in}$、$\dot{H}_{out}$分别为入口焓流量和出口焓流量，$\dot{Q}_f$为车舱与外部换热量，P_t、m_w分别为乘客产热量和产水量，h_{wv}、h_{da}分别为干空气比焓和水蒸气比焓，T为乘员舱内温度。

在冬季工况中，当舱内湿空气含湿量逐渐升高，达到饱和值时，舱内水汽凝结，式(4)等式右侧需加入水汽冷凝放热项：

$$Q_c=\dot{m}_c h_{fg} \tag{5}$$

式中：$\dot{m}_c$为冷凝水质量流量，h_{fg}为汽化潜热值。

3　控制策略系统建模

使用Modelica软件对某汽车的冬季采暖除湿工况域控制器控制策略进行图形化建模，模型包含7个偏差判断阈值计算子模型和5个状态判断子模型，其结构如图4所示。其中，输入为环境温度、车内温度、通道温度(头部、脚部送风通道)等22个物理信号，输出为压缩机转速、制冷阀开度、供暖阀开度和电磁阀开/闭状态4个模型逻辑信号。

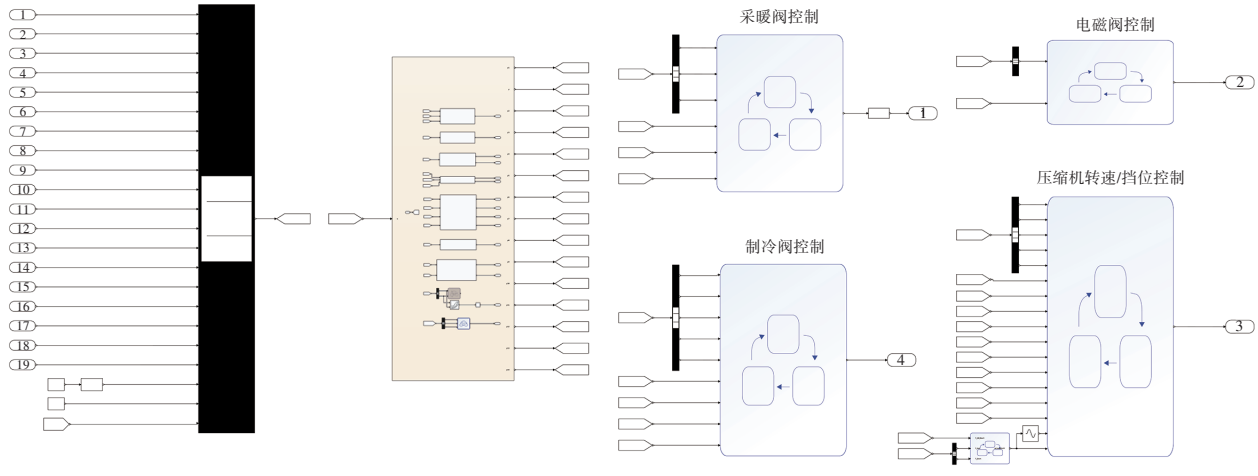


图4　空调控制策略模型

由图4可知，所有输入值均通过Bus总线模型统一管理，以保证信号的一致性和可追溯性。模型的4个输出值由状态机计算和决策获得，状态机所需的部分中间参数，可通过查表、计算或逻辑判断获得，中间参数的计算集成在子模块中，包括初始化、差值计算、高低压保护等。

4　耦合仿真模型及验证

4.1　耦合仿真模型

本文将空调系统模型、乘员舱模型以及控制策略模型构建为空调系统耦合仿真模型，结构如图5所示。基于Modelica语言采用非因果建模陈述式物理建模，换热器、压缩机等部件以守恒方程形式进行描述。仿真时求解器自动排序，并支持变量双向求解。控制计算为单向、因果明确的信号流，遵循“传感器信号输出，随后状态机判断，最后执行器输出”的传递路径，依靠采样周期与离散事件驱动。

Modelica耦合仿真通过统一建模语言实现物理微分代数方程与控制信号流/状态机的共存，由编译求解流程

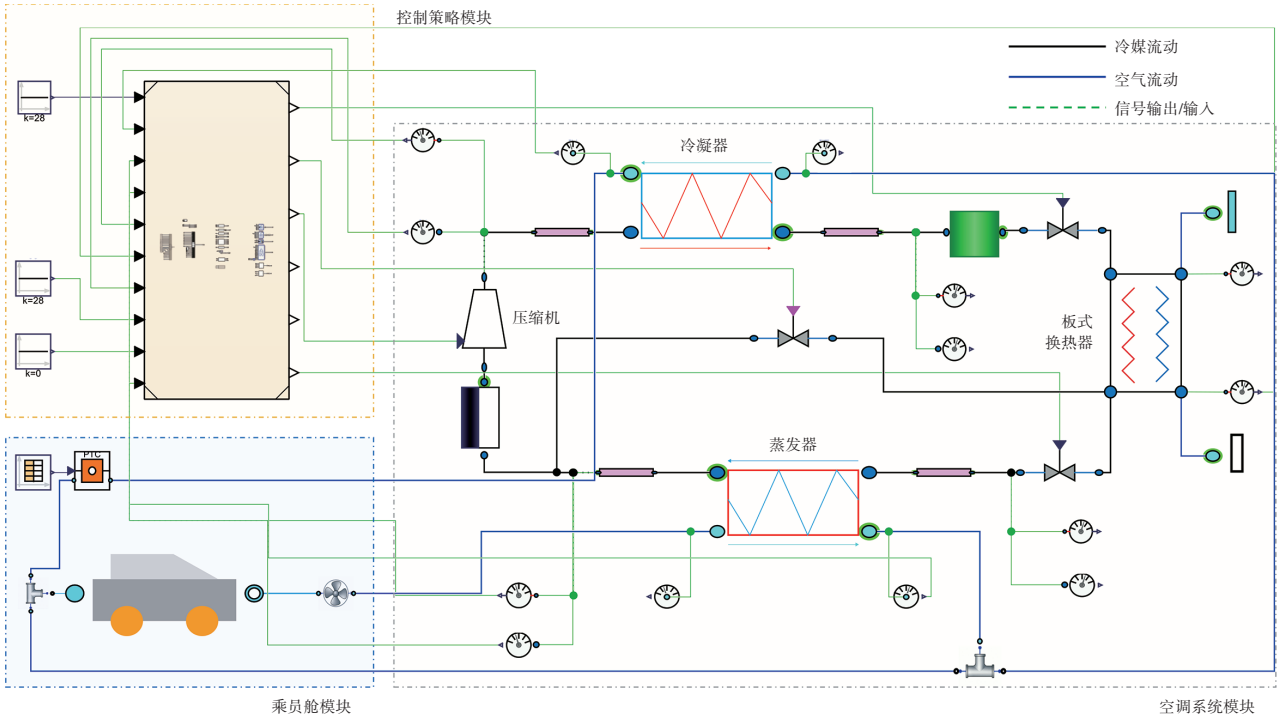


图5　热管理系统策略-物理模型耦合仿真模型

统一处理连续变量与离散事件。通过对物理连续状态信号的离散采样获取系统输入，经过控制策略仿真运算，得到实时控制输出，并更新物理模型边界条件，最终实现热-流体-控制在同一仿真时间轴上的自动融合。

鉴于耦合仿真模型中，空调系统模型和乘员舱模型均为物理模型，通过空气管道实现能量的闭环传递：冷凝器和蒸发器的空气侧与舱内风机的进气口、空调出风口相连，形成封闭的气流回路。该回路能够保证制冷剂循环所释放或吸收的热功率在舱内进行完整的热交换，从而实现舱温的调节。

控制策略模型与耦合仿真模型通过传感-执行耦合进行交互，在每个仿真步长中，空调系统和乘员舱模型向控制器输出传感器变量（舱内温度、蒸发器压力、压缩机排气温度等），控制器依据预设的舒适性和能耗目标，分类处理传感器信号并计算压缩机转速、膨胀阀开度；将控制信号输入至空调系统模型，改变压缩机、阀门和热交换器的运行状态，完成热-流体-控制的完整闭环仿真回路。

因此，本文结构化耦合方式可实现空调、舱体与控制的同步仿真，有效平衡了部件物理建模精度与系统调控的灵活性，为整车工况验证提供标准化、可调性平台。

4.2　实车试验数据处理

实车试验中使用某款纯电动轿车，试验外部环境温度约为20 ℃、相对湿度为68%，无阳光辐照。所有车载传感器与车载域控制器间采用控制器局域网（Controller Area Network，CAN）完成数据交互，经过严格时间对齐与量纲转换后，成为模型输入/输出的标定来源。实车试验具体流程如表1所示，以CAN总线模型首次收到车速报文时间 t = 0 s为时间起点，所有信号同步插值（步长0.1 s），保证仿真输入-输出的时间对应关系准确。

在数据后处理阶段，采用3阶贝塞尔（Bessel）低通滤波器对压力、温度信号进行0.5 Hz低通滤波处理，随后，通过3σ准则对离群样本进行剔除处理（约占总数据的0.4%），在保留信号真实瞬态信息基础上实现信号平滑，完成数据去噪与异常点剔除。

4.3　物理模型仿真

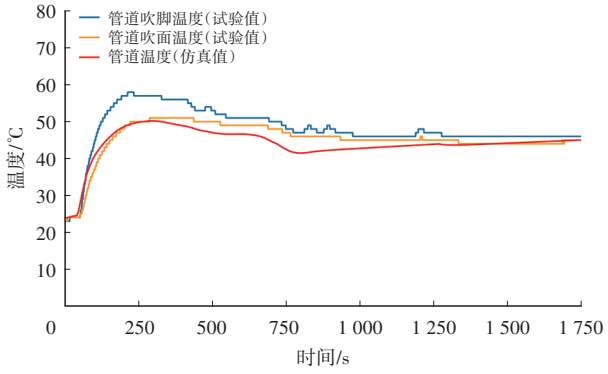
将试验平台记录的压缩机转速 η、制冷阀开度 α_r、供暖阀开度 α_h，电磁阀闭合状态 s_e 4个物理量作为模型的外部输入。输出变量为压缩机出口冷媒温度和压力、蒸发器出口冷媒温度和压力、空调出风口管道空气温度、乘员舱内空气温度。仿真步长设置为0.1 s，采用微分代数系统求解器（Differential Algebraic System Solver，DASSL）解算。

鉴于管道温度体现制冷剂流动特性和热交换效率，蒸发器冷媒温度直接关联蒸发器换热性能和制冷效果。因此，将管道温度和蒸发器冷媒温度的变化量作为物理模型的评价指标，将仿真结果和试验结果进行对比分析，结果如图6所示。在瞬态响应上，管道温度仿真值与试验值存在偏差，但稳态误差控制在1.5 ℃以内；蒸发

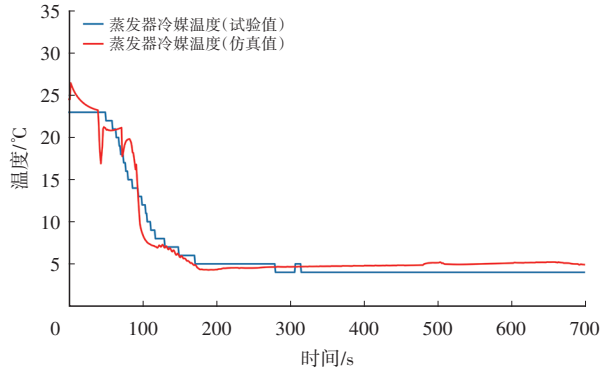
表1　实车试验流程

流程	操作描述	持续时间/s
静置	车辆在室外静置30 min，关闭所有电源，使系统温度与外界环境平衡，达到稳态（外壳≈23 ℃、冷凝器外壁≈23 ℃）	1 800
起动汽车	打开车辆电源，空调系统保持关闭状态40 s，并开始记录域控通过CAN-bus发送的所有控制指令与从传感器接收到的实时测量值	40
启动空调	打开空调，并设定空调模式为“采暖除湿”模式，并将风扇风量调至最大，记录所有数据1 705 s	1 705
结束	采暖-除湿阶段结束后关闭空调	

器冷媒温度仿真值在前200 s内与试验值相近，但在第300 s后略高于试验值，最终结果偏差在2 ℃以内。



(a)管道温度



(b)蒸发器冷媒温度

图6　管道温度、蒸发器冷媒温度对比结果

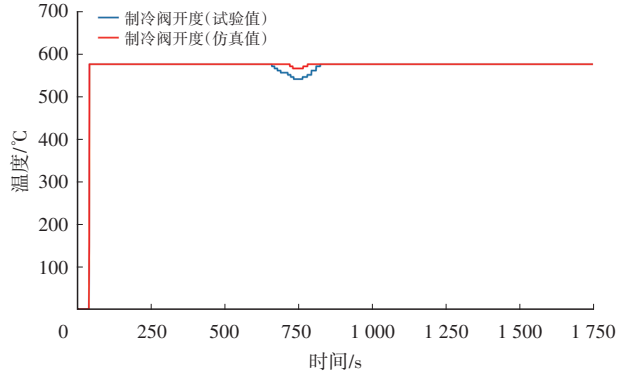
4.4　策略模型仿真

策略模型仿真中，输入信号为压缩机出口冷媒温度和压力、蒸发器出口冷媒温度和压力、空调出风口管道空气温度、乘员舱内空气温度。输出值为压缩机转速n、制冷阀开度α_r、供暖阀开度α_h、电磁阀状态s_e。

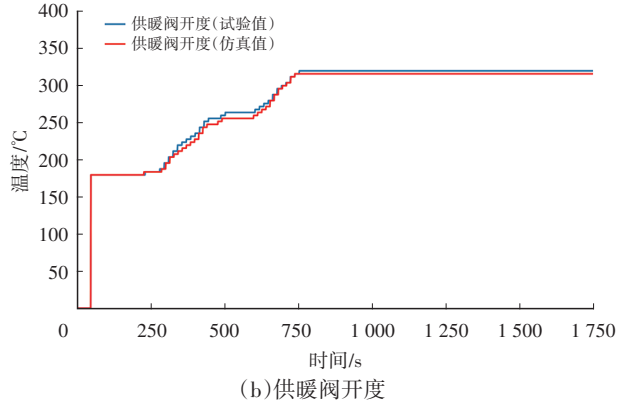
由于制冷阀开度决定制冷剂流量，直接影响制冷能力；供暖阀开度控制热量分配，影响制热效率；压缩机转速调节系统整体能量输出，故将上述因素的变化量作为策略模型的评价指标。仿真与试验对比分析，结果如图7所示。制冷阀开度、供暖阀开度和压缩机转速仿真值均与试验值保持较好的一致性，仿真稳定时误差小于2%。

4.5　耦合仿真模型仿真

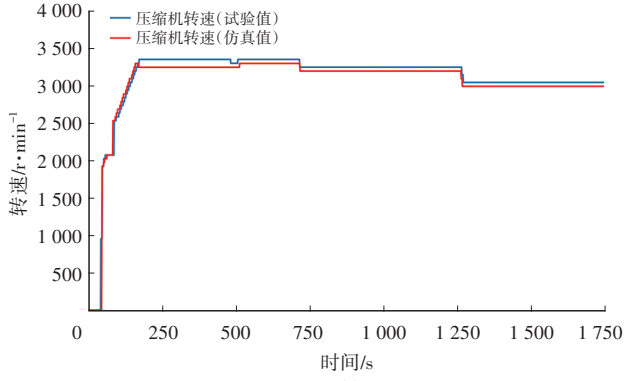
将物理模型的输出作为控制模型的输入，控制模型的输出作为物理模型的输入，进行模型耦合仿真。策略模型和物理模型均以0.1 s步长进行积分，二者通过SignalPort信号端口模块完成离散-连续耦合。耦合仿真模型仿真与试验对比结果如图8所示。



(a)制冷阀开度



(b)供暖阀开度

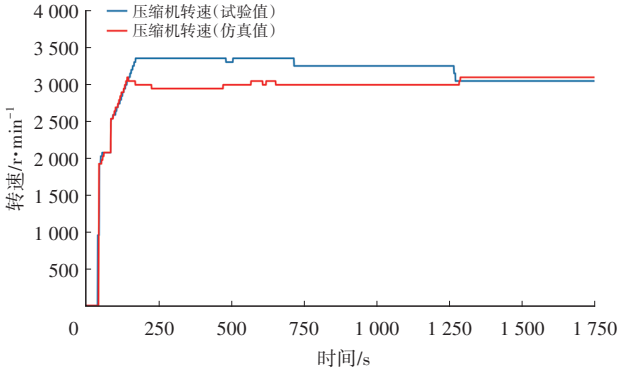


(c)压缩机转速

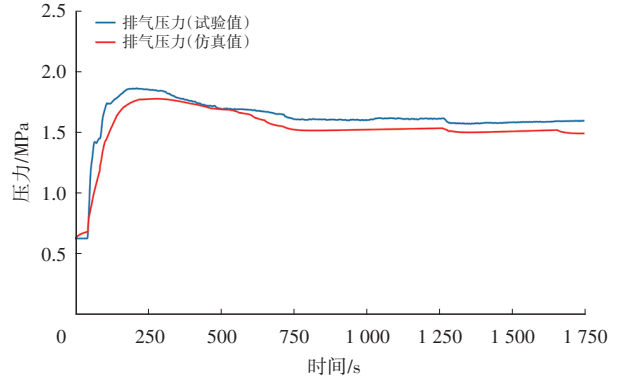
图7　策略模型仿真与试验对比结果

由图8可知，在图8a中瞬态变化阶段（第200 s~第1 250 s），压缩机转速仿真值与试验值存在一定的误

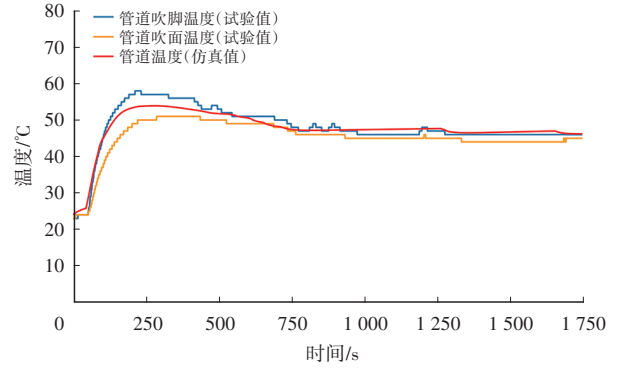
差，主要源于压缩机在实际运行中的实际效率偏离理论值，该差异受运行工况、热力学状态等多重因素影响，一维模型难以精确复现瞬态结果。但在第1 250 s后的稳态区间，试验值与仿真值的误差较小，低于2%。在图8b中，压缩机出口压力仿真值在瞬态趋势和稳态结果与试验值的一致性较好，稳态值偏差低于6%。



(a)压缩机转速



(b)排气压力



(c)管道温度

图8　耦合仿真模型仿真与试验对比结果

由于物理模型未区分头部送风和脚部送风结构，而是直接计算空调系统管道温度，可将模型中管道温度的仿真值与试验测量温度进行对比。在图8c中，管道温度的仿真值在瞬态趋势和稳态结果与试验的一致性较好，但稳态值相对偏高，偏差仍保持在2 ℃内。该偏差可能源于简化后的管路模型将进气管视为单一热容，而实际管道存在轴向温度梯度，导致测点温度略有偏差。

本文未将独立仿真与耦合仿真的数值结果进行逐一对比，是因为二者在评价目标上存在本质差异：独立仿真常用于单向给定驱动条件下，对标物理部件以验证其稳态机理模型精度。在该场景下，压缩机转速、阀开度等中间物理量为模型输入，而非待评估指标。耦合仿真多用于表征物理系统与控制系统双向闭环耦合作用下的瞬态特性，模型内部控制变量经运算后转换为系统输出变量，致使评价指标的物理内涵发生改变。同时，耦合误差为物理模型、控制模型及其交互作用的复合结果，无法分离归因。

因此，本文采用“独立仿真分步验证机理与耦合仿真验证闭环整体行为”的递进式验证方法，兼顾2类模型的保真度与整体闭环可信度的验证。试验结果表明：耦合仿真模型在压缩机转速、排气压力和管道温度等关键指标的仿真结果均与试验一致性较高，能够复制试验中观察到的瞬态和稳态行为。

5　结束语

本文基于Modelica语言构建了一个完整的白盒汽车空调热管理系统模型，与传统黑盒方法相比，该模型遵循能量、质量守恒原理，既具备高度可解释性，又能够在瞬态和稳态工况下再现系统行为。在对冬季采暖除湿工况的实车验证中，实现了对压缩机转速、出口压力、舱内温度等关键物理量的验证，仿真值与试验值在瞬态趋势及稳态结果的一致性较高，验证了模型的高保真度与工程可用性。

该仿真技术能够在车辆概念设计阶段快速评估不同零部件配置与控制方案对热管理效果及能耗的影响，有效缩短了前置验证周期并降低研发成本。未来，可引入多部件的二维/三维流体仿真模型和数据驱动的降阶模型，结合模型预测控制或强化学习等高级控制算法，有效拓宽系统有效工作工况区间，提升全域热管理效能。

参　考　文　献

[1] JOSE S S, CHIDAMBARAM R K. Electric Vehicle Air Conditioning System and Its Optimization for Extended Range—A Review[J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(11).

[2] 周衍涛, 戴军, 苑惠丽, 等. 城市电动汽车充电设施需求预测与规划布局研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 177-187.
ZHOU Y T, DAI J, YUAN H, et al. Demand Forecasting and Planning Layout of Urban Electric Vehicle Charging Facilities[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 177-187.

[3] CLOUTIER R, SAUSER B, BONE M, et al. Transitioning Systems Thinking to Model-Based Systems Engineering: Systemigrams to SysML Models[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(4): 662-674.

[4] 刘玉生. MBSE: 实现中国制造创新设计的使能技术探析[J]. 科技导报, 2017, 35(22): 58-64.
LIU Y S. MBSE: The Enabling Technology for the Innovative Design of Intelligent Manufacturing in China[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(22): 58-64.

[5] CUI Z Y, LUO M Q, ZHANG C, et al. MBSE for Civil Aircraft Scaled Demonstrator Requirement Analysis and Architecting[J]. IEEE Access, 2022, 10: 43112-43128.

[6] TAO F, QI Q L, WANG L H, et al. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison[J]. Engineering, 2019, 5(4): 653-661.

[7] 王鹏, 杨妹, 祝建成, 等. 面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2779-2786.
WANG P, YANG M, ZHU J C, et al. Dynamic Data Driven Modeling and Simulation Method for Digital Twin[J]. System Engineering and Electronics, 2020, 42(12): 2779-2786.

[8] 赵洲轮, 路昭, 倪强强, 等. 基于驾驶风格识别的纯电动汽车能耗预测研究[J]. 汽车技术, 2026(8): 37-44.
ZHAO Z L, LU Z, NI Q Q, et al. Research on Energy Consumption Prediction of Electric Vehicle Based on Driving Style Recognition[J]. Automobile Technology, 2026(8): 37-44.

[9] 杜常清, 孙嘉豪, 李文浩, 等. 纯电动汽车热管理系统集成设计及多级模糊控制策略研究[J]. 汽车技术, 2025(2): 17-25.
DU C Q, SUN J H, LI W H, et al. Integrated Design of Thermal Management System for Pure Electric Vehicles and Research on Multi-Level Fuzzy Control Strategy[J]. Automobile Technology, 2025(2): 17-25.

[10] WANG J J, LI Y L, GAO R X, et al. Hybrid Physics-Based and Data-Driven Models for Smart Manufacturing: Modelling, Simulation, and Explainability[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 381-391.

[11] RASHEED A, SAN O, KVAMSDAL T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21980-22012.

[12] ADAMS M, LI X, BOUCINHA L, et al. Hybrid Digital Twins: A Primer on Combining Physics-Based and Data Analytics Approaches[J]. IEEE Software, 2022, 39(2): 47-52.

[13] FRITZSON P, ENGELSON V. Modelica — A Unified Object-Oriented Language for System Modeling and Simulation[C]// The 12th European Conference on Object-Oriented Programming. Brussels, Belgium: Springer, 1998: 67-90.

[14] YOO Y, LEE S, YOON J, et al. Modelica-Based Dynamic Analysis and Design of Lift-Generating Disk-Type Wind Blade Using Computational Fluid Dynamics and Wind Tunnel Test Data[J]. Mechatronics, 2018, 55: 1-12.

[15] BELLOCCHI S, LEO GUIZZI G, MANNO M, et al. Reversible Heat Pump HVAC System with Regenerative Heat Exchanger for Electric Vehicles: Analysis of Its Impact on Driving Range[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 290-305.

[16] STEINER A, RIEBERER R. Simulation Based Identification of the Ideal Defrost Start Time for a Heat Pump System for Electric Vehicles[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 57: 87-93.

[17] CVOK I, RATKOVIĆ I, DEUR J. Optimisation of Control Input Allocation Maps for Electric Vehicle Heat Pump-based Cabin Heating Systems[J]. Energies, 2020, 13(19).

[18] YANG C Y, WEBB R L. Condensation of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and without Micro-Fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(4): 791-800.

[19] YANG C Y, WEBB R L. Friction Pressure Drop of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and without Micro-Fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(4): 801-809.

（责任编辑　瑞　秋）
修改稿收到日期为2026年9月17日。