

# 基于Dymola的汽车空调系统性能仿真分析

汪本源\*, 武卫东#, 王烽先, 朱群东, 黄逸宸

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年3月30日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

## 摘要

为了解决汽车空调系统仿真涉及多领域耦合的问题, 本文运用Dymola仿真非因果性建模、层级化建模、多领域建模等特点, 搭建了一套汽车空调系统仿真模型, 与实验数据对比分析了不同极端工况及多参数变化下仿真计算的准确性, 利用仿真模型定量分析了不同因素对系统性能的影响。结果表明: 仿真计算得到的换热性能与对应实验值之间的平均误差在 $\pm 7\%$ 以内; 车内环境温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ 、蒸发器进风风量每增加 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 、车外换热器进风风速每增加 $0.5\text{ m/s}$ 或车外环境温度每降低 $1^{\circ}\text{C}$ , 制冷量分别提高了2.4%、1.9%、0.4%、0.8%; 系统能效比分别提高了1.6%、6.3%、4.0%和3.1%。

## 关键词

汽车空调, Dymola, 系统仿真, 性能分析

# Performance Simulation Analysis of Automobile Air Conditioning System Based on Dymola

Benyuan Wang\*, Weidong Wu#, Fengxian Wang, Qundong Zhu, Yichen Huang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2023; published: May 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

To solve the problem of multi-domain coupling involved in the simulation of automobile air conditioning system, this paper was used Dymola simulation non-causal modeling, hierarchical modeling, multi-domain modeling and other characteristics to build a set of automobile air condition-

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 汪本源, 武卫东, 王烽先, 朱群东, 黄逸宸. 基于 Dymola 的汽车空调系统性能仿真分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 3251-3260. DOI: 10.12677/mos.2023.123299

ing system simulation model. Compared with the experimental data, the accuracy of the simulation calculation under different extreme conditions and multi-parameter change coverage was analyzed, and the influence of different factors on the system performance was quantitatively analyzed by using the simulation model. The results showed that the average error between the simulated heat transfer performance and the corresponding experimental value was within  $\pm 7\%$ . The cooling capacity increased by 2.4%, 1.9%, 0.4%, and 0.8% respectively, when the in-vehicle ambient temperature rose by  $1^\circ\text{C}$ , the evaporator air flow rate increased by  $50\text{ m}^3/\text{h}$ , the external heat exchanger air velocity increased by  $0.5\text{ m/s}$  or the external ambient temperature decreased by  $1^\circ\text{C}$ . Additionally, the system coefficient of performance is improved by 1.6%, 6.3%, 4.0%, and 3.1% respectively.

## Keywords

Automotive Air-Conditioning, Dymola, System Simulation, Performance Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会的进步与时代的发展，人们对汽车空调系统的需求也在逐步递升[1] [2] [3]。近年来，我国出台政策对新能源汽车进行了大力扶持[4] [5]，新能源汽车的产销量和保有量均快速增长。但与传统的燃油汽车相比，新能源汽车，尤其是纯电动车，在舒适度和续航里程上还存在一些问题，其中汽车空调系统的高耗电量就是纯电动汽车发展需要攻关的重大难点之一，所以如何改善新能源汽车空调性能也成为了相关行业研究关注的热点[6] [7]。

目前在众多研究汽车空调领域问题的方法中，模拟仿真因其周期短、成本低、灵活性高的优点，已被广泛且成熟地应用[8] [9]。闵海涛等人[10]运用 MATLAB/Simulink 对汽车空调冷凝器与蒸发器进行仿真建模，分析了换热器整体性能，并对换热器的选型及结构优化给出了参考意见。Zhang 等人[11]采用 CFD 流体分析软件 Fluent 对汽车空调风道进行了仿真建模，并对前后排空调出风口风量进行了仿真分析，对现有的某款汽车空调风道结构提出了优化建议。靳永言[12]基于 CFD 方法对汽车空调平行流冷凝器分别在空气侧以及制冷剂侧建立了仿真模型，分析了不同百叶窗开角度与间距下冷凝器的散热量以及空气流过百叶窗流道流场的变化规律。Ibrahim 和 Mehta [13]运用 Fluent 对汽车空调系统内压缩机的热力过程进行了仿真模拟，对动态模型参数进行了优化改进，提出了对压缩机的优化设计。前文提到了多种仿真分析方法，但是汽车空调系统是囊括了两相流、控制、电子、液压、机械、传热等多个专业学科领域的复杂系统，当前市面上的仿真软件大多只能通过单一领域软件的集成实现联合仿真，这割裂了汽车空调系统中多领域物理耦合作用的机制，使得包含各种复杂环境、机电控制、零件设备等的汽车空调系统仿真无法有效做到多领域的模块化建模及集成仿真。早在 2012 年 Dymola 就运用于宝马及大众等知名车企的概念车型研发过程之中，作为宝马热销产品宝马 i8 动力传动系统的设计平台[14]。朱涛[15]运用 Dymola 对汽车热管理系统进行建模并与实车实验进行对照，研究分析了在不同车辆行驶条件和热管理方案下，热管理系统的表现和电池性能会受到的影响。黄锡昌等人[16]运用 Dymola 对电动汽车电池系统进行建模，并利用仿真软件对动力电池的离散时间、载荷电流、载荷电压等性能参数进行求解，完善仿真模型并对实际电动汽车电池组设计提出理论改进建议。Hirano [17]基于 Dymola 对电动汽车转向系统的转向性能进

行研究,建立了转向系统的各关键模块模型,通过与实验系统对比分析得出仿真模型能够准确反映出车辆转向性能。

综上所述, Dymola 作为一款成熟的具有多领域建模、模块化建模的仿真软件,已在新能源汽车相关领域取得了成功的运用,但其研究领域依旧多集中于汽车动力学方向,而运用 Dymola 进行新能源汽车空调系统领域研究的还较少见。本文将运用 Dymola 仿真平台搭建一套新能源汽车空调系统,阐述仿真模型开发过程中各部件建模原理。在根据仿真模型与实验数据进行仿真精度对比分析之后,运用仿真平台分析常见工况下,车内外环境温度(换热器进风温度)、车外换热器(冷凝器)迎风风速和车内蒸发器进风量等因素对系统性能的影响。

## 2. Dymola 建模原理

### Dymola 简介

Dymola (全名 Dynamic Modeling Laboratory)是由瑞典 Dynasim 公司开发的一种基于 Modelica 语言面向对象的仿真软件[18],有着非因果性、层级化建模、多领域建模等特点,被广泛应用于汽车、航空、航天等领域[19]。Dymola 非因果性建模的特点,能够让其通过陈述性的方程建模,使其在保留了实际物理系统的拓扑结构的同时又不必给出一个详细的算法来表述怎么达到目标,这个特点能够在保证原系统物理方程不变的同时提高建模的效率。层级化建模的特点能够让 Dymola 建立的仿真模型在模块划分上非常清晰,非常合适用来为汽车系统进行模块化建模和仿真研究。

Dymola 的建模机理是通过分层、组件连接和继承的方法来进行组件的搭建[20] [21]。由于 Dymola 是基于面向对象编程的 Modelica 语言进行开发,子组件的搭建其基本单元是类,每个类包含成员类、变量和方程等要素,可以对很多方程进行重用,大大加快了组件编写过程。最后需要对这些子组件进行连接(既建立连接器),一般每个连接器都包括接口定义、flow 量和守恒方程等部分。

### 3. 仿真模型搭建及验证

汽车空调系统是实现对车厢内空气进行制冷、制热、除湿、换气等功能的汽车附件装置。本文研究的是制冷模式下的汽车空调系统,包含了压缩机、冷凝器、膨胀阀、蒸发器、气液分离器及必要的空调管路等部件组成(如图 1),要对整个空调系统进行仿真研究,就要进行各部件的分别建模及标定。

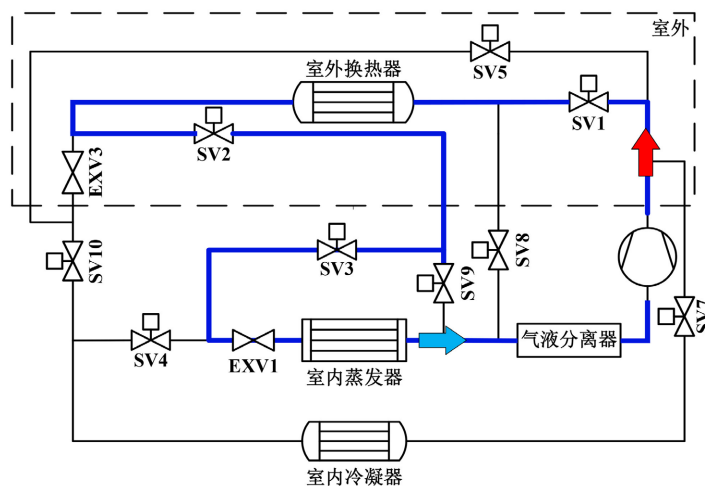


Figure 1. Diagram of the system

图 1. 系统原理图

### 3.1. 压缩机的建模

汽车空调压缩机根据其排量是否可变,可分为:定排量和变排量压缩机。根据压缩机结构形式不同,可以分为:曲轴连杆式、斜盘式和涡旋式压缩机。本文选择电动汽车中比较常用的变排量涡旋式压缩机作为建模研究的对象。对压缩机进行建模时,压缩机模型包括制冷剂侧、机械转动侧和控制侧模型。制冷剂侧主要计算压缩机中制冷剂的热力学状态变化,机械转动侧主要计算压缩机主轴的转速和扭矩,而控制侧主要是应用于变排量压缩机中,用于控制压缩机排量变化。压缩机的效率参数(容积效率  $\eta_v$ , 等熵效率  $\eta_{is}$ , 机械效率  $\eta_{eff}$ )通常是随压缩机工作状态变化而变化的,可由实验数据拟合的压缩机转速和压比曲线得到。

### 3.2. 膨胀阀的建模

膨胀阀作为汽车空调系统中的重要部件,主要起到节流降压以及控制制冷剂流量的作用。本文选择的膨胀阀类型为电子膨胀阀。通过输入设定的过热度,根据制冷剂的实际过热度,通过PID调节膨胀阀的开度。

$$M = C_D A \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (1)$$

$$C_D = 0.02005\sqrt{\rho} + 0.634v \quad (2)$$

式中,  $M$  为制冷剂的流量, kg/s;  $C_D$  为流量系数, Cv;  $A$  为流通面积,  $m^2$ ;  $p_1$  为进口制冷剂压力, Pa;  $p_2$  为出口制冷剂压力, Pa;  $\rho$  为制冷剂密度,  $kg/m^3$ ;  $v$  为出口制冷剂比体积,  $m^3/kg$ 。

### 3.3. 微通道平行流换热器的建模

本文选用的是汽车空调系统中常用的微通道换热器[22] [23]作为系统的冷凝器以及蒸发器。微通道换热器主要由进出口集管、挡板以及微通道多孔扁管和百叶窗翅片等主要部件组成。制冷剂首先从进口管流入,继而由进口集管根据流程的不同分配至相对应的多孔扁管中,制冷剂在多孔扁管内通过翅片强化与外界空气的换热过程,再经过出口集管汇合,由出口管流出微通道换热器。微通道扁管的结构及参数如图2所示。

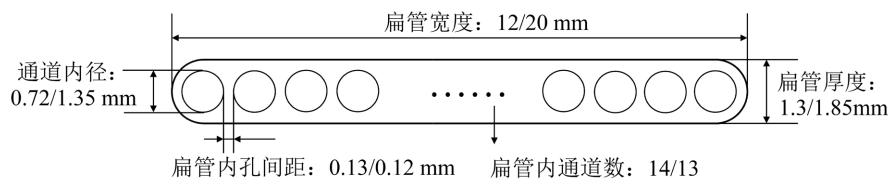


Figure 2. Diagram of the flat tube structure

图2. 扁管结构图

微通道换热器的翅片类型为百叶窗翅片结构,其结构如图3所示。空气通过翅片与制冷剂进行换热。其中,一部分热量直接通过扁管壁面与空气接触,完成换热过程;另一部分热量通过百叶窗翅片,传递到扁管的壁面,完成换热。

在微通道换热器内,制冷剂在多孔扁管内的流动换热情况较为复杂,制冷剂在蒸发器内的状态伴随着其物性变化分为两相区和过热区。制冷剂在冷凝器内的状态伴随着其物性变化分为过热区、两相区和过冷区。制冷剂在两相区中的传热系数  $a$  选用 Shan-Chen 公式[24]进行计算,在过热区和过冷区时的传热系数  $a$  则采用 Ditus-Boelter 公式[25]进行计算。制冷剂侧摩擦系数  $f$  则统一采用 Konakov 公式[26]进行计算。

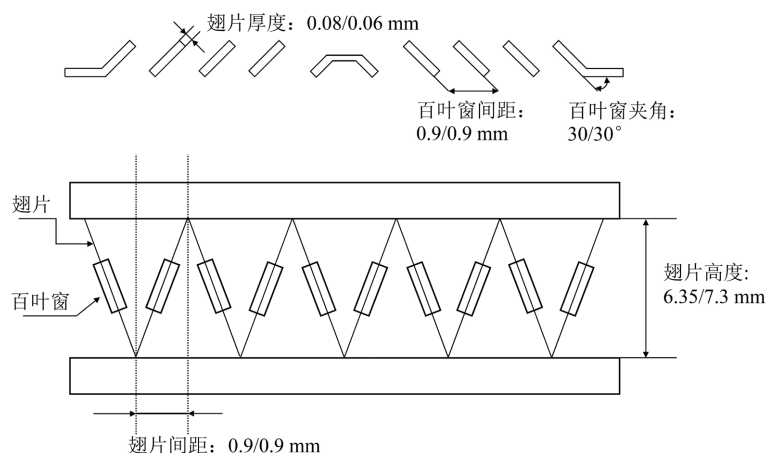


Figure 3. Diagram of the louver structure  
图 3. 百叶窗结构图

### 3.4. 仿真模型精度验证

运用上文所述的建模方法建立单体仿真模型进行模拟，将模拟结果与实验结果进行对比。仿真模型各部件的几何参数与性能参数均与实验装置相同，通过改变进风风速、进风温度、制冷剂高低压、进出口过冷过热等条件测试仿真模型精度，实验工况见表 1。

Table 1. Heat exchanger monomer experimental condition table  
表 1. 换热器单体实验工况表

工况	车外换热器单体实验工况					车内蒸发器单体实验工况					
	进风温度 (°C)	进风风速 (m/s)	进口压力 (bar)	进口过热 (°C)	出口过冷 (°C)	进风温度 (°C)	进风量 (m <sup>3</sup> /h)	阀前压力 (bar)	出口压力 (bar)	阀前过冷 (°C)	出口过热 (°C)
1	40	1.5	18	35	5	40	550	18	3	5	5
2	40	2	18	35	5	40	500	18	3	5	5
3	40	2.5	18	35	5	40	480	18	3	5	5
4	50	1.5	18	35	5	40	480	25	3	5	5
5	55	1.5	18	35	5	40	480	22	3	5	5
6	60	1.5	18	35	5	40	480	20	3	5	5
7	40	2	18	35	10	40	480	18	3	5	10
8	40	2	18	35	15	40	480	18	3	5	15
9	40	2	18	35	20	40	480	18	3	5	20
10	40	2	20	35	5	50	480	18	3	5	5
11	40	2	22	35	5	55	480	18	3	5	5
12	40	2	24	35	5	60	480	18	3	5	5

换热器模型精度验证结果如图 4，可见制冷剂质量流量与换热量误差基本都在 5% 以内，个别工况点高于 5% 但仍在 10% 以内，误差可能是由于实验设备的参数与仿真模型输入参数的偏差，也可能由于仿真计算时使用的经验公式匹配度的问题。总之，上述结果验证了 Dymola 仿真的可靠性，利用 Dymola 仿真可有效地预测汽车空调系统的制冷性能。

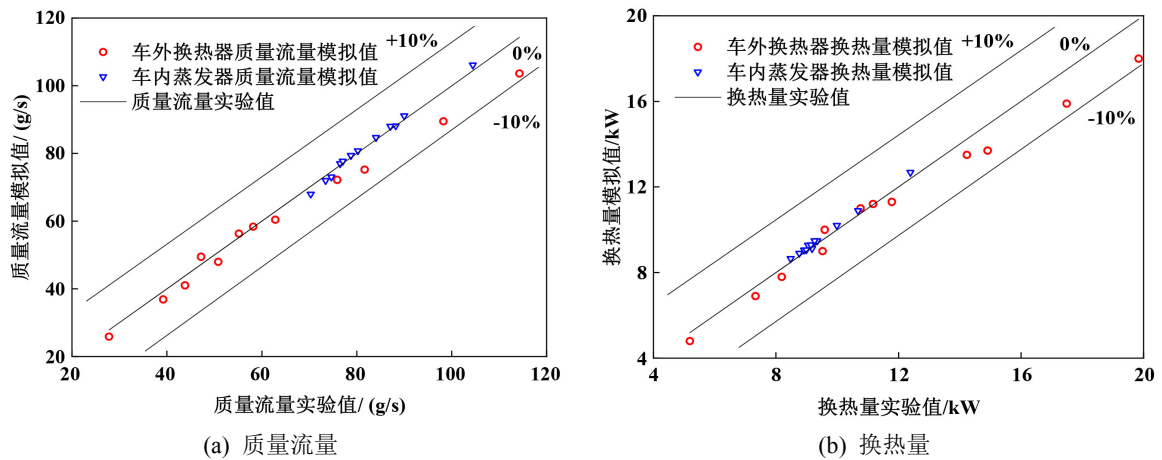


Figure 4. Accuracy verification of heat exchanger model  
图 4. 换热器模型精度验证

## 4. 结果与分析

### 4.1. 车内蒸发器进风风量对系统性能的影响

图 5 和图 6 为车内环境温度  $27^{\circ}\text{C}$ ，车外环境温度  $40^{\circ}\text{C}$ 、迎风风速  $2.5\text{ m/s}$ ，压缩机转速不变时，蒸发/冷凝压力、制冷量、压缩机功耗和系统 COP (Coefficient Of Performance) 随车内蒸发器进风风量的变化情况。由图 5 可知，随着蒸发器进风风量从  $250\text{ m}^3/\text{h}$  增至  $400\text{ m}^3/\text{h}$ ，蒸发压力和冷凝压力均升高，前者增幅明显大于后者。这是因为蒸发器进风风量增加，导致蒸发器空气侧换热系数增加，换热效率增加，换热量增大，制冷剂气化加快，蒸发器内制冷剂气体增多，蒸发压力增大，蒸发温度升高，而压缩机转速不变的情况下，蒸发压力增加使压缩机进口压力增加，其排气压力也随之增大，所以导致冷凝压力增大。由图 6 可知，随着蒸发器进风风量的增大，制冷量和系统 COP 明显增加；压缩机功耗增幅较小。这是因为蒸发器进风风量增加，吸气压力增加，吸气比容减小，系统质量流量增加，所以压缩机功耗增大，但压缩机功耗增加幅度较小。COP 由制冷量与压缩机功耗共同影响，因制冷量增幅明显大于压缩机功耗增幅，导致 COP 增大。进一步分析可得车内蒸发器进风风量每上升  $50\text{ m}^3/\text{h}$ ，制冷量上升 8.9%；压缩机功耗上升 1.9%；COP 上升 6.3%。

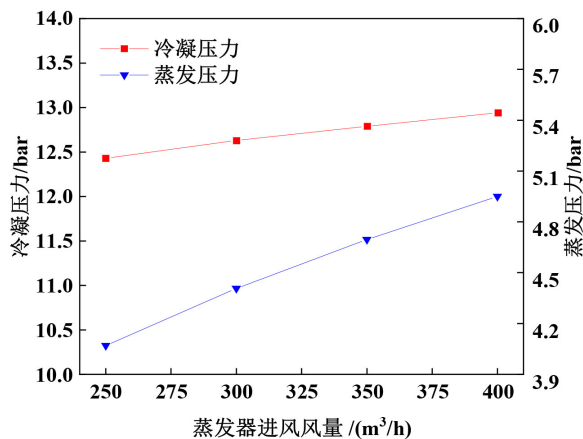
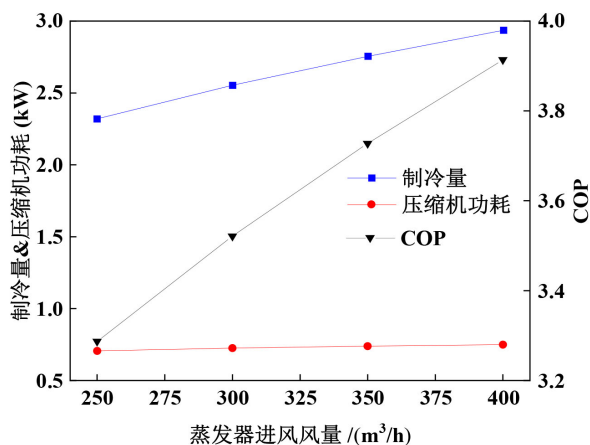


Figure 5. The influence of evaporator inlet air volume on the condensation/evaporation pressure of the system  
图 5. 蒸发器进风风量对系统冷凝/蒸发压力的影响



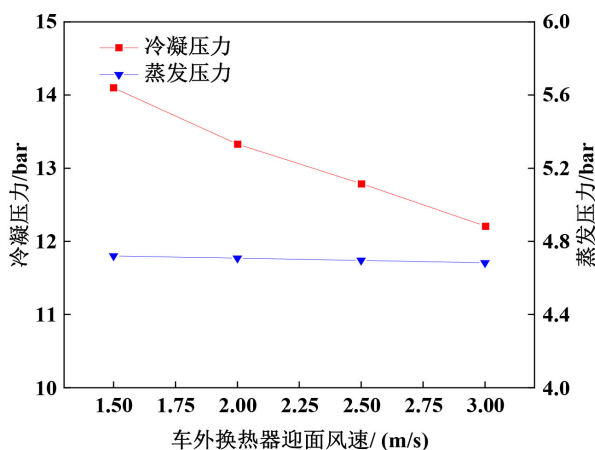
**Figure 6.** The influence of inlet air volume of evaporator on cooling capacity, compressor power consumption and COP

**图 6.** 蒸发器进风风量对制冷量、压缩机功耗和 COP 的影响

#### 4.2. 车外换热器迎面风速对系统性能的影响

图 7 和图 8 为车内环境温度 27℃、进风风量 350 m<sup>3</sup>/h，车外环境温度 40℃，压缩机转速不变时，蒸发/冷凝压力、制冷量、压缩机功耗和系统 COP 随车外换热器迎面风速的变化情况。由图 7 可知，随着车外换热器迎面风速从 1.5 m/s 增至 3 m/s，蒸发压力和冷凝压力均减小，前者降幅明显小于后者。这是因为迎面风速的增大，导致空气侧换热系数增加，车外换热器换热性能增大，使换热器内的制冷剂气体更快的冷凝为液体，冷凝器压力降低，冷凝温度降低。而压缩机转速不变，冷凝压力的降低使压缩机排气压力降低，相同节流效应下相应蒸发压力(低压侧压力)也随之降低。

由图 8 可知，随着迎面风速增加，制冷量略有增加、系统 COP 显著增加，压缩机功耗降低。这是因为随着迎面风速增加，冷凝压力减小，冷凝温度降低，单位制冷量增大，但由于吸气压力降低，吸气比容增大，压缩机质量流量减小，制冷量虽然增加但幅度较小。同时冷凝压力减小的幅度大于蒸发压力，压比减小，压缩机功耗降低，进而导致 COP 增大。进一步分析可得车外换热器迎面风速每增加 0.5 m/s，制冷量上升 0.4%；压缩机功耗下降 3.4%；COP 上升 4.0%。



**Figure 7.** The influence of the frontal wind speed of the external heat exchanger on the condensation/evaporation pressure of the system

**图 7.** 车外换热器迎面风速对系统冷凝/蒸发压力的影响

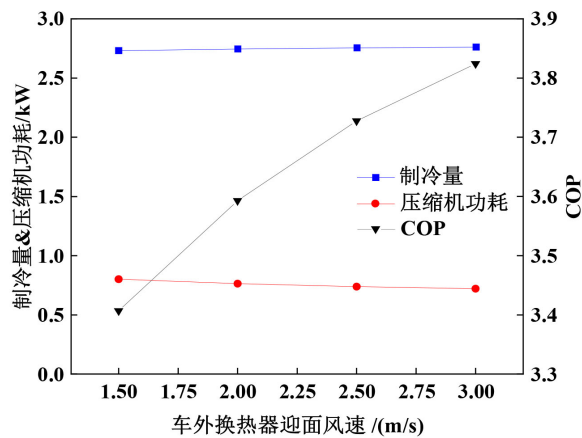


Figure 8. The influence of the frontal wind speed of the heat exchanger on the cooling capacity, compressor power consumption and COP

图 8. 车外换热器迎面风速对制冷量、压缩机功耗和 COP 的影响

#### 4.3. 车内环境温度对系统性能的影响

图 9 为在车内蒸发器进风风量为  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ , 车外换热器迎风风速为  $2.5 \text{ m/s}$ , 车外环境温度为  $40^\circ\text{C}$  时, 不同压缩机转速下, 制冷量、压缩机功耗和系统 COP 随车内蒸发器进风温度的变化情况。由图中可知, 在相同压缩机转速条件下, 随着车内环境温度从  $24^\circ\text{C}$  升至  $30^\circ\text{C}$ , 制冷量明显增加; 压缩机功耗略有增加; COP 增加。这是因为车内环境温度升高, 蒸发压力(温度)增大, 单位制冷量增大, 同时吸气比容减小, 制冷剂质量流量增大, 在二者共同作用下, 导致制冷量增大。而且制冷量增大幅度大于压缩机功耗增加幅度, 导致 COP 增大。进一步分析可得车内环境温度每上升  $1^\circ\text{C}$ , 制冷量上升  $2.4\%$ ; 压缩机功耗上升  $0.8\%$ ; COP 上升  $1.6\%$ 。由图还可知, 在相同车内环境温度条件下, 随着压缩机转速升高, 制冷量增大, 压缩机功耗增大, COP 降低。这是因为, 随着转速升高, 系统制冷剂循环流量增大, 使制冷量增大。但转速升高会导致排气压力升高, 吸气压力降低, 压比增大, 引起压缩机功耗增大, 此时压缩机功耗增大幅度大于制冷量增大幅度, 引起 COP 下降。

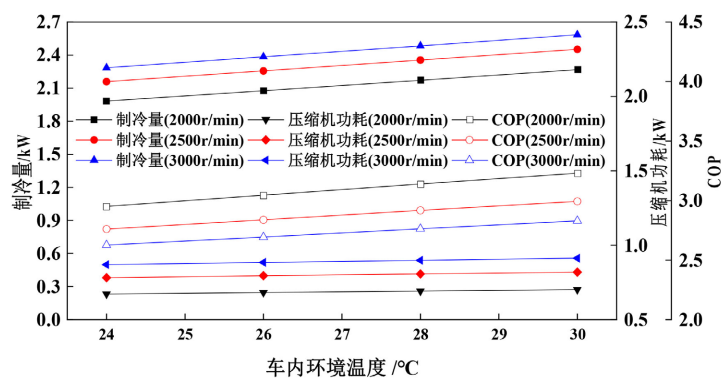


Figure 9. The influence of interior environment temperature on cooling capacity, compressor power consumption and COP

图 9. 车内环境温度对制冷量、压缩机功耗和 COP 的影响

#### 4.4. 车外环境温度对系统性能的影响

图 10 为在车内蒸发器进风风量为  $350 \text{ m}^3/\text{h}$ , 车外冷凝器迎风风速为  $2.5 \text{ m/s}$ , 车内环境温度为  $27^\circ\text{C}$



时,不同压缩机转速下,制冷量和系统 COP 随车外环境温度的变化情况。由图可知,在相同压缩机转速条件下,随着车外环境温度从 34℃升至 40℃,制冷量略有下降;压缩机功耗增大;COP 减小。这是因为车外环境温度升高,制冷剂侧和空气侧传热温差减小,换热量(制冷量)随之减小。同时车外环境温度增加,吸气比容减小,质量流量增加,耗功增加。当制冷量减小时,压缩机功耗上升,系统 COP 变小。进一步分析可得车外环境温度每下降 1℃,制冷量上升 0.8%;压缩机功耗下降 1.9%;COP 上升 3.1%。由图还可知,在相同车外环境温度条件下,随着压缩机转速升高,制冷量变大,压缩机功耗变大,COP 降低。

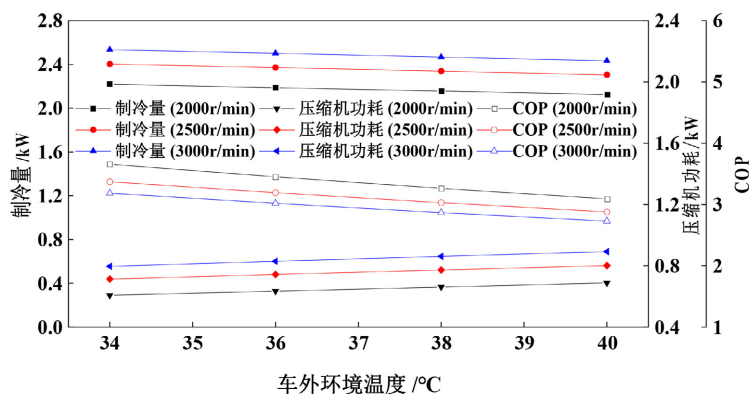


Figure 10. The influence of ambient temperature on cooling capacity, compressor power consumption and COP

图 10. 车外环境温度对制冷量、压缩机功耗和 COP 的影响

## 5. 结论

本文针对汽车空调系统仿真涉及多领域耦合的问题,运用 Dymola 仿真非因果性建模、层级化建模、多领域建模等特点,搭建并验证了汽车空调系统仿真模型,研究了车内外环境温度、车外换热器迎风风速和车内蒸发器进风风量对系统性能的影响。得到如下结论:

1) 换热量和质量流量作为决定系统仿真准确性的主要参数,二者的实验值与模拟值平均误差均小于 7%。验证结果表明了该模型可以可靠、准确地预测实际系统,对汽车空调设计具有一定指导意义。

2) 随着车内蒸发器进风风量增加,制冷量明显增加;压缩机功耗增幅较小;COP 显著增加。随着车外换热器迎风风速增加,制冷量略有增加;压缩机功耗降低;COP 显著增加。随着车内环境温度增加,制冷量明显增加;压缩机功耗略有增加;COP 增加。随着车外环境温度上升,制冷量略有下降;压缩机功耗增大;COP 下降。

3) 车内蒸发器进风风量每上升 50 m<sup>3</sup>/h,制冷量上升 8.9%;压缩机功耗上升 1.9%;COP 上升 6.3%。车外换热器迎面风速每增加 0.5 m/s,制冷量上升 0.4%;压缩机功耗下降 3.4%;COP 上升 4.0%。车内环境温度每上升 1℃,制冷量上升 2.4%;压缩机功耗上升 0.8%;COP 上升 1.6%。车外环境温度每下降 1℃,制冷量上升 0.8%;压缩机功耗下降 1.9%;COP 上升 3.1%。

## 基金项目

上海市科学技术委员会优秀技术带头人计划项目(No. 21XD1433400)。

## 参考文献

[1] Zhang, X. and Bai, X. (2017) Incentive Policies from 2006 to 2016 and New Energy Vehicle Adoption in 2010-2020 in

- China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **70**, 24-43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.211>
- [2] 杨仕稼. 电动汽车空调系统性能系数及压缩机性能分析[J]. 制冷技术, 2019, 39(3): 46-51.
- [3] 雷良新, 陶乐仁, 孙悦, 等. 纯电动汽车乘员舱冬季热负荷特性研究[J]. 制冷技术, 2022, 42(1): 65-70.
- [4] Zhang, Z., Wang, J., Feng, X., et al. (2018) The Solutions to Electric Vehicle Air Conditioning Systems: A Review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **91**, 443-463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.005>
- [5] Du, Z., Lin, B. and Guan, C. (2019) Development Path of Electric Vehicles in China under Environmental and Energy Security Constraints. *Resources, Conservation and Recycling*, **143**, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.007>
- [6] Li, H.-J., Zhou, G.-H., Li, A., et al. (2014) Heat Pump Air Conditioning System for Pure Electric Vehicle at Ultra-Low Temperature. *Thermal Science*, **18**, 1667-1672. <https://doi.org/10.2298/TSCI1405667L>
- [7] Zhou, G., Li, H., Liu, E., et al. (2017) Experimental Study on Combined Defrosting Performance of Heat Pump Air Conditioning System for Pure Electric Vehicle in Low Temperature. *Applied Thermal Engineering*, **116**, 677-684. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.088>
- [8] 陈鸿明, 钱锐, 李华. 汽车空调系统仿真自动优化平台研究[J]. 制冷技术, 2019, 39(4): 53-58.
- [9] 孙港国, 魏名山, 郑思宇, 宋盼盼. 纯电动汽车空调与电池综合热管理仿真研究[J]. 制冷技术, 2022, 42(2): 12-18.
- [10] 闵海涛, 曹云波, 曾小华, 徐星. 电动汽车空调系统建模及对整车性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(S1): 53-57.
- [11] Zhang, H., Dai, L., Xu, G., et al. (2009) Studies of Air-Flow and Temperature Fields Inside a Passenger Compartment for Improving Thermal Comfort and Saving Energy. Part I: Test/Numerical Model and Validation. *Applied Thermal Engineering*, **29**, 2022-2027. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.10.005>
- [12] 靳永言. 汽车空调两器(冷凝器与蒸发器)与系统的建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [13] Ibrahim, S. and Mehta, R.C. (2018) An Investigation of Air Flow and Thermal Comfort of Modified Conventional Car Cabin Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **11**, 141-150. <https://doi.org/10.36884/jafm.11.SI.29431>
- [14] 王耀凯. 基于 Modelica 的纯电动客车动力系统建模、仿真和优化[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [15] 朱涛. 基于 Dymola 的电动车热管理系统模块化建模与集成仿真[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [16] 黄锡昌, 宗志坚, 陈承鹤, 查鸿山. 基于 Modelica 的电动汽车电池建模与仿真[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(5): 2073-2077.
- [17] Hirano, Y. (2019) JSAE-SICE BENCHMARK PROBLEm for Vehicle Dynamics Control. *Control Theory and Technology*, **17**, 131-137. <https://doi.org/10.1007/s11768-019-8246-y>
- [18] Tummescheit, H., Eborn, J. and Prölss, K. (2005) Airconditioning—A Modelica Library for Dynamic Simulation of AC Systems. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.151.5654&rep=rep1&type=pdf>
- [19] Desideri, A., Hernandez, A., et al. (2016) Steady-State and Dynamic Validation of a Small-Scale Waste Heat Recovery System Using the ThermoCycle Modelica Library. *Energy*, **115**, 684-696. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.004>
- [20] 陈雪平, 张海亮, 钟再敏, 陈辛波. 插电式混合动力汽车能耗及其影响因素分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 1749-1754.
- [21] Cvok, I., Ratković, I. and Deur, J. (2020) Optimisation of Control Input Allocation Maps for Electric Vehicle Heat Pump-based Cabin Heating Systems. *Energies*, **13**, Article No. 5131. <https://doi.org/10.3390/en13195131>
- [22] 薛庆峰, 张晓强, 邹慧明, 田长青. 流道布局对微通道平行流车外换热器性能的影响[J]. 汽车技术, 2018, 2023(1): 25-30.
- [23] 杜琳, 周黎昉, 陈琪, 等. 微通道平行流换热器分配特性及优化研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 111-117.
- [24] Ezzatneshan, E. and Goharimehr, R. (2021) A Pseudopotential Lattice Boltzmann Method for Simulation of Two-Phase Flow Transport in Porous Medium at High-Density and High-Viscosity Ratios. *Geofluids*, **2021**, Article ID: 5668743. <https://doi.org/10.1155/2021/5668743>
- [25] Sundén, B. (2017) Chapter Two—Advanced Heat Transfer Topics in Complex Duct Flows. In: Sparrow, E.M., Abraham, J.P. and Gorman, J.M., Eds., *Advances in Heat Transfer*, Vol. 49, Elsevier, Amsterdam, 37-89. <https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2017.09.001>
- [26] He, Y., Ren, A., Tang, T. and Wang, T. (2022) Multi-Scale Numerical Simulation of Flow, Heat and Mass Transfer Behaviors in Dense Gas-Solid Flows: A Brief Review. *Journal of Thermal Science*, **31**, 607-633. <https://doi.org/10.1007/s11630-022-1605-x>