

Proposal and Verification of Matching Design Method for Electric Vehicle Heat Pump Air-Conditioning System

Shasha Hu*, Lin Su, Nankui Han, Kang Li, Yidong Fang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: *1224472644@qq.com

Received: Apr. 16th, 2020; accepted: May 1st, 2020; published: May 8th, 2020

Abstract

According to the driving conditions and design requirements of electric vehicles, this paper proposes a matching design scheme suitable for electric vehicle heat pump air conditioning systems, which mainly includes the calculation of automobile hot (cold) load and matching methods of main parameters of main components. An electric vehicle heat pump air-conditioning system was used to verify the reliability of the method, simulate the design conditions in the environmental simulation laboratory, conduct experimental tests on the performance of the designed heat pump, and compare and analyze with the design goals. The results show that the experimental results are basically consistent with the design goals, and the error is within 5%. It can be seen that the matching design method of the electric vehicle heat pump air conditioning system proposed in this paper combines the driving state and working environment of the car, which is suitable for the basic electric vehicle heat pump air conditioning system to provide a reliable method and ideas for the design of heat pump air conditioning systems for electric vehicles.

Keywords

Load Calculation, Matching Design, Electric Vehicle, Environmental Simulation Experiment

电动汽车热泵空调系统匹配设计方法的提出与验证

胡莎莎*, 苏林, 韩南奎, 李康, 方奕栋

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海
Email: *1224472644@qq.com

*通讯作者。

收稿日期：2020年4月16日；录用日期：2020年5月1日；发布日期：2020年5月8日

摘要

本文根据电动汽车的行驶工况以及设计需求提出了一套适用于电动汽车热泵空调系统的匹配设计方案，主要包括汽车热(冷)负荷的计算以及主要零部件主要参数的匹配方法，并设计搭建了一套电动汽车热泵空调系统验证该方法的可靠性。在环境模拟实验室内模拟设计工况，对所设计系统的热泵性能进行实验测试，并与设计目标进行对比和分析。结果表明：实验结果与设计目标基本吻合，误差在5%以内，由此可见本文提出的电动汽车热泵空调系统匹配设计方法结合了汽车的行驶状态以及工作环境，适用于基础的电动汽车热泵空调系统，为电动汽车热泵空调系统的设计提供了可靠的方法和思路。

关键词

负荷计算，匹配设计，电动汽车，环境模拟实验

Copyright © 2020 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

为了减少温室气体的排放和节约可再生能源，包括混合动力汽车和燃料电池汽车在内的电动汽车已经引起了全世界的关注，并被认为是传统内燃机汽车的替代品[1] [2] [3]。与传统燃油汽车一样，电动汽车也需要车载空调系统提供一个舒适的驾驶和乘坐环境。汽车空调作为保障乘员舒适性及安全驾驶的必备设备，目前已经得到广泛的普及[4]。作为汽车中能耗最大的辅助设备，空调的开启会对电动汽车的续航里程造成极大的影响。在不同的测试工况及环境条件下，开启空调后电动汽车的续航里程最大可下降近40%~60%，严重影响电动汽车的使用[5]。为此，精确测定电动汽车的空调负荷，并以此指导汽车空调的设计和控制就显得尤为重要。除了需要确定整车负荷之外，对整个空调热泵系统进行合理的匹配设计也是开发纯电动汽车的重要环节之一。热泵空调系统主要零部件能力值的确定以及它们之间的合理匹配设计，将大大影响纯电动汽车的整车热管理和整体经济性。不少学者在负荷计算以及动力系统设计方面做出了努力[6] [7] [8]，但多集中于单一的夏季热负荷或冬季热负荷的影响，系统匹配设计方面也多为汽车动力系统的设计，一整套的电动汽车负荷计算及热泵空调系统的匹配设计方法还较为少见。

本文对电动汽车热泵空调系统的负荷计算以及主要零部件能力匹配设计的方法进行了研究，提出了一套适用于不同车型的电动汽车热泵空调系统的设计方法。文章分为三部分：第一部分分析了电动汽车热泵空调的负荷构成，提出了冬季与夏季负荷的不同计算方法；第二部分提出了针对电动热泵空调系统主要零部件能力值的匹配方法及流程；第三部分选取了某一品牌的纯电动汽车作为对象，为其设计了一套适用的热泵空调系统并进行实验测试，分析了在不同测试工况下，电动汽车热泵空调系统的相关性能，并与前期的设计分析进行对比，从而验证本文提出的热泵空调系统设计方法的可行性。

2. 电动汽车负荷的构成与计算

2.1. 电动汽车负荷的构成

汽车热泵空调系统的负荷计算，有助于理解系统的能力需求，为汽车热泵空调系统的设计提出目标。

图 1 为当车内目标温度为 18℃ 时，汽车热泵空调系统的需求曲线。

当环境温度低于目标温度 18℃ 时，系统需要开启热泵模式，汽车所处的环境温度下对应的负荷值即为汽车热泵系统需要达到的最大能力值，如果系统实际能力无法满足时，可以通过增加辅助 PTC 或降低车内目标温度等手段来达到系统与需求的匹配。同理，当环境温度高于目标温度时，系统则需要开启空调模式，为乘员舱进行降温。在进行热泵空调系统设计时，一般选取夏季高温工况和冬季低温工况作为系统的设计工况。

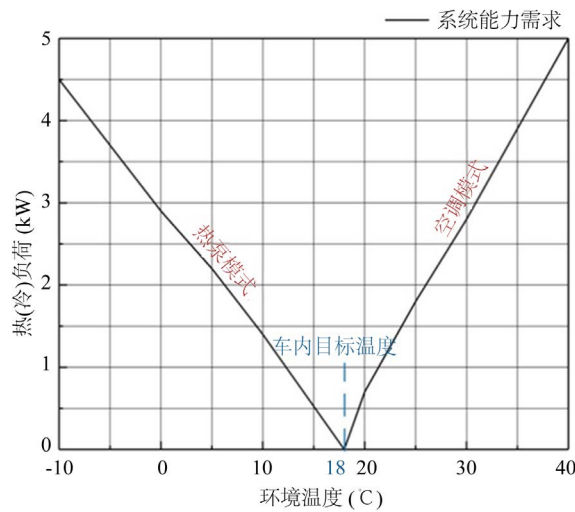


Figure 1. Demand curve of system

图 1. 汽车热泵空调系统的需求曲线($T_{\text{目标}} = 18^{\circ}\text{C}$)

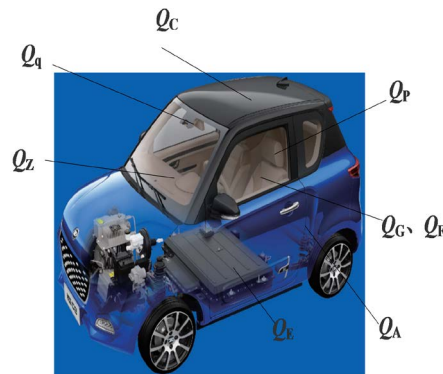


Figure 2. Sources of load in electric vehicles

图 2. 电动汽车各部分负荷的来源

如图 2 所示，电动汽车的负荷 Q 主要包括车体围护结构传入的热(冷)量 Q_c ，通过玻璃表面对流方式传入的热(冷)量 Q_g ，通过玻璃表面以辐射方式传入的热量 Q_f ，驾乘人员人体热量 Q_p ，新风热(冷)量 Q_a ，电池包散热量 Q_e ，车内其他电器散热量 Q_q ，车内结构热惯性 Q_z [9]。由于冬季是进行采暖，所以当电动汽车在冬季工况运行时，通过玻璃表面以辐射方式传入的热量 Q_f ，电池包的散热量 Q_e ，驾乘人员人体热量 Q_p 都会导致冷负荷的减少，对冬季采暖起到积极作用。因此计算冬季冷负荷时，应考虑从冷负荷总量中扣除这部分的热量。

$$Q = Q_c + Q_g + Q_f + Q_p + Q_a + Q_e + Q_q + Q_z \quad (1)$$

2.2. 电动汽车负荷的计算

汽车各部分负荷的计算涉及大量的公式及参数,如表 1 所示,各参数的意义及参考值如表 2 所示[9]。负荷计算还需要知道目标车辆各部分的围护面积,具体的几何尺寸需要根据所选的车型具体设定。

Table 1. Calculation method of each partial load

表 1. 各部分负荷计算方法

负荷名称	组合部分	计算方法
围护结构对流 Q_C	$Q_{C_{顶}} + Q_{C_{侧}} + Q_{C_{地}}$	$Q_C = K_c A_c \Delta t C$
玻璃对流 Q_G	$Q_{G_{前}} + Q_{G_{后}} + Q_{G_{侧}}$	$Q_G = K_G A_G \Delta t G$
太阳辐射 Q_F	$Q_{F_{前}} + Q_{F_{后}} + Q_{F_{侧}}$	$(\eta + \rho_G \times an/aw) \times J \times C$
新风漏风 Q_A	$Q_V + Q_X$	$Q_V = g V_S \rho (H_{out} - H_{in})$ $Q_X = N q_{VN} \rho (H_{out} - H_{in})$
电池包散热 Q_E		300 w
其他电器散热 Q_q		$Q_q = CL_1 \times KW$
人体负荷 Q_P		$Q_P = 116 N n$
车结构热惯性 Q_z	$Q_z = Q_j + Q_m$	$Q_j = cm \Delta t$

Table 2. Meaning and reference value of each parameter

表 2. 各参数的意义及参考值

符号	物理意义	单位	数值
K	车体围护结构的传热系数	$w/m^2 \cdot K$	
η	太阳辐射通过玻璃的透入系数		0.85
ρ_G	玻璃对太阳的辐射吸收系数		0.08
an	玻璃内表面换热系数	$W/m^2 \cdot K$	
aw	玻璃外表面换热系数	$W/m^2 \cdot K$	
C	遮阳修正系数		0.93
J	车窗玻璃的太阳辐射量	W	
N	驾乘人员数	人	5
n	群集系数		0.93
g_V	单位长度每小时漏风量	$m^3/(h \cdot m)$	5
S	车身缝隙的总长度	m	2
ρ	空气密度	kg/m^3	
q_{VN}	人均新风量	$m^3/(人 \cdot h)$	11
CL_1	电器发热系数		0.7
KW	车内电器的发热功率	W	
Cm	车内各部分材料的比热容	$J/(kg \cdot ^\circ C)$	
m	各部分材料的质量	kg	
Δt	车内外温差	$^\circ C$	

汽车的热(冷)负荷会随着汽车的行驶工况变化,因此负荷计算时需要确定待测车辆的运行参数,如表3所示。除此之外,负荷计算还与所选车型使用的材料有关,因此还需根据所选工况,确定车体不同结构的材料质量及其比热容,导热系数等物性参数,主要包括钢板和玻璃两个部分。不同的汽车车型主要对计算公式中的面积 A 和人体负荷中的 n 产生影响,其他的参数受车型变化的影响不大,可以直接采用参考值进行计算。

依据上述的计算过程,选取了市面上某款电动汽车作为目标车辆,计算了环境温度为 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 工况下对应的冷负荷,结果如图3所示。

3. 系统的匹配设计

热力计算是空调热泵系统匹配设计的基础,热力计算的主要任务是在给定的设计条件和设计工况下求出制冷(制热)循环的各项性能指标,为系统各部件的设计匹配提供必要的资料和依据。图4为简单热泵空调系统主要零部件的能力值匹配计算流程图。

本文选取了某微型纯电动汽车为研究对象,根据上述两章介绍的电动汽车热泵空调系统负荷计算以及主要零部件参数匹配设计的方法,设计了一款热泵空调系统,图5为该系统的原理图,表4为该系统在选取的设计工况下主要零部件的最大能力值。

Table 3. Operating parameters of the vehicle to be tested

表 3. 待测车辆运行参数

名称	单位	参数值
常用车速	km/h	40/60
空气流速	m/s	2.5
驾乘人员数	/	2
漏风量	m^3/h	5
人均新风量	$\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{h})$	11

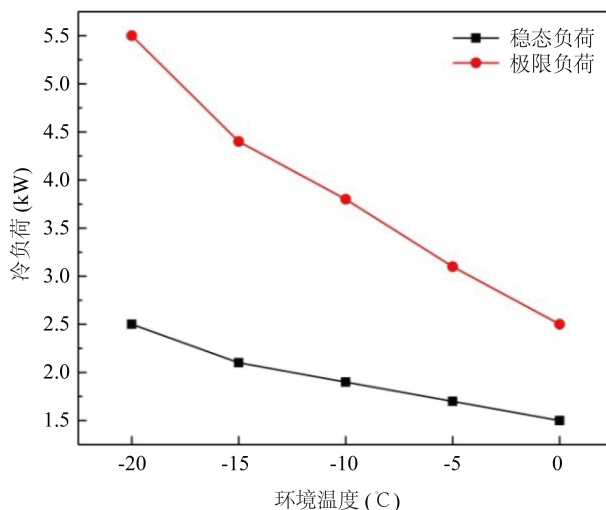


Figure 3. The cooling load of the target car at different ambient temperatures

图 3. 目标汽车在不同环境温度下的冷负荷

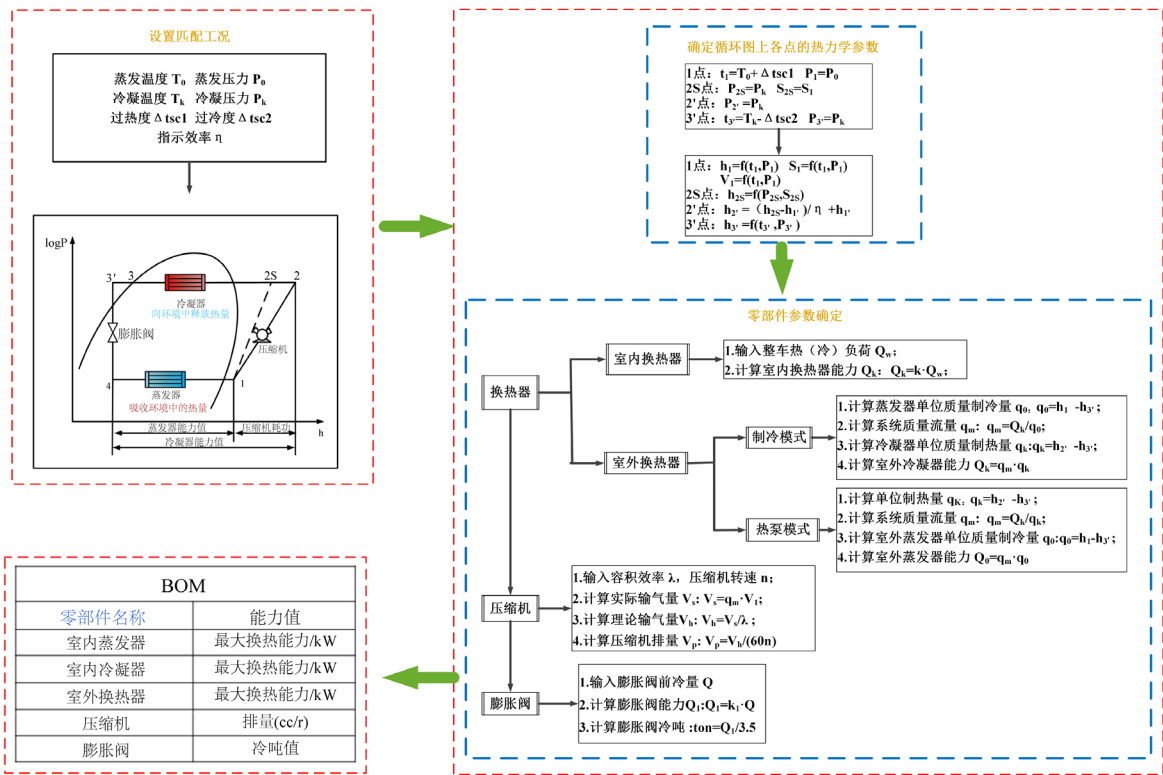


Figure 4. Capability value matching calculation flow chart of main parts

图 4. 主要零部件的能力值匹配计算流程图

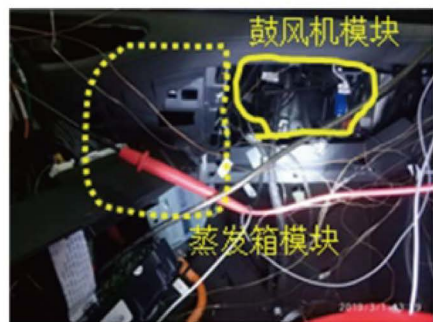
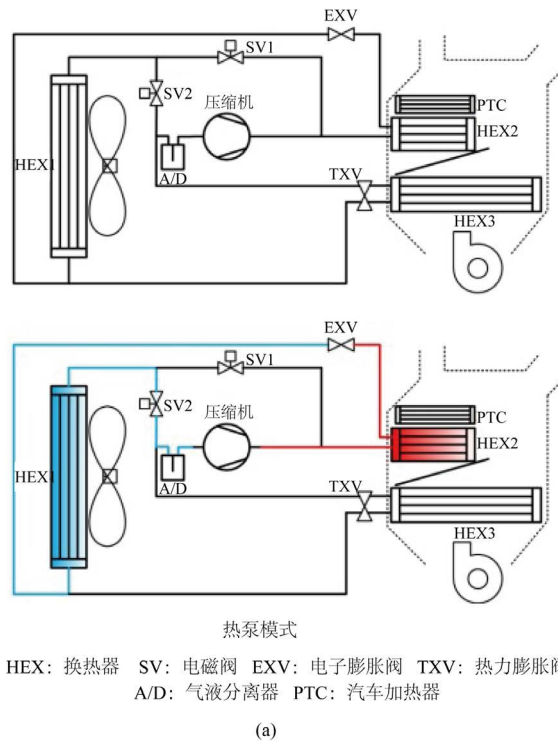


Figure 5. System schematic diagram

图 5. 系统原理图

Table 4. Capability value of main parts
表 4. 主要零部件能力值

零部件名称	能力值
压缩机	排量 27 cm ³ /r
室内冷凝器	2.7 kW
室外蒸发器	2.5 kW
膨胀阀	1.0 T

4. 实验验证

4.1. 环境模拟实验室

环境模拟实验室是综合的热学环境实验室，它通过模拟路况条件和环境工况，研究汽车空调系统的性能，是典型的汽车空调系统研究的试验装置[10]。如图 6 所示，环境模拟实验室由温湿度控制器、光照模拟系统、车速模拟风机、传感器数据采集器等部分组成[11]，环境模拟实验室的能力范围及控制精度如下：气温：-20~60℃，精度：±0.5℃；风速：0.5~10 m/s，精度：±0.1 m/s；空气相对湿度：-30~95% RH，精度：±5% RH。

本文在汽车环境模拟实验室内搭建实验系统，并进行整车实验，为了充分反映车内环境参数的变化以及记录乘员的实时感受，在车内的主要出风口以及乘员头部及脚部位置布置了温度传感器，具体布点位置如图 7 所示。环境模拟实验室可以复现试验所需的气候环境，在近似的外界环境下测试所设计的汽车空调系统的性能，大大提高了系统性能的可信度以及所设计的系统的实用性[12]。

4.2. 实验结果分析与对比

根据《汽车用电动热泵空调系统性能测试规范》，本文所选的实验工况如下：环境温度为-10℃，湿度为环境湿度，光照强度为 0 w/m²，系统处于热泵吹脚模式，外循环，最大送风量。根据制冷剂充注量实验研究分析，本文系统的制冷剂最佳充注量为 650 g，故实验过程中，制冷剂充注量均为 650 g。

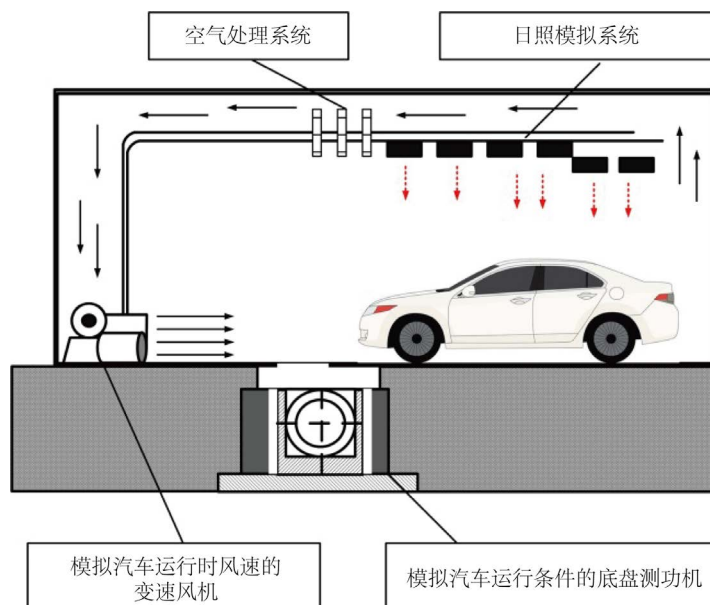


Figure 6. Environmental simulation laboratory diagram
图 6. 环境模拟实验室示意图



Figure 7. Schematic diagram of the temperature measurement point inside the car
图 7. 车内温度测点位置示意图

图 8 为热泵实验过程中吸排气温度和压力的变化趋势，由图 8 可知，系统开始启动阶段时，吸气压力和吸气温度急剧下降，反之排气温度和排气压力急剧升高，两者间的差值不断增大，这是由于热泵系统的工作原理导致的，吸气口与排气口形成稳定合理的差值，系统才能正常工作，达到制热的目的。随着时间的增加，在 40 min 后，系统的吸排气温度和压力均达到一个稳定的数值，系统处于稳定工作状态，为整个乘员舱升温。

汽车热泵空调系统设计的最终目的就是使汽车在移动过程中，整个车内空间能维持在一个舒适安全的环境。其中衡量乘员舱环境舒适的重要参数之一便是温度，图 9 为整个升温过程中，车内环境温度的变化情况。当实验开始时，车内各测点温度逐渐升高，说明系统在正常工作，10 min 后，车内各测点温度上升趋势减缓，逐渐稳定在某一数值附近，40 min 后，车内温度稳定在 18℃ 左右，与当初的设计目标 18℃ 一致。

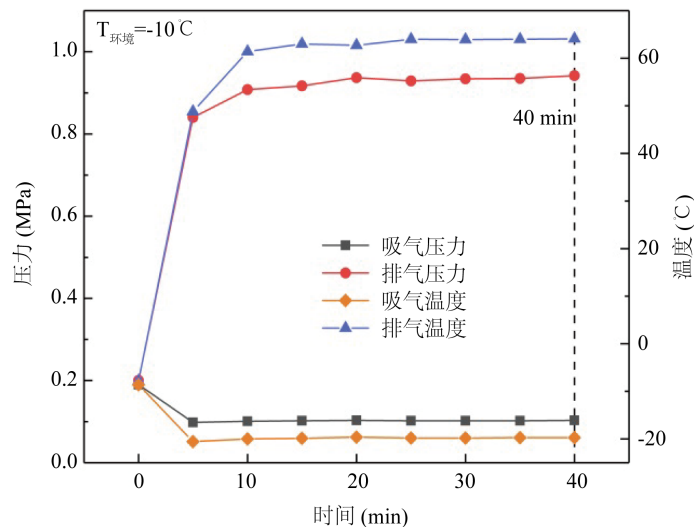


Figure 8. Changes in suction and discharge temperature and pressure over time

图 8. 吸排气温度和压力随时间的变化

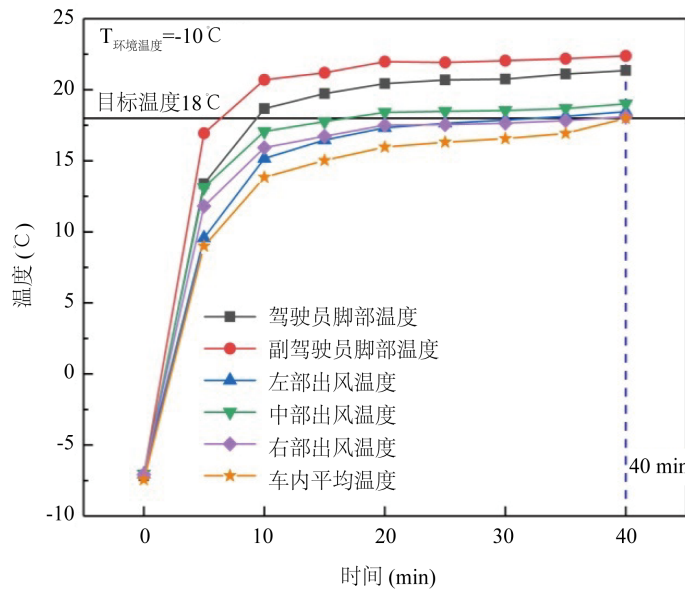


Figure 9. Changes in the ambient temperature of the car over time
图 9. 车内环境温度随时间的变化

图 10 为室内换热器的最大换热量以及系统 COP 的对比图，如图所示，实验中室内换热器的最大换热量与目标换热量基本一致，误差在 5% 左右，实际 COP 与目标 COP 也基本吻合。由此可见按照上述设计方法设计的汽车空调热泵系统在实际实验中，能满足设计目标，说明该套汽车热泵空调系统的设计思路和设计方法是可行的。

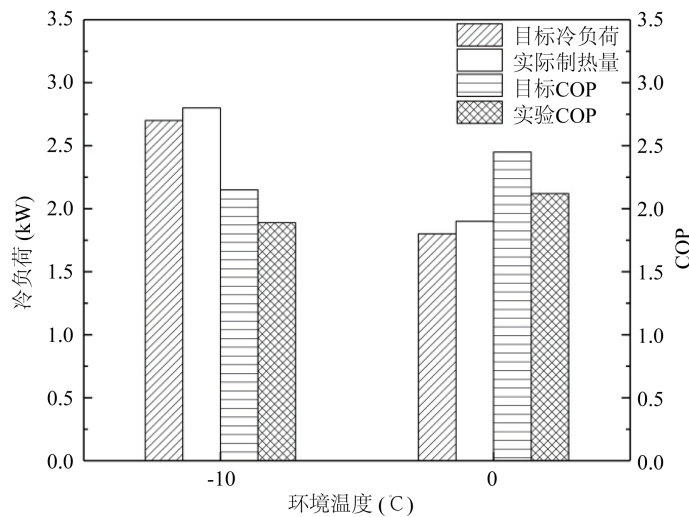


Figure 10. Comparison of maximum heat exchange capacity of indoor heat exchanger and system COP
图 10. 室内换热器的最大换热量以及系统 COP 对比

5. 结束语

本文根据电动汽车的行驶工况以及设计需求提出了一套电动汽车热泵空调系统匹配设计方案，主要

包括汽车热负荷以及主要零部件的主要参数匹配方法, 为了验证该方法的可靠性, 设计并搭建了一套电动汽车热泵空调系统, 在环境模拟实验室内模拟设计工况, 对本系统的制热性能进行实验验证, 并与设计目标进行对比和分析。结果表明: 实验结果与设计目标基本吻合, 误差在 5% 以内, 由此可见本文提出的电动汽车热泵空调系统匹配设计方法结合了汽车的行驶状态以及工作环境, 适用于基础的电动汽车热泵空调系统, 为电动汽车热泵空调系统的设计提供了可靠的方法和思路。

参考文献

- [1] Zhang, Z., Wang, J., Xu, F., Li, C., Chen, Y. and Wang, X. (2018) The Solutions to Electric Vehicle Air Conditioning Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **91**, 443-463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.005>
- [2] Zhou, G., Su, L., Li, K., Fang, Y. and Cheng, Q. (2018) An Experimental Investigation of Dehumidifying and Reheating Performances of a Dual-Evaporator Heat Pump System in Electrified Vehicles. *International Journal of Energy Research*, **42**, 754-763. <https://doi.org/10.1002/er.3863>
- [3] Wang, Y., Li, W., Zhang, Z., Shi, J. and Chen, J. (2019) Performance Evaluation and Prediction for Electric Vehicle Heat Pump Using Machine Learning Method. *Applied Thermal Engineering*, **159**, 113901. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113901>
- [4] 张文嵘, 刘丽娜, 钱程, 楼军. 热泵型纯电动汽车空调系统特性[J]. 制冷学报, 2018, 39(6): 109-114.
- [5] 张子琦, 李万勇, 张成全, 施骏业, 陈江平. 电动汽车冬季负荷特性研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 39-44.
- [6] 刘志勇, 沈长海, 邹金校, 崔亚, 彭政瑜. 电动汽车空调与电池热管理系统设计与匹配[J]. 制冷与空调, 2018, 18(1): 67-71.
- [7] 杨坤, 王杰, 肖军生, 等. 某 B 级燃料电池电动汽车匹配设计研究[J]. 汽车工程学报, 2018, 8(6): 399-406.
- [8] 郭敏锐, 杨勇. 纯电动汽车动力系统匹配设计及多工况仿真[J]. 现代制造工程, 2018(12): 62-65+88.
- [9] 阙雄才, 陈江平. 汽车空调实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [10] 黄志坚. 试验环境的模拟与汽车空调的性能试验[J]. 信息系统工程, 2010(9): 29.
- [11] 张行周, 王浚. 汽车空调整车环境模拟试验室[J]. 汽车技术, 2002(10): 21-23.
- [12] 朱晓明. 基于环境模拟试验的轿车空调系统降温性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.