

分类号: U463

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110140



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于客观仿真评价的驾舱乘员
热舒适性研究

论 文 作 者 任思源

校 内 导 师 王建彬 教授

校 外 导 师 汪爽、周超群 高级工程师

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 汽车座舱热舒适性研究

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：U463

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110140

基于客观仿真评价的驾舱乘员热舒适性研究

RESEARCH ON THERMAL COMFORT OF COCKPIT OCCUPANTS

BASED ON OBJECTIVE SIMULATION EVALUATION

学 生 姓 名 : 任思源

指 导 教 师 : 王建彬 教授

校 外 导 师 : 汪爽、周超群 高级工程师

专 业 : 机械

研 究 方 向 : 汽车座舱热舒适性研究

论文答辩日期: 2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：任思源

日期：2025 年 5 月 16 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：任思源

日期：2025 年 5 月 16 日

指导教师签名：马建彬

日期：2025 年 5 月 16 日

基于客观仿真评价的驾舱乘员热舒适性研究

摘 要

现代化汽车的设计正朝着舒适化、智能化、节能化的方向发展，尤其是对车舱内乘员热舒适性的研究，正受到汽车设计者的广泛关注。保证驾乘人员的热舒适性对于营造安全的驾乘环境以及提高汽车行业市场竞争力均有着重要意义。因此，如何辅助空调系统在节约能耗的前提下，快速改善车舱内热环境以提高乘员的热舒适性，正成为汽车热管理及热舒适性研究的重点，这也是智能座舱发展的重要方向。

对不同工况下乘员的热舒适状态和热舒适水平进行实时评价是开展驾舱乘员热舒适性研究的重要工作。但由于舱内空间密闭狭小且不易散热，乘员热舒适感受又具有较大的个体差异，很难做到统一标准。因此，本文采用客观仿真评价方法，不考虑少数差异性的同时平均了大多数人的热舒适性评价结果，为乘员热舒适性的研究提供了可以量化的参考。此外，在车舱热环境系统中，乘员热舒适性时刻受到多种因素的共同影响，如热对流、热辐射、热传导以及人体自身的热调节反应等。因此，为达到改善乘员热舒适性的目的，在综合多种因素的共同作用后，本文主要通过以下几个方面展开了具体的研究：

（1）建立热舒适性仿真方法并进行试验验证。首先通过试验测量人体局部皮肤温度数据，并实时记录人体热舒适性的主观评价结果。然后基于仿真软件对试验车乘员舱进行反向建模，并在导入假人模型后进行客观热舒适性仿真评价。最后，将仿真数据及客观评价结果与

试验结果进行对比，以验证仿真方法的可靠性。分析发现，仿真与试验的皮肤温度数据最大相对误差约 7.1%，且主、客观热舒适性的评价结果基本一致，满足工程前期的预研要求。

(2) 相对湿度对乘员热舒适性的影响研究。基于客观热舒适性仿真方法，分别在夏季和冬季两种工况下探究车舱内相对湿度对人体热舒适性的影响规律。通过不同湿度间的对比，得出了不同工况下满足人体热舒适性的最适湿度，不仅为后续研究确定了最佳湿度边界值，也为汽车智能座舱在不同气候条件下的湿度调节研究提供了参考。

(3) 乘员舱流场对乘员热舒适性的影响研究。首先对空调出风口参数进行了定义，在分配好各出风口风量后，对乘员舱的流场分布情况进行仿真分析。然后通过改善空调出风口位置，得到不同的流场分布数据，将速度场数据导出并单向耦合至热分析软件中，基于客观仿真评价方法探究了人体热舒适性的变化。最后通过分析不同流场对人体热舒适性的改善，进而得出更舒适的空调出风口布局。

(4) 开发一种新型座椅加热策略辅助空调系统改善乘员热舒适性。首先对固定功率和固定座椅表面温度两种加热策略进行仿真，分析了不同工况下座椅的最适加热功率和表面温度，进而设计出一种新型间歇式座椅加热策略。之后，对新策略进行热舒适性仿真分析，并通过计算评估了该策略与传统固定功率加热策略的能耗差异。结果表明，新型间歇式加热策略可以在更短的时间内帮助人体更快达到最适状态，且随着座椅加热开启的时间越长能耗也会更低。

关键词：热舒适性，客观评价，相对湿度，乘员舱流场，座椅加热

RESEARCH ON THERMAL COMFORT OF COCKPIT OCCUPANTS BASED ON OBJECTIVE SIMULATION EVALUATION

ABSTRACT

The design of modern cars is developing in the direction of comfort, intelligence and energy saving, especially the research on the thermal comfort of passengers in the cabin is widely concerned by car designers. Ensuring the thermal comfort of drivers and passengers is of great significance for creating a safe driving environment and improving the market competitiveness of the automotive industry. Therefore, how to assist the air conditioning system to rapidly improve the thermal environment in the cabin to improve the thermal comfort of passengers on the premise of saving energy consumption is becoming the focus of the research on vehicle thermal management and thermal comfort, which is also an important direction for the development of intelligent cockpit.

Real time evaluation of Thermal Comfort Status and thermal comfort level of passengers under different working conditions is an important work to carry out thermal comfort research of cabin passengers. However, due to the confined and small space of the cabin and its limited heat

dissipation, as well as the significant individual differences in passengers' thermal comfort experiences, it is difficult to establish a unified standard. Therefore, this paper adopts an objective simulation evaluation method, which averages the thermal comfort evaluation results of the majority of people while disregarding the differences of a few, providing a quantifiable reference for the study of occupant thermal comfort. In addition, in the cabin thermal environment system, occupant thermal comfort is constantly influenced by various factors, such as thermal convection, thermal radiation, thermal conduction, and the body's own thermoregulatory responses. Therefore, in order to achieve the purpose of improving the thermal comfort of passengers, after the combined effect of various factors, this paper mainly carried out specific research through the following aspects:

(1) The thermal comfort simulation method was established and verified by experiments. Firstly, the local skin temperature data of human body is measured through experiments, and the subjective evaluation results of human thermal comfort are recorded in real time. Then, the passenger compartment of the test vehicle is reverse modeled based on the simulation software, and the objective thermal comfort simulation evaluation is carried out after the dummy model is imported. Finally, the simulation data and objective evaluation results are compared with the test results to verify the reliability of the simulation method. It is found that the

maximum relative error between the simulated and experimental skin temperature data is about 7.1%, and the evaluation results of subjective and objective thermal comfort are basically the same, which meets the pre research requirements of the early stage of the project.

(2) Study on the influence of relative humidity on thermal comfort of passengers. Based on the objective thermal comfort simulation method, the effects of relative humidity in the cabin on human thermal comfort were explored in summer and winter. Through the comparison of different humidity, the optimal humidity to meet the human thermal comfort under different working conditions is obtained, which not only determines the optimal humidity boundary value for subsequent research, but also provides a reference for the humidity regulation research of the automotive intelligent cabin under different climatic conditions.

(3) Investigate the influence of the airflow in the passenger compartment on the thermal comfort of occupants. Firstly, the air conditioning outlet parameters are defined, and the flow field distribution of the passenger compartment is simulated and analyzed after the air volume of each outlet is distributed. Then, different flow field distribution data were obtained by improving the air conditioning outlet position, and the velocity field data were derived and unidirectionally coupled to the thermal analysis software. The changes of human thermal comfort were explored based on the objective simulation evaluation method. Finally,

through the analysis of the improvement of different flow fields on human thermal comfort, a more comfortable air conditioning outlet layout is obtained.

(4) A new seat heating strategy auxiliary air conditioning system is developed to improve the thermal comfort of passengers. Firstly, the two heating strategies of fixed power and fixed seat surface temperature are simulated, and the optimal heating power and surface temperature of the seat under different working conditions are analyzed, and then a new intermittent seat heating strategy is designed. Then, the thermal comfort of the new strategy is simulated and analyzed, and the energy consumption difference between the new strategy and the traditional fixed power heating strategy is evaluated by calculation. The results show that the new intermittent heating strategy can help the human body to reach the optimal state faster in a shorter time, and the energy consumption will be lower as the seat heating is turned on for a longer time.

KEY WORDS: Thermal comfort, Objective evaluation, Relative humidity, Cabin flow field, Seat heating

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究状况.....	2
1.2.1 湿度对人体热舒适性影响研究现状.....	2
1.2.2 乘员舱流场研究现状.....	2
1.2.3 座椅加热研究现状.....	4
1.3 本文主要研究内容.....	5
第 2 章 热舒适性仿真评价方法及试验验证.....	7
2.1 人体-车舱-外界环境系统热传递过程.....	7
2.2 人体热调节模型.....	8
2.2.1 人体内部热调节反应.....	9
2.2.2 人体与周围环境的热传递.....	10
2.3 乘员舱热环境及乘员热反应试验研究.....	12
2.3.1 试验器材及试验对象.....	12
2.3.2 测点位置布置.....	15
2.3.3 人体皮肤表面温度试验测量.....	15
2.3.4 人体热舒适性主观试验测量.....	17
2.4 仿真评价方法研究及验证.....	18
2.4.1 车舱模型建立.....	19
2.4.2 边界条件及人体热参数设置.....	19
2.4.3 仿真计算结果及验证.....	20
2.5 本章小结.....	22
第 3 章 湿度对人体热舒适响应特性的影响研究.....	23
3.1 研究目的及边界条件设置.....	23
3.1.1 研究目的.....	23

3.1.2 不同工况下边界条件设置.....	24
3.1.3 热舒适性评价方法.....	25
3.2 制冷工况下人体热舒适响应特性.....	26
3.2.1 出汗量及血管舒张量.....	26
3.2.2 PMV-PPD 指标.....	28
3.2.3 局部皮肤温度及其温差变化.....	29
3.3 采暖工况下人体热舒适响应特性.....	31
3.3.1 寒颤量及血管收缩量.....	31
3.3.2 PMV-PPD 指标.....	33
3.3.3 局部皮肤温度及其温差变化.....	34
3.4 本章小结.....	35
第 4 章 乘员舱流场对人体热舒适性的影响.....	37
4.1 研究目的及方法.....	37
4.1.1 研究目的.....	37
4.1.2 研究方法.....	37
4.1.3 基本控制方程.....	39
4.1.4 网格划分及边界条件设置.....	41
4.2 后排出风口对乘员热舒适性的影响.....	42
4.2.1 空调出风口风量分配.....	43
4.2.2 流场仿真计算结果.....	44
4.2.3 乘员热调节反应.....	46
4.2.4 乘员热舒适性分析.....	47
4.3 顶棚出风口对后排乘员热舒适性的改善.....	48
4.3.1 流场仿真计算结果.....	48
4.3.2 后排乘员热调节反应.....	49
4.3.3 后排乘员热舒适性分析.....	50
4.4 本章小结.....	51
第 5 章 座椅加热辅助空调系统对人体热舒适性的改善.....	52
5.1 研究目的及边界条件设置.....	52

5.1.1 研究目的及意义.....	52
5.1.2 边界条件设置.....	52
5.1.3 热舒适性评价方法.....	53
5.2 不同座椅加热策略对人体热舒适性的影响.....	54
5.2.1 固定座椅加热功率策略.....	54
5.2.2 固定座椅表面温度策略.....	56
5.3 新型间歇式座椅加热策略的开发.....	57
5.3.1 开发目的及加热功率选择.....	57
5.3.2 基于档位设计的间歇式座椅加热策略.....	58
5.3.3 新型间歇式座椅加热对人体热舒适性的改善.....	59
5.4 不同策略下座椅加热能耗分析.....	62
5.5 本章小结.....	63
第 6 章 总结与展望.....	64
6.1 全文总结.....	64
6.2 展望.....	65
参考文献.....	66
攻读硕士学位期间发表学术论文及参研项目.....	74
致谢.....	75

插图清单

图 1-1 技术路线	5
图 2-1 综合系统中各因素相互影响关系	7
图 2-2 乘员-车舱-外环境综合系统热传递过程.....	7
图 2-3 人体热调节控制系统原理图	8
图 2-4 人体节段与组织划分	9
图 2-5 艾瑞泽 5GT 实车图.....	12
图 2-6 乘员舱模型	14
图 2-7 人体测点位置	15
图 2-8 受试者测试过程	16
图 2-9 局部皮肤表面温度变化曲线图	17
图 2-10 乘员舱模型	19
图 2-11 人体热舒适性指标	21
图 3-1 PMV-PPD 函数关系	25
图 3-2 无制冷工况下人体出汗量及血管舒张量变化	26
图 3-3 不同湿度下人体血管舒张量变化	27
图 3-4 不同湿度下人体出汗量及 PMV 指标变化.....	28
图 3-5 制冷工况下人体 PPD 指标变化.....	29
图 3-6 头部温度变化及不同湿度间温差	29
图 3-7 胸部温度变化及不同湿度间温差	30
图 3-8 胳膊温度变化及不同湿度间温差	30
图 3-9 腿部温度变化及不同湿度间温差	30
图 3-10 不同湿度下人体寒颤量变化	31
图 3-11 不同湿度下人体血管收缩量及 PMV 变化.....	32
图 3-12 不同湿度下 PPD 值变化.....	33
图 3-13 头部温度变化及不同湿度间温差	34
图 3-14 胸部温度变化及不同湿度间温差	34
图 3-15 胳膊温度变化及不同湿度间温差	35
图 3-16 腿部温度变化及不同湿度间温差	35

图 4-1 CFD 流场仿真分析路线图	38
图 4-2 假人添加位置图	39
图 4-3 网格划分	42
图 4-4 乘员舱空调出风口及回风口布置	43
图 4-5 方案 1 乘员舱流场速度场分布	45
图 4-6 方案 3 乘员舱流场速度场分布	45
图 4-7 前排乘员热调节反应	46
图 4-8 后排乘员热调节反应	47
图 4-9 前排乘员 PMV 指标.....	47
图 4-10 后排乘员 PMV 指标.....	48
图 4-11 乘员舱空调出风口布置	49
图 4-12 方案 2 乘员舱流场速度场分布	49
图 4-13 不同工况下后排乘员热调节反应	50
图 4-14 不同工况下后排乘员热舒适性	51
图 5-1 0℃工况不同功率下热舒适性变化图	54
图 5-2 -10℃工况不同功率下热舒适性变化图.....	55
图 5-3 -20℃工况不同功率下热舒适性变化图.....	55
图 5-4 0℃工况下不同座椅表面温度热舒适性变化图	56
图 5-5 -10℃工况下不同座椅表面温度热舒适性变化图.....	56
图 5-6 -20℃工况下不同座椅表面温度热舒适性变化图.....	57
图 5-7 基于档位设计的间歇式座椅加热策略	59
图 5-8 0℃工况下仿真结果对比图	60
图 5-9 -10℃工况下仿真结果对比图.....	60
图 5-10 -20℃工况下仿真结果对比图.....	61

插表清单

表 2-1 车体信息	12
表 2-2 测试人员身体特征	14
表 2-3 试验所测相关参数	15
表 2-4 热电偶与人体部位对应关系	16
表 2-5 人体局部皮肤温度数据	17
表 2-6 主观热舒适性评价	18
表 2-7 人体在不同状态下的活动水平	19
表 2-8 假人服装热阻值	20
表 2-9 边界参数设置	20
表 2-10 仿真计算与试验测量的皮肤温度数据	20
表 2-11 PMV 热感觉指标	21
表 3-1 服装基本热阻值	24
表 3-2 冬季工况下参数设置	24
表 3-3 夏季工况下参数设置	24
表 4-1 出风口设计方案	38
表 4-2 车身壁面参数设置	42
表 4-3 计算域边界设置	42
表 5-1 参数设置	53
表 5-2 ISO14505-2 热舒适性评价指标	53
表 5-3 不同工况下最优解	58
表 5-4 间歇式座椅加热功率选择	58
表 5-5 档位划分	58
表 5-6 不同策略在前 600s 内座椅加热能耗	62
表 5-7 不同策略在间歇时段下座椅加热能耗	62
表 5-8 不同策略下座椅加热总能耗	62

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

汽车作为人们出行最主要的交通工具之一，为民众的生活带来了巨大的便利，并对社会的发展进步产生了巨大的推动作用。但随着社会的不断发展，人们的生活水平在不断提高，汽车技术也在不断革新与进步，人们对于日常出行的需求不再仅仅满足于驾乘汽车这一单纯代步行为，而是更注重一种智能性、舒适性、安全性的驾乘环境与驾乘体验^[1-3]。因此，在不同的环境条件下，怎样改善车舱内环境以提高驾乘人员的舒适性正受到汽车研究者的广泛关注。

在汽车行驶过程中，驾乘人员的舒适性深受驾乘时间的影响，营造一个舒适的驾乘环境，不仅可以确保安全舒适的驾驶环境，提高驾驶的安全性，同时还可以有效降低长时间驾驶带来的疲惫感^[4,5]。现有研究表明，在汽车短途出行的情况下，85%的汽车行程在 18km 以内，驾驶时间在 30min 以内^[6]，而在如此短的时间内，人体很难快速达到热舒适状态，因此如何在短时间内快速达到人体对于热舒适性的需求，正成为汽车热舒适性研究的重点^[7,8]。而在长途出行的情况下，随着驾驶时间的不断增长，人体的疲劳感也会逐渐增大，这时一个舒适的驾乘环境更显得尤为重要，不仅能减小驾驶员的压力和疲惫感，更能维持乘员热舒适性的稳定。

另一方面，乘员热舒适性受外界环境温度、太阳辐射，以及车内空气气流、相对湿度、座椅热传导等环境因素的影响^[9]。同时，人体的服装热阻及自身的热调节行为也影响着乘员的热舒适性^[9-11]。因此，如何在车内瞬态不均匀变化的热环境中，确保驾乘人员的热舒适性，正成为当前汽车行业的主要研究目标，更是目前汽车智能座舱研究的关键方向之一。

研究车舱热环境及乘员热舒适性，首先需从理论层面上分析人体与车舱环境以及车舱与外界环境之间的热传递方式，包括热传导，热对流，热辐射以及人体自身热调节等因素。然后基于理论分析，结合外界环境与人体热调节等相关因素，进一步研究空调系统对人体热舒适性的改善。考虑到空调系统虽然是改善车舱热环境及人体热舒适性的重要手段，但却也是导致汽车能耗最大的辅助系统^[12,13]。

因此本文基于客观热舒适性仿真评价方法,将辅助空调系统改善人体热舒适性的手段作为研究重点,探究如何通过其他方式在辅助空调系统快速提高人体热舒适性的同时不消耗过多能耗。

1.2 国内外研究状况

1.2.1 湿度对人体热舒适性影响研究现状

关于改善乘员舱热环境以及提高乘员的热舒适性,首先对于车舱相对湿度(RH)的研究必不可少。因为当相对湿度过高或过低时,对车舱热环境及人体热舒适性均有着不同的影响。所以在不同的环境工况下,如何调节车舱的相对湿度,使其成为该工况下人体最佳舒适湿度,对人体更快达到舒适状态起着非常重要的作用^[14]。

在不同环境工况下,相对湿度对乘员舱热环境及驾乘人员舒适性有着不同的影响,目前国内外对这方面也有很多的研究。Alahmer 等^[15]通过两种不同的人体模型来研究车舱内相对湿度对人体热感觉和热舒适的影响,结果表明控制 RH 的变化使车舱达到人体舒适区的速度比不控制的情况下更快,且在车舱降温过程中, RH 越高人体感觉越舒适;在加热过程中, RH 越低人体感觉越舒适。Li 等^[16]将相对湿度设置为三个级别:15%(低)、50%(中)和 85%(高),并通过主观试验来探究不同季节气候下人类对湿度的主观反映,结果表明季节性差异对人体对湿度的主观反映有着显著影响。Lam 等^[17]通过对不同气候背景下的人体热舒适性进行研究,结果显示当相对湿度为 45%~95%时,不同气候背景下的受试者会有不同的湿感觉和湿偏好。Li 等^[18]通过将受试者在控制良好的气候室中进行实验,探究了在温暖和炎热环境下湿度对人体热舒适的影响,结果表明在高温环境中,相对湿度对人体自身热调节反应和主观热感会产生更明显的影响。

关于湿度对人体热舒适性的影响,相关学者们已经进行了众多的研究,并得出了不同环境工况下提高人体热舒适性的湿度范围,这对于通过调节湿度来改善人体热舒适性有着及其重要的意义。但是关于湿度对人体内部具体的响应特性研究还较少,因此无法通过具体的热调节反应来体现人体最佳热舒适状态,从而缺乏更精确的使人体快速达到热舒适状态的湿度值。

1.2.2 乘员舱流场研究现状

在夏季炎热的气候环境下，由于车舱内部空间相对狭小，且趋于封闭状态，导致舱内温度会在短时间内快速升高，因此人们乘车出行时更依赖于车内空调的制冷系统。对于空调出风口位置、出风温度、吹风角度以及各出风口的风量分配均会直接影响车舱内流场的分布，进而直接影响到人体的热舒适性感受，同时对空调能耗也会产生较大影响^[19-21]。如果驾乘人员长期处于不舒适的流场分布环境中，就无法取得有效的降温效果，容易产生燥热、烦闷、疲劳以及注意力不集中等问题，进而大大增加了驾驶安全隐患^[22]。因此，对乘员舱流场的研究是很有必要的，通过分析舱内不同流场分布对人体热舒适的影响，进而找到可有效提升乘员热舒适性的方法。

乘员舱流场的分布是否合理，是影响人体热舒适性重要因素之一。目前，研究汽车车舱内的流场主要是通过 CFD（Computational Fluid Dynamics）仿真技术进行分析。早在上世纪九十年代，P. VNielsen^[23]便首次通过流函数-涡度法解封闭二维流动方程，并采用 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟了室内空气流动，最终与实验结果相对比验证了数值模拟的可靠性，从此 CFD 技术在国际上得到了广泛的应用。如 Zhang H^[24]在探究有无乘客两种工况下的车舱三维模型内流场时，通过仿真技术与实验结果进行对比发现，仿真计算的误差大多集中在车厢内乘员头部区域。NE Ahmad Shafie^[25]基于 CFD 仿真模拟，探究了大型客车乘员舱内各座椅区域流场分布情况，并通过优化分析得出了使空调气流均匀分布的最佳风速，有助于提高乘员的舒适性。Sen S 和 Selokar M 等^[26]通过使用 CFD 仿真方法对空调送风格栅进行了流场的温度场仿真，以探究乘员舱流场对整车温度的影响，结果表明，舱内流场对温度整体冷却速率以及乘员热舒适性均有很大影响，并通过流场仿真结果得出了满足乘客所需的所有出风口最小平均速度。

虽然对乘员舱流场的研究在国内起步较晚，但发展轨迹与国外基本相似。最初的研究主要集中在二维模拟上，但随着 CFD 仿真技术的快速发展，不仅有效缩短了流场计算时间，并且精度也得到了提高。通过 CFD 对气流速度场、温度场进行仿真分析是目前最经济有效的方法，也能够更好的获得流场呈现效果，因此现如今均以三维模拟分析为主^[27,28]。例如吕鸿斌等^[22]基于流场和温度场分析不同送风温度对轿车舱内乘员热舒适性的影响，结果表明在炎热环境下，通过将送风量增加至临界风量可快速达到降温效果，并且通过调整空调格栅角度，可有效

避免出现散热不佳现象。李兴^[29]通过使用流体仿真软件对乘员舱流场进行计算,得到了出风口流量、玻璃表面气流速度以及驾驶舱内气流分布情况,从而对除霜效果展开分析,最终得出了提高除霜性能的方法。曹凡^[27]通过 CFD 仿真对房车的舱内流场进行了数值模拟及可视化分析,确定了空调的最佳送风参数并得出了合理的气流组织分布,从而有效提升了房车的降温效果。

1.2.3 座椅加热研究现状

在冬季气候或者严寒地区,通过空调制热系统来提高人体热舒适性不仅存在速度较慢的问题,而且能耗较高。因此,对座椅加热技术的研究就更显得及其重要。尤其对于纯电动汽车来说,座椅加热不仅能够辅助空调系统快速提高乘员的热舒适性,而且能降低空调系统的能耗,因此正成为国内外的重点研究对象^[30,31]。现在,国内外无论是燃油车还是电动汽车,均逐渐开始标配座椅加热系统,如常见的奔驰、宝马、奥迪等,又如国产品牌蔚来的乐道 L60、小鹏 M03、理想 L6 等均已成为标配。此外,一些国产、德系、日系等经济型品牌汽车也开始提供座椅加热功能作为选装配置,由此可见,座椅加热在如今的汽车配置中正扮演着越来越重要的角色。

主观实验主要是通过对主观评价量表的填写,统计后可得到对相应热环境的主观评价^[32-34]。目前通过座椅加热对乘员热舒适性的研究大都通过主观实验来进行,并且主要采用固定加热功率的方式进行座椅加热实验。如 Pasut 等^[35]通过组织测试人员对新型加热座椅进行主观热感觉和舒适性评价,每隔 15min 获取测试人员的主观反映,结果表明该座椅对提高受试者的热感觉和舒适性有着明显作用。Hajime 等^[36]通过 12 种不同条件下的主观实验来研究车内座椅加热和脚部加热器对人体热感觉及热舒适的影响,最终发现座椅加热和脚加热器的组合能显著改善乘员在凉爽环境下的热感觉和热舒适。邹等^[37]通过采用座椅加热、腿部加热和脚部加热组合的采暖方式,实测人体局部和整体的热舒适情况,结果表明在外界环境温度低于 10℃的情况下,该采暖方式可显著提高人体的热舒适性。Yang 等^[38]在外界温度为 14℃、16℃及 18℃下分别进行座椅加热试验,结果表明,这些温度下的座椅加热对受试者热舒适性的改善效果皆不明显,因此当外界温度高于 10℃时打开座椅加热的效果并不理想。

在寒冷环境下,为了提高人体热舒适性,众多学者已经对座椅加热进行了较

多的研究。虽然已经取得了一定的进展,但多是采用与其他身体部位加热器组合研究的方式,不太满足实际上的应用,也无法对节能效果进行综合评价。目前对于座椅加热策略方面的研究还依然较少,而这也是汽车行业目前在汽车热管理方向上研究的重点,因此对于座椅加热策略进行深入研究是十分必要的。

1.3 本文主要研究内容

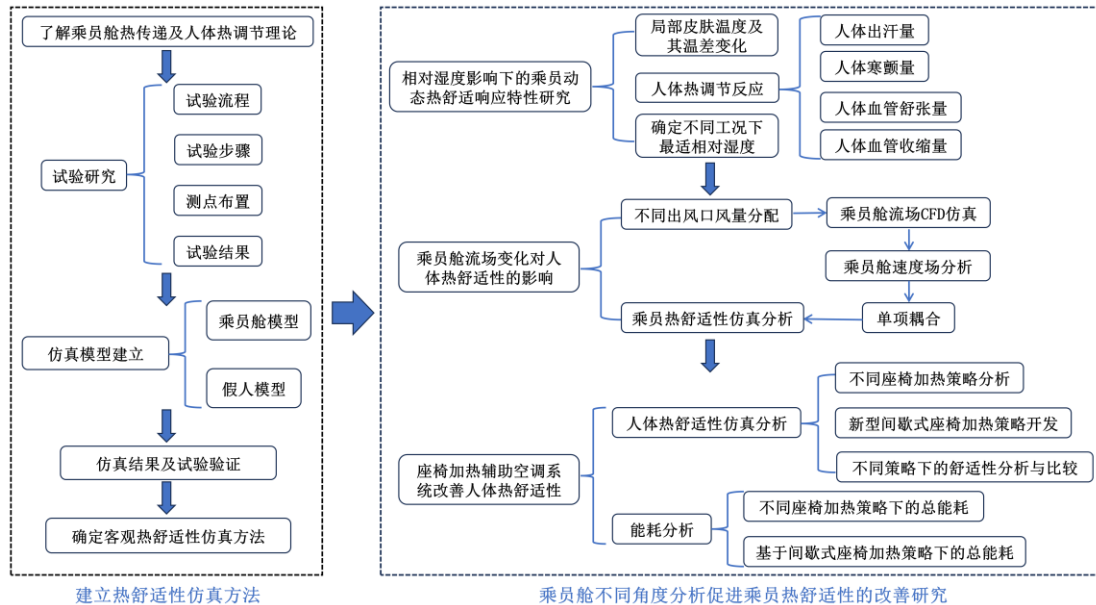


图 1-1 技术路线

本文主要以乘用车为研究对象,从影响车舱乘员热舒适性的环境因素入手,然后基于客观热舒适性仿真方法,以快速提高车舱乘员热舒适性且满足低能耗为主要研究目的,并确定以辅助空调系统快速改善人体热舒适性的方法为主要研究思路展开研究。主要研究内容如下:

(1) 首先通过分析人体-车舱-外环境之间的一个热传递过程,了解三者间相互进行热传递的方式,然后基于人体热调节模型完成人体自身热调节反应的理论分析。基于本文提出的客观热舒适性仿真方法,为验证仿真结果误差值的大小及其准确性,首先进行了试验测试。在试验过程中,通过将测点布置在人体局部皮肤表面,完成对人体皮肤表面温度的实时采集,随后通过主观试验的方法,对测试人员的舒适性感受进行实时的评价。将试验所测外界真实环境因素设为边界条件,通过仿真分析,得到人体客观热舒适性仿真评价结果及体表皮肤温度,最后通过试验结果与仿真结果进行对比验证,确保本文仿真方法的准确性。

(2) 在冬季和夏季工况下分别模拟人体从进入乘员舱开始到加热或制冷过

程结束的整个过程，基于不同相对湿度影响下的乘员热舒适性，分析人体在当前热环境下的热舒适响应特性。通过对人体寒颤量、出汗量、血管舒张量、血管收缩量以及局部皮肤温度的变化情况分析，总结出不同湿度下人体自身热调节变化情况，并得出在该气候条件下使人体达到最佳舒适状态的最适湿度，也为下文针对不同环境工况下进行的研究确定了最佳湿度边界设置。

（3）通过对乘员舱流场的仿真分析，得到乘员舱内部流场趋势及其速度场数据，将数据导出后单项耦合至热仿真软件中并完成乘员热舒适性的仿真。然后通过仿真结果，确定不同流场对乘员舱热环境及乘员热舒适性的影响。最后通过对后排空调出风口位置的优化分析，确定后排不同出风口位置对前后排乘员热舒适性的影响，进而得出更快提高乘员热舒适性的出风口布置及最适流场分布。

（4）采用基于人体热调节模型结合客观热舒适性评价方法，针对固定加热功率以及固定座椅表面温度的加热策略进行分析，探究座椅加热策略对乘员热舒适性的影响，并总结得出不同工况下的最佳策略。然后提出一种新型间歇性座椅加热策略，并从热舒适性和能耗角度分析其与固定加热功率及固定座椅表面温度策略的差异，最终开发出一种适用于工程应用的汽车座椅加热策略。

第 2 章 热舒适性仿真评价方法及试验验证

2.1 人体-车舱-外界环境系统热传递过程

由于驾乘人员始终处于相对密闭的车舱空间中,因此人体的热舒适状态会直接受到车舱内环境的影响,并且由于车身的隔热储热能力较差,车舱内环境易受外界环境的影响,如外界环境温度、太阳辐射、风速等,进而会影响到乘员的热舒适性状态^[39]。因此在驾乘汽车过程中,乘员、车舱及外环境形成了一个热传递综合系统,在进行人体热舒适性的研究过程中需综合考虑车舱热环境及外界环境中各种因素的影响,分析各种热传递过程,才能提高热舒适性研究的准确性。如图 2-1 所示,在人体-车舱-外环境综合系统中,人体与车舱内环境直接接触,各子因素之间相互耦合、相互影响,因此对车舱热环境的调节将直接影响人体自身的热调节反应以及热舒适状态,外环境则是通过影响车舱内环境进而影响人体的热舒适性。

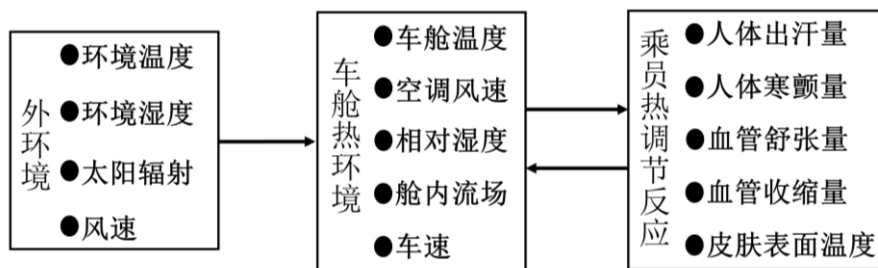


图 2-1 综合系统中各因素相互影响关系

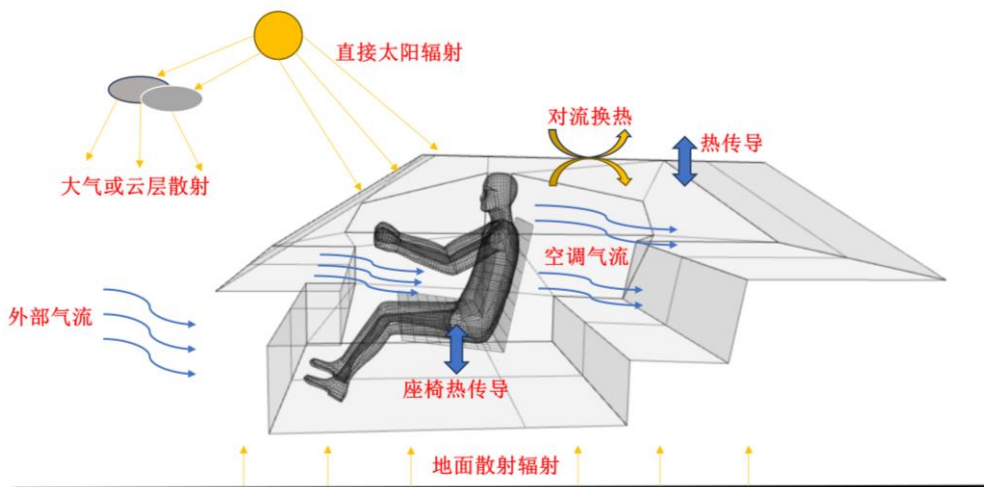


图 2-2 乘员-车舱-外环境综合系统热传递过程

如图 2-2 所示,在该系统中,热传递主要通过热传导、热对流、热辐射三种方式进行。其中热传导包括车舱环境通过车身壁面与外界环境之间的热传导,车舱环境与人体之间的热传导以及人体与座椅之间的热传导。热对流主要包括外界环境气流对车身外壁面的对流换热,空调气流对车身内壁面以及人体的对流换热。热辐射主要考虑外界太阳辐射,包括太阳直接辐射以及通过其他介质形成的散射辐射。

2.2 人体热调节模型

人体本身是一个具有复杂调节反应的热力学系统,可以在不同环境温度下使体温维持相对稳定^[40]。当环境温度产生变化时,人体可以通过自身热调节系统调节体温,在适应不同环境温度的同时保证人体正常的生命活动^[40,41]。人体通过自身的产热和散热与外界环境进行热传递及热交换是影响人体体温恒定的重要手段,当人体受到外界温度的刺激时,体温会产生变化,此时人体温度感受器会向下丘脑传达信号,然后下丘脑体温调节中枢会进一步传达指令使人体做出相应的热调节反应来调节体温,通过产热或散热使人体恢复到正常体温,并使人体达到一个舒适的热状态,具体的人体热调节控制系统原理图如下图 2-3 所示。

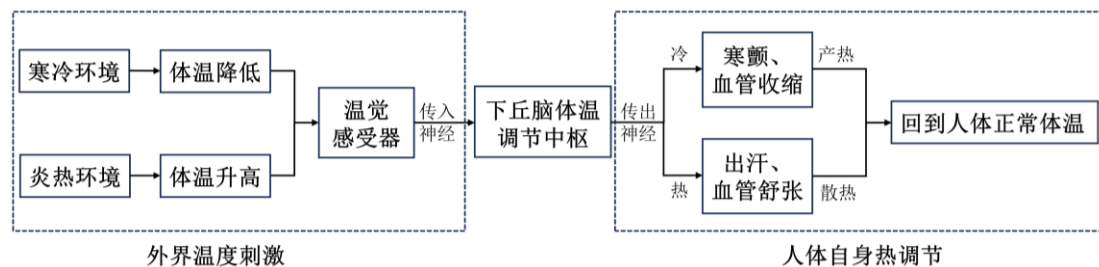


图 2-3 人体热调节控制系统原理图

为了更好的研究人体热调节与热交换过程,需要添加人体热调节模型用于数值模拟与计算,这对仿真研究中人体温度及热舒适性的表达也有更直观的体现。人体热调节模型采用 FIALA 人体模型,可与周围环境完全耦合,且对流、辐射、蒸发均会被同时考虑,这也是目前较为完善的人体模型^[42-44]。FIALA 人体模型不仅考虑外界环境的变化对人体热反映的影响,还考虑了人体自身热调节作用。该模型把人体划分为 20 个不同球形和圆柱形节段,且每个节段内部都划分有不同内径的组织层^[44,45],人体模型节段和组织划分如图 2-4 所示。

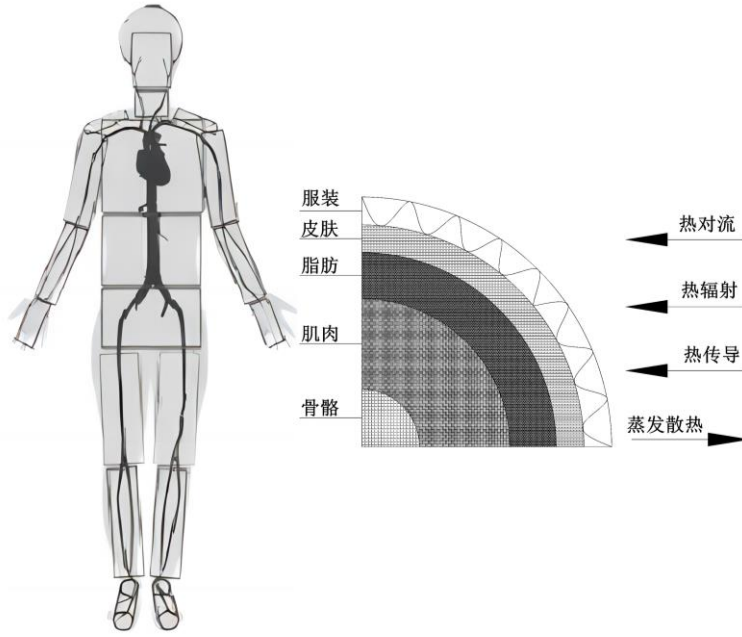


图 2-4 人体节段与组织划分

FIALA 人体热调节模型的核心是生物热方程，该方程通过传热和储热来平衡人体内部能量，人体正是通过新陈代谢产热并通过血液循环传递热量，因此采用 Pennes 提出的人体生物热方程来表示人体内部组织传热关系^[46,47]。

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\omega}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_m + \rho_{bl} w_{bl} c_{bl} (T_{bl,a} - T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-1)$$

式中， k 表示组织间热导率； T 表示组织温度； ω 表示几何系数； r 表示组织半径； q_m 表示新陈代谢热量； ρ_{bl} 表示血液密度； w_{bl} 表示血液灌注率； c_{bl} 表示血液比热容； $T_{bl,a}$ 表示动脉血液温度； ρ 表示组织密度； c 表示组织比热容； t 表示时间。

FIALA 人体模型由两部分组成，包括被动系统和主动系统。被动系统用来模拟人体内部及体表与周围环境间的热传递；主动系统用来模拟人体各种复杂的生理现象，主要包括人体内部的体温调节反应：寒颤、出汗以及血管的收缩和舒张。

2.2.1 人体内部热调节反应

当人体受到外界环境的温度刺激时，下丘脑体温调节中枢会接收温差信号并通过控制人体的寒颤、出汗以及血管的收缩和舒张来调节体温，具体表现如下：

(1) 人体寒颤量 $S_h(W)$ ：

$$S_h = 10 \left[\tanh(0.48\Delta T_{sk,m} + 3.62) - 1 \right] \Delta T_{sk,m} - 27.9\Delta T_{hy} - 28.6 + 1.7\Delta T_{sk,m} \frac{dT_{sk,m}}{dt} \quad (2-2)$$

当 $\Delta T_{sk,m} < 0$ 或 $\frac{dT_{sk,m}}{dt} < 0$ 时, $\Delta T_{sk,m} \frac{dT_{sk,m}}{dt} = 0$ 。

(2) 人体出汗量 S_w (g/min):

$$S_w = \left[0.8 \tanh(0.59\Delta T_{sk,m} - 0.19) + 1.2 \right] \Delta T_{sk,m} + \left[5.7 \tanh(1.98\Delta T_{hy} - 1.03) + 6.3 \right] \Delta T_{hy} \quad (2-3)$$

(3) 血管收缩量 C_s (W/K):

$$C_s = 35 \left[\tanh(0.34\Delta T_{sk,m} + 1.07) - 1 \right] \Delta T_{sk,m} + 6.8\Delta T_{sk,m} \frac{dT_{sk,m}}{dt} \quad (2-4)$$

当 $\Delta T_{sk,m} < 0$ 或 $\frac{dT_{sk,m}}{dt} < 0$ 时, $\Delta T_{sk,m} \frac{dT_{sk,m}}{dt} = 0$ 。

(4) 血管舒张量 D_l (W/K):

$$D_l = 21 \left[\tanh(0.79\Delta T_{sk,m} - 0.7) + 1 \right] \Delta T_{sk,m} + 32 \left[\tanh(3.29\Delta T_{hy} - 1.46) + 1 \right] \Delta T_{hy} \quad (2-5)$$

上式 2-2~2-5 中, $\Delta T_{sk,m}$ 表示皮肤平均温度; ΔT_{hy} 表示下丘脑温度; $\frac{dT_{sk,m}}{dt}$ 表示皮肤温度随时间变化率。

2.2.2 人体与周围环境的热传递

在整个环境系统中, 人体处于车舱内环境中, 与外部环境间存在着复杂的能量交换。为了维持正常的生命活动, 人体的温度必须保持在一个相对稳定的范围内^[48]。人体体内的各种生命活动在不断产生热量时, 可以通过传导、对流、辐射和蒸发等方式将体内多余的热量散发出去, 从而与外界维持热量交换, 以保持体温的相对稳定。在这一过程中, 人体生热和散热之间是一个动态平衡过程, 主要热流量包括对流换热量 q_c (W/m²), 蒸发换热量 q_e (W/m²), 太阳辐射 q_{sr} (W/m²) 以及周围物体的表面辐射量 q_R (W/m²), 根据能量守恒原理, 得出人体净热流量 q_{sk} 的方程如下:

$$q_{sk} = q_c + q_R + q_{sr} + q_e \quad (2-6)$$

人体与外界环境的热交换是通过体表与周围空气的对流、外界环境的辐射以及人体的蒸发散热进行的，并且受服装热阻的影响，具体表现如下：

(1) 与空气对流换热：

$$q_c = h_{c,mix} (T_{sf} - T_{air}) \quad (2-7)$$

式中， q_c 表示对流换热量； $h_{c,mix}$ 表示对流换热系数； T_{sf} 表示皮肤表面温度； T_{air} 表示周围空气温度。

(2) 与外界环境辐射换热：

$$q_R = h_R (T_{sf} - T_{sr,m}) \quad (2-8)$$

式中， q_R 表示物体表面辐射量； h_R 表示辐射换热系数； $T_{sr,m}$ 表示车身内壁平均辐射温度。

$$q_{sR} = s\alpha_{sf}\psi_{sf-sr} \quad (2-9)$$

式中， q_{sR} 表示太阳辐射量； s 表示辐射密度； α_{sf} 表示吸收率； ψ_{sf-sr} 表示人体与围护结构表面间的角系数。

(3) 人体的蒸发散热：

$$q_e = h_e (p_{sk} - p_{air}) \quad (2-10)$$

式中， q_e 表示蒸发散热量； h_e 表示蒸发散热系数； p_{sk} 表示皮肤表面水蒸气分压； p_{air} 表示空气中的水蒸气分压。

(4) 通过服装的传导散热量：

$$q_k = \frac{\lambda A (T_{sf} - T_{cl})}{L} \quad (2-11)$$

式中， q_k 表示通过服装的传导散热量； λ 表示服装材料的导热系数； A 表示人体与服装接触面积； T_{sf} 表示皮肤表面温度； T_{cl} 表示服装表面温度； L 表示服装厚度。由上式可得出服装热阻 R_{cl} ：

$$R_{cl} = \frac{L}{\lambda} = \frac{A (T_{sf} - T_{cl})}{q_k} \quad (2-12)$$

2.3 乘员舱热环境及乘员热反应试验研究

为了对仿真计算进行必要的的数据支撑和验证,本文在夏季环境中对汽车空调制冷工况下的车舱热环境及乘员的热状态变化进行了试验验证。主要目的一方面在于分析乘员舱热环境变化过程中人体的热反应及热舒适性变化情况,并主要通过测量人体局部皮肤表面温度来反映这种人体的热状态;另一方面通过所测试验数据以及人体的主观热舒适评价来验证仿真模型的计算结果,以验证仿真方法的可靠性。

2.3.1 试验器材及试验对象

本次试验以奇瑞艾瑞泽 5GT 汽车为对象,实车如图 2-5 所示,其车身结构是 4 车门三厢车,具体车体信息如下表 2-1 所示。该款汽车的空间使用非常灵活,头部腿部均有足够的空间,后排空间也比较宽敞,有利于试验前的准备以及试验仪器的安装。同时,不仅空间感较好,而且座椅舒适度高,整体内外部设计也较为出色,因此用作本次研究对象。



图 2-5 艾瑞泽 5GT 实车图

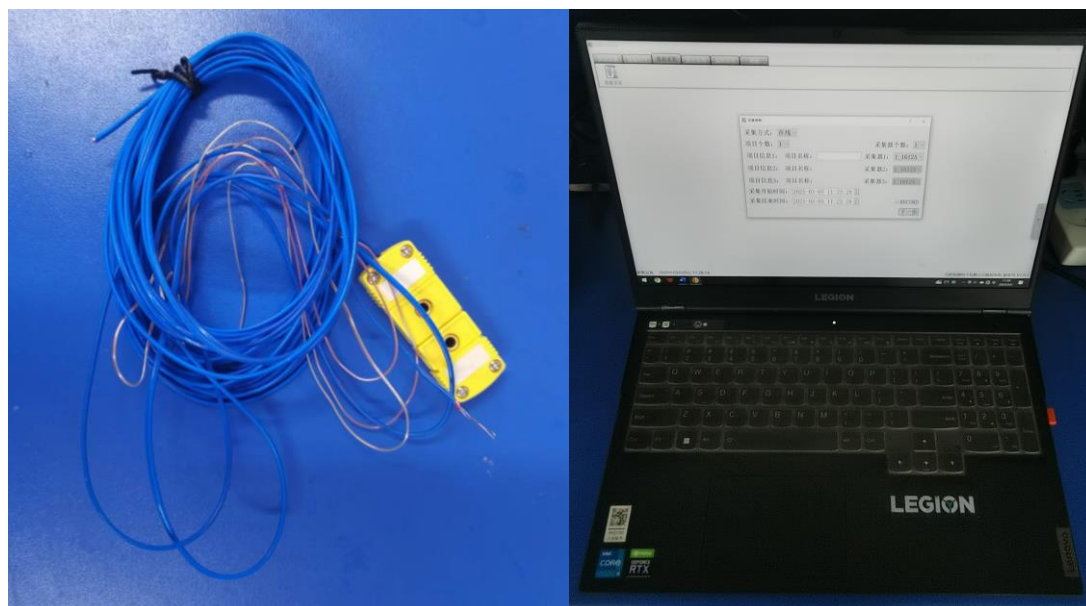
表 2-1 车体信息

车身尺寸/mm	轴距/mm	前轮距/mm	后轮距/mm	后备箱容积/L	整备质量/kg
4710×1829×1490	2670	1561	1554	570	1344

试验过程中所使用的试验仪器主要有风速仪、热电偶、数据采集器及笔记本电脑等，如图 2-6 所示，其中风速仪主要用于测量空气和空调气流流速；热电偶一端连接在数据采集器上，一端贴在人体皮肤表面用于感应皮肤温度并传递至数据采集器上；数据采集器一端连接热电偶，一端连接到电脑端，可将实时采集到的热电偶感应的温度数据上传至电脑端。



(a) 风速仪



(b) 热电偶、笔记本电脑



(c) 数据采集器

图 2-6 试验仪器

在进行热舒适性试验或用户体验研究时,相关学术论文及一些国际标准虽未明确规定测试人数,但有强调小样本量试验在实际应用中的可行性和有效性,尤其在早期研究阶段及小范围测试中^[49,50]。而且汽车制造商们通常也会将 6~12 人规模作为常见的实践选择,因为不仅能控制成本和时间,又能平衡多样性且保证数据的有效性。因此本次试验招募了 10 名受试者,其中包括不同职业和年龄段的 6 名男性和 4 名女性,具体如表 2-2 所示。每位测试人员统一着装夏季短裤、短袖 T 恤或衬衫,并在测试前避免各种剧烈运动,保证状态以便试验顺利进行。

表 2-2 测试人员身体特征

人员编号	性别	年龄	身高/cm	体重/kg	职业
1	男	27	174	69	公司职员
2	男	52	177	70	教师
3	男	34	176	82	司机
4	男	26	182	64	研究生
5	男	38	178	76	工程师
6	男	42	176	68	医生
7	女	27	166	48	护士
8	女	28	168	51	公司职员
9	女	24	163	47	研究生
10	女	19	159	45	大学生

2.3.2 测点位置布置

对于人体皮肤温度的测量主要分为接触式和非接触式两种测温方式，接触式测温主要是通过热电偶进行测量，非接触式测温主要包括微波热像仪、红外热像仪等^[51]。非接触式测温虽然不需要直接接触皮肤，但无法测量被服装挡住的皮肤温度，且价格昂贵，操作复杂^[52]。因此本次试验采用接触式测温方式，即通过热电偶直接测量人体皮肤温度，测温时将热电偶的探头紧贴在皮肤表面，不仅更易操作，而且可以避免服装，防止服装热阻的影响。

人体皮肤温度的采集需要提前布置好测点位置，以便于在试验前进行热电偶的安置。本次试验将分别选取人体头部、胸部、大臂、小臂、手部、大腿和小腿区域共七个测点位置测量人体的局部皮肤温度，并分别用于验证这七个区域仿真温度数据误差，人体测点布置如图 2-7 所示。

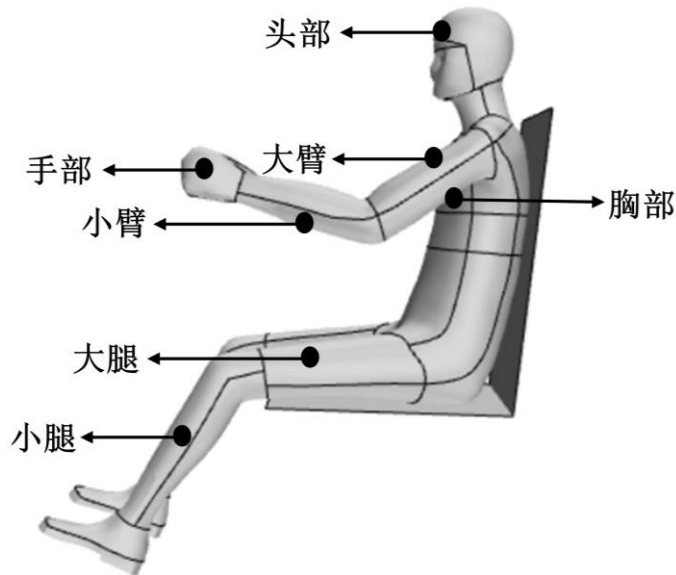


图 2-7 人体测点位置

2.3.3 人体皮肤表面温度试验测量

本次试验在夏季 8 月份进行，试验场地为芜湖市安徽工程大学的室外停车场，在试验过程中保持汽车始终静止停放在停车位上，并开始进行实验前的准备工作，试验前所测相关参数如下表 2-3 所示。

表 2-3 试验所测相关参数

环境温度	太阳辐射	湿度	风速	乘员人数
38℃	1000W/m ²	40%	0m/s	1

试验整体流程如下：首先对所选试验车辆的配置以及车辆的完整性进行检查，确保空调系统能正常工作，并对空调格栅的角度进行调整，将空调改为吹面模式。然后将所有车门全部打开，使车舱温度快速与外界环境温度保持一致，同时试验人员进入车舱安装好试验仪器并在受试者身上布置好热电偶，如 2-8 左图所示。最后在整个测试过程中，试验人员需始终保持好坐姿，通过热电偶感应人体皮肤温度随车舱环境温度的变化结果，并通过数据采集器传达出来。



图 2-8 受试者测试过程

整个测试过程持续 20min，具体试验步骤如下：试验人员首先坐在主驾驶位置上，在试验人员身上布置好测点，随后在测点处安装热电偶并标记好标签以方便对应人体各个部位，再将热电偶另一端连接到数据采集器上，热电偶标签与人体部位对应关系如表 2-4 所示。

表 2-4 热电偶与人体部位对应关系

热电偶标号	1	2	3	4	5	6	7
人体部位	手部	小臂	大臂	胸部	大腿	小腿	头部

开启空调制冷系统，通过数据采集器实时记录热电偶测得的人体局部皮肤温度的变化，并通过风速仪测量空调吹风口的风速，以便为仿真分析提供边界设置。在 20min 后结束试验并关闭空调系统，通过数据采集器采集的试验数据见下表 2-5，局部皮肤表面温度变化曲线图如 2-9 所示。

根据表 2-5 数据采集结果及 2-9 的曲线图可知，在初始阶段由于环境温度较高，人体皮肤表面温度测量结果均较高，当开启空调制冷 5min 后，由于车舱温度迅速降低，人体皮肤表面温度随着迅速降低，且在 10min 后处于相对稳定的状态。其中，手部由于接触方向盘，空调吹出的冷风会直接吹过手部，因此温度下降更快，手部最终表面温度也最低。大腿部位由于与座椅紧密接触，难以散热，空调系统的冷风也难以直接吹到该部位，因此在初始阶段温度较高，整个测试过程中其温度下降也较慢，并且始终高于其他身体部位。

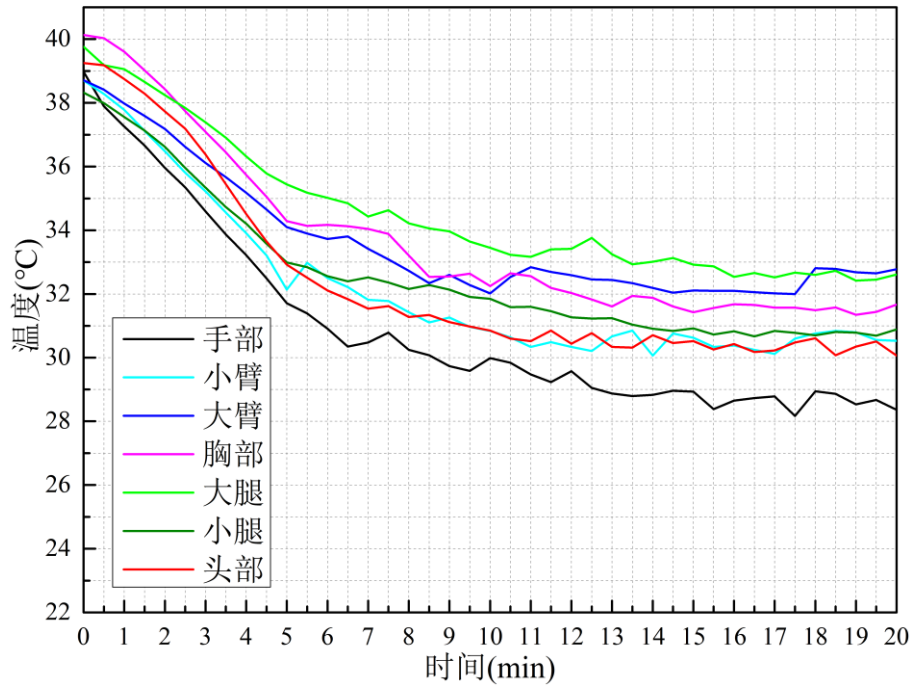


图 2-9 局部皮肤表面温度变化曲线图

表 2-5 人体局部皮肤温度数据

人体部位	0min	5min	10min	15min	20min
头部	39.25	32.92	30.85	30.52	30.07
胸部	40.13	34.29	32.25	31.43	31.67
大臂	38.71	34.10	32.02	32.11	32.78
小臂	38.70	32.14	30.84	30.63	30.53
手部	38.98	31.71	29.98	28.93	28.36
大腿	39.76	35.44	33.45	32.92	32.61
小腿	38.32	32.99	31.85	30.92	30.89

2.3.4 人体热舒适性主观试验测量

在完成人体皮肤表面温度的试验测量后需将车门全部打开，此时处在浸车阶段，使舱内温度快速回升，并最终与外界环境温度保持一致。然后测试人员进入

车舱，关闭所有车门并开启空调制冷系统，此阶段主要是测量人体主观热舒适性变化，如图 2-8 右图所示。

整个测试过程分两次进行，每次 20min，整体流程如下：将十位测试人员分为 5 组，每组 2 人，依次进入车舱并坐在前排座位上，然后开启空调系统进行测试，受试者在持续 20min 的测试过程中每隔 5min 需进行一次主观热舒适性评价量表的填写。待上一组试验人员完成测试后关闭空调系统并打开全部车门，重复进行浸车过程，然后进行下一组人员的测试，所有主观评价结果见表 2-6 所示（注：a 表示非常舒适；b 表示一般舒适；c 表示不舒适；d 表示非常不舒适）。

表 2-6 主观热舒适性评价

人员编号	0min	5min	10min	15min	20min
1	d	c	b	a	a
2	d	b	a	a	a
3	d	d	b	a	a
4	d	c	a	a	a
5	d	c	b	a	a
6	d	b	b	a	a
7	d	c	a	a	a
8	d	c	b	a	a
9	d	c	b	a	a
10	d	c	a	a	a

通过对所有测试人员主观评价表的统计分析，除去个别时间段个别乘员的差异性评价，主观测试结果整体呈现出统一的趋势。当人体刚进入车舱时，由于温度较高，乘员均处于非常不舒适的状态；在开启空调制冷 5min 后，除去部分测试人员差异性评价，整体处于不舒适状态；在 10min 左右，测试者均已达到舒适状态，且在评价中包含有一般舒适和非常舒适两种水平；在 15min 以后，所有测试人员均已达到非常舒适的状态。

2.4 仿真评价方法研究及验证

关于驾舱乘员热舒适性的客观仿真评价方法，首先需建立一个用于仿真分析的乘员舱模型，在导入假人模型后，基于热仿真软件对车舱热环境及人体热舒适性进行仿真模拟。然后基于客观评价指标，对乘员热舒适性仿真结果进行定量分析，有利于实时反应乘员热舒适水平，并能够清晰呈现出人体在不同工况下的热舒适动态变化过程。最后基于 2.3 节的试验结果验证了该仿真评价方法的可靠性。

2.4.1 车舱模型建立

在热舒适性仿真分析前需先建立乘员舱模型，因为只需考虑舱内热环境，因此为了便于计算并确保结果的准确性，对试验汽车模型进行了适当简化，忽略了发动机舱、后备箱及车轮等部件，并对舱内仪表盘和座椅的几何特征进行了简化。

在模型建立过程中，首先需要对目标汽车进行实际尺寸测量，记录乘员舱轮廓以及内部座椅的尺寸数据，然后基于 THESEUS-FE 仿真软件对乘员舱实际尺寸进行了 1:1 反向建模，即得到该汽车乘员舱的简易模型。在添加 FIALA 假人模型后车舱模型如图 2-10 所示，该模型将用于接下来的仿真分析。

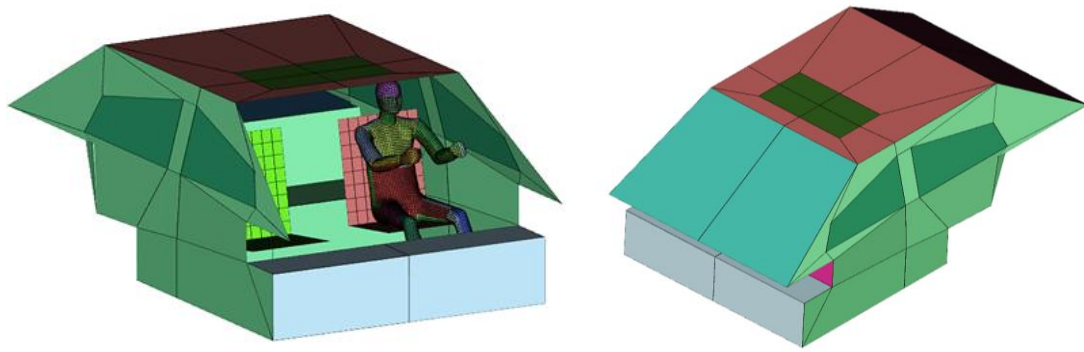


图 2-10 乘员舱模型

2.4.2 边界条件及人体热参数设置

由于试验在夏季环境温度下进行，因此在车舱模型中添加 FIALA 夏季人体热调节模型，对于假人模型的边界设置主要涉及人体活动水平及服装热阻的设定。

人体的活动水平决定了人体的代谢产热率^[53,54]，如下表 2-7 所示为人体不同状态下的活动水平，因为乘员处在驾乘汽车状态，活动水平取 1.0MET。

表 2-7 人体在不同状态下的活动水平

人体状态	人体活动水平 (MET)
睡觉	0.7
坐姿	0.8
驾驶汽车	1.0~2.0
行走	2.0~3.8
打球	5.0~7.6

服装热阻也会影响到人体的热传递，服装热阻通常用“clo”表示，假人着装及这些单件服饰的基本热阻值由 GB/T 24254-2009 查找并定义^[55]。因为试验人员均统一穿着夏季短袖 T 恤或衬衫，以及夏季短裤，因此查找定义的假人服装热阻见表 2-8 所示。其中 1clo=0.155m²K/W，计算出假人模型总服装热阻值为 0.37clo。

表 2-8 假人服装热阻值

服装类型	基本热阻值（m ² K/W）
内衣、裤	0.003
短袜	0.003
鞋（薄底）	0.003
短袖衬衫	0.029
短裤	0.017

外界环境温度设置为试验所测温度 38℃，即初始温度，湿度设为 40%，外环境风速为 0m/s，完成初始边界设置。仿真过程中空调设置为吹面模式，空调风速为试验所测的 4m/s，因为试验结束后通过热电偶所测得舱内温度稳定在 23℃左右，因此将制冷工况下仿真时的舱内最终稳定温度设置为 23℃，整个仿真时间为 1200s，具体参数见下表 2-9。

表 2-9 边界参数设置

初始温度	人体活动水平	服装热阻	稳定舱温	空调风速	太阳辐射	湿度
38℃	1.0MET	0.37clo	23℃	4m/s	1000W/m ²	40%

2.4.3 仿真计算结果及验证

在进行了试验探究后，基于试验所测参数来定义仿真的边界条件，并在 THESEUS-FE 热分析软件中进行人体热舒适性仿真分析，最终通过数值计算得出乘员各部位的皮肤温度数据、热调节反应量以及整体热舒适性变化。

在数据验证时，因为人体热调节反应量与皮肤温度变化直接相关，而且皮肤温度数据更易被试验实时采集出来，便于对仿真数据进行对比验证，以保证仿真模型数值计算的合理性，仿真计算结果与试验所测数据对比如表 2-10 所示。

表 2-10 仿真计算与试验测量的皮肤温度数据

人体部位	0min (°C)		5min (°C)		10min (°C)		15min (°C)		20min (°C)		最大误差	相对误差
	仿真	试验	仿真	试验	仿真	试验	仿真	试验	仿真	试验		
头部	38.12	39.25	32.05	32.92	30.25	30.85	29.57	30.52	29.28	30.07	1.13	2.9%
胸部	37.92	40.13	32.91	34.29	31.49	32.25	30.90	31.43	30.69	31.67	2.21	5.5%
大臂	37.94	38.71	32.32	34.10	31.04	32.02	30.57	32.11	30.44	32.78	2.34	7.1%
小臂	37.95	38.70	31.28	32.14	29.59	30.84	29.07	30.63	28.91	30.53	1.62	5.3%
手部	38.10	38.98	30.55	31.71	28.64	29.98	28.03	28.93	27.84	28.36	1.34	4.5%
大腿	40.51	39.76	33.30	35.44	32.55	33.45	32.38	32.92	32.37	32.61	2.14	6%
小腿	37.98	38.32	32.34	32.99	30.97	31.85	30.43	30.92	30.23	30.89	0.88	2.8%

通过仿真与试验数据的对比分析可知，乘员局部皮肤表面温度仿真与试验结果基本较为符合，整体趋势为在初始阶段皮肤表面温度均最高，随着空调制冷作

用，温度均迅速下降，且在 10min 之后均趋于稳定。因为误差值=试验测量值—仿真计算值，相对误差=（最大误差值/测量值）×100%，因此计算的仿真与试验相差最大部位为大臂区域，最大误差值为 2.34℃，误差为 7.1%，而其余部位误差均在 6%以内，满足工程前期预研要求，因此可以认为客观热舒适性仿真方法研究及其数值计算是可靠的^[42]。除了客观舒适性评价及皮肤表面温度外，该热舒适模型还可计算人体热调节反应量的变化，具体将在下一章进行分析。

在空调制冷过程中，人体的热舒适性是动态变化的，在不同时段处于不同的水平，通过 PMV（Predicted Mean Vote）指标可以清晰呈现出在这一过程中人体动态热舒适性的变化情况。PMV 是用于评价人体整体热感觉的指标，它代表了在同一环境下大多数人的热感觉平均值，是衡量人体具体的舒适状态而创造出来的指标。PMV 采用七级分度指标，取值范围为-3~+3，分别对应了人体的冷、热感觉，对应关系如表 2-11 所示。其中在-0.5~0.5 之间表示人体热舒适水平较高，且当 PMV=0 时表示人体处于最佳舒适状态；而在-1~-0.5 及 0.5~1 之间人体整体热舒适水平较低；当指数<-1 或>1 时则表示不舒适状态，且不舒适水平越来越高。通过对试验过程中人体热舒适性主观评价与仿真结果进行验证，也确保了仿真方法的可靠性，基于客观热舒适性仿真评价结果如图 2-11 所示。

表 2-11 PMV 热感觉指标

PMV 指数	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
热感觉	冷	凉	微凉	适中	微暖	暖	热

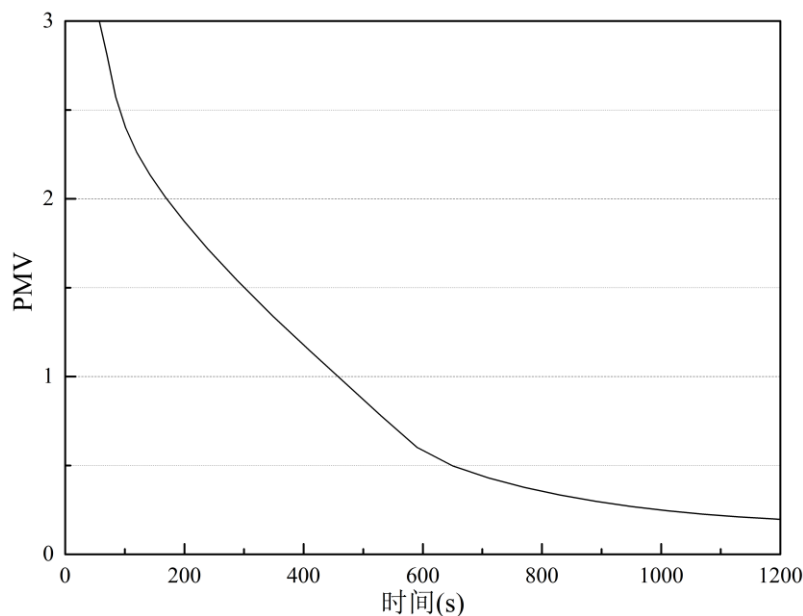


图 2-11 人体热舒适性指标

由图 2-11 可知，在初始阶段由于车舱温度较高，PMV 指数一直较高，人体始终处于非常不舒适状态；在 5min 左右，PMV 指数降至 1~2 范围之间，人体处于不舒适的状态；10min 左右时，PMV 指数降至 0.5~1 之间，此时人体达到舒适状态；在 10min 之后 PMV 指数降至 0.5 以下，人体达到最舒适状态。结合表 2-6 主观热舒适性评价结果分析可知，客观热舒适性评价结果与试验过程中测试者的主观评价结果基本一致，符合工程前期预研要求。

2.5 本章小结

本章首先介绍了人体热调节模型以及车舱环境系统的热传递过程，对人体的热反应及热传递过程进行理论分析，然后采用试验验证了客观热舒适性仿真方法。针对乘员热反应和热舒适性变化情况分别进行测试，主要通过试验测量受试者的局部皮肤温度及其对周围热环境的主观热舒适性评价，使仿真计算结果得到验证。结果表明，试验测量的人体局部皮肤表面温度数据及其变化情况与仿真计算结果较为符合，相对误差最大约 7.1%，最大误差值为 2.34℃，且人体热舒适性主、客观评价结果基本一致，可以认为客观热舒适仿真评价方法对乘员热舒适性的分析是可靠的。

第3章 湿度对人体热舒适响应特性的影响研究

在第2章中通过实验测试对仿真方法进行验证,确定了本文客观热舒适性仿真方法的准确性,因此本章将基于该仿真方法来分析不同气候条件下相对湿度对车舱乘员热舒适性的影响。通过模拟人体在冬季和夏季两种工况下从进入乘员舱开始到加热或制冷过程结束的整个过程,采用人体热调节模型结合客观热舒适性评价方法,对乘员热舒适响应特性在不同湿度下的变化情况进行分析,具体包括人体热调节反应量、局部皮肤温度以及人体热感觉状态。其中人体热调节反应量的变化主要通过人体的寒颤量 Sh 、出汗量 Sw 、血管舒张量 DI 和血管收缩量 Cs 的变化来体现。通过总结不同湿度下的人体热舒适响应情况,进而得出不同气候条件下使人体能快速达到舒适状态的最佳舱内相对湿度,这对于汽车热管理方面的研究有着极其重要的意义。

3.1 研究目的及边界条件设置

3.1.1 研究目的

空气的相对湿度(RH)反映了湿空气中水蒸气接近饱和状态的程度,是影响人体热舒适性的重要因素之一。相对湿度越大,湿空气越接近饱和,空气越潮湿;相反,相对湿度越小,空气越干燥^[56,57]。保持车舱内的相对湿度在一个舒适范围内,不仅可以营造出良好的驾乘环境,提高驾乘人员的舒适性,而且对人体健康及驾驶安全均具有重要意义^[58]。如何合理调节车舱内的相对湿度,使人体快速达到舒适状态并始终维持在相对舒适的水平,正成为智能座舱的一个发展重点,也是目前纯电动汽车在舒适性方面发展的重要方向。

基于客观热舒适性仿真评价方法,对车舱内不同湿度下的乘员热舒适性进行仿真分析,不仅可以通过数据直观的显示出人体热舒适响应指标的变化,而且可以对不同湿度下人体热舒适响应时间进行分析,进而可确定不同气候环境下人体所需的最佳舒适湿度。本次研究主要在不同气候条件下通过调节车舱内相对湿度,达到改善乘员热舒适性的目的,以节省空调系统能耗,并为下文针对不同环境工况下进行的研究确定了最佳湿度边界条件,同时为智能座舱在湿度调节方面的研究提供参考。

3.1.2 不同工况下边界条件设置

因为主要研究在冬季和夏季气候环境下相对湿度对车舱乘员热舒适响应的影响，因此设定冬季和夏季的环境温度分别为 5℃和 38℃。定义的假人模型是标准人体热生理模型——FIALA 人体模型，不同环境工况下分别穿着冬季和夏季服饰，通过 GB/T 24254-2009 查找并定义假人模型着装单件服饰基本热阻值如下表 3-1 所示。

表 3-1 服装基本热阻值

气候类型	服装类型	基本热阻 (m ² K/W)	总热阻值 (m ² K/W)
冬季	内衣、裤	0.003	0.206
	厚长袜	0.016	
	鞋（厚底）	0.006	
	毛线衫	0.054	
	厚裤子	0.039	
	羽绒夹克	0.085	
夏季	内衣、裤	0.003	0.058
	短袜	0.003	
	鞋（薄底）	0.003	
	短袖衬衫	0.029	
	步行短裤	0.017	

由表 3-1 可知，在分别定义好冬季和夏季人体服饰穿着后，便可计算出人体着装的总热阻值。因为 1clo=0.155m²K/W，因此通过计算得出，在冬季工况下人体总服装热阻约为 1.33clo，在夏季工况下约为 0.37clo。

保持车舱内空调始终开启，在冬季工况下使舱温在短时间内迅速上升并维持在 24℃，夏季工况下使舱温在短时间内迅速下降并维持在 23℃，相对湿度 RH 分别取 20%、40%、60%和 80%。因为冬季工况下人体活动水平会略高于夏季工况，所以设置为 1.2MET，不考虑太阳辐射，假设乘员在进入车舱前，汽车已在对应的环境温度下浸车 10h，舱内初始温度与外界环境温度均已保持一致，具体参数如表 3-2、3-3 所示。

表 3-2 冬季工况下参数设置

环境温度	人体活动水平	服装热阻	舱温	车速	太阳辐射
5℃	1.2MET	1.33clo	24℃	40km/h	无

表 3-3 夏季工况下参数设置

环境温度	人体活动水平	服装热阻	舱温	车速	太阳辐射
38℃	1.0MET	0.37clo	23℃	40km/h	短波辐射

3.1.3 热舒适性评价方法

根据美国空调工程师协会（ASHRAE）的定义，人体热舒适性是指人体对周围热环境感到满意的一种意识状态，是人体对周围环境在主观心理上的一种感知过程^[59,60]。本章基于人体热舒适性的评价采用 PMV（Predicted Mean Vote）-PPD（Predicted Percentage of Dissatisfied）指标，该指标由丹麦著名教授 Fanger 提出，不仅表示出大多数人对当前热环境的平均投票值，并且综合考虑了人体活动程度、服装热阻、空气温度、空气流速、平均辐射温度、及相对湿度等 6 个因素^[61-63]。其中 PMV 是衡量人体整体舒适状态而创造出来的指标，最初由 Fanger 教授通过大量气候实验和理论分析提出，是旨在预测人体热舒适状态的指标，取值范围从 -3 到 +3，具体在 2.4.3 节中有详细的介绍。但由于人与人之间存在生理差异，PMV 未必能够准确反映所有人的热舒适状态，因此，Fanger 教授又提出了与之相关的 PPD 指标，表示在当前热环境下，群体对当前热环境不满意的人数百分比，是对当前热环境不满意程度的投票平均值。PMV 与 PPD 对应关系如下式(3-1)所示，两者间函数关系见图 3-1。

$$PPD = 100 - 95 \exp \left[\left(0.03353 PMV^4 + 0.21 PMV^2 \right) \right] \quad (3-1)$$

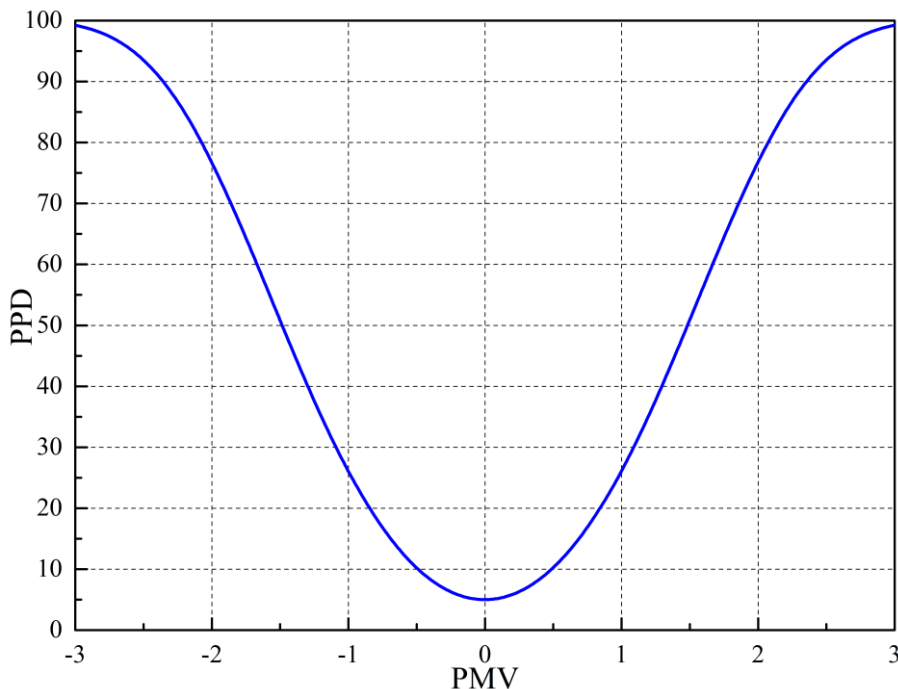


图 3-1 PMV-PPD 函数关系

从图 3-1 中可以看出，PMV 指数越是偏离 0，则对周围环境不满意人数的百分比就越多。其中 PMV 指标为 ± 0.5 时，对应 PPD 指数为 10%，表示某环境

下有 90% 的人感觉处于舒适状态，并对当前环境感到满意；PMV 处于 $-0.5 \sim 0.5$ 之间时，对应 PPD $<10\%$ ，表示人体对当前热环境的满意程度以及舒适度已处于最佳状态^[64-66]。

3.2 制冷工况下人体热舒适响应特性

在夏季高温环境下，主要通过分析人体出汗量 Sw 和血管舒张量 DI 的变化来探究相对湿度对人体热调节反应的影响。在对制冷工况下人体热舒适响应特性进行研究前，首先分析了无空调制冷时相对湿度对人体热调节反应的影响，然后探究开启空调制冷时人体的热舒适响应特性。因此本节主要研究在高温环境下开启空调制冷时人体热调节反应及热舒适性的变化情况。

3.2.1 出汗量及血管舒张量

外界环境温度始终为 38°C ，首先在不开启空调制冷的情况下，探究了不同相对湿度下人体出汗量及血管舒张量的变化，结果如图 3-2 所示。然后在开启空调后，整个制冷过程中仅使用空调降温功能，不考虑座椅通风等降温因素，不同相对湿度下的人体血管舒张量及出汗量的变化分别如图 3-3 和 3-4 所示。

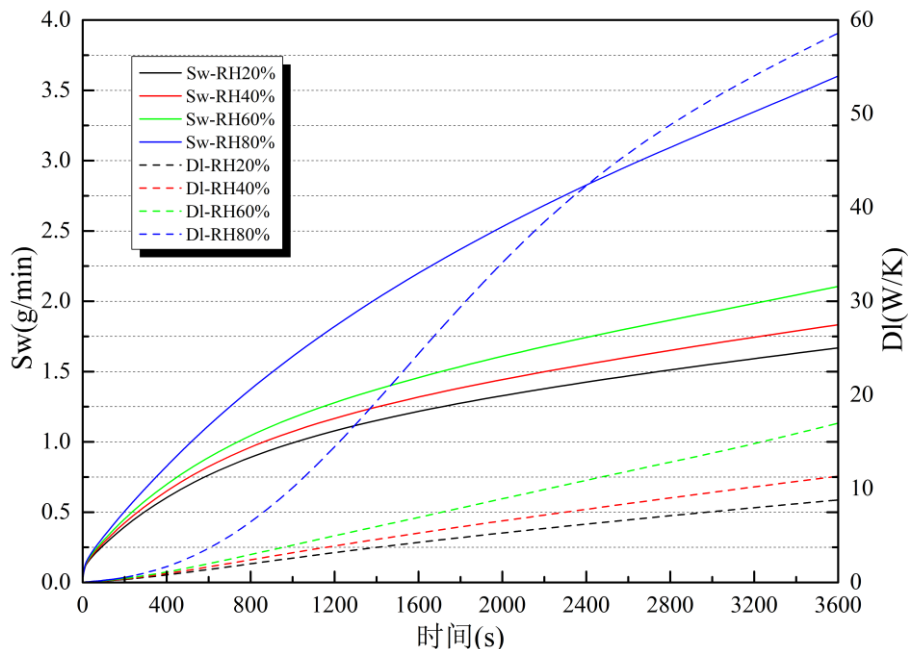


图 3-2 无制冷工况下人体出汗量及血管舒张量变化

由图 3-2 可知，在整个过程中，人体的出汗量及血管舒张量均随着相对湿度以及时间的升高而升高。当相对湿度在 $20\% \sim 60\%$ 之间时，随着湿度的增高，人

体出汗量和血管舒张量呈现出缓慢升高的现象，且在同一相对湿度条件下，随着时间的增长，人体出汗量和血管舒张量也均逐渐增高。但当车舱内相对湿度达到80%时，人体的热调节反应量呈现出一个显著升高的现象，变化速度更快，且在同一时间点人体的出汗量及血管舒张量也更大。这主要是因为湿度过高时，空气中的水分含量增大，不利于人体汗液的蒸发，从而导致体温不易下降，因此身体会增大出汗量^[67,68]。该情况下不讨论人体热舒适性，因为外界环境温度较高，且人体始终处于极热的车舱环境中，因此无论相对湿度如何变化人体热舒适性将始终处于极不舒适状态。

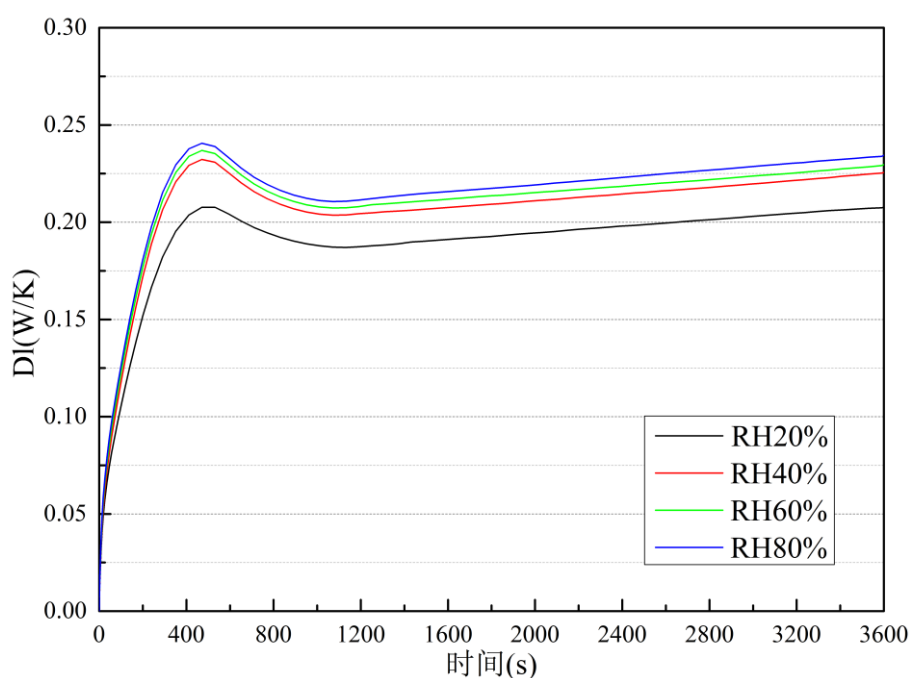


图 3-3 不同湿度下人体血管舒张量变化

由图 3-3 可知，在制冷过程初始阶段，人体血管舒张量会迅速增大，这是因为在前期车舱温度较高，人体需要通过排汗来迅速调节自身热量，而人体血管舒张量越大，人体排汗量会越快。结合图 3-4 分析，当血管舒张量越大时，排汗量也越高。后期随着舱温降低，血管舒张量也会逐渐降低，并在 1200s 后随着时间的延长，逐渐呈现出缓慢上升的趋势，此时就需要进一步调低空调温度，对车舱达到一个更好的制冷效果。

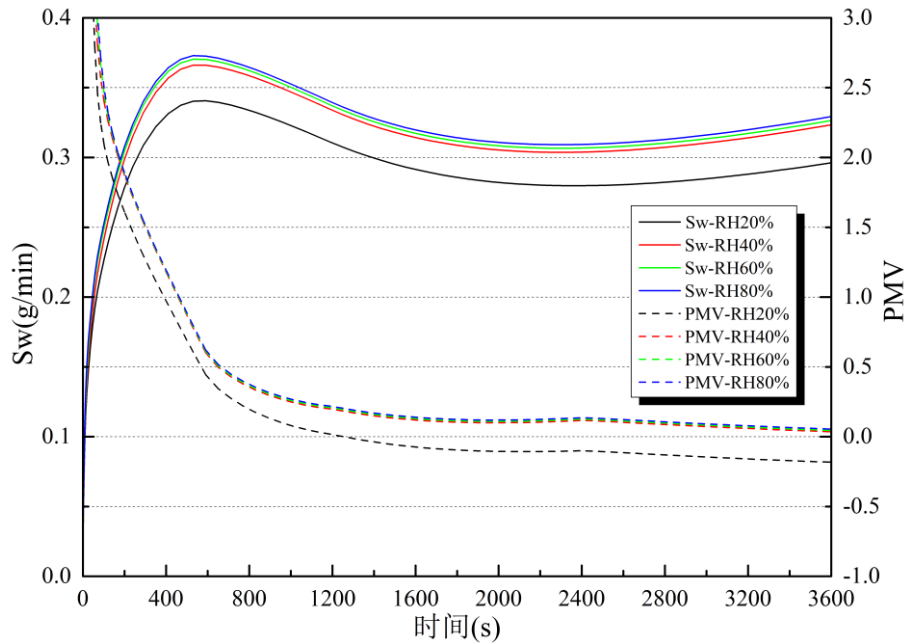


图 3-4 不同湿度下人体出汗量及 PMV 指标变化

结合图 3-4 和 3-2 分析,在高温环境下开启空调制冷时,人体整体出汗量会显著降低。但在制冷过程的前 600s 内,由于处在制冷过程初始阶段,舱温过高,人体出汗量会迅速增大。之后随着舱温的降低并维持在 23℃,人体出汗量也在 600s 后逐渐降低,并始终维持在较低的水平。在整个制冷过程中,相对湿度越高时人体血管舒张量越高,出汗量也会越高,但由于空调的降温作用,当湿度超过 40%时,人体血管舒张量及出汗量的增加并不明显。

3.2.2 PMV-PPD 指标

根据图 3-4 中 PMV 指标变化可知,空调制冷过程中无论相对湿度如何变化,前期 PMV 指标均迅速下降,人体会迅速达到舒适状态,且当湿度越低时下降速度越快,并在 600s 后趋于平稳。此外,当相对湿度高于 40%时,由于空调降温作用,PMV 变化并不明显,但在 40%~80%之间随着湿度的降低,PMV 指标会更接近 0,人体也会处于最佳舒适状态。当相对湿度为 20%或者更低时时,PMV 指标则会低于 0,此时人体热舒适性相较于湿度为 40%时也较差。

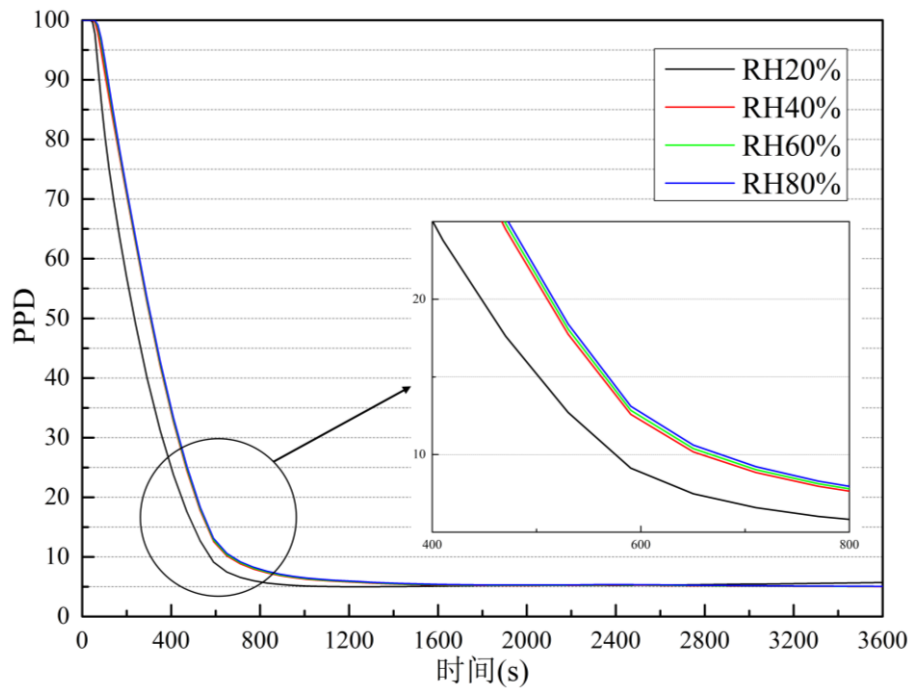


图 3-5 制冷工况下人体 PPD 指标变化

由图 3-5 可知，在制冷工况下，无论相对湿度如何变化 PPD 指标均会迅速降低至 10%以下，即不满意人数百分比会在空调开启制冷系统后的短时间内迅速降低，且最终均稳定在 5%左右。从图中还可以看出，当开启空调系统后，相对湿度对不满意人数百分比的影响并不大，且对最终稳定下来的 PPD 指标也不产生影响。

3.2.3 局部皮肤温度及其温差变化

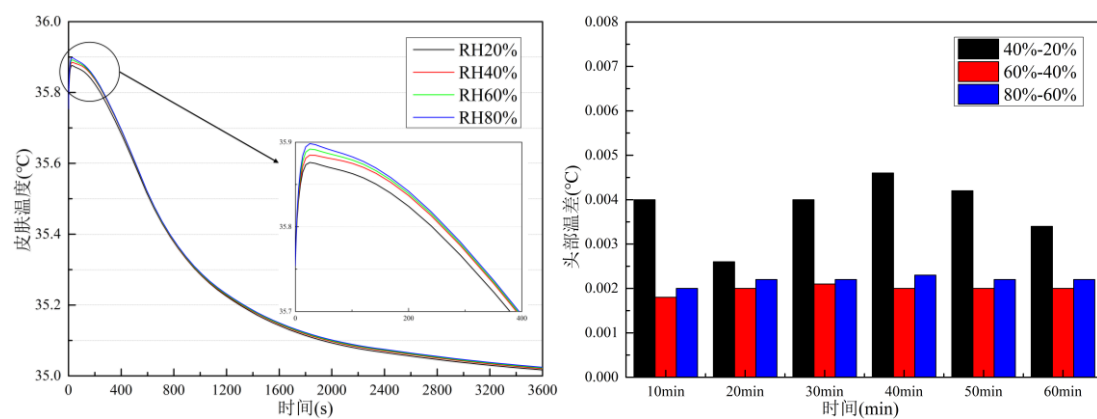


图 3-6 头部温度变化及不同湿度间温差

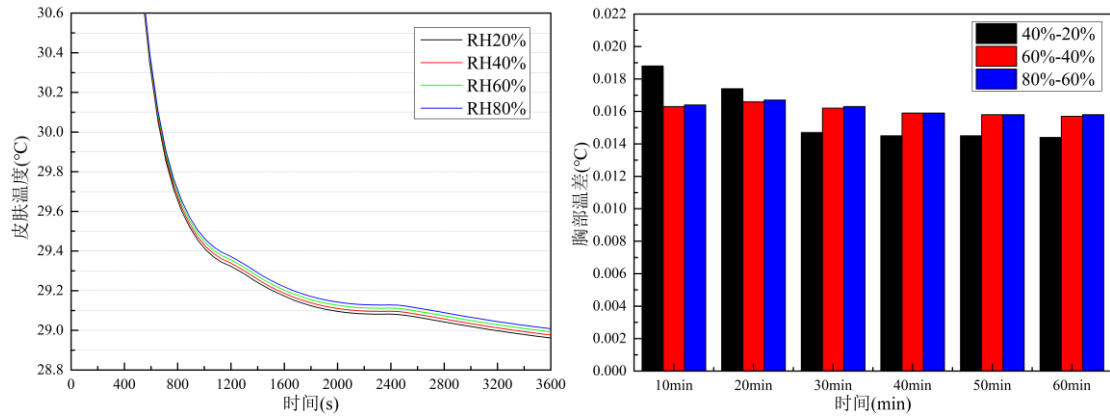


图 3-7 胸部温度变化及不同湿度间温差

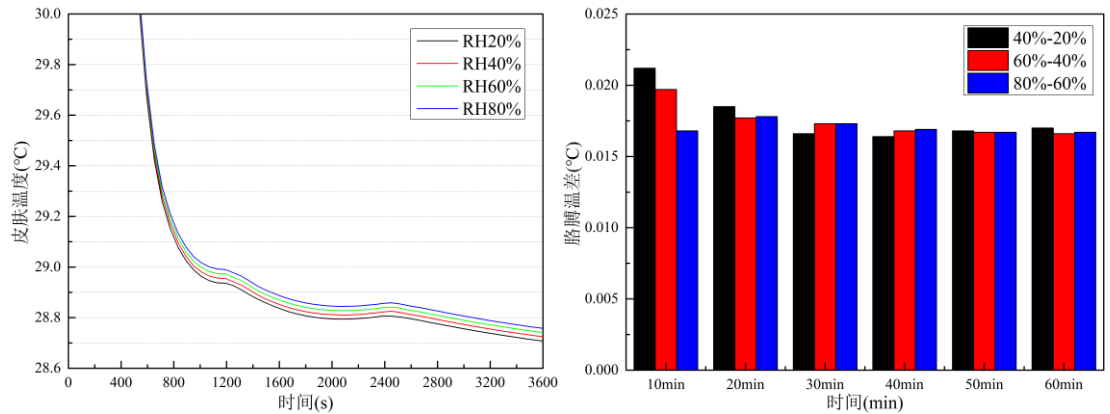


图 3-8 胳膊温度变化及不同湿度间温差

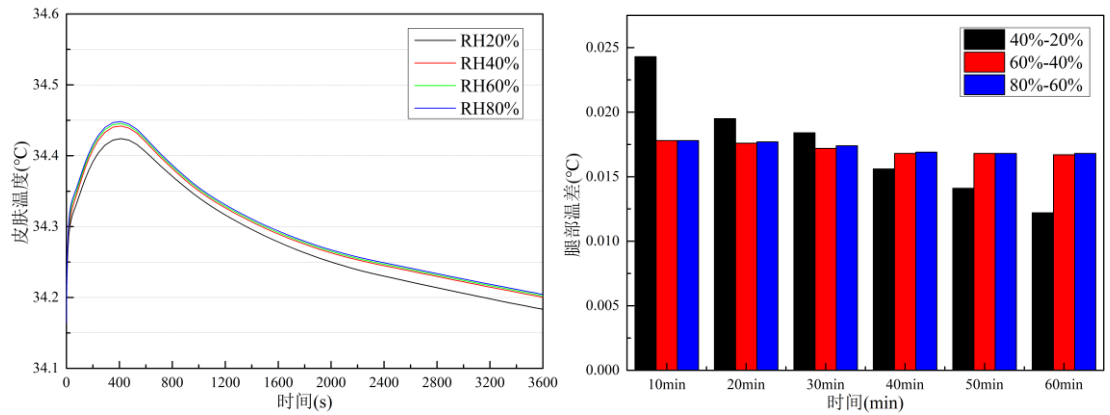


图 3-9 腿部温度变化及不同湿度间温差

由图 3-6~3-9 可知,开启空凋制冷时,不同湿度下人体局部皮肤温度的变化趋势是相同的。但相对湿度越低时,温度下降速度越快,温度也越低。其中头部区域的温度在人体刚进入车舱时会出现短瞬间的急速上升现象,但因为空调的开启,之后会迅速降低,并随着时间的延长逐渐趋于稳定。胸部和胳膊区域的温度在空调开启 500s 后会迅速降低,800s 后下降速度均逐渐减慢并逐渐趋于稳定。腿部区域则在初始 400s 内由于车舱温度较高,导致温度不断升高,之后随着车

舱温度的降低，腿部温度也随之逐渐降低。

通过图 3-6~3-9 中不同湿度间温差图还可发现，随着时间越长，相对湿度在 20%~40% 间的温差浮动较大，尤其是在头部和腿部区域可以明显看出。而湿度在 40%~60% 和 60%~80% 间不同人体部位的皮肤温差几乎相同，且浮动很小，说明此时人体皮肤温度相对稳定，所受的影响也更小。同时还能发现，头部温差值远小于其他部位的皮肤温差，这是因为头脑温度属于机体深部温度，当皮肤温度越接近人体深部温度时就会越稳定，所以头部皮肤温度波动相对较小，温差值也较小^[69,70]。

3.3 采暖工况下人体热舒适响应特性

3.3.1 寒颤量及血管收缩量

与夏季制冷不同的是冬季采暖工况下主要分析人体寒颤量 Sh 和血管收缩量 Cs 的变化，探究了相对湿度对人体热调节反应的影响。在整个采暖过程中，外界环境温度设置为 5°C ，仅开启空调系统采暖，不考虑座椅加热等其他采暖因素，仿真分析了不同相对湿度下的舱内乘员寒颤量及血管收缩量的变化如下图 3-10、3-11 所示。

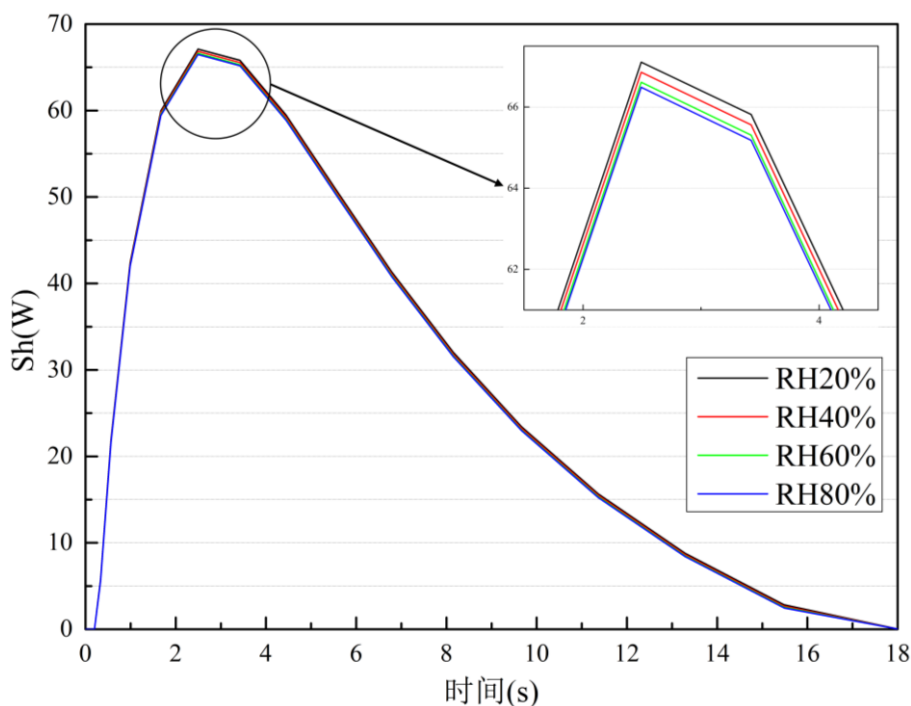


图 3-10 不同湿度下人体寒颤量变化

不同工况下人体寒颤量如图 3-10 所示，在人体刚进入车舱时，由于车舱温

度较低,人体体温与舱温之间有较大差异,此时人体会通过自身的热调节作用产生更多的热量来抵抗外界低温环境,因此在刚开始阶段,人体在短时间内会产生较大的寒颤量。图中还可看出相对湿度对人体的寒颤量也略有影响,尤其在寒颤量达到峰值时,湿度越低寒颤量就越高,说明此时人体感觉越冷,因此就需要更高的寒颤量来实现自身热调节。在刚进入车舱的 10s 内人体会产生较大的寒颤量,在短时间内可以为自身提供较高的热量,之后寒颤量会迅速降低,因为此时舱温在空调制热的过程中也在快速回升,人体逐渐回暖,所以人体不再产生寒颤,寒颤量也随之逐渐降为 0。

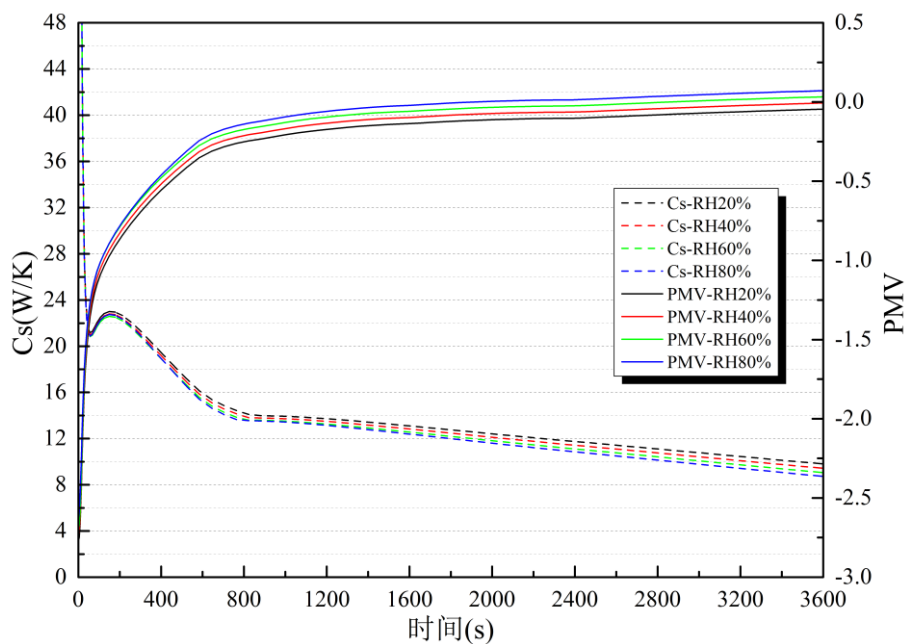


图 3-11 不同湿度下人体血管收缩量及 PMV 变化

不同工况下人体的血管收缩量如图 3-11 所示,由图可知,在前 100s 内由于乘员舱处在加热过程刚开始阶段,且外界温度较低,致使人体体温与舱温之间存在较大差异。而为了降低血液流动以防止热量过多的散失,人体的血管会在这一阶段迅速收缩。因此在初始阶段,人体会具有较高的血管收缩量,且此时相对湿度的变化对人体血管收缩量几乎没有影响。之后随着车舱温度快速回升,人体状态逐渐回暖,血管收缩量也随之迅速减小,并在 800s 后下降速度逐渐减缓。此时较低的湿度对应的血管收缩量较高,说明湿度越低时人体血液流动量越少,人体感觉会越干冷。综上所述,在采暖过程初始阶段,相对湿度的变化对人体几乎没有影响,但随着车舱持续升温,相对湿度越高时人体血管收缩量会越低,此时血液流动加快,人体也更舒适。

3.3.2 PMV-PPD 指标

由上图 3-11 中的 PMV 指数随时间的变化关系可知,在加热过程开始的前 100s 内,相对湿度 RH 对 PMV 的变化几乎没有影响,人体热感觉始终处于较冷的状态。但在车舱开始加热时,人体 PMV 值就在迅速升高,人体热感觉也在迅速得到改善。随着车舱的快速升温,这一过程中人体在迅速回暖,PMV 值的上升速度也会降缓并逐渐接近于 0,人体热感觉逐渐接近最佳舒适状态。此时相对湿度 RH 对人体也有着较大的影响,相对湿度越高,PMV 升高速度就越快,人体也能更快的达到最佳舒适状态。在加热 600s 后的一段时间,由于车舱温度维持在 24℃,PMV 逐渐稳定,人体热感觉也处于舒适状态,此时相对湿度越高人体越舒适。但随着时间继续增长,PMV 值上升速度逐渐降缓,在 2400s 且湿度为 60%时,PMV 已经接近 0,但 3600s 后 PMV 值仍有缓慢升高的趋势。因此,当相对湿度处于 40%~60%的范围时,PMV 值最终更接近于 0,人体最终也处在最佳舒适状态。

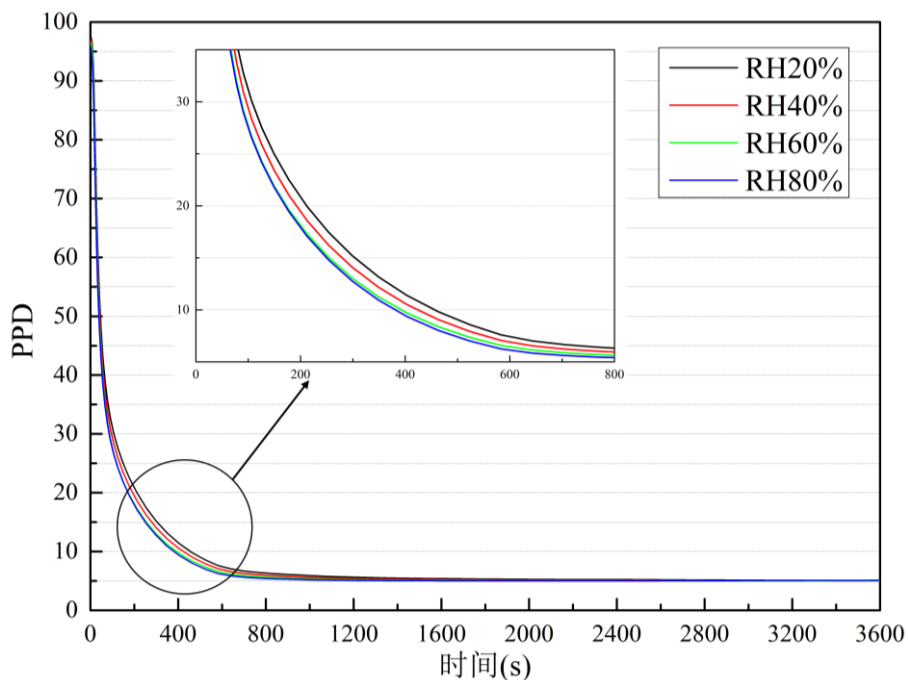


图 3-12 不同湿度下 PPD 值变化

PPD 指数随时间的变化如图 3-12 所示,在采暖过程的前 600s 内,PPD 值先迅速下降至 10%以下,并在之后的加热过程中稳定在 5%左右。在前 800s 的采暖过程中,PPD 值的下降速度会受到相对湿度的影响,当湿度越大时 PPD 下降速度越快一些,但无论相对湿度为何值,PPD 值最终均能稳定在 5%左右,人体对

周围的热环境最终均能达到满意状态。

3.3.3 局部皮肤温度及其温差变化

由下图 3-13~3-16 可知，当环境温度为 5℃时，人体局部皮肤表面温度的变化趋势在不同湿度下是相同的，其中腿部区域的温度从开始阶段便迅速下降，但随着舱温的升高，温度下降速度会逐渐趋于稳定；而头部和胳膊区域的温度在开始阶段会迅速下降，但一段时间后随着舱温的升高其温度会逐渐缓慢回升；胸部区域则更为明显，在前 100s 内由于车舱温度较低，胸部温度会迅速下降，之后随着舱温升高后便迅速回升，同时相对湿度越高，上升速度就越快。从不同区域的皮肤温度变化图中可见，在整个变化过程中，相对湿度分别为 20%、40%、60% 和 80% 情况下所对应平均皮肤温度均依次增高，可见相对湿度越高，对应的皮肤温度也越高，且变换速度也越快。

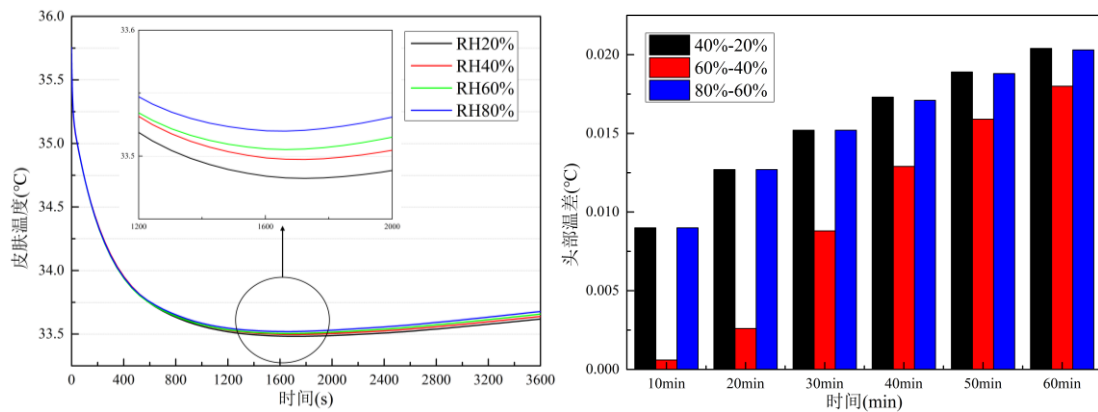


图 3-13 头部温度变化及不同湿度间温差

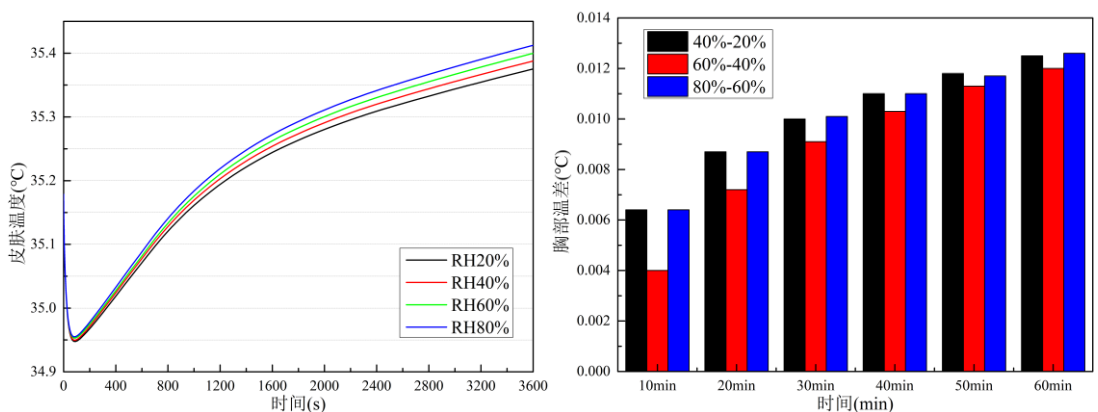


图 3-14 胸部温度变化及不同湿度间温差

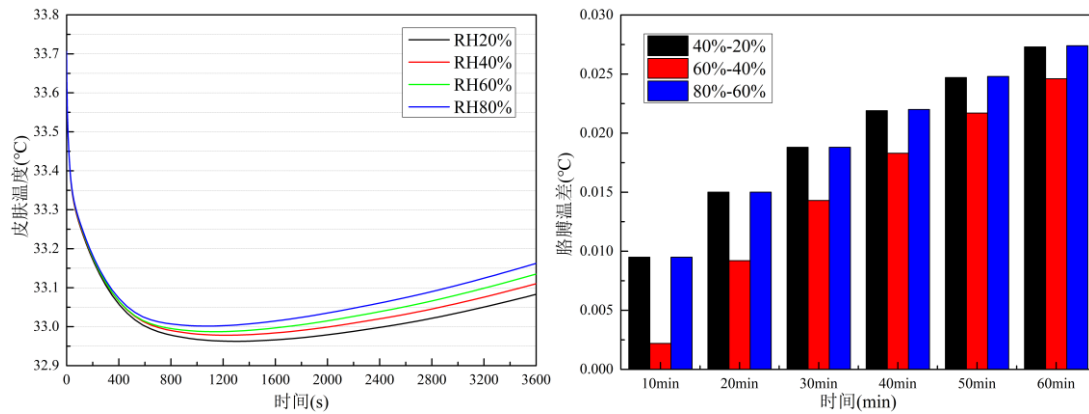


图 3-15 胳膊温度变化及不同湿度间温差

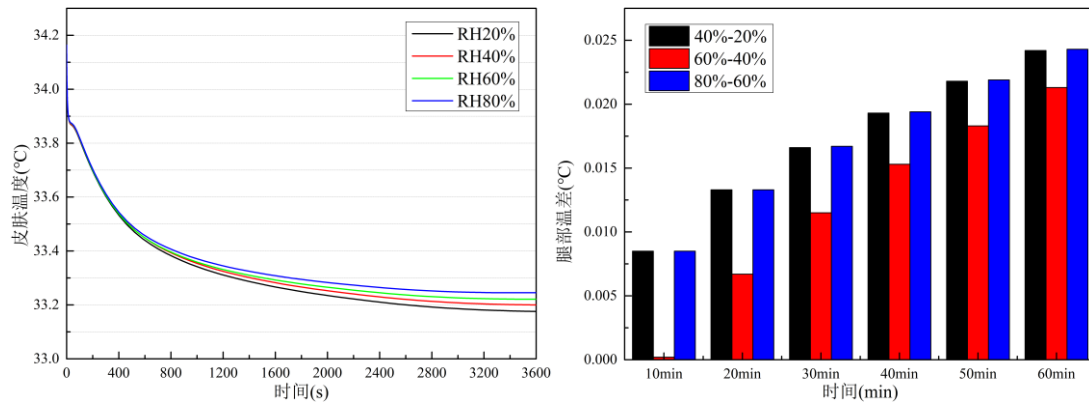


图 3-16 腿部温度变化及不同湿度间温差

通过图 3-13~3-16 中不同湿度间的温差图还可发现,随着时间越长,人体不同部位在不同湿度间的温差均越大,且局部皮肤温度在 RH 为 20%~40%间的温差和 RH 为 60%~80%间的温差几乎相同,均大于 RH 在 40%~60%间的温差。一方面因为服装存在湿阻,具有一定的吸湿作用,当相对湿度过高时,超过了服装吸湿范围,从而对皮肤温度的影响变得更加显著^[71,72]。此时空气中水蒸气分压也会更大,人体越不容易散热,所以散热量就会越小,进而使皮肤温度要高于相对湿度较小的情况,导致与较小的相对湿度间存在较大的温差。另一方面,当相对湿度过小时,空气中水蒸气分压越小,使人体皮肤水分缺失,人体越干冷,皮肤表面温度也会越低,导致与较高的相对湿度间存在较大的温差。因此,可以得知相对湿度在 40%~60%的范围间变化时,人体皮肤温度相对稳定,温差浮动较小,所受的影响也更小。

3.4 本章小结

本章主要研究了相对湿度对人体热舒适响应特性的影响,通过乘员热舒适性

变化及热调节反应来探究车舱内最适相对湿度。分别在夏季制冷和冬季采暖两种工况下,通过对高温以及低温环境下人体热舒适响应指标进行仿真分析以探究不同湿度对人体热舒适性的影响,并探究了在开启空调系统的情况下使人体更快达到舒适状态的最佳相对湿度。

综上所述,在制冷工况下,控制车舱相对湿度在 40%左右更为合适,此时人体出汗量和血管舒张量均相对较低,皮肤温差浮动也相对较低,且 PMV 指数更接近于 0,人体也会快速达到最佳舒适状态。在采暖工况下,则控制车舱相对湿度在 40%~60%的范围内会使人体更快的达到舒适状态,且该范围内人体寒颤量及血管收缩量相对较低,皮肤温差浮动也较低。

第 4 章 乘员舱流场对人体热舒适性的影响

对于室内气流组织的研究最初主要应用于建筑通风领域,而汽车乘员舱与建筑物室内气流流场的分布既存在差异,但也有很多相似之处,因此后来逐渐将流场分析引入到汽车乘员舱研究中^[27]。以往对汽车乘员舱内流场的设计分析多是以实车试验为基础,但随着 CFD 仿真技术的发展及完善,基于 CFD 仿真软件的计算流体力学技术逐渐应用于乘员舱流场的研究中^[51]。本章主要通过设计不同的方案来分析车舱内不同的流场分布对人体热舒适性的影响,尤其是通过改善后排排出风口的位置来改善后排乘员的热舒适性。

4.1 研究目的及方法

4.1.1 研究目的

乘员舱流场对于驾乘人员热舒适性的研究至关重要,通过对车舱内流场进行仿真分析,可以详细观察到流场在车舱中的分布情况,同时掌握舱内气流组织的速度场、温度场变化情况。之后将速度场单向耦合至热舒适分析软件中,并通过对人体热舒适性客观评价来分析流场分布的合理性。

由于传统小轿车乘员舱内后排空调出风口位置大多安置在中央扶手箱处,距离后排靠窗位置的乘员距离较远,且无法直接达到吹面的效果。因此本文通过改善后排空调出风口的位置,并重新设计了顶棚出风口,得到不同的乘员舱流场分布,可以达到对后排乘客直接吹面的效果,同时达到对乘员舱内流场布局的改善以及对前后排乘员热舒适性改善的目的。

4.1.2 研究方法

由于本章主要研究的是车舱内流场对乘员热舒适性的影响,而对于流场的分析需要通过 CFD 仿真软件进行,因此本章的研究方法与其他章节稍有不同,需要先在 CFD 仿真软件中进行流场的计算分析,然后导出速度场数据并单项耦合至热分析软件中,进而进行人体热舒适性的研究。本章研究所用的 CFD 软件为 Star-CCM+软件,不仅能将几何模型、网格划分、求解器以及后处理集成在一个统一的工作环境中,而且支持多种类型的网格生成及质量检查功能,网格划分精确且易于生成,大大简化了工作流程,提高工作效率,因此被广泛用于车舱流场

的仿真分析。

无论是对乘员舱流场的仿真分析还是对乘员热舒适性的研究，都是以车舱内流场的分布情况为研究对象，因此需要先通过 CFD 仿真软件模拟乘员舱流场的分布，流场仿真及数据耦合步骤如图 4-1 所示。在流场仿真分析过程中主要设计并分析了三种方案，每种方案均设置四个前排出风口且位置均固定在仪表板区域，后排出风口分为三种情况，即无后排出风口，后排出风口位置在中央扶手箱处，后排出风口位置设置在顶棚处，具体如表 4-1 所示。通过方案一与方案三的对比较分析，探究有无后排出风口对前后排乘员不同的影响；通过方案二与方案三的对比较分析，探究与传统轿车的后排出风口相比，当后排出风口位置改善后对后排乘员热舒适性的影响。

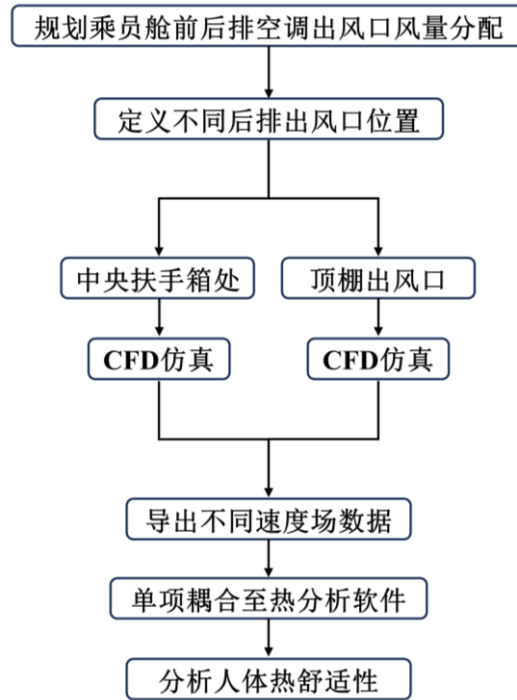


图 4-1 CFD 流场仿真分析路线图

表 4-1 出风口设计方案

	总出风口 数量	前排出风口 数量	前排出风口 位置	后排出风口 数量	后排出风口 位置
方案 1	4	4	仪表板区域	0	/
方案 2	6	4	仪表板区域	2	中央扶手箱处
方案 3	6	4	仪表板区域	2	顶棚出风口

由图 4-1 可知，为了探究乘员舱流场对前后排乘员热舒适性的影响，并得出能快速提高乘员热舒适性的流场分布情况，首先需要基于 THESEUS-FE 热分析

软件在车舱前后排位置分别添加两个假人模型以便分析。添加位置如图 4-2 所示，分别在前排驾驶位和后排靠窗位添加两名假人乘员。然后将仿真模型导入 Star-CCM+ 流体仿真软件中，用于模拟和分析舱内流场。通过在乘员舱模型中定义好空调出风口数量以及前后排区域不同出风口位置，并分配好不同位置的出风口风量后，再基于 CFD 仿真软件对乘员舱内流场进行仿真分析。最后通过在 Star-CCM+ 中改善后排空调出风口的位置，进而改善舱内流场的分布，并得出不同的速度场分布数据，再将数据导出并单向耦合至热分析软件中，以分析不同流场分布对前后排乘员热舒适性的影响。

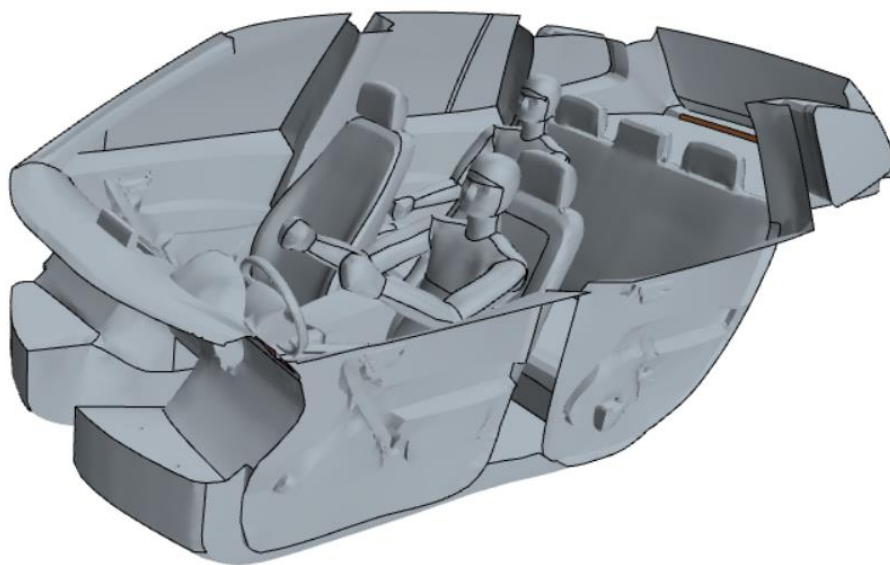


图 4-2 假人添加位置图

4.1.3 基本控制方程

CFD 对流场的数值模拟是基于流体动力学的基本方程进行的，流体的运动服从基本守恒定律，包括质量守恒、动量守恒和能量守恒定律。这些守恒定律的偏微分表述形式即称为基本控制方程，依据这些守恒定律得出的流体动力学三大守恒方程具体如下：

(1) 连续性方程

质量守恒定律可表述为单位时间内流体微元体中质量的增加等于该时间间隔内流入微元体的净质量，也称为质量守恒方程，如下式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4-1)$$

若引入散度(div)，则式(4-1)可简化为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (4-2)$$

式中, ρ 表示流体密度; t 表示时间; U 表示流体速度矢量; u 、 v 、 w 分别表示速度矢量 U 在 x 、 y 、 z 三个方向上的分量。若流体不可压缩, 即该流体密度 ρ 为常数, 则式(4-1)可简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4-3)$$

(2) 动量守恒方程

动量守恒定律可表述为流体微元体的动量随时间的变化率与该微元体上所受的外力之和成正比。根据动量守恒定律, 粘性不可压缩流体的动量守恒方程就是著名的 N-S 方程。任何流体的运动都必须遵循动量守恒定律, 根据该定律, 微元体在直角坐标系 x 、 y 、 z 三个方向上的动量守恒方程分别如下:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (4-4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4-6)$$

式中, p 表示作用在流体微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等表示作用在微元体上的粘性应力 τ 的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 分别表示微元体上的体积力。若体积力只有重力, 且 z 轴竖直向上, 则 $F_x = 0$, $F_y = 0$, $F_z = -\rho g$ 。

(3) 能量守恒方程

能量方程是分析计算热量传递过程的基本方程之一, 可表述为流体微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量与体积力、表面力对其所做的功总和。以温度为变量的能量守恒方程表示如下:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (4-7)$$

展开为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (4-8)$$

式中, c_p 表示比热容; T 表示温度; k 表示流体传热系数; S_T 表示流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分; 简称粘性耗散项。为使上述方程组封闭便于求解, 关于密度 ρ 和压力 p 的状态方程如下:

$$p = p(\rho, T) \quad (4-9)$$

该状态方程对于理想气体有:

$$p = \rho R T \quad (4-10)$$

式中, R 表示摩尔气体常数。

4.1.4 网格划分及边界条件设置

在研究乘员舱内流场对人体热舒适性影响的过程中, 舱内流场的分布是主要分析对象, 因此计算域确定为舱内空间。对于舱内流场的 CFD 仿真是以网格为载体来体现整个几何模型和计算域, 因此网格划分是流场仿真过程中首要且关键的一步, 仿真计算的速度和精度也主要取决于网格数量和质量。网格划分主要分结构化与非结构化两种网格形式, 结构化网格适合处理复杂的曲面或空间拟合, 生成速度快且数据结构简单, 但适用范围有限, 仅适合规则形状的图形, 难以处理不规则区域。因此, 本次选用更适合复杂几何形状的非结构化网格进行划分, 不仅适应性强, 能够处理各种形状与连通区域, 而且还具备高灵活性, 便于控制网格大小和节点密度。

本文先基于网格划分软件 ANSA 对模型进行几何清理及面网格划分, 采用适应性更好的非结构化三角形网格, 然后将模型导入 Star-CCM+ 软件中并检查面网格质量是否需要修复, 完成修复后再基于该软件进行体网格划分。对于体网格划分采用非结构化的四面体网格, 自动化程度高, 生成速度快, 而且关键区域细化更能适应复杂几何形状。当所有体网格划分完成后得到的体网格数量约在 490 万左右, 网格划分模型如图 4-3 所示。



图 4-3 网格划分

对于流场仿真过程中的前后排乘员参数设置与表 3-3 夏季工况下的人体参数设置保持一致，车身壁面参数如表 4-2 所示。

表 4-2 车身壁面参数设置

汽车部件	材料	导热系数 (W/(m·K))	吸收率	透射率	反射率
车身	钢	0.15	0.7	0	0.3
车窗	玻璃	0.75	0.5	0.4	0.1
仪表盘	聚碳酸酯	0.033	0.9	0	0.5
座椅	皮革	0.16	0.8	0	0.2

为了方便计算，将初始舱温与外界环境温度保持一致。由于乘员舱内部结构不规则，流场分布较为复杂，且部分壁面曲率较大，因此湍流模型采用可实现的 K-Epsilon 模型，可以准确的预测乘员舱内速度场、温度场的整体分布，表 4-3 列出了具体计算域边界设置。

表 4-3 计算域边界设置

设置项	设置内容
计算域入口	质量流量入口
计算域出口	压力出口
外界温度	38℃
初始舱温	38℃
太阳辐射	1000W/m ²
湿度	40%
湍流模型	K-Epsilon 模型

4.2 后排出风口对乘员热舒适性的影响

本节主要研究有无后排空调出风口的工况下，乘员舱流场分布情况以及后排乘员热舒适性的变化。首先定义好车舱内空调出风口位置，并对各出风口风量进

行分配,然后对仅有前排出风口和添加后排出风口两种工况下的乘员舱流场分别进行仿真分析,得到不同工况下流场分布情况。最后将不同工况下的速度场数据单向耦合至热分析软件中,探究在添加后排出风口后,车舱内流场的分布对前后排乘员热舒适性的改善情况。

4.2.1 空调出风口风量分配

车舱内空调出风口的布置将直接影响到车舱内气流流速和流动方向以及流场的整体分布,进而对驾乘人员热舒适性有着很大的影响^[52]。根据试验所用汽车舱内空调出风口的系统配置,在前排仪表板区域设置四个出风口,并在副驾驶脚边位置设置了一个空调回风口,如 4-4 左图所示。后排区域将不同于传统汽车在中央扶手箱处设置出风口,本文在后排侧窗顶棚区域设置了两个顶棚出风口,如 4-4 右图所示。

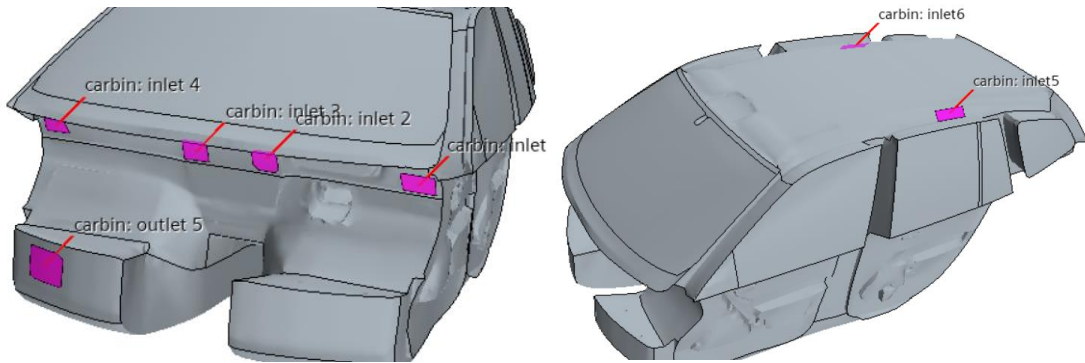


图 4-4 乘员舱空调出风口及回风口布置

车舱空调的总风量一般是根据车舱体积和空调系统的设计来确定的,包括有体积流量 q_v 和质量流量 q_m 两种表达形式,且两者之间存在一定的转化关系。关于车舱内空气的体积流量 q_v 涉及到气流的平均流速和空调管道截面积,相关表达式如下:

$$q_v = Av = V/t \quad (4-11)$$

式中: A 表示出风口截面积, v 表示空调吹出的气流流速, V 表示空调吹出的气流体积, t 表示气流通过时间。

考虑到人体的舒适程度,将空调风速设置为 4m/s。因为当风速过低时,气流很难直接吹到人体,乘员的体感会比较差,而高于这一风速时,气流流速过快可能会导致人体感到不舒适。通过对试验样车实际测量计算,得到前排每个空调出

风口截面积约为 0.006m^2 ，后排每个空调出风口截面积约为 0.004m^2 ，因此可以计算出车舱空调出风口截面积 $A=0.032\text{m}^2$ 。由式(4-11)计算可知，车舱内空调吹出的气流体积流量为 $q_v=0.128\text{m}^3/\text{s}=460\text{m}^3/\text{h}$ 。关于空气质量流量 q_m 的计算公式表达如下：

$$q_m = m/t \quad (4-12)$$

式中： m 表示空气质量，与空气密度 ρ 紧密相关。取标准工况下空气密度为 $\rho=1.29\text{kg}/\text{m}^3$ ，则当前空气质量可表达如下：

$$m = \rho V = 1.29V \quad (4-13)$$

由式(4-13)并结合(4-12)、(4-11)分析，气流质量流量与体积流量的相互换算关系如下式所示：

$$q_m = \frac{1.29V}{t} = 1.29q_v \quad (4-14)$$

因为计算得出的气流体积流量约为 $460\text{m}^3/\text{h}$ ，即车舱空调出风口的总风量，再由公式(4-13)转化为质量流量约为 $0.16\text{kg}/\text{s}$ 。对于整车风量的分配，一般前排四个出风口分配 70% 的总风量，后排两个出风口分配 30% 的总风量^[73-76]。对于后排两个出风口采用均分风量分配，而对于前排四个出风口，当中间两个出风口分配的风量较多时，可兼顾后排乘客的舒适性；当两侧出风口分配的风量较多时，可有效抵消侧窗照射的太阳辐射热^[74,75]。但对于不同的车型来说，为兼顾不同地区、不同环境及天气情况，一般采用均分风量的情况较多^[77]。因此，本文对前排出风口在设置为吹面模式下四个出风口均分风量，即车舱前排空调每个出风口风量为 $0.028\text{kg}/\text{s}$ ，后排空调每个出风口风量为 $0.024\text{kg}/\text{s}$ 。

4.2.2 流场仿真计算结果

通过上文分析，计算出的车舱前排四个出风口平均每个出风口风量用质量流量表达为 $0.028\text{kg}/\text{s}$ ，后排两出风口的平均风量为每个 $0.024\text{kg}/\text{s}$ 。在 CFD 仿真软件中设置好边界条件后，出风口吹风角度设置为吹面模式，方案 1 仅有前排四个出风口时的乘员舱速度场流线分布如图 4-5 所示，方案 3 开启前排四个出风口和后排两侧顶棚出风口的速度场分布如图 4-6 所示。

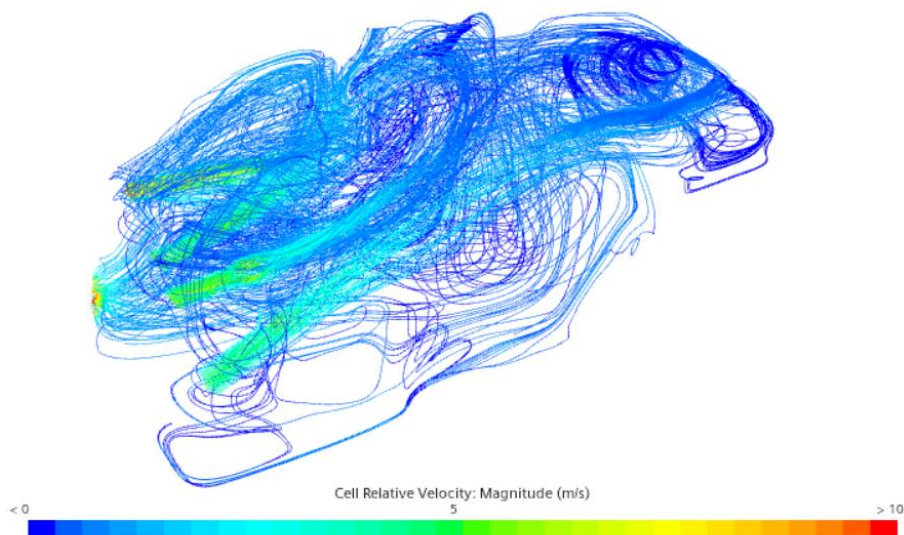


图 4-5 方案 1 乘员舱流场速度场分布

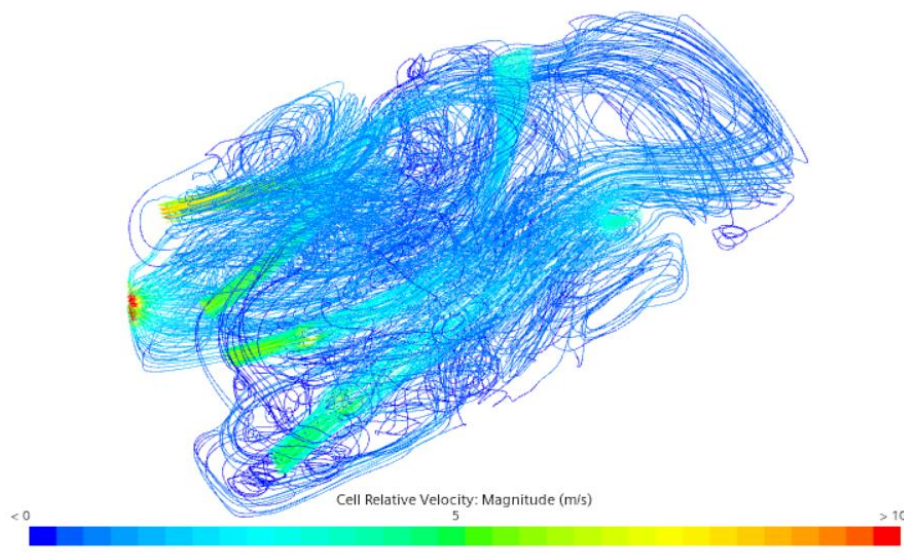


图 4-6 方案 3 乘员舱流场速度场分布

由图 4-5 和 4-6 可知，前排出风口吹出的气流风速约为 5m/s ，后排出风口吹出气流的风速约为 3m/s 。在仅有前排出风口时，车舱整体前排气流流速较高，气流主要吹向前排乘员的面部及上半身区域，后经过分流，一部分通过车顶吹向后排区域，一部分通过前排座椅两侧吹向后排区域，还有一部分在接触座椅和人体后直接回流并通过回风口排出舱外。吹向后排区域的气流流速很低，在接触后排座椅及后备箱壁面后开始回流，并呈现出逆时针漩涡，最后未通过回风口排出舱外的气流流速逐渐降为零乃至消失。

开启顶棚出风口后，前排气流吹过前排乘员后分流，一部分经过车顶和两侧吹向后排区域，并沿着车舱顶部和两侧壁面吹过后备箱区域并回流；一部分通过

前排两座椅中间区域吹向后排，与顶棚出风口吹出的气流交汇，形成漩涡。在此过程中，一部分气流被引导至回风口并排出舱外，一部分气流流速会逐渐降为零。从图中可以看出，开启顶棚出风口后会使得后排区域的整体气流流速更高，更有利于提高后排乘员的热舒适性。

4.2.3 乘员热调节反应

通过 CFD 仿真得到乘员舱流场后，导出速度场数据并单项耦合至热分析软件中，通过将方案 1 仅前排出风口和方案 3 开启前排和后排顶棚出风口两种工况进行对比，分析前后排乘员在不同工况下的热调节反应。因为在高温环境下，外界环境温度为 38°C ，因此仅以人体出汗量 S_w 的变化作为热调节反应指标。空调为吹面模式且使舱温在短时间内迅速下降并始终维持在 23°C ，结果如下图所示，4-7 表示两种工况下前排乘员出汗量的变化，4-8 则表示后排乘员出汗量的变化。

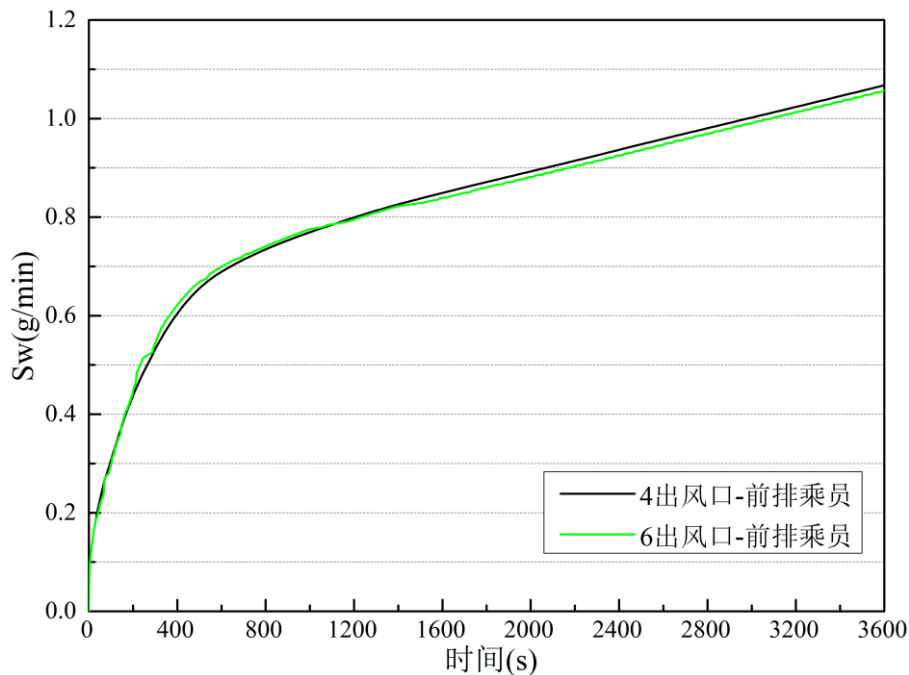


图 4-7 前排乘员热调节反应

由图 4-7 可知，后排空调出风口对前排乘员热调节反应几乎没有影响，前排驾乘人员的出汗量仅与前排 4 个出风口有关，且随着空调的持续吹风，人体出汗量的速度也呈现出先增大后减小的趋势，呈现出很好的降温作用。由下图 4-8 可知，后排空调出风口对后排乘员的热调节反应有着较大的影响，相较于仅有前排出风口，开启后排出风口后可以有效降低后排乘员的出汗量，同时更快的降低乘员出汗速度。

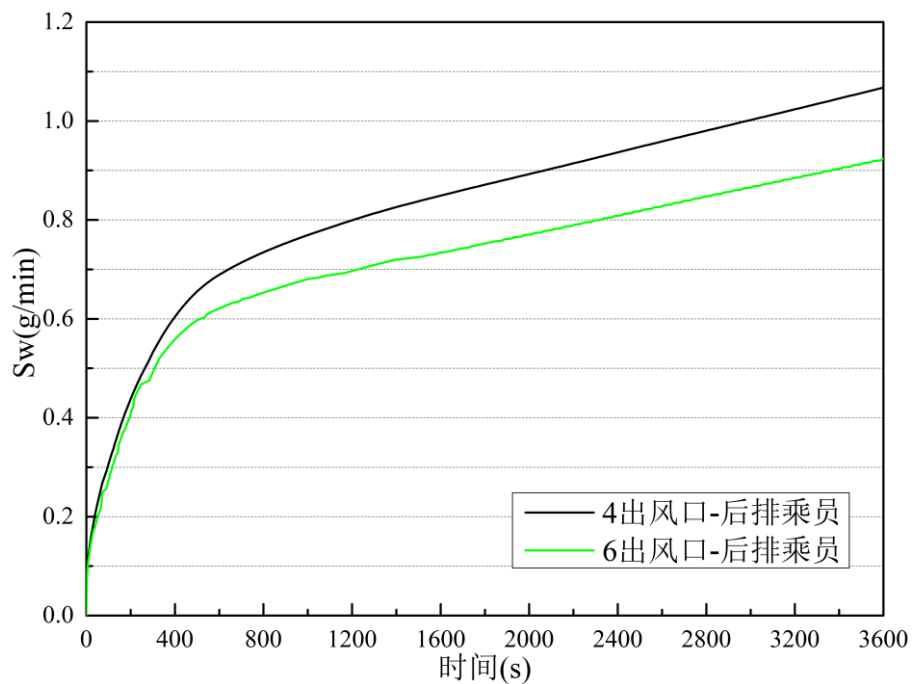


图 4-8 后排乘员热调节反应

4.2.4 乘员热舒适性分析

关于乘员舱前后排乘员的热舒适性分析是基于 PMV 热舒适指标进行的，如下图所示 4-9 表示两种工况下前排乘员热舒适性变化，4-10 表示两种工况下后排乘员的热舒适性变化。

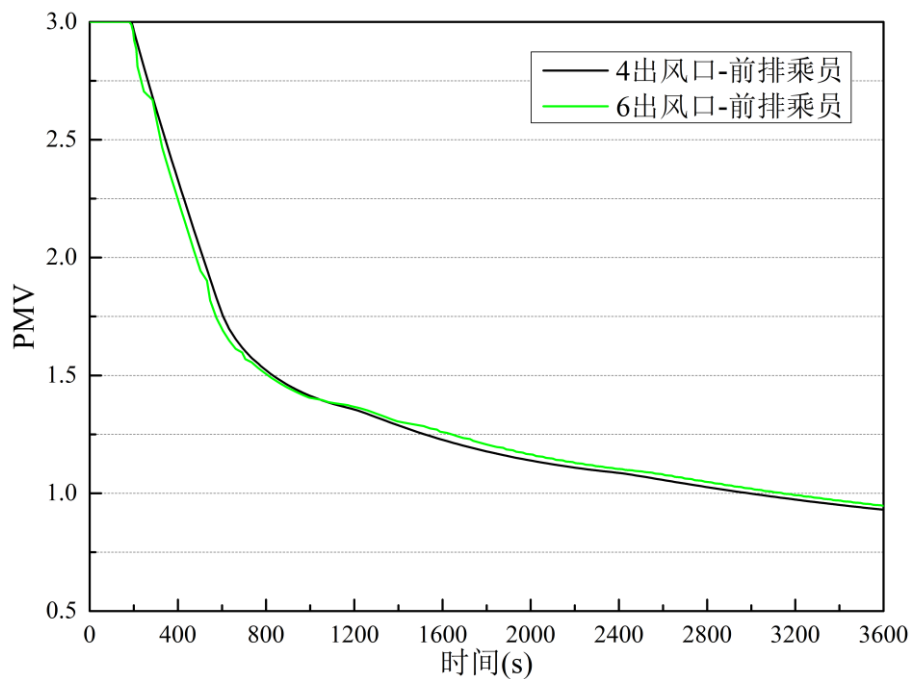


图 4-9 前排乘员 PMV 指标

由图 4-9 可知, 在空调降温过程中, 开启后排空调出风口对前排乘员 PMV 指标几乎没有影响, 结合图 4-7 分析, 两种工况下的前排乘员热调节反应及热舒适状况几乎不受后排出风口的影响。

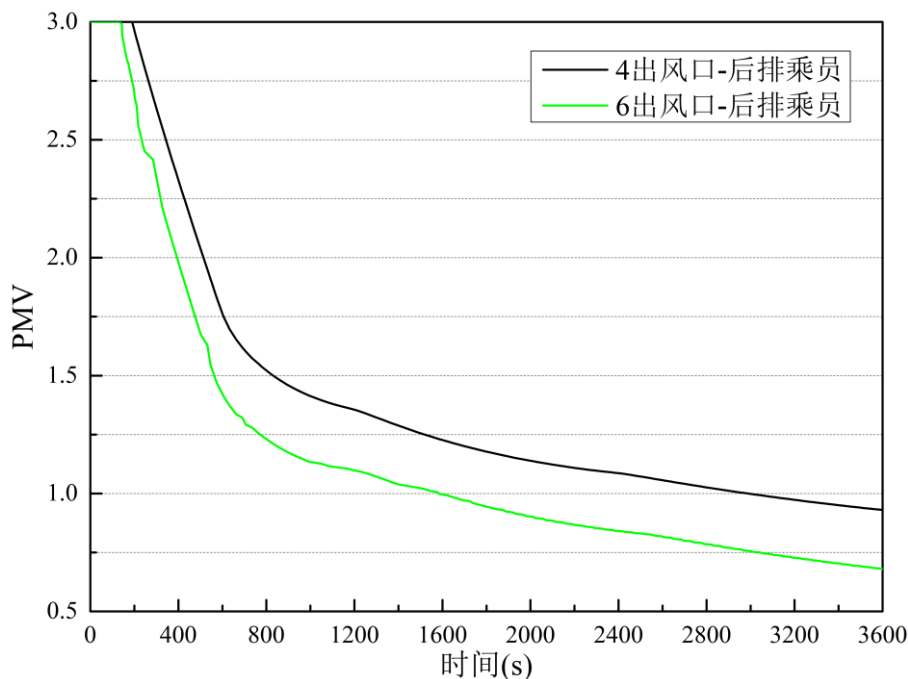


图 4-10 后排乘员 PMV 指标

结合图 4-9 和 4-10 分析, 在初始阶段, 两种工况下前后排乘员的 PMV 指标均很高, 此时乘员均处于极不舒适状态。但随着空调的降温作用, 前后排乘员的 PMV 指数均呈现出迅速降低的趋势, 且在接近指数 1 时速度开始缓慢降低并逐渐接近 0, 表明乘员在快速达到舒适状态后开始缓慢朝着最佳热舒适状态发展。

由图 4-10 可知, 开启后排空调出风口后可以更快的降低 PMV 指数, 结合图 4-8 分析, 在开启后排空调出风口后, 更有利于后排乘员热舒适性的改善, 不仅出汗量更低, 且 PMV 指数下降速度更快也更接近于 0, 人体也处于更舒适状态。

4.3 顶棚出风口对后排乘员热舒适性的改善

4.3.1 流场仿真计算结果

因为传统乘用车包括现有小汽车的后排空调出风口设计普遍是在中央扶手箱处, 所以本次研究设计了方案 2。如图 4-11 所示, 即后排两个空调出风口设在中央扶手箱处, 并与方案 3 所改善的后排空调出风口的仿真结果进行对比, 分析并验证方案 3 对人体热舒适性的改善情况。在设置好边界条件后, 对方案 2 进行

CFD 仿真分析以探究舱内速度场的分布情况，流场仿真结果如图 4-12 所示。

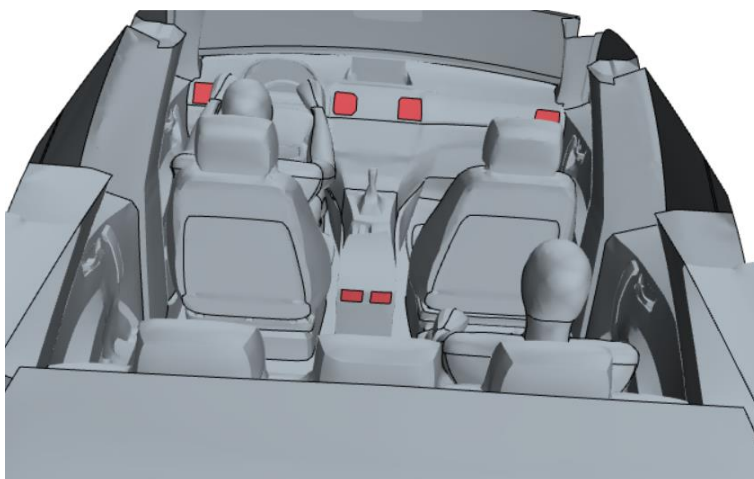


图 4-11 乘员舱空调出风口布置

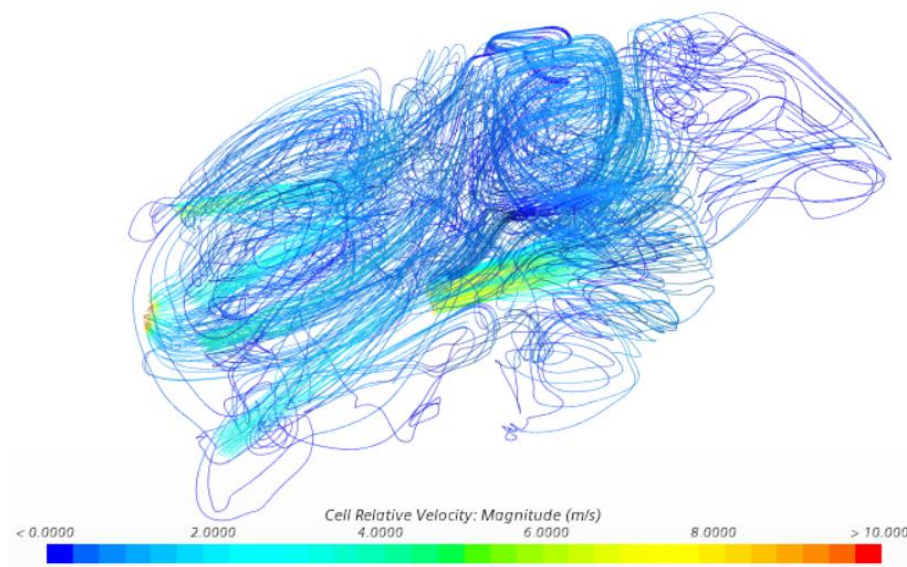


图 4-12 方案 2 乘员舱流场速度场分布

由图 4-12 可知，前排四个空调出风口吹出的气流在吹过人体面部后产生分流，一部分气流沿着座椅两侧及车舱顶部吹向后排区域，一部分回流并最终通过回风口排出舱外。后排中央扶手箱出风口吹出的气流在接触后排座椅壁面后产生分流，一部分气流沿着座椅壁面向上吹，一部分吹向两侧乘客位置，但距离较远，无法直接形成较好的吹面效果。最终车舱内的气流要么经过回风口排出舱外，要么气流流速逐渐降为零。

4.3.2 后排乘员热调节反应

通过 CFD 仿真得出不同乘员舱流场后，将速度场数据导出并单项耦合至热分析软件中，外界环境温度设置为 38°C ，使舱温在短时间内迅速下降并维持在

23℃, 通过将方案 2 和方案 3 两种工况进行对比, 分析不同工况下前后排乘员不同的热调节反应, 在高温环境下仅以人体出汗量 Sw 作为人体热调节反应指标, 具体如图 4-13 所示。

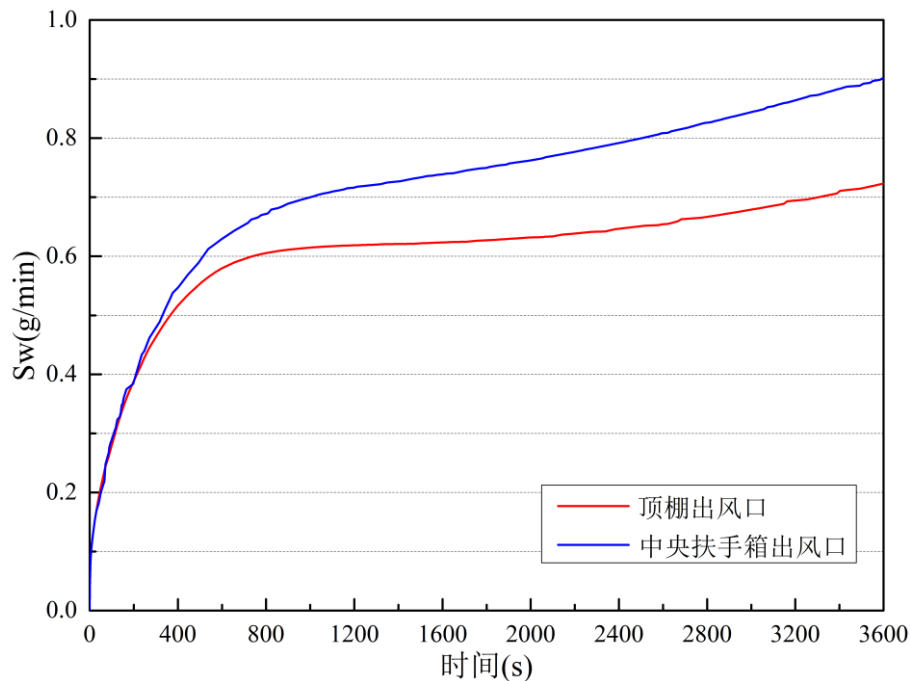


图 4-13 不同工况下后排乘员热调节反应

由图 4-13 结合图 4-6 可知, 相较于后排中央扶手箱出风口, 顶棚出风口可以对后排乘员达成更好的吹面效果, 因此降温效果也会更好。当后排空调出风口的位置改善为顶棚位置后, 后排乘员的出汗速度显著降低, 且整体出汗量也更低, 尤其在长时间乘坐汽车时会更具优势。如图在 3600s 后, 相较于传统中央扶手箱出风口, 后排乘员的出汗量显著降低了 0.2g/min, 因此顶棚出风口对后排乘员有着更好的降温效果。

4.3.3 后排乘员热舒适性分析

基于 PMV 热舒适性指标对不同工况下后排乘员热舒适性的分析如图 4-14 所示, 当 PMV 指数在 0~1 之间时, 人体即处于舒适状态, 且越接近于 0 人体舒适感越强。在开启后排空调出风口后, 随着空调的降温作用, 方案 2 和方案 3 两种工况下的后排乘员 PMV 指数均迅速降低, 人体均会快速达到舒适状态, 且当 PMV 指数接近 1 时, 整体下降趋势开始缓慢降低, 并随着时间的延长逐渐趋于平稳状态。

根据图 4-14 分析可知, 当改善后排空调出风口为顶棚位置后, 人体 PMV 指

数下降速度会更快,可以使后排乘员更快的达到舒适状态,而且 PMV 指数也更接近于 0,相比传统中央扶手箱出风口要小约 0.5 个指数。因此对于后排乘员的热舒适性改善效果,顶棚出风口要比中央扶手箱出风口更具优势,可以使后排乘员更快达到最佳舒适状态。

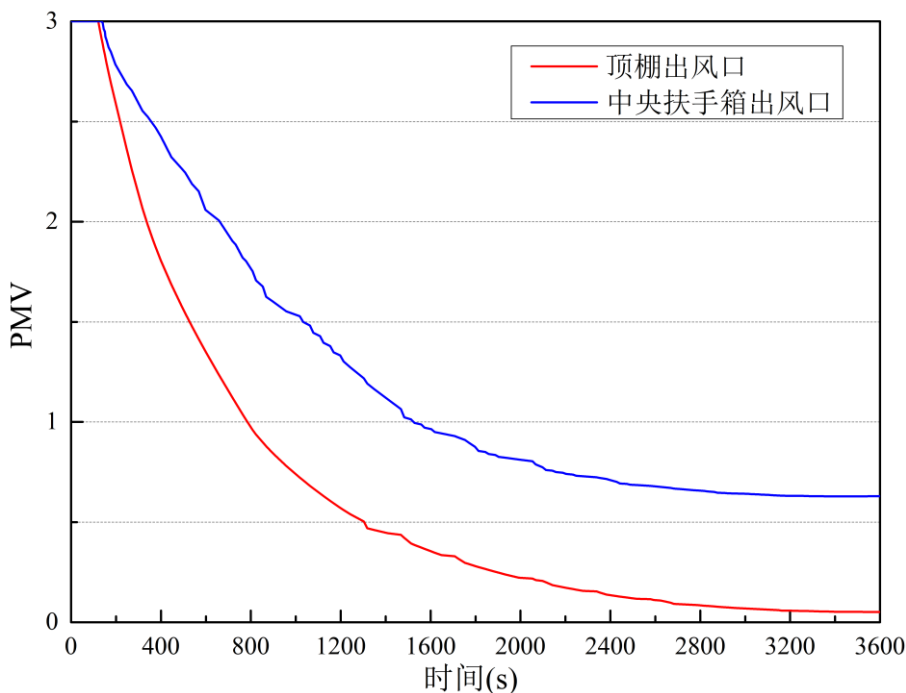


图 4-14 不同工况下后排乘员热舒适性

4.4 本章小结

本章主要通过 CFD 仿真软件对乘员舱流场进行仿真分析,并通过单向耦合将气流速度场数据导入热分析软件中,分析了不同流场对乘员热舒适性的影响。通过前后排空调出风口仿真结果的对比分析可知,开启后排出风口能够显著降低后排乘员的出汗量,尽管前排乘员几乎未受影响,但显著提高了后排乘员的热舒适性。

最后相较于传统中央扶手箱出风口,将后排空调出风口改善在车舱顶棚位置,并探究了顶棚出风口流场对乘员热舒适性的改善。结果表明,顶棚出风口相比传统中央扶手箱位置更有利于后排乘员热舒适性的改善,不仅有更好的降温效果,减少乘员的出汗量,而且使后排乘员可以更快的达到舒适状态。

第5章 座椅加热辅助空调系统对人体热舒适性的改善

在寒冷的地区和环境,座椅加热是辅助空调采暖系统快速提高车舱乘员热舒适性最重要的手段。目前通过座椅加热对乘员热舒适性的研究方式主要是采用固定加热功率进行加热实验,并通过主观试验得到相应热环境的主观评价。尽管主观评价方法可对当前环境进行直观的热舒适性评价,但主观试验个体差异性较大且复现性差,少量测试很难保证结果的一致性,使试验研究成本较高,耗时也长^[78]。而基于人体热调节模型和客观热舒适性仿真评价方法,在研究人体热舒适性方面有着广阔的发展前景,其结果不仅具有良好的稳定性和一致性,且不同测试结果也具有可比性和复现性,目前已经得到了很多应用,作用也得到了证实^[44]。因此本章通过设计一种新型间歇式座椅加热策略,增加了智能化调节作用,使其可以自主适应外界环境,并基于人体热调节模型和客观热舒适性评价方法,探究了新策略对人体热舒适性的改善。

5.1 研究目的及边界条件设置

5.1.1 研究目的及意义

空调系统是提升车舱乘员热舒适性的重要手段,但在严寒地区空调系统存在热舒适性提升速度慢以及能耗过高的问题^[79-82]。通过座椅加热辅助空调系统的方式,可以使乘员快速达到热舒适状态,同时协同控制还可节约车内空调系统的能耗,因此逐渐成为中高端汽车的常规配置^[83],这也是智能座舱的发展重点。然而,座椅加热的设计一直是个难题,若功率较小,则加热效果不理想,乘员热舒适性也比较差;若加热功率较大,会导致座椅表面温度过高,存在烫伤的潜在危险。因此,如何合理的设置座椅加热策略对提升乘员热舒适性、安全性以及降低能耗十分重要。

本章通过对不同的座椅加热策略进行分析,从而得到座椅最适的加热功率和表面温度,进而设计一种新型间歇式座椅加热策略,不仅能够自主适应外界低温环境的变化,使人体更快达到热舒适性的需求,而且在提高安全性的同时又能保证低能耗的需求。

5.1.2 边界条件设置

考虑到当外界环境温度在 10℃或者高于 10℃时，仅开启空调加热即可快速满足人体对热舒适性的需求，座椅加热作用较小，所以本文仅分析外界环境温度在 0℃或者远低于 0℃天气下的座椅加热对人体热舒适性的影响。

外界环境温度分别设置为 0℃、-10℃和-20℃三种工况，保持车内空调始终开启并维持在 24℃，车速定义为 40km/h。根据第 3 章中车舱最适相对湿度的分析，设置舱内湿度为 40%，不考虑太阳辐射。人体穿着冬季服饰，假设乘员进入车舱前，汽车已在对应环境温度下浸车 10h，车舱及汽车内饰初始温度与外界环境温度均已保持一致，具体参数设置如表 5-1 所示。

表 5-1 参数设置

环境温度	湿度	人体活动水平	服装热阻	舱温	车速	太阳辐射
0℃、-10℃、-20℃	40%	1.2MET	1.33clo	24℃	40km/h	无

5.1.3 热舒适性评价方法

本章主要分析座椅加热对人体热舒适性的改善，而座椅加热通过与人体局部区域直接接触并进行热交换，进而改善整体热舒适性。相较于 PMV 整体预测平均投票指数，等效温度可以通过计算各身体节段与周围环境直接的热交换，从而更好的利用局部热舒适反应整体热舒适性评价指标，因此本章对于人体热舒适性的评价采用等效温度（ISO14505-2）评价指标。ISO14505 评价标准共分为四部分：ISO14505-1 用于陆地、海上和空中作业的交通工具内部热应力评估；ISO14505-2 提供了车厢内热状况评估指南，包括评估热舒适性的计算方法，重点在于分析人体局部热感觉对整体热舒适感的影响；ISO14505-3 侧重于环境条件对受试者整体热舒适性的影响，并提供了计算这些影响的具体方法；ISO14505-4 使用数值计算评估车辆热舒适性，提出了一种模拟数值人体模型作为暖体假人模型的可行替代方案，用于计算等效温度^[84]。基于等效温度 ISO14505-2 对人体热舒适性进行评价，其热舒适性评价指标如下表 5-2 所示。

表 5-2 ISO14505-2 热舒适性评价指标

热舒适指数	评价结果
1	太冷，不舒适
2	凉爽，舒适
3	最舒适状态
4	温暖，舒适
5	太热，不舒适

5.2 不同座椅加热策略对人体热舒适性的影响

5.2.1 固定座椅加热功率策略

定义环境温度分别为 0°C 、 -10°C 和 -20°C ，在不同工况下使座椅加热功率从 20W 依次增大到 120W ，并与无座椅加热时的仿真结果进行对比，分析固定座椅加热功率策略对乘员热舒适性的影响。

由下图 5-1~5-3 可以看出，无座椅加热时，仅依靠空调系统的热舒适性改善速度慢且最终热舒适程度也较差。当环境温度为 -10°C ，仅依靠空调需在 10min 之后舒适性才能出现改善，但整体也始终都处于较冷的不舒适状态；在 -20°C 时，需要的时间更长，整体热舒适性也更差。但在开启座椅加热后，人体热舒适状态明显得到了改善，虽然加热功率越大人体达到最佳舒适状态的时间越快，但高功率面临着高能耗，因此对最适加热功率的选择需综合考虑能耗与热舒适性情况。

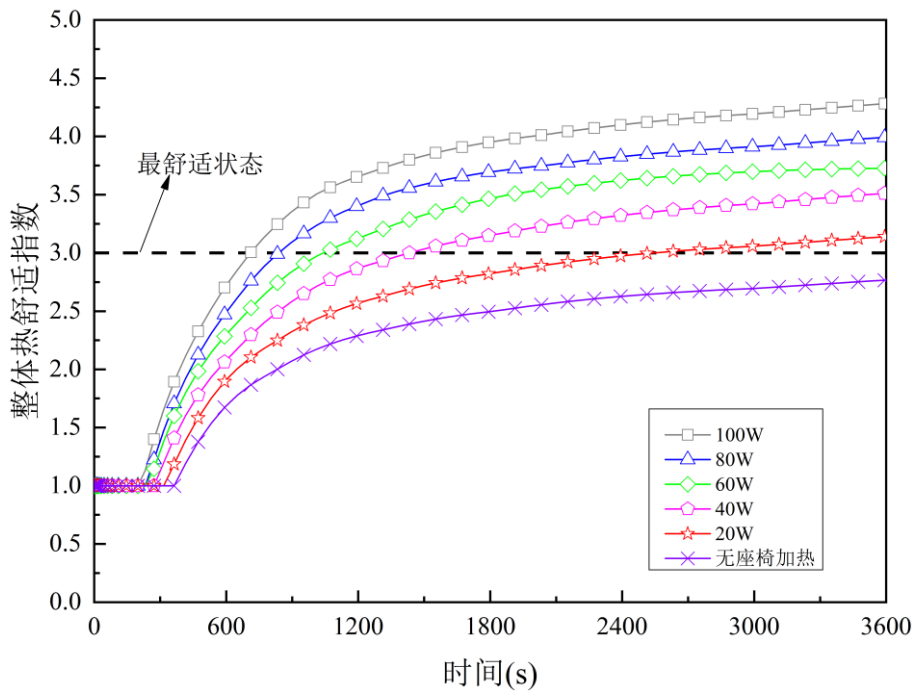


图 5-1 0°C 工况不同功率下热舒适性变化图

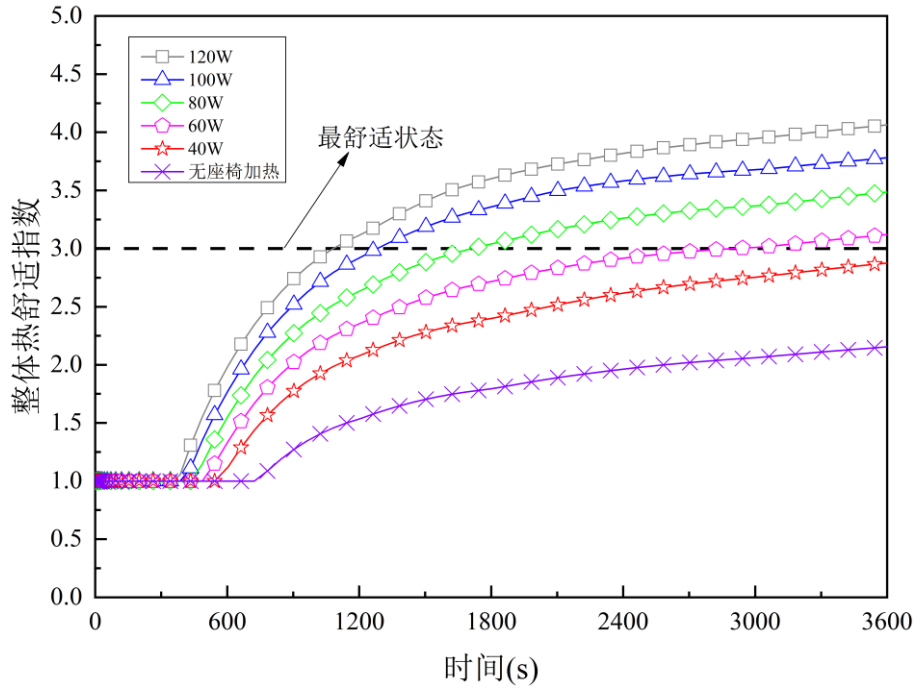


图 5-2 -10°C工况不同功率下热舒适性变化图

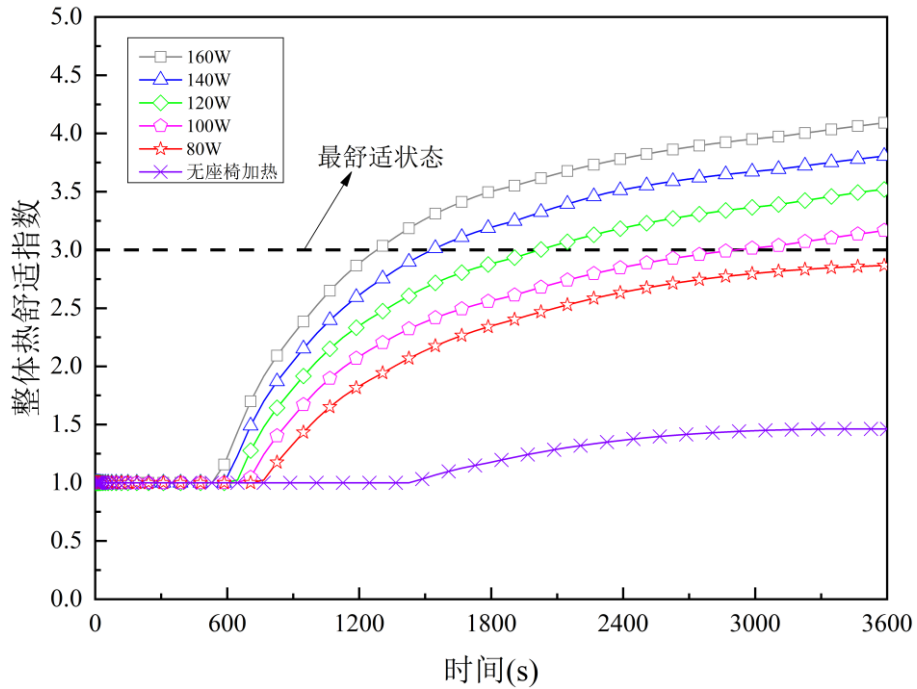


图 5-3 -20°C工况不同功率下热舒适性变化图

综合不同功率下的人体热舒适性改善速度以及稳定后的热舒适性水平,可以定义不同环境温度下的最适座椅加热功率。当环境温度为 0°C 时,最适宜加热功率约 60W ; 环境温度为 -10°C 时,最适宜加热功率约 80W ; 环境温度为 -20°C 时,最适宜加热功率约 120W 。在兼具能耗需求下,三种工况下最适加热功率的选择不仅能更快达到乘员的最佳热舒适状态,且最终热舒适指数均逐渐达到 3.5 左右。

5.2.2 固定座椅表面温度策略

在对该座椅加热策略的分析过程中，通过控制加热功率使座椅表面温度在 10min 后分别达到 34℃、35℃、36℃、37℃、38℃和 39℃，并在之后一直维持该温度。下图 5-4~5-6 分别是环境温度为 0℃、-10℃和-20℃时，固定座椅表面温度策略对乘员热舒适性的影响结果。

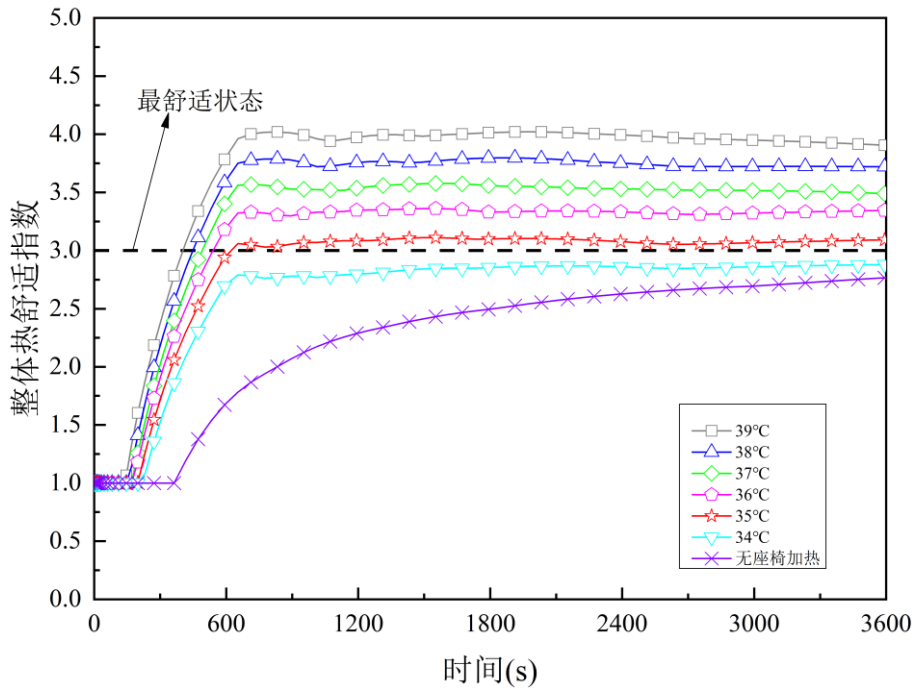


图 5-4 0℃工况下不同座椅表面温度热舒适性变化图

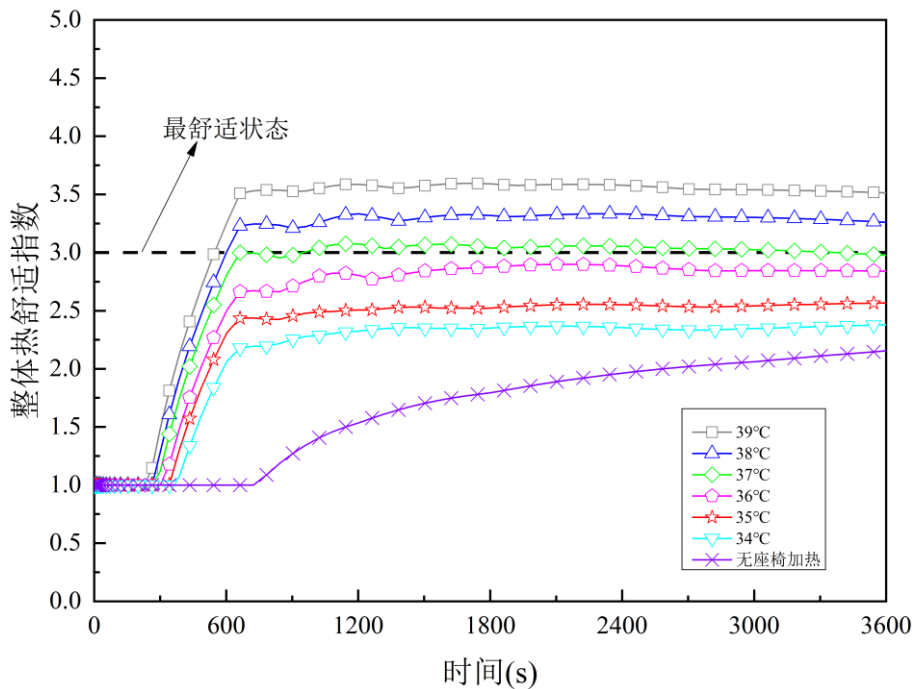


图 5-5 -10℃工况下不同座椅表面温度热舒适性变化图

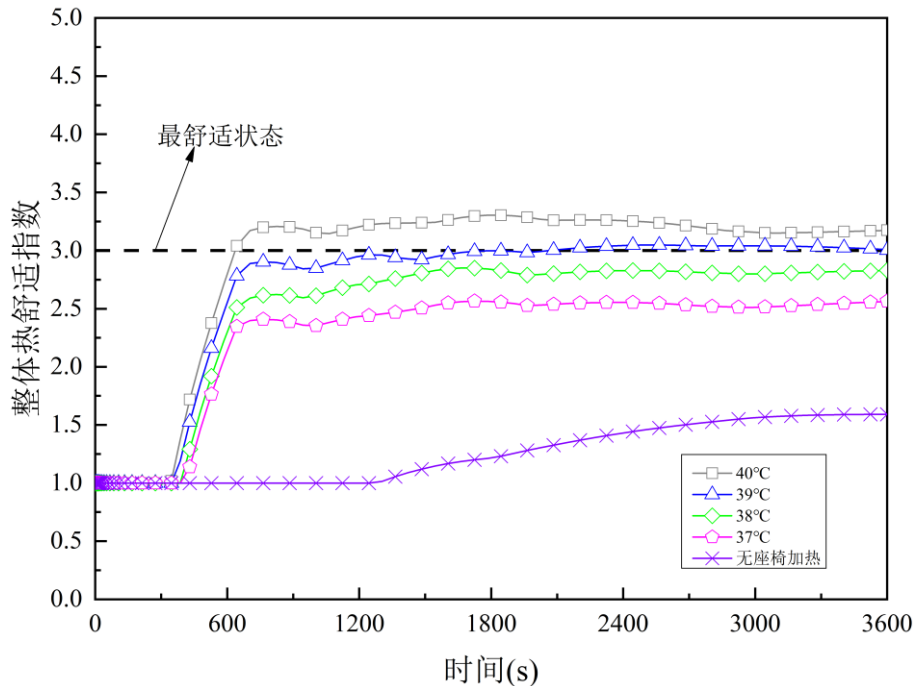


图 5-6 -20℃工况下不同座椅表面温度热舒适性变化图

从图中可以看出,控制座椅表面温度可以很好的调节乘员热舒适性水平,且优于固定加热功率策略。通过综合热舒适性改善速度以及稳定后的热舒适性水平,可以得到不同环境温度下的最适座椅表面温度,当环境温度为 0℃时,最适座椅表面温度为 35℃;环境温度为-10℃时,最适座椅表面温度为 37℃;环境温度为-20℃时,最适座椅表面温度为 39℃。但当座椅表面温度高于 41℃时,可能会由于局部温度过高而导致人体与座椅接触部位的皮肤过烫甚至出现烫伤的潜在危险因素^[85,86],所以座椅表面温度最好控制在 41℃以下,当座椅表面温度超过 41℃时,需强制关闭座椅加热,以免造成烫伤危险。

5.3 新型间歇式座椅加热策略的开发

5.3.1 开发目的及加热功率选择

工程上控制座椅表面温度恒定实现难度大,且不同环境温度下最适座椅表面温度也有差异,因此固定功率持续加热策略的应用更为广泛。此外,基于前述工作发现固定功率持续加热后期的热舒适指数处于持续上升趋势,不利于热舒适性的维持和低能耗的需求。为此开发一种新型间歇式座椅加热策略,并从热舒适性和能耗角度分析其与固定加热功率及固定座椅表面温度策略的差异,最终完善该策略使其成为适用于工程应用的汽车座椅加热策略。

间歇式座椅加热是指通过频繁启停来控制座椅加热,因此在不同的工况以及不同的时间段需要不同的加热功率。基于 5.2 节的分析结果,总结得到固定功率以及固定座椅表面温度的持续座椅加热策略最优控制变量,如表 5-3 所示。

表 5-3 不同工况下最优解

工况	0℃	-10℃	-20℃
最适加热功率	60W	80W	120W
最适座椅表面温度	35℃	37℃	39℃

基于固定座椅表面温度确定的不同工况下座椅最适温度,在间歇加热策略的前 600s 以固定功率方式加热座椅,使座椅快速达到最佳舒适温度,之后采用间歇加热。通过多次验证发现间歇时间过长会导致热舒适性波动变大,因此间歇时间控制在 5s 内最佳。在 600s~1800s 选择 4s 开/4s 关策略,1800s~3600s 选择 4s 开/5s 关策略,确定不同工况下间歇式座椅加热的功率选择如表 5-4 所示。

表 5-4 间歇式座椅加热功率选择

工况	0℃	-10℃	-20℃
加热功率 (0~600s)	120W	200W	280W
加热功率 (600~3600s)	100W	160W	200W

5.3.2 基于档位设计的间歇式座椅加热策略

由于外界环境温度具有不确定性,在工程上针对不确定的外界环境温度实现有效的座椅加热不仅难度大、成本高,且鲁棒性较差,所以将本文提出的间歇式座椅加热策略划分为三个不同的档位,以适应不同的外界环境温度,具体如下表 5-5 所示。

表 5-5 档位划分

档位	一档	二档	三挡
加热功率 P1 (0~600s)	120W	200W	280W
加热功率 P2 (600~3600s)	100W	160W	200W
外界温度范围	-5℃~5℃	-15℃~-5℃	<-15℃

由表 5-5 可知不同档位 600s 内的持续加热功率 P1,以及间歇阶段的加热功率 P2。对该间歇式座椅加热策略档位划分,其中一档适应外界环境温度范围在-5℃~5℃,二挡适应外界环境温度在-15℃~-5℃,三挡适应外界环境温度低于-15℃的情况。该间歇式座椅加热策略具体流程如图 5-7 所示。

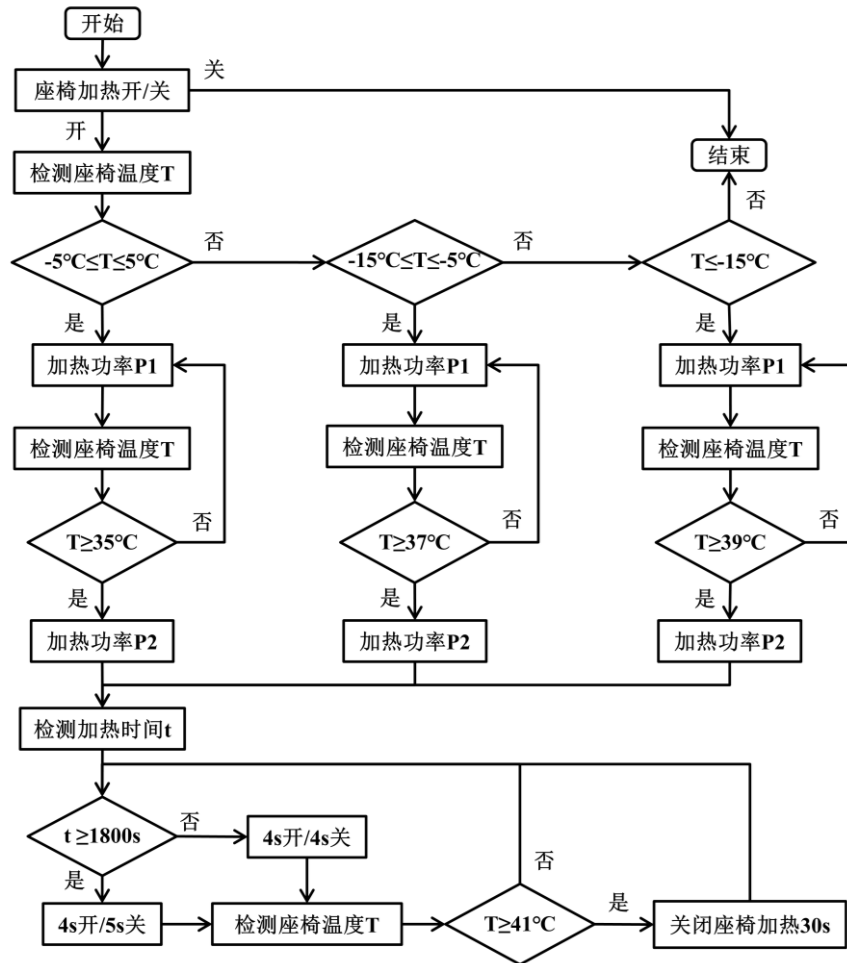


图 5-7 基于档位设计的间歇式座椅加热策略

由图 5-7 可知, 开启座椅加热后, 通过对座椅温度的检测, 识别出对应的档位, 之后在 600s 内由加热功率 P1 持续加热, 当检测到座椅的温度达到指定温度后, 加热功率降为 P2, 座椅开始间歇加热。之后通过对加热时间的检测判断是否超过 1800s, 若超过则间歇方式为 4s 开/5s 关, 否则为 4s 开/4s 关, 以保证人体热舒适性维持在舒适的范围。此外, 在加热过程中若座椅表面温度超过 41℃, 对人体皮肤可能会造成烫伤风险, 所以当座椅表面温度一旦超过 41℃时, 将强制关闭座椅加热, 并在 30s 后重新启动间歇加热。这种基于档位设计的新型间歇式座椅加热策略, 可以根据外界环境温度的变化, 自动调整座椅加热功率, 能更好的辅助空调系统提高人体热舒适性, 同时又具有足够的安全保障, 使该策略更符合工程上的应用。

5.3.3 新型间歇式座椅加热对人体热舒适性的改善

由表 5-3 可知固定功率持续座椅加热策略在 0℃、-10℃和-20℃工况下的最

适加热功率和最佳座椅表面温度,通过对不同工况下间歇式座椅加热的仿真分析,并与相同工况下最适加热功率及最适座椅表面温度持续座椅加热的仿真结果相比较,分析人体的热舒适性,结果如图 5-8~5-10 所示。

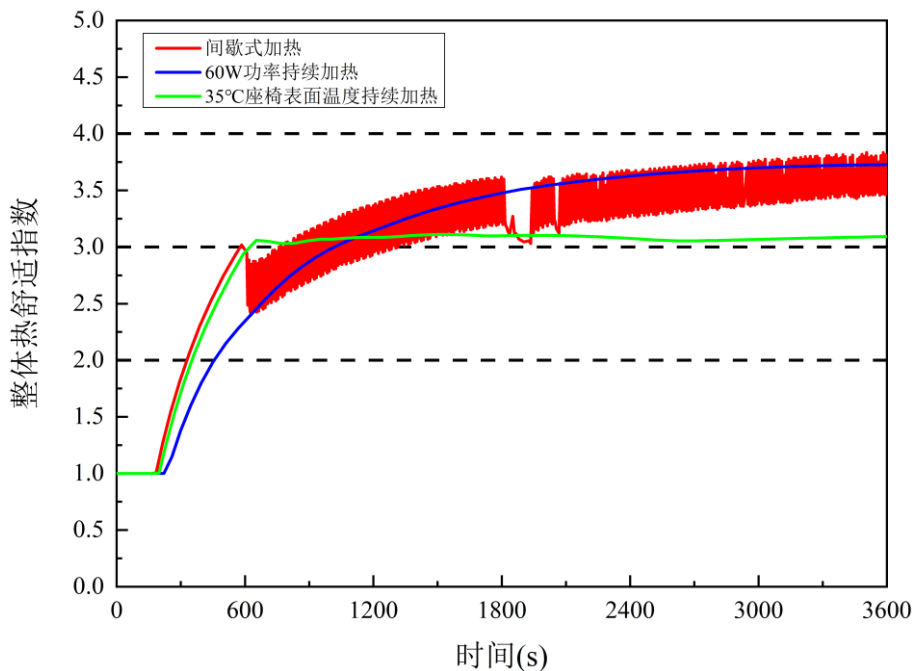


图 5-8 0°C工况下仿真结果对比图

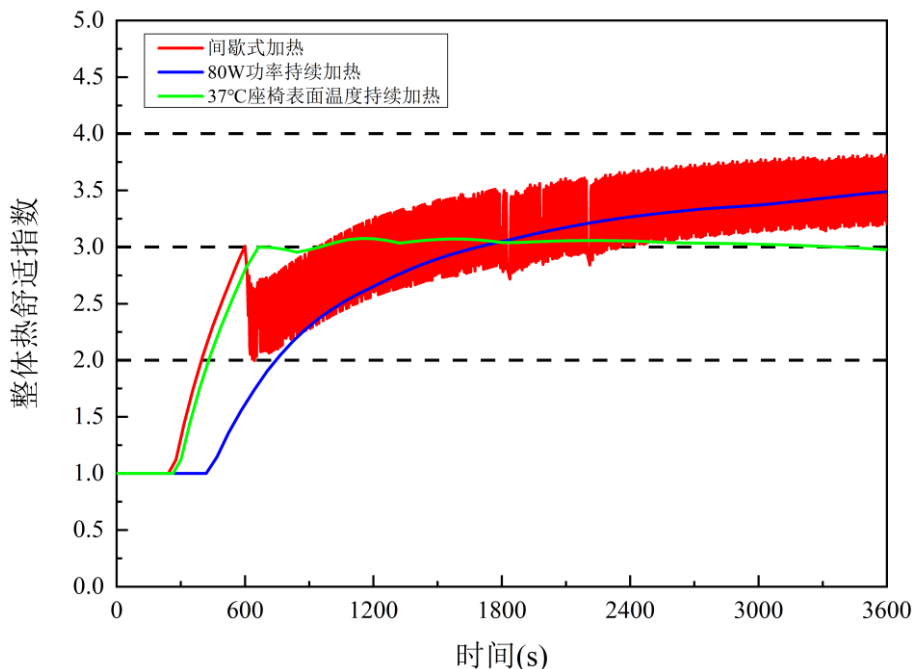


图 5-9 -10°C工况下仿真结果对比图

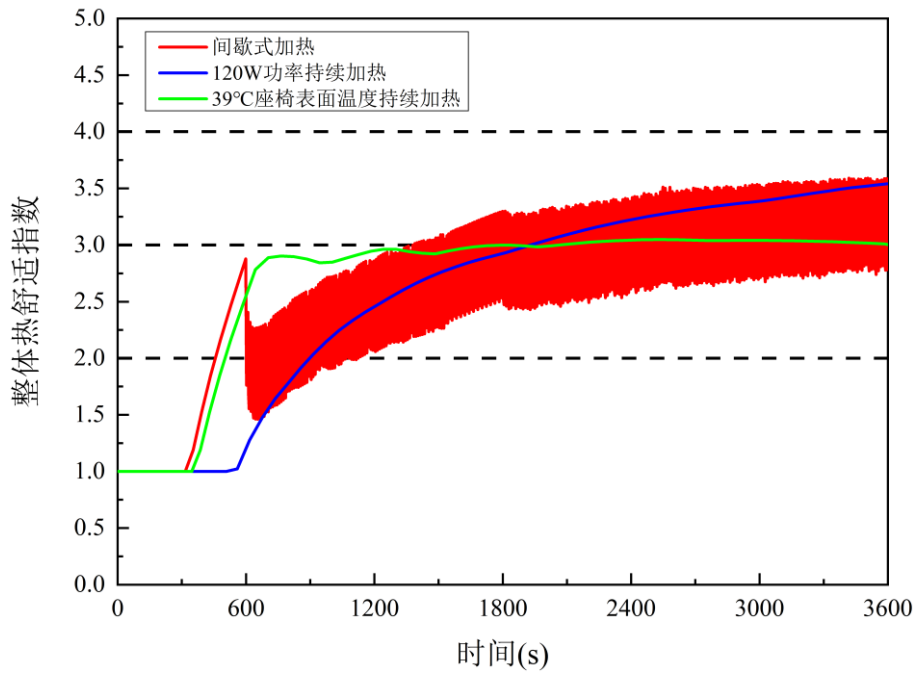


图 5-10 -20℃工况下仿真结果对比图

由图 5-8~5-10 可以看出，三种工况下的间歇式座椅加热以及固定座椅表面温度加热均能使人体热舒适性在前 300s 内快速升高，且在较短的时间内热舒适指数便能达到 3。固定功率持续座椅加热则需要更长的反应时间，且热舒适性升高的速度也很慢，这在外界环境温度越低时越明显。在 600s 处，间歇式座椅加热的整体热舒适性会突然有一定程度的下降，这是由于在座椅表面温度达到指定温度后，座椅由持续加热转为间歇加热，加热功率突然降低导致的人体热舒适性有一个短暂的变化，但仍高于同时间点下固定功率持续加热的热舒适指数，并且很快就能恢复。在 600s 后人体热舒适指数处于小范围的上下浮动，这是由于座椅加热频繁启停导致，但热舒适性始终稳定在舒适范围内，0℃和-10℃工况下热舒适指数最终处在 3.5 左右的舒适范围内，-20℃工况下热舒适指数最终稳定在 3 左右。

此外，三种工况下的固定座椅表面温度加热方式也均极为舒适，但由于外界不同环境温度所需的最适座椅表面温度也不同，因此要控制最适座椅表面温度分别恒定在不同的外界环境温度下实现难度较大。而相较于固定座椅表面温度以及固定功率持续座椅加热方式，间歇式加热不仅可以使人体快速达到所需的热舒适水平，而且也能更快的稳定在舒适状态，整体热舒适水平也更优于固定功率持续座椅加热策略。

5.4 不同策略下座椅加热能耗分析

为了达到在初期快速提高人体热舒适状态的目的,间歇式座椅加热策略的前 600s 采用固定功率持续加热,而在 600s~3600s 时采用间歇加热,所以首先计算前 600s 的能耗,并与固定功率及固定座椅表面温度两种加热策略在该时段的能耗相比较,结果如表 5-6 所示。

表 5-6 不同策略在前 600s 内座椅加热能耗

工况	0℃	-10℃	-20℃
固定功率	0.01kw·h	0.013kw·h	0.02kw·h
固定座椅表面温度	0.02kw·h	0.034kw·h	0.046kw·h
间歇加热	0.02kw·h	0.033kw·h	0.047kw·h

由表 5-6 可知,在前 600s 内固定座椅表面温度持续加热和间歇式座椅加热因为要快速达到最适座椅表面温度,需要更大的加热功率,所以能耗均大于固定功率加热方式。在不同策略下,外界环境温度越低时,不仅加热功率越大,所需能耗也越大。

因为间歇式座椅加热在 600s~1800s 是 4s 开/4s 关策略,在 1800s~3600s 是 4s 开/5s 关策略,所以在 600s~3600s 间歇时段内该座椅加热开启的总时长为 1400s。分别计算出各策略在间歇时段下的能耗如表 5-7 所示,在 3600s 内的总能耗如表 5-8 所示。

表 5-7 不同策略在间歇时段下座椅加热能耗

工况	0℃	-10℃	-20℃
固定功率	0.05kw·h	0.067kw·h	0.1kw·h
固定座椅表面温度	0.048kw·h	0.063kw·h	0.1kw·h
间歇加热	0.039kw·h	0.062kw·h	0.078kw·h

表 5-8 不同策略下座椅加热总能耗

工况	0℃	-10℃	-20℃
固定功率	0.06kw·h	0.08kw·h	0.12kw·h
固定座椅表面温度	0.068kw·h	0.097kw·h	0.146kw·h
间歇加热	0.059kw·h	0.095kw·h	0.125kw·h

由表 5-7 可知,在间歇时段内,间歇式座椅加热的能耗均低于固定加热功率和固定座椅表面温度两种加热策略,这是因为间歇加热的功率虽然更大,但其所用加热时间更少,因此在间歇时段内能耗更低。随着加热时间越长,在加热功率不变的情况下,间歇式座椅加热的加热时间相较于另两种策略更少,总能耗也只

会更低。

5.5 本章小结

本章首先通过对固定加热功率以及固定座椅表面温度两种座椅加热策略进行仿真分析，探究了不同策略下乘员的热舒适性变化情况。分析发现随着座椅初始温度的不同，维持乘员热舒适性的最佳加热功率或最佳座椅表面温度均有所不同。然后基于不同工况下人体的热舒适性及能耗分析，设计了一种新型间歇式座椅加热策略，相较于固定加热功率和固定座椅表面温度两种策略，本章设计的间歇式座椅加热可以在更短的时间内使人体达到最佳舒适状态，且随着座椅加热开启的时间越长消耗的电能也更少。这种基于档位设计的间歇式座椅加热策略，不仅能够自主适应外界不同的低温环境，而且在快速提高人体热舒适性的同时也具有足够的安全保证。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

作为现代社会不可或缺的交通工具,汽车的发展及其技术的革新也在一定程度上推动着社会的发展与进步。随着汽车行业的不断发展与进步,人们对于汽车的需求也不再单纯作为日常出行的代步工具,更是增加了对人体舒适性、智能化及能耗控制的需求,这也是汽车行业中智能座舱发展的重要方向。本文为了更好地对车舱乘员热舒适性的变化及改善情况进行研究,采用客观热舒适性仿真方法,以热舒适性指标定义不同的热舒适水平,并通过反向建模建立乘员舱热负荷模型,在添加假人模型后模拟不同环境工况下人体热舒适性的变化。基于该仿真方法,本文分别从舱内湿度、流场以及座椅加热辅助空调系统三个方面探究了人体热舒适性的变化情况,最终得出了改善车舱乘员热舒适性的最佳相对湿度,以及最适流场分布和座椅加热策略。这些结论旨在辅助空调系统共同提高舱内驾乘人员的热舒适性,同时也保证了对能耗的控制,为智能座舱的研究提供了参考,具体结论总结如下:

(1) 建立了乘员舱热仿真模型。通过实车测量,首先对乘员舱进行反向建模,得到了仅保留车舱壁面及座椅区域的简易模型。然后通过对人体与周围环境热传递过程的理论分析,确定了便于数值模拟的 FIALA 人体热调节模型,并基于热仿真软件添加到乘员舱模型中,完成乘员舱热仿真模型的建立。

(2) 建立了客观热舒适性仿真评价方法,并通过试验验证了该方法的可靠性。本文主要基于热仿真软件分析人体热调节反应量及皮肤温度的变化,并结合客观评价指标来反映人体热舒适性的变化情况。为了验证该仿真评价方法的可靠性,通过试验完成了受试者局部皮肤温度的测量以及对周围热环境的主观评价,与仿真结果对比分析发现,人体热舒适性主、客观评价结果基本一致,且皮肤温差数据误差较小,最大约 7.1%,满足工程前期预研需求及计算所需精度。

(3) 在夏季制冷和冬季采暖两种工况下探究了人体热舒适响应指标的变化,得出不同工况下使人体更快达到舒适状态的最佳相对湿度,为后续研究确定了最佳湿度边界设置。研究发现,在制冷工况下,控制车舱相对湿度在 40%更为合适,此时人体能在当前工况下更快的到达最佳舒适状态;在采暖工况下,则控制车舱

相对湿度在 40%~60% 的范围内均会使人体更快的达到舒适状态。

(4) 在确定最适湿度后, 基于 CFD 仿真软件分析了乘员舱流场的分布情况, 并将速度场数据单向耦合至热分析软件中, 进而探究了不同流场对乘员热舒适性的影响。通过前后排空调出风口的仿真结果对比分析发现, 后排出风口对前排乘员几乎没有影响, 但能显著提高后排乘员的热舒适性。通过改善后排空调出风口位置发现, 相较于传统中央扶手箱出风口, 顶棚出风口更有利于后排乘员热舒适性的改善, 可以使后排乘员更快的达到舒适状态。

(5) 完成了新型间歇式座椅加热策略的开发。首先通过对固定加热功率以及固定座椅表面温度两种座椅加热策略的仿真分析, 确定了维持乘员热舒适性的最佳加热功率和最适座椅表面温度。然后基于不同工况下人体热舒适性及能耗的变化, 设计了一种更适用于工程应用的新型间歇式座椅加热策略, 不仅可以在更短时间内使人体达到最适状态, 而且时间越长其消耗的电能也越低。最后对该策略进行了不同档位的划分, 使其能够自主适应外界不同的低温环境, 提高了智能化, 而且在快速提高人体热舒适性的同时也具备足够的安全保证。

6.2 展望

本文主要通过对舱内湿度、流场及座椅加热的研究寻求辅助空调系统快速提高车舱乘员热舒适性的方法, 并保证舱内能耗需求。但由于能力和时间的限制, 尚存在些许不足有待进一步完善和提高, 主要可通过以下几方面进行改善和优化:

(1) 传统的空调系统依据温度、湿度等参数进行控制, 无法实时响应乘客个体的差异性变化, 因此若以人体热舒适性为目的, 可建立基于热舒适控制的车载空调系统。如将雷达或热像仪技术应用在车舱内, 通过实时监测人体热量浮动及舒适性变化, 对人体热数据进行分析, 并基于反馈机制自适应调节空调系统, 以优化车舱热环境, 提升乘员热舒适性。

(2) 可通过控制算法将本文开发的座椅加热策略加入到整车控制系统, 并进行整车试验测试, 结合实车试验数据量化分析该控制策略的实际效果。

(3) 基于本文建立的客观热舒适性仿真方法, 后续可对座椅通风策略进行深入的研究, 分析在夏季制冷工况下座椅通风辅助空调系统对人体热舒适性及车舱能耗的改善情况。

参考文献

- [1] Arena F, Pau G, Severino A. An overview on the current status and future perspectives of smart cars[J]. Infrastructures, 2020, 5(7): 53.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 1-192.
- [3] Luo J, Chen G, Xie P, et al. Research progress of human thermal comfort in vehicle passenger compartment based on computational fluid dynamics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2024: 09544070241306826.
- [4] Zhou X, Lai D, Chen Q. Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions[J]. Building and environment, 2019, 149(2): 109-119.
- [5] Nastase I, Danca P, Bode F, et al. A regard on the thermal comfort theories from the standpoint of Electric Vehicle design—Review and perspectives[J]. Energy Reports, 2022, 8(12): 10501-10517.
- [6] Rugh J, Hovland V. National and world fuel savings and CO2 emission reductions by increasing vehicle air conditioning COP[C]. Automotive Alternate Refrigerant Systems Symposium. Scottsdale: SAE, 2003: 58.
- [7] Chen B, Lian Y, Xu L, et al. State-of-the-art thermal comfort models for car cabin Environment[J]. Building and Environment, 2024, 262(8): 111825.
- [8] Wang J, Xie X, Hu X, et al. Research on Thermal Comfort of Human Body Under Localized Automotive Air Conditioning[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2025, 17(1): 011002.
- [9] Abou Jaoude R, Thiagalingam I, El Khoury R, et al. Berkeley thermal comfort models: Comparison to people votes and indications for user-centric HVAC strategies in car cabins[J]. Building and Environment, 2020, 180(8): 107093.
- [10] Lizák P, Mojumdar S C. Influence of the material structure on the thermal conductivity of the clothing textiles[J]. Journal of Thermal Analysis and

- Calorimetry, 2015, 119(2): 865-869.
- [11] Koelblen B, Psikuta A, Bogdan A, et al. Thermal sensation models: Validation and sensitivity towards thermo-physiological parameters[J]. Building and Environment, 2018, 130(2): 200-211.
- [12] 程思淇. 基于热舒适性的汽车空调系统能耗分析[D]. 吉林大学, 2024.
- [13] Gil-Sayas S, Di Pierro G, Tansini A, et al. Energy consumption of mobile air-conditioning systems in electrified vehicles under different ambient temperatures[J]. International Journal of Engine Research, 2024, 25(2): 293-304.
- [14] 孙畅, 姜远征, 赵国明. 冬季室内相对湿度对热舒适性的影响[J]. 洁净与空调技术, 2019, (03): 29-30.
- [15] Alahmer A, Omar M, Mayyas A R, et al. Analysis of vehicular cabins' thermal sensation and comfort state, under relative humidity and temperature control, using Berkeley and Fanger models[J]. Building and environment, 2012, 48(2): 146-163.
- [16] Li C, Liu H, Li B, et al. Seasonal effect of humidity on human comfort in a hot summer/cold winter zone in China[J]. Indoor and Built Environment, 2019;28(2): 264-277.
- [17] Lam C K C, Cui S, Liu J, et al. Influence of acclimatization and short-term thermal history on outdoor thermal comfort in subtropical South China[J]. Energy and Buildings, 2021, 231(1): 110541.
- [18] Li B, Du C, Tan M, et al. A modified method of evaluating the impact of air humidity on human acceptable air temperatures in hot-humid environments[J]. Energy and Buildings, 2018, 158(1): 393-405.
- [19] 谭礼斌, 袁越锦, 黄灿, 等. 基于 STAR-CCM+的整车空调系统计算流体力学模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11353-11358.
- [20] Turgut E, Yardımcı U. The effect of air conditioning positions, air conditioning fluid speed, and temperature on thermal comfort in the truck cabin[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(6): 3171-3179.
- [21] Oh J, Choi K, Son G, et al. Flow analysis inside tractor cabin for determining air conditioner vent location[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169:

- 105199.
- [22] 吕鸿斌, 陈博, 高天元, 等. 基于流场和温度场的轿车乘员舱热舒适性分析[J]. 汽车工程, 2020, 42(02): 234-239.
- [23] Nielsen P V. Description of supply openings in numerical models for room air distribution[J]. ASHRAE Transaction, 1992, 98(1): 963-971.
- [24] Zhang H, Dai L, Xu G, et al. 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[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(10): 2022-2027.
- [25] Ahmad Shafie N E, Mohamed Kamar H, Kamsah N. CFD simulation of air temperature inside a bus passenger compartment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 735: 85-90.
- [26] Sen S, Selokar M. Numerical Simulation and Validation of Cabin Aiming and Cool-Down of a Passenger Car[J]. SAE 2016, 9(1): 52-61.
- [27] 曹凡. 基于 CFD 的房车内流场分析与热舒适性研究[D]. 山东理工大学, 2019.
- [28] 曹红军, 吉扬, 熊乐, 等. 基于 CFD 分析的电动客车电器舱温度场优化[J]. 客车技术与研究, 2023, 45(03): 19-22.
- [29] 李兴. 某型轿车驾驶舱空调系统流场分析[D]. 北方工业大学, 2024.
- [30] He Y, Wang X, Li N, et al. Heating chair assisted by leg-warmer: A potential way to achieve better thermal comfort and greater energy conservation in winter[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 1106-1116.
- [31] Jia C, Zhang Z, Li S, et al. Study on the effects of personal heated table mats on the comfort level of large office space heated by air-conditioner[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 42: 102731.
- [32] 杨洁. 汽车乘员舱热舒适性主客观试验与评价[D]. 重庆大学, 2020.
- [33] WEIWEI H, YAXIAN C, YUNXU J, et al. Research on the thermal comfort of passenger compartment based on the PMV/PPD[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 184: 107876.

- [34] 李伟健, 陈吉清, 兰凤崇, 等. 驾乘舱非均匀热环境中人体热生理响应与主观热感觉相关性分析[J]. 汽车工程, 2022, 44(01): 131-141.
- [35] PASUT W, ZHANG H, ARENS E, et al. Energy-efficient comfort with a heated/cooled chair: Results from human subject tests[J]. Building and Environment, 2015, 84: 10-21.
- [36] HAJIME O, KOTARO Y, Koji T, et al. Effects of heated seat and foot heater on thermal comfort and heater energy consumption in vehicle[J]. Ergonomics, 2011, 54(8): 690-699.
- [37] 邹莹, 赵敬德, 邹钺. 纯电动汽车内个性化采暖的热舒适试验[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(04): 636-642.
- [38] YANG H, CAO B, ZHU Y. Study on the effects of chair heating in cold indoor environments from the perspective of local thermal sensation[J]. Energy & Buildings, 2018, 180: 16-28.
- [39] 梁远情. 电动汽车座舱热负荷预测模型及智能新风控制策略研究[D]. 安徽工程大学, 2024.
- [40] Seebacher F, Little A G. Plasticity of performance curves can buffer reaction rates from body temperature variation in active endotherms[J]. Frontiers in Physiology, 2017, 8: 575.
- [41] Li W, Chen J, Lan F, et al. Numerical projection on occupant thermal comfort via dynamic responses to human thermoregulation[J]. International Journal of Automotive Technology, 2022, 23(1): 193-203.
- [42] 郑习娇. 汽车乘员动态热反应及热舒适性研究[D]. 华南理工大学, 2018.
- [43] JINGXIAN X, AGNES P, JUN L, et al. Evaluation of the convective heat transfer coefficient of human body and its effect on the human thermoregulation predictions[J]. Building and Environment, 2021, 196: 107778.
- [44] 陈吉清, 郑习娇, 兰凤崇, 等. 基于人体热调节模型的乘员舱热舒适性分析[J]. 汽车工程, 2019, 41(06): 723-730.
- [45] 陈吉清, 李晓婷, 兰凤崇, 等. 非均匀热环境人体局部热响应对整体热感觉影响差异性分析[J]. 汽车工程, 2023, 45(11): 2034-2046.
- [46] ZAINOL N Z, TAP M M, KAMAR M H, et al. Heat Transfer Model to Predict

- Human Skin Temperature under Comfort Level by using Bioheat Equation[J]. International Journal of Online and Biomedical Engineering, 2019, 15(10): 52-64.
- [47] GANI J D, MIR A, M. I A, et al. Estimation of Heat Diffusion in Human Tissue at Adverse Temperatures Using the Cylindrical Form of Bioheat Equation[J]. Mathematics, 2022, 10(20): 3820.
- [48] Tian J J, Levy M, Zhang X, et al. Counteracting health risks by Modulating Homeostatic Signaling[J]. Pharmacological research, 2022, 182: 106281.
- [49] ISO 7730: 2005, Ergonomics of the Thermal Environment—Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria[S]. Geneva: ISO, 2005.
- [50] Cui W, Cao G, Ouyang Q, et al. Influence of dynamic environment with different airflows on human performance[J]. Building and environment, 2013, 62: 124-132.
- [51] 李亮. 制冷工况下某轿车乘员舱热舒适性分析与优化[D]. 重庆理工大学, 2021.
- [52] 侯郡阳. 某款汽车空调总成配风特性研究[D]. 吉林大学, 2018.
- [53] Roelofsen P. A comparison of the dynamic thermal sensation between the modified Stolwijk model and the Fiala thermal physiology and comfort (FPC) model[J]. Intelligent Buildings International, 2020, 12(4): 284-294.
- [54] 钱振东. 基于不同活动水平的微型建筑室内热环境及人体热舒适性研究[D]. 扬州大学, 2019.
- [55] GB/T 24254-2009, 纺织品和服装 冷环境下需求热阻的确定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [56] Liang L, Li M, Liu N, et al. A high-sensitivity optical fiber relative humidity sensor based on microsphere WGM resonator[J]. Optical Fiber Technology, 2018(11), 45: 415-418.
- [57] Hao J, Lu E. Variation of Relative Humidity as Seen through Linking Water Vapor to Air Temperature: An Assessment of Interannual Variations in the Near-Surface Atmosphere[J]. Atmosphere, 2022, 13(8):1171.
- [58] Liang Y, Wang J, Wang S. Intelligent Control Strategy of Fresh Air Volume in Cabin Under Heating Condition and Evaluation of Its Energy-Saving Effect[J].

- Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2023, 15(9): 091009.
- [59] Wang S, Ren S. Research on automotive seat heating strategy based on objective thermal comfort evaluation[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2024, 16(4): 041008.
- [60] Su X, Yuan Y, Wang Z, et al. Human thermal comfort in non-uniform thermal environments: A review[J]. Energy and Built Environment, 2024, 5(6): 853-862.
- [61] He X, Zhang X, Zhang R, et al. More intelligent and efficient thermal environment management: a hybrid model for occupant-centric thermal comfort monitoring in vehicle cabins[J]. Building and environment, 2023, 228: 109866.
- [62] Huo W, Cheng Y, Jia Y, et al. Research on the thermal comfort of passenger compartment based on the PMV/PPD[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 184(2): 107876.
- [63] 王亚龙, 张喜清, 张浩杰. 基于 PMV-PPD 的装载机驾驶室热舒适性分析[J]. 太原科技大学学报, 2024, 45(01): 38-43.
- [64] Zare S, Hasheminezhad N, Sarebanzadeh K. Assessing thermal comfort in tourist attractions through objective and subjective procedures based on ISO 7730 standard: A field study[J]. Urban climate, 2018, 26(12): 1-9.
- [65] Cheung T, Schiavon S, Parkinson T, et al. Analysis of the accuracy on PMV-PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II[J]. Building and Environment, 2019, 153(4): 205-217.
- [66] Angelova R A, Velichkova R. Thermophysiological comfort of surgeons and patient in an operating room based on PMV-PPD and PHS indexes[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1801.
- [67] Yao H, Zhang P, Huang Y, et al. Highly efficient clean water production from contaminated air with a wide humidity range[J]. Advanced Materials, 2020, 32(6): 1905875.
- [68] Sekiguchi Y, Benjamin C L, Dion S O, et al. Changes in hydration factors over the course of heat acclimation in endurance athletes[J]. International journal of sport nutrition and exercise metabolism, 2021, 31(5): 406-411.
- [69] Piallat B, Davin A, Torres-Martinez N, et al. Frequency-dependent deep brain

- p>stimulation of the lateral hypothalamic area modulates arousal level and core body temperature in healthy and parkinsonian monkey[J].
- Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation*
- , 2025, 18(1): 538-539.
- [70] Tveita T, Sieck G C. Physiological impact of hypothermia: the good, the bad, and the ugly[J]. *Physiology*, 2022, 37(2): 69-87.
- [71] Su Y, Fan Y, Liu G, et al. A review on sustainable method to evaluate heat and moisture transfer in clothing material[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2747.
- [72] Yang R, Wu Z, Qian X, et al. Development of thermal resistance prediction model and measurement of thermal resistance of clothing under fully wet conditions[J]. *Textile Research Journal*, 2023, 93(3-4): 911-924.
- [73] 赵鑫. 基于 LabVIEW 的汽车空调风量测试系统设计与研究[D]. 天津科技大学, 2013.
- [74] 崔金利. 汽车出风口布置要求及刚度分析[J]. *汽车实用技术*, 2024, 49(17): 70-73.
- [75] 崔学平, 李桂强. 乘用车整车气流与泄漏量研究[J]. *汽车电器*, 2015, (05): 6-8.
- [76] 王华伟, 朱帅, 王博, 等. 汽车空调风道风量分配和气动噪声优化研究[J]. *机械设计与制造*, 2024, (04): 346-350.
- [77] Chen S, Xue D, Li Q, et al. Thermal comfort of automobile driver based on local air conditioning vent arrangement[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2023, 24(4): 945-954.
- [78] 王瑞, 栗玮, 高剑峰, 等. 基于暖体假人的汽车空调热舒适性评价[J]. *人类工效学*, 2021, 27(04): 61-65.
- [79] FLORIN B, VLAD N B, LUCIAN T F, et al. Improving Electric Vehicle Range and Thermal Comfort through an Innovative Seat Heating System[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5534.
- [80] CVOK I, ŠKUGOR B, DEUR J. Control trajectory optimization and optimal control of an electric vehicle HVAC system for favourable efficiency and thermal comfort[J]. *Optimization and Engineering*, 2020, 22(1): 83-102.

- [81] 王建彬, 梁远情, 汪爽. 制冷工况下汽车座舱新风比例智能控制策略及节能效果评价[J]. 汽车工程, 2023, 45(01): 147-156.
- [82] 汪琳琳, 焦鹏飞, 王伟, 等. 新能源汽车低温热泵型空调系统研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(12): 1744-1750+1757.
- [83] MAGHAIREH M, HOPPE M. Multi-Zone HVAC Development and Validation with Integrated Heated/Vented Seat Control[R]. SAE Technical Paper, 2020, 01: 1247.
- [84] Warthmann A, Kohri I, Ozeki Y, et al. Equivalent contact temperature (ECT) for personal comfort assessment—analytical description and definition of comfort limits[J]. Ergonomics, 2024, 67(2): 207-224.
- [85] PIRKO M, L T P, G D G. Car seat heaters: a potential hazard for burns[J]. The Journal of burn care & rehabilitation, 2003, 24(5): 315-316.
- [86] Mallette M M, Gur-Arie N, Gerrett N. A Local Heating Profile to Manage Lower Back Pain in an Automotive Seat: A Pilot Study[J]. Bioengineering, 2024, 11(10): 1040.

攻读硕士学位期间发表学术论文及参研项目

一、发表学术论文

[1] Wang S, Ren S. Research on Automotive Seat Heating Strategy Based on Objective Thermal Comfort Evaluation[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2024, 16(4): 041008. DOI:10.1115/1.4064668

[2]任思源,柳士江,王刚等. 基于相对湿度影响下的冬季车舱乘员热舒适响应特性研究[J] 安徽工程大学学报, 2025, 40(01): 15-21.

二、参研项目

[1] 智能座舱热舒适性与节能控制方法研究——QCKJ202208B 开放基金

[2] 安徽省发改委新能源汽车专项（皖发改产业函[2019]534 号）

致谢

三年的研究生时光匆匆而过，在这三年的研究生生涯中，我经历过很多困难与迷茫，但所幸我都坚持了下来，最终也收获了很多，而今已经到了快要离开的时候了，在此，我想向所有在我学术旅程中给予过我帮助和支持的人表达我最诚挚的谢意。

首先我要感谢我的导师王建彬教授，在三年的研究生学习和生活中，王老师均给予了我热情的关怀，并指导我顺利毕业。同时王老师严谨的治学态度、高瞻远瞩的学术眼光、务实的工作作风以及为人处事的态度都对我产生了很大的影响，让我受益匪浅。能够成为王老师的学生，聆听他的教诲，我深感荣幸，王老师的栽培之恩，我永生难忘。

还要特别感谢我的指导老师汪爽老师，从课题的制定、研究方案、研究方法，每一步都凝聚着老师的潜心指导和帮助，汪老师精益求精的研究态度和广阔的知识面令我感触颇深，也使我受益匪浅。当我在研究中遇到困难或没有头绪的时候，汪老师总能第一时间为我指明方向，教我研究方法，并指导我去解决困难，这对我的学术、科研能力以及心智的成长均有着很大的帮助。同时，还有周超群老师教会了我很多解决问题、勇于创新的能力，非常感谢老师们的良苦用心，无论以后遇到任何困难，我都一定会牢记老师的教诲，勇敢去面对困难，解决困难。

另外还要特别感谢课题组所有的兄弟姐妹们，无论在我的课题研究中还是生活中均为我提供了很多帮助。感谢我的师姐梁远情，即使已经毕业了，但依然帮助我解决了很多研究中遇到的困难；感谢同门好友张红松、胡家乐和张伟，为我的课题研究提供了很多宝贵意见和帮助；也感谢我的师弟师妹们，大家一直在相互鼓励，共同进步，感谢大家。

最后我要特别感谢我的家人，特别是我的父母，感谢你们始终如一的理解、支持和鼓励，是你们让我在学术的道路上不畏艰难，一路前行，我一定会好好努力，不辜负你们的期望。还要郑重地感谢我的大学，感谢安徽工程大学为我提供优质的教育资源与学习环境，使我能够顺利的完成学业并完成本论文。再次感谢所有支持和帮助过我的人，是你们的陪伴让我走到今天，衷心的祝愿所有人永远健康快乐！

尚德敏学 唯实惟新

