

氢燃料电池客车乘员舱热舒适性研究综述

蔡思远 刘丛浩* 井绪宝

辽宁工业大学, 辽宁 锦州 121012

[摘要] 为了了解目前新能源客车乘员舱热舒适性的研究动态, 反映新能源客车乘员舱热舒适性的发展趋势并为相关研究提供依据与新思路, 文中对相关专题研究论文的主要观点、数据等资料进行了归纳整理、分析与提炼。文中主要从三个部分展开阐述, 一是前言部分, 二是国内外研究现状, 三是总结部分。在前言部分主要介绍了关于乘员舱热舒适性研究的背景、目的与意义, 以及氢燃料电池汽车乘员舱热舒适性研究的社会及经济价值。在国内外研究现状部分, 主要介绍了在本课题的相关方向上, 国内外的学者们都进行了哪些方面的研究, 有哪些观点, 并对各个研究进行了比较, 找出问题的焦点。在总结部分, 主要对前人的成果进行了总结, 以及对相关研究的发展趋势做出了预测。

[关键词] 氢燃料电池客车; 热舒适性; 综述

DOI: 10.33142/sca.v5i2.6162

中图分类号: U469.1

文献标识码: A

Review on thermal comfort of passenger cabin of hydrogen fuel cell bus

CAI Siyuan, LIU Conghao*, JING Xubao

Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning, 121012, China

Abstract: In order to know the current study about thermal comfort which passenger compartment of new energy bus, reflect the development trend of thermal comfort of passenger compartment of new energy bus, and provide basis and new ideas for relevant research, this paper summarizes, analyzes and refines the main viewpoints and data of relevant special research papers. This paper mainly expounds from three parts: the preface, the research status and the summary. In the preface, it tells the background, purpose and significance of the research on the thermal comfort of passenger compartment, as well as the social and economic value which the research on the thermal comfort of passenger cabin of hydrogen fuel cell vehicle. In the part of research status, it mainly introduces what aspects scholars at home and abroad have carried out in the pertinent direction of this topic and what views they have, as well as compares various studies to find out the focus of the problem. In the summary part, it mainly summarizes the previous achievements and forecasts the development trend of relevant research.

Keywords: Car heater; Thermal comfort optimization; AMESims

引言

近年来, 我国的汽车行业蓬勃发展, 汽车产业以其产业链长并且消费面广的优势, 在社会经济的发展中起到了不可忽视的作用, 成为了国民经济的重要支柱产业^[1]。燃料电池客车是新能源汽车的重要组成部分, 将氢气作为主要能源, 对于促进我国汽车客运行业的可持续发展有着重要作用^[2], 而燃料电池客车在冬季时是否具有快速升高车舱温度及达到舒适温度的能力也成为了各大车企在激烈的市场竞争中脱颖而出的重要因素。燃料电池客车的车舱具有空间紧凑、空气流通性低、不均匀性、隔热性差等特点, 因此舒适的乘员舱环境也成为了汽车行业重点研究的问题。2022年北京冬奥会的运动员客车就是氢燃料电池客车, 为了给运动员们创造最为安全舒适的乘车环境, 对于乘员舱内的温度把控就更为严格, 对其研究也就尤为重要了。

燃料电池客车相较于传统客车的热效率更高, 燃料电池系统热效率一般约为 35%~45% (理论值 41%), 而传统发动机热效率约 30%左右^[3], 而对于散热的要求及余热利

用的要求也更高, 对乘员舱进行加热就是最为普遍的余热利用方式之一。在寒冷的冬季时, 利用燃料电池余热的水暖式暖风系统可以快速提高客车内温度, 提升汽车的舒适性, 并有效的利用能源。车内散热器数量、出风温度、风速等因素对这种暖风系统的性能都有着重要影响。因此对于暖风系统的设计及优化是氢燃料电池客车余热利用的关键因素之一。

车舱外的环境温度、太阳辐射、乘员自身散热等因素都决定了汽车暖风系统制热载荷的大小。通过改变客车水暖装置的进水温度、散热器风扇的风速、散热器的数量及摆放位置等方式都可以调节车舱内的温度、空气流速以及空气均匀性, 进而改变乘员舱的热环境。因此乘员舱内的温度及乘员的热舒适性也是评价乘员舱热环境的最重要参数。

一直以来车舱内的人体热舒适性都是汽车技术研究的重点方向, 热舒适性是指人从生理到心理对环境温度所感到舒适的特性^[4], 自 Fanger 教授提出的评价热舒适性的 PMV 方法被广泛认可后, 关于汽车车舱的热舒适性问题

就成为了许多学者重点研究的问题。PMV 方法是基于测试环境的温度、出风速度、湿度以及各类辐射等所进行的热舒适性客观评价,此方法得到的结果具备客观性与稳定性,并能使不同的结果进行比较与重复出现。现如今,PMV-PDD 是最常用的以评价汽车热舒适性的指标,其主要从人体平均热感觉 (PMV) 与不适人员比例 (PDD) 两个方面对人的热舒适性做出评价。热舒适性不仅能够影响人体的感受,其也是影响汽车安全的一个重要指标,舒适的温度可以减轻驾驶人员的疲劳感与不适感,提高行车安全性。

车舱内人体自身的辐射散热及座椅等设施散热均会影响车舱内的温度场及流场的变化,因此对乘客数量对客车乘员舱温度场的影响趋势进行研究也是十分重要的,同时其也是影响车舱内热舒适性的一个重要因素。

1 国内外研究现状

随着汽车技术的不断发展,人们对于车舱内热环境的要求也越来越高。为了使车舱的温度能快速升高、保证乘员的舒适性并且对燃料电池客车的余热进行利用,近些年来许多的国内外学者们对车舱的温度问题进行了研究。随着诸如 AMESim、Fluent 等一维及三维软件的发展普及,对于燃料电池汽车车舱温度等问题的研究也日益趋向成熟,国内外的许许多多的研究人员也一直聚焦于这个问题。

1.1 乘员舱温度场研究现状

Oh M S 等人基于 CFD 方法,采用热指标的经验关联式,通过调节空调的送风速度、温度以及前部、顶部出风口的送风比例来分析车舱内的温度变化,利用计算流体力学方法分析了有前部和顶部通风孔的乘员舱内热舒适性。此外,还测量了空调机组在不同风量和风温下的性能来探究具有前、后排风口的局部空调系统的节能效果。Shafie 等使用了 Fluent 软件建立了四分之一的公交车模型,采用标准 $k-\epsilon$ 模型进行湍流分析,以研究不同送风参数下的空气流场情况。

不仅国外的学者在对此问题进行研究,国内的学者们也在此方向有所建树。黄强等^[5]建立了车舱计算流体力学模型,采用了标准湍流模型以模拟流动的空气,并利用 Fluent 软件模拟仿真了太阳照射下乘员舱的温度场,通过与实车测试结果的对比表明了 CFD 技术能较好的模拟温度场变化,为乘员舱内温度场的设计与改进提供了有效的技术支持。虽然该研究很好的表明了乘员舱内温度场的变化,但其只考虑了自然状况下乘员舱的温度变化,而没有对车舱制冷或制暖情况进行研究。吴清清等^[6]研究了汽车在制冷工况下乘员舱的热环境变化和人体舒适性情况以及不同行驶状况下对乘员舱温度场的影响,通过测量车厢内各个位置的温度来分析温度场变化,并测量受试者的皮肤温度以计算舒适性指标,结果表明乘员舱温度均匀度在路试状态比怠速工况下高。崔津楠^[7]使用 CFD 方法对某车型的乘员舱空调制冷过程进行了瞬态计算,实验显示使用 CFD 瞬态仿真得到的温度曲线与舱内的温度检测点曲线一致,证明了方案的可行性。张文安等^[8]研究了客车的

暖风系统对整车续驶里程的影响,得到了低温会加大暖风能耗,从而使续驶里程下降的结论。以上研究都只考虑了制冷工况下的乘员舱温度变化,而没有考虑制热工况。

刘建祥等^[9]为了改善汽车的采暖问题,考虑了发动机水温对乘员舱传热的影响,搭建了乘员舱瞬态升温模型,进行瞬态换热仿真,得到了乘员舱升温时的温度场变化趋势。华从波等^[10]从更深层次上研究了发动机散热情况对乘员舱采暖的影响,其利用 flowmaster 软件,建立了乘员舱换热模型和格栅模型,并分析格栅开、关时乘员舱温度上升的速度,结果表明关闭格栅后乘员舱温度上升速度更快。杜兴慧等^[11]则没有研究乘员舱的热流场而是从热负荷入手,研究了冬季时乘员舱的热负荷随着各种因素影响的变化,其研究了汽车的车顶、玻璃、座椅、车门等车身体部件自身散热对乘员舱热负荷的影响,其研究结果也为客车供暖设备的设计与优化提供了理论依据。

1.2 乘员舱热舒适性研究现状

以上学者们都主要将研究重点聚焦于汽车在制冷或制热情况下乘员舱内温度场及流场的变化上,但没有重点研究乘员舱温度对人体舒适程度的影响,而关于乘员舱热舒适性的研究也是一个很广泛的课题了,许多优秀的学者都对其进行了研究。

Piao Canghao 等基于 AEMSim,对车舱内升温时的温度和湿度进行了仿真分析,以评价车舱的热舒适性。Moon J H 等考虑了太阳辐射对乘客舱热舒适性的影响,通过使用三维仿真软件 Fluent,进行了计算流体动力学仿真,以准确预测供暖、通风和空调系统运行条件下的热场和流场。结果表明,当考虑太阳辐射时,驾驶员和乘客附近的温度增加了约 $1-2^{\circ}\text{C}$,空气温度的微小差异导致隔间内的热舒适性发生了很大变化。Danca 等利用测量乘员舱内不同位置的温度与风速来计算 PMV-PPD 热舒适评价指标,通过实验与模拟结果进行对比验证,但没有考虑人体自身散热对乘员舱热环境的影响。Hodder 等研究了太阳辐射的强度、光谱分布和穿过玻璃的种类对车舱内人体热舒适的影响,结果显示太阳辐射强度对人体的热舒适性影响程度最大。Thirumal 等采用计算流体力学 (CFD) 方法,讨论了座舱的空气质量问题与人体负荷不同的情况下座舱的热舒适性。

叶立等^[12]建立了某 SUV 车舱的三维模型,并通过 STAR-CCM+完成网格划分以及数值求解来模拟人体舒适性情况,采用 PMV-PPD 热舒适评价体系和相对湿度 RH 以表现人体的热舒适程度。张炳力等^[13]对客车的取暖系统进行了匹配计算,以研究其暖风性能,并使用 AMESim 进行仿真,以提高暖风性能。张丹等^[14]综合考虑了车舱与外界的太阳辐射和车舱内部的辐射两种情况,进行了乘员舱流场与温度场之间联合仿真,以评价车舱的舒适性。

在进行乘员舱热舒适性研究中,有一个因素是不可忽视的,那就是人体自身辐射的热量对乘员舱热环境及热舒适性的影响。Zhang Wencan 等^[15]采用离散热电偶网络,

测量了车厢内多个位置的空气温度,以评估车厢内的瞬态温度分布,并使用ASHRAE标准提出的七点热舒适性调查问卷评估局部热感觉,讨论皮肤温度与热感觉之间的关系,在冬季时,华南地区怠速车辆的车舱内的升温情况作了研究,结果显示,车内空气温度在乘员舱内高度不均匀且乘员坐的位置对乘员的热反应有显著影响。王瑞等^[16]利用汽车风洞实验室搭建了测试环境,使用会发热的暖体假人来模拟人体自身的发热情况,通过测量暖体假人各个部位的温度来分析车内非均匀环境的热舒适性,结果表明通过测试基于假人的等效空间温度可以预测环境的热舒适性。陈吉清等^[17]基于人体热调节模型对乘员舱的热舒适性进行了研究,其综合考虑了车舱的环境因素以及人体代谢、服装热阻等因素的影响,计算人体各个部分的温度变化以分析人体自身散热与热舒适性之间的关系,结果表明乘员舱热环境模型与人体热调节模型耦合的方法可以可靠地反应乘员舱动态温度变化以及热舒适性变化。

1.3 取暖方式研究现状

李四旺等^[18]对于出风口叶片角度对舒适性的影响进行了研究,其通过STAR-CCM+进行车舱内的热流场仿真,并设置了不同的人体部位温度检测点以分析人体舒适性,在几组不同的送风角度下结合热舒适性指标对车舱的温度场、流场进行了分析,结果表明当出风口的第一排叶片的角度为 50° 时最为舒适。

2 总结

由上述国内外研究现状可知,目前对燃料电池客车乘员舱温度问题的研究的主要聚焦于以下几个方面:

(1) 乘员舱内温度的瞬态变化

通过设定环境参数(温度、车速、太阳辐射等)以及送风参数(风速、初始温度等),并使用三维仿真软件例如:Fluent、STAR-CCM+等进行热流体仿真,以分析乘员舱内的温度变化、流体分布均匀性等问题。但三维软件的计算量大,仿真时间长,得到结果不易并且结果容易不收敛,不适用于可变边界条件的反复仿真。

(2) 热舒适性

乘员舱的热舒适性不仅关乎乘员的自身健康,还影响着汽车的行驶安全性。热舒适性问题也一直是研究乘员舱温度的重点。目前对于人体自身散热对乘员舱温度及舒适性影响的研究有很多,但关于乘客数量不同对乘员舱影响趋势的研究仍是空白。

(3) 取暖装置的结构优化及余热利用

目前多数研究都将空调作为客车的主要制热来源,对其结构进行设计与优化以改善制热性能,从而调节乘员舱内的热环境,对于余热制热的利用也只是作为辅助热源来加热乘员舱,对以余热作为主要热源的水暖式暖风系统及其对乘员舱温度场影响的研究较少。

[参考文献]

[1]江芳.绿色低碳发展背景下我国汽车行业与居民消费

水平耦合协调关系研究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2021(12):130-133.

[2]梁满志,匡金军,陈振国,等.燃料电池客车整车热管理技术研究[J].时代汽车,2020(11):89-91.

[3]张宇阳.燃料电池客车整车热管理系统分析与探讨[J].建筑热能通风空调,2021,40(10):63-66.

[5]吴清清,柳建华,张良,等.非对称热环境下人体热舒适性模型研究进展[J].制冷学报,2020,41(2):79-86.

[10]黄强,朱玉琴,张云,等.车辆舱室流动传热及温度场分析[J].装备环境工程,2018,15(4):10-14.

[11]吴清清,柳建华,张良,等.基于热评价模型的乘员舱降温特性[J].制冷学报,2020,41(4):118-126.

[12]崔津楠.汽车乘员舱空调制冷CFD瞬态分析[J].计算机辅助工程,2012,21(6):54-57.

[13]张安文,赵强,刘焕东,等.燃料电池公交车暖风系统对续航里程的影响[J].内燃机与动力装置,2020,37(3):77-80.

[14]刘建祥,王次安,朱增怀,等.汽车发动机和乘员舱温升过程仿真建模分析[J].汽车工程师,2019(5):22-25.

[15]华从波,刘建祥,刘吉林,等.不同格栅开闭状态对发动机散热及采暖温升时间的影响分析[J].汽车实用技术,2018(15):77-79.

[16]杜兴慧,刘伟军,傅允准.轿车乘员舱内供热负荷计算及影响因素分析[J].上海工程技术大学学报,2014,28(4):322-327.

[22]叶立,张梦旻,张文韬,等.基于各评价指标的某SUV6座汽车热舒适性的研究[J].农业装备与车辆工程,2021,59(8):15-19.

[23]张炳力,张高超,窦聪.车辆采暖系统匹配计算与性能分析[J].汽车科技,2013(5):1-5.

[24]张丹,徐新洁,刘希东,等.某轻卡乘员舱热舒适性分析[J].汽车工程学报,2020,10(6):448-457.

[25]Wencan,Zhang,Jiqing,et al.Experimental study on occupant's thermal responses under the non-uniform conditions in vehicle cabin during the heating period[J].中国机械工程学报:英文版,2014,27(2):9.

[26]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(4):61-65.

[27]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(6):723-730.

[28]李四旺,黎帅,冯鸿飞.出风口叶片角度调节对整车舒适性的影响[J].制冷学报,2020,41(3):117-133.

作者简介:蔡思远(1996-),学校:辽宁工业大学;职务:研究生。