

文章编号:0253-4339(2020)02-0079-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.02.079

非对称热环境下人体热舒适度模型研究进展

吴清清^{1,2} 柳建华^{1,2} 张 良¹ 张嘉文¹ 姜林林³

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093;
3 南通职业大学电子信息工程学院 南通 226001)

摘 要 本文根据热空间模型、人体热生理模型和人体热心理模型的分类标准,对非对称热环境下人体热舒适度研究进行全面综述。热空间模型通过空调、环境参数直接预测人体客观、主观反应,人体热生理模型通过研究人体内部主动、被动生理调节预测人体生理参数,人体热心理模型侧重研究生理参数和主观反应的联系或人体如何适应热环境,最后概述了各模型的优点及局限。结果表明:热空间模型与选用的空间结构具有重大联系,一旦空间结构改变,模型建立的很多关系便无法成立,在车辆的应用领域价值更大;大多数热生理及热心理模型不够全面或仅限于特定环境,只有少数能够通过详细的体温调节解决人类对非均匀和瞬态条件的反应;Berkeley 热舒适模型同时涵盖了热生理及热心理模型,但其耦合模拟过程过于复杂,而等效温度模型虽然精度相对较低,但由于其运算简便受到更广泛的应用;自适应模型充分考虑了人的主观能动性,但仍处于初级研究阶段。

关键词 非对称热环境;热空间;热生理;热心理
中图分类号:TB61⁺1; TH122;TU831.3 **文献标识码**: A

Research Progress on Human Thermal Comfort Models in Asymmetric Thermal Environments

Wu Qingqing^{1,2} Liu Jianhua^{1,2} Zhang Liang¹ Zhang Jiawen¹ Jiang Linlin³

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2.Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, 200093, China; 3. College of Electronical and Information Engineering, Nantong Vocational University, Nantong, 226001, China)

Abstract Based on the classification criteria of thermal space models, human thermal physiological models, and human thermal psychological models, this paper gives a comprehensive review of human comfort research in an asymmetric environment. Thermal space models directly predict the objective and subjective response of humans using air conditioning and environmental parameters. Human thermal physiological models predict the physiological parameters of humans by studying active and passive physiological regulation in human bodies. Human thermal psychological models focus on the relationship between physiological parameters and subjective responses or on how the human body adapts to the thermal environment. Finally, the advantages and limitations of each model is summarized. The results show that the thermal space model has a significant relationship with the selected space structure; once the space structure changes, many of the relationships established by the model cannot be established, which is more valuable in the field of vehicle applications; most thermophysiological and thermopsychological models are not comprehensive or limited to specific environments, and only a few can address human responses to non-uniform and transient conditions through detailed body temperature regulation; the Berkeley thermal comfort model covers both thermophysiological and thermopsychological models, but its coupling simulation process is too complicated; while the equivalent temperature model has relatively low accuracy, it is more widely used due to its simple operation; adaptive model fully considers human subjective initiative, but its research is still in its infancy.

Keywords asymmetric thermal environments; thermal environment; thermal physiological; thermal psychological

对称热环境是指具有均匀的空间特征和稳态的时间特征的热环境,非对称热环境是指具有非均匀的空间特征或非稳态的时间特征的热环境。早期的人体舒适度研究多在对称热环境中展开,但是随着建筑

空间内能耗问题日益突出,以及人们对汽车车舱内热舒适度要求的提高,对非对称热环境下人体热舒适度的研究十分有意义。

根据 Y. A. Horr 等^[1]研究,人类待在建筑物内的时间约占生命的 80%~90%。随着人类在建筑物内的舒适性标准不断提高,建筑能耗不断增大。为同时满足减少能量消耗和创造热舒适环境的需要,地板送风系统^[2]、工位空调系统^[3]、局部冷却系统^[4]等个人送风系统开始普及。这些热环境都是非均匀的,为了改善这些热环境的性能,研究人体在非均匀环境下的热反应十分有必要^[5-6]。

随着城市发展和生活方式的变化,汽车成为大众消费品,汽车乘员的热舒适性也变得越来越重要。一方面,舒适的汽车热环境在许多情况下不仅有助于减少驾驶员的压力,还有助于提高驾驶的安全性;另一方面,通过科学的热管理,可以在保障人体热舒适性和获得良好的车内空气品质的同时,有效降低汽车的能量消耗。据统计,在城市商务行军中,85%的旅程在 18 km 内,行车时间约 15~30 min^[7],该阶段由于汽车空调、太阳辐射、环境辐射等因素,具有高度的非稳态和非均匀性,因此研究人体在该阶段的热舒适性是必要的。

无论是车内热环境还是建筑物内新型的送风系统,只要人体周围微环境具有非均匀或非稳态的特征,均为非对称热环境。本文将已有的关于非对称热环境下人体热舒适度的部分研究成果进行总结和分类,将研究分为热空间模型、人体热生理模型和人体热心理模型,介绍非对称热环境下人体反应的研究现状,为今后进一步的研究奠定基础。

1 热空间模型

对建筑物内新型送风系统的热空间模型研究较少,建筑物内新型送风系统研究多采用人体热生理模型或人体热心理模型。热空间模型大多针对汽车车舱内的热环境开展研究,对汽车空调、车舱边界条件和外界环境(如太阳辐射)对车厢的温度场、速度场和人体热感觉的影响进行研究,主要研究方法是实验和 CFD 模拟。

1.1 汽车空调研究

J. W. Wan 等^[8]采用 PHOENICS 来模拟车厢内的流动和温度场,特别是在供气口周围,最终找到了最佳的供气情况。C. H. Lin 等^[9]采用二维、实车五分之一的模型,模拟了汽车空调入口速度和出口位置对车内通风的影响,并利用烟气可视化及照相的方法进行测量。G. Besombes 等^[10]使用风洞控制

风速、温度、湿度、太阳辐射以及温度升降的速度。在车室内布置了 18 个温度传感器测量车内各区温度,验证数值模拟的正确性。A. Alahmer 等^[11]利用湿度计、红外热成像仪和热电偶等仪器,通过实验分析了空调湿度值对车内温度变化以及乘员热舒适性的影响,研究结果表明在制冷开始阶段,湿度值对温度和人体热舒适性的影响明显,而在稳态阶段湿度的影响作用可以忽略。

1.2 车舱边界条件及外界环境研究

A. Mezrhab 等^[12]开发了一个数值模型,该模型根据太阳辐射的变化、玻璃的种类、汽车的颜色以及车内材料的辐射特性来研究乘用车车厢内的热舒适性。Zhang Huajun 等^[13]进行了对客舱内气流及温度场的实验研究,外界的温度对冷负荷起着至关重要的作用,车厢的热舒适依赖人员的数量及其座位安排,通过改变车窗的材质来降低其透射率,可以降低冷负荷。

T. Han 等^[14]利用 RadTherm 环境下的三维模型对不同环境热负荷对乘客热舒适的影响进行了评估,计算太阳负荷和温度变化对乘客舱的影响,并与 Fluent 相结合来帮助预测在自然和冷却期间乘员周围的空气速度。G. Karimi 等^[15]提出的另一种模型是基于一个汽车乘客在冬夏工况下与座椅加热/通风环境的热相互作用的瞬态物理模型,并验证了模型预测的正确性。

热空间模型的优点是可通过对空调参数和环境参数的直接测量或模拟来获取影响人体热舒适参数的变化,从而间接推断人体的热舒适度。但是该模型受空间结构影响,一旦空间结构发生改变,很多关系变得不再明确,简短推断也变得模糊,因此通过热空间模型在热舒适评价研究领域建立一个普遍适用的模型存在局限,但其在车辆的应用领域仍有很大价值。

2 热生理模型

人体与热环境之间的传热是一个很复杂的过程,同时涉及导热、对流、辐射、蒸发和呼吸换热等。人体对各种热环境具有自我调节功能,人体会通过一系列复杂的生理活动来适应新的环境,包括血管收缩和发抖等。这两个领域研究起步较早,已取得较多的研究成果。

B. Givoni 等^[16]开发了一个著名的单节点模型,它将整个人体表示为一个节点,该模型只是经验性的,且仅适用于较热的环境^[17]。Pierce 双节点模型最初由 A. P. Gagge 等^[18]开发,将人体分离为核心层

和皮肤表层,由控制系统和受控系统这两个子系统组成。该模型适用于中等活动水平和均匀环境条件,仅限于人体暴露时间少于 1 h,且不能解释空间不均匀性^[19]。另一个著名的双节点模型为 KSU 双节点模型^[20],其与 Pierce 双节点模型相似,但在汗液率和血流控制方程有所不同。

J. A. J. Stolwijk^[21]开发了一种多节点模型,该模型将人体分成 6 个部分,并且每个部分在径向方向上进一步分成 4 个部分。由于每个部分的生理现象都可以控制,因此该模型比以前的模型具有更好的精度和灵活性。随后的许多现代多段多节点生物热模型^[22]都是对 J. A. J. Stolwijk^[21]模型参数和热控制方程的修改和改进,典型的代表是英国能源与可持续发展研究所的 D. Fiala 等^[23]体温调节模型,它由受控被动系统和控制主动系统这两个相互作用的系统组成,如图 1 所示。值得注意的是,越靠近外皮肤层温度变化越剧烈,节点相应布置得越密集。被动系统模拟人体内部以及体表与周围环境之间的热交换。在模型中考虑了表面对流,定向辐射换热,皮肤水分蒸发以及服装热阻的不均匀性^[24]。主动系统通过 4 种基本的体温调节反应来模拟复杂的生理现象:血管收缩、血管扩张、颤抖和出汗,如图 2 所示。

另一个被广泛验证的人类热生理模型是 Berkeley 热生理模型^[25],其基于 S. Tanabe 等^[22]的 65 节点模型进行了几项重大改进,也借鉴了 J. A. J. Stolwijk^[21]的模型。该模型理论上可以模拟任意数量的段,并且在实践中通常使用 16 个段。与 D. Fiala 等^[23]模型类似,该模型开发了一种独特的血流模型,包括逆流热交换,以考虑血液温度在躯体流向四肢时的变化。模型考虑了衣物的热容量、湿容量以及通过热传导与身体接触表面的热量损失、对流和辐射系数^[26]以及个体生理差异。由于上述改进,

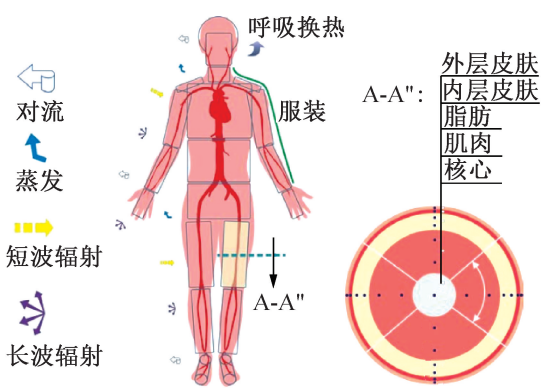


图 1 D. Fiala 等^[23]模型人体被动传热系统
Fig.1 Passive human body heat transfer system of
D. Fiala et al^[23] model

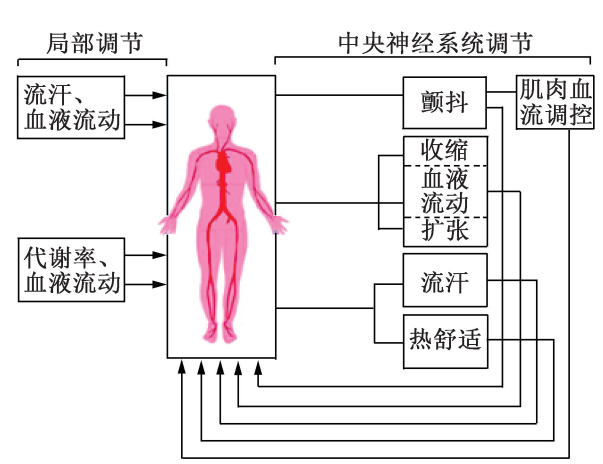


图 2 D. Fiala 等^[23]模型人体主动调节系统^[23]
Fig.2 Active human body adjustment system of
D. Fiala et al^[23] model

Berkeley 模型能够预测对瞬态或非均匀热环境的生理反应,并且通过与稳态条件和瞬态环境中的实验结果进行对比,验证了准确性^[27]。最近,加州大学伯克利分校与清华大学合作,进一步回顾并完善了他们的舒适模型^[28]。但是该模型和 CFD 模拟之间的耦合过于复杂,限制了其广泛传播的可能性。

最复杂并且物理上最真实的是多元模型^[17],其采用有限差分或有限元方法求解生物偏微分方程,得到人体的详细温度分布。该模型最初由 C. E. Smith^[19]开发,后来由 G. Fu^[29]改进,能够预测人体局部部分对热环境的生理反应。由于模型非常复杂,因此需要大量的计算资源,但该模型的源代码可用,且注释详细,因此它被广泛采用并且已被其他研究人员修改和改进。

表 1 所示为经典人体热生理模型及适用范围汇总,其中 N/A 指无限制条件。

3 热心理模型

在过去的几十年中,已经开发了许多热心理模型,这些模型可分类为理性(客观)热心理模型和自适应(主观)热心理模型。

3.1 理性热心理模型

理性热心理模型的原理是所有理性热心理模型都有一个固有的假设,即对于某个身体部位给定的生理状态,存在一些可预测的热舒适反应,这意味着心理热舒适反应完全与人体的生理行为有关^[30]。一些理性热心理模型必须与热生理模型同时运作,而其他一些模型则可独立运行。

P. O. Fanger^[31]进行的研究是热舒适的里程碑,他开发的预测平均投票(predicted mean vote, PMV)

和预测百分比不满意 (predicted percentage dissatisfied, PPD) 模型影响了之后的所有研究并且直到现在

仍被许多标准采用。PMV 是一个指数,用于根据 ASHRAE 热感量表预测大组的平均反应。

表 1 经典人体热生理模型及适用范围汇总
Tab.1 Classical human thermophysiological model and its scope of application

热生理模型	适用环境	代谢速率	静态	动态	均匀	非均匀
单节点模型 ^[16]	较热环境	N/A	√	×	√	×
Pierce 双节点模 ^[18]	凉爽至非常热	中低	√	√	√	×
KSU 双节点模型 ^[20]	凉爽至非常热	中低	√	√	√	×
J. A. J. Stolwijk ^[21] 多节点模型	N/A	N/A	√	×	√	√
D. Fiala 等 ^[23] 体温调节模型	5~50 ℃	0.8~10 met	√	√	√	√
Tanabe65 节点模型 ^[22]	N/A	N/A	√	×	√	√
Berkeley 热生理模型 ^[25]	N/A	N/A	√	√	√	√
多元模型 ^[17]	N/A	N/A	√	√	√	√

虽然 PMV-PPD 模型已经使用了 40 多年,但其有效性受到质疑,该模型的建立条件是稳态均匀热环境,在不均匀和瞬态下该模型的使用经常失败。因此,研究者开发了许多其他模型来填补空白。在此之后的很长一段时间里,研究的重点仍然是预测均匀环境的热感。Pierce 双节点模型^[18]和 KSU 双节点模型^[20]均带有预测热感的模型,Pierce 双节点模型^[18]使用计算的皮肤温度,核心温度和皮肤湿度来预测热感和热不适,KSU 双节点模型^[20]直接从生理应变确定热感。

进入 20 世纪 90 年代后,许多研究人员开始致力于预测人类对不对称和瞬态环境的反应。然而,在前十年,即使是非均匀环境中,仍然在全身基础上进行预测。早期 Y. Taniguchi 等^[32]开发了一个多元线性回归模型,该模型基于一系列人体测试,其中整体热感觉投票 (thermal sensation vote, TSV) 仅与面部部分的感觉相关,该模型忽略了其他身体部位的局部热感也对全身热感有影响。

K. Matsunaga 等^[33]采用平均等效温度 (average equivalent temperature, AET) 来计算 PMV,并评估整体舒适度。AET 是人体三个区域的表面积加权值:头部(0.1),腹部(0.7)和脚部(0.2)。由于 AET 是三个体段的平均值,可以在一定程度上反映整体热感觉,但不能反映局部的热感觉。

X. L. Wang^[34]提出了一种热感模型,可以计算瞬态条件下的瞬态热感,分为静态和动态两部分,静态响应来自 P. O. Fanger^[31]的 PMV 模型,而动态项取决于全身净热量增益。但该模型是一个整体模型,没有考虑局部热舒适。

K. J. Lomas 等^[35]基于实验数据与 IESD-Fiala 生理模型结果的回归分析,提出了一种名为动态热感觉 (dynamic thermal feeling, DTS) 的瞬态热感觉模型。该模型采用的数据源涵盖了 13~48 ℃ 的气温和 1~10 met 的活动水平,并且在发展后得到广泛应用和验证^[36]。该模型包括静态和动态输入信号,适用于瞬态条件,但不考虑非均匀环境。

更受广泛应用的是 E. Arens 等^[37-41]建立的一种适用于多种环境的综合热感觉与舒适性模型,通过皮肤和核心温度对人体热感觉投票的回归,得到人体各个部位的局部热感觉模型,由静态部分和动态部分组成。局部热舒适模型则由局部热感觉、发生最大舒适度时的局部感觉的回归函数及最大热舒适度组成。

对于整体热感觉模型,Zhang H.^[38]早期的研究中认为整体热感觉是各局部热感觉的加权平均,各个部位的局部热感觉对整体热感觉的影响权重不同,而且同一部位,其对整体热感觉的影响权重不恒定,随着其局部热感觉与整体热感觉的差异增加呈线性增大。在后期研究中,Zhang Hui 等^[41]提出了新的整体热感觉预测模型,该模型中整体热感觉有“无对立热感觉”和“有对立热感觉”这两种形式,这取决于是否有任何身体部位感觉与其他部位明显相反。但是该模型在研究过程中过度关注人体在温暖状态下的冷却效用,加热效应只进行了少量实验。

另一种受到普遍认可的是基于 H. O. Nilsson 等^[42]提出的等效温度 (t_{eq}) 模型,等效温度的定义为设有一空气静止的假象封闭空间,人体与该空间的显热交换量与实际情况相同,则该假想空间的温度是真实环境的等效温度。受试者用平均热投票 (mean

thermal vote, MTV) 对各部位及全身进行热感觉投票,人体模型提供各节段及全身热损失数据,根据公式转换为 t_{eq} 值,而 t_{eq} 和 MTV 之间的关系是通过实验数据回归建立的^[43],然后通过计算每个尺度区域边

界^[44]对应 MTV 值的 t_{eq} 值,得到 t_{eq} 的边界值。该模型作为一种方便的评估非均匀环境热舒适的方法,该方法被广泛引用,并已被推广到 ISO/TS 14505^[45]。表 2 所示为人体理性热心理模型及适用范围汇总。

表 2 经典人体理性热心理模型及适用范围汇总							
Tab.2 Classical human rational thermal mental model and its scope of application							
理性热心理模型	适用环境	静态	动态	均匀	非均匀	局部反应	其他限制
PMV-PPD 模型 ^[31]	N/A	√	×	√	×	×	机械通风建筑; 0.3~1.2 clo; <1.4 met
Pierce 双节点模型 ^[18]	凉爽至非常热	√	√	√	×	×	中低代谢率
KSU 双节点模型 ^[20]	凉爽至非常热	√	√	√	×	×	中低代谢率
Y. Taniguchi 等 ^[32] 模型	汽车	√	×	√	×	×	只考虑了脸部
K. Matsunaga 等 ^[33] 模型	N/A	√	×	√	√	×	N/A
Wang X. L.等 ^[34] 模型	N/A	√	√	√	×	×	N/A
DTS 模型 ^[35]	13-48 ℃	√	√	√	√	×	N/A
Berkeley 模型 ^[37-41]	N/A	√	√	√	√	√	不涉及蒸发效果,不适合无或衣物
等效温度模型 ^[42]	常规穿着	√	×	√	√	√	更注重在温暖的条件下局部冷却

3.2 自适应模型

在过去 20 年中,热舒适研究领域最彻底的变化之一是接受了一种根本不同的舒适自适应模型。这个概念源于将乘员作为舒适“系统”的一个组成部分的想法^[46],适应过程分为生理(适应环境)、行为(使用可操作的窗户、风扇、门、遮阳篷等)和心理(调整对室内和室外普遍的气候条件的舒适期望)^[47]。该模型的原理是,乘员不仅可以感知舒适度,还可以做出反应以获得舒适感^[48]。使乘员达到舒适水平的最重要的生理适应方式是换衣服和改善空气流动^[49],心理适应导致乘员可以更快适应不同的条件

和更宽范围的舒适温度^[47]。与理性热舒适模型不同,这个模型放松了对室内温度控制的限制,但目前的标准只允许它应用于自然通风建筑^[49]。自适应模型仍处于初步研究阶段,适用的范围很窄。通过热空间模型、人体热生理模型和人体热心理模型的不同研究方向,本文选取了较为突出的成果进行全面综述。图 3 所示为人体热舒适模型构架。个体性因素如年龄、性别及体重等影响人体的核心温度,但差别不大,外部环境因素及人体着装、活动水平影响着皮肤温度。下丘脑通过不同的热调节指令控制着核心温度及皮肤温度,在核心温度及皮肤温度的

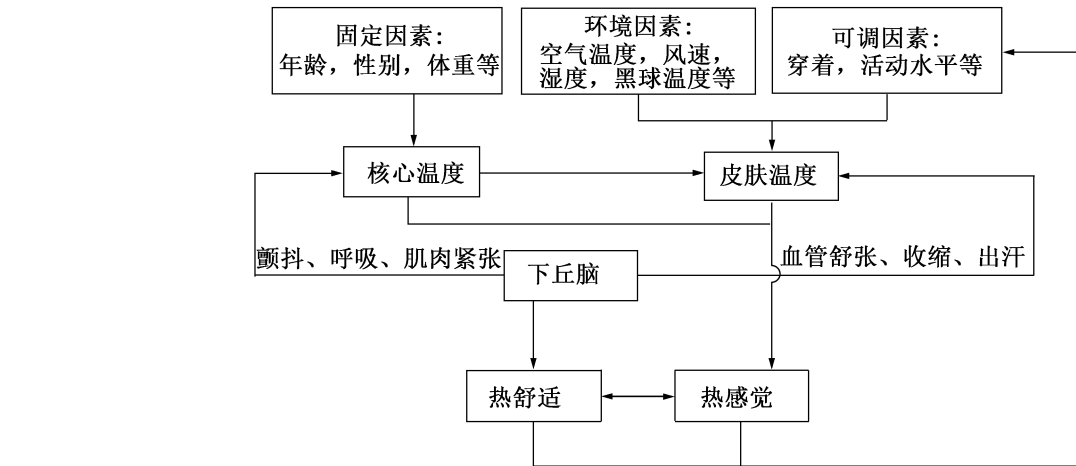


图 3 人体热舒适模型构架

Fig.3 Framework of human thermal comfort model

— 83 —

共同作用下产生相应的人体热感觉及热舒适,热感觉与热舒适相互影响,并可以反作用于人体的着装及多动水平。

4 总结与展望

本文根据热空间模型、人体热生理模型和人体热心理模型的分类标准,对非对称热环境下人体热舒适度研究进行回顾,概括了各热舒适模型的优点及局限,得到如下结论:

1)热空间模型旨在建立空调参数、环境参数等因素与人体热感觉的关系,但是该模型与选用的空间结构具有重大联系,一旦空间结构改变,模型建立的关系很多便无法成立,因此该方法虽然在早期研究较多,但其在热舒适评价领域的局限依旧存在,在车辆的应用领域价值更大。

2)不对称环境中的人体热感和舒适性是复杂的生理和心理反应,完整的热舒适模型应同时包含物理、生理和心理因素,但其中大多数模型不够全面或仅限于特定环境(如强调制冷或制热),只有少数能够通过详细的体温调节解决人类对非均匀和瞬态条件的反应。

3)Berkeley 热舒适模型同时建立了人体热生理模型与人体热心理模型,但是模型和 CFD 模拟之间的耦合过于复杂,限制了其广泛传播的可能性。等效温度模型虽然较为简单,偏差较大,其应用更为简便,因此受到更广泛的应用。

4)自适应模型充分考虑了人的主观能动性,但研究仍处于初级阶段。

因此,从长远来看,不对称环境的热舒适模型需要进一步开发和改进,既要同时满足瞬态和不均匀的双重特性,又要对冷却和加热给予相同的关注度。此外,通过 CFD 方法可以获得人体与环境之间的热传递的实际可靠预测,可以直接反馈到人体热调节模型,从而准确评估各部位的热感觉与舒适度,这需要对二者的耦合进一步研究,促进这种方法的广泛利用。最后,自适应模型仍处于开发阶段,该领域的研究对减少能源消耗具有重要意义。

本文受上海市部分地方院校能力建设专项计划(16060502600)资助项目。(The project was supported by the Capacity Building Plan for some Non-military Universities and Colleges of Shanghai Scientific Committee (No. 16060502600).)

参考文献

[1] HERR Y A, ARIF M, KATAFYGIOTOU M, et al. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and

comfort: a review of the literature[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2016, 5(1): 1-11.

[2] ALAJMI A, EL-AMER W. Saving energy by using under-floor-air-distribution (UFAD) system in commercial buildings[J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(8): 1637-1642.

[3] WATANABE S, MELIKOV A K, KNUDSEN G L. Design of an individually controlled system for an optimal thermal microenvironment[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(3): 549-558.

[4] LAN L, QIAN X L, LIAN Z W, et al. Local body cooling to improve sleep quality and thermal comfort in a hot environment[J]. *Indoor Air*, 2018, 28(1): 135-145.

[5] MELIKOV A K, KNUDSEN G L. Human response to an individually controlled microenvironment[J]. *HVAC & R Research*, 2007, 13(4): 645-660.

[6] BOGDAN A, CHLUDZINSKA M. Assessment of thermal comfort using personalized ventilation[J]. *HVAC & R Research*, 2010, 16(4): 529-542.

[7] ALAHMER A, MAYYAS A, MAYYAS A A, et al. Vehicular thermal comfort models: a comprehensive review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(6/7): 995-1002.

[8] WAN J W, KOOI J V D. Influence of the position of supply and exhaust openings on comfort in a passenger vehicle[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 1991, 12(5/6): 588-597.

[9] LIN C H, MICHAEL A L, TAEYOUNG H, et al. Experimental and computational study of cooling in a simplified GM-10 passenger compartment[EB/OL]. (1991-02-01) [2019-03-22]. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/9102>.

[10] BESOMBES G, PETITJEAN C, ROBIN R. Preliminary experimental validation of a car cabin model for climate control[C]// SAE International Congress and Exposition. US: SAE, 1997.

[11] ALAHMER A, ABDELHAMID M, OMAR M. Design for thermal sensation and comfort states in vehicles cabins[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36: 126-140.

[12] MEZRHAB A, BOUZIDI M. Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(14/15): 1697-1704.

[13] ZHANG Huajun, DAI Lan, XU Guoquan, 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.

[14] HAN T, CHEN K H, KHALIGHI B. Assessment of various environmental thermal loads on passenger thermal comfort

- [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2010, 3(1): 830–841.
- [15] KARIMI G, CHAN E C, CULHAM J R. Experimental study and thermal modeling of an automobile driver with a heated and ventilated seat[C]// SAE Technical Papers, US: SAE, 2003.
- [16] GIVONI B, GOLDMAN R. Predicting metabolic energy cost[J]. Journal of Applied Physiology, 1971, 30(3): 429–433.
- [17] LI Yi, LI Fengzhi, LIU Yingxi, et al. An intergrated model for simulating interactive thermal processes in human-clothing system[J]. Journal of Thermal Biology, 2004, 29(7/8): 567–575.
- [18] GAGGE A P, STOLWIJK J A J, NISHI Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response[J]. ASHRAE Transactions, 1971, 77(1): 247–262.
- [19] SMITH C E. A transient, three-dimensional model of human thermal system[D]. Manhattan: Kansas State University, 1991.
- [20] AZER N Z, HSU S. The prediction of thermal sensation from a simple thermoregulatory model[J]. Arch Sci Physiol, 1973, 27(4): 425–432
- [21] STOLWIJK J A J. NASA contractor report: a mathematical model of physiological temperature regulation in man[R]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1971.
- [22] TANABE S, KOBAYASHI K, NAKANO J, et al. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)[J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 637–646.
- [23] FIALA D, PSIKUTA A, JENDRITZKY G. Physiological modeling for technical, clinical and research applications[J]. Frontiers in Bioscience, 2010, 2(3): 939–968.
- [24] HUIZENGA C, ZHANG Hui, ARENS E. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments[J]. Building and Environment, 2001, 36(6): 691–699.
- [25] DEAR R J D, ARENS E, ZHANG Hui, et al. Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments[J]. International Journal of Biometeorology, 1997, 40(3): 145–156.
- [26] ZHANG Hui, HUIZENGA C, ARENS E, et al. Considering individual physiological differences in a human thermal model[J]. Journal of Thermal Biology, 2001, 26(4): 401–408.
- [27] ZHANG Hui, ARENS E, HUIZENGA C, et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model[J]. Building and Environment, 2014, 72: 300–308.
- [28] FU Ming, YU Tiefeng, ZHANG Hui, et al. A model of heat and moisture transfer through clothing integrated with the UC Berkeley comfort model[J]. Building and Environment, 2014, 80: 96–104.
- [29] FU G. A transient, 3-D mathematical thermal model for the clothed human[D]. Manhattan: Kansas State University, 1995.
- [30] ZOLFAGHARI A, MAEREFAT M. A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing[J]. Building and Environment, 2010, 45(3): 776–783.
- [31] FANGER P O. Thermal comfort—analysis and applications in environmental engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1973.
- [32] TANIGUCHI Y, HIROSHI A, KENJI F. Study on car air conditioning system controlled by car occupants` skin temperatures—part I: research on a method of quantitative evaluation of car occupants` thermal sensations by skin temperature[C]// International Congress and Exposition. US: SAE, 1992.
- [33] MATSUNAGA K, SUDO F, TANABE S, et al. Evaluation and measurement of thermal comfort in the vehicles with a new thermal manikin[C]// International Pacific Conference on Automotive Engineering. US: SAE, 1993.
- [34] WANG X L. Thermal comfort and sensation under transient conditions[D]. Sweden: The KTH Royal Institute of Technology, 1994.
- [35] LOMAS K J, FIALA D, STOHRER M. First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions[J]. ASHRAE Transaction, 2003, 109(1): 179–187.
- [36] FIALA D, PSIKUTA A, JENDRITZKY G, et al. Physiological modeling for technical, clinical and research applications[J]. Frontiers in Bioscience, 2010, 2(3): 939–968.
- [37] ARENS E, ZHANG Hui, HUIZENGA C, et al. Partial-and whole-body thermal sensation and comfort, part II: non-uniform environmental conditions[J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31(1/2): 60–66.
- [38] ZHANG H. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments[D]. San Francisco: University of California Berkeley, 2003.
- [39] ARENS E, ZHANG Hui, HUIZENGA C. Partial- and whole-body thermal sensation and comfort, part I: uniform environmental conditions[J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31(1/2): 53–59.

- [40] ARENS E, ZHANG Hui, HUIZENGA C, et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: part I: local sensation of individual body parts[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(2): 380–388.
- [41] ZHANG Hui, ARENS E, HUIZENGA C. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: part III: whole-body sensation and comfort[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(2): 399–410.
- [42] NILSSON H O, HOLMÉR I. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models[J]. *Indoor Air*, 2003, 13(1): 28–37.
- [43] CENA K, DEAR R D. Thermal comfort and behavioural strategies in office buildings located in a hot-arid climate [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2001, 26(4): 409–414.
- [44] NILSSON H O. Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(12): 4000–4005.
- [45] Ergonomics of the thermal environment-evaluation of thermal environments in vehicles: ISO/TS 14505 [S]. Belgium: CEN, 2007.
- [46] KIM J, DEAR R D, CANDIDO C, et al. Gender differ-

ences in office occupant perception of indoor environmental quality (IEQ)[J]. *Building and Environment*, 2013, 70: 245–256.

- [47] DEAR R D, BRAGER G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference[J]. *ASHRAE Transaction*, 1997, 104(1): 145–167.
- [48] NICOL F, HUMPHREYS M. Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(3): 295–304.
- [49] NICOL J F, RAJA I A. Indoor thermal comfort: the Pakistan study[J]. *Energy for Sustainable Development*, 1997, 3(5): 50–60.

通信作者简介

柳建华,男,教授,博士生导师,上海理工大学能源与动力工程学院,13817757889, E-mail: 2892487703@qq.com。研究方向: 制冷及低温工程。

About the corresponding author

Liu Jianhua, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13817757889, E-mail: 2892487703@qq.com. Research fields: refrigeration and cryogenic engineering.