

个性化热舒适系统在电动汽车中的应用与展望

周翔¹, 宋林烨¹, 夏海峰², 曾映祺¹, 张树铭¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海;
2. 中汽研汽车检验中心宁波有限公司, 315000, 浙江宁波)

摘要: 个性化舒适系统(PCS)所具有的节能性和舒适性优势,使其成为解决电动汽车里程焦虑和乘员热不适的新思路。首先,讨论了不同类型 PCS 在乘员舱中的应用可行性,并对比了它们在整体热感觉和热舒适提升方面的差异。然后,以目标调控区域为维度,将 PCS 对人体不同部位产生的差异性影响进行了可视化分析。最后,统计了典型 PCS 对环境温度设定点的拓展能力,以进一步观察其对空调节能的积极作用。结果表明:PCS 的整体改善效果受环境温度影响明显,高效区间内可以独立承担热舒适调控任务,恶劣工况下需关注多类别设备的联合使用;从影响范围看,PCS 以影响目标调控区域为主要特征,其他部位小幅改善;同时,PCS 对整车空调设定点具有拓宽作用,合理的设备组合可将乘员冬季可接受温度拓展到 10℃ 以下,并为过渡季空调关闭运行提供可能。未来,汽车场景的 PCS 设计与运行应重点面向与乘员舱温度的联合调控,同时还需关注不同类型 PCS 对人体的协同改善作用,并充分利用对舒适区间的拓展能力实现汽车空调运行节能。

关键词: 热舒适;个性化舒适系统;乘员舱;电动汽车

中图分类号: U463.85 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202601001 **文章编号:** 0253-987X(2026)01-0001-13

Application and Prospects of Personalized Thermal Comfort Systems in Electric Vehicles

ZHOU Xiang¹, SONG Linye¹, XIA Haifeng², ZENG Yingqi¹, ZHANG Shuming¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. CATARC Automotive Test Center (Ningbo) Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: The energy-saving and comfort advantages of personalized comfort systems (PCS) make them a novel approach to addressing range anxiety and occupant thermal discomfort in electric vehicles. First, the feasibility of applying different types of PCS in vehicle cabins is discussed, and their differences in improving overall thermal sensation and thermal comfort are compared. Then, from the perspective of target regulation zones, the differential effects of PCS on various parts of the human body are visually analyzed. Finally, the capability of typical PCS to extend the environmental temperature setpoint is statistically evaluated to further observe their positive impact on air conditioning energy efficiency. The results show that the overall improvement effect of PCS is significantly influenced by ambient temperature. Within the efficient range, PCS can

收稿日期: 2025-05-01。 作者简介: 周翔(1980—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178087)。

网络出版时间: 2025-09-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250923.1701.003>

independently handle thermal comfort regulation tasks, while under harsh conditions, the combined use of multiple types of devices should be prioritized. In terms of the scope of influence, PCS primarily affects the target regulation zones, with minor improvements in other areas. Additionally, the role of PCS in widening the vehicle air conditioning setpoint is emphasized. Reasonable device combinations can extend the acceptable temperature for occupants to below 10 °C in winter and provide the possibility of turning off the air conditioning during transitional seasons. Future PCS design and operation in automotive scenarios should focus on coordinated regulation with cabin temperature, while emphasizing the synergistic improvement effects of different PCS types on human comfort and fully leveraging their capacity to expand thermal comfort ranges to achieve energy savings in automotive air-conditioning systems.

Keywords: thermal comfort; personalized comfort system; vehicle cabin; electric vehicle

作为世界上的碳排放大国,车辆电气化技术是我国减少碳排放的重要措施之一^[1]。2030年,我国计划将新能源和清洁能源动力交通工具的份额提升至40%^[2]。里程焦虑一直以来都是影响电动汽车产品推广的关键因素。作为主要能耗设备,空调和供热可以使电动汽车的续航里程降低20%~59%^[3]。与内燃机汽车相比,电动汽车在冬季工况下没有可以利用的发动机余热,续航受到的影响更大。此外,良好的乘员舱热舒适性也是消费者的重点关注内容。如何让司乘人员尽快达到舒适区间,是车辆空调系统设计需要解决的关键问题^[4]。

21世纪以来,提升汽车空调能效的研究思路可以分为“减量”和“增效”两种。“减量”是指减少空调负荷,如车体结构的热性能改良^[5]、调高或降低空调供热的设定温度。“增效”方法通过优化能量转换途径,使同等负荷下消耗更少的电能,如热泵效率、控制模式和气流组织的优化^[6-8]。然而,进一步“增效”,特别是热泵性能的突破性提高已较为困难。相比之下,“减量”是一种值得发掘的路线。个性化舒适系统(PCS)作为一种代表性技术,调控区域面向局部空间或局部节段,一方面可以减少冷量或热量向非占用区的无效传递;另一方面,它可以拓宽环境温度设定范围,减小冷热负荷。从热舒适角度看,PCS方便调控,更加契合人体不同部位的热需求,能够显著提升用户驾乘体验,并增加汽车产品竞争力。

PCS在能源节约和热舒适提升方面的优势已被证实^[9],并在建筑领域得到了广泛应用。一些学者综述了不同PCS的换热机制、加热部位和组合方法对热舒适和能耗的影响^[10-13],主要面向建筑领域如办公场景,缺乏对乘员舱领域的讨论。本文以汽车空调为切入点,讨论了PCS在乘员舱

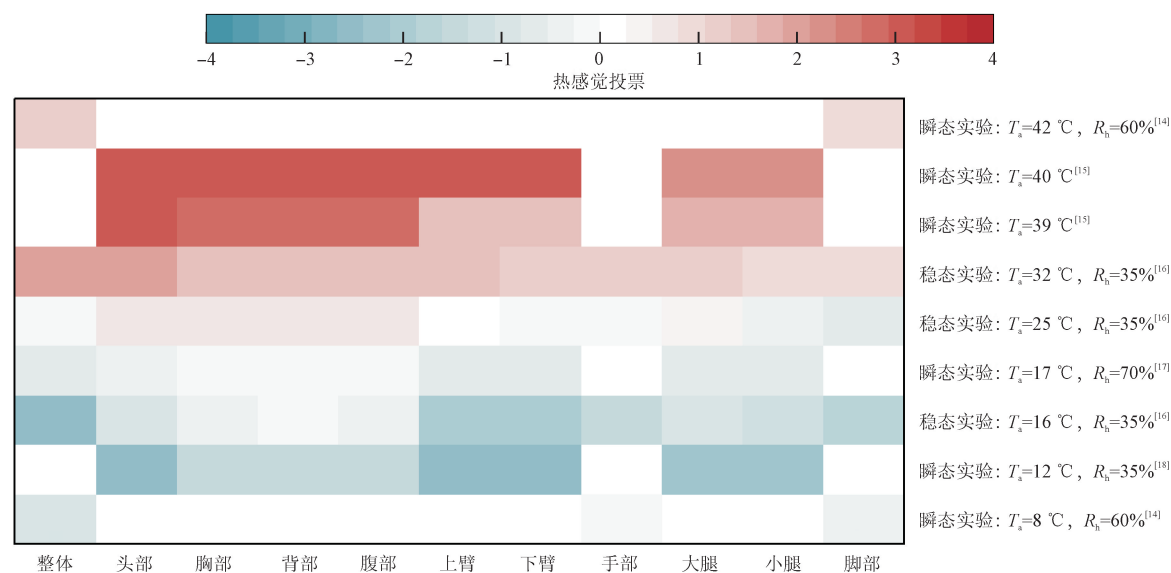
环境下的应用潜力。提出汽车乘员舱个性化舒适系统(VC-PCS)的概念,并按照调控的目标区域对潜在设备进行了分类。具体内容包括:①不同类型PCS对整体热感觉和热舒适的影响;②不同身体节段的局部热状态反馈;③PCS对环境温度设定点的拓展作用。

1 解决乘员热舒适问题的新思路:PCS

1.1 乘员的热不适体验

图1展示了开启空调、无PCS配置时,乘员舱不同温度和湿度下人体整体和局部热感觉的一些对比数据^[14-18],数据颜色代表了乘员在当前工况的冷热程度。由于纳入考虑的文献包含不同类型的投票问卷,因此范围、描述和连续性的差异使这些数据不能被直接整合或比较。本文通过问卷描述词汇建立不同投票数据的映射关系,以避免实际感受与数据偏移。热感觉投票(TSV)被统一为9个刻度,取值-4~4:-4表示非常冷,-3表示冷;-2表示凉;-1表示稍凉;0表示不冷不热;1表示稍暖;2表示暖;3表示热;4表示非常热。

炎热环境下,座椅为躯干附近的接触部位增加了额外的热阻,并削弱了汗液蒸发。冬季的乘员冷不适体现在四肢部位,这源于较小的服装热阻。此外,很多研究观察到,在汽车空调开启的后期,身体局部节段会出现过冷或过热的情况^[15,18]。汽车空调的不均匀送风会使射流区附近的身体部位会更快受到空调的影响。以加热阶段为例,头部和上肢的热感觉会快速提升并达到中性,但此时偏下的身体节段依然会感觉寒冷^[18]。值得注意的是,与图1工况相比,实际环境条件可能更加恶劣,这将给刚上车的乘员带来不良的体验。



T_a 、 R_h —测试工况对应的空气温度、相对湿度;瞬态实验—观察整个过程中的环境参数与热感觉变化,取最不适时刻对应的热感觉;
稳态实验—测试时间足够长,取乘员最后达到的稳定热感觉。

图 1 乘员舱不同温度和湿度下人体整体和局部热感觉对比

Fig. 1 Comparison of overall and local thermal sensation of human body under different temperatures and humidity in the vehicle cabin

1.2 面向汽车乘员舱的个性化舒适系统

如图 2 所示,VC-PCS 作为一种新型的乘员舱环境控制模式,通过利用有限的舱内空间,可把调节设备与原有汽车部件相结合,为多部位灵活调控提供可能。传统汽车空调无需承担全部空间的负荷,只需要通过少量气流对局部部位进行调节,如夏季进行面部冷却或冬季进行躯干加热,送风温度也可以放宽要求。另外,VC-PCS 将身体节段作为最小控制单元,可以有效解决局部热不适问题。基于热传导的调控设备所具备的快速、高效响应能力,比传统对流为主的汽车空调具有显著优势。考虑到驾乘舒适性和空间可行性,本文所述的 VC-PCS 对手部、躯干和脚部的调控设备进行了讨论。

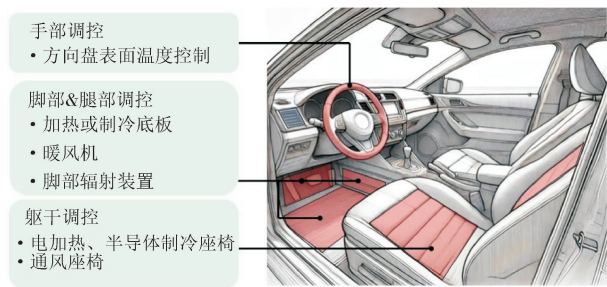


图 2 汽车乘员舱个性化舒适系统

Fig. 2 Vehicle cabin personalized comfort system

在 1.1 节提到的 9 刻度 TSV 标尺的基础上,热舒适投票(TCV)统一为 7 刻度标尺,范围为-3~3:-3 表示非常不适; -2 表示不适; -1 表示稍不适; 0 表示中性; 1 表示稍舒适; 2 表示舒适; 3 表示非常舒适^[19]。可接受温度区间根据整体热感觉计算,取整体热感觉-1 和 1 作为可接受阈值^[20],二者对应的操作温度使用线性插值法确定,该方法在非炎热工况的可行性已被证明^[21]。

2 PCS 对人体热状态的改善作用

2.1 PCS 对整体热感觉和热舒适的改善

由于人体对冷热刺激反应的不对称性^[22],本节对设备的加热和冷却工况进行了分别讨论,并关注了环境温度、PCS 类型和控制模式的影响。PCS 类型信息包括表征能耗的参数(功率、温度或风量)以及供冷供热形式(电热、通风或水系统)。控制模式分为恒定设定点和自由调控两类,前者在实验过程中保持恒定功率或表面温度,后者允许实时调节。

图 3 和图 4 展示了开启加热/冷却座椅前后热感觉投票和热舒适投票的变化^[23-39],以及设备性能与背景温度之间的关联。

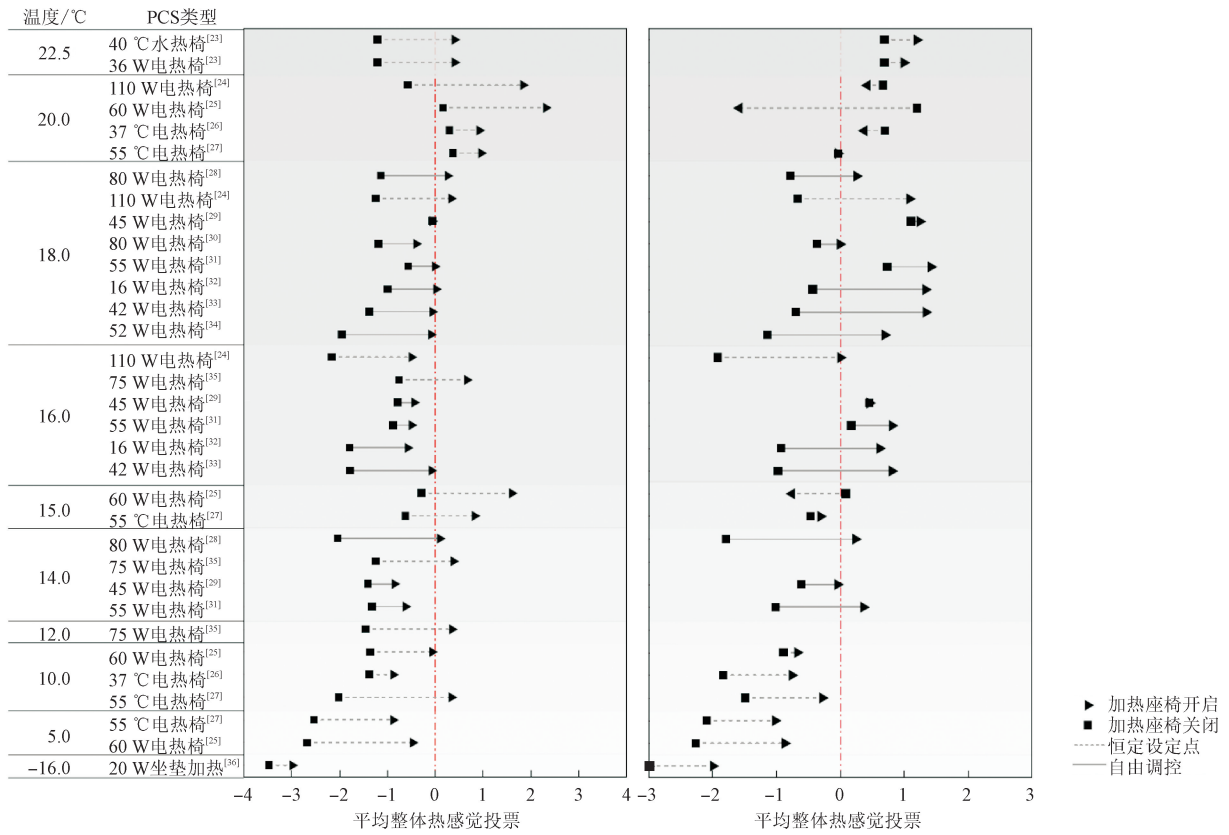


图 3 加热座椅对人体整体热感觉和热舒适的影响

Fig. 3 Impact of heated seats on overall thermal sensation and comfort

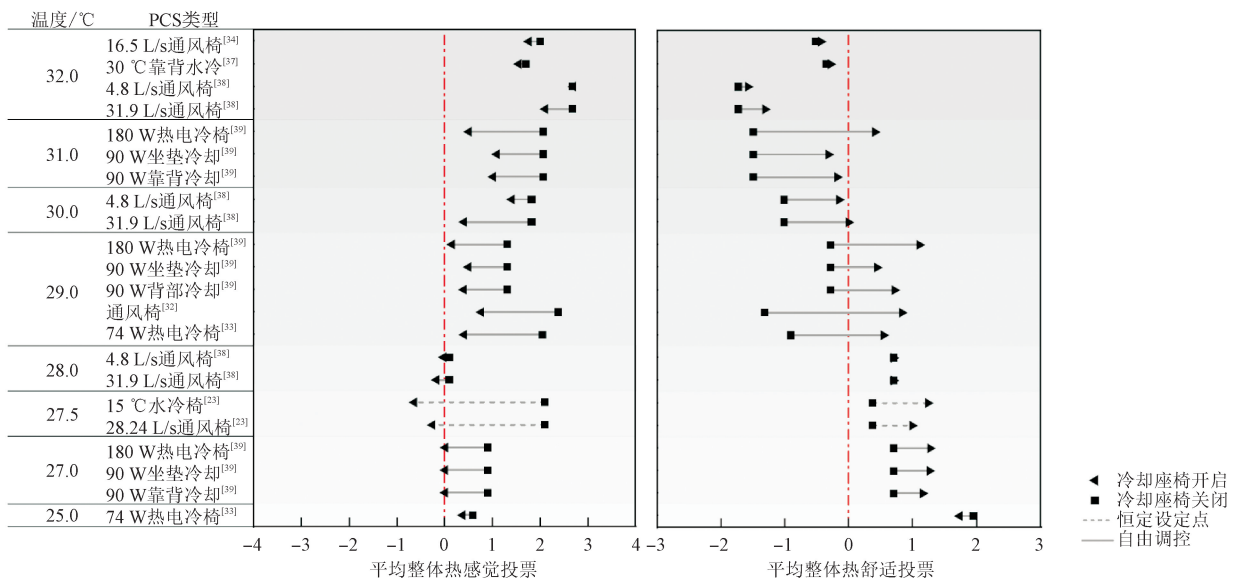


图 4 冷却座椅对人体整体热感觉和热舒适的影响

Fig. 4 Impact of cooling seats on overall thermal sensation and comfort

背景温度对座椅的热舒适调控性能有较大影响。当环境趋于中性时,座椅的开启需要认真考量。一方面,受试者在不开启座椅时便处于相对舒适的水平,额外的调节设备会增加能耗^[23-25];另一方面,

接触面产生的冷感或热感会引起人员不适^[25],这种不适感在座椅不可自由调控时尤为明显。同样应注意的是,环境温度偏离中性区间较远时,如低于 10℃或高于 32℃,座椅调控能力的限制会使受试

群体依然处于热不适区间。因此,推荐过渡季对应的温度区间内独立使用个性化座椅,而炎热和寒冷季节需要与汽车空调或其他设备结合使用。

一般而言,电动汽车会将加热和降温元件集成到汽车座椅上,使其兼具夏季和冬季工况的适应性,目前常用的组合策略是电加热结合通风。冬季加热模式下,热量通过热传导依次传递给织物和人体,因此汽车座椅表面温度很大程度受电热丝位置和发热功率的影响。一些产品应用了石墨烯加热技术,以提高升温速率和发热均匀性^[40]。夏季时,汽车座椅在通风模式下运行,靠背和坐垫内部布有风道,由风扇吸入的空调冷空气会均匀分配到乘员的背部和臀部以消除局部热不适,优化座椅吸风口位置和乘员舱气流组织,这是一种提高舒适性的思路。然而,通风座椅本身没有制冷能力,改善效果受制于吸风口的空气温度,在炎热的天气条件下可能出现降温困难。一些汽车座椅应用了热电冷却技术^[41],它可以适应较广的温度调节范围,但乘员舱中难以实现座椅废热的排放,且可能需要额外装置去除冷凝水。另外,热电冷却存在低效率和高能耗的问题,制冷效果有限^[42]。一些其他形式的汽车座椅类型,如Zhang等^[43]提到的汽车水冷座椅,多停留在理论研

究阶段,应用于电动汽车需要设计额外的水系统,这对生产成本和制作工艺是一种挑战。

图5为手部调控设备对整体热感觉和热舒适的影响^[44-47]。手部的热感受器密度较高,对寒冷和炎热环境都比较敏感^[48-49],同时也是区分冷偏好和暖偏好群体的关键部位。虽然手部具有较小的加热面积,但热调控会对整体热感觉产生0.5~1个刻度的影响,且对热舒适有显著改善^[50]。由于不同组织节点之间的血流换热,Chao等^[24]观察到手部加热会使人体平均皮肤温度升高,且随着加热温度的增加而变得显著。相比于寒冷工况,手部对炎热环境的耐受性更强,这可能归因于血管舒张和出汗的机制^[22]。根据Iwata等^[44]的研究,手部冷却没有对人体的核心温度和血流量产生影响,即使是在0℃的刺激下,这两项指标也未发生明显变化。手部冷却对整体热舒适的改善作用,可能直接归因于手部及附近区域的热感降低,即局部的凉爽感觉会削弱人在炎热环境下的整体热感^[50]。这种改善也可以用空间热愉悦解释,炎热环境进行局部冷刺激会使人产生愉悦感^[51]。这种冷刺激同样存在上限,如图5提到的,0℃的手掌冷刺激会降低人员的舒适度。

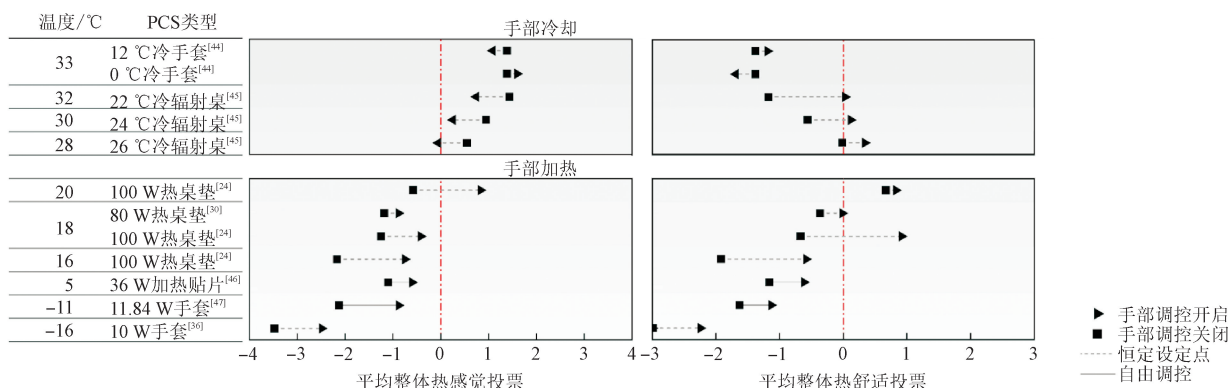


图5 手部调控对人体整体热感觉和热舒适的影响

Fig. 5 Impact of hand thermal regulation on overall thermal sensation and comfort

作为与司机手部直接接触的部件,方向盘是进行手部热舒适调控的天然载体,也是汽车零部件生产商进行PCS设计时关注的主要目标。目前,加热方向盘在多款车型中都有应用,比如福特、宝马和奇瑞^[52]。主流的加热方式为电加热,通过布于方向盘外周的电热丝或石墨烯通电实现^[53]。此外,有学者提出液体加热的方法,将发动机冷却液与方向盘加热相结合^[54],但这种余热利用方法可能不适用于电动汽车。除方向盘外,市

面上也有一些独立的手部取暖设备供车主安装,如小型的暖风机,它们通常不需要特别高的电压,可以直接连接车内的电源接口。由于乘员对手部冷却的需求没有冬季加热大,制冷方向盘目前还未普及,一些设计思路停留在概念阶段。出汗所带来的黏着感是偏热环境手部不适的主要原因,故部分方向盘的设计中引入了防汗材料或半导体制冷技术^[55]。

同样位于身体末端的脚部,也是VC-PCS的重

点调控区域^[56-63]。如图 6 所示,在低于 14℃ 的环境下,脚部加热的改善效果明显,几乎在每个研究案例中,整体热感觉和热舒适都提高了近一个刻度,整体热舒适的提升也可以用热不适部位的改善进行解

释^[50]。虽然脚部喜欢温暖的感受,但由于过热风险,热感觉不能偏离中性过多^[61]。当环境温度提高到 16℃ 或更高时,脚部的加热效果开始减弱,此时脚部加热的作用更倾向于“补充”。

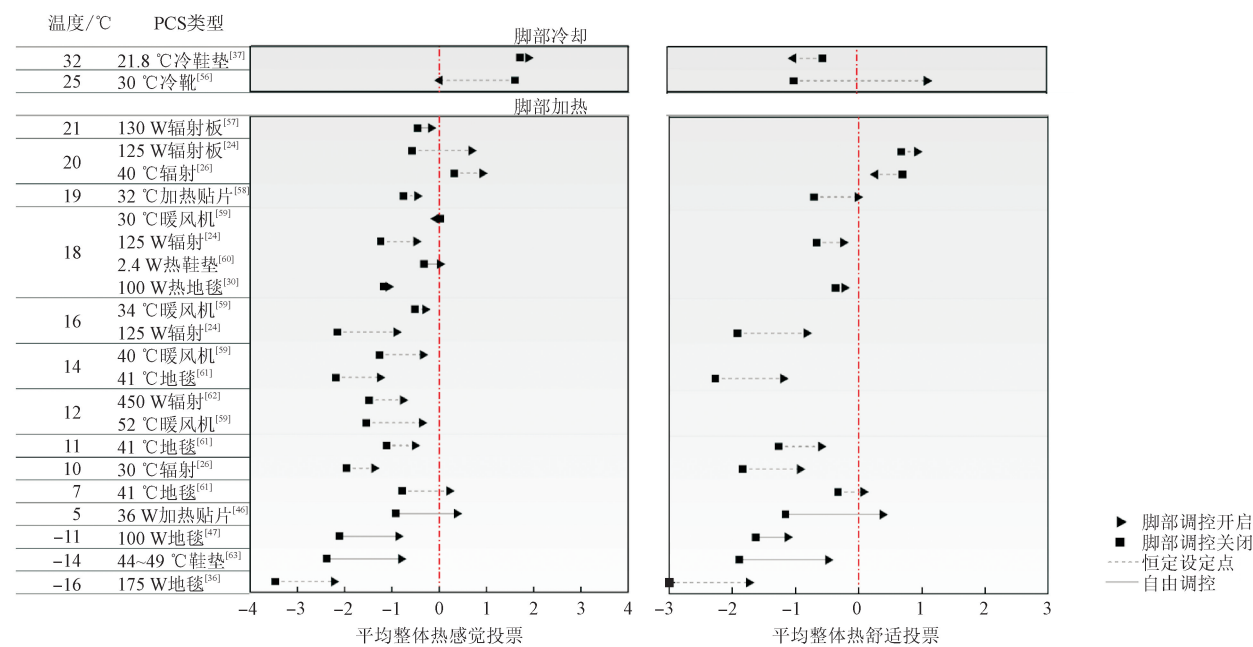


图 6 脚部调控对人体整体热感觉和热舒适的影响

Fig. 6 Impact of foot thermal regulation on overall thermal sensation and comfort

冬季寒冷环境下,乘员更倾向于穿较厚的衣物,躯干部位热阻的增大会削弱汽车加热座椅等装置的供暖效果,脚部加热装置是一种有效补充^[31]。相比于办公场景,乘员舱内的人员具有固定位置和姿势,底板加热的适用性更高^[57]。已有技术可以将加热芯体嵌入到汽车底板内部,不会占用乘员舱空间^[64]。底板加热的劣势在于,鞋底热阻会使热量传递给脚部所需的时间变长,消费者布置的脚垫会进一步削弱传热效果。将辐射面设计为腿部和脚部的外周环绕式是一种解决思路,但考虑到部分热量会以辐射的形式与其他冷表面进行热交换,实际的能量利用效率可能偏低。此外,辐射换热效果与表面温度有关,由于车内空间狭小,因此辐射面温度不能太高以避免烫伤。目前汽车的脚部加热多采用对流形式,一些高档车型会在脚部附近提供额外的出风口,空调风会直接送至目标区域。这种方法对脚部冷不适的改善更快,适合乘员舱这种短时停留场景,且夏季时可以为脚部供给凉风。一些通风座椅在设计时也会在脚部增加开口,实现多部位联合冷却。脚部接触型冷却设备相对少见,这是因为乘员通常不喜欢脚部有过强的冷感^[37]。

2.2 从身体节段角度评估 PCS 性能

加热/冷却座椅属于调控面积较大的 PCS,能

够对人体不同部位的热感觉产生影响。背部和骨盆作为直接接触的部位,热感觉的改变最明显,它们已经被证明是影响整体热感觉的“主导型”身体节段^[50],间接解释了图 3 中整体热感觉提升的原因。由于整体热感觉向中性的改善,非接触部位的热舒适也会有提升。图 7 的数据多面向办公环境或气候室,实车的测试数据可能会有所差异。

正如 1.1 节提到的,乘员舱温度远偏离中性时,热不适部位的改善意愿会更加强烈。虽然汽车空调的运行会将乘员舱温度逐渐调整至中性附近,但对于更极端的场景,热环境达到可接受水平需要较长时间。在低温环境下使用加热座椅时,小腿和脚部等非加热区依然会感到冷不适^[31],但不同部位的热感觉会有所提升,可以认为加热座椅是空调的有效补充设备。此外,由于汽车座椅较大的热惯性,人在刚入座时,接触部位的热流会与人期望的方向相反^[29],乘员热舒适会快速下降。加热或冷却座椅的使用可以使座椅的表面温度更快地恢复到可接受区间,缩短乘员热状态达到稳定所需的时间,对于短程驾驶而言具有重要意义。

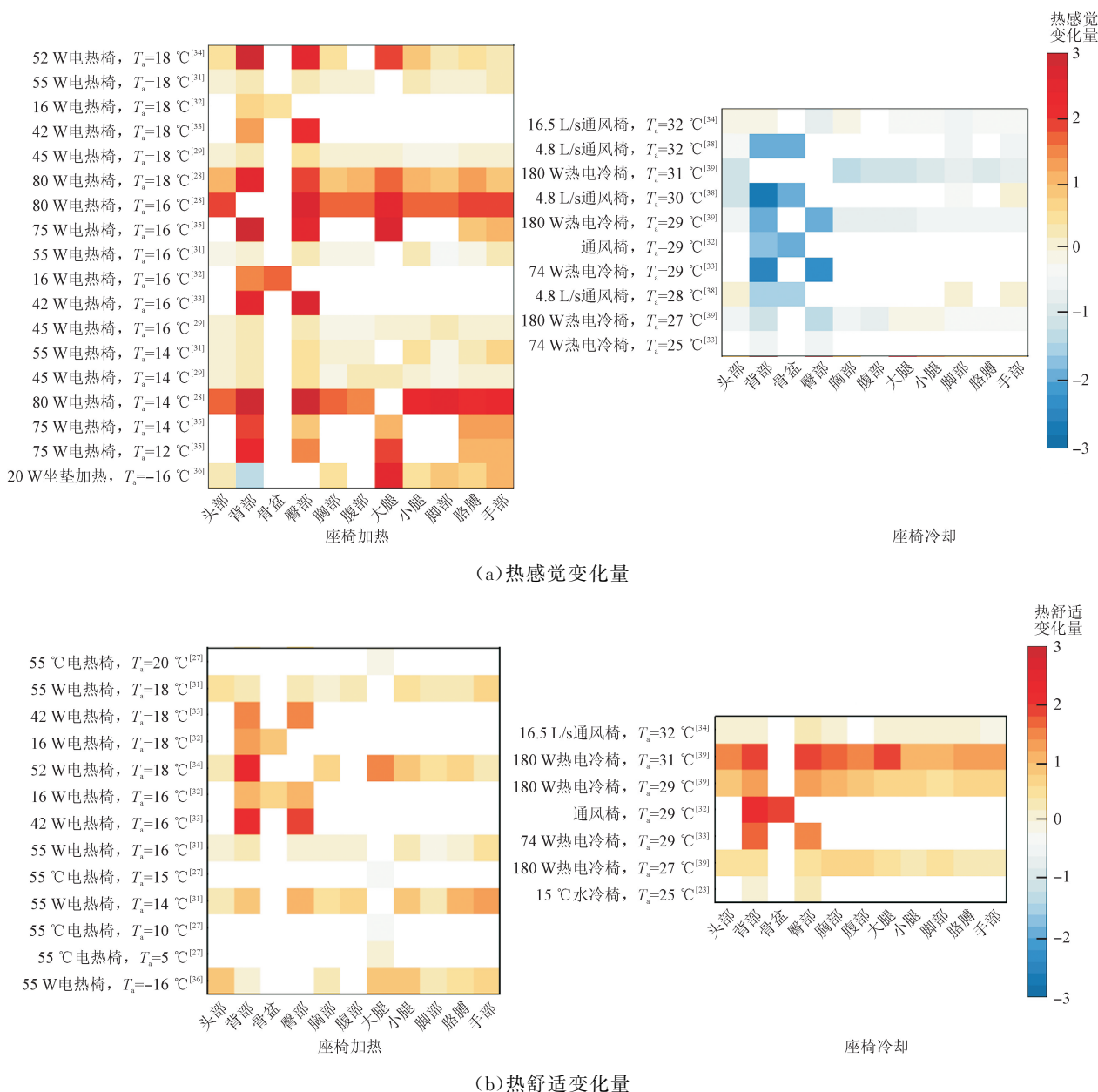


图 7 座椅加热和冷却对局部身体部位的影响

Fig. 7 Impacts of seat heating and cooling on local body parts

如图 8 和图 9 所示,脚部和手部调控表现出相似的规律,即目标区域改善明显,非目标区域小幅改善。加热手套是一种讨论较多的手部加热手段,在手心和手背均设有加热区,并增加了手部与外界之间的热阻。这种穿戴式设备比地板和座椅加热具有更小的能耗^[47],但由于加热面积受限,其他部位受到的影响较小。对手部进行局部辐射的冷却和供暖效果也已被证实^[45, 65],由于辐射面影响范围较大,手部附近的区域也会有直接的热改善效果。由于脚部冷却研究较少,图 9 的数据均为座椅加热的实验结论。研究表明,脚部加热可显著降低心率,使人的心理状态更加放

松^[58]。除了与加热面直接接触的脚部,热传导和血液交换会使相邻部位(如小腿)受到积极影响。距离较远的躯干和手臂的局部热感觉也有所增加,对应部位的皮肤温度也略有上升^[24]。根据 Wang 等^[66]的研究,脚部加热垫产生的热羽流会提高人体附近的环境温度,脚踝和头部附近的环境温升分别为 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,这可能是加热脚垫间接影响其他部位的原因之一。

虽然图 8 和图 9 提供了一些可参照的数据,但设备类型与乘员舱 PCS 具有较大差异。如现有的加热方向盘以手心区域的热传导为主,辐射和对流占比较小,且方向盘不会为手背侧提供额外的服装

热阻,手部依然会有部分区域暴露在寒冷空气中。另外,车辆启动初期,加热方向盘通常会和加热座椅和空调末端联合控制,以提升更多部位的热舒适水

平。办公环境中所测试的加热脚垫与实际应用到汽车的脚部加热设备也会有所区别,因此未来对乘员舱 PCS 的舒适性测试是必要的。

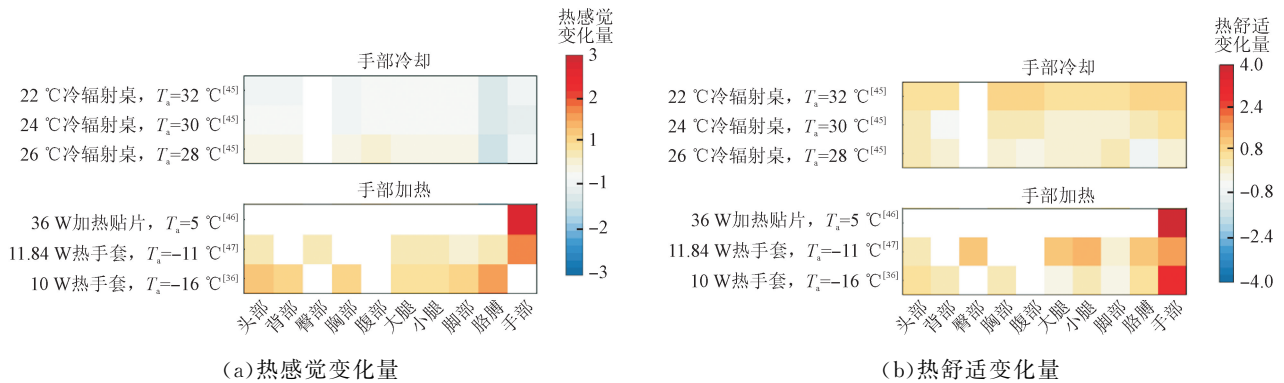


图 8 手部热调控对局部身体部位热感觉和热舒适的影响

Fig. 8 Effects of hand thermal regulation on thermal sensation and comfort of local body parts

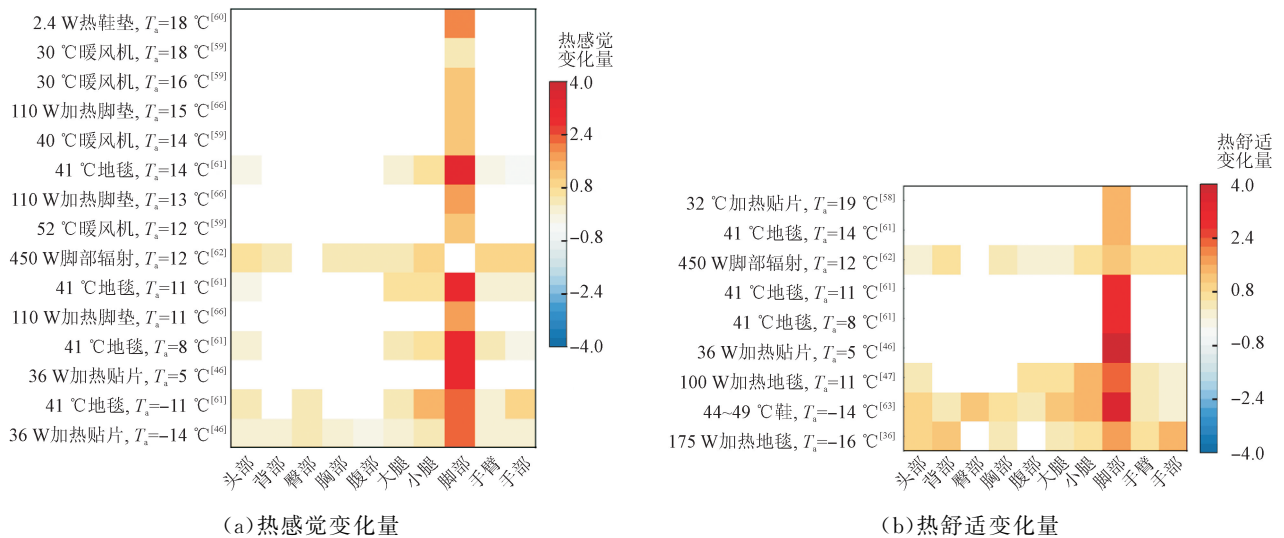


图 9 脚部加热对局部身体部位热感觉和热舒适的影响

Fig. 9 Effects of foot heating on thermal sensation and comfort of local body parts

3 PCS 对可接受环境温度的影响

通过 1.3 节所述的方法计算不同 PCS 对可接受环境温度的拓展能力,结果如图 10 所示。对于涉及多个功率工况的研究,取最大加热或制冷功率对应的测试结果作为拓展能力,即理论的最大温度拓展效果。矫正能力(CP)被定义为 PCS 将温暖或寒冷的环境温度“校正”到中性的程度,本节将其纳入 PCS 环境影响效果的评价指标^[10]。为便于横向对比,图 10 中还展示了预测平均投票(PMV)方程求得的 80%满意率对应的环境温度范围。总体来看,单个 PCS 的使用可以将可接受温度向下拓展至

10~15 °C,向上拓展至 35 °C 左右。多个 PCS 的联合加热能使可接受温度下限降低到 5 °C 左右。

不同 PCS 效果之间的差异可能取决于类型、尺寸与功率。热电与水冷座椅比通风座椅更能适应高温工况,通风座椅只能将可接受温度提高至为 30 °C,范围比前二者低 5 °C 左右。对于图 10 所示的相似类型加热座椅,当额定加热功率分别为 60^[26]、55^[31]、45^[39]、16 W^[32] 时,温度分别向下拓展至 9.34、11.94、13.24、13.47 °C。可以认为,座椅在寒冷侧的适应能力与加热功率具有相关性。此外,加热底板也表现出优异的性能,下限温度可拓展至 9.20 °C^[66]。正如前文提到的,0.5 m×0.5 m 的加

热面积和 110 W 加热功率已足以对局部环境温度产生影响。

乘员舱温度设定点将影响空调通风负荷与车体传热负荷。通过合理的 PCS 组合及参数设定,将乘员的可接受温度拓展到 10 °C 以下和 30 °C 以上是可行的,为汽车空调采用更节能的温度设定点提供了支持。此外,这种可接受温度的拓宽对于过渡季的汽车空调节能具有重要意义,驾乘人员可以通过类似的 PCS 组合,减少对空调的依赖^[67]。此外,电动汽车的电池可以对 VC-PCS 进行直接驱动,不依赖内燃机的间接电能转化,因此能够实现不同设备功

率的精确灵活调控。

值得一提的是,在非均匀环境中,受试者对环境的不满意率不仅取决于整体热感觉。根据 Zhang 等^[68]的研究,即使整体热感觉为中性时,群体的不满意百分比也会在 5%~40% 变化。身体各部位间热感觉的不均匀性也是影响热可接受性的另一重要因素^[68]。暴露于高度非均匀环境的乘员,通常很难准确描述自己的整体热状态,特别是身体节段间的局部热感觉差距过大时。Fanger 的方法主要面向稳态均匀热环境,使用整体热感觉 ± 1 作为可接受判据可能会存在误差。

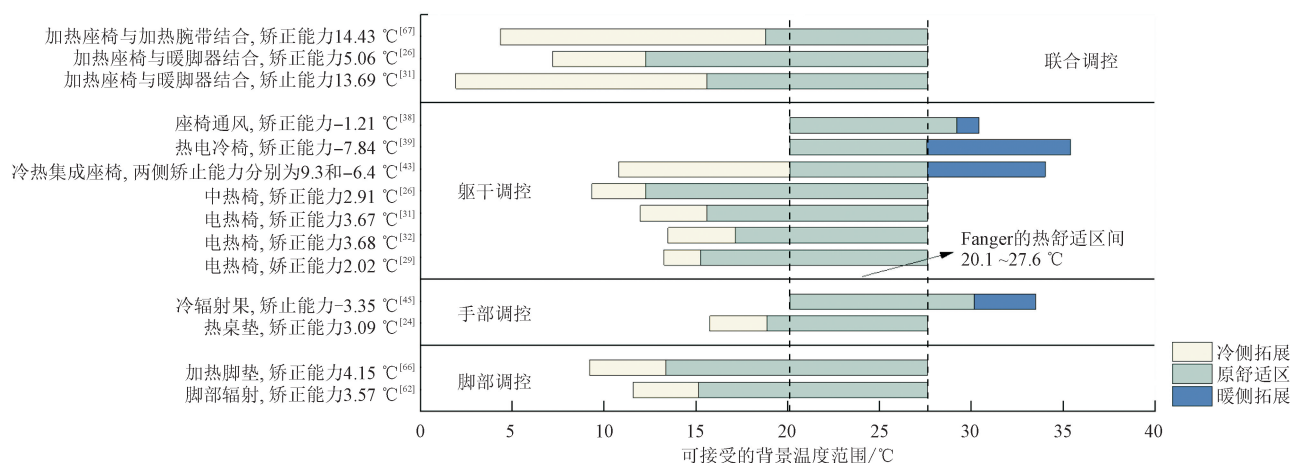


图 10 通过 PCS 增加对背景温度的可接受性

Fig. 10 Increasing the acceptability of occupants to background temperature through PCS

4 总结与展望

本文在电动汽车热环境营造视角下对 PCS 的调控性能进行了整合性量化分析,主要结论如下。

(1)从整体热感觉和热舒适的改善效果看,躯干、手部和脚部调控设备的潜力都应得到关注。同时,VC-PCS 的调控策略将对乘员热舒适产生重要影响,这不仅要求设备具有灵活可控的加热或冷却功率,还需要它们具备与乘员舱温度的联合调控能力。

(2)通过对局部节段的分析,加热或冷却的目标区域具有最明显的热感觉或热舒适变化,而受制于血流传热和热传导的范围,其他部位的改善效果有限。因此,乘员舱热舒适提升依赖于不同设备的协调配合。以躯干为目标的座椅热调控设备具有较大接触面,对乘员舱环境具有良好适应性,在此基础上辅以足部和手部调控,能够满足大多数部位的热需求。

(3)VC-PCS 可以在足够大的环境温度范围下保证乘员处于热舒适区间,这意味着汽车空调设定点可以放宽,冷热负荷也会随之降低。这种低能耗供冷供热模式对电动汽车续航里程的提升具有重要意义。

未来需关注传热机制对人体热舒适改善效果的影响^[42],比如充分结合热传导型设备的高效性以及辐射型设备的舒适性^[42,69]。此外,现阶段的 PCS 实验数据以办公场景为主,与瞬态非均匀的真实驾乘场景具有较大差异,后续更多的测试是必要的,特别是关于乘员舱手部和脚部调控设备的热舒适测试数据,在已有文献中鲜有报道。

另外需要关注的是,相关研究及规范的滞后使 VC-PCS 现处于工程实践先行于理论研究的发展阶段,在乘员舱热环境营造方面缺乏科学引导。作者团队在先前的综述中对当前应用到乘员热舒适评估的主要理论进行了介绍^[70],并将热生理模型与热舒适模型相结合,实现了乘员皮肤温度和局部热感觉

良好的预测效果。由于 VC-PCS 会引起输入边界条件的变化,准确量化环境-设备-人体之间的传热关系,是后续模型开发的重点。对于加热方向盘、加热座椅等热传导型设备,需要考虑对人体的附加热阻和材料蓄热引起的延迟作用。对于对流型设备,特别是冷却型,需额外关注气流对湿阻的影响和对潜热交换的强化。辐射设备则涉及不规则表面与各个身体节段间的换热量计算,作者团队在先前的研究中对角系数的快速计算提供了一些思路^[71]。

电动汽车的蓬勃发展和人们对驾乘舒适性要求的提高,为 VC-PCS 带来广阔的发展机遇。可以预见的是,随着相关设备的标准化和成熟化,VC-PCS 将在未来的整车能量管理和提高市场竞争力方面扮演重要的角色。

参考文献:

- [1] YU Hang, NIU Songyan, SHANG Yitong, et al. Electric vehicles integration and vehicle-to-grid operation in active distribution grids: a comprehensive review on power architectures, grid connection standards and typical applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 168: 112812.
- [2] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知: 国发〔2021〕23 号 [EB/OL]. (2021-10-26) [2025-05-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [3] 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(4): 636-642.
ZOU Ying, ZHAO Jingde, ZOU Yue. Thermal comfort of personal comfort system in electric vehicles [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2020, 46(4): 636-642.
- [4] WENG C L, KAU L J. Design and implementation of a low-energy-consumption air-conditioning control system for smart vehicle [J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2019, 2019(1): 3858560.
- [5] LAKATOS Á. Thermal insulation capability of nano-structured insulations and their combination as hybrid insulation systems [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 41: 102630.
- [6] HUANG Xianghui, LI Kuining, XIE Yi, et al. A novel multistage constant compressor speed control strategy of electric vehicle air conditioning system based on genetic algorithm [J]. *Energy*, 2022, 241: 122903.
- [7] HUANG Yue, WU Xiuchun, JING Jiahao. Research on the electric vehicle heat pump air conditioning system based on R290 refrigerant [J]. *Energy Reports*, 2022(S7): 447-455.
- [8] LEE D, LEE H. Impact of focus-and diffuse-type air vents on cabin thermal comfort [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2020, 21(5): 1315-1322.
- [9] VESELY M, ZEILER W. Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance-a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 34: 401-408.
- [10] ZHANG Hui, ARENS E, ZHAI Yongchao. A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments [J]. *Building and Environment*, 2015, 91: 15-41.
- [11] LUO Wei, KRAMER R, DE KORT Y, et al. Effectiveness of personal comfort systems on whole-body thermal comfort-a systematic review on which body segments to target [J]. *Energy and Buildings*, 2022, 256: 111766.
- [12] TIAN Xiaoyu, LIU Weiwei, LIU Jiawei, et al. Effects of personal heating on thermal comfort: a review [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(7): 2279-2300.
- [13] HOOSMAND S M, ZHANG Hui, JAVIDANFAR H, et al. A review of local radiant heating systems and their effects on thermal comfort and sensation [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 296: 113331.
- [14] ALAHMER A, ABDELHAMID M, OMAR M. Design for thermal sensation and comfort states in vehicles cabins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36: 126-140.
- [15] QI Liangkui, LIU Jianhua, ZHANG Liang, et al. Study on local thermal sensation and model applicability in vehicle cabin under different driving states [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2021, 57(1): 41-52.
- [16] 陈吉清, 李晓婷, 兰凤崇, 等. 非均匀热环境人体局部热响应对身体热感觉影响差异性分析 [J]. *汽车工程*, 2023, 45(11): 2034-2046.
CHEN Jiqing, LI Xiaoting, LAN Fengchong, et al. Analysis of differential effect of local thermal response on overall thermal sensation in non-uniform thermal environment [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(11): 2034-2046.
- [17] HE Yansong, YANG Jie, LING Jing, et al. Predictive modeling for overall thermal sensation of vehicle occupants based on local thermal sensation when warming up [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D Journal of Automobile Engineering*

- neering, 2020, 234(8): 2127-2134.
- [18] 张文灿, 陈吉清, 兰凤崇. 汽车乘员舱升温过程中非均匀热环境下乘员热响应试验 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 210.
- ZHANG Wencan, CHEN Jiqing, LAN Fengchong. Thermal response test of passenger compartment in non-uniform thermal environment during temperature rise [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 210.
- [19] SCHWEIKER M, FUCHS X, BECKER S, et al. Challenging the assumptions for thermal sensation scales [J]. Building Research & Information, 2017, 45(5): 572-589.
- [20] LI Peixian, PARKINSON T, BRAGER G, et al. A data-driven approach to defining acceptable temperature ranges in buildings [J]. Building and Environment, 2019, 153: 302-312.
- [21] FANGER P O. Thermal comfort [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1970.
- [22] ZHANG Hui, ARENS E, 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.
- [23] LEE M, SHIN Y, LEE H, et al. Investigation of bio-signal changes of occupants resting in buildings using local cooling and heating seats [J]. Energy and Buildings, 2021, 245: 111092.
- [24] CHAO Jia, LI Shaoxuan, ZHANG Zhicheng, et al. Differences in heating effects of three personalized heating devices under various indoor temperatures: table heating pad, cushion heating pad and leg heating pad [J]. Indoor and Built Environment, 2024, 33(3): 571-582.
- [25] OI H, TABATA K, NAKA Y, et al. Effects of heated seats in vehicles on thermal comfort during the initial warm-up period [J]. Applied Ergonomics, 2012, 43(2): 360-367.
- [26] OI H, YANAGI K, TABATA K, 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.
- [27] BROOKS J E, PARSONS K C. An ergonomics investigation into human thermal comfort using an automobile seat heated with encapsulated carbonized fabric (ECF) [J]. Ergonomics, 1999, 42(5): 661-673.
- [28] 田健. 基于农村地区座椅辅助供暖方式的热舒适性研究和经济性分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [29] YANG Hecheng, CAO Bin, ZHU Yingxin. Study on the effects of chair heating in cold indoor environments from the perspective of local thermal sensation [J]. Energy and Buildings, 2018, 180: 16-28.
- [30] VESELY M, MOLENAAR P, VOS M, et al. Personalized heating-comparison of heaters and control modes [J]. Building and Environment, 2017, 112: 223-232.
- [31] HE Yingdong, WANG Xiang, LI Nianping, 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.
- [32] PASUT W, ZHANG Hui, 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.
- [33] PASUT W, ZHANG Hui, ARENS E, et al. Effect of a heated and cooled office chair on thermal comfort [J]. HVAC&R Research, 2013, 19(5): 574-583.
- [34] TANG Yin, YU Hang, ZHANG Kege, et al. Thermal comfort performance and energy-efficiency evaluation of six personal heating/cooling devices [J]. Building and Environment, 2022, 217: 109069.
- [35] 冯爽, 顾赵季, 于国清, 等. 夏热冬冷地区加热座椅个性化研究 [J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(4): 64-70.
- FENG Shuang, GU Zhaoji, YU Guoqing, et al. Personalized study of heated seats in hot summer and cold winter areas [J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(4): 64-70.
- [36] WANG Zhen, ZHANG Yuanyuan, XIA Yun, et al. Study on personal comfort heating system and human thermal comfort in extremely low-temperature building environments [J]. Building and Environment, 2024, 259: 111640.
- [37] PALLUBINSKY H, SCHELLEN L, RIESWIJK T A, et al. Local cooling in a warm environment [J]. Energy and Buildings, 2016, 113: 15-22.
- [38] WATANABE S, SHIMOMURA T, MIYAZAKI H. Thermal evaluation of a chair with fans as an individually controlled system [J]. Building and Environment, 2009, 44(7): 1392-1398.
- [39] YANG Hecheng, DENG Yue, CAO Bin, et al. Study on the local and overall thermal perceptions under non-uniform thermal exposure using a cooling chair [J]. Building and Environment, 2020, 176: 106864.
- [40] 胡杭君, 王懿, 曹品金, 等. 石墨烯加热垫在汽车座椅上的应用与展望 [J]. 上海汽车, 2023(10): 56-58.

- HU Hangjun, WANG Yi, CAO Pinjin, et al. Application and prospect of graphene heating pad in car seats [J]. *Shanghai Auto*, 2023(10): 56-58.
- [41] 杨姣, 战磊, 肖海涛, 等. 新型热电空调座椅系统设计研究 [J]. *汽车零部件*, 2021(9): 36-40.
- YANG Jiao, ZHAN Lei, XIAO Haitao, et al. Research on the design of new thermoelectric ac seat system [J]. *Automobile Parts*, 2021(9): 36-40.
- [42] SONG Wenfang, ZHANG Ziran, CHEN Zihao, et al. Thermal comfort and energy performance of personal comfort systems (PCS): a systematic review and meta-analysis [J]. *Energy and Buildings*, 2022, 256: 111747.
- [43] ZHANG Y F, WYON D P, FANG Lei, et al. The influence of heated or cooled seats on the acceptable ambient temperature range [J]. *Ergonomics*, 2007, 50(4): 586-600.
- [44] IWATA R, KAWAMURA T, OKABE F, et al. Effects of palm cooling on thermoregulatory-related and subjective indicators during exercise in a hot environment [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2024, 120: 103803.
- [45] HE Yingdong, LI Nianping, HE Meiling, et al. Using radiant cooling desk for maintaining comfort in hot environment [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 145: 144-154.
- [46] CHEN Xue, ZHANG Zhaohua, YANG Yutong. Preferred local electrical heating and its effect on overall thermal response [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2023, 35(4): 526-544.
- [47] DENG Yue, CAO Bin, YANG Hecheng, et al. Effects of local body heating on thermal comfort for audiences in open-air venues in 2022 Winter Olympics [J]. *Building and Environment*, 2019, 165: 106363.
- [48] LUO Maohui, WANG Zhe, ZHANG Hui, et al. High-density thermal sensitivity maps of the human body [J]. *Building and Environment*, 2020, 167: 106435.
- [49] TAMURA T, LEE U J. Thermal spot over human body surface: part II regional difference in warm spot distribution [J]. *Journal of Human and Living Environment*, 1995, 2(1): 37-42.
- [50] ZHANG Hui, ARENS E, HUIZENGA C, et al. 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.
- [51] PARKINSON T, DE DEAR D. Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia [J]. *Building Research & Information*, 2015, 43(3): 288-301.
- [52] 韩奔. 具有加热和离手检测功能的方向盘智能控制系统研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2022.
- [53] 通用汽车环球科技运作有限责任公司. 包括石墨烯热电元件的用于车辆的方向盘: CN202010001184.9 [P]. 2020-07-10.
- [54] 东风汽车股份有限公司. 一种液体加热的汽车方向盘: CN202010736062.4 [P]. 2020-11-10.
- [55] 长安大学. 一种防滑吸汗可调温方向盘套: CN202123012793.3 [P]. 2022-05-27.
- [56] SIXTUS R P, GALLAND B C, COTTER J D. Foot cooling does not improve vigilance but may transiently reduce sleepiness [J]. *Journal of Sleep Research*, 2019, 28(3): e12701.
- [57] ZHANG Hui, ARENS E, TAUB M, et al. Using footwarmers in offices for thermal comfort and energy savings [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 104: 233-243.
- [58] LIU Chao, TANG Yuanze, SUN Limei, et al. Effects of local heating of body on human thermal sensation and thermal comfort [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 53: 104543.
- [59] DU Chenqiu, LIU Hong, LI Caijie, et al. Demand and efficiency evaluations of local convective heating to human feet and low body parts in cold environments [J]. *Building and Environment*, 2020, 171: 106662.
- [60] LUO Maohui, ARENS E, ZHANG Hui, et al. Thermal comfort evaluated for combinations of energy-efficient personal heating and cooling devices [J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 206-216.
- [61] LI Qibin, LIU Hong, WU Yuxin, et al. Effects of constant and fluctuating temperature modes of foot heating on human thermal responses in cold environments [J]. *Building and Environment*, 2023, 238: 110364.
- [62] 陈淑琴, 陈悦, 华颖, 等. 个人舒适系统作用下的杭州市冬季住宅居民热舒适特征 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(5): 223-232.
- CHEN Shuqin, CHEN Yue, HUA Ying, et al. Thermal comfort characteristics of residential residents in Hangzhou in winter under the action of personal comfort system [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2022, 49(5): 223-232.
- [63] DENG Yue, CAO Bin, LIU Bin, et al. Effects of local heating on thermal comfort of standing people in extremely cold environments [J]. *Building and Environment*, 2020, 185: 107256.

- [64] 上汽通用五菱汽车股份有限公司. 一种汽车脚部供暖装置: CN201621291103.9 [P]. 2017-10-03.
- [65] WATANABE Y, NOMOTO A, PARKINSON T, et al. Thermal perception of infrared radiation applied at different wavelengths to distal body segments in neutral and cool ambient environments [J]. *Building and Environment*, 2024, 262: 111783.
- [66] WANG Haiying, LI Wenyu, WANG Jie, et al. Experimental study on local floor heating mats to improve thermal comfort of workers in cold environments [J]. *Building and Environment*, 2021, 205: 108227.
- [67] ZHANG Hui, ARENS E, KIM D E, et al. Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task-ambient conditioning system [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(1): 29-39.
- [68] ZHANG Yufeng, ZHAO Rongyi. Effect of local exposure on human responses [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2737-2745.
- [69] WANG Lijuan, TIAN Yufei, KIM J, et al. The key local segments of human body for personalized heating and cooling [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2019, 81: 118-127.
- [70] 曾映祺, 夏海峰, 翟永超, 等. 汽车乘员舱空调热舒适测试与评价方法 [J]. *暖通空调*, 2024, 54(5): 33-41.
- ZENG Yingqi, XIA Haifeng, ZHAI Yongchao, et al. Testing and evaluation methods for thermal comfort of air conditioning in automobile cabins [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2024, 54(5): 33-41.
- [71] ZENG Yingqi, LIANG Yaowen, LUO Maohui, et al. Calculating the local and overall view factors of a multi-segment human model [J]. *Energy and Buildings*, 2024, 325: 114967.

(编辑 亢列梅)