

冬季汽车座舱不均匀热环境及人体舒适性研究

杨宇鑫^{1,2}, 余娟^{1,2}, 金妍薇^{1,2}, 林波荣^{1,2}, 师劭航^{1,2}

(1. 清华大学建筑学院, 100084, 北京;

2. 清华大学生态规划与绿色建筑教育部重点实验室, 100084, 北京)

摘要: 针对汽车座舱环境瞬态、不均匀、强辐射等特性引发的热响应机制不明确的问题,采取现场实验研究方法,基于冬季早晚通勤期间实车驾驶实验,探究冬季汽车空调系统工作时舱内环境时空异质性及人体动态热反应规律。结果表明:首先,冬季空调供暖期间垂直方向存在显著“头热脚冷”分层,平均温差达 $(7.20 \pm 1.16)^\circ\text{C}$,水平方向脚部区域温差最大,为 $(5.15 \pm 1.36)^\circ\text{C}$,前后舱平均温差为 $(2.12 \pm 0.54)^\circ\text{C}$ 。其次,座舱热环境呈现显著动态变化,前 3 min 平均升温速率高达 $1.8^\circ\text{C}/\text{min}$,20 min 后趋于稳定(变化率小于 $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$);“环境-主观反馈解耦”现象明显,人体心理感知响应更快,约 6 min 即趋于稳定;光环境虽存在昼夜差异($0 \sim 3837 \text{ lx}$),但人体能适应较大照度范围的光。最终,确定了典型冬季着装服装热阻为 1.45 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)下冬季座舱环境的热中性温度(空气温度 $T_a = 19.3^\circ\text{C}$,操作温度 $T_o = 16.8^\circ\text{C}$,等效空间温度 $T_{\text{eq}} = 16.5^\circ\text{C}$),该值显著低于 ISO 标准推荐值。研究成果为提升座舱舒适性及优化空调控制策略提供理论支撑,助力汽车行业低碳化、人因化绿色发展。

关键词: 汽车座舱;空调系统;热环境;现场实验研究;冬季

中图分类号: R852.12;TB611 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603001 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0001-08

Study on Non-Uniform Thermal Environment and Human Comfort in Automotive Cabins During Winter

YANG Yuxin^{1,2}, YU Juan^{1,2}, JIN Yanwei^{1,2}, LIN Borong^{1,2}, SHI Shaohang^{1,2}

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. MOE Key Laboratory of Eco-Planning & Green Building, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To address the unclear thermal response mechanisms caused by the transient, non-uniform, and radiation-dominated characteristics of automobile cabin environments, this study adopts a field experimental approach. Based on real-world driving experiments during morning and evening commutes in winter, this study investigates the spatiotemporal heterogeneity of cabin environments and the patterns of dynamic human thermal responses under heating by automotive air conditioning systems. The results show that: First, significant vertical thermal stratification with a “head-warm-foot-cold” pattern occurs during winter heating, with an average vertical temperature difference of $(7.20 \pm 1.16)^\circ\text{C}$. The maximum horizontal temperature difference in

收稿日期: 2025-07-25。 作者简介: 杨宇鑫(1994—),男,助理研究员;林波荣(通信作者),男,教授,博士生导师。
基金项目: 国家自然科学基金杰青延续项目(52425801);国家资助博士后研究人员计划资助项目(GZC20252157);清华大学梅赛德斯奔驰可持续交通联合研究院资助项目。

网络出版时间: 2025-10-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251014.1907.006>

the foot region reaches $(5.15 \pm 1.36)^\circ\text{C}$, while the average temperature difference between front and rear cabins is $(2.12 \pm 0.54)^\circ\text{C}$. Second, the cabin thermal environment exhibits pronounced dynamic changes: the average heating rate in the first 3 min is as high as $1.8^\circ\text{C}/\text{min}$, stabilizing after 20 min (variation rate less than $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$). A notable “environment-subjective feedback decoupling” is observed, with human thermal sensation responding more rapidly and stabilizing in about 6 min. Although the luminous environment shows diurnal differences (0—3 837 lx), humans can adapt to a wide range of illuminance levels. Finally, for typical winter clothing of 1.45 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), the thermal neutral temperatures for the winter cabin environment are determined (air temperature $T_a = 19.3^\circ\text{C}$; operative temperature $T_o = 16.8^\circ\text{C}$; equivalent spatial temperature $T_{eq} = 16.5^\circ\text{C}$). These values are significantly lower than those recommended by the ISO standard. The findings provide theoretical support for improving cabin comfort and optimizing air conditioning control strategies, contributing to the low-carbon, human-centric green development of the automotive industry.

Keywords: automotive cabin; air conditioning system; thermal environment; field experimental study; winter

随着我国汽车保有量的持续增长,驾乘人员对车辆座舱环境舒适性的需求日益提升^[1]。冬季车内人工环境的营造面临多重挑战:一方面需要快速提升低温环境下的座舱温度;另一方面需应对车内外显著温差、行驶工况动态变化以及乘员个体热需求差异等复杂因素。传统静态热舒适理论,如 PMV-PPD(predicted mean vote-predicted percentage of dissatisfied)模型在动态行驶场景中的适用性受到质疑^[2-4]。

目前,国内外学者对汽车座舱人工环境的舒适性研究逐渐增多^[5-7]。陈吉清等^[8]结合人体热调节模型的耦合计算方法,通过 Berkeley 热舒适模型评价空调供暖和供冷工况下乘员动态热反应和热舒适。研究发现,由于乘员舱热环境非均匀特性、人体自身组织结构与新陈代谢水平等因素的不同,乘员不同部位的皮肤温度和热感觉(thermal sensation vote,TSV)响应存在差异。Zhou 等^[9]对夏季室外驾驶工况下乘员舱热环境进行了研究,发现空调制冷条件下车内空气温度分布不均匀且随驾驶时间动态变化,平均皮肤温度与平均热感觉之间存在较好的相关性。赖晨光等^[10]在优化电动汽车气流组织的研究中发现,座舱温度分布不均匀对乘员热舒适影响较大。Han 等^[11]在 SUV 上开展了实验,对座舱高度不均匀的热环境中驾乘人员局部热舒适水平进行快速预测。贺岩松等^[12]测试了汽车空调供暖工况下车内热流场的动态变化,发现乘员舱内空气温度在垂直和水平空间上均存在显著的非均匀性,且不同位置乘员皮肤温度响应差异性较明显。Daanen 等^[13]开展了偏热、偏冷及中性热环境下的驾

驶表现实验,表明相比于中性环境,偏冷环境下,受试者的驾驶表现降低了 16%,偏热环境中降低了 13%。

现有关于汽车座舱热舒适性的实验研究多集中于环境模拟舱的稳态工况,或室外/停车场停放的近稳态工况。此类方法虽能有效控制变量,却难以反映真实道路动态特性。车舱热环境呈现强瞬变特征,现有研究对实际道路驾乘过程的动态环境及舒适性研究尚不充分。本研究通过真实路况实车实验,重点探究冬季空调供暖工况下驾乘人员对座舱光热环境动态响应规律。研究成果将为智能座舱温控系统的设定提供理论依据,对提升新能源汽车能效水平、实现个性化热舒适需求响应具有重要工程实践价值。

1 研究方法

1.1 环境参数测试

实验于 2025 年 1 月 7 日到 1 月 14 日在北京某校园 8:00 及 18:00 进行,模拟冬季早、晚驾乘最不利工况。本研究采用某紧凑型轿车作为实验车辆,车辆长、宽、高分别为 4 783、1 810、1 442 mm,前、后挡风玻璃面积分别约为 1.2 、 0.8 m^2 ,侧窗面积约为 $4 \times 0.19 \text{ m}^2$ 。实验期间未打开天窗遮阳板及车窗。考虑到座舱环境不均匀性,本研究对室内外环境温度、不同人员位置左、右两侧 3 个高度(头部、腰部、脚部)空气温度、座舱不同内壁面表面温度、驾驶舱黑球温度、太阳辐射强度以及驾驶员眼部光谱进行监测。其中,环境参数每秒进行逐时记录,驾驶员眼部光谱监测跟随主观投票同步进行。

1.2 受试者选择及主观评价

实验共邀请 12 名青壮年男性(4 名驾驶员及 8 位乘客)作为受试者参与实验,年龄集中在 21~39 岁,身体质量指数(BMI)为 22~28。需要说明的是,本研究所采用的受试者数量高于统计学要求的最低 6 人次^[14]。文献[15-16]均采用 8 名受试者开展相关实验研究。

实验中每位受试者参与 5 个工况实验,详细实验工况设定如表 1 所示,共计 59 人次参与实验,收集到 649 组有效问卷。实验期间,空调风速统一设置为低速,出风口百叶方向为水平。本文重点对工况 1 数据进行分析。为了确保所得舒适区间的有效性,采用全部数据拟合求解冬季汽车座舱环境舒适区间。

表 1 实验工况设定

Table 1 Experimental settings

工况	温度情况	设定温度
1	偏凉	0~45 min:18℃
2	中性	0~45 min:22℃
3	偏热	0~45 min:26℃
4	预热	-5~0 min:16℃; 0~45 min:22℃
5	变温	0~15 min:26℃; 15~45 min:22℃

实验期间对受试者着装进行统一要求,平均服装热阻为 1.45 ± 0.10 clo(1 clo = $0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)^[17-18]。驾驶员新陈代谢率为 1.2 met(1 met = $58.2 \text{ W}/\text{m}^2$),乘客为 1.1 met。主观投票评价标尺如表 2 所示。

表 2 主观投票标尺

Table 2 Subjective voting scale

类别	主观投票标尺
热感觉	-3(冷),-2(凉),-1(稍凉),0(适中),1(稍暖),2(暖),3(热)
光感觉	-3(非常暗),-2(暗),-1(稍暗),0(适中),1(稍亮),2(亮),3(非常亮)
潮湿感	-3(很潮湿),-2(潮湿),-1(有点潮),0(适中),1(有点干),2(干燥),3(很干燥)
舒适感	-3(非常不舒适),-2(不舒适),-1(稍不舒适),1(稍舒适),2(舒适),3(非常舒适)

1.3 实验流程

实验分为 3 个阶段,前 20 min 为室内适应准备期,随后模拟人们外出驾车/等车,有短暂 5 min 室外热暴露。随后开始正式实验,考虑到座舱温度变化率存在明显衰减,其中正式实验 0~9 min 每 3 min 进行一次投票,随后 9~25 min 每 5 min 进行

一次投票,最后 25~45 min 每隔 10 min 投票一次,实验流程如图 1 所示。

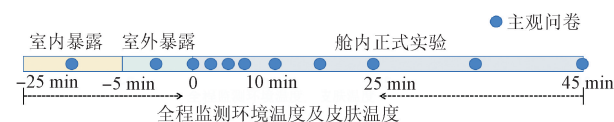


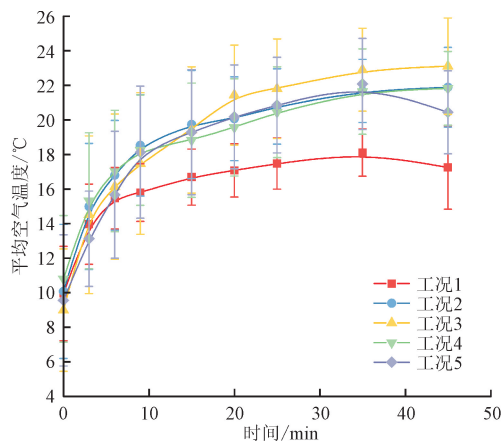
图 1 实验流程图

Fig. 1 Experimental flow chart

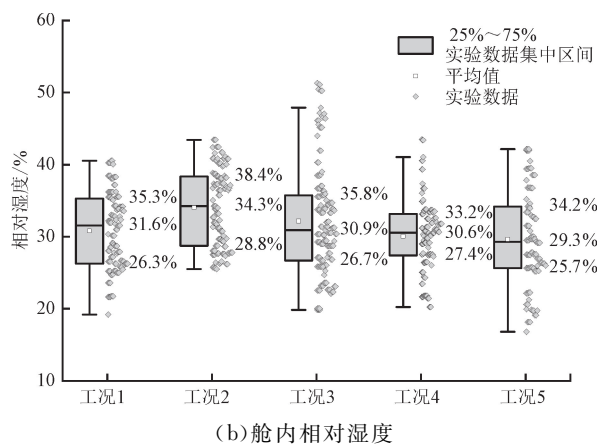
2 驾乘期间热环境及舒适性结果分析

2.1 热环境及热反应特征分布

图 2 展示了不同工况下座舱平均环境温度随时间变化的趋势以及各工况下舱内相对湿度的分布情况。由图 2(a)可见,各工况 45 min 后未稳定达到设定值,均略低于设定温度。进入车舱前 3 min 温度基本达到 15℃左右,由于工况 4 预热高于工况 2 近 0.5℃,该阶段内温度变化率最高,最大达到 $1.8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。综合而言,设定温度越高,温度变化率趋于稳定时间越长;基本 20 min 后,温度变化率均小于 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,趋于稳态。



(a) 座舱平均环境温度



(b) 舱内相对湿度

图 2 实验期间座舱环境参数

Fig. 2 Cockpit environmental parameters during the experiment

图2(b)展示了各工况下舱内相对湿度的统计分布。工况1~5舱内平均相对湿度分别为30.8%、34.1%、32.2%、30.0%、29.6%，整体集中在28%~32%，约30%~47%的相对湿度值低于30%，低于建筑室内环境相对湿度推荐下限。因此，建议对座舱环境湿度给予关注。进一步分析，不同工况均呈现出先增加后下降的趋势，可能与人员上车呼吸释放湿气，稳定后，随着温度上升，相对湿度下降。

图3展示了实验期间驾乘人员热、湿感觉投票情况。总体趋于正态分布，偏冷侧投票略多，受试者约10~15 min后，热感觉趋于中性；“贪婪效应”预热和变温工况初始热感觉较高，但最终热感觉低于工况1。

在湿感觉投票方面，约40%人员选择有点干或干燥，且大部分投票对应的热舒适感觉为稍不舒适。座舱内相对湿度情况值得关注，需进行加湿。

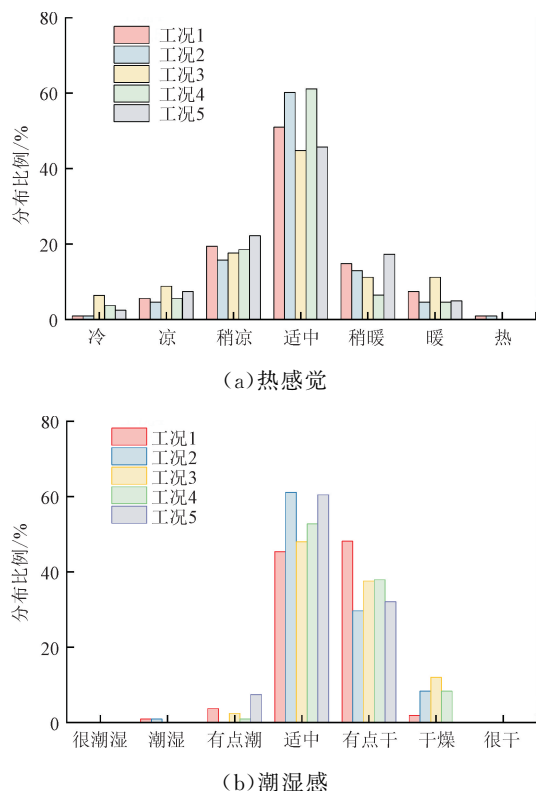


图3 实验期间主观反应投票情况

Fig. 3 Distribution of subjective thermal response votes

2.2 座舱热环境不均匀性分析

基于上述分析各工况环境温度及主观热感觉相差不大，由于文章篇幅所限，本文重点对工况1 (18℃)进行分析。

图4对比了实验期间(汽车空调设置为18℃、低速、空调百叶水平设置)不同方向温差(某时刻最

大差值)情况。监测数据表明，冬季汽车座舱内热环境存在显著的空间非均匀性特征。在竖直方向上，平均温差达到 $(7.20 \pm 1.16)^\circ\text{C}$ ，进入车舱6 min时出现最大值 8.96°C ，随后温差逐渐降低。这说明了在汽车座舱有限空间中热分层效应显著，符合热空气自然对流引起的头热脚冷的典型现象。水平方向的热分布呈现逐层递减特征：脚部区域温差最大为 $(5.15 \pm 1.36)^\circ\text{C}$ ，腰部为 $(1.50 \pm 0.50)^\circ\text{C}$ ，头部为 $(1.19 \pm 0.52)^\circ\text{C}$ ，依次降低，这种差异可能与空调出风口布局及气流组织分布相关。脚部温度差异主要体现在驾驶舱内侧温度显著高于外侧，这可能是由于内部热源集中导致的。

受试者刚进入座舱时，驾驶舱与乘员舱温差为 1.7°C 。开启空调后，第3 min温差达到最大值 3.1°C ，随后逐渐降低到 1.4°C ，两舱平均温差为 $(2.12 \pm 0.54)^\circ\text{C}$ ，这说明空调系统热量传递时存在沿程损失，建议前后舱独立设置控制策略，避免出现温差过大现象。

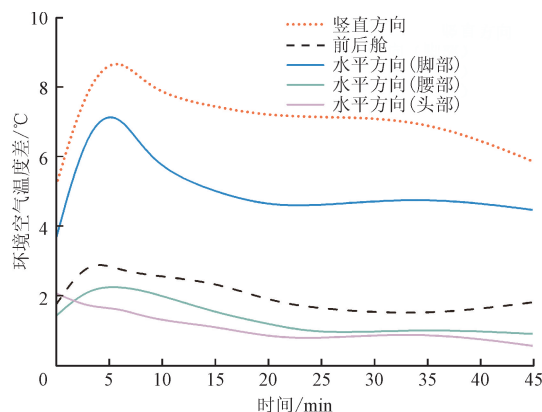


图4 实验期间座舱环境温差

Fig. 4 Temperature difference in the cabin

2.3 热感觉变化趋势

图5展示了实验期间驾乘人员平均热感觉投票值(MTS)的变化趋势。从中可见，与环境温度变化趋势较为一致，热感觉投票值呈现先快速上升后趋于稳定，变化率逐渐趋于平稳。综合而言，刚进入座舱，所有工况均处于冷感状态(平均热感觉投票值为 $-2.3 \sim -1.4$)，其中工况3受室外温度影响冷感最显著。在车内进行热暴露3 min后，各工况TSV呈现快速上升趋势，尤其是工况3，热感觉投票值上升了1.2。基本在6 min后，所有工况MTS变化低于 $0.2/\text{min}$ ，在15 min后，均低于 $0.1/\text{min}$ 。经显著性分析，不同工况间无显著性差异($p > 0.05$)。

以工况1为例详细分析。由于热感觉滞后及座舱四周冷辐射的原因,受室外热经历影响,刚进入座舱时平均热感觉投票值为-1.5。随后,逐渐增加到0.4。对应环境温度不同阶段主观热感觉投票值分别变化了1.3(0~3 min)、0(4~6 min)、0.7(10~45 min)。值得注意的是,在9 min时,整体平均热感觉趋于中性,相应的环境温度为15.8℃、皮肤温度为30.1℃,该参数低于ISO给出的舒适区间下限(18℃)。这可能是由于,本研究中受试者穿着冬季典型户外服装(1.45 clo),高服装热阻下人体通过降低临界皮肤温度阈值实现热适应的生理补偿机制。该研究结果与我国夏热冬冷地区冬季室内人员服装热阻及热中性温度接近^[19],进一步证明了本研究结果的有效性。

对整体热感觉投票进行成对 t 检验,发现在6 min后无显著性差异,即可认为主观热感觉在6 min后达到近似稳定状态。与环境温度稳定时间对比,主观热感觉稳定快于环境变化。这可能是由于后期环境变化较小低于或接近人体的可感知阈值,无法引起主观感觉的进一步显著变化。

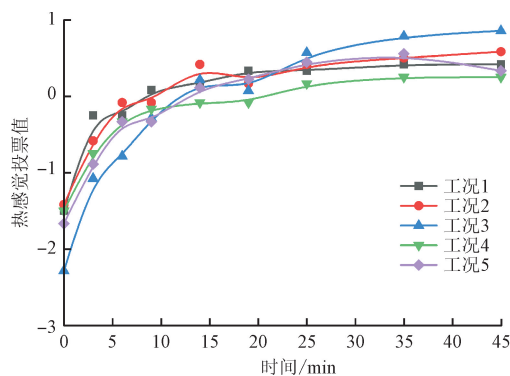


图5 整体平均热感觉变化趋势

Fig. 5 Variation in the overall mean thermal sensation vote

2.4 热感觉评价模型构建

由于人体热感觉6 min即可趋于稳定,因此本研究重点针对后续稳定阶段构建热感觉评价模型。

为了确保数据分析的可靠性,选取5个工况全部数据进行分析。通过Pearson相关性分析发现,空气温度 T_a (相关性系数 $r=0.48$)、等效空间温度 T_{eq} ($r=0.55$)、操作温度 T_o ($r=0.55$)与TSV呈显著正相关($p<0.01$),而预测平均热感觉($r=0.27$)和标准有效温度($r=0.25$)指标相关性较弱。基于统计学显著性水平,选取相关系数较高的 T_a 、 T_{eq} 、 T_o 建立热感觉评价模型,最终确定冬季汽车座舱环境

热中性温度,如表3所示。

表3 热感觉评价模型及中性温度

Table 3 Thermal sensation evaluation model and neutral temperature

拟合公式	R^2	中性温度/℃
$P_{TSV}=0.1445T_a-2.7878$	0.95	19.3
$P_{TSV}=0.1304T_{eq}-2.1448$	0.96	16.5
$P_{TSV}=0.1354T_o-2.2711$	0.95	16.8

注: P_{TSV} 为热感觉投票值。

图6以等效空间温度为例展示了热感觉投票值的变化趋势。TSV随 T_{eq} 升高呈线性增长趋势, T_{eq} 每升高1℃可使TSV标尺值增加0.13。值得注意的是, T_{eq} -TSV散点图显示同一 T_{eq} 对应TSV分布区间达±1.5,这既印证了人体通过行为调节(如增减衣物)和心理适应实现的动态热平衡机制,也揭示了个体热敏感性存在显著差异。

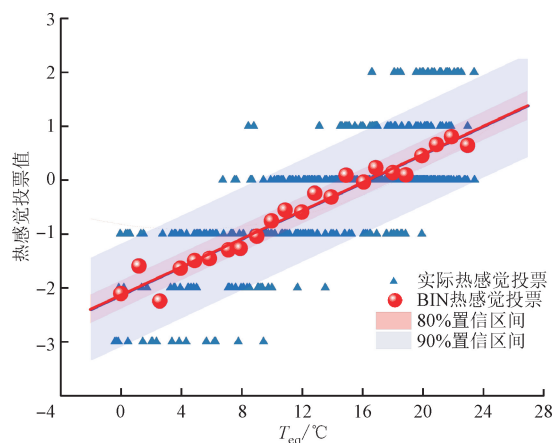


图6 热感觉评价模型

Fig. 6 Thermal sensation evaluation model

与ISO 14505-2标准推荐的舒适温度22℃相比(服装热阻 $I_{cl}=1.0$ clo),本研究所得热中性温度显著偏低。结合已有研究^[20],服装热阻每上升0.1 clo,相应的热中性温度上升0.4℃,可解释约1.8℃差异。剩余差异可能源于以下因素:首先,本实验对象限定为青壮年男性群体,其基础代谢率较混合人群较高,导致热需求降低;其次,本研究模拟了完整的“室内-室外-车舱”全流程经历,室外热暴露经历可能导致了总体热中性温度偏低。

将本文研究与已有文献结果进行对比。文献[21]将汽车座舱空调开启调控后5 min和55 min时,不同部位的 T_{eq} 同样存在舒适温度略低于ISO推荐值($I_{cl}=1.84$ clo)的情况。文献[22]对不同汽车空调供

暖模式下,人体主观及生理反应进行分析,确定中性操作温度为 17.5°C ($I_{cl}=1.0\sim 1.2\text{ clo}$)。文献[23]发现当座舱温度从 6°C 上升到 20°C 时,受试者热感觉基本在 15 min 保持稳定,同样发现在不同阶段热感觉存在显著差异性[24]。综合而言,不同研究由于工况、受试者选择、服装热阻等均存在一定差异,且座舱环境受外界影响较大,所获得的结果存在一定差异。

3 光环境及舒适性结果分析

3.1 不同时间段光环境的差异性

图 7 为驾驶员早、晚驾驶阶段人眼处光环境参数分布图。早晨座舱照度主要集中在 $(655\pm 807)\text{ lx}$,最高照度可达 $3\ 838\text{ lx}$ 。夜晚的照度集中在 $0.55\sim 15.33\text{ lx}$,不足常规阅读照明标准的 $1/10$,暗光环境易导致视觉疲劳与信息识别延迟。对相关色温分析可知,早、晚色温平均值分别为 $(9\ 160\pm 3\ 047)$ 、 $(3\ 912\pm 1\ 376)\text{ K}$ 。此外,早晨座舱显色指数相对稳定($92\%\pm 6\%$),而夜晚呈现显著波动($70\%\pm 17\%$)。夜晚低照度、低色温及低显色指数可能导致视觉效能降低甚至干扰驾驶员生理节律。

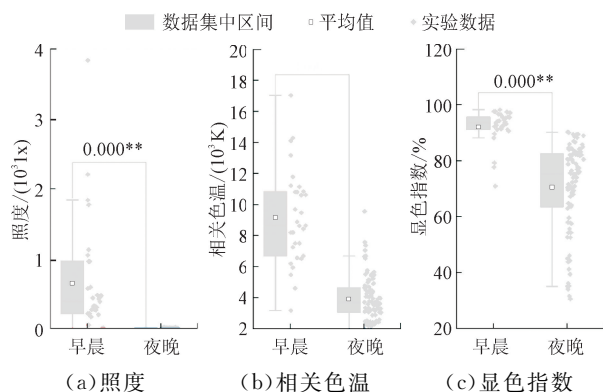


图 7 早、晚座舱光环境参数

Fig. 7 Lighting environment parameters of the cabin in the morning and evening

3.2 光环境适应性分析

图 8 对比了驾乘人员对早、晚座舱光环境的主观感受情况。总体而言,人们能较好地适应不同光环境,适应范围较广,主观光感受集中于稍暗、适中及稍亮之间。无论何时光感受为适中的人员比例最多,均达到 80% 以上。适中的光感受,在早、晚带来的综合平均光舒适投票值分别为 0.7 及 0.9 ,相差不大。

晨间偏向不舒适端的光感受投票值主要集中在适中(20.0%)、稍亮(6.7%);夜晚产生不舒适感对应的光感受分别是稍暗(3.0%)、适中(9.1%)、稍亮(1.5%)。综合而言,不同时间段的光感受会带来不

同的舒适感,夜间光感受的个体差异偏大。

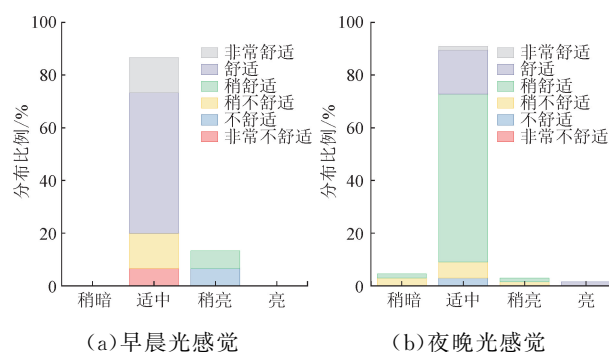


图 8 早、晚座舱主观光感受情况

Fig. 8 Subjective lighting vote in the cabin in the morning and evening

4 对比及展望

表 4 为不同文献中关于汽车座舱热环境的实验结果对比,重点关注座舱温度不均匀性和全身热舒适核心指标。由表可知:①座舱热环境存在严重的不均匀性,尤其是头脚温差,在空调供暖模式下普遍且显著(常超过 6°C ,极端可达 15°C),前后排温差相对较小($2\sim 3^{\circ}\text{C}$),但依然不可忽视。后续研究可结合座舱物理结构,深入探究不同送风口布局策略或新型材料的应用对温度场均匀性的优化效果。②目前,汽车座舱评价指标种类较多,借鉴 ISO 标准,多数研究采用等效空间温度,但该参数需要依托于实验测量,实际场景测量难度大,急需发展一种综合考虑座舱内多种环境参数(如空气温度、辐射温度、气流速度、湿度)且便于工程应用的热舒适评价新指标或模型。③由于汽车座舱环境复杂,不同研究舱内空调设置及室外环境参数存在一定差异,导致中性温度有所不同。但是可以看出,冬季座舱中性操作温度在 $17\sim 20^{\circ}\text{C}$,主要取决于服装热阻情况。

基于上述分析,未来研究可重点关注:①深入探索不同驾乘阶段(如冷启动、稳态运行)及乘员个体差异对热中性温度感知的影响。②开发基于实时环境监测与乘员热需求预测的智能空调控制策略,以动态优化舱内热环境,有效提升驾乘人员的热舒适体验与能效。③针对不同年龄、生理特征人群(如老年人、儿童等)的个性化热舒适需求展开研究,构建基于“千人千面”的差异化热舒适模型,并研发相应的智能调控算法,以实现舱内热环境的精准按需分配。

表 4 不同文献中关于汽车座舱热环境实验结果的对比

Table 4 Comparison of experimental results on the thermal environment of automobile cabin in different references

文献	空调工况	实验工况	受试者人数	座舱不均匀性(温差)	热中性温度
[25]	供暖	26 ℃ (1.30 clo)	20	头脚:6 ℃;前后排:3.4 ℃	
[23]	供暖	空调与个性化设备对比	12	空调工况:平均温差 0.7~2.4 ℃	空调工况:新标准有效温度为 22.7 ℃; $T_o=19.5\text{ ℃}$
[26]	供暖	强风雪最大制热	1 (空调假人)	头脚:15.1 ℃	
本文	供暖	18~26 ℃ (1.45 clo)	59	头脚:(7.2±1.2) ℃; 前后排:(2.12±0.54) ℃	$T_a=19.3\text{ ℃}$; $T_o=16.8\text{ ℃}$; $T_{eq}=16.5\text{ ℃}$
[27]	供冷	20~25 ℃ (阶跃)	24	头脚:−4~9 ℃; 前后排:−8~1 ℃	$T_{eq}=25.2\text{ ℃}$
[28]	供冷	22 ℃ (0.71 clo)	8	腿部:31 ℃; 脸部:26 ℃	$T_{eq}=24\text{ ℃}$

5 结 论

本研究采用真人实车驾驶实验研究的方法,探究了冬季早、晚最不利情况下,汽车座舱光热环境、驾乘人员主观感受及皮肤温度的变化规律,主要结论如下。

(1)在冬季空调供暖工况下,座舱垂直方向呈现“头热脚冷”的热分层现象(头脚温差达 7.20 ℃±1.16 ℃),水平方向驾驶舱与乘员舱存在明显温度梯度(平均温差为 2.12 ℃±0.54 ℃),建议通过优化送风策略或分区温控改善。

(2)驾乘人员热感觉在入舱 6 min 后趋于稳定,早于环境温度稳定时间(大于 20 min)。热中性温度($T_{eq}=16.5\text{ ℃}$, $T_o=16.8\text{ ℃}$)显著低于 ISO 标准推荐值($T_{eq}=22\text{ ℃}$),主要可能由于冬季高服装热阻(1.45 clo)的生理补偿效应以及室外-车舱动态热暴露经历。

(3)在冬季升温工况下,舱内相对湿度整体集中在 28%~32%,约 40%人员选择有点干或干燥,且大部分人员认为稍不舒适。因此,冬季北方地区座舱内相对湿度情况值得关注,建议进行加湿处理。

(4)晨间照度(655±807) lx 与夜晚照度 0.55~15.33 lx 相差较大,且夜晚显色指数(70%±17%)剧烈波动。然而,80%以上受试者对光环境投票“适中”,表明人体具备较强调节能力,但低照度下视觉效能下降风险仍需关注。

参考文献:

[1] 王国华,桑国辉,张英朝,等. 汽车乘员舱热舒适性影响因素多参数优化分析 [J]. 汽车工程, 2023, 45 (11): 2023-2033.
WANG Guohua, SANG Guohui, ZHANG Yingzhao,

et al. Multi-parameter optimization analysis of factors influencing thermal comfort in automobile passenger compartment [J]. Automotive Engineering, 2023, 45 (11): 2023-2033.

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

WU Qingqing, LIU Jianhua, ZHANG Liang, et al. Research progress on human thermal comfort models in asymmetric thermal environments [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(2): 79-86.

[3] ZHU Y, OUYANG Q, CAO B, et al. Dynamic thermal environment and thermal comfort [J]. Indoor Air, 2016, 26(1): 125-137.

[4] YAU Y H, TOH H S, CHEW B T, et al. A review of human thermal comfort model in predicting human-environment interaction in non-uniform environmental conditions [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(24): 14739-14763.

[5] CHEN Bingqian, LIAN Yubo, XU Longhui, et al. State-of-the-art thermal comfort models for car cabin environment [J]. Building and Environment, 2024, 262: 111825.

[6] BANDI P, MANELIL N P, MAIYA M P, et al. Influence of flow and thermal characteristics on thermal comfort inside an automobile cabin under the effect of solar radiation [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117946.

[7] KAYNAKLI O, PULAT E, KILIC M. Thermal comfort during heating and cooling periods in an automobile [J]. Heat and Mass Transfer, 2005, 41(5): 449-458.

[8] 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.
- CHEN Jiqing, ZHENG Xijiao, LAN Fengchong, et al. An analysis on thermal comfort in passenger compartment based on human thermal regulation model [J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(6): 723-730.
- [9] ZHOU Xiaojie, LAI Dayi, CHEN Qingyan. Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions [J]. *Building and Environment*, 2019, 149: 109-119.
- [10] 赖晨光, 李亮, 周毓婷, 等. 多目标智能算法的某轿车空调风道改进及乘员热舒适性优化 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(4): 19-27.
- LAI Chenguang, LI Liang, ZHOU Yuting, et al. Air duct improvement and occupant thermal comfort optimization of an automobile air conditioner with intelligent algorithm [J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2022, 36(4): 19-27.
- [11] HAN T, HUANG Linjie. A sensitivity study of occupant thermal comfort in a cabin using virtual thermal comfort engineering [C]//SAE 2005 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2005: 2005-01-1509.
- [12] 贺岩松, 凌婧, 杨洁, 等. 考虑人体热调节的乘员表面温度分布及车内热环境的数值仿真和试验 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 199-208.
- HE Yansong, LING Jing, YANG Jie, et al. Experiment and simulation for occupant's surface temperature and thermal environment with human thermal regulation model [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 199-208.
- [13] DAANEN H A M, VAN DE VLIERT E, HUANG Xu. Driving performance in cold, warm, and thermo-neutral environments [J]. *Applied Ergonomics*, 2003, 34(6): 597-602.
- [14] COHEN J. Quantitative methods in psychology: a power primer [J]. *Psychological Bulletin*, 1992, 112(1): 155-159.
- [15] LAN Li, LIAN Zhiwei. Application of statistical power analysis-how to determine the right sample size in human health, comfort and productivity research [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(5): 1202-1213.
- [16] 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.
- [17] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 [S]. Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2020.
- [18] 全国纺织品标准化技术委员会. 服装热阻测试方法: 暖体假人法: GB/T 18398—2001 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [19] 杨建军. 基于乘员感知的汽车智能座舱舒适性综合评价研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [20] 杨宇鑫. 供暖环境中热经历对人体热反应的影响与热感觉评价研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [21] 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.
- [22] WU Jingjing, LIU Jianlin, ZHAO Jingde, et al. Influencing assessment of different heating modes on thermal comfort in electric vehicle cabin [J]. *Energy and Built Environment*, 2024, 5(4): 556-567.
- [23] KIM Y, LEE M, SHIN Y, et al. Investigation of changes in Driver's biosignals and thermal comfort according to the heating method in winter [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 42: 102749.
- [24] YUN S, CHUN C, KWAK J, et al. Prediction of thermal comfort of female passengers in a vehicle based on an outdoor experiment [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 248: 111161.
- [25] HU Yuxin, ZHAO Lanping, XU Xin, et al. Experimental study on thermal environment and thermal comfort of passenger compartment in winter with personal comfort system [J]. *Energies*, 2024, 17(9): 2190.
- [26] 林虹霞, 武金模, 宋舆涵, 等. 强风暴雪环境下汽车座舱非均匀环境热舒适性实验研究 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2022, 13(4): 625-633.
- LIN Hongxia, WU Jinmo, SONG Yuhuan, et al. Thermal comfort experimental study of non-uniform vehicle environment in chilly freezing and snowstorm [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2022, 13(4): 625-633.
- [27] 邹佳庆. 车内热环境评价分析及乘员热舒适实验研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
- [28] 马凤阁. 基于乘员舱环境热舒适性的汽车空调送风方式优化 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2023.

(编辑 杜秀杰)