

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202104006



农村地区座椅辅助供暖方式下 人体热反应的变化规律

田健, 王美萍, 田琦, 张玲

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对北方农村地区“煤改电”供暖方式带来运行费较高的问题,以及农居环境室温偏低的问题提出一种座椅辅助供暖方式. 分析局部供暖方式下人体热反应的变化规律,研究人体整体热感觉、整体热舒适,以及整体热可接受度在座椅加热前后的变化和相互关系. 研究表明:座椅加热可以有效改善人体热反应,环境温度偏离热中性环境越多,改善程度越明显;3 个热反应指标在加热前密切相关,加热后因热感觉分布不均匀出现分离;以整体热舒适作为评价指标,对整体热感觉与热感觉不均匀度做线性回归分析,拟合度较高($R^2 = 0.896$);而引入平均皮肤温度与整体热感觉做拟合分析,拟合度较好($R^2 = 0.916$). 由此得到结合主观热反应与客观生理指标的综合预测评价模型,经验证预测效果较好($R^2 = 0.903$).

关键词: 座椅加热; 辅助供暖; 人体热反应; 热感觉; 预测评价模型; 农村地区

中图分类号: TU 832.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)01-0088-08

Human Body's Thermal Response Under Auxiliary Seat Heating in Rural Areas

TIAN Jian, WANG Meiping, TIAN Qi, ZHANG Ling

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to deal with the high running cost problem caused by coal to electricity heating way, and low room temperature problem in northern rural areas, a seat auxiliary heating way was proposed. Human thermal response was analyzed under local heating, and human overall thermal sensation, overall thermal comfort, and overall thermal acceptability and correlation were studied before and after seat heating. The results show that seat heating can effectively improve human thermal response. The more the environment temperature deviates from the thermal-neutral environment, the more obvious the improvement will be. The three thermal reaction indexes were closely related before heating and separated after heating due to thermal sensation uneven distribution. Taking the overall thermal comfort as the evaluation index, the linear regression analysis on the overall thermal sensation and the thermal sensation ununiformity is conducted, and the fitting degree is high ($R^2 = 0.896$); introducing the mean skin temperature to fitting analysis with the overall thermal sensation, the fitting degree is high ($R^2 = 0.916$). Thus a comprehensive prediction and evaluation model combining subjective thermal response and objective physiological indicators is obtained with good prediction effect ($R^2 = 0.903$).

收稿日期: 2021-04-07

通信作者: 王美萍(1976-),女,副教授,博士,主要从事集中暖通空调系统节能优化及新能源利用的研究. E-mail: wangmp@126.com.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAJ04B02); 科技部国际合作项目(2013DFA61580)

Keywords: seat heating; auxiliary heating; human thermal response; thermal sensation; predictive evaluation model; rural areas

近年来,在国家各项鼓励政策的保障下,“煤改电”项目取得了显著进展,其中低温空气源热泵采暖技术^[1]更以其高效和环保节能得到推广使用.然而,对于经济条件较弱的农村地区的大部分家庭而言,每年的取暖费仍旧较高,只能通过降低室内温度来减少该项费用.因此,辅助供暖成为农居环境中一种有效的取暖手段.与传统供暖方式需要对整个室内空间加热来满足人体热舒适相比,个性化供暖系统^[2-3]通过少量的能量直接加热人体周围的局部环境,在提高热舒适的同时,有效降低了供暖能耗,环保节能性显著.

Brooks 等^[4]发现在环境温度低至 5℃时,加热座椅仍能使人体躯干和大腿保持较高温度,全身热感觉保持在微凉之上,全身热舒适也要高于稍有不适.这说明使用座椅供暖可以提高人体对冷环境的适应能力.宋磊等^[5]对受试者在不同背景温度下的整体热感觉、整体热舒适和整体热可接受度的投票数据进行了综合分析,发现使用加热坐垫能在保证环境温度偏离热中性的一定前提下,较大程度地提升受试者的热舒适和对背景环境的整体满意率.此外,一些学者们开发研究了新型的座椅供暖系统,如 Pasut 等^[6-7]研究使用了一种室内通风加热座椅,对受试者在 16~29℃环境下的热感觉和热舒适投票进行分析,发现该座椅显著地提升了受试者的热感觉和热舒适,同时还可以有效改善对室内空气质量的接受程度;张宇峰等^[8-9]开发了一种可变温座椅系统,研究表明使用该可变温座椅能够提高人体对热环境的可接受程度,受试者 90%可接受温度范围为 16.0~28.9℃,对比均匀热环境可接受温度范围 21.5~26.6℃,下限扩展 5.5℃,上限扩展 2.3℃.

目前,关于座椅供暖的热舒适研究大多侧重于对人体热感觉、热舒适,以及热可接受度等 3 个热反应指标的独立分析研究,对相互之间的影响和联系研究相对较少;同时,热舒适分析大多围绕主观热反应展开,缺少客观指标来做进一步的分析和完善.本文提出一种低功率座椅辅助供暖的方式,通过主观实验的方式,分析加热前后热反应的变化趋势,并运用统计学理论分析热感觉、热舒适和热可接受度三个热反应指标之间的相互关系;同时,将平均皮肤温度作为客观评价指标,综合主观热反应和客观指标,提出适用于座椅供暖非均匀稳态热环境下的热舒适预测评价模型.

1 实验介绍

1.1 实验装置

靠背和坐垫区域以通电导热的方式加热,各区域内温控加热垫尺寸为 450 mm×450 mm,可通过变档进行无级调温.图 1 为座椅供暖示意图.实验过程中,受试者可根据自身需要进行多档位自由调节.各档位对应的加热功率,如表 1 所示.表 1 中: P 为加热功率.

1.2 实验环境

实验房间尺寸(长×宽×高)为 8.6 m×4.0 m×3.4 m,如图 2 所示.空调机组用来控制室内温度到所需水平.为避免空调机组对人体造成的

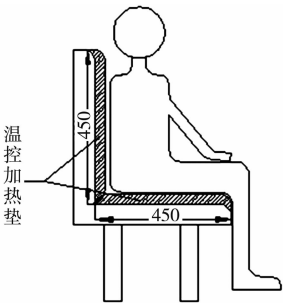


图 1 座椅供暖示意图(单位:mm)

Fig. 1 Seat heating diagram (unit: mm)

表 1 各档位加热功率表
Tab. 1 Each heating power

档位	1 档	2 档	3 档	4 档	5 档	6 档	7 档	8 档	9 档
P/W	3	6	12	16	20	25	28	30	40

吹风感影响实验结果的准确性,机组的条形送风口朝上设置,以使送风气流贴于天花板,避免直接吹向人体,并在实验过程中用帆布在靠近机组的受试者一侧进行遮挡.实验区域为两个装有加热坐垫的实验工位和室内环境参数测量点.实验使用的测量仪器有:FLUKE 971 型温湿度检测仪,量程为-20~60℃,精度为±0.5℃;QN02-BD-II-604 型数字皮温计,测量范围为-50~199.9℃,测量误差为(1±0.002)℃;ST400 型红外测温仪,量程为-32~390℃,精度为±1.5℃;QDF-6 型数字风速仪,量程为

0~30 m·s⁻¹,精度≤3%.

1.3 受试者

本次实验共有 30 名受试者,全部为在校大学生,男、女各 15 名,年龄为 23~26 岁,身高(1.7±0.1) m,身体质量指数(BMI)为 20.5±1.6. 受试者穿冬季室内服装,上身为卫衣加厚背心,下身为休闲裤加内衬裤,脚部为运动鞋加厚袜,服装平均热阻(\bar{R}_{cl})为 0.169 m²·K·W⁻¹;所有受试者身体状况良好,在实验前无剧烈运动,正常饮食和睡眠. 开始实验前,通过讲解让受试者熟悉调查问卷的填写、实验步骤和实验的概况,但不给出具体的实验工况参数,以保证他们的期望不会给实验结果带来偏差.

1.4 实验工况及方法

实验设有 3 个工况,室内环境温度分别为 14,16,18 ℃. 环境温度控制主要为自然室温结合空调微调. 每次实验提前打开空调系统对房间环境进行预处理,将室内温度控制到所需水平,并在实验过程中保持室温相对稳定;然后,对室内环境工况实时记录.

采用问卷调查获取受试者整体热感觉、整体热舒适和整体热可接受度的热投票值. 热感觉投票采用 ASHRAE 7 级标尺,热舒适投票采用 He 等^[10]提出的等级划分方法,热可接受度投票采用最初用于室内空气质量调查的可视化模拟标尺^[11],如表 2 所示.

表 2 热反应投票标尺

Tab. 2 Thermal reaction voting scale

热感觉	冷	凉	微凉	中性	微暖	暖	热
指标	-3	-2	-1	0	1	2	3
热舒适	非常不舒适	不舒适	稍有不适	没感觉	有点舒适	舒适	非常舒适
指标	-3	-2	-1	0	1	2	3
热可接受度	完全不可接受		刚刚不可接受		刚刚可接受		完全可接受
指标	-1		-0.01		0.01		1

平均皮肤温度^[12]可以真实表达整体皮肤温度的变化趋势,也可以直观有效地反映人体在不同热环境下热感觉的变化情况. 目前,适用于偏冷环境中平均皮肤温度的计算方法有 8 点法、10 点法和 12 点法,其中 Hardy-Dubois 8 点法^[13]由于设计有据,实验方便和计算简便,为人们广泛使用. 相应计算式为

$$t_{skin}=0.175t_{背}+0.19t_{大腿}+0.175t_{胸}+0.07t_{额头}+0.07t_{前臂}+0.07t_{后臂}+0.20t_{小腿}+0.05t_{手背}.$$

(1)

文中依据该方法将人体划分为背部、大腿、胸部、额头、前臂、后臂、小腿和手背共 8 个区域,在实验过程中利用热电偶温度传感器,实时采集记录各部位温度变化情况. 图 3 为实验现场情况图.

实验中每种工况测试包括 15 min 的稳定期、30 min 的适应期,以及 30 min 的暴露期. 稳定期是为了减少实验前外界环境及代谢率对受试者的影响,要求受试者在实验开始前在 20 ℃ 的房间停留 15 min,达到热中性稳定状态;适应期是为了受试者进入实验房间于实验工位就坐,不进行座椅供暖以适应实验室环境,并在 3 种环境温度下开始热反应投票,对局部皮肤温度实时记录;暴露期是为了受试者使用加热座椅进行局部供暖,期间可根据自身需要进行多档位自由调节,同时进行热反应投票和局部皮肤温度

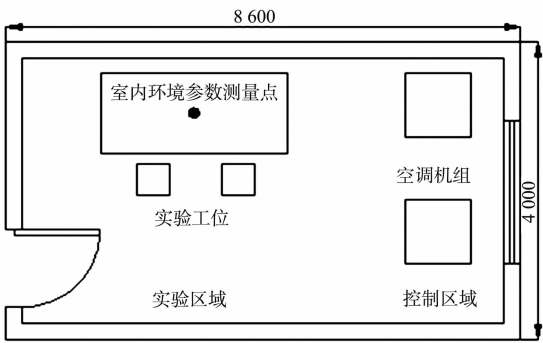


图 2 实验房间布置图(单位:mm)
Fig. 2 Experimental room layout (unit: mm)



图 3 实验现场情况图
Fig. 3 Experiment site

实时测量记录.

在适应期和暴露期内,受试者均从第 5 分钟开始填写热反应问卷,同时对身体各部位进行皮肤温度测量记录;每隔 5 min 进行一次问卷填写和温度记录,所有工况下每个人共有 36 份问卷.受试者在实验期间保持静坐,可以进行普通阅读和交谈,但不允许交流与实验相关的内容.

2 实验结果与分析

2.1 室内环境

实验区域不同工况室内温度实测值,如表 3 所示.受试者所处环境区域和壁面温度分布均匀,风速保持在 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 内,受试者无吹风感.

表 3 不同实验工况下室内温度实测值

Tab. 3 Indoor temperature measured values under different experimental conditions (°C)

序号	前壁面	后壁面	左壁面	右壁面	天花板	地板	平均值	实测值	设计值
工况 1	13.8	14.0	13.9	14.1	13.6	13.5	13.82	14.2 ± 0.1	14.0
工况 2	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	15.9	15.98	15.9 ± 0.2	16.0
工况 3	18.2	18.2	17.9	18.3	18.1	17.8	18.08	18.1 ± 0.1	18.0

利用 SPSS 22.0 分析受试者在 3 种工况下的整体热感觉、整体热舒适和整体热可接受度投票结果,经 S-W 检验验证投票结果服从正态分布;同时,对各个时间段内热反应投票值进行方差分析,确定受试者在适应期和暴露期热反应均在 30 min 内达到稳态.

2.2 整体热反应变化趋势

根据受试者在适应期和暴露期内的热反应投票结果绘制箱线图,对座椅加热前后整体热感觉、整体热舒适和整体热可接受度进行讨论和分析.受试者从适应期到暴露期内的整体热感觉投票(TSV)与整体热舒适投票(TCV)的分布趋势,如图 4,5 所示.图 4,5 中: t_{en} 为环境温度.

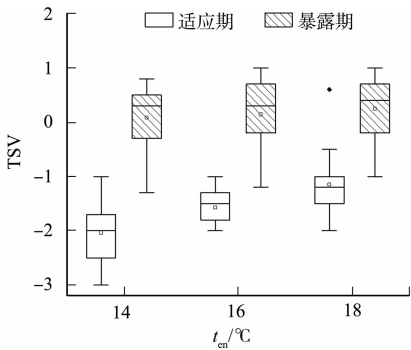


图 4 整体热感觉投票

Fig. 4 Overall thermal sensation voting

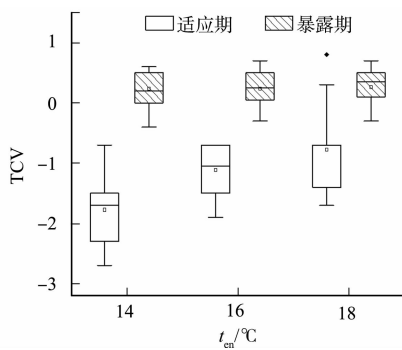


图 5 整体热舒适投票

Fig. 5 Overall thermal comfort voting

各个工况下热反应投票的具体变化情况,如表 4 所示.表 4 中: t_{en} 为环境温度.

表 4 各工况下热感觉与热舒适变化

Tab. 4 Thermal sensation and thermal comfort variations under various working conditions

$t_{\text{en}}/\text{°C}$	热感觉		热舒适	
	适应期	暴露期	适应期	暴露期
14	-2.50~-1.70 (冷至凉)	-0.30~0.50 (微凉至微暖)	-2.30~-1.50 (不舒适到稍有不适)	0~0.50 (没感觉到有点舒适)
16	-1.80~-1.30 (凉至微凉)	-0.2~0.7 (微凉至微暖)	-1.50~-0.70 (不舒适到稍有不适)	0.05~0.50 (没感觉到有点舒适)
18	-1.50~-1.00 (凉至微凉)	-0.20~0.70 (微凉至微暖)	-1.40~-0.70 (不舒适到稍有不适)	0.10~0.70 (没感觉到有点舒适)

从表 4 可知:座椅供暖在提升热感觉的同时也在改善受试者的热舒适,并且环境温度越低改善程度越好.在适应期的热投票值受背景工况影响较大,温度越低热投票值越低;而在暴露期内的热投票值比较接近,说明受试者在使用座椅供暖达到热反应稳态后,受背景工况的影响较小.

为了更加直观地分析受试者对热环境接受程度的变化情况,使用热环境不满意率(PD)来表示,与热可接受度投票(TAV)值之间的关系为

$$PD = \frac{\exp(-0.18 - 5.28TAV)}{1 + \exp(-0.18 - 5.28TAV)} \times 100\%.$$

(2)

各个工况下热环境不满意率(PD)的具体变化情况,如表 5 所示. 热环境不满意率(PD)在座椅供暖前后的分布结果,如图 6 所示.

表 5 各工况下热环境不满意率变化情况

Tab. 5 Thermal environment dissatisfaction rate under various working conditions

$t_{\text{en}}/^\circ\text{C}$	PD/%	
	适应期	暴露期
14	79.0~96.5	4.0~30.0
16	49.0~93.0	6.0~23.0
18	47.0~75.5	6.5~16.0

从表 5 和图 6 可知:座椅供暖可以显著降低受试者对偏冷环境的不满意率,提高对偏冷环境的可接受程度,同时环境温度偏离舒适环境越多,改善程度越明显.

2.3 整体热反应相互关系

2.3.1 均匀热环境(适应期) 在适应期内,受试者不进行座椅供暖,背景为均匀热环境工况,讨论整体热感觉投票(TSV)、整体热舒适投票(TCV)和整体热可接受度投票(TAV)之间的相互关系,如图 7 所示. 图 7 中每个点代表在所有工况下某一时刻受试者的热反应投票均值. 从图 7 可知:3 种热反应指标之间呈现出较强的线性相关关系($R^2>0.9$). 这表明在均匀热环境中,整体热感觉、整体热舒适和整体热可接受度密切相关. 因此,可以采用热感觉作为指标来评价一个热环境的可接受和舒适状况,这也验证了以往在均匀热环境中的研究成果.

2.3.2 非均匀热环境(暴露期) 暴露期内房间热环境与适应期相同,同时使用座椅进行局部加热,由此形成了非均

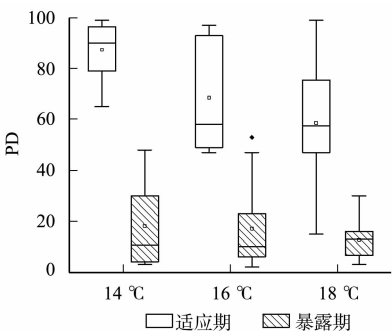
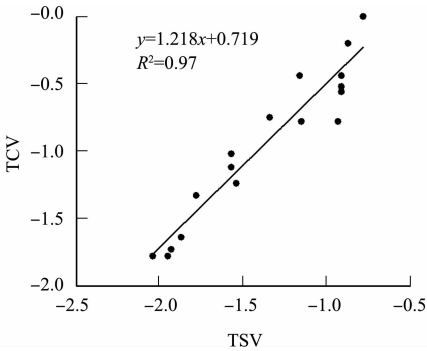
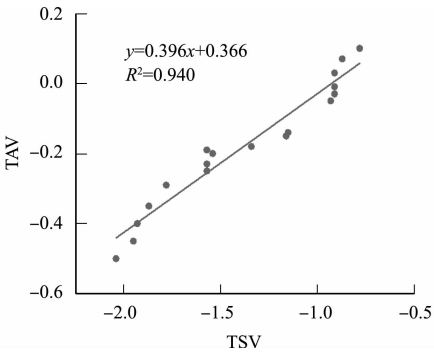


图 6 热环境不满意率

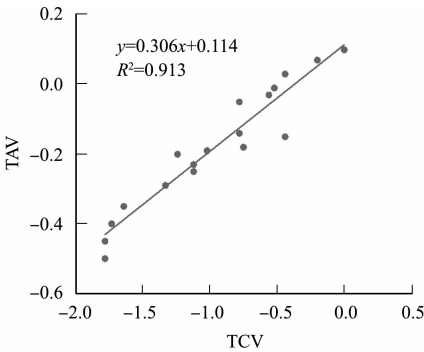
Fig. 6 Thermal environment dissatisfaction rate



(a) 整体热感觉与整体热舒适



(b) 整体热感觉与整体热可接受度



(c) 整体热舒适与整体热可接受度

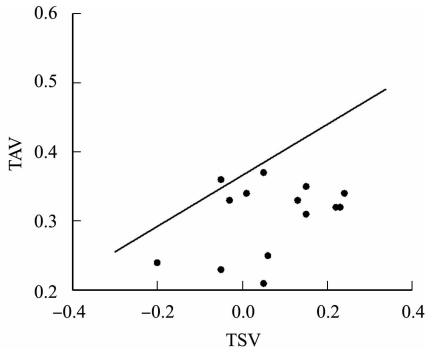
图 7 均匀热环境下整体热反应相互关系

Fig. 7 Overall thermal reaction correlation under uniform thermal environment

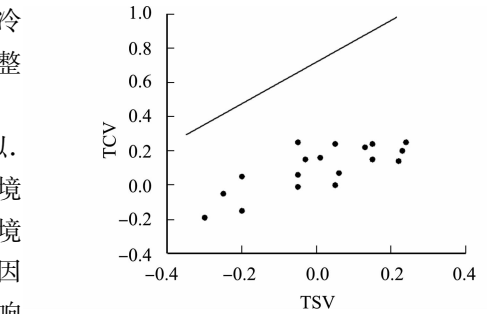
匀热环境. 在此工况下讨论整体热感觉投票(TSV)、整体热舒适投票(TCV)和整体热可接受度投票(TAV)之间的关系,如图 8 所示. 图 8(a),(b)中直线代表图 7 对应均匀热环境下 3 种热反应之间的相互关系. 从图 8 中可知:与均匀热环境中 3 种热反应得到的线性关系相比,整体热感觉与整体热舒适、整体热可接受度出现分离,其关系呈现离散状态;而热舒适与热可接受度仍能呈现较强的线性相关关系($R^2=0.96$). 从图 8 中还可知:在整体热感觉投票值相同的前提下,受试者在不均匀热环境中的整体热

舒适和整体热可接受度较均匀热环境下要低. 说明在偏冷的非均匀环境下, 整体热舒适和整体热可接受度除了受整体热感觉的影响, 还受到其他因素的影响.

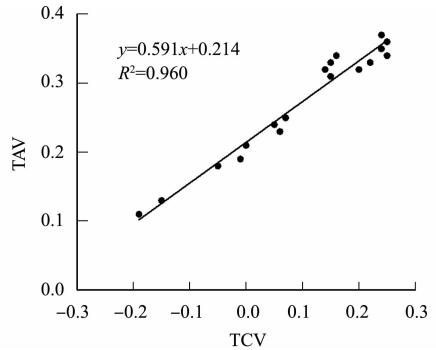
上述结果与张宇峰等^[14]和胡鹏超^[15]的研究结果相似. 由此可知, 在非均匀热环境中, 仅根据热感觉去评价热环境的可接受和舒适状况已经不再合理, 此时在非均匀热环境中整体热舒适更适合表达人体对热环境满意的程度. 因此, 文中继续探讨非均匀热环境中, 除整体热感觉之外影响整体热舒适的其他因素.



(b) 整体热感觉与整体热可接受度



(a) 整体热感觉与整体热舒适



(c) 整体热舒适与整体热可接受度

图 8 非均匀热环境下整体热反应相互关系

Fig. 8 Overall thermal reaction correlation under non-uniform thermal environment

2.4 热感觉不均匀度

在问卷调查的实验过程中, 同时考察记录了受试者 11 个身体部位(额头、胸部、背部、腹部、前臂、后臂、手背、臀部、大腿、小腿及脚部)热感觉的变化情况. 结果发现, 非均匀热环境下, 绝大多数受试者反应在进行座椅供暖的过程中, 受到热刺激的身体部位(背部、臀部和腿部)与未受到热刺激的部位明显感到热感觉分布不均匀. 受试者身体的热感觉不均匀度, 可能是整体热感觉与热舒适和热可接受度出现分离的原因. 考虑到人体在感知身体各个部位的冷热不均时最强烈的感受来自于最热和最冷两个部位之差, 故选取身体部位间热感觉之差的极大值(ΔTSV_{\max})作为衡量热感觉不均匀度的参数.

文中研究的重点是探讨人体在座椅供暖非均匀热环境中整体热反应的变化规律, 关于局部热感觉的变化趋势在这里不进行详细分析, 只根据各部位热感觉之差极大值计算得到暴露期各个时间段对应的整体热感觉不均匀度, 与整体热舒适进行拟合分析. 两者之间的关系, 如图 9 所示.

由图 9 可知: 热感觉不均匀度与全身热舒适有较强的线性关系($R^2=0.872$). 当热感觉不均匀度较小时, 对应的全身热舒适与均匀环境下的热舒适投票值相差较小, 且随着热感觉不均匀度的增加, 整体热舒适也在显著下降. 由此可见, 热感觉不均匀度在很大程度上解释了非均匀环境下热感觉与热舒适和热可接受度出现分离的情况.

2.5 热舒适预测评价模型

由上述分析可知, 整体热感觉与热感觉不均匀度(身体部位间热感觉之差的极大值)是影响受试者在非均匀热环境下热舒适和可接受程度的两个重要因素, 受试者的整体热舒适是感知两个热反应指标的综合结果. 鉴于对受试者整体热舒适投票(TCV)、整体热感觉投票(TSV)和热感觉不均匀度热投票(ΔTSV_{\max})的数据分析, 假设前者与后两者满足线性回归关系, 符合线性关系的适配性条件, 即整体热感觉与热感觉不均匀度对整体热舒适具有显著影响. 利用回归模型^[16]进行三者相关关系的研究,

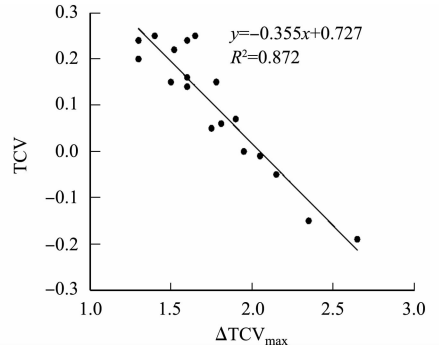


图 9 热感觉不均匀度与整体热舒适
Fig. 9 Thermal sensation unevenness and overall thermal comfort

建立含有两个自变量的回归模型,即

$$TCV = \beta_0 + \beta_1 TSV + \beta_2 \Delta TSV_{\max} + e.$$
 (3)

式(3)中: β_0 为常数项; β_1, β_2 为回归系数; e 为随机误差. 文中主要讨论整体热感觉与热感觉不均匀度对整体热舒适的影响状况,其他未加考虑的因素(包括随机因素)所产生的影响忽略不计,因此式(3)可简化为经验回归方程,即

$$TCV = \beta_0 + \beta_1 TSV + \beta_2 \Delta TSV_{\max}.$$
 (4)

将所有背景工况暴露期内整体热感觉投票值、热感觉不均匀度计算值,以及整体热舒适投票值进行统计整理;然后,利用 SPSS 22.0 对其进行多元线性回归分析,可得到回归方程中的常数项及回归系数估计值,如表 6 所示. 由表 6 可知:显著性水平平均小于 0.05,这表明整体热感觉与热感觉不均匀度对整体热舒适具有显著影响,原假设成立.

将求得的回归系数估计值代入式(4),求得最终的回归模型为

$$TCV = 0.616 + 0.193TSV - 0.293\Delta TSV_{\max}.$$
 (5)

该模型判定系数 $R^2=0.896$,表示自变量可以解释因变量 89.6%的变化. 为验证在座椅供暖非均匀热环境下的适用性,继续对 15 名受试者进行新一轮的主观热反应投票实验,获取暴露期内受试者整体及局部热感觉投票值和整体热舒适投票值;然后,将各时间段内整体热感觉投票值与热感觉不均匀度计算值代入式(5)得到整体热舒适预测值,并与实验实测值进行比较,结果如图 10 所示.

从图 10 可知:回归模型计算得到的预测值与实验实测值有较好的对应关系, $R^2=0.903$,数值上保持一致,预测效果较好. 因此,对于偏冷环境下座椅供暖形成的非均匀热环境可以使用整体热感觉与热感觉不均匀度来对整体热舒适进行预测和评价.

基于上述在主观热反应投票基础上分析和研究得到的热舒适预测评价模型,将平均皮肤温度作为客观评价指标,进一步探讨非均匀稳态热环境下整体热感觉与平均皮肤温度的关系. 对热舒适评价模型做进一步的延伸和完善,将暴露期稳态工况下测得的身体部位的皮肤温度经式(1)进行换算处理,得到对应的平均皮肤温度,并与整体热感觉进行拟合分析,结果如图 11 所示. 图 11 中: t_{skin} 为皮肤温度.

座椅供暖稳态工况下,整体热感觉与平均皮肤温度之间的线性拟合关系为

$$TSV = 0.433t_{\text{skin}} - 14.298.$$
 (6)

判定系数 $R^2=0.916$,拟合效果较好,对回归方程进行显著性检验,显著性水平小于 0.05,表明平均皮肤温度对整体热感觉影响显著,得到的方程有效. 在此基础上综合主观热反应与客观生理指标,提出了座椅供暖非均匀稳态热环境下热舒适预测评价模型为

$$\left. \begin{aligned} TCV &= 0.616 + 0.193TSV - 0.293\Delta TSV_{\max}, & R^2 &= 0.896; \\ TSV &= 0.433t_{\text{skin}} - 14.298, & R^2 &= 0.916. \end{aligned} \right\}$$
 (7)

式(7)中:TCV 为整体热舒适投票;TSV 为整体热感觉投票; ΔTSV_{\max} 为热感觉不均匀度; t_{skin} 为平均皮肤温度.

表 6 回归系数估计值

Tab. 6 Regression coefficient estimated values

回归系数	回归系数估计值	显著性水平
β_0	0.616	0
β_1	0.193	0.045
β_2	-0.293	0

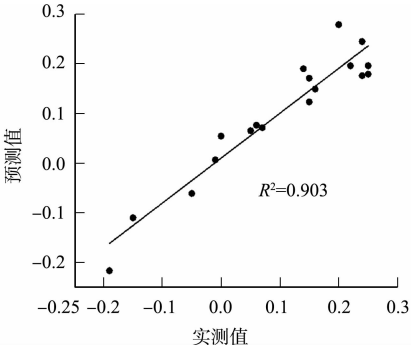


图 10 模型验证

Fig. 10 Model validation

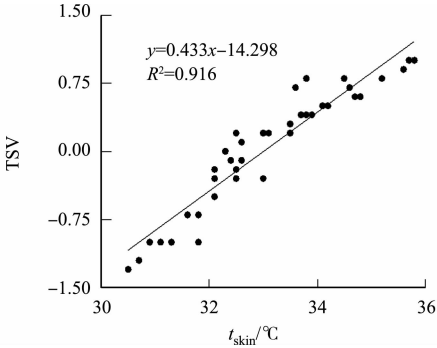


图 11 平均皮肤温度与整体热感觉

Fig. 11 Mean skin temperature and overall thermal sensation

3 结论

文中分析了偏冷环境下座椅供暖对人体热舒适的影响,验证了在农村地区使用座椅辅助供暖方式的可行性.从主观热反应与客观生理指标出发,围绕整体热感觉、热感觉不均匀度和平均皮肤温度对整体热舒适进行了具体分析,得到了预测评价模型.

1) 使用座椅供暖能有效提高整体热感觉与热舒适,降低热不满意率,同时实验环境温度偏离舒适环境越多,改善程度越明显.

2) 在均匀热环境中整体热感觉、整体热舒适和整体热可接受度三者密切相关,呈现较强的线性关系;在非均匀热环境中热感觉与热舒适、热可接受度出现分离,在热感觉保持中性的基础上,发现热感觉不均匀度是导致热感觉出现分离的原因.

3) 以整体热舒适作为评价指标,以整体热感觉与热感觉不均匀度作为影响因素做多元线性回归分析,同时引入平均皮肤温度作为客观评价指标,得到热舒适预测评价模型.经验证,该模型预测效果较好,可用于座椅供暖稳态工况下的热舒适性预测研究.

参考文献:

[1] 林祥明. 适用于我国农村地区的低温空气源热泵采暖技术[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(19): 4161.

[2] 李俊,赵荣义. 个体化微环境调节研究进展[J]. 暖通空调, 2003, 33(3): 52-56. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8501. 2003. 03. 015.

[3] 陈薪,于晓明. 个性化用热和节能供暖并驾齐驱[J]. 低碳世界, 2013, 25(6): 45-49.

[4] BROOKS J E, PARSONS K C. Anergonomicsinvestigation into human thermal comfort using an automobile seat heated with encapsulated carbonized fabric (ECF) [J]. Ergonomics, 1999, 42(5): 661-673. DOI: 10. 1080/001401399185379.

[5] 宋磊,陈威铭,周翔,等. 加热座垫对人体热舒适影响研究[J]. 建筑环境与能源, 2018(10): 81-84.

[6] PASUT W, ZHANG Hui, ARENS E, *et al.* Effect of a heated and cooled office chair on thermal comfort[J]. HVAC and R RESEARCH, 2013, 19(5): 574-583. DOI: 10. 1080/10789669. 2013. 781371.

[7] PASUT W, ZHANG Hui, ARENS E, *et al.* Energy-efficientcomfortwith a heated/cooled chair; Results from human subject tests[J]. Building and Environment, 2015, 84: 10-21. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2014. 10. 026.

[8] ZHANG Yufeng, 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. DOI: 10. 1080/00140130601154921.

[9] 张宇峰,赵荣义. 座椅与人体接触表面最佳热流通量的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(9): 1405-1408. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0054. 2007. 09. 003.

[10] HE Yingdong, LI Nianping, HUANG Qing. A field study on thermal environment and occupant local thermal sensation in offices with cooling ceiling in Zhuhai, China[J]. Energy and Buildings, 2015, 102(sep.): 277-283. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2015. 05. 058.

[11] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 167-168.

[12] 刘蔚巍,连之伟,邓启红. 基于平均皮肤温度的个体热舒适评价模型[J]. 东南大学学报(英文版), 2010, 26(2): 254-257. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-7985. 2010. 02. 024.

[13] CHOI J K, MIKI K, SAGAWA S, *et al.* Evaluation of mean skin temperature formulas by infraredthermography [J]. International Journal of Biometeorology, 1997, 41(2): 68-75. DOI: 10. 1007/s004840050056.

[14] 张宇峰,赵荣义. 均匀和不均匀热环境下热感觉、热可接受度和热舒适的关系[J]. 暖通空调, 2007, 37(12): 30-36. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8501. 2007. 12. 006.

[15] 胡鹏超. 偏冷环境下局部热刺激对人体热舒适的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[16] 王松桂. 线性模型引论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)