



基于人体热调节模型的局部辐射温度对热舒适的影响

马景辉, 魏厚福, 杨艺真, 汪 辰, 戴博斌

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了探究非均匀热辐射环境中局部辐射温度对人体热舒适的影响, 利用温冷感实验和中国人体热调节模型, 研究了局部辐射温度与局部和整体热感觉之间的关系。结果表明: 头部、手部、脚部的热感觉对整体热感觉的回归系数分别为 0.504、0.441、0.461, 对整体热感觉影响显著; 在冬季室内设计温度为 16.0 °C 的供暖工况和夏季室内设计温度为 28.0 °C 的供冷工况下, 当脚部和头部的辐射温度分别为 23.3 °C 和 23.2 °C 时, 人体的热舒适度可分别达到 II 级和 I 级; 当室内风速为 0.1 m/s、相对湿度为 50%, 人体代谢量为 1 met, 服装热阻冬季为 1.2 clo, 夏季为 0.7 clo 时, 通过模型计算获得了人体等热舒适度线, 并得到了局部环境空气温度与辐射温度的关系。

关键词: 局部辐射温度; 中国人体热调节模型; 热感觉; 等热舒适度线

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2020) 01-0130-06

Effect of local radiant temperature on thermal comfort based on human thermoregulation model

MA Jinghui, WEI Houfu, YANG Yizhen, WANG Chen, DAI Bobin

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to clarify the effects of local radiant temperature on human thermal comfort in asymmetric thermal radiant environment, the relationship between local radiant temperature and thermal sensation was studied by thermal sensation experiment and the Chinese human body thermoregulation model. The results show that the regression coefficients of thermal sensation of the head, hands and feet to the overall thermal sensation are 0.504, 0.441 and 0.461, which have significant effects on the overall thermal sensation. The thermal comfort grade of the human body can meet Level II and Level I respectively, when the local radiant temperature of feet is 23.3 °C for indoor design temperature of 16.0 °C in winter heating, and the local radiant temperature of head is 23.2 °C for indoor design temperature of 28.0 °C in summer cooling. The isothermal comfort line of the human body was obtained by model calculation, and the relationship between the local ambient air temperature and the radiant temperature was acquired under the following conditions: indoor wind speed 0.1 m/s, relative humidity 50%, human metabolism 1 met, clothing thermal resistance 1.2 clo in winter, and 0.7 clo in summer.

Key words: local radiant temperature; Chinese human body thermoregulation model; thermal sensation; isothermal comfort line

收稿日期: 2019-05-28 网络出版日期: 2019-09-02

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E080003); 杭州市余杭区社科联项目(Yhsk19C11)

作者简介: 马景辉(1972—), 男, 山西太原人, 副教授, 博士, 主要从事建筑节能、被动式建筑设计策略、空调系统优化控制等方面的研究。

0 引言

人体的热感觉与热舒适密切相关,是系统设计运行过程中的重要指标,也是建筑节能设计过程中首先考虑的重要因素。传统空调系统通常以均一热环境中人体热舒适条件下的室内温度、湿度为设计指标,利用空气的对流换热达到调节室内温热环境的目的。然而,即使在空气温度分布均匀的空调房间内,由于室内各围护结构内表面温度的不同,人体也长期处于非均匀热辐射环境中。在这种环境中,由于局部温冷感的影响,以均一热环境中室内温度、湿度为调节目标,一般会导致人体局部的热不舒适和系统能耗的增加。

既有研究也指出,在室内非均匀热辐射环境中,人体的局部热感觉存在显著的差异,并影响整体的热舒适性^[1-2]。近年来,随着辐射空调系统的普及和建筑节能要求的不断提高,非均匀热辐射环境中人体热舒适的研究逐步受到了国内外学者的广泛关注^[3-4]。Vorre等^[5]为了使人体获得最佳舒适度,通过开发一种建筑角系数的计算方法,优化了不对称辐射环境中的热辐射因素。何梅玲等^[6-7]发现在非均匀辐射环境中,利用工位辐射制冷使人体在28.0℃和30.0℃时仍能保持热舒适。张宇峰等^[8]对有局部热暴露存在的不均匀环境进行了实验研究,提出以部位之间热感觉之差的最大值作为衡量热感觉不均匀程度的参数。Zhang等^[9-10]通过实验研究和文献调查,提出了非均匀瞬变环境中局部和全身热感觉预测模型。由此可见,关于室内非均匀热辐射环境,虽有通过调整人体局部热辐射条件达到人体热舒适的研究,但并没有明确人体局部热感觉对整体热感觉的影响程度,特别是针对室内空气温度、湿度分布均匀的工作区,局部温热环境条件对整体热舒适影响的研究尚不全面。

为了探讨非均匀热辐射环境中,人体局部热环境的辐射温度对局部和整体热感觉的影响,本文首先通过人体温冷感实验,研究了局部热感觉对整体热感觉的影响程度,然后根据人体生理调节理论^[11],建立了中国人体多点热调节模型,分析了在室内空气温度、湿度分布均匀的热环境中,人体局部热辐射条件对整体热感觉的影响。

1 非均匀热辐射环境中人体温冷感实验

1.1 实验概述

为了研究在非均匀热辐射环境中人体局部热感

觉对整体热感觉的影响,在相同室外气象条件下,随机选取30名21~23岁普通冬季着装(热阻约为1.5 clo),身体健康且无主观不适的在校男性大学生为受试者,针对具有相同围护结构构成的南北两间教室的室内温热环境进行温冷感调查。南北实验室室内温热环境测点如图1所示,其中S1、S2、S3和N1、N2、N3为受试者位置。室内垂直温度测点如图2所示。

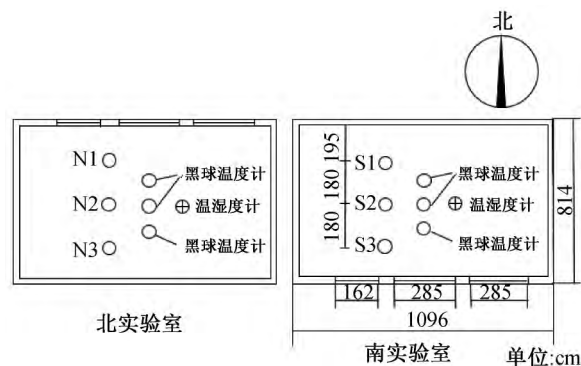


图1 实验房间示意图

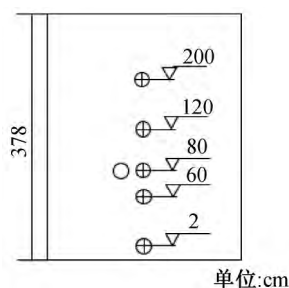


图2 垂直温度测点示意图

实验同时备有与南北实验室相同的准备室。受试者在准备室静坐20 min以后,进入实验室。为了调查人体的局部和整体热感觉,在实验进行的20 min内,处于静坐状态的受试者,每隔10 min填写一次基于如图3所示的七级衡量标准的调查问卷。实验期间同时测得手背、额头、小腿部和脚部的皮肤逐时温度。实验中使用的测量仪器如下:

- TR-52i 表面温度计,测量人体皮肤温度,测量范围为-60.0~155.0℃,精度为±0.1℃;
- Testo405-V1 风速仪,测量室内风速,测量范围为0~10 m/s,精度为±5%读数;
- Testo174T 温湿度计,测量室内温湿度,测量范围为0~100% RH,精度为±3% RH;
- TR-72S 黑球温度计,测量黑球温度,精度为±0.1℃。

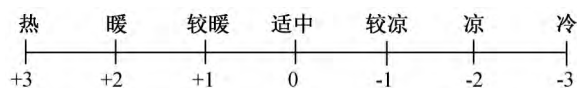


图3 热感觉标度

1.2 室内温热环境构成

图4是实验期间实验室各壁面内表面温度及环境温度的分布情况。实验中,南实验室室内空气平均温度为 13.7°C ,与室内黑球温度相比高 1.5°C ,比北实验室室内空气平均温度高 4.5°C 。受太阳辐射的影响,南窗内表面最高温度为 20.4°C ,比其它围护结构内表面平均温度高 10.0°C 左右。北实验室北外墙内表面平均温度为 7.7°C ,接近其他壁面最低温度。如图5(a)~(b)所示,实验期间,南北实验室各时刻垂直温度的最大差值均在 3.0°C 以内。另外,实验期间的室内风速在 0.1 m/s 以下,室内相对湿度在50%左右。

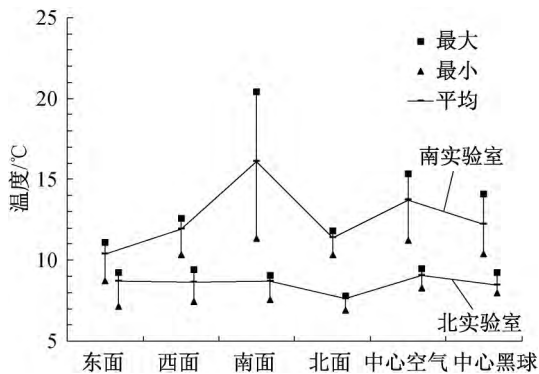
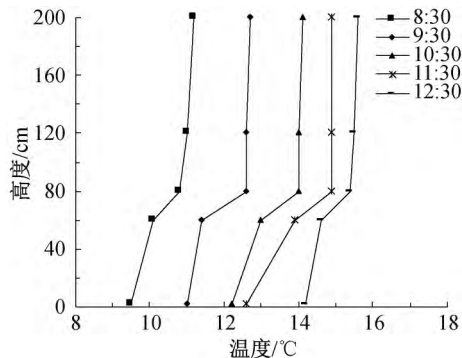
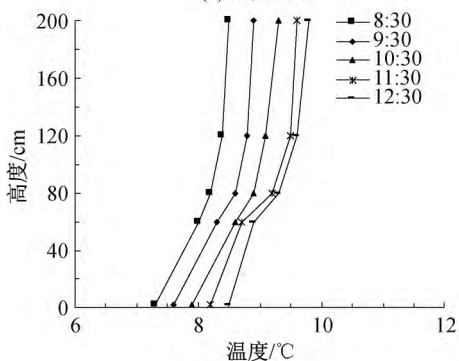


图4 实验室各壁面温度及环境温度



(a) 南实验室



(b) 北实验室

图5 实验室垂直温度分布

1.3 实验结果分析

图6是南北实验室受试者热感觉投票的平均结果。如图6所示,实验期间,由于南实验室室内空气温度和黑球温度均高于北实验室,全身及各部位热感觉投票均高于北实验室。南北实验室的手部和脚部的热感觉投票最低,分别为 -1.75 和 -2.75 ,头部热感觉投票分别为 -0.25 和 -0.5 明显高于整体和其它部位,可见身体各部位的热感觉存在显著差异。

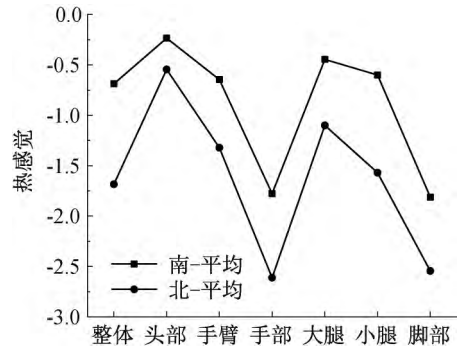


图6 南北实验室热感觉投票对比

表1是身体各部位热感觉与全身热感觉进行多元回归分析的结果。如表1所示,局部热感觉与全身热感觉均为正相关,头部、手部、脚部的热感觉对整体热感觉的回归系数分别为 0.504 、 0.441 、 0.461 ,对整体热感觉影响显著。其中 R^2 为 0.91 , P 值为 0.00043 。

表1 局部热感觉对整体热感觉回归系数

部位	头部	手臂	手部	大腿部	小腿部	脚部
回归系数	0.504	0.190	0.441	0.160	0.061	0.461

2 中国人体热调节模型

2.1 多点人体热调节模型概述

本文采用根据人体生理调节理论的多点模型^[13],通过此模型,可以获得人体在非均匀温热环境中各部位的皮肤温度。该模型中,人体被划分头、颈、胸、手和脚等17个部位,各部位细分为核心层、肌肉层、脂肪层和皮肤层。各部位通过血液进行耦合,血液从胸部的中央血液开始,通过动脉流向各部位,并流过静脉返回中央血液,其中,四肢拥有浅层静脉和深层静脉的血液分流。

2.2 中国人体模型参数

表2是根据GB 10000—88《中国成年人人体尺寸》,身高和体重分别为 170 cm 和 60 kg 的中国成年男子(18~25岁)的热性能参数。人体内部的热交换主要包括组织间的热传导、产热以及血流量的变化。

表 2 中国成年男子(18~25 岁)的热性能参数

参数	位置	头部	颈部	背部	胸部	腹部	肩部	腕部	手部	大腿部	小腿部	脚部
长度/m	—	0.12	0.08	0.31	0.30	0.52	0.31	0.24	0.37	0.47	0.37	0.26
半径/m	核心	0.14	0.02	0.021	0.146	0.147	0.015	0.013	0.011	0.018	0.016	0.02
	肌肉	0.068	0.044	0.024	0.123	0.101	0.028	0.026	0.029	0.058	0.042	0.031
	脂肪	0.081	0.051	0.035	0.128	0.115	0.036	0.034	0.035	0.063	0.046	0.035
	皮肤	0.167	0.104	0.072	0.258	0.231	0.074	0.070	0.0715	0.129	0.094	0.073
导热率 $K/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	核心	0.49	1.16	0.75	0.28	0.53	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
	肌肉	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
	脂肪	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	皮肤	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
血液灌注率 $w/(s \cdot m^3)^{-1}$	核心	10.13	0	0	(输出)	4.31	0	0	0	0	0	0
	肌肉	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538	0.538
	脂肪	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	皮肤	5.48	6.80	6.80	1.58	1.44	1.01	1.10	4.54	1.05	1.05	1.50
代谢产热量 $q/(W \cdot m^{-3})$	核心	13400	0	0	500	4800	0	0	0	0	0	0
	肌肉	514	514	514	514	514	514	514	514	514	514	514
	脂肪	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
	皮肤	368	368	368	368	368	368	368	368	368	368	368

注：数据来自文献[14-15]，其中胸部核心为中央血液的输出。

2.3 模拟与测试的皮肤温度结果对比

图 7 是身体各部位皮肤温度的模拟与实验测试结果的对比。如图 7 所示，手、脚的皮肤温度在 27.2°C 以下时，脚部的计算结果低于实验测试结果，而手部计算结果高于测试结果，但最大误差在 0.5°C 以内，其它各部位的模拟计算结果与测试结果的拟合度较好。

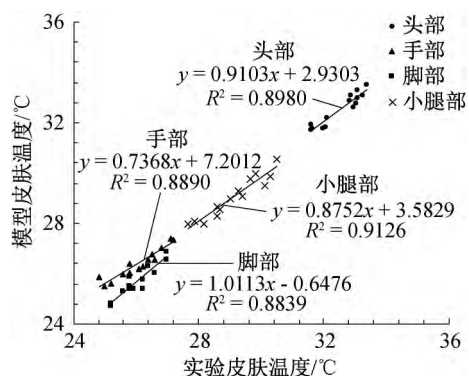
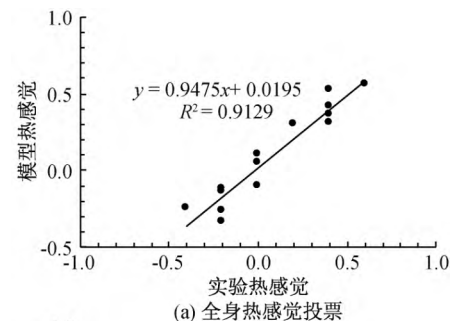


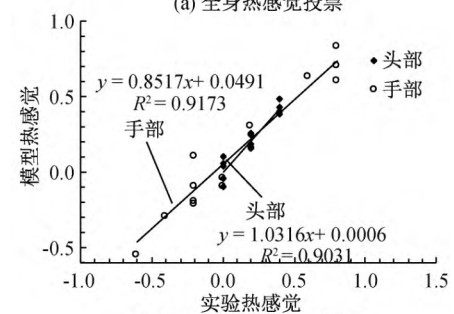
图 7 人体各部位实验与模型皮肤温度的对比结果

2.4 热感觉对比

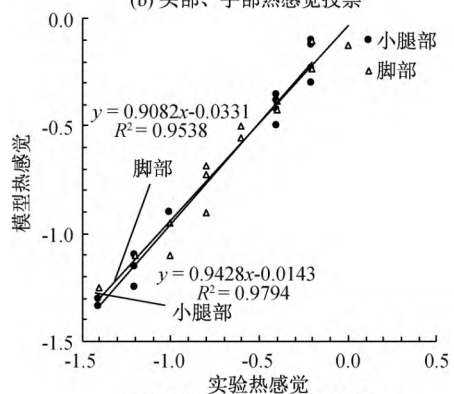
图 8(a)——(c)是在实验条件下，根据多点人体热调节模型计算得到的全身和身体各部位热感觉与实验热感觉投票的比较结果。如图 8 所示，全身及身体各部位的热感觉计算预测值与实验热感觉投票的最大误差小于 0.1, R^2 均在 0.9 以上，具有较高的相关性。可见，模型温冷感的预测值可以再现实际环境中的人体整体及各部位的温冷感情况。



(a) 全身热感觉投票



(b) 头部、手部热感觉投票



(c) 小腿部、脚部热感觉投票

图 8 实验与模型热感觉的结果

3 局部辐射温度与热舒适

为了探讨局部辐射温度对人体热舒适的影响,本文在初始温度、湿度等环境参数分布均匀的室内温热环境中,通过改变人体某一部位的局部环境辐射温度,利用中国人体热调节模型获得局部和整体的热感觉。

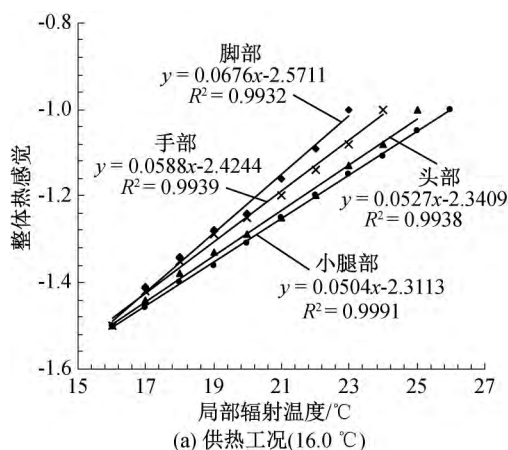
3.1 模拟计算的工况

如表3所示,根据GB 50736—2016《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》对空调室内设计温度 and 对应室内热舒适度等级的规定,本文分别针对冬季室内设计温度分别为16.0、18.0、20.0℃的供暖工况,夏季室内设计温度为26.0℃和28.0℃的供冷工况,研究人体局部辐射温度对热舒适的影响。

表3 模拟计算工况

工况	热舒适等级	辐射温度/℃	空气温度/℃	服装热阻/clo	人体热感觉
供暖工况1	—	16.0	16.0	1.2	-1.5
供暖工况2	II	18.0	18.0	1.2	-1.0
供暖工况3	I	20.0	20.0	1.2	-0.5
供冷工况1	I	26.0	26.0	0.7	+0.5
供冷工况2	II	28.0	28.0	0.7	+1.0

注:1.2 clo 着装内容为:有长袖和长裤腿的内衣、衬衫、夹克、袜、鞋;0.7 clo 着装内容为:内衣、衬衫、裤、袜、鞋;在夏热冬冷地区冬季室内的设计温度最低可到16.0℃;计算工况中风速为0.1 m/s、相对湿度为50%,人体代谢量为1 met。



3.2 局部辐射温度对热舒适的影响

图9(a)是室内温度为16.0℃时冬季供暖工况下局部辐射温度与整体热感觉的关系。如图9(a)所示,冬季室内初始设计工况无法满足人体的热舒适时,通过提高局部的辐射温度可以改善整体的热感觉。从图9(a)中趋势线可以看到,当各局部升高相同的辐射温度时,脚部对于整体热感觉的提升最大。局部辐射温度从16.0℃升高到23.3℃时,脚部对应的整体热感觉从-1.5提升到-1.0(热舒适II级),比手部、头部、小腿部所对应的整体热感觉高0.05、0.11、0.14,对整体热感觉的影响最为显著。

如图9(b)所示,夏季室内温度为28.0℃的供冷工况下,当各局部辐射温度降低至23.2℃时,头部对应的整体热感觉从+1.0提升到+0.5(热舒适I级),比手部、脚部、小腿部所对应的整体热感觉高0.15、0.25、0.27,对整体热感觉的改善最为显著。

由此可见,冬季供暖工况和夏季供冷工况下,分别调整脚部和头部附近的环境辐射温度对热舒适的改善最为有效。因此可以考虑设置局部工位辐射装置,冬季对脚部和小腿部进行辐射供暖,夏季对头部和手部进行辐射供冷,提高整体的热舒适性。

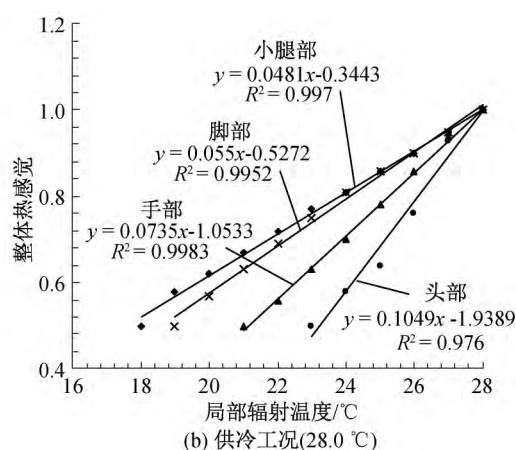


图9 局部辐射温度与整体热感觉

3.3 人体等热舒适度线

图10是为了探讨工位辐射装置对整体热舒适的影响,以表3的供暖和供冷工况下室内设计温度为初始条件,供暖工况下对脚部和小腿部进行局部辐射供暖,供冷工况下对头部和手部进行辐射供冷时,通过模型计算得到的人体等热舒适度线,并获得了不同热舒适度条件下局部辐射温度与空气温度的

关系。如图10所示,冬季室内设计计算温度为16.0℃,对脚部和小腿部进行局部辐射供暖,当局部辐射温度为22.0、28.2、34.0℃时,人体整体热感觉可以达到-1.0、-0.5、0。夏季室内设计温度为28.0℃,对头部和手部进行辐射供冷,当局部辐射温度为24.5、23.0℃时,人体整体热感觉可以从+1.0分别提高到+0.5和0。

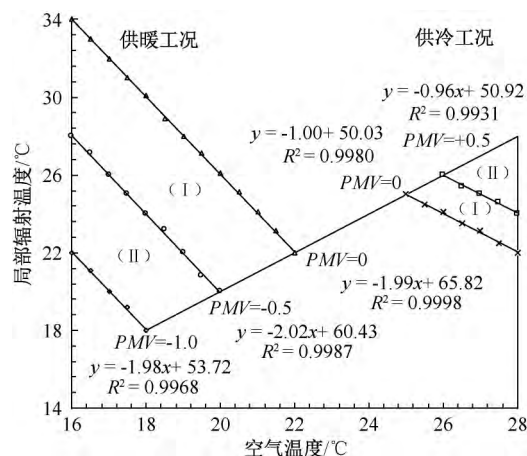


图 10 供暖和供冷工况下的等热舒适度线

注: PMV 为预测平均热感觉指数。

4 结 论

为了研究非均匀热辐射环境中人体局部辐射温度对热舒适的影响,本文通过温冷感实验和建立中国人体热调节模型,研究了局部辐射温度与局部和整体热感觉之间的关系,得到了以下结论:

a)通过温冷感实验结果分析,头部、手部、脚部的热感觉对整体热感觉的回归系数分别为 0.504、0.441、0.461,对整体热感觉影响显著。

b)构建了中国人体热调节模型,通过模拟计算与实验的结果对比,皮肤温度最大误差在 0.5℃以内,局部和整体热感觉的误差不大于 0.1,此模型可以再现非均匀热环境中人体皮肤温度和人体不同部位和整体的热感觉。

c)冬季室内设计温度为 16.0℃的供暖工况下,当各局部辐射温度升高至 23.3℃时,脚部对应的整体的热感觉从-1.5提升到-1.0(热舒适Ⅱ级),比手部、头部、小腿部位所对应的整体热感觉高 0.05、0.11、0.14,对整体热感觉的影响最为显著。

d)夏季室内温度为 28.0℃的供冷工况下,当各局部辐射温度降低至 23.2℃时,头部对应的整体热感觉从+1.0提升到+0.5(热舒适Ⅰ级),比手部、脚部、小腿部位所对应的整体热感觉高 0.15、0.25、0.27,对整体热感觉的影响最为显著。

e)当室内风速为 0.1 m/s、相对湿度为 50%、人体代谢量为 1 met、服装热阻冬季为 1.2 clo、夏季为 0.7 clo 的条件下,冬季供暖工况下对脚部和小腿部位进行局部辐射供暖,夏季供冷工况下对头部和手部进行辐射供冷时,通过模型计算获得了人体等热舒适度线,并得到了局部环境空气温度与辐射温度的关系。

参考文献:

- [1] 王昭俊, 何亚男. 冷辐射不均匀环境中人体热反应评价模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(12): 53-56.
- [2] 王昭俊, 侯娟, 康诚祖, 等. 不对称辐射热环境中人体热反应实验研究[J]. 暖通空调, 2015, 45(6): 59-63.
- [3] 徐国梁, 章慧颖, 连之伟, 等. 非均匀环境下人体热舒适研究进展[J]. 上海应用技术学院学报:自然科学版, 2011, 11(3): 237-242.
- [4] Deng Q H, Wang R H, Li Y G, et al. Human thermal sensation and comfort in a non-uniform environment with personalized heating [J]. Science of the Total Environment, 2017, 578: 242-248.
- [5] Vorre M H, Jensen R L, Le Dréau J. Radiation exchange between persons and surfaces for building energy simulations [J]. Energy and Buildings, 2015, 101: 110-121.
- [6] 何梅玲, 李念平, 何颖东, 等. 热湿工况下工位辐射空调的热舒适实验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(4): 11-16.
- [7] He M L, Li N P, He Y D, et al. Influences of temperature and humidity on perceived air quality with radiant panel workstation [J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 765-772.
- [8] 张宇峰, 赵荣义. 局部热暴露对人体热反应的影响研究(2): 不均匀热环境的评价[J]. 暖通空调, 2007, 37(10): 31-35.
- [9] Zhang H, 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.
- [10] Zhao Y, Zhang H, Arens E A, 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.
- [11] Crosbie R J, Hardy J D, Fessenden E. Electrical analog simulation of temperature regulation in man[J]. IRE Transactions on Bio-Medical Electronics, 1961, 8(4): 245-252.
- [12] 杨冬, 张艳, 聂怡丹, 等. 顶板和地板辐射供冷方式下的室内热舒适研究[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(2): 125-131.
- [13] Kobayashi Y, Tanabe S I. Development of JOS-2 human thermoregulation model with detailed vascular system[J]. Building and Environment, 2013, 66: 1-10.
- [14] Zhou X, Lian Z W, Lan L. An individualized human thermoregulation model for Chinese adults[J]. Building and Environment, 2013, 70: 257-265.
- [15] Zhou X, Zhang H, Lian Z W, et al. A model for predicting thermal sensation of Chinese people [J]. Building and Environment, 2014, 82: 237-246.

(责任编辑:康 锋)