

冷辐射不均匀环境中人体热反应评价模型

王昭俊, 何亚男

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 为了研究具有冷辐射的不均匀环境中人体局部和全身热感觉与热舒适、热可接受度之间的关系, 对 20 名受试者进行两种具有冷辐射工况和一种均匀工况的热反应实验, 通过对受试者的局部和全身热感觉与热舒适、全身热可接受度的主观调查, 分析冷辐射不均匀环境中人体热反应, 研究不同部位热感觉对全身热感觉的影响权重、全身热感觉与整体热可接受度、全身热舒适与整体热可接受度的关系. 建立了具有外窗、外墙冷辐射和电加热器采暖的不均匀环境中考虑局部热感觉影响权重的人体热感觉评价模型, 以及用部位间热感觉之差的最大值评价热可接受度的模型. 结果表明: 热可接受度与全身热感觉不相关, 而与全身热舒适具有很好的线性关系.

关键词: 热感觉; 热舒适; 热可接受度; 冷辐射不均匀环境; 评价模型

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)12-0053-04

Evaluation model for thermal responses in asymmetrical cold radiation environments

WANG Zhaojun, HE Yanan

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To study the relationships between human thermal sensation, thermal comfort and thermal acceptability at the local parts of the body and the overall in cold radiation non-uniform environment, 20 subjects were invited to participate in three experimental conditions, overall slightly cool and overall neutral conditions with asymmetrical cold radiation, and an overall neutral uniform condition. The subjects were asked to report their thermal responses such as thermal sensation, thermal comfort, and thermal acceptability in these three conditions. An overall thermal sensation evaluation model considering local thermal sensation and a thermal acceptability evaluation model based on the maximum local thermal sensation difference were presented, which were both applied to thermal environment with non-uniform radiation from the cold exterior window and wall. The results showed that there was no significant relationship between the overall thermal acceptability and overall thermal sensation, while the overall thermal acceptability was significantly correlated to the overall thermal comfort.

Key words: thermal sensation; thermal comfort; thermal acceptability; asymmetrical cold radiation environment; evaluation model

由于严寒地区外窗、外墙等内表面温度低, 环境辐射温度不均匀, 靠近外窗的人会明显感觉到身体局部受到来自外窗表面的冷辐射^[1]. 由于冷

辐射环境的不均匀性, 人体各部位所受到的冷辐射程度不同, 使人体各部位的热感觉和热舒适不同. 实验结果表明: 与无冷辐射的均匀环境相比, 有冷辐射的不均匀环境中, 人体的手部、小腿、手臂的热感觉和整体热感觉均有显著性差异; 有冷辐射的中性工况的整体热感觉较无冷辐射的均匀工况时低, 尽管前者室内平均温度高^[2]. 进一步的研究表明, 来自外窗的冷辐射会降低人体的皮肤

收稿日期: 2013-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278142); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201039); 教育部留学回国人员科研启动基金项目.

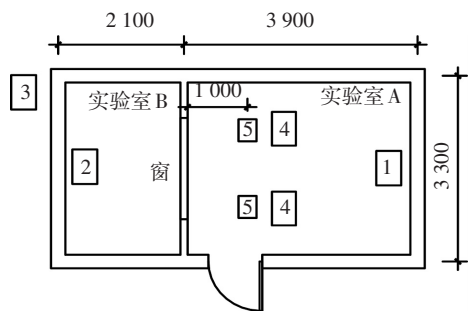
作者简介: 王昭俊(1965—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王昭俊, wangzhaojun@hit.edu.cn.

温度,进而影响到人体热感觉和热舒适^[3].针对具有外窗冷辐射的不均匀环境的评价,Fanger提出了PMV模型适用于评价均匀和稳态热环境中人体的整体热感觉^[4],而在非均匀环境中,全身热中性并不等同于全身热舒适,尚须考虑局部热不舒适的影响^[5].McNall等指出,在不对称辐射环境中,虽然受试者全身热感觉为中性,但全身热舒适的比例低于均匀环境的比例^[6].说明不对称辐射会降低人体的热舒适性.文献[7]认为不同的全身热状态和局部热感觉的组合对全身热反应有不同的影响.文献[8-9]认为整体热舒适反应并不是身体所有部位局部热舒适反应的累加,而是遵循“抱怨”模式,即最不舒适的部位对整体热舒适的感知起决定性作用.在冷辐射环境中,人体的全身热感觉不仅决定于环境参数,还取决于人体的局部热感觉.因此,应该研究局部热感觉和全身热感觉的关系,全身热感觉与整体热可接受度的关系,全身热舒适与整体热可接受度的关系,以便在冷辐射不均匀环境中控制对全身热感觉影响程度最大的部位的热水平状态,建立冷辐射不均匀环境中人体热反应评价模型.

1 实验

实验在人工气候室中完成,如图1所示.该气候室包括实验室A和实验室B.实验室A的温度为10~30℃,通过电加热器控制.实验室B的温度为-20~-5℃.实验室的隔墙和窗可视为外墙和外窗.因此,实验室A是具有外墙、外窗冷辐射以及电加热器采暖的不均匀热环境.



1—电加热器;2—蒸发器;3—冷凝器;4—桌子;5—椅子.

图1 实验室平面图(mm)

为了考察冷辐射不均匀环境对人体热感觉与热舒适的影响,设计了两个具有冷辐射的实验工况:稍凉工况和中性工况.室内空气温度分别为19、22℃.为了对比研究,设计一种均匀工况,空气温度为20℃.3种工况实测的环境参数详见文献[2].20名受试者身着冬季服装,服装热阻平均值为1.02 clo.在对环境参数和受试者生理学参数进行测试的同时,对受试者的额头、后背、手臂、手

和小腿等部位的局部热感觉和热舒适,全身热感觉和热舒适以及热可接受度进行了主观问卷调查.其中局部热感觉和整体热感觉采用ASHRAE的7点连续标度^[10],局部热舒适和整体热舒适采用Zhang Hui的间断标度^[2,8].整体热可接受度的调查采用6点标度:完全不可接受(1),中等不可接受(2),有点不可接受(3),有点可接受(4),中等可接受(5),完全可接受(6).

2 热感觉评价模型

主成分分析法主要是利用降维的思想,在尽量减少损失信息的前提下将多个指标转化为少数几个互不相关的综合指标(主成分)的多元统计方法.采用该方法对具有冷辐射的两个工况中的局部和全身热感觉投票进行数据处理.得到基于各部位影响权重的具有外墙、外窗冷辐射以及电加热器采暖不均匀环境中人体热感觉评价模型为

$$V_{TS} = 0.18V_f + 0.28V_b + 0.33V_h + 0.33V_l + 0.33V_a - 0.011. \quad (1)$$

式中: V_{TS} 为全身热感觉投票, V_f 为额头热感觉投票, V_b 为后背热感觉投票, V_h 为手部热感觉投票, V_l 为小腿热感觉投票, V_a 为手臂热感觉投票.

由式(1)可见,手部、小腿和手臂的系数相等,说明这3个部位对全身热感觉的影响程度相同.额头的系数最小,说明额头的热感觉对全身热感觉的影响最不明显.Crawshaw等认为人的脸部、背部和胸部对冷感觉最敏感^[11].张宇峰等也认为脸部、胸部和背部的热感觉对人体全身热感觉的影响权重更大^[7].在本实验中,受试者背对外窗而坐,在2个工况中头部和背部的温度都较高,头部和背部的热感觉也最高.由于受试者身着冬季较厚的服装,无法测试胸部皮肤温度,故未对该部位的热感觉进行调查.实验中手臂、手部和小腿的热感觉较低.现场调查结果也表明靠窗组受试者的腿部感到最冷,其次为手部和后背^[1].

具有冷辐射的不均匀环境中基于各部位影响权重的人体热感觉评价模型反映了冷辐射环境中人体全身热感觉与局部热感觉的关系,即用某环境下的人体局部热感觉计算得到的全身热感觉来评价冷辐射环境.该评价模型在全身热感觉为稍凉至中性的范围内适用.

3 热可接受度评价模型

在局部热暴露条件下,全身热感觉偏离热中性,或部位间热感觉之差大于0都会造成人体对环境热不满意率的增加^[12].在局部热暴露条件

下,二者可能同时出现.这种情况下,受试者对热环境可接受程度的判断是感知全身热感觉和部位间热感觉之差的综合结果.同样,人体对冷辐射环境的热可接受度也依赖于局部和全身的热感觉.

由中性工况和稍凉工况中的热感觉分析可知,在具有冷辐射的不均匀环境中,人体各部位间的热感觉投票存在较大的差异^[2].张宇峰^[12]提出采用部位间的热感觉之差最大值来评价非均匀环境.丁千茹^[13]采用部位间热感觉之差的最大值对局部热可接受度进行回归,得到了较好的相关性.

整体热可接受度 V 与部位间热感觉之差最大值 x 的关系如图 2 所示.

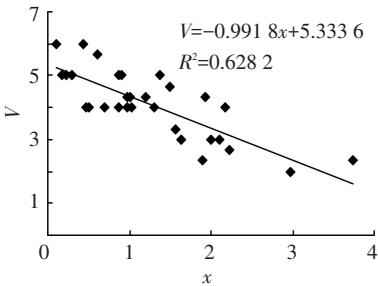


图 2 整体热可接受度与部位间热感觉之差最大值的关系

通过线性回归,得到采用部位间热感觉之差最大值 x 来评价具有外墙、外窗冷辐射以及电加热器采暖不均匀环境中整体热可接受度的模型为

$$V = -0.9918x + 5.3336. \quad (2)$$

线性相关系数 $R^2 = 0.6282$,说明部位间热感觉之差的最大值与热可接受度有良好的线性关系.随着部位间热感觉之差的最大值的增加,即各部位间的局部热感觉的差异性增加,热可接受度降低.当 $x = 0$ 时, $V = 5.3$,介于“中等可接受”和“完全可接受”之间.当 $x > 1.3$ 时, $V < 4$,即当部位间热感觉之差的最大值大于 1.3 标度时,人体对热环境“不可接受”.

4 评价模型分析

4.1 热感觉评价模型

Zhang Hui^[8]、张宇峰^[12]和丁千茹^[13]的研究都是针对动态送风引起的不均匀环境,通过对单一部位的冷刺激或热刺激,得到全身热感觉与局部热感觉的关系.Zhang Hui^[8]采用的影响权重定义为暴露部位的热感觉每变化一个标度单位,所引起的全身热感觉改变的单位数.指出头部、脸部、背部、盆骨等部位的热感觉不如全身热感觉对环境变化敏感;胸部、手臂和腿部等部位与全身热感觉对环境变化的敏感程度一样.可见,Zhang Hui 给出的是稳态和动态环境中单一部位热感觉变化时,局部热感觉与全身热感觉的关系,而非各部位

同时变化时,局部热感觉与全身热感觉的关系式.

张宇峰^[12]采用的影响因子与 Zhang Hui 的一致,得到脸部、胸部、背部和下半身对全身热感觉的影响权重分别为 0.21、0.24、0.25 和 0.30.但其局部刺激区域划分较大,忽略了肢体末端(如手、手臂、小腿等)的热反应特性.

丁千茹^[13]采用主成分回归方法,将不同部位刺激下的影响权重进行平均而得到各部位同时受刺激时的全身热感觉评价模型.模型中头部、背部和胸部的影响权重大于胳膊、手、腿、脚的权重.

李俊^[14]采用多元线性回归方法研究局部热感觉与全身热感觉的关系.认为头颈部对全身热感觉的影响权重最大,上半身次之,下半身最小.

而本文的研究结果与文献[13-14]不同,其原因是由于实验条件不同.文献[13-14]中的非均匀环境是由于向人体上部吹冷风所致,故而头部、背部和胸部的影响权重较大.而本实验环境的非均匀性是由于外窗、外墙冷辐射和电加热器采暖导致的,室内存在较大的温度梯度^[2].人体脚踝处空气温度低,而头部空气温度高.因此,腿部的影响权重大于头部的权重.

在不同的实验条件下,全身热感觉与局部热感觉之间的关系各有差异,难以得到统一的全身热感觉评价模型.因此当采用全身热感觉评价室内热环境时,要注意模型的适用条件.Zhang Hui、张宇峰和丁千茹得到的评价模型适用于由吹风引起的非均匀环境,而本文得到的基于各部位影响权重的人体热感觉评价模型适用于评价具有外墙、外窗冷辐射以及电加热器采暖的不均匀环境.

4.2 全身热感觉与热可接受度

在具有冷辐射的不均匀工况中,全身热感觉与热可接受度的关系如图 3 所示.由于本实验工况的平均热感觉为稍凉和中性,因此热感觉投票的最大值为 1.由图 3 可知,当热感觉为 -3 时,对应的热可接受度为“完全不可接受”.当热感觉投票为中性时,热可接受度从“中等不可接受”变化至“完全可接受”.当热感觉投票接近于稍暖时,热可接受度的范围为“有点可接受”至“完全可接受”,均在“可接受”的范围内.图中的回归方程为

$$V = 0.9226y + 4.3011. \quad (3)$$

式中: V 为整体热可接受度, y 为全身热感觉投票.相关系数 $R^2 = 0.4139$,说明整体热可接受度与全身热感觉没有相关性,这与丁千茹的结论^[13]一致.说明在具有冷辐射的非均匀环境中,整体热可接受度是人们对全身热感觉和局部热感觉的综合感知,不能仅用全身热感觉来评价具有冷辐射的

非均匀环境的热可接受度.

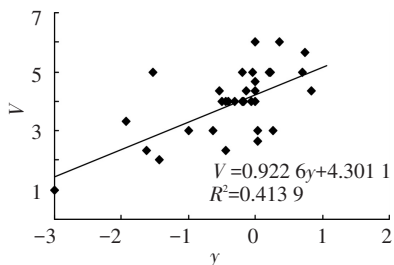


图3 整体热可接受度与全身热感觉的关系

4.3 全身热舒适与热可接受度

分析稍凉工况和中性工况的全身热舒适投票和对应的全身热可接受度,得到可接受程度与全身热舒适的关系,如图4所示,其回归方程为

$$V = 1.354 8z + 3.910 2. \quad (4)$$

式中: V 为整体热可接受度, z 为全身热舒适投票. 线性相关系数 $R^2 = 0.629 2$, 表示整体热可接受度与全身热舒适有良好的线性关系. 这与张宇峰等的研究结果一致^[15]. 说明具有冷辐射的非均匀环境中,可采用全身热舒适来评价整体热可接受度.

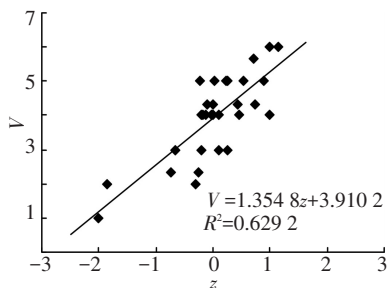


图4 整体热可接受度与全身热舒适的关系

令 $V = 6$, 求得 $z = 1.5$; 令 $V = 4$, 求得 $z = 0.07$. 即当人体的全身处于“舒适”和“非常舒适”时,人体对热环境“完全可接受”;当全身处于“有点舒适”时,人体对热环境“有点可接受”.

在具有冷辐射的不均匀热环境中,全身热舒适与全身热可接受度具有很好的相关性.而全身热感觉与热可接受度出现分离.因为在冷辐射不均匀热环境下,即使全身热感觉为中性,人体某些部位可能受来自外窗和外墙冷辐射的影响而感到不适,从而影响人体对热环境的整体热可接受度.

5 结 论

1) 建立了基于各部位影响权重的、适用于具有外窗和外墙冷辐射以及电加热器采暖的不均匀热环境的人体热感觉评价模型.

2) 部位间热感觉之差的最大值与热可接受度有良好的线性关系,可采用部位间的热感觉之差最大值来评价冷辐射非均匀热环境中热可接受度.

3) 整体热可接受度与全身热感觉不具有很

好的相关性,不能仅采用全身热感觉来评价冷辐射非均匀热环境的热可接受度.

4) 整体热可接受度与全身热舒适有良好的线性关系,冷辐射非均匀热环境中可采用全身热舒适来评价整体热可接受度.

参考文献

- [1] 王昭俊, 李爱雪, 何亚男, 等. 哈尔滨地区人体热舒适与热适应现场研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (8): 48-52.
- [2] 王昭俊, 何亚男, 侯娟, 等. 冷辐射不均匀环境中人体热响应的心理学实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45 (6): 59-64.
- [3] WANG Zhaojun, HE Yanan, HOU Juan, *et al.* Human skin temperature and thermal responses in asymmetrical cold radiation environments [J]. Building and Environment, 2013, 67 (9): 217-223.
- [4] FANGER P O. Thermal comfort [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [5] OLESEN B W. Thermal comfort requirements for floors occupied by people with bare feet [J]. ASHRAE Transactions, 1977, 83 (2): 41-57.
- [6] MCNALL P E, BDDISON R E. Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant fields [J]. ASHRAE Transaction, 1970, 76 (1): 123-136.
- [7] 张宇峰, 赵荣义. 局部热暴露对人体全身热反应的影响[J]. 暖通空调, 2005, 35 (2): 25-30.
- [8] ZHANG H. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2003.
- [9] ARENS E, ZHANG H, HUIZENGA C. Partial- and whole-body thermal sensation and comfort: non-uniform environmental conditions [J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31: 60-66.
- [10] ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta, GA: ASHRAE, 2004.
- [11] CRAWWAHAW L I, NADELI E R, STOLWIJK J A J, *et al.* Effect of local cooling on sweating rate and cold sensation [J]. European Journal of Physiology, 1975, 354: 19-27.
- [12] 张宇峰. 局部热暴露对人体热反应的影响 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [13] 丁千茹. 非均匀环境下局部热感觉对整体热反应的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [14] 李俊. 个体送风特性及人体热反应研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [15] 张宇峰, 孙淑凤, 赵荣义. 均匀与不均匀室内热环境的评价指标 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46 (12): 1949-1952.

(编辑 魏希柱)