

夏热冬冷地区人体热舒适 气候适应模型研究^{*}

西安建筑科技大学 李俊鸽[☆] 杨 柳 刘加平

摘要 对夏热冬冷地区居住建筑冬、夏季室内空气温度、相对湿度、风速等参数进行大样本测试和统计,以问卷方式调查了居民的基本情况,以 ASHRAE 的 7 级热感觉标度对居民的热感觉主观反应进行了调查统计。运用统计学分析方法对结果进行了回归分析,得出了该地区冬、夏季的热中性温度与期望温度。建立了夏热冬冷地区热舒适气候的适应性模型,确立了室内舒适温度与室外空气温度之间的相互适应关系。将适应性舒适温度作为室内热环境设计指标,在改善室内热舒适度的同时,可显著地降低建筑设备能耗。

关键词 夏热冬冷地区 热舒适 适应模型 节能

Adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter zone

By Li Junge[★], Yang Liu and Liu Jiaping

Abstract Conducts a large-scale field survey in hot summer and cold winter zone to measure the indoor environmental parameters including air temperature, humidity, air velocity etc. in residential buildings in summer and winter. Obtains by questionnaires the base condition of the residents, using the seven-point thermal sensation votes to evaluate the subjective thermal sensation. Analyses the test results with statistical method and obtains the neutral temperature and expected temperature. Develops an adaptive thermal comfort model and determines the adaptive interface relationship of indoor comfort temperature and outdoor air temperature. The variable temperature standard based on the adaptive model can both increase thermal comfort and reduce the energy consumption.

Keywords hot summer and cold winter zone, thermal comfort, adaptive model, energy saving

★ Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China

①

0 引言

舒适和节能已成为当今建筑、设备设计的基本课题,保护自然资源、削减能源消耗的生态建筑已成为今后建筑设计的方向。确立与当地室外气候、建筑特性、文化背景、生活习惯等因素相适应的室内舒适温度设计指标,是创造理想的室内热舒适环境的前提条件。适应性热舒适是以热舒适的实测研究为基础的,人体热舒适的适应性被认为是实测研究与实验室研究之间产生差异的主要原因。在人工环境实验室进行的热舒适研究中,人体的姿势、活动量及衣着等都是固定的值,并且也没有考

虑建筑类型,季节,气候,社会环境,人的性别、年龄、经济条件、认知水平等非热因素对热舒适的影响。实验室研究把人体看成是环境热刺激的被动接受者。而在适应性的研究中,更加强调人的社会属性,认为人体并不是某一给定热刺激的被动接受者,人类积极主动地与环境相互作用,并在不断地通过多种方式调节和适应着人与环境系统,热舒适气候适应性模型反映出的人与环境的关系是一种

①☆ 李俊鸽,女,1976 年 1 月生,在读博士研究生
710055 西安建筑科技大学 229 号信箱
(0) 13572837601
E-mail: pigeonli1976@126.com
收稿日期:2006-12-06
一次修回:2007-03-27
二次修回:2007-03-30

^{*} 国家青年自然科学基金资助项目(编号:50408014),国家自然科学基金重大国际合作资助项目(编号:50410083)

“给与拿”的关系^[1]。

Humphreys, Auliciems, de Dear 和 Brager 等人在热舒适的实测研究方面做了大量的工作,并对热舒适实测调查结果进行了分析和概括归纳。Humphreys 和 Nicol 首先提出了一种根据室外空气温度来预测室内热舒适温度,从而创造出最佳室内热环境的适应性方法。Humphreys 通过对大量实测数据的分析,得出了自然通风建筑中室内的舒适温度 t_n 与室外月平均温度 t_{om} 的显著相关性,其相关性方程^[2]为

$$t_n = 11.9 + 0.534t_{om} \quad (1)$$

Auliciems 等人对 Humphreys 的研究结果作了修正与补充,提出了一个适用于所有建筑(自然通风与空调建筑)的舒适温度 t_n 与室外月平均温度 t_{om} 的函数关系式^[3]:

$$t_n = 0.31t_{om} + 17.6 \quad (2)$$

Nicol 等人通过在不同气候条件下的实测研究也得到了舒适温度与室外气候的一种关系^[4]:

$$t_n = 0.36t_{olt} + 18.5 \quad (3)$$

式中 t_{olt} 为 30 年的室外月平均温度。

香港学者通过实测研究得到了香港地区的中性温度与室外日平均温度 t_o 的关系^[5]:

$$t_n = 0.158t_o + 18.303 \quad (4)$$

这些研究结果都充分表明舒适温度与室外空气温度即当地气候特征的显著相关性。这种适应性方法是用单一的温度变量来作为热舒适评价指标,而不是一个综合指标,更便于在工程实践中的应用。然而这些回归方程都各自适用于不同的气候状况,针对我国夏热冬冷地区这样的气候特征目前还没有得出其舒适温度与气候的适应性关系。夏热冬冷地区夏季炎热、冬季比较寒冷,围护结构的保温隔热性能又差,而这一地区经济又相对比较发达,造成夏热冬冷地区夏季空调和冬季供暖的能耗正在急剧增长。在同等的热舒适情况下,其单位建筑面积的建筑运行能耗甚至要比寒冷地区更高。为此,笔者于 2005 年冬季和 2006 年夏季就夏热冬冷地区(以河南省南阳市为例)居民住宅的室内热物理参数进行了大样本的客观测试和统计,并以 ASHRAE 的 7 级热感觉标度对居民的热感觉主观反应进行了调查统计。运用统计学分析方法对调查与测试结果进行了统计回归分析,初步得到了夏热冬冷地区人体热舒适的气候适应性特点。

1 测试方案的确定

1.1 测试地区概况

南阳市为豫西南中心城市,处于亚热带向暖温带的过渡地带,属典型的季风大陆半湿润气候,四季分明、阳光充足、雨量充沛。年平均气温 14.4~15.7℃,属于夏热冬冷气候区。调查结果表明,该地区住宅室内冬季普遍无集中供暖,居民的室内外着装情况基本相同。而夏季空调设备的安装使用则达到近 97%,基本上达到了家家使用空调,而且还有近 20%的家庭有两台空调。

1.2 测试对象的选择

本次测试分冬季和夏季两个阶段进行,测试的主要是居住建筑,总共测试的样本量为 121 户,受试人数为 241 人,其中男性 112 人,女性 129 人,共得到 1 596 组有效测试数据。本次测试的对象涵盖了不同性别、不同年龄、不同居住楼层等背景的人群,他们长期在本地生活,已经基本上适应了当地的室内外气候环境条件。

1.3 测试过程及方法

1.3.1 室内外物理环境参数的客观测量

所测物理环境参数包括:室内外空气温度、相对湿度及空气流动速度。每天早上(06:00~09:00)、中午(11:00~15:00)、晚上(17:00~23:00)各测一次,每户连续测试 3 天。由于在自然通风房间内,室内平均辐射温度 t_{mrt} 与干球温度 t_a 基本相同,因此,在本次测试中认为 $t_{mrt} = t_a$ 。本次测试取地板以上 1.2 m 为典型测量点。

1.3.2 填写主观问卷调查表

为了保证受试者填写的热感觉是对其当时所处环境的真实反应,要求测试者在填写资料之前要坐下来稳定 30 min,新陈代谢率取 1.2 met(坐着填写调查表时的取值)。问卷内容包括:

1) 基本背景情况,如年龄、性别、身高、体重、衣着情况等。

2) 对室内热环境的主动控制和调节方法(如午睡、喝冷饮、调整衣着量和活动量、开空调、洗澡等等)。

3) 人体热感觉及舒适度调查,调查当时居民的热感觉以及对室内环境的满意度、风速、潮湿状况等的主观评价。对热感觉的投票值采用 ASHRAE 的 7 级热感觉指标。

1.3.3 试验设备

自记式干湿球温度计和卡他温度计。

1.3.4 测试时间

第一阶段:2006 年 1 月 20 日~3 月 9 日;第二阶段:2006 年 7 月 15 日~8 月 20 日。

2 热舒适适应性分析

2.1 着装习惯的适应性调节

为了适应室内的热环境,该地区居民长期以来也形成了一定的不同季节的穿衣习惯,根据测试数据,利用统计学的方法对夏、冬季该地区居民的着装情况与室内外空气温度进行了相关性分析,如图 1 所示。

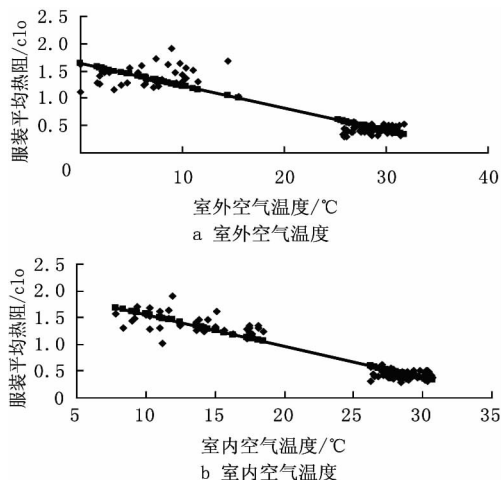


图 1 服装热阻与室内、外空气温度的关系

由图 1 可以看出,该地区居民的室内着装量季节性变化比较大,冬季人们的着装热阻分布在 1.0~2.0 clo 之间,多在 1.4 clo 附近,而夏季平均着装热阻在 0.4 clo 左右。夏季室内着装量较少而冬季服装热阻偏大,这也是该地区居民对夏热冬冷地区气候特征的适应性调节措施。

由图 1 可以发现,该地区居民的室内着装量与室内、外空气温度之间存在显著线性相关性,服装热阻与室内、外空气温度的回归方程分别为

$$C = -0.0599t_i + 2.1614 \quad (R^2 = 0.9223) \quad (5)$$

$$C = -0.041t_o + 1.6375 \quad (R^2 = 0.8714) \quad (6)$$

式(5),(6)中 C 为服装热阻, clo; t_i 为室内空气温度, ℃; t_o 为室外空气温度, ℃。

式(5),(6)反映了夏热冬冷地区人们的穿衣习惯与室内、外气候的适应性特点。

2.2 热接受能力分析

根据对实测数据的统计回归分析分别得到了冬季和夏季热不可接受率与室内温度的拟合曲线图,如图 2,3 所示。

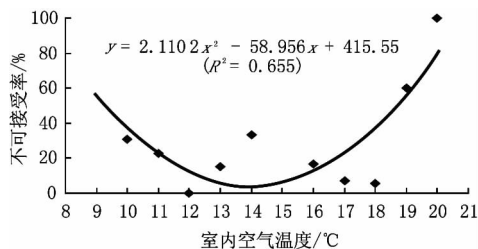


图 2 冬季热不可接受率与室内空气温度的拟合图

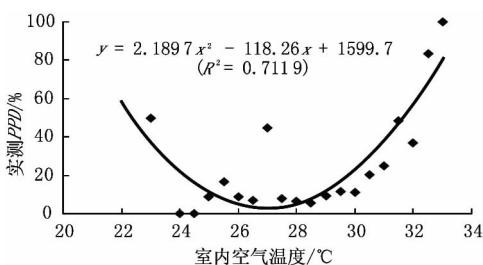


图 3 夏季热不可接受率与室内空气温度的拟合图

由图中曲线可以看出,在实际生活环境中,夏季满足 80% 的人可接受的热环境为室内空气温度为 24.2~29.8 ℃;由于冬季人们的着衣量较多,冬季满足 80% 人对室内热环境感到满意的室内空气温度偏低,约在 11.2~16.8 ℃ 之间。

2.3 热中性温度与热适应性理论

中性温度为人体热感觉最适中时的温度,即既不感觉到热也不感觉到冷时的温度,理论上的中性温度为 $PMV=0$ 时的温度。

将实测热感觉投票值与室内空气温度进行回归分析,可得出其回归曲线(见图 4,5)及回归方程为

$$\text{冬季} \quad TSV = 0.1454t_i - 1.9768 \quad (R^2 = 0.5135) \quad (7)$$

$$\text{夏季} \quad TSV = 0.2813t_i - 7.6745 \quad (R^2 = 0.9168) \quad (8)$$

式(7),(8)中 TSV 为实测热感觉投票值。

由图 4,5 可以看出,在人们的实际生活环境中,夏热冬冷地区冬、夏季人体的热中性温度分别为 13.6 ℃ 和 27.3 ℃。而在本次研究中,利用所测参数,根据 Fanger 的预测平均热反应 PMV 的方程式,编制程序计算了理论的 PMV 值。结果表明,夏季实测的热感觉 TSV 普遍比理论计算的 PMV 值低,且当 $PMV=0$ 时, $t_i=25.1$ ℃,低于实

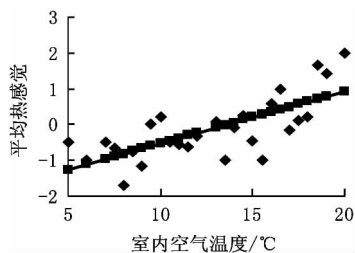


图4 冬季实测热感觉与室内空气温度的拟合图

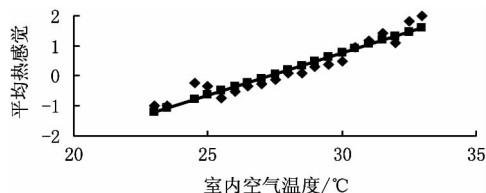


图5 夏季实测热感觉与室内温度的拟合图

测的热中性温度(27.3℃)。而冬季得到的理论热感觉值普遍低于实测的热感觉 TSV , 当 $PMV=0$ 时, $t_i=22.4^\circ\text{C}$, 远高于冬季实测的热中性温度(13.6℃)。可见, PMV 预测指标针对着装量较小(0.6 clo)的情况其预测较为准确, 而对于衣服热阻较大的情况其预测值并不准确。同时也说明由于人们采取适宜的主动调节措施与热环境相适应, 使得实际的舒适范围比理论计算值要宽泛。

适应性热舒适理论假设热中性温度是随着室内平均温度的变化而变化的。将所测试的每一住宅居民的热中性温度, 与对应的室内空气平均温度 t_i (某一住宅测试期间内测得的室内空气温度的平均值) 进行统计回归分析, 即可得出热中性温度与室内空气温度的相关性, 其回归曲线如图6所示。

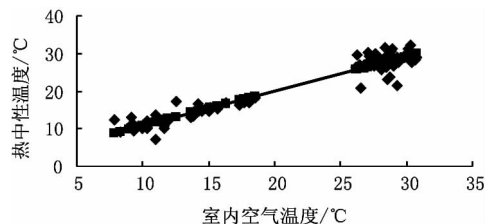


图6 热中性温度与室内空气温度的回归曲线

由图6可以看出, 热中性温度与室内空气温度有着较强的线性相关性, 其相关性方程为

$$t_n = 0.916 9 t_i + 1.624 4 \quad (R^2 = 0.940 4) \quad (9)$$

与香港地区的测试结果(式(10))^[5]相近。

$$t_n = 1.018 1 t_i + 0.434 2 \quad (R^2 = 0.703 4) \quad (10)$$

由其回归方程的斜率(0.916 9)可以看出, 热

中性温度的变化与室内空气温度的变化比率极其一致, 也再一次验证了热中性温度是建立热适应性模型的一个很好的参数。

3 夏热冬冷地区热舒适气候适应性模型

热舒适气候适应性模型是室内热中性温度与室外温度之间相关性的一个线性回归模型。将实测统计得到的热中性温度与室外空气平均温度(某一住宅测试期间测得的室外空气温度的平均值)进行回归分析(见图7), 得到的回归方程为

$$t_n = 0.607 t_o + 10.092 \quad (R^2 = 0.829 5) \quad (11)$$

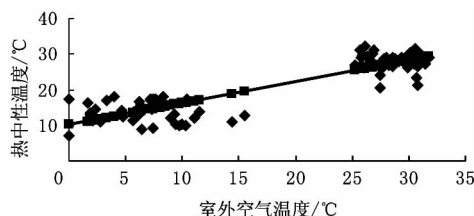


图7 热中性温度与室外空气温度的回归曲线

由适应性热舒适模型方程的斜率可知, 室外空气温度每改变 1°C , 其热中性温度将改变 0.6°C , 具有一定的节能潜力。

与 Humphreys 的研究结果(式(1))相比, 其方程斜率与常数都是很接近的。

这个适应性热舒适模型的回归方程是比较合理的, 它覆盖了影响热舒适的其他众多变量因素, 便于实际工程应用。

由前面的论述已经得出了夏热冬冷地区人体的热中性温度随着室外平均空气温度的变化规律, 但是, 某一地区人们对热舒适的适应性是有一定范围的, 要想建立其适应性热舒适标准, 确定气候适应性模型的上、下限是很重要的, 也就是确定其热中性温度的上、下限。

采用 ASHRAE 热舒适区的确定原则, 即满足 80% 人群满意度的要求, 对室内热环境的不接受投票百分率不超过 20% 作为确定热中性温度上、下限的依据。将由平均温度实测数据统计归纳出的热不接受投票(即投票值在标度 +3, +2, -2, -3 的投票)百分率与其平均温度进行统计回归分析, 如图8所示。其回归方程为

$$PPD^* = 0.211 7 t_n^2 - 8.656 4 t_n + 95.145 \quad (R^2 = 0.435 3) \quad (12)$$

由图8可以看出, 在不接受投票百分率不超过

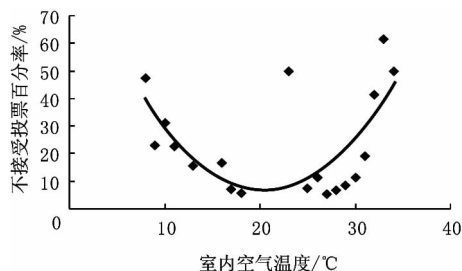


图8 热不接受投票百分率

20%的条件下,其热中性温度的范围应控制在12.5~28.4℃之间,与香港地区的研究结果(19.1~24.8℃)^[5]相比,夏热冬冷地区人们的热舒适区域明显宽泛,说明该地区人们的热舒适适应性比较强。于是,可得夏热冬冷地区人们的适应性热舒适模型如图9所示,其方程为

$$t_n = 0.607t_o + 10.092$$

$$(R^2 = 0.8295, 12.5^\circ\text{C} < t_n < 28.4^\circ\text{C}) \quad (13)$$

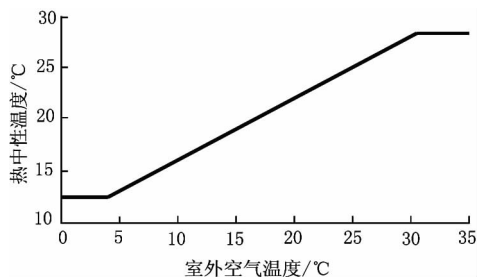


图9 热舒适气候适应性模型

4 适应性热舒适标准在建筑与设备设计中的应用

舒适温度与室外空气温度之间显著的相互依赖关系表明,人们感觉舒适的温度并不是恒定不变的,而是随着室外空气温度的变化而变化的,没有一个能够普遍适用于任何不同气候条件的舒适温度。利用热中性温度与室外空气温度之间的相关性分析,可以指导建筑师判断采取建筑的被动式设计策略获得室内热舒适的可能性。

若采用被动式的手段不能满足人们的热舒适要求,那么在设备设计时可以参考热中性温度与室外空气温度的相互适应性关系,使室内舒适温度根据室外空气温度来设定。采用这种适应性热舒适的设计方法,一方面可以节约能源,另一方面可以更好地满足人们的热舒适感。

5 节能潜力分析

由热中性温度与室外空气温度的相关性曲线(图7)可以看出,热中性温度与室外空气温度的变

化趋势一致,即热中性温度随着室外空气温度的升高而相应升高,随着室外空气温度的降低而相应降低,这种适应性关系减小了室内外的温差,从而有利于降低空调的供暖与制冷能耗。

由前述的分析结果可知,实测得到的夏热冬冷地区冬、夏季人们的热中性温度分别为13.6℃和27.3℃,这样的舒适标准均低于目前我国居住建筑空调室内温度设计标准,给我们提供了一种在保证人体热舒适的前提条件下,通过降低冬季室内供暖温度与提高夏季室内制冷温度来降低空调制冷与供暖能耗的有效节能途径。

文献[6]指出,在围护结构和室外计算参数一定的条件下,室内计算温度每降低1℃,耗煤量可减少5%~10%。照此估计,若室内空气温度在目前设定标准18℃的基础上降低3~4℃,则耗煤量可减少15%~40%。

另有资料表明,夏季随着室内设计温度的变化,空调节能率也呈线性变化,且夏季室内设计温度每提高1℃,空调系统将减少能耗5%~7%^[7],由此推算,若由现在夏季空调居住建筑内26℃的设定温度升高为夏季27.3℃的中性温度,则可减少空调能耗6.5%~9.1%。因此,在供暖空调室内热环境设计时应该充分尊重人们自身的适应性调节潜能,从而创造出更加舒适节能的绿色建筑。

6 结论与建议

适应性热舒适理论认为人们感觉舒适的温度并不是恒定不变的,而是随着室外空气温度的变化而变化的,没有一个能够普遍适用于任何不同气候条件下的舒适温度。本文对夏热冬冷地区居住建筑室内热环境状况进行了大范围的客观测试和主观反应调查,并对调查结果进行了统计分析,得到以下结论。

6.1 夏热冬冷地区四季分明,夏季炎热潮湿而冬季寒冷干燥。人们室内的着衣量具有明显的季节性特点,夏季居民室内着装的平均热阻为0.28 clo,着衣量较少;而冬季为1.41 clo,着衣量较多。调整着衣量是适应室内外空气温度变化的主要调节措施。

6.2 夏热冬冷地区夏季居民的实测热中性温度为27.3℃;冬季的热中性温度为13.6℃。该地区居

(下转第5页)