

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.054

寒冷地区被动房冬季室内热舒适评价模型

周涵宇, 刘刚, 王立雄, 刘魁星

(天津大学 a.建筑学院; b.天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室, 天津 300072)

摘要:关于热舒适的研究主要针对空调房间,而被动房主要通过被动技术来保证室内环境舒适,为研究寒冷地区被动房冬季的热环境状况,了解被动技术对热舒适的影响,选取天津地区某被动房为实验对象,分为供暖和无供暖工况,通过室内环境测试及问卷调查,得到每种工况下的实际热感觉投票值 TSV,数据拟合后对比 TSV 模型与 PMV 模型,对偏差较大的无供暖工况下原始热舒适预测模型进行修正,最终得到适用于寒冷地区被动房供暖与无供暖工况下的热舒适评价模型。结果表明,无供暖工况下,有 44% 的人希望温度升高,单纯通过被动技术无法完全满足寒冷地区被动房冬季热舒适,但无供暖工况下,比预测可接受温度下限降低 1.93 °C,用户对热环境的适应性强,可以适当延长过渡季时间。

关键词:热舒适;被动房;模型校准和验证;对比分析

中图分类号:TU111.2

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)07-061-09

Evaluation model of indoor thermal comfort for passive houses in cold regions in winter

ZHOU Hanyu, LIU Gang, WANG Lixiong, LIU Kuixing

(a. School of Architecture; b. Tianjin Key Laboratory of Building Physical Environment and Ecological Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: Previous studies on thermal comfort mainly focus on air-conditioned rooms, whereas passive houses mainly rely on passive technology to ensure comfortable indoor environment. In order to study the thermal environment and the influence of passive technology on thermal comfort of passive houses in winter in cold regions, a passive house in Tianjin area was selected as the research object. The experiment was carried out in two conditions; with heating and without heating. Through indoor environmental test and questionnaire survey, the actual thermal sensation polling value TSV under each working condition was obtained. After data fitting, the TSV model was compared with the PMV model. The original thermal comfort prediction model without heating was modified due to the large deviation of the model. Finally, a thermal comfort evaluation model for passive houses in cold regions was obtained under heating condition and without heating condition. The results show that 44% of the people want the temperature to rise under the condition of no heating. Passive technology alone cannot completely satisfy the thermal comfort

收稿日期:2020-01-19 网络出版日期:2020-04-21

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700200);国家自然科学基金重点项目(51338006)。

Supported by National Key R&D Plan for the 13th Five-Year Plan (2016YFC0700200) and National Natural Science Foundation of China (51338006).

作者简介:周涵宇(1991—),女,博士研究生,主要从事建筑技术科学研究,(E-mail)1031619076@qq.com。

通信作者:刘魁星,男,博士,(E-mail)liukuixing1@sina.com。

requirement of passive housing in cold areas in winter. However, the actual acceptable temperature limit was reduced by 1.93 degrees centigrade under the condition of no heating, suggesting that users are more adaptable to the thermal environment and the transition season can be appropriately extended.

Keywords: thermal comfort; passive house; model calibration and verification; comparative analysis

被动房需要同时解决室内环境质量及建筑节能减排的问题^[1],减小人体热舒适需求与室外环境的差异是被动房设计的关键。被动房主要通过被动技术来保证室内环境舒适,利用室外自然环境对室内环境进行调节,具有较强的独立性,室内环境受室外环境影响大,同时人体的热舒适反应也和普通建筑不同,研究表明,自然通风建筑的人体舒适区间远大于空调建筑^[2-3]。Toe 等^[4]调查了使用被动冷却技术的马来西亚建筑,发现使用被动式设计可减少热不适,但无法确保整天的热舒适度。丁颖慧等^[5]研究发现,被动房中用户在热适应过程中采取的调节方式更加多样和主动,如通过调节遮阳和通风来改善室内环境^[6-8]。我国传统民居中大量使用了被动技术, Chengcheng Xu 等^[9]调研了南京地区传统民居的居民热舒适度和适应行为,发现居民采用一系列热适应行为来扩展他们的热舒适区,对恶劣环境的耐受性更强。在对人体热舒适的研究中,应用最普遍的是 Fanger 教授的 PMV /PPD 模型^[10],但它在非空调环境中的适用性有局限,考虑到人体的心理、生理和行为适应性,自然通风建筑需要对 PMV 模型进行修正,不同气候区、建筑类型及人员组成均有不同的修正系数,前人已针对不同条件等做了大量的研究^[11-13],这些研究大多针对普通住宅及公共建筑。冬季供暖是我国寒冷地区建筑能耗的最主要组成部分,通过建立寒冷地区冬季被动房的热舒适模型,可以为冬季建筑热环境的评价与设计提供准确的依据,在保证室内热舒适的基础上降低采暖能耗。

目前,寒冷地区被动房热舒适的研究中,尚存在以下问题:

1) 寒冷地区冬季室外温度低,单纯使用被动技术能否保证室内热舒适有待探讨,在只使用被动技术与主被动技术配合的情况下,用户的热舒适状态有何不同值得讨论。

2) 舒适度的研究中多为物理环境因素对热舒适的影响,对于被动房,人体自身心理调节和行为调节也是影响舒适度的主要因素。

3) 每项热舒适适应性修正模型都有地域性、建筑类型、生活习惯、人员组成等局限,关于寒冷地区被动房的室内热舒适研究较少,有必要制定针对性更强的舒适度标准。

针对上述问题,以天津地区某被动房为实验对象,通过现场测试、问卷调查、回归分析、模型修正等方法,对比寒冷地区冬季被动房开供暖与不开供暖工况下的人体热舒适,得到适用于该条件的热环境评价模型。

1 研究方案

1.1 调研对象概述

天津具有寒冷地区的典型气候特征,选取天津大学被动式太阳房实验室为研究对象,如图 1 所示。该实验室以太阳能十项全能竞赛作品 sunflower 为原型,通过分析寒冷地区被动房设计原则进行再设计,建立典型寒冷地区被动房实验室,建筑类型定为办公建筑。建筑采用紧凑的矩形平面,东西长 10 m,南北进深 7.2 m,层高 2.9 m,净高 2.5 m,其体型系数为 0.85。外墙采用结构保温板系统,平均传热系数为 $0.18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。外门窗采用三层 Low-e 真空玻璃与木框,平均传热系数为 $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,被动节能率 65%,高于节能建筑节能率 50% 的标准。被动房冬季采用地板辐射供暖^[14-15]。

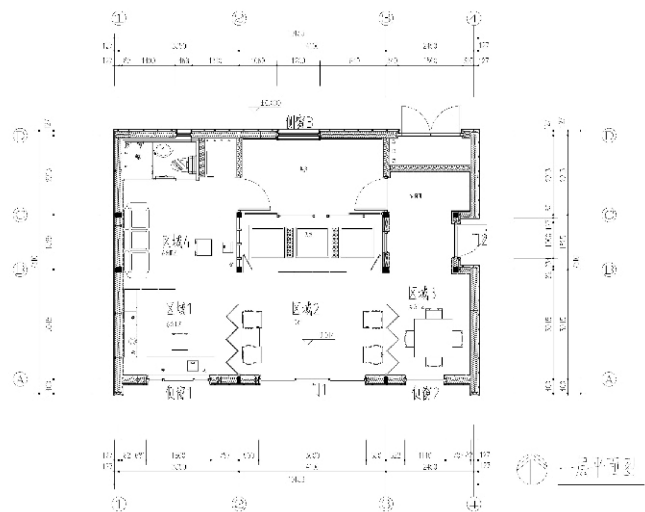


图 1 被动房平面图

Fig. 1 Passive house plan

1.2 热环境参数测试

测试时间为2016年11月10日—2017年1月10日,在每天10:00—16:00进行,研究被动房在节能基础上不同温度下用户的热感觉,推迟供暖时间。其中,11:10—12:10无供暖,研究冬季无供暖工况下人员的热感觉;12:10—1:10对实验房供暖,研究冬季在不同温度条件下被试的反应。所有时间段内样本时间分布均匀,有供暖与无供暖情况各得到110份问卷。被试在进入室内至少30 min后进行测试,给予足够的稳定时间使身体适应当前环境,保证实验过程中温度等环境参数变化速率较小,减少环境变化对热舒适的影响。测试仪器布置在房间中心位置,高度1.5 m处。使用TSI model 9545热线风速仪测量相对湿度、空气温度和风速,KIMO TM200黑球温度计测量黑球温度。

1.3 主观问卷调查

采用不同对象、不同时间在该建筑的1—4区域内进行热感觉问卷调查,各区域样本分布均匀。测试期间门窗及遮阳的开闭完全由受试者自行决定,被试者已知此实验环境为被动太阳房,了解被动房调控原理,得知它能够很好地提高室内温度,使之接近舒适区。调研问卷基于Appendix E, Thermal Survey of Standard^[16],内容包括被试个人基本信息,如年龄、性别、在建筑里的位置等;其次是衣着及活动状态,分别对应PMV模型里的衣阻及代谢率;以及被试的主观评价,包括对当前热环境的热感觉投票和热期望投票,热感觉投票采用ASHRAE七级标尺,热期望投票采用三级标尺;问卷还增设当前房间的使用状态调查,如门窗及遮阳的开闭状态。

2 调研结果统计与分析

2.1 被试者基本信息

被试人员均为20~30岁的研究生,男生占67%,女生占33%,供暖工况下平均衣阻为0.82,无供暖工况下平均衣阻为0.91。

2.2 热环境参数统计

在发放问卷的时间段内,记录被动房室内的热环境情况,每隔10 s自动记录3组数据,然后取平均值,统计各参数如表1所示。

表1 被动房冬季整体热环境参数

Table 1 Overall thermal environment parameters of passive house in winter

参 数	空气温度/℃		黑球温度/℃		相对湿度/%		空气流速/(m·s ⁻¹)	
	无供暖	有供暖	无供暖	有供暖	无供暖	有供暖	无供暖	有供暖
平均值	20.55	26.64	21.21	26.28	40.02	20.05	0.22	0.11
最大值	24.90	31.90	24.70	31.70	60.90	39.20	0.42	0.26
最小值	14.50	22.20	14.10	21.80	14.10	2.40	0.12	0.00
标准偏差	2.79	2.02	2.83	1.87	13.81	6.36	0.08	0.05

将被动房冬季热环境参数与现有规范进行对比,了解被动房实验室的热环境情况。根据《中等热环境PMV和PPD指数的测定及热舒适条件的规定》(GB/T 18049—2000),对于冬季有供热工况下,主要进行坐姿活动的人员,其舒适条件如下:作业温度在20~24℃(22℃±2℃);风速≤0.15 m/s;相对湿度为30%~70%。测试期内各物理环境范围均比规范要求广,可得到冬季各环境情况下用户的热感觉。供暖工况下,空气温度平均值略高于规范要求,无供暖工况下温度较低;供暖工况下风速平均值在规范要求范围内,无供暖工况下风速略高;由于寒冷气候区冬季供暖季室内湿度普遍不足,供暖工况下相对湿度略低于规范要求,而无供暖工况下相对湿度平均值在规范要求范围内。

2.3 主观问卷结果统计

2.3.1 热感觉投票

由图 2 可以看出,被试热感觉投票符合正态分布,无供暖工况下被试偏凉,供暖工况下被试偏热。根据 ISO 推荐的可接受热感觉区间,无供暖工况下投票在 $-1 \sim +1$ 之间比例的占 76.27%,供暖工况下占 93.10%,大部分人认为热环境可接受,无供暖工况下对热环境的接受度明显较低。

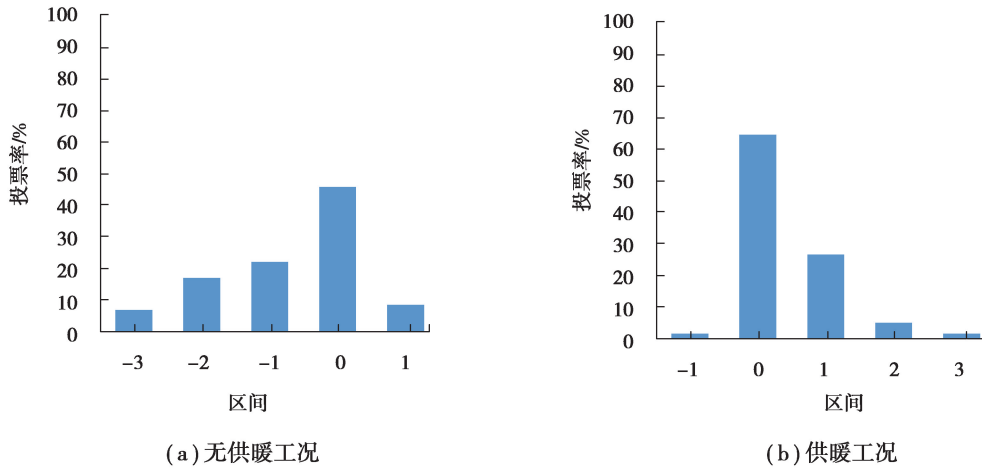


图 2 热感觉投票频率分布图

Fig. 2 Frequency distribution of thermal sensory voting

2.3.2 热期望投票

如图 3 所示,根据温度期望投票结果,无供暖工况下 44% 的人希望温度升高,说明单纯通过被动技术无法完全满足被动房冬季热舒适,而供暖工况下 88% 的人认为温度不需改变,使用者对温度的满意程度较高。

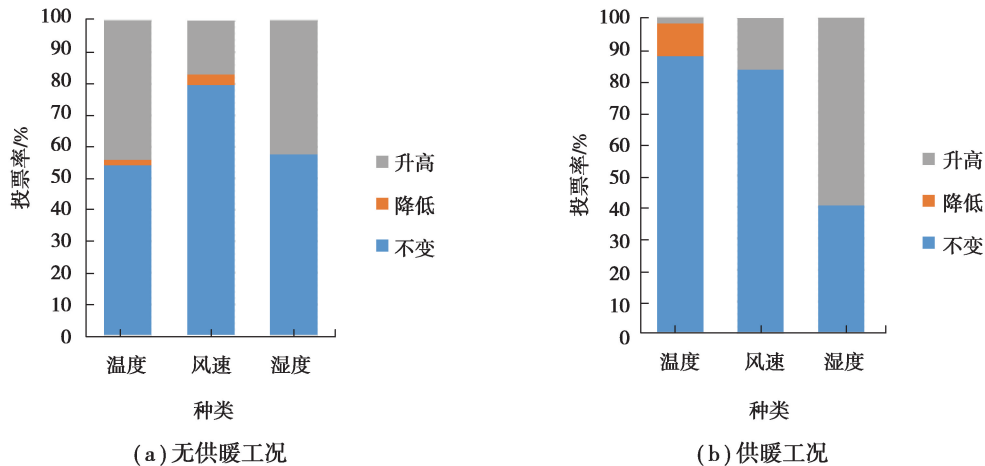


图 3 热期望投票频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution of thermal expected voting

根据风速期望投票结果,有无供暖工况下均有超过 80% 的人认为风速不需要改变,说明使用者对当前的风环境接受程度较高。根据湿度期望投票结果,无供暖工况下有 42% 的人期望湿度提高,供暖工况下有 59% 的人期望湿度提高,说明被动房冬季室内相对湿度过低,供暖工况下湿度更低,符合寒冷气候区的气候特点及其建筑室内湿度的普遍现状。

2.4 用户调节行为统计

2.4.1 开启率统计

如图 4 所示,整体来看,为保持冬季较高的室温,所有门窗的开启率都很低,无供暖工况下所有门窗的整体开启率为 5%,供暖工况下为 10%。侧窗均为悬窗,侧窗 1 正对主要工作区,无供暖情况下开启率为 3%,有供暖情况下开启率为 6%;侧窗 2 由于窗户较重,无供暖情况下无开启,有供暖情况下开启率仅为 1%;侧窗 3 为北向唯一的小窗,且建筑北侧为辅助空间,此窗作为通风换气窗,开启率最高,无供暖情况下为 17%,有供暖情况下为 36%;门 1、门 2 为平开门,门 1 为主要入口,开启率较高,无供暖情况下为 12%,有供暖情况下为 10%;门 2 主要影响区域 3 的热环境,无供暖情况下为 2%,有供暖情况下为 5%;天窗设置有电动开窗器,但相对于其他门窗开启的便利性仍较低,无供暖情况下无开启,有供暖情况下为 1%。以上分析可以看出,由于无供暖情况室内温度较低,为避免带来更多的冷量,开启率更低。

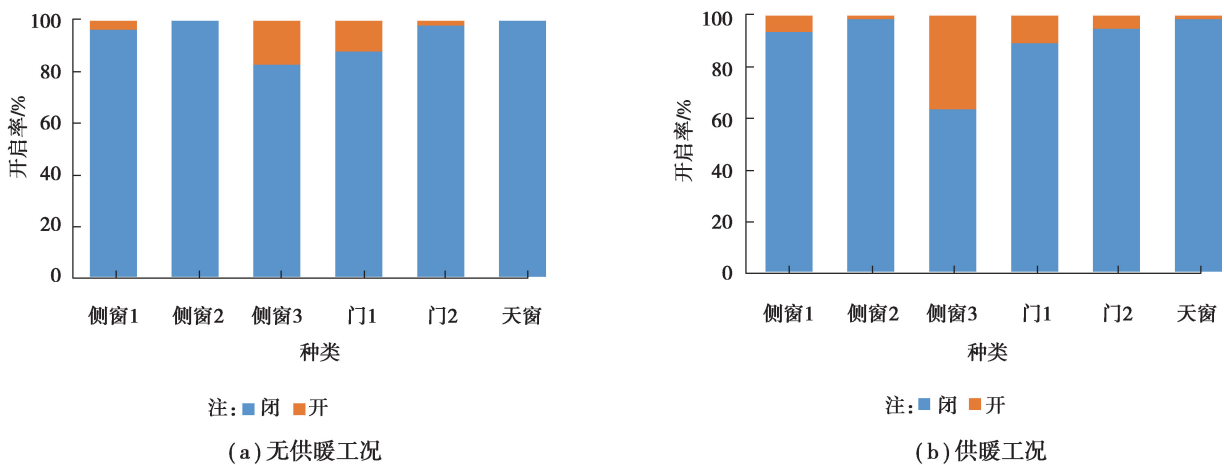


图 4 门窗开启率频率分布图

Fig. 4 Frequency distribution of door and window opening rate

2.4.2 遮阳率统计

如图 5 所示,有供暖与无供暖情况分布规律较为一致,总体来看,侧窗 1:由于区域 1 为纸质阅读区,照度要求较高,所以低遮阳率的情况比较多。侧窗 2:由于区域 3 为电脑工作区,照度要求低,所以高遮阳率的情况较多。门 1:南向大面积的透明材质,易产生眩光,所以高遮阳率的情况较多。其余门窗对应的区域没有特殊的光环境要求,遮阳状态分布较均匀。所有门窗在遮阳率为 0~25%时的比率,无供暖工况为 31%,供暖工况为 17%;遮阳率为 75%~100%时,无供暖工况为 27%,供暖工况为 37%。在光环境舒适的基础上,无供暖情况由于室内温度较低,为获得更多的太阳辐射带来热量,侧窗及天窗低遮阳率的情况明显更多。

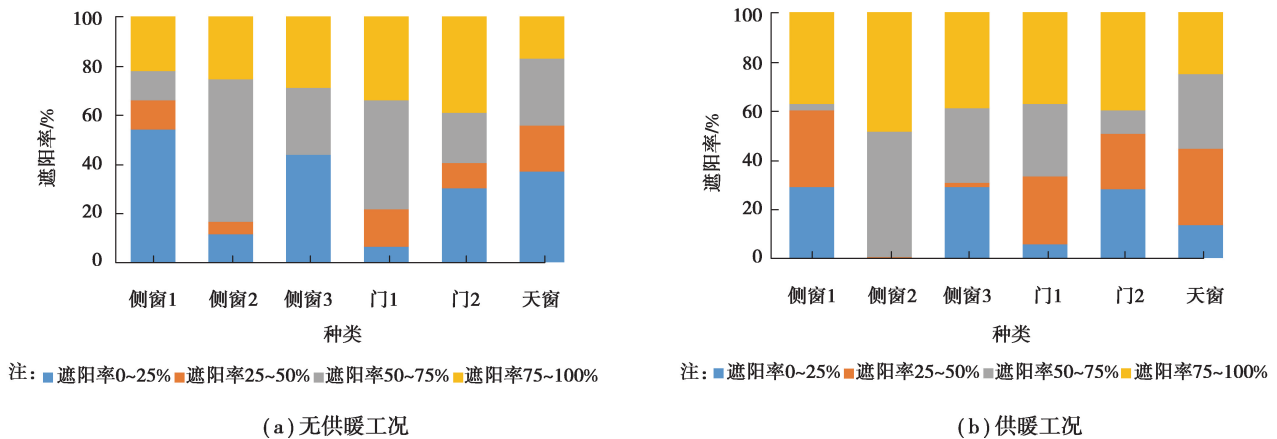


图 5 遮阳率统计

Fig. 5 Statistics of shading rate

3 热舒适模型

3.1 热舒适模型对比

根据现场实测数据及问卷调查结果,建立基于实际热感觉的 TSV 模型,将其与 Fanger 提出的原始 PMV 模型对比,分析两者的差异。使用温度频率法^[17]对操作温度以每 1 °C 为间隔来划分温度区间,然后,将每个区间内的平均热感觉投票与操作温度平均值进行回归分析,得到实际平均热感觉投票与室内操作温度关系的曲线。通过现场实测及问卷调查,得到 PMV 模型里的空气温度、相对湿度、风速、平均辐射温度、衣阻及代谢率这 6 个物理量,代入 PMV 模型中,得到相应的预测热感觉投票值。同样采用温度频率法,将预测热感觉投票值与操作温度做回归分析,得到预测平均热感觉投票与室内操作温度关系的曲线,如图 6 所示。

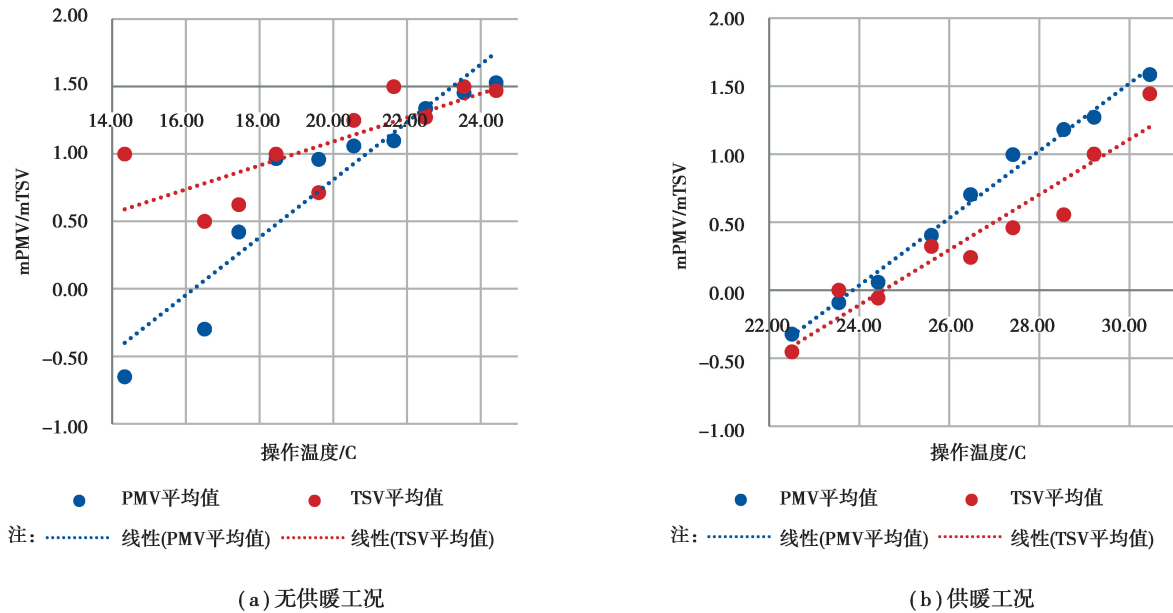


图 6 TSV 模型与 PMV 模型对比

Fig. 6 Comparison of TSV model and PMV model

通过图 6 所示的回归分析曲线,得到被动房被调查者的冬季预测/实际热感觉投票与操作温度关系式。其中, y 为预测/实际热感觉投票(PMV/TSV); x 为操作温度(top),°C。当 TSV 或 PMV 为 0 时,得到被动房冬季中性温度。据研究预计不满意者的百分数(PPD) $\leq 20\%$ (对应 TSV/PMV 为 $-1 \sim +1$) 为可接受热环境,当 TSV/PMV 为 $-1 \sim +1$ 时得到可接受温度范围。

表 2 热舒适模型对比

Table 2 Comparison of Thermal Comfort Models

参 数	无供暖工况		供暖工况	
	TSV	PMV	TSV	PMV
回归方程	$y = 0.18x - 4.37$	$y = 0.43x - 9.93$	$y = 0.20x - 4.99$	$y = 0.25x - 5.91$
R^2	$R^2 = 0.591$	$R^2 = 0.8783$	$R^2 = 0.9153$	$R^2 = 0.9916$
斜率	0.18	0.43	0.20	0.25
中性温度/°C	24.60	23.23	24.55	23.87
可接受温度下限/°C	18.96	20.89	19.63	19.83
可接受温度上限/°C	30.23	25.57	24.55	27.90

3.2 模型差异性分析

图6显示,被动房冬季供暖工况下 TSV 曲线与 PMV 曲线几乎一致,而无供暖工况下 TSV 曲线与 PMV 曲线差异较大,两曲线斜率差异明显,形成“剪刀差”。无供暖工况下实际可接受温度范围要比预测可接受温度范围大,TSV 曲线斜率比 PMV 曲线斜率小,说明实际热感觉不如预测的热感觉敏感。

被动房不同于空调建筑最大特点是它营造了一个更加接近自然的动态环境,在无供暖工况下,用户为达到自身舒适性,会更加主动地通过自我行为意识来调节。因此,存在环境适应性,包括心理、行为和生理上的适应,当人们能够主动对环境进行调控时,会提高对环境的满意程度,相应的舒适温度范围也会变宽。心理适应性调节作用:由于被试已知该建筑为被动房,在潜意识中对环境的舒适温度预期不高,导致被动房的舒适温度范围大于空调房间。行为适应性调节作用:在被动房里,人们的自我调节意识远远高于空调房间^[5],根据前文分析,冬季无供暖工况下为减少热损失,门窗开启率比供暖工况下低 1/2,为获得更多的太阳得热,无供暖工况下遮阳率大大低于供暖工况,用户通过对门窗、遮阳、天窗等被动措施的自行调控来改善室内环境,有利于提高对环境的接受度,导致热舒适范围也相应扩大。

4 无供暖工况模型修正

PMV 模型可以预测寒冷气候区被动房冬季供暖工况下人体的热感觉,但不能准确预测无供暖工况下人体的热感觉,需要对其进行修正。主要有 2 种 PMV 模型的适应性修正方法。1)为使 PMV 模型能够适用于自然通风建筑,Fanger 教授^[18]提出期望因子 e 来修正 PMV 模型;2)姚润明在 Humphreys 研究的基础上,将黑箱法引入人体热调节模型中,提出 aPMV 模型^[19]。本节选用这 2 种修正方法进行对比,通过求取 PMV 修正模型的期望因子 e ^[20]和适应性 PMV 模型的适应系数 λ ^[21],得到寒冷地区被动房的热感觉评价模型。

4.1 带期望因子的 PMV 修正模型

非稳态环境下,人们的实际热感觉与 PMV 预测值的偏离出现“剪刀差”现象^[21]。据此,Fanger 考虑了人体心理适应性,提出了期望因子 e ,用来修正当量稳态空调条件下计算出来的 PMV,得到修正模型:

$$PMV_e = e \times PMV, \quad (1)$$

给出 e 的取值区间为 $0.5 \sim 1$ ^[11],并根据气候条件和空调普及状况对自然通风建筑分类,将用户热期望分为高、中、低三级,对应不同期望因子 e 值($0.9 \sim 1.0, 0.7 \sim 0.9, 0.5 \sim 0.7$)。空调越不普及,热期望越低,对应的期望因子越低。

根据最小二乘法,PMV 修正模型的期望因子 e 值由以下方程进行计算^[22]:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N (TSV_i \times PMV_i)}{\sum_{i=1}^N PMV_i^2}, \quad (2)$$

其中, N 为总数据组数。

根据温度频率法,以 1°C 为温度间隔对操作温度分组,将各组的 TSV 和 PMV 平均值代入式(2),得到 PMV 修正模型的期望因子 $e=0.47$ 。

结果显示,根据 Fanger 给出不同建筑类型、气候条件下 PMV 修正因子 e 值的参考范围,寒冷气候区被动房冬季无供暖工况下的热期望比最低期望等级还要低。由于超出修正因子 e 的取值范围,该修正模型不适用。

4.2 适应性 PMV 修正模型

姚润明将自动控制理论中的反馈调节机制引入人体热舒适调节模型,把实际热感觉投票 TSV 与预测热感觉 PMV 之间的差异认为是人体作出的适应性自我调节,即人体调节作用的负反馈,包括心理适应与行为适应。从而提出适应性模型,引入适应系数 λ ,该模型的计算结果为考虑了人体适应性的实际热感觉投票近似值。模型表达式为

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda PMV}, \quad (3)$$

适应系数 λ 反映了不同工况下人体做出的反馈调节情况, λ 的正负表示对热环境反馈调节作用的方向, λ 为正表示实际热感觉投票 TSV 低于预测热感觉投票 PMV, λ 为负表示实际热感觉投票 TSV 高于预测热感觉投票 PMV。 λ 的绝对值大小表示对热环境反馈调节作用的程度,适应系数的数值越大,热舒适的反馈作用越强,PMV 和 TSV 相差越大。

适应系数 λ 的计算方程为^[22]:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N 1/TSV_i - \sum_{i=1}^N 1/PMV_i}{N} \quad (4)$$

同样根据温度频率法,以 1 °C 为温度间隔对操作温度分组,将每组的 TSV 和 PMV 平均值代入式(4),得到适应性 PMV 模型的适应系数 $\lambda = -3.49$ 。适应系数 λ 为负,说明寒冷地区被动房冬季无供暖工况下实际热感觉高于预测热感觉,人体更不容易感到寒冷。适应系数绝对值为 3.49,与其他类型建筑对比,文献[22]中得出寒冷地区高铁站在秋末的适应系数 λ 绝对值为 0.40,文献[23]中得出寒冷地区大型商业综合体在冬季的适应系数 λ 绝对值为 0.35,可以看出寒冷地区被动房冬季无供暖工况下人体的热适应反馈调节水平明显高于其他类型建筑。

5 结 论

1) 冬季无供暖工况下室内平均空气温度为 20.55 °C,44% 的人希望温度升高,单纯通过被动技术无法满足被动房冬季热舒适,当室内温度低于无供暖工况舒适温度 18.96 °C 时,需要开启供暖设备。

2) 由于寒冷地区被动房冬季无供暖工况下用户对热环境的心理适应性强,热期望低,调节反馈作用强,可以适当延长过渡季时间。

3) 寒冷地区被动房冬季无供暖工况下实际可接受温度范围为 18.96~30.23 °C,比预测可接受温度下限降低 1.93 °C。

4) 冬季供暖工况下可以直接使用 PMV 模型预测用户的热感觉,无供暖工况下需要对 PMV 模型进行适应性修正,结果表明,适应性 PMV 模型更适合预测无供暖工况下寒冷地区被动房冬季的热舒适,即:

$\alpha_{PMV} = \frac{PMV}{1-3.49PMV}$ 。运用该模型预测寒冷地区被动房冬季无供暖工况下人体的热舒适状况,可确定过渡季时间,有效判断何时需要供暖,同时保证寒冷地区被动房冬季的节能和热舒适需求。

参考文献:

- [1] 杨柳,杨晶晶,宋冰,等.被动式超低能耗建筑设计基础与应用[J].科学通报,2015,60(18):1698-1710.
Yang L, Yang J J, Song B, et al. Fundamental research and practice of passive and ultra-low energy consumption buildings[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(18): 1698-1710. (in Chinese)
- [2] 吕芳,涂光备,李景广.天津地区夏季人体热舒适的测试与分析[C]//全国暖通空调制冷 2000 年学术年会论文集. 2000: 636-639.
Lyu F, Tu G B, Li J G. Testing and analysis of human thermal comfort in Tianjin in summer [C]//Paper Collection of the National Annual Conference on HVAC Refrigeration 2000. 2000:636-639. (in Chinese)
- [3] de Dear R J, Brager G S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55[J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 549-561.
- [4] Toe D H C, Kubota T. Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot-humid climate of Malaysia[J]. Solar Energy, 2015, 114: 229-258.
- [5] 丁颖慧.寒冷地区被动式太阳房室内人体舒适性的研究[D].大连:大连理工大学,2006.
Ding Y H. Study on indoor thermal comfort in passive solar house in cold area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] Yan H Y, Yang L, Zheng W X, et al. Analysis of behaviour patterns and thermal responses to a hot-arid climate in rural China[J]. Journal of Thermal Biology, 2016, 59: 92-102.
- [7] Liu W W, Zheng Y, Deng Q H, et al. Human thermal adaptive behaviour in naturally ventilated offices for different outdoor air temperatures: a case study in Changsha China[J]. Building and Environment, 2012, 50: 76-89.
- [8] Yao R M, Liu J, Li B Z. Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms[J]. Applied Energy, 2010, 87(3): 1015-1022.
- [9] Xu C C, Li S H, Zhang X S, et al. Thermal comfort and thermal adaptive behaviours in traditional dwellings: a case study in Nanjing, China[J]. Building and Environment, 2018, 142: 153-170.
- [10] Fanger P O. Thermal comfort: analysis and application in environmental engineering [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1973, 1-20..
- [11] Yan H Y, Mao Y, Yang L. Thermal adaptive models in the residential buildings in different climate zones of Eastern China[J]. Energy and Buildings, 2017, 141: 28-38.

- [12] Yu W, Li B Z, Yao R M, et al. A study of thermal comfort in residential buildings on the Tibetan Plateau, China [J]. *Building and Environment*, 2017, 119: 71-86.
- [13] Lu S L, Fang K, Qi Y F, et al. Influence of natural ventilation on thermal comfort in semi-open building under early summer climate in the area of tropical island[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 121: 944-951.
- [14] 房涛. 天津地区零能耗住宅设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Fang T. Research on design of zero-energy residential building for Tianjin area [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [15] 杨向群. 零能耗太阳能住宅原型设计与技术策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Yang X Q. Research on design and technical strategies of zero-energy solar house prototype [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [16] ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy [S]. Atlanta: ASHRAE, 2004.
- [17] 王昭俊. 现场研究中热舒适指标的选取问题[J]. *暖通空调*, 2004, 34(12): 39-42.
Wang Z J. Selection of thermal comfort indexes in the field study[J]. *Hv & Ac*, 2004, 34(12): 39-42. (in Chinese)
- [18] Fanger P, Toftum J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 533-536.
- [19] Yao R M, Li B Z, Liu J. A theoretical adaptive model of thermal comfort-Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(10): 2089-2096.
- [20] Nicol J F, Humphreys M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 563-572.
- [21] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 122-124.
Zhu Y X. *Architectural Environment* [M]. Third Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2010: 122-124. (in Chinese)
- [22] Liu G, Cen C, Zhang Q, et al. Field study on thermal comfort of passenger at high-speed railway station in transition season[J]. *Building and Environment*, 2016, 108: 220-229.
- [23] 党睿, 闫紫薇, 刘魁星, 等. 寒冷地区大型商业综合体冬季室内热舒适评价模型研究[J]. *建筑科学*, 2017, 33(12): 16-21.
Dang R, Yan Z W, Liu K X, et al. Research on indoor thermal comfort evaluation model for large commercial complex in cold area in winter[J]. *Building Science*, 2017, 33(12): 16-21. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)