

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202104057



寒冷地区高校教室冬季室内 热环境与热舒适性分析

闫旭峰¹, 雷勇刚^{1,2}, 景胜蓝², 尹晗硕²

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600;

2. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 以寒冷地区太原市某大学供暖季教室为研究对象,对教室室内外热环境进行现场实测,同时对室内人体热舒适情况进行主观问卷调查.研究表明:教室内实测热中性温度为 25.21℃,80%满意度热舒适温度范围为 19.64~30.78℃,而根据 PMV (predicted mean vote)计算得到的室内热中性温度为 21.07℃,80%满意度热舒适温度范围为 16.61~25.53℃.说明 PMV 模型预测的热感觉与实测热感觉之间存在一定偏差,而验证 Griffiths 模型可以准确预测该地区教室内热舒适温度,预测值为 24.69℃.利用最小二乘法优化 PMV-PPD(predicted percent dissatisfied)模型,建立适应性 PMV 修正方程,最终提出适用于寒冷地区高校教室冬季热环境评价数学模型.

关键词: 热环境; 热舒适性; 寒冷地区; 热适应性模型; 供暖模式; 高校教室; 太原市

中图分类号: TU 832.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)02-0198-08

Research on Indoor Thermal Environment and Thermal Comfort of College Classrooms in Cold Regions

YAN Xufeng¹, LEI Yonggang^{1,2}, JING Shenglan², YIN Hanshuo²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The classroom of a university in Taiyuan City during heating season in the cold area is taken as the research object, the indoor and outdoor thermal environment of the classroom is measured on-site, and the subjective questionnaire survey of the indoor thermal comfort of the human body is conducted at the same time. The research results show that the measured thermal neutral temperature in the classroom is 25.21℃, and the temperature range for 80% acceptability is 19.64 to 30.78℃; and the indoor thermal neutral temperature predicted by PMV (predicted mean vote) is 21.07℃, the temperature range for 80% acceptability is 16.61 to 25.53℃; it shows that there is a certain deviation between the thermal sensation predicted by the PMV model and the measured thermal sensation. It is verified that the Griffiths model can accurately predict the thermal comfort temperature in classrooms in this area, with a predicted value of 24.69℃. The PMV-PPD (predicted percent dissatisfied) model is optimized by the least square method, and the adaptive PMV correction equation is established. Finally, a mathematical model for winter thermal environment evaluation of college classrooms

收稿日期: 2021-04-27

通信作者: 雷勇刚(1976-),教授,博士,博士生导师,主要从事建筑节能与可再生能源利用、供热管网敷设与节能、热量高效传递与储热技术,以及通风空调气流组织的研究. E-mail:leiyonggang@tyut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106103); 山西省住房和城乡建设厅科研基金资助项目(R20210013)

in cold regions is proposed.

Keywords: thermal environment; thermal comfort; cold regions; thermal adaptability model; heating mode; college classrooms; Taiyuan City

在美国采暖、制冷与空调工程(ASHRAE 55)标准中,热舒适被定义为人对所处热环境表示满意的心理状态^[1]. 随着国家经济的迅速发展,人们生活水平得到显著提高,人们对室内热环境的要求越来越高,导致了暖通空调技术和设备的快速发展,同时也增加了能源的使用和温室气体的排放. 因此,确定热舒适和节能之间的平衡已经成为一个世界性的挑战^[2]. 对于学生来说每天大约三分之一的时间是在教室里度过. 由于教室内学生的高密度聚集和不理想的室内热环境会直接对学生的学习和表现产生一定的负面影响,因此,在教室里提供舒适的室内环境是至关重要的.

迄今为止,国内外许多学者针对不同地区大学教室热舒适进行了大量的研究. Carolina 等^[3]在巴西某大学进行了热舒适调查研究,结果表明空调教室的最佳温度条件是 23~24 ℃ 之间,超过 20% 的学生在 22 ℃ 以下会感到不舒服,而且室内温度高达 26 ℃ 不会对人体的热舒适性产生明显的影响. Kumar 等^[4]得出在自然通风的大学教室内,学生们更喜欢通过打开门窗或操作吊扇来维持室内舒适度,在室内空气温度为 29 ℃ 时,吊扇的使用率超过 80%. Fang 等^[5]研究发现香港空调教室学生的可接受温度下限低于 ASHRAE 标准. Mishra 等^[6]在埃因霍温工业大学的一个教室里进行了热舒适研究,结果表明在近 20 min 的过渡后,参与者的最近一次热记忆的影响还较为显著,但随实验进行逐渐适应. 刘佳璐等^[7]研究发现西安某大学学生的热中性温度为 20.6 ℃;热舒适温度范围为 19.5~21.8 ℃. 宁浩然等^[8]对哈尔滨某大学教室进行热舒适研究,发现 90% 可接受的温度范围为 19.7~23.2 ℃. 姚润明等^[9]通过对重庆大学自然通风教室热环境的研究,引入适应系数 λ ,提出 aPMV(adaptive predicted mean vote)模型,使其结果更接近受试者的主观感受,并且减小了误差.

综上,前人主要是在有调节措施或环控设备的工况下对教室室内热环境开展研究,并主要在夏季进行. 虽然关于教室热舒适的研究在过去几年里不断增加,但与一般的热舒适研究相比,寒冷地区大学教室热舒适研究的数量还比较少的^[10],尤其是在冬季供暖模式下的大学教室的研究更少. 鉴于此,本文以寒冷地区太原市某大学供暖季教室为研究对象,对教室室内外热环境进行现场实测,同时对室内人体热舒适情况进行主观问卷调查.

1 研究对象与方法

1.1 调研对象概述

太原市位于山西省的中北部区域,东经 111°30′—113°09′,北纬 37°27′—38°25′. 气候属于夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,四季气候分明,而且昼夜温差较大. 根据国家标准 GB 50178—1993《建筑气候区划标准》^[11],太原市是典型的寒冷气候区城市,月平均最高气温 24.1 ℃,最低气温—4.6 ℃. 冬季采用集中供暖,供暖系统为上供下回单管式,供暖季从每年 11 月 1 日到次年 3 月底. 本次调研是在冬季供暖后,2019 年 12 月份的 6 次上课过程中进行,时间为 10:00—12:00,或 14:00—16:00;测试期间气象条件包括晴天、阴天. 地点选取太原市某大学教学楼二层的一间教室. 该教学楼建筑于 2012 年建成,共 4 层,教室建筑层高为 4.5 m,墙体为混凝土墙(带有聚苯乙烯保温材料),墙厚度为 40 mm,传热系数为 0.46 W·(m²·K)⁻¹,窗户为中空玻璃,空气层厚度为 12 mm,传热系数为 2.86 W·(m²·K)⁻¹. 教室平面尺寸为 10 m×7.7 m,窗户平面尺寸为 2 m×2 m.

1.2 研究方法

1.2.1 环境参数测试方法 热环境参数的测试主要包括室内与室外的参数采集,测试仪器参数如表 1 所示. 室内所测参数包括室内空气温度、湿度、室内风速,以及室内黑球温度;室外参数包括室外温度、湿度. 依据国际标准 ISO 7726—1998《热环境的人类工效学 物理量测量仪器》^[12]要求,室内测试仪器放置于在教室的前、中、后不同点,以及离地板 0.1,0.6 和 1.1 m 的 3 个不同高度水平,各位置点所测量的参数取 3 个不同高度测量的平均值.

表 1 测试仪器参数
Tab. 1 Test instrument parameters

仪器名称	型号	测量内容	测量范围	测量精度
温湿度计	FLUKE971	空气温度/℃	20~60	±0.5
		相对湿度/%	10~90	±3
黑球温度计	ZK-HQ8758	黑球温度/℃	0~80	±2 ℃
热线风速仪	QDF-6	空气流速/m·s ⁻¹	0~30	±3%
自动气象站	PC-4	室外温度/℃	-40~80	±0.2
		室外湿度/%	0~100	±2

测量仪器在教室中的具体布置,如图 1 所示.上课的时间为 110 min,其中课间休息 10 min,调研者在上课期间每隔 10 min 记录一次室内热环境参数.对于室外环境参数的测量,可通过室外自动气象站进行记录.为了保证实测数据的准确性,先于课程开始前 20 min 布置测试仪器,待测试稳定后进行读取数据.本次实验所用仪器精度与测试范围均符合国际标准 ISO 7726—1998《热环境的人类工效学 物理量测量仪器》^[12] 标准规定.

1.2.2 主观问卷调查 本次实验采取纸质版问卷表,现场主观问卷调查采用纵向研究法^[13],即对受试者在整个调研期间进行重复调查,共 6 次.由于本次调研是在本科大三学生上课过程中进行的,这两个班的受试学生都是来自于建筑环境与能源应用工程专业,他们已经学习过热环境和热舒适的知识.据前述研究证明,他们充分了解本类调查结果的用途,可以提高热舒适性数据的准确性.调查问卷的内容参照 ASHRAE 55 标准制定^[1],一部分为具体内容,包括受试者的基本信息,如性别、年龄、衣着等;另一部分为个人对所处热环境的主观评价,如受试者的热感觉、热舒适、热期望、热可接受度等.具体的热舒适投票标尺:

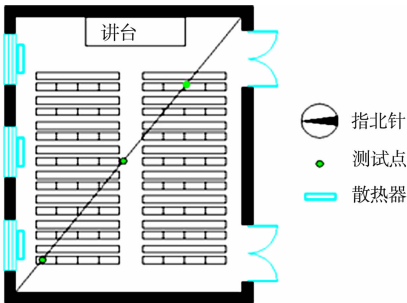


图 1 测量仪器布置图

Fig. 1 Layout of measuring instrument

- 1) 热感觉投票标尺 -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 分别表示冷、凉、稍凉、中性、稍暖、暖、热;
- 2) 热期望投票标尺 -1, 0, 1 分别表示降低、不变、升高;
- 3) 热舒适投票标尺 0, 1, 2, 3 分别表示舒适、稍不舒适、不舒适、难以忍受;
- 4) 热可接受度投票标尺 0, 1 分别表示可接受、不可接受.

2 测试结果与分析

2.1 受试者情况

表 2 为受试者的基本信息.由表 2 可知:所有受试者都身体健康,没有服用任何药物;受试者来自中国不同的省份,平均在太原地区已生活 2 a 以上,可以认为已充分适应太原市的气候环境;受试者平均年龄 20.2 岁,全为青壮年.

表 2 受试者的基本信息
Tab. 2 Basic information of subjects

人员参数	年龄/岁		身高/cm		体质量/kg		在太原生活的时间/a	
	男	女	男	女	男	女	男	女
最大值	21	21	185	178	88	80	20	19
最小值	19	19	155	150	44	42	2	2
平均值	20.2	20.1	171.4	161.3	60.3	50.1	3.2	3.3
标准差	1.7	1.5	5.8	6.9	5.7	6.7	4.1	4.3

为保证测量数据的真实有效性,通常在课堂上同时进行实验环境的测量和问卷调查的填写.参与问卷调查共 49 人,其中男生 30 人(占 61.2%),女生 19 人(占 38.8%),人员数量基本可以满足样本量的要求.最终得到有效问卷 294 份,其中男性 180 份,女性 114 份.受试者的服装热阻、新陈代谢率按 ASHRAE 55—2004 标准进行计算,可以得到学生受试者的平均新陈代谢率为 1.2 MET(1 MET 定义

为每公斤体质量每分钟消耗 3.5 mL 氧气).

2.2 室内外热环境参数

测试期间,室内外的温湿度实时变化趋势,分别如图 2 所示.图 2 中: θ_o, θ_i 分别为室外和室内温度; RH_o, RH_i 分别为室外和室内湿度; t 为测试时间.

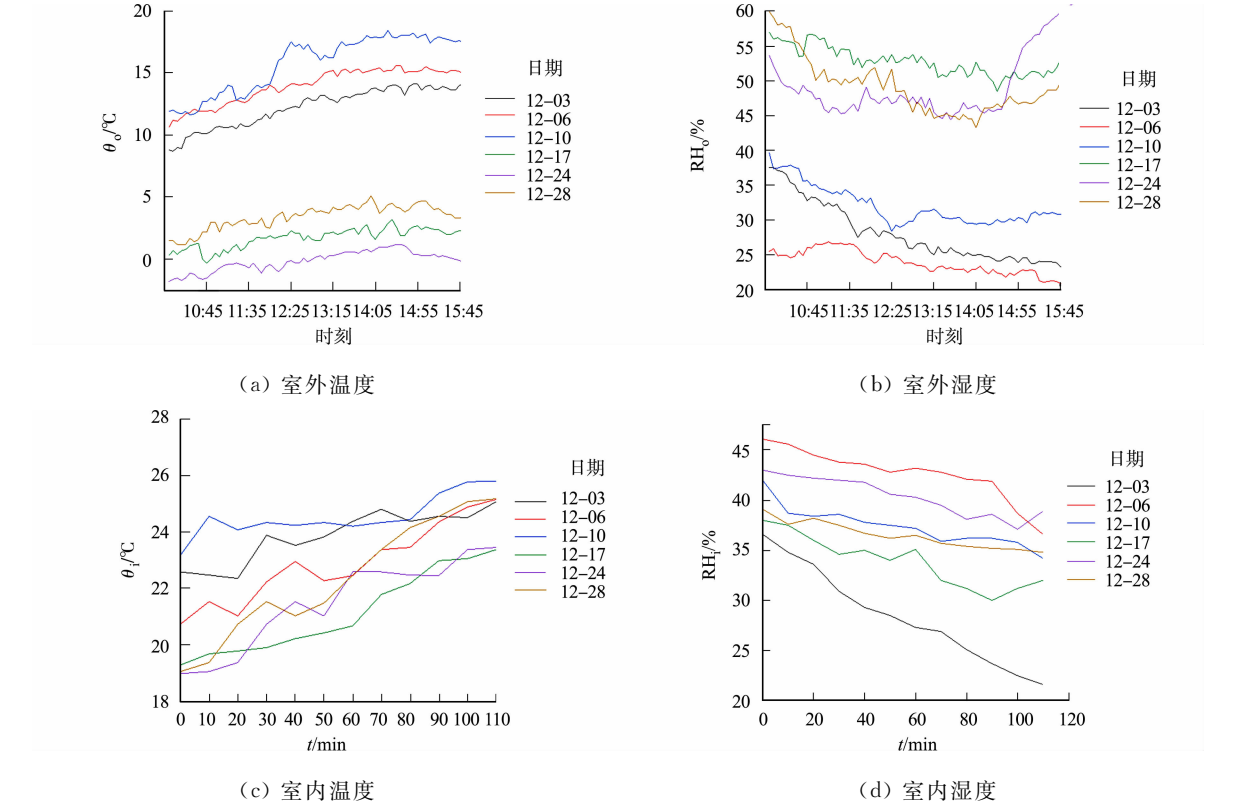


图 2 测试期间室内外的温、湿度变化情况

Fig. 2 Variation of indoor and outdoor temperature, and humidity during test

对教室室内外环境参数的统计结果,如表 3 所示.表 3 中: θ_o, θ_i 分别为室外和室内温度; RH_o, RH_i 分别为室外和室内湿度; $\bar{\theta}_R$ 为平均辐射温度; v 为室内风速; θ_{op} 为操作温度; R_{cl} 为服装热阻.

表 3 室内外环境参数

Tab. 3 Indoor and outdoor environmental parameters

参数	$\theta_o/^\circ\text{C}$	$RH_o/\%$	$\theta_i/^\circ\text{C}$	$RH_i/\%$	$\bar{\theta}_R/^\circ\text{C}$	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta_{op}/^\circ\text{C}$	$R_{cl}/\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
最大值	18.70	60.50	25.80	45.80	24.90	0.03	25.35	0.209
最小值	-1.90	20.60	19.70	21.60	19.60	0.01	19.65	0.152
平均值	14.10	47.70	22.84	33.90	22.49	0.01	22.67	0.158
标准差	1.63	5.01	1.18	4.47	1.38	0.02	1.05	0.157

由表 3 可知:冬季教室室外空气温度的变化范围为 $-1.9\sim 18.7\text{ }^\circ\text{C}$,室内空气温度的变化范围为 $19.7\sim 25.8\text{ }^\circ\text{C}$;冬季室外相对湿度变化范围为 $20.6\%\sim 60.5\%$,室内相对湿度变化范围为 $21.6\%\sim 45.8\%$;室内平均辐射温度的平均值为 $22.49\text{ }^\circ\text{C}$;室内温度最大值为 $25.8\text{ }^\circ\text{C}$,比国家标准 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中的冬季供暖设计温度($18\sim 24\text{ }^\circ\text{C}$)最大值要高 $1.8\text{ }^\circ\text{C}$,但整体平均温度 $22.84\text{ }^\circ\text{C}$ 在规定的范围内.这表明教室内温度整体是达标的,偶尔存在室内温度过高.

由表 3 还可知:室内平均风速为 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这是由于冬季在上课的过程中教室的门、窗是关闭的,所以在整个测试期间风速是比较低的,受试的学生基本没有明显的吹风感.此外,这也符合国家标准 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[14]规定的在供热工况室内风速应小于 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围.根据国际标准 ISO 7726—1998《热环境的人类工效学 物理量测量仪器》要求,对于从事接近静坐条件(新陈代谢率在 $1.0\sim 1.3\text{ MET}$ 之间),在空气速度小于 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且平均辐射温度和平均空气温度相差小于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时,可以使用室内空气温度和平均辐射温度平均值的近似计算操作温度

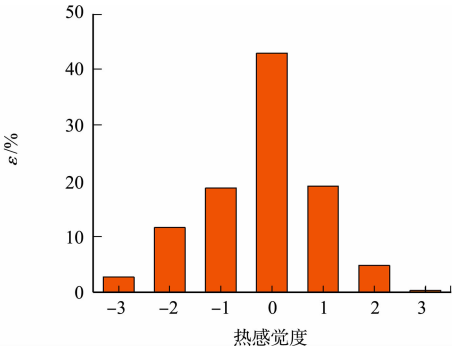
(θ_{op}). 通过问卷统计可知, 冬季室内学生的平均服装热阻为 $0.158\text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

头部水平和脚踝水平之间的垂直空气温差, 如图 3 所示. 图 3 中: $\Delta\theta$ 垂直空气温差; θ_{op} 为操作温度. 由图 3 可知: 最大垂直空气温差约为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不超过 ASHRAE 55^[1] 中允许的 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差极限. 由此说明, 垂直温差对室内热环境的影响不是很大.

2.3 热感觉与热舒适

对受试者热感觉和热舒适进行统计, 结果如图 4 所示. 图 4 中: ϵ 为投票百分比.

由图 4(a) 可知: 在热感觉投票方面有 42.9% 的受试者投票为中性, 有 24.1% 的受试者投票为稍暖、暖、



(a) 热感觉

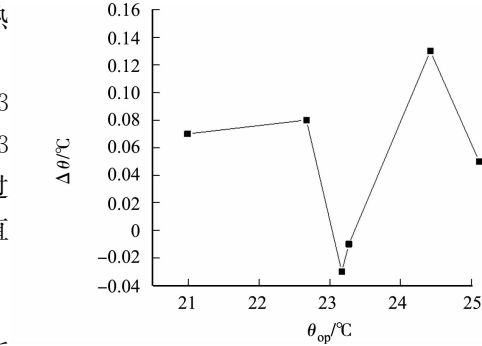
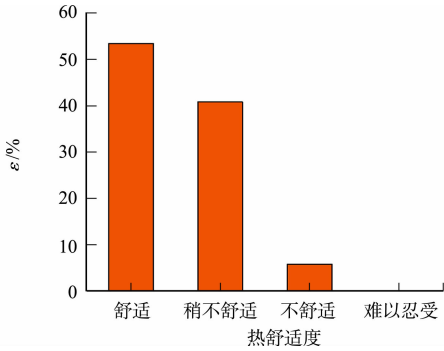


图 3 头顶水平和脚踝水平之间的垂直空气温差

Fig. 3 Vertical air temperature difference between head level and ankle level



(b) 热舒适

图 4 热感觉和热舒适的投票频率分布

Fig. 4 Voting frequency distribution of thermal sensation and thermal comfort

热; 有 33% 的受试者投票为稍凉、凉、冷, 说明教室在试验期间整体热环境偏冷; 投票值在 $-1 \sim +1$ 之间的频率为 80.6%. 表明大部分的学生觉得教室内的环境是可以接受的.

由图 4(b) 可知: 有 53.4% 的学生觉得舒适, 有 40.8% 的学生觉得稍不舒适, 而仅有 5.8% 的学生感到不舒适. 表明在测试期间对于大部分学生来说冬季教室内热环境是舒适的, 对室内环境满意度较高. 同时, 投票值为舒适和稍有不适的学生比例率低于整体可接受率 (92.5%), 表明受试者对环境的适应能力强, 可以在一定程度上忍受不舒适的室内热环境.

2.4 热期望

受试者分别对教室内热环境的温度期望、湿度期望、风速期望进行投票, 结果如图 5 所示. 由图 5 可知: 1) 在温度期望投票中, 希望温度降低的受试者占 23.1%, 希望温度不变的受试者占 49.3%, 而有 27.6% 的受试者希望温度升高. 这说明当前教室内的热环境温度适中, 能基本满足大部分学生的要求. 2) 在湿度期望投票中, 希望湿度保持不变的受试者占 51.4%, 希望湿度提高的占 43.2%. 说明此时教室内空气干燥, 相对湿度比较低. 3) 在风速期望投票中, 有 61.6% 的受试者期望教室内风速保持不变. 说明在冬季学生并不希望通过增加风速来改善热舒适状况, 更希望通过增加湿度来改善舒适状况, 因为风速增加会增加冷感.

2.5 局部热不舒适

受试者在调研测试期间对典型的身体症状进行投票, 包括手、脚、头、背、胳膊、腿等不舒适的症状, 其分布比例如图 6 所示. 从图 6 可知: 绝大部分受试的学生感到了局部热不舒适, 首先受试者感到脚不

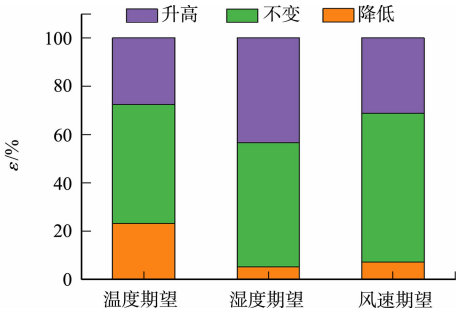


图 5 热期望投票频率分布

Fig. 5 Hot expectation voting frequency distribution

舒适的比例为最高约 25%, 这主要是由于传统的散热器供暖引起的; 其次是皮肤、嘴唇和喉咙干燥超过 40%, 表明调研期间教室内湿度比较低, 教室内比较干燥。

3 热舒适模型

3.1 热感觉投票(TSV)模型和 PMV 模型

参考 ASHRAE 7 级热感觉投票标尺, 对调查测试数据进行统计分析。采用温度频率法, 以 0.5℃为一个间隔进行分组, 将操作温度分为若干个区间, 以每一个操作温度为自变量, 每一个操作温度对应的实测热感觉投票(TSV)为因变量, 得到平均热感觉投票与操作温度之间的关系。将现场实测的空气温度、相对湿度、风速、平均辐射温度, 以及问卷调查表中记录的受试者新陈代谢率和服装热阻代入 GB/T 50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》^[15]的计算程序, 得到对应的预测热感觉投票(PMV)值。同样采用温度频率法, 得到 PMV 值与操作温度之间的回归曲线。将 TSV 和 PMV 两条拟合曲线绘制在一张图上, 可以更方便地观察实测热感觉与预测热感觉之间的差异, 如图 7 所示。

由图 7 可知: 调研期间 TSV 和 PMV 之间存在显著的差异。虽然 TSV 模型和 PMV 模型的线性回归曲线在形式上和趋势上基本一致, 但二者的曲线并不重合, 表明受试学生的实际热感受与 PMV 指标预测的结果并不相同。PMV 曲线在 TSV 曲线之上, 表明在室内温度相同的情况下, 受试者的实际热感觉比预测热感觉偏冷。TSV 的拟合式斜率均小于 PMV 的拟合式斜率, 表明教室内学生实际热感觉不如 PMV 模型预测的热感觉好。预测与实测热感觉回归方程为

$$\begin{aligned} \text{PMV} &= 0.190\ 8t_{\text{op}} - 4.020\ 3, & R^2 &= 0.995\ 0; \\ \text{TSV} &= 0.152\ 6t_{\text{op}} - 3.847\ 2, & R^2 &= 0.843\ 1 \end{aligned}$$

令 PMV=0 和 TSV=0, 就可计算出预测热中性温度为 21.07℃和实测热中性温度 25.21℃, 二者相差 4.14℃。在冬季高校教室内, 热中性温度比预测热中性温度高, 说明教室内学生对热环境的接受能力要比预测的强。当 PMV, TSV 等于±0.85 时, 表示 80%受试者对所处热环境表示满意。令 PMV, TSV 分别等于±0.85, 可以求得 80%可接受率下的预测热舒适温度范围为 16.61~25.53℃, 80%可接受率下的实测热舒适温度范围为 19.64~30.78℃。经比较可知, 实际可接受温度范围要比预测可接受温度范围宽, 表明学生对教室内热环境的接受能力更强。

3.2 Griffiths 模型

Griffiths 模型与 Fanger 提出的 PMV/PPD((predicted percent dissatisfied))模型是不相同的, PMV/PPD 模型可以在稳定的环境中准确的预测中性温度。Griffiths 模型是一个即使在任何条件下, 投票数很少, 温度范围很窄, 也能准确预测中性温度^[16]。其舒适温度计算式为

$$T_c = \theta_{\text{op}} + \frac{(0 - \text{TSV})}{G}.$$

上式中: θ_c 为舒适温度,℃; θ_{op} 为操作温度,℃; G 为 Griffiths 常数,℃⁻¹。

对于 Griffiths 常数, 文献[13]发现 0.5 为最佳的常数。Griffiths 常数实质上表示的是在假设没有自适应情况发生的条件下舒适度和温度的关系(斜率)。

取 G 值为 0.25, 0.33, 0.5℃⁻¹, 计算得到的舒适温度分别 21.62, 23.06, 24.69℃, 验证了 Nicol 等的结论。即当 Griffiths 常数 0.5℃⁻¹时, 得到的热中性温度为 24.69℃, 高于 PMV 预测的热中性温度 21.07℃, 与 TSV 计算所得实测热中性温度 25.21℃相差很小。说明, Griffiths 模型可以改变回归系

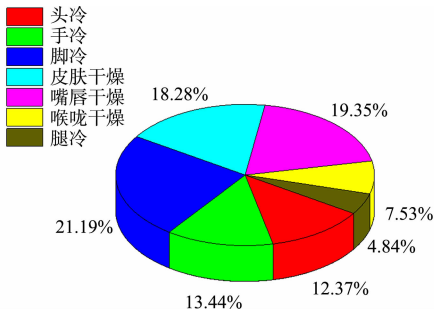


图 6 局部不舒适百分比
Fig. 6 Percentage of local discomfort

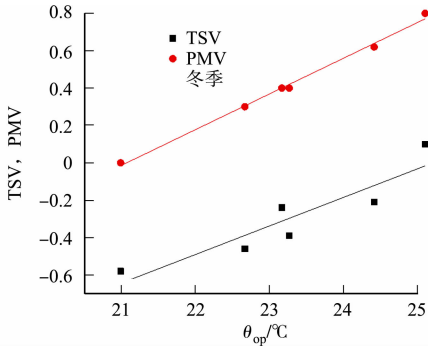


图 7 冬季 PMV 与 TSV 拟合曲线
Fig. 7 Fitted curve of PMV and TSV in winter

数,准确地预测寒冷地区高校教室的实测中性温度.

3.3 aPMV 模型

国内外偏热环境下的诸多现场调查研究结果显示,环境越热,人们的实测热感觉 TSV 与 PMV 预测值的偏离就越大,出现“剪刀差”现象.这是由于 Fanger 教授的 PMV/PPD 模型没有考虑到人体因受诸如气候、文化、心理、生理、行为等因素的影响.据此,Yao 等^[9]针对这一差异,将黑箱理论用于人体热调节模型中,第一次引入了适应系数(λ),将人体适应性行为作为反馈的一部分,提出了预计适应性平均热感觉指标(aPMV),并建立了 aPMV 模型.其表达式为

$$aPMV=PMV/(1+\lambda PMV).$$

上式中: λ 表示的是人体适应性行为反馈调节的方向和大小.基于最小二乘法,适应系数 λ 计算式为

$$\lambda=\left[\sum_{i=1}^N\frac{1}{TSV_i}-\sum_{i=1}^N\frac{1}{PMV_i}\right]/N.$$

采用温度频率法,计算出每组的 TSV_i 和 PMV_i ,带入上式,可得到 $\lambda=-0.05$.

综合上述,寒冷地区高校教室内室内热舒适模型应选用适应系数 λ 来修正,得到修正后的适应性 PMV 模型为

$$aPMV=PMV/(1-0.05PMV).$$

4 严寒地区或寒冷地区的冬季热舒适

寒冷地区或严寒地区不同地点冬季热舒适结果,如表 4 所示.表 4 中: R_{cl} 为服装热阻; θ_M 为中性温度.从表 4 可知:寒冷地区舒适温度都比本次(25.21℃)要低,表明其他地区的学生对温度的敏感性要比本次测试的学生对温度的敏感性低.这可能与教室内热环境和各地气候背景有关.因此,寒冷地区高校教室冬季室内设计温度的取值应当结合当地气候条件,考虑服装习惯、心理预期、生理反应等的因素.需要根据室外气候提出合适的热舒适标准.

表 4 严寒地区或寒冷地区的冬季热舒适结果
Tab.4 Results of winter thermal comfort in severe cold regions or cold regions

研究者	地区	气候分区	调查对象	$R_{cl}/m^2\cdot K\cdot W^{-1}$	模型	$\theta_M/^\circ C$	90%舒适温度范围/ $^\circ C$
Wang,等 ^[17]	哈尔滨	严寒	大学生	0.157	$TSV=0.16t_{op}-2.97$	18.00	16.0~22.4
Wang,等 ^[18]	哈尔滨	严寒	大学生	0.161	$TSV=0.24t_{op}-5.43$	22.60	22.0~25.0
李敏,等 ^[19]	北京	寒冷	大学生	0.178	$TSV=0.17t_{op}-3.93$	22.90	19.9~25.8
蒋婧,等 ^[20]	西安	寒冷	大学生	0.186	$MTS=0.16t_{op}-2.61$	16.30	13.2~19.7
本研究	太原	寒冷	大学生	0.158	$TSV=0.1t_{op}-3.85$	25.21	21.9~28.5

5 结论

通过对寒冷地区高校教室室内热舒适的研究,可以得出以下 3 点主要结论.

1) 冬季高校教室内实测热中性温度 25.21℃,80%满意度热舒适范围为 19.64~30.78℃;预测热中性温度为 21.07℃,80%满意度热舒适温度范围为 16.61~25.53℃,两者相差 4.14℃,且实测温度的可接受范围明显比预测的要宽.这表明实测 TSV 模型与预测 PMV 模型结果有差别,学生对教室内热环境的接受能力更强.

2) 通过 Griffiths 模型可以准确地预测出寒冷地区高校教室室内热舒适温度为 24.69℃,与实测温度比较接近.

3) 对寒冷地区冬季高校教室内热舒适度模型进行修正,引入热适应系数 λ 为-0.05,得到适用于寒冷地区高校教室热感觉评价的模型为 $aPMV=PMV/(1-0.05PMV)$.

参考文献:

[1] ASHRAE Standards Committee, Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2017[S]. Atlanta: ANSI/ASHRAE,2013.

- [2] JING Shenglan, LEI Yonggang, WANG Hongjian, *et al.* Thermal comfort and energy-saving potential in university classrooms during the heating season[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 202: 109390. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2019. 109390.
- [3] BUONOCORE C, DE VECCHI R, SCALCO V, *et al.* Thermal preference and comfort assessment in air-conditioned and naturally-ventilated university classrooms under hot and humid conditions in Brazil[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 211: 109783. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2020. 109783.
- [4] KUMAR S, SINGH M K, MATHUR A, *et al.* Evaluation of comfort preferences and insights into behavioural adaptation of students in naturally ventilated classrooms in a tropical country, India[J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 532-547. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2018. 07. 035.
- [5] FANG Zhaosong, ZHANG Sheng, CHENG Yong, *et al.* Field study on adaptive thermal comfort in typical air conditioned classrooms[J]. *Building and Environment*, 2018, 133: 73-82. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2018. 02. 005.
- [6] MISHRA A K, DERKS M T H, KOOI L, *et al.* Analysing thermal comfort perception of students through the class hour, during heating season, in a university classroom[J]. *Building and Environment*, 2017, 125: 464-474. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2017. 09. 016.
- [7] LIU Jialu, YANG Xian, JIANG Qiwen, *et al.* Occupants' thermal comfort and perceived air quality in natural ventilated classrooms during cold days[J]. *Building and Environment*, 2019, 158: 73-82. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2019. 05. 011.
- [8] NING Haoran, WANG Zhaojun, ZHANG Xuexiang, *et al.* Adaptive thermal comfort in university dormitories in the severe cold area of China[J]. *Building and Environment*, 2016, 99: 161-169. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2016. 01. 003.
- [9] YAO Runming, LI Baizhan, LIU Jing. A theoretical adaptive model of thermal comfort: Adaptive predicted mean vote (aPMV)[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(10): 2089-2096. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2009. 02. 014.
- [10] SINGH M K, OOKA R, RIJAL H B, *et al.* Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 189: 149-174. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2019. 01. 051.
- [11] 中华人民共和国建设部. 建筑气候区划标准: GB 50178—1993[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.
- [12] International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment: Instruments for measuring physical quantities: ISO 7726—1998[S] Geneva: ISO, 1998.
- [13] DE ABREU-HARBICH L V, CHAVES V L A, BRANDSTETTER M C G O. Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate[J]. *Building and Environment*, 2018, 135: 257-268. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2018. 03. 017.
- [14] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[s]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [15] 重庆大学, 中国建筑科学研究院. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T 50785—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 25-27.
- [16] ZAKI S A, DAMIATI S A, RIJAL H B, *et al.* Adaptive thermal comfort in university classrooms in Malaysia and Japan[J]. *Building and Environment*, 2017, 122: 294-306. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2017. 06. 016.
- [17] WANG Zhaojun, NING Haoran, ZHANG Xuexiang, *et al.* Human thermal adaptation based on university students in China's severe cold area[J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2016, 23(3): 413-420. DOI: 10. 1080/23744731. 2016. 1255495.
- [18] WANG Zhaojun, LI Aixue, REN Jing, *et al.* Thermal adaptation and thermal environment in university classrooms and offices in Harbin[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 77: 192-196. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2014. 03. 054.
- [19] 李敏, 曹彬, 欧阳沁, 等. 北京地区大学教室热舒适长期调查研究[J]. *暖通空调*, 2014, 44(12): 67-70.
- [20] 蒋婧, 牛淑佳, 狄育慧, 等. 西安高校教学建筑冬季室内热环境研究[J]. *西安工程大学学报*, 2020, 34(6): 20-26. DOI: 10. 13338/j. issn. 1674-649x. 2020. 06. 004.

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)