

# 人体热感觉实测值偏离预测值的原因分析

冯国会<sup>1</sup>,周梓强<sup>1</sup>,宋嘉森<sup>2</sup>,何勇<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 重庆大学土木工程学院,重庆 400044)

**摘要** 目的 研究建筑环境中人体热感觉实测值偏离预测值的原因,明确 *PMV* 指标的应用条件和适用场所。方法 在工程实践应用中,许多学者发现实测热感觉投票值 *TSV* 与预测热感觉投票值 *PMV* 有一定偏差,笔者借鉴已有研究,通过查阅相关文献来探寻服装热阻、新陈代谢率、个体差异、建筑类型、行为习惯等因素对该现象的影响。结果 服装热阻和新陈代谢由于影响因素复杂,无法得到准确的量化值,导致人体热感觉预测值的不准确。同时人群个体差异性和建筑类型均会影响人体热感觉预测值的准确性。结论 面对复杂多变的热环境舒适性评价问题,不能直接套用 *PMV* 模型,应把人为因素和环境因素综合起来考虑。

**关键词** 预测平均评价;热感觉投票;热感觉;热舒适

中图分类号 TU111.3 文献标志码 A

## Cause Analysis of Deviation of Measured Value of Human Thermal Sensation from Predicted Value

FENG Guohui<sup>1</sup>, ZHOU Ziqiang<sup>1</sup>, SONG Jiasen<sup>2</sup>, HE Yong<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;  
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, 400044)

**Abstract:** The purpose of paper is to study the reason why the measured value of human body thermal sensation deviates from the predicted value in the built environment is studied, and the application conditions and applicable places of *PMV* index are further clarified. In engineering practice, many scholars have found that the measured Thermal Sensation Vote is a deviation from the Predicted Mean Vote. The author draws on existing research and reviews relevant literature to explore the influence of clothing thermal resistance, metabolic rate, individual differences, building type, behavior habits and other factors on this phenomenon. Results Due to the complex factors, the thermal resistance and metabolism of clothing could not be accurately quantified, resulting in inaccurate prediction of thermal sensation. At the same time, the individual differences of the population and the building type will affect the accuracy of the prediction value of human thermal

收稿日期:2022-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52038009,52178082);辽宁省高校创新人才项目(SHscxc2017003);  
沈阳市科技计划项目(21-108-9-03)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事建筑节能技术等方面研究。

sensation. Conclusion PMV model cannot be directly applied to the complex and changeable thermal environment comfort evaluation, and human factors and environmental factors should be considered together

**Key words:** PMV; thermal sensation vote; hot sensation; thermal comfort

随着科学的进步和生活水平的提高,人们越来越向往舒适度高的生活环境。文献[1]把热舒适环境定义为人在心理状态上感到满意的热环境。目前常用预测平均投票 *PMV* 指数来评价人的热感觉。影响人体热舒适的因素有很多,*PMV* 是考虑最为全面的评价指标,包括空气温度、空气湿度、空气流速、平均辐射温度 4 个环境因素,还有服装热阻和新陈代谢率两个人为因素。目前关于热环境舒适性的研究主要分为现场测试研究和实验室研究两种,由于现场研究能更好地反映随机人群对环境的适应性,所以应用较广。邢金城<sup>[2]</sup>在对天津市某办公建筑内热环境舒适度进行现场研究发现,冬季、过渡季、夏季人体热感觉实测值均偏离预测值;姚新玲<sup>[3]</sup>对上海地区养老建筑进行现场测试分析发现,老年人热感觉的实测值和热感觉的预测值相比较存在差异,预测效果不理想。

众多研究发现,当 *PMV* 与现场研究中得到的实测热感觉投票 *TSV* 进行比较时,呈现出显著的差异,这使得国内外许多学者开始怀疑 *PMV* 热舒适模型的准确性。笔者通过研究得出,服装热阻、新陈代谢率、个体差异、建筑类型、行为习惯等因素均会造成人体热感觉实测值偏离预测值,进一步明确了 *PMV* 热舒适模型的适用范围。

## 1 *PMV* 热舒适模型

### 1.1 *PMV* 热舒适模型理论

20 世纪 70 年代, P. O. Fanger<sup>[4]</sup> 收集了 1396 名受试者在严格控制室内参数的人工气候实验室测出的热舒适实验数据,进而推导出了 *PMV* 的实验回归公式(见式(1))。其原理为人体处于稳态的热环境中时,人体

的热负荷值越大,人就越热,反之越冷。

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] TL \quad (1)$$

式中:*M* 表示人体能量代谢率,取决于人体活动量大小,  $W/m^2$ ; *TL* 表示人体热负荷,  $W/m^2$ , 即人体产热量与散热量的差值。

*PMV* 指标采用七级标度,热感觉分别对应:冷、凉、微凉、适中、微暖、暖、热;对应的 *PMV* 指标值分别为 -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3。

由于个体差异性的存在,*PMV* 指标并不能代表每个人的热感觉。因此, P. O. Fanger<sup>[4]</sup> 又提出了预测不满意百分比 *PPD* 来表示对环境不满意的人数占总人数的百分比,同时给出了 *PMV* 和 *PPD* 之间的定量关系:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (2)$$

文献[5]中采用 *PMV-PPD* 指标来评价热环境,当 *PMV* = 0 时, *PPD* = 5%, 表示即使室内环境处于最佳舒适状况时,仍然有 5% 的人处于不满意的状态。

### 1.2 热感觉和热舒适

热感觉是人体对所处环境是“冷”还是“热”的主观评价,当人体用于体温调节所消耗的能量最少,人体感到不冷不热,此时叫做人体处于“中性”状态。热舒适是人体对热环境表示满意的意识状态,有的学者认为热感觉的中性状态就是热舒适状态。笔者认为这样的判断有失偏颇,热舒适应该指热不舒适感消失时所产生的愉悦感,此时所处的状态不一定是“中性”的。

无论是热感觉还是热舒适,都无法利用仪器精确地测量出来,一般都是利用主观的

调查问卷形式来了解受测者的主观感受。王昭俊<sup>[6]</sup>对哈尔滨市 66 户住宅中 120 名居民的热感觉和热舒适进行现场调查,得到数据并分析得出了热感觉投票值分布频率与热舒适投票值分布频率是不同的结果。热舒适和热感觉有分离的现象存在。

## 2 热环境测试分析

### 2.1 测试过程

在进行某一建筑环境热舒适的调研时,往往是通过对环境中的人群进行调查问卷的形式来获取其对当前环境的真实感受,问卷会设置受试者对温度、湿度、风速等物理项的感觉投票,测试时所穿的衣物进行记录,在进行调查问卷的同时对当前环境的温度、湿度、风速、黑球温度利用仪器测试,采用黑球温度间接计算法计算平均辐射温度:

$$T_m = T_g + 2.44(T_g - T_a)\sqrt{V} \quad (3)$$

式中: $T_m$  为平均辐射温度,℃; $T_g$  为黑球温度,℃; $T_a$  为室外空气温度,℃; $V$  为空气流速,m/s。

测试中一般采用操作温度作为环境热舒适的温度指标,操作温度是把辐射和对流因素综合考虑所得出的,具有精度高、操作简单等优点,操作温度计算如下:

表 1 国内外热感觉投票  $TSV$  与  $PMV$  的对比结果

Table 1 Comparison of thermal sensation voting  $TSV$  and  $PMV$  at home and abroad

研究者	地点	$TSV$ 回归方程	$PMV$ 回归方程	建筑类型
姚新玲 <sup>[9]</sup>	上海	$TSV = 0.046T_0 - 0.765$	$PMV = 0.133T_0 - 2.36$	养老院
冯思宁 <sup>[10]</sup>	天津	$TSV = 0.253T_0 - 6.752$	$PMV = 0.641T_0 - 17.674$	养老院
Shaari <sup>[11]</sup>	马来西亚	$TSV = 0.497T_0 - 13.7$	$PMV = 0.25T_0 - 6.024$	教室
Rina <sup>[12]</sup>	印度	$TSV = 0.319T_0 - 7.93$	$PMV = 0.328T_0 - 7.85$	实验室
冯鹤华 <sup>[13]</sup>	重庆	$TSV = 0.159T_0 - 3.376$	$PMV = 0.159T_0 - 3.484$	病房
刘冲 <sup>[14]</sup>	大连	$TSV = 0.413T_0 - 9.39$	$PMV = 0.269T_0 - 6.047$	养老院

从表 1 中可以看出, $TSV$  与  $PMV$  的回归方程系数是不一致的,总体都是随着操作温度的增加而呈上升的趋势,公式斜率反映的是受试人群对环境操作温度变化的敏感程度,可以看到不同的受试人群,不同的建筑类型对于热敏感程度是不同的。同时,分别令

$$T_0 = A \times T_a + (1 - A)T_m \quad (4)$$

式中: $T_0$  为操作温度,℃; $T_a$  为室外空气温度,℃; $T_m$  为平均辐射温度,℃; $A$  为系数,由空气流速确定。

### 2.2 实测值与预测值的对比

笔者选取多个现场研究的数据进行比较分析,发现热感觉实测值与预测值之间的偏差是普遍存在的。对于现场实际热感觉投票值,采用温度频率法进行回归处理,即通过计算出来的操作温度  $T_0$ ,以 0.5℃ 为一个区间,每一个区间内的平均温度作为自变量,参与调查问卷的人群在该温度区间内的实测热感觉投票值为因变量,利用 SPSS 软件进行数据的回归统计,得到人群实测热感觉投票  $TSV$  关于操作温度  $T_0$  的回归曲线  $TSV = f(T_0)$ 。根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)<sup>[7]</sup> 中的  $PMV-PPD$  计算程序,将现场测量和调查问卷中得到的空气温度、空气湿度、空气流速、平均辐射温度、服装热阻、新陈代谢率等数据输入到程序中,即可计算出每一份问卷对应的  $PMV$  预测值。同样利用温度频率法,得到  $PMV$  关于操作温度  $T_0$  的回归曲线  $PMV = f(T_0)$ 。国内外研究热环境舒适度的现场调查结果见表 1。

回归方程  $TSV = 0, PMV = 0$  可以得到实际的热中性温度和预测的热中性温度,通过热中性温度可以更直观地看出人对环境热感觉实测值偏离预测值的程度。

## 3 偏差现象分析

要分析  $PMV$  热舒适模型的偏差现象,首先

从其主要的影响因素方面着手, *PMV* 模型是由 6 个变量计算出来的, 包括四个可测量的环境参数和两个估算参数(服装热阻和新陈代谢率), 测试前四个变量主要是利用《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)<sup>[7]</sup>中规定的仪器进行测量, 因此在各种不同的研究中所产生的误差是非常小的, 可以忽略不计。而另外两个参数的确定往往会产生一定程度的误差, 因此笔者主要针对服装热阻、新陈代谢率和其他因素进行偏差分析。

### 3.1 服装热阻

服装隔热对人体热舒适至关重要, 因此考虑人与环境的热交换时必须考虑服装热阻的影响。服装热阻一般是利用假人在稳态环境中测量得出, 假人所测得的服装热阻值, 相当于真人静坐状态下的衣服热阻。因为人体与环境之间的热交换过程必须借助于服装的作用, 所以这种过程是比较复杂的。目前的热舒适研究中, 服装热阻值可通过查询《民用建筑热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)中代表性服装热阻表获得。在进行热舒适现场调查问卷过程中, 通过记录被试人员的穿着情况来确定总的服装热阻值。韩滔<sup>[8]</sup>认为除了极少数天气突变情况外, 人在一天中的穿着一般情况是不变的, 大多是以上午的天气为参考标准, 产生一定的误差。基于某些情况受试人群是坐在椅子上或者卧床状态, 因此也要考虑椅子或床铺的热阻。G. S. Brager<sup>[9]</sup>在研究中增加了 0.15clo 的椅子热阻, 对旧金山办公建筑人员热感觉进行重新计算分析, 发现 *TSV* 相比较 *PMV* 的偏差有所减少。综上所述, 服装热阻的确定多以估算为主, 但有很多的细节问题没有考虑导致估算值有偏差。所以笔者认为在确定服装热阻时的不严谨性是 *TSV* 与 *PMV* 存在偏差的原因之一。

### 3.2 新陈代谢率

人的能量新陈代谢率受多种因素影响, 包括肌肉强度、温度、进食时长、神经紧张程

度等。实际的研究中是根据受试人的活动水平来确定新陈代谢率, 通过查询《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)<sup>[7]</sup>中的代谢率表得到。表 2 为给定环境参数下代谢率对 *PMV* 的影响, 从表中可以看到, 不同的行动水平会产生不同的代谢率, 从而对应不同的 *PMV* 指数。新陈代谢率表中给出的是平均代谢率, 无法反映不同个体之间的差异或者同一个体不同时间段的差异。准确的估算代谢率是比较困难的, 由文献[10]可得 *PMV* 模型预测值的准确性随着代谢率的变化而变化: 在 1.4 met 以下, *PMV* 模型的准确性最高; 高于 1.8 met 时, 预测值会比实测值高出一个等级。

表 2 给定环境参数下代谢率对 *PMV* 的影响

Table 2 Effect of metabolic rate on *PMV* under given environmental parameters

室内参数	行动水平/met	<i>PMV</i>
空气温度 25.8 °C	静坐 1	-0.06
黑球温度 26 °C	站立 1.2	0.37
湿球温度 22.7 °C	走路 2	1.36
相对湿度 77%	做操 3.4	2.69

### 3.3 其他因素

#### 3.3.1 个体差异

个体差异普遍考虑的是年龄、性别、人种等因素的影响。徐刚<sup>[11]</sup>认为因为男性骨骼肌较为发达, 在工作状态下会产生更多的热量, 因此更容易感到炎热。L. Lan<sup>[12]</sup>针对我国人群性别对热舒适的影响研究发现, 女性处于热中性状态时的温度为 26.3 °C, 男性为 25.3 °C, 女性可接受的环境温度偏高于男性。

对于年龄的影响是比较明显的, L. Schellen<sup>[13]</sup>研究发现老年人对于温度的敏感程度较低, 并且对于偏暖的环境期望较大; 杨玉兰<sup>[14]</sup>认为老年人因为心理和生理上的特殊性, 直接使用 *PMV* 模型会产生较大的误差, 无法准确预测老年人热感觉。分析原因主要是因为老年人相比于年轻人有较低的代谢率, 从而影响自身产热。

### 3.3.2 建筑类型

由于  $PMV$  模型公式是在环境参数严格控制的人工气候实验室内归纳总结出来的,因此对于建筑类型是没有考虑的。建筑可以分为空调建筑和自然通风建筑,对于自然通风建筑,其室内的温度、湿度、风速等环境参数都是不断变化的,是一种不稳定的动态环境,因此面对不同的建筑环境不能简单地套用  $PMV$  模型去预测热感觉。P. O. Fanger<sup>[4]</sup>对雅典等四个较热地区的自然通风建筑现场调查后发现热感觉实测值与预测值呈现出“剪刀差”现象,并且温度越高, $PMV$  与  $TSV$  的偏差越大。刘剑钊<sup>[15]</sup>对自然通风建筑和空调建筑  $PMV$  模型进行分析得出,对于自然通风建筑, $PMV$  模型在夏季和冬季都低估了人体热感觉;而在空调建筑中,却高估了夏季和冬季的人体热感觉。

对于自然通风建筑,P. O. Fanger<sup>[4]</sup>分析如下:①自由运行的环境使得人体新陈代谢率估计不准;②自然通风建筑中的人群对环境温度期待较低,假如其长期生活在炎热环境中,就会比普通人更加能接受高温。对此 P. O. Fanger<sup>[4]</sup>引入了一个值为 0.5~1 的期望因子  $e$ ,对原来的  $PMV$  模型进行修正(见式(5))。通常情况下根据不同的气候条件选择不同的期望因子,对于自然通风建筑所处的环境,炎热程度越强,采用的期望因子数值越小。但该方法的问题是只考虑心理的影响,没有实质性的反映两种热环境的区别,最明显的缺陷就是不能修正室内中性温度。

$$PMV_e = ePMV. \quad (5)$$

另一种方法是采用适应性模型,将室内的中性温度与室外月平均温度联系起来,表现出了自然通风建筑中室内舒适温度随室外温度的变化过程,计算如下:

$$T_{\text{conf}} = aT_{\text{out,m}} + b. \quad (6)$$

式中: $T_{\text{conf}}$ 为室内舒适温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{out,m}}$ 为室外空气月平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

金振星<sup>[16]</sup>在研究中对我国9个南北方

典型城市进行现场调查,分别建立了我国南北方的适应性模型:

$$\text{南方: } T_{\text{conf}} = 0.821T_{\text{out,m}} + 14.79. \quad (7)$$

$$\text{北方: } T_{\text{conf}} = 0.422T_{\text{out,m}} + 15.69. \quad (8)$$

端木琳等<sup>[17]</sup>认为适应性模型只考虑人的适应性,忽略了环境因素的影响;而  $PMV$  模型考虑了环境因素,未考虑人的适应性,两者各有优劣,可以考虑将两者结合起来。R. M. Yao 等<sup>[18]</sup>综合考虑了心理适应、生理适应和行为适应等因素,基于“黑箱”理论得到自适应预测平均投票模型  $aPMV$ :

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda \times PMV}. \quad (9)$$

《民用建筑室内热湿环境评价标准》(GB/T 50785—2012)<sup>[7]</sup>中对自适应系数  $\lambda$  在我国不同气候区不同建筑类型做了说明(见表3)。

表3 不同情况下  $\lambda$  的取值

Table 3 The values of  $\lambda$  in different cases

建筑气候区	$PMV$ 取值	居住、商店建筑 $\lambda$	教育建筑 $\lambda$
严寒、寒冷地区	$\geq 0$	0.24	0.21
	$< 0$	-0.5	-0.29
夏热冬冷、夏热冬暖、温和地区	$\geq 0$	0.21	0.17
	$< 0$	-0.49	-0.28

## 4 结论

(1)对服装热阻值和新陈代谢率的估算较为粗略,这两个因素直接影响  $PMV$  预测值的准确性。不同的情况下对衣物阻值的简单累加并不能代表真实情况下的热阻;新陈代谢率只考虑了运动情况得出指标,肌肉强度、温度、进食时长、神经紧张程度等多种因素均会影响新陈代谢水平。

(2)样本人群中个体差异性的存在使得对同一建筑环境热舒适的评价不同,例如老年人代谢率普遍低于年轻人,男人比女人更易产生热量。

(3) $PMV$  模型在处于空调建筑稳态环境

中预测会较为准确,在自然通风房间中误差较大,因此可以采用 *PMV* 修正模型、适应性模型和 *aPMV* 的方法进行评价。

## 参考文献

- [1] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: ASHRAE standard 55 - 1992[S]. Atlanta: ASHRAE Inc, 1992.
- [2] 邢金城,李泽青,凌继红,等.天津地区办公建筑人体热舒适研究[J].暖通空调,2018,48(2):97-101.  
(XING Jincheng, LI Zeqing, LING Jihong, et al. Study on human thermal comfort of office buildings in Tianjin [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2018, 48(2): 97 - 101.)
- [3] 姚新玲.上海养老机构老年人居室热环境调查及分析[J].暖通空调,2011,41(12):66-70.  
(YAO Xinling. Investigation and analysis of the thermal environment of the elderly living room in Shanghai pension institution [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2011, 41(12): 66 - 70.)
- [4] FANGER P O. Thermal comfort [M]. Florida: Robert E Krieger Publishing Company, 1982.
- [5] ISO. Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO7730—2005 [S]. Geneva: International Standard Organization, 2005.
- [6] 王昭俊.关于“热感觉”与“热舒适”的讨论[J].建筑热能通风空调,2005,24(2):26-28.  
(WANG Zhaojun. Discussion of “thermal sensation” and “thermal comfort” [J]. Building thermal ventilation and air conditioning, 2005, 24(2): 26 - 28.)
- [7] 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.  
(Chongqing University, China Academy of Building Research. Evaluation standard for indoor thermal and humid environment of civil buildings: GB/T 50785—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [8] 韩滔,许志浩.服装热阻在 PMV 计算中的影响[J].制冷与空调,2005(增刊):176-179.  
(HAN Tao, XU Zhihao. Influence of clothing thermal resistance on PMV calculation [J]. Refrigeration and air-conditioning, 2005 (S): 176 - 179.)
- [9] BRAGER G S, FOUNTAIN M E, BENTON C C, et al. A comparison of methods for assessing thermal sensation and acceptability in the field [J]. Thermal comfort: past, present and future, 1993 (7): 17-39.
- [10] HAVENITH G, HOLMER I, PARSONS K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat reduction [J]. Energy and building, 2002, 34(6):581-591.
- [11] 徐刚,安启启,杨杰,等.考虑个体差异性的 PMV-PPD 人体热舒适性评估模型及应用[J].西安科技大学学报,2021,41(1):55-61.  
(XU Gang, AN Qiqi, YANG Jie, et al. PMV-PPD thermal comfort evaluation model considering individual difference and its application [J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 2021, 41(1): 55 - 61.)
- [12] LAN L, LIAN Z, LIU W, et al. Investigation of gender difference in thermal comfort for Chinese people [J]. European journal of applied physiology, 2008, 102(4):471-480.
- [13] SCHELLEN L. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition [J]. Indoor air, 2010, 20(4):273-283.
- [14] 杨玉兰,李洋,邵惠鑫,等.一种老年人热舒适仿真模型[J].浙江工业大学学报,2021,49(1):47-52.  
(YANG Yulan, LI Yang, TAI Huixin, et al. A thermal comfort simulation model for the elderly [J]. Journal of Zhejiang university of technology, 2021, 49(1): 47 - 52.)
- [15] 刘剑钊,林迪,张欣冉,等.空调建筑和自然通风建筑中 PMV 模型热舒适性的预测结果比较分析[J].科学技术创新,2021(12):130-132.  
(LIU Jianzhao, LIN Di, ZHANG Xinran, et al. Comparison and analysis of prediction results of PMV model for thermal comfort of air-conditioned buildings and naturally ventilated buildings [J]. Scientific and technological innovation, 2021(12): 130 - 132.)
- [16] 金振星.不同气候区居民热适应行为及热舒适区研究[D].重庆:重庆大学,2011.  
(JIN Zhenxing. Study on thermal adaptation behavior and thermal comfort zone of residents in different climate zones [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.)
- [17] 端木琳,任雨婷,金权,等.自然通风建筑热舒适评价模型[J].暖通空调,2016,46(3):1-8.  
(DUAN Mulin, REN Yuting, JIN Quan, et al. Thermal comfort evaluation model of naturally ventilated building [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2016, 46(3): 1 - 8.)
- [18] 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.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)