

关于 PMV 热舒适模型及指标的分析

李伊洁¹, 刘何清^{1,2}, 高黎颖¹, 刘天宇¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: PMV 热舒适模型是目前应用最为广泛的室内热舒适评价模型,但其适用范围及“负荷偏离值”的确定观点不一;Fanger 热舒适方程是 PMV 热舒适模型的基础,但其适用条件及“热中性”平衡存在异议.作者通过对现有文献的分析,提出了对 PMV 热舒适模型“负荷偏离值”计算的见解及适用范围;通过分析 Fanger 等学者自“人体热平衡方程”到“Fanger 热舒适方程”的演化与简化过程,提出了对 Fanger“热中性”状态的新认识;并分析了可能引起 PMV 指标误差的因素.

关键词: PMV 热舒适模型;热舒适方程;偏离值;“热中性”状态

中图分类号: TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2016)02-0070-06

Analysis of the PMV thermal comfort model and its index

LI Yijie¹, LIU Heqing^{1,2}, GAO Liying¹, LIU Tianyu¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The PMV thermal comfort model is the most widely used indoor thermal comfort evaluation model. However, reading its scope of application and the determination of load deviation value, people have different views. Fanger thermal comfort equation is the basis of the PMV thermal comfort model, but there are different voices about its applicable condition and thermal neutral equilibrium situation. Through the analysis of other scholars' literature understanding, this paper puts forward the load deviation value calculation of the PMV thermal comfort model insights and applicable scope; by analyzing the evolution process, that is from the human body heat balance equation to Fanger thermal comfort equation, and the simplification process put forward by such scholars as Fanger, the paper puts forward the new understanding of Fanger thermal neutral state, and analyzes the possible causes of the error of the PMV index.

Key words: PMV thermal comfort; thermal comfort equation; deviation value; thermal neutral equilibrium situation

随着经济的发展和科学技术的进步,人类对建筑环境舒适性的要求也在逐渐提升,在人体众多的舒适要求中,热舒适一直是评价环境的一个重要方面,也是人类生存最基本的需求之一.目前和曾经使用过的评价环境热舒适的指标很多,主要有有效温度指标 ET,新有效温度 ET*,标准有效温度 SET*,PMV 预测热舒适的指标等^[1].其中,以 PMV 预测热舒适的指标最具代表性,其包含了人体热舒适感相关的诸多因素,是目前囊括影响因素最全面、应用最广泛的室内热环境评价指标.

收稿日期:2015-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474105;51276058)

通信作者:刘何清(1964-),男,山东荣成人,教授,博导,研究方向:工业通风安全与矿井热害防治. E-mail: hqliu8222638@163.com

1 热舒适定义与影响人体热舒适因素

暖通、制冷和空气调节工程师学会(简称 ASHRAE)研究发现影响人体热舒适主要有 6 个因素. 其中, 4 个与环境有关的因素: 空气的干球温度、水蒸汽分压力、流速和室内物体及壁面的辐射温度; 2 个与人本身有关的因素: 人的新陈代谢率和服装^[2]. ASHRAE 把热舒适环境定义为, 人类在心理状态上感到满意的热环境^[2]. 在 ISO7730 标准中, 热舒适的定义为, 人对周围热环境所做的主观满意度评价^[3]. ASHRAE55 相关标准中, 人的热舒适被解释为, 热舒适是对热环境表示满意的意识状态. 从这些定义可以看出, 无论环境热舒适还是人体热舒适, 都是由人的热感觉判定的, 人是热舒适感觉的主体; 离开了人这个主体, 环境好坏则没有意义. 因此, 热舒适是一种感觉、是人对环境因素与自身因素耦合作用的主观反应.

2 Fanger 热舒适方程

2.1 Fanger 热舒适方程适用条件及推导

PMV 热舒适模型建立的理论基础是人体热平衡方程和 Fanger 热舒适方程, 同时考虑了人体自身生理调节功能对环境参数的适应能力. Fanger 热舒适方程表征的是热舒适情况下的热平衡方程, 是 PMV 指标的基准状态, 对 PMV 指标的推导有着重要的意义.

在生理代谢功能正常的情况下, 任何环境、任何新陈代谢强度下, 不论是处于舒适状态、还是不舒适状态, 人体均存在产热量与散热量的平衡, 可用下列方程式表达^[4]:

$$M - W - C - R - E - S = 0. \quad (1)$$

式中, M : 人体新陈代谢率, W/m^2 ; W : 人体对外所做的机械功, W/m^2 ; C : 人体体表对流散热量, W/m^2 ; R : 人体体表辐射散热量, W/m^2 ; E : 人体蒸发散热量和呼吸热散失量, W/m^2 ; S : 人体蓄热率, W/m^2 .

式(1)中的人体蓄热率 S 分等于 0 和 不等于 0 这 2 种可能, 人体正常情况下, 靠自身强大的调节功能, 可以保持 $S=0$; 当 $S \neq 0$, 则意味着人体调节功能失调, 人体将处于病态, 肯定是一种极度不舒适状态.

当人体处于正常情况下, 蓄热率 $S=0$; 人体产热量为^[5]:

$$H = M - W. \quad (2)$$

人体蒸发散热量包括呼吸显热、潜热损失和皮肤扩散蒸发损失、出汗蒸发损失^[4]:

$$E = L + E_{res} + E_d + E_{sw}. \quad (3)$$

则: 人体无蓄热情况下的热平衡方程可表示成:

$$H - L - E_{res} - E_d - E_{sw} - R - C = 0 \quad (4)$$

式中, H : 人体产热量, W/m^2 ; L : 呼吸显热损失, W/m^2 ; E_{res} : 呼吸潜热损失, W/m^2 ; E_d : 皮肤扩散蒸发损失, W/m^2 ; E_{sw} : 皮肤表面出汗造成的蒸发热损失, W/m^2 .

变量 H 中的 M 的表达式是由实验回归得出; 呼吸热损失 L 和 E_{res} 受环境因素影响较小; 辐射热 R 和对流换热量 C 的计算式是根据经典理论总结的出的^[6], 适用于任何情况, 但其换热量大小受人体皮肤平均温度 t_s 的影响; 皮肤扩散蒸发热损失 E_d 受正常排汗影响较小, 可忽略, 其与人体平均皮肤温度 t_s 呈线性相关. 因此, 归结起来, 平均皮肤温度 t_s 和皮肤表面出汗造成的热损失 E_{sw} 才是影响人体热平衡的主要因素.

Fanger 等人研究得出, 当人体接近热中性时, t_s 和 E_{sw} 只取决于人体新陈代谢率和对外所做的功, 且存在线性关系^[7].

$$E_{sw} = 0.42(M - W - 58.15); \quad (5)$$

$$t_s = 35.7 - 0.028(M - W). \quad (6)$$

将人体接近中性时所有变量的表达式带入式(4)便得出了 Fanger 热舒适方程^[8]:

$$(M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) - 0.0014M \times (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8}f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) = 0. \quad (7)$$

式中, P_a : 环境空气水蒸气分压力, kPa; t_a : 环境空气温度, °C; f_{cl} : 服装面积系数; t_{cl} : 服装外表面温度, °C; \bar{t}_r : 平均辐射温度, °C; h_c : 对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$.

Fanger 热舒适方程的前提条件为(1)人体必须处于热平衡状态,且蓄热量为0;(2)皮肤平均温度应具有与舒适相适应的水平;(3)人体应具有最佳的排汗率.亦即:Fanger 热舒适方程是指具有舒适皮肤平均温度、舒适排汗率、人体蓄热率为0的“热中性”条件下的各变量之间的热平衡关系^[8],即理论上的“最适”热状态.在最舒适状态下, $(M_0 - W_0)$ 为一定值,即为 PMV 指标的基准.

2.2 Fanger “热中性”平衡的释义

根据 PMV 热舒适模型的定义可知,Fanger 热舒适方程表达的“最适”人状态是任何接近热舒适状态热平衡的参照.那么,什么样的热平衡是 Fanger 热舒适方程所指的“热中性”平衡?

前面已经述及,任何新陈代谢条件或任何环境参数下,人体通过自身强大的调节功能都能达到人体产热量与散热量的平衡.但是,该种热平衡并不一定表示人体都处于热中性状态下,更不一定是 Fanger 热舒适方程中所指的“热中性”平衡状态.

金招芬,朱颖心认为人体在裸身状态下处于 29 °C 的气温中,安静时代谢率为最低;若着衣适当,则人体在 18 ~ 25 °C 的气温范围内代谢率都是低且平稳的.在上述情况下,人体不出汗,也不觉得冷,仅仅靠轻微改变皮肤表层血管的口径便可让人体产热量和散热量达到平衡.此时,人体消耗用来调节体温的能量最少,且人觉得不冷不热,这种人体热感觉称之为“中性”状态^[9].

魏润柏,徐文华则认为当静止状态的人处于环境温度大约为 20 ~ 30 °C 的范围内,新陈代谢率是比较稳定的.在该范围中的某一区域中,一定的进食、活动及着装条件下,新陈代谢率最小,并且人体只要依靠表皮组织内毛细血管的收缩或扩张来调节人体皮肤的导热率就能使新陈代谢率基本不变.该温度区域称为热中性区域^[10].

综上所述,他们均强调:“消耗的能量最少”的不冷不热状态为“热中性”状态.那么,这种“热中性”状态和 Fanger 热舒适方程所指的“热中性”状态是否一致呢?

魏润柏,徐文华还认为一定的活动强度下都存在一新陈代谢率相对较低且比较稳定的温度区域^[10].但在此温度区域内,又存在一很窄的温度范围仅靠改变皮肤血管的口径即可以保持热平衡,当环境温度逐渐升高超出此很窄的温度区间时,显热损失开始逐渐下降,蒸发热损失开始逐渐增加,此时人体显热、潜热比例发生较大变化,致使皮肤温度和出汗率偏离了舒适的皮肤温度和舒适的出汗率,亦即偏离 Fanger 热舒适方程所指的“热中性”状态.

因此,笔者认为,Fanger 热舒适方程所指的“热中性”状态是包含于以上“热中性”状态中的一个很小的温度范围中的,在这个小的温度区间中,人体既能保持代谢率较低、感觉不冷不热的状态,又能保持合适的散热比例,只是这个很窄的温度区间的上下限温度值会随活动强度的变化而有所变化.

3 PMV 热舒适模型和指标

3.1 PMV 热舒适模型及指标的含义

PMV 热舒适模型建立的理论是人体热平衡方程和 Fanger 热舒适方程,同时考虑了人体自身生理调节功能对环境参数的适应能力.

PMV 热舒适模型不仅仅表征“热中性”条件下的热舒适,同时还表征“接近热中性”条件下的“某热平衡状态”下的热舒适.PMV 指标的定义为:人体处于接近热中性的某热平衡条件对应的平均皮肤温度、出汗率、辐射温度下的人体散热热负荷,相对于“热中性”平衡条件对应的平均皮肤温度、出汗率、辐射温度下的人体散热热负荷的偏离值引起的偏离“热中性”的冷热感觉^[3].

因此,PMV 指标的表征范围是有限的,主要表征接近热中性条件下的热平衡状态的舒适性,而不能表征“偏离热中性条件较大”的热平衡状态的热舒适.且评价的关键是计算“偏离值”.

3.2 PMV 热舒适指标适用条件

3.2.1 PMV 热舒适指标

根据 2.1 节和 2.2 节的分析,PMV 热舒适指标表征的是一个以 Fanger “热中性平衡”为基准的相对量. Fanger 教授根据收集统计的 1 396 位受试人员在特定的人工气候环境中对冷热感觉作出主观反应数据,回归得出了 PMV 指标的表达式如下^[6]:

$$PMV = [0.303e^{(-0.036M)} + 0.0275] TL. \quad (8)$$

式中,TL 表示“某热平衡条件”相对于“热中性热平衡”人体散热热负荷的偏离值,可表示成:

$$TL = (M_0 - W_0) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5\ 733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5\ 867 - P_a) - 0.001\ 4M \times (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) = 0 \quad (9)$$

式中, M_0 :舒适热平衡状态下人体新陈代谢率, W/m^2 ; W_0 :舒适热平衡状态下人体对外所做的机械功, W/m^2 . 朱颖心将人体热负荷 TL 定义为人体产热量与对外散热量的差值,即人体热平衡方程中的蓄热率 S ^[7],笔者认为该表述是错误的. 在 PMV 模型适用的热平衡条件下,人体的蓄率必然也为零,并不会偏离到 S 不为零的情况,一旦出现 S 不为零,则人会生病,这显然不符合 PMV 模型的应用条件. PMV 热舒适模型中的“负荷偏离值”TL 是指其他热平衡条件下的人体产热量或散热量相对 Fanger “热中性平衡”下的产热量($M_0 - W_0$)或散热量($R_0 + C_0 + E_0$)的值.

3.2.2 PMV 热舒适模型与指标的适用条件

人体与环境达到热平衡状态并不一定表示其处于热舒适的状态,必须对热平衡状态有所规定,因此,PMV 有一定的适用条件,若条件不符合,指标的应用将会产生偏差.

1) 人体须较长时间处于热平衡的稳态、且蓄热率 $S = 0$ 的状态,不适用于短时的稳态或瞬态热环境的评价.

2) 皮肤平均温度应接近与舒适相适应的水平. 若皮肤表面平均温度偏离“热中性”平衡条件下的皮肤表面平均温度太多、皮肤毛细血管收缩或扩张较大时,人体将进入“不舒适的”负荷热平衡状态;此时,PMV 指标计算式将不再准确,从而影响最后 PMV 指标的准确评价.

3) 人体具有接近热舒适的最佳排汗率. 而对于因自身体温调节系统引起的负荷热平衡下的排汗率,或者说,若人体排汗率偏离“热中性”平衡条件下的舒适排汗率太多时,PMV 指标计算式将不再准确.

3.3 PMV 热舒适模型及指标的修正与改进

PMV 热舒适模型综合了人体变量和环境变量中 6 个影响人体热舒适的因素,其推导的 PMV 指标是迄今为止最全面的评价热环境的指标. 1984 年国际标准化组织根据 Fanger 教授的研究成果,以 PMV 模型为基础提出了 ISO7730 系列标准^[3]. 而在 2004 年,美国采暖、制冷与空调工程师学会对其系列标准 ASHRAE55 修订时也引入了 PMV 指标^[2]. 至此,PMV 热舒适模型和指标已经成为预测人体热舒适的标准方法之一. PMV 指标提出以来,研究人员进行了大量的室内实验研究,有的与之吻合较好,有的则不然,如: Humphreys 通过实验发现,实际的热中性温度存在于比 PMV 预测值低 $0.8\ ^\circ\text{C}$ 到高 $3\ ^\circ\text{C}$ 的范围内,且随着运动水平的提高和服装的加厚而偏离更多. 近几年来,热舒适性现场测试工作进一步扩大,研究人员通过现场调查发现,PMV 预测结果与 TSV(热感觉投票)在偏离了热中性的空间环境中常常存在偏差,环境越热受试者的实际热感觉与 PMV 指标的偏差就越大,出现了所谓的“剪刀差”现象^[11]. 并且,受试者对环境温度变化的敏感度要高于 PMV 热舒适模型的预测.

对于非空调温暖气候环境, Fanger 提出了 PMV 修正模型,通过引入一个期望因子 e 来修正空调稳态条件下所计算出的 PMV 值,即^[12]:

$$PWVe = e \times PMV. \quad (10)$$

式中, e :期望因子,取值在 $0.5 \sim 1.0$. 对于中国, Fanger 认为 e 应为 0.7 .

国内通用标准 GB/T50785 - 2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》中,对于非空调环境引入了 APMV 模型,该模型表示出了热湿环境对人体生理、心理和行为的刺激引起的适应性调节所产生的负反

馈,并给出了 APMV 指标的计算公式^[13]. 即:

$$\text{APMV} = \text{PMV} / (1 + \lambda \times \text{PMV}). \quad (11)$$

式中, APMV: 预计适应性平均热感觉指标; λ : 自适应系数; PMV: 预计平均热感觉指标.

4 PMV 指标偏差的讨论

在以往文献资料中, PMV 指标产生误差的原因大多是应用过程中的测试误差或是建筑类型、受试个体以及气候带产生的影响^[14]. 本文将从热舒适与热感觉本身的概念、推导及适用条件出发, 对偏差产生的根本原因进行讨论.

4.1 热感觉与热舒适定义

在 ISO7730 - 2005 热舒适标准中, PMV 指标的推荐值为 $-0.5 \sim +0.5$, 即某环境中 90% 的人觉得处于热中性环境中, 则该环境为热舒适环境^[15]. 由此可见 PMV 模型中热舒适等同于热中性感觉, 或者说, 热感觉处于中性时(即人体感觉不冷不热)就是热舒适. 可是, 对照热舒适的定义可以发现, 热舒适是一种生理、心理综合感觉, 由于人的多样性和其主观反应、自身调节的差异性, 使得对环境舒适性的认可度变得复杂起来, 使得环境舒适性的评价难以采用某一固定参数来简单地进行判定^[16]. 所以, 不少研究者认为, 即使人体处于中性温度时, 也并不一定能够由此推出舒适条件^[17]. 因此, 建立在以热中性感觉为基础的热平衡理论上的 PMV 模型在评价环境热舒适时, 可能会有其局限性.

4.2 推导过程中的实验误差

从 Fanger 教授对 PMV 指标的推导过程可以发现, 为了得出热舒适方程, 必须解决影响热平衡生理过程的出汗率和平均皮肤温度的计算, 这两个变量均与人体的不同运动水平的代谢率有关.

运动水平和出汗率之间的线性关系是根据 McNall 等的研究数据推导出了, 其数据来自于 183 位受试人员在给定运动水平下, 热感觉处于热中性时所测的出汗率, 实验中热中性感觉是由投票得到的^[6]. 由于 McNall 等的研究中, 给定运动水平下的热中性是由投票结果得出的, 而不是通过公式或是生理参数算出的, 投票中涉及到人的主观感觉必然会带来偏差.

平均皮肤温度与运动水平的线性关系由 Fanger 教授实验得出, 实验测量了热中性条件下受试人员在 4 种运动水平, 即静坐、低运动水平、中等运动水平和较高运动水平的皮肤温度数据, 通过这些数据推导出皮肤温度和运动水平的线性关系^[6]. 但该实验中的热中性条件是由 McNall 等研究得出的, Fanger 教授并没有让受试人员在实验中直接进行热感觉的投票, 且样本容量为 20 名, 这也是可能产生实验误差的地方.

最后, 在对舒适方程进行拓展时, 根据总计 1 396 位受试人员构成的数据这些数据也是由投票产生的, 人的主观性影响不可避免.

以上 3 点都可能在推导过程中直接带入误差.

4.3 个体差异及适应性产生的误差

Fanger 教授、Nevins 和 McNall 等的研究对象的人种多样性较为单一, 所以他们的实验数据是否适用于所有人仍有待研究. 此外, 在 PMV 模型中, 对热舒适环境的研究均是实验室研究. 在实验室研究中, 人被看做环境的被动接受者. 但是在实际情况中, 特别是非空调环境下人不仅仅是冷热环境刺激的被动接受者, 同时也是环境的积极适应者, 而且人的适应性会大大影响到热舒适感觉. 另外, 不少学者提出的热偏好问题, 也会影响实验中对热感觉的投票结果. 这种个体差异及适应性对于以热平衡方程为基础, 并且结合人的热感觉投票的 PMV 指标将会是较大的误差来源.

5 结论

1) PMV 热舒适模型综合了人体变量和环境变量中 6 个影响人体热舒适的因素, 其推导的 PMV 指标是迄今为止最全面的评价热环境的指标.

2) PMV 指标第一次将热舒适与热感觉联系起来, 并给出了可以量化的计算公式.

3) PMV 指标在接近热舒适环境的空调环境下较为适用,且结果较为准确,但对于非空调环境,可能会存在较大偏差.

4) 由于 PMV 热舒适模型建立过程的复杂性及实验人员个体差异性和适应性对主观判断所带来的影响,都会成为环境热舒适性预测偏差的来源. 引入更客观的评价指标到 PMV 热舒适模型中,或建立起受人主观感觉较小的热舒适模型是未来研究的方向之一.

参考文献:

- [1] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55 – 2010: Thermal Environment Conditions for Human Occupancy [S]. Atlanta, GA, American Society of Heating, Ventilating and Air – Conditioning Engineers, Inc. , 2011.
- [2] ASHRAE. ANSI/ASHRAE55 – 2004. ASHRAE standard; thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta (USA); American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers Inc. , 2004.
- [3] ISO 7730 – 1984. Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort[S]. Geneva, International Organization for Standardization, 1984.
- [4] 赵荣义. 范存养. 空气调节[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [5] 范存养. 热舒适评价指标 PMV 及其实际应用[J]. 暖通空调,1993(3):20 – 26.
- [6] 杨世铭. 陶文栓. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [7] Fanger P O. Thermal Comfort[M]. Krieger Publishing Company, Malabar, FL, 1982.
- [8] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [9] 金招芬,朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [10] 魏润柏,徐文华. 热环境[M]. 上海:同济大学出版社,1994.
- [11] 张吉礼,马良栋,赵天怡. 建筑环境热舒适性研究进展与趋势分析[J]. 建筑热能通风空调,2011,30(1):1 – 10.
- [12] 李芳艳,裴清清. 热舒适评价指标应用分析[J]. 制冷,2009,12(4):74 – 77.
- [13] GB/T5701 – 2008:民用建筑室内热湿环境评价标准[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [14] 王海英,胡松涛. 对 PMV 热舒适模型适用性的分析[J]. 建筑科学,2009,25(6):109 – 114.
- [15] ISO7730 – 2005;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 [S]. Geneva, International organization for Standardization, 2005.
- [16] 赵荣义. 关于“热舒适”的讨论[J]. 暖通空调,2000,30(3):25 – 26.
- [17] 胡钦华,丁秀娟,李奎山. 关于热感觉和热舒适与热适应性的讨论[J]. 山西建筑, 2007,10(29):1 – 2.