

浅谈 PMV 方程的适用范围*

许景峰

(重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045)

摘要:近年来随着人们对居住环境热舒适度的重视,利用 ISO7730 标准中 PMV - PPD 指标来进行室内热环境舒适度评价的现象越来越普遍,目前许多研究室内热环境的文章也是把 PMV - PPD 指标作为参考和依据,来进行研究与分析。但是对于 PMV - PPD 指标的适用范围却很少有人关注和了解,从而出现了对 PMV 指标的误用和滥用,并推导出某些不准确的结论。通过对 PMV 方程推导过程的分析,解释了在高温条件下 PMV 指标与实际情况不符的现象,进一步说明 PMV 方程的适用范围,从而保证在进行热舒适度研究过程中可以作出科学合理的评价与结论。

关键词:热舒适; PMV - PPD 指标; 热舒适测试仪; PMV 方程; 适用范围

中图分类号:TU111.19⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**1006 - 7329(2005)03 - 0013 - 06

Discussion on the Application Range of the PMV Equation

XU Jing - feng

(College of Architecture & Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: With the attention to the comfort degree of living environment, the phenomenon of making use of the PMV - PPD index within the ISO7730 standard to evaluate the indoor thermal comfort degree is more and more widespread. Many papers about indoor thermal environment are based on the PMV - PPD index as the reference or basis to research and analyze. But few people understand and pay attention to the application range of the PMV - PPD index. So some people misuse and abuse the PMV index and deduce some inaccurate conclusions. In this thesis, based on the analysis of the process of deducing PMV equation, the phenomenon that PMV index is different from the fact in the high temperature condition is explained; furthermore the application range of the PMV equation is confirmed. So to obtain the scientific and reasonable evaluation and conclusion in the process of research of the thermal comfort degree can be ensured.

Keywords: thermal comfort; PMV - PPD index; thermal comfort meter; PMV equation; application range

随着人们生活水平的日益提高,对生活质量和居住环境舒适度的要求也愈来愈高。因此,创造一个舒适的居住环境是人们提高生活水平的需要,是社会不断进步、科技不断发展的必然。

美国采暖、制冷和空气调节工程师学会(ASHRAE)把热舒适环境定义为:人在心理状态上感到满意的热环境^[1]。热舒适是一种人们对热环境的主观感觉量,既属于物理环境的范畴,又涉及生理学、心理学和社会学。自上个世纪初以来,不少学者对室内热舒适的评价方法进行了许多研究,并根据各种不同的评价方法先后提出了一系列的评价指标。如有效温度(ET)、新有效温度(ET^{*})、标准有效温度(SET)、热应力指标(H. S. I.)、预计热指标(PMV)等^[3]。为建筑热工设计和室内热环境的评价提供了重要的设计依据和评价方法。其中,丹麦范格尔(P. O. Fanger)教授提出的预计热指标 PMV (Predicted Mean Vote)是考虑人体热舒适感诸多相关因素最全面的评价指标,也是目前最通用的室内热环境评价

* 收稿日期:2005 - 01 - 06

作者简介:许景峰(1980 -),男,安徽芜湖人,研究生,主要从事建筑物物理热工与声学研究。

指标。它既包括四个室内气候因素:空气温度、空气湿度、空气速度以及平均辐射温度;也包括了两个人为因素:服装和新陈代谢率。

早期的热舒适指标 PMV 是对实验室或现场调查结果进行统计得到的,这些实验性指标有其具体的适用场合,且实验中的各有关参数可改变的数量有限,再加上各参数之间存在很多耦合关系,结论难以推广。因此,为了推出综合的舒适指标,为了找到一个适用范围更广的综合性热舒适指标,Fanger 于是提出了描述人体在稳态条件下能量平衡的热舒适方程,同时根据热舒适方程中热负荷与热舒适偏移量之间的关系,从而推出了预计热指标 PMV 方程^[6]。

1984 年国际标准化组织提出了室内热环境评价与测量的标准化方法 ISO7730。在 ISO7730 标准中采用了 PMV - PPD 指标来描述和评价热环境。丹麦的 B&K 公司根据 Fanger 的 PMV 方程,研制生产了 1212 热舒适测试仪(Thermal Comfort Meter)用于室内热舒适的测定。从而使得预计热指标 PMV 在室内热环境评价与测量中得到运用。

1 热舒适测试仪的使用情况

虽在许多工程中,都使用 1212 热舒适测试仪来测量 PMV 指标和评价室内热舒适。然而,但测量中却存在一定的局限性。主要包括有:

1) 由于 1212 热舒适测试仪的热传感器不能测量出空气中的湿度,在进行室内热环境的 PMV 评价时还需要借助其它热仪器测出室内空气的水蒸气分压力值;

2) 当 1212 热舒适测试仪的热传感器从一个热环境到另一个热环境,调整传感器倾角或高度,或更改服装热阻参数的时候,都需要花几分钟的时间才能使热传感器达到热平衡的状态,然后进行 PMV 和 PPD 数值的读取;

3) 对于服装热阻、新陈代谢率和水蒸气分压力三个输入参数,只能通过仪器上的旋钮进行选择,其数值都有一定的范围且不连续,其可改变的数量有限,因此在有些特殊的情况下不能准确的反映其舒适度指标(如水蒸气分压力大于 3.6 kPa 时,在参数旋钮上找不到相应的数值);

4) 1212 热舒适测试仪上的 PMV 和 PPD 数值是有一定范围的($-2.2 \leq PMV \leq +2.2, 5\% \leq PPD \leq 90\%$),对于更不舒适情况下的热环境不能进行准确的评价;

5) 1212 热舒适测试仪没有数据采样和存储的功能,只能由工作人员进行现场数据读取,对于长时间的室内热舒适监测有一定的困难。

因此,使用 1212 热舒适测试仪进行 PMV 指标测量和室内热舒适评价存在着许多不便,因而在实际中并没有能得到广泛的应用。

2 预计热指标 PMV 方程

由于热舒适测试仪进行预计热指标 PMV 测量时存在一定的局限性。因此,结合室内气候分析仪或其它热仪器所测出的四个室内气候参数,通过 PMV 方程计算得出预计热指标 PMV,就成为目前进行室内热舒适评价和分析最方便和简单的方法。

Fanger 的预计热指标 PMV 方程为^[6]:

$$\begin{aligned} PMV &= [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \times TL \\ &= [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \times \{M - W - 3.05[5.73 - 0.007(M - W) - p_a] \\ &\quad - 0.0173M(5.87 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 0.42(M - W - 58) \\ &\quad - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \alpha_c (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:TL 为人体热负荷(Thermal Load),人体产热量与为了维持人体舒适所必须向外界散出的热量之间的差值,反映人体对热平衡的偏离程度;M 为人体新陈代谢产热率(Metabolic Rate),人体在分解食物的化学反应中释放能量的速率, W/m^2 ;W 为人体对外做功率(Work Rate),人体不同活动强度下对外输出的机械效率(一般取值为0), W/m^2 ; p_a 为空气中的水蒸气分压力(Pressure of Water Vapor),kPa; t_a 为

人体周围的空气温度 (Air Temperature), $^{\circ}\text{C}$; \bar{t}_r 为周围环境的平均辐射温度 (Mean Radiant Temperature), $^{\circ}\text{C}$;

$$\bar{t}_r = \frac{\sum_{k=1}^n (F_k \theta_{i,k})}{\sum_{k=1}^n F_k} \quad (2)$$

F_k 为房间围护结构各内表面面积 (Surface Area), m^2 ; $\theta_{i,k}$ 为房间围护结构各内表面温度 (Surface Temperature), $^{\circ}\text{C}$; t_{cl} 为衣服外表面温度 (Clothing Surface Temperature), $^{\circ}\text{C}$;

$$t_{cl} = \frac{35.7 - 0.0275(M - W) + R_{cl}f_{cl}[4.13(1 + 0.01dT) + \alpha_c t_a]}{1 + R_{cl}f_{cl}[4.13(1 + 0.01dT) + \alpha_c]} \quad (3)$$

R_{cl} 为服装热阻值 (Clothing Resistance), $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$); f_{cl} 为服装的面积系数 (ratio of clothed/nude surface area), 用来表示人体着装后的实际表面积 F_{cl} 和人体裸身表面积 F_D 之比; 即:

$$f_{cl} = F_{cl}/F_D = 1.00 + 0.968R_{cl} \quad (4)$$

$dT = \bar{t}_r - 22$, $^{\circ}\text{C}$; α_c 为对流交换系数 (Convective Transfer Coefficient), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

$$\alpha_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v} \\ 12.1\sqrt{v} & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v} \end{cases} \quad (5)$$

v 为空气对人的相对流速 (Relative Air Velocity), m/s 。

PMV 指标预测的是在同一环境下, 绝大多数人的热感觉。为了与 ASHRAE 的热感觉标尺保持一致, PMV 也采用 7 点生理、心理热感觉标尺, 如表 1 所示^[2,6]:

表 1 PMV 生理、心理热感标尺

热感觉	寒冷	凉	稍凉	热舒适	稍暖	暖	热
PMV 标尺	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

PMV 指标代表了对同一环境下绝大多数人的感觉。但是人与人之间存在生理差别, PMV 指标并不一定能够代表所有个人的感觉。因此 Fanger 提出了预测不满意百分比 PPD (Predicted Percent Dissatisfied) 指标来表示人群对热环境不满意的百分数, 并利用概率分析方法, 给出 PMV 与 PPD 之间的定量关系, 其关系如下:

$$\text{PPD} = 100 - 95 \exp[-(0.03353 \text{PMV}^4 + 0.2179 \text{PMV}^2)] \quad (6)$$

ISO 及 ASHRAE 等组织依据 Fanger 的 PMV - PPD 指标, 规定室内热环境的舒适标准为: $-0.5 < \text{PMV} < 0.5$, 相应的 PPD 为: $\text{PPD} < 10\%$ 。而我国很多学者认为, 上述指标要求太高, 在我国大部分地区难以实现, 而且亦无必要。所以一般认为可以接受舒适热环境的 PMV 为: $-1.0 < \text{PMV} < 1.0$, 相应的 PPD 为: $\text{PPD} < 26\%$ 。

3 PMV 方程的适用范围

3.1 问题的提出

根据 PMV 方程, 我们只需要通过仪器测出室内气候的四个参数: t_a 、 \bar{t}_r 、 p_a 、 v , 然后针对人体的服装和活动情况进行相应的取值, 得到影响 PMV 的六个参数, 然后通过计算就可以得到室内热环境的 PMV - PPD 指标。从而可以方便的对室内热舒适进行评价和分析, 并为将发生改变的室内热环境进行预测。

但是在高温情况下, PMV 方程就不能准确的反映热环境下的不舒适度。

1) 假设室内的热环境为 $t_a = \bar{t}_r = 34^{\circ}\text{C}$, $p_a = 1.8 \text{ kPa}$, 坐着活动 (工作) 人员的 $M = 70 \text{ W}/\text{m}^2$, $W = 0$, 夏季着装的 $R_{cl} = 0.062 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。而对于室内空气的流速 v 我们进行改变, 并通过 PMV 方程计算出其相应的 PMV 值。这种情况下空气流速 v 与 PMV - PPD 指标值之间的关系如图 1 所示。

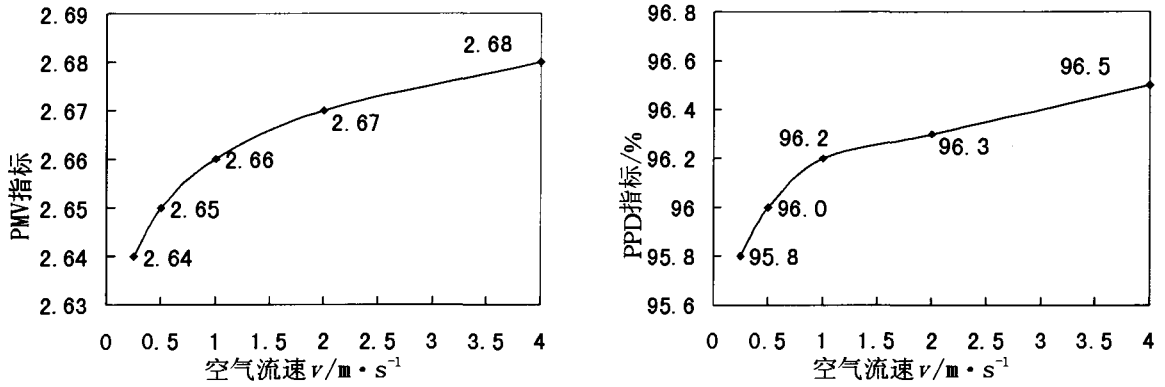


图1 空气流速 v 与 PMV - PPD 指标值之间的关系图

从图1我们可以看出,在 $t_a = \bar{t}_r = 34\text{ }^\circ\text{C}$ 情况下,PMV - PPD 指标值随着空气流速 v 的增大而变大,即随 v 的增大人体的热舒适度越差,人们感到越热。但实际情况并非如此,在没有空调的年代,夏季中午时段室内气温超过 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况屡见不鲜,然而人们最常用的方法就是通过电风扇进行降温。而且在一定风速范围内(不会引起人体头部不适的前提下)风速越大,人们感觉越凉快。其原理是众所周知的:随着风速的增加,加快了皮肤表面汗液的蒸发,带走了身体的热量,从而达到降温的目的。

2) 假设室内的热环境为 $t_a = \bar{t}_r = 34\text{ }^\circ\text{C}$, $p_a = 1.8\text{ kPa}$, $v = 0.5\text{ m/s}$,坐着活动(工作)人员的 $M = 70\text{ W/m}^2$, $W = 0$ 。只改变夏季着装的 R_{cl} ,并通过 PMV 方程计算出其相应的 PMV 值。这种情况下服装热阻 R_{cl} 与 PMV - PPD 指标值之间的关系如图2所示。

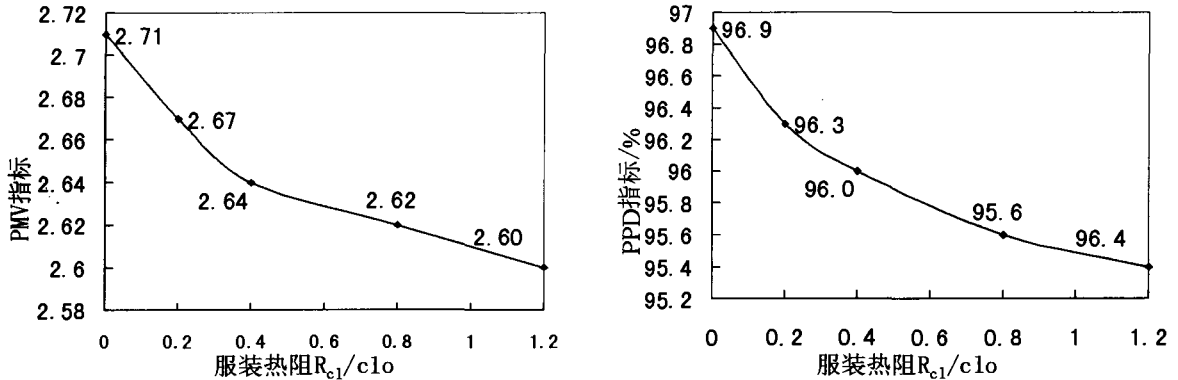


图2 服装热阻 R_{cl} 与 PMV - PPD 指标值之间的关系图

从图2我们可以看出,在 $t_a = \bar{t}_r = 34\text{ }^\circ\text{C}$ 情况下,PMV - PPD 指标值随着服装热阻 R_{cl} 的增大而减小,即随 R_{cl} 的增大人体的热舒适度增加,人们感觉反而不热一些。但现实情况并非如此,夏季人们是越热穿的越少,很多人一回家都是首先换上更加轻薄的衣服,甚至脱去上衣光着上身。

通过分析,在高温情况下,风速 v 越小,PMV - PPD 指标值反而越小;服装热阻 R_{cl} 越小,PMV - PPD 指标值反而越大,利用 PMV 方程计算出的 PMV 指标值已经不能正确的反映人们对热环境的不舒适程度,且与实际情况相矛盾。因此,在这种情况下 PMV 方程已经不再适用了。

3.2 方程的推导与分析

Fanger 的 PMV 方程实际上是由 Fanger 的热舒适方程推导得来的。其方程为^[6]:

$$\begin{aligned}
 M - W = & 3.05[5.73 - 0.007(M - W) - p_a] + 0.0014M(34 - t_a) + \\
 & 0.0173M(5.87 - p_a) + 0.42(M - W - 58) + \\
 & 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \alpha_c (t_{cl} - t_a) \quad (7)
 \end{aligned}$$

方程是人体在舒适条件下的热平衡表达式。而 PMV 方程正是利用该方程在不舒适条件下产生的

热负荷与热舒适偏移量之间的关系推导出来的。PMV 方程与热舒适方程之间的关系为:

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \times TL \quad (8)$$

其中 TL 就是热舒适方程等式两边之差。

然而热舒适方程是由人体热平衡表达式推导出来的。人体的热平衡表达式为:

$$M - W = R + C + E \quad (9)$$

式中: R 为辐射换热量(Heat Loss by Radiation), W/m^2 , $R = 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4]$; C 为对流换热量(Heat Loss by Convection), W/m^2 , $C = f_{cl} \alpha_c (t_{cl} - t_a)$; E 为蒸发散热量(Heat Loss by Evaporation), W/m^2 。

$$E = E_{is} + E_{sw} + E_{res} + C_{res} \quad (10)$$

式中: E_{is} 为皮肤的水分蒸发散热量(Heat Loss by Skin Vapour Diffusion), W/m^2 , $E_{is} = 3.05(0.256T_{sk} - 3.37 - p_a)$; T_{sk} 为皮肤表面温度(Skin Temperature), $^{\circ}C$, $T_{sk} = 35.7 - 0.0275(M - W)$; E_{sw} 为汗液的蒸发散热量(Sweat Rate), W/m^2 , $E_{sw} = 0.42(M - W - 58)$; E_{res} 为呼吸的潜热散热量(Heat Loss by Latent Respiration), W/m^2 , $E_{res} = 0.0173M(5.87 - p_a)$; C_{res} 为呼吸的显热散热量(Heat Loss by Dry Respiration), W/m^2 , $C_{res} = 0.0014M(34 - t_a)$ 。

根据上面 PMV 方程的推导过程我们可以看出,蒸发散热量 E 是四个散热量的综合,而对于计算皮肤表面温度 T_{sk} 和汗液蒸发散热量 E_{sw} 的公式是假设在热舒适的范围下进行的,其 T_{sk} 和 E_{sw} 只与人体的新陈代谢率有关,是一个固定不变的值。因此,当出现 $t_a = \bar{t}_r = T_{sk} = 35.7 - 0.0275(M - W)$ 时,无论风速 v 和服装热阻 R_{cl} 怎么改变,都不会引起 PMV - PPD 指标值的变化。也就是说当 $t_a = \bar{t}_r = T_{sk}$ 时,人体与周围热环境不发生热量的传递和得失,从而无论外界空气的流速为多少,身上所穿的衣服有多厚,都没有发生热负荷的变化,PMV 指标也就不会发生改变。而当 $t_a = \bar{t}_r > T_{sk}$ 时,正是因为外界温度比人体皮肤表面温度高,因此加大风速和减少服装阻值就反而使得 PMV 指标值变大,使得人们感到不舒适了。

对于热平衡方程本身来说,这样的推导结果并没有错误,但是这与实际情况相违背。那么到底是什么原因呢?其主要原因是:

1) PMV 方程的主要目的是用于评价比较舒适热环境中的热舒适程度。

PMV 方程本来就是从热舒适状态下的热平衡方程推导出来的,是用于评价比较舒适热环境中的热舒适程度,其 T_{sk} 和 E_{sw} 的计算公式是在接近热舒适环境下的推导出来的,而对于不舒适热环境下其公式并没有进行修正;

2) 没有考虑到人体自身的生理调节功能。

当人体处于热环境中,首先会引起血管的扩张,增加血液流量,提高皮肤温度,从而增加皮肤向环境的散热量。如果这样仍不能抑制身体内部的温度上升,就会使皮肤出汗,通过蒸发来带走身体的热量^[4,6]。在这种情况下减少服装热阻和增加风速就会增加传热和对流交换系数,从而增强人体向周围环境的散热量,减少人体的热不舒适感。当人体处于冷环境下,则首先通过皮下血管收缩来减少身体表层的血流量,降低皮肤温度以减少人体辐射和对流热损失。

正是因为 T_{sk} 和 E_{sw} 的计算公式是在接近热舒适环境下的推导出来,没有考虑人体体温调节系统在不舒适热环境中所起的作用,从而影响了 PMV 指标在不舒适热环境中进行评价的适用性。

3.3 适用范围的分析

由于 PMV 方程是通过实验调查统计和传热学理论两者相结合所推导出来的,对人体舒适感影响参数的考虑确实比较全面,对室内热舒适度的评价也是可靠的。同时,由于热舒适方程中热负荷与热舒适偏移量之间的确有着一定的关系,在一定范围内确实可以通过对人体热负荷的计算评价热舒适的好坏。

但是目前不少使用 PMV 指标来评价室内热环境的研究人员对 PMV 方程本身的适用范围和局限性并没有充分了解,经常使用 PMV 方程所计算出的 PMV 指标对一些非舒适环境进行评价,并以此来说明该环境的恶劣程度,但是却忽略了 PMV 方程在不舒适环境中的局限性,从而得出一些与实际不符

的结论。

任何一个理论或公式都有一定的适用范围,都有一定的前提条件。综上所述,PMV 方程主要是用于评价热环境舒适的程度,而非不舒适的程度。PMV 方程的适用范围必须满足^[6]:

1) 人体必须长时间处于比较稳定的热平衡状态。

PMV 热舒适方程是建立在人体和周围环境进行稳态传热基础上的,仅仅适用于长时间暴露在稳态热环境下,具有恒定新陈代谢率的人们。而对于短时间热舒适的评价则不宜用 PMV 指标,而多采用相对热指标 RWI(Relative Warmth Index) 和热损失率 HDR(Heat Deficit Rate) 及其它的一些指标;而对于动态热环境的热舒适评价也有相应的评价指标。

2) 皮肤表面具有接近舒适时的温度。

计算皮肤表面温度 T_{sk} 的公式是以皮肤表面处于正常温度为前提的,而对于因自身体温调节系统引起的皮肤表面温度变化,该公式就不再准确,从而影响最后 PMV 指标的准确评价。

3) 人体具有接近舒适的最佳排汗率。

对于计算汗液蒸发散热量 E_{sw} 的公式同样是以皮肤处于正常最佳排汗率为前提的。而对于因自身体温调节系统引起的排汗率变化,该公式也就不准确,以致影响 PMV 指标评价的准确性。特别是在夏季排汗率适当增加的条件下,提高风速可以一定程度上提高人体的热舒适度,且仍处于正常热平衡状态。(若排汗率过大,虽然提高风速会稍微降低不舒适性,但是该条件已经不处于舒适范围,而属于负荷热平衡状态)。

因此,PMV 热舒适方程最大的局限就是:人体的皮肤温度 T_{sk} 和汗液蒸发散热量 E_{sw} 被限定在热舒适状态下的范围之中。即当人体在不舒适状态下(如皮肤温度升高或降低,皮肤大量出汗)时,PMV 方程则不能准确的反应出其热舒适的偏移量的大小。

PMV 方程所计算的 PMV 指标虽然充分考虑了影响热舒适的六个因素,但仍然忽略了其它一些次要的影响因素,如使用人群的体型、年龄、性别与周边热环境等^[5]。例如对于比较炎热或寒冷的地区,就可以考虑当地人们对当地气候的适应性和身体调节能力,在对其进行热工设计时,可使 PMV 指标的数值稍微偏向当地人们适应的热环境,在保证比较舒适的热环境下,又节约一定的能源。因此,在一些特殊情况下,需要考虑到这些次要因素对 PMV 指标的影响,做到科学的评价热环境。

本文只是对 PMV 方程在高温条件下不适用的情况进行了分析,而对于由低温引起的皮肤温度下降是否会影响 PMV 方程的适用范围,没有进行详细的分析。另外,对于如何评价皮肤温度和汗液蒸发量处于非正常情况下的热环境,采用何种评价指标进行综合评价,还需进一步研究和探讨。

参考文献:

- [1] S. A. 康兹,魏润柏. 人与室内环[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985.
- [2] 陈启高. 建筑热物理基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991.
- [3] 高等学校试用教材. 建筑物理(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [4] 冯雅,刘才丰. 除湿是解决室内热环境的有效措施[J]. 重庆建筑大学学报,2001,23(1):6-9.
- [5] 张振南,李溯译. 建筑环境学[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [6] 金招芬,朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.