

室内热舒适性的综合定量评价方法与应用

王子介

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 给出了室内热舒适综合评价计算公式, 通过实验测定获得了南京地区室内空气温度、围护结构内表面温度、平均辐射温度等参数, 对同样室外温度下有无辐射供冷暖时的室内热舒适状况进行了定量对比分析。
[关键词] 热舒适, 辐射供暖, 辐射供冷, PMV 指标
[中图分类号] TU832, [文献标识码] B, [文章编号] 1672- 1292- (2003)02- 0022- 05

0 引言

随着经济的发展, 提高生活质量已日益为人们所关心. 改善室内环境, 尤其是室内热湿环境, 是提高生活质量的主要途径之一. 大量的研究也已证实, 人体在舒适条件下才能充分发挥本身的工作潜能, 大大提高工作效率. 我们将空气调节技术按服务范畴划分为舒适性空调和工艺性空调, 前者的主要任务之一就是改善室内热湿环境, 提高人体热舒适性.

人们对热舒适性的认识和研究是不断发展的. 早期的评价标准只规定室内温、湿度, 最多加上送风速度要求, 例如, 夏季温度 26℃、相对湿度 50%, 冬季 18℃、相对湿度 40%, 风速 ≤0. 25 m/s 等. 稍后, ASHRAE(美国采暖空调制冷工程师学会) 提出有效温度(ET) 概念, 以综合考虑温度和相对湿度的影响.

由于房间围护结构内表面与人体的辐射热交换对热舒适性影响极大, 在评价房间的热舒适性时, 为了综合考虑辐射影响, 又相继提出了平均辐射温度(MRT)、作用温度(OT)、标准有效温度(SET) 等概念和指标, 对人体热舒适性评价又提高了一步.

1984 年, 国际标准化组织提出了室内热环境评价与测量的新标准化方法 ISO7730, 采用 PMV-PPD 指标评价人体热舒适性, 是目前为止公认的最合理的评价方法. 由于 PMV-PPD 方法的受试者主要是欧美人, 此外欧美国家室内温度设计要求与我国也有不同, 对这一标准用于我国时的具体情况应作分析.

1 评价计算方法

国际标准 ISO7730 中采用 PMV (Predicted Mean Vote)-PPD (Predicted Percent Dissatisfied) 指标来描述和评价热环境. 该

表 1 PMV 指标

热感觉	热	暖	稍暖	适中	稍凉	凉	冷
PMV 值	+ 3	+ 2	+ 1	0	- 1	- 2	- 3

指标是 Fanger^[1] 收集了 1 396 名美国、丹麦受试者对冷热感觉的反映之后得出的, 它通过回归公式使人体热舒适指标量化, 并提出 PMV 具体指标(见表 1).

由于冷热是主观感觉, PMV 值只能代表同一条件下绝大部分人的感觉, 因此用 PPD 指标来表示不满意百分率, 并用概率统计方法给出二者间的关系. 当 PMV = 0 时, PPD = 5%. 就是说, 在最舒适状态下, 仍有 5% 的人不满意. ISO7730 给出的指标推荐值为: - 0. 5 ≤PMV ≤+ 0. 5, 相当 PPD ≤10%. PMV-PPD 方法的基本根据是人体热平衡方程:

$$M - W - C - R - E = S$$

(1)

收稿日期: 2003- 02- 15.
基金项目: 南京师范大学高层次人才科研项目(2001DLYXQB901) 资助.
作者简介: 王子介, 1948- , 南京师范大学动力工程学院教授, 主要从事建筑节能、室内环境与暖通空调新技术方面的研究与教学.

22
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中: M 为人体新陈代谢产热量; W 为人体作功量; C 为对流散热量; R 为辐射散热量; E 为蒸发散热量; S 为热量蓄积。

达到舒适状态时, 热量蓄积应为 0, 式(1)变为:

$$M - W - C - R - E = 0 \quad (2)$$

对流散热量可用下式计算:

$$C = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (3)$$

式中: f_{cl} 为服装面积系数, $f_{cl} = A_{cl}/A_d$, A_{cl} 是人体着装后实际表面积, A_d 为裸身表面积。人的裸体表面积可用杜波依斯(DuBois)公式计算:

$$A_d = 0.202 m_b^{0.425} H^{0.725} \quad (4)$$

式中: m_b 为人的体重, kg; H 为人的身高, m; 着衣后人体表面积可由参考文献[2]查得。

由于 f_{cl} 与服装热阻有一定关系, 可粗略表示为:

$$f_{cl} = 1.0 + 0.3 I_{cl} \quad (5)$$

式中: I_{cl} 为服装热阻, $m^2 \cdot K/W$, 服装热阻的另一常用单位为 clo, $1 \text{ clo} = 0.155 m^2 \cdot K/W$; h_c 为对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$, 可由以下经验公式计算[3]

$$h_c = 8.3 v^{0.5} \quad (6)$$

式中: v 为空气流速, m/s; t_{cl} 为着衣人体外表面温度, $^{\circ}C$; t_a 为室内空气温度, $^{\circ}C$ 。

服装热阻增加时, 面积系数随之增大, 同时人体外表面温度下降, 由式(3)算得的对流传热量增大还是减小取决于二值的增减程度。

人体总辐射散热量用下式计算:

$$R = \varepsilon f_{eff} \sigma (T_{cl}^4 - T_r^4) \quad (7)$$

式中: ε 为人体表面发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$; f_{eff} 为人体姿态系数, 一般可取为 0.72; T_{cl} 为着衣人体外表面绝对温度, K; T_r 为绝对平均辐射温度, K, $T_r = 273 + \bar{t}_r$; \bar{t}_r 为平均辐射温度, $^{\circ}C$, 可近似认为等于围护结构内表面平均温度, 围护结构内表面平均温度采用面积加权平均温度, 即:

$$\bar{t}_r = \frac{\sum A_i t_i}{\sum A_i} \quad (8)$$

式中: A_i 为 i 表面面积, m^2 ; t_i 为 i 表面温度, $^{\circ}C$ 。

若取发射率为 $\varepsilon = 0.99$, 姿态修正数 $f_{eff} = 0.72$, 则有:

$$R = 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \quad (9)$$

人体总蒸发散热量用下式计算:

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

式中: C_{res} 为呼吸时的显热损失, W/m^2 ,

$$C_{res} = 0.0014 M (34 - t_a) \quad (11)$$

E_{res} 为呼吸时的潜热损失, W/m^2 ,

$$E_{res} = 0.0173 M (5.867 - P_a) \quad (12)$$

P_a 为人体周围空气中的水蒸气分压力, kPa,

E_{dif} 为皮肤扩散蒸发损失(无感觉体液渗透), W/m^2 ,

$$E_{dif} = 3.05 (0.254 t_{sk} - 3.335 - P_a) \quad (13)$$

E_{sw} 为出汗造成的潜热损失, W/m^2 , 接近舒适条件时,

$$E_{sw} = 0.42 (M - W - 58.2) \quad (14)$$

将式(3)、(9)、(10)代入(2), 得到舒适性方程:

$$M - W - [f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) - 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - (C_{res} + E_{res} + E_{dif} + E_{sw}) = 0 \quad (15)$$

人体各部分温度不同, 其核心温度变动范围很小, 但皮肤温度可因代谢率、着衣情况、外界环境等因素变化而在一定范围内变化^[4]. 在本文以下计算中, 人体平均皮肤温度均取为 36℃. 在人体舒适性计算中, 要用到人体接近热舒适状态的皮肤温度, 根据 Rohles Nevins 试验回归式^[4]:

$$t_{sk} = 35.7 - 0.0275(M - W) \quad (16)$$

式中: M 为人体代谢率, $W \text{ m}^2$, 成年男子静坐时为 58.2, 站立休息时为 70, 偶尔走动时为 123, 步行(0.9 m/s)时为 115, 步行(1.8 m/s)时为 220, 下楼时为 233, 上楼时为 707. W 为人体所作机械功: $W = M\eta$, $W \text{ m}^2$, η 为人体机械功效率, 5%~10%, 在空调负荷计算时, 人体机械功率 η 看作 0.

着衣后的人体表面温度由于受活动情况、衣服热阻等的影响, 更加难以准确确定, 可用式(3)、(4)、(7)、(8)、(16)试算得到.

在确定以上有关参数后, 可以计算 PMV-PPD 指标:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0.303\exp(-0.036M) + 0.0275] \times \{M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - P_a] - \\ & 0.42(M - W - 58.15) - 1.73 \times 10^{-2}M(5.867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - \\ & 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{PPD} = 100 - 95\exp[-(0.03353\text{PMV}^4 + 0.2179\text{PMV}^2)] \quad (18)$$

2 应用实例

人们在长期工作生活实践中逐步认识到, 除了室内空气参数之外, 房间内壁面的温度对人体热舒适影响极大. 例如, 保温不好的顶层和靠西山墙的房间, 即使室内空气温度适宜, 夏季人体还会感到热, 冬天觉得冷. 主要是吊顶和西山墙内表面温度太高(低), 导致人体辐射散热困难(辐射失热过大)造成. 采用辐射供冷暖可以从根本上解决这一问题. 所谓建筑辐射供暖 冷是提升 降低围护结构内表面中一个或多个表面的温度, 形成热 冷辐射面, 依靠辐射面与人体、家具及围护结构其余表面的辐射热交换进行供暖 冷的技术方法^[5]. 由于辐射面及围护结构和家具表面温度的变化导致它们与空气间的对流换热加强, 房间空气温度同时上升 降低, 进一步加强了供暖 供冷效果. 改变围护结构内表面温度的方法可以通过电热、热 冷空气或热 冷水, 辐射面可以是地板、顶板或墙面等立面(可以做成屏风等形式), 系统可以单独供暖或供冷, 也可以同一系统夏天供冷冬天供暖. 辐射供暖 冷系统又按不同工作媒质或不同辐射面位置分别命名为水媒辐射供暖 冷、电热辐射供暖、顶板辐射供暖 冷、地板辐射供暖 冷, 等等.

我们在南京师范大学紫金校区新建的实验室和位于仙林校区的实验样板住宅进行了对比测试. 实验室, 分为上、下两层. 底层地面、吊顶及二层吊顶都铺设了埋管. 埋管采用进口生产线及进口原料、国内生产的交联聚乙烯(PEX)管, 管径 16 mm, 管间距约 250 mm. 系统配用了置换通风系统, 提供经过干燥的新风, 以降低地面结露温度, 发挥辐射供冷能力, 同时可以在一定范围内控制室内温度和相对湿度. 实验住宅位于南京市东郊新建的仙林地区大学城. 该住宅为一跃层公寓楼房, 位于五楼. 总建筑面积约 160 m^2 . 实验住宅同样铺设了地板管用于冬季采暖. 管材同于实验室, 管间距 250~350 mm, 沿外墙处密, 内区疏. 有关实验住宅详情可参看文献[6]. 实验室地面、墙面和空气温度测定采用铜-康铜热电偶, 事先在平衡水浴试验台上进行了校正. 住宅围护结构表面温度用 ST-60 型非接触测温仪(美国制)测得, 室内、外空气温度和相对湿度用 HMP-46 型温湿计(芬兰制)读取, 温湿计使用前也进行了校正.

为便于对比分析, 我们取室外温度、相对湿度相同时的室内测试值冬、夏季各一组. 其中夏季辐射供冷情况下的参数由实验室测得, 其余取自样板间卧室的测试值. 该房间南墙为外墙, 西墙为隔墙, 但邻室不采暖, 东墙、北墙为内墙. 表 2 示出了测定结果. 其中冬季测定值为 2001 年 1 月份的, 夏季测定值为 2002 年 7 月份的. 表 2 中序号 1、2 两项的室内相对湿度相同, 系在供冷时, 启动了实验室新风减湿系统, 将相对湿度

控制到 70%, 以使对比条件尽可能趋同. 表中的围护结构内表面温度是为计算辐射温度所用.

表 2 有(无)辐射供暖冷时室内温度测定值 $^{\circ}\text{C}$

序号	室外	地板	东墙	南墙	西墙	北墙	吊顶	室内空气温度	室内空气相对湿度(%)	备注
1	34	22.3	27.3	27.6	27.8	27.4	27.2	27.2	70	辐射供冷
2	34	31.1	31.4	31.5	31.5	31.2	31.1	32	70	未供冷
3	7	22.4	16.6	13.6	14.6	16.3	15.4	17.4	45	辐射采暖
4	7	14.3	14.1	13.6	13.8	13.9	14.5	14.0	45	未采暖

3 计算过程与结果

计算以室内静坐成年男子为例, 取夏季室内人服装热阻 $0.5 \text{ clo} (0.0775 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W})$, 冬季室内人着装热阻 $1 \text{ clo} (0.155 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W})$. 夏季室内空气流速 0.15 m/s , 按式(6)算得, 室内空气对流换热系数 $h_c = 8.3 \times 0.15^{0.5} = 3.21 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. 冬季室内空气对流热交换系数取为 3. 服装的面积系数 f_{cl} 可按式(5)算得, 夏季为 1.023, 冬季为 1.047. 平均辐射温度 \bar{t}_r 可用式(8)经面积加权平均算得. 人体舒适表面温度可由式(16)算得, 对静坐成年男子为 34.1°C , 并可查得相应皮肤表面饱和水蒸气分压力. 根据表 2 中室内空气温度和相对湿度可以从 $i-d$ 图上查得室内空气中水蒸气分压力. 使用公式(2)至(18)可以进行人体热舒适评价计算. 其中计算人体出汗散(失)热量时, 由式(2)和(10)可以导出:

$$E_{sw} = M - W - C - R - E_{tol} \tag{19}$$

式中: $E_{tol} = C_{res} + E_{res} + E_{dif}$, 是除了出汗潜热以外其余蒸发散热量的总和.

夏季有无辐射供冷条件下的各项散热量列于表 3, 可以看出, 有辐射供冷时(环境 1)总散热量增加约 10%, 但辐射散热量为无辐射供冷(环境 2)的 2.23 倍. 环境 1 的辐射散热占 33.7%, 蒸发散热占 46.5%; 而环境 2 由于辐射散热量小, 因而 75.8% 的热量要靠蒸发散发, 其中 59% 热量要靠出汗带走. 冬季情况列于表 4, 可以看出, 无辐射供暖(环境 4)时较之有辐射供暖(环境 3)人体失热量要多 $18.5 \text{ W}/\text{m}^2$, 其中辐射失热量要多 20.8%. 为更直观地进行分析, 图 1、图 2 分别给出了有无辐射供冷时散热量的构成及有无辐射供暖时失热量的构成.

表 3 夏季有无辐射供冷条件下散热量 $/(\text{W}/\text{m}^2)$

	衣服外表 温度 $t_{cl}/^{\circ}\text{C}$	对流散 热 C	辐射散 热 R	呼吸显热 损失 C_{res}	呼吸潜热 损失 E_{res}	皮肤蒸发 损失 E_{dif}	出汗潜热 损失 E_{sw}	蒸发总散 热量 E	总散 热量
1($t_a = 27.2, \bar{t}_r = 26.3$)	30.7	11.49	19.54	0.55	3.39	8.62	14.32	26.88	57.91
2($t_a = 32.0, \bar{t}_r = 31.3$)	33.2	4.04	8.75	0.16	2.57	6.15	31.13	40.01	52.80
占总散热量比例, %									
1($t_a = 27.2, \bar{t}_r = 26.3$)		19.8	33.7				24.7	46.5	
2($t_a = 32.0, \bar{t}_r = 31.3$)		7.7	16.5				59.0	75.8	

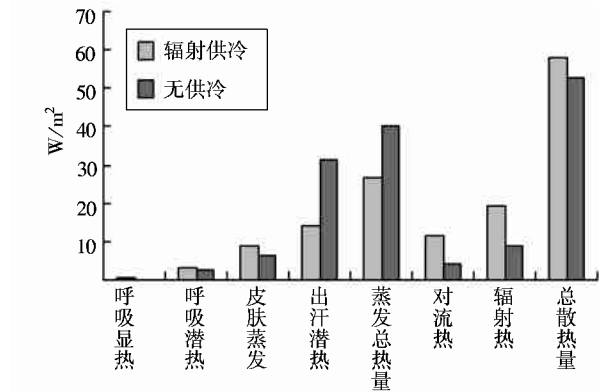


图 1 有无辐射供冷时散热量构成

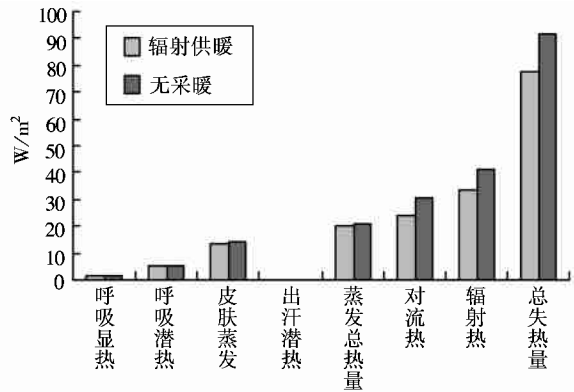


图 2 有无辐射供暖时失热量构成

表 4 冬季有无辐射供暖条件下失热量/(W/m²)

	衣服外表 温度 $t_{cl}/^{\circ}\text{C}$	对流失 热 C	辐射失 热 R	呼吸显热 损失 C_{res}	呼吸潜热 损失 E_{res}	皮肤蒸发 损失 E_{dif}	蒸发失 热 E	总失 热量
3($t_a=17.4, \bar{t}_r=16.2$)	24.6	24.20	33.71	1.35	5.0	13.5	19.85	77.76
4($t_a=14.0, \bar{t}_r=13.5$)	23.1	30.58	40.73	1.67	5.18	13.97	20.82	92.13

不同环境下的 PMV-PPD 值列于表 5。可以看出,冬季辐射采暖及夏季辐射供冷时的 PMV 值要理想得多,虽然相对于欧美标准,还达不到最舒适要求,但根据天津大学对于国内大量人群所作的实测研究^[7],由于生活习惯等因素的影响,中国人满意温度下限比 Fanger 标准要低 1℃左右,上限要高 0.7℃左右,即中国人舒适标准为 $-1.5 \leq \text{PMV} \leq +1.2$,此范围内的辐射供冷和供暖,均能较好地满足舒适要求。

表 5 不同环境条件下的 PMV-PPD 值

环境	1($t_a=27.2, \bar{t}_r=26.3$)	2($t_a=32.0, \bar{t}_r=31.3$)	3($t_a=17.4, \bar{t}_r=16.2$)	4($t_a=14.0, \bar{t}_r=13.5$)
PMV	0.73	1.84	-0.99	-1.71
PPD	16.2	69.1	25.7	62.3

4 结论

(1) 国内现行空调室内设计参数只提出空气温度、相对湿度要求,而采用 PMV-PPD 指标可以定量分析室内热湿环境。由于可以定量分析人体散热量(失热量)构成、室内平均辐射温度的影响等因素,所以对于舒适性空调室内设计参数确定更有具体指导意义。

(2) 天津大学提出的适合中国人舒适要求的 PMV 指标范围比 Fanger 提出的适用于欧美人的标准更宽泛,与本项目的实测及计算结果是一致的。

(3) 冬季采用辐射供暖(夏季辐射供冷)在提高(降低)室内空气温度的同时,提高(降低)了室内平均辐射温度,从而进一步提高了室内舒适性。

[参考文献]

[1] Fanger P.O. Thermal Comfort[M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1982.
[2] American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineer Inc. ASHRAE Handbook (SI) Fundamental[Z]. 1997.
[3] American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineer Inc. ASHRAE Applications Handbook[Z]. 1999.
[4] 金招芬. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
[5] 王子介. 地板供暖及其发展动向[J]. 暖通空调, 1999, (2): 35~ 38.
[6] 王子介. 辐射采暖住宅能耗与作用温度[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2002, (2): 78~ 83.
[7] 郭利华, 朱能, 蒋薇. 人体热舒适的实验研究[A]. 中国建筑学会暖通空调委员会, 中国制冷学会第五委员会. 全国暖通空调制冷 2002 年学术文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 219~ 223.

Synthetical and Quantitative Evaluation Method
for Interior Thermal Comfort Level

Wang Zijie

(College of Power Engineering, Nanjing Nomal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The traditional interior design parameters for comfort air conditioning demand only space temperature and relative humidity. Equations for interior thermal comfort synthetical evaluation is proposed in this paper. The interior space temperature, inner surface temperature and mean radiate temperature etc. may be obtained according to the equations based on experimental measurements. The quantitative comparison and analysis of inside thermal comfort level are carried out for rooms with and without radiate heating/cooling in the same outside temperatures.

Key words: thermal comfort, synthetical evaluation, radiate heating, radiate cooling, PMV-PPD [责任编辑: 严海琳]