

近窗处冬季平均辐射温度变化对 PMV/PPD 值影响

何 梅^{1,2}, 王志航¹

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘要: 就严寒地区冬季外窗附近较低的平均辐射温度的变化对人体的热舒适影响进行讨论. 经计算, 室内距外窗 0.5 m 处的平均辐射温度可比空气温度低 3℃; 在衣物热阻较小、空气温度较低、相对湿度较低的环境下, 平均辐射温度的变化, 对人体的热舒适影响会较大; 当 PMV 的绝对值大于 1 的时候, 平均辐射温度的变化对人体热舒适影响会较为明显.

关键词: PMV; PPD; 平均辐射温度; 衣物热阻; 相对湿度; 空气温度

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)03-0388-05

现今, 对于建筑房间内热舒适的评价, 除了现场调研的方法, P. O. Fanger 教授所提出的 PMV 是被广泛采用的一种热舒适评价指标. 它包括空气温度、平均辐射温度、空气相对湿度、气流速度以及衣物热阻和新陈代谢率 6 项因素^[1]. 通过把以上 6 项因素, 带入 PMV/PPD 方程, 可以较为容易的评价室内的热舒适状况.

1 背景

在寒冷和严寒地区的居住建筑内, 尤其是 20 世纪 80~90 年代建造的居住建筑室内, 冬季人们在窗口附近普遍都会有吹冷风感; 2008 年以后建造的居住建筑, 虽然建筑的整体热工性能较以前有较大提升, 但是因为现在普遍追求室内通透和外立面效果, 外窗面积较以前有所增大, 人在室内窗口附近仍然有较强的冷辐射感. 最新颁布的节能规范对窗墙比有所限制, 但是由于可以进行节能权衡计算, 严寒地区的南向窗墙比可以放宽到 0.55. 所以较大窗口附近较强的冷辐射依然存在.

文献[2-5]均是从不同的角度, 就这 6 种因素对人体 PMV/PPD 值的影响, 进行相应的讨论. 文献[6]表明, 人体的对流散热大约占总的散热量 32%~35%, 蒸发散热占总散热量的约 20%~25%, 而通过辐射散发的热量约占到人体总散热量的 42%~44%. 从以上数据可见, 辐射散热所占人体与周围环境热交换的比例最大. 在严寒地区, 对比冬季和夏季的情况, 即使室内空气温度相同, 但是人们普遍感觉冬季室内要比夏季室内冷, 这就是壁面辐射温度较低, 进而通过辐射散失的热量增加所导致的. 在相关论题的研究中, 部分研究^[3,8]将平均辐射温度简单等同于空气温度, 而且没有对严寒地区冬季室内平均辐射温度对 PMV/PPD 指数的影响进行深入讨论. 由于冷表面对人体的角系数的影响, 位于房间不同位置的平均辐射温度将会有所变化, 导致同一个房间内, 热舒适分布并不均匀. 国内文献^[7,9]和国外相关文献^[10-13,16]对此问题都从不同角度进行了探讨. 在窗口附近, 平均辐射温度相对于空气温度较低, 导致了 PMV 数值也随位置变化而发生变化. 但是, 结合这种趋势, 就平均辐射温度变化对 PMV/PPD 的影响的量化, 尚未有深入研究. 所以, 窗口附近的平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响, 以及其与房间其他部分的舒适程度究竟有怎样的差别, 值得深入进行研究.

2 窗口附近平均辐射温度的计算

本文以哈尔滨为居住建筑为例进行分析. 哈尔滨属于寒冷 B 区. 哈尔滨一月份的室外最低温度可达 -33℃, 十二月份和一月份, 夜间室外平均温度在 -23℃~-30℃波动. 计算时取室外空气温度为 -26℃^[7], 而室内温度按照 18℃计算. 房间的几何尺寸为 3.6 m×5.1 m×3.0 m, 具体尺寸见图 1. 其中 P 点为人体位置, 距窗口 0.5 m, 距离地面高度为 1 m, 在房间的正中线上. 本次计算分别计算距窗户 0.5 m 和 1 m 处的角系数, 进而计算出该位置的平均辐射温度. 窗尺寸为 2.2 m×2.2 m, 窗墙比约 0.45.

收稿日期: 2013-03-22

修改稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目 (50921005)

作者简介: 何梅 (1964-), 女, 副教授, 主要从事建筑构造与建筑节能研究. E-mail: he_mei_01@163.com

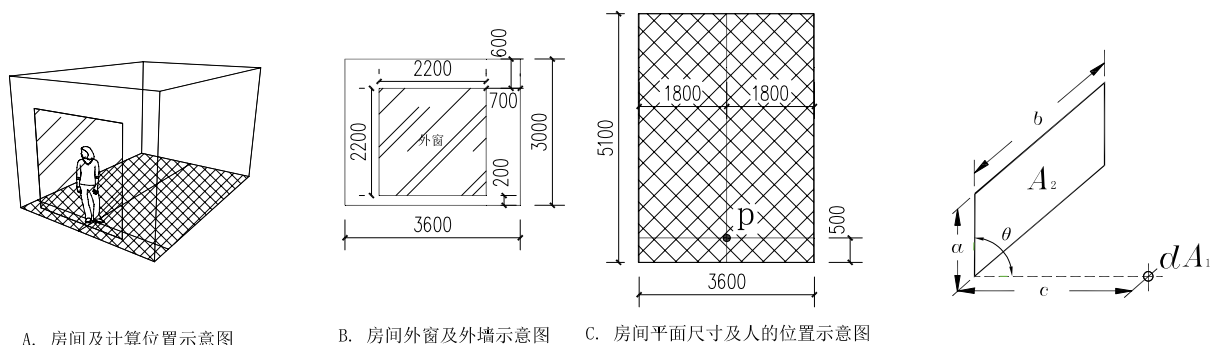


图 1 模型房间的尺寸示意图

图 2 角系数计算模型

Fig.1 Schematic diagram of model size

Fig.2 Calculated model of view factors

房间外墙的传热系数为 $0.55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 而窗玻璃分别为 6 mm (低透光热反射玻璃) + 12 mm 空气层 + 6 mm (透明白玻) 和 6 mm (Low-E) + 12 mm 空气 + 6 mm (透明白玻) 两种类型考虑, 窗框为多腔塑料型材, 窗整体传热系数分别为 $2.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [15]。

根据文献[17-18], 室内不存在红外线辐射, 也不考虑太阳辐射, 平均辐射温度计算人体的辐射换热已经够精确了, 所以人体可以简化成 P 点距地面 1 m 处的球形微元面。图 2 为计算模型。当 $\theta=90^\circ$ 时候, 角系数 $F_{\text{dl-2}}$ 可按照以下公式进行计算:

$$F_{\text{dl-2}} = \frac{1}{4\pi} \arctan \left(\frac{X+Y}{\sqrt{1+X^2+Y^2}} \right)$$

(1)

人体对周围环境的角系数, 经过计算, 结果如表 1。

表 1 距外窗不同距离, 人体对围护结构的角系数

Tab.1 View factors of human body to building envelope away from window at different distances			
距离外窗距离/m	地面、天花、内墙对人的角系数	外墙对人的角系数	外窗对人的角系数
0.5	0.614	0.136	0.25
1	0.75	0.098	0.152

根据文献[7], 由于绝大多数的壁面装饰材料都具有较高的辐射率, 可以认为均相同, 所以平均辐射温度可按照以下公式进行计算:

$$T_{\text{mrt}}^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n}$$

(2)

根据公式 (2), 距离窗户 0.5 m 远距离的人体与环境平均辐射温度见表 2。表 2 中另列出了距离窗口 1 m 远距离的人体与环境的平均辐射温度以供比较。

表 2 距外窗不同距离处不同传热系数外窗的平均辐射温度

Tab.2 MRT in different window heat transfer coefficient at different distances away from window		
距离外窗距离/m	窗的传热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	
	1.9	2.2
0.5	15.3℃	15.05℃
1	16.46℃	16.19℃

3 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响

哈尔滨冬季空气较为干燥, 但是很多家庭备有加湿装置。通过调研, 相对湿度取值在 $25\% \sim 65\%$ 较为合适; 因为哈尔滨采暖期, 室内基本不开窗, 室内风速较低, 所以风速取 0.1 m/s ; 根据调研及相关文献[7], 哈尔滨在冬季采暖期室内温度范围在 $16 \sim 22^\circ\text{C}$, 所以本次计算取值范围在 $17 \sim 20^\circ\text{C}$; 根据调研和相关文献[7-8,14], 哈尔滨冬季室内的着装热阻为 $1 \sim 1.5 \text{ clo}$; 冬季人们在居住建筑内, 一般均为静坐或者休息, 所以活动量可以取为 1 met ($58.2 \text{ W}/\text{m}^2$); 机械效率 η 为 0% 。

表 2 显示, 距离外窗 0.5 m 处的平均辐射温度比空气温度 18°C 低约 3°C ; 距外窗 1 m 处的平均辐射温度也比室内空气温度低 2°C 。由于本文算例中, 对窗及墙体的传热系数取值较为保守, 而实际情况中, 很多房间的传热系数远大于本文传热系数值, 其相同位置平均辐射温度值会更低。所以, 在计算中, 平均辐射温度最低值取低于空气温度 3°C , 最高值取等于空气温度。

3.1 不同温度下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响

通过 MATLAB 程序, 在不同空气温度下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 的影响见表 3。

由于外窗附近的平均辐射温度较低, 所以导致此处 PMV 和 PPD 较低. 在表 3 中, 以表中的环境和人体因素进行计算. 灰色区域内分别为空气温度与平均辐射温度的差值在 0、1、2、3 的时候, PMV/PPD 值的大小. 经计算, 当平均辐射温度比空气温度每降低 1℃ 的时候, 则 PMV 值比空气温度和平均辐射温度相同的时候低约 0.112~0.115. 当温差在 3℃ 的时候, PMV 值的差值将会达到 0.33~0.34; 而 PPD 值, 当空气温度和平均辐射温度的差值在 3℃ 的时候, PPD 值的差值在 18%~13%; 并且当 PMV 值的绝对值越大, 虽然每增加 1℃ 的平均辐射温度所引起的 PMV 变化相同, 但是 PPD 值的变化将会越大, 则对人体的不适程度影响就越大. 所以, PMV 的绝对值较大的时候, 窗口附近的较低的平均辐射温度将会对人体的热舒适产生更大的影响.

表 3 不同空气温度下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响
Tab.3 Influence of MRT on PMV/PPD in different air temperature

$R_h=45\%, M=1\text{ met}, V=0.1\text{ m/s}, I_{cl}=1.1\text{ clo}$				
$T_{mrt}/^{\circ}\text{C}$	$T_{air}=17^{\circ}\text{C}$ $P_v=835\text{ Pa}$	$T_{air}=18^{\circ}\text{C}$ $P_v=920\text{ Pa}$	$T_{air}=19^{\circ}\text{C}$ $P_v=985\text{ Pa}$	$T_{air}=20^{\circ}\text{C}$ $P_v=1055\text{ Pa}$
14	-1.824/68.267	-1.683/60.834	-1.549/53.569	-1.411/46.096
15	-1.714/62.479	-1.572/54.840	-1.437/47.466	-1.301/40.310
16	-1.600/56.329	-1.461/48.773	-1.325/41.560	-1.188/34.664
17	-1.487/50.167	-1.348/42.765	-1.212/35.856	-1.076/29.407
18	-1.382/44.560	-1.232/36.828	-1.099/30.458	-0.962/24.549
19	-1.275/39.000	-1.117/31.292	-0.984/25.454	-0.847/20.154
20	-1.168/33.684	-1.008/26.443	-0.866/20.826	-0.732/16.271

注: T_{air} 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$; P_v 为水蒸气分压力, Pa .

3.2 不同衣物热阻下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响

不同服装热阻下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响, 见表 4.

表 4 不同服装热阻下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响
Tab.4 Influence of MRT on PMV/PPD in different clothing thermal resistance

$R_h=45\%, M=1\text{ met}, V=0.1\text{ m/s}, T_{air}=18^{\circ}\text{C}$						
$T_{mrt}/^{\circ}\text{C}$	$I_{cl}=1\text{ clo}$	$I_{cl}=1.1\text{ clo}$	$I_{cl}=1.2\text{ clo}$	$I_{cl}=1.3\text{ clo}$	$I_{cl}=1.4\text{ clo}$	$I_{cl}=1.5\text{ clo}$
15	-1.798/66.912	-1.572/54.840	-1.369/43.875	-1.185/34.525	-1.018/26.872	-0.865/20.783
16	-1.680/60.695	-1.461/48.773	-1.263/38.378	-1.084/29.779	-0.921/22.908	-0.772/17.555
17	-1.559/54.131	-1.348/42.765	-1.156/33.112	-0.982/25.349	-0.823/19.289	-0.678/14.669
18	-1.439/47.613	-1.232/36.828	-1.048/28.161	-0.878/21.285	-0.724/16.043	-0.584/12.141
19	-1.328/41.690	-1.117/31.292	-0.936/23.502	-0.774/17.627	-0.625/13.191	-0.488/9.983

从表 4 中我们可以看出, 随着衣物热阻的变化, 平均辐射温度的变化对 PMV/PPD 值的影响也会发生变化. 当衣物热阻从 1.0~1.5 clo, 空气温度与平均辐射温度的差值每增加 1℃, PMV 值增加从 0.12~0.094, PPD 值增加从 6.433%~2.881%. 可见, 衣物热阻越小, 平均辐射温度变化, 对 PMV/PPD 的影响越大.

3.3 不同相对湿度下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响

不同相对湿度下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响见表 5.

表 5 显示, 空气相对湿度的变化, 不会引起平均辐射温度变化对 PMV 值的影响发生变化, 但是会引起平均辐射温度变化对 PPD 值的影响发生变化. 相对湿度从 25%~65% 变化时, 每当空气温度与平均辐射温度的差值每增加 1℃ 的时候, PMV 值增幅约为 0.113~0.114, 而 PPD 的增值从 6.117%~5.774%. 平均辐射温度变化对 PMV/PPD 值的影响基本与 4.1 节中相同. 所以, 相对湿度的增减, 并不会引起平均辐射温度变化与 PMV 值变化的对应关系; 但是当相对湿度较小, 即 PMV 的绝对值较大的时候, 平均辐射温度的与空气温度差值的增大, 将会使得 PPD 的增幅大于衣物热阻较大的情况, 即人体的寒冷感觉会加剧.

表 5 不同相对湿度情况下, 平均辐射温度对 PMV/PPD 值的影响
Tab.5 Influence of MRT on PMV/PPD in different relative humidity

$M=1\text{ met}, V=0.1\text{ m/s}, I_{cl}=1.1\text{ clo}, T_{air}=18^{\circ}\text{C}$					
$T_{mrt}/^{\circ}\text{C}$	$R_h=25\%$ $P_v=510\text{ Pa}$	$R_h=35\%$ $P_v=705\text{ Pa}$	$R_h=45\%$ $P_v=920\text{ Pa}$	$R_h=55\%$ $P_v=1\,125\text{ Pa}$	$R_h=65\%$ $P_v=1\,340\text{ Pa}$
15	-1.681/60.708	-1.629/57.927	-1.572/54.840	-1.518/51.892	-1.462/48.814
16	-1.569/54.654	-1.518/51.85	-1.461/48.773	-1.407/45.866	-1.350/42.861
17	-1.456/48.532	-1.405/45.768	-1.348/42.765	-1.294/39.958	-1.237/37.086
18	-1.340/42.356	-1.289/39.693	-1.232/36.828	-1.178/34.176	-1.121/31.490
19	-1.225/36.484	-1.174/33.971	-1.117/31.292	-1.063/28.838	-1.006/26.376
20	-1.116/31.244	-1.064/28.909	-1.008/26.443	-0.954/24.206	-0.897/21.982

注: T_{air} 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$; P_v 为水蒸气分压力, Pa .

3.4 PMV 值的变化对 PPD 值的影响

从以上3节,我们可以看出,当PMV的绝对值较大的时候,平均辐射温度与空气温度的差值加大,PPD值将会激增.PPD(prediction percentage dissatisfied)为预计处于热环境中的群体对于热环境投票的平均值.PPD的计算公式^[1]如下:

$$PPD=100-95\times\exp(-0.033\ 53\times PMV^4+0.217\ 9\times PMV^2) \quad (3)$$

根据公式(3),PMV与PPD的函数图像见图3.

从图我们可以看出,当PMV在小于-1时,PMV和PPD值几乎是呈线性关系,且斜率较大,但是PMV在-1~0之间变化的时候PMV值的绝对值越小,对应的PPD值变化越平缓.这也印证了,当PMV值的绝对值较大的时候,平均辐射温度的减少导致的PMV值的减小,会造成PPD值的激增.

4 结论

(1) 空气温度、相对湿度、平均辐射温度以及衣物热阻的增加,当PMV小于0的情况下,都会使人的热舒适度有所提高.

(2) 冬季室内,当PMV值在-1~0的时候,PMV值的变化对PPD值的变化影响较小;当PMV值小于-1时,PMV值的变化,对PPD值的变化影响将会增加,且在PMV方程适用范围内,近似线性变化.

(3) 平均辐射温度的变化对PMV值的影响,不会受到空气温度、空气相对湿度的变化的影响,但是它却会受到衣物热阻值变化的影响,且衣物热阻越小,这种影响将会增大;空气温度、相对湿度以及衣物热阻的变化,都会产生平均辐射温度变化对PPD值的影响的改变量增加,特别是当总体的PMV值小于-1的时候,平均辐射温度每下降1℃,PPD的增幅大约在6%左右.

(4) 按照哈尔滨冬季非极端气温状况下,对室内热舒适进行计算,发现普遍达不到规范要求的舒适范围.由于平均辐射温度在窗口附近较低,那么热舒适状况将会更加恶劣.本研究中,尚未考虑窗的冷风渗透和窗的下沉冷气流对热舒适的影响.当考虑窗表面的下沉冷气流时^[16],热舒适性将会更差.

(5) 对于一些通过计算评价房间整体热舒适的方法,当整体的PMV的绝对值小于1时,平均辐射温度的变化对人体热舒适产生的影响较小;当整体PMV值的绝对值大于1时,类似于窗口附近的平均辐射温度和总体平均辐射温度差距较大的位置,这种差异对人体热舒适的影响将会加大,那么,这种情况下,就需要考虑平均辐射温度的变化,对人体热舒适的影响,才会使对于房间内人体热舒适的评价更加准确.

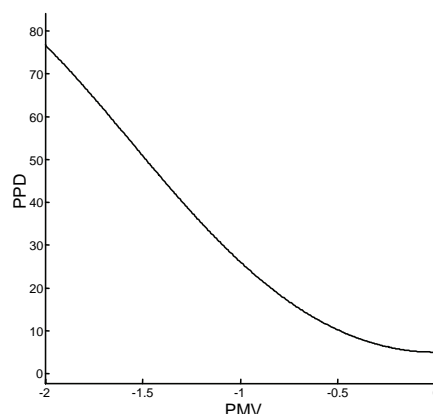


图3 PMV-PPD对应关系函数图像

Fig.3 Function diagram of PMV to PPD

参考文献 References

- [1] ISO 7730-2005 Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort[S]. Geneva: International Standards Organization, 2005: 33-35.
- [2] 申欢迎, 秦萍. 环境因素对PMV指标的影响分析[J]. 制冷与空调, 2003(3): 27-29.
SHEN Huanying, QING Ping. Analysis on the environment factors affecting the PMV index[J]. Refrigeration & Air condition, 2003(3): 27-29.
- [3] 曾光, 天永铮. 环境因素及综合因素对PMV指标的影响分析[J]. 建筑节能, 2007, 35(3): 11-16.
ZENG Guang, TIAN Yongzheng. Analysis on the environment and synthesis factors affecting the PMV index.[J]. Construction Conserves Energy, 2007, 35(3): 11-16.
- [4] 宋煦亚, 余南阳. 影响PMV的四大环境因素的敏感性分析[J]. 制冷与空调, 2007, 21(S1): 37-40.
SONG Xuya, YU Nanyang. Sensitivity analysis on four major environment factors affecting the PMV index[J]. Refrigeration & Air condition, 2007, 21(S1): 37-40.
- [5] 阎琳. 影响人体热感觉的因素的敏感性分析[J]. 安徽机电学院学报, 1998, 13(3): 12-15.
YAN Lin. Sensitivity analysis on the factors affecting human thermal sensation[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 1998, 13(3): 12-15.
- [6] 巴赫基 L. 房间的热微气候[M]. 傅忠诚, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987: 12-16.
BACHKI L. Hot micro-climate of the room.[M]. FU Zhongcheng, translated. Beijing: China Architecture & Building Press, 1987: 12-16.

- [7] 袁堂仕, 高甫省. 冬季围护结构冷辐射对人体热舒适的影响[C]//全国暖通空调制冷1998年学术会议论文集, 1998: 17-20.
YUAN Tangshi, GAO Pusheng. Influence of cold radiation on human thermal comfort in winter[C]// National HVAC Conference Proceedings 1998, 1998: 17-20.
- [8] 王昭俊, 张志强. 热舒适评价指标及冬季室内计算温度探讨[J]. 暖通空调, 2002(2): 26-28.
WANG Zhaojun, ZHANG Zhiqiang. Discussion of thermal indices and design indoor temperature for winter heating[J]. Heating, Ventilating & Air Conditioning, 2002(2): 26-28.
- [9] 刘光军, 邢世海. 围护结构冷辐射对人体热舒适的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1999(1): 59-63.
LIU Guangjun, XING Shihai. Cold radiation of a surrounding structure effect heat comfort of human body[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 1999(1): 59-63.
- [10] GAN Guohui. Analysis of mean radiant temperature and thermal comfort[J]. Building Serv. Eng. Res. Technol, 2001, 22(2): 95-101.
- [11] LYONS Peter, ARASTEH Dariush. Window performance for human thermal comfort[C]// 2000 ASHRAE Winter Meeting, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc, 2000: 5-9.
- [12] SENGUPTA Jeet, CHAPMAN Kirby S. Window Performance for Human Thermal Comfort[J]. ASHRAE 4765(RP-1162), 2000: 95-101.
- [13] ZMEUREANU R, ILIESCU S. Radiation from cold or warm windows: computer model development and experimental validation[J]. Building and Environment, 2003, 38: 427-434.
- [14] GB/T 18049-2000 中等热环境PMV和PPD指数的测定及热舒适条件的规定[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 55-60.
GB/T 18049-2000 Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 55-60.
- [15] DB23/1270-2008 黑龙江居住建筑节能65%设计标准[S]. 哈尔滨: 黑龙江省建设厅, 2008: 34-37.
DB23/1270-2008 Design standard for energy efficiency of residential buildings in heilongjiang province[S]. Harbin: Heilongjiang Provincial Department of Construction, 2008: 34-37.
- [16] HEISELBERG Per. Draught risk from cold vertical surfaces[C]// Indoor Air '93 The 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. 1993: 5-13.
- [17] 杨贤荣, 马庆芳. 辐射换热角系数手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 132-133.
YANG Xianrong, MA Qingfang. Manual of radiation heat transfer of view factors[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982: 132-133.
- [18] 麦金太尔 D A. 室内气候[M]. 龙惟定, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 204.
MCINTYRE D A. Indoor Climate.[M]. LONG Weiding, translated. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988: 204.

Effect of values of PMV/PPD caused by the change of mean radiation temperature which near window in winter

HE Mei^{1,2}, WANG Zhihang¹

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: The paper discusses the influences of human thermal comfort caused by the change of mean radiation temperature near the window in winter. According to calculations, mean radiation temperature is 3℃ lower than air temperature away from window. Human radiation temperature would be affected obviously by mean radiation temperature in the conditions of lower clothing thermal residence, air temperature and relative humidity. It would be also affected obviously when absolute value of PMV is greater than 1.

Key words: PMV; PPD; mean radiation temperature; air temperature

(本文编辑 桂智刚)