

文章编号:1003-0344(2007)02-045-6

夏季空调时 PMV 的图算和公式求解法的探讨

郑华美

(福州大学建筑学院)

摘要:为了计算夏季空调时的 PMV-PPD,分别在居室者静坐、站立或轻作业时,在相对湿度为 20%、气流速度为 0.1 m/s~0.5 m/s,室内空气温度(=平均辐射温度)为 22℃~30℃的条件下,与 PMV 的关系进行图解化。并在图解出 PMV 的基础上,导出求解不同环境条件下 PMV 的计算公式,为空调技术提供了简单计算 PMV 的方法。

关键词:预测平均投票值 空调 图算 公式

Research on Calculating Method of PMV through Nomograph and Equation under Air Conditioning in Summer

Zheng Huamei

(School of Architecture, Fuzhou University)

Abstract: In order to calculate PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) under air conditioning in summer, under the conditions of relative humidity 20% and air velocity 0.1 m/s~0.5 m/s, indoor air temperature (equal to mean radiant temperature) 22℃~30℃, PMV is nomographed when people are seated, standing, and light activity. Moreover, on the basis of this nomograph, the equation has been obtained for calculating PMV under different indoor environment in summer. It can provide simple calculating method of PMV for air conditioning technology.

Keywords: PMV, air conditioning, nomograph, equation

0 引言

舒适的空调设计,缺少不了合理的评价标准。常见的室内温湿环境评价标准有 Fanger PMV^[1-2],在我国 PMV 也是在建筑空调设计当中重要的评价指标^[3-4]。笔者详细探讨了 PMV 的热舒适方程式,明确了 PMV 使用的局限性^[5]。在实际中,确定 PMV 的方法,较为方便的是图解法,它可以一目了然,但还难于完备各种环境条件,使求解 PMV 缺乏完整性。因此,本文首先通过 PMV 热舒适方程式的计算,考察夏季空调中,室内空气温度、气流速度、相对湿度对 PMV-PPD 的影响程度,将其关系进行图解化。并在图解基础上,尝试

推导出各种室内环境条件下的 PMV 计算公式,实现图解和公式综合求解 PMV 的方法。

1 计算条件

主要根据《采暖通风与空气调节设计规范》(GB50019-2004)^[6],《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ134-2001)^[6],及《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》(JGJ75-2003)^[7]中的夏季空调设计条件,设定计算 PMV 的各参数。表 1 是具体设定的计算参数和 PMV 值相对应的冷热感尺度^[1-2]。

收稿日期:2006-6-29

作者简介:郑华美(1964~),男,博士,副教授;福州市工业路 523 号(350002);13959197621;E-mail:huamei_zheng@hotmail.com

基金项目:福州大学校科研基金资助项目(XYJ-0404)

表 1 计算条件及 PMV 值对应的冷热感尺度

参数	参数值
室内空气温度=平均辐射温度	22~30 °C
$t_a=MRT$	
气流速度 V	0.1~0.5 m/s
相对湿度 RH	20%~100%
代谢量 M	58.14(1.0), 69.77(1.2) W/m ² (met)
着衣量 Clo	0.0775(0.5) m ² K/W(clo)
PMV 值对应	-3 -2 -1 0 1 2 3
冷热感尺度	冷凉 稍凉 中立 稍暖 暖热

室内空气温度 t_a , 根据设计规范^[3], 夏季舒适性设计温度为 22 °C~28 °C, 休息室控制温度 26 °C~30 °C; 在夏热冬暖地区中, 空调设计温度为 26 °C; 在夏热冬冷地区, 空调设计温度为 26 °C~28 °C, 故室内空气温度设定为 22 °C~30 °C。平均辐射温度 MRT, 设定等于室内空气温度。气流速度 V , 舒适性空调室内的气流速度 ≤ 0.3 m/s, 活动区为 0.2 m/s~0.5 m/s, 故其计算设定为 0.1 m/s~0.5 m/s。相对湿度 RH, 舒适性范围为 40%~65%, 实际中, 绝干空气是不存在的, 因此, 相对湿度设定为 20%~100%。

代谢量 M , 按居室者的一般活动方式分: 静坐为 58.14 W/m² (1met); 站立或轻作业为 69.77 W/m² (1.2met), 并设定外界机械效率为 0。着衣量 Clo, 在夏季一般生活习惯的穿着, 设定为 0.0775 m²K/W (0.5clo)。

2 静坐时 PMV-PPD 的计算结果

2.1 气流速度对 PMV-PPD 的影响

相对湿度 20%, 不同气流速度, 静坐时室内空气温度与 PMV-PPD 的关系如图 1。图 1(a) 中, 随着气流速度的增大, PMV 呈下降趋势; 图 1(b) 中, PMV 负值的 PPD 呈上升趋势, 正值的呈下降趋势。室内空气温度 30 °C 时, 气流速度 0.1 m/s 的 PMV-PPD 约为 1.25%~38%, 气流速度 0.5 m/s 的 PMV-PPD 下降为 0.88%~21%, 感觉在“稍凉”上下, 气流影响 PMV-PPD 最大幅度 0.37%~17%。室内空气温度 22 °C, 气流速度 0.1 m/s、0.5 m/s 的 PMV-PPD 分别为 -1.62%~57%、-2.74%~97%, 感觉“(稍)凉”到“冷”附近, 气流影响 PMV-PPD 幅度在 1.12%~40%。满意率最高 PPD 约为 5% 的室内空气温度约在 26.5 °C~28 °C。

2.2 相对湿度对 PMV-PPD 的影响

图 2 是气流速度为 0.1 m/s, 相对湿度为 20%~100%, 室内空气温度对 PMV-PPD 的关系。随着相对湿度的增大, 从图 2 (a) 可知, PMV 呈上升趋势;

PMV 负值的 PPD 呈下降趋势, 正值的呈上升趋势, 如图 2(b)。室内空气温度 30 °C, 相对湿度 20%、100% 的 PMV-PPD 分别为 1.25%~38%、2.15%~83%, 变化幅度 0.90%~45%; 室内空气温度为 22 °C, 相对湿度 20%、100% 的 PMV-PPD 分别为 -1.62%~57%、-1.06%~29%, 变化幅度 0.56%~28%。满意率最高的室内空气温度, 约在 24.5 °C~26.5 °C。

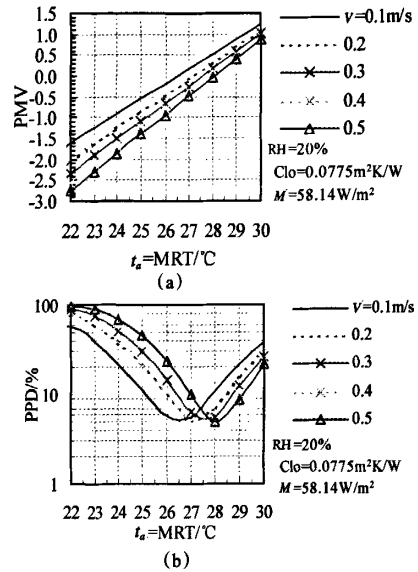


图 1 静坐, 各气流速度条件下室内空气温度对 PMV-PPD

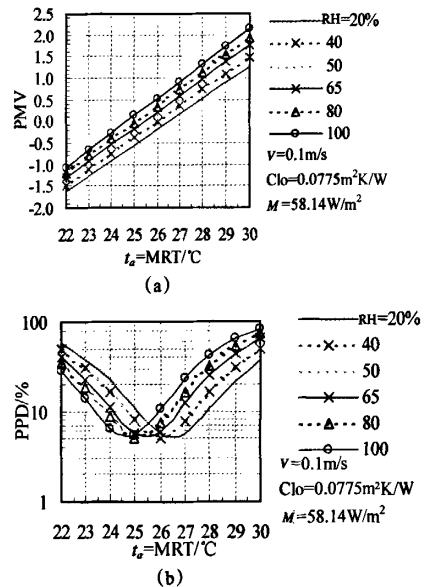


图 2 静坐, 各相对湿度条件下室内空气温度对 PMV-PPD

图 2(a)仅仅表示了气流速度 0.1 m/s,不同相对湿度条件下,室内空气温度与 PMV 的关系。从图中看出,相对湿度间隔 20%、10%或 15%变化,PMV 似乎呈一定差值的变化。假如能够找出相对湿度发生单位变化时,PMV 变化量的函数关系,那么便可推算在某一定环境下其它相对湿度下的 PMV。在此提出相对湿度变化所能产生 PMV 变化的梯度概念。即:在某一定室内空气温度和气流速度的环境内,相对湿度每增加 1%,所产生 PMV 的变化量,定义为相对湿度 PMV 梯度,用 ΔPMV 表示,单位与 PMV 相同。

2.3 气流速度 0.1 m/s 时的 ΔPMV

根据 ΔPMV 定义,对图 2(a)中,气流速度 0.1 m/s、室内空气温度 22℃~30℃条件下,计算两相邻相对湿度间各室内空气温度下的 ΔPMV ,再求其均值 $\Delta PMV_{0.1}$ 。图 3 是各室内空气温度与 $\Delta PMV_{0.1}$ 的关系。图中“x”为各室内空气温度下的 $\Delta PMV_{0.1}$,曲线是其指数回归线, R^2 为前两者的相关系数,公式为指数回归线的方程式:

$$\Delta PMV_{0.1} = 0.0018 \cdot e^{0.0609t_a} \quad (1)$$

式中, $\Delta PMV_{0.1}$ 为气流速度 0.1 m/s 的相对湿度 PMV 梯度; t_a 为室内空气温度,℃; e 为自然数 2.718。

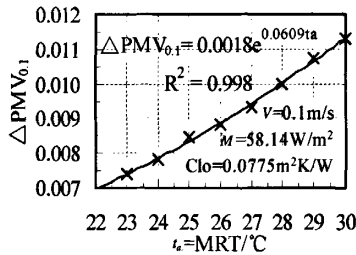


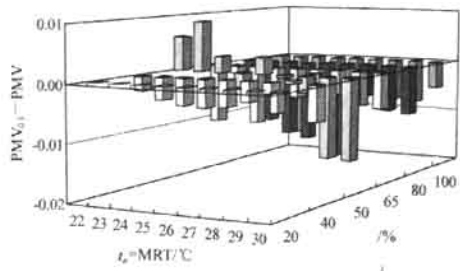
图 3 气流速度 0.1m/s 时,室内空气温度对 $\Delta PMV_{0.1}$

那么,由式(1)按相对湿度 PMV 梯度的定义,以相对湿度 20%的 PMV 为准,可得出气流速度 0.1 m/s,其他相对湿度的 PMV 计算式:

$$PMV_{0.1} = PMV_{20} + (RH - 20)\Delta PMV_{0.1} \quad (2)$$

式中, $PMV_{0.1}$ 为气流速度为 0.1 m/s、室内空气温度为 22℃~30℃时的 PMV; PMV_{20} 为相对湿度为 20%的 PMV; RH 为相对湿度,20%~100%。

图 4 是按式(2)计算出的 $PMV_{0.1}$ 与图 2(a)计算出各 PMV 的差。从图 4 可知,计算结果最大精度差在 +0.01~-0.02 之间。所以,可按公式(2)计算出图 2(a)中没有标明的相对湿度大于 20%条件下的 PMV。



$$V=0.1\text{m/s}, Clo=0.0775\text{m}^2\text{K/W}, M=58.14\text{W/m}^2$$

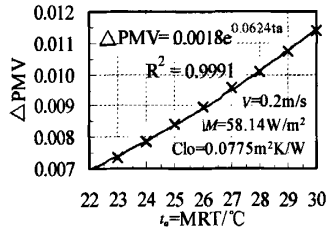
图 4 $PMV_{0.1}$ 与 PMV 计算精度差

2.4 各气流条件下的 ΔPMV

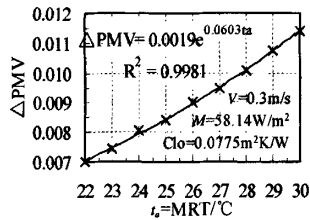
同理可导出图 1(a)中,气流速度 0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s,相对湿度 20%~100%时,室内空气温度与 ΔPMV 的关系,如图 5。它们的回归方程式,可共同表示为:

$$\Delta PMV = A \cdot e^{Bt_a} \quad (3)$$

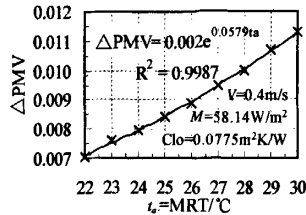
式中, A 、 B 指数方程式的常数项。



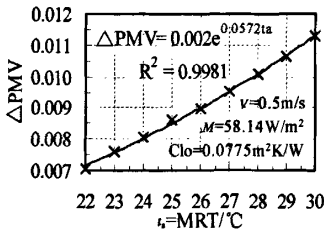
(a) V = 0.2 m/s



(b) V = 0.3 m/s



(c) V = 0.4 m/s



(d) $V = 0.5 \text{ m/s}$

图5 静坐时,室内空气温度对 ΔPMV

A、B常数和相关系数 R^2 , 以及它们的平均值, 见表2。从表2中可知, 相关系数均值 $R^2=0.9984$, 几乎接近于最大值1, 表明指数方程式计算具有可靠性。那么, 气流速度 $0.1 \text{ m/s} \sim 0.5 \text{ m/s}$, 室内空气温度 $22 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 夏季静坐时的 ΔPMV 可表示为:

$$\Delta PMV_{ss} = 0.0019e^{0.05974t_a} \quad (4)$$

根据定义, 得出夏季空调静坐时 PMV 计算式:

$$PMV_{ss} = PMV_{20\%} + (RH - 20)\Delta PMV_{ss} \quad (5)$$

将公式(4)代入公式(5)得:

$$PMV_{ss} = PMV_{20\%} + 0.0019(RH - 20)e^{0.05974t_a} \quad (6)$$

式中, PMV_{ss} 为夏季空调静坐, 气流速度 $0.1 \text{ m/s} \sim 0.5 \text{ m/s}$ 、室内空气温度 $22 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境下的 PMV; $PMV_{20\%}$ 为相对湿度 20% 的 PMV, 即图 1(a) 中图算出的 PMV; RH 为相对湿度, 20%~100%; t_a 为室内空气温度, $22 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

已知 PMV_{ss} , 根据式(7)^[9], 将 PMV_{ss} 代入 PMV 便可算出相应的 PPD。

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2)} \quad (7)$$

表2 静坐时 ΔPMV 指数方程中的常数

气流速度 V m/s	$\Delta PMV = A \cdot e^{Bt_a}$		
	A	B	R^2
0.1	0.0018	0.0609	0.998
0.2	0.0018	0.0624	0.9991
0.3	0.0019	0.0603	0.9981
0.4	0.0020	0.0579	0.9987
0.5	0.0020	0.0572	0.9981
平均值	0.0019	0.05974	0.9984

综上所述, 先由图 1(a) 确定相对湿度 20% 条件下, 气流速度 $0.1 \text{ m/s} \sim 0.5 \text{ m/s}$, 室内空气温度 $22 \text{ }^\circ\text{C} \sim$

$30 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的某一条件的 $PMV_{20\%}$, 按式(6)和(7), 便可算出相对湿度 RH 时的 $PMV_{ss} - PPD$ 。特别说明, $PMV_{ss} - PPD$ 是应用图算和公式综合求解的结果。Fanger PMV-PPD 是必须通过微机计算。两者只是计算值存在精度差, 而内涵是相同的。两者的差值在 $+0.01 \sim -0.02$ 之间。

3 站立或轻作业时 PMV-PPD 的计算结果

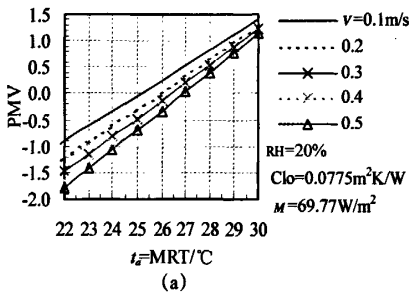
上节中详细叙述了夏季空调, 居室者静坐时, 室内空气温度、气流速度和相对湿度对 PMV-PPD 的影响程度, 并以相对湿度 20% 的 PMV 为准, 导出了简单的计算 PMV 的指数方程式。本节讨论居室者在站立或轻作业 (代谢量 $M=69.77 \text{ W/m}^2$) 时的 PMV-PPD 和 ΔPMV 的指数方程式。

3.1 气流速度对 PMV-PPD 的影响

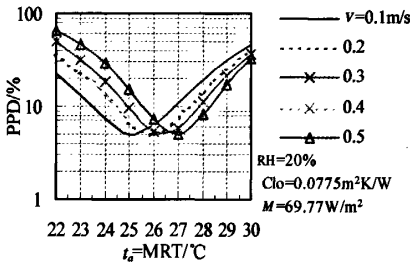
相对湿度 20%, 不同气流速度条件下, 室内空气温度与 PMV-PPD 的关系, 如图 6。图 6(a) 中, 随着气流速度的增大, PMV 呈下降趋势。PMV 负值的 PPD 呈上升趋势, 正值的呈下降趋势, 如图 6(b)。室内空气温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 气流速度 0.1 m/s 、 0.5 m/s 的 PMV-PPD 分别为 $1.41\% \sim 46\%$ 、 $1.14\% \sim 32\%$, 感觉在“(稍)暖”之内, 气流对 PMV-PPD 影响的幅度最大值为 $0.27\% \sim 14\%$ 。室内空气温度 $22 \text{ }^\circ\text{C}$, 气流速度 0.1 m/s 、 0.5 m/s 的 PMV-PPD 分别为 $-0.90\% \sim 22\%$ 、 $-1.79\% \sim 67\%$, 感觉在“(稍)凉”之内, 气流对 PMV-PPD 的影响幅度最大值为 $0.89\% \sim 45\%$ 。满意率最高时的室内空气温度约在 $25 \text{ }^\circ\text{C} \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 相对速度对 PMV-PPD 的影响

图 7 是气流速度 0.1 m/s , 相对湿度 20%~100% 室内空气温度与 PMV-PPD 的关系。结果可知, 随着相对湿度的增大, PMV 呈上升趋势, 见图 7(a), PMV 负值的 PPD 呈下降趋势, 正值的呈上升趋势见图 7(b)。室内空气温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 20%、100% 的 PMV-PPD 分别为 $1.41\% \sim 46\%$ 、 $2.17\% \sim 84\%$, 相对湿度对 PMV-PPD 的影响幅度为 $0.76\% \sim 38\%$ 。室内空气温度 $22 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 20%、100% 的 PMV-PPD 分别为 $-0.90\% \sim 22\%$ 、 $-0.43\% \sim 9\%$, 相对湿度的变化对 PMV-PPD 影响幅度为 $0.47\% \sim 13\%$ 。满意率最高的室内空气温度约在 $23 \text{ }^\circ\text{C} \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围。

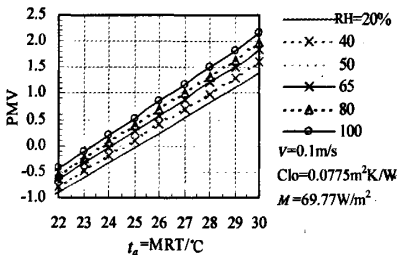


(a)

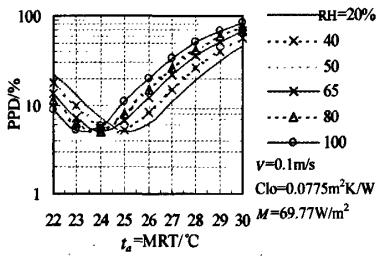


(b)

图 6 站立或轻作业,各气流速度条件下室内空气温度对 PMV-PPD



(a)

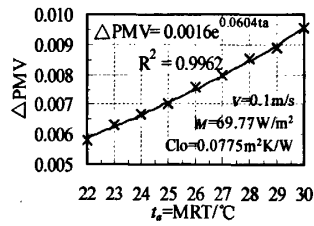


(b)

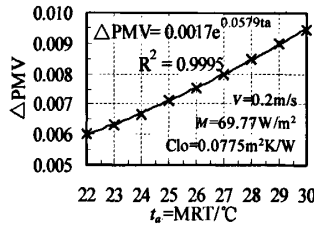
图 7 站立或轻作业,各相对湿度条件下室内空气温度对 PMV-PPD

3.3 各气流条件下的 ΔPMV

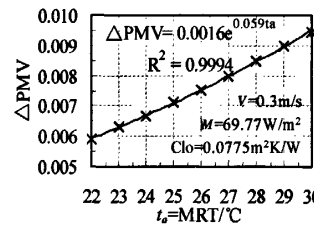
根据 ΔPMV 的定义,可推导出在气流速度 0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s 的条件下相对湿度 20%~100% 时室内空气温度与 ΔPMV 的关系,如图 8。它们的回归方程式与公式(3)相同。



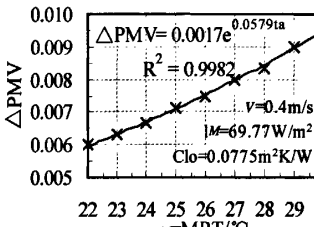
(a) V=0.1 m/s



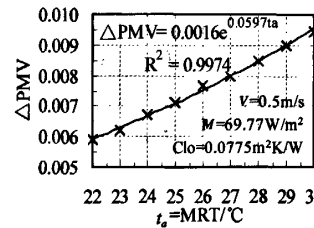
(b) V=0.2 m/s



(c) V=0.3 m/s



(d) V=0.4 m/s



(e) V=0.5 m/s

图 8 站立或轻作业时,室内空气温度对 ΔPMV

表 3 是指数方程式中 A、B 常数和相关系数

R^2 及均值。从表 3 中可知,相关系数 $R^2=0.9981$, 同样得到高计算精度指数方程式。气流速度 0.1 m/s~0.5 m/s, 室内空气温度 22 °C~30 °C 的条件下, 夏季空调, 站立或轻作业的 ΔPMV 可用式(8)表示:

$$\Delta PMV_{sd} = 0.00164e^{0.05898t_a} \quad (8)$$

同样根据定义, 得出夏季空调, 站立或轻作业 PMV 的计算公式:

$$PMV_{sd} = PMV_{20d} + 0.00164(RH - 20)e^{0.05898t_a} \quad (9)$$

式中, PMV_{sd} 为夏季空调, 站立或轻作业条件下, 气流速度 0.1 m/s~0.5 m/s、室内空气温度 22 °C~30 °C 时的 PMV ; PMV_{20d} 为相对湿度 20% 的 PMV , 即图 6(a) 中的图算 PMV ; 其它符号与公式(6)相同。

将 PMV_{sd} 代入式(7)中 PMV , 算出相应 PPD 。图 6(a) 中各气流速度, 相对湿度 20%~100% 下的 PMV , 与通过公式(9) 计算得出的 PMV_{sd} 的差均在 +0.02 和 -0.01 之间。

表 3 站立或轻作业时 ΔPMV 指数方程中的常数

气流速度 V m/s	$\Delta PMV = A \cdot e^{Bt_a}$			R^2
	A	B		
0.1	0.0016	0.0604		0.9962
0.2	0.0017	0.0579		0.9995
0.3	0.0016	0.0590		0.9994
0.4	0.0017	0.0579		0.9982
0.5	0.0016	0.0597		0.9974
平均值	0.00164	0.05898		0.9981

4 结语

在夏季使用空调时, 探讨了相对湿度、气流速度、室内空气温度对 $PMV-PPD$ 的影响程度。分别在居室者静坐、站立或轻作业情况下, 气流速度 0.1 m/s~0.5 m/s、相对湿度 20% 条件下, 将室内空气温度(等于平均辐射温度)22 °C~30 °C 与 $PMV-PPD$ 的关系进行图解化, 并在该图解出 PMV 的基础上, 分别导出了静坐、站立或轻作业时, 求解 PMV 的计算式, 为空调技术提供了简单计算 PMV 的方法。

参考文献

- [1] 涂光备. 医院建筑空调净化与设备 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [2] GB50333-2002 医院洁净手术部建筑技术规范 [S]. 北京: 中华人民共和国国家标准, 2002
- [3] 许钟麟. 空气洁净技术原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2003

- [4] 赵彬. 室内颗粒运动和分布的模拟方法 [A]. 见: 2005 年全国暖通空调专业委员会空调模拟分析学组学术交流论文集 [C], 2005. 224-241
- [5] 郑华美. 建筑室内温热环境的预计冷热感指标 PMV 的探讨 [J]. 福州大学学报(自然科学版). 2005, 33(4): 496-500
- [6] JGJ134-2001 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [7] JGJ75-2003 夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003

符号说明

符号	说明	单位
A	指数方程常数	—
B	指数方程常数	—
Cl_o	着衣量	$m^2K/W(clo)$
M	代谢量	$W/m^2(met)$
MRT	平均辐射温度	°C
PMV	预计冷热感指标	—
$PMV_{0.1}$	气流速度 0.1 m/s 静坐时的 PMV	—
PMV_{20}	相对湿度 20% 的 PMV	—
PMV_{20s}	静坐时相对湿度 20% 的 PMV	—
PMV_{20d}	站立或轻作业时相对湿度 20% 的 PMV	—
PMV_{ss}	夏季空调静坐时的 PMV	—
PMV_{sd}	夏季空调站立或轻作业时的 PMV	—
ΔPMV	相对湿度变化 1% PMV 的梯度	—
$\Delta PMV_{0.1}$	气流速度 0.1 m/s 时的 ΔPMV	—
ΔPMV_{ss}	夏季空调静坐时的 ΔPMV	—
ΔPMV_{sd}	夏季空调站立或轻作业时的 ΔPMV	—
PPD	预计不满率	%
R	相关系数	—
RH	相对湿度	%
t_a	室内空气温度	°C
V	气流速度	m/s

· 书讯 ·

书 名: 建筑节能技术指南

作 者: 李汉章

出版社: 中国建筑工业出版社

出版时间: 2006 年

定 价: 48 元

内容简介: 该书是一本融建筑节能市场、技术、标准、管理以及政策法规于一体的建筑节能的专业工具书。全书由七章和附录组成, 其中介绍建筑节能概念的第一章概述, 第二章评估; 介绍建筑节能物化成果的第三章技术、第四章产品、第五章建筑; 介绍建筑节能管理信息的第六章管理和第七章展望; 附录中收录了国家建筑节能标准以及湖北省及武汉市的地方标准和案例等文件。