

基于极值判优的热环境综合评价方法探讨

陈雷, 黄晨, 任荣

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 设定服装热阻和人体能量代谢率为定值, 以 $PMV=0$ 为依据, 建立室内热环境单指标空气温度、相对湿度和风速标准参数库, 以此获得基于标准参数的单指标无量纲值, 采用极值判优概念构建了综合评价矩阵, 进而建立表征各单指标权重的判断矩阵, 以获得黑球温度与空气温度差为定值时影响室内热环境的空气温度、湿度、风速三个参数的权重, 加权各指标无量纲值, 得出综合评价值。据此对一组实测结果采用综合评价方法进行热环境评价, 获得空气温度权重为 0.815, 风速为 0.1, 湿度为 0.085。综合评价结果与 PMV 评价结果具有良好的线性关系, 其相关系数接近 0.9。通过对比分析可知, 论文所提出的热环境综合评价方法可以反映实际室内热环境舒适性。

关键词: 热环境; 标准参数; 极值判优; 权重; 综合评价方法

中图分类号: TU831.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-8449(2010)02-0017-05

0 引言

影响室内热湿环境的因素较多。为此, 人们一直在寻求简便、且能综合多种因素的评价指标, 来简化热湿环境的评价。迄今为止, 国内外对于热环境的评价指标有很多, 国际上通用的 ISO7730 是评价室内热环境最常用的热舒适标准^[1], 该标准阐述了丹麦工业大学 Fanger 教授提出的既考虑客观因素又考虑主观因素的 $PMV-PPD$ 的评价方法。 PMV 综合了空气温度 t_a 、空气相对湿度 ψ 、平均辐射温度 θ_{ra} 、空气风速 v 、服装热阻 I_{cl} 以及人体能量代谢率 M 六个影响人体热舒适的客观物理因素; PPD 表示了人群对热环境的不满意率, ISO 7730 推荐: 对某一环境处于热舒适时应满足 $-0.5 < PMV < +0.5$, 即此时 $PPD < 10\%$ 。此外, 上世纪初还有学者提出了综合空气温度、湿度、速度的有效温度指标 ET , 以后学者 Gagge 提出了综合空气环境参数、衣着、活动量因素的标准有效温度指标 SET ^[2], 由于其计算复杂, 一直未得到很好地推广与应用。空气分布特性指标 $ADPI$ 是综合考虑室内空气温度和风速来评价室内热环境分布的均匀性; 而作用温度又是一个综合室内对流和辐射的一个空气环境参数, 并用此参数作为热舒适性评价的依据^[3]。上述诸类指标以及评价方法, 或以

人体热平衡方程为基础或以实验结果为依据。上世纪末许多学者提出了建立模糊评判模型来评价室内热环境。2001 年, 连之伟等以地板空调送风房间为对象, 综合 4 个室内热环境主要影响因素(环境温度、风速、相对湿度、平均辐射温度), 建立了热舒适模糊综合评判模型^[4]; 2006 年, 阮秀英等应用模糊数学的方法建立室内环境多级模糊综合评价模型, 综合了室内热环境、声环境以及光环境等因素对环境进行评价^[5]。上述两位学者均从模糊数学的角度出发建立模型, 其中各影响因素权重的确定均采用德尔斐法, 即专家评议法。本文亦基于模糊评价方法, 从统计学角度出发, 采用判断矩阵分析法确定各因素的权重, 对其子评价参数建立标准参数库, 从而建立基于标准参数评优的热环境综合评价方法, 并用该方法评价实际室内热环境。

1 综合评价方法原理

综合评价方法是综合多个指标对某一对象或特性进行评价的一种方法。此方法的关键是确定不同指标的权重, 通过确定的权重计算得出多个指标的综合评

价值,然后分析得出被评价对象或特性的优劣。

1.1 权重确定方法

设有 n 个评价指标组成对全体 m 个方案的评价指标样本集为 $\{x(i,j)|i=1\sim n,j=1\sim m\}$, 评判指标优劣一般有两种判优方法: 1) 指标值越大, 被评价对象越优; 2) 指标值越小, 被评价对象越优。由于各指标值大小不一, 指标之间的加权不在同一个基准上, 为综合评价方法首先将各指标转换为同一基准下的标准化处理, 上述两种指标判优的无量纲化处理可采用下式计算获得。即越大判优和越小判优的标准化计算方法如公式(1)和公式(2)^[6]:

$$r(i,j)=\frac{x(i,j)}{x_{\max}(i)+x_{\min}(i)} \quad (1)$$

$$r(i,j)=\frac{x_{\max}(i)+x_{\min}(i)-x(i,j)}{x_{\max}(i)+x_{\min}(i)} \quad (2)$$

由上述处理后获得的各指标标准值组成了评价矩阵 $R=[r(i,j)]_{n \times m}$, 为便于对比各影响因素的影响程度, 设构造用于确定各评价指标权重的 1~9 级判断尺度的判断矩阵 $B=(b_{ij})_{n \times n}$, 其元素 b_{ij} 可按照下式计算:

$$b_{ij}=\frac{1}{\frac{S(i)-S(j)}{S_{\max}-S_{\min}}(b_m-1)+1} \quad S(i)<S(j) \quad (3)$$

$$b_{ij}=\frac{S(i)-S(j)}{S_{\max}-S_{\min}}(b_m-1)+1 \quad S(i)\geq S(j) \quad (4)$$

其中 $S(i)=\left\{\sum_{j=1}^m[r(i,j)-\bar{r}_i]^2/m\right\}^{0.5}$, $b_m=\min[9, \text{int}(S_{\max}/S_{\min}+0.5)]$ 。利用上述获得的判断矩阵 $B=(b_{ij})_{n \times n}$, 可计算各评价指标权重 W_i , 即^[7]:

$$M_i=\prod_{j=1}^n b_{ij} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (5)$$

$$\bar{W}_i=\sqrt[n]{M_i} \quad (6)$$

$$W_i=\frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad (7)$$

1.2 一致性检验及其综合评价方法

为使各指标判断结果协调一致, 不致出现相互矛盾的结果, 需对上述判断矩阵进行一致性检验。判断矩阵一致性检验指标 CI 作为表征判断矩阵偏离完全一致性的程度, 其计算式为:

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i} \quad (8)$$

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \quad (9)$$

式中 n —评价指标的个数;

B —判断矩阵;

W —权重矩阵;

λ_{\max} —判断矩阵的最大特征值。

CI 值越小, 说明判断矩阵的一致性越好, 反之, 判断矩阵的一致性越差。但对于不同指标个数即其阶数的判断矩阵, 判断的一致性误差不同, 其 CI 值的要求也不同。因此, 衡量不同阶判断矩阵是否具有满意的一致性, 还需引入判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 值。对于 1~9 阶判断矩阵, RI 参考值可见表 1。

表 1 平均随机一致性指标 RI 值

判断矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI 参考值	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

判断矩阵的一致性指标 CI 与同阶平均随机一致性指标 RI 的比值称为随机一致性比率, 记作 CR 。当随机一致性比率 $CR=\frac{CI}{RI}<0.10$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性。

在满足一致性的前提下, 利用上述得出的各指标的权重对指标值加权得到综合评价值 $z(j)$, 其数学表达式为:

$$z(j)=\sum_{i=1}^n W_i r(i,j) \quad (j=1\sim m) \quad (10)$$

综合评价方法的实质是将各指标评价值合成为一个指标值, 即加权平均各指标值, 其关键是确定表征各指标相对重要程度的权重。首先要根据各指标的特性, 将实际指标值无量纲化处理, 得到相对评价值, 然后根据判断矩阵得出各指标的权重系数, 从而最终获得综合指标值 $z(j)$, 综合指标值 $z(j)$ 越大说明第 j 个方案越优, 其最大值为 1。

2 综合评价方法在热环境评价中的应用

评价室内热环境的主要参数有空气温度、湿度、风速和辐射温度等。为便于综合这些影响因素获得单一的热环境评价值, 本文借助一组热环境实测数据应用上述综合评价方法, 综合室内热环境各评价参数获得对实测热环境的综合评价, 并将综合评价与 PMV 评价结果进行对比分析, 进而获得改进型综合评价方法。

2.1 热环境实测结果

本文所引用的热环境实测结果来自于某一大空间建筑夏季分层空调时热环境的实验结果。实验结果表

明,在室内中心点高度为 1.7m 处的热环境参数可以表征室内居住域内的热环境参数^[8],为此本文采用 1.7m 处的热环境参数测定结果应用于热环境综合评价,图 1 为 37 个不同工况下的室内空气温度、湿度、风速、黑球温度的现场测定结果。

2.2 综合评价方法存在的问题

由于通常的综合评价方法是采用越大越优和越小越优两种方法进行判优,为此本文尝试各指标值越小越优的方法,并借助热环境经典评价参数 PMV 作为方法判优的依据,应用上述综合评价方法获得如图 2 所示为综合评价结果与 PMV 方法计算结果的比较,图中采用了上述 37 个热环境测定结果绘制。

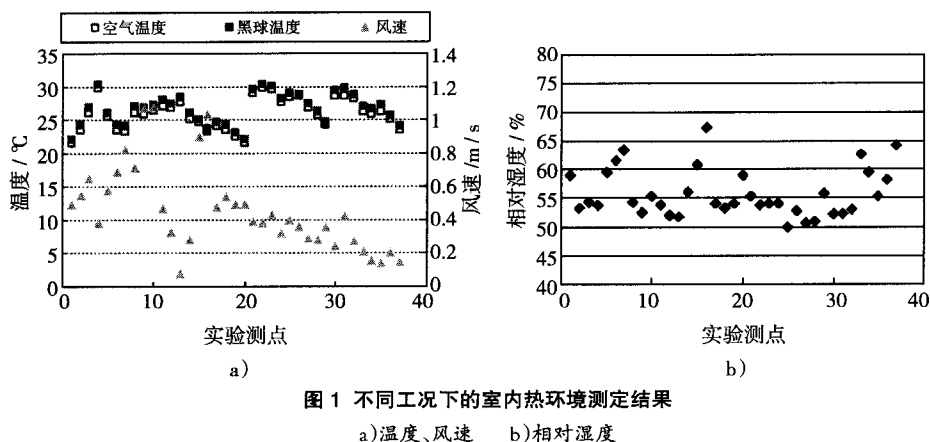


图 1 不同工况下的室内热环境测定结果
a) 温度、风速 b) 相对湿度

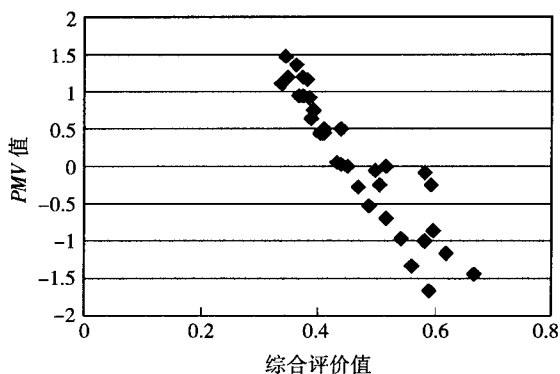


图 2 综合评价与 PMV 绝对值的对比

PMV 评价值是目前公认物理意义明确的热舒适评价指标,从图 2 中可以看出,综合评价结果和 PMV 值呈线性关系,相关性很好。但当 PMV 为正值时,综合评价结果随 PMV 降低而增加,表明热环境朝舒适方向变化,这与 PMV 变化规律相符;当 PMV 为负值时,综合评价结果随 PMV 降低而增加,表明热环境也是朝舒适方向变化,这与 PMV 变化规律相反,即综合评价方法判据与 PMV 判据结果不同,综合评价方法存在着不合理

判断的区域。因此,各指标参数采用越小越优的单值变化规律并不合适,如何将各指标实测值进行标准化处理,直接影响到最终的综合评价值。

2.3 极值判优标准化处理

主要影响热环境的空气温度、湿度、风速三个参数具有不同的量纲和范围,若要得到综合评价值,需对各参数进行无量纲处理。从式(1)和式(2)中可以看出,指标参数的标准化结果与其实测数值的最大、最小范围有关,不同的实验,其结果不同。同时,影响热环境的各参数并非越大越好,也不是越小越优,比如空气温度夏季空调时设定为 26℃ 时最佳,比此值大则不舒适,比此值小不节能,即空气温度判优并不能用最小判优和

最大判优的方法进行判断,实际上在评判对象特性优劣时,其判据存在着极值最优的情况。因此,首先应确定各评价参数达到最佳热舒适($PMV=0$)时的标准值,并以此为基准来对指标参数进行无量纲化处理,从而确定各指标的权重。影响空调室内热环境的主要因素有空气温度 t_a 、空气流速 v 、空气湿度 ψ 以及环境平均辐射温度 t_{mrt} 。其中空气温度与环境平均

辐射温度存在着一定的关联,为避免这种关联对综合评价的影响,本文设立前三个因素(即三个热环境评价指标)作为综合评价的指标集。假定黑球温度与空气温度存在着特定的温差,并定义此温差为黑空温差 DT 。以 ISO7330 标准中 $PMV=0$ 为基准,服装热阻 I_{cl} 取 0.5clo ($1\text{clo}=0.155\text{m}^2\cdot\text{°C/W}$),人体能量代谢率取 1.2met ,人体做功取 0W/m^2 ,通过设定不同的 DT ,计算确定各环境参数标准值,从而建立了如表 2 所示的热环境标准参数库,表中 t_{mrt} 是根据黑空温差、空气温度、湿度、风速等参数计算得到。

表 2 热环境标准参数库

$DT, \text{°C}$	$t_a, \text{°C}$	$v, \text{m/s}$	$\psi, \%$	$t_{mrt}, \text{°C}$
0	26	0.300	51.5	26.00
0.5	25.5	0.300	55	26.67
1	25	0.300	59	27.34
1.5	24.5	0.300	62.5	28.00
2	24	0.300	66.5	28.67

定义过剩参数为实测值与标准参数的差值的绝对值。其数学表达式为:

$$\bar{x}(i,j)=|x(i,j)-x_b(i,j)| \quad (11)$$

式中 $x(i,j)$ —实测值;

$x_b(i,j)$ —标准参数。

当评价指标为标准参数时最优,即极值判优。过余参数值越小,说明实测参数与标准参数越接近,热环境越舒适,因此可对过余参数进行越小越优标准化处理,从而获得三个指标在无因次量纲内同一个基准下的评价矩阵 $R(i,j)$ 。

2.4 基于极值判优的热环境综合评价结果及分析

下面以黑空温差 $DT=0$ 为例进行分析计算。由综合评价方法原理利用公式(3)和(4)得到衡量各指标权重的判断矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 1.00 & 8.86 & 9.00 \\ 0.11 & 1.00 & 1.14 \\ 0.11 & 0.88 & 1.00 \end{bmatrix}$$

利用公式(5)~(7)便可获得不同 DT 下各单指标的权重系数,其结果见表3。

表3 各指标值的权重

$DT, ^\circ\text{C}$	0	0.5	1	1.5	2	平均值
$w(\text{温度})$	0.817	0.810	0.817	0.818	0.813	0.815
$w(\text{湿度})$	0.096	0.073	0.089	0.090	0.079	0.085
$w(\text{风速})$	0.087	0.117	0.094	0.092	0.108	0.100

利用式(8)和式(9)求解得到最大特征根为: $\lambda_{\max}=3.00145$ 。一致性指标 $CI=0.000724$, 随机一致性比率 $CR=0.0012<0.1$, 因此判断矩阵有很好的-致性。

从表3中可以看出,不同 DT 的各指标权重并不相同。总体看来, DT 对各指标权重的影响不大,其中温度的权重最大,其次是风速,湿度对于热环境综合评价的影响相对较小。加权各指标值利用公式(10)得到综合评价值 $z(j)$,图3为不同工况计算获得的综合评价值与 PMV 值的对比图。

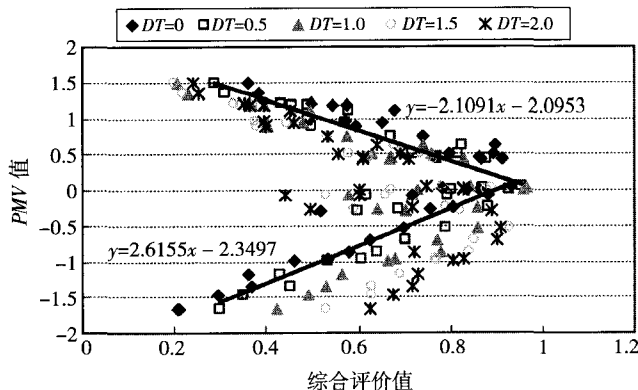


图3 综合评价值与 PMV 的对比

从图3中可以看出,不同 DT 下的综合评价结果基本趋于一致。综合评价值在 PMV 正值区和负值区分别与 PMV 成线性关系。以 $DT=0.5$ 为例,分别拟合 $PMV>0$ 和 $PMV<0$ 时 PMV 与综合评价值的关系,其相关系数分别为 -0.94 和 0.88 ,相关性良好,如图中两条直线所示,此时其标准差分别为 0.16 和 0.28 。当 PMV 值为正时,综合评价值越大, PMV 越小,热环境越舒适;当 PMV 值为负时,综合评价值越大, PMV 越大,越接近于 0 ,热环境越舒适,完全与实际相符,说明本文提出的热环境综合评价方法适用热环境的评价。但与 PMV 值比较,综合评价值还难以判断冷热倾向,因此还有待于今后进一步研究。

3 结语

(1)论文以空气温度、相对湿度和风速三个指标为例,通过理论分析,借助热环境实测结果,尝试了综合评价方法在热环境评价中的应用,应用结果发现,综合评价方法中采用单值判优的标准化处理思想不适合室内热环境的评价。

(2)通过对热环境各指标参数实际判优分析,建立以 $PMV=0$ 为依据的热环境标准参数库,并以极值判优的标准化处理方法构建了热环境过余参数指标,应用综合热环境评价方法思想,建立了相应评价矩阵、指标权重等参数。

(3)利用一组实测数据,采用极值判优的标准化处理,通过一致性检验后,获得服装热阻 I_a 为 0.5clo ,人体能量代谢率为 1.2met 时,指标空气温度权重为 0.815 ,风速为 0.1 ,湿度为 0.085 。

(4)采用基于极值判优的热环境综合评价方法对37个工况的热环境实测结果进行评价,获得与 PMV 吻合的综合评价值,在 PMV 正值区和负值区具有良好的线性关系,以 $DT=0.5$ 为例,其相关系数分别为 -0.94 和 0.88 。其标准差分别为 0.16 和 0.28 。

基于标准参数评优的热环境综合评价方法可利用实测结果以及所建立的标准参数库,应用极值判优标准化处理,便可获得综合评价值,其方法层次清晰、计算简单。但与 PMV 值相比,无法判断冷热结果,为此,还有待于今后深化研究。

参考文献:

- [1] ISO7730, Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort[S].
- [2] GAGGE A P. A standard predictive index of human response to the thermal environment[J]. ASHRAE Trans, 1986, 92(2):709~731.

- [3] 黄晨. 建筑环境学[M]. 北京:机械工业出版社,2005-09.
- [4] 连之伟, 冯海燕. 空调房间热环境模糊综合评判 [J]. 暖通空调, 2001,31(5).
- [5] 阮秀英,丁力行,等. 室内环境的多级模糊综合评价方法[J]. 制冷空调与电力机械,2006,116(28).
- [6] 王硕,张礼兵,等. 系统预测与综合评价方法[M]. 安徽:合肥工业大学出版社,2006-12.

- [7] 杜栋,庞庆华,等. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2008-06.
- [8] 贾玉凤. 展厅建筑室内热环境设计参数分析及探讨 [D]:[硕士学位论文]. 上海:上海理工大学,2008.

收稿日期:2009-12-30

修回日期:2010-02-02

Discussion on Comprehensive Evaluation Method Based on Extremal Judgement

CHEN Lei, HUANG Chen, REN Rong

(School of Environment and Architecture, Shanghai Technological University, Shanghai 200093, China)

Abstract: Data bank of standard parameters of the air temperature, relative humidity and air velocity for thermal comfort were established, based on $PMV=0$ when clothing thermal resistance and energy metabolism in the human body were set to be constant. The dimensionless quantities for single target was obtained based on the data bank and comprehensive evaluation matrix was constructed, and then the judgment matrix to signify single target was established, so that the weight of the three parameters of air temperature, relative humidity and air velocity under different black-bulb temperature and air temperature differences was obtained. This comprehensive evaluation method was applied for a group of measured data, which showed the weight of air temperature was 0.815, the weight of air velocity was 0.1, and the weight of relative humidity was 0.085. The comprehensive evaluation method and the PMV evaluation were good linear relation and its coefficient of correlation was near 0.9. Through relative analysis, the comprehensive evaluation method on thermal environment mentioned in this paper could reflect the actual comfort of the indoor thermal environment.

Key words: thermal environment; extremal judgement; standard parameters; weight; comprehensive evaluation method

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.50478113)和上海市教委重点学科(No.J50502)。

作者简介: 黄 晨(1958-),女,上海人,教授,主要从事大空间建筑室内热环境方面的研究;
陈 雷(1985-),男,山东人,硕士,研究方向:大空间喷口送风室内热环境研究。

(上接第 29 页)

Experimental Investigation on a Cold Display Cabinet with Environment Air Supply

SUN Ying¹, YU Ke-zhi², CHEN Tian-ji²

(1. Liaoning Research & Design Institute of Food and Refrigeration, Shenyang 110031, China;

2. Department of Refrigeration Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to solve the high power consumption of conventional display cabinet, a vertical display cabinet with environment air supply (VDCEAS) was established. Compared with the conventional vertical display cabinet (CVDC), the experimental findings showed that it has better energy-saving performance than the CVDC. VDCEAS can introduce the outdoor cold air for refrigerating, so it save much of the energy consumption. However, the application of VDCEAS is limited by environment temperature.

Key words: display cabinet; power consumption; velocity; temperature

作者简介: 孙 莹(1969-),女,辽宁人,学士,工程师,研究方向:制冷与节能的方法探讨。