

基于个性化桌面空气调节对人体热舒适影响的数值模拟

龙杰 刘益才¹ 王宇迪 朱晓涵

(中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 针对统一环境条件下热舒适不满意的受试者, 桌面通风可以根据不同人的需求, 以其灵活的送风温度和风速使人体热舒适达到要求。本文在26℃的背景温度下, 分别调节送风温度为20℃、22℃、24℃、26℃, 风速为0.15m/s、0.25m/s、0.35m/s、0.45m/s、0.55m/s。研究桌面通风中不同送风温度温度和风速对人体热舒适的影响, 并得出不同送风温度下的和风速适宜区间为(20℃, 0.15m/s~0.35m/s), (22℃, 0.15m/s~0.35m/s), (24℃, 0.25m/s~0.45m/s), (26℃, 0.35m/s~0.55m/s)。

关键词: 个性化 空气调节 数值模拟 热舒适

Numerical Simulation of the Effect of Personalized Desktop Air Conditioning on Human Thermal Comfort

Long jie liuYicai Wang yudi Zhu xiaohan

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: For subjects with uncomfortable thermal comfort under uniform environmental conditions, the desktop ventilation can meet the needs of different people, and the thermal comfort temperature of the body and the wind speed can meet the requirements of human thermal comfort. In this paper, under the background temperature of 26 °C, the air supply temperature was adjusted to 20 °C, 22 °C, 24 °C, and 26 °C, respectively. The wind speed was 0.15m/s, 0.25m/s, 0.35m/s, 0.45m/s, 0.55m/s. Study the effects of different supply air temperature and wind speed on human thermal comfort in desktop ventilation, and find that the appropriate range of wind speeds at different air supply temperatures is (20 °C, 0.15m/s~0.35m/s), (22 °C., 0.15 m/s~0.35 m/s), (24 °C., 0.25 m/s~0.45/s), (26 °C., 0.35 m/s~0.55 m/s).

Keywords: personalization air conditioning numerical simulation thermal comfort

0. 引言

目前, 对空调热舒适的研究基本限于全房间空气系统。现一般采用 P.O.Fanger 提出的 PMV-PPD 作为评价方法。该方法包含了四个环境因素: 空气温度、空气流速、空气湿度及平均辐射温度, 两个主观因素: 人的新陈代谢率和着衣量。在统一环境因素下, 以此方法制定的室内环境设计标准是以受试者整体满意率>80%而确定的, 而剩余 20%的受试者则很难同时达到热舒适要求。针对这一问题, 个性化通风通过改变送风温度和速度, 使每个人根据自己的需求调节送风参数, 从而达到舒适度要求。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776226); 中南大学研究生自主探索创新项目资金资助(2018zzts494)

作者简介: . 刘益才 (1968-), 男, 教授, E-mail: lyccsu@csu.edu.cn

1. 研究现状

国内外对个性化通风都有一定研究。**Hanzawa** 使用旋流风口的结构进行地板送风的热舒适的测试, 测试结果表明旋流风口极大的降低了吹风感, 可以为处于工作区的人群供舒适的环境。**Bauman** 发现, 在低送风量下, 人体周围产生了剧烈温度梯度, 如果送风量较大, 人体周围空气温度更为均匀。实验结果表明通过调节送风量和送风方向就能得到较好的热舒适度。**端木琳**在固定送风距离和送风温度的情况下比较了不同送风速度对人员舒适性的影响。**S.H.Cho** 对比研究了地板系统和桌面系统两种形式的个性化空调认为, 桌面工位空调优于地板工位空调并且调节更为灵活。**Arens** 设计了一种对个性化桌面调节系统, 通过研究发现该系统可以在一个较大的范围内控制局部热环境, 只要通过微小的空气流量改变, 也能使处于工作的人群的热舒适性达到要求。工作者可以根据个人需及调节能力的不同, 控制个性化空调的输出参数, 最大限度地满足个人对热环境的不同需求。

2. 理论基础

本文热舒适判定由预测平均评价 **PMV(Predicted Mean Vote)**和预测不满意百分比 **PPD(Predicted Percent Dissatisfied)** 作为理论基础, 通过公式推导找到 **PPD** 和送风温度以及送风速度得关系。

PMV 评价指标是引入反应人体热平衡偏离程度的人体热负荷 **TL** 而得出的, 它是基于人体处于稳态热环境下, 人体热负荷越大, 人体偏离热舒适的状态就越远。即人体热负荷正值越大, 人就感觉越热, 负值越大, 人就感觉越冷。**Fanger** 得出了人的热感觉与人体热负荷之间的经验关系式:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275] \times \{M - W - 3.05[5.733 - 0.007(M - W) - \\ P_a] - 0.42(M - W - 58.2) - 0.0173M(5.867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - \\ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c(t_{cl} - t_a) \} \quad (1) \end{aligned}$$

其中,

M—新陈代谢率, **W/s**;
W—人体做功率, **W/s**;
P_a—环境空气中水蒸气分压力, **Pa**;
t_a—空气温度, **℃**;
f_{cl}—穿衣人体与裸体表面积之比;
 \bar{t}_r —平均辐射温度, **℃**;
t_{cl}—穿衣人体外表面平均温度
h_c—对流换热系数, **W/(m² · K)**

表1 PMV热感觉标尺

| 热感觉 | 热 | 暖 | 微暖 | 适中 | 微凉 | 凉 | 冷 |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| PMV 值 | +3 | +2 | +1 | 0 | -1 | -2 | -3 |

忽略除对流换热系数**h_c**和空气温度**t_a**以外的参数。而对流换热系数**h_c = $\frac{\lambda N_u}{l}$** , **N_u**可用经验公式计算:

$$N_u = 0.3 + \frac{0.62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{2}}}{[1+(0.4/Pr)^{\frac{1}{3}}]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{28200} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (2)$$

其中 $Re = \frac{pvd}{\mu}$ ，由此得到空气流速 v 和传热系数 h_c 的关系式。从而可以把空气温度 t_a 和空气流速 v 反映到 PMV。但是因为人与人之间存在个体差异，所以仅凭 PMV 指标来评价个人感受并不准确。所以 Fanger 又提出了不满意百分比 PPD(Predicted Percent Dissatisfied) 指标来表示受试者对环境不满意率得百分数。PPD 与 PMV 有以下关系：

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PVM^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (3)$$

因而预测不满意率 PPD 指标是本文热舒适判定的理论依据。

3. 数值模拟

3.1 物理模型

- (1) 房间：5m（长）×4m（宽）×3m（高）；
- (2) 人体模型：胸部 0.4m(宽)×0.4m（高）×0.2m(厚)的椭圆柱体；颈部为Ø0.16m（直径）×0.1m（高）的圆柱体；头部为Ø0.2m（直径）×0.2m（高）的圆柱体。
- (3) 进风口在一送风管风口正对人体模型胸颈连接处，距离为 1m，离地面 0.8m，尺寸为 0.15 m（宽）× 0.15m（高）的正方形。
- (4) 排风口尺寸为 0.3m（宽）× 0.3m（高）的长方形，距地面 2.7m。

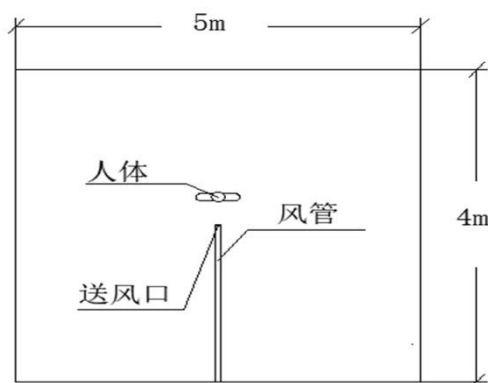


图1 办公室尺寸

3.2 网格

网格划分采用非结构法，数量为 67258，网格质量均为 0.4 以上，且 80% 的大于 0.8。网格质量较好。

3.3 边界条件

雷诺数为 $Re = 3497$ ，故为湍流进行稳态求解。

墙壁材料为 200mm 粘土砖墙，外面 25mm 普通砂浆，内表面 25mm 绝热砂浆，导热系数为 $1.5W/m^2 \cdot K$ 。风管边界良好保温材料，边界条件设为绝热。人体设为 $34W/m^3$ 的体热源。进风口设为速度入口，出风口设为压力出口。房间背景温度为 299K，空气湿度为 55%~60%。

3.4 模拟工况

如表 2~表 5 所示，为保证单一变量，每个送风温度下对应应有 5 种工况，总共 20 组工况。

表 2. 送风温度为 20℃时的模拟工况

| | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 送风速度（m/s） | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 0.45 | 0.55 |
| 送风温度 20℃ | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 | 工况 4 | 工况 5 |

表 3. 送风温度为 22℃时的模拟工况

| | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|-------|
| 送风速度（m/s） | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 0.45 | 0.55 |
| 送风温度 22℃ | 工况 6 | 工况 7 | 工况 8 | 工况 9 | 工况 10 |

表 4. 送风温度为 24℃时的模拟工况

| | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 送风速度（m/s） | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 0.45 | 0.55 |
| 送风温度 24℃ | 工况 11 | 工况 12 | 工况 13 | 工况 14 | 工况 15 |

表 5. 送风温度为 26℃时的模拟工况

| | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 送风速度（m/s） | 0.15 | 0.25 | 0.35 | 0.45 | 0.55 |
| 送风温度 26℃ | 工况 16 | 工况 17 | 工况 18 | 工况 19 | 工况 20 |

3. 4 模拟结果分析

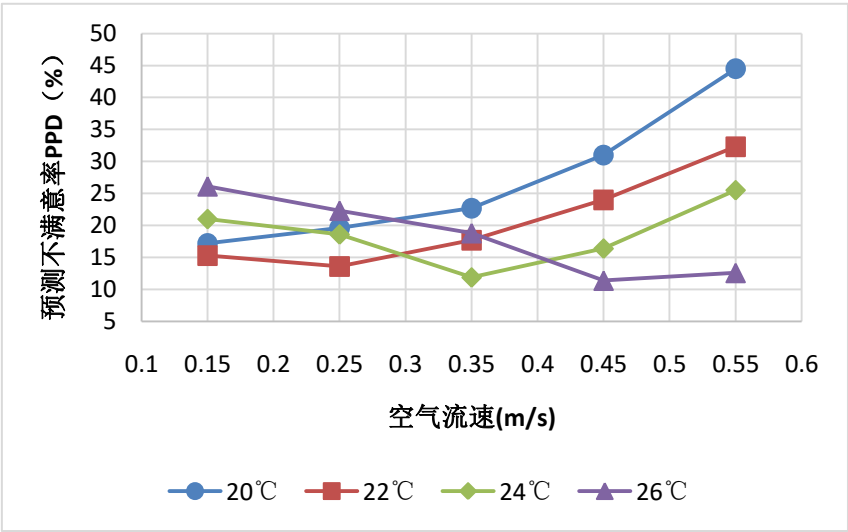


图 2. 各工况下的预测不满意率（PPD）

送风温度为 20℃时，随着风速的增大不满意率上呈上升趋势，且斜率越来越大，只有 0.15m/s~0.25m/s 时不满意率满足要求。所以送风温度为 20℃时的适宜送风速度为 0.15m/s~0.25m/s。

送风温度为 22℃时，随着风速的增大不满意率上呈先减小后增大的趋势，转折点出现在 0.25m/s 处。0.15m/s~0.35m/s 时满足不满意率要求,风速超过 0.35m/s 之后不满意率不符合要求。所以送风温度为 22℃时的适宜送风速度为 0.15m/s~0.35m/s。

送风温度为 24℃时，随着风速的增大不满意率也是呈先减小后增大的趋势，转折点出现在 0.35m/s 处。其中 0.25m/s~0.45m/s 时满足不满意率要求,风速超过 0.45m/s 之后不满意率急速上升且不符合要求。所以送风温度为 24℃时的适宜送风速度为 0.25m/s~0.45m/s。

送风温度为 26℃时，随着风速的增大不满意率整体上呈减小的趋势。但值得注意的是，在风速为 0.55m/s 时虽然不满意率仍然符合要求，但是呈现了上升趋势，说明此后继续增大风速的话，满意率会继续上升。综上，送风温度为 26℃时的适宜送风速度为 0.35m/s~0.55m/s。

4. 结论

个性通风对改善人体热舒适有着较好的效果,加入个性通风之后,整体预测不满意率在全空间通风不满意率的基础上再降低 80%,即预测不满意率(PPD)降到 4%以下。对于不同送风温度,有着以下适宜送风速度:

- (1)空气温度 20℃, 对应适宜风速为 0.15m/s~0.25/s;
- (2)空气温度 22℃, 对应适宜风速为 0.15m/s~0.35/s;
- (3)空气温度 24℃, 对应适宜风速为 0.25m/s~0.45/s;
- (4)空气温度 26℃, 对应适宜风速为 0.35m/s~0.55/s。

参考文献

- [1]Melikov A K. Advanced air distribution: improving health and comfort while reducing energy use.[J]. Indoor Air, 2015, 26(1):112-124.
- [2]Edwards W B, Troy K L, Bhatia V A. Predicting surface strains at the human distal radius during an in vivo loading task - Finite element model validation and application[J]. Journal of Biomechanics, 2014, 47(11):2759-65.
- [3]Oh M S, Ahn J H, Dong W K, et al. Thermal comfort and energy saving in a vehicle compartment using a localized air-conditioning system[J]. Applied Energy, 2014, 133(6):14-21.
- [4]De D R. Thermal comfort in practice[J]. Indoor Air, 2004, 14(s7):32-39.
- [5]Melikov A K, Cermak R, Majer M. Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices[J]. Energy & Buildings, 2002, 34(8):829-836.
- [6]朱颖心. 建筑环境学-第 2 版[M]. 中国建筑工业出版社, 2005.
- [7]端木琳, 沈胜强, 孙宇明. 个性化通风系统的热舒适性分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(2):31-37.
- [8]王骏顺. 桌面送风对人体热舒适影响的分析及研究[D]. 湖南大学, 2008.
- [9]李俊. 个体送风特性及人体热反应研究[D]. 清华大学, 2004.
- [10]李伟涛. 桌面工位空调舒适性实验及气流组织模拟研究[D]. 大连理工大学, 2006.