

空调环境下吊扇对热舒适影响的研究

王晓倩 刘益才¹ 毕麟 刘绍文

(中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 针对空调使用情况下室内温度分布不均和垂直温差较大的问题, 采用控制变量法对空调设定温度和风扇使用工况下受试者坐姿状态 1.1m 处的温度和风速进行测量, 并对工况下受试者的热感觉、热舒适及热可接受度投票进行统计分析, 发现在空调设定温度一定的情况下, 合理的使用吊扇可以增加热可接受度, 改善室内热环境, 满足人体对热舒适的需求, 提高工作学习效率, 为夏季室内空调的使用和吊扇的开启提供了参考。

关键词: 吊扇; 热舒适; 热环境; 问卷调查

Research on the Effect of Ceiling Fan on Thermal Comfort in Air Conditioning Environment

Wang xiaoqian Liu Yicai Bi lin Liu shaowen

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

Abstract : In view of the problem of uneven indoor temperature distribution and large vertical temperature difference in the use of air conditioners. The control variable method was used to measure the temperature and wind speed at 1.1m in the seated state of the subjects under the conditions of air conditioning set temperature and fan use conditions. The statistical analysis of the subjects' thermal sensation, thermal comfort, and hot acceptability vote under working conditions was conducted. It was found that with a certain set temperature of the air conditioner, a reasonable use of the ceiling fan can increase the thermal acceptability, improve the indoor thermal environment, meet the human body's need for thermal comfort, and improve work efficiency. It provides a reference for the use of indoor air conditioning in summer and the opening of ceiling fans.

Key words: ceiling fan; thermal comfort; thermal environment; questionnaire survey

0 前言

随着生活水平的提高, 无论是住宅建筑还是办公建筑, 空调的使用率已经逐年增加。生活中, 人大约有 90% 的时间都处于室内, 室内热环境与人的健康密切相关, 然而空调设定温度的不合理不仅浪费能源, 而且会导致人体的舒适程度降低, 这也是引发“空调病”的主要因素, 因此室内的热环境亟待提高。现阶段调节室内热环境, 提高人体热舒适程度的主要手段是通过空调, 而传统空调只是单一的控制室内温度、创造稳定恒温的热中性(不冷不热)环境, 由于热扩散的影响, 导致温度在室内分布不均, 垂直高度上温差较大, 降低了人体的热感觉和热舒适程度。

本文研究在夏季空调开启的情况下, 增加吊扇对人体热感觉和热舒适程度的影响。

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(2018zzts491)

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

1. 研究现状

1986年, Fanger 和 Christensen 对 100 名受试者进行冷吹风试验, 研究了温度、冷吹风感以及人体满意率之间的关系^[1]; 清华大学的赵荣义教授分析了热舒适与热感觉的不同含义, 并讨论了两者在稳态和动态条件下的差别^[2]; 华南理工大学的张宇峰教授与清华大学的赵荣义教授对 30 名受试者采用问卷调查的方式, 研究了均匀热环境和不均匀热环境下人体全身热感觉、热可接受度和热舒适的关系^[3]; Son H. Ho, Luis Rosario 等人采用吊扇来研究速度、温度和相对湿度的分布, 进而改善热舒适^[4]; Chen, WH 等人从风扇转速、风扇叶片几何形状、天花板至扇形深度以及天花板高度四个方面系统地研究了安装有吊扇的空置办公室中的空气流动分布^[5]; Babich, F 等人通过比较使用不同 URANS 湍流模型获得的模拟结果与受控环境中收集的测量数据, 开发和验证印度典型吊扇的三维瞬态隐式 CFD 模型, 结果表明这种吊扇模型能够复制风扇产生的气流的主要特征^[6]。综上所述, 本文研究是否在使用吊扇的情况下, 通过改变空调设定温度, 同时测试人周围的温度及风速, 采用主观问卷调查的方式进一步研究吊扇对热舒适的影响。

2. 理论基础

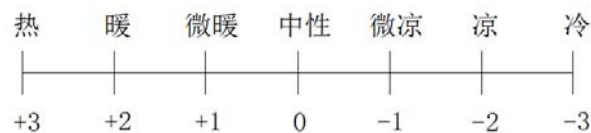
2.1 人体主观热反应

本文采用主观问卷调查的方式直接询问受试者对室内热环境的评价^[3], 包括被广泛使用的热感觉投票 TSV(Thermal Sensation Vote)、热舒适投票 TCV(Thermal Comfort Vote)以及热可接受度投票 TAV(Thermal Accepted Vote)。三种指标的关系决定着热舒适最佳状态的定义和可接受范围的确定, 且都是对热环境的客观评价与主观意识不同程度的综合体现。

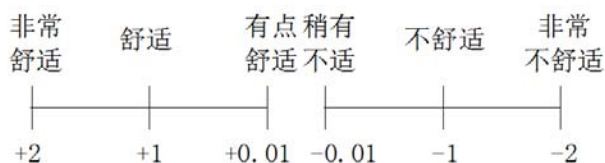
(一) 热感觉投票 TSV: 热感觉是人体对周围环境是“冷”还是“热”的主观描述。人对热环境的感受通过皮肤下面的神经末梢感受到冷热刺激, 并侧重心理上的主观描述。将人体感受到的冷热感觉设置成某种等级标度, 让受试者根据这些标度结合实际感觉进行投票。热感觉标尺采用 ASHRAE7 点标尺(见图 1a)。

(二) 热舒适投票 TCV: 热舒适是人体通过自身的热平衡和感觉到的环境状况综合起来是否获得舒适的感觉。它是由生理和心理共同决定的, 且更偏重于心理上的感觉。根据 ASHRAE 标准中对热舒适的定义, 可知热舒适投票是人对热环境感到满意的意识状态, 强调对热舒适性的主观评价。热舒适投票采用 Zhang 开发的断裂标尺(见图 1b)。

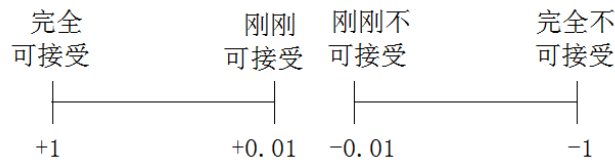
(三) 热可接受度投票 TAV: 热可接受度是人体对周围环境的满意度。室内的热舒适研究将热可接受范围定义为热感觉为稍凉、中性、稍暖的状态。热可接受度投票采用一种最初用于室内空气质量调查的可视化模拟标尺(见图 1c)。



a. 热感觉投票标尺



b.热舒适投票标尺



c.热可接受度投票标尺

图 1 投票标尺

2.2 控制变量

考虑到空气温度是影响人体热感觉和热舒适程度的重要环境参数^[7],本实验采用控制变量法,首先从主观上研究在不同的空调设定温度下,是否开启吊扇对人体热感觉、热舒适及热可接受度的影响;然后从客观上分析不同工况下人所处坐姿时 1.1m 处的温度和风速,提出既能够改善热舒适,又可以实现节能的策略。

3 实验方法

3.1 实验装置

2017 年 7 月对中南大学能源楼的某一办公室进行了实验研究,该办公室的几何尺寸为 6.0m(长)×6.0m(宽)×3m(高),北立面有两扇推拉外窗几何尺寸为 2.0m(宽)×1.5m(高),室内放置一台格力分体落地式空调,室内布置 8 个办公位,正中间布置一吊扇,具体布置见图 2。

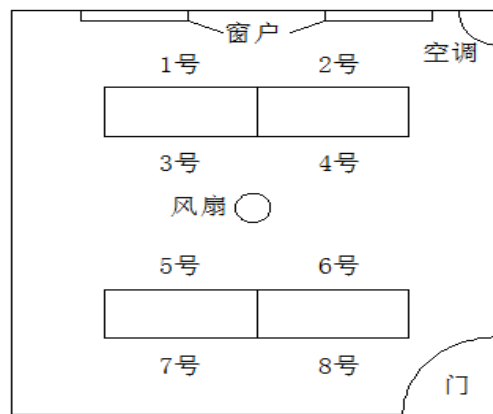


图 2 实验测试布置图

3.2 实验工况

本文基于 2017 年 7 月的测试数据进行研究,室外环境各参数变化范围分别为:温度 32~37℃,湿度 60~80%,室外风速 0.3~0.5m/s。本实验要求全部的受试者穿夏装(短裤和短袖,服装热阻大约 0.3clo^[2])参加主观问卷。考虑到受试者从一个实验温度进入到另一个温度时,需要一段时间使自身生理状况适应新的环境条件,本文将适应期定为 30 分钟^[8]。在环境温度适应期间,受试者只能静坐在办公桌前,不能进行较剧烈的活动,因此人体的新陈代谢率定为 1.2met。

根据 ASHRAE Standard 55-2010^[8]中空调建筑可接受的热环境区域, 空调设定温度分别取 25℃、26℃、27℃, 在考虑吊扇的开启对室内气流的扰动的影响, 分别进行了不同工况下各办公位的温度、风速测量和主观问卷调查, 具体实验工况见表 1。在实验进行之前, 先让室内的空调按设定温度 25℃运行 30min, 当室内环境进入稳态中, 受试者填写问卷调查, 然后根据设定的工况改变设置条件, 受试者适应后继续填写问卷调查。在空调运行的过程中, 工作人员利用红外测温仪和多参数通风表定时定点测量八个工位距地面 1.1m 处的温度和风速, 每隔 5 分钟测量一次。

表 1 测试工况条件设置

工况	空调设定温度/℃	是否开窗	是否开风扇
1	25℃	否	否
2	25℃	否	是
3	26℃	否	否
4	26℃	否	是
5	27℃	否	否
6	27℃	否	是

3.3 主观热反应调查问卷

本文采用热感觉投票 TSV、热舒适投票 TCV 和热可接受度投票 TAV 三个指标来反映人体的主观热反应。热感觉投票采用 ASHRAE 7 点标尺(见图 1a);热可接受度投票采用一种最初用于室内空气质量调查的可视化模拟标尺(见图 1b);热舒适投票采用 Zhang 开发的断裂标尺^[11](见图 1c), 以便让受试者在舒适和不舒适间作出明确的判断。受试者在适应期后对室内热环境的投票时间不少于 5 分钟。

基于对受试者热舒适与热感觉进行主观调查的基础上, 设计了热舒适调查问卷。该问卷包括以下 5 个部分^[7]:

- (1) 受试者基本信息: 办公位、年龄、身高、体重、着装、活动情况;
- (2) 实验时间: 日期、开始时间、结束时间;
- (3) 热感觉: 热 (+3), 较热 (+2), 稍热 (+1), 适中 (0), 稍冷 (-1), 较冷 (-2), 冷 (3);
- (4) 热舒适: 非常舒适 (+2), 舒适 (+1), 有点舒适 (+0.01), 稍不舒适 (-0.01), 不舒适 (-1), 非常不舒适 (-2);
- (5) 热可接受: 完全可接受 (+1), 刚刚可接受 (+0.01), 刚刚不可接受 (-0.01), 完全不可接受 (-1)。

为了保证热舒适问卷调查结果的准确性, 在实验开始之前先让受试者仔细阅读问卷的内容, 并对各部分内容(尤其是(3)-(5))进行详细解释, 使受试者充分了解调查问卷的内容。

4. 数据分析

4.1 主观投票分析

为了保证实验结果不受办公位的影响, 每位受试者在填写问卷的过程中, 只待在同一办公位, 并对 6 种实验工况进行多次实验, 将每位受试者每种工况下的热感觉、热舒适及热可接受度投票值多次测试取均值, 具体结果见图 3、4、5。

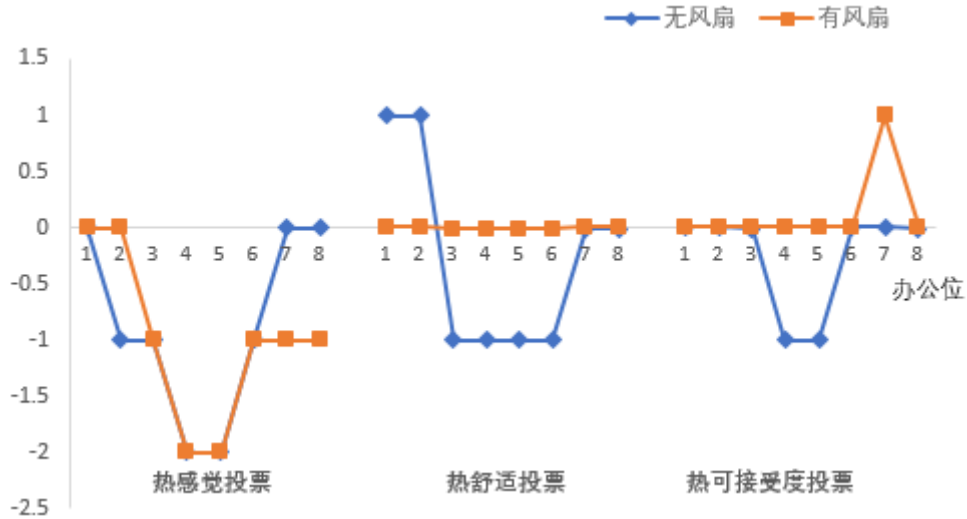


图3 工况一、二（25℃）热感觉、热舒适、热可接受度投票

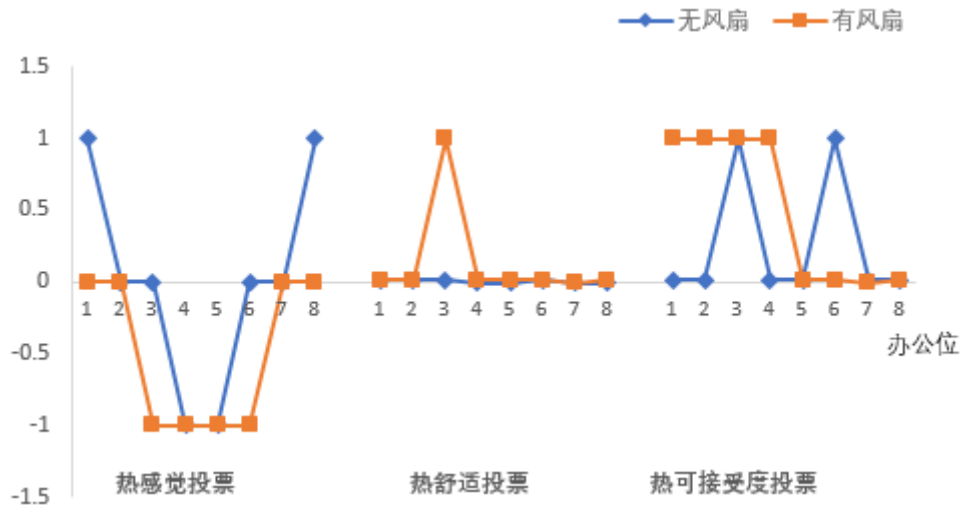


图4 工况三、四（26℃）热感觉、热舒适、热可接受度投票

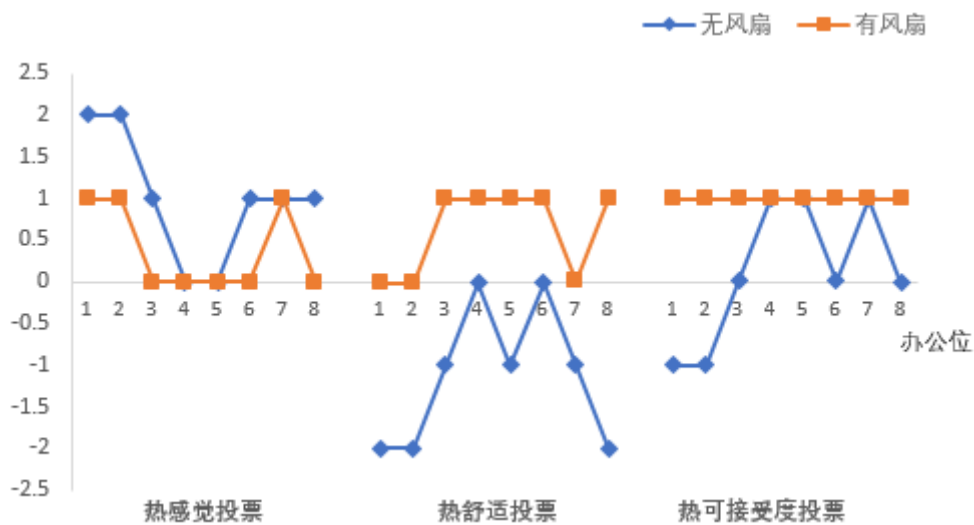


图5 工况五、六（27℃）热感觉、热舒适、热可接受度投票

进一步比较工况，我们可以发现：

- (1) 从图4中可看出，不开启吊扇时空调设定温度为26℃，人工作区域的舒适性更好；从

图 5 可看出，吊扇的加入使人体感觉舒适的温度提升到 27℃，这可能是由于吊扇可以使冷热气流互相更好的掺混，提高了人体对室内环境舒适程度的感知温度，同时还可以降低空调的能耗。

(2) 从图 3、4、5 中，可以整体的看出吊扇的加入改善了室内的热环境，主观调查的热感觉、热舒适、热可接受度投票值都有一定程度的提高，更能满足人体对热舒适的需求，可以提高工作学习效率。

4.2 客观数据分析

采用红外测温仪和多参数通风表记录八个工位在各工况运行时的温度和风速，多次测量取均值，具体见表 2。

表 2 各工况运行时各办公位 1.1m 处温度和速度

办公位	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	
温 度 °C	1	26.6	25.9	27.5	26.5	28.1	27.6
	2	26.5	25.6	27.1	26.5	27.9	27.5
	3	25.7	25.5	26.5	26.6	27.3	27.1
	4	24.9	25.8	25.5	26.4	26.3	27.3
	5	25.5	25.8	26.0	26.5	27.1	27.3
	6	25.1	25.6	26.2	26.5	27.5	27.4
	7	25.6	25.3	26.5	26.6	27.5	27.3
	8	26.2	25.9	26.6	26.7	27.8	27.3
风 速 m/ s	1	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02	0.03
	2	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02	0.03
	3	0.01	0.06	0.01	0.05	0.01	0.04
	4	0.09	0.06	0.08	0.05	0.09	0.04
	5	0.05	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04
	6	0.02	0.06	0.01	0.04	0.03	0.04
	7	0.01	0.06	0.01	0.05	0.01	0.03
	8	0.03	0.06	0.02	0.05	0.02	0.02

从表 2 中可以看出：

(1) 在无吊扇的情况下，工位 1 和工位 2 的温度普遍偏高，这可能是因为邻近外墙和外窗，受太阳直射，工位 4 和工位 5 的风速普遍偏高，这可能是由于正处于空调吹风口，而工位 8 温度高风速大，可能是因为门缝外的热空气渗入导致的。

(2) 吊扇的加入，加强了室内气流的扰动，使冷热气流互相更好的掺混，室内的温度和风速分布比较均匀，减小了头脚温差大和冷吹风感对人体的影响。

4. 结论

通过对某办公室的分体式空调和吊扇的使用情况进行工况组合，客观分析各办公位工作区域温度和速度的分布，结合主观对室内热环境的热感觉、热舒适及热可接受度投票值，可以发现：

(1) 加入吊扇后实验测得的温度和风速与主观问卷调查的结果一致，可以充分说明在合理设定空调温度时，吊扇可以改善室内热舒适。

(2) 吊扇的使用可以使室内冷热气流均匀的掺混，改善了室内不同办公位人员的舒适感，

降低了垂直温差太大和冷吹风感造成的不适,而且可以获得更高空调设定温度的相同水平的舒适度,还可以降低空调的能耗。

(3) 在空调设定温度一定的情况下,合理的使用吊扇可以降低室内环境的热感觉,提高热舒适,增加热可接受度,改善室内热环境,满足人体对热舒适的需求,提高工作学习效率。

参考文献

- [1] P O Fanger , et al. The impact of turbulence on draught. Proceedings of the Meeting of XVII International Congress of Refrigeration, 1987.
- [2] 赵荣义.关于热舒适的讨论[J].暖通空调,2000,30(3):25-26.
- [3] 张宇峰, 赵荣义. 均匀和不均匀热环境下热感觉、热可接受度和热舒适的关系*[J].暖通空调, 2007, 37(12):25-32
- [4] Son H. Ho, Luis Rosario, Muhammad M. Rahman *, Thermal comfort enhancement by using a ceiling fan, Applied Thermal Engineering .29 (2009) 1648–1656
- [5] Chen, WH, et al. Experimental and numerical investigations of indoor air movement distribution with an office ceiling fan [J]. Building and environment.USA.2017,130(14-26)
- [6] Babich, F , Cook, M, et al. Transient three-dimensional CFD modelling of ceiling fans[J]. Building and environment. England: Loughborough Univ.2017,123(37-49)
- [7] 刘蔚巍. 人体热舒适客观评价指标研究[D].上海: 上海交通大学, 2007
- [8] ASHRAE. ASHRAE Standard 55-2010. Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- [9] 阮芳, 宋凯华, 王晓倩等. 吊扇对分体式空调器热舒适性及能耗的影响 [J].制冷与空调,2016,16(9):54-57.
- [10] ISO 7730. Moderate thermal environments- Determination of the PMV and PPD indices and the specification of conditions for thermal comfort, 2nd ed, Geneva, International Standards Organization, 1994
- [11] Yongchao Zhaia , b , Yufeng Zhang a , b * , Hui Zhang b , Wilmer Pasut b , c , Edward Arens b , Qinglin Menga , Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans, Building and Environment 90 (2015) 178-185
- [12] Rohles F, Konz S, Jones B. Ceiling fans as extenders of the summer comfort envelope. ASHRAE Trans 1983;89(1):245-263.