

# 强化室内空气流动以改善热舒适的节能研究

天津大学 嵇贊 ■ ★ 涂光备

**摘要** 基于热舒适实验,研究了提高室内空气流速对人体热舒适的改善程度以及空气流速的合理取值。研究结果表明,可以通过提高空气流速保持室内标准有效温度  $SET^*$  不变,从而可适当提高室内温度、相对湿度的设定值,达到节能的目的。以天津地区为例,分析结果表明,空调运行时间大大缩短,直接蒸发冷却方式的利用率得到提高。

**关键词** 空气流速 热舒适 问卷调查 标准有效温度 蒸发冷却 节能

## Energy saving research on strengthening indoor air movement to improve thermal comfort

By Ji Yunzhe★ and Tu Guangbei

**Abstract** Based on a thermal comfort experiment, studies the influence of increasing air velocity on human thermal comfort and the proper air velocity. The results show that  $SET^*$  (standard effective temperature) could remain unchanged by increasing air velocity, thereby the design values of temperature and relative humidity could be properly increased to save energy. Taking Tianjin as an example, analyzing results show shorter operation period for air conditioning systems and higher utilization ratio for direct evaporative cooling mode.

**Keywords** air velocity, thermal comfort, questionnaire, standard effective temperature, evaporative cooling, energy saving

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

### 0 引言

空调室内环境参数的设定,不仅直接影响室内人员的热舒适感,还影响空调能耗的大小。在保证室内人员热舒适的前提下,尽可能减少空调能耗是热舒适研究的主要目的之一。目前大多数空调设计室内参数的设定都参照 ASHRAE 标准 55—1981 推荐的夏季的舒适区。根据 ASHRAE 标准,舒适区内干球温度的最大值为 26 ℃,湿球温度的最大值为 19 ℃,以此为室内空气的设定指标,在我国大部分地区会导致空调设备容量较大、运行时间过长,并缩短了蒸发冷却这种较节能的制冷方式的使用时间。对天津地区室外气象资料进行统计发现,在 6~9 月(共 2 928 h),需要使用空调的时间为 2 024 h(按室外空气干球温度或湿球温度高

于舒适区最大值计),约占所统计时间的 69.1%;因为只有室外空气的湿球温度不高于舒适区内最大湿球温度值 19 ℃时,才可能采用直接蒸发冷却,统计结果表明仅有 286 h 符合要求,约占空调使用时间的 9.8%,而且在最热的 7,8 两月,可以采用直接蒸发冷却的时间几乎为零,见表 1。

已有的研究表明热环境中人体的热舒适感与皮肤表面湿润度  $W$  及皮肤表面温度  $T_{sk}$  密切相关,

①★ 嵇贊,女,1975 年 12 月生,在读博士研究生  
300450 天津海军后勤学院军港管理教研室  
(0)13174801531  
E-mail:jiyunzhe99@163.com  
收稿日期:2002-06-05  
一次修回:2002-11-18  
二次修回:2004-03-04

表 1 天津统计资料

	6月	7月	8月	9月	h
总时间	720	744	744	720	
不需空调时间	低于舒适区	160	7	64	383
	舒适区内	109	76	50	55
空调时间 <sup>1)</sup>	451	661	630	282	
可采用蒸发冷却的时间 <sup>2)</sup>	158	26	10	92	

1) 干球温度大于 26 ℃或湿球温度大于 19 ℃。

2) 干球温度大于 26 ℃且湿球温度小于 19 ℃。

当人体处于热状态时,  $W$  的下降会令人更舒适<sup>[1]</sup>。当人体周围空气流速适当增加时, 不仅可提高皮肤表面与环境的换热系数, 而且可加强皮肤表面汗液的蒸发, 有效降低  $W$ , 提高环境的热舒适度。因此, 在热环境中, 提高空气流速较之降低环境空气温度, 可能是改善室内人员热舒适的更节能和有效的手段。此外, 不同国家研究者取得的研究成果随参加热舒适实验受试者的来源的不同而各有差异, 因此, 可以推测受试者的民族差异亦对人体的热舒适反应有一定影响。天津大学以中国学生为受试对象, 在实验室进行一系列热舒适实验, 以观察在环境温湿度较高的室内, 提高室内的空气流速对人体热舒适的改善程度以及空气流速的适度增大范围, 期望得出针对中国地区室内空气参数(干球温度、湿球温度、气流速度)的合理组合。

## 1 热舒适实验

### 1.1 实验设计

热舒适实验安排在天津大学暖通大实验室的气流测试小室内进行, 测试小室尺寸为 5 m × 4.5 m × 3 m, 配有一套小型空气处理系统控制室内温湿度, 为在室内产生足够的空气流速, 在吊顶中心安装风扇。室内布置如图 1 所示, 为受试者共设 6 个固定座位。在室内离地 60 cm 及 140 cm 平面均

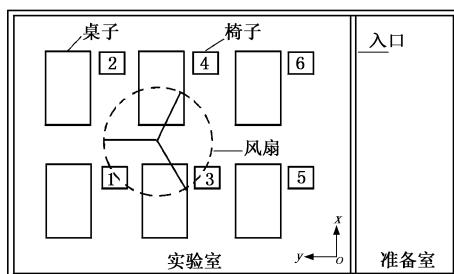


图 1 室内布置示意图

匀布置温湿度自动巡检仪的探头, 监测环境温湿度, 保证实验过程测试室内温湿度稳定。采用 TSI

风速检测仪测定所在位置的平均风速, 因为人体上部的空气流动较其他部位对热舒适影响更明显, 所以选定离地 110 cm 处布置探头<sup>[2~3]</sup>。测量时, 连续测量 2 min, 每隔 5 s 记录一次数据, 以计算平均风速。离地 110 cm 高平面上速度分布如图 2 所示, 图中曲线上的数值表示风速大小(单位为 m/s)。图 3 为各座位所处位置空气流动的风速频谱图。各位置的平均风速值、湍流强度及主频值见表 2。

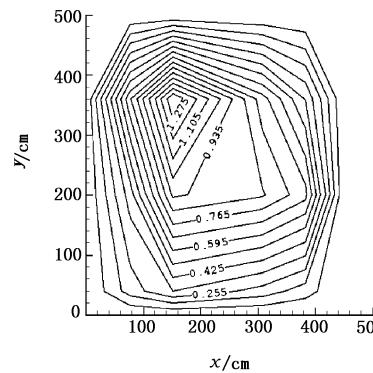


图 2 室内 110 cm 高平面风速分布

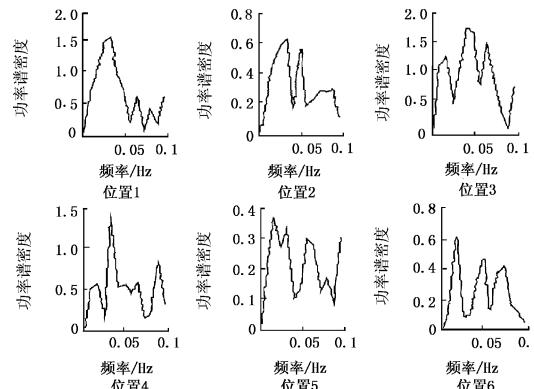


图 3 各位置的风速频谱图

表 2 实验环境风速统计表

	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6
平均风速/(m/s)	1.36	0.42	0.95	0.70	0.34	0.25
湍流强度 <sup>1)</sup>	0.12	0.07	0.22	0.17	0.32	0.24
主频 <sup>2)/Hz</sup>	0.032	0.032	0.040	0.032	0.016	0.016

1) 湍流强度为速度波动的标准差与平均速度之比<sup>[4]</sup>。

2) 频谱描述了波动能量随频率的分布, 主频是频谱最大幅值对应的频率<sup>[4]</sup>。

参加实验的受试者是天津大学的学生, 共 96 名, 男生 50 名, 女生 46 名, 平均年龄 20 岁, 受试者身体健康, 参加实验前有良好的睡眠以及饮食, 且未喝过含酒精的饮料。受试者的服装为夏季标准着装, 即上身穿短袖棉质衬衣, 下身穿长裤(上衣搁在裤子外面), 脚上穿线袜、塑料拖鞋。根据标准, 此时的衣服热阻为 0.5 clo(1 clo=0.155 m<sup>2</sup>·K/W)。

每组6名受试者在进入测试室前,先在准备室静坐30 min,使受试者以相似的状态进入测试室,进入后在指定的位置静坐,测试历时90 min,每30 min填写一次热舒适调查问卷,记录热感觉、热舒适,以及对空气流速和湿度的感觉。

## 1.2 评估方法

影响人体热舒适的主要因素包括室内物理因素(如空气温度、相对湿度、空气流速、平均辐射温度)和个人因素(如衣服热阻和人体新陈代谢率等)<sup>[5]</sup>。因此宜采用一综合指标来描述众多影响因素,以便对热环境进行热舒适的预测。因本文讨论的环境空气流速较高,所以采用Gagge基于新有效温度 $ET^*$ (effective temperature)改进的标准有效温度 $SET^*$ (standard effective temperature),依其定义编写相应的计算程序,根据环境的干球温度、湿球温度、空气流速、辐射温度,以及受试者的衣服热阻和新陈代谢率,计算出各环境的标准有效温度 $SET^*$ <sup>[6]</sup>。测试室内的温湿度共4种组合,风扇启动后,受试者所处6个位置的气流速度各不相同,共有24种实验工况,表3列出了各工况对应的 $SET^*$ 。

表3 实验工况对应的 $SET^*$  °C

空气流速 /(m/s)	温度/相对湿度/( °C / % )			
	27.1/68.8	28.1/69.3	29.1/69.0	30.1/70.3
1.36	22.13	23.32	24.44	25.51
0.95	22.73	23.88	24.99	26.16
0.70	23.34	24.40	25.50	26.65
0.42	24.29	25.43	26.52	27.75
0.34	24.71	25.75	27.03	28.15
0.25	25.28	26.42	27.68	28.90

注:新陈代谢率为静坐状态下对应的值,衣服热阻按0.5 clo计。

室内人员对环境的主观评价包括多个方面,本实验中受试者热感觉、热舒适评价尺度分别采用ASHRAE的热感觉七级指标和热舒适四级指标,同时调查受试者对环境潮湿度的评价,以及对所处位置空气流速大小的期望。将受试者的评价进行分析总结,以得出主观评价与环境指标之间的关系,从热舒适的角度对环境进行评估。

## 1.3 实验结果

### 1.3.1 空气流速对热感觉、热舒适的影响

将本次实验中受试者热感觉投票值 $TSV$ (thermal sensation vote,-3—冷,-2—较冷,-1—微冷,0—适合,+1—微热,+2—较热,+3—热)

与所处环境的 $SET^*$ 进行线性拟合,根据Fanger的热舒适方程计算各工况下预测的热感觉值 $PMV$ (predicted mean vote)<sup>[7]</sup>,并将其与 $SET^*$ 进行线性拟合,见图4。

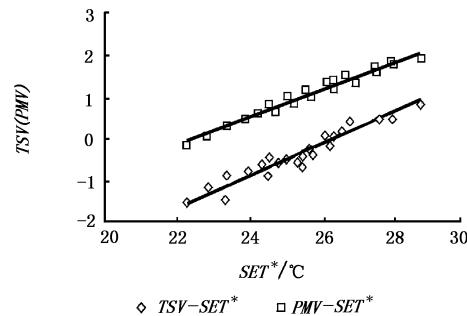


图4  $TSV(PMV)$ 与 $SET^*$ 的线性拟合

比较两条拟合线,可看出两者之间存在较大差距,这说明Fanger的热舒适方程对本组环境的预测并不准确,它低估了空气流动在热湿环境中所起的降低热感觉、提高热舒适的作用。根据本实验得出的拟合曲线,可得出中性温度( $TSV=0$ 时)为 $SET^*=26.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,与美国和日本的两项类似实验<sup>[8]</sup>进行比较(见表4),本实验结果与日本东京实验的

表4 中性温度

	线性拟合公式	中性温度 ( $SET^*$ )/ °C
实测值	$TSV=0.372SET^*-9.801$	26.3
PMV理论值	$PMV=0.301SET^*-6.666$	22.2
日本 <sup>[8]</sup>	$TSV=0.339SET^*-8.882$	26.2
美国 <sup>[8]</sup>	$TSV=0.290SET^*-8.010$	25.8

所得值相近,这反映了受试者适应气候环境的习惯对热感觉的影响,天津和东京夏季7月的平均温度皆在27 °C以上,并较为潮湿,所以其室内人员相对更能忍受热湿环境。

将受试者的热舒适投票值 $TCV$ (thermal comfort vote)与 $SET^*$ 进行拟合,结果见图5,可

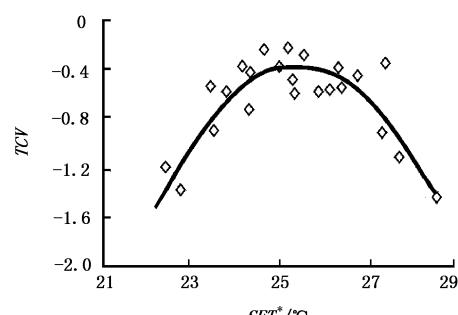


图5  $TCV$ 与 $SET^*$ 的线性拟合

以看出热舒适投票值最大(即受试者最舒适)( $TCV = -0.27$ )时,  $SET^* = 25.6^\circ\text{C}$ , 代入实测值  $SET^* - TSV$  的线性拟合方程(见表 4), 得到  $TSV = -0.3$ , 这说明中性温度并不一定是最令人舒适的温度, 在夏季人们更喜欢中性偏凉的热感觉。

### 1.3.2 受试者对空气流速的期望

将调查表中受试者对环境空气流速的期望值  $VS(+1-\text{期望风速变小}, 0-\text{不变}, -1-\text{期望风速变大})$  在不同的空气干球温度下与空气流速  $v$  进行线性拟合, 见图 6。表 5 列出不同温度下的线性拟合

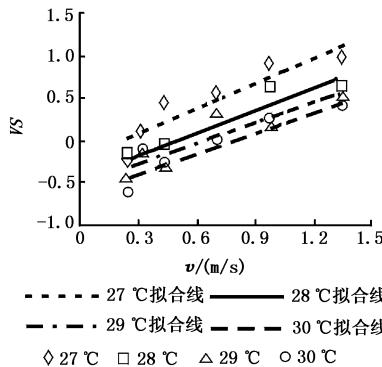


图 6 不同温度下  $VS$  与  $v$  的线性拟合

合方程和期望风速。温度越高, 期望风速值越大, 而在较低温度( $27^\circ\text{C}$ )时, 人体对风速更加敏感( $27^\circ\text{C}$  线性方程斜率较大, 且与其他曲线距离较

表 5 期望风速

温度/相对湿度 / (°C/%)	线性拟合方程	期望风速 / (m/s)	期望风速对应的 $SET^*/^\circ\text{C}$
27.1/68.8	$VS = 1.0241v - 0.2323$	0.23	25.47
28.1/69.3	$VS = 0.8889v - 0.3911$	0.44	25.26
29.1/69.0	$VS = 0.8463v - 0.5309$	0.63	25.70
30.1/70.3	$VS = 0.8492v - 0.6367$	0.74	26.59

远)。除  $30.1^\circ\text{C}/70.3\%$  环境外, 期望风速对应的  $SET^*$  均低于中性温度, 说明在热湿环境中, 人们希望风速偏大一点, 使热感觉达到中性偏凉。

在  $30.1^\circ\text{C}/70.3\%$  时期望风速低于使  $SET^*$  值达到中性温度所需的风速, 这说明人们对身体周围空气流速有一最高接受限度, 超过该限度, 即使热感觉在可接受范围内, 对风速也无法接受。参考已有的文献<sup>[8~10]</sup>和本次实验的结果, 可认为室内人员能接受的风速不高于  $0.8 \text{ m/s}$ 。

### 1.3.3 风速对潮湿感觉的影响

在不同温度下, 将受试者对空气潮湿程度感觉的投票  $DS$  值(+3—潮湿, +2—较潮湿, +1—微潮湿, 0—适中, -1—微干燥, -2—较干燥, -3—干燥)与空气流速  $v$  进行拟合, 见图 7。可以看出, 在实验工况下, 空气温度、气流速度都会影响人体对

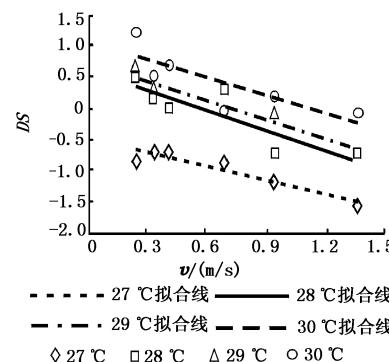


图 7 不同温度下  $DS$  与  $v$  的线性拟合

空气的潮湿感觉。温度升高,  $DS$  值增大, 而且  $27^\circ\text{C}$  时的拟合线与其他 3 条拟合线之间有较大的差距, 温度达到  $28^\circ\text{C}$  后, 人们易觉得环境潮湿。空

气流速加大,  $DS$  值会下降。因此, 空气流速的提高可以缓解环境给人的潮湿感。从图 7 中可发现不同温度下各期望风速(见表 5)相应的  $DS$  值皆在  $\pm 0.5$  之间, 这说明对于相对湿度较大的环境, 适当的风速可减弱或消除室内人员的潮湿感。

## 1.4 结论

1.4.1  $SET^*|_{TSV=0} = 26.3^\circ\text{C}$ ,  $SET^*|_{TCV\text{最大}} = 25.6^\circ\text{C}$ , 为保证室内人员的热舒适, 建议使室内的  $SET^*$  等于  $25.6^\circ\text{C}$ , 当热感觉中性偏凉时受试者更舒适。

1.4.2 室内人员能接受的环境最高空气流速为  $0.8 \text{ m/s}$ , 这就限制了室内干球温度值。由表 6 可见, 相对湿度为  $70\%$  时, 能保证  $TCV$  最大的干球温度为  $29.3^\circ\text{C}$ , 即当空气干球温度低于  $29.3^\circ\text{C}$  时, 依靠调整室内空气流速, 可保证室内人员的热舒适。

表 6 不同相对湿度下干球温度的限制值

干球温度 / °C	相对湿度 / %			
	70	60	50	40
29.3	29.7	30	30.4	

1.4.3 空气流速提高, 室内人员的潮湿感会减弱, 但湿度过大( $80\%$ 以上), 金属器皿易生锈, 且易于霉菌滋生。因此, 一般场合相对湿度维持在  $70\%$  以下是可以接受的。

根据以上结论, 为保证人体的热舒适( $SET^* = 25.6^\circ\text{C}$ ), 相对湿度  $70\%$  时, 运用  $SET^*$  程序可算出相应干球温度下推荐的风速, 见表 7。

表 7 不同温度下的推荐风速

湿球温度 / °C	干球温度 / °C		
	27	28	29
22.8	22.8	23.8	24.5
0.23	0.42	0.64	

## 2 节能效应

适当提高室内空气流速可扩展热舒适区,从而提高舒适区干、湿球温度的上限。根据研究结论,不同空气流速下,舒适区的温度、相对湿度上限可分别达到 $27\text{ }^{\circ}\text{C}/70\%$ , $28\text{ }^{\circ}\text{C}/70\%$ , $29\text{ }^{\circ}\text{C}/70\%$ 。

图8显示了舒适区扩展后,天津地区夏季空调运行

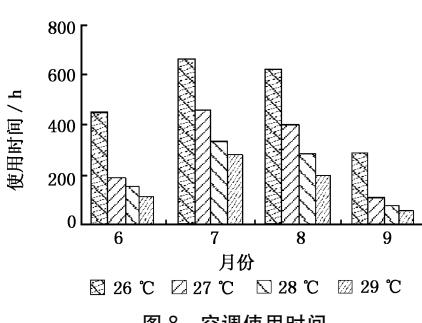


图8 空调使用时间

区扩展后,室内湿球温度值相应提高,直接蒸发冷却的使用状况也得到改善。图9显示了室内湿球

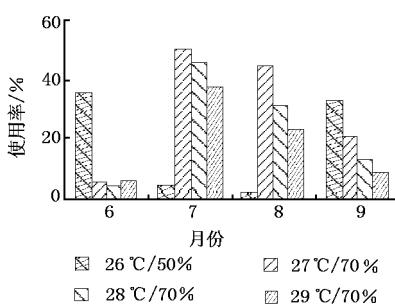


图9 直接蒸发冷却使用率

直接蒸发冷却的可利用率大大增加。因此,风速的提高可带来明显的节能效益。

当然,室内参数的设定还应考虑场所的性质。对于一些有人长时间停留的场所,允许的风速还应适度降低,以避免长期吹风产生的不舒适,如实行岗位送风的方式,可以让室内人员选择风向和风速,会进一步提高热舒适性。而在人员短暂停留的场所,要求较低,风速可以适度提高,从而温度设定

值也可提高。另外,以上的结果是受试者在静坐状态下得出的,当室内人员从事其他活动时,新陈代谢率会有所提高, $SET^*$  值亦会提高,应适度提高风速或降低空气温度。

## 参考文献

- Gagge A P, Nishi Y, Gonzalez R. Standard Effective Temperature—a single index of temperature sensation and thermal discomfort. In: Proceedings of the CIB Commission W45 (Human Requirements) Symposium at the Building Research Station, 1972. 229—250
- 吕芳. 热舒适与建筑节能:[硕士学位论文]. 天津:天津大学, 2001
- 蒋薇. 人体热舒适的实验研究:[硕士学位论文]. 天津:天津大学, 2001
- 贾庆贤,赵荣义,许为全,等.吹风对舒适性影响的主观调查和客观评价.暖通空调,2000,30(3):15—17
- 赵荣义,范存养,薛殿华,等,编.空气调节.第3版.北京:中国建筑工业出版社,1994
- Gagge A P, Stolwijk J, Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. In: ASHRAE Trans. 1971, 77(1). 247—262
- Fanger P O. Thermal comfort. Malabar: Krieger Publishing Company, 1982
- Tanabe S, Kimura K. Effects of air temperature, humidity, and air movement on thermal comfort under hot and humid conditions. In: ASHRAE Trans. 1994, 100(2). 953—969
- Scheatzle D, Wu H, Yellot J. Extending the summer comfort envelope, with ceiling fans in hot, arid climates. In: ASHRAE Trans. 1989, 95(1). 269—280
- Rohles F, Konz S, Jones B. Ceiling fans as extenders of the summer comfort envelope. In: ASHRAE Trans. 1983, 89(1). 245—265

(上接第50页)

屋面反梁的方式来减轻影响,并在设备与底座之间安装适当的隔振装置,例如压缩型橡胶隔振器。

总之,在住宅小区内选用风冷冷水机组时要充分考虑配电因素的影响,将单台设备的配电功率控制在168 kW以下;并应该在充分满足散

热要求的前提下着重解决冷水机组的降噪、减振问题。这样才能更好地发挥它土建成本低、控制简单、使用方便的优势。

## 参考文献

- 1 郑长聚,洪宗辉,编.环境噪声控制工程.北京:高等教育出版社,1988
- 2 张沛商,姜元,编.噪声控制工程.北京:北京经济学院出版社,1991

3 李耀中,主编.噪声控制技术.北京:化学工业出版社,2001

4 李文成,主编.工厂供电.第2版.北京:机械工业出版社,1990

5 中国航空工业规划设计研究院,中国航天建筑设计研究院,中国兵器第五设计研究院,等,编.工业与民用配电设计手册.第2版.北京:水利电力出版社,1994