

# 个性化通风系统的热舒适性分析\*

大连理工大学 端木琳<sup>☆</sup> 沈胜强 孙宇明

**摘要** 个性化通风系统可以改善空气质量、改善人体热舒适性。介绍了个性化通风改善热舒适性方面的研究成果,指出可以利用局部热感觉对整体热感觉的影响、通过个性化送风手段来满足人的不同热舒适要求。

**关键词** 个性化通风系统 热舒适性 热感觉

## Thermal comfort analysis for personalized ventilation systems

By Duanmu Lin<sup>☆</sup>, Shen Shengqiang and Sun Yuming

**Abstract** Personalized ventilation systems can enhance IAQ and improve thermal comfort of the human body. Presents the study results on the thermal comfort improvement of personalized ventilation and points out that the different thermal comfort requirements can be met by utilizing the influence of part body heat sensation on whole body heat sensation and the personalized ventilation method.

**Keywords** personalized ventilation system, heat comfort, heat sensation

★ Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning Province, China

①

## 0 引言

长期以来,人们对空调热舒适的研究主要依据丹麦技术大学 P. O. Fanger 教授提出的理论和美国 ASHRAE 制定的框架体系,采用 PMV-PPD 评价方法。该方法综合考虑了空气温度、湿度、风速及热辐射四个环境因素与着衣量、活动强度两个主观因素,规定了舒适区并以此作为室内环境的设计依据<sup>[1]</sup>。这些标准都是根据整体稳定环境下主观试验中 80% 的受试者表示满意确定的。之所以规范允许高达 20% 的人表示不满意,是因为统一控制下很难达到更多人的热舒适要求。个性化通风使得每位使用者都可以根据各自的热舒适要求控制温度,因此在改善热舒适性方面具有很大的潜力。考虑到空气流动不应带来吹风感,ASHRAE Standard 55 推荐在 20 °C 的室温条件下室内平均空气流速不得超过 0.12 m/s,26 °C 的室温条件下室内平均空气流速不得超过 0.2 m/s,虽然这种限

制是否适合于个性化通风仍有待研究,但是 ASHRAE Standard 55 中的规定仍然是个性化通风系统设计时值得参考的<sup>[2]</sup>。研究表明,个性化通风系统在改善热舒适方面的性能与送风位置、送风温度、送风量以及背景条件等都有很大的关系,其中个性化送风的风量是影响热舒适性的因素中较为重要的一项<sup>[3]</sup>。而对于个性化通风局部热感觉对整体热感觉的影响,目前也已得出了一些指导性的结论。

### 1 个性化通风系统改善热舒适性的主观实验

丹麦技术大学 J. Kaczmarczyk 等人比较了人体对个性化通风和混合通风的反应,其中热舒适性是研究的一方面<sup>[4]</sup>。个性化通风系统(见图 1)未

①☆ 端木琳,女,1959 年 4 月生,硕士研究生,硕士,副教授  
116023 大连市大连理工大学土木水利学院  
(0411) 84707684-815  
E-mail: duanmulin@sina.com  
收稿日期: 2006-03-01  
一次修回: 2006-06-30  
二次修回: 2007-01-04

\* 辽宁省自然科学基金资助项目(编号:20022143)



图 1 个性化送风实验台

端送风装置为半圆柱形,风口为半圆柱的矩形截面。通过与之相连的可移动软管可以调整送风口的位置,送风量调节是利用末端可调节电压的风扇进行的。

此次实验包括了两种工况,调查了个性化送风温度、背景温度对舒适性的影响。在实验中维持室内空气的相对湿度恒定在 30%,送风量在 0~15 L/s(54 m<sup>3</sup>/h)范围内可调,其他的实验条件如表 1 所示。

表 1 实验条件一

	实验 1(23 °C 室温)	实验 2(26 °C 室温)
条件 1	PVS, 20 °C 的全新空气	PVS, 20 °C 的全新空气
条件 2	PVS, 23 °C 的全新空气	混合通风
条件 3	PVS, 23 °C 的室内混合空气	
条件 4	混合通风	

注: PVS 指个性化通风系统。

参加实验的 60 名大学生平均分为两组,实验过程持续了 3.75 h。热舒适性的衡量采用 TSV 投票,实验过程中允许改变着衣量。实验结果表明,当背景温度为 23 °C 时,无论有无个性化通风,都可以使受试者达到热中性的状态。但是,当背景温度提升到 26 °C 时,个性化通风就起到了明显的效果。此次实验调查了头部热感觉与整体热感觉的关系,实验发现,个性化通风无论在局部热感觉还是整体热感觉方面与混合通风均有明显的不同,混合通风下整体热感觉与头部热感觉在 26 °C 条件下均接近于稍暖的水平,而个性化通风下可以使整体热感觉趋向于中性,实验条件 2 下利用 TSV 进行投票得到的平均值见图 2。

设计个性化通风系统需要确定送风口的位置与送风量的变化范围,由于受试者会根据自己对热舒适的要求进行自由调整,所以,需要研究的是人

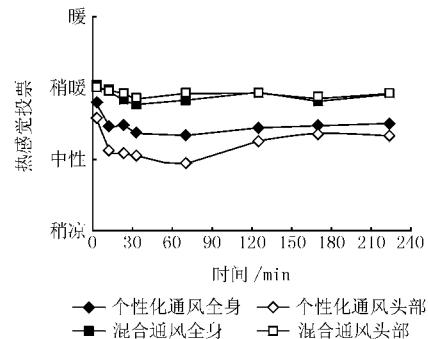


图 2 热舒适性投票结果

们喜欢的送风参数组合而不是可以接受的送风参数组合。这次实验也记录了受试者对个性化通风的使用情况。对个性化控制的跟踪调查表明,在室温为 23 °C 的第一组实验中,受试者使用的风量范围为 3~15 L/s(54 m<sup>3</sup>/h);在室温为 26 °C 的第二组实验中受试者使用的风量范围为 0~15 L/s(54 m<sup>3</sup>/h),其中有两人在实验的一段时间中关闭了个性化通风系统。在整个实验过程中,受试者选择的送风量的频率统计结果见图 3。

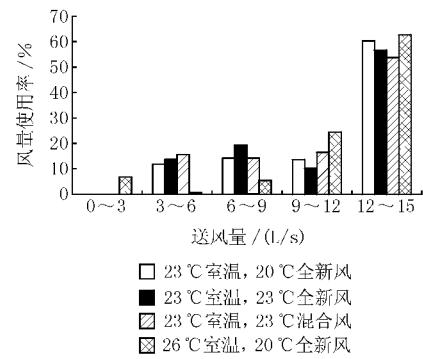


图 3 风量选择频率

实验表明,在绝大多数时间使用者所选择的风量均大于 12 L/s(43.2 m<sup>3</sup>/h),实验中还发现不论是在 23 °C 还是在 26 °C 的背景温度下,大多数的受试者都把送风口固定在距离面部 30~40 cm 处,角度为正对面部或者稍微向下倾斜。

日本的 J. Hayashi 等人也对个性化通风的热舒适性作过研究<sup>[5]</sup>。他们主要研究了一种形式的个性化通风系统在改善热舒适性方面的作用,描述了最易被接受的气流速度与送风位置,并且分析了受试者时而离开工作位置、时而又回到工作位置的实际情况下此种个性化通风系统的性能。系统装置如图 4 所示,末端送风口为矩形,通过送风面处的挡板可以调整风口送风角度,利用末端可调节电

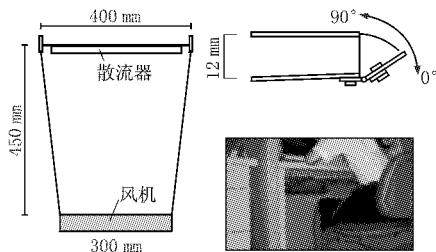


图 4 系统装置

压的风扇进行送风量的调节。参加实验的是 18 名大学生(9名男生和 9名女生),三种实验工况均采用等温送风,背景空调系统采用上送下回,其他实验条件为:实验者着衣量男生为 0.71 clo,女生为 0.55 clo;空气温度分别为 26.1, 28.1, 30.1 °C;相对湿度分别为 54%, 53%, 50%。实验对受试者刚到工作位置到稳定下来的 0~30 min 这一段时间作了研究。热感觉、热舒适与气流感采用投票进行,投票标尺见表 2。热感觉和热舒适性的投票结果如图 5,6 所示。

表 2 热感觉、热舒适性投票标尺

	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
热感觉投票	冷	凉	稍凉	正常	稍暖	暖	热
热舒适性投票	很不舒适	不舒适	稍不舒适	舒适			
空气流动感觉投票		不可接受		可接受			

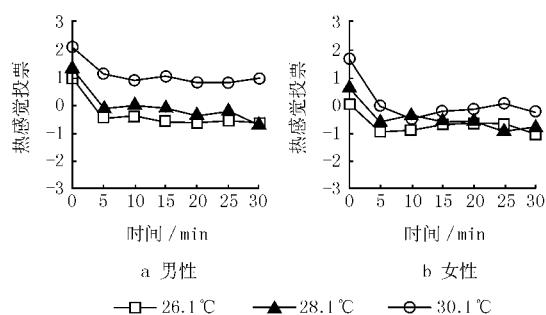


图 5 热感觉投票结果 1

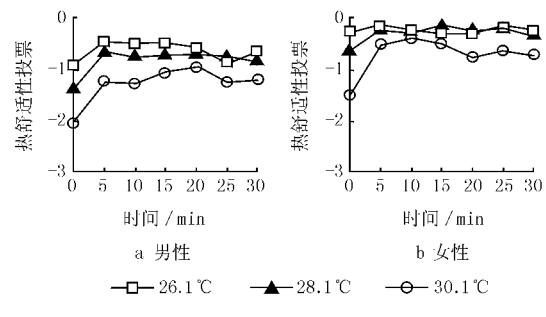


图 6 热舒适性投票结果 1

实验结果表明,在使用个性化通风的前 5 min 内的热感觉与热舒适变化非常大,之后基本趋于稳

定;26.1 °C 与 28.1 °C 两种工况下的热感觉与热舒适在 5 min 后很相近,但在 30.1 °C 时热舒适性明显变差。实验还表明,当室温提高时男性比较偏爱于高速气流,而女性无论在低温还是在高温下都偏爱低速气流。送风方向的选择的实验结论与丹麦技术大学的实验结论相似,大多数人喜欢风口对着前胸或头部,实验过程中,只有很小比例(4%)的时间中有人把风口正对腹部。

在此实验的基础上,日本的 H. Amai 等人在 28.1 °C 背景温度下利用 3DU<sup>-1</sup>, PEM, TU 三种不同形式的个性化通风系统也证明了个性化通风对改善热舒适性是很有效的,具体实验内容可以参考文献[6]。为了考察个体差异性,选择受试者为 12 名男性大学生和 12 名女性大学生,采用热舒适性投票 TCV 与热感觉投票 TSV。实验表明 28.1 °C 的个性化通风与 26.1 °C 的标准条件通风均能使热感觉达到热中性,个性化通风下热舒适性投票值男性在 -0.4~ -0.7 之间,女性在 -0.3~ -0.4 之间(见图 7,8)。这表明个性化通风对改善热舒适性有很大的作用。

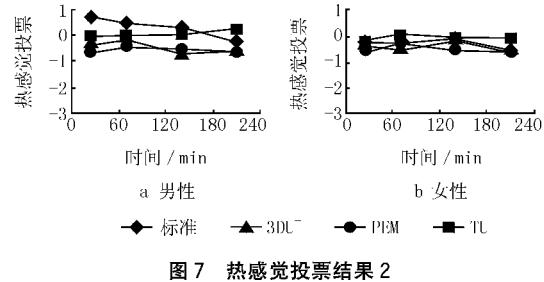


图 7 热感觉投票结果 2

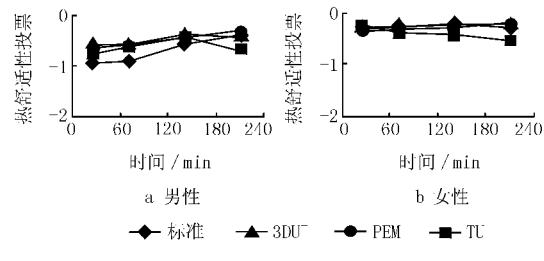


图 8 热舒适性投票结果 2

清华大学李俊等人试验研究了个性化送风条件下的人体热感觉,研究结果表明,个性化通风可以改善局部热环境,在一定条件下可以满足使用者整体热感觉的要求<sup>[7]</sup>。试验重点研究中性热环境下人体对个性化送风的反应。在三种背景温度(26, 28, 30 °C)下研究了 3 °C 和 6 °C 两种送风温差,以研究人体最舒适的背景温度与送风温度的组

合,加上等温送风条件,总计9种工况。在每种工况下改变风速以研究人体适宜的送风速度。对30名受试者进行了主观实验,其中热感觉采用标准7点TSV投票标尺;热舒适性采用标准4点TCV投票标尺。试验结果表明,随着风速的加大,整体热感觉值逐渐减小,个性化送风系统可以改善热环境,随着送风速度和温差的加大,效果更加明显,在高温环境中更是如此——即使背景温度达到30℃,通过一定的送风温差和速度的组合,仍然可以使总体热感觉达到热中性,即TSV值在±0.5范围内。不同背景温度、不同送风速度对整体热感觉均有极显著的影响,而且各环境参数的交互作用对整体热感觉有显著影响,因此,只有选择合适的环境参数组合,才能满足人体整体热感觉的要求。

在各实验工况及不同的风速水平下,对受试者的TCV投票结果表明,TCV和TSV的变化规律很一致,TSV接近热中性时,TCV值减小,受试者感觉热舒适性较好,而当TSV偏离热中性(偏冷或偏热)时,TCV增大,受试者感觉热舒适性变差。检验结果表明背景温度、送风温差、风速等因素对TCV有显著的影响。

## 2 个性化通风系统送风参数的确定

N. Gong等人的研究表明,人体偏爱的空气流动速度存在一个范围,较高或者较低的空气流速都会引起受试者的不满意<sup>[8]</sup>。实验装置如图9所示,实验条件如表3所示,送风速度分别为0.15,0.30,0.45,0.60,0.75,0.90 m/s。

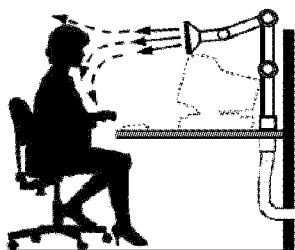


图9 个性化通风实验装置

表3 实验条件二 °C

个性化送风温度	室温				
	26	23.5	26	21	23.5
个性化送风温度	21	23.5	26	21	23.5

送风速度指距离面部约15 cm处送风口的速度,利用空气流动感觉投票(见表2)进行主观试验。实验结果(见图10)表明可接受的空气流速随着室温和个性化送风温度的升高而增加。在室温

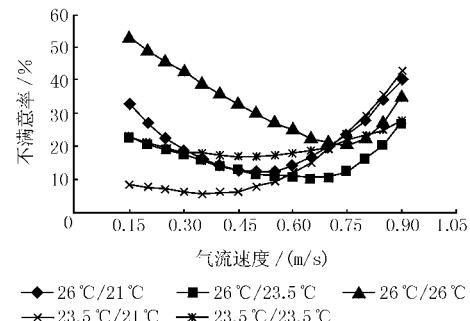


图10 空气流动带来的不满意率

为23.5℃、送风温度为21℃时最佳的个性化送风风速为0.3~0.45 m/s;在室温为26℃、送风温度为23.5℃时最佳的个性化送风风速为0.3~0.9 m/s。

## 3 个性化通风系统改善热舒适性的理论分析

上述结论证明了个性化通风能改善热舒适性。热舒适性的影响因素很多,除了与热状态有关外,还与心理、周边环境有关,笔者在此主要分析热状态和心理因素的影响。

### 3.1 整体热状态和局部热状态共同作用于热舒适性

散热量的大小与新陈代谢强度有关。人体产生的热量能及时地散出,保持蓄热基本为零是舒适的最基本条件。但即使整体的散热量可以基本抵消整体的产热量时,也可能由于局部存在不舒适而影响整体舒适性<sup>[9]</sup>。对于个性化通风系统,笔者认为整体散热量与产热量基本平衡是热舒适性的前提,局部热感觉对整体热感觉的影响是个性化通风系统能改善热舒适性的原因所在。所以研究局部热感觉对整体热感觉的影响对解决个性化通风系统热舒适性问题很重要。

### 3.2 局部热感觉对整体热感觉的影响研究

不同部位的局部热感觉对整体热感觉影响的权重国内外都作过研究。研究时一般保持受试者全身处在一个稳定的热状态中,然后对局部部位施加冷热刺激来观察局部热感觉对整体热感觉的影响。其中,整体热感觉分为中性、偏热和偏冷三种,局部热感觉分为偏热和偏冷两种。研究发现,在一定条件下,局部热感觉的变化可以改善整体热感觉,但是改善程度有一定的限度,超过这个限度再继续增加局部刺激会使得全身热可接受度降低。局部热感觉与全身热可接受度近似为二次多项式

函数关系<sup>[10-11]</sup>。另外,研究发现不同部位的局部热感觉对全身热感觉影响的权重不同,李俊在对工位空调的研究中指出,头颈部的权重最大,上半身(包括胸部和腹部)次之,下半身最小<sup>[12]</sup>。其他一些研究也得到了不同部位具有不同权重的结论。同时,也有研究指出同一个部位的权重不是恒定不变的。

Zhang Hui 在研究中发现,某一部位的局部热感觉与身体其他部位的热感觉差别越大,其权重就该定得越大<sup>[13]</sup>。可以按照局部热感觉对整体热感觉热舒适性的影响程度将整个身体分成三个组,即:影响最大的、影响一般的和影响最小的。影响最大的一组的局部热感觉与整体热感觉最接近(见图 11),原因在于这些部位最不能忍受较大的温度变化,因此,这些部位的热感觉与整体热感觉最相近。影响最小的那一组则表现出与整体热感觉很大的无关性。影响最小的部位有两个特点,一个是为了调整整体的散热平衡,这些部位的皮肤表面温度变化范围较大,而且变化很剧烈(见图 12);另一个特点就是这些部位的热感觉与整体的热感觉关系很小。影响最大的一组包括:背部、胸部和骨盆,

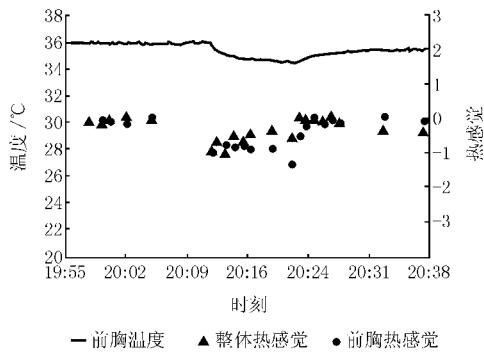


图 11 前胸冷却时前胸热感觉与整体热感觉关系(室温 30 °C, 送风温度 28 °C)

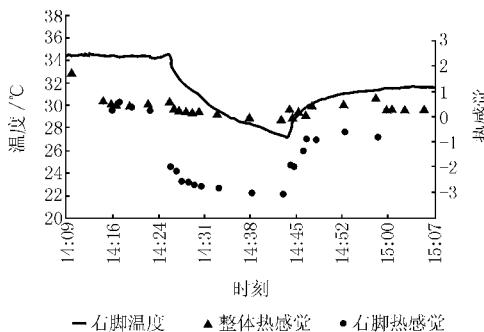


图 12 脚部冷却时脚部热感觉与整体热感觉关系(室温 28.2 °C, 送风温度 14 °C)

热感觉影响最小的部位包括手和脚,其他的部位如面部、胳膊、腿等都属于影响一般的一组。

文献[14]在个性化通风舒适性实验中研究了人体的局部热感觉和整体热感觉。人们在工作区与背景区之间活动时,所处的是一个动态的环境。为了研究工作区与背景区环境差异对舒适性的影响,让受试者经历不同的背景温度及工作区温度,并记录了他们在背景区的热感觉状况,以研究人体对背景区和工作区环境差异的反应。背景区选用 28 °C 和 30 °C 两种温度,工作区与背景区的温差选择 1 °C, 2 °C, 3 °C 三种,因此共有 6 个工况,见表 4。其中热感觉采用标准 7 点 TSV 标尺,研究几种不同工况下的前身热感觉、后背热感觉与整体热感觉,结果见图 13。结果表明,受试者刚进入工作区

表 4 工位空调的工作区与背景区舒适性研究工况

	背景区温度/°C	工作区温度/°C	工作区风速/(m/s)
工况 1	28	27	0.15~0.30
工况 2	28	26	0.25~0.45
工况 3	28	25	0.35~0.55
工况 4	30	29	0.15~0.30
工况 5	30	28	0.25~0.45
工况 6	30	27	0.60~0.80

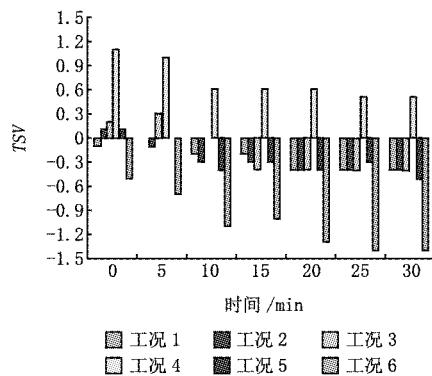


图 13 不同工况下的整体热感觉

时的整体热感觉、前身热感觉和后背热感觉存在着一定的差异,后背热感觉基本都在 0 以上,而前身热感觉和整体热感觉除工况 4 以外基本都在 0 以下,整体热感觉始终跟前身的热感觉比较接近,和后背的热感觉相差较远; 28 °C 的背景温度下,工作区温度为 25 °C 时,实验起始阶段两者差为 1.3,稳定阶段差为 0.7,当工作区温度为 27 °C 时,实验起始阶段两者差为 1.0,稳定阶段差为 0.5,30 °C 的背景温度下,工作区温度为 27 °C 时,实验起始阶段两者差为 1.4,稳定阶段差为 1.2,当工作区温

度为 29 °C 时,实验起始阶段两者差为 0.8,稳定阶段两者差为 0.3。可见当工作区与背景区的温差较大时,前身热感觉和后背热感觉差别比较大,在该实验中,两者之差最大为 1.4,最小为 0.3。由图 13 可以看出,背景温度为 28 °C 的 3 个工况,整体热感觉差别不大,稳定后热感觉值都在 -0.3~ -0.5 之间。背景温度为 30 °C 时,3 种工况之间的整体热感觉差别较大,特别是当工作区温度为 27 °C,TSV 稳定在 -1.0 以下时,这主要是由于背景温度为 30 °C 时,为了将工作区人体附近的温度降低到 27 °C,必须选择比其他工况更大的风量,此时的风量已达到 250 m<sup>3</sup>/h,到达人体前的风速也在 0.6 m/s 以上,所以此时受试者的热感觉值比较小。

由图 13 还可以发现,在进入工作区 10~20 min 后,整体的热感觉才趋于稳定,在稳定以前,整体热感觉呈下降趋势。同时还可以发现,随着工作区与背景区温差的不同,整体热感觉的波动范围也不同,温差较大时,进入工作区的初始阶段和稳定阶段的整体热感觉差别比较大。在该实验中,当背景温度为 28 °C、工作区温度为 25 °C 时,实验前后整体热感觉差值可以达到 0.7,当工作区温度为 27 °C 时,实验前后整体热感觉差值只有 0.3;当背景温度为 30 °C、工作区温度为 27 °C 时,实验前后整体热感觉差值最大可以达到 0.9,当工作区温度为 29 °C 时,实验前后整体热感觉差值只有 0.5。

#### 4 衡量个性化通风系统热舒适性的方法研究

##### 4.1 非均匀环境下的热舒适模型

由于个性化送风创造的环境的参数分布是非均匀的,局部送风使得不同部位具有不同的热感觉,在这样复杂的条件下描述整体热舒适性是非常困难的。Zhang Hui 等人在建立非均匀环境下的热舒适模型时发现最不舒适的部位对整体的热舒适具有决定性的影响,当有两个身体部位感觉很不舒适(热舒适投票低于 -2)时,无论其他部位感觉如何,整体热感觉仍然是不舒适的。最后,在实验的基础上提出了非均匀热环境下预测整体热舒适性的模型<sup>[13]</sup>,此模型对评价非均匀热环境下的整体热舒适性具有一定的使用价值,关于此模型的具体情况见文献[7]。

##### 4.2 用等效均匀温度衡量个性化通风改善热舒适性的能力

等效均匀温度(EHT)的概念首先由 Wyon 和 Bauman 等人提出,用于衡量汽车车厢不均匀热环境中的人体全身热反应<sup>[15~16]</sup>。等效均匀温度定义为:当实际的非均匀热环境下的整体散热率与均匀热环境下的整体散热率相等时,均匀环境的温度即为对应于该非均匀热环境的等效均匀温度。均匀环境指物体表面温度等于空气温度,除自然对流外没有空气流动的环境。由于着衣量、新陈代谢率等的不同,不同个体要求的热舒适环境不同。同一个体活动强度相同时穿着一般夏季服装时的舒适温度要比穿着工作服时约低 2 °C;同一个体着装相同时在办公室行走时的舒适温度要比静坐时约低 3 °C。如果通过个性化通风可以满足不同个体不同状态下的热舒适要求,那么理论上讲是可以满足所有人的热舒适要求的。因此,个性化通风对热环境的改善能力就值得研究了。

利用等效均匀温度可以衡量个性化送风系统对热环境的改善程度,送风口位于桌面的个性化通风系统对热环境的改善能力的实验结果如图 14 所示,实验结果可应用于室温为 22~26 °C,个性化送风温差为 0~7 °C,风量为 9.4~71 L/s 的情况。

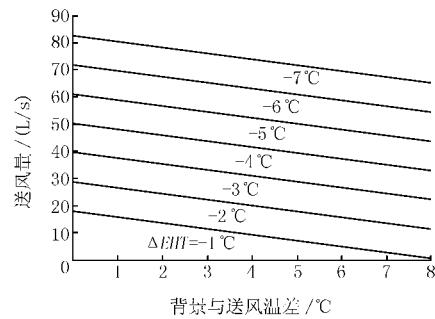


图 14 等效均匀温度

如图 14,当  $\Delta EHT$  为 -3 °C、温差为 0~4 °C 时,对应的送风量为 30~40 L/s,但对于这样的送风量下是否舒适仍然需要进一步研究。

#### 5 结论

5.1 国内外学者在其各自的实验条件下,研究个性化通风系统的结论均表明了此系统具有改善热舒适性的作用,但具体的改善机理仍然需要进一步研究。

5.2 个性化通风系统末端装置的送风吹向胸部或者头部是较为理想的选择。

5.3 人体局部热感觉对整体热感觉存在一定的影响,可以利用这种影响,通过个性化送风来改善人

的舒适性,满足不同人不同的舒适要求。

5.4 目前的研究表明,个性化送风适宜的室温大部分在23~26℃之间,送风温差为0~7℃;在绝大多数的实验时间段,受试者选择的送风量均大于43.2 m<sup>3</sup>/h。

5.5 背景空调与个性化通风的合理搭配问题仍有待于进一步研究。

#### 参考文献

- [1] Olesen B W, Parsons K C. Introduction to thermal comfort and standards and to the proposed new version of EN ISO 7730[J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6):537~548
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 55—1992 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1992
- [3] Arsen K M, Radim C, Milan M. Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices[J]. Energy and Buildings, 2002, 34(8):829~836
- [4] Kaczmarczyk J, Melikov A, Fanger P O. Human response to personalized ventilation and mixing ventilation[J]. Indoor Air, 2004, 14(8):17~29
- [5] Hayashi J, Lee S, Tomioka Y, et al. The effect of isothermal task unit on thermal comfort [C] // Proceedings: Roomment 2004, 2004
- [6] Amai H, Tanabe S, Akimoto T, et al. Thermal sensation and comfort with three task conditioning systems[C]// Proceedings of Indoor Air 2005, 2005: 143~148
- [7] 李俊,孙淑凤,狄洪发,等. 稳态条件下人体对个体送风的热反应研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(12):1~6, 58
- [8] Gong N, Tham K W, Melikov A K, et al. Human perception of local air movement and the acceptable air velocity range for local air movement in the tropics [C] // Proceedings of Indoor Air 2005, 2005: 452~457
- [9] 金招芬,朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001:84~100
- [10] 张宇峰,赵荣义. 局部热暴露对人体全身热反应的影响[J]. 暖通空调, 2005, 35(2):25~30, 34
- [11] Tsuzuki K, Arens E A, Bauman F S, et al. Individual thermal comfort control with desk-mounted and floor-mounted task/ambient conditioning (TAC) systems[C]// Proceedings of Indoor Air 1999, 1999: 8~13
- [12] 李俊. 个体送风特性及人体热反应研究[D]. 北京:清华大学, 2004
- [13] Zhang Hui. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments[D]. Berkeley: University of California, 2003
- [14] 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:大连理工大学, 2006
- [15] Wyon D P, Larsson S, Forsgren B, et al. Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin[G] // SAE Technical Paper Series, 1989
- [16] Bauman F, Tsuzuki K, Zhang Hui, et al. Experimental comparison of three individual control devices: thermal manikin tests [R]. Berkeley: University of California, 1999

(上接第75页)

高层建筑地下室多数用作洗衣房和管理人员办公室,有些工程机房出入口的门采用普通门,机组运行时地下室噪声很大,人员很难静下来工作。所以机房应设隔声套间,同时设二道隔声门。

#### 5 结语

根据我国各地的气象条件,依靠通风的方法为地下柴油发电站机房降温,应是首选方法。因为风冷房间内的空气环境好,有害物浓度低,系统简单,初投资和运行费用低<sup>[4]</sup>。即使设有制冷或冷水降温措施的电站,也应在过渡季节和冬季采用风冷,以便降低工程的运行费用,也是对自然冷源的合理开发和应用。

还应强调的是,发电站排风机房应选耐高温排

烟风机,不单是考虑火灾时排烟温度高,同时还因为排风温度也比较高。最好选用离心式风机,由于其电动机外置,耐高性能更为优良。

#### 参考文献

- [1] 中国建筑设计研究院. GB 50038—2005 人民防空地下室设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005
- [2] 总参谋部工程兵第四设计研究院. RFJ 2—91 人民防空工程柴油电站设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1991
- [3] 郭春信. 地下空间自然通风[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1994
- [4] 尧勇,李刻铭. 柴油发电机房冷却系统设计方案的比较[J]. 防护工程, 2005, 26(5):73~75