

## 家用热泵空调送风方式对热舒适性的影响

董明珠<sup>1,2</sup>, 谭建明<sup>1,2</sup>, 肖彪<sup>1,2</sup>, 李斌<sup>1,2</sup>, 赵树男<sup>1,2†</sup>

(1. 空调设备及系统运行节能国家重点实验室, 广东 珠海 519070;  
2. 珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海 519070)

**摘要:**为研究家用热泵空调送风方式对热舒适性的影响,在人工环境实验室内测试了中送风、下送风和分布式送风的环境参数,并对15名受试者的热感觉和热舒适进行了问卷调查.实验结果表明:初始背景温度为0℃时,分布式送风可快速、均匀地提升人体各部位的空气温度,受试者的整体热感觉以及整体热舒适上升最快,受试者的热舒适性可得到显著改善;室内热环境稳定后,分布式送风温度均匀度最小为1.9℃,在送风区域内的受试者各部位感觉较暖,局部热感觉差异最小,且其他位置的受试者都不觉得冷;稳态局部热感觉与整体热舒适的拟合结果表明,足部热感觉对整体热舒适影响显著,下送风与分布式送风垂直温差小于3℃,在送风区域内,可以明显提升人体足部的热感觉,约75%的受试者对热环境表示满意.综合环境参数测试及问卷调查的结果,分布式送风热舒适性的综合效果最好.

**关键词:**送风方式;室内热环境;热感觉;热舒适

**中图分类号:**TU831.4 **文献标志码:**A

## Influence of Household Heat Pump Air Conditioner Air Supply Modes on Thermal Comfort

DONG Mingzhu<sup>1,2</sup>, TAN Jianming<sup>1,2</sup>, XIAO Biao<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1,2</sup>, ZHAO Shunan<sup>1,2†</sup>

(1. State Key Laboratory of Air-conditioning Equipment and System Energy Conservation, Zhuhai 519070, China;  
2. GREE Electric Appliances Inc of Zhuhai, Zhuhai 519070, China)

**Abstract:** In order to study the influence of household heat pump air conditioner air supply modes on thermal comfort, the environmental parameters, as well as 15 subjects' thermal sensation and thermal comfort, were investigated under the air supply modes of medium air supply, down air supply and distributed air supply in the artificial environment laboratory. The results show that when the initial background temperature is 0℃, the air temperature around all human body parts can be increased quickly and evenly by the distributed air supply mode, and the overall thermal sensation and the overall thermal comfort of the subjects rise fastest, so the thermal comfort of the subject has a significant improvement. After the indoor thermal environment is stable, the temperature evenness of the distributed air supply is the minimum of 1.9℃, which makes the subjects in the air supply area feel warm, the local thermal sensation difference is the smallest, and the subjects in the other places do not feel cold. The fitting results of steady-

\* 收稿日期:2021-01-15

基金项目:空调设备及系统运行节能国家重点实验室开放课题资助项目(ACSKL2019KT11), Project of the Open Project Foundation of State Key Laboratory of Air-conditioning Equipment and System Energy Conservation (ACSKL2019KT11)

作者简介:董明珠(1954—),女,江苏南京人,珠海格力电器股份有限公司教授级高级工程师

† 通信联系人, E-mail: zhaosn@cn.gree.com

state local thermal sensation and overall thermal comfort show that the thermal sensation of the feet has a significant effect on the overall thermal comfort, the vertical air temperature difference of the distributed air supply and down air supply is less than 3 °C, and the thermal sensation of feet can be improved in the air supply area. Thus, about 75% of the subjects are satisfied with the thermal environment. In conclusion, the distributed air supply can meet more people's requirements for thermal comfort.

**Key words:** air supply modes; indoor thermal environment; thermal sensation; thermal comfort

人全天有超过80%的时间都是在室内度过<sup>[1]</sup>,舒适的室内热环境不仅让人感到精神愉快,而且有利于提高工作效率<sup>[2]</sup>.目前,空调系统是调控室内热环境的主要手段.然而传统空调系统的送风方式单一<sup>[3]</sup>,室内气流组织分布不合理、温度分布不均匀,难以满足人们对舒适性的要求<sup>[4]</sup>.一直以来,学者们不断探索和研究新型的空调送风方式,努力提高室内环境的热舒适性.

围绕空调送风方式对室内热环境的影响,国内外学者开展了相关研究. Webster等<sup>[5]</sup>研究发现,下送风空调送风量越大时,室内工作区域的热分层高度越小. 林金煌等<sup>[6]</sup>研究得到分布式送风空调系统可改善房间气流组织分布,同时具有节能效果. 李楠等<sup>[7]</sup>分析了冷却顶板与置换通风复合空调系统的热舒适性,得到该系统具有较小的垂直温差,能有效降低吹风感. 张国强等<sup>[8]</sup>则以辐射制冷-独立新风空调系统为研究对象,得到该系统平均空气流速较低,各工况下冷风不满意率均在标准限值内的研究结果. 龚光彩、刘佳<sup>[9]</sup>将空调运行与开门窗习惯结合控制管理,在同等热舒适度下降低了空调系统的能耗. 李念平等<sup>[10]</sup>将桌面风扇与辐射空调相结合,设计了一款新型工位空调系统,有效拓展了夏季室内舒适温度的范围. 此外,也有学者研究了送风方式对人体热舒适性的影响. Chludzinska等<sup>[11]</sup>在背景温度为18 °C的条件下以0.35 m/s风速对脸部和脚踝送热风,发现送热风至脸部对人体热舒适改善更有效. 在16 °C背景温度下,李彩杰<sup>[12]</sup>以相同的风速对人体脸部和脚部送热风,发现送风温度在22 °C以上可避免吹风不适感. 杨宇等<sup>[13]</sup>在低温环境采用小腿送风的方式局部供暖,改善了人体热舒适性. 在偏热的环境中,谈美兰等<sup>[14]</sup>研究发现空气流动可在一定程度改善人体的热舒适性,但风速过大也会导致人体不舒适. 阮立扬<sup>[15]</sup>研究了偏热环境中风扇吹风对人体热舒适性的影响,发现增加风速可显著改善

中等湿度环境下的热感觉,但当风速超过1.3 m/s后,则会产生明显的不适感.

现有研究大多通过实验测试或者数值模拟,分析单一送风方式下的室内热环境及人体热舒适性,较少对比不同送风方式下室内热环境以及人体热感觉、热舒适的差异. 基于此,本文采用环境参数测试和问卷调查相结合的方法,对家用热泵空调中送风、下送风和分布式送风3种不同的送风方式进行研究,分析送风方式对室内热环境及人体热舒适性的影响.

## 1 研究方法

### 1.1 实验条件

实验在人工环境实验室内进行,实验室分为外室与内室:外室配有工况机调节空气温湿度,模拟外界环境;内室依据南京地区居民楼设计,模拟实际用户住所,房间尺寸为6.4 m×6.2 m×3.0 m. 内室的长、宽和高方向上均匀布置6×5×5组热电偶,用来测量室内温度. 共邀请15名受试者全程参与实验,每台样机测试时将受试者分3组、每组5人分别进入实验室体验并按照前、后、左、右和中间的方位分布在房间内. 样机、室内温度测点及受试者位置如图1所示. 实验主要测量的参数为:室内温度、室内风速以及出风温度,所使用的仪器及其测量范围见表1.

### 1.2 实验样机与工况

选取中送风、下送风和分布式送风的家用热泵空调进行测试,三者均3匹机,变频一级能效. 中送风空调出风口为长条形,出风口下沿距离地面0.50 m,制热时水平送风;下送风空调出风口为方形,出风口下沿距离地面0.05 m,制热时水平送风;分布式送风空调具备上下两个风口,上风口下沿距离地面1.70 m,下风口下沿距离地面0.05 m,制热时上风口斜向下送风,下风口水平送风,三台样机的风口位置

如图 2 所示.

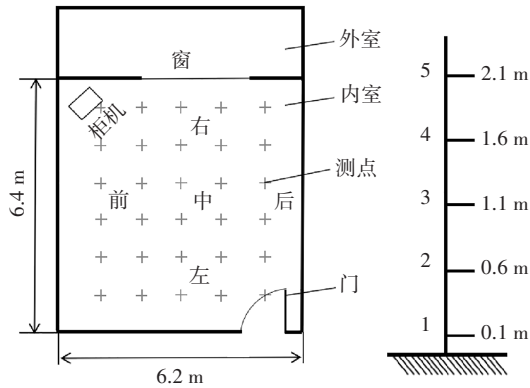


图 1 样机、室内温度测点及受试者位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of prototype, indoor temperature measuring point and subjects location

表 1 实验用仪器及精度

Tab.1 Experimental instruments and accuracy

仪器名称	测量参数及范围	测量精度
T 型热电偶	温度: -50 ~ 200 °C	±0.5 °C
湿度传感器	相对湿度: 20% ~ 95%	±3% RH
转轮式风速仪	风速: 0.3 ~ 45 m/s	±0.3 m/s

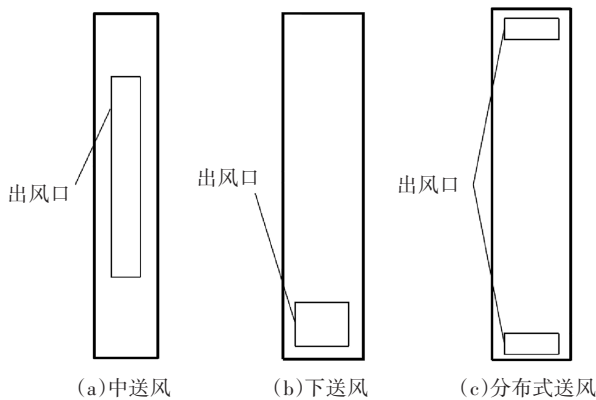


图 2 样机风口位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tuyaere position of prototype

基于用户使用习惯设定空调目标温度. 前 30 min, 空调目标温度设定 30 °C; 后 30 min, 将其设定为 27 °C, 分别考量升温过程和室内环境达到热稳定状态后送风方式对室内热环境以及热舒适性的影响. 实验工况如表 2 所示, 三台样机均在相同的工况下测试. 为保证三者制热量相同, 控制风机转速使三者风量相同, 同时调节系统参数保证出风温度偏差在 ±2 °C. 实验过程中室外温湿度保持不变, 保证每次实验时房间的供暖负荷不变.

表 2 实验工况

Tab.2 Test conditions

外环温度/°C	外环湿度/%	内环初始温度/°C	设定温度	风量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
-5	70	0	前 30 min 设定 30 °C 后 30 min 设定 27 °C	920

### 1.3 实验流程与调查问卷

实验开始前, 受试者先在环境温度为 26 °C 的空调房停留 5 min, 以便身体状态恢复至稳定, 并填写个人信息; 然后穿军大衣进入环境温度为 -5 °C 的外环待 15 min, 模拟用户长时间在室外停留的情形; 最后进入测试房间, 分坐于不同位置并开机, 开始正式测试. 开机后, 所有受试者立即填写问卷, 之后每间隔 2 min 填写一次至实验结束. 每次实验持续进行 1 h.

问卷调查内容包括受试者局部与整体热感觉以及整体热舒适. 其中, 局部热感觉部位为: 头部、躯干和足部. 调查中使用的标度见表 3. 采用风速仪测量并记录受试者局部位置附近风速.

表 3 调查问卷投票标度

Tab.3 Questionnaire voting scale

标度/°C	热感觉	热舒适
3	热	非常舒适
2	暖	舒适
1	较暖	有点舒适
0	适中	没感觉
-1	较凉	有点不舒适
-2	凉	不舒适
-3	冷	非常不舒适

## 2 结果与分析

### 2.1 室内热环境分析

实验的前 30 min, 设定温度为 30 °C, 测点温度快速上升, 室内环境处于动态温升阶段; 实验的后 30 min, 设定温度降低到 27 °C, 温升速率变慢; 实验的最后 10 min, 室内平均温度接近设定温度, 且随时间变化波动较小, 室内环境达到热稳定状态. 对实验前 30 min 和最后 10 min 的环境参数进行分析, 研究不同送风形式下动态和稳态的室内热环境.

#### 2.1.1 局部空气温度

实验过程中, 取 0.1 m、0.6 m 和 1.1 m 的垂直高度为受试者足部、躯干和头部的代表高度. 在温升阶

段,将各个受试者不同部位周围4个测点的平均温度作为该部位的平均空气温度,其结果如图3所示.中送风出风口底端距离地面0.50 m,热风直吹人体躯干和头部,其周围空气温度上升快;热风上浮使得空间下层热风少,足部空气温度上升慢.下送风出风口贴近地面,热风与空间下层空气充分混和后再上浮到空间上层,足部空气温度上升快,躯干和头部的空气温度上升较慢.分布式送风上风口斜向下送风,热风直吹人体头部和躯干,其周围空气温度上升快;下风口水平送风,足部空气温度上升也较快.

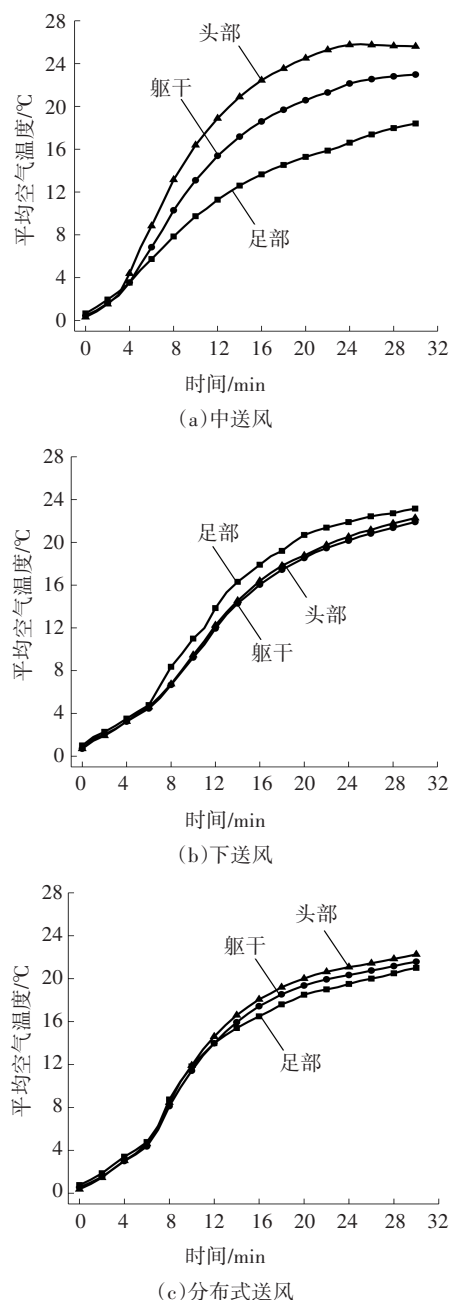


图3 不同送风方式下各部位平均空气温度  
Fig.3 Average air temperature of each part under different air supply modes

综上所述,中送风可快速提升人体头部和躯干的空气温度;下送风可快速提升人体足部的空气温度;分布式送风可快速提升人体各部位的空气温度.

### 2.1.2 垂直温差

垂直温差是影响人体热舒适的重要因素之一,其定义为:室内环境达到热稳定状态后,人员头脚位置垂直方向上存在的空气温差,即坐姿时,距地面1.1 m与0.1 m处平均温度的差值. ISO 7730—2005<sup>[16]</sup>提到,垂直温差上限值应不大于3 °C. 室内热环境稳定后,不同送风方式下,各个水平面的平均温度如图4所示. 由图可知:中送风垂直温差接近6 °C;下送风垂直温差接近0 °C;分布式送风垂直温差在2 °C左右. 下送风与分布式送风的垂直温差均在3 °C以下,满足标准规定.

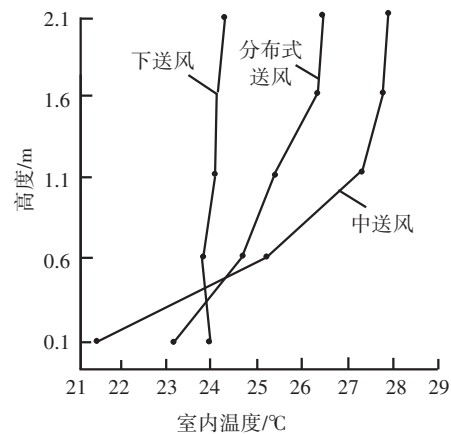


图4 不同送风方式下室内垂直温度分布  
Fig.4 Indoor vertical temperature distribution under different air supply modes

0.1 m和1.1 m水平面温度分布云图分别如图5和图6所示. 中送风出风口距离地面较高,热风受浮升力影响向上运动而无法加热靠近地面的区域,0.1 m处平面温度最低,垂直温差最大. 下送风出风口贴近地面,热风贴附地面流动,0.1 m处平面温度最高,垂直温差最小. 分布式送风下风口水平送风,热风贴附地面流动提升了空间下层空气温度;上风口斜向下导风,提升了空间中上层的空气温度,垂直温差较小.

综上所述,分布式送风与下送风能够提升空间下层空气温度,降低垂直温差.

### 2.1.3 温度均匀度

温度均匀度是另一个影响人体热舒适的重要因素,其定义为:室内环境达到热稳定状态后,在同一时刻,不同测点温度的差异情况. 温度均匀度较大



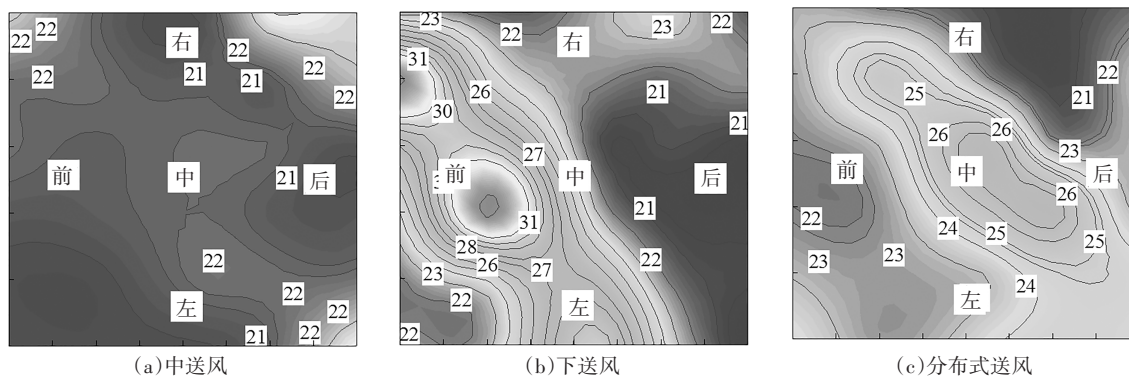


图 5 不同送风方式下 0.1 m 水平面温度云图

Fig.5 Temperature contour of 0.1 m horizontal plane under different air supply modes

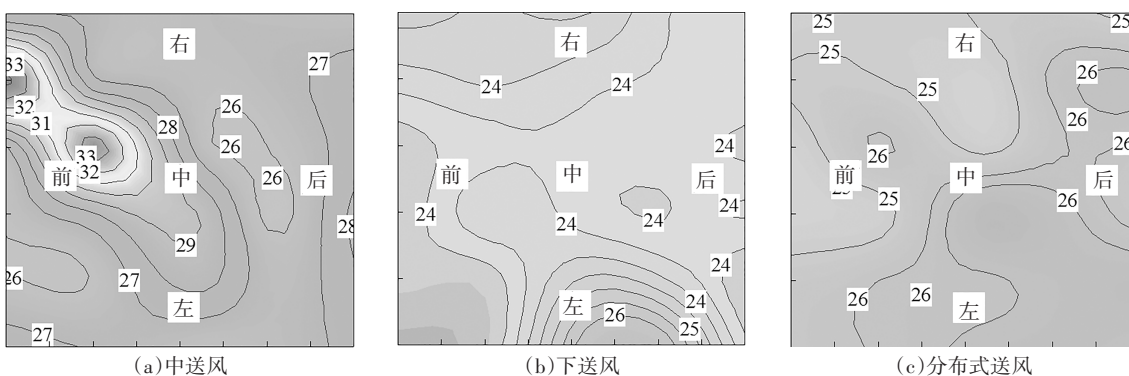


图 6 不同送风方式下 1.1 m 水平面温度云图

Fig.6 Temperature contour of 1.1 m horizontal plane under different air supply modes

时房间温度分布不均,不同位置的热舒适性差异较大. GB/T 33658—2017<sup>[17]</sup>规定,室内温度均匀度应不大于 2℃. 室内热环境稳定后,按照式(1)计算出第*i*时刻的瞬时温度均匀度:

$$T_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (t_i - t_{avg})^2}{m - 1}} \quad (1)$$

式中: $T_s$ 为瞬时温度均匀度,℃; $t_i$ 为检测点*i*的瞬时温度,℃; $t_{avg}$ 为所有检测点的瞬时平均温度,℃; $m$ 为温度检测点总数. 室内温度均匀度为实验最后 10 min 瞬时温度均匀度的平均值. 不同送风方式下的室内温度均匀度如图 7 所示,由图可知:中送风温度均匀度最大,为 2.9℃;下送风温度均匀度为 2.3℃;分布式送风温度均匀度最小,为 1.9℃.

温度均匀度可从垂直方向和水平方向两个层面分析. 在垂直方向上,中送风垂直温差最大接近 6℃,而下送风和分布式送风垂直温差小于 3℃,温度分布均匀性更优. 在水平方向上,中送风和下送风在出风口附近热量集中,水平温度梯度较大,温度分布不均;分布式送风上下出风,风量被分散避免了

局部区域温度过高,不同位置的空气温差不超过 5℃,温度分布均匀性更优. 因此,分布式送风在水平和垂直方向上温度分布均匀,温度均匀度最小,营造的室内环境更舒适.

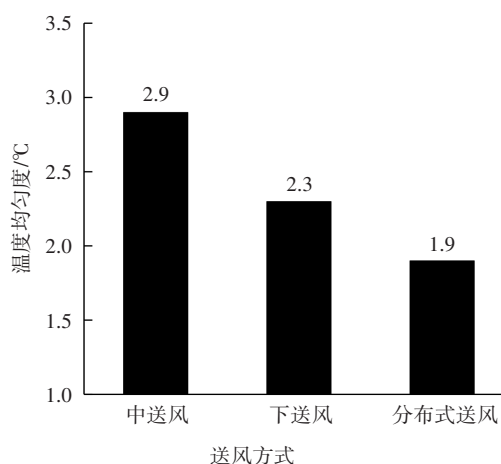


图 7 不同送风方式下温度均匀度

Fig.7 Temperature evenness under different air supply forms

## 2.2 动态热舒适性分析

实验的前 30 min,受试者的热感觉和热舒适均

处于动态变化的过程. 对受试者前 30 min 的问卷数据进行分析, 研究不同送风方式下受试者的动态热舒适性.

### 2.2.1 动态整体热感觉

热感觉是指人体由热环境得到的冷热刺激所产生的主观感觉. 图 8 为不同送风方式下 5 个位置整体热感觉投票平均值的变化. 0 min 时, 受试者从室外进入室内, 整体热感觉为冷, 此时整体热感觉投票在 -2.5 到 -2.8 之间, 证明本实验初始热感觉的一致性较好. 5 min 后, 整体热感觉开始显著提高. 24 min 时分布式送风和中送风的整体热感觉投票为 0, 受试者整体热感觉适中, 但下送风的整体热感觉投票为 -0.7, 受试者仍感觉较冷.

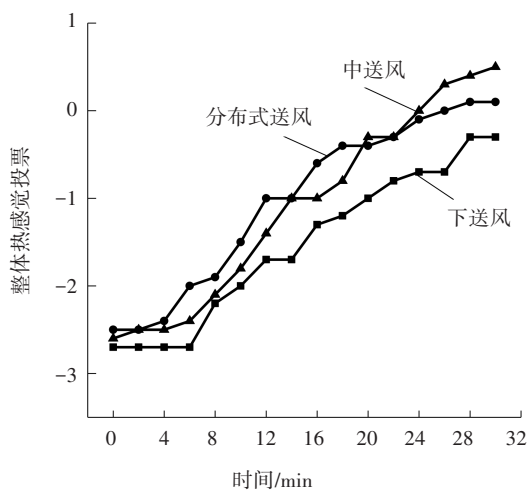


图 8 动态整体热感觉

Fig.8 Dynamic-state overall thermal sensation

已有研究表明<sup>[18]</sup>, 胸背部的热感觉对整体热感觉影响显著. 通常人体各部位的热感觉受周围空气温度的影响, 由前文可知, 下送风足部空气温度上升快, 胸背部空气温度上升慢热感觉较低, 受试者整体热感觉上升较慢. 与下送风相比, 分布式送风和中送风可以直接加热对整体热感觉影响较大的胸背部, 因此, 分布式送风和中送风可以更快地提升受试者的整体热感觉.

### 2.2.2 动态整体热舒适

热舒适是指人对周围热环境所做的主观满意度评价. 图 9 为不同送风方式下 5 个位置整体热舒适投票平均值的变化. 0 min 时, 整体热舒适投票在 -2.5 到 -2.8 之间, 受试者均处于不舒适状态. 5 min 后, 受试者的整体热舒适投票开始显著提高. 在

实验的前 20 min, 分布式送风的整体热舒适投票更高, 受试者对热环境满意度上升更快.

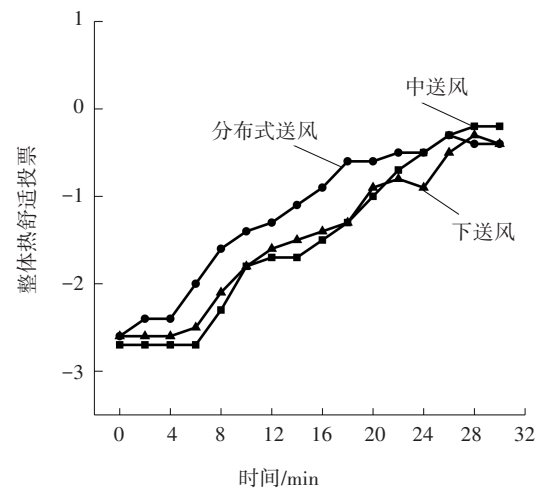


图 9 动态整体热舒适

Fig.9 Dynamic-state overall thermal comfort

Zhang 等<sup>[18]</sup>研究表明, 使各部位热感觉相近, 避免局部不适可提升整体热舒适度. 在实验的前 20 min, 分布式送风上下出风, 空间上层和下层空气同时强制对流换热, 各平面温度均匀上升, 受试者各部位热感觉更接近, 提升了整体热舒适度; 中送风, 躯干和头部空气温度上升更快; 而下送风, 足部空气温度上升更快, 受试者不同部位的热感觉存在差异, 影响了整体热舒适度. 因此, 与中送风和下送风相比, 分布式送风可以更快地提升受试者的整体热舒适度.

### 2.3 稳态热舒适性分析

实验的最后 10 min, 受试者的热感觉和热舒适基本处于稳定状态. 对受试者最后 10 min 的问卷数据进行分析, 研究不同送风方式下受试者的稳态热舒适性.

#### 2.3.1 稳态局部热感觉

制热时, 送风区域内风速高, 对流换热效果好, 空气温度明显高于无风区域. 由图 5 可知: 下送风的前位置和左位置以及分布式送风的中间位置处于送风区域内; 由图 6 可知: 中送风的前位置处于送风区域内. 相关研究<sup>[11-13]</sup>指出在低温的环境中, 局部提供暖风可有效改善人体热感觉, 因此, 分析送风区域内受试者的热感觉可以更好地体现出送风方式对热舒适性的影响.

图 10 为不同送风方式下, 送风区域内受试者局

部热感觉投票的平均值。各部位的热感觉受周围空气温度的影响,由图 5 和图 6 可知:中送风前位置的头部空气温度接近 30℃,而足部空气温度在 21℃左右;分布式送风中间位置头部和足部的空气温度在 26℃左右。因此,中送风头部热感觉投票最高,足部热感觉投票为 0 最低,局部热感觉差异最大;分布式送风各部位的热感觉投票都大于 1,均处于较暖的状态,局部热感觉差异最小。

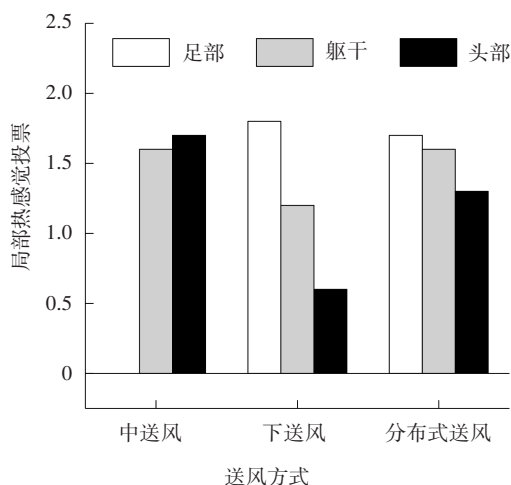


图 10 稳态局部热感觉

Fig.10 Steady-state local thermal sensation

综上所述,在送风区域内,分布式送风的受试者各部位感觉较暖,局部热感觉差异最小。

### 2.3.2 稳态整体热感觉

投票值为-3、-2、-1的整体热感觉投票归为“冷侧”,0为“中性”,1、2、3归为“热侧”,图 11 为不同送风方式下整体热感觉投票率。

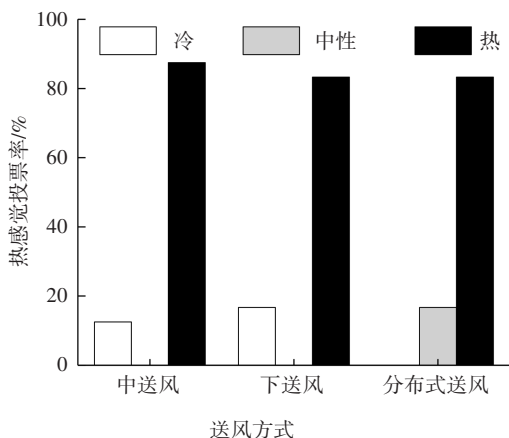


图 11 稳态整体热感觉投票率

Fig.11 Steady-state overall thermal sensation voting rate

由图 11 可知:3 种送风方式下,超过 80% 的受试者整体热感觉投票都在“热侧”;中送风和下送风仍有一部分受试者处于“冷侧”;分布式送风受试者整体热感觉投票都处于不冷的状态。室内热环境达到稳定状态后,不同送风方式下,温度分布不同,使得不同位置受试者的整体热感觉存在差异。与中送风和下送风相比,分布式送风温度均匀度最小为 1.9℃,不同位置的空气温差不超过 5℃,所以,在测试过程中分布式送风不同位置受试者的整体热感觉更为接近,所有受试者都不觉得冷。

### 2.3.3 稳态整体热舒适

投票值为-3、-2、-1的热舒适投票归为不舒适,0为没感觉,1、2、3归为舒适,图 12 为不同送风方式下整体热舒适投票率。

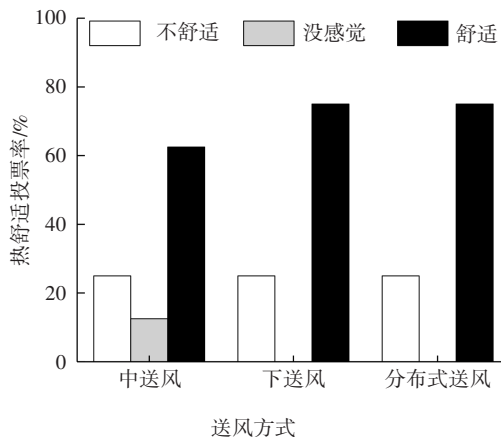


图 12 稳态整体热舒适投票率

Fig.12 Steady-state overall thermal comfort voting rate

由图 12 可知:3 种送风方式下,都会有受试者觉得不舒适,且感觉到不舒适的投票比例相近;分布式送风和下送风,有 75% 左右的受试者感觉舒适,而中送风,感到舒适的投票比例下降到 60% 左右。这是因为中送风垂直温差接近 6℃,部分受试者处于“头热脚冷”的状态,局部不适影响了受试者的整体热舒适。分布式送风和下送风垂直温差小于 3℃,局部不适对整体热舒适的影响小,提升了受试者对热环境的满意度。因此,与中送风相比,分布式送风和下送风更能提升受试者的整体热舒适。

### 2.3.4 稳态局部热感觉与整体热舒适回归模型

局部热感觉差异大时,整体热舒适度较差。为获得稳定状态下局部热感觉对整体热舒适的影响,采用多元线性回归方法进行拟合。拟合方程为:

$$OTC = A_f \times LTS_f + A_b \times LTS_b + A_h \times LTS_h + A_0 \quad (2)$$

式中:OTC为整体热舒适投票; $A_f$ 、 $A_b$ 和 $A_h$ 分别为足部、躯干和头部拟合系数; $A_0$ 为拟合常数; $LTS_f$ 、 $LTS_b$ 和 $LTS_h$ 分别为足部、躯干和头部热感觉投票。

拟合结果为:

$$OTC = 0.50LTS_f + 0.33LTS_b + 0.06LTS_h + 0.26 \quad (3)$$

其中, $R^2=0.96$ ,相关性较好。拟合结果与实验结果的绝对偏差主要处于 $\pm 0.2$ 的范围内,该模型的拟合效果较好。

从上述模型可以看出,制热工况下,足部的热感觉对整体热舒适影响显著,头部的热感觉对整体热舒适的影响最弱。在送风区域内,分布式送风和下送风显著提升了受试者足部的热感觉。因此,与中送风相比,下送风和分布式送风的受试者对热环境更满意。

### 3 结论

本文采用客观环境参数测试和主观问卷调查相结合的方法,对3种家用热泵空调送风方式的热舒适性进行了研究与分析,结果表明分布式送风热舒适性的综合效果最好,具体结论如下:

1)初始背景温度为0℃时,分布式送风可快速、均匀地提升人体各部位的空气温度,受试者的整体热感觉以及整体热舒适上升最快,受试者的热舒适性可得到显著改善。

2)室内热环境稳定后,相比于中送风和下送风,在分布式送风作用下,温度均匀度最小为1.9℃,在该环境中处于送风区域内的受试者各部位感觉较暖,局部热感觉差异最小,其余区域内的受试者都不觉得冷。

3)对稳态局部热感觉与整体热舒适的拟合结果表明,不同送风方式下,对整体热舒适影响最大的身体部位是足部。与中送风相比,下送风与分布式送风的垂直温差小于3℃,在送风区域内可较明显地提升人体足部的热感觉,约75%的受试者表示对热环境感到满意。

### 参考文献

- [1] 张婧,张群,成辉,等.《绿色建筑评价标准》室内空气质量指标的演进分析[J].建筑科学,2020,36(8):137-142.  
ZHANG J, ZHANG Q, CHENG H, *et al.* Evolution of indoor air quality index in assessment standard for green building[J]. Building Science, 2020, 36(8): 137-142. (In Chinese)
- [2] 刘晶.夏热冬冷地区自然通风建筑室内热环境与人体热舒适的研究[D].重庆:重庆大学,2007:1-2.  
LIU J. Study on the indoor thermal environment and human thermal comfort in natural ventilation building in summer-hot and winter-cold zone[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007: 1-2. (In Chinese)
- [3] 张辉,林金煌,陈姣,等.分布式送风技术在家用热泵空调上的应用[J].制冷与空调,2018,18(2):17-21.  
ZHANG H, LIN J H, CHEN J, *et al.* Application of distributed air supply technology to household heat pump air conditioner[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2018, 18(2): 17-21. (In Chinese)
- [4] 李念平,李娜,何颖东,等.多种局部供冷方式下人体热反应特性[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(3):140-148.  
LI N P, LI N, HE Y D, *et al.* Human thermal responses with various local cooling methods[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 140-148. (In Chinese)
- [5] WEBSTER T, BAUMAN F, REESE J. Underfloor air distribution: thermal stratification [J]. ASHARE Journal, 2002, 44(5): 26-28.
- [6] 林金煌,陈姣,何振健.分布式送风气流组织节能特性研究[J].制冷技术,2017,37(6):67-71.  
LIN J H, CHEN J, HE Z J. Research on energy-saving characteristics of distributed air flow organization [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(6): 67-71. (In Chinese)
- [7] 李楠,廖建科,郑文茜,等.冷却顶板与置换通风复合空调系统的热舒适性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(6):2434-2440.  
LI N, LIAO J K, ZHENG W Q, *et al.* Analysis on thermal comfort of combined system with cooling ceiling and displacement ventilation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(6): 2434-2440. (In Chinese)
- [8] 张国强,傅凯能,张帆,等.住宅辐射制冷-独立新风空调系统负荷比的多目标优化[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(9):158-168.  
ZHANG G Q, FU K N, ZHANG F, *et al.* Multi-objective optimization of load ratio of CRCP-DOAS system in residential buildings [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(9): 158-168. (In Chinese)
- [9] 龚光彩,刘佳.空气载能辐射空调混合通风协同运行研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(5):148-156.



- GONG G C, LIU J. Research on synergistic operation of mixing ventilation for air carrying energy radiant air-conditioning [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(5): 148-156. (In Chinese)
- [10] 李念平, 贺德, 何颖东, 等. 热湿环境工位辐射空调加桌面风扇热舒适实验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(11): 198-204.
- LI N P, HE D, HE Y D, *et al.* Experimental study on thermal comfort with radiant cooling workstation and desktop fan in hot-humid environment [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(11): 198-204. (In Chinese)
- [11] CHLUDZIŃSKA M, BOGDAN A. The effect of temperature and direction of airflow from the personalised ventilation on occupants' thermal sensations in office areas [J]. *Building and Environment*, 2015, 85: 277-286.
- [12] 李彩杰. 偏冷环境局部热送风对人体热舒适影响的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 66-67.
- LI C J. Effect of local heating air supply on thermal comfort in cold environment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 66-67. (In Chinese)
- [13] 杨宇, 李百战, 刘红, 等. 低温环境暖风对改善人体舒适性的实验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(10): 4142-4147.
- YANG Y, LI B Z, LIU H, *et al.* Experimental research of improvement on human comfort by warm airflow in cold environment [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(10): 4142-4147. (In Chinese)
- [14] 谈美兰, 李百战, 李文杰, 等. 夏季空气流动对人热舒适性的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(2): 70-73.
- TAN M L, LI B Z, LI W J, *et al.* Physiological experiment for human thermal comfort of air flow in summer [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(2): 70-73. (In Chinese)
- [15] 阮立扬. 偏热环境下落地风扇舒适性调控策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 43-44.
- RUAN L Y. Study on comfort control strategy of landing fan in heat environment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019: 43-44. (In Chinese)
- [16] Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO 7730—2005 [S]. Geneva: International Standard Organization, 2005: 3-13.
- [17] 室内人体热舒适环境要求与评价方法: GB/T 33658—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 2-3.
- Thermal comfort requirements and evaluation for indoor environment: GB/T 33658—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 2-3. (In Chinese)
- [18] ZHANG H, ARENS E, HUIZENGA C, *et al.* Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(2): 399-410.