

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-434-10

落地扇与空调联合运行舒适性与节能性实验研究

高敏 毕海权 王宏林

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 建筑能源消耗日益严峻,暖通空调能耗占比持续上升;在保证室内热舒适的条件下,合理降低建筑夏季空调能耗是实现建筑节能的重要措施。根据落地扇产生的气流扰动对热环境的影响效果,通过实验测试及舒适性问卷的方式研究落地扇对办公室内的温度分布、舒适性以及节能性的影响,从而实现节能条件下的室内热舒适,并给出落地扇与空调联合运行的建议。研究表明:落地扇与空调联合运行提高温度分布均匀性、加强室内气流扰动,联合运行相比空调单独运行时房间较高温度区域获得最高1.4℃的降温;平均热感觉的优化程度最高可从有一点热(0.37)变化到有一点冷(-0.52);落地扇扰动作用有效降低空调回风口的温度,减少空调高能耗运行的时间,从而实现最高13.82%的节能效率。

【关键词】 落地扇与空调联合运行;气流扰动;热舒适;能耗
中图分类号 TU83 文献标识码 A

Experimental Study on Comfort and Energy Saving of Floor Fan and Air Conditioner Combined Operation

Gao Min Bi Haiquan Wang Honglin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Building energy consumption is increasingly serious, HVAC energy consumption proportion continues to rise. Under the condition of indoor comfort, it is an important measure to reduce the energy consumption of air conditioning in summer. In this paper, according to the effect of airflow disturbance of floor fan on indoor thermal environment, the influence of floor fan on temperature distribution, comfort and energy saving in office were studied through experimental test and comfort questionnaire, so as to achieve indoor thermal comfort under energy-saving conditions, and suggestions were given for the combined operation of floor fans and air conditioning. The results show that the combined operation of floor fans and air conditioners can improve the temperature distribution uniformity and indoor airflow disturbance. Compared with the single operation of the air conditioner, the combined operation can obtain the highest temperature drop of 1.4℃ in the higher temperature area of the room. The average thermal sensation optimization degree can be changed from a little hot (0.37) to a little cold (-0.52). The disturbance effect of floor fan can effectively reduce the temperature of the air return outlet of the air conditioner, and reduce the operation time of the air conditioner with high energy consumption, thus achieving the maximum energy saving efficiency of 13.82%.

【Keywords】 floor fan and air-conditioner combined operation; airflow disturbance; thermal comfort; energy consumption

0 引言

夏季恶劣天气频发,人们越发地离不开空调系

统提供舒适的生活、工作环境,而巨大的空调能耗也成为夏季电力紧张的重要原因。为了实现建筑的

节能减排, 需要对建筑能耗中占比较大的空调系统进行节能优化探究。对于最常使用的柜式空调, 由于其作用特点与人们的使用习惯, 常出现空调出风方向单一、沿出风方向舒适性较好, 而房间的其他区域甚至靠近空调的区域没有良好降温效果的现象; 因室内环境不均匀而导致大量的能源浪费^[1]。

已有学者通过调研发现, 大多数办公人员认为办公室内的空气流速过低、达到舒适的风速可高于 ASHRAE 标准的上限值^[2]。实验结果得出, 在环境温度为 30℃、相对湿度为 80% 的环境中, 受试者能接受的风速上限可达 1.6m/s^[3]。研究发现气流扰动在较高温度环境中能对人体热感觉产生补偿作用, 提高人体舒适性^[4,5]; 从而在空调房间加入气流扰动, 可降低空调设定温度, 既满足舒适性又具有节能效果^[6-8]。而风扇作为人们最早使用的夏季消暑家用电器, 相对于空调拥有更低的能耗; 能利用空气扰动增加人体的对流散热^[9-11]、减少不舒适感觉^[12]。

本文基于舒适性实验, 研究落地扇位置、摇定等形式对室内温度、舒适性分布的影响, 以及落地扇与空调联合运行相对空调单独运行的节能效率。

1 实验方案

1.1 实验条件

落地扇与空调联合运行实验在西南交通大学某办公室内进行, 房间仅一面窗墙比为 3:1 的外墙, 外窗设有外遮阳和不透光的窗帘。办公室布置方式如图 1 所示。

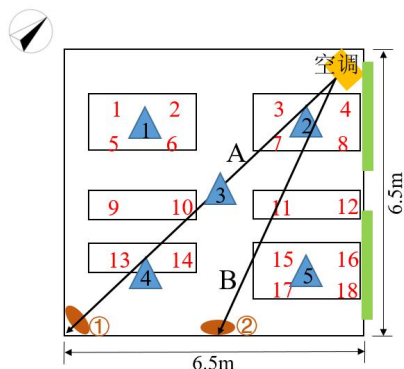


图 1 办公室内部结构示意图

Fig.1 Office internal structure

参加实验的受试者均为该办公室工作人员共 12 名, 其中男性 9 人, 女性 3 人。所有受试者均参与每项实验, 受试者信息统计结果如表 1 所示。

表 1 受试者信息

Table 1 Subject information

信息参数	最大值	平均值	最小值	
男性	年龄 (岁)	24	23.1	22
	身高 (cm)	175	172.9	170
	体重 (kg)	73	65.3	50.3
	体质系数	24.1	21.8	18.3
	年龄 (岁)	25	24.6	24
女性	身高 (cm)	163	160	158
	体重 (kg)	53	52	51
	体质系数	21.2	20.4	19.2

1.2 实验工况

实验主要探究落地扇摆放位置、强度、朝向、空调出风方向等因素对室内环境的影响, 设置的实验工况具体如表 2 所示。其中, 空调出风方向如图 1 所示, A 向代表空调出风方向为南向角落, B 向代表空调出风方向为东南向墙中点; 各工况空调设定温度均为 26℃。实验工况中落地扇位置①、②的选取原则为: 结合办公室内部布置情况, 按照不改变原有布置, 不妨碍办公室正常工作的原则。

表 2 实验工况

Table 2 Experimental condition

工况	空调		落地扇							
	出风方向	位置	摆/定	强度	仰/俯					
J-1	A	①	定向	二档	平视					
J-2					仰头					
J-3				三档	平视					
J-4					仰头					
J-5				二档	摇头	平视				
J-6						仰头				
J-7				三档		平视				
J-8						仰头				
Z-1				B		②	定向	二档	平视	
Z-2									仰头	
Z-3								三档	平视	
Z-4									仰头	
Z-5								摇头	二档	平视
Z-6									仰头	
Z-7	三档	仰头								

续表 2 实验工况

工况	空调		落地扇		
	出风方向	位置	摇/定	强度	仰/俯
Z-8	B	①	定向	二档	平视
Z-9					仰头
Z-10					平视
Z-11			摇头	三档	仰头
Z-12					平视
Z-13					仰头
Z-14			三档	平视	
Z-15				仰头	

1.3 实验步骤

受试者需提前 30min 达到实验地点,在实验开始前 15min 内保持静坐休息,避免剧烈运动和心理状态的改变而影响实验结果。受试者进入实验室

后,每个受试者所在位置在不同工况下均固定不变,并做好相关记录。实验期间,实验人员及时测量、记录实验数据;受试者根据提示完成舒适性调查问卷的填写。在实验过程中,受试者可以读书、聊天等活动,但不能饮水、进食、离开座位活动等,以保证相对恒定一致的代谢率;不得交流与实验内容相关的任何话题,以免影响实验结果。

为详细记录室内参数变化较大阶段的舒适性变化情况,在空调开启和落地扇开启的动作之后,舒适性问卷的填写时间间隔较短。在参数较为稳定的阶段,舒适性问卷的填写时间间隔适当延长。实验的第一个周期和第二个周期的舒适性问卷填写时间节点均相同,实验流程如图 2 所示。认为实验期间的两个小时之内室外参数波动较小可忽略不计。每个实验工况均进行多次重复实验,使实验结果具有普遍性。

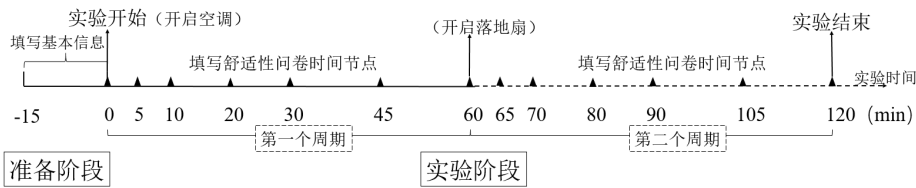


图 2 实验流程

Fig.2 Experimental procedure

2 测试与问卷

2.1 实验仪器



(a) 能耗电表 (b) 热敏风速仪

图 3 实验仪器

Fig.3 Experimental instrument

能耗、热环境测量仪器如图 3 所示。能耗电表采用高精度功率计量插座,可累计计数,能耗测量精度为 0.001kWh。热线风速仪测量温度的量程为 -20℃至 60℃,精度为±0.5℃;测量风速的量程为 0m/s 至 30m/s,精度为 0.05m/s+0.05 倍测量值。符合标准[13,14]对温度、风速测量精度要求。

2.2 测点布置

实验所在办公室面积为 42.25m²。根据标准规定[15]: 房间或区域面积大于 30m²但小于等于 60m²的,应选择测试区域对角线上的三个等分点作为测点。实验房间内测点布置如图 1 所示,5 个测点位置由三角形表示,测点高度选择根据标准规定[15]: 人体为坐姿时,测点应位于距离地面 0.6m 处。

2.3 舒适性问卷

为保证数据的准确性,问卷需保证有效性和可靠性。问卷有效性通过实验所获得的数据反映真实情况的程度来衡量,多次测量结果的一致性衡量实验结果的可靠性。问卷具体内容如下:

以国家标准关于 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定[16]采用国际标准 ISO7730,即为七级刻度标尺,结合夏季中国人的语言习惯,确定对热感觉标尺的表述分别为: 很冷 (-3)、冷 (-2)、有一点冷 (-1)、适中 (0)、有一点热 (+1)、热 (+2)、

很热 (+3)。设置热舒适投票评价环境的舒适程度以佐证受试者对环境的热感觉投票准确性。热舒适投票标尺为: 舒适 (0)、稍不舒适 (1)、不舒适 (2)、很不舒适 (3)、不可忍受 (4)。

3 落地扇对温度分布的影响分析

实验测试的主要数据为温度、风速值, 图 4 为工况 Z-1 的 5 个测点温度变化趋势, 3600s 开启落地扇后各测点温度均发生不同程度的下降。为便于不同工况之间进行比较, 消除初始温度不同对实验结果的影响, 针对各测点的温降值进行归一化处理。

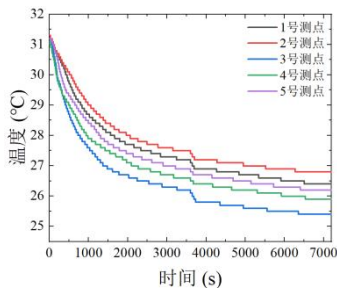


图 4 工况 Z-1 测点温度趋势

Fig.4 Temperature trend of measuring point under condition Z-1

由测点温度监测的变化趋势可以看出: 在空调单独运行的 2500s 至 3600s 的温降斜率和开启落地扇与空调联合运行的 4000s 至 7200s 的温降斜率已大致相同。这一现象说明这两个阶段均为空调作用引起的测点温降, 而在 3600s 至 4000s 时的温降原因则是开启落地扇的扰动作用。为比较各工况落地扇对室内温度的影响程度, 同时消除室内初始温度不一致的影响, 提出无量纲温度 T_{fan} 将室内温降值转换为统一的指标进行对比分析, 计算公式如下:

$$T_{fan} = \frac{T_{3600s} - T_{mean}}{T_{0s} - T_{mean}} \quad (1)$$

其中: T_{0s} 为 0s 时的测点温度, 即初始时刻的测点温度, °C; T_{3600s} 为 3600s 时的测点温度, 即空调单独运行最后时刻、落地扇即将开启时刻的温度, °C; T_{mean} 为 4000s 至 7200s 测点温度的平均值, °C。

其中, 选取落地扇与空调联合运行稳定过程 4000s 至 7200s 的温度平均值 T_{mean} 的原因在于: 首先, 这种取值方式既避免选取温度对应的时间过长而过多的包括空调降温作用, 又避免选取温度对应

的时间太短而忽略联合运行中落地扇影响效果的完整性; 其次, 落地扇与空调联合运行稳定阶段前后的温度差值较小也满足取平均值的合理性; 综合分析选取该平均值较为合适。

实验过程中温度、风速均为实时监测数据, 各工况温度下降趋势均相似, 由于篇幅有限仅给出落地扇与空调联合运行的工况 Z-1 的温度变化趋势, 其余工况实验结果以测点的无量纲温度 T_{fan} 表示。

3.1 落地扇位置对室温的影响

实验主要研究两种不同的落地扇放置位置对室内温度分布的影响, 其中①号位置位于南向角落处, ②号位置位于东南向墙壁中央; 空调固定 B 向出风。

对于落地扇处于三档、平视状态, 对比工况 Z-3 和 Z-10 由图 5 可以得出: 落地扇在②号位置的工况 Z-3 对 1、3 号测点的降温效果更明显; 落地扇在①号位置的工况 Z-10 对 2、4、5 号测点的温降影响更明显。原因在于: Z-3 工况落地扇位于②号位置其作用主要使到达房间东南向的空调冷气快速的到达房间西北向, 直接受影响的 3 号测点降温更加明显; 落地扇持续的作用下, 气流向房间西、北向角落扩散, 对 1、2 号测点产生较小的扰动。Z-10 工况的落地扇位于①号位置与空调出风形成交叉气流扰动加强, 将大量的空调冷空气吹向 2、5 号测点一侧, 2 号测点在空调单独运行期间的温度较高, 开启落地扇后 2 号测点温降最为明显达 1.3°C, 无量纲温度 T_{fan} 达 0.265。其次 4 号测点离落地扇较近且在其辐射范围之内降温效果较明显。

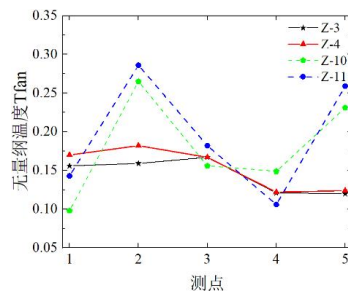


图 5 落地扇位置的影响对比

Fig.5 Comparison of the influence of floor fan position

对于落地扇处于三档、仰头状态的工况对测点温度的影响对比, Z-4 号工况落地扇位于②号位置, 在房间上部形成扰动直接越过 3 号测点到达房间西北向再分散, 在 1 号测点相较于 Z-11 工况形成更加明显的温降。Z-11 工况落地扇在①号位置对 2、

5号测点的降温效果更加突出,在2号测点处的温降值是所有工况中的最大值1.4℃,无量纲温度 T_{fan} 为0.286。其原因在于空调向房间上部出风,落地扇处于仰头工况在房间上部产生强烈的气流扰动,使空调吹出的冷风更快速地到达房间下部,三档仰头的落地扇吹出的气流能达到更远处,气流扰动越过了3号测点,故2号测点降温效果较3号测点明显。但Z-11工况落地扇扰动减少空调冷量到达4号测点附近,故4号测点的温降低于Z-4工况。

3.2 落地扇摇定对室温的影响

落地扇的摇头、固定主要影响落地扇扰动的范围和强度。固定吹风影响范围较小,但在辐射范围内的扰动强度较大且能够产生持续作用;摇头模式下落地扇扰动范围较广,辐射范围内扰动强度呈周期性的波动。

(1) 空调 A 向出风

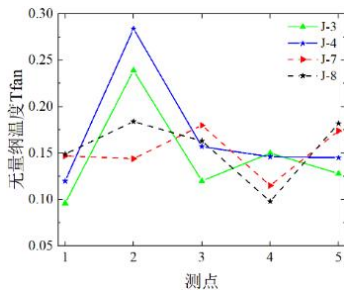


图6 空调A向落地扇摇定的影响对比

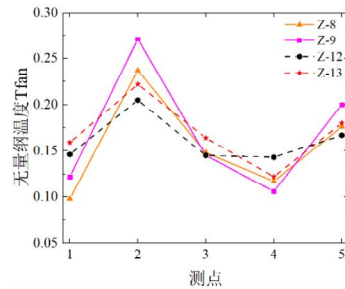
Fig.6 Comparison of the influence of floor fan rocking under air conditioner A-direction

空调A向出风时,落地扇定向、摇头对测点降温作用的影响差别最大的是J-4、J-8工况如图6所示,对比得到摇头状态下对1、3、5号测点的温降更明显,定向状态下对2、4号测点的温降更明显。2号测点的降温效果差异最为明显相差0.5℃,无量纲温度 T_{fan} 相差0.094。原因在于:空调A向出风、落地扇位于①号位置时,落地扇的扰动将直接影响冷量的分布。落地扇定向状态时冷量被持续地送到房间对角区域,再由于J-4工况为三档仰头,落地扇的扰动不受房间下部物体阻挡且有较高的强度,使得2号测点降温效果显著。由于摇头工况扰动周期性作用强度减弱,故在2号测点的降温作用不如定向工况明显。但对于1、5号测点,则是摇头工况J-8的降温效果更好,原因在于1、5号测点在房间东、西向角落,不在落地扇定向工况产生的扰动范围之内。而摇头工况的扰动范围更广,

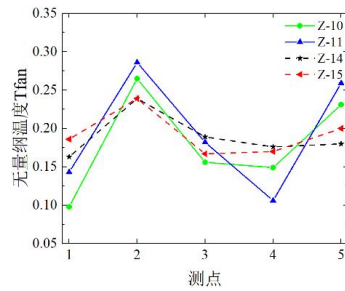
能在该处产生较小的气流扰动同时伴随少量冷量的到达实现降温作用。

(2) 空调 B 向出风

对比落地扇放置在①号位置时定向工况Z-8至Z-11与摇头工况Z-12至Z-15,各测点的无量纲温度 T_{fan} 出现不同的规律,如图7所示。摇头工况下1、3、4号测点降温效果更好,定向工况下2、5号测点的降温效果更佳。其原因在于:摇头工况产生的扰动更能到达1号测点处而降温;2号测点由于定向落地扇的持续扰动效果使更多的冷量到达该处而降温;3、4号测点所在区域均在落地扇出风辐射范围内,但摇头工况能产生更大范围的扰动的同时更有利于空调冷量的扩散;5号测点原空调单独运行时温度较高,定向工况在2号测点附近持续的降温作用对5号测点的影响强于摇头工况直接对5号测点产生的间歇性扰动形成的降温作用,故定向工况下5号测点的降温效果更显著。



(a) 二档落地扇摇定的影响对比



(b) 三档落地扇摇定的影响对比

图7 空调B向①号落地扇摇定的影响对比

Fig.7 Comparison of the influence of floor fan rocking under air conditioner B-direction

由图8对比Z-1与Z-5、Z-2与Z-6、Z-4与Z-7工况发现落地扇位于②号位置时,落地扇摇头工况的降温效果普遍高于定向工况。由于落地扇位于②号位置,定向工况下的扰动影响范围小,仅在正对落地扇的过道处产生强烈的扰动;落地扇摇头工况能在房间更大范围以及人体周围产生扰动,即使在

房间各区域产生间歇性的扰动, 也比落地扇固定吹风的降温效果明显。分析测点的无量纲温度发现落地扇位于②号位置时, 由于办公室内部的陈设、人员分布近似对称布置, 落地扇和空调出风方向均在对称轴上, 对称布置的测点 1、2 和测点 4、5 对应出现近似的无量纲温度值。

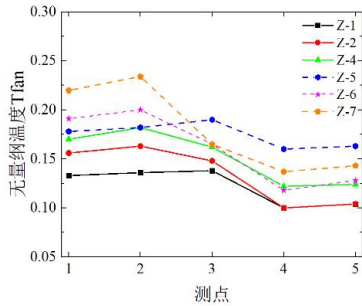


图 8 空调 B 向②号落地扇摇定的影响对比

Fig.8 Comparison of the influence of floor fan② rocking under air conditioner B-direction

对于落地扇摇定的设置, 综合分析可以得出落地扇处于摇头状态对温度的影响效果稍好, 虽然落地扇为定向的 Z-9 至 Z-11 工况的 2 号测点降温明显, 但整体分析室内各处的温降, 落地扇摇头作用的范围更广, 综合效果稍好。

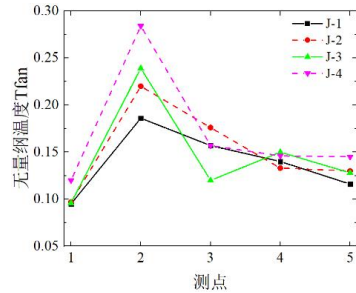
3.3 落地扇仰俯对室温的影响

(1) 空调 A 向出风

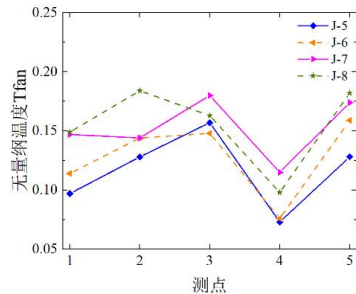
对于落地扇定向工况如图 9 (a), 落地扇仰头工况对 1、2、3、5 号测点的温降影响更显著; 落地扇平视工况 4 号测点有更明显的降温效果。分析落地扇仰头的作用特点可以知道, 仰头状态向房间上部出风, 其作用特点有两点: 其一, 不再受到房间下部物体对气流扰动的阻碍, 能到达更远距离; 其二, 产生的扰动能与空调吹出的冷风形成相反方向的扰动, 更利于落地扇对空调冷量的控制。故定向的仰头状态对 2、3 号测点温降直接影响、从而对 1、5 号测点有降温效果; 由于落地扇离 4 号测点更近, 落地扇平视状态更能直接对该处产生扰动影响。

对于落地扇摇头工况如图 9 (b), 落地扇仰头形式对 1、2、5 号测点的温降影响更显著, 落地扇平视工况 3、4 号测点有更明显的降温效果。由于仰头状态下能在距离落地扇较远的区域产生扰动, 并且摇头状态的周期性扰动范围更大, 1、2、5 号测点附近均在落地扇的扰动范围之内, 形成较强的

降温扰动作用。而摇头状态下的平视工况的扰动区域较小, 3、4 号测点距离落地扇较近并在其扰动区域内, 故 3、4 号测点的降温作用在落地扇平视时更显著。



(a) 定向落地扇仰俯的影响对比



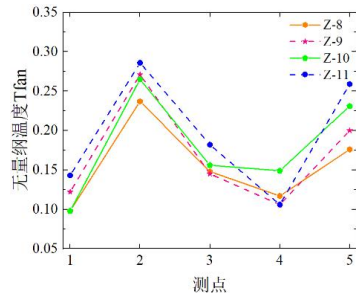
(b) 摇头落地扇仰俯的影响对比

图 9 空调 A 向落地扇仰俯的影响对比

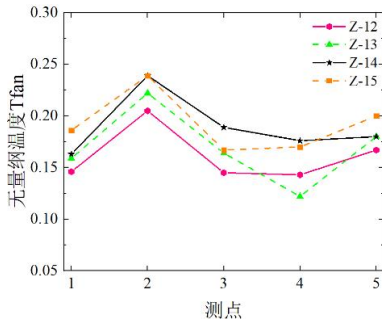
Fig.9 Comparison of the influence of floor fan leaning under air conditioner A-direction

(2) 空调 B 向出风

落地扇位于①号位置时落地扇仰俯的影响对比如图 10 所示, 定向仰头工况影响 1、2、5 号测点较为明显, 主要由于仰头工况在房间上部实现空气的扰动, 使得空调冷量较为均匀的在房间下部产生降温效果。定向平视的工况在房间下部产生扰动, 对位于房间上部的空调冷量分布的直接影响效果和影响范围较小; 但能直接影响 4 号测点附近的温度分布, 形成更明显的降温效果。对于摇头工况规律相似, 仍是仰头工况对大部分测点的降温效果影响优于平视工况。



(a) 定向落地扇仰俯的影响对比



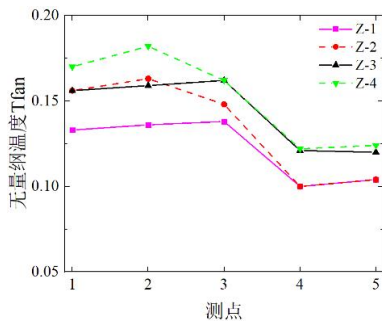
(b) 摇头落地扇仰俯的影响对比

图 10 空调 B 向①号落地扇仰俯的影响对比

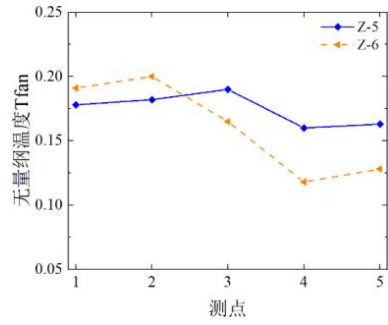
Fig.10 Comparison of the influence of floor fan① leaning under air conditioner B-direction

落地扇位于②号位置时，对比工况 Z-1 至 Z-4 如图 11 (a) 所示，定向工况下二、三档对落地扇仰俯状态具有相同的规律。落地扇仰头工况下温降程度普遍较高，且主要影响 1、2 号测点的温降程度。原因在于仰头工况下落地扇主要在房间上部产生扰动影响空调的送风气流，直接将部分空调冷量吹到房间西北向进行降温；平视工况则是将空调到达东南方向的送风通过落地扇的搅动送到房间西北方向，故降温效果更弱。定向工况下 4、5 号测点主要受空调出风的直接影响，故落地扇的仰俯形式对其附近的降温作用影响小。

落地扇②号位置摇头工况下的仰头和平视形式对测点温降的影响规律有所不同如图 11 (b) 所示。对比 Z-5、Z-6 工况可以看出，落地扇仰头主要影响 1、2 号测点温降，平视状态主要影响 4、5 号测点温降。主要原因是：摇头状态下的落地扇更能在较大范围内产生扰动；并且落地扇仰头工况主要在较远距离产生扰动、平视工况主要在近距离产生扰动。故仰头、平视状态对 4、5 号测点的温降效果有明显的差距。



(a) 定向落地扇仰俯的影响对比



(b) 摇头落地扇仰俯的影响对比

图 11 空调 B 向②号落地扇仰俯的影响对比

Fig.11 Comparison of the influence of floor fan② leaning under air conditioner B-direction

仰头、平视状态对于 3 号测点的影响因落地扇的摇定有所差异，对于定向工况 Z-1 和 Z-2，仰头工况对 3 号测点无量纲温度影响更大；对于摇头工况的 Z-5、Z-6，则是平视工况对 3 号测点无量纲温度影响更大。分析其形成原因：虽然摇头工况对 3 号测点附近产生的是周期性的扰动，但平视状态在高度方向上产生的扰动距离 3 号测点更近，即冷量扰动更强烈、降温效果更明显；定向仰头工况产生的扰动虽是持续的，但扰动在高度方向、水平方向上距离 3 号测点均更远、效果减弱。此规律同样适用于空调 A 向出风、落地扇位于①号位置时，仰头、平视状态对于 3 号测点的影响因落地扇摇定而形成的差异。

综合看来，落地扇在仰头工况产生的扰动范围更大、更易与空调出风产生强烈掺混直接影响冷量分布，故对室内温度分布的影响更显著。

3.4 落地扇挡位对室温的影响

分析落地扇强度对比工况测点无量纲温度值，可以发现当落地扇在三档时绝大多数测点的无量纲温度都大于落地扇置于二档时。

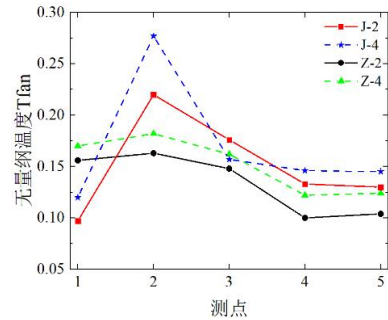


图 12 落地扇强度的影响对比

Fig.12 Comparison of the influence of floor fan strength

在对比 J-2、J-4 工况时出现异常如图 12 所示, 两工况均为空调 A 向出风、落地扇位于①号位置定向仰头工况, 仅是落地扇强度不同。J-2 工况的 3 号测点的降温效果优于 J-4 工况, 原因在于: 落地扇档位越高, 产生扰动的强度越大, 更能使气流扰动到达更远处。即落地扇在①号位置, 向房间北向角落吹风, 将冷量送往北向角落时, 二档工况时扰动主要作用范围靠近更 3 号测点, 3 号测点降温明显; 三档工况扰动强度加大、扰动范围更靠近 2 号测点, 3 号测点降温效果减弱。

4 落地扇对舒适性的影响分析

受试者的热感觉投票统计如图 13 所示, 60min 的热感觉是空调单独运行的最后时刻受试者记录的热感觉, 65min 的热感觉是落地扇加入空调联合运行 5min 后的受试者热感觉。整体来看, 落地扇的加入对各工况的平均热感觉均有不同程度的优化效果, 热感觉从偏热一侧向偏冷一侧移动。90min 和 120min 的热感觉仍在图 13 中表示, 对比落地扇开启之后 65min、90min、120min 三个时刻的热感觉, 可以发现三个时刻的热感觉相近且几乎没有明显变化。故可以将 60min 的热感觉与 65min 的热感觉对比分析落地扇开启前后的平均热感觉差异。

柱状图的高度可以反应热感觉的平均不舒适程度, 柱状图在 0 线之上对应热感觉, 柱状图在 0 线以下对应冷感觉。J-1、J-5 工况 65min 的平均热感觉达到了适中的状态, 故图中无柱状图显示。

由热感觉对比图可以发现, Z-11 工况的落地扇对热感觉的优化作用最强, 平均热感觉从有一点热 (0.37) 变化到有一点冷 (-0.52), Z-11 工况也是温降最明显的工况, 特别是对于空调单独运行时处于温度较高区域的受试者热感觉降低作用显著。

对比落地扇位于②号位置的 Z-1 至 Z-7 工况和落地扇位于①号位置的 Z-8 至 Z-15 工况的平均热感觉投票的统计图, 分析落地扇摆放位置对舒适性的影响。发现落地扇位于①号位置的各工况对平均热感觉影响程度普遍强于落地扇在②号位置的工况。但其中 Z-5 工况对舒适性的优化程度强于 Z-12 工况, 原因在于当落地扇平视的摇头工况时, 落地扇在①号位置仅在较小范围内影响受试者的热感觉, 即对 9、10、13、14、15 号受试者的热感觉有提升; 而落地扇位于②号位置时, 对 9、10、11、

12、13、14、15、17 号受试者的热感觉有较大提升、对 6、7 号受试者的热感觉稍有提升。

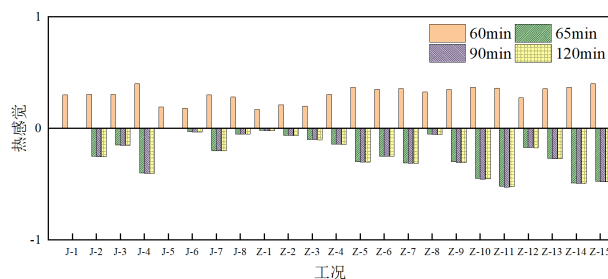


图 13 热感觉变化对比

Fig.13 Comparison of thermal sensation changes

落地扇摇头或定向对热感觉、热舒适的影响, 由空调出风方向不同而出现不同的规律。对于空调 A 向出风, 落地扇位于①号位置时, 落地扇定向工况的热感觉改善作用明显强于摇头工况。原因在于定向工况时落地扇主要改善 7、8、10、11 号受试者的热感觉, 其中 7、8 号受试者的热感觉在空调 A 向出风时最难达到热舒适; 而摇头工况下 7、8 号受试者的热感觉在开启落地扇后的改善程度并不明显, 对 9、13、14、15 号受试者的舒适性稍有提高。整体来看, 空调朝 A 向出风时定向工况对舒适性影响更大。对于空调 B 向出风, 受试者普遍认为落地扇摇头模式舒适性优于定向模式。其中对于落地扇位于②号位置, 摇头工况的扰动范围更大, 其舒适性提高较定向工况显著。对于落地扇位于①号位置, 摇头工况比定向工况热感觉舒适性稍好但不显著, 原因在于摇头工况比定向工况主要改善 5、6、9 号受试者的热感觉, 两工况其他受试者的热感觉相近。

落地扇的仰头、平视工况对舒适性的影响范围与落地扇的距离有关。落地扇仰头工况在较远处产生扰动改善舒适性, 落地扇扰动到达的区域往往是空调冷量不能很好覆盖的区域, 故对空调单独运行时舒适性较差、需要重点改善的区域舒适性提高显著。落地扇平视工况仅对就近的个别位置舒适性有改善作用, 对整体热舒适的影响较小。就房间内整体的舒适性而言, 落地扇仰头工况的改善效果更佳。

空调出风方向对整体舒适性的影响主要表现为 B 向出风的舒适性优于 A 向出风, 关键在于 B 向出风能使冷量较好的分布扩散, 避免冷量集中在角落难以扩散的现象; 再辅以落地扇的扰动作用,

有利于冷量扩散、气流扰动带来冷感觉的双重作用，舒适性提升更加明显。

5 能耗分析

空调和落地扇能耗均由耗电电表直接测量，各工况节能率如图 14 所示。节能率计算公式如下：

$$\eta = \frac{Q_{AC} - Q_{AC+FAN}}{Q_{AC}} \quad (2)$$

其中： Q_{AC+FAN} 为落地扇与空调联合运行的能耗总和，kWh； Q_{AC} 为空调单独运行的能耗，kWh。

空调单独运行时室内温度分布均匀性较差，主要表现为室内靠外墙部分热源集中、受室外热环境影响较大温度较高；靠近内墙部分直接受空调送风

影响，温度较低、舒适性更高。从而，回风口附近仍维持较高温度，以至于空调需要较长时间的运行，直到回风温度达到设定温度。但此时房间大部分区域的温度已降至设定温度以下，而造成能源的浪费。

落地扇与空调联合运行时，落地扇搅动空气使室内温度更加均匀，提高舒适性的同时降低了回风口附近温度与室内平均温度的差值，减少空调满负荷运行的时间，从而达到节能的目的。对比各工况，Z-11 工况对应最高的节能效率达 13.82%，该工况对回风口附近温度的降温作用最大，节能率最高。J-5 工况对空调回风口附近的降温作用相比于其他工况较弱，节能率仅 3.05%。

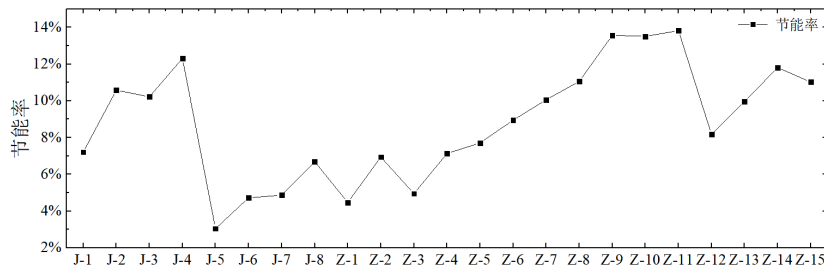


图 14 节能率

Fig.14 Energy saving rate

6 风扇与空调联合运行建议

落地扇与空调联合运行既能改善室内温度分布又能加强空气流动、提高舒适性，同时满足节能需求。基于上述研究结果，对风扇与空调的联合运行提出如下建议：

(1) 风扇的放置要求应尽量符合以下条件：

其一，放置位置能尽量弥补空调作用不易到达的地方；其二，能与空调出风产生强烈的掺混，影响冷量的分配使之在室内更加均匀的分布。

(2) 对于风扇增大室内空气流动，提高热舒适的作用，联合运行时可适当提高空调设定温度，实现更高的节能效果。

(3) 对于气温稍高的过渡季节，开启空调使房间温度降低之后再关闭空调，开启风扇加强室内空气扰动从而保持热舒适，避免气温不高而持续开启空调造成能源浪费。

7 结论

根据落地扇与空调联合运行的实验结果，得出

如下结论：

(1) 落地扇产生的扰动影响室内气流组织，提高室内温度分布的均匀性；落地扇开启后在室内产生最高 1.4℃ 的降温。

(2) 落地扇与空调联合运行使人体平均热感觉向偏冷一侧改善，改善作用最高可从有一点热 (0.37) 变化到有一点冷 (-0.52)。

(3) 落地扇的摆放位置应根据空调出风方向决定，尽可能与空调出风产生强烈的掺混。落地扇的摇定、仰俯、强度等形式应使冷量更均匀的分布，弥补空调单独作用较弱的区域。

(4) 落地扇与空调联合运行能有效影响空调回风口附近温度，减少空调持续高能耗运行的时间，节能率最高可达 13.82%。

参考文献：

- [1] Zhao Rongyi, Sun Shufeng, Ding Rongyi. Conditioning strategies of indoor thermal environment in warm climates[J]. Energy & Buildings, 2003,36(12):1281-

- 1286.
- [2] Zhang Hui, Arens E, Fard SA, et al. Air movement preferences observed in office buildings[J]. International journal of biometeorology, 2007,51(5):349-60.
- [3] 翟永超.湿热环境下空气流动对人体热舒适影响的实验研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [4] 谈美兰,李百战,李文杰,等.夏季空气流动对人体热舒适性的影响[J].土木建筑与环境工程,2011,33(2):70-73.
- [5] Li Huang, Qin Ouyang, Yingxin Zhu, et al. A study about the demand for air movement in warm environment[J]. Building and Environment, 2013,61:27-33.
- [6] 田元媛,许为全.热湿环境下人体热反应的实验研究[J].暖通空调,2003,(4):27-30.
- [7] Huang Li, Ouyang Qin, Zhu Yingxin. A study about the demand for air movement in warm environment[J]. Building and Environment, 2013,61(3):27-33.
- [8] 嵇赟喆,涂光备.强化室内空气流动以改善热舒适的节能研究[J].暖通空调,2004,(4):14-18.
- [9] R J Dear, K G Leow, S C Foo. Thermal comfort in the humid tropics: Field experiments in air conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore[J]. International Journal of Biometeorology, 1991,34(4): 259-265.
- [10] Busch John F. A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand[J]. Energy and Buildings, 1992,18(3-4):235-249.
- [11] C Cândido, RJ de Dear, R Lamberts, et al. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone[J]. Building and Environment, 2009,45(1):222-229. C. Cândido, R.J. de Dear, R. Lamberts, L. Bittencourt,
- [12] 卫诣凡.偏热环境下适宜风速实验与理论研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [13] ISO7726. Ergonomics of thermal environment-instruments for measuring physical quantities[S].
- [14] JGJ/T 347-2014,建筑热环境测试方法相关标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [15] GB/T 50785-2012,民用建筑室内热湿环境评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [16] GB/T 18049-2000,中等热环境 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定[S].北京:中国标准出版社, 2000.

(上接第 421 页)

的实时监测,可以实时对空调设备及控制系统进行故障诊断,同时对空调系统运行能效进行评估。

(4) 冷却水系统高效运行采用以设备实际运行参数为基础、系统能耗为控制目标的实时自行校准运行具有系统简单、稳定和易实现的现实意义。

参考文献:

- [1] 刘阳.碳中和大背景下建筑节能材料的发展方向[J].中国建材,2021,5:144-147.
- [2] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [3] 刘江涛,余晓平,刘丽莹.重庆某医院大楼空调冷却水系统诊断分析[J].制冷与空调,2015,29(5):528-532.
- [4] 沈启,魏庆芄,陈永康.空调系统节能优化运行与改造案例研究(4):冷却塔[J].暖通空调,2010,40(8):45-50.
- [5] GB 19577-2015,冷水机组能效限定值及能源效率等级[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [6] GB 19761-2020,通风机能效限定值及能效等级[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [7] GB 19762-2007,清水离心泵能效限定值及节能评价价值[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [8] 蔡宏武,魏庆芄.冷水机组运行性能评价及节能诊断[J].暖通空调,2008,38(增刊):106-111.