

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-549-07

基于 Airpak 的柜式空调 出风方式对普通家用场景热环境的影响研究

李 帆 史洲弟 吴鸿亮 向 艳

(成都轻工职业技术大学 成都 611731)

【摘 要】 在普通民用住宅中,柜式空调被大量使用,但在冬季实际运行过程中存在“脚冷”的舒适性问题,人体舒适感较差。针对上述问题,基于 CFD 模拟软件,探讨不同送风方式在家用场景的热环境使用情况,通过温度云图、不均匀系数、空气分布特性指标 (*ADPI*) 对不同送风方式进行对比,研究表明相较于传统上送风形式,分布式送风的柜式空调在降低送风温度的同时,脚部 0.1m 高度处平均温度可提高约 2℃,房间整体不均匀系数可降低约 30%,*ADPI* 提升 10%以上,能有效改善室内的热舒适性环境。

【关键词】 Airpak 软件; 送风方式; 室内热环境; 热舒适

中图分类号 TU831 文献标志码 A

Research on the Impact of the Air Distribution Method of Cabinet-Type Air Conditioners Based on Airpak Software on the Thermal Environment in Ordinary Household Scenarios

Li Fan Shi Zhoudi Wu Hongliang Xiang Yan

(Chengdu Qingong Polytechnic University, Chengdu, 611731)

【Abstract】 In ordinary civilian residences, cabinet air conditioners are widely used. However, during actual operation in winter, there is a comfort issue of "cold feet", and the human comfort level is relatively poor. In response to the above problems, this paper, based on CFD simulation software, explores the application of different air supply methods in the thermal environment of home scenarios. Through temperature cloud maps, the temperature unevenness coefficients, and air distribution performance index (*ADPI*), different air supply methods are compared. The research shows that compared with the traditional overhead air supply form, the cabinet-type air conditioner with distributed air supply can reduce the supply air temperature while increasing the average temperature at the 0.1m height of the feet by approximately 2℃, reducing the overall temperature unevenness coefficient of the room by about 30%, and increasing the *ADPI* by more than 10%, effectively improving the thermal comfort environment in the room.

【Keywords】 Airpak software; Supply air method; Indoor thermal environment; Thermal comfort

0 引言

在当今生活场景中,室内环境舒适度已成为影响人们生活品质和工作质量的重要因素之一^[1,2],而空调作为调控室内环境舒适度的关键设备之一,其技术

的迭代和产品功能方面的升级始终备受人们的关注^[3]。据有关数据统计,室内工作人员一天有 80%的时间处于室内空间之中^[4],因此,如何优化空调系统以提高人体使用的舒适感,已成为现如今空调技术研

基金项目: 2025 年四川省省级大学生创新训练计划 (S202511553006)

作者(通讯作者)简介: 李 帆 (1996-), 男, 硕士, 助教, 研究方向为室内热环境, E-mail: 2211456755@qq.com

收稿日期: 2026-03-30

究领域的重点之一^[5]。在改善人体舒适感方面,众多学者提出了许多的办法,例如对送风口形状进行优化让温度场和流场相较普通送风口更加均匀^[6,7],或通过调整柜机空调的送风角度,优化气流的扩散路径与覆盖范围^[8-10],以此提升人体热舒适感。此外,改变空调的送风方式也是不少学者所探讨的对象之一。

现如今,对室内气流组织的分析与研究的方式主要有以下四类,即区域模拟、喷射的物理研究、模型实验和应用计算流体力学技术(CFD)的数值模拟^[11]。孙畅等^[12]将传统柜式空调和圆柱立柜式空调的送风方式进行了模拟对比,分析得出圆柱立柜式空调的送风面积更大,空气流动组织也更为理想。周兴法等^[5]通过热舒适性实验室测试出了三种出风口状态,即纵向出风口式、上出风口式和上下出风口式对热舒适性的影响,发现单一的上出风口式有着最佳的热舒适性。但在吴欢龙等^[13]对传统上出风口的柜机空调和某款已量产的上下出风式柜机空调进行 CFD 的模拟对比下,得出上下出风口式柜机空调相对于传统柜机空调的制冷、制热效果相对更好且室内的温度分布得更加均匀。张辉等^[14]采用试验对比分析了分布式送风(上下双风口)与传统上部送风及正面送风气流组织对舒适性及能耗的影响,并得出相较于传统送风方式,分布式送风在制热时垂直空气温差可降低 71%~81%,耗电量可相对降低 29%~48%。在董明珠等^[15]对家用热泵空调送风方式对热舒适度影响的探究中,他们分别选取了三种不同送风方式的家用热泵空调,分别是中送风、下送风和分布式送风(上下双风口),在保证三者功率相同的条件下进行了实验,并得出分布式空调的热舒适性综合效果最好。

梳理现有柜式空调送风方式对热舒适性影响的相关实验与模拟研究,我们可以发现当前的研究成果在家庭常用空间上的适配性仍存在进一步的优化空间。基于此,本文将以家庭使用场景下的人体热舒适性为研究对象,借助 Airpak 模拟软件,构建更接近于实际使用空间的物理模型,通过对不同送风方式的模拟仿真对比,进行系统性的分析,进而探究出更适配家庭常用空间且能有效提升人体热舒适性的柜式空调送风方案。

1 数值模拟

考虑柜式空调在民用住宅客厅中的广泛应用

性,且在冬季运行工况下,空调送风存在上浮趋势,并伴随温度分层现象^[16]。所以以冬季典型的民用住宅客厅作为研究对象。

1.1 模型建立

本文以常见的家庭客厅空间为模型进行研究,该房间模型长×宽×高为 8.4m×5m×3m,客厅面积 42m²,柜式空调放置在角落,房间呈客厅+小餐厅的形式,中间有一小隔墙进行分割,分别放置有电视、冰箱用电设备,东墙面和西墙面上分别有大小为 1.5m×3m 的外窗。该房间内有 5 位人员活动,均设为坐姿,具体的三维模型如图 1 所示。

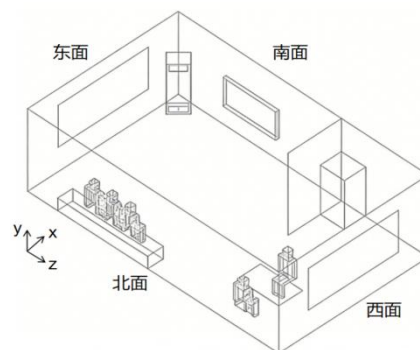


图 1 房间三维模型图

Fig.1 3D model of the room

研究送风方式对室内环境的影响,结合柜式空调自身结构,以下三种送风方式进行工况模拟,分别为上送侧回(工况一)、下送侧回(工况二)、分布式送风(工况三)。冬季供暖工况,房间负荷以 60W/m² 进行估算,室内温度设定为 20℃,相对湿度为 60%,送风温差宜控制在 5~10℃ 范围内,经计算送风温度为 27℃ 适宜。分布式送风采用上下风口同时送风时,为保持与单风口送风方式总热量一致,经计算降低分布式的送风温度至 25℃,风口设置条件如表 1 所示。

表 1 各送风方式参数

Table 1	Parameters of different air supply methods		
	工况一	工况二	工况三
回风口尺寸	0.1m×0.8m	0.1m×0.8m	0.1m×0.8m
送风口尺寸	0.3m×0.2m	0.3m×0.2m	0.3m×0.2m
送风方向	垂直于风口 平面	垂直于风口 平面	垂直于风口 平面
送风风速	2.5m/s	2.5m/s	2.5m/s
送风温度	27℃	27℃	25℃

送风口皆位于空调正面,距空调柜顶和距地高

度均为 0.1m, 回风口位于空调侧面, 三种工况皆使用相同回风口, 风口布局图如图 2 所示。

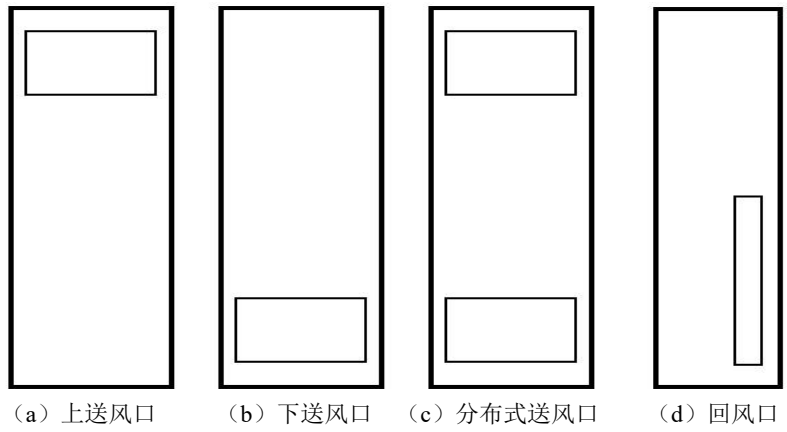


图 2 送、回风口示意图

Fig.2 Schematic of supply & return air outlets

1.2 边界条件

空调采暖多适用于夏热冬冷地区的民用住宅, 建筑围护结构热工系数参照《实用供热空调设计手册》进行选取, 具体数值如表 2 所示。

表 2 围护结构传热系数

Table 2 Heat transfer coefficient of building envelope		
构造形式	传热系数 W/(m ² ·℃)	
墙体	水泥砂浆+砖墙	1.7
窗户	Low-E 中空玻璃	2
地板	普通混凝土	1.5

对于冬季一般建筑物, 围护结构的基本耗热量按一维稳定传热过程进行处理, 对围护结构基本耗热量进行计算, 如式 (1) 所示:

$$q' = KF(t_n - t'_w)\alpha \tag{1}$$

式中: K 为围护结构的传热系数, W/(m²·℃); F 为围护结构的面积, m²; t_n 为冬季室内计算温度, 取值为 20℃; t'_w 为供暖室外计算温度, 取值为 2℃; α 为温差修正系数, 外墙取值为 1, 非采暖房间相邻隔墙及楼板取值为 0.4。

由于风压和热压的影响, 室外冷空气会通过门、窗等缝隙渗透入室内, 采用换气次数法对冷风渗透耗热量进行计算, 如式 (2) 所示:

$$Q = 0.278n_k V_n \rho_w c_p (t_n - t'_w) \tag{2}$$

式中: V_n 为房间的内部体积, m³; n_k 为房间的换气次数, 取值为 0.8, 次/h; ρ_w 为空气密度, 取值为 1.2kg/m³; c_p 为空气比热, kJ/(kg·℃)。

本次模拟房间内的负荷主要考虑人员、用电设备和围护结构传热。天花板传热与房间照明负荷抵

消, 简化为绝热条件; 冷风渗透耗热量经计算约为 600W, 将冷风渗透负荷值附加在外窗上, 房间总体热负荷约为 2600W, 热负荷指标约为 60W/m², 符合民用建筑热负荷概算指标, 边界条件的具体数值如表 3 所示。

表 3 房间边界条件

Table 3 Boundary conditions of the room				
	数量	尺寸/m	模型名称	取值
东、西外墙	2	3×5	wall	-30W/m ²
南内墙	1	8.4×3	wall	-10W/m ²
天花板	1	8.4×5	wall	绝热
地板	1	8.4×5	wall	-10W/m ²
窗户	2	1.5×3	wall	-100W/m ²
冰箱	1	0.8×1.8×1.7	block	200W
电视	1	1.8×1×0.1	block	200W
人员	5	—	person	100W/人
北外墙	1	8.4×3	wall	-30W/m ²
沙发	1	3×0.45×0.5	block	绝热

1.3 模型选择

基于前文对门窗室外空气的渗透进行了简化, 所以模拟不考虑冷风实际渗透对室内气流组织的影响并忽略太阳辐射, 并且将室内空气视为不可压缩的理想气体。在 CFD 模拟中, 零方程由于计算效率高、鲁棒性强、收敛快速稳定, 所以在室内环境模拟中被广泛使用^[11], 因此本文采用零方程模型对室内湍流空气流动进行模拟。

1.4 网格无关性

为保证模拟结果不受网格数量影响, 需对网格无关性进行验证^[17-19]。选取三个工况中的分布式工

况进行模拟, 网格数量分别为 10.1 万、13.8 万、16.8 万、20.1 万、23.5 万和 26.2 万, 进行网格无关性检验, 对室内不同高度下的截面平均温度进行对比, 结果如图 3 所示。

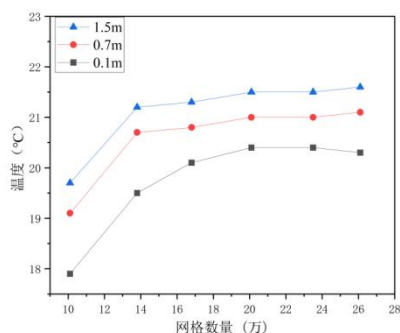


图 3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

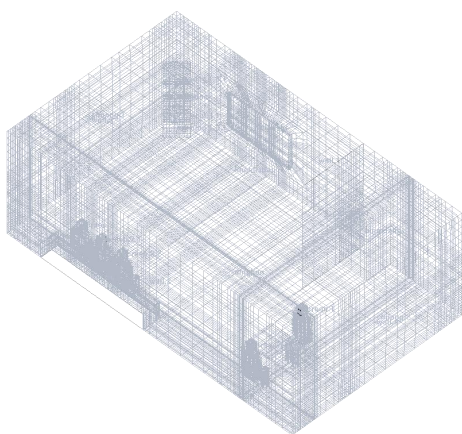


图 4 网格分布情况

Fig.4 Grid distribution situation

随着网格数量的增加, 各截面平均温度趋于平稳, 当网格数量大于 20.1 万时, 各计算结果趋于收敛与网格数量无关, 考虑计算效率, 本文采用 23.5 万的网格进行划分。网格最大尺寸限定为 $0.25\text{m} \times 0.15\text{m} \times 0.25\text{m}$, 采用软件自动对网格进行划分为正六面体形式, 在送回风口处附近进行网格加

密, 网格分布情况如图 4 所示。收敛标准定为: 能量方程残差小于 10^{-6} , 其余方程的残差小于 10^{-3} , 三个工况都在 350 步左右处收敛。

2 模拟结果与分析

2.1 模拟设计

基于前文的数学模型与物理模型, 本文将针对工况一(上送风)、工况二(下送风)和工况三(分布式送风)进行测量点选取, 对三种工况进行对比, 测量点的选取按客厅和餐厅的区域进行平均分布, 测量点分布如图 5 所示。考虑民用住宅的实际使用情况, 且房间人员主要为坐姿, 对于垂直高度的选取, 研究多集中在 0.1m、0.7m 和 1.5m 的截面高度^[20,21], 分别对应人员脚部、身体、头部区域。

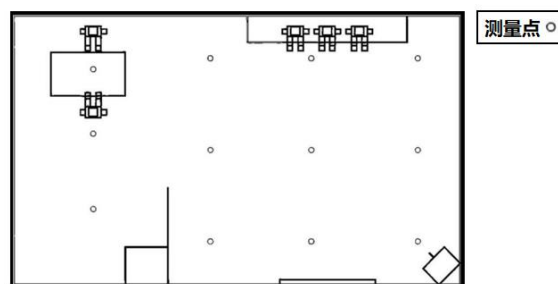


图 5 测量点分布图

Fig.5 Measuring point distribution

2.2 温度场分析

CFD 温度分布云图能直观反映房间内温度的分布情况, 分别对 0.1m、0.7m、1.5m 高度处做温度场分析。

从图 6 可见, 在距离地面 0.1m 高度处, 工况一的房间截面温度整体偏低; 工况二虽在送风口前方有明显的温升区域, 但其他区域温度也处于较低水平, 气流扩散效果并不理想; 工况三的温度分布均匀性最优, 房间截面整体呈现均匀的温度分布, 且温度维持在 20°C 以上。

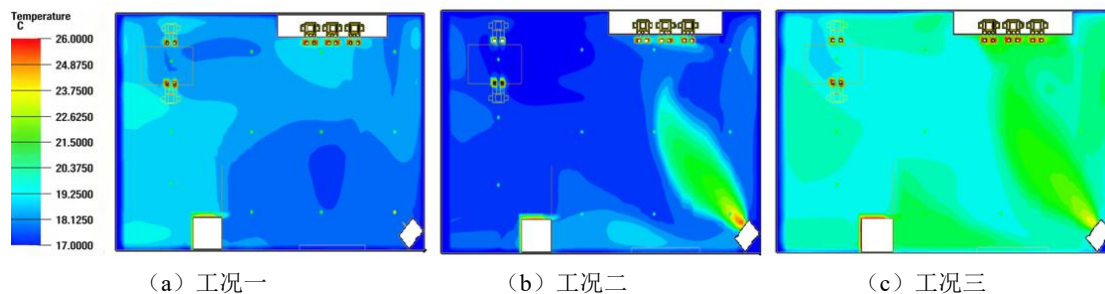


图 6 不同工况 0.1m 截面温度场图

Fig.6 Temperature field of 0.1m section under different working conditions

从图7可见,在距离地面0.7m高度处,三种工况下的房间截面温度均有所上升,符合热空气上浮的物理特性,工况一的截面温度相较于0.1m高度上升明显;工况二在小餐厅区域温度仍处于较低

水平,表明下送风方式的扩散效果不佳,室内热舒适环境较差;工况三截面温度相较于其他两个工况温度更高,且温度分布更均匀。

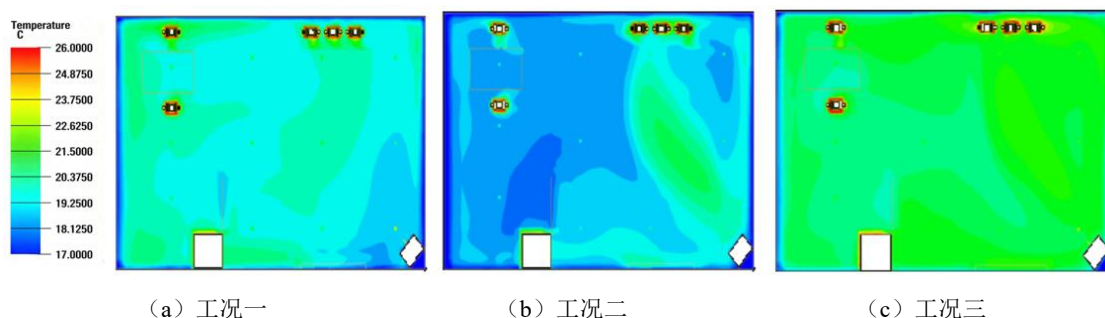


图7 不同工况0.7m截面温度场图

Fig.7 Temperature field of 0.7m section under different working conditions

从图8可见,在距离地面1.5m高度处,三种工况的房间截面温度均呈现持续上升的趋势。其中,工况二在该截面的温度水平相较于工况一和工

况三仍偏低,难以满足室内热舒适要求;工况一与工况三在此高度下的温度场分布较为相近,温度也更均匀,表现出较好的热舒适性。

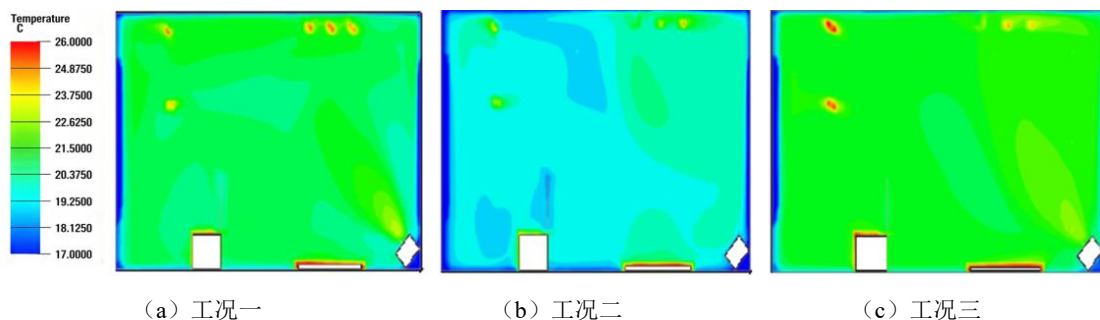


图8 不同工况1.5m截面温度场图

Fig.8 Temperature field of 1.5m section under different working conditions

2.3 室内不均匀系数

室内温度分布的均匀性和稳定性与室内环境的优劣有着密切关系,是影响人体热舒适的重要参数。本文采用不均匀系数法对室内温度均匀性进行评估。计算公式如式(3)~(5)所示:

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n} \quad (3)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{n}} \quad (4)$$

$$k_t = \frac{\sigma_t}{\bar{t}} \quad (5)$$

式中: $\bar{t}$ 为平均温度, °C; t_i 为测量点温度, °C; n 为测量点个数; σ_t 为温度均方根偏差; k_t 为温度不均匀系数。

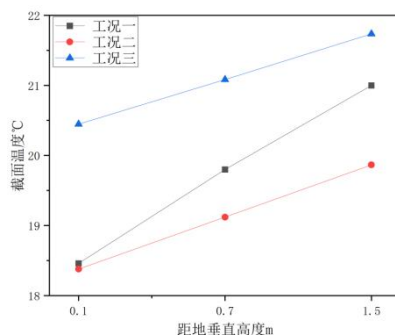


图9 房间截面平均温度

Fig.9 Room average cross-sectional temperature

分别对0.1m、0.7m、1.5m高度下三种工况的平均温度进行计算,从图9可以看出,由于热空气具有上浮的物理特性,随着高度的上升,平均温度皆呈现上升趋势,符合2.2章节的温度场云图变化。

对比三种工况, 分布式送风的平均温度最高, 其次是上送风, 平均温度最低的是下送风。在 0.1m 高度处, 分布式送风的平均温度比上送风和下送风高约 2℃, 脚部温度提升明显, 且在 0.7m、1.5m 高度处, 平均温度也比其他工况较高。分布式送风和下送风的垂直温差较小, 约为 1.2℃, 上送风的垂直温差较大, 温差约为 2.3℃, 上升幅度最为明显。

分别对 0.1m、0.7m、1.5m 高度和房间整体下三种工况的温度不均匀系数进行计算, 不均匀系数越小, 说明温度分布越均匀。从图 10 可见, 工况三分布式送风的温度不均匀系数最小, 温度分布最均匀, 不均匀系数相比上送风与下送风降低 30% 左右; 1.5m 高度处工况一上送风的温度不均匀系数最高, 0.1m 处工况二下送风的温度不均匀系数最高, 工况三分布式送风在 0.7m 高度下的温度不均匀系数均低于 0.1m 和 1.5m 高度, 三种工况反映越接近送风口位置, 温度的不均匀性会提高。此外, 工况一上送风的房间整体温度的不均匀系数, 皆高于此工况下单个截面高度下的不均匀系数, 因为上送风工况在三个高度下的升温最明显, 所以整体的温度不均匀系数也有提升, 与图 9 呈现的现象相符。

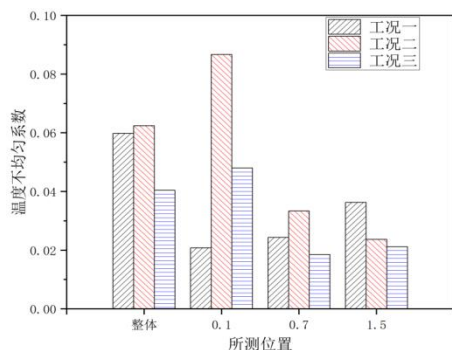


图 10 不同送风方式的温度不均匀系数

Fig.10 Temperature non-uniformity coefficients under different air supply methods

2.4 空气分布特性指标

空气分布特性指标 ($ADPI$)^[22,23] 是满足规定风速和温度要求的测点数与总测点数之比, 对于舒适性空调, $ADPI$ 常用来评价空调工作区热舒适性好坏。有效温度差与室内风速的关系公式如式 (6) 所示:

$$\Delta ET = (t_i - t_N) - 7.66(u_i - 0.15) \quad (6)$$

式中: ΔET 为有效温度差, 为 -1.7~+1.1 时大多数人会感到舒适; t_i 、 t_N 为工作区某点的空气温度和给定室内温度, 给定室内温度取 21℃; u_i 为工作区某点的空气流速, m/s。

$$ADPI = \frac{-1.7 < \Delta ET < +1.1 \text{ 的点数}}{\text{总测点数}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $ADPI$ 为空气分布特性指标, 一般情况下, 应使 $ADPI \geq 80\%$ 。

对三种工况的 ΔET 有效温度差进行计算, 从图 11 可以看出, 工况三分布式送风的大部分有效温差点 ΔET 在舒适区范围内, $ADPI$ 为 80.6%, 室内环境舒适; 工况一上送风的 $ADPI$ 为 69.4%; 工况二下送风的大部分有效温差点 ΔET 在舒适区范围外, $ADPI$ 为 36.1%, 室内舒适性最差。三种工况, 只有工况三满足 $ADPI \geq 80\%$ 的室内要求。

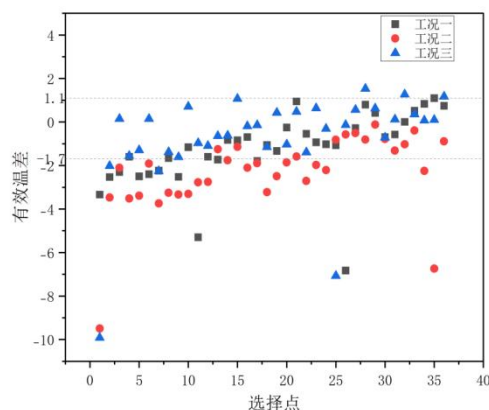


图 11 不同送风方式下 $ADPI$ 数值分布

Fig.11 Distribution of $ADPI$ under different air supply modes

3 结论

营造舒适生活环境是空调设计中的核心诉求之一。通过对家庭常用空间中柜式空调的单一上、下送风与分布式送风方案的 CFD 模拟对比, 可以得出以下结论:

(1) 综合来看, 上送风和下送风在距地面 0.1m 高度处, 截面平均温度皆偏低, 约为 18.4℃, 导致冷足感明显。其中, 下送风方式整体温度不均匀系数为 0.062, 表明其气流扩散效果较差, 温度分布不均匀且整体偏低, 热舒适性不佳。因此, 下送风柜式空调不宜作为全屋空调推广, 仅局部区域使用较适宜。

(2) 对不同送风方式在各高度下的温度不均匀系数进行分析,在越接近送风口处的高度截面下,温度不均匀系数均呈现上升趋势。为保证整屋温度达到设定水平,送风口需维持一定的送风温度与风速,在一定程度上,增大了该高度截面下的温度不均匀性系数。

(3) 相较于上送风和下送风方式,分布式送风能够在较低的送风温度下运行,且室内温度不均匀系数更小、ADPI 值更高,在典型家庭空间中表现出最优的热舒适性能。该送风方式能够实现送风气流与室内空气更充分地混合,有效降低垂直温度梯度,避免局部过冷或过热现象。

参考文献:

- [1] 李晓俊.室内热声环境对人体舒适度的影响研究[D].长沙:湖南大学,2023.
- [2] 刘彩霞,邹声华,杨如辉.基于 Airpak 的室内空气品质分析[J].制冷与空调,2012,26(4):381-384.
- [3] 种道坤.人居室内环境与暖通空调[J].科技资讯,2012,296(11):227.
- [4] 高峰,李玉海.空调房间三种侧送风方式下室内气流组织的数值模拟与分析[C].第13届学术交流会论文集,2010:95-99.
- [5] 周兴法,卢云,黄国俊.三种不同出风口形式的柜式空调的热舒适性实验分析[J].家电科技,2022,(2):34-39.
- [6] 汪宁,左宇航,徐嘉俐,等.基于 CFD 模拟的酒店客房空调风口优化设计研究[J].洁净与空调技术,2024,(4):7-13.
- [7] 邓晓芳.办公建筑典型空调对流末端送风口流场特性及热舒适优化研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [8] 李杨,郁文红,王福林.基于 Airpak 的夏季柜式空调机办公室内热环境数值模拟分析[J].北方工业大学学报,2017,29(2):122-130.
- [9] 银桂华,彭小勇,左振海,等.柜式空调器室内机送风角度对室内热舒适性影响的数值分析[J].制冷与空调,2009,23(2):114-118.
- [10] 郭建,董作荣,张灵辉.基于 Airpak 软件的学生宿舍夏季室内热环境数值模拟分析[J].绿色科技,2025,27(22):251-254,269.
- [11] 张钧程.幼儿园空调送风方式对比分析[J].智能城市,2023,9(9):14-17.
- [12] 孙畅,赵国明.柜式空调不同送风方式对室内柜式空调不同送风方式对室内舒适度的影响探究[J].洁净与空调技术,2020,(2):42-44.
- [13] 吴欢龙,姚紫薇,张旭阳.柜式空调出风方式对人体舒适性影响的研究[J].家电科技,2022,419(6):84-89.
- [14] 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.
- [15] 董明珠,谭建明,肖彪,等.家用热泵空调送风方式对热舒适性的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(1):183-191.
- [16] 姚喻晨.某图书馆阶梯阅览室气流组织的设计与分析[J].制冷与空调,2022,22(9):37-43,102.
- [17] 郭文成,闫睿一,康宁.基于 CFD 的医用直线加速器机房通风效率研究[J].制冷与空调,2025,39(3):1-7.
- [18] 许琳,张济辞,刘跃登,等.高大空间复合气流送风供暖方式研究[J].制冷与空调,2023,37(2):180-186,209.
- [19] 施强.华东地区某办公类建筑夏季室内热舒适度分析[J].暖通空调,2024,54(S1):142-145.
- [20] 程海峰,许洁,王庚,等.夏热冬冷地区低温散热器与空调供暖室内温度分布特征研究[J].安徽建筑大学学报,2018,26(4):70-74.
- [21] 张国兵,程海峰,张洋,等.空调工况下空气柱送风风场模拟与舒适度评价[J].建筑热能通风空调,2020,39(2):13-17,39.
- [22] 黄翔.空调工程(第3版)[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [23] 颜晓光,敬成君,李冰.基于 ADPI 的房间空调器气流组织性能评价[J].制冷与空调,2013,27(3):292-296.