

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.102



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



面向室内热均匀性的房间空调器制冷送风 优化方法

邱向伟^{1,2}, 翟英贤¹, 刘志龙¹, 李子桥¹, 刘猛¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 广东美的空调设备有限公司, 广东 佛山 528311)

摘要:随着公众对室内环境质量需求的提升以及极端高温天气频发,提升室内温度分布均匀性成为保障热舒适的重要内容。对于老年群体而言,由于生理调节能力下降和对局部冷风更为敏感,空间冷热不均更易引发不适反应。传统房间空调器受送风形式和安装位置限制,往往出现“近冷远热”的温差分布,难以满足老年人对稳定、均匀热环境的需求。为此,提出基于超低马赫数对旋风机与环形旋转射流技术的双层远近循环送风方法,通过增强空气诱导和改善流场叠加,实现更均匀的气流组织。在人工气候室中进行原型测试,并针对老年人的典型居住场景开展真实体验验证。结果表明,该送风方式可将40 m²房间0.1~1.7 m高度范围内的纵向温差控制在0.7℃以内,近端2.0 m内温差小于1.0℃;在运行10 min后,老年受试者热感受明显改善,运行60 min后各种位置均处于舒适水平,且吹风感评价良好。该方法能有效提升房间空调器的室内温度均匀性,特别适用于满足老年群体对稳定、舒适、低刺激性热环境的需求。

关键词:空调器;热舒适;供冷;老年人;室内热环境

中图分类号: TU831.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

Optimization of cooling air supply in room air conditioners for improved indoor thermal uniformity

QIU Xiangwei^{1,2}, ZHAI Yingxian¹, LIU Zhilong¹, LI Ziqiao¹, LIU Meng¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Guangdong Midea Air-Conditioning Equipment Co., Guangdong 528311, P. R. China)

Abstract: With the growing demand for high-quality indoor environments and the increasing frequency of extreme heat events, improving the uniformity of indoor temperature distribution in room air conditioners has become essential for maintaining thermal comfort. For elderly individuals, diminished thermoregulatory capacity and greater sensitivity to localized drafts make them more vulnerable to discomfort caused by uneven temperature distribution. However, traditional room air conditioners often exhibit a “cold near-warm far”

收稿日期: 2025-05-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费科研平台与成果培育专项(2024CDJYXTD-003、2023CDJKYJH102)

作者简介: 邱向伟(1981-),男,博士生,主要从事老年人热舒适相关研究, E-mail: qiuwx@midea.com。

刘猛(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: liumeng@cqu.edu.cn。

Received: 2025-05-14

Foundation items: Platform and Achievement Cultivation Special Project under the Fundamental Research Funds for Central Universities (Nos. 2024CDJYXTD-003, 2023CDJKYJH102)

Author brief: QIU Xiangwei (1981-), PhD candidate, main research interest: elderly's thermal comfort, E-mail: qiuwx@midea.com.

LIU Meng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: liumeng@cqu.edu.cn.

temperature pattern due to limitations in air supply configurations and installation positions, making it difficult to meet elderly users' needs for a stable and uniform thermal environment. To address this issue, this study proposes a dual-layer near-far circulation air supply method based on an ultra-low-Mach-number counter-rotating fan and an annular rotating jet, which enhances air entrainment and improves flow-field superposition to achieve more uniform airflow organization. Prototype tests were conducted in a controlled climatic chamber, followed by real-life scenario evaluations in typical elderly residential settings. Results show that the proposed method can control the vertical temperature difference within $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ at heights from 0.1 to 1.7 m in a 40 m^2 room, and within $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the near zone within 2.0 m. Elderly subjects reported noticeably improved thermal sensations within 10 minutes of operation, and all measured positions reached comfortable levels after 60 minutes, with favorable evaluations of draft sensation. These findings demonstrate that the proposed method effectively improves indoor temperature uniformity in room air conditioners, and is particularly suitable for meeting the elderly population's need for a stable, comfortable, and low-irritation thermal environment.

Keywords: air conditioning; thermal comfort; cooling; elderly; indoor thermal environment

随着人口老龄化进程增速,中国60岁及以上老年人口达2.67亿(占比18.9%),其中65岁及以上老年人口突破2亿(占比14.2%)^[1]。老年群体的生理调节能力随年龄下降,对温度变化和局部冷风更为敏感,在不均匀热环境中更容易出现不适反应。研究表明,老年群体每天超过90%的时间在室内度过^[2],其居住空间的热环境质量对健康和舒适具有直接影响。适宜的室内环境可缓解焦虑情绪^[3],而冷热不均、过热或局部冷风等不良热环境则可能增加热相关疾病的发生风险^[4]。因此,在老年居住环境中实现更加稳定和均匀的室内温度分布,对于改善舒适性与保障健康尤为重要。

房间空调器已成为中国家庭调节室内热环境的核心设备^[5],尤其在极端气候下对营造老年人健康热环境具有关键作用^[6]。然而,传统空调系统(尤其是分体落地式空调)普遍存在温度分布不均问题:制冷时冷空气下沉导致近端过冷、而远端降温不足^[7]。老年人常通过提高风速或降温度来调节^[8],但这既增加能耗,又可能引发热不适。因此,优化空调制冷技术对改善温度均匀性具有重要价值。

温度不均问题主要由冷空气沉降、热交换效率低及送风方式局限所致^[9-10]。现有技术如辐射制冷成本高^[11],附壁送风穿透力不足^[12],难以满足家庭需求。关键挑战在于平衡远端冷量输送与近端过冷问题,同时兼顾经济性和实用性。对旋风机技术因结构紧凑、效率高等优势成为研究热点^[13]。其双叶轮设计可提升气流均匀性,但在空调应用中面临低马赫数工况(<0.05)和大叶顶间隙($\geq 7.0\text{ mm}$)的挑战^[14],导致气动性能下降和噪声增加。此外,环形旋转射流技术通过增强气流扩散和混合能力^[15],能改善近端冷空气分布,但其在空调领域的应用仍需创新设计。

基于此,笔者提出一种结合对旋风机和环形旋转射流技术的双层远近循环送风方法,以提供均匀、舒适且节能的室内热环境。

1 优化方法

为实现远端区域的快速降温与近端气流分布的均匀性优化,基于房间空调器冷量分配与风场特性的理论基础,提出一种融合超低马赫数对旋风机技术与环形旋转射流原理的双层远近循环送风方法。首先,通过对旋风机的双风轮反向旋转结构进行流体动力学优化设计,在保证超低马赫数运行条件下显著提升气流增压效率与能量转化率;其次,基于庞斯坦流体力学理论,研发具有特殊风道结构、混流风轮及环形导风装置的旋转射流系统;最终通过系统集成优化,构建上下分层的协同送风体系。

1.1 基于超低马赫数的远距离送风方法

针对房间空调器应用对旋风机面临的超低马赫数机和大叶顶间隙问题,从叶片设计和基于计算流体动力学(CFD)的多目标参数优化两方面进行改进。

1.1.1 任意形叶形造型设计

以对旋轴流风轮为研究对象,利用贝塞尔曲线任意叶形造型设计方法^[16],构建风轮设计技术。通过调整叶片形状和气动特性,降低叶尖涡形成并改善气流通道流动。根据轴流风机的全压方程^[17],风机理论做功能力取决于经过叶片前缘和尾缘的相对速度在旋转方向的投影的差值。用 W_s 表示叶片吸力面的相对速度变化, W_p 表示压力面的相对速度变化,用式(1)表示叶片沿弦长方向(从前缘到后缘)的相对速度变化规律,该变化规律控制叶轮的做功能力,同样定义式(2)表示沿叶片半径方向(从

轮毂到轮缘)的叶轮做功能力的变化规律^[18]。

1) 叶片前缘至尾缘载荷

$$L_{D,btb} = \frac{W_s - W_p}{(W_s + W_p)/2} \quad (1)$$

式中: $L_{D,btb}$ 为叶片前缘至尾缘载荷; W_s 为吸力面相对速度,m/s; W_p 为压力面相对速度,m/s。

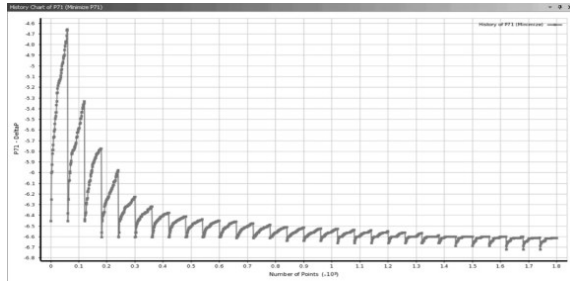
2) 轮毂至轮缘载荷

$$L_{D,shth} = \frac{W_{sh} - W_h}{(W_{sh} + W_h)/2} \quad (2)$$

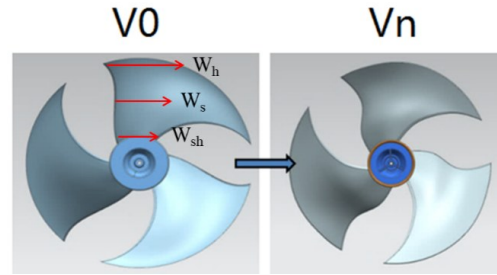
式中: $L_{D,shth}$ 为轮毂至轮缘载荷; W_{sh} 为轮毂相对速度 m/s; W_h 为轮缘相对速度,m/s。

1.1.2 基于CFD的多目标参数优化

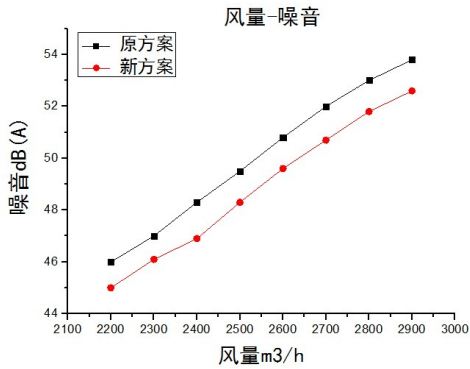
进一步集成基于CFD的多目标参数化优化设计方法^[19],结合ANSYS WORKBENCH平台,通过参数化叶形定义及Design of Experiment (DOE)试验设计^[20],显著提升风机性能。基于目标的参数化自动寻优,风轮在同风量下噪声降低1.5 dB,功率下降4.5 W,如图1所示。



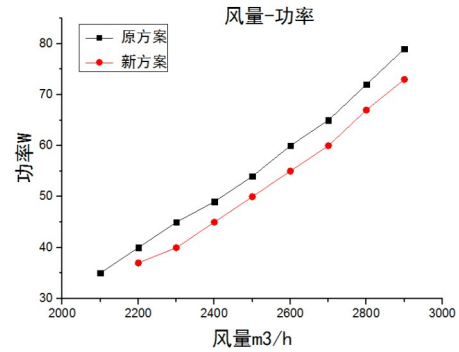
(a) 优化计算过程



(b) 轮毂至轮缘载荷



(c) 优化前后风量噪音对比



(d) 优化前后风量功率对比

图1 优化算例及结果

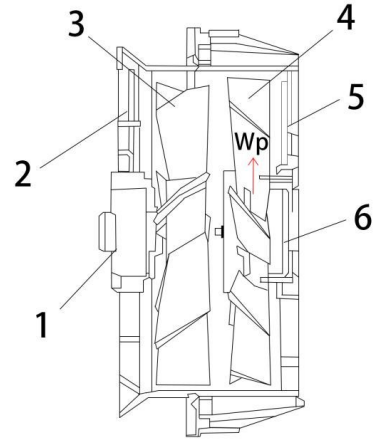
Fig.1 Optimization examples and results

按照后导叶轴流风轮设计方法对第1级风轮进行初始设计,而后按照前导叶的轴流风轮设计方法对第2级风轮进行初始设计,如图2所示。设计时,第1级风轮后的气流出口速度为第2级风轮的入口速度。对旋风轮全压为两级风轮全压之和,即

$$P_{tF} = P_{tFI} + P_{tFII} = \rho u \Delta C_{uII} \quad (3)$$

式中: P_{tF} 为风道总压,Pa; P_{tFI} 为一级风道总压,Pa; P_{tFII} 为二级风道总压,Pa; ρ 为空气密度,kg/m³;u为圆周速度,m/s; ΔC_{uII} 为二级风轮后旋转速度分量,r/min。

对旋风机的第2级风机进口相对速度最高,第2级风机流动引起的总压损失较大。同时,在叶片通道内相同气流偏转角时,气流的扭速增加,导致第2级风机负载加大,造成第2级风机过载。从合理分配前后两级风机的压力负载角度看,两个风轮最佳的理论全压为整级理论全压的一半,以保证通过两



注:1. 第1驱动;2. 第1支架及风筒;3. 第1风轮;4. 第2风轮;5. 第2支架及风筒;6. 第2驱动。

图2 对旋风机结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the cyclone structure

级风机的气流比较平稳,满足对旋风机气流连续性的条件,有利于提高风机的全压效率。此时有

$$P_{tFI} = P_{tFII} \quad (4)$$

$$\Delta C_{ul} = \Delta C_{uII} \quad (5)$$

式中: ΔC_{ul} 为一级风轮后旋转速度分量, r/min。

假设空气从换热器表面,即空调器的背面流入,经过空调器内部风道进入房间来模拟空调对整个房间的空气循环,速度场仿真结果如图3所示。

随着送风距离不断增加,集束气流中心仍保持稳定,具有较高的流动速度且流动范围半径逐渐加大,在11.0 m左右逐渐分散成小束的高速气流,到13.0 m左右消散为速度较低较为均匀的气流。

如图4所示,对旋风机通过前后级协同原理进行互相消旋,产生有别于传统轴流风机的整流增压的风场从而达到远距离送风的效果,并依此对原始对旋风机进行PIV测试^[21]。

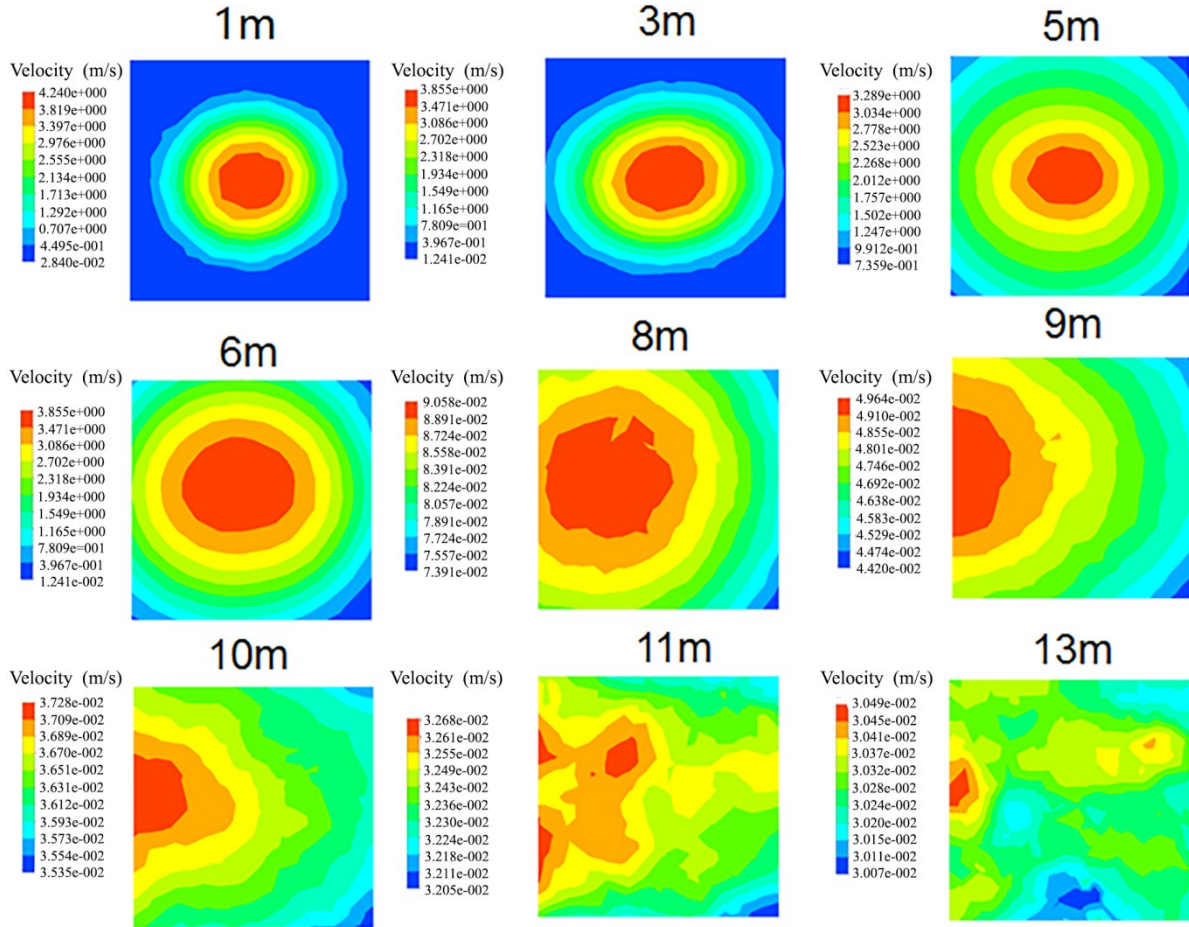


图3 不同距离的风速云图(各图纵横方向均为房间X、Y两个方向)

Fig.3 Wind speed cloud images at different distances (Each figure represents the X and Y directions of the room in both horizontal and vertical directions)

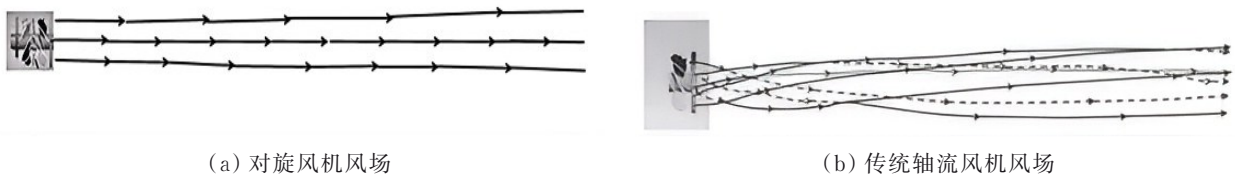


图4 对旋风机与传统风机风场对比

Fig.4 Comparison of wind field between cyclone and traditional fan

验证结果如图5所示。通过第2级风机消旋,可产生有别于常规风机的整流增压的风场,实现集束远距离送风。为进一步验证测试结果,分别仿真

对比了对旋和单轴流风机的流场,如图6所示。从流场图中看出,对旋风机经过第2级风轮的整流消旋,出口气流平直而聚集,而单轴流风机出口气流

发散且呈螺旋状,与实验测试结果完全吻合。

基于仿真结果,结合典型人员初始开机的室内环境状态,进行出风口 18°C 、房间温度 30°C 的绝热边界条件的送风场仿真,结果如图 7 所示。在对旋风机作用下,可实现 12.5 m 的远距离送风,在距离风口近 10.0 m 位置风场仍呈聚集风束状,有利于避免家具对风场的影响,减小风速的耗散。根据温度场结果,在 200 s 时即可达到远处均匀温度分布,实现短时快速远距离制冷。表明提出的优化方法能满足人员开机后室内全局快速降温需求。

通过以上方法,设计了具有流量大、压力高和效率高(相对单级轴流)、结构紧凑(相对两级同旋)等特点的对旋风机,并实现高风压、大风量、送风距离远、风场先聚焦成束一定距离再发散的无环量远距离送风效果。

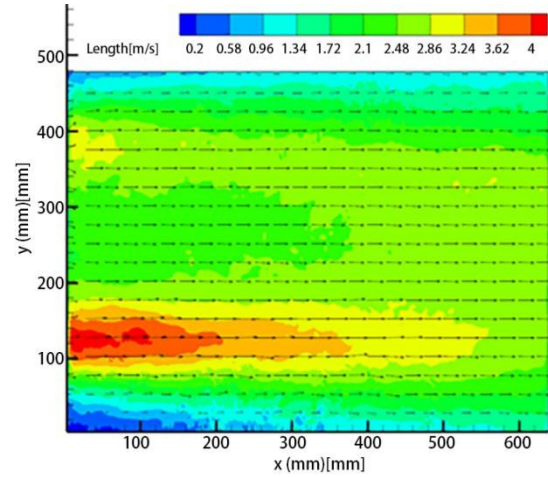
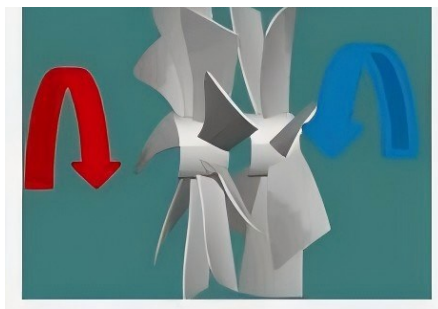
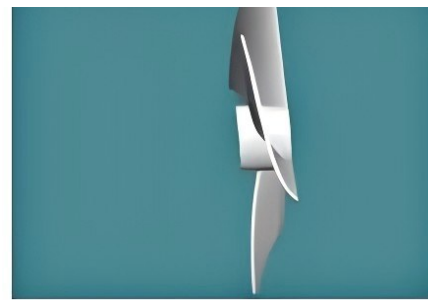


图 5 距离出风口 1.0 m 处的对旋风机风场与测试效果(纵向剖面)

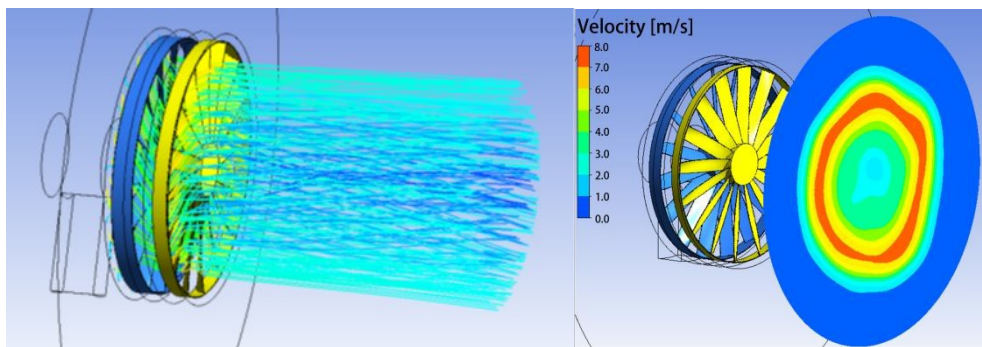
Fig.5 Wind field and test effect of cyclone at 1.0 m distance from outlet (Longitudinal section)



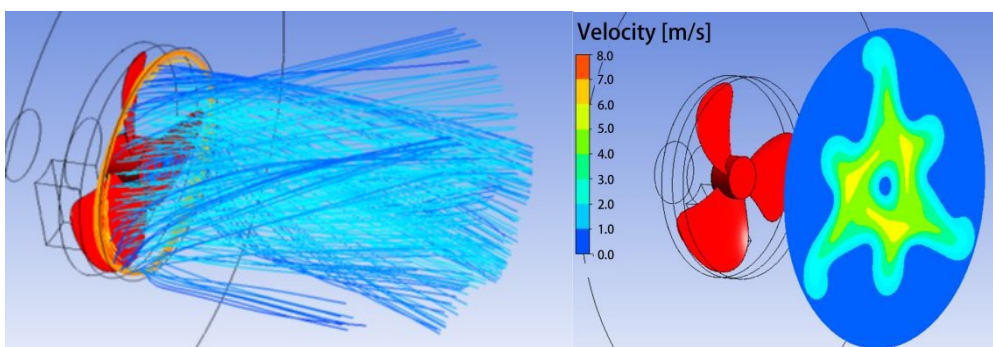
(a) 对旋风轮示意图



(b) 常规风轮示意图



(c) 对旋风轮气流仿真结果



(d) 常规风轮气流仿真结果

图 6 对旋风轮前后级协同原理

Fig.6 Principle of coordination between the front and rear stages of the cyclone wheel

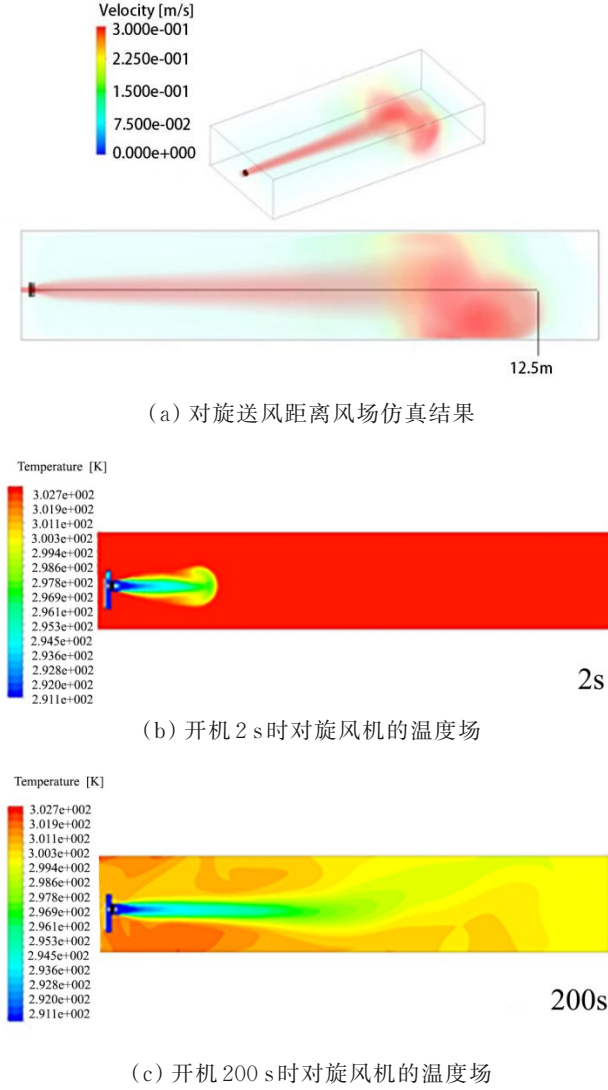


图 7 对旋风机远距离送风温度分布情况仿真结果

Fig.7 Simulation results of temperature distribution of cyclone remote air supply

1.2 基于 Ponstein 理论的均匀送风方法

根据 Ponstein 理论^[22]可知,在旋转射流中,气流同时具有轴向速度和周向速度,由此产生的剪切作用显著增强了湍流强度,且射流中心会形成稳定的回流区。这些特性使旋转射流在低速条件下也能获得较高的湍流混合效率。旋转射流的速度衰减规律可用式(6)~(8)描述^[22]。

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{K_1 \sqrt{A_0}}{x} K_n \quad (6)$$

$$\frac{K_1 \sqrt{A_0}}{x} K_n = \left[1 \pm \frac{2.5 K_2}{K_1^2} A_{r0} \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$A_{r0} = \frac{g \Delta t_0 H_0}{TV_0^2} \quad (8)$$

式中: V_x 为射流中心速度, m/s; V_0 为射流出口速度, m/s; K_1 为射流轴心速度衰减系数; A_0 为风口有效面

积 m^2 ; x 为离风口出风的距离, m; K_n 为比例因数, 由实验确定; K_2 为射流温度衰减系数; Δt_0 为射流温度与房间温度差值, $^{\circ}\text{C}$; H_0 为风口有效宽度, m; T 为射流绝对温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

旋转射流示意图如图 8 所示。对于进入自由空间的气流, 建立柱坐标系 (θ, r, x) 。轴向坐标轴为 x , 径向极坐标轴为 r , 极角为 θ 。取 x 轴与旋转射流轴线重合, 假设原点位于出口平面中心 O 处。旋转射流为轴向偏转叶片形成的单层旋转射流, 其内径为 d_1 , 外径为 d_2 , 旋转射流在出口处射流层的中心半径为 $r_0 = 0.25(d_1 + d_2)$ 。旋转射流在出口处的速度分布均匀, 径向向外偏转角度为 γ , 切向偏转为 β 。旋转射流在喷口处的质量流率为 M , kg/s; 动量流率为 G_{tot} , $(\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}^2$ 。设旋转气流沿着旋流器周向分布均匀。

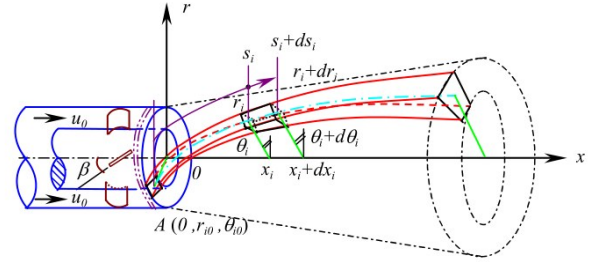


图 8 旋转射流示意图

Fig.8 Schematic diagram of a rotating jet

在旋转射流的沿程质量卷吸研究中,形式上采用与直流射流相同的卷吸质量方程,参考直流射流的研究方法,获得针对旋流射流的卷吸系数。在存在中间钝体的条件下,用当量直径 d_e 代替单孔直径 d_0 ,得到旋转射流的质量卷吸方程,实现对出风口近端气流的扰动^[22]。

$$d_e = \sqrt{d_2^2 - d_1^2} \quad (9)$$

$$\frac{M}{M_0} = C_{se} \frac{x}{d_e} \sqrt{\frac{\rho_{\infty}}{\rho_0}} \quad (10)$$

$$\Omega = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_2/d_3)^3}{1 - (d_2 - d_3)^2} \right] \tan \beta \quad (11)$$

式中: M 为距离出口 x 处质量流量, $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$; M_0 为出口处质量流量, $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$; C_{se} 为自由射流卷吸系数; ρ_{∞} 为环境流密度, kg/m^3 ; ρ_0 为射流密度, kg/m^3 ; Ω 为旋流数。

基于中心对称结构对近端风道进行优化设计,通过对比 3 种风轮特性(表 1)最终选用混流风轮。具体而言:离心风轮虽风压系数高(可实现远距离送风),但存在需加装整流器导致结构复杂、噪音大、效率低等问题;轴流风轮虽结构紧凑、噪音小且风量大,但气流平行输出导致扩散性不足;而混流

风轮兼具离心与轴流特性,通过同时实现气流的离心运动和轴向运行,在保证风压的同时优化了气流扩散性能,成为最优设计方案。

表 1 不同风轮形式优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different wind turbine forms					
风轮形式	气体流向	风压系数	风量	效率	噪音
离心风轮	风轮出口气流与旋转轴夹角=90°	高	低	低	大
混流风轮	风轮出口气流与旋转轴夹角<90°	中	中	中	中
轴流风轮	风轮出口气流与旋转轴夹角=0°	低	高	高	小

在风叶叶形设计中,为满足空调结构紧凑性与风机性能的双重要求,经过多次仿真测试与模具调试,最终使风轮在风压系数、扩散角等性能指标与可制造性之间实现了较好的平衡。以 CFD 仿真为基础,图 9 展示了混流风轮射流效果图。从混流风轮的流线图可以看出,气流在具有轴向速度的同时,还具有一定的周向速度,形成了螺旋状的气流分布,并展现出 15° 的扩散角,从而构成螺旋形送风风场。

为进一步增强气流的扩散效果,在结构设计中

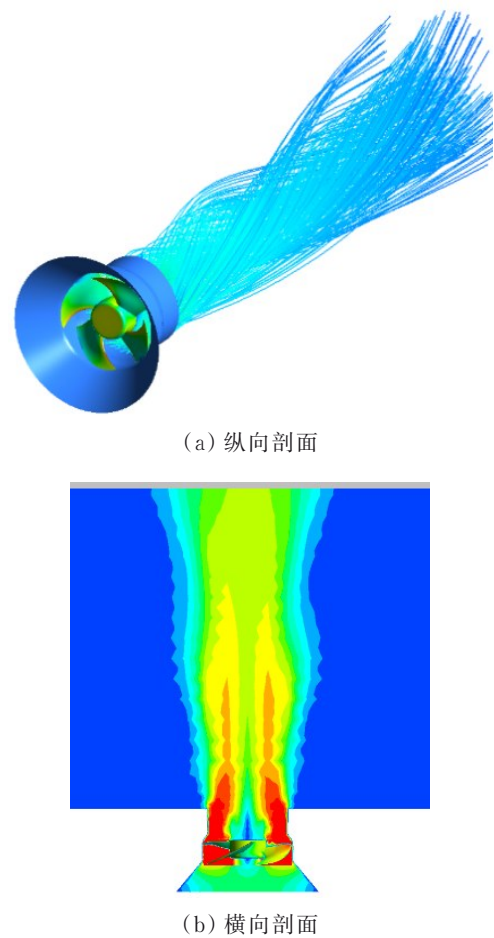


图 9 CFD 仿真混流风轮射流效果图
Fig.9 CFD simulation mixed-flow wind turbine jet effect

引入了中心对称的环形导风装置。该装置旨在强化气流的径向速度,使得从混流风轮生成的螺旋气流在通过导风装置后,径向速度进一步增强,最终在脱离导风装置后形成直径更大的环形旋流,并以持续螺旋的方式向外推进。如图 10 所示,基于理论设计的导流装置进行的风场仿真表明,这种改进能显著优化气流的扩散特性和覆盖范围。

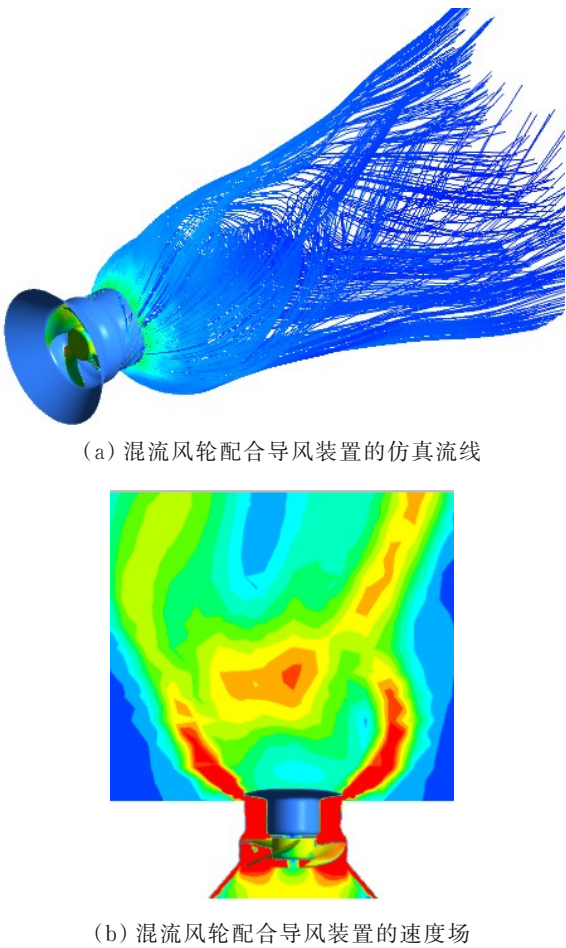
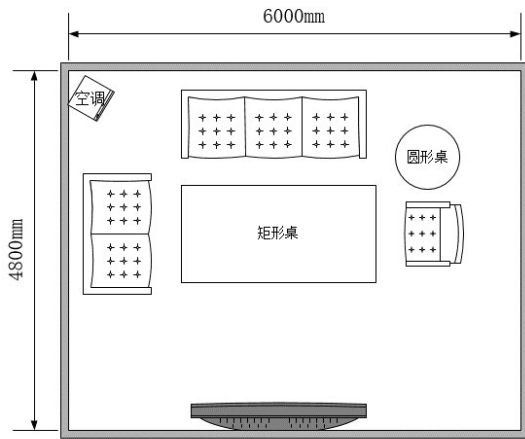


图 10 CFD 仿真混流风轮配合导风装置的射流效果图
Fig.10 CFD simulation of mixed flow wind turbine with wind deflector jet effect

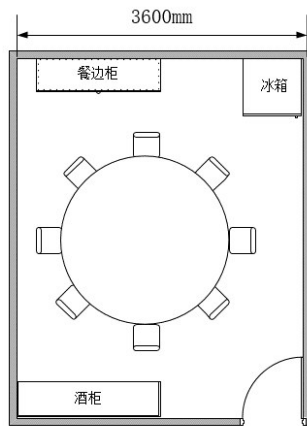
1.3 双层远近循环送风设计

上部采用对旋风机产生平直高压气流(送风距离 11.0 m),解决远端冷量不足问题;下部通过环形旋转射流形成强湍流气流有效改善近端过冷现象。基于明源地产研究院的户型调研数据(客厅进深 9.6 m,开间 4.8 m,如图 11 所示),在保证系统紧凑性和换热效率的前提下,优化设计符合 ASHRAE 标准^[23]中风机结构参数,确保优化方案既满足大空间送风需求,又兼顾安装可行性。

根据优化设计进行原型机实测,测试结果如表 2 显示,对旋风机的风速与距离关系可以满足上述要求。考虑到换热器效率、送风效率及换热器尺寸



(a) 高舒适客厅



(b) 高舒适餐厅

图 11 高舒适型房间尺寸

Fig.11 High comfort room size

的综合影响,且制冷时冷空气由于密度大下沉,因为对旋送风距离远,上出风口采用对旋大风量携带大冷量,确保更多冷量送达房间远处。因此设定该模式下,对旋风机的最高转速为 600 r/min,同时将下风口转速设定为 480 r/min。在此配置下,上风口的出风量为 750 m³/h,下风口为 450 m³/h,使风速分布更加合理,从而充分利用换热器性能,实现远距离送冷与近距离扰动制冷目标。

表 2 对旋风机风速与距离关系

Table 2 Relation between wind speed and distance of cyclone

距离/m	中轴线风速/(m/s)						
1.0	4.2	3.6	3.3	2.8	2.2	1.5	0.7
2.0	3.9	3.3	2.7	2.2	1.5	0.9	0.2
4.0	3.3	2.7	2.2	1.6	0.8	0.3	-
6.0	2.7	2.1	1.4	0.9	0.2	-	-
8.0	2.1	1.5	0.9	0.2	-	-	-
10.0	1.5	0.8	0.3	-	-	-	-
12.0	0.9	0.3	-	-	-	-	-
14.0	0.3	-	-	-	-	-	-

结合《中国成年人人体尺寸》(GB/T 10000—2023)^[24]中的人体身高基础数据,18~70岁成年男子 50% 百分位的肩部高度为 1.37 m,肘部高度为 1.04 m;18~70岁成年女子 50% 百分位的肩部高度为 1.28 m,肘部高度为 0.96 m。将空调上出风口的高度设计为 1.4 m,下出风口高度为 1.0 m,制定了符合人体工程学的空调结构尺寸方案(如图 12 所示),以确保最佳的舒适性和功能性。

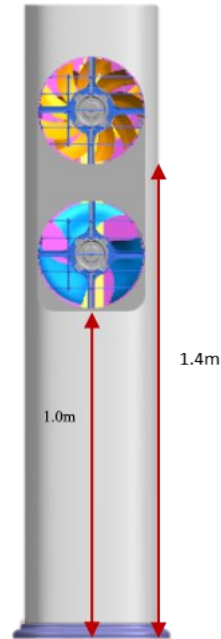


图 12 基于风场分析与用户需求设计原型机

Fig.12 Prototype design based on wind field analysis and user requirements

2 优化技术验证测试

为了全面评估双层远近循环送风技术的性能和实际应用效果,通过气候室热环境测试和居家场景体验测试双维度验证双层远近循环送风技术的效果。

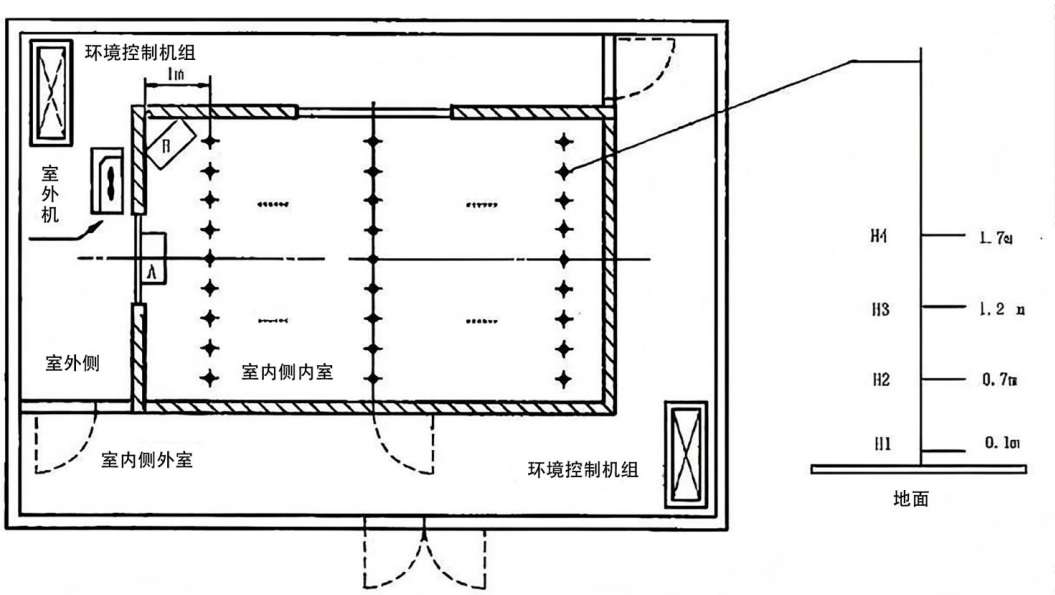
2.1 气候室热环境测试

2.1.1 测试条件

测试在中国标准化研究院人工气候室进行,如图 13 所示,模拟标准住宅环境(9.5 m×5.0 m×3.0 m)。室外工况稳定在夏季空调计算干球温度 34℃、相对湿度 68%^[25],室内初始工况为夏季通风计算干球温度 32℃、相对湿度 68%^[25],墙体温度 32℃。测试选择 A 点为空调内机摆放位置。

2.1.2 热环境监测

采用 Swema 热线风速仪(温度测量范围:(0~100.00)±0.01)℃,风速测量范围((0~2.0)±0.01) m/s)和 Vaisala 湿度传感器(测量范围:(1~98)±1.0%)对热环境参数进行全方位监测。测试过程



注:A点为挂壁式空调内机典型摆放位置,B为落地式空调内机典型摆放位置。

图 13 模拟环境实验室结构示意图

Fig.13 Schematic diagram of the structure of the simulation environment laboratory

中,依据房间面积将 7 100~9 000 W 制冷量的空调样机安装于侧墙角落,按照三维网格化方案布置监测点:水平方向以房间中心线为基准,宽度方向间隔 0.5 m 对称布置,长度方向每隔 1.0 m 布置监测点,垂直方向选取 0.1、0.7、1.2、1.7 m 四个高度层。待环境工况稳定后,开启均匀风制冷模式运行 60 min,每隔 5 min 记录靠近室内机方向的温度点平均值,并计算每层的干球温度差,取最大差值作为房间温差测试结果。

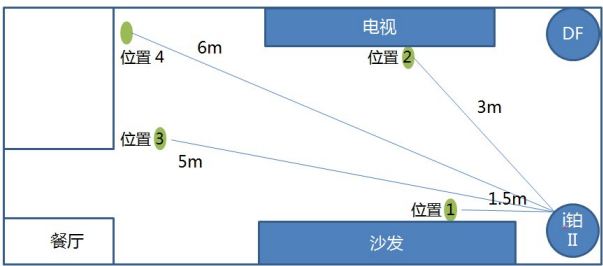
2.2 居家场景体验测试

2.2.1 测试场地及设备配置

体验测试在实际住宅客厅(25 m²)中进行对比测试,以模拟典型家庭使用场景,如图 14 所示。测试设置两台空调样机:实验组搭载“双层远近循环送风技术”(均匀风模式),对照组为标准机型(常规模式)。实验环境设定为室温 26℃、相对湿度 50%~60% 的标准舒适范围内。为确保数据准确性,采用 HOBO 温湿度传感器(范围-30.0~50.0℃,精度±0.01℃)连续记录实验期间各点的空气温度、湿度,并在实验开始前使用相同的热线风速仪测量各受试位置的风速。温湿度传感器分别布置在受试者周围 0.5 m 内,于 0.1、0.6、1.1 m 三个高度设置测点;此外,热线风速仪在实验开始前对受试位置进行逐一风速测量,保证各位置的风速小于 0.3 m/s。

2.2.2 受试者信息

共招募 20 名健康老年受试者,男、女性各 10 名,年龄范围在 60~75 岁,均无心血管、内分泌及神



注:右上角及右下角标注分别为对照空调样机及本研究空调样机的摆放位置。

图 14 居家场景环境实验室结构示意图

Fig.14 Schematic diagram of the structure of the home environment laboratory

经系统疾病史,以排除生理病理因素对热感受干扰,如表 3 所示。老年受试者为当地常住居民,热适应水平趋同,实验全程着装统一-夏季典型套装(热阻 0.6 clo),确保个体热交换边界条件一致,增强样本同质性与实验结果可比性,为精准解析空调对人体影响奠定坚实基础。

表 3 受试者基本信息

Table 3 Basic information on experimental subjects

性别	人数	年龄	身高/cm	体重/kg	BMI
男性	10	65.0±5.0	169.5±2.7	67.4±2.6	23.5±0.5
女性	10	66.0±2.9	159.6±2.2	55.8±3.3	22.6±1.0
全部	20	64.0±4.2	164.5±5.0	62.0±4.8	23.0±0.8

注:表中年龄、身高、体重、BMI 的数据为均值±标准差。

2.2.3 测试流程

采用标准化测试流程评估空调送风舒适性:20 名受试者依次就座于距出风口 1.5、3.0、5.0、7.0 m 的标准位置(中轴线布置),在 26℃ 设定温度下进行

60 min 静坐测试。实验前设置 10 min 适应期。主观感知评估通过问卷完成,采用 ASHRAE 七级量表(-3:冷,-2:凉,-1:稍凉,0:中性,1:稍暖,2:暖,3:热)评估热感觉、六级评分(1:完全没有,2:几乎没有,3:有一点,4:有点大,5:比较大,6:非常大)记录风感、五级量表(1:很不舒适,2:比较不舒适,3:一般,4:比较舒适,5:很舒适)评定热舒适度。测试期间每 10 min 以及测试结束时采集一次主观反馈,共完成 6 轮问卷。

3 优化技术验证测试结果及分析

3.1 气候室热环境营造效果分析

在人工气候室的测试结果表明,搭载双层远近循环送风技术的空调样机显著改善了温度均匀性,如图 15 所示。测试数据显示:1)纵向温差控制在 0.7°C 以内,远端区域快速降温至目标值,解决了传统空调远端降温不足的问题;2)近端区域通过环形旋转射流技术实现冷热空气高效混合,将感知温差控制在 1.0°C 舒适范围内;3)系统 60 min 内将室温由 36.0°C 稳定降至 26.0°C ,远风速和温度分布均匀性均表现优异。

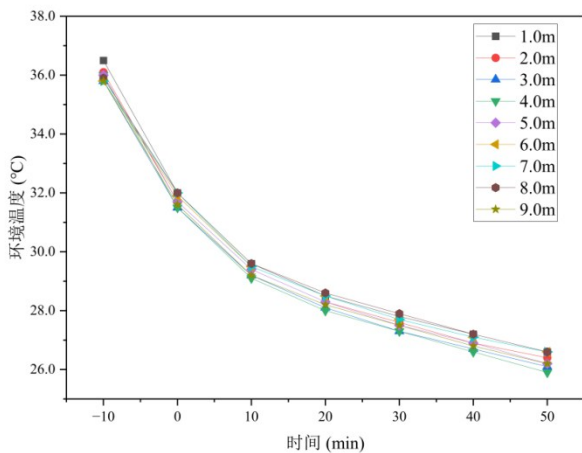


图 15 人工气候室环境试验结果

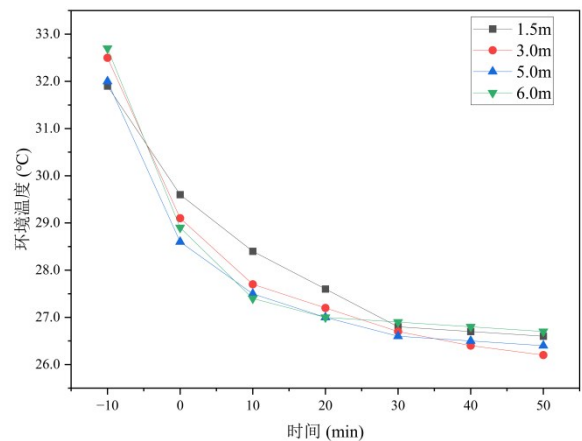
Fig.15 Environmental test results of artificial climate chamber

3.2 居家场景人员体验效果分析

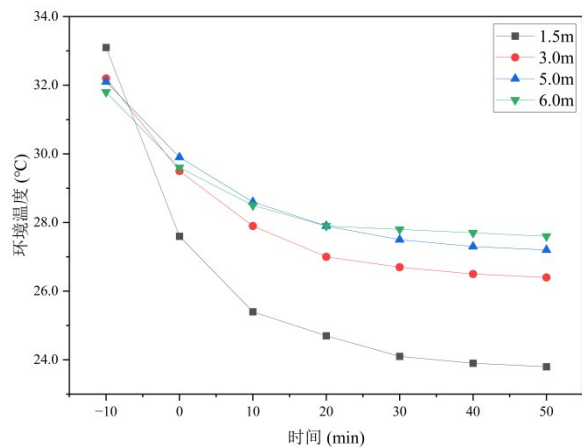
3.2.1 居家场景热环境营造效果

如图 16 所示,测试数据表明,双层远近循环送风技术显著提升了温度控制性能。在 60 min 测试周期内,该技术在各距离均实现稳定降温:1.5 m (32.7°C 至 26.7°C)、3.0 m (31.9°C 至 26.4°C)、5.0 m (28.6°C 至 26.5°C)、6.0 m (29.6°C 至 26.8°C),温差控制在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 范围内。相较之下,传统参考工况呈现明显缺陷:近距离(1.5 m)过冷(23.9°C),远距离(6.0 m)降温不足(27.7°C),各点位温差达 3.8°C 。

从制冷效率来看,双层远近循环送风技术在各距离上制冷效率较为均衡,60 min 内可将温度稳定降低到相对低且均匀的水平,而参考工况下制冷效果在不同距离表现不一,近距离制冷可能导致局部过冷,远距离制冷效果差。从温度均匀性角度来看,双层远近循环送风技术能在不同距离实现较均匀的温度控制,各距离温度曲线平缓且最终温度相近,而参考工况下温度均匀性差,不同距离的温度下降幅度和最终温度差异较大。综上所述,该技术通过均衡的制冷效率实现了全空间温度均匀性控制,解决了传统空调“近冷远热”的技术难题,展现出显著的应用优势。



(a) 双层远近循环送风技术



(b) 传统技术

图 16 不同距离下环境平均温度

Fig.16 Average environmental temperature at different distances

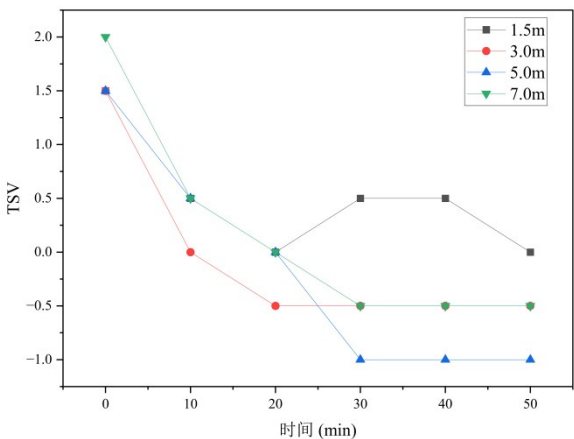
3.2.2 人员体验主观感受

居家体验测试结果表明,搭载双层远近循环送风技术的空调显著提升了老年人的热舒适性(图 17)。该技术使老年受试者在 10 min 后达到中性热感觉,各距离凉爽感受均匀。而传统空调需 30 min,

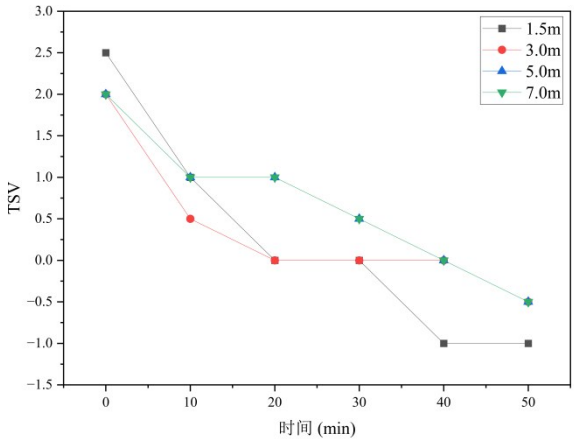
且存在明显距离差异(远端降温滞后)。这种快速均匀的温度调节特性,有效解决了老年人对温度变化敏感的问题。

双层远近循环送风技术显著提升了全空间热舒适性,如图 18 所示。60 min 运行后,该技术在 1.5~6.0 m 全距离范围内均达到舒适标准,而传统

技术仅在 3.0 m 和 5.0 m 两个位置达标。特别值得注意的是,该技术展现出卓越的稳定性:在 30~50 min 关键时段内,各距离舒适度保持稳定(波动 < 0.5 TCV),相较之下,传统技术舒适度波动幅度达 1.2~1.8 TCV。这一结果证实了该技术在消除“距离效应”和维持稳定舒适环境方面的双重优势。



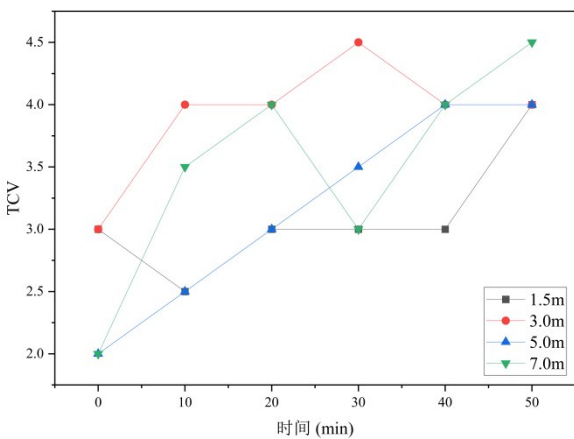
(a) 双层远近循环送风技术



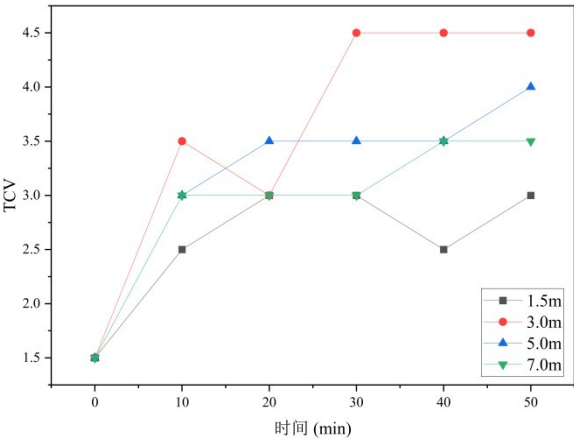
(b) 传统技术

图 17 平均热感觉投票

Fig.17 Average thermal sensation votes



(a) 双层远近循环送风技术



(b) 传统技术

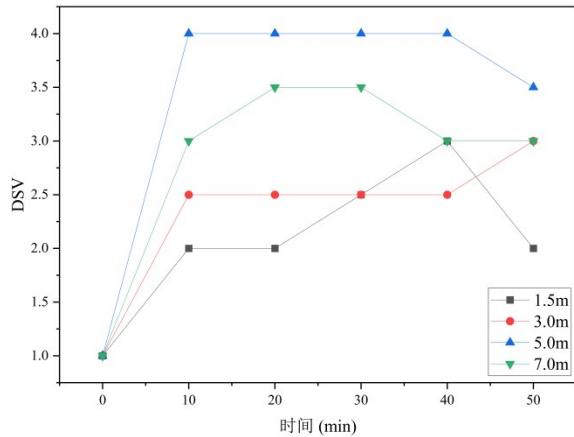
图 18 平均热舒适投票

Fig.18 Average thermal comfort votes

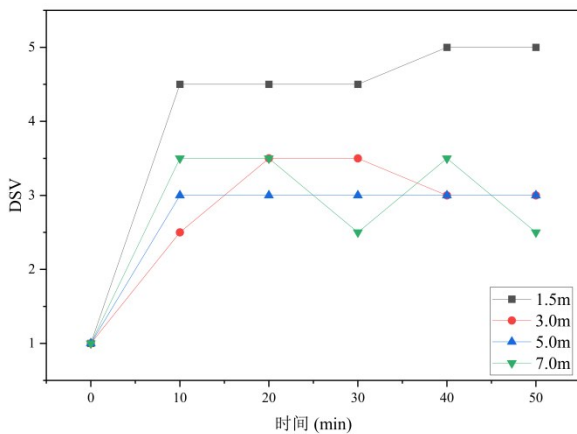
通过对比测试验证了双层远近循环送风技术在风速控制方面的优越性(图 19)。数据显示:在 1.5 m 近距离处,该技术将吹风感稳定控制在“几乎没有风感、有一点风感”的适中水平,而传统技术后期骤升至“比较大”的强风感;在 5.0~7.0 m 远距离处,该技术维持“有一点风感”的稳定风感,显著优于传统模式。这种距离自适应送风特性,既避免了近距离强风不适,又确保了远距离有效气流扰动,解决了传统空调“近端风感过强、远端风感不足”的

技术难题。

整个体验过程中,双层远近循环送风技术的表现更加出色,其在各个位置所提供的冷热感受舒适性始终优于不包含该技术的情况。这种优势在距离空调较近和较远的位置表现得尤为突出。无论是近距离的快速调节,还是远距离的有效覆盖,双层远近循环送风技术都能够确保使用者在不同位置都能享受到舒适的冷热感受。



(a) 双层远近循环送风技术



(b) 传统技术

图 19 平均吹风感投票

Fig.19 Average draught sensation votes

4 结论

针对传统空调送风设计形式或摆放不当时会导致室内空间冷热不均进而呈现“近冷远热”的特点,且老年人群对室内热环境均匀性要求日益提高问题,依据优化房间空调器送风量分配距离和风场特性原理,提出了基于超低马赫数对旋风机和环形旋转射流技术的双层远近循环送风技术。通过人工气候室环境测试和基于 20 位老年受试者的居家场景人员体验测试,对比了含该技术和标准空调样机工况的热环境参数和主观感受。得到以下主要结论:

1)在技术原理方面,对旋风机远送风技术采用了双风轮反向旋转设计,优化后能在超低马赫数下实现高效气流增压与能量利用,满足大房间远端降温需求且降低噪声;基于庞斯理论,环形旋转射流技术通过设计风道、选择混流风轮及环形导风装置,增强近端气流扰动和冷量扩散。二者结合实现上下分层送风,优化空调结构参数。

2)验证测试结果显示,人工气候室测试中搭载该技术的空调样机使房间纵向温差控制在 0.7°C 以内,近端温差小于 1.0°C ;居家场景中,该技术各距离制冷效率均衡,温度均匀性好,老年受试者 10 min 后趋向凉爽且不同距离凉爽程度均匀,各位置冷热感受舒适性在 60 min 后多达到“舒适”水平,且吹风感在不同距离表现良好。

3)双层远近循环送风技术能有效改善室内温度均匀性,提升热舒适性,可为未来智能房间空调器老年呵护模式设计以及营造室内适老化健康舒适热环境提供技术支撑。

参考文献

- [1] 关于印发“十四五”健康老龄化规划的通知(国卫老龄发〔2022〕4号)[J]. 中华人民共和国国家卫生健康委员会公报, 2022(2): 16-25.
Notice on printing and distributing the “Fourteenth Five-Year Plan” for healthy aging (Guo Wei Lao Nian fa [2022] No. 4) [J]. Gazette of the National Health Commission of People’s Republic of China, 2022(2): 16-25. (in Chinese)
- [2] JIAO Y, YU H, WANG T, et al. Thermal comfort and adaptation of the elderly in free-running environments in Shanghai, China [J]. Building and Environment, 2017, 118: 259-272.
- [3] 边一超. 唐山市老年住宅室内环境舒适性研究[D]. 河北唐山: 华北理工大学, 2019.
BIAN Y C. The study on indoor environment comfort-ability of elderly building in Tangshan city [D]. Tangshan, Hebei: North China University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [4] WILLIAMS A A, SPENGLER J D, CATALANO P, et al. Building vulnerability in a changing climate: Indoor temperature exposures and health outcomes in older adults living in public housing during an extreme heat event in Cambridge, MA [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16 (13): 2373.
- [5] YAN L, LIU M, XUE K, et al. A study on temperature-setting behavior for room air conditioners based on big data [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101197.
- [6] LIU M, ZHAI Y X, QIU X W, et al. Air-conditioning usage behaviour of the elderly in caring home during the extremely hot summer period: An evidence in Chongqing [J]. Building and Environment, 2023, 244: 110828.
- [7] ZHAI Y X, LI Z Q, CHEN X C, et al. Thermal perception of non-uniform and dynamic air-conditioned environment in the elderly [J]. Journal of Building Engineering,

- 2023, 76: 107236.
- [8] LEI Y, LIU M, ZHU L, et al. Differences in the elderly's behaviour pattern of using room air conditioners between the normal and extremely-hot summers: A case in Chongqing, China [J]. *Energy and Buildings*, 2025, 328: 115237.
- [9] 李万才, 倪金卫, 饶碧玉, 等. 基于高精度 CFD 网格空调室内温度及流场模拟研究[J]. *甘肃科学学报*, 2022, 34(6): 147-152.
- LI W C, NI J W, RAO B Y, et al. Simulation of indoor temperature and flow field based on high-precision CFD grid [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2022, 34(6): 147-152. (in Chinese)
- [10] HUANG C, QIAO L, BAI T Y, et al. Experimental study on thermal environment and stratified air-conditioning load of large-space building with low-sidewall air supply under periodic thermal disturbance [C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC 2019). Singapore: Springer, 2020: 553-562.
- [11] ZHANG F, GUO H A, LIU Z X, et al. A critical review of the research about radiant cooling systems in China [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 235: 110756.
- [12] 王哲. 高温矿井掘进工作区压入式附壁射流通风技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- WANG Z. Research on press-in wall-attached jet ventilation technology in excavation working area of high temperature mine [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2024. (in Chinese)
- [13] 张立祥, 秦语嫣, 郑娃. 喷雾降尘对旋式轴流风机气动性能研究[J]. *煤矿机械*, 2023, 44(12): 42-45.
- ZHANG L X, QIN Y Y, ZHENG W. Study on aerodynamic performance of counter rotating axial flow fan for apray dust reduction [J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44 (12): 42-45. (in Chinese)
- [14] 谢俊. 基于 Fluent 的对旋轴流风机性能仿真研究[J]. *自动化应用*, 2023(12): 113-115.
- XIE J. Study on the performance simulation of rotary axial flow fan based on fluent [J]. *Automation Application*, 2023(12): 113-115. (in Chinese)
- [15] 杨会群, 金东范, 卢天健. 环形旋转冲击射流热流特性的实验研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(5): 648-655.
- YANG H Q, JIN D F, LU T J. Experimental study on heat flow characteristics of annular rotating impinging jet [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2011, 41(5): 648-655. (in Chinese)
- [16] 刘剑, 陈亚, 王开拓, 等. 涡轮叶片参数化设计与优化[J]. *汽轮机技术*, 2022, 64(3): 167-170.
- LIU J, CHEN Y, WANG K T, et al. Parametric design and optimization of turbine blades [J]. *Turbine Technology*, 2022, 64(3): 167-170. (in Chinese)
- [17] 张玉成, 仪登利, 冯殿义. 通风机设计与选型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- ZHANG Y C, YI D L, FENG D Y. Ventilation fan design and selection [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 广东美的制冷设备有限公司. 大空间自由风感舒适型房间空调器关键技术研究及应用技术研究报告[R]. 广东 佛山: 美的集团, 2020. Guangdong Midea Refrigeration Equipment Co., Ltd. Research and application technology report on key technologies of free airflow comfort room air conditioners for large spaces[R]. Foshan, Guangdong: Midea Group, 2020.
- [19] 刘威, 郑焕祺, 周玉成. 基于改进 NSGA-II 的新风系统多目标优化控制策略研究[J]. *现代电子技术*, 2024, 47(15): 169-177.
- LIU W, ZHENG H Q, ZHOU Y C. Research on fresh air system multi-objective optimal control strategy based on improved NSGA-II [J]. *Modern Electronics Technique*, 2024, 47(15): 169-177. (in Chinese)
- [20] 高中勇, 孙海滨, 张豪杰, 等. 基于 DOE 的压缩机电机转子扇叶优化设计[J]. *日用电器*, 2025(2): 32-37.
- GAO Z Y, SUN H B, ZHANG H J, et al. Optimization design of compressor motor rotor blades based on DOE design [J]. *Electrical Appliances*, 2025 (2): 32-37. (in Chinese)
- [21] 孔繁熙, 朱慧玲, 周玲, 等. 压气机复杂流场 PIV 测量技术综述[J]. *力学学报*, 2025, 57(2): 335-348.
- KONG F X, ZHU H L, ZHOU L, et al. Review of particle image velocimetry measurement technology for the complex flow field of compressors [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, 57 (2): 335-348. (in Chinese)
- [22] PONSTEIN J. On the stability of a helical flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, 5(2): 185-201.
- [23] ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 [J]. Atlanta, GA: ASHRAE, 2020.
- [24] 中国成年人人体尺寸: GB/T 10000—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- Human dimensions of Chinese adults: GB/T 10000—2023 [S]. Beijing: China Standards Press, 2023. (in Chinese)
- [25] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)