

文章编号: 1671-6612 (2024) 04-491-07

民机客舱空调送风方式 对 CO₂ 传播及通风性能影响的数值模拟

张唯一 于 女 钟鸣远 陈燮阳

(南京航空航天大学民航学院 南京 211106)

【摘要】 利用计算流体力学方法构建 A320 经济舱 7 排座数值模型, 并对 CFD 模型进行验证。对顶部送风、混合送风以及置换送风三种空调送风模式进行数值模拟, 以 CO₂ 作为污染物对比分析飞机客舱通风性能及排污效率。研究发现: 顶部送风会使中间乘客吹风感较强, 乘客垂直温差约为 3K; 混合送风的速度场和温度场分布均匀, 热舒适性良好; 置换送风模式下, 乘客周围速度小于 0.3m/s, 存在温度分层现象, 气流运动受到人体热羽流的影响显著。从排污效果看, 置换送风会使乘客周围的 CO₂ 积聚时间较长, 呼吸区平均浓度高出约 35%; 顶部送风和混合送风的排污效率大小相近。相较于传统空调送风模式, 置换送风的排污效率提升了约 42.8%, 适用于飞机通风结构的优化。

【关键词】 飞机客舱; 计算流体力学; 空调送风模式; 排污效率

中图分类号 V245.3 文献标志码 A

Numerical Simulation of the Effect of Air Supply Modes on CO₂ Transmission and Ventilation Performance in Civil Aircraft Cabin

Zhang Weiyi Yu Nv Zhong Mingyuan Chen Xieyang

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106)

【Abstract】 The computational fluid dynamics method was used to construct the numerical model of the 7-row of A320 economy class, and the CFD model was validated. Numerical simulations were conducted for three air supply modes: ceiling ventilation, mixing ventilation and displacement ventilation, and CO₂ was used as a pollutant to compare and analyze cabin ventilation performance and discharge efficiency. It is found that ceiling ventilation will make middle passengers feel more windy, and the vertical temperature difference of passengers is about 3K; the velocity field and temperature field of mixing ventilation are evenly distributed, and the thermal comfort is good. In the displacement ventilation, the surrounding speed of passengers is less than 0.3m/s, there is temperature stratification, and airflow movement is significantly influenced by the plume of human body. In terms of the discharge efficiency, displacement ventilation will make the accumulation of CO₂ around passengers longer, and the average concentration in breathing zone is about 35% higher, the discharge efficiency of ceiling ventilation and mixing ventilation is similar. Compared with the traditional air supply modes, the discharge efficiency of displacement ventilation is improved by about 42.8%, which is suitable for the optimization of ventilation structure of the aircraft.

【Keywords】 Aircraft cabin; Computational fluid dynamics; Air supply mode; Discharge efficiency

0 引言

近年, 民航飞机的旅客与货物运输量持续增

长。民航行业以绿色、低碳、循环为可持续发展目标, 其中飞机舱内建设是我国绿色民航发展规划的

基金项目: 江苏省科研与实践创新计划项目基金 (SJCX20-0067)

作者 (通讯作者) 简介: 张唯一 (1999-), 男, 硕士研究生, E-mail: only1004@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2023-06-29

关键部分^[1]。在飞机起降过程会产生各类污染物,如一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物及挥发性有机物等,污染物会通过地面空调车(Ground Air-conditioned vehicle, GAC)扩散至舱内。客舱环境较为密闭狭窄,人员密度大,空气流通率低,容易导致污染物与呼吸性疾病的传播,良好的空气质量可以降低舱内人员安全风险,提高乘机舒适度^[2]。

座舱内的空气 50%来源于发动机引气,另一部分为经 HEPA 过滤的洁净空气。民航客机现大多采用混合送风方式,不同的送风方式会直接影响客舱内流场特性。针对飞机客舱气流组织及污染物研究通常采用实验测量或计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法。与实验测量方法相比,CFD 计算效率更高,结果更详细,成本低,适用于多工况分析。陈希远^[3]等人利用 CFD 建立波音 737 五排座三维模型,计算了顶部和混合送风下 CO₂ 浓度场,指出混合送风有利于污染物的扩散,顶部送风会导致污染物积聚,通风效果差;WANG et al^[4]同样发现混合送风控制污染物的效率低,但舱室温度较为均匀,乘客热舒适性表现良好。杨建忠等人^[5]使用 CFD 方法计算了混合、侧壁及顶部三种送风方式下客舱速度场、污染物浓度场并对比了空气龄(AOA)大小,并结合 PIV 系统实验数据进行验证,分析表明流场结构特征差异会影响污染物传播,顶部送风污染物排除效率最高,混合送风次之。

全球疫情蔓延期间,国内外学者针对客舱病毒传播展开了大量研究。Acikgoz et al^[6]利用 CFD 技术模拟客舱不同病毒释放方向、传染源位置、通风量及液滴直径等因素对病毒传播规律的影响。Mazumdar 等人^[7]首次通过 Fluent 动网格技术总结出乘客尾流会使病毒扩散至携带者前 7 排的距离,合理解释了 SARS 传播距离较远的原因。林家泉等人^[8]运用离散相(DPM)模型以 N₂O 模拟波音 737 客舱病毒扩散,考虑了通风量、乘客位置、送风方式等因素并采用 SEI 指标评估乘客的感染风险。2022 年,大连理工大学 Qing Cao 等人^[9]定量评估了通风系统、湍流模型、病毒颗粒模拟方法、几何简化和边界条件对客舱气流场的影响。今年 2 月,Wang and Zhang^[10]研究了客舱类型对病毒传播的影响,并以 3-3 七排座客舱的实验数据验证了 CFD 模型。结果表明,不同客舱类型感染概率几乎相同,

飞行时间长短是重要因素;旅客不佩戴口罩的情况下,乘坐 10 小时的长航程航班的感染概率为 8%。

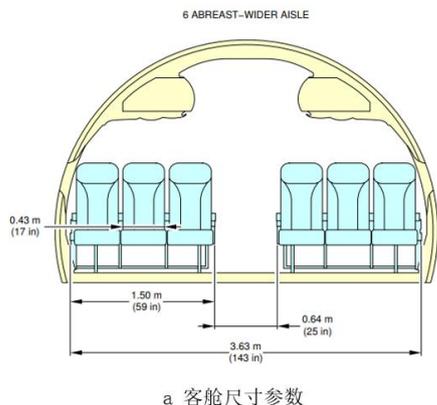
为提高客舱空气质量与乘客热舒适性,近年来许多学者提出了新型个性化送风方式。2017 年,天津大学 Chen Wenhua 等人^[11]对一架 MD-82 商用飞机和波音 737 客舱模拟模型进行实验分析,比较了通风速率、质量平衡及空气速度。结果发现两者具有相似的空气分布特征,同时验证了机舱 CFD 模型可以代表真实机舱环境从而应用于通风研究。黄衍等人^[12]研究了个性送风喷口对气流组织的影响,发现污染源位于个性送风口下时,强射流会促进污染物在空间稀释。Zhang and Chen^[13]最早提出发展新型个性化送风的构想,设计了一种前排椅背供风系统。Zitek et al^[14]探究了直接向乘客呼吸区提供清洁空气的通风设计,结果发现该设计可以防止乘客吸入 60% 的空气污染物。Melikov et al^[15]开发了安装在座椅头枕的通风设备。You et al^[16]利用 CFD 方法模拟了一种安装在客舱地板的个性化通风系统,分析得到该系统可以有效保持客舱热舒适度并降低污染物传播范围。置换送风是一种空间底部低速送风模式,现已应用于各种实际工程与室内环境,J Bosbach^[17]首次利用仪器在飞机机舱内进行实验,测量了置换送风在飞机客舱的各类环境数据,对比发现置换送风会提供良好的热舒适度,并改善了机舱表面的散热效率。

综上所述,现有研究集中于传统送风和个性化送风的研究,而对于新型置换送风模式在飞机客舱的应用及不同类型的通风排污能力评估较为欠缺,仿真分析不够全面。本文在现有研究基础上建立飞机经济舱三维模型,利用 CFD 技术探究三种空调送风工况下客舱内流场情况(包括速度场和温度场),并以常见的呼吸性污染物 CO₂ 为研究对象,探究污染物在舱内的分布特性,结合排污效率指标评估通风性能。研究旨在为未来飞机座舱通风优化设计和运行提供技术支撑。

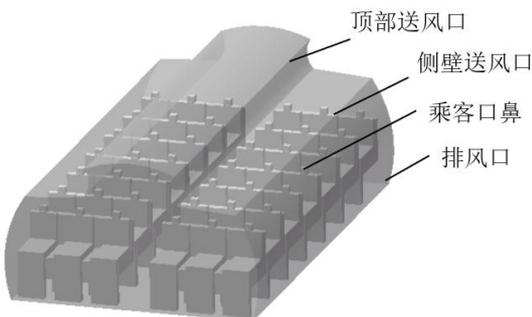
1 几何模型

本文依照已有研究的客舱模型及飞机特性手册中的尺寸参数(见图 1a),模型长宽高分别为 6.3m、3.6m 和 2.3m,使用 Solidworks 软件构建了 A320 经济舱 7 排座几何模型,如图 1b 所示。飞机客舱顶部天花板两侧与侧壁设置进风口,客舱底部

地板两侧为排风口, 当空调采用混合送风模式进行数值计算时, 新鲜空气分别从顶部和行李架下方侧壁进风口进入, 从地板两侧排风口排出。置换送风模式进风口位于客舱地板两侧与行李架下方侧壁,



a 客舱尺寸参数



b 客舱三维模型

图 1 七排座客舱几何模型

Fig.1 Seven-row cabin geometry model

2 数值模型与控制方程

研究的客舱空气流动属于定常低速湍流流动, 流体遵循连续性方程、动量方程、能量方程及组分输运方程, 其统一形式的表达式如下:

$$\rho \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \right) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; $\bar{\phi}$ 为流体变量均值; \bar{u}_i 为 x_i 方向上的平均速度; t 为时间; $\Gamma_{\phi, \text{eff}}$ 为有效扩散系数; S_{ϕ} 为源项。当 $\bar{\phi}=1$, $\Gamma_{\phi, \text{eff}}=0$, $S_{\phi}=0$ 时, 式 (3) 为连续性方程。

根据文献[18,19], RNG k- ϵ 湍流模型是平衡计算精度与计算资源的最佳选择。RNG k- ϵ 湍流模型是基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程对流场物理量进行求解, 相较于 k- ϵ 模型有更高的准确度, 更适用于飞机客舱的内流场计算, RNG k- ϵ 的控制方程如式 (2) 所示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}_i\phi - \Gamma_{\phi, \text{eff}}\text{grad}\phi) = S_{\phi} \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; ϕ 为流体变量; t 为时间; \bar{u}_i ($i=1,2,3$) 代表时均速度; $\Gamma_{\phi, \text{eff}}$ 为有效扩散系数; S_{ϕ} 为源项。当 ϕ 取不同值时, 式 (2) 可以表示连续性方程、动量方程、能量方程及湍动能方程。当 $\phi=k$ (k 为湍动能), 式 (2) 即为湍动

新鲜空气以低速流入乘客座椅下方, 排风口位于客舱顶部两侧。考虑到舱内结构较为复杂, 影响计算结果与精度, 故需对客舱模型及人体模型的高曲率面和圆角做一定程度的简化。

能方程。

仿真计算数值方法使用 SIMPLE 算法, 压力基于 Standard 离散格式, 其余变量为二阶迎风离散格式, 时间步长为 0.05s。当速度残差小于 10^{-3} , 能量残差小于 10^{-6} 时, 认为计算收敛。

3 CFD 模型验证

由于 CFD 模型需满足各种假设, 所以本文在数值模拟前通过实验数据和网格无关性分析来验证 CFD 计算的可靠性。

3.1 客舱内流场 CFD 验证

RNG k- ϵ 模型使用了很多近似值来模拟湍流参数, 存在一定误差。因此, 许多研究在客舱内进行了实验测量, 验证了速度、温度、污染物浓度等 CFD 模拟结果。本文使用 Cao et al^[9]在 7 排座经济舱模型中的实验结果进行 CFD 验证, 实验分析了气流组织、空气温度及污染物浓度, 图 2 为客舱第四排截面处不同流场参数的对比结果。其中, 速度分布的实验结果和模拟结果吻合度较好, 温度及污染物浓度数值模拟值与实验值有所偏差, 污染物浓度分布不均匀, 这是由于客舱气流时刻变化, 仪器精度和测量误差所造成的。实验与模拟值总体误差小于 15%, 故认为 RNG k- ϵ 模型能准确计算不同客舱环境下的流场结果。

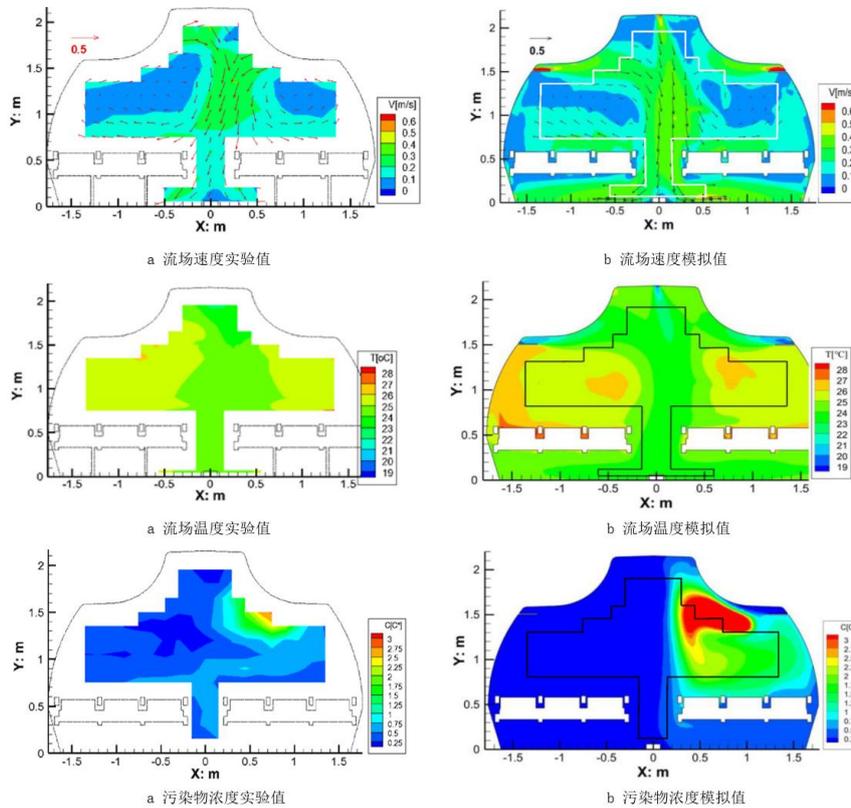


图 2 流场速度、温度及污染物浓度的实验值和模拟值的对比

Fig.2 Comparison of experimental and simulation results of flow field velocity, temperature and pollutant concentration

3.2 网格无关性验证

网格类型采用 Fluent Meshing 多面体非结构化网格, 并对计算精度要求较高的区域如送风口、出风口和乘客口鼻处的网格局部加密。选取网格数量为 40 万、60 万、80 万和 100 万分别进行仿真计算,

采集舱内第 4 排 6 名乘客头顶上方 5cm 处的温度和速度数据。如图 3 所示, 网格数量为 60 万和 80 万的两项监测值较为接近, 可获得准确的计算结果。因此研究采用 60 万的网格进行计算。

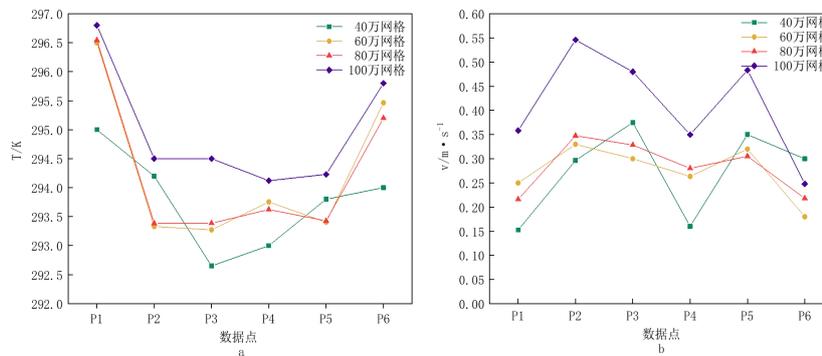


图 3 网格无关性验证

Fig.3 Grid-independent validation

4 边界条件设置

边界条件设置如表 1 所示。顶部送风速度为 2m/s, 混合送风的送风速度为 2m/s 和 1.5m/s, 置换送风速度为 1m/s 和 0.8m/s, 不同送风方式的总

流量一致。排风口类型为压力出口。考虑到客舱近壁面区域湍流未充分发展, 需使用标准壁面函数。

根据 ASHARE 制定的相关环境标准, 舱室空气温度为 297K, 舱壁和进风口温度分别设为 295K

和 293K, 以满足人体热舒适性要求^[20,21]。人体表面热流量设为固定值 80W/m²。CO₂ 是呼吸代谢产生的气态污染物, 通风系统和人体呼吸都会产生大量的 CO₂, 过高浓度的 CO₂ 会使人感到心悸, 降低人的反应与决策能力, 因此 CO₂ 是客舱内主要污染源, CO₂ 浓度大小与分布特点可以作为室内通风效率的评价指标^[22]。为保证计算准确度与真实性, 使用 UDF 函数定义乘客周期性呼吸速度, 一个呼吸周期为 5 秒, 呼吸速度为 1.5m/s (见图 3), CO₂ 初始质量分数设为 0.04, 送风量为 10L/s。

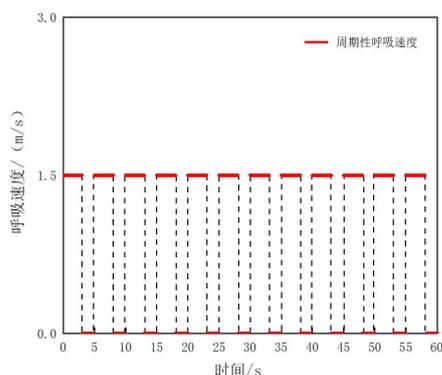


图 4 UDF 函数定义的周期性呼吸速度曲线

Fig.4 Periodic respiratory velocity profile defined by UDF function

表 1 边界条件

Table 1 Boundary condition

参数	边界数值
顶部送风	2m/s; T=20°C
混合送风	2m/s+1.5m/s; T=20°C
置换送风	1m/s+0.8m/s; T=20°C
客舱壁面	T=22°C
客舱地板及座椅	T=24°C
客舱乘客	呼吸速度 1.5m/s; 发热功 80W; 体表温度 32°C; 口腔温度 36°C
湍流强度	5%

5 计算结果与分析

在 XOY、XOZ 方向和乘客呼吸区高度位置共设置 2 个截面与 42 个监测点以便于分析不同送风工况下内流场特性及污染物分布情况, 计算结果使用 Tecplot 进行后处理。

5.1 客舱速度场温度场分析

客舱气流组织是影响污染物传播扩散的关键因素。图 5 是三种空调送风模式下客舱速度场云图。当使用顶部送风时, 新鲜空气沿着行李架壁向下输送, 一部分空气沿着舱壁流动至排风口排出, 而另一部分空气在过道汇聚, 形成方向相反的局部气团。位于中间位置的乘客头顶上方区域速度大于 1m/s, 吹风感较强, 其余乘客周围速度范围在 0.2-0.5m/s。混合送风可以使气流更好地混合, 速度分布较为均匀。乘客座椅下方流速增大, 周围气流流速增大, 整个空间存在多个空气滞留区。图 5c 置换送风的速度场与前两者差异明显。乘客周围速度小于 0.3m/s, 满足我国《采暖通风与空气调节设计规范》。侧壁的低速气流会在行李架壁附近出现“康达效应”, 气流附着在壁面并沿壁面向内侧流动, 而且客舱气流受到人体上升的热羽流影响显著。图 6 是三种送风方式下客舱的温度场云图, 采用顶部送风模式时, 客舱温度范围在 295K-305K, 乘客周围温度较高, 垂直温差约为 3K, 有强烈的热感觉。而混合送风模式下客舱整体温度有所下降, 平均温度小于 297K, 乘客周围温度在 300K 左右, 符合 ASHARE 的规定。图 6c 置换送风下的客舱温度场存在分层现象, 座椅下方为低温区, 而乘客周围温度在 305K 左右, 走道上方区域的温度较低, 排风口附近温度小于 299K。

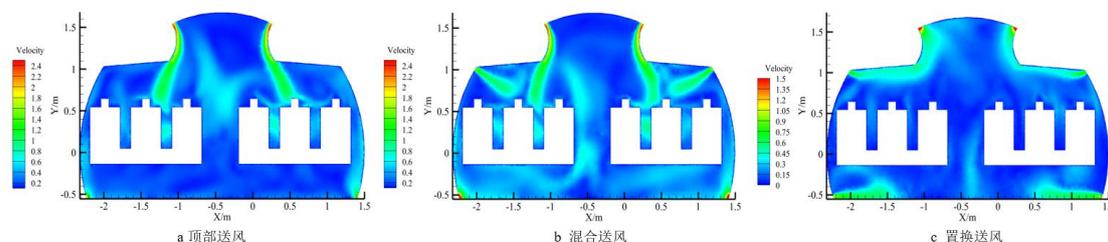


图 5 三种送风方式下的速度场云图

Fig.5 Velocity field contours of three air supply modes

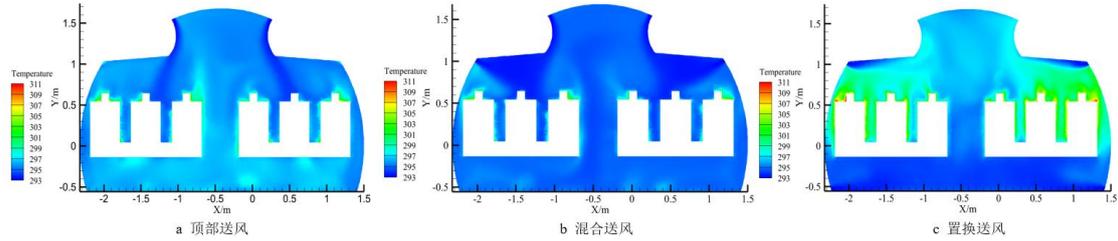


图 6 三种送风方式下的温度场云图

Fig.6 Temperature field contours of three air supply modes

5.2 CO₂ 浓度分布情况

图 7 和图 8 分别是 $t=60$ 秒乘客呼吸区高度截面处 CO₂ 纵向分布云图与不同时刻乘客呼吸区 CO₂ 平均质量分数变化情况。可以看出，三种送风模式下 CO₂ 的分布有着显著差异。图 7a 第一排区域和壁面处存在 CO₂ 积聚现象，过道区域 CO₂ 浓度较低。而混合送风截面的 CO₂ 浓度相差较小，说明混合送风的流场均匀。置换送风模式下污染物纵向传播明显，处于壁面区域的 CO₂ 浓度低，这是因

为向上的新鲜空气和人体热羽流的稀释作用。乘客前方 CO₂ 的浓度较高。此外从图 8 可以看出，在 0-10 秒内，乘客呼吸区 CO₂ 浓度急剧下降，随后在流场作用下趋于平稳。顶部送风和混合送风模式下不同时刻乘客呼吸区的 CO₂ 平均质量分数相近，而置换送风下平均质量分数比前两者高出约 35%。说明置换送风会使乘客周围的 CO₂ 浓度积聚时间较长，短时间内难以排出至舱外。

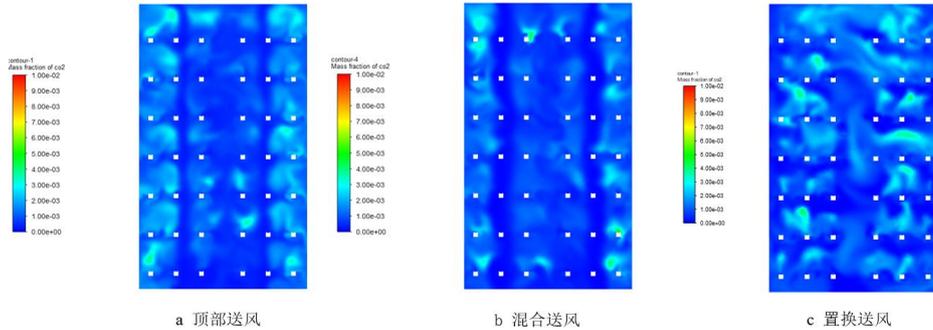


图 7 $t=60$ 秒乘客呼吸区截面 CO₂ 分布云图

Fig.7 Contours of cross-sectional CO₂ distribution in passenger breathing zone at 60 seconds

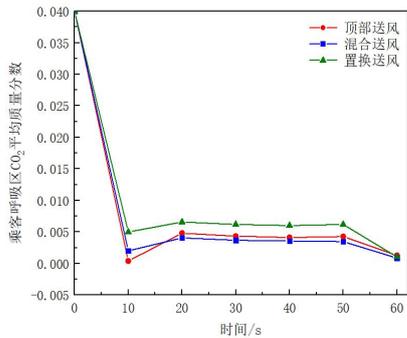


图 8 三种送风模式下乘客呼吸区 CO₂ 平均质量分数

Fig.8 Average CO₂ mass fraction in passenger breathing zone for three air supply modes

5.3 客舱排污效率指标评估

为了评估飞机客舱通风性能与污染物去除能

力，本文采用室内环境排污效率评价指标，该指标现应用于各种室内环境的研究分析^[13]。排污效率可以充分反映空间内不同位置的污染程度及排污效果，其公式如下：

$$\eta = \frac{C_e - C_s}{C - C_s} \tag{3}$$

式中： C_e 为客舱排风口处污染物浓度； C_s 为客舱进风口处污染物浓度； C 为客舱空间内污染物平均浓度。 η 值越大说明客舱通风系统排污效率越高。根据仿真监测数据进行计算，图 9 为客舱空调采用三种不同送风模式下各个时刻的客舱排污效率对比图。

根据计算结果可以看出，在 CO₂ 进入客舱空间后 10-50 秒内，三种送风方式的排污效率都在 0.2

以下,顶部送风和混合送风的排污效率大小相近。CO₂在客舱气流组织作用下趋于稳定,1分钟后三种送风模式的瞬时排污效率分别达到0.515、0.598和0.854。在不同时刻置换送风相较于两种传统空调送风模式,其排污效率提高了约42.8%。

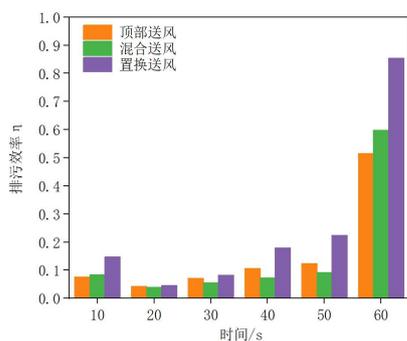


图9 三种送风模式下客舱的排污效率

Fig.9 Cabin discharge efficiency under three air supply modes

6 结论

(1) 飞机客舱气流组织是影响污染物分布及通风效果的根本原因。客舱空调采用顶部送风会导致中间乘客的吹风感较强;混合送风的速度场分布较为均匀,乘客周围速度增大,空间存在多个气团滞留区;置换送风模式下乘客周围速度小于0.3m/s,气流受到人体上升的热羽流影响显著。

(2) 顶部送风模式下乘客热感觉较强,垂直温差约为3K;采用混合送风模式下客舱整体温度小于297K,乘客热舒适性良好;置换送风会出现温度分层,乘客周围温度在305K左右。

(3) 对比不同送风方式下的CO₂分布排污效率得出,置换送风会使乘客周围的CO₂浓度积聚时间较长,呼吸区平均浓度高出35%顶部送风和混合送风的排污效率大小相近,不同时刻内置换送风相较于传统空调送风模式,排污效率提升了约42.8%,未来飞机通风结构设计可以考虑置换送风模式。

参考文献:

[1] 中国民用航空局.“十四五”民航绿色发展专项规划[M].北京:中国民用航空局,2020.
[2] MANGILI A, MARK A G. Transmission of infectious diseases during commercial air travel. The Lancet,

2005,365(9463):989-996.

- [3] 陈希远,王振斌,马博文,等.考虑污染物传播规律的飞机座舱送风方式研究[J].航空学报,2018,39(7):91-100.
[4] WANG F, YOU R, ZHANG T, et al. Recent progress on studies of airborne infectious disease transmission, air quality, and thermal comfort in the airliner cabin air environment [J]. Indoor Air,2022,32(4):e13032.
[5] 杨建忠,裴春波,陈希远.送风方式对飞机座舱内污染物传播影响研究[J].应用力学学报,2021,38(01):241-248.
[6] ACIKGOZ M B, AKAY B, MIGUEL A F, et al. Airborne Pathogens Transport in an Aircraft Cabin [J]. Defect and Diffusion Forum,2011,312-315:865-70.
[7] MAZUMDAR S, POUSSOU S B, LIN C-H, et al. Impact of scaling and body movement on contaminant transport in airliner cabins [J]. Atmospheric Environment, 2011,45(33):6019-28.
[8] 林家泉,孙凤山,李亚冲.客舱内呼吸道病原体传播与感染风险数值模拟[J].系统仿真学报,2019,31(8):7.
[9] Cao Q, Liu M, Li X, et al. Influencing factors in the simulation of airflow and particle transportation in aircraft cabins by CFD[J]. Building and environment, 2022(Jan. Pt.B):207.
[10] WANG F, ZHANG T T, YOU R, et al. Evaluation of infection probability of Covid-19 in different types of airliner cabins [J]. Build Environ,2023,234:110159.
[11] Ventilation similarity of an aircraft cabin mockup with a real MD-82 commercial airliner - ScienceDirect[J]. Building & Environment, 2017, 111:80-90.
[12] 黄衍,段然,李炳焯,等.飞机座舱个性化送风下的气态污染物传播规律实例研究[J].应用力学学报,2015, 32(4):7.
[13] ZHANG T, CHEN Q. Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins[J]. Building and Environment, 2007,42(4):1675-84.
[14] ZÍTEK P, VYHLÍDAL T, SIMEUNOVIĆ G, et al. Novel personalized and humidified air supply for airliner passengers [J]. Building and Environment, 2010,45(11): 2345-53.
[15] MELIKOV A, IVANOVA T, STEFANOVA G. Seat headrest-incorporated personalized ventilation: Thermal comfort and inhaled air quality [J]. Building and Environment,2012,47:100-8. (下转第 574 页)