

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-202-08

商用客机驾驶舱通风系统的送风方式研究

陈燮阳 于 女 米雪宁 张唯一

(南京航空航天大学民航学院 南京 211106)

【摘要】 为了探究通风系统送风方式如何影响客机驾驶舱的空气质量,采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法,针对波音 737 客机驾驶舱建立数值计算模型。研究重点对比不同送风模式下驾驶舱内的流场结构特点、乘员呼吸区的空气流速,并结合乘员呼吸区的污染物清除效率和空气龄进行空气质量的定量评估。结果表明:风挡进气口可能减缓呼吸区的空气流速,而个人通风口则可以显著提升乘员呼吸区的空气质量;周期信号送风技术可以有效提高空气净化效果,与恒值信号相比,污染物清除率提升 7.5%,平均空气龄降低 7.39%。

【关键词】 商用客机驾驶舱;周期信号送风;数值模拟;空气污染物

中图分类号 V245.3 文献标志码 A

Research on Air Supply Methods of a Typical Commercial Flight Cockpit Ventilation System

Chen Xieyang Yu Nu Mi Xuening Zhang Weiyi

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

【Abstract】 To investigate the impact of ventilation system air supply methods on air quality in the cockpit of a commercial aircraft, this study employs the Computational Fluid Dynamics (CFD) method to develop a numerical calculation model tailored to the Boeing 737 aircraft cockpit. The research prioritizes contrasting flow field structure characteristics within the cockpit across various air supply modes, analyzing the fresh airflow, and quantitatively evaluating air quality, taking into account pollutant removal efficiency and air age within the passenger breathing zone. Results suggest that windshield inlets may decelerate the airflow rate within the breathing zone, while the personal vent markedly enhance air quality in the passenger breathing zone; moreover, periodic signal air supply technology can effectively elevate air purification performance. In comparison with constant signals, the pollutant removal rate raises by 7.5%, and the mean air age is reduced by 7.39%.

【Keywords】 Commercial aircraft cockpit; Periodic signal air supply; numerical simulation; air pollutants

0 引言

民航机舱内的热环境和空气质量是影响乘客和机组人员安全健康与舒适性的核心因素。尤其从飞行安全角度考虑,飞行员需在有限的驾驶舱空间中保持长时间的高度专注,这使得驾驶舱的空气质量与飞行安全直接相关。对比客舱,驾驶舱空间更狭小、结构更精细,且大面积风挡玻璃和多种电气设备提供了多重冷热源,造成流场叠加,微环境复

杂,因而受到越来越多研究和关注。但是真实通风情况、热环境和空气质量数据测量尚不充分,因此深入研究和优化驾驶舱的送风方式尤为必要。本研究在此背景下,探索了送风方式对驾驶舱流场结构与污染物清除方面的影响,在通风系统性能设置方面提出参考意见,希望为提高飞行的安全性并维护机组人员的职业健康和操作舒适度作出贡献。

从研究方法来说,驾驶舱工作状态的真实测量

作者简介:陈燮阳(1998-),男,硕士,E-mail: cchenxy@nuaa.edu.cn

通讯作者:于女(1971-),女,博士,副教授,E-mail: nuyu@nuaa.edu.cn

收稿日期:2023-10-19

或搭建环境室模型进行测量能够获得更符合实际的流场数据。但实时监测会影响飞行安全, 或者因实验成本高昂等现实原因, 难以对流场进行全方位细致的观察。计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 因其计算成本低、可模拟工况多, 普遍被国内外学者应用于机舱空调供气系统的研究^[1]。例如在 2022 年, Yan 等人建立夜间航班飞行员人体微环境, 并讨论了稳态条件下人体周围气流特征、CO₂ 浓度场及热分布情况^[2]。孙贺江、薛红军等人利用 redtherm 平台建立驾驶舱乘员热舒适性模型, 得到稳态情况下满足飞行员热舒适性的最佳送风速度约为 2m/s^[3,4]。Fang 等在模拟舱中对 16 名志愿者开展个人通风喷口实验, 结果表明喷口对乘员上半身热感觉影响最大, 而过大的流速会带来不适^[5]。

近年新的研究指出适当调节送风占空比可提高空气利用率^[6]。不同于持续送风, 周期性送风通过规律性的气流输入可以有效地打破稳态流场, 增强室内空气的湍流度, 促进空气的混合, 对于污染物清除具有独特的优势。例如 2013 年 Fallenius 等学者提出使用机械脉冲发生器制造脉动进流, 使流场产生更多漩涡, 从而达到与增加流量相同的混合效果^[7]。2020 年 van Hooff 等发现周期变速送风能够增强室内空气混合速度^[8]。在此基础上, 林家泉、周立祥等学者采用数值模拟计算客舱气流特征, 并通过粒子图像测速实验进行验证, 结果表明飞机客舱空调采用高-低速梯形方波信号送风具有最好的排污效率, 但舒适度欠佳^[9,10], 而正弦信号送风的流速变化舒缓, 能有效降低人体吹风感而提升舒适度^[11]。但以上研究都集中在建筑室内微环境和飞机客舱中, 尚缺乏针对通风系统周期信号送风影响驾驶舱气流特征的研究。

在此背景下, 本项研究对波音 737 客机驾驶舱进行建模, 以驾驶舱空调系统的标准通风配置为基础, 对比研究传统稳态与新型周期送风的差别, 使用流速、空气年龄等量化指标对模拟结果进行定量分析, 旨在为驾驶舱内部空气质量的改善提供建议, 以提升驾驶舱内飞行员和机组成员的健康防护, 为航空公司、航空器设计部门提供建议与参考。

1 研究方法

1.1 驾驶舱几何模型

本文利用 Catia 软件, 基于波音 737 客机驾驶

舱的实际尺寸 (2.0m 宽×1.8m 高×2.2m 长), 构建了一个与实际相符的几何模型。在此模型内部还建立了在驾驶舱内工作的飞行员、副驾驶以及随行人员的简化人体模型, 详细结构可参见图 1。简化人体模型的建立依据了 Li 等人在 2015 年使用的方法^[12]。此模型可以在大幅度减少计算时间的同时, 仍满足流场精度的基本要求。此外, 该驾驶舱模型考虑了总计 11 个通风入口, 它们在结构上包括了对称分布于顶部、侧壁、脚部和风挡的进气口, 以及为飞行员和随行人员专设的个人通风喷嘴和进气口。

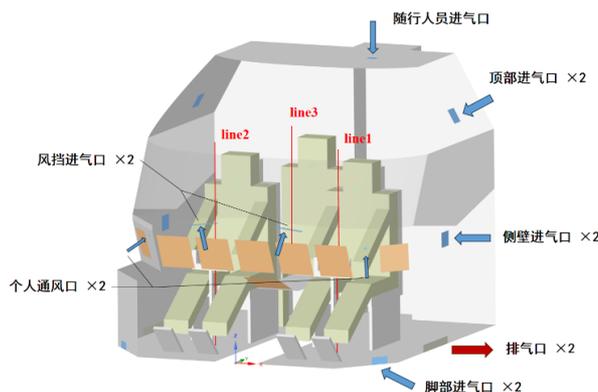


图 1 驾驶舱物理模型

Fig.1 Cockpit geometry

1.2 求解方法

研究使用不可压缩的纳维-斯托克斯 (N-S) 方程描述与速度、温度、密度和压力相关的气流。参考 RNG k-ε 模型在预测室内、机舱气流和污染物分布方面的成功应用, 使用 RNG k-ε 模型对湍流的特征进行建模^[13,14], 控制方程如下:

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

式中: $\Gamma_{\varphi, eff}$ 为有效扩散系数; $\bar{\varphi}$ 为流体变量均值 (速度、湍流参数等); \bar{u}_i 为 x_i 方向的平均速度, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; t 为时间, s; S_{φ} 为广义源项。

计算对压力、动量、湍流动能、能量、能量耗散率均采用二阶迎风格式进行离散化, 求解压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。使用对流扩散方程描述流场内不同气体组分的局部质量分数, 如式 (2) 所示:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla c) - \nabla \cdot (vc) \quad (2)$$

式中： c 是各气体组分浓度，变化范围 $0 \leq c \leq 1$ ； v 为速度，m/s， D_{eff} 为有效扩散系数； $\nabla \cdot (vc)$ 是对流项，代表速度场的物质运输； $\nabla \cdot (D_{eff} \nabla c)$ 是扩散项，模拟空气扩散机制。

1.3 边界条件设置

本文考虑航班日间巡航的情况，假设一架飞机正于一年中的 6 月 21 日在东部沿海地区的海拔 10,000 米处沿正北方向巡航，考虑到这一高度的外部环境温度非常低，通常需开启风挡加热系统以避免机舱风挡的冰冻和起雾现象。参照该飞机型号的机务维修手册，建议的风挡温度设定为 40℃。同时，仪表板的热源功率和温度分别被设定为 30W 和 35℃。假设驾驶舱的所有壁面（包括座椅、墙壁和地板等）均由铝材制成，其温度设定为 23℃。根据生理学参数，我们假定一个人的呼吸产生的空气质量流量为 0.5kg/h，呼出气体温度为 35℃。根据美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHRAE）的标准文件，驾驶舱内为满足乘员的需求，每人所需的新风送风流量的下限是 46.4kg/h。然而，为了确保飞行员在操作过程中获得足够的氧气供应，驾驶舱的进气总流量被设定为 300kg/h。关于具体的空调送风口条件设定，详见表 1，其余边界条件见表 2。

表 1 空调送风条件

Table 1 Air supply speed

送风工况	进气口配置	送风速度 (m/s)	送风温度 (℃)
1	6 个 (侧壁、顶部、脚部)	1.5	25
2	8 个 (侧壁、顶部、脚部、风挡)	1.4	25
3	11 个 (侧壁、顶部、脚部、风挡、个人通风)	1.4	25
4	11 个 (侧壁、顶部、脚部、风挡、个人通风)	$1.4 + 1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{30}t\right)$	25

表 2 其余边界条件

Table 2 Other boundary conditions

模型边界	边界值
机舱壁面	温度 23℃；绝热
风挡玻璃	温度 40℃；热源功率 23W
仪器表盘	温度 35℃；热源功率 30W
人体模型	温度 35℃；呼吸流量 0.5kg/h

考虑方波以及梯形周期信号送风模式下送风速度变化剧烈，乘员舒适度较差，研究采用变化较缓且初始送风速度最快的余弦函数来模拟周期性送风模式。工况 4 以工况 3 的进气口数量为基础，参考前期学者的研究结果，送风周期设定为 30 秒。在该周期的初始时刻，送风速度达到峰值，即 2.4m/s。随着时间推移至周期的一半（即 15 秒），送风速度减小到其最低点，为 0.4m/s。在随后的 15 秒内，送风速度重新增加到 2.4m/s，标志着本周期的结束并开始下一个送风周期。周期送风工况下各时间点的送风速度数据参考图 2。

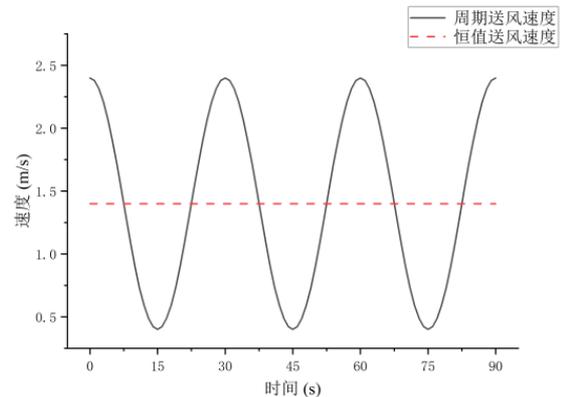


图 2 工况 4 各时刻送风速度

Fig.2 Air supply speed cycles under condition 4

1.4 网格无关性验证

研究选用多面体非结构网格方法对模型进行网格划分。针对驾驶舱的各个进气口、排气口、人体模型以及壁面等具有附面层、需要高计算精度的部分，实施了局部网格细化以及边界层加密。非结构网格的一个显著特点是其内部节点周围的单元形态是不规则的，这为其赋予了极佳的几何适应性，使其特别适用于对驾驶舱这类具有复杂几何结构的空进行网格划分。

为了深入探讨网格数量对模拟结果的敏感性并验证计算的可靠性，我们设定了五种不同的网格数量——55 万、70 万、110 万、200 万和 300 万。在相同的边界条件下，对这五种网格配置进行了持续 120 秒的流场模拟。模拟过程中，对三个人体模型前方 20cm 的位置，从地面至 1.5m 的高度区域的气流速度进行监测。结果如图 3 所示，当网格数量增加至 200 万时，计算结果趋于稳定，即继续增加网格数量到 300 万并不会使得第 120 秒的监测数据有显著偏差。因此，为了在保证计算精度的同时降低

计算负担, 我们选定了网格数量为 200 万、最小正交质量为 0.278 的网格配置进行后续数值模拟。

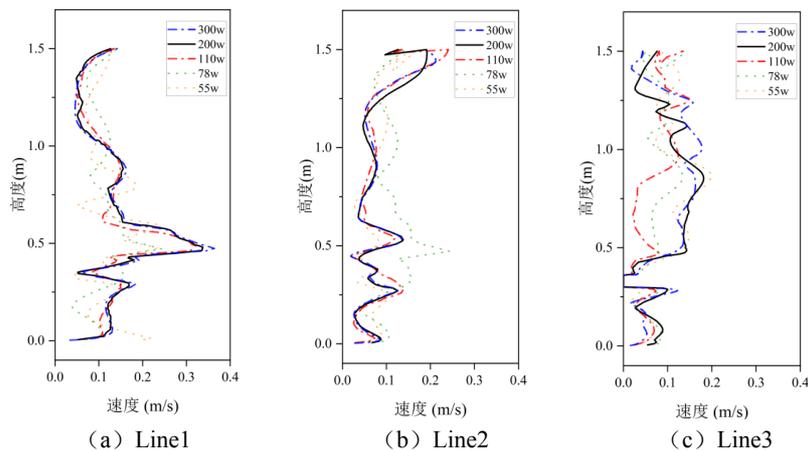


图 3 网格无关性验证结果

Fig.3 Grid-independent validation

2 结果与分析

模拟计算初始设置驾驶舱内存在质量分数为 0.05 的 NO₂, 计算过程中通风系统仅输入新鲜空

气, 以瞬态流动计算流场 90s。如图 4 所示, 分别截取驾驶舱 X、Y、Z 三个方向截面以研究乘员呼吸区域的流场图, 观察不同工况下的气流特征。

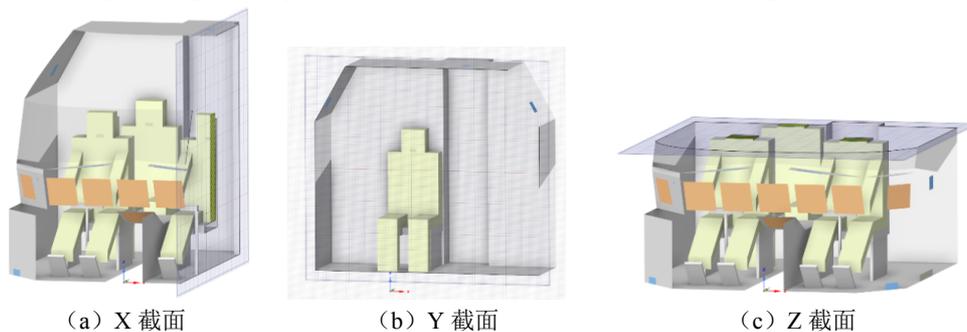


图 4 截取界面位置示意

Fig.4 Schematic diagram of interface location

2.1 恒值信号送风的驾驶舱气流特征

在恒值信号送风条件下, 通风口持续且稳定地

为驾驶舱提供新鲜空气, 截取乘员呼吸高度 Z 截面的流场图进行分析。

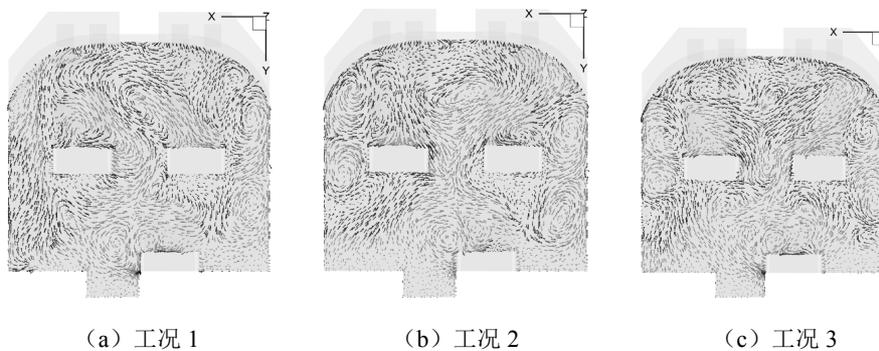


图 5 恒值信号送风的呼吸高度 Z 截面流场

Fig.5 Breathing height Z-section flow field of constant value signal air supply

如图 5 (a) 所示, 当送风条件设置为工况 1, 顶部送风口送入的气流在驾驶舱的中部流动与其

他流动相撞，并于随行人员的身体左前侧产生两个涡旋结构：一正向及一逆向。部分气流沿着顺流方向流动并通过排风口排出，而另一部分气流在前进的过程中，在机长的呼吸区形成一个低速度的逆向涡旋。这种涡旋可能导致污染空气的循环流动，从而增加污染物的浓度，导致污染物在该区域内的积累^[12]。在工况 2 中，从风挡送风口释放的新风重新整理了驾驶舱前部气流场，在其影响下，经两侧壁送风口流入的气流在与机长和副驾驶座椅的碰撞后，在左右壁面上分别形成了两个稳定涡旋结构。这些涡旋影响两位驾驶员呼吸区域内的气流，同时在中控台上方构建了一个稳定的涡旋。对照工况 2，工况 3 呈现出了更为稳定与对称的流场特性。两名飞行员前方的个人通风喷嘴所喷出的气流有效地打破了呼吸区域内的污染物聚集现象。由于两人身体两侧分别形成一组对称涡流，他们的身体附近流场更加稳定，舒适性得以提升，而呼吸区域的涡旋则被全部打破。此外，随行人员专用的送风口排放的气流导致驾驶舱后部的气流速度显著上升，从而为随行人员创造了更为清新的呼吸环境。

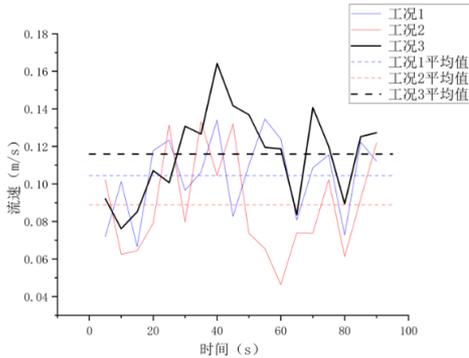


图 6 恒值信号送风下各工况空气流速对比

Fig.6 Comparison of air flow rates under different operating conditions

以 5s 为间隔，分别对三种工况下乘员呼吸区

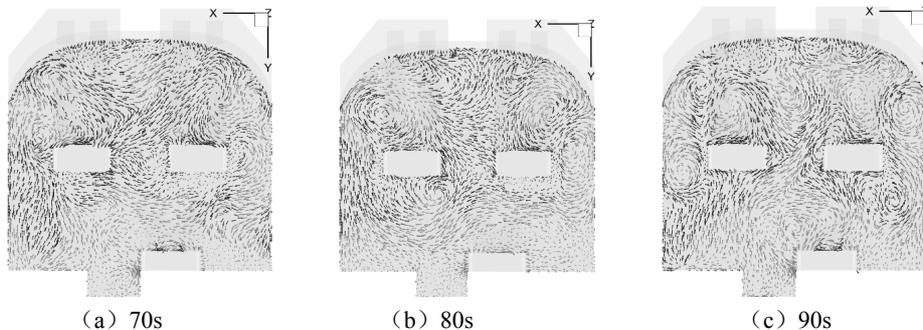


图 7 周期信号送风的 Z 截面流场

Fig.7 Z-section flow field of periodic signal air supply

域进行空气流速采样。于三名乘员身体前方 10cm 处建立监测点以记录平均流速，见图 6。如图 6 所示，工况 3 在计算的 90s 中，乘员呼吸区域流速均保持在较高的水平。保持进气质量流量恒定的情况下，工况 3 的平均流速大约为 0.116m/s，这不仅显著高于先前两种通风配置，并且符合 ASHRAE 的舒适度要求，即平均流速需小于 0.3m/s。因此，它能在满足舒适度要求的同时，高效清除流场中的污染物，为乘员提供更加新鲜的空气。考虑到工况 3 送风方式在通风效果方面的卓越表现，后续对周期送风的研究将仅采用这种方式进行对比分析。

2.2 周期信号送风的驾驶舱气流特征

基于工况 3 的送风口配置，将恒值信号替换为以 30s 为周期的周期余弦信号，分别截取驾驶舱乘员 Z 截面、乘员 X 截面在 70s、80s、90s 时刻的流场图，以研究其在周期信号送风工况在一个周期内的气流特征。

如图 7 所示，在 $t=70s$ 时，流场正在经历从高速到低速的过渡阶段，随着进风速度的降低，流场开始朝稳定状态发展。此刻，风挡的左右两侧分别出现了两道回流，相较于恒值送风的情境，此时的流场中涡旋数量减少，污染物的清除效率相应提高。到了 $t=80s$ ，送风速度逐步增大，风挡两侧的回流进一步演化并形成涡旋结构，两名驾驶员的背后区域与随行人员身前均呈现出一个较为稳定的流态。到 $t=90s$ ，此时送风已经完成一个完整的周期，进风速度达到峰值。在驾驶舱中，一些远离进风直接冲击的区域因其相对较低的流速，围绕速度最慢的涡心区域形成一系列的小型、高速涡旋。这些涡旋由于其高速和动态的特点，对其周围环境显示出强烈的吸附作用，从而有效捕获和迅速带走局部污染物，在下一周期中混合并排出。

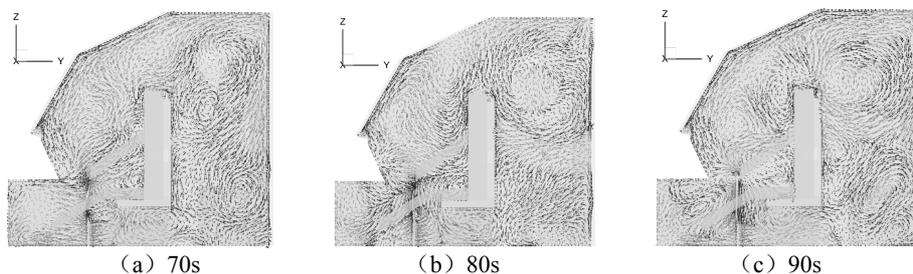


图 8 周期信号送风的 X 截面流场

Fig.8 X-section flow field of periodic signal air supply

图 8 为根据机长身体中轴线划定的驾驶舱流场截面。在 $t=70s$ 时, 可以注意到个人通风喷嘴所产生的新风流直接冲向了呼吸区域。由于进风速度此时正处于一个逐渐减小的阶段, 因此风挡附近区域观察到有一股流体显示出形成涡旋的趋势。与此同时, 从顶部进风口流出的气流干扰了驾驶舱后上方部的流场结构, 并形成了一股朝向驾驶舱中轴线方向、速度逐步衰减的射流。这一射流与其周围的流体进行了混合, 并最终与周围环境流体达到了相同的速度。在射流的下方区域, 出现了一个逐渐靠近射流的小涡旋。 $t=80s$ 时, 流速开始逐步增大, 机长身前发展出一个逐渐向上、移向机长的头部区域的涡旋。同时, 后方的射流对其下方的小涡旋进行破坏并将其吸入, 捕获并带走附近空气中的污染物。到了 $t=90s$, 进风速度达到最大值, 此时在机长身体的前侧区域形成了一个小型但速度较高的涡旋, 可能会带来较高的吹风感。驾驶舱后段射流

的混合作用依旧明显, 靠近底部位置则有两个涡旋, 他们将在不久后混合形成一个新的涡旋, 顺势开始下一个进风周期。

由上讨论可知, 在同样的进风口配置下, 周期信号送风相对于恒值送风具有更优的通风效果, 其能够有效地破坏稳态流场中的低速涡旋, 从而更好地带走和扩散污染物, 有助于维护驾驶舱空气的清洁度。

2.3 驾驶舱呼吸区域污染物浓度分析

研究设置初始状态下驾驶舱空气成分存在质量分数为 0.05 的 NO_2 , 通过监测记录各时刻驾驶舱空间内的 NO_2 质量分数以评估通风系统对污染物的清除效率。图 9 与图 10 是工况 3 和工况 4 下驾驶舱呼吸高度的污染物浓度分布图。恒值信号送风能够持续地清除污染物, 但其变化过程相对温和。在这种情况下, 污染物的清除更多地依赖于污染物自身的扩散能力。

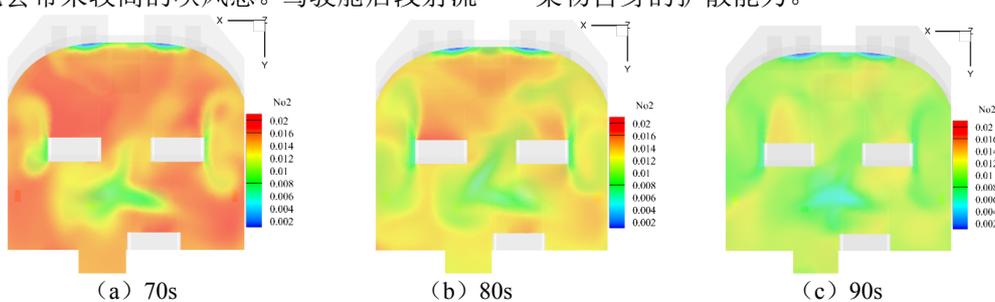


图 9 恒值信号送风下的污染物浓度分布

Fig.9 Distribution of pollutant concentration under constant value signal air supply

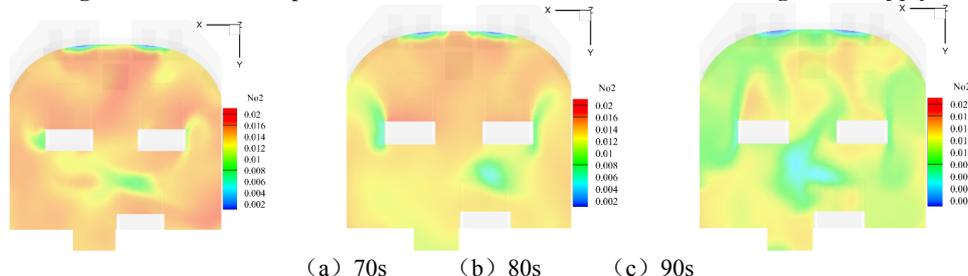


图 10 周期信号送风下的污染物浓度分布

Fig.10 Distribution of pollutant concentration under Periodic signal air supply

与之相反，周期信号送风通过干扰稳态流场，进而增强了污染物的混合与清除。通过观察图 9 和图 10 不难发现，由于两种送风方式采用相同的通风口配置，其污染物的分布区域在空间上较为相似。然而，当对比同一时刻恒值信号送风与周期信号送风的污染物浓度分布时，二者表现出明显的差异。在 $t=70s$ 和 $t=80s$ 时，周期信号送风下的呼吸区污染物浓度明显低于恒值信号送风。但到了 $t=90s$ ，部分区域内的污染物浓度在周期信号送风下高于恒值信号送风。研究分析主要是因为此时周期信号送风处于其最高流速阶段，快速的气流导致局部区域产生了高速的小涡旋，外部的污染物不能即时得到稀释清除。但当进入下一个送风周期后，这些高浓度的污染物将迅速扩散，从而使得驾驶舱内的整体污染物浓度得到有效的降低。

2.4 驾驶舱空气品质评估

图 11 是恒值信号送风与周期信号送风条件下呼吸高度截面的污染物平均浓度对比。观察图 11 可知，恒值信号送风持续且稳定的稀释驾驶舱内的污染物浓度。与此不同，周期信号送风则以其送风周期规律来清除污染物。当污染物浓度处于较高值时，周期信号送风通过较高的进风流量迅速减少污染物的浓度；在中间阶段，较低的进风速度有利于污染物的混合与扩散；而在周期的末尾阶段，逐步加快的流速进一步推动稀释污染物浓度。

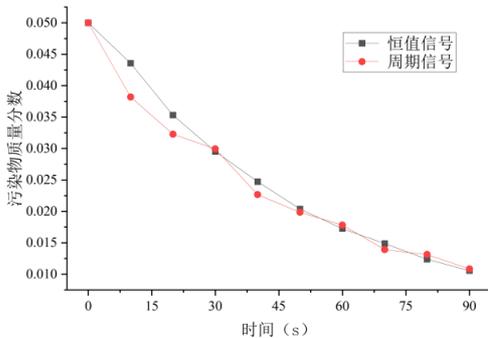


图 11 呼吸高度污染物平均浓度

Fig.11 Average concentration of pollutants at breathing height

研究提出使用呼吸区排污效率来衡量送风方式对乘员呼吸区域污染物的清除能力。在相同的通风量和时间内，乘员呼吸高度平面的污染物浓度更低的送风方式具有更高的呼吸区排污效率。呼吸区排污效率计算公式为：

$$\varepsilon = \frac{\int C_0 dt}{\int C_i dt} \times 100\% \quad (3)$$

式中： C_0 为该时刻排风口的污染物浓度； C_i 为该时刻呼吸区污染物浓度。计算恒值信号送风与周期信号送风的呼吸区排污效率如图 12 所示，工况 4 具有最高的呼吸区排污效率 95.6%，相对工况 1、2、3 的排污效率分别提高 13.6%、8.9%、7.5%，因此可以认为工况 4 具有较好的呼吸区排污能力。

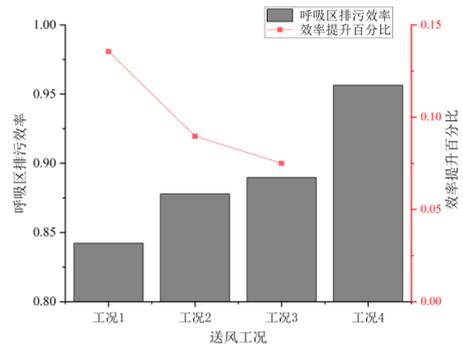


图 12 呼吸区排污效率对比

Fig.12 Comparison of pollutant removal efficiency in breathing zone

为客观量化驾驶舱不同送风模式的通风效果，采用空气龄作为评价指标观察呼吸高度截面。空气龄定义为外界空气自进入室内后，到达室内某点所经历的时间。流体环境中某点的空气龄越小，说明该点的通风效果越好、空气越新鲜。不同位置的空气龄计算表达式为：

$$\nabla(\tau_a \vec{v}_a - D_a \nabla \tau_a) = 1 \quad (4)$$

式中： \vec{v}_a 是空气速度，m/s； D_a 是质量扩散系数。对三名乘员呼吸区空气龄进行计算采样，如图 13，工况 1、2、3 的乘员的呼吸区域空气龄总和差异较小，与工况 2 和 3 相比，工况 1 在机长与副驾驶的呼吸区所展现的空气龄显著较低，深入分析其原因可以发现，工况 2 和 3 中，风挡进气口处于打开状态。这使得输入的气流沿着风挡向上流动，随后沿着舱壁逐渐形成一股流速持续减缓且向外部扩散的气流。最后在乘员的头顶部分形成了一个流速较慢的高压区。这片高压区对乘员呼吸区原有的向上流动的气流造成了阻碍，此时相对于不开启风挡进气口的工况 1，呼吸区的气流速度明显减缓，从而导致了更低的空气龄。由于打开了个人进

气, 工况 3 中直接对面部的吹风使得呼吸区的流速得到了提升, 因此个人通风口的打开使得三名乘员的呼吸区均有更低的空气龄。而在工况 4 中, 其空气龄相较工况 3 更低, 原因主要归结为其周期性的进气速度变化, 这种变化模式能够更为有效地破坏流场中的陈旧空气团和污染物沉积区, 进而实现了更低的空气龄和更高的空气更新效率。综上所述, 不同工况下的送风方式对乘员呼吸区的空气龄产生了显著影响, 其中周期性进气模式在提高空气更新效率方面表现出了独特的优势。

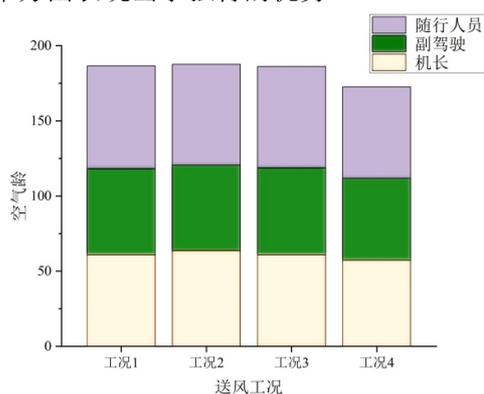


图 13 呼吸区域空气龄

Fig.13 Mean air age in the breathing zone

3 结论

本文基于 CFD 方法, 对民航客机驾驶舱内空调送风系统如何影响舱内流场进行了探讨。在模拟分析了四种不同送风工况下驾驶舱的流场特性、污染物的清除能力以及相应的空气品质后, 得出以下结论:

(1) 送风模式对驾驶舱内的流场特性产生显著影响, 当驾驶舱内的 11 个进风口全部开启时, 通风效果达到了最佳。开启风挡进气口可能增加乘员呼吸区的空气龄, 而个人通风口却能有效地提高乘员呼吸区的空气流速并保持舒适度要求, 从而显著提高空气品质。

(2) 在保持流量恒定的条件下, 采用余弦周期信号送风模式能够带来更高的空气品质和更强的污染物清除能力。与恒值信号送风模式相比, 该模式的污染物清除效率增长了 7.5%, 而平均空气龄则下降了 7.39%, 展现出本研究中最优秀的排污效果。

研究的限制在于未对其他周期性信号送风方式对流场的影响进行比较分析, 然而这些不同的周

期性送风方式可能引发截然不同的通风效果和污染排除效率。未来的研究可以进一步探讨如脉冲信号和方波信号等周期性送风模式对驾驶舱流场的影响, 有助于深入理解不同送风模式的性能差异, 为室内空气质量和通风效率提供更为全面的数据支持。

参考文献:

- [1] WANG F, CHEN F, ZHANG T F. An aisle displacement ventilation system for twin-aisle commercial airliner cabin[J]. *Building and Environment*, 2022,223:109439.
- [2] YAN Y Y, LI X R, TAO Y, et al. Numerical investigation of pilots' micro-environment in an airliner cockpit[J]. *Building and Environment*, 2022,217:109043.
- [3] 孙贺江, 安璐, 冯壮波, 等. 客机驾驶舱流场 CFD 模拟与热舒适性分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014,47(4):298-303.
- [4] 薛红军, 马占元, 张晓燕, 等. 驾驶舱人体热舒适性建模及环境评估[J]. *计算机工程与应用*, 2014,50(8):265-270.
- [5] FANG Z S, LIU H, LI B Z, et al. Thermal comfort and skin temperature responses to the supplied air from personal air nozzles in aircraft cabins[J]. *Indoor and Built Environment*, 2017,27(6):831-845.
- [6] WU C F, AHMED N A. Numerical study of transient aircraft cabin flowfield with unsteady air supply[J]. *Journal of Aircraft*, 2011,48(6):1994-2001.
- [7] FALLENIEUS BEG, SATTARI A F, FRANSSON J H M, et al. Experimental study on the effect of pulsating inflow to an enclosure for improved mixing[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 44:108-119.
- [8] VAN HOOFF T, BLOCKEN B. Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics[J]. *Indoor and Built Environment*, 2020,29(4):603-620.
- [9] 林家泉, 戴仕卿. 基于排污效率和吹风感指数的客舱空调最佳送风方式[J]. *航空学报*, 2022,43(7):100-109.
- [10] 周立祥, 林家泉. 一种清除引气污染物的空调梯形信号送风方法[J]. *航空学报*, 2023,(10):77-86.

低温回热器热平衡校核高压压力, 根据高温回热器热平衡和气液分离器处质量守恒迭代计算出总运行浓度和气液分离后各自的流量, 为该类小型低温制冷系统获得关键运行数据以便进行系统性能分析提供了参考。

参考文献:

- [1] 芮胜军,张华,黄理浩,等.两级自动复叠低温冰箱的理论及试验研究[J].机械工程学报,2014,50(2):159-164.
- [2] 晏刚,颜俊,王维,等.自复叠制冷循环双温冰箱设计的理论研究[J].西安交通大学学报,2008,(5):551-555.
- [3] 赵巍,张华,刘瑞希,等.一种四级自动复叠制冷系统混合工质组分选取及配比研究[J].制冷学报,2013,34(5):17-22.
- [4] Kim S G, Kim M S. Experiment and simulation on the performance of an autocascade refrigeration system using carbon dioxide as a refrigerant[J]. International journal of refrigeration, 2002,25(8):1093-1101.
- [5] Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Peris B, et al. Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems[J]. Energy Conversion and Management, 2015,105:756-762.
- [6] 芮胜军,张华,张书春.自复叠制冷系统混合工质配比研究[J].低温与超导,2012,40(3):64-68.
- [7] 刘煜森,张华,赵巍,等.基于 Aspen Hysys 的单级与自复叠耦合制冷系统性能模拟分析[Z].中国上海:20176.
- [8] 贺素艳,邵超,杨玉涛,等.混合工质配比对自复叠制冷循环影响的理论模拟和实验研究[J].化工学报,2018,69(S1):108-114.
- [9] 刘金平,朱宇龙.非共沸混合工质自复叠热泵相积存实验研究[J].制冷学报,2009,30(6):5-10.
- [10] 许雄文,刘金平,曹乐,等.非共沸混合工质在制冷循环中浓度偏移分析[J].化工学报,2011,62(11):3066-3072.
- [11] 刘金平,吴啸,郭灵兵.节流阀开度对自复叠制冷循环冷凝蒸发器换热性能影响的试验研究[J].机械工程学报,2011,47(8):152-157.
- [12] 任娜颖,晏刚,颜俊,等.自复叠双温冰箱的流程改进和性能分析[J].西安交通大学学报,2007,(5):549-552.
- [13] 秦闯,张超,崔四齐,等.低 GWP 制冷剂 R32 和 R290 的选择对比研究[J].当代化工,2023,1(52):129-132.
- [11] 林家泉,李波,邱岳恒.基于空调正弦送风的清除客舱引气污染物方法 [J]. 北京航空航天大学学报,2023,(5):1009-1016.
- [12] LI X D, YAN Y H, TU J Y. The simplification of computer simulated persons (CSPs) in CFD models of occupied indoor spaces[J]. Building and Environment, 2015,93:155-164.
- [13] ZHAI Z Q J, ZHANG Z, ZHANG W, et al., Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1--Summary of Prevalent Turbulence Models[C]. HVAC&R Research, 2007.
- [14] WANG F, YOU R Y, ZHANG T F, 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):11.

(上接第 209 页)