

涂仁泉, 何法江, 商逸澹. 民航客舱内部流体流动的数值模拟计算研究 [J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(10): 201-204.
DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 251031

民航客舱内部流体流动的数值模拟计算研究

涂仁泉, 何法江, 商逸澹

(上海工程技术大学 航空运输学院(飞行学院), 上海 201620)

摘要: 近年来面对人们日益增长的民航出行需求, 对机舱环境污染开展研究则显得尤为必要。本文对机舱进行三维建模, 使用计算流体力学的有限元分析对机舱内的流场进行模拟, 计算了3种不同进风量下的流场, 对流场特征进行了分析, 为后续机舱内部供气设施设计提供了有效的建议。

关键词: 环境污染; 机舱环境; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号: X821 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)10-0201-05

Numerical simulation research on the fluid flow inside air cabins

TU Renquan, HE Fajiang, SHANG Yidan

(School of Air Transportation and School of Flying, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In recent years, in the face of people's increasing demand for civil aviation travel, it is particularly necessary to study cabin environmental pollution. This paper conducts three-dimensional modeling of the cabin and employs finite element analysis using Computational Fluid Dynamics to simulate the airflow within the cabin. Flow fields under three different air intake rates are calculated and their characteristics are analyzed. This study offers valuable insights for the design of air supply facilities within the cabin.

Key words: environmental pollution; cabin environment; CFD; numerical simulation

0 引言

目前, 民航运输的高效和快捷赢得了众多消费者的青睐, 并在经济发展和文化交流中发挥了重要的支撑作用^[1-5]。随着生活水平的提升, 公众对民航出行的需求提出了更高的要求。然而, 由于飞行高度较高和封闭舱体内外压差大等因素, 民航飞机的机舱内部空气相对湿度偏低, 会在一定程度上造成乘客呼吸道及皮肤的不适^[6-7]。这些缺陷使得乘客在舒适度体验等方面相比其他交通出行方式稍显不足。因此, 对机舱内的流场特征展开研究有助于为调整设计并改善机舱内的通风系统和座位布置提供建议^[9-12]。

1 方法

1.1 模型重建

本研究对空客A320飞机客舱模型建模。由于

机舱内气流的数值模拟计算需要消耗大量的计算资源, 在前处理软件Spaceclaim中, 采用了一种周期性边界条件的方法, 将完整的机舱模型简化为包含3排座位的部分模型, 从而优化了计算资源的分配。在后期数据处理中, 通过周期性数据的还原, 可以得到完整机舱的气流情况。带有乘客的客舱的计算模型如图1所示。通风入口位于客舱墙壁和天花板的上部, 出口则位于客舱墙壁的下部。进出风口的角度均与所在位置的切线保持平行。为了尽可能还原真实情况, 本文采用了使用SolidWorks构建的计算模拟人(CSP)模型, 该模型与Yan等学者^[8](2017)的模型具有相似的特征, 参见图1。

1.2 网格划分

本文使用了一个包含651万个多面体网格的横截面模型。该模型包括2列座位, 分别位于客舱的两侧, 以及每排6个计算模拟人。网格的最大偏斜度为0.81, 因为计算资源有限, 故在网格绘制中需

基金项目: 国家自然科学基金(82370101)。

作者简介: 涂仁泉(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 室内环境污染, 上呼吸道颗粒物运输和沉积。

通信作者: 何法江(1965—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 热能动力, 机械设计与制造。Email: mikehfj@sues.edu.cn。

收稿日期: 2024-03-12

哈尔滨工业大学主办 ◆ 科技创见与应用

尽可能合理规划网格尺寸,根据不同区域所需的计算精度设计网格大小,才能保证数值模拟计算结果的质量。因此,文中将靠近 CSP 头部的网格尺寸设为 5 mm,嘴巴开口的网格尺寸设为 1 mm,以便有效地捕捉临界头部附近的气流模式的变化。本文将空气供应和排气区域周围的网格尺寸设为 18 mm,以确保这些关键区域模拟的准确性。为了模拟客舱内的气流,在网格外层上设置了边界层网格,其第一高度为 0.002 m,增长率为 1.2。由此确保了 y^+ 值保持在 5 以下。网格的绘制如图 2 所示。

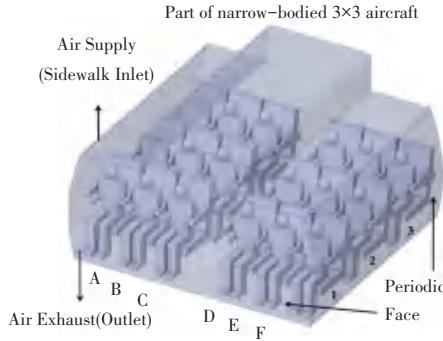


图 1 机舱模型的重建

Fig. 1 Model reconstruction of air cabin

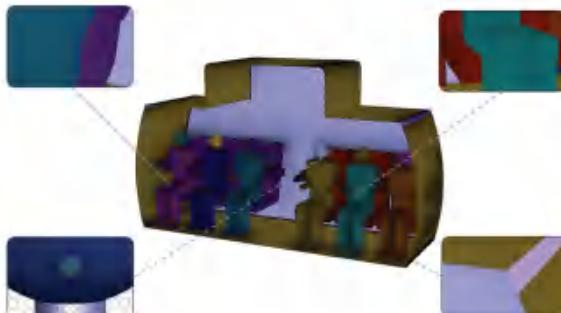


图 2 网格的绘制

Fig. 2 Division of the grid

1.3 模型及边界条件设置

本文机舱数值模拟计算部分采用了 Realizable k –

ϵ 模型来模拟机舱内部的气流。该模型是根据机舱几何模型特征,以及计算准确度和算力的平衡而选择的。图 3 展示了 Realizable k – ϵ 模型的具体参数设置。



图 3 湍流模型的设置

Fig. 3 Setting of the turbulence model panel

本文在机舱模型中设立了 4 个风口,分别位于左右 2 个墙壁的上下角,构成了双边通风方式。这样的风口布局使得气流能够沿着机舱的长度方向自然流动。本文根据不同的风口功能,设置了不同的边界类型:进风口的边界类型为 Velocity-inlet,即指定进风速度和温度;出风口的边界类型为 Pressure-outlet,即指定出风压力和温度。所有壁面温度设置均参照了之前文献研究的数据^[9-16]。

表 1 列出了本部分数值模拟的具体边界条件。本文设置了 3 种不同的进风速度,分别为 1、2、3。其中,1 为基础进风速度,即最小供气量下的进风速度,2、3 为在基础速度上设立的速度(最小供气量是指保证机舱内空气量满足乘客呼吸所需的最低要求)。基础速度计算公式如下:

表 1 边界条件的设置

Table 1 Boundary conditions setting

位置	名称	参数	边界类型	壁面类型	温度/℃
机舱内壁左右上角	INLET	进风速度 1: 0.51 m/s 进风速度 2: 0.77 m/s 进风速度 3: 1.02 m/s	Velocity-Inlet	Escape	19
机舱左右下角	OUTLET	—	Velocity-Inlet	Escape	19
所有座椅	SEAT	—	Wall	Trap	25
计算模拟人	CSP	—	Wall	Trap	32
机舱墙壁(含天花板和地面)	Cabin	—	Wall	Trap	25

$$V_{\text{Basic}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{\min}}{S_{\text{inlet}}} \quad (1)$$

其中, V_{Basic} 表示进风速度 1; V_{\min} 表示最小供气量; S_{inlet} 表示进风口面积(包含双侧进风口面积)。

2 结果与讨论

2.1 模型对比

速度矢量在仿真和实验测量方面的数据对比如图 4 所示。由图 4 可知, 在实验测量数据^[17-20]和数值模拟数据的对比中, 两者的气流模式都有相似之处。气流从进风口水平注入后, 不断向过道前进, 并在过道中间汇聚。发生交叉碰撞后, 绝大部分气流方向向下运动, 并在左右两侧形成 2 个对称的涡流, 部分气流在人体热羽流的影响下缓慢向上攀升。除此之外, 两者的速度矢量表现出高度的一致。以上所述都表明, 该机舱模型能够有效地模拟机舱内气流模式。

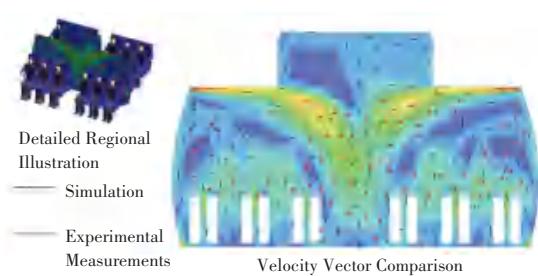


图 4 速度矢量在仿真和实验测量方面的数据对比

Fig. 4 Comparative analysis of velocity vectors between simulation and experimental measurements

2.2 速度云图分析

图 5 展示了 3 个不同方向的速度等值线剖面: 横截面、纵向剖面和水平剖面。从图 5 中可以看出, 机舱内气流的主要驱动力源自机舱入口排出的空气。速度最快的气流主要集中在机舱内壁, 而其他区域的气流速度则相对一致。特别值得关注的是, 过道附近的气流速度最慢。纵向和水平剖面显示出相对稳定的气流速度, 而横截面则揭示了速度的显著变化。

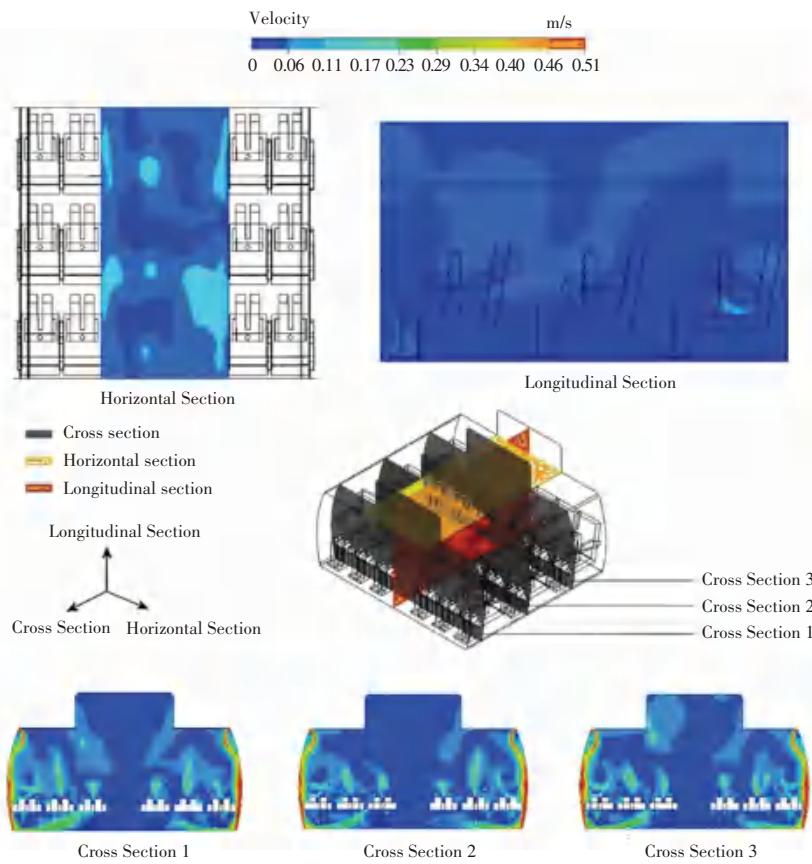


图 5 机舱各断面速度等值线 (0.51 m/s)

Fig. 5 The velocity contour in all sections of air cabin (0.51 m/s)

3 个横截面视图的速度趋势基本一致。从进气口出来的气流沿着舱内壁下降, 到达地板后, 部分气流反弹上升, 其余的则从出风口逸出。在不同的横截

面中, 可以清楚地看到, 与过道区域相比, 包括 CSP 和座位附近区域的速度值更高。此外, 机舱天花板区域的气流速度相对稳定, 波动最小。这些观察结果为深

人理解机舱内气流特性提供了重要依据。

客舱内气流分布既受进风速度影响,也受气流方向影响。图 6 展示了机舱内 3 个不同视角:横截面、纵向剖面和水平剖面。图 6 中清晰地展示了,初始气流从机舱入口进入后,会先向前推进一段距离,然后沿着机舱侧壁下降。这个现象既与进气速度有关,也与进气口角度密切相关。接着,左右两侧的气流在过道附近相遇,然后两者沿相反方向上升。

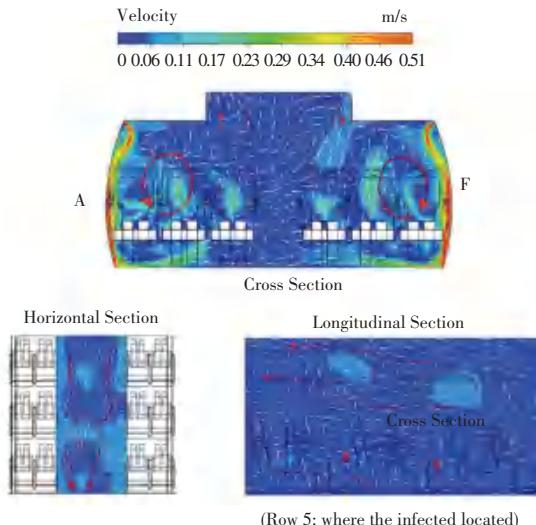


图 6 3 个方向上的截面速度云图及矢量图

Fig. 6 The velocity contour and vector in all sections

此外,人体热羽流对气流运动产生了显著影响。这是由于人体释放的热流会改变周围空气的压力,进而影响机舱内的气流的流动。3 个方向上的截面速度云图及矢量如图 7 所示。图 7 中,展示了 3 种进气速度下的横截面。可以清楚地看到,当气流在两侧碰撞并上升时,会在 CSP-A 和 CSP-F 区域附近形成 2 个涡流。同时,2 个漩涡会出现在机舱的左右两侧,靠近天花板的位置。

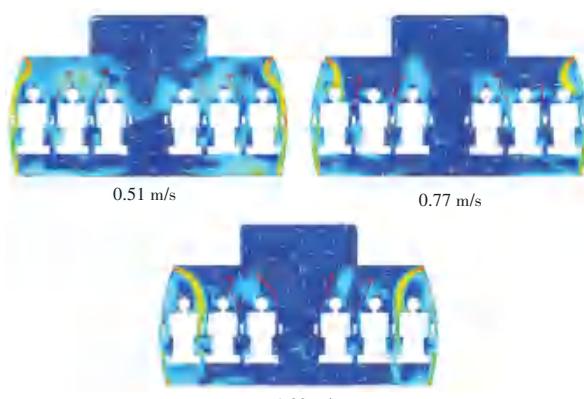


图 7 3 个方向上的截面速度云图及矢量图

Fig. 7 The velocity contour and vector in all sections

图 8 展示了 3 种进风速度下的速度云图和横截面上的矢量箭头。图 8 中揭示了,随着进风速度的逐渐增大,射流与侧壁的夹角也在逐渐增大。这一现象进一步证实了机舱内侧壁与天花板之间的角度对射流路径有显著影响。然而,尽管进风速度持续增加,机舱内的整体气流趋势并未发生明显变化,仍然表现为两侧速度值较大,两股气流在相遇后各自向相反方向运动,形成 2 个涡流。

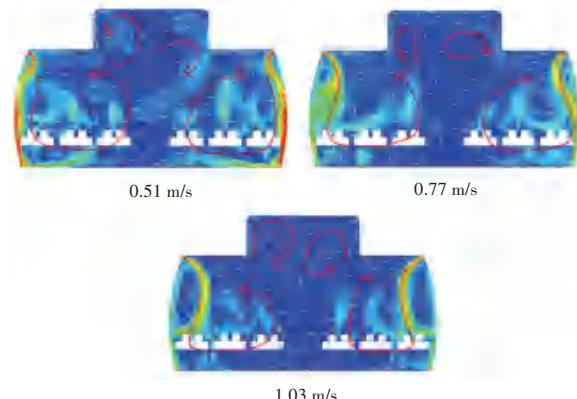


图 8 不同供气量下的速度云图及矢量图

Fig. 8 The velocity contour and vector of three cases with different gas supply rates

3 结束语

本文利用计算流体力学技术对机舱环境中不同进气速度下的气流模式进行了研究,从不同平面对机舱内的流场进行了综合分析,总结出了不同流速下的流场特征,为后续对机舱内空气质量研究、机舱通风系统设计提供了有效的建议。

参考文献

- [1] LINDGREN T, NORBÄCK D, WIESLANDER G. Perception of cabin air quality in airline crew related to air humidification, on Intercontinental flights [J]. Indoor Air, 2007, 17 (3): 204–210.
- [2] 黄伟. 中国民航法律法规的发展与完善[J]. 重庆工商大学学报(社会科学版), 2019, 36 (6): 109–114.
- [3] 佚名. 民航局发布《2018 年民航行业发展统计公报》[J]. 民航管理, 2019 (5): 77.
- [4] 芮海田, 吴群琪. 高铁运输与民航运输选择下的中长距离出行决策行为[J]. 中国公路学报, 2016, 29 (3): 134–141.
- [5] 王浩. 论民航运输服务与国民经济增长[J]. 中国储运, 2023 (5): 102–103.
- [6] 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.
- [7] GIACONIA C, ORIOLI A, DI G A. Air quality and relative humidity in commercial aircrafts: An experimental investigation on short-haul domestic flights [J]. Building and Environment, 2013, 67: 69–81.

[8] YAN Yihuan, LI Xiangdong, SHANG Yidan, et al. Evaluation of airborne disease infection risks in an airliner cabin using the Lagrangian-based Wells-Riley approach [J]. Building and Environment, 2017, 121: 79–92.

[9] PANTELIC J , THAM K W. Adequacy of air change rate as the sole indicator of an air distribution system's effectiveness to mitigate airborne infectious disease transmission caused by a cough release in the room with overhead mixing ventilation: A case study [J]. HVAC & R Research, 2013, 19(8):947–961.

[10] TALAAT K, ABUHEGAZY M, MAHFOZE O A, et al. Simulation of aerosol transmission on a Boeing 737 airplane with intervention measures for COVID-19 mitigation [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(3): 033312.

[11] CHEN Wenhua, LIU Junjie, LI Fei, et al. Ventilation similarity of an aircraft cabin mockup with a real MD-82 commercial airliner [J]. Building and Environment, 2017, 111: 80–90.

[12] 汪新智,任安星,武永吉,等. 基于欧拉-拉格朗日方法的携病毒飞沫扩散过程的数值模拟 [J]. 自然杂志, 2020, 42 (3): 239–248.

[13] YOU Ruoyu, LIN C H, WEI D, et al. Evaluating the commercial airliner cabin environment with different air distribution systems [J]. Indoor Air, 2019, 29(5): 840–853.

[14] CHOI E S, YOOK S J, KIM M, et al. Study on the ventilation method to maintain the PM10 concentration in a subway cabin below $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [J]. Toxics, 2022, 10(10): 560.

[15] LI Jiayu, CAO Xiaodong, LIU Junjie, et al. Global airflow field distribution in a cabin mock-up measured via large-scale 2D-PIV [J]. Building and Environment, 2015, 93: 234–244.

[16] CAO Qing, LIU Mingxin, LI Xingyang, et al. Influencing factors in the simulation of airflow and particle transportation in aircraft cabins by CFD [J]. Building and Environment, 2022, 207: 108413.

[17] YAO C C, HUANG Qi, HUANG A. Lesson learned from COVID-19 retrospective study: An entropy-based clinical-interpretable scorecard for mortality risk control at ICU admission [J]. Tsinghua Science and Technology, 2024, 29(1):34–45.

[18] HÂNCEAN M G, SLAVINEC M, PERC M. The impact of human mobility networks on the global spread of COVID-19 [J]. Journal of Complex Networks, 2020, 8(6): cnaa041.

[19] TAKYI P O, DRAMANI J B, AKOSAH N K, et al. Economic activities' response to the COVID-19 pandemic in developing countries [J]. Scientific African, 2023, 20: e01642.

[20] GUPTA J K, LIN C H, CHEN Qingyan. Risk assessment of airborne infectious diseases in aircraft cabins [J]. Indoor Air, 2012, 22(5): 388–395.