

民用飞机座舱气流组织技术研究现状分析

Research on the Cabin Airflow Organization for Civil Aircraft

简夕忠 袁建新 / Jian Xizhong Yuan Jianxin

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

舒适性是民用飞机的重要要求,座舱气流组织设计是否合理对乘员舒适性和健康性有直接影响。现在最常见和可靠的预测、设计和分析民用飞机座舱舱内气流组织的方法分别是实验测量和数值模拟。分别对这两种方法进行了描述,两种方法各有优劣,用大量 CFD 模拟配合有限的模拟舱实验被证明是国际上最有效、最可靠、最经济、最快速的研发手段。

关键词: 气流组织;数值模拟;实验测量;CFD 模拟

[Abstract] Comfort is an important requirement of civil aircraft, and whether the cabin airflow organization is reasonable or not will directly affect the comfort and health of passengers. The most popular and reliable prediction, design and analysis methods of cabin airflow organization for civil aircraft are the experimental measurement and numerical simulation. This paper describes the two methods, both have advantages and disadvantages. The limited simulated cabin experiments cooperate with many CFD simulations are proved to be the most effective, reliable, economical, and rapid research means.

[Key words] Airflow Organization; Numerical Simulation; Experimental Measurement; CFD Simulation

0 引言

目前,越来越多的人选择乘坐飞机旅行,包括那些身体不健康或存在潜在病患、对客舱环境敏感的人群。乘飞机旅行的乘客会要求更为舒适和清洁的环境,因为他们遇到的是一个包括低湿度、低气压、空气中含有污染物(如臭氧、一氧化碳、各种有机化合污染物和生物制剂)的客舱环境^[1]。此外,对于国际航空旅行,在飞行过程中通过空气传播疾病和释放有毒物质的相关潜在风险^[2-3]进一步增强。2003 年急性呼吸系统综合症(SARS)爆发时,从香港飞到北京的 120 名乘客中有 22 名乘客被感染^[4],这一事件也证明了在客机机舱传播呼吸道疾病存在可能性^[5]。研究表明,在航空旅行中感染传染病的风险与乘客所处的客舱环境相关^[6]。世界卫生组织(WHO)指出,航空旅行可能会加速新出

现的疾病蔓延,同时由于防治措施的准备时间较少,使得阻止疾病的传播蔓延变得更加困难^[7]。因此创建良好的客舱环境,为乘客提供安全、健康、舒适的飞行环境非常重要,而合理的气流组织形式是创造舒适客舱环境的关键。

客舱的环境是否舒适,其气流组织形式是否合理,需要一个评价标准。目前适航标准 FAR/EASA/CCAR25 对飞机客舱环境的控制进行了规定^[8-10],美国 ACER(Aircraft Cabin Environment Research)也给出了商用客机座舱中通风、压力和臭氧的标准和要求,ASHRAE 标准 161-2007^[11]给出了商业客机中气流组织和通风的评价标准。

目前飞机机舱的气流组织研究主要有两个方法:实验测量和数值模拟。后者通常用来分析许多不同场景,在较低成本下提供更详细的信息;而前者通常用于验证 CFD 模型^[12-13],其周期较长,成本较高。

1 实验测量

实验测量通常是在全尺寸的客舱实体模型中进行,但由于机舱空间较大以及气体流动速度相对较低,使得确定合适的数据处理方法、相机分辨率、粒子大小、数量和粒子的选择以及速度边界条件的测量面临较大的挑战。因此,推荐选用数值模拟,因为在低成本的情况下它能够模拟和控制不同的物理现象,例如内部障碍物(座位、乘客),热效应或污染物(机舱内产生的或乘客散发的)的扩散等。

尽管相比数值模拟,实验研究更昂贵和耗时,但实验研究通常被认为更可靠。对客舱内气流组织的许多实验研究都使用客舱实体模型。目前,用于测量气流组织的仪器主要包括三类:一是热线风速计和热球风速计;二是光学测速仪,包括粒子跟踪测速系统(PTV)、粒子轨迹测速仪(PSV)和粒子成像测速仪(PIV);三是三维超声波测速仪。

1.1 热线风速计和热球风速计

热线风速计和热球风速计的基本原理是传热学中的牛顿定律,用速度较高的空气冷却探头,并根据探头的温度来确定空气的速度。这两种风速仪只能测量某个点的速度,有些热线风速计可以同时测量气流的方向,但热球风速仪只能测量速度的大小。Mizuno 和 Warfield^[14]用热线风速仪测量速度分布来研究气流组织对污染物传播的影响,但是其所用的风速仪无法测量方向。

1.2 光学测速

光学测速仪(包括粒子追踪测速、粒子轨迹测速、粒子成像测速)是测量飞机舱内空气分布最常用的测量方法^[15],通常应用薄光片测量空气的速度,一般假定粒子随流体流动,然后根据这些粒子的流动信息来确定流体速度并生成二维流场^[16]。

通常都在空舱实体模型中进行气流的实验测量,没有考虑乘客的影响。由于有乘客的机舱与空机舱的气流模式有着显著的区别,因此这些研究不能准确反映飞行条件下机舱的气流分布。尽管也有一些研究学者对有乘客的机舱的气流模式进行了测量,但由于受技术的限制,仅能对机舱上部气流进行测量。图1是利用PIV测量座舱流场时测量仪器的布置,从中可以明显看出座椅和人体挡住了光线而导致其周边的流场无法被测量;图2表示Wang等人利用PTV测量座舱流场的速度矢量结果^[17];图3表示Rosenstiel等人利用PSV测量座舱

流场的速度矢量结果^[18];图4表示Bosbach等人利用PIV测量座舱流场的速度矢量结果^[19]。这些研究可以表明机舱内人员产生的热量对流场有显著影响,但很难准确地通过实验测量评估其影响。

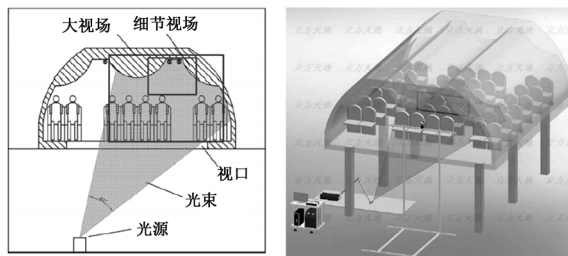


图1 利用PIV测量飞机客舱气流组织的设备布置

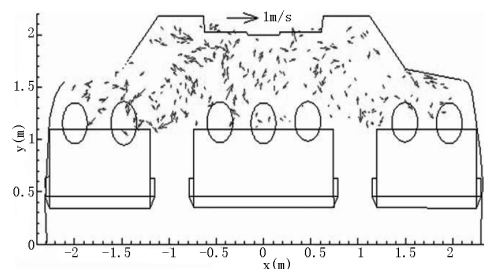


图2 VPTV测量的速度分布



图3 PSV测量的速度分布

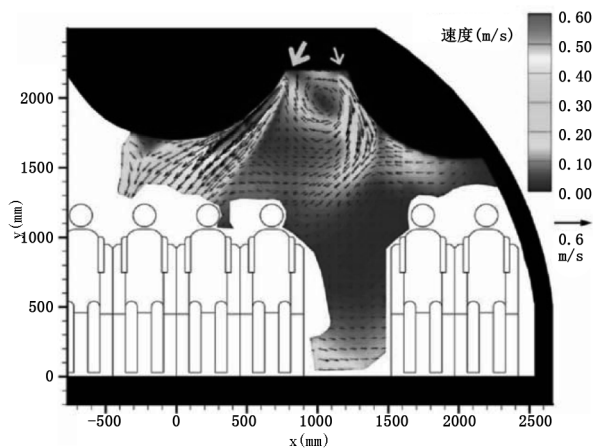


图4 PIV测量的速度分布

1.3 超声波测速仪

虽然超声波风速仪由于探针的尺寸过大不能测量详细的座舱气流组织边界条件,但是有一些实验也开始使用其测量座舱气流速度。Garner 等人在一架空的波音 747 客机机舱中首次使用三维超声波测速仪测量座舱气流^[20],其测量结果表明速度场随时间变化且不稳定,同时测量区域的平均气流速度极值是 1m/s,而实际机舱的平均速度低于 0.2m/s。图 5 所示为用三维超声波测速仪测量座舱气流速度。

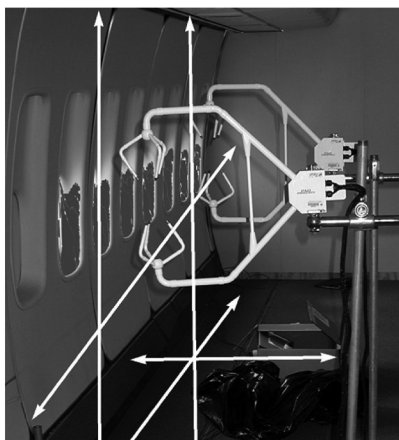


图 5 超声波风速仪测量风速

显而易见,即使在一个全尺寸机舱进行实验室测量也是很困难的,同时由于这种实验研究缺少足够的空间和时间分辨率很难来研究复杂流动和污染物传播。大部分座舱气流组织的实验研究要么考虑机舱是空的要么没有考虑乘客的影响,与此同时,这些测试方法都很难测量和研究座舱空气进气口附近的气流情况。

总之,使用全尺寸实验室模型分析飞行情况下的座舱气流组织是比较昂贵和困难的。机舱环境的变化如不同的客座率、乘客容量以及乘务人员和乘客的移动都会使得实验测量更加复杂^[21-22]。因此,使用花费较少并且有效的数值模拟工具对于研究座舱气流组织更有必要。

2 数值模拟

自 20 世纪 70 年代以来,计算流体动力学(CFD)技术已成为室内环境分析的工具。随着计算机性能及人们对高速计算机购买能力的提高,数值模拟已经成为研究封闭空间内气流与污染物分布的实用性方法。与实验研究相比,对飞机客舱内气流分布进行数值研究既经济又有效。数值模拟

通过求解一系列守恒方程,如质量、能量、污染物组分守恒方程来计算空间内气流及污染物分布情况。数值模拟求解的参数,如风速、空气温度、污染物浓度、相对湿度以及湍流量,对于设计一个舒适和健康的舱内环境都至关重要。这是因为设计合适的通风系统需要对气流组织和污染物扩散进行详细地研究。下面对在过去近四十年的研究中,关于座舱气流组织的数值模拟的方法和相关的各种计算模型进行总结说明。

2.1 数值模拟方法

数值模拟的第一步是要确定所研究的对象包含的物理现象,如紊流、传热、传质等,然后根据所使用的商业软件,验证所选择的数值模拟软件是否可以模拟所包含的物理特征,包括基本流动特征、紊流模型、传热模型和数值方法;第二步根据实验的结果,选择出适合数值模拟的边界条件,如送风速度和温度、边界的温度或热流密度、污染物的发生量等,选择合适的紊流模型和数值方法,将计算的结果和实验所测量的结果进行对比验证;最后根据计算的结果总结仿真模型的特性、使用范围以及流场的各种性质。大多数的数值模拟都是这样一个过程,关于座舱气流组织的数值模拟也是这样。在数值模拟中,选择合适的数值模型是至关重要的。

2.2 数值模型

数值模型是把实际流体理想化,把物理过程进行简化。在过去的几十年里,出现了许多数值模型,依据其简化程度及应用的情况可分为 Zonal 模型、Box 模型、及 CFD(计算流体动力学)模型。

Zonal 模型能够在流动区域内建立多维流体网络,将一个封闭的空间分成有限的小单元,对于每个单元建立质量、能量和污染物组分守恒方程,通过流量与压力的关系式或流量与温度的关系式求解单元与单元之间的流量变化,而且其需要预先了解计算区域内的气流形式。1991 年, Olander 和 Westlin^[23]应用 Zonal 模型对飞机客舱内的气流与污染物浓度变化进行了研究。Box 模型与 Zonal 模型非常相似,原理是将气流流动形式简化为流动网络,并且假设在每个单元中气流完全混合,应用线性控制方程进行求解。Box 模型与 Zonal 模型因只计算区域内的宏观流量变化,所以对空间内气流组织的分布只能给出粗略的估计。Box 模型与 Zonal 模型原则上都是应用集总参数法。与应用很粗糙网格的 CFD 模拟计算相比,Zonal 模型输入数据所

花时间比 CFD 模拟计算的时间更长些,所以 Zonal 模型并没有显示出缩短计算时间的优越性。

计算流体动力学(CFD)基本上是通过求解非线性偏微分方程组数值模拟流体流动的动量、能量传递过程,得到计算区域内的气流压力分布、温度和速度分布,水蒸气浓度变化(相对湿度)以及室内和室外空间的湍流参数。尽管在模型中还有很多不确定的因素,需要使用者掌握扎实的流体力学知识和使用高性能计算机,但是随着计算机性能和 CFD 用户界面的不断发展,CFD 模拟在气体流动研究中应用越来越广泛。

CFD 模拟技术已被广泛的应用在封闭空间,例如大型客机机舱内的流场和污染物传播的研究中^[24],它可以有效地获得商用飞机座舱内流场和污染物传播的详细信息^[25-33],其中许多研究多是通过实验对 CFD 模拟结果进行验证,使得 CFD 模拟更具有信服力。CFD 模型在预测座舱通风性能方面多为逼近法,因此,在预测气流组织分布、气流速度、温度、及气体组分浓度方面会带来一些不确定性。尽管 CFD 模拟已经在建筑通风领域中应用三十余年,工程师们依旧在探寻一种更精确、更合理、更快的并能够应用在机舱内气流模拟的 CFD 模型,同时对其进行实验验证也是很有必要的。

Aboosaidi 等人^[25]尽管没有考虑到乘客和热效应的影响,但却是最先应用 CFD 技术研究带内饰商用飞机舱内气流组织的学者之一。考虑到乘客对气流组织的影响,Lin 等^[27-28]从容纳 300 名乘客的波音 767 飞机客舱中取出一小部分建立了详细的 CFD 模型,研究双通道机舱中一个断面上气流的分布,该模型中机舱几何机构和内部装置更接近实际情况。

2.3 模拟软件

由于数值模型能模拟出实际运动过程中各种所测数据状态,并且成本低、周期短,对于指导设计具有很重要的作用,所以计算流体力学技术得到了越来越多的作用,这也促进商业计算流体力学软件的发展。1981 年英国的 CHAM 公司推出求解流动与传热问题的商业软件 PHOENICS 以后,迅速在国际软件产业中形成了通称为 CFD 的软件产业市场,其它的求解流动、传热等问题的商业软件,如 FLUENT、STAR-CD、CFX、CONTAM 等也先后问世。目前在飞机客舱中模拟气流组织和污染物传播常用的软件主要是 CONTAM、FLUENT 和 STAR-CD。

3 结论

通过对过去几十年内机舱内气流组织研究的回顾和总结发现:实验研究和模拟计算的结合是一种可靠的研究方法;实验方法中对于狭小的空间可以用超声波风速仪测量,大空间可以用超声波风速仪或 PIV 或 PSV 的方法测量,流场边界条件可以用热球风速仪测量;数值模拟计算中,CFD 模拟得到广泛的应用,并且能取得良好的模拟结果,在应用方面是相当可靠的。

虽然实验是一种可靠的研究方法,但是真实而且复杂的机舱环境对于实验的精确性和合理性是一个巨大的挑战。在耗资和耗时的前提下获得理想可靠的实验数据是困难的。如果利用一个经过试验验证并且适合机舱气流组织模拟的计算模型,通过数值模拟的方法来研究和验证客舱的气流组织、开发客舱内新型的环境控制系统是经济高效的,并且具有相当的可靠性。因此,用大量 CFD 模拟配合有限的模拟舱实验被证明是国际上最有效、最可靠、最经济、最快速的研发手段。

参考文献:

- [1] National Research Council. The airliner cabin environment and the health of passengers and crew[M]. National Academy Press, Washington, DC, 2002.
- [2] A. J. Tatem, S. I. Hay, and D. J. Rogers. Global traffic and disease vector dispersal[J]. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(16): 6242 - 6247.
- [3] A. T. Pavia. Germs on a plane: aircraft, international travel, and the global spread of disease[J]. The Journal of Infectious Diseases, 2007, 195(1): 621 - 622.
- [4] Olsen S., Chang H., Cheung T., Tang A., Fisk T., Ooi S., Kuo H., Jiang D., Chen K., Lando J., Hsu K., Chen T., Dowell S.. Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft[J]. New England Journal of Medicine, 349(25): 2416 - 2422.
- [5] Mangili A., Gendreau M.. Transmission of infectious diseases during commercial air travel[J]. The Lancet, 2005, 365: 989 - 995.
- [6] Spengler, J. D., and Wilson, D. G. Air Quality in Aircraft[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E-Journal of Process Mechanical Engineering, 2003, 217: 323 - 335.
- [7] World Health Organization. WHO Global Influenza Prepared-

ness Plan—The Role of WHO and Recommendations for National Measures before and during Pandemics [Z]. United Nations, 2005.

[8] FAR 25 Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes.

[9] CS 25 Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes.

[10] 中国民用航空局. CCAR 25 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准[S]. 中国:中国民用航空局, 2001.

[11] ASHRAE 标准 161-2007 Air Quality Within Commercial Aircraft.

[12] R. P. Garner, K. L. Wong, S. C. Ericson, A. J. Baker, and J. A. Orzechowski. CFD validation for contaminant transport in aircraft cabin ventilation. Report DOT/FAA/AM-04/7, Office of Aerospace Medicine, U. S. Department of Transportation, Washington, DC, 2004.

[13] H. Mo, M. H. Hosni, and B. W. Jones. Application of particle image velocimetry for the measurement of the airflow characteristics in an aircraft cabin[J]. ASHRAE Journal, 2003, 109(1): 101 - 110.

[14] T. Mizuno and M. J. Warfield. Development of three-dimensional thermal airflow analysis computer program and verification test[J]. ASHRAE Journal, 1992, 98(2): 329 - 338.

[15] Grant, I., 1997, Particle Image Velocimetry: A Review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C; Journal of Mechanical Engineering Science. 1997, 211: 55 - 76.

[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_image_velocimetry.

[17] A. Wang, Y. Zhang, and Y. Sun. Streak recognition for a three-dimensional volumetric particle tracking velocimetry system[J]. ASHRAE J, 2005, 111(2): 476 - 484.

[18] Marcus Rosenstiel, Rolf-Rainer Grigat. Segmentation and classification of streaks in a large-scale particle streak tracking system[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21: 1 - 7.

[19] M. Kühn, J. Bosbach, and C. Wagner. Experimental parametric study of forced and mixed convection in a passenger aircraft cabin mock-up[J]. Building and Environment, 2009, 44: 34 - 43.

[20] R. P. Garner, K. L. Wong, S. C. Ericson, A. J. Baker, and J. A. Orzechowski. CFD validation for contaminant transport in aircraft cabin ventilation. Report DOT/FAA/AM-04/7, Office of Aerospace Medicine, U. S. Department of Transportation, Washington, DC, 2004.

[21] Z. Zhang, X. Chen, S. Mazumdar, T. Zhang, and Q. Chen. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup[J]. Build Environment, doi:10.1016/j.buildenv.2008.01.012, 2008.

[22] Mazumdar, S. and Chen, Q. 2007. Impact of moving bodies on airflow and contaminant transport inside aircraft cabins. Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms, Roomvent 2007, Helsinki, Finland: 165.

[23] Olander L. Westlin A. Air flow in aircraft cabins (J). Staub- Reinhaltung der Luft, 1991, 51(7-8): 283-288.

[24] Chen, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications[J]. Building and Environment, 2009, 44(4): 848-858.

[25] F. Aboosaidi, M. J. Warfield, and D. Choudhury. Computational fluid dynamics applications in airplane cabin ventilation system design. In Proceedings of the International Conference on Environmental Systems, Society of Automotive Engineers, pages 249 - 258, San Francisco, CA, July 1991.

[26] Müller RHG, Scherer T, Rötger T, Schaumann O, Markwart M. Large Body Aircraft Cabin A/C Flow Measurement by Helium Bubble Tracking[J]. Journal of Flow Visualization and Image Processing, 1997, 4: 295-306.

[27] C-H. Lin, R. H. Horstman, M. F. Ahlers, L. M. Sedgwick, K. H. Dunn, J. L. Topmiller, J. S. Bennett, and S. Wirogo. Numerical simulation of airflow and airborne pathogen transport in aircraft cabins - part I: numerical simulation of the flow field[J]. ASHRAE Journal, 2005, 111(1): 755 - 763.

[28] C-H. Lin, R. H. Horstman, M. F. Ahlers, L. M. Sedgwick, K. H. Dunn, J. L. Topmiller, J. S. Bennett, and S. Wirogo. Numerical simulation of airflow and airborne pathogen transport in aircraft cabins - part II: numerical simulation of airborne pathogen transport[J]. ASHRAE Journal, 2005, 111(1): 764 - 768.

[29] M. P. Wan; G. N. Sze To; C. Y. H. Chao; L. Fang; A. Melikov. Modeling the Fate of Expiratory Aerosols and the Associated Infection Risk in an Aircraft Cabin Environment[J]. Aerosol Science and Technology, 2009, 4(23): 322 - 343.

[30] S Yin, T Zhang. A new under-aisle displacement air distribution system for wide-body aircraft cabins. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009.

[31] Vincenzo Bianco, Oronzio Manca, Sergio Nardini, Mario Roma. Numerical investigation of transient thermal and fluiddynamic fields in an executive aircraft cabin[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 3418 - 3425.

[32] Ryan K. Dygert, Thong Q. Dang. Mitigation of cross-contamination in an aircraft cabin via localized exhaust[J]. Building and Environment, 2010, 45: 2015 - 2026.

[33] P. Zítek, T. Vyhřídál, G. Simeunović, L. Nováková, J. Čížek. Novel personalized and humidified air supply for airliner passengers[J]. Building and Environment, 2010, 45(11): 2345 - 2353.