DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.06.015

大型飞机客舱气流组织分析及优化设计

杨文强*,张翠峰,张冕

航空工业第一飞机设计研究院,陕西 西安 710089

摘 要:针对大型飞机客舱,采用计算流体力学(CFD)方法建立了气流组织分析模型,给出了典型截面的流速分布及温度分布, 分析了气流组织结果的不合理性,提出了客舱气流组织优化设计方案并进行数值模拟,模拟结果显示优化后的流速及温度 分布合理,满足设计要求。可以依此方法确定客舱气流组织相关参数,缩短研制周期。

关键词:大型飞机;客舱;气流组织;优化设计

中图分类号: V211.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 06-0015-06

随着社会的发展,大型客机已经成为越来越重要的交 通出行工具。据统计,目前全球大约1/4以上的人选择了航 空客运的出行方式^[1],而将近5%的出行人员中患有心肺功 能障碍疾病^[2],这对客舱空气环境提出了更加严格的要求。 然而,现代客机的客舱空气环境不是很理想,因为大部分乘 客经常感觉到过冷或过热从而对客舱环境不是很满意^[3]。

目前,国外主要针对旅客机开展研究,以试验测试和数 值模拟为手段,集中于测试方法以及数学模型的求解方面的 研究。在试验测试方面,均在地面静态试验中进行,无法准 确获取气流组织受干扰以后的特性;在数值模拟方面,均简 化了客舱模型,忽略了客舱中供气口、排气口及再循环系统 对气流组织的影响^[4-11]。国内的多数研究是针对军用飞机 驾驶舱开展的,主要以数值模拟为手段,集中于计算结果的 分析研究,主要以人体舒适度为评价标准^[12,13]。

本文针对大型飞机客舱气流组织进行分析和优化设 计,使得优化后的客舱气流组织能够更好地满足民用飞机的 舒适性要求和经济性要求。

1 客舱几何模型

大型飞机客舱的全尺寸三维造型较为复杂,设备多,不适用于数值模拟计算,对大型飞机客舱模型进行了简化,客舱在长方体空间内填充布置舱内结构,长方体空间的几何尺寸坐标为;xS:-2.96m,xE:2.96m,yS:-1.7m,yE:2.4m;zS:0m,zE:

-54.5m。其中,S代表起点,E代表终点。客舱全尺寸建模 时,进行了以下处理:(1) 舱段划分:客舱主要包括 12 人座的 头等舱、54人座的商务舱和312人座的经济舱。为后续研 究方便,将头等舱和商务舱作为前客舱,将经济舱分为中客 舱和后客舱。(2) 模型简化: 取消舱内与空气流动无关的部 分,如密闭厨房、电子设备柜以及盥洗室等存在的不规则的 部分。简化或者移除舱内不重要的设备和较小附件,这样可 以在划分网格时变得容易,同时也能够加快数值计算速度, 节省计算资源。(3)设置乘员模型:考虑舱内乘员的影响,布 置了舱内乘员模型,在不影响计算结果的情况下,乘员模型 以矩形块代替,乘员几何尺寸为0.4m×1.1m×0.55m。根据 飞机总体设计要求,头等舱乘员前后排间距为1.575m,商务 舱乘员前后排间距为1.030m,经济舱乘员前后排间距0.81m。 (4) 设计空气分配系统:在客舱中设计了空气分配系统,包 括各供气口、地板排气通道、排气口、再循环系统等。供气口 沿z方向两侧均匀布置共计20个,均采用矩形供气口,第1 个供气几何尺寸坐标为:在x=-1.6m 平面上, vS: 1.95m, vE: 2.15m; zS: -1m, zE: -1.3m, 其他供气口以此为基准布置设计。 地板排气通道与客舱内壁之间的宽度为0.26m,沿z方向左 右对称。排气阀沿z方向前后各共布置2个,几何尺寸坐标 分别为:圆心为(0m,-1.7m,-10m)和(0m,-1.7m,-54m), 半径均为0.05m。再循环系统在客舱内布置2个,几何尺寸 坐标分别为:圆心为(-2.96m,-0.35m,-18m)和(2.96m,

收稿日期:2017-02-20; 退修日期:2017-03-14; 录用日期:2017-04-25

^{*}通讯作者.Tel.:029-86832721 E-mail:ywq801@163.com

引用格式: YANG Wenqiang, ZHANG Cuifeng, ZHANG Mian. Analysis and design optimization of airflow distribution for large aircraft cabin[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(06):15-20. 杨文强,张翠峰,张冕. 大型飞机 客舱气流组织分析及优化设计[J]. 航空科学技术, 2017, 28(06): 15-20.

-0.35m, -36m), 半径均为 0.3m。

最终建立计算区域的最大尺寸为:5920mm× 4100mm×54500mm。客舱三维等轴视图如图1所示。





2 客舱空气流动的物理和数学模型

2.1 物理模型

飞机客舱空气满足理想气体状态方程,压力为常数, 低速流动且不可压缩,温度和密度都变化很小,符合黏 性流体动力学理论。将飞机客舱空气流动的物理模型概 括为:(1)与气体状态方程的等压流动规律相一致;(2)空气 为常温、低速、不可压缩的理想气体;(3)湍流流动中同时有 自然对流、辐射换热和强迫对流的情况。

2.2 数值计算模型

飞机客舱空气流动遵循不可压黏性流体的控制方程。 连续方程:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho \beta g_i (T_{\text{ref}} - T)$$
(2)

能量方程:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_{\rm H}$$
(3)

式中: U_i 为 x_i 方向的速度,单位为m/s; $i=1,2,3,x_i$ 代表3 个垂直坐标轴坐标; ρ 为空气密度,单位为 kg/m^3 ; U_j 为 x_j 方 向的速度,单位为m/s;p为空气压力,单位为Pa; μ 为空气 层流动力黏度,单位为 $kg/(m \cdot s)$; β 为空气热膨胀系数,单 位为1/K; T_{ref} 为参考温度,单位为K;T为空气温度,单位为 K; g_i 为i方向之重力加速度,单位为 m/s^2 ;h为空气定压比 焓,单位为J/kg; S_H 为热源,单位为W; λ 为空气热导率,单 位为 $W/(m \cdot K)$; c_p 为空气比定压热容,单位为 $J/(kg \cdot K)$ 。

2.3 湍流模型

室内零方程湍流模型是在室内空气自然对流和混合 对流的直接数值模拟结果的基础上提出的,该模型针对 室内非等温流动的瑞利(Rayleigh)数范围[(2.6~3.0)× 1010],涡黏系数正比于流体密度、当地速度和距壁面最近之 距离,比例系数由直接数值模拟的结果拟合为:

 $\mu_t = 0.0387 \rho V l$ (4)

式中: V 为当地时均速度; l 为当地距离壁面最近的距离。

本文采用零方程湍流模型,计算至残差非常小,其 数值小于1×10⁻⁴,进口流量与出口流量相等,结束迭代 计算。

2.4 边界条件

客舱内壁假设为绝热壁面,厨房和盥洗室等均为封闭块体,外壁为绝热壁面,乘员设为客舱内热源,热载荷为 75W;前客舱、中客舱和后客舱供气温度为13.5℃,流速为 2m/s;地板排气通道为自由出口,排气阀为自由出口,再循 环系统流量设定为0.3kg/s,操作压力为101325Pa,操作密 度为1.225kg/m³,环境温度为20℃。

2.5 网格生成

采用六面体非结构化网格划分计算区域,便于网格的 自动生成及自适应处理,客舱区域网格如图2所示。



图 2 客舱区域网格 Fig.2 Grids of aircraft cabin

3 客舱气流组织分析

3.1 空气流场计算及分析

分别选取6个典型截面*x*=-0.25m,*x*=-1.6m,*x*=1.6m, *y*=0.55m,*z*=-18m,*z*=-36m,其流速分布如图3所示。

由图 3 可以看出:客舱内气流速度分布不合理,乘员区 域的流速较低,大致在 0.1m/s 以下,容易出现气流"堆积" 现象,不利于污染物的排出;前客舱、中客舱和后客舱流速 分布呈现逐渐减小的规律;顺航向从客舱左侧到右侧流速



Fig.3 The flow velocity distribution of typical cross section

分布呈现逐渐减小的规律;客舱从顶部至地板处流速分布 呈现逐渐减小的规律。

3.2 空气温度场计算及分析

典型截面温度分布计算结果如图 4 所示。从图 4 可以 看出,客舱内空气温度分布较为不合理,乘员区域的温度较 高,大致在 27℃,不利于乘员散热;前客舱、中客舱和后客舱 温度分布呈现逐渐增大的规律,且温差较大;顺航向左侧和 右侧温度分布呈对称趋势。



Fig.4 The temperature distribution of typical cross section

4 客舱气流组织优化设计

经数值结果分析发现,客舱气流分布和温度分布均不 合理,需要对其进行优化设计,优化需要综合考虑以下几 个方面:客舱供气参数、排气阀安装位置、再循环系统安装 位置。

4.1 供气参数

大型飞机客舱空气分配系统设计完成后,供气口的流 量、几何尺寸等参数均匹配好后不宜更改,而供气温度主要 由客舱温度控制系统调节,因此,对供气温度进行优化设计。 另外,针对客舱主要热载荷即人员热载荷在舱内分布的规律 (前客舱乘员少,热载荷小,中客舱和后客舱乘员多,热载荷 大),需对客舱进行区域温度控制。优化设计后的供气参数 为:前客舱供气温度为 13.5℃,中客舱和后客舱供气温度为 8℃,其他供气参数均不变。

4.2 排气阀安装位置

大型飞机客舱排气阀安装在客舱底部,客舱空气最终 均由其排出,针对客舱布局的特点,将前后排气阀均匀布 置在顺航向客舱对称面上,几何坐标尺寸为:圆心为(0m, -1.7m,-18m)和(0m,-1.7m,-36m),半径均为0.05m。

4.3 再循环系统安装位置

大型飞机客舱空气再循环系统一方面减少新鲜供气量,另一方面减低供气与客舱空气温差。针对客舱布局的特点,将再循环系统布置在顺航向客舱两侧,位于客舱中部、地板以下,几何尺寸坐标为:圆心为(-2.96m,-0.35m, -27.25m)和(2.96m,-0.35m,-27.25m),半径均为0.3m。

4.4 优化设计结果分析

大型飞机客舱气流组织优化设计后,对客舱内气流组织 进行了计算。典型截面客舱内流速分布计算结果如图5所示。

从图 5 (a) 可以看出,最大流速出现在前后排气阀附 近,最小流速出现在后客舱后部区域;前客舱、中客舱和后 客舱区域流速分布较为均匀,在 0.25m/s 左右;乘员通道附 近流速分布较为均匀,在 0.2m/s 左右。从图 5 (b) 可以看 出,最大流速出现在客舱顶部供气口处,最小流速出现在后 客舱后部区域;前客舱、中客舱和后客舱区域流速分布较为 均匀,在 0.26m/s 左右;乘员通道附近流速分布较为均匀,在 0.23m/s 左右。从图 5 (c) 可以看出,最大流速出现在中客 舱和后客舱部分乘员通道中,为 0.38m/s;最小流速出现在后 客舱后部区域;飞机客舱顺航向前后和左右位置流速分布 均匀,在 0.21m/s 左右;乘员通道附近流速分布较为均匀,为 0.19m/s。从图 5 (d) 可以看出,最大流速出现在客舱排气阀 附近;最小流速出现在客舱内壁面垂直方向(即 y 方向);客 舱从顶部到地板逐渐减小,顺航向左右侧分布均匀对称,客 舱通道流速在0.22m/s左右,不会产生"穿堂风"感觉。从 图5(e)可以看出,最大流速出现在客舱排气阀附近;最小 流速出现在客舱内壁垂直方向上部;客舱从顶部到地板逐 渐减小,顺航向左右侧分布均匀对称,人员通道附近流速在 0.18m/s左右。





综上所述,客舱内气流速度分布较为均匀,尤其在乘员 通道附近流速在 0.2m/s 左右,乘员较为舒适;前客舱、中客 舱和后客舱空气流速分布均匀;顺航向左右侧空气流速分 布均匀对称。典型截面客舱内空气温度分布计算结果如图 6 所示。



Fig.6 The temperature distribution of typical cross section after optimization

从图 6 (a) 可以看出,乘员表面温度较高,最低温度出现 在前客舱前部区域:前客舱、中客舱和后客舱温度分布较为 均匀,为23℃左右;乘员附近通道空气温度分布较为均匀,为 25℃左右。从图6(b)可以看出,最高温度出现在中客舱和 后客舱顶部,为24.1℃左右,最低温度出现在中客舱和后客舱 顶部供气口附近,为8℃左右,前客舱、中客舱和后客舱温度 较为均匀,为19℃左右。从图6(c)可以看出,乘员表面温度 较高,最低温度出现在前客舱前部,为16.4℃,前客舱、中客舱 和后客舱温度逐渐升高,温差为2℃左右,顺航向左右两侧温 度呈对称分布。从图6(d)可以看出,最高温度出现在客舱 顶部部分区域,为22℃左右,最低温度出现在客舱底部部分 区域,为17℃左右;客舱顶部到地板之间温度分布较为均匀, 为20℃左右。从图6(e)可以看出,最高温度出现在坐姿人 员头部上方的部分区域,为37℃,最低温度出现在客舱底部, 为18℃;乘员附近通道温度分布较为均匀,为23℃左右;客 舱顶部到客舱地板之间温度分布较为均匀,温差不超过2℃。

综上所述,客舱内气流温度分布较为均匀,尤其在乘员 通道附近温度为22℃左右,乘员较为舒适,前客舱、中客舱 和后客舱温度逐渐升高,但温差不大于2℃,顺航向左右侧 温度分布均匀对称。

5 结束语

通过建立客舱模型,对初步的气流组织方案进行流场 分析和温度场分析,发现流速分布和温度分布均不合理,经 过多轮迭代,对座舱气流组织进行了优化设计,优化后客舱 流速分布和温度分布均满足设计要求,依此可以确定客舱的 关键参数,通过客舱气流组织分析及优化设计,可以减少试 验费用,缩短设计周期。

参考文献

- National Research Council. The airliner cabin environment and the health of passengers and crew[M].Washington, DC: National Academy Press, 2002.
- [2] Bruni M, Steffen R. Impact of travel-related health impairments [J]. Journal of Travel Medicine, 1997 (4): 61-65.
- [3] Rayman R. Cabin air quality: an overview[J]. Aviation Space and Environmental Medicine, 2002, 73: 211-215.
- [4] Fred A, Mathew J W, Dipankar C. Numerical analysis of airflow in aircraft cabins[R].SAE-911411, 1991.
- [5] Baker A J, Taylor M B. Prediction of the distribution of indoor

air quality and comfort in aircraft cabins using computational fluid dynamics[C]// Air Quality and Comfort in Airliner Cabins, 2000.

- [6] Lin C H, Horstman R H, Ahlers M F. Numerical simulation of airflow and airborne pathogen transport in aircraft cabins, Part I: Numerical simulation of the flow field[J]. Ashrae Transactions, 2005, 111 (1): 755-763.
- [7] Gero G, Johannes B, Julien P, et al. Experimental and numerical simulations of idealized aircraft cabin flows[J]. Aerospace Science and Technology, 2006 (10): 563-573.
- [8] Johannes B, Julien P, Claus W, et al. Experimental and numerical simulations of turbulent ventilation in aircraft cabins[J]. Energy, 2006, 31: 694-705.
- [9] Zhang T F, Chen Q. Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse CFD model[J]. Indoor Air, 2007, 17: 167-177.
- [10] Chen X, Chen Q Y. Numerical investigation of decontaminant delivery strategies in a commercial aircraft cabin[C]// International Conference on Air Distribution in Rooms, 2007.
- [11] Vincenzo B, Oronzio M, Sergio N, et al. Numerical

investigation of transient thermal and fluid dynamic fields in an executive aircraft cabin[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29; 3418-3425.

- [12] 林国华,杨燕生,袁修干.客舱环控系统气流组织的数值研究[J]. 应用基础与工程科学学报,1998,6(3):302-307.
 LIN Guohua, YANG Yansheng, YUAN Xiugan. Numerical simulation of flow fields and heat transfer within air-conditioning cockpit[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1998,6 (3):302-307. (in Chinese)
- [13] 王黎静,王昭鑫,何雪丽.大型客机驾驶舱气流热仿真及舒适性 评价 [J]. 北京航空航天大学学报,2010,36 (12):1436-1439.
 WANG Lijing, WANG Zhaoxin, HE Xueli. Airflow thermal simulation and comfort evaluation of commercial airliner[J].
 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36 (12): 1436-1439. (in Chinese)

作者简介

杨文强(1984-) 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机 环境控制系统设计、仿真和试验。 Tel:029-86832721 E-mail: ywg801@163.com

Analysis and Design Optimization of Airflow Distribution for Large Aircraft Cabin

YANG Wenqiang*, ZHANG Cuifeng, ZHANG Mian AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: The model of the large aircraft cabin were established by CFD, the airflow velocity and temperature distribution were analyzed and found that was unreasonable, cabin airflow distribution optimization proposal was given, the numerical simulation for the design optimization of the airflow indicates that it is reasonable and meets the requirement of the system. Using this method of the optimization, it will shorten the development period.

Key Words: large aircraft; aircraft cabin; airflow distribution; design optimization

Received: 2017–02–20; **Revised:** 2017–03–14; **Accepted:** 2017–04–25 ***Corresponding author. Tel.** :029–86832721 **E-mail:** ywq801@163.com