

单通道民用飞机客舱气流组织 数值仿真研究

Numerical Simulation Analysis of the Air Distribution in Single-aisle Cabin Civil Aircraft

袁建新 / 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:

建立了单通道民用飞机客舱气流组织数值仿真模型,对不同的送风角度、送风速度和送风比例等状态的客舱气流组织进行了数值仿真研究,通过对比分析不同状态的仿真结果的流场、温度场、预期不满意百分率 PPD、预测平均反应 PMV、吹风感所引起的不满意率 DR 及其垂直温差导致的不满意率 PD 等热舒适性参数,发现水平角度送风、上风口较低风速和下风口较大风速、上风口风量少于下风口的设计较为合理。

关键词:环控;客舱;气流组织;舒适性

中图分类号:V216.5

文献标识码:A

[Abstract] The numerical simulation analysis model of air distribution in single-aisle cabin civil aircraft is built. The flow field, temperature field, PMV, PPD and DR are calculated and analyzed at different air-supply angle, different air-supply velocity and different air proportion between the high outlet and low outlet. The results show that horizontally supplying air at the low and high outlet, high velocity for low outlet and low velocity for high outlet, and more air for low outlet and less air for the high outlet are suitable.

[Key words] environment control; cabin; air distribution; comfort

0 引言

舒适性是民用飞机的关键要求之一,客舱气流组织设计是否合理对乘员舒适性和健康有直接影响。客舱供排气口的位置和尺寸、送风量、送风角度、送风温度等因素影响客舱气流组织设计的好坏,因素间的相互关系复杂,采用常规的理论计算或经验设计很难设计出良好的客舱气流组织。若采用试验的方式来重新设计客舱供气系统不仅费用昂贵,而且设计周期长。随着计算机技术和 CFD 技术的发展,数值仿真技术越来越频繁地应用于飞机客舱气流组织研究中^[1-3],具有不受试验条件的限制、通用性强、成本低和研究周期短等特点。

本文以单通道民用飞机客舱气流组织为研究对象,通过合理的简化,建立了客舱气流组织数值仿真模型,研究了不同送风角度、送风比例和送风速度对客舱舒适性的影响。

1 仿真模型

1.1 物理模型及网格离散

建立了 5 排座椅单通道民用飞机客舱几何模型,对窗户、行李架、座椅以及人体等部位进行了合理简化。忽略舱内小部件的影响,对于部分尖角进行圆滑处理,并假设各表面光滑。

采用四面体与六面体网格结合的方法对计算域进行离散。客舱内壁面附近、人体附近的几何结

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)“大型客机座舱内空气环境控制的关键科学问题”研究成果之一,项目编号:2012CB720100。

构复杂,采用四面体网格划分;中部空间结构简单,采用六面体网格划分以降低总网格数。同时对气流进出口、壁面以及人体附近等关键位置进行网格加密处理,进行网格独立性分析,即保证网格质量不影响计算分析结果,计算中每排座椅空间网格数约为 438 万。几何模型示意及网格剖面如图 1 所示。

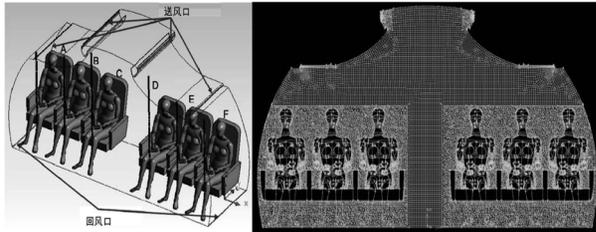


图 1 几何模型示意及网格剖面图

1.2 数值方程及湍流模型

本文假定客舱内为定常、不可压、牛顿粘性流体。在求解区域内应用质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律 3 个基本物理规律,可得到如下控制方程^[4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \left(-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i u_j \right) + S_i \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + S_i \quad (3)$$

应用 ANSYS Fluent^[5] 软件进行稳态模拟计算,选用 RNG k-ε 湍流模型闭合方程组,采用 SIMPLE 算法来耦合压力和速度。对于压力的离散选用 PRESTO! 格式,其他参数的离散均采用一阶迎风格式。收敛标准采用 Fluent 默认的收敛标准,即对于能量所有网格的残差和小于 10⁻⁶,对于其他参数所有网格的残差和小于 10⁻³。残差的定义如下:

$$R^\phi = \frac{\sum_{cells P} |\sum_{nb} \alpha_{nb} \phi_{nb} + b - \alpha_p \phi_p|}{\sum_{cells P} |\phi_p \alpha_p|} \quad (4)$$

其中 ϕ_p 和 ϕ_{nb} 分别表示当前网格和相邻网格的流动参数; α_p 表示中心参数, α_{nb} 表示相邻网格的影响参数; b 为源项或边界条件产生的量。

1.3 数值仿真假设及边界条件

以飞机巡航热天状态作为计算工况,该工况下乘客一般不使用个人通风喷嘴,因此计算中不考虑个人通风喷嘴送风。假设壁面无滑移,出口采用压力边界条件。压力环境设为 2 400m 高度对应的大气压力,75.69kPa。边界条件见表 1。

表 1 巡航热天状态边界条件

状态	供气温度 /℃	外部环境温度 /℃	马赫数	内壁面及地板温度 /℃	人均风量 /L/S	人体表面温度 /℃
巡航热天	16.3	-31.5	0.74	19.4	10.38	31

2 数值仿真及分析

2.1 评价标准

本文中客舱速度分布和温度分布评价标准采用美国采暖、制冷与空调工程师学会标准 ANSI/ASHRAE STANDARD 161-2007^[6] 相关规定,温度和气流速度范围见表 2。同时结合人体热舒适相关指标:预期不满意百分率 PPD、预测平均反应 PMV 指标、吹风感所引起的不满意率 DR 及其垂直温差导致的不满意率 PD 等进行了评估分析,相关指标见表 3^[7]。

表 2 民用飞机客舱温度及风速要求

参数	标准
客舱温度	在飞行和地面运行时的温度范围: 18.3℃ ~ 23.9℃; 飞行时的温度都不得超过 26.7℃; 设计控制误差: ± 1.1℃
空间温度变化要求	温度控制区横向温度变化: <4.4℃; 座椅处竖直方向温度变化: <2.8℃, 分别测量距离地板 100 mm、610mm、1 090mm 处的温度。
局部风速	在座椅上的乘客和机组人员: <0.36m/s 身体敏感部位: <0.30m/s (推荐<0.20m/s) 头部(无个人通风): >0.1m/s

表 3 可接受的室内热环境舒适性指标

PPD	PMV 范围	吹风引起不满意率 DR	垂直温差引起不满意率 PD	温暖或冷地板引起不满意率 PD
<10%	-0.5 < PMV < +0.5	<20%	<5%	<5%

2.2 算例列表

本文中的计算工况如表 4 所示。

2.3 送风角度计算分析

通过对比分析算例 1 至算例 3 结果,对不同送风角度下气流组织进行研究。算例 1~3 的第三排座椅位置处的 PMV 及 PPD 分布如图 2 所示。通过对比 PMV 和 PPD 分布,水平送风情况下 PMV 基本处于 -0.5 到 +0.5 中间,PPD 不满意率也均低于其他两种情况。同时根据仿真结果,对三种情况的人体头部和脚部由于吹风感导致的不满意率 DR、头部脚部垂直温差导致的不满意率 PD 进行了计算,结果见表 5。通过比较可以发现水平送风时由吹风

表4 本文计算工况

算例编号	送风角度	送风速度	送风比例
1	上风口:水平送风 下风口:水平送风	上风口:0.6m/s 下风口:1m/s	上风口:40% 下风口:60%
2	上风口:水平送风 下风口:向下15°	上风口:0.6m/s 下风口:1m/s	上风口:40% 下风口:60%
3	上风口:水平送风 下风口:向下30°	上风口:0.6m/s 下风口:1m/s	上风口:40% 下风口:60%
4	上风口:水平送风 下风口:水平送风	上风口:1m/s 下风口:1m/s	上风口:40% 下风口:60%
5	上风口:水平送风 下风口:水平送风	上风口:1m/s 下风口:0.6m/s	上风口:40% 下风口:60%
6	上风口:水平送风 下风口:水平送风	上风口:0.6m/s 下风口:1m/s	上风口:50% 下风口:50%
7	上风口:水平送风 下风口:水平送风	上风口:0.6m/s 下风口:0.6m/s	上风口:50% 下风口:50%

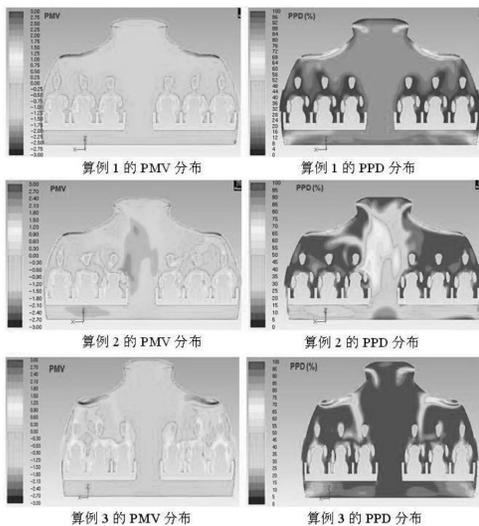


图2 算例1~3的第三排座椅位置处的PMV及PPD分布

表5 不同送风角度下人体舒适度

送风角度	人员位置	DR(%) 吹风感导致的不满意率		PD(%) 垂直温差导致的不满意率
		头部	脚部	
水平送风	左一	11.98	14.64	3.95
	左二	11.34	16.00	5.93
	左三	9.74	16.02	1.72
向下15°送风	左一	7.76	14.64	3.95
	左二	9.32	16.00	8.82
	左三	10.65	16.07	1.72
向下30°送风	左一	11.98	18.64	18.54
	左二	10.71	16.33	3.95
	左三	11.70	13.68	8.82

感导致的不满意率较为一致,而且均小于20%,同侧的三个乘客的舒适度较为一致;同时,由垂直温差导致的不满意率在三者中最低,因此可以得出结论:下风口水平送风较为合适。

2.4 送风速度分析

通过对比分析算例1、算例4和5结果,分析不同送风速度下的气流组织情况。算例4和5的第三排座椅位置处的温度场、PMV及PPD分布如图3所示。通过比较这三种情况的PMV值和PPD不满意率,下风口风速为0.6m/s的情况最为不舒适。对于上送风口、下送风风口风速都是1m/s的情况,舱内温度的均匀性较差,人体周围垂直温差最大达到5℃。可以发现上风口低风速送风,下风口较高风速送风热舒适性较好。

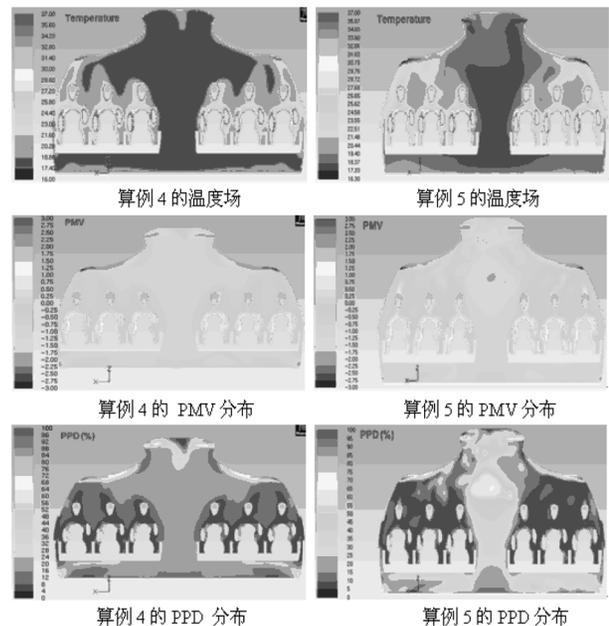


图3 算例4和5的第三排座椅位置处的温度场、PMV及PPD分布

2.5 上下送风口送风比例分析

通过对比算例1、6和7结果,分析上下送风口不同送风比例时气流组织情况。算例6和7第三排座椅位置处的PMV及PPD分布如图4所示。通过比较可以发现这两种情况人体周围的PMV值均较高,即人体会感觉较热。通过流场可以看出,造成这一现象的原因是由于上风口的风主要流过中间走道然后通过座椅下方流向两侧的排风口,带走的热量减少,从而导致人体周围较热,新鲜空气利用效率较低。因此,可以得出结论:上送风口风量少,下送风口风量多较为合适。

(下转第104页)

维修性原则,通过比对供应商 RSPL/CMM 文件,并向供应商与设计方沟通核对,最终明确了航线保障所需的航材件号,及时满足航材保障需求。

4 结论

近年来,民用航空产业迅速发展,已逐渐演变成民机产品和综合保障服务的双重竞争,因此,飞机厂商除了提供优质的产品之外,还必须为客户提供高效卓越的服务,这也是民机产业普遍的共识之一。维修工程和航材支援是民机综合保障服务的重要组成部分,完善的航材保障体系对航空公司的运营至关重要。本文基于工程实际应用,介绍了航材工程潜在航材集的制定和航材推荐清单的编制过程,并从民机航线可维修性的原则出发,以维修性工程方法验证了航材推荐清单的有效性和实用性,以满足航材保障要求。同时,经过维修工程对比验证,也发现了有很多环节需要细化和完善,以逐步提高航材工程研究水平。

(上接第 13 页)

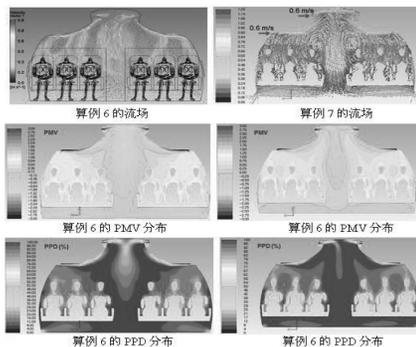


图4 算例6和7的第三排座椅位置处的流场、PMV及PPD分布

3 结论

通过对不同送风角度、不同送风速度以及不同的上下送风比例情况下客舱气流组织进行了数值仿真研究,通过对各算例结果中第三排座椅位置处温度场、流场、预期不满意百分率 PPD、预测平均反应 PMV、吹风感所引起的不满意率 DR 及其垂直温差导致的不满意率 PD 等进行了分析,结果表明:

- (1) 送风角度、送风速度及不同送风口送风比例对客舱热舒适性有较大影响,飞机设计时应考虑;
- (2) 对于送风角度,水平送风较为合理,该结论和波音公司、空客公司单通道飞机设计一致;

参考文献:

- [1] 侯甲凯. 我国航材管理现状及发展趋势研究[J]. 现代商贸工业,2013,14:91-92.
- [2] 刘巧云,苏茂根. 民用飞机修理级别分析方法研究[J]. 航空维修与工程,2014,1:87-89.
- [3] 李纲. 维修工程——飞机安全的保证[J]. 中国民用航空,2008,12:64-67.
- [4] 王文龙. 基于飞机客户需求的航材工程及产品研究[J]. 科技与企业,2012,15:316-319.
- [5] 张琦. 现代航材供应系统的成本控制研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [6] 常玉,同姗姗. 航材管理发展方向研究[J]. 航空制造技术,2012,9:87-89.
- [7] 吕川. 维修性设计与验证[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [8] 左洪福. 航空维修工程学[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [9] 康锐. 可靠性、维修性、保障性工程基础[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

(3) 对于送风速度,下风口较大风速和上风口较低风速的热舒适性较好;

(4) 对于送风量比例,由于上风口的风量带走的热负荷较少,上送风口风量少,下送风口风量多的热舒适性较好。

参考文献:

- [1] Fred A, Mathew J. W and Dipankar C. Numerical Analysis of Airflow in Aircraft Cabins[R]. SAE-911411.
- [2] 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.
- [3] A. Singh, M. H. Hosni, and R. H. Horstman. Numerical Simulation of Airflow in an Aircraft Cabin Section[J]. ASHRAE Journal, 2002,108(1):1005 - 1013.
- [4] John D, Anderson, JR. Computational Fluid Dynamics The Basics with Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [5] <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+Fluent>.
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 161 - 2007 Air Quality within Commercial Aircraft[S]. Atlanta; 2007.
- [7] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Atlanta;2004.