

民用飞机驾驶舱气流组织的数值分析

Numerical Analysis of the Air Distribution in Civil Aircraft Cockpit

王 刚 / WANG Gang

(中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 200232)

(Flight Test Center of COMAC, Shanghai 200232, China)

摘 要:

作为一架飞机的指挥中心,驾驶舱的重要性是显而易见的。舱内的环境控制尤其是气流组织对飞行员的身体健康和正常工作有很大影响。建立了某型民用飞机的三维驾驶舱模型,做出合理假设和简化后运用流体力学计算软件 FLUENT 进行了数值模拟,基于 PS 模型对各种工况进行热舒适性评价。结果表明,总供风量为 $0.08\text{m}^3/\text{s}$,侧面送风占总风量 40% 且送风方向垂直于送风口的方式为最佳工况,此时驾驶员、观察员周围空气的温度和速度达到人体舒适度要求,模拟结果为驾驶舱气流组织的设计提供了参考。

关键词: 民机驾驶舱; 气流组织; 数值模拟; PS 模型

中图分类号: V245.3

文献标识码: A

[**Abstract**] As the command center of an aircraft, the importance of cockpit is obvious. The air distribution in the environment of cabin has very large effect on the pilot's body health and normal operating. This paper establishes the three-dimensional cockpit model of a certain civil aircraft. The computational fluid dynamics software FLUENT is used to numerical simulation after setting some reasonable assumptions and simplifications, then the thermal comfort of various working conditions is evaluated based on PS model. It is found that the best condition is that when the total supply air is $0.08\text{m}^3/\text{s}$, the side supply air accounts for 40% and the flow direction perpendicular to the outlet. At this time, the surrounding air temperature and speed of pilot and observer meet the requirements of the human body comfort. The simulation results can provide reference for the design of cockpit air distribution.

[**Keywords**] civil aircraft cockpit; air distribution; numerical simulation; PS model

0 引言

作为飞机的“大脑”,驾驶舱的地位和重要性不言而喻。为保证飞行员、观察员的身体状况和在驾驶舱的正常工作,需要对驾驶舱的环境进行控制。通常环控内容包括通风、温湿度调节、空气品质、降噪等,而气流组织设计更是环控设计的第一步,供排气口的布置和尺寸、送风量及其分配、送风方向、供气温度等直接影响到驾驶舱内人员的舒适性^[1]。气流组织设计是否合理需要通过计算或试验进行验证,模拟实际环境得到的试验数据比较直观、精确性也较高,但其耗时耗费的缺点同样很明显。随着计算机和数值仿真技术的发展,越来越多的国内

外学者在进行试验验证之前更倾向于 CFD 数值模拟。王黎静^[2]等人建立了波音 737-800 飞机驾驶舱的全尺寸三维模型,采用 PMV 指标模拟评价舱内舒适度,发现仿真结果和驾驶员的客观评价结果一致;文献[3]作者利用 FLUENT 软件模拟了地面夏季工况下客机驾驶舱内部的热舒适性,提出飞行员热不舒适的主要原因为平均辐射温度过高;Gunther^[4]等对商用飞机座舱内的新风分布进行了数值模拟和试验研究;Singh^[5]等对座舱的天花板送风情况进行了数值模拟,得到了影响舱内人体热负荷的因素,计算结果和试验结果一致。

本文以某型民用飞机驾驶舱内的空气流动和传热特性为研究对象,运用数值模拟方法计算了不同工

况下驾驶舱内的速度场、温度场,基于PS模型对舱内热舒适性进行了评价,获得了最佳送风工况,为民用飞机驾驶舱气流组织的设计和 optimization 提供了依据。

1 仿真模型

1.1 物理模型和网格离散

利用 ANSYS ICEM CFD 软件对某型民用客机驾驶舱进行建模和网格划分离散,建模时在不影响驾驶舱内部流场的情况下对内部结构做了一定简化,对尖角进行圆滑处理,各表面均光滑。如图1所示,驾驶舱顶部天花板布置2个对称的送风口,左右侧操纵台各布置2个圆形送风口,2个出风口对称布置在正副驾驶员座椅下方地板上。机组人员的个人送风口采用个性化送风方式,根据个人喜好打开,本文模型暂不考虑这些送风口。考虑到模型几何形状的不规则性,采用非结构化网格进行离散,对送风口和出风口进行局部加密,总网格单元数270万。

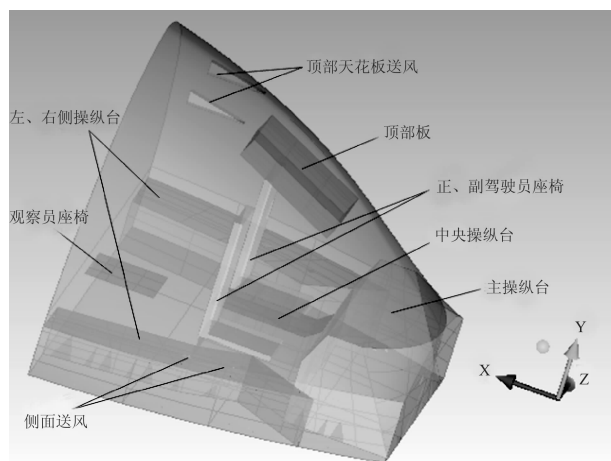


图1 驾驶舱结构示意图

1.2 边界条件

对物理模型的简化和假设:①舱内空气为稳态、不可压缩、常物性牛顿流体;②热源按恒温壁面处理,计算初始温度为303.15K,各送风口空气温度为常量295.15K;③座舱压力高度为8000ft,其对应的大气压力为75kPa;④送风量和送风口速度按实际工况进行设置,空气密度为定值 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 。⑤送风口为速度边界,出风口为出流边界,固体表面为标准无滑移边界。

根据驾驶舱供风量设计要求,每名机组的最低新风需求量为 $0.75\text{kg}/\text{min}$,按驾驶舱两名驾驶员、一名观察员的标准配给模式,得到驾驶舱所需最低

新风量为 $2.25\text{kg}/\text{min}$,即 $0.0375\text{m}^3/\text{s}$,考虑到驾驶舱电子设备散热、人员散热和外界辐射,计算了 $0.04\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.06\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.08\text{m}^3/\text{s}$ 、 $0.10\text{m}^3/\text{s}$ 这4种送风量工况,通过数值模拟方法得到最优送风量后,再对各送风口的风量、送风方向进行优化设计。各通风口参数见表1。

表1 送风口参数

名称	数量	位置	尺寸/m	当量直径/m
天花板送风	2	驾驶舱天花板左右对称布置	0.45×0.05	0.09
侧操纵台送风口1	2	左、右侧操纵台对称布置	R0.024	0.048
侧操纵台送风口2	2	左、右侧操纵台对称布置	R0.04	0.08
排风口	2	正副驾驶员座椅下方地板	0.2×0.2	0.2

1.3 数学模型

基于前文提出的驾驶舱物理模型和做出的假设,表征舱内流动和传热的连续性方程、动量方程、能量方程、标准 $k-\varepsilon$ 方程^[6]分别为:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' T'}) + S_T \quad (3)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

式中, u_i 、 u_j 为速度分量; ρ 为密度; μ 为粘性系数; T 为时间量; Pr 为普朗特数; S_T 为合并后的源项; k 为湍流动能; ε 为湍流耗散率; G_k 为层流速度梯度产生的湍流动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_M 为扩散产生的波动; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常量; σ_ε 是 k 方程和 ε 方程的湍流普朗特数; S_k 和 S_ε 是自定义参数。

1.4 求解策略

采用商用软件 ANSYS FLUENT 13 进行求解,设置压力和动量方程的耦合方式采用 SIMPLE 算法,压力的离散选择 STANDARD 算法,其他参数的离散均选择一阶迎风格式,收敛值采用软件默认的收敛标准,即能量项的残差低于 10^{-6} ,其余变量残差低于 10^{-3} 。

2 数值模拟和分析

2.1 PS 模型

和传统的热舒适性指标 PMV-PPD 比较,PS 模型用来预测局部空气运动可控时,人体对所处热环境的满意率,计算公式如下:

$$PS = 1.13T^{0.5} - 0.24T + 2.7V^{0.5} - 0.99V \quad (6)$$

式中,PS 为人体对所处热环境的吹风感满意率; T 表示操作温度,℃; V 表示空气流速,m/s; $PS \leq 1$,PS 值大于 1 时,取 $PS = 1$ 。人体脸部对吹风感最为敏感,选择正副驾驶员和观察员脸部中点为观察点,分别为 $(1.336, 1.088, 0.532)$ 、 $(1.336, 1.088, -0.532)$ 、 $(2.256, 1.088, 0)$ 。

2.2 总送风量计算仿真

1.2 节中已经设定了 4 种不同送风量的工况,左、右侧操纵台两个圆形送风口出风速度相等,计算工况见表 2。

表 2 送风量计算工况

总送风量 (m^3/s)	天花板 送风口(m/s)	侧操纵台 送风口 1(m/s)	侧操纵台 送风口 2(m/s)
0.04	0.58	1	1
0.06	0.87	1.5	1.5
0.08	1.17	2	2
0.10	1.45	2.5	2.5

PS 值计算结果如图 2 所示。从图中可看出,通风口参数、送风温度恒定时,正副驾驶员和观察员的吹风感满意率随着总送风量的增加而增大,正、副驾驶员的满意率基本相同。送风量为 $0.08m^3/s$ 时,正副驾驶员的满意率已超过 1,此时观察员的满意率为 0.87,由于观察员的舒适性为非优先级,且考虑到送风量继续增大会增加空调系统负担,可认为该送风量为最优工况。图 3 给出了 4 种计算工况下驾驶员界面的温度场和速度场。(驾驶员界面为 $X = 1.432$)

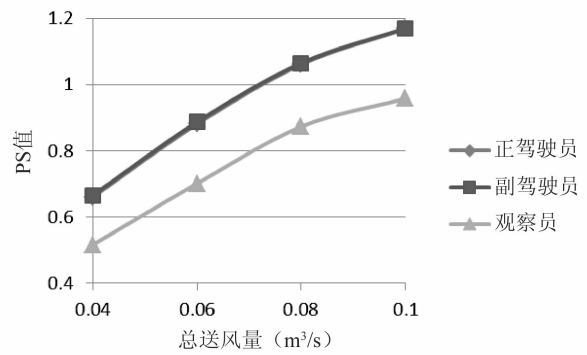


图 2 随总送风量变化的 PS 值

2.3 新风量分配计算仿真

在总送风量为 $0.08m^3/s$ 时,对各送风口的空气量进行分配,计算 4 种工况,见表 3,比较 4 种工况下观察点的 PS 值,得到最佳新风分配方案。

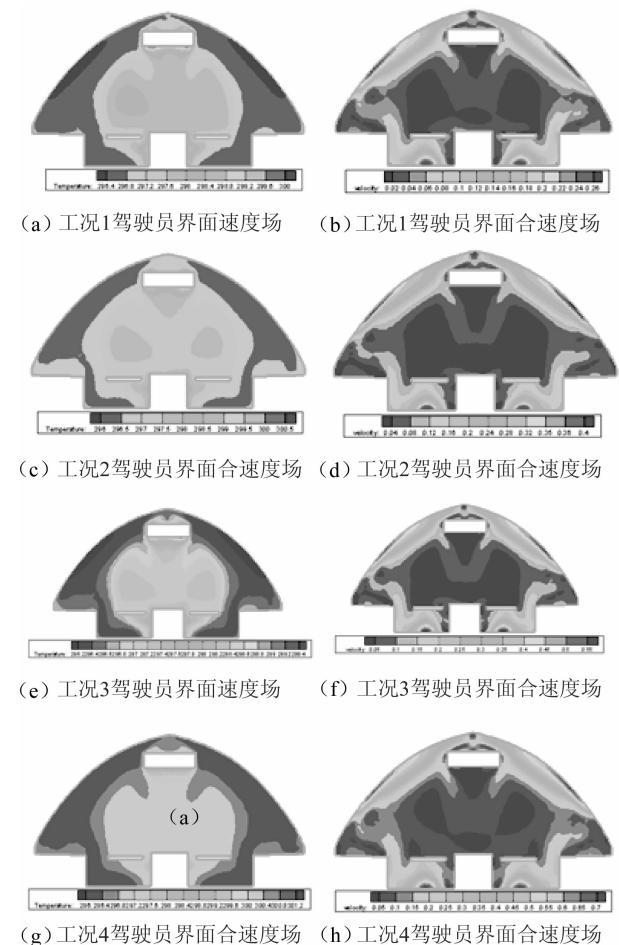


图 3 四种计算工况下驾驶员界面温度场和速度场

表3 新风量分配计算工况

工况	天花板送风口 (m/s)	侧操纵台送风口 1 (m/s)	侧操纵台送风口 2 (m/s)
1	1.05	2.4	2.4
2	1.17	2	2
3	1.3	1.6	1.6
4	1.47	1	1

图4给出了四种工况下观察点PS值的计算结果,发现左、右侧操纵台送风口速度增大可增加人员满意率,侧面出风口速度2.4m/s时,人员的吹风感满意率都达到了可接受程度,此时侧面出风量占总送风量的40%。

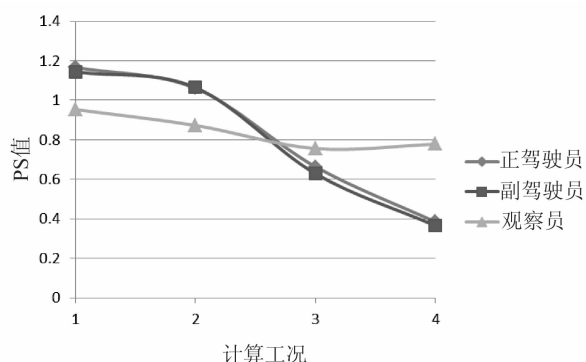


图4 不同新风量分配工况下的PS值

2.4 送风口出流方向计算仿真

在某一恒定送风速度下改变送风方向,计算模拟不同出流方向工况下人员的吹风感满意率。总送风量为 $0.08\text{m}^3/\text{s}$,天花板送风口 1.17m/s ,侧面送风口 2m/s ,考虑4种工况的侧面送风方向,即在YZ平面内与Y轴夹角分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° ,仿真计算结果如图5所示。

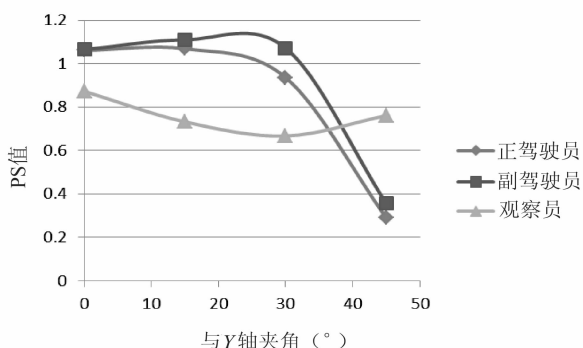


图5 不同送风方向工况下的PS值

从图中可看出侧面送风方向与Y轴夹角增大时,正副驾驶员满意率稍微上升之后明显下降。夹角 45° 时,正副驾驶员观察点空气流速仅 0.03m/s ,其PS值仅 0.36 ;观察员满意率在夹角 30° 时最低,之后有所回升。所以侧面送风方向垂直于送风口时,驾驶舱内所有人员的舒适性均可保证。

2.5 温度场和速度场模拟结果

图6~图9给出了总风量 $0.08\text{m}^3/\text{s}$,天花板送风速度 1.05m/s ,侧面流速 2.4m/s ,送风方向垂直于送风口工况下驾驶员界面、观察员界面的温度场和速度场,两个界面的位置分别为 $X=1.432$ 、 $X=2.348$ 。

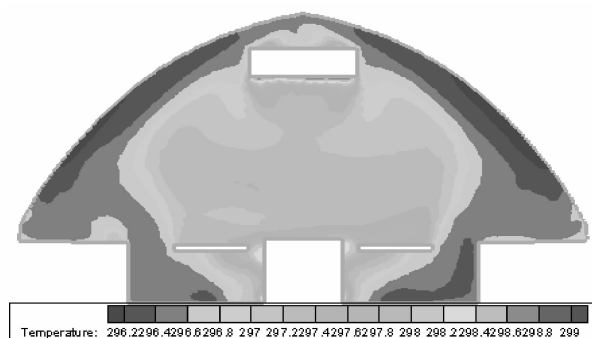


图6 驾驶员界面温度场

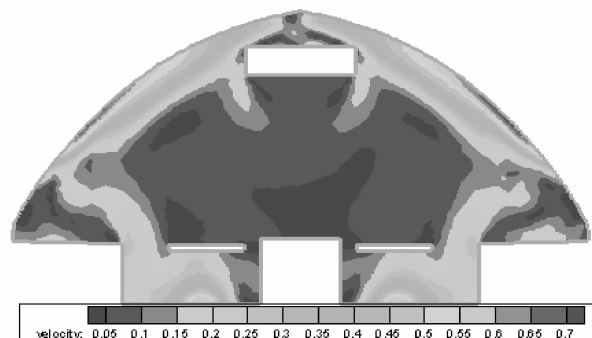


图7 驾驶员界面速度场

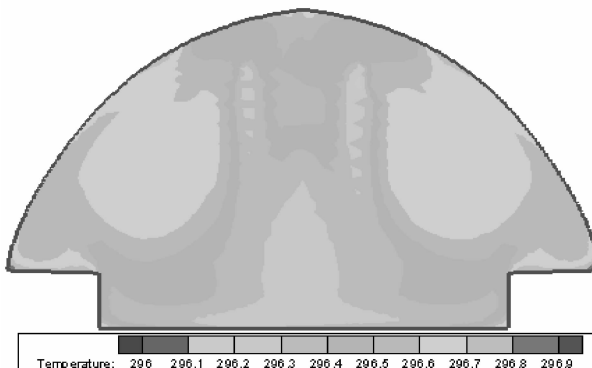


图8 观察员界面温度场

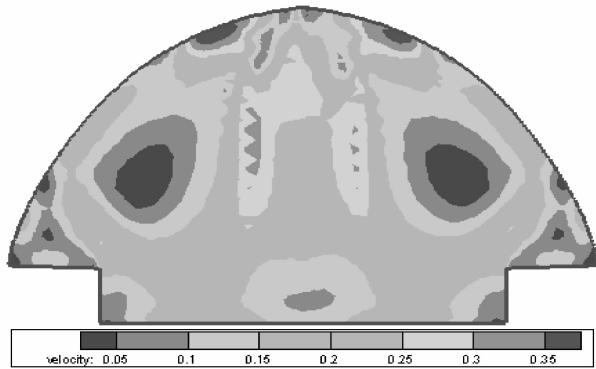


图9 观察员界面速度场

从图中可看出驾驶员区域温度在 297K ~ 298K 之间,分布均匀且无较大温差,正驾驶和副驾驶温度分布、速度分布基本一致,座椅上部分速度在 0.05m/s ~ 0.15m/s 之间,座椅下部分速度在 0.15m/s ~ 0.55m/s 之间,这是因为出风口在正对座椅下方的地板上;观察员区域温度控制在 296K ~ 296.6K,温度场分布均匀波动很小,速度控制在 0.05m/s ~ 0.25m/s,满足 ASHRAE 中规定的人体热舒适性要求^[7]。

3 结论

本文对某型民用客机的驾驶舱建立了数理模型,对其气流组织进行了数值计算,选择三个观察点并基于 PS 模型评价各工况的优劣,得到以下结论:

(1)在保证人员新鲜空气量和电子设备散热的前提下,驾驶舱总送风量的最佳设计值为 $0.08\text{m}^3/\text{s}$ 。

(2)在总送风量为 $0.08\text{m}^3/\text{s}$ 的工况下,左、右侧操纵台出风口出风量占总风量的 40% 时,可获得

最优的人员满意率,此时天花板出风速度为 1.05m/s,侧面出风速度为 2.4m/s。

(3)对侧面送风方向进行了计算分析,最优工况为侧面出风方向垂直于出风口。

(4)计算了最佳工况下驾驶员界面和观察员界面的温度场和速度场,其结果完全满足人体热舒适性的标准,为民用飞机驾驶舱气流组织的设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 袁建新. 单通道民用飞机客舱气流组织数值仿真研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2015, 1: 11 - 14.
- [2] 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.
- [3] 孙贺江, 安璐, 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, 2014, 47(4): 298 - 303.
- [4] Gunther G, Bosbach J, Julien P. Experimental and numerical simulation of idealized aircraft cabin flows[J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(7): 563 - 573.
- [5] Singh A, Hosni MH, Horstman RH. Numerical simulation of airflow in an aircraft cabin section[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108(1): 1005 - 1013.
- [6] 陈鹏. 客机驾驶舱供风系统的初步设计与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [7] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environment Condition for Human Occupancy [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2004.

(上接第 18 页)

5 结论

以某民用飞机载荷筛选为例采用组合包线法从 60 多万种总载荷工况中筛选出各个部件的严重工况;结合经典法共筛选出 500 多种纵向严重工况, 100 多种侧向严重工况, 相比只用单值筛选方法(100 多种纵向情况, 70 多种侧向情况)更完善、合理, 不会遗漏部件局部严重情况;组合包线法已经经过多轮载荷设计, 目前采用的严重载荷筛选法已经得到适航当局审批, 可应用到民用飞机工程设计中。2014 年 12 月, 通过咨询国外技术专家, 了解到

空客载荷设计目前也应用了组合包线筛选法, 其中, 机翼选取了 4 ~ 5 个站位, 机身选取了 10 ~ 20 个站位, 平尾垂尾选取了 1 ~ 2 个站位。这说明采用的载荷筛选法已经与国际接轨。

参考文献:

- [1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第九册: 载荷、强度和刚度[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [2] 中国民用飞机航空局. CCAR-25 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.