大型客机驾驶舱气流热仿真及舒适性评价

王黎静 王昭鑫 何雪丽

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：驾驶舱的空气速度场和温度场直接影响驾驶员的热舒适和工效，是驾驶舱结构和环境控制系统设计中考虑的重要内容. 对B737-800驾驶舱进行全尺寸三维建模，以高空夜航工作情况为例，采用商用CFD(Computational Fluid Dynamics)软件Fluent计算该驾驶舱的流场和温度场，再用平均温度评价指标和热环境综合评价指标PMV(Predicted Mean Vote)来对驾驶舱进行温度环境客观评价，并采用问卷调查法对飞行员进行驾驶舱内部空气流速和温度舒适度的主观评价. 数值仿真结果与主观评价结果都得出B737-800驾驶舱在高空夜航时基本处于舒适的环境，除躯干和脚部由于偏凉而略感不舒适. 数值仿真结果与客观评价结果的一致性，验证了大型客机驾驶舱气流热仿真的准确性.

关 键 词：数值仿真；速度场；温度场；评价

中图分类号：V 223

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)12-1436-04

Airflow thermal simulation and comfort evaluation of commercial airliner

Wang Lijing Wang Zhaoxin He Xueli

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Air velocity field and temperature field of cockpit will affect the pilots' thermal comfort and performance directly, which are important parts need to be considered in the design of cockpit structure and environmental control system. After full-size three-dimensional model of B737-800 cockpit being established, a commercial computational fluid dynamics(CFD) software Fluent was used to calculate the flow field and temperature field of cockpit in high-altitude night work. Then the average temperature evaluation and the predicted mean vote(PMV) on the thermal sensation scale were used to evaluate cockpit temperature environment. A questionnaire was given to the pilot to obtain cockpit air flow and temperature comfort subjective evaluation. The results of simulation and subjective evaluation both indicate the B737-800 cockpit is a comfortable environment at night at high altitude. Besides, the trunk and legs feel a little uncomfortable as a result of slight coolness. The agreement of simulation results and evaluation results validates the accuracy of the cockpit airflow thermal simulation.

Key words: numerical simulation; velocity field; temperature field; evaluation

客机驾驶舱可视为一个有内热源的有限封闭空间，舱内空调供气在其中作强迫对流换热，将舱内热源(如驾驶员、电子设备等)的发热带出舱外，在驾驶员周围形成适宜的微环境. 飞机驾驶舱内空气流动和传热研究，涉及飞机舱室空调通风、人体热舒适性、能源合理利用、改善空气品质及降低气流噪音等，因此是飞机设计和使用部门非常关注的问题之一，也是人机环境系统工程领域一个重要的研究问题.

波音和空客公司在客机的设计研发前期，均

收稿日期：2010-07-31

基金项目：国家973基金资助项目(2010CB734103)

作者简介：王黎静(1965—)，女，山东郓城人，副教授，wanglijing@buaa.edu.cn.

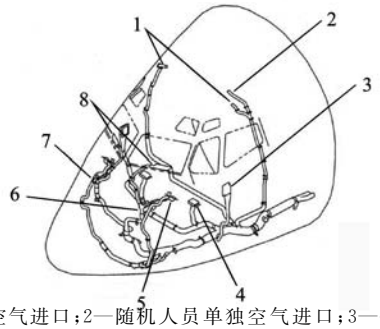
对驾驶舱空气流动和传热进行了数值模拟[1-3],初步验证设计方案和指导后续工作.但在客机驾驶舱数值模拟的相关文献中,数值模拟的适用范围、计算条件和计算方法等都未给出,所以有必要对此进行研究.

本文对 B737-800 客机驾驶舱内空气的流动和传热进行数值模拟,进而得出以数值模拟结果等为计算依据的驾驶舱空气环境客观评价,并通过飞行员主观评价对数值模拟结果及客观评价进行验证.数值模拟计算按照 B737-800 客机的实际飞行情况,选择高空航、第三观察者不在驾驶舱内的工作情况进行研究,总结出数值模拟、客观评价与主观评价的关系,以供开展此类飞机驾驶舱初期的数值模拟设计、环境评价研究.

1　物理和数学模型

1.1　物理模型

图 1 给出了 B737-800 驾驶舱进气口的分布简图.驾驶舱空气出口位于脚蹬上部、中央仪表板后面.图 2 给出了 B737-800 驾驶舱及两位飞行员的结构简图.气流经位于驾驶舱内壁面的各进气口进入驾驶舱,在驾驶舱内做强迫对流换热后经飞行员脚上部、仪表板后部被抽出去.



1—顶部空气进口;2—随机人员单独空气进口;3—侧壁空气进口;4—座椅下部空气进口;5—机长单独空气进口;6—机长脚部空气进口;7—副驾驶脚部空气进口;8—风挡空气进口.

图 1　驾驶舱内各空气出口的位置示意图

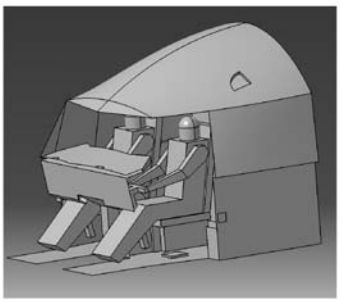


图 2　驾驶舱简化结构示意图

为保证仿真计算的准确性,建模时驾驶舱和飞行员的几何模型尽可能与实际情况保持一致,特别是进气口的位置尺寸和几何尺寸.忽略舱壁连接处缝隙,即不考虑驾驶舱空气的泄露.本文研究 B737-800 的飞行状态是夜间高空巡航,飞行高度 1×10^4 m、飞行速度 0.785 Ma,此时飞机对驾驶舱提供 300 kg/h 的供气分配.

1.2　数学模型

本文假设驾驶舱内空气为不可压缩、牛顿粘性流体,流动为稳态紊流.考虑人体代谢热、设备发热,但不考虑驾驶舱内辐射换热的影响.驾驶舱内空气流动和传热的控制方程可描述如下:

连续性方程

$$\frac{\partial\rho}{\partial\tau}+\nabla\cdot(\rho U)=0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial\tau}+\nabla\cdot(\rho U\times U)=\nabla\cdot p+\nabla\cdot[\mu_{\mathrm{eff}}U+(\mu_{\mathrm{eff}}\nabla\cdot U)^{\mathrm{T}}] \tag{2}$$

式中,μ_{eff}为有效粘性系数;p 为修正压力.

能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial\tau}+\nabla\cdot(\rho UT)=\nabla\cdot(\lambda\nabla T)+S_{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中,λ 为导热系数;S_{T} 为源项.

湍流动能 k 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial\tau}+\nabla\cdot(\rho Uk)-\nabla\cdot\left(\frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma_k}\nabla k\right)=G-\rho\varepsilon \tag{4}$$

湍流动能耗散率 ε 方程

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial\epsilon}+\nabla\cdot(\rho U\varepsilon)-\nabla\cdot(\frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma_\varepsilon}\nabla\varepsilon)=\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon1}G-C_{\varepsilon2}\rho\varepsilon) \tag{5}$$

式中,k 为紊流动能;ε 为紊流动能耗散率;$C_{\varepsilon1}$,$C_{\varepsilon2}$,σ_k,σ_ε 为常数;G 为紊流动能生成项.

上述方程为空气流动和传热的基本方程,由于假设的驾驶舱内的空气为稳态紊流,故方程中的时间项就没有意义,且流体的密度 ρ 为定值.

1.3　边界条件

驾驶舱内流动和传热边界主要包括空气进口、空气出口、飞行员服装附近表面和各个壁面.各种飞行条件下旅客机舱内空气的温度、湿度、气流速度都应保持在允许范围或规定值[4].故根据飞行和环境状况驾驶舱进气温度取为 288 K,气流流量取为 300 kg/h,各进口气流量分别取为:顶部空气进口 58.5 kg/h;侧壁空气进口 45 kg/h;座椅下部空气进口 21 kg/h;脚部空气进口 6 kg/h;风挡空气进口 19.5 kg/h.驾驶舱壁面的流动边界

条件采用固体壁面无滑移边界条件，应用标准壁面函数决定靠近壁面附近流体的流动行为. 采用试验测试的驾驶舱壁面温度数据作为驾驶舱壁面边界条件(本文根据驾驶舱分区给定壁面温度).

1.4 网络生成和求解策略

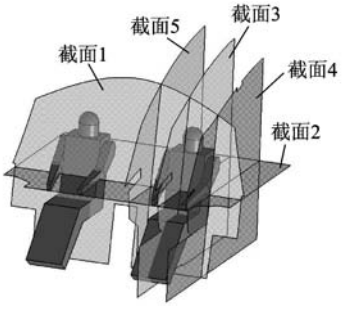
本文采用非结构化四面体网格[5]划分计算区域. 非结构化网格对复杂外形具有很强的适应能力和很好的灵活性，便于网格的自动生成、自适应处理及并行计算实施. 节点数约 45 万个，体单元数约 158 万个. 为了获得更多驾驶舱各壁面边界层信息，对各壁面进行了附面层控制和网格控制，对各进气口和飞行员附近需要关注的区域进行网格局部加密.

采用标准 k-ε 模型封闭湍流控制方程，控制微分方程离散时采用有限容积法，计算中能量方程和动量方程采用二阶迎风格式离散，连续方程、k 和 ε 方程采用一阶迎风格式离散. 采用 RMS (Root Mean Square)残差值对速度、压力的监测值判断是否收敛，计算迭代了 1 600 步，至 800 步时 RMS 到达 1×10^{-4}，速度和压力监测值趋于稳定，获得较理想的结果.

2 仿真结果及分析

2.1 驾驶舱分析截面的选择

数值模拟中，主、副驾驶员周边空气流动和传热的情况相同，所以只对主驾驶员周围空气进行分析. 选取如图 3 所示 5 个截面对数值模拟结果进行分析.

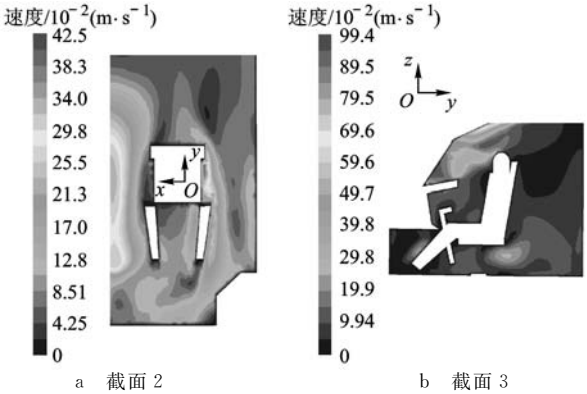


截面 1—主驾驶员正面，距主驾驶员前胸垂直距离约5～8 cm；截面 2—与驾驶舱地板平行，距地板约 80 cm；截面 3—过主驾驶员正中心、与飞机左右对称面平行；截面 4—主驾驶员左侧与截面 3 平行，距主驾驶员左侧表面的垂直距离约 4 cm；截面 5—主驾驶员右侧与截面 3 平行，距主驾驶员右侧表面的垂直距离约 4 cm.

图 3 驾驶舱分析截面示意图

2.2 速度场分析

300 kg/h 供气状态下，图 4 给出对应 5 个截面的速度等值线图. 在主驾驶员身体附近的区域，截面 1～5 上最大速度分别为 0.43，0.45，0.35，0.66 和 0.36 m/s. 除截面 4 上人体附近最大风度超过 0.5m/s，其余人体附近区域的截面上风速都符合飞行员舒适标准. 截面 4 上人体附近风速过大原因是 B737-800 驾驶舱侧壁空气进口处没有安装导流板，进气直接吹向驾驶员腰部，导致腰部空气速度超过指标.

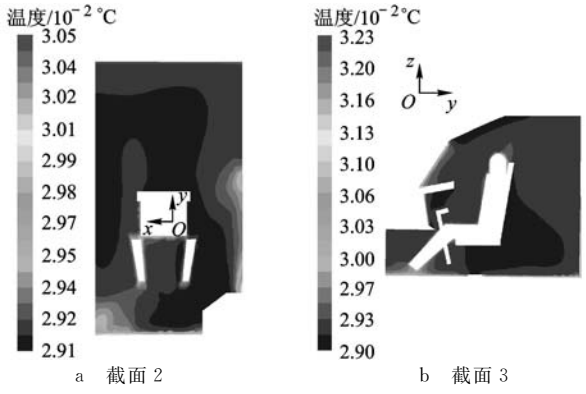


a 截面 2 b 截面 3

图 4 部分截面速度等值线图

2.3 温度场分析

图 5 为部分截面温度等值线图.



a 截面 2 b 截面 3

图 5 部分截面温度等值线图

在主驾驶员身体附近的区域，截面 1～5 平均温度分别为 18.8，18.9，19.1，19.3 和 18.9 ℃；最高温度分别为 19.9，20.1，20.1，19.8 和 19.8 ℃；最低温度分别为 17.5，17.9，16.9，16.6 和 17.4 ℃. 数值仿真计算出飞行员身体附近区域的 5 个截面的平均温度值，均在大型客机驾驶舱空气温度设计要求最佳值 18～22℃ 之间；且截面 1～5 的温差分别为 2.4，2.2，3.2，3.4，2.4 ℃，基本符合驾驶舱温度不均匀度小于 3 ℃ 的要求，截面 3，4 温差稍大的原因和侧壁空气进口没加导流板的设计有关.

3 客观评价

根据供气量为 300 kg/h 时的速度场和温度

场的计算结果,采用预测平均热感觉指标(PMV,Predicted Mean Vote)[5]对该驾驶舱的环境进行评价.

$$\begin{aligned}\text{PMV 值}=&(0.303\mathrm{e}^{-0.036M}+0.028)\{M-W-\\&3.05\times10^{-5}[5\,733-6.99(M-W)-P_a]-\\&0.42(M-W-58.15)-\\&1.7\times10^{-5}M(5867-P_a)-\\&0.0014M(34-t_a)-\\&3.96\times10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-\\&(t_r+273)^4]-f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)\}\end{aligned}\tag{6}$$

式中,M 为人体能量代谢率;W 为机械功;P_a 为人体周围空气的水蒸气分压力;t_a 为人体周围空气温度;f_{cl} 为穿衣面积系数;t_{cl} 为衣服外表面温度;t_r 为房间的平均辐射温度;h_c 为对流换热系数.

PMV 代表了大多数人对同一环境的冷热感觉,反映了某一环境的热舒适度.PMV 热舒适评价指标综合考虑了环境与人的 6 个因素,包括:人体活动情况(新陈代谢率)、衣着情况(服装热阻)、空气温度、空气相对湿度、空气流速、平均辐射温度.PMV 指标与上述 6 个因素之间的计算关系式见文献[6].PMV 值与热感觉的对应关系如表 1 所示.

表 1　PMV 值与热感觉的对应关系

热感觉	热	暖	稍暖	舒适	稍凉	凉	冷
PMV 值	+3	+2	+1	0	−1	−2	−3

由驾驶舱空气流动和传热数值仿真得到人体各节段邻近服装表面的环境温度(19.90 ℃)和空气流速(0.28 m/s),然后再结合飞行员活动情况、衣着情况.结果代入计算式,可得相应的 PMV 值,见表 2.

表 2　PMV 评价指标计算结果

工作状态	按数值仿真模拟结果计算所得结果	PWV 值		
		稍凉	舒适	稍暖
300 kg/h 供气	−0.415	−1	0	1

由表 2 得结论:模拟结果得出的 PMV 值介于−1 和 0 之间,即在稍凉和舒适感觉之间.这与仿真结果的分析相吻合,即飞行员对驾驶舱整体感觉舒适,但飞行员身体局部位置偏凉.

4　飞行员主观评价

通过直接测定飞行员对驾驶舱热环境的主观感受,与数值模拟和客观评价做对照补充,验证数值模拟和客观评价的有效性.

对 B737-800 飞行员做该机型夜间高空巡航时热舒适性的主观评价.邀请国航某飞行大队中的 10 位 B737-800 飞行员(B737-800 人均飞行时数:7 000 h;性别:男;年龄:29～37 岁)进行主观评价问卷调查,调查飞行员在 B737-800 飞机高空夜航时的热环境评价[6].结果汇总可提供表 3～表 8 所示的答复分布情况(下列所有表中的数字均代表人数).

表 3　热感觉主观评价数据统计表

部位	凉	稍凉	不冷不热	暖	稍暖
头部		2	5	1	2
躯干	3	4	3		
手部	1	1	7		1
脚部	3	1	5		1

表 4　情感主观评价数据统计表

部位	舒适	稍不舒适	不舒适	很不舒适
头部	7	3		
躯干	2	4	2	2
手部	8	2		
脚部	4	3	1	2

表 5　热偏好主观评价数据统计表

部位	凉一点	稍凉一点	无变化	稍暖一点	暖一点
头部	1	3	4	2	
躯干			4	6	
手部		1	8	1	
脚部		2	3	4	1

表 6　个体可接受性主观评价数据统计表

是	不是
6	4

表 7　个体耐受度主观评价数据统计表

完全可耐受	稍难耐受	相当难耐受	很难耐受	无法耐受
6	4			

表 8　评价结果数据分析表

部位	飞行员感觉	飞行员感情评价	飞行员热偏好
头部	不冷不热	舒适	无变化
躯干	稍凉	稍不舒适	稍暖一点
手部	不冷不热	舒适	无变化
脚部	不冷不热	舒适	稍暖一点

根据数据的数字特征及其分布的统计学特性进行评价结果数据分析[7].

60%的飞行员将热环境判定为在个体水平上是可接受的.60%的飞行员认为驾驶舱环境完全可耐受,40%认为环境是稍难耐受.可以得出结论,B737-800 飞行员在高空夜航时总体上处于舒适的环境,躯干和脚部由于偏凉而略感不舒适.该结论与数值模拟结果和客观评价结论相一致.

(下转第 1452 页)

的性能也有所提高，误差均值降为补偿前的29%，误差标准差降为补偿前的53%.

4 结束语

MEMS陀螺随机漂移是随时间缓慢变化的、无规律的近似随机过程，是影响姿态测量系统精度的主要因素之一，有必要加以补偿. 通过在线建立随机漂移的ARMA模型和机动角速率模型，进行基于虚拟噪声补偿理论的自适应Kalman滤波，对随机漂移和角速率进行实时估计. 试验结果表明，文中采用的系统模型和滤波算法能够适应姿态测量系统动态应用的需要，且使姿态解算精度有了较大程度的提高.

参考文献（References）

[1] 王新龙，马闪. 光纤陀螺随机漂移误差补偿适用性方法[J]. 北京航空航天大学学报，2008，34(6)：681－685
Wang Xinlong，Ma Shan. Applicability compensation method for random drift of fiber optic gyroscopes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2008，34(6)：681－685(in Chinese)

[2] 杨叔子，吴雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 2版. 武汉：华中理工大学出版社，2007：46－138
Yang Shuzi，Wu Ya. Time series analysis in engineering application[M]. The Second Edition. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology Press，2007：46－138 (in Chinese)

[3] Box G E P，Jenkins G M，Reinsel G C. Time series analysis：forecasting and control[M]. Beijing：Post & Telecom Press，2005：287－298

[4] Piet D J，Jeremy P. The ARMA model in state space form [J]. Statistic & Probability Letters，2004，70(8)：119－125

[5] 周洪仁，敬忠良，王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京：国防工业出版社，1991：135－153
Zhou Hongren，Jing Zhongliang，Wang Peide. Maneuvering target tracking [M]. Beijing：National Defense Industry Press，1991：135－153 (in Chinese)

[6] 邓自立. 自校正滤波理论及其应用：现代时间序列分析方法[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003：179－185
Deng Zili. Adaptive filtering theory and application：method of modern time series analysis[M]. Harbin：Harbin Institute of Technology Press，2003：179－185 (in Chinese)

[7] 邓自立，许燕. 基于Kalman滤波的白噪声估计理论[J]. 自动化学报，2003，29(1)：23－31
Deng Zili，Xu Yan. White noise estimation theory based on Kalman filtering[J]. Acta Automatica Sinica，2003，29(1)：23－31(in Chinese)

（编　辑：赵海容）

（上接第1439页）

5 结　论

1）本文完成B737-800驾驶舱空气流动和传热的数值模拟，得出的数值模拟结果符合大型客机驾驶舱空气设计要求，且与飞行员主观评价结果相一致；

2）根据数值模拟结果求得驾驶舱PMV指标，该客观评价得出B737-800驾驶舱处于舒适区的范围内，与飞行员主观评价结果相一致；

3）根据以上两个结论，得出本文驾驶舱的模型设计、简化与驾驶舱边界条件、计算条件的处理均为合理的，本文的驾驶舱数值模拟方法和客观评价方法可运用于此类机型驾驶舱的初期设计研究中.

参考文献（References）

[1] Aboosaidi F，Warfield M J. Numerical analysis of airflow in aircraft cabins[R]. SAE-91-1441，1991

[2] DeJager A W，Lytle D B. Commercial airplane air distribution system development through the use of computational fluid dynamics[R]. AIAA-1992-0987，1992

[3] Singh A，Hosni M H，Hortsman R H. Numerical simulation of airflow in an aircraft cabin section[J]. ASHRAE Transactions，2002，108(1)：1005－1013

[4] 寿荣中，何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2006：7
Shou Rongzhong，He Huishan. Aerocraft environment control system[M]. Beijing：Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press，2006：7(in Chinese)

[5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2004：28－47
Tao Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an：Xi'an Jiaotong University Press，2004：28－47(in Chinese)

[6] 谢东，王汉青. 不同气流组织下夏季空调室内热舒适环境模拟[J]. 建筑热能通风空调，2007，27(3)：66－69
Xie Dong，Wang Hanqing. Room thermal comfort simulation of different air conditioning in summer [J]. Building Energy & Environment，2007，27(3)：66－69(in Chinese)

[7] GB/T 18977—2003　热环境人类工效学、适用主观判定量表评价热环境的影响[S]
GB / T 18977—2003 Thermal environment of ergonomics，using the subjective evaluation scale determine the effective of thermal environment[S](in Chinese)

（编　辑：李　晶）