

文章编号: 1000-6893(1999)-增-0S21-03

# 人机环境系统中 CFD 的研究

林国华<sup>1</sup>, 袁修干<sup>2</sup>, 杨燕生<sup>2</sup>

(1 中国科学院力学研究所 LNM 开放室, 北京 100080)

(2 北京航空航天大学 人机环境系统工程研究所, 北京 100083)

## CFD APPLICATIONS IN THE MMES INDUSTRY

L N Guo-hua, YUAN Xiu-gan, YANG Yan-sheng

(1 LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 Institute of Man-Machine-Environment System Engineering, Beijing Univ. of Aero. and Astro., Beijing 100083, China)

**摘要:** 采用 CFD 技术对人机环境系统中的一个典型问题——飞机空调座舱的舒适性进行了数值模拟, 建立了相应的数值模拟方法, 扩展了原有算法。数值模拟的成功, 充分展示了 CFD 技术在人机环境系统中的作用与可能带来的效益。

**关键词:** 人机环境系统; CFD; 控制方程; 贴体网格; 数值模拟

**中图分类号:** V 211.3; V 245.3 **文献标识码:** A

**Abstract:** This article presents an introduction to the CFD technique, with a special emphasis on the MMES industry. The CFD procedure is quite discussed. The body-fitted coordinate makes the CFD technique easier to solve MMES-related problems. Some examples further demonstrate the applications of CFD in the MMES industry and the benefits from CFD technology.

**Key words:** MMES; CFD; governing equations; body-fitted coordinate; numerical simulation

CFD 自 60 年代初期诞生以来, 已广泛应用于与流动和传热有关的各个领域。显然, 人机环境系统也可以采用 CFD 技术解决许多工程问题。本文将 CFD 技术应用到人机环境系统中, 对其中的一个典型问题——飞机空调座舱的舒适性进行了数值模拟。从环控的角度分析, 空调座舱的舒适性主要与舱内的温度、速度和湿度有关。对于相同的环控系统, 可以因为气流组织的不同, 而导致不同的环控效果及舒适性; 另一方面, 良好的气流组织可以充分利用系统的制冷功率, 有利于能源的节约, 对于航空器宝贵的动力来说, 是极有吸引力的。因此, 座舱内气流组织已成为环控工程一个重要研究课题。早先的研究通常是采用试验的方法, 费用大、周期长; 本文在现有的 CFD 基础上, 建立了空调座舱这种结构复杂的三维空间的舒适性的数值模拟方法, 从而在人机环境系统中引入了一个新的、有效的研究手段。

### 1 数值方法

根据 Patankar 和 Spalding 观点, 流动和传热的控制方程(包括基本方程和湍流模型)都可以写

成一个通用的微分方程<sup>[1,2]</sup>。在笛卡尔直角坐标系, 三维通用输运方程的矢量形式为

$$\nabla \cdot (\rho V \phi) - \nabla \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) = S \phi$$

对流项                      扩散项                      源项

由于空调座舱结构复杂, 在笛卡尔直角坐标系下描述不方便。因此, 需要把控制方程从笛卡尔直角坐标系变换到一般曲线坐标系。本文采用张量分析, 建立了笛卡尔直角坐标系到一般曲线坐标系的坐标变换公式, 得到的流体力学张量形式的通用输运方程为<sup>[3,4]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x^i} (\sqrt{g} \rho \phi^i) - \frac{\partial}{\partial x^i} (\sqrt{g} \Gamma^{\phi, ji} \frac{\partial \phi}{\partial x^j}) = \sqrt{g} S \phi$$

因此, 对于坐标变换

$$x = x(\xi, \eta, \zeta), y = y(\xi, \eta, \zeta), z = z(\xi, \eta, \zeta)$$

可以导出  $\xi\eta\zeta$  曲线坐标系下通用输运方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \phi}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho \phi}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho \phi}{\partial \zeta} = \\ & \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\alpha}{J} \Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\beta}{J} \Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \frac{\gamma}{J} \Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right) + JS^{\psi} + JS^{\phi}(\xi, \eta, \zeta) \end{aligned}$$

上式是计算空间上的守恒型方程, 式中的各项仍然保持了笛卡尔坐标中相应各项的意义。S<sup>ψ</sup> 是由于网格非正交性引入的, 系数 ψ(包括下标)反映了局部坐标偏离正交性的程度。S<sup>ψ</sup> 值一般较



小, 在计算中可以取上一轮的变量的值, 因而把它从扩散项中分离出来, 归入源项中。

三维贴体网格生成, 本文采用 Thompson 等人提出的 TTM 法<sup>[5]</sup>, 即求解三维的 Poisson 方程

$$\left. \begin{aligned} \xi_{,x} + \xi_{,y} + \xi_{,z} &= P(\xi, \eta, \zeta) \\ \eta_{,x} + \eta_{,y} + \eta_{,z} &= Q(\xi, \eta, \zeta) \\ \zeta_{,x} + \zeta_{,y} + \zeta_{,z} &= R(\xi, \eta, \zeta) \end{aligned} \right\}$$

将上述方程变换为计算空间的拟线性椭圆方程

$$\alpha_{11}r\xi\xi + \alpha_{22}r\eta\eta + \alpha_{33}r\zeta\zeta + 2(\alpha_{12}r\xi\eta + \alpha_{31}r\xi\zeta + \alpha_{23}r\eta\zeta) = -J^2(Pr\xi + Qr\eta + Rr\zeta)$$

其中:

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \alpha_{ij} = \sum_{m=1}^3 \beta_{mi}\beta_{mj}, \beta_{ij} \text{ 是矩阵 } M \text{ 的第 } (i, j)$$

元素的余子式,  $M = \begin{bmatrix} x_\xi & x_\eta & x_\zeta \\ y_\xi & y_\eta & y_\zeta \\ z_\xi & z_\eta & z_\zeta \end{bmatrix}$ , Jacobian 行列式  $J = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\xi, \eta, \zeta)} = |M|$

利用控制容积积分法导出计算域上的离散方程。在计算域上采用交错网格系统, 将通用输运方程对控制容积积分, 并采用 Spalding 等人提出的混合差分格式<sup>[1,2]</sup>, 最终的离散方程可以表示为

$$A_P \phi = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + A_H \phi_H + A_L \phi_L + B$$

式中:  $A, B$  为离散方程中的系数和常数项;  $\phi$  为通用因变量;  $P, E, W, N, S, H, L$  为主节点及东西南北南上下节点。对上述代数方程组采用 TDMA 法进行求解, 在给定的初始条件和边界条件下, 可以求出计算区域内的速度场和温度场。

有限空间内人的热舒适感主要建立在人与周围环境正常的热交换上。人与周围环境的热交换主要有: 对流换热、辐射换热和蒸发散热 3 种类型。由新陈代谢所产生的热量和人与周围环境交换的热量之间的平衡关系为

$$\Delta q = \frac{H}{A_{Du}} - q_c \pm q_r \pm q_s$$

本文采用 PMV 指标作为有限空间内的热环境舒适性评价的标准。PMV 指标的英文全称是: Predicted Mean Vote——预测平均热感觉指标。根据 P. O. Fanger 假设, 由上述方程及其它相应方程, 可给出 PMV 关系式为<sup>[4]</sup>

$$PMV = [0.107 \exp\left(-0.049 \frac{M}{A_{Du}}\right) + 0.027] \Delta q$$

上述热舒适指标是环境空气速度分布和温度分布的函数, 在已知分布下, 它可以计算人在多种衣着和活动状态下对热环境的舒适感觉。目前, 国内一般认为 PMV 值在 -1 至 +1 范围内均可视为热舒适环境。

## 2 算例

对某型机 3 种不同的气流组织方案进行了数值计算(方案 1 是风挡送风, 座位下排风; 方案 2 = 方案 1 + 两侧送风; 方案 3 = 方案 2 + 驾驶员头部后上方送风), 根据数值模拟的结果, 分别计算了 3 种方案的舒适性指标 PMV 值, 由此可以判断 3 种方案的舒适性程度。图 1 是本文生成的某

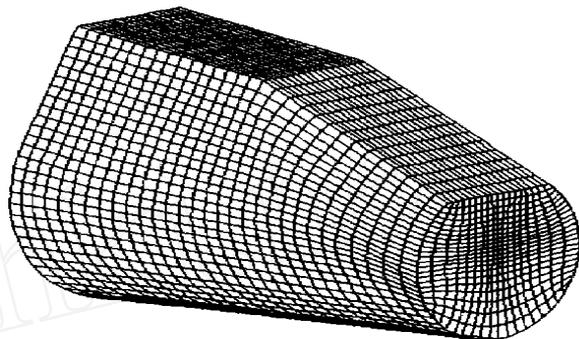


图 1 某型机空调座舱的三维贴体网格

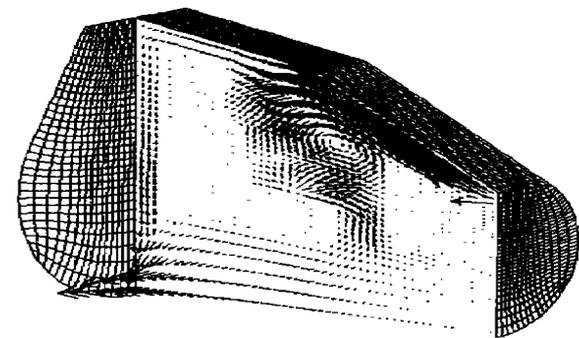


图 2 方案 2 的三维速度分布示意图  
三维速度分布示意图, 为了能方便分析各方案的速度分布, 本文给出了各方案的 1 个典型截面上的速度分布(图 3)。方案 1 取得是通过驾驶员对称面的截面速度分布; 方案 2 取得是通过驾驶员腰部的截面速度分布; 方案 3 取得是通过驾驶员右肩的截面速度分布。在上述速度分布和温度分布下, 本文计算了 3 种方案的舒适指标 PMV 值(见图 4), 由图可以看出, 气流分配的愈均匀, 空调座舱的舒适性愈好。

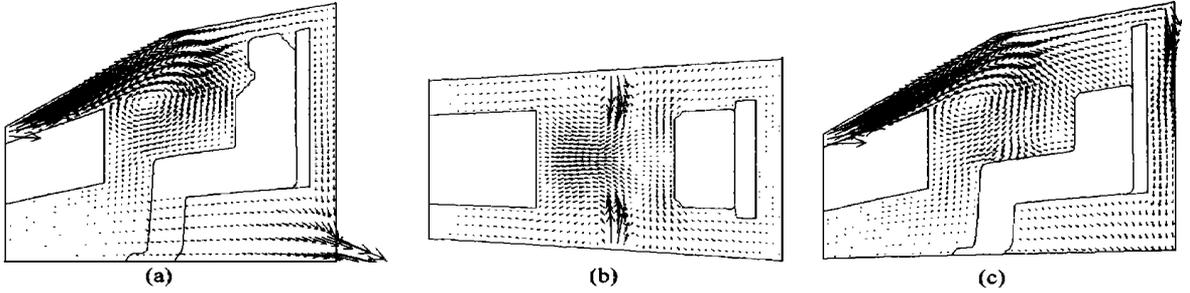


图3 各方案典型截面的速度分布

(a) 方案 1, 驾驶员对称面; (b) 方案 2, 驾驶员腰部; (c) 方案 3, 驾驶员右肩

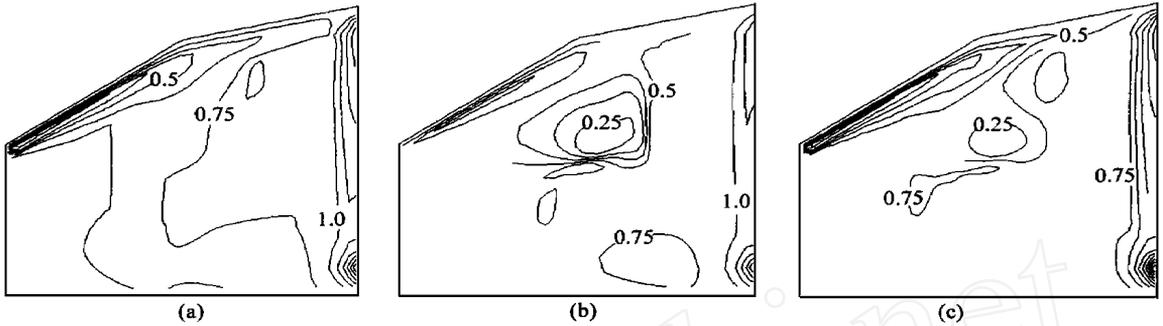


图4 各方案的舒适性指标 PMV 值

(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3

### 3 结 束 语

CFD 技术在人机环境系统的应用才刚刚开始, 掌握这门技术, 对人机环境系统来说将是一次质的飞跃。本文首先介绍了 CFD 技术的实现过程, 并采用 CFD 技术对人机环境系统中的一个典型问题——飞机空调座舱的舒适性进行了数值模拟, 评价了 3 种气流组织方案的舒适性。数值模拟的成功, 一方面表明本文所建立的舒适性数值模拟方法是成功的; 另一方面也证实了 CFD 技术在人机环境系统中的应用及可能带来的效益。

### 参 考 文 献

[1] 陶文铨 数值传热学[M] 西安: 西安交通大学出版社, 1988

[2] Patankar S V. 传热与流体流动的数值计算[M] 张政译 北京: 科学出版社, 1984

[3] 王甲升. 张量分析及其应用[M] 上海: 上海机械学院出版社, 1982

[4] 林国华 空调座舱流体流动和传热的数值研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998

[5] Thompos J F, Warsi Z U A, Mastin C W. Numerical grid generation, foundation and applications[M] North-Holland, New York, 1985

#### 作者简介:



林国华 1966 年 9 月生, 中国科学院力学研究所博士后。先后在西北工业大学、北京航空航天大学获得了学士、硕士和博士学位。涉及专业有: 航空动力、热能工程、人机与环境工程等。现在研究方向: 数值计算与图像处理。联系电话: (010) 62545533-2154 e-mail: lingh@lm.mech.ac.cn