

载人航天器座舱空气龄的数值模拟

哈尔滨工业大学 梁 珍[☆] 张吉礼 陆亚俊

摘要 建立了一个包含乘员、仪器设备和简单生活设施在内的载人航天器座舱物理模型,采用房间零方程湍流模型模拟了座舱工作区的空气龄分布。送风模式为舱顶两侧 45°斜送风,风口布置采用了连续对称布置、间隔对称布置和间隔交错布置 3 种方案。模拟结果显示,连续对称布置会产生分叉现象,不建议采用;间隔交错布置优于间隔对称布置,并在送风速度为 1.1 m/s 左右时换气效率最高;在舱壁附近有乘员长期工作的情况下,乘员呼吸区的空气龄偏大,建议采用个性化送风来解决此问题。

关键词 载人航天器座舱 空气龄 送风模式 风口布置 数值模拟

Numerical simulation on air age in manned spacecraft cabins

By Liang Zhen[★], Zhang Jili and Lu Yajun

Abstract Develops a physical model of manned spacecraft cabin which contains astronauts, apparatus and simple living installations, and numerically simulates the air age distribution in workplaces by use of a zero-equation turbulence model. Air is supplied by air outlets installed in the two top corners with 45 degree, and air outlets are collocated with continuous symmetry, alternative symmetry and alternative stagger modes. Simulation results show that bifurcation phenomenon would appear at continuous symmetry mode and this mode is not recommended, that the alternative stagger mode is better than the alternative symmetry mode and when outlet air velocity is about 1.1m/s the air exchange efficiency is the highest, and that if astronauts work near cabin wall for longer time, the air age around them would be older and a personalized ventilation system is recommended.

Keywords manned spacecraft cabin, air age, air supply mode, air outlet collocation, numerical simulation

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

神舟六号飞船延长了我国神舟系列飞船停留太空的时间,且航天员首次离开轨道舱进入座舱工作和休息,这标志着我国载人航天事业进入一个崭新的时代。要实现载人航天器在太空更长时间的停留,为宇航员创造适合长时间生活的舱内环境就显得尤为重要,这也正是载人航天器中的环境控制与生命保障系统所要完成的任务,而这其中非常重要的一点是航天员所呼吸的空气是否是清洁和新鲜的,所以对舱内空气清洁程度和新鲜程度的研究就显得非常必要。空气龄正是可以较好地反映这两个特性的参数。

空气龄是指空气质点自进入房间至到达室内

某点所经历的时间 τ 。空气从进风口进入室内后的流动过程中,不断掺混污染物,空气的清洁程度和新鲜程度不断下降。因此,空气龄小,预示着到达该处的空气可能掺混的污染物少。用空气龄作为判断通风效果的参数比传统的换气次数更有意义。研究载人航天器座舱内的空气龄,就是研究如何合理地设计通风系统使送入座舱内的清洁和新

①☆ 梁珍,女,1971 年 12 月生,在读博士研究生,讲师
150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院 2651 号
(0451) 86283867
E-mail: liangzhen71@163.com

收稿日期:2006-07-24

一次修回:2006-12-12

二次修回:2007-04-03

鲜的空气到达航天员的呼吸区时空气龄最小。当然不可能去研究某一质点的空气龄,而只能研究某一微小区域内各空气质点空气龄的平均值,即局部平均空气龄 τ_p 。假设该区域所有质点的空气龄存在一个频率分布函数 $f(\tau)$,则

$$\tau_p = \int_0^{\infty} \tau f(\tau) d\tau \quad (1)$$

全室平均空气龄 $\bar{\tau}$ 为全室各点的局部平均空气龄的平均值,即

$$\bar{\tau} = \frac{1}{V} \int_V \tau_p dV \quad (2)$$

式中 V 为房间体积。

与空气龄相关的定量描述空气进入和污染物排出快慢的参数还有局部平均滞留时间 τ_r ,它是指房间某一微小区域内气体离开房间前在室内的滞留时间。全室平均滞留时间则为全室各点的局部平均滞留时间的平均值,等于全室平均空气龄的 2 倍,用 $\bar{\tau}_r$ 表示。理论上空气在室内的最短滞留时间(称为房间通风名义时间常数) τ_n 等于房间体积

$$\frac{\partial}{\partial x}(u\tau_p) + \frac{\partial}{\partial y}(v\tau_p) + \frac{\partial}{\partial z}(w\tau_p) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial z}\right) + 1 \quad (3)$$

式中 u, v, w 分别为 x, y, z 三个坐标轴方向的速度; Γ 为扩散系数。从式(3)可以看出,空气龄与流动和扩散系数有关。方程形式与连续性方程、动量方程、湍流模型方程相同。有了空气龄输运方程,就可以采用数值计算方法对空气龄进行求解。

1 问题描述

1.1 物理模型

研究对象为一个 $8.7 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ 座舱工作区,如图 1 所示,工作区内有一张饭桌,一台健

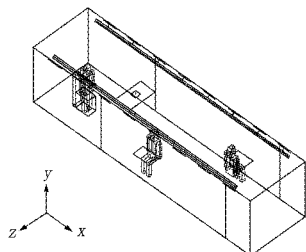


图 1 座舱工作区示意图

身器,两个工作台,乘员 3 名,2 人在舱壁附近的工作台前坐着工作,1 人在健身器上锻炼身体。具体布置见图 2。座舱上下舱壁和端头按绝热考虑,左右舱壁处的仪表柜向舱内的散热量为 $1\,000 \text{ W}$,其

与送风量的比值,也就是换气次数的倒数。 τ_n 与 $\bar{\tau}_r$ 的比值称为换气效率 η_n ,它是评价气流分布特性和换气效果优劣的指标。

目前,研究空气龄的方法主要有两种:示踪气体法和数值算法。示踪气体法是用测量示踪气体的浓度变化来确定局部平均空气龄,主要的实验方法有:脉冲法、上升法和下降法,方法不同,得到的浓度表达式也不同,但不论哪种方法,要得出某处的空气龄,都要测出该处示踪气体浓度随时间变化的关系,一般测量时间较长,费用较高。北京航空航天大学的庄达民等人研究了客舱内多室情况下采用示踪气体测量空气龄的计算公式和求解方法^[1];清华大学李先庭等人应用示踪气体法测量得到了 8 种强制通风工况下实验小室中各测点的浓度衰减曲线,并计算出了各测点的空气龄^[2]。

数值计算方法是根据示踪气体的质量守恒方程,得到其质量浓度输运方程,然后根据示踪气体法,可以推导出空气龄的输运方程^[3]:

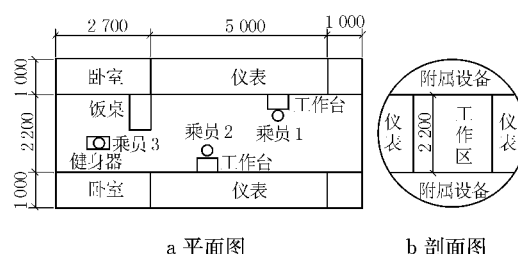


图 2 座舱平面剖面图

他壁面也按绝热考虑。坐着工作的乘员散热、散湿量按轻度劳动考虑,作锻炼的乘员按重度劳动考虑,具体散热、散湿量可参见文献^[4];工作区上方两侧有照明灯管,总散热量为 400 W ;生活设施及洗手和烘干衣物散湿量为 1.8 kg/h 。

舱内设计参数为温度 25°C ,相对湿度 50% 。通风采用定风量系统,通过计算确定送风量为 $960 \text{ m}^3/\text{h}$,当热湿负荷发生变化时调整送风参数来满足舱内要求。根据一些学者的研究,舱顶两侧 45° 斜送风的送风模式在换热能力和创造舒适性方面的综合性能较好^[5],故采用此种送风方式,送风口的布置采用风口连续对称布置(方案 1)、风口间隔对称布置(方案 2)和风口间隔交错布置(方案 3)3 种方案,见

图 3。为方便比较,每个送风口的外形尺寸均为 $500\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,有效面积系数为 0.8。这样,方案 1 布置 32 个送风口,有效风口面积为 0.64 m^2 ,方案 2,3 各布置 16 个风口,有效风口面积为 0.32 m^2 。回风口布置在舱下两侧,有效尺寸为 $800\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。假设载人航天器处于飞行状态,微重力水平为 $1 \times 10^{-6} g_0$ (g_0 为地面自由落体加速度)。

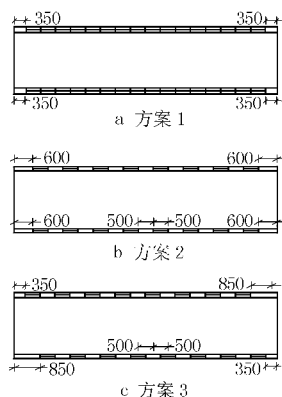


图 3 送风口布置图

1.2 数学方程

气体连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

气体动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \rho_c g_i \beta (T - T_c) + F_i \quad (5)$$

气体能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{c_p \mu}{Pr} + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_T \quad (6)$$

传质方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_i') = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{i,i} + R_i \quad (7)$$

式(4)~(7)中 u_i 为速度, m/s ; i, j 为方向, $i, j = 1, 2, 3$; ρ 为密度, kg/m^3 ; p 为静压, Pa ; μ 为动力黏度, $\text{kg/(m} \cdot \text{s)}$; ρ_c 为参考密度, kg/m^3 ; g_i 为自由落体加速度, m/s^2 ; β 为体积热膨胀系数, K^{-1} ; T 为温度, K ; T_c 为参考温度, K ; F_i 为除体积力外的其他源项; h 为比焓, kJ/kg ; c_p 为比定压热容, $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$; Pr 为普朗特数; μ_t 为湍流动力黏度, $\text{kg/(m} \cdot \text{s)}$; Pr_t 为湍流普朗特数; S_T 为广义热源; m_i' 为组分 i' 的质量分数; $J_{i,i}$ 为组分 i' 在 i 方向单位面积上的扩散量, $\text{kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$; R_i 为单位容积内组分 i' 的产生率, $\text{kg/(m}^3 \cdot \text{s)}$ 。

2 研究工具和方法

本文采用 CFD 软件 Airpak 来模拟座舱的空气龄。

2.1 湍流模型选择

目前,对航天器座舱内环境进行数值模拟的研究还不是很多。在以前的研究中,有的将座舱内气流流动假设为层流^[5-6]。然而,当微重力水平为 $(1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3}) g_0$ 时,气流的 Ra 的数量级约为 $10^4 \sim 10^7$, Re 的数量级约为 10^4 ,舱内通风对流换热问题应该是常温、低速、符合 Boussinesq 假设、且自然对流基本消失的湍流流动。文献[7-9]采用标准 $K-\epsilon$ 模型结合壁面函数法研究了空间站实验舱的气流流动。

本文模拟中采用房间零方程湍流模型,该模型认为湍流动力黏度 μ_t 正比于流体密度、当地速度和距壁面最近之距离,比例系数根据直接数值模拟的结果拟合而得。

$$\mu_t = 0.03874 \rho u L \quad (8)$$

式中 L 是距壁面最近之距离;0.03874 是比例系数。

航天器座舱内因微重力存在而导致自然对流极大削弱甚至消失,即舱内的空气流动为强迫对流。文献[10]采用房间零方程模型进行了强迫对流的模拟,取得了较好的效果。文献[11]的研究也表明,房间零方程模型对等温流动(自然对流消失)能快速获得模拟结果,并能保证一定准确度。

2.2 在微重力条件下模拟方法的验证

微重力下的实验非常困难,难以找到有效的可对比的实验数据。根据建立在相似理论基础上的热缩比技术,文献[5]提出了“温度-湿度-材料-努塞尔数-舍伍德数保持技术”,并通过理论分析、数值模拟和模型实验表明,1:5 的实验模型在保持温度和材料不变的情况下,可以消除地面模拟装置中的重力影响,即常重力下尺寸为 l 的模型的实验结果与微重力下尺寸为 $5l$ 的模型的模拟结果具有可比性。具体技术详见文献[5]。

根据该研究结果,如果能找到地面上常重力下某模型的实验数据,就可以建立一个 5 倍于其尺寸的物理模型作为研究对象,进行微重力下的模拟研究,而后与地面实验数据进行比较,以验证模拟方法的可行性。

Sandberg 等人采用脉冲法、上升法、下降法测

量了如图 4 所示小室中点 1, 2, 3, 4 和出风口处的空气龄^[12]。文献[3]针对相同的物理模型, 利用数值方法计算出了这几点的平均空气龄。可以对尺寸为该小室 5 倍的小室进行微重力下的数值模拟, 模拟结果与文献[12]的实验结果和文献[3]的计算结果进行对比, 以验证本文空气龄模拟计算方法的有效性。

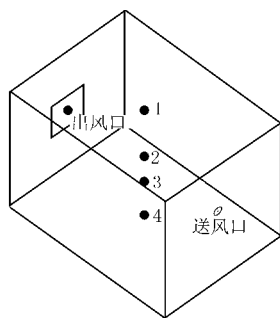


图 4 实验小室

表 1 列出了实验及模拟得到的空气龄 τ_p 与房间通风名义时间常数 τ_n 的比值。

表 1 模拟结果与文献结果比较

	τ_p / τ_n			相对偏差/%	
	文献[12]	文献[3]	本文	与文献[12]	与文献[3]
点 1	1.08	1.137	1.25	15.7	9.9
点 2	0.85	1.051	0.96	12.9	8.7
点 3	1.15	1.146	1.13	1.7	1.4
点 4	1.16	1.146	1.13	2.6	1.4
出风口	1.00	1.023	1.05	5.0	2.6

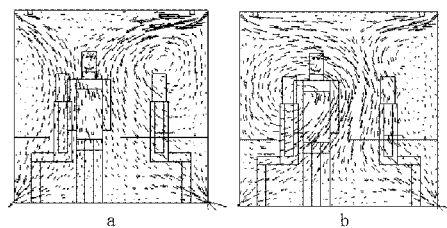
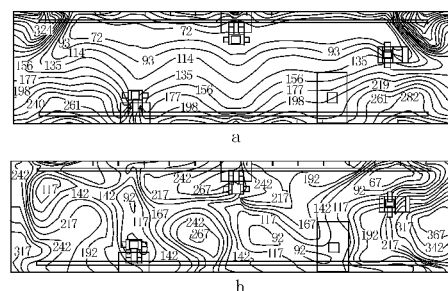
从表 1 可以看出, 本文的模拟结果在点 3, 4 和出风口与文献较符合, 在点 1, 2 也基本符合, 共同的特点都是点 2 的空气龄最小。说明本文模拟微重力下载人航天器座舱工作区的空气龄所采用的工具和方法是可行的。

3 模拟结果分析

3.1 送风方案分析比较

在总送风量和其他参数保持不变的情况下, 对 3 种不同的送风口布置方案进行了模拟。模拟结果显示方案 2 和方案 3 模拟结果稳定, 无论以什么初始条件开始计算, 结果都基本相同, 而方案 1 的气体流动及相关的热力学参数随初始条件不同而发生变化, 出现了不稳定的现象。图 5 给出了方案 1 在不同的初始流场下 $x=3.5\text{ m}$ 截面的不同速度矢量场。图 6 显示的是方案 1 在不同的初始流场下 $y=1.28\text{ m}$ (乘员坐着工作时口部的大体高度) 截面的不同空气龄分布。

从图 5, 6 可以看出, 在风口连续对称布置的情

图 5 方案 1 在不同初始流场下 $x=3.5\text{ m}$ 截面的速度矢量场图 6 方案 1 在不同初始流场下 $y=1.28\text{ m}$ 截面的空气龄分布 (图中数值为空气龄, 单位为 s)

况下出现了某一侧气流占优的情况, 而且哪一侧占优并不确定, 而是随着初始流场的变化而不同, 同时带来包括空气龄在内的所有参数的不稳定, 这是由于射流的 Coanda 效应引发的流动多解现象, 称为分叉现象^[13]。从图 6 可以看出, 图 6a 所示的初始流场下空气龄分布上侧好下侧差, 不过主要区域的空气还比较新鲜, 但在图 6b 所示的初始流场下空气龄分布就比较差, 在主要区域空气龄出现了较大值。既然方案 1 有分叉解存在, 气流组织不稳定, 空气龄及换气效率也无法达到预期的设计要求, 故不推荐这种风口连续对称布置的送风方案。

下面主要分析方案 2 和方案 3 的模拟结果。图 7 给出了 $y=1.28\text{ m}$ 截面空气龄的分布。从图中可以看出, 主要特点都是中间区域小, 舱壁附近大, 基本呈现对称特点。根据此特点, 采用这两种送风方式时乘员应尽量在中间区域活动。

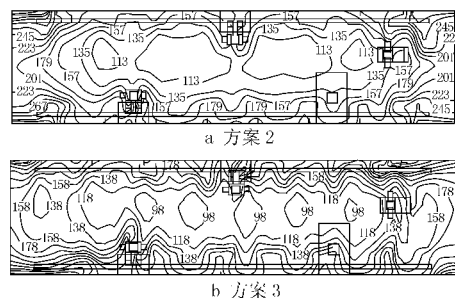
图 7 方案 2 和方案 3 在 $y=1.28\text{ m}$ 截面的空气龄分布

表 2 列举了工作区几个截面的空气龄数据以及全舱平均空气龄和换气效率以便作进一步比较。

表 2 方案 2 和方案 3 数据比较

	方案 2	方案 3
τ_p/s		
$y=1.28\text{ m}$ 截面	90~415	78~371
$y=1.53\text{ m}$ 截面	81~404	65~366
$y=1.70\text{ m}$ 截面	70~396	55~375
全舱平均空气龄/s	168	160
换气效率	0.467	0.491

从表 2 可以看出,方案 3 换气效率略高于方案 2,且在几个主要截面的空气龄都小于方案 2。综合分析模拟结果,可以看出方案 3 优于方案 2,即风口间隔交错布置好于风口间隔对称布置。

3.2 风口间隔交错布置方案的进一步优化

在方案 3 布置方式下,乘员呼吸到的空气新鲜度如何呢?图 8 给出方案 3 在 $x=4.3\text{ m}$ 截面的空气龄分布,这个截面是本文设定的一个乘员工作的位置。从图中可以看出,由于乘员的遮挡,在其面前的空气最不新鲜,空气龄最大达 314 s(图中未标出)。该结果提示我们,如果某一位置有长期工作的乘员,可以在其面前增加一个个性化送风口,保证乘员呼吸到新鲜的空气。

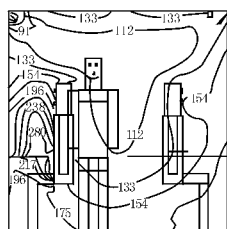


图 8 方案 3 $x=4.3\text{ m}$ 截面的空气龄分布(图中数值单位为 s)

如果在保持方案 3 单个风口尺寸不变的情况下改变风口个数,即改变总出风口面积(出风速度),将对换气效率产生怎样的影响呢?笔者在保持总送风量不变的条件下通过调整风口个数,模拟了不同出风面积(出风速度)下的多种工况,图 9 显示了换气效率随送风速度变化的情况。

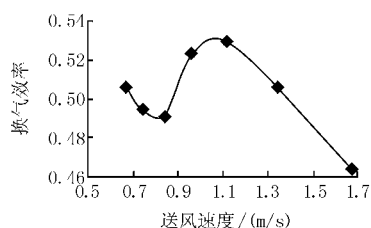


图 9 换气效率和送风速度的关系

从图 9 可以看出,当送风速度在 1.1 m/s 左右

时换气效率最高,为 0.53,这个风速对应的是 12 个送风口。虽然计算结果也显示,随着风口增多,换气效率也有增长的趋势,但不会超过 0.53,且风口个数增加会增加系统质量,所以,选择风口个数使其出风速度在 1.1 m/s 是比较合适的。

4 结论

4.1 利用热缩比技术作为微重力与常重力环境的比较桥梁,将微重力下的模拟结果与其他学者常重力下的实验及模拟结果进行对比,提出了一种可以验证微重力下模拟结果的思路。

4.2 采用侧上 45° 斜送风,当风口连续对称布置时会出现分叉解,不建议采用。

4.3 风口间隔交错布置优于风口间隔对称布置,是一种较理想的布置方案,并且在送风速度等于 1.1 m/s 左右时换气效率最高。

4.4 在舱壁处有乘员长期工作的情况下,乘员呼吸区的空气龄偏大,可以采用个性化送风来解决此问题。

参考文献

- [1] 庄达民,袁修干. 示踪气体法求客舱通风量和空气龄的方法[J]. 航空学报, 1999, 20(增刊): 78-80
- [2] 李先庭,王欣,李晓峰,等. 用示踪气体方法研究通风房间的空气龄[J]. 暖通空调, 2001, 31(4): 79-81
- [3] 李先庭,江亿. 用计算流体动力学方法求解通风房间的空气年龄[J]. 清华大学学报, 1998, 38(5): 28-31
- [4] 陆亚俊,马最良,邹平华. 暖通空调[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002
- [5] 任建勋. 空间站舱内流动和传热的地面模拟及实验研究[D]. 北京:清华大学, 1998
- [6] 刘云龙. 空间站舱内流动和传热的地面模拟及数值分析[D]. 北京:清华大学, 1997
- [7] 徐小平,钟奇,范含林,等. 大型航天器舱内流动与传热传质集成分析[J]. 空间科学学报, 2004, 24(4): 295-301
- [8] 郑忠海. 空间站舱内气流分布特性数值模拟与热舒适性评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005
- [9] 吴宏,李娜,梁新刚,等. 空间站实验舱进出风口大小影响的数值研究[J]. 航天医学与医学工程, 2001, 14(4): 268-271
- [10] Chen Q, Xu W. A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation [J]. Energy and Buildings, 1998, 28(2): 137-144
- [11] 赵彬,李先庭,彦启森. 用零方程湍流模型模拟通风空调室内的空气流动[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2001, 41(10): 109-113
- [12] Sandberg M, Sjberg M. The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms [J]. Building and Environment, 1983, 18(4): 181-197
- [13] 姬朝玥. 空间站舱内通风及分叉现象的研究[D]. 北京:清华大学, 1997