

大型航天器舱内流动与传热传质集成分析

徐小平 钟 奇 范含林 李劲东

(中国空间技术研究院总体设计部 北京 100086)

摘 要

在低流速、常温、层流假定下,利用数值模拟方法,实现了大型航天器返回舱、轨道舱内流动与传热传质分析。模拟结果表明,冷凝干燥组件、净化通风组件、风扇、热控风机和其他仪器设备对航天器舱内空气流动具有不同的影响;通过分析空气流场对舱内温度、空气湿度、二氧化碳浓度的影响,探讨了评价流场的质量和能量输运作用;从总体角度提出,通过一定的布局,设计出具有环流的全局流场的同时,具有流动与扩散相协调的局部流场,建立了统一流场的设计新思路。

关键词 数值模拟; 流场分析; 航天器

1 引言

随着载人航天器系统越来越复杂,热控分系统的设计改变了传统的卫星设计,而从总体的角度考虑废热收集、利用与排散问题,热载分布及其变化关系复杂的热控制问题,以及各分系统之间的复杂热耦合问题。为此,国内外提出了具有更高层次的航天器热管理概念^[1],从系统总体的角度研究所涉及的热量和能量传递问题。热管理研究的一个重要方面就是对载人航天器内部空气进行统一的流场分析、统一的温湿度分析。航天器内部空气流场对湿度、温度、二氧化碳浓度分布具有非常重要的影响。

由于受自然对流的影响,地面实验很难模拟研究舱内空气的流动。采用数值模拟方法可以完全不受此影响,但复杂结构内部的流动模拟是当前数值模拟的一个难点,特别是对于湍流模拟等^{[2],[3]}。根据目前所具有的数值模拟的软硬件条件,本文在低流速、常温、层流假定下,对某大型航天器轨道舱和返回舱内部空气流动以及传热传质进行数值模拟,分析影响流场的各因素,并探讨了对统一流场的设计和评价。

2 模型分析与边界条件处理

2.1 模型分析

由于航天器舱内部的设备很多,需要进行合理地简化和筛选。航天器返回舱、轨道舱结构和设备如图1所示。其中,返回舱简化为圆柱、球台、圆锥台等组合体,轨道舱简化为圆柱和圆锥台等组合体,舱内其他设备简化为体积等效的长方体或圆柱体。其中,航天员每舱按一人考虑,返回舱航天员处于中间座椅位置,轨道舱航天员位于该舱中间位置。

2003-12-03 收到原稿, 2004-05-08 收到修定稿

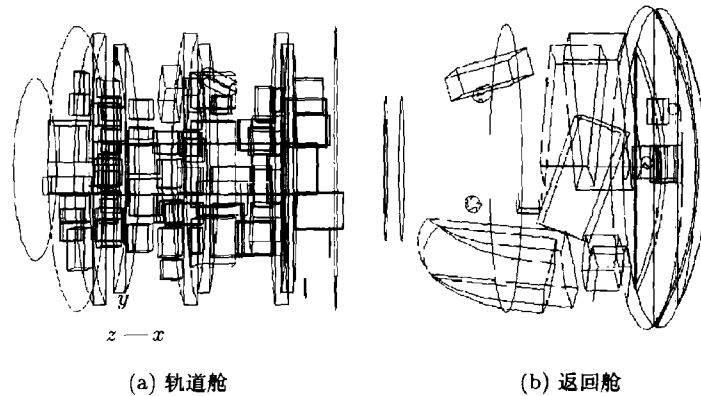


图1 返回舱和轨道舱及其内部数值模拟设备三维结构图

Fig.1 Numerical simulating structure of orbital module and descent module

在轨失重条件下,舱内部无自然对流,故温度场不影响舱内的流场.计算模型为三维稳态工况,舱内平均 R_e 数约为 300,通风组件、冷凝器出入口 R_e 数为 1000—3000,风扇附近的 R_e 数为 7000—15 000,无法确切判别舱内部流动是否为湍流,抑或舱内有层流、湍流及过渡区 3 种,本模拟过程假定为层流流动.连续方程、动量方程、能量方程和浓度方程如下:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_{U_i}. \quad (2)$$

式中, U 为空气速度, p 为空气压力, $i = 1, 2, 3$, j 为 Einstein 求和约定, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, S_U 为动量源项.

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j H)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_{\text{eff}} \left(\frac{\partial H}{\partial x_j} \right) \right] + S_H. \quad (3)$$

式中, S_H 为能量源项, H 为静焓, $H = C_p T$, $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$, $H(T=0) = 0$, $\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i C - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) = S_c. \quad (4)$$

式中, Γ 为扩散系数, S_c 为浓度源项. 其中,相对湿度定义为绝对湿度与当地温度下的饱和湿度之比. 计算应用 Fluent 商用软件进行.

2.2 边界条件分析及其简化

舱内仪器设备可以简化为风扇、空气出入口物体和一般物体 3 类. 航天器舱内风扇简化为无限薄圆面,在计算中,处理为计算域内风扇位置处压力的一个不连续面,该面上压力有跳变,其他参数保持连续不变. 该类物体包括座舱风扇 a 、 b 、 c 、 d ,陀螺风扇,应答机风扇,其压力跳变 Δp 分别为 1.5 Pa, 1.5 Pa, 1.5 Pa, 1.5 Pa, 17.25 Pa, 5.29 Pa.

舱内空气出入口物体边界条件处理为恒定流速,流动方向都垂直于出口或入口平面. 该类物体包括冷凝干燥组件、净化通风组件、气体净化装置、热控风机. 其中,冷凝干燥

组件 e 、 f 入口空气流速分别为 0.33 m/s 、 0.66 m/s , 出口流速为 1.41 m/s 、 1.56 m/s , 净化通风组件 g 、 h 的入口空气流速分别为 0.30 m/s 、 0.19 m/s , 气体净化装置出口空气流速均为 0.067 m/s , 热控风机入口空气流速为 0.08 m/s , 出口空气流速为 2.04 m/s . 舱内其他物体、舱结构和人体的边界条件处理为无滑移壁面.

温度的边界条件为: 设备空气出口温度给定为入口处温度, 入口温度梯度为零. 其他设备简化为固体区域, 与空气区域耦合, 固体区域的热源大小为对应设备单位体积上的发热功率.

湿度边界条件为: 冷凝干燥组件的出口和人体头部为给定湿度, 其他出入口和设备的边界的湿度梯度为零. 水汽的扩散系数为 $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

3 数值模拟结果与分析

3.1 流场评价

通常对流场的评价有平均流速和速度不均匀系数等指标, 其中全场速度不均匀系数定义为舱内全场速度的均方根偏差与平均速度之比^[4]. 计算结果表明, 返回舱、轨道舱空气平均流速分别为 0.22 m/s 和 0.17 m/s , 全场速度不均匀系数分别为 0.66 和 0.9 . 返回舱和轨道舱内部分截面上空气流动的模拟结果如图 2—图 6 所示.

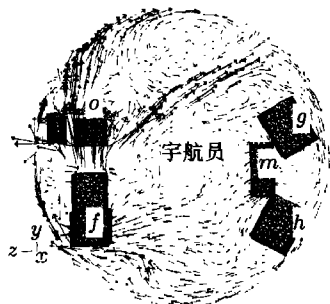


图 2 轨道舱冷凝干燥组件附近垂直于航天器轴线平面内的空气流动
(f : 冷凝干燥组件, g 、 h : 空气净化装置, m : 净化通风组件, o : 环控检测装置)

Fig.2 Air flow in plane near the condenser vertical axes of spacecraft

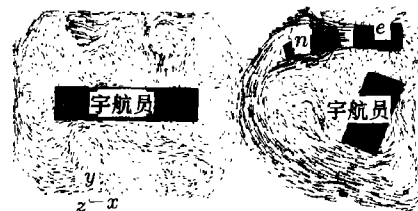


图 3 过航天器轴线的平面内空气流动
(e : 冷凝干燥组件, n : 仪表板)

Fig.3 Air flow in plane in axes of spacecraft

3.2 热力组件对流场的共同影响

热力组件包括冷凝干燥组件、气体净化装置和净化通风组件等.

由于冷凝干燥组件的气流量较大, 所以, 舱内空气的基本流型受其影响很大. 可以看出, 轨道舱内冷凝干燥组件所形成的沿航天器周向的空气环流.

图 2 所给出了受冷凝干燥组件和净化通风装置、净化通风组件所共同影响下的流场. 可以看出, 气体净化装置 h 的出流方向与冷凝干燥组件 f 所形成的流动一致, 出口空气流动很流畅, 相反, 气体净化装置 g 出口的空气流动则比较混乱. 轨道舱净化通风组件 m 的空气入口同样受冷凝干燥组件 f 大流速的影响, 使该空气入口对流场的影响很小.

图 3 给出了过航天器轴线的平面内空气流动. 由图 3 可以看出, 返回舱内的冷凝干燥组件 e 所形成的空气环流.

3.3 风扇和热控风机对流场的影响

过航天器轴线垂直于返回舱风扇 a 、 b 平面内的空气流动如图 4 所示. 可以看出, 风扇 b 所形成的气流可以到达宇航员附近, 而风扇 a 所形成的气流由于受其他气流的影响, 未能直接流向宇航员. 风扇 a 、 b 对流场所形成不同的作用是受返回舱冷凝干燥组件 e 在舱内所形成环流的不同影响, 所以, 调整风扇 a 、 b 可以协调返回舱的流场.

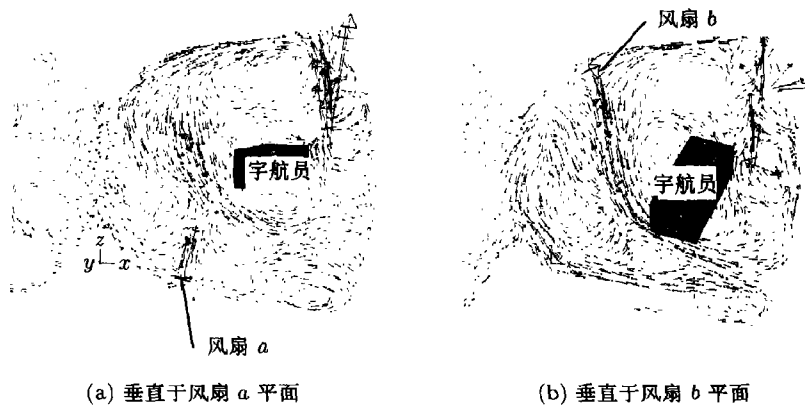


图 4 过轴线分别垂直于风扇 a 和 b 返回舱平面内的空气流动
Fig.4 Air flow in plane vertical fan a and fan b

过轴线垂直于返回舱陀螺风扇、应答机风扇平面内的空气流动如图 5 所示, 陀螺风扇和应答机分别吹向陀螺组件和应答机, 由于其风速较大, 可以看到风扇在返回舱所形成的连续流线.

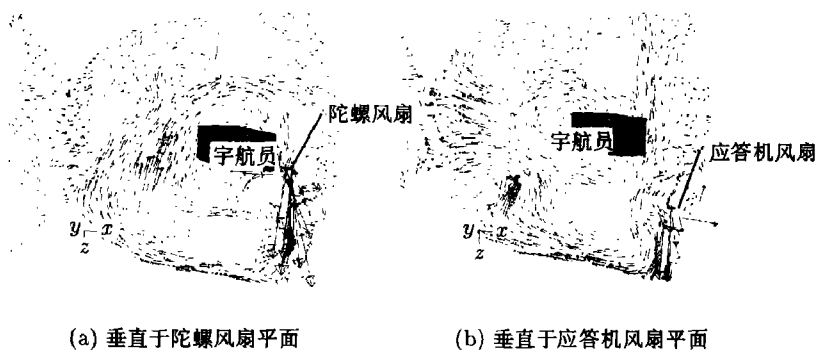
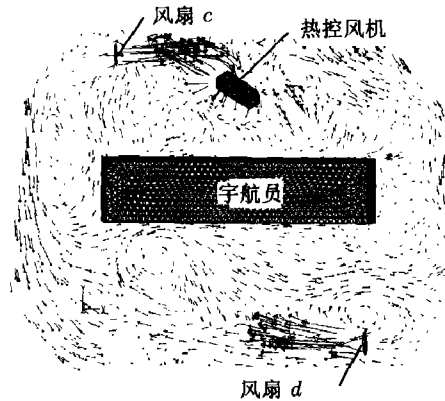


图 5 过轴线垂直于返回舱陀螺风扇、应答机风扇平面内的空气流动
Fig.5 Air flow in plane vertical fans of gyroscope and responder beacon

轨道舱风扇 c 、风扇 d 和热控风机对空气流动的影响如图 6 所示, 由图可以看出风扇 c 在轨道舱内形成明显的有序流动, 而风扇 d 与热控风机所形成的相对混乱流动. 所以, 特定的风扇布置可以形成所需的流场分布.

图 6 过轴线垂直于风扇 *c* 和 *d* 轨道舱平面内空气流动Fig.6 Air flow in plane vertical fan *c* and fan *d*

3.4 舱内其他仪器设备对流场的影响

舱内其他物体和舱体结构对流场的影响主要表现在引起流动的绕流和回流方面。如图 3 所示, 仪表板 *n* 对冷凝干燥组件 *e* 出口空气所形成的绕流, 由图 2 也可以看出, 轨道舱环控检测装置 *o* 对该冷凝干燥组件的绕流作用。

舱内物体对流动的阻挡作用使得舱内部分区域流速较低。返回舱流量较大的冷凝干燥组件 *e* 在整个返回舱内形成了很大的环流, 而在轨道舱内, 由于仪器安装板把轨道舱分成了 4 段, 冷凝干燥组件 *f* 只在该舱 1/4 段内周向形成环流, 所以导致轨道舱的空气平均流速低于返回舱。

3.5 流场对温度、浓度分布的影响分析

由于航天器内部各仪器设备对流场都有不同的影响, 通过分析计算, 合理布置各仪器设备, 从航天器热管理的高度, 建立统一的舱内流场, 以实现设备的低能耗和高效率是非常重要的。流场在航天器内主要有三方面的影响作用。

(1) 流场对温度场的影响。例如, 图 2 中轨道舱冷凝干燥组件空气出口的气流量很大, 正对出口处的仪器对气体有很大的绕流作用, 同时, 该设备与空气的换热很强。

(2) 流场对空气中二氧化碳浓度场的影响。比如, 图 2 气体净化装置 *h* 出口的洁净空气位于冷凝干燥组件所形成的环流上, 则洁净空气很容易随环流到达舱内各处, 从而可以减少对通风组件的送风作用的依赖, 提高流场的质量输运效率。

(3) 流场对空气中湿度的影响。从前面的流场分析可以看出, 返回舱冷凝干燥组件 *e* 在整个舱内形成了环流, 而轨道舱冷凝干燥组件 *f* 只在舱 1/4 段内形成周向的环流, 所以返回舱干燥的空气可以更容易到达舱内各部分。

舱内不同的设备为实现温度、湿度、二氧化碳浓度控制等不同的要求, 都对空气流动有或多或少的的影响, 从而, 某一设备为实现其功能, 所产生的对流场的影响, 必然导致其他设备在流场中不同的工作效果, 因此, 需要从总体的角度在航天器舱内建立统一的流场, 以使流场高效率、低能耗实现能量和质量的输运。

3.6 统一场设计与评价

由于航天器密封舱内部空气流场对舱内空气和设备的温度分布, 舱内空气的二氧化

碳浓度和湿度分布有重要的影响,所以必须对流场进行一定的设计,同时提出对流场作用评价理论,以指导流场的设计.在对所形成的流场评价方面有文献使用了全场平均速度,全场速度的不均匀系数,局部平均速度和局部不均匀系数等.事实上,从实现流场的功能和要求出发还可以提出更客观、更丰富的评价方法和评价准则.由于设备以及设备的布局对流场的影响是不同的,返回舱内的冷凝干燥组件和轨道舱内的仪器安装板影响了整个流场,而其他设备影响了局部流场.所以,在流场设计之前需对设备和舱内结构从考虑影响流场的角度出发对其分类.然后,根据对流场的影响类别的不同对流场进行设计.

首先,进行流场的全局设计,考虑能影响整个流场的设备和结构,以实现洁净、低湿度、合适温度的空气到达舱内各个区域,也即设计舱内的主流动,犹如设计城市的环线或形成地球的大气环流,使得环流能到达舱内几乎所有的地方.比较图 1、2 中返回舱和轨道舱不同的环流,可以看出返回舱内的环流到达了舱内大部分区域,而轨道舱内的环流则只在舱 1/4 段内形成了环流.当然,从全场平均流速这个指标也可以看出,虽然形成舱内环流的冷凝干燥组件的流量是一样的,但返回舱的平均流速比轨道舱的要高,同时,返回舱的全场速度不均匀系数比轨道舱的要小.

其次是流场的局部设计,考虑影响局部流场的设备和结构.局部设计除了要满足宇航员附近低流速的要求外,更需要解决温度、湿度等源附近流动与扩散的协调作用.这是因为无论是湿度源、二氧化碳源还是热源,其附近由于是固体壁面,往往流速很低,湿度、二氧化碳、热量向周围输运很大程度上依赖于扩散,如果要想实现有效的输运过程,除了采取提高源附近的流速的手段外,还可以通过协调流动的输运作用与扩散的输运作用,来明显改善由浓度源(或热源)到空间的输运.流场的局部设计可使全场内的所有气体都能参与主流动,并能实现调节控制方便准确,适应性强,效率高等优点.

通过以上对流场的全局环流设计和局部源附近流动与扩散的协调设计,可以有效实现流场的功能和要求.

4 结 论

应用数值模拟的方法,实现了航天器返回舱、轨道舱内空气流场分析.模拟结果指出,冷凝干燥组件由于流量大,在各自的舱内形成了一定的环流,而气体净化装置、净化通风组件、风扇、热控风机由于流量小,只在舱内环流的影响下对航天器舱内空气流场有不同扰流作用.不同的流场对舱内温度场、空气湿度场、二氧化碳浓度场有不同的影响,因此,需要通过从全局和局部两个方面评价流场是否形成了有效的全局环流,和局部源附近流动与扩散的协调作用,从总体角度建立统一的流场,以实现舱内温度、湿度、二氧化碳浓度控制等不同要求.

参 考 文 献

- [1] Guo Zengyuan, Liang Xingang, Zhang Xinrong. Thermal management of space station. *Chin. Sci. Bull.*, 2001, **48**:1403—1408. in Chinese (过增元, 梁新刚, 张信荣. 空间站热管理. 科学通报, 2001, **48**:1403—1408)
- [2] Karniadakis G E. Simulating turbulence in complex geometries. *Fluid Dyn. Res.*, 1999, **24**:343—362
- [3] Patera A D. A spectral method for fluid dynamics: Laminar flow in a channel expansion. *J. Comp. Phys.*, 1984, **54**:468—453
- [4] Wu Hong, Li Na, Liang Xingang, Guo Zengyuan. Numerical study of the effect of size of inlet and outlets of ventilation system in experimental space station cabin. *Space Med. Med. Eng.*, 2001, **14**(8):268—271. in Chinese (吴宏, 李娜, 梁新刚, 过增元. 空间站实验舱进出风口大小影响的数值研究. 航天医学与医学工程, 2001, **14**(8):268—271)

INTEGRATED FLOW HEAT AND MASS TRANSFER ANALYSIS IN LARGE SPACECRAFT

XU Xiaoping ZHONG Qi FAN Hanlin LI Jindong

(Department of Spacecraft System Design, Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100086)

Abstract

The air flow field in a large spacecraft was analyzed by the method of numerical simulation under conditions of low velocity, room temperature and laminar flow's assumption. Effects of the condenser, air cleaner, fans and other objects in the spacecraft on the air flow field were observed, and corresponding influences of flow field to distributions of temperature, humidity and carbon dioxide concentration inside the spacecraft were presented. Accordingly, the transport of mass and energy by airflow was evaluated and a theory of whole-flow-field-design in the large spacecraft was brought forward. In this theory, a novel design to construct the whole flow field with circumfluent and the partial flow field cooperating with diffusion of mass and heat was emphasized, from the whole system point of view. That was, equipments in spacecraft must be arranged in specified place to result in circumfluence in the whole flow field, and the partial flow field was designed to cooperate with diffusion of heat, water and carbon dioxide source. Comparisons of some parameters e.g. average velocity and velocity un-uniformity coefficient of flow, were carried out between the recoverable module and the orbital module of the spacecraft, and the results well approved the novel theory above.

Key words Numerical simulation, Flow analysis, Spacecraft