

# 空间站密封舱空气龄分布数值模拟及试验研究

裴一飞, 苏新明

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 介绍了空气龄理论, 阐述了空气龄在空间站密封舱内空气品质评价方面的作用, 对国内外在空间站密封舱内空气龄数值模拟、空气龄分布验证试验的研究进展进行了综述, 并给出了对空间站密封舱进行空气龄数值模拟及试验研究的建议。

**关键词:** 空间站; 密封舱; 空气龄; 数值模拟; 验证试验

**中图分类号:** V416.5      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2012)03-0013-06

## Numerical Simulation and Validation Test of Air Age in Pressurization Room of Space Station

PEI Yi-fei, SU Xin-ming

(Beijing Institute of Spacecraft Environmental Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The theory of air age was introduced. The effect of air age in pressurization room air quality evaluation of space station was discussed. Research progress of numerical simulation and validation test of air age distribution in pressurization room of space station domestic and abroad was summarized. Suggestions were put forward for numerical simulation and validation test of air age in pressurization room of space station.

**Key words:** space station; pressurization room; air age; numerical simulation; validation test

载人空间站是一套复杂庞大的系统, 在保证各项功能顺利实现的同时, 还需考虑航天员与空间站之间的关系, 区别在轨密封环境和地面环境对人员造成的不同影响, 为航天员提供舒适、安全的工作环境。

影响舒适性的环境因素包括空气品质、结构布局、噪声、照明等, 其中空气品质是衡量室内环境的重要指标<sup>[1]</sup>, 美国供热制冷空调工程师学会

(ASHRAE)颁布的标准ASHRAE62-1989R从客观指标和人的主观感受方面给出了比较科学的空气品质定义, 提出了可接受的室内空气品质和感受到的可接受的室内空气品质的概念。可接受的室内空气品质指空调空间中绝大多数人没有对室内空气表示不满意, 并且空气中已知的污染物没有达到可能对人体健康产生严重威胁的含量。感受到的可接受的室

收稿日期: 2012-03-15

作者简介: 裴一飞(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事航天器环境试验的技术研发和管理工作。

室内空气品质指空调空间中绝大多数人没有因为气味或刺激性而表示不满。

对于空气品质的评价指标,主要包括送风有效性指标、热舒适性指标和污染物排除有效性指标<sup>[9]</sup>。送风有效性指标主要包括空气龄、换气效率、送风可及性等,热舒适性指标主要包括预测平均评价、预测不满意百分比、有效温度、标准有效温度和不均匀系数等,污染物排除有效性指标主要包括污染物含量和排空时间、排污效率和余热排除效率、污染物年龄以及污染源可及性等。

在众多指标中,空气龄是反映新鲜空气供给程度的指标,同时可根据该指标得出室内的换气效率,适合于评价空间站这类密封舱体的气流组织形式,描述舱内空气品质状况,检验流场内是否存在空气运动死区,是否出现污染物聚集状况等。因此针对空间站、潜艇等大型载人密封环境的空气品质,采用空气龄指标进行评价将会更加全面。文中以空气龄为中心系统阐述了空间站密封舱的空气龄分析方法及试验手段。

## 1 空气龄理论

空气龄最早于20世纪80年代由Sandberg<sup>[3]</sup>提出,根据Sandberg的定义,空气龄是指空气从入口到达房间某一位置的时间,反映了室内空气的新鲜程度。某点的空气龄越小,说明该点的空气越新鲜,空气品质就越好。

房间中某点的空气由不同空气龄的空气微团组成,因此该点所有微团的空气龄( $\tau$ )存在一个频率分布函数 $f(\tau)$ 和累计分布函数 $F(\tau)$ <sup>[4]</sup>:

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

累计分布函数与频率分布函数的关系如下:

$$\int_0^{\tau} f(\tau) d\tau = F(\tau) \quad (2)$$

某点的空气龄 $\tau_p$ 就是该点所有微团的空气龄的平均值,因此有:

$$\tau_p = \int_0^{\infty} \tau f(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} [1 - F(\tau)] d\tau \quad (3)$$

房间内某点p的空气龄 $\tau_p$ 的定义如图1所示,图1中 $\tau_0$ 是房间的名义时间常数,与房间的体积V以及送风流量Q有关。

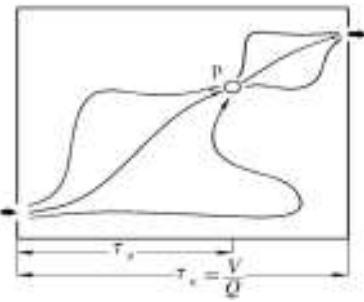


图1 房间内某点的空气龄

Fig. 1 The air age of point p inside a room

空气龄反映的是室内空气的新鲜程度,可以根据空气龄推导出换气效率、通风效率等其它空气品质评价指标<sup>[5]</sup>。因此在民用建筑领域以及军事领域,研究空气龄及其分布可以得到室内空气运动的停滞区域,了解工作区内新鲜空气的分布情况,在评价室内空气品质的优劣方面,有着广泛的应用。对于空间站这类大型载人密封环境的航天器,进行空气龄研究可以有效地反映空气品质。

## 2 空气龄数值模拟

数值模拟是研究空气龄分布的一种有效方法。根据气体的质量守恒方程,得到质量浓度输运方程,然后可以推导出空气龄的输运方程。庄达民等<sup>[6]</sup>对空气龄的输运方程进行了详细推导,得出了空气龄输运方程的稳态解和瞬态解,验证了利用数值方法计算空气龄的正确性。

稳态下的空气龄输运方程的表达式为<sup>[6-7]</sup>:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \tau) + \nabla \cdot (\Gamma_A \nabla \tau) = \rho \quad (4)$$

式中: $\mathbf{V}$ 为空气速度矢量, $\mathbf{V}=(u, v, w)^T$ ;  $\tau$ 为舱内空间某点空气龄; $\nabla$ 为矢量微分算子; $\rho$ 为空气密度,作为空气龄控制方程的源项。 $\Gamma_A$ 为空气龄的扩散系数,有:

$$\Gamma_A = \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \quad (5)$$

式中: $\mu$ 为空气分子动力粘性系数; $\mu_t$ 为空气紊流黏性系数; $Sc, Sc_t$ 分别为 Schmidt 数和紊流 Schmidt 数,一般取值均为1。

经过多年的发展,国际上已经有了较成熟的空气龄数值仿真软件,如AIRPAK, FLUENT等,在AIRPAK中,空气龄是一个独立的计算模块,只需定

友好相应的边界条件,通过计算即可得出空间内的空气龄分布;FLUENT则需要二次开发,将空气龄输运方程以自定义标量的形式写入求解器,对空气龄分布进行求解。

目前,国内针对空间站的空气龄分布仿真分析已经取得了初步成果,梁珍等<sup>[8]</sup>对载人航天器座舱进行了空气龄模拟,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,比较了舱顶两侧斜送风的情况下,风口布置采用连续对称布置、间隔对称布置和间隔交错布置3种方案,如图2所示。最后,计算了舱内空气龄分布和相应的换气效率。

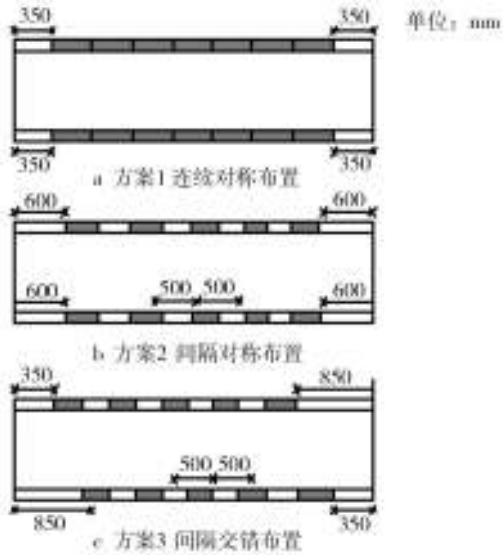


图2 3种送风方案示意

Fig. 2 Three types of ventilation

通过对模拟结果进行比较,发现方案1出现了流动分叉现象,且空气龄值较大,因此不能满足要求。方案3的换气效率略高于方案2,且在几个主要截面上空气龄都小于方案2,因此方案3要优于方案2,即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。

苏新明等<sup>[9]</sup>利用 FLUENT 软件及 UDF 自定义函数功能<sup>[10]</sup>对某空间站小舱进行了空气龄仿真分析,比较了进出口同侧和进出口异侧两种通风方案下活动区的流场及空气龄分布,如图3所示。当进出口同侧时,活动区内流场及空气龄分布较好;同时,计算了5种不同入口风速条件下,进出口同侧时活动

区内的空气龄分布,发现空气龄数值随风速增大而减小。计算结果对试验工作提供了理论依据,可指导空间站地面流场模拟试验。

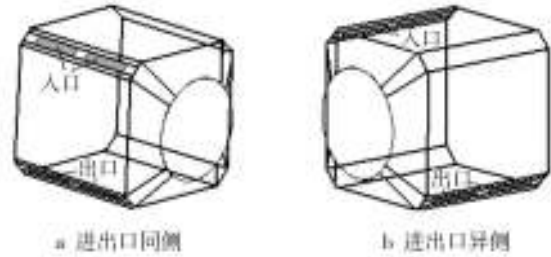


图3 2种风口排布方案

Fig. 3 Two arrangements of inlets and outlets

当进出口同侧时,小舱内速度分布比较均匀,空气龄数值较小,空气在舱内进行了较好的循环运动;当进出口异侧时,空气从进口进入小舱后,很快从出口排出,导致其它区域空气速度降低,未能得到充分循环,且空气龄数值相对较高,如图4所示。因此,进出口同侧的通风方案要优于进出口异侧的通风方案。最后,比较了进出口同侧方案下,5种不同风速时小舱活动区内的空气龄分布,结果表明空气龄最大值与最小值随着风速的增加而减小,如图5所示。

针对空间站进行的空气龄仿真分析已经具备了分析基础,掌握了相应的模拟方法,并比较了不同送风方案下的空气龄分布差异及变化趋势。根据国际空间站等大型空间站的通风方案设计,一般均选择了风口间隔对称布置的方式,我国的空间站很有可能也采用此种方式,如何在此种方式下改善舱内空气龄分布,提高舱内换气效率是一项亟待研究的内容。同时,上述分析仅围绕单舱开展计算,未能考虑空间站组合体状态以及不同舱段之间送风差异引起的舱内空气龄分布,因此分析结果还存在一定的局限性。

### 3 空气龄分布试验

示踪气体试验法,通过测量被测点示踪气体含量的变化推导出空间某点的空气龄值。一般用作示踪气体的有  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $SF_6$  等。其基本原理是:用示踪气体法测量某点示踪气体含量随时间的变化过程,得到该点的频率分布函数  $f(\tau)$  或累计分布函数  $F(\tau)$ ,从而根据式(3)计算出该点的空气龄。

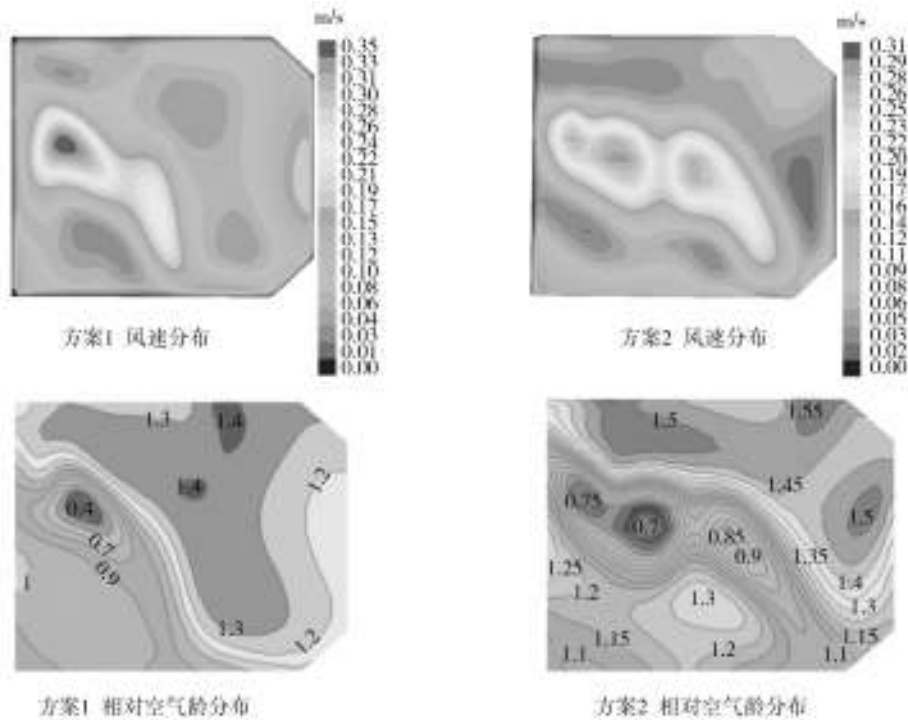


图4 两种方案下的舱内风速、空气龄分布比较

Fig. 4 Comparison of velocity and air age distribution of the two plans

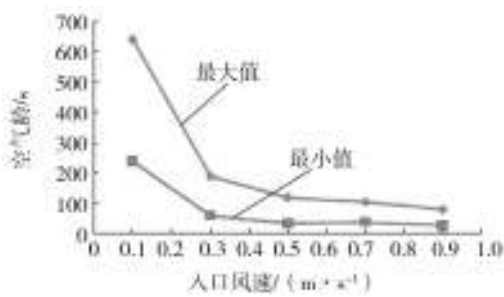


图5 进出口同侧不同入口风速下,某截面空气龄最大值与最小值比较

Fig. 5 Comparison of the maximal and minimum value of air age on one section when inlets and outlets were put in the same side and different velocity

根据试验方法的不同主要可以分为:脉冲法、上升法和下降法<sup>[1]</sup>。

脉冲法是指在通风房间的送风口释放少量的示踪气体,记录测量点气体含量随时间的变化过程。此时空间p点示踪气体的概率分布函数如下:

$$f(\tau) = \frac{C_p(\tau)}{\int_0^\infty C_p(\tau) d\tau} = \frac{C_p(\tau)}{m/Q} \quad (6)$$

式中: $C_p(\tau)$ 为 $\tau$ 时刻p点处示踪气体的含量; $m$ 为释放的示踪气体的质量; $Q$ 为送风量。

根据式(3),得出此时p点的空气龄为:

$$\tau_p = \frac{\int_0^\infty \tau C_p(\tau) d\tau}{\int_0^\infty C_p(\tau) d\tau} = \frac{\int_0^\infty C_p(\tau) d\tau}{m/Q} \quad (7)$$

上升法是指在房间送风口处恒定释放示踪气体,记录被测点的含量随时间变化情况。此时空间p点示踪气体的累计分布函数如下:

$$F(\tau) = \frac{C_p(\tau)}{C_p(\infty)} = \frac{C_p(\tau)}{m/Q} \quad (8)$$

同样根据式(3)可以得出该点的空气龄为:

$$\tau_p = \int_0^\infty [1 - F(\tau)] d\tau = \int_0^\infty \left[1 - \frac{C_p(\tau)}{m/Q}\right] d\tau \quad (9)$$

下降法指预先向房间内通入一定的示踪气体,待稳定后停止示踪气体加入并开始通风,测量被测点气体含量的变化过程。此时空间p点示踪气体的累计分布函数如下:

$$1 - F(\tau) = \int_\tau^\infty f(\tau) d\tau = \frac{C_p(\tau)}{C_p(0)} \quad (10)$$

式中:  $C_p(0)$  为0时刻p点的示踪气体的初始含量。

同样可以得出该点的空气龄为:

$$\tau_p = \frac{\int_0^{\infty} C_p(\tau) d\tau}{C_p(0)} \quad (11)$$

尽管试验实施方法不同,但3种方法最终得到的结论是一致的。从计算角度可以看出,采用下降法进行试验比较简单,从试验实施方面同样可以验证这一结论,因此在空气龄试验方面,示踪气体下降法应用较多。

目前国内针对民用建筑开展的空气龄分布试验研究较多,如庄达民等<sup>[12]</sup>讨论了利用示踪气体法求解飞机客舱通风量和空气龄的方法。李先庭等<sup>[13]</sup>应用示踪气体法得到了8种强制通风工况下实验室中各测点的衰减曲线,并计算出了各测点的空气龄。

对于空间站或者载人飞船的有人活动密封环境,国内还没有进行空气龄分布试验的相关报道。从检测载人航天器人员活动区空气品质角度出发,国内相关研究机构仅进行了风速分布测量试验,如孟繁孔等<sup>[14]</sup>对某目标飞行器舱内流场设计进行了试验验证和评价,提出采用等温化试验准则,降低地面自然对流的影响,从而对流场进行了地面验证。该试验只考核了目标飞行器人员活动区内的速度分布,认为活动区大部分风速在0.08~0.5 m/s,睡眠区风速均在0.08~0.2 m/s的范围内满足设计要求,可以保证航天员的热舒适性要求。

虽然国际空间站等大型载人航天器对人员活动区的风速范围做了详细规定,而且我国的相关设计也参考了该标准,但仅从风速分布角度考核舱内的空气品质还有不足,如不能体现舱内通风的换气效率、新鲜空气的供给程度以及不能检验舱内是否存在空气运动死区。

2000年,某国际空间站哥伦布舱进行了通风试验<sup>[15]</sup>,在验证了风速分布的同时,还以SF<sub>6</sub>作示踪气体进行了空气龄分布试验。结果表明:1)通过两种试验可以充分地考核舱内通风情况,找出通风最坏点;2)仅仅进行风速测量是不够的,还需要进行空气龄试验,空气龄试验得到的结果对于预示舱内的气体分布情况要比风速测量得到的结果好。因此,对空间站这类大型载人航天器进行空气龄分布试验

证是非常有必要的。

哥伦布舱的设计人员设计了传感器三维移动支架和示踪气体供气流程,如图6和图7所示。这对于我国开展相关空间站空气龄分布验证试验研究有一定的借鉴作用。



图6 三维移动支架

Fig. 6 3D motion frame

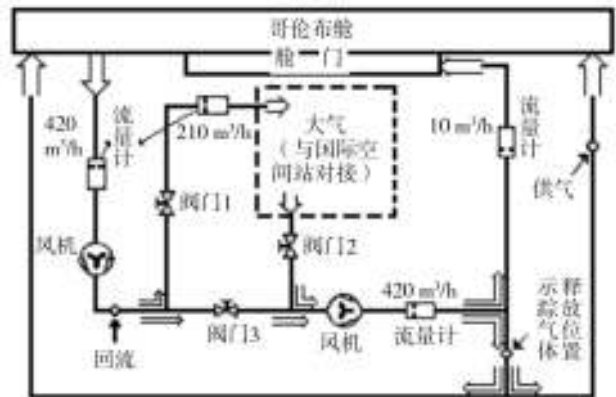


图7 供气流程

Fig. 7 Air supply flow chart

## 4 结语

文中详细阐述了空气龄在空间站密封舱内空气品质评价方面的重要作用,介绍了空气龄理论,并详细讨论了国内外在空间站密封舱内空气龄数值模拟以及空气龄分布验证试验方面的研究进展。

1) 应针对风口间隔对称布置的情况,进一步研究空间站密封舱内的空气龄分布情况及改善措施。同时,针对空间站组合体构型开展空气龄分布数值模拟工作,分析不同舱段之间送风差异引起的舱内空气龄分布差异。

2) 针对空间站进行的密封舱内空气品质评价验证试验,不能局限于风速分布测量,还应考虑空气龄分布测量,这有助于全面考核舱内通风情况。

3) 借鉴国外在空间站密封舱内空气龄分布验证试验中先进的测量技术及手段有助于我国科研人员针对空间站开展相关的试验研究工作。

参考文献:

[1] 邹国荣, 马立. 室内空气品质的影响因素及其改善措施[J]. 制冷与空调, 2005(1): 71—74.

[2] 李先庭. 高大空间气流组织的评价体系[R]. 北京: 清华大学, 2006.

[3] SANDBERG M. What is Ventilation Efficiency[J]. Building and Environment, 1981, 16(2): 123—135.

[4] 王伟. 几种房间送、回风方式的空气龄评价[D]. 天津: 天津大学, 2001.

[5] 马仁民. 国外非工业建筑室内空气品质研究动态[J]. 暖通空调, 1999, 29(2): 38—41.

[6] 庄达民, 袁修干. 空气龄的数值解法[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(5): 565—570.

[7] 邓伟鹏, 沈晋明, 唐喜庆, 等. SARS 隔离病房内的气流组

织优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(2): 9—14.

[8] 梁珍, 张吉礼, 陆亚俊. 载人航天器座舱空气龄的数值模拟[J]. 暖通空调, 2007, 37(5): 1—5.

[9] SU Xin-ming, FU Shi-ming, PEI Yi-fei. Computation of the Air Age of the Space Station Cabin[C]//中国自动化学会系统仿真专业委员会. 第13届中国系统仿真技术及其学术年会论文集. 合肥.(余不详)

[10] FLUENT Inc. Fluent User's Guide [M]. USA: Fluent Inc., 2003.

[11] 刘珊. 示踪气体跟踪测量技术在暖通空调领域中的应用[D]. 天津: 天津大学, 1999.

[12] 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(6): 78—80.

[13] 李先庭, 王欣, 李晓锋. 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.

[14] 孟繁孔, 曹剑锋, 满广龙. 目标飞行器舱内流场设计验证与评价[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(6): 583—588.

[15] HAIDL T, LEHR B, RAATSCHEN W. Thermal Comfort, Ventilation Efficiency, Contaminant Removal Effectiveness and Safety in the Columbus Cabin[J]. Society of Automotive Engineers, 2000(1): 2298—2314.

(上接第 12 页)

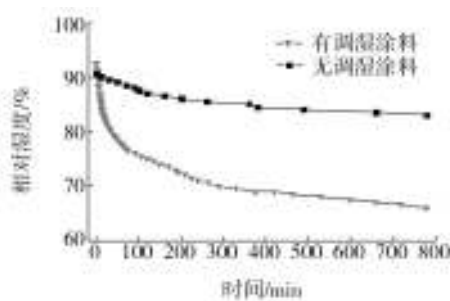


图2 调湿涂层试验结果

Fig. 2 The experimental results of humidity control coating

相对湿度由 92.5% 降低到了 66%, 降低了 28.6%。

试验结果表明,研制的调湿涂层具备了一定的吸湿性能。

试验装置和试验的范围需要继续完善,对调湿涂层的调湿性能进行更系统的测试。另外,还要结合航天器的实际情况,研制满足载人航天器可靠性和安全性要求的调湿涂层。

3 结论

文中对调湿涂层进行了试验研究,通过性能测试,证明调湿涂层具有良好的吸湿性能。可以在 40 min 内使密闭环境的相对湿度由 92.5% 下降到 79.5%, 在 13 h 内可由 92.5% 下降到 66%。

参考文献:

[1] 季旭, 梁新刚, 任建勋, 等. 载人航天器通风除湿系统运行参数的优化分析[J]. 航天医学及医学工程, 2001, 14(4): 272—276.

[2] JOUANNE R G, BARKER R S, SITLER Ga. Dew Point Analysis for Space Station Freedom[J]. SAE Transactions, 1992, 101(1): 735—748.

[3] DAUES K. A History of Spacecraft Environmental Control and Life Support Systems[R]. 2008. (余不详)

[4] 闫全智, 贾春霞, 冯寅烁, 等. 被动式绿色调湿材料研究进展[J]. 建筑节能, 2010(12): 41—42.

[5] 李双林, 吴玉庭, 马重芳, 等. 新型调湿涂料调湿性能的初步试验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(3): 502—504.