

# 天宫一号目标飞行器载人环境设计与实施

杨宏, 魏传锋\*, 满广龙, 李英斌, 姚峰, 杨彪

中国空间技术研究院载人航天总体部, 北京 100094

\* E-mail: mlinzhi501@gmail.com

收稿日期: 2013-11-25; 接受日期: 2013-12-24

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

**摘要** 基于天宫一号目标飞行器载人环境控制任务的新特点, 以航天员的“舒适性”为设计目标, 天宫一号进行了大气环境控制设计、噪声控制设计、辐射控制设计以及组合体热支持设计等载人环境设计, 将组合体密封舱内的大气总压、温湿度、风速、气体成分、噪声以及辐射水平控制在人体舒适性范围内, 天宫一号飞行任务表明, 其载人环境系统设计正确, 为飞行任务期间航天员的身体健康和工作效率提供有力保障。

**关键词**  
天宫一号  
载人环境  
设计  
实施

## 1 引言

天宫一号目标飞行器是我国第一艘长寿命的载人航天器, 其主要任务是突破交会对接技术, 作为交会对接目标完成交会对接试验, 为航天员在轨工作、生活以及综合对地观测、空间科学实验、航天医学实验和空间站技术试验提供必要条件, 并为我国建立长期载人空间站进行技术验证。根据天宫一号的飞行任务规划, 在其 2 年的寿命期内需完成与神舟八号、神舟九号以及神舟十号 3 艘载人船的交会对接, 其中神舟八号为无人船, 神舟九号、神州十号为搭乘 3 名航天员的有人飞船, 两次载人飞行航天员乘组进入天宫一号后分别要完成为期 10 和 12 天组合体驻留任务。

不同于地面, 载人航天器在轨运行时外部为微重力、真空和冷黑环境, 航天员工作和生活的密封舱是典型的密闭环境, 为保证其中航天员的身体健康和工作效率, 必需为载人航天器配置载人环境控制系统, 为密封舱内航天员提供适宜的大气环境、低噪声及低辐射环境。天宫一号之前载人飞船的载人任

务, 为载人环境控制技术进行了必要的技术积累, 与载人飞船相比, 天宫一号具有在轨运行时间长、多次驻留任务支持、外来飞行器环境支持、密封舱容大以及航天员乘组驻留时间长的特点, 这些特点都对我国载人航天器载人环境控制技术提出了新的挑战。

基于天宫一号目标飞行器载人环境控制任务的新特点, 以航天员的“舒适性”为设计目标, 天宫一号进行了大气环境控制设计、噪声控制设计、辐射控制设计以及组合体热支持设计, 将组合体密封舱内的大气总压、温湿度、风速、气体成分、噪声以及辐射水平控制在人体舒适性范围内, 为保证航天员身体健康和工作效率提供有力的环境支持。

## 2 空气温湿度及风速控制

### 2.1 实验舱温湿度控制

#### 2.1.1 实验舱温度控制

天宫一号在飞行期间热量的产生包括设备工作热耗和组合体期间航天员活动产生的热量。这些热

**引用格式:** 杨宏, 魏传锋, 满广龙, 等. 天宫一号目标飞行器载人环境设计与实施. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 119-124  
Yang H, Wei C F, Man G L, et al. Design and implementation of the manned environment of Tiangong-1 spacecraft (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 119-124, doi: 10.1360/092013-1202

量除通过舱体漏热向外部空间排散外, 主要用于加热实验舱和组合体期间密封舱内空气、维持低温环境下设备的工作温度和组合体期间为飞船提供热支持, 并将多余热量排散至外部空间。

目标飞行器实验舱温度控制以主动控制为主, 通过传导、对流将实验舱内多余热量传递到舱外, 再利用辐射器排散至外部空间。另外, 采用在舱外包覆多层隔热材料、在内壁面粘贴泡沫塑料的被动措施对舱体进行绝热处理, 减少向外部空间漏热。实验舱主动控温换热关系如图 1 所示。

首先, 通过通风系统对舱内设备进行强制换热, 将舱内热量传递到通风系统, 同时形成舱内人活动区和睡眠区的空气流动, 并使舱内温度分布均匀化。然后, 通风系统热量通过一级换热器传递给内回路。最后, 再利用二级换热器传递至外回路, 通过空间辐射散热器向外排散。

### 2.1.2 实验舱湿度控制

天宫一号目标飞行器的流体回路内回路系统设置了专用于密封舱大气湿度控制的气液换热设备。空气除湿和空气冷却相关, 而空气温度可通过调节气液换热设备的风门开度实现, 湿度控制应首先保证温度控制满足要求, 同时兼顾湿度在 30%~70% R.H. 范围内。其工作原理是当仪器区风机工作时, 在压差作用下使气流进入冷凝干燥组件中, 实现降温除湿。

## 2.2 通风系统设计

通风系统要满足实验舱内人活动区和睡眠区的风速要求, 既为仪器设备散热提供流场环境和散热途径, 又为人活动区空气温度控制提供流场环境和散热途径; 在组合体阶段, 通过实验舱和飞船之间的

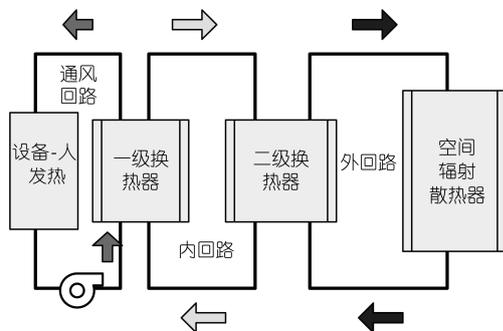


图 1 主动控温换热关系图

舱间通风, 实现对飞船的热支持。

通风系统包括人活动区通风系统和仪器区通风系统两部分。人活动区通风系统主要是完成舱内空气循环, 形成满足要求的人活动区风速环境, 实现人活动区温度均匀化的目的。仪器区通风系统主要是加强仪器设备和空气的强迫对流, 实现对仪器设备的散热, 满足仪器设备控温的要求。同时, 通风系统通过仪器区冷凝干燥组件, 实现向流体回路的热量传递, 并对实验舱内湿度进行控制。

## 2.3 舱压和成分控制

天宫一号在组合体飞行期间会对实验舱舱压进行控制, 其余飞行期间对舱压不进行控制。根据目标飞行器交会对接任务安排、舱体泄漏率和一次泄复压要求, 目标飞行器进行了供气调压系统设计, 对组合体期间密封舱内的总压和氧分压进行控制。

## 2.4 压力控制模式设计

在有人组合体阶段, 当氧分压低于控制下限时, 打开供氧组件的供氧阀供氧, 当氧分压高于控制上限时, 关闭供氧阀, 正常情况下, 舱内氧分压维持在氧分压控制范围内。

有人组合体期间, 当总压低于控制下限时, 首先通过目标飞行器供氧组件向舱内供氧, 当氧分压高于氧控制上限时, 关闭供氧组件的供氧阀, 之后打开复压组件的复压阀供空气; 当总压高于上限时, 关闭复压阀。

## 2.5 泄复压控制设计

泄复压系统可在目标飞行器自主飞行期间根据地面指令启动, 启动后从当前舱压泄压至低压状态, 再从低压状态复压至常压。

为验证泄复压系统的设计, 在空间环境模拟容器内进行了密封舱的泄复压试验<sup>[1]</sup>。泄压过程中, 空间环境模拟容器内绝对压力为 100 Pa, 通过泄压阀将密封舱由 100 kPa 泄压至 3 kPa, 泄压过程总时间为 44 min, 压力随时间变化曲线如图 2 所示。

试验结果表明, 泄压过程中密封舱压力随时间变化呈负指数曲线规律。

复压过程中, 密封舱从初始压力 3 kPa 复压至载人环境要求的常压状态, 复压过程总时间为 87 min, 压力随时间变化曲线如图 3 所示。

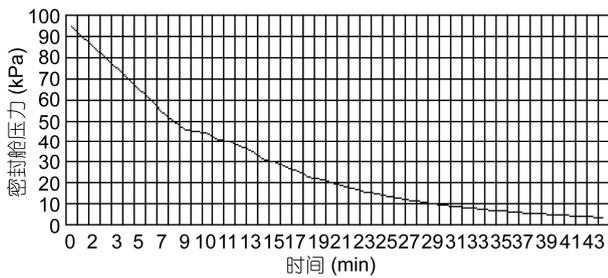


图2 常温泄压压力随时间变化曲线

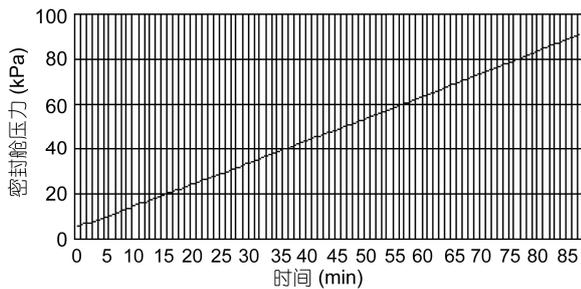


图3 低温复压压力随时间变化曲线

试验结果表明,复压过程中密封舱压力随时间呈匀速增长,符合线性规律。

### 3 组合体热支持设计与实施

天宫一号目标飞行器与载人飞船通过对接机构对接后,形成一个刚性的组合体,如图4所示。

有人对接时,将依次打开载人飞船轨道舱前舱门和目标飞行器实验舱前舱门,载人飞船的返回舱、轨道舱以及目标飞行器的实验舱,3个密封舱形成了一个整体,共同作为航天员生活的场所。

飞船组合体期间处于停靠模式,舱内多数仪器

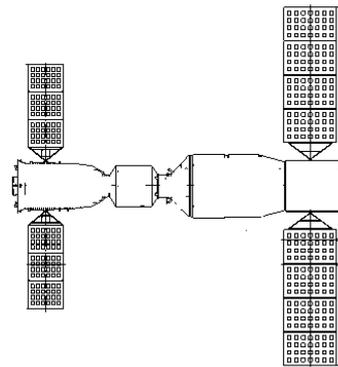


图4 目标飞行器与载人飞船组合体构形图

设备不工作,舱内热量很少,且飞船帆板发电受到了限制,对舱内电加热的能力有限,因此单靠飞船不足以将飞船密封舱内温度维持在航天员需要的范围,而目标飞行器此时作为组合体管理的主体,舱内多数仪器设备都处于工作状态,帆板也处于单自由度对日跟踪状态,能源系统正常工作,舱内热量相对较多,因此可以通过通风手段将天宫一号对飞船进行热量支持,天宫一号目标飞行器对载人飞船的通风热支持能流原理如图5所示。

通过对组合体期间天宫一号目标飞行器和载人飞船发热量及温度水平分析,确定了目标飞行器对载人飞船的热支持风量,具体实现方式为:将一根直径通风软管从天宫一号仪器区通过对接通道拉至返回舱大底附近,热支持设置于风管的天宫一号一侧,将来自载人飞船的温度较低的气流送入天宫一号仪器区对设备进行散热,天宫一号密封舱内温度较高的气流通过对接通道回流至载人飞船,实现对载人飞船的热支持。天宫一号的气液换热设备的通风量

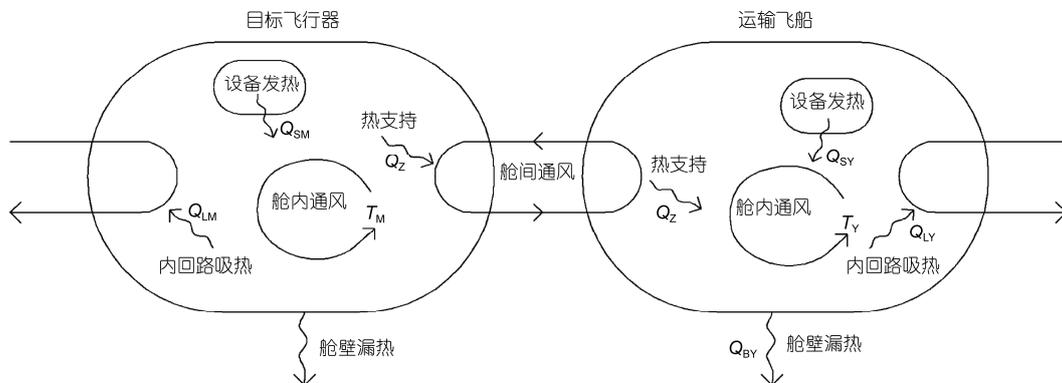


图5 组合体能流关系示意图

可调, 并设置了空气电加热器, 以适应不同舱内热量工况。

## 4 噪声控制设计与实施

### 4.1 天宫一号噪声源特点

天宫一号密封舱的噪声源与其工作方式有关, 主要来源于大型高速旋转部件, 包括辐射传播和振动传导两种方式。辐射传播的噪声源有风机、风阀机构、气动噪声、电子设备等, 考虑噪声的量级及产生频率, 辐射传播的噪声源主要定位在密封舱内的风机上<sup>[2]</sup>。大型控制力矩陀螺、流体回路泵均会产生振动传导噪声, 其中流体回路泵的转速和功率均小于大型控制力矩陀螺, 振动传导的噪声源主要定位在大型控制力矩陀螺上。

### 4.2 噪声控制措施

天宫一号密封舱内噪声控制的措施主要包括吸声、隔声、消声、减振 4 个方面, 根据前面识别确认的主要噪声源采取噪声控制措施如下。

#### 1) 吸声措施

密封舱内装饰材料选用美塔斯布中间缝制聚氨酯泡沫, 密封舱舱壁直接参与构成通风风道, 声音在传播过程中可直接到达热控泡沫表面并被吸收。

#### 2) 隔声措施

利用密封舱承载用的结构仪器板及挡风帘将风机所在区域密闭, 在满足通风功能要求的同时, 可实现隔声降噪。

#### 3) 消声措施

在风机所在的送风管路系统中增加消声控制措施, 例如, 在风机的出口处增加静压箱, 其作为阻性消声器具有较宽的消声频率范围, 在中、高频段的消声效果尤为显著。

#### 4) 减振措施

将风机均安装在蜂窝板上, 蜂窝板结构对振动具有阻尼减振效果; 令风机的进口全部为自由端, 出口管道全部为软管连接, 可以隔离风机对下游管路的振动传递。

### 4.3 噪声控制效果

根据天宫一号密封舱内的实际噪声源和控制措施, 构建了噪声计算模型如图 6 所示。

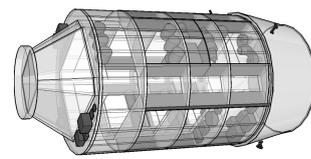


图 6 密封舱内噪声计算模型

由噪声计算模型仿真分析得出的舱体内声压级水平分布结果如图 7 所示, 舱体内声压级在睡眠区的分布结果如图 8 所示。

由仿真结果可知, 经吸声、隔声、消声、减振控制后, 密封舱内的噪声水平为 55~62 dB(A), 满足不大于 65 dB(A)的指标要求。

## 5 空间辐射防护设计与实施

天宫一号目标飞行器在其运行轨道上将受到地球辐射带捕获粒子、太阳宇宙线和银河宇宙线等空间电离辐射环境的影响, 这些带电粒子可能穿透航天器舱壁与航天员人体组织发生相互作用并在组织内部引起原子的电离、激发、核反应和化学反应, 从而对人体造成辐射损伤, 引发人体的生理功能变化, 甚至发生癌变, 威胁生命安全。

在天宫一号目标飞行器总体设计中, 需要对舱

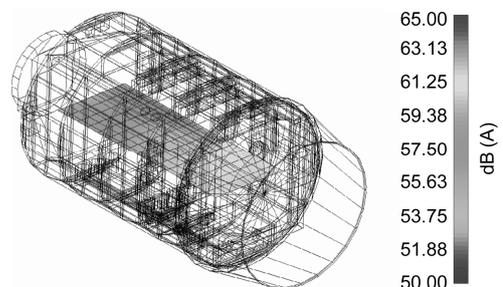


图 7 舱体内声压级水平分布仿真图

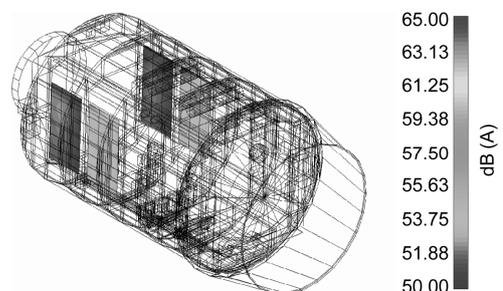


图 8 舱体内睡眠区声压级分布仿真图

内航天员遭受的生物剂量进行仿真分析, 评价空间辐射对航天员健康和安全的影 响程度, 并以仿真结果为依据改进航天器构型布局设计, 实现整器质量屏蔽最优化, 满足航天员电离辐射医学要求.

表 1 中给出了 GJB 4018-2000 《飞船乘员舱电离辐射防护要求》<sup>[3]</sup> 中规定的航天员皮肤当量剂量限值, 这里为方便描述, 用“生物剂量”来表征人体皮肤的当量剂量.

在设计中, 采用载人航天器生物剂量三维分析技术<sup>[4]</sup>来分析天宫一号密封舱内的生物剂量水平. 该方法充分考虑了天宫一号目标飞行器舱体结构和设备布局复杂性所导致的质量屏蔽各向异性特点, 在传统的一维实心球屏蔽模型基础上, 采用扇区射线法获得不同方向的辐射剂量分布<sup>[5]</sup>.

天宫一号密封舱内生物剂量分析结果如表 2 所示. 在建立天宫一号的质量屏蔽模型时, 为了获得生物剂量值的最大包络, 这里忽略了舱内仪器设备的屏蔽, 仅考虑舱体防护结构、蒙皮、舱门和辐射器的屏蔽效应. 在密封舱乘员活动空间内选取 4 个典型位置点, 从密封舱后部至舱门方向分别为 A1, A2, A3, A4, 生物剂量三维结果显示如图 9 所示.

在工程设计中, 三维仿真分析的预期目标是验证天宫一号不同方向上的质量屏蔽是否合理, 找出屏蔽薄弱的部位, 为辐射防护设计提供参考. 首先通过表 2 中的总剂量值从宏观上考察不同位置的生物剂量值, 与航天员医学指标进行对比, 找出不满足剂量限值要求的部位. 再利用图 9 的结果形式对不满足指标要求位置点的剂量分布情况进行具体分析, 找出剂量值较大(屏蔽薄弱)的方位, 优化设计措施包括: 1) 在不增加整器重量的前提下, 调整舱内仪器设备

和物资的布局, 在屏蔽较弱的方向进行补强; 2) 经过布局调整和多伦迭代分析后, 如果仍无法达到剂量限值要求, 则考虑在屏蔽薄弱的部位增加防护材料. 通过仿真结果可知, 航天员在轨 30 天驻留遭受的生物剂量不超过 0.15 Sv, 满足 30 日飞行不大于 0.4 Sv 的限值要求(见表 1). 表明天宫一号目标飞行器辐射防护设计合理可行, 满足航天员生物剂量限值要求.

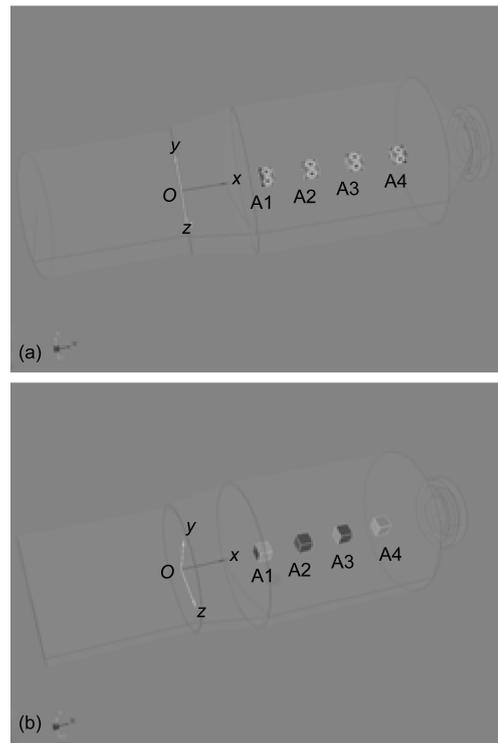


图 9 (a) 每个方向上的剂量分布情况; (b) 每个方向上的剂量值分量

表 1 GJB 4018-2000 中规定的航天员皮肤当量剂量限值

在轨飞行时间 (天)	3	7	30
航天员皮肤当量剂量限值	0.15 Sv	0.20 Sv	0.40 Sv

表 2 密封舱内 4 个分析点的生物剂量仿真计算结果

特征点	30 天生物剂量						总剂量值 (Sv)
	分量值 (Sv)						
	+X	+Y	+Z	-X	-Y	-Z	
A1	0.0199	0.0238	0.0238	0.0145	0.0238	0.0238	0.130
A2	0.0207	0.0262	0.0262	0.0161	0.0262	0.0262	0.142
A3	0.0209	0.0262	0.0262	0.0181	0.0262	0.0262	0.144
A4	0.0208	0.0246	0.0246	0.0183	0.0246	0.0246	0.138

## 6 结论

天宫一号自 2011 年 9 月发射入轨以来, 已在轨运行 2 年有余, 期间完成了 2 年设计寿命期内的神舟八号无人交会对接任务和神舟九号、十号的两次有人交会对接、乘组驻留任务, 圆满实现了天宫一号的最初设计任务, 目前在轨运行平台状态良好, 可以进行部分后续任务. 神舟九号、十号载人飞船 2 组共 6

名航天员的在轨驻留期间, 天宫一号及载人飞船密封舱内总压、氧分压、温湿度、风速、气体成分等大气关键参数控制良好, 舱内噪声水平和辐射水平控制良好, 保证了航天员身体健康和工作效率, 对顺利完成交会对接任务起了重要的保障作用, 也充分验证了天宫一号目标飞行器载人环境控制系统设计和实施的合理性和正确性.

## 参考文献

---

- 1 张昊, 魏传锋. 载人航天器泄复压地面模拟试验方法. 航天器工程, 2012, 04: 106-110
- 2 魏传锋, 张伟. 载人航天器密封舱噪声控制与试验. 航天器工程, 2013, 01: 91-93
- 3 中国人民解放军总装备部. GJB 4018—2000 飞船乘员舱电离辐射防护要求. 2000
- 4 杨彪, 杨东升, 魏传锋. 载人航天器密封舱内生物剂量三维仿真技术. 航天器环境工程, 2013, 30: 602-605
- 5 Cai Z, Lin G, Chen G, et al. The 3D radiation does analysis for satellite. In: 53rd International Astronautical Congress, The World Space Congress. Huston, Texas, IAC-02-U.2.02: 1-5, 2002

# Design and implementation of the manned environment of Tiangong-1 spacecraft

YANG Hong, WEI ChuanFeng, MAN GuangLong, LI YingBin, YAO Feng & YANG Biao

*Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*

Based on the new characteristics of the manned environment control of Tiangong-1, aiming for satisfying the comfortableness of the astronauts, various manned environment designs are performed in "Tiangong-1" such as the atmosphere environment control design, noise control design, radiation control design and combined vehicle thermal support design, to control the atmosphere pressure, temperature and humidity, wind speed, gas components, noise and radiation level within the comfortable limits of astronauts. Tiangong-1 mission indicates that the manned environment system design is correct, and it can provide strong supports for the health and working efficiency of astronauts during spaceflight missions.

**Tiangong-1, manned environment, design, implementation**

doi: 10.1360/092013-1202