

# “飞天”舱外航天服便携式生保系统研制

梁志伟 高峰 吴志强 黄刚 赵丕盛 臧华兵

(中国航天员科研训练中心)

**摘要** 介绍我国研制的“飞天”舱外航天服便携式生保系统的方案原理与组成,突破的关键技术及系统达到的技术指标,并给出飞行试验验证结果。

**关键词** 出舱活动 舱外航天服 环境控制 生保系统

**分类号** R852.83 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2010) 01-0037-07

## 引言

随着我国载人航天第二步工程实施,2004 年 7 月展开了“飞天”舱外航天服的研制工作。便携式生保系统是舱外航天服的关键组成部分之一,用于实现服装内环境的氧气供给、压力调节、温湿度控制、通风净化、以及主要环境参数的测量监测等,保证航天员在出舱活动期间的生命安全和有效工作。

美、俄两国已开展了大量相关系统的研制和应用,国内尚无完整的系统研究。国内可以借鉴的是飞船环控生保系统的相关技术,但由于舱外服的总体布局设计、服装狭小空间的约束、人机操作工效上的特殊要求等,使得在舱外服便携生保系统总体技术方案面临重大挑战,也产生了相关专项新技术应用上的需求,另外产品的小型化设计和系统的高度集成、系统的安全性设计、纯氧环境适应性设计等都是必须解决的技术难点。

## 1 系统设计

### 1.1 总体设计原则

结合我国目前载人航天的发展特点,舱外服的基本要求是满足近地轨道短期出舱活动使用,能够保障航天员安全性和工作的舒适性,能够完成空间维修、空间搬运等飞行任务。总体设计原则如下:

a. 采用独立自主的便携式生保技术,并同时设置可以和母船系统连接的脐带接口。

b. 采用非再生式环控生保技术,在满足小型化、轻量化的系统集成需要的前提下,满足轨道出舱活动时间的需要。

c. 消耗品具有在轨补充或更换能力,可适用于后续的正常性的空间站出舱活动任务。

d. 采取高安全可靠设计措施,确保航天员的生命安全。

e. 体积小、重量轻、高度集成,满足舱外服空间布局约束。

### 1.2 主要技术指标

工作时间:独立出舱 4h+气闸舱 2h;

具备 30min 舱外应急工作能力;

正常服装压力控制范围:35~41kPa;

CO<sub>2</sub> 分压控制范围:≥1.33kPa, 峰值负荷时 ≥2.67kPa;

系统散热能力:最大不小于 700W,最小不大于 150W;

正常通风量:120~220NL/min;

引射通风量:不小于 100NL/min;

噪声水平:≥70dB(A);

系统重量:≥32kg;

系统功耗:≥44W。

### 1.3 系统组成与方案要点

按照系统功能分解,将本系统划分为四个功能模块,分别是供氧调压、通风净化、温湿度控制、信号测量。系统原理及构成如图 1。

来稿日期:2009-06-03;修回日期:2009-10-21。

作者简介:梁志伟(1969.10-),男,硕士,副研究员,主要从事载人航天器环控生保分系统总体技术研究及相关产品研制工作。

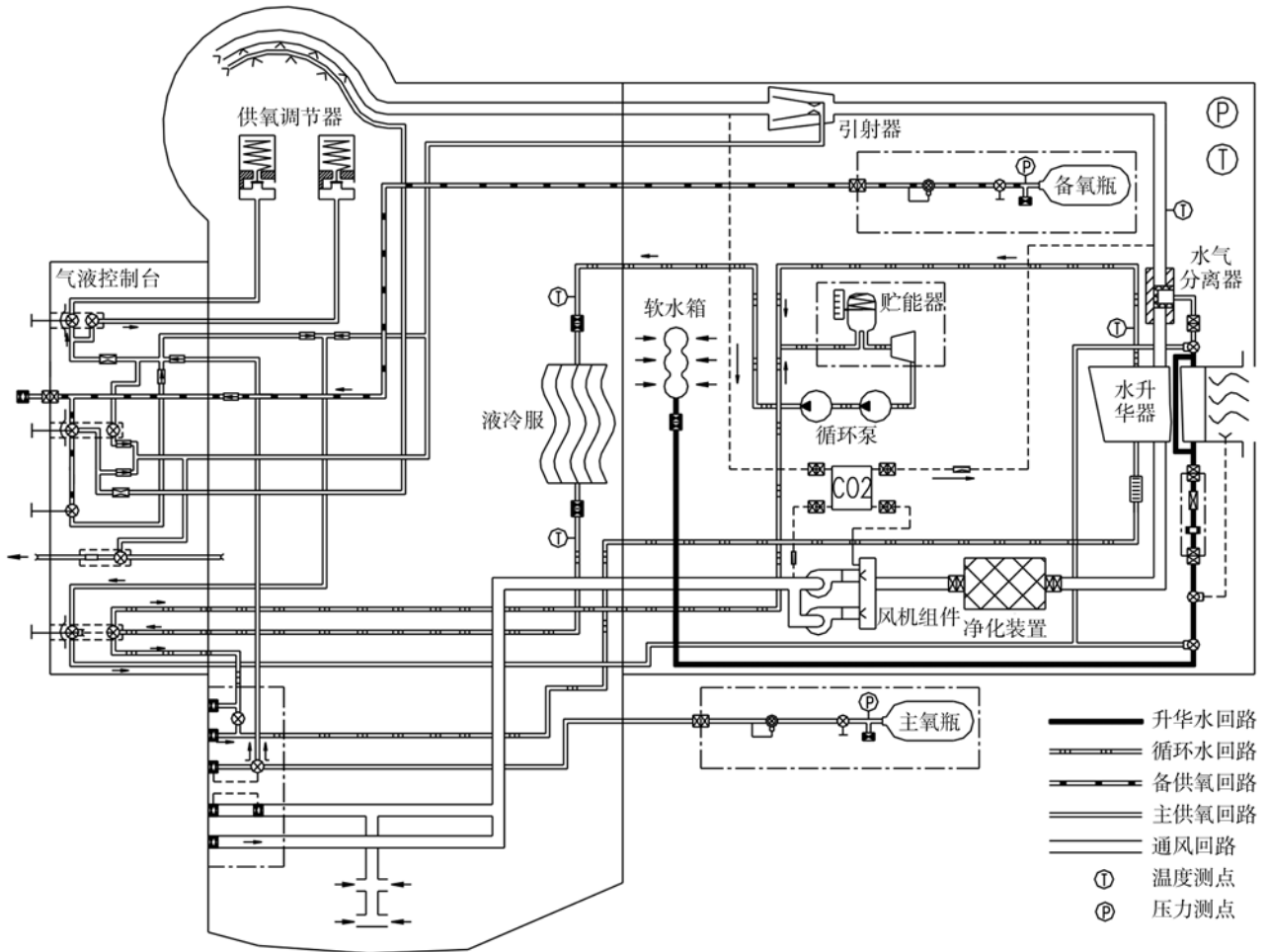


图 1 系统原理及构成

### 1.3.1 供氧调压

对舱外服来说，压力维持和氧气供应是保障航天员安全和生存的最重要的功能，所以在该系统的实现上采取了大量措施来保障系统可靠运行，特别是设置了完备的功能备份系统来保障故障情况下的航天员安全。方案要点如下：

a. 采用纯氧环境压力制度，正常工况下，由供氧调节器采用按需供氧方式，自动补充人体代谢耗氧和服装泄漏，并维持服装压力在 35 ~ 41kPa 范围内。

b. 采用 42MPa 高压气态氧源，提高了有限空间下的氧气携带量；采用二级减压将高压氧气降低到 0.45 ~ 0.55MPa，实现平稳输出。

c. 设置了完备的递进式应急供氧模式：当出现压力应急，服装压力低于 35kPa 时，实施 10~15NL/min 引射供氧；实施引射供氧后，若服装压力仍低于 35kPa 时，实施 10~15NL/min 应急供氧，直接供向航天服头盔处；在实施应急供氧后，若服装压力继续降

低到 27±2kPa 时，实施 11~16NL/min 自动应急供氧。递进式应急供氧模式的设置，有力保障了压力应急工况下的压力维持，并保证系统具有不小于 30min 的应急返回能力。

### 1.3.2 通风净化

通风净化系统的主要功能是实现服装内强迫对流通风，保障服装内，特别是头盔内的温度、湿度、CO<sub>2</sub> 等分布和控制，并去除航天员代谢产生的 CO<sub>2</sub> 和服装内其它微量有害气体。方案要点如下：

a. 采用带有无刷电机的离心式风机作为通风循环的动力设备，有压头高、能耗低、尺寸小、噪声低等特性。

b. 采用和 LiOH 药品化学反应的方式去除人体代谢产生的 CO<sub>2</sub>，采用活性炭混合物的吸附作用去除服装内其它微量有害气体；系统具有不小于 6h 的净化能力。

c. 在通风管道内设置引射器，利用引射供氧时

的喷流动能带动通风管道内的气体流动。一方面引射器作为备份的通风动力设备, 即当通风装置或电源发生故障时, 可实施引射通风; 另外当实施引射通风时, 供氧系统大流量向服装内供氧, 并通过关联控制装置将这些氧气最终将排放到服装外部, 排放出的气体可以带走  $\text{CO}_2$  和微量有害气体, 以及带走热量和去除湿气, 所以引射功能可以作为净化故障、温控故障下的备份功能使用。

### 1.3.3 温湿度控制

采用主动温控的方式带走人体和设备产生的热量。以水升华器为冷源, 建立了通风散热和液路散热两条热交换回路, 液路散热为主, 通风散热为辅。方案要点如下:

a. 以水升华器为冷源, 其充分利用了真空资源散发热量, 具有体积小、质量轻的显著优点。

b. 液冷回路: 以冷备份串联设置的离心式循环泵作为液冷回路的动力; 设置贮能器补充系统泄漏造成的工质损失, 维持泵入口压力在规定的范围内; 设置蜗旋式气泡分离器, 利用离心原理进行液路中的气泡分离, 提高了液路运行效率; 设置液冷旁路, 通过改变旁路流量实现温度调节功能; 冷却工质为含有银离子的水。

c. 在水升华器中设置通风热交换通道, 实现通风散热和冷却除湿; 通过气流通道设计, 利用离心原理和毛细吸附原理使通风气体中的冷凝水滴被毛细材料吸附收集, 收集到的冷凝水作为升华水再利用。

d. 用软式水箱贮存升华用水, 利用服装内外压力差的驱动向水升华器供水, 供水压力由压力调节器控制, 保证水升华器的正常工作; 并通过适当的供水压力匹配来保证冷凝水供水支路和软水箱供水支路协调工作, 实现冷凝水回路优先供水。

### 1.3.4 信号测量与监测

系统中设置了服装压力、 $\text{CO}_2$  分压、服装温湿度、氧瓶压力、通风流量、通风温度、液路温度、泵转速、风机转速、以及供氧状态指示等参数测量装置, 监视主要环境参数和设备运行状态。

## 2 关键技术及实现

### 2.1 42MPa 高压氧源技术

系统采用 42MPa 高压氧源, 完成了铝合金内胆

碳纤维全缠绕复合材料氧瓶, 以及结构紧凑的高压截止阀、减压阀、压力传感器等的研制, 解决了高压氧应用的安全性问题、结构紧凑的高压密封和平稳减压等技术难点, 提高了有限空间约束下的氧气携带量, 并减轻了产品的体积、重量, 实现了输出压力平稳。

### 2.2 高效安全净化技术

系统采用与  $\text{LiOH}$  药品产生化学反应的方式去除人体代谢产生的  $\text{CO}_2$ , 采用活性炭混合物的吸附作用去除服装内其它微量有害气体。LiOH 为强碱类化学药品, 其粉尘会对人的呼吸道造成刺激并致危险。研制了颗粒状  $\text{LiOH}$  药品(规格  $\Phi 3 \times 3$ ), 既能保证较高的吸收效率又能保证较高的力学强度。在产品结构设计上, 采用柱状结构、径向气体流动, 并采用锥形弹簧压紧机构对  $\text{LiOH}$  药层实施压紧, 有效保障了产品具有较小的通风阻力、良好的抗振能力等。另外在出气口采用高效过滤材料, 有效地阻止了粉尘泄漏, 出口洁净度试验优于 ISO8 级。

### 2.3 静态水气分离及再利用技术

研制出了具有高吸水性能、低液体流动阻力、低体积变形率聚乙烯醇缩甲醛吸水材料。采用肘式主进风通道, 首先实现了大冷凝水滴的初步分离; 在吸水材料中内嵌弹簧通风通道, 弹簧各圈间留有缝隙, 有利于液体与吸水材料接触, 并利用弹簧支撑避免通道的收缩变形。采用粉末冶金烧结微孔管作为液体输送的关键部件, 并结合适当的限流器设置, 实现了产品液体输送功能(如图 2)。另外, 构建地面气液两相流发生系统, 使用激光颗粒测试仪等设备对产品出入口液体形态进行测试, 解决了地面试验验证技术难题; 建立三维物理模型, 采用拉格朗日法进行微重力下水气分离的仿真研究, 为地面验证提供了参考。

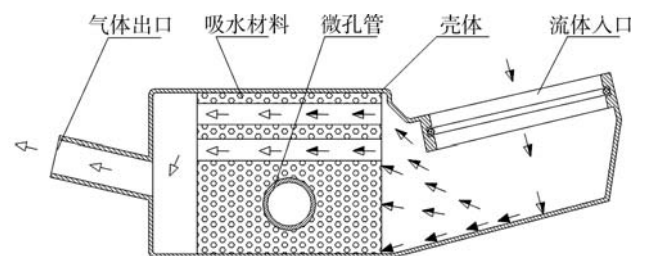


图 2 通风流体除湿示意图

### 2.4 红外 $\text{CO}_2$ 传感器技术

红外  $\text{CO}_2$  传感器光源采用白宝石结构密封, 可

避免热灯丝暴露在纯氧环境中,同时保护罩内充惰性气体,使灯丝免受污染和发生氧化反应,使得光源可以耐受纯氧环境并提高了使用寿命。选用双波长探测器,用参比波长的方法消除由于光源辐射、光强变化、光学元件污染、以及探测器漂移等影响,解决了长期稳定性能。选用具有较低的失调电压(1 $\mu$ V)、温漂(0.02 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C)和输入偏置电流(4pA),以及较高的输入阻抗(1012 $\Omega$ )和共模抑制比(大于 120dB)的斩波稳零放大器 ICL7650S 研制信号调理电路,在保证足够的信噪比的情况下测量传感器较微弱的输出信号。在探头内部安装温度传感器用来测量探头内部的温度,以补偿温度变化对测量精度的影响。红外 CO<sub>2</sub> 测量原理如图 3 所示。

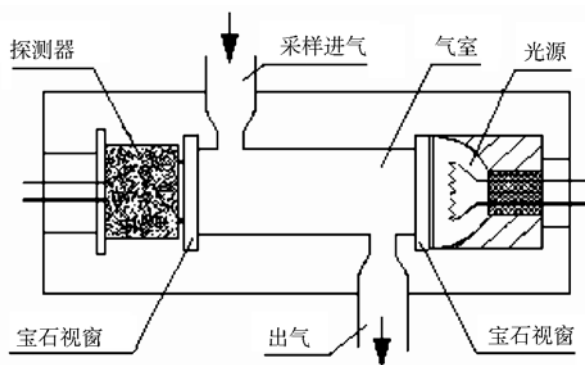


图 3 红外 CO<sub>2</sub> 测量原理示意图

## 2.5 集成控制技术

气液控制台是本系统的操作控制枢纽,研制中解决了复杂控制机构的集成和航天员操作工效等技术难题。该产品设置在舱外服的胸前(如图 4),集成了主备氧源切换阀、正常供氧切换阀、引射供氧阀、应急供氧阀、自动排气阀、液路调温阀、水升华器开关阀、以及多个单向控制阀、状态指示器和复杂的管道系统;并设置了氧源切换、调节器切换、应急供氧切换、液温调节等多个机械操作机构,由航天员操作实现各种供氧模式的切换和航天服内的温度调节。有限的体积约束(体积仅为 160mm $\times$ 120mm $\times$ 125mm)是研制的技术难点之一,另外操作机构需适应航天员在 40kPa 余压下带加压手套操作,研制中解决了产品结构布局、操作方向、操作力矩等多方面的技术难题,并在各手柄上均设置了防误操作锁止机构。

## 2.6 纯氧环境的安全性设计与验证

舱外服内为 40kPa 的纯氧环境条件,本系统的

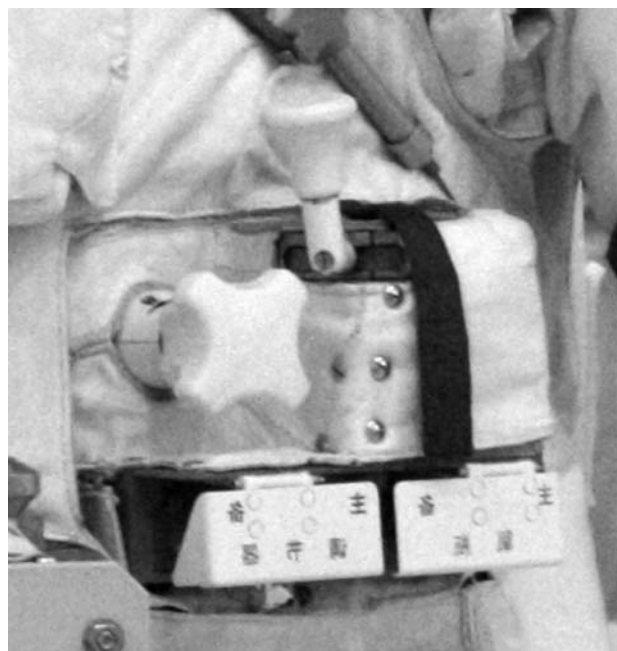


图 4 集成气液控制机构外形图

所有产品上能产生静电的单机,均采取了防火灾安全设计,如:选择阻燃性原材料;在二次电源与负载间串联限流电阻,防止二次电源过载;短路保护措施分散到模块单元,关键电容串联使用,防止短路;印制板分层设计,大面积铺铜,增加电路的散热面,防止局部温度过高;元器件的使用严格进行 I 级降额使用,保证元器件的结温低于安全温度;电路板用有机硅凝胶灌封,增加散热效果,同时防止氧气与元器件直接接触。研制中建立了详细的纯氧安全性试验验证规范,并对产品进行了大量试验验证。

## 2.7 小型化设计与系统集成

依据总体布局,本系统的大部分部件集成在背包中,而可以由航天员操作的控制部件集成在胸前。背包空间非常有限,为了能够优化系统在背包中的整体结构和布局,在方案阶段采用 ProE 三维设计软件进行了大量结构设计和系统布局工作,使得背包内部的整体结构和布局非常紧密、巧妙。为尽可能缩小整个系统装配的体积,除了进行精细化系统方案及整体结构设计外,在产品设计上也大下功夫,完成了小型化的气体循环风机、液体循环泵,以及结构非常紧凑的水升华器、气液控制台等设计。

## 3 地面试验验证

为了考核和评价便携式生保系统的性能,建立了一整套适用于地面模拟试验的方法和技术,设计和构

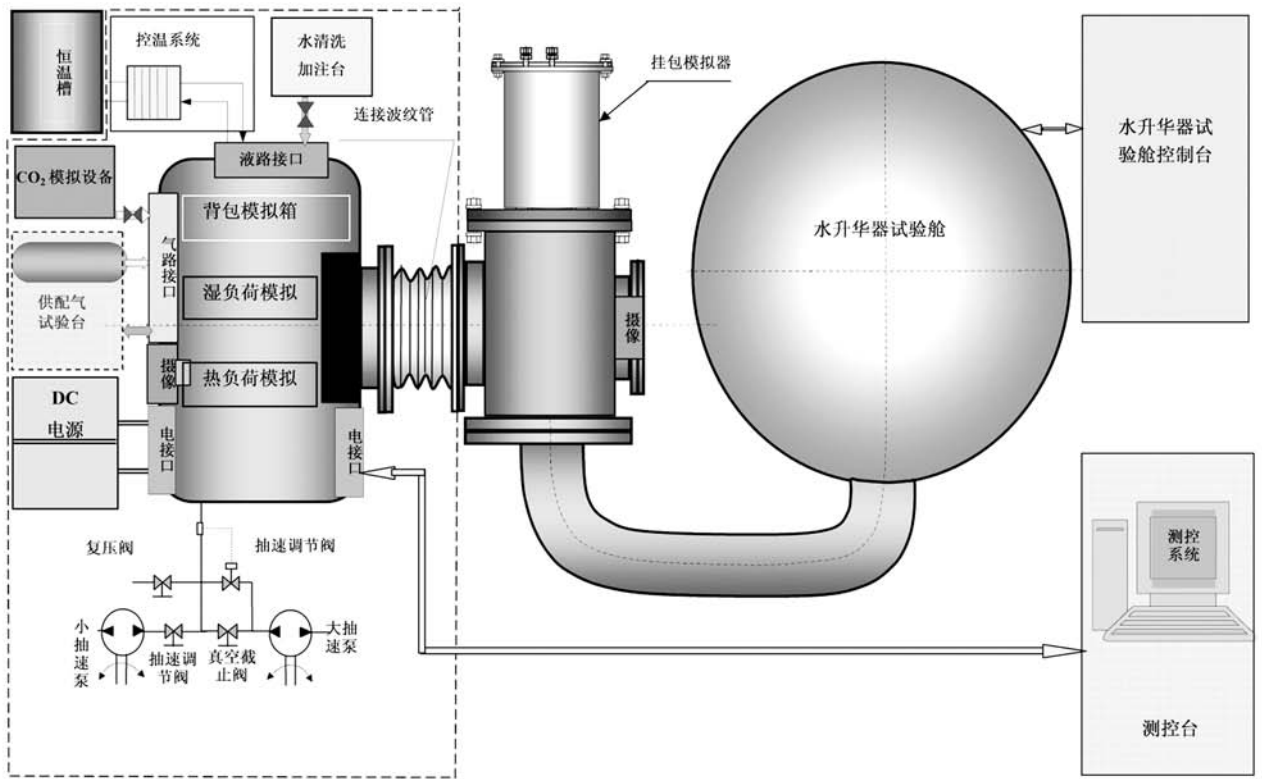


图 5 地面综合模拟试验系统

建了模拟试验平台(如图 5)。并利用该试验平台进行了舱外服便携式生保系统试验验证,为系统的研制、优化设计和评价提供了重要技术支持。主要试验项目包括:正常工况性能验证、故障工况模拟试验、极限工况性能试验、液路相容性试验、纯氧环境安全性验证试验等。

试验系统需重点模拟舱外真空、气体压力变化、人体代谢负荷和测量控制信息等主要因素。地面模拟试验平台具备如下特点:

- 环境相似——采用纯氧、压力交变、真空环境;
- 几何相似——采用物理硬件真实模拟布局及安装;
- 信息流相似——采用硬件模拟和软件模拟相结合,做到供电电制度相似、测控信息相似和控制程序相似;
- 物质流、能量流相似——采用航天员代谢模拟、外环冷却系统、水升华物质传递等。

通过各项试验,验证和考核了单机产品性能、系统匹配性、产品接口协调性以及产品的工作稳定性。特别是低压综合试验、载人低压试验充分考核了本

系统产品在舱外服系统中的综合工作能力,表明本系统产品的性能、环境耐受能力、接口匹配、故障应急、极限工况、操作工效等满足系统要求。

#### 4 飞行应用

2008 年 9 月 27 日下午,航天员穿着“飞天”舱外服成功实施了出舱活动。在整个过程中本系统工作正常,各项数据均满足设计指标要求。

出舱活动段服装压力和氧瓶压力变化趋势见图 6,服装压力控制在 37.96~40.88kPa,主氧源正常供氧共 55min,耗氧约 84NL,平均供氧流量 1.59NL/min。

服装 CO<sub>2</sub> 分压变化趋势见图 7。入口分压代表了服装内环境的 CO<sub>2</sub> 分压,在整个过程维持在 0.04~0.94kPa,出舱活动段 CO<sub>2</sub> 分压明显高于出舱前和返回后,表明航天员代谢率升高。出口分压代表了净化后通向航天员头部的的新鲜气体中的 CO<sub>2</sub> 分压,在整个过程均控制在 0.01~0.04kPa。

通风气体温度及水升华器的出口液温变化趋势如图 8,当水升华器开启后,出口液温从 27℃迅速下降为 3℃,通风温度从 26℃下降为 15℃,系统温控效果明显。

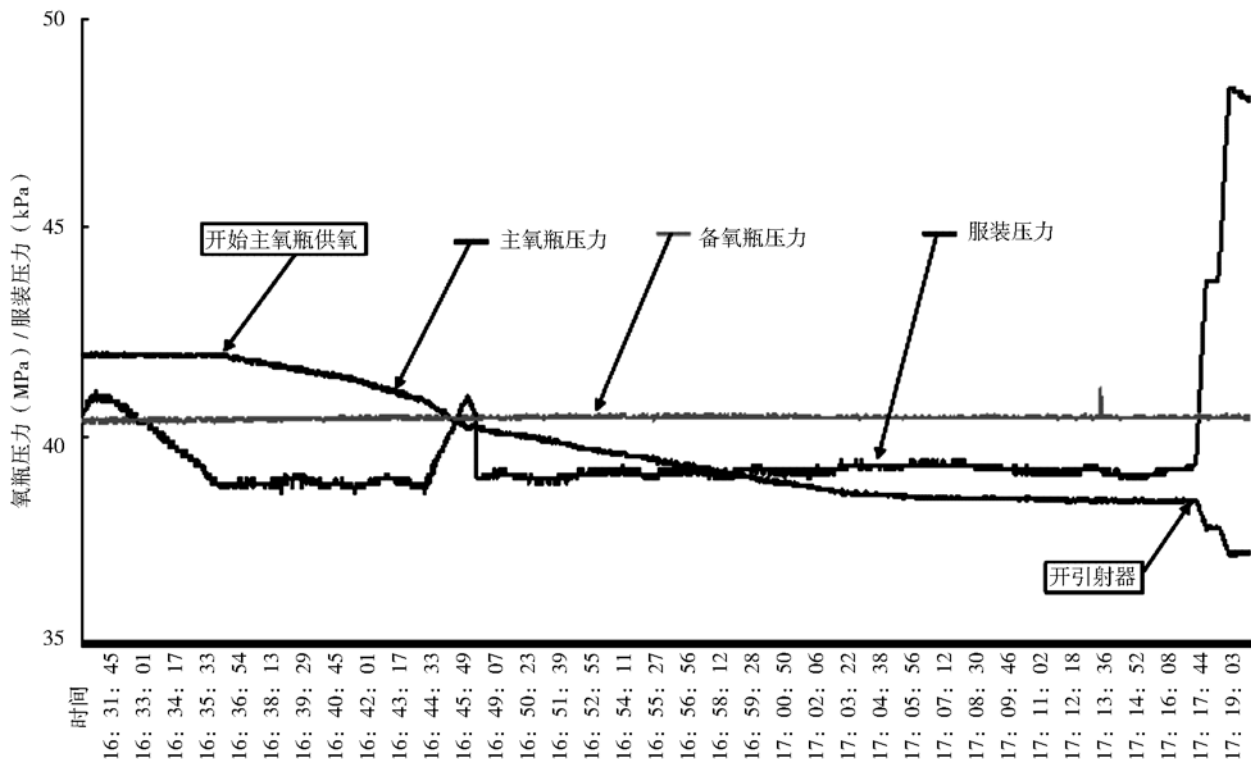


图 6 服装压力和氧瓶压力变化趋势

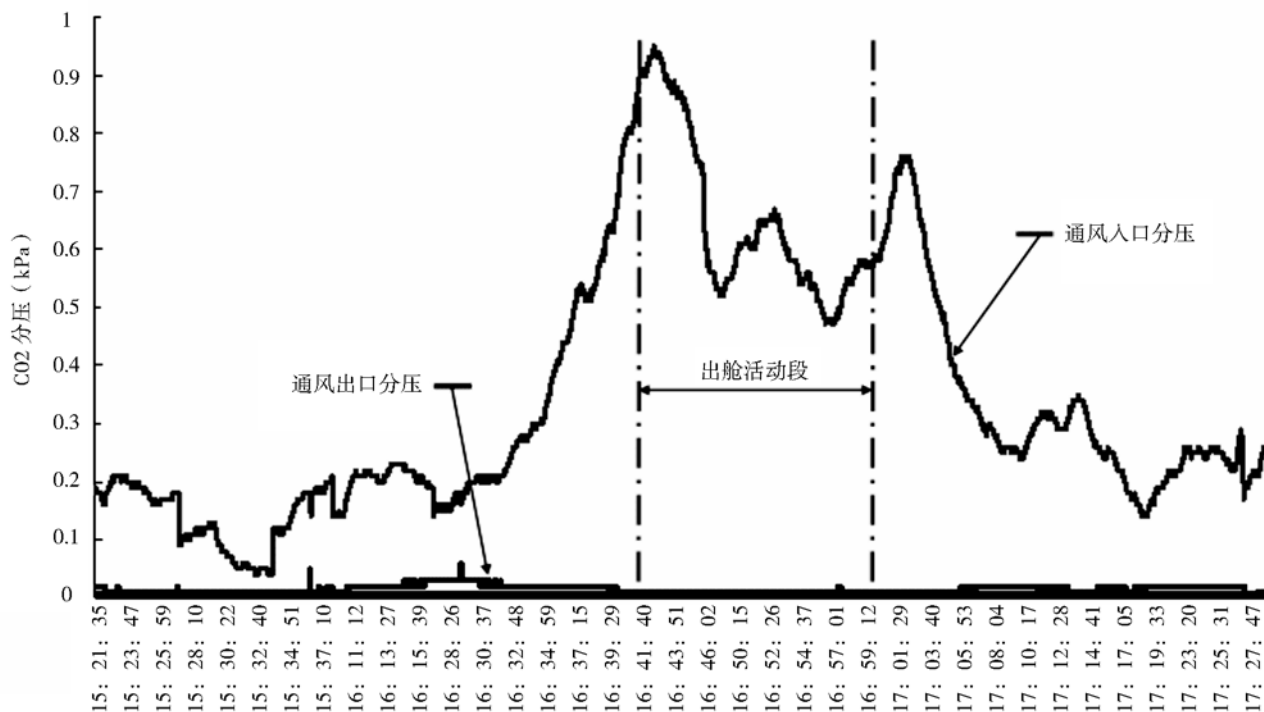


图 7 CO<sub>2</sub> 分压变化趋势

气体温湿度变化情况如图 9，温度始终为 24℃ 左右，湿度在 50~80% 之间。出舱前由于处于舱载和自主模式转换期间，水升华器关闭，故湿度很快上升，在水升华器工作后，湿度得到明显控制。

### 结束语

在本项目的研制中完成了具有高可靠性的系统方案设计，解决了有限空间约束下的系统整体设计

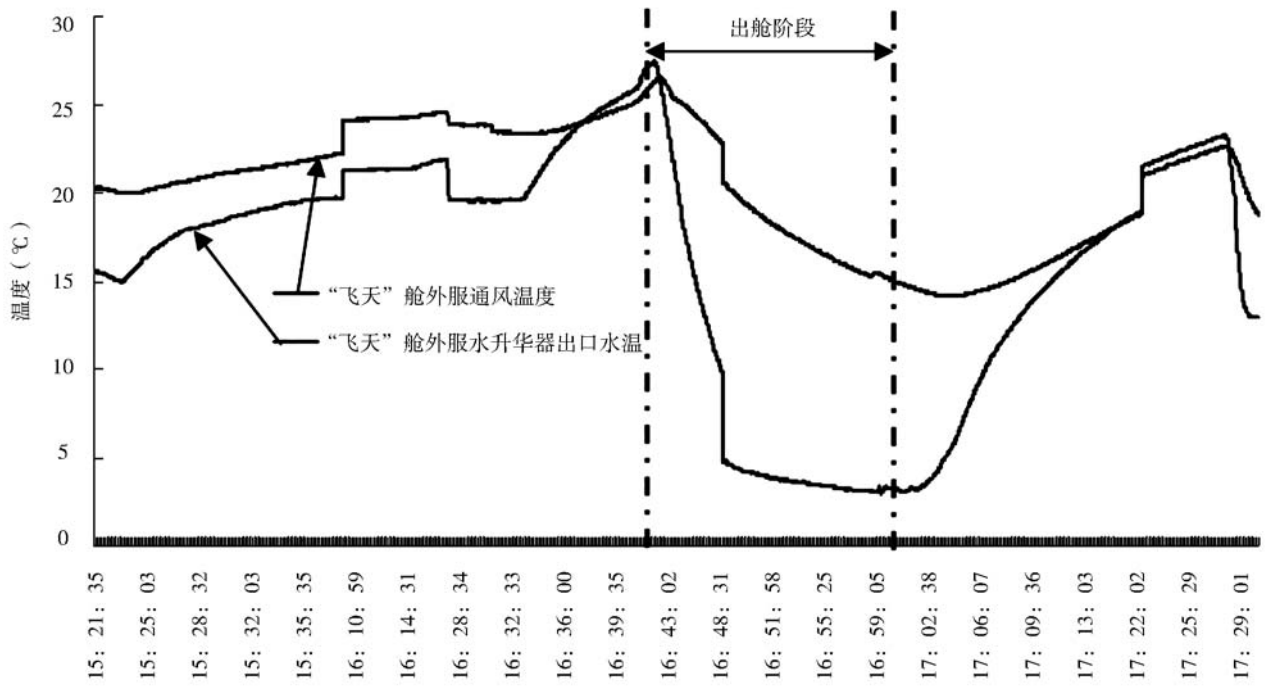


图 8 通风温度及水升华器出口温度变化趋势

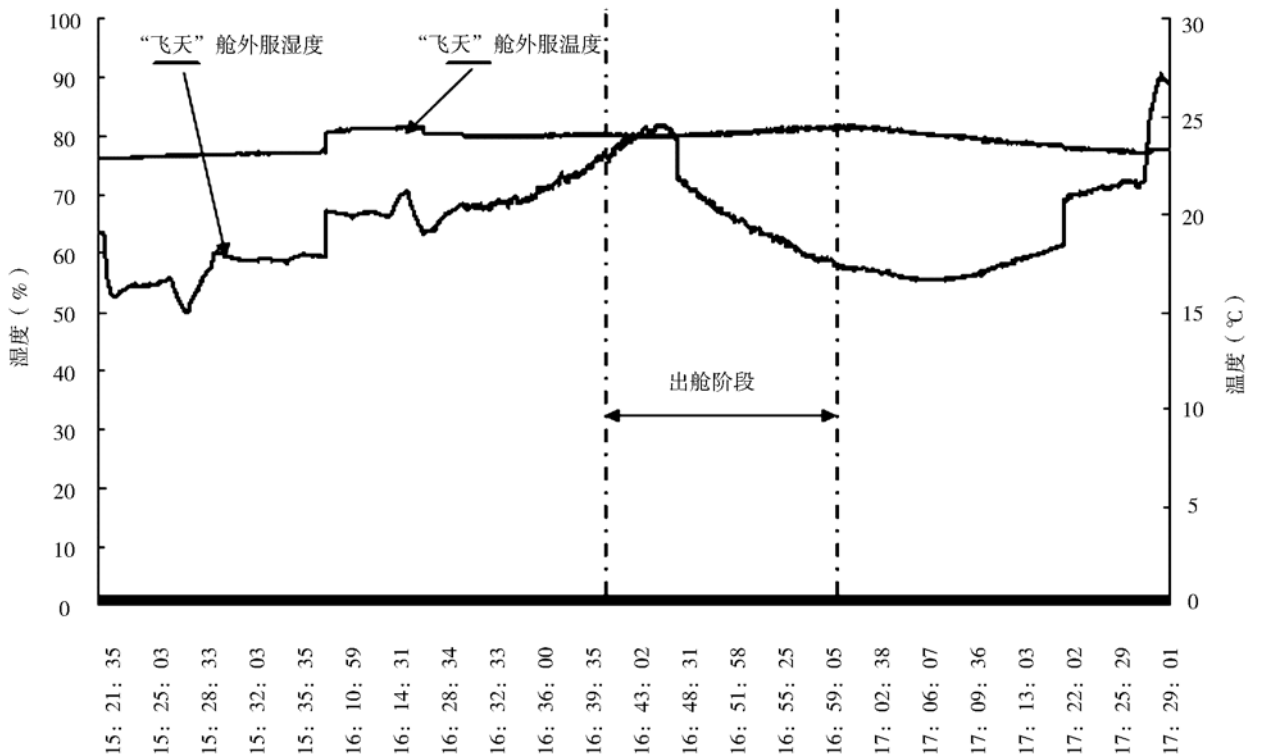


图 9 气体温湿度变化趋势

和系统匹配等难题,完成了小型化、轻量化、高度集成的功能复杂的便携式生保系统工程实现。本系统的研制为我国后续舱外航天服研制的发展提高奠定了坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 陈景山、李潭秋等.航天服工程.北京:国防工业出版社,2003.10.
- [2] 李潭秋.“飞天”舱外航天服的研制.载人航天.2008.4.

(下转第 47 页)