

美俄新型登月航天服技术研究进展

管春磊 李 猛 陈景山

(中国航天员科研训练中心)

摘 要 载人登月,对航天员穿着的航天服提出了多样化的使用环境要求,特别是出舱活动(EVA)期间的需求。通过航天服的研发,美国对登月航天服压力服、液冷服、生命保障系统和通信电子系统等进行了重点研究,制定了相关指标体系,并进行了权重因数评估,建立了地面模拟试验设备,并通过激光扫描和计算机建模等手段,有力地促进了新型登月航天服的研制。俄罗斯也基于“海鹰”-M 航天服,提出了行星压力服设计概念,还特别研究了提供下躯干活动性的相关部件技术。最后,提出了对我国自主研制新型登月航天服的有关建议。

关键词 登月航天服 舱外活动 舱外航天服

分类号 V444.3*91 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2010) 02-0045-08

1 引言

月球环境与空间环境存在很大差异,月球存在引力(相当于地球引力的 1/6),无所不在的月尘时刻威胁航天服外层材料和轴承的性能,月球山峦起伏的地形地貌也给航天员舱外作业带来困难。此外,月球舱外活动内容更为复杂,环境条件更为恶劣,其中包括月球基地的建造和科学考察活动,舱外活动的时间更长,范围更远,这就要求航天服(特别是下肢)具有更好的活动性,生命保障系统能够维持长时间使用并具有模块化替换功能,对通信测控系统性能也提出更高要求。同时,还需要航天服能够与月球车、动力补给站等装备具有相兼容的接口。

历史上,曾真正使用过的登月航天服是美国“阿波罗”航天服,其研制于 1965 年启动,有效保障了“阿波罗”10 次飞行任务,其中经历了多次修改,从最初研制到最后任务完成配备了 A5L、A6L、A7L、A7LB 四种型号航天服。1964 年,随着载人登月计划出台,苏联也曾研制过“鹫”型软式登月服、“隼”型和“海鹰”型半硬式登月服。虽然这些航天服没有经历过实战,但通过改进强化逐渐发展为现在的俄罗斯“海

鹰”系列航天服。

从 1997 年,美国航空航天局(NASA)就开始资助一些私人公司和院校,进行适合月球和火星探索的“先进航天服”项目的研究,先后研制出多种舱外服样机,并每年对先进出舱系统进行为期 2 周的野外联合演练,得到大量可贵经验和数据。2004 年美国公布了“太空探索新构想”和“星座”计划,2005 年秋,NASA 组织各个研究机构,对“星座航天服”系统进行论证,极大地推动了工程研制的启动。俄罗斯航天服研究人员,也对基于俄罗斯“海鹰”航天服技术的登月舱外服概念进行了初步研究。本文对美、俄新型登月服的研究进展和成功经验进行了分析,希望对相关研究人员有参考借鉴作用。

2 主要研究内容

2.1 压力服技术

登月舱外航天服主要由通风液冷服、舱外压力服、防护(包括热、微陨石、灰尘和辐射)服,以及生命保障系统、测控系统等组成,其中登月舱外压力服是重要的组成部分,也是美、俄新型登月舱外服初期研究的重点,通常由头盔、上躯干、下躯干(包括腰部、

来稿日期:2010-02-22;修回日期:2010-05-20。

作者简介:管春磊(1976.09-),女,硕士,助理研究员,主要从事航天医学工程科技情报研究。

腿部和脚部)、衣袖和手套组成。虽然麻省理工等高校提出一些新概念压力服(如生物航天服、变色龙航天服等),而且 NASA 也向社会公开招标“星座”计划航天服,但美国近些年进行的月球和火星压力服新技术研发,还是以 Mark III(图 1)和第一代、第二代 I-Suit(图 2)等先进航天服样机为基础进行的。所进行的研究包括:



图 1 Mark III 压力服

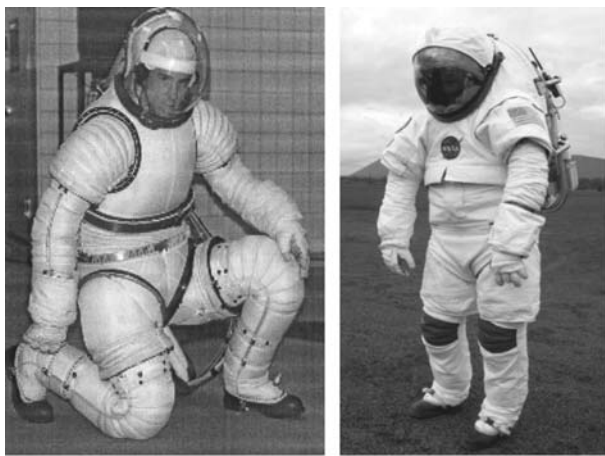


图 2 第一代 I-Suit(左)和第二代 I-Suit(右)

(1)上躯干技术研究。根据未来登月任务需要,美国国际橡胶公司(ILC Dover)研制出用新型布料制成的软式上躯干(SUT)样机^[1],SUT除了质量轻、可折叠存储之外,其最大的优点是可以被快速重新组合和尺寸调整。此外,NASA 相关人员还提出背心式上躯干与气闸舱相结合(即“航天服气闸舱”概念)^[2],防止月尘污染的相关技术。俄罗斯航天服专家研究了上躯干与月球车的接口方案^[3],即采取“三点式机械接口”技术,通过该项技术,乘组成员能够自主完成

所有的气闸过程、航天服穿脱、月球车上车/连接/下车和长时间月球车驾驶。

(2)下躯干技术研究。俄罗斯登月压力服方案中^[4],特别在下躯干使用一种软关节(全织物技术)和轴承相结合的技术,极大地提高了下肢活动性,能够满足月球科学考察时航天员在崎岖地面行走和下蹲采集样本等要求灵活性较大的工作。为了让穿着更为舒适,俄罗斯研究人员提出了下躯干舒适衬垫设计。

(3)手套技术研究。为了避免未来月球舱外作业时手套的热与微陨石防护层(TMG)上产生切口,基于目前美国使用的第六代新型航天服手套,美国国际橡胶公司和 NASA 约翰逊航天中心进行了材料特性评估,研究了材料抗切割特性,手套对切口和系统冲击的响应,试验得到切口试验的数据,研究人员提出了材料局限性和防止尖锐表面产生切口的设计要点^[5]。

(4)登月靴技术研究。由于月球探索活动需要航天员在崎岖而布满灰尘的月表进行大量的行走活动,因此对月球靴的性能要求很高。NASA 研制了改进型航天飞机 EMU 靴子,俄罗斯“星星”与汉密尔顿·松德斯特兰德公司(Hamilton Sundstrand)联合研究与开发出“俄罗斯靴子”,大卫克拉克公司也开发出月球靴(DCC 靴子),并进行了模样对比试验^[6]。此外,还研制了几款“靴套”,套在月球靴外面防止月尘污染,并降低月球靴的磨损。

2.2 通风液冷服技术

由 NASA 和私人公司共同进行一项研究,其目的是开发登月探索液冷服(ExCG)相对较高的工艺准备级别(TRL)设计概念^[7],可以在所有探索任务阶段中,在较大的代谢负荷下保持乘组成员健康和工作效率,而不会妨碍航天服的灵活性。已经研究的子系统 and 设计需求包括致冷量和位置、通风系统、服装结构(也就是所谓服装部件的数量和结构)、服装材料、液冷管布局、辅助设备、水连接装置和生物医学测试背心。此外,美国研究人员也开展了轻型液冷服技术的研究,并建立了结构醋酸乙烯管、冷却水和服装的热性能的液冷服模型和采用高导热材料代替冷却管(即无水冷却)的方案模型^[8]。

在 2000-2002 年期间,明尼苏达州大学研究小组设计了一种新型短液体冷却/加温服(SLCWG)^[9]。该种液冷服管线覆盖了人体热交换高活跃区域(例如,头部或人体内大量血管,例如锁骨下静脉、股骨

动脉等)不仅能实现液冷服功能,而且更为舒适轻便(图 3)。

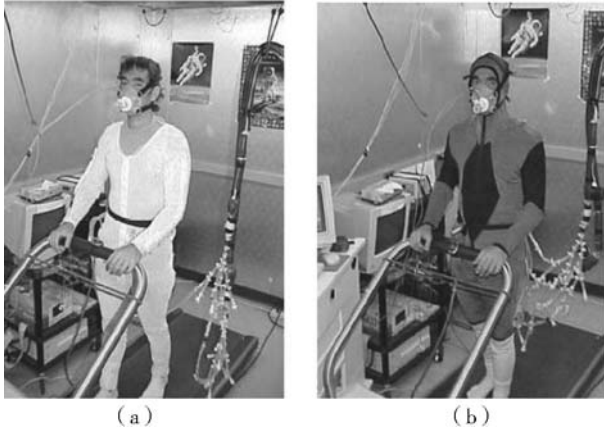


图 3 (a)标准液冷服 (b)试验阶段的 SLCWG。

2.3 生命保障系统

1993 年,美国研究人员进行了可能用于首次 45 天月球前哨(FLO)任务出舱活动(EVA)的几种便携式生命保障系统(PLSS)概念的初步评价。“星座”计划”启动之后,为了保障任务目标,NASA 设定了星座计划航天服系统(CSSE)PLSS 的设计目标是可靠性高、重量轻、可升级/可改造、任务可维护性、体积小(图 4)^[10]。由此对三个特定领域展开研究:电池(和电

子设备)散热、EVA 拆装装置、电池尺寸。此外,还开发了泡沫防护系统,并研究了 PLSS 连接部件,以及内部部件的排列。

2.4 电子信息与电源系统

未来的月球和火星探索将需要具有更大自主性的 EVA 探险活动。这将驱使未来探索 EVA 航天服需要具有新的和增强的性能。NASA 格伦研究中心电子信息分系统研究小组研制了高带宽音频、视频和数据通讯系统;先进的电子控制和传感系统;可以提供自主操作并减少对任务控制依赖的信息系统^[11]。NASA 约翰逊航天中心研究人员正在进行航天服智能信息系统的研发工作^[12],航天服使用两套软件系统:LEGACI(生命保障,探索导航算法和消耗品询问应答机),VIOLET(用于生命保障和探索跟踪的语音控制系统)。这些系统可以利用服装内的一套生物传感器获取实时数据,与舱外航天服的通讯、电子、信息软件一起,提供 EVA 状态、生命保障消耗品、生理状态和安全情况的实时信息。

电源分系统方面,美国研究人员正在进行下一代多功能光纤电池的研究^[13],通过将电池放置在现

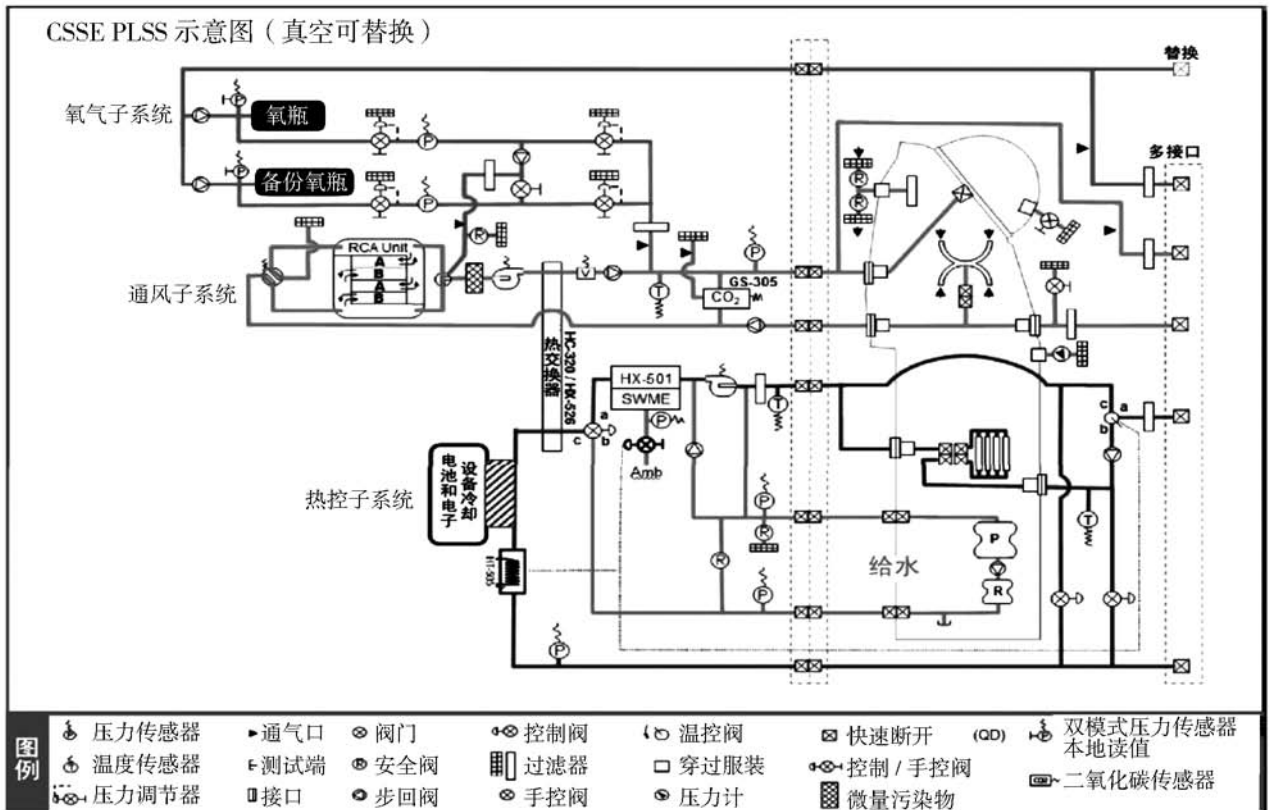


图 4 “星座”计划航天服生命保障系统示意图

有航天服纤维上(例如,在热和微陨石防护服(TMG)层内的纤维织物),整体上减小了质量,并可以得到较高的能量密度。

2.5 材料技术

在约翰逊航天中心(JSC)正在进行的以气凝胶为基础的合成物材料研究^[14],是致力于为新型航天服寻找通用登月和火星绝热材料研究的组成部分。气凝胶是由微型粒子多孔网格构成的固体结构。由于其 90% 多的体积是充气空隙,因此这种材料按质量比有非常大的表面区域,低密度轻型构造具有很好的绝热属性。目前的研究是继续对气凝胶合成物的多次使用循环后期热性能进行调查。研究也提出了将各种类型的气凝胶合成物结构,与航天服织物结合在一起,并且作为完整的航天服部件进行测试。

3 研究方法手段的进展

为了更好地开展研究工作,NASA 和相关企业和院校采取了科学和系统的研究方法,通过建立科学的综合指标体系并展开权重因数评估,对“星座”计划航天服体系进行了总体研究。在多年先进航天服的研制过程中,美国相关机构和企业建立了多种地面模拟试验手段,并广泛应用了计算机建模和激光扫描技术。

3.1 建立科学的综合指标体系并展开权重因数评估

在“星座”计划航天服体系评估中,NASA 相关研究小组首先通过确定“太空探索远景”(VSE)任务组

成部分中航天服的使用和功能需求,确定当时的技术设计驱动因素,提出了 4 种航天服体系结构方案,并为分析 4 种体系结构建立了相关权重因数。分析提出了对 4 种体系结构的选择建议^[15]。

为了配合 NASA 的论证,美国航天服重要的制造商国际橡胶公司和汉密尔顿·松德斯特兰德公司相关专家组成的跨部门研究小组,也对 NASA 的体系进行了研究。研究通过对以往航天服压力服经验的回顾,提出 10 种航天服体系方案(RFP),并做了权重分析,还进行了可以将每种候选体系方案具体化的相对详细的概念评估,并以此为基础制定研究决策(图 5)。

科罗拉多州大学也对此展开了研究,研究之前进行了体系结构评估^[2],确定了 4 种备选航天服构造方案的使用需求,并以此为基础提供了概念性设计方案。另外,还定义了用于实现航天服和各种“星座”飞船脐带和物理连接的飞船接口要求子系统,总结了最终的设计服装及部件概念和飞船接口定义。

3.2 地面模拟试验

(1)新型月球重力悬吊式出舱模拟器。为了对航天员进行登月舱外活动训练,并进行航天服活动性验证和工效学试验评价,NASA 约翰逊航天中心飞船模拟实验室(SVMF)建立了低重力模拟器(Pogo)实验室^[16],为了提供连续的重力卸载,Pogo 把受控气压缸伺服系统用到了应变器上,在穿着航天服被试运动范围内提供持续重力卸载,以模拟低重力状态(图 6)。

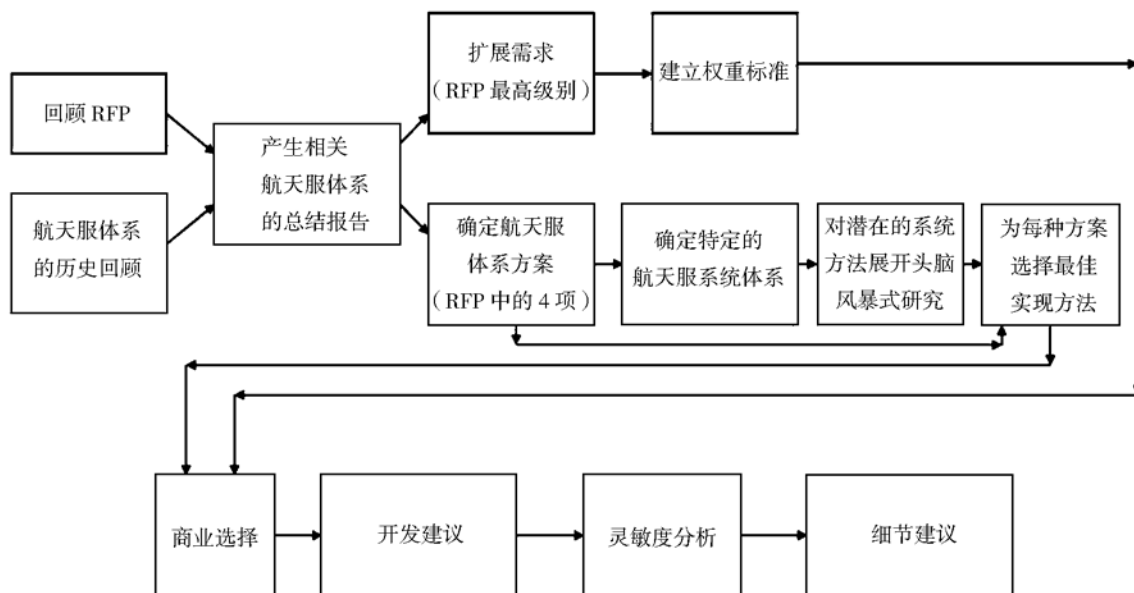


图 5 国际橡胶公司和汉密尔顿航天服体系研究过程



图 6 NASA 约翰逊航天中心低重力模拟器(Pogo)实验室

(2)荒漠环境模拟、训练试验条件的建立。为了对月球环境进行仿真模拟试验,NASA 约翰逊航天中心(JSC)专门建立了“岩石场”(Rock Yard)试验基地(图 7),分为火星模拟场和月球模拟场两个区域。月球模拟场的地基为加固的碎石灰石,上面覆盖着黑星花岗岩,场内设有三个月球陨石坑。三块场地面积均大约为 42.7m×42.7m。



图 7 JSC 的 Rock Yard 试验场

“灰烬湖”(Cinder Lake)则是进行仿真行星表面设备综合和复杂交互系统测试活动的测试场,提供了大面积测试区(图 8)。其火山灰和火山灰合成物可以模拟月球月海区域的环境。

在这些场地上,NASA 每年进行为期两周的荒漠试验(RATS),主要的航天服测试内容包括:航天服活动性、航天服照明、航天服与其他舱外设备的接口验证、科学考察地质和生物学样本采集和处理过程、航天服测控通讯系统、航天服系统监测、医学生理学监测、生命保障系统及其后勤补给、两名航天员出舱协作等任务等等。



图 8 Cinder Lake 试验场

(3)水下环境模拟试验、训练条件的建立。NASA 近几年一直在在美国海洋与大气管理局(NOAA)位于佛罗里达海岸上的“宝瓶座”海水水下实验室里进行海下模拟月球环境的试验和训练(NASA 极端环境任务实施计划-NEEMO,图 9)。在海下实验室内还测试航天服的材料和构造、通信技术、导航战略、获取地质样本的方法、月球居留地施工技术和远程控制机器人。此外,为了在中性浮力水槽内进行登月模拟试验,马里兰大学空间系统实验室正在进行 MX-3 登月水槽航天服的研制工作。

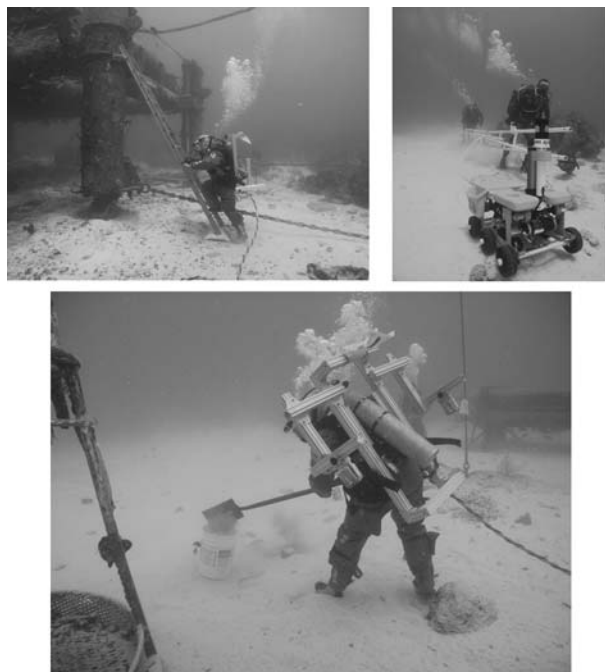


图 9 航天员在“宝瓶座”进行登月任务模拟训练

3.3 利用激光扫描技术建立航天服计算机 3D 模型

新型航天服样机的研发过程中,研究人员广泛使用了计算机建模和激光扫描技术。例如,在 I-Suit 软上躯干(SUT)的研制过程中,ILC 的研究人员使用激光扫描技术建立了软上躯干的计算机 3D 模型^[1]。

对三种不同宽度位置上的袖口平面 SUT 进行了扫描。扫描包括完全展开位置的,和袖子宽度减少 50% 的位置(图 10),还进行了具有穿着航天服经验的被试者的激光扫描(图 11),被试者的手臂在身体两侧下垂,随后其手臂将与躯干垂直。通过反复的增压航天服评估过程和 3D SUT 模型内 3D 人体扫描处理,建立起一种基于舒适和有效性的最佳适体性确定算法。这种方法也将用来确定保障航天服舒适性和被试者灵活性的上躯干尺寸调节的局限性。

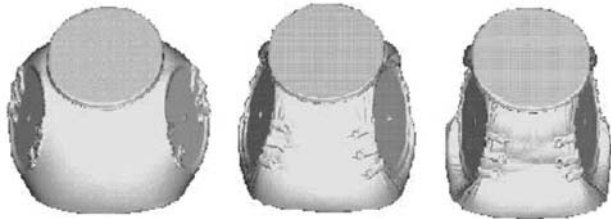


图 10 原型 SUT 激光扫描表面模型



图 11 被试激光扫描

4 思考与建议

目前,我国也积极推行探月计划,相信在不远的未来,也会开始我国登月航天服的研制工作,国外特别是美俄的相关技术值得我们借鉴和学习。除了加强航天服总体论证和预研,制定科学合理的战略路线图和指标体系之外,还应该不断地展开对现有航天服的研究和改进,对舱外服的全寿命、全功能进行测试,探究现有技术的潜力,为新型舱外服的研制和改进提供基础。登月航天服预研工作可以从以下几个方面展开:

(1)开展医学与工效学设计要求和评价技术研究

航天服技术研究部门需要与航天医学、航天工效学研究部门展开深入合作,进行广泛试验研究,为

登月航天服研制提供各项详细的医学和工效学指标。对中长期低压下呼吸纯氧和高浓度氧的生理效应进行分析和研究。还需要进行最优活动性需求分析,特别是进行穿着不同活动性服装的情况下执行任务时工作负荷的比较。

(2)高性能材料研究

舱外航天服的改进,很大程度上是随着科学技术的进步,将新材料、新工艺引入航天服的基本结构框架中。高性能材料的制造,需要从原理、设计、工艺、制造等多方面进行系统全面的创新型研究,因而技术难点多、研究周期长,需要进行前瞻性的研究。航天服需要的高性能材料包括:铝基复合材料、高性能纺织材料、高性能合成橡胶材料等。必须对其展开月球应用的针对性的研究和试验,开展高效热防护材料、轻量化材料等高性能材料的研究,并提出对比意见,对其进行升级改造。

(3)登月压力服设计研究

登月压力服研制首先需要明确服装压力制度和压力要求,解决服装压力和居住舱压力的关系,研制能够智能调节压力的调节系统,保障短时间吸氧排氮和长时间出舱的需要。此外,限制服装质量和体积也非常重要,而且质量应提供足够的杠杆作用,防止乘员从月面腾空而起。手套的灵活性设计对于舱外活动系统的发展最为重要。手套的灵活性决定了手部的工作能力。手套位置应设计合适,在抓取物体时不需要额外用力,而且具有相当的灵活性和反馈。在现有基础上,结合整形外科(尤其是手部)研究人员和手套设计人员的最新知识来进行手套性能的评测和测量标准的制定。

(4)开展便携式生保系统设计研究

航天服生命保障系统对于航天服研制来说非常重要,必须展开此方面的研究包括:研制再生式生保系统;减少背包质量和体积;改进系统冗余,所有关键子系统都备有系统设计冗余,在其中一个发生故障的情况下完成目标;提高水质,能够处理水质的各种变化;提高高压供氧系统的安全性,对于高压氧系统,清洁具有不易挥发的剩余物(包括碳氢化合物)的氧气加注是非常重要的,而且需要定期检查。这种检查需要测试到百万分之一的水平,以确保其安全范围。

(5)在轨维护技术研究

模块化是维护服装的一个辅助措施和备份的一种有效手段,同时也是控制费用的合理办法。所有的登月航天服尽可能最大程度地使用在轨替换模块(ORU)能力。对于长期登月任务来说,ORU 能力以及同时运输备件的能力将可以减少发射质量需求,同时改进全部任务的可靠性。

(6)开展电子显示和控制技术研究

航天服信息显示应简单明了,而且只显示一些需要的信息,主要需要与现在操作任务相关的信息以及与安全相关的状态信息。状态信息应该基于一种调用机制。对于一些极为重要的事件,应给予报警,但是应先让地面与舱内处于监督模式下,只在需要时才提请乘员注意。只有这样,出舱乘员才能集中精力执行好任务。

(7)开展针对各种环境条件的专项研究

目前面对未来空间探测需要,需要解决空间条件中各种环境因素的防护问题,这是一个长期性、难度大却又无法回避的技术难题。不同空间层次的环境影响因素有相似处,但各有其特点,其防护研究又各有侧重点,需要进行系统性的研究,同时又需要根据任务剖面的不同开展针对性研究。各种空间环境影响因素经常耦合在一起,需要开展深入的理论研究以及工程实践经验的大量积累。主要应开展的专项研究包括:月尘防护技术、月球重力环境下活动性技术、极端高低温防护技术、辐射防护技术等专项研究。

5 结束语

月球环境与月球任务与空间出舱存在很大差异,攻克载人登月航天员系统技术,登月航天服的研发是重要的一环。美俄研制新型登月压力服的经验可以证明,一定要立足现有研制基础,重视总体论证,不断进行新技术新工艺的突破,同时还应该鼓励和资助私人公司和大学参与,分阶段进行概念研究和预先研究,重视系统接口并开展大型联合演练,才能科学而有序地进行这项复杂和艰巨的工作。◇

参 考 文 献

- [1] David Graziosi, Jinny Ferl and Keith Splawn. Development of a Space Suit Soft Upper Torso Mobility/Sizing Actuation System. SAE2004-01-2342, 2004
- [2] Luis A. Trevino, Charles Allton, et. Advanced Airlock Concept Studies for Exploration Surface Systems. SAE 2006-01-2234
- [3] Abramov, N. Moiseyev and A. Stoklitsky. Concept of Mechanical Interfaces for Planetary Space Suit to Airlock and Rover. SAE 2002-01-2313
- [4] Abramov, N. Moiseyev and A. Stoklitsky. Concept of Space Suit Enclosure for Planetary Exploration. SAE 2001-01-2168, 2001
- [5] Linda Hewes, Keith Splawn, Mary Jane O'Rourke and Rajib Dasgupta, Cut Resistance Analysis of Glove Thermal Micrometeoroid Garment Materials for Constellation Space Suit Systems Design Considerations. SAE 2008-01-1992
- [6] Amy J. Ross, Joseph J. Kosmo, Nikolay Moiseyev, Anatoly Stoklitsky, Daniel Barry, Edward Hodgson. Comparative Space Suit Boot Test. SAE2002-01-2315
- [7] Janet Ferl, Linda Hewes, et. Trade Study of an Exploration Cooling Garment. SAE2008-01-1994
- [8] Grant Bue, Luis Trevino. Thermal Analysis of Lightweight Liquid Cooling Garments Using Highly Conductive Materials. SAE2005-01-2972
- [9] Victor S. Koscheyev, Gloria R. Leon and Aitor Coca. Comparison of Shortened and Standard Liquid Cooling Garments to Provide Physiological and Subjective Comfort During EVA. SAE 2004-01-2347
- [10] Paul Dillon, Gretchen Thomas, et. Flexible Packaging Concept for a Space Suit Portable Life Support Subsystem. SAE 2009-01-2345
- [11] David Carek, Diane Malarik, Michelle Manzo, et. Concepts for Advanced Extravehicular Activity Systems to Support NASA's Vision for Space Exploration. AIAA 2006-348
- [12] Brian Berland, Bruce Lanning, et. Multifunctional Fiber Batteries for Next Generation Space Suits. SAE2007-01-3173
- [13] Henry H. Tang, Evelyn S. Orndoff and Luis A. Trevino. Thermal Performance of Space Suit Elements with Aerogel Insulation for Moon and Mars Exploration. SAE 2006-01-2235
- [14] Klaus, D. Bamsey, M. Schuller. Defining Space Suit Operational Requirements for Lunar and Mars Missions and Assessing Alternative Architectures. SAE2006-01-2290
- [15] Steven Dionne, Edward Hodgson. A Comparison of Pressure Suit Systems Architectures for the Space Exploration Enterprise. SAE2006-01-2135

Advances in the American/Russian Lunar Extravehicular Space Suit

GUAN Chunlei LI Meng CHEN Jingshan
(China Astronaut Research and Training Center)

Abstract: Lunar manned spaceflight presents a variety of operational environments in which astronauts will need to wear a space suit, especially during Extravehicular Activity (EVA). In the development of the advanced space suits, NASA experts are focusing their research on Lunar pressure suits, liquid cooling suits, portable life support subsystems, communications avionics and information subsystems, etc. During this, NASA and relative organization have established appropriate trade variables with associated weighting factors for analyzing the proposed architecture options. They have built simulation facilities and used laser scanning technology and 3D computer model. Based on Orlan-M space suit, Russian proposed Planetary Space Suit (PSS) enclosure design concepts, especially for elements providing mobility of the lower torso assembly. Finally, proposals about developing lunar space suit of China are provided.

Key words: Lunar space suit; Extravehicular Activity; Extravehicular Activity space suit

《载人航天》2009 年度刊发优秀论文 评选结果公布

经《载人航天》编委会审定,以下 12 篇获奖文章为《载人航天》2009 年度刊发优秀论文:

一等奖:《神舟七号航天员出舱活动总体设计与飞行实践》,发表于 2009 年第 2 期,作者:陈金盾、刘伟波、陈善广。

二等奖:《航天测控通信新体制研究》,发表于 2009 年第 1 期,作者:钱卫平。

三等奖:《载人运载火箭迭代制导方法应用研究》,发表于 2009 年第 1 期,作者:吕新广、宋征宇。

三等奖:《航天发射一体化仿真训练系统》,发表于 2009 年第 2 期,作者:陆晋荣、樊忠泽、聂冲。

三等奖:《载人深空飞行返回再入策略研究》,发表于 2009 年第 2 期,作者:闵学龙、潘腾、郭海林。

优秀论文:《载人航天器结构优化设计的数值方法》,作者:陈飙松、张洪武、亢战、陈同祥、刘刚、康健;《空间交会调相轨道设计和变轨规划研究评述》,作者:罗亚中、张进、李海阳、唐国金;《载人航天器操作器系统评述》,作者:朱仁璋、王鸿芳、泉浩芳、王晓光;《空间实验室技术综述及发展战略》,作者:何宇、杨宏、白明生;《钢丝绳的弹性变形对锁系机构运动同步性的影响分析》,作者:郑云青、柏合民、刘志;《充气可展开结构技术在空间探索领域中的应用》,作者:关富玲、徐彦、郑耀。