

神舟七号航天员出舱活动 总体设计与飞行实践

陈金盾 刘伟波 陈善广

(中国航天员科研训练中心)

摘要 航天员出舱活动总体设计,是决定任务的关键技术之一。围绕人、服、舱、失重和真空环境,解决复杂系统人机环境的医学工程难题,制定系统总体方案,实施医学综合防护,确保我国航天员穿着专门研制的“飞天”舱外航天服,安全、健康和高效地完成首次出舱活动任务,突破出舱活动技术。着重介绍航天员出舱活动任务分析、总体设计、出舱活动方案设计、系统集成与验证和飞行验证结果。

关键词 神舟七号 出舱活动 总体设计 系统集成 飞行验证

中图分类号 V7 **文献标识码** A **文章编号** 1174-5825 (2009) 02-0001-09

1 引言

2008 年 9 月 27 日 16 时 41 分,航天员翟志刚、刘伯明分别着“飞天”和“海鹰”舱外航天服执行出舱活动,舱外活动 19min,完成了出舱、舱外通话、国旗展示、有效载荷回收、舱外行走后回到轨道舱内,圆满完成了出舱活动任务,实现了我国空间技术发展具有里程碑意义的重大跨越,标志着我国成为世界上第三个独立掌握空间出舱关键技术的国家。

空间出舱活动突破了三大技术:舱外航天服研制技术、出舱活动航天员训练技术、气闸舱研制技术,其中前两项是航天员系统研制实现的。

航天员出舱活动总体设计是神七任务的重中之重,重点围绕人、舱、服、失重和真空环境等要素开展研制,解决复杂系统人机环境的医学工程难题,其主要内容包括航天员出舱活动任务分析、识别难点和关键点、系统总体设计、系统集成与验证、出舱活动方案与程序设计、航天员-舱外航天服-气闸舱接口设计、安全可靠设计、地面试验验证、出舱活动专业技术支持等。本文重点介绍航天员出舱活动任务分析、总体设计、出舱活动方案设计、系统集成与验证和飞行验证结果。

2 航天员出舱活动任务分析

2.1 主要任务及重点与难点

突破出舱活动技术是我国载人航天发展规划第二步第一阶段的两大主要任务目标之一。根据工程总体的统一部署,在神舟七号载人航天飞行任务中首先突破出舱活动技术,神舟七号飞船充分利用神舟六号飞船的成果,在继承返回舱和推进舱技术状态的基础上,对轨道舱进行改造,使其兼具气闸舱功能;按计划乘载 3 名航天员,飞行 3 至 5 天,执行空间出舱活动。航天员系统据此完成以下主要任务:

(1)航天员选拔训练,提供合格的飞行乘组,执行飞行和出舱活动任务。

(2)实施飞行前、中、后和出舱前、中、后航天员医监医保。

(3)研制舱外航天服。

(4)研制乘员装备,包括舱内航天服、航天食品、医监设备、工作生活用品、个人防护装备和个人救生装备等。

(5)医学和工效学要求与评价,包括对飞船工程设计的医学和工效学要求与评价;对舱外航天服设计的医学和工效学要求与评价,以及舱外作业任务

来稿日期:2009-03-25

作者简介:陈金盾(1966.11-),男,硕士,研究员,主要从事航天医学工程总体及载人航天安全可靠研究。

的工效学要求与评价。

(6) 航天环境因素对人体的影响等医学问题及其防护措施研究。

(7) 出舱活动方案与程序的设计与验证。

(8) 为舱外航天服研制试验、出舱活动训练及系统验证试验研制所需的地面试验与训练设备。

相对神舟六号和神舟七号飞行任务中出舱活动航天员选拔训练、舱外航天服研制、出舱活动医学防护、大型地面设备研制、出舱活动医学和工效学要求与评价、出舱活动程序设计与验证均属新增任务,而且技术难度很大。如何确定科学合理的技术指标,保证舱外航天服研制、出舱训练、大型设备研制同步展开研制、接口匹配,是总体设计面临的挑战;飞行时间短、测控覆盖率低、航天员处于生理功能不稳定期,如何保证出舱任务成功和航天员安全,是出舱方案和程序设计的难点;人-服-舱接口复杂,如何保证接口协调,是降低研制风险的关键;出舱活动地面试验验证属于新的技术领域,需要解决有人参与试验的方法和安全问题。因此,做好航天员出舱活动总体设计、集成与验证,是保证神舟七号飞行任务成功的关键。

出舱活动是项高风险、高负荷的太空作业,在程序上分为在轨组装检查训练、出舱准备与过闸、舱外活动和返回过闸四个任务段,航天员需通过大量地面训练才能熟练掌握出舱活动技能,并在入轨后短时间内适应空间特因环境,避免出现影响出舱活动的空间运动病和减压病;舱外航天服在国内属首次研制,技术复杂、难度大。因此,神舟七号飞行任务航天员出舱活动任务航天员系统研制的重点和难点是:舱外航天服研制、出舱活动飞行乘组选拔训练、出舱活动医学问题防护。

2.2 舱外航天服研制任务分析

舱外航天服是航天员出舱活动时用于防护宇宙空间环境对人体危害的个人防护作业密闭服装,主要功能是防止真空、热辐射/热沉等近地球轨道空间环境因素对人体的危害,具有气密、承压、隔热和一定的抗微流尘/空间碎片冲击等性能,并具有良好的关节结构活动性能和面窗视觉防护能力,保证航天员在飞行器表面正常操作活动,是航天员出舱活动关键装备。

根据国外发展情况、国内研制力量及任务计划安排,采用引进俄罗斯“海鹰”舱外航天服的同时,开

展国内研制工作。

舱外航天服实际上是一个小型的载人航天器,其研发本身就是一项技术构成复杂、结构集成度高、技术综合性强的系统工程。由于研发周期短、基础薄弱,挑战极为严峻,是整个神舟七号任务的短线和关键。

2.3 飞行乘组选拔训练

神舟七号飞行乘组的主要任务包括正常和应急飞行任务、出舱活动任务。这次任务的主要特点是入轨后第一天任务繁重、出舱时机与航天员空间运动病高发期重叠、操作难度大、工作负荷重、协同配合和应急处置能力要求非常高。

神舟七号飞行乘组在进行飞船飞行技术训练的基础上,重点进行出舱活动训练。出舱活动训练是一项内容多、技术复杂程度很高的训练项目,而地面无法同时模拟失重和真空环境,必须通过出舱活动程序训练模拟器、模拟失重水槽、舱外航天服试验舱等多个现场实施训练。

美国、俄罗斯经验表明,往往几个小时的出舱活动任务,需要进行较长时间的模拟失重水槽和出舱活动程序训练模拟器训练。而神舟七号飞行任务航天员训练资源和时间都非常有限,顶层策划和总体设计尤为重要。

2.4 出舱活动医监医保与医学问题防护

出舱活动时航天员不仅面临着失重、低压、空间辐射、高低温等多种因素的共同作用,而且出舱活动本身高负荷、高风险的操作任务将对航天员的能量代谢、心血管功能乃至心理等机体状态产生明显的影响。

根据国内外航天飞行资料统计,大部分航天员入轨约 3 天后才能适应失重环境。而神舟七号飞行任务计划在飞行的第 2 天实施出舱活动,正处于空间运动病高发期。空间运动病一直是航天医学中的重要问题,具有发病率高、病程快、对运动敏感、发病机理复杂、难以预测等特点,其主要症状为不适、呕吐、恶心、昏睡、头痛、厌食等,其中呕吐的发生率最高,占 86%,不仅会降低航天员工作能力和效率,而且呕吐物可能污染舱外航天服和座舱环境,导致出舱活动无法完成。

执行出舱活动任务过程中,航天员需经历从 91kPa 到 40kPa 再到 91kPa 的不同气体压力环境,可能诱发减压病。

针对神七任务出舱活动特点,重点开展空间运动病、减压病、立位耐力等医学问题与防护措施研究和航天员出舱活动前、中、后医监医保工作。

3 航天员出舱活动总体设计

3.1 总体设计的指导思想和原则

(1)突出以人为本的设计思想,以确保航天员安全为设计原则。

(2)以完成出舱活动任务为目标,注重系统安全可靠性和整体性能优化。

(3)充分继承载人航天工程一期的成功经验和成熟技术,保持技术状态的相对稳定。

(4)加强国际合作,舱外航天服研制与引进并举,注重借鉴、吸收国外成熟的载人航天技术,降低技术风险,缩短研制周期。

3.2 系统组成与任务分解

根据上述任务分析结果,结合载人航天工程一期研制模式和经验,在出舱活动中航天员系统任务分解为总体设计和 14 个模块(见图 1),分别由系统总体、舱外航天服和 10 个分系统(航天员选拔训练、航天员医监医保、舱内航天服、航天营养与食品、失重生理效应与特因防护、地面模拟试验设备、航天员训练模拟器、医学要求与评价、工效学要求与评价、医监设备)承担。

总体设计包括系统设计与专项设计。系统设计的主要内容对系统任务进行分析和分解并提出研制技术要求,控制接口及技术状态;将涉及面广、系统性强模块纳入总体专项设计;各模块依据技术要求开展详细设计和研制。在各模块研制的基础上,进行系统集成与验证,确保航天员出舱活动任务成功。

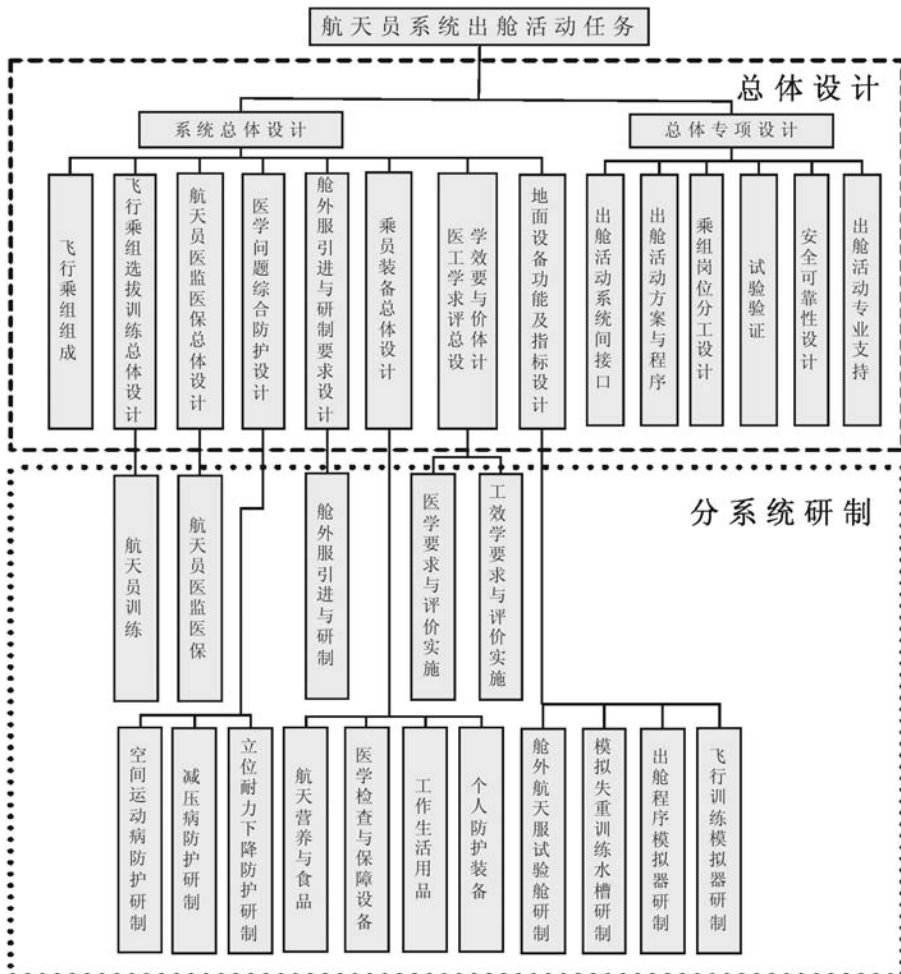


图 1 神舟七号飞行任务航天员出舱活动任务分解

3.3 飞行乘组选拔训练

3.3.1 飞行乘组选拔

神舟七号任务飞行乘组从现有航天员队伍中选出。根据神舟七号任务出舱活动任务特点和要求,主要从思想政治素质、身体情况、心理素质、知识与技能等方面对航天员进行全面的考核、检查与评定,并有针对性的补充、强化有关选拔项目与内容:

(1)思想政治素质考评:主要对航天员的政治合格、爱岗敬业、刻苦训练、遵章守纪及团队精神等方面的军政素质做出评价。

(2)医学检查与评定:主要对航天员的健康状况、一般生理功能、航天环境耐力与适应性进行检查与评定。针对神舟七号飞行任务特点,新增高空减压病易感性检查和身体基本素质检查,强化了前庭功能检查和耳气压功能检查。

(3)心理素质测评:主要对航天员的情绪稳定性、危机处理能力及心理相容性等做出评价。新增敢为性和心理搁置能力的评价。

(4)训练成绩考评:主要对航天员的专业知识与操作技能、故障识别、判断和处理能力、对飞行程序和故障预案的掌握以及协同配合能力等进行考核与评价。新增出舱活动相关知识、技能及出舱活动程序的考评,并作为心理成绩考评的重点内容之一。

(5)选拔综合评定:在单项考评的基础上,主要对思想政治素质、医学检查与评定、心理素质测评和训练成绩等考评结果,并结合其它要素进行综合评定。选拔各阶段综合评定的重点不同,各项目所占权重也不相同,同时强调对重点项目的一票否决。

飞行乘组选拔分初选、定选和确认三个阶段实施:

(1)初选:从参选航天员中优选出 6 名航天员,并进行初步分组,参加任务训练。

(2)定选:在任务训练基础上,对初选出的 6 名航天员进一步考核评定,确定飞行乘组和候补航天员,并确定乘组人员岗位。

(3)确认:在人-船-箭-地联合检查之后、射前 2 天等关键节点,对飞行乘组和候补航天员的健康状况、思想、心理状态及训练考评情况进行评价和确认。

3.3.2 航天员训练

神舟七号飞行任务航天员训练包括常规训练、飞

船专业技术训练、飞行程序与任务模拟训练、出舱活动训练及大型联合演练等五大类 24 个项目。其中,出舱活动训练是新增任务,也是最重要的训练项目。

出舱活动训练是一项内容多、规模大、技术复杂程度和风险均很高的训练项目,主要包括出舱活动基础理论训练、潜水训练、舱外航天服理论与操作技能训练、气闸舱理论与操作技能训练、出舱活动手册学习、出舱活动程序训练、故障处置训练、舱外有效载荷回收操作训练等。

出舱活动程序训练必须涵盖“人、舱外航天服、气闸舱、太空环境”四要素,而在地面无法同时模拟真空和微重力的复合环境,也没有一个训练设备能覆盖所有的训练内容。因此,出舱活动训练采用分阶段训练的方法,在出舱程序训练模拟器、模拟失重水槽、舱外航天服试验舱等设备上实施训练:

(1)航天员在出舱程序训练模拟器主要进行出舱准备与过闸段、返回过闸段等正常出舱程序(舱外活动段除外)训练和故障处置程序训练,使航天员熟练掌握舱外航天服操作和出舱工作程序。

(2)航天员在模拟失重水槽主要进行开/关舱门、出舱/进舱、舱外行走、舱外有效载荷回收操作、正常出舱程序训练;通过水槽训练,可使航天员熟练掌握在模拟失重状态下身体的运动与姿态控制以及出舱活动操作的特点、方法、技巧和技能等,体验微重力条件下的漂浮和平衡感觉,掌握着舱外航天服状况下的运动技巧,掌握进出舱方法和舱外作业方法。

(3)航天员在舱外航天服试验舱主要进行舱外航天服和气闸舱设备操作训练、常压和低压条件下的正常出舱程序和故障处置训练。低压训练设置了 53kPa 和 10kPa 两种工况,在 53kPa 低压训练中既安排了正常出舱程序训练,也安排了故障处置训练;在 10kPa 低压训练中,主要进行正常出舱程序训练,期间穿插进行运动负荷体验和开/关水升华器和引射器等操作,并进行部分故障体验。通过低压训练,一方面考查和训练航天员对近似真空环境适应能力和工作能力,突破心理障碍,在心理上做好执行穿插活动任务的准备;另一方面也使航天员体验或操作真实的泄复压过程、真实低压环境中的运动负荷、服装温度调控、水升华器和引射器工作。

此外,执行任务前航天员在正样气闸舱狭小环境和真实的人机界面中,进行舱外航天服组装、检

测、穿脱训练。

航天员训练分共同训练、任务训练、强化训练和任务准备等几个阶段实施。训练安排上综合考虑舱外航天服、模拟失重水槽、舱外航天服试验舱、出舱活动程序训练模拟器等产品 and 训练设备研制进度及飞船发射时间,科学统筹、合理安排,在不同的训练阶段安排不同的训练项目,有不同的侧重点,逐步实现出舱活动训练目标:即通过训练,使航天员熟知舱外航天服和气闸舱的结构、布局、性能和工作原理;熟练掌握舱外航天服和气闸舱相关设备的操作技能,包括正常操作和故障的识别、判断和处理;熟练掌握正常出舱程序和故障应急处置程序。

3.4 航天员医监医保与医学问题防护

遵循预防为主、寓治于防的原则,采取中西医结合、药物与物理防护相结合等综合防护措施,最大限度地降低航天员空间运动病发病概率,防止出现减压病,提高航天员的心血管功能状态,保障乘组不因身体状况影响出舱活动任务,健康返回。

3.4.1 医学问题综合防护措施研究

针对神舟七号飞行任务特点及航天员面临空间运动病、减压病的风险,重点开展空间运动病、减压病、立位耐力不良等医学问题防护措施研究,主要包括以下几个方面:

(1)乘组选拔:在选拔中增加高空减压病易感性检查,注重前庭功能及立位耐力检查。对于重要单项检查项目,采取单项不合格淘汰制。

(2)航天员训练:将前庭功能训练、心理应激反馈能力训练及心血管功能锻炼作为专项训练,纳入整个训练方案中并重点实施,以提高航天员的综合素质。

(3)药物防治措施:开展药物配比方案、药物效果、作用方法、用量、使用时间等研究,确定在轨联合用药方案,并落实到乘员装船产品中。

(4)物理防护措施:采用中西医结合、物理防护与药物防护相结合的综合防治方法,开展耳穴刺激、穴位按摩等物理防护措施效应研究,确定物理防护方案。

(5)诊断与处置:制定空间运动病、减压病的在轨检查方法、诊断标准及处置预案,并落实到飞控故障处置预案中。

(6)整体状态调整:采用作息制度调整、心理状态调适、中医药调理等措施,将航天员整体状态调整到最佳。

3.4.2 综合防护实施方案

上述综合防护措施合理落实到飞行前、中、后的选拔、训练、医监医保、飞程序序和出舱程序中:

(1)乘组航天员第 2 次进场前实施被动性前庭功能训练、空间运动病防护心理训练和中药耳穴贴敷。

(2)飞行前 28 天起航天员服用提高心血管功能的药物;发射前 8h 服抗运动病预防用药。

(3)在轨期间定时服用抗运动病预防用药及提高心血管功能的药物,出舱准备时注射抗运动病药剂。

(4)飞行中根据个体感觉,采取呼吸调节、穴位按摩等方法缓解飞行中的不适;出舱活动前安排出舱航天员充分的休息和睡眠时间,保持良好的身体和精神状态。

(5)出舱活动前对舱外航天服内进行大流量氧冲洗,航天员进行吸氧排氮,防止减压病发生。

(6)返回前约 12h 补液,并进行下肢肌肉锻炼。

(7)飞行中根据航天员的主诉、生理指标和图像,实施医学检查和确认;发现问题时,及时启动医学应急预案,指导医学处置。

通过上述飞行前、中、后的综合防护实施方案,防止航天员出现空间运动病、减压病和立位耐力不良,保障航天员健康地完成出舱和飞行任务。

3.4.3 航天员医监医保

(1)根据出舱活动任务特点,预测出舱航天员负荷状况,制定航天员出舱前、中、后的医学检查方法、程序和评价标准。

(2)制定航天员放飞与中止飞行的医学标准,以及出舱放行与中止舱外活动的医学标准。

(3)制定航天员飞行期间和出舱活动期间的医监医保实施大纲和医学应急预案,并对航天员实施医监医保。

(4)飞行前航天员身体健康维护、伤病预防,发射前对航天员进行医学跟踪和医学鉴定,并实施医学放飞。

(5)制定航天员出舱前、舱外活动过程中及出舱后医学检查方法和程序,并制定出舱后航天员恢复的方法和程序。

(6)对返回后的航天员实施医学检查及有效的

医学处置措施,从医学的角度促进航天员再适应。

3.5 舱外航天服研制

3.5.1 目标

(1) 研制能够确保首次出舱任务安全可靠的系统,实现出舱活动核心技术的突破。

(2) 采用先进的系统结构体系,具备逐步发展成为国际主流舱外航天服的能力,适应后续出舱任务发展需要。

3.5.2 主要技术指标和要求

神舟七号出舱任务采用飞船作为母船,利用轨道舱作为气闸舱,出舱舱门直径不大于 850mm。气闸舱内配置两套舱外航天服,两名航天员联合执行出舱活动任务,一人出舱进行舱外行走和有效载荷回收等舱外作业,另一人在气闸舱内实施协助、救援工作。根据神舟七号飞行任务要求,系统设计约束条件、医学和工效学要求,兼顾后续技术目标,确定舱外航天服总体技术指标和要求:

(1) 质量:出舱状态总质量不超过 120kg。

(2) 功耗:独立工作总功耗不超过 55W。

(3) 工作时间:独立工作时间不小于 4h、舱载联合工作时间不小于 2h。

(4) 压力制度:出舱正常工作压力为 40kPa (绝对压力)。

(5) 尺寸适应性:能够满足身高 165~175cm 的非极端体型航天员穿着使用。

(6) 密封性:总漏气率不大于 1L/min (40kPa 余压)。

(7) 服内气体环境指标:氧气不低于 95%,盔内

口鼻区的 CO_2 不超过 1.33kPa,重负荷工作条件下不超过 2.67kPa,时间不超过 15min;氮不超过 $20\text{mg}/\text{m}^3$;CO 不超过 $15\text{mg}/\text{m}^3$;有机物不超过 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(8) 热控性能:轨道热真空环境中,舱外航天服漏入/漏出的辐射热流不超过 $\pm 130\text{W}$;手套能够耐受温度为 $-110^\circ\text{C}\sim+110^\circ\text{C}$;独立工作模式下,散热能力满足人体代谢和设备散热要求,开展服内气温 $18\sim 28^\circ\text{C}$ 。

(9) 人体代谢热保障能力:按人体代谢平均 300W,最低 100W,最高不低于 600W 保障散热能力;耗氧量为平均 52.4L/h,最大 77.3L/h; CO_2 产生量为平均 47.1L/h,最高 73.4L/h。

(10) 工效学要求:穿脱方便,经过训练后穿脱时间不大于 5min;操作和视觉保障工效满足出舱活动任务工效学要求。

(11) 视觉防护能力:头盔面窗能保护航天员免受紫外线辐射,具有防眩光能力和良好的防雾能力。

(12) 同时使用遥测通信能力:舱外航天服状态参数、服内环境参数、航天员生理参数具有有线和无线两种遥测传输方式;与飞船实现无线全双工通话。

3.5.3 系统组成与构型

舱外航天服由本体结构、环控与生保、医监与遥测、控制与显示等分系统组成,采用半硬式结构,由头盔、躯干、上肢和下肢等部分组成(见图 2)。头盔为不可拆卸硬式结构,四肢为软式结构,手套可快速断接。进出方式为后背铰链门方式,采用操纵杆控制,生保系统集成于背包门内;无线遥测装置安装在可拆卸的挂包内。航天员自操纵部分,即电动控制和

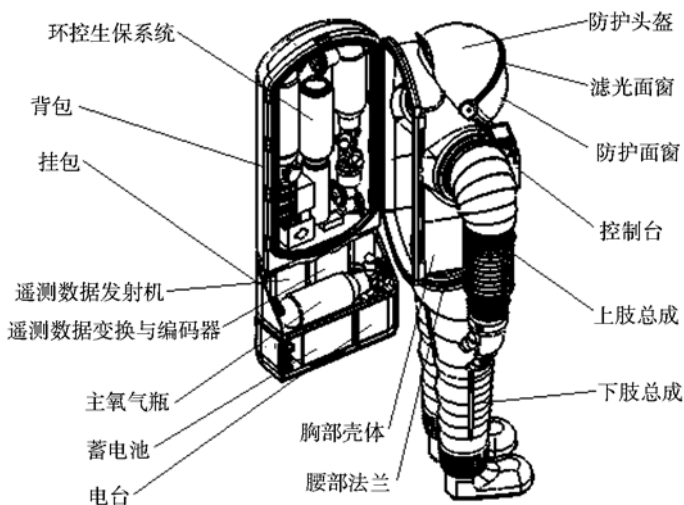


图 2 舱外航天服构型与总体布局

气液控制集成于腔前位置,通过整合设计保证操作工效。

舱外航天服设计能够支持舱载和自主两种工作模式,具备压力防护、热防护、工效保障、服内环境控制和生命保障,以及遥测通信等功能。

3.6 乘员装备研制

在神舟六号飞行任务基础上,按照 3 名航天员共同完成神舟七号飞行任务的技术状态要求,配置舱内航天服、航天食品、医监设备、救生装备、医保卫生用品、工作生活用品等 70 件乘员装船产品。

3.7 出舱活动医学和工效学要求与评价

3.7.1 医学要求与评价

针对首次出舱活动飞船及其气闸舱、舱外航天服特点,制定医学要求,确定出舱活动人体代谢参数,为工程设计提供依据;结合工程研制试验,对飞船及其气闸舱、舱外航天服实施医学评价。

3.7.2 工效学要求与评价

针对首次出舱活动飞船及其气闸舱、舱外航天服和舱外作业的特点,制定工效学要求,为工程设计提供依据;结合工程研制试验和训练,对飞船及其气闸舱、舱外航天服和有效载荷实施工效学评价。

3.8 出舱活动地面设备研制

为完成神舟七号飞行乘组选拔训练、舱外航天服研制试验、系统试验验证等任务,研制的主要大型地面模拟训练与试验设备有:

(1)研制舱外航天服试验舱,模拟气闸舱泄复压过程和真空环境,满足舱外航天服低压性能试验、有人参与综合试验和航天员低压环境出舱训练需求。

(2)研制出舱活动程序训练模拟器,在常压环境中提供四自由度运动功能,模拟出舱准备与过闸、返回过闸过程中舱外航天服和舱载设备的响应,模拟出舱活动故障,满足航天员正常和故障出舱活动程序训练需求。

(3)研制模拟失重水槽,配置水槽训练服和全尺寸气闸舱模型,利用中性浮力配平技术,模拟失重状态,用于出舱活动程序验证,满足航天员进出舱、开关舱门及舱外活动训练需求。

3.9 人-服-舱系统接口设计

包括人-服-舱-服和人-舱-服接口设计:

(1)设计发射上升段(打包状态安装)、在轨出舱准备和出舱时舱外航天服及其配套设备与轨道舱间

的机械安装接口,确定不同阶段航天员对服、舱的操作方法及操作空间,满足航天员操作工效要求。

(2)设计舱外航天服与飞船舱载供电接口、遥测通信显示接口,满足舱外航天服舱载和自主、有线和无线两种工作模式间切换的供电、信息、话音通信等需求。

(3)设计舱外航天服与飞船相关设备间液路接口和热交换接口,确保舱载工作模式下船服液路换热接口匹配。

(4)根据乘组人-服之间的匹配尺寸,设计个人装备配型。

(5)针对 1 人出舱模式,设计单套舱外航天服出舱模式的气、电、液等接口。

(6)根据 2 次出舱的要求,设计舱外航天服消耗品配置和使用方案。

4 出舱活动方案与预案设计

4.1 正常出舱方案

综合考虑飞行时间、出舱准备工作、微重力适应期、测控资源等约束,设计提出出舱时机:在飞行的第 2 天末或第 3 天末的连续测控区进行。

第 2 天和第 3 日均为正常出舱时机。首选第 2 天末出舱;如第 2 天不能完成舱外航天服在轨组装、检查和训练等出舱准备工作,则推迟到第 3 天末出舱。

4.2 舱外行走与作业方案

综合考虑时域和空域的设计约束,设计航天员舱外工作内容和行走路径,包括舱外通话、国旗展示、回收有效载荷、舱外行走路径。

4.3 出舱活动预案

针对舱外航天服故障、航天员医学问题、出舱程序延时等可能的异常情况,设计出舱活动预案,包括 1 人出舱、延迟出舱、推迟 1 圈出舱和飞行乘组在轨岗位替换预案,并制定各种预案的最低出舱条件。

4.4 出舱活动程序

根据上述出舱活动方案和相关预案,设计 2 个正常出舱程序、5 个出舱应急程序、35 个出舱故障处置程序和 7 个医学问题处置对策,均经地面试验验证可行、有效。在出舱程序设计中确保航天员发挥主观能动性,无论装备故障、医学问题,还是进程延迟,都能在 3 天内完成出舱任务,提高出舱活动的安全可靠。

5 系统集成与验证

5.1 系统集成

航天员出舱活动任务以人为核心,从出舱能力、出舱方法和出舱装备三个方面进行系统集成,确保航天员健康、高效地完成出舱活动任务(见图 3)。主要体现在以下几个方面:

(1)出舱能力:根据乘组组成岗位分工要求,选拔训练出身体、心理及技能满足要求的航天员乘组,并对其实施医监医保和关键医学问题防护,使其具备出舱活动能力。

(2)出舱装备:根据系统总体设计要求,研制舱外航天服和乘员装备,并对其实施医学、工效学评价,确保产品满足航天员使用要求,人、舱、服匹配。

(3)出舱方法:通过出舱活动方案和程序设计,使航天员、舱外航天服、飞船气闸舱及相关系统接口匹配,协同工作,并实施出舱活动专业技术支持,确保航天员出舱活动安全可靠。

5.2 系统验证

为验证系统方案和系统集成的正确性,在单机和单项试验的基础上,规划并系统验证试验方案,实施完成 3 类 8 个现场 17 项试验,全面验证任务剖面状态和系统设计:

(1)出舱装备验证试验:实施舱外航天服综合性

能试验、船-服联试及整船测试,验证出舱保障装备间接口的正确性和匹配性,同时获取医学工效学评价数据。

(2)出舱方法验证试验:按照出舱活动任务剖面,利用常压环境下气闸舱狭小空间组装试验、低压环境 KM6 人-舱-服试验、水下模拟失重环境试验,验证人-舱-服接口和出舱活动程序,确定出舱活动方案。

(3)人、舱、服和出舱方法的综合验证:由飞行乘组穿着正样状态舱外航天服,在水平放置的正样状态气闸舱中,按出舱活动任务剖面执行出舱活动程序,对人、舱、服和出舱方法进行综合验证。

(4)利用验证过的出舱装备和出舱方法,实施航天员训练,使飞行乘组具备出舱能力。

6 飞行验证结果

2008 年 9 月 25 日至 28 日,神舟七号飞行乘组按照预定方案和程序完成了出舱活动和飞行任务,系统工作正常,人-舱-服接口匹配,证明航天员出舱活动总体设计正确、合理,地面验证全面、有效。飞行实践表明:

(1)神舟七号飞行任务航天员出舱活动总体设计正确、合理:航天员出舱活动总体方案设计正确,对各项目模块的技术要求合理;任务分解合理;乘组岗位分工合理,协同配合默契;“飞天”舱外航天服工

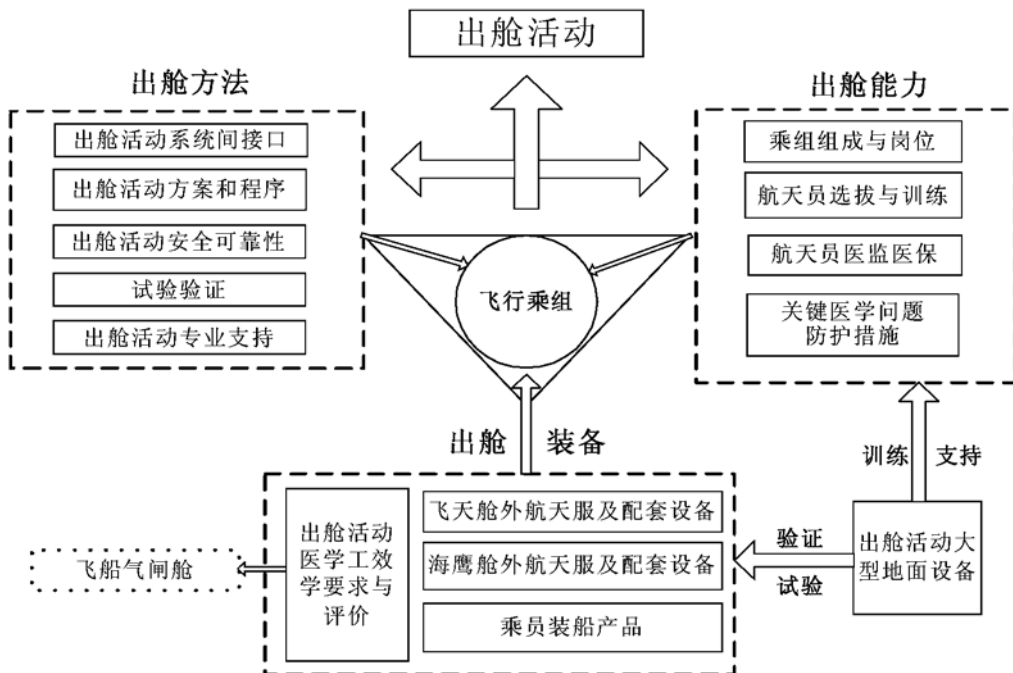


图 3 航天员出舱活动任务系统集成示意图

作正常,工效性能良好,服内环境舒适;系统内外接口设计正确、匹配,人-舱-服系统接口协调;乘员装备配置合理;医学和工效学设计评价正确;航天员出舱能力满足任务要求;出舱方法和程序正确,安全性措施有效;系统整合科学,地面验证充分有效,航天员按第 2 天出舱的首选方案圆满完成出舱任务。

(2)出舱活动方案和程序正确、合理:出舱活动方案设计正确;舱外作业方案合理可行;出舱预案周全、有效;出舱放行条件设置科学合理。出舱程序中航天员职责分工合理,时域空域匹配,程序中事件的逻辑关系编排正确;程序中设计的安全机制正确、有效;出舱程序与测控区匹配精确。

(3)出舱医学问题综合防护措施有效:经过实施医学综合防护措施,航天员在轨飞行中仅出现空间运动病征候,未出现明显的空间运动病;未发生减压病,未出现立位耐力不良,航天员返回地面后身体状况良好。表明医学综合防护措施正确、有效,为神七任务成功提供重要保障。

(4)出舱活动专业技术支持及时有效:为保证出舱成功和航天员安全,准备 97 个预案对策,在第 8 圈至第 30 圈提供 32 次出舱活动技术支持,在舱外活动段提供全程支持;根据出舱活动进程,及时有效地启用在轨组装检查和训练段程序延时预案、开舱门辅助工具使用预案、取消密封圈保护罩安装预案、

航天员延时出舱 4 个预案,有效确保本次出舱按首选方案胜利完成。

7 结 论

神舟七号飞行任务航天员出舱活动总体设计是我国载人航天工程突破出舱活动技术的顶层项目和关键技术之一,围绕人、服、舱、失重和真空环境,多学科融合、优化设计,制定了系统总体方案和完备的出舱方案、预案和程序,实施医学综合防护,总体设计与集成正确,整体性能先进,确保我国培养的航天员穿着自己研制的舱外航天服,安全、健康和高效地完成了首次出舱活动任务,突破了出舱活动技术,取得了重要飞行成果,为交会对接等后续任务积累了宝贵的经验,也为未来空间站建设运营的出舱活动奠定了坚实技术基础。◇

参 考 文 献

- [1] 魏金河, 黄端生. 航天医学工程概论. 北京: 国防工业出版社, 2005.6
- [2] 黄伟芬. 神舟七号载人航天飞行任务航天员选拔与训练. 载人航天.2008.4:19~26
- [3] 李潭秋.“飞天”舱外航天服的研制.载人航天.2008.4:8~28
- [4] 陈金盾, 黄伟芬. 航天员舱外活动危险分析及对策. 载人航天. 2006.2:1~5
- [5] 沈湊云、薛月英等.航天重力生理学与医学.北京:国防工业出版社,2001.1

The system design and flight application of astronaut EVA in Shenzhou VII mission

CHEN Jindun LIU Weibo CHEN Shanguang
(China Astronaut Research and Training Center)

Abstract: Astronaut extravehicular activity (EVA) system design and integration is a key project of Shenzhou VII mission. The system engineering methodology and the medical-engineering integration thought are applied to the project of complex man-machine-environment system. The system scheme is contrived to comprehensive of astronauts, spacesuit, spaceship air-lock, weightlessness, and vacuum. Furthermore, systematic medical measues have been taken to prevent medical problems during EVA. As well, the system design and preventative measues are verified through a series of proof tests. Astronauts trained have successfully finished the first EVA mission, wearing Feitian spacesuit. And technology of EVA has been broken through. This paper summarizes tasks, technical requirements and design principle of astronaut EVA system for Shenzhou VII mission. And a scheme of the system including functions, configuration, task disintegrating, and running mode is discribed. The flight crewmember selection and training, astronaut medical monitoring and support is demonstrated. Feitian spacesuit structure, function and performance are summarized. The system integration and proof tests are depicted. The result of the project application in EVA of Shenzhou VII mission is also presented. In conclusion, the system design is exactitude and legitimacy, as well as the innovations on the system design is mentioned.

Keywords: Shenzhou VII mission; extravehicular activity; system design; system integration; spacesuit