

对航天员出舱活动问题的几点初步认识

刘映国 张国清 石培新 肖建军

(中国国防科技信息中心)

摘要 航天员出舱活动是载人航天持续发展与开展空间科学研究不可缺少的基础技术之一。航天员出舱活动首先必须保证人在宇宙空间生存和工作的能力,能够完成空间设施组装、在轨维修、有效载荷布设等任务。在脐带式出舱活动、机械臂辅助式出舱活动,以及采用载人机动装置出舱活动等三种方式之中,采用载人机动装置的出舱活动显现了许多优点,已成为当今世界载人航天技术研究与发展的一个重要方面。

关键词 出舱活动 载人机动装置 空间组装 空间维修

1965年3月18日,苏联航天员列昂诺夫第一次走出“上升二号”载人飞船,在舱外停留了24分钟。据统计,世界各国共进行了260多次航天员出舱活动,累计在舱外停留的时间达1200多小时。其中,美国实现航天员出舱活动150多次,苏联/俄罗斯实现航天员出舱活动110次,欧洲和日本的航天员也借助美、俄载人航天器进行了出舱活动。这些出舱活动不仅验证了人在外层空间生存与工作的能力,而且完成了空间设施组装与维修、卫星释放与回收等具有明显经济效益的航天飞行任务。实践证明,出舱活动是载人航天持续发展与开展空间科学研究的重要保障,在推动载人航天技术发展中发挥了至关重要的作用。目前,航天员出舱活动技术发展方兴未艾,已经成为衡量一个国家是否可以有效开展大规模航天工程建设与应用的重要标志之一。

1 航天员出舱活动的内涵

出舱活动是指航天员脱离航天器(飞船或空间站)的保护环境,依靠自身的生命保障系统在空间进行科学观察与研究、维修舱外设备、在舱外安装或回收有效载荷、组装空间设施和到星球表面实地探测等活动。出舱活动实质上包括两方面内容:出入载人航天器密封舱,在航天器舱外从事各种操作活动。

总的来看,美、俄完成的航天员出舱活动方式基本可分为三种:一是“脐带式”出舱活动,航天员出舱活动时,出舱活动生命保障(生保)装置放于航天器主舱中,借助连通航天器生保装置和航天服的“脐带”对航天员进行换气(氧气和废气)、换热、供电和

通信等。这种方式因为对技术的局限,在早期的航天员出舱活动中比较普遍,由于脐带限制了航天员在空间的活动范围,因此脐带式生保系统逐渐被便携式环控生保系统取代。便携式环控生保系统采用与航天服一体化设计,提高了安全性和灵活性,但为安全考虑,出舱时都要系“安全带”。

二是机械臂辅助式出舱活动,即航天员在受控机械臂带动下进行空间作业,此方式相对安全易行,但航天员在空间的活动范围仍十分有限。航天员在出舱活动时自身背着自持的生保系统。

三是采用载人机动装置(MMU),即由航天员通过控制该装置在空间“自由”飞行,有时也需要系到主航天器的安全带。这种出舱活动方式是目前最为先进的一种,其在空间机动距离远、行动灵活,也适应在其他星球上探索等深空任务。即使配备舱外活动机动装置,也不排除在大型空间设备组装维护中与机械臂协同工作。

美国最早使用的载人机动装置由洛克希德·马丁公司研制,重达111千克。它由压缩氮气缸、供气系统、喷气推进器、电子控制设备、温度控制装置和蓄电池等组成。它能供给航天员呼吸用氧,有维持人体所需温度、湿度等生命保障条件,还装有使航天员与航天器保持在同一轨道上的专门设备。航天员操纵左右机械臂上的手控器,控制高压氮气从安装在不同部位的24个氮气喷管中喷出,可以改变飞行速度、方向和姿态,实现上下左右前后移动,以及顺转、逆转等机动目的。MMU装有两套互为备份的氮气缸和供气系统,防止发生故障,保证航天员的安全。

1984年2月7日,航天员麦坎德利斯和斯图尔特第一次不系安全带,驾驶MMU进入空间,与航天飞机最远距离达90米。1984年4月,身穿MMU的美国航天员出舱完成了停止太阳峰值观测卫星的旋转的任务。1984年11月,美国航天员又借助MMU回收两颗在轨出故障的卫星。这是一次历史性的使命,标志着人类能够将人造卫星召回地球的新纪元的开始。

2 出舱活动是载人航天技术的重大突破

载人航天飞行、航天员出舱活动与交会对接是载人航天工程的三项在轨基本技术,每项技术都能推动载人航天事业的发展。特别是航天员出舱活动是风险很大的一项航天活动,因为空间环境非常恶劣:真空,温度急剧变化,以及大量的宇宙辐射。因此,航天员在舱外活动时必须使用复杂的出舱活动设备,包括气闸舱、舱外航天服、微型生命保障系统和载人机动装置等。

2.1 气闸舱系统

气闸舱是航天员进行出舱活动的“门户”。气闸舱是一种特设的专用小舱室,主要特点是有内、外两扇闸门,内闸门与座舱相通,外闸门与空间相通。气闸舱的功能是使航天员从载人航天器舱内过渡到外层空间,防止座舱中的空气外泄。气闸舱的关键技术包括:减压阀技术、控制技术和气密技术等。美国在国际空间站上使用“探索”号气闸舱。这种气闸舱既能提供给穿着美国出舱活动航天服的航天员使用,又能给俄罗斯穿着海鹰-M型航天服的航天员使用。在没有这种气闸舱之前,美国航天员只能使用航天飞机(对接以后)的气闸舱或俄罗斯星辰号服务舱上的过渡舱进行出舱活动。

2.2 出舱活动航天服系统

出舱活动航天服为航天员创造适合人生存的环境,保障其正常有效地工作。出舱活动航天服首先必须具有舱内功能,同时还要满足出舱活动的需要:外套具有隔热辐射、隔热和防微陨石功能;真空屏蔽层具有高热阻值,可保证航天员在宇宙空间不受过热或过冷环境的危害;防陨石微粒层,能防止可击穿航天服外层的陨石微粒对人的危害;具有两层气密壳体,在主层壳体(外层)损坏后,内层开始工作,这是由内层压力调节器来完成的;液冷服可以保障人体的热平衡,是航天服与自持式生命保障系统的共同组成部分;头盔可以抵抗冲击过载,其面窗可以预防紫外线对视觉器官的危害。目前,较为典型的出舱活

动航天服有俄罗斯的海鹰-M型航天服、NASA研制的阿波罗舱外航天服和航天飞机出舱活动装备(EMU)。

2.3 生命保障系统

初期出舱活动的生命保障系统,由于微型生命保障技术还不够成熟,或者为了减轻航天员的负重,用一根由多条管道组成的“脐带”,从母航天器中伸出,连接到出舱航天员的航天服上。由母航天器的环境控制与生命保障系统通过“脐带”向航天服输送氧气、压力、冷却水和电力,完成通风、散热,清除废气及提供通信等功能。由于“脐带”对航天员活动的限制,美俄分别研制了背包式环控生保系统。

背包式环控生保系统属于自持式生命保障系统,由出舱活动的航天员背在身上。背包式环控生保系统由供氧装置、温度控制系统、监测系统和无线电通信系统等组成。其功能是,向航天服内输送供氧气和冷却水,维持航天服内的压力和温度,实施通风、散热,以及为航天员提供与载人航天器或地面之间的通信。

2.4 空间机动装置

早期的航天员出舱活动靠航天员使用手持喷气枪喷气产生推力,使航天员在空间机动。这只限于在母航天器周围活动,而且必须系“安全带”,以防止出现意外。航天员使用系带,控制精度差,灵活性小,有很大局限性。另外一种机动方式是依靠固定航天员的机械臂、机械手或导轨实现空间机动操作。空间机动单元和载人机动装置是一种专门实现空间机动的推进装置,带有高压氮气和若干个喷气的推力器,推力器安装在不同位置 and 不同方向。航天员用手动控制不同位置的推力器,向不同方向喷气产生推力,可以改变自己在空间移动的方向、快慢以及身体的姿态。这种专用机动装置能携带的高压氮气,可以让航天员到达离航天器百米远的地方活动。如美国航天员现在使用的载人机动装置叫“舱外活动轻便救援器”(SAFER),是一种有推力的小型喷气装置,结构比较小巧简单,安放在生命保障系统背包的下方。航天员可通过绑在航天服前面的开关控制喷气,实现各个方向的移动。它多次用于“国际空间站”的组装、维修和求援,不使用的的时候可以折叠起来保存。

舱外航天服与背包式环控生保系统,为航天员提供一个合适的压力、供氧、温度、通风的环境,并提供电力和通信能力,保证航天员能脱离航天器,在开放的空间中生存与执行任务。舱外活动机动装置具

备比较完善的轨道机动能力,与航天服、背包式生保系统一起构成了一颗微型航天器。这些相关技术是空间机器人技术发展的重要方面,推动航天器向小型化方向发展。

3 出舱活动是载人航天飞行的重要内容

在载人航天飞行初始阶段,航天员出舱活动主要是试验人在宇宙空间生存和工作的条件,以及为保证出舱活动顺利进行需要提供哪些装备和设施。从 20 世纪 70 年代中期开始,随着载人航天技术快速发展,航天员出舱活动逐渐由试验技术向实际应用转变,主要进行空间组装、在轨维修与回收、空间研究和试验。纵观航天员出舱活动 30 多年的发展历程,在已完成的 254 次航天员出舱活动中,主要用于人在空间的生存能力验证、大型空间站组装、航天器维护、补给与回收、空间科学研究与试验等。事实表明,航天员出舱活动是载人航天飞行的重要内容,为载人航天技术发展和空间科学研究试验发挥了不可或缺的作用,并取得了巨大的政治、军事及经济效益。

3.1 验证人在空间生存的能力

1965 年 3 月 18 日,苏联航天员列昂诺夫,乘上升 2 号飞船遨游空间时,冒险出舱活动了 24 分钟,成为空间出舱活动第 1 人。出舱后,列昂诺夫仅在空间从事浮游、翻筋斗、移动简单的舱外物体等空间生存适应性试验。据统计,人类的前 30 次出舱活动的主要目的都是为了试验人在空间的生存能力,出舱活动的主要工作包括从一艘飞船走到另一艘飞船,在月球表面行走,试验月球航天服等,其中有 6 次为“站立”出舱活动,即航天员坐在舱内的座椅上,上半身伸出舱口外进行工作。直到 1973 年 6 月 7 日,美国航天员查里斯·康瑞德和杰斯弗·科文在第 30 次出舱活动中的主要任务是打开太阳能电池帆板,人类的出舱活动才逐渐由科学试验向实际应用转变。

3.2 在轨组装推动了大型空间设施建设

俄罗斯的“和平”号空间站,全长 32.9 米,总重量为 143 吨,容积达 400 立方米;建成后的国际空间站长 108 米、宽 88 米,总重量达 423 吨,有效容积 1202 立方米。显然,这种大型空间结构必须分批地运到轨道上,然后在天上组装起来,并运到更高的轨道上去。这些工序没有航天员的直接参加并出舱活动,是完不成的。

航天员出舱活动能够在轨组装空间设施,包括

改装现有设备、组装大型卫星天线、太阳能电池阵和大型长焦距相机、大型望远镜等。所有因尺寸、重量或不能承受地面发射冲击的大型结构都可用空间运输系统分批或散装发射入轨,再在轨完成组装。前苏联/俄罗斯航天员通过出舱活动组装“和平”号空间站。当前正在建造的国际空间站,航天员更是进行多次出舱活动,才逐步建设成目前的规模。例如,2006 年 9 月 9 日,“亚特兰蒂斯”号航天飞机载 6 名航天员进行第 116 次飞行,编号为 STS-115。此次任务共安排了三次出舱活动,分别在 9 月 12 日、13 日和 15 日。主要任务是在国际空间站上安装 P3/P4 桁架,展开太阳能电池板,并进行对空间站的维护保养工作。据航天飞机项目主管韦恩·海尔说,“此次任务将接触到国际空间站装配序列的核心部分,很明显,这是美国航天员所遇到的最为复杂的出舱活动和装配任务。”

通过航天员出舱活动建造大型空间设施,并且在上面安装复杂的仪器设备,是提高空间侦察、通信、预警能力的重要途径。美国的有关研究表明,在空间设置一个天线直径为 180m 的相控阵雷达,不仅能探测、跟踪空中飞行的弹道导弹、巡航导弹和飞机,而且可以跟踪海上的船只、地面上的装甲车辆。

3.3 航天员出舱活动使在轨维修、航天器模块更新与回收成为可能

航天器在严酷的空间环境中容易出现故障,对其维修、更换故障单元或增加新的有效载荷,就可以大大延长其寿命或增强其能力。美国航天飞机就多次执行这样的维修任务,还曾在空间捕获失效的卫星,经维修后再次释放卫星。例如,1985 年 4 月,美国海军 LeaSat-3 租赁卫星因上面级火箭故障未进入预定轨道,航天员进行出舱活动,辅助修复排除故障,重新启动火箭上面级将送入静止轨道,同年正式投入使用。还有一次航天飞机上机械手出现故障,未能将捕捉到的失效卫星抓进货舱,通过航天员出舱活动将它拖入货舱,修复后再次送到预定位置。

航天员出舱活动对恢复高价值航天器功能起到重要的保障作用,其中维修“哈勃”望远镜是一个最典型的例子。“哈勃”望远镜是被送入轨道的口径最大的望远镜。它全长 12.8 米,镜筒直径 4.27 米,重 11 吨,价值 15 亿美元。自从 1990 年被送入空间以来,“哈勃”望远镜拍摄到了大量有价值的天文照片。“哈勃”望远镜发射入轨之初就没有达到预期目的,美国进行过近 20 次的出舱活动,对其进行维护、更换部

件和技术升级,不断提高望远镜的性能指标,使其寿命延长至今。2006 年 10 月 31 日,美国 NASA 局长格里芬宣布,定于 2008 年派 7 名航天员搭乘“发现”号航天飞机赴空间继续维护哈勃望远镜。维护工作大约将花费 9 亿美元。航天员将为“哈勃”望远镜新添两架照相机和导航传感器,更换一个已经坏掉的陀螺仪和成像光谱仪,并对旧电池和稳定装置进行升级。这些工作一共需要 5 次出舱活动来完成。之后,“哈勃”望远镜将可以工作到 2013 年。

3.4 航天员出舱活动是进行空间科学研究和实现载人探测其他星球的必备条件

1969 年 7 月 20 日,美国航天员尼尔·阿姆斯特朗和埃德温·奥尔德林乘“阿波罗”11 号飞船首次成功登上月球,实现了人类登上月球的梦想。从 1969 年到 1972 年,美国共进行了 5 次“阿波罗”飞行,共有 12 名航天员登上月球,每次“阿波罗”飞行都对月球表面进行广泛考察,搜集了大量月球岩石、土壤标本,其中从月球上带回地球的月岩样品就达 440 千克。“阿波罗”飞行同时把许多仪器安装在了月球上,进行科学研究。“阿波罗”登月计划只是一个起点,许多宏伟设想还有待实现,许多突破还有待完成。

自 1972 年“阿波罗”登月计划结束之后,30 多年来,人类再没有登上月球。2004 年,美国宣布新空间探索计划,准备在 2020 年之前派航天员重返月球,并建立永久月球基地,随后将尝试登陆火星。在未来的月球基地建设和资源开发等深空探索中,航天员出舱活动是人类进一步探索外层空间的技术基础和必备条件。

4 航天员出舱活动技术发展方兴未艾

经过四十多年的发展,航天员出舱活动技术取得了长足的发展,在人类的载人航天事业中发挥了至关重要的作用。进入新世纪以来,载人航天活动面临着新的机遇和挑战,2001 年“哥伦比亚”号航天飞机失事后,美国在 2004 年宣布了以重返月球和登陆火星为重要内容的“空间探索新构想”;俄罗斯也计划于 2011~2012 年进行首次载人探月飞行,并考虑在月球建造永久性基地;欧空局在 2004 年宣布的“曙光”星际探索计划,其目标就是要力争在 2030 年~2035 年间实现载人登陆火星。此外,已有 4 人成功地完成了太空旅游,美国正在推出太空漫步(出舱活动)的商业旅游项目,这些重要目标的实现,无疑对航天员出舱活动技术与设备提出了新的更高的要求。

美国和俄罗斯将凭借已有的出舱活动技术与经验积累,促进舱外活动机动装置的小型化与灵活性,提高航天服与环控生保系统的性能,发展更多的舱外操作辅助设施。位于德国科隆的欧洲航天员中心的工作就是对航天员进行训练,日本“筑波”航天中心的一项重要任务就是通过中性浮力水槽进行航天员出舱活动的模拟训练,日本还正在开发重量仅为美国航天服 1/6 的新式航天服,供航天员在出舱活动中使用。可以预测,随着人类载人航天活动的深入发展,出舱活动技术将会获得新一轮更大的发展,主要趋势包括:

在出舱活动环境控制与生命保障技术方面,当前研究的重点和热点是非排式排热方案和再生式二氧化碳吸收方案。

在舱外航天服技术方面,早期的舱外航天服都是软性航天服,除了头盔可拆卸外,其余部分是一个整体,随后以俄罗斯研制的“奥兰”型为代表的半硬航天服,采用坚硬的躯干并与头盔结合成一个整体,四肢为软囊,它提高了舱外工作效率,减少了减压病的危险性。当前,航天服与自持式生命保障系统一体化的出舱活动生命保障系统,正在成为航天服技术发展的新趋势。美国正在对火星航天服进行研究和设计,这是航天服设计思想的一次革命,它需要新的思想、技术和材料,以满足人类探索火星的新要求。同时,美国、俄罗斯和欧洲的一些国家还在继续对出舱活动机动装置进行研究,提高航天员出舱活动的机动性,用于支持建造和装配大型空间结构,能够搭载航天员离开航天器在空间一定距离内自由飞行。出舱活动机动装置的小型化、轻量化是各国研发的重点,与航天服一体化设计是其中一种发展趋势。

在出舱活动的医学研究方面,为了对抗空间减压病的威胁,美国航天飞机采用 29.6 千帕压力制度,航天员出舱活动前先吸氧排氮 3.5~4 小时,或者采用阶段降压法。俄罗斯的舱外航天服采用双压力制度,这种灵活的方式降低了发生减压病的概率。为了准备在 2030 年左右载人登陆火星,欧空局还在研究怎样使航天员在飞船中进入“冬眠”状态,以减小飞船空间和节省能量消耗等。

在出舱活动工效学研究方面,出舱活动通道的横断面应根据使用通道的穿航天服的航天员的最大宽度设定,出舱活动使用的工具应适合相对低负荷的运动技巧。出舱活动工作台应有固定安装的和便携式灯光照明。当前,计算机技术已为数字人体模型的

应用提供了仿真人体所必须的计算速度和网络环境,已成为出舱活动人机界面工效学研究的首选方法,是用来解决实际工程中与航天员相关的复杂因素问题的重要手段。

在出舱活动模拟技术方面,早期的出舱活动模拟试验是在中性浮力水池中以及悬挂吊车上进行的,这些分析简单易行,但活动不灵活并具有摩擦力的影响。近年来,出现了把人体肢体作为研究对象,

动态分析航天员在微重力环境中移动的方法,在出舱活动中采用虚拟现实技术,克服了中性水箱和失重飞机的缺点,可训练航天员进行太空中的各种操作。随着虚拟现实技术中的数据手套、数据服以及视景技术的不断完善,虚拟现实技术必将成为出舱活动的一种重要模拟方法。◇

★ 动 态 ★

美国成功发射“亚特兰蒂斯”号航天飞机

【本刊综合报道】美国东部时间 2007 年 6 月 8 日 19 时 38 分(北京时间 6 月 9 日 7 时 38 分),“亚特兰蒂斯”号航天飞机载着 7 名航天员从佛罗里达州肯尼迪航天中心发射升空,飞往国际空间站。这是美国航天飞机第 21 次飞往国际空间站,也是美国航天飞机 2007 年的首次飞行。航天飞机在升空约 8 分钟后,顺利进入预定轨道。6 月 10 日 15 时 36 分(北京时间 6 月 11 日 3 时 36 分),“亚特兰蒂斯”号与国际空间站成功对接。

在预定 11 天的飞行任务期内,航天员将通过 3 次出舱活动,为国际空间站安装一种 17500 千克重的新型 S3/S4 桁架组件和新型太阳能电池板。每个太阳能电池板约 35 米长,两块板展开后约 75 米。“亚特兰蒂斯”号还携带了约 453 千克的货物、太空行走工具和补给品,运往国际空间站。携带的货物包

括一套俄罗斯制造的“索科尔”航天服和为国际空间站第 15 远征队的工程师克莱顿·安德森准备的“联盟”号飞船坐垫。安德森乘坐“亚特兰蒂斯”号前往空间站,替换现在国际空间站上的美国女宇航员苏尼塔·威廉姆斯。

执行此次飞行任务的机组成员共有 7 名宇航员,均为美国男性。这次代号为“STS-117”的飞行任务最初定于 3 月 15 日,但因 2 月底一场冰雹突袭,航天飞机的外部燃料箱被砸出数千个小坑。NASA 被迫将航天飞机撤回,对燃料箱进行为时两个月的修理。这也迫使 NASA 将 2007 年原定的 5 次航天飞机飞行任务缩减至 4 次,发射时间也依次延后。NASA 计划在 2010 年航天飞机退役前,至少完成 13 次空间站任务;在 2008 年 9 月的飞行任务中,计划修复老化的“哈勃”太空望远镜。◇