

浅谈航天器安全性、可靠性、维修性技术实践 及发展展望

于元元

江南机电设计研究所, 贵州 贵阳 550009

DOI: 10.61369/SSSD.2025040014

摘 要 : 随着我国航天航空技术的飞速发展, 我国航天器安全性、可靠性、维修性实现了长远发展, 为航天器的安全运行与航天员的人身安全提供了坚实保障。但其技术实践与未来发展仍有较大提升空间, 需要相关科研人员进一步探索与实践, 为我国的航天事业做出贡献。基于此, 本文将浅析航天器安全性、可靠性、维修性的特点, 并探讨其技术实践与发展展望。

关 键 词 : 航天器; 技术实践; 发展展望

A Brief Discussion on the Technical Practice and Development Outlook of Spacecraft Safety, Reliability, and Maintainability

Yu Yuanyuan

Jiangnan Mechanical and Electrical Design Institute, Guiyang, Guizhou 550009

Abstract : With the rapid development of China's aerospace technology, the safety, reliability, and maintainability of our country's spacecraft have achieved long-term growth, providing solid guarantees for the safe operation of spacecraft and the personal safety of astronauts. However, there is still room for significant improvement in their technical practice and future development, which requires further exploration and practice by relevant scientific researchers to contribute to China's space industry. Based on this, this paper will briefly analyze the characteristics of spacecraft safety, reliability, and maintainability, and discuss their technical practice and development outlook.

Keywords : spacecraft; technology practice; development prospect

引言

安全是航天事业的根本目的和各阶段或各工程目标实现核心理念, 不论是“三步走”发展战略, 还是各阶段或各工程各目标, 都以系统设计的安全可靠、可核实、可维护性设计为基础。10余次载人登月飞行任务成功发射、返航; 天宫一号成功飞行超过4年半, 并且实施了多次交会对接且有人短期驻留; 天宫二号成功飞行超过近3年, 并成功进行组合体在轨维修维护、在轨推进剂在轨加注实验验证和在轨维修技术实验验证, 为未来的空间站建立打下了坚实基础。航天工程通过对飞行器系统的安全性、可靠性和维修性设计活动的开展, 不仅达成了在轨稳定运行、航天员安全以及各项任务圆满完成的目, 还在适应航天器和空间站任务要求, 以及进行长时间运行的高效高质需求的基础上, 实现了跨越式的技术发展。

一、航天器安全性、可靠性、维修性的特点

(一) 对安全性要求极高

航天器的根本宗旨是保障航天员的生命安全。航天器所处的环境中的物理因素会对航天员造成人身危险, 火灾、漏气、有毒有害气体或高压电等都可能危及其生命安全^[1]。在国际空间站上执行任务的航天员会经常出舱工作, 这增加了航天员受到辐射、外部设备电势、工作环境危险以及进行货包装束时的热量、微生物污染和有毒气体的接触几率。此外, 长时间的飞行可能出现系统故障, 这些故

障虽然属于间接的飞行故障, 但也会间接影响航天员的生命安全^[2]。

另外, 随着航天员长时间飞行和执行任务的复杂化, 新的风险也会随之出现, 必须准确查找出共性和个别性的影响安全的因素, 并充分利用产品的安全可靠特性减少这些因素, 对航天器的安全性、可靠性进行有效验证和评估, 这也是航天器相关工作的重点。

(二) 需要较长的运行寿命

随着人们对太空探索需求的增加, 对于航天器的使用周期也愈发提出更高的要求, 需让航天器可在轨运行数周甚至更长时间。然而, 航天器所处的轨道位置是低轨的空间环境, 其中含有

大量等离子体、较高的温度变化率以及大剂量原子氧，这些条件均会对航天器搭载产品，如航天器结构舱体、外部太阳能电池帆板等产生不良影响，进而减少其使用寿命^[3]。另外，由于航天器长时间保持工作状态，致使其自身使用寿命逐步消耗殆尽。对此，为满足以上需求，除了提高设备自身使用寿命，还需通过剩余资源配置、设计操作方式、开展在轨维修处置等方式来延长航天器使用寿命，使航天器更加安全、可靠。

二、航天器安全性、可靠性、维修性的技术实践

（一）航天器安全性技术实践

安全性技术实践是保障航天员生命安全的关键手段，航天器从设计到运行。方案设计期间应用冗余设计，例如，对于主要系统的部件采用备用机设计，这样在主系统失效的时候备用机就可以接管设备的功能，美国阿波罗号的制导与导航系统就采用了这种技术方案，无论是在复杂的太空环境中都可以精确定轨和姿态控制^[4]。生产期间要严格选材，严格把关，在高强度、耐高温、耐辐射的材料中进行选择，例如，采用钛质材料作为航天器的框架，增加了刚度也减轻了负载重量，同时每个零件都需要严格的非破坏检查，运用超声波、X光等方式查找缺陷并排除危险。此外，为防止受到太空的辐射，受到微小天体的撞击等情况，航天器表面要加装特殊防卫屏障，如多层热控隔离材料、凯夫拉纤维护盾等，大幅度降低危险发生。并设置紧急救生系统，在发射和返回过程保护好航天员生命的最后一道防线。

（二）航天器可靠性技术实践

为了确保航天器安全运行以及在复杂的外太空环境能够顺利地完成任务，应采用可靠性技术。从航天器的设计角度出发，运用模块化的思潮，将航天器分成具有不同作用的小部件，如动力舱、信息舱以及发动机等部分，可对其分别进行检查和修理，有利于发现问题和修复问题，而且还能够增加系统的扩展性^[5]。例如，俄罗斯“联盟”火箭已经使用几十年，通过模块化更新实现提升效率和可靠性的目的。为确保可靠性，在大量模拟的手段下，利用计算机仿真实验可以模拟出航天器在上升段、轨道阶段以及返回段所处的物理环境、温度条件和电子状态，进而发现问题并优化设计。除此之外，在实际过程中对其实体进行全系统的集成检测以及长时间运用时长大检测，在模拟的过程中进行航天器整个工作状态的环境检测，确保其稳定性和耐久性。

（三）航天器维修性技术实践

对于航天器，维修技术使用目的是在受限的空间环境与航天员操作条件制约下，妥善处置并保障设备正常运行状态。为了达到维修目标，在系统设计时就采用了便于维修的设计原则，采用了易拆换的结构方式。例如，将常用的设备部件放置在方便航天员操纵的位置，采用快装连接的方式节省维修时间并降低难度^[6]。同时进行了设备的标准化设计，使得相同的功能单元部件互相可以替换，降低维修成本与备用的消耗量。为了发展维修技能，积极开展遥控维修支援技术研究，通过上天与在地之间信息链路，我们实时向航天员提供维修建议，还可以通过高清晰图像传输、

虚拟现实(VR)等方式让地面上的专家“身临其境”，从而提供最精准的维修方案^[7]。此外，还可研制一些轻便式的维修工具和设备，如多功能维修钳、微型焊接器等，以满足空间失重操纵规范，且尺寸小、质量轻、功能集成化高。

三、航天器安全性、可靠性、维修性的发展展望

（一）安全性发展展望

未来的航天器的安全性发展将会凭借新材料、新技术以及自动化防御装置提高。在新材料方面，随着纳米技术的兴起，新型纳米复合材料有望被引入航天器制造之中^[8]。这些材料不但有着出色的力学性能、热稳定性和辐射耐性，而且能够凭借纳米材料能够自我修复的构造特性，使它可以在遭到微陨石撞击，或被空间碎片碰撞导致的小规模裂缝出现之后，凭借内部的自我修复功能自行填补缺陷，由此减少结构损坏的危险。自动化防御装置将是安全发展的强劲力量。利用人工智能和物联网可以构建全面的智能监测系统网络，监测持续性地对航天器外部危险环境因素和内部系统的异常情况。例如，在航天器表面布满大量微型监测器，从而以极其高的准确度测量出航天器表面的温度和压力变化，然后利用机器学习的算法快速识别可能出现的结构损伤^[9]。而对于航天器的太空辐射危险，需要更高级别的主动式防御设备，利用电子屏蔽技术适时地调整防护强度，以取得成功阻隔高能量粒子侵入的效果。此外，未来的航天器救生系统也将更智能、更高效，在航天器的运行状况和外部环境的监控下，自动计算出最佳逃生路径，在遇到突发应急情况下航天员也能安全逃脱^[10]。

（二）可靠性发展展望

在可靠性方面，量子技术、仿生设计也会产生巨大影响。通过量子计算技术，能够极大提升航天器的预知维护(PHM)能力。量子计算技术的并行计算能力，可以实现对海量传感器数据的实时解析，用更加准确的方式识别与判断航天器的工作状态，提前数年或更长一段时间识别出潜在的问题，从而给予维修与修理相对充分的准备时间^[11]。仿生设计将在未来航天器的设计中大量使用。从大自然生物体中获取生存经验与结构特性，进一步优化航天器功能设计。例如，借鉴昆虫复眼的图像生成方法，研究新型多视点高分辨率的航姿测量与探测设备，在复杂空间环境中对目标的捕捉能力更强；模仿鸟类翅膀的外形，优化航天器空气动力学外形设计，降低发射和再入过程中的能量使用、提高系统的稳定性和可靠性^[12]。此外，随着模块化技术的不断发展，未来航天器模块将越来越规范、通用，通过快速替换与更新，可以使航天器功能持续改进与延伸，增强其可靠性。

（三）维修性发展展望

未来的航天器维修将朝向自动化的、无人化的方向发展，并深入发挥3D打印技术的潜力。自动修复机器人将在太空中发挥主导作用，它具有良好的自治能力和适应能力，可以无人自立进行设备拆卸、更换、装配操作，不会干扰航天员工作^[13]。同时也可实时与航天器核心控制系统进行交流互动，以故障检测结果为基础判断出最优的维修方案，极大地方便了航天员修理任务的

进行，同时减少了航天员进入出舱工作的时间和增加的风险。另外无人化的维修方式也会一直发展，无人机或小型无人航天器去维修大型的空间站或深空探测器。无人装备通过较高级的通讯技术接入地面控制中心，通过地面专家的遥控完成复杂的修理任务^[14]。3D 打印技术将在太空中发挥重要作用，相信未来的航天员会携带着便携式3D 打印机飞入太空，通过在太空中环境的原料或者预先存储的原料，打印出需要的零件，以解决由于备用零件不足而导致的问题，这势必会在很大程度上提高修理速度和灵活性。伴随着虚拟现实 (VR) 和增强现实 (AR) 技术的应用，远程技术支持会更加直观有效，地面专业工作人员可以利用 AR 技术将维修步骤直观地呈现在航天员的眼前，实现“面对面”的远程培训及技术支持^[15]。

四、结束语

综上所述，随着我国航天的不断发展，安全性、可靠性、维修性的航天器已形成了一套涵盖安全性、可靠性、维修性设计和测试一体化的工程技术体系。本文主要介绍其安全性、可靠性、维修性技术实践。未来空间站运行任务，航天器在轨长期工作同样会存在较高安全性和可靠性要求，从国际空间站实践来看，航天器在轨工作寿命则会更长，大量的维护维修在轨工作将带来高昂的维护成本，只有采用安全性、可靠性、维修性一体化设计理念，才能保证航天器长期稳定工作、减少地面保障强度，延长其服务寿命，创造最大的社会效益和科学价值。

参考文献

- [1] 潘威振, 杨胜, 白明生, 等. 载人航天器对接通道密封性在轨快速评估方法 [J]. 航天器环境工程, 2024, 41(06): 670-674.
- [2] 黄连兵, 薛霞, 李立凌, 等. 载人航天器交会对接灯故障目标检测模型 [J]. 航天器工程, 2024, 33(04): 130-136.
- [3] 李耀楠, 田巍, 郝维宁, 等. 大型载人航天器数据存储服务系统设计与应用 [J]. 航天器工程, 2024, 33(03): 9-15.
- [4] 刘彦伟, 赵振昊. 载人航天器可更换舱外载荷接口通用设计与应用 [J]. 航天器工程, 2024, 33(02): 27-32.
- [5] 齐岳, 许耀午, 马彤, 等. 载人航天器热排散方式分析 [J]. 航天器环境工程, 2023, 40(06): 617-621.
- [6] 张杰, 朱欣, 尹玉梅, 等. 国外载人航天器维修性标准综述 [J]. 载人航天, 2023, 29(06): 824-831.
- [7] 李喆, 罗文成, 王蔡健, 等. 长寿命载人航天器有效载荷认证方法研究 [J]. 中国质量, 2023, (11): 97-101.
- [8] 李喆, 罗文成, 王蔡健, 等. 大型载人航天器舱外试验支持技术 [J]. 航天器工程, 2023, 32(05): 56-62.
- [9] 常洁, 李小琪, 余晨帆, 等. 载人航天器常见密封结构的失效分析 [J]. 航天器工程, 2023, 32(04): 53-59.
- [10] 李涛, 敬铮, 王为, 等. 载人航天器数字化研制方法与应用 [J]. 载人航天, 2023, 29(04): 513-520.
- [11] 韩冬, 巩生波, 王丽俐, 等. 基于成功包络线理论的载人航天器产品重量控制方法研究 [J]. 载人航天, 2023, 29(03): 407-414.
- [12] 武江凯, 迟润强, 韩增亮, 等. 载人航天器密封舱结构超高速撞击易损性 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(08): 25-31.
- [13] 聂小亮, 王国军, 禹颂耕, 等. 载人航天器产品质量改进的探索与实践 [J]. 航天器工程, 2023, 32(02): 135-139.
- [14] 许冬彦, 周玉霞, 陈运军, 等. 《载人航天：航天器架构与系统工程本体模型》标准研究 [J]. 中国航天, 2023, (04): 30-33.
- [15] 艾绍洁, 宋佳, 王鹏程. 载人航天器自主故障诊断与预测技术研究进展综述 [J]. 无人系统技术, 2023, 6(01): 26-42.