

空间站的维修性

张海军 崔利荣

(北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081)

摘要 阐述了在轨维修技术对空间站的重要作用，并在初步分析空间站维修性的需求和可行性的基础上，提出了空间站维修性设计的思路、方案及支撑技术。通过对 NASA 和俄罗斯的空间站维修策略进行比较，结合我国空间站建设的现状，设想性地给出了我国空间站的维修策略。

关键词 空间站 维修性 在轨维修技术 维修策略

引言

“天宫一号”发射成功，标志着我国已迈入载人航天“三步走”战略的第二阶段。天宫一号与神舟八号、神舟九号、神舟十号飞船实现交会对接，为中国建立空间站探索和积累了重要的经验。到2020年前后，我国将建成自己的载人空间站。本文结合我国航天发展战略阶段及空间站建设现状，探讨空间站维修性方面的有关问题。维修性是系统的一种设计与运行属性，是指产品在规定的条件下和规定的维修时间内，按规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复其规定状态的能力^[1]。从国外建造空间站的历史及经验来看，要延长空间站的寿命和保证空间站的正常可靠运行，有航天员参与的在轨组装和维修工作是必不可少的；航天员用于维修操作的时间占整个空间任务时间的比重很大，也从另一方面说明了开展空间站维修工作的必要性。

空间站长寿命要求与航天员在轨对设备维修和更换的技术是相辅相成的。在轨维修是保证航天员在轨安全、空间站正常可靠运行、优化空间站设计、降低运营费用和延长空间站寿命的一种有效手段。离开维修保障，空间站很难实现长寿命、高可靠的工作。美国天空实验室在运行期间出现了数百次故障，其中大多数故障都是通过航天员在轨检查、维修、更换等方式排除的。美国科学家认为，天空实验室的最重要贡献是证明了人在太空中的重要作用，特别是人具有完成事先没有安排的在轨维

修能力^[2]。俄罗斯的和平号空间站总体设计存在一些问题，设备可靠性差，运行后期航天员用于设备维护和排除故障的时间占整个工作时间的80%；但是，通过耗时的维修，其设计运行寿命由设计之初的5年提高到15年，获得了巨大的经济和社会效益^[3]。因此，研究空间站的维修性具有重要的意义。我国应加大对空间站维修性研究的投入力度，推进空间站在轨维修技术的发展，为将来的空间站建设与深空探索积累宝贵经验和提供理论支撑。

1 空间站维修性的需求及可行性分析

通过提高部件可靠性来达到系统的高可用性的代价是昂贵的，有时甚至是不切实际的。1973年，航天员在天空实验室中验证了在轨维修的可行性^[4]。美国宇航局(NASA)对有冗余的自动化系统和载人空间系统维修性的研究结果表明，在长寿命任务的空间系统中，由人负责维修要比完全自动化的系统更为有效^[4]。空间站是一个大型的复杂系统，受到成本、效益、质量、功耗、总体布局、总体安装、技术成熟度等因素的制约，通过冗余设计来提高其各分系统及设备的可靠性，只是一种途径。因为冗余设计需要对各个分系统及其设备、元件等进行备份，最终会导致各分系统的复杂性和质量增加，从而导致空间站的体积、质量和成本上升，且在工程中增加了实现的难度。文献[3]中提到：1) 空间站在轨故障通常只是个别部件出问题，整机报废损失大；2) 实际影响空间站寿命的主要因素不多，

维修量并不大；3) 在轨维修可以解决空间站寿命和性能升级之间的矛盾；4) 在轨维修将极大地提高空间站的运行效益；5) 在轨维修将有利于对空间垃圾的控制。

因此，在轨维修技术对提高空间站的可靠性、保证空间站安全运行可起到重要作用。但由于空间站具有处于失重状态、保障资源少、保障支援比较困难、安全性要求高等特点及特殊性，所以在轨维修工作必须满足安全、快速、高效、经济等要求。NASA 安全性与飞行质量办公室 (OSMQ) 提出了一些可靠的维修倡议来考虑空间计划任务的要求，把开发和实施“NASA 可靠性最佳措施”放在高度优先的地位。NASA 提出拟定维修检查表及无损评估 (Nondestructive Evaluation, NDE) 技术来保证维持系统的功能。实践证明，这些技术措施可以有效地提高系统可靠性^[5]。

美国从 20 世纪 60 年代开始就开展了航天员在轨维修空间站方面的研究，研究有人在轨维修的可行性和航天员在轨维修可能受到的生理、心理和物理因素的影响，研究影响航天员在轨维修效率的主要因素，以及有人在轨维修对维修工具和空间站设计原则的影响等，取得了非常好的效果。空间站在轨维修的历史和经验，以及在技术层面的发展，使空间站的维修成为可能。

2 空间站维修性设计

空间任务成功的概率是航天器整体性能的函数，而性能反过来又依赖于每一系统和部件的可靠性和维修性。维修性要求需要在方案设计阶段首先由各个分系统根据以往的试验、应用数据及案例进行可靠性数据收集、分析，并整理出每个分系统的特点，根据各自特点设计各个分系统的维修性技术方案。总体根据各分系统的维修性方案，结合总体技术指标要求对维修性提出总体方案。通过对空间站维修历史数据的收集、整理和分析，建立空间站的维修模型。维修模型是维修性分析与评定的重要基础和手段。根据维修模型，将空间站系统的各分系统及设备等按照 FMEA 方法，把故障类型分为：1) 可忽略的（Ⅰ级），不会造成人员轻伤、职业病，系统也不会受损，不需要采取措施；2) 临界的（Ⅱ级），可能造成人员轻伤、职业病或主要系统破坏，应采取措施；3) 严重的（Ⅲ级），可能造

成人员严重伤害、严重职业病，主要系统损坏，要立即采取措施；4) 致命的（Ⅳ级），可能造成人员死亡或系统损失，必须立即排除。同时，根据设备对总体系统的重要程度、可能发生的故障类型及故障的危险程度等，将设备分为关键功能性设备和非关键功能性设备，并且要加强对关键性设备的研发和设计，进行充分的地面试验，在参考同类设备实际飞行结果数据的基础上，针对各种可能出现的故障提前制定预案，提高设备的可用性，保证空间站的正常运行，并且对关键设备进行相应的备份设置。根据航天器在轨故障统计分析，控制、供配电和推进 3 个分系统发生的故障所占比例最高，达到 55%。这说明控制、供配电和推进分系统相对于热控、测控等其他分系统，其故障发生率较高。有效载荷的故障占总数的 22%。在所公布的航天器故障中，呈现两头小、中间大的趋势，即致命（Ⅳ级）的和可忽略（Ⅰ级）的故障相对较少，临界（Ⅱ级）的和严重（Ⅲ级）的故障相对较多。但致命（Ⅳ级）的故障比例为 20%，仍占相当大的比重^[6]。

根据维修性分析理论、在轨维修约束因素以及空间站系统设计方案，维修性系统设计的基本思路如下^[1]：

- 1) 根据可靠性数据及设计经验等，初步确定空间站寿命期内需要在轨维修的设备。
- 2) 根据设备的故障模式分析，确定设备的故障模式和危害等级，基于维修性分析方法来确定设备的维修方式。
- 3) 在满足在轨维修约束条件的前提下，确定维修设备中 ORU (Orbital Replaceable Units) 设备的数量。
- 4) 根据维修时间统计有关数据，对各设备维修时间进行预计。

对空间站故障的维修是一项复杂的任务，受到空间环境等特殊性条件的约束。在进行维修性设计时，要考虑到系统配置的各个方面，包括维修的操作能力、维修任务的时间分配、维修工具和支持设备等^[7]。航天员在空间站的主要任务是进行空间探测、空间技术应用试验等，因此，用于空间站的维修时间不能在整个任务期间占据太多的比重。通过利用计算机技术提高维修的自动化和智能化水平，空间机动平台技术给航天器维护保障带来了变革^[8]。

系统能够根据出现的故障进行自动诊断，定位故障发生的位置，分析故障的原因，并对系统方案数据库进行快速的搜索查询，启动自修复和恢复功能，对故障进行排除。如接口出现松动或损坏，系统可以及时做出响应，并通知航天员出现故障的接口的位置信息，航天员根据情况进行维修或更换。另外，通过增加视频监控器来监测系统故障，甚至允许在故障发生前进行预诊断并进行预处理，避免故障的发生。这样，提高了维修水平且不需要航天员的参与，节约了时间，提高了效率。

航天员进行舱外维修活动时失去了航天器外壁的保护，而必须身着宇航服以获得生命保障。根据在轨维修的特点，空间站设计应考虑的因素有维修安全、微重力环境、维修时间窗口限制、维修操作的灵活性限制和维修资源的限制等^[9]。舱外维修工作的主要途径是完善舱外航天服的保障系统，使航天服能应对特殊的空间环境、航天手套具有极好的触觉敏感性等。

3 空间站维修性的支撑技术

3.1 空间目标识别、跟踪与测量技术

空间目标的识别、跟踪和测量技术是空间站在轨维修的前提之一，通过在一定范围内对被服务对象进行搜索、捕获、跟踪、测量，为实现对目标的接近或交会对接操作提供必要的条件^[10]。

3.2 故障诊断技术

当系统或设备发生故障时，能够及时、准确地对故障进行诊断分析是提高空间站系统的安全性和可靠性的有效手段。因此，空间站故障诊断系统应具有故障预测、故障检测（预警）、故障识别、系统重组及状态恢复、任务规划等功能^[11]。

3.3 故障隔离技术

空间站的维修性要求空间平台在排除故障期间能够正常运行。在维修过程中，航天员通过故障隔离功能对发生故障的设备进行维修和更换。

3.4 即插即用技术

考虑到航天员在轨维修分配时间的约束性，空间站的维修性要求空间站应该具有良好的即插即用功能^[2]，需要维修或更换的设备容易联入系统。这样可缩短维修时间，实现对故障的快速处理。

3.5 交互性接口技术

按照系统科学思想和人—机—环境系统工程理

论，任何一个系统出现不可靠并不是所有要素本身不可靠，而是由于各要素之间的联系或沟通存在缺陷。开发接口分析技术用来评价空间站表面匹配的要求^[5]，提高各要素之间的交互性。

3.6 空间机械臂技术

受空间站环境特殊性的约束，很多舱外维修工作需要机械臂的参与，如在轨维修、在轨模块更换等。目前世界上最著名的机械手是加拿大宇航局研制的 Dextre 机器人^[12]。该种机器人将使航天员减少危险的出舱行走，帮助航天员维修空间站。Dextre 机器人具有高精确度，其维修工作效率更高、速度更快。

3.7 遥控操作技术

利用遥控操作技术可以从地面指挥控制系统发出一系列操作指令，控制系统进行一系列操作，也可以指导航天员对突发的设备故障进行维修。

3.8 对空间环境的模拟

模拟空间环境，进行人—机工效学演练。在对航天员进行培训时，要对空间站中工作环境、生活环境、外太空环境等进行模拟，以此让航天员适应在进行维修及设备更换操作时的失重状态。

3.9 人的因素研究

人的固有因素是影响空间站可靠性及维修性的重要因素。在对人的因素研究中，NASA 提出了定量化和概率研究方法，强调人的因素评定方面必须要在保证航天员能够生存的基础上进行，通过建立空间系统风险模型来计算航天员生存率，用航天员生存率来衡量人的因素。

4 空间站的维修策略

4.1 国外空间站维修策略

在空间站的维修策略上，俄罗斯空间站由于上行运输能力等条件的约束，对发生故障的 ORU 采取在轨维修的方式。而 NASA 则采取完全替换发生故障的 ORU，这样对航天员的维修技能要求较低，同时可以减少维修时间，增加航天员在轨科学的时间。在国际空间站的维修中，美国和俄罗斯对各自负责的舱段采取不同的维修方法。NASA 采用以可靠性为中心的维修方法（RCM）^[13]，通过对传统的 RCM 方法在航天领域应用时存在问题的分析研究，NASA 的 RCM 专家组提出了改进的 RCM，引进基于条件的维修理论，补充了仅仅基于时间维

修的方式，大大延长了设备的寿命和维修间隔，提高了效率。总的来说，美国采用了更加先进的设计理念和更加可靠的技术，提高了设备的固有可靠性，降低了对维修性的要求；采取以可靠性为中心的维修策略，对后果严重的故障采用预防性维修，对设备的各指标参数进行监控，在故障表征的决策点进行视情维修，美国的修复性维修比预防性维修稍多，这样大大节约了维修时间。而俄罗斯由于设备的固有可靠性较低，采取了大量的预防性维修方法来延长系统寿命，占用了大量的时间和资源。

4.2 我国空间站维修策略和方案

由于我国空间站建设刚刚起步，理论和技术基础都不成熟。在借鉴国外空间站采用的维修策略的基础上，我国的空间站维修策略如下。

1) RCM 方法。鉴于我国空间站的规模以及对维修资源的诸多约束，采用 RCM 方法比较合适。

2) 提高设备的固有可靠性。根据我国空间站航天员驻留时间短、维修时间短、货船运输能力有限等实际情况，建议在开展维修性设计的同时，也必须加强可靠性设计和长寿命设计，提高设备的固有可靠性和寿命，减少系统发生的故障数。

3) 对关键分系统或设备进行需求分析。从空间站的维修情况来看，控制、供配电和推进分系统相对于热控、测控等其他分系统，故障发生率较高，重点应对这些系统的功能进行分析。

4) 采取以预防性为主、其他维修类型为辅的维修方式。由于关键设备故障可能导致任务无法完成或者威胁航天员的生命，所以对关键设备采取预防性维修方式（根据设备寿命定期更换）可以降低风险、提高安全性。

5) 在轨维修 ORU。考虑到空间维修环境的特殊性，为了减少在轨维修的危险性并提高在轨时间利用率，将空间站需要在轨维修的设备设计成 ORU，进而航天员可实施基层级维修^[1]。

应根据空间站的维修策略制定维修方案。一般包括以下内容：可维修性设计标准；尽量减少维修停机时间的措施；避免维修失误的潜在可能性措施；采用标准化接口，保证互换性措施；维修实施过程的安全措施；维修正确性的验证措施。

5 结束语

本文通过对国外空间站在轨维修技术的研究分

析，对空间站维修性的需求和可行性以及维修性设计等进行了初步分析和构思，提出了维修性设计的思路、方案及支撑技术。根据国外空间站的维修案例及维修策略，提出了我国空间站的维修策略，期望对我国未来空间站的建设有参考作用。

参考文献

- [1] 王大鹏, 谭春林. 载人航天器在轨维修性系统设计 [J]. 中国空间科学技术, 2010 (5): 16–22.
- [2] 魏鹏威. 载人航天器设计中的可维修性技术研究 [J]. 航天器工程, 2008 (6): 68–72.
- [3] 王世清, 王靖. 航天器的在轨维修性 [J]. 质量与可靠性, 2012 (4): 4–8.
- [4] 曾利卫, 吕川. NASA 和 ESA 的空间系统维修性/维修技术研究 [J]. 宇航学报, 2003 (1): 12–16.
- [5] G.A.Rodney, 廖炯生. 美国宇航局 (NASA) 可靠性维修性保证在空间探索中的未来作用 [J]. 控制工程, 1993 (5): 42–43.
- [6] 谭春林, 胡太彬. 国外航天器在轨故障统计与分析 [J]. 航天器工程, 2011 (4): 130–136.
- [7] Angelini R, Costa M. Multimedial maintenance manuals: International space station applications for on-orbit maintenance support [J]. ACTA ASTRONAUTICA, 2002, 51 (1–9): 415–425.
- [8] 欧宁, 刘映国. 空间机动平台在航天器维护保障中的应用前景 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008 (4): 47–50.
- [9] 徐宏强, 吕川. 空间环境对空间系统维修性设计的影响 [J]. 上海航天, 2003 (5): 38–41.
- [10] 谭春林, 刘永健. 在轨维护与服务体系研究 [J]. 航天器工程, 2008 (3): 45–50.
- [11] 于勇, 姜兴渭. 空间站故障诊断技术研究与应用 [J]. 航空兵器, 2000 (4): 5–7.
- [12] Elliott Coleshill, Layi Oshinowo, Richard Rembala. Dextre: Improving maintenance operations on the International Space Station [J]. ACTA ASTRONAUTICA, 2009, 64 (9–10): 869–874.
- [13] 滕鑫紫, 陈庆华. 国外空间站在轨维修策略研究及启示 [J]. 航天医学与医学工程, 2012 (6): 475–478.