

航天可靠性工程技术体系及关键技术探析

于元元

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

DOI: 10.61369/SSSD.2025040013

摘 要： 航空航天工程作为我国科技的代表领域，取得了斐然的成绩，但其中伴随的高风险特性也不容忽视。尤其是可靠性设计直接关乎着飞行人员的安全保障与飞行器性能。为此，本文主要针对航天可靠性工程技术体系及关键技术展开了相关分析与研究，仅供参考。

关 键 词： 航天工程；技术体系；关键技术

Analysis of Aerospace Reliability Engineering Technology System and Key Technologies

Yu Yuanyuan

Jiangnan Mechanical and Electrical Design Institute, Guiyang, Guizhou 550009

Abstract： Aerospace engineering, as a representative field of China's science and technology, has achieved remarkable results. However, the high-risk characteristics accompanying it cannot be ignored. Especially, reliability design directly relates to the safety guarantee of flight personnel and the performance of aircraft. Therefore, this paper mainly conducts relevant analysis and research on the aerospace reliability engineering technology system and key technologies, for reference only.

Keywords： aerospace engineering; technology system; key technologies

引言

航天装备具有诸多特性，如价格高昂、性能卓越、系统组成复杂、生产规模小众等，同时还需具备适应严苛运行环境的能力。因此，加强对可靠性技术的应用与研发极为重要。

一、航天可靠性工程中的基础性问题分析

（一）保持可靠性方面

航天产品通常需要经过前、中、后三期工作，前期工作主要包括：①物资采买②部件加工③产品组织④调试试验⑤打包；中期工作主要包括：①贮存②转运③吊装④整体组装；后期工作主要包括：①测试②发射等。但是，在上述实际工作中，航天产品容易受到元器件、加工尺寸、人员操作、原材料、外部环境、接口条件、装调状态等多种因素的影响，所以，为了保持航天产品的可靠性，相关人员必须要预见上述问题，并做好应对预案，才能够降低产品使用过程中的故障^[1]。

（二）度量可靠性方面

可靠性如何度量？实际上，可靠性是无法度量的，但是，通过一些手段，如度量零部件尺寸、检验产品各项数据和参数等，在一定程度上可以做到对航天产品可靠性的度量，从而保证生产出的产品符合各项航天要求。

（三）赋能可靠性方面

在航天可靠性工程体系中，如何赋予产品更好的可靠性一直是科研人员最为关心的问题。航天产品的开发，往往需要多个立项论证阶段，如①立项论证②方案设计③工程研制④鉴定定型等^[2]。通常情况下在相关部门提出航天装备可靠性指标后，才会进行立项论证^[3]。同时，立项论证阶段还会讨论如何实现、验证和确认“可靠性做法”，并借助①可靠性设计②可靠性分析③可靠性仿真④可靠性试验⑤可靠性评估等工程技术，研究符合产品工艺、设计的“可靠性方案”，从而有效保障产品的可靠性。

二、航天可靠性工程技术体系的构成框架

（一）可靠性保持技术

1. 延寿技术

在航天装备临近使用寿命到期前，通过各种延寿手段（如整修、升级、改造及试验等），从而达到有效延长产品的贮存期或

使用寿命的目的，使其能够继续完成航天任务。

2. 缺陷剔除技术

该技术应用于两个关键环节：一是元器件、原材料到货后的复验阶段，二是产品生产过程中。通过实施复验和二次筛选，可以有效确保产品质量和标准。

3. 系统重构技术

通常应用于航天装备发射及执行任务阶段。该技术可以轻松辨识系统故障并根据故障情况执行相关预案，实时构建新的系统模型以及应用全新的模型控制律，从而保障航天装备在异常情况下仍能继续执行预定任务。

4. 维护保养技术

在产品投入使用前，通过定期维护保养，可以是航天产品一直处于良好的可用状态，确保其功能的正常发挥。

5. 故障诊断技术

在航天装备完成集成装配后，通过故障诊断技术可以产品性能、功能以及环境参数进行分析计算，实现对系统健康状态的预测、监控与管理，从而为技术决策提供数据支持。

（二）可靠性度量技术

1. 评估技术

该项技术主要是对成型产品进行较为准确地可靠性估计。通过应用该技术可以尽可能多的保障航天产品的可靠性，提高任务完成率^[4]。

2. 鉴定技术

其核心应用场景为鉴定定型阶段。通过开展可靠性鉴定工作，能够得出产品是否达到可靠性指标的明确结论，并为装备能否通过定型提供关键依据。

3. 预计技术

该技术主要是对初期设计方案的预计。通过对产品设计方案、任务剖面、工作原理、产品的元器件和零部件失效率等数据的整理分析，从而确定设计方案是否满足可靠性指标，从而为技术决策提供数据支撑^[5]。

3. 建模技术

作为可靠性工程的基础技术，其建模方法总体可以划分为三类：基于不确定理论与机会理论的建模方法、基于故障机理的建模方法，基于概率论的建模方法。

（三）可靠性赋能技术

1. 可靠性仿真技术

作为航天工程体系研制的重要手段，该技术可以有效弥补产品实物可靠性试验的不足^[6]。通过虚拟仿真技术模拟各类随机故障、因素对产品可靠性的影响，可以有效验证相应设计措施、应急预案的作用，从而为后续设计与评估提供数据支撑。

2. 可靠性设计技术

作为工程研制、方案设计两大阶段中常用技术，其运用简化设计、继承性设计等方法可以优化产品方案设计架构；通过降额设计、裕度设计、热设计、减振设计等技术手段，可以在产品详细设计阶段，进一步强化产品的可靠性^[7]。

3. 可靠性分配技术

在方案设计阶段具有关键性的作用，它可以根据航天装备的

整体可靠性指标，按照层级关系对各类产品进行精准分配，从而为各级航天设备可靠性的设计与鉴定提供量化标准。

4. 可靠性增长技术

在运载火箭、卫星等任务执行阶段，该项技术可以通过深入排查产品可靠性的薄弱环节，自主提出相关改进措施，从而持续提升产品的可靠性。

5. 可靠性论证技术

该技术主要服务于立项论证阶段，通过系统性论证，确立科学合理、具备可实现性与可验证性的可靠性指标，从而为航天装备后续研制工作提供核心依据。

6. 可靠性分析技术

作为应用于工程研制以及方案设计阶段的重要技术，通过前瞻性识别、分析航天设备的潜在故障模式，可以自主制定、提出对应的纠正方案，从而对产品设计进行改进与完善。

7. 可靠性试验技术

主要应用于鉴定定型、工程研制阶段^[8]。例如，在工程研制阶段，可以通过采用工程样机的方式，寻找设计、工艺中的不足部分，并为可靠性改进指明方向。

三、航天可靠性工程关键技术

（一）不可检测产品问题辨识技术

航天可靠性工程技术体系是一个非常复杂、精细的系统，尤其是航天装备中一些关键、微小、精密的小部件，一旦出现问题则很难查明，进而影响整个航天可靠性工程体系，带来工程延期、发射延迟、发射失败等问题^[9]。随着大数据、人工智能等技术的兴起，一些科研人员研发了“不可检测产品问题辨识技术”，不过，该技术处于研究的初期阶段，只能用于一些常规数据检验、辨识，对实际产品缺陷识别率相对较低^[10]。

（二）智能维护及后勤保障技术

为了有效避免航天装备在待机或贮存中发生问题，航天科研人员应当积极发展和研究航天装备智能维护及后勤保障技术，通过“数据驱动”维修预防技术、人工智能后勤保障技术、在线式和嵌入式状态感知技术的综合应用，能够及时发现航天装备在待机或贮存中潜在的问题，快速制定维修、保养以及后勤保障方案。

（三）可靠性仿真技术

仿真技术在航天装备中的应用，一方面可以有效降低实物试验暴露产品问题的投入成本，另一方面还可以将电子、发动机、软件、机构、结构、机电、光电、火工等各类产品，长时间“放置”在真实环境下，进而进行足够的可靠性增长试验和贮存试验，积累更多的技术经验、成果^[11]。因此，必须要加大航天设备可靠性仿真技术的研究。

（四）产品故障动态辨识及重构技术

造成航天设备飞行失利的突发状况，通常包括发动机推力异常下降、无法正常分离、姿态控制失效、通信中断等^[12]。为了在局部或是单一产品故障情况下航天设备能够持续完成任务，科研

人员可以尝试研发产品故障动态辨识及重构技术，及时、快速辨识问题产品，并制定相关应急方案，保持航天设备正常飞行。

（五）可靠性建模技术

随着建模技术的不断成熟，其在航天产品可靠性中的应用途径越来越多，极大地提高了航天装备的可靠性^[13]。但是该项技术和航空航天领域的结合尚处于初始阶段，相关学术研究、研究成果相对较少，因此，需要相关科研人员深入研究、开发人工智能建模技术，从而为航天设备、体系、架构等可靠性的优化提供有力支持。

（六）可靠性试验技术

在航天设备中，通常只要一个设备发生问题都会影响最终的发射结果，如主发动机可靠性的缺失，直接会导致发射失败。通过可靠性试验技术，如人工智能建模、仿真技术，可以有效降低航天设备各个部件发生问题的机率。但是，这类技术研究难度较大，相关经验积累不足，无法直接用于设备检验中^[14]。因此，目前航天发动机可靠性试验，仍旧依赖于传统工艺和技术。

（七）设备可靠性设计及验证

在航天装备中，伺服机构、阀门、对接机构、包带等运动机构设备发生问题的诱因多种多样，且存在一定的“潜伏期”，一旦某个部件发生故障，不仅会影响设备发射，还会增加航天投入成本和时间，影响最终成果^[15]。尽管国内外在相关方面的研究投入越来越多，但是设备可靠性设计及验证技术仍具有极大的提升空间，需要相关人员从环境、动作及多余物方面进行进一步的考虑和思考，才能够研发出“受影响因素较小”的设备可靠性设计及验证技术。

四、结束语

总而言之，在航空航天体系中，航天可靠性工程技术体系及关键技术的成果，直接关系着人民的生命财产安全以及国家安全战略。因此，相关部门必须高度重视航天可靠性工程体系及关键技术的研究与发展，持续加大人财物的投入，攻克关键技术难题，才能够不断完善航空航天技术系统。

参考文献

[1] 杨双进, 杨兆军, 程海龙, 等. 航天可靠性工程创新与实践 [J]. 中国航天, 2024(4):34-39.

[2] 郭宇, 张海军, 薛璐, 等. 工程机械可靠性工程技术体系及其关键技术 [J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(04):298-302.DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2023.04.004.

[3] 杜飞平. 航天液体动力关键技术研究进展与趋势 [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023(1).

[4] 王博, 尤军峰. “航空航天结构与力学”专栏（Ⅱ）导语 [J]. 固体火箭技术, 2023, 46(3):333-334.

[5] 赵建伟, 李化义, 张明, 等. 航天器大功率固态配电关键技术研究 [J]. 航天器工程, 2024, 33(3):40-47.

[6] 吴国材, 胡浩德, 张潇, 等. 某深空探测任务工程级产品保证工作实践 [J]. 质量与可靠性, 2024(4):1-6.

[7] 马佳楠, 张利萍, 董浩, 等. 航天测控网多模式效能评估系统设计与关键技术实现 [J]. 电讯技术, 2023, 63(1):32-38.

[8] 靖连天, 付婉月, 刘艳秋, 等. 宇航元器件应用验证指标体系优化方法研究 [J]. 质量与可靠性, 2023(1):56-61.

[9] 陈义鹏, 徐志强, 钟杰, 等. 基于时空自注意力的航天器电源系统故障诊断 [J]. 电子测量技术, 2024, 47(7):184-191.

[10] 李莺歌, 杨强, 张璇, 等. 基于故障树分析的航天器加强梁胶接接头可靠性提升 [J]. 航天器环境工程, 2023, 40(5):567-574.

[11] 杨磊, 曹秋立. 航空航天元器件和集成电路的可靠性试验与数据分析应用 [J]. 大众科学, 2024, 45(23):64-66.

[12] 韩西龙, 杜贝娜, 赵朋飞. 航天质量与可靠性标准体系建设思路 [C]// 中国标准化年度优秀论文（2023）论文集 .2023.

[13] 朱佳森. 基于小子样的航天电磁继电器贮存可靠性分析与评价方法研究 [D]. 江苏科技大学, 2024.

[14] 刘付成, 韩飞, 孙玥, 等. 在轨服务航天器的制导, 导航与控制关键技术 [J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(9):849-860.

[15] 陈翔, 王小丽, 孙冬全, 等. 航天微波通信中的无源互调问题及其关键技术 [J]. 中国空间科学技术 (中英文), 2025, 45(1):124-134.