

基于产品保证的卫星可靠性保证机制与作用的研究

舒适, 俞洁, 周志涛, 那顺布和
(上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要: 文章根据国内卫星可靠性保证的现状, 与 NASA、ESA 等进行了对比分析, 结合 GJB 450A 要求, 研究了基于产品保证下卫星可靠性保证模式及其运行机制, 并探讨了可靠性保证对卫星稳定运行和可靠性增长的内在作用。研究表明, 产品保证下的可靠性保证是卫星可靠性的必然趋势, 基于全寿命周期的使用和耐用开展可靠性的设计、分析、试验和管理工作是卫星可靠性保证的重点, 必须加强卫星可靠性发展的基础研究。

关键词: 卫星; 产品保证; 可靠性保证; 全寿命周期

中图分类号: TB114.3

文献标识码: C

文章编号: 1673-1379(2010)02-0238-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.02.023

1 引言

可靠性是卫星产品质量的基础, 卫星产品的质量与可靠性保证工作如何快速适应卫星高可靠性的要求是需要解决的重要问题。

20 世纪 80 年代末, 美国军方从最新的全面质量管理的原理出发研究并推行产品保证的管理。在工程研制中, 采取一系列技术及管理措施以保证最终产品的质量是产品保证的核心思想。可靠性保证属于产品保证范畴^[1, 2], NASA、ESA 要求将可靠性保证纳入到产品保证范畴内进行管理。

推行产品保证要求下的可靠性保证, 有一个

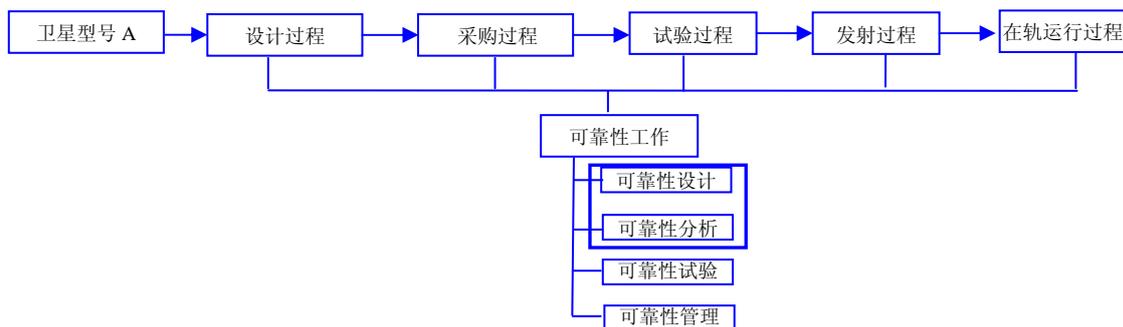


图 1 型号可靠性保证功能与作用关系图

Fig. 1 Diagram of the satellite reliability assurance

这种模式以可靠性大纲为牵引, 从型号研制初期至发射、在轨运行全过程进行可靠性保证工作。该模式在周期长的卫星新型号研制中发挥

体制机制和观念上的适应过程。从传统的型号研制组织结构转变为产品保证组织结构, 存在着从体制到观念的各种障碍, 这将妨碍可靠性保证的实施。因此本文重点对基于产品保证下的可靠性保证的机制与作用展开分析与研究。

2 可靠性保证工作现状分析

2.1 国内卫星可靠性保证现状

国内卫星可靠性保证的典型模式是可靠性专业人员作为设计师系统的成员开展可靠性工作, 参与型号研制各过程, 执行设计师职能, 如图 1 所示。

了重要作用, 但也存在以下问题:

(1) 产品设计师应负责产品可靠性设计与分析工作, 但不少卫星产品可靠性设计分析工作往

收稿日期: 2009-06-01; 修回日期: 2009-06-24

作者简介: 舒适(1973-), 男, 硕士学位, 高级工程师, 研究方向为卫星质量与可靠性、系统不确定性。E-mail: shushi00@163.com。
俞洁, 男, 研究员, 研究方向为卫星总体设计。

往依赖于可靠性专业人员, 而可靠性专业人员对产品掌握的深入程度不够, 使得产品可靠性设计和分析等工作深度不够。

(2) 可靠性专业人员主要参与卫星研制工作, 对可靠性专业基础研究不够, 造成对卫星型号的技术支撑不够, 尤其是面临瓶颈和关键问题时支撑不够。

(3) 可靠性专业机构对型号具有明显的应急性质, 对多批、装备生产的卫星可靠性保证作用不明显^[1], 可靠性平台化的作用不足。

(4) 可靠性工作主要集中在可靠性设计和分析指导上, 对可靠性试验和管理比较弱。

可靠性工程处于初级阶段, 可靠性保证功能和作用不适应 GJB 450A^[3]的要求, 不适应卫星公用平台化的研制要求, 更不适应大规模、长寿命、产品化卫星研制和高密度发射的需求。

2.2 国外卫星可靠性保证现状

从 20 世纪 90 年代开始, 美国、欧洲将可靠性保证纳入产品保证范畴, 将可靠性保证融入产品保证机制中, 由产品保证经理负责统筹策划和实施^[4,5]。图 2 为 ESA 典型产品保证组织机构。



图 2 ESA 典型产品保证组织机构图

Fig. 2 The typical organization of ESA product assurance

采用成熟的卫星平台继承性好, 能缩短卫星的研制生产周期。平台在开发过程中形成了一套完整的设计、制造、装配、测试、试验等工程规

范, 在研制过程中严格执行^[4,5]。卫星的每次发射看作为一个可靠性增长过程, 经过多次发射同型号卫星, 其可靠性逐步提高, 卫星平台成熟度也逐步提高, 为后续卫星高可靠性奠定基础。

基于平台化的卫星研制发射模式, 卫星从研制到发射, 一般只需两年时间, 这样年研制卫星数目就可以增加, 这是一种高效率的研制模式。

2.3 卫星发展对可靠性保证的要求

可靠性保证工作主要为可靠性设计、分析、试验、管理^[6]。

卫星可靠性保证贯穿于设计、生产、装配、测试、试验、发射、在轨运行等过程, 并用工艺、元器件、材料、可靠性、安全性、技术状态、软件等方面的工程规范进行产品保证, 并通过贯彻通用化、系列化、组合化(模块化)原则, 最大限度地采用成熟的技术和现有的先进方法, 以产品保证和产品化的储备和积累, 有效地规范和保证卫星产品可靠性。

随着卫星研制数目多、研制周期短和高可靠性需求的推动, 卫星研制开始采用协同研制模式。由串行研制变成并行工程, 在研制过程中并行考虑制造、总装、测试、试验、发射和在轨运行等工作, 这就对可靠性保证如何同步开展提出了要求。

另外, 随着卫星产品化和卫星平台的型谱化的快速推动, 卫星研制从单颗向基于卫星平台和单机型谱化为牵引的研制模式转移, 需尽快建立相适应的可靠性保证能力、机构和保证机制。

2.4 由实验室式可靠性研究向产品化、平台化可靠性保证转变

建立产品保证下的可靠性保证组织机构, 需要从传统的可靠性工作模式向产品保证模式过渡、转变和深化。

需要将单颗研制可靠性保证向产品化、平台化的可靠性保证转变, 将每颗卫星的研制和发射看作为一个可靠性增长项目过程, 这样, 可靠性的工作就会持续改进提高。

需要通过建立可靠性专业技术机构与型号产品保证协调运行的工作机制的带动,增加对基础可靠性工作和共性可靠性工作的支持,并利用可靠性专业机构为卫星型号提供技术支撑。

在项目产品保证队伍与可靠性专业机构之间形成矩阵式管理模式,解决长期存在的可靠性技术不深入的问题。

3 GJB 450A 对可靠性保证的要求

GJB 450A 是可靠性工程领域标准体系中的顶层标准,它包括装备在其寿命周期中开展可靠性工作应该遵循的基本原则和一系列管理及技术方面的可靠性工作项目^[6]。GJB 450A 涉及装备寿命周期可靠性工程领域的各项工作,为全面考虑和安排装备寿命周期的可靠性工作提供了一个标准平台,对开展装备寿命周期的可靠性工作具有规范化的指导作用。GJB 450A 新增加工作项目见表 1。

表 1 GJB 450A 新增加工作项目汇总表
Table 1 New reliability items from GJB 450A

工作项目系列	工作项目编号	新增加工作项目名称	备注
可靠性及其工作项目要求的确定(100 系列)	101	确定可靠性要求	新增系列
	102	确定可靠性工作项目要求	
可靠性管理(200 系列)	201	制定可靠性计划	
	207	可靠性增长管理	
可靠性设计与分析(300 系列)	305	故障树分析	
	308	制定可靠性设计准则	
	312	有限元分析	
	313	耐久性分析	
可靠性试验与评价(400 系列)	402	可靠性研制试验	
	406	可靠性分析评价	
	407	寿命试验	
使用可靠性评价与改进(500 系列)	501	使用可靠性信息收集	新增系列
	502	使用可靠性评估	
	503	使用可靠性改进	

GJB 450A 系列从原来的 3 个增加到 5 个,工作项目从 18 个增加到 32 个,新增的 14 个工作项

目显示出以下特点:

(1) 增加可靠性要求,明确可靠性要求的重要性;

(2) 加强可靠性管理,明确将可靠性大纲等内容纳入到可靠性管理范畴;

(3) 强化可靠性分析;

(4) 强化可靠性试验与评价工作;

(5) 强调使用可靠性的内容,体现了使用寿命的评估和分析工作。

总之,新增工作项目核心体现了全系统、全寿命的思想,综合突出了在全寿命周期的可靠性管理与分析评价要求,突出了可靠性的保证要求,即突出了产品保证的基本要求,也就是运用产品保证思想对可靠性进行了综合强化。

综上所述,要系统性地执行可靠性保证要求,完整地实施装备可靠性保证机制,必须将可靠性保证纳入到产品保证范畴内。

4 可靠性保证在产品保证下的机制与作用

4.1 产品保证下的可靠性组织机构

通过产品保证来集中统一可靠性工作的各个方面。产品保证包括产品保证管理、技术状态控制、质量保证、可靠性保证、安全性保证、元器件保证、材料和工艺控制、软件产品保证等^[7,8]。

可靠性保证属于产品保证部门的职责。产品保证部门是一个技术和管理实体,系统地开展可靠性、安全性和质量保证等工作,对型号产品保证工作提供所需的指导和技术支持并进行控制与监督。将可靠性保证纳入产品保证下可以达到:

(1) 将可靠性内涵和外延拓展,将可靠性技术和管理工作融入产品保证工作,强化可靠性保证、管理与监督职能,推行可靠性设计与分析工程化,将可靠性工作变成工程设计人员日常工作;

(2) 对可靠性机构进行重组,将质量与可靠性等产品保证职能集中设置至产品保证部门,建立和加强技术权威和管理权威,以强化对卫星型号质量与可靠性的牵引和指导作用。

4.2 可靠性保证在产品保证下的运行机制

如图 3 所示,可靠性保证是卫星型号产品保证的核心内容之一^[7,8],基于产品保证的可靠性保

证模式、机制及作用也要随之转变。

实行将可靠性保证纳入产品保证的机制，需重点开展：

- (1) 将设计、分析、试验和管理职能相统一的技术管理；
- (2) 以可靠性基础技术研究支撑产品高可靠、长寿命。

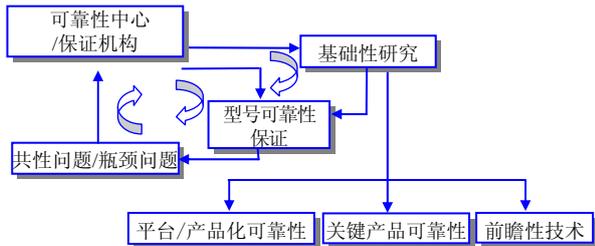


图3 卫星可靠性保证运行示意图

Fig. 3 Diagram of the satellite reliability assurance in operation

4.3 可靠性对卫星稳定运行的作用

应用常微分方程理论，将卫星系统稳态运行简化为一个平衡点局部稳定性的动力系统。

将求解卫星可靠性与寿命转化成求解动力系统稳定性，且满足下式：

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} = F(t, \mathbf{x}), \quad (1)$$

其中 \mathbf{x} 表示运行性能。从式(1)可以看出，系统稳定性具有一个循环迭代的特性，说明卫星可靠性具有可增长、可优化的特性。所以可靠性保证的一个作用就是增长和优化运行稳定性。

若将第 i 个系统在规定时间内稳定性表示为

$$\dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt} = F_i(t, x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$ ；整体系统与单个系统具有实时性，则卫星系统稳定性可表达为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = F_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dot{x}_2 = F_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ \dot{x}_i = F_i(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ \dot{x}_n = F_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出，为优化系统稳定性的全局解，对涉及每个系统的优化都会增加系统全局的稳定性，即称之为共性因子。对共性因子的优化

转化为工程就是对涉及可靠性共性和基础性优化。

可在以下方面增强可靠性专业基础对型号支撑作用：

- (1) 规范、统一可靠性工作的要求，发挥可靠性基础平台的作用；
- (2) 研究卫星可靠性规律性、共性以及整体突破性技术的研究；
- (3) 开展可靠性关键技术研究，解决制约高可靠、长寿命卫星要求的因素；
- (4) 开展卫星可靠性的前瞻性技术研究；
- (5) 开展基于卫星平台以及产品化的可靠性工程的研究；
- (6) 提高卫星整体可靠性成熟度、研制可靠性队伍成熟度的管理研究。

对系统影响最大的是 $\dot{\mathbf{x}}$ ，其定义为

$$\dot{\mathbf{X}} = \min(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_i, \dots, \dot{x}_n) \quad (4)$$

从式(4)分析可看出， $\dot{\mathbf{x}}$ 是影响系统成败的关键因素，对 $\dot{\mathbf{x}}$ 的识别和防范是可靠性最重要的工作。

4.4 卫星全寿命周期可靠性保证

高可靠、长寿命是卫星可靠性的基本要求，也是涉及元器件、原材料、机电零部件、软件等产品保证以及卫星设计、制造、装配、试验、发射、飞行全寿命周期产品保证活动的复杂的系统工程^[8,9]。全寿命周期可靠性保证工作不仅包括了可靠性设计、分析、试验、评估和管理工作，而且将产品研制、生产、使用、管理、在轨维护、报废的全寿命周期纳入进来，其重点在于以全寿命周期使用和耐用为牵引，开展可靠性的设计、分析、试验和管理工作，包括：

- (1) 在卫星寿命周期的任意时刻分析卫星的可靠性；
- (2) 分析卫星设计的运行中断特性，尤其在卫星寿命期的飞行故障或运行中断事件发生的概率和预估次数；
- (3) 在卫星寿命期的任意时刻对卫星可用度的模拟；
- (4) 对在设备级存在单点失效部件及具有精度要求的部件进行最坏情况分析，以说明当部件的性

能因为制造的偏差、温度的变化老化或辐射等原因有所下降时,卫星的性能仍能满足其要求等等。

5 结束语

本文对基于产品保证下的卫星可靠性保证的现状、基本要求、机制和作用以及机构设置思路等进行了探索和研究,并就现状与 ESA 等国外航天机构的可靠性保证模式进行了对比分析。

分析认为,产品保证下的可靠性保证模式是产品保证向深度扩展的必然趋势;要实现 GJB 450A 要求的职能和作用,需从机制和机构设置等方面按照产品保证思路作快速适应的转变。

参考文献 (References)

- [1] 舒适, 陆力斌, 朱鸿昌. 航天产品保证与项目管理在实施 QJ9000-98 标准中的应用[J]. 科研管理, 1999, 20(4)
- [2] 杨多和. 当前航天工程推行产品保证的制度障碍与对策[J]. 质量与可靠性, 2008(4): 15-18
- [3] GJB 450A, 装备可靠性工作通用要求[S], 2004
- [4] 何国伟, 角淑媛. 对当前质量可靠性工作的几项重点的建议[J]. 质量与可靠性, 2008(4): 7-11
- [5] 舒适, 朱鸿昌. 基于卫星产品保证的并行工程的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1)
- [6] 祝耀昌, 曾照洋. GJB 450A《装备可靠性工作通用要求》的简要介绍和分析[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 360-368
- [7] 舒适, 陆力斌, 朱鸿昌. 基于卫星产品保证体系的质量控制模型[J]. 系统工程理论与实践, 2001(1)
- [8] 舒适, 陆力斌, 朱鸿昌. 卫星产品保证体系的质量控制目标函数[J]. 管理工程学报, 2000, 14(2)
- [9] 金恂叔. 航天器环境试验和航天产品的质量与可靠性保证[J]. 中国空间科学技术, 2004, 24(6)

明星档案

“遥感卫星九号”

类别: 属于新一代对地遥感卫星。

用途: 主要用于国土资源勘查、环境监测与保护、城市规划、农作物估产、防灾减灾和空间科学试验等领域, 为国家建设提供及时、准确的遥感数据, 将对我国国民经济发展发挥积极作用。

研制单位: 航天东方红卫星有限公司。

发射时间: 2010年3月5日12时55分。

发射地点: 酒泉卫星发射中心。

运载火箭: “长征四号丙”火箭。

发射追踪:

“遥感卫星九号”为三星星座系统, 包括1颗主星和2颗副星共3颗卫星, 三星均采用成熟的小卫星公用平台, 设计寿命3年。

火箭升空大约22min后, 西安卫星测控中心传来的数据表明, “遥感卫星九号”3颗卫星先后成功分离, 并准确进入预定轨道。卫星发射任务取得圆满成功。

相关链接:

前几次遥感卫星发射的时间分别为: “遥感卫星四号”为2008年12月1日; “遥感卫星五号”为2008年12月15日; “遥感卫星六号”为2009年4月22日; “遥感卫星七号”为2009年12月9日; “遥感卫星八号”为2009年12月15日。