

风云四号微波星技术风险识别与控制的思考与实践

杨之浩¹,周宇²,汪自军²,陈强²,江世臣²,靳浩²

(1.上海航天技术研究院,上海 201109; 2.上海卫星工程研究所,上海 201109)

摘要: 航天工程研制是一个复杂的系统工程,涉及的环节众多且紧密结合,任何一个环节出现问题都可能给项目研制带来不可挽回的损失。随着航天工程高密度研制与发射形势的发展,航天产品生产任务量逐年增加,而质量问题也随之频发。暴露出技术风险识别不全面,控制不到位,管理不规范。本文从当前航天发展所面临的质量形势展开论述,指出风险识别所面临的问题。通过梳理当前所使用的相关标准规范,给型号的技术风险分析、控制提供工具和手段。最终以上海航天技术研究院风云四号微波星为例,给出其风险分析、识别与控制的过程和效果,以供其他型号参考。

关键词: 风云四号微波星; 航天产品; 风险; 技术风险识别; 风险分析; 风险控制

中图分类号: X 91; TB 4 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2025.01.003

引用格式: 杨之浩,周宇,汪自军,等. 风云四号微波星技术风险识别与控制的思考与实践[J]. 上海航天(中英文), 2025, 42(1): 29-37, 67.

Thinking and Practice of Technical Risk Identification and Control for FY-4 Microwave Satellite

YANG Zhihao¹, ZHOU Yu², WANG Zijun², CHEN Qiang², JIANG Shichen², JIN Hao²

(1. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aerospace engineering development is a complex system engineering project. It involves many links with close combination, and any link problems may bring irreversible losses to the project development. With the high-density development and launch situation of aerospace engineering, the number of aerospace product tasks is increasing year by year, and the quality problems also occur frequently. This shows that the risk identification is not comprehensive, the risk control is not in place, and the risk management is not standard. In this paper, the quality situation of aerospace development is discussed, and the problems of risk identification are pointed out. The relevant standards used at present are summarized, which provides tools and means for the technical risk analysis and control of the model. Finally, taking Fengyun-4 (FY-4) microwave satellite as an example, the risk analysis, the identification, and the control process and effect are given, providing reference for other models.

Key words: Fengyun-4 (FY-4) microwave satellite; aerospace products; risk; technical risk identification; risk analysis; risk control

0 引言

航天事业发展至今,传统世界航天强国出现重大失利的现状仍然没有改变。在各航天企业研制、发射和在轨工作中,大小故障不胜枚举,轻则造成

任务推迟,重则造成数十亿经济损失,甚至人员伤亡。这与航天产品具有小子样、无维护、复杂性、先进性及探索性导致的高风险性是密不可分的。

1986年和2003年,美国挑战者号、哥伦比亚号

收稿日期:2024-11-17; 修回日期:2024-12-16

基金项目:国家级项目

作者简介:杨之浩(1965—),男,研究员,本科,主要研究方向为卫星总体设计、技术风险识别与控制。

通信作者:周宇(1981—),女,高级工程师,博士,主要研究方向为航天产品环境与可靠性保证技术、技术风险识别与控制技术。

航天飞机爆炸,14名宇航员全部遇难;2010年,AEHF卫星上主发动机未能点火;2011年,金牛座火箭发射“辉煌”卫星失败;2010年12月—2011年12月,俄罗斯连续6次发射失利(5次运载、1次探测器);2006年11月我国鑫诺二号失效;2007年11月尼日利亚通信卫星一号卫星失效;2020年4月长征三号乙火箭发射印尼努桑塔拉段通信卫星失败;近2年还有多颗卫星在轨工作期间出现遥测信号消失后整星失联等。历史上一代代成功的经验和失败的教训无时无刻不在提醒人们,质量是政治,质量是生命,质量是效益,质量是航天科技工业发展永恒的主题。

近几年,宇航产品任务量及发射量递增,质量问题层出。经统计,质量问题分别发生在研制生产、总装测试、发射场测试、飞行试验、在轨运行阶段,如图1所示。问题原因分布为设计、工艺、操作、管理、器材、软件、设备、环境、其他及待定,如图2所示。

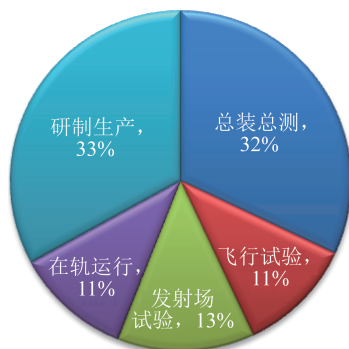


图1 2023年度质量问题发生阶段分布

Fig.1 Distribution of quality problem occurrence stages in 2023

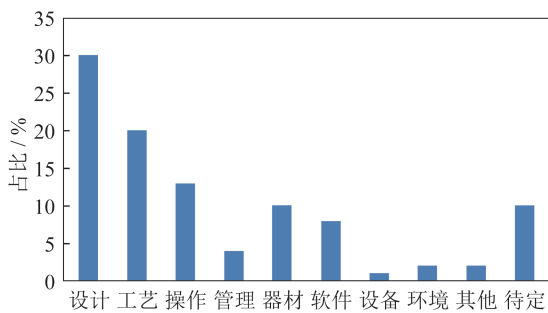


图2 2023年度质量问题分布原因占比

Fig.2 Distribution of quality problem causes in 2023

由2023年全年的质量问题分析可知,质量问题在航天产品研制的全流程中的各个环节都有体现,涉及多种原因。

党的二十大报告指出——“于安思危,于治忧

乱。”整个中华民族一以贯之增强忧患意识、坚持底线思维,主动识变、应变、求变,主动防范化解风险,这是新时代全面建设社会主义现代化国家、全面推进中华民族伟大复兴的必然要求。航天领域更是要有底线思维,坚守底线,加强航天型号技术风险分析和控制。底线思维是“有守”和“有为”的有机统一,是指从可能出现的最坏情况出发,调动一切积极因素使事物朝着预期目标发展的一种思维方法。

近年来,许多航天产品设计、研制、装配、测试相关行业关于航天产品技术风险识别及控制进行了相关研究。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在20世纪80年代将概率风险评价法应用到航天飞机项目研制工作中,并将风险管理与资源管理、采购管理等并列^[1]。欧洲空间局(European Space Agency, ESA)对风险管理工作也非常重视,在借鉴美国风险管理的基础上,结合实际情况进行了适当改进^[2]。胡青^[3]对国外航天领域风险管理的发展历史及主要的风险分析和管理方法进行了研究,主要包括专家评估法、风险矩阵法、故障树分析法、故障模式与影响分析法、概率风险评价法。王立伟和冯卫宁^[4]对根据中国航天型号研制经验总结出来的特有的项目风险管理方法进行了研究与分析,如飞行时序动作分析与确认法、工程分析评价法等。余后满^[5]针对项目研制过程中,需要把握的管理方面和技术方面的风险特性,按照项目研制阶段,对存在的重要风险源进行了控制。张刚等^[6]针对技术成熟度不高的航天型号研制风险管理方法进行了梳理。苏晓东等^[7]提出一套组织级模块化风险辨识与分析方法,借助“五维”风险分析线索,对各个专业、各个项目、各个产品进行风险识别与分析,确保组织级风险识别全面。针对航天系统质量风险较高的外协外包生产的产品,韩晶晶等^[8-11]分析了其存在的质量风险,并从技术及管理2个方面采取措施,识别并化解产品研制风险,保证产品质量及可靠性,从而保障航天型号任务的圆满成功。针对火箭,王小静^[12]逐步形成了“设计要求量化、试验验证量化、生产操作量化、测试比对量化”的技术风险和产品质量可靠性量化控制工作思路。刘智

卿^[13]针对低层次质量问题,从组织管理、工作流程、工作方法、条件保障、责任制落实等方面找出薄弱环节,制定了有效的改进措施。李翠兰等^[14]通过计算交会时间、交会次数、碰撞概率等参数,分别对构建的轨道高度为600 km小卫星星座和已经发射的SpaceX的Starlink星座第一批60颗卫星与大型低轨航天器的碰撞风险进行了评估分析。刘皓等^[15]针对高可靠集成电路产品,从全流程的各阶段充分识别风险,并针对风险事项及影响程度,事前进行分析研判,及时制订应对预案,阐述了风险管理在高可靠集成电路产品研制过程的重要作用。宋文成等^[16]研究以技术风险识别为核心的航天产品保证模式,有效地识别了风险项目及风险点,制定了切实有效的风险防范控制措施,加强了总装、集成和测试(Assembly, Integration and Test, AIT)现场的质量安全控制。范舟等^[17]针对首飞技术创新性的特点,在风险管理上,构建以流程为牵引、以方法为核心、以组织为保障、以基础为支撑的3个子体系、一个基础平台构成的技术风险管理体系。范舟等^[18]分析了空射运载火箭型号研制特点,对研制过程中涉及的主要风险项目进行研究,从空射运载火箭总体技术方案设计、可靠性和安全性设计、环境适应性设计、系统接口管理、任务特情处置共5个方面提出了相应的风险控制措施,可为后续空射运载火箭型号风险控制提供一定的借鉴和参考。唐自新等^[19]结合管理熵理论,以核心舱机械臂产品研制为例,分析航天复杂新产品研制风险管控流程与措施。同时,张世慧、袁金如等^[20-28]分别针对无人机火箭助推发射技术、激光雷达载荷AIT过程等进行了技术风险管控工作的梳理。但都是针对产品或者是质量体系某一环节进行风险控制,而作为系统工程的航天产品,系统、全面、有效地识别风险,分析风险,控制风险是亟待完成的工作。

航天科技集团和上海航天技术研究院近年来制定并逐步完善了航天产品技术风险识别与控制的相关工作要求、细则和标准,以指导航天产品的风险控制工作。本文梳理相关标准,展示型号开展风险识别与控制的方法,并以风云四号微波星为例,给各个相关领域产品的风险识别与控制工作提供参考。

1 概念

“风险”是一个舶来词,在拉丁语指“悬崖”或“礁石”,引申为“大海上难避免之事”。

美国国防部(United States Department of Defense, DOD)定义风险是在规定的费用、进度和性能约束条件下实现项目目的和目标中不确定性的度量。这意味着,任何可能影响项目按时、按预算或达到预期性能完成的因素,都被视为风险。这些风险可能来自多个方面,包括技术挑战、市场变化、供应链问题、人力资源短缺等。这一定义体现了风险管理的核心思想,即识别、评估、优先排序并应对项目中可能影响目标实现的不确定性因素。

欧洲空间局(European Space Agency, ESA)定义风险是有可能发生并对项目产生负面影响的不利形势或不利情况。这一定义突出了风险的“可能性”和“影响”。因此,评估风险的潜在影响是风险管理过程中的一个重要步骤。

GB/T 23694—2024《风险管理 术语》^[29]中定义风险是不确定性对目标的影响。GJB/Z 171—2013《武器装备研制项目风险管理指南》^[30]定义风险是在规定的费用、进度和技术等约束条件下,对不能实现装备研制项目目标的可能性及所导致的后果严重性的一种度量。该标准是指导性技术文件,适用于武器装备研制项目的风险管理工作,其他项目也可参照执行。它规定了武器装备研制项目风险管理的基本要求、主要活动和各阶段的主要工作中,强调了在风险管理过程中,识别、评估和应对风险是至关重要的步骤,以确保项目能够在规定的费用、进度和技术条件下顺利实现预定目标。

GJB 5852—2006《装备研制风险分析要求》提供了武器装备研制项目风险管理基本框架和通用方法。主要规定了项目风险、风险管理、风险规划等基本定义;提出了项目风险管理的基本要求;明确了风险规划、风险评估、风险应对、风险监控各阶段主要工作;制定了常见风险评估方法的适用范围及使用简介;并给出了典型风险源示例。

航天产品的研制过程涉及复杂的系统工程和高精尖技术,其技术风险主要体现在对新技术的依赖、系统的集成复杂性以及极端环境下的性能可靠性等方面。因此,技术风险的识别与控制是确保航天任务成功的关键。航天科技集团针对航天器技术风险进行了深入研究,并制定Q/QJA 670—2018

《航天器技术风险管理要求》,给出航天工程技术风险定义:造成航天器技术指标或战术指标不满足要求,危害航天器任务目标实现或导致航天器任务失败的不确定性。该标准同时给出了航天工程技术风险管理的定义:按照预定程序,采用一定的技术方法,识别技术风险项目,在分析风险发生可能性与后果严重性基础上确定风险综合等级,进而采取必要的应对措施,随着航天器研制工作深入迭代开展,将风险消除或降低至可接受水平。

航天产品技术风险的特点包括不确定性、概率性、规律性、可控性以及和研制过程的关联性。这些特点要求风险管理团队在产品设计和研制的各个阶段进行全面的风险评估和控制。尤其是需要在设计、研制阶段前就开始识别和管理,在研制过程中不断迭代,以确保整个研制过程的质量受控,并最终实现航天任务的成功。

2 现行的标准

经过多年的实践,我国各领域形成了相应的风险管控标准。目前,上海航天技术研究院的航天产品在设计 and 研制过程中所采用的风险管控标准见表 1。

表 1 风险相关现行管理要求及标准(按时间顺序)

Tab.1 Current management requirements and standards relevant to risks(in chronological order)

序号	编号	名称
1	Q/QJA 10—2002	《航天产品质量问题归零实施要求》
2	GJB/Z 171—2013	《武器装备研制项目风险管理指南》
3	Q/QJA 670—2018	《航天器技术风险管理要求》
4	Q/QJA 709—2019	《“三个面向”质量分析工作指南》
5	Q/RJ 185.7—2020	《航天型号出厂评审实施细则 第 7 部分:风险识别、分析与控制专项评审》

Q/QJA 10—2002《航天产品质量问题归零实施要求》规定了航天产品质量问题归零的实施要求,适用于航天产品在设计、生产、试验机使用过程中出现质量问题后的归零工作。指出航天产品质量问题归零工作,既强调技术归零,也强调从管理上查找原因,重视完善规章和标准规范,又被称为“双归零”;提出“双五条”和归零原则;给出了归零流程等。细化了技术归零——定位准确、机理清楚、问题复现、措施有效、举一反三;同时明确了管理归零——过程清楚、责任明确、措施落实、严肃处理、完善规章。

GJB/Z 171—2013《武器装备研制项目风险管理指南》提供了武器装备研制项目风险管理基本框架和通用方法。该标准主要规定了项目风险、风险管理、风险规划等基本定义;提出了项目风险管理的基本要求;明确了风险规划、风险评估、风险应对、风险监控各阶段主要工作;制定了常见风险评估方法的适用范围及使用简介;并给出了典型风险源示例。

QJA 670—2018《航天器技术风险管理要求》给出了技术风险管理的原则:系统策划,识别全面,分析准确,措施有效,风险受控。该标准要求航天器从产品方案阶段起对技术风险管理工作进行系统策划,对技术风险进行全面识别(全系统、全过程、全要素),保证风险识别不漏项、风险产生的原因清楚、风险控制措施得到有效验证、残余技术风险控制在可接受范围内。要求明确各级产品风险管控责任人,配备必要的资源,充分发挥专业机构和同行专家的作用,按照策划、识别与评估、应对、监控的步骤,开展各阶段技术风险管理工作,并持续迭代完善。并且明确航天器研制各个阶段的风险识别与控制工作的重点——方案阶段保证风险识别全面,确保方案正确,降低固有风险;初样阶段保证风险控制措施验证到位,解决测试、试验验证不充分带来的风险;正样阶段保证过程风险控制到位。该标准适用于指导航天器型号总体开展风险管理与评估。

Q/QJA 709—2019《“三个面向”质量分析工作指南》规定了开展“三个面向”质量分析工作的一般要求、工作流程、分析重点和监督检查机制。《“三个面向”质量分析工作指南》要求对型号发生的质量问题,从产品、流程和组织 3 个维度,分析问题产生的深层次原因、查找问题背后的隐患和薄弱环节、提出并落实改进措施。其中,面向产品的质量分析,以质量问题技术归零工作为基础,对本单位同类产品、具有相同原理设计和相同工艺设计的其他产品,开展横向分析,全面举一反三,落实改进措施,确保单位内同类产品及相关产品的技术要求和质量要求横向一致,实现相关产品质量的共同提升。面向流程的质量分析,以面向产品的质量分析和质量问题管理归零工作为基础,对问题涉及的技术、管理等相关流程进行分析,查找各流程中可能存在的漏洞、重复低效、不合理等方面的隐患和薄弱环节,明确改进措施,实现相关流程的持续改进和优化,提升流程的科学性和有效性。面向组织的

质量分析,以面向产品、面向流程的质量分析和质量问题管理归零工作为基础,从人员能力与意识、责任落实、技术条件、资源保障和持续改进等方面,分析存在的隐患和薄弱环节,完善职责,落实改进措施,不断提升组织的质量保证能力。

在上海航天技术研究院各航天产品型号转阶段过程中,则遵循 Q/RJ 185.7—2020《航天型号出厂评审实施细则 第 7 部分:风险识别、分析与控制专项评审求》开展风险识别与控制工作。该标准规定了上海航天技术研究院航天型号出厂风险识别、分析与控制专项评审的组织、内容和程序,适用于航天器出厂评审阶段风险识别、分析与控制专项评审。

另外,为加强航天型号“九新”分析工作,上海航天技术研究院制定了航天型号“九新”分析实施细则,明确了“九新”分析这一风险识别方法,具体指导上海航天技术研究院航天器“九新”风险管理的实施和识别与分析工作。将“九新”分析管理工作细化,要求型号将“九新”风险分析与控制工作先期策划,充分识别,融入过程,嵌入流程,“持续迭代,专项把关”。

总的来说,上海航天技术研究院在设计和研制过程中,采用了多种技术风险识别、分析与控制标准,这些标准相互补充,共同构成了一个全面的风险管理体系。通过这些标准的实施,可以有效提高航天产品的可靠性和安全性,确保型号任务的成功。后续需要进一步研究、实践并完善细化各领域技术风险管理实施细则,制修订标准,规范型号和产品技术风险管控工作。

3 风险识别与控制工作

3.1 风险识别与控制时机

航天型号需按照“系统策划,识别全面,分析准确,措施有效,风险受控”的原则开展技术风险识别与控制工作。从立项开始,将技术风险识别与控制纳入研制流程,对型号和产品全生命周期进行策划,按阶段进行技术风险识别、分析、控制工作,如图 3 所示。主要开展风险识别与控制的时机有:

- 1) 各研制阶段的技术风险应按照策划、识别、分析、控制的步骤开展,并在型号研制中迭代进行;
- 2) 型号研制过程中,在方案阶段、初样阶段、正样阶段的转研制阶段前、设计方案或工艺方案发生重大变化时、重要试验前等时期,均应开展技术风险分析;

3) 对在研制过程技术状态更改的分系统,应对改进部分及其影响开展技术风险分析;

4) 在型号产品设计、生产、试验、交付、参加飞行试验等有特殊技术风险分析要求时,应依据型号的要求进行。



图 3 风险控制过程

Fig.3 Risk control process

3.2 型号研制各阶段风险识别与控制重点

各研制阶段的风险识别与控制工作各有侧重,方案阶段针对任务特点、方案正确性、继承性、新技术等方面进行识别、分析与控制;初样阶段对方案阶段的风险进行迭代,以及各级产品协调性、匹配性等方面进行技术风险的识别、分析与控制;正样阶段则侧重于技术状态更改的影响、数据超差与临界分析等方面的技术风险识别、分析与控制。具体见表 2。

表 2 各阶段风险识别与控制重点

Tab.2 Key work of risk identification and control at each stage

序号	方案阶段	初样阶段	正样阶段
1	任务特点分析	方案阶段风险的迭代分析	技术状态更改影响分析
2	方案正确性分析	本阶段的任务特点分析	工艺稳定性和敏感性
3	继承性分析	各级产品接口的协调性和匹配性分析	设计裕度量化分析
4	新技术分析	试验验证和仿真分析的全面性、充分性、有效性分析	产品最终使用状态分析
5	新工艺分析	环境适应性分析	数据超差与临界分析
6	新器件、新材料分析	关键特性识别全面性分析	空间飞行器抗单粒子防护和供电安全措施有效性分析
7	新产品分析	设计裕度量化分析	质量问题归零、举一反三的检查与分析
8	新单位分析	单点故障及强制检验点设置充分性和控制有效性分析	故障预案充分性及其验证情况分析
9	技术成熟度分析	新人员分析	过程控制分析
10	曾经发生过影响成败问题的型号(产品)	空间飞行器抗单粒子防护和供电安全措施有效性分析	测试覆盖性分析
11	设计裕度量化分析		软件验证确认分析

4 风险识别与控制案例

静止轨道微波探测卫星(简称微波星)是《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》中明确发展的“十四五”科研卫星,是全球首颗地球静止轨道微波探测卫星,意义重大。

微波星采用 SAST5000 平台(电推型),采用平台+毫米波亚毫米波探测仪一体化方案。整星发射质量为 5 450 kg,功耗为 3 200 W,具有国内最大口径高精度天基面天线,天线收拢发射,在轨分步展开。微波星定标精度影响因素复杂,实现难度大。同时,首次采用静止轨道微波图像导航配准技术,指标要求高,实现难度大。另外,载荷平台整体二维扫描,对动力学兼容和活动部件长寿命要求高。

4.1 微波星技术风险识别与控制策划

微波星严格贯彻集团、上海航天技术研究院技术风险识别与控制工作要求,在方案阶段制定了技术风险管理目标和原则,组建了风险管理组,开展了风险识别与控制策划及组织实施,并依照航天型号技术风险识别方法、评估及接受准则、控制策略和监控方式等要求,完成了方案阶段的技术风险识别与控制工作。

本着“两总抓总,分级策划,逐级落实”的原则,型号总指挥是型号风险管理工作的第一责任人,总设计师对型号风险识别与评价、应对措施的正确性和完整性负责,对型号风险决策。项目办协助型号两总开展风险管理组织、策划工作,并监督检查各承制单位风险管理要求落实情况。各承制单位是实施微波星产品技术风险分析与控制管理要求的主体,负责开展所承担产品技术风险的管理策划、

识别、分析、控制和评价工作。各承制单位行政指挥负责组织开展本单位的各项风险管理活动,且将风险分析与控制工作纳入研制计划流程,协调相应资源;各级设计师负责各自产品技术风险识别与控制工作的实施,并检查、督促下一层次产品的风险识别与控制工作的实施;各承制单位质量师参与技术风险分析与控制,发挥检查、监督作用。各级产品主管设计师、指挥、质量师、工艺、电装、总装人员等协助其完成风险分析与控制工作。

整星及各分系统初样/正样设计评审、研制总结评审前需完成各阶段的风险迭代,形成风险分析与控制专题报告,其中整星和探测仪的风险报告需专题组织评审,其他分系统风险报告与分系统报告同时评审。

4.2 微波星风险识别

按照 Q/QJA 670《航天器技术风险管理要求》微波星从技术要素、产品要素、操作要素和管理要素 4 个维度线索重点针对卫星研制特点,开展风险识别工作。

方案(设计)阶段的重点是依据型号研制和使用要求,对其任务特点、使用状态和环境条件等方面进行分析;在此基础上,对总体、分系统、重要单机设计方案,研制过程各类大型试验方案,关键技术攻关情况,采用的新技术、新工艺、新材料(含器件)情况,用户技战术指标的满足程度,可靠性指标分配和传递情况等方面的技术风险进行分析与控制。

方案阶段识别出 14 项通用风险和 11 项 B 类风险(含 3 项管理风险),其中 10 项风险作为重点风险控制。方案阶段识别的部分风险项目见表 3。

表 3 方案阶段识别的风险项目(部分)

Tab.3 Risk items identified in the scheme design stage (part)

序号	可能产生风险的项目	风险要素分类	风险类型	风险综合评级	采取措施后评级
1	在轨复杂热变形下天线精度实现风险	技术要素分析、产品要素分析	B类风险	Dc(19)	Db(14)
2	微波图像导航与配准精度实现风险	技术要素分析	B类风险	Dc(19)	Db(14)
3	整星动力学兼容性风险	技术要素分析	A类风险	Eb(17)	Db(14)
4	微波载荷定标精度实现风险	技术要素分析、产品要素分析	B类风险	Dc(19)	Db(14)
5	载荷与卫星电磁兼容性风险	技术要素分析	A类风险	Db(17)	Da(11)
6	整星超重风险	技术要素分析	B类风险	Eb(17)	Db(14)
7	整星 AIT 流程优化及天线装调、测量、卸重、展开方案和工艺风险	技术要素分析、产品要素分析、操作要素分析	B类风险	Dc(19)	Db(14)

续表 3 方案阶段识别的风险项目(部分)

Continued tab.3 Risk items identified in the scheme design stage (part)

序号	可能产生风险的项目	风险要素分类	风险类型	风险综合评级	采取措施后评级
8	某新材料地面全流程保障风险	技术要素分析、操作要素分析、产品要素分析	B类风险	Dc(19)	Db(14)
9	活动部件一次性展开和长寿命运行风险	产品要素分析、操作要素分析	B类风险	Ec(21)	Eb(17)
10	新型综合电子可靠性风险	技术要素分析	B类风险	Cc(15)	Ca(5)
11	研保条件建设与整星研制进度不匹配风险	技术要素分析 管理要素分析	B类风险	管理风险	
12	用户使用要求未最终确定及地面系统建设存在延迟风险	技术要素分析 管理要素分析	B类风险	管理风险	
13	载荷进口产品引进风险	管理要素分析	B类风险	管理风险	
14	天线反射面等机构类展开风险	整星	A类风险	Eb中风险	Ea中风险
15	电推进系统长寿命运行风险	姿控、推进分系统	A类风险	Cc中风险	Cb低风险
16	整星能源流单点风险	整星	A类风险	Dc中风险	Cc中风险

4.3 技术风险控制措施制定及执行

微波星整星识别出的风险项目通过产保大纲自上而下传递,各相关方须完成应对措施分解、细化和落实。

型号总体制定了技术、计划、产保、条件保障相结合的整星和载荷研制流程,将风险控制的各项产保措施融入研制流程中,确保执行到位。各级产品的技术风险实施全过程动态监控,重点关注因设计变化、技术状态更改、质量问题、举一反三等产生技术风险项目变更、新增。

为了在研制过程中分阶段释放风险,型号策划在方案转初样、初样转正样以及卫星出厂前分3个阶段开展可靠性独立评估,根据卫星的特点、难点,梳理出卫星关键技术,在此基础上明确了6项评估项目和评估重点。2023年完成了第一阶段的评估工作,型号对专家提出的504条意见和建议,均逐一

进行了分析、答复和确认。其中387项进行了现场或书面答复;25项待初样相关试验和仿真完成后答复;92项采纳为初样产品或工艺状态和控制措施,并落实责任人,其中解锁装置剪切销位置和分离面倒角方式2类技术状态更改已落到初样设计及实物中。通过独立评估工作,使天线型面精度保证、活动部件可靠展开和连续工作等重点风险得到了部分释放。

在型号重大节点前后,项目办组织对当前阶段进行风险迭代分析,对前一阶段识别的风险是否已经消除进行确认;对未消除风险的控制措施进行再调整,再制定。

方案转初样前11项重点风险进行迭代分析,根据方案阶段已采取的控制措施执行情况,重新进行风险评级评估,对已降级到可接受范围的风险不再作为初样重点风险进行控制。具体见表4。

表 4 方案阶段措施落实及风险评级迭代情况

Tab.4 Implementation of risk control measures identified in the scheme design stage and iteration of risk rating

序号	风险项目	风险识别等级	方案阶段采取的控制措施	采取措施后风险等级	后续风险控制策略
1	在轨复杂热变形下天线精度实现风险	Dc(19)(中风险)	投产了ULE、碳纤维反射面、展开机构验证件开展了工艺和环境适应性验证;投产了测量与控制系统各组件原理样机,开展了部件精度和系统闭环精度的验证	Db(14)(中风险)	继续作为初样重点风险控制
2	微波图像导航与配准精度实现风险	Dc(19)(中风险)	优化了定位系统方案及使用地标观测数据解算热变形的算法,完成红外定位相机指标论证与实现、观测区域和频次、光轴和微波电轴相关性机理仿真等必要性和方案论证	Db(14)(中风险)	继续作为初样重点风险控制
3	整星动力学兼容性风险	Eb(17)(中风险)	完成了旋转扫描镜与帆板频率的耦合分析并进行了错频设计;数传天线更改相控阵避免与帆板、副反频率耦合;新增副反展开臂支撑杆,增强刚度规避频率耦合风险	Db(14)(中风险)	继续作为初样重点风险控制

续表 4 方案阶段措施落实及风险评级迭代情况

Continued tab.4 Implementation of risk control measures identified in the scheme design stage and iteration of risk rating

序号	风险项目	风险识别等级	方案阶段采取的控制措施	采取措施后风险等级	后续风险控制策略
4	微波载荷定标精度实现风险	Dc(19)(中风险)	开展了定标误差源分析,明确了定标技术路线,并开展了部分验证测试,提前启动了条件建设	Db(14)(中风险)	继续作为初样重点风险控制
5	载荷与卫星电磁兼容性风险	Db(17)(中风险)	建立了微波星微波干扰路径等效模型,计算微波干扰途径,优化了整星布局,增加了谐波抑制度等敏感度要求,数传通道增加滤波器,确保 7 次谐波不会影响载荷探测频段	Da(11)(中风险)	风险降低,作为 A 类通用风险控制,不再作为整星的重点风险控制
6	整星超重风险	Eb(17)(中风险)	载荷系统优化,减少内部非必要冗余设计,实现减重;与运载协调,卫星质量可增加至 5 450 kg	Db(14)(中风险)	继续作为初样重点风险控制
7	整星 AIT 流程优化及天线装调、测量、卸重、展开方案和工艺风险	Dc(19)(中风险)	利用工程样机进行了装调和展开工艺验证,对测量装调一体化方案和恒张力主动吊挂展开方案可行性和精度进行了摸底验证	Db(14)(中风险)	合并到“在轨复杂热变形下天线精度实现风险”中联合控制
8	ULE 材料地面全流程保障风险	Dc(19)(中风险)	提前投产小型 ULE 产品,提前验证加工、运输和保护的工艺流程;开展针对性支撑设计,使用试件开展抗力学和热环境及空间环境适应性专项试验	Db(14)(中风险)	继续作为初样重点风险控制
9	活动部件一次性展开和长寿命运行风险	Ec(21)(高风险)	投产了主反展开机构、副反展开机构的原理样机,开展了多次展开及精度验证试验;明确了旋转扫描机构的可靠性要求和寿命试验要求,优化了 CMG 设计,开始了寿命试验验证	Eb(17)(中风险)	继续作为初样重点风险控制
10	新型综合电子可靠性风险	Cc(15)(中风险)	更改为不使用 FT6672 和操作系统作为综合电子计算机的 CPU 方案,采用更为成熟的处理器芯片,综合和姿控计算机独立,确保系统工作稳定性,与光学星结合开展了综合电子的桌面联试,对方案可行性进行了充分验证	Ca(5)(低风险)	风险降低到可接受范围,不再作为整星的重点风险控制
11	研保条件建设与整星研制进度不匹配风险	Cc(15)(中风险)	系统梳理了研制保障所需设备清单,明确了设备最晚齐套时间,并均已报备提前启动;组织多轮载荷测试条件专项方案论证和评审,并将保障条件流程合并到整星研制流程中,与技术、计划、产保流程统一	Cc(15)(中风险)	继续作为初样重点风险控制

4.4 初样阶段技术风险识别与控制

整星初样阶段从任务特点、风险迭代风险、各级产品接口的协调性和匹配性分析、设计裕度量化的关键项目和关键特性、“十新”等方面识别整星风险项目,从技术、产品、操作、管理 4 个维度,结合自下而上汇集各分/子系统识别的风险源分析,最

终确定微波星初样阶段技术风险项目清单共 21 项,其中 A 类通用风险 14 项, B 类风险 7 项;其中前 10 项中风险项目(7 项 B 类、3 项 A 类:动力学兼容性/活动部件展开及长寿命运行/供配电安全)作为微波星重点风险进行应对。初样阶段技术部分风险识别与分析情况见表 5。

表 5 初样阶段技术风险识别与分析情况(部分)

Tab.5 Identification and analysis of technical risks in the preliminary design stage (part)

序号	可能产生风险的项目	风险要素分类	风险类型
1	在轨复杂热变形下天线精度实现风险(含天线装调、测量、卸重、展开)	技术要素分析、产品要素分析、操作要素分析	B 类风险
2	微波载荷定标精度实现风险	技术要素分析、产品要素分析	B 类风险
3	微波图像导航与配准精度实现风险	技术要素分析	B 类风险
4	活动部件一次性展开和长寿命运行风险	技术要素、卫星寿命分析	A 类风险
5	整星动力学兼容性风险	技术要素分析	A 类风险
6	整星超重风险	技术要素分析	B 类风险
7	整星供配电安全性风险	技术要素分析	A 类风险
8	ULE 材料加工和地面环境保障风险	技术要素分析、产品要素分析、操作要素分析	B 类风险

续表 5 初样阶段技术风险识别与分析情况(部分)

Continued tab.5 Identification and analysis of technical risks in the preliminary design stage (part)

序号	可能产生风险的项目	风险要素分类	风险类型
9	研保条件建设与整星研制进度不匹配风险	技术要素分析 管理要素分析	B类风险
10	载荷研制进度无法满足整星研制流程的风险	管理要素分析	B类风险
11	星箭分离异常	通用风险	A类风险
12	测控链路失效	通用风险	A类风险
13	姿态基准建立和标定过程异常	通用风险	A类风险

在研制过程中,各风险项目负责人需每周跟踪各项措施的进展,并落实情况。当实际滞后原计划一周以上或确认原控制措施不能按期实施时,各项目负责人将当前风险控制落实逐级上报,由项目办组织型号两总、相关人员讨论制定风险应对方案,调整风险应对措施或采取措施将风险项目的不利影响降到最低。

5 结束语

随着“十四五”规划以及二〇三五年远景目标的确定,航天强国建设迈向新征程,航天发射开启超级模式。比如,卫星新研载荷方面要求与国际对标,不仅技术指标要求标准更高,其寿命与可靠性要求明显提高,其研制难度增大;在航天进入产业化发展及任务量加大的同时,将更加注重成本、效率和用户评价,对航天产品的可靠性设计、分析、试验验证等方面提出了新的要求。

面对行业新形势、新挑战,航天产品研制必须提升风险意识,靠前保障。设计是质量源头,技术是设计的源头,必须回归初心,回溯本源,加强技术风险管理。已知技术风险靠过程管控,将已知技术风险控制细化、量化,可检测、可确认;未知技术风险靠底线思维,将未知技术风险的影响域尤其是安全底线的影响域识别全面,通过底线手段和裕度设计,将未知技术风险限制在可控范围。

航天领域产品在提升专业能力的同时,有效利用技术风险识别、分析与控制技术,加强型号的风险管控能力,实现航天产品研制全流程风险可控,提供长期稳定的高质产品,才可以实现航天产品“高质量、高效益、高效率”全面发展目标。

参考文献

[1] Griner, Carolyn S. NASA program and project management processes and requirements: NPG 7120.5A

[S]. NASA, Ntrs.Nasa.Gov, 1988:4.

[2] ESA-ESTEC. Space project management: risk management: ECSS-M-00-03A [S]. Noordwijk, The Netherlands: ESA Requirements and Standards Division, 2000:4.

[3] 胡青. 风险管理方法及其在国外航天领域中的应用[J]. 中国战略新兴产业, 2017(12):16-18.

[4] 王立炜,冯卫宁. 航天型号研制风险管理方法研究及应用[J]. 质量与可靠性, 2010(1):4-8.

[5] 余后满. 航天器项目研制重要风险源识别及控制措施[J]. 航天器工程, 2018(4):1-5.

[6] 张刚,王潇茵,马宽,等. 基于技术成熟困难度的航天型号研制风险管理方法[J]. 航天控制, 2011(5):77-81.

[7] 苏晓东,万越,刘召军,等. 基于模块化的组织级航天项目风险辨识与分析方法[J]. 质量与可靠性, 2022(6):51-55.

[8] 韩晶晶,李坤,王鑫,等. 航天产品外协外包质量管控实践[J]. 航天工业管理, 2023(1):8-11.

[9] 徐晶,赵明,张亮. 浅析航天型号外包产品质量风险管理策略[J]. 质量监管, 2021(5):71-72.

[10] 刘戎,丁丽娟,徐秀强. 航天产品外协外包中的风险控制[J]. 研究与探讨, 2018(2):42-47.

[11] 王志强. 航天产品外包过程质量管理风险及控制措施[J]. 现代经济信息, 2017(10):354.

[12] 王小静. 航天型号技术风险及产品质量的量化管控[J]. 航天工业管理报, 2013(3):40-43.

[13] 刘智卿. 航天型号杜绝低层次质量问题管控措施探索与实践[J]. 企业管理, 2021(5):71-72.

[14] 李翠兰,欧阳琦,陈明,等. 大型低轨航天器与星座卫星的碰撞风险研究[J]. 宇航学报, 2020(9):1158-1165.

[15] 刘皓,王永平,张东明,等. 高可靠集成电路产品风险管理的实践与探究[J]. 企业改革与管理, 2023(1):28-30.

[16] 宋文成,刘小庆,董学金. 技术风险管控保证航天产品过程质量[J]. 中国质量, 2022(9):32-36.

[17] 范舟,安全强,戴彧昕,等. 面向航天重大武器工程首飞特性的质量管理方法[J]. 航天工业管理, 2022(增刊):3-7.

(下转第 67 页)