科技论坛

航天可靠性数据包全生命周期管理优化策略研究

陆华　王毅鹏　李骏
上海航天电子通讯设备研究所　上海市闵行区　201908

【摘　要】航天可靠性数据包是航天产品全生命周期内形成的质量与可靠性证实性材料集合。当前管理面临数据标准不统一、信息系统碎片化、全链条追溯困难、过程质量管控薄弱及智能化应用不足五大突出问题。本文提出标准统一化、平台一体化、追溯链条化、质量可量化、应用智能化的五维协同优化策略，创新性地构建了五维协同框架，引入数据包络分析方法和过程检替代终检的分阶段验收机制。研究成果可为航天型号可靠性数据包管理的数字化转型提供理论参考与实践路径。

【关键词】航天可靠性数据包；全生命周期管理；结构化数据包；采验一体管理；数据包络分析

Research on Optimization Strategies for the Full Life Cycle Management of Aerospace Reliability Data Packages

Lu Hua　Wang Yipeng　Li Jun
Shanghai Institute of Aerospace Electronic Communication Equipment, Minhang District, Shanghai　201908

【Abstract】An aerospace reliability data package constitutes a collection of quality and reliability verification materials generated throughout the entire life cycle of aerospace products. Current management practices face five major challenges: inconsistent data standards, fragmented information systems, difficulties in full-chain traceability, inadequate process quality control, and insufficient application of intelligent technologies. This paper proposes a five-dimensional collaborative optimization strategy encompassing standard unification, platform integration, traceability chain establishment, quantifiable quality assessment, and intelligent application; it innovatively constructs a five-dimensional collaborative framework and introduces the Data Envelopment Analysis (DEA) method, as well as a phased acceptance mechanism that replaces final inspection with process-based inspection. The research findings can provide theoretical references and practical pathways for the digital transformation of reliability data package management in aerospace programs.

【Key words】aerospace reliability data package; full life cycle management; structured data package; integrated sampling and inspection management; data envelopment analysis

一、引言

高密度发射成为常态，航天产品小批量、多品种、高复杂、短周期的研制特征日益突出，供应链全级次配套单位数量庞大，可靠性数据包管理面临严峻挑战。当前数据包管理存在数据分散、检索困难、批次管理困难、可追溯性不强等问题，设计端产品数据管理系统、制造端制造执行系统与试验端试验数据管理系统各自为政形成数据孤岛，传统终检模式难以适应精细化管控需求。优化数据包全生命周期管理有助于推动质量管控从定性管理向定量管理转变，从被动存档向主动赋能跃升。本文采用概念界定、问题诊断、策略提出、保障落地的分析结构，从标准统一化、平台一体化、追溯链条化、质量可量化、应用智能化五个维度展开研究。

二、航天可靠性数据包全生命周期管理概述

（一）航天可靠性数据包的内涵与构成

航天可靠性数据包是航天产品研制生产全过程中形成的、与产品质量和可靠性有关的数据证实性材料集合，是评价产品功能性能与可靠性特性的客观证据。依据研制实践，其内容可分为十类：设计输入类、设计文档类、工艺文档类、物资配套清单类、测试试验文档类、生产过程记录类、关键项目控制记录类、问题处理信息类、技术状态控制类、产品验收文档类。三类基本属性贯穿其中，即证据性、集合性与阶段性，分别体现为数据包提供可靠性评价依据、多类文件的有机整合以及不同研制阶段侧重不同的数据内容。

（二）全生命周期管理的内涵与特征

全生命周期管理从时间、数据、组织三个维度展开。时间维度覆盖方案设计至退役全阶段，各阶段数据具有承接递进关系。数据维度涵盖数据产生至销毁全过程，各环节存在复杂的映射与转换关系。组织维度涉及系统总体至原材料供应商，构成全级次供应链数据传递链条。其核心特征可概括为链条长、环节多、主体广、标准高与可追溯性强，反映了航天产品高可靠要求下数据管理的特殊性与复杂性。

（三）全生命周期管理的重要意义

全生命周期管理在四个层面彰显其战略价值。质量保证层面，数据包使质量管理由定性判断向定量管控转变。故障归零层面，完备的数据链是快速定位故障根因的基础，可有效解决归零周期长与追溯困难等工程痛点。知识沉淀层面，数据包的持续积累构成可靠性工程能力提升的数字资产，为后续型号设计与预测提供历史数据支撑。效费优化层面，全寿命周期数据为卫星效费权衡优化提供输入，直接回应了低成本与高效能的发展导向。

三、航天可靠性数据包全生命周期管理存在的问题

（一）数据标准体系不统一，跨阶段衔接困难

现行数据包管理中，各研制阶段和分系统单位都采用独立的数据格式与分类规则，不适应全生命周期流转需求。一方面，设计与生产阶段数据格式兼容滞后，设计成果进入生产需要重新整理转换，难以直接复用，数据跨阶段流转不畅。另一方面，各类参数缺乏统一定义标准，同一参数在不同系统中责任主体不同，取值相互矛盾。此外，数据包要求仅落实到一级供方，供应链全级次覆盖不足，下级单位的数据完整性难以保障。标准混乱无法保障数据一致性，制约了数据跨阶段衔接效率。

（二）管理信息系统碎片化，数据孤岛现象突出

设计、生产、试验端分别部署不同业务系统，系统间集成和数据互通不足。一方面，各类业务系统独立运行，同一份数据多头录入、分散存储，难以保障版本一致。另一方面，跨地域协同存在困难，不联网环境下，承研单位间数据依赖人工线下传递，效率低且容易出错丢失。此外，数据包仍以纸质文件和 Word 文档为主要载体，信息化水平较低。系统碎片化无法发挥一体化平台提升流转效率的作用，制约了数据共享价值。

（三）数据全链条追溯能力不足

故障归零场景中，全链条追溯存在功能缺陷。一方面，反向追溯链路不通，尚未建立从故障现象到设计参数、生产过程、试验条件的完整链路，根因定位依赖个人经验手动翻查，归零周期长。另一方面，数据变更缺乏系统的版本控制和审批留痕，无法确定关键节点使用的数据版本，技术状态管控存在盲区。此外，缺少版本与批次结合的标识方法，数据和实物对应关系模糊。追溯功能缺失无法发挥全链条追溯提升故障定位效率的作用，制约了数据包的实用价值。

（四）数据过程质量管控薄弱

现行质量管控重终检轻过程。一方面，数据包审查集中在验收环节，缺少研制过程的数据质量同步管控，问题往往到交付阶段才被发现，纠错成本高，完整性审核依靠人工比对，容易出现关键字段缺失。另一方面，数据质量缺少完整性、准确性、及时性的量化评价指标，无法开展横向对比和趋势分析。此外，Word、Excel 形式的非结构化数据人工校验效率低、错误率高。管控的过程短板无法发挥过程管控降低纠错成本的作用，制约了数据包的可信度。

（五）数据智能化应用不足

数据价值挖掘存在智能化短板。一方面，海量可靠性数据以非结构化形式存储，手工操作效率低，多数数据存而不用，除基础统计外，复杂分析难以开展，无法直接支撑型号决策。另一方面，历史数据在可靠性预测、故障模式挖掘等高级应用中的价值未得到充分发挥，对设计改进的反馈作用有限。此外，故障案例、归零报告等知识型数据没有转化为可检索的知识资产，存在经验流失风险。应用层面的不足无法发挥智能化提升决策效率的作用，制约了数据包的价值创造能力。

四、航天可靠性数据包全生命周期管理优化策略

（一）构建统一的数据标准体系

需以数据格式规范程度和供应链穿透深度为依据，对数据包内容进行科学分类，形成覆盖全阶段的统一数据字典，使统计口径与实际研制流程有效贴合。一方面，细化物理参数、功能参数与状态参数的具体分类并规范其定义和归属，通过统一模板提升数据一致性。另一方面，结合装备可靠性工作通用要求和质量管理体系要求等现行标准，构建与行业标准接轨的分类指南，推动总体单位制定统一的数据包实施细则。系统总体统一下发结构化数据包模板，设备承研单位只能导入使用而不可编辑模板结构。将数据包要求纳入外协合同，建立总体制定细则、一级供方落实、二级供方执行的逐级传递机制，实现全级次数据标准统一。

（二）建设一体化数据管理平台

产品数据管理系统、制造执行系统与试验数据管理系统各自独立运行，数据多头录入且版本不一致。需采用面向服务架构构建统一门户、分级管理的数据管理平台，通过集成服务实现与各既有系统的互联互通，采用电子数据交换技术制定系统间接口规范，实现设计、生产、试验数据的自动采集与同步。建立总体、分系统、设备三级站点架构，支持不联网环境下的数据加密导出与导入，实现标准正向下发与数据反向反馈的双向流通。按密级和岗位角色设置分级访问权限，兼顾数据共享与保密要求。

（三）建立全链条追溯机制

为每个产品建立唯一的可靠性数据标识，借鉴版本与批次相结合的综合标识方法串联所有阶段的数据记录，确立数据与实物的一一对应关系。建立数据血缘关系图谱，记录每项数据的来源与变更历史，上游变更自动触发下游通知，确保变更留痕、版本可回溯。开发智能化追溯工具，支持按产品编号、批次号、故障模式等多维度的快速追溯查询，实现从系统到整机的一键追溯。建立严格的变更审批流程，确保技术状态始终受控，有效缩短故障归零周期。

（四）完善数据质量管控体系

以过程检替代终检为核心抓手，建立设计基线、生产基线、交付基线三阶段管控节点，每个阶段的数据包审查结论

作为下一阶段的前置条件，实现不达标不转段，将质量控制重心前移至过程控制。设定完整性、准确性、及时性、一致性四个维度的量化评价指标，以齐套率等统计方法客观衡量数据包质量。在数据采集入口设置值域校验、逻辑校验、完整性校验等自动规则，减少人工录入错误。明确各环节责任人，建立发现、整改、验证的闭环管理机制，将数据质量纳入岗位考核。

（五）推动数据智能化应用

按照四个层次递进推进。第一层次，汇聚全生命周期数据构建多维度查询与对比展示功能，使海量数据看得见、查得到。第二层次，统计历次成功产品的关键特性参数实测值形成参数包络线，为新研产品提供定量评估基准。第三层次，利用同类产品故障数据，通过时间环境折合系数统一折算后开展可靠性增长预测，为设计定型提供决策依据。第四层次，将历史故障案例与归零报告转化为可检索的知识资产，建立故障模式、根因与改进措施的智能推荐机制，实现可靠性知识的沉淀与复用。

五、优化策略实施的保障措施

（一）加强组织领导与顶层设计

优化策略的有效实施，需结合航天型号研制管理体制特征，以型号总师或主管领导的统筹协调为牵引全面部署。一方面，成立由型号总师牵头的专项工作组，明确其决策权与协调权，有效统筹各参研单位之间的协同配合，形成自上而下的执行合力。另一方面，将数据包管理优化纳入型号研制管理流程和考核体系，与研制计划同步部署推进，避免优化工作沦为信息部门的单打独斗。同时，制定分阶段实施路线图，明确近期以标准化建设、中期以平台搭建、远期以智能化为目标的里程碑节点与验收标准，为策略落地提供清晰的时间表和路径图。

（二）加大资源投入与技术支持

策略落地离不开充足的资源投入和技术支撑。一方面，数据管理相关的专项投入在现行经费结构中占比较低，需设立专项经费将平台建设、系统开发及日常运维纳入型号研制预算，确保资金不断流。另一方面，数据管理与可靠性分析领域的复合型人才储备相对薄弱，应通过外部引进与内部培养相结合充实专业力量，同时与高校或技术企业联合攻关数据包络分析、可靠性增长预测模型及知识图谱构建等关键技术，借助外部智力资源突破技术瓶颈并带动内部人才成长。

（三）完善管理制度与标准规范

技术平台和数据标准解决的是能不能做到的问题，而管理制度解决的是必须做和怎么做的问题。一方面，需修订完善数据包管理规章制度，系统明确各阶段各岗位的数据管理职责和操作规范，使每项要求有章可循。另一方面，制定标准作业程序，将原则性要求转化为可操作可检查的具体步骤，使执行人员清楚知道何时由谁用什么模板完成什么工作。同时建立常态化培训与宣贯机制，使制度从挂在墙上走向落实在行动中，从有章可循走向有章必循。

（四）建立持续改进与评估机制

管理优化是动态演进的过程，需建立持续改进与评估机制保障其生命力。一方面，从标准覆盖率、系统集成度、追溯完整率、数据合格率等维度建立成熟度评估指标体系，定期量化衡量优化进展与成效。另一方面，设立问题反馈渠道，使一线发现的问题及时上传至管理层，形成发现、分析、改进、验证的闭环迭代机制。同时对标国内外先进航天机构的数据管理实践，定期开展标杆学习与经验引进，避免闭门造车，确保优化策略始终与工程实践需求有效贴合。

六、结语

航天可靠性数据包全生命周期管理优化是一项系统工程，需从标准统一化、平台一体化、追溯链条化、质量可量化、应用智能化五个维度协同发力，其中标准是基础、平台是载体、追溯是功能、质量是保障、智能是方向。优化管理不仅是提升航天型号可靠性的技术手段，更是航天组织数字化转型与知识管理体系建设的核心内容。在高密度发射任务与低成本高效能发展理念驱动下，数据包管理的优化将直接转化为研制效率的提升与成本的节约。随着数字航天与智能航天的深入推进，数据包管理将向自动化采集、智能化分析、知识化服务方向持续演进，从数据支撑决策迈向数据驱动决策，成为支撑航天强国建设的重要基石。

参考文献

[1]付中梁,王正伟,田尚可,等.航天器结构化数据包采验一体管理系统设计与应用[J].航天器工程,2025,34(3):144-154.
[2]朱江,宁敏,樊子源,等.航天供应链质量与可靠性数据包管理及其信息系统设计与实现[J].航天工业管理,2023,(2):18-25.
[3]郑怀芳,杨锋,周璇,等.面向航天产品全生命周期 BOM 管理研究——以航天发射支持系统为例[J].航天返回与遥感,2022,43(2):142-150.
[4]赵健宇,王晶燕,程卓,等.卫星全寿命周期效费评价及优化方法[J].指挥控制与仿真,2025,47(1):129-140.
[5]胡琳,吴和成.基于 AMSAA 模型的航天产品可靠性增长预测研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2025,(1):42-50+64.
作者简介：陆华（1979.1-），男，汉族，籍贯：上海宝山，学历：本科，职称：中级工程师，研究方向：质量管理。