

航天产品可靠性数据包数字化管理研究

李骏 陆华 王毅鹏

上海航天电子通讯设备研究所

DOI : 10.32629/jpm.v7i7.8968

[摘 要] 针对航天产品研制中可靠性数据包依赖纸质流转、证据链断裂及跨岗位追溯困难等问题，旨在构建适配多单位协同与状态频繁更改的数字化管理体系。采用云边端一体化架构，融合元数据编码、电子签章及成功包络线统计模型，实现数据采集、存储、分析全流程受控管理。应用结果表明，该体系可显著提升证据链连续性与追溯效率，有效降低记录错配风险。研究结论认为，数字化管理须以数据对象编码为核心约束，将可靠性判读嵌入科研生产主线，为型号复核与放行决策提供可量化支撑。

[关键词] 航天产品；可靠性数据包；数字化管理；成功包络线；证据链追溯

Research on Digitalized Management of Reliability Data Packages for Aerospace Products

Li Jun Lu Hua Wang Yipeng

Shanghai Institute of Aerospace Electronic Communication Equipment

[Abstract] Addressing issues such as the reliance on paper-based workflows for reliability data packages during aerospace product development, the disruption of evidence chains, and the difficulty of cross-role traceability, this study aims to establish a digital management system tailored for multi-organizational collaboration and scenarios involving frequent state changes. By adopting an integrated cloud-edge-terminal architecture and integrating metadata encoding, electronic signatures, and a success envelope statistical model, the system enables controlled management throughout the entire process of data collection, storage, and analysis. Results from the application demonstrate that this system can significantly enhance the continuity of the evidence chain and improve traceability efficiency, while effectively reducing the risk of record misalignment. The research concludes that digital management must center its core constraints around data object encoding, integrate reliability assessment into the main workflow of scientific research and production, and provide quantifiable support for model verification and release decisions.

[Key words] aerospace products; reliability data package; digital management; success envelope; evidence chain traceability

引言：

航天产品研制呈现多专业并行、技术状态迭代频繁、参研单位分布广泛等特征，可靠性数据包作为设计输入、试验记录、故障处置与放行依据的证据链集合，其完整性与可追溯性直接关系飞行任务成败^[1]。当前管理仍以纸质卷宗与分散文件夹为主，证据割裂于不同载体，版本不一致、签署遗漏、查询困难等问题突出，制约质量判读的准确性与时效性^[2]。随着数字化技术的渗透，统一数据建模、电子签章固化来源及自动流程校核为破局提供可行路径^[3]。因此，亟须构建以数据对象编码为牵引、覆盖全生命周期的可靠性数据包数字化管理体系，破解证据链断点与状态管控失序难题。

1. 航天产品可靠性数据包数字化管理的现状与需求分析

1.1 传统可靠性数据包管理的现状及痛点

航天产品可靠性数据包是涵盖设计输入、试验记录、故障处置及放行依据的证据链集合。传统管理依赖纸质卷宗与分散文件夹，在多专业并行、状态频繁更改的研制环境下，资料归档被动滞后，命名与版本缺乏统一约束，跨岗位查询平均耗时逾 24 h。以长征系列运载火箭配套单机为例，纸质流转致使审批、试验、闭环记录割裂于不同载体，关键节点缺失率约 12%，手工录入易引发编号错配与状态沿用错误^[4]。此类问题削弱证据连续性，在复核与追溯中放大质量判读不

确定性。痛点分布显示，版本不一致占 35%，签署不完整占 28%，查询困难占 22%，附件遗漏占 15%，反映出版本控制、签审闭环与信息共享为亟须突破的薄弱环节^[5]。

1.2 数字化管理的需求与价值分析

针对航天产品多单位协同研制与技术状态频繁更改的现实情境，可靠性数据包数字化管理不应止于电子文件替代纸质卷宗，而应将设计输入、试验数据、故障处置、评审签署及放行依据纳入统一数据对象进行管理。系统需围绕数据实时共享、全生命周期追溯及过程确认自动化配置功能，形成以标准化采集为底座、依托元数据编码与电子签章固化来源及边界的需求层次架构（见图 1），使跨专业查询由人工台账核验转向条件检索，预期查询时间压缩至 1 h 以内。进一步，数字化平台可将问题归零单、试验曲线及评审结论关联至同一产品构型，减少状态沿用错误，结合流程节点自动提醒与完整性校验，提升过程确认效率约 40%，为后续可靠性增长分析提供连续、可复核的数据基础。

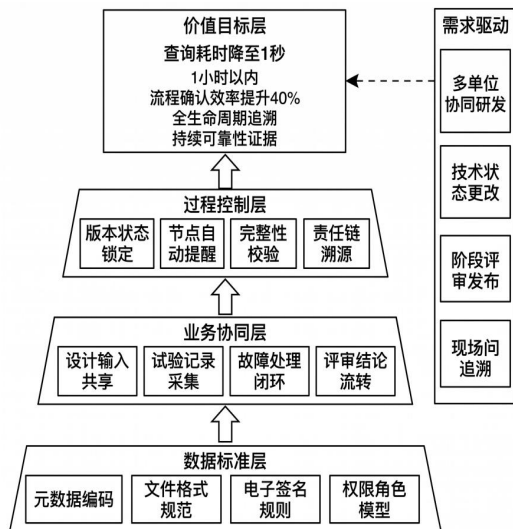


图1 数字化管理需求层次架构图

2. 航天产品可靠性数据包数字化管理体系构建

2.1 数字化管理体系的总体架构设计

针对航天产品数据来源分散、状态更改频繁及证据链跨岗位流转的业务特征，可靠性数据包数字化管理体系采用

表1 航天产品可靠性数据采集项及来源表

数据类别/来源	采集方式	核心关联字段	存储与校核要求
试验测控数据	传感器+边缘网关	单机编号、测点号、时间戳	对象存储，原始曲线哈希校验
过程检查记录	移动终端结构化录入	工序号、检验项、复核人	结构化存储，必填字段完整率≥98%
故障处置数据	接口同步+人工确认	问题编号、故障模式、关闭状态	与产品构型关联，版本保存≥15年
评审签署文件	电子签章归档	评审批次、签署人、放行条件	PDF存档，签章证书链同步存证
构型基线数据	标准接口调用	产品代号、批次号、状态号	主数据统一索引，调用日志全留存

存储环节以数据对象编码为核心约束，编码规则由产品代号、批次号、单机编号、技术状态号及数据类型码组成，确保多源数据在同一构型下建立关联。结构化数据、非结构化文件与原始测控数据分别存入关系数据库、文档库及对象存储，通过统一索引映射。入库时执行格式校验、字段完整性核验、时间顺序审查及电子签章有效性检查，结果写入审计日志。安全性采用身份认证、岗位授权、传输加密与分级

云、边、端一体化架构。云端负责统一数据治理与构型基线管控，边缘端就近完成数据汇聚与格式校核，终端覆盖设计、试验、质量及评审等岗位的录入与签署场景，将证据形成嵌入科研生产流程，实现从文件流转到受控数据流转的转变（见图 2）。在功能分层上，采集层依托模板约束与时间戳实现源头规范；存储层以产品代号、批次号、单机编号及状态号为索引，构建多模协同的证据仓；分析层调用可靠性增长、包络线计算及完整性核查模型，确保结论可溯源；应用层面面向型号办、设计所及总装单位，提供编制、审签、追溯及归零闭环等功能。体系通过标准接口与质量管理体系双向同步任务令与放行状态，并完整保留跨系统调用痕迹与责任链记录。

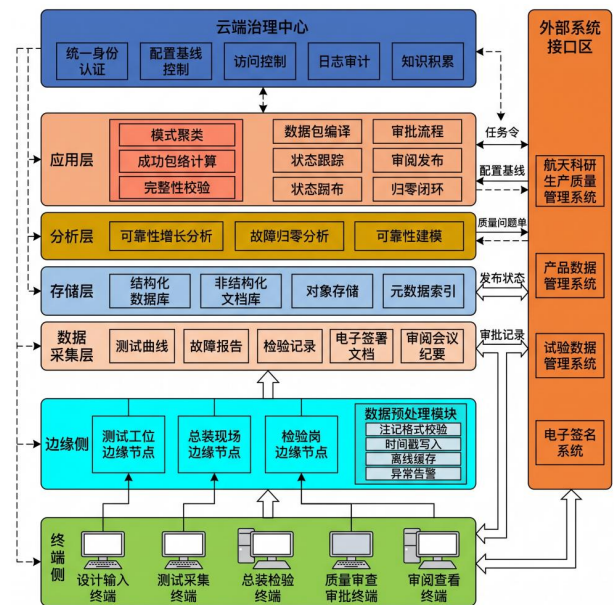


图2 数字化管理体系总体架构图

2.2 可靠性数据包的数字化采集与存储机制

采集机制依循研制现场数据生成节奏，将试验测控、过程检验、故障处置与评审签署纳入统一链路。传感器连续量数据经边缘网关完成协议转换与时间戳写入，过程检查表单通过移动终端结构化录入，将检验项、操作者、复核人、设备编号及工步状态固化为必填字段。主要采集项及来源配置见表 1。

备份四级管控，按型号、专业及任务权限划分访问边界，使可靠性数据包在动态更新中始终保持来源可查、状态可辨、责任可追溯。

2.3 基于成功包络线的可靠性数据分析模型

完成数据统一编码与关联存储后，需将离散试验记录转化为可用于状态判读的统计边界。成功包络线指从满足任务判据的历史样本中提取性能参数随时间、应力及工况变化的可接受

区间边界，用于描述航天单机在环境试验、通电检查及综合测试中的正常波动范围。模型以同一产品构型下的成功样本为基准集，按测点、工况段及技术状态分组，避免跨构型数据混入同一统计口径鉴于航天产品试验样本量受研制批次及成本约束，包络线不宜仅依靠极值边界绘制，而应引入置信区间表达样本波动不确定性。对第 j 个时间点或工况点的性能参数进行统计估计，按样本均值与标准差计算上下包络边界：

$$E_{\alpha}^{\pm}(t_j) = \bar{x}(t_j) \pm t_{1-\alpha/2, n_j-1} s(t_j) \sqrt{1 + \frac{1}{n_j}} \quad (1)$$

式(1)中， $E_{\alpha}^{\pm}(t_j)$ 表示置信水平为 $1 - \alpha$ 时第 j 个时间点或工况点的成功包络线上下边界， $\bar{x}(t_j)$ 表示成功样本在该点的性能参数均值， $s(t_j)$ 表示样本标准差， n_j 表示参与统计的成功样本数量， $t_{1-\alpha/2, n_j-1}$ 表示自由度为 $n_j - 1$ 的 t 分布分位数， α 表示显著性水平。运行中，平台将新试验曲线与对应构型包络线逐点比对，当连续测点接近边界时，系统将偏移趋势写入预警记录，并关联测点号、试验批次、设备编号及

表2 数字化管理前后关键指标对比表

评估维度	核心指标	传统管理阶段	数字化管理阶段	变化幅度
数据准确性	记录错误率（含编号错配、附件遗漏等）	15%	5%	↓10个百分点
追溯与效率	单次跨岗位联合查询平均耗时	8.0 h	5.6 h	↑30%
追溯与效率	过程追溯完成率（问题闭环单至原始证据链）	85%	98%	↑13个百分点
数据规范性	数字化表单必填字段完整率	91%	99%	↑8个百分点
数据规范性	阶段评审提交材料版本一致率	88%	97%	↑9个百分点

3.2 基于雷达图的管理效果多维度评估

为量化评估数字化管理效能，选取数据准确性、效率、安全性、追溯性及易用性5项维度，采用10分制雷达图对比分析。基于遥感卫星A型号载荷控制单机应用数据，数字化管理综合得分为8.5分，显著优于传统模式的6.2分。其中，追溯性与数据准确性提升尤为突出，分别达9.0分与8.8分，表明统一编码、电子签章与构型关联有效重构了连续证据链。雷达图轮廓由传统模式的不均衡收缩转为数字化阶段的均衡外扩，印证了系统对分散证据的组织整合能力。值得关注的是，易用性得分7.9分，相对偏低，反映一线岗位在模板适配、批量上传及异常提示等方面尚存操作壁垒。后续优化应聚焦于界面简化与规则固化，以提升现场应用效能。

3.3 持续优化策略与改进方向

持续优化应聚焦一线岗位的高频阻塞环节，建立问题标签、操作日志与退回缘由的联合分析机制，将界面适配、字段冗余、模板不一致等痛点转化为可配置规则，降低对版本改造的依赖。在数据模型层面，成功包络线与故障聚类模型应按构型、工况段及样本成熟度分层维护，并对技术状态更改后的样本权重动态修订，防止历史样本对当前判读边界产生不当牵引。系统集成方面需深化与技术状态管理、质量归零及试验数据管理系统的接口协同，统一主数据编码、状态字典与日志格式，保障任务令、构型基线、问题闭环与放行结论在同一证据链中稳定流转。针对涉密型号，应将访问授权、脱敏调用与离线归档策略嵌入流程节点，使数字化管理在适用性、可维护性与安全边界之间保持协调。

责任岗位，供质量师复核。该方法将可靠性判读从单次阈值判断延伸至趋势边界识别，可对性能漂移、离散度增大及状态沿用异常提前提示。需重点关注，包络线模型应随技术状态更改迭代训练，过期样本不宜继续参与当前构型判读，确保分析结论与产品真实状态一致。

3.航天产品可靠性数据包数字化管理的应用效果与优化策略

3.1 数字化管理的应用案例与效果数据统计

以遥感卫星A型号载荷控制单机为对象，将数字化平台应用于方案评审、鉴定试验及出厂放行阶段，共纳入设计输入126份、试验曲线184组、故障处置37项及评审文件52份。平台以单机编号、批次号、技术状态号及问题闭环编号为关联索引，实现证据链的有机整合。应用效果显示（见表2），记录错配率由15%降至5%，跨岗位查询效率提升30%，过程追溯完成率由85%提升至98%。实践表明，数字化管理将可靠性数据包从静态档案转化为动态证据链，有力支撑了型号质量复核与放行决策，验证了体系构建的有效性。

结语：

本文系统阐述了航天产品可靠性数据包数字化管理的体系架构、采集存储机制及分析模型，核心在于以统一编码贯穿证据链各环节，将成功包络线引入动态判读，实现可靠性数据从静态档案向可追溯证据链的跃升，为型号放行决策提供了技术支撑。受型号样本与系统集成深度所限，当前模型迭代效率与跨系统协同能力仍有提升空间。后续将聚焦样本权重动态修订、异构系统接口标准化及智能预警规则自优化，推动数字化管理向数据资产化与判读智能化纵深发展。

[参考文献]

- [1]石劲凯.数字化工作包在国际导管架项目中的应用研究[J].石油工程建设,2024,50(6):79-83.
 - [2]黄志斌,吕雅琪,杨昭信.数字化管理系统的开发与实践——以塞尺检定项目为例[J].中国计量,2025,(6):127-129.
 - [3]李莉,聂庆芝.供应链数字化管理对流通企业韧性的影响[J].商业经济研究,2025,(8):115-118.
 - [4]马振威,马晓斌,王婉扬,丁健文.工程项目全过程数字化交付实施路径——以数据中心项目为例[J].中国工程咨询,2024,(12):41-48.
 - [5]任胜利,王康,陈黎,鲁阳,杨炫烨.天然气管道建设工程数字化管理措施探讨与实践[J].石化技术,2024,31(12):99-101.
- 作者简介：李骏（1978.10-），男，汉族，籍贯：安徽太和，学历：本科，职称：中级工程师，研究方向：质量管理。