

质量特性全集在航天电子产品中的研究和实践

包睿^{1*}, 卢迪¹

(1.北京精密机电控制设备研究所, 北京市, 100000; *通讯作者, xinnian823@126.com)

摘要: 文章探讨了质量特性全集理论在航天伺服电子产品中的应用研究和实践, 针对航天伺服电子产品高可靠性、应用环境复杂、多学科交叉的特点。传统的设计质量特性分析法已无法涵盖产品的全生命周期的质量管理, 提出了从顶层产品需求分解、产品FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) 分析转化、历史质量问题转化、供应链数据集成和智能化提取等多维度设计特性全集设定的方法, 以及如何通过信息化手段对质量特性全集数据进行实时采集、监控和全环节控制; 通过对质量全集数据的分析建模, 对产品进行的故障剔除、质量评价和风险预测。以伺服控制驱动器为例, 已开展了在供应链管控、生产、调试和验收环节的应用, 对应用效果进行了总结。

关键词: 质量特性全集; 质量大数据; 航天电子产品

引言

航天伺服产品作为火箭姿态控制执行机构, 其性能直接决定航天任务成败。航天伺服电子产品则具备高精度、高可靠、轻量化、耐极端环境等特点, 对质量控制提出极高要求远超一般工业产品。现有的质量控制措施主要在可靠性设计与仿真、高精度制造和工艺控制和多场景验收试验三个环节分别进行控制。在设计阶段通过高等级元器件选用、降额设计、冗余设计、FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) 分析、多物理场仿真等手段正向提升产品可靠性, 并依据FMEA故障模式和原因分析, 得到产品关键、重要和关注的设计特性, 并转化为工艺特性落在产品生产、测试环节。在工艺制造环节则是通过人工检测结合自动光学检测、三防、多余物控制、多媒体记录等方法保证产品焊接质量。在验收试验环节则通过对飞行环境模拟、可靠性摸底、加速寿命等试验对产品质量进行考核。质量部门分别在产品出厂和飞行前分别对产品的质量数据以报告形式行开会评审和复查。目前, 质量管理工作中存在一些问题: 1.传统的设计特性无法对产品的制造、维护、使用进行全面的覆盖, 2.质量特性数据无法实时监控和共享; 3.设计仿真、生产调试、产品验收试验等环节的数据分散, 缺乏统一管理平台, 导致质量问题追溯效率低下; 4.数据独立难以建立关联, 分析困难; 5.质量数据多为人工采集判读, 有误判、故障隐藏的风险; 6.依赖经验, 跨学科难度高; 7.工艺波动, 检测成本高。

而质量特性全集是覆盖产品全要素、全流程的质量参数体系, 是一种系统性的解决方案。本文创新性地质量特性全集与航天工程实践结合, 形成“理论建模-技术实现-工程验证”的完整研究闭环。对产品全生命周期、上下游单位质量控制以及历史故障案例并加以人工智能技术对产品质量特性进行提取, 得到可以快速辅助优化设计、工艺的高质量的质量特性全集。通过数字化平台实时采集、监控、共享质量数据, 并对数据进行建模分析和处理, 从而快速定位、处理故障并预判产品的质量数据趋势和短板, 从而能从产品设计工艺前端尽早的发现问题、处理问题、解决问题。航天产品质量特性数据集集成示意图详见图1。

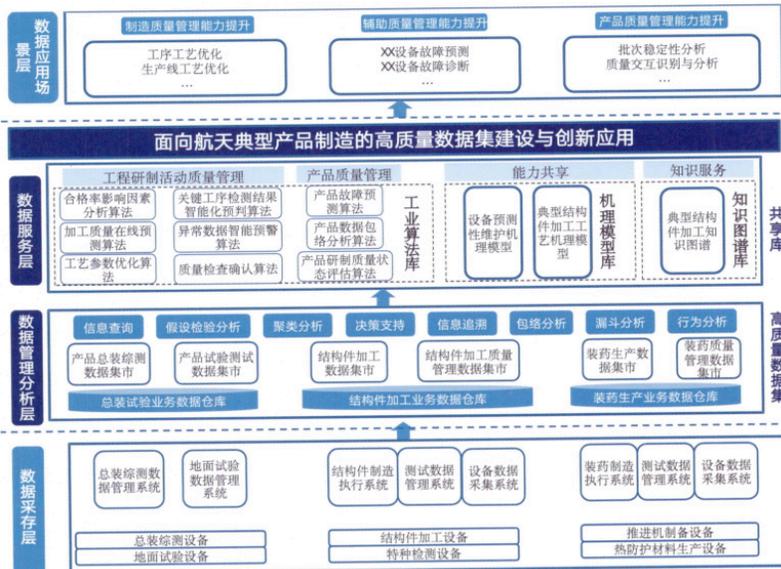


图1 航天产品质量特性数据集集成示意图 [1]

1. 质量特性全集的构建

质量特性全集 (Quality Characteristics Universe) 的定义是贯穿产品全生命周期, 系统化识别、定义、分类并管理所有影响质量的关键属性集合。在航天电子领域其构建维度包括上层产品分解、行业标准转化、产品物理层面的FMEA分析、历史故障事件转化、仿真数据生成、供应链数据集成、智能化特性提取技术等方面。

1.1. 顶层产品需求分解

依据上一级产品提出的任务书了解任务需求, 对产品功能、性能进行解析, 得到用户要求的功能、性能的约束, 参考电子产品相关行业标准并提取标准中的强制要求。结合上一层产品FTA (Fault Tree Analysis) 分解至单机产品的故障模式均可转化为质量特性。

1.2. 产品FMEA分析转化

以电子产品FMEA分析为基础, 按照产品物理层级关系, 分析各故障模式和故障原因, 从整机、印制板组件、机加零件到元器件到焊点进行逐层分析, 各故障模式和故障原因以及产生的影响和严酷度, 形成故障模式合集。针对电子产品特点, 按照以下线索对于是否设置为质量特性进行筛选: 严酷度为I、II类的故障模式应进行设计特性设置, 包括与产品输入输出接口相关特性、需要过程控制的技术指标特性、生产过程中多余物、焊点质量、一般元器件、有技术状态更改的元器件、有安装极性要求的元器件过程控制, 结构尺寸、产品环境特性等等。

1.3. 历史质量问题转化

通过对产品自身质量问题数据库以及同类产品的故障库的故障模式 [2]、产品试验数据、遥测数据分析性能退化项目的总结、提炼，结合仿真数据中通过多物理场仿真 (ANSYS、COMSOL) 生成极端环境下的边界试验条件，以及真实极限条件鉴定试验中出现的薄弱环节、边界条件等，均可转化为产品的质量特性。进行成功数据包络分析，在多次飞行测试的各数据符合技术条件的情况下，确定飞行测试的所有数据是否在产品设计的数据包络线之内，并对超过数据包络线的数据作出了技术问题分析。

1.4. 供应链数据集成

从元器件供应商获取外购件批次号、合格证号、检验报告、九新状态、生产过程异常情况、详细规范升级情况、芯片下游供应商九新状态、其他用户发生的质量问题、元器件质量性能参数离散性分析等，实现对外购件 (包括芯片、机加件和标准件) 100%特性数据穿透式管理。

1.5. 全生命周期闭环管理

设计阶段通过降额设计、裕度设计、物理场仿真发现产品的性能、环境适应性的薄弱环节转化为生产测试环节关注特性进行管控；制造阶段：对关键工艺参数 (如贴片精度 $\pm 25\mu\text{m}$) 进行管控。通过多媒体、X光采集光学图片信息对BGA (Ball Grid Array球栅阵列) 焊点质量进行管控。贮存阶段：对长期贮存产品的产品特性进行退化追踪，为贮存产品的延寿、大修等工作做技术储备。

1.6. 智能化提取

通过人工智能、自然语言处理 (NLP)、机器学习、数据挖掘等技术，自动化识别和提取产品质量特性，可通过人工校验、建立机器学习模型反馈机制以及持续学习行业新标准进行校验与更新，动态更新产品的质量特性全集。

2. 质量特性全集向质量大数据的转化

通过“特性指标化→数据融合→知识建模→智能应用”的技术路径，实现了质量特性向大数据的结构化映射 [3]。其核心价值在于打破数据孤岛，构建覆盖设计、生产、服务的全链路质量数据闭环，最终支撑航天电子产品从经验驱动转向数据驱动的质量管理模式。

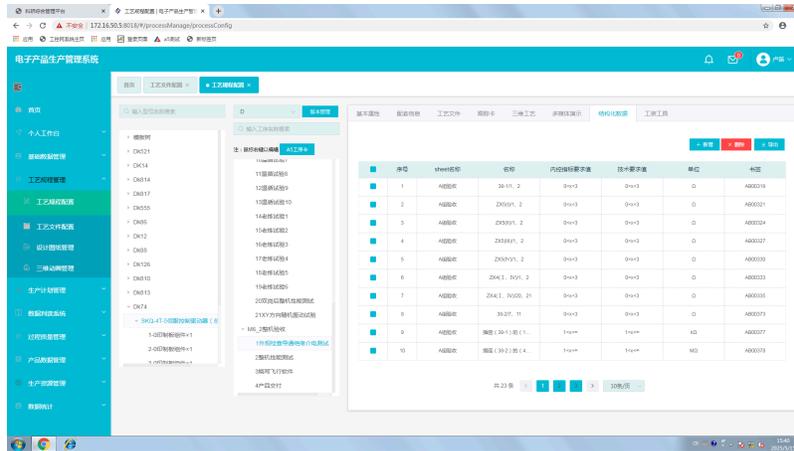
2.1. 质量特性的数据化和分级

质量特性依据其获得方式分为可检可测、可检不可测、不可检不可测等。其中可检和可测的指标均可进行逻辑上、数字化、图表化的指标进行采集和判定。例如，产品性能和工艺参数等均可通过具体的数据范围进行量化，而此种类型的特性判定只需要设置一定的数据范围判定产品性能合格与否；产品的焊点质量、线束处理、壳体机加、表面处理情况等则需要通过多媒体记录和自动光学检测来完成，图像信息现阶段大多由人工判定，但随着人工智能技术的发展也出现了一些图像处理和视觉AI模型进行辅助判定；而产品的外协信息则需要通过与物料系统的集成，然后将物料信息采集成字段信息或文本存储在数据库中，并使其与具体的产品性能进行关联，以便产品故障时可快速定位至相关的物料信息，如产品在发生大范围类似质量问题时可迅速定位到相关物料的批次信息。

质量特性依据故障模式在发射准备阶段和飞行阶段的危害程度分为关键特性、重要特性、关注特性、一般特性等，其中关键特性、重要特性和关注特性需优先映射为结构化数据字段。

2.2. 质量数据的获取

装配测试车间通过MES (Manufacturing Execution System) 系统通过生产线上物料系统、可视化工艺、测试设备、光学检测设备的联网，实时采集传输物料信息、测试数据、设备参数、工艺参数至各个节点 [4]。通过对产品质量特性全集进行结构化数据的设定，形成跨工序、跨系统的数据流可实时共享或存储在服务端待进一步处理。通过数据处理模块将采集到数据用各种内嵌算法模型形成各种数据处理的结果和报表见图2，图3。



序号	物料名称	规格	内控标准字串	技术要求字串	单位	库位
1	电阻器	30-05, 2	0+0+3	0+0+3	Ω	A000019
2	电阻器	Z950A, 2	0+0+3	0+0+3	Ω	A000021
3	电阻器	Z950A, 2	0+0+3	0+0+3	Ω	A000024
4	电阻器	Z950A, 2	0+0+3	0+0+3	Ω	A000027
5	电阻器	Z950A, 2	0+0+3	0+0+3	Ω	A000030
6	电阻器	Z950A, 2	0+0+3	0+0+3	Ω	A000033
7	电阻器	Z950A, 2	0+0+3	0+0+3	Ω	A000036
8	电阻器	30-05, 11	0+0+3	0+0+3	Ω	A000039
9	电阻器	30-11, 11	1+0+0	1+0+0	Ω	A000037
10	电阻器	30-11, 14	1+0+0	1+0+0	Ω	A000039

图2 航天电子产品跨工序跨系统结构化数据

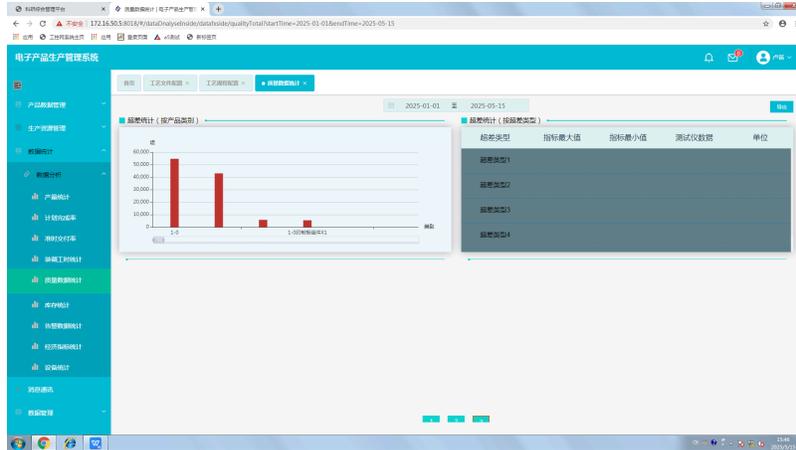


图3 航天电子产品质量数据统计界面

3. 质量大数据的挖掘

航天产品在研制过程中产生的数据不仅包含产品质量信息，还包括与产品质量相关的大量半结构化和非结构化数据，为了有效地管理和分析这些数据，必须采用相关技术进行转换和深入挖掘。

数据转换主要包括：数据采集与整合、数据存储、数据预处理和数据建模分析。航天电子产品质量工作信息化建设基本建成了独立运行、覆盖主要装备的质量管理信息系统。但是，当前的数据处理方法无法发现数据中存在的关系和规则，无法预测未来的发展趋势，缺乏挖掘数据背后隐藏知识的手段。将大数据挖掘技术应用于航天电子产品质量管理，能够有效的解决这一问题。通过对数据进行分类、聚类、关联分析，挖掘出数据中隐含的质量问题和潜在规律 [5]。利用机器学习算法，如决策树、神经网络、支持向量机等，可以对产品的质量性能进行预测和分析。

数据挖掘能够为装备管理提供决策信息。通过对研制、生产和使用过程中的质量信息进行多维数据分析和面向属性的归纳方法可以揭示隐藏在数据背后的信息，有利于从整体上把握未来装备研制和现有装备使用的情况。其次，数据挖掘能分析研究装备质量问题。通过采集各阶段质量问题，运用数据挖掘中的聚类、分类和神经网络等算法深入分析挖掘影响产品质量的关键特性以及生产设计过程中的缺陷。最后，数据挖掘能够分析研究装备质量生产过程，优化工作程序，发现影响产品质量的主要环节，为电子产品的研制和生产提供决策意见。

4. 在航天伺服电子产品中的应用

将质量特性全集通过MES系统应用到新一代运载火箭的伺服控制器设计生产维护环节。伺服控制器产品具有精度高、通道多、电路复杂等特点，可靠性要求极高。在批产阶段如何保证产品质量，是设计、工艺人员面临的巨大挑战。通过对产品质量特性全集的构建，并通过对MES系统中一体化工艺规程中结构化数据的设定，将质量特性全集落实于电装、总装、测试等多个生产现场，将传统的分散的、孤立的纸质化信息数字化、信息化串联起来，变成可以相互关联、可进行建模分析处理的质量大数据。具体在以下几个方面：

4.1. 产品化质量特性全集规范

依据产品特点，将单机产品质量特性全集推广至所有产品化单机，形成质量特性全集规范，建成产品质量特性全集规范供各种单机产品灵活删减应用。

产品顶层为伺服系统和控制系统，依据产品任务书以及顶层系统FTA分析，梳理整机电性能、电气接口、机械接口、地面测试抗干扰电压、冗余性能、环境条件满足情况等。

依据产品FMEA分析，自顶而下分析整机、单板组件、元器件、连接器、焊点故障模式，并转换为可检可测的质量特性。如单板安装键位、关键焊点设置、只能在单板测试到的关键电源、时钟信号、内部线束绑扎情况、非金属材料缺陷、减震器破损情况等。

从产品自身及同类产品归零事件、质量问题中提取新的故障模式，动态更新故障库，并转化为产品质量特性。

供应链数据主要来自于对元器件、原材料的批次、合格证信息的采集、后续在集成物料系统后将对元器件批次性质量特性、状态更改情况、上下游状态更改等等。

4.2. 产品化质量特性全集规范实现方式

质量特性数据分为结构化数据、多媒体图像数据和元器件供应链数据三大类，构成产品全生命周期质量管理的基础。结构化数据以产品性能参数为核心，通过CPK (Process Capability Index) 过程能力指数算法实现元器件批次质量监控。Cpk越大，就表示参数的分布越好，越集中，约接近设计值。如果Cpk很小，则说明参数离散性较大，也说明有可能这批的良率有问题，或者制程管控有问题。采用业界常用的一个Cpk的标准 $Cpk > 1.33$ ，小于此值，就要优化质量特性全集中的设计、工艺参数部分。流程见图4

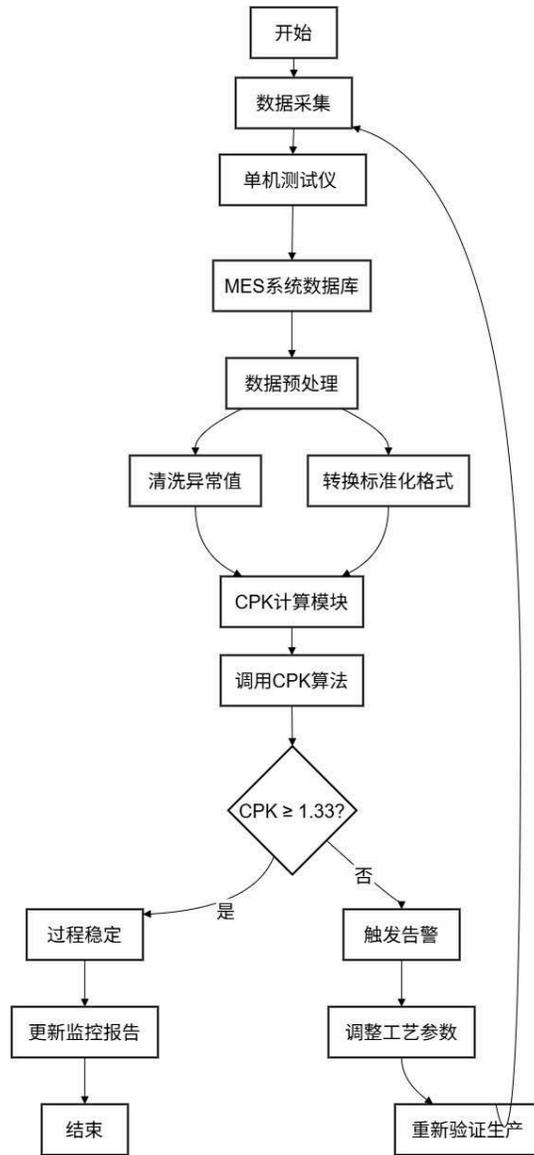


图4 CPK控制流程图

多媒体图像数据采用分级压缩策略，产品检验过程多媒体技术采用缺陷特征图像保留PNG无损格式。通过人工与AI图像识别协同分析机制，将故障件图像与历史案例库比对，生成缺陷关联图谱，定位效率较传统方式大幅提高，AI多媒体记录图像辨识流程见图5。

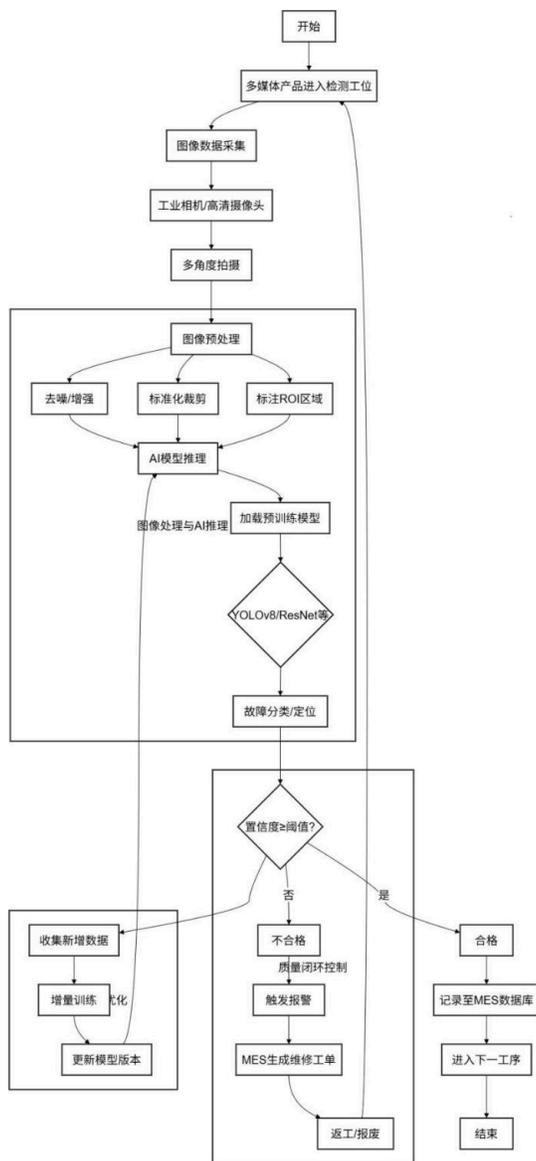


图5 AI多媒体记录图像识别流程

元器件供应链数据包含：数据采集、区块链存储和智能分析，通过算法挖掘元器件失效关联规则，建立故障模式与元器件供应链采购批次之间的映射关系，实现从产品缺陷快速定位到元器件采购批次的路径。

累计完成以下工作：

- (1) 梳理120多条质量特性，形成产品化产品质量特性全集规范。
- (2) 识别30多个潜在风险。
- (3) 沉淀下10余条产品工艺改善点。
- (4) 基于经验知识的积累，设计研发效率预测提升10%。
- (5) 多场景开展质量研发设计工作的应用场景和使用需求。

5. 结论

本文提出了一种从质量理论到产品实践的方法。综合阐述了质量特性全集的构建方案、质量特性到质量大数据的转化途径和数据挖掘的方法，并通过实际应用展示了良好的应用效果，可以数字化、全生命周期、多维度对航天电子产品质量进行管理。通过实时采集、分析质量数据，让航天电子产品更全面更准确地评估质量水平，定位和追溯产品上下游质量问题、预测和解决薄弱环节，提升现有的航天电子产品质量管理水平。

参考文献

- [1] 陈立辉,王勇,黄创绵,等.质量大数据白皮书——数字化转型系列研究报告No.1[R].广州:工业装备质量大数据工业和信息化部重点实验室,工业和信息化部电子第五研究所·赛宝智库,2022.
- [2] 贾丰盛,王禹铭,游佳琪,等.航天产品质量问题数据应用研究[J].质量与可靠性,2022(1):36-41.
- [3] 王建军,向永清,赵宁.航天器质量信息大数据技术的研究与实现[J].计算机测量与控制,2017,25:200-203.
- [4] 钟志坚,邓攀,万小伟,等.基于MES系统的大数据应用[J].中国科技信息,2025(5):91-93.
- [5] 王志梅,鲍志文,王禹铭,等.航天质量大数据整理与挖掘应用研究[J].质量与可靠性,2021(1):43-47.