

基于过程质控的火箭发动机装配缺陷预防体系研究

张卫华 陈慕琪 李 享 冯 超 李朝扬

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要：火箭发动机装配精度直接决定航天产品可靠性，为解决装配过程缺陷频发、管控滞后等问题，本文拆解其核心装配工艺流程，统计结构性、连接类等典型缺陷类型，剖析人员、设备、环境等致缺陷机理。依托 Pareto 法则筛选高频高危关键缺陷，构建“三横三纵”过程质控缺陷预防体系，涵盖前置预防、动态预警、闭环迭代三大核心模块。经工程验证，该体系可大幅降低装配缺陷率，提升工序稳定性与生产效益，为航天发动机装配质量管控提供技术支持。

关键词：过程质控；火箭发动机装配；缺陷预防体系

引言：火箭发动机作为航天飞行器核心动力装置，其装配质量是保障航天任务成功的关键核心。当前发动机装配工序繁杂、精度要求极高，受人员操作、设备精度、环境工况等多因素影响，密封失效、多余物、尺寸偏差等缺陷频发，易引发重大安全事故。传统事后整改的质控模式存在滞后性，难以适配高精度装配需求。为此，本文立足全过程质控理念，构建系统化缺陷预防体系，精准防控装配风险，助力航天装配质量管控向主动预判、智能防控迭代升级。

1 火箭发动机装配过程及缺陷机理分析

1.1 火箭发动机核心装配工艺流程拆解

(1) 零部件预处理与精密匹配工序流程：涵盖来料复检、尺寸精测、去毛刺及清洗烘干，依据实测数据完成分组选配与配合间隙计算，为高精度装配奠定基础。(2) 管路、转子、燃烧室核心部件装配流程：采用专用工装完成转子同轴度校准与静平衡测试，按交叉拧紧规程实施燃烧室螺栓连接，并通过激光跟踪仪监测各环节形位公差。(3) 总装调试与气密性检测全流程梳理：完成整机对接与管路系统总装后，依次开展常温/低温氦质谱检漏、压力衰减测试及燃料/氧化剂供给系统联动调试，确认整机密封性与功能完好性^[1]。

1.2 装配过程典型缺陷类型及特征统计

(1) 尺寸偏差、装配错位等结构性缺陷：表现为轴承安装间隙超差、燃烧室与喷管不同心等，影响结构传力路径与振动特性。(2) 螺栓力矩异常、密封失效等连接类缺陷：包括力矩衰减、O 形圈压缩量不足，引发界面泄漏或连接松动。(3) 多余物、清洁度不达标等环境类缺陷：如金属屑、纤维残留在燃料管路，可能堵塞喷嘴

或损伤高速转动部件。(4) 工序操作不规范导致的工艺性缺陷：例如拧紧顺序错误引起密封面翘曲，或装配前未及时去毛刺导致应力集中。

1.3 装配缺陷产生机理与影响因素分析

(1) 人员操作误差引发缺陷的机理分析：手动拧紧力矩一致性差，且对异常手感识别不足，易导致密封件安装偏斜或损伤。(2) 工艺参数偏差与设备精度不足的致缺陷机制：拧紧设备扭矩标定超期，以及定位工装磨损造成的轴线偏移，直接引发超差。(3) 装配环境、物料状态对质量的影响机理：环境湿度波动或颗粒物浓度超标，影响密封件性能与洁净度；存放周期过长则增大配合面微动磨损风险。

1.4 基于 Pareto 法则的关键缺陷筛选

(1) 装配缺陷数据统计与分类梳理：系统收集历史故障记录，按“尺寸偏差”“密封失效”“多余物”“拧紧异常”“管路错位”等类别整理频次与影响后果。(2) 高频高危核心缺陷精准识别：结合累积频率曲线，确认密封失效与多余物问题构成前 20% 的关键少数，且多伴随灾难性故障模式。(3) 关键缺陷管控优先级划分：将密封面损伤、多余物、拧紧力矩异常定为最高优先级(A 类)，实施专项过程检验与防错措施；其余缺陷归入 B/C 类，分别采用 SPC 监控与标准化作业控制。

2 基于过程质控的火箭发动机装配缺陷预防体系模型构建

2.1 缺陷预防体系构建原则与整体框架

(1) 全过程、全要素、闭环化构建原则：覆盖零部

件入厂检验、清洗配对、装配执行、检测验收直至整机交付的全链条流程,将人员技能、设备状态、工艺方法、物料特性、环境条件及测量系统六大质量要素全部纳入管控网络;同时强化数据可追溯性与措施有效性验证,形成“计划—执行—检查—处理”的完整闭环,确保体系具备自我纠偏和持续进化能力^[2]。(2)事前预防、事中管控、事后复盘三级管控逻辑:事前阶段聚焦工艺防错设计与来料质量门槛设置,将高发缺陷消灭于萌芽;事中阶段依托在线传感与实时判异,对偏差实施即时干预,防止缺陷跨工序蔓延;事后阶段对已暴露问题进行根因剖析、整改验证,并将经验沉淀为新的控制规范,反向优化事前与事中措施,实现三级联动、层层递进的防御纵深。(3)体系整体架构与核心模块划分:构建“三横三纵”矩阵式架构——横向设置前置预防、动态监控、闭环处置三大业务模块,纵向搭建数据采集层、分析决策层、执行反馈层三个技术层级;以质量数据中心为枢纽,横向模块间通过信息流传递异常信号与改进指令,纵向层级间通过规则引擎驱动阈值预警、趋势预测与决策推送,形成网格化、数字化的预防体系。

2.2 装配过程前置化缺陷预防模块设计

(1)装配工艺标准化优化与防错设计:针对轴承压装、管路焊接、螺栓拧紧等关键工序,编制图文并茂的标准操作卡,明确每一步的工装型号、扭矩递进次序及检测节点;同时植入物理防错(如定位销非对称设计)与信息化防错(如扫码比对物料编码与工艺版本)双重手段,从源头上杜绝错装、漏装及参数误设。(2)零部件入厂质量前置校验机制:对每批次核心件实施“几何尺寸全检+表面缺陷荧光探伤+颗粒度抽检”的三级筛选,构建供应商过程能力指数(Cpk)动态评分卡,对连续两批低于1.33的供应商启动专项审核;设立专用洁净暂存区,规定拆包至装配的时限,避免存放期间二次污染^[3]。(3)操作人员岗前质控能力管控机制:建立装配资质电子档案,记录每位员工的理论考核、实操熟练度及历史违规记录;每日班前开展工装量具校准状态确认、环境温湿度及洁净度核查,并通过虚拟仿真终端进行模拟装配练习,确保人员心理和技能状态均达到上岗要求。

2.3 装配过程动态质控与实时预警模块

(1)关键工序质控参数阈值设定:基于工艺规范与历史数据统计,采用均值-极差控制图确定扭矩、压装力、间隙等参数的控制限和预警限,其中预警限设为均值 $\pm 2\sigma$,超差限设为均值 $\pm 3\sigma$;对液氧相容性等高危特性,额外增加基于失效模式的风险系数加权修正阈

值,确保安全裕度。(2)装配过程数据实时采集与动态监测方案:在压机、拧紧枪、激光位移计等设备上集成高频采样模块,以1000Hz采样率采集扭矩-角度、力-位移等特征曲线,通过工业以太网实时上传至边缘计算节点;同时利用数字孪生模型同步模拟装配变形,将实测值与虚拟值比对,提前识别异常趋势。(3)缺陷异常实时预警与动态干预机制:构建三级响应策略——黄色预警(参数接近预警限)时,看板提示操作者加强目视检查;橙色预警(触及预警限)时系统自动暂停当前工步,建议调整参数后继续;红色超差(触及超差限)时强制联锁停机,并触发质量工程师远程会诊,依据历史相似案例推荐处置方案,阻断缺陷向下游流转^[4]。

2.4 缺陷闭环处置与迭代优化模块

(1)装配缺陷溯源分析与定位方法:采用故障树分析结合贝叶斯网络,将缺陷现象逐层分解至具体的工装、人员、批次物料或环境因素;同时回放装配过程曲线,通过动态时间规整算法与标准模板对比,精准定位异常发生的时刻与关联参数,形成量化溯源报告。(2)缺陷整改、复核与闭环管控流程:依据缺陷严重程度启用8D问题解决法,明确临时遏制措施(如隔离可疑产品)与根本原因纠正措施(如更换工装、调整程序);整改后需通过同工位复装验证及无损检测复核,由独立质保人员签署闭环确认单,方可恢复生产,确保每项缺陷均有据可查、有措可施^[5]。(3)基于历史数据的体系迭代优化机制:建立缺陷案例知识库,定期开展聚类分析与关联规则挖掘,识别出共性失效模式(如某型号密封圈低温脆裂),据此触发工艺参数修订、防错装置升级或培训教材更新;同时利用强化学习算法动态优化预警阈值,使体系在持续运行中不断逼近最优控制边界,实现数据驱动的主动式预防进化。

3 缺陷预防体系应用验证与效果分析

3.1 体系应用验证方案设计

(1)验证对象与试验工况选取:选取某型号液氧煤油火箭发动机为验证对象,覆盖推力室装配、涡轮泵组装及整机总装三条典型产线;试验工况包含常温环境标称工况、高温高湿极限环境工况及模拟振动运输工况三类,以全面检验体系在不同条件下的适应性。(2)质控评价指标体系构建(缺陷率、工序合格率等):构建三层指标体系——顶层为综合缺陷率与一次交验合格率;中层涵盖关键工序过程能力指数、预警触发响应时间、干预措施有效率;底层细化至各工位扭矩超差率、密封件损伤率、多余物检出率等操作级指标,形成逐层支撑的评价网络。(3)对比验证试验方案规划:采用AB分

组的对比验证策略——A 组沿用原质控模式装配 30 台次, B 组应用本体系装配 30 台次, 两组在物料批次、人员配置、环境条件方面保持一致; 同时设置中间过渡组 10 台次, 用于观察体系分步导入过程的渐进效果, 确保验证结论具备统计显著性。

3.2 体系工程落地实施流程

(1) 装配现场质控流程适配优化: 对原装配流程进行价值流分析, 识别非增值环节, 合并重复检验节点 12 处, 将多余物检查前移至清洗工序末端, 在燃烧室对接等高风险工位增设强制确认停留点, 使质控流程与生产节拍协调匹配, 整体流转时间缩短约 8%。(2) 数字化管控工具落地应用: 部署装配执行管理系统 (AEMS) 及移动终端, 实现工艺文件电子化推送、力矩数据自动采集上传、影像记录按工步归档; 开发质控驾驶舱看板, 实时展示各工位合格率、在检状态及预警信息, 支持管理人员通过移动端远程监控现场质量态势。(3) 岗位质控职责与管理制度落地细化: 重新编制 27 个装配岗位的质量职责卡, 明确每个岗位的自检、互检、专检内容与记录频次; 同步制定《预警响应处置操作细则》与《违规操作追责管理办法》, 将质控绩效与班组月度考核直接挂钩, 确保制度可执行、可追溯、可问责。

3.3 应用效果数据统计与分析

(1) 装配缺陷发生率对比分析: 体系应用后综合缺陷率由实施前的 3.27% 降至 1.14%, 降幅达 65.1%; 其中密封失效缺陷由 0.92% 降至 0.21%, 多余物缺陷由 0.78% 降至 0.18%, 尺寸偏差类缺陷由 0.65% 降至 0.33%, 三大高发缺陷得到有效遏制。(2) 关键工序质量稳定性提升效果分析: 推力室螺栓拧紧工序过程能力指数由 0.89 提升至 1.52, 轴承压装力波动标准差由原先的 157N 收窄至 68N, 关键扭矩点合格率由 94.3% 提升至 98.7%, 工序波动显著减小, 质量一致性明显增强。(3) 装配效率与返工成本优化效果评估: 单台平均装配工时从 36.5 小时压缩至 33.2 小时, 返工拆解次数由平均 4.3 次/台降至 1.6 次/台; 返工及报废成本由年均约 124 万元降至 46 万元, 降本增效成果突出。

3.4 体系现存问题与优化改进策略

(1) 体系落地应用中的短板与不足梳理: 部分老旧

工装设备无法支持数据自动采集, 仍依赖人工录入, 存在数据滞后与漏记风险; 复杂管路连接区域的传感器布设空间不足, 导致该区域预警覆盖率偏低, 约为 72%; 班组对新系统操作熟练度参差不齐, 个别人员对预警响应处置流程执行不到位。(2) 复杂工况下缺陷防控能力优化方案: 针对深冷介质输送管路等高风险区域, 研发柔性薄膜式应变传感贴片, 解决狭小空间测点布置难题; 建立极端工况下的强化试验验证数据库, 结合故障模式库匹配推荐最优工艺补偿策略, 提升体系在极限边界条件下的防御能力。(3) 长期迭代完善与智能化升级方向: 规划引入 AI 视觉检测替代人工多余物目检, 实现毫米级颗粒自动识别; 构建基于数字孪生的虚拟装配预演平台, 在新品试制阶段提前预测装配干涉与应力集中风险; 最终朝向以装配过程数据驱动的全生命周期质量智能管控体系演进, 实现火箭发动机装配质量的跨越式提升。

结束语

本文完成火箭发动机装配缺陷机理分析与关键缺陷筛选, 搭建了全流程闭环缺陷预防质控体系, 通过工程对比试验证实体系可有效降低装配缺陷、缩减生产成本、提升装配效率。同时梳理了体系落地的现存短板, 明确了传感优化、AI 检测、数字孪生赋能的智能化升级方向。研究成果有效解决了传统装配质控的短板, 可为各类航天动力装置装配质量精细化、数字化管控提供重要参考与实践借鉴。

参考文献

- [1] 刘敏, 陈强, 赵阳. 液体火箭发动机外协装配工序质量管理提升方法 [J]. 质量与可靠性, 2024, 7(2): 41-44.
- [2] 琚奕鹏, 吴法勇, 陈雪骑, 等. 航天发动机界面装配品质过程控制方法 [J]. 航空动力学报, 2025, 40(8): 202-207.
- [3] 徐玉芬, 杨军. 基于过程方法的液体运载火箭发动机质量管理实践 [J]. 航天工业管理, 2025, 16(3): 56-60.
- [4] 苏永超, 王梦姣, 魏洁. 基于 PFMEA 与 FTA 的航天装配工序缺陷预防研究 [J]. 航天标准化, 2024, 37(4): 233-238.
- [5] 董鹏, 王子豪, 晋志博. 航天发动机装配车间多工序协同质控与多余物缺陷治理 [J]. 设备管理与维修, 2025, 11(2): 89-92.