

液体火箭发动机装配质量控制体系研究

李浩天 孙磊 田跃达 田文轩 张勇
首都航天机械有限公司 北京 100076

摘要: 液体火箭发动机作为火箭核心动力装置,其装配质量直接决定发射安全与运行可靠性。本文结合全面质量管理等理论,分析装配质量影响因素,遵循可靠性优先等原则,构建“决策-执行-监控-改进”四级管控体系,涵盖事前预防、事中控制、事后改进全流程。通过某中型发动机应用验证,该体系可实现装配合格率100%,大幅提升管控效率,解决现存管控痛点,为液体火箭发动机装配质量管控提供理论支撑与实践参考。

关键词: 液体火箭; 发动机装配; 质量控制体系

引言:随着航天高密度发射常态化,液体火箭发动机对装配精度、可靠性的要求愈发严苛,其装配工序繁琐、系统关联性强,现存管控模式存在数字化程度低、追溯不全面等问题,易引发质量隐患。装配作为衔接零部件制造与整机试验的关键环节,直接影响发动机性能与发射安全。因此,开展装配质量控制体系研究,构建科学高效的全流程管控机制,对推动航天动力产业高质量发展、保障发射任务安全具有重要现实意义。

1 液体火箭发动机装配相关基础理论与质量特性

1.1 液体火箭发动机装配核心概念与流程

(1) 核心概念界定:液体火箭发动机装配是将零部件按设计要求,通过连接、调试等工序组装成完整可正常工作的发动机系统的过程,是衔接零部件制造与整机试验的关键环节,直接决定发动机性能与可靠性。(2) 典型装配流程梳理:核心流程分为零部件预处理、组件装配、分系统装配、整机总装及调试验收,先对零部件清洁、检测,再组装成推力室、涡轮泵等组件,整合为推进、控制系统等分系统,最终完成整机装配并开展气密性、性能调试。(3) 装配关键环节识别:关键环节包括零部件清洁与检测、精密连接、密封件装配、管路对接及整机调试,直接影响发动机密封性能、动力传输效率及运行稳定性,是质量控制重点。

1.2 液体火箭发动机装配质量核心特性

(1) 质量关联性与复杂性:发动机各零部件、各系统关联性极强,单个零部件装配偏差或缺陷,会引发整机性能异常;装配涉及机械、液压、电控等多领域,工序繁琐,质量控制难度大、复杂性高。(2) 可靠性与安全性要求:作为火箭核心动力装置,装配质量直接决定发射安全,需确保发动机在高温、高压、高速工况下长期稳定运行,无泄漏、无故障,满足极端环境下的可靠性与安全性标准。(3) 一致性与可追溯性要求:批量生

产的发动机装配质量需保持高度一致,确保性能统一;所有装配工序、零部件来源、检测数据需全程记录,实现全流程可追溯,便于故障排查与责任追溯^[1]。

1.3 装配质量控制的核心理论基础

(1) 全面质量管理理论:贯穿装配全流程,涵盖设计、零部件采购、装配施工、调试验收各环节,强调全员参与、全程管控,通过PDCA循环持续提升装配质量。(2) 过程控制理论:聚焦装配关键工序,通过设置质量控制点,实时监测装配参数,及时发现并纠正偏差,确保装配过程符合规范,避免不合格品流入下一道工序。(3) 供应商质量管控理论:重点管控零部件供应商,通过资质审核、进厂检测、过程监督等手段,确保零部件质量符合装配要求,从源头保障装配质量。

1.4 装配质量影响因素分析

(1) 人员因素:装配人员的专业技能、责任意识及操作规范性,直接影响装配精度与质量,需具备相应资质并经过系统培训。(2) 设备与工装因素:装配设备、检测工装的精度及稳定性,决定零部件装配精度,需定期校准、维护,确保满足装配要求。(3) 物料与供应商因素:零部件质量、规格是否符合设计要求,供应商的质量管控水平,直接影响装配质量的基础。(4) 工艺与环境因素:装配工艺的合理性、规范性,以及装配环境的温湿度、洁净度,会影响装配精度及零部件性能稳定性。

2 液体火箭发动机装配质量控制体系构建

2.1 体系构建原则与目标

(1) 构建原则:以“可靠性优先、全流程管控、标准化作业、持续改进”为核心原则,结合液体火箭发动机高精度、高风险、高复杂度的装配特点,坚持科学性与实用性结合,确保体系可落地、可追溯、可优化;遵循“预防为主、防治结合”,将质量管控前置,减少事后返工与质量隐患;兼顾合规性与创新性,贴合行业

标准与型号要求,融入数字化管控技术,提升体系适配性。(2)核心目标:核心目标是实现装配质量零重大缺陷、零批量隐患,确保发动机装配精度符合设计要求,提升装配一致性与稳定性;建立全流程可追溯的质量管控机制,实现人员、设备、物料、工艺、过程的全要素管控;降低装配质量成本,缩短装配周期,保障发动机交付合格率达到100%,为火箭发射任务的可靠性提供坚实支撑。

2.2 装配质量控制体系总体框架设计

(1)体系层级划分:采用“决策层-执行层-监控层-改进层”四级架构,决策层负责体系规划、资源配置与目标下达;执行层负责具体装配作业与质量管控措施落地;监控层负责全流程质量监测、异常预警与过程监督;改进层负责质量问题分析、体系优化与持续提升,四级层级协同联动,形成闭环管理。(2)各层级核心功能:决策层聚焦体系顶层设计,制定质量方针与管控目标,协调人力、设备、资金等资源;执行层严格按照工艺标准开展装配作业,落实事前预防与事中控制要求,做好过程记录;监控层通过实时监测、定期检查等方式,排查质量隐患,及时反馈异常情况;改进层依托质量数据与问题分析,优化管控流程、完善标准规范,推动体系持续升级^[2]。

2.3 事前预防控制体系设计

(1)人员资质管控:建立分级资质认证体系,对装配人员开展专业技能、安全规范、质量意识培训,考核合格方可上岗;关键工序操作人员需具备对应等级资质,定期复训考核,保障技能达标;建立人员档案,记录培训、考核、作业质量等信息,实现资质可追溯。(2)设备与工装校准:对装配设备、工装实施全生命周期管理,制定定期校准计划,委托具备资质的机构校准,确保设备精度与工装符合性;建立设备工装台账,详细记录校准结果、使用状态及维护情况,对不合格设备工装立即停用、维修或更换,杜绝设备问题影响装配质量。(3)物料与供应商穿透式管控:建立供应商准入、考核与退出机制,分级管理供应商,重点审核其资质、生产能力及质量管控水平;进场物料实行全检验收,核查规格、型号、性能等指标,不合格物料严禁入库;建立物料追溯体系,实现从供应商到装配工位全流程追溯,确保物料可查、可追、可换。(4)工艺文件标准化:编制标准化装配工艺文件,明确各工序作业要求、操作步骤、质量标准及检验方法,确保作业有章可循;工艺文件经审核、审批后执行,结合型号迭代与装配实践及时修订完善,规避工艺不规范带来的质量隐患。

2.4 事中过程控制体系设计

(1)关键工序质量管控:识别装配过程中的关键工序与特殊工序,设置质量控制点,实行专人负责、全程监控;关键工序作业需严格执行“三检制”(自检、互检、专检),检验合格后方可进入下一工序;对关键工序的作业参数、操作过程进行详细记录,确保过程可追溯。(2)装配过程实时监测:采用在线监测设备,对装配过程中的压力、温度、扭矩等关键参数进行实时采集与分析,设置预警阈值,出现异常立即报警并暂停作业;安排质量监督员现场巡查,及时纠正不规范操作,排查过程质量隐患,确保装配过程符合质量要求。(3)数字化与智能化控制手段应用:引入数字化装配管理系统,实现装配过程、质量数据的数字化记录与管理,提升管控效率;应用智能化检测设备,减少人工检测误差,提高检验精度;通过物联网技术,实现设备、物料、人员的实时联动,实现全流程智能化管控^[3]。(4)过程异常处置机制:建立分级异常处置流程,明确异常识别、上报、分析、处置的责任与时限;对装配过程中出现的质量异常,立即暂停作业,组织技术人员分析原因,制定整改措施,整改完成并检验合格后,方可恢复作业;记录异常处置过程与结果,形成案例库,避免同类问题重复发生。

2.5 事后检验与改进体系设计

(1)装配成品检验标准:制定严格的成品检验标准,明确检验项目、检验方法、合格判定标准,对装配成品进行全面检验,包括外观、尺寸、性能、密封性等指标;检验合格的成品方可入库,不合格成品需进行返工、返修或报废处理,做好相关记录。(2)质量问题追溯与分析:建立质量问题追溯体系,对检验中发现的质量问题,追溯至相关人员、设备、物料、工艺等要素,明确问题根源;采用统计分析方法,对质量问题进行分类汇总,分析问题产生的规律,为体系优化提供依据;建立质量问题档案,记录问题详情、处置过程与整改效果^[4]。(3)持续改进机制建立:定期开展质量评审,总结体系运行效果,分析存在的不足,制定改进计划;结合质量问题分析结果、装配实践经验与行业技术发展,优化管控流程、完善标准规范、提升技术水平;建立反馈机制,收集装配人员、检验人员的意见建议,持续提升体系的适用性与有效性。

3 液体火箭发动机装配质量控制体系应用与验证

3.1 应用场景概况

(1)应用对象介绍:本次应用对象为某中型液体火箭发动机,该发动机用于运载火箭芯级动力系统,结构

复杂,包含推力室、涡轮泵、阀门组等关键部件,装配精度要求高,对密封性、可靠性要求严苛,装配流程涵盖物料装配、部件对接、系统调试等多个环节,是典型的高精度、高风险装配场景,适合本次构建的质量控制体系落地应用。(2) 现有装配质量管控现状:当前装配质量管控以人工检验为主,数字化程度低,关键工序管控存在盲区;物料追溯仅覆盖进场环节,供应商管控深度不足;工艺文件执行缺乏有效监督,过程异常处置不规范;质量数据分散,无法形成闭环分析,存在装配一致性差、小隐患频发、追溯困难等问题,亟需通过标准化体系提升管控水平。

3.2 体系应用实施步骤

(1) 体系落地准备:组建专项实施小组,明确各成员职责;开展体系培训,确保装配、检验、管理人员熟练掌握管控要求;完善工艺文件、检验标准,校准装配设备与工装;搭建数字化追溯系统,完成人员资质复核与供应商分级梳理,为体系落地奠定基础。(2) 分阶段实施过程:第一阶段试点实施,选取关键部件装配工位,落实事前预防与事中控制措施;第二阶段全面推广,将体系覆盖所有装配工序,规范全流程作业与检验;第三阶段固化完善,形成标准化作业规范,实现管控流程常态化运行。(3) 实施过程中的调整与优化:建立实施反馈机制,收集一线人员意见,针对数字化系统操作繁琐、部分工艺管控节点不合理等问题,及时调整管控流程与技术手段;结合装配实践,优化物料追溯流程与异常处置时限,确保体系适配实际装配需求^[5]。

3.3 体系应用效果验证

(1) 验证指标设定:设定核心验证指标:装配合格率、关键工序一次合格率、质量隐患整改率、物料追溯率,同时辅助考核装配周期、质量成本等指标,全面验证体系的有效性与实用性。(2) 验证方法与数据采集:采用对比验证法,对比体系应用前后的质量数据;通过现场巡查、数据统计、成品检验等方式,采集装配各环节数据,涵盖人员作业、设备运行、物料管控、质量检验等全要素,确保数据真实准确。(3) 验证结果分析:验证结果显示,体系应用后装配合格率提升至100%,关

键工序一次合格率提升30%,质量隐患整改率达100%,物料追溯实现全流程覆盖,装配周期缩短15%,质量成本降低20%,表明体系能有效提升装配质量与管控效率,达到预期目标。

3.4 体系应用中存在的问题与改进建议

(1) 现存问题梳理:一是数字化系统与部分老旧装配设备兼容性不足,数据采集效率偏低;二是部分员工质量意识仍需提升,存在不规范操作现象;三是供应商穿透式管控深度不够,部分外协物料质量管控存在薄弱环节。(2) 针对性改进建议:针对设备兼容性问题,升级数字化系统接口,对老旧设备进行改造或替换;加强员工常态化质量培训,建立奖惩机制,强化规范操作意识;完善供应商管控体系,增加外协物料过程抽检环节,建立供应商动态考核机制,持续提升管控深度。

结束语

本文围绕液体火箭发动机装配质量控制体系展开研究,梳理装配质量核心特征与关键影响因素,搭建全流程多层级管控体系,并结合实际应用验证其可行有效。该体系弥补了传统管控模式的不足,切实提升装配质量与管控效率,同时指出当前数字化适配程度欠缺等问题。后续可依托数字孪生、智能脉动装配等技术优化完善体系,推动管控模式智能化转型,为航天动力装备高质量发展筑牢支撑。

参考文献

- [1]刘丹.航空发动机装配难点与装配质量控制措施[J].中国新技术新产品,2023,(16):49-50.
- [2]杜海雷.面向装配精度的航空发动机转子零件选配优化[J].计算机集成制造系统,2021,(5):94-97.
- [3]黄小东.航空发动机智能化装配技术体系构建探索[J].航空发动机,2024,10(1):132-135.
- [4]郑虎.航空发动机对接装配工艺方法研究[J].科学大众:科技创新,2021,(2):83-85.
- [5]刘辉,严洪森.基于改进文化基因算法的航空发动机装配车间调度优化研究[J].工业控制计算机,2021,34(8):123-126.