

# 航空发动机装配-修理全生命周期质量追溯系统设计

樊明状 孔敬儒 傅 正

中国航发南京航空动力有限责任公司 江苏 南京 210000

**摘要:** 航空发动机装配-修理流程复杂,对质量追溯要求高。需求涵盖流程、信息、功能及性能多方面,包括工序把控、信息完整准确、追溯高效精准、系统稳定安全等。系统设计以构建智能化追溯体系为目标,遵循实用、可靠等原则,采用分层架构,划分五大功能模块,设计结构化与非结构化结合的数据库。关键技术涉及数据采集集成、存储管理、追溯算法及可视化,为航空发动机质量管控提供有力支撑。

**关键词:** 航空发动机;全生命周期管理;质量追溯

**引言:** 航空发动机作为高端装备,其装配与修理质量关乎飞行安全与性能。其装配-修理流程工序繁杂、精度要求苛刻、多专业协同紧密,且存在大量离散作业节点,质量追溯难度大。传统追溯方式效率低、信息不完整,难以满足现代航空发动机管理需求。构建全生命周期质量追溯系统,实现数据全链路贯通与精准追溯,对提升质量管控水平、缩短故障处理周期、降低返修成本意义重大,是航空发动机制造与维修领域的关键发展方向。

## 1 航空发动机装配-修理全生命周期质量追溯需求分析

### 1.1 航空发动机装配-修理流程分析

航空发动机装配-修理流程具有工序复杂、精度要求高、流程闭环性强的特点,贯穿从零部件入厂到成品交付及后续返修的全链条。装配阶段需经过零部件验收、分组装配、总装整合、试车验证等核心工序,每个环节均需符合严苛的技术标准。修理流程则以故障诊断为起点,涵盖拆解、零部件检测、损伤评估、维修或更换、重新装配、性能测试等步骤,需针对不同故障类型制定个性化方案。该流程涉及多专业协同,包含机械、电子、液压等多个系统的联动作业,且各工序衔接紧密,前道工序质量直接影响后续环节<sup>[1]</sup>。流程中存在大量离散化作业节点,零部件周转频繁,需严格把控每个环节的操作规范性,为质量追溯提供清晰的流程依据。

### 1.2 质量追溯信息需求

质量追溯信息需求覆盖全生命周期各环节,核心在于实现“来源可查、去向可追、责任可究”。零部件层面需采集供应商信息、批次编号、生产日期、检测报告、合格证书等基础信息,确保零部件溯源的完整性。装配-修理过程中需记录操作人员、作业时间、设备编号、工艺参数、检测数据、故障描述及处理方案等动态信息,实时追踪作业全过程。成品层面需留存试车数

据、性能指标、交付信息、售后服务记录等,支撑后续使用及返修追溯。另外,还需包含质量体系文件、技术标准、工艺规程等静态信息,为追溯分析提供依据。信息需求需满足准确性、完整性、实时性要求,既要涵盖定量数据,也要包含定性描述,同时需支持信息关联联动,实现从成品到零部件、从作业环节到责任主体的全维度追溯,为质量问题排查和改进提供数据支撑。

### 1.3 追溯功能需求

追溯功能需求聚焦于高效检索、精准定位及全链路追踪能力。核心功能包括正向追溯与反向追溯,正向可从零部件出发,查询其在装配-修理过程中的所有作业记录及最终去向;反向可从成品或故障节点切入,回溯相关零部件、操作环节及责任主体。需具备多条件组合查询功能,支持按批次、编号、时间、人员等关键词快速筛选信息,生成追溯报告。同时,需实现追溯信息可视化展示,直观呈现流程节点、数据关联及问题脉络。针对质量异常,需具备异常预警与追溯分析功能,快速定位问题根源,评估影响范围,并提供数据支持以制定整改措施。还需支持追溯数据的导出、打印及共享,满足跨部门协同需求,同时具备权限管理功能,确保追溯信息的安全性与保密性,适配不同岗位人员的查询与操作需求。

### 1.4 系统性能需求

系统性能需求需适配航空发动机装配-修理的复杂场景,保障系统稳定高效运行。响应速度方面,要求单条追溯信息查询响应时间 $\leq 2$ 秒,多条件组合查询及报表生成时间 $\leq 5$ 秒,避免因性能滞后影响作业效率。数据处理能力需支持海量数据存储与并发访问,可容纳数万级零部件及作业记录,同时支持 $\geq 50$ 用户并发操作,满足多岗位同步作业需求。稳定性方面,要求系统年故障率 $\leq 3$ 次,单次故障恢复时间 $\leq 30$ 分钟,具备数据备份与灾难恢复功能,防止数据丢失。安全性方面,需采用

加密技术保障数据传输与存储安全，建立完善的操作日志，记录所有数据修改及访问行为，实现操作可追溯。系统需具备良好的兼容性与扩展性，可适配现有生产管理系统，支持后续功能升级与业务场景拓展。

## 2 航空发动机装配-修理全生命周期质量追溯系统总体设计

### 2.1 设计目标与原则

系统设计目标旨在构建一套覆盖航空发动机装配-修理全生命周期的智能化质量追溯体系，实现数据全链路贯通、追溯精准高效、管理可视化赋能。通过系统落地，打通各环节信息壁垒，消除数据孤岛，确保追溯信息的完整性与一致性，为质量管控提供数据支撑；提升质量问题排查效率，缩短故障处理周期，降低返修成本；实现责任精准界定，强化各岗位操作规范性，推动质量持续改进<sup>[2]</sup>。设计过程中需遵循四大原则：一是实用性原则，贴合实际作业流程，简化操作环节，适配不同岗位人员的使用习惯；二是可靠性原则，保障数据存储与传输安全，确保系统长期稳定运行；三是可扩展性原则，预留功能接口与数据存储空间，适配业务规模扩大与技术升级需求；四是合规性原则，符合航空行业质量标准及数据管理规范，确保追溯结果具备权威性与有效性。

### 2.2 系统架构设计

系统采用分层架构设计，自上而下分为表现层、业务逻辑层、数据访问层及数据存储层，各层独立运行且协同联动，保障系统的灵活性与可维护性。表现层面向用户提供交互界面，适配PC端、移动端等多终端访问，涵盖追溯查询、数据录入、报表展示、权限管理等功能模块，采用直观的可视化设计，提升操作便捷性。业务逻辑层为核心层，负责处理各类业务需求，包含追溯管理、数据校验、异常预警、流程管控等核心算法，实现正向与反向追溯、数据关联分析等功能，同时衔接各模块业务流程，确保逻辑闭环。数据访问层负责数据的读取与写入，采用标准化接口实现与各层的数据交互，支持多数据源集成，同时具备数据过滤、转换及加密功能，保障数据传输安全。数据存储层采用分布式存储架构，结合关系型数据库与非关系型数据库，分别存储结构化业务数据与非结构化文档数据，实现数据高效存储与快速检索。

### 2.3 功能模块设计

基于需求分析，系统划分五大核心功能模块，实现全生命周期质量追溯的全覆盖。零部件管理模块负责零部件入厂验收、信息录入、批次管控及库存追踪，记录零部件全生命周期流转信息，支持供应商信息关联查

询。装配-修理管理模块实时采集作业过程数据，包含操作记录、工艺参数、检测结果等，实现工序衔接管控与作业全程追溯。质量追溯模块提供正向、反向追溯及多条件查询功能，生成追溯报表，支持异常数据标注与根源分析。数据分析模块对追溯数据进行统计分析，挖掘质量波动规律，生成质量趋势图表，为质量改进提供决策支持。系统管理模块负责用户权限分配、操作日志管理、数据备份与恢复、系统参数配置等，保障系统安全稳定运行。各模块相互关联，数据实时同步，形成“数据采集-存储-追溯-分析-管控”的完整业务闭环，适配装配-修理全流程的质量追溯需求。

### 2.4 数据库设计

数据库设计严格遵循数据完整性、一致性与高效性原则，精心构建结构化与非结构化数据深度融合的数据库体系。结构化数据库选用成熟稳定的MySQL，围绕航空发动机装配-修理全生命周期，设计了一系列核心数据表。零部件信息表详细记录供应商、批次、规格、生产日期等基础信息，为零部件溯源提供全面依据；作业记录表精准关联操作人员、使用设备、作业时间等关键作业数据，实现作业全程可追溯；检测数据表则完整留存各环节的检测指标与结果，确保质量检测数据有迹可查。各表通过主键与外键紧密关联，形成完整且逻辑严密的数据关系模型。非结构化数据库采用MongoDB，充分发挥其擅长处理海量非结构化数据的优势，用于存储零部件图纸、检测报告、工艺文件、故障现场图片等文档数据，支持高效存储与快速检索。为提升查询效率，针对高频查询字段精心设计数据索引，有效缩短检索时间。同时，制定完善的数据冗余与备份策略，定期进行数据备份，并采用主从复制架构，确保在主数据库出现故障时，从数据库能迅速接管，保障数据的持续可用性<sup>[3]</sup>。另外，严格设定数据校验规则，从数据录入源头把控，确保录入数据的准确性与规范性，为航空发动机全生命周期质量追溯提供坚实可靠的数据基础。

## 3 系统实现关键技术

### 3.1 数据采集与集成技术

数据采集与集成技术是系统实现的基础，旨在实现全流程数据的全面捕获与多源融合。采集层面采用多方式协同采集方案，针对结构化数据，通过物联网设备、检测仪器自动采集工艺参数、检测数据等，实现数据实时上传；针对非结构化数据，通过扫码录入、手动上传等方式采集操作记录、文档资料等，提升采集灵活性。采用RFID射频识别技术，为零部件及成品赋予唯一标识，实现流转过程中的自动识别与数据关联，确保追溯

链条的连续性。集成层面采用ETL技术,对来自不同系统、不同格式的数据进行提取、转换、加载,统一数据标准与格式,消除数据异构性。通过WebService接口与现有生产管理系统、ERP系统对接,实现数据跨系统共享,打破信息壁垒。采用数据校验与清洗技术,剔除无效数据、修正异常数据,保障集成后数据的准确性与一致性,为后续追溯与分析提供高质量数据支撑。

### 3.2 数据存储与管理技术

数据存储与管理技术需满足海量追溯数据的长期存储、高效访问及安全管控需求。采用分布式存储架构,结合关系型与非关系型数据库的优势,实现结构化与非结构化数据的分类存储,分布式节点可动态扩展,适配数据量增长需求。引入数据分片技术,按业务类型、时间维度对数据进行分片存储,提升数据读写效率,避免单点故障影响系统运行。采用数据加密技术,对存储数据进行对称加密处理,保障数据隐私安全;同时建立数据访问控制机制,基于角色分配访问权限,防止数据泄露与篡改。引入数据生命周期管理技术,对不同重要性的数据进行分级管理,定期对历史数据进行归档备份,释放存储资源,同时确保归档数据可随时调取。通过数据缓存技术,将高频访问数据存入缓存,缩短查询响应时间,提升系统整体性能。

### 3.3 数据追溯算法

数据追溯算法是实现精准追溯的核心,旨在快速构建全链路数据关联,定位问题根源。采用基于图论的追溯算法,将零部件、作业环节、人员、设备等追溯对象抽象为节点,对象间的关联关系抽象为边,构建追溯关系图,通过图遍历算法实现正向与反向追溯,高效检索关联数据。引入模糊匹配算法,针对部分信息不完整的场景,支持关键词模糊查询,提升追溯的灵活性与覆盖面。采用层次化追溯算法,按装配-修理流程的层级结构,从成品到总装、分装、零部件逐步拆解追溯,或反向逐层溯源,确保追溯链路清晰有序。针对质量异常追溯,采用因果分析算法,结合历史数据挖掘质量异常与作业参数、零部件质量等因素的关联关系,精准定位问题根源,评估影响范围。算法设计兼顾效率与准确性,通过优化算法逻辑,减少冗余计算,确保在海量数据场

景下仍能快速输出追溯结果。

### 3.4 可视化技术

可视化技术旨在将复杂的追溯数据与业务流程转化为直观的图形化展示,提升数据解读与管理效率。采用流程图可视化技术,以动态流程图形式展示航空发动机装配-修理全流程,标注各环节作业状态、数据关联及质量节点,支持节点点击查看详细信息,直观呈现追溯链路<sup>[4]</sup>。采用数据图表可视化技术,通过折线图、柱状图、饼图等展示质量趋势、数据分布、异常统计等信息,帮助管理人员快速掌握质量状况。引入三维可视化技术,对发动机装配结构、零部件布局进行三维建模,直观展示零部件装配关系,辅助故障定位与追溯分析。采用仪表盘可视化技术,实时展示关键质量指标、系统运行状态等核心数据,实现质量管控的可视化监控。支持自定义可视化报表生成,用户可根据需求选择展示维度与数据指标,提升报表的实用性与针对性,为决策制定提供直观的数据支撑。

### 结束语

航空发动机装配-修理全生命周期质量追溯系统的设计与实现,有效解决了传统追溯方式的诸多弊端。通过全面分析需求,进行科学合理的系统设计,并运用先进的关键技术,实现了数据的高效采集、存储、追溯与可视化展示。该系统提升了质量追溯的精准性与效率,为航空发动机的质量管控提供了坚实的数据支持,有助于推动航空发动机制造与维修行业向智能化、精细化方向发展,增强我国航空工业的核心竞争力。

### 参考文献

- [1] 由博.航空发动机装配精度研究[J].内燃机与配件,2025(21):8-10.
- [2] 王怡琳,刘鹏,乔非,等.不确定环境下的航空发动机装配线适应性调度方法[J].控制与决策,2024,39(5):1629-1635.
- [3] 孙惠斌,颜建兴,魏小红,等.数字孪生驱动的航空发动机装配技术[J].中国机械工程,2020,31(7):833-841.
- [4] 胡兰,欧阳华,栗娜娜.基于振动分析的航空发动机装配试车故障诊断技术研究[J].内燃机与配件,2025(10):63-65.