

航空附件装配过程的质量追溯系统设计与实现

黄 梅¹ 王海菊² 蒲师焯¹ 李 祥¹

1. 贵州永红航空机械有限责任公司 贵州 贵阳 550009

2. 中航重机股份有限公司 贵州 贵阳 550009

【摘要】：航空附件在装配过程中对质量控制要求极高，传统方式存在追溯不及时、数据缺失等问题，影响了产品的可控性与安全性。本文围绕航空附件装配过程中的质量追溯需求，设计并实现了一套基于信息化手段的质量追溯系统。该系统通过构建标准化流程、集成数据采集与自动化分析，实现对装配全过程的实时监控与可追溯性管理，提高了质量控制水平和问题溯源效率，满足现代航空制造对精细化管理的需求。

【关键词】：航空附件；装配过程；质量追溯；系统设计；信息化管理

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.034

引言

航空产品对质量控制的要求极为严苛，尤其在附件装配阶段，任何细微缺陷都可能影响整机性能。传统装配质量记录多依赖人工操作，数据分散、追溯滞后，难以满足高效、安全的生产需求。为实现全过程质量可控与快速溯源，迫切需要构建一套信息化、可视化的质量追溯系统。本文从实际装配需求出发，探索质量追溯体系在航空附件装配中的构建与应用，推动制造过程向智能化、精细化迈进。

1 航空附件装配过程质量控制现状与问题分析

航空附件是航空装备的关键功能部件，其装配质量直接关乎整机可靠性与飞行安全。该环节零部件种类多、结构复杂、精度要求高，对操作规范性和一致性标准严苛。传统人工操作与纸质记录模式缺乏系统信息支撑，造成质量数据残缺、追溯路径模糊，难以快速定位分析质量问题。多品种小批量生产模式进一步加剧了标准化作业难度，人为因素影响扩大，质量控制复杂度攀升，对追溯系统的灵活性与精确性提出了更高要求。

当前大多数航空制造企业虽已引入一定程度的制造执行系统（MES）或生产过程监控手段，但在质量追溯的精细化管理方面仍存在明显不足。信息孤岛现象普遍存在，各类工艺参数、检测数据和人员操作记录散落在多个系统或介质中，缺乏统一的集成平台^[1]。在遇到质量缺陷或异常时，往往需要依赖经验进行人工排查，效率低下，溯源路径不清，极易造成质量风险扩大。由于数据未能实时关联产品型号、批次、装配节点等核心信息，形成的质量闭环管理体系不完善，限制了企业对质量过程的精准管控和持续改进能力。

在航空附件装配环节建立全流程质量追溯系统，是提升企业核心竞争力的关键。系统需具备关键工序、

特性及零件的全流程数据采集能力，实现人员、设备、材料与工艺参数的全维度关联，并依托可视化技术辅助质量监控与问题溯源。面对日趋增长的质量管理压力与客户审核要求，亟需构建标准化、模块化、智能化的追溯体系，为航空附件精密装配提供数据支撑与管理保障。这既是提高装配质量的技术手段，更是推动企业从传统人工经验管理向数据驱动决策转变的重要路径，为航空制造企业数字化、智能化、精益化发展筑牢根基。

2 质量追溯系统的功能需求与设计目标

为了满足航空附件装配过程中对高精度、高可靠性质量控制的严苛要求，质量追溯系统的建设必须围绕实际生产管理需求进行系统性功能规划。系统应覆盖装配全过程中的关键环节，涵盖物料进厂、零件装配、过程检验、最终检测等质量控制节点，能够对每一项操作过程进行数据采集与记录，并实现数据的时序性管理与多维度关联。系统需要支持对工艺参数、检测结果、作业人员信息、装配工序状态等核心数据的实时录入，还应具备可回溯的时间轴机制，确保每一条追溯路径清晰可查。为保障系统的实用性和操作效率，应结合车间作业环境进行功能界面设计，支持移动终端使用与数据离线缓存，从而适应现场作业的多变性。

在质量追溯系统的功能需求中，数据采集的全面性与准确性是基础，数据集成与统一编码规则是关键。系统需要与MES、ERP、PLM等现有信息系统进行深度集成，实现跨系统数据的互通与共享。在数据编码方面，应对产品结构、零部件编号、工序编号和人员身份进行统一标准化管理，确保在后续分析和问题定位过程中能够快速定位到责任源头^[2]。系统还需内嵌质量控制规则引擎，对关键控制点进行预设报警阈值

设置,一旦数据异常即可自动触发预警机制,并联动质量管理人员进行干预。为满足航空行业在质量审计与监管方面的严格标准,系统应保留全生命周期的数据可追溯记录,并具备审计日志与权限管理功能,确保数据的真实性、完整性与不可篡改性。

设计目标方面,质量追溯系统应以提升装配过程质量透明度、增强问题闭环处理能力和提高生产效率为核心。系统的整体架构应采用模块化、可扩展的设计思路,支持后续功能升级与多产品适配需求。在技术架构层面,应基于分布式架构构建稳定的数据处理平台,结合边缘计算和工业物联网(IIoT)技术,实现车间级别的实时数据采集与处理能力。系统应支持多维度的质量数据分析报表与可视化展示,辅助管理人员进行决策分析与质量改进。经过该系统的实施,将显著提升航空附件装配过程的管控能力,实现从事后整改向过程预防转变,为实现精益制造和质量零缺陷目标奠定坚实基础。

3 质量追溯系统的架构设计与关键模块构建

质量追溯系统的架构设计必须契合航空附件装配过程中多工序、高精度、强监管的特点,构建具备高可用性、高集成性与高扩展性的系统框架。在整体架构上,应采用“感知层—传输层—平台层—应用层”四层结构模式,其中感知层负责实现对装配过程数据的实时采集,传输层负责数据的稳定传输与协议适配,平台层承担数据存储、处理与分析功能,而应用层则面向用户提供可视化操作界面与业务功能服务。在感知层中,部署RFID标签、扫码枪、数据采集终端、传感器等设备,可实现对零部件流转状态、操作人员身份、工艺参数变化等信息的实时感知,确保数据来源的准确性与即时性。

在平台架构中,应采用基于微服务的分布式设计理念,构建松耦合、高内聚的服务组件体系。各关键业务模块如数据采集模块、工序追溯模块、异常预警模块、质量分析模块等通过独立服务运行,具备独立部署、动态扩展与快速响应的能力,有助于提升系统整体灵活性和可维护性^[3]。平台应搭建统一的数据中台,整合来自ERP、MES、PLM等系统的数据,数据总线进行标准化处理与语义映射,实现异构系统间的信息贯通。在数据库层面可采用混合型数据库结构,关系型数据库用于结构化工艺与过程数据管理,非关系型数据库用于大规模实时采集数据和日志信息的高效存储,满足航空附件装配中多类型数据处理的需求。

系统的关键模块构建需结合装配现场实际业务流

程,重点开发装配节点管理模块、工艺参数管理模块、过程质量控制模块和问题闭环处理模块。装配节点管理模块用于对每一个质量控制点进行定义与关联,工艺参数模块记录每道工序的工艺要求与控制范围,过程质量控制模块则依据采集数据进行实时比对与报警。问题闭环模块支持从问题发现、初步定位、原因分析、责任识别到整改验证的全过程管理,构建PDCA质量管理闭环。引入数字孪生技术,实现虚实结合的可视化装配过程呈现,使管理者能够动态掌握现场质量状态与风险趋势。经过上述模块的协同运行,质量追溯系统将有效支撑航空附件装配全生命周期的精细化质量管控,助力企业构建起高可靠性的产品质量保障体系。

4 数据采集与信息集成在装配过程中的实现

在航空附件装配过程中,实现高效、精准的数据采集是质量追溯系统功能落地的核心前提。由于航空附件通常结构复杂、装配环节多、精度要求高,每一个操作节点都涉及到关键工艺参数和质量控制点。为确保数据的真实性与完整性,必须在装配线中部署多种工业级采集设备,包括条码扫描器、射频识别(RFID)系统、温湿度传感器、力矩传感器以及图像识别装置等。这些设备能够实时采集零部件标识、装配顺序、装配力矩、环境参数等关键数据,并与系统中的作业计划、工艺规范进行自动关联。数据采集应覆盖人工操作与自动化设备操作场景,保证无论是人工工序还是自动装配节点,都能实现高精度的实时数据输入。

信息集成的关键在于构建统一的数据管理机制,将原本分散在ERP、MES、PLM、QMS等多个系统中的业务数据进行横向整合与纵向打通,形成面向装配过程的统一数据视图。集成平台应具备高兼容性的数据接口框架,支持多种工业通信协议(如OPC UA、Modbus、TCP/IP等),并通过中间件实现数据的清洗、转换与结构化存储^[4]。在信息集成过程中,还需将产品的BOM结构、工艺流程图、检验标准与采集到的过程数据进行多维度映射,建立面向零件、工艺、人员、设备的关联模型,确保每一条质量数据都可追溯至具体的操作节点与责任来源。信息集成平台还应具备实时监控与数据同步能力,实现对装配状态的动态掌握与即时响应,增强系统的实时性和业务支撑能力。

在实际部署过程中,为应对复杂多变的航空制造环境,需采用边缘计算与云端协同的技术架构,使得数据可在本地快速处理并在云端集中分析与存储。边缘计算单元部署在装配站点,可对传感器数据进行预

处理、滤波和初步判断，降低系统延迟，提高响应效率。而云平台则聚合全线数据资源，承担深度分析、趋势预判与大数据挖掘任务，支持质量预测、预警策略调整和知识模型迭代。构建数据采集与信息集成的一体化技术体系，航空附件装配过程中的每一项作业行为和状态都被系统化记录并可实时调用，实现从静态记录向动态监控的转变，为质量追溯系统提供了坚实的数据基础与决策支撑能力。

5 质量追溯系统的部署应用与效果评估

在航空附件装配环节成功构建质量追溯系统之后，系统的部署与实际应用效果成为验证其设计合理性与工程价值的关键环节。系统部署需依据工艺流程及生产节拍进行节点分布与终端布控，确保所有关键质量控制点都能被有效覆盖。在现场实施中，应将系统嵌入到操作流程中，使操作人员能够在不增加额外负担的情况下完成数据采集、确认与反馈。在装配线布设数据采集终端、身份识别设备及质量状态指示模块，系统能够在装配全过程中实时记录人员操作、零部件状态及工艺参数，并在触发异常阈值时进行自动报警。系统运行过程中，依托与MES、ERP等系统的集成机制，可实现作业计划的自动下发、任务执行状态的实时更新及过程数据的闭环上传，推动车间生产与质量管理一体化融合。

在系统实际应用过程中，航空附件装配各环节质量信息实现透明化，大幅提升异常问题响应速度与溯源效率。相较传统纸质记录、人工排查模式，新系统可在数秒内定位目标批次产品的装配节点、责任人员及工艺参数，显著缩短质量问题处理周期^[5]。系统扭转了传统质量管理质量审计“事后整改”质量审计的模式，构建起质量审计“过程监控”质量审计为核心的质量预防机制，通过积累分析历史数据，精准识别潜在风险点，为工艺参数调整、作业流程优化提供决策支撑。同时，系统以可视化界面向管理层呈现工序合格率、质量问题频次、设备稳定性等关键指标，为质量改进与绩效评估提供可靠数据支撑。为全面评估系统应用成效，选取质量审计2024年1—6月（上线前）与质量审计2024年7—12（上线后）的核心质量、生产指标开展对比分析（见表1）。

表1 系统上线前后核心指标对比

核心指标	上线前 (2024.1-6)	上线后 (2024.7-12)	提升/下降幅度
装配数据完整率	78.3%	99.2%	提升 20.9%

质量问题平均溯源时间	4.2 小时	22 分钟	缩短 91.3%
数据缺失导致问题无法定位占比	15.7%	1.8%	下降 13.9%
客户质量审核整改次数 (半年)	1.3 次	0 次	下降 100%
装配差错率	3.2%	2.1%	下降 34.4%
生产效率(件/天)	28	32.2	提升 15%

在应用效果评估方面，对系统上线前后的质量数据对比分析，可清晰看出系统带来的显著成效。零部件装配差错率明显下降，问题响应时间大幅缩短，数据丢失和信息遗漏问题基本消除。在外部客户审计与第三方质量监管中，系统提供了全链条的电子追溯记录与不可篡改的操作日志，显著增强了产品交付过程的透明度与可信度。员工对系统的接受度也随培训与现场优化不断提高，操作习惯逐步由经验驱动转向数据驱动。质量追溯系统的稳定运行，提升了装配过程的合规性与可靠性，更为航空附件制造企业实现数字化转型、打造高水平质量管理体系提供了坚实支撑。

6 航空附件装配质量追溯系统的优化路径探索

航空附件装配质量追溯系统虽已实现全流程数据采集与可视化管理，但长期运行仍需多维度优化，核心在于拓展数据维度、提升质量控制粒度。当前系统侧重关键工序与核心零件，辅助环节追溯能力不足。需在非关键工序引入精细化采集机制，全面记录装配环境、工装状态、人员操作规范性等质量影响因素；集成高频智能传感器，对力矩、温度等工艺参数开展趋势监控，助力潜在缺陷预警，推动系统从静态追溯向主动预测与过程控制演进。

从系统性能与用户体验角度，需持续优化平台架构与交互界面。当前系统依托传统Web平台，数据处理能力和实时响应速度受服务器性能与网络带宽制约。面对数据量快速增长，建议引入边缘计算与本地缓存技术，提升分布式数据处理能力，降低传输延迟；引入人工智能算法，基于历史质量数据建模，实现装配异常自动识别与预警。界面设计需针对不同角色定制可视化视图，并开发多终端兼容版本，增强系统灵活性及扩展性^[6]。

未来，航空附件装配质量追溯系统的优化需深度融合企业智能制造战略，朝着平台化、智能化、协同化方向迈进。系统应构建全生命周期质量大数据中心，打通设计、制造、检验至售后服务的质量闭环；引入

工业互联网平台,实现跨部门、跨系统、跨工厂数据互通,推动追溯体系向供应链上下游延伸;融合数字孪生与虚拟仿真技术,建立装配数字映射模型,支撑质量问题虚拟验证与复现。经多维度优化,该系统将从单纯溯源工具升级为企业质量管理数字化转型的核心载体与战略支撑平台。

7 结语

本文围绕航空附件装配过程中的质量追溯系统展开研

究,从系统需求分析、架构设计、数据采集到实际应用与优化路径进行了系统阐述。构建覆盖全过程的数据追溯机制,实现了对装配质量的动态监控与精细化管理,有效提升了航空制造的质量控制水平与响应能力。质量追溯系统不仅是提升产品可靠性的重要保障,更是推动航空企业实现智能制造与数字化转型的关键抓手。

参考文献:

- [1] 徐锦霖.基于区块链的航空发动机运维数据管理技术研究[D].哈尔滨工业大学,2025.
- [2] 张孟珂.面向航天复杂产品协同研制的动静态质量 BOM 方法研究[D].天津理工大学,2025.
- [3] 王康文.基于数字孪生智能生产单元监测系统研究[D].合肥大学,2024.
- [4] 侯德飞.基于区块链技术的航空装备质量溯源研究[D].东南大学,2024.
- [5] 朱日兴.航空发动机需求追溯管理分析[J].民用飞机设计与研究,2022,(03):105-111.
- [6] 赵罡,李瑾岳,徐茂程,等.航空发动机关键装配技术综述与展望[J].航空学报,2022,43(10):475-507.