

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.031

飞机修理过程中数字化总装生产线研究与应用

郭海利,张忠洁,王伟,胡烽

(国营芜湖机械厂,安徽 芜湖 241007)

摘要:针对飞机修理的工作内容和现状进行分析,提出脉动式总装生产线和数字化技术相结合的作业模式。通过将生产过程相关的资源和要素数据化,搭建集成的数据管控平台和业务系统,进行基于结构化工艺文件的工艺流程重构,建设智能物流仓储与配送系统;融入精益生产理念,实现生产全过程的工艺流、信息流和物流的有机结合。通过试点应用表明:该作业模式显著提升了飞机修理过程中总装工作的生产效率和管理水平。

关键词:数字化;飞机修理;总装;脉动;生产线

中图分类号:V267 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0159-04

Research and Application of Digital Assembly Line in Aircraft Repairing

GUO Haili,ZHANG Zhongjie,WANG Wei,HU Feng

(State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China)

Abstract:Based on the analysis of tasks and current status in aircraft repairing, this paper puts forward an operation mode combining pulsating assembly line and digital technology. By digitizing all the resources and factors related to the production process, an integrated data control platform and business system are established, the process flow is reconstructed based on structured process documents, and an intelligent logistics, warehousing and distribution system is built. The proposed mode integrates the concept of lean production to realize the organic combination of process flow, information flow and logistics in the whole production process, and its pilot application shows the significant improvement in production efficiency and management level of final assembly work in aircraft repairing.

Keywords:digitization; aircraft repair; assembly; pulsation; production line

0 引言

脉动生产线作为一种先进的、高效的飞机生产组织模式,在国内外多个型号飞机的研制生产中得到了应用^[1]。国内的西飞、陕飞等飞机制造厂均建成了脉动式总装生产线^[2],大幅提升了飞机生产效率及其装配质量,同时降低了总装成本^[3]。以精益思想为核心的脉动式生产线是飞机制造的发展趋势,美国波音公司在进行 KC-135 运输机的返厂维修中以及德国汉莎航空在 CFM/V2500 发动机的修理和维护中也采用了精益脉动线,从而大修周期得以大幅压缩^[4]。李西宁等^[5]学者提出了飞机总装数字化脉动生产线技术,重点对飞机装配流程和关键过程进行了分析,对每个环节中数字化测量和对接技术的应用进行了研究。黄江等^[6]提出了面向智能制造航空发动机数字化总装生产线应用架构,阐述了主要建设内容及技术实现路线,为装备制造业开展面向智能制

造的产品数字化生产线建设提供重要的借鉴。彭文华等^[7]提出了包含物理层、数据层、模型层和服务层的智能柔性生产线架构,对数字孪生驱动下的航空制造车间智能柔性生产线的创新设计与实践路径进行了探索。

本文在前人研究的基础上,针对飞机修理装配过程进行研究,搭建数字化工艺体系,以此为基础重构生产作业流程,将相关生产资源要素数据化,构建基于信息系统的管控平台,打破数据孤岛,实现数据的互联互通。将数字化理念与精益的脉动式生产相结合,探索一条具有修理特色的、精益的、智能的飞机总装生产线。

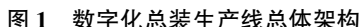
1 飞机修理过程总装工作分析

飞机修理过程中的总装工作内容与飞机制造基本一致,但因为修理过程的特殊性,在管控和实施上又存在较为显著的差别,目前飞机修理过程的总装工作具有如下特点。

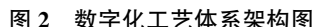
第一作者简介:郭海利(1988—),男,辽宁朝阳人,工程师,硕士,研究方向为飞机自动化装配与测试、数字化技术研究与应用,ghlsau@126.com。

因此,飞机总装工艺流程及站位设计、关键技术装备、物料仓储配套、生产线管控等是制约飞机总装集成脉动生产线技术水平及效能的关键要素^[8]。

数字化生产线是指通过应用数字化手段,将传统的生产线进行数字化升级和改造,实现生产过程的自动化和高效化,以及实时数据采集、监控和分析,从而提高生产效率、质量和可靠性^[9]。为解决当前存在的生产过程不透明、不精益、信息传递滞后、总体效率不高等问题,需对飞机总装的工艺流程进行重构和优化,同时打破当前各环节的信息壁垒,构建实时感知、自主分析和辅助决策的信息系统,从而实现信息流、工艺流程、物流的有机结合。飞机修理后的数字化总装生产线底层为基础数据层或者感知层,主要将生产过程相关的人、机、料、法、环、测等环节进行数据化,变成可识别和管理的唯一对象。中间层为网络传输和应用系统,实现物理世界与信息世界的交互共融,对数据信息进行分类整合、传递、分析和应用。顶层为展示和决策层,实现信息显性化,辅助管理决策,其总体架构如图1所示。



工艺文件是飞机修理作业的依据性文件,而数字化工艺则是构建数字化飞机总装修理线的重要基础。基于 PLM(product lifecycle management)和 IETM(interactive electronic technical manual)融合技术,搭建数字化维修工作卡平台,可实现工艺文件的在线维护、审签、发布和查阅,其相互关系如图 2 所示。



3)将 PLM 系统中的维修任务与数字化工作卡出版物同步映射到 MES (manufacturing execution system)系统中,以工序方式进行生产过程管理。便于用户进行在线阅读、记录、交检和归档,支持远程无线终端的访问,实现了飞机维修作业过程的无纸化。

数字化总装生产线按照脉动式修理理念,将

飞机总装和调试过程划分为 5 个站位^[10],如表 1 所示。1 站位进行各系统导管的安装及局部密封性试验;2 站位进行产品的装机及各子系统的初调工作;3 站位进行大部件安装和机电系统调试;4 站位进行航电系统调试工作;5 站位进行全机总检以及合格交付。

表 1 总装工作站位分布

站位	工作内容
1	安装导管、拉杆,救生产品装配,油箱产品装配,液压系统清洗
2	密封性检查试验,救生系统调试,成品件安装,减速板等调试
3	大部件对接,首次供电、供压,电传系统调试,机电系统调试
4	油序检查试验,航电系统调试,整机校靶,水平测量
5	总检、交付

某型飞机装配过程共约 3 000 道工序,将其按照作业工作量与作业时间均衡划分至 5 个站位,每个站位按照固定节拍进行工作和移位,每个站位内部又将具体工作分解到每一天,实现精确的日装配作业计划。作业准备工作则由信息系统根据作业计划指派智能工装设备进行配送,减少非精益环节,提高作业效率。

3.3 智能仓储与配送系统

飞机总装所需物料繁多,物料配送延迟将导致整条装配线生产延误^[11]。及时、准确、高效的智慧物料传输和调度是保障生产连续进行的基础,在降低物料流动时间和成本的同时,能够提升生产制造的整体效率和仓储利用率,实现生产制造资源的合理分配和管理,在智能制造中具有重要意义和作用^[12]。智能仓储与配送系统主要通过建立立体仓储实现上游工序交付产品和器材的分拣入库、盘点、出库等功能。WCS (warehouse control system) 系统接收 MES 系统下发的每日工作任务,调度 AGV (automated guided vehicle) 配送机器人将工作所需物料自动配送至相应的站位,同时也将使用完毕的空箱进行回收。射频识别技术(RFID)作为物联网感知层的重要核心组成部分,通过非接触式感知来实现智能化采集数据,可以代替传统的手工记录。将 RFID 接入生产管控系统,使生产管理人员能及时掌握生产状况并根据情况调整生产安排,能随时掌控物料的流向,从而提升生产线柔性化、数字化、智能化^[13]。智能

仓储与配送系统的流程如图 3 所示。

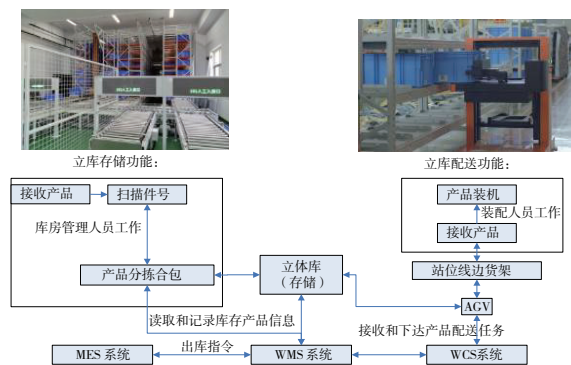


图 3 智能仓储与配送系统流程图

智能仓储与配送系统主要功能及实现方式如下。

1) 产品入库与分拣:产品入库的原则是将同一道装配工序下的产品和物料存放在同一个料箱中,便于装配工作的开展;每件产品修理和交付过程中均带有 RFID 标签,标签中包含了产品 ID、图号、名称、所属架次、部位、所属工序编号等信息;产品首次入库时通过扫描 RFID 标签信息,指派空料箱进行入库,入库后产品信息则和料箱信息完成绑定;同一料箱中的其他产品再次入库时,则调用该料箱完成存储。

2) 产品出库:WMS (warehouse management system) 系统接收来自 MES 系统的工作任务,根据工序编号和料箱编码等信息找到对应料箱完成出库;仓储和配送系统也可通过授权人员进行生产计划的调整,进而实现物料系统的出库。

3) 盘点:WMS 系统会自动进行物料信息的盘点,给出飞机的齐套性情况,给管理人员进行预警并提供决策支撑;同时将预警信息通过 MES 系统传递至上游工序,实现拉动管理,将原来的事后管理转变为具有预警功能的事前管理。

4) 配送:WCS 系统按照任务指令调度运送 AGV 配送机器人领取出库料箱,按照二维码导航送至站位的线边货位。AGV 能够实现物料的高效输送、精准定位和即时调度,大幅减少人力参与,降低生产成本,提高产线整体运转效率^[14]。

3.4 总装 MES 系统

总装 MES 系统是飞机数字化总装生产线的关键组成部分,起到承上启下,联通和管理各类资源的作用,是实现数字化管理的驱动部分。包括数据管理、计划排程管理、生产调度管理、库存管理、质量管理、人力资源管理、设备管理、工具工装管理、

看板管理等模块^[15],各模块协同运作以提升生产过程的高效性与稳定性^[16]。其架构如图4所示。

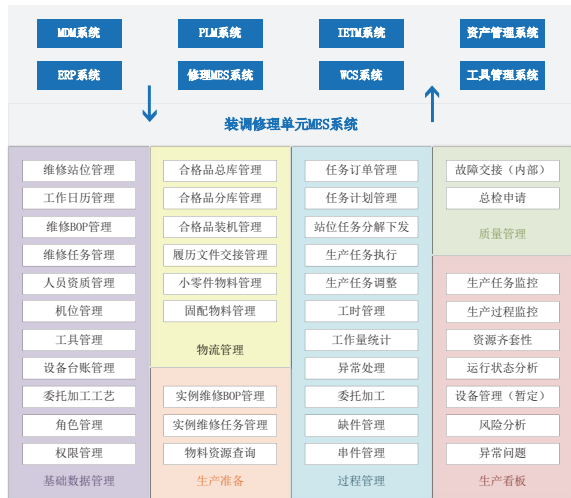


图4 总装MES系统功能架构图

总装MES系统接收工厂级作业计划,然后根据终端传感器和各业务子系统传递的生产资源信息,对作业计划进行动态调整,改善了以往作业计划科学性不强、应变能力不足的问题。同时将齐套性以及现场异常问题通过网络信息系统传递给上游修理工序,实现拉动式管理,使信息传递更透明、更准确。MES系统既是执行端,也是各类资源的集合端。MES系统按层级下发生产作业计划,将每日工作计划下发至作业人员的移动终端。与此同时将计划发送至仓储、工装设备以及人员管理系统,进行资源的判断与锁定^[17]。如有不满足生产计划的情况,将异常信息进行展示以辅助决策。

总装MES系统采用B/S结构,以C++语言为开发工具,利用SQL语言操作关系型数据库管理相关信息,开发适宜各类人员的用户界面和报表,作业人员可通过Web页面进行访问和操作。

3.5 数据采集

数据是生产组织管理的基础,在数字化产线中所有资源都是以数据的形式被采集和利用。资源的数据化实现了实时采集和在线管理,数字化总装生产线需要搭建可以满足信息实时传递的网络系统。建设安装在车间内部的5G通讯网络或者WiFi系统,车间局域网通过交换机连接到工厂主干网络。将所有生产要素和资源全部进行在线管理,可通过三维建模和数字化标识等方式将物理世界的实体在网络系统中进行映射。从而实现总装车间内的万物互联,满足人员、设备、生产计

划、物流仓储等子系统的交互。

按照数据来源,其采集形式主要有以下几种。

1) 基础信息:人员信息、工装设备基础信息、产品物料信息等基础信息主要依靠人工维护方式管理,供各应用系统调用。

2) 设备运行信息:在设备上安装嵌入式工控机以及传感器、RFID、二维码、数据采集卡等数据采集装置;通过在嵌入式工控机上开发程序,获取设备的能耗、负载、故障信息、作业时间等信息^[18]。

3) 试验数据管理:含有应用程序的检测类设备,主要将其试验结果按照规定的格式进行保存;通过TDM(test data management)系统以结构化的形式自动采集和上传试验数据。

4) 业务流程信息:业务运行的信息如工序开工时间、当前状态、现场问题处理的进展等直接根据需要从数据库获取,以规定的格式存储于企业数据中台;企业数据中台能够对所有采集的数据进行管理和存储,并支持异构数据之间的转换,实现数据互通。

3.6 可视化管控

业务运行情况的直观展示对于管理人员决策和作业人员的执行反馈具有显著的促进意义,同时基于历史数据和当前数据,亦可进行趋势性分析。展示数据主要基于各业务具体流程获取实时数据信息,经过后台的加工整合,按照设计的逻辑方式进行展示。将不同维度、不同层级的信息按照设定的逻辑分别展示,例如把生产进度实时情况以及异常问题、物料、设备、人员等状态进行采集和实时分析,直观展示当前情况以及趋势预测,并传递给各类相关人员。真正实现作业过程可视化、可量化,彻底解决生产过程不透明问题。可视化管控平台如图5所示。

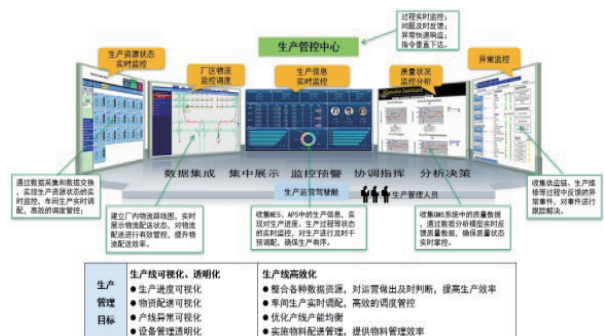


图5 可视化管控平台示意图

(下转第239页)

- 2024,38(1):72-85.
- [14] 武斌,金春洁. 基于小波神经网络与遗传算法的机器人全局路径和局部路径优化[J]. 自动化与仪表, 2023,38(7):33-37.
- [15] 盛峰,沈拓,谢远翔,等. 全自动无人驾驶列车障碍物检测的轨道区域检测算法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2025,53(3):402-409.
- [16] 王胜源,王珍. 基于改进遗传算法的冷鲜肉配送路径优化研究[J]. 物流科技,2025,48(7):15-19.
- [17] 胡碟,胡志华,李姚娜. 基于两阶段算法的多无人机船舶排放监测选址与路径优化[J]. 中国航海, 2025,48(1):165-173.
- [18] 陈颖,姜建满,杨磊. 基于改进遗传算法的冷链配送路径优化方案[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2025,51(1):66-70.
- [19] 戴萍. 基于 FWA 及 ABC 的冷链物流配送路径优化模型[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2025, 20(1):53-58.
- [20] 张玉建,杨坤,何超,等. 基于改进模拟退火算法的单层网壳结构拆除施工路径优化方法[J]. 建筑结构, 2025,55(5):107-116.
- [21] 张萌,孙璐璐,苏兵,等. 考虑空载损失的非集中式共同配送订单分派及路径优化研究[J]. 工业工程, 2024,27(2):107-118,137.

收稿日期:2023-10-20

(上接第 162 页)

4 结语

某型飞机修理的总装车间,采用精益的脉动生产理念,同时将自动化、传感器、数字化技术与具体装配业务相结合,在网络信息系统支持下,构建基于数据驱动的总装生产线。实现了装配全过程的透明化,改变了传统飞机维修的总装作业模式,将总装生产周期缩短了 30%,提升了飞机总装交付能力和整体生产管理水平。

数字化总装修理线建设是当前形势下航空修理企业转型升级的必然趋势,也是提升管理和运营水平的一项重大变革,涉及数字化技术、物流系统和精益管理理念等,是一项复杂的系统工程。随着数字孪生、数据中台、5G 等技术的成熟和应用,持续研究和改善数字化飞机总装修理线对于飞机批量修理能力的提升具有重要意义。

参考文献:

- [1] 裴书梅,杨根军,陈军. 飞机总装脉动生产线智能制造技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16):41-47.
- [2] 宋利康,郑堂介,朱永国,等. 飞机脉动总装智能生产线构建技术[J]. 航空制造技术,2018,61(增刊1):28-32.
- [3] 方水良,刘猛男,鲜果,等. 飞机移动装配线:脉动与续动[J]. 航空制造技术,2021,64(16):40-50.
- [4] 李金龙,杜宝瑞,王碧玲,等. 脉动装配生产线的应用与发展[J]. 航空制造技术,2013,56(17):58-60.
- [5] 李西宁,支劭伟,蒋博,等. 飞机总装数字化脉动生产线技术[J]. 航空制造技术,2016,59(10):48-51.
- [6] 黄江,杨海,史小强,等. 面向智能制造的航空发动机数字化总装生产线建设研究[J]. 航空制造技术, 2020,63(6):34-42.
- [7] 彭文华,王茜,周勇,等. 数字孪生驱动的航空制造车间智能柔性生产线设计与实践探索[J]. 数字化转型,2025(4):100-109.
- [8] 杨锋,穆志国,范军华,等. 大型飞机总装集成脉动生产线技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(12): 48-55,62.
- [9] 关宇际,侯张艳,王兆清. 装备制造企业数字化生产线的建设与应用[C]//2024 中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 北京:中国航空工业技术装备工程协会,2024:126-130.
- [10] 严金凤. 飞机总装脉动生产线数字化仿真与优化关键技术[J]. 航空制造技术,2020,63(20):54-60.
- [11] 董玉龙,陈璐,鲍中凯. 基于博弈论的飞机总装物流配送系统资源配置[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025,59(1):120-129.
- [12] 孙孝飞,郭捷,魏灿名,等. 3C 智能制造工厂的 AGV 智慧物料传输与调度综述[J]. 中南大学学报(自然科学版),2025,56(2):514-535.
- [13] 田亚丽,陈建勋,王雷,等. 面向数字化制造的船舶生产线群控方法[J]. 制造业自动化,2024,46(10): 136-141,195.
- [14] 杜纪柱,李帅,徐洪森,等. 智能物流 AGV 在机械制造产线中的应用[J]. 智能制造,2025(2):80-85.
- [15] 张礼武. 浅谈 PDM 与 MES 系统集成[J]. 智能制造, 2017(5):59-61.
- [16] 胡振宇,窦耀,邵长野,等. 基于 B/S 架构的智能制造产线 MES 系统的设计与开发[J]. 农业装备与车辆工程,2025,63(3):122-126.
- [17] 任秀丽,陈敬,周宇,等. 数字化装配生产线中的工艺装备管理[J]. 机械工程与自动化, 2025(1): 206-209.
- [18] 郑杜,唐敦兵,王旭,等. 个性化定制生产模式下的云制造系统设计研究[J]. 机械制造与自动化,2020, 49(1):33-36.

收稿日期:2024-03-26