

航空发动机精益装配线探讨

Discussion on Lean Assembly Line of Aero Engine

■ 高鸽 张晗 王海宁 郭桃都 / 中国航发黎明

随着信息技术和管理理念的快速发展，航空发动机传统的固定站位的工序移动式手工装配模式，在效率、质量方面均显落后。伴随着航空发动机装配模式的变革，建立精益装配线已成为航空发动机工厂升级的必由之路。

航空发动机的装配先后经历了固定集中装配、固定分散装配和工序移动式装配、脉动装配线等几种模式的变迁。近年来，由于信息技术和管理理念快速发展，精益装配线的概念开始出现，并得到初步应用。

精益装配线是将先进的数字化装配技术、管理理念集成融合到生产过程中，实现基于工艺和生产过程全面优化、基于模型的产品全过程数字化制造，以及基于信息流、物流集成的精益化生产管控，以提高生产线运行效率，提升产品质量稳定性的新型装配线。

罗罗公司是将精益装配线应用于航空发动机领域的先行者之一，其

遑达系列发动机的生产中采用了精益装配线，核心机部分采用固定站位装配，后续则采用基于下部吊装设备的脉动装配模式（如图1所示）。赛峰飞机发动机公司在2011年也建立了CFM56发动机的精益装配线（如图2所示），从而将完成一台发动机装配的时间减少为10天，对比在1999年所需的29天，显著缩短了装配周期。

精益装配线的特点

通过罗罗公司和赛峰飞机发动机公司的实践，可以看到精益装配线的特点主要有以下几方面。

装配参数检测数字化

航空发动机装配过程包含大量

间隙、配合、跳动及力矩等参数测量。通过大量采用数字化测量工具和设备，可以提升测量精度和稳定性，大幅降低人为因素影响，提升装配质量。

局部过程自动化

航空发动机结构复杂、体积质量大、装配空间受限，主要依靠人工进行装配。通过大量应用自动化技术，并通过机械、电子手段实现技术防错，能有效保证相关装配特性，提升装配过程的质量稳定性。

人机工程与助力装配

良好的人机工程与助力装配可降低装配人员的劳动强度，有效提升装配过程的效率和质量稳定性。



图1 遑达系列发动机的精益装配线



图2 CFM56发动机的精益装配线

先进的精益装配线在设计之初就应充分考虑人机协同，通过自动化设备实现发动机装配过程中的升降和翻转（或沿轴线滚转），保证装配人员的良好姿态。

仓储物流信息化

航空发动机零组件数量众多，平铺式零组件存放方式导致配套面积严重侵占生产面积，通过将各套件原始物料信息录入条形码，以条形码作为识别依据将所有配套件存储于数字化立库。发动机配台时，根据物料清单，数字化立库自动配台，并提取相应电子物料信息。配套件通过转运小车准确及时地运送至各生产工位，电子物料信息同步传递。数字化立库的应用既能更有效地利用空间，变相扩大生产面积，又能提高物料配送的精确性及准确性。

工检文件一体化、无纸化

采用传统的人工方式在装配现场对质量数据进行采集记录，无法及时、快速、准确地采集现场数据，另外，通过纸质文件记录、传递和归档质量信息，不利于质量数据的整理、分析和追溯。航空发动机装配过程中大量的工艺文件和质量记录，若通过较为完善的文件体系，良好地将工艺文件及质量记录合二为一，并借助信息化手段基本实现生产现场的无纸化，技术状态管控和装配过程的可追溯性便能大幅提高，与生产计划的制订结合更加紧密，减轻了操作者负担。

精益装配线建设需求

精益装配线的建立是一项发动机装配模式的整体变革，是一项涵盖生产管理、工艺优化、技术创新、分

配模式、员工素养等诸多方面的系统工程。从思想意识和实际操作中，建立精益装配线还应满足以下几点需求。

将精益制造思想融合到生产线的构建与实践中心

装配生产线的核心及基础就是精益制造，只有从领导到员工都深刻领会并愿意积极践行和善于应用各种精益工具，生产线才会有生命和活力。

保证全方位参加

精益生产线的构建不局限于总装线、总装车间，需要整个工厂生产计划、物资供应、设备保障、设计协同、工艺保障等全方位参与，缺少任何一环都会导致精益生产线运行出现问题。

做好精益装配线产线规划

产线的建设涉及产线线体设计、新工艺技术应用评估、各种异常情况处理预案、生产管理系统、物流配送系统等，是关系到整个企业的系统工程；在吃透先进精益线的基础上，进行充分的论证及数字孪生的产线仿真后，再进行产线实体的搭建。

不接收、不制造、不传递缺陷

利用数据信息载体和控制技术，实现“三不”目标；具有完备的质量控制措施，满足“零缺陷”生产的要求；具备在线检测、数据采集和存储功能；满足产品信息按零部件批次、工位设备等可追溯性要求；时时防错，处处防漏。

排除操作人员的个人因素的影响，确保过程受控

工艺过程描述要求独立、唯一、明确和数字化；明确各生产过程初始状态（工件、装备和人员）；所有

的行为和动作必须采集信息，保证和设定方式一致；所有的实时工艺参数必须采集；所有的结果必须与控制要求进行比对，给出结论并记录；所有的结论必须有决策，并反馈给操作人员，从而实现闭环。

航空发动机精益装配线的构建

通过对精益装配线的特点和需求分析可以看出，要构建航空发动机精益装配线，必须对工艺技术、硬件应用技术（含传感技术）、工业软件、数据分析及标准化的工作流程等开展深入的应用研究，这是构建精益装配线的重要基础，也是需要重点攻关的难题。

参考架构模型

在精益装配线的构建过程中，可供参考的架构模型主要有工业4.0的参考架构模型（RAMi4.0）与美国工业互联网联盟（IIC）的架构模型（IIRA）。

RAMi4.0主要依据全生命周期和价值链维度、层次结构维度和功能级维度建立。全生命周期和价值链维度分为样机（开发、维护/使用）、产品（生产、维护/使用）。层次结构维度分为互联世界、企业、工作中心、站、控制设备、现场设备、产品。功能级维度分为商业、功能、信息、通信、集成和资产，可以将它理解为一种信息建模方法，用于对另外两个维度建模，即对生命周期维度进行价值链建模，对层次结构维度进行技术对象建模。RAMi4.0在功能级维度上通过建立企业各种资源库（产品库、设备库、工艺库等），保证全生命周期及生产管理工具中实现资源互联互通和互操作。

IIRA 则包括商业视角、使用视角、功能视角和实现视角4个层级。其功能架构确定了商业、运营、信息、应用和控制5大功能领域，以及系统安全、信息安全、弹性、互操作性、连接性、数据管理、高级数据分析、智能控制、动态组合9大系统特性。在功能架构基础上，IIC 进一步确定了由边缘层、平台层和企业层组成的系统架构，以及各层包含的软硬件系统和网络。

航空发动机精益装配线整体架构

参考以上两种架构模型，结合航空发动机工厂实际情况，精益装配线的整体架构应包括4个层级：企业层、车间层、集控层和现场层。其中，在企业层，利用产品协同研发平台、企业资源计划平台、全生命周期质量管理平台、综合维修与服务保障平台、综合办公协同平台6大系统，覆盖企业运营管理全过程，向车间层传递生产计划、设计文件等信息，并接收车间层执行过程中质量、装配履历等数据的反馈；在车间层，以产品协同研发平台、企业资源计划平台系统为基础，通过改造升级并扩展功能，实现排产调度、工艺状态、物流配送等业务管理，对制造执行过程全面管控；在集控层，以工业总线为基础，通过数据采集与监视控制（SCADA）系统的建设，实现现场设备数据采集和设备运行监控；在现场层，建设脉动生产线，配备数字化和自动化的装配、检测、仓储物流设备，为精益装配线的形成提供底部支撑。

根据上述层级的划分，构建精益装配线首先应建立主生产系统、数字化车间系统、配套支撑环境3大部分。

主生产系统位于现场层，核心是建设脉动装配线。结合脉动装配线和合理优化后的装配工艺进行设置，融入先进的数字化装配技术作为支撑，提升装配效率和质量稳定性，产线设置大量信息传感器，接收并执行生产计划、物料供应、工艺文件等指令信息，反馈管控系统所需的生产进度、质量数据、异常问题等信息，实现精益生产模式，确保产线高效稳定运行。通过配备数字化装配工具、自动化仓储物流系统、数字化检验检测工具以及其他辅助配套设备，采用工业控制网将各类设备产生的数据进行采集集成，全面构建精益装配线，提高装配线制造响应能力，实现全透明管理。

数字化车间系统贯穿企业层、车间层和集控层。以产品协同研发平台、企业资源计划平台、全生命周期质量管理平台等系统为基础，对发动机装配全过程数据等进行数字化、网络化管理。在数字化装配工艺管理方面，形成包含设计信息、制造信息、检验检测规划等的数字化模型，实现装配工艺技术状态数字化管理。以装配制造执行管理系统为核心，实现自动排产、生产调度和生产过程数字化管控。以工业控制网络为基础，通过装配任务调度管理系统将自动化分系统数据对接集成，形成承接车间上下层信息交互的信息枢纽，实现执行工单自动接收、生产数据采集、工件位置和状态自动追踪、设备状态实时监控、设备远程控制等业务功能。通过各层级信息系统的紧密集成，组成精益装配线的“大脑”，形成结构化信息知识积累，通过知识库的积

累、储存、共享、挖掘，使之成为现场进行灵活分析与决策的知识库。

配套支撑环境的建设包括数字化识别设备、服务器及存储等，并构建工业网络和信息安全系统，为精益装配线整体安全高效运行提供基础环境支撑。

结束语

航空发动机是高端装配制造业的典型代表，以资金密集、技术密集著称。受航空发动机的装配特点限制，传统的航空发动机生产基本沿用固定站位的工序移动式手工装配模式进行生产，为提升航空发动机制造水平，在日益激烈的国际大环境中占得一席之地，航空发动机的装配模式急需变革，而通过数字化、网络化、信息化理念构建精益装配线，提升质量稳定性、提高生产效率，是今后发展的主要方向。

构建航空发动机精益装配线虽迫在眉睫，却须“缓步缓行”，要在充分透彻学习先进精益线的基础上，结合航空发动机产业现状，深入开展体系架构和运行模式的研究。

航空发动机精益装配线需要紧密结合企业现有的数字化、网络化和信息化环境基础，突破共性关键技术后，进行小范围示范应用，再逐步推广。

成熟稳定的装配技术和批量化的产品需求是精益装配线规划的基础，装配技术能力的提升及数字化装配技术的应用是精益装配线的先决因素，应该得到足够的重视和支持。

（高鸽，中国航发黎明副总工程师，研究员级高级工程师，主要从事航空发动机设计、航空发动机装配研究）