

# 面向智能制造的航空发动机 数字化总装生产线建设研究

黄江, 杨海, 史小强, 单继东, 张婧, 郝峰

(中国航发西安航空发动机有限公司, 西安 710021)

[摘要] 结合航空发动机总装业务特点,通过对面向智能制造航空发动机总装生产线信息化发展趋势和建设需求分析研究,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,为我国航空发动机制造企业以及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。

关键词: 航空发动机; 脉动生产线; 智能制造; 信息化; 数字化生产线

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.06.034



黄江

高级经济师,主要从事具有多品种、小批量、离散型特点的复杂装备制造企业精准供应链及面向智能制造基于统一IT架构的企业信息化应用研究,先后承担和参与多项重要课题和型号攻关项目。

航空发动机为航空器飞行提供动力,是在高温、高压、高速旋转的恶劣环境下长期可靠工作的极其复杂的热力机械,是知识、技术和资金高度密集的高科技产品,被誉为现代工业皇冠上的明珠,其研制生产的难度不仅体现在零部件生产上,而且最后的装配环节涉及上万个零件。因装配技术、生产管理、物料供应、质量控制等错综复杂因素叠加耦合影响,如何进一步提高装配质量、提升装配效率、提高产品的可靠性等方面,成为航空发动机研制生产长期的重要研究课题<sup>[1]</sup>。

当前,罗罗、赛峰等国际先进航空发动机制造企业在不断深化数字化技术应用的同时,将智能制造作为工业变革的金钥匙,作为企业保持行业领先地位以及长远发展的战略制高点<sup>[2]</sup>。罗罗不仅将数字化技术融入到设计研发中,还将其作为践行全球化的重要手段,通过无缝连接的全球化供应链管理系统,保

证了制造品质与效率,通过健康管理系统,跟踪遍布全球10万台世界各地运营发动机的健康状态;赛峰在LEAP系列发动机生产线上,通过横向集成,将全球240多家供应商进行价值链以及信息网络资源整合,形成高效的供应链管控能力,同时利用数字孪生和自动化技术,有效提升产品的装配效率和质量,形成了年均总装1500多台的交付能力。

自20世纪90年代以来,我国航空发动机主机生产单位,以提升产品总装生产能力为目标,开始产品总装数字化技术应用的探索。典型应用有:针对某航空发动机修理型号,建立了基于知识和精益思想的大修管理系统;针对某航空发动机总装和服务保障特点,建立了总装/维护/维修/大修系统;针对某小型航空发动机型号生产管理特点,建立了服务保障与大修管理系统。这些企业正在开展基于脉动装

配思想的数字化总装生产线建设。这些探索实践,积累了一定的信息化经验,在生产管控能力、产品交付效率、产品质量等方面都得到一定的提升。

面对新一轮工业革命的兴起,制造业走向智能制造是科学技术发展的必然,是社会经济发展的必然<sup>[3]</sup>。当前,国外在航空发动机制造方面,特别是产品总装技术还实行对我国长期严密的技术封锁。抓住我国推进智能制造战略契机,独立自主地开展智能化装配生产线技术的研究,突破相关关键技术,这将从根本上变革我国传统的航空发动机装配模式,在提高发动机装配能力、缩短装配时间、保障产品质量、缩小与国际先进水平的差距、获取可持续发展竞争优势等方面,都具有重要的

战略意义<sup>[4]</sup>。

### 面向智能制造航空发动机总装生产线信息化发展趋势分析

智能制造改变了制造企业中的生产方式、人机关系和商业模式。因此,智能制造不单纯是技术突破,更是对传统产品、产品研发、生产组织模式等的改造和变革,须将信息化与工业化深度融合、创新集成<sup>[5]</sup>。从国际先进航空企业智能制造发展路线来看,迈向智能制造产品总装生产模式不是一蹴而就的工作,是以深度数字化、网络化应用为基础,充分利用先进的自动化技术、人工智能技术等(表1)将生产线复杂组织体中的人、物、系统互联互通,打破时间和空间上的限

制,形成高效率的生产关系网络、先进的制造技术,实现生产线上物流、信息流、资金流的同步以及信息的全面共享<sup>[6]</sup>,从而提高产品制造质量、缩短交付周期,实现企业核心竞争力保持长期发展,占据市场的制高点。

### 面向智能制造我国航空发动机总装生产线建设信息化需求

当前,面临生产任务量逐年递增、制造新技术实现难度大、准时交付管理严格等挑战,我国航空发动机主机厂纷纷面向智能制造探索基于脉动线思想的总装生产线,期望将先进的管理理念、管理方法、组织流程、装配工艺、工艺装备与新一代信息技术深度融合,打造

表1 面向智能制造产品总装生产线信息技术发展分析

Table 1 Analysis on information technology development for the final assembly line of intelligent manufacturing products

关键业务		手工管理	数字化、网络化	智能化
工艺设计与管理	工艺设计;	纸质传递;	三维装配工艺;	基于实物装配零件自动优选;
	工艺仿真;			
生产计划排产	工艺应用;	工艺不精细;	装配工艺结构化、资源化	装配方法、资源、知识自动匹配
	BOM管理			
生产管理	排产方式;	资源冲突严重,难协调;	基于订单排产;	优化的排产策略;
	影响因素;			
生产操作	排产策略;	排产时间长;	多人协同排产,避免冲突;	可预测的资源冲突;
	可视化跟踪			
生产操作	生产调度;	人工电话生产调度;	工单执行及跟踪管理;	动态优化调度;
	操作指导;			
物料管理	工艺管理;	纸质操作指导;	实时生产信息采集及分析;	操作防错;
	谱系跟踪;			
物料管理	生产统计	有限的透明度	实时报工;	精益生产、敏捷反应
	采购;	人工管理及配送;	基于生产计划自动生成物料需求计划;	缺料预警;
配送;	不能做到齐套配送;			
质量保障及控制	监管;	物料信息不能共享;	物料呼叫及ANDON;	关键物料可跟踪及追溯性;
	识别			
质量保障及控制	质量标准;	手工记录,查找检验记录困难;	质量跟踪及追溯;	提高产品一次合格率;
	质量检验;			
质量保障及控制	质量跟踪及追溯	手工检测记录;	控制不合格品流转和流出;	预防不合格品生产;
	返修管理;	手工质量统计分析;	质量数据可视;	防止不合格品流转及流出;
质量保障及控制	质量跟踪及追溯	质量问题事后管理	缺陷标准化分类统计	质量预警;
				市场质量问题及时反馈到制造部门

新型产品总装生产与管理方式,大幅提高产品总装生产效率和质量,缩短生产周期,保障型号研制需要,对信息技术特别是对大数据、人工智能、物联网等新兴技术需求表现在以下几个方面。

(1) 提升生产管理科学水平对信息技术的需求。

我国航空发动机主机厂要打破传统固定站位总装组织模式,实现脉动装配方式,均衡生产节拍是最基本的保障。因此,企业内需要利用物料需求计划 MRP (Material requirements planning)、高级计划与排程 APS (Advanced planning and scheduling) 等信息技术代替手工计划编制方式,打通企业级计划、车间作业计划、班产计划三级计划,不断迭代修正生产期量数据,提升生产计划均衡性和可执行性;同时需要构建供应链集成网络,提升外部供应商管控能力,保障物料及时交付。

需要利用数字孪生技术,建立生产计划和物料库存之间的关联关系,动态感知物料保障情况及物料缺件、转工异常情况,快速解决物料缺件、转工、串换冲突,杜绝发动机装配生产的扰动和影响。

需要利用大数据和人工智能技术,建立事件驱动的制造资源冲突预警和消解模型,采用基于规则、约束和实例的混合消解策略,处理突发故障、临时插单等因素引起的工装、设备等冲突,保证生产过程的平稳、有序。

(2) 实施先进装配工艺对信息技术的需求。

需要利用数字主线技术,以生产节拍为牵引,通过模型驱动对工艺流程进行分解、优化与重组,通过仿真对各装配工位的任务载荷进行均衡化分布。

需要数字孪生和系统集成技术,将工艺物料清单 BOM (Bill of

materials) 与装配 BOM 进行转化和关联,达到航空发动机装配履历结构化表达和数字化存储以及技术状态与航空发动机实物的映射,实现技术状态向部装、总装、总试的数据传递,对物料状态、工艺状态和质量状态的单台份装机技术状态的管理与跟踪,以及时间轴分布的技术状态动态变迁的装配技术状态管理与智能跟踪。

需要利用虚拟装配技术,建立典型组件配合尺寸链、误差传递模型,嵌入平衡求解精度和效率的智能优化算法,基于零件实物模拟计算,形成优化的零件选择方案,提高装配合格率以及装配质量的一致性和稳定性。

(3) 实现准时物料供应对信息技术的需求。

需要利用供应商关系管理 SRM (Supplier relationship management) 系统、企业资源计划 ERP (Enterprise resource planning) 系统、制造执行管理系统 MES (Manufacturing execution system) 集成技术,形成装配现场任务驱动的仓储调度和生产计划模式,拉动零部件生产和外部物料供应,支撑物料准时供应,通过感知物料实际供应情况,动态调整装配计划,保障装配现场顺畅进行。

需要利用条码技术,对航空发动机零部件进行标识、信息快捷采集,实现物流、信息流的合拍,支撑生产信息同步连续,资源信息能够透明共享和技术、质量问题的溯源。

需要利用工艺 BOM 与装配 BOM 紧耦合技术,形成齐套性检验方法和多站位动态精准配送方案,实现面向单台份装配的物料精准配送,以及形成装配现场换件的追踪方法,实现装配现场多台航空发动机串件的可用性匹配和追溯技术。

(4) 推进先进工艺装备对信息

技术的需求。

需要利用信息物理融合技术,对生产线上的机器人、数字化检测工具、VR/AR 工具、AGV 小车、智能仓储等自动化工具或装备进行互联或集成,支撑脉动生产线的运行。

## 面向智能制造航空发动机数字化总装生产线应用架构

以先进的产品装配物理生产线和装配工艺方法为基础,将脉动装配、精益生产、敏捷制造等先进生产管理思想,融入到 ERP、产品数据管理 PDM (Production data management)、MES、虚拟仿真、大数据等信息技术,实现信息系统指挥产品总装要素和装配资源的运行,以数字量代替模拟量作为生产组织、管理、拉动与控制的基本形态,达到“物流、信息流、工作流”的高度同步<sup>[7]</sup>,实现快速动态响应和柔性制造,从而提升整个生产线的装配能力和技术水平,提高产品交付质量,缩短交付周期,降低生产成本(图 1)。

### 1 基于模型和知识驱动的产品协同研制

将 PDM 作为企业数字化研发的基础信息化平台,通过行业网与上游设计单位的 PDM 集成,形成厂所间异地联盟网络,实现基于模型驱动的产品协同设计、数据传递以及制造问题快速处理,企业内部基于 PDM 定制基于模型、资源库和知识驱动的数字化结构化工艺设计方式,通过与装配工艺仿真分析软件以及 ERP、MES、动态感知的生产智能管控系统等集成,形成涵盖产品设计、工艺规划、工艺设计、工装设计等环节的产品总装技术活动,保障产品模型能够贯穿产品总装生产全过程,从而实现基于知识和模型驱动的产品总装工艺设计,支持工艺技术创新和装配过程工艺方案的快速修正<sup>[8]</sup>,达到产品总装脉动生产线全过程数据链贯通

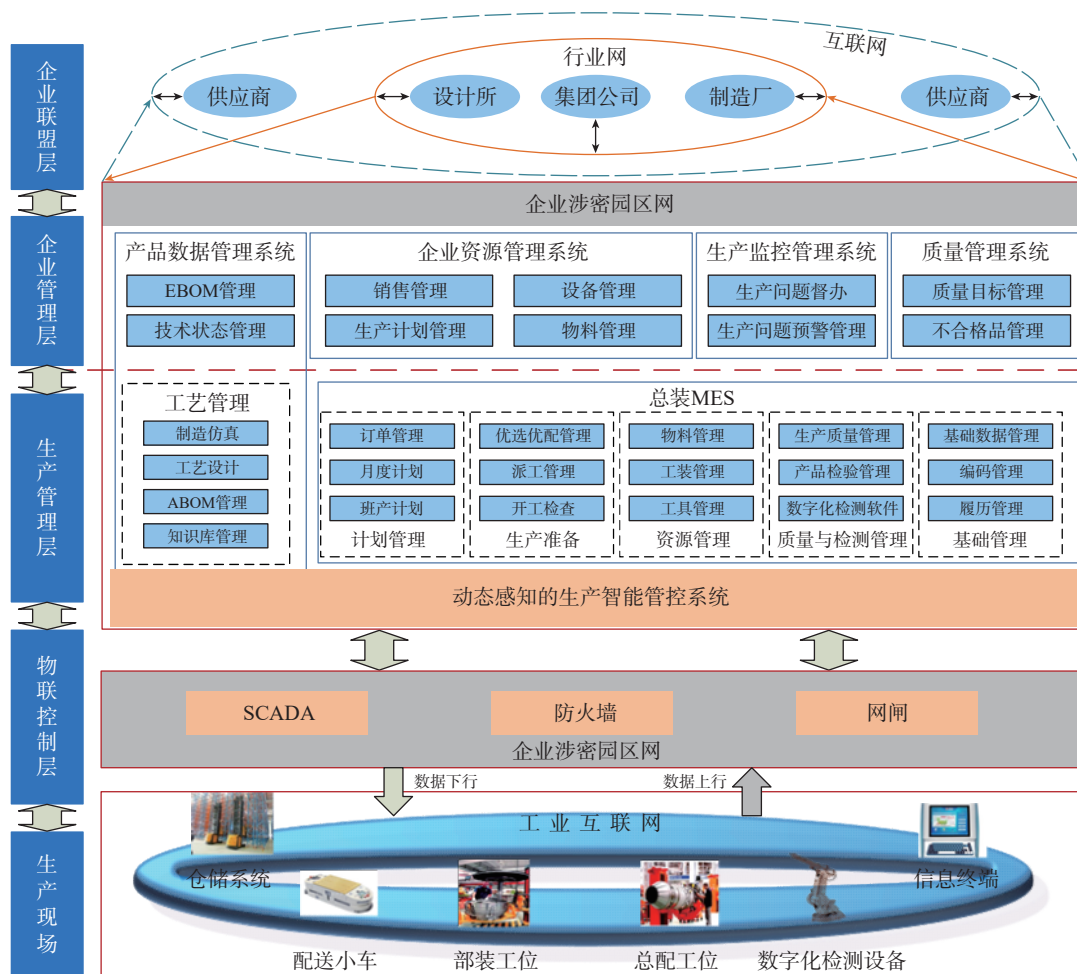


图1 面向智能制造数字化脉动总装生产线应用架构图

Fig.1 Application architecture of digital pulsation assembly line for intelligent manufacturing

(图2)。

(1) 模型驱动的异地厂所协同设计。

基于行业网和厂所 PDM 系统搭建跨地域的数字化协同研制平台,支持工艺人员异地参与产品设计、工程变更等设计环节,实现产品模型从设计到制造、端到端的贯通应用,提高知识转化与重用程度,以及产品装配过程技术问题能够快速向设计所反馈并得到快速处理。

(2) 基于模型驱动和知识工程的数字化工艺设计。

以产品设计 BOM 为基础,根据产品装配工艺路线,将设计 BOM 转化成装配 BOM,作为产品装配工艺数据管理以及装配计划制定的基础,

基于三维工艺设计环境,进行基于模型定义的三维工艺设计,并同步应用装配仿真技术,验证和优化装配工艺,将工艺规范数据在 PDM 上基于装配 BOM 进行结构化数据管理,为后续工艺数据在生产计划制定、指导现场装配以通过获取产品装配实做信息,形成实做台份 BOM 即电子卷宗奠定基础。

(3) 基于数字孪生的总装过程生产线验证与优化分析。

建立总装生产线模型,应用具有融合智能求解方法及离散事件装配过程仿真软件与生产现场的 ERP、总装 MES、PDM、生产智能管控、动态感知的生产智能管控系统等集成,构建数字孪生的仿真环境,重点对多型

号、多状态、变批量、多约束条件下的装配生产线总体布局进行全面仿真验证以及进行实时数据驱动的仿真优化决策机制模拟,为生产线的科学合理布局、生产节拍以及平稳流畅运行奠定基础。

(4) 基于迭代和预测的航空发动机装配工艺知识库和故障知识库建设。

基于 PDM 知识库管理架构,建设结构化的典型工艺库、常用术语库、工艺资源库、故障知识库等,实现对产品装配工艺知识的积累和应用,提升装配工艺设计水平与效率,同步为生产计划管理、数字化检测等业务提供标准的工艺数据,保障跨专业系统数据的顺畅传递。

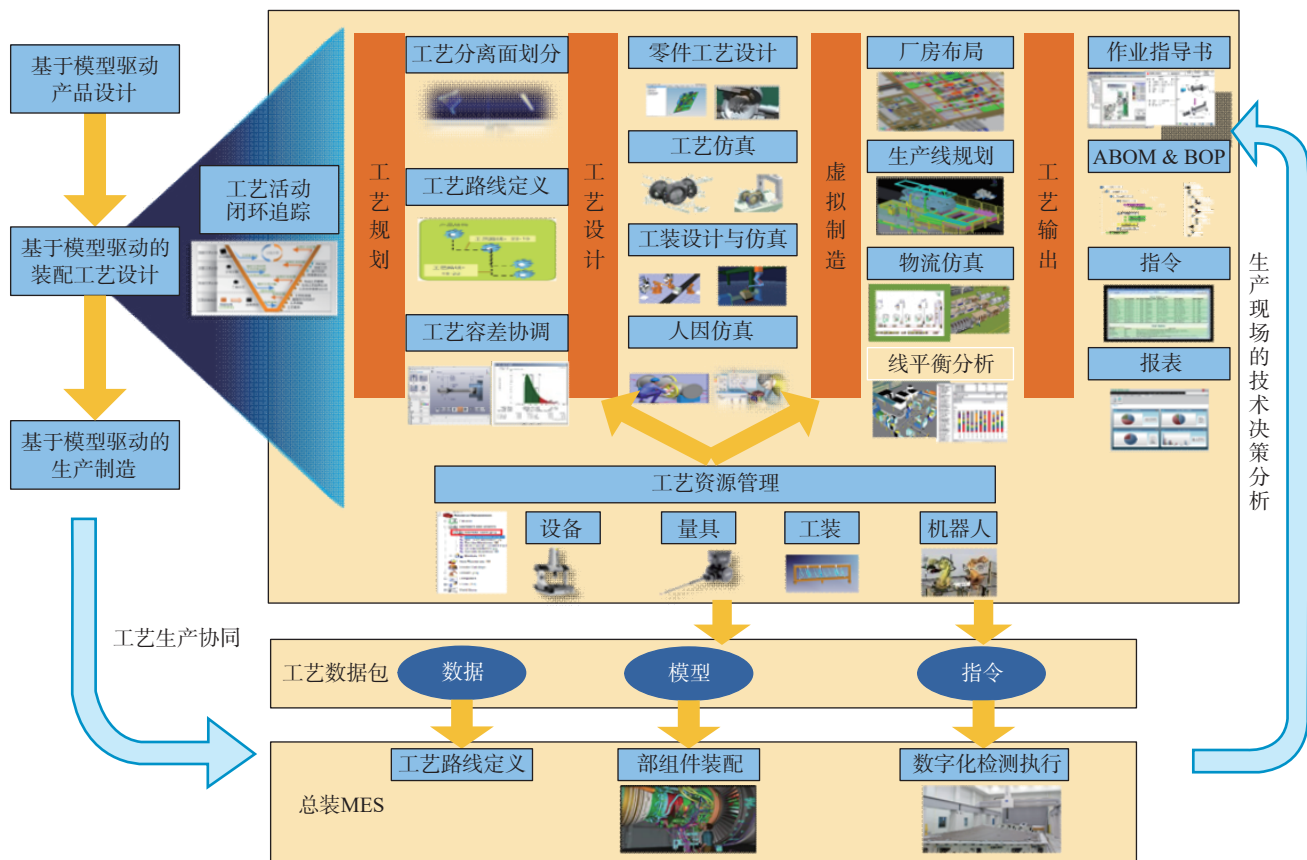


图2 基于模型和知识驱动的数字化工序设计系统框架图  
Fig.2 Frame diagram of model-based and knowledge-driven digital process design system

## 2 多层贯通与推拉结合的计划管理模式

以航空发动机脉动生产线的总装MES作为基础平台,与ERP、供应链管理系统等深度集成以及企业涉密园区网与互联网通过信息摆渡方式集成,实现公司级生产计划和总装车间月计划、班产计划一体化联动和供应商紧密联盟网络环境,实现在总装车间月计划拉动下,外部配套供应商和内部零部件制造单位协同的多层贯通的计划管理模式<sup>[9]</sup>,克服航空发动机总装零部件数量多、物料供应关系复杂、装配过程问题等不利因素,形成多层贯通与推拉结合的计划管理模式(图3),保障准时物料供应,支撑总装脉动思想的实现,主要内容为:

(1) 双向数据驱动紧耦合的总

装生产计划制定。

以航空发动机总装产品的制造BOM为对象,通过ERP与总装生产线MES、零部件生产线MES、供应链管理系统等集成以及制造BOM与装配BOM耦合映射,实现基于物资库存、零部件生产进展、总装装配进展等多源数据驱动的MRP运算,实现企业级航空发动机总装生产计划、物料供应计划、企业内零部件生产月计划与总装生产线月生产计划的紧密关联和信息的可视化与动态共享,实现企业级总装生产计划的科学性、及时性。

(2) 多约束条件及实时感知数据驱动的班产计划智能排产与动态调度。

以总装MES为基础平台,嵌入APS软件、集成动态感知的生产

智能管控系统,将提炼的航空发动机零部件装配顺序约束因素和不同场景定义到APS软件中,确定班产计划排产优化空间与目标,形成基于APS技术的虚实交互班产计划制定与实际运行的协调统一和相互映射,形成多约束条件及实时感知数据驱动的班产计划智能排产与动态调度,提升生产线的快速响应能力和灵活应变能力,保障脉动装配的顺畅运行,实现生产线的高效运行和稳定生产。

在总装生产月度计划、班产计划制定和执行过程中,计划完成情况、存在问题等信息通过动态感知的生产智能管控系统,动态传递到企业生产管理部门和生产线管理者,进行工作进展、存在问题的展示,实现不同层级管理者对总装生产线的可视化

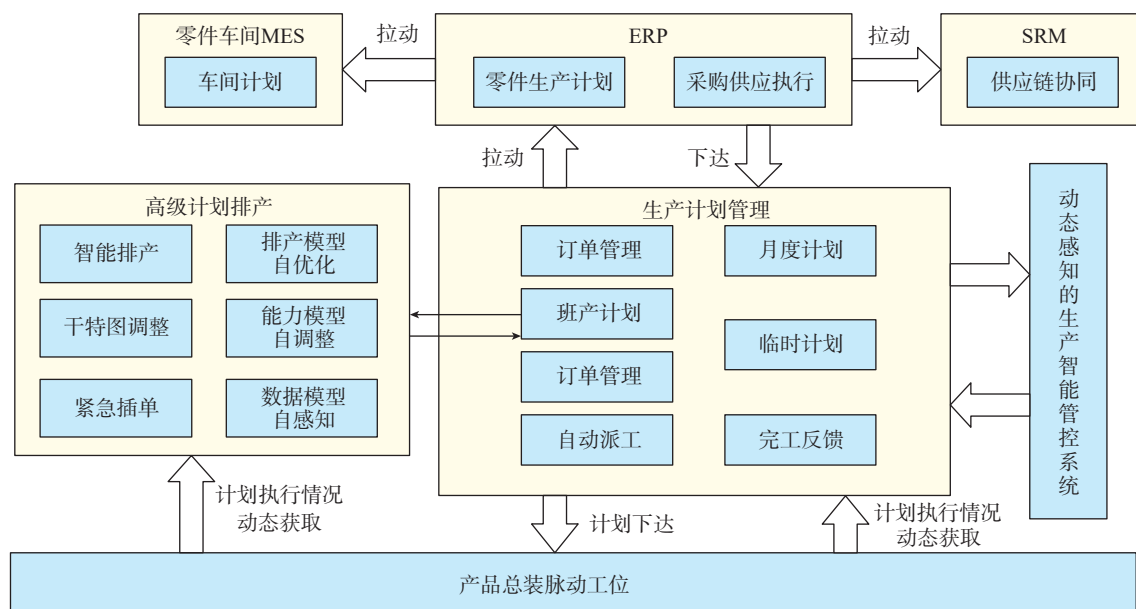


图3 多层贯通与推拉结合的计划管理模式框架图

Fig.3 Frame diagram of the plan management mode of multi-layer connection and push-pull combination

了解和智能决策。

### 3 基于总装实时数据驱动的物料精准供应保障

航空发动机总装涉及零部件多、物料供应关系极其复杂。精准的物料供应保障才能实现航空发动机脉动装配。因此,物料计划管理作为企业级生产计划和总装线生产计划的重要组成部分,其重要作用更为突显。基于ERP和总装MES集成应用,以及与条码系统、生产现场智能立体仓库等系统集成<sup>[10]</sup>,构建具有数字孪生和自动化物流特点的一体化物料管理,强化企业内部及装配过程的物流管理、拉动外部供应商按时交付,形成企业内部零部件制造、企业产品总库、线边库存的透明化管理以及车间物流中转的透明化管理、车间作业的自动化配送,从而实现基于总装实时数据驱动的物料精准供应保障(图4)。

(1) 基于现场驱动的物料月计划管理。

基于ERP和总装MES集成应用以及与生产现场智能立体仓库等系统集成,进行基于工位与工序的颗

粒度的智能化物流配送建设,同时紧密结合虚拟装配的技术应用,使物流配送体系的效率、计划性、准确性、精益性大幅提升,消除原有多次领料、多次往返、停工等料的情况。

(2) 基于条码技术动态感知的物料管理。

综合利用二维码、RFID等条码技术,以条码系统为平台,与SRM、ERP、MES等系统集成,构建围绕计划和物流两个维度,以物料为对象、条码为媒介,从物料采购、上游零组件入厂接收、装配集件、装配、检验等生产环节的物料动态采集,为实现物料精准管控、全生命周期管理、装机产品信息的追溯提供基础。

(3) 配套管理。

基于MES的生产准备管理功能,配套工段根据班产计划准备物料,根据产品装配BOM生产领料清单,如需到企业产品总库领用物料,将领料申请传递到ERP,产品总库物料管理人员依据该申请进行零件出库,ERP系统将物料批次号/序列号等信息传递到总装MES;如需在装配线边库领料,则将领料申

请传递到智能立体仓库系统,智能立体仓库系统将自动进行配送,同时将物料批次号/序列号等信息传递到总装MES。

物料月计划完成情况、配套缺料信息通过动态感知的生产智能管控系统,实时反馈到企业生产管理部门,进行统一协调和处理,保障总装生产按计划开展。

### 4 基于物联感知的总装生产智能管控管理

以互联、洞察、优化为主要目的,建立涵盖生产、质量、技术、资源、问题等紧密耦合动态感知的生产智能管控系统,通过信息系统的互联、信息系统与自动化的设备互联,为各类角色提供生产现场人、机、料、法、环、测全方位实时展示<sup>[11]</sup>,实现自下向上的数据快速准确反馈、自上向下的过程监控和问题追溯(图5)。

(1) 基于现场数据驱动的状态感知。

以生产过程可视化为出发点,以动态感知的生产智能管控系统为平台,通过与总装MES以及生产

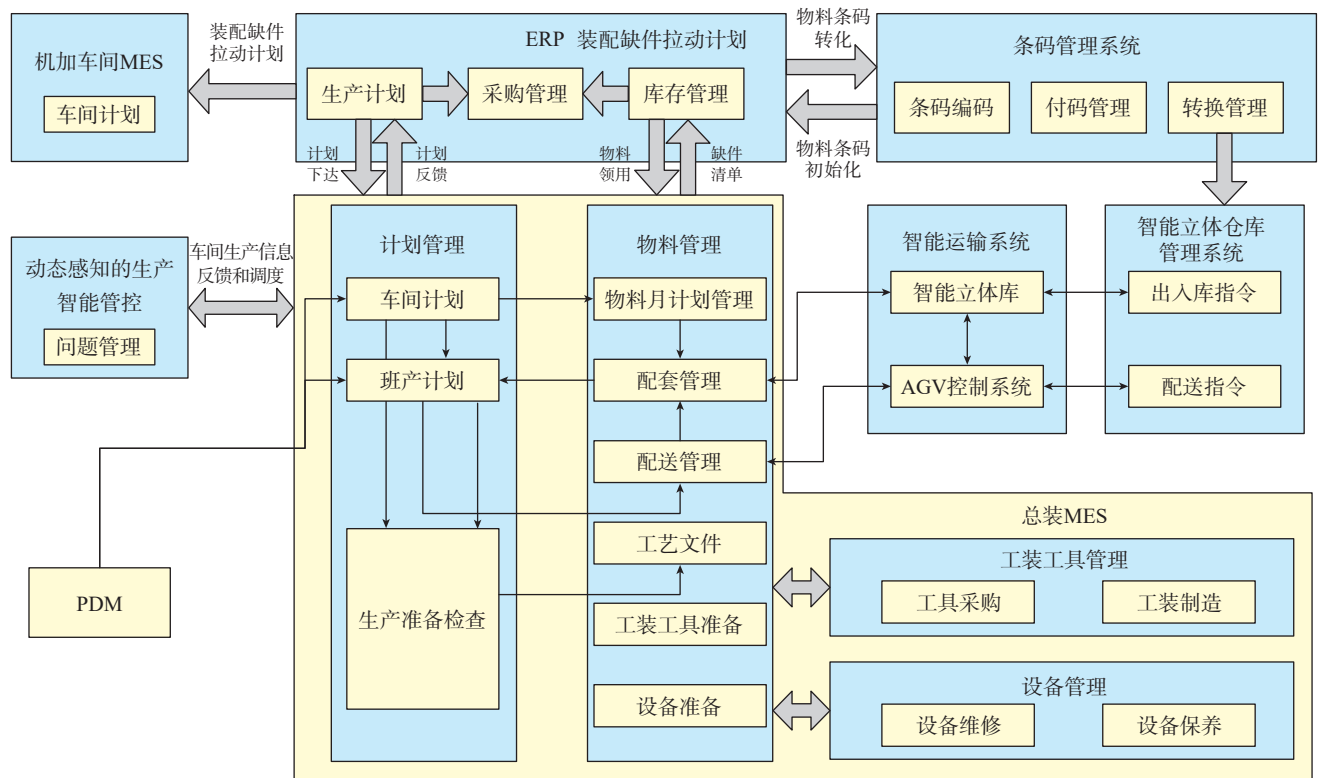


图4 实时数据驱动的材料精准供应保障框架图

Fig.4 Frame diagram of precise material supply guarantee driven by real-time data

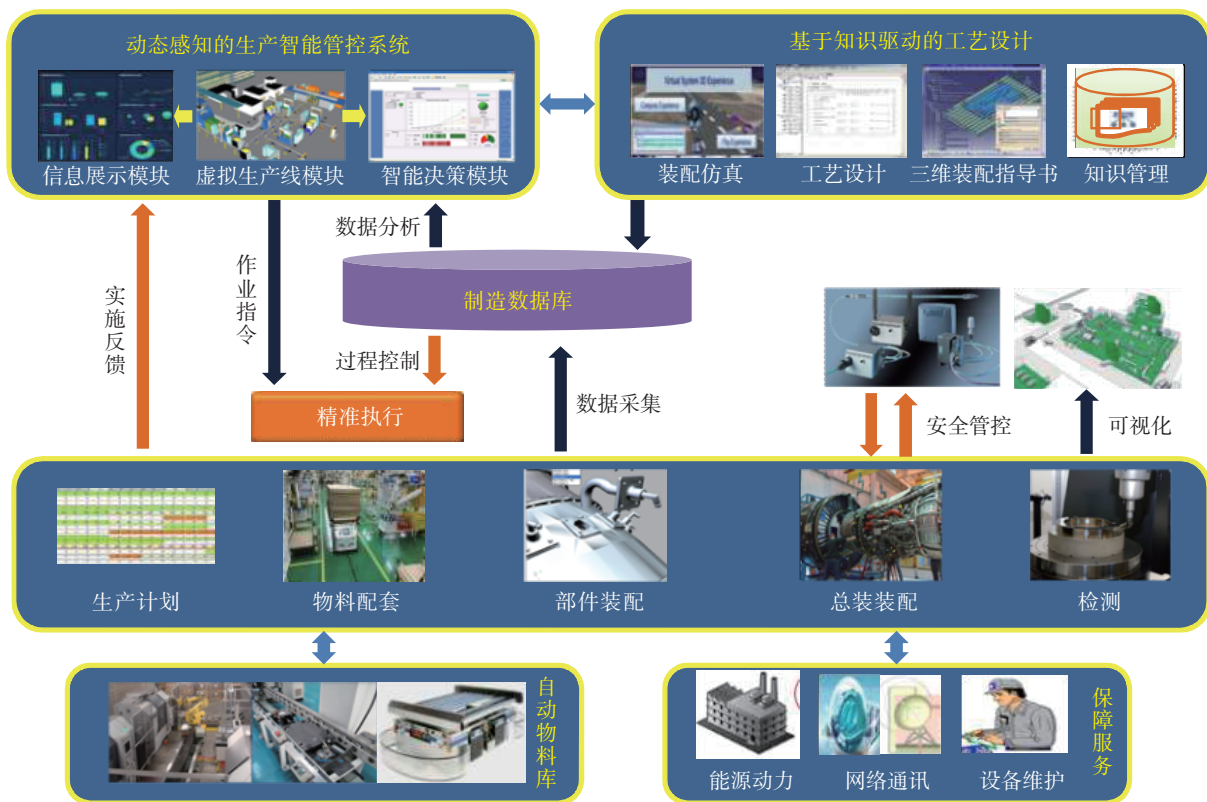


图5 总装脉动生产线智能管控系统架构图

Fig.5 Intelligent control system architecture of final assembly pulsation production line

物联集成系统的集成,实时获取人、机、料、法、环状态,能够从产品、项目、组织、质量、时间、空间等多个维度对生产过程进行展示。

## (2) 生产管理的智能决策。

在实现生产现场可视化管理的基础上,建立计划管理、质量管理、技术管理等主要业务智能预警、分析和决策模型,通过对生产过程大数据的不断分析,对存在的潜在风险能够及时进行预报,并为发生的问题进行决策提供依据。

## 5 高度自动化与智能化脉动总装现场

基于统一的标准总线技术,统一数据格式,通过工业互联网将智能加工设备、工业机器人、智能工装设备、智能仓储与ERP、PDM、MES、数字化检测系统等集成应用,构建高度自动柔性脉动总装生产线(图6)。

## (1) 物联集成管理系统。

基于工业互联网和数据采集与监视控制 SCADA (Supervisory control and data acquisition) 系统、网闸、防火墙等建立物联集成管理系统,将生产线上的各类数控设备、工具工装以及数字化检测工具进行集成,形成 PDM、ERP、MES 等信息系统与生产线物理系统的互联互通,支撑各类信息系统数据的下行以及实现设备运转能耗及故障数据的实时采集。

## (2) 装配工业机器人。

通过工业互联网,将搬运机器人、水平对接装配机器人和高精度质量检测机器人、焊接机器人等工作端与应用系统集成。搬运机器人用于物料在自动化立体仓库以及装配工装上的下料或装配准备,水平对接装配机器人用于航空发动机主体自动化调姿及姿态升降以及单元体自动

化水平对接,高精度质量检测机器人用于装配质量光学检测等,提高航空发动机装配效率和质量。

## (3) 智能仓储与物流系统。

基于 AGV/RGV 系统、码垛机、物流机器人以及立体仓库等建立智能仓储与物流系统,实现仓储优化调度、物料出入库管理、库存管理等,达到物流系统在智能工厂内部的安全、高效、精确运转。

## (4) 数字化检测。

通过数字化检测规划,检测数据自动采集、数字化在线检测与质量评估,基于数字化检测平台实现测量数据的上下游传递及共享、分析、应用,推动传统检测由定性评价向定量分析的变革。

## 结论

当前,我国航空发动机主机生产企业虽然具有一定的数字化技术应

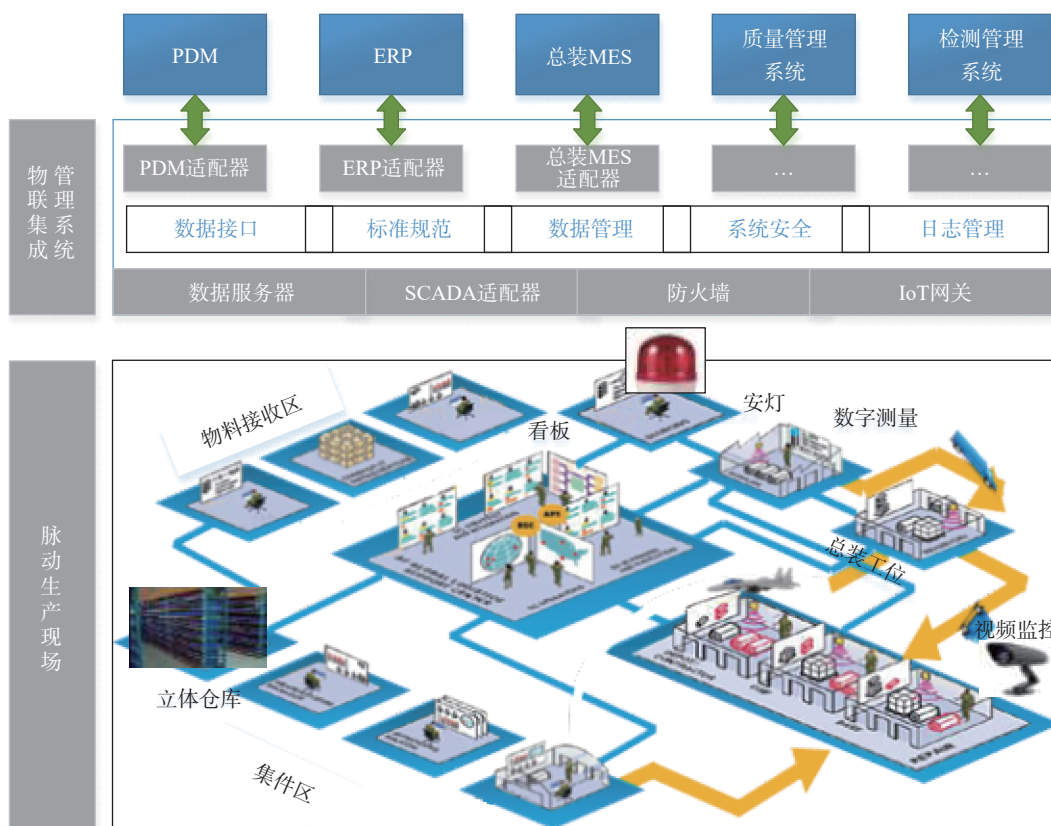


图6 高度自动化脉动装配线示意图

Fig.6 Schematic diagram of highly automated pulsation assembly line

用基础,但尚处于工业化的中后期,要实现从传统的生产方式转变到智能制造模式,需要技术升级换代、管理创新发展,是一个持续迭代的过程。需要抓住国家实施智能制造战略机遇,从技术特点、物料供应短板、管理问题等方面进行深度剖析,开展具有较强前瞻性、系统性、指导性的智能制造建设规划方案,持之以恒开展建设,不断挖掘数据资源,优化业务流程,从而不断迈向智能制造。智能制造没有终点,永远在路上。

### 参 考 文 献

[1] 张渝,李琳,陈津,等.航空发动机重要装配工艺分析及研发展望[J].航空制造技术,2019,62(15):14-21.

ZHANG Yu, LI Lin, CHEN Jin, et al. Analysis of important assembly process of aero-engine and prospect of research and development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 14-21.

[2] 苏巧灵.国内外智能制造的发展及对我国商用航空发动机发展的启示[J].航空制造技术,2017,60(18):55-61.

SU Qiaoling. Development of intelligent manufacturing and its impact on commercial aircraft engine manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(18):

55-61.

[3] 蒋明炜.机械制造业智能工厂规划设计[M].北京:机械工业出版社,2019.

JIANG Mingwei. Mechanical manufacturing intelligent plant planning and design[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.

[4] 周济.智能制造—“中国制造2025”的主攻方向[J].中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.

ZHOU Ji. Intelligent—main direction of "made in China 2025" [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.

[5] 侯志霞,邹方,王湘念,等.关于建设航空智能生产线的思考[J].航空制造技术,2015,58(8):50-52.

HOU Zhixia, ZOU Fang, WANG Xiangnian, et al. Suggestions on aeronautic intelligent production line construction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 50-52.

[6] 杜宝瑞,王勃,赵璐,等.航空智能工厂的基本特征与框架体系[J].航空制造技术,2015,58(8):26-31.

DU Baorui, WANG Bo, ZHAO Lu, et al. Basic characteristics and framework of the intelligent factory in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 26-31.

[7] 单继东,曹增义,王昭阳,等.航空发动机制造企业智能工厂建设[J].航空制造技术,2018,61(16):52-56.

SHAN Jidong, CAO Zengyi, WANG Zhaoyang, et al. Smart factory construction

research of aero-engine manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(16): 52-56.

[8] 唐竟.数字孪生在航空机电产品装配工艺中的应用研究[J].航空制造技术,2019,62(15):22-30.

TANG Jing. Study on application of digital twin in assembly process of aviation electromechanical products[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 22-30.

[9] 陆波.基于面向智能制造的航空发动机协同设计与制造研究[J].电子技术与软件工程,2016(23):174.

LU Bo. Design and manufacture of aeronautical engines based on intelligent manufacturing[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2016(23): 174.

[10] 李伟.面向智能制造的航空发动机企业标准化探究[J].航空标准化与质量,2017(4):6-9.

LI Wei. Research on the standardization of aeroengine enterprises oriented to intelligent manufacturing[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2017(4): 6-9.

[11] 陈明,梁乃明.智能制造之路:数字化工厂[M].北京:机械工业出版社,2015.

CHEN Ming, LIANG Naiming. Smart manufacturing system and practices[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.

通讯作者:单继东,高级工程师,主要从事制造业信息化技术研究与应用工作, E-mail: shanjidong999@qq.com。

## Research on Construction of Aero-Engine Digital Final Assembly Line Oriented to Intelligent Manufacturing

HUANG Jiang, YANG Hai, SHI Xiaoqiang, SHAN Jidong, ZHANG Jing, HAO Feng  
(AECC Xi'an Aero-Engine Ltd., Xi'an 710021, China)

**[ABSTRACT]** Based on the characteristics of aero-engine final assembly business, this paper puts forward the application architecture of aero-engine digital final assembly line oriented to intelligent manufacturing by analyzing the information development trend and construction demand, and expounds the main construction content and technical realization route. It provides an important reference for the construction of digital production lines for intelligent manufacturing products in China's aero-engine manufacturing enterprises and equipment manufacturing industry.

**Keywords:** Aero-engine; Pulsation production line; Intelligent manufacturing; Information; Digital production line

(责编 李丹)