

航空发动机智能生产线架构与集成应用技术

Framework and Integration Technology for Aero Engine Intelligent Product Line

曹志涛 朱宇 阚鑫禹 魏钱铎/中国航发研究院

作为企业核心竞争力的基础要素和生产活动执行的实体，生产线承载了物流、信息流和价值流的流通与汇聚。经过有效的组织和集成，将传统生产线与大数据、机器学习等智能化手段相结合，来构建智能生产线是达成航空发动机智能制造的基本条件。

航空发动机智能生产线的意义及功能要求

自18世纪中叶以来，人类历史经历了三次工业革命的转型升级。如果把单台机械设备看作最简单的生产线的话，每一次工业革命都是以生产线升级换代为动力完成的，如图1所示。

美国辛辛那提大学李杰教授对前三次工业革命的发展过程进行总结得出，每一次工业革命的根本原因在于原有技术体系下的生产要素已经无法满足生产力发展的需求，而新的使能技术的诞生会帮助人们突破限制生产力发展的瓶颈。用同样的思维考虑第四次工业革命，李杰教授认为，当前遇到的新瓶颈是，人的知识产生和利用效率已经不能满足生产系统的要求，依靠人的知识和经验去驱动生产系统已经达到了生产力的边界，难以使其以最优的效率运行和协同^[1]。能满足智能制造时代生产线要求的使能技术，应部分或完全替代人的分析决策工作。

航空发动机零部件制造及装配具有多品种、小批量、高质量等离

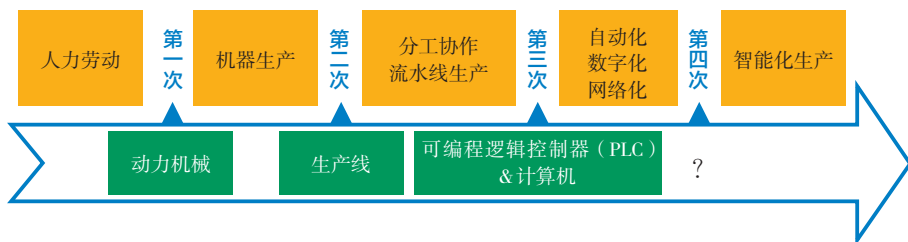


图1 历次工业革命中生产要素变化（橙色：生产要素及形式；绿色：使能工具）

散式特点，经验、知识等智力生产要素在制造水平提升方面的作用非常巨大。因为历史的原因，我国航空发动机设计制造水平与发达国家有一定的差距，急需抓住新的战略机遇期完成追赶。工业4.0阶段主要是克服知识的产生和利用效率问题，通过关键数据的大量收集和大数据分析算法，可以快速地从信息中获取知识，从而达到提高航空发动机研发水平的目的。所以说，智能制造是我国航空发动机制造业落实创新驱动发展、实现工业转型升级和跨越式发展的关键机遇。在全面转向工业4.0阶段的时代大背景下，开展适用于航空发动机智能制造生产线构建的探讨，对于帮助国内各航空发动机制造企业的产业升级有重

要的实践参考意义。周济院士将智能制造分为数字化制造、智能制造1.0和智能制造2.0等3个不同范式的制造系统发展阶段。其中，智能制造1.0是在全面数字化的基础上实现网络互联和系统集成^[2]。也就是说，实现生产线智能化的基础是自动化、数字化和网络化。人的智能特征主要表现在感觉、记忆、思维、行为和语言5个层面的循环迭代过程，智能生产线要辅助甚至取代人的智慧决策职能，需要有能力帮助整个生产系统完成感知、存储、分析、决策及通信等相应的功能，达成自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等要求。

GE公司制造工厂以超级材料、高端设备、先进工艺、高度自动化



图2 GE公司(左上)、普惠公司(左下)和罗罗公司(右)的航空发动机及燃气轮机智能生产线

为基础，通过工业互联网将工业生产和服务要素进行横向和纵向集成，以实现高效的人与机器效率的优化和对市场需求的高度自适应；罗罗公司围绕智能制造制定了分阶段发展战略，计划把位于生产车间的数字化设备或者资产与更广泛的、更大范围内的制造系统相连，将物联网、云计算、数据分析等应用到发动机制造上；普惠公司于2012年就实施了智能制造单元战略，对制造工厂进行大规模升级，2014年在智能制造单元的基础上斥资2.75亿美元建立了3条下一代发动机关键零部

件的智能生产线，以设备互联和实时交互的手段来实现提升价值链的目标。典型的先进发动机制造企业智能生产线如图2所示。

航空发动机智能生产线架构

综合考虑从感知到决策等功能的实现需求，根据航空发动机典型产品离散化制造特点总结出的智能生产线架构如图3所示。智能装备模块和仓储物流模块构成智能生产线的自动化和数字化硬件基础，智能装备中的先进制造技术体现了航空发动机制造企业自身工艺技术水平，是

智能制造中生成知识的根本来源。先进传感技术和自动控制技术，由装备供应商或企业自身按照航空发动机制造企业的知识储备和工艺经验，有目的地进行集成开发；仓储物流模块针对原材料、加工设备和工装工具等制造资源的数字化和配置，按照生产线实时要求保证资源的准确供给。智能装备模块和仓储物流模块配备有传感器、二维码和射频识别装置，传感器和识别装置所采集的设备监控、制造检测和物料信息数据按照一定的安全通信协议收集起来，与虚拟仿真数据一起，经工业数据总线交由生产管控模块进行分析处理，显示实时生产状态并生成决策，并由工业数据总线传输到各个执行端迭代循环。生产线网络是双向数据集成传输模块的支撑，分为总控系统网络和执行系统子网络，分别对接生产管控模块和各功能硬件子模块。智能生产线的智能性主要取决于上述软硬件模块，但真正的智能特征体现在系列智能使能技术对人员分析和决策过程的支撑，智能使能技术将人从繁重的数据分析计算工作中解放出来，以超高效率和准确性为人类决策提供依据（甚至直接决策），将从数据中提炼形成的经验知识应用到生产线中，重新收集分析数据并不断获取新的知识，这样才能实现真正的智能制造，显然，缺少智能使能技术的支持，人的能力无法实现如此快速的循环迭代过程。

智能生产线集成应用技术

从总体智能的角度来看，从制造全过程获取数据并实现数据的共享和分析，形成决策并持续优化工艺技

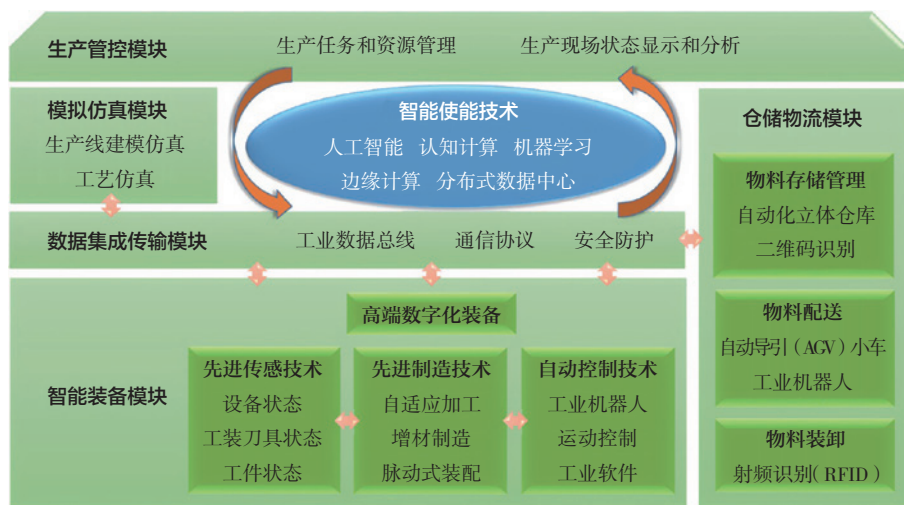


图3 智能生产线架构

术和流程，促进人员的经验积累是智能生产线集成的直接目的。围绕航空发动机生产线加工精准执行、生产过程动态排产及智能调度等迫切需求，生产线集成应用要逐渐实现制造全过程工艺仿真优化、数字化控制、网络化联通、状态实时监测和精确化执行，主要涉及以下几方面的技术研究。

数字化虚拟环境与仿真

航空发动机产品批量较小且种类多样，单个零件加工工序数量和种类都较多，且存在多型号混线生产情况，实际生产过程中会出现很多问题且较难解决^[3]。通过虚拟仿真技术建立大量设备模型，可以快速实现智能生产线布局设计，在虚拟环境快速模拟生产线布局及生产线上的工艺流程、制造过程、物流过程、人因工程，达到生产线综合性能最优化。在虚拟空间实现各生产要素的集成和优化，将生产过程中的冲突与失误暴露在仿真验证阶段，最大程度解决生产线工艺布局不合理带来的物流浪费、任务负荷不合理等问题。

制造生产线的流畅运行必须建立在每个生产节点正常工作的基础上，智能生产线获取零件数字化模型后，应用数字化三维工艺设计与仿真技术完成现有资源状态下的工艺规划、工艺设计和工装设计，预先分析、评估产品制造过程的工艺性，降低物理验证成本^[4]。

先进制造工艺

企业核心的先进制造工艺是智能装备的基础，依据工艺知识进行有目的的先进工艺技术集成是数字化装备升级建设的最合理途径。集成代表制造企业核心能力的先进制

造工艺技术和流程，配以信息化和智能化技术集成来实现核心工艺过程的自动化、数字化和智能化是智能升级的必修课。另外，数字化编程技术是实现先进工艺技术和发挥高端数字装备潜力的重要辅助技术。开展关键零部件基于模型特征的自动识别和自动化编程技术，实现工艺参数自动加载和刀具的自动选取调用，是实现生产线智能化集成的重要技术环节。

先进传感技术

先进传感技术是数字化装备升级的必备技术之一，是生产现场实时数据的直接来源。智能生产线对数据的需求依赖先进的传感技术来实时获取，最终实现从定性定量相结合的检测到全定量检测、从模拟检测到数字化检测的转换。首先，零件形貌尺寸的检测在传统制造过程中就是关键的检验工序，用以表征复杂零件的加工能否满足设计图样要求。传统生产线允许不同工序间的装夹以保证核心参数的必要检测，但是在智能生产线中，对流程的自动化要求迫使必要的检验环节在线实时化；其次，贯穿设计、工艺、制造、检测的唯一零件数据源要求在加工过程中的全尺寸符合性，集成在智能装备上的在线传感装置获取的零件状态与三维数据源的反复比对反馈是智能生产线自决策和自执行的依据。基于以上情况分析，针对相应典型零件开发适用的先进传感技术是智能生产线集成的必须技术之一。

自动化控制技术

自动化是智能化的基础，所以要达成传统装备向智能装备的升级，通过自动化控制技术完成软硬件的

集成运行是必不可少的。实现自动化的基础包括自动化设备、工业机器人、工业芯片等设备器件，还有与硬件配套的运动控制逻辑、可编程逻辑控制器（PLC）程序以及外化的嵌入式软件或工业软件。各种工业软件被植入生产设备的嵌入式系统中，按照预先设定的逻辑算法控制相关硬件完成受控动作，通过电子看板显示生产线实时的生产状态，达到自动化控制、监测、管理各种设备和系统运行的目的。

自动识别技术

物物互通以及人物互通是智能制造的基本特征，也是完成智能生产线集成的重要方面。航空发动机智能生产线的建设包括各种设备、工装、物料、产品甚至人员的集成，其中工装、物料、产品和人员的频繁流动，要求智能生产线具备精确识别各种生产资料的能力^[5]，这既是达到数字化生产的要求，也是航空发动机行业保密和安全生产的要求。对工装物料等生产资料的自动识别技术一般包括射频识别和二维码识别技术，还包括在检测过程中使用的机器视觉等技术；对人员的自动识别技术一般包括虹膜、指纹、声音和面部识别等生物识别技术。

仓储物流技术

在生产线层级范围内，仓储物流涉及物料存储及管理、物料传送和物料装卸等方面的技术，执行系统在自动识别技术的辅助下完成相应的物料运送任务。物料存储设备一般为自动化立体仓库，配有二维码打标识别技术，能根据生产线要求管理并准确提供所需物料；物料传送通常采用工业机器人及其控制系统来执行，配合自动导引（AGV）小车及传送带等自动

化设备完成零件物料的搬运和装卸，实现物料在智能生产线的有序流动；装卸单元需要具备物料信息读取和传输功能，一般采用射频识别（RFID）技术识别刀具及工装夹具信息。

数据集成传输技术

数据集成传输技术是实现设备及系统互联互通，支撑装备、软件、测量仪器等各种指令及数据传递的通道，是集成各要素形成有机整体的纽带，涉及接口层、互联层和传输层相关技术。

面对庞大的数据量和数据类型，单一要求数据集成传输网络的兼容性是远远不够的，如何梳理和表达不同来源的数据类型，考虑在不丢失数据价值的前提下完成数据的集成与传输才是建设企业网络的最终目的。数据集成与传输网络要解决企业内信息集成中实现异构数据整合与实时分析的问题，需要涉及工业数据总线和通信协议等技术。

网络安全技术

互联互通是智能生产线的特征之一，面临比传统生产线更严重的网络安全问题^[6]，所以航空发动机设计制造必须在符合国家安全保密要求的前提下完成。搭建数据集成传输网络过程中，除了关注功能性和稳定性，还要增加对安全性的考虑，充分分析操作系统漏洞、工业控制系统漏洞和网络漏洞，在开放服务中谨防外部网络渗透，注重各种账号和用户口令的保护，控制移动介质的接入流程，严格审查PLC程序和工业通信协议中的缺陷，杜绝恶意程序病毒的入侵。

智能使能技术

在先进制造技术与信息化技术深度融合的过程中，智能使能技术将起

到提高设备系统分析决策能力的关键作用。随着人工智能、认知计算以及机器学习技术的发展，系统具备了解读、分析或学习互联设备所收集数据的能力，在计算、存储与带宽成本大幅下降的背景下，信息处理能力瓶颈将不复存在，边缘计算和分布式数据中心技术甚至可实现生产线实时数据分析。通过智能使能技术不断挖掘潜在数据和过程中的大量知识财富，辅助进行最终决策，使生产线真正实现智能化。

结束语

因为航空发动机零部件的复杂多样和高质量要求，其制造工艺在自动化实现层面面临诸多困难，而且由于各国对航空发动机材料、设计、制造和测试等技术的严密封锁，智能生产线的搭建没有现成的经验可借鉴。对航空发动机而言，不是每个零件都要实现智能化生产，不同工艺的智能化潜力各不相同。要理性分析企业现状，以核心关键重要件为对象，深挖企业工艺技术能力，首先实现其部分制造工艺的自动化和数字化，不断优化和集成扩展，从小处着手并迅速释放其经济和经验价值，同时尽量将积累的经验知识以设备、工具、传感器和数据模型的形式集成到生产装备/生产单元上。

在策划设备、传感器与工艺经验的集成过程中，要充分考虑数据的兼容性和扩展性。在完成部分生产线改造并充分挖掘其价值后，要将局部自动化和数字化的成功经验不断推广，持续改进制造流程来实现更大范围生产资料的互联，显著提高整个生产线的效能和数字化程度。

数字化生产线建立的意义在于提供生产过程中深层次价值挖掘的可能性。企业在数字化建设阶段需要做的主要工作是决定积累哪些数据，依靠专家经验来选择数据源和合适的数据模型作为生产线迭代优化的起点，然后依靠网络化和智能使能技术将循环迭代的过程固化为生产线的运行流程，不断增强系统在分析决策过程中的占比，逐渐完成数字化生产线到智能生产线的进化。

中国的航空发动机事业正处于最好的发展时代，为提升产品生产质量并满足交付任务，各企业开展了众多以智能为目标的生产线集成升级，走出了智能制造最困难的第一步。随着经验的丰富和新集成应用技术的不断涌现与融入，我国航空发动机智能生产线一定会日渐成熟。

航空动力

（曹志涛，中国航发研究院，工程师，主要从事设计制造协同研究工作）

参考文献：

- [1] 李杰. CPS: 新一代工业智能[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
- [2] 周济. 智能制造: "中国制造2025" 的主要方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17).
- [3] 侯志霞. 关于建设航空智能生产线的思考[J]. 航空制造技术, 2015(8).
- [4] 单继东. 航空发动机智能制造生产线构建技术研究[J]. 航空制造技术, 2016(16).
- [5] 黄培. 对智能制造内涵与十大关键技术的系统思考[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(5).
- [6] Burke R, Mussomeli A, Laaper S. The Smart Factory: Responsive, Adaptive, Connected Manufacturing[R]. Deloitte University Press, 2018.