航空发动机制造企业智能工厂建设

单继东，曹增义，王昭阳
（中国航发西安航空发动机有限公司，西安 710021）

[摘要] 为加快航空发动机制造企业智能制造技术应用步伐，满足新一代航空发动机研制需要，结合航空发动机制造企业业务特点，基于体系结构设计方法，对企业智能制造需求进行系统分析，提出了航空发动机制造企业智能工厂信息化应用架构，阐述了主要建设内容、实现方法，并简述了智能工厂建设尚需攻克的关键技术及解决建议，供航空发动机制造企业以及装备制造业智能工厂建设借鉴。

关键词：信息化；数字化企业；工业 4.0；智能制造生产线；信息化应用架构
DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.070

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。近年来，负责企业承担的国防基础科研、总装预研以及型号攻关等项目具体实施工作，研究前沿数字化制造、管理技术在企业应用中的架构。

当前，信息技术领域不断开拓创新，以人工智能、大数据、物联网、云计算等为代表的先进信息技术不断实现工程化应用，正成为技术革新、产业变革、经济增长的重要推手，也孕育着以智能为特征的新一轮工业革命。世界各国纷纷推出了传统的信息技术与自动化技术、人工智能技术、互联网技术深度融合应用以及提升工程化水平的战略举措，如我国的“互联网 +”行动计划、“中国制造 2025”等一系列国家战略，德国的工业 4.0、美国的再工业化等 [1]。

航空发动机作为体现国家综合实力、军事威慑能力和国际影响力的战略性高科技产业，是衡量国家工业基础、科技领先水平、综合国力以及国防现代化程度的重要标志。以 GE、罗罗、普惠为代表的先进航空发动机制造企业先后制定了智能制造战略规划；我国的《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》、《中国制造 2025》等都明确将航空发动机列为高端装备进行重点发展，更是将“航空发动机及燃气轮机重大科技专项”列为国家“十三五”百个专项的首列。

在国家大力推进航空发动机自主研制的大趋势下，我国航空发动机制造企业也力图借助智能制造，实现创新驱动发展和升级发展，推动航空发动机的自主创新和正向研制，逐步向打造国际一流的航空发动机企业迈进。

面向智能工厂的航空发动机制造企业信息化变革分析

1 我国航空发动机制造企业信息化应用现状

我国航空发动机制造企业十分重视信息技术的研究及其在型号研制中的应用。“九五”以来，我国航空发动机制造企业信息技术应用经历了“甩图板”、单点应用系统建设、企业级信息平台建设 3 个阶段，信息化基础条件和应用能力取得了长足的发展，有力保障了航空发动机重点型号研制任务顺利完成，促进了企业技术创新和管理变革。主要体现在

以下 4 个方面：

（1）深入应用先进的数字化技术，全面提升重点型号研制能力。

我国航空发动机制造企业，在重点型号研制中紧跟国外航空发动机研制模式和理念、学习先进的数字化技术在新型号研制中的应用经验。构建了跨厂所异地协同研发平台，初步实现基于模型数据厂所协同研制；锻造、铸造、机加、装配等工艺仿真技术基本实现普及应用，显著提高了工艺设计质量、减少了产品物理试验次数；建立了基于 PDM 的数字化工艺设计平台以及典型工艺、工艺资源、工装设计资源等数据库，使我国航空发动机重点型号研制能力有很大提高，研制周期显著缩短、研制质量明显提升。

（2）全面开展 ERP 应用，实现单向应用向集成化、一体化应用跨越。

随着型号研制任务的日益繁重，我国航空发动机制造企业陆续引入 ERP 来提升企业的综合管控水平。在生产计划的管控、物资库存管理、财务数据管理等方面已经体现出了 ERP 的理念和价值，消除了原来生产、采购、财务、工艺等业务之间的信息孤岛，初步实现了物流、资金流、信息流的统一，将企业的业务管理水平明显提升了一个台阶。

（3）基本建立覆盖各业务的信息化应用基础网络。

目前，各航空发动机制造企业已经建立了较为完整的企业网络，确保了各信息系统的平稳运行。部分企业开始将数控设备、机器人、数字化采集设备等单独组网，探索符合国家保密要求的工业互联网建设，期望加速智能工厂建设步伐。

（4）探索智能制造技术在企业中应用。

目前，我国航空发动机制造企业都比较重视智能制造技术的应用，均成立了设计、工艺、信息化等多专业联合团队，开展智能制造技术应用研究。中国航发西航将数字化工装设计制造技术、非接触在线检测技术、自适应加工技术、生产过程自动管控等技术相互融合，建成了国内领先的精锻叶片数字化加工生产线，实现精锻叶片加工技术水平显著提升，通过少人干预、SPC 预警、智能补偿、生产线实时监控，产品合格率达到 98% 以上。其他制造企业已开展智能制造单元试点建设。

2 我国航空发动机制造企业对智能制造技术的迫切需求

目前，我国航空发动机制造企业仍采用“重节点、轻过程”的粗放式生产组织模式和以人工管控为主的运行管控手段，无法从根本上解决行业内产能优化、产业链协同的问题，严重制约了行业的研制生产能力，无法满足快速响应、高质量交付的客户需求。

（1）智能制造改变型号研制模式。

我国航空发动机制造企业总体上处于“工业 2.X”阶段，部分生产线达到了“工业 3. 0”阶段，距离智能制造的目标尚有较大差距。通过智能制造推进，将先进的制造工艺、制造装备和先进的管理方法，同先进的信息化技术相结合；通过人、机、物之间的信息数据传递与互联，将数控加工设备、数字化应用系统及信息化网络环境互联互通，构建具备加工状态感知、生产运行过程控制、实时分析、自适应制造等智能制造数字化支撑环境，改变型号研制模式，达到加速新产品研制、尽快形成批产能力、缩短交货期、提高产品质量、降低生产成本的目的，提升发动机的快速响应制造能力和型号的保障与交付能力。

（2）智能制造提升生产线能力。

航空发动机产品具有种类多、单个类型数量少、结构复杂、设计和制造周期长、生产组织协调难度大的特点。目前，航空发动机行业的生产线基本上都是早期建立，产品适应性差，无法满足种类多、数量少、结构复杂、交付周期短的航空发动机零部件生产需求。且通过 PDM、ERP、MES 单个信息系统实现了工程数据、生产数据、物料数据、现场数据的管理，尚未实现各系统的数据、业务集成，无法实现针对航空发动机生产线复杂状态、多专业混合制造模式的技术状态控制。需结合智能制造提高生产线柔性、快速响应能力，实现生产计划、过程管理信息集成和有效运行，对企业资源、物料需求的统一规划及生产即时控制。

（3）智能制造助力企业转型发展。

中国航空发动机集团针对我国航空发动机厂所提出了两级化管理，形成“小核心大协作”的研制模式。通过智能制造推进，改变航空发动机研制的模式，作为协同的参与者，厂所需要借助信息化技术，改进和完善内部的管理。在行业内部打破厂所隔离，合理配置资源，按照协同的机制，组织航空发动机研制生产流程，促进航空发动机厂所对型号研制全价值链进行有效管控，缩短发动机研制周期、减少研制成本、全面提高产品质量、大幅提高研发效率，增强发动机核心竞争能力，助力“小核心大协作”的模式实现，推动航空发动机企业转型升级和跨越发展，满足发动机自主创新、自主研发、自主发展的业务需求。

3 面向智能工厂企业信息化建设存在的不足

信息化是实现智能制造的关键。虽然我国航空发动机制造企业通过多年的不懈努力，企业信息化应用取得了一定应用成效，但大部分企业的信息化基础设施还较弱，其整体水平无法有效支撑智能制造。智能制造在企业应用中还处于起步探索阶段，面向智能工厂建设的企业信息化还存在以下不足：

（1）信息化战略布局还未向智能工厂方向转变。

目前，我国航空发动机制造企业信息化建设，基本基于传统的企业信息化中长期规划开展信息化应用，其中智能制造技术仅是作为探索在企业尝试应用。企业信息化总体布局还未面向智能制造、企业大数据、企业私有云等方面进行系统的谋篇布局，导致智能制造发展的引领方向不强，无法有效支撑面向未来智能工厂建设。

（2）现有信息化应用架构与智能工厂要求差距较大。

一是设计过程缺乏高效的知识工程保障能力，仿真能力弱、数据积累不足。面向制造的设计能力较弱，设计和制造部门的工作协同无法做到全面、及时，设计制造符合性差。二是支撑航空发动机智能制造所需的设计制造共性技术基础和关键工艺能力严重不足，航空发动机研制业务与自动化、工业互联网技术结合不够，数字化制造发展水平不均衡，现有软硬件资源配套投入与实际应用效果存在反差，与设计尚未实现三维模型的贯通。三是航空发动机研制过程的自动化控制、数字化加工水平低，相配套的自动化辅助工艺装备严重不足，尚未形成相对系统的自动化生产能力，难以保证型号制造过程的稳定性和持续优化，缺乏对生产线物料、设备、产品质量等生产工况的实时采集与监控，难以为生产决策提供及时、准确、有效的数据支撑。

航空发动机数字化工程以单点应用为主，缺乏端到端的业务流程管理理念和优化机制，业务活动以相对单一的“管”与“控”为主要体现，而非正向的、基于系统工程的、基于流程驱动的、具备数据支撑的业务模式，综合管控体系能力有待提高。

（3）自动化、智能化设备应用较少。

航空发动机制造企业制造装备普遍存在数控设备种类繁杂，结构差异大，新旧差异大；工艺工装设计思路智能化的因素缺乏；在线自动化的检测设备、机器人应用更是寥寥无几，这种现状距离构建数字化、智能化生产线还存在较大差距。

4 基于智能工厂的航空发动机制造企业信息化应用变化分析

智能制造始于 20 世纪 80 年代人工智能在制造业领域应用，21 世纪基于信息技术的智能制造逐步成熟，其内涵是将智能技术、网络技术和制造技术等应用于产品研发和服务的全过程，并通过产品制造过程分析、推理、感知等，满足产品的变化、市场需求等。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，智能制造不仅是简单的技术突破，更是对传统产品、产品研发、生产组织模式等改造和变革，须将信息化与工业化深度融合、创新集成。

围绕智能制造，罗罗公司制定了分阶段发展战略。第 1 阶段，把数字化工厂与数字化设计机构相连接，实现深度的设计制造协同；第 2 阶段，将各种供应商连接在一起，使数据化贯穿完整的价值链。罗罗公司通过建立专业化设计系统、发展 CFD 仿真分析、建立发动机典型零件的自动化生产线等措施，建立了在线协同工作环境，从整体上增强了其航空发动机产品的发展能力；2013 年 11 月，普惠公司宣布未来 5 年的投资计划，共计 2.75 亿美金，在公司总部建立了世界级智能制造卓越中心，通过开发和建设智能生产线，对工厂进行大规模升级。普惠公司的智能制造卓越中心具备自动化、数字化闭环流程控制和高精密机械加工技术等[2]。围绕航空发动机制造技术，普惠公司提出了企业产品生命周期管理战略，将产品研制全过程进行集成，突破仿真、集成、优化等关键技术，最终实现智能数字企业的目标。

基于智能制造的内涵以及国外先进航空发动机制造企业的实践，企业传统信息化应用与智能工厂建设比较，变化如表 1 所示。

基于智能工厂的航空发动机制造企业信息化应用架构

面对我国航空发动机制造企业对智能制造技术应用的迫切需求，打造智能工厂旨在提高生产线柔性、快速响应能力及制造能力，适应航空发动机多品种、小批量生产模式带来的定制需求挑战，提高航空发动机产品研制质量和效率。因此，航空发动机制造企业信息化应总体布局，应按照“企业管理决策智慧化、产品研发协同化、生产管理均衡化、制造过程自动化、制造装备集成化、状态控制实时化、数据资源资产化”的思路[3]，形成具备智能制造系统构建及产品研制全过程智能管控能力，提升航空发动机自主研发和生产制造水平，其架构如图 1 所示。

1 企业运营层

1.1 基于PDM构建异地多厂所横向互联的信息化平台

以数字化工厂为目标、以全面深度互联为基础、以端到端信息数据流为核心驱动，通过企业工业互联网驱动行业产品生产配套新模式，建立厂际、厂内业务协同机制，促进航空发动机制造产业链整体集成[4]，保证行业整体制造水平的全面提升。

（1）制造厂内协同模式：通过 PDM、ERP、MES、生产线控制总线等系统与工业互联网技术的集成应用，推进基于 BOM 单一数据源的产品设计数据、工艺数据、生产计划、采购计划、财务数据的关联共享机制[5]；通过对生产计划、物流数据进行采集、跟踪和分析，实时掌握物料状态信息，实现航空发动机制造过程中物流与生产计划需求的自动协同与匹配，达到物流与制造的均衡化、同步化，形成工艺设计、物流供应、制造和

服务等环节业务的并行组织和协同优化模式。

（2）制造厂际协同模式：通过企业工业互联网建立主承制厂与配套厂、外协厂的信息数据交互，形成企业间生产计划、订单需求、库存数据的协同共享，消减企业间产品配套信息的不对称，解决库存积压和流动资金周转的瓶颈问题，通过产品全制造周期流程的数字化以及基于信息通信技术的系统集成，形成高度灵活、敏捷化、柔性化、数字化的产品与服

表1　航空发动机信息技术应用分析

信息技术	传统信息化	智能工厂
信息化应用技术架构	（1）推进数字化和信息化技术应用为重点；（2）基于业务架构提出逻辑相对清晰的信息化应用技术架构，但不能进行整体仿真；（3）ERP、PDM、MES是该架构核心应用；（4）信息化与工业化实现初步融合，但对推动工业化发展不是十分显著	（1）具有全局性和系统性，纵向打通现场层、管控层、运营层之间通道；横向打通业务端到端流程；（2）虚拟化技术深入应用，通过多专业耦合仿真，实现设计、制造、检测、装配全业务过程仿真，提升企业柔性快速响应能力；（3）产品研发知识化，建立完备的知识库，支撑智能工艺设计、智能检测、智能加工等智能技术点的实现；（4）生成过程自动化：在智能生产系统及过程中实现网络化分布式生产设施物流管理、人机互动中达到人、机器和资源的沟通协作
信息化应用数据架构	（1）强调基础数据的统一管理和统一编码；（2）系统间进行数据直接集成或基于ESB方式集成	（1）构建基于模型的数字化企业，通过数字化模型打通贯穿产品全生命周期、全流程、全价值链的数字化系统；（2）由基础数据管理向数据治理方向转变；（3）管理颗粒度细化至元数据和主数据
信息化应用基础架构	建立面向访问应用的企业园区网，通过服务器、计算机、网络，将应用系统联通	建立工业互联网，将工业软件、加工设备、机器人、检测设备、仓储系统等进行互联，RFID、无线网络等技术普及应用

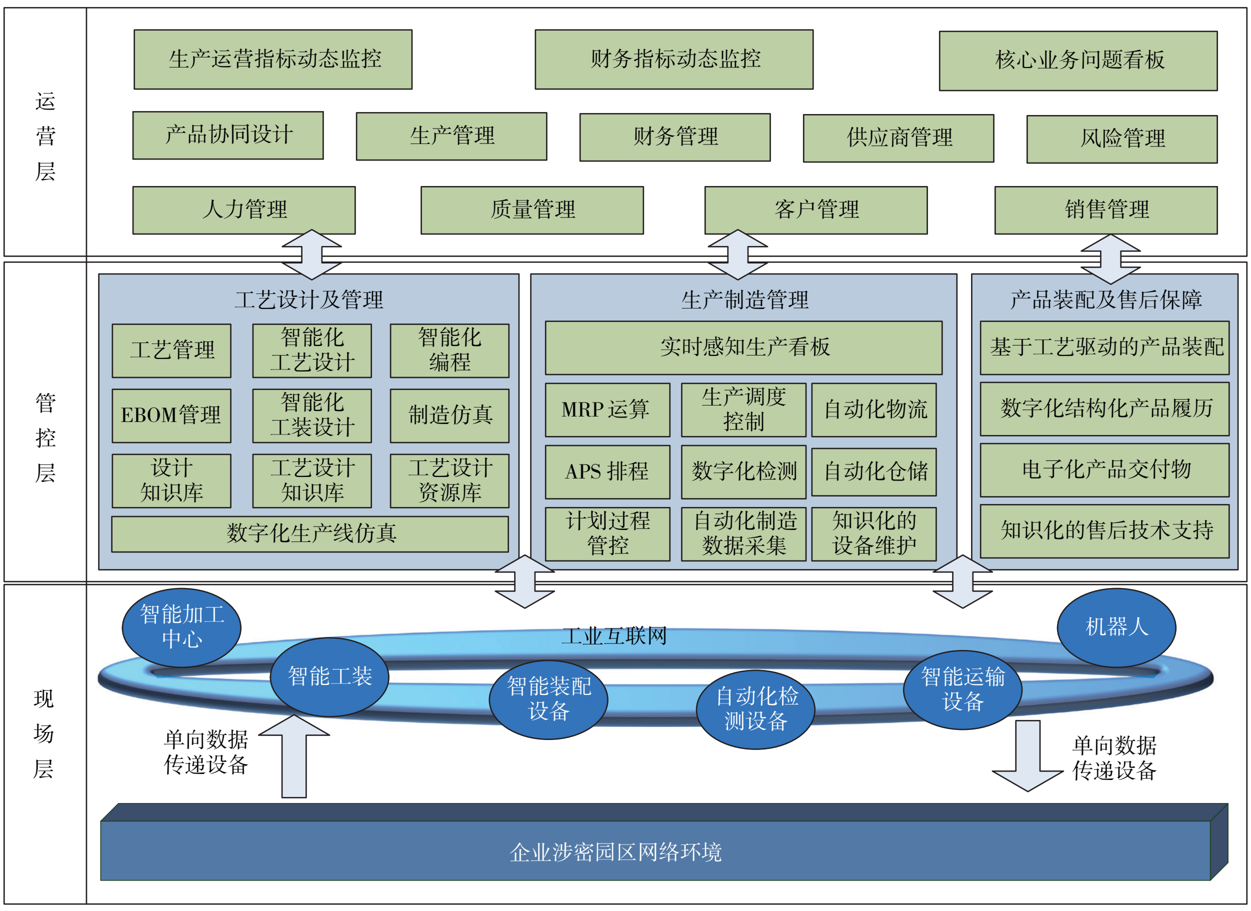

图1　基于智能工厂的航空发动机制造企业信息化应用架构图

Fig.1　Application architecture of aero-engine manufacturing enterprise based on intelligent plant

务的生产模式。

1.2 基于ERP构建企业纵向互联信息化平台

通过 ERP 适应性改造并深化应用，构建企业纵向互联信息化平台，打通需求、计划和保障的一体化企业运营机制渠道，实现生产计划对整个生产过程的精准调控。基于该平台，通过对生产计划、采购计划、库存计划的集成感知与预测分析，建立了涵盖生产需求、生产计划、制造执行和现场反馈的智能化生产计划体系，保证生产计划的均衡、可见、可靠和可行。通过与合作单位的横向贯通，形成生产计划与供应链的互感知和互操作，提升多品种、小批量的科研 / 批产混线生产模式下生产计划与供应链的协调运作能力。

1.3 提供企业运营智能决策信息化手段

基于物联网、云计算、大数据分析等技术，增强制造信息感知能力、综合感知能力、信息分析处理能力。重点突破航空发动机传统制造体系中隐性因素无法被量化的瓶颈，揭示海量制造数据中制造过程运行的内在规律，科学指导产品制造过程，提升产品质量和生产效率，为各级领导科学决策提供支持 [6]，如图 2 所示。

2 企业管控层

在企业管控层，按照多品种小批量、离散型生产特点，对企业现有的信息系统进行智能化改造，并进行 PDM、ERP、MES 3 大企业级信息系统的进行紧密集成，实现企业内设计、工艺、制造、成本等业务协同和信息集成共享，通过业务流程驱动制造执行、物流运作和成本管理的协同运作和灵活机动，提升企业制造执行的快速响应能力。通过贯穿产品研制全过程的智能化管理，实现企业内部多部门的纵向集成、企业与合作单位的横向贯通，全面保障航空发动机产品的研制与交付。

（1）构建基于知识工程的数字化工艺设计技术环境。

围绕航空发动机智能化工艺设计与制造过程，重点开展基于知识工程的结构化工艺设计、快速编程、制造过程仿真、数字化检测、智能化工艺装备等关键技术研究 [7]，形成航空发动机制造基础数据库和协同制造能力。突破基于知识驱动的 MBD 工艺设计关键技术，建立支持各类工艺设计的工艺知识库，形成切削参数库、刀具数据库、典型工艺库等与工艺编制有关的标准化数据库。通过知识、模型的驱动，实现基于知识化驱动的工艺设计，支持工艺技术创新和制造执行过程工艺方案的快速修正，达到从产品数字化工艺设计到生产线智能制造全过程的数据链贯通。

（2）构建基于生产订单关联的生产制造过程管理。

以生产订单为主线，实现生产计划、采购计划、生产执行计划的紧密关联，能够对计划的执行情况进行实时分析。构建以 CPS 为核心的智能生产指挥系统，通过虚实交互实现制造执行与实际运行的协调统一和相互映射。生产线外在环境和内在参数发生变动的条件下，通过智能生产指挥系统实现制造执行的快速调整，提升生产线的快速响应能力和灵活应变能力，保障生产线的高效运行和稳定生产。通过采集与分析物料配备、设备运行和产品质量等生产工况，对工艺指令和生产指令的实际执

图2 企业生产及运营自动化监控示意图

Fig.2 Diagram of automatic monitoring of production and operation of enterprises

行情况进行符合性检查，使得生产管理部门能够对生产进度、产品质量、成品入库、生产成本等运行状态进行动态监控与紧密跟踪，提高企业对产品制造执行过程的管控能力，依靠过程管控实现生产线实际运行的可见、可控和可调 [8]。

（3）构建虚拟装配与实物装配相结合的“双胞胎”运行模式。

构建航空发动机虚拟装配生产环境、资源和装配要素，通过对实物数据的信息采集与加工，依据航空发动机重量、动平衡等装配要求，实现基于实物信息的装配过程仿真与优化，使不同零部件之间能够智能化的筛选出最佳装备关系 [9]，并将零件信息、批次信息自动传递给 ERP 系统，进行更有目的性的物料配套准备，从而提高产品的质量和可靠性；通过虚拟装配，提前计算分析最合理的装配路线，避免实际装配的返工、漏装等问题，并将虚拟装配过程以图片、视频等形式进行输出，形成可视化的装配指导手册，为现场装配提供可视化指导。

3 现场层

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、自适应加工系统、数字化检测系统等集成应用，构建高度自动柔性单元或生产线（如图 3 所示），提高生产线制造响应能力。

（1）自适应加工。

以机内自动化为重点，通过传感技术、优化技术和实时通信技术集成应用，实现基于感知数据的设备误差补偿以及刀具状态、工件几何尺寸和加工工艺过程的智能调控等关键技术 [10]，实现设备状态数据采集、刀具在线监控、工件在位 / 在线检测以及工艺参数的实时感知，实现加工过程的自适应闭环控制。

（2）工业机器人。

通过工业互联网，将搬运机器人、焊接机器人、抛磨机器人等工作端与应用系统集成，实现物料运输、在制品码垛、设备上下料 / 装卡、设备运行控制等执行控制。

（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

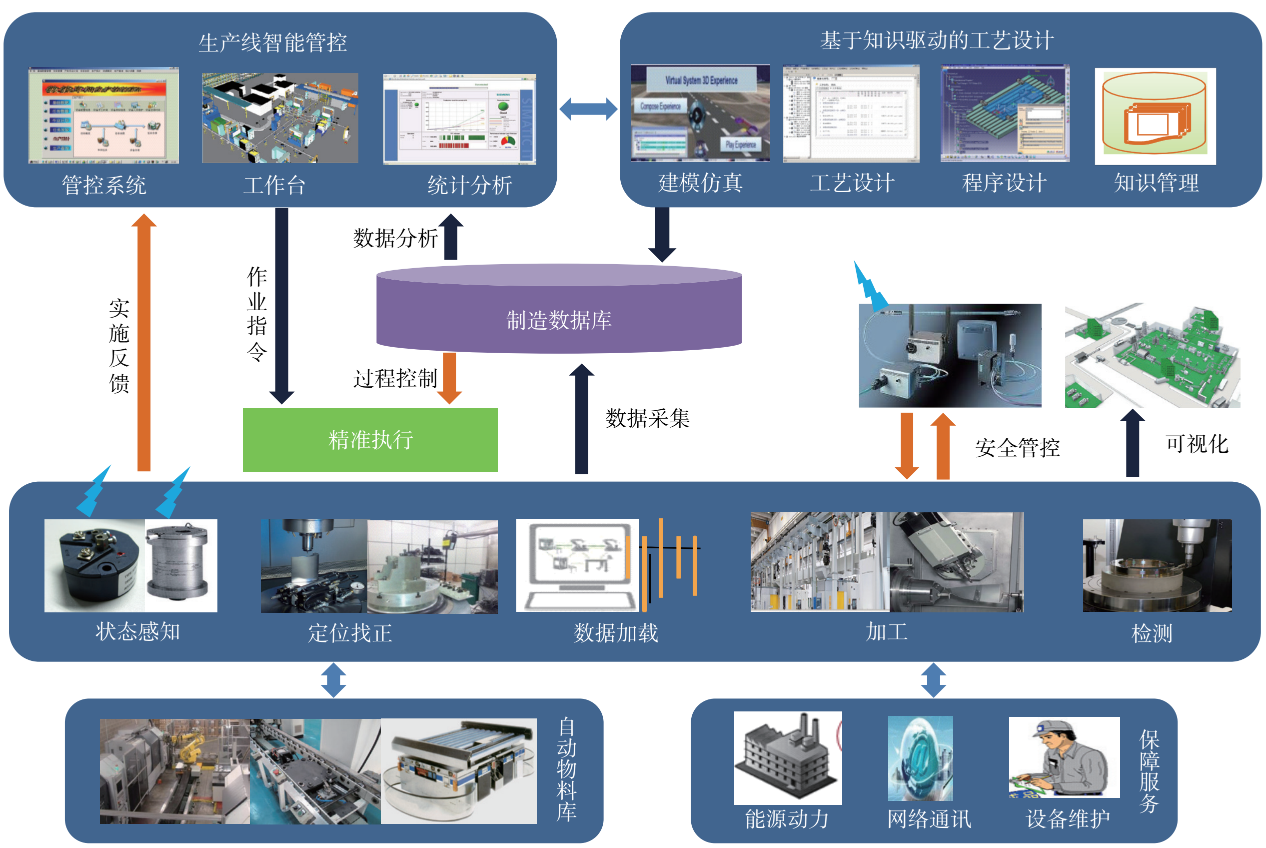

图3 智能生产线架构示意图

Fig.3 Diagram of intelligent production line

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。

（5）设备互联互通与集成。

在控制网络安全、数据安全的前提下，基于统一的标准总线技术，统一数据格式、整体规划联通机制，提高设备集成通讯能力，以成熟的联通机制支撑各类设备运行数据的实时共享。基于设备运行数据，应用大数据管理与可视化、智能化数据挖掘等技术，实现设备状态的实时监控、故障预警、故障快速定位等，以及对联通设备进行实时在线诊断和智能化生产调度。

目前需攻克的关键技术

根据航空发动机制造企业的信息化建设现状和智能工厂建设需求，急需攻克的关键技术主要包括：

1 自动化应用技术

根据智能制造技术特点，目前航空发动机制造企业在自动编程、自动检测、高级排程、自适应加工、自动换装、中央控制等技术的运用上还处于起步探索阶段，而这些技术在智能制造过程中扮演着非常重要的作用，需要对其开展深入、系统性的研究与应用，使智能制造过程体现自动、智能特点，而不是现有基础技术的简单组合。具体解决途径如下：

（1）开展智能单元试点建设，掌握自动化关键技术。结合航空发动机产品技术和管理特点，以典型产品为研究对象（叶片、机匣等零件），基于已有加工经验，有针对性地研究基于特征的自动编程、自适应加工、自动换装、自动检测技术，并建立关键技术间的关联关系，确保零件制造过程数据的自动化传递。对于计划和调度，结合企业现有管理模式及基础环境，研究基于现有约束的航空产品制造高级排程方法，确保方法的适用性。

（2）引进高技术人才，同时加强本企业人才培养。对于自动化制造技术，应采用引进、消化、优化、再利用的方式，利用产学研等方式引入相关技术人才，快速掌握技术基本原理和功能，同时加强企业内部人才培养，确保自动化技术与实际业务紧密结合，提高后期技术的可扩展性和技术支持的及时性。

2 基础支撑技术

目前，航空发动机各制造企业都在纷纷提出建设智能生产线、智能工厂，但各企业的信息化基础条件水平参差不齐，智能制造模式下的信息化基础条件相对还比较薄弱。依据智能工厂信息化应用架构，通过夯实现有数字化应用基础，为企业实施智能制造创造前提条件。具体解决途径如下：

（1）智能制造信息化标准构建。智能制造模式是严格基于流程驱动的执行过程，部门角色显著被弱化，同时计划指令和技术指令结合更加紧密，各种活动的标准化程度非常高。通过完善和修订企业现有设计、制造、检测等相关数字化制造标准，将智能制造技术探索形成的经验以标准形式进行固化和推广，满足智能制造的建设需要。

（2）结构化的数字化制造知识库构建。智能单元、智能工厂均需要大量的知识、规则进行支撑，目前智能特点的体现主要是基于已经定义的既定程序进行自动化处理，如果缺乏制造知识库的支撑，就无法实现真正意义上的智能制造。企业应面向智能制造，构建完整的知识体系，包括技术和管理，且需以结构化的形式管理，并与相关信息系统进行紧密关联。

（3）数据治理。企业信息化建设是不同历史时期，不同实施主体，不同需求构建的信息系统，由于开始缺乏统一规划，导致数据特别是基础数据描述不一致、编码不统一，致使各信息系统之间无法进行数据交互。因此企业需要开展数据治理，统一数据标准，构建统一的数据管理平台，对历史数据进行清洗，以新的物料编码作为全企业唯一识别对象。

（4）系统集成。以业务为驱动，以数据为对象，打通 PDM、ERP、MES、DNC 等核心信息系统与系统的集成，包括技术参数和计划指令；根据企业目前园区网和设备网物理隔绝的特点，通过突破数据快速交换技术实现信息在两个网络之间高效传递，确保管控层和现场层信息交互通畅。

结论

建设数字化、智能化航空发动机制造企业，不是一蹴而就的事情，需要很长时间积累，技术升级换代，是一个迭代发展的过程。德国推进工业 4.0 是一个面对制造业未来发展趋势的积极行动，已经在政府、企业、学界达成广泛共识。推进工业 4.0 要把握节奏，德国业界认为工业 4.0 是一个战略愿景和旅程，以德国强大的工业基础实力，尚需 10~15 年时间。通过与西门子公司的交流，深刻体会到工业 4.0 是一个长期的旅程，没有终点，永远在路上。

我国尚处于工业化的中后期，还是一个发展中国家。我国制造业生产力水平的跨度从 20 世纪 50 年代到 21 世纪初，前后相差达 60 年。同时，我们航空发动机制造业生产力水平参差不齐、差异较大。为此，结合航空发动机制造企业现状，对照工业革命的发展演变进程，分析工业 2.0、工业 3.0、工业 4.0 等阶段航空发动机行业的典型特征，从而制定未来发展路线。

参考文献

[1] 周济. 智能制造—“中国制造 2025”的主攻方向 [J]. 北京：中国机械工程，2015, 26: 2273–2284.

ZHOU Ji. Intelligent—main direction

of "Made in China 2025"[J]. Beijing: China Machanical Engineering, 2015, 26: 2273–2284.

[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] 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 aero-engine enterprises oriented to intelligent manufacturing[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2017(4): 6–9.

[4] 陈冰 . 面向智能制造的航空发动机协同设计与制造 [J]. 航空制造技术，2016，59(5): 16–21.

CHEN Bing. Collaborative design and manufacturing of aeroengine oriented to smart manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016，59(5): 16–21.

[5] 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，2016，59(23): 174.

LU Bo. Design and manufacture of aeronautical engines based on intelligent manufacturing[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2016, 59(23): 174.

[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, 59(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, 59(8): 26–31.

[7] 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，2015，59(8): 50–52.

HOU Zhixia, ZOU Fang, WANG Xiangnian, et al. Suggestions on aeronautic intelligent production line construction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 59(8): 50–52.

[8] 单继东 , 王昭阳 , 陈贺利 , 等 . 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 , 59 (16) : 52–56.

SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, CHEN Heli, et al. Building technology of intelligent manufacturing production line for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59 (16): 52–56.

[9] 陈明 , 梁乃明 . 智能制造之路 [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.

[10] 宋福田，杜广 . 机械加工中的自适应控制技术 [J]. 装备制造技术，2017 , 270 (6): 91–93.

SONG Futian，DU Guang. Adaptive control technology in machining[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017, 270(6): 91–93.

[11] 张亚平 , 陈颖 . 电网工程数据治理与应用 [J]. 中国电力企业管理 , 2017(36): 44–45.

ZHANG Yaping, CHEN Ying. Engineering data management and application of power grid[J]. China Power Enterprise Management, 2017(36): 44–45.

通讯作者：单继东，E–mail：27710162@qq.com。

Smart Factory Construction Research of Aero-Engine Manufacturing Enterprises

SHAN Jidong, CAO Zengyi, WANG Zhaoyang

(AECC Xi’an Aero-Engine Ltd., Xi’an 710021, China)

[ABSTRACT] In order to speed up the steps of intelligent manufacturing technology of aircraft engine manufacturing enterprises, meet the needs of a new generation of aviation engine development, and combine with service characteristics of aircraft engine manufacturing enterprises, firstly, it systematically analyzes the intelligent manufacturing requirements of the enterprise based on the architecture design method. Secondly, it puts forward the informatization application architecture of the intelligent factory aircraft engine manufacturing enterprises in this paper. Finally, it expounds the main construction content, implementation method, and briefly describes the key technology of intelligent factory construction yet to be conquered and the solving suggestion, which is a mirror for aircraft engine manufacturing enterprises and intelligent factory of the equipment manufacturing industry.

Keywords: Informatization; Digital enterprise; Industry 4.0; Intelligent manufacturing production line; Information application architecture

（责编 大漠）