

面向智能制造的航空发动机数字化生产线建设研究

中国航发沈阳黎明航空发动机有限公司 亢亚敏 秦新冰 汪九佳

借鉴国内外制造企业智能制造实施的先进经验，通过搭建数字化生产线，研究利用数字化、智能化技术提升生产管理能力。数字化生产线建设是航空发动机企业实现全方位、高效率和穿透式管理的重要信息化手段，涵盖了数字化工厂总体框架、数字化系统架构，以及面向智能化的关键数字化技术研究等。通过数字化、网络化和智能化深度融合，使工程信息化技术与航空发动机制造技术深度融合，实现制造过程和产业模式变革。本文将重点阐述该面向智能制造的数字化生产线建设总体架构及建设内容。

一、引言

随着中国制造 2025 的提出以及智能制造专项的推进，航空制造企业必须认清数字化、网络化与智能化的发展方向。

智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术的深度融合，贯穿设计、生产、管理和服务等制造活动的各个环节，是具有自感知、自学习、自决策、自执行和自适应等功能的新型生产方式。加快发展智能制造，是培育我国经济增长新动能的必由之路，是抢占未来经济和科技发展制高点的战略选择，对于推动我国制造业供给侧结构性改革，打造我国制造业竞争新优势，实现制造强国具有重要战略意义。智能化是指延展人类认知过程和机器动力控制系统的自主化能力，基于赛博物理系统（CPS）实现对物理世界的感知、

处理、决策和反馈，提升设计、制造、服务和管理等业务过程的自组织、自学习、自适应和自优化能力。

作为数字化与智能化制造的关键技术之一，数字化生产线是现代工业化与信息化融合的应用体现，也是实现智能制造的必经之路。数字化生产线借助于信息化和数字化技术，通过集成、仿真、分析和控制等手段，实现对制造工厂的生产全过程进行全面管控。面向智能制造的数字化生产线建设是航空发动机企业从信息化建设向数字化工厂迈进的重大措施。建立基于智能制造技术的数字化制造平台，支持型号的研制与生产，为企业智能制造进行技术储备，最终全面提升企业的制造能力与科学管理水平。

二、数字化工厂框架

数字化工厂是指以产品全生命周期的相关数据为基础，在计算机虚拟环境中，对整个生产过程进行仿真、评估和优化，并进一步扩展到整个产品全生命周期的新型生产组织方式。数字化工厂是现代数字化制造技术与计算机仿真技术相结合的产物，同时具有鲜明的特征，主要作为沟通产品设计和产品制造的桥梁。数字化生产线的建设需要采用先进的生产管理模式，并结合公司自身的生产特点进行突破和创新，实现生产管理的敏捷制造、准时交货、精益高效和质量至上目标。基于数字化工厂的远景，数字化工厂的总体框架参考

国际标准 ISA-95 对企业架构层级定义, 全面构建各个层级的能力, 如图 1 所示。

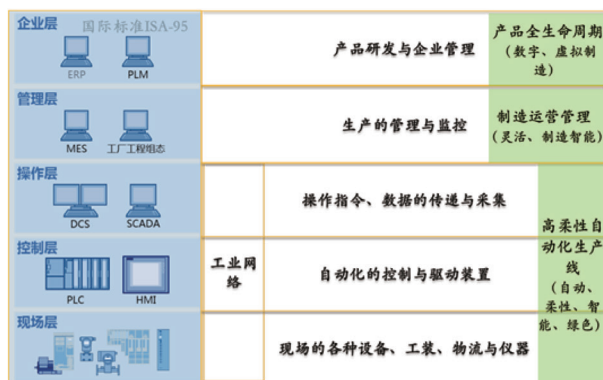


图 1 数字化工厂的 ISA-95 层级

现场层主要是生产线现场的各种设备、工装、工具、测量仪器和物流设施等各方面的内容。控制层主要是接收操作层的指令, 来实现现场层的各种硬件的自动化控制和驱动, 确保其准确执行。操作层主要是执行和发布各种生产指令, 实现产品、工艺、设备和测量仪器等各种数据的传递和采集。管理层主要是车间层面的监控与管理, 实现生产订单、在制品、质量、设备利用率、工装、刀具和物料等全方位管控。企业层主要是产品研发 PLM 和企业管理 ERP 层面。尤其是应用 PLM 中的数字化制造技术, 实现工厂的数字化建模和仿真分析, 并基于虚拟工厂展现和操控生产, 为数字化工厂奠定基础。对于现场层、控制层和操作层这三个层级需要全面采用工业网络实现其统一联网, 并最终与管理层和企业层的局域网贯通, 为网络化工厂奠定基础。

三、数字化生产线信息系统框架

数字化工厂是全部产品制造人员的日常工作平台, 是开展智能制造工作的基础。该平台连接虚拟工厂与实物自动化工厂 (虚拟的产品、工艺、生产线数据、生产指令数据和实物的产品全面贯通), 制造工程师在虚拟工厂中开展工艺 / 工厂的设计、仿真和优化, 同时监控和操控着由众多赛博物理系统 (CPS) 构成的实物工厂 / 生产线, 实现高效率、高质量的绿色制造。

把基于数字化工厂的五个层级的全面建设分解到数字化和信息化的视角, 主要模块有数字化工厂体系建设、数字化工艺设计管理和数字化制造执行及系统集成等。实施数字化系统的目的在于利用先进的数字化制造技术, 打造具有工

厂自身特色的数字化制造平台, 实现工厂的生产、技术、质量和经营等业务的全面信息化管理, 并给管理人员及领导提供决策支持。

四、数字化生产线建设内容

1. 数字化工厂体系建设

数字化工厂生产管理模式的建设目标是快速响应、准时交货、精益高效和质量至上。其中, 快速响应要求智能工厂能够敏捷响应市场需求的多样性变化, 具有支持多品种、小批量生产的动态调整能力。准时交货则要求智能工厂能够有效缩短产品的研制、生产周期, 做到按照用户要求的交货期保质保量完成任务。精益高效代表智能工厂追求精益的生产效率和管理能力, 通过精细化管理以最小的投入达到最大的产出。质量至上则要求智能工厂通过全过程在线质量监控及“六西格玛”质量管理, 实现一次性成功投产并满足用户的质量要求。智能工厂的建设需要采用先进的生产管理模式, 并结合公司自身的生产特点进行突破和创新。

2. 数字化工艺设计管理

(1) 设计制造协同。设计制造协同以型号任务需求为牵引, 以型号研制体制创新、机制创新和技术创新为动力, 实现型号设计、制造和维护保障过程中, 设计单位与制造单位的紧密协同和数据共享, 打造贯通设计制造全过程的信息链, 在各个阶段的各种信息能够被准确地定义到以模型为核心的技术数据包中, 并始终保持上游的技术数据包能够被下游直接重用, 一直拓展到生产现场或维修现场, 从而提高型号质量管理体系的运行效率, 实现产品研制全过程技术状态的有效管理与控制, 不断提升产品设计、生产、维护和协同能力, 增强型号自主创新和可持续发展能力。

(2) 基于 MBD 可视化工艺设计。基于 MBD 的工艺设计, 不同于传统的工艺规程设计方式方法。传统的工艺规程设计, 直接在工艺卡片中完成, 工艺员手工填写所需的设备、工装和工具, 手工填写工艺内容, 手工添加工艺简图。基于 MBD 的工艺设计, 要求各种资源的填写、工艺内容的编制及工艺简图的设计完全基于三维模型, 实现结构化和可视化的工艺输出, 其中工序模型基于 PMI 的智能数控编程和检测编程, 以及模板化工装设计和管理。甚至实现了检验卡基于 MBD 模型 PMI 的自动生成能力。完全满足了工艺规程设计的需要。在数字化工艺平台中的工艺、工序对象上创

建 NX 数据集。进入 NX 中通过 WAVE Link 功能关联引用设计模型或其他工序模型，通过 NX 同步建模功能对模型直接修改，比如增加加工余量、删除加工孔或槽等，方便快捷地建立工序模型。在 NX 中通过 PMI 功能进行 3D 制造信息标注，比如尺寸公差要求、加工区域标识、操作说明和检验要求等。需要展示内部细节时，可通过 PMI 剖视图展示。复杂工序可根据表达需要增加标注视图。对于热工艺，表现形式可根据加工特点作相应调整，一般情况下形状变化不多，尺寸公差信息较少，工艺参数较多。

(3) 数字化快速工装设计。基于智能工厂实现三维工装设计与管理，将模块化设计的理念应用到工装设计中。通过对工装的模块化分类应用，实现工装设计知识和经验的积累和重用，促进工装的创新设计。基于三维工序模型 / 零件模型设计工装，相比二维设计方法，设计结果更容易被重用到数控仿真、检测仿真和生产线仿真等环节。通过设计数据重用及设计的智能和自动化，形成工装设计知识和经验积累与重用的机制，不断丰富和完善工装设计知识库，促进技术人员设计水平的提高。同时，将部分工装设计知识通过 NX 软件二次开发的形式置入 NX 软件应用系统，提高工装创新设计的能力。

3. 数字化制造系统管理

智能化的生产计划管理，包括订单的创建和维护、生产批次管理、生产派工、工程变更管理、生产插单和订单进度跟踪等业务活动。实时分析生产计划和生产进度的匹配情况，并在异常情况发生时（如设备宕机、物料短缺等）进入自动运算模式，对当前的任务队列进行动态排产，最大程度地降低生产变化对计划的影响和冲击。

智能化的生产现场管理，包括物料控制，电子看板功能和产品追溯的管理。通过物料控制将投料环节、零件加工环节和产品交付环节综合管控，并对过程数据进行实时数据采集、统计和分析。

智能化的在制品管理。通过条码技术在毛坯进入工段到产品交付的整个生产过程中，对在制品的流转行为进行智能化监控和记录。实时查看在制品的位置、数量和状态信息，提供统计分析功能，对在制品的种类、数量等进行统计，方便在制品的随时清点和台帐的查看，并根据在制品实时情况提供智能决策建议，提高产品的可控能力。

智能化的制造资源管理。通过建立统一的资源库，对

工装、刀具等资源信息进行统一管理，包括资源的维护保养、借用和维修等信息。采用条码技术对制造资源进行标识，实现刀具、工装等制造资源的出入库管理，并实时记录刀具工装的报损信息和盘点记录。制造资源出现短缺或非正常损耗时能够做出自动提醒和建议。

4. PDM/ERP/MES 与生产线系统集成

通过生产线集成系统实现生产线控制单元、加工单元、辅助加工单元、质量检测单元和中央刀库等设备之间的物理连接，构建可支撑整条生产线运转的生产资料物流系统和信息传输系统，同时与公司级的 PDM 系统、ERP 等系统集成。

五、结语

以智能制造为核心的“工业 4.0”，强调赛博物理融合（CPS），认为虚拟与物理是一对“双胞胎”，以数字驱动的数字化系统理念与“工业 4.0”一致。所有的管理要素必须被数字化准确定义，通过数字化系统有效地控制实际生产过程，为后续企业智能制造提供了支撑。数字化生产线建设完成后，可有效提高航空发动机制造技术优势和生产能力，提高产品的制造效率和产品质量，降低制造成本，缩短产品制造周期，促进数字化制造技术在型号研制各环节中的推广应用，从而带动产品设计的创新、制造方法与制造工具的创新、型号管理模式创新以及单位间协作关系的创新。实现传统研制模式向先进的数字化研制模式的转变，实现航空发动机研制基于智能工厂的协同数字化、工艺数字化、制造数字化以及经营管理数字化。为全面实现产品设计制造和管理的信息化、生产过程控制的智能化以及协作的网络化奠定基础，促进我国制造业综合竞争能力的提升。IM