

智能制造在航空发动机企业的探索与实践

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 孟震威 秦新冰

本文通过对航空发动机产品研制的发展现状、发展需求的深入分析，阐述了智能制造在航空发动机产品研制过程中的推进重点，解析了未来智能制造的必要性，对企业开展智能制造与航空发动机产品研制深度融合提出了建议。

一、引言

航空发动机作为飞机的核心，被誉为“工业之花”，它直接影响飞机的性能、可靠性及经济性。航空发动机制造技术难度大、覆盖面广且连带效应强，对整个装备制造业的发展起着引领的作用，在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用。因此，航空发动机制造是一项战略性高科技产业，被公认为综合国力的体现，代表着一个国家的整体工业水平，具有重要的战略意义。

当前，制造业已成为世界发展的焦点，德国“工业4.0”、美国“工业互联网”和中国的“中国制造2025”无一不在众人的瞩目下如火如荼地进行着。在我国，《国务院关于加强培育和发展战略性新兴产业的决定》中已明确将“智能制造装备”列为高端制造装备中的重点发展领域。同时，在《国家中长期科技发展规划纲要》中，也明确将智能制造技术列为优先发展主体，并于2012年发布《智能制造装备产业“十二五”发展规划》和《智能制造科技发展“十二五”专项规划》。中国科学院发布的《中国先进制造技术到2050年的发展路线图》中指出，“基于泛在信息的智能制造”将会是先进制造技术两大发展主流之一。智能制造引发新一轮

制造业革命已初见端倪。

在航空发动机领域大力开展智能制造技术研究，在传统制造技术基础上发展先进制造技术，打造支撑现代制造业的骨架和核心，将成为提高设计、制造和管理水平，保障重点型号的研制，促进航空工业跨越式发展的必然选择。以信息化带动传统制造业长足发展，以网络化突破空间地域对企业生产经营范围和方式的约束，实现企业间的协同和各种社会资源的共享与集成，将数字化制造技术渗透到产品研制的设计、制造、试验和管理的全过程中，提高生产过程的可控性、减少生产线上人工的干预，高效、高质量和低成本地为市场提供所需的产品和服务。

二、航空发动机产品研制的发展现状

航空发动机产品研制集成了大量的机电软一体化关键工艺装备，尽管多年来航空制造业已经有了良好的基础，但面对高科技和高投入的新型产品，仍显得储备不足。快速研制能力、批量生产和变批量生产快速转换能力薄弱，致使航空零件研制周期过长，难以满足部队更新武器装备和发展民航运输的迫切需求。无论在单项专业技术还是综合技术水平

上，与世界发达国家相比还存在不小的差距。

1. 缺失柔性

现有工厂各生产车间以常规工艺流程为生产纲领，厂房交叉布局，混线生产，无法融合数字化工艺装备自动化、柔性化的优势。

2. 缺失系统性

工厂长期受制于常规分阶段、分工序的工艺设计理念，配套工艺装备构成以数控化为指导方针，缺乏系统性和合理性，使得零件计划排产、生产组织混乱，整体技术水平不高。

3. 缺失关联性

工厂关键工艺装备以保证关键件、关键工序技术指标要求和满足保守交付能力为主导，缺失工艺过程、工艺装备、生产节拍间的逻辑关联性，造成零件精加工能力严重不足。

4. 缺失共享性

工厂现有生产线组织管理环节冗长，部门之间缺少必要的信息共享、沟通与协同手段，各部门间重叠工作较多，工作效率低。

5. 缺失统一性

由于个性化需求和习惯性思维的长期掣肘，工业软件、工艺装备以单一功能简单应用或零散使用为主，工业软件、工艺装备均各自为政，难以实现从工艺路线规划、工艺设计到加工生产、质量检测的系统集成。

6. 缺失前瞻性前瞻性

技术发展相对滞后，技术储备薄弱，无法支撑工厂智能制造的发展需求。

航空发动机行业的研发生产体系大多处于三维设计、数字样机、PLM 和三维数字性能样机综合的工具层面的低阶段应用，各应用间独立开展工作，缺乏关联和流程、过程与系统的整合不足，无法形成系统化、体系化的综合能力。现有的研发生产体系构架如维持现状或在原有基础上进行改造延续，将无法达到两化融合和国家工业发展战略的要求，无法实现追赶制造业强国的目标。

三、航空发动机产品智能制造定位思考

近年来，在国家重点型号工程的支持下，企业在 3D 制造技术、虚拟加工技术和数字化工厂技术等方面开展了深入的研究，研制了技术产品、开发了应用平台、研发了智能制造解决方案。一大批新产品、新工艺和新技术得到了应用，

成效显著。

产品复杂性和个性化程度在不断加深，同时产品的自动化程度随着开发周期的缩短和成本的压力明显增加，而且这一趋势还将继续下去，传统单打独斗式的生产模式逐渐被技术产业化联盟所取代。为了在新一轮工业革命中占领先机，航空发动机的产品研制应以技术转型升级为契机，在全面认知智能制造领域价值创造内涵的基础上，全新定位智能制造价值链和战略发展规划，目的是增强企业长期的产业化预测、评估和控制能力。

通过整合企业已有研发、制造、应用和保障等资源，全面进行战略思维和全盘规划，实现智能工厂技术和智能制造技术的高度融合、智能制造技术和数字化制造技术的高度融合，全面打通智能制造的技术瓶颈，形成整体优势能力，支撑核心技术的滚动式发展。

以智能制造在生产过程中的工程化应用为目标，重点关注智能化的生产技术和工业自动化控制技术，开发相应的生产管理系统和硬件设施，通过计算机网络和智能生产中心对整个生产过程实行智能管理和控制，促进工业自动化控制的集群效应和良性发展。

促进航空发动机制造过程技术转型。在核心工艺发展方面，从智能制造和智能应用两个角度分析面向产业化的智能制造技术需求、发展现状和现实挑战，探讨智能制造技术转型的重点突破口。在支撑技术方面，开发加速产品制造过程、减少内耗和资源浪费的技术及工具，开发面向制造的信息技术及面向制造的高效、可控的系统，研究可提高对新技术、新工艺及新材料应用响应速度的开放的、具有学习能力的生产组织结构等。

启动智能工厂建设项目。针对批产型号零件作为实施对象，在技术方面，全新规划高可靠性的典型主导工艺，建立核心工艺、工业软件和配套工艺装备与零件加工过程之间的逻辑关系；在生产单元方面，分别针对不同类型零件特点，建设对应的对开、环形和焊接智能加工单元。通过融合信息化工程建设取得的成果，实现信息化和产业化的高度融合，重点解决零件生产准备周期长、加工过程失控的问题。

发展以智能工厂技术、工业软件和工艺装备三位一体的智能制造技术体系，着眼于智能制造工艺装备，立足于智能制造总成配套能力、系统集成能力、技术研发能力和运行保障能力建设，构建智能制造技术研发平台，进一步推动企

业智能化制造技术转型的步伐。

提升智能制造保障能力。以数字化、智能化和网络化为驱动，带动产品设计、制造工艺、工艺装备及试验保障等技术的全面协调发展，将航空产品的设计、制造、试验和保障等全生命周期有机结合为一个整体。在制造阶段，通过对制造过程的模拟和仿真，实现数字化全维度建模设计。根据设计模型和生产批量，协同安排制造规划和工艺，形成全生产过程的数字化制造。采用模拟试验与实物试验结合的方法，提高航空产品的试验效率，充分验证航空产品的性能。在具备自主研发智能设备能力的基础上，推动航空制造业数字化车间、工厂的建立，并构建基于网络的一体化制造和服务。

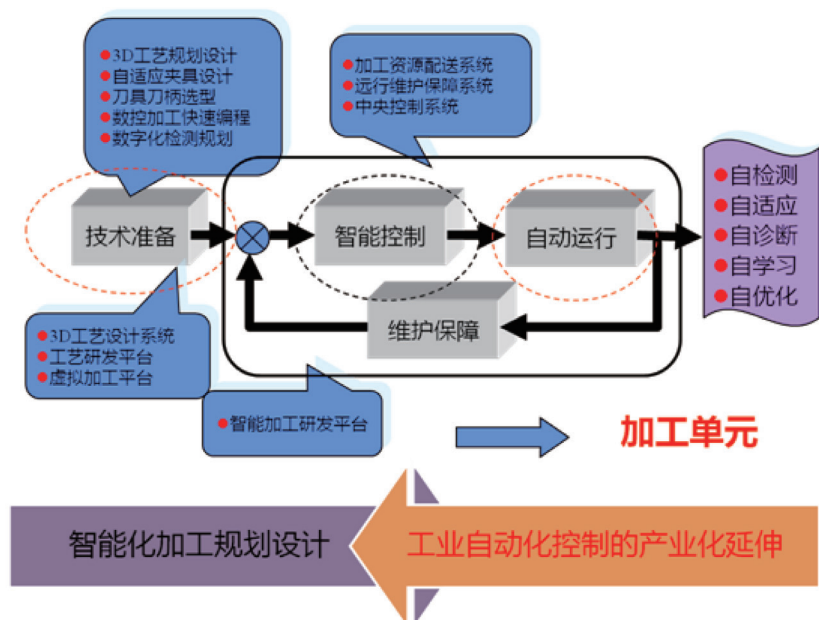


图1 智能制造方式定义

四、企业对智能制造探索与实践

1. 建设原则

在企业现行信息技术应用的基础上，以业务发展需求为导向，遵循“统一规划、统一组织、统一标准、统一平台、统一管理”，简称“五统一原则”。同时，在具体信息化建设上，重点强调如下原则。

(1) 业务牵引，需求驱动。智能工厂建设将以工厂业务需求为发启，通过工程化的推进管理模式，分阶段推进智能工厂建设。在推进过程中，特别要重视需求调研和需求分析，只有完整准确的需求调研才能做好智能工厂建设。

(2) 统筹规划，突出重点。智能工厂建设涉及的业务面广而复杂，而资源是有限的。在推进智能工厂建设过程中，需要在一定时期内以有限的资源，根据统筹规划和智能工厂规划，确保以科研生产管理平台为重点的管理信息化建设落实。

(3) 注重协同，加强集成。在建设智能工厂前应该充分考虑各系统之间的集成，统一数据源。同时在数据共享的情况下注重各部门各业务的协同以及与合作兄弟单位的协同。

(4) 完善基础，深化应用。在完善网络与硬件基础的同时，通过数据规范、标准配合、制度约束的方式构建扎实的智能工厂数据基础，并在此基础上开展深化应用工作，分

析评估基于智能工厂的科研生产管理，从而解决瓶颈问题、优化流程。

2. 技术方案

智能制造宏观上可以分为两条主线，一是以工艺为主线的工艺技术链；二是以运行为主线的加工技术链。需要解决底层理论基础到顶层加工单元之间各个环节存在的技术问题，构建产品全生命周期、企业全业务流程和产业全价值链的“三全”技术能力货架，打通虚拟与现实技术融合的技术壁垒，图1为智能制造方式定义示意图，图2为智能工厂体系架构示意图。

(1) 智能工厂体系，包含智能工厂管理理念、组织模式、业务流程、标准及规范、技术与工具。

(2) 虚拟工厂，涵盖车间模拟，包含生产车间/生产线三维布局设计与优化仿真、物流设计与优化仿真。数字化制造，数字化工艺设计系统包含设计制造协同、结构化三维零件工艺设计、结构化装配工艺。数字化工装设计管理，包含工装申请、设计、工艺与制造。数字化工艺仿真系统包含工厂布局及物流仿真、数控加工仿真验证、产品运动仿真和机器人仿真。

(3) 虚实结合，包含虚拟试运行、生产系统远程监控、数字化车间制造执行管理（机加车间MES、装配车间MES



图2 智能工厂体系架构

和其他车间MES,其内容包含制造数据管理、车间计划排程、生产调度管理、物料跟踪管理、工位管理、看板管理、制造资源管理、设备维护管理、车间质量管理和数据采集)以及生产车间数据监控与数据采集。

(4) 实体工厂,构建涵盖自适应加工中心、运输装置、传送带、机器人(手)、料仓、刀库、清洗烘干机和测量机及标印识别装置等设备的数字化加工车间,实现航空发动机叶片类、机匣类零件,由毛坯状态自动入线,进而智能加工制造为合格产品并自动出线。

3. 工作重点

(1) 遵循“改善已知+发明未知+需求驱动”的总体发展思路。着眼于智能制造工艺装备,立足于智能制造总成配套能力、系统集成能力、技术研发能力和运行保障能力建设,发展集智能工厂技术、工业软件和工艺装备为一体的数字化制造技术体系。

(2) 用好已有工业软件工具、关键工艺装备。充分利

用企业现有制造资源,实现软件工具使用效能最大化、工艺装备利用效能最大化、型号研制技术风险最小化以及企业综合制造能力最大化。

(3) 变革研发模式,开发研发系统环境。预判研制过程,构建虚拟加工平台,研发实用化技术及工具;管控制造过程,建设智能化工厂、数字化车间、柔性制造单元生产模式。

(4) 构建综合“工艺研发平台+虚拟加工平台+智能工厂”三位一体的数字化制造技术研发平台。

4. 建设内容

数字化制造技术研发平台作为企业实体研发机构,遵循“前沿技术研究—关键技术突破—技术集成验证—型号转化应用”的总体研究思路,在顶层设计和统一规划的基础上,构建工艺研发中心、虚拟加工仿真和智能工厂研发三大主体平台,形成智能制造综合维护保障条件。

(1) 围绕航空发动机制造体系发展规划和型号研制需求,通过开展新材料、新技术、新工艺的预先研究和应用研

究,开发多专业融合的工艺技术研发平台,探索工艺研发中重点关注的技术研发能力和前沿制造技术能力。

(2) 针对不同功能的需求,构建以技术预先验证理念为导向的虚拟加工平台,在虚拟加工环境再现实际加工状态和加工瓶颈问题,在实际加工之前进行工艺过程仿真、分析和优化,预先发现问题、分析问题,并解决问题。

(3) 结合批产任务和研制能力综合保障需求,从综合提升企业核心能力入手,建设专业化的研发平台,重点解决生产制造需解决的问题,产品研制需突破的瓶颈问题和未来发展需解决的技术储备问题。

(4) 建立企业级综合管控模式,大力推进信息化与管理模式的融合互动,以管理信息化平台固化、追踪和显性化管理模式的变革路径,以管理模式的发展诉求促进信息化能力的不断优化与提升。实现资源和能力的整合协同、业务的快速发展以及商业模式的不断优化,最终带动管理效能提升。

5. 探索实践

为实现智能制造探索实践的目标,必须具备数字化车间、3D 制造探索、工业互联网和高端数控设备应用。只有在具备上述应用基础的前提下,才能更有效地开展智能制造探索工作,并有可能取得预期的建设效果。智能制造的探索涵盖以下几个方面内容。

(1) 在生产工艺准备阶段,采用协同设计制造、三维工艺设计、3D 制造和虚拟仿真技术,实现虚拟验证与现实制造的相互验证和迭代优化。

(2) 采用高端数控机床、工业机器人结合工业自动化手段等发展新的数字化生产线,提高制造过程的自动化和数字化水平。

(3) 把传感器、处理器和通讯模块通过工业互联网集成到加工单元中,实现产品制造过程和工厂运行管控过程的可追溯、可识别和可定位。

(4) 构建基于工业互联网的 IT 协同和自动化管控系统集成模式,实现航空发动机产品研制功能化自主设计,摆脱企业 IT 技术长期受制于人的尴尬局面。

典型零件智能制造从虚拟和现实两个维度入手,通过工业互联网实现关联和集成,统筹安排协同设计制造、3D 工艺准备、虚拟研发、数字化生产线、工业自动化控制、生产线运行维护与保障等六大关键领域。

第一个层次是智能制造的技术研发、先进制造技术应

用和预先技术验证,并作为智能制造的技术和资源支撑平台,涉及协同设计制造、3D 工艺准备和数字化仿真等三个关键领域,关注航空发动机产品智能制造研发自身技术的研究和积累,目的是夯实智能制造技术基础。

第二个层次是智能制造在航空发动机产品中的具体实际应用,将数字化生产线作为智能制造的应用环境,涉及智能工厂、工业自动化控制和生产线运行与保障等三个关键领域,关注大数据处理、知识工程,以及生产线运行维护及保障等智能制造核心技术的产业化应用,目的是夯实工业基础,提高航空发动机产品整体制造能力。

五、经验与启示

企业智能制造的推进并不仅仅是独立的信息技术工作,更重要的是涉及到策略、组织、流程和人员等诸多方面。为保证系统的顺利实施和上线后的成功应用,在推进实施工作中着重关注如下方面。

(1) 无论工业技术基础多么雄厚、研制经验多丰富或管理水平多先进,融合工业 4.0 理念的航空发动机产品研制过程难免会出现这样或那样的问题,企业应该做好打一场攻坚战准备。既要多快好省,选择经过验证的成熟的工业软件、工艺装备来建设数字化生产线,又要精准稳狠,发展适合企业智能制造的生产方式和管控模式,为深度融合工业 4.0 理念提供和创造一个宽松而有利的条件。

(2) 坚持“整体规划、分步实施”。从企业整体层面通盘考虑,对智能工厂进行整体规划,理清各子系统所支持的业务范围和彼此间的边界,定义子系统建设的范围,依据需求的紧迫程度和资金预算的要求,分步建设实施。

(3) 着重考虑“先试点,后推广”。对涉及企业全局或多个业务单元、部门的系统,从控制风险的角度考虑先选择少量业务单元进行试点,取得成功或积累相关经验后再推广到其它业务单元或部门。

(4) 充分调动各方积极参与系统建设。系统的成功实施和运行需要得到领导、业务单元和部门负责人、业务人员、IT 人员等多方的指导、参与、支持和配合,积极调动各方,通过采用恰当的组织分析、定义沟通流程、计划和工具,加大组织中的变更推动力。充分发挥公司员工熟悉本公司实际业务的优势,并逐步培养其在数字化环境下开展各业务活动的的能力,并在项目实施过程中,充分吸收公司员工参与。

基于 PAM-STAMP 的进油管成形有限元分析

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 蒋佳华 黄乐 李松 王帅

航空发动机加力总管的进油管结构较为特殊，发动机导管成形时由于受设计结构、材料等因素影响，常常产生难以成形、加工质量较差等问题。本文以某型发动机加力燃油总管的进油管为例，借助专业金属板料成形的有限元模拟分析软件 PAM-STAMP，对其弯曲成形过程进行数值模拟分析，对软件计算得到的成形结果进行分析，为实际加工工艺的制定和模具的设计提供了重要指导。

一、引言

导管弯曲成形是管子完成所需形状尺寸的二次塑性加工，是一种典型的材料非线性、几何非线性且边界条件非线性的多重非线性耦合变形，其弯曲过程属于三维非稳定变形。弯曲时管子大部分形面为无约束自由表面，沿弯曲半径方向材料中断而失去相互约束和支撑，材料流动变形易于形成壁

厚减薄、波纹度超差及圆度超差等弯曲缺陷。加力总管的成形质量直接关系到后续装配质量以及使用性能。以某型加力总管的进油管为例，利用专业金属板料成形有限元模拟分析软件 PAM-STAMP 对其弯曲成形过程进行了数值模拟分析，以得到工艺可行性、工装可行性以及成形危险区域等结果，为后续的工艺制定提供了重要指导。

(5) 作为产品技术依托企业，应充分发挥自身拥有的产品配套、技术总成及共享资源等本源优势，发展新的合作方式势在必行。因此，以企业为主体打造新的泛产业联盟应运而生，目的是发挥联合研发优势，互通有无、利益共享、资源共享和成果共享，服务于军工、服务于社会。

(6) 项目保证稳定投资，专款专用。智能工厂的建设周期长投资较为密集，因此需要资金投入的保障，实现专款专用，才能确保达成建设目标。

驱使，作为技术、工业软件、工艺装备的领先者，标准和规则的制定者，新一轮工业革命势必成为发达国家的重要发展战略。历次工业革命的警示告诉我们，在这种机遇与挑战并存的背景下，航空制造业只有顺应时代发展新趋势，大力发展并推进智能制造的产业化，才能帮助企业完成转型进化，最终实现行业内“中国制造”向“中国智造”的跃升。

六、结语

新一轮工业革命的导火索源自于西方发达国家的利益