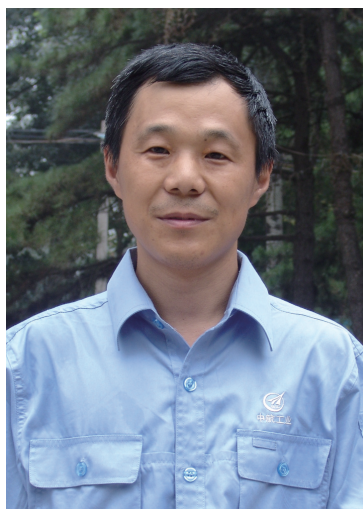




智能制造的基础、组成及 发展途径

Foundation, Composition and Development Ways of Intelligent Manufacturing

中航工业北京航空制造工程研究所 王焱 王湘念



王焱

中航工业北京航空制造工程研究所研究员,长期从事切削加工、数控工艺、柔性制造技术、数字化制造技术等研究与应用工作,完成了多项科研课题和型号攻关任务。近年来,重点开展了复杂结构件精确数控加工、快速响应制造车间、复杂曲面构件适应性加工等技术研究。撰写科技论文及科技报告60余篇,获集团公司科技进步奖5项、航空科学技术研究计划项目立功2次。

作为数字化、网络化、自动化延伸发展的智能制造,将为制造业带来从大规模生产到定制化柔性生产的变革,将建立一个高度灵活的个性化和网络化的产品研制和服务模式,实现从最初设计创意到最终产品制造乃至使用服务的全流程控制和管理。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.13.032

制造技术的发展带来了人类社会的进步,从利用自然动力到蒸汽动力,从机械装置到电气应用,从电子技术到计算机快速发展,都给工业领域带来了不同程度的影响和推动。进入21世纪,电子、信息、计算等技术快速发展并日趋成熟,从而推动了互联网、物联网、大数据等技术领域的快速发展,引发了工业界尤其是制造业模式的变革。德国称这种变革为第四次工业革命,即“工业4.0”;美国则称其为第三次创新变革浪潮,

认为未来工业的特征是“工业互联网”,最终的结果殊途同归,就是更高的智能化。

以智能制造为核心的新一代工业变革的基本促进要素是计算机及网络技术的快速发展所带来的计算机应用模式的变化(见图1)。一方面,计算机技术的发展促进了复杂数据计算处理能力的提升;另一方面,推动了网络通信技术向应用领域的渗入和融合,从计算机联网发展到物联网,乃至万物互联,为工业产品设

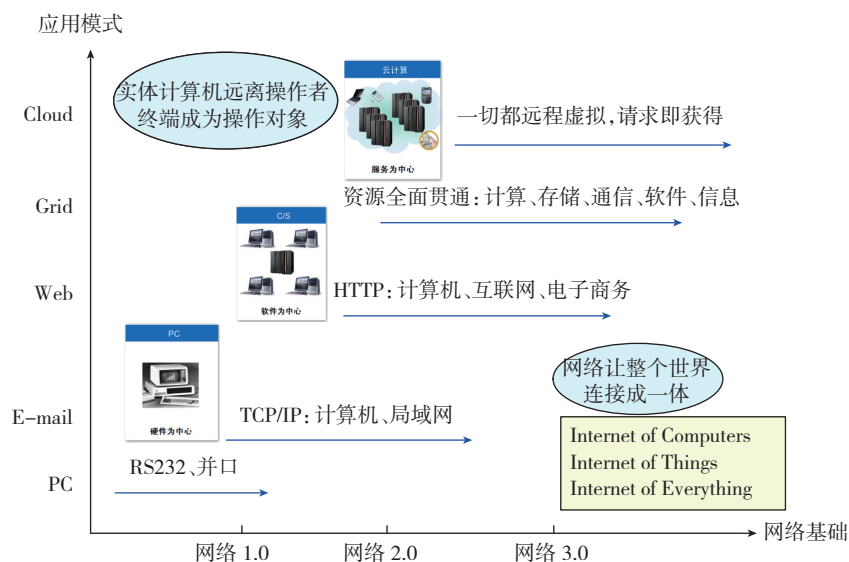


图1 计算机及网络技术发展带来的应用模式变化

计制造活动进入全数字量贯通的数字化、自动化、网络化时代,奠定了良好的技术基础及应用环境。

航空产品研制过程是一个复杂的系统工程,这一过程将产品设计与制造、分析与计算、计算机控制与辅助技术、网络技术、自动化技术、微电子技术、材料技术、管理技术等集成为一体。航空制造技术一直是先进制造技术发展和应用的重点领域之一,数控机床、CAD/CAM 技术首先是为了满足航空产品复杂结构制造需求而出现和不断发展,并大量应用于航空产品的研制过程。随着航空产品设计制造技术和计算机应用技术的发展,传统的以设计图纸为载体的设计数据表达方式已经逐渐被产品数字化模型所取代,计算机三维模型成为航空产品信息的基本载体,其制造过程也伴随着计算机技术、信息技术、网络技术的发展和不断完善,从早期以数控加工为主体的计算辅助制造扩展到零件加工、生产运行、部件装配及总体装配等全过程的数字化制造。伴随着数字化技术的发展变化,航空产品研制在经历了二维图纸、三维模型、数字样机等典型阶段后,发展到现在的并行协同工作模式,数字量信息贯穿从产品设计到制

造的整个过程,大大提高了产品质量,并缩短了研制周期。航空产品全数字化设计制造模式已经形成,数控车间已经成为各航空企业的核心能力建设重点,数控设备已经成为航空企业近年来技术改造配备的主流装备。总体上,航空产品研制已经进入数字化时代,数字化表达、网络化连通、协同化研制、数字化执行已经成为航空产品研制的基本模式。

现代航空产品要求具有良好的飞行性能、长寿命与高可靠性、合理

的制造与使用成本等,使得航空产品的零件结构、材料体系、加工要求等不断发展变化(如整体结构、高强度材料、抗疲劳等),提升工件加工精度、提高表面质量、实现零部件制造过程稳定控制成为航空产品研制和批量生产所关注的核心;另外,用户需求的多样化也导致产品类型的多样化,多品种、小批量乃至个性化成为新的航空产品研制模式。在处于数字化时代的航空产品研制过程中,加工执行、工况处理、生产系统快速响应等方面,都迫切需要提升整个过程的智能处理和协同管控能力,以实现制造系统的稳定、准确运行,满足制造过程稳定控制需求,智能制造将为提升航空产品研制过程的智能处理和协同管控能力提供保障,也将带来航空产品研制模式的变革和转型升级。

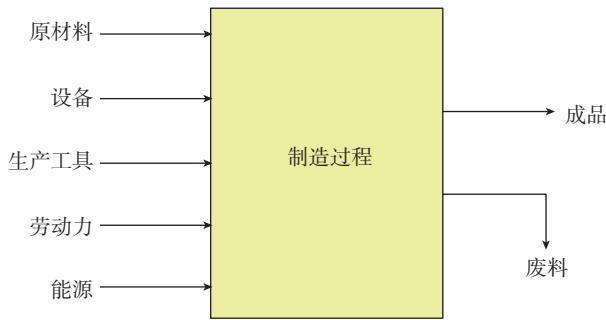
智能制造的基础及内涵

制造是从概念到实物的过程,通过制造活动把原材料加工成适用的产品。制造可分为狭义的制造和广义的制造 2 类,表 1 给出其基本涵义和表现形式。

传统的制造活动模型如图 2^[1] 所

表1 制造的涵义及表现形式

狭义的制造	广义的制造
指生产工厂/车间内与产品加工、装配相关的工艺过程。利用加工设备和工具在能源驱动作用下,使原材料或毛坯的几何形状或物理化学性能发生变化,最终形成各种用途的产品过程。工厂/车间对于生产出的产品承担售后服务责任。涵盖生产生命周期	指将可用的资源(如物质、能量、信息等)转化为可供人们利用或使用产品的过程,主要包括:一些具体的工艺活动,与产品制造相关的需求分析、产品设计、工艺规划、生产准备、作业计划、加工装配、质量保证、销售、售后服务以及报废产品回收等一系列相互联系的活动。涵盖产品全生命周期
<p>狭义制造的生产生命周期</p>	<p>广义制造的产品生命周期</p>



示,其过程是,输入原材料或毛坯,利用加工设备和工具在能源驱动作用下,使原材料或毛坯的几何形状或物理化学性能发生变化,最终形成各种用途的产品,人(劳动力)是活动的主体。所有的制造活动需要通过制造系统来实现,制造系统是指以生产产品为目的,由制造过程的物料、能源、软硬件设备、人员以及相关设计方法、加工工艺、生产调度、系统维护、管理规范等组成的具有特定制造功能的有机整体。

在数字化环境下,数字量信息伴随着原材料流动、设备运转和制造活动成为产品制造过程中产生、处理、存储和使用的关键资源之一,这使得生产方式由传统的以物流为核心向以信息为核心的模式转变,信息驱动下的制造活动(见图3)模式下把产品看做是在传统的原始资源上赋予

新信息的产物,而从用户的角度只是使用产品的功能满足需求(即产品提供服务),这样,制造过程就是一个对制造系统注入生产信息(原始资源、能源和信息),从而使产品信息获得增值的过程^[2]。

从抽象的角度看,制造活动就是对“资源+信息”的处理过程,现代制造系统中由于数字模型、自动控制、数字量驱动的存在而使得制造过程的信息量激增,制造活动是对市场、开发、制造、服务和管理等各阶段信息的获取、加工、处理的过程,要求制造系统具有更强的信息加工(智能处理)能力,减小复杂处理过程对人类智慧的依赖。20世纪90年代,人工智能开始在制造领域逐步得到应用,专家系统、模式识别、神经网络等成为当时学术领域探讨的重点,出现了“智能制造”的概念,并形成了智

能制造技术、智能制造系统的基本概念(见表2^[3])。

心理学认为,从感觉到记忆到思维的过程成为“智慧”,其结果产生了行为和语言,行为和语言表达过程表现出“能力”;将感觉、记忆、回忆、思维、语言、行为的整个过程称为智能过程。人类智能涉及记忆力、计算及判断力、理解力、预测能力、情感、直觉等,而机器智能(或称人工智能)主要体现存储、计算、逻辑、推理能力,机器智能依据的方法、规则只是人类部分智能的抽象和固化。智能制造是一种生产模式,涵盖了从独立设备的机器智能到制造过程的系统智能的进步和发展,从控制论原理看,控制系统的作用就是以某种智能的方式从外界提取必要的信息(称为输入),按一定的规则由中央处理器进行处理,产生新的信息(称为输出)反作用于外界,以达到一定的目的^[4]。由此,我们给出智能制造的典型特征:“动态感知——实时分析——自主决策——精准执行”(见图4),即利用传感系统获取制造系统的实时运行状态信息和数据,通过高速网络实现数据和信息的实时传输、存储和分析,根据分析的结果,按照设定的规则或积累的知识通过人工智能方法做出判断和决策,再将处理结果反馈到现场完成精确调整和处理,这一过程是在数字量、网络通信和自动化技术支持下实现的。

对于航空产品研制,智能制造的前提是产品和制造过程的数字化模型、数字化控制的工艺装备、网络化集成的制造系统、基于规则或知识库的智能化处理。智能制造系统是人—机一体化的混合系统,在智能制造系统中,机器智能和人的智能将紧密地集成在一起。实现智能制造的工厂首先是数字化工厂,制造活动及对象是数字定义的,执行过程是由数字量驱动的;其次是虚拟工厂,所有的制造活动可以在计算机支持的虚拟

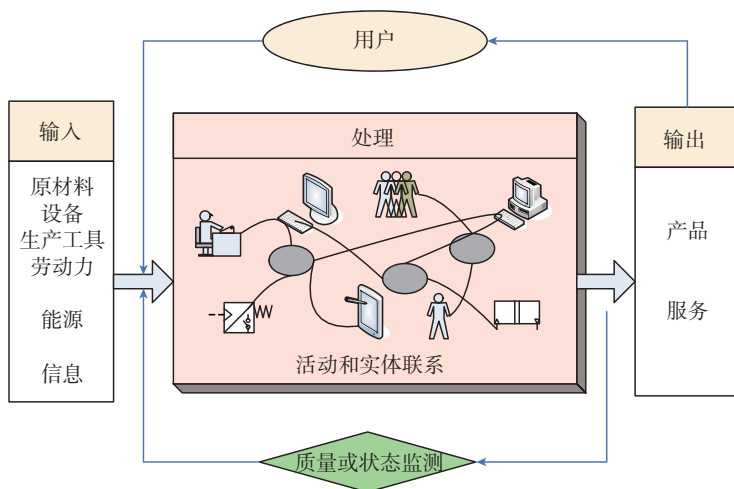


图3 信息驱动下的制造活动模型

表2 智能制造技术及智能制造系统的基本概念

智能制造技术 (IMT)	智能制造系统 (IMS)
在数字化、自动化装置及系统应用的基础上,将人工智能引入到制造过程中,形成以存储、计算、逻辑、推理为特征的机器智能所驱动的产品制造技术。在制造过程的各个环节,通过计算机模拟人类专家的智能活动,进行分析、判断、推理、构思和决策,取代或延伸制造中人的脑力劳动,并对人类专家的制造智能进行收集、存储、完善、共享、继承与发展	借助计算机和网络,综合人工智能技术、自动化技术、智能制造设备、现代管理技术、制造工艺技术、信息技术和系统工程技术;以标准化和互换性为基础,使制造系统中的经营决策、生产规划、作业调度、产品加工和质量保证等各个子系统分别智能化;是通过网络集成的高度自动化制造系统
传统的工具、设备延伸了人的四肢能力,IMT 扩展了人的大脑能力	为集成化的制造系统,从个体智能到整体智能

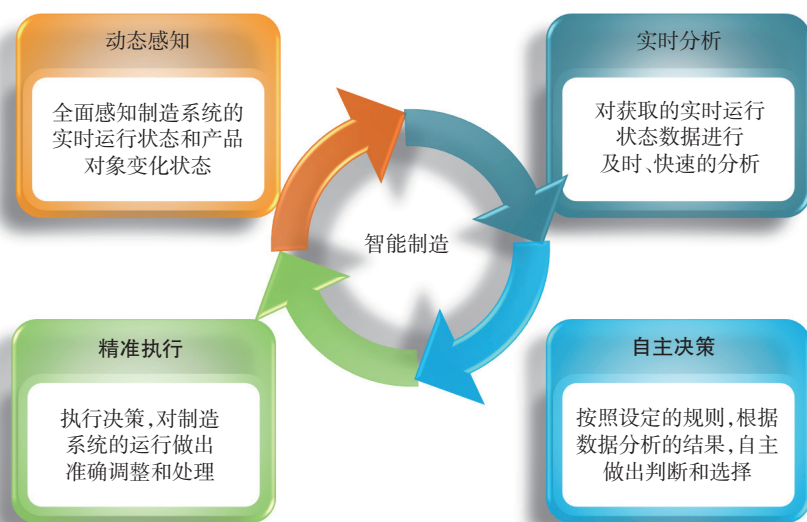


图4 智能制造特征

空间中进行仿真执行;最后是智能工厂,独立的智能设备或单元(系统)体现出“自动化”和“自主性”,由设备或单元(系统)构成的制造系统具有“自组织能力”和“合作性”,面向供应链或外部市场体现出“协作化”。

从智能制造的基础和内涵中可以看出,数字化、网络化、自动化、智能化是智能制造系统的基本前提要素。数字化是全制造和产品定量表达的手段;网络化是数据和信息的实时传输、存储和分析的基本支持环境;自动化是制造系统运行、智能化处理的基本保障;智能化是制造系统中数据和信息处理的基本方法,智能制造系统是一个“感知—分析—决策—执行”的全闭环系统。

航空产品智能制造的技术结构及基本组成

制造控制过程通常分为批量生产型、连续生产型、离散生产型3种形式,制造活动体现在企业的不同层级中,企业、工作场所、工作区域、生产线/生产单元、加工设备构成了支持制造活动的主体^[4-6],综合起来,这里给出智能制造系统的信息层级结构模型(见图5),一方面是制造活动的从语义/图形(Semantics/Graphics)到Pattern(模式)到Model(模型)到字节(Byte)的数字化,另一方面是制造运行过程中现场状态信息从字节(Byte)到字/像素(Words/Pixels)到语句/图像(Sentence/Image)到语义

/图形(Semantics/Graphics)的理解,在这样的过程中,智能处理将在各个环节以“感知—分析—决策—执行”的全闭环控制发挥作用。

制造系统中信息的智能处理是智能制造的核心,也是航空产品狭义制造过程首先要关注的重点,主要涉及生产规划、工厂/生产线设计、产品工艺设计、生产运行、现场加工等过程。

航空产品研制已经进入数字化时代,数字化的装备成为各个工艺环节不可或缺的基础资源,复杂形状零部件制造的工艺活动已经由传统的手工操作变成程序控制执行,这种数字化执行手段为实现航空产品智能制造奠定了基础。航空产品制造过程的智能化主要由4个方面组成。

(1) 智能加工工艺。

传统的数控和数字化加工过程是根据零部件的设计模型和工艺要求确定加工工艺及程序,基于空间和时间的确定性关系来完成产品制造工作,加工状态是依靠现场工作人员监控、事后检测来确认的,难以实时掌握加工过程中工况的时变规律,并即时做出决策,导致航空产品零部件质量一致性不稳定,表面质量状态波动大,零部件的装配互换性差,服役性能不稳定,从而引起返修或安全事故。智能加工工艺是在零部件制造过程中,增加对加工过程、时变工况的在线监测,采用智能技术对获取的加工过程状态信息进行实时分析、评估和决策,实现对加工过程的自主学习和决策控制,扩展了加工过程智能处理能力。更进一步,可以通过自主学习形成工艺知识库,支持工艺设计与程序设计过程,实现工件加工工艺的自主决策设计和优化。

智能化加工工艺的航空制造领域的应用主要方向是:工件加工过程的力—热—变形场的实时监控与工况优化控制、加工轨迹跟踪与实时修正、加工区域状态的实时监控与评

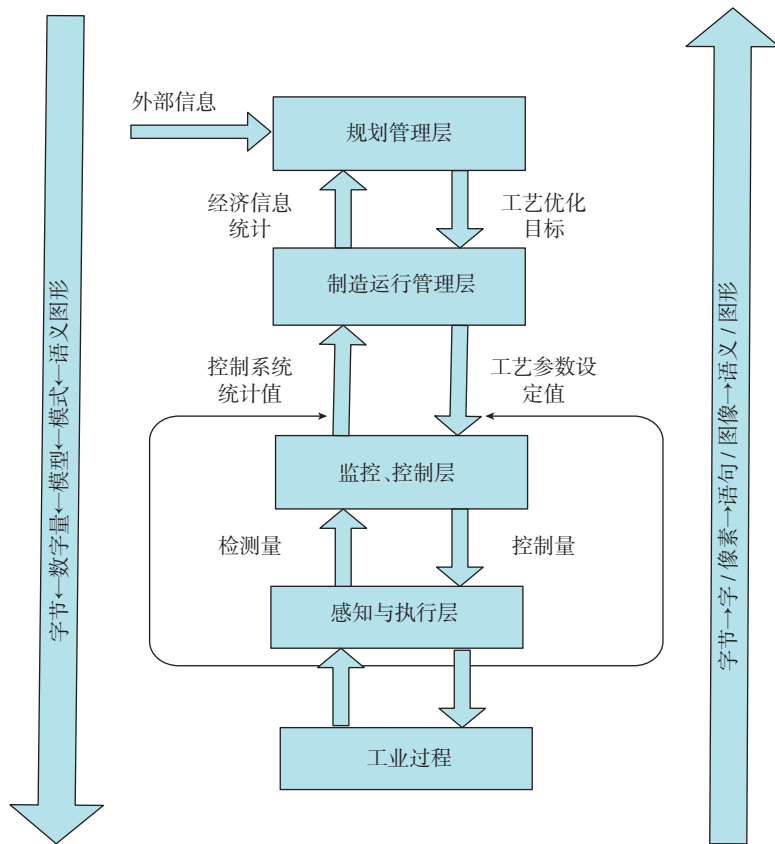


图5 智能制造系统的信息层级结构模型

估、非确定定位状态下的工艺基准协调、复杂零件加工余量优化调整及其表面平顺性控制、加工工艺与程序的智能化设计等,典型实例如叶片和整体叶盘的自适应加工、焊接轨迹跟踪及实时修正、焊缝质量监测评估与工艺参数即时优化、部件自动化制孔与连接装配工艺等。

(2) 智能装备及智能制造单元。

现代数控装备是按确定的空间关系和程序逻辑来运转的。随着数控系统计算处理能力的不断提升和功能部件不断发展完善,数控装备的加工效率、稳定性、灵活性、信息处理能力都有了极大的提高,已经成为支持航空产品制造的关键基础,航空产品构件的整体化、大型化、结构复杂化以及高性能材料的广泛应用,推动了航空产品制造工艺向集成化和复合化方向发展。智能装备及智能制造单元是支撑航空产品智能加工工艺实现的基础,也是航空智能制造实

施的关键条件。

航空制造领域的智能装备及智能制造单元主要包括智能机床、智能机器人、智能控制装置及系统、复合加工单元、智能物流系统、传感识别及信息采集装置等,能够对设备、工艺系统及加工状态实时监测,并通过人机交互实现智能决策与自适应控制。这些智能装备及单元应针对航空产品整体化、大型化、结构复杂化零件及高性能材料加工进行适应性设计和开发,满足航空产品制造过程中运动、功率、扭矩、能量、信息等的智能化控制要求。目前已经应用的智能装备和单元包括智能化加工中心、机器人智能焊接系统、部件及总装自动化喷漆系统、飞机大部件对接与装配系统等。

(3) 智能制造系统。

从狭义的制造看,航空产品制造包含一系列工艺过程和工序过程,原材料及信息进入由工艺装备、物流系

统、工作人员、能源动力等组成的制造系统,经过不同的工序或工艺处理,形成符合设计要求的产品;而从广义的制造看,制造包含了产品设计、制造、服务的全过程。传统制造过程是以人为核心实现制造系统的运转,制造过程信息化也主要是在信息收集、存储、传递方面减轻了人工工作量,航空产品数字模型、复杂结构、数字量协调、工艺装备高度自动化控制等带来的大量数据、复杂的工作状态、准实时和实时数据处理等,使得工作人员在制造状态跟踪、决策处理方面面临巨大压力。智能制造系统以数字化技术为基础,引入智能处理决策功能,构建出基于智能化装备、智能化工艺、传感识别网络、智能决策处理系统、人机互联的智能化制造系统,使制造智能由个体智能跨越到整体智能,实现对航空产品设计、制造、服务的全过程支持。

由于航空产品结构和制造过程的复杂性,智能制造系统依据产品类型和主体制造工艺不同而有所差异,可分为切削加工、钣金成形与加工、复合材料构件制造、部件装配、整机装配、检测测试等不同类型,但他们均具备智能化工艺设计与优化、智能化运行管控、传感识别网络及实时处理、制造数据采集与知识库、网络化开放控制、在线学习和工艺优化等基本能力,典型的智能制造系统包括飞机结构件智能切削加工系统、发动机盘环件智能生产线、复合材料构件智能制造系统、飞机智能装配生产线等。

(4) 航空产品智能维护与服务。

波音 787 飞机采用数字化技术和网络化协同形成了全球协作研制模式,通过网络技术,波音公司也在全球范围内初步实现了对服役飞机的飞行起降点、维修状态等的实时监测。随着计算机和网络化技术的发展、信息化与工业化的深度融合,移动互联网、知识工作自动化、云计算、先

进机器人等成为影响人类未来生存模式发展的颠覆性技术,产品的制造模式也将从传统的专业化分工、流水线化作业、协同化研制跨入以网络互联为基础的全新模式,多品种研制、批量化生产将逐步由个性化定制所取代,设计、制造、服务将形成一种“众包”模式,用户需求、产品制造、使用服务将成为网络世界的主要活动,用户获得的是需求服务而不是通过拥有产品满足需求。

航空产品智能维护与服务具有以下特征:对产品使用过程的主动监测、关键结构或组件的连续跟踪、产品工作状态即时分析、基于工作状态的维护更换等。典型的支持系统包括:传感与状态检测系统、基于高速网络的数据传输系统、大数据分析系统、云服务平台及系统、维护支持系统、电子手册等。

航空智能制造技术发展途径

尽管航空产品研制模式已经开始进入数字化时代,但由于相关基础环境和平台条件还不能准确、及时、有效支持产品研制、数据协同、运行监控、全生命周期管理等关键过程,导致产品研制过程中,存在数据传递及时性差、数控设备运行效率低下、产品质量跟踪控制难等一系列制约产品及时交付的问题,数字化系统集成、网络化连通、智能化制造将成为提升航空产品研制和生产核心能力的基本手段。发展航空智能制造技术,应从支撑技术入手,实现从智能制造单元、智能制造系统到智能工厂的演进,最终打造智能航空产品。

(1) 针对航空产品研制和发展需求,建立关键智能工艺装备研制和应用能力,形成典型产品智能化生产线,开发一批支持产品稳定加工的智能化系统或装置,形成全数字化驱动、网络化协同、全生命周期管理的研制与批生产模式。

(2) 针对典型零部件制造过程,

研究状态监控与信息采集、基于工况的决策处理、制造过程建模仿真等智能制造关键技术,建立航空产品智能化设计与执行的支持工具,满足机械加工、钣金成形、复合材料构件制造、零部件装配等需求,为航空产品制造提供高精度、高效率、智能化的工艺手段;建立包括智能化测控一体加工、复材自动铺放、钣金数字化成形、数字化光整加工、智能物流传输、数字化柔性装配线等智能化装备及系统,形成航空产品数字化智能化支持产品;研制以数字化、智能化控制为特征的关键工艺设备及系统,通过设备联网、物流集成、数据协调、生产线运行控制等技术方法集成应用,建立关键零件的集成化生产线,采用智能化的管理、调整与控制技术方法,实现生产线物流、信息流的协调运行,满足航空关键零件加工精度稳定性、表面质量一致性控制的迫切需求。

(3) 应从现在起,围绕支撑技术、单元技术、系统技术等层面逐步开展智能制造的推进和实施工作。

智能支撑技术重点要突破的技术包括:适用于航空制造工况及其产品的智能传感技术,基于大数据的各种工况感知信息的采集、融合和分析处理技术,分布式实时网络的构建及赛博物理融合系统(CPS)技术,制造过程的虚拟建模、半物理和物理仿真技术等。

智能制造单元技术重点要突破的内容包括:专用嵌入式控制单元、减速机智能核心器件,实时状态监控、健康检测、故障诊断等实时运行监控方法,视觉监控的机器人焊接、智能化钻铆、测控一体的五坐标加工,基于力感知的打磨、柔性化工装定位等智能化执行单元,知识建模、智能决策支持系统等。

智能制造系统重点要突破的技术包括:制造系统的分布式网络化管控、多机器人的协同控制、工艺与装备的信息交互与过程优化、系统状

态监控与智能化加工决策、制造过程数值仿真与工艺优化等。

智能工厂要解决的关键技术包括:工艺布局规划与虚拟工厂、智能仓储与物流、智能化生产调度、生产过程实时监控、质量状态跟踪与智能化检测等。

智能制造是工业化与信息化深度融合的产物,当前,我国政府正在推进《中国制造2025》这一战略规划和行动计划,我们应该抓住这一有利时机,在中航工业已有的数字化网络化设计/制造基础上,打造航空智能制造,提升我国航空制造业的整体能力和水平。

结束语

智能制造从宏观上将推动传统的标准化、大批量、刚性缓慢的生产模式向个性化、高度柔性化、快速响应市场需求方向转变;微观上,将通过数字化、网络化、自动化和智能化的系统集成,实现产品研制过程的全闭环控制。

作为数字化、网络化、自动化延伸发展的智能制造,将为制造业带来从大规模生产到定制化柔性生产的变革,将建立一个高度灵活的个性化和网络化的产品研制和服务模式,实现从最初设计创意到最终产品制造乃至使用服务的全流程控制和管理。

参考文献

- [1] James A R, Henry W K. 计算机集成制造. 夏莲, 韩江, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 王焱. 未来工厂: 数字量贯通的集成运行. 航空制造技术, 2015(8):40-45.
- [3] 王润孝. 先进制造技术导论. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 万百五, 韩崇昭, 蔡远利. 控制论—概念、方法及应用. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [5] GB/T 20720.1—2006. 企业控制系统集成 第1部分: 模型和术语.
- [6] BS EN62264-1:2013. Enterprise-control system integration Part 1: Models and terminology. (责编 玲犀)