



科技前沿——数字孪生：基于仿真的系统工程

数字孪生是一种通过数字技术在虚拟空间中创建物理实体数字化镜像的技术,旨在实现物理世界与数字世界的实时交互和优化。数字孪生以物理实体为基础,利用物联网、传感器等采集数据,结合人工智能、大数据分析等技术,构建动态更新的数字模型,并通过双向数据流实现物理与虚拟的实时连接与反馈。2009年美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency,DARPA)明确提到数字孪生体概念框架及工程实施路径,并将其定义为基于仿真的系统工程,2010年NASA在技术路线图中正式使用数字孪生名称。数字孪生贯穿产品全生命周期,可用于设计、制造、运行和维护等环节,具备实时性、高仿真和智能决策能力。在制造业,可优化设备运行和预测维护;在医疗领域,可用于个性化诊疗和健康管理;在城市治理中,助力智慧城市的交通、能源优化管理;在航空航天和能源管理中,提升关键设备的监控与调度效率。数字孪生通过虚拟仿真与智能分析,为提升效率、降低成本和风险、推动创新提供了重要支撑,是数字化转型和智能化发展的关键技术。

本章在介绍当前“工业 4.0”、工业互联网和“中国制造 2025”等智能制造观的基础上,探讨新一代信息技术环境中的智能制造技术、智能工厂的体系结构和智能企业网络化协同制造框架。

3.1 概述

新一轮科技革命,特别是移动互联网、大数据、人工智能、云计算等新一代信息技术的普及,带动几乎所有领域发生了以绿色、智能、服务化、网络化为特征的群体性技术革命^[11]。产品和制造技术更加复杂,出现了全球化、智能化、服务化、协同化发展趋势^[5]。生产组织方式(生产模式)转变为运用全球资源的智能制造模式^[6],在企业内部以数据为中心实现预测型生产系统,如订单和成本预测等;产品模式向智能产品与服务系统演

变^[8],以智能产品为承载,融合全流程的服务管理和全生命周期的数据管理,为客户提供硬件、网络和软件服务的整体或个性化解决方案,如租赁服务;商业模式向服务型制造演变^[9,15],可以由制造企业之间分工合作完成制造过程,相互之间提供制造服务,如外包等,也可以将制造环节的生产性服务独立出来,建立以生产性服务为经营核心的企业,在产品生命周期内为制造企业和最终消费者提供服务,如运营、维护服务;在产品和服务的全球化开发、生产、运营和维护过程中多主体紧密协作,价值链从企业为客户提供产品向提供个性化产品和服务转变^[15],在提供服务的过程中以自组织方式整合企业内部、合作伙伴、用户、领域专家、云平台服务商、竞争企业等各类服务资源和智慧要素,协同为客户创造价值。

在数字经济时代,基于信息物理系统(CPS)的德国“工业 4.0”与美国工业互联网的核心要义是传统制造业利用物联网(Internet of Things, IoT)和大数据分析(big data analytics)进行的智能化转型^[27-28]。随着新一代信息技术的持续渗透以及大数据技术的推广应用,我国政府也适时地提出了“中国制造 2025”战略、“互联网+”行动计划和“新一代人工智能发展规划”等战略规划,必将驱动中国制造在生产模式上向智能制造演变、在商业模式上向服务型制造演变,价值链从为客户提供产品转变为为客户提供个性化和智能化的产品和服务。

智能制造是指将移动互联网、物联网、新一代人工智能、云计算、工业互联网和大数据等新一代信息技术,与设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节融合起来的先进制造过程、系统与模式的总称。智能制造关注信息技术与制造技术的深度融合。

在智能制造模式下,原来的基础材料、基础工艺和基础零部件等制造基础将转变为传感器、大数据和软件等内容,制造企业拥有丰富的设备实时运行状态、运营环境状态、业务运营状态、人员状态、社交网络数据以及客户反馈数据等大数据信息,通过对这些数据的分析和挖掘可以了解问题产生的过程、造成的影响和解决的方式,这些信息被抽象化建模后转化成知识,再利用知识去认识、解决和避免问题,实现智能生产与决策。这样,智能制造模式将改变“传统以库存管理为基础的制造运作管理理论”为“基于大数据的智能化服务型制造”,在这种条件下,知识成为服务型制造企业运作的基础,数据作为产生知识的主要途径,将成为企业的核心资产。

3.2 “工业 4.0”的智能制造技术

按照德国学术界和产业界解释,“工业 4.0”是继机械化(“工业 1.0”,蒸汽动力机械设备应用于生产)、电气化(“工业 2.0”,电机发明和电能使用,大规模流水线生产)、自动化和信息化(“工业 3.0”,应用 IT 技术实现自动化生产)之后,以智能制造为主导的第四次工业革命(“工业 4.0”),通过移动互联网、物联网、人工智能、云计算、工业互联网和大数据等新兴信息技术,实现智能制造。

“工业 4.0”从嵌入式系统向 CPS 进化,利用 CPS 对制造过程的组织管理模式进行革

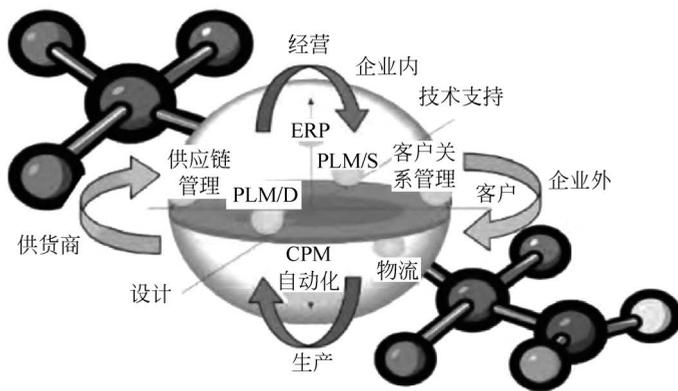
命性变革,通过工业软件、智能器件实现制造过程的智能化、虚拟化,力图在制造工厂这一德国的传统优势领域保持领先地位。在设备层面,通过智能器件和控件的小型化、自主化实现设备的智能化;在工厂层面,通过工业软件整合设备资源,实现制造过程的智能化,打造智能工厂;在生产与市场的整合方面,把设计、生产计划、制造过程管控、产品运营维护等全生命周期信息进行整合,在智能工厂内实现端到端集成,并最终实现制造模式的变革——智能制造。智能工厂作为未来第四次工业革命的标志,不断向实现实物、数据以及服务等元素的无缝连接(物联网、大数据和服务互联网)的方向发展。

3.2.1 智能工厂的概念

智能工厂作为智能制造重要的实践领域,引起了制造企业的广泛关注和各级政府的高度重视。智能工厂的概念起源于早期的智慧工厂/数字工厂模型。

1. 智慧工厂/数字工厂的概念模型

智慧工厂/数字工厂概念首先由美国 ARC 顾问集团(ARC Advisory Group)于 2006 年提出,智慧工厂/数字工厂实现了以制造为中心的数字制造、以设计为中心的数字制造和以管理为中心的数字制造,并考虑了原材料、能源供应、产品销售的销售供应,提出从工程(面向产品全生命周期的设计和技术支持)、生产制造(生产和经营)和供应链这 3 个维度描述。智慧工厂全部的协同制造与管理(Collaborative Manufacturing Management, CMM)活动^[27]如图 3.1 所示。



CPM—Collaborative Production Management (协同生产管理); PLM/D/S—Product Lifecycle Management Design/Service(产品生命周期管理设计/服务); ERP—Enterprise Resource Planning(企业资源计划)

图 3.1 早期智慧工厂的概念模型(来源于美国 ARC 提出的智慧工厂/数字工厂模型)

数字工厂作为支撑“工业 4.0”现有的最重要国际标准之一,是 IEC(国际电工委员会)/TC65(65 技术委员会:工业过程测量、控制和自动化)的重要议题。

2011 年 6 月,IEC/TC65 成立 WG16“数字工厂”工作组,西门子、施耐德电气、罗克

韦尔自动化、横河等国际自动化企业,以及我国机械工业仪器仪表综合技术经济研究所等研究机构都参与了 IEC/TR 62794: 2012 数字工厂标准的制定。为更好地指导国内企业开展数字工厂建设,全国工业过程测量控制和自动化标准化委员会(SAC/TC124)组织国内相关单位,将该标准等同转化为我国国家标准《工业过程测量、控制和自动化生产设施表示用参考模型(数字工厂)》(GB/Z 32235—2015,2015年12月发布)。

IEC 词汇库给出的定义是:数字工厂是数字模型、方法和工具的综合网络(包括仿真和 3D 虚拟现实可视化),通过连续的、没有中断的数据管理集成在一起。它是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生命周期的新型生产组织方式。

IEC 数字工厂的概念模型分为图 3.2 所示的 3 个层次:底层是包含产品构件(如汽车车灯、发动机、轮胎等)和工厂生产资源(如传感器、控制器和执行器等)的实物层;第二层是虚拟层,对实物层的物理实体进行语义化描述,转化为可被计算机解析的“镜像”数据,同时建立数字产品资源库和数字工厂资源库的联系;第三层是涉及产品全生命周期过程的工具应用层,包括设计、仿真、工程应用、资产管理、物流等各个环节。

数字工厂概念模型的最大贡献是实现虚拟(设计与仿真)到现实(资源分配与生产)。通过连通产品组件与生产系统,将用户需求和产品设计通过语义描述输入资源库,再传递给生产要素资源库,制造信息也可以反馈给产品资源库,从而打通产品设计和产品制造之间的“鸿沟”。更进一步,实现了全网络统筹优化生产过程的各项资源,在改进质量的同时减少设计时间,缩短产品开发周期。

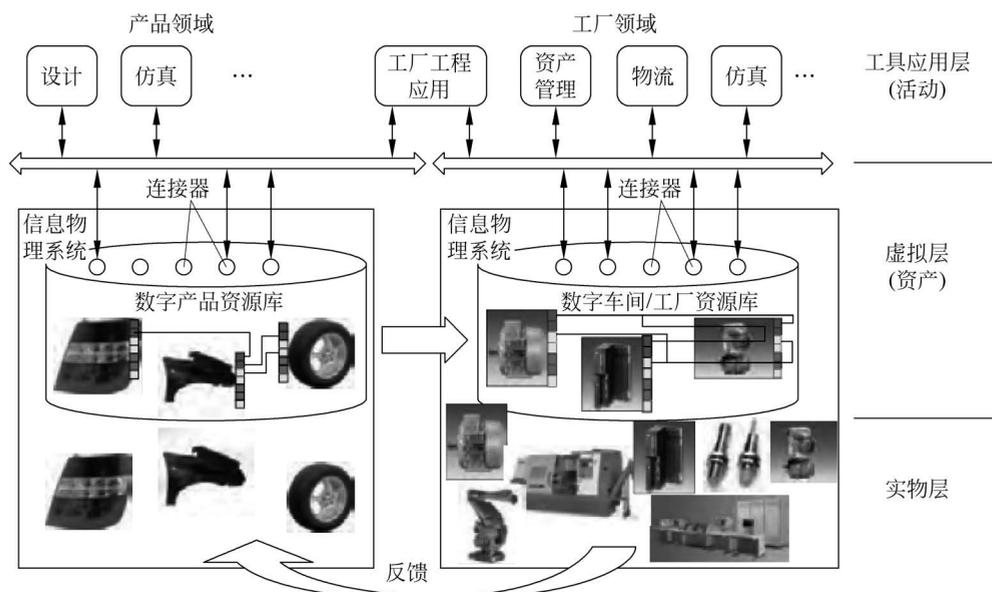


图 3.2 数字工厂概念模型的示意图

2. 虚实结合的智能工厂概念模型

随着信息技术和数据库技术的发展,数字工厂的概念和功能有了扩展。

德国的专家基于制造立国和制造强国的理念,把 CPS 运用于生产制造,提出了信息物理生产系统(Cyber Physical Production System, CPPS),以 CPPS 为模型构建智能工厂(smart factory)或者数字工厂。2012年,德国政府制定和大力推行“工业 4.0”,而且强调“工业 4.0”的特征是工业自动化和信息的紧密结合,它建立在 CPS 的基础之上。这就为智能工厂的实现指明了一条具有现实可行性的途径。于是,德国为数众多的、与制造相关的企业从跨国超大型企业(如 Siemens、SAP 等)到各类自动化产品的中小企业,都在考虑和酝酿如何应对这一发展的大趋势。

CPS 深度融合了 3C(计算、通信和控制)能力,在对物理设施深度感知的基础上,构建安全、可靠、高效、实时的工程系统。通过计算进程和物理进程实时相互反馈循环,实现信息世界和物理世界的完全融合,从而改变人类构建工程物理系统的方式。因此,智能工厂可以看作“物理工厂+虚拟工厂”的结合体^[28],如图 3.3 所示。在这个模型中,依靠自动化生产设备构建而成的物理工厂是智能制造的基础,也是绝大多数的中国制造工厂现阶段转型提升的重点和关键,即实现生产过程的自动化和数字化;在数字化的基础上,通过大数据分析及新一代人工智能技术,实现工厂的智能化分析和应用。

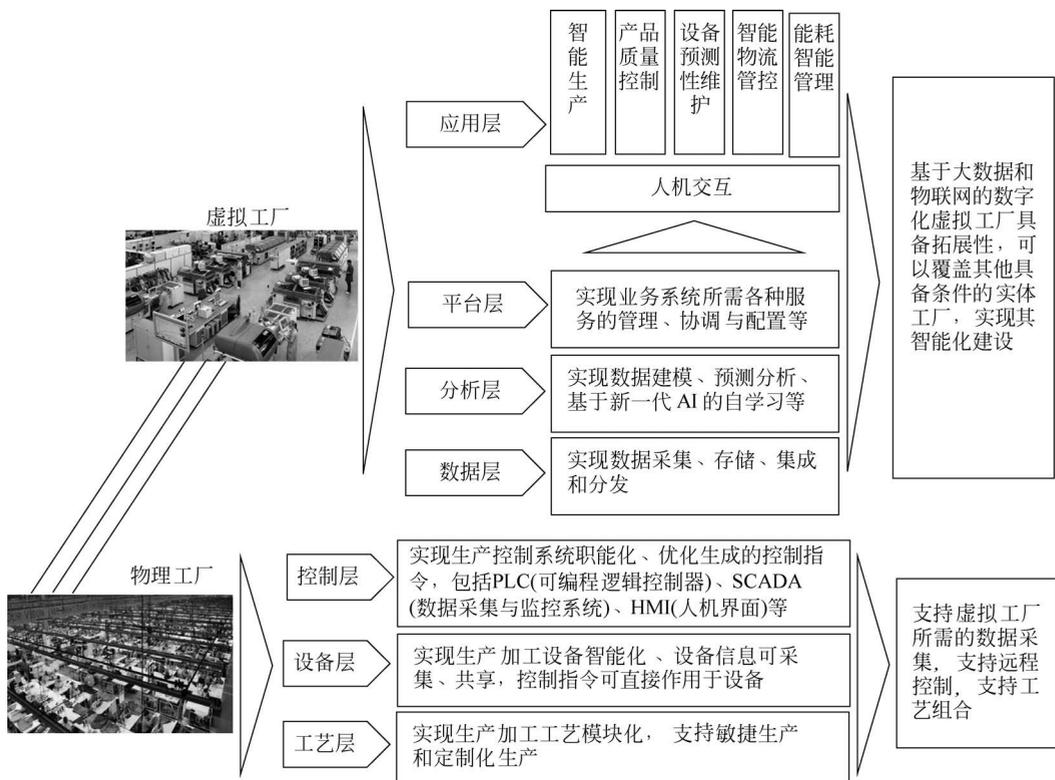


图 3.3 智能工厂 = 物理工厂 + 虚拟工厂

智能生产：当今市场瞬息万变，为了能够应对与日俱增的市场竞争压力，更好地满足市场需求，企业生产模式也由以往的大规模生产向大规模定制和更高级的个性化定制转变，这就要求工厂的生产线具备模块组合能力；在模块组合生产中，借助物联网技术，对生产模块中混线生产的个性化定制半成品、成品进行实时追踪、组合配置与调度，实现工厂的柔性化生产，并解决大规模生产向定制化生产转型带来的不确定性、多样性和复杂性问题。

产品质量控制：为更好地响应市场需求，追求成本最优，绝大多数公司会设立多家自有工厂或者使用代工厂。因此，虽然是同样的制造工艺及生产流程，但不同的供应商存在原材料差异，且生产工艺易受气候、温湿度等众多因素影响，在这种情况下，如何确保在任何工厂和同一工厂的任何时间按照同样生产工艺流程制造的产品保持同一、优质的产品特性，成为质量工程师和工艺工程师的一道难题。

设备预测性维护：为适应客户的不同需求，现在越来越多的制造业工厂同时拥有面向大批量生产的连续型流水线工艺设备、面向定制化需求的离散型多机台工艺设备，以及管线型动力设备、区域型值守物流设备等。对于不同的设备类型，如何建立差异化的运维与保障策略，实现对生产工艺、产品质量的有效保障(图 3.4)，已经成为大型生产制造企业普遍面临的难题。

智能物流管控：车间物流的智能化管理与控制。

能耗智能管理：企业能源管理是构建智能工厂的重要环节，优先对企业能源实现智能管理是智能工厂建设的重要步骤。

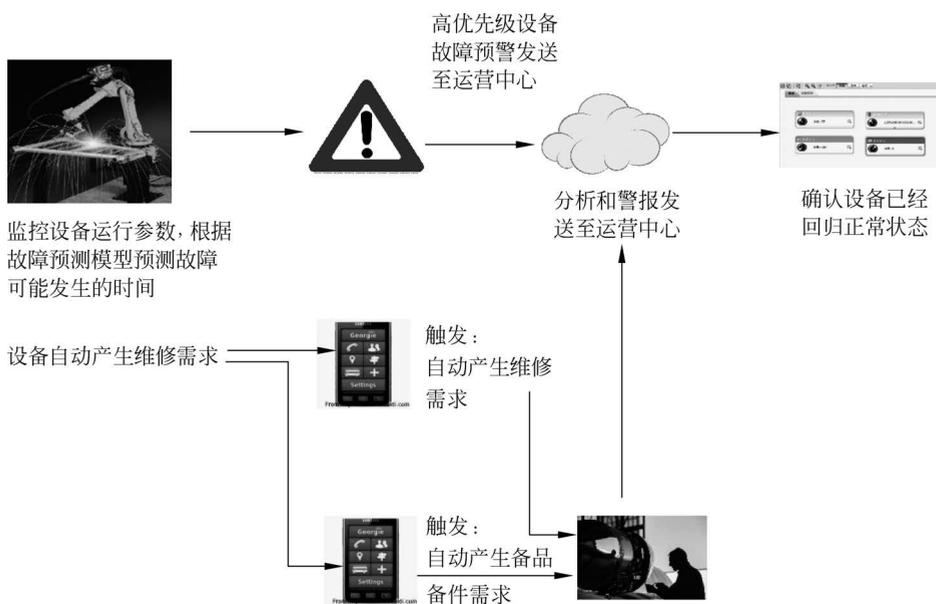


图 3.4 基于物联网和大数据的设备预测性维修

3. 通用电气(GE)智慧工厂的概念模型

2015年2月14日,GE公司在印度 Pune 建设的智慧工厂(brilliant factory)揭幕。区别于传统大型制造厂,这家工厂具备超强的灵活性,可以根据 GE 公司在全球不同地区的需要,在同一厂房内加工生产飞机发动机、风机、水处理设备、内燃机车组件等看似完全不相干的产品。

GE公司的智慧工厂结合工业互联网和先进制造技术,用数据主线打通设计、工艺、制造、供应链、分销渠道、售后服务,并形成一个内聚、连贯的智能系统。该工厂雇用的1500名工人共同分享使用生产线,包括3D打印机和激光检测设备。这里,工厂的设备和计算机相互“沟通交流”、共享信息,并且为保证质量和预防设备故障采取措施。而且,工厂的生产线通过数字化的方式与供应商、服务商、物流系统相连接用来优化生产。

GE智慧工厂^[29]的理念基于两个概念:数字主线(digital thread)和数字孪生(digital twin),其理念是通过数字主线驱动智慧工厂(图3.5),在企业各阶段实现经营目标。

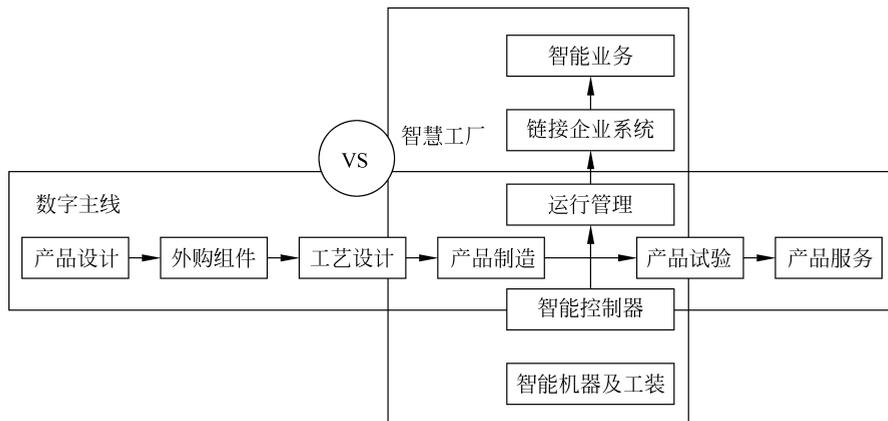


图 3.5 数字主线驱动的智慧工厂

(1) 数字主线:描述一束连接(贯穿)着产品生命周期里各阶段过程的数据(图3.6),如喷漆发动机的传感器链接着供应商等。

洛克希德·马丁公司在21世纪初研制F-35战斗机时,为大幅提高产品质量、缩短研制周期和降低成本,构建了集成产品和过程研发(Integrated Product and Process Development, IPPD)平台,提出了digital thread的概念,强调数字主线贯穿于产品全生命周期(digital thread throughout life-cycle),在F-35战斗机研制中取得了很好的效果,此后被大家广泛认可。

在2005年F-35战斗机的评审中提到:整个F-35战斗机团队通过IPPD能共享数字工程模型,其效果是非凡的,使我们能基于设计/工程/制造软件CATIA的计算机模型制作产品部件。当部件交付时,非常令人满意地看到它们完美地匹配计算机模型。这种方法创造了奇迹,如澳大利亚制造的用于F-35战斗机自主物流项目的发动机运输车,可以

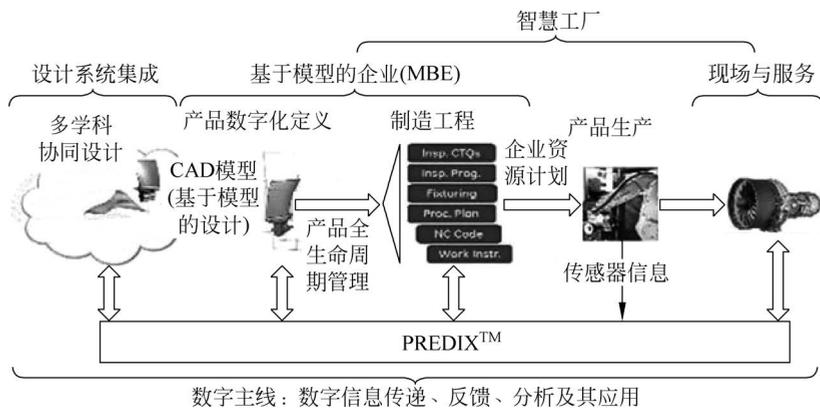


图 3.6 数字主线

精确地与发动机匹配。

GE 数字主线的核心框架(图 3.7)：将企业的运营数据转变为有效的客户化定制方案。

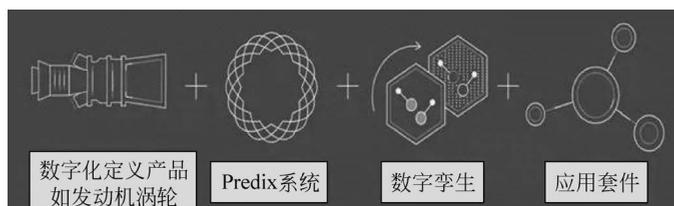


图 3.7 GE 数字主线的核心框架

(2) 数字孪生(图 3.8)：是指每件物质资产的数字模型(虚拟)，包括设计和工程细节,描述其集合形状、材料、组件和行为,以及特定物理资产的制造和操作数据,最初由美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)提出。

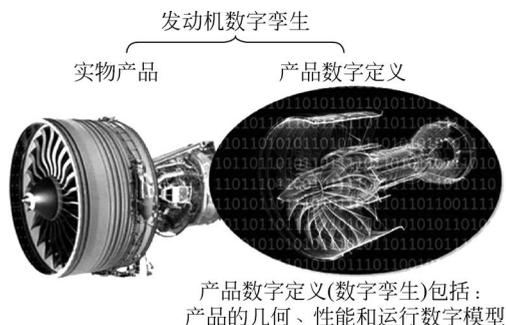


图 3.8 发动机的数字孪生模型

数字孪生的概念模型由 3 个主要部分构成：真实世界的实物产品、虚拟世界的虚拟产品、虚拟产品和实物产品间关联的数据和信息连接。

数字孪生革新了工程模拟过程(图 3.9),可帮助公司分析和优化产品在实际操作条件下的性能。



图 3.9 工程模拟的数字孪生模型

数字孪生革新了产品生产过程,可以改进物理工厂的操作监控及资产管理(图 3.10)。

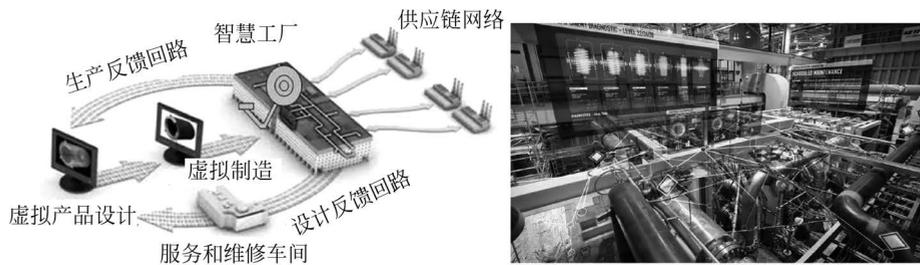


图 3.10 工厂的孪生模型(虚拟工厂和物理工厂)

数字孪生的本质是根据物理工厂创建一个资产的运营数字模型(虚拟工厂),因此,数字孪生和数据主线成为“工业 4.0”成功的关键技术。

(3) GE 智慧工厂的理念是将设计、工程、制造、供应链、分销和服务链接到一个智能系统中,因此,现代制造就是从云到车间的智能制造过程(图 3.11)。

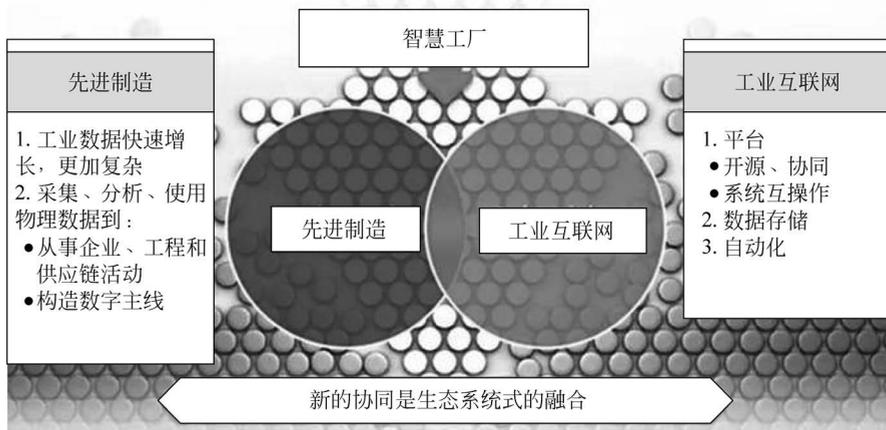


图 3.11 GE 智慧工厂

3.2.2 “工业 4.0”的核心特征

在“工业 4.0”框架(图 3.12)中,物联网和服务互联网分别位于智能工厂三层信息技术基础架构的底层和顶层。最顶层中包含与生产计划、物流、能耗和经营管理相关的 ERP、SCM、CRM 等,和产品设计、技术相关的 PLM 也处在最顶层,与服务互联网紧密相连。中间一层通过信息处理系统实现与生产设备的连接和生产线控制、调度等相关功能,从智能物料的供应到智能产品的产出,贯穿整个产品生命周期管理。最底层通过物联网实现控制、执行、传感,最终实现智能生产。

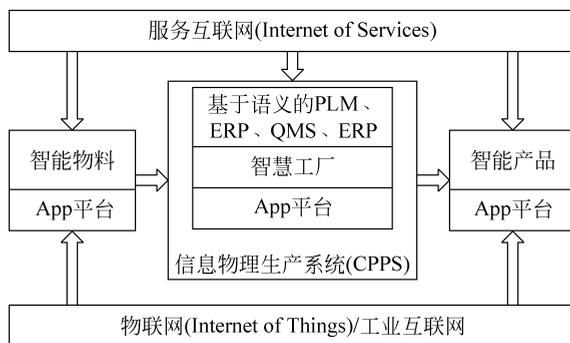


图 3.12 “工业 4.0”框架

1. “工业 4.0”的核心特征

“工业 4.0”的核心在于工业、产品和服务的全面交叉渗透,这种渗透借助于软件,通过在互联网和其他网络上实现产品及服务的网络化而实现。“工业 4.0”重点关注两方面内容:产品开发与生产过程。“工业 4.0”实施建议中,进一步提出“工业 4.0”的 3 个核心特征:

- 通过价值链及网络实现企业间的横向集成,将各种不同制造阶段和商业计划的 IT 系统集成在一起,强调产品的价值流(增值过程)集成,既包括一个公司内部的材料、能源和信息的配置(如原材料物流、生产过程、产品外出物流、市场营销等),也包括不同公司间的配置(形成价值网络)。
- 企业内部灵活可重组的网络化制造系统的纵向集成,将各种不同层面的自动化与 IT 系统集成在一起(如传感器和执行器、控制、生产管理、制造执行、企业计划等各种不同层面),强调生产信息流的集成,包括订单、生产调度、程序代码、工作指令、工艺和控制参数等信息的下行传递,以及生产现场的工况、设备状态、测量参数等信息的上行传递。
- 全生命周期管理及端到端系统工程,通过集成 CAD/CAM/CAPP、PLM、ERP、SCM、CRM、MES 等软件/系统,实现用户参与设计(个性化),并通过虚拟设计、虚拟评估和虚拟制造,更好地把用户需求同生产制造完美地结合起来,并涉及产

品直到维护服务的全生命周期,随时将用户意见反馈给前端的设计阶段,动态提升产品质量。

智能工厂的横向集成(图 3.13):网络协同制造的企业通过价值链以及信息网络所实现的信息共享与资源整合,确保各企业间紧密合作,提供实时产品和服务,实现产品开发、生产制造、经营管理等在不同企业间的信息共享和业务协同,主要体现在网络协同合作上,从企业集成过渡到企业间的集成,进而走向产业链、企业集团,甚至跨国集团间基于企业业务管理系统的集成,产生全新的价值链和商业模式。

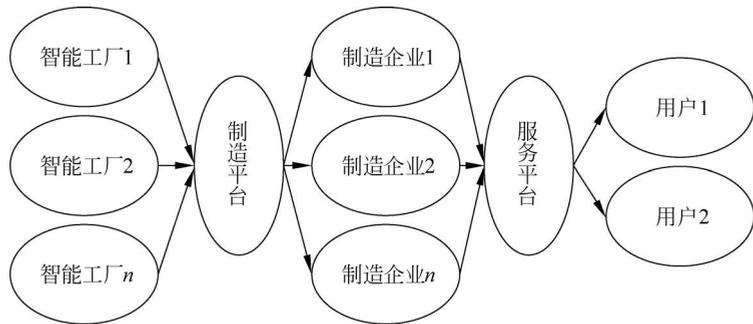


图 3.13 智能工厂的横向集成

智能工厂的纵向集成(图 3.14):基于智能工厂中网络化的制造体系,实现贯穿企业内部管理、运行、控制及现场等多个层级的企业内部业务流程集成,是实现柔性生产、绿色生产的途径,主要体现在工厂内的科学管理从侧重于产品的设计和制造过程,走向产品全生命周期的集成过程,最终建立有效的纵向生产体系。

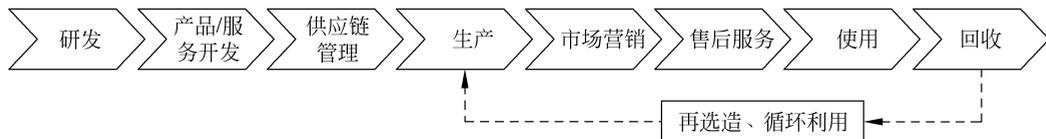


图 3.14 智能工厂的纵向集成

智能工厂的端到端集成(图 3.15):贯穿整个价值链的工程化信息集成,以保障大规模个性化定制的实施。端到端集成是基于满足用户需求的价值链的集成,通过价值链上不同企业间及每个企业内部的资源的整合及协作,是实现个性化定制服务的根本途径。端到端集成可以是企业内部的纵向集成,可以是产业链中的横向集成,也可以是两者的交互融合。

在“工业 4.0”中,对供应商而言,动态商业模式和工程流程使生产和交付变得更加灵活,而且对于生产中中断和故障可以灵活响应。现在工业制造在制造流程中已经能够提供端到端的透明化,以促进选择决策的制定。安全和安保是智能制造系统成功的关键(图 3.16),设备和产品中包含的信息特别需要被保护,以防止这些信息被滥用或者在未



图 3.15 智能工厂的端到端集成

被授权的情况下使用。这将对安全和安保的架构和特殊识别码的集成调用产生更高的要求。

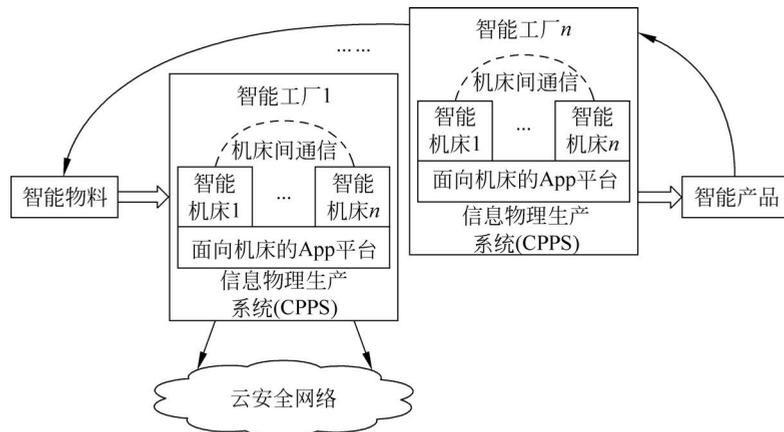


图 3.16 基于云安全网络的智慧工厂流程

企业从信息集成、过程集成、企业集成不断向智能发展的集成阶段迈进,在智能工厂的横向集成、纵向集成和端到端集成 3 项核心特征的基础上,智能制造将推动企业内部、企业与网络协同合作企业之间以及企业与顾客之间的全方位整合,形成共享、互联的未来制造平台。另外,这 3 个集成实际上为我们指明了实现“工业 4.0”的技术方向。

2. “工业 4.0”的基本特征

互联、数据、创新和集成是“工业 4.0”的基本特征,具体说明如下。

(1) 互联: 把设备、生产线、工厂、供应商、成品及客户紧密地连接在一起,将无处不在的传感器、嵌入式终端系统、智能控制系统、通信设施通过 CPS 形成一个智能网络,使得产品和生产设备之间、不同的生产设备之间以及数字世界和物理世界之间能够互联,使得机器、功能部件、系统以及人类通过网络持续地保持数字信息的交流。

(2) 数据: 在“工业 4.0”时代,制造企业的数据将会呈现爆炸式增长态势。数据包括产品数据、运营数据、价值链数据、外部数据。

(3) 创新：“工业 4.0”的实施过程就是制造业创新发展的过程，制造技术（新型传感器、集成电路、人工智能、移动互联、大数据等信息技术，传统制造技术，传统工业与信息技术融合，如信息物理空间、智能工厂等）、产品（“全面感知+可靠通信+智能”的产品以及智能装备从单机智能向智能生产线、智能车间和智能工厂演进）、模式（全新的生产模式：基于 CPS 的智能工厂和智能制造模式；商业模式：网络众包、异地协同设计、大规模个性化定制、精准供应链管理等）、业态、组织（开放创新、协同创新、用户创新）、转型（从大规模生产向个性化定制转型、从生产型制造向服务型制造转型、从要素驱动向创新驱动转型）等方面的创新将会层出不穷。

(4) 集成：互联、数据、创新这 3 项的集成。

3.2.3 信息物理系统

“工业 4.0”通过利用信息物理系统建立高度灵活的个性化和数字化的生产模式，推动现有制造业向智能化方向转型。在实践上，数字孪生和数字主线使信息物理系统成为可能。

2005 年 5 月，美国国会要求美国科学院评估美国的技术竞争力，并提出维持和提高这种竞争力的建议，5 个月后形成研究报告《站在风暴之上》。2006 年 2 月发布的《美国竞争力计划》则将信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)列为重要的研究项目。

2007 年 7 月，美国总统科学技术顾问委员会在题为《挑战下的领先——竞争世界中的信息技术研发》的报告中列出了以 CPS 为首的八大关键信息技术。2013 年 4 月，德国在汉诺威工业博览会上正式推出代表第四次工业革命的工业 4.0，并将其定义为“以信息物理系统为基础的智能生产”。至此，信息物理系统得到了广泛的研究和应用。

信息物理系统是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统，通过 3C (computation, communication, control) 技术的有机融合与深度协作，实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务。CPS 的内涵是虚实双向的动态连接，通过物理系统感知并传递数据至信息系统，从而用信息系统控制物理系统。也就是说，信息物理系统就是把物理设备连接到物联网或者互联网上，让物理设备系统具有计算、通信、精确控制、远程协调和自我管理的能力，实现虚拟网络世界和现实物理世界的融合。从这个角度而言，人体也是由物理和信息两个系统组成，健壮的身体、灵巧的四肢、敏锐的感官，相当于一个嵌入了无数传感器的物理系统，人的大脑和意识，赋予了人思考、社交和活动的的能力，构成了一个完备的信息系统，从而控制和操纵肌体这一物理系统。

按照前面数字孪生的分析，如果将数字孪生定义为物理对象的一个数字模型，那么数字孪生和信息物理系统之间的关系就很容易理解了，即数字模型、基于数字模型的各种活动（仿真）、物理对象、数字模型和物理对象之间的数据连接即数据主线（数据及仿真结果等信息）以及支持数据传输的通信网络共同形成一个信息物理系统，如图 3.17 所示。

如果将数字孪生定义为基于仿真的系统工程，那么物理对象、数字孪生、数据主线和通信网络共同形成一个图 3.18 所示信息物理系统。

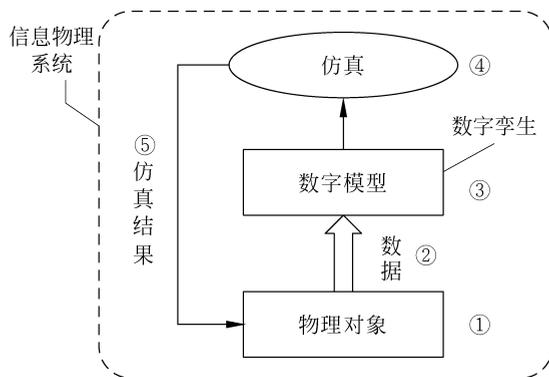


图 3.17 数字孪生和信息物理系统之间的关系

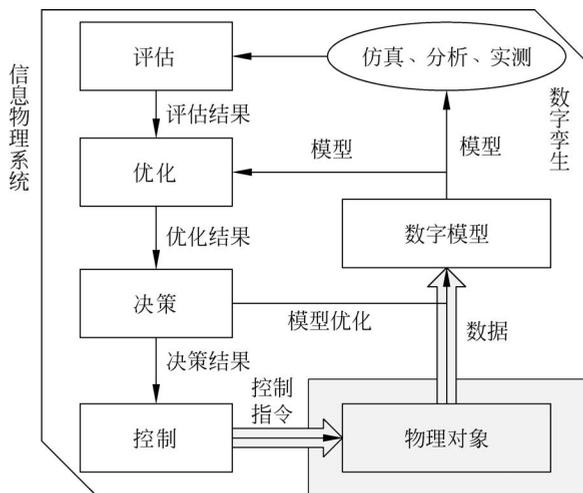


图 3.18 数字孪生和信息物理系统之间的关系

在制造领域,数据主线贯穿在产品(生命周期)域、制造(过程)域和管理(域)等不同主题域之间,从而形成了不同主题域的数据空间。因此,物理对象、数字孪生、由数据主线连接的不同数据空间和通信网络共同构成了物理对象的信息物理系统。物理对象包括机械、电气和化学等部件,这些部件嵌入传感器和执行器、A/D 和 D/A 转换器等,并由微处理器控制。传感器感知物理对象并收集有关物理对象行为的数据,数据通过通信网络传输到数字孪生系统。数字孪生则负责数据建模(数字模型)、仿真、分析、评估、优化、决策和控制物理对象,以控制和协调物理对象的行为,控制决策结果通过通信网络以控制指令的形式传输到相应的执行器,以执行控制行动。

数字孪生是从物理实体对象镜像出一个信息化的数字孪生体,是物理系统到信息系统的映射过程。从这个角度看,数字孪生是建设 CPS 的基础,是 CPS 发展的核心技术。

3.3 工业互联网的智能制造技术

工业互联网是机器、物品、控制系统、信息系统、人之间互联的网络,为智能制造提供信息感知、传输、分析、反馈、控制支撑。工业互联网的概念最早由美国通用电气(GE)公司于2012年提出,随后,GE联合AT&T、思科、IBM和英特尔于2014年3月发起成立美国工业互联网联盟(IIC),将这一概念大力推广,并由对象管理组织(OMG)管理。

工业互联网联盟的愿景是使各个制造业厂商的设备实现数据共享。工业互联网联盟的成立目的在于通过制定通用的工业互联网标准,利用互联网激活传统的生产制造过程,促进物理世界和信息世界的融合。通过感知网络把机器、设备和人进行高效地连接,在制造全流程实现信息的高效整合。通过全流程大数据分析,对整个制造系统的运行方式进行整体把握和全局优化。通过人机交互和决策,构建实时的智能设计、生产和运营维护保障。

3.3.1 工业互联网框架

工业互联网的实质是指利用智能设备采集智能数据,利用智能系统进行数据挖掘和可视化展现,实现智能决策,为生产管理提供实时判断参考,反过来指导生产,优化制造工艺,如图3.19所示。工业互联网的典型特征是其智能性:与数字化制造相比,智能制造具有预测、决策与自主调整优化等能力。

1. 物联网

2013年,美国提出的万亿传感器覆盖地球(Trillion Sensors Universe, TSU)计划,旨在推动社会基础设施和公共服务中每年使用1万亿个传感器。

物联网是将现实世界与信息技术紧密结合的系统。通过信息技术源源不断地获取由摄像头等各种传感器的现实世界的的数据,互联网将直接和间接地对机器人和其他设备在现实世界的活动产生影响。信息技术与现实世界的融合,除了物联网之外,还有其他表述。例如,美国自认科学基金早在2006年就召开了CPS工作组会议,探讨了CPS的可行性,并认为CPS是美国在未来世界保持竞争力的关键;IBM公司推出智慧星球(smart planet)的愿景,借助传感器推动信息技术与现实世界的融合;HP公司也推出了类似的地球中枢神经系统(the Central Nervous System for the Earth, CeNSE)概念。

在制造业领域中,信息技术与物理世界的融合并非是最近才开始的,飞机与汽车中实际上已经嵌入了复杂的信息技术,一辆高端汽车中可能含有100多项信息技术工艺。

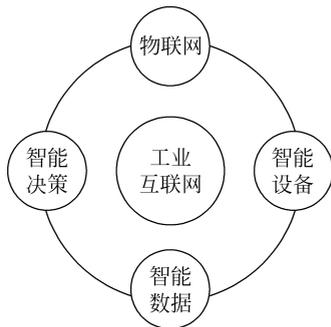


图 3.19 工业互联网框架

可以说,物联网为智能设备奠定了基础。

2. 智能设备

GE 的工业互联网带来了智能设备的概念,其基本含义就是在现有的基础上引入工业互联网的机制,包括连接性、智能机器、传感器、大数据和数据模型等。通过在各个层面采集数据、分析数据,形成智能决策,既要实现设备自身的可维护性,又要实现运营过程的优化。

由智能设备和网络搜集的数据存储之后,利用大数据分析工具进行数据分析和可视化。由此产生的智能信息可以由决策者在必要时进行实时判断处理,或者成为大范围工业系统优化战略决策过程的一部分。例如,GE 使其生产的风力发电机叶片实现全部联网,实现:①点击自我监测,并通过无线网络发送感知数据;②汇集各个时段、各个区域的数据;③通过数据挖掘,分析风速和电机叶片的夹角,实现叶片的自我调整,以及分析最佳的电机维修保养时机;④匹配最恰当的工具和经验技巧知识,让工作人员高效地完成作业;⑤保持网络协同,同步更新工业互联网数据,从而有望使产能提高 50%。

智能设备还可以在机器、网络、个人或企业之间促进实现数据共享,用以进一步促进智能协作,使众多的相关企业参与到资产维护、管理和优化过程中,也可以确保在恰当的时候将哪些本地和远程拥有专业知识的人们整合起来。每台智能设备都会产生大量可以通过工业互联网传输给远程机器和用户的数据,这些数据还包括那些能够优化系统运行、维护机器和机组的外部数据。随着时间的推移,机器能够从它的历史数据中得到启示,并且通过控制系统更加智能地运转。

3. 智能数据

随着越来越多的机器和设备加入工业互联网,可以实现跨越整个机组和网络的机器与仪表的协同。智能数据具有优化网络、优化运维、恢复系统与自主学习价值,具体如下。

(1) 优化网络:在一个网络系统内实现互联的各种设备或机器,可以相互协作,提高网络整体的运营效率。

(2) 优化运维:通过智能数据可以实现效率最大化,成本最低化,并有利于整个设备或系统的运行维护。

(3) 恢复系统:通过建立广泛的大数据信息,帮助网络系统在发生毁灭性打击之后更加快速、有效地进行恢复。

(4) 自主学习:每台设备或机器的操作经验可以聚合为大数据,使得整个系统能够自主学习。

4. 智能决策

一旦智能设备采集到大量智能数据,就可以通过智能系统进行智能决策,以提升商业经营价值。设备与数据相结合,实现了协同实时更新,将使诸多行业受益。

3.3.2 工业互联网的支撑技术

2021年8月,尽管美国工业互联网联盟的名称改为美国工业物联网联盟,全面转型物联网,其核心是工业互联,而建立在工业互联基础上的大数据分析理论奠定了工业互联网的理论基础,系统建模与仿真、信息融合则支撑着大数据的分析决策过程。

1. 系统建模与仿真

系统是指具有某些特定功能、按照某些规律结合起来,互相作用、互相依存的所有事物集合。例如,可以把餐馆定义为一个系统,系统有服务员和顾客。顾客按照某种规律到达,服务员根据顾客的要求按一定的程度为其服务,服务完毕后顾客离去。在该系统中,顾客和服务员互相作用,顾客到达模式影响着服务员的工作忙闲状态和餐馆预定状态,服务员的多少、服务效率高低也影响着顾客接受服务的质量。

模型是对实际系统的一种抽象,是系统本质的表述,是人们对客观世界反复认识、分析,经过多级转换、整合等相似过程而形成的最终结果,具有与系统相似的数学描述形式或物理属性,以各种可用的形式给出研究系统的信息。

在一般意义上,模型是一种替代,用于代表原对象以便得到更好的定义,从应用的角度,模型不是原对象的复制,而是根据不同的使用目的,选取原对象的若干方面进行抽象和简化。模型有多种形式,典型的有以下几种:

- (1) 物理对象模型(比例模型、模拟模型或原型),如汽车轮胎、引擎模型等。
- (2) 图表模型,如记录地理数据的地图,设备及部件的几何模型等。
- (3) 方程式或逻辑表达式表示的数学模型,如卫星轨迹计算程序,飞机飞行轨迹计算程序,化学反应的最终产品质量或能量平衡方程等。
- (4) 智力模型,如为指导人的行为而建立的人与环境的关系模型。
- (5) 口述或文字描述(语言模型),如指导工序操作的方案等。

按照系统论的观点,模型是对真实系统的描述、模仿或抽象,即将真实系统的本质用适当的表现形式(如文字、符号、图表、实物、数学公式等)加以描述。

为了研究、分析、设计和实现一个系统,需要进行试验。试验的方法基本上可分为两大类:一类是直接在真实系统上进行;另一类是先构造模型,通过对模型的试验来代替或部分代替对真实系统的试验。历史上大多数采用在实际系统上做实验的方法。随着科技的发展,尽管第一类方法在某些情况下仍然是必不可少的,但第二类方法日益成为常用方法。

建模(开发模型)的目的是用模型作为替代品来帮助人们对原物进行假设、定义、探究、理解、预测、设计,或者与原物某一部分进行通信。人们在长期的研究与应用中,创造出了适用于不同对象研究分析要求的模型描述形式。

仿真是以相似原理、系统技术、信息技术及其应用领域有关专业技术为基础,以计算机和各种专用物理效应设备为工具,利用模型对真实的或假想的系统进行动态研究的一门多学科的综合技术,仿真的对象是系统。随着科学技术的进步,特别是信息技术的

迅速发展,仿真的技术含义不断地得以发展和完善。但是无论哪种定义,仿真基于模型这一基本观点是共同的。因此,系统、模型、仿真三者之间有着密切关系。系统是研究的对象,模型是系统的抽象,仿真意在通过对模型的实验来达到研究系统的目的。

现代仿真技术均是在计算机支持下进行的,因此,为了理解和认识客观世界的本来面目及其复杂性,人们必须建立人造对象并使其动态地运行,计算机的作用就是驱动人造对象和虚拟环境。仿真首先要建立模型,然后运行模型。因此,计算机仿真有三个基本活动:建立实际的或设想的物理系统模型(系统模型)、在计算机上执行模型(模型执行)、分析输出(模型分析)。联系这三个活动的是仿真的三要素,即系统、模型、计算机(包括硬件和软件)。

由于仿真以建立模型为基础的,为了突出建模的重要性,建模和仿真(Modeling & Simulation, M&S)常常一起出现,都是计算机科学和数学的独特应用。1997年,美国国防部对武器采购进行改革,提出了基于仿真的采办(Simulation Based Acquisition, SBA),将建模和仿真技术应用于武器从需求分析到最终报废的全生命周期过程。洛克希德马丁公司的F35战斗机是第一个全面引进SBA概念而研制的产品。

在制造业,建模和仿真也一直发挥着不可替代的作用。早在2000年,美国DARPA、商务部、能源部、NSF联合发布了一项国家级制造业发展战略研究及推广计划“集成制造技术路线图(Integrated Manufacturing Technology Roadmapping, IMTR)”,提出了制造业面临的6个重大挑战,即成为精良、高效的企业,提高响应客户的企业,成为全面互联的企业,保持环境可持续性,进行知识管理,善于应用新技术。不难看出,这六大挑战放到今天也仍然成立。IMTR进而提出了迎接这6大挑战的4类技术对策,即面向制造的信息系统、建模和仿真技术、制造工艺与装备、企业集成。由此可见,建模和仿真技术对于制造业的重要性。

2. 大数据分析建模

大数据的分析建模流程如图3.20所示,包括数据准备(data preparation)、数据处理(merging data sources)、特征工程(feature engineering)、预测建模(modeling)、算法训练和仿真(training&simulation)、评估与决策(decision)、提醒与操作等步骤。

3. 信息融合技术

信息融合来自不同设备、不同数据源以及不同感知实体的信息,通过处理这些多元异构数据更加全面地感知物理世界,为人类提供精准和智能的服务。

信息融合起源于20世纪70年代的多传感器数据融合。20世纪90年代,信息融合发展为数据层融合(原始数据预处理与一致性分析等)、特征层融合和决策层融合等内容。从人的认知角度来看,信息融合包括感知融合(视觉、听觉、味觉、触觉、嗅觉)、认知融合(记忆、想象,即学习和建模过程)、决策融合(思维,即分析和决策过程)等层次。

目前的信息融合无论在理论上还是在技术和应用实现上,都力图建立一个能够自动运行的产品,嵌入应用系统中或直接作为系统应用到相应业务活动中。而对于传统结构化数学模型和方法,如统计学、计算方法、数学规划以及各种信息处理算法无法解决的目

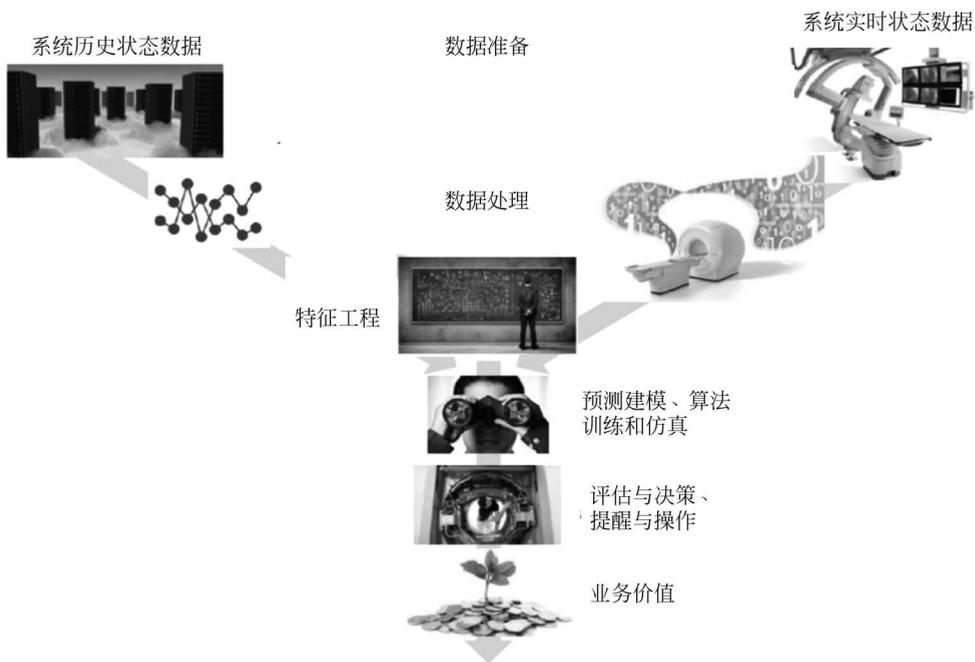


图 3.20 大数据的分析建模流程

标识、态势估计、影响估计等高级融合问题，则求助于不确定性处理和人工智能技术。然而，当前不确定性处理技术特别是人工智能技术的发展与高级信息如人的需求相差甚远。处理不确定性问题是人的优势所在，因此在信息融合过程中添加人认知层面的选择判断与行动管理，能促使人机融合智能在观测、判断、分析与决策等方面的认知领域产生质变。

3.4 “中国制造 2025”的智能制造技术

我国将工业互联网和人工智能定位于国家战略高度。2015 年，国务院与工业和信息化部先后出台了《中国制造 2025》^[30]《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》^[31]《工业和信息化部关于贯彻落实〈国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见〉的行动计划(2015—2018 年)》等一系列指导性文件，部署全面推进实施制造强国战略。2016 年，政府工作报告中进一步提出要深入推进“中国制造+互联网”。

《中国制造 2025》明确提出，通过政府引导、整合资源，实施国家制造业创新中心建设、智能制造、工业强基、绿色制造、高端装备创新 5 项重大工程，实现长期制约制造业发展的关键共性技术突破，提升我国制造业的整体竞争力。

人工智能的迅速发展将深刻改变人类社会生活、改变世界。为抢抓人工智能发展的重大战略机遇，构筑我国人工智能发展的先发优势，加快建设创新型国家和世界科技强

国,按照党中央、国务院部署要求,2017年7月,制定了《新一代人工智能发展规划》^[32],立足国家发展全局,准确把握全球人工智能发展态势,找准突破口和主攻方向,全面增强科技创新基础能力,全面拓展重点领域应用的深度和广度,全面提升经济社会发展和国防应用智能化水平。推动人工智能与各行业融合创新,在制造、农业、物流、金融、商务、家居等重点行业和领域开展人工智能应用试点示范,推动人工智能规模化应用,全面提升产业发展智能化水平。在智能制造领域,围绕制造强国重大需求,推进智能制造关键技术装备、核心支撑软件、工业互联网等系统集成应用,研发智能产品及智能互联产品、智能制造使能工具与系统、智能制造云服务平台,推广流程智能制造、离散智能制造、网络化协同制造、远程诊断与运维服务等新型制造模式,建立智能制造标准体系,推进制造全生命周期活动智能化。

3.5 智能制造的技术体系架构

由“工业4.0”、工业互联网和“中国制造2025”有关智能制造的理念和技术可以看出,智能制造融合了新一代信息技术、先进制造技术、自动化技术和人工智能技术等,利用智能装备、智能装配线、智能车间、智能工厂等智能生产系统设施,通过智能研发系统、智能管理和系统服务开发出智能产品,面向客户推进产品智能服务,最终实现企业的智能决策。

3.5.1 智能制造技术的构成及体系结构

1. 智能制造技术的构成

如图3.21所示,可以从商业模式、生产模式、运营模式和科学决策等层次揭示智能制造的相关关键技术构成。其中,智能产品与产品智能服务技术可以给企业带来商业模式的创新,由智能装备、智能装配线、智能车间和智能工厂构成的智能生产技术可以帮助企业实现生产模式的创新,智能研发、智能运营管理和服务、智能物流和供应链服务可以实现运营模式的创新,智能决策可以帮助企业实现科学决策。

1) 智能产品

智能产品(smart product)通常包括机械、电气和嵌入式软件。典型的智能产品包括智能手机、智能可穿戴设备、无人机、智能汽车、智能家电、智能售货机等。智能装备也是一种智能产品。企业应该思考如何在产品上加入智能化的单元,提升产品的附加值。例如,在工程机械上添加传感器,可以对产品进行定位和关键零部件的状态监测,为实现智能服务打下基础。

智能产品是发展智能制造的基础与前提,由物理部件、智能部件和联结部件构成。物理部件由机械和电子零件构成;智能部件由传感器、微处理器、数据存储装置、控制装置和软件,以及内置操作和用户界面等构成;联结部件由接口、有线或无线连接协议等构

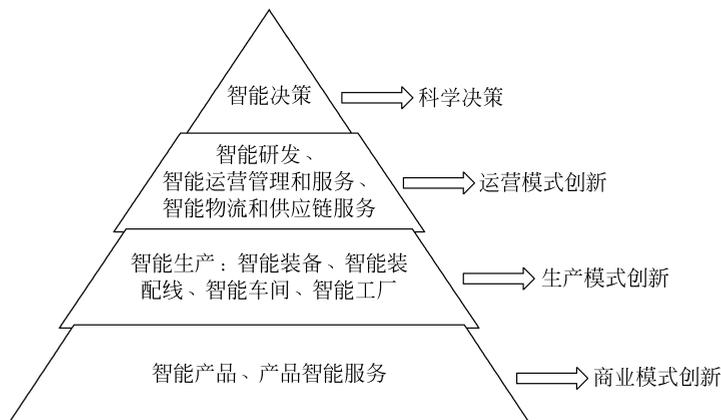


图 3.21 智能制造的关键技术

成。智能部件能加强物理部件的功能和价值,而联结部件进一步强化智能部件的功能和价值,使信息可以在产品、运行系统、制造商和用户之间联通,并让部分价值和功能脱离物理产品本身存在。

智能产品具有监测、控制、优化和自主 4 方面的功能。监测是指通过传感器和外部数据源,智能产品能对产品的状态、运行和外部环境进行全面监测;在数据的帮助下,一旦环境和运行状态发生变化,产品就会向用户或相关方发出警告。控制是指可以通过产品内置或产品云中的命令和算法进行远程控制。算法可以让产品对条件和环境的特定变化做出反应;优化是指对实时数据或历史记录进行分析,植入算法,从而大幅提高产品的产出比、利用率和生产效率;自主是指将监测、控制和优化功能融合到一起,产品就能实现前所未有的自动化。

2) 智能装备

制造装备(smart equipment)经历了机械装备到数控装备,目前正逐步发展为智能装备。智能装备具有检测功能,可以实现在机检测,从而补偿加工误差、提高加工精度、补偿热变形等。以往一些精密装备对环境的要求很高,现在由于有了闭环的检测与补偿,所以可以降低对环境的要求。智能装备一个最基本的要求,就是要提供开放的数据接口、支持 M2M(Machine to Machine, 机器与机器互连)的设备联网。另外,3D 打印机本质上是一种数控装备,不是智能装备。

3) 智能车间

一个车间通常有多条生产线,这些生产线要么生产相似的零件或产品,要么有上下游的装配关系。要实现智能车间(smart workshop),需要对生产状况、设备状态、能源消耗、生产质量、物料消耗等信息进行实时采集和分析,进行高效排产和合理排班,显著提高设备利用率(OEE)。因此,无论什么制造行业,制造执行系统(MES)成为企业的必然选择。MES 是一个车间级的综合管理系统,可以帮助企业显著提升设备利用率,提高产品质量,实现生产过程可追溯和上料防错,提高生产效率。离散制造企业也可以应用

MES。先进生产排程(APS)系统也已经进入制造企业的视野,开始了初步实践,实现基于实际产能约束的排产。

数字化制造(DM)技术也是智能车间的支撑工具,可以帮助企业在建设新厂房时,根据设计的产能科学进行设备布局,提升物流效率,提高工人工作的舒适程度。对于机械制造企业,可以通过分布式数控(Distributed Numerical Control, DNC)技术实现设备状态信息和加工代码的上传下达。应用数字孪生技术可以将MES采集到的数据在虚拟的三维车间模型中实时地展现出来,在提供车间虚拟现实(Virtual Reality, VR)环境的基础上,还可以显示设备的实际运行状态,实现虚实融合。

4) 智能工厂

一个工厂通常由多个车间组成,大型企业有多个工厂。仅有自动化生产线和一大堆机器人,并不是智能工厂。作为智能工厂(smart factory),不仅生产过程应实现自动化、透明化、可视化、精益化,同时,产品检测、质量检验和分析、生产物流也应当与生产过程实现闭环集成。

一个工厂的多个车间之间要实现信息共享、准时配送、协同作业。一些离散制造企业也建立了类似流程制造企业那样的生产指挥中心,对整个工厂进行指挥和调度,及时发现和解决突发问题,这也是智能工厂的重要标志。智能工厂必须依赖无缝集成的信息系统支撑,主要包括PLM、ERP、CRM、SCM和MES等系统。大型企业的智能工厂需要应用ERP系统制订多个车间的生产计划,并由MES根据各个车间的生产计划进行详细排产,MES排产的粒度是天、小时,甚至分钟,MES是一个企业级的实时信息系统。

5) 智能生产

智能生产(smart production)是指以智能制造系统为核心,以智能工厂为载体,通过在工厂和企业内部、企业之间以及产品全生命周期形成以数据互联互通为特征的制造网络,实现生产过程的实时管理和优化。智能生产涵盖产品研发、工艺设计、工厂规划的数字设计与仿真,底层的智能装备、制造单元和自动化生产线,制造执行系统,以及物流自动化与企业管理系统等。

6) 智能研发

离散制造企业在产品研发方面,已经应用了CAD/CAM/CAE/CAPP/EDA(电子设计自动化)等工具软件和PDM/PLM系统,但很多企业应用这些软件的水平并不高。企业要开发智能产品,需要机、电、软多学科的协同配合;要缩短产品研发周期,需要深入应用仿真技术,建立虚拟数字化样机,实现多学科仿真,通过仿真减少实物试验;需要贯彻标准化、系列化、模块化的思想,以支持大批量客户定制或产品个性化定制;需要将仿真技术与试验管理结合起来,以提高仿真结果的置信度。流程制造企业已开始应用PLM系统实现工艺管理和配方管理,LIMS(实验室信息管理系统)比较广泛。

目前,在产品研发方面,已经出现了一些智能化的软件系统,成为智能研发(smart R&D)的具体体现。例如,Geometric的DFM PRO软件可以自动判断三维模型的工艺特征是否可制造、可装配、可拆卸;CAD Doctor软件可以自动分析三维模型中存在的问

题；基于互联网与客户、供应商和合作伙伴协同设计，也是智能研发的创新形式；Altair的拓扑优化技术可以在满足产品功能的前提下，减轻结构的质量；系统仿真技术可以在概念设计阶段，分析与优化产品性能，这方面达索系统、西门子(LMS)公司已有成熟的技术，天喻软件也开发出系统仿真的平台，并在中国商飞得到应用；PLM向前延伸到需求管理，向后拓展到工艺管理，例如，西门子的 Teamcenter Manufacturing 系统将工艺结构化，可以更好地实现典型工艺的重用；此外，索为高科和金航数码合作，开发了面向飞机机翼、起落架等大部件的快速设计系统，也是一种智能研发的软件，可以大大提高产品设计效率。

汽车整车企业和设计公司广泛应用 Cave 技术，利用虚拟现实技术辅助产品研发，也是一个智能研发技术。全球 PLM 领导厂商之一，达索系统公司提出了三维体验(3D Experience)的理念，在 VR 和 AR 方面提供了解决方案。

7) 智能运营管理和服务

时至今日，ERP 仍然是制造企业实现现代化管理的基石。以销定产是 ERP 最基本的思想，MRP 是 ERP 的核心。制造企业核心的运营管理系统还包括人力资本管理系统(Human Capital Management, HCM)、客户关系管理系统(CRM)、企业资产管理系统(EAM)、能源管理系统(EMS)、供应商关系管理系统(SRM)、企业门户(EP)、业务流程管理系统(BPM)等，办公自动化(OA)也可作为一个核心信息系统。为了统一管理企业核心主数据，近年来，主数据管理(Master Data Management, MDM)也开始在大型企业部署应用。实现智能管理和智能决策的条件是基础数据准确和主要信息系统无缝集成。

8) 智能物流和供应链服务

制造企业内部的采购、生产、销售流程都伴随着物料的流动，因此，越来越多的制造企业在重视生产自动化的同时，也越来越重视物流自动化，自动化立体仓库、无人引导小车(AGV)、智能吊挂系统得到了广泛的应用；而在制造企业和物流企业的物流中心，智能分拣系统、堆垛机器人、自动辊道系统的应用日趋普及。仓储管理系统(Warehouse Management System, WMS)和运输管理系统(Transport Management System, TMS)也受到制造企业和物流企业的普遍关注。其中，TMS 涉及 GPS 定位和 GIS 的集成，可以实现供应商、客户和物流企业三方的信息共享。

实现智能物流与供应链的关键技术包括自动识别技术，如 RFID 或条码、GIS/GPS 定位、电子商务、EDI(电子数据交换)，以及供应链协同计划与优化技术。其中，EDI 技术是企业间信息集成(B2B integration)的必备手段，然而，我国企业对 EDI 的重视程度非常不够。EDI 技术最重要的价值，就是可以实现供应链上下游企业之间，通过信息系统之间的通信，实现整个交易过程无须人工干预，而且不可抵赖。

9) 产品智能服务

产品智能服务(product smart service)通过采集设备运行数据，并上传至企业数据中心(企业云)，系统软件对设备实时在线监测、控制，并经过数据分析提早进行设备维护。基于传感器和物联网(IoT)，可以感知产品的状态，从而进行预防性维修、维护，及时帮助

客户更换备品、备件,甚至可以通过了解产品运行的状态,给客户带来商业机会。还可以采集产品运营的大数据,辅助企业进行市场营销的决策。此外,企业通过开发面向客户服务的 App 应用,也是一种智能服务的手段,可以针对企业购买的产品提供有针对性的服务,从而锁定用户,开展服务营销。

10) 智能决策

企业在运营过程中产生了大量的数据。一方面是来自各个业务部门和业务系统产生的核心业务数据,如与合同、回款、费用、库存、现金、产品、客户、投资、设备、产量、交货期等有关的数据,这些数据一般是结构化的数据,可以进行多维度的分析和预测,这就是商业智能(BI)技术的范畴,也被称为管理驾驶舱或决策支持系统。企业可以应用这些数据提炼出企业的关键绩效指标(Key Performance Indicator, KPI),并与预设的目标进行对比,同时,对 KPI 进行层层分解,来对干部和员工进行考核,这就是企业绩效管理(Enterprise Performance Management, EPM)的范畴。

企业在运营中产生了诸多的大数据,包括生产现场采集的实时生产数据、设备运行的大数据、质量的大数据、产品运营的大数据、电子商务带来的营销大数据、来自社交网络的与公司有关的大数据等,这些大数据统称为工业大数据(industrial big data),对这些工业大数据进行分析,需要引入新的分析工具。对于制造企业而言,要实现智能决策,首先必须将业务层的信息系统用好,实现信息集成,确保基础数据准确,这样才能使信息系统产生的数据真实可信。在此基础上应用 BI 软件进行分析。例如,三一重工借助大数据和物联网技术,将工程机械通过机载控制器、传感器和无线通信模块进行实时采集,通过对大数据进行多维度分析和预测,使“挖掘机”指数成为我国经济运行的晴雨表。

智能制造的相关技术不限于以上内容。

2. 智能制造技术体系结构

根据上述分析,可以构建如图 3.22 所示智能制造技术体系的总体框架。智能制造基础关键技术为智能制造系统的建设提供支撑。智能制造系统是智能制造技术的载体,相关的关键技术包括智能产品、智能制造过程、智能管理和服务、智能制造模式 4 部分内容。

1) 智能产品

智能产品可以分为面向使用过程的智能产品、面向制造过程的智能产品和面向服务过程的智能产品 3 种类型。

(1) 面向使用过程的智能产品。

无人机、无人驾驶汽车、智能手机等典型的面向使用过程的创新智能产品具有“人-机”或“机-机”互动能力强、用户体验性好的特征,可以代替或者辅助用户完成某些工作,具有较高的附加值。产品的智能性主要通过自主决策(如环境感知、路径规划、智能识别等)、自适应工况(如控制算法及策略等)、人机交互(如多功能感知、语音识别、信息融合等)、信息通信等技术实现。借助工业互联网和大数据分析技术,这类产品的使用信息也可以反馈回设计部门,为产品的改进与创新设计提供支持。

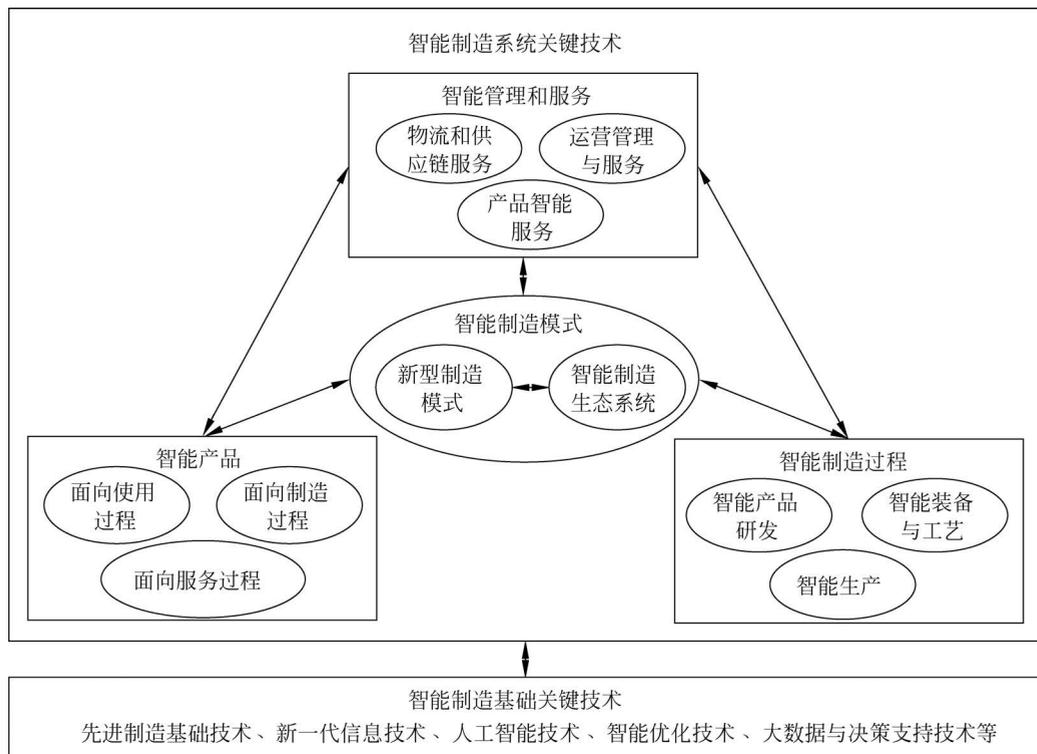


图 3.22 智能制造技术体系的总体框架

智能制造装备也属于面向使用过程的智能产品,如智能数控机床将专家的知识 and 经验融入感知、决策、执行等制造活动中,并赋予产品制造在线学习和知识进化能力,实现高品质零件的自学自律制造。智能制造装备和智能制造工艺密切相关。

(2) 面向制造过程的智能产品。

产品是制造的目标对象,要实现制造过程的智能化,产品(含在制品、原材料、零配件、刀具等)本身的智能化是不可缺少的,它的智能特征体现在可自动识别、可精确定位、可全程追溯、可自主决定路径和工艺、可自主报告自身状态、可感知并影响环境等诸多方面。“工业 4.0”中描述了这样一个场景,产品进入车间后,自己找设备加工,并告诉设备如何加工,这就是面向制造过程的智能产品的具体体现,实现的关键技术包括无线射频识别技术等自动识别技术、CPS 技术、移动定位技术等。

(3) 面向服务过程的智能产品。

对于工程机械、航空发动机、电力装备等产品,远程智能服务是产品价值链中非常重要的组成部分。以通用电气为例,其位于美国亚特兰大的能源监测与诊断中心,收集了全球 50 多个国家上千台 GE 燃气轮机的数据,每天的数据量多达 10GB,通过大数据分析可对燃气轮机的故障诊断和预警提供支撑。为了实现远程智能服务,产品内部嵌入了传感器、智能分析与控制装置和通信装置,从而实现产品运行状态数据的自动采集、分析和

远程传递。

2) 智能制造过程

智能制造过程是指以智能制造系统为核心,涵盖智能产品研发、智能装备与工艺、智能生产等系统。

(1) 智能产品研发。

产品设计是产品形成的创造性过程,是带有创新特性的个体或群体性活动,智能技术在设计链的各个环节使设计创新得到质的提升。通过智能数据分析手段获取设计需求,进而通过智能创成方法进行概念生成,通过智能仿真和优化策略实现产品的性能提升,辅之以智能并行协同策略来实现设计制造信息的有效反馈,从而大幅缩短产品研发周期,提高产品设计品质,主要有面向多源海量数据的设计需求获取技术(多源数据来自于互联网的客户评价、服务商的协商调研、设计伙伴的信息交互、正在服役产品关键性能数据的实时在线反馈等数据,智能方法有智能聚类方法、神经网络技术、机器学习策略、软计算方法、数据挖掘技术等大数据和云计算技术)、设计概念的智能创成技术(如何从设计需求转变为概念产品是设计智能的实际体现和具化过程,可以使用各种人工智能和系统工程方法)、基于模拟仿真的智能设计技术(产品功能是产品性能的具体载体,由设计概念信息发展为具体产品需要进行产品性能的具体量化实现,随着高性能计算技术的发展,工业企业越来越倾向使用高性能仿真来替代昂贵的物理性能实验,在节约成本的同时大幅缩短研制周期)、面向性能优化的智能设计技术(性能优先是在产品设计时要对产品如何通过工艺手段实现来加以综合考量,在确保产品能够实现的前提下对产品性能进行优化)。

(2) 智能装备与工艺。

智能装备是装备能对自身和加工过程进行自感知,对与装备、加工状态、工件材料和环境有关的信息进行自分析,根据零件的设计要求与实时动态信息进行自决策,依据决策指令进行自执行,通过“感知—分析—决策—执行与反馈”大闭环过程,不断提升装备性能及其适应能力,使得加工从控形向控性发展,实现高效、高品质及安全可靠的加工,而且,设备与人的协同工作、虚拟环境/虚实结合环境制造等也是智能装备与工艺的重要内容。

(3) 智能生产。

针对制造工厂或车间,引入智能技术与管理手段,实现生产资源最优化配置、生产任务和物流实时优化调度、生产过程精细化管理和智慧科学管理决策。智能手段有:智能计划与调度、工艺参数优化、智能物流管控、产品质量分析与改善、设备预测性维护、生产成本分析与预测、能耗监控与智能调度、生产过程三维虚拟监控、车间综合性能分析评价等。

制造工厂或车间的智能体征体现在:制造车间具有自适应性,具有柔性、可重构能力和自组织能力,从而支持多品种、多批量和混流生产;产品、设备、软件之间实现相互通信,具有基于实时反馈信息的智能动态调度能力;建立预测制造机制(可见异常:设备停

机、质量超差；不可见异常：设备性能衰退、制造过程失控），可实现对未来的设备状态、产品质量变化、生产系统性能等的预测，从而提前主动采取应对措施。

3) 智能管理和服务

通过泛在感知、系统集成、互联互通、信息融合等信息技术手段，将工业大数据分析技术应用于生产管理服务和产品售后服务环节，实现科学的管理决策，提升供应链运作效率和能源利用效率，并拓展价值链，为企业创造新价值。具体体现为：智能物流与供应链管理技术（自动化、可视化物流技术，全球供应链集成与协同技术，供应链管理智能决策技术）、智能运营管理与服务技术[智能的企业资源管理、客户关系管理、全面质量管理、电子商务以及能源管理（能源综合监测、生产与能耗预测、能源供给/调配/转换/使用等重点环节的节能优化技术）等技术]、产品智能服务技术（通过持续改进，建立高效、安全智能服务系统，实现服务和产品的实时、有效、智能化互动，为企业创造新价值）。

例如，产品的智能服务技术通过采集设备运行数据，并上传至企业数据中心（企业云），系统软件对设备实时在线监测、控制，并经过数据分析提早进行设备维护。例如，维斯塔斯通过在风机的机舱、轮毂、叶片、塔筒及地面控制箱内安装传感器、存储器、处理器以及 SCADA 系统，实现对风机运行的实时监控，还通过在风力发电涡轮中内置微型控制器，可以在每次旋转中控制扇叶的角度，从而最大限度地捕捉风能，还可以控制每台涡轮，在能效最大化的同时，减小对邻近涡轮的影响。维斯塔斯通过对实时数据进行处理预测风机部件可能产生的故障，以减少风机不稳定现象，并使用不同的工具优化这些数据，达到风机性能的最优化。

4) 智能制造模式

智能制造技术的发展催生了许多新型制造模式，如家用电器、汽车行业的客户化定制模式，电力、航空装备行业的异地协同研发和云制造模式，食品、药材、建材、钢铁、服装等行业的电子商务模式，以及众包设计、网络协同制造、服务型制造等新型制造模式。

(1) 客户化定制。

客户化定制模式以用户或订单为中心，根据产品总体结构或者原型，结合个性化需求完成产品设计和生产制造。大规模个性化定制以品种多、个性化、专业化、网络化、柔性化和效率高等特点快速灵活生产产品或提供服务满足客户的个性化需求。

(2) 网络协同制造。

网络协同制造基于网络制造、全球制造和敏捷制造的生产模式，采用互联网技术，建立灵活有效、互惠互利的动态企业联盟，有效实现研究、设计、生产和销售各种资源的重组，提高企业的市场快速反应和竞争能力。网络协同制造打破时间和地域约束，实现动态资源调配与协同运行，可最大限度缩短新品上市的时间和生产周期，快速响应客户需求，提高设计和生产的柔性。

(3) 云制造。

云制造是一种基于网络的、面向服务的智能制造新模式。它融合发展了现有信息化制造（信息化设计、生产、试验、仿真、管理、集成）技术与云计算、物联网、服务计算、智能

科学等新兴信息技术,将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化,构成制造资源和制造能力的服务池,并进行统一的、集中的优化管理和经营,从而使用户只要通过网络和制造,就能随时随地按需获取制造资源与制造能力的服务,进而智能地完成其产品全生命周期的各类活动。

(4) 服务型制造。

服务型制造将物理资源或虚拟资源进行服务化封装,对封装的服务进行建模和描述并发布到云平台,提供生产性服务和生产性服务,实现分散化制造资源的整合和企业核心竞争力的高效利用,使得以传统产品制造为核心的模式向以提供服务为核心的模式转变。服务型制造可建立制造基地或业务流程外包,实现制造价值链中利益相关者价值增值,降低企业制造成本,增强产业竞争力,进而提高全要素生产率、产品附加值和市场占有率。

这些制造模式以工业互联网、大数据分析、3D 打印等新技术为实现前提,极大地扩展了企业的价值空间。新模式下,智能制造系统将演变为复杂的大系统,结构更加动态,企业间的协同关系也更加分散化,制造过程由集中生产向网络化异地协同生产转变,企业之间的边界逐渐变得模糊,制造生态系统则变得更加清晰和重要,企业必须融合智能制造生态系统,才能得以生存和发展。

3. NIST 提出的智能制造系统标准体系结构

2012 年,时任美国总统奥巴马宣布实施再工业化战略,GE 公司随后提出了“工业互联网”概念,为其向更加依赖数字化的转型行动打造了一个全新的理念。2014 年,由美国 GE、思科、IBM、英特尔和 AT&T 主导成立了工业互联网产业联盟(ICC)。与此同时,2013 年德国出台了“工业 4.0”战略,中国制定了“中国制造 2025”战略。随着“工业互联网”“工业 4.0”“中国制造 2025”等国家制造战略的提出,逐步形成了以网络协同制造与智能工厂为核心的第二代智能制造范式,又称数字化网络化制造范式。

“工业 4.0”以信息物理系统(CPS)为核心构建智能工厂,将产品、制造和服务数据化和集成化,实现企业内和企业间的协同和互联互通。“工业互联网”提出将全球工业系统与高级计算、分析、传感技术及互联网高度融合,实现网络协同与信息融合,重构全球工业,激发生产力。“工业 4.0”和“工业互联网”完整地阐述和提出了以网络协同制造与智能工厂为核心的第二代智能制造范式及实现的技术路线。“中国制造 2025”在原有数字产业化基础上大力推进“互联网+制造”的智能制造战略,一批企业在进行数字化改造的同时,逐渐形成从内部互联到企业间互联互通,形成了一些典型试点示范项目,如海尔集团建立的以智能制造执行系统(iMES)为核心的互联工厂,西安飞机工业(集团)有限责任公司构建的飞机协同开发与制造云平台(DCEaaS)等。

2020 年以来,欧美一些专家直接将第二代智能制造范式称之为智能制造(Smart Manufacturing, SM),其中 Smart 并非智能的意思,而是聪明的意思。聪明就是耳聪目明,就是耳朵灵敏、眼睛明亮、大脑能思考、嘴巴能说话、四肢能执行。Smart

Manufacturing 就是通过自动化、数字化、网络化、智能化等技术手段,在人口老龄化、竞争白热化等严峻的现实情况下,通过企业内部、企业间、社会化的网络协同、深度协作和资源集成,实现高效、高质、快速响应市场的生产和服务模式,同时还具备一定的智能。

围绕第二代智能制造范式,2016年2月,美国国家标准研究院(NIST)牵头组织产业界制定了以智能制造金字塔为核心,产品、生产和商业三条相互连接主线所构成的《智能制造系统现行标准体系》(*Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems*)(见图 3.23),将产业领域标准变成全美的公共标准。

智能制造系统标准体系包括生产、管理、设计和工程功能等制造业中广泛应用的制造系统,图 3.23 从产品、生产和商业三个维度揭示了智能制造系统的构成,每个维度都拥有自己的生命周期。产品生命周期包括从早期产品设计阶段开始,一直持续到产品使用和服务、废弃与回收等产品生命周期结束的信息流和控制过程。生产生命周期从数字工厂(digital factory)的角度,关注于整个生产设施(包括其系统)的设计、部署、操作和停用。商业周期涉及供应商和客户互动的功能。制造金字塔实现了机器、工厂和商业系统的垂直集成,使每个维度都发挥作用。每个维度上制造软件应用系统的集成有助于实现车间的高级控制和工厂和企业的最佳决策,这些系统(表 3.1)的结合构成了智能制造生态系统。

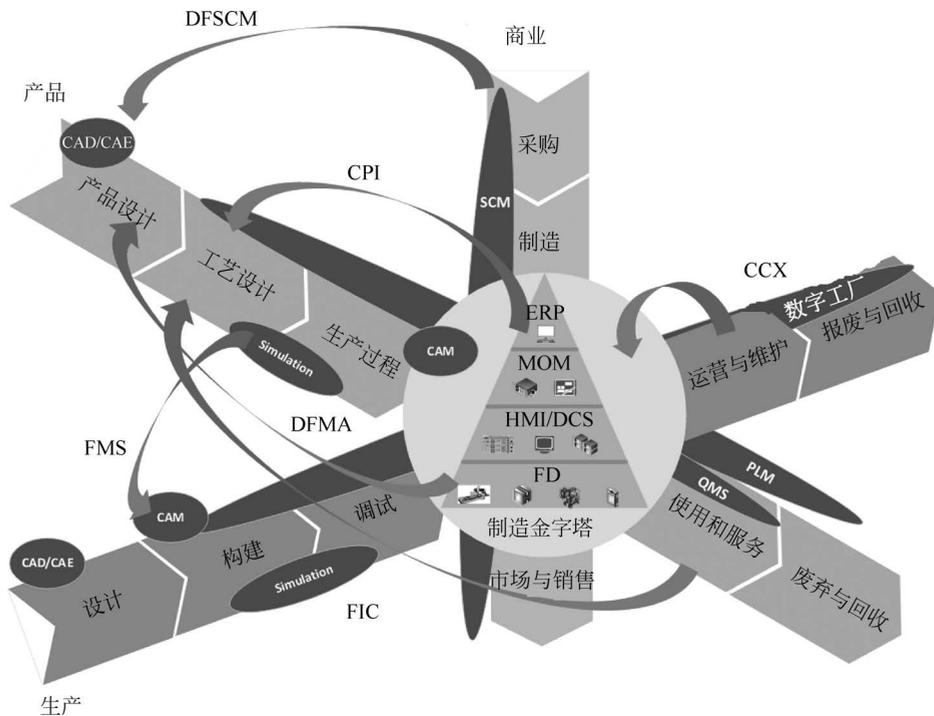


图 3.23 NIST 提出的智能制造系统标准体系结构(改编)

表 3.1 智能制造系统标准体系结构

系 统	描 述	信 息 流	关键能力映射
PLM(产品生命周期管理)	对产品的整个生命周期进行管理的过程,从产品设计开始,到工程设计和制造,再到服务和处理制造的产品	产品和生产系统生命周期中双向信息流	质量、敏捷性、可持续性
SCM(供应链管理)	管理供应商、公司、经销商和最终消费者之间的物料、最终产品和相关信息的上游和下游增值流	供应链利益相关者-制造商、客户、供应商和分销商之间的双向信息流	敏捷性、质量、生产率
DFSCM(面向供应链管理的设计)	设计产品以利用和加强供应链	供应链管理活动与设计工程师活动之间双向信息流	质量、敏捷性
CPI(持续流程改进)	一组持续的系统工程和管理活动,用于选择、定制、实施和评估用于生产产品的过程	从实时制造系统到过程设计活动的信息流	质量、可持续性、生产率
CCX(持续调试)	生产系统的诊断、预测和性能改进的持续过程	生产工程活动与生产经营活动的双向信息	生产率,敏捷性,可持续性,质量
DFMA(面向制造和装配的设计)	便于制造的零件设计和装配的产品设计	从生产工程、运营活动到产品设计活动的信息流	生产率,敏捷性
FMS/RMS(柔性制造系统/可重构制造系统)	为了快速响应市场变化及需求,制造系统结构及组成单元可以灵活配置、重组或更新,以生产新类型产品	从产品工程活动到生产工程活动的信息流	敏捷性
制造金字塔	由 ERP、MOM(制造运营管理)、车间 HMI(人机接口)/DCS(分布式控制系统)和 FD(现场设备)组成的四层制造金字塔	ERP、MOM 活动和控制系统之间的双向流动	质量、敏捷性、生产率和可持续性
FIC(快速改进周期)	通过从产品使用中收集的数据和产品构思的反馈的趋势预测来快速改进新产品导入(NPI)周期	从产品使用到产品设计的信息流	质量、敏捷性

第二代智能制造范式本质是在数字化制造的基础上,深入应用先进的通信和网络技术,连接人、流程、数据和事务,联通企业内部和企业间的信息孤岛,通过企业内(产品、生产与管理)、企业间(供应链和产业链)的网络协同和各种社会资源(生态系统)的共享与集成,实现产业链优化,快速高质量低本地为市场提供所需产品和服务,其本质是数字化网络化协同制造。主要特征表现为:

- (1) 在产品方面,普遍应用数字和网络技术,形成网络化的互联产品。
- (2) 在生产制造方面,实现企业内、企业间的供应链、价值链的连接和优化,打通整个

制造系统的数据流和信息流。

(3) 在服务方面,企业与用户通过网络平台实现连接和交互,企业掌握用户的个性化需求,用户能够参与产品全生命周期活动,将产业链延伸到为用户提供产品健康保障等服务。

(4) 在商业模式方面,规模化定制生产逐渐成为消费品制造业发展的一种普遍模式,远程运维服务模式在工程机械行业得到广泛应用,企业生产开始从以产品为中心向以用户为中心转型,企业形态也逐步从生产型向生产服务型企业转型。

4. 新一代智能制造技术

智能制造是一个大概念,其内涵伴随着信息与制造技术的发展和融合而不断更新。随着工业互联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的迅猛发展,新一代信息技术与先进制造技术深度融合,促进了人、信息系统和物理系统加速融合与协同,形成了新一代智能制造范式(图 3.24),又称数字化网络化智能化制造范式^[36-37],成为新一轮工业革命的核心驱动力。

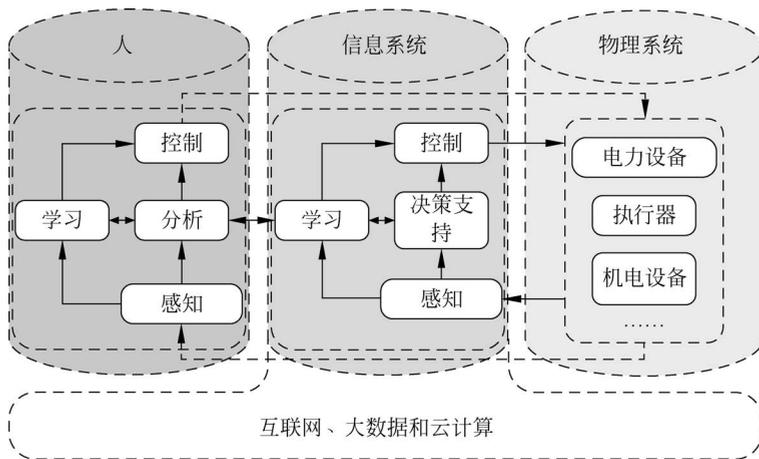


图 3.24 新一代智能制造范式

新一代智能制造范式通过人的分析决策、基于新一代人工智能的管理分析决策以及设备自主控制实现人-机(信息空间)-物(物理空间)的资源协同与信息融合(人机物融合),并从生产制造、产品工程和商业管理等三个维度分别实现设备的智能感知、智能分析决策和智能自主控制,制造系统的学习提升、精准执行、自主决策和实时分析,以及商业模式的可持续发展。新一代智能制造范式在第二代智能制造范式的基础上,通过人机物融合机制进一步提高了生产过程的效率和自主控制能力,以及产品和生态系统平台的适应性和自主服务能力,并且保持可持续的商业模式创新。

新一代智能制造范式是智能制造的第三种基本范式,对应于国际上推行的智能制造(Intelligent Manufacturing, IM)。新一代智能制造范式的主要特征表现在制造系统具备了认知学习能力。通过深度学习、增强学习、迁移学习等技术的应用,新一代智能制造中

制造领域的知识产生、获取、应用和传承效率将发生革命性变化,显著提高创新与服务能力。

新一代智能制造将给制造业带来革命性变化,是真正意义上的智能制造,它将从根本上引领和推进第四次工业革命,为我国实现制造业换道超车、跨越发展带来历史性机遇。如果说网络协同制造是新一轮工业革命的开始,那么新一代智能制造的突破和广泛应用将推动形成新一轮工业革命的高潮。数字化制造、网络协同制造和新一代智能制造次第展开,目标聚焦制造业的效率和品质提升,以实现制造业的智能升级和跨越发展。

3.5.2 新一代信息技术支撑的智能工厂体系结构

CPS提高了物理系统的可控性、效率和可靠性,但是在社会和自然环境中,大多数的物理系统和相关的网络系统涉及人的参与,将人类社会融合到CPS中,形成了人信息物理系统(Human-Cyber-Physical System, HCPS)。信息系统连接物理系统和人类社会,物联网(传感网络)连接物理系统和相应的信息系统,互联网连接人类社会和相应的信息系统,从而物理系统和人类社会能映射到二者共同的信息系统。HCPS环境支撑的智能工厂体系结构(图3.25)包含了服务价值链、产品全生命周期供应链和HCPS制造环境3部分,整个价值链成为智能工厂价值增值的聚合体。

1. 服务价值链

服务价值链由客户参与、生产性服务和服服务性生产构成。生产性服务是在服务业里将提供服务的对象强调在生产者或是市场的中间投入,借由生产性服务可以将制造业的价值链向市场延伸;而服务性生产则是强化了制造业本身的服务功能,以提升公司与产品的竞争力。

(1) 客户参与。

客户参与指的是以信息反馈的形式参与整个生产活动,包括联合设计、联合开发、供应链集成、大规模定制、虚拟集成、商务咨询、故障诊断等。客户作为主体发布其个性化的需求,为制造企业创造市场,并参与到产品制造的每个环节,以自己掌握的知识、技术和信息对产品从设计到销售提出有用的建议。将客户引入制造和服务的全过程,强调客户参与式设计、制造和销售,从根本上解决为谁制造的问题,使得企业能够根据目标客户的个性化需求,提供产品及服务,实现了客户锁定,也提高了客户满意度。

利用工业数据平台获取消费者、市场等各维度的数据信息,包括企业关注的产品反馈、市场需求、消费者习惯等信息,达到生产者和消费者之间“信息黏性”的效果,并利用这些关联数据信息,通过大数据挖掘分析技术构建大量的相关性标签体系去匹配产品需求、细分客户类型、分析兴趣爱好、挖掘关注点,实现客户全面洞察,改进、创新设计产品的功能和款式。此外,利用平台门户与消费者直接交互,为消费者提供定制和配置工具,捕捉他们个性化的解决方案,使得消费者更直接、深入地参与到产品创新设计的过程中。

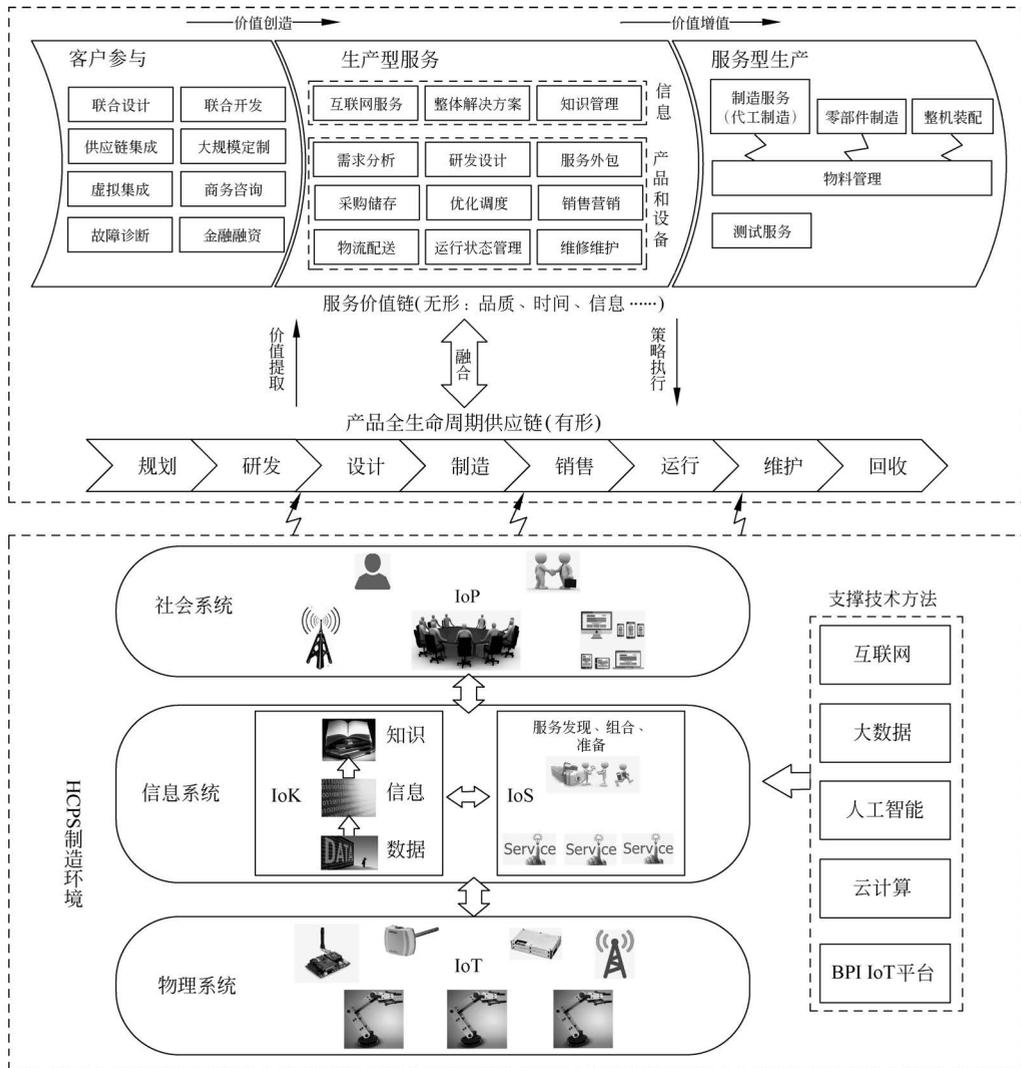


图 3.25 HCPS 环境支撑的智能工厂体系结构

(2) 生产性服务。

生产性服务包括信息类服务以及产品和设备类服务。信息类服务为生产制造过程提供互联网服务、整体解决方案、知识管理等内容。产品和设备类服务涵盖需求分析、设计改造、服务外包、采购储存、优化调度、广告销售、物流服务、运行状态管理、维修维护等。生产性服务贯穿于整个制造生命周期的上、中、下游。例如，在产品设计的上游，涉及的生产性服务包括市场需求分析、新产品设计等。利用生产性服务，从全局出发将产品的价值实现延伸至产品设计前的市场需求分析和产品交付顾客使用后的维修活动中，完成对产品服务系统的完整应用。

(3) 服务性生产。

服务性生产包括制造服务(代工制造)、零部件制造、整机装配、物料管理和测试服务等。制造企业可以将非核心制造外包出去,通过自身核心制造能力协同其他企业完成产品的加工制造。越来越多的厂商倾向于采用社会化大生产方式,将产品制造的一部分或者全部环节外包给专业化的制造商完成;也有越来越多的专业化制造服务供应商(如富士康科技集团)为其他企业提供制造外包等服务性生产活动。通过服务性生产协作,使得多企业主体能够在更广阔的范围内寻找具有比较优势的制造资源,降低制造成本,提高生产效率,增强生产柔性,降低生产投资风险,加强市场应变能力。

2. 产品全生命周期供应链

将产品供应链中相关的信息、资源、设备、人员和服务等都纳入服务体系中,基于信息系统的支持,采用合理的实施方法,通过服务增效来实现企业利润的最大化。制造服务包括产品规划、研发、设计、制造、销售、运行、维护以及回收等阶段,伴随了产品从初级生产直到消费的各环节,最后到终端客户。

通过将服务价值链和产品供应链进行对比,可以检验一个智能工厂或制造企业是否已经完整地提供顾客所需的服务内容。如果有部分服务内容无法满足顾客的需求,则该智能工厂短期可以采取外包方式服务顾客,长期而言则要思考是否该建立更完整的服务价值链。

3. HCPS 制造环境

HCPS 制造环境以 4 个支柱为基础,即物联网(IoT)、知联网(Internet of Knowledge, IoK)、服务互联网(Internet of Service, IoS)、人联网(Internet of People, IoP)。HCPS 的支撑技术方法包括区块链、物联网、互联网、工业大数据分析、云计算、人工智能等。IoT 连接物理系统和信息系统,使制造具有智慧化;IoP 连通利益相关者,提供产品设计、创造和销售的在线社区,打破制造商和消费者(产消者)之间的壁垒,使制造具有社会化;IoS 描述了一个应用互联网作为媒介以提供、出售服务的信息基础框架,涉及的技术有面向服务的体系结构(SOA)以及使制造具有服务化的 Web、网格和云技术;IoK 将数据(由 IoT 连接的智能对象所产生的)转化为信息/知识,使制造具有智能化。从一定程度上讲,IoK 可以看作是语义网(semantic web),信息被给予明确界定的含义,使计算机和人更好地协作。然而,大数据环境下语义网的研究仍在初期阶段,制造面临着海量数据的挑战。IoP、IoK、IoS 和 IoT 4 大支柱为基于 HCPS 的制造环境提供了使能技术,信息系统由 IoK 和 IoS 构成,IoS 能够提供符合 SOA 标准的 Web 服务。

在 HCPS 制造环境中,智能工厂以 BPI、IoT 以及互联网为通信载体,为使用者提供机器到机器的通信解决方案,满足使用者对生产过程监控、指挥调度、远程数据采集和测量、远程诊断等方面的信息化需求,实现智能化、远程化和实时化,实现从客户到生产线的产品和工艺配置畅通无阻的数据交流,使得人、机器和资源如同在一个社交网络里自然地沟通协作。

3.5.3 面向网络协同的智慧企业协作框架

智能制造模式将利用新一代信息技术,以智能工厂为实践,以全面深度互联为基础,以端到端数据流为核心驱动,以互联网驱动的新产品、新模式、新业态为特征,通过将产品研发设计流程、企业管理流程和生产产业链流程有机地结合起来,形成一个如图 3.26 所示的面向网络协同的智慧企业业务流程体系,从而使得产品研发与设计、制造管理和服务、客户关系管理、产品生产和服务的全生命周期管理和供应链管理有机地融合在一个完整企业与市场的闭环系统中,形成一个集成了工程、生产制造、供应链和企业管理的全球网络化协同智能制造系统平台,在设计、工业、制造和服务各环节实现端到端无缝协作的智能工业生态系统。

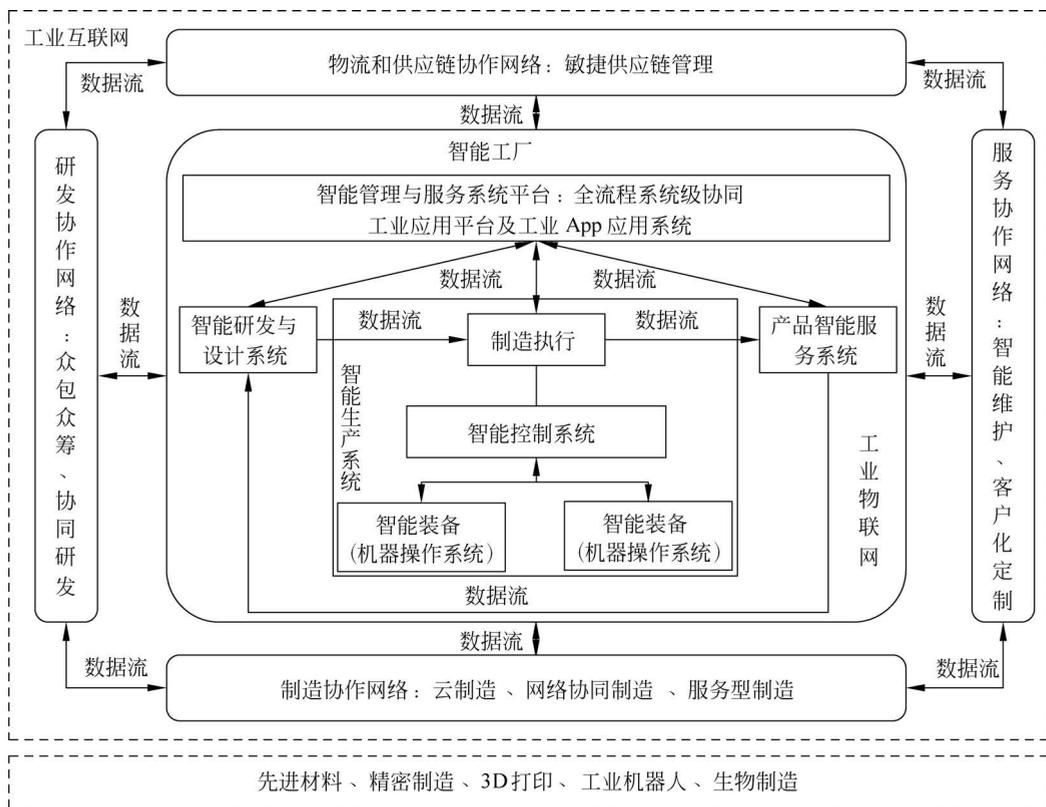


图 3.26 面向网络协同的智慧企业业务流程协作框架

随着人工智能、虚拟现实和网络技术的进一步发展,未来的网络化协同智能制造模式将以工业物联网和工业互联网为基础,将设计、工业、制造和服务各环节融合到一个如图 3.27 所示的网络化协同智能制造系统平台中,实现用户、智慧企业和智能工厂的协同研发和设计、生产、销售和运维网络平台^[33-35]。

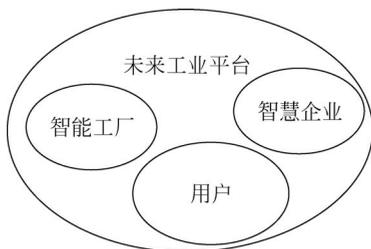


图 3.27 未来的网络化协同智能制造平台

思政元素——“十四五”智能制造发展规划

“十四五”智能制造发展规划是国家于 2021 年为推动制造业转型升级、提高智能化水平和创新能力而制定的国家战略规划。该规划旨在通过新一代信息技术与先进制造技术的深度融合,实现制造业的数字化转型、网络化协同和智能化变革。规划重点包括推进数字化车间和智能工厂建设,完善智能制造标准体系,构建开放共享的产业生态系统。规划发展路径包括:到 2025 年,规模以上制造业企业大部分实现数字化网络化,重点行业骨干企业初步应用智能化;到 2035 年,规模以上制造业企业全面普及数字化网络化,重点行业骨干企业基本实现智能化。该规划对于加快发展现代产业体系、巩固壮大实体经济根基、构建新发展格局、建设数字中国具有重要意义。

习题

1. 阐述智能工厂的概念。
2. 阐述“工业 4.0”的特征及其核心技术。
3. 阐述工业互联网的框架结构及其核心技术。
4. “中国制造 2025”的核心思想是什么?
5. 阐述智能制造技术的构成。
6. 智能工厂和智慧企业的联系和区别是什么?