

第1章 绪论

1.1 智能制造的基础

智能制造的概念提出于 20 世纪 80 年代,它是一种由智能机器和人类专家共同组成的人机一体化智能系统,能在制造过程中进行分析、推理、判断、构思和决策等智能活动。通过人与智能机器的合作共事,扩大延伸和部分取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。它对制造自动化的概念进行了更新,将其扩展到柔性化、智能化和高度集成化。

18 世纪 60 年代,以蒸汽机为代表的第一次工业革命开创了机器代替手工劳动的时代,这是制造业的第一次深刻变革,这次变革也改变了世界的面貌。20 世纪初期,电气化制造的引入标志着制造业迈入了“电气时代”,社会生产力也随之得到极大发展。20 世纪 70 年代,计算机技术的迅猛发展,为制造业带来了第三次变革,极大地提高了行业生产效率。21 世纪,随着美国先进制造伙伴计划、德国工业 4.0、中国制造 2025 的推出,智能制造获得了快速发展的新契机,已成为现代先进制造业新的发展方向。工业 1.0 到工业 4.0 的发展过程如图 1-1 所示。

1.1.1 数字化、网络化、智能化的发展

数字化、网络化、智能化是我国制造业创新发展的主要技术路线,是我国制造业转型升级的主要技术路径,是加快建设制造强国的主攻方向。

数字化、网络化、智能化与先进制造技术深度融合形成的智能制造技术,成为新一轮工业革命的核心技术,也成为第四次工业革命的核心驱动力。数字化、网络化、智能化技术可以为各行各业、各种各类制造系统赋能,进而与各行各业、各种各类制造技术深度融合,形成智能制造技术。

数字化技术、网络化技术、智能化技术的发展过程呈现出后者以前者为基础、不断递进和深化的特点,如图 1-2 所示。

数字化、网络化、智能化技术的发展也为经济社会发展带来重大创新变革。数字化技术的发展将催生以数据为关键要素的新型经济形态,形成以数字产业化和产业数字化为主要特征的数字经济。网络化技术将社会经济串联为高效、协同、统一的有机整体,将互联网的

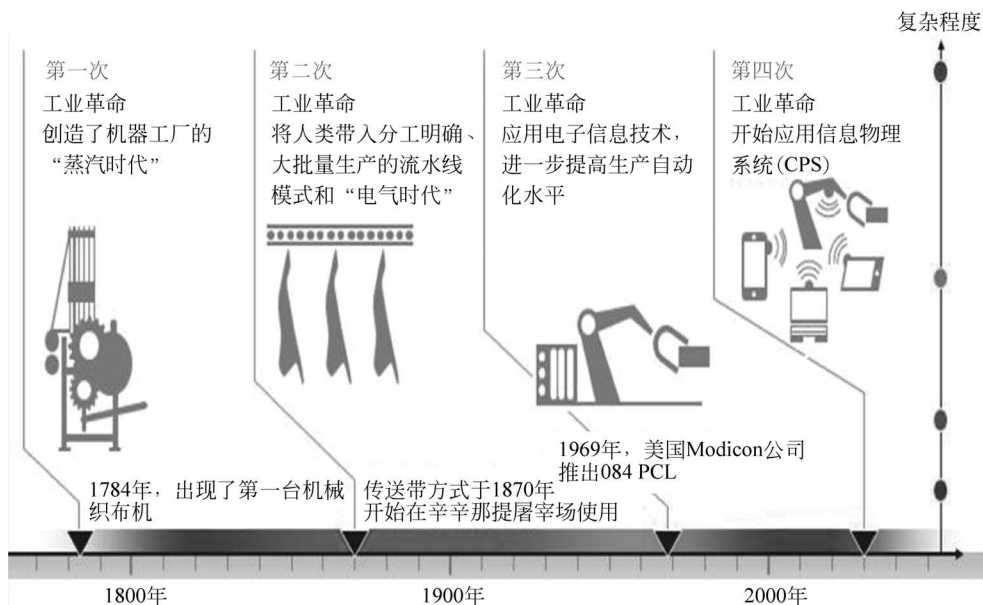


图 1-1 工业 1.0 到工业 4.0 的发展过程

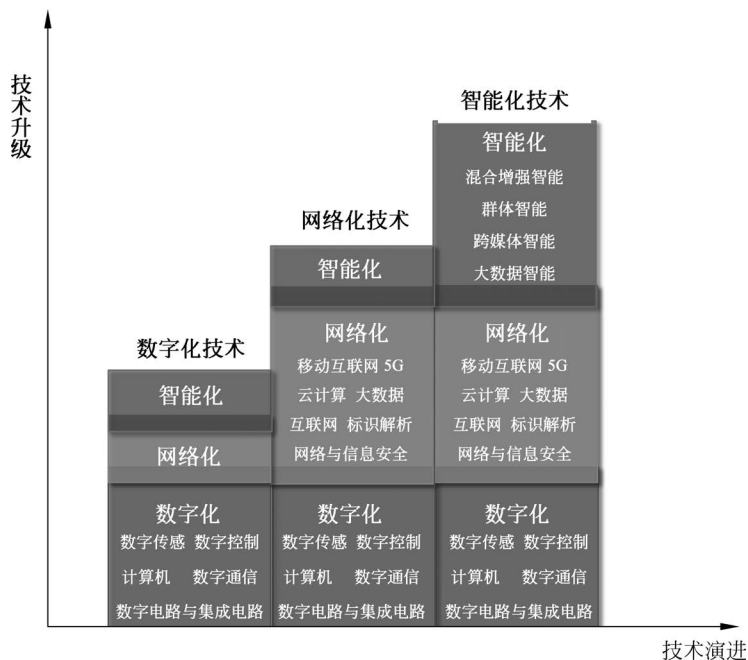


图 1-2 数字化、网络化、智能化的发展过程

创新成果与经济社会各领域深度融合,促进“互联网 +”的蓬勃兴起。而以新一代人工智能技术为代表的智能化技术,将进一步引发社会经济各领域的深层次智能化变革,带来生产、生活与社会治理模式的全面跃迁,构建面向未来的智能社会。

就智能制造而言,在智能制造发展的不同阶段,数字化、网络化、智能化技术发挥着不同的赋能作用。在数字化制造阶段,数字化技术发挥着主导赋能作用;在数字化、网络化制造阶段,数字化技术和网络化技术共同发挥赋能作用;在数字化、网络化、智能化制造阶段,则需要数字化、网络化、智能化技术三者共同发挥作用。这一阶段新一代人工智能技术的战略性突破和快速转化为现实生产力作为核心特征,将彻底改变科技创新方式与产业发展模式,重塑经济与社会形态,进一步解放人类生产力,引领真正意义上的第四次工业革命。

1.1.2 面向智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)

1. 制造系统发展的第一阶段:传统制造与人-物理系统(HPS)

200多万年前,人类就会制造和使用工具。从石器时代到青铜器时代,再到铁器时代,这种以人力和畜力为主要动力并使用简易工具的生产系统一直持续了百万年。以蒸汽机的发明为标志的动力革命引发了第一次工业革命,以电机的发明为标志的动力革命引发了第二次工业革命,人类不断发明、创造与改进各种动力机器并使用它们制造各种工业产品,这种由人和机器组成的制造系统大量替代人的体力劳动,大大提高了制造的质量和效率,极大提高了社会生产力。

案例 1-1: 传统手动机床

在传统手动机床(图 1-3)上加工零件时,需要操作者根据加工要求,通过手眼感知、分析决策并操作手柄控制刀具相对工件按希望的轨迹运动以完成加工任务(图 1-4)。

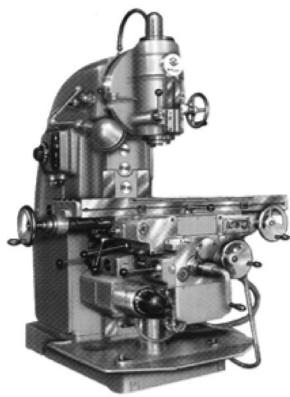


图 1-3 传统手动机床示意图

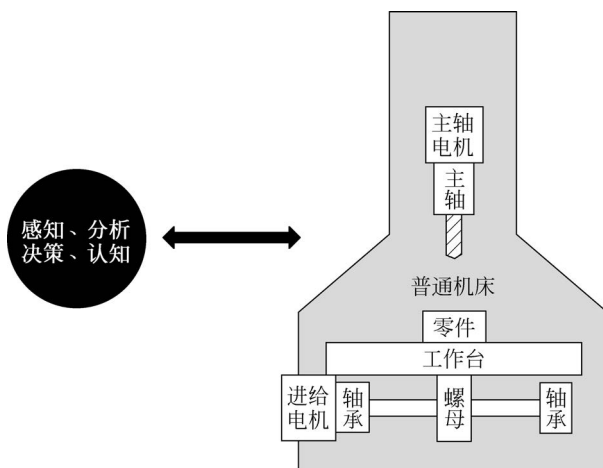


图 1-4 传统手动机床工作简图

传统制造系统由人和物理系统(如机器)两大部分组成(图 1-5),因此称为人-物理系统(human-physical system, HPS)(图 1-6)。其中,物理系统(P)是主体,工作任务是通过物理系统完成的;而人(H)是主宰和主导,人是物理系统的创造者,也是物理系统的使用者,工作任务所需的感知、学习认知、分析决策与控制操作等均由人完成。

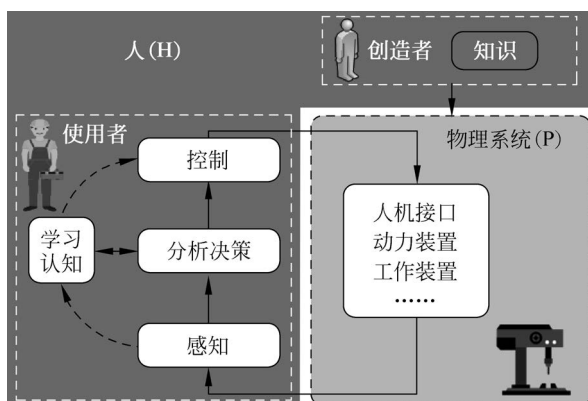


图 1-5 人和物理系统组成的传统制造系统

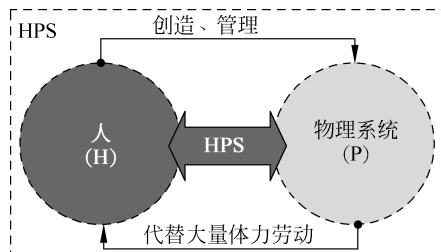


图 1-6 人-物理系统的原理简图

2. 制造系统发展的第二阶段：数字化制造与人-信息-物理系统(HCPS1.0)

1) 数字化制造——智能制造的第一种基本范式

20 世纪中叶以后,随着制造业对技术进步的强烈需求,以及计算机、通信和数字控制等信息化技术的发明和广泛应用,制造系统进入了数字化制造时代,以数字化为标志的信息革命引领和推动了第三次工业革命。

数字化制造是智能制造的第一种基本范式,也称为第一代智能制造。

案例 1-2: 数控机床

第三次工业革命最典型的产品之一是数控机床。与手动机床相比,数控机床发生的本质变化是在人和机床实体之间增加了数控系统。操作者只需根据加工要求,将加工过程中需要的刀具与工件的相对运动轨迹、主轴速度、进给速度等按规定的格式编写为加工程序,计算机数控系统即可根据该程序控制机床,自动完成加工任务。数控机床原理图如图 1-7 所示。

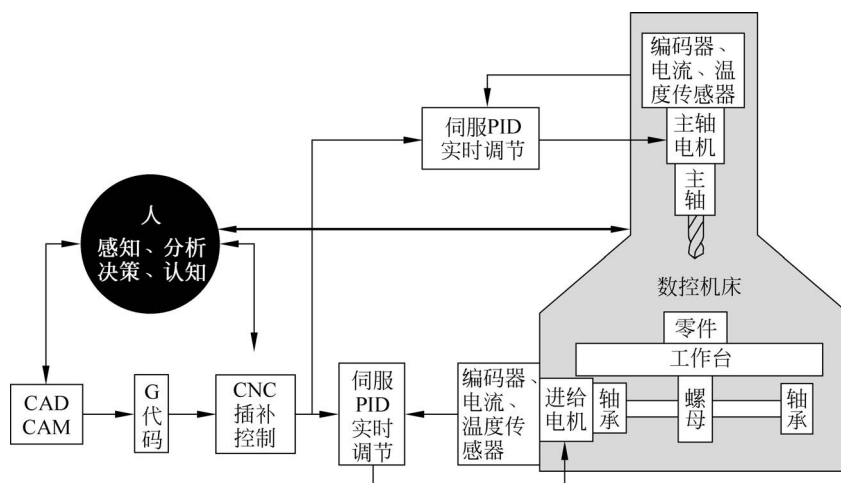


图 1-7 数控机床原理图

2) 人-信息-物理系统(HCPS1.0)

与传统制造系统相比,数字化制造系统最本质的变化是在人和物理系统之间增加了一个信息系统(C),由原来的人-物理二元系统发展为人-信息-物理(humen-cyber-physical system, HCPS)三元系统, HPS 进化为 HCPS(图 1-8)。人相当部分的感知、分析、决策和控制功能迁移至信息系统,信息系统可以代替人类完成部分脑力劳动。信息系统是由软件和硬件组成的系统,其主要作用是对输入的信息进行各种计算分析,并代替操作者控制物理系统完成工作任务。

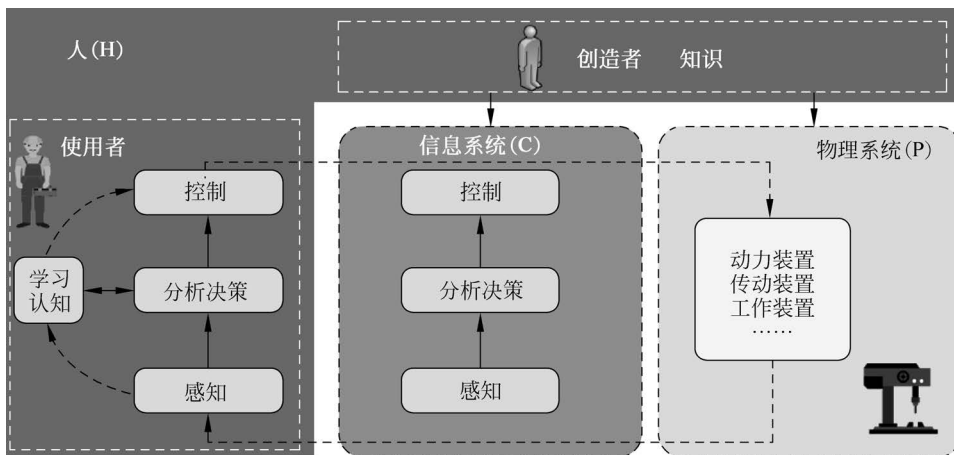


图 1-8 人-信息-物理系统(HCPS1.0)的数字化制造

面向数字化制造的 HCPS 可定义为 HCPS1.0。与 HPS 相比,HCPS1.0 通过集成人、信息系统和物理系统的各自优势,其能力尤其是计算分析、精确控制以及感知能力等,都得以极大提高,其结果是:一方面,制造系统的自动化程度、工作效率、质量与稳定性,以及解决复杂问题的能力等各方面均得以显著提升;另一方面,不仅操作人员的体力劳动强度进一步降低,更重要的是,人类的部分脑力劳动也可由信息系统完成,知识的传播利用及传承效率都得到有效提高。图 1-9 为人-信息-物理系统(HCPS1.0)的原理图。

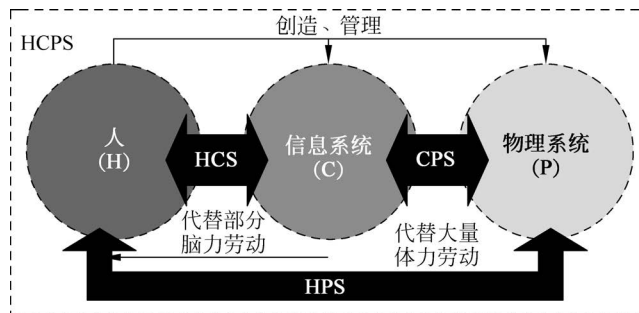


图 1-9 人-信息-物理系统(HCPS1.0)的原理图

在 HCPS1.0 中,物理系统仍然是主体;信息系统成为主导,信息系统在很大程度上取代了人的分析计算与控制工作;人依然起着主宰作用:首先,物理系统和信息系统都是由人设计制造出来的,其分析计算与控制的模型、方法和准则等都是在系统研发过程中由研发人员通过综合利用相关理论知识、经验、实验数据等确定并通过编程等方式固化到信息系统

中的；同时，HCPS1.0 的使用效果在很大程度上依然取决于使用者的知识与经验。例如，对于上述数控机床加工系统，操作者不仅需要预先将加工工艺知识与经验编入加工程序，还需要对加工过程进行监控和必要的调整优化。

3) 数字化制造的内涵及主要特征

数字化制造是在制造技术和数字化技术融合的背景下，通过对产品信息、工艺信息和资源信息进行数字化描述、集成、分析和决策，进而快速生产出满足用户需求的产品。数字化制造主要聚焦于提升企业内部竞争力，提高产品设计和制造质量，提高劳动生产率，缩短新产品研发周期，降低成本和提高能效。

数字化制造的主要特征表现如下。第一，数字技术在产品中得到普遍应用，形成“数字一代”创新产品。第二，大量采用 CAD/CAE/CAPP/CAM(计算机辅助设计/计算机辅助工程分析/计算机辅助工艺规划/计算机辅助制造)等数字化设计、建模和仿真方法；大量采用数控机床等数字化装备；建立信息化管理系统，采用 MRP II /ERP/PDM(制造资源计划/企业资源计划/产品数据管理)等，对制造过程各种信息与生产现场实时信息进行管理，提升各生产环节的效率和质量。第三，实现生产全过程各环节的集成和优化运行，生成以计算机集成制造系统(CIMS)为标志的解决方案。在这个阶段，以现场总线为代表的早期网络技术和以专家系统为代表的早期人工智能技术在制造业得到应用。

3. 制造系统发展的第三阶段：数字化网络化制造与人-信息-物理系统(HCPS1.5)

1) 数字化网络化制造——智能制造的第二种基本范式

20 世纪末 21 世纪初，互联网技术快速发展并得到广泛普及和应用，“互联网+”不断推进制造业和互联网融合发展，制造技术与数字技术、网络技术的密切结合重塑制造业的价值链，推动制造业从数字化制造向数字化网络化制造的范式转变。

数字化、网络化制造是智能制造的第二种基本范式，也可称为“互联网+制造”，或第二代智能制造。“互联网+制造”实质上是“互联网+数字化制造”。

案例 1-3：互联网+数控机床

与传统数控机床相比，互联网+数控机床增加了传感器，增强了对加工状态的感知能力。更重要的是，它实现了设备的互联互通，以及机床状态数据的采集和汇聚。互联网+数控机床原理图如图 1-10 所示。

2) HCPS1.5

该数字化、网络化制造系统仍然是基于人、信息系统、物理系统三部分的 HCPS(图 1-11)，但这三部分相对于数字化制造的 HCPS1.0 均发生了根本性变化，故数字化、网络化制造的 HCPS 可定义为 HCPS1.5。

HCPS1.5 最大的变化在于信息系统：互联网和云平台成为信息系统的重要组成部分，既连接信息系统、物理系统的各部分，还连接人，是系统集成的工具；连接互通与协同集成优化成为信息系统的重要内容。同时，HCPS1.5 中的人已经扩展为由网络连接起来共同进行价值创造的群体，涉及企业内部、供应链、销售服务链和客户，使制造业的产业模式从以产品为中心向以客户为中心转变，产业形态从生产型制造向生产服务型制造转变。

3) 数字化网络化制造的内涵及特征

“互联网+制造”的实质是有效解决了“连接”这个重大问题：在数字化制造的基础上，

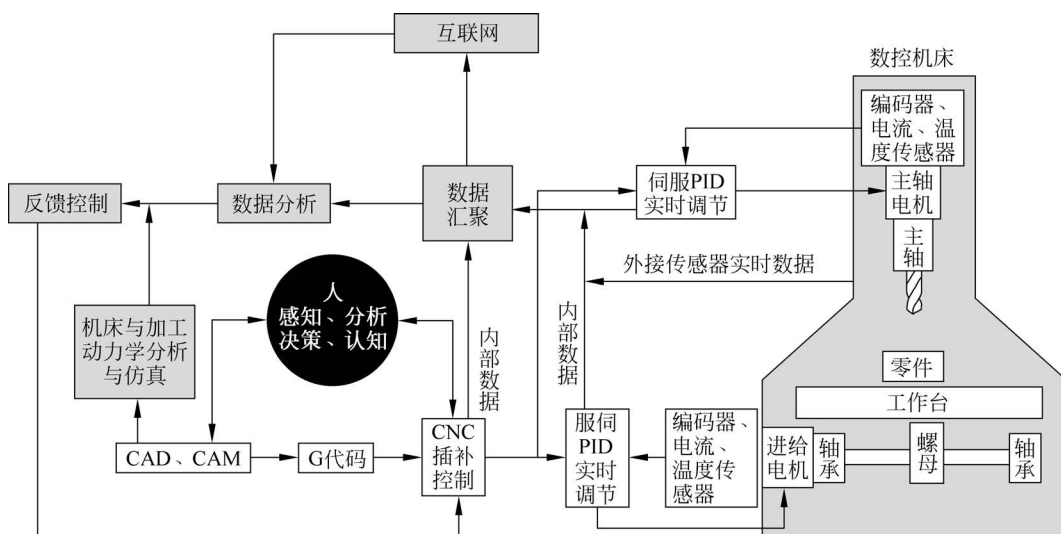


图 1-10 互联网+数控机床原理图

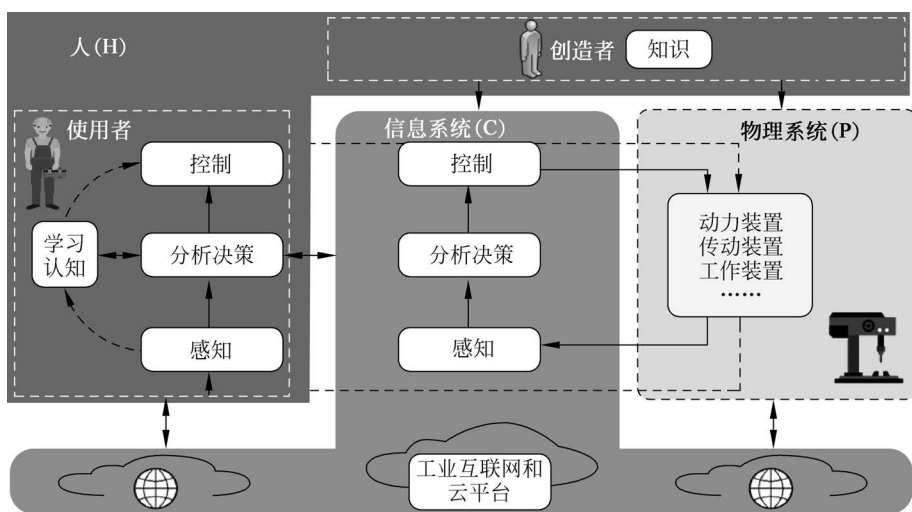


图 1-11 人-信息-物理系统(HCPS1.5)的数字化、网络化制造

深入应用先进的通信技术和网络技术,用网络将人、流程、数据和事物连接起来,连通企业内部和企业间的“信息孤岛”,通过企业内、企业间的协同和各种社会资源的共享与集成,实现产业链的优化,快速、高质量、低成本地为市场提供所需的产品和服务。先进制造技术和数字化网络化技术的融合,使企业对市场变化具有更强的适应性,能够更好地收集用户对产品使用 and 产品质量的评价信息,在制造柔性化、管理信息化方面达到更高的水平。

“互联网+制造”的主要特征表现如下。

(1) 在产品方面,数字技术、网络技术得到普遍应用,产品可实现网络连接。

(2) 在制造方面,实现横向集成、纵向集成和端到端集成,打通整个制造系统的数据流和信息流。企业能够通过设计和制造平台实现制造资源的全社会优化配置,与其他企业之间进行业务流程协同、数据协同、模型协同,实现协同设计和协同制造。

(3) 在服务方面,企业与用户通过网络平台实现连接和交互,掌握用户的个性化需求,将产业链延伸到为用户提供产品健康保障等服务,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转化。

案例 1-4: 三一重工的企业数字化、网络化转型

三一重工股份有限公司(以下简称三一重工)是我国工程机械领域最早进行数字化转型的企业之一,2008 年筹建的三一重工 18 号厂房是亚洲最大的数字化制造车间。之后,三一重工推进网络化进程,自主部署基于设备全球互联的物联网、大数据平台,为用户提供预测性维护、物联网金融等新业务,显著提高了三一产品的质量、水平和效益。目前,三一重工已发展成为排名居世界前列的工程机械制造企业。三一重工的企业数字化、网络化转型如图 1-12 所示。



图 1-12 三一重工的企业数字化、网络化转型

案例 1-5: 春风动力的企业数字化、网络化转型

浙江春风动力股份有限公司(以下简称春风动力)原来是一家摩托车配件厂,数字化水平不高。通过“互联网+创新+制造”,很好地完成了数字化“补课”,全面打造“制造云、电商云、物流云、设计云、流程云”,产品质量达到国际一流水平。目前,春风动力已经发展成为特种摩托车行业的世界级“隐形冠军”企业。春风动力产品及生产线如图 1-13 所示。



图 1-13 春风动力产品及生产线

4. 制造系统发展的第四阶段：数字化网络化智能化制造与人-信息-物理系统(HCPS2.0)

新世纪以来,互联网、云计算、大数据等信息技术日新月异、飞速发展,并得到极其迅速的普及应用,形成群体性跨越。这些历史性的技术进步,集中汇聚为新一代人工智能(AI2.0)的战略性突破,新一代人工智能已经成为新一轮科技革命的核心技术。新一代人工智能技术与先进制造技术深度融合形成的新一代智能制造技术,成为新一代工业革命的核心技术。

新一代智能制造——数字化、网络化、智能化制造是智能制造的第三种基本范式,其本质是“人工智能+互联网+数字化制造”。

新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合,形成了新一代智能制造技术,成为新一轮工业革命的核心技术,也成为第四次工业革命的核心驱动力。

面向新一代智能制造系统的 HCPS,相对于面向数字化、网络化制造的 HCPS1.5 又发生了本质性变化,因此,面向新一代智能制造系统的 HCPS 可定义为 HCPS2.0,如图 1-14 所示。最重要的变化发生在起主导作用的信息系统,由于将部分认知和学习的脑力劳动转移至信息系统,HCPS2.0 中的信息系统增加了基于新一代人工智能技术的学习认知部分,不仅具有更强大的感知、决策与控制的能力,还具有学习认知、知识产生能力,即实现了真正意义上的“人工智能”。信息系统中的“知识库”由人和信息系统自身的学习认知系统共同建立,不仅包含人输入的各种知识,还包含信息系统自主学习到的知识,尤其是那些人类难以描述与处理的知识,知识库可以在使用过程中不断学习,进而不断积累、不断完善、不断优化。

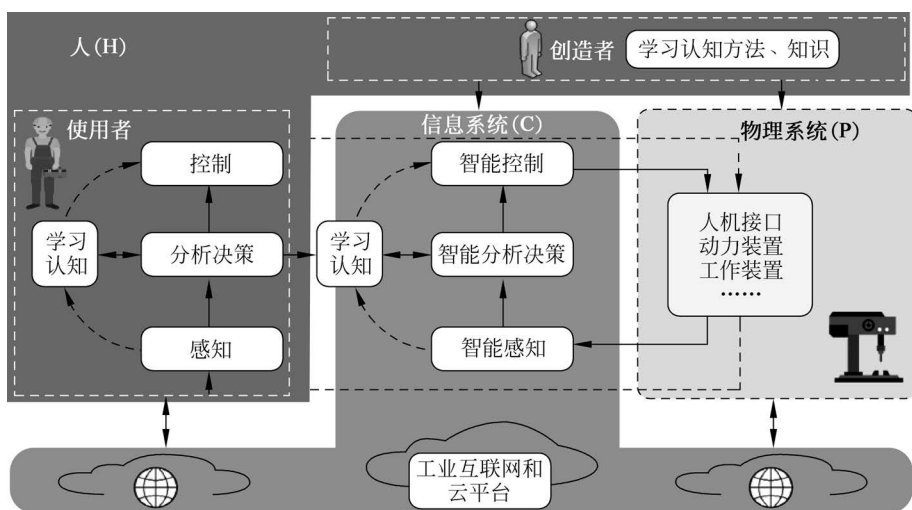


图 1-14 人-信息-物理系统(HCPS2.0)的新一代智能制造

这种面向新一代智能制造的 HCPS2.0 通过新一代人工智能技术赋予信息系统强大的“智能”,从而带来三个方面的重大技术进步。

(1) 从根本上提高制造系统的建模能力,极大提高处理制造系统复杂性、不确定性问题的能力,有效实现制造系统的优化。

(2) 使信息系统拥有学习认知能力,使制造知识的产生、利用、传承和积累效率发生革命性变化,显著提升知识作为核心要素的边际生产力。

(3) 形成人机混合增强智能,使人的智慧与机器智能的各自优势得以充分发挥并相互

启发增长,极大释放人类智慧的创新潜能,并极大提升制造业的创新能力。

案例 1-6: 新一代智能机床

新一代智能机床是在工业互联网、大数据、云计算的基础上,应用新一代人工智能技术和先进制造技术深度融合的机床。新一代智能机床能够实现自主感知、自主学习、自主优化与决策、自主控制与执行,极大提高机床加工质量、使用效率,并降低成本,是第四次工业革命的典型产品。如图 1-15 所示。

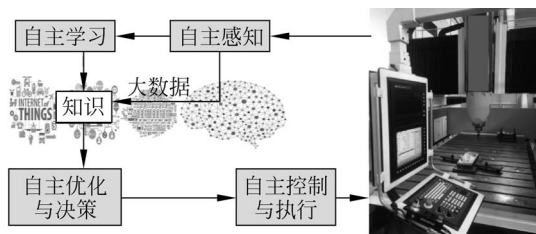


图 1-15 新一代智能机床系统

新一代智能制造进一步突出人的中心地位,在 HCPS2.0 中,人是主宰。一方面,智能制造将更好地为人类服务;另一方面,人作为制造系统创造者和操作者的能力和水平将极大提高,人类智慧的潜能将得到极大释放,社会生产力将得到极大解放。知识性工作自动化可将人类从大量体力和脑力劳动中解放出来,使其从事更有价值的创造性工作。人类的思维进一步向互联网思维、大数据思维和人工智能思维转变,人类社会开始进入智能时代。

1.1.3 智能制造覆盖产品全生命周期

智能制造是一个大系统,主要由智能产品、智能生产及智能服务三大功能系统,以及工业互联网和智能制造云平台两大支撑系统组合而成(图 1-16)。其中,智能产品是智能制造的主要载体和价值创造的核心;智能生产是制造产品的物化活动,亦即狭义而言的智能制造;以智能服务为核心的产业模式和产业形态变革是智能制造创新发展的主要方向之一,工业互联网和智能制造云平台是智能制造的支撑与基础。

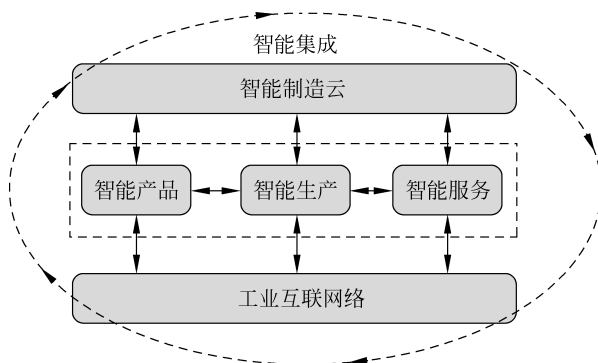


图 1-16 智能制造系统

智能制造技术是一种技术融合和系统集成创新技术,可广泛应用于产品创新、生产创新、服务创新、制造价值链全过程创新及其系统集成创新和优化。智能制造的三大功能系统