

---

# 第1篇

## 智能制造基础

---



# 第 1 章

## 智能制造发展历程简介

### 1.1 从自动化到智能化

大概从中学开始,人们就接受一个概念:人和动物最根本的区别在于使用工具。英国伟大的动物学家珍妮·古道尔(Jane Goodall)发现,黑猩猩可以选择和加工工具,如去掉树枝上的树叶,以树枝作为工具,伸进白蚁穴中捕捉白蚁<sup>[1]</sup>。和人类制造的工具相较,那种工具当然是最简单、最原始的,但这一现象足以颠覆人们关于人与动物根本区别的认知。

如果一定要从使用和制造工具的角度区别人与动物,恐怕需要对工具进行限定。黑猩猩制作的工具,即树枝,虽然去掉了树叶,但其实质和形态还是自然界本已存在的东西。想想原始人制作的弓箭,其形态不是自然本来存在的。因此,弓箭是“超自然存在”“超世界存在”的东西。人类的文明史,从某一角度看,就是一部不断探究“超自然存在”“超世界存在”的历史。人不断地通过创造“超自然存在”的工具(技术)去改善其生存问题。农业文明开始后最简单的农具、中国古代的冶炼技术(如春秋失蜡铸造法)、汉代纺织机械、毕昇活字印刷、公元 8 世纪前后波斯的风车、14 世纪意大利的机械钟和齿轮、18 世纪的蒸汽机,及至现代的汽车、计算机……这些“超自然存在”的工具或技术越来越复杂,功能越来越强大。

海德嘉·加塞特言,“称作‘技术’的最基本的事实只是起于如下奇怪的、戏剧般的、形而上学的事件:两种完全不同的实在——人和世界——以这样一种方式共存,即二者之一(人)要在另一者(恰恰是‘世界’)中建立‘超世界’的存在。如何实现这一点的问题——类似于工程师的问题——正是‘人的生存’的主题”。<sup>[2]</sup>有一点需要注意的是,“我们开发技术以满足我们预想的需求,而不是为了满足自然所规定的一套普适需求。用法国哲学家加斯东·巴歇拉尔的话说:征服多余的比征服必需的能给予我们更大的精神刺激,因为人类是欲望的产物而不是需求的产物”。<sup>[3]</sup>这里可以看出,人和动物在制作工具方面的最根本区别在于:动物没有对“超自然存在”“超世界存在”工具的欲求,而对其的欲求和创造力则是无止境的。

人类对工具的欲求淋漓尽致地表现在对自动化的追求上。看看纺织技术的演进,从纺坠、纺车、水力大纺车逐步进化到珍妮织机,而后的无锭纺纱、无梭织布、无纺布等皆是对纺织自动化技术无止境的追求。人们总是希望使用的工具尽可能少甚至没有人工干预,这样的工具其实就是自动化的机器或装置,如东汉张衡发明的一种观察地震的自动检测仪器

(候风地动仪)、瓦特改良的蒸汽机中的离心式调速器(当负载或蒸汽量供给发生变化时,离心式调速器能够自动调节进气阀的开度,从而控制蒸汽机转速)、20 世纪上半叶开始发展起来的自动产线,包括当代最精密的用于微电子生产的自动化装备等。

伴随着人们对自动化机器或装置的追求,从 20 世纪 40 年代开始,自动控制理论发展迅速。20 世纪 30 年代前后,美国开始采用比例-积分-微分(PID)调节器。其后,从维纳滤波到卡尔曼滤波,从经典控制理论到现代控制理论,最优控制理论,随机控制……不一而足。但后来人们发现,这些理论的实际应用局限性很大,并不如当初人们所期望的那样。

长期以来,有形的自动化机器或装置的主要作用是替代人的体力。难道人的脑力不能被部分取代?难道人类不能以人造系统减轻人的脑力活动乃至扩展人的智能?人类对“超自然存在”工具的欲求显然不会止于自动化机器与装置。自动化的发展势必指向:不仅减轻和替代人的体力,还要减轻人的脑力活动乃至扩展人的智能;不仅要有形的机器或装置,还需要某种无形的东西。

计算机及其软件的出现便是必然的。今天软件已经成为各个领域无形的工具。软件大大改善硬件产品的功能和性能,办公软件大大提高办公的效率,设计软件大大提升设计的效率和质量,管理软件大大提升管理水平……企业蓦然发现,数字化是企业发展的基本途径。

企业中自然存在大量的信息交流。传统的信息交流,除了口头外,便是以纸张为载体的各种文字、图表等,其传递也依靠人。20 世纪最伟大的发明——互联网,为人类信息交流带来革命性的变化。今天几乎所有的企业都离不开互联网,协同设计、供应链管理、客户管理、生产调度……企业的各种活动中,互联网似乎无处不在。近些年来,随着电子信息技术的发展,网络技术与移动通信技术融合而形成移动互联网。移动互联网的发展进一步地使网络渗透到工业及人们的生活,它改变了上网的空间和时间的局限性。企业中,设备的监控及运维、物流控制、用户体验等都是移动互联网发挥作用的极佳场所。网络宛如企业的数字神经系统。

数字化、网络化大大减轻了人的脑力活动的强度,但人类当然不会满足于“减轻”,而希望“替代”某些脑力活动。企业的自动化程度越来越高,产线和生产设备内部的信息流量增加;市场的个性化需求越来越强烈,产品所包含的设计信息和工艺信息量猛增;对市场的快速响应导致制造过程和管理工作的信息量也必然剧增……诸多因素使企业的关注点转向了提高制造系统对于爆炸性增长的信息处理能力、效率及规模上。这就不仅需要自动化、数字化、网络化技术,还需要智能化技术。

中华人民共和国国务院在 2017 年发布了《新一代人工智能发展规划》,其中指出:“人工智能成为经济发展的新引擎。人工智能作为新一轮产业变革的核心驱动力,将进一步释放历次科技革命和产业变革积蓄的巨大能量,并创造新的强大引擎,重构生产、分配、交换、消费等经济活动各环节,形成从宏观到微观各领域的智能化新需求,催生新技术、新产品、新产业、新业态、新模式,引发经济结构重大变革,深刻改变人类生产生活方式和思维模式,实现社会生产力的整体跃升。”<sup>[4]</sup>

OpenAI 于 2022 年 11 月 30 日发布 ChatGPT(chat generative pre-trained transformer)之后,整个世界为之震惊。尽管目前难以准确预测生成式人工智能(generative AI)将来对制造业的影响(因为 AI 本身发展的速度太快),但有一点确信无疑,未来 AI 在制造业中的应用将无处不在。当前关于生成式人工智能在制造业中应用的话题或许存在泡沫,但多数企业恐怕会低估 AI 将来在工业中的作用。

未来,智能化工厂将不只是人们的欲求和梦想!至于未来的“超自然存在”工具将以怎样的新形式存在?人和工具的关系如何?谁是制造的主体?甚至人何以存在?我们今天还难以想象!

## 1.2 学术概念的提出

一般认为,最早提出智能制造概念的当属美国纽约大学的怀特教授(P. K. Wright)和卡内基梅隆大学的布恩教授(D. A. Bourne),他们在1988年出版了《制造智能》(*Manufacturing Intelligence*)一书<sup>[5]</sup>。书中阐述了若干制造智能技术,如集成知识工程、制造软件系统、机器人视觉、机器控制,对技工的技能和专家知识进行建模,使智能机器人在没有人工干预的情况下进行小批量生产,等等。安德鲁·库夏克(Andrew Kusiak)于1990年出版了《智能制造系统》(*Intelligent Manufacturing System*)一书<sup>[6]</sup>,且有中译本<sup>[7]</sup>。主要内容包括:柔性制造系统,基于知识的系统,机器学习,零件和机构设计,工艺设计,基于知识系统的设备选择、机床布局、生产调度等。库夏克还在20世纪90年代初期创刊《智能制造杂志》(*Journal of Intelligent Manufacturing*)。早期关于智能制造的著述多见于智能技术在制造中的局部问题的应用。如加拿大学者董左民(Zuomin Dong)教授编辑出版的 *Artificial Intelligence in Optimal Design and Manufacturing*<sup>[8]</sup>,主要介绍人工智能技术在设计和制造中的应用。文献<sup>[9]</sup>的研究把切削速度、进给、切削力和加工时间作为人工神经网络(ANN)的输入,用于刀具磨损的估计。类似的文献在智能制造相关的杂志中比较常见,而关于企业智能制造系统的研究相对较少。

近些年,Smart Manufacturing(SM)受到关注。美国还成立了一个智能制造领导力联盟(SMLC),他们定义SM为:“通过高级智能系统的深度应用,从而实现新产品快速制造,产品需求的动态响应,生产和供应链网络的实时优化。”<sup>[10]</sup>一些学者认为SM是较智能制造(IM)更高级的发展阶段。如Yao、Zhou、Zhang和Boër等认为,早期的IM中用到的智能技术主要基于符号(symbolic)逻辑,处理结构化的、中心化的问题,如知识库系统(KBS);而SM则是建立在大数据技术以及相关的智能技术基础上,能够处理非结构化的、分布式的问题<sup>[11]</sup>。本书的中文术语不再对IM和SM进行区别,只是认为它们均属于智能制造的不同阶段或不同层次。

直到今天,关于智能制造的学术概念仍然在发展中,学者和企业的专家们都在不断探索。如2019年5月于北京举行的第七届智能制造国际会议上,中国机械工程学会荣誉理事长周济院士介绍了新一代智能制造,提出面向新一代智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)的新概念,相应的文章在《工程》期刊上发表<sup>[12]</sup>。

## 1.3 智能制造的国际合作计划

日本于1989年正式提出“智能制造系统”国际合作计划(以下简称“IMS计划”),是当时全球制造领域内规模最大的一项国际合作研究计划。由时任东京大学工程系主任吉川裕行(Iiroyuki Yoshikawa)提出,获得日本通产省的支持。计划的进展起初并不顺利,西方政

界对于 IMS 的设想显得态度冷淡。1990 年日本通产省、美国商务部和欧委会在比利时布鲁塞尔进行了会晤,此后,经过长达两年的协商谈判,才最终同意开展试点行动。1993—1994 年,IMS 在日本、美国、欧洲、加拿大和澳大利亚五个区域开展试点项目,73 家公司和 60 多所大学及研究机构参与。1995 年,IMS 计划进入正式实施阶段,为期 10 年,后又继续延期,但影响力日渐减弱。2010 年,日本退出 IMS 计划。这一计划目前仍在运转,仍然参与的国家(或地区)包括美国、瑞士、韩国、墨西哥和欧盟<sup>[13-14]</sup>。

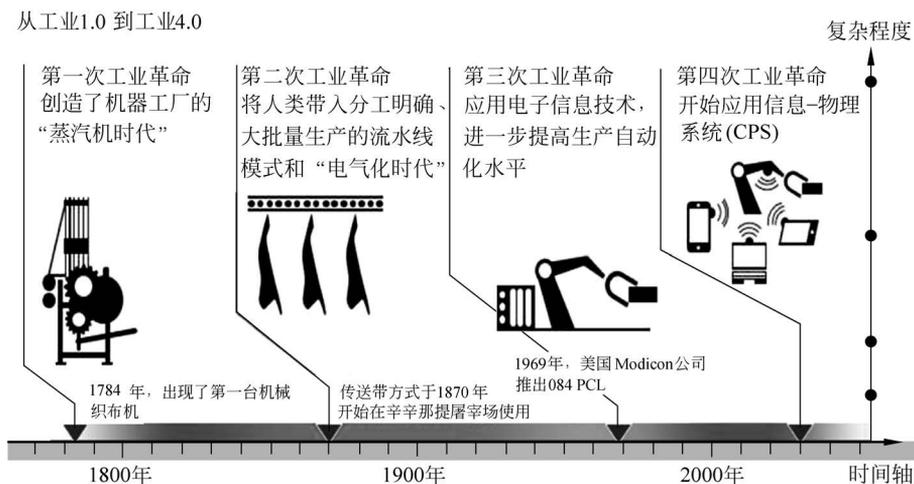
中国科协智能制造学会联合体(由中国机械工程学会、中国仪器仪表学会、中国自动化学会、中国人工智能学会等 13 家学会成员组成)于 2017 年 12 月发起筹备国际智能制造联盟,中国机械工程学会荣誉理事长周济院士任筹委会主席。2019 年 5 月 8 日,国际智能制造联盟(筹)启动会在北京召开。联盟旨在促进更大范围的智能制造国际交流,共同建立开放协同的创新生态,增加更多跨国界、跨领域、跨行业的合作,进而推动全球制造业的数字化网络化智能化。截至目前,澳大利亚、比利时、中国、丹麦、法国、德国、以色列、日本、瑞典、英国、美国等 16 个国家和地区的 60 家机构同意作为国际智能制造联盟的发起单位和参与国际智能制造联盟筹备委员会的工作。

## 1.4 世界主要国家的智能制造发展战略与实践

21 世纪以来,世界上主要国家都非常重视制造业发展战略。2012 年,美国提出“先进制造业国家战略计划”,提出中小企业、劳动力、伙伴关系、联邦投资以及研发投资等五大发展目标和具体实施建议;2019 年提出未来工业发展规划,将人工智能、先进的制造业技术、量子信息科学和 5G 技术列为“推动美国繁荣和保护国家安全”的 4 项关键技术;另外,美国通用电气(GE)公司于 2012 年提出“工业互联网”<sup>[15]</sup>计划,其基本思想是“打破智慧与机器的边界”(pushing the boundaries of minds and machines),旨在通过提高机器设备的利用率并降低成本,取得经济的效益,引发新的革命。GE 为此投入巨额资金,并进行了有益的实践。其后,GE 又联合了 IBM、思科(Cisco)、英特尔(Intel)、AT&T 等,成立了世界上推广工业互联网的最大组织工业互联网联盟(IIC),以期打破技术壁垒。目前,该联盟的成员已经超过 200 个。

在 2013 年 4 月的汉诺威工业博览会上,德国政府宣布启动“工业 4.0(Industry 4.0)”国家级战略规划,意图在新一轮工业革命中抢占先机,奠定德国工业在国际上的领先地位。工业 4.0 在国际上,尤其在中国,引起极大关注。2014 年 11 月李克强总理访问德国期间,中德双方发表了《中德合作行动纲要:共塑创新》,宣布两国将开展工业 4.0 合作。一般的理解是,工业 1.0 对应蒸汽机时代,工业 2.0 对应电气化时代,工业 3.0 对应信息化时代,工业 4.0 则是利用信息化、智能化技术促进产业变革的时代,也就是对应智能化时代,如图 1-1 所示<sup>[16]</sup>。

“工业 4.0”的基本思想是数字和物理世界的融合,主要特征是互联。利用信息-物理系统(CPS,有人亦称“赛博物理系统”)的理念,把企业的各种信息与自动化设备等整合在一起,打造智能工厂。智能工厂中,通过数据的无缝对接实现设备与设备、设备与人、设备与工厂、各工厂之间的连接,实时监测分散在各地的生产系统,使其实行分布自治的控制。工业 4.0 需要很多前沿技术的支撑,如物联网、大数据、增强现实、增材制造、仿真、云计算、人工智能等,见图 1-2<sup>[17]</sup>。德国于 2019 年又提出“国家工业战略 2030”,明确提出在某些领域德国需要拥有国家及欧洲范围的旗舰企业。

图 1-1 工业 4.0 概念图<sup>[16]</sup>图 1-2 工业 4.0 所需要的主要前沿技术<sup>[17]</sup>

2014 年日本发布制造业白皮书，提出重点发展机器人、下一代清洁能源汽车、再生医疗以及 3D 打印技术；2018 年版制造业白皮书中指出在生产一线数字化方面，应充分利用人工智能的发展成果，加快技术传承和节省劳动力；2016 年 1 月日本政府发布《第五期科学技术基本计划》，首次提出“社会 5.0”概念<sup>[18]</sup>。在少子老龄化负面影响正在凸显的日本，为实现人人都能快乐生活，系统化及系统之间联合协调的举措不能只限于制造业领域，还须扩展至其他各个领域，将其与建设经济增长、健康长寿的社会乃至社会变革联系在一起。

上述的战略计划并未冠以“智能制造”，但实际上都包含智能制造的内容。

我国为实现制造强国的战略目标，在 2015 年由国务院发布了《中国制造 2025》战略规划，智能制造成为其主攻方向。紧接着，工业和信息化部、财政部发布《智能制造发展规划（2016—2020 年）》<sup>[19]</sup>，近几年，一批企业推动智能制造，产生了很好的效果。一些企业的应用示范项目各有侧重，如数字化工厂/智能工厂（包括离散制造和流程制造），智能装备（产品），以个性化定制、网络协同开发、电子商务为代表的智能制造新业态新模式，以物流管理、能源管理

智慧化为方向的智能化管理,以在线监测、远程诊断与云服务为代表的智能服务,如此等等。

值得注意的是,在中国明确提出智能制造只是近几年的事情,但与智能制造紧密相关的数字化、网络化工作的探索于20世纪80年代末期便已开始。在当时“863”计划中的CIMS(计算机集成制造系统)主题(后改名为制造业信息化)和机器人主题的引导下,一批大学、研究院所和企业共同致力于机器人和企业数字化应用软件(如CAD(计算机辅助设计)、CAPP(计算机辅助工艺规划)、PDM/PLM(产品数据管理/产品生命周期管理)、ERP(企业资源计划)、MES(制造执行系统)、SCM(供应链管理)、CRM(顾客关系管理)……)的研发及应用,为企业的数字化和网络化发展奠定了坚实的基础。某种意义上,数字化、网络化是智能制造的必要条件,也可视为智能制造的早期阶段。也正因如此,今天中国的一批制造企业能够开始尝试智能制造。

## 参考文献

- [1] 古道尔. 我与黑猩猩在一起的三十年[M]. 邓晓明, 卢晓, 译. 北京: 中国广播电视出版社, 1990.
- [2] 加塞特. 关于技术的思考[M]. 高源厚, 译. // 吴国盛. 技术哲学经典读本. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [3] 乔治·巴萨拉. 技术发展简史[M]. 周光发, 译. 上海: 复旦大学出版社, 2000.
- [4] 中华人民共和国国务院. 新一代人工智能发展规划[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2017.
- [5] WRIGHT P K, BOURNE D A. Manufacturing intelligence[M]. Reading: Addison-Wesley, 1988.
- [6] KUSIAK A. Intelligent manufacturing systems[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990.
- [7] 安德鲁·库夏克. 智能制造系统[M]. 杨静宇, 陆际联, 译. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [8] DONG Z M. Artificial intelligence in optimal design and manufacturing[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994.
- [9] VENKATESH K, ZHOU M, CAUDILL R J. Design of artificial neural networks for tool wear monitoring[J]. Journal of intelligent manufacturing, 1997, 8(3): 215.
- [10] SMLC. Implementing 21st century smart manufacturing[R]. Los Angeles: Workshop Summary Report, 2011-7-24.
- [11] YAO X, ZHOU J, ZHANG J, et al. From intelligent manufacturing to smart manufacturing for Industry 4.0 driven by next generation artificial intelligence and further on[J]. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ES.2017.58.
- [12] 周济, 李培根, 周艳红, 等. 走向新一代智能制造[J]. 工程, 2018, 4(1): 28-47.
- [13] CORNING G P. Japan's intelligent manufacturing systems initiative and the politics of international technology collaboration[R]. Austin: The University of Texas, 1997.
- [14] 唐任仲. 智能制造系统国际合作研究计划[J]. 制造技术与机床, 1996(9): 45-47.
- [15] 通用电气公司. 工业互联网: 打破智慧与机器的边界[J]. 中国经济报告, 2015(8): 4.
- [16] 周济. 智能制造: “中国制造2025”的主攻方向[C]//国家制造强国建设战略咨询委员会 & 中国工程院战略咨询中心. 智能制造. 北京: 电子工业出版社, 2016: 13.
- [17] 新华网. 我们正在经历第四次工业革命[EB/OL]. (2015-12-15)[2020-02-18]. [https://www.xinhuanet.com/politics/2015-12/15/c\\_128529837.htm](https://www.xinhuanet.com/politics/2015-12/15/c_128529837.htm).
- [18] 薛亮. 日本第五期科学技术基本计划推动实现超智能社会“社会5.0”[J]. 华东科技, 2017(2): 46-49.
- [19] 工业和信息化部、财政部. 智能制造发展规划(2016—2020年)[R]. 北京: 工业和信息化部, 2017.

---

---

## 第 2 章

---

---

---

---

# 智能制造的基本概念和架构

---

---

### 2.1 定义

制造是把原材料变成适用的产品。需要特别注意的是,这里制造的含义不限于加工和生产。对于一个制造企业而言,其制造活动包含一切“把原材料变成适用的产品”的相关活动,如产品研发、工艺设计、设备运维、采购、销售……

对智能制造最通俗的理解莫过于“把智能技术用于制造中”。然而什么是智能?什么是人工智能?尽管从人工智能概念的提出到现在已经过了半个多世纪,但是关于人工智能的定义却依然存在争议。一般认为,目前人工智能的研究方向主要集中在自然语言处理、机器学习、计算机视觉、自动推理、知识表示和机器人学等六大方向上。但显然人们并不认为,企业实施智能制造就一定要应用上述所有技术。

关于智能制造的定义有很多。

美国 Wright 和 Bourne 在其《制造智能》(智能制造研究领域的首本专著)中将智能制造定义为“通过集成知识工程、制造软件系统、机器人视觉和机器人控制来对制造技工们的技能与专家知识进行建模,以使智能机器能够在没有人工干预的情况下进行小批量生产”<sup>[1]</sup>。今天能够用于制造活动的智能技术不只是上述定义中所列举的,此外智能制造显然不局限于小批量生产。但人们没有任何理由因为此定义的局限性而轻视其意义,在当时(20 世纪 80 年代)相关技术发展尚不成熟的时期提出智能制造的概念无疑是富有远见和开创性的工作。

路甬祥曾对智能制造给出定义:“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,它在制造过程中能进行智能活动,诸如分析、推理、判断、构思和决策等。通过人与智能机器的合作共事,去扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动。它把制造自动化的概念更新、扩展到柔性化、智能化和高度集成化。”<sup>[2]</sup>其中强调的人机一体化,乃深刻洞见。

在中国《智能制造科技发展“十二五”专项规划》中,定义智能制造是“面向产品全生命周期,实现泛在感知条件下的信息化制造,是在现代传感技术、网络技术、自动化技术、拟人化智能技术等先进技术的基础上,通过智能化的感知、人机交互、决策和执行技术,实现设计过程智能化、制造过程智能化和制造装备智能化等”。此说中实现设计过程、制造过程和制造装备

的智能化,只是智能制造的现象。或者说,智能化设计、装备等只是制造的手段,而非目标。

工信部在2016年发布的《智能制造发展规划(2016—2020年)》中对智能制造明确定义:“智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合,贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的生产方式。”<sup>[3]</sup>此定义无疑吸取了多位学者和专家的智慧,点明了智能制造的技术基础、应用的环节,揭示了其功能表象,但未能触及智能制造的本质和内涵。

第1章提到在美国、欧盟、韩国等受到重视的SM,可以看成是智能制造发展的更高级阶段。SM是近些年一些前沿技术迅猛发展的结果,如物联网、大数据、VR(虚拟现实)/AR(增强现实)、智能传感、云技术、新一代人工智能等。美国国家标准技术局认为,SM是完全集成的协同制造系统,能够实时响应企业、供应链和客户中需求及条件的变化<sup>[4]</sup>。这一定义颇为简单,并未直接点出所涉及的技术及系统具体的功能,却更清晰地揭示了智能制造的目标。

本书不妨给出智能制造及系统的极简定义,之所以如此,恰恰因为智能制造还在发展中。简单的定义可能包罗更广泛的功能和技术要素,不管是已有的,还是未来的。简单的定义可能含义更深,不管是表象的,还是内在的;不管是显性的,还是隐性的。

**【定义】 智能制造: 把机器智能融合于制造的各种活动中,以满足企业相应的目标。**

**定义中的关键词: 机器智能、融合、制造活动、目标。**

机器智能包括计算、感知、识别、存储、记忆、呈现、仿真、学习、推理……,既包括传统智能技术(如传感、KBS等),也包括新一代人工智能技术(如基于大数据的深度学习)。一般来说,人工智能分为计算智能、感知智能和认知智能3个阶段。第一阶段为计算智能,即快速计算和记忆存储能力。第二阶段为感知智能,即视觉、听觉、触觉等感知能力。第三阶段为认知智能,即能理解、会思考。认知智能是目前机器与人差距最大的领域,让机器学会推理和决策异常艰难。ChatGPT的进展正迅速缩短机器与人在某些工作中的差距,甚至在某些方面(如生成式设计、管理决策等)超越人类思维。

虽然机器智能是人开发的,但很多单元智能(如计算、记忆……)的强度远超人的能力。将机器智能融合于各种制造活动,实现智能制造,通常有如下好处<sup>[5]</sup>:

(1) 智能机器的计算智能高于人类,在一些有固定数学优化模型、需要大量计算但无须进行知识推理的地方,比如设计结果的工程分析、高级计划排产、模式识别等,与人根据经验来判断相比,机器能更快地给出更优的方案。因此,智能优化技术有助于提高设计与生产效率、降低成本,并提高能源利用率。

(2) 智能机器对制造工况的主动感知和自动控制能力高于人类。以数控加工过程为例,“机床/工件/刀具”系统的振动、温度变化对产品质量有重要影响,需要自适应调整工艺参数,但人类显然难以及时感知和分析这些变化。因此,应用智能传感与控制技术,实现“感知—分析—决策—执行”的闭环控制,能显著提高制造质量。同样,一个企业的制造过程中,存在很多动态的、变化的环境,制造系统中的某些要素(设备、检测机构、物料输送和存储系统等)必须能动态地、自动地响应系统变化,这也依赖于制造系统的自主智能决策。

(3) 制造企业拥有的产品全生命周期数据可能是海量的,工业互联网和大数据分析等技术的发展为企业带来更快的响应速度、更高的效率和更深远的洞察力。这是传统凭借人的经验和直觉判断的方法所无可比拟的。