

第1章

绪论

导学

制造业是国民经济和国防建设的重要基础,是立国之本、兴国之路、强国之基。智能制造是当前制造技术的核心发展方向。智能制造装备是智能制造的载体,是实现智能制造的关键环节。本章以“生产力发展需求”和“满足人类对美好生活的需要”为起点,阐述智能制造装备面临的需求和挑战,使学生理解智能制造装备需要解决的关键技术问题,掌握智能制造装备的主要特征,理解智能制造装备发展的核心问题和发展趋势。

教学目标和要求:理解智能制造装备发展的内外因素和发展趋势,掌握智能制造装备涉及的核心问题和关键技术等基础概念,具有针对特定工程问题提出智能制造装备系统具体功能要求的能力。

重点:理解制造装备智能化需求的内在和外在驱动因素,掌握智能制造装备核心问题与关键技术的基础概念和技术要求。

难点:智能制造装备核心问题与关键技术的基础概念和技术要求。

1.1 智能制造装备发展概述

纵观世界工业的发展历史,科技创新始终是推动人类社会生产生活方式产生深刻变革的重要力量。如图 1-1 所示,从第一次工业革命的“蒸汽时代”,到第二次工业革命的“电气时代”,再到第三次工业革命的“信息化时代”,都是以推动人类生产力的发展,满足人类对美好生活的需要为追求。

开始于 18 世纪 60 年代中期的第一次工业革命(即工业 1.0),从发明、使用和改进机器开始,以蒸汽机作为动力,实现工厂机械化。第一次工业革命使机械生产代替了手工劳动,工厂制代替了手工工场,社会生产力得到了极大的提高,人类经济社会从以农业、手工业为基础转型到以工业化的机械制造带动经济发展的新模式。

开始于 19 世纪后半期的第二次工业革命(即工业 2.0),在劳动分工基础上,通过采用电力驱动机械加工,实现了大规模生产。因为有了电力,社会生产进入了由电气自动化控制机械设备生产的年代,社会生产力进一步提升。这次的工业革命,通过零部件生产与产品装配的成功分离,开创了产品批量生产的高效新模式。

开始于 20 世纪 70 年代左右的第三次工业革命(即工业 3.0),通过广泛应用电子信息

技术,使制造过程自动化控制程度再进一步大幅提高。生产效率、良品率、分工合作、机械设备寿命都得到了前所未有的提高。在此阶段,工厂大量采用由 PC、PLC(可编程控制器)、微控制器等电子信息技术自动化控制的机械设备进行生产。自此,机器能够逐步替代人类作业,不仅接管了相当比例的“体力劳动”,还接管了一些“脑力劳动”,工业生产能力进一步提升。

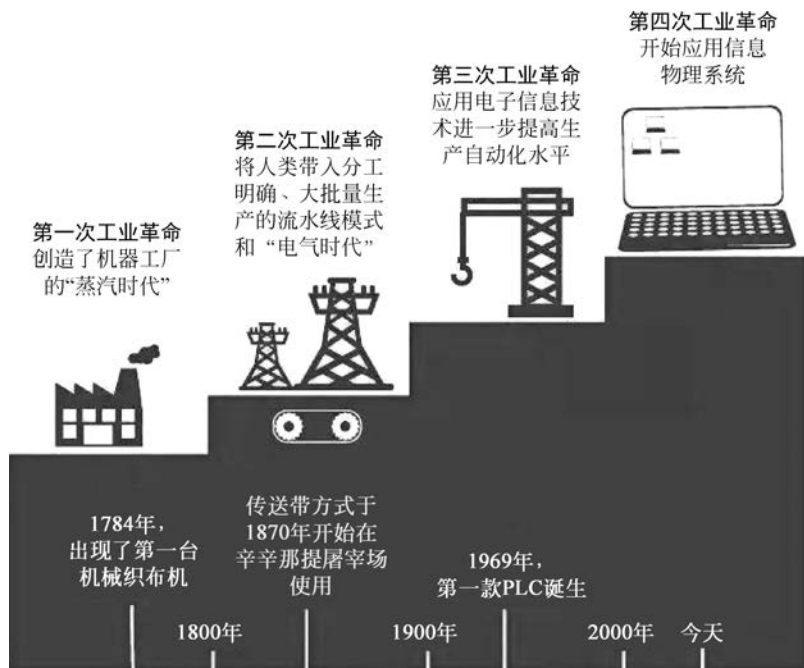


图 1-1 工业革命史简图^[1]

进入 21 世纪,互联网、云计算、大数据等信息技术的飞速发展,推动着人工智能技术的战略性突破,人工智能技术已经成为新一轮科技革命的核心技术之一。人工智能技术与先进制造技术的深度融合,形成了智能制造技术,成为第四次工业革命的核心驱动力。新一代智能制造的突破和广泛应用将重塑制造业的技术体系、生产模式、产业形态,实现第四次工业革命。

纵观近现代工业发展史,生产力发展始终是推动智能制造发展的根本动力。适应新技术、新经济的发展,满足人类对美好生活的需求是智能制造装备发展的根本需求。智能制造是一个大系统,贯穿于产品设计、制造和服务全生命周期的各个环节,智能生产是主线,智能制造装备是基础。理解智能制造装备发展的内外需求和发展趋势,是开展智能制造装备关键技术学习,建立智能制造装备体系宏观思维的前提。

1.1.1 智能制造装备发展内因

生产力发展始终是人类社会发展的决定性因素,现代科学技术的进步提升着人类生产力发展与变革的速度。智能制造装备通过先进制造技术、信息技术和智能技术的集成和深度融合,将实现人类社会生产力的跨越式发展。20 世纪以来,人们对生产力发展水平的注意力主要偏重于生产过程的自动化,自动化程度的提高极大地解放了生产过程中的体力劳

动。但随着人类对更高生产能力、生产质量和生产效率的要求,越来越多的生产问题需要更多的脑力劳动来决策。如极端制造、超精密加工、高速高效加工以及考虑可持续发展问题的绿色制造等,都是传统工艺和成熟经验无法解决的生产制造问题,迫切需要智能化加工设备才能够完成。

1. 极端制造系统问题

随着人类社会不断对深空、深海等极端条件的挑战,各种极端制造问题成为人类生产力发展的主攻方向。如大型空间站舱体的一次性成型问题(见图 1-2);用于深海探测潜水器的高强度、超大构件的精密锻造问题;万吨级大型船舶用整体结构件及其精密焊接问题;飞机制造与热连轧机组制造等复杂巨系统制造问题^[4]等。在这类极端条件中,常大量采用整体薄壁结构和复杂曲面结构,以满足零件极端服役性能的要求。这类生产问题制造成本高、制造过程复杂、试错代价高,需要在有限的实验条件下,获得尽可能多的经验和数据。因此制造装备需要具有较强的数据采集和分析能力,通过对生产工艺数据、设备运行状态、工件加工质量,以及材料应力、应变等数据的实时跟踪和采集,结合信息物理系统,进行正确的数值模拟与仿真,实现有效的数据分析和预判,进而降低试错成本,提升生产能力。

同时科学家在微尺度物质结构和形态上的挖掘与制造技术的突破,正不断地创造着具有新结构、新功能的产品。新的纳米制造工艺,需要在 1cm^2 的芯片上集成数十亿个电子管(见图 1-3);基于原子尺度的增材制造技术,通过大分子可控组装能够“跳动”的心脏、具有“呼吸”功能的肺气囊等人造器官;科学家构建的量子计算机“九章”,处理“高斯玻色取样”的速度比最快的超级计算机快一百万亿倍;超精密磨削技术已经将零件表面加工质量提升到皮米级的原子尺度^[5]。目前,制造技术已由毫米级的手工制造、微米及纳米级的机器制造,逐步进入到了原子和近原子尺度的皮米级制造,这就需要新一代具有更高感知能力、创新驱动控制和人工智能技术的智能制造装备来实现。



图 1-2 中国空间站构想图^[2]

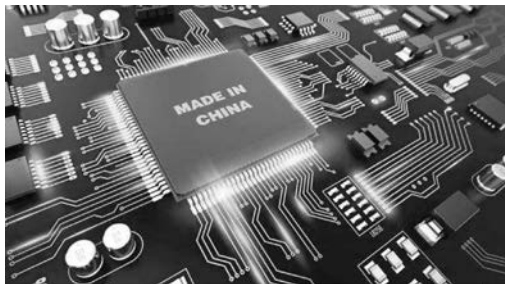


图 1-3 国产芯片制造^[3]

2. 难加工材料复杂工艺问题

对于一些难加工材料的复杂工艺过程,如满足极限工况使用要求的氮化硅陶瓷球(见图 1-4)的超精密加工问题,其材料硬度达到 $2840\sim 3320\text{kgf/mm}^2$,且对加工精度和表面质量都有很高的要求,通常只能在复杂的混合金刚石磨料的柔性流道内研磨加工,影响其加工精度的工艺条件多达 40 余个^[5]。借助于先进的传感器与检测技术,通过大数据分析和人工智能方法,一些最重要的工艺参数才能够被提取出来,这就要求新一代研磨机具有更高的

智能化水平。而对于硬脆石材雕塑制品(见图 1-5)的复杂加工工艺问题,其材料组成成分和结构复杂,每一块石材都有不同的工艺特性,每一道工序的加工工艺参数都会对刀具产生较大的影响。借助于加工过程的实时监控和数字化模型的准确预测,工艺路径和参数才能够不断地得到优化^[6]。对于高温合金、钛合金、高强度钢、复合材料等难加工材料,在高速切削过程中,切削温度高、刀具磨损严重,零件在制造中加工变形和切削振动现象严重,加工精度和表面完整性难以保证,必须充分考虑切削过程的非线性、时变、大应变、高应变率、高温、高压和多场耦合等复杂工程问题^[7],这些都要求智能制造装备具有高效、可靠的检测、分析和控制能力。

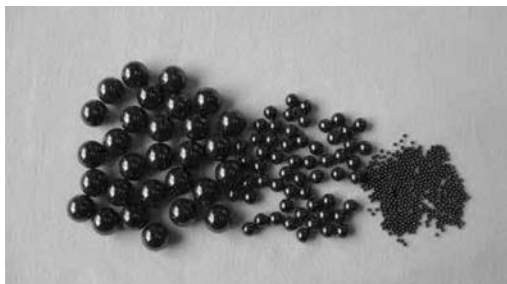


图 1-4 氮化硅陶瓷球



图 1-5 石材复杂工艺制品

3. 高速高效绿色制造问题

“力争 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和”是中国政府确定的重大发展战略决策,事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体。“推动技术和产业变革朝着信息化、数字化、智能化方向加速演进”是主要战略方向。切削加工技术的高速高效绿色制造过程,并不是纯粹的几何制造过程,而是典型的力热强耦合的物理制造过程。切削加工过程涉及的材料学、弹塑性力学、断裂力学、传热学、运动学、动力学和摩擦学等多学科交叉问题,切削过程中的各种物理现象如切削力、切削热、切削振动和刀具磨损等,与工件、刀具、机床和夹具所构成的工艺系统具有密切联系。工艺系统的制造误差、刀具磨损、受力变形、受热变形以及定位误差和测量误差等因素都会直接影响零件的加工质量^[8]。在智能切削加工过程中,通过将先进传感器与检测技术、数据技术、智能算法与机床运动控制相结合,实现对切削加工状态和表面质量的实时监控与动态控制,它要求智能制造装备具有实时监控与分析能力、具有数据传输和共享能力、能够对控制决策进行准确和快速的响应能力。

4. 离散型制造模式的智能化

离散型制造是大部分工业产品的主要生产方式,离散型制造的产品往往由多个零件经过一系列并不连续的工序加工最终装配而成,这些零件往往由同一工厂的不同部门或者不同的工厂生产完成。离散型制造企业往往生产相关和不相关的较多品种和系列的产品,其生产过程是由不同零部件加工子过程或并联或串联组成的复杂过程,其过程中包含着更多的变化和不确定因素。因此,离散型制造企业的产能主要由加工要素的配置合理性决定,企业的管理水平和数据收集与运用能力已经成为离散型企业发展的核心竞争力。这些数据既

包括产品及其构成的产品结构、工艺路线、物料信息、生产调度、质量管理等与产品密切相关的生产数据,还包括生产管理、财务管理、人力资源管理生产要素。如图 1-6 和图 1-7 所示,现代离散型制造企业需要借助于工业互联网、云制造和人工智能等手段,将企业内部和企业与企业之间的物流、信息流和控制流等数据在生产过程中汇集起来,把企业的人、财、物、产、供销及相应的物流、信息流、资金流、管理流、增值流等紧密地集成起来实现资源优化和共享,使企业运行向着精细化和智能化的方向发展。



图 1-6 智能化车间



图 1-7 智能化工厂模型

5. 流程工业生产过程的智能化

石油、化工、钢铁、有色金属、建材和电子等流程工业行业,面临着资源综合利用率低、能源消耗大、环境污染严重等问题,特别是流程工业涉及原料变化频繁、工况波动剧烈;生产过程涉及物理化学反应,机理复杂;生产过程连续,不能停顿,任一工序出现问题必然会影响整个生产线和最终的产品质量。流程工业迫切需要对原料成分、设备状态、工艺参数和产品质量等进行实时和全面的检测,实现生产过程的高效化与绿色化、生产工艺和生产流程的智能化的制造模式转变。如图 1-8 和图 1-9 所示,通过将复杂工业过程控制、全流程运行监控与管理大数据,企业运作管理与决策和生产管理与决策大数据,工艺研究实验大数据等工业资源和人工智能技术相结合,实现知识型工作智能化,借助计算机和通信技术与流程工业物理资源的紧密融合与协同,实现生产工艺智能优化和生产流程智能优化^[9]。

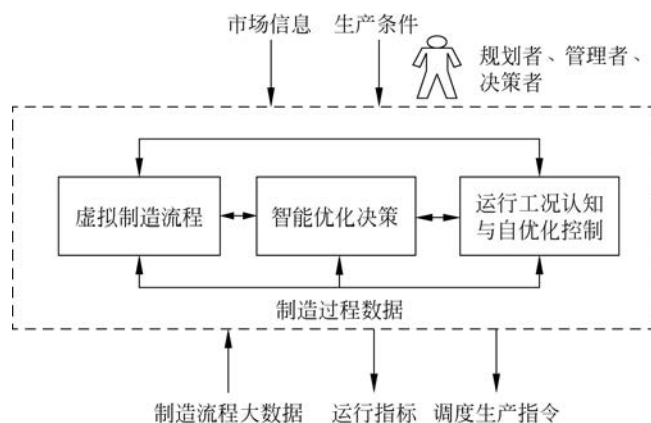


图 1-8 人机合作智能优化决策系统

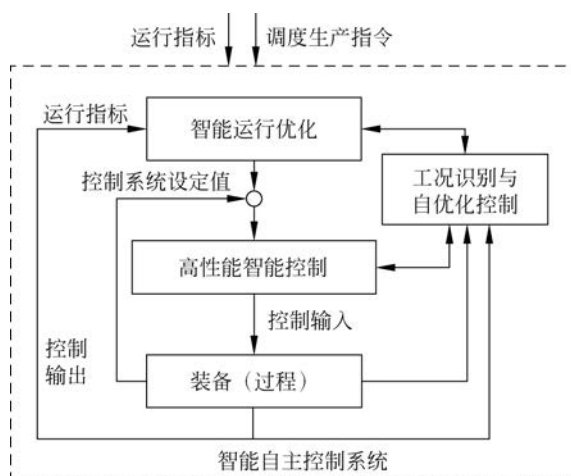


图 1-9 工业过程智能自主控制系统

1.1.2 智能制造装备发展外因

满足人类对美好生活的向往,是社会发展的根本目标,也是智能制造装备发展的追求。标准化的大规模生产极大地丰富了人们的物质生活,人们在追求更多个性需求的同时,希望获得更好的用户体验和实现更富有创造性的劳动创造,关注人的发展和需求是智能制造装备产品和技术发展的主要着力点。

1. 多样化的个性需求

随着大众化功能性需求的广泛性满足,人们对于产品的需求开始向着功能与文化价值共存的多样化个性需求发展,消费者不再是被动的,客户与市场的针对性定位更加细分化。如图 1-10 和图 1-11 所示,从消费品到生产工具,批量定制生产已经成为制造业的主流生产模式。批量定制生产是一种集企业、客户、供应商和环境于一体,在系统思想指导下,用整体优化的思想,充分利用企业已有的各种资源,在标准化技术、现代设计方法学、信息技术和先进制造技术等的支持下,根据客户的个性化需求,通过模块化、平台化、配置设计和变型设计等技术,使得最终产品在外部多样化与内部少样化之间达到综合最优,以批量生产的低成本、高质量和高效率提供定制产品和服务的生产方式^[10]。数量极少的产品要快速、有效、低成本地生产制造,制造模式必须是设计、协作、准备、制造、检测、物流、消费、报废回收的全流程全寿命的动态智能控制,物体、组织、个人、服务等网络无缝连接才能应对^[11]。产品要在消费者直接或间接的参与下完成,就需要对产品的用户体验具有及时的收集和分析能力。5G 等通信技术的发展极大地丰富了“互联网+大数据+人工智能”的统计分析手段,柔性化生产制造系统和 3D 打印等新型制造技术则在定制化生产中展示了独有的优势,智能制造装备体现出了应对多样化个性需求的快速响应能力。



图 1-10 宝马定制汽车



图 1-11 智能机床定制

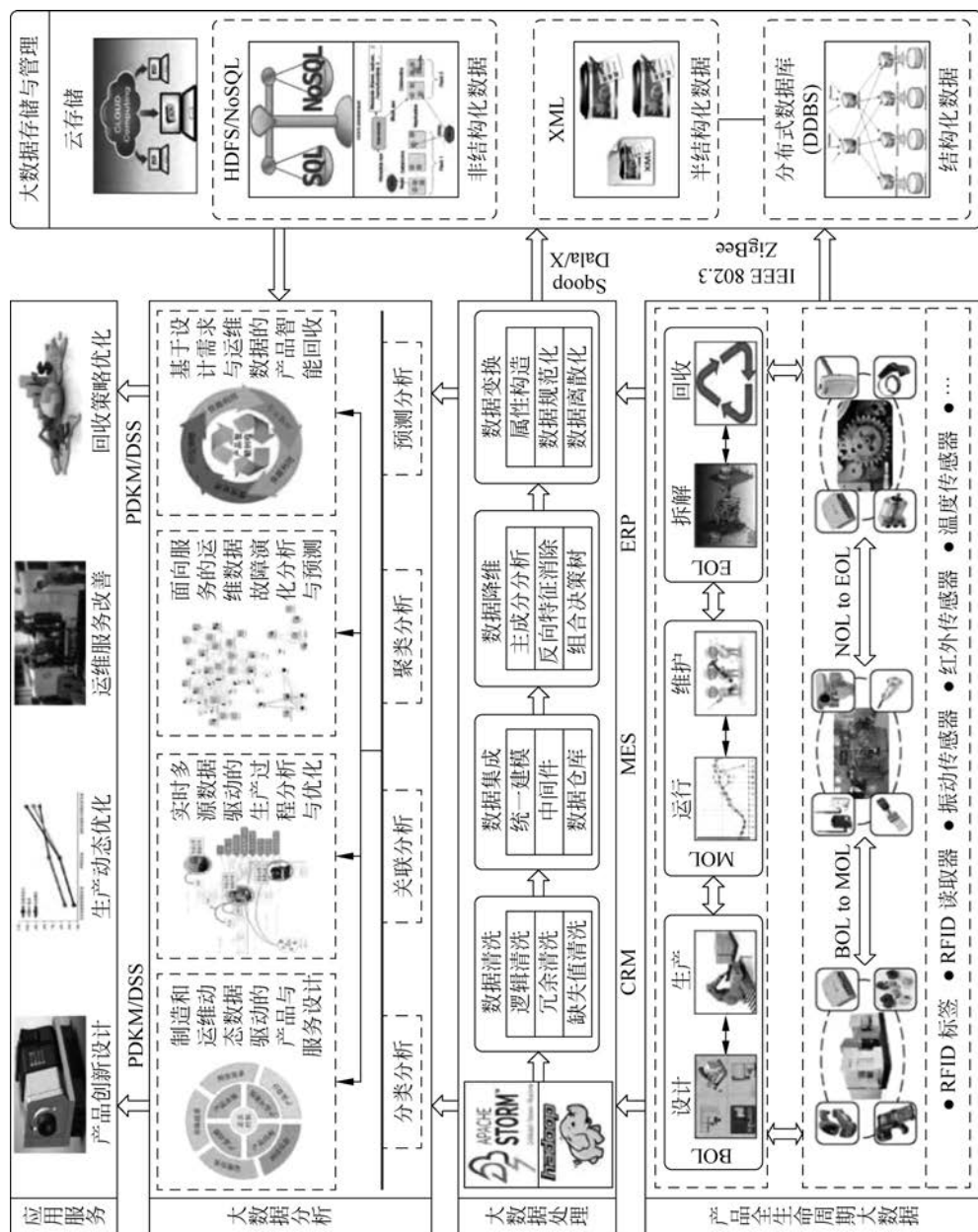
2. 更高质量的生产服务

服务经济已经成为全球工业发展的主要趋势之一,其核心是增加生产附加价值,优质服务可以为企业带来额外的价值。制造与服务的深度融合,使经济的增长越来越多地依托用户感知价值的创造。产品价值创造的重心正在由制造过程向顾客的使用过程和需求满足过程转变,由此导致了制造与服务在产品生命周期中价值比重的重新分配。产品通过服务增值为用户提供更多的附加价值,吸引用户参与产品配置和服务模式协同创新,溢出更多的用户感知价值,也成为制造业塑造差异化竞争优势的重要手段,制造企业需要加强服务化变革和协同创新以持续寻求新的利润点^[12]。如图 1-12 所示,产品全生命周期大数据的运用为制造业整个生命周期管理的改善与优化带来了新的机遇:借助互联网和 5G 通信技术的发展,用户体验和需求能够及时汇总到生产和服务端,进而提高产品更新迭代速度;工业互联网、云制造的发展使“制造即服务”能够更快地实现,分散制造资源和能力的服务化为社会化的集成、分享和使用提供了可能;以产品全生命周期管理为依托的绿色回收和再制造技术,为可持续发展创造着新的价值。以物联网、产品嵌入式信息装置、智能传感器等为主要技术特征的新一代智能设备,极大地推动了制造业从自动化向服务化、智能化的发展。

3. 更富价值的劳动创造

马克思的劳动价值理论,是马克思主义政治经济学体系的出发点,马克思说:“一切商品的价值都是由人的劳动创造的。”2020 年 11 月 24 日,习近平总书记在全国劳动模范和先进工作者表彰大会上指出:“劳动是一切幸福的源泉。”人类社会活动的本质在于创造劳动价值,参加社会劳动实现价值创造是人最基本的社会需求^[14]。工业自动化通过对人类重复性体力和脑力劳动的替代,提高了社会平均劳动生产率,使人们能够创造更多的劳动价值。

技术的进步推动了制造领域新一轮的产业变革,以互联网、大数据、云计算为代表的新一代信息技术与传统工业融合发展,制造业呈现出新的方向,以智能化、网络化、数字化、服务化、绿色化为核心特征的智能制造成为制造业发展的重大趋势。智能制造的提出是技术创新累积到一定程度的必然结果,是制造业依据其内在发展逻辑经过长时间的演变和整合逐步形成的制造模式^[15]。智能制造是集成制造、精益生产、敏捷制造、虚拟制造、数字化制造、网络化制造等多种先进制造模式的综合,它通过信息物理系统(cyber-physical systems,CPS),实现人、设备、产品、服务等制造要素与资源的相互识别、实时交互和信息集成,改变了传统制造业设计、制造、管理、服务的方式。智能制造的应用能够减少生产加工过程

图 1-12 一种生命周期大数据驱动的复杂产品智能制造服务体系构架^[13]

中的脑力劳动,完成复杂的任务,提高生产质量,节约加工成本,其灵活化、方便化、个性化的生产组织方式,也使得中、小型企业在竞争中更具有优势,承担的风险更低。

智能制造装备是智能制造技术的重要载体。智能制造装备通过模拟人的体力和脑力劳动过程,实现工业生产过程的智能化,大幅降低劳动者的体力和部分脑力劳动,帮助劳动者创造更大的价值。智能制造装备融合了先进制造技术、数字控制技术、现代传感技术以及人工智能技术,具有感知、学习、决策、执行等功能,是实现高效、高品质、节能环保和安全可靠生产的下一代制造装备。智能制造装备是传统制造产业升级改造,实现生产过程自动化、智能化、精密化、绿色化的有力工具,是培育和发展战略性新兴产业的重要支撑,也是衡量一个国家工业化水平的重要标志。

1.1.3 智能制造与装备发展路径

1. 国内外智能制造与装备发展战略

20 世纪 80 年代,工业发达国家已开始对智能制造进行研究,并逐步提出智能制造系统和相关智能技术。进入 21 世纪,人工智能和网络信息技术的迅速发展,使实现智能制造的条件逐渐成熟。在国际金融危机之后,虚拟经济出现泡沫,制造业强国开始将重心转回实体经济,如表 1-1 所示,世界各国纷纷颁布了一系列发展智能制造的国家战略,期望以发展制造业刺激国内经济增长,巩固大国地位。

表 1-1 一流国家的智能制造发展战略^[16]

战略名称	国家	时间	战略核心
“中国制造 2025”	中国	2015 年	把智能制造作为“两化融合”的主攻方向,着力发展智能装备和智能产品,使生产过程智能化,全面提高企业在生产、研发、管理和服务过程中的智能化水平
“再工业化”计划	美国	2009 年	发展先进制造业,实现制造业的智能化,保持美国制造业价值链上的高端位置和全球控制者地位
“工业 4.0”计划	德国	2013 年	通过信息物理系统实现人、设备与产品的实时连通、相互识别和有效交流,构建一个高度灵活的个性化和数字化的智能制造模式
“机器人新战略”	日本	2015 年	通过科技和服务创造新价值,以“智能制造系统”作为该计划核心理念,促进日本经济的持续增长,应对全球大竞争时代
“高价值制造”战略	英国	2014 年	应用智能化技术和专业知识,以创造力带来持续增长和高经济价值潜力的产品、生产过程和相关服务,达到重振英国制造业的目标
“新增长动力规划及发展战略”	韩国	2009 年	确定三大领域 17 个产业为发展重点推荐数字化工业设计和制造业数字化协作建设,加强对智能制造基础开发的政策支持
“印度制造”计划	印度	2014 年	以基础设施建设、制造业和智慧城市为经济改革战略的三根支柱,通过智能制造技术的广泛应用将印度打造成新的“全球制造中心”

1) “中国制造 2025”

2015 年,国务院印发《中国制造 2025》,围绕实现制造强国的战略目标,《中国制造 2025》中明确了 9 项战略任务和重点,并制定了通过“三步走”实现制造强国的战略目标:第一步,到

2025 年迈入制造强国行列；第二步，到 2035 年我国制造业整体达到世界制造强国阵营中等水平；第三步，到新中国成立一百年时，制造业大国地位更加巩固，综合实力进入世界制造强国前列^[17]。如表 1-2 所示，2011 年以来，国家发布了一系列智能制造行业文件。

表 1-2 2011—2021 年中国智能制造行业文件一览表^[18]

时间	部门	文件名称	主要内容
2011 年 12 月	国务院	《工业转型升级规划 (2011—2015 年)》	以科学发展为主题，以加快转变经济发展方式为主线，着力提升自主创新能力，推进信息化与工业化深度融合，改造提升传统产业，培育壮大战略性新兴产业，加快发展生产性服务业，调整和优化产业结构，把工业发展建立在创新驱动、集约高效、环境友好、惠及民生、内生增长的基础上，不断增强我国工业核心竞争力和可持续发展能力
2012 年 7 月	国务院	《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》	突破新型传感器与智能仪器仪表、自动控制系统、工业机器人等感知、控制装置及其伺服、执行、传动零部件等核心关键技术，提高成套系统集成能力，推进制造、使用过程的自动化、智能化和绿色化；提出了智能装备产业发展路线图并将智能装备工程列为二十项重大工程之一
2015 年 5 月	国务院	《中国制造 2025》	提出紧密围绕重点制造领域关键环节，开展新一代信息技术与制造装备融合的集成创新和工程应用。依托优势企业，紧扣关键工序智能化、关键岗位机器人替代、生产过程智能优化控制、供应链优化，建设重点领域智能工厂/数字化车间
2016 年 12 月	工信部、财政部	《智能制造发展规划 (2016—2020 年)》	2025 年前，推进智能制造发展实施“两步走”战略：第一步，到 2020 年，智能制造发展基础和支撑能力明显增强，传统制造业重点领域基本实现数字化制造，有条件、有基础的重点产业智能转型取得明显进展；第二步，到 2025 年，智能制造支撑体系基本建立，重点产业初步实现智能转型
2017 年 7 月	国务院	《新一代人工智能发展规划》	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，文件制定了“三步走”的战略目标：第一步，到 2020 年人工智能总体技术和应用与世界先进水平同步；第二步，到 2025 年人工智能基础理论实现重大突破，部分技术与应用达到世界领先水平；第三步，到 2030 年人工智能理论、技术与应用总体达到世界领先水平，成为世界主要人工智能创新中心，智能经济、智能社会取得明显成效
2017 年 11 月	国务院	《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》	以全面支撑制造强国和网络强国建设为目标，围绕推动互联网和实体经济深度融合，聚焦发展智能、绿色的先进制造业，构建网络、平台、安全三大功能体系，增强工业互联网产业供给能力，持续提升我国工业互联网发展水平，深入推进“互联网+”，形成实体经济与网络相互促进、同步提升的良好格局，有力地推动现代化经济体系建设