

1.1 智能制造装备的基本概念

1.1.1 智能制造装备的定义

18世纪60年代至19世纪中期,随着蒸汽机的出现,手工劳动开始被机器生产逐步替代,世界工业经历了第一次革命,人类发展进入“蒸汽机时代”;19世纪70年代至20世纪初期,伴随电磁学理论的发展,电力技术得到广泛应用,机器的功能开始变得多样化,世界工业经历了第二次革命,人类发展进入“电气化时代”;自20世纪50年代开始,随着信息技术的不断发展,社会生产不再局限于单台机器,互联网的出现使得机器间可以互联互通,计算机、机器人、航天、生物工程等高新技术得到了快速发展,世界工业经历了第三次革命,人类发展进入“信息化时代”。回顾每一次工业革命,人类社会的发展都离不开科学技术的进步,而在智能制造技术不断发展的今天,世界工业正面临着一场新的产业升级与变革,智能制造技术也将成为第四次工业革命的核心推动力量。

智能制造将人工智能技术、网络技术、检测传感技术和制造技术在产品生产、管理和服务过程中进行融合与交叉,使制造过程具备分析、推理、感知等功能。美国纽约大学的赖特教授和卡内基梅隆大学的布恩教授(D. A. Bourne)在1988年出版了 *Manufacturing Intelligence* (《制造智能》) 一书,首次提出了智能制造的概念,认为智能制造通过集成知识工程、制造软件系统、机器人视觉和控制系统,实现对制造技能和专家知识的建模,使机器在没有人工干预的情况下可以进行小批量自动化生产。进入20世纪90年代后,随着信息化技术和人工智能技术的不断发展,智能制造开始引起发达国家的关注,美国、日本等国纷纷启动了智能制造研究专项并建立了实验基地,使智能制造的研究和实践取得了长足进步。在2008年全球金融危机之后,发达国家认识到“去工业化”发展的弊端,制定了“重返制造业”的发展战略^[1],同时深度学习、大数据、云计算、物联网等前沿技术引领制造业加速向智能化转型,智能制造已成为未来制造业的主要发展方向,各国政府均给予了有力的支持,以抢占竞争的制高点。

智能制造的产业链十分广泛,包括智能制造装备、工业互联网、物联网、工业软件等,其中智能制造装备是实现智能制造的核心载体。智能制造装备是指具有感知、分析、推理、决策、执行功能的制造装备(主要是指数控机床)的总称,是先进制造技术、信息技术和人工智能技术的高度集成,在航空、航天、汽车、能源、海洋等国民经济重点制造领域占据着重要地位并发挥着关键作用。大力发展智能制造装备能够加快制造业的转型升级,提升制造装备的研发水平和产品质量,还能降低能源与资源的消耗,同时智能制造装备的发展水平也是衡量一个国家工业现代化程度的重要标志。^[2]

1.1.2 智能制造装备的特征

智能制造装备是机电系统与人工智能系统的高度融合,充分体现了制造业向智能化、数字化和网络化发展的需求。与传统的制造装备相比,智能制造装备的主要特征包括以下几个方面。

1. 自我感知能力

自我感知能力是指智能制造装备通过传感器获取所需信息,并对自身状态与环境变化进行感知,而自动识别与数据通信是实现自我感知的重要基础。与传统的制造装备相比,智能制造装备需要获取数据量庞大的信息,且信息种类繁多,获取环境复杂,因此,研发新型高性能传感器成为智能制造装备实现自我感知的关键。目前,常见的传感器类型包括视觉传感器、位置传感器、射频识别传感器、音频传感器与力/触觉传感器等。

2. 自适应和优化能力

自适应和优化能力是指智能制造装备根据感知的信息对自身运行模式进行调节,使系统处于最优或较优的状态,实现对复杂任务不同工况的智能适应。智能制造装备在运行过程中不断采集过程信息,以确定加工制造对象与环境的实际状态,当加工制造对象或环境发生动态变化后,基于系统性能优化准则,产生相应的调控指令,及时地对系统结构或参数进行调整,保证智能制造装备始终工作在最优或较优的运行状态。

3. 自我诊断和维护能力

自我诊断和维护能力是指智能制造装备在运行过程中,对自身故障和失效问题能够做出自我诊断,并通过优化调整保证系统可以正常运行。智能制造装备通常是高度集成的复杂机电一体化设备,当外部环境发生变化后,会引起系统发生故障甚至是失效,因此,自我诊断与维护能力对于智能制造装备十分重要。此外,通过自我诊断和维护,还能建立准确的智能制造装备故障与失效数据库,这对于进一步提高装备的性能与寿命具有重要的意义。

4. 自主规划和决策能力

自主规划和决策能力是指智能制造装备在无人干预的条件下,基于所感知的信息,进行自主的规划计算,给出合理的决策指令,并控制执行机构完成相应的动作,实现复杂的智能行为。自主规划和决策能力以人工智能技术为基础,结合系统科学、管理科学和信息科学等其他先进技术,是智能制造装备的核心功能。通过对有限资源的优化配置及对工艺过程的智能决策,智能制造装备可以满足实际生产中不同的需求。

1.1.3 制造装备智能化的意义

1. 智能制造装备是未来制造装备发展的必然趋势

制造装备经历了机械装备到数控装备的转变,而智能制造装备是制造装备未来发展的必然趋势。智能制造装备自感知、自适应、自诊断、自决策的特点与优势,将在航空、航天、汽车、能源等重点制造领域得到充分体现,例如传统面向航空大型结构件加工的制造装备^[3],当加工环境(如温度)发生变化后,无法自动感知并进行相应调整,影响加工精度,而发展相应的智能制造装备,通过实时感知工况并进行状态检测,给出合理的决策指令,调整系统运行状态,可以有效降低加工过程中的静/动态误差,并提高对切削力干扰的抵抗能力,使得加工精度与稳定性得到大幅度提升,满足现代航空制造的需求。此外,相比传统制造装备,智能制造装备可以实现低污染、节能加工,对推动可持续性发展具有重要的战略意义。

2. 智能制造装备是全面发展社会生产力的重要基础

通过三次工业革命可以看到,只有当制造装备的自动化程度得到大幅度提升,脑力劳动逐步替代体力劳动后,社会生产力才能得到快速发展。但现有制造装备在面临各种复杂场景与问题时,加工制造的结果很大程度上仍然依赖于决策者的水平,随着信息量与复杂程度的增加,决策难度不断上升,通过人进行决策的生产模式难以满足制造领域的新需求。通过发展具有自决策能力的智能制造装备,可以有效弥补“人主观决策”的缺点,在产业发展的过程中释放出巨大的能量,满足各个领域对智能化发展的需求,在生产、分配、交换、消费等各个环节建立起新的模式,成为推动社会生产力全面发展的重要基础。

3. 智能制造装备是推动我国制造业转型升级的核心力量

智能制造装备是智能化、信息化与自动化深度融合的体现,大力发展智能制造装备对加快我国制造业向“高端智造”转型升级,提升制造效率、技术水平与产品质量,降低能源与资源消耗,推动制造过程智能化和可持续发展具有十分重要的战略意义。在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要(2011—2015年)》(简称“十二五”规划)中,国家已将“高端装备制造”确定为战略性新兴产业重点发展方向,并指出需要在航空航天装备、轨道交通装备、海洋工程装备与智

能装备等领域实现突破^[4],而智能制造装备是实现高端装备的主要技术手段,涉及智能仪器仪表、智能数控系统、智能机床与成套装备等方面。因此,加强智能制造装备的发展,能够满足关键领域向高端制造转型的需求。此外,在2016年12月,工业和信息化部与财政部联合发布了《智能制造发展规划(2016—2020年)》^[5],明确指出要将“加快智能装备发展”作为“十三五”时期我国智能制造发展的首要任务,明确了智能制造装备的重要地位,同时也对智能制造装备的发展提出了更高的要求。我国目前正处于制造业转型升级的关键时期,站在新的历史节点,我们必须大力培育和发展智能制造装备,形成相应的产业,提高国家制造业核心竞争力,带动产业升级和其他新兴领域的发展,推动“中国制造”向“中国智造”转变。

1.2 智能制造装备的主要分类

智能制造装备是人工智能技术与装备先进设计制造技术的深度融合,覆盖了庞大的业务领域,典型的智能制造装备包括智能机床(金属切削机床、木工机床与锻压机床)、智能数控系统、智能机器人、智能传感器、智能装配装备及智能单元与生产线等。

1. 智能机床

传统数控机床不具有“自感知”“自适应”“自诊断”与“自决策”的特征,无法满足智能制造的发展需求。智能机床可以认为是数控机床发展的高级形态,它融合了先进制造技术、信息技术和智能技术,具有自我感知和预估自身状态的能力,其主要技术特征包括:利用历史数据估算设备及关键零部件的使用寿命;能够感知自身加工状态和环境的变化,诊断出故障并给出修正指令;对所加工工件的质量进行智能化评估;基于各种功能模块,实现多种加工工艺,提高加工效能,并降低对资源和能源的消耗。以智能数控车床为例,通过在车床的关键位置安装力、变形、振动、噪声、温度、位置、视觉、速度、加速度等多源传感器,采集车床的实时运行数据及相应环境数据,形成智能化的大数据环境与大数据知识库,进一步对大数据进行可视化处理、分析及深度学习,形成智能决策。在2006年9月的IMTS展会(美国芝加哥国际机械制造技术展览会)上,日本Mazak公司展出了世界上第一台智能机床^[6],在此之后,日本Okuma公司、瑞士米克朗公司等著名制造厂商也相继推出了智能机床,实现了主动振动控制、智能热屏蔽、智能安全、智能工艺监视等功能。

2. 智能数控系统

智能数控系统是智能机床的“大脑”,在很大程度上决定了机床装备的智能化水平。与传统数控系统相比,智能数控系统除完成常规的数控任务外,还需要具备其他技术特征。首先,智能数控系统需要具备开放式系统架构,数控系统的智能化

发展需要大量的用户数据,因此,只有建立开放式的系统架构,才能凝聚大量用户深度参与系统升级、维护和应用;其次,智能数控系统还需要具备大数据采集与分析能力,支持内部指令信息与外部力、热、振动等传感信息的采集,获得相应的机床运行及环境变化大数据,并通过人工智能方法对大数据进行分析,建立影响加工质量、效率及稳定性的知识库,给出优化指令,提升自适应加工能力;最后,智能数控系统还需要具备互联互通功能,设置开放式数字化互联网协议接口,借助物联网实现多系统间的互联互通,完成数控系统与其他设计、生产、管理系统间的信息集成与共享。国内华中数控推出了 iNC-848D 智能数控系统^[7],提供了全生命周期“数字双胞胎”数据管理接口和大数据智能化算法库,为智能机床的研发提供了技术支撑;沈阳机床集团也研发了基于工业互联网环境的 i5 智能数控系统^[8],提出了“工业互联-云服务-智能终端”的新模式。

3. 智能机器人

智能机器人是集成计算机技术、制造技术、自动控制技术、传感技术及人工智能技术于一体的智能制造装备,其主体包括机器人本体、控制系统、伺服驱动系统和检测传感装置,具有拟人化、自控制、可重复编程等特点。智能机器人可以利用传感器对环境变化进行感知,基于物联网技术,实现机器与人员之间的交互,并自主做出判断,给出决策指令,从而在生产过程中减少对人的依赖。随着人工智能技术、多功能传感技术以及信息收集、传输和分析技术的快速发展,通过配备传感器、机器视觉和智能控制系统,智能机器人正朝着服务化与标准化的方向发展,其中服务化要求未来的智能机器人充分利用互联网技术,实现在线的主动服务,而标准化是指智能机器人的各种组件和构件实现模块化、通用化,使智能机器人的制造成本降低,制造周期缩短,应用范围得到拓展。

4. 智能传感器

智能传感器是指能将待感知、待控制的参数进行量化并集成应用于工业网络的高性能、高可靠性与多功能的新型传感器,通常带有微处理系统,具有信息感知、信息诊断、信息交互的能力。智能传感器是集成技术与微处理技术相结合的产物,是一种新型的系统化产品,其核心技术涉及五个方面,分别是压电技术、热式传感技术、微流控 Bio MEMS 技术、磁传感技术和柔性传感技术。多个智能传感器还可组建成相应的网络拓扑,并且具备从系统到单元的反向分析与自主校准能力。在当前大数据网络化发展的趋势下,智能传感器及其网络拓扑将成为推动制造业信息化、网络化发展的重要力量。

5. 智能装配装备

随着人工智能技术的不断发展,智能装配技术及装备开始在航空、航天、汽车、半导体、医疗等重点领域得到应用,例如,配备机器视觉的多功能多目标智能装配装备首先可以准确找到目标的各类特征,并自动确定目标的外形特征和准确位置,

进一步利用自动执行装置完成装配,实现对产品质量的有效控制,同时增加生产装配过程的柔性、可靠性与稳定性,提升生产制造效率;数字化智能装配系统则可以根据产品的结构特点和加工工艺特点,结合供货周期要求,进行全局装配规划,最大限度地提升各装配设备的利用率,尽可能地缩短装配周期。除此之外,智能装配装备在农林、环境等领域也具有巨大的潜力。

6. 智能单元与生产线

智能单元与生产线是指针对制造加工现场特点,将一组能力相近相辅的加工模块进行一体化集成,实现各项能力的相互接通,具备适应不同品种、不同批量产品生产能力的组织单元,智能单元与生产线也是数字化工厂的基本工作单元。智能单元与生产线还具有独特的属性与结构,具体包括:结构模块化、数据输出标准化、场景异构柔性化及软硬件一体化,这样的特点使得智能单元与生产线易于集成为数字化工厂。在建立智能单元与生产线时,需要从资源、管理和执行三个维度来实现基本工作单元的智能化、模块化、自动化、信息化功能,最终保证工作单元的高效运行。

1.3 国内外智能制造装备发展现状

1.3.1 国外智能制造装备发展现状

在 2008 年全球金融危机之后,美国、英国等发达国家相继推出“再工业化”的发展战略,将发展重心重新聚焦于制造业。德国、日本则充分发挥其在智能制造装备方面的优势,在相关领域进行技术垄断。韩国也大力发展制造业,希望跻身世界制造强国之列。总体上,世界各国均将智能制造作为制造业转型升级的目标,纷纷做出战略部署,而智能制造装备作为智能制造的核心载体,已成为竞争的焦点。

1. 美国提出“再工业化”战略,大力发展智能制造装备

美国将“制造业复兴”和“再工业化”战略作为制造业发展的重要途径^[9],颁布了《重振美国制造业政策框架》《先进制造伙伴计划》《先进制造业国家战略计划》等纲领性文件和一系列战略性措施,并已投入超过 20 亿美元,研究智能制造及相关的高、精、尖技术,希望通过制造业的转型和升级,在智能制造领域保持美国制造业和制造技术的全球领先地位。在智能制造装备的研发方面,美国也投入了大量经费,并在技术上处于领先地位。实际上,从早期的数控机床、集成电路,到今天的智能传感器、智能生产线,大量的先进技术和制造装备都由美国主导研发。随着全球智能化发展的不断推进,智能技术在制造领域得到了广泛应用,而以智能机床、智能传感器、智能机器人为代表的智能制造装备得到了美国政府的高度重视,并在全球取得了领先。此外,针对智能制造装备的法律保障也得到逐步加强,在 2010 年 8 月,美国政府通过了《制造业促进法案》,免除了包括智能机床在内的智能制造装备

原材料的进口关税。

2. 欧盟推出“数字化欧洲工业”计划,加快工业数字化进程

在全球制造业智能化的发展大趋势下,欧盟也推出了相应的战略计划。欧盟在整合各成员国工业发展需求的基础上,推出了“数字化欧洲工业”计划^[10],旨在通过智能制造,推进欧洲工业的数字化进程。该计划主要依托物联网、大数据与人工智能三项技术,提升欧洲工业的智能化程度,并着重强调了5G通信、云计算、物联网、数据技术和网络安全等五方面的标准化发展,以实现各成员国工业发展间的协同性。欧盟的很多成员国都拥有良好的制造基础,部分成员国还是传统制造强国,在智能机床、智能机器人、智能单元与生产线等智能制造装备方面具备强大的研发实力,同时拥有包括西门子、罗尔罗伊斯、爱立信等在内的众多优秀企业,在智能制造装备的生产与应用方面具备良好的基础。此外,欧盟在推动智能制造发展的同时,还致力于可持续性制造与高绩效制造的研究与应用,综合考虑产品的特性与产量变化,降低制造成本,提高制造效率,增加产能驱动力。可以预见,欧盟将坚定不移地推动智能制造装备的发展。

3. 德国推出“工业4.0”计划,建立智能生产系统

2013年,德国正式发布了《保障德国制造业的未来:关于实施“工业4.0”战略的建议》,并将“工业4.0”作为国家发展战略,希望成为第四次工业革命的领导者,受到各界的广泛关注。“工业4.0”计划是一项全新的制造业升级计划,在智能化技术的支持下,通过工业网络、多功能传感器以及信息集成,将分布式与组合式的工业制造单元模块构建成智能化的工业制造系统,具备丰富的功能与极高的生产柔性。此外,在生产制造设备、零部件、原材料上装载可交互的智能终端,利用物联网实现各终端间的信息交互和实时互动,为机器自主决策奠定基础,并为生产制定个性化方案。“工业4.0”包含三大主题^[11]:首先是智能工厂,需要重点研究智能化生产系统的组建与生产过程,以及网络化分布式生产设备的实现;其次是智能生产,涉及生产制造过程中的管理、人机互动以及3D技术在工业生产过程中的应用等;最后是智能物流,希望利用智能物流管理系统和网络技术,整合物流资源信息,实现物料信息的快速匹配,改变传统生产制造模式中管理者、机器、物料间的脱节关系,从而提高生产效率。可以看到,智能制造装备在“工业4.0”计划中始终占据核心地位。

4. 日本推出“创新工业”计划,重塑制造业竞争力

在西方国家掀起智能化发展浪潮的同时,日本依托其雄厚的制造实力推出了“创新工业”计划,大力发展网络信息技术与人工智能技术,重塑日本制造业的竞争力。通过加快发展智能协同机器人、多功能电子设备、智能机床等智能制造装备,建立先进的无人化智能工厂。2015年,日本发布了《制造业白皮书》,明确了将智能机器人与人工智能技术作为重点发展方向,并强调了其在材料、医疗、能源和关

键零部件等领域的应用。同年推出的“机器人新战略”指出将构建世界机器人创新基地,重点研发面向工业应用的智能机器人。可以看到,在智能制造装备方面,日本将以智能机器人为主要突破口,重塑制造业竞争力。

1.3.2 国内智能制造装备发展现状

经过改革开放 40 年的快速发展,我国的装备制造业体系和相关产业链已逐渐完善,在规模和水平上都有了长足的进步^[12],研发了许多性能优异的产品,已成为国民经济的支柱产业,为工业和国防建设做出了十分重要的贡献。在智能制造方面,国内相关研究开始于 20 世纪 80 年代,已取得了一些研究成果,但研究规模一直较小,没有形成完整的研究体系。在 2008 年全球金融危机之后,世界各国政府开始重新发展制造业,并将智能制造作为主要发展方向,我国政府也出台了相关的政策,大力发展智能制造,包括 2012 年工业和信息化部发布的《高端装备制造业“十二五”发展规划》^[13],2015 年国务院发布的《中国制造 2025》^[14],2016 年工业和信息化部 and 财政部联合发布的《智能制造发展规划(2016—2020 年)》,这些政策都以制造业转型和升级为核心目标,希望通过发展智能制造,逐步实现制造强国的战略目标,可以看到,我国的智能制造发展政策环境已基本建立。

作为智能制造的核心载体,在国家政策的大力扶持下,我国智能制造装备得到了快速发展,已逐渐形成规模。到 2015 年,中国智能装备产值已超过 1 万亿元人民币^[15],体现了巨大的发展潜力,而快速发展的网络信息技术、人工智能技术和先进制造技术为推进智能制造装备的发展提供了良好的条件。与此同时,我国在智能制造装备方面也取得了一些成绩,例如,自主研发的多功能智能传感器、智能数控系统已接近世界先进水平;智能机床、智能机器人、智能生产线等智能制造装备的性能也得到了大幅提升,并逐步形成了完整的智能制造装备产业体系。随着智能制造装备和先进工艺技术在重点行业不断推广,制造企业的生产效率得到大幅提升,同时降低了对人的依赖程度,并优化了资源的配置,推动了可持续发展。此外,通过在代表性制造企业推广智能制造装备和技术,可以逐渐形成一套可推广的应用模式,为深入推进智能制造奠定了基础。

可以看到,我国智能制造装备发展较快,形成了一定的技术基础,在核心技术与重大装备方面有了一定的积累,智能制造装备产业体系已初步形成,并在多个重点领域实现了应用。但作为一个正在培育和成长的新兴产业,我国智能制造装备的发展仍然存在一些问题,包括以下几个方面。

1. 缺乏核心技术自主创新能力

我国智能制造装备的整体创新能力不强^[16],发展仍然集中于技术跟踪研究和引进消化吸收。由于自身基础研究能力薄弱,对引进技术的消化能力不足,导致智能制造装备的整体技术水平与世界先进水平有较大的差距。此外,创新人才的不足与流失也是造成智能制造装备自主创新能力不足的重要原因。

2. 关键零部件仍主要依赖进口

智能制造装备的研发基础薄弱,产业链不完善,导致智能制造装备的关键零部件仍主要依赖进口^[17],例如智能传感器、精密测量装置、机器人关节减速器、高性能伺服电机、液压元件、气动元件与高速精密轴承等。此外,在原材料的加工工艺方面也存在不足,导致国产零部件的性能无法满足智能制造装备的需求。

3. 产业规模小、智能化程度低

智能制造装备是人工智能技术与装备先进设计制造技术的深度融合,也是发展智能制造的重要基础与核心载体。但是目前我国智能制造装备产业规模仍旧较小,特别是智能机器人、智能机床、智能生产线等典型产品与美国、德国、日本等发达国家间的差距较大。此外,国内制造企业的自动化程度较低,智能化技术水平不足以支撑智能制造装备的快速发展。

4. 骨干企业的核心竞争力不足

我国智能制造装备的发展起步较晚,国内优势企业数量较少,竞争力不足,目前十分缺乏有竞争力的骨干企业,同时,大部分企业集中于单纯的制造生产,在维修改造、备件供应、设备租赁、再制造等方面的增值服务能力较为欠缺。此外,大部分优秀企业目前只能在国内进行竞争,较少进入国际竞争市场。

作为智能制造的核心载体,发展智能制造装备对实现制造业转型升级具有十分重要的意义。本书汇聚了陕西宝鸡机床集团有限公司、四川普什宁江机床有限公司和济南二机床集团有限公司等三家国内智能制造装备骨干企业多年的研发成果,详细论述了典型智能制造装备及系统,包括智能数控车床、智能车削生产线、智能精密卧式加工中心、机床箱体类零件智能制造系统、智能伺服压力机及智能冲压生产线等。希望以本书为契机,加强国内智能制造装备领域各高校与企业间的交流,为推动我国智能制造装备的发展提供基础。

参考文献

- [1] 王德生. 世界智能制造装备产业发展动态[J]. 竞争情报, 2015, 11(4): 51-57.
- [2] 傅建中. 智能制造装备的发展现状与趋势[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 959-962.
- [3] 陶永, 李秋实, 赵昱. 大力发展航空智能制造支撑高端装备制造转型升级[J]. 制造业自动化, 2016, 38(3): 106-111.
- [4] 杨拴昌. 解读智能制造装备“十二五”发展路线图[J]. 电器工业, 2012(5): 17-19.
- [5] 工业和信息化部, 财政部. 智能制造发展规划(2016—2020年)[R], 2016.
- [6] 周延佑, 陈长年. 智能机床——数控机床技术发展新的里程碑: IMTS2006 观后感之一[J]. 制造技术与机床, 2007(4): 43-46.
- [7] iNC-848D: 华中数控新一代 iNC 智能数控系统[J]. 世界制造技术与装备市场, 2018(3): 44-47.

- [8] 刘艳. 沈阳机床发布全球首款工业操作系统 i5OS[J]. 制造技术与机床, 2018(1): 15.
- [9] 方毅芳, 宋彦彦, 杜孟新. 智能制造领域中智能产品的基本特征[J]. 科技导报, 2018, 36(6): 90-96.
- [10] 万志远, 戈鹏, 张晓林, 等. 智能制造背景下装备制造业产业升级研究[J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(3): 316-327.
- [11] 谭建荣, 刘振宇, 徐敬华. 新一代人工智能引领下的智能产品与装备[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 35-43.
- [12] 孙柏林. 未来智能装备制造业发展趋势述评[J]. 自动化仪表, 2013, 34(1): 1-5.
- [13] 工业和信息化部. 高端装备制造业“十二五”发展规划[R], 2012.
- [14] 国务院. 中国制造 2025[R], 2015.
- [15] 杨华勇. 关于智能装备的思考和探索[J]. 中国科技产业, 2017(1): 35.
- [16] 卢秉恒. 智能制造: 摆脱装备“形似神不似”[J]. 中国战略新兴产业, 2015(Z2): 54-56.
- [17] 王影, 冷单. 我国智能制造装备产业的现存问题及发展思路[J]. 经济纵横, 2015(1): 72-76.