

智能制造技术进展与应用

巩亚东, 高家浩, 金丽雅, 赵衡

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 基于人工智能发展对制造技术产生广泛深刻影响的分析, 阐述了智能制造是建设制造强国的主攻方向, 并探讨其在新型工业化体系建设过程中的重要作用. 通过概述智能制造赋能技术, 阐释人工智能技术与先进制造技术深度融合形成的智能制造技术, 该技术将推动新一轮工业革命和产业革命的进程. 随后以典型智能制造研究成果和应用实例, 阐明了智能制造与传统自动化的本质区别和工程应用. 最后指出, 新一代信息技术与先进制造技术深度融合形成的先进生产模式, 呈现出未来制造业的新形态.

关键词: 智能制造; 人工智能; 大数据; 5G通信; 云计算

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)07-0084-10

Progress and Application of Intelligent Manufacturing Technology

GONG Ya-dong, GAO Jia-hao, JIN Li-ya, ZHAO Heng

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Based on an analysis of the extensive and profound impact of the development of artificial intelligence on manufacturing technology, it is expounded that intelligent manufacturing is the main direction for building a strong manufacturing country, and its important roles are discussed in the construction of a new industrialization system. Through an introduction to intelligent manufacturing empowerment technology, it is claimed that intelligent manufacturing technology by the deep integration of intelligent technology and advanced manufacturing technology will drive the progress of the new round of industrial revolution and industrial transformation. Subsequently, typical research results and application examples of intelligent manufacturing are used to clarify the essential differences and engineering applications between intelligent manufacturing and traditional automation. Finally, it is pointed out that the advanced production mode of the deep integration of new generation information technology and advanced manufacturing technology demonstrates a new form of future manufacturing industry.

Key words: intelligent manufacturing; artificial intelligence; big data; 5G communication; cloud computing

随着人工智能(artificial intelligence, AI)、计算机网络、大数据、人机交互等新一代信息技术的快速发展, 信息技术与先进制造技术不断加速融合, 制造业逐渐向以智能感知、自适应、自学习、自决策为主要特征的智能制造方向发展^[1].

在全球产业竞争中, 制造业已成为国际产业竞争的核心. 各国政府高度重视并全力振兴和发

展制造业, 智能制造作为竞争的焦点, 被视为决定性国家能力和核心发展战略, 众多国家已开展战略性布局. 德国提出“工业4.0战略”计划、日本提出“超智能社会5.0战略”计划、美国提出“先进制造业美国领导力战略”、英国提出“英国工业2050战略”计划以及我国实施的新型工业化战略都将智能制造提升到了至关重要的位置. 这不仅

反映了各国对制造业未来的战略预判,也表明了对智能制造的高度重视。

2024年政府工作报告提出,深化大数据、人工智能等研发应用,开展“人工智能+”行动,“人工智能+”首次被写入政府工作报告。近年来,随着数字经济持续发展,产业数字化规模逐步提升,人工智能正在与制造、医疗、教育等众多行业融合应用,成为重塑千行百业的重要引擎。党的二十届三中全会《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》明确指出:“加快推进新型工业化,培育壮大先进制造业集群,推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。”这需要深刻认识智能制造在新型工业化体系建设中的重要作用,全面理解支撑引领中国式现代化建设的理论逻辑,并准确把握智能制造是建设制造强国战略的主攻方向。

当前,新一轮科技革命和产业变革突飞猛进,人工智能作为新的赋能技术,已经成为推动全球技术进步和经济发展的重要驱动力,体现了新一代信息技术与先进制造技术的深度融合,凸显了未来制造业的新形态,更是新质生产力发展的重要方向。

1 人工智能发展的影响

1.1 人工智能发展历程

人工智能作为前沿交叉学科,其定义始终存在不同的学术观点。学者相对公认的人工智能概念是指通过机器模拟人类的学习、推理、决策等认知能力,并实现自主执行复杂任务的技术体系。具有使用机器代替人类实现认知、识别、分析、决策等功能,其本质是实现对人的意识和思维过程的模拟。

人工智能的发展历程经历了三次高潮和两次低谷期。第一次高潮发生在20世纪50—70年代,起始于1956年的达特茅斯会议,首次提出了“人工智能”的概念,并开展了大量的相关研究工作。计算机被广泛应用于数学和自然语言领域,取得了众多瞩目的成果。而后,由于算法理论缺陷与计算机性能限制,导致实际应用无法推广,人工智能发展陷入停滞,进入第一个低谷期。第二次高潮发生在20世纪80年代,以专家系统和日本第五代计算机为代表,专家系统的出现推动了人工智能从理论走向部分实际应用。然而,由于专家系统推理方法简单、智能性不足、数据量

匮乏,致使人工智能进入第二个低谷期。第三次高潮始于2000年以后,信息技术的蓬勃发展带来了行业数据量的爆发和高性能新型人工智能芯片的进阶制造,为人工智能的发展提供了基础条件。

机器学习和深度学习等算法的不断进步,使得人工智能在图像识别、语音识别、自然语言处理等技术领域取得了长足的进步。每一次技术浪潮都推动了人工智能研究与应用的发展和进步,同时也带来新的机遇和挑战。

1.2 人工智能技术进展

人工智能技术对全球社会和经济产生广泛而深刻的影响。全球170多个国家和地区分别发布人工智能战略,这将重塑人类的未来。伴随着高性能计算机、云计算、大数据、传感器的普及,以及计算成本的下降,“深度学习”随之兴起。通过模仿人脑的“神经网络”来学习大量数据的方法,使人工智能可以像人类一样辨识多种信息,或是针对工程问题作出合理的自主判断。在人工智能第三次发展高潮中,其技术及应用有了很大的完善和提高,其中深度学习算法的突破发挥了重要作用。

深度学习能够很好地辨识图像数据或波形数据这类无法符号化的数据。自2010年以来,Apple, Microsoft及Google等国际知名IT企业都投入大量资源开展深度学习的研究。深度学习如此快速的发展和应用,也要归功于硬件设备的提升。图形处理器(GPU)英伟达(NVIDIA)利用该公司的图形适配器、连接库(library)和框架/framework)产品大大提升了深度学习的性能。

以ChatGPT为代表的AIGC(artificial intelligence generated content)兴起,在工作成本效率、模型计算消耗、用户流量基础等维度实现了重大突破,大型通用模型和大型专用数据模型开始研发。新场景新需求驱动连接产业从万物互联到万智互联,推动了AI商业化进程的大幅加速。纵观世界信息技术发展规律,人工智能技术发展未来可期^[2]。

1.3 人工智能发展对制造技术的影响

人工智能是引领未来的战略性技术,正在对全球经济发展、社会进步和人类生活产生深远影响。各国均在战略层面上给予高度关注,科研机构大量涌现,科技巨头大力布局,新兴企业迅速崛起,人工智能技术开始广泛应用于不同行业,展现出巨大的发展潜力和可观的商业价值。

智能制造是先进制造技术深度融合了具有人工智能特征的新一代信息技术,其中人工智能

发展对制造技术的影响巨大.20世纪50—90年代,以数字感知、计算、通信和控制为显著特征的信息化进程催生了数字化制造;之后,以互联网的普及应用为重要特征的信息化将其推升发展成数字化网络化制造;目前,工业互联网、云计算、大数据及人工智能实现群体性突破和融合应

用,以新一代人工智能技术为突出特征的信息化将制造业推进到数字化网络化智能化制造的新阶段.人工智能技术在制造业逐步实现工程化应用(见图1),将重塑制造业的技术体系、生产模式、产业形态.智能制造技术的新突破,必将推动形成第四次工业革命和产业变革的浪潮.

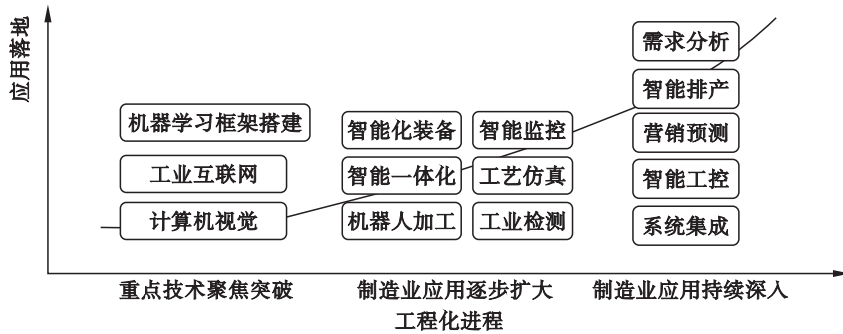


图1 AI技术在制造业工程化进程应用

Fig. 1 Application of AI technology in the engineering process of manufacturing industry

2 智能制造概述

2.1 智能制造概念与范式

物质流、能量流和信息流是构成制造过程的三大基本要素.制造本质上是在信息流交互传递的作用下,利用能量将物质转化为具有一定功能的最终产品.物质是被加工的对象,能量是将物质加工为产品的原动力,信息则起着沟通联系制造各因素的作用.制造过程中信息化程度决定着制造水平,也是提升制造业智能化水平的重点和关键所在.

智能制造是一个广义的概念,在工业互联网和云平台的支撑下,将制造全生命周期的产品、生产和服务等集成为不同层级的智能集成制造系统.国内外关于智能制造的定义有很多,都体现了不同发展阶段学术界和产业界对于智能制造本质的认识、理解和深化,都是智能制造研究成果、技术思想和知识财富的宝贵总结.周济院士^[1,3]创造性地提出了智能制造的3种基本范式.通过3个不同阶段技术迭代发展,形成了数字化制造(第一代智能制造)、数字化网络化制造(第二代智能制造)、数字化网络化智能化制造(新一代智能制造)的3种基本范式^[2].这3个基本范式次第展开又相互交织,相辅相成,融合发展.

2.2 智能制造赋能技术

进入新时代,我国大力推进新型工业化,做大做强先进制造业,建设制造强国上升为国家战

略.推进人工智能赋能新型工业化,就是要推进智能制造,实现制造业产业模式和企业形态根本性转变.智能制造是我国制造业转型升级的重要技术路径,更是建设制造强国的主攻方向^[3].

ChatGPT是人工智能发展史上的一次革命性突破,跨越了从“弱”人工智能到“强”人工智能的拐点.周济院士强调:“新一代人工智能具备自学习和生成知识以及更好地运用知识的能力,实现了质的跃升.”新一代人工智能为人类提供了认识复杂系统的新思维,提供了各个行业领域转型升级的新赋能技术.新一代人工智能呈现出深度学习、跨界融合、人机协同、群体智能等新特征.大数据智能、跨媒体智能、人机混合增强智能、群体智能和自主智能装备正在成为发展的重点.李培根院士等^[2]指出了人工智能赋能装备制造的几个重要途径,即以机器学习、深度学习等人工智能解决复杂工程问题,利用生成式设计系统、迈向大模型时代的人工智能对工程高阶相关性的认知,基于数字孪生的过程仿真和控制、智能机器人制造等途径进行制造系统和技术赋能.

智能制造系统一般被认为是由智能产品、智能生产与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基础支撑系统集成而成的.其中,智能产品是智能制造应用和创造价值的集中体现;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;以智能服务为特征的新的产业模式和产业形态变革是智能制造创新应用的重要方向之一;集成系统是将智能制

造各功能系统和支撑系统无缝连接并协同运作的综合性技术架构;而工业互联网和智能制造云平台是智能制造集成系统支撑的基础^[4-5]。

2.3 实施智能制造的意义

快速发展的人工智能技术与先进制造技术不断融合形成的智能制造技术,将成为新一轮产业革命的核心技术,也必将作为核心驱动力推动第四次工业革命的进程。智能制造以制造为主体、智能为主导、人为主宰,三者融合发展,深刻影响制造业发展理念,彻底改变现有制造模式,促进制造业的技术体系、生产模式、发展要素及价值链的重构,从而推动制造业发展进入新的阶段,实现社会生产力的整体跃升。智能制造是实现我国制造业高端化的重要路径,也是加速智能制造技术进步的内在要求。它可以帮助企业实现制造业升级,加快适应我国智能制造技术产业化的客观需要。

智能制造系统不仅能够搜集与理解系统信息和环境信息,还具有自学习功能,随着制造大数据增加和知识库不断地充实,可以进行分析判断和自主规划制造策略与行为。虚拟制造技术可以在产品设计阶段就模拟出该产品的整个生命周期,从而更有效、更经济、更灵活地组织生产,实现缩短产品开发周期和降低成本的目标。智能制造还可以有效推动柔性制造、生物制造、绿色制造、分形制造等全新的制造模式,实现柔性制造所追求的定制化,拓展制造业新的领域和技术。

新一轮科技革命和产业变革与我国新型工业化战略实施形成历史性交汇,智能制造便是其中的交汇点。中国制造业需要抓住这个历史机遇,创新引领高质量发展,实现向世界产业链中高端的跨越发展。近年来,得益于智能计算、大模型等新技术的持续突破,以及智能基础设施的不断完善,人工智能技术正在成为新型工业化的重要驱动力和赋能技术,加快制造业形成和发展新质生产力。

2.4 智能制造发展趋势

未来制造技术发展趋势为:数字化是发展的核心,精密化是发展的关键,极端化是发展的焦点,自动化是发展的条件,网络化是发展的道路,集成化是发展的方法,智能化是发展的前景,绿色化是发展的目标。智能制造技术将彻底改变传统制造范式和生产模式。

智能制造的发展趋势主要包括算力显著增长与应用深化、高度自动化与智能化生产、数据

驱动的决策与优化、个性化定制与柔性生产以及互联与协同。这些趋势反映了智能制造行业正在向更加智能化、自动化和高效化的方向发展^[6-7]。

算力的显著增长与应用深化是智能制造发展的重要基础。随着信息技术与制造业的深度融合,算力的提升推动了智能制造技术的创新,智能工厂等应用场景提高了生产效率。智能制造的发展还需要解决人与机器的协同融合和精准匹配的问题。随着具身智能技术的成熟,具身智能机器人具有更高的自主性、灵活性和适应性,能够在复杂多变的环境中自主决策完成复杂不确定的工作,智能制造的生产模式正在向完全无人化的方向演进^[8-9]。

随着智能制造的进一步发展,预计未来不久,智能制造将成为AIGC技术的重要应用场景。通过深度融合“关键环节数据+深层机理智能优化”,推动其由单点场景应用向全流程综合化演进。工业领域大规模设备更新将加速智能制造的落地,这将推进数字化、智能化设备和软件的大规模普及。

制造业设备种类繁多、应用场景较为复杂,不同环境有不同的工业协议,数据量大,格式差异较大,不统一标准就难以兼容,也难以转化为有用的资源。另外,制造业生产流程复杂,即使单个工序也可能存在多个工业控制系统与生产执行系统,数据来源非常分散;加之多数制造业存在供应链条长和层次多的问题,制约了协同与集成和资源利用。因此,推动智能制造发展,需要制定权威的数据标准。

3 智能制造关键技术

3.1 数字化技术

工程应用中的信息多数是以数字化形式存在的,制造过程变革就是要实施数字化转型。数字化转型是一个集业务、组织、技术与管理于一体的综合工程。数字技术是多种数字化技术的集成,不仅包括人工智能、大数据、云计算、区块链等前沿技术,还涵盖物联网和5G等新兴技术。随着企业数字化进程的加速,人工智能、工业互联网、低代码等底层技术正全面重塑企业运营生产体系,推动新的生产要素和制造模式的建立。数字技术应用的优势是能够大幅提高整体生产和经济效率。

人工智能包括深度学习、计算机视觉等技

术,它正在加速向制造业渗透,不仅提高生产效率,还优化生产流程,进而实现个性化生产.区块链作为一种分布式数据库技术,提供了去中心化的数据存储和传输方案,增强了数据的安全性和透明度^[10].云计算通过互联网提供动态易扩展且多元化的超大资源,包括服务器、存储、数据库、网络、软件等,提高了资源的利用效率和数据的可访问性.大数据处理海量数据集合,具备体量大、类型多、速度快和价值高等特点,支持快速获取有价值信息.物联网通过信息传感设备完成物物相连,实现了智能化识别、定位、跟踪、监控和管理,提高了装备和工艺的智能化水平.5G是第五代移动通信技术,提供了更高的数据传输速度和更低的延迟,为物联网及其他需要高速数据传输的应用提供了基础.这些技术的发展和运用,极大地推动了制造业信息化和智能化的进程,将从根本上改变制造业模式和生产方式.

智能制造变革过程不仅会颠覆原有制造体系,而且会影响各行各业的所有细分行业 and 产业链价值链的每个环节,为众多领域高效率高质量发展提供了新的可能.传统制造业的数据分析方法以经典统计学和计算机科学为基础,能够处理的数据量和计算速度都较为有限^[11].引入深度学习等机器学习方法后,制造业企业能够对海量数据进行高效处理分析,并使其产生有效实际价值.深度学习技术能够将工业数据转化为具备价值的资产,随着各类算法的逐渐完善,深度学习技术逐渐成为衡量制造业数字化转型进程的核心技术之一.未来,随着人力成本的不断上升和传感器、电子元器件等工业硬件成本的逐渐下降,数字技术在制造业中的应用将逐步提高.

3.2 网络化技术

数字技术体系支撑下的工业互联网是工业制造业实现全面数字化和智能化转型的关键基础设施.工业互联网是新一代信息技术与工业制造业深度融合的产物,通过对生产要素和系统的全面链接,构建起覆盖工业制造业全产业链的全新制造和服务体系,是制造业实施智能制造的关键综合信息基础设施.以5G通信、区块链、边缘计算、数字孪生等技术为代表的新兴数字技术对工业互联网体系架构在保证智能制造中的实时性、智能决策以及数据安全等要求的实现具有重要作用.

由于在制造业领域中系统与数据繁杂和实时性要求,欲实现全面链接离不开具有海量连

接、低时延的网络连接技术.5G作为新一代移动通信技术,具备海量连接、高可靠性、低时延等优势,利用5G专网融合时间敏感网络、5G+云等技术,借助云端超大数据存储和超强算力,可有效解决不同工业场景的多样性需求^[12].

5G、区块链、边缘计算和数字孪生等技术将在更广泛的生产制造场景中实现落地应用.当前,5G赋能工业互联网部分研究成果已经开始应用,在实际生产和制造场景下,5G可以较好地支持机器人和AGV(automated guided vehicle)等移动机器设备的工作,并在网络架构融合的基础上支持部分设备的远程控制.

企业在部署工业互联网过程中,隐私数据需要上云,因此,需要新的区块链技术解决工业互联网平台中的数据保密、安全控制权以及互信协作等问题.通过区块链的加密算法实现的访问控制、隐私保护以及入侵检测等功能,可以实现企业生产过程各部分的数据共享、加密保护及访问权限控制等要求.目前,区块链技术在产品生产、质量管理和生产过程追溯等环节已经成功应用;未来随着“区块链+工业互联网”融合研究成果和技术突破以及各项标准制度的完善,区块链技术将在工业互联网中持续发挥更大的作用.

3.3 智能化技术

智能制造预示着未来制造业发展的趋势和方向,也是加快转变经济发展方式,促进制造业高端化、智能化与绿色化发展,推进制造强国建设的重要举措,更是新形势下构建国际竞争优势的必然选择.智能制造技术是利用计算机模拟制造业领域的专家的构思分析、判断推理和优化决策等智能活动,并将其智能信息系统与物理系统融合,贯穿于整个制造过程的各子系统.其核心是制造企业高度柔性化和高度集成化经营运作,部分取代或延伸制造领域技术专家的脑力工作,是一种全面提升制造质量和生产效率的先进制造技术^[13].

边缘计算与工业互联网的融合,能够将制造过程场景的存储与计算转移到工业互联网边缘来减少云端存储资源和算力,解决云计算存在的实时性差、运维成本高、数据安全等问题.一些需要高效算力的实时数据传输到云端计算后,再下行传输去控制制造场景就无法满足实时性要求.另外,由于制造现场设备间通信标准的不统一和异构的总线连接,需要将计算资源在制造场景端部署,以满足其高效实时需求.未来,边缘计算技

术的数据安全性及其协同性、可靠性将进一步提升,边缘计算也将成为制造业数字化转型的技术之一。

数字孪生为工业互联网智能化部署提供了强大驱动力。数字孪生是物理世界在数字世界的建模映射,起源于新兴信息技术与不同领域技术的融合,其技术基础包括物联网、大数据、机理模型建模、人工智能及云边协同计算等技术。这些数字技术的融合为数字孪生系统提供了数据采集、建模分析、高效计算和判断决策等能力。未来,数字孪生与工业互联网的融合将不断完善工业互联网的功能架构,帮助企业实现全方位数据优化和仿真^[14]。

大数据技术使人类能够处理和分析海量的数据,从而获得有价值的分析结果和决策支持。其具有数据量大、多样性、高速性和价值密度低等特点。通过大数据分析,企业可以更好地了解客户需求、优化工艺流程,以及发现新的商业机会。云计算提供了灵活、可扩展的计算资源,使企业能够根据需求快速部署和扩展应用程序。它具有成本效益高、按需服务、可靠性强等优势,为企业提供了更高效的IT基础设施。

智能制造实施还需要更多其他新型技术的融合应用。高灵敏度、精度、可靠性和强环境适应性的传感技术能实现微弱传感信号的提取与处理。采用模块化、嵌入式和协同控制的系统设计技术,开发统一数据格式、统一编程环境的工程软硬件应用平台。借助先进控制与优化技术,完成大规模、高性能的多目标优化。应用智能故障诊断与健康维护技术,可及时在线或远程进行智能设备故障诊断与健康维护。另外,智能化技术还需要可靠性高的实时网络通信技术、安全防护技术和低成本与低功耗识别技术等基础性保障技术的支撑。

3.4 赋能技术与制造技术的融合

当前,人工智能技术与先进制造技术正在逐步深度融合。其中,制造技术是本体技术,是融合的主体;而人工智能技术作为赋能技术,发挥主导作用;二者深度融合的根本目的是实现制造业数字化转型和智能化升级^[15]。随着大模型、大数据、超算力等新一代人工智能支撑技术的快速发展,新一代人工智能技术成为新一轮科技革命和产业变革的核心技术,已经形成推动智能制造发展的强大动力。在全新的通用人工智能时代,人工智能的应用范围发生了质的改变,其使能技术拓展了制造领域的智能化应用,实现智能化转

型,加速制造业迈向智能化。

新一代人工智能为工程技术人员提供了认识与解决复杂制造问题的新方法,也为智能制造提供了新的技术基础。新一代人工智能呈现出深度学习、跨界融合、人机协同、群体智能等新特征。通用人工智能(AGI)、人机融合系统增强智能、具身智能和智能网联装备正在成为发展的重点。制造业大模型是制造业数字化转型的重要工具,智能制造需要开发基于大数据、深度学习等技术构建的模拟和优化制造业全过程的制造业大模型。它集成了产品设计、生产、供应链、销售等多个环节的数据,通过算法和模型训练,实现对制造业的精准预测和优化。

基于大模型+大数据+大算力创生的新一代人工智能技术与先进制造技术的紧密融合,必将推动产品创新、生产技术创新、产业模式创新和制造系统集成创新,形成制造业高质量发展的核心驱动力,是实现制造业创新发展的主要技术路径^[16]。

为了满足智能制造变革需要,新一代人工智能在算力、算法和数据3个层面都需要进一步升级,并将赋能技术与制造技术赋能融合。华为已经基于自身实践,并与合作企业一道,从智能感知、智能联接、智能底座、智能平台、AI大模型和智能应用等多个层面入手,打造了行业智能体架构。面向行业大模型训练/推理场景,针对十亿至万亿级模型应用,集成高性能存储节点、训练/推理节点、交换设备、AI平台软件与管理运维软件,实现一站式服务。训练/推理节点与存储节点均可独立水平扩展,以匹配不同规模的模型需求。盘古大模型已在30多个行业、400多个场景中落地,在政务、金融、制造、医药研发、煤矿、钢铁、铁路、工业设计、建筑设计、气象等领域发挥作用。动态递增的方式帮助盘古5.0在动态分辨率的表征上超过业界同等模型,并有效提升了模型在下游多模态任务中的能力。

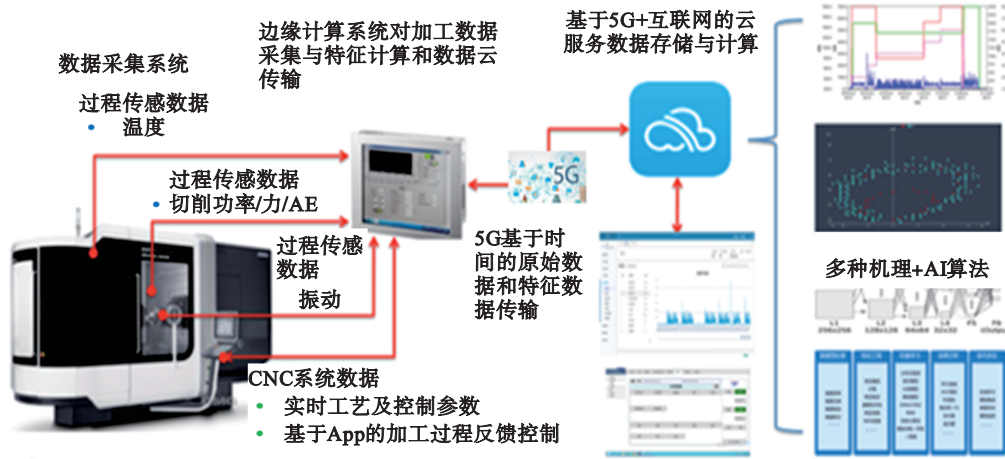
4 典型智能制造技术工程应用

4.1 基于5G云计算的机械加工智能监控

基于5G的云计算与云服务将成为智能装备的发展模式。已有研究表明,基于5G和云计算构建的智能装备和机械加工监控系统在智能设备运行及生产加工质量的实时监控中展现了良好的应用效果,证明了其在实际操作中的可行性与有效性。数控(CNC)机床智能监控系统结构原理

如图 2 所示,机床端工业电脑数据采集软件将采集到的不同传感器数据通过 5G 模组传输到云端数据服务器存储,再由开发安装在云端的监控软件使用所存储的数据进行智能监控.监控系统借

助 5G 移动通信大规模接入、大带宽、超低时延和高可靠性的特点,充分利用云计算服务的超大数据存储和超强计算能力,解决了传统机械加工难以实现智能监控的难题.



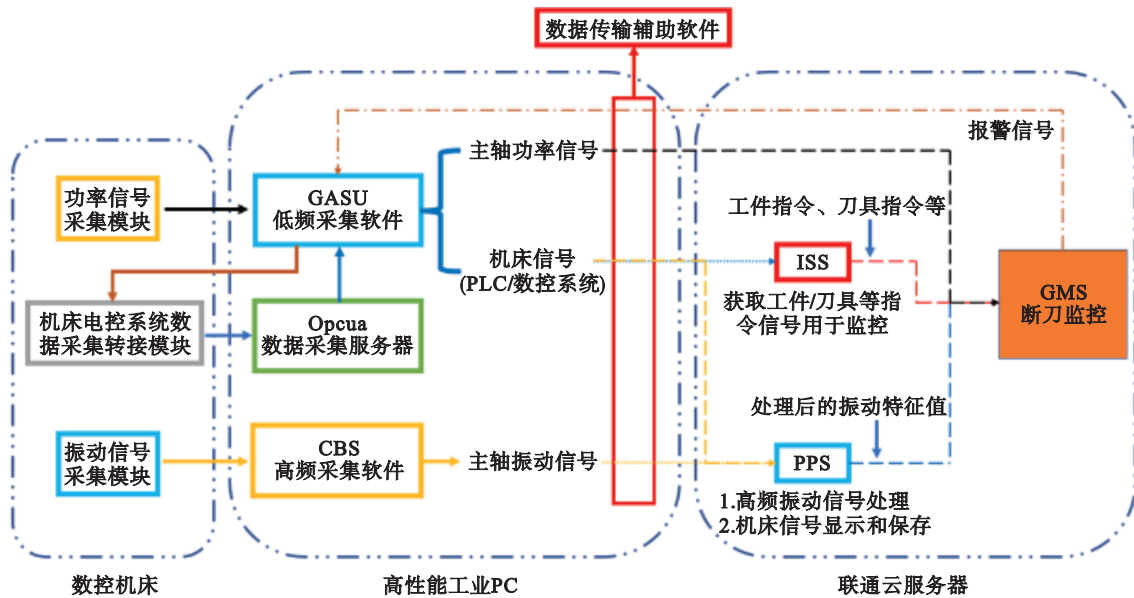
注:AE(acoustic emission)为声发射.

图 2 数控机床智能监控系统结构原理图

Fig. 2 Structural schematic diagram of intelligent monitoring system for CNC machine tools

数控机床数据采集与监控系统架构如图 3 所示,由信号采集系统、数据传输存储系统以及切削加工监控系统 3 个子系统组成.信号采集系统进行高频和低频信号传感器数据采集,在机床电控系统数据采集转接模块中通过通信转接模块来读取机床的 PLC(programmable logic controller)以及数控系统相关的数据.将 3 种类型的数据传

输到工业计算机的 GASU 软件和 CBS(collison buffer software)软件中,通过 5G 传输到云服务器进行处理及存储,实现基于 5G 通信模式下底层设备与云服务器间的数据传输.GMS(general monitoring software)软件提取正常加工状态下的学习文件,并智能确定监控信号阈值,由此实现对加工过程和加工质量的实时智能监控.



注:ISS(instruction set software)为指令集软件;PPS(process processing software)为过程处理软件.

图 3 数控机床数据采集与监控系统架构图

Fig. 3 Architecture diagram of data acquisition and monitoring system for CNC machine tools

基于 5G 和云存储计算的加工数据动态采集、传输与存储方法,可实现数据云存储和双向

传输.通过监控数据特征值处理和阈值智能确定,云端监控软件可实现加工动态数据多通道采

集与有效监控.基于5G传回底层的通信时延低至20 ms,随着5G技术的不断完善和提升,基于5G云计算的机械加工智能监控会得到普及和应用.

4.2 机器人化智能制造

以机器人作为制造装备执行体的机器人化智能制造,正逐渐成为大型复杂构件智能制造的新模式,代表着智能制造重要的前沿方向.人工智能对实体机器人的赋能,使得机器人拥有了智能性.智能制造技术、机器人技术与信息技术不断深度融合,孕育出新的制造原理和方法,形成人与机器人自然交互能力的新一代“共融机器人”^[17].

在宽广时空范围内,高效精准完成各类加工对机器人化智能制造产生了本质需求.利用机器人开放性好、操作灵活、并行协调、高效易重构、可实现视觉/力觉的智能控制等特点,通过研究机器人化加工的灵巧性与结构形貌-性能调控机制、加工多模态感知与行为顺应、人机共融和智能制造系统的迭代进化等科学问题,已初步创建了机器人化智能制造基础理论体系,研制出多种类型机器人化智能制造的装备(如图4所示),其加工精度突破了30 μm .机器人化加工的灵巧性与形性调控有效解决了复杂空间可达性、加工多模态感知与行为顺应问题,实现了大范围的高精度加工.人-机-环境共融与制造系统的进化,完成了工艺知识学习.利用机器人灵巧、顺应和协同等特点,将人类智慧和知识融入制造过程,通过机器人化智能制造实现非结构环境的制造.



图4 爬行机器人在飞机机身上钻孔加工

Fig. 4 Crawling robot drilling on aircraft fuselage

目前,已开发出大空间运动范围内机器人随形跟踪的精度保障工艺,急剧曲率零件加工时接触力的平稳高精度控制方法,环境刚度预测与主动匹配的变刚度力控制技术,并在复杂表面高光铣削和磨抛轨迹规划、机器人仿人操作的运动编码、刚柔耦合力控执行器优化设计及振动抑制等

方面取得新进展.实现人-信息-物理制造系统数字孪生建模,全场景多模态跨尺度感知与人机协同制造和在线测量-加工-监测一体化闭环制造,非结构动态环境下多机器人协同自律控制和不确定与不完全信息下制造系统多目标智能决策.

随着视觉引导的机器人加工路径规划和核心算法及关键技术的突破,实际工程中已有易变形薄壁曲面的测量-加工机器人协同加工、吸附式移动加工机器人集群协同制造、复杂曲面机器人化测-铣-磨加工、机器人化大型构件制造等典型应用.实现了高铁车身、C919客机机翼与机体装配、风电叶片、大型风洞构件、汽轮机大叶片机器人化制造的技术跃迁,如图5所示.突显了机器人智能制造超大空间测量与重构全场景阵列式并行三维全域测量、瞬态振荡抑制与稳态平顺跟踪力控的随形顺应、等刚度优化与工艺学习的智能工艺、系列化功能部件与系列化装备研发的特征.曲面跟踪姿态精度为0.09°,力控精度为 $\pm 0.7\text{ N}$,汽轮机大叶片磨抛精度提高到 $\pm 0.06\text{ mm}$,高铁测量精度为 $\pm 0.15\text{ mm}$,效率为4.7 m^2/min ,显示出良好的工程应用前景.

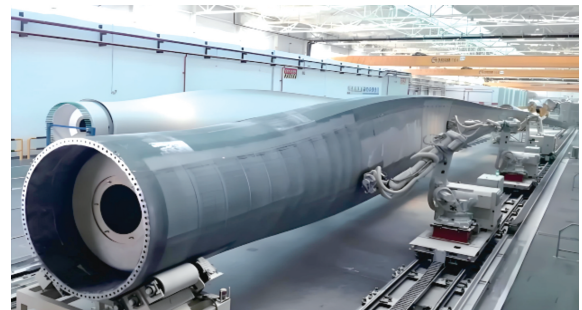


图5 多机器人协同加工大型风电桨叶

Fig. 5 Multi-robot co-processing of large wind turbine blades

4.3 智能钢铁制造

我国钢铁生产企业在基本完成以自动化、信息化、精益化为主要特征的工业3.0进程背景下,选择钢铁制造核心环节之一热轧开展智能车间试点,通过实施在线检测、多层闭环控制、工业大数据应用等措施,开展智能车间探索与实践,实现制造装备、全供应链、分析决策过程的智能化,如图6所示.某钢厂1580热轧智能化车间板坯库实现无人化运行,采用图像识别技术自动识别板坯号,电子防摇技术提升吊具平稳度;利用激光成像技术和智能防撞技术,实现精准定位,并提高作业安全性,使得板坯物流更顺畅、管理更高效.通过实时监控燃烧状态,采用富氧燃烧和热

值调整等技术,可以提高能源利用率,减少能耗^[18]。



图6 1580热轧智能化车间

Fig. 6 Intelligent workshop for 1580 hot rolling

在钢板轧制过程中,通过翘头检测与控制保证中间坯的平直,采用中间坯头尾最优化剪切控制减少切损,基于闭环智能优化控制实现轧制过程中的稳定生产.新一代热轧工艺模型利用先进信息检测技术,实施智能动态调整轧制过程,保证生产的高效稳定.通过优化层流冷却工艺,提高带钢抗拉强度、断裂延伸率等性能指标的稳定性.通过助卷辊表面检测、叠板自动检测技术,提高带钢质量.

根据材料成分分析,智能调控轧制工艺参数和冷却过程参数实现产品性能预测,预防品质异常产品流出,使用机器人为输送钢卷喷涂编号.通过状态传感器感知设备状态和工况信息,在线检测离线分析,由专家远程实时诊断,实现设备的智能诊断和状态预测.建设数字化产线,实现虚拟生产,预测生产风险与制造成本以及各关键工艺参数的变化趋势,对各区域设备进行健康评估.热轧智能化车间成功改造后,利用互联网技术构建全局协同优化,精准高效的信息物理融合系统,使1580热轧生产线更高效、更环保、更安全,满足用户的个性化需求.

盘古大模型赋能钢铁智能制造,将重塑钢铁制造新模式.目前,中国钢铁智能制造在技术应用、产业升级和政策驱动下呈现快速发展态势.大型钢企普遍引入AI优化生产流程,部分热轧产线通过盘古大模型实现工艺参数动态调整,生产效率提升30%,产品合格率达99.8%.通过智能模型实现高炉炉温预测和铁水成分实时监测,减少人工依赖并降低能耗.多数钢企已经完成智能化改造,推动了“5G+工业互联网”工厂落地.传感器+机器视觉+AI算法实现缺陷实时剔除,大数据分析降低吨钢综合能耗,工业互联网平台支持个性化订单“零售化”响应.AI与工业互联网深度融合、数字孪生与全流程管控等核心技术已经落地

应用场景,AI正从辅助工具升级为核心生产力.钢铁智能制造已从单点技术应用转向全产业链协同,钢铁智能制造的核心技术体系已形成多维度融合应用^[19].

4.4 智能化检测与监控

智能化检测和监测技术是指利用先进的传感器、数据分析方法和自动化技术,对各种物理量、化学量、生物量等进行实时监测和分析.随着人工智能、物联网、大数据等技术的不断发展,智能化检测和监测技术得到了广泛应用.通过对生产过程中的各种数据进行分析 and 处理,能够实现故障预测、优化生产流程等目标.大模型技术可以利用优化算法,对生产过程的参数进行智能优化和控制.通过建立复杂的生产过程模型,并结合实时数据进行实时优化调整,大模型技术可以帮助企业提高生产效率,降低能耗和成本,同时保证产品质量.

随着人工智能技术的迅猛发展,基于大模型的检验报告解析成为各行业所关注的技术.大模型是训练参数极大的神经网络模型,它能够进行大量工程行业数据训练和知识学习,并通过智能算法实现检验报告的精确解析.应用视觉大模型进行工业异常检测,可实现工业异常信息和位置的文本描述,并提供提示词和检测要求,从而为零样本和小样本工业异常检测提供新的途径.大模型检验检测系统能够在采样后进行自动数据处理,大幅度提高检测效率和质量,降低成本.该系统能够有效解决检验检测认证行业存在的检测周期长、人为误差难以控制和检测数据应用不足等问题,可实现客观判断,准确快速生成检验检测结果报告.大模型检验在检测领域的应用,将推动检验检测认证实现全流程智能化,丰富知识图谱,构建高质量的数据集,为实现基于大数据检验检测分析提供基础.

基于工业大模型,电动汽车制造厂根据产品设计需求筛选特殊需要的工程材料,充当数字质检员,在生产制造各个工艺流程环节中使生产更加高效和智能.从1 016万种材料中,选择出能够满足工程要求的材料,并生成对应的加工工艺.成功开发了一体化压铸泰坦合金车身零件,将车身强度提高20%,耐久性提高近10倍.将所制零件送入基于大模型的智能检测系统进行检测,在短时间内拍摄几十张X光片,传送到AI大模型检测系统,AI大模型会自动在非常短的时间内对几十张X光片进行智能检测,其精准性达到99.9%.

工业大模型在短时间内完成技术人员团队几年才能完成的工作任务.可以预期,随着工业大模型的发展一定会拓展智能化应用范围.

5 结 论

1) 智能制造是基于新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合,并贯穿于制造全过程的设计、生产、管理、服务等各个环节,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的创新型制造模式.数字化与智能化转型势在必行,智能制造是制造业未来发展的主要方向.

2) 传统的制造业,由于其设备的复杂性,生产过程的多态性和不可预知性,需要系统的复合智能技术才能实现.目前,优秀的智能化制造工厂案例并不多.制造业存在的问题不是单方面的问题,而是需要行业内各方面共同研究开发出一个颠覆性的、综合性的方案来解决.

3) 研究结果显示,数控机床借助5G极低时延、高可靠性、海量连接的网络,利用云端超大数据存储和超高计算能力的平台,结合人工智能技术,使得智能控制通过无线网络连接使用云服务成为可能.基于5G通信的云计算在制造业的成功应用,为实现制造业智能化提供了新方法,必将推进制造业的智能化进程.

4) 随着智能制造技术实施和发展,制造过程所需解决的问题和方法将发生根本改变.即由考虑传统的较为单一的制造场景改变到多种复合型制造场景,由基于控制的机器学习改变到基于大数据的深度学习,从基于主观经验的判断改变为基于证据的智能决策,从通过剔除废品解决已产生的问题转变为预测避免问题的产生.

参考文献:

[1] 周济,李培根.智能制造导论[M].北京:高等教育出版社,2021:1-56.
(Zhou Ji, Li Pei-gen. Introduction to intelligent manufacturing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021: 1-56.)

[2] 李培根,高亮.智能制造概论[M].北京:清华大学出版社,2021:1-68.
(Li Pei-gen, Gao Liang. Introduction to intelligent manufacturing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021: 1-68.)

[3] 周济.智能制造——“中国制造2025”的主攻方向[J].中国机械工程,2015,26(17):2273-2284.
(Zhou Ji. Intelligent manufacturing: main direction of “made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.)

[4] 臧冀原,刘宇飞,王柏村,等.面向2035的智能制造技术预见和路线图研究[J].机械工程学报,2022,58(4):285-308.
(Zang Ji-yuan, Liu Yu-fei, Wang Bai-cun, et al.

Technology forecasting and roadmapping of intelligent manufacturing by 2035 [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 285-308.)

[5] Zhou J, Zhou Y H, Wang B C, et al. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 624-636.

[6] He B, Bai K J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review [J]. *Advances in Manufacturing*, 2021, 9(1): 1-21.

[7] 杨晓楠,房浩楠,李建国,等.智能制造中的人-信息-物理系统协同的人因工程[J].中国机械工程,2023,34(14):1710-1722,1740.
(Yang Xiao-nan, Fang Hao-nan, Li Jian-guo, et al. Human factor engineering for human-cyber-physical system collaboration in intelligent manufacturing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(14): 1710-1722, 1740.)

[8] Zhou G H, Zhang C, Li Z, et al. Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing [J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(4): 1034-1051.

[9] 汪俊亮,高鹏捷,张洁,等.制造大数据分析综述:内涵、方法、应用和趋势[J].机械工程学报,2023,59(12):1-16.
(Wang Jun-liang, Gao Peng-jie, Zhang Jie, et al. A review of manufacturing big data: connotation, methodology, application and trends [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(12): 1-16.)

[10] Ryalat M, ElMoaqet H, AlFaouri M. Design of a smart factory based on cyber-physical systems and Internet of Things towards industry 4.0[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(4): 2156.

[11] Maddikunta P K R, Pham Q V, Prabadevi B, et al. Industry 5.0: a survey on enabling technologies and potential applications [J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2022, 26: 100257.

[12] Li C Q, Chen Y Q, Shang Y L. A review of industrial big data for decision making in intelligent manufacturing [J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2022, 29: 101021.

[13] 高亮,李培根,黄培,等.数字化设计类工业软件发展策略研究[J].中国工程科学,2023,25(2):254-262.
(Gao Liang, Li Pei-gen, Huang Pei, et al. Development strategies of industrial software for digital design [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 254-262.)

[14] 庄存波,刘检华,张雷.工业5.0的内涵、体系架构和使能技术[J].机械工程学报,2022,58(18):75-87.
(Zhuang Cun-bo, Liu Jian-hua, Zhang Lei. Industry 5.0 connotation, architecture and enabling technologies [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(18): 75-87.)

[15] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.
(Tao Fei, Liu Wei-ran, Zhang Meng, et al. Digital twin five-dimensional model and ten domain applications [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.)

[16] 刘强.智能制造理论体系架构研究[J].中国机械工程,2020,31(1):24-36.
(Liu Qiang. Study on architecture of intelligent manufacturing theory [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(1): 24-36.)

[17] Zhu D H, Feng X Z, Xu X H, et al. Robotic grinding of complex components: a step towards efficient and intelligent machining-challenges, solutions, and applications [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 65: 101908.

[18] 张健民,单旭沂.热轧产线智能制造技术应用研究——宝钢1580热轧示范产线[J].中国机械工程,2020,31(2):246-251.
(Zhang Jian-min, Shan Xu-yi. Application of intelligent manufacturing technology in hot rolling production line: Baosteel 1580 hot rolling demonstration production line [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(2): 246-251.)

[19] Zhou D D, Xu K, Lyu Z M, et al. Intelligent manufacturing technology in the steel industry of China: a review [J]. *Sensors*, 2022, 22(21): 8194.