

DOI: 10.3901/JME.2022.18.088

## 面向工业 5.0 的人本智造<sup>\*</sup>

马南峰<sup>1</sup> 姚锡凡<sup>1</sup> 陈飞翔<sup>2</sup> 俞鸿均<sup>3</sup> 王柯赛<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640;

2. 中电科航空电子有限公司 成都 611731;

3. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 成都 610091)

**摘要:** 工业 4.0 是技术驱动型的工业模式, 注重生产流程的优化、效率和生产力的提高, 而忽视了“人”这一最重要的主体。因此, 作为一种价值驱动型的新工业模式——工业 5.0 的概念逐渐引起人们的重视, 将工业重心由技术转向对人身心的关怀、自然的可持续发展及工业的弹性等方面, 而人机智能协作是走向未来以人为本的智能制造的关键。这种价值观的转变预示着人本智能制造会越来越受到重视, 因而很有必要对如此新兴的智能制造模式开展详细研究, 旨在为工业 5.0 理念下的人本智造发展提供有益的借鉴参考。为此, 首先分析工业革命及制造范式的演化并指出目前制造模式存在的典型问题; 然后给出工业 5.0 的定义, 并分析其主要特征以及“人-社会-自然-技术”视角下与工业 4.0 的区别和联系; 接着对工业 5.0 背景下人机交互方式及人机共生关系进行详细论述; 最后探讨元宇宙背景下的人本智造演化及其面临的问题进行展望。

**关键词:** 工业 5.0; 工业 4.0; 人本智造; 人机协作; 协作机器人; 元宇宙

**中图分类号:** TH16; TH18; TP18

## Human-centric Smart Manufacturing for Industry 5.0

MA Nanfeng<sup>1</sup> YAO Xifan<sup>1</sup> CHEN Feixiang<sup>2</sup> YU Hongjun<sup>3</sup> WANG Kesai<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,  
Guangzhou 510640;

2. CETC Avionics Company Limited, Chengdu 611731;

3. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091)

**Abstract:** Industry 4.0 is a technology-driven industrial model that focuses on the optimization of production processes and the improvement of efficiency and productivity, while neglecting the most important subject of “human”. Therefore, the concept of Industry 5.0, a new value-driven industrial model, is gradually attracting attention, shifting the focus of industry from technology to the care of human physical and mental health, the sustainable development of nature and the resilience of industry, while as human-machine smart collaboration is the key to the future human-centric smart manufacturing. Such change in value indicates that human-centric smart manufacturing will receive more and more attention, so it is necessary to study such emerging smart manufacturing model in detail, aiming to provide useful reference for the future development of human-centric smart manufacturing. To this end, we first address the industrial revolution and the evolution of the manufacturing paradigm and point out the typical problems of the current manufacturing models; define Industry 5.0, and analyze its main features as well as its difference from and connection with Industry 4.0 in the perspective of “human-society-nature-technology”; then explain in detail the human-machine interaction and the human-machine symbiosis in Industry 5.0; and finally give prospects for human-centric smart manufacturing and its facing problems in the context of metaverse.

**Key words:** Industry 5.0; Industry 4.0; human-centric smart manufacturing; human-machine collaboration; cobots; metaverse

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金委员会与英国爱丁堡皇家学会合作交流(51911530245)、国家自然科学基金(51675186)和广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515010506, 2022A1515010095)资助项目。20211228 收到初稿, 20220601 收到修改稿

## 0 前言

工业是推动社会、人文及经济进步繁荣的巨大引擎, 不仅为国民经济的各部门供应源源不断的原材料和发展动力, 而且可以满足人们对日益增长的物质文化需求, 它还是国家重要的财政收入来源, 是实现国家经济自主、主权独立、领土完整和建设现代化国防的根本保证。

从 18 世纪末至今, 人类业已经历了四次工业化革命, 分别是由蒸汽和水(蒸汽机)驱动的第一次工业革命(机械化)、电力驱动的第二次工业革命(电气化)、计算机及自动化设备驱动的第三次工业革命(自动化)、新一代信息通信技术(Information and communication technology, ICT)及人工智能(Artificial intelligence, AI)驱动的第四次工业革命(智能化), 每一次工业革命都深刻地改变了人们的日常生产生活方式, 推动了社会的快速发展和人类文明的进步。

具体来讲, 第一次工业革命提高了钢铁和纺织业的生产力, 其代表事件为诞生了“第一台机械式织布机”, 其影响之一便是前所未有的人口增长; 第二次工业革命发生在第一次世界大战之前, 通过使用电力来创造大规模生产, 流水线的引入极大地提高了生产效率, 其代表事件为 1913 年福特公司在 T 型汽车组装过程引入流水线式生产, 使该型汽车的生产效率提高了 8 倍。随着 20 世纪 80 年代个人电脑和互联网的飞速发展, 第三次工业革命提高了制造过程中的柔性化及自动化水平, 并改变了世界经济格局, 其典型事件为出现了第一个可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)。第四次工业革命源于德国政府一个“计算机制造”相关的项目, 并由德国政府于 2011 年首次在汉诺威工业博览会上提出。

工业 4.0 是一种基于数字化、网络化、自动化的智能生产模式, 其核心技术为信息物理系统(Cyber physical system, CPS), 涉及的其他技术还包括增材制造(Additive manufacturing, AM)、先进机器人技术、AI、自动驾驶汽车、区块链(Blockchain)、无人机及物联网(Internet of things, IoT)等<sup>[1]</sup>。工业 4.0 时代, 机器设备和产品等呈现出“智能化”的特征, 一般被称为技术驱动/推动(Technology-driven/push)型的工业模式<sup>[2]</sup>。

目前工业 4.0 正在如火如荼地进行, 已深入应用到各行各业, 学者界和商业界对工业 4.0 的未来发展形势总体上持乐观态度。但是也有部分研究者及从业人员逐渐发现工业 4.0 在发展过程中过于侧

重生产制造流程的优化和设备的自动化水平的提升, 而忽视了制造过程中最重要的参与者“人”这一主体。而未来的社会, 工业(产业)端的创新和用户端的个性化需求将变得越来越急切和重要, 而需要创新和个性化定制时, 人是关键因素, 目前可行的解决方案有人机智能协作和产消协同创新。此外, 制造业带来的污染也引起了人们对生态环境恶化的担忧, 如何实现可持续发展是一个重要议题。还有全球供应链在新冠疫情面前暴露出的脆弱性引起了人们对全球供应链稳健性的担忧, 再加之地缘政治变化和自然灾害等频发, 人们越来越渴望具有弹性、稳健性高的工业系统(模式), 弹性一般指抵御社会地缘政治变化和自然灾害等重大变故的能力, 确保在危机时期仍能提供和支持关键的基础性设施或服务。

因此, 有部分先行者开始关注下一代以人为中心的工业革命——工业 5.0(Industry 5.0)<sup>[3]</sup>, 一种以人为中心、更有人情味和更具人性化的生态友好(可持续发展)型弹性生产模式。从工业 1.0 到工业 5.0 的演化进程如图 1 所示。

在工业化演进过程中, 诞生了许多先进的生产制造模式, 如面向提高生产效率、避免出现“信息化孤岛”的计算机集成制造(Computer integrated manufacturing, CIM)、投入产出比高的精益生产(Lean manufacturing, LM)等互联网制造模式和面向服务的制造网格(Manufacturing grid, MG)、敏捷制造(Agile manufacturing, AM)、云制造(Cloud manufacturing, CM)等网络化/智能化制造模式<sup>[4, 5]</sup>。这些制造模式的相继提出极大地改变了人们对制造的观念, 在资源配置、生产调度协同、加工过程监控及经营管理等方面取得了一定的成果, 提高了企业的生产效率和数字化水平, 但要进一步推广扩大应用, 从而取得显著的社会经济成果并满足社会日益增长的个性化需求, 目前的制造模式还存在以下显著的问题:

(1) 对“人”这一主体关注度不够。目前较多学者关注的是人与 CPS/CPSS 等系统的融合或交互等问题<sup>[6-8]</sup>, 如 ZHOU 等<sup>[9]</sup>提出的“HCPSs”, 侧重于人与 CPS 的融合问题。姚锡凡等提出的基于社会信息物理生产系统(Social-cyber-physical production system, SCPSS)<sup>[10]</sup>, 是一种面向未来互联网人机物协同的新型制造模式——智慧制造(Wisdom manufacturing, WM)<sup>[11]</sup>, 侧重于社会与 CPSS 的融合问题。还有王柏村等<sup>[12]</sup>于 2020 年对人本智造基本内涵、技术体系、应用实践等方面进行了分析探讨,

这些先进的制造模式过多地关注人/社会与 CPS 等系统融合或交互的问题,而对“人”(主要是生产者

或消费者)这一主体的根本需求(自我价值实现的愿望和个性化需求)关注度和研究深度远远不够。

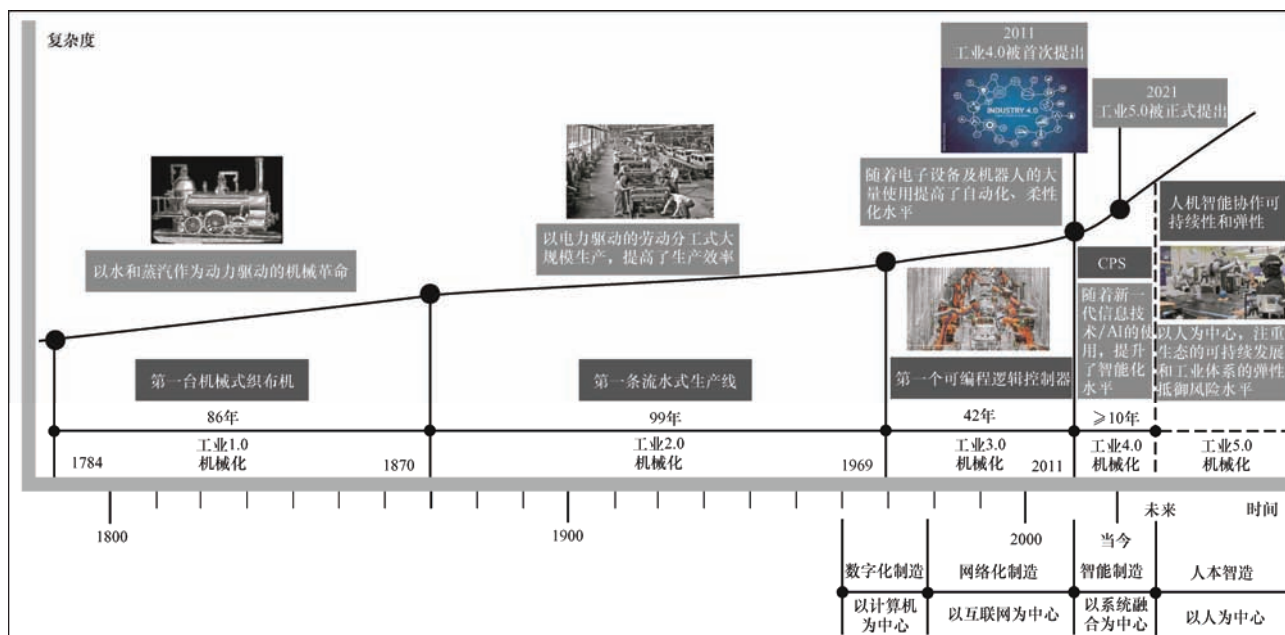


图1 工业革命及制造模式演化

(2) 将人、生态环境及工业融合起来研究的还太少。目前也有出现譬如绿色制造(Green manufacturing)<sup>[13]</sup>、可持续制造和清洁生产等生产模式或理念,但是其更多探讨的是环境与经济成本(循环经济)、质量及效率等之间的关系,缺乏对“人”这一主体“三位一体”式的系统性集成研究。

(3) 以人为本的人机共生关系研究不够。人机和諧共生是未来工业和社会繁荣的重要保障,目前的人机共生更多的是从技术层面研究人机协作问题,对 人机协作背后的驱动力、价值观、社会伦理和道德等方面的研究还太少或者深度不够。

因此,面对这些突出的问题,迫切需要一种以人为本(主体),兼顾生态环境及工业弹性的“三位一体”式的新型工业模式,所论述的人机共生的“人本智造”便是这样一种面向工业 5.0 时代的新型制造模式(理念)。

工业革命的浪潮将产生涟漪效应,远远超过工厂车间的技术变革。一个转型的行业也将对社会产生变革性影响,这对行业工人来说是最真实的,因为他们有可能看到自己的角色被改变,甚至受到威胁<sup>[14]</sup>。近些年,随着机器人在各行各业的广泛应用,逐渐引起人们对“机器换人”的担忧,RAY 等<sup>[15]</sup>于 2008 年发表的著名会议论文“*What do people expect from robots?*”中调查了 240 个人对机器的看法,其研究结果表明,不管在个人和社会层面上,人类对机器最害怕的就是

失去工作,另外两个占比较高的分别为机器失去控制(功能障碍)、机器替换人类。就像马克思所提出的“劳动异化(Alienation of labor)”<sup>[16]</sup>理论一样,工人正在逐渐失去对自己工作的控制,进而失去对生活的控制。根据协作机器人(Cobots)生产厂商“优傲机器人(Universal Robots)”公司的统计结果,部署了该公司协作机器人的公司最终雇用了更多的工人,而不是更少,比他们在使用协作机器人之前更多<sup>[17]</sup>。因此,工业 5.0 将工业 4.0 剥夺的劳动力重新回归到工厂,这也是工业 5.0 的一个显著特点,即劳动力回归工厂,将打消工人对失业的担忧。

综上所述,为了满足消费者对产品(或服务)日益增长的个性化需求、克服目前制造模式存在的典型问题和打消工人对失业的担忧进而提高工人工作的安全感和幸福感,亟需开展面向工业 5.0 时代以人为本的智能制造研究,将从以下几个方面展开。

## 1 工业 5.0

为了了解国内外工业 5.0 的研究现状及未来可能的发展趋势,选取时间段为 2015 年至 2021 年 12 月 16 日对国内的“中国知网”和国外的“Scopus”两个比较有代表性的数据库进行简单文献检索统计,文献类型包括论文、综述、会议论文,以期发

现工业 5.0 近年的研究情况(趋势)。

检索方式描述如表 1 所示,文献分布情况如图 2 所示。由图 2 可知,目前国内关于工业 5.0 这一主题的发文量相对较少,并且国内外的发文趋势近年来均呈上升趋势,这说明部分先行研究者除了关注工业 4.0 的发展外,也在积极寻求(探索)新的工业范式(工业 5.0),不同的研究者从不同的角度提出了自己对工业 5.0 的看法,以解决目前工业 4.0 存在的部分问题,并与其他学者的研究提供一定借鉴意义。当然,目前的探讨力度还远远不够,还需要开展更多面向未来“工业 5.0”相关的研究和应用。

表 1 检索方式描述

数据库	中国知网	Scopus
检索关键字	工业 5.0	Industry 5.0
检索范围	主题模式	标题、摘要、关键词
语言	不限	
文献数量	80	1 573

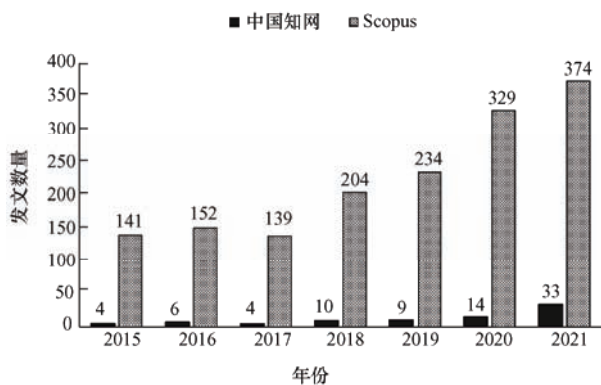


图 2 工业 5.0 近年来发文数量统计

## 1.1 工业 5.0 主要特征及定义

欧盟委员会(European commission)提出工业 5.0 的三个核心要素分别为以人为中心(Human-centric)、可持续(Sustainability)以及弹性/恢复力(Resilience),如图 3 所示。欧盟委员会指出工业 5.0 关注的重点从单纯的股东价值转移到利益相关者的价值,为所有相关者服务;工业 5.0 的成功与否取决于所有利益相关者尽可能广泛地参与和行动。欧盟委员会认为工业要成为社会真正繁荣的提供者,其真正的定义必须包括人、环境和社会相关方面的考虑<sup>[14]</sup>。工业 5.0 现在还处于初步探讨阶段,概念定义等还很不完善,很难有一个所有人都认同的定义,因为不同行业参与认知工业 5.0 的方向、侧重点不一样。但为了避免出现管中窥豹,基于对工业 5.0 有一个更好认识的出发点,对目前的几种定义进行归纳整理,结果如表 2 所示,表格中引用的文献为目前关于工业 5.0 较新的或者被引用量较高的部分文献,希望通过这些定义能形成对工业 5.0 的共性认知。此外,综合已有文献对工业 5.0 的定义,探索性地给出工业 5.0 的一种参考定义,希望对后续研究者能有一些启发性作用。

工业 5.0 定义:工业 5.0 是工业 4.0 的延续和补充,是建立在工业 4.0 概念和基础上的一种进化的、渐近的但非常有必要的价值驱动型新工业模式,除了关注生产流程优化和自动化水平提升等技术层面外,还应重点关注包括人、环境、工业弹性等社会价值层面,人类与机器和谐共处,而不必担心工作不安全或失业,从而产生增值服务并使人性回归到制造业。

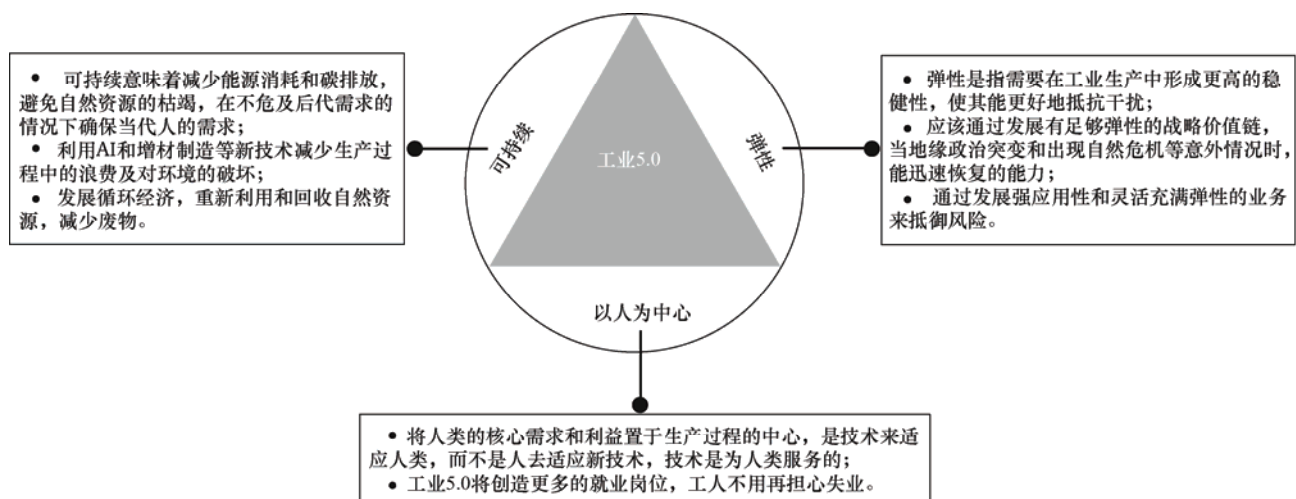


图 3 工业 5.0 核心要素及含义

表 2 部分文献中关于工业 5.0 的参考定义

文献	定义
庄存波等 <sup>[18]</sup>	工业 5.0 通过使生产尊重地球的边界, 以及人、机、物、环在知识层面的交互、协同与融合, 将工业劳动者及其利益置于生产过程的核心, 从而实现包括经济增长之外的多种社会目标, 稳健地、可持续地提供繁荣的一种工业生产模式
欧盟委员会 <sup>[14]</sup>	工业 5.0 认识到工业有能力实现超越就业和增长外的社会目标, 成为繁荣的富有弹性的提供者, 使生产尊重地球的边界, 将工人的福祉置于生产过程的中心
ÖZDEMİR 等 <sup>[19]</sup>	工业 5.0 是指在不影响创新生态系统及其成员的长期安全和可持续性的情况下, 建立复杂的、超级连接的数字网络
NAHAVANDI 等 <sup>[20]</sup>	工业 5.0 把人和机器结合起来, 进一步利用人类的脑力和创造力, 通过将工作流程与智能系统结合起来, 提高生产效率, 机器人与人之间的关系是合作者而不是竞争者
DEMİR 等 <sup>[21]</sup>	给出工业 5.0 两个版本的定义, 其中一个致力于人-机协作和创造智能社会, 另一个是专注于生物经济以实现更大的可持续性, 并将两个版本的定义与工业 4.0 的定义进行了对比
MADDIKUNTA 等 <sup>[22]</sup>	认为工业 5.0 尚未充分发展, 各行各业的从业者和研究人员提供了各种定义, 总结了 7 种关于工业 5.0 的定义, 在此不再赘述

工业 5.0 的概念和其自身一样, 尚处于一个不断进化、渐近完善的过程, 相信随着越来越多的研究者和从业者陆续加入到工业 5.0 的研究和应用中后, 其概念、内涵和应用将越来越趋于完善、丰富, 届时的工业 5.0 或许是另一番景象, 也未可知。

## 1.2 “人-社会-自然-技术”视角下工业 4.0 /5.0

在与工业 4.0 比较前, 有必要先弄清目前的一个热点比较问题(社会 5.0、工业 5.0), 这有益于探讨工业 5.0 与工业 4.0 的异同和联系。社会 5.0(Society 5.0)是日本政府于 2016 年提出的一种社会发展战略, 旨在构建一个生活舒适、充满活力的“超智能社会(Super smart society)”<sup>[4]</sup>。从本质上讲, 社会 5.0 试图提供一个基于高级服务平台的共同社会基础设施, 以促进社会繁荣。工业 4.0 在一定程度上遵循社会 5.0, 但工业 4.0 侧重于生产, 而社会 5.0 旨在将人类置于创新的中心, 利用技术的影响力和工业 4.0 的成果, 在改善生活质量、社会责任和可持续性方面深化技术整合<sup>[23]</sup>。因此, 社会 5.0 聚焦解决社会问题, 如老龄化、环境恶化和能源紧张等。与工业 4.0 相比, 社会 5.0 借助于物理和虚拟世界的融合来解决社会问题, 因此社会 5.0 范围更广泛<sup>[24-25]</sup>。社会 5.0 试图平衡经济发展和解决社会及环境问题, 不仅仅局限于制造业, 其目的除了提高工业生产力之外, 更重要的是提高人们生活的便利性。而工业 5.0 概念的引入, 主要围绕的是工业系统中的人、工业造成的相关问题(如环境污染和资源利用方面)和工业弹性(稳健性)等方面。因此工业 5.0 和

社会 5.0 的侧重点、出发点不一样, 但其本质基本一样, 都是以“人”为中心、服务于“人”, 促进人类生活生产的便利性, 并实现社会的共同繁荣。其细微区别仅为工业 5.0 更关注的是工业系统中相关“人”的福祉, 而社会 5.0 则通过技术促进社会中“人”的便利性。因此, 两者关注的对象有细微的区别。

工业 4.0 虽然通过新技术的使用降低了制造成本并提高了生产过程的自动化水平, 但它忽略了通过流程优化导致的人力成本提升, 工业 5.0 涉及 AI 在人类共同生活中的渗透, 它们的合作旨在提高人类的能力, 并使人类回到“宇宙的中心(Centre of the universe)”<sup>[25]</sup>。此外, 一般认为工业 4.0 是技术驱动(Technology-driven)型, 而工业 5.0 为价值驱动(Value-driven)型<sup>[26]</sup>。工业 4.0 从技术出发(技术驱动), 通过“技术-自然-社会-人”的路径, 先考虑的是技术的进步获得更高的自动化水平和流程优化带来的效率提升, 起始点(出发点)为“技术”。而工业 5.0 从“人”出发, 优先考虑人的各项需求(自我价值实现和个性化需求等), 通过“人-社会-自然-技术”的路径, 以人、自然、社会的需求驱动技术的革新(价值驱动), 并且技术需要主动去适应、观察和学习人类, 起始点(出发点)为“人”。

文明的进步一般伴随着人类生活质量、生产水平的提高, 此外, 还需要具备良好的创新交流共享氛围和稳定的社会发展环境。图 4 从“人-社会-自然-技术”的维度探讨了工业 5.0 和工业 4.0 的区别及关联。工业 4.0 和工业 5.0 都是工业化进程中重要的工业模式, 因此“工业化”为两者之间的连接“桥





了自动化时代,各种柔性化、智能化机器人和高端机床等设备的大范围应用,极大地提高了人类生产制造过程中的自动化水平;2011 年左右,随着工业 4.0 概念的引入,人类进入了以 AI 引导的智能时代,自动化水平进一步提高。从工业 1.0 演化为目前正在兴起的工业 5.0 后,社会对工业模式的关注不再局限于制造本身,而是回归到“人”这一最重要的主体。

如果说工业 1.0 到工业 4.0 是围绕“技术”进步展开的,那么工业 5.0 则是围绕“人”的核心需求展开的,包括解决工人的失业担忧和生产过程的安全,提高工人工作的幸福感、成就感和获得感。

因此,在这样的时代背景下提出的工业 5.0 是十分有必要的,这是以人为本的“人本智造”(人性化)的回归。伴随着工业革命的演化,也诞生了典型的制造模式,如数字化制造、网络化制造、智能制造(图 1),还有重点探讨的人本智造,工业 4.0 催生了智能制造模式,工业 5.0 是工业 4.0 的延伸和拓展,侧重了人本智造,其关系示意图如图 5 所示。下面从人机交互方式、人机共生关系和人机协作应用案例三个方面探讨工业 5.0 背景下的人本智造。

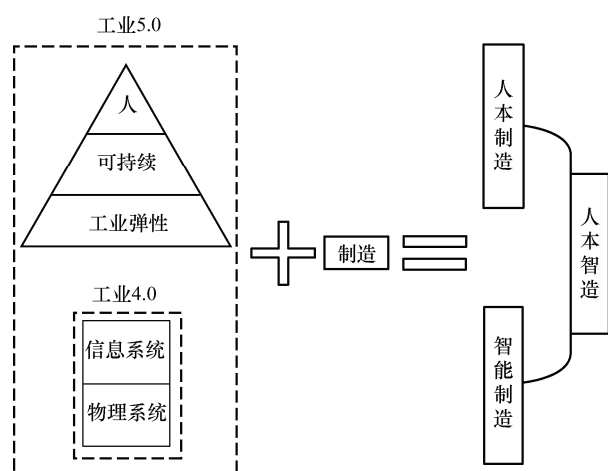


图 5 面向工业 5.0 时代的人本智造示意图

## 2.1 人机交互方式演化

如果说工业 1.0 到工业 3.0 解放了工人(此时主要为“蓝领”)的体力劳动,那么随着工业 4.0 的引入,此时不仅解放了工人的体力,还将逐步解放工人的脑力,此时的工人包括蓝领和白领。值得一提的是在工业 5.0 时代,工人已不再区分蓝领、白领,因为此时的工人主要从事的是具有创新性和更有意

义的工作,繁复枯燥的工作已被机器取代,甚至部分需要智能的工作也交由机器协作完成。

计算机出现之前,人类主要通过“手工作业”的方式操作机器(二进制代码),借助打字机完成数据的输入和输出,实现简单的交互,这阶段对工人的专业要求较高,具备较高的操作难度,称为“手工作业交互”。20 世纪 60 年代左右,随着第一台电子计算机的出现,人类的生产生活便与计算机有着千丝万缕的联系,人机交互方式随着计算机的发展而不断变化,此时采用交互命令语言的方式与计算机交互,专业要求较高,此阶段称为“命令交互”。20 世纪 80 年代,随着“Three Rivers”公司推出“Perq”图形工作站,图形用户界面(GUI)开始进入公众视野中,由此人机交互方式主要通过视窗、图标、按钮和菜单栏等与计算机实现交互,这种交互方式降低了人机交互难度,扩大了使用人群。20 世纪 90 年代开始,网络浏览器是用户界面的代表,进一步完善和丰富了交互方式,此阶段称为“Web 界面交互”。

进入新世纪后,随着 AI 复兴和新一代信息通信技术的出现,交互方式变为“多通道交互”,通过触觉、语音、面部表情、体感等实现人与机器的安全交互<sup>[28]</sup>,人与机器的交互方式越来越像人与人交互一样。面向工业 5.0 时代的人机交互依然是以“多通道交互”为主,但是随着 AI、机器学习、认知系统和计算机视觉等先进技术逐渐应用于协作机器人后,人类将与协作机器人智能协作生产,而不必担心失业,从而产生增值服务。

随着元宇宙相关使能技术不断取得新突破,未来的人机交互将会是更具体验感的“三维沉浸式交互”,届时人将通过“化身(Avatar)”在三维虚拟空间(另一个与现实平行的“宇宙”)中与机器、人、社会等交互,现实与虚拟之间将没有明显的界限,两者相互连通,相互作用,实现真正意义上的虚拟与现实的“互操作”及互联互通,图 6 所示为人机交互方式演化示意图。从人机交互方式的演化过程来看,人机交互的难度越来越趋于简单,对专业性的要求也越来越低,未来的交互设备和方式将根据人的需求设计制造,将进一步增强人类通过人机交互获得的满足感和体验感,这与所探讨的人本智造理念是相符的,体现着以人为本的交互方式将是未来的主要发展方向。

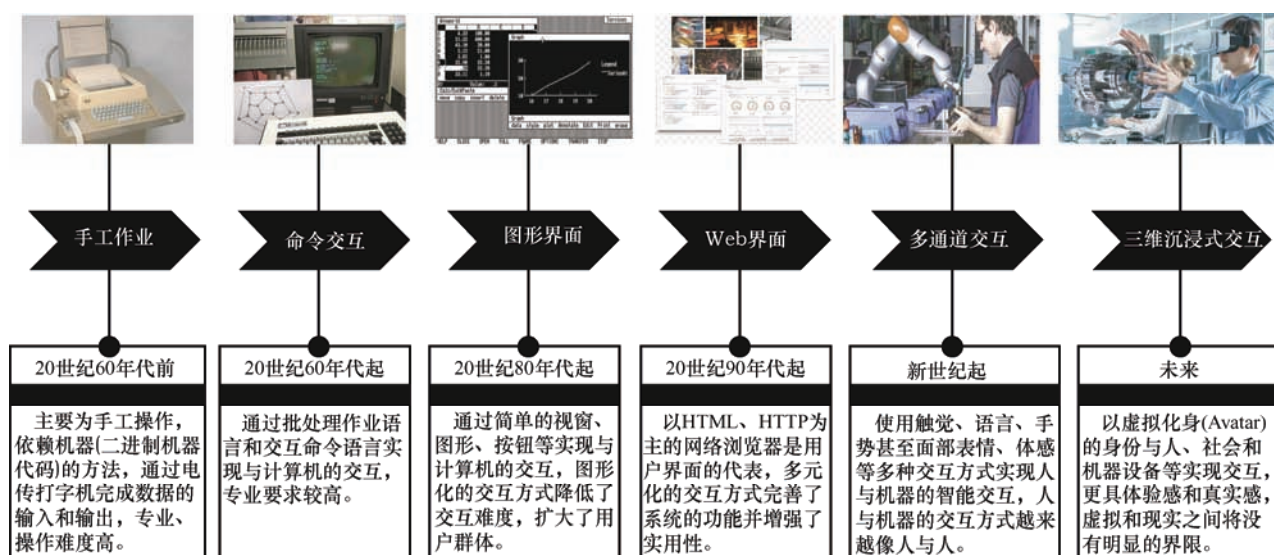


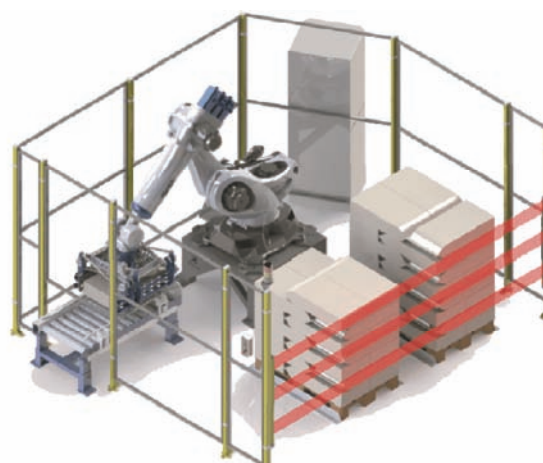
图6 人机交互方式演变

## 2.2 人机共生关系探讨

工业 5.0 时代下的人本智造, 人机协作是重点, 协作机器人在其中扮演着重要角色。值得注意的是, 人机协作不仅包括人-机器人协作, 还包括人-机床/计算机/生产系统等协作。重点探讨了以协作机器人为交互对象的人机关系, 其他交互对象类同。协作机器人由机器人演化而来, 是机器人的一种细分, 代表了一种突破性的技术, 旨在实现工人和机器之间的高层次(如协作)互动, 并具有在制造等行业灵活部署的能力<sup>[29]</sup>。其典型特征是直接与操作员实现精准合作, 除了可以减轻操作员的负担外, 还可以承担繁重单调且不符合人机工程学的工作。因此, 协作机器人可看作是操作员的一个更具人情味的“同事”。协作机器人最显著的特征是大部分时间都需要与人协作, 但不局限于一定要在同一工作空间, 远程协同工作也有可能, 进而共同完成任务, 而不是像传统机器人一样大部分时间都在“独自”工作, 把工人丢一边, 进而抢夺部分工人的就业机会。此外, 协作机器人一般还具备小巧、灵活、柔性、智能、便捷易上手、“亲密”等特点, 人与协作机器人之间将没有明显的“围栏”, 图 7 为两者示意图。图 7a 为传统意义上的机器人, 人与机器人之间有明显的围栏或者安全警示距离, 图 7b 为工业协作机器人。

ROMERO 等提出面向工业 4.0 的“操作员 4.0(Operator 4.0)”类型, 将操作员细分为 8 类, 即超强操作员(Super-strength operator)、增强操作员(Augmented operator)、虚拟操作员(Virtual operator)、

健康操作员(Healthy operator)、智慧操作员(Smarter operator)、协作操作员(Collaborative operator)、社交操作员(Social operator)、分析操作员(Analytical operator)<sup>[30]</sup>。



(a) 西班牙Atlas Robots 公司码垛机器人



(b) 丹麦 Universal Robots 公司 UR16e 工业协作机器人

图7 传统机器人与协作机器人



操作员 4.0 的目的是用创新的技术手段扩大操作员的能力并重新定义工人的角色以包容不同工人的特点和偏好,进而促进工作场所的包容性,而不是用机器人来取代工人<sup>[14]</sup>。操作员 4.0 定义的 8 种不同类型的操作员都是与“机器人”合作,只是分工不同。需要注意的是,工业 5.0 植根于工业 4.0 的理念,因此,工业 5.0 将向下兼容工业 4.0 的大部分使能技术,两者不是绝然对立的,而是有交集式的存在。

起初机器人主要用在汽车行业,随着技术的成熟,机器人开始在各行各业得到广泛应用。在 2006 年,汽车行业以外的机器人使用量首次超过了汽车行业。刚开始机器人主要用来减少或消除“3D(Dull、Dangerous、Dirty)工作”,即枯燥、危险和肮脏的工作,发展到今天,机器人不仅被用于大型复杂产品的制造和基础物流设施,而且随着更小、更智能、更容易使用、与人类友好的协作机器人的出现,将在广大企业中得到更广泛的应用<sup>[17]</sup>。

工业 5.0 将是人类与协作机器人协同工作,将彻底改变“机器人”这个词的定义,机器人不仅仅是一个可以执行重复性工作的可编程机器,还将在某些情况下转变为人类的理想伴侣。协作机器人除了可以完成重复性的任务外,还具备学习理解能力,就像学徒一样,机器人将观察和学习人类如何执行任务,一旦他们学会了,机器人就会像人类操作员那样执行所需的任务,值得注意的人与机器人不再是激烈的竞争关系,而是相互协作,人类操作机器不再是冷冰冰地操作,而是更具人情味式的交流协作。

人类与机器人一起工作,不仅没有恐惧,而且心态平和,因为知道他们的机器人同事充分理解他们,并且可以与之开展有效的合作<sup>[20]</sup>。在协作过程中,协作机器人观察人类的表情、行为、动作并结合周围环境的动态变化,利用深度学习驱动的 AI 技术分析推断出操作者下一步将做什么,提前预测并做出合理的响应,做到人机心灵相犀,因此工业 5.0 将给人机交互领域带来前所未有的挑战和机遇。因为它将使机器非常接近人类的日常生活,工业 5.0 将在人机交互和计算认知、分析人类意图方面创造更多的就业机会。工业 5.0 下的人本智造,操作员不仅不用担心失业,

而且将在协作机器人的辅助下从事更多富有创造性和艺术性的工作。通过人机智能化协作,工业 5.0 除了可以提高生产力和运营效率外,还将是环境友好,工伤事故较少,并缩短生产周期。这些协作机器人由先进的智能材料组成,在开发和发明新品种的协作机器人方面,将创造大量的就业机会。

因此,与一般人的直觉相反,工业 5.0 创造的就业机会将远多于它所剥夺的。然而,由于还是发展初期阶段,工业 5.0 目前对如何进行人机协作还没有达成统一的共识,相关法律、法规及伦理道德约束等还远没有完善。相关产业政策应该为人机协作的蓬勃发展提供良好的创新条件,并为其指明方向,以便我们的社会受益,没有人被落下,并且工业界也需要重新思考其(人机协作)在社会中的地位和作用。

### 2.3 人机协作应用案例

人机协作在许多行业已经得到了广泛应用,如智能医疗、制造、智能培训教育、灾难预防及管理等方面,并且还在以较快的速度普及开来,下面例举两个典型的应用场景案例。

#### 2.3.1 人机协作在医疗诊断方面的应用

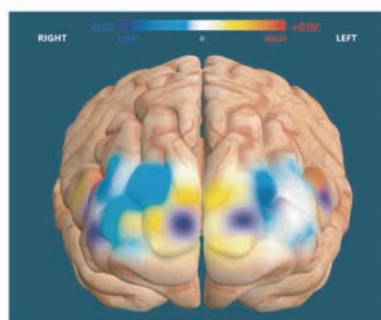
人机协作在医疗诊断方面具有广阔应用前景,尤其是在外科手术方面,可以协助医生精确、高效安全地开展各项手术工作。图 8 是通过智能传感器捕获人脑的活动,并将捕捉到的信号传给协作机器人,从而通过人机协作达到智能诊断的目的。

图 8a 中,医务人员利用头戴式功能性近红外光谱系统(Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)感知人类大脑的活动,该设备具备信号分析、意图预测和前后文逻辑意识等功能,并且是便携式的,更容易设置和使用,图中人的面部模糊主要是为了保护其隐私,医务人员通过 fNIRS 可以控制配备有诊断或手术器械的机械臂。图 8b 是 fNIRS 捕获到的人类大脑的活动。这些数据被传递到深度学习模型以解释医务人员的意图。该设置不需要医务人员与患者在同一个房间,因此,它支持通过网络进行远程诊断。这是工业 5.0 下人机协作的一个典型例子,该例子中并没有将人工操作员(此例指医务人员)从等式中移除,相反,通过利用人的智能(思维、意图及决策等)实现人机智能协作,提高了医疗诊断的

流程效率<sup>[20]</sup>。



(a) 人机协作智能诊疗

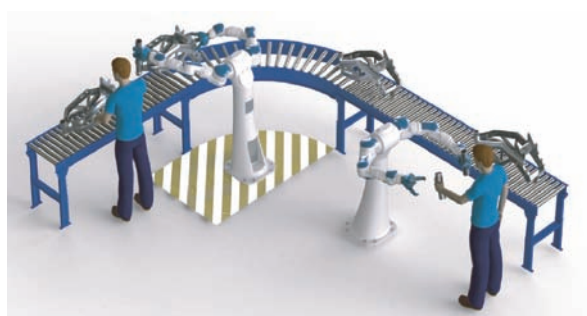


(b) 捕获到的人类脑部活动

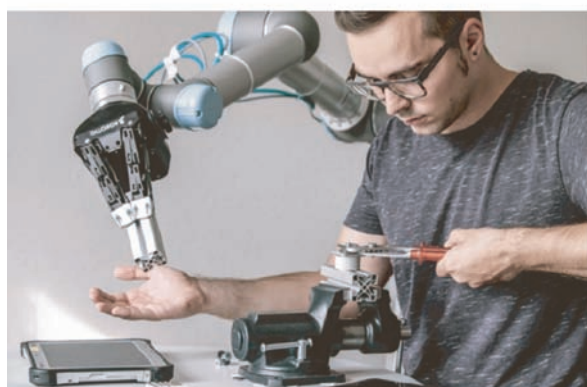
图 8 人机协作医疗诊断应用案例<sup>[20]</sup>

### 2.3.2 人机协同在制造领域中的应用

图 9 所示为人机协同工作在制造领域两个典型应用场景，在人机协作环境中，协作机器人人与人之



(a) 人机协同装配应用场景一



(b) 人机协同装配应用场景二<sup>[31]</sup>

图 9 人机协同装配应用

间没有明显的围栏，而是通过其自身的多传感器、机器视觉等先进技术实现与人的智能安全协作，从而完成零部件的智能组装、检测等复杂工作。在这种人机协作的环境中，将较大地促进工人解决问题的能力，而协作机器人则在执行手头任务时提供力量、耐力和精确度，实现人机智能协同。

协作机器人当前阶段的主要目标依然是安全、快速、高可靠性和高精度地执行重复性任务，随着以深度学习驱动的 AI 技术的发展和工业 5.0 的加快落地应用，协作机器人将具备强大的观察、学习人类的能力，通过分析获得人类的下一步意图并提前作出响应，从而获得更高的效率和降低成本，在更短的时间内提高产量和获得高品质。

## 3 元宇宙背景下人本智造理念

### 3.1 元宇宙与人本智造演化

当今，科技变化形势加快，新概念、新思维、新理念等层出不穷，如何在这种云谲风诡的环境中把握制造业的未来发展趋势并提前布局是一个难点。下面从元宇宙的角度探讨工业 5.0 背景下的人本智造问题。

元宇宙(Metaverse)的理念并不是 2021 年才出现的，其起源于著名科幻小说“Snow Crash”，意思是人以虚拟化身的身份在一个与现实平行的三维虚拟空间中完成人与人、人与社会的交互<sup>[32]</sup>，现实与虚拟世界之间没有明显的界限，虚拟世界的“动作”将对现实世界产生影响，与数字孪生<sup>[33]</sup>有点类似。虽然数字孪生比元宇宙晚出现约 10 年，但是数字孪生相关的体系研究远比元宇宙更完善。数字孪生源于工业界，再拓宽到社会层面。而元宇宙则相反，起源于游戏娱乐等行业(社会)，再逐渐应用到工业，综合来看，数字孪生是元宇宙的子集。

分析元宇宙背景下人本智造演化过程，首先需要理清元宇宙的发展脉络和主要特点。元宇宙之所以在 2021 年兴起，其主要原因有两点：第一，美国社交公司“Facebook”改名为“Meta”，迅速推动了元宇宙这一概念在大众中的普及；第二，多使能技术的铺垫应用为“元宇宙”赋能，如区块链、物联网、AR/VR/MR、数字孪生等。Web、工业革命、制造模式及操作员类型演化对应关系如图 10 所示。

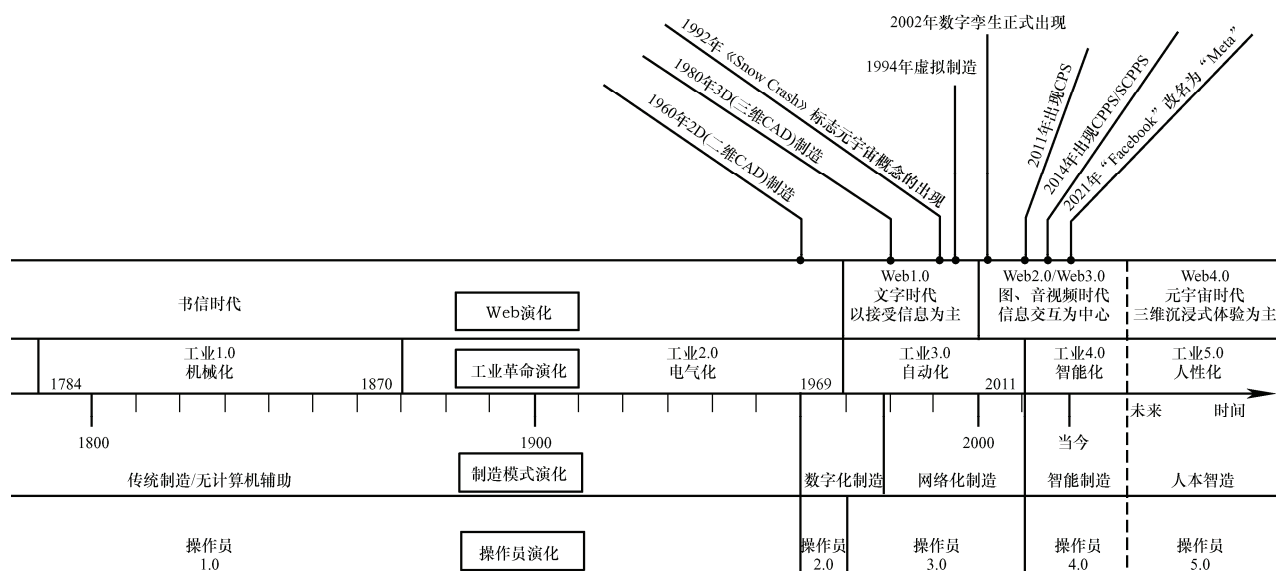


图10 Web、工业革命、制造模式及操作员演化对应关系图

### 3.2 元宇宙赋能人本智造

面向工业 5.0 的人本智造的核心是以人为本,这个“人”不仅包括生产者还将进一步拓展到消费者,从而实现产消融合。第一方面,通过人机智能协作,充分解放工人的体力,使“年老体弱”劳动力重新回到工厂,可以缓解因人口老龄化导致的劳动力人口减少问题;第二方面,随着元宇宙时代的到来,借助先进的虚实交互设备,设计和生产通过各种传感器实现数据互连互通,为用户提供他们所需的个性产品,用户对产品的体验感将大大提高,反之,生产者可以实时获取消费者的动态反馈,为生产者提供源源不断的创新来源,实现产消协同创新;第三方面,面向工业 5.0 时代的人本智造,工人与协作机器人的合作大部分情况下还需要在共同的物理空间内执行,随着元宇宙时代的来临,届时,人可在协作机器人工作空间之外的任意地方完成产品生产加工,通过先进的感测设备获得工人的生产制造意图,协作机器人将迅速“领会”到人类的意图并执行具体的加工作业。工人通过先进的虚实交互设备完成对协作机器人所在的物理空间的精准控制。届时,与制造相关的工作都将在与现实平行的另一个世界完成,并将影响到物理世界,实现虚拟与现实的真正互联互通。

### 3.3 “人本智造元宇宙”探索

随着元宇宙各项底层技术不断取得进步、突破、融合,元宇宙的应用范围将不断往工业、产业各领域延伸,工业(产业)互联网拓展演化为工业(产业)元宇宙,各个行业都从其自身角度,为元宇宙赋予了不同的含义,下面以元宇宙视角对“人本智造元

宇宙”进行简要探讨。

元宇宙发端于娱乐、游戏等社会行业,作为一种新的互联网应用生态系统,融合了多种新技术,其作为一种起源于社交、娱乐等行业的新型社会形态,具有“社会性(Sociality)”的天然特性,包括经济制度、文化制度、法律制度等,与现实世界密切相关,但又有其自身的特点。作为与现实世界平行且紧密联系的虚拟世界,元宇宙还具有“超时空性(Hyper spatiotemporality)”的特点,所谓“超时空性”是指元宇宙是一个与现实世界完全平行的虚拟世界,它打破了时间和空间的界限,为用户提供开放、自由和沉浸式的体验<sup>[34]</sup>。因此,利用元宇宙具有的“社会性”和“超时空性”可以很好地将其拓展到“人本智造元宇宙”研究中。

工业互联网在实现智能制造的过程中起着关键性作用,而“人本智造元宇宙”则是智能高效打通企业的研发、生产、销售、服务、终端客户反馈五大场景并形成优质、高效、闭环迭代优化的关键手段,并秉持以人为中心的“初心”,围绕这五大场景构建三维沉浸式的虚拟场景,模拟其在真实环境状态下产生价值的全生命周期过程。借助数字孪生、平行系统(Parallel system)、AR/VR/MR、脑机接口等虚实融合交互技术,企业将自身打包成为一座与现实工厂数据同步的虚拟工厂,进而实现企业全要素、全业务、全流程的可视、可析、智能化运行及精准管控的“元宇宙”应用,极大减少了实体的运营维护、生产成本,提升了生产效率,从而实现绿色可持续智造,进而迈向“人本智造元宇宙”时代。

需要指出的是,数字孪生作为元宇宙的子集,

是打开“人本智造元宇宙”的关键之钥，因此，从某种意义上也可以说元宇宙是“广义数字孪生”。数字孪生的最显著特点是依据孪生数据、虚拟模型实现对“物理实体”的动态仿真。而(工业)元宇宙则具有“社会性”、“超时空性”等特性，不仅可以实现对真实世界的三维沉浸式平行映射，而且可以实时优化完善智能制造的各个过程，可以实现更广泛意义上的同步与迭代优化，可验证设计、制造及加工方案中流程、产线和设备结构的合理性，发现潜在问题，并针对性地提出改进建议，同时消费者通过 AR/VR/MR、脑机接口等先进的虚实交互设备可以随时参与到产品设计生产的各个环节，实现产消协同创新；而结合人本智造的理念，为制造全价值链上的所有参与者、利益相关者提供更具体验感、互动性及人文性的制造感受。由此可见，数字孪生在“人本智造元宇宙”未来应用场景中具有极强的可塑性和潜在应用前景。

科技的发展、制造范式的转变应该以服务、造福人类为宗旨，关注所有参与制造者的体验感、成就感及幸福感。因此，如果说由智能制造演变为“智造元宇宙”是元宇宙相关使能技术驱动的结果，那么由“智造元宇宙”演化蜕变为“人本智造元宇宙”则是由以人为中心的制造理念推动，这与所探讨的以人为本的智能制造理念殊途同归。

## 4 展望

工业 5.0 已经在许多方面开展实例应用，譬如新冠疫情的治疗防控<sup>[35]</sup>、整形外科手术<sup>[36]</sup>等医学方面，还有仿生学和合成生物学<sup>[37]</sup>等生物经济方面，甚至区块链等数据安全方面也有应用<sup>[38]</sup>，但是在制造方面的应用还较少。主要有三个方面的原因：一方面是工业 5.0 本身的概念还在不断完善中，还没有一个统一的概念；第二方面是，目前对工业 5.0 展开研究的人还较少，尤其是国内，目前可供参考的研究资料还太少；最后一方面，人们普遍对工业 4.0 的未来发展前景持乐观态度，因为它可以提高生产效率，这意味着投资工业 4.0 相关产业在短期内就会有回报。而工业 5.0 主要围绕的是“人”、社会、自然的需求，对利益相关者的吸引力也可能较小，因为他们可能不得不接受短期内的损失以实现以人为中心、可持续性和弹性的长期目标。因此工业 5.0 的内涵超越了为盈利而生产商品和服务的范围，是一种更高层次的对人、自然、社会等方面哲学性和存在性的思考，其将触及人类存在的本质、人与自

然的关系等<sup>[39]</sup>。

工业 5.0 是工业 4.0 的补充和完善，是一个渐近的但却十分有必要的进化过程，富有远见的卓识者、思想家或观察家一定会提前布局，因为这是一个真正围绕以人为中心的工业模式，面向个人日益增长的自我实现和个性化需求的时代，自我价值的实现、个性化的需求必将越来越强烈。围绕工业 5.0 背景下的人本智造还需要解决以下几个方面的问题。

(1) 学习与机器愉快相处。随着机器开始接管人类的部分工作，人类将专注于需要创造力、艺术性、研究和发展的工作，然而，因为被机器接管工作的这一部分人不太可能马上具备承担需要创造力的工作，因此工业 5.0 时代下的人机协作相关的教育、培训将变得越来越重要。技术的发展速度应该与技术需求的发展速度一致。然而，目前的问题是，技术的发展速度远远超过人类技能提升的速度，目前很多国家都在解决技能短缺的问题，而目前的教育和培训机构却不能很好地应对这一需求，很多年轻人觉得没有充分掌握未来劳动力市场所需的技能。解决技能需求与技能不匹配的问题，可以从两个方面展开。一方面，发展新的难度较低的技术，而这种新技术对工人技能水平的要求较低，这样工人就不需要特定的技能来使用它。另外一种方法，是新技术的开发与培训工作同时开展，从而确保现有的技能组合与工业的技能需求更加匹配。显然，第二种方法更适合未来技术快速变革的时代，除了此类培训之外，工人的技能还会过时，将面临技能再培训的问题，这同样也值得思考。此外，面对日新月异的世界，科技迅速迭代更新，不同学科之间的交叉联系正在成为新技术的核心，学科交叉研究应用将会越来越多，应该提倡终身学习和跨学科方面的培训，以应对科技变化及多学科交叉应用带来的挑战。总之，不仅协作机器人在未来与人类协同工作时要通过观察、学习分析人类的意图，人类也需要时间来学习和习惯与机器合作相处，这将是你跟你的机器人同事相互学习进步的一个过程。

(2) 人机协作面临的道德问题。勤奋、敬业、诚实和乐于助人是人们对员工的道德行为期许。机器人相较于人类来说，具备无私、不知道懒惰、不会撒谎、没有野心、工作状况稳定、任劳任怨等诸多优点，人类与机器人在这些方面可能无法竞争，并且这些肯定会对当前工作价值观产生影响。必须考虑采用协作机器人所涉及到的道德问题，从而避免大规模应用后产生的潜在弊端和负面社会影响。未来的人机协作，工作规范如何发展很难预测，亟



需这方面的道德规范来定义人类和机器之间的交互问题。

在走向人机共生的人本智造时,需要妥善处理好人与协作机器人的关系,必须保持人在其中的主体地位,切勿缘木求鱼、舍本逐末。同时,应该重视人机协作带来的道德风险,提前做好研判和预防工作,发挥主动性,构建和谐的人机共生关系,充分挖掘出人类和协作机器人的潜力,产生强大的聚合效应,满足人类对未来美好生活的追求和向往,实现人机和谐发展<sup>[40]</sup>。

(3) 协作机器人选择的问题。未来协作机器人的种类、数量会越来越多,深入应用到人类生活的方方面面,就像当今手机对人类的影响一样,未来的“人机(人-协作机器人)”关系将发展为类似今天的“人机(人-手机)”关系,即未来你跟协作机器人的相处类似于你今天与你的手机相处一样,每时每刻都要与之交互,就像你的一个亲密朋友一样。随着协作机器人数量及种类的提升,首先,这是机器人制造商的一个巨大发展机会,能制造人类喜欢、安全的机器人公司将获得巨大的发展机会,并在未来激烈的市场环境中获得先机;其次,选择何种类型的机器与人协作也是一个值得思考的问题。目前的协作机器人大体可以分为两类,一类是具有机器学习能力的协作机器人。这类协作机器人在某些情况下会提前预测人类的下一步行为,具有一定的优势,但是基于机器学习的协作机器人可能会表现出不可预知的行为,这是由机器学习的特性决定的。如果这种不可预测的行为经常发生,那么人类将不愿意将重要的任务分配给机器人,甚至某些人会拒绝与机器一起工作;另一类协作机器人是那些不具备学习能力的机器人(基于规则的机器人),这类机器人的行为是可预测的,然而,他们的学习能力将受到限制,因此其适应范围较窄,可能不能适用于复杂的工作环境。因此,未来人类将在这两类机器人类型之间进行权衡取舍。

(4) 元宇宙时代提前布局。当今世界,科技的发展速度远远超过大多数人的想象。预测未来本来就是一件极具难度的事,我们能做的事是提前规划,做到未雨绸缪,这样才能在未来激烈的竞争环境中立于不败之地。同样,谁也无法预测未来的元宇宙会如何发展,但是我们可以提前布局元宇宙相关的技术,新范式的出现一般是建立在之前多项技术取得突破的基础之上的,从量变引起质变。多项使能技术的累积必将导致时代范式的革命,未来也许是元宇宙时代,也许是另外一种新的时代。不管如何

发展,诸如 6G、AI、云技术和边缘计算等底层科技应该得到进一步发展,其次像虚实交互的相关硬件技术或平台,如 AR、VR、MR 和脑机接口、CPU、GPU 等应该提前布局,这对于未来的时代将非常重要,最后还有支持虚实交互的相关软件及应用也将得到重视。

## 5 结论

技术的发展是为了更好地服务人类,也就是说,用于制造业的技术要适应行业工人的需求和多样性,要创造一个安全和包容的工作环境,优先考虑工人的身心健康和福祉,并最终保障人的基本权利,即自主权、人类尊严和隐私等。技术进步的目的不是引起人们对技术进步的担忧和畏惧,而是为了更好地服务人类,为人类生活生产带来便利。

工业 4.0 模式目前正在如火如荼地开展着,其有效地促进了生产效率、生产力的提升和流程的优化,但是它却忽略了“人”这一最重要的主体。鉴于此,有些有识之士前瞻性地提出了以人为中心的工业 5.0 概念,工业 5.0 的三个核心要素是人、自然及工业弹性。由技术驱动的工业 4.0 转变为价值驱动的工业 5.0 体现着工业制造越来越人性化,越来越具有人情味。工业 5.0 围绕“人”这一重要主体展开,实现工业 5.0 人本智造的重要方式是人机智能协作,人与机器相互学习合作是未来大的发展趋势。

对工业 5.0 背景下的人本智造进行了概要性研究,主要从工业革命演化、工业 5.0 背景下人本智造研究、元宇宙背景下人本智造演化等角度展开详细论述,最后进行了四个方面的展望。

制造(工业)范式的转变一般都伴随着社会需求、共性认知、思维方法及价值观的转变,新旧两种范式可以同时共存而不是绝然对立的<sup>[4]</sup>。因此,在未来若干年时间内,工业 4.0 与工业 5.0 将同时存在。即便如此,工业 5.0 将带来行业对人性回归制造业的思考并引起人机协作相关的道德规范、法律法规的转变,从根本上改变我们对制造业的态度和认知,应该提早布局相关使能技术,争取在未来激烈的市场环境中取得先发优势。

## 参 考 文 献

- [1] TANG C S, VEELENTURF L P. The strategic role of logistics in the industry 4.0 era[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,

- 2019, 129: 1-11.
- [2] LASI H, FETTKER P, KEMPER H G, et al. Industry 4.0[J]. Business & Information Systems Engineering, 2014, 6(4): 239-242.
- [3] HAN J, WU S, ZHANG X. Artificial intelligence and industry 5.0[J]. Artificial Intelligence and Robotics, 2017, 6(4): 135-140.
- [4] 马南峰, 姚锡凡, 王柯赛. 面向未来互联网的智慧制造研究现状与展望[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(1): 55-75.
- MA Nanfeng, YAO Xifan, WANG Kesai. Current status and prospect of future Internet oriented wisdom manufacturing[J]. Sci. Sin. Tech., 2022, 52(1): 55-75.
- [5] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 11-23.
- TAO Fei, QI Qinglin. Service-oriented smart manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 11-23.
- [6] WITTENBERG C. Human-CPS Interaction-requirements and human-machine interaction methods for the Industry 4.0[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(19): 420-425.
- [7] FANTINI P, TAVOLA G, TAISCH M, et al. Exploring the integration of the human as a flexibility factor in CPS enabled manufacturing environments: Methodology and results[C]//IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2016: 5711-5716.
- [8] 王柏村, 黄思翰, 易兵, 等. 面向智能制造的人因工程研究与发展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(16): 240-253.
- WANG Baicun, HUANG Sihan, YI Bing, et al. State-of-art of human factors/ergonomics in intelligent manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(16): 240-253.
- [9] ZHOU J, ZHOU Y, WANG B, et al. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2019, 5(4): 624-636.
- [10] 景轩, 姚锡凡. 走向社会信息物理生产系统[J]. 自动化学报, 2019, 45(4): 637-656.
- JING Xuan, YAO Xifan. Towards social cyber physical production systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(4): 637-656.
- [11] 姚锡凡, 练肇通, 杨屹, 等. 智慧制造: 面向未来互联网的人机物协同制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(6): 1490-1498.
- YAO Xifan, LIAN Zhaotong, YANG Yi, et al. Wisdom manufacturing: new humans-computers-things collaborative manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(6): 1490-1498.
- [12] 王柏村, 薛源, 延建林, 等. 以人为本的智能制造: 理念、技术与应用[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 139-146.
- WANG Baicun, XUE Yuan, YAN Jianlin, et al. Human-centered intelligent manufacturing: Overview and perspectives[J]. Strategic Study CAE, 2020, 22(4): 139-146.
- [13] 刘培基, 刘飞, 王旭, 等. 绿色制造的理论及技术体系及其新框架[J]. 机械工程学报, 2021, 57(19): 165-179.
- LIU Peiji, LIU Fei, WANG Xu, et al. The theory and technology system of green manufacturing and their new frameworks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(19): 165-179.
- [14] BREQUE M, DE NUL L, PETRIDIS A. Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry[R]. Luxembourg, LU: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2021.
- [15] RAY C, MONDADA F, SIEGWART R. What do people expect from robots?[C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France: IEEE, 2008: 3816-3821.
- [16] PETROVIĆ G. Marx's theory of alienation[J]. Philosophy and Phenomenological Research, 1963, 23(3): 419-426.
- [17] ØSTERGAARD E. Welcome to Industry 5.0[J]. Quality, 2019, 58(5): 36-39.
- [18] 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/OL]. 机械工程学报: 1-13[2021-12-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211203.1427.032.html>.
- ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, ZHANG Lei. Connotation, Architecture and Enabling Technology of Industrial 5.0[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering: 1-13[2021-12-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211203.1427.032.html>.
- [19] ÖZDEMİR V, HEKİM N. Birth of industry 5.0: Making sense of big data with artificial intelligence, "the internet of things" and next-generation technology policy[J]. Omics: A Journal of Integrative Biology, 2018, 22(1): 65-76.
- [20] NAHAVANDI S. Industry 5.0—A human-centric solution[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4371.
- [21] DEMİR K A, DÖVEN G, SEZEN B. Industry 5.0 and

- human-robot co-working[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 158: 688-695.
- [22] 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.
- [23] CARAYANNIS E G, DRAPER J, BHANEJA B. Towards fusion energy in the Industry 5.0 and Society 5.0 context: Call for a global commission for urgent action on fusion energy[J]. *Journal of the Knowledge Economy*, 2021, 12(4): 1891-1904.
- [24] DI NARDO M, YU H. Special issue “industry 5.0: The prelude to the sixth industrial revolution”[J]. *Appl. Syst. Innov.*, 2021, 4(3): 45.
- [25] SKOBELEV P O, BOROVIK S Y. On the way from Industry 4.0 to Industry 5.0: From digital manufacturing to digital society[J]. *Industry 4.0*, 2017, 2(6): 307-311.
- [26] XU X, LU Y, VOGEL-HEUSER B, et al. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 61: 530-535.
- [27] ROSENBAUM M S, RAMIREZ G C, CAMPBELL J, et al. The product is me: Hyper-personalized consumer goods as unconventional luxury[J]. *Journal of Business Research*, 2021, 129: 446-454.
- [28] 贾计东, 张明路. 人机安全交互技术研究进展及发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3): 16-30.
- JIA Jidong, ZHANG Minglu. Research progress and development trend of the safety of human-robot interaction technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(3): 16-30.
- [29] MICHAELIS J E, SIEBERT-EVENSTONE A, SHAFFER D W, et al. Collaborative or simply uncaged? understanding human-cobot interactions in automation[C]//*Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York: Association for Computing Machinery, 2020: 1-12.
- [30] ROMERO D, STAHR J, WUEST T, et al. Towards an operator 4.0 typology: A human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies[C]//*proceedings of the international conference on computers and industrial engineering (CIE46)*. Tianjin, China, 2016: 29-31.
- [31] GERVASI R, MASTROGIACOMO L, FRANCESCHINI F. A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108: 841-865.
- [32] DUAN H, LI J, FAN S, et al. Metaverse for social good: A university campus prototype[C]//*Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia*. New York: Association for Computing Machinery, 2021: 153-161.
- [33] ZHOU G, 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.
- [34] NING H, WANG H, LIN Y, et al. A survey on metaverse: The state-of-the-art, Technologies, applications, and challenges[J/OL]. [2022-01-09]. <http://Grxiv.org/abs/2111.09673.pdf>.
- [35] JAVAID M, HALEEM A, SINGH R P, et al. Industry 5.0: Potential applications in COVID-19[J]. *Journal of Industrial Integration and Management*, 2020, 5(4): 507-530.
- [36] HALEEM A, JAVAID M. Industry 5.0 and its applications in orthopaedics[J]. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 2019, 10(4): 807.
- [37] SACHSENMEIER P. Industry 5.0—the relevance and implications of bionics and synthetic biology[J]. *Engineering*, 2016, 2(2): 225-229.
- [38] RUPA C, MIDHUNCHAKKARAVARTHY D, HASAN M K, et al. Industry 5.0: Ethereum blockchain technology based DApp smart contract[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2021, 18(5): 7010-7027.
- [39] MADSEN D Ø, BERG T. An exploratory bibliometric analysis of the birth and emergence of industry 5.0[J]. *Applied System Innovation*, 2021, 4(4): 87.
- [40] 王晓丽, 徐鑫钰. 人工智能的道德风险及其治理[J]. *华南理工大学学报*, 2020, 22(2): 10-17, 2.
- WANG Xiaoli, XU Xinyu. The moral hazard of artificial intelligence and its governance[J]. *Journal of South China University of Technology*, 2020, 22(2): 10-17, 2.

作者简介: 马南峰, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为复杂系统和网络科学、智能制造。

姚锡凡(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字制造、集成制造、智能控制和智能制造。

E-mail: mexfyao@scut.edu.cn

陈飞翔, 男, 1990 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为航空设备设计与制造。

俞鸿均, 男, 1991 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为智能制造。

王柯赛, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能机器人。