

以人为本的智能制造：理念、技术与应用

王柏村^{1,2}，薛源¹，延建林¹，杨晓迎¹，周源³

(1. 中国工程院战略咨询中心，北京 100088；2. 密西根大学机械工程系，密西根州安娜堡 48109；
3. 清华大学公共管理学院，北京 100084)

摘要：人是制造生产活动中最具能动性和最具活力的因素，智能制造最终需回归到服务和满足人们美好生活需求上来。本文基于人-信息-物理系统（HCPS）智能制造发展理论，提出以人为本的智能制造（人本智造）的基本概念，并从发展背景、基本内涵、人的因素、技术体系、应用实践等方面对人本智造进行了分析探讨。研究指出，人本智造体现了智能制造发展的一种重要理念，同时也是新一代智能制造系统的一个重要技术方向。在此基础上，针对人本智造从政策、企业、科研 3 个层面提出了若干建议：及时对接国家相关战略、企业将“以人为本”作为发展智能制造的重要理念、重视智能制造系统中人因工程的研究等，以促进以人为本的智能制造在我国的发展和应用。

关键词：以人为本；新一代智能制造；人-信息-物理系统；人本智造

中图分类号：TP11；TH16；TB18 **文献标识码：**A

Human-Centered Intelligent Manufacturing: Overview and Perspectives

Wang Baicun^{1,2}, Xue Yuan¹, Yan Jianlin¹, Yang Xiaoying¹, Zhou Yuan³

(1. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 2. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109, United States; 3. School of Public Policy & Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Human is the most dynamic factor in a manufacturing system; no matter how advanced intelligent manufacturing would be, it should meet humans' needs and serve for a better life. Based on the theory of human-cyber-physical systems (HCPS) in the context of intelligent manufacturing, the concept of human-centered intelligent manufacturing (HCIM) is firstly proposed in this work. HCIM is discussed from the aspects of background, connotation, human factors, technical system, and practical applications. It clarifies that HCIM not only reflects an important perspective, but also represents one of the significant research directions of intelligent manufacturing. On this basis, several suggestions are recommended from policy decision-making, enterprise development, and scientific research levels, including linking HCIM with relevant national strategies, regarding HCIM as a key concept for enterprises' development, and enhancing research on human factors/ergonomics in intelligent manufacturing systems. It's expected that this work can provide a reference to promote HCIM development and applications in China.

Keywords: human-centered; new-generation intelligent/smart manufacturing; human-cyber-physical systems (HCPS); human-centered intelligent manufacturing (HCIM)

收稿日期：2020-05-15；修回日期：2020-07-14

通讯作者：周源，清华大学公共管理学院副教授，研究方向为公共政策、创新管理；E-mail: zhou_yuan@tsinghua.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“制造强国战略研究（三期）”（2017-ZD-08）；中国博士后国际交流计划派出项目（20180025）；中国博士后科学基金项目（2018M630191）

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

当今世界正处于百年未有之大变局，特别是新一代信息技术与制造技术的持续深度融合，深刻改变着全球制造业的发展形态。面对以智能制造技术为核心的新一轮科技革命与产业变革，世界各国或地区都在积极采取行动 [1,2]，推动制造业转型升级，以确保本国制造业在未来工业发展中占据有利地位（见表 1）。其中，智能制造成为各个国家或地区构建本地域制造业竞争优势的关键选择。与此同时，各国学术界和产业界也较多开展相关研究，为推进智能制造相关战略计划提供理论基础 [1~5]。

近年来，我国不断加快智能制造领域的发展步伐。《中国制造 2025》明确提出，以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向，按照“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”方针，实现制造业由大变强的历史跨越 [1]。2017 年，国务院发布的《新一代人工智能发展规划》详细阐述了人工智能（AI）的新特征，明确提出智能制造是新一代 AI 的重要应用方向。我国学术界提出了人-信息-物理系统（HCPS）的智能制造发展理论，并在此基础上分析了智能制造的范式演变，指明了未来 20 年我国智能制造的发展战略和技术路线 [1~3]。

基于 HCPS 的智能制造发展理论，以人为本

的智能制造（人本智造）正逐渐引起学界和业界的普遍关注，有望成为智能制造的重要发展方向。本文着重分析人本智造的发展背景，阐述人本智造的内涵与技术体系，研究人本智造的应用实践，并在此基础上提出推动人本智造发展的对策建议。

二、人本智造的发展背景

制造是人运用工具将原材料转化为能够满足人们生产生活需要的产品和服务的过程。智能制造是提高这种转化效率和质量的手段，但智能制造不能为了智能而智能，而是要回归到服务和满足人们美好生活需求上来。因此，在整个制造生产活动中，人始终是最具有能动性和最具有活力的因素。

（1）人是智能制造的最终服务目标。智能制造借助新的生产技术、生产方式的变革，进而实现更快、更灵活、更高效地为消费者提供各种优质产品和服务。随着新一代信息技术的快速发展，特别是移动互联网、传感器、大数据、超级计算、工业互联网、物联网、AI、机器学习、协作机器人、虚拟现实和增强现实（VR/AR）等数字化网络化智能化技术，为人本智造提供了重要的技术支撑。同时，随着消费者个性化需求的不断提升，企业为了获得更多的市场份额、提高市场竞争力，

表 1 世界各国或地区发布的工业 / 制造业战略计划

时间/年	国家/地区	名称
2008	欧盟	未来工厂（Factories of the Future）
2011	美国	“先进制造业伙伴”计划（Advanced Manufacturing Partnership）
2012	美国	工业互联网（Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines）
2013	德国	工业 4.0（Industrie 4.0）
2013	英国	工业 2050 战略（The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK）
2014	韩国	制造业创新 3.0 战略（Manufacturing Industry Innovation 3.0 Strategy）
2015	中国	《中国制造 2025》
2015	法国	未来工业计划（Industrie du Futur）
2016	日本	智能社会 5.0（Society 5.0）
2018	美国	美国先进制造领先战略（Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing）
2019	德国	国家工业战略 2030（Nationale Industriestrategie 2030）

注重坚持以用户为中心，通过运用先进技术和变革组织管理方式，不断满足消费者的个性化需求。因此，面对多样化的市场需求，考虑到技术经济性和就业等因素，推进智能制造必须坚持“以人为本”的理念。

(2) 人在智能制造实施过程中扮演关键角色。工业机器人是智能制造的重要组成部分，而传统工业机器人存在一些不足，目前尚未充分满足新的市场需求。例如，传统机器人部署成本较高，单独的机器人无法直接用于工厂的生产线，仍需诸多外围设备的配套支持；虽然机器人本身具有较高的柔性和灵活性，但整个生产线的柔性一般较差。另外，中小企业限于资金条件，难以对生产线进行大规模改造，且对产品的投资回报率更为敏感，这就要求机器人具有较低的综合成本、快速的部署能力、简便的使用方法，但目前很难在成本可控的情况下给出满意的解决方案。如果由人类承担对柔性、触觉、灵活性等要求比较高的工作环节，机器人则利用其快速精准的优势来负责重复性和程序化的工作环节，那么这种人机协作将会为中小企业提供一个较好的解决方案。此外，如果通过机器人技术增强劳动力水平达到降低成本和提高竞争力的目的，还可以为社会创造更多的工作机会。

(3) 人在未来智能制造发展过程中将继续发挥重要作用。智能制造的实际需求在不同行业或不同企业之间存在着较大差异，并不是所有行业、所有工厂都需要完全自动化或完全无人化，因而推进智能制造需考虑技术经济性的问题。例如，与汽车行业不同，航空、航天、船舶和建筑等行业由于任务和过程复杂性，目前尚未实现完全自动化和无人化，而是更多地依赖人机合作、人的知识经验的积累以及人的主观能动性的发挥。因此，制造的未来并不是追求纯粹的无人工厂，而是要以人为核心，使人在先进技术的支持下从事更有价值、更有乐趣的工作，同步为企业带来更好的经济效益。

三、人本智造的内涵与技术体系

人本智造，就是将以人为本的理念贯穿于智能制造系统的全生命周期过程（包括设计、制造、管

理、销售、服务等），充分考虑人（包括设计者、生产者、管理者、用户等）的各种因素（如生理、认知、组织、文化、社会因素等），运用先进的数字化网络化智能化技术，充分发挥人与机器的各自优势来协作完成各种工作任务，最大限度实现提高生产效率和质量、确保人员身心安全、满足用户需求、促进社会可持续发展的目的。

人本智造体现的是一种重要的发展理念，同时代表了未来智能制造发展的一个重要方向。人本智造并不特指某个单一的制造模式或者范式，在其发展进程中还会出现大量的制造新模式、新业态，如共享制造、社会化制造、可持续制造等。目前对人本智造的研究尚处于起步阶段，但可以预计，相关定义、内涵和特征仍将不断演化拓展。

（一）智能制造中人的因素

从智能制造全生命周期 [6] 的角度来看，智能制造中的人的因素包括人的作用、人机关系、人体工效学、认知工效学、组织工效学（见图 1），具体阐述如下。

1. 人的作用

人的作用主要体现为人在智能制造系统中的不同角色、作用及工作类型等。从智能的角度看，人的作用集中体现在知识创造和流程创造方面，正是基于人的经验、才智、知识等的持续沉淀和不断实践，制造的智能水平才得以不断优化和提升。

国内外学者对智能制造中人的关键地位、决定性作用以及人的因素的重要性进行了分析，认为只

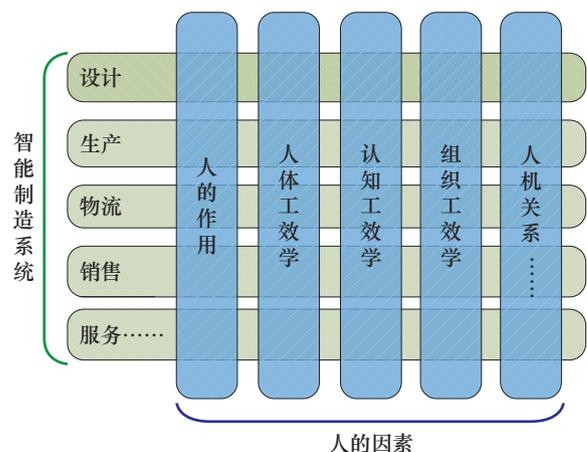


图 1 智能制造系统与人的因素

有将先进技术、人和组织集成协同起来才能真正发挥作用，进而产生效益 [7,8]。周济等 [1,2] 提出了 HCPS 的概念，认为在 HCPS 中人起着主宰作用：物理系统和信息系统都是由人设计并创造出来的，分析计算与控制的模型、方法和准则等都是由研发人员确定并固化到信息系统中的，整个系统的目的是为人类服务，人既是设计者、操作者、监督者也是智能制造系统服务的对象。美国通用电气公司在其工业互联网报告中指出，人是工业互联网中的重要要素之一 [4]。Nunes 等 [9] 认为，人在信息-物理系统 (CPS) 中的作用包括数据获取、状态推断、驱动、控制、监测等方面。Madni 等 [10,11] 认为，HCPS 中人的作用包括人不在控制回路的监测、人不在控制回路的监测指导、人在回路的控制。Jin 等 [12] 将 HCPS 中人的角色总结为操作者、代理人、用户以及传感终端等。

2. 人机关系

人机关系指人类在生产生活过程中，持续改造自然、社会和人类本身，并与劳动对象和生产工具发生联系，如人机交互、人机合作等。在智能制造系统人的因素研究中，通常会涉及人机关系问题，目前国际上的代表性工作有人与机器人的关系问题、第四代操作工 (Operator 4.0)、人与 CPS 的关系研究以及以人为中心的智能制造系统研究等。例如，Romero 等 [13] 在 HCPS 语义下提出了 Operator 4.0 概念并展望了发展前景，认为 Operator 4.0 理念有助于实现人机共生和可持续制造。Operator 4.0 具体分为：分析操作工、增强现实操作工、协作操作工、健康操作工、智能操作工、社交操作工、超强操作工和虚拟操作工等 [14]。

国内外研究均高度重视智能制造系统中人的不可替代作用，同时阐述了智能制造系统中人的作用和人机关系等研究的重要意义。随着制造系统智能化的推广应用，人在整个系统中的角色将逐渐从“操作者”转向“监管者”，成为影响制造系统能动性最大的因素。在劳动力有限、人力成本增加的情况下，有必要优化人员配置，改进人工操控与机器运作之间的匹配性，进而实现高效协作。

3. 人因工程 / 人类工效学

人因工程 / 人类工效学，指综合运用生理

学、心理学、计算机科学、系统科学等多学科的研究方法和手段，致力于研究人、机器、工作环境之间的相互关系和影响规律，以实现提高系统性能，确保人的安全、健康和舒适等目标的学科 [15]；可细分为人体工效学、认知工效学和组织工效学等。

人因工程 / 人类工效学主要有三方面的研究内容。①传统的人体工效学研究包括工作姿势、重复动作、工作地点布局、工作疾病、员工安全等；而在智能制造系统中，人体工效学研究涉及部分工作和动作自动化、人的安全、可穿戴设备等 [16]。②认知工效学关注的是心理过程，研究内容包括脑力负荷、决策、工作压力、人的可靠性以及技能表现等；在智能制造语义下，相关研究进展包括虚实融合、信息技术减轻认知压力、技术储备等 [17~19]；此外，感知、模拟仿真、AI、云计算、大数据、数字孪生等技术发展的主要目的也是在于提高或模拟增强人的各种认知能力，因而也属于认知工效学的研究范畴。③组织工效学关注的是社会技术系统的优化，包括工作设计、人员资源管理、团队合作、虚拟组织以及组织文化等内容；在智能制造系统中，相关研究进展包括组织结构扁平化、更新工作设计方式、产用融合等。

(二) 人本智造的技术体系

基于 HCPS 理论，本文提出的人本智造的三层参考架构如图 2 (a) 所示，包含单元级智能制造、系统级智能制造、系统之系统级智能制造。其中，单元级智能制造的技术体系如图 2 (b) 所示，主要包括机器智能技术（如智能感知、智能决策、智能控制、学习认知等）、制造领域技术（如切削加工、焊接、增材制造等）、人机协同技术 / 人机关系三方面。在单元级智能制造的基础上，通过工业网络集成、物联网、智能调度、工业互联网、云平台等技术，可构建系统级、系统之系统级智能制造（如智能车间、智能产线、智能工厂等），从而实现制造资源与人力资源在更大范围上的优化配置。

在人本智造系统中，信息系统主要是与人一起，对物理系统进行必要的感知、认知、分析决策与控制，从而使物理系统（如机器、加工过程等）

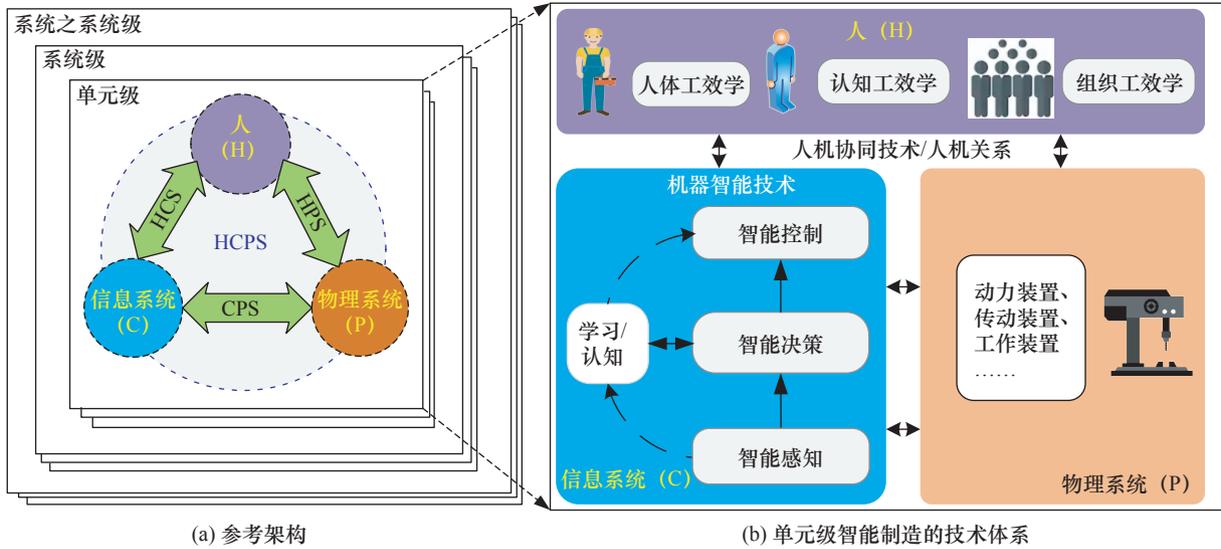


图2 人本智造的技术体系示意图 [2, 3, 5]
注：HPS表示人-物理系统；HCS表示人-信息系统。

以尽可能最优的方式运行，包括认知层面、决策层面以及控制层面的人机协同等；还需考虑人体工效学、认知工效学、组织工效学等内容。人本智造的相关技术主要有以人为本的设计、控制、AI、计算、自动化、服务、管理等。其中，以人为本的设计也称“参与式设计”，在设计中注重人的思维、情感和行为，是一种创新性的解决问题的方法；始终关注最终用户的需求，并将其作为数字设计过程的中心。以人为本的AI则强调AI的发展应以AI对人类社会的影响为指导，更多融入人类智慧的多样性、差异性和深度性，以增强人类技能而非取代人类。

四、人本智造的应用实践

人本智造是一个大系统，可从产品、生产、模式、基础4个维度来进行认识和理解。其中，以人为本的智能产品是主体，以人为本的智能生产是主线，以人为本的产业模式变革是主题，HCPS和人因工程是基础（见图3）。在前文阐述人因工程和HCPS的基础上，聚焦应用层面，对以人为本的智能产品、以人为本的智能生产、以人为本的产业模式变革展开讨论。

（一）以人为本的智能产品

智能制造的主体包括产品、制造装备，其中

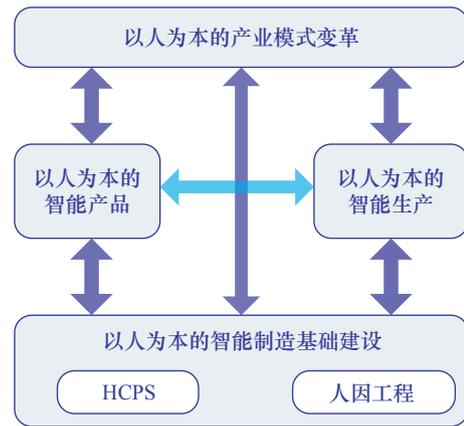


图3 “人本智造”的4个维度

产品是智能制造的价值载体，制造装备是实施智能制造的前提和基础。这里的“以人为本”指智能产品和装备的服务目的在设计之初就应充分考虑人的需求和人的因素，尤其是直接面向广大消费者的智能产品。同时，在智能工业装备的设计之初需要充分考虑人工干预的可能情况，在设计上留有权限和空间。

例1：某品牌手机。该公司采用“互联网开发”模式引领了“创客”设计模式的新潮流，成为目前按销售额计算成长最快的公司之一，2018年销售额超过1700亿元。基于“互联网开发”模式，研发人员通过微博、微信、论坛等渠道汇集用户需求并对产品进行改进；手机系统80%的更新需求是根

据网友建议产生的，而有 33% 的系统更新是由用户直接研发的 [1]。

（二）以人为本的智能生产

制造业的数字化、网络化、智能化是生产技术创新的共性使能技术，推动制造业逐步向智能化集成制造系统方向发展。在此过程中，需要坚持以人为本，全面提升产品设计、制造和管理水平，构建智能企业。以人为本的智能生产应用实践包括人机合作设计、人机协作装配、以人为本的生产管理等。实际上，智能优化设计、智能协同设计、基于群体智能的“众创”设计等都是以人为本智能设计的重要内容，而基于 HCPS 开发智能设计系统也是发展人本智造的重要内容之一。

例 2：基于深度学习的人机合作设计。卡内基梅隆大学的 Raina 等 [20] 采用深度学习方法提取人类设计策略和隐性规则，由此训练机器以更好地协助人类进行设计活动。事实上，人类有很强的策略/方法迁移能力，可以依靠已有经验解决相似问题，但机器在这方面就逊色很多。Raina 等 [21] 尝试对人类的这种迁移过程进行建模，提出了一种概率模型，可以有效地将人类的经验迁移策略转移到机器上，从而更高效地帮助人类进行设计。

例 3：人机协作装配。针对部分行业或工艺过程不能完全部署机器人的实际情况，瑞典皇家理工学院 Wang Lihui 团队在欧盟科研框架计划“地平线 2020”的资助下，开展了人机共生协作装配项目 (SYMBIO-TIC) 研究 [22]。项目聚焦人机协作装配，主要研究传感与通信、主动防碰撞、动态任务规划、适应性机器人控制、移动式工人辅助等，旨在确保工人安全参与人机高效协作；已与多家汽车公司和机器人公司开展应用合作。

例 4：精益模式。作为技术管理、精益制造、精益产品研发认证等课程的共同创办人，美国密西根大学 Jeffrey Liker 认为精益模式的核心内涵在于持续改进与尊重人。尊重人的实质就是以人为本，即重视公司文化、全员参与、标准化，发展信奉公司理念的杰出人才与团队，不断反思与持续改善、建设学习型组织等。从精益模式可以看出，以人为本的管理是企业重要的发展战略，人是企业内部发

展的生命力与创造力，是企业最宝贵的资源。

（三）以人为本的产业模式变革

以智能服务为核心的产业模式变革是人本智造的主题。随着先进技术的推广应用，制造业将从以产品为中心向以用户为中心发生转变，产业模式从大规模流水线生产向规模定制化生产转变，产业形态从生产型制造向服务型制造转变。

例 5：某家电企业工业互联网平台。与传统制造和其他电商平台不同，该平台坚持以人为本、人单合一的理念。平台用户从产品交互、设计、采购、制造到服务全流程参与体验，且产品在用户使用过程中通过“网器”（该公司相对于传统“电器”提出的新概念）进行持续的交互和迭代，最大程度满足用户个性化需求。企业通过产品交互了解用户需求，把封闭的企业变成了生态系统，让用户、企业、资源能够全流程的创造价值；用户主动成为产品成长的重要组成部分，企业也实现了自身效益的增加和发展模式在行业内的复制推广。例如，该平台与某地合作建立建筑陶瓷产业基地，将原本“单打独斗”的 130 余家企业，通过平台集约化为 20 余家，在转型升级后，使得制造成本降低 10%，产能提升 20%。以人为本的产业模式变革实现了用户和企业的双赢 [3]。

五、思考与建议

（一）政策层面

欧盟、美国、日本等国家和地区都十分重视人本智造的研究，如美国专门设立“人-技术前沿的未来工作”系列研究项目进行前瞻布局，这为我国发展人本智造带来了挑战和启示。建议人本智造及时对接国家相关战略，加强顶层设计；在智能制造试点示范、应用推广、宣传贯彻、教育培训方面，系统考虑人的因素，将以人为本的理念融入到智能制造标准体系建设和成熟度评价等工作中；更加重视人机协同标准化、人机任务分工和智能制造人员成熟度评价等工作。推动 HCPS 和人因工程等概念在智能制造实践中落地生根，促进人本智造在我国的深化发展。

(二) 企业层面

从人的角度来看, 智能制造企业需着重考虑并解决两个问题: 如何用先进适用的技术延长员工的职业生涯, 让那些体力逐渐下降而智力与经验仍处在高峰的员工, 在技术的支持下继续贡献价值; 如何用技术营造一种环境氛围, 让年轻一代愿意从事制造业工作, 并体会到智能制造工作和价值创造的乐趣。建议制造企业将“以人为本”作为发展智能制造的重要理念, 重视员工的培训、教育与管理, 并将此视为企业的战略性投资。企业进一步使用协作机器人来满足自己的需求, 而不是全部采用传统机器人来“机器换人”。通过不断的尝试、磨合与调整, 找到适合企业自身的人机搭配工作方式以不断地提高生产效率和增加经营利润。

(三) 研究层面

从研究现象看, HCPS 与人本智造、面向智能制造的人因工程、协作机器人等方面需进一步加强探索。高度重视 HCPS 科学与技术体系的构建与完善, 在智能制造领域推广应用 HCPS, 由此大力发展人本智造。相关理论与应用研究应包括以人为本的设计、产品、自动化、AI、生产、工厂、服务等。重视智能制造系统中的人体工效学、认知工效学、组织工效学等人因工程的研究, 致力实现自然科学与社会科学的良性互动。此外, 协作机器人、共融机器人是重要的研发方向, 人与信息物理系统的交互、人的数字孪生、人在回路的控制是亟待加强的研究课题。

参考文献

- [1] 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 J. Intelligent manufacturing—Main direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [2] Zhou J, Li P G, Zhou Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4(1): 11–20.
- [3] 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.
- [4] Wang B C, Hu S J, Sun L, et al. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 56: 373–391.
- [5] 王柏村, 臧冀原, 屈贤明, 等. 基于人–信息–物理系统 (HCPS) 的新一代智能制造研究 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 29–34.
Wang B C, Zang J Y, Qu X M, et al. Research on new-generation intelligent manufacturing based on human–cyber–physical systems [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(4): 29–34.
- [6] 李清, 唐睿璘, 陈耀棠, 等. 智能制造体系架构、参考模型与标准化框架研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(3): 539–549.
Li Q, Tang Q L, Chen Y T, et al. Smart manufacturing standardization: Reference model and standards framework [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(3): 539–549.
- [7] 张伯鹏, 汪劲松. 制造系统中知识信息与人的作用 [J]. 机械工程学报, 1994, 30 (5): 61–65.
Zhang B P, Wang J S. Knowledge information and human function in manufacturing systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 1994, 30(5): 61–65.
- [8] 陈国权. 先进制造技术系统研究开发和应用的——人的因素 [J]. 中国机械工程, 1996, 7(1): 12–14.
Chen G Q. Human factors—The key to the research, development and application of advanced manufacturing technology system [J]. China Mechanical Engineering, 1996, 7(1): 12–14.
- [9] Nunes D, Sá Silva J, Boavida F. A practical introduction to human-in-the-loop cyber–physical systems [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2018.
- [10] Madni A M, Sievers M, Madni C C. Adaptive cyber–physical–human systems: Exploiting cognitive modeling and machine learning in the control loop [J]. Insight, 2018, 21(3): 87–93.
- [11] Madni A M. Exploiting augmented intelligence in systems engineering and engineered systems [J]. Insight, 2020, 23(1): 31–36.
- [12] Jin M. Data-efficient analytics for optimal human–cyber–physical systems [D]. Berkeley: University of California, Berkeley (Doctoral dissertation), 2017.
- [13] Romero D, Bernus P, Noran O, et al. The operator 4.0: Human–cyber–physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems [C]. Iguassu Falls: International Conference on Advances in Production Management Systems, 2016.
- [14] Ruppert T, Jaskó S, Holczinger T, et al. Enabling technologies for operator 4.0: A survey [J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1–19.
- [15] 孙林岩. 人因工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Sun L Y. Human factors engineering [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2011.
- [16] Dannapfel M, Burggräf P, Bertram S, et al. Systematic planning approach for heavy-duty human–robot cooperation in automotive flow assembly [J]. International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications, 2018, 7: 51–57.
- [17] Ma M, Lin W, Pan D, et al. Data and decision intelligence for human-in-the-loop cyber–physical systems: Reference model, recent progresses and challenges [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2017, 90(8): 1167–1178.
- [18] Fantini P, Pinzone M, Taisch M. Placing the operator at the centre of Industry 4.0 design: Modelling and assessing human activities within cyber–physical systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 139: 1–11.
- [19] Pacaux-Lemoine M P, Trentesaux D, Zambrano Rey G, et al.

- Designing intelligent manufacturing systems through human-machine cooperation principles: A human-centered approach [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 111: 581–595.
- [20] Raina A, McComb C, Cagan J. Learning to design from humans: Imitating human designers through deep learning [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2019, 141(11): 111102.
- [21] Raina A, Cagan J, McComb C. Transferring design strategies from human to computer and across design problems [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2019, 141(11): 114501.
- [22] Wang L, Gao R, Váncza J, et al. Symbiotic human-robot collaborative assembly [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2019, 68(2): 701–726.