DOI: 10.3901/JME.2020.16.240

面向智能制造的人因工程研究与发展*

王柏村^{1,2} 黄思翰^{1,3} 易兵⁴ 鲍劲松⁵

- (1. 密执安大学机械工程系 安娜堡 48109 美国;
2. 中国工程院战略咨询中心 北京 100088;
3. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;
4. 中南大学交通运输工程学院 长沙 410075;
5. 东华大学机械工程学院 上海 201600)

摘要: 面向智能制造的人因工程是人因工程学(或称人类工效学)在智能制造领域的应用,秉承“以人为本”的理念,在人-信息-物理系统(Human-cyber-physical systems, HCPS)语义下,系统研究解决人、物理系统、信息系统之间的关系问题,确保系统安全高效运行。从智能制造系统人的作用出发,系统梳理面向智能制造的人因工程的研究内容,论述国内外在智能制造系统人因工程与人机关系等领域的研究进展和重点,具体包括人的安全、虚实融合、组织结构扁平化、产用融合、人机协作、人与CPS的关系等方面。结合我国在智能制造人因工程领域所面临的挑战,从学科建设、科学研究、社会关注等层面提出了进一步发展的建议,包括加强顶层战略设计、完善学科体系建设、宣贯系统设计理念、加强定量定性研究的融合、促进新兴技术的创新应用等内容。

关键词: 智能制造; 人因工程/人类工效学; 人的因素; 人机关系; 人-信息-物理系统

中图分类号: TH16; TB18; TP39

State-of-art of Human Factors/Ergonomics in Intelligent Manufacturing

WANG Baicun^{1,2} HUANG Sihan^{1,3} YI Bing⁴ BAO Jinsong⁵

- (1. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA;
2. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088;
3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
4. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075;
5. School of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201600)

Abstract: Human factors/ergonomic (HF/E) for intelligent manufacturing is the application of HF/E in the field of intelligent manufacturing (IM), which is based on the human-centered concept in the context of human-cyber-physical systems (HCPS). The research goal of HF/E for IM is to ensure safe and efficient operation of IM systems, through systematic research on relationships between humans, cyber systems and physical systems. First, the research contents of HF/E for IM are listed. Then, the state-of-art in humans' role, HF/E, and human-machine relationship in the context of IM are reviewed. Research hotpots include human safety, integration of virtual and physical entity, horizontal organization, production and use integration, human-machine collaboration, and human-CPS relationship, etc. Based on China's current challenges in intelligent manufacturing HF/E, several suggestions are proposed from the aspects of discipline construction, scientific research, and social attention. These suggestions include strengthening top-level strategic design, improving discipline construction, advocating system design concept, promoting integration of quantitative and qualitative research, and innovative applications of emerging technologies.

Key words: intelligent manufacturing; ergonomics; human factors; human-machine relationship; human-cyber-physical systems

* 中国工程院重大咨询研究(2017-ZD-08)、中国博士后国际交流计划派出(20180025)、博士后创新人才支持计划(BX20200053)、国家自然科学基金(51975589)和湖南省自然科学基金(2018JJ3663)资助项目。
20200320 收到初稿, 20200706 收到修改稿

0 前言

智能制造系统自 20 世纪 80、90 年代提出至今, 经过不断地探索和发展, 先后出现了多种制造范式、模式和概念, 包括敏捷制造、云制造、信息物理生产系统、社会化制造、工业 4.0 等^[1-2]。总体来看, 智能制造历经了数字化、网络化发展阶段, 目前正在向新一代智能制造(数字化网络化智能化)加速发展^[3-4]。在智能制造系统的长期发展进程中, 学术界、工业界对系统中人的作用、人的因素以及人机关系等问题的探讨和研究, 甚至争论, 也从未止步。例如, 20 世纪 90 年代, 路甬祥等^[5-7]提出人机一体化的理念, 认为智能制造系统不单是人工智能系统, 而且是人机一体化智能系统, 是一种混合智能。想以人工智能全面取代制造过程中人类专家的智能, 独立承担分析、判断、决策等任务, 是不现实的。另一方面, 日本等国家提出无人工厂的概念^[8], 试图通过“机器换人”实现少人化甚至无人化, 并达到提高生产效率和企业利润的目的。因此, 对于智能制造系统中人的作用以及人机关系等问题并没有一个确切答案。近年来, 随着人们对“人的因素”认识的逐渐深入, 以及大数据、物联网、人工智能 2.0 等新一代信息技术的飞速发展, 学术界、工业界更加关注智能制造系统中人的因素相关研究。ZHOU 等^[3, 9-10]提出人-信息-物理系统(Human-cyber-physical systems, HCPS), 认为智能制造系统中物理系统是主体, 信息系统是主导, 人是主宰, HCPS 揭示了智能制造的技术机理并构成了智能制造的技术体系。赵敏^[11]在“三体智能革命”的理念中将物理世界、生命世界(人)与数字世界的智能现象打通研究, 并提出三体智能模型、数字虚体、认知引擎等概念, 揭示了“三体化一”走向智能的趋势。NUNES 等^[12]认为目前在大多数信息-物理系统(Cyber-physical systems, CPS)的研究中均忽略了人的作用, 并提出人在回路的 CPS, 分析了这一全新研究领域的概况、特征、分类和挑战。与此同时, 在相关研究和应用过程中也产生不少问题和疑惑, 可归纳为以下四个方面。

(1) 为什么要研究智能制造系统中人的因素相关问题?

(2) 智能制造系统中人的因素相关研究具体包括什么?

(3) 智能制造系统中人的因素相关研究发展态势怎么样?

(4) 智能制造系统中人的因素相关研究面临哪些挑战? 未来将如何发展?

为此, 本文试图从文献综述的视角分四个部分回答以上问题: 第 1 部分介绍智能制造系统中人的作用; 第 2 部分探讨智能制造人因工程的基本研究内容; 第 3 部分系统分析国内外研究进展(第 3~第 7 小节); 第 4 部分讨论当前挑战和相关建议。

1 智能制造系统中人的作用

ZHOU 等^[9-10]提出了面向新一代智能制造的人-信息-物理系统的概念, 并认为 HCPS 能够揭示新一代智能制造的技术机理, 有效指导新一代智能制造的理论研究和工程实践。在 HCPS 理念中, 对人的作用表述为: 人在系统中起着主宰作用。物理系统和信息系统都是由人设计并制造出来的, 有关分析计算与控制的模型、方法和准则等都是由研发人员来确定并固化到信息系统中的。随着制造系统自动化、数字化、智能化在各领域的推广应用, 人在整个系统的地位逐渐从“操作者”转向“监管者”, 成为影响制造系统中能动性最大的因素。在劳动力有限、人力成本增高的情况下, 需要优化人员配置, 改进人工操控与机器运作之间的匹配。张伯鹏等^[13-15]在研究中均突出了人的第一生产力要素的关键地位和决定性作用。陈国权^[16]论述了人的因素在先进制造技术中的重要性, 包括人-机协同因素和人-人协同因素, 并认为只有将技术、人和组织集成协同起来才能真正发挥作用, 进而产生效益。张晓冬等^[17]针对制造系统设计中人因的评价问题, 提出了指导人因仿真实施的通用参考模型与系统方法。美国通用电气在其工业互联网报告中指出, 智能机器、高级分析和工作人员是三个关键要素, 表明人是工业互联网中的重要要素之一^[18]。ROMERO 等^[19-20]在 HCPS 语义下提出了第四代操作工的概念并展望了其前景, 认为第四代操作工的理念有助于实现社会化可持续制造和人机共生。NUNES 等^[12]梳理了人在 CPS 中的作用, 包括数据获取、状态推断、驱动、控制、监测等, 如图 1 所示。MADNI 等^[21-22]基于 HCPS 对人的作用进行了研究, 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、备用 CPS 等。JIN 等^[23]将 HCPS 系统运行中人的角色总结为操作者、代理人、用户以及传感终端等。PÉREZ 等^[24]认为, 与汽车行业不同, 航空航天、造船和建筑等行业由于任务和过程过于复杂, 目前还未能完全自

动化和智能化,需要更多地依赖于人机合作和人的主观能动性。以上相关研究说明国内外学者均高度重视智能制造系统中人不可替代的作用,同时也表明智能制造系统中人的因素和人机关系等研究具有重要意义。

图1 HCPS 语义下人的作用分类

2 面向智能制造的人因工程

中国工程院智能制造课题组的研究报告指出^[25]：“智能制造系统是一个大概念，一个不断演进的大系统，是新一代信息技术与先进制造技术的深度融合，贯穿于产品、制造、服务全生命周期的各个环节及相应系统的优化集成，不断提升企业的产品质量、效益、服务水平，推动制造业创新、绿色、协调、开放、共享发展”。该报告从 HCPS 视角分析了智能制造的范式演变过程，突出了人的核心作用。国家智能制造标准体系建设指南^[26]指出：智能制造系统架构可以从生命周期、系统层级和智能特征三个维度对智能制造所涉及的活动、装备、特征等内容进行描述。其中，设计是指根据企业的所有约束条件以及所选择的技术来对需求进行构造、仿真、验证、优化等研发活动过程；生产是指通过劳动创造所需要的物质资料的过程；物流是指物品从供应地向接收地的实体流动过程；销售是指产品或商品等从企业转移到客户手中的经营活动；服务是指提供者与客户接触过程中所产生的一系列活动的过程及其结果，包括回收等。

人的因素包括很多方面，至今学术界并没有一个公认的命名或定义。表1中包括几个有代表性的命名。从广义角度来看，人的因素至少包括人的作用、人因工程/人类工效学、人机关系等内容。其中，“人的作用”主要研究人在系统中的不同角色、作用及工作类型等。人类在生产生活过程中，不断地改造着自然、社会和人类本身，不可避免地劳动对象和生产工具发生联系，这种联系可称为“人机关系”，相关内容包括人机交互、人机合作等。人因工程或称人类工效学是一门重要的工程技术学科，综合运用生理学、心理学、生物力学、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、机器及其工作环境之间的相互关系、影响规律和合理结合，使设计的机器、程序、产品和系统等能够适应人的生理及心理等特点，最终达到提高工作效率和质量且确保人的安全、健康和舒适等目标^[27]。

表1 人的因素相关命名表

英文	中文译名	使用范围或领域
Ergonomics	人类工效学、工效学	主要是欧洲
Human factors	人体学	主要在美国
Human factors engineering	人因工程学	主要在美国
Engineering psychology	工程心理学	主要在心理学领域
Human-machine relationship	人机关系	主要在机械制造领域

在对智能制造系统和人的因素有关内容进行分析的基础上，本文将“面向智能制造的人因工程”初步定义为：基于对人、机器、技术和环境的深入研究，发现并利用人的行为方式、工作能力、作业限制等特点，通过对于智能制造系统中相关工具和机器、任务和环境、人员安排等进行合理设计，以提高智能制造系统的效率、安全性、舒适性和有效性的工程技术领域。图2从智能制造系统生命周期角度给出了面向智能制造的人因工程研究内容示意图。当然，也可以基于智能制造系统层级和智能特征提出分析框架，对此暂不展开讨论。从图2可以看出，人的作用、人的因素、人机关系等研究内容，分布在智能制造系统不同生命周期中，或者说智能制造系统的不同环节均需要考虑人因工程的不同方面。比如，在智能产品的设计中怎么融合用户的个人偏好？在智能生产过程中，是否需要设计人员临时介入权限？在智能服务中，怎样促进消费者和生产厂家的无缝对接？工业互联网中人的作用如何？这些问题均属于智能制造系统人因工程的研究范畴。同时，面向智能制造的人因工程各个子领域并不是相互排斥的，其作用范围处于不断发展的状态，原有的领域可能会有新的解读，也可能出现新的应用。

图2 面向智能制造的人因工程研究内容示意图

后续章节将从人体工效学、认知工效学、组织工效学、人机关系等方面综述面向智能制造的人因工程相关研究进展。

3 智能制造系统人体工效学

传统的人体工效学包括与身体活动有关的人体解剖学、人体测量学、生理学和生物力学特征等,人体工效学研究内容包括工作姿势、物料处理、重复动作、与工作有关的肌肉骨骼疾病、工作地点布局、安全及健康等。在智能制造系统中,人体工效学的主要进展包括:部分工作和动作的自动化、人的参与不可或缺、人的安全、可穿戴设备等新技术的应用等。

3.1 人的参与不可或缺

机器是人类智慧的产物,作为一种工具,是对人类能力(包括体力和脑力)的替代、补充。在自动化时代,机器大量替代人类执行一些简单、重复性、体力型的工作^[28],大大提高了生产率和生产质量。随着智能制造时代的到来,在先进信息技术的支撑下,赛博空间和物理空间的实时交互成为可能,机器将更深层次地替代人类的工作^[29],生产活动的自动化程度将再次飞跃^[30-31]。但是,机器始终无法完全替代人类,尤其在面临复杂情况时,还是需要人类的参与^[19, 32-34]。STERN等^[35]讨论了CPS的引入对任务分配的影响,并提出了一个集成系统设计模型,在系统设计早期就将人类因素纳入其中,使得人机分工更加合理。HUMMEL等^[36]指出,随着产品周期的缩短和需求的波动,制造系统需要具备快速的调整能力,这就要求制造系统设计时要更加注重人机之间的交互,包括功能性交互和社交性交互。类似地,RICHERT等^[33]提出了混合人机团队(Hybrid human-robot-teams)的概念,对赋予机器社交属性进行了探讨。DANNAPFEL等^[30]对重体力工作的人机分工规划问题进行了探讨,统筹考虑人机任务分配,寻求使用更多的机器来替代人类劳动,以提升生产效率。FANTINI等^[32]对如何更好地将人的因素融入到生产过程中进行研究,以提升制造系统的柔性和尽可能地释放人类的潜能。这些研究均表明,自动化和智能化并不会完全代替人,人的参与依然重要。因此,部分研究聚焦系统设计和任务分工来不断释放人的潜能。

3.2 人的安全是首要

随着智能制造的发展,人类与机器的协作会越来越密切,并且正在向人机共融方向发展,随之而

来就是安全问题。从安全的角度考虑,人机协作的最高境界应该是可以并排工作,而不需要通过围栏等物理隔绝的方式来保证安全^[37]。HORVÁTH等^[38]提出了采用数字孪生体等仿真手段对人机协作的安全性进行评估,以确保人机系统在不同的场景下的安全性。但是即便是近乎完备的评估,也还是无法保证绝对的安全,除非是采用非接触式控制机器的方式才能保证百分之百的安全。另外,在作业过程中,通常需要两手协同工作,此时如果还需要手持一些辅助设备,就会降低作业效率甚至是产生安全问题。例如,SCHEUERMANN等^[39]从定性和定量两个角度对操作起重机并进行扫描这一工作过程进行了研究,对比了手持扫描仪和非手持扫描仪这两种方式,结果表明非手持扫描仪的人机交互可以有效缓解肢体疲劳,提高操作稳定性,从而提升安全性。总之,在制造系统中,只要有人的参与,人的安全依然是首要。

3.3 信息技术驱动

随着信息技术的发展,出现了诸如智能手机、智能手表、智能手环等一大批人机交互媒介,大大提升了人类与机器的交互效率和质量。例如,ROMERO等^[19]指出利用可穿戴设备将制造系统中人的基本信息(健康状况、位置、活动水平等)传递给机器或者CPS,可以极大地改善人因工程。一方面,人类可以通过穿戴便携式设备来提高自己的专注力,避免无效的动作,提高人机交互的效率^[40]。另一方面,可穿戴设备收集的数据可以用来调整和改造生产活动,以协调人机的状态^[36]。SENEVIRATNE等^[41]对可穿戴设备的相关研究进行了综述,对现有可穿戴设备进行了全面的调查和分类,研究了可穿戴设备的通信安全问题,并对提升可穿戴设备能效进行了分析。MEATTINI等^[42]对远程控制机械手臂执行抓取动作进行了研究,尝试利用肌电图包含的信息来远程操作机器人完成抓取任务。YIM等^[43]提出了一种新的远程微操作系统,用户可以在不颤抖的情况下精确地操纵微型物体,并提出了折叠机器人在可穿戴机器人和微型机器人中的新应用。这些研究表明,随着信息技术的发展,可穿戴设备、远程控制等将越来越受到重视。

4 智能制造系统认知工效学

如果说人体工效学更关注物理过程,那么认知工效学关注的则是心理过程,如感知、记忆、推理和运动反应等,这些均影响着人与系统其他元素之

间的相互作用。认知工效学具体研究内容包括脑力负荷、决策、技能表现、人机交互、人的可靠性、工作压力以及与人机系统设计相关的培训等。本节在智能制造语义下,对虚实融合改变人机角色、信息技术减轻认知压力、技术储备和培训三个方面展开介绍。

4.1 虚实融合改变人机角色

随着工业自动化技术的快速发展,人类在制造过程中参与的工作量越来越少。表面上看,机器正在加速替代人类的劳动,甚至出现了“无人工厂”的概念。事实上,无论自动化技术发展到了何种水平都无法完全代替人类在制造过程中发挥的重要作用^[44]。随着 CPS 等虚实融合技术的发展,人类在这一过程中所扮演的角色看似越来越少,却也越来越重要,最直观的体现就是人机协作越来越倾向于人类专职于决策^[45]、支持系统正常运转(监控、预警、干预等)等复杂工作^[32]。BECKER 等^[46]讨论了人的因素如何影响信息物理生产系统(Cyber-physical production systems, CPPS)的设计工作,并对未来的发展趋势进行评估,以促进人的因素与 CPPS 设计工作的结合。基于此,也引发了关于“人在回路”(Human-in-the-loop, HitL)的讨论。HitL 指的是制造系统中人类的活动,包括监控和调整机器、直接控制系统、第一时间检测并汇报异常情况^[32]。MA 等^[47]指出 HitL 集成了包含人类智慧的数据及模型,可以提升机器的智能化水平。RAINA 等^[48]采用深度学习提取人类设计策略和隐性规则来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,用已有的经验来解决类似的问题,但是机器在这方面就逊色很多。RAINA 等^[49]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,结果表明该概率模型可以有效地将人类的迁移策略转移到机器上。另外,“人在网格”(Human-in-the-mesh, HitM)则是人机角色定位的另一个方向。不过,目前学术界对于 HitM 的定义尚不明确,还有待进一步研究。随着人机角色定位的发展,人类所需要掌握的技能也逐渐向解决问题的能力与 IT 技术发展^[29, 32, 44]。可以想象,在智能制造时代,从业人员如果没有掌握 IT 技术,无法在虚实融合的制造环境中综合各方面信息迅速给出问题解决方案,则很可能被淘汰。随着自动化和智能化技术的发展,大量的低技术含量工作可能很容易被高新技术替代,基于此,DWORSCHAK 等^[50]还专门讨论了智能制造时代从业人员需要具备的能力。另外,现有的

智能制造系统并没有完全发挥其潜力,有待在未来的工作中进一步挖掘,而这些工作的实现都需要有强大的 IT 技术来辅助决策。随着 CPS、HitL、HitM、深度学习等技术的发展和应用,虚实融合将逐渐改变人机角色,帮助智能制造系统进一步发挥其潜在价值。

4.2 信息技术减轻认知压力

虚拟现实技术(Virtual reality, VR)和增强现实技术(Augmented reality, AR)的快速发展,出现了诸如 Head-gear、智能眼镜、AR 空间投射机等一大批相关设备,为人类对制造过程的认知提供了更加便捷的方式。THEIS 等^[51]指出 AR 技术可以有效排除不必要信息,以减轻人类在处理复杂和高强度工作时的认知压力,甚至能够做到精确提供所需的信息。FANTINI 等^[52]则强调 VR/AR 技术在信息处理上的灵活性,可以单独呈现制造资源的组份信息,从而减轻认知压力。尹旭悦等^[53]利用计算机视觉识别和三维环境感知技术,开发航天产品装配作业一体化训练系统,为装配操作者提供智能辅助支持,有利于提高航天产品生产效率。张秋月等^[54]综合运用 AR 和 VR 的混合现实技术(Mixed reality, MR)构建飞机的虚拟装配系统,实现对装配所需的大量信息进行统一集中的管理,拓展了工作人员信息获取的渠道和范围,加强了对重要信息的感知能力,同时也降低了对工作人员视觉空间能力的要求。唐健钧等^[55]指出在飞机装配作业过程中,AR 智能引导技术能够识别现场场景智能地给出作业过程中的操作引导信息,并与其他信息系统进行集成,以辅助飞机装配作业人员高效、优质完成现场装配作业任务。另外,VR/AR 技术还可以结合知识工程、云技术和工业互联网技术,实时提供作业指导、维修建议等。当然,任何技术都要适度,过度使用信息技术可能会造成信息过载,反而加重了认知压力^[56]。

4.3 技术储备和培训

智能制造时代,技术更新换代加快,制造企业需要做好技术储备,以保持企业竞争力。技术储备,侧重对员工的能力和技能培训^[57]。一方面,培训员工需要企业投入大量的资金;另一方面,市场机会稍纵即逝,如果企业能够预测所需的技术,并提前做好技术储备,则将极大地提升企业的竞争力。当然,技术预测绝非易事,企业需要从战略层面进行综合决策^[50],还需要对技术发展趋势有深刻的理解并对潜在的应用进行深度评估。DWORSCHAK 等^[50]建议企业重点储备未来 3~5 年所需的技术,这样既

不会太仓促,也能尽可能地保证预测准确性。另外,年龄结构也是企业在进行技术储备时需要考虑的一个重要因素。很多国家都在探讨甚至执行延迟退休的政策,这样会导致企业中会有大量的年长员工^[58],甚至有返聘员工^[29]。考虑到老员工接受新技术的能力,对于这类员工的培训工作要格外注意。总之,人才培养、储备与教育是智能制造转型是否成功的关键^[59],需要高度重视、提前研究。

5 智能制造系统组织工效学

不同于人体工效学和认知工效学,组织工效学关注的是社会技术系统的优化,研究内容包括沟通、人员资源管理、工作设计、工作时间设计、团队合作、参与式设计、新工作模式、虚拟组织、远程工作、质量管理以及组织文化等。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。

5.1 组织结构扁平化

随着信息技术和智能技术的快速发展,CPS、VR/AR等的引入,机器越来越智能化,人类的工作也越来越有针对性,人机协作也越来越融洽。STERN等^[35, 45]指出在移动设备、智能技术、专家知识和工人创造力的共同作用下,制造企业的许多传统组织方式会消失,超扁平化发展。部门之间的界限越来越模糊,传统的组织、管理、计划和控制活动可以综合决策并实时发布到每个个体(人或者机器),从而很容易地实现跨部门作业。MAZALI^[45]指出决策活动也不再是管理者的特权,一线的工人不仅有机会参与,而且很方便参与。但是新型的组织结构也会带来新的问题和新的挑战。FANTINI等^[52]强调未来的研究需要去探索如何控制人类与CPS的交互,如何捕捉增值工作(决策、创造性工作、社交举动等),以及如何将工人的技能和个性纳入到制造过程中。汪应洛等^[60]在先进制造生产模式与管理的研究过程中,以制造资源集成为基本原则,重点关注了组织的创新和人的因素的作用,强调组织创新、高素质人员的培养和制造资源的快速有效集成是先进制造生产模式的核心任务,作者还讨论了网络组织结构、虚拟企业等对先进制造的推动作用。随着人工智能、机器学习、工业互联网、物联网、企业应用软件等的迅速发展,智能制造领域的商业组织结构将加快向扁平化、专业化、分散化、协同化发展。

5.2 更新工作设计方式

人机交互的方式层出不穷,传统的作业设计方式逐渐变得低效,甚至不合时宜。在智能制造背景下,作业设计方式需要更新换代,将更多的因素纳入考虑范畴,包括使用率、用户界面和人机交互等。KADIR等^[28]强调作业设计过程中要明确人与机器的分工。DANNAPFEL等^[30]开发了一个软件来协助作业设计,通过多次迭代,在明确人机分工的同时,达到合理分工的目的。从HitM的角度看,人机交互频繁且复杂,需要从组织层面来保证交互的效率。FANTINI等^[32]对HitM集成的复杂性、易变性和不可预测性进行了深入分析,强调了组织因素在人机交互中的保障作用。虽然改变传统作业设计方式势在必行,但是现在还没有很明确的手法和工具。在未来的研究中,研究人员需要将重点放在如何协助企业利用数字化、智能化技术来实现新型的作业设计^[31]。DWORSCHAK等^[50]认为数字化技术与工作组织的深度结合直接决定企业的未来技术储备。因此,随着新技术与工作组织方式的不断结合,未来企业需要储备的技术也会发生改变。另外,作业设计中的“以人为中心”理念大有裨益,现有的作业设计往往都忽略了这一点。事实上,人类不是完美的,可能会犯错,面临突发情况时可能会慌乱。以人为中心的作业设计可以从全局的角度去评估作业的复杂性来消解冲突,从而达到降低工人作业负荷、避免人为事故的目的^[57]。ROMERO等^[19]指出以人为中心的作业设计需要重点关注如何通过巧妙的设计来提升人类的认知能力,而不是一味地强调无人自动化作业。

5.3 产用融合

近年来,制造业企业在个性化定制、服务型制造、协同制造、互联网+制造、共享制造、社会化制造等不同方向进行了大量探索与实践,形成了一批成功的智能制造范例^[61]。杨青峰^[62]从技术、社会环境、制造价值观和制度等角度综合分析,认为在当前的制造价值观引领下,智能技术群必然会构造出“产用融合”这个全新的制造范式,独特性在于把生产者和使用者放在一个系统中,实现双方的连接、打通、理解,以及价值环流,最终实现实时永续的按需个性化生产。目前,海尔公司在产消合一/人单合一等方面进行了较为成功的探索^[63],传统意义上的消费者正逐渐变成一个产消者——既是生产设计者又是消费者。

6 人机关系

在智能制造系统人的作用以及人因工程的相关研究中,不可避免地需要涉及人机关系。目前,国际上在人机关系方面比较有代表性的研究包括人与机器人关系研究、人与 CPS 关系研究、第四代操作工(Operator 4.0)以及“以人为中心”的智能制造系统^[22, 64]。

6.1 人与机器人关系

WANG 等^[65]认为人与机器人的基本关系是共存关系,此时机器人和人类放置在物理空间中但彼此的工作空间不重叠,人与机器人之间没有直接接触。在共存人机关系中,人类和机器人之间可以交换工作对象,但是它们的操作是相互独立且同时执行的。如果人和机器人共享工作空间且彼此互相通信,此时人机属于交互关系。在交互关系中,一方可指导或控制另一方,或者它们之间发生物理接触(无论是计划中的还是意料之外的),人和机器人都可以执行相同的任务,但是需要按顺序逐步完成任务。如果机器人具有自主能力(目的、效用或利润),那么该机器人可以与人类进行合作,人机关系即为合作关系。为了互惠互利,机器人可能会暂时放弃原先预设的利

益目标来分享它们的某些资源(物理、认知或计算资源)。双方的工作空间可以有部分重叠的地方,但是双方之间通常不直接进行物理接触。它们可以同时工作,但有时必须等待其他人或者机器完成现有操作。协作关系是指人类和机器人能够在共享工作空间中共同完成一组给定的工作任务,通常允许所有参与者之间有物理接触来执行协同工作。在任何情况下,协作是针对具有联合聚焦属性的活动,需要各方共享自己的不同能力和资源。在此基础上,作者重点介绍了共生人机协作装配的主要技术、未来发展方向及挑战。

6.2 人与 CPS 关系

MADNI 等^[22, 64]在人与信息物理系统(即智能机器)关系的研究中提出适应性 HCPS。并将其分为:人类直接控制 CPS 的系统;CPS 被动监视人员并在需要时可采取适当措施的系统;以及以上两者结合的系统。具体的适应类型、触发标准和预期输出如表 2 所示^[22, 64]。SCHIRNER 等^[66-67]认为目前多数 CPS 仍然将人定义为不可预测的元素,并只将人放在控制回路外部。但为了使系统更好地满足人类需求,未来 CPS 将需要与人类建立更紧密的联系,通过“人在回路”控制,将人的意图、心理状态、情绪、动作等考虑进来。

表 2 适应性 HCPS 中的适应类型

适应类型	触发标准	预期输出
任务由人重新分配给机器	人的认知载荷超过阈值;疲劳;人的错误率超过阈值	可管理的人的认知载荷
任务由机器重新分配给人	CPS 无法识别新情况;CPS 请求;CPS 出现故障人的	应对新情况的卓越能力
机器适应人	偏好以及信息搜索策略	提高信息传递给人的速率,特别是时间紧张情况下
人适应机器	机器请求控制转移;上下文改变请求控制转移	处理操作任务和事件的卓越能力

6.3 第四代操作工

RUPPERT 等^[68]从四代操作工的角度分析了人机关系的演变进程(图 3)。第一代操作工(Operator 1.0)被定义为手工操作人员;第二代操作工(Operator 2.0)指由专业工具支持的操作人员(比如机床操作工有数控系统的支持);第三代操作工(Operator 3.0)主要是指与机器人和计算机等工具合作的操作工。如表 3 所示,该研究团队详细解释了第四代操作工的各种形式和具体内涵,并认为这是未来的发展方向。

图 3 制造系统中的操作工进化过程

表 3 第四代操作工方法学的内涵

类型	描述	例子
分析操作工	在智能制造中应用大数据	挖掘出有用的信息并用来预测相关的事件
增强现实操作工	AR 丰富工厂环境并改善数字空间和物理空间之间的信息传递	智能手机、平板作为 RFID 的识别器。空间 AR 投影仪支持汽车制造
协作操作工	协作机器人(Cobots)是面向直接与操作工协作而设计的。主要从事重复性工作或者非工效学的工作	Baxter 和 Sawyer 的 Rethink 机器人可以实现低成本、易操作的协作机器人
健康操作工	可穿戴跟踪器可以测量活动、压力、心率和其他的健康指标以及 GPS 定位和其他个人数据	可穿戴手表(Apple Watch、Fitbit 等)、手环等
智能操作工	基于 IPA 的解决方案,充分利用人工智能	帮助操作工与机器、电脑、数据库和其他信息系统进行交互
社交操作工	企业社交网络服务(E-SNS)专注可移动和社交协作来连接智能车间的智能操作工	社交工业互联网可以创造、分享信息并进行信息交互来支持决策
超强操作工	带动力、可穿戴、轻质、柔性的负重机器人	动力机构可以用来增强人类操作工的力量以减轻体力消耗
虚拟操作工	VR 是一种沉浸式、交互式、多媒体和计算机仿真现实,可以创造一种设计、装配或者制造环境的数字复制体,并可以与之交互。	辅助操作工在危险情境下进行决策;基于 VR 的步态训练中的实时反馈;多目的的虚拟工程空间

6.4 “以人为中心”的智能制造系统

路甬祥等在 20 世纪 90 年代意识到当时的计算机集成制造系统和智能制造系统过分追求自动化和智能化的问题,提出人机一体化系统,在强调了人在系统中的重要性的同时,指出了人机一体化系统与技术将是 21 世纪机械科学的重要发展方向。路甬祥等^[5-7, 69]在分析人与机器的各自优缺点的基础上,结合思维科学理论、信息科学理论、人工智能技术和机械科学的新进展,对“人机一体化系统与技术”思想进行立论讨论;对人机一体化系统科学体系和关键技术进行了研究,将人机一体化系统分为了六个功能层次,包括结构与组成、感知与操作、通信与界面、决策与协作、功能与效益、开放与环境,人机一体化系统的关键技术则包括人机耦合技术、思维的研究与处理、感知技术、新型信息库等;对人机一体化系统的建模技术进行了研究,从感知层面、思维层面和执行层面进行综合建模,并对“人主机辅”、“机主人辅”、“人机耦合”三种控制策略进行讨论。TRENTESAUX 等^[70]分析了“以技术为中心”设计系统的局限性,指出目前智能制造系统缺乏对人的有效融合,并忽略了人类解决某些复杂问题的能力,作者认为在智能制造系统的早期设计阶段需要定义好相关人员的角色,即“以人为中心”来设计智能制造系统。作者同时认为:基于不同级别有关人员的能力和局限,可以提出人与机器之间任务分配以及人机合作的原则,进而根据系统情况选择自动化/智能化级别。美国国家自然科学基金委在 2016 年启动十个“大概念”项目,“未来人-技术前沿的工作”项目(FW-HTF)是其中之一^[71]。该项目以人为中心,目标是为了应对新工业革命可能带来的风险,包括过度自动化造成失业、对教育资源的压力、安全和隐私威胁、算法上的偏见、对技术的过度依赖、以及对人类技能的侵蚀等。随着智能制造系统的不断发展,在系统的设计、运行等过程中,“以技术为中心”正逐

渐向“以人为中心”转变。

7 挑战与未来发展

对以上分析的研究现状进行汇总,如表 4 所示,面向智能制造的人因工程相关研究覆盖智能制造系统的设计、生产、物流、销售、服务等各个环节。目前,我国在此领域处于刚刚起步阶段,相关成果报道较少。因此,很有必要综合分析我国相关领域所面临的挑战,并提出进一步发展的建议。

表 4 面向智能制造的人因工程相关研究

范畴	内容	对应环节
人体工效学	手动重复性工作的自动化	生产
	人机协作引发的安全问题	生产
	可穿戴设备	生产、内部物流
	数字技术的应用	内部物流
认知工效学	虚拟模型改善认知并提升交互效率	生产
	CPS 引入了新型的人机交互模式	设计、生产
	问题解决能力和 IT 技术是必要条件	设计、生产、物流、服务
	AR 技术可以减轻认知压力	生产、服务
	跨部门数据交流持续改善认知工效学	设计、生产
	技术预测有助于提前进行技能储备	生产、服务
组织工效学	混合生产系统为人机交互架起了交互的桥梁	生产
	新型人机交互会影响工作的组织和设计	生产、服务
	以人为中心的设计方式对工人更友善	设计、生产
	产用融合	设计、生产、销售、服务
人机关系	人与机器人关系	
	人与 CPS 关系	
	第四代操作工(Operator 4.0)	主要在生产环节
	以人为中心的智能制造系统	
	人机一体化	

7.1 面临的挑战

当前,我国智能制造系统人因工程相关领域所面临的挑战主要来自三个层面:学科层面、研究层

面、以及社会层面。

7.1.1 学科层面

智能制造系统的人因工程/人类工效学, 所涉及的学科/专业涵盖机械工程、仿生学、神经科学、脑科学、认知科学、工业工程、甚至哲学等, 以及与互联网、机器人、大数据、机器学习等理论、方法和技术的结合, 总体来看, 属于交叉科学与技术, 存在被边缘化的风险。例如, 对于人因工程, 由于学科发展的历史原因, 目前人因工程作为一个方向, 设立在人机环境工程、工业工程等学科下面, 其重要性和内涵尚未得到重视; 对于智能制造系统, 相关概念正处于迅速升温阶段, 不少企业都花重金投入在机器人、人工智能等上面, 却容易忽略其中“人的因素”的重要性, 面临“重硬轻软”的挑战。因此, 学科/专业和相关研究的边缘化是智能制造系统人因工程/人类工效学面临的挑战之一^[71]。

7.1.2 研究层面

人因工程以人为研究对象, 研究系统中人为因素的影响, 同时也研究环境、机器、工具、信息、软件等对人的影响; 智能制造系统又存在大量不确定性和复杂性问题, 因而, 考虑人的因素的智能制造系统是一个复杂巨系统。同时, 人的某些因素(情绪、感觉、灵感等)难以量化和建模, 在回路仿真、行为决策建模、人机性能建模等方面存在大量挑战。总之, 智能制造系统人因工程/人类工效学的另一个重大挑战是复杂系统建模^[9]。

7.1.3 社会因素

目前社会各界对于智能制造的理解存在一些误解(比如部分人士将智能制造等同于“机器换人”), 在具体推动智能制造的发展过程中也存在很多疑惑^[72], 比如, 智能化是否意味着机器完全代替人? 怎样协调好工人就业与智能化之间的平衡问题? 因此, 制造数字化网络化智能化可能带来的伦理道德、工作就业、数据治理等问题是智能制造系统人因工程/人类工效学的又一挑战^[73]。

7.2 进一步发展方向

面对上述挑战, 建议我国将顶层战略设计、学科体系建设、系统设计理念、定量与定性研究融合、新兴技术应用等作为进一步研究和发展的方向。

7.2.1 对接国家顶层战略

建议将人因工程纳入到制造强国、人工智能、质量强国等国家战略和规划体系中, 扭转目前“重硬轻软”的被动局面。加强顶层战略设计和行业宣贯, 让人因工程/人类工效学的理念与方法深入到智能制造系统的落地实践中。促进人因工程理念与

方法论落实到智能制造相关政策、制度和标准之中, 推动人因工程在智能制造各领域的应用。在更多行业和领域的智能制造实践中开展人因工程应用的试点示范, 加强宣传推广, 提升智能制造人因工程/人类工效学的影响力。

7.2.2 完善 HCPS 学科体系

随着新一代信息技术的迅猛发展, 人、物理系统、信息系统正在成为智能制造系统不可缺的三个组成部分, 传统的“人-机-环境”系统理论与方法需要升级为“人-信息-物理系统”(HCPS)。围绕“人”这一关键因素, 构建、完善 HCPS 理论和学科体系能够有力支撑智能制造系统人因工程/人类工效学的研究与发展, 具体内容包括: HCPS 理论与系统架构、HCPS 使能技术研究、HCPS 最佳应用实践以及标准体系建设等。

7.2.3 推动人因融入系统设计

推动把人因设计作为智能制造系统和智能产品设计的必须环节。目前产品开发过程中缺乏人因设计环节, 建议制定产品开发中有关人因设计环节的强制性要求, 将人因工程贯穿系统/产品设计研制的全过程, 充分发挥人因设计的作用, 提高系统的人因设计水平。加强人因设计的方法学研究, 进一步提升其价值和地位。加强人的数字孪生体相关研究。

7.2.4 加强定量研究与评测

人因工程评价应用和研究中存在定性指标多而定量指标少, 主观评价多而客观评价少等问题, 需要建立完善定量和客观的测试技术与评价指标。建议尽快建立智能制造系统人因工程/人类工效学测评中心, 确保各类系统产品人因测评规范、高效、可靠。同时, 要加强智能制造系统中人因工程定量研究、实证研究和案例研究, 促进定量研究和定性研究的融合, 不断丰富研究手段和方法。

7.2.5 创新应用新兴技术

新兴技术与装备的创新性应用主要有两个方面: 一是如何更好的将人的经验、知识快速高效地转移到信息系统并集成到智能制造系统中, 从而提高系统处理复杂问题的能力, 相关技术包括深度学习、迁移学习、知识自动化等; 二是在制造系统实现高度自动化/智能化之前, 怎样使用新技术与方法来提高人与人、人与机器之间的沟通互动与控制能力, 怎样使用各种技术提高人的工作效率、提升管理水平、保护工作人员身心健康。相关技术包括智能装备、第五代移动通信技术、可穿戴智能产品、虚拟现实技术、数字孪生、人机交互等。总之, 要综合

考虑人和机器,并创新应用各种新兴技术来构建新一代智能制造系统。

7.2.6 研究未来工人与工作

人工智能、机器人等技术的飞速发展,让不少人感到不安。因此,智能制造系统人因工程与人类工效学的研究和应用要能够进一步消除不确定性,使系统的运行可预测可控制;构建和谐的人机关系,使人与机器和谐共处;利用新技术提升员工工作舒适度和幸福感。建议要进一步研究智能化投入与产出比、未来工作分工、工人安全和隐私、教育与培训改革等内容。

8 结语

智能制造转型是一个长期过程,不可能一蹴而就。人因工程在制造业自动化与信息化进程中发挥了重大作用,必将在制造业迈向数字化网络化智能化过程中继续发挥重要作用。本文在分析智能制造和人的作用基本概念的基础上,梳理了面向智能制造的人因工程的研究内容,即包括智能制造系统中人体工效学、认知工效学、组织工效学、人机关系等内容,综述了国内外相关领域的研究进展。主要结论如下:国内外学者和相关部门高度重视智能制造系统中人的作用,HCPS是分析智能制造系统中人的作用的重要理论和模型。在智能制造系统人因工程的研究中,人机一体化趋势明显,保障人的安全仍然是首要任务;新一代信息技术的使用减少了人员的认知压力,同时又要求制造企业有更强的技术储备;智能制造系统的组织结构正向扁平化发展,并要求更新工作设计方式,制造范式进一步向产用融合方向发展。智能制造系统人机关系的相关研究包括人与机器人的关系、人与CPS的关系、以及“以人中心”的智能制造等内容,人与机器之间的相互适应、和谐共生是人机关系的发展方向。我国智能制造系统人因工程进一步发展方向包括对接国家顶层战略、完善HCPS科学体系、推动人因融入智能制造系统的设计、加强定量与定性融合研究、创新运用新技术等。

本文对面向智能制造的人因工程/人类工效学进行了初步探讨和定性分析,下一步可结合专家访谈、文献计量、基于大数据的技术预见等手段开展深入研究和量化分析,为我国智能制造、人-信息-物理系统(HCPS)以及人因工程等领域的研究和应用做出更多贡献。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] MUELLER E, CHEN X, RIEDEL R. Challenges and requirements for the application of industry 4.0: A special insight with the usage of cyber-physical system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5): 1050-1057.
- [3] ZHOU J, LI P, ZHOU Y, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2018, 4(1): 11-20.
- [4] 臧冀原,王柏村,孟柳,等.智能制造的三个基本范式:从数字化制造、“互联网+”制造到新一代智能制造[J].中国工程科学,2018,20(4):13-18.
ZANG Jiyuan, WANG Baicun, MENG Liu, et al. Brief analysis on three basic paradigms of intelligent manufacturing[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(4): 13-18.
- [5] 路甬祥,陈鹰.人机一体化系统与技术立论[J].机械工程学报,1994,30(6):1-9.
LU Yongxiang, CHEN Ying. Foundation of the humachine system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1994, 30(6): 1-9.
- [6] 路甬祥,陈鹰.人机一体化系统科学体系和关键技术[J].机械工程学报,1995,31(1):1-7.
LU Yongxiang, CHEN Ying. Academic architecture and key techniques of the humachine system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1995, 31(1): 1-7.
- [7] 杨灿军,路甬祥.人机一体化系统建模初探[J].机械工业自动化,1997,19(1):1-5.
YANG Canjun, LU Yongxiang. First exploration of humachine system modelling[J]. Chinese Journal of Manufacturing Automation, 1997, 19(1): 1-5.
- [8] 潘锋.国外柔性加工系统的发展状况、趋势及无人工厂的实践[J].国外自动化,1983(6):48-51,68.
PAN Feng. The development trends of flexible machining system abroad and the implementation of unmaned factory[J]. Journal of Abroad automation, 1983(6): 48-51, 68.
- [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] 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 Baicun, ZANG Jiyuan, QU Xianming, et al. Research on new-generation intelligent manufacturing based on human-cyber-physical systems[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(4): 29-34.
- [11] 赵敏. 数字虚体, 智能革命的助推器——解读《三体智能革命》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(1): 110-119.
- ZHAO Min. Digital entity, the booster of intelligent evolution: Interpretation of three entities intelligent evolution[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(1): 110-119.
- [12] NUNES D, JORGE S S, BOAVIDA F. A practical introduction to human-in-the-loop cyber-physical systems: Setting up the development environment[M]. New York: John Wiley & Sons, 2017.
- [13] 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 Bopeng, WANG Jinsong. Knowledge information and human function in manufacturing systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 1994, 30(5): 61-65.
- [14] 谢贤平, 冯长根, 钱新明. 敏捷制造系统中人的因素研究[J]. 人类工效学, 2000, 6(3): 15-18.
- XIE Xianping, FENG Changgen, QIAN Xinming. Research on the human factors in the agile manufacturing system[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2000, 6(3): 15-18.
- [15] 滕弘飞, 王奕首, 史彦军. 人机结合的关键支持技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 1-9.
- TENG Hongfei, WANG Yishou, SHI Yanjun. Key supporting techniques of human-computer cooperation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 1-9.
- [16] 陈国权. 先进制造技术系统研究开发和应用的关健——人的因素[J]. 中国机械工程, 1996, 7(1): 12-14.
- CHEN Guoquan. The key factor in the development and application of advanced manufacturing technology: Human factor[J]. China Mechanical Engineering, 1996, 7(1): 12-14.
- [17] 张晓冬, 杨育, 易树平, 等. 制造系统人因仿真参考模型及若干关键技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 56-63.
- ZHANG Xiaodong, YANG Yu, YI Shuping, et al. Reference model and key technology for human factors simulation in manufacturing systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 56-63.
- [18] EVANS P C, ANNUNZIATA M. Industrial internet: Pushing the boundaries[J]. General Electric Reports, 2012: 488-508.
- [19] ROMERO D, STAHRE 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.
- [20] 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]// IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Springer, Cham, 2016: 677-686.
- [21] MADNI A M. Integrating humans with software and systems: Technical challenges and a research agenda[J]. Systems Engineering, 2010, 13(3): 232-245.
- [22] 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.
- [23] JIN M. Data-efficient analytics for optimal human-cyber-physical systems[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2017.
- [24] PÉREZ L, RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ S, RODRÍGUEZ N, et al. Symbiotic human-robot collaborative approach for increased productivity and enhanced safety in the aerospace manufacturing industry[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106: 851-863.
- [25] “新一代人工智能引领下的智能制造研究”课题组. 中国智能制造发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 9-16.
- “Intelligent Manufacturing Investigation Driven by New Generation Artificial Intelligence” Group. Research on the development strategy of intelligent manufacturing in China[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(4): 9-16.
- [26] 李清, 唐骞璘, 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 Qing, TANG Qianlin, CHEN Yaotang, et al. Smart manufacturing standardization: Reference model and standards framework[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(3): 539-549.
- [27] 孙林岩. 人因工程[M]. 北京: 中国科技出版社, 2005.
- SUN Linyan. Human factors engineering[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2005.
- [28] KADIR B A, BROBERG O, SOUZA DA CONCEIÇÃO C. Designing human-robot collaborations in Industry 4.0: Explorative case studies[C]//DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference. 2018: 601-610.
- [29] KERPER D, LÖHRER M, SAGGIOMO M, et al. Effects of cyber-physical production systems on human factors in a weaving mill: Implementation of digital working environments based on augmented reality[C]//2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2016: 2094-2098.
- [30] DANNAPFEL M, BURGRÄF 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(2): 51-57.
- [31] RICHTER A, HEINRICH P, STOCKER A, et al. Digital work design[J]. *Business & Information Systems Engineering*, 2018, 60(3): 259-264.
- [32] 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.
- [33] RICHERT A, SHEHADEH M A, MÜLLER S L, et al. Socializing with robots: Human-robot interactions within a virtual environment[C]// 2016 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO). IEEE, 2016: 49-54.
- [34] RICHERT A, SHEHADEH M, MÜLLER S, et al. Robotic workmates: Hybrid human-robot-teams in the industry 4.0[C]// International Conference on e-Learning. Academic Conferences International Limited, 2016: 127.
- [35] STERN H, BECKER T. Development of a model for the integration of human factors in cyber-physical production systems[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 9: 151-158.
- [36] HUMMEL V, HYRA K, RANZ F, et al. Competence development for the holistic design of collaborative work systems in the logistics learning factory[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 32: 76-81.
- [37] MATTHIAS B, REISINGER T. Example application of ISO/TS 15066 to a collaborative assembly scenario[C]// Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics. VDE, 2016: 1-5.
- [38] HORVÁTH G, ERDŐS F G. Gesture control of cyber physical systems[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 63: 184-188.
- [39] SCHEUERMANN C, STROBEL M, BRUEGGE B, et al. Increasing the support to humans in factory environments using a smart glove: An evaluation[C]// 2016 Intl IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress (UIC/ATC/ScalCom/CBDCom/IoP/SmartWorld). IEEE, 2016: 847-854.
- [40] BORISOV O I, GROMOV V S, KOLYUBIN S A, et al. Human-free robotic automation of industrial operations[C]// IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2016: 6867-6872.
- [41] SENEVIRATNE S, HU Y, NGUYEN T, et al. A survey of wearable devices and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2573-2620.
- [42] MEATTINI R, BENATTI S, SCARCIA U, et al. An sEMG-based human-robot interface for robotic hands using machine learning and synergies[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(7): 1149-1158.
- [43] YIM S, MIYASHITA S, RUS D, et al. Teleoperated micromanipulation system manufactured by cut-and-fold techniques[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(2): 456-467.
- [44] LAZAROVA-MOLNAR S, MOHAMED N, SHAKER H R. Reliability modeling of cyber-physical systems: A holistic overview and challenges[C]// 2017 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSPES). IEEE, 2017: 1-6.
- [45] MAZALI T. From industry 4.0 to society 4.0, there and back[J]. *Ai & Society*, 2018, 33(3): 405-411.
- [46] BECKER T, STERN H. Future trends in human work area design for cyber-physical production systems[J].

- Procedia Cirp, 2016, 57: 404-409.
- [47] 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, 2018, 90(8-9): 1167-1178.
- [48] 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): 1-11.
- [49] 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): 1-7.
- [50] DWORSCHAK B, ZAISER H. Competences for cyber-physical systems in manufacturing—first findings and scenarios[C]// Procedia CIRP. Elsevier, 2014, 25: 345-350.
- [51] THEIS S, ALEXANDER T, WILLE M. The nexus of human factors in cyber-physical systems: Ergonomics of eyewear for industrial applications[C]// Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program. 2014: 217-220.
- [52] 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: 105058.
- [53] 尹旭悦, 范秀敏, 王磊, 等. 航天产品装配作业增强现实引导训练系统及应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(1): 48-53.
- YIN Xuyue, FAN Xiumin, WANG Lei, et al. Augmented reality training system for aerospace product assembly process guidance and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1): 48-53.
- [54] 张秋月, 安鲁陵. 虚拟现实和增强现实技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2017(11): 40-45.
- ZHANG Qiuyue, AN Luling. Application of virtual reality and augment reality in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(11): 40-45.
- [55] 唐健钧, 叶波, 耿俊浩. 飞机装配作业 AR 智能引导技术探索与实践[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 22-27.
- TANG Jianjun, YE Bo, GENG Junhao. Exploration and practice of aircraft assembly AR intelligent pilot technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 22-27.
- [56] CZERNIAK J N, BRANDL C, MERTENS A. Designing human-machine interaction concepts for machine tool controls regarding ergonomic requirements[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 1378-1383.
- [57] PACAUX-LEMOINE M P, TRENTESAUX D, REY G Z, et al. Designing intelligent manufacturing systems through human-machine cooperation principles: A human-centered approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 111: 581-595.
- [58] PERUZZINI M, PELLICCIARI M. A framework to design a human-centred adaptive manufacturing system for aging workers[J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 33: 330-349.
- [59] 程晓蕾, 张平华. 智能制造工业 4.0 体系下的高层次人才培养模式分析[J]. 科教文汇旬刊, 2015(7): 50-51, 74.
- CHENG Xiaolei, ZHANG Pinghua. Analysis of high-level personnel training mode under the system of intelligent manufacturing industry 4.0[J]. The Science Education Article Cultures, 2015(7): 50-51, 74.
- [60] 汪应洛, 孙林岩, 黄映辉. 先进制造生产模式与管理的研究[J]. 中国机械工程, 1997, 8(2): 63-73.
- WANG Yingluo, SUN Linyan, HUANG Yinghui. Production mode and management investigation of advanced manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 1997, 8(2): 63-73.
- [61] 陶永, 王田苗, 李秋实, 等. 基于“互联网+”的制造业全生命周期设计、制造、服务一体化[J]. 科技导报, 2016, 34(490/4): 47-51.
- TAO Yong, WANG Tianmiao, LI Qiushi, et al. The whole life cycle design, manufacture and service integration of manufacturing industry based on Internet+[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(490/4): 47-51.
- [62] 杨青峰. 产用融合——智能技术群驱动第五制造范式[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(1): 32-41.
- YANG Qingfeng. Production and use integration—fifth manufacturing paradigm driven by intelligent technology group[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(1): 32-41.
- [63] 张瑞敏, 姜奇平, 胡国栋. 基于海尔“人单合一”模式的用户乘数与价值管理研究[J]. 管理学报, 2018, 15(9): 1265-1274.
- ZHANG Ruimin, JIANG Qiping, HU Guodong. Research on the user multiplier theory: The economic principles behind the Haier “Integrating order with

- personnel” management model[J]. Chinese Journal of Management, 2018, 15(9): 1265-1274.
- [64] MADNI A M, MADNI C C, SIEVERS M. Adaptive cyber-physical-human systems[C]// Proceedings of the 2018 INCOSE International Symposium, Washington, DC, USA. 2018: 7-12.
- [65] WANG L, GAO R, VANCZA J, et al. Symbiotic human-robot collaborative assembly[J]. CIRP Annals, 2019, 68(2): 701-726.
- [66] SCHIRNER G, ERDOGMUS D, CHOWDHURY K, et al. The future of human-in-the-loop cyber-physical systems[J]. Computer, 2013, 46(1): 36-45.
- [67] NUNES D S, ZHANG P, SILVA J S. A survey on human-in-the-loop applications towards an internet of all[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 944-965.
- [68] RUPPERT T, JASKÓ S, HOLCZINGER T, et al. Enabling technologies for operator 4.0: A survey[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1650.
- [69] 丁一, 操雅琴, 费志敏. 智能制造背景下人因工程实验教学改革探索[J]. 中国教育技术装备, 2018, 4: 123-125.
- DING Yi, CAO Yaqin, FEI Zhimin. Exploration of experimental teaching reform of human factors engineering under background of intelligent manufacturing[J]. China Educational Technology and Equipment, 2018, 4: 123-125.
- [70] TRENTESAUX D, MILLOT P. A human-centred design to break the myth of the “magic human” in intelligent manufacturing systems[M]. Berlin: Springer, 2016.
- [71] LIN L, SPECTOR J M. The human-techndogy frontier: Understanding the learning of now to prepare for the work of the future[J]. Tech. Trends, 2018, 62(5): 438-440.
- [72] QIN S, CHENG K. Special issue on future digital design and manufacturing : Embracing industry 4.0 and beyond[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(6): 1045-1045.
- [73] 许为, 葛列众. 人因学发展的新取向[J]. 心理科学进展, 2018, 26(9): 1521-1534.
- XU Wei, GE Liezhong. New trends in human factors[J]. Advances in Psychological Science, 2018, 26(9): 1521-1534.
-
- 作者简介: 王柏村, 男, 1990 年出生, 博士, 助理研究员/博士后。主要研究方向为智能制造、人-信息-物理系统(HCPS)、能源系统优化等。
E-mail: baicunw@umich.edu
- 黄思翰(通信作者), 男, 1991 年出生, 博士, 博士后。主要研究方向为智能制造、可重构制造系统、数字孪生。
E-mail: huangsihan@bit.edu.cn
- 易兵, 男, 1987 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字样机、虚拟现实和结构拓扑优化。
E-mail: bingyi@csu.edu.cn
- 鲍劲松, 男, 1972 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能制造、虚拟现实/人机交互技术等。
E-mail: bao@dhu.edu.cn