

智能制造系统中人机协作技术研究

王 鑫

江苏理工学院 江苏常州

【摘要】 人机协作技术是智能制造系统实现高效、柔性、安全生产的关键使能技术。本文系统综述了 2019—2024 年智能制造系统中人机协作技术的研究进展。首先，阐述了人机协作技术发展的时代背景与战略意义，分析了从工业 4.0 到工业 5.0 演进过程中人机关系从人机共存、人机交互、人机合作向人机协作乃至人机共生的深刻转变。其次，重点综述了协作机器人智能控制、人机安全交互、人因工程与智能任务分配、数字孪生与增强现实辅助等核心技术的研究现状，深入探讨了力控制、视觉伺服、碰撞检测、互认知交互及远程协作等关键技术的实现原理与应用进展。进一步，分析了数字孪生技术在人机协作虚实映射与协同优化中的作用，以及增强现实技术在提升操作工人认知能力和协作效率方面的应用价值。最后，从认知制造、智能预见协作及危险环境远程协作等前沿方向展望了人机协作技术的未来发展趋势。本文旨在为智能制造系统中人机协作技术的深入研究及工程应用提供理论参考。

【关键词】 人机协作；智能制造；协作机器人；安全交互；数字孪生；增强现实；人因工程

【收稿日期】 2026 年 2 月 10 日 **【出刊日期】** 2026 年 3 月 18 日 **【DOI】** 10.12208/j.ijme.20260006

Research on human-machine collaboration technology in intelligent manufacturing systems

Xin Wang

Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu

【Abstract】 Human-machine collaboration technology is a key enabling technology for achieving efficient, flexible, and safe production in intelligent manufacturing systems. This paper systematically reviews the research progress of human-machine collaboration technology in intelligent manufacturing systems from 2019 to 2024. First, it elucidates the historical context and strategic significance of the development of human-machine collaboration technology, analyzing the profound transformation of human-machine relationships from coexistence, interaction, and cooperation to collaboration and even symbiosis during the evolution from Industry 4.0 to Industry 5.0. Second, it focuses on reviewing the current research status of core technologies such as intelligent control of collaborative robots, safe human-machine interaction, human factors engineering and intelligent task allocation, digital twins, and augmented reality assistance. It also delves into the implementation principles and application progress of key technologies such as force control, visual servoing, collision detection, mutual cognitive interaction, and remote collaboration. Furthermore, it analyzes the role of digital twin technology in virtual-real mapping and collaborative optimization in human-machine collaboration, as well as the application value of augmented reality technology in improving the cognitive abilities and collaborative efficiency of operators. Finally, the future development trends of human-machine collaboration technology are discussed from the perspectives of cutting-edge areas such as cognitive manufacturing, intelligent predictive collaboration, and remote collaboration in hazardous environments. This paper aims to provide theoretical reference for in-depth research and engineering applications of human-machine collaboration technology in intelligent manufacturing systems.

【Keywords】 Human-machine collaboration; Intelligent manufacturing; Collaborative robots; Safe interaction; Digital twin; Augmented reality; Human factors engineering

1 引言

随着全球制造业竞争格局的深刻变革和新一轮科技革命的不断推进,智能制造已成为各国制造业转型升级的核心战略。智能制造的本质在于通过新一代信息技术与制造技术的深度融合,实现制造系统的自感知、自决策、自执行和自适应,从而提升生产效率、产品质量和资源利用效率。然而,智能制造并非以完全取代人类为目标,而是强调人与机器的协同互补,构建“以人为本”的智能制造新模式^[1]。在这一背景下,人机协作技术作为连接人类智慧与机器智能的桥梁,成为智能制造系统研究的前沿热点和关键使能技术。

“以人为本”的智能制造理念强调将人的因素置于制造系统设计和运行的核心位置。传统自动化制造系统追求“无人化”或“少人化”,将人视为系统的干扰因素和效率瓶颈。而以人为本的智能制造则认识到,人类在复杂情境判断、创造性问题解决、灵活适应性及社会交互等方面具有不可替代的优势,机器则在计算速度、精度保持、重复执行及危险环境作业等方面具有卓越能力^[2]。人机协作的核心思想在于充分发挥人与机器各自的比较优势,通过合理的任务分配和高效的交互协作,实现协同效应。这一理念不仅体现在技术层面的协作机制设计,更体现在组织层面的工作模式创新和战略层面的价值创造重构。

人-信息-物理系统(Human-Cyber-Physical Systems, HCPS)是理解和实现智能制造中人机协作的重要理论框架。HCPS将传统的信息-物理系统(CPS)扩展为包含人的三元系统,强调人、信息系统与物理系统之间的深度融合与协同优化。在HCPS视角下,人不仅是系统的操作者和监控者,更是系统的决策者和创新者;信息系统不仅是数据的采集和处理平台,更是知识的生成和传递媒介;物理系统不仅是执行机构,更是感知环境和反馈状态的智能体。三者通过双向信息流和控制流实现闭环协同,共同完成制造任务。HCPS理论为人机协作系统的设计提供了系统化的方法论指导,包括人的认知建模、信息交互界面设计、物理系统安全控制及整体性能优化等方面。

数字孪生技术为人机协作的智能化升级提供了新的技术路径。数字孪生通过构建物理制造系统的虚拟镜像,实现物理空间与虚拟空间的实时同步和

双向交互^[3]。在人机协作场景中,数字孪生不仅能够映射机器人的运动状态和工件的几何信息,还能够建模人的认知状态、行为意图和协作需求。通过数字孪生平台,可以在虚拟环境中预演和优化人机协作方案,评估不同任务分配策略和交互模式的安全性和效率,从而降低物理试验的成本和风险。此外,数字孪生还支持远程人机协作,使操作者能够在远离危险现场的情况下,通过虚拟环境实时操控物理机器人,拓展了人机协作的应用场景。

面向人-机-环境共融的智能制造是未来制造系统发展的重要方向。传统制造系统往往将人、机器和环境视为相互独立的要素,而共融制造则强调三者的和谐共生和协同演化^[4]。在人-机-环境共融系统中,机器不再是被动执行指令的工具,而是能够感知人的意图、适应环境变化、主动提供协助的智能伙伴;人不再是单一的控制者,而是与机器平等协作、相互学习的合作者;环境不再是静态的背景,而是动态变化、需要共同适应的复杂系统。实现人-机-环境共融,需要在感知、认知、决策和执行等多个层面突破关键技术,包括多模态感知融合、意图识别与预测、自适应任务规划、柔顺控制及安全交互等。

以人为本的智能制造经历了从理念提出到技术实现、从单点应用到系统集成的发展历程^[5]。早期研究主要关注人机工程学和机器人界面设计,强调减轻人的体力负荷和认知负荷。随着人工智能、机器人技术和传感器技术的发展,研究重点转向智能人机协作,强调机器对人的智能辅助和协作增强。近年来,随着工业5.0和可持续制造理念的提出,人本智造进一步强调人的全面发展、工作意义感和制造系统的社会可持续性。未来,人机协作技术将朝着更加智能化、人性化、安全化和可持续化的方向发展,为制造业的高质量发展提供有力支撑。

综上所述,人机协作技术是智能制造系统实现以人为本、高效柔性和安全可靠运行的关键技术。本文基于近年来国内外代表性研究成果,从协作机器人与安全交互、人因工程与任务分配、数字孪生与增强现实、国际前沿发展等方面,系统综述智能制造系统中人机协作技术的研究进展,并探讨未来发展趋势。

2 协作机器人与人机安全交互技术

协作机器人(Collaborative Robot, Cobot)是专为人机协作场景设计的机器人系统,与传统工业机

与人相比,具有轻量化、高柔性、易编程及具备多层安全机等特点。协作机器人的出现从根本上改变了人机关系的性质,使机器从隔离作业的工具转变为与人类共享工作空间的伙伴^[6]。

2.1 协作机器人智能控制技术

协作机器人的智能控制是实现高效人机协作的技术基础。与传统工业机器人追求高速高精度的轨迹跟踪不同,协作机器人控制更强调柔顺性、适应性和交互性。力控制是协作机器人实现柔顺交互的核心技术,通过六维力/力矩传感器或基于电流观测的力估计方法,实时感知机器人与环境或人的接触力,并据此调整机器人的运动轨迹和速度,实现类似人类肌肉的柔顺特性。

阻抗控制和导纳控制是协作机器人力控制的两种主要方法。阻抗控制通过调节机器人末端的质量-阻尼-弹簧特性,使机器人在受到外力作用时表现出期望的动态响应。导纳控制则通过建立力与位移之间的动态关系,实现机器人对外部力的柔顺跟随。近年来,基于学习的方法被引入协作机器人控制中,通过强化学习或模仿学习,使机器人能够从与人的交互经验中学习最优的柔顺控制策略,适应不同操作者和任务需求。

视觉伺服控制是协作机器人实现智能感知和精准操作的重要技术。通过深度相机、激光雷达等视觉传感器,协作机器人能够实时感知工作场景中工件的位置、姿态和状态,以及人的位置、手势和动作意图。基于视觉的伺服控制将视觉信息直接映射为机器人控制指令,实现“手-眼”协调的闭环控制。在协作装配场景中,视觉伺服使机器人能够跟踪人的手部运动,实现同步协作装配;在协作搬运场景中,视觉感知使机器人能够识别人的抓取意图,主动调整姿态配合搬运。

此外,协作机器人的智能控制还包括基于语音和自然语言的交互控制、基于手势和体态的意图识别控制,以及基于脑机接口的直接神经控制等。这些多模态交互控制技术拓展了人机协作的交互通道,使协作方式更加自然和高效。

2.2 人机安全交互技术

安全是人机协作系统设计和运行的首要原则。与传统工业机器人通过安全围栏或光幕实现人机隔离不同,协作机器人必须在无物理隔离的条件下与人共享工作空间,这对安全交互技术提出了更高要

求^[7]。人机安全交互技术涵盖碰撞检测、安全控制、风险评估及安全认证等多个层面。

碰撞检测是人机安全交互的第一道防线。基于力传感器的碰撞检测通过监测机器人关节或末端的力和力矩异常变化,判断是否发生碰撞。基于电流观测的碰撞检测通过监测电机电流的突变,无需额外传感器即可实现碰撞检测,具有成本低、响应快的优点。基于视觉的碰撞检测通过深度相机实时监测人与机器人之间的距离,在潜在碰撞发生前进行预警和规避。近年来,基于皮肤电子和分布式触觉传感器的碰撞检测技术受到关注,通过在机器人表面覆盖柔性触觉传感器阵列,实现碰撞位置和力度的精确感知,为精细的安全控制提供依据。

安全控制策略是碰撞发生后的关键响应机制。当检测到碰撞或潜在碰撞风险时,协作机器人应立即执行安全控制策略,包括安全停止、回退、柔顺顺应及协作模式切换等。安全停止是最基本的控制策略,要求机器人在最短时间内减速至停止。回退策略使机器人在碰撞后沿反方向运动,释放接触力。柔顺顺应策略使机器人在碰撞时表现出类似人类肌肉的柔顺特性,吸收冲击能量,降低伤害程度。协作模式切换策略根据风险评估结果,动态调整机器人的运动速度和协作范围,在安全与效率之间取得平衡。

人机安全交互还涉及风险评估和安全标准。国际标准化组织(ISO)发布的 ISO/TS 15066 技术规范,明确了协作机器人安全设计的要求和验证方法,包括生物力学极限、安全相关控制系统性能及协作模式分类等。风险评估需要从任务分析、危险识别、风险估计到风险降低的完整流程,综合考虑机器人的运动学特性、工作空间布局、人的可达范围及潜在暴露时间等因素。

2.3 人机智能协同研究

人机智能协同是人机协作技术发展的更高阶段,强调人与机器在认知层面的深度协作,而非仅仅是物理层面的动作配合^[8]。人机智能协同的核心在于实现人与机器之间的知识共享、意图理解和协同决策。

在知识共享方面,人机智能协同系统需要建立统一的知识表示和交换机制,使人和机器能够共享任务知识、领域知识和过程知识。知识图谱技术为人机知识共享提供了有效的技术支撑,通过构建结构化的知识网络,将人的经验知识和机器的数据知识

进行融合,支持推理查询和智能推荐。在协作装配场景中,知识图谱可以存储零件的装配关系、工具的使用方法及常见故障的处理策略,既供人查询学习,也供机器推理决策。

在意图理解方面,人机智能协同系统需要具备理解人的操作意图和协作需求的能力。意图识别通过分析人的行为模式、语音指令、眼动轨迹及生理信号等多模态信息,推断人的当前目标和下一步行动。基于深度学习的意图识别模型,通过训练大量人机交互数据,能够学习从行为到意图的映射关系,实现意图的实时准确识别。意图预测则进一步利用时序模型和上下文信息,预测人未来的行为轨迹和协作需求,使机器能够提前准备和主动配合。

在协同决策方面,人机智能协同系统需要建立合理的决策机制和权限分配。对于常规性和程序化的决策,可由机器自主完成,人进行监督和确认;对于复杂性和创造性的决策,需要人的主导和机器的建议;对于紧急性和安全关键的决策,需要建立快速响应和人工干预机制。基于博弈论和契约理论的协同决策模型,通过定义人和机器的效用函数和策略空间,求解纳什均衡或帕累托最优的协作策略,实现双方利益的协调和整体效用的最大化。

2.4 面向工业 5.0 的人本智造

工业 5.0 是欧盟提出的制造业发展新范式,强调以人为中心、可持续性和韧性,与工业 4.0 的技术驱动导向形成互补^[9]。面向工业 5.0 的人本智造,将人的福祉、技能发展和工作意义置于制造系统设计和运行的核心位置,人机协作是实现人本智造的关键路径。

人本智造强调人机协作不仅是技术问题,更是社会问题和价值问题。在技术层面,需要发展更加安全、智能、易用的人机协作技术,降低技术门槛,使普通工人能够轻松与协作机器人和智能系统交互。在社会层面,需要关注人机协作对工作组织、就业结构和劳动关系的影响,通过技能培训和岗位再设计,帮助工人适应智能制造带来的变化,实现人机协作的包容性发展。在价值层面,需要重新审视制造系统的目标函数,将人的幸福感、成长性和社会贡献纳入评价体系,超越单纯的生产效率和经济效益。

人本智造还强调可持续性和韧性。在可持续性方面,人机协作应有助于减少资源消耗、降低环境影响和促进循环经济。例如,通过人机协作实现产品的

个性化定制,减少库存和浪费;通过人机协作优化能源使用,降低碳排放。在韧性方面,人机协作应有助于制造系统应对外部冲击和不确定性。例如,在疫情期间,人机协作使制造系统能够在人员减少的情况下维持生产;在供应链中断时,人机协作使制造系统能够快速调整生产计划和产品组合。

2.5 人机协作运行功能标准模型

标准化是推动人机协作技术产业化和规模化应用的重要基础。智能制造人机协作运行功能标准模型的研究,旨在建立统一的功能框架、接口规范和评价指标,促进不同厂商、不同型号的协作机器人和智能系统之间的互操作和协同工作^[10]。

人机协作运行功能标准模型包括功能需求层、功能实现层和功能评价层。功能需求层定义人机协作系统的基本功能需求,包括任务规划、运动控制、感知认知、交互通信、安全监控及性能评估等。功能实现层规定各功能模块的技术实现方案和接口规范,包括数据格式、通信协议、控制接口及安全机制等。功能评价层建立人机协作系统的性能评价指标体系,包括协作效率、安全性、用户体验、适应性及可靠性等。

人机协作运行功能标准模型的建立需要基于大样本数据的实证研究和跨学科的专家讨论。通过扎根研究方法,从实际的人机协作应用场景中提取关键功能要素;通过文献对比和案例分析,借鉴国内外先进经验和最佳实践;通过量表开发和统计检验,验证模型的信度和效度。标准模型的建立不仅有助于规范人机协作系统的研发和应用,还为智能制造系统的成熟度评价和认证提供了依据。

3 人因工程与智能任务分配

人因工程(Human Factors Engineering)是研究人与系统中其他要素之间交互关系的学科,其目标是优化人的福祉和整体系统性能。在智能制造系统中,人因工程对于设计高效、安全、舒适的人机协作环境具有重要指导意义^[11]。

3.1 面向智能制造的人因工程研究

面向智能制造的人因工程研究,关注人机协作系统中人的认知、生理、心理及社会因素,以及这些因素与机器特性、任务需求和环境条件的交互作用。与传统制造中的人因工程主要关注人体工效学和作业环境改善不同,智能制造中的人因工程更加强调人的认知负荷、情境意识、信任建立及协作绩效。

认知负荷是人机协作系统设计中需要重点考虑的因素。过高的认知负荷会导致操作者的注意力分散、决策失误和疲劳累积,降低协作效率和安全性。认知负荷的评估方法包括主观评价法(如 NASA-TLX 量表)、生理测量法(如心率变异性、瞳孔直径、脑电信号)及任务绩效法(如反应时间、错误率)。在人机协作界面设计中,应遵循信息呈现简洁化、决策支持智能化及反馈及时化等原则,降低操作者的认知负荷。例如,通过自适应信息显示技术,根据操作者的认知状态和任务紧急程度,动态调整显示信息的数量和优先级;通过智能推荐技术,为操作者提供决策建议,减少信息搜索和比较的认知负担。

情境意识是操作者理解当前系统状态、预测未来发展趋势和做出正确决策的基础。在人机协作系统中,情境意识不仅包括对物理环境(如机器人位置、工件状态)的感知,还包括对虚拟环境(如数字孪生状态、预测结果)的理解和对社会环境(如团队成员意图、协作规则)的把握。增强情境意识的技术手段包括多模态信息融合显示、预测性可视化、协作意图共享及异常预警等。例如,通过增强现实技术,将机器人的运动轨迹、工作范围和安全边界叠加到操作者的视野中,增强空间情境意识;通过预测性可视化,显示机器人未来几秒的运动预测,帮助操作者提前规划自己的行动。

信任是人机协作关系建立和维持的重要心理基础。适度的信任能够促进人机协作的顺畅进行,过高或过低的信任都会导致协作问题。过度信任可能导致操作者对机器的过度依赖,忽视潜在风险;信任不足则可能导致操作者对机器的不必要干预,降低协作效率。信任的建立需要通过可靠的机器性能、透明的决策过程、可预测的行为模式及及时的沟通反馈来实现。可解释人工智能(XAI)技术通过揭示机器决策的依据和逻辑,增强人对机器的理解和信任。人在回路(Human-in-the-Loop)的设计通过保留人在关键决策中的最终控制权,增强人对系统的控制感和安全感。

3.2 面向人本智造的新一代操作工

智能制造的发展对操作工人的知识、技能和素质提出了新的要求。面向人本智造的新一代操作工,不再是简单的体力劳动者或机器监控者,而是具备数字素养、协作能力和创新精神的复合型人才^[12]。

新一代操作工的参考架构包括能力模型、培养

路径和使能技术三个维度。能力模型定义了新一代操作工应具备的核心能力,包括技术能力(如数字工具使用、数据分析、编程基础)、协作能力(如人机协作、团队协作、跨文化沟通)、认知能力(如问题解决、批判性思维、创造性思维)及元能力(如学习能力、适应能力、自我管理能力)。培养路径规划了从基础教育到职业教育、从岗前培训到在职学习、从技能认证到学历提升的完整发展通道。使能技术为新一代操作工的培养和能力发挥提供技术支撑,包括虚拟现实培训系统、自适应学习平台、数字技能徽章及职业能力图谱等。

在典型应用场景中,新一代操作工与协作机器人共同完成复杂装配任务。操作工负责需要精细触觉反馈和灵活手指操作的装配步骤,协作机器人负责需要大力矩和重复执行的装配步骤。通过增强现实眼镜,操作工可以实时查看装配指导、质量标准和机器人状态,接收智能系统的操作建议和错误预警。通过语音和手势交互,操作工可以自然地协作机器人发出指令和调整协作策略。在这种协作模式下,操作工的工作内容从单调重复的体力劳动转变为需要判断和决策的智力劳动,工作满意度和成就感显著提升。

3.3 工作场所人机协作对员工的影响

人机协作的引入不仅改变了制造系统的技术架构,也深刻影响了工作场所中员工的工作体验、职业发展和心理健康。系统研究工作场所人机协作对员工的影响,对于设计人性化的人机协作系统和制定合理的组织管理策略具有重要意义^[13]。

从工作设计角度,人机协作改变了工作的内容、要求和意义。一方面,机器承担了繁重、危险和单调的工作任务,减轻了员工的体力负荷和心理压力,提高了工作安全性。另一方面,人机协作也导致部分传统技能贬值,员工需要学习新的数字技能和协作技能,面临技能更新的压力和职业转型的挑战。从组织行为角度,人机协作改变了员工的工作角色、团队结构和权力关系。员工从机器的操作者转变为机器的协作者和监督者,需要建立与机器的新型工作关系。人机协作团队的构成和管理也与传统团队不同,需要考虑人和机器的互补性、协调性和适应性。

从心理健康角度,人机协作对员工的心理状态产生复杂影响。积极的方面包括工作自主性的提高、工作成就感的增强和职业发展前景的拓展。消极的

方面包括技术焦虑（对机器取代自己的担忧）、技能焦虑（对自身技能不足的担忧）和意义焦虑（对工作价值降低的担忧）。这些心理问题如果得不到及时关注和疏导，可能导致员工的工作满意度下降、离职率上升和组织认同感降低。因此，企业在推进人机协作时，需要同步开展员工心理支持、职业辅导和技能培训，帮助员工积极适应技术变革，实现人机协作的包容性发展。

3.4 人工智能时代人机协作工作模型

人工智能时代的人机协作工作模型，需要重新审视人与机器的能力边界和协作模式，建立基于人机匹配的任务分配和协作机制^[14]。

人机匹配是人机协作工作模型的核心概念，强调根据任务特征和人与机器的能力特点，进行合理的任务分配和角色定位。人类智能在模式识别、常识推理、创造性思维、情感理解和伦理判断等方面具有优势；机器智能在计算速度、数据存储、逻辑推理、精确执行和不知疲倦等方面具有优势。基于人机匹配的任务分配原则，应将需要灵活性、创造性和社会交互的任务分配给人，将需要速度、精度和重复性的任务分配给机器，将需要人机互补和协同配合的任务分配给人机团队。

人机协作工作模型包括四种基本模式：人机分工模式、人机协同模式、人机增强模式和人机共生模式。人机分工模式是最基本的协作模式，人和机器各自独立完成分配的任务，通过任务分解和结果集成实现整体目标。人机协同模式强调人和机器在时间和空间上的同步配合，通过信息共享和动作协调实现协同效应。人机增强模式强调机器对人的能力增强和辅助支持，通过智能工具、决策支持和知识推荐提升人的工作效率和质量。人机共生模式是人机协作的最高形态，强调人和机器在认知、情感和价值层面的深度融合，形成相互依赖、共同进化的共生关系。

在人工智能时代，人机协作工作模型的构建还需要考虑伦理和法律问题。包括算法偏见和歧视的防范、数据隐私和安全的保护、人机决策责任的界定以及人机协作对就业和社会公平的影响等。建立人机协作的伦理准则和法律框架，是保障人机协作健康可持续发展的重要基础。

3.5 人-机器人协同作业中的人因问题

人-机器人协同作业（Human-Robot Collaborative

Operation）是智能制造系统中人机协作的具体实现形式，涉及人因工程、机器人学、认知科学及组织管理等多学科交叉问题^[15]。

在人-机器人协同作业中，人因问题主要体现在以下几个方面：一是物理人因问题，包括工作空间布局、可达性设计、体力负荷及疲劳累积等。协作机器人的工作范围和运动轨迹需要考虑人的可达性和舒适度，避免操作者需要过度伸展或扭曲身体。二是认知人因问题，包括信息过载、注意力分配、情境意识及决策负荷等。人机协作界面需要合理呈现机器状态、任务进度和环境信息，避免信息过载导致认知资源耗竭。三是社会人因问题，包括团队沟通、角色冲突、信任建立及文化适应等。人机协作团队需要建立清晰的沟通渠道和协作规范，避免角色模糊和冲突。

人-机器人协同作业的人因问题研究还面临一些特殊挑战。例如，协作机器人的行为可预测性影响人的信任建立和协作效率，过于复杂或不可预测的行为会降低人的情境意识和控制感。又如，协作机器人的外观和交互方式影响人的心理感受和协作意愿，过于拟人化的设计可能引发“恐怖谷”效应，而过于机械化的设计则难以建立情感连接。再如，长时间人机协作可能导致人的技能退化和依赖性增强，需要设计合理的技能保持和轮换机制。

解决人-机器人协同作业中的人因问题，需要采用以人为中心的设计方法（Human-Centered Design），从用户需求分析、概念设计、原型测试到迭代优化的全过程，充分考虑人的因素。同时，需要建立跨学科的研究团队，整合人因工程、机器人学、心理学、设计学及管理学等多领域知识，共同推动人机协作技术的创新发展。

4 数字孪生与增强现实辅助的人机协作

数字孪生和增强现实是支撑智能制造系统中人机协作智能化升级的两项关键技术。数字孪生通过虚实映射实现人机协作的预测优化，增强现实通过虚实融合提升操作者的认知能力和协作效率。

4.1 数字孪生驱动的智能人机协作

数字孪生驱动的智能人机协作，通过构建物理制造系统的虚拟镜像，实现人机协作过程的实时映射、动态仿真和智能优化。在数字孪生框架下，物理空间中的人和机器通过传感器网络实时采集状态数据，传输到虚拟空间进行建模和仿真；虚拟空间的仿真结果和优化方案通过执行器网络反馈到物理空间，

指导实际的人机协作行为。

数字孪生在人机协作中的应用包括协作方案预演、协作过程监控和协作性能优化三个层面。在协作方案预演层面,通过数字孪生模型在虚拟环境中模拟不同的人机协作方案,评估其安全性、效率和可行性,选择最优方案后再部署到物理系统。这种“先仿真后执行”的模式,显著降低了物理试验的成本和风险,特别适用于高价值、高风险的协作任务。在协作过程监控层面,数字孪生实时同步物理系统的运行状态,通过对比物理状态和虚拟状态的差异,检测异常情况和潜在故障,及时预警和干预。在协作性能优化层面,通过分析数字孪生积累的历史数据,挖掘人机协作的优化空间,如任务分配优化、路径规划优化及交互时机优化等。

面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术,进一步将环境要素纳入数字孪生模型,实现人、机器和环境的三元协同优化。环境要素包括温度、湿度、光照、噪声等物理环境因素,以及任务紧急程度、团队氛围、组织文化等社会环境因素。通过多源传感器融合和环境建模技术,数字孪生能够实时感知和预测环境变化,并据此调整人机协作策略。例如,在高温环境下,适当降低机器人的运动速度和协作强度,减少人的热负荷;在紧急任务场景下,优化任务分配和调度策略,提高协作效率和响应速度。

4.2 增强现实辅助的互认知人机安全交互

增强现实(Augmented Reality, AR)技术通过将虚拟信息叠加到真实场景中,增强人对物理环境的感知和理解。在人机协作中,增强现实技术能够提升操作者对机器人状态、协作意图和安全边界的认知,实现互认知的安全交互^[16]。

互认知(Mutual Awareness)是人机协作安全高效运行的重要前提,指人和机器对彼此状态、意图和能力的相互了解。在传统人机协作中,互认知主要依赖操作者的直接观察和推理,信息获取有限且容易出错。增强现实技术通过在操作者的视野中叠加机器人的运动轨迹、工作范围、速度矢量及安全边界等虚拟信息,显著增强了操作者对机器人状态的感知和预测能力。

增强现实辅助的人机安全交互系统包括感知层、认知层和交互层。感知层通过多源传感器(如深度相机、激光雷达、惯性测量单元)实时采集机器人和环境的状况信息。认知层通过数字孪生模型和预测算

法,生成机器人的运动预测、风险评估和协作建议。交互层通过增强现实显示设备(如AR眼镜、头戴式显示器)将虚拟信息以直观、易懂的方式呈现给操作者,并支持语音、手势等自然交互方式。

增强现实辅助的互认知人机安全交互还面临一些技术挑战。一是虚实配准精度,要求虚拟信息与真实场景精确对齐,配准误差会导致信息误导和操作失误。二是显示舒适度,长时间佩戴AR设备可能导致视觉疲劳和眩晕,需要优化显示亮度、对比度和视场角。三是交互自然性,当前的AR交互方式(如手势、语音)在复杂工业环境中可能受到噪声和遮挡的干扰,需要发展更加鲁棒的交互技术。

4.3 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造

工业互联网是实现人机协作系统互联互通和数据共享的重要基础设施。在流程工业中,工业互联网通过连接人、机器、物料和环境,实现制造过程的全面感知、实时分析和智能优化^[17]。

流程工业(如石化、冶金、电力)具有连续生产、工艺复杂、安全风险高等特点,对人机协作提出了特殊要求。一方面,流程工业中的大型设备和高温高压环境,使得现场作业危险度高,需要通过远程人机协作减少人员暴露。另一方面,流程工业中的工艺参数优化和质量控制,需要人的经验和机器的计算能力相结合,实现人机协同的智能制造。

工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式,包括感知-认知-决策-执行四个环节。感知环节通过工业互联网平台汇聚来自传感器、控制系统和企业管理系统等多源数据,实现制造过程的全面数字化感知。认知环节通过大数据分析和人工智能算法,挖掘数据中的规律和知识,建立工艺模型和优化模型。决策环节通过人机协同的决策机制,结合机器的计算优化和人的经验判断,生成最优的控制策略和生产计划。执行环节通过工业互联网将决策指令下发到执行设备,实现制造过程的闭环优化。

在人机协作层面,工业互联网支持远程监控和协作,使专家能够在远离生产现场的情况下,通过数字孪生和增强现实技术,实时了解现场状态,指导现场操作,与现场人员和机器人协同解决复杂问题。这种“远程专家+本地操作者+智能机器人”的协作模式,突破了地理空间的限制,实现了优质人力资源的共享和优化配置。

4.4 面向2035的智能制造技术预见

面向 2035 年的智能制造技术发展,需要系统预见未来技术趋势和发展路径,为人机协作技术的长期规划提供指导^[18]。技术预见方法包括德尔菲法、情景分析法、技术路线图法及文献计量法等,通过专家智慧和数据分析的结合,识别关键技术、评估发展潜力和规划研发路径。

面向 2035 的智能制造技术路线图,将人机协作技术置于智能制造技术体系的核心位置。在技术发展维度,人机协作技术从当前的物理协作(共址协作)向认知协作(远程协作)和情感协作(共生协作)演进。在应用拓展维度,人机协作从当前的装配、搬运等简单任务,向检测、维修、设计等复杂任务拓展,从当前的单一机器人协作向多机器人协同和群体协作拓展。在产业升级维度,人机协作从当前的试点应用向规模化部署和生态化运营演进,形成人机协作的产业集群和创新生态^[19]。

面向 2035 的人机协作技术发展重点包括:一是认知增强型人机协作,通过脑机接口、神经反馈和认知计算技术,实现人与机器在认知层面的直接交互和协同增强。二是情感智能型人机协作,通过情感计算、社会机器人学和伦理 AI 技术,实现人与机器在情感层面的理解和共鸣,建立更加人性化的协作关系。三是自主进化型人机协作,通过持续学习、元学习和自组织技术,使人机协作系统能够自主适应新任务、新环境和新伙伴,实现自我进化和发展。

4.5 面向智能制造的产业模式演变与创新应用

人机协作技术的发展推动了智能制造产业模式的深刻变革,从传统的大规模标准化生产向大规模个性化定制、从产品制造向服务制造、从封闭体系向开放生态转变^[20]。

在大规模个性化定制模式中,人机协作使制造系统能够在保持高效率的同时,满足消费者的个性化需求。协作机器人和智能系统负责标准化和重复性的生产环节,人负责个性化和创造性的设计环节,通过人机协作实现“大规模”与“个性化”的有机统一。例如,在家具制造中,消费者可以通过 AR 技术参与产品设计,设计结果通过数字孪生进行仿真验证,最终由人机协作系统完成生产。

在服务制造模式中,人机协作使制造企业能够向客户提供全生命周期的增值服务。通过远程人机协作,制造企业可以为客户提供设备的远程监控、故障诊断、预测性维护和性能优化等服务。服务制造不

仅延长了产品的价值链,还建立了制造企业与客户的长期合作关系,实现了从“卖产品”向“卖服务”的转型。

在开放生态模式中,人机协作技术平台成为连接制造资源、创新能力和市场需求的重要枢纽。通过人机协作云平台,制造企业可以共享协作机器人和智能算法资源,中小企业可以低成本地获取先进制造能力,创新者可以快速验证和迭代新产品。这种开放共享的生态模式,降低了智能制造的准入门槛,促进了制造能力的民主化和普及化。

5 智能制造环境下人机协作的国际前沿发展

人机协作技术是全球智能制造研究的前沿热点,欧美等发达国家和地区在该领域开展了大量基础研究和应用探索,形成了各具特色的技术路线和发展模式^[21]。

5.1 协作机器人在制造应用中的国际进展

欧美国家在协作机器人制造应用方面起步较早,形成了较为成熟的技术体系和应用生态。欧洲以德国、丹麦为代表,强调协作机器人的精密性和安全性,注重与工业 4.0 体系的融合。德国弗劳恩霍夫研究所开展了大量协作机器人基础研究,在力控制、安全交互和人机协同规划等方面取得了重要进展。丹麦优傲机器人(Universal Robots)是全球协作机器人市场的领导者,其产品以易编程、高安全性和低成本著称,广泛应用于装配、检测、包装等制造场景。

美国以波士顿动力、Rethink Robotics 等公司为代表,强调协作机器人的智能性和适应性,注重与人工智能技术的结合。波士顿动力的 Spot 机器人和 Atlas 机器人展示了高度的运动智能和环境适应能力,虽然主要面向非制造领域,但其技术成果对制造协作机器人的发展具有重要启发。Rethink Robotics 的 Baxter 和 Sawyer 机器人是最早的商用协作机器人之一,虽然公司已停止运营,但其开创性的设计理念和技术探索为后续发展奠定了基础。

日本以发那科、安川电机等传统工业机器人巨头为代表,强调协作机器人与现有自动化系统的兼容性和集成性,注重渐进式升级而非颠覆式替代。日本企业在协作机器人的人机界面设计、安全功能集成及可靠性保障方面具有丰富经验,其产品在汽车、电子等精密制造领域具有较强竞争力。

国际协作机器人研究的前沿方向包括:一是移动协作机器人,将协作机器人的操作能力与移动平

台的机动能力相结合,实现更大工作范围的灵活协作。二是双臂协作机器人,通过双臂的协调配合,模拟人类的双手操作,完成更加复杂的装配和操作任务。三是群体协作机器人,通过多机器人的分布式协作,实现大规模、高效率的协同制造。

5.2 智能制造环境中人机协作的系统性研究

智能制造环境中的人机协作是一个复杂的系统工程,涉及技术、组织、管理及文化等多个维度。近年来,国际研究从单一的技术优化转向系统性的协同优化,强调人机协作系统的整体性能提升^[22]。

在技术系统集成方面,人机协作系统需要与制造执行系统(MES)、企业资源计划(ERP)、产品生命周期管理(PLM)及供应链管理系统(SCM)等进行深度集成,实现数据互通和流程协同。通过制造物联网(IIoT)和工业互联网平台,人机协作系统可以实时获取订单信息、工艺参数、质量标准和库存状态,动态调整协作策略和生产计划。通过数字主线(Digital Thread)技术,人机协作过程的数据可以追溯至产品设计阶段,支持产品全生命周期的质量管理和持续改进。

在组织管理创新方面,人机协作的引入需要相应的组织架构、工作流程和绩效评价体系进行调整。传统的科层制组织结构可能难以适应人机协作的灵活性和动态性,需要向扁平化、网络化和自组织方向演变。传统的工作流程可能将人和机器的任务严格分离,需要向融合化、协同化和迭代化方向重构。传统的绩效评价体系可能以产量和效率为主要指标,需要向综合考虑质量、安全、满意度及可持续性的多维指标体系转变。

在文化理念塑造方面,人机协作的成功实施需要建立开放、包容、创新的组织文化。管理层需要树立以人为本的理念,将人机协作视为提升员工能力和价值的手段,而非降低成本的工具。员工需要建立终身学习的意识,积极拥抱技术变革,不断提升自身的数字素养和协作能力。企业需要建立人机协作的伦理准则,明确机器辅助人、增强人而非替代人的基本原则,保障员工的权益和尊严。

5.3 数字孪生增强制造系统中的人机协作

数字孪生技术在国际人机协作研究中受到高度关注,被视为实现人机协作智能化升级的关键使能技术^[23]。数字孪生增强的人机协作系统,通过构建物理系统的虚拟镜像,实现协作过程的实时映射、预

测分析和优化控制。

在制造系统设计中,数字孪生支持人机协作方案的虚拟验证和优化。通过建立制造系统的数字孪生模型,可以在虚拟环境中模拟不同的人机布局、任务分配和交互模式,评估其对生产效率、安全性和人体工效的影响,选择最优方案后再进行物理部署。这种“数字先行”的设计模式,显著缩短了系统开发周期,降低了试错成本。

在制造系统运行中,数字孪生支持人机协作过程的实时监控和预测维护。通过对比物理状态和虚拟状态的差异,可以检测协作过程中的异常情况和潜在风险,及时预警和干预。通过预测仿真,可以预测机器人在未来几秒的运动轨迹,为人的安全避让和协作配合提供时间窗口。

在制造系统优化中,数字孪生支持人机协作性能的定量评估和持续改进。通过积累和分析数字孪生的历史数据,可以识别人机协作的瓶颈环节和优化空间,如任务分配不合理、交互时机不恰当、路径规划不优化等。通过机器学习和优化算法,可以自动生成改进方案,实现人机协作系统的自我进化。

数字孪生增强人机协作还面临一些挑战,包括模型精度与计算效率的权衡、多物理场耦合建模的复杂性、虚实同步的实时性保障及数据安全和隐私保护等。解决这些挑战需要跨学科的技术攻关和系统性的工程实践。

5.4 预见性认知制造范式

预见性认知制造(Proactive Cognitive Manufacturing)是人机协作技术发展的前沿方向,强调机器不仅能够响应人的指令,还能够预测人的需求、理解人的意图并主动提供协助^[24]。这一范式将人机协作从被动响应型提升为主动预见型,显著提高了协作效率和用户体验。

预见性认知制造的核心在于构建可预见的认知制造系统,该系统具备以下能力:一是情境感知能力,通过多源传感器融合和场景理解算法,实时感知制造环境的状态和变化。二是意图预测能力,通过分析人的行为模式、历史数据和上下文信息,预测人的下一步行动和协作需求。三是主动规划能力,基于预测结果,提前规划机器人的行动方案,在恰当时机主动提供协助。四是自适应学习能力,通过与人的持续交互,学习人的偏好和习惯,不断优化协作策略。

预见性认知制造的实现依赖于工业物联网、大

数据分析和机器人学习等技术的融合。工业物联网提供了全面感知制造环境的基础设施,大数据分析提供了挖掘规律和知识的算法工具,机器人学习提供了从交互经验中学习协作策略的方法框架。通过这些技术的综合应用,机器人能够从“被动执行者”转变为“主动协作者”,从“工具”转变为“伙伴”。

预见性认知制造在装配、搬运、检测等制造场景中具有广阔的应用前景。例如,在协作装配中,机器人能够预测操作者下一步需要的零件和工具,提前准备并递送到合适位置;在协作搬运中,机器人能够预测操作者的搬运意图和路径,主动调整姿态配合搬运;在协作检测中,机器人能够预测操作者的检测关注点,主动调整视角和照明,提供最佳的检测条件。

5.5 危险制造环境中的远程人机协作

在某些危险制造环境(如高温、高压、有毒、辐射环境)中,人员直接进入现场作业存在严重的安全风险。远程人机协作通过信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)实现人与机器人的远程交互和协同控制,使操作者能够在安全区域操控现场的机器人完成任务^[25]。

远程人机协作系统包括现场层、传输层和远程层三个部分。现场层包括协作机器人、传感器网络和本地控制器,负责执行操作指令和采集环境信息。传输层包括通信网络和边缘计算节点,负责数据的实时传输和预处理。远程层包括操作界面、数字孪生模型和远程控制器,负责呈现现场状态、接收操作者指令和生成控制策略。

远程人机协作的关键技术包括临场感(Telepresence)技术、时延补偿技术和共享控制技术。临场感技术通过多模态反馈(视觉、听觉、触觉、力觉)使操作者获得身临其境的操控体验,提高远程操作的精确性和自然性。时延补偿技术通过预测控制和预测显示,补偿通信时延对系统稳定性和操作性能的影响。共享控制技术通过将机器人的自主控制与操作者的远程控制相结合,在通信中断或操作者失误时,机器人能够自主维持安全状态,提高系统的可靠性和安全性。

远程人机协作在核设施维护、深海作业、太空探索及疫情期间的无人化生产等领域具有重要应用价值。随着5G/6G通信、边缘计算和虚拟现实技术的

发展,远程人机协作的实时性、沉浸感和可靠性将不断提升,应用范围也将不断拓展。

6 结论与展望

本文系统综述了智能制造系统中人机协作技术的研究进展,主要结论如下:

(1) 人机协作技术是实现以人为本智能制造的关键使能技术。从工业4.0到工业5.0的演进过程中,人机关系经历了从人机共存、人机交互、人机合作到人机协作乃至人机共生的深刻转变,人本智造理念强调将人的福祉、技能发展和工作意义置于制造系统设计和运行的核心位置。

(2) 协作机器人智能控制与人机安全交互技术取得了显著进展。力控制、视觉伺服、碰撞检测及安全控制等技术的成熟,使协作机器人能够在无物理隔离的条件下与人共享工作空间,实现安全高效的物理协作。人机智能协同研究进一步推动了人与机器在认知层面的深度协作。

(3) 人因工程与智能任务分配研究为人机协作系统的人性化设计提供了理论基础。面向人本智造的新一代操作工培养、工作场所人机协作对员工的影响分析,以及人工智能时代人机协作工作模型的构建,为人机协作系统的社会可持续性和组织适应性提供了保障。

(4) 数字孪生与增强现实技术为人机协作的智能化升级提供了重要支撑。数字孪生通过虚实映射实现协作过程的预测优化,增强现实通过虚实融合提升操作者的认知能力和协作效率,两者结合显著提升了人机协作系统的智能化水平和用户体验。

(5) 国际前沿发展表明,人机协作技术正从被动响应型向主动预见型演进,从共址协作向远程协作拓展,从单一机器人协作向多机器人协同和群体协作发展。预见性认知制造和危险环境远程人机协作代表了人机协作技术的重要发展方向。

展望未来,智能制造系统中人机协作技术的发展将呈现以下趋势:一是认知协作深化,通过脑机接口、神经反馈和认知计算技术,实现人与机器在认知层面的直接交互和协同增强;二是情感协作发展,通过情感计算和社会机器人学技术,建立更加人性化的协作关系;三是自主协作进化,通过持续学习和自组织技术,使人机协作系统具备自主适应和自我进化的能力;四是生态协作拓展,通过人机协作云平台,实现制造能力的共享和协同,构建开放包容的人

机协作创新生态。随着上述技术的不断突破,人机协作必将在智能制造中发挥更加重要的作用,推动制造业向更高质量、更可持续、更人性化的方向发展。

参考文献

- [1] 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): 58-67.
- [2] 王柏村, 易兵, 刘振宇, 等. HCPS 视角下智能制造的发展与研究[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-16.
- [3] 杨赓, 周慧颖, 王柏村. 数字孪生驱动的智能人机协作: 理论、技术与应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 279-291.
- [4] 鲍劲松, 张荣, 李婕, 等. 面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 103-115.
- [5] 姚锡凡, 马南峰, 张存吉, 等. 以人为本的智能制造: 演进与展望[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 1-16.
- [6] 黄海丰, 刘培森, 李擎, 等. 协作机器人智能控制与人机交互研究综述[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 531-544.
- [7] 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(13): 1-14.
- [8] 孙效华, 张义文, 秦觉晓, 等. 人机智能协同研究综述[J]. 包装工程, 2020, 41(22): 1-12.
- [9] 马南峰, 姚锡凡, 陈飞翔, 等. 面向工业 5.0 的人本智造[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 88-102.
- [10] 刘泽双, 韩金, 王一帆. 智能制造人机协作运行功能标准模型研究[J]. 科技进步与对策, 2022, 39(20): 1-10.
- [11] 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): 1-12.
- [12] 黄思翰, 王柏村, 张美迪, 等. “面向人本智造的新一代操作工: 参考架构、使能技术与典型场景”[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 1-16.
- [13] 王振源, 姚明辉. 工作场所人机协作对员工影响的研究述评[J]. 外国经济与管理, 2022, 44(5): 1-16.
- [14] 李慧, 李贵卿. 人工智能时代人机协作工作模型构建研究[J]. 现代管理, 2020, 10(5): 1-10.
- [15] 张岚云, 刘怡宏, 王翀姿, 等. 人-机器人协同作业中的人因问题研究综述[J]. 电子机械工程, 2024, 40(1): 1-10.
- [16] 郑湃, 李成熙, 殷悦, 等. 增强现实辅助的互认知人机安全交互系统[J]. 机械工程学报, 2023, 59(6): 173-184.
- [17] 柴天佑, 刘强, 丁进良, 等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(11): 1-16.
- [18] 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(18): 1-16.
- [19] 许为, 高在峰, 葛列众. 智能时代人因科学研究的新范式取向及重点[J]. 心理学报, 2024, 56(3): 363-376.
- [20] 薛源, 臧冀原, 孔德婧, 等. 面向智能制造的产业模式演变与创新应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 1-16.
- [21] MATHESON E, MINTO R, ZAMPIERI E G G, et al. Human-robot collaboration in manufacturing applications: A review[J]. Robotics, 2019, 8(4): 100.
- [22] OTHMAN U, YANG E. Human-robot collaborations in smart manufacturing environments: Review and outlook[J]. Sensors, 2023, 23(12): 5663.
- [23] BARATTA A, CIMINO A, LONGO F, et al. Digital twin for human-robot collaboration enhancement in manufacturing systems: Literature review and direction for future developments[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 187: 109764.
- [24] LI S, WANG R, ZHENG P, et al. Towards proactive human-robot collaboration: A foreseeable cognitive manufacturing paradigm[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 60: 547-552.
- [25] LIU H, WANG L. Remote human-robot collaboration: A cyber-physical system application for hazard manufacturing environment[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 54: 24-34.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS