

·智能决策与博弈·

基于HCPS的智能制造可重构性 研究：发展现状和趋势展望



□付超 薛旻 占倩珊 丁晓艺 侯冰冰 吴子健
[合肥工业大学 合肥 230009]

【摘要】 【目的/意义】基于人-信息-物理系统 (HCPS) 的智能制造方法研究是推动以智能制造为核心的先进制造业发展和变革的重要基础理论。因此,围绕基于HCPS的智能制造可重构性开展回顾性综述分析,为丰富基于HCPS的智能制造方法体系具有重要的理论意义。【设计/方法】在系统性剖析相关基础理论和研究现状的基础上,明确指出了基于HCPS的智能制造可重构性发展趋势和研究展望。【结论/发现】围绕机床可重构性、生产线可重构性和智能车间可重构性,当前已积累了较为丰富的研究成果,但是对于智能工厂可重构性的研究尚处于起步阶段。基于上述发现,深入分析并提出了智能制造可重构方法体系、基于HCPS的智能工厂可重构性和面向工业互联网的智能制造可重构性的相关研究展望,推动了智能制造可重构性的理论研究及其在未来智能工厂中的应用发展。

【关键词】 HCPS; 智能制造; 可重构性; 可重构制造系统

[中图分类号] TP391

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2021)-1103

Research on Reconfigurability of Intelligent Manufacturing Based on HCPS: Development Status, Trend and Prospect

FU Chao XUE Min ZHAN Qian-shan DING Xiao-yi HOU Bing-bing WU Zi-jian
(Hefei University of Technology Hefei 230009 China)

Abstract [Purpose/Significance] The researches of intelligent manufacturing methods based on Human-Cyber-Physical System (HCPS) are important basic theories to promote the development and transformation of the advanced manufacturing industry with intelligent manufacturing as the core. Therefore, it is of great theoretical significance to carry out a retrospective literature review and analysis on the reconfigurability of intelligent manufacturing based on HCPS for enriching the intelligent manufacturing method system based on HCPS. [Designs/Methodology] Based on the relevant basic theories and systematic analysis of the research status, this paper clearly points out the development trend and research prospect of HCPS-based intelligent manufacturing reconfigurability. [Conclusions/Findings] Currently, there are abundant research results of the reconfigurability of machine tools, production lines, and intelligent workshops. However, the researches on the reconfigurability of intelligent factory are still in the initial stage. Based on the above findings, this paper deeply analyzes and proposes the prospect of reconfigurable method system of intelligent manufacturing, the reconfigurability of intelligent factory based on HCPS, and reconfigurability of intelligent manufacturing for the industrial internet, and promotes

[收稿日期] 2021-05-18

[基金项目] 国家重点研发计划项目 (2018AAA0101705)。

[作者简介] 付超 (1978-) 男, 博士, 合肥工业大学管理学院教授、博士生导师; 薛旻 (1990-) 女, 博士, 合肥工业大学管理学院讲师; 占倩珊 (1997-) 女, 合肥工业大学管理学院硕士研究生; 丁晓艺 (1992-) 女, 合肥工业大学管理学院博士研究生; 侯冰冰 (1997-) 女, 合肥工业大学管理学院硕士研究生; 吴子健 (1996-) 男, 合肥工业大学管理学院博士研究生。

theoretical researches on the reconfigurability of intelligent manufacturing and its applications in future intelligent factories.

Key words HCPS; intelligent manufacturing; reconfigurability; reconfigurable manufacturing systems

引言

制造业代表着一个国家的生产力水平,是国民经济的支柱性产业。过去的200多年里,在经历了第一次、第二次和第三次工业革命后,制造业的世界格局在不断发生着变化^[1]。以人工智能、云计算、物联网等为代表的新一代信息技术的发展,正推动着以智能制造为核心的第四次工业革命的到来。如何把握这一轮工业革命的浪潮,促使制造业成功完成产业升级,实现制造大国向制造强国的转变,是当前我国制造业面临的重要挑战。基于此,围绕智能制造的发展历程,深入分析和揭示智能制造的核心特征和发展机理便显得尤为重要。

智能制造自诞生以来,就受到学术界和工业界的广泛关注^[2-4]。新一代信息技术,作为技术革命历史性的突破,在泛在感知、群体智能、动态优化、敏捷响应等方面呈现出新的能力和特性,为人类认识自然、改造社会、大幅提高生产力,提供了新的技术支撑。随着新一代信息技术和智能制造技术的不断融合和发展,智能制造逐步从传统制造向数字化制造、网络化制造和以数字化、网络化、智能化为核心的新一代智能制造迈进^[5]。传统制造系统主要包含两个部分,即人-物理系统(Human-Physical System, HPS),通常是利用人对物理机器的操作和控制完成制造任务。不同于传统制造,数字化制造和网络化制造中增加了信息系统,用于替代人类完成部分劳动,可以通过操作信息系统来部分控制物理系统。这两类制造模式通常分别被认为是人-信息-物理系统(Human-Cyber-Physical System, HCPS) 1.0和1.5。然而,新一代智能制造作为未来制造的前沿方向,被认为是HCPS 2.0阶段。该阶段不仅仅只是HCPS 1.0和1.5的简单优化,更强调以人为中心,极大地开发和释放人的智慧潜力,将人与机器深度融合在一起,实现真正的智能化生产。基于HCPS和智能制造的发展历程,可以清楚地看到,HCPS为揭示智能制造发展机理提供了重要的理论基础。

基于上述发现,众多学者从HCPS视角出发,深入剖析智能制造,特别是新一代智能制造的基本原理、技术特征和发展趋势^[6]。明确指出,新一代智能制造是一个基于HCPS的集成大系统。高度集成、柔性灵活、决策闭环、以人为中心等是智能制

造要具备的重要能力。然而,如何在HCPS视角下提出智能制造获取所要具备能力的有效方法和途径,是当前围绕智能制造开展的研究热点和难点之一。

为解决这一难题,本文以可重构制造系统特征为基础,围绕基于HCPS的智能制造可重构性开展回顾性综述分析,在系统性剖析研究现状的基础上,提出基于HCPS的智能制造可重构性研究展望,为解决基于HCPS视角的智能制造核心能力获取问题提供方法参考。具体而言,本文首先分别介绍了智能制造、HCPS及可重构性的定义和内涵,并利用Institute for Scientific Information (ISI)数据库,以“智能制造”“可重构”“智能工厂”等为关键词,对智能制造可重构性的发展变化进行了简要的统计分析。进而,本文系统分析了面向智能制造的HCPS研究现状和面向智能制造的可重构制造系统的特征和发展趋势。其中,重点分析了HCPS和可重构制造系统之间的关系,并基于此,给出了基于HCPS的智能制造可重构性的定义和内涵。随后,本文基于上述理论分析结果,主要围绕机床可重构性、生产线可重构性、智能车间可重构性和智能工厂可重构性四个方面,对面向智能制造的可重构性开展了系统而翔实的回顾性分析。在此基础上,本文聚焦于智能制造可重构方法体系、基于HCPS的可重构智能工厂和面向工业互联网的智能制造可重构性,阐述了基于HCPS的智能制造可重构性的下一步研究展望。上述研究工作,对于丰富基于HCPS的智能制造方法体系,推动以智能制造为核心的智能工厂的应用发展具有重要的理论意义和实践价值。

一、定义和内涵

新兴信息技术与传统制造的不断融合推动了智能制造的诞生和快速发展,替代了大量的重复性体力劳动,大幅提高了社会生产力。Wright和Bourne首次提出智能制造的概念,即通过集成知识工程、制造软件系统、机器人视觉和机器人控制,针对专家知识与工人技能进行建模,进而使智能机器能够在无人干预状态下实现小批量生产^[4]。该定义主要从技术层面解释了智能制造的含义,将智能制造定义为一类面向生产制造过程的工程技术。

然而,迄今为止,尚无公认的智能制造的标准

概念。认可度较高的概念是由美国国家标准与技术研究院提出的,即完全集成和协作的制造系统,能够实时响应工厂、供应链网络、客户不断变化的需求和条件。国内多位学者也曾提出智能制造的相关概念,其中具有代表性是周佳军和姚锡凡,他们认为智能制造是在新一代信息技术和人工智能等技术的基础上通过感知、人机交互等类人行为操作来实现产品设计、制造、管理与维护等一系列流程,是信息化和工业化融合的集中体现^[1]。

智能制造由智能制造系统和智能制造技术组成,智能制造系统是智能制造的核心^[2]。智能制造系统是一类由智能装备、智能控制和智能信息共同组成的人机一体化制造系统,它集结了人工智能、柔性制造、虚拟制造、系统控制、网络集成、信息处理等学科和技术的发展^[3,7]。

在智能制造的发展过程中,同样伴随着HCPS(人、信息系统和物理系统)的演进和发展。换言之,HCPS的不断发展也改变着智能制造内涵和体系的发展。HCPS是以人为中心,由人-物理系统(HPS)进化而来,即一种由人、信息系统和物理系统组成,以优化的方式实现特定目标的复合智能系统^[8-11]。HCPS包括HPS、人-信息系统(Human-Cyber-System, HCS)和信息-物理系统(Cyber-Physical-System, CPS)等子系统。基于HCPS视角,王柏村等提出以数字化、网络化、智能化为主的新一代智能制造,其本质就是一个基于HCPS的集成大系统^[6]。

在智能制造系统的自动化、网络化、智能化等众多特性之中,可重构性是其中一个重要的特性。美国Lowa州立大学的Lee教授将可重构性定义为一种以低成本和短周期重组制造系统的能力^[12]。祁海铭将可重构性定义为在一定的能量约束条件下,控制系统在故障后通过应用主动或被动容错控制策略仍然保持可控、可观测性的能力^[13]。以可重构性为核心,可重构制造系统的概念被提出了,并受到了众多学者的广泛关注,这一概念将在下文中深入分析。

为更直观地了解面向智能制造的可重构性当前的发展趋势,本文以“智能制造”“可重构”“智能工厂”等为关键词,对智能制造可重构性的发展变化进行了简要的统计分析。基于Institute for Scientific Information (ISI)数据库,本文首先统计了1983~2021年智能制造可重构性相关的文献发表数量,以及截至2021年4月前所统计文章相应的引用数量,如图1与图2所示。由图1、2可得,智能制

造可重构性相关研究萌芽于20世纪80年代,并于2000年后得以加速发展。同时,智能制造可重构性近五年研究增长达到巅峰,并有不断上升的趋势,说明该领域在当前仍有着可观的研究前景。

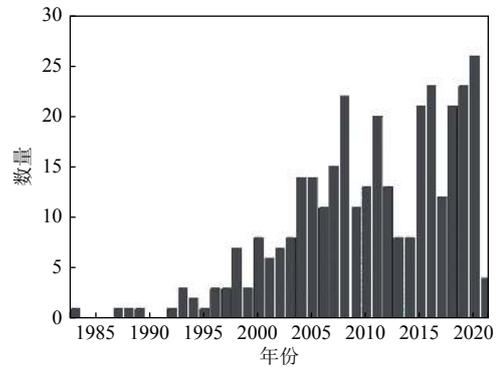


图1 智能制造可重构性研究发表数量

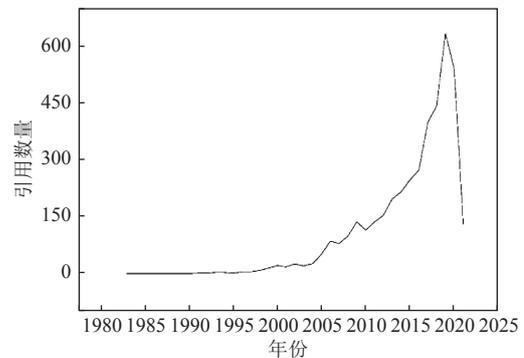


图2 智能制造可重构性研究被引用数量

围绕智能制造可重构性的研究发表于不同期刊及会议上,且发表于会议居多,其中有近4.478%研究发表于IFAC Papers Online,如表1所示。

表2与表3给出智能制造可重构性研究的主要来源国家/地区,以及来自不同国家/地区的相关学者。目前智能制造可重构性相关研究主要集中于中国,研究量占比为22.090%,而美国仅次于中国,研究量占比为14.328%。相关研究量最多的三位学者分别为来自葡萄牙布拉干萨理工大学的Leitao Paulo、瑞典吕勒奥理工大学的Vyatkin Valerity以及中国华南理工大学的李迪。

如表4所示,智能制造可重构性研究涵盖不同研究方向,包括工程、计算机科学、自动化控制系统、机器人、仪器仪表等。其中,工程与计算机科学为主要研究方向,研究量占比高达92.537%与75.522%。同时,研究方向涉及商业经济学、材料科学、数学、光学等,表明智能制造可重构性研究所涉及学科范围较广、领域交叉性较强。

表 1 智能制造可重构性研究来源出版物

| 来源出版物 | 比例 (%) |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|
| 《IFAC Papers Online》 | 4.478 |
| 《Procedia CIRP》 | 2.985 |
| 《IEEE International Conference on Industrial Informatics》 | 2.687 |
| 《IEEE Industrial Electronics Society》 | 1.493 |
| 《International Journal of Advanced Manufacturing Technology》 | 1.493 |
| 《International Journal of Production Research》 | 1.493 |
| 《Journal of Intelligent Manufacturing》 | 1.493 |
| 《Proceedings of the SPIE the International Society for Optical Engineering》 | 1.493 |
| 《Computer Integrated Manufacturing Systems》 | 1.194 |
| 《Lecture Notes in Computer Science》 | 1.194 |
| 《Proceedings of the Society of Photo Optical Instrumentation Engineers》 | 1.194 |

表 2 智能制造可重构性研究来源国家/地区

| 国家/地区 | 数量 | 比例 (%) |
|-------|-----|--------|
| 中国 | 74 | 22.090 |
| 美国 | 48 | 14.328 |
| 意大利 | 22 | 6.567 |
| 英国 | 22 | 6.567 |
| 英格兰 | 21 | 6.269 |
| 加拿大 | 20 | 5.970 |
| 德国 | 20 | 5.970 |
| 法国 | 15 | 4.478 |
| 罗马 | 14 | 4.179 |
| 葡萄牙 | 13 | 3.881 |
| 芬兰 | 10 | 2.985 |
| 墨西哥 | 10 | 2.985 |
| 新西兰 | 10 | 2.985 |
| 其他 | 107 | 31.952 |

表 3 智能制造可重构性研究相关学者

| 作者 | 数量 | 比例 (%) |
|---------------|----|--------|
| Leitao P. | 10 | 2.985 |
| Vyatkin V. | 9 | 2.687 |
| Li D. | 7 | 2.09 |
| Barbosa J. | 6 | 1.791 |
| Colombo A. W. | 6 | 1.791 |
| Lastra Jlm | 6 | 1.791 |
| Norrie D. H. | 6 | 1.791 |
| Wan J. | 6 | 1.791 |
| Zoitl A. | 6 | 1.791 |
| Bin Wu | 5 | 1.493 |

表 4 智能制造可重构性主要研究方向

| 研究方向 | 数量 | 比例 (%) |
|---------|-----|--------|
| 工程 | 310 | 92.537 |
| 计算机科学 | 253 | 75.522 |
| 自动化控制系统 | 165 | 49.254 |
| 机器人 | 66 | 19.701 |
| 仪器仪表 | 65 | 19.403 |
| 商业经济学 | 52 | 15.522 |
| 数学 | 36 | 10.746 |
| 材料科学 | 35 | 10.448 |
| 光学 | 25 | 7.463 |
| 电子通信 | 25 | 7.463 |
| 运筹与管理科学 | 19 | 5.672 |
| 其他 | 143 | 42.698 |

本文以5年为单位,进一步分析了智能制造可重构性不同研究方向的发展情况,如图3所示。由图3可得,智能制造可重构性在“工程”“计算机科学”以及“自动化控制系统”方面研究量自20世纪80年代以来保持稳步增长,并于2006~2010年达到波峰。2011~2015年相关研究增长速度有所减缓,甚至稍有下降,但2016~2020年又恢复增长速度,预估未来相应研究将继续保持增长趋势。此外,智能制造可重构性在“机器人”“仪器仪表”及“数学”等方面研究量虽然基本保持增长趋势,但增长速度较为缓慢。

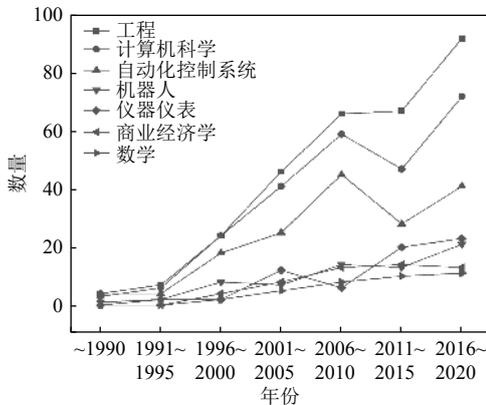


图 3 智能制造可重构性主要研究方向的发展情况

二、基础理论及发展现状

(一) 面向智能制造的HCPS研究现状

智能制造的发展过程本质上也是HCPS发展的过程^[14]。HCPS有两条具有代表性的发展主线:其一是由CPS扩展得到,在CPS的基础上,HCPS考虑了人在信息传播技术的支持下与网络系统和物理系统之间的互动和合作^[15]。其二是从原始的人-物二元系统(HPS)过渡到人-网-物三元系统(HCPS)。

国内关于HCPS的研究还处于起步阶段。王柏

村等基于HCPS的系统组成和内涵,探讨了智能制造的演进过程和新一代智能制造的主要特征,从人、信息系统、物理系统及系统集成等角度提出发展建议,为我国相关制造企业践行HCPS和发展智能制造技术提供参考^[16]。周济等基于HCPS的角度回顾智能制造的发展进程,深度剖析了用于新一代智能制造的HCPS的作用、特征、技术框架和关键技术,进而总结并展望在智能制造中实施HCPS所面临的关键挑战^[5]。

国际上关于HCPS的研究较早于国内,但也处于探索阶段。Ma等将人引入传统的CPS过程中,提出用于CPS数据和决策智能的闭环计算框架并且对该闭环的关键特征进行了定义,通过审查和比较,总结了建立人参与的CPS智能闭环的关键未来机遇^[17]。Emmanouilidis等提出一种新观点,即人能够与认知能力联系起来并参与生产制造过程,并强调信息管理在工业系统中的作用,此外,还提供了技术支持者的示例,这些技术支持者可以在与生产环境相关的应用案例中将人置于循环之中^[18]。Wang等基于人工智能发展过程,指出传统制造到智能制造的发展历程也是原始HPS到HCPS的发展历程,此外,明确表明HCPS揭示了智能制造发展的基本准则^[15]。Sun等基于工业互联网和可穿戴科技的系统角度提出健康运营商4.0(HO4.0)概念,构建一个统一框架支持不同技术的融合来实现这一新概念,此外,开发了一个原型系统并进行了相关实验以验证所提出的系统架构和实现框架的可行性^[19]。Flores等从人类技能的角度来对比人与机器之间的相似性和优势,该分析突显了一些已经转移到技术上的人类能力并且提供了人机能力差异的更新列表,此外,确定了参与HCPS的人为因素以及与HCPS合作时包括和要求的技能^[20]。Liu和Wang回顾了HCPS的发展进程,引出并明确了HCPS中的部分重要概念,进而讨论了从系统工程的角度建立HCPS科学基础的关键挑战及未来研究方向^[21]。Wang等构造了一个统一的框架来理解HCPS中的学习和智能并提出一个对工业4.0更加现实和整体的理解,此外,介绍了HCPS学习和智能的要素和子系统,讨论了实施以人为中心的工业4.0将要面临的挑战^[22]。由此得出,HCPS是支持智能制造未来发展的理论基础,从HCPS视角探究智能制造的可重构性对于传统制造转向智能制造的影响是尤为重要的^[5]。

(二) 面向智能制造的可重构性研究现状

1. 可重构制造系统定义

以可重构性为核心所形成的制造系统,被称为

可重构制造系统(Reconfigurable Manufacturing System, RMS)。本文将以RMS为核心深入分析面向智能制造的可重构性的研究现状。1999年,在国际生产工程研究学会(CIRP)年会上,Koren教授等提出了可重构制造系统(RMS)的概念:“可重构制造系统是一种能在同一零件族内快速改变系统结构、软硬件模块,迅速调整生产能力和生产功能以快速响应瞬息万变的市场需求和客户定制要求的制造系统。”^[23]

北京理工大学的梁福军等将可重构制造系统定义为:一种对市场需求变化具有快速响应能力的可重新构形的可变制造系统,该系统能够基于现有自身系统在系统规划与设计规定的范围内,通过系统构件自身变化和数量增减以及构件间连续变化等方式动态地改变其构形,从而达到根据发生的变化调整生产过程、生产功能和生产能力,实现短系统研制周期、低重构成本以及高加工质量和经济效益的目标^[24]。

2. 可重构制造系统特征

区别于传统制造系统,可重构制造系统主要具备重构性、经济性、定制性、集成性、模块化、可诊断性、可转换性等特征。具体而言,重构性是可重构制造系统区别于其他制造系统最本质的特点。重构性的实现主要依靠制造模块的合理划分和接口的科学设计,根据结构的变化实现不同的功能。可重构制造系统的重构性在克服了一般柔性系统的冗余烦琐和周期长等缺点的基础上,增加了制造柔性。可重构制造系统的定制性特点可以满足客户个性化和多样化的需求,同时能够快速响应市场变化和客户的需求变化。定制性特点增加了可重构制造系统的柔性和响应速度,同时缩短了研发周期、降低了管理成本。可重构制造系统的集成性是指系统中各个设备和模块具备可集成化的能力。一般而言,可重构制造系统中的所有主要部件,包括硬件和软件都是模块化的。此外,可重构制造系统能够对重构后的产品加工质量和可靠性等进行辨识和检测^[25]。

3. 发展历程

第一,可重构制造系统出现的原因。可重构制造系统的提出和传统生产线制造模式(Transfer Line, TL)以及柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)密不可分,传统生产线制造模式和柔性制造系统是制造业应用最为广泛的两种基本制造模式,但这两种制造模式都有其优缺点^[26]。FMS具有高柔性但生产率较低,TL具有高生产率,但柔性较低。从柔性和生产率的关系来看,同时具备

高生产率和高柔性的制造系统目前尚不存在, 需要提出一个兼具高柔性和高生产率的新型制造系统, 即可重构制造系统。

第二, 可重构制造系统的发展趋势。可重构制造系统一经提出, 便受到了学术界和工业界的广泛关注。目前而言, 围绕以下三个方面, 形成了可重构制造系统的主要研究方向。(1) 系统建模: RMS的系统建模通过建立能反映RMS的各要素随时间发生变化的随机模型, 准确判断RMS性能与各因素之间的关系, 进而对系统性能进行优化^[27-28]。

(2) 模块化设计: RMS的模块化设计包括硬件和软件的模块化设计。硬件模块化设计是指采用模块化设计的各种设备, 如可重构机床、工业机器人、夹具和物流设备等。软件模块化设计是指制造系统的控制系统采用模块化设计, 在系统重构过程中能够快速完成控制系统的调整^[29-30]。(3) 设施布局与优化: RMS的设施布局与优化技术可以根据费用、质量、系统稳定性等要求, 选择最优重构方式^[31-33]。

(三) HCPS和RMS之间的关系

HCPS和RMS本质上都是一种通过集成子系统或模块构成的具有一定智能的制造系统, 这里从三个方面对HCPS和RMS的相同点进行阐述和分析, 分别是智能性、系统性和集成性。

第一, 智能性是HCPS最基本的特征, 即系统能够通过不断优化调整进而实现自身行为趋于最优。在智能制造的生产过程中, RMS能够通过增强子系统或模块的可重构性, 进而实现快速响应变化的需求生产出符合客户要求的产品, 依托于优化、调度、人工智能算法等, 使得RMS系统具备了所需的智能性。因此, 从智能制造的视角看, HCPS和RMS都具备智能性这一特征。

第二, 从系统的角度来看, HCPS和RMS本质上都是一类集成系统。HCPS是由人、信息系统和物理系统构成的复合系统, 其包括HPS、HCS和CPS等子系统。RMS是由多个可重构的子系统或模块集成的能够通过自调整、自优化实现特定目标的系统。总的来看, HCPS和RMS都具备系统性这一特征。

第三, HCPS和RMS都不是由单一系统构成, 二者都是通过集成具有不同功能和作用的子系统或模块得到的复杂系统。因此, HCPS和RMS都具备集成性这一特征。

尽管HCPS和RMS具有以上三个相同点, 但二者所强调的侧重点不同。HCPS强调的是通过融合

先进的人工智能和信息技术来智能化制造过程, 而先进的人工智能技术和信息技术却是RMS所缺失或者研究较少的方向。RMS强调的是通过提高系统的可重构性来快速响应市场需求, 其中包括机床可重构性、生产线可重构性、车间可重构性等, 而HCPS相关研究尚未明确涉及系统的可重构性这一特性。

基于上述对HCPS和RMS的分析, 这里给出基于HCPS的智能制造可重构性的新定义, 即基于人、信息系统和物理系统的集成系统, 深度融合新一代信息技术和制造业以实现产品全生命周期流程的自组织、可重构、智能化的复杂制造系统。

三、关键技术及研究现状

围绕智能制造的可重构性特征, 以下主要从机床可重构性、生产线可重构性、智能车间可重构性和智能工厂可重构性开展回顾分析。

(一) 机床可重构性

在过去的几十年里, 随着计算机技术的迅猛发展, 新兴因素对制造业产生了巨大的影响。新兴因素, 如市场需求的变化、对于灵活性的需求、产品生命周期缩短、海量的个性化需求, 这些因素都极大地改变了生产环境, 促使制造企业开展生产模式的革新^[30]。

可重构机床(Reconfigurable Machine Tools, RMT)是可重构制造系统中的重要组成部分, 是实现可重构制造系统的关键技术设备之一, 是针对特征族零部件而设计的新一代机床^[25]。可重构机床的主要组成部分包括: 基础模块, 如底座、立柱、床身等, 以及辅助模块, 也称作动态模块, 用来执行不同的任务和操作, 如主轴、面板、刀架等, 辅助部件和基础部件之间的连接应该是模块化的, 以便快速添加和移除^[30]。机床可重构性是指以成本效益的方式, 在机床上添加或移除模块化部件的能力。通过使用一系列模块化部件, 如驱动关节、部件之间的链接、传感器等来增强可重构机床的可重构性^[34]。

Ersal等针对可重构机床的设计提出一种模块化建模方法, 分为构件模型开发和构件装配两个步骤来构建可重构模型^[35]。利用机床投资成本、生产率和设备可用性等多种评价指标, Spicer等确定了可重构机床中包含的最优模块数量^[36]。特征选择方法可用于识别满足可重构机床加工要求的最小模块集合^[37]。基于生产流程信息和辅助模块需求的机床间相似性度量方法, 利用模块化机床设计机床单元, 实现机床可重构。在最小化零件之间的移动量, 以

及最小化用于生产的辅助模块的总变化量的基础上,运用多目标进化算法对需要重构的机床单元进行识别,得到Pareto最优解,实现机床可重构^[38]。基于形象思维的人机交互设计方法可以通过计算机模仿人的形象思维方式,获取人的知识,模拟可重构机床的所有重构情形^[39]。考虑到辅助模块的可用性,即辅助模块在机床上的安装和拆卸,以及辅助模块在可重构机床之间的运转,Bortolini等提出一种线性规划优化模型对可重构机床进行重构,进而实现对可重构制造系统的动态管理^[30]。

(二) 生产线可重构性

可重构生产线是指面对市场不确定性、订单多样性等不可预知因素的随机性质,可重新分配现有制造资源,改变生产过程和生产能力,以适应新环境的能力。当前可重构生产线的研究主要聚焦于可重构生产线系统建模、可重构生产线平衡以及可重构生产线评估三个方面。

1. 可重构生产线系统建模

可重构生产线系统建模通过构建可重构生产线的动态随机模型对制造过程中的随机性进行分析、仿真、优化和控制。多年来,可重构生产线系统建模问题的重要性和复杂性受到学术界的广泛关注并开展了大量研究。

在基础研究层面,He等面向智能工厂设计了具有高度自动化、柔性化、可靠性和可重构性的自动化柔性传输生产线。该生产线由多个加工单元组合的顺序和可重构阶段组成,可减少平衡和配置生产线的成本^[40]。针对发动机缸体清理打磨产线的设计周期长、混线效率低、作业过程复杂等问题,通过结合工业物联网和数字孪生提出一条发动机缸体智能清理打磨生产线,降低了产品废品率,实现了车间无污染、无工伤、无不良品目的^[41]。针对道钉整理装箱效率低和生产线自动化程度低的问题,基于差速传送带分离思想设计全自动道钉整理装箱生产线,提高了道钉整理装箱效率和生产线的整体自动化程度^[42]。

在应用研究层面,面向纺织工业,基于计算机视觉、深度学习和机器人技术针对服装生产过程设计了生产线的硬件部署和管理架构,促进了纺织工业发展,提升了现有生产技术^[43]。面向自行车生产过程,Liu等设计了自动控制系统、现场管理监控系统和远程监控系统,提升了自行车生产效率和工业生产安全性^[21]。面向手工艺品生产加工过程,基于数据建模、数据收集、数据分析和数据可视化技术构建了工艺品结构自动生产线大数据平台,实现

了对工艺品加工过程的实时动态控制^[44]。

2. 可重构生产线平衡

可重构生产线平衡问题直接关系设施利用率和生产效率,是制造领域的关键问题。制造业的生产线通常是细分后的多工序流水化连续作业生产线。在作业细化之后,各工序作业时间之间的差异容易造成工序间作业负荷不均衡的现象。高负荷工序不能按时完成生产任务,降低生产效率。低负荷经常停工待料,造成工时损失和工件堆积滞留,阻碍生产线的顺畅流通。多年来,可重构生产线平衡问题一直受到学术界的广泛关注,开展了大量研究。

在基础研究层面,针对预防维护下的装配线平衡问题,提出一种带有重启策略的多目标变邻域搜索算法,优化了正常工作、设备维护下的节拍并调整了工序^[45]。针对单U型装配线平衡问题,焦玉玲等提出一种基于邻接矩阵特征的启发式算法^[46]。针对2型流水线平衡问题,提出混合整数编程模型并开发基于逻辑的Benders分解算法,缩短了每个任务的设置时间^[47]。考虑到任务中不同型号设备对任务作业次数、设备采购成本的影响,Niroomand等提出了元启发式算法来高效求解^[48]。Li等利用不确定性理论对不确定任务时间进行建模,并考虑不相容的任务集约束,提出了一种能够逃避邻域生成得到的局部最优的重启机制,整合了一个修复机制,使工作站结合起来,进一步提高解决方案的质量^[49]。针对求解大规模机加工线平衡问题时存在的复杂性高和效率低等问题,提出面向缸体类零件加工特征的层次聚类方法,提高了优化问题的求解效率^[50]。针对求解箱体类零件的可重构生产线平衡优化模型的效率低问题,提出基于多色集合理论方法优化求解效率^[51]。针对不确定的市场需求,Delorme等基于贪婪随机自适应搜索程序框架提出一种新的启发式方法^[52]。Lahrichi等考虑到分配给工作站操作之间的可访问性、包含性、排除性和优先级约束,提出了多项式精确算法并嵌入到元启发式框架中^[53]。针对需求不确定性,提出基于贪婪随机自适应搜索程序和可变邻域搜索的启发式算法,刻画了不确定需求^[54]。

在应用研究层面,针对手机装配线不平衡问题,运用Lingo软件提升产线平衡率实现装配线的优化改善^[55]。针对柴油发动机缸体机缸体加工生产线平衡问题,提出基于粒子群和模拟退火的混合算法求解机加工工艺线平衡问题^[56]。针对航空发动机装配线不平衡问题,万晓琴等根据系统负载平衡原则优化装配组数量,建立班组自重构优化模型并提

出启发式算法求解^[57]。

3. 可重构生产线评估

可重构生产线评估是指从多个方面(属性)评估多个生产线规划设计方案的过程。生产线规划设计是一项复杂的系统工程,影响最终规划设计方案质量的因素也很多。因此,有必要针对制造系统生产线的规划设计问题,建立系统有效的综合评估体系。多年来,国内外学者对制造系统生产线评价体系展开了研究。

在基础研究层面,孙连胜等基于虚拟制造技术建立制造系统的模糊综合评价模型以指导制造系统方案实施并保证系统各项性能指标^[58]。针对复杂生产线健康度难以评估、量化和预测的问题,提出结合物元信息熵和支持向量机的生产线健康度评估预测方法,为生产决策提供数据支持和理论依据^[59]。

在应用研究层面,针对复杂的芯片组组装和测试生产线, Li等提出了考虑性能区间和状态可变性的生产线评估方法^[60]。针对核工业企业生产线工作场所空气汞浓度超标问题,采用现场调查法、现场检测法、半定量风险评估法对工作场所的汞污染治理效果进行检测与评估^[61]。针对AP1000核燃料元件生产线存在核临界、UF₆泄漏等问题,构建风险评估体系并对生产辐射风险进行评估,为企业管管理提供了科学依据^[62]。

由上述分析可知,关于可重构生产线的平衡问题的理论研究较多,关于可重构生产线系统建模和评估的应用研究较多。

(三) 智能车间可重构性

可重构智能车间是指面对市场需求不确定性、技术的更新、制造流程的改变,车间能够快速实现可配置、可缩放和可重用的能力。可重构智能车间是目前学术界和工业界研究和应用的热点之一,国内外学者对可重构智能车间进行了广泛的研究,也取得了一定的成果。

在基础研究层面,针对现有车间自动编程系统高耦合性问题,王泓晖等设计并实现了一种基于加工特征的可重构式车间自动编程系统,实验结果表明该系统耦合性较低且便于维护和升级,具有一定的实用性^[63]。针对生产装备与操作工人的在线数据采集与信息交互问题,提出一种面向服务的离散车间可重构制造执行系统,为操作工人提供了一个实时信息采集与信息交互的工作平台^[64]。针对工艺管理在车间执行过程的集成问题,提出一种可重构性工作流管理方法,既能满足制造系统的可重构性要求,也能很好地指导车间生产^[65]。针对车间布局的

小范围精细搜索问题, Shoham和Linkens等提出基于智能体机制的混合作业车间布局和调度模型^[66-67]。面向不同尺寸设备, Sherali等提出一种改进的混合整数规划模型来解决车间设施布局优化问题^[68]。Ertay等结合数据包络分析法与层次分析法优化车间设备布局^[69]。Azadeh等提出随机数据包络分析和仿真方法在安全和环境层面找到最佳设备布局方案^[70]。为减少设备间的搬运成本,通过运用粒子群优化算法求解车间动态布局设施优化问题^[71]。为减少生产车间设备布局物流费用,建立车间设备布局优化问题的二次分配模型,并采用蚁群-遗传混合算法求解该模型^[72]。为提高车间物流搬运效率,构建智能车间布局和AGV路径规划集成优化模型,并提出带精英策略的快速非支配排序遗传算法求解该模型^[73]。为缩短完工时间,设计多目标果蝇优化算法求解构建的以总完工时间最小为优化目标的车间布局和调度集成优化模型^[74]。

在应用研究层面,面向纱线染整企业车间布局问题,改进系统布置设计分析流程,基于车间物流强度和车间面积构建优化模型并运用遗传算法求解,为开发智能化染整示范性车间提供了合理的布局方案^[75]。面向造船业中的车间布局问题,构建优化布局和调度的集成优化模型并运用非支配排序遗传算法II求解,为造船业的绿色制造提供了指导^[49]。

由上述分析可知,智能车间可重构性研究主要聚焦于制造资源的可重构性,即能根据需求变化快速有效重构车间资源,如人、设备、工具等,为车间设备和工人提供接口和信息交互平台,并有效地实现人、技术、设备集成的能力。

(四) 智能工厂可重构性

目前而言,直接关注于智能工厂可重构性的研究较少,因此尚没有智能工厂可重构性的规范化定义。当前围绕智能工厂可重构性的研究大多聚焦于智能工厂的流程可重构性、制造过程可重构、组织可重构性等内容。

在基础研究层面,面向智能工厂流程可重构性,提出一种基于可重构流程模型和组件技术的流程进化实施方法,使得制造执行系统流程与用户业务流程保持一致^[76]。针对复杂流程工业过程中能源流、物流和信息流之间的强耦合性,基于Petri网提出CpnHPN方法,精确描述能源流、物流和信息流,通过构件化封装理念实现快速、灵活的多层次可重构建模方式^[77]。基于现有加工设备、刀具、夹具等制造资源,提出一种针对生产能力扩展过程中的工艺重构方法,并设计混合遗传算法完成求解^[78]。

考虑到组织与过程优化重构是优化配置制造资源的基础,王成恩等讨论了组织重构的影响因素和基本形式,促进了供应链管理、动态联盟和网络化制造等的发展^[79]。针对嵌入式计算设备之间异构资源接入和自适应协同管理问题,提出了一种任务驱动的嵌入式可重构异构计算平台,有助于形成具有足够规模“算力”的智能空间“云”计算平台^[80]。

在应用研究层面,为适应医疗行业在敏捷性、灵活性以及低成本需求,基于药品的生产需求以及低级机器资源的信息,提出一种数据驱动的可重构智能制药工厂生产模式^[81]。为将新产品无缝引入生产并适应需求波动,提出可重构航空生产系统的数字制造和柔性装配技术,为提升航空生产系统的灵活性提供支持^[82]。

由上述综述可知,关于智能工厂可重构的理论研究和应用研究工作较少,亟需相关研究工作来弥补空白。

四、研究展望

围绕基于HCPS的智能制造系统可重构性特征,基于上述关键技术和研究现状回顾分析,以下主要从智能制造可重构性方法体系、基于HCPS的智能工厂可重构性和面向工业互联网的智能制造可重构性展望未来研究。

(一) 智能制造可重构性方法体系

智能制造的目标是通过精确跟踪过程状态和完整获取实时数据,以获得更丰富的信息,进而对生产过程进行更科学的管理和决策,实现更加灵活和灵活的制造过程^[1-2, 16, 83]。可重构性是智能制造的主要特征之一,该特征使得制造过程能够快速响应市场需求波动,对制造系统生产能力和功能进行调整。伴随新兴技术的发展与演进,未来智能制造可重构性方法体系可从以下两个方面展开:

一是继续推进基于人工智能的智能制造可重构优化算法研究。在已有智能制造可重构研究中,存在可重构机床配置优化、生产线优化调度、生产线平衡以及车间布局优化等优化问题。这些优化问题多为NP难问题,当问题规模较大时,求解优化模型是相当困难的。在计算技术的推动下,启发式人工智能方法,如遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、神经网络算法等被越来越多地应用于优化模型求解中。未来智能制造可重构研究将更加聚焦于启发式人工智能方法在上述制造可重构优化问题中的应用,强化不确定复杂制造环境下的智能分析

和优化控制能力,进一步完善智能制造可重构性方法体系研究。

二是继续推进制造系统的可重构决策支持方法研究。现有制造系统可重构决策大多局限于系统的特定方面,如机床可重构性、生产线可重构性、布局规划可重构性等,而忽视了对制造系统整体性能的诸多因素进行综合。此外,现有制造系统可重构水平评估研究多采用多属性决策方法,其评价指标权重大多通过专家知识水平和检验确定,客观程度有待提高。因此,未来智能制造可重构性研究将针对制造系统整体可重构水平进行客观综合的评估,在实际应用中分析、比较多种可重构方案并加以选择,帮助对制造系统进行快速重构。

(二) 基于HCPS的智能工厂可重构性

智能工厂由于其涉及制造单元、层次较多,其可重构建模优化也面临着更多不确定性、复杂性问题,因此当前智能制造可重构性研究大多仍聚焦于机床、生产线及车间层面,难以针对智能工厂提供全面、多层次的可重构方案。

面向未来不确定复杂制造环境,基于HCPS的智能工厂凭借HCPS2.0所赋予的强大的智能,利用智能感知、智能决策、智能控制与自主认知等技术,在充分发挥人类智慧的基础上形成人机混合增强智能,变革智能工厂的可重构性,有效应对复杂制造环境下制造工艺复杂性、生产任务多样性与生产需求波动性等问题,实现制造资源的高度动态敏捷可重构,满足高维、动态、多目标可重构场景的需求,进而突破传统可重构边界,实现基于HCPS的智能工厂可重构性的集成式创新,如图4所示。

首先,基于HCPS的智能工厂将能实现复杂制造系统可重构建模与优化。面向不确定复杂制造环境,基于HCPS的智能工厂可基于工业大数据与工业大数据,挖掘生产制造流程中的“关联关系”与“因果关系”,并利用大数据智能建模方法对二者进行深度融合,进而提出复杂动态可重构过程混合建模方法,提高复杂制造系统可重构的建模与优化求解能力,实现不确定复杂制造环境下的制造系统动态可重构。

其次,基于HCPS的智能工厂将能实现高度的动态敏捷可重构。新一代HCPS2.0,使得智能工厂能够基于其自身强大的感知、计算与分析能力,依据“知识库”及实时生产数据,不断总结归纳新的知识规律,形成学习与认知的能力。基于这一能力,智能工厂可对不同可重构场景中的规律进行归纳、挖掘,构建智能可重构决策模型,并能对模型

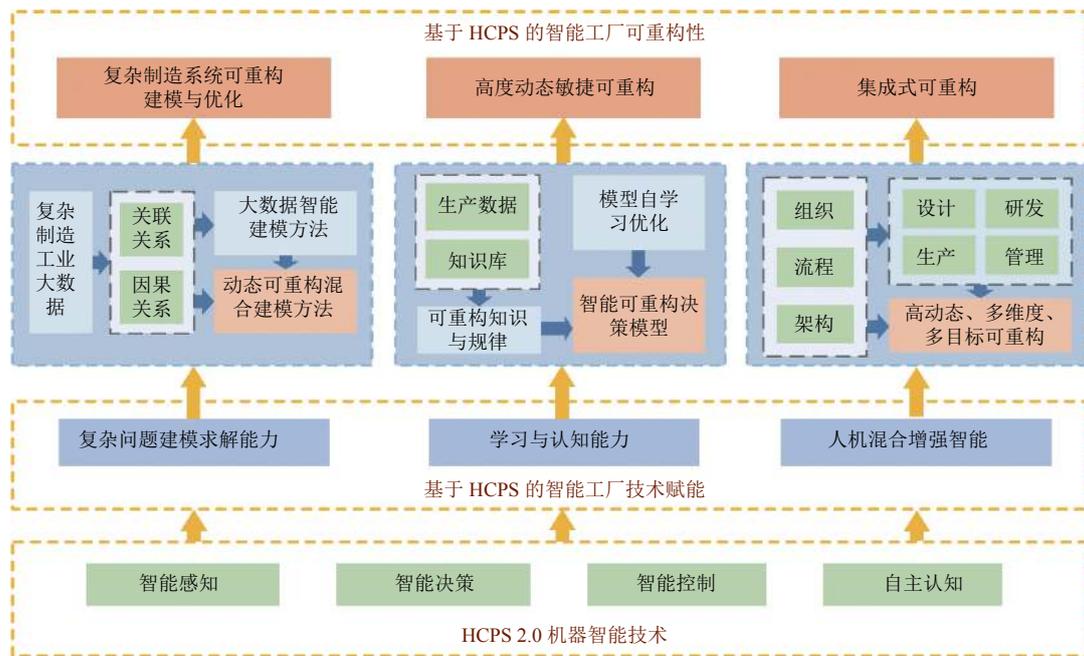


图 4 基于HCPS的智能工厂可重构性

进行自学习优化，从而在满足复杂制造环境高敏捷性、高稳定性与高可靠性要求的前提下，自动为不同场景中的重构需求提供最优解决方案，实现制造资源的高度动态敏捷可重构。

最后，基于HCPS的智能工厂将能充分发挥人类智慧，突破传统可重构性边界。基于HCPS的智能工厂将人的智慧与人工智能有效结合，充分发挥二者优势，从而带来极大的创新潜能。这一创新潜能将给智能工厂的可重构性带来根本上的变革，使其不局限于对机床、生产线或车间进行简单的制造流程重构，能够进一步对设计、研发的要素加以考虑，突破传统可重构性边界，进行集成式创新，形成面向组织、流程、架构，集设计、研发、生产、管理于一体的高动态、多维度、多目标可重构场景，大幅提高智能工厂的生产效率。

(三) 面向工业互联网的智能制造可重构性

工业互联网是支撑智能制造的基础，面向工业互联网的智能制造系统可将智能产品设计、智能制造过程、智能优化管理和智能服务等相集成，实现技术流程和业务流程的融合。在面对市场需求不确定性、技术更新、制造流程改变时，面向工业互联网的智能制造系统所具备的可重构性，可赋予制造系统可配置、可缩放和可重用的能力，这在产品制造质量、时间、成本等方面提供了巨大的竞争优势。伴随制造业数字化转型的不断深化与新一代信息技术的加速融入，面向工业互联网的智能制造可重构性也得到进一步提高，具体表现在以下三个

方面：

一是基于数据的高效集成。不断增加的业务模式与日趋复杂的业务流程加大了各类业务间的数据集成难度，进一步加剧了数据孤岛问题。工业互联网通过在设备层和边缘层建设生产控制网络，推动工业数据充分高效集成，打破数据孤岛，帮助构建全方位、多层次、高集成的智能制造可重构模式，可迅速对制造流程、组织等进行调整优化，进而提升制造系统对市场变化和需求的响应与交付速度。

二是基于制造业智能化核心驱动——数据智能。基于工业互联网对制造数据资源的集成能力，可利用人工智能技术对数据分析应用的深度和广度进行持续拓展，并形成数据智能。数据智能可强化面向工业互联网不确定复杂制造系统中的决策能力，提高可重构模型智能水平，同时能自动化提供可重构方案，并对可重构方案进行在线评估、优化及学习，最终形成具备自学习、自决策、自使用能力的新型智能制造系统。

三是基于应用开放创新。当业务模式发生变化或不同业务之间开展协同时，需要对现有制造系统进行定制化二次开发或打通集成。在此基础上，系统可软件化封装工业经验知识，复用共性业务组件，集成式重构包含制造、研发、销售、管理等在内的业务模式，调整企业整体生产、经营目标，从而帮助制造系统构建快速适应市场变化和满足用户个性化需求的能力，形成智能制造开放性可重构模式，进一步提高智能制造灵活性。

五、结束语

在分析可重构制造系统特征的基础上, 梳理面向智能制造的 HCPS 研究现状和面向智能制造的可重构性发展趋势, 剖析 HCPS 和可重构制造系统之间的关系, 给出基于 HCPS 的智能制造可重构性的定义和内涵。在系统分析可重构制造系统关键技术的基础上, 从未来智能制造可重构性方法体系, 基于 HCPS 的智能工厂可重构性设想, 以及面向工业互联网的智能制造可重构性三个方面, 提出基于 HCPS 的智能制造可重构性研究展望。

在新一代信息技术和新一代人工智能的助力下, 智能制造成为制造业重要发展趋势, 在可以预见的未来, 基于 HCPS 的智能制造可重构性的理论探索方兴未艾, 以智能制造为核心的智能工厂的应用探索前景广阔。

参考文献

- [1] 周佳军, 姚锡凡. 先进制造技术与新工业革命[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 1963-1978.
- [2] 严英仕, 杨爱民. 智能制造技术与信息化技术的结合[C]// 2014年中国家用电器技术大会. 宁波: 中国家用电器协会, 2014.
- [3] 朱剑英. 智能制造的意义、技术与实现[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(3): 30-35.
- [4] WRIGHT P K, BOURNE D A. Manufacturing intelligence[M]. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1988.
- [5] 周济, 周艳红, 王柏村, 等. 面向新一代智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)[J]. Engineering, 2019, 5(4): 71-97.
- [6] 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, 20(4): 29-34.
- [7] SETOYA H. History and review of the IMS (Intelligent Manufacturing System)[C]// 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing: IEEE, 2011: 30-33.
- [8] KRUGH M, MEARS L. A complementary cyber-human systems framework for industry 4.0 cyber-physical systems[J]. Manufacturing Letters, 2018, 15: 89-92.
- [9] 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.
- [10] NUNES D, SILVA J S, BOAVIDA F. A practical introduction to human-in-the-loop cyber-physical systems[M]. Hoboken: Wiley Online Library, 2018.
- [11] SOWE S K, SIMMON E, ZETTSU K, et al. Cyber-physical-human systems: putting people in the loop[J]. IT Professional, 2016, 18(1): 10-12.
- [12] LEE G H. Reconfigurability consideration design of components and manufacturing systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13(5): 376-386.
- [13] 祁海铭, 程月华, 姜斌, 等. 功能模块故障下的卫星姿态控制系统硬件可重构性[J]. 航天控制, 2014, 32(4): 62-68.
- [14] 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.
- [15] 王柏村, 臧冀原, 屈贤明, 等. 基于人-信息-物理系统(HCPS)的新一代智能制造系统[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 29-34.
- [16] 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, 2020(7): 1-19.
- [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, 2018, 90(8): 1167-1178.
- [18] EMMANOUILIDIS C, PISTOFIDIS P, BERTONCELJ L, et al. Enabling the human in the loop: linked data and knowledge in industrial cyber-physical systems[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47: 249-265.
- [19] SUN S, ZHENG X, GONG B, et al. Healthy operator 4.0: a human cyber-physical system architecture for smart workplaces[J]. Sensors, 2020, 20(7): 1-21.
- [20] FLORES E, XU X, LU Y. Human cyber-physical systems: a skill-based correlation between humans and machines[C]// 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Hong Kong, China: IEEE, 2020: 1313-1318.
- [21] LIU Z M, WANG J. Human-cyber-physical systems: concepts, challenges, and research opportunities[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(11): 1535-1553.
- [22] WANG B, LI X, FREIHEIT T, et al. Learning and intelligence in human-cyber-physical systems: framework and perspective[C]// 2020 Second International Conference on Transdisciplinary AI (TransAI). Irvine: IEEE, 2020: 142-145.
- [23] KOREN Y, HEISEL U, JOVANE F, et al. Reconfigurable manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1999, 48(2): 527-540.
- [24] 梁福军, 宁汝新. 可重构制造系统理论研究[J]. 机械工程学报, 2003(6): 36-43.
- [25] LANDERS R G, MIN B K, KOREN Y. Reconfigurable machine tools[J]. CIRP Annals, 2001, 50(1): 269-274.
- [26] 蔡宗琰. 计算机辅助可重构制造系统设计的概念研

究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.

[27] SUGI M, MAEDA Y, AIYAMA Y, et al. A holonic architecture for easy reconfiguration of robotic assembly systems[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(3): 457-464.

[28] ABDI M R, LABIB A W. A design strategy for reconfigurable manufacturing systems (RMSs) using analytical hierarchical process (AHP): a case study[J]. *International Journal of Production Research*, 2003, 41(10): 2273-2299.

[29] KATZ R. Design principles of reconfigurable machines[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34(5-6): 430-439.

[30] BORTOLINI M, FERRARI E, GALIZIA F G, et al. An optimisation model for the dynamic management of cellular reconfigurable manufacturing systems under auxiliary module availability constraints[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58: 442-451.

[31] 管贤平. 基于变邻域遗传算法的RMS布局设计方法[J]. *制造业自动化*, 2011, 33(18): 121-124.

[32] 段建国, 李爱平, 谢楠, 等. 可重构制造系统生产能力扩展性重构方法[J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(9): 1357-1363.

[33] 陈友玲, 刘文科, 严键. 基于RMC的可重构制造系统设备布局优化研究[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(12): 4550-4553.

[34] NAPOLEONE A, POZZETTI A, MACCHI M. A framework to manage reconfigurability in manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(11): 3815-3837.

[35] ERSAL T, STEIN J L, LOUCA L S. A modular modeling approach for the design of reconfigurable machine tools[C]. Montreal, Quebec, Canada: The ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2004.

[36] SPICER P, YIP-HOI D, KOREN Y. Scalable reconfigurable equipment design principles[J]. *International Journal of Production Research*, 2005, 43(22): 4839-4852.

[37] CHEN L, XI F, MACWAN A. Optimal module selection for preliminary design of reconfigurable machine tools[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127(1): 104-115.

[38] PATTANAIK L, KUMAR V. Multiple levels of reconfiguration for robust cells formed using modular machines[J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2010, 5(4): 424-441.

[39] YIN Y H, XIE J Y, DA XU L, et al. Imaginal thinking-based human-machine design methodology for the configuration of reconfigurable machine tools[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(3): 659-668.

[40] HE C, GUAN Z, GONG Y, et al. Automated flexible transfer line design problem: Sequential and reconfigurable

stages with parallel machining cells[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, 52: 157-171.

[41] 高狄, 王擎天, 舒赞辉. 发动机缸体智能清理打磨生产线的设计及应用[J]. *铸造工程*, 2021, 45(1): 26-29.

[42] 罗文科, 李光. 道钉整理装箱生产线设计及平衡分析[J]. *包装工程*, 2021, 42(5): 199-208.

[43] WANG S, LI B, LIU X, et al. The design of intelligent production line for clothing industry[C]. Chengdu: The 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2020: 2403-2408.

[44] ZHANG Y. Design of big data platform for automatic production line of handicraft structure[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1575: 012041.

[45] 赵联鹏, 唐秋华, 张子凯, 等. 预防维护下装配线平衡的多目标重启变邻域搜索算法[J/OL]. (2021-03-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.th.20210319.1804.022.html>.

[46] 焦玉玲, 李琳, 李津, 等. 一种求解U型装配线平衡的改进启发式算法[J/OL]. (2021-02-22). <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200606>.

[47] ZOHALI H, NADERI B, ROSHANAIE V. Solving the type-2 assembly line balancing with setups using logic-based benders decomposition[J/OL]. [2021-04-13]. https://www.researchgate.net/publication/350300865_Solving_the_Type2_Assembly_Line_Balancing_with_Setups_Using_Logic-Based_Benders_Decomposition.

[48] NIROOMAND S. Hybrid artificial electric field algorithm for assembly line balancing problem with equipment model selection possibility[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, 219: 106905.

[49] LI H, DUAN J, ZHANG Q. Multi-objective integrated scheduling optimization of semi-combined marine crankshaft structure production workshop for green manufacturing[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2021, 43(3): 579-596.

[50] 李爱平, 傅翔, 刘雪梅. 基于层次聚类的机加工线平衡优化[J]. *机械制造*, 2018, 56(2): 81-86.

[51] 邵焕, 李爱平, 于海斌, 等. 基于多色集合理论的箱体类零件可重构生产线多目标优化算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(9): 2393-2402.

[52] DELORME X, MALYUTIN S, DOLGUI A. A multi-objective approach for design of reconfigurable transfer lines[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(12): 509-514.

[53] LAHRICHI Y, GRANGEON N, DEROUSSE L, et al. A new split-based hybrid metaheuristic for the reconfigurable transfer line balancing problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(4): 1127-1144.

[54] LIU X, CHEN J, LI A. Optimisation of line configuration and balancing for reconfigurable transfer lines considering demand uncertainty[J]. *International Journal of*

Production Research, 2021, 59(2): 444-466.

[55] 贾舒媛, 李高升, 董学文, 等. 手机装配单一品种流水线的平衡改善[J]. *制造业自动化*, 2020, 42(5): 104-106+152.

[56] 徐立云, 徐昌飞, 邓伟, 等. 基于SA-PSO算法的发动机缸体机加工线平衡研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 16-21.

[57] 万晓琴, 严洪森. 面向航空发动机的知识化制造系统拖期调度与自重构[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3): 526-534.

[58] 孙连胜, 宁汝新, 张志英. FMS规划方案的综合评估方法研究[J]. *机械工程学报*, 2003(2): 47-52.

[59] 牛国成, 胡贞, 胡冬梅. 基于物元信息熵的生产线健康度评估及预测[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(7): 1639-1646.

[60] LI C J, XIE Z S, PENG X R, et al. Performance evaluation and improvement of chipset assembly & test production line based on variability[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2019, 16(2): 186-198.

[61] 姜霞, 战景明, 刘占旗. 核工业某生产线工作场所汞污染治理效果评估[J]. *中国卫生工程学*, 2020, 19(6): 820-822.

[62] 薛向明, 潘泽君, 武钊, 等. AP1000核燃料元件生产线辐射风险评估探讨[J]. *中国工业医学杂志*, 2020, 33(5): 450-453.

[63] 王泓晖, 刘日良, 张承瑞. 基于加工特征的车间可重构式自动编程系统设计与实现[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(10): 2396-2407.

[64] 王琦峰, 刘飞, 黄海龙. 面向服务的离散车间可重构制造执行系统研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2008(4): 737-743.

[65] 王骏, 饶成明, 陈高俊, 等. 基于可重构MES的智能车间工作流管理方法研究[J]. *制造业自动化*, 2014, 36(12): 12-16.

[66] SHOHAM Y. Agent-oriented programming[J]. *Artificial Intelligence*, 1993, 60(1): 51-92.

[67] LINKENS D A, YANG Y Y. Scheduling and optimisation for heating of steel soaking pits: case study for hybrid systems[J]. *IEEE Proceedings—Science, Measurement and Technology*, 1995, 142(5): 362-370.

[68] SHERALI H D, FRATICELLI B M P, MELLER R D. Enhanced model formulations for optimal facility layout[J]. *Operations Research*, 2003, 51(4): 629-644.

[69] ERTAY T, RUAN D, TUZKAYA U R. Integrating data envelopment analysis and analytic hierarchy for the facility layout design in manufacturing systems[J]. *Information*

Sciences, 2006, 176(3): 237-262.

[70] AZADEH A, NAZARI T, CHARKHAND H. Optimisation of facility layout design problem with safety and environmental factors by stochastic DEA and simulation approach[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(11): 3370-3389.

[71] FARIBORZ J, REZA T, MOHAMMAD T. A multi-objective particle swarm optimisation algorithm for unequal sized dynamic facility layout problem with pickup/drop-off locations[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(15): 4279-4293.

[72] 孙凯, 刘祥. 基于蚁群-遗传混合算法的设备布局优化方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(10): 2581-2589.

[73] 葛华辉, 冯毅雄, 密尚华, 等. 集成自动导引车路径规划的智能制造数字化车间设备布局优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(7): 1655-1664.

[74] 刘琼, 赵海飞. 基于多目标果蝇算法面向低碳的车间布局与调度集成优化[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(11): 122-133.

[75] 黄淇, 周其洪, 张倩, 等. 基于系统布置设计-遗传算法的纱线浸染生产线布局优化[J]. *纺织学报*, 2020, 41(3): 84-90.

[76] 李亚杰, 何卫平, 陈金亮, 等. 可重构流程模型驱动和组件化的MES流程进化[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(4): 735-744.

[77] 戴毅茹, 王坚. 多耦合混杂流程工业过程可重建建模方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(11): 2457-2466.

[78] 徐立云, 郭昆吾, 刘伟, 等. 基于可重构制造系统生产能力扩展过程的工艺重构[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(6): 1460-1468.

[79] 王成恩. 企业组织与过程的优化重构[J]. *信息与控制*, 2001(S1): 581-585.

[80] 杨鹏飞, 刘波, 党佳乐, 等. 面向条件受限环境的动态可重构异构计算平台[J]. *空间控制技术与应用*, 2020, 46(3): 11-17.

[81] WAN J, TANG S, LI D, et al. Reconfigurable smart factory for drug packing in healthcare industry 4.0[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(1): 507-516.

[82] JACKSON K, EFTHYMIOU K, BORTON J. Digital manufacturing and flexible assembly technologies for reconfigurable aerospace production systems[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 52: 274-279.

[83] 张映锋, 张党, 任杉. 智能制造及其关键技术研究现状与趋势综述[J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(3): 329-338.

编辑 何婧