

控制与决策

Control and Decision

基于多智能体的数字孪生及其在工业中应用的综述

张颖伟, 高鸿瑞, 张鼎森, 冯琳, 张升阳, 毕诸明

引用本文:

张颖伟,高鸿瑞,张鼎森,冯琳,张升阳,毕诸明. 基于多智能体的数字孪生及其在工业中应用的综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2168–2182.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0399>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于条件对抗生成孪生网络的目标跟踪](#)

Conditional generative adversarial siamese networks for object tracking

控制与决策. 2021, 36(5): 1110–1118 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1215>

[基于马尔可夫过程的多部件系统劣化状态空间划分模型](#)

Multi-component system state space partition model based on Markov process

控制与决策. 2021, 36(2): 418–428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0480>

[多模态多目标优化综述](#)

A survey on multimodal multiobjective optimization

控制与决策. 2021, 36(11): 2577–2588 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1509>

[基于深度学习的仿生集群运动智能控制](#)

Intelligent control of bionic collective motion based on deep learning

控制与决策. 2021, 36(9): 2195–2202 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0071>

[基于观测器的网络化多智能体预测控制](#)

Observer-based networked multi-agent predictive control

控制与决策. 2021, 36(9): 2290–2296 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1801>

基于多智能体的数字孪生及其在工业中应用的综述

张颖伟^{1,2†}, 高鸿瑞¹, 张鼎森¹, 冯琳¹, 张升阳¹, 毕诸明³

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819; 3. 普渡大学韦恩堡分校土木与机械工程系, 韦恩堡 46805)

摘要: 数字孪生是一种将物理实体数字化的技术, 通过建立虚拟的数字孪生模型模拟实际的物理过程, 以便进行模拟仿真、数据分析和优化设计等操作. 鉴于此, 分析数字孪生技术在复杂工业生产中的发展历程和研究现状, 并重点讨论其概念、国家相关重点研究的政策, 以及数字孪生使能技术在各行业的应用. 主要途径是分析和综述基于多智能体的数字孪生、基于数字孪生的设计、制造和运维、数字孪生的集成在智能制造中的应用相关的研究成果. 此外, 提出高炉连续生产数字孪生方案和大飞机多智能体离散制造方案, 高炉模型包括成分场大模型和增量学习小模型, 该模型可以为数字孪生在复杂流程工业中的应用提供带有增量补偿的机理与计算机视觉相结合的解决方案. 在复杂工业制造中, 数字孪生和多智能体技术可以提高生产效率和质量, 减少能源消耗和废品产生, 同时也能够降低复杂度、安全风险和成本.

关键词: 数字孪生; 多智能体技术; 复杂工业流程; 智能制造; 高炉

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0399

引用格式: 张颖伟, 高鸿瑞, 张鼎森, 等. 基于多智能体的数字孪生及其在工业中应用的综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2168-2182.

A review of multi-agent-based digital twins and its application in industry

ZHANG Ying-wei^{1,2†}, GAO Hong-ru¹, ZHANG Ding-sen¹, FENG Lin¹, ZHANG Sheng-yang¹, BI Zhu-ming³

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Laboratory of Synthesis Automation of Process Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Department of Civil and Mechanical Engineering, Purdue University Fort Wayne, Fort Wayne 46805, USA)

Abstract: Digital twins involve the transfer of a physical entity into a virtual model, enabling the simulation, analysis, and optimization of physical products, processes, operations, or systems. This paper aims to explore the current state of research and development in digital twins and their applications within complex industrial processes. It examines concepts, government development strategies, and ongoing applications. The primary approach of this study involves analyzing research findings related to the status of multi-agent based digital twinning, as well as the design, manufacturing, and operation and maintenance of digital twins in intelligent manufacturing. Furthermore, this paper presents a digital twin scheme for continuous production in a blast furnace, along with a multi-agent discrete manufacturing scheme for large aircrafts. The digital twin of the blast furnace incorporates a comprehensive component field model and a small incremental learning model. It leverages computer vision to implement an incremental compensation mechanism within the complex process industry. In the realm of complex industrial manufacturing, digital twins and multi-agent technologies have the potential to enhance production efficiency and quality, reduce energy consumption and waste generation, while also mitigating complexity, safety risks, and costs.

Keywords: digital twins; multi-agent technology; complex industrial processes; intelligent manufacturing; blast furnace

0 引言

随着科学技术的快速发展, 复杂工业流程的生产规模越来越大、生产过程复杂程度越来越高, 所以, 相

应工业流程的性能越来越依赖于对系统运行预测的准确性^[1-3]. 传统的工业建模方法已经不能满足现代工业流程控制的需要, 如何改进工业建模使之智能化

收稿日期: 2023-04-01; 录用日期: 2023-06-11.

基金项目: 科技部重大项目 (2020AAA0109200).

责任编辑: 丁进良.

[†]通讯作者. E-mail: zhangyingwei@ise.neu.edu.cn.

变得尤为重要^[4-6]。作为数字经济使能技术的代表,数字孪生技术已经得到发达国家和许多发展中国家尤其包括中国等越来越多的资金投入和政策扶持^[7]。

数字孪生随着大数据和人工智能发展的浪潮孕育而生^[8-10]。数字孪生以数字化的方式实时映射物理对象,通过对数字模型的仿真模拟现实环境中的行为。数字孪生依赖高性能的传感器采集实时数据,利用数据对真实环境建模并实现虚拟场景和现实环境的对应和同步^[11]。虚拟和物理对象的映射机制包括:1)物理体到孪生体的物理变化映射机制;2)多智能体间的连接映射机制;3)孪生体整体运行映射机制。以上映射机制通过对物理端进行交互反馈、数据分析和决策优化为物理体提供理论支持与能力扩展^[12]。近几年来,数字孪生技术在发改委、住建部、国务院及国资委的大力推动下取得了长足的发展,并已经成为各国推进数字化进程的重要引擎^[13]。与中国类似,国外的主要发达经济体也从国家层面考虑,制定相关优惠政策、成立组织联盟、开展合作研究以加速数字孪生发展和应用。数字孪生已经开始应用于石化、冶金、汽车制造等关键领域的重大设备设计、制造、运维和综合优化^[7-8],正被纳入众多工业科技企业战略大方向,成为数字领域技术和市场竞争主航道。总之,数字孪生是当前热度最高的数字化技术之一,存在巨大的发展空间。

数字孪生的应用依赖于可靠、丰富和实时的数据,在生产环境中能够获取的常用信息包括:具备形态、品位、状态分布的宏微观生产对象数据;设备结构、材料等生产环境数据;生产时间、工艺、方案及过程参数等冶炼方案数据;施工计划和实施数据;视频、声音、文本等多媒体监测数据;专家知识、经验;物理化学反应和机理等6个方面。数字孪生技术在虚拟空间中对物理对象以及相应物理流程实施映射、仿真、优化和数据支持等数字化活动,其最终目的是通过优化数字孪生体最大程度地优化物理对象或过程以提高时间、能源、人力等操作效率和质量^[14]。实现数字孪生的目标需要充分利用知识、机理模型、实时传感数据、历史数据以及专家知识等信息,结合多学科、多变量、多层次、多尺度、多粒度的建模仿真过程,准确系统地分析表征数据特征并进行高效的精准计算,实现虚实空间的高精度、高可靠、高可信的映射及演化,为实际物理系统的设计、制造和运维决策提供支持^[15]。通过在虚拟空间中进行映射,可以全面还原实体装备的完整生命周期过程^[16]。如图1所示,数字孪生的定义除了体现和强调映射、仿真、优化和数字体

验等价值,还涵盖了物理实体、业务流程等相对完整的优化对象,重点提出了优化物理世界的材料、时间、能量、人力等要素的作业效率与完成质量^[14]。

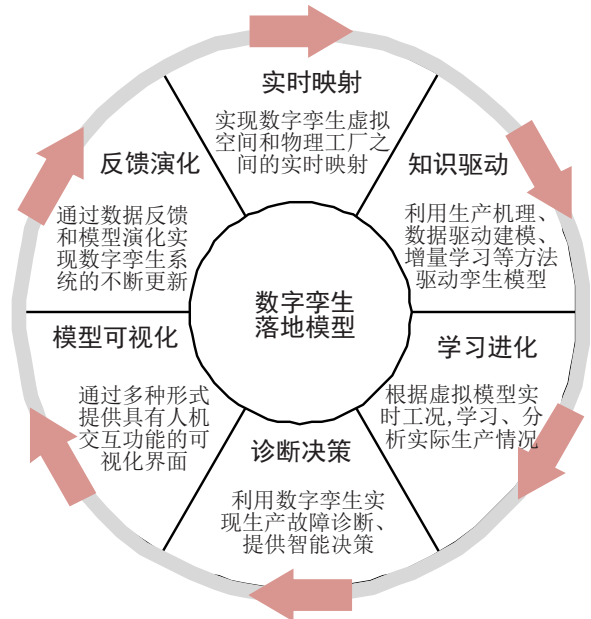


图1 数字孪生模型^[14]

数字孪生的实现离不开先进的信息技术,大数据和人工智能是数字孪生技术的基石^[17-18],很多学者对数字孪生研究现状做过分析和总结^[19]。在离散制造工业中,有学者利用基于多尺度融合建模、融合模型的状态评估、数据采集与传输、完整生命周期数据管理、虚拟现实来构建数字孪生系统^[20]。此外,数字孪生受益于变量数据、图像声音视频、知识和机理的协同应用技术的突破。我国当前致力于制造智能化、工业化和信息化,对数字孪生的深入理解、规律把握以及了解其对科学发展影响对研究和制定科学决策具有重要意义,因此必须重新认识知识、机理和大数据的重要价值^[21]。即使中国已经成为全球最大的数据资源国,但对于数据保存的重视程度以及数据利用率还不理想。提升数字孪生技术的关键途径是不断地创新,作为新一代信息技术的核心,数字孪生需要以应用为驱动来开发其巨大潜力和新兴的应用领域。在数字孪生领域的研究开发能够为我国提供实现跨越式发展的宝贵机遇^[21-25],数字孪生将为知识、机理、变量数据、图像声音视频协同分析提供可靠的技术支持^[21]。很多发达国家长期对高信息技术企业积极投入,促进他们加大研发力度并转型为数字经济,我国也迫切需要开发自主的数字孪生技术^[21]。

基于数字孪生的设计、制造、运维和综合优化的重要性体现在很多方面。首先,越来越多的现代制造系统采用集散控制系统,集散控制需要采集和储存大量流程测量数据,为实现数据驱动提供了稳定可靠的

信息支持^[26-28];其次,工业计算机技术、数据库技术以及存储技术的巨大进步提供了大规模数据分析可行性;在另一方面,数据挖掘和信号处理等数据分析技术与知识机理的协同发展也为基于数字孪生的方法提供了重要的技术支持^[29]。

数字孪生设计包含许多功能模块,其设计建模从对其功能模块的细化开始,现有的数据孪生分析方法可规划为以下类型:1)传统的并行化方法即分而治之,通过重新排序,显式或隐式并行性结合定义数字孪生^[30];2)多层次结构建模,通过空间划分方法、相似性和对称性的提取等定义数字孪生;3)多时空时间序列建模与知识机理协同,即通过采用动态时间规整等定义数字孪生;4)含有不真实数据的鲁棒建模,如鲁棒数据驱动方法与知识机理协同。此外,数字孪生的建模需要适度简化,主要途径包括:1)数据的稀疏化处理与知识机理协同建模,如压缩感知等;2)分类存储,按一定规则存储数据,合理划分类别,将数据和化学方程数据以目录形式存取等;3)删除大数据与知识机理重复数据,在工业数字孪生中,有很多数据是大量重复的,如视频监控中,大量的帧可能是没有性质变化的,可以考虑删除重复数据,只记录起始时间即可。还有一些其他存储数据的方法,如通过记录初值和对应法则使后续数据由化学方程得到。

目前,数字孪生技术仍存在一些困难与挑战,主要体现在3个环节中:一是知识迁移,要达到低成本、低能耗、高可靠性的目标还很困难;二是对于复杂工业流程的数据而言,物理映射是一个重要问题,这些数据涉及到众多变量,其复杂性不仅表现在数据样本本身,还表现在多源异构属性的存在上;三是多实体与多空间之间的交互具有动态性,无法用传统的方法进行建模,因此处理这种复杂性带来的挑战很大^[21-22]。例如:由于表达物理化学变化的能量流、动量流和质量流的复杂性和动态性,如何求解数字孪生物理化学变化模型是一个现实的挑战,解决的途径可以是最优化正交分解方法或者机器学习。复杂的工业流程也给维护数字孪生的一些基本特性带来难题,因为基于数据驱动的传统方法很少顾及知识机理与非结构化数据样本以及结构化数据集间的相关性。显而易见,解决方案需要综合知识、机理和数据来处理三者之间的关联性^[31-33]。目前,提升数字孪生应用的主要障碍包括^[17]:1)数字孪生应用环境中,有效信息浓度低,其中冗余和无关信息占主要部分,同时,数据结构复杂,没有统一框架;2)处理海量数据和物理化学方程涉及超大的计算量,严重影响数据处理

的实时性;3)计算成本高,准确性低,计算成本包括时间成本、所用的计算资源和能耗;4)传统建模的可靠性通过限制对象的复杂性取得,而数字孪生具有多时空、多相态、多层次等特性,相应的复杂性不适应于传统的建模方法。此外,现有建模方法中的性能指标也难以量化。

针对以上问题,本文提出新的集成机理、知识和大数据多智能体于一体的数字孪生构建方法。首先介绍基于数字孪生的多智能体,以及基于数字孪生多智能体的设计、制造和运维;然后构建一个高炉连续生产流程的数字孪生模型和一个描述大飞机离散制造过程的多智能体协同制造方案。融合数字孪生和多智能体可以提高数据孪生的质量和效率,降低成本和碳排,并提高安全和可靠性。

1 基于多智能体的数字孪生

随着工业智能化趋势的发展,多智能体和数字孪生技术合作解决工业难题的技术路线日益受到关注。多智能体学习是指多个智能体在一个共享环境中协同或竞争学习,一组互相连接的独立智能体能够协同完成某个任务或者解决某个问题,通过相互交互与学习提高整体性能^[34]。

多智能体学习已应用于不同领域,如机器人控制、博弈等^[35-37]。在制造业中,多智能体学习的应用也越来越受到关注,其中一个重要的应用领域是数字孪生问题。一些解决数字孪生问题的方法通过优化算法来实现,例如使用遗传算法、模拟退火算法等优化工作分配方案。由于传统的方法只能处理较小规模的问题,当生产线上的工序数量变得非常大时,这些优化算法往往不再适用,这时多智能体学习便可以提供一种新的解决方案。

常见的多智能体学习算法包括博弈论、强化学习和进化算法^[37-39],其中强化学习是最为常用的方法之一,其通过不断试错和学习来确定最优策略。在数字孪生中,强化学习可以用于智能体的动态决策以平衡负载。多智能体强化学习的基本框架包括状态表示和动作决策,博弈论是另一类重要的多智能体学习。博弈论中的智能体相互竞争获得收益的最大化。在数字孪生中,博弈论可用于协调不同工作站之间的竞争关系,以确保系统的平衡性。进化算法是另一类被用于解决数字孪生问题的优化算法,它通过模拟自然进化过程来搜索最优解。多智能体学习的一个重要问题是如何确定智能体之间的交互方式,常见的交互方式包括竞争和合作。协作型方法旨在最大程度地提高整个系统的效率和质量,而竞争型方法中

每个智能体都追求自身利益,通过最大化各工作站的个体收益来达到这个目标。

多智能体学习在数字孪生中将各个工作站或组成看作智能体,通过智能体之间的协作解决问题。由于各个智能体之间的任务分配和调度是相互关联的,通常采用合作的交互方式。在合作中,智能体之间需要相互协作,共同实现全局最优解。这种方法可以通过控制每个智能体的决策,使得每个智能体的负载相对平衡,从而提高整个生产效率。多智能体学习技术具有自适应性、强鲁棒性和可靠性等优点,被广泛应用于解决数字孪生问题。Johnson等^[40]通过多智能体强化学习动态调度机器人装配单元的装配作业;装配单元中的每个智能体(即机器人)根据本地观察执行分散的调度决策。Su等^[41]提出了一种基于价值分解多智能体演员-评论家算法的自适应学习框架,用于序列生产线的自适应学习,解决了传统方法难以处理大规模生产系统的问题。Zeng等^[42]提出了基于多智能体系统的演化算法,通过学习、竞争和交叉-变异等智能体行为提高个体的知识和智能。Liao等^[43]提出一种基于多智能体的混合组装线平衡算法,结合Tabu搜索算法作为机器智能体之间的通信机制来调整所有工作站的工作负载,从而解决混合模型数字孪生问题。Dobrowolski等^[44]利用进化的多智能体系统,建立了一个决策支持系统来解决生产线平衡的多目标优化问题,这种方法能够有效平衡生产线,为生产线优化提供一种新的思路。Sabart等^[45]采用多智能体实现了多产品装配中心动态环境下的人员调度与重调度。

数字孪生技术对真实世界对象进行数字建模和仿真,连接虚拟世界与现实世界,利用虚拟世界来映射现实世界,实现对设计、制造和运维过程进行准确预测^[46],这种技术可以在产品设计、生产和运维阶段提供有价值的信息。数字孪生技术可以创建实时仿真模型,对设计、制造和运维过程进行准确预测。通过数字孪生技术,技术人员可以对实际生产过程进行安全试验和高保真度仿真。陶飞等^[47]提出了数字孪生五维模型的概念,结合相关合作企业的实际应用需求,重点探讨了数字孪生五维模型在数字孪生电厂智能管控等10个领域的应用思路与方案。

基于多智能体的数字孪生有望在工业生产中发挥重要作用。在生产智能化方面,多智能体可以通过合作、协调和学习优化生产过程,实现生产过程的智能化自适应控制。数字孪生可以将实际生产过程转化为虚拟生产过程,利用虚拟模型进行仿真、模拟和

优化以提高生产效率、质量和安全性。在生产运行和维护方面,多智能体可以发挥协同控制和智能化监控作用。数字孪生通过监测物理工厂的运作,实时分析数据以预测故障、实现预测性维护、保障生产的稳定性和可靠性。在工业领域,基于多智能体的数字孪生技术可以提高生产效率,降低生产成本,同时提高生产质量和安全性。例如,多智能体结合数字孪生技术可实现生产和运营的智能化、自适应控制、优化生产排程、降低检测误差等。张文杰等^[48]针对航天器试验周期长、成本高以及制造环节中海量数据共享困难等问题,提出了基于数字孪生的智能试验体系架构设计,综合考虑全要素、全过程和全业务的应用背景,设计了试验资源、试验过程和试验服务3类智能体的结构模型,并对试验的运行机制和技术流程进行优化,从而推动航天器试验模式从以物理试验为主导向以物理试验和虚拟试验深度融合的模式转型。Clemen等^[49]将实时传感器网络嵌入多智能体框架,通过实时数据修正数字孪生的模拟过程,降低模拟过程中的不确定性因素,为城市规划者、政策利益相关者和其他决策者提供决策支持。Zheng等^[50]考虑制造过程中的质量控制问题,提出一种基于数字孪生多智能体建模方法以保障相关信息收集对产品质量的影响。传统制造系统缺乏对制造过程的数据收集、分析和反馈,这会阻碍资源的合理利用。Nie等^[51]建立了一个由物理车间、虚拟车间和数字孪生为组件的服务系统,该系统用于合理分配资源,降低外部干扰对制造系统的影响。Latsou等^[52]提出了一种集成在多代理网络物理系统中的新型数字孪生技术,用于检测传感数据中的异常。Nie等^[53]建立了云端和边缘的多智能体系统来制定和协调生产作业。利用数字孪生技术和工业物联网(IIoT)收集并处理分布式制造资源的实时状态数据,由相应的智能体在获得许可后进行决策。

2 数字孪生在工业中的应用

2.1 基于数字孪生的设计

随着智能制造的发展,数字孪生技术在智能制造设计中的应用越来越广泛^[54]。基于数字孪生的设计可帮助企业快速而准确地设计和仿真产品,从而提高产品质量,增强市场的竞争力^[55-56]。数字孪生可模拟物理产品在实际生产中的行为、预测性能,从而避免在实际生产中出现不必要的错误。数字孪生支持更新换代,提高其模拟物理系统的准确性和可靠性,同时也可以用于产品的可持续性评估,从而确保产品符合质量要求^[57]。数字孪生技术在产品设计中的重要

意义有以下几方面:首先,基于数字孪生的设计能够提高产品的设计效率,数字孪生技术可以数字化实体产品,构建数字孪生模型,通过虚拟仿真优化产品设计,与传统的试错式设计比,数字孪生可更快发现问题,准确地预测产品性能和行为,并支持工程师们制定出更优化的设计方案,从而提高设计的效率和准确性;其次,基于数字孪生的设计能够降低产品研发成本,通过虚拟仿真在产品开发早期预测性能,避免昂贵的物理试验,降低产品的研发成本;再次,基于数字孪生的设计能够提高产品的质量和可靠性,通过数字化产品生命周期的各个阶段,发现生产和测试阶段可能存在的问题,从而提高产品的质量和可靠性;最后,基于数字孪生的设计能够优化产品的生产流程,将生产过程数字化,通过模拟仿真对生产流程进行优化,从而提高生产效率,减少生产周期,降低生产成本。

基于数字孪生的设计已广泛应用于制造业中的很多领域^[54],事实证明,数字孪生因其特点具有试错成本低、设计精度高、实时性和可视化效果好等特点,可以有效地帮助制造企业提高产品设计效率,降低设计成本,提高产品质量和可靠性,并提供可持续性更强的设计方法。

2.2 基于数字孪生的制造

通过数字孪生可实现从物理世界到数字世界的并行控制,通过虚实联动优化产品制造过程。制造企业可以将物理实体的数据收集到虚拟实体中,并利用模拟技术在虚拟实体中进行设计、测试和优化,仿真实际生产过程,验证过程设计方案的合理性。使用数字孪生可提高制造过程的效率和质量,更好地预测和管理生产过程中的风险和机会,从而避免成本浪费,提高生产效率和产品质量。

以大飞机、汽车、电子设备等产品制造的装配过程为例,数字孪生已应用于模拟物理装配线,通过收集实时数据模拟和分析装配线的物理特性,诸如产线布局、工作站分配方式、装配任务和物料等,将实时数据收集到虚拟装配线中,以便监测装配线的运行状况并进行优化。此外,数字孪生技术还用来预测未来的装配线运行状况,帮助制造企业优化装配线的设计和运行。数字孪生技术在装配线平衡调度问题上的应用很多,例如,在汽车制造业中,数字孪生技术可以帮助制造商设计和优化汽车生产线,在汽车生产装配过程中可以协助企业制定最佳的工作任务调度。在航空和航天领域中,数字孪生可用来设计、测试飞机和航天器的部件和系统,优化生产线的组织、管理和调度。近年来,数字孪生技术和装配线平衡中

的调度问题研究进展表明,这两个领域可以相互促进,以实现更高效的制造过程。在数字孪生技术应用于生产线的研究中,一些学者将数字孪生技术应用于装配线模拟,以模拟生产线上的物理装配过程,实现装配线的高效运行。此外,一些学者将数字孪生技术应用于装配线的生产计划与排程。例如,Zhang等^[58]提出了一种基于数字孪生的重构框架解决企业需要频繁切换的半自动电子装配线问题。Caputo等^[59]针对并行生产问题提出一个基于工作站的数字孪生框架以减少开发和设计新装配线所需的时间。为有效管理个性化制造过程的复杂性和多变性,Leng等^[60]提出了一种开放式的基于数字孪生的生产线设计柔性系统。Pabolu等^[61]利用数字孪生解决协同装配系统中装配线工人分配与平衡问题。Zhuang等^[62]利用数字孪生对复杂装配车间实施智能生产管理与控制。Yildiz等^[63]建立、模拟了基于数字孪生的虚拟工厂分析物理工厂及其子系统在复杂环境中的复杂性,以支持制造组织适应动态复杂环境。已有的研究成果表明,利用数字孪生解决装配调度问题的主要优势在于:1)通过虚拟环境中测试和优化,可以减少实验和测试成本,避免对生产线进行不必要的中断;2)通过模拟装配线的运行情况提高装配线效率和质量,优化任务分配调度,在不影响生产线效率的同时提高质量;3)通过预测技术帮助制造企业预测未来的装配线运行状况,制定更好的装配调度方案。

随着产品多样化带来的生产周期缩短,生产过程和制造系统不断复杂,传统方法在智能制造组织分析和形式化模型、管理、维护以及产品和系统生命周期模拟方面面临着方方面面的挑战,数字孪生体现了可以模拟物理实体的优势。当然,在装配线调度中采用数字孪生的概念需要4种核心支撑技术^[64-67]:1)实时采集、组织和融合装配车间物理数据;2)实时计算模型数据以构建装配线数字孪生体;3)发布数据化视图和输出数字孪生模型;4)调用数字孪生体中的数据并经过智能算法完成优化,生成决策方案和模型。数字孪生技术在制造问题上的应用是重要研究领域,其应用和研究进展有助于制造企业提高生产效率和质量,从而在全球竞争中获得优势。

2.3 基于数字孪生的运维

随着工业生产和智能化的进一步推进,基于数字孪生技术的异常工况预测逐渐成为工业生产领域的热门研究课题。数字孪生技术是一种将物理世界与数字世界相结合的新兴技术^[68],通过建立物理世界的数字映像,实现对物理世界的全面监测和预

测^[69]。异常工况预测则是工业生产过程中的重要课题,预测可用于发现和诊断生产过程中的异常工况,避免生产事故,减少人员和财产损失,提高生产效率和质量。

传统工业生产中的异常工况预测主要依赖于操作人员的经验和直觉,能够发现的隐藏异常非常有限。随着信息技术的高速发展,异常工况的预测也逐渐向数字化、智能化方向发展,数字孪生技术的出现为异常工况预测提供了一种全新的思路和方法。数字孪生可应用于建立准确的数字模型,全面监测生产过程,系统分析实时数据诊断异常情况,制定相应的运维方案。一方面,数字孪生技术可以帮助工业生产实现数字化转型,提高生产过程的自动化和智能化水平,实现可持续发展。另一方面,异常工况预测可以避免生产过程中异常情况的发生,减少生产损失,提高生产效率和质量。总之,基于数字孪生的异常工况预测可以提高工业生产的智能化,实施生产过程的精细化管理,为企业提供可靠的生产保障。

很多学者在基于数字孪生的监测和运维方面做了大量研究工作。Hung等^[70]利用数字孪生快速部署、实施数据交换和接口模式,并通过开发数控加工系统验证其有效性和通用性。Zhang等^[71]提出的数字孪生模型包括数据、模型、控制和功能4个主要系统组件,该系统已用于浮选加药的自动化以及药剂调整的智能化。Lv等^[72]针对深度学习环境下的协作智能系统数字孪生的安全问题,提出了一种卷积神经网络与支持向量回归相结合的数字孪生方法,并将该方法用于路径规划,降低系统的数据传输延迟,提高预测精度,合理地改变路径,抑制拥堵的蔓延。在研究核电站热工液压系统的过程中,Nguyen等^[73]利用数字孪生补充传感器数据的不足,进一步利用守恒定律和本构方程预测过程变量,识别并定位了异常工况。Wu等^[74]指出,数字孪生技术为工业设备故障预测与健康管理的發展提供了新的机遇,其认为数字孪生正在成为解构、描述和理解物理世界的新工具,而

且随着技术研究的不断深入,数字孪生将与工业设备预测和健康管理的深入集成,并将在应用过程中继续进行优化和改进,更好地提高设备的工作效率。Kutzke等^[75]开发了一种无人水下航行器的数字孪生系统,能够对系统进行建模并预测整个系统生命周期中的性能、条件退化以及基于子系统状态的系统维护性能,他们认为该系统对于带有成本和可靠性估计的多目标问题具有通用性。Kenett等^[76]和Ren等^[77]针对复杂设备全生命周期管理问题,利用机器学习算法建立数字孪生系统,将系统应用于柴油机故障预测与维修中。余永华等^[78]利用NI LabVIEW软件平台构建了带有孪生模型、信息感知与传输模块、服务应用程序的船用柴油发动机数字孪生系统,该系统能够对柴油机状态进行识别并将工况信息等特征参数传输给模型,最终利用模型实现燃烧室部件的故障诊断。唐和生等^[79]针对传统数据驱动的结构损伤识别方法训练数据样本不足的问题,将数字孪生技术与深度学习相结合,提出一种工况实际结构损伤状态识别方法,利用固有模态传递率函数和深度神经网络建立孪生体模型,有效提高了在没有地震信息情况下模型的损伤识别率。

数字孪生能够为实际生产提供重要补充,捕获物理空间的过去、现在并预测未来的状态,通过定期更新实时表示物理实体的当前状态^[7,10],表1列出了数字孪生的研究领域及其应用等方面的内容。数字孪生与传统的建模有所不同,因为在数字孪生中传感器的数据是与孪生体实时连续通讯的,而不是仅依赖于历史数据^[100]。当利用数字孪生进行故障识别时,还要合理利用历史数据中健康和故障两种状态的设备运行数据。与传统的运维和优化技术相比,引入数字孪生会带来如下优势:1)提高异常工况预测的实时性;2)提高早期异常工况预测的敏感性;3)降低异常工况的误报率和漏报率;4)提高异常工况的定位和评价准确性;5)提高综合优化程度。因此,基于数字孪生的生产装备运维具有重要意义。

表1 数字孪生研究领域及其应用

	应用场景	技术方法	解决的问题	存在的不足
设计 ^[80-85]	车辆设计	人工智能技术	优化设计问题	孪生体与物理体差异 计算资源要求高 智能感知复杂
	飞机设计	知识迁移技术	减少成本问题	
	装备设计	传感器技术	设计缺陷问题	
制造 ^[86-92]	离散过程	机器人自动化技术	提高制造灵活性和效率	技术成熟度低 持续发展慢 过度依赖成本
	连续流程	物联网技术	提高生产效率和质量	
	定制化生产	区块链技术	实现个性化定制生产	
运维 ^[93-99]	飞机、汽车运维	故障预报技术	预测故障和预防维护	数据安全和隐私 实时性要求较高 设备部署和管理复杂性
	冶炼、化工装备运维	故障运维技术	实时监测和安全性	
	风电、光伏能源系统	风险评估技术	预知风险和延长寿命	

3 数字孪生的应用实例分析

本节提出高炉连续生产流程的数字孪生模型构建方案和大飞机离散制造过程的多智能体协同制造方案.

3.1 连续生产流程数字孪生方案

应用实例中的工业高炉由炉喉、炉身、炉腰、炉腹和炉缸等5部分组成,每个部分是一个独立的智能体,高炉的正常运行需要在系统层次协调各个智能体的行为.如图2所示,相应的数字孪生体包括大小模型两部分,即基座大模型加上增量小模型.基座大模型是指基于物理场多智能体机理建模的成分场,增量小模型采用增量学习建模,即采用大小模型相结合的方式构建高炉的数字孪生体.

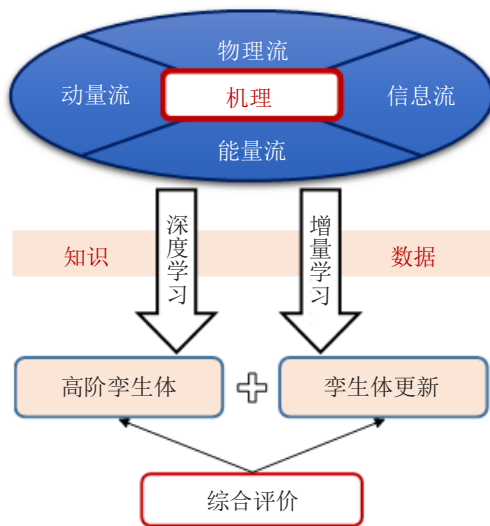


图2 数字孪生体

相比较于三维N-S方程,二维N-S方程刻画物理场带来了误差,但是通过孪生体边界条件的反演计算和深度学习的知识可以消除误差,而且由于三维N-S方程也只是反映物理体的机理,仍然与真实物理体有一定的差距需要修正,所以可以选择二维N-S方程通过修正达到数字孪生的目的.

3.1.1 高炉运行机理

基于计算流体力学,以自然界的守恒定律为基础,推导出高炉过程的基本控制方程,构建全高炉二维数学模型的整体框架^[101].为了提高模型的准确性,分析高炉内存在的相之间的传递现象,并将其引入控制方程的源项中,建立起连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程^[102].基于计算流体动力学的高炉仿真建模便是通过数学方程和计算机数值计算模拟高炉的实际运行过程^[103],得到高炉模型的基本方程组如下.

1) 连续性方程.

高炉上部煤气视作不可压缩流,因此推导有连续性方程^[101]为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

2) 动量方程.

高炉内部的动量方程采用N-S方程以及厄根方程^[101],表征为

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + f_x - \\ &\quad (f_1 + f_2 \sqrt{u^2 + v^2})u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + f_y - \\ &\quad (f_1 + f_2 \sqrt{u^2 + v^2})v. \end{aligned}$$

其中

$$f_1 = 150 \frac{(1 - \varepsilon_g)^2 \eta_g}{\varepsilon_g^3 \Psi_s^2 d_s^2}, \quad d_2 = 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_g) \rho}{\varepsilon_g^3 \Psi_s d_s}.$$

动量方程参数如表2所示.表2中: Ψ_s 为颗粒球形度,表征了非球形颗粒与球形颗粒的差别,定义为

$$\Psi_s = \left(\frac{\text{球形颗粒表面积}}{\text{实际颗粒表面积}} \right)_{\text{相同体积}}.$$

对于球形颗粒, $\Psi_s = 1$;对于其他颗粒, $0 < \Psi_s < 1$.通常煤炭颗粒的 Ψ_s 在0.63~0.73之间,砂粒在0.66~0.86之间.

表2 动量方程参数

物理量	说明
u	x 方向的速度分量
v	y 方向的速度分量
ρ	气体密度
p	压力
f_x	x 方向的体积力分量
f_y	y 方向的体积力分量
ε_g	填料孔隙率
η_g	流体动力粘度
d_s	填料当量球直径
Ψ_s	颗粒的球形度

3) 气体温度能量方程.

气体温度能量方程用能量守恒方程^[101]表征为

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial T_g}{\partial x} + v \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) - \beta (T_g - T_s),$$

其中 $\beta = A_{g-s} \frac{k_g}{d_s} [2.0 + 0.39(\text{Re}_{g-s})^{1/2}(\text{Pr}_g)^{1/2}]$.

气体温度能量方程如表3所示.表3中: Pr_g 为对流传热普朗特系数,表示流体中能量与动量迁移过程相互影响的无因次组合数,表明温度边界层与流动边界层的关系.

4) 固体温度方程.

固体温度方程使用热传导方程,考虑气固传热以及炉料的反应热^[101]表征为

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) + \beta (T_g - T_s) + f_3.$$

表3 气体温度能量方程

物理量	说明
T_g	气体温度
T_s	固体温度
u	x 方向的速度分量
v	y 方向的速度分量
A_{g-s}	接触面积
k_g	气体的导热系数
d_s	平均粒度
Re_{g-s}	雷诺数
Pr_g	对流传热普朗特系数

固体温度方程如表4所示. 表4中: k_s 为热扩散率, 决定与材料的热传导率、密度与热容.

表4 固体温度方程

物理量	说明
T_g	气体温度
T_s	固体温度
β	气体温度能量方程
f_3	炉料自身的反应热
k_s	热扩散率

3.1.2 孪生体大模型

孪生体大模型是指高炉高阶成分场, 其通过高炉运行温度场、化学反应速率与机理方程式联合求解^[104]. 高炉生产运行温度场通过两种方式获得, 一是物理变量和机器视觉协同建模, 二是边界条件和N-S方程协同建模. 高炉炉顶、炉腰和炉底分别安装CCD摄像头, 获取图像后与从高炉PLC系统获得的物理变量数据协同计算如图3所示的温度场^[101,105], 计算流程如图4所示. 高炉的化学反应如图5所示, 化学反应速率^[101]为

$$R_5 = A_s \frac{P_g}{RT_s} y_{CO_2} \left(\frac{1}{k'_5} + \frac{6}{d_s \rho_s E_5 k''_5} \right)$$

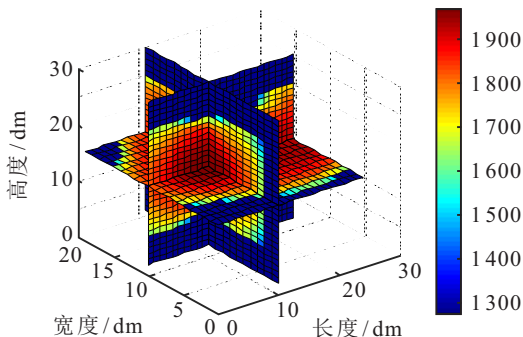


图3 高炉温度场的计算

3.1.3 孪生体小模型

孪生体小模型是指基于增量学习^[106]的孪生体增量模型. 基于计算流体力学高炉机理模型能够在一定程度上实现高炉生产实际物理空间与虚拟数字孪生空间的数据和信息交互^[107], 但随着生产的进

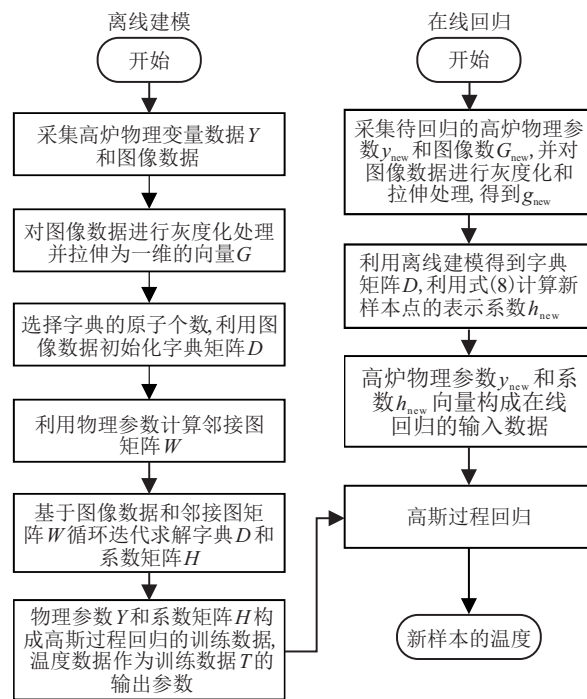


图4 温度场计算流程

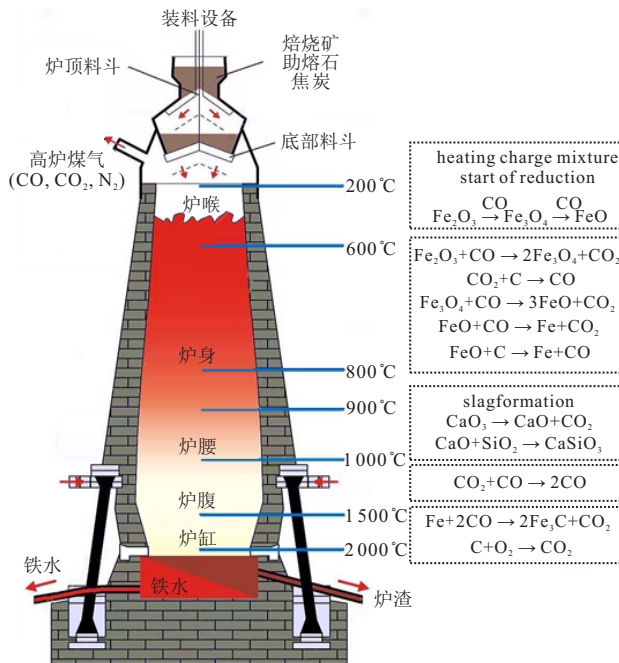


图5 高炉化学反应^[24]

行, 生产数据不断累积, 为了使模型能够不断升级从而符合最新的生产需求, 采用增量学习的方法建立补偿模型.

增量学习是一种机器学习技术, 通过不断地引入新数据样本来增量地更新模型. 在增量学习中, 模型可以在不重新训练的情况下, 通过学习新的数据样本改善其预测能力, 同时保留已有的知识和模型结构^[108-109].

传统的机器学习方法通常基于离线数据集进行

模型训练,一旦模型被训练完成,需要重新训练才能将新数据融入到模型中.然而在实际应用中,数据集通常是动态变化的,因此传统的机器学习方法的性能和准确性随着时间的推移而降低.相反,增量学习能够随着新数据的引入逐步改进模型的预测能力.增量学习通常用于以下场景^[110-112]:

1) 数据流式处理.当数据以流的形式输入系统时,无法存储所有数据进行批处理,此时使用增量学习能够逐步更新模型,使其能够处理新的数据.

2) 实时系统.实时系统需要实时响应新数据,而不是等待批处理完成后再进行模型更新,模型更新采用增量学习,从而保证系统的实时性.

3) 大规模数据集.当数据集非常庞大时,传统的批处理方法往往需要消耗大量的计算资源和时间,而增量学习能够通过逐步引入新数据,避免重复处理大规模的数据集.

基于增量学习的高炉数字孪生模型的建模步骤如下^[113-114].

step 1: 数据采集.采集新的高炉运行数据,如温度、压力、流量等,将其添加到原有的数据集中.

step 2: 模型初始化及训练.将已有的高炉数字孪生模型作为基础模型并对其进行训练,得到一个初步的数字孪生模型.

step 3: 新数据集的处理.将新的数据集分为训练集和测试集.

step 4: 模型微调.将新的数据集输入到初步数字孪生模型中,可基于梯度下降的优化算法,如随机梯度下降、自适应矩估计等,对模型进行微调和优化,以提高模型的精度和泛化能力.

step 5: 模型评估.使用测试集对模型进行评估,以检验模型的性能和泛化能力,如果模型表现不佳,则需要进一步微调和优化.

step 6: 模型更新.如果新的数据集通过了测试,则可以将其添加到原有的数据集中,并使用新的数据集对数字孪生模型进行再次训练和更新.

通过以上步骤能够获得适合新生产条件的高炉数字孪生模型,将模型部署在生产现场进行工业应用.

高炉生产运行数字孪生体建立后,基于数字孪生的预测和运维对制造企业异常工况的早期预报和管理具有重要作用.传统的异常工况检测是基于装备边界观测数据检测的,可是装备内部物理化学变化早于边界变化,因此基于数字孪生的异常工况检测优于基于边界数据的检测.基于数字孪生技术的异常工

况预测可以实现对高炉生产过程的实时预测,及时预报高炉生产过程中的微小异常工况,不仅能够避免微小异常演变成大型事故,而且可以通过运维提高高炉的生产效率和质量.数字孪生技术可以将高炉生产过程构建成完整的数字模型,通过传感器等设备采集高炉生产过程的各种数据,为数字化模型提供数据支持.通过模型的分析 and 预测,为高炉生产过程的优化决策和控制提供支持.

3.2 离散制造过程多智能体协同制造

智能制造正在世界范围内兴起,它是自动化技术和集成技术向纵深发展的结果.随着人工智能和计算机技术在制造业中的广泛应用,多智能体系统提供了一种智能化的方法,用于解决产品设计、生产制造以及产品整个生命周期中不同领域之间的协调合作问题^[36,38-39].该技术为系统集成、并行设计和实现智能制造提供了更有效的手段^[115].

航空制造业作为尖端产业,具备技术密集度高、产业关联范围广、辐射带动效应大等显著特征^[116].该行业不仅是国家工业发展、科技能力的重要标志,也是国防水平的重要综合体现^[117].大飞机的制造和装配需要考虑众多因素,如生产效率、资源利用、成本控制、安全保障等.飞机装配线是一个复杂的离散制造系统,具体体现为装配任务多、约束种类多、人员约束复杂等特点.以某飞机制造公司X机型为例,完成此飞机一架次的装配工作需要超过100万个装配零件,4500本装配大纲,共约35000个工序.同时,装配过程中涉及大量特定工种的劳动力和操作,以及各种类型的工具.为了清晰地完成飞机装配工作,通常将飞机装配线分为6个层次,分别是架次、站位、工位、AO(装配大纲)、工序和工步^[118].飞机装配计划的优化目标是在满足工艺约束的前提下,通过合理安排任务的执行顺序提高资源利用效率,减少任务间不必要的等待时间,以缩短每架产品的装配周期^[119].任务之间存在紧前紧后的约束关系,并且上下层次之间也存在着父子约束关系^[118].飞机装配序列规划合理与否直接影响飞机装配过程的效率和质量^[119].使用多智能体学习技术解决装配线平衡问题的方法是将各个工作站看作智能体,通过智能体之间的协作来追求共同的优化目标.这种方法可以通过控制每个智能体的决策,使得每个智能体的负载相对平衡来实现.图6表示其中一个工作站的甘特图^[120],序号代表不同工序,不同颜色的工序代表不同批次的分配结果,最终通过任务甘特图指导现场装配,从而提高整个装配线的效率.

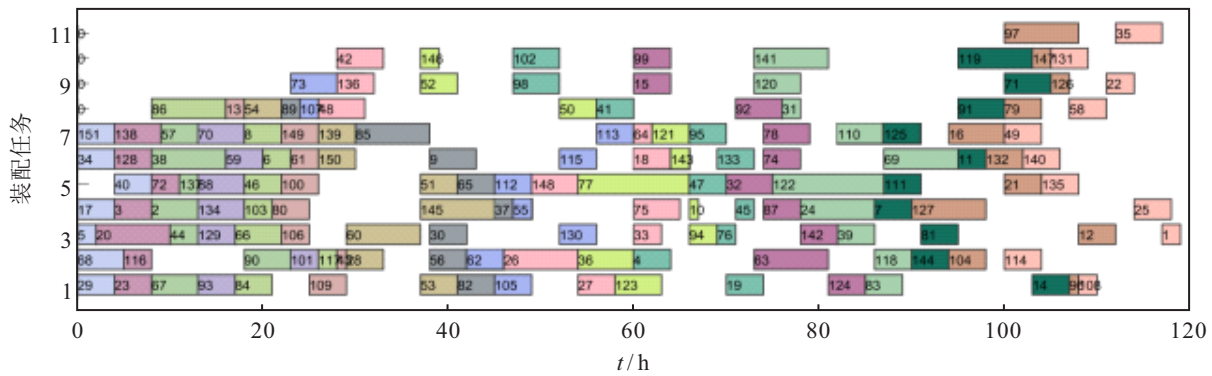


图6 多智能体调度结果

4 结论与展望

数字孪生的价值和重要性已经毋庸置疑,但数字孪生究竟带来哪些新的技术趋势,它对当前工业的发展会造成何种影响,更关键的是每个企业如何才能获取数字孪生中的“宝藏”,则是需要真正关注的焦点^[121-123]。在“十四五”期间,我国数字孪生行业发展非常迅速,有望一直保持较高的增长率。本文从数字孪生的概念、相关政策、在各行业应用的角度介绍了数字孪生在复杂工业流程生产中的发展历程和研究现状,综述了基于数字孪生的异常工况预测、基于数字孪生的生产平衡和多智能体在智能制造的应用等相关的国内外研究现状,最后提出一种包括全高炉二维数学模型、高炉温度场模型、高炉成分场模型和增量学习模型的高炉数字孪生案例,为数字孪生在复杂流程工业中的应用提供了带有增量补偿的机理与计算机视觉相结合的解决方案。

数字孪生在复杂流程工业生产过程中的应用研究已经取得了一定进展,在进一步的研究中,可以利用全流程生产过程中的大量数据建立大小模型协同的数字孪生系统。主要可以进行以下3个方面的研究:1)在大模型端通过迁移学习和增量学习等方式协助小模型完成数据的处理,弥补小模型计算、存储等能力的不足;2)建立大模型与小模型协同建模的研究,利用多智能体分布式协同决策的学习进化和反馈演化,实现大模型全局综合评估机制和小模型局部评估机制协同实现最优求解,优化资源利用率,降低响应时间,提高产品质量的整体性能;3)实现大小模型数字孪生系统中大模型和小模型交互知识图谱和知识优化,基于多智能体博弈通过群体智能强化学习等人工智能方法完成知识积累和优化。

参考文献(References)

[1] Zonta T, da Costa C A, da Rosa Righi R, et al. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020,

150: 106889.
 [2] Yang T, Yi X L, Lu S W, et al. Intelligent manufacturing for the process industry driven by industrial artificial intelligence[J]. Engineering, 2021, 7(9): 1224-1230.
 [3] Min Q F, Lu Y G, Liu Z Y, et al. Machine learning based digital twin framework for production optimization in petrochemical industry[J]. International Journal of Information Management, 2019, 49: 502-519.
 [4] Lu Y. Artificial intelligence: A survey on evolution, models, applications and future trends[J]. Journal of Management Analytics, 2019, 6(1): 1-29.
 [5] Li B H, Hou B C, Yu W T, et al. Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: A review[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(1): 86-96.
 [6] Cioffi R, Travaglioni M, Piscitelli G, et al. Artificial intelligence and machine learning applications in smart production: Progress, trends, and directions[J]. Sustainability, 2020, 12(2): 492.
 [7] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.
 [8] Fuller A, Fan Z, Day C, et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108952-108971.
 [9] Groshev M, Guimarães C, Martín-Pérez J, et al. Toward intelligent cyber-physical systems: Digital twin meets artificial intelligence[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(8): 14-20.
 [10] Rasheed A, San O, Kvamsdal T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21980-22012.
 [11] Qing Z H U, Li G Z, Yu L D, et al. From real 3D modeling to digital twin modeling[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 1040.
 [12] 李浩, 刘根, 文笑雨, 等. 面向人机交互的数字孪生系统工业安全控制体系与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 374-389.
 (Li H, Liu G, Wen X Y, et al. Industrial safety control system and key technologies of digital twin system oriented to human-machine interaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021,

- 27(2): 374-389.)
- [13] 杨一帆, 邹军, 石明明, 等. 数字孪生技术的研究现状分析[J]. 应用技术学报, 2022, 22(2): 176-184.
(Yang Y F, Zou J, Shi M M, et al. Analysis of the research status of digital twin technology[J]. Journal of Technology, 2022, 22(2): 176-184.)
- [14] 赵敏, 朱铎先. 新工业革命四大术语辨析[J]. 软件和集成电路, 2020(7): 14-21.
(Zhao M, Zhu D X. Discrimination of four terms of new industrial revolution[J]. Software and Integrated Circuit, 2020(7): 14-21.)
- [15] 高士根, 周敏, 郑伟, 等. 基于数字孪生的高端装备智能运维研究现状与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(7): 1953-1965.
(Gao S G, Zhou M, Zheng W, et al. Intelligent operation and maintenance for advanced equipment based on digital twin: Challenges and future[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(7): 1953-1965.)
- [16] 李国祥, 王海燕, 陈晓东. 基于数字孪生技术的船舶智能机舱[J]. 中国船检, 2023(1): 52-54.
(Li G X, Wang H Y, Chen X D. Intelligent engine room of ship based on digital twinning technology[J]. China Ship Survey, 2023(1): 52-54.)
- [17] Zhao C H, Wang W, Qin Y, et al. Comprehensive subspace decomposition with analysis of between-mode relative changes for multimode process monitoring[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(12): 3154-3166.
- [18] Jiang Q C, Yan X F. Multimode process monitoring using variational Bayesian inference and canonical correlation analysis[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(4): 1814-1824.
- [19] Zhang K, Peng K X, Dong J. A common and individual feature extraction-based multimode process monitoring method with application to the finishing mill process[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 4841-4850.
- [20] Shen L, Chen Z P, Jiang Z H, et al. Soft sensor modeling of blast furnace wall temperature based on temporal-spatial dimensional finite-element extrapolation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-14.
- [21] 郭贺铨. 大数据时代的机遇与挑战[J]. 求是, 2013(4): 47-49.
(Wu H Q. Opportunities and challenges in the era of big data[J]. China Business Update, 2013(4): 47-49.)
- [22] 李斌硕. 大数据带来的价值与挑战[J]. 城市建设理论研究, 2014(36): 10056-10057.
(Li B S. Value and challenges brought by big data[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2014(36): 10056-10057.)
- [23] 周志华. 机器学习与数据挖掘[J]. 中国计算机学会通讯, 2007, 3(12): 35-44.
(Zhou Z H. Machine learning and data mining[J]. Communications of the CCF, 2007, 3(12): 35-44.)
- [24] 张琦, 沈佳林, 籍杨梅. 典型钢铁制造流程碳排放及碳中和实施路径[J]. 钢铁, 2023, 58(2): 173-187.
(Zhang Q, Shen J L, Ji Y M. Analysis of carbon emissions in typical iron- and steelmaking process and implementation path research of carbon neutrality[J]. Iron & Steel, 2023, 58(2): 173-187.)
- [25] 杨利锋, 林大华, 邓振云, 等. 低秩特征选择多输出回归算法[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(20): 116-121.
(Yang L F, Lin D H, Deng Z Y, et al. Low-rank feature selection for multiple-output regression algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(20): 116-121.)
- [26] Xu X, Ding J L, Liu Q, et al. A novel multimanifold joint projections model for multimode process monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(9): 5961-5970.
- [27] Bishop C M, Nasrabadi N M. Pattern recognition and machine learning[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [28] 安家玉. 基于重构PCA的过渡过程监测方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
(An J Y. Research on reconstruction-PCA based transition process monitoring method[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.)
- [29] 葛志强. 复杂工况过程统计监测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
(Ge Z Q. Statistical process monitoring methods for complex processes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.)
- [30] 江南. 并行处理技术简介[J]. 福建电脑, 2002, 18(12): 3-4.
(Jiang N. Brief introduction of parallel processing technology[J]. Fujian Computer, 2002, 18(12): 3-4.)
- [31] Fu Y J, Luo C M. Joint structure preserving embedding model and its application for process monitoring[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(45): 20667-20679.
- [32] Quiñones-Grueiro M, Prieto-Moreno A, Verde C, et al. Data-driven monitoring of multimode continuous processes: A review[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2019, 189: 56-71.
- [33] Yu J E, Qin S J. Multimode process monitoring with Bayesian inference-based finite Gaussian mixture models[J]. AIChE Journal, 2008, 54(7): 1811-1829.
- [34] Panait L, Luke S A. Cooperative multi-agent learning: The state of the art[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2005, 11(3): 387-434.
- [35] Cao J Y, Leng S P, Zhang K. Multi-agent learning empowered collaborative decision for autonomous driving vehicles[C]. International Conference on UK-China Emerging Technologies. Glasgow, 2020: 1-4.
- [36] Yu C, Dong Y Z, Li Y N, et al. Distributed multi-agent deep reinforcement learning for cooperative multi-robot pursuit[J]. The Journal of Engineering, 2020, 2020(13): 499-504.

- [37] Bloembergen D, Tuyls K, Hennes D, et al. Evolutionary dynamics of multi-agent learning: A survey[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2015, 53: 659-697.
- [38]] Li T, Zhao Y H, Zhu Q Y. The role of information structures in game-theoretic multi-agent learning[J]. *Annual Reviews in Control*, 2022, 53: 296-314.
- [39] Feriani A, Hossain E. Single and multi-agent deep reinforcement learning for AI-enabled wireless networks: A tutorial[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 1226-1252.
- [40] Johnson D, Chen G, Lu Y Q. Multi-agent reinforcement learning for real-time dynamic production scheduling in a robot assembly cell[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 7684-7691.
- [41] Su J Y, Huang J, Adams S, et al. Deep multi-agent reinforcement learning for multi-level preventive maintenance in manufacturing systems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 192: 116323.
- [42] Zeng C W, Gu T L, Zhong Y R, et al. A multi-agent evolutionary algorithm for connector-based assembly sequence planning[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 3689-3693.
- [43] Liao L M, Huang C J, Lin C S. Multi-agent system for balancing mixed-model assembly lines with Bi-objective[C]. *International Conference on Manufacturing Automation*. Hong Kong, 2011: 191-195.
- [44] Dobrowolski G, Kisiel-Dorohinicki M, Nawarecki E. Evolutionary multi-agent system for multiobjective balancing of production lines[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, 35(1): 73-78.
- [45] Sabar M, Montreuil B, Frayret J. An agent-based algorithm for personnel shift-scheduling and rescheduling in flexible assembly lines[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2012, 23(6): 2623-2634.
- [46] Rathore M M, Shah S A, Shukla D, et al. The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 32030-32052.
- [47] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.
(Tao F, Liu W R, Zhang M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.)
- [48] 张文杰, 王国新, 阎艳, 等. 基于数字孪生和多智能体的航天器智能试验[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(1): 16-33.
(Zhang W J, Wang G X, Yan Y, et al. Intelligent test of spacecraft based on digital twin and multi-agent systems[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(1): 16-33.)
- [49] Clemen T, Ahmady-Moghaddam N, Lenfers U A, et al. Multi-agent systems and digital twins for smarter cities[C]. *Proceedings of the 2021 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*. Virtual Event, 2021: 45-55.
- [50] Zheng X C, Psarommatis F, Petrali P, et al. A quality-oriented digital twin modelling method for manufacturing processes based on a multi-agent architecture[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 51: 309-315.
- [51] Nie Q W, Tang D B, Zhu H H, et al. A multi-agent and internet of things framework of digital twin for optimized manufacturing control[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2022, 35(10/11): 1205-1226.
- [52] Latsou C, Farsi M, Erkoyuncu J A. Digital twin-enabled automated anomaly detection and bottleneck identification in complex manufacturing systems using a multi-agent approach[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 67: 242-264.
- [53] Nie Q W, Tang D B, Liu C C, et al. A multi-agent and cloud-edge orchestration framework of digital twin for distributed production control[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, 82: 102543.
- [54] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.
(Tao F, Liu W R, Liu J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18.)
- [55] Lo C K, Chen C H, Zhong R Y. A review of digital twin in product design and development[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 48: 101297.
- [56] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 141-144.
- [57] Tao F, Sui F Y, Liu A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(12): 3935-3953.
- [58] Zhang D, Leng J W, Xie M, et al. Digital twin enabled optimal reconfiguration of the semi-automatic electronic assembly line with frequent changeovers[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022, 77: 102343.
- [59] Caputo F, Greco A, Fera M, et al. Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace design[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2019, 71: 20-31.
- [60] Leng J W, Chen Z Y, Sha W N, et al. Digital twins-based flexible operating of open architecture production line for individualized manufacturing[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 53: 101676.
- [61] Pabolu V K R, Shrivastava D, Kulkarni M S. A digital-twin based worker's work allocation framework for a collaborative assembly system[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55(10): 1887-1892.
- [62] Zhuang C B, Liu J H, Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1): 1149-1163.
- [63] Yildiz E, Møller C, Bilberg A. Demonstration and

- evaluation of a digital twin-based virtual factory[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(1): 185-203.
- [64] 段明峰, 张南, 耿华, 等. 基于数字孪生的装配车间实时监控系统的开发[J]. *制造业自动化*, 2021, 43(12): 110-112.
(Duan M H, Zhang N, Geng H, et al. Development of real-time monitoring system for assembly workshop based on digital twin[J]. *Manufacturing Automation*, 2021, 43(12): 110-112.)
- [65] 王昀睿, 李妍, 仁文哲, 等. 基于数字孪生的混流装配线资源配置优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 536-544.
(Wang Y R, Li Y, Ren W Z, et al. Digital Twin-based resource allocation optimization method of mixed-model assembly line[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 536-544.)
- [66] Kousi N, Gkourmelos C, Aivaliotis S, et al. Digital twin for adaptation of robots' behavior in flexible robotic assembly lines[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 28: 121-126.
- [67] Yao B T, Xu W J, Shen T, et al. Digital twin-based multi-level task rescheduling for robotic assembly line[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 1769.
- [68] Tao F, Qi Q L, Wang L H, et al. Digital twins and cyber-physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 132-149.
- [69] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与并行系统: 发展现状、对比及展望[J]. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
(Yang L Y, Chen S Y, Wang X, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001-2031.)
- [70] Hung M H, Lin Y C, Hsiao H C, et al. A novel implementation framework of digital twins for intelligent manufacturing based on container technology and cloud manufacturing services[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(3): 1614-1630.
- [71] Zhang D S, Gao X W. A digital twin dosing system for iron reverse flotation[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 63: 238-249.
- [72] Lv Z H, Li Y X, Feng H L, et al. Deep learning for security in digital twins of cooperative intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 16666-16675.
- [73] Nguyen T N, Ponciroli R, Bruck P, et al. A digital twin approach to system-level fault detection and diagnosis for improved equipment health monitoring[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 170: 109002.
- [74] Wu D H, Tao W, Duan X Y, et al. Applications and analysis of digital twin in prognostic and health management[C]. *IEEE 11th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication*. Beijing, 2021: 200-203.
- [75] Kutzke D T, Carter J B, Hartman B T. Subsystem selection for digital twin development: A case study on an unmanned underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 223: 108629.
- [76] Kenett R S, Bortman J. The digital twin in Industry 4.0: A wide-angle perspective[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2022, 38(3): 1357-1366.
- [77] Ren Z J, Wan J F, Deng P. Machine-learning-driven digital twin for lifecycle management of complex equipment[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2022, 10(1): 9-22.
- [78] 余永华, 章宁, 解美强, 等. 基于数字孪生的柴油机故障诊断系统研究[J]. *船舶工程*, 2022, 44(10): 86-91.
(Yu Y H, Zhang N, Xie M Q, et al. Research on diesel engine fault diagnosis system based on digital twin[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(10): 86-91.)
- [79] 唐和生, 王泽宇, 陈嘉缘. 基于数字孪生和深度学习的结构损伤识别[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1218.TU.20221227.1016.001.html>.
(Tang H S, Wang Z Y, Chen J Y. Structural damage identification based on digital twin and deep learning[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1218.TU.20221227.1016.001.html>.)
- [80] Yerra V A, Pilla S. IIoT-enabled production system for composite intensive vehicle manufacturing[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2017, 10(2): 209-214.
- [81] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 141-144.
- [82] Lu Q C, Parlakad A K, Woodall P, et al. Developing a digital twin at building and city levels: Case study of West Cambridge campus[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(3): 05020004.
- [83] Francisco A, Mohammadi N, Taylor J E. Smart city digital twin-enabled energy management: Toward real-time urban building energy benchmarking[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(2): 04019045.
- [84] Liu Y, Zhang L, Yang Y, et al. A novel cloud-based framework for the elderly healthcare services using digital twin[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 49088-49101.
- [85] Bruynseels K, Santoni de Sio F, van den Hoven J. Digital twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm[J]. *Frontiers in Genetics*, 2018, 9: 31.
- [86] Lo C K, Chen C H, Zhong R Y. A review of digital twin in product design and development[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 48: 101297.
- [87] Rauch L, Pietrzyk M. Digital twins as a modern approach to design of industrial processes[J]. *Journal of Machine*

- Engineering, 2019, 19(1): 86-97.
- [88] Oyekan J O, Hutabarat W, Tiwari A, et al. The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 55: 41-54.
- [89] Bilberg A, Ahmad Malik A. Digital twin driven human-robot collaborative assembly[J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(1): 499-502.
- [90] Park K T, Lee J, Kim H J, et al. Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(5/6): 1787-1810.
- [91] Fang Y L, Peng C, Lou P, et al. Digital-twin-based job shop scheduling toward smart manufacturing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(12): 6425-6435.
- [92] Guo D Q, Ling S Q, Li H, et al. A framework for personalized production based on digital twin, blockchain and additive manufacturing in the context of Industry 4.0[C]. *IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering*. Hong Kong, 2020: 1181-1186.
- [93] Tuegel E J, Ingraffea A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011: 1-14.
- [94] Li C Z, Mahadevan S, Ling Y, et al. Dynamic Bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(3): 930-941.
- [95] Venkatesan S, Manickavasagam K, Tengenka N, et al. Health monitoring and prognosis of electric vehicle motor using intelligent-digital twin[J]. *IET Electric Power Applications*, 2019, 13(9): 1328-1335.
- [96] Fu X A, Han J Y, Castle M, et al. Digital twin-driven vibration amplitude simulation for condition monitoring of axial blowers in blast furnace ironmaking[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2023, 11(1): 2152400.
- [97] Short M, Twiddle J. An industrial digitalization platform for condition monitoring and predictive maintenance of pumping equipment[J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3781.
- [98] Shim C S, Dang N S, Lon S, et al. Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, 15(10): 1319-1332.
- [99] Abadias Llamas A, Bartie N J, Heibeck M, et al. Simulation-based exergy analysis of large circular economy systems: Zinc production coupled to CdTe photovoltaic module life cycle[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2020, 6(1): 34-67.
- [100] Stavropoulos P, Mourtzis D. Digital twins in industry 4.0[C]. *Design and Operation of Production Networks for Mass Personalization in the Era of Cloud Technology*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 277-316.
- [101] 黄勇良. 高炉风口回旋区温度软测量与三维温度场建模[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
(Huang Y L. Soft sensing and 3D temperature field modeling of blast furnace tuyere raceway[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.)
- [102] 商晓东. 基于计算流体力学的高炉多相流整体建模[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
(Shang X D. The modeling of multi-fluid fullblast furnace based on computational fluid dynamics[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.)
- [103] 商晓东, 张贝克. 基于CFD的高炉气场建模与仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2014, 31(1): 216-219.
(Shang X D, Zhang B K. Study on blast furnace modeling and simulation based on CFD[J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(1): 216-219.)
- [104] 李彦瑞, 杨春节, 张瀚文, 等. 流程工业数字孪生关键技术探讨[J]. *自动化学报*, 2021, 47(3): 501-514.
(Li Y R, Yang C J, Zhang H W, et al. Discussion on key technologies of digital twin in process industry[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(3): 501-514.)
- [105] Jiao H Y, Zhang Y W, Luo C M, et al. Collaborative multiple rank regression for temperature prediction of blast furnace[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-10.
- [106] Belouadah E, Popescu A, Kanellos I. A comprehensive study of class incremental learning algorithms for visual tasks[J]. *Neural Networks*, 2021, 135: 38-54.
- [107] Fu X A, Han J Y, Castle M, et al. Digital twin-driven vibration amplitude simulation for condition monitoring of axial blowers in blast furnace ironmaking[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2023, 11(1): 2152400.
- [108] 刘冰瑶, 刘进锋. 增量学习研究综述[J]. *现代计算机*, 2022, 28(13): 72-75.
(Liu B Y, Liu J F. Literature review of incremental learning[J]. *Modern Computer*, 2022, 28(13): 72-75.)
- [109] Bouchachia A, Gabrys B, Sahel Z. Overview of some incremental learning algorithms[C]. *2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference*. London, 2007: 1-6.
- [110] Gepperth A, Hammer B. Incremental learning algorithms and applications[C]. *European Symposium on Artificial Neural Networks*. Piscataway: IEEE, 2016: 357-368.
- [111] Joshi P. Incremental learning: Areas and methods—A survey[J]. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*, 2012, 2(5): 43-51.
- [112] Yang Q, Gu Y D, Wu D S. Survey of incremental learning[C]. *Chinese Control and Decision Conference*. Nanchang, 2019: 399-404.
- [113] Shang J, Chen M Y, Zhang H W, et al. Increment-based recursive transformed component statistical analysis for monitoring blast furnace iron-making processes: An index-switching scheme[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 77: 190-200.
- [114] Liu Y, Wang Y F, Chen L, et al. Incremental Bayesian

- broad learning system and its industrial application[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2021, 54(5): 3517-3537.
- [115] 乔兵, 朱剑英. 多 Agent 智能制造系统研究综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2001, 33(1): 1-7.
(Qiao B, Zhu J Y. Agent-based intelligent manufacturing systems: A state-of-the-art survey[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2001, 33(1): 1-7.)
- [116] 徐磊, 刘金山, 孙宏宇, 等. 卫星结构板智能投影辅助装配系统研制与应用[J]. *空间控制技术与应用*, 2022, 48(5): 116-124.
(Xu L, Liu J S, Sun H Y, et al. Development and application of smart projection aided assembly system for satellite structural plate manufacturing[J]. *Aerospace Control and Application*, 2022, 48(5): 116-124.)
- [117] Tabaković N, Durakovic B. Impact of industry 4.0 on aerospace and defense systems[J]. *Defense and Security Studies*, 2021, 2: 63-78.
- [118] 桂达, 朱海平, 廖嘉伟, 等. 基于混合算法的飞机多层次装配计划优化及应用[J]. *工业工程*, 2015, 18(6): 8-18.
(Gui D, Zhu H P, Liao J W, et al. Multi-level assembly plan optimization of airplane based on a hybrid algorithm and its application[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2015, 18(6): 8-18.)
- [119] 陈俊皓, 贾晓亮. 基于实例学习的飞机装配序列智能规划方法[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(12): 77-85.
(Chen J H, Jia X L. An approach for aircraft assembly sequence intelligent planning based on case learning[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(12): 77-85.)
- [120] Wang Z, Zhang J, Yang S. An improved particle swarm optimization algorithm for dynamic job shop scheduling problems with random job arrivals[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 51: 100594.
- [121] Yin S, Li X W, Gao H J, et al. Data-based techniques focused on modern industry: An overview[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(1): 657-667.
- [122] Severson K, Chaiwatanodom P, Braatz R D. Perspectives on process monitoring of industrial systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2016, 42: 190-200.
- [123] Joe Qin S. Statistical process monitoring: Basics and beyond[J]. *Journal of Chemometrics*, 2003, 17(8/9): 480-502.

作者简介

张颖伟(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 从事工业流程的复杂工况识别、自主数字孪生和物理人工智能等研究, E-mail: zhangyingwei@ise.neu.edu.cn;

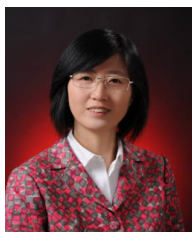
高鸿瑞(1997—), 男, 博士生, 从事机器学习、资源调度等研究, E-mail: Hongrui_G2022@163.com;

张鼎森(1992—), 男, 讲师, 博士, 从事复杂工业流程工况识别、质量预测、故障诊断等研究, E-mail: zhangdingsen@ise.neu.edu.cn;

冯琳(1979—), 女, 副教授, 博士, 从事复杂工业过程建模与优化、人工智能、图像处理等研究, E-mail: fenglin@ise.neu.edu.cn;

张升阳(1998—), 男, 硕士生, 从事复杂工业过程建模与优化的研究, E-mail: 1174364763@qq.com;

毕诸明(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事企业信息系统、数字化制造、有限元分析等研究, E-mail: biz@pfw.edu.



特邀专家 张颖伟, 东北大学教授、博士生导师. 于东北大学获得控制理论与控制工程硕士和博士学位, 并进入东北大学计算机科学与技术博士后流动站. 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部长江学者特聘教授, 享受国务院政府特殊津贴, 百千万人才工程国家级人选, 科技创新2030-“新一代人工智能”重大项目首席, 省科技创新团队, 省政协委员. 研究方向为复杂工况识别、自主数字孪生、物理人工智能、工业大数据与图像科学、流程监测与质量预测、机器学习与深度学习、多智能体与进化博弈、智能计划与资源调度等工业智能技术, 以及在钢铁制造、大飞机制造、装备芯片制造、能源工业、军事工业中的工程应用.

专家寄语 白山黑水, 伟大雄豪, 德化昭昭; 知行合一, 自强不息, 为贵登高. 值此母校百年华诞, 祝愿母校为祖国育英才, 创辉煌!