

平行车间调度模型构建和系统设计

彭绍明 熊刚 沈震 董西松 曲之平 付龙 陶志坤 韩云君

Parallel workshop scheduling model and system design

PENG Shaoming, XIONG Gang, SHEN Zhen, DONG Xisong, QU Zhiping, FU Long, TAO Zhikun, HAN Yunjun

引用本文:

彭绍明, 熊刚, 沈震, 等. 平行车间调度模型构建和系统设计[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 254-266.

Shaoming PENG, Gang XIONG, Zhen SHEN, et al. Parallel workshop scheduling model and system design[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 254-266.

您可能感兴趣的其他文章

McCulloch-Pitts 人工神经元模型 80 周年纪念: 思想、方法与意义

In celebration of McCulloch-Pitts ANN model's 80th anniversary: its origin, principle, and influence
智能科学与技术学报. 2023. 5(2): 133-142

元宇宙下的平行交通系统

Parallel transportation systems in era of metaverse

智能科学与技术学报. 2023. 5(1): 32-40

系统农业: 结合农业社会经济属性的建模和控制

Systems agriculture: modeling and control based on social and economic attributes of agriculture

智能科学与技术学报. 2023. 5(1): 41-50

平行推理: 一种基于 ACP 方法的虚实互动的知识协同框架

Parallel reasoning: a virtual-real interactive knowledge collaboration framework based on ACP approach

智能科学与技术学报. 2023. 5(1): 69-82

元宇宙与平行系统: 发展现状、对比及展望

Metaverses and parallel systems: the state of the art, comparisons and prospects

智能科学与技术学报. 2023. 5(1): 121-132

平行圆明园: 从数字孪生园林到元宇宙智慧遗址公园

Parallel Yuan-Ming Yuan Imperial Garden: from digital twin garden to metaverse smart heritage park

智能科学与技术学报. 2022. 4(3): 301-307

平行车间调度模型构建和系统设计

彭绍明^{1,2}, 熊刚^{1,3}, 沈震^{1,4}, 董西松^{1,4}, 曲之平⁵, 付龙^{1,2}, 陶志坤¹, 韩云君¹

(1. 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室, 北京市智能化技术与系统工程技术创新中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049;

3. 东莞中科云计算研究院, 广东省3D打印与智能制造工程技术研究中心, 广东 东莞 523808;

4. 青岛智能产业技术研究院智能制造研究所, 山东 青岛 266109;

5. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 作业车间环境是一个高动态、强耦合的复杂系统, 一种调度算法无法做到一次训练而终身使用, 需要结合车间环境、作业过程、作业任务进行计算实验和渐进式学习。针对作业车间提出了一种基于平行系统理论的平行车间调度模型, 实现了调度算法优化和系统演化。针对该模型, 阐述了基于多智能体的人工车间调度系统建模、面向车间调度任务的计算实验方法, 以及面向虚实系统的平行调度方法, 实现了人工系统和实际系统之间的闭环控制, 迭代优化。最后, 在平行车间调度模型的指导下, 设计了平行车间调度系统的技术架构和基本功能。

关键词: 平行系统; 计算实验; 平行车间调度系统

中图分类号: TP29

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202321

Parallel workshop scheduling model and system design

PENG Shaoming^{1,2}, XIONG Gang^{1,3}, SHEN Zhen^{1,4}, DONG Xisong^{1,4}, QU Zhiping⁵,
FU Long^{1,2}, TAO Zhikun¹, HAN Yunjun¹

1. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, State Key Laboratory of Multimodal Artificial Intelligence Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Guangdong Engineering Research Center of 3D Printing and Intelligent Manufacturing, Cloud Computing Center, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523808, China

4. Intelligent Manufacturing Center, Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

5. Northern Institute of Automatic Control Technology, Taiyuan 030006, China

Abstract: The workshop environment is a highly dynamic and tightly coupled complex system. A scheduling algorithm cannot be trained once and used for life. It needs to perform computational experiments and progressive learning according to the workshop environment and processing state. In this paper, a parallel workshop scheduling system model was proposed to realize scheduling optimization and system evolution. For this model, we described the modeling of artificial workshop scheduling system based on multi-agent system, the computational experiment for workshop scheduling tasks, and the parallel scheduling method for the virtual-real system, realizing the closed-loop control and iterative optimization. Finally, under the guidance of the parallel workshop scheduling model, we designed the architecture and basic functions of the parallel workshop scheduling system.

Key words: parallel system, computational experiment, parallel workshop scheduling system

收稿日期: 2023-02-22; 修回日期: 2023-04-27

通信作者: 韩云君, yunjun.han@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2021YFB3301504); 国家自然科学基金项目 (No.U19B2029); 中科院科技服务网络计划 (STS)-东莞专项 (No.20201600200072, No.20211600200022)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB3301504), The National Natural Science Foundation of China (No.U19B2029), CAS STS Dongguan Joint Project (No.20201600200072, No.20211600200022)

0 引言

工业和信息化部、国家标准化委员会联合发布的《国家智能制造标准体系建设指南(2021版)》指出,智能制造系统具有自主感知、自主学习、自主决策和自主执行的智能特征。其中,工厂/车间的自主智能和无人化是智能制造系统发展的主要特征。车间调度模块是车间智能制造系统的核心组成部分。车间调度模块承担了智能车间的大脑工作,通过智能优化算法在有限的车间资源条件下对车间生产加工和输送活动进行调度优化,从而实现缩短工期、降低能耗、提高车间效益等目标,是实现智能车间作业的中心构件。在工业界,车间调度模块又称为高级计划和排程(advanced planning and scheduling, APS)系统。

Lupeikiene 等人^[1]认为以往的文献没有充分研究具体的调度系统建模和实现问题,针对复杂供应链环境对调度系统建模的挑战,提出了一种分布式的调度系统建模思想和协作算法集成的概念,但该文并未给出系统的设计框架和系统实现。Vieira 等人^[2]指出目前的车间调度系统依然是人的因素起决定性作用,尽管有许多关于调度的方法、算法和数学模型的研究,但很少有人关注这些算法在系统中的应用。如何减少系统对人的依赖,如何将大数据应用到调度系统,如何设计协同运行的云系统架构,如何实现人、机、物、环的系统集成仍然是个开放的研究课题。

数字孪生技术促进了孪生车间的研究。陶飞等人^[3]提出了一种数字孪生车间框架及其四要素模型,并阐述了孪生车间的运行机制。赵浩然等人^[4]提出了数字孪生车间的三维可视化监控模式,并基于实时信息设计了车间运行逻辑和三维监控的功能。Zhang 等人^[5]提出了一种基于数字孪生技术的动态调度方法,将物理车间的真实数据和虚拟模型的模拟数据融合,支持机器的可用性预测、动态干扰检测和调度的多维度评估。刘娟等人^[6]针对车间的预测问题,阐述了基于事件调度法的仿真预测逻辑,明确了孪生车间的输入输出关系,提出一种基于数字孪生车间数据的状态在线预测方法。魏一雄等人^[7]提出了数字孪生车间系统的总体架构,并阐述了多源异构数据处理、高保真环境构建和模型实时运行的实现方法。刘庭煜等人^[8]针对车间人员行为的识别和理解问题,提出了一种融合注意力机制

的图卷积网络的生产行为识别方法。综上所述,目前数字孪生车间的研究主要集中在孪生车间总体模型构建以及车间各组成部分的孪生体建模,孪生车间的状态和行为仿真预测等方面,对车间调度及自适应调度的研究较少。

基于平行系统对生产车间进行调度管理是一种新的技术范式。平行系统方法是指包含对物理社会的人工系统建模、面向各类场景的计算实验和决策优化,以及实际系统和人工系统之间交互进化的闭环控制过程^[9]。一般情况下,实际物理或社会系统中可供学习和优化的数据并不多。通过平行系统方法构建的人工系统,可将实际系统中不多的“小数据”以某种博弈或演化算法生成“大数据”;然后,基于生成的大数据进行训练,获得面向特定场景的“小知识”;最后,通过实际系统和人工系统之间的不断交互和平行执行,逐步细化校准人工系统模型,从而获得更精准的知识。虽然平行系统和数字孪生都需要对物理实体进行描述建模,但数字孪生重点强调对物理对象的高保真刻画,确保孪生体与物理对象的数据实时同步,以实现系统状态预测和控制,不关注可能性场景的设计,获得的预测结果可能不是最优的。平行系统则基于人工系统生成大量的可能场景,并基于可能场景进行大量的计算实验,输出多场景、多参数的多种控制方案,并筛选出全局最优解。从这个层面上讲,数字孪生是平行系统的一种特殊情况^[10]。平行系统理论和方法至今已在石化生产^[10-12]、无人矿山^[13-14]、智能制造优化与决策管理^[15-17]、交通预测与管理^[18-22]、地铁管理^[23]、航空飞行控制^[24]、核电和电网管理^[25-28]、自动驾驶^[29-30]、智慧医疗^[31-33]、智能村庄^[34]与智慧农业^[35-36]、智慧风沙防护^[37]、企业员工关系管理^[38]、生产物流调度优化^[39]、智慧汽车轮胎控制^[40]、艺术创作^[41]等生产领域以及语言理解^[42]、机器学习^[43-44]、元宇宙建模与感知^[45-47]、社会建模与智能^[48]、科学研究范式^[49-51]等基础技术领域得到了广泛应用。

作业车间调度环境是一个高动态、紧耦合的复杂系统,一种规划模型无法做到一次训练、终身使用的程度。需要结合车间环境、调度过程进行计算实验和渐进式学习,实现系统的演化,不断提高系统的准确度。在车间遭遇机器故障或订单插入等突发情形时,应当采取适当的动态调度策略,对预调度方案进行调整。受平行系统方法的启发,本文针

对作业车间调度过程的优化和控制提出一种平行车间调度系统的建模方法和实现路径, 本文主要贡献如下。

- 面向车间调度问题, 提出了基于平行系统的平行车间调度模型。该模型由实际车间调度系统和人工车间调度系统构成, 基于人工车间调度系统, 可以进行不同调度场景的计算实验、管理和控制, 实现车间调度系统演化和自适应调整。

- 阐述了平行车间调度各模块的实现方法, 构建了基于多智能体的人工车间系统模型, 阐述了包括调度方案优化和动态调度策略学习在内的计算实验方法和平行调度执行方法。

- 基于所提出的模型设计了平行车间调度系统的技术架构和基本功能体系。

1 平行车间调度模型

基于平行系统理论建立平行车间调度模型, 为车间调度的系统描述、调度实验和调度控制难题提供一种可行的解决方案。

平行车间调度模型由人工车间调度系统与实际车间调度系统构成, 其基本框架如图1所示。其中, 实际车间调度系统是作业车间实际使用的调度系统。其状态变化通过实际车间生产调度系统、制造执行系统以及设备安装的传感器以及其他传感器测量和估计获得。其状态数据包括生产计划、生产进度、每个工件的加工状态、加工时间、物料的变化和设备运行状态等。实际车间调度系统的状态数据被实时传递给人工车间调度系统进行评估。人工车间调度系统是一种软件定义的数字车间调度系统, 使用不同类型的代理模型来模拟实际车间不同工况的状态变化和调度控制活动。常用的模型包括物理模型、几何模型和行为模型。人工车间调度系统是实际车间调度系统在数字空间的映射。这

种映射不仅仅是一种“摄影机”的映射, 而是以实际调度系统为参照并可在数字空间进行进化的多维映射, 是对车间调度“描述智能”的体现。详细设计见第2节阐述。

平行车间调度模型包含三个操作单元, 即学习与培训、实验与评估和管理与控制。学习与培训模块为车间作业人员提供学习和培训功能。人工车间调度系统可以作为一种能够适应多种场景的虚拟调度环境, 管理和控制人员可以设置不同工况、不同作业模式的调度场景, 在数字空间对作业人员进行培训和演练, 降低培训成本, 增强培训效果。实验与评估模块为生产调度决策人员提供调度优化的计算实验功能。调度决策人员根据实际车间调度的数据和运行机理, 在人工车间调度系统设置各种调度参数, 生成各种难以在实际车间复现的调度场景, 并进行大量重复性的计算模拟, 获取真实调度环境难以获得的实验数据。基于不同的工况或作业模式, 设计调度优化模型, 进行大量探索性的计算实验, 分析各种调度方案的性能, 评估调度策略的优劣。预测与控制模块为调度管理和控制人员提供调度执行、预测监控和误差调节功能。在这一过程, 将调度模型部署到人工调度系统和实际调度系统并行运行, 人工系统可以预估实际调度的行为表现, 并通过实际系统反馈预测误差, 校准人工系统的模型参数, 减少差别, 为下一轮的优化和评估提供依据。

2 车间调度的人工系统建模

人工车间调度系统是实际车间调度系统的一种等效映射, 通过对实际车间调度系统实体和属性进行分析, 采用多智能体系统 (multi agent system, MAS) 方法对人工车间调度系统进行建模。车间调度任务下的智能体 (agent) 指具有自治性、反应性等基本特性的车间实体, 它们既能自主感知环境实现自主行为决策, 又能通过相互协作实现复杂的智能调度, 这提高了系统的鲁棒性和灵活性。

遵循 ACP (artificial system — 人工系统、computational experiments — 计算实验、parallel execution — 平行执行) 建模原则, 人工车间调度系统的建模不追求对实际调度系统的高度保真, 而是将实际车间调度系统作为人工车间调度系统的演化结果之一, 仅对车间调度系统的对象和行为进行等效建模。本文以齿轮生产车间为例阐述车间调度的人工系统建模。

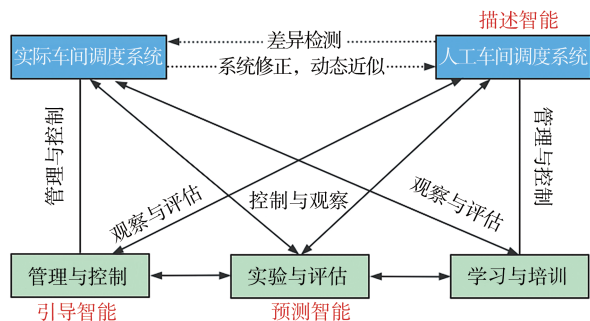


图1 平行车间调度的基本模型

车间调度的人工系统模型结构如图2所示，人工车间调度MAS的构建分为人工对象模型和软件模块两个部分。人工对象模型包括工作站智能体、设备智能体、刀具智能体、工件智能体、工序智能体、工人智能体、AGV智能体、物料智能体和车间智能体；软件模块包括随机事件模拟器智能体、数据库智能体、MES智能体和人机交互面板智能体。每个智能体对象或模块包括对象的标识码、属性、运动规则、与其他智能体对象的关系，它是具有一定自主行为能力的虚拟对象，并与实际系统中的对象保持一种对应关系。

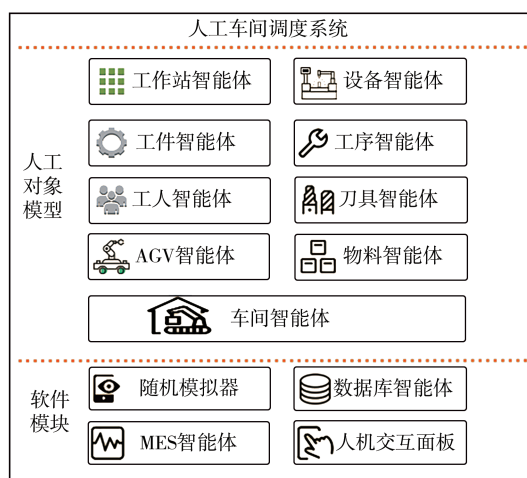


图2 人工车间调度系统模型

车间智能体描述人工车间全局属性。车间全局属性包括生产车间场地的大小、形状、工作站的数量和布局，生产设备的数量和布局、物料运输通道，以及生产任务的启停等状态。车间智能体还负责作业分配和调度过程控制，建立和管理车间调度的地图和资源布列，建立黑板共享区，交换车间所有设备和工作站的占用信息和可用资源，管理其余智能体的信息交流反馈，协调解决调度过程死锁和冲突问题。工作站智能体描述车间工作站区域坐标、面积、形状、设备配置、工位数量以及占位动态特性。设备智能体描述加工设备种类、型号、尺寸、功能、额定寿命、已使用时间、安装位置、隶属工作站，以及运行状态、是否发生故障等动态特征，并内置故障检测功能。刀具智能体描述加工刀具的种类、型号、尺寸、功能（可加工工艺）、额定寿命、已使用时间、安装部位、安装设备，以及运行状态、是否发生磨损和磨损机理，建立刀具安装使用模型。工件智能体描述工件种类、型号、尺

寸、需加工工序集合及加工顺序，以及工件加工进度、加工质量、加工状态等。工序智能体描述工序种类、工艺要求、工艺加工资源约束，以及加工状态等。工人智能体描述性别、年龄、工龄、身高、职称、技术水平、职位、受教育程度等可定量描述的信息，对于性格、心理状态等不可定量建模的因素进行模糊描述。此外，工人智能体还要描述工人工作时的动态属性，例如所在工作站，所负责工件、工序、设备、刀具及忙碌状态。内置虚拟人运动引擎和导航避障算法。AGV智能体是自动运输车设备的代理，描述AGV种类、型号、尺寸、已工作年限、额定寿命、工作级别、工作场地要求、运输作业特征、适用运送范围等静态特征，以及运送目标地、运送工件、运送速度、运送进度。内置运动引擎和导航避障算法^[39]。物料智能体定义种类、数量、型号、零件号、体积、工艺配方等静态属性，以及生产消耗转移的动态属性，建立物料配送和加工生产模型^[39]。随机模拟器内置各类随机突发事件发生概率模型，如机器故障概率模型、订单插入事件概率模型等。MES智能体是制造执行系统软件的代理，为了与实际车间调度系统平行执行，需在人工车间调度系统配置虚拟MES智能体，驱动工件在人工车间调度系统中生产执行。MES智能体与实际车间的MES功能相当。数据库智能体存储人工车间调度系统产生的生产调度数据以及计算实验产生的虚拟数据。人机交互面板提供操作人员对人工车间调度系统的管理和控制交互界面，实现人机协同调度和生产执行。上述各个智能体之间可以根据业务对应关系进行通信。例如，工件智能体在确定好下一个工序的加工设备后，工件智能体将移动到指定设备智能体所在的设备工位上，并使用指定的刀具智能体所对应的刀具进行加工作业，实现调度执行功能。

为了建立复杂作业调度过程的MAS协调机制，可考虑使用离散事件调度方法对状态调度过程进行建模。多智能体系统的事件调度过程由各智能体的调度推理机联合协调完成。调度系统的各智能体的状态实时汇报给车间智能体，车间智能体再将信息共享给相关智能体，使各智能体可根据自身的观察和必要的全局信息进行下一轮的行为。由于分布式多智能体系统中的各智能体之间具有相对的独立性，某一个智能体调度失败并不影响其他智能体的调度，使得系统具有更快的反应能力，更好的灵活

性和稳定性。

3 车间调度的计算实验

基于车间调度的人工系统,通过设置作业车间、工件、设备、工作站和物料等智能体的参数,可以产生复杂的调度场景。基于不同的调度场景,可以进行大量重复的模拟和计算,获得不同工况下的调度数据。借助智能搜索、机器学习等手段,对获得的数据进行训练和学习,获得不同场景下的最优调度策略。计算实验可以多次重复,输入和参数可调,成本低、效率高,这是解决目前各类作业车间生产调度技术难题的有效方法。

3.1 计算实验内容

作业车间调度的问题主要是寻找满足生产约束的最优调度方案,以及在动态作业环境下应采取的最优调度策略。因此,计算实验的内容主要包括调度方案优化和动态调度策略学习。实验设置包括实验场景设置、实验目标设置、实验数据设置和实验算法的设置。实验算法类型主要包括智能优化类算法和机器学习类算法。车间调度常用的智能优化类算法主要包括遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、粒子群算法等。机器学习算法主要包括监督学习和强化学习。具体算法的选择需要根据客户需求、实验场景、实验目标和实验数据来综合确定。

3.2 调度方案优化

3.2.1 实验场景

首先要确定需要解决的具体问题,根据问题来确定实验场景,然后在前述车间调度的人工系统中进行实验场景的实例化设置,根据情况可能需要进行增量开发。根据问题的特征,实验场景可能包括工件的类型、数量,每个工件待加工的工序以及优先级约束,工作站和机器的类型、数量、功能以及空间覆盖关系等内容,这些约束或关系需要写入人工系统所对应的实验环境中。实际车间调度还存在机器故障、加工时间波动、物料短缺等不确定性因素,我们利用人工车间系统中的随机事件模拟器生成随机干扰的实验案例。

3.2.2 实验算法

一般根据调度问题的结构来选择或设计实验算法。为了具体阐述实验过程,本文以强化学习为例,设计调度方案优化模型的训练过程。首先,强化学习方法是一种参数化模型,能够自适应根据状态变

化实时计算生成调度策略;其次,实际车间的调度数据很难获取和积累,采用监督学习算法会遇到数据稀缺的问题。强化学习不依赖于外部标注数据,它通过与环境的交互来获取经验,优化模型。强化学习可以充分利用人工车间调度系统作为环境来进行计算实验。

强化学习算法的设计主要考虑网络结构、损失函数、状态空间、动作空间和奖励函数。其中,网络结构和损失函数的通用性较强,已有的网络模型可供选择。网络结构有单智能体结构和多智能体结构,每个智能体的网络又存在单独的策略学习结构、演员-评论家以及更复杂的结构。损失函数一般与网络结构的设计密切相关,模型中的网络越多、越复杂,损失函数可能也越复杂。而状态空间、动作空间、奖励函数则需要根据调度问题的结构和求解方法来确定。例如,动作空间可以是一个由调度规则组成的集合,那么状态空间可以设计为一组与调度效果相关的统计指标的集合。奖励函数则与调度目标密切相关,假如调度目标是使全部工件的最大完工时间最短,则奖励函数应与最小化最大完工时间保持一致。

3.2.3 实验流程

基于强化学习的模型训练的实验过程一般分为以下几个步骤。

(1) 在人工车间调度系统创建实验场景模型,初始化实验参数,实例化实验所涉及的工件、工序、机器、工位等智能体对象,建立调度生成程序。

(2) 设计和开发强化学习网络模型,设置学习参数。在人工系统的实验场景模型中写入状态转换程序和奖励函数。

(3) 生成样本/测试模型。如图3所示,环境输出状态,强化学习模型输出动作,环境执行动作,并输出执行动作后的状态,给出执行当前动作的奖励。强化学习模型把当前状态、动作和奖励组成的数据作为样本存入生成样本库。在不使用探索策略的情况下,生成样本的过程就是模型测试的过程。

(4) 策略优化。当生成经验库达到一定数量后,学习模型从经验库采样一批样本进行学习,更新模型参数,并记录训练次数。

(5) 判断是否满足测试条件。如果满足,则执行模型测试;如果不满足,则检查步骤(6)。

(6) 判断训练次数是否满足停止条件。如果未满足停止条件,则转到步骤(3);如果满足停止条

件，则停止训练，保存模型网络参数。

图3展示了基于强化学习的调度方案优化训练过程。

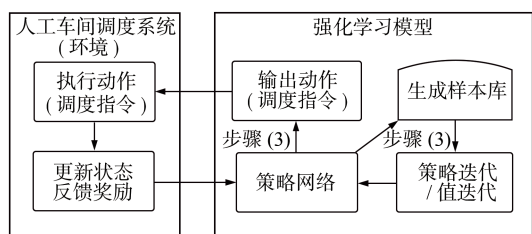


图3 基于强化学习的调度方案优化训练过程

3.2.4 评估方法

调度模型的性能可由调度方案的优劣来评估。调度方案的优劣由调度目标来确定。针对车间调度问题，通常的评估指标是一个调度周期的最大完工时间（makespan）、机器利用率、能源消耗量和工件延迟交付数量等。如果是多目标优化，则要计算帕累托最优解集构成的帕累托前沿。

3.3 动态调度策略学习

动态调度策略是指针对生产执行过程发生紧急插单、机器故障、加工参数改变等动态事件导致初始调度方案无法准确执行，而必须修改调度方案所采取的调整策略。动态调度策略包括右移重调度、完全重调度和部分重调度等类型。其中，右移重调度只对初始调度方案中工序的作业时间向后推移，不调整工序的加工顺序，也不重新分配工序的加工机器。完全重调度策略是指对截至调度中断时刻点全部未完成工序，重新生成调度方案，相当于根据当前状态进行实时调度。此时，工序的加工时间、加工顺序和所指派的机器均可能产生变化。部分重调度策略则只针对未开始的工序进行重新调度安排，而其余已经开始的工序的排程计划不变。不同的动态调度策略产生的调度执行成本不同，将影响到作业车间的稳定性和调度效率。

3.3.1 实验场景

实验场景设置包含第3.2节所述场景设置内容，但需要增加动态事件模拟。根据动态事件类型以及专家经验，在人工车间调度系统的随机模拟器中开发动态事件概率模型。在训练过程中，根据动态事件概率模型向调度过程插入动态事件。

3.3.2 实验算法

一般基于规则的动态调度策略严重依赖专家经验，且很难保证决策最优性。基于启发式方法的动

态调度策略计算成本较高，实时性欠佳；基于机器学习方法的决策模型具有响应速度快的优点，因此，本实验考虑设计基于机器学习的动态调度策略学习方法。为了具体阐述实验过程，本文采用BP神经网络作为动态调度策略学习的模型。将动态调度策略的类型看作样本的标签，模型的输入是当前调度的生产状态，例如预调度最大完工时间、加工进度、加工误差等。反向传播（BP）神经网络学习模型需要大量训练数据，本文利用人工车间调度系统生成大量模拟训练数据，以辅助模型的训练。

3.3.3 实验流程

学习步骤分为两个步骤，生成训练数据集与模型训练。

（1）生成训练数据集。将车间调度的人工系统作为样本数据生成实验室，通过人工系统的随机事件模拟器产生突发事件，利用遗传算法或已经训练好的调度模型生成调度方案，通过给定突发事件情形下的目标函数生成动态调度策略标签，样本数据被存入训练数据库。图4（a）展示了样本生成过程。

（2）模型训练。样本数据生成后，即可启动模型训练。每次从训练数据集中采样（包含输入特征和标签），特征被送入BP神经网络模型进行计算预测，对预测结果和标签进行比较，计算预测损失，并进行反向传播，更新模型参数。通过测试数据集测试模型性能。图4（b）表示了动态调度策略模型训练过程。

3.3.4 评估方法

调度模型的性能指标应当根据车间调度效益目标决定，例如，以最小化预调度方案和重调度方案的最大完工时间之差、累计工序结束时间偏差和工序变动成本为性能指标。多目标优化函数中各项指标的权重可以通过层次分析等方法予以确定。

4 车间调度的平行执行

通过车间调度的人工系统的计算实验获得调度模型之后，将模型并行部署到人工车间调度系统和实际车间调度系统，构成车间调度的平行管理和控制系统，将传统的被动型管理控制变为主动型管理控制。图5展示了车间调度的平行执行和反馈控制过程。

平行执行包含预调度执行和动态调度执行两个过程。在预调度执行过程中，控制系统根据生产计

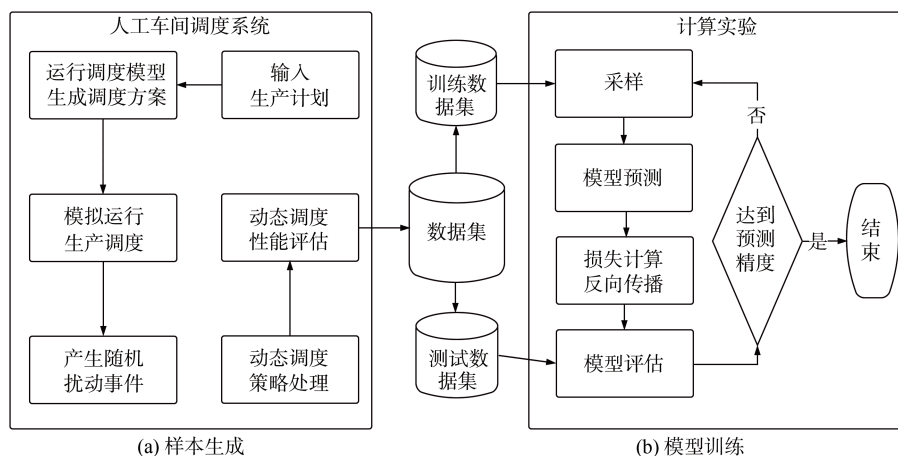


图4 动态调度策略学习的计算实验流程

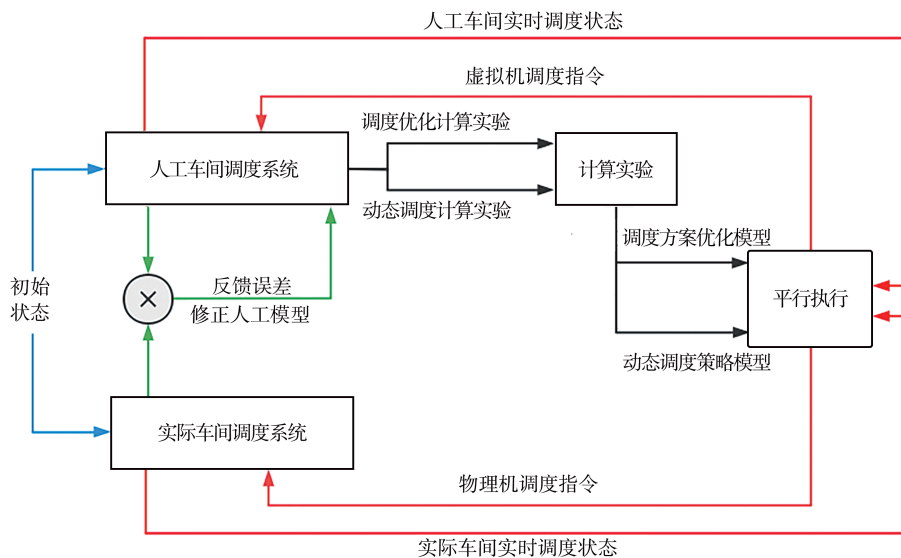


图5 车间调度的平行执行和反馈控制过程

划和加工参数，调用计算实验训练完成的预调度模型生成预调度方案，并根据预调度方案和初始状态同时向实际车间调度系统和人工车间调度系统发送调度指令，控制两个系统平行执行生产调度任务。动态调度的执行是随机的，当系统检测到动态事件干扰后，系统将启用动态调度策略模型进行控制。如果实际执行进程和预调度进程产生的偏差超过系统设定的阈值，则触发重调度。当达到重调度条件，调用动态调度策略模型计算输出动态调度策略。控制系统基于剩余生产计划，推荐动态调度策略，并依据动态调度策略调用合适的调度方案优化模型，生成新的调度方案。控制系统将新的调度方案发送人工车间调度系统和实际车间调度系统进行重新执行。

反馈控制包含人工系统误差修正过程和调度模

型的演化过程。人工系统之所以需要修正，一方面是因为人工系统对实际系统的建模难以一次性完成，需要通过平行执行来发现可能存在的误差；另一方面是因为实际车间调度系统可能因生产条件改变而发生新的变化。无论哪种情况，平行执行中的控制系统实时感知和比对实际车间调度系统和人工车间调度系统的运行参数和生产状态，如果发生状态误差，通过误差反馈机制修正人工车间调度系统的参数，实现人工车间调度系统和实际车间调度系统的动态一致性。系统中不同的物理参数性质不同，其误差反馈调整的方法可能不同。例如，对于车床刀具切割轨迹误差，如果人工系统与实际系统存在差距，则可以建立关于速度、方向等因素的比例-积分-微分（PID）控制器进行误差反馈修正。对于某台机器加工某个工序的时长误差，则可能需

要积累足够的观察数据,以便计算较为可靠的加工时长统计特性。修正后的人工车间调度系统可以为新的计算实验提供更为精准的环境支持。

调度模型之所以需要演化更新,一方面是因为初次生成的调度模型可能因人工系统参数的误差而导致模型学习的偏差,另一方面是因为实际车间调度系统本身会因生产条件改变而改变,从而原有调度模型难以完全适应变化后的工况。调度模型的演化过程是指控制系统不断收集实际车间调度系统的数据,并基于经过修正的人工系统进行新的计算实验。通过周期性或不定期的计算实验对调度方案生成模型和动态调度策略模型进行迭代更新,以实现调度模型的演化学习。

平行执行中的人工系统误差修正和模型演化过程共同构成了人工车间和实际车间调度的动态闭环控制。

5 案例测试与分析

为了验证平行车间调度模型的有效性,本文设置了一个基于生成对抗模仿学习方法的调度方案生成实验,目的是让人工系统的生成模型学习从实际车间获取的专家方案所蕴含的生成策略,本文称该算法为生成对抗平行学习(generative adversarial parallel learning, GAPL)方法,其对比方法是纯粹基于模拟环境进行强化学习的调度方案生成方法,本文称之为传统强化学习(Conventional RL)算法。GAPL和Conventional RL主要区别在于是否采用实际车间的专家数据作为对抗学习的样本。本文想验证的是,结合了实际车间数据和人工系统进行平行学习的GAPL是否比纯粹基于仿真环境学习的Conventional RL算法更有优越性。

本文设置了一个码头多AGV装卸货的车间作业场景。该车间拥有 N 台AGV小车, M 个装/卸货站以及若干个充电站(供AGV充电),每个装/卸货站具有确定数量的货物。每台小车需进行移动、装货、卸货、充电等作业工序,小车容量、装卸货站货物数量以及小车剩余电量不同,每个工序的作业时长也不同。目标是 최소화最大作业时长(简称makespan)。

本文分别选择了 $N=3$ (N3)和 $N=8$ (N8)台AGV作业的实例进行计算实验。实验中Conventional RL算法采用的学习网络以QMIX为基础,GAPL采用的学习网络以GAIL为基础,判别器采

用多层前馈神经网络,生成器采用与Conventional RL相同的QMIX基础网络,QMIX算法的基本逻辑参见文献[52],GAIL算法的基本逻辑参见文献[53]。两个算例的实验结果见图6和图7。学习曲线纵轴代表调度模型测试的总作业时长,其值越低代表调度性能越好。

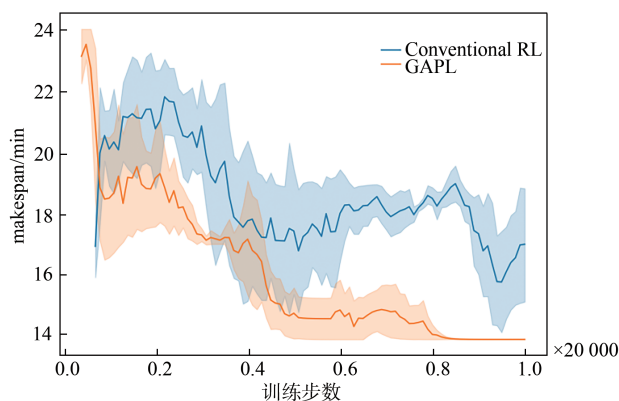


图6 N3算例算法学习曲线

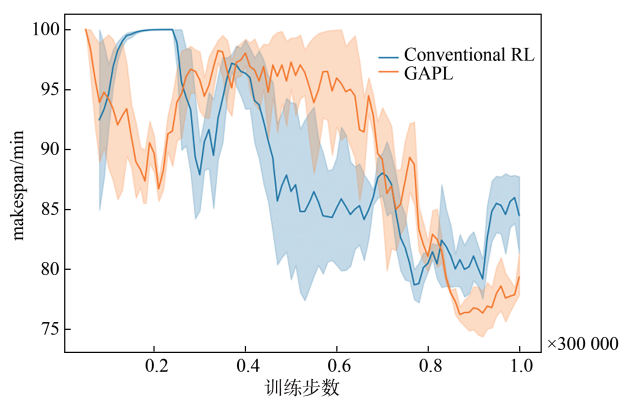


图7 N8算例算法学习曲线

从图6的N3算例实验结果可以看出,GAPL比Conventional RL收敛速度快,且收敛的makespan更低。在N8算例实验中(图7所示),尽管GAPL的收敛速度没有Conventional RL快,但是GAPL收敛的makespan比Conventional RL更低。这表明,基于平行学习的GAPL算法相对于纯基于仿真环境的强化学习算法Conventional RL具有更佳的性能。

6 平行车间调度系统设计

基于前述平行车间调度系统建模方法,本节对平行车间调度系统的总体架构和功能进行设计和描述。

6.1 平台架构设计

为了应对调度系统的功能复杂性和耦合性,平

行车间调度系统平台采取分层架构、模块化设计原则。平台分为数据资源层、基础服务层、功能组件层和应用系统集成层，外加一个接口层，如图8所示。

数据资源层负责组织、存储和构建人工车间调度系统所需的模型和知识资源库，以及实现应用系统所需的事实数据库资源。其中，模型库存储人工车间调度系统实例化所需调用的各种实体对象模型。例如，车间模型、工作站模型、各类机器模型和各类工件模型等。本体库存储潜在应用领域的领域本体，例如，加工工具构型、零部件模型和工艺模型等。本体库增强各智能体交互的语义互操作性。场景库存储实际生产环境的数字化调度场景实例以及计算实验系统预定义的虚拟场景和参数。算法库存储计算实验系统所需使用的预定义算法和参数，以及平行执行控制系统需调用的训练好的算法模型。知识库存储人类经验总结的调度规则、调度策略，以及系统调度所需的控制规则。规则库存储经验总结的调度指派规则。事实数据包含计算实验和调度执行产生的各类事实数据，例如，加工订单

数据、任务表、生产进度和状态数据、实验生成场景实例以及实验分析数据、实验算法模型等。基础服务层负责提供各应用系统需调用的共性或基础性功能。事件调度管理负责调度事件的创建、调用、查询、修改和删除等；服务注册管理负责系统内部的微服务注册、调用、查询、发现和删除等；资源调度管理负责对车间资源调度进行及时有效的检测、分析和调节，解决资源冲突、调度死锁发现、解锁等问题；随机模拟器内置各类数学随机概率模型，辅助计算实验动态事件模拟和随机测试；并行计算解决平行执行所涉及的并行计算资源请求、实时调度和数据同步等问题；可视化框架通过动态实时的人机交互界面，以多种形式呈现计算实验和平行执行状态。功能组件层在下文分节阐述。应用系统集成层是指根据用户需求对功能组件进行应用集成和交互界面呈现。人工车间调度系统的应用系统包含计算实验系统、平行执行控制系统和人工车间虚拟执行系统。接口层实现人工车间调度系统与实际车间调度系统的数据交互。需开发的接口既包含实际车间机器设备等硬件通信接口，又包含实际车

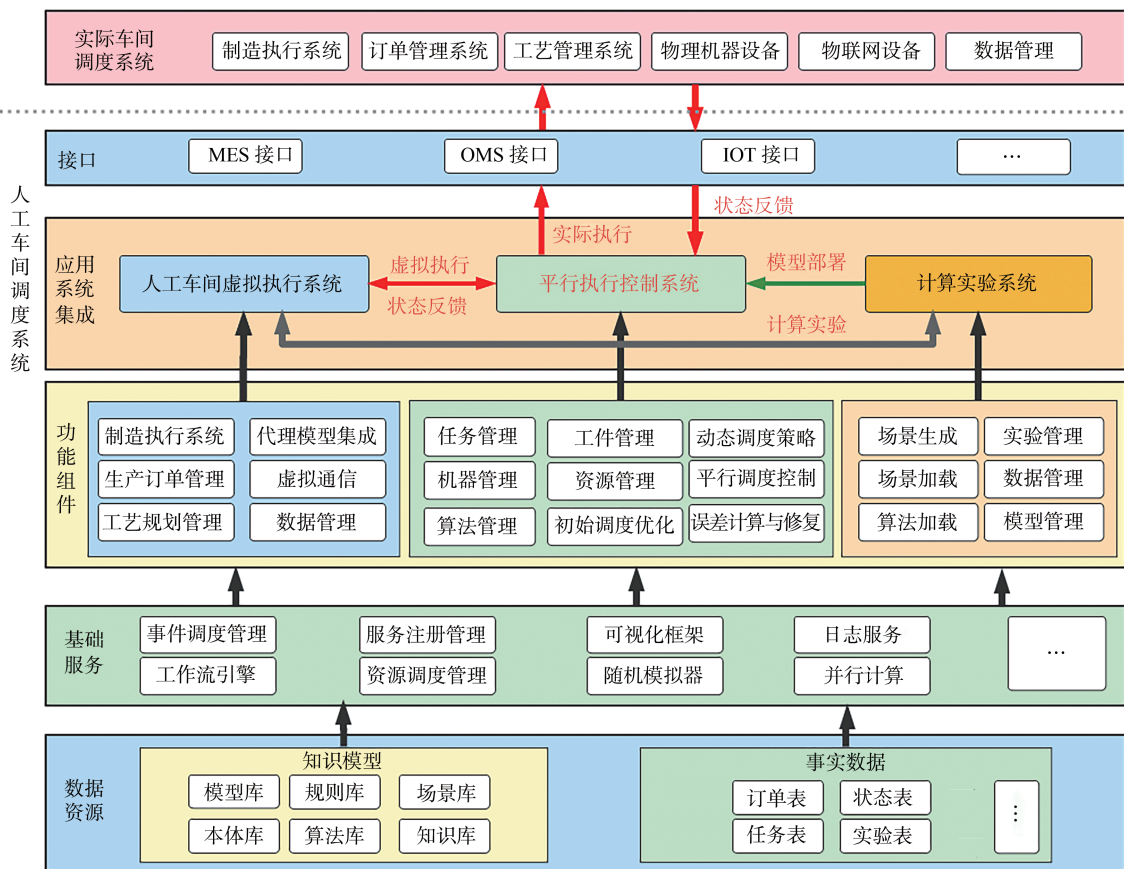


图8 平行车间调度系统总体架构

间所使用的制造执行系统等软件接口。物理通信接口监测物理设备运行状态变化，而软件接口交互实际车间制造执行系统的运行数据。

6.2 人工车间虚拟执行系统

人工车间虚拟执行系统主要承载调度方案在虚拟车间的执行过程和状态反馈。它包含了前文所述车间调度的人工系统的各类智能体模型的软件定义和机理实现，还包括模拟生产调度执行过程所需的制造执行系统、生产订单管理以及工艺规划管理等生产软件系统。它表示了实际车间调度执行过程的等价映射。制造执行系统等软件的实现可以不必重复编码，可以将实际车间调度所用的系统重复部署一份，供人工车间调度使用即可，数据存储与实际车间调度数据存储分离。

6.3 计算实验系统

计算实验系统的基本功能模块包含场景生成、场景加载、算法加载、实验管理、数据管理和模型管理。

场景生成模块从场景库动态提取和配置计算实验场景，并通过合适的机制、策略将其实例化；场景加载、算法加载模块分别负责从生成的场景实例库和算法库选择实例和算法，加载到目标实验对象中；实验管理负责计算实验对象的构建、实验参数的设置、实验的启停、监控等业务；数据管理负责每个计算实验对象的数据日志、统计指标数据和模型性能图表等数据管理；模型管理负责对每个计算实验过程所形成的测试模型进行分类管理。

6.4 平行执行控制系统

平行执行控制系统是驱动人工车间虚拟运行和实际车间调度系统制造执行的控制系统。该系统的核心功能是生产调度优化和平行控制，辅助功能包含任务、机器、资源、算法等管理。

调度优化包含初始调度方案优化和动态调度方案优化。初始调度优化是指根据初始生产计划加工资源和工艺参数，调用调度算法模型生成初始调度方案，即一批订单的生产排程表。动态调度优化是指当制造执行系统遭遇紧急插单、机器故障等干扰事件后重新输出调度方案。

平行控制的功能主要包含平行调度控制与误差计算和修复。平行调度控制是指根据指定的调度方案并行向人工车间调度仿真系统和实际车间调度系统发送生产执行指令，并实时接收和检测来自人工车间和实际车间的生产状态反馈。误差计算和修复

则负责计算监测人工系统和实际系统调度执行的差异，包括进度误差、质量误差、完工时间误差、能耗误差以及其他预定义指标或参数误差。根据误差阈值决策是否修正人工系统模型的参数。

算法管理模块负责管理生产场景需使用的调度算法模型，它可以根据生产批次类型对算法模型的适用性、自主性以及功能性进行分类管理。对于可配置参数的算法模型，也可以在此配置可供不同生产场景的实例算法模型。任务管理模块管理所有加工任务的详细信息，包括任务名称、需要加工的工件数、所需要使用的机器数、订单生成的时间、订单的最早交付时间和最迟交付时间、加工任务的开始执行时间和任务的完成时间等。工件管理模块管理的是各类工件的加工信息，如工件类型、型号、所属单号、加工进度等。工序管理模块管理的是全部工序的加工信息，例如工序类型、所属工件、加工进度等。机器管理模块管理的是作业车间机器设备的信息，如机器型号、功能、加工对象、加工进度、忙碌状态、工况等。资源管理模块管理的是其他加工资源的信息，例如刀具、物料等信息。

7 平行车间调度的特征

根据上述人工车间调度系统建模、计算实验和平行执行过程的设计，平行车间调度系统的特征如下。

- 在建模方面，人工车间调度系统基于代理的方法采用多智能体系统建模，主要强调各智能体功能的等价性，而不像数字孪生一样强调虚拟构件的相似性。这种建模方法使得我们更关注问题求解本身，不断改进问题求解方法，而不是孪生体是否全面保真。此外，基于多智能体的人工系统建模能够对车间调度环境中每个要素的属性、行为及其与其他要素之间交互状态进行细致的描述，能够更灵活、精准地描述车间调度环境的动态特性和要素之间的耦合关系。

- 在计算实验方面，车间调度的计算实验并不局限于实际车间的调度数据，而是通过设置或动态调整车间调度的人工系统参数，模拟各类生产场景以及动态特性进行实验，从而产生可引导现实车间调度执行的模型。根据计算实验系统设计的功能，还可以配置生成更多未知的场景进行实验，并评估模型在多种可比场景下的不同表现。基于不同场景的实验可产生自适应各类生产场景的调度

模型,并在实际车间调度系统中进行自适应部署。实际车间一旦遭遇类似场景,即可调用对应模型进行调度,从而使无法调度的场景变成可调度的场景。

• 在平行执行方面,一般的仿真系统与实际生产系统是分离的。而在平行执行系统中,实际车间调度系统与人工车间调度系统是持续交互的。实际车间所遭遇的客观情况可以通过误差反馈机制修正人工车间调度系统。反过来,通过人工系统的计算实验所得出的调度模型部署到平行执行系统,又引导实际车间的调度优化。人工车间调度系统和实际车间调度系统的管理控制和反馈修正促成了车间调度的滚动优化、闭环控制。

8 结束语

本文基于平行系统理论提出了平行车间调度系统模型,并阐述了车间调度的人工系统建模、计算实验和平行执行的实现方法。在车间调度的人工系统建模方面,本文采用基于智能体的方法建立了车间调度的多智能体系统模型。在计算实验方面,本文考虑了作业车间调度的两种典型应用场景,阐述了基于人工系统的调度方案优化和动态调度策略学习的计算实验方法。在平行执行层面,本文设计了并行驱动实际车间调度系统和人工车间调度系统生产调度的平行执行框架,建立了人工系统和实际系统的平行控制的演化模型。最后,在平行车间调度模型的指导下,本文设计了平行车间调度系统平台的技术实现架构和基本功能体系。

参考文献:

- [1] LUPEIKIENE A, DZEMYDA G, KISS F, et al. Advanced planning and scheduling systems: modeling and implementation challenges[J]. Informatica, 2015, 25(4): 581-616.
- [2] VIEIRA J, FERNANDO D, PABLO D V. Advanced planning and scheduling (APS) systems: a systematic literature review[A]. In Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions: Proceedings of the 28th ISTE International Conference on Transdisciplinary Engineering[C]. Amsterdam: IOS Press, 2021, 16: 385.
- [3] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1):1-9.
TAO F, ZHANG M, CHENG J F, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1):1-9.
- [4] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6):1432-1443.
ZHAO H, LIU J, XIONG H, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [5] ZHANG M, TAO F, NEE A Y C. Digital twin enhanced dynamic job-shop scheduling[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 146-156.
- [6] 刘娟, 庄存波, 刘检华, 等. 基于数字孪生的生产车间运行状态在线预测[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2):467-477.
LIU J, ZHUANG C B, LIU J H, et al. Online prediction technology of workshop operating status based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 467-477.
- [7] 魏一雄, 郭磊, 陈亮希, 等. 基于实时数据驱动的数字孪生车间研究及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2):352-363.
WEI Y X, GUO L, CHEN L X, et al. Research and implementation of digital twin workshop based on real-time data driven[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 352-363.
- [8] 刘庭煜, 洪庆, 孙毅峰, 等. 基于图卷积网络的数字孪生车间生产行为识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2):501-509.
LIU T Y, HONG Q, SUN Y F, et al. Approach for recognizing production action in digital twin shop-floor based on graph convolution network [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 501-509.
- [9] 王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(2): 26-34.
WANG F Y. On the modeling, analysis, control and management of complex systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2006, 3(2): 26-34.
- [10] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: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.
- [11] 熊刚, 王飞跃, 沈小伟, 等. 乙烯生产的平行控制与管理系统设计[C]//中国自动化大会暨两化融合高峰论坛, 北京:[出版者不详], 2009:1-10.
XIONG G, WANG F Y, SHEN X W, et al. Parallel control and management system design for ethylene production[C]//China Automation Conference and the Integration of the Two Summit, Beijing:[s.n.], 2009: 1-10.
- [12] 熊刚, 王飞跃, 邹余敏, 等. 提升乙烯长周期生产管理的平行评估方法[J]. 控制工程, 2010, 17(3):401-406.
XIONG G, WANG F Y, ZOU Y M, et al. Parallel evaluation method to improve long period ethylene production management[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(3): 401-406.
- [13] 杨超, 高玉, 艾云峰, 等. 端对端平行无人矿山系统及其关键技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 228-240.
YANG C, GAO Y, AI Y F. End-to-end parallel autonomous mining systems and key technologies[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 228-240.
- [14] 陈龙, 王晓, 杨健健, 等. 平行矿山: 从数字孪生到矿山智能. 自动化学报, 2021, 47(7): 1633-1645.
Chen L, Wang X, Yang J J, et al. Parallel mining operating systems: from digital twins to mining intelligence[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1633-1645.
- [15] YANG J, WANG X X, ZHAO Y D. Parallel manufacturing for industrial metaverses: a new paradigm in smart manufacturing[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2063-2070.
- [16] LU J W, WANG X X, CHENG X, et al. Parallel factories for smart industrial operations: from big AI models to field foundational models and scenarios engineering[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2079-2086.
- [17] WANG F Y, YANG J, WANG X X, et al. Chat with ChatGPT on indus-

- try 5.0: learning and decision-making for intelligent industries[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 831-834.
- [18] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
- LV Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [19] XIONG G, DONG X, FAN D, et al. Parallel traffic management system and its application to the 2010 Asian Games[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 225-235.
- [20] WEI Z B, ZHAO H X, WANG F Y, et al. STGSA: a novel spatial-temporal graph synchronous aggregation model for traffic prediction[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(1): 226-238.
- [21] LI B, CAO D P, TANG S Q, et al. Sharing traffic priorities via cyber-physical-social intelligence: a lane-free autonomous intersection management method in metaverse[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(4): 2025-2036.
- [22] FAN L L, CAO D P, ZENG C X, et al. Cognitive-based crack detection for road maintenance: an integrated system in cyber-physical-social systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(6): 3485-3500.
- [23] XIONG G, SHEN D, DONG X S, et al. Parallel transportation management and control system for subways[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(7): 1974-1979.
- [24] 袁利, 程铭, 王磊. 航天器飞行控制仿真与平行系统[J]. 宇航学报, 2021, 42(8): 982-988.
- YUAN L, CHENG M, WANG L. Spacecraft flight control simulation and parallel Systems[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(8): 982-988.
- [25] 熊刚, 王飞跃, 侯家琛, 等. 提高核电厂安全可靠性的平行系统方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 31(5): 1018-1026.
- XIONG G, WANG F Y, HOU J C, et al. To improve safety and reliability of nuclear power plant with parallel system method[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2012, 31(5): 1018-1026.
- [26] 侯家琛, 董西松, 熊刚, 等. 平行核电: 迈向智慧核电的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 192-201.
- HOU J C, DONG X S, XIONG G, et al. Parallel nuclear power: intelligent technology for smart nuclear power[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 192-201.
- [27] 李小双, 王晓, 杨林瑶, 等. 元电网 MetaGrid: 基于平行电网的新一代智能电网的体系与架构[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(4): 387-398.
- LI X S, WANG X, YANG L Y, et al. MetaGrid: a parallel grids based approach for next generation smart power systems[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(4): 387-398.
- [28] YANG L Y, LV C, WANG F Y, et al. Collective entity alignment for knowledge fusion of power grid dispatching knowledge graphs[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(11): 1990-2004.
- [29] WANG F Y, ZHENG N, CAO D, et al. Parallel driving in CPSS: a unified approach for transport automation and vehicle intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 577-587.
- [30] 刘腾, 王晓, 邢阳, 等. 基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 40-51.
- LIU T, WANG X, XING Y, et al. Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 40-51.
- [31] 王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 等. 平行眼: 基于 ACP 的智能眼科诊疗[J]. 模式识别与人工智能, 2018, 31(6): 495-504.
- WANG F Y, ZHANG M, MENG X B, et al. Parallel eyes: an ACP-based smart ophthalmic diagnosis and treatment[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2018, 31(6): 495-504.
- [32] 王飞跃. 平行医学: 从医学的温度到智慧的医学[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(1): 1-9.
- WANG F Y. Parallel medicine: from warmness of medicare to medicine of smartness[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(1): 1-9.
- [33] WANG S, WANG J, WANG X, et al. Blockchain-powered parallel healthcare systems based on the ACP approach[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2018, 5(4): 942-950.
- [34] WANG X J, KANG M Z, WANG F Y, et al. DeCASA in AgriVerse: parallel agriculture for smart villages in metaverses[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2055-2062.
- [35] 康孟珍, 王秀娟, 华净, 等. 平行农业: 迈向智慧农业的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 107-117.
- KANG M Z, WANG X J, HUA J, et al. Parallel agriculture: intelligent technology toward smart agriculture[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 107-117.
- [36] KANG M Z, WANG X J, WANG H Y, et al. The development of AgriVerse: past, present, and future[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(6): 3718-3727.
- [37] 常方乐, 康孟珍, 王秀娟, 等. 平行智能风沙防护治理决策支持系统——塔克拉玛干沙漠公路及其防沙体系[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(4): 499-506.
- CHANG F L, KANG M Z, WANG X J, et al. Windblown sand control decision-making support system based on parallel intelligence: taklimakan desert highway and its sand-breaking system[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(4): 499-506.
- [38] 沈小伟, 刘希未, 王飞跃, 等. 生产车间非正式组织关系网络建模及其计算实验分析[C]//第四届全国平行控制会议, 北京: [出版者不详], 2012: 1-9.
- SHEN X W, LIU X W, WANG F Y, et al. An informal organization network model for manufacturer and its computational experiment analysis[C]//The 4th Chinese Conference on Parallel Control Proceedings, Beijing: [s.n.], 2012: 1-9.
- [39] 刘建军, 王磊, 刘希未, 等. 生产车间物流平行系统体系研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 698-704.
- LIU J J, WANG L, LIU X W, et al. Research on parallel system of production workshop logistics[J]. Journal of Lanzhou University (NATURAL SCIENCES), 2018, 54(5): 698-704.
- [40] 张向文, 王飞跃. 平行轮胎的基本架构与关键技术[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(3): 445-457.
- ZHANG X W, WANG F Y. Basic framework and key technologies of parallel tires[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(3): 445-457.
- [41] GUO C, LU Y, WANG F Y, et al. Can ChatGPT boost artistic creation: the need of imaginative intelligence for parallel art[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 835-838.
- [42] WANG F Y, MIAO Q H, LI X, et al. What does ChatGPT say: the DAO from algorithmic intelligence to linguistic intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 575-579.
- [43] MIAO Q H, LV Y S, WANG F Y, et al. Parallel learning: overview and perspective for computational learning across Syn2Real and Sim2Real[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 603-631.
- [44] MIAO Q H, ZHENG W B, WANG F Y, et al. DAO to HANOI via DeSci: AI paradigm shifts from AlphaGo to ChatGPT[J]. IEEE/CAA

- Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 877-897.
- [45] WANG F Y. The DAO to metacontrol for metasystems in metaverses: the system of parallel control systems for knowledge automation and control intelligence in CPSS[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(11): 1899-1908.
- [46] SHEN Y, LIU Y H, TIAN Y L, et al. Parallel sensing in metaverses: virtual-real interactive smart systems for "6S" sensing[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2047-2054.
- [47] 田永林, 陈苑文, 杨静, 等. 元宇宙与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(1): 121-132.
- TIAN Y L, CHEN Y W, YANG J, et al. Metaverses and parallel systems: the state of the art, comparisons and prospects[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(1): 121-132.
- [48] WANG F Y, TANG Y, PAUL J W. Guest editorial: cyber - physical - social intelligence: toward metaverse-based smart societies of 6I and 6S[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(4): 2018-2024.
- [49] 王飞跃, 缪青海. 人工智能驱动的科学研究新范式: 从AI4S到智能科学[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 536-540.
- WANG F Y, MIAO Q H. Novel paradigm for AI-driven scientific research: from AI4S to intelligent science[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(4): 536-540.
- [50] WANG F Y, DING W W, WANG X, et al. The DAO to DeSci: AI for free, fair, and responsibility sensitive sciences[J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(2): 16-22.
- [51] 王飞跃, 缪青海, 张军平, 等. 探讨 AI for Science 的影响与意义: 现状与展望[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(1): 1-6.
- WANG F Y, MIAO Q H, ZHANG J P, et al. The DAOs to AI for science by DeSci: the state of the art and perspective[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(1): 1-6.
- [52] RASHID T, SAMVELYAN M, SCHROEDER C, et al. QMIX: monotonic value function factorisation for deep multi-agent reinforcement learning[C]//Proceedings of International Conference on Machine Learning. New York: PMLR, 2018: 4295-4304.
- [53] SONG J, REN H, SADIGH D, et al. Multi-agent generative adversarial imitation learning[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM, 2018: 7472-7483.

[作者简介]

彭绍明 (1983-), 男, 中国科学院大学人工智能学院与中国科学院自动化研究所硕士生, 主要研究方向为强化学习和决策规划。

熊刚 (1969-), 男, 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室研究员, 主要研究方向为复杂系统平行控制、智能制造和智能交通。

沈震 (1982-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所副研究员, 主要研究方向为复杂系统和智能制造。

董西松 (1978-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所副研究员, 主要研究方向为复杂系统的建模与控制 and 智能交通系统。

曲之平, 男, 北方自动控制技术研究所与北京怀柔平行传感智能研究院资深研究员, 主要研究方向为平行系统、平行智能、社会计算和知识自动化。

付龙 (1993-), 男, 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室硕士生, 主要研究方向为平行系统和强化学习。

陶志坤 (2001-), 男, 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室博士生, 主要研究方向为网络化系统决策与控制。

韩云君 (1973-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为制造系统的规划与调度。