

# 基于Agent的制造系统建模与仿真研究\*

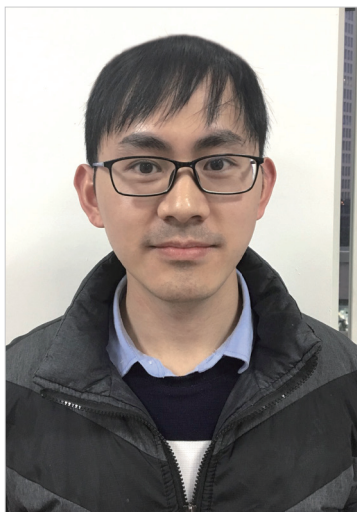
江海凡,丁国富

(西南交通大学机械学院,成都 610031)

[摘要] 在生产组织方式从静态集中的层次结构向动态分布式网络结构转变的趋势下,制造系统呈现出动态、复杂、自治等新特点。Agent技术作为解决复杂、动态、分布式人工智能应用问题的新方法,被广泛应用于智能制造和数字化车间中。智能制造和数字化车间的目标是实现物理空间和信息空间的交互与融合。围绕这一目标和制造系统的新特点,在对虚实结合的制造系统简要阐述的基础上,综述了Agent技术在制造系统建模、仿真和监控3个方面的应用及研究现状,并对Agent技术在制造系统建模仿真中的发展趋势进行了展望。

关键词: Agent; 制造系统; 虚实结合; 建模; 仿真; 监控; 数字化车间

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.054



江海凡

博士研究生,主要研究方向为数字化车间建模和仿真。

随着云计算、“互联网+”、大数据、人工智能、移动互联等新一代信息技术的发展与应用,制造业呈现出智能化、数字化、网络化、全球化的发展趋势<sup>[1]</sup>。数字化车间<sup>[2-5]</sup>技术是数字化、智能化制造的关键技术之一。而数字化车间的关键之一是建立虚实结合的制造系统,将现实物理空间映射到虚拟信息空间,再通过信息空间来真实反映和模拟物理空间,最终实现物理空间和信息空间的融合。虚实结合的制造系统必然紧紧围绕建模、仿真、监控这3个过程展开。

在数字化车间背景下,以机械加工为代表的离散制造系统具有4个特点<sup>[2-4]</sup>:(1)事件的发生具有突发性和随机性,其内部行为不可预知,是一个典型的多因素、多扰动的复杂系统;(2)设备智能性程度高,以高端数控机床、智能机器人和AGV为代表的智能设备被广泛应用;(3)以市场需求为中心,市场适应能力强,

生产单元柔性高,对市场机遇能快速做出动态响应;(4)数字化程度高,以CAD\CAM\CAE为代表的计算机辅助设计、制造、分析软件、商业管理软件和条码技术、RFID(无线射频识别技术)为基础,搭建了数字化生产、管理和监控平台。针对上述特点,对制造系统的建模和仿真提出了新的挑战和要求:(1)能描述复杂系统中事件的随机性、突发性;(2)能较好地体现设备的智能性、自治性、可交互性;(3)能较好地体现生产系统的柔性、可重构性;(4)能较好地体现车间的数字化管理和监控。

数字化车间强调生产设备智能化、生产过程自动化、生产系统自组织和自适应、生产组织方式由静态的集中控制层次结构向动态的分布式自治网络结构转变。传统建模和仿真方法往往基于概率论和生产系统“金字塔”式的静态层次结构模型,按照一定的“剧本”进行仿真,是从

\*基金项目:“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2015ZX04001002)。

上至下的建模思路,难以描述分布式自治网络结构中个体的自主性及个体间的动态交互行为。Agent 技术是为解决复杂、动态、分布式人工智能应用问题,从人工智能领域发展出来的新方法<sup>[6]</sup>。研究表明,使用 Agent 建模更符合人们对实际事物的认知和抽象,是对智能设备、数字化建设、智能制造领域很好的探索,被认为是最具仿真潜力、应用前景和实用价值的方法。有必要从制造系统建模、仿真、监控 3 个方面全面系统地总结和梳理 Agent 在数字化车间虚实结合的制造系统中的研究及应用,理顺数字化车间信息模型构建思路,为实现物理信息空间融合提供参考和借鉴。

## Agent 技术介绍

目前,业内对 Agent 尚无统一、明确的定义。学术界广泛认可的是 Wooldridge 给出的强定义和弱定义<sup>[7]</sup>,一般认为 Agent 至少应具备自治性(autonomy)、社会性(socialability)、反应性(reactivity)和主动性(proactive)。如图 1 所示,Agent 的基本结构可由传感器、信息处理单元和执行器表示。根据信息处理单元内部结构的不同,又可分为慎思型 Agent、反应型 Agent 和混

合型 Agent。如红色箭头所指模块,慎思型 Agent 用信念(belief)、愿望(desire)和意图(intention)即 BDI 模型来描述其内部推理行为<sup>[6]</sup>。慎思型 Agent 智能化程度高,但内部推理计算量较大,执行效率较低。如绿色箭头所指模块,反应型 Agent 建立“感知-动作”关系库,并不需要知识库和推理,具有对外界响应迅速的特点,但同时智能化程度和灵活性较慎思型 Agent 低。混合型 Agent 则兼具了两者的特点,根据实际情况的紧急和重要程度,选择相应的信息处理单元,因而具有较高的效率和灵活性。

多 Agent 系统(multi-Agent system, MAS)<sup>[8]</sup>是由多个 Agent 组成的松散系统,单个 Agent 并不具有解决问题的全部知识,Agent 通过通信、协商和协作达到集群智慧。

Agent 和 MAS 的概念来源于对人工智能和复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)<sup>[9]</sup>的研究,后被广泛应用于人工智能问题求解以及经济学、管理学、生物学、社会学等复杂系统建模和仿真等领域<sup>[10]</sup>。离散制造系统属于多因素、多扰动的动态、随机复杂系统,较难通过自顶向下的宏观顶层设计来描述和研究其

运行机制,这也是传统建模和仿真方法的局限性。引入 Agent 思想,对制造系统元素建立 Agent 模型,通过研究 Agent 个体间相互通信、竞争和协作等微观现象来描述和研究系统的宏观行为和规律,为解决此类随机动态问题提供了新的思路。

基于 Agent 的制造系统研究可以分为 Agent 理论研究、MAS 运行机制研究和 MAS 应用研究 3 个层次<sup>[11]</sup>。(1)Agent 理论研究。主要研究内容包括 Agent 的结构、形式化定义、行为建模、推理机制等。廖守亿<sup>[12]</sup>对复杂系统 Agent 的建模和仿真进行了研究,给出了 Agent 的形式化定义,并提出了基于 Agent 的建模与仿真的软件框架。包振强等<sup>[13]</sup>运用粗集理论对调度 Agent 的知识库建模进行了研究。(2)MAS 运行机制。研究内容主要包括 MAS 结构、Agent 通信机制、Agent 协商机制、Agent 规划机制等。李海刚等<sup>[14]</sup>阐述了 Agent 的认知模型、体系结构和 MAS 的技术基础和规划。刘荣<sup>[15]</sup>对多 Agent 的协作机制和规划方法进行了研究,建立了适用于动态开放环境的基于规划和协商的多 Agent 协作模型,设计了多 Agent 协作规划框架。(3)MAS 的应用研究。主要研究内容包括面向 Agent 的程序设计(Agent-oriented programming, AOP)、Agent 在智能制造中的应用、Agent 在虚拟制造中的应用等。毛新军等<sup>[16]</sup>对 AOP 在程序设计抽象与模型、机制与理论、语言与设施和支撑平台 4 个方面进行了系统总结。王自强等<sup>[17]</sup>提出了一种用 Agent 结构和 Agent 通讯和协商结构二元组定义的基于多 Agent 智能制造系统(MMAS),并使用 Petri 网对 Agent 特性进行了描述。乔兵等<sup>[18]</sup>综述了 Agent 技术在智能制造系统企业集成,供应链管理、规划、调度和控制等方面的应用。李高正等<sup>[19]</sup>在对 Agent 模型和 MAS 的概括和总结上,论述了 MAS 在 FMS 中

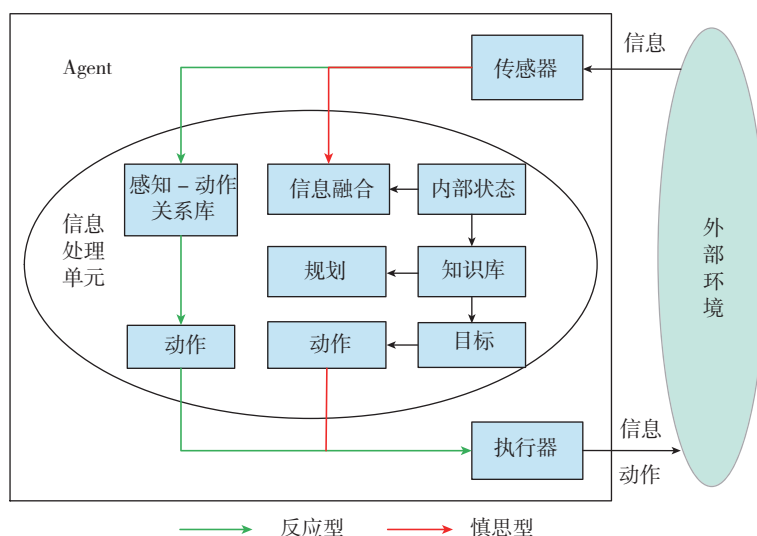


图1 Agent结构图  
Fig.1 Structure of Agent

的研究和应用。赵骥等<sup>[20]</sup>则对制造系统虚拟环境下的 Agent 和多 Agent 的建模方法进行了研究,给出了一种 Agent 的定义和实现方法。

Agent 及 MAS 是较新的概念和方法,被广泛应用于智能制造和虚拟制造中,不少学者对其内涵、基本结构、运作机理和应用进行了研究和总结。本文围绕物理空间与信息空间共融这一目标,探讨在虚实结合的制造系统下基于 Agent 的建模和仿真,并对其发展趋势进行展望。

## 基于 Agent 的制造系统建模与仿真

### 1 虚实结合的制造系统

构建虚实结合的制造系统是实现物理空间和信息空间融合的关键。物理空间和信息空间的融合可分为 3 个阶段:物理空间到信息空间的映射、信息空间到物理空间的反馈、物理空间和信息空间的交互与共融。3 个阶段分别对应 3 大内容,即建模、仿真和监控。建模是物理空间到信息空间的映射,将真实物理空间的物理实体和逻辑实体抽象成信息空间的虚拟对象,是仿真和监控的基础,是“由实到虚”的过程;仿真是信息空间到物理空间的反馈,一方面能有效地检验模型的正确性和有效性,另一方面对真实物理世界的运行逻辑进行分析和评估,探索真实世界运行规律,是“由虚到实”的过程;监控则是物理空间和信息空间的有机融合,实现数据的实时互通、实时同步、实时控制,从而达到真正的“虚实结合”。图 2 描述了数字化车间中虚实结合的制造系统和建模、仿真、监控之间的关系。

### 2 基于 Agent 的制造系统建模

建模是数字化车间仿真和监控的基础。将现实物理空间的物理实体和逻辑实体抽象成 Agent 模型,并真实反映其自治性、主动性、社会性和反应性,是建模需要解决的问题。

制造系统中 Agent 的建模流程可大致归纳为:(1)发现 Agent。将车间物理实体(加工设备、物流设备、生产资源等)和逻辑实体(订单、生产计划、管理系统等)抽象成 Agent。(2)设计 Agent。根据 Agent 的属性对 Agent 进行分类,选用合适的 Agent 结构。(3)Agent 行为建模。根据 Agent 的结构,对 Agent 的传感器、信息处理单元、执行器进行实现。(4)确定 Agent 间的通信方式<sup>[6]</sup>,主要采用的通信方式有知识交换格式(Knowledge Interchange Formant, KIF)、本体论(ontology)和知识查询语言(Knowledge Query Manipulation Language, KQML)。具

体流程如图 3 所示。

Agent 建模思想可以认为是面向对象思想的发展和延伸,是对对象的进一步认识和细化。面向对象思想用属性和方法来表达一类实体,Agent 在对象的基础上引入了感知、推理和决策,赋予了对象“心智”,从静态的、被动的对象转换成动态的、主动的 Agent,具备感知外部环境变化,并根据外部环境改变来做出相应决策,向目标逼近的能力<sup>[6,20]</sup>。为了描述 Agent 自感知、自决策、自适应等特性,研究者一般采用对面向对象方法进行拓展的方式来表达 Agent。常见的 Agent 建模方法有拓展的 UML (Unified Modeling Language,

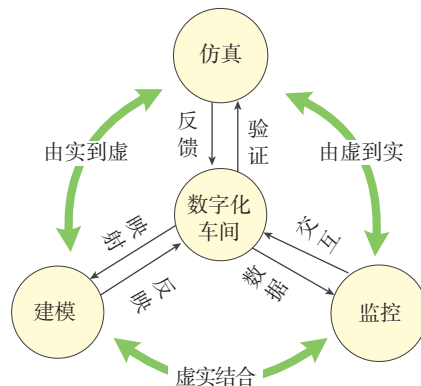


图2 制造系统与建模、仿真、监控关系

Fig.2 Relationships of manufacture system with modeling, simulation and supervisory control

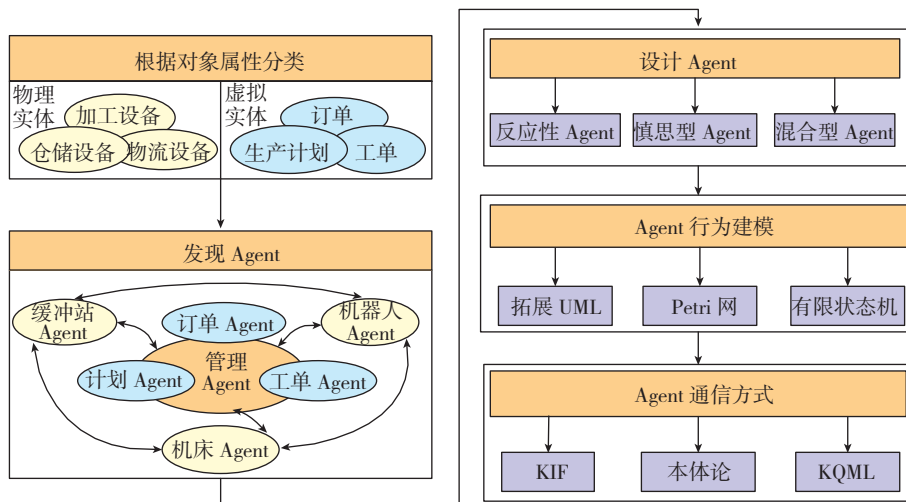


图3 基于Agent建模过程

Fig.3 Process of Agent-based modeling

统一建模语言)、面向对象 Petri 网和有限状态机(Finite State Machine, FSM)。

(1) 拓展 UML 方法<sup>[21]</sup>。UML 具有标准统一、可拓展性强和可视化强等特点,被广泛应用于系统分析、设计、开发阶段。Tong 等<sup>[22]</sup>在总结了各种 Agent 建模语言的基础上,指出 UML 是 Agent 建模的一个热门研究方向,未来研究应聚焦于 MA-UML 中建模范式、语言语义和集成开发环境 3 个方面。Bauer 等<sup>[23]</sup>总结了用 UML2.0 建立 Agent 的方法,以结构图来表达 Agent 静态属性、以行为图表达其动态属性。谢锁文<sup>[24]</sup>使用 UML 方法对物流分拣系统进行了静态建模和动态建模,通过状态图来表示 Agent 的状态变迁和行为模型。杨浩<sup>[25]</sup>借助拓展的 UML 和图转换来表达 Agent,用状态图表示 Agent 的自治性、用顺序图表示其社会性、用转换图表示其反应性,详细论述了 MAS 开发各阶段的建模方法。高波等<sup>[26]</sup>则通过用例图来发现 Agent,用拓展类图和对象图的角色关系图来分析 Agent 的静态组织结构,用拓展的顺序图和状态图来描述 Agent 间的交互及其内部推理行为。

(2) 面向对象 Petri 网<sup>[27]</sup>。Zhu 等<sup>[28]</sup>结合 Petri 网和 BDI 型 Agent,提出 BDIPN 建模方法。苑明海等<sup>[29]</sup>用赋时着色 Petri 网模型来表达装配资源 Agent,建立了可重构装配单元。Zhai 等<sup>[30]</sup>针对半导体制造生产线提出将生产系统分层以降低模型复杂性,使用 AOCTPN 建立了分布式离散事件仿真平台。曹春平<sup>[31]</sup>结合 UML 和 Petri 网建模方法的各自优点,取长补短,提出了 UML-PNs 集成建模策略,该方法既有利于系统的模块化和模型重用,又能对系统进行严密的分析,还利于使用计算机工具进行模型仿真。

(3) 有限状态机。有限状态机是表示有限状态以及状态间进行转

换和动作的一种数学模型,可用状态集、输入集、输出集、状态转移规则和始末状态组成的五元组来描述,被广泛应用于软件工程的程序设计中,并成为典型的设计模式之一。金晶<sup>[32]</sup>针对玻璃堆垛系统,把每个 Agent 抽象成一个有限状态机,建立了物料输送 Agent、水平堆垛机 Agent、堆垛小车 Agent 的行为模型和仿真模型,并利用可视化开发工具 Stateflow 对玻璃堆垛系统进行仿真。张春霞等<sup>[33]</sup>针对 Petri 网建立的柔性制造系统(FMS)存在功能单元之间耦合性强、不利于建立分布式应用、较难维护且其节点数过多、仿真复杂度和出错率较高的缺陷,提出将 FMS 分解成“系统层、子系统层、设备层和子设备层”的 4 级层次结构,对设备智能体进行行为建模,并以数控机床为例,利用有限状态机理论建立了其行为模型。何传俊等<sup>[34]</sup>则对卧式机床加工中心建立了具有空闲、急停、故障、关闭和运行 5 种状态的状态机模型,并通过状态的继承来进一步细化状态,具有很好的封装性和拓展性。

表 1 对上文所述的 3 种常用 Agent 建模方法的优缺点和适用范围

进行了对比和总结。

### 3 基于 Agent 的制造系统仿真

离散制造系统是一个多因素、多扰动的复杂系统,事件的发生具有突发性和随机性,其内部行为不可预知。如图 4 所示,在生产活动流程中,生产需求信息传递给高级计划排程(APS),生成作业计划与排班,面对需求的变化(如追加订单、取消订单、更改订单、紧急订单)和生产过程中不可控因素(如设备故障)等如何快速调整生产计划,并进行有效验证,以辅助决策,就需要对生产计划进行仿真。APS 将生产任务下发到生产车间,形成物流需求,如何将各种物流设备有效组织,保证物料快速准确送达指定位置,消除物流瓶颈,达到生产平衡,就需要对生产物流进行仿真。在保证生产柔性的情况下,同时保证生产系统的稳定性和高效性,检验控制逻辑的正确性,就需要对生产过程进行仿真。

(1) 生产计划仿真。谭辉等<sup>[35]</sup>探讨了 APS 在分布式生产模型下的应用,通过在某大型制药厂的实施,验证了其提出的改进遗传算法在解决分布式生产排程问题上具有较好

表 1 Agent 建模方法对比

Agent 建模方法	特点
拓展 UML 法	有统一的建模规范,拓展性强,能借助现有成熟的面向对象方法和开发工具,容易将概念模型转换为设计模型,但缺乏严密的数学推理,较难描述死锁、冲突现象和验证模型的内部逻辑和正确性,适合于系统的需求分析、设计和开发阶段
Petri 网	能很好地描述系统资源冲突、死锁等动态现象,有严密的数学推理和分析工具,但具有组合爆炸问题,且不能直接转换成可编程的设计,适用于系统分析和设计阶段
有限状态机	能很好地模拟和表达 Agent 对环境的感知、内部状态转变和对环境的反应行为,便于编程实现,非常适合反应型 Agent,但难以描述 Agent 的推理和学习等更复杂行为,适用于相对简单的小型系统设计和开发阶段

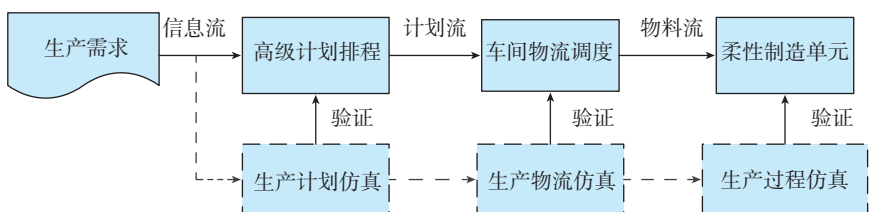


图 4 生产活动流程

Fig.4 Process of production activity

的算法性能。黄恩洲<sup>[36]</sup>提出以最小化最大完工时间为目标的多智能体调度系统,并针对FMS中多智能体交互的特点,提出双禁忌表搜索算法。黄平<sup>[37]</sup>对车间调度自适应系统进行了研究,提出由任务Agent、调度Agent、生产单元Agent、资源Agent组成的MAS车间调度系统框架,并建立了包含外部信息集、内部状态集、事件集、规则集的Agent决策规则,仿真结果表明其所建立的MAS模型和自适应调度机制正确可行。Nejad等<sup>[38]</sup>提出了一种基于Agent的多任务柔性制造系统流程计划和调度集成架构。生产排程本身是NP-Hard问题,约束条件和扰动因素较多,且是一个动态的过程。经典调度理论采用组合优化的方式对生产排程问题进行求解,但由于现代制造系统的复杂性和订单变更、设备故障等不确定性因素,在实际应用中有很大的局限性。借助Agent思想,建立MAS,结合智能算法,将传统的集中式调度问题转化为分布式调度策略问题,为描述此类动态、多扰动的复杂系统提供了新的方法和思路。

(2)生产物流仿真。车间的物流系统是典型的离散事件系统,物流管理没有一个固定的模式,物流的批次和数量很大程度上取决于人的主观判断,增加了系统的复杂性和不确定性。Zhu等<sup>[28]</sup>通过petri网建立BDI型Agent来描述管理者的意念,用确定和随机Petri网来表达库存系统,对复杂物流和敏捷物流系统进行了建模和仿真研究。赵业清<sup>[39]</sup>针对钢铁生产复杂物流,利用MaSE方法和AgentTool进行系统设计,通过商业软件AnyLogic实现了钢铁生产MAS,对不同生产情况下的物流运行规律、扰动对物流的影响进行了模拟,并通过和实际生产对比,验证了模型的正确性,通过仿真可以分析物流的生产瓶颈,对不同生产流程的物流策略提供决策支持。谢锁文<sup>[24]</sup>采

用Agent和UML建立了物流配送中心分拣系统各个作业环节的静态模型和动态模型,并用FlexSim进行了仿真。

(3)生产过程仿真。在生产模型从大批量生产到多批次、多品种、小批量生产转变的主流趋势下,柔性制造单元(FMC)是确保高效、高质的先进生产模型之一。赵骥等<sup>[20]</sup>对虚拟环境中的柔性制造单元生产逻辑的仿真机制进行了研究。何传俊等<sup>[34]</sup>基于Agent架构,对由3台卧式加工中心、立体仓库、上下料机械手和管理控制系统组成的柔性制造单元进行了设计和实现。

综上,基于Agent的仿真完全不同于传统自上而下,基于静态层次结构的仿真方法,Agent模型能较好地描述动态、随机和复杂系统,为分布式网络结构下制造系统的排程调度、生产物流和生产逻辑提供仿真验证和决策支持。

#### 4 基于Agent的制造系统监控

实时、有效的监控是数字化建设的目标之一,是虚实结合的集中体现。如图5所示,生产系统层次模型可分为设备层监控、单元层监控和车间层监控。

(1)设备层和单元层监控。智能设备是数字化车间的基石,对重要设备进行远程监控和故障预警能显著提高生产系统的稳定性和可靠性。Atluru等<sup>[40]</sup>提出了一种集成了流程控制、健康管理和刀具状态监控的智

能机器监控系统框架。利用有限状态机对数控机床进行远程监控也是研究者广泛采用的方法之一<sup>[33-34]</sup>。

(2)车间层监控。Cupek等<sup>[41]</sup>研究了针对小批量生产、基于Agent的MES,提出了一种区别于传统信息流,基于数据采集和活动集的活动模型,并使用IT架构和.NET技术进行了系统实现。Rolón等<sup>[42]</sup>对MES中分布式生产控制的交互机制和车间自动化生产的自主计算模式开展了研究。杨浩<sup>[25]</sup>在研究了MES中Agent的映射方式和结构、多Agent间通信和调度的基础上,设计并实现了敏捷化智能MES系统。刘举艳<sup>[43]</sup>则针对中小型离散制造企业,设计并实现了基于Agent的MES系统。Barenji等<sup>[44]</sup>提出了结合RFID技术和多Agent技术的FMS分布式控制系统架构,以提高系统的灵活性和敏捷性。

综上,Agent技术在制造系统监控中的研究和应用可分为设备、单元和车间3个层次,因为Agent的优势在于研究复杂、动态、分布系统,所以对基于Agent的MES研究较多。同时可以看出,物理信息的融合促使传统MES从金字塔式的层次结构向分布式操作实体的网络结构转变,基于Agent的MES成为研究分布式网络结构的趋势。另外,综合应用多种关键技术(如RFID、OPCUA等)来实现制造系统的监控,也是发展趋势之一。

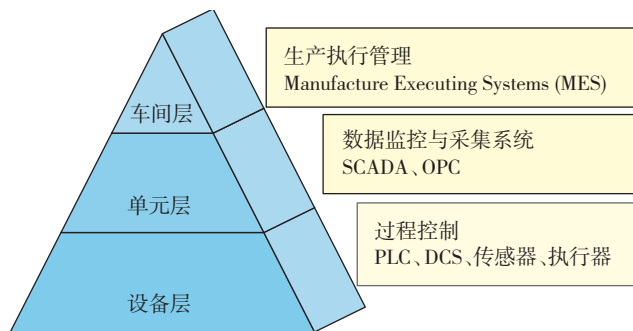


图5 生产系统层次模型  
Fig.5 Layered model of production system

## 基于 Agent 的制造系统建模和仿真的发展趋势

Agent 技术及 MAS 的广泛应用是分布式网络结构制造系统下的发展趋势,是智能制造和数字化车间背景下,制造系统建模、仿真和监控的重要途径和有效方法。

研究者们对基于 Agent 的智能制造系统建模和仿真进行了很多有意义的探索和尝试,开发了基于 Agent 的 FMS<sup>[33-34]</sup>、车间调度自适应系统<sup>[37]</sup>、钢铁复杂物流多 Agent 仿真系统<sup>[39]</sup>、智能 MES<sup>[25,41-42]</sup> 等原型系统。这些系统通过对制造系统实体进行 Agent 抽象和表达,构建 MAS 进行仿真分析,来研究分布式制造系统的运行机理和规律,并在实际应用中取得了一定的研究成果。但 Agent 技术作为一项发展中的新兴技术,在实际应用和实施中还需要很多深入研究和探讨。

### 1 制造系统建模方面

(1) Agent 模型的建模规范。Agent 的结构建模和行为建模尚未形成统一的方法论和理论体系,研究者往往根据自己对制造系统和 Agent 的理解,提出自己的 Agent 模型,模型的粒度和划分角度不一,模型的通用性和有效性有待检验。

(2) 异构 Agent 的统一表达。针对具体的数字化车间,设备的智能化程度不一,Agent 模型如何反映真实设备的智能性?如何刻画智能化程度?如何检验模型的正确性和有效性?针对物理实体和逻辑实体,其在物理空间是完全异构的,Agent 的结构模型如何统一?异质 Agent 间如何通信、协作?这些问题都值得探讨。

(3) Agent 的知识获取和学习机制。在制造系统领域,对 Agent 的反应性和社会性研究较多,而对 Agent 的自学习、自组织、自适应机制研究较少。知识是 Agent 决策的基础,

Agent 如何进行知识的自动获取和更新还有待研究。

### 2 制造系统仿真方面

(1) 系统的稳定性与可靠性。由于 Agent 本身的自治性、社会性和主动性等特性,由 Agent 建立起来的系统是不确定和动态的,事先不可预知,只在实际运行时才能看到其整体行为。一方面符合分布式制造系统的发展趋势,系统具有很强的灵活性和适应性;但另一方面也对系统的稳定性、可靠性和性能评价等带来了巨大挑战。

(2) 三维可视化仿真。可视化技术有助于仿真过程的真实呈现和仿真结果的生动展示。目前对基于 Agent 的三维可视化建模仿真研究较少,真实体验感较差。

### 3 MAS 系统开发和应用方面

(1) MAS 开发工具和集成开发环境。近 20 年,几十种 AOP 语言被提出,并开发了诸多支撑软件工具集和平台,但是由于 AOP 抽象与模型的多样性导致 AOP 技术难以标准化、集成和互操作;对于 MAS 不同层次的支持和融合也有限,尚未在技术层面和工程实践环节充分发挥 MAS 的潜力<sup>[16]</sup>;符合软件工程学、可重用、开放的 Agent 建模、仿真平台和集成开发环境还不多,造成 MAS 开发周期长、难度大、可重用性较差,且难以保证模型的质量。亟须人机界面友好、互操作性强的 MAS 开发工具。

(2) 人机协同。人是制造系统中最具智能的部分,是知识创新的根源。人的智能与机器智能的完美结合是智能制造最终实现的切实可行的途径<sup>[45]</sup>。MAS 应充分考虑人在智能制造系统中的重要作用,人机交互、人机协同是一个重要研究方向。

(3) 与其他新兴技术的融合。MAS 的应用近 10 年进展缓慢,一方面在理论研究上无重大突破,另一方面受限于技术水平和硬件设施。高

档数控机床、智能机器人、AGV 等设备的智能化程度不断提高,以及大数据、云计算、深度学习、移动互联、实时跟踪技术等新兴技术的发展,为 MAS 在制造系统的应用和实施提供了硬件支撑和技术保障。MAS 与智能设备和新兴技术深度融合,发挥 Agent 的优势和潜力值得深入探讨和研究。

在深入探讨上述问题的基础上,今后的研究应围绕:制造系统 Agent 模型的建模规范和统一表达;Agent 的知识获取和学习机制;模型的验证, MAS 的稳定性、可靠性评估和性能评价机制;基于 Agent 的三维可视化仿真;Agent 集成开发平台;Agent 与其他新兴技术的融合和人机协同等方面展开。以期形成一整套基于 Agent 的数字化车间虚实结合制造系统建模、仿真和监控的系统分析、设计、实施及评估的方法论和理论体系。

### 参考文献

- [1] 张国军,黄刚. 数字化工厂技术的应用现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(8): 34-37.  
ZHANG Guojun, HUANG Gang. Digital factory: its application situation and trend[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(8): 34-37.
- [2] LGNAT V. Digitalization and the global technology trends[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 227: 012062.
- [3] 蔡敏,崔剑,叶范波. 数字化工厂——建模、实施与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
CAI Min, CUI Jian, YE Fanbo. Digital factory— modeling, implementation and evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [4] 丁鹏飞,周世杰,王贺,等. 面向航天制造企业的数字化工厂建设方案探讨[J]. 航空制造技术, 2014, 57(14): 51-55.  
DING Pengfei, ZHOU Shijie, WANG He, et al. Digital factory construction program for aerospace manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(14): 51-55.

[5] 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): 315-321.

TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 315-321.

[6] 朱福喜. 人工智能[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2017: 161-182.

ZHU Fuxi. Artificial intelligence[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 161-182.

[7] WOOLDRIDGE M, JENNINGS N. Intelligent agents: theory and practice[J]. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152.

[8] WOOLDRIDGE Michael. 多 Agent 系统引论[M]. 石纯一, 张伟, 徐晋晖, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.

WOOLDRIDGE Michael. An introduction to multi-agent systems[M]. SHI Chunyi, ZHANG Wei, XU Jinhui, et al, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

[9] KAUFFMAN S A. The origins of order: self-organization and selection in evolution[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.

[10] MACAL C M, NORTH M J. Tutorial on agent-based modelling and simulation[J]. Journal of Simulation, 2010, 4(3): 151-162.

[11] 刘大有, 杨鲲, 陈建中. Agent 研究现状与发展趋势[J]. 软件学报, 2000, 11(3): 315-321.

LIU Dayou, YANG Kun, CHEN Jianzhong. Agent present status and trends[J]. Journal of Software, 2000, 11(3): 315-321.

[12] 廖守亿. 复杂系统基于 Agent 的建模与仿真方法研究及应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.

LIAO Shouyi. Research on methodology of Agent-based modeling and simulation for complex systems and application[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.

[13] 包振强, 王宁生, 李斌. 基于粗集的调度 Agent 知识库建模研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(6): 671-675.

BAO Zhenqiang, WANG Ningsheng, LI Bin. Knowledge base model for scheduling Agent based on rough set[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, 35(6): 671-675.

[14] 李海刚, 吴启迪. 多 Agent 系统研究综述[J]. 同济大学学报, 2003, 31(6): 728-732.

LI Haigang, WU Qidi. Summary on research

of multi-Agent system[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(6): 728-732.

[15] 刘荣. 多 Agent 协作机制的研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

LIU Rong. Research on collaborative mechanism in multi-Agent system and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[16] 毛新军, 胡翠云, 孙跃坤, 等. 面向 Agent 程序设计的研究[J]. 软件学报, 2012, 23(11): 2885-2904.

MAO Xinjun, HU Cuiyun, SUN Yuekun, et al. Research on Agent-oriented programming[J]. Journal of Software, 2012, 23(11): 2885-2904.

[17] 王自强, 冯博琴. 智能制造系统的多 Agent 模型研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(16): 1390-1393.

WANG Ziqiang, FENG Boqin. Research on multi-Agent model of intelligent manufacturing system[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(16): 1390-1393.

[18] 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): 97-103.

QIAO Bing, ZHU Jianying. Agent-based intelligent manufacturing systems: a state-of-the-art survey[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(1): 97-103.

[19] 李高正, 黄小平, 师汉民, 等. 智能制造中多 Agent 系统的研究和应用[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(2): 287-290.

LI Gaozheng, HUANG Xiaoping, SHI Hanmin, et al. Research on multi-Agent system with application to intelligent manufacturing[J]. Mechanical Science and Technology, 2002, 21(2): 287-290.

[20] 赵骥, 肖田元, 朱名铨, 等. 制造系统虚拟环境的多 Agent 建模方法[J]. 中国机械工程, 2002, 13(8): 660-663.

ZHAO Ji, XIAO Tianyuan, ZHU Mingquan, et al. Modeling manufacturing system virtual environment using multi-Agent[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(8): 660-663.

[21] 侯爱民, 欧阳骥, 胡传福, 等. 面向对象分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

HOU Aimin, OUYANG Ji, HU Chuanfu, et al. Object-oriented analysis and design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.

[22] TONG S P, ZHANG J. A research on multi agent modeling language[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 1840-1847.

[23] BAUER B, ODELL J. UML 2.0

and agents: how to build Agent-based systems with the new UML standard[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005, 18(2): 141-157.

[24] 谢锁文. 基于 Agent 的物流分拣系统建模仿真[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.

XIE Suowen. Modeling and simulation of logistics sorting system based on Agent[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.

[25] 杨浩. 基于多 Agent 的敏捷化智能制造执行系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.

YANG Hao. Multi-Agent based agile intelligent manufacturing execution system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.

[26] 高波, 费奇, 陈学广. 基于拓展 UML 的多 Agent 系统建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(5): 70-74.

GAO Bo, FEI Qi, CHEN Xueguang. A modeling method of MAS based on extended UML[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(5): 70-74.

[27] 彭海波. 基于 Petri 网的机加工车间建模与仿真研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2006.

PENG Haibo. Modeling and simulation of machine shop based on Petri nets[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2006.

[28] ZHU W F, FEI Q. A Petri-net modeling method of Agent's belief-desire-intention and its application in logistics[J]. Advances in Neural Network Research and Applications, 2010, 67: 817-844.

[29] 苑明海, 白颖, 李东坡. 基于面向 Agent 的赋时着色 Petri 网的可重构装配线建模[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(11): 2142-2149.

YUAN Minghai, BAI Ying, LI Dongpo. Modeling for reconfigurable assembly line based on ATCPN[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(11): 2142-2149.

[30] ZHAI W B, CHU X N, ZHANG J, et al. Research on AOCTPN-based modeling and simulation technology of semiconductor fabrication line[J]. The International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(7/8): 814-821.

[31] 曹春平. 基于多 Agent 的可集成制造执行系统(I-MES)关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.

CAO Chunping. Study on crucial technologies of multi-Agent based integratable

manufacturing executive system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.

[32] 金晶. 基于多 Agent 的生产线建模、优化与仿真研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

JIN Jing. Research of modeling, optimization and simulation of production line based on multi Agent[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[33] 张春霞, 苏秦. 基于多 Agent 的 FMS 建模仿真方法研究[J]. 计算机仿真, 2004, 22(3): 71-73.

ZHANG Chunxia, SU Qin. Research on FMS modeling and simulation method based on Multi-Agent[J]. Computer Simulation, 2004, 22(3): 71-73.

[34] 何传俊, 杨东升, 李家霖. 基于 Agent 架构的 FMS 信息控制系统模型[J]. 制造技术与机床, 2009(3): 9-13.

HE Chuanjun, YANG Dongsheng, LI Jiaji. Information control system model of FMS based on Agent architecture[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(3): 9-13.

[35] 谭辉, 张洪伟, 朱丽. APS 系统中基于改进的遗传算法的分布式排产研究[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(6): 76-79.

TAN Hui, ZHANG Hongwei, ZHU Li. Research of distributed scheduling based on modified GA in APS[J]. Application Research of Computers, 2005, 22(6): 76-79.

[36] 黄恩洲. 粒子群——禁忌搜索的 FMS 多智能体调度[J]. 辽宁工程技术大学学

报(自然科学版), 2014, 33(4): 497-501.

HUANG Enzhou. Particle swarm—tabby search for FMS multi-Agent scheduling[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(4): 497-501.

[37] 黄平. 基于多 Agent 的制造企业车间调度自适应系统仿真[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

HUANG Ping. Simulation about workshop scheduling adaptive system of manufacturing enterprise based on multi-Agent[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

[38] NEJAD H T N, SUGIMURA N, LWAMURA K, et al. Agent-based dynamic process planning and scheduling in flexible manufacturing system[C]//Proceedings of the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems. Tokyo, 2008: 269-274.

[39] 赵业清. 基于多 Agent 的钢铁生产复杂物流系统建模与仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.

ZHAO Yeqing. Modeling and simulation of complex logistics system for iron and steel process based on multi-Agent[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.

[40] ATLURU S, HUANG S H, SNYDER J P. A smart machine supervisory system framework[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5-8): 563-572.

[41] CUPEK R, ZIEBINSKI A, HUCZALA L, et al. Agent-based manufacturing

execution systems for short-series production scheduling[J]. Computers in Industry, 2016, 82: 245-258.

[42] ROLÓN M, MARTÍNEZ E. Agent-based modeling and simulation of an autonomic manufacturing execution system[J]. Computers in Industry, 2012, 63(1): 53-78.

[43] 刘举艳. 基于多 Agent 的中小型离散制造企业 MES 系统的设计与实现[D]. 汕头: 汕头大学, 2010.

LIU Juyan. The design and realization of MES system for multiple typical medium or small-sized discrete manufacture companies as based on multi-Agent[D]. Shantou: Shantou University, 2010.

[44] BARENJI R V, BARENJI A V, HASHEMIPOUR M. A multi-Agent RFID-enabled distributed control system for a flexible manufacturing shop[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9-12): 1773-1791.

[45] 赵福民, 王治森, 高锴, 等. Agent 技术在智能制造系统中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 140-144.

ZHAO Fuming, WANG Zhisen, GAO E, et al. Application study of Agent technology for intelligent manufacture[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 140-144.

通讯作者: 丁国富, 教授、博士生导师, 研究方向为数字化设计与制造、加工过程仿真、数控加工及装备自动化, E-mail: dingguofu@swjtu.edu.cn.

## Survey of Agent-Based Manufacturing System Modeling and Simulation

JIANG Haifan, DING Guofu

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**[ABSTRACT]** In the trend of organizational change from static centralized hierarchy to dynamic distributed network structure, the manufacturing system presents new features such as dynamic, complex and autonomous. As a new method to solve the problem of complex, dynamic and distributed artificial intelligence applications, Agent technology has been widely used in intelligent manufacturing and digital workshop. The goal of intelligent manufacturing and digital workshop is both to achieve the interaction and integration of physical space and information space. Around the goal and the new features of the manufacturing system, firstly, the virtual-real synthesis manufacturing system is introduced briefly. Then the application and research status of Agent-based modeling, simulation and supervisory control of manufacturing system are summarized. Finally, the development trend of Agent-based manufacturing system modeling and simulation is prospected.

**Keywords:** Agent; Manufacturing system; Virtual-real synthesis; Modeling; Simulation; Supervisory control;

Digital workshop

(责编 逸飞)