

文章编号:1005-2615(2001)01-0001-07

多 Agent 智能制造系统研究综述

乔 兵 朱剑英

(南京航空航天大学机电学院 南京,210016)

摘要 Agent 与多 Agent 系统是分布式人工智能的主要研究方向之一。Agent 技术已经被认为是进行分布式工业系统建模的一种重要方法,是设计与实施分布式智能制造环境的最自然的手段,是构建下一代制造系统的重要技术之一。基于 Agent 的制造系统是多 Agent 系统理论和方法在制造领域中的具体应用,在对 Agent 与多 Agent 系统技术研究进行简要总结的基础上,综述了 Agent 技术在制造企业集成、供应链管理、制造规划、调度和制造控制等方面的应用及其研究现状,并对 Agent 制造系统研究的主要内容及关键问题进行了探讨。

关键词:多 Agent 系统;智能制造;供应链管理;企业集成
中图分类号:TP11;TP18;TP273 **文献标识码:**A

引 言

根据对国际生产工程学会(CIRP)近十年来发表的论著统计,已经提出的先进制造与设计模式达 30 多种^[1],提出如此多的制造设计模式反映了人们对设计智能化、制造智能化和管理智能化的不断追求。目前,人们正在寻求面向 21 世纪满足知识经济时代需求的“下一代制造系统”。

随着信息技术的飞速发展和经济全球化趋势的不断加剧,制造业将不得不面对日益频繁、无法预知的市场变化^[2]。产品生命周期的日益缩短、更新速度的不断加快和顾客对产品需求的日趋个性化、多样化,使得制造企业的生产模式和制造组织方式逐渐由面向产品转变为面向客户、面向需求和面向服务。为了赢得竞争,企业必须动态地调整其生产制造策略以支持全球竞争、产品创新和对市场变化的快速反应。传统的制造系统和过程为金字塔式分级递阶结构,其规划、调度和控制为集中串行式,缺乏柔性,不能够适应全球化市场竞争条件下生产组织方式的频繁调整和产品需求的动态变化,集中、分级递阶式的组织方式还限制了制造系统进行扩展和重构的能力^[3],系统的鲁棒性较差,往往

由于个别环节的错误导致整个系统不能正常工作。因此,迫切需求一种具有良好柔性、快速反应性和具有容错能力的分布式网络合作化生产制造系统,这种制造系统应当能够在具备一定成本效益优势的情况下快速响应市场变化,根据不同的产品要求,迅速、经济地建立制造过程,并能动态地对整个制造过程进行自适应、自组织、自学习、自优化和自我维护。分布式人工智能领域(Distributed artificial intelligence, DAI)的研究成果表明,Agent 技术是实现这一制造哲理的最富潜力和最自然的方法。

近来,Agent 技术已被认为是进行分布式工业系统建模的一种重要方法^[3,4],一些主要的美国制造企业和政府机构认为基于 Agent 的制造是美国制造业的未来^[5]。Agent 技术是设计与实施分布式智能制造环境的最自然的手段,是构建下一代制造系统的重要技术之一。很多学者正在研究将 Agent 技术运用到制造企业集成、供应链管理、规划、调度、控制和物料处理等制造领域,已取得了不少研究成果。

1 Agent 与多 Agent 系统

Agent 与多 Agent 系统(Multiagent system,

基金项目:国家自然科学基金(编号:59990470)资助项目。

收稿日期:2000-09-29;修订日期:2000-10-19

作者简介:乔 兵,男,讲师,1967 年 6 月生;朱剑英,男,教授,博士生导师,1937 年 7 月生。

MAS)的概念起源于人工智能领域,是分布式人工智能的主要研究方向之一,目前已引起了计算机科学及其他学科领域的极大兴趣。对于何为 Agent?不同的研究者根据自己的研究背景和研究领域提出了不同的观点和看法,但到目前为止,并没有形成统一的 Agent 定义。梁义芝等^[6]总结了 Agent 的 7 项特征,杨鲲等^[7]搜集并概括了几种 Agent 的定义,其中以 Wooldridge 和 Jennings^[4]提出的定义最为流行,在他们关于 Agent 的定义中有三个关键性的概念:情境性(Situatedness)、自治性(Autonomy)和适应性(Flexibility)。他们认为 Agent 就是处于某个环境中的计算机系统,该系统接收来自环境的传感输入并执行行动,以某种方式改变其所处的环境;自治性是指 Agent 能够在没有人或其他 Agent 直接干预的情况下持续运行,并能采取灵活自主的行动控制和改变自身的行为与内部状态,自治性是 Agent 最重要的特征,具有自治性的 Agent 被称为自治 Agent;适应性是指 Agent 能够对其感知到的环境变化作出反应,能够与共处相同情境中的人或其他 Agent 进行社交活动。根据 Russel 和 Norvig^[8],Agent 可以是任何通过传感器感知环境并通过效应器作用于环境的事物,根据该定义,Agent 可以包罗万象。图 1 为一种

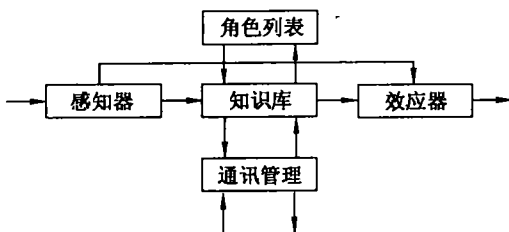


图 1 Agent 的结构

被学者们普遍接受的 Agent 的结构:感知器是 Agent 接受外部世界信息的感觉通道;知识处理模块是 Agent 的知识库管理系统;通讯管理是 Agent 与系统中其他成员进行交互的机制或协议;效应器是 Agent 影响或改变环境的界面;角色列表是 Agent 在 Agent 系统中所扮演角色的列表。在实际应用中,设计者往往根据不同的需要而采用不同的 Agent 结构,但一般都直接或间接地包含 Agent 的这几个功能。在制造系统建模中,单个的 Agent 可以用来表示具有一定智能的物理实体,如机床、零件、AGV 和机器人等,或逻辑实体,如作业、订单等,这些 Agent 具有相似的结构,但所包含的实际内容却根据其所代表的实体而千差万别,各 Agent

的行为是自治的,他们通过合作、协商来解决复杂的制造问题。

多 Agent 系统是由多个 Agent 形成的松散耦合的网络系统^[9,10]。这些 Agent 在物理上或逻辑上是分散的,其行为是自治的,他们为了共同完成某个任务,或达到某些目标遵守某种协议连接起来,通过交互与合作解决超出单个 Agent 能力或知识的问题。近来,由于其组织行为的显现效应(emergence),多 Agent 系统已被认为是建造大型复杂分布式信息处理系统的重要技术和框架,并将为 21 世纪分布式移动计算技术提供强大的建模工具。目前,多 Agent 系统的应用空间正不断扩大,一般认为多 Agent 系统特别适用于那些能根据空间、时间或功能进行分解和划分的应用问题^[11],在这些应用中采用多 Agent 系统将带来如下优点:由于处理的并行化,系统的运行速度将加快;由于对信息的处理是在信息源的附近进行的,所以对通讯带宽的要求较低;由于某一个 Agent 出错不会影响整个系统的运行,因此,系统具有较高的可靠性;由于感知、处理和动作紧密相伴,系统具有较高的反应速度。

虽然单个 Agent 仅具有环境或任务的不完全信息和局部作用能力,但多个 Agent 根据某种协议组织而成的 Agent 系统,通过竞争、协作、协商等却显现出智能化的系统行为,从而能够进行大规模的问题求解活动,这种现象在生物系统中是普遍存在的,如蚂蚁群,单个蚂蚁的能力是非常有限的,但通过分工、协作,蚁群却能够建造精美绝伦的蚁穴。多 Agent 系统表现出的这种生物型智能已引起了包括 AI、计算机科学、生命科学、制造科学等领域的重视,但构建多 Agent 系统是困难的,为了成功地应用多 Agent 系统,必须解决以下关键问题:

(1) Agent 的内部结构模型及多 Agent 系统的体系结构。

(2) 支持多 Agent 建模的软件系统。主要包括多 Agent 系统通讯语言、Agent 知识表达语言、具有平台独立性的 Agent 编程语言、多 Agent 系统的高层模型框架等,目前,已有几个测试版本的面向 Agent 的建模工具,可供研究多 Agent 系统,如 IBM 的 ABE (Agent building environment), Aglets, Gensym 的 ADE (Agent development environment toolkit) 和斯坦福大学的 JATLite (Java agent template, lite) 等,这些系统可以从网上下载。

(3) 多 Agent 系统的规划与调度、协作与协

商、冲突消解与死锁检测。

(4)多 Agent 系统动力学行为及其性能的评估和预测、智能显现机制。

(5)多 Agent 系统自组织、自学习^[12]与自维护。

(6)多 Agent 系统的安全与容错策略^[13]。安全问题是多 Agent 应用系统必须要考虑的一个重要方面,特别是以 Internet 和 Intranet 为平台的开放式多 Agent 系统,安全性将直接决定系统的最终成败。

(7)混合异构型多 Agent 系统建模。长期以来,多 Agent 系统的研究被分成两个阵营:合作的 Agent (Cooperative agents)和利己的 Agent (Self-interested agents)^[11]。但在很多应用中,有些 Agent 之间是合作关系,有些 Agent 之间是竞争关系,特别是以 Internet 为运行平台的多 Agent 系统,Agent 之间的关系错综复杂,如何描述这种混合异构型系统的行为是一个极具挑战性的课题。

2 基于 Agent 的制造系统

由于多 Agent 系统的分散自治性、网络合作性和结构开放性,它在许多领域受到重视和应用。现代制造系统是高度分散的制造系统,由许多标准化或非标准化、自治和半自治的加工设备、材料运输设备、机器人等各种制造资源组成,因此它是多 Agent 系统的最佳应用对象,目前国际上已有若干家制造企业、研究机构和大学正在进行基于 Agent 的制造系统的研究与开发。

2.1 基于 Agent 的供应链管理和企业集成

制造企业的供应链是由供应商、生产工厂、仓库、分销商和零售商以及顾客形成的一个全球化的网络,通过该网络,企业获得原材料,将其转换成产品并最终销售到客户手中。改进企业的供应链管理,对整个企业的运行系统进行集成化,使之形成一个高效统一的增值链体系,是企业提高其竞争能力的重要手段。Swaminathan^[14]运用多 Agent 系统对供应链的动力学行为进行建模;Mehra 和 Nissen 采用 ADE (Agent development environment toolkit)工具和 Java 语言研究并开发了基于 Agent 的供应链管理系统;加拿大 Calgary 大学开展的 MetaMorph II^[15]项目提出了一种以混合型中介 Agent 为核心的体系结构,通过 Internet 和 Intranet 以及各环节的中介 Agent,将企业的合作伙

伴、供应商和客户集成到一个供应链网络,在 MetaMorph II 中,Agent 可以用来表示制造资源和零件、对已有的软件系统进行封装、作为系统/子系统的中介 Agent 以及执行供应链功能等;Papaoannou 和 Edwards^[16]采用移动 Agent 技术进行虚拟企业建模和集成;Jeff 和 Pan 等^[17]提出了一种采用智能 Agent 进行企业智能化集成的方案;Pancerella 和 Hazelton^[18]等提出了一种支持敏捷制造的自治 Agent 的体系结构;Lefrancois^[19]等提出了基于 Agent 的企业信息集成框架;高国军等^[20]采用多 Agent 技术建立可重构企业信息系统;Baker^[5]在对多 Agent 系统三种体系结构(递阶分层结构、黑板结构、变态分层结构)比较研究的基础上,指出变态分层结构的多 Agent 系统是实现敏捷制造系统的最具吸引力的体系结构等。

研究表明,采用 Agent 方法进行企业集成和供应链管理,企业能够增加其对市场需求变化的反应性,Agent 方法还使企业能够极大地提高其信息交换的效率和快速获得市场反馈。同时,由于采用多 Agent 系统进行供应链管理和企业集成,使得企业可以通过多 Agent 系统的学习,合理配置供应链资源,不断提高和优化整个企业系统运作的性能。另外,基于 Agent 的供应链管理和企业集成是企业实施电子商务的最自然的方案。

2.2 基于 Agent 的制造规划、调度与控制

Agent 技术在制造规划、调度、控制等方面也具有巨大的应用潜力。规划是在满足一定约束的前提下,为了达到某些目标而选择和安排作业;调度是将时间和资源分配给规划中的作业,并根据一组规则和指标对规划进行优化选择,这组规则或约束反映了作业与资源之间的时间关系;制造控制是指制造工厂或车间操作与运行的策略和算法^[3]。制造规划与调度是复杂的问题^[21],特别是由于现代制造系统的运行环境越来越充满了不确定性,系统的制造任务经常是动态变化的^[2],如不可预知的任务增加与减少、某些制造资源的紧缺和引入、制造任务处理时间的变化等。同时,企业为了赢得竞争,必须在保持质量和降低投资成本的前提下,缩短产品的生命周期、加快产品的上市时间、增加产品的多样性、实时满足市场需求等。这些不确定性、动态性和复杂性组合在一起,使规划与调度变得更加困难,同时,为了能够处理这种不断增长的不确定性和复杂性,制造车间的控制系统必须具有较强的适应性、鲁棒性和可伸缩性。

由于规划、调度和控制对制造系统具有重要的实际意义,学者们对其进行了广泛的研究,各种启发式搜索策略、模拟退火算法、遗传算法、人工神经网络、模糊逻辑系统等技术被众多学者用来解决制造规划、调度、控制问题^[22,23],近年来,基于 Agent 的技术也被广泛地用于解决该类问题。Baker^[5]对车间控制算法在变态分层多 Agent 制造系统下的实现问题进行了研究。Bussmann^[24,25]提出了面向 Agent 的制造系统体系结构,采用 Agent 技术进行制造系统中的物流控制研究。Shaw^[26]提出用 Agent 方法进行制造调度和控制,指出制造单元可以通过投标机制将工作以子合同的形式转包给其他制造单元。YAMS^[27](Yet another manufacturing system)系统将合同网协议^[28]运用于制造控制。在 YAMS 中,制造企业被建模成由许多执行不同任务的工作单元组成的层次结构,并根据功能将这些单元组成若干柔性制造系统(Flexible manufacturing system, FMS),然后由一组 FMS 形成一个工厂,一个企业往往有许多这样的工厂。YAMS 采用多 Agent 方法来管理这些工厂中的制造过程,工厂及其组成部分被表示成一个一个的 Agent,每个 Agent 具有一组代表其能力的计划,通过合同网协议将各种任务委托给工厂,再由工厂委托给 FMS,最后委托给一个的工作单元。Butler^[29]提出了用于分布式动态调度的多 Agent 体系结构 ADDYMS(Architecture for distributed dynamic manufacturing scheduling),将调度分为两个层次,第一层通过 Agent 的协商机制,以一种分布式的方法将制造单元分配给作业;第二层对共享制造资源进行动态分配。Hadavi 等^[30]提出了分布式实时调度的多 Agent 系统结构 ReDS(Real time dynamic scheduling),Lin 和 Solberg^[31]提出了基于自治 Agent 的集成化车间控制框架,采用价格机制与作业目标相结合的市场化模型、作业优先策略、多步协商等技术以获得对制造环境变化的适应性。Chen 和 Luh^[32]采用 Agent 技术进行制造调度与供应链协调研究。廖强等^[33]提出了一种基于现场总线的多 Agent 作业车间动态调度模型,首先由一个主 Agent 向其他辅助 Agent 发送调度任务,通过对回收的所有调度结果进行统一判断和协调,最终得到一个可行的调度方案。MetaMorph II^[34]提出了一种基于混合型中介 Agent 体系结构的仲裁模型,采用基于合同网协议的投标机制,进行制造调度和再调度研究。Wang 等^[35]运用 Agent 技术进行实时分布式智能制造控制系统设计。

Wiendahl 等^[36]研究了基于 Agent 的自组织生产系统控制,Rowe^[37]采用智能多 Agent 方法选择磨削参数。Jin^[38]及殷勇^[39]等进行了多 Agent 协同设计研究。

Shen^[3]列举了近 30 个国际上已经开展或正在进行的运用 Agent 技术制造规划、调度、制造控制的研究项目。从这些研究项目可以看出,运用 Agent 技术进行制造规划、调度、控制等问题的研究,其常见的做法是用 Agent 来表示制造中的各种物理资源或逻辑资源,如机床、物料运输设备、机器人、订单、BOM 等,并根据制造过程的组织形式,通过网络及 Agent 通讯协议将这些单元连接成一个多 Agent 制造系统,然后,采用多 Agent 系统理论和方法对该制造系统中 Agent 的协作、协商、调度、控制、冲突消解、智能显现等行为进行研究。

多 Agent 系统通过分解将复杂性降低,并在必要的时候以相对较低的成本获得必要的系统适应性、鲁棒性和可伸缩性,而且 Agent 系统能够动态协调其控制决策,自主调整其行为,对产品变化、设备故障等事件作出智能化的反应。Agent 的这一重要特征正是人们进行基于 Agent 的制造规划、调度和控制研究的原动力。

3 基于 Agent 制造系统研究的主要内容及关键问题

基于 Agent 的制造系统是多 Agent 系统理论和方法在制造领域中的具体应用,因此,多 Agent 系统研究的关键问题同样也是基于 Agent 制造系统研究的关键。基于 Agent 的制造系统研究的主要内容和关键问题包括:

(1)制造智能 Agent 的结构模型。在分布式人工智能研究中,Agent 被分为协商型(Deliberative)、反应型(Reactive)、混合型(Hybrid)和 BDI(Belief-desire-intention)型 4 种,这些 Agent 的内部结构及其在系统中的行为模式有一定的区别。制造问题的智能 Agent 的结构模型有待进一步被提炼,目前学者们一般都是根据所研究的特定问题提出各自的制造 Agent 结构。

(2)基于 Agent 制造系统的体系结构。在基于 Agent 的制造系统中,Agent 一般用来表示具有一定智能的逻辑实体或物理资源,如订单、BOM、加工设备,这些 Agent 以何种形式组织成一个多

Agent 制造系统是成功实施多 Agent 制造方案的关键,学者们普遍认为变态分层结构是实施多 Agent 制造系统的最佳结构,但变态分层结构的多 Agent 系统的动力学行为建模是困难的。

(3)多 Agent 制造系统的运行模式及性能评价方法。多 Agent 制造系统的运行模式与其体系结构有关,多 Agent 系统的诱人之处在于一定数量的 Agent 通过协作而表现出的集结行为或显现行为,这种显现行为的智能明显高于单个 Agent 的智能。那么这种智能行为显现的动力学机制如何在制造环境中体现?系统运行遵循什么样的模式?如何评价系统的性能?

(4)基于 Agent 的制造企业供应链协调。

(5)基于 Agent 制造系统的自学习、自组织、自维护及自适应。学习能力和适应能力是系统具备智能的重要体现,研究基于 Agent 制造系统的自学习、自组织、自维护及自适应机制对于提高系统的生存能力和竞争能力具有重要的理论意义和实际价值。

(6)传统制造控制、规划、调度等算法在多 Agent 制造系统中的实现。

(7)多 Agent 制造系统的动态重构。制造系统的动态重构性是一种现实的要求^[40],研究基于 Agent 的制造系统的动态重构对于建构面向 21 世纪的可重构制造系统具有重要的意义,目前已有一些学者开展基于 Agent 的可重构制造系统方面的研究。

(8)多 Agent 制造系统与人的交互及合作。多 Agent 制造系统应当考虑人的参与性,有助于发挥人的创造性,这就要求为系统设计智能化的接口,将人融入多 Agent 制造系统,共同参与制造问题的合作求解。

4 结 论

制造系统和过程的结构正由传统的分级递阶式向分布自治式发展,对市场变化的快速响应能力已成为下一代制造系统的设计目标,而基于 Agent 的分布式智能制造系统以其能动性 and 快速反应性被认为是替代传统分级递阶式制造系统的最有前途的选择。目前,基于多 Agent 的智能制造系统的研究正在全球广泛开展,并在某些方面取得了一些成果,这些成果无疑为多 Agent 系统在制造领域的应用奠定了一定的基础,但其研究还处于初期阶段,相信随着 DAI 研究的不断深入和信息技术的

日益进步,多 Agent 技术在制造系统建模、规划、调度、制造过程控制等领域及制造企业供应链管理和协调方面的应用空间必将得到极大地拓展。

参 考 文 献

- 1 Qiao Bin, Zhu Jianying. Agent-based intelligent manufacturing system for the 21st century[C]. International Forum for Graduates and Young Researchers at EXPO 2000, Germany: Hannover, 2000
- 2 Kimura F, Lipson H, Shpitalni M. Engineering environments in the information age: research challenges and opportunities[J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1):87~90
- 3 Shen W, Norrie D H. Agent-based systems for intelligent manufacturing: a state-of-the-art survey [J]. Knowledge and Information Systems, 1999, 1(2):129~156
- 4 Wooldridge M, Jennings N. Intelligent agents: theory and practice [J]. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2):115~152
- 5 Baker A D. A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: dispatching, scheduling, and pull[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1998, 17(4):297~320
- 6 梁义芝,刘云飞. 基于 Multi-agent 技术的决策支持系统[J]. 计算机科学, 1999, 26(8):50~52
- 7 杨 鲲,翟永顺,刘大有. Agent: 特性与分类[J]. 计算机科学, 1999, 26(9):30~34
- 8 Russell S, Norvig P. Artificial intelligence: a modern approach. Prentice-Hall [M]. Upper Saddle River, New Jersey, USA, 1995
- 9 胡舜耕,张 莉,钟守义. 多 Agent 系统的理论、技术及其应用[J]. 计算机科学, 1999, 26(9):20~24
- 10 Fischer K, Chaib-drra B, Muller J P, et al. A simulation approach based on negotiation and cooperation between agents: a case study[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1999, 29(4):531~544
- 11 Lesser V R. Cooperative multiagent systems: a personal view of the state of the art[J]. IEEE Transaction on Knowledge and Date Engineering, 1999, 11(1):133~142
- 12 高 阳,周志华,何佳洲,等. 基于 Markov 对策的多 Agent 强化学习模型及算法研究[J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(3):257~263
- 13 马俊涛,刘积仁. Mobile Agent 体系结构及关键技术探讨[J]. 小型微型计算机系统, 1998, 19(2):7~14
- 14 Swaminathan J M, Smith S F, Sadeh N M. A multi-

- agent framework for supply chain dynamics[C]. In: Proceedings of NSF Research Planning Workshop on AI & Manufacturing, Albuquerque, NM, 1996
- 15 Shen W, Xue D, Norrie D H. An agent based manufacturing enterprise infrastructure for distributed integrated intelligent manufacturing systems[C]. In: Proc of PAAM'98. UK; London. 1998
 - 16 Papaioannou T, Edwards J. Mobile agent technology enabling the virtual enterprise: a pattern for database query [C]. In: Working Notes of the Agent-Based Manufacturing Workshop, Minneapolis, M N, 1998
 - 17 Jeff Y C, Pan J M, Tenenbaum. An intelligent agent framework for enterprise integration[J]. IEEE Trans on Syst, Man and Cybernetics, 1991, 21(6): 1391~1408
 - 18 Pancarella C, Hazelton A, Frost R. An autonomous agent for on-machine acceptance of machined components[C]. In: Proceedings of SPIE International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, Philadelphia, PA. 1995
 - 19 Lefrancois P, Cloutier L, Montreuil B. An agent-driven approach to design factory information systems [J]. Computers in Industry, 1996, 32: 197~217
 - 20 高国军, 段永强, 张申生. 基于 CORBA 和多代理技术的可重构企业信息系统[J]. 计算机集成制造系统, 2000, 6(3): 25~29
 - 21 Garey M R, Johnson D S, Sethi R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling [J]. Math Oper Res, 1976, 1: 117~129
 - 22 Teti R, Kumara S R T. Intelligent computing methods for manufacturing systems [J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(2): 629~652
 - 23 Monostori L, Markus A, Brussel H V, *et al.* Machine learning approaches to manufacturing[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(2): 675~711
 - 24 Bussmann S. An agent-oriented architecture for holonic manufacturing control[C]. In: Proc of 1st International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. EPFL, Lausanne, Switzerland, 1998. 1~12
 - 25 Bussmann S. Agent-oriented programming of manufacturing control tasks[C]. In: Proc 3rd International Conference on Multi-agent Systems (ICMAS'98). France: Paris, 1998. 57~63
 - 26 Shaw M J. Dynamic scheduling in cellular manufacturing systems: a framework for networked decision making [J]. Journal of Manufacturing Systems, 1988, 7(2): 83~94
 - 27 Parunak V D. Manufacturing experience with the contract net [M]. Distributed Artificial Intelligence, Huhns, M N ed, Pitman, 1987. 285~310
 - 28 Smith R G. The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver[J]. IEEE Transactions on Computers, 1980, C-29(12): 1104~1113
 - 29 Butler J, Ohtsubo H. ADDYMS: architecture for distributed dynamic manufacturing scheduling[M]. Artificial Intelligence Application in Manufacturing, MIT Press, 1992. 199~214
 - 30 Hadavi K, Hsu W L, Voigt K. ReDS-a dynamic planning, scheduling, and control system for manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1990, 32(4): 332~344
 - 31 Lin G, Solberg J. Integrated shop floor control using autonomous agents [J]. IIE Transaction, 1992, 24(3): 57~71
 - 32 Chen H, Luh P B. Scheduling and coordination in manufacturing enterprise automation[C]. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, USA: San Francisco, CA, 2000. 389~394
 - 33 廖强, 周凯, 张伯鹏. 基于现场总线的多 Agent 作业车间动态调度问题的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(7): 757~759
 - 34 Shen W, Norrie D H. An agent-based approach for dynamic manufacturing scheduling[C]. In: Workshop Notes of the Agent-Based Manufacturing Workshop at Autonomous Agents'98, 1998
 - 35 Wang L, Balasubramanian S, Norrie D. Agent-based intelligent control system design for real-time distributed manufacturing environments[C]. In: Working Notes of the Agent-Based Manufacturing Workshop, Minneapolis, MN, 1998
 - 36 Wiendahl H P, Ahrens V. Agent-based control of self-organized production systems[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 365~368
 - 37 Rowe W B, Li Y, Chen X, *et al.* An intelligent multiagent approach for selection of grinding condition [J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 233~238
 - 38 Jin Y, Lu Stephen C Y. An agent-supported approach to collaborative design [J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 107~110
 - 39 殷勇, 蔡希尧. 协同设计和多 Agent[J]. 计算机科学, 1997, 24(3): 62~64
 - 40 盛伯浩, 罗振壁, 俞圣梅, 等. 快速重组制造系统的动态建模和结构体系[J]. 中国机械工程, 1999, 10(9): 1055~1060

Agent-Based Intelligent Manufacturing Systems: A State-of-the-Art Survey

Qiao Bing Zhu Jianying

(College of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016, P. R. China)

Abstract Agent and multiagent systems are main research areas of distributed artificial intelligence. Recently the agent technology is considered as an important approach for modeling the distributed industrial systems, and the most natural method to design and implement distributed intelligent manufacturing environments as well as one of the most promising technologies to construct the next generation manufacturing systems. Agent-based manufacturing system is a concrete application of agent technology in the manufacturing. First, the agent and multiagent systems are briefly introduced. Then a state-of-the-art survey for the applications of agent technology in the manufacturing enterprise integration, supply chain management, manufacturing planning, scheduling and control is presented. Finally, the research aspects and the key issues of agent-based manufacturing are discussed.

Key words: multiagent systems; intelligent manufacturing; supply chain management; enterprise integration