

文章编号: 1001-0920(2003)01-0001-06

## MAS 技术在生产调度研究中的应用

赵 博, 范玉顺

(清华大学 国家 CMS 工程技术研究中心, 北京 100084)

**摘 要:** 对 MAS 技术在生产调度领域中的研究成果进行分析, 归纳出 MASS 的基本特征和系统框架。按照不同的技术路线将 MASS 分成实体型 MASS 和过程型 MASS 两大类, 并对两大类 MASS 的代理定义、系统结构和主要代理协商策略等进行具体分析, 同时对两类系统的特点做了比较。最后展望了 MAS 研究的未来发展趋势。

**关键词:** 多代理系统; 生产调度; 多代理调度系统

**中图分类号:** TP18; F273 **文献标识码:** A

## Applications of MAS to production scheduling research

ZHAO Bo, FAN Yu-shun

(National CMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Research results of using MAS technique in production scheduling field are analyzed. The basic feature and framework of MASS are summarized. According to different paths of using the MAS technique, the MASS is divided into two types: entity-type MASS and process-type MASS. The definitions of their agents, the architecture of systems, some important agent negotiation strategy of the two types of MASS are studied in detail with the comparison of their characters. Finally, development of this field in the future is discussed.

**Key words:** Multi-agent system; Production scheduling; Multi-agent scheduling system

### 1 引 言

20 世纪 80 年代以来, 人工智能逐渐成为调度研究的重要方法, 特别是分布式人工智能的发展, 促使生产调度应用系统的研究从传统的集中式转向分布式。其中的 MAS 技术在调度领域的应用研究日益活跃, 已成为一个独特的调度研究方向。

多代理系统(MAS)是从问题的局部概念模型出发, 通过由底向上方式形成的一种分布式人工智能系统。它研究的是一组在逻辑上或物理上分离的代理之间行为的协调, 各个代理具有一定的独立解决问题能力, 它们通过彼此之间的协商共同完成比较复杂的任务。MAS 既能处理单一目标问题, 也可

处理多目标问题, 因其在问题求解方面的潜力, 非常适合于研究复杂生产调度和制造系统优化问题。

十多年来, 学者们运用 MAS 技术进行调度研究, 在研究方法和技术路线上达成了某些共识, 使这方面研究的体系结构逐渐清晰起来。本文的主要目的是对这些研究成果进行分析和总结, 希望能将其中带有规律性的东西提炼出来, 为该领域的进一步研究做一点基础性工作。

### 2 多代理调度系统

作者将应用 MAS 技术的调度系统称为多代理调度系统(MASS)。本文通过对某些重要文献的研究和分析, 归纳出 MASS 的特点和基本结构。

收稿日期: 2001-09-10; 修回日期: 2001-10-29。

作者简介: 赵博(1969—), 男(满族), 辽宁辽中人, 博士后研究人员, 从事网络化制造、CMS 等研究; 范玉顺(1962—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士生导师, 从事企业建模、 workflow 管理等研究。

## 2.1 对以往研究的简要回顾

MAS 技术从 20 世纪 80 年代开始逐步向调度研究领域渗透, 90 年代后呈现出迅速增长的趋势。其中 90 年代初期的一些成果为后来的研究打下了坚实的基础。文献[1]用多代理方法研究了分布式约束启发搜索问题, 并用分布式 Job-shop 调度案例对其效果进行验证; [2]在所提出的框架中将制造系统的各个功能和实体(机器设备、任务、数据库等)都予以代理化, 并采用基于价格机制的拟市场模型等实现代理之间的协商; [3]在分布式调度系统研究中应用了合同网协议<sup>[4]</sup>; [5]将多代理技术应用于一种基于知识的柔性制造系统(FMS)调度。在以上研究中, 文献[2, 3, 5]主要用代理映射任务和资源等实体, 而[1]中的代理则封装了问题的部分求解过程。

90 年代中期, MASS 的研究得到进一步发展。文献[6]提出了以资源和任务作为核心代理的 MASS 结构方案; [7]对这一成果做了进一步发挥, 应用合同网协议来处理一些问题求解过程的临时约束; [8]认为代理可对应于一个组织中不同层次的角色或功能, 因此定义了一个三层次的 MASS 结构; [9]将遗传算法封装到代理当中, 多个代理之间通过协作完成 CM 中 Job-shop 问题的求解; [10]提出的代理是具有学习能力的调度模块, 采用人工神经网络和遗传算法来完成学习过程。这一时期的研究还有[11~15]等。

到了 90 年代后期, 多代理方法已成为调度系统研究方法中的一个重要分支。文献[16]已证明: 生产控制中的各种方法(算法)均可应用于 MAS 结构, 因此出现了一些有特色的以过程代理为主的研究。[17, 18]研究了具有遗传学习能力的 MASS; [19]用基于公共对象请求代理体系结构(CORBA)的 MASS 来解决跨车间的柔性 Flow-shop 问题; [20]定义了能封装各种调度算法的计算代理, 通过对不同计算代理的动态调用和组合来解决复杂的调度问题。

在以资源和任务等物理实体为核心的 MASS 研究方面, 文献[21]用代理映射柔性装配系统的各个执行单元, 通过自主调用一定的调度规则, 并根据其他代理的反应来规划自己的行为; [22, 23]提出以一个任务代理和多个资源代理为核心的 FMS 调度框架, 并使用改进的合同网策略; [24]针对虚拟企业生产调度问题提出一种通用性 MASS 框架, 它能为不同的环境要求定制不同的敏捷调度系统实例。其他以实体为核心代理的研究还有[25~27]等。

## 2.2 对 MASS 基本特征的分析

相对于传统的调度方法和系统, MASS 主要有以下几个特点: 1) 用自主模块构成的分布式结构代替传统的集中式非自主性结构; 2) 实际的调度执行主要通过多个代理协商来完成, 而不是完全的预先计划, 因此具有更强的实时性, 特别适合于动态调度; 3) 针对某个问题使用多种方法来代替传统的单一方法; 4) 更多地用并行计算代替串行计算。

在这些共性的基础上, 不妨用系统的观点, 从 MASS 的要素(即代理)构成、要素之间的关系(协商策略)和系统的总体结构等方面, 对 MASS 做进一步分析。

### (1) 代理的映射对象

不同的代理映射方案基本上可以代表不同的 MASS 技术路线, 因为用代理映射现实系统中的对象决定了整个 MASS 的性质和行为模式。代理映射的对象一般有两类: 物理实体和抽象过程。物理实体是指现实系统中可以独立发挥作用的设备、工具、存储地点等资源或它们的组合, 即代表任务的被加工零件等以物质形态存在的客观现实, 其对应的代理是针对这些实体行为的控制功能模块。抽象过程是指那些具有动态性质的信息变换, 如算法、事务处理过程和功能实现等, 其对应的代理是对这些过程进行封装和规范化处理的智能模块。

### (2) 代理的内部结构

不同角色或作用的代理在内部结构上是有差别的, 但在满足自治性、通信性和独立性等代理基本要求方面则基本上是一致的。认知型代理具有一定的内部状态, 包括知识表示、问题求解、环境分析、通信协议等, 因此其内部大都有知识库、规则库、分析模块、通讯器等; 反应型代理只需对环境信息做出简单反应, 一般只有简单的通讯接口和信息处理模块。

在大多数研究中, 实体代理和过程代理都是趋向于认知型的, 表现为能根据本身的状态、任务目标及环境特征等信息, 在某些规则库的支持下进行推理和决策。只在少数研究中使用了反应型代理, 如文献[25, 28]。

### (3) MASS 的总体结构

MASS 的总体结构表现为代理之间的拓扑关系, 主要有网状结构(图 1(a))、星形结构(图 1(b))和树形结构(图 1(c))。代理映射的对象不同, 可能导致 MASS 总体结构上的差异。

网状结构较为复杂, 在一些实体型 MASS 中应用得较多。它一般表现为资源代理和任务代理之间

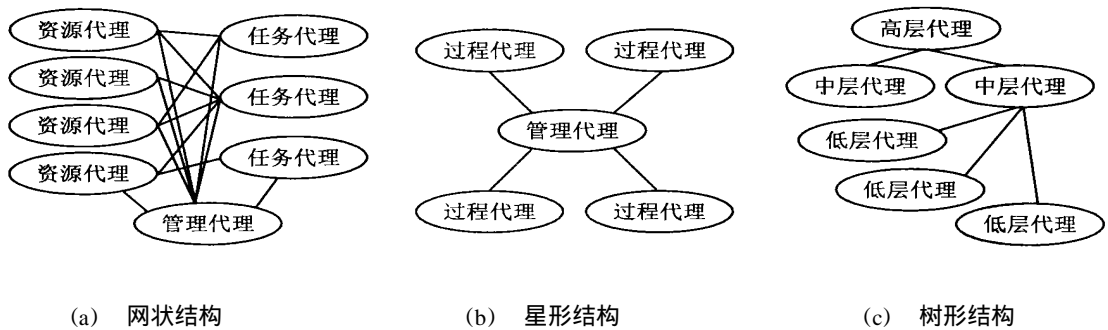


图 1 MASS 的 3 种结构

错综复杂的关系,那些采用合同网协议或拟市场模型的系统更适于采用这种结构。在以过程代理为核心的 MASS 中,那些以多个代理协作求解一个问题的场合适于采用星形结构,如文献[20]采用的是以管理代理为中心的星型结构。树形结构表现为一种系统的层次性,如文献[8, 15]采用的是三层次的树形结构。

#### (4) 代理间的协商策略

系统的代理之间采用何种方式实现协商与整个系统的结构有关。在以实体代理为核心的 MASS 中,合同网协议、拟市场模型或它们的变型等经常被采纳。在以过程代理为核心的 MASS 中,则根据各自的情况采用特殊的方式。

由上述分析可见,根据代理映射策略,MASS 基本上可分为实体型和过程型两大类。下面分别讨论它们的特点。

### 3 实体型 MASS

实体型 MASS 中的代理常常具有较强的人格化特征,每个代理都有自己的愿望、目的和利益等,它们能够判断自己的状态和能力,识别自己的任务,获取和运用知识,并对环境的变化做出对自己有利的反应。它们象市场上的经济人一样,通过协商来实现一种均衡,从而使整个系统的问题得到较好的解决。

#### 3.1 实体代理的划分

实体代理主要根据它所映射的对象在现实系统中的作用或角色进行划分。在调度系统中,系统要素通常分为三类角色:资源、任务和管理者,因此实体型 MASS 中大都用这三类角色来映射相应的代理。

##### (1) 资源代理

一个资源是指至少能完成一个功能的单元或单元组合,单独的机器、工具、夹具和运输装备等这些制造系统中最基本的功能单元都是资源。当它们为

完成某个操作而结合在一起时,也可看作一个资源,甚至可根据问题的需要,把一个车间当作一个资源。资源代理是这些物理资源或它们的控制器在 MASS 中的映射。

资源的主要功能是完成对任务的处理,因此用资源代理来反映所代表资源的状态、目标、能力、行为、运行成本等指标。资源代理有时也用来直接驱动或控制所对应的资源。

##### (2) 任务代理

任务代理映射现实系统中的任务,或者说它代表任务控制功能。任务代理在某些场合也称作作业代理或工件代理。有的研究是随着各个任务在现实系统中的释放动态地生成一个任务代理,有的则用一个统一的任务代理来对应所有的任务<sup>[22]</sup>。

认知型的任务代理为任务赋予了一定的主动性,能够发出处理需求信息,并选择合适的资源来完成对自己的处理。反应型的任务代理<sup>[25]</sup>则只用来动态标定自身状态,激发相关资源代理的进程,本身并不需要有判断和推理能力。

##### (3) 管理代理

管理代理通常用来建立一般代理之间的协作关系或处理一些全局性质的信息,它在某种程度上相当于一个虚拟的车间调度员。管理代理可有多种表现形式:文献[2]定义一个监控代理来监察、收集和分析环境信息,监控资源代理和任务代理的状态,协调它们之间的关系;[6, 22, 23]分别用资源管理器和任务管理器管理多个资源代理和任务代理;[8]中定义的战略层代理用来管理战术层,解决战术代理之间的冲突问题;[12]的工厂控制管理器用来初始化调度活动和维护订单信息等,事件管理代理则用来收集事件并根据事件激活其他某些代理;[25]中管理代理的主要功能是任务规划、管理、协调和监控其他代理,以及更新和维护自身规则库等。

除了上述3种代理之外,在MASS中有时还可根据特殊需要定义其他一些代理,如文献[2]中的知识库处理代理、通信代理和数据库管理代理等。

### 3.2 代理协商策略

代理协商模型代表了一种系统关系结构。在实体型MASS中,最主要的行为特征是资源代理与任务代理之间的对立统一关系,这类MASS通常使用合同网协议、拟市场模型或它们的改进型进行代理间的协商。下面主要介绍这两种协商模型在MASS中的应用。

#### (1) 合同网协议

合同网协议中的代理分为两类角色:管理者和执行者。管理者向多个执行者发出招标信息和处理执行结果;执行者负责具体的任务执行。有时,同一个代理可在不同的阶段扮演不同的角色。

在MASS中,由于对资源代理和任务代理的划分,又产生了两种不同的合同网协商方案:一种是以资源代理为主的合同网协同,这里任务代理不需要很强的智能性,在一定程度上只起到与用户交互的作用,即接收任务<sup>[22,23]</sup>。合同网的作用主要发生在资源代理与管理代理之间,对于没有管理代理的MASS则发生在资源代理之间。另一种是以任务代理为主的合同网协同,这里由任务代理来调配资源代理,合同网的作用在任务代理和与之相关的资源代理之间<sup>[7]</sup>。

使用合同网策略的MASS不一定得到调度的最优解,特别是对那些没有专门管理代理的系统,一般的资源代理不具备对整个调度问题的全局视点,只能做到局部优化。但它适用于实时调度,能够及时处理异常情况。

#### (2) 拟市场模型

拟市场模型是一种基于对策论的协商模型,它把一个MASS环境看作一个开放的市场:任务代理相当于进入市场的买主,它追求自己的某些目标(如时间、成本、质量等);资源代理相当于卖主,它根据自己的状态确定供应价格,向买主出售自己的服务,从而达到利益的最大化或完成整个系统的某些目标要求<sup>[2]</sup>。买卖双方通过市场机制中“看不见的手”不断调整交易价格,达到供求上的均衡,从而实现彼此间的合作。

在这里,任务代理的目标被映射为一系列评价函数,这些函数的权重可依据系统状态和一些外部条件动态地调整;而资源代理则依据自身能力和系

统的某些状态来调整自己的供给价格,一个协商过程通过各个任务代理与各个资源代理之间不断讨价还价而完成。

文献[12]运用拟市场模型模拟了拍卖市场,该模型所构造的系统是事件驱动的,当新任务到达系统或一个资源代理完成一项任务时,拍卖动作就被激活。

相对而言,拟市场模型比合同网更为灵活。拟市场模型中资源代理和任务代理都具有主动性,表现出经济人更多的理性,能自动调整自己的需求价格或供给价格,达成最大限度的妥协,这使它的环境适应能力更强。拟市场模型所模拟的更象一个完全竞争的市场,按照微观经济学原理,一个完全竞争的市场其效率是最高的。但是,拟市场模型中的协商过程和代理结构要复杂一些。正是由于这一原因,在实体型MASS中多采用合同网结构。

## 4 过程型MASS

过程型MASS中的代理统称为过程代理,它们不直接映射现实系统中的实体,而是封装具有局部的和简单求解能力的功能模块或不可分割的计算单元,因此映射范围较为灵活。一段事务处理过程、一种算法和一个活动都可成为映射对象。

过程MASS的行为特征表现为对一个较复杂的系统问题进行分解,或分阶段通过多个代理来解决。代理之间的逻辑关系可分为串行和并行两种:如果是串行关系,那么不同的代理负责问题求解的不同阶段。如果是并行关系,则或将问题分解为子问题,由不同相互独立的代理分别解决;或对问题投标,从一组代理中选择最适当的一个。一个系统中两种关系可以并存。

过程型MASS的研究还没有形成较为固定的结构模式,因此以下结合几个具体的研究实例对这种系统加以介绍。

### 4.1 基于多代理的调度算法集成

文献[16]已论证了生产控制中各种算法与多代理技术相结合的可能性;[20]则提出了基于多代理技术的调度算法集成,即设计一种计算代理,它将某一种或某一类算法与知识库、推理机、通信接口等模块封装在一起,一种计算代理只能解决与该算法有关的问题,对于某个问题,通过其内部的知识库来判断自己是否有能力求解,并向外界做出反馈。不同类别的计算代理加上管理代理共同组成一个MASS(如图2所示),它能在不同的环境和约束条件下,按

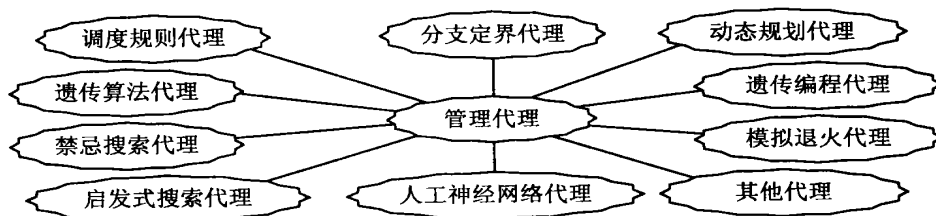


图 2 多代理调度算法集成的结构

照一定的知识调用或动态组合封装不同算法的代理,以求解各种复杂的调度问题。

各种计算代理的内部结构是类似的,不同之处主要表现在算法库和知识库的内容上。同一类算法中的各种具体算法存储在算法库中,它们的应用条件则存储在知识库中。这样有利于用一种基本计算代理模型派生出各类计算代理。

#### 4.2 基于多代理的项目调度

一个项目由多个活动组成,每个活动都受到两种约束:活动在项目中的次序和完成活动所需的资源。文献[28]针对多模式资源约束下项目调度问题提出一种多代理方法,用一个代理对应一个活动,代理的主要任务是获取活动所需的资源。代理产生后先要检索一个记载全局信息的黑板,察看自己的约束条件是否满足,并按一定的规则产生动作。动作完成后,要把可重复使用资源的空闲信息写到黑板上。这里定义了两种代理:

1) 基本代理:一种纯粹的反应型代理,它只能接受环境的刺激而产生无意识的动作,在次序和资源得到满足的前提下,只要发现可行的模式就按该模式激活。

2) 增强代理,它除了拥有基本代理的能力外,还有一定的判断能力,能遵循某些规则选择不同的执行模式。

在项目管理过程中,信息的不确定性较高,实际生产中预算超支和项目延期等都是较为常见的。因此,基于多代理的项目调度研究具有很大的实用价值。

#### 4.3 其他研究

除了上述基于多代理的调度算法集成和项目调度外,还有其他一些研究,下面简要加以介绍。

文献[1]用多代理技术实现分布式约束启发搜索过程,每个代理拥有有限的知识,包括环境、约束和其他代理的需求,可调用的资源也是有限的,因此它们只能做出局部性的决策,全局解则通过代理之间的信息交换并随求解过程的深入而逐步获得。求

解 Job-shop 问题时,一个代理只完成一部分任务的调度,全局性调度则通过代理之间对共享资源使用的协调而实现。

文献[9]用多代理系统来解决计算机集成制造(CM)中的调度问题,全局问题按不同的CM阶段分解为多个子问题,并分派到各个代理上,代理内部封装了遗传算法以进行优化计算。代理通过与环境交互读取任务和资源等数据,代理之间串行工作。最后的代理将全局性结果提交给环境,环境对结果进行评估,然后将评估结果逆向依次反馈给前面的代理,使各代理改进其内部遗传算法的参数,进行新一轮的方案寻优。

文献[19]针对跨车间的柔性装配生产线问题,提出一种基于CORBA的分布式柔性Flow-shop多代理调度系统。多代理系统由一个通讯代理和多个调度代理组成,一个调度代理对应一个车间。通讯代理通过CORBA中间件实现上下游车间的调度代理间的通讯,及时将车间生产的变化情况传达给相关车间的调度代理,并根据这些信息向调度代理推荐适当的调度规则。调度代理则用来执行车间级的调度功能。

#### 5 对未来研究趋势的展望

在调度系统中应用多代理技术,主要是针对不断变化的制造系统环境下较为复杂的调度问题,特别是那些短期的敏捷性较强的动态调度。两种类型的MASS按照不同的技术路线来解决复杂调度问题。在实体型MASS中,实体代理的人格化特征较为明显,它们之间的关系表现为利益驱动下的竞争和妥协;而在过程型MASS中,则突出了不同代理之间的任务分工。

MASS的研究还有许多工作要做,作者认为以下几方面问题尤为值得关注:

1) 理论研究:MASS的研究要充分利用经典调度理论中丰富的算法及其他生产控制技术,调度理论的发展也有赖于吸取MAS技术的思想精华。目

前的调度算法在理论上较为完善,所缺乏的则是应用上的普适性,而MASS恰好提供了这方面的补充。各种生产控制技术,如物料需求计划(MRP)、准时制(JIT)和最优生产技术(OPT)等,在生产实际中已得到广泛的应用,将它们与MAS技术有机地结合起来,有助于开发出更符合生产实际的调度应用系统。

2) 系统开发: 调度研究的实践证明,要设计一个具有固定结构的通用性调度系统是不现实的,但是不同生产系统都是由最一般的实体或过程组成的。在设计调度应用系统时,这些实体和过程恰好可被封装成代理,然后根据需要对它们进行任意组合,这样便构成了一种动态的调度应用系统。它既能适应不同的生产系统要求,也可根据环境的变化及时进行结构调整。

3) 标准化: 代理可以看作一个小型或微型的专家系统,其结构较为复杂,设计一个代理需要相当的工作量。另外,既然代理可以映射最一般的实体和过程,那么就应在现有研究成果的基础上走标准化的道路,按照大多数生产系统的要求建立如资源代理、任务代理、计算代理等标准化结构或参考模型,从而避免代理设计上的重复性劳动。

MAS技术正处于发展中,理论上还有待完善,但这并不妨碍将现有的成果付诸于实践。反过来,MAS在调度等领域的应用,也将对其自身的发展起到重要的推动作用。

#### 参考文献(References):

- [1] Katia Sycara, Steven F Roth, Norman Sadeh, et al Distributed constrained heuristic search [J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1991, 21(6): 1446-1461.
- [2] Grace Yuh-jiun Lin, James J Solberg Integrated shop floor control using autonomous agents[J]. *IIE Trans*, 1992, 24(3): 57-71.
- [3] 刘伟,金雁 基于合同网的作业车间分布式合作调度策略[J]. *上海交通大学学报*, 1992, 26(2): 77-82  
(Liu Wei, Jin Yan Distributed job-shop cooperative scheduling strategy based on contract net[J]. *Shanghai Jiaotong Univ*, 1992, 26(2): 77-82)
- [4] Reid G Smith The contract-net protocol: High level communication and control for a distributed problem solver[J]. *IEEE Trans Computers*, 1980, 29(12): 1104-1113
- [5] Klaus Fischer Knowledge-based reactive scheduling in a flexible manufacturing system [J]. *IFIP Trans Comp Appl Tec*, 1993, B(15): 1-18
- [6] Carlos Ramos An architecture and a negotiation protocol for the dynamic scheduling of manufacturing systems[A]. *Proc IEEE Int Conf Robot Automat* [C]. San Diego, 1994 3161-3166
- [7] Carlos Ramos Task negotiation for distributed manufacturing systems[A]. *Proc IEEE Int Symp Assembly Task Planning* [C]. Pittsburgh, 1995 259-264
- [8] Carla P Gomes, Austin Tate, Lyn Thomas Distributed scheduling framework[A]. *Proc Int Conf Tools Artif Intell*[C]. New Orleans, 1994 49-55
- [9] Koji Morikawa, Takeshi Furuhashi, Yoshiki Uchikawa Evolution of CM system with genetic algorithm [A]. *IEEE Conf Evolut Comput Proc* [C]. Orlando, 1994 2: 746-749
- [10] Rachel Lau, Joel Favrel Intelligent scheduling agent for distributed decision making[A]. *Proc IEEE Conf Decision Control*[C]. Kobe, 1996 4: 3849-3850
- [11] Kap Hwan Kim, Jong Wook Bae, Joon Yub Song, et al Distributed scheduling and shop floor control method[J]. *Comp Ind Eng*, 1996, 31(3-4): 583-586
- [12] Kap Hwan Kim, Jun Yeob Song, Ki Hong Wang Negotiation based scheduling for items with flexible process plans[J]. *Comp Ind Eng*, 1997, 33(3-4): 785-788
- [13] Kouiss K, Pierreval H, Mebarki N. Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling[J]. *J Intell Manuf*, 1997, 8(1): 41-47.
- [14] Maturana F P, Norrie D H. Multi-agent mediator architecture for distributed manufacturing[J]. *J Intell Manuf*, 1996, 7(4): 257-270
- [15] Ananda A L, Tan G S H, Lau L F. Distributed scheduling algorithms for the astra virtual machine [J]. *Australian Comp Sci Comm un*, 1997, 19(1): 218-227.
- [16] Albert D Baker Survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: Dispatching, scheduling and pull[J]. *J Manuf Syst*, 1998, 17(4): 297-320
- [17] Siddhartha Bhattacharyya, Gary J Koehler Learning by objectives for adaptive shop-floor scheduling [J]. *Decision Sci*, 1998, 29(2): 347-375
- [18] Pendharkar P C. A computational study on design and performance issues of multi-agent intelligent systems for dynamic scheduling environments[J]. *Expert Syst Appl*, 1999, 16: 121-133

(下转第12页)

## 参考文献(References):

- [1] Goodwin G C, Hill D J, Palaniswami M A. Perspective on convergence of adaptive control algorithms [J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 519-531.
- [2] Wittenmark B, Astrom K J. Practical issues in the implementation of self-tuning control [J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 595-605.
- [3] Narendra K S, Balakrishnan J, Ciliz M K. Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning [J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 1995, 15(3): 37-51.
- [4] Narendra K S, Balakrishnan J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and switching [J]. *IEEE Trans Automat Contr*, 1994, 39(9): 1861-1866.
- [5] Narendra K S, Balakrishnan J. Intelligent control using fixed and adaptive models [A]. *Proc IEEE 33rd CDC [C]*. Vista, 1994. 1680-1685.
- [6] Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models [J]. *IEEE Trans Automat Contr*, 1997, 42(2): 171-187.
- [7] Narendra K S, Xiang C. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models [A]. *Proc IEEE 37th CDC [C]*. Tampa, 1998. 3978-3983.
- [8] 王昕, 岳恒, 柴天佑, 等. 基于多模型切换的多变量直接自适应极点配置控制器 [J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(增刊): 23-27.  
(Wang X, Yue H, Chai T Y, et al. Multivariable direct adaptive pole placement controller using multiple models [J]. *Contr Theory Appl*, 2001, 18 (Suppl): 23-27.)
- [9] 柴天佑. 多变量自适应解耦控制及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 66-74.
- [10] 孙增圻. 计算机控制理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 109-115.
- [11] 夏道行, 舒五昌, 严绍宗, 等. 泛函分析第二教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 135-136.
- [12] Goodwin G C, Ramadge P J, Caines P E. Discrete-time multivariable adaptive control [J]. *IEEE Trans Automat Contr*, 1980, 25(3): 449-456.
- (上接第6页)
- [19] Yu Lian, Ohsato Ario, Kawakami Terujiyu, et al. CORBA-based design and development of distributed scheduling systems: An application to flexible flow shop scheduling systems [A]. *Proc IEEE Int Conf SMC [C]*. Tokyo, 1999. 4: 522-527.
- [20] 赵博. 结构化集成调度系统理论及基于该理论的虚拟车间智能支撑平台的体系结构研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [21] Chen Y Y, Fu L C, Chen Y C. Multi-agent based dynamic scheduling for a flexible assembly system [A]. *Proc IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. Leuven, 1998. 3: 2122-2127.
- [22] Ouelhadj D, Hanachi C, Bouzouia B. Multi-agent system for dynamic scheduling and control in manufacturing cells [A]. *IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. Leuven, 1998. 3: 2128-2133.
- [23] Ouelhadj D, Hanachi C, Bouzouia B, et al. Multi-contract net protocol for dynamic scheduling in flexible manufacturing systems (FMS) [A]. *Proc IEEE Int Conf Robot Automat [C]*. Detroit, 1999. 1114-1119.
- [24] Rabelo R J, Camarinha L M. Multi-agent-based agile scheduling [J]. *Robot Automat Syst*, 1999, 27(1): 15-28.
- [25] 王艳红, 尹朝万, 张宇. 基于多代理和规则调度的敏捷调度系统研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2000, 6(4): 45-49.  
(Wang Y H, Yin C W, Zhang Y. Multi-agent and rule based dynamic scheduling system for agile manufacturing job shop [J]. *Comp Integ Manuf Syst*, 2000, 6(4): 45-49.)
- [26] Brun A, Portoli A. Agent-based shop-floor scheduling of multi-stage systems [J]. *Comp Ind Eng*, 1998, 37(1): 457-460.
- [27] Weiming Shen, Douglas H Norrie. Dynamic manufacturing scheduling using both functional and resource related agents [J]. *Integ Comp Aided Eng*, 2001, 8(1): 17-30.
- [28] Knotts Gary, Dror Moshe, Hartman Bruce C. Agent-based project scheduling [J]. *IIE Trans*, 2000, 32(5): 387-401.