基于多Agent的柔性作业车间动态调度系统的设计与研究

随着全球制造化和信息化的普及，制造业面临着技术革新和竞争加剧带来的多重挑战，面对分布式的制造资源、随机订单、频繁的订单更改以及设备故障等种种动态多变的因素，制造企业需要迫切地提高自身的管理和服务水平。调度系统作为车间调度管理的重要模块，需要综合考虑多方因素，包括对制造资源、产品工艺的管理，订单调度方案的生成以及对诸如设备故障等异常因素的响应等等，系统的架构设计和调度策略、重调度策略的配置等对构建一个具有自主性、自适应性、智能化的分布式制造环境有着至关重要的作用。

现代车间调度系统趋向于智能化、自动化、信息化，而多Agent理论作为人工智能领域的分支，通过对大型复杂任务进行分解，针对每个子任务设计对应的Agent，构建多Agent系统，系统通过各Agent之间的交互协调来快速灵活地完成任务。本文在车间动态调度的研究中应用了多Agent理论，设计了一种基于多Agent的车间动态调度系统，旨在提高制造业生产效率的同时，提高车间制造的稳定性。

1. 绪论

1.1 研究背景

（经济全球化—竞争激烈—生产调度系统很关键—学者研究：传统/新型—提出Agent）

（生产调度关键—生产环境充满不确定性—提出分布式人工智能—提出从调度系统的角度解决问题）

（自己的：提出当前制造业面临的困难（竞争激烈、生产模式、分布式、动态不确定性）--生产调度很关键—当前算法和系统的不足—提出多Agent调度系统）

我国现代制造业面临着愈来愈激烈的竞争，一是由于经济全球化的影响，制造企业需要在全球化舞台上跟来自世界各地的企业竞争，这带来了更大的市场和机遇的同时，也要求企业在制造和管理上需要作出变革，适应全球化的竞争潮流；二是随着经济的发展、生活水平的提高，人们的消费观念和习惯有了很大的转变，对多样化和个性化的商品给予了更多的关注，因此商家需要根据市场需求不断推陈出新，调整经营策略，更换出售商品的种类和结构，对应的，制造企业在生产模式上也发生了很大的转变，传统的“小品种大批量”生产模式已被逐渐摈弃，取而代之的则是面向订单的小批量多品种甚至是单件生产。这导致了制造业传统的面向大批量的长时间跨度的静态生产调度方案已经不再适用，而是要充分考虑市场需求的动态变化，能够灵活响应随机订单、紧急插单等情况，同时要快速生成满足交货期的调度方案。除此之外，制造业所处的生产环境充满不确定性，面临包括急插单、原料紧缺、设备故障等多种异常因素，这对制造业在快速调整调度方案，尽可能满足订单的交货期、保证系统稳定性上无疑有了更高的要求。

为提高我国制造业的发展水平，除了需要在生产技术和设备配置上进行改进外，还需要在生产管理上进行优化，而生产调度作为车间制造的核心，一直是制造领域的研究热点。相比于渐趋成熟的生产技术，生产调度涉及的改进所需成本和人力更小，且效果同样显著，因此吸引了众多研究人员的关注。尽管如此，生产调度依旧是制造领域的难点，这是由于其涉及的方面广，问题规模庞大，异常因素多且解决难度大，因此至今仍未有十分成熟通用的调度系统能够广泛应用到制造业中。

传统的生产调度系统属于集中控制式的静态调度系统，特点是制造资源集中、生产规模庞大、时间跨度长等，主要面向种类单一、工艺结构简单的产品制造，该形式的调度系统简单地把管理、控制、监控等功能交由人力负责，因此容错能力和稳定性低，当生产过程中发生如原料短缺或设备故障等情况时，往往需要对整个生产线进行停工处理，显然集中控制式的静态调度系统是无法满足现代制造业的要求的。现代制造业使用较为广泛的调度系统为递阶控制式的调度系统，属于智能控制和动态调度理论的早期成果，该形式的调度系统的特点是分层管理，决策单元位于上层，对下层单元进行管辖和监控，信息传递通常由上层经过多层迭代传输至目标单元。对比集中控制式的调度系统，强化了管理控制职能和信息反馈速度，但是对于规模庞大的复杂系统而言，递阶控制式意味着系统的层次会过深，各层次间单元的通讯需要经过多次中转处理，灵活性较低，效率不高，这将导致系统在应对环境的动态异常因素时不够灵敏。为克服以上不足，同时还需要考虑到当今大多数企业制造资源的分布式特点，即一家企业在世界各地设有工厂车间，如何综合利用不同地理位置的制造资源和生产技术，对提高制造业的生产效率和资源利用率是非常关键的。由此，制造业的生产调度系统更趋向于向智能化、信息化的方向发展，同时应强调系统的分布式协调和控制能力，提高系统的自适应能力和稳定性，从而保证系统的容错能力。

近年来，与Agent相关的理论在制造领域一直备受关注，主要原因在于单个的Agent能够自主地获取来自外界的信息，感知周边环境的变化，从而根据自身需求作出反应。每个Agent都被赋予一定的学习能力，这取决于Agent的计算能力和配置的决策规则，在与外界环境交换信息的同时，能够收集自身需要的数据，强化自主学习能力。考虑把多Agent理论应用到车间调度系统上，根据生产管理中各个流程的结构和功能，把其中的物理实体或算法逻辑封装为具有不同功能和结构的Agent，构建多Agent系统，通过Agent之间的交互协调，能够快速灵活地完成任务，Agent的这些特点，能够很好地满足车间调度系统在灵活性、自适应性、分布式上的需求。

目前多Agent理论已经较为成熟，但能成功应用多Agent理论并正式投入市场使用的车间调度系统仍很少，这主要是由于调度问题涉及方面广，难度大，因此如何把理论与实践相结合，构建满足市场需求以及实际生产需要的调度系统，仍然是广大研究人员急需解决的一个难题。本文的研究重心在于综合考虑现代制造企业的分布式资源，所面临的动态变化的生产需求以及干扰正常生产的异常因素，应用多Agent理论设计一个分布式的动态车间调度系统。

1.2 车间调度问题的描述和分类

车间调度问题可以描述为在生产资源一定的前提下，如何把这些资源分配给特定时间范围内的不同生产任务，以达到完成一个或多个目标的目的[1]。更具体地，车间调度问题可以表示为把n个工件安排在m个设备上进行加工，其中每个工件从加工到完成需要经历若干道工序的加工，工序间存在顺序约束；每个设备能够对若干道工序进行加工，对应不同的完成时间，而调度目的就是如何定义设备的分配、工件工序的加工顺序以及工序的开始和结束时间，以达到一定的优化目标，因此车间调度问题的实质是全局考虑若干生产任务的约束条件，按照一定的策略制定资源的分配以及任务的生产顺序，最终满足生产任务在一个或多个目标上的期望值。这里的约束条件主要由生产环境以及生产任务的特点所提供，例如生产设备的加工能力，有些设备只能对单一工序进行加工，有些设备能够对若干工序进行加工，对应不同的完成时间；生产任务上的约束主要体现在工艺约束上，存在生产工艺固定的工件，也存在生产工艺可选的工件，后者在工序的前后顺序选择上存在多个可选分支，并且每道工序可以在多个设备上进行加工，对应不同的完成时间，因此具有更多的柔性。在车间调度的目的上，存在多种优化目标，包括在满足交货期的前提下，最小化最大生产时间、成本最低或者在可容忍任务延期的情况下，最小化延时总和等等。

根据制造业生产系统的特点，车间调度可以分为以下几种类型：单机调度、多机调度、流水车间调度、作业车间调度。单机调度是最简单最早期的调度种类，所有工件的生产加工都由一个设备来完成；多机调度是相对于单机调度而言的，区别体现在生产设备的数量上更多，单一工件的加工同样只需要由一个设备来完成，但是由于相同功能的设备更多，因此效率上更高。单机和多机调度灵活性较低，不存在柔性，属于早期生产力较低下的调度方式，已不适用于现代制造业；流水车间调度和作业车间调度细化了生产流程，强调设备的职能分工，对于工件中的每一道工序都会分配特定的设备来进行加工。其中流水车间调度中所有工件都有相同且固定的加工工艺，每个工件有着严格的工序顺序约束，需要按照特定的顺序经过每一个设备，这些设备就组成一条流水线，若存在功能相同的设备可并行运作，则其中的工序可选择任意一个设备，可选择的设备数量越大，则系统具备的柔性越多；而作业车间调度中，每个工件的工艺路径可以是不同的，工件与工件间也不存在排队间的顺序约束，由于可能存在多个可选工艺路线的情况，甚至即使是同一种工件，在设备选择上也存在多种形式，因此当设备规模较为庞大、工件加工工艺复杂时，作业车间调度可看作是柔性作业车间调度。

流水车间调度在上世纪八十年代以来一直是众多车间工厂最主要的调度方式，尤其适用于大批量小品种的长期静态生产，极大地降低了人力成本，使生产力得到高速提升。但由于现代市场商品生命周期更短，需求动态变化，制造业的生产模式逐渐转向面向订单的小批量多品种生产模式，因此具备更高灵活性和更多柔性的作业车间调度已逐渐成为主流。加上生产环境中存在订单随机、紧急插单、资源短缺、设备故障等诸多异常因素，车间调度要具备快速响应能力，本论文的研究重心正是面向柔性车间调度的动态调度系统。

1.3国内外研究现状

自1954年，Johnson开展对基于两台机床的flow shop型调度问题的研究后，便逐渐引起实践人员的广泛研究。但随着时代的变迁以及生产力的发展，车间调度的种类越来越多，从最原始的单机调度、多机调度过渡到广泛的流水车间调度和作业车间调度，对应的调度模型越来越复杂，难点越来越多，因此关于车间调度的大部分研究是针对某个方面展开的，例如调度算法、重调度算法的优化、调度系统结构的调整等等。

在研究方法上，最初是集中在整数规划、多目标优化、仿真和简单规则上，这些经典的调度方法在应用中存在很大的局限性，如难以建立准确约束条件下的数学模型，并且求解最优解时间是随问题规模呈指数成倍增长的NP一hard型，因此只能对小规模的系统求解。近年来，随着各种新的相关学科与优化技术的建立与发展，出现了许多新的优化方法，如神经网络、遗传算法、基于知识的方法、基于离散事件系统(DED)S的解析模型和方法等。值得关注得是，人们将这些优化方法有机地结合起来，如遗传算法与调度规则、仿真与基于知识的方法等结合，在一定程度上达到了一种较为科学有效的调度效果。  
但是随着顾客需求的个性化及要求企业响应市场的敏捷化，往往在生产加工过程中加入了更多的不确定性及复杂性约束，这些使得上述的调度思想难以适合敏捷化制造的要求。

近年来，随着对DAI和先进制造系统的进一步研究，表明拥有较高的智能性、灵活性和良好的合作能力的Agent之间彼此协作的分布式制造系统可以快速地响应环境变化。多Agent放松了对集中式、规划和顺序控制的限制，提供了分散控制、应急和并行处理，提供更快速的问题求解。这样，制造系统便可以通过分布在车间里的资源和个体Agent之间的联合来实现系统的集成。近些年来，各国纷纷将Agent理论和多AGENT技术应用于制造车间调度问题的研究上，己经取得了一定的研究成果，建立了各种各样基于Agent的调度原型或仿真系统。

国外的研究机构已展开了对基于Agent调度系统的研究，日本、美国、和欧洲在DIA及其应用研究处于世界前列。Hadvai等出的分布式实时调度的多Agent系统结构REDS;Baker等研究了包括调度在内的工厂控制算法在分布分层结构的多Agent制造环境中的实施问题；Shaw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，将作业以子合同的形式转包给其它制造单元;Chen等采用Agent技术进行制造调度与供应链协调研究;Butler等提出了用于分布式动态调度的多Agent体系结构，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;这些系统都引入了Ageni概念对制造车间生产过程加以分析，但并没有一个切实可行的基于多Agent的调度原型系统。

Norrie等列举了近30个国际上已经开展或正在进行的运用Agent技术进行制造规划、调度及控制的研究项目。从这些研究项目可以看出，运用Agent技术进行制造规划与调度等问题的研究，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通讯协议将它们连接成一个多Agent系统，然后，采用多Agent系统理论和方法对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。

在1994年的一项国际合作研究项目“智能制造系统研究计划”提出的六个研究方向当中，合弄制造系统HMS是比较有影响的一种思想，它偏重于利用人工智能技术研究新的未来灵活制造模式，具有合作性、自治性和智能性。在具体实现方式上与分布式人工智能中Agent十分相似，目前的HMS的实验系统全部是借助于多Agent系统技术实现的，研究尚处于起始阶段，还无法在大中型制造系统中实际应用。虽然HMS的自治性及合作能力有赖于DAI技术的支持，但Agent建模协作机制在其中并没有太多体现。

国内的对Agent的研究近年来也相继开展开来，尤其是大学己展开这方面的研究。华中理工大学在国家自然科学基金重点资助项目(5935090)支持下，成功地以数控加工系统为背景，开发了一个基于Agent分布式网络化IMS调度原型系统，实现了制造单元的柔性智能化与基于网络的制造系统柔性智能化集成。此外，沈阳自动化所在多智能控制器研究与设计中，把Agent及多Agent模式应用于多机械手、多机器人的协调与协作设计中，开发了基于多Agent的多机器人协调调度系统，已取得了阶段性成果。我国“八五”期间也有一些高校和研究机构如清华大学、上海交通大学、西安交通大学、北京机械工业自动化研究所等进行此类问题的研究，并己开发出相应的计算机宿主生产调度与管理系统，逐步从理论研究阶段走向应用阶段。这表明国内越来越多的研究人员开始进驻Agent技术和应用制造系统调度问题的研究。

回顾以往的研究历程，我们发现在早期的研究中，生产调度往往被抽象描述为一个有性能指标、有约束条件、寻求最优解的数学问题。但由于其实质上是一个NP难题，即随着问题规模增大，寻求最优解的计算量呈指数增长，使得一些常规得优化方法难以奏效。因此，激发了很多研究者致力于“优化调度”的研究，试图解决调度算法的求解速度和求解质量等问题。

随着研究的深入和制造系统的发展，特别是柔性制造系统、计算机集成制造系统的应用，实际生产系统的复杂性和动态性增加，促使人们进一步研究能够处理生产环境的不确定性和意外时间的生产调度技术，使得调度目标变成柔性调度。可见,面对现代制造的复杂要求,如果依然遵循传统的调度研究方法和思路,单纯通过研究某些算法的改进和扩展等努力来解决,是达不到预期的效果的,需要从系统的角度出发,采用新的思路研究理想的调度系统模型、合理的调度系统结构以及能够集成经典的调度方法的先进调度策略和方法。这是生产调度系统适应未来制造需要的必然发展趋势,也是制造控制理论和技术发展的必然趋势

2 基于多Agent的柔性作业车间调度系统结构的设计

一个车间调度系统是否具备实用价值，可以从系统的通用性去衡量，即调度策略能否广泛应用于多种调度模型，当出现新的调度模型时，调度算法和重调度算法是否可以无缝替换甚至只需少量修改便可重新适应；系统在产品信息、工件工艺约束的表现形式能否适用于各种产品；系统能否快速响应工艺信息、设备节点信息的增删查改等等，这些都要求系统能在各类型的生产环境下均能保持高稳定性、可适应性和可扩展性，因此关键在于对系统功能的划分和结构的设计是否合理，本章将主要阐述Agent和多Agent的基本理论，同时根据调度系统在订单任务输入、调度和重调度、故障检测等多个方面对系统的结构进行分析，最终应用多Agent理论设计分布式的动态调度系统。

2.1 Agent与多Agent理论

2.1.1 Agent理论

尽管Agent在众多研究中应用非常广泛，在理论上已渐趋成熟，但目前对Agent并未有统一的标准。Agent通常也被称为智能体，属于人工智能领域，因此人们关注的主要是Agent的自主性，从这个角度而言，Agent比较主流的定义是Wooldrige和Jennings提供的：Agent属于由硬件和软件两者综合组成的实体，能够和所处的环境进行信息交换，并能够按照特定目标自主采取相应的行动。Agent通常也被认为是“可移动的”，能够根据自身的需求并在在外界环境信息的刺激下作出相应的判断，改变自身的位置，还能够影响周边环境以及其他Agent。尽管现在Agent尚未大范围推广，实际的应用实例也比较少，但是Agent具有大家所公认的以下一些特点：

1. 自主性：拥有支撑自身行为的决策库，具备学习能力，可根据与周边环境的接触扩充决策库，根据决策规则选择对应的行为，可连续动态地改变自身的状态。
2. 社交性：具有通信标识和通信语言，Agent之间具有通信的能力，遵循特定的通信规则可相互交换信息。
3. 反应性：能够时刻感知来自外界的信息而无需特定的信息进行唤醒，能够分析信息的种类和价值，把有用的信息扩充自身数据库。
4. 能动性：不仅能接收外界的信息，同时还能够发起对周边环境的探索，通过主动获取环境信息以及接收其他Agent的信息更改决策库以及位置。

可见，Agent有一定的智能和学习能力，能够根据自身的目的获取、交换信息，从而更改自身的状态，包括决策库的决策规则、数据库信息、地理位置等等。

根据以上Agent的描述，可见Agent不仅具有学习能力，同时具有可移动性，在分布性和扩展性的环境中易于迁移，因此由若干Agent组成的多Agent系统非常适合用于部署分布式系统，对于分布式系统中的各个功能模块或子系统，可以交由单独的Agent或者由若干Agent组成的Agent模块负责，通过多Agent系统间Agent的信息交互，来协同完成各项任务。

2.1.2 多Agent系统的概念

多Agent系统是由Agent组成的具有一定结构和功能的分布式系统。其中的Agent需要承担系统中的部分功能，功能相似或相同的Agent可组成一个Agent组。系统需指定Agent间的通信协议和通信方式。

多Agent系统能够对复杂问题进行分解，分配到相关的Agent，各Agent根据自身的计算能力求解子问题，通过Agent间的通信进行交互协调，最终获取对复杂问题的完整求解结果。与传统集中控制式、递阶控制式的系统而言，多Agent系统部署和维护所需要的成本更低，系统将计算能力和资源分散到一组Agent中，单一的Agent在子问题的计算中对硬件性能的要求较低，减少了对高性能的大型服务器的依赖。同时，Agent能独立于中央服务器运行，能并行处理消息请求以及进行问题求解，因此能有效提高系统整体的稳定性和效率。

Agent的自主性、反应性、能动性等决定了多Agent系统具有更强的灵活性，对外界的变化反应更为灵敏，在环境动态变化频繁的场景中具有更大的优势。Agent作为分布式系统中的节点，由于其具有可移动性，因此对于节点的增删处理反馈更及时，保证系统的高可扩展性，再者Agent的学习能力能够调整自身的状态和行为，随着时间的推进，可以优化求解过程、提高系统整体的求解质量，这相当于延长了系统的生命周期，减少人工干预、维护的成本。

2.1.3 多Agent系统的结构

多Agent调度系统一般存在两种较广泛使用的系统结构，分别是层次型和分布型：

（1）层次型：该结构强调的是节点间的从属关系，属于递阶控制式，Agent间通过分层的形式进行管理，上层Agent负责对下层Agent进行管理和控制，不同层次的Agent进行通信是必须通过层次间逐层传递，位于同一层次的Agent之间可平等自由地通信，因此系统主要通过上层Agent对下层Agent的控制管理来完成任务。该结构具有很多优点，首先是易于扩展，层次的增删或者在某一层次中Agent的增删对系统其它部分影响很小。其次易于系统功能的划分和管理，层次间的从属关系能够规范下层Agent的行为，相同层次的Agent间易于数据共享。但该结构的缺点同样明显，首先是通信效率较低，当系统规模扩大，层次加深时，最顶层和底层之间的通信需要跨越多个层次，延时明显。而且当同一层次的Agent数量过多时，会加重上层节点控制和协调的负担，最严重的问题是，当上层Agent失效时，层次间的通信将被阻断，因此一般通过增加功能相近的可替换节点来预防该情况的发生，可以一定程度上提高系统的稳定性。

（2）分布型：该结构中各节点间不存在从属关系，不需要经过消息中转，相互间可以平等自由通信，系统通过各Agent之间的协调完成任务。对比层次型结构，分布型结构拥有更高的灵活性和扩展性，由于Agent间自由通信，信息可直达，因此效率更高，并且不存在由于某一Agent失效导致局部或全局通信瘫痪的情况。该结构同样存在缺点，由于不存在Agent间的控制从属关系，因此Agent之间数据共享、状态同步更困难，当任务对数据一致性要求很高时，分布型系统效率反而会下降，因此通常会添加专门用于进行数据存取和共享操作的Agent。再者由于信息在任意的Agent之间可达，提高通信效率的同时也可能导致占用过多的通信带宽，这是由于Agent具有自主性和能动性，可以发起对环境以及Agent的探测，若不以约束，可能导致通信风暴，网络阻塞。

通常情况下，可以综合两种结构的优点，兼顾两者在控制管理和通信效率上的性能，因此就有了混合型的多Agent系统结构，该结构为功能相近以及依赖数据共享的Agent组建Agent组，实施局部的控制管理，并且由组内具有管理职能的Agent发起对环境的探索，能够约束系统整体的通信量，同时功能职责分明的Agent之间不设置从属关系，可自由通信，保证系统的灵活性和高效性。

2.2 动态车间调度系统功能与结构分析

车间调度系统最基本的功能在于满足生产任务在时间和经济效益上的要求，尽可能地给出最优的调度方案，并按照方案把任务安排到对应的加工设备上。目前市场需求动态变化、商品更新迭代的周期不断缩短，制造环境也充满诸多异常因素，因此系统的结构要能够兼顾灵活性和稳定性，当生产任务发生变化时，能够动态调整系统结构；当发生各种异常情况时，系统结构中的各单元能够灵活配合，快速反馈。

完整的柔性作业车间动态调度系统应当具备以下功能：一是能够管理订单任务，包括对任务合法性和优先级的判定；二是对订单任务进行分解分配，把任务分解成工件的工序集合，基于各设备原有的加工任务计算各工序的分配方案；三是能够快速响应异常因素，对原有调度方案进行调整。根据以上功能，本文把柔性车间动态调度系统生产管理涉及的工作流程总结为：订单的输入和处理、产品工艺信息的管理、订单任务的分解分配、计算和筛选调度方案、异常检测和开启异常调度。对应以上流程，本文基于多Agent理论，设计了五类Agent，包括管理Agent、资源Agent、工艺Agent、算法Agent、和监控Agent，其中管理Agent负责订单任务的处理以及对系统内的Agent进行管理；资源Agent分为车间Agent和设备Agent，设备Agent对应系统内的加工设备，负责模拟设备的工作进度和状况，车间Agent负责管理分布其中的设备Agent；工艺Agent负责管理系统内产品的工艺信息，为其他Agent提供数据查询接口；算法Agent是对系统内各种调度算法和重调度算法的封装；监控Agent对应系统的监控设备，通过分析监控数据，反馈系统内设备的工作状况。调度系统把其中的物理实体、数据或算法逻辑封装为以上五类Agent，各Agent各司其职的同时，通过Agent间灵活自由的通信，共同完成生产管理的完整流程。

为了保证系统生产管理中各流程能够平滑衔接，信息高效传递，本文对基于多Agent的柔性作业车间动态调度系统的体系结构设计如下。由于现代制造业的资源具有分布式的特点，在世界各地可能均设有加工工厂，各工厂根据生产技术特点有着各自的车间和设备配置，形成了相对独立的生产系统。为了能够联合各个地理位置的制造资源和生产技术，设置了车间Agent对其中的设备Agent进行管理，同时分配子管理Agent协调工厂内的各个车间Agent，因此子管理Agent、若干车间Agent以及对应的设备Agent形成了一个具有层次型结构的资源Agent组。由图可知，全局管理Agent与各资源Agent组存在从属关系，上层Agent对下层Agent具有控制协调的功能，而全局管理Agent、算法Agent、工艺Agent和监控Agent间是平等的关系，能够自由通信，因此本文调度系统的体系结构属于典型的混合型结构，柔性车间调度系统应用该结构具有如下优点：

（1）易于资源管理和系统扩展。资源Agent组的结构符合现代制造系统的资源分布特点，制造业的资源结构基本是以“工厂-车间-设备”的方式进行呈现，一个加工工厂内设置若干车间，每个车间根据所生产加工的产品、零件来配备对应的生产设备，而企业可能在多个地理位置分布有加工工厂，制造业资源的这种分布特点是与层次型结构一致的。系统是基于各设备Agent的仿真数据对订单任务执行分解分配过程的，该过程涉及诸多数据和状态的共享，通过上层Agent对下层Agent控制管理的能力，能够更有效率协调资源Agent间的工作。

（2）系统运行效率高，稳定性强。资源Agent组属于层次型结构，有全局管理Agent进行统一的管理。全局管理Agent、算法Agent、工艺Agent和监控Agent之间是松耦合关系，属于分布式结构，各Agent之间不存在从属关系，消息直接可达，无需经过层次间或中央服务器的消息中转，通信效率高，在协同解决大型复杂的调度任务时更灵活高效。

（3）系统的成本降低。车间调度系统把生产管理的各个功能进行划分并分配到对应的Agent，相当于把系统所需的计算量和控制量分散到各个Agent中，降低了系统对大型高性能服务器等硬件的依赖。

2.3 各Agent功能分析

本文的动态调度系统中各Agent相互配合协调的过程为：全局管理Agent接收来自客户的订单任务，通过把任务中产品对原材料、精度、加工设备等要求与工艺Agent提供的数据进行对比来判定任务的合法性，若合法性通过，把任务进行封装后分发到各个资源Agent组，由对应的子管理Agent负责任务分解，得到若干任务分配的可行解，最终交由算法Agent计算每一个可行解需要的完成时间，从中筛选出最优解作为调度方案。当发生设备故障时，由监控Agent通知全局管理Agent，根据故障类型以及影响执行重调度，调整调度方案。个Agent具体的功能如下：

管理Agent：分为全局管理Agent和子管理Agent。全局管理Agent相当于系统内部的管理员，协调Agent间的通信和任务配合。每个Agent在启动运行后需在全局管理Agent注册自身的信息，该信息是Agent间通信和任务协调的重要依据。其次全局管理Agent作为系统对外的通信接口，负责接收并审核来自客户的生产订单，根据交货期对订单任务进行优先级排序，协调各个资源Agent组进行任务的分解分配工作。全局管理Agent还需负责接收来自监控Agent的故障诊断信息，根据故障类型和影响协调各资源Agent组进行重调度。子管理Agent是系统分配给资源Agent组的管理员，作为Agent组与全局管理Agent通信的主要接口。子管理Agent接收到全局管理Agent传递的订单任务后，根据其下车间Agent和设备Agent的配备结构和加工能力来计算生成若干任务的分配可行解。

资源Agent：资源Agent代表系统内的制造资源，分为车间Agent和设备Agent。设备Agent对应一个加工设备，负责对设备的工作状况进行模拟仿真，仿真的数据作为算法Agent执行调度策略和重调度策略的重要依据，包括对应设备当前工序的加工进度、待加工工序的开始时间和结束时间等。车间Agent对应系统内的一个车间，负责对该车间中的设备Agent进行管理，在订单任务分解过程中，车间Agent根据其中设备的加工能力来生成对应的任务分配方案。一座工厂内的车间Agent和设备Agent构成一个资源Agent组，由子管理Agent负责管理。

工艺Agent: 负责对系统统的产品工艺信息进行管理，为其他Agent提供数据查询服务。该工艺信息用于表示系统所能生产加工的产品种类、产品需要的原材料、产品中各零部件的加工工艺流程以及其中各个工序的机器选择等信息。工艺Agent负责为全局管理Agent审核订单任务提供依据，当任务对设备、原材料、加工精度的要求能够与工艺Agent记录的工艺信息一一对应时，表示任务的合法性通过，可进一步进行任务的分解分配；工艺Agent还负责为算法Agent提供关于工序在设备上的加工选择以及加工时间。

算法Agent: 封装了调度系统内的算法逻辑，为其他Agent提供计算服务。本文的算法Agent封装了两种算法策略，分别是基于蚁群算法的车间调度策略以及重调度策略。当全局管理Agent和各资源Agent组经过任务分解过程，并得到若干工序任务在设备上的分配可行解后，由算法Agent执行调度策略为每个可行解计算完成时间，从中筛选最优的调度方案；当系统发生设备故障时，由算法Agent执行重调度策略，调整调度方案。

监控Agent:代表系统内的检测设备。一方面，监控Agent根据监控设备采集的加工设备工作状态信息，判定故障类型以及故障的影响，并通知全局管理Agent开启重调度过程。故障种类分为两种，分别是工作效率下降和中止运行，前者导致故障设备上工序加工耗时延长，后者导致加工设备停工等待维修。

2.4 各Agent的决策库设计-

Agent属于人工智能领域，具有自主性、能动性、社交性等，这些特点保证了Agent的灵活性，能够相互配合解决复杂问题，同时强调了Agent的智能性，即Agent的学习能力，能够根据自身的目标主动探索周边环境，调整自身状态，这提供了Agent对外界信息的快速响应能力，根据学习能力的强弱可以一定程度上减少人为的干预，提高系统的稳定性。

Agent的学习能力主要由决策库提供，库中配备的决策规则的完善程度决定了Agent学习能力的强弱，并由此可分为三种类型的Agent：

慎思型：需要人工智能领域发展到较高阶段，赋予Agent以较高的智能，对应的Agent具备最强的学习能力，拥有对自身和环境的认知能力。该认知能力关键在于能够根据所接受的信息、行动导致的结果与目标的一致性来调整所配备算法、规则的相关参数，从而改变后续的行为模式，提高目标的完成度以及效率。因此慎思型Agent需要由强大的推理决策能力，无需人工干预。

反应型：不具备或者具备很低的学习能力，在功能上更偏向于是一个程序编程接口，内部封装了提供各种服务的函数，简单地根据决策库中定义的规则来决定自身的行为，运行过程中不会涉及对原有规则的优化，较为被动地等待接收外界的信息请求。

混合型：拥有最强的学习能力，但运行过程中需要结合多方面的信息和规则来进行推理，从而决定自身行为，因此需要更多的计算时间；反应型学习能力低，但是由于行为模式已经事先确定，因此处理速度快。混合型就是结合了两种Agent的优点，兼顾了计算能力以及处理速度。

本文的基于多Agent的车间调度系统并未统一定义Agent的类型，而是根据各个Agent的功能来进行决策库的设计，从而决定Agent的类型。各Agent的决策库设计如下：

（1）管理Agent

全局管理Agent属于混合型Agent,决策规则包括：生产订单合法性审核，根据订单任务对产品的精度、规格、精度、加工设备的要求与工艺Agent提供的数据进行对比；维护任务队列，根据生产订单交货期进行任务优先级计算、排序，出现紧急订单时，调整任务队列；开启并执行订单任务分解分配的全过程，协调各资源Agent组之间的配合；开启并执行重调度过程，当接收到设备故障信息，基于正常设备调整原调度方案；Agent运行状态监测，每隔一段时间，向系统内的Agent发起探询，若连续十次探询均未收到回复，判定Agent运行故障，通知车间管理人员进行检测。

子管理Agent属于混合型Agent。决策规则包括：执行任务分解策略，协调其下的车间Agent任务分解分配的工作，从各车间Agent返回的调度结果中选择用时最少的方案；监控对应资源Agent组Agent的运行状况，如上层Agent与下层Agent间通信是否可达，设备Agent的实时仿真结果与设备实际工作进度的误差等。

（2）资源Agent

车间Agent属于混合型Agent,决策规则包括：接收子管理Agent传递的任务，根据车间内设备的配置和加工能力判定能否完成任务；对车间内满足任务要求的设备所仿真的数据进行封装，提交给算法Agent计算完成时间。

设备Agent属于反应型Agent,决策规则包括：记录对应设备的工作历史数据，如设备的工作状态、已完成的工序种类和数量、读取对应设备的工作进度信息，并与自身仿真的设备提工作进度数据进行同步，控制误差；

（3）算法Agent

算法Agent属于混合型Agent。决策规则包括：根据车间Agent传递的零件工序任务集合以及设备的仿真数据，执行调度策略，计算任务的完成时间；根据全局管理Agent传递的零件工序任务集合执行重调度策略；当算法Agent处于空闲状态时，根据调度方案计算的历史数据，调整算法参数以得到更优的调度方案。

（4）工艺Agent

工艺Agent属于反应型Agent。决策规则包括：向其他Agent提供产品、零件以及工序的信息，如产品的种类以及对应的规格、精度等，零件的加工流程、工序的机器选择和对应的加工时间等；响应系统管理人员对产品工艺的增删查改操作。

（4）监控Agent

监控Agent属于反应型Agent。决策规则包括读取监控设备如机械状态监测设备、机械故障诊断仪的监控数据，判定故障类型和对应的影响，并封装数据返回到全局管理Agent;当设备故障修复后，通知全局管理Agent.

3 基于多Agent的生产任务跨区域分解策略与调度策略

车间调度系统作为现代制造业生产管理的关键，需要解决生产任务在制造资源上的分配和调度问题，满足任务的交货期，减少产品库存。对比传统的多机、流水作业车间调度，柔性作业车间调度问题在生产过程中具备更多的柔性，系统中的产品通常由若干零件组成，一个零件从投入生产到加工完成需要按照一定的顺序经历若干设备，由于零件在加工过程中存在工序的顺序约束，工序加工也存在多个机器选择，对应不同的完成时间，因此零件的加工工艺并不唯一，当零件的工序数量增多、顺序约束更复杂时，零件的工艺路线的数量将呈指数型增长，属于典型的NP-hard问题，这对系统在资源分配和调度策略上有了更高的要求。

本文的柔性车间动态调度系统是基于多Agent的分布式系统，其内各Agent相对独立，并行处理各项子任务的同时，通过信息交换和数据共享，彼此间相互配合，共同完成大型复杂的柔性车间调度问题。本文通过全局管理Agent对多个资源Agent组进行管理和控制，完成生产任务在分布式工厂车间中的分解流程，最终可得到若干加工设备集合，每个集合均能满足完整生产任务对设备的要求；算法Agent执行其中封装的调度策略，基于每个设备组合计算对应的调度时间，全局管理Agent从中选择用时最短的结果最为最终的调度方案。

3.1 基于多Agent的订单任务跨区域分解策略

目前对车间调度理论的研究成果大部分是面向处于在固定地理位置的工厂车间的调度问题，根据零件的加工工艺以及工序的机器选择等约束，执行进化算法、神经网络算法、禁忌搜索算法等来进行任务的分解分配，这对于资源集中的制造系统通常是有效的，但是目前大型制造企业在世界各地均设有制造工厂，各工厂根据自身的技术和设备配置生产对应的产品，对资源分布在不同地区的企业而言，如果仍使用传统的任务分解分配策略，则一个零件的各个加工工序可能会被分配到各个地区的设备上进行加工，这显然是不符合实际的。本文根据制造业资源的分布式特点，设计了一种基于多Agent的订单任务跨区域分解策略，实现分布式资源和技术的综合利用。

调度系统接收到来自客户的生产订单后，根据订单对生产对象的要求封装为若干生产任务。系统把生产任务传递到各个地区的工厂，各工厂根据生产任务跟设备和原材料的需求，对比自身的设备配置和原材料库存来判定是否有能力完成任务。若各工厂均无法独立完成任务，则系统将对任务进一步分解为一组子任务，协调各个工厂的任务匹配过程，直至得到多个满足任务要求的设备集

3.2 生产任务模型

在本文的调度系统中，客户的生产订单通过合法性判定后将被封装为对应的生产任务MT（Manufacturing Task），MT可分为三种粒度的任务，分别是产品级任务PRT（product task）、零件级任务CPT（component tast）和工序级任务WPT（working procedure task），与产品的构造相似，一个产品由若干零件组成，一个零件由一组工序以及工序见得约束组成。PRT、CPT、WPT分别对应产品、零件和工序，工艺Agent中所记录产品、零件和工序均可封装为对应生产任务，即PRT、CPT和WPT。MT的模型表示如下：

MT={MTI,CST,CSN,R}

MTI(Manufacturing Task Infomation)描述了任务的基本信息,使用一个四元组（ID,NAME,TYPE,DESCR）表示，其中的ID是MT的唯一标识；NAME是MT的名称，概括了生产对象的基本特征；TYPE指定了MT的粒度，即MT属于PRT、CPT或WPT。DESCR（Description）是对生产对象的详细描述，如CPT中DESCR描述了零件的精度和规格等信息，CPT中描述了工序加工的注意事项等。

CST（Constraint）描述了MT的生产约束，使用三元组（TIME，COST，QUALITY）来表示，其中TIME为MT对加工时间，即交货期的约束；COST为MT对生产成本的约束；QUALITY为MT对生产质量的约束，如零件在规格、精度上的要求。由于CPT和WPT作为PRT的子任务，因此TIME为空，不指定。

CSN（Construction）描述了生产任务的构成以及子任务的约束关系，例如PRT由一组CPT组成；CPT由一组WPT按照一定的约束关系组成。CSN可以描述为：

CSN={COMP,CRAFT}

COMP={MT1,MT2,...,MTi,...,MTn}

COMP（Composition）是生产任务MT的子任务集合，其中MTi是MT的第i个子任务。当MT的粒度为WPT时，任务无法再分解，因此COMP为空。CRAFT是MT的生产工艺，呈现了子任务完成的顺序约束，例如当MT的粒度为PRT时，CRAFT指定了零件级子任务的生产对象的组装顺序；当MT粒度为CPT时，CRAFT指定了工序级子任务加工的顺序约束。

R（Resource）描述了生产任务MT对资源的要求，表示如下：

R={M,HR,E,T}

其中M（Material）表示生产任务MT对原材料的需求；HR（Human Resource）表示MT在生产过程中对技术人员的需求；E（Equipment）表示可用于完成MT的设备集合；T（Time）与E一一对应，表示每一个机器选择对应的加工时间。

3.3 基于多Agent的订单任务跨区域分解策略的设计

传统的任务分解分配根据客户的生产订单对设备、原材料、精度、尺寸等要求以及产品的工艺约束，建立数学模型，使用如局部搜索、人工智能算法等进行单目标或多目标的调度方案求解，对比使用枚举法的传统算法，更适合用在问题规模较大的车间调度问题上，但随着生产设备的数量规模的增长，满足任务生产需求的设备组合数目将呈指数增长，所需的计算量也会大大增加，这不利于调度系统响应生产需求中的动态变化以及生产环境中异常状况的发生。

本文把任务的分解分配过程进行一定程度的分离，首先根据生产任务MT对资源的需求、任务分解得到的子任务集合以及制造资源的跨地区分布特点，单独进行任务分解过程，即执行基于多Agent的订单任务的跨区域分配策略，得到能够满足任务生产条件的若干设备组合；而后进行任务分配流程，由算法Agent对每个设备组合执行调度策略，生成对应的调度方案最后由全局管理Agent从中选出用时最少的方案。把任务分解单独分离出来，能够大幅减少满足生产条件的设备组合，使调度策略执行时面向的设备规模降低从而减少所需计算量。

本文的基于多Agent的订单任务的跨区域分解策略的执行过程遵循以下原则：

（1）生产任务MT的分解顺序需符合产品结构，按照产品级任务PRT、零件级任务CPT、工序级任务WPT从上往下逐层分解。

（2）生产任务MT分解过程中的传递顺序需符合资源Agent的结构，按照全局管理Agent、子管理Agent、车间Agent的顺序从上往下逐层传递。

（3）MT的粒度与资源Agent组的结构需一一对应。PRT、CPT、WPT分别与SMA、JSRA、MRA对应。当TM粒度大于自身级别时，资源Agent需对TM进一步分解；当TM粒度小于自身粒度时，直接把TM发布至其下的各个资源Agent；当两者级别相同时，判断自身是否有能力完成TM，判断的依据是原材料和设备是否满足TM的要求。

（4）尽量保证生产任务MT的粒度。随着生产任务MT分解程度的加深，最终参与分解的任务粒度将越来越小，极端情况下会导致一个零件级别的生产任务CPT所包含的若干子任务WPT分配到不同地区的生产设备上，在实际生产中，需要把零件在多个地区工厂车间之间进行运输，从而大大提高了各种费用和成本。因此，当某个粒度的任务分解所得到的设备组合能够满足任务的交货期时，不再进行进一步的分解。

基于多Agent的订单任务的跨区域分解策略是由系统内的管理Agent和资源Agent之间的协调和配合来完成的。在生产任务分解过程中，全局管理Agent以得到满足生产任务要求的最优调度方案为全局目的，执行生产任务的跨区域分解策略，为每个资源Agent组指定个体目标，由于全局管理Agent和各资源Agent组之间构成的是层次型结构，上层Agent对下层Agent有控制和指导的作用，便于数据共享、状态同步的同时，能够降低Agent间通信的冗余，通过协调各Agent的决策与执行，从各资源Agent组的计算结果中选取最优的方案来满足全局目标，从而更有效率地完成任务分解。

（1）封装生产任务：

（2）发布生产任务：全局管理Agent把TM广播至各个地区对应的子管理Agent。当不存在能够完成任务的子管理Agent时，全局管理Agent需对TM进一步分解得到若干子任务，对于每个子任务，分别重复任务发布过程。

（3）匹配生产任务：资源Agent根据自身设备的配置来判定是否有能力完成任务并向上层Agent返回计算结果。

（4）筛选生产任务：全局管理Agent从子管理Agent返回的计算结果中选取用时最短的方案，若该方案的满足任务的交货期，结束分解过程，否则对任务进一步分解，把子任务逐一发布到各个子管理Agent。

生产任务分解策略的执行流程如图，该流程可以划分为以下步骤：

步骤一：封装生产任务。全局管理Agent接收到客户的生产订单后，进行订单合法性判定。合法性通过后，根据产品结构按照工序、零件、产品的顺序从下往上进行封装，得到生产任务TM。

步骤二：任务发布。资源Agent把TM广播至其下各个子Agent。

步骤三：粒度判定以及任务分解。资源Agent接收到上层Agent发布的TM，若TM粒度与RA级别对应，RA进行能力判定，即进行步骤四；若TM粒度小于RA的级别，RA直接把TM发布至其下各个子Agent，由子Agent进行能力判定；若TM粒度大于RA的级别，RA需进一步分解TM，得到若干子任务，并逐一把子任务发布至其下的子Agent，即执行步骤二。

步骤四：能力判定。当RA级别与TM粒度相同时，进行能力判定，即根据自身的原材料和设备配置与TM对资源R的需求进行对比，若匹配成功执行步骤五，否则向上层RA返回TM无法完成的结果，执行步骤六。

步骤五：计算调度方案。RA把TM和设备集发送至ALA，由ALA基于TM和设备集合生成调度方案，计算所需的时间，并返回调度方案到上层RA。

步骤六：结果筛选。RA收集到下层子Agent对TM的判定结果，分两种情况进行处理：

（1）所有子Agent均返回无法完成的判定结果。若TM可进一步分解，则对分解得到的子任务集，逐个发布到下层子Agent，即执行步骤二；若TM无法再分解（粒度为WPT），则RA向上层Agent返回无法完成的判定结果，若此时Agent位于最上层，即为全局管理Agent，表明系统无法完成任务，向客户返回判定结果，结束分解流程。

（2）存在子Agent能够完成任务，从返回的结果中选择用时最少的调度方案，返回到商机Agent。若该Agent为全局管理Agent，进行交货期的判定。若该方案满足任务的交货期，则结束分解流程，该方案作为最终的调度方案；若该方案不满足TM的交货期且TM可进一步分解，分解任务后执行步骤二，若TM不可分解，表明系统无法完成任务，向客户返回判定结果，结束分解流程。

4 基于改进蚁群算法的柔性作业车间调度策略

在生产任务跨区域分解过程中，当RA判定自身有能力完成生产任务TM时，RA通过把相关的设备集以及TM发送至ALA，由ALA执行调度策略计算并返回调度方案。尽管在TM分解过程中，遵循尽量保持TM粒度的原则，得到的设备组合的数目以及组合内设备的数量将大大减少，降低了ALA的计算量，但由于柔性作业车间调度问题具有产品工艺复杂、约束多。充满不确定性等特定，因此是典型的NP完全问题，传统的基于枚举法的精确调度算法无法适用。为此，本文的算法Agent中封装的是基于改进蚁群算法的柔性作业车间调度策略。

4.1 制造系统中的车间调度问题

4.1.1 车间调度问题的描述和分类

车间调度问题可以描述为在生产资源一定的前提下，如何把这些资源分配给特定时间范围内的不同生产任务，以达到完成一个或多个目标的目的[1]。更具体地，车间调度问题可以表示为把n个工件安排在m个设备上进行加工，其中每个工件从加工到完成需要经历若干道工序的加工，工序间存在顺序约束；每个设备能够对若干道工序进行加工，对应不同的完成时间，而调度目的就是如何定义设备的分配、工件工序的加工顺序以及工序的开始和结束时间，以达到一定的优化目标，因此车间调度问题的实质是全局考虑若干生产任务的约束条件，按照一定的策略制定资源的分配以及任务的生产顺序，最终满足生产任务在一个或多个目标上的期望值。这里的约束条件主要由生产环境以及生产任务的特点所提供，例如生产设备的加工能力，有些设备只能对单一工序进行加工，有些设备能够对若干工序进行加工，对应不同的完成时间；生产任务上的约束主要体现在工艺约束上，存在生产工艺固定的工件，也存在生产工艺可选的工件，后者在工序的前后顺序选择上存在多个可选分支，并且每道工序可以在多个设备上进行加工，对应不同的完成时间，因此具有更多的柔性。

根据制造业生产系统的特点，车间调度可以分为以下几种类型：单机调度、多机调度、流水车间调度、作业车间调度。单机调度是最简单最早期的调度种类，所有工件的生产加工都由一个设备来完成；多机调度是相对于单机调度而言的，区别体现在生产设备的数量上更多，单一工件的加工同样只需要由一个设备来完成，但是由于相同功能的设备更多，因此效率上更高。单机和多机调度灵活性较低，不存在柔性，属于早期生产力较低下的调度方式，已不适用于现代制造业；流水车间调度和作业车间调度细化了生产流程，强调设备的职能分工，对于工件中的每一道工序都会分配特定的设备来进行加工。其中流水车间调度中所有工件都有相同且固定的加工工艺，每个工件有着严格的工序顺序约束，需要按照特定的顺序经过每一个设备，这些设备就组成一条流水线，若存在功能相同的设备可并行运作，则其中的工序可选择任意一个设备，可选择的设备数量越大，则系统具备的柔性越多；而作业车间调度中，每个工件的工艺路径可以是不同的，工件与工件间也不存在排队间的顺序约束，由于可能存在多个可选工艺路线的情况，甚至即使是同一种工件，在设备选择上也存在多种形式，因此当设备规模较为庞大、工件加工工艺复杂时，作业车间调度可看作是柔性作业车间调度。

流水车间调度在上世纪八十年代以来一直是众多车间工厂最主要的调度方式，尤其适用于大批量小品种的长期静态生产，极大地降低了人力成本，使生产力得到高速提升。但由于现代市场商品生命周期更短，需求动态变化，制造业的生产模式逐渐转向面向订单的小批量多品种生产模式，因此具备更高灵活性和更多柔性的作业车间调度已逐渐成为主流。

4.1.2 柔性作业车间调度问题的特点

在传统的作业车间调度问题中，工艺的加工路线确定且唯一，即工序间的加工顺序、工序的加工时间和所需的加工设备类型是确定的。而在柔性作业车间调度问题中，加工工序具有多个机器选择，对应不同的加工时间。同时由于生产环境充满如随机订单、订单更改、设备故障等动态不确定性，柔性作业车间调度问题在工艺规划时往往会添加更多的柔性，即为工件提供可选的多个加工路线。当制造系统出现异常因素时，工件加工可以灵活替换工艺路线，显著提高系统的动态响应能力。但机器选择、柔性工艺在提高系统稳定性和可适应性的同时，也扩大了调度方案可行解空间，对系统的计算能力有了更高的要求。

柔性作业车间调度问题可总结为把n个工件分配到m台机器上进行加工，其中每个工件存在一种或多种工艺选择，每个工件从加工到完成需要经历若干道工序，工序之间有顺序约束，并且每道工序存在一种或多种机器选择，分别对应不同的完成时间。柔性作业车间调度中工件的工艺规划可以使用网络图表示，网络图通常也成为与或图（AND/OR图），下图使用网络图表示工件的工艺规划。

网络图中首先必定包含一个开始节点S和一个终止节点E，这两种节点仅分别用于表示加工的开始和结束，不包含其他信息。一条完整的工艺加工路线必须始于节点S，终于节点E，一个工件经历一条完整的加工路线后即可完成。其次，网络图中还包含工序节点，该节点用于表示一道工序的加工信息，例如图中节点1、2、3、4等均是工序节点，其中节点6表明对应工序可在设备7、8上进行加工，加工时间分别为23，29个时间单位。节点间的箭头表示顺序约束，例如节点2和节点3之间有箭头相连，表明节点3对应的工序必须在节点2对应的工序加工完成后才能开始。网络图中还有三种节点用于约束工序间的顺序，分别是AND、OR和JOIN节点。AND和OR节点会分出两条以上的加工路线的分支，其中AND节点要求其后的分支都必须选择，而OR节点要求仅能从其后的分支中选择一条。例如节点3为AND节点，存在两条分支：3-4-5和3-6-7，则工序4、5、6、7是工件加工过程中必须经历的；节点9是OR节点，存在两条分支：9-10-11和9-12-13，则仅能从中选择一条分支。此外网络图中的JOIN节点表示分支的合并，每个JOIN节点均与一个AND或OR节点对应。要注意的是，柔性作业车间调度的工艺规划中可以不包含OR节点，此时表明该工件的工艺规划只有一种选择。当所有工件的工艺规划只有一种选择，并且所有工序只有一种设备选择时，该调度问题就是传统的作业车间调度问题。

4.1.3 柔性作业车间调度问题的数学模型

柔性作业车间调度问题的研究中通常作出以下几点假设：

（1）每台设备在任一时刻只能加工一道工序。

（2）每个工件在任一时刻只能有一道正被加工的工序，且工序加工过程中不得中止。若由于设备故障等原因导致必须中止加工，则工件报废，需重新安排另外的同种工件进行加工。

（3）不同工件间的加工互不影响，工件与工件之间没有顺序约束，不同工件间的工序之间也不存在顺序约束。

（4）初始时刻各设备为空闲状态，均可投入生产。

（5）工序在同属一个地区的设备上加工时忽略转移时间。

数学模型中的各个变量定义如下：

（1）n：工件数量

（2）m：设备数量

（3）P={p1,p2,p3,...,pn}：工件集合，pi表示第i个工件

（4）M={ m1,m2,m3,...,mn }：设备集合，mi表示第i个设备

（5）Oi={0i1,0i2,...Oik}:第i个工件的工序集合，其中Oij表示第i个工件的第j个工序

（6）MCij=mcijk: 工序Oij的机器选择集合，mcijk表示工序Oij能在设备mk上进行加工

（7）Tij=tijk：工序Oij的加工时间集合，与MCij中元素一一对应，tijk表示工序Oij在设备mk上的加工时间。

（8）D=di：工件的交货期，di表示的第i个工件的交货期

（9）C=ci:工件的完工时间，ci表示第i个工件的完工时间

4.2 基本蚁群算法

4.2.1 基本蚁群算法的原理

1992年M.Dorigo等研究人员通过观察蚁群觅食过程中的行为，总结了影响蚂蚁行动决策的因素，并由此提出了蚁群算法。蚁群算法属于仿生学的启发式算法，多用于图论中最短路径的搜索问题，算法通过模仿蚁群觅食过程中的行为以及蚂蚁间、蚂蚁与环境间的相互作用规律，使问题求解能够逐渐收敛，得到最优解。

蚁群在觅食过程中存在如下的行为和规律：

（1）蚂蚁从蚁巢出发寻找食物时，会沿途洒下一种化学物质，即信息素。信息素对其他蚂蚁有一定的指引作用，信息素浓度越高的方向，蚂蚁选择的概率越大。

（2）蚂蚁的行为具有一定的随机性。当周围环境没有信息素指引时，蚂蚁会概率性地选取觅食方向；当环境中有信息素指引时，蚂蚁并不完全遵循信息素浓度最高的方向，而是存在一定的概率探索信息素浓度较低的方向。

（3）信息素会自行挥发。随着时间的进行，信息素

会挥发直至完全消失。因此离蚁巢越远，信息素浓度越低。

因此，当一只蚂蚁沿某条路径寻找到食物后，沿途洒下的信息素会吸引其他蚂蚁，这些蚂蚁在行动过程中同样会洒下信息素，吸引更多的蚂蚁选择该路径，随着时间的推移，路径上的信息素浓度将越来越高，这是一个正反馈的过程，因此蚁群总能找到一条连接蚁巢和食物源的路径。又由于蚂蚁的行动具有随机性，存在少数蚂蚁独辟蹊径，选择信息素浓度低甚至没有信息素的方向，当蚂蚁寻找到一条通往食物源更短的路径，吸引其他蚂蚁的同时，由于路径短，所花时间少，残留信息素更多，因此选择该路径的蚂蚁会逐渐增多，最终蚁群会收敛到更短的路径。由此可看出，蚁群觅食过程中信息素的正反馈作用能够指引蚁群寻找到食物，而蚂蚁之间行动中所具备的一定随机性可以使蚁群聚集到最优的路径。

4.2.2 基本蚁群算法在柔性作业车间调度问题中的执行流程

基本蚁群算法遵循蚁群觅食过程中体现的社会性以及蚂蚁和环境间的相互作用，其执行流程如图。可以分为以下几个步骤

（1）定义觅食环境以及初始化蚁群

初始化环境中的起始信息素浓度，定义蚁群的规模、蚂蚁的搜索规则、各蚂蚁的起始位置等。

（2）定义搜索目标

定义蚁群的搜索目标，如蚁巢距离食物的路径最短、单位距离中食物量最大等等。

（3）蚂蚁位置移动

蚂蚁根据环境中各个方向的信息素浓度以及当前环境约束（如障碍物）等概率性地选择自身下一步的位置。

（4）撒下信息素

蚂蚁每进行一次位置转移都需要在所经过的路径中洒下一定量的信息素。

（5）终止判定

蚁群终止搜索的判断依据一般有两个：是否达到搜索目标以及搜索时间。当蚁群搜索时间达到一定值时，终止搜索。搜索时间在算法中一般使用迭代次数表示。

（6）信息素挥发

随着时间的推移，蚂蚁洒下的信息素会按照一定的比例挥发直至完全消失。

基本蚁群算法在根据搜索目标、搜索规则以及信息素浓度等进行概率性位置转移的特点非常适用于旅行商问题（Traveling Salesman Problem, TSP）的求解。TSP定义了n座城市，其中任意两座城市之间均可达，推销员需要从某个起点城市出发，仅访问每个城市一次后回到起点，要求推销员所经过的回路路程最短。TSP等同于在一各完全图中寻找一条路径最短的哈密顿回路，这是典型的NP完全问题，随着完全图中节点数目增加，经典的精确算法无法在多项式时间内进行求解。

FJSP（以最小化最大完工时间为单优化目标）与TSP非常相似：两者均属于图论中的最短路径搜索问题，其中TSP等同于要求在完全图中寻找一条最短回路，FJSP要求在若干工件的工艺规划网络图中寻找一条用时最少的的加工路径；TSP中每个城市只能被访问一次，FJSP中每个工序只能被加工一次；FJSP和TSP同为NP完全问题，精确算法难以求解。

FJSP和TSP之间存在如下几点差异：

（1）TSP中任意两个城市之间可达，若干城市构成了一个完全图。FJSP中同属一个工件的工序之间存在顺序约束，工序的加工顺序必须严格按照约束。

（2）TSP求解的路径是一个回路，达到最后一个城市时需返回到起点城市。FJSP所求的加工路径要求包括每个工件工艺规划网络图的起始节点S和终止节点E，不要求是回路。

（3）TSP求解的路径要求包含每一个城市。FJSP中若所有工件只有一种工艺规划（工艺规划网络图中不存在OR节点），则每个工件的工序都必须加工；若存在工件有可选的工艺规划，由于工艺规划网络图中包含OR节点，因此有可选的分支，存在非必选的工序，因此不要求所有工序都包含在最终的调度方案中。

（4）FJSP中工序存在机器选择，因此在工艺规划网络图中进行状态转移，即从一个节点转移到另一个节点时，需要面临工序的机器选择问题。

为阐述基本蚁群算法在FJSP的执行过程，先对其中的数学符号进行说明：

n: 参与调度的工序个数

O={o1,o2,...,0n} 参与调度的工序集合

m:参与调度的设备个数

M={m1,m2,...,mm} 参与调度的设备集合

MCi=(mci1,mci2,...,mcij) 第i个工序的机器选择序列，mcij表示第i个工序的第j个工序选择

Ti=(ti1,ti2,...,tij) 第i个工序在对应机器选择上的加工时间，tij与mcij按照顺序一一对应

w:蚂蚁数量

N:算法循环次数

Q:每轮循环中蚂蚁洒下的信息素总量

:信息素浓度矩阵, 1≤i,j≤n。τij表示从工序i转移到工序路径上的信息素浓度。

: 各工序间初始信息素浓度

: 信息素挥发因子

: 蚂蚁x在工序i和工序j的路径间洒下的信息素浓度

: 蚂蚁x从工序i转移到工序j的启发式，由工序j的完工时间决定

：蚂蚁x从工序i转移到工序j的概率

：蚂蚁x在工序i时的禁忌池，记录了蚂蚁k完成工序i时走过所有工序

：蚂蚁x在工序i时的可选池，记录了蚂蚁k完成工序i时下一步可选的工序

下面根据FJSP和TSP中的差异对上述符号表示进行细节的说明：

（1）FJSP中每个工序存在机器选择，每个选择对应一种加工时间。例如假设存在两个工序，工序1和工序2，以及三个设备，设备1、设备2和设备3。两个工序的机器选择如下表。由表可知工序1可在设备1和设备3上进行加工，对应的加工时间是3和6；工序2可在设备1、2和3上加工，对应的加工时间分别是2、5和1。表格中的“--”表明工序1不能再设备2上进行加工。因此工序1的设备选择序列MC1=(m1,m3),加工时间序列为T1=（3,5）。同理可得MC2=(m1,m2,m3),T2=(2,5,1)。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 设备1 | 设备2 | 设备3 |
| 工序1 | 3 | -- | 6 |
| 工序2 | 2 | 5 | 1 |

（2）TSP和FJSP中禁忌池Tabu都是用于记录蚂蚁已经走过的节点，但两者中的可选池allowed有所差异。TSP中由于任意两个节点间均可达，因此可选池包含除禁忌池中节点外的所有节点；FJSP中由于工件的工序间存在顺序约束，因此可选池中包含的节点只能是禁忌池节点中的后续节点。例如，假设FJSP需要对如下图中两个工件进行调度，算法执行过程中某只蚂蚁已走过节点1,2,3，即tabu={o1,o2,o3},则根据工序间的约束关系此时allowed={o4,o5}。

（3）蚂蚁在经过的路径需要洒下信息素，随着时间的推移，信息素会自行挥发直至完全消失，因此需要对信息素矩阵进行更新，如下：

其中，为上一轮循环中蚁群在工序i和工序j之间洒下的信息素增量。为上一循环中蚂蚁在在工序i和工序j之间洒下的信息素。

蚂蚁洒下信息素的时机有两种，一种是每次进行状态转移时洒下信息素，另一种是在每轮结束时更新信息素，本文选择后者，如下：

其中Q是定值，Lk是蚂蚁经过的路径总长度，在FJSP中Lk代表蚂蚁走过的路径对应的完工时间。因此完工时间越长的路径，单位长度撒下的信息素量就越少。

（4）蚂蚁x从工序i转移到工序j的概率计算公式为：

其中，是蚂蚁从工序i转移到工序j的启发式，由工序j的完工时间决定，由于工序j存在机器选择序列MCi，因此的计算表达式如下：

为蚂蚁在工序i时转移到工序j的机器选择mcj,k的启发式，是蚂蚁选择mcj.k后工序j的完工时间。

根据以上数学模型，基本蚁群算法在FJSP中的执行流程总结如图。

（1）初始化。定义蚂蚁数量m、初始信息素浓度、优化目标（完工时间等）、最大循环次数N，为每只蚂蚁设置可选池和禁忌池、当前最优路径等。

（2）执行N轮循环。在每次循环开启前，清空所有蚂蚁的可选池和禁忌池，把每个工件网络图的起始节点添加到每只蚂蚁的可选池中。蚂蚁根据环境信息素浓度和状态转移概率公式从可选池中选择下一个移动的节点。选择某个节点后，把该节点加入到禁忌池中，同时把其后续节点添加到可选池中。当所选节点属于OR节点的某个分支，需要把另一个分支的所有节点均添加到禁忌池中。当且仅当每只蚂蚁均经历了所有工件网络图的起始节点S和终止节点E，结束循环。循环结束前需把本轮最优路径与全局最优路径进行对比，若前者更优，则进行替换。

（3）结束一轮循环后，进行终止条件判定。若当前最优路径达到优化目标或者循环次数到达N，可结束算法流程；否则进行信息素更新，并开启下一轮循环。

（4）结束算法流程，输出全局最优路径。

对比传统的精确算法，蚁群算法在逻辑上更简单清晰，不需要建立十分复杂的数学模型，非常适合用于图空间的全局搜索。基本蚁群算法最初是用于旅行商问题（Traveling Salesman Problem, TSP）的求解。TSP定义了n座城市，其中任意两座城市之间均可达，要求找出一条能够连接所有城市的路程最短的闭合路径，同时该路径中每个城市

管理模块：整个系统的管理中枢，为各模块之间的信息传输提供消息中转功能，协调模块间的交互，同时对订单任务进行合法性判断、排序管理，并由此开启调度和重调度流程。

1. 资源模块：表征整个系统中制造资源的分布和结构。该资源专指系统中的制造资源，如机床、机械臂等加工设备，其次资源模块呈现了系统中工厂、车间和设备的分布和组织结构，同时还要对设备的工作状态进行模拟仿真，包括设备的历史工作记录，当前工作进度以及运行状况等。
2. 调度模块：封装了系统所需要的各种算法，用于计算最优的调度方案以及重调度方案。
3. 工艺模块：表征系统所能生产的产品信息，包括产品的基本信息（名称、组成、规格、所需原材料等）、工件的加工工艺。工艺模块在功能上偏向于数据库，管理、更新产品信息的同时为其他模块提供数据查询接口。
4. 监控模块：负责监控设备的工作状态，当存在设备故障时，通知管理模块调整原有调度方案。

从调度流程的角度对调度系统进行模块划分后，需要把各模块相互连接最终形成一个完整的调度系统，这种连接关系呈现的是各模块间的信息流动方向。考虑到柔性作业车间调度系统中工厂的车间结构、车间的设备配置、产品的更新迭代可能频繁发生，因此多Agent系统的结构能够保证系统的扩展性，能够轻易对其中的节点进行增删操作；其次，柔性作业车间调度是典型的NP-hard难题，随着调度规模的增长，需要的计算时间将呈指数增长，在系统易于扩张的同时，还要保证系统原有的灵活性，如模块间以及模块内部个体间的交互仍可维持较高的效率。

2.3 基于多Agent的柔性作业车间动态调度系统的建模

2.3.2 基于多Agent的柔性作业车间动态调度系统的结构设计

本文所研究的调度系统使用的是综合性的混合型系统结构，车间调度系统在功能上可以分为资源、管理、算法、工艺以及监控模块,如图所示，五个模块以分布式的结构构件了完整的调度系统。各模块中的物理实体或算法逻辑均封装为相应的Agent，功能的实现和任务的执行由各个Agent间相互协调完成。与各功能模块相对应，系统中定义了五类Agent：管理Agent，资源Agent、工艺Agent、算法Agent和监控Agent。

资源Agent：对应资源模块，代表系统中的制造资源。资源Agent分为车间Agent和设备Agent。每个设备Agent对应一个加工设备，如机床、机械臂等，用于对设备的加工进度以及状态进行模拟仿真，记录设备的任务队列，即设备当前加工工序的完成进度以及待加工工序安排的开始时间和结束时间。系统的调度过程是基于各设备Agent的仿真数据进行的。每个车间Agent对应工厂内的一个车间，负责对分布于其中的设备Agent进行管理。

管理Agent：对应管理模块，负责

2.4 Agent建模

[009] 所述动态调度系统包括：工艺Agent、管理Agent、监控Agent、资源Agent模块和算法Agent。

[010] 所述工艺Agent对系统的产品工艺信息进行管理，为管理Agent和算法Agent提供数据查询服务。

[011] 所述监控Agent负责采集并分析来自机械状态监测设备、机械故障诊断仪、RFID读取器等设备所采集的工作设备工作进度和状态信息，判断设备的故障类型以及对应的影响，并把相关信息发送至所述管理Agent。

[012] 所述管理Agent负责对全体Agent进行管理监控。管理Agent分为全局管理Agent和子管理Agent。由于企业可能在不同的地理位置设有工厂，为了联合各工厂部门的技术和制造资源，因此系统需为每个工厂分配一个子管理Agent,子管理Agent负责对车间内的所有Agent进行管理。全局管理Agent能够接收客户的生产订单任务，然后对任务的合法性进行判断；子管理Agent能够接收来自监控Agent关于设备工作进度信息，然后发送至对应的设备Agent，与设备Agent的模拟数据进行同步；子管理Agent同时也能接收来自监控Agent的故障信息，把信息发送至

故障设备所属的资源模块后，由资源模块和算法Agent对原有调度方案进行调整，即启动重调度。

[013] 所述资源模块由若干资源Agent组成，资源Agent分为车间Agent和设备Agent。设备Agent负责对其所对应的机床、机械臂等的工序任务队列进行模拟。车间Agent对应工厂内的一个车间，负责对车间内加工设备对应的设备Agent进行管理。当车间Agent接收到来自管理Agent的任务时，根据其下的设备配置与任务所要求的设备进行匹配，若匹配成功，由算法Agent生成调度方案。

[014] 所述算法Agent封装了调度系统内的逻辑方法，可根据系统需求灵活地增加、删除、替换、调整对应算法逻辑。在该系统中，算法Agent至少需要封装两种方法，分别是调度方法和重调度方法，前者计算任务的最小完成时间，生成调度方案，后者当发生订单更改、设备故障等异常因素时，调整原有调度。

[015] 所述工艺Agent管理的工艺信息用于表示系统所能生产加工的产品种类、产品需要的原材料、产品中各零部件的加工工艺流程以及其中各个工序的机器选择等信息。一种产品在结构上由若干零部件装配而成；一个零部件从投入生产到完成需要经过多道工序的加工；每道工序能在若干机器上进行加工，对应不同的完成时间。因此根据产品的结构，工艺Agent对其所存储管理的产品工艺信息分为三个级别：产品工艺信息、零部件工艺信息和工序加工信息。

（1）所述产品由若干零部件组成，对应的产品工艺模型由三元组<I, S,R>来表示，I代表产品信息，S代表产品的零部件组成，R代表约束。产品信息包括产品

名称、产品ID、规格和精度等；零部件组成声明产品的结构；约束表示零部件在生产上的约束关系，若零部件可并行生产，代表该产品的生产具有一定的柔性。

（2）所述零部件需要经历若干道工序的加工，对应的零部件工艺模型由三元组<I,S,R>表示，I代表零部件信息，S代表零部件的工序组成，R代表约束。零部件信息包括零部件名称、零部件ID、需要的原材料、规格和精度等；零部件的工序组成表示该零部件从生产到完成需要经历的工序；约束表示工序的顺序约束。在零部件的若根据该约束可以得到多条可选的工艺路线，表示产品的生产具有一定的柔性。

（3）所述工序能够在若干机器上进行加工对应不同的加工时间，对应的工序加工信息模型由二元组<I,S>组成，I代表工序信息，S代表工序的机器选择。工序信息包括工序名称、ID；机器选择代表能够完成该工序的设备集合以及对应的加工时间。

[016] 本发明所述的工艺Agent通过修改产品工艺模型的约束、零部件工艺模型的约束或工序加工信息模型的约束，能够适用具有柔性或不具有柔性的产品生产，因此具有通用性。

[017] 所述动态调度是通过各Agent间的交互和配合来共同解决任务分解、调度和重调度流程的，各Agent之间的信息交互如下：

[018] 所述工艺Agent能够接收处理如下两类消息请求：

（1）工艺Agent能够响应来自系统管理员对工艺信息的增删查改操作。当系统管理员执行添加新产品操作时，工艺Agent需执行的步骤如下：

S1、若新产品是由系统原有零部件组成的，工艺Agent根据系统管理员对零部件的选择以及指定的约束关系，以所述产品工艺模型三元组<I,S,R>的形式录入

说 明 书

自身数据库中，而后添加完成，结束操作。若新产品在零部件组成上包含工艺Agent所不具有的零部件，执行步骤S2。

S2、若新的零部件是由系统原有工序组成的，工艺Agent根据系统管理员对工序的选择以及指定的工序约束，以所述零部件工艺模型三元组<I,S,R>的形式录入自身数据库中，而后把新零部件与原有零部件组成的新产品录入数据库中，最终新产品添加完成，结束操作。若零部件在工序组成上包含工艺Agent所不具有的工序，执行步骤S3。

S3、工艺Agent根据系统管理员对新工序的信息和机器选择，以所述工序加工信息模型三元组<I,R>的形式录入自身数据库中，而后经过对新零部件、新产品的相继封装得到新产品的信息，至此产品添加完成，结束操作。

[019]（2）工艺Agent能够接收来自管理Agent对产品信息的获取请求，工艺Agent最终返回产品中各零部件所需的设备集。

[020]（3）工艺Agent能够接收来自算法Agent对零部件工艺信息的获取请求，工艺Agent最终返回对应零部件的加工工艺流程，其中主要是工序间的顺序约束以及机器选择。

[021] 所述监控Agent能够发送如下三类消息请求：

（1）监控Agent需定时读取对应设备的工作进度信息，进度信息是指设备正在加工的工序已经完成的百分比，并把进度信息发送至该设备对应的设备Agent，通知设备Agent进行进度同步。

[022]（2）当机械状态监测设备、机械故障诊断仪等监控设备有新数据读入时，监控Agent需要对数据进行分析，得到设备的故障类型以及故障的影响，而后把故障信息发送至全局管理Agent通知其启动重调度。

[023]（3）当故障设备维修完毕可重新投入使用后，返回该信息通知全局管理Agent再次启动重调度。

[024] 所述管理Agent能够接收处理如下三类信息请求：

（1）全局管理Agent能够接收来自客户的产品订单任务，订单中标注了所需生产的产品、产品数量、产品的规格和精度等等。管理Agent需对订单合法性进行判断，先向所述工艺Agent获取任务所要求的产品工艺信息，根据系统的设备配置和库存原材料判断是否匹配，若匹配成功，表示系统有能力生产该产品，然后把任务发送至其下各个子管理Agent;若匹配失败，向客户返回无法完成订单的结果。

[025]（2）子管理Agent能够接收来自全局管理Agent的任务请求，而后把任务分别发送至其下的各个车间Agent，获取到各车间Agent的调度方案后，从中选择用时最短的方案；若不存在车间Agent能够完成任务，子Agent执行基于订单任务的分解与分配方法。

[026]（3）全局管理Agent能够接收来自所述监控Agent的设备故障信息，而后清空故障设备上原有的工序任务队列，向算法Agent发送重调度请求。

[027]（4）全局管理Agent能够接收来自所述监控Agent的故障修复信息，而后把原故障设备重新加入调度集合，再次启动重调度流程。

[028] 所述资源模块能够接收如下两类消息请求：

（1）车间Agent能够接收来自其所属的子管理Agent的任务请求，该任务可能是产品级、零部件级或工序级别的加工任务，车间Agent把任务所要求的加工设备

说 明 书

与自身拥有的设备配置进行匹配，表示该车间有能力完成该任务，然后向算法Agent发起调度请求，计算调度方案；否则，向所述子管理Agent返回任务无法完成的判断结果。

[029]（2）设备Agent能够接收来自监控Agent的的设备工作进度信息请求，而后设备Agent需进行进度同步，即根据该进度信息调整自身所模拟的设备工作进度，以保证模拟数据与设备实际工作进度的误差控制在可接受范围内。

[030] 所述算法Agent能够接收处理如下两类消息请求：

（1）算法Agent能够接收来自所述车间Agent的调度请求，该请求附有参与调度的任务以及设备Agent所模拟的设备工序任务队列，算法Agent先向所述工艺Agent获取任务所要求的零部件加工工艺流程，流程中标注了各工序的顺序约束关系以及对应的加工设备，而后根据设备Agent所模拟的工序任务队列，执行调度方法对零部件任务的工序进行分配，最终得到用时尽可能少的调度方案，该方案最终返回到所述子管理Agent。

[031]（2）算法Agent能够接收到来自所述子管理Agent的重调度请求，该请求附有故障设备集合和故障信息，算法Agent需根据设备故障的类型以及影响程度采用对应的重调度方法，并把重调度方案返回到全局管理Agent。

[032] 同时，本发明还提供了一种基于订单任务的分解分配方法以及面向设备故障的重调度方法。

[033] 基于订单任务的分解分配方法根据企业分布在各地的工厂的生产能力把

订单任务进行分解，以达到联合各工厂的技术和制造资源，提高生产效率的目的，该方法的执行步骤如下：

[1] 基于多Agent的可中断作业车间调度问题研究\_万明谊