说 明 书

**一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统**

**摘要**

本发明公开了一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统，其特点在于，为了能够综合利用制造业的分布式制造资源，提出了一种基于订单任务的分解分配方法。其次，为了快速响应用户的需求订单，制定了基于群体智能算法的调度和重调度方法，而后，为了提高制造业的管理和服务水平，构建了对应的基于多Agent的动态调度系统来加快对环境不确定性的响应能力，该系统由管理模块、资源模块和监控模块三大模块组成，包含管理Agent、资源Agent、监控Agent、工艺Agent和算法Agent。系统内Agent通过对物理设备或算法逻辑的封装，各司其职，通过通信管理模块实现灵活高效的信息交互，在车间生产过程能够快速生成调度方案并响应订单任务以及各种异常因素。

**摘要附图**



权 利 要 求 书

1.一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统，其特征在于：

（1）为合理利用分布式的制造资源，提出基于订单任务的分解分配方法来得到订单任务在制造单元的若干分配可行解，并制定基于智能群体算法的调度方法来对可行解进行计算，根据计算结果筛选得到用时最少的调度方案。

（2）在结构上，该调度系统由管理模块、资源模块和监控模块三个模块组成。基于多Agent理论，系统内包含全局管理Agent、与生产线上各工位设备相连接的设备Agent、与机械状态监测设备、机械故障诊断仪等相连接的监控Agent、管理产品工艺信息的工艺Agent和计算调度方案的算法Agent。各Agent间通过信息交互完成订单任务的调度以及各种不确定因素引起的重调度。

（3）管理模块由若干管理Agent组成，用于管理和监控其它Agent的运行状况；监控模块由若干监控Agent组成，用于采集和分析机械设备的工作状态和故障信息；两个模块中Agent的数目由系统内车间和设备规模来决定。资源模块的主体是设备Agent，主要执行基于订单任务的分解分配方法，为了方便管理，资源模块根据系统内制造资源的结构层次，会为每个车间分配对应的车间Agent以对其下的设备Agent进行管理。

（4）系统内Agent均设有通信管理模块，使用基于TCP的Socket通信方式实现Agent之间的信息交互，该模块由一个线程池和同步阻塞消息队列组成。

（5）当系统内存在设备故障、订单更换等异常因素时，由所述资源模块执行基于群体智能算法的重调度方法，重新规划调度方案。

2.根据权利1所述的一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统，其特征在于，所述的基于订单任务的分解分配方法执行步骤如下：

步骤1：资源模块把订单任务进行封装，标注任务中零部件对设备的要求，通过广播把任务发布到各个车间Agent。车间Agent根据自身所管辖的设备列表与任务中零部件所要求的设备进行对比，若匹配成功，订阅该任务，并把任务和其下的设备集合发送至算法Agent，由算法Agent计算最优的调度方案，该方案最终返回到资源模块，然后执行步骤2。

步骤2：资源模块若能够收到车间Agent的对任务的订阅，表明存在车间能够独立完成完整的加工任务，而无需把其中的工序分配到多个车间，因此根据各车间Agent的订阅结果，从中选取用时最短的方案作为最终的调度方案，结束任务分解分配策略。若不存在车间Agent能够订阅任务，执行步骤3。

步骤3：由于不存在车间Agent能够订阅任务，需进一步进行任务分解。若任务为完整的产品加工任务或者为某一零部件的加工任务，则资源模块能够对任务进一步分解，得到新的子任务集合，对于集合内的每一个任务均需要进行发布/订阅过程，即执行步骤1。

3. 根据权利1所述的一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统，其特征在于，所述的基于群体智能算法的调度方法执行步骤为：

步骤1：建立群体的搜索空间。零部件的加工工艺呈现的是工序间的先后约束关系，根据这种关系形成了一个零部件的工艺流程图。把加工任务集合中各个零部件的工艺流程图的起点相互连接，，由此形成了一个完整独立的有向无环

权 利 要 求 书

图。该图即为群体执行活动的搜索空间，空间的起始点设为S，终点设为E。

步骤2：对步骤1建立的搜索空间中进行路径搜索，具体过程如下：

<1>执行N轮循环，每轮循环开始时生成一个规模为m的群体，群体中每个个体都有一个搜索序列和可选池，搜索序列初始只包含起始点S，可选池初始包含S的后续工序。在每轮循环中执行以下内循环

<1.1>执行内循环1.1：当且仅当群体中所有个体均达到终点E时内循环结束。结束后个体的搜索序列中的工序按照添加顺序即成为该个体的搜索路径，对应一种调度方案。该内循环的执行过程为：每个个体都需要计算可选池中每一个工序的加工选项的概率。产生随机数，根据各选项的概率选择一个工序加入到搜索序列中，并把后续工序添加到可选池中。个体重复该执行过程直至达到终点E，即搜索序列包含终点E。

<1.2>执行内循环1.2：遍历群体中每个个体的搜索序列，搜索序列中工序的添加顺序即为对应个体的探索轨迹，从中选择用时最短的路径；将该最短路径与全局的最优路径对比，若用时更少，则进行替换。

<1.3>执行内循环1.3：遍历群体中的每个个体，根据个体的搜索序列，更新个体对环境信息的影响程度。

4.根据权利1所述的一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统，其特征在于，所述的算法Agent的重调度方法，具体过程为：

（1）启动重调度：监控Agent返回设备故障信息到管理Agent，故障信息包括故障类型、故障的影响（工作效率下降或中断运行）和预估的维修时间。管理Agent把故障信息发送至对应的资源模块，开启重调度。

（2）资源模块构建调度设备集合和任务集合：设备集合包括模块内所有正常设备；任务集合包括所有设备Agent模拟仿真数据中尚未开始加工的工序，同时根据工序间的约束关系构建全局搜索空间。若故障设备仍能运作，只是工作效率下降，也将其归入调度设备集合中，其次根据效率下降的程度，修改相应工序在故障设备上的执行时间。最后，资源模块把设备集合和任务集合发送至算法Agent，由算法Agent执行基于群体智能算法的调度规则，计算调度方案。

（3）当故障设备维修完毕，能正常投入使用后，监控Agent返回信息到管理Agent，通知对应资源模块再一次执行重调度规则，此时的调度设备集合需包含原故障设备，相应工序的执行时间也要恢复到原本的大小。

5. 根据权利1所述的一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统，其特征在于，所述的Agent通信管理模块由一个线程池和同步阻塞消息队列组成。同步阻塞队列并不会真实保存请求，每一个请求的入队操作必须对应一个出队操作。当接收到来自其他Agent的通信请求时，从线程池中获取空闲线程处理消息请求。若无空闲线程，创建新线程。若线程数量已达最大值，执行拒绝策略，丢弃请求并返回通知信息给请求方，要求请求方延迟一段时间后重新发送请求。通信管理模块中的线程池大小需要动态计算，公式如下：

其中，为主机CPU数量，为主机CPU使用率，为线程等待时间，为线程处理请求的计算时间。

说 明 书

**一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度系统及方法**

**技术领域**

本发明属于车间调度控制技术领域，具体涉及一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度系统及方法，用于提高现代制造业的生产效率以及应对制造环境变化的响应能力，合理利用企业的分布式制造资源。

**背景技术**

（1）随着生活质量的提高，人们更加关注个性化和多样化的商品，用户需求显得灵活多变，由此现代制造业的生产已经以面向订单制造为主，订单任务往往是小批量甚至是单件生产，因此制造业面临着订单随机、产品种类繁多、结构复杂等多重困难，这都对传统的车间生产制造的管理水平和客户服务能力有了更高的要求。

（2）现代制造业相对传统制造业在生产经营上有了很大的转变，产品的生产制造呈现分布式的特征，不再局限于单独或少数几个地点，而是可能位于全球任意一个地理位置，这是制造业为了联合各企业各部门的技术和资源所作出的改变。其次，制造业的产品的工艺结构更加复杂，技术含量更高，因此生产过程具有更多的柔性，例如，一个零部件的加工往往存在多个可选的加工工艺，其中的工序能在多台设备上进行，对应不同的加工时间。考虑现代制造业的分布式和具有柔性等特征，如何在世界各地的制造资源上进行生产任务的分配，对缩短产品生产周期，减少产品库存，更好地满足产品交货期有着重大的意义。

（3）现代制造业的生产制造环境充满不确定性：（1）由于工艺复杂或高精度要求可能导致某些零部件在整机测试中不合格需要返工返修，（2）装配生产过程中可能发生设备故障，情况严重时甚至可能导致生产线停止运作。（3）由于订单插入、原料短缺等原因需要对原有生产线调度方案进行变更以重新满足交货期。制造环境中的各种不确定性导致了制造业以往所采用的基于长时间跨度、大批量的不具有柔性的静态调度已无法适应当今的市场变化，如今已逐渐向基于订单的多品种，变批量的生产模式转变。因此，为了提高制造业的生产效率以及对各种不确定性的快速响应能力，市场上急需一种行之有效的动态调度方法以及对应的具有自主性、灵活性、高效性和稳定性的动态调度系统。

现代制造业面临着越来越复杂的制造环境，主要体现在以下几点：

（1）随着生活水平的提高，人们更加关注个性化和多样化的商品，客户需求更加动态多变，企业的生产模式逐渐以面向小批量的订单生产甚至是单件生产为主，因此企业需要解决订单随机、产品种类繁多等制造难题。

（2）企业的制造资源呈现分布式的特征。一个企业可能拥有若干工厂，分别位于不同地理位置，每个工厂的车间结构、设备配置等均可能存在差异。在确定生产调度方案时，需要综合考虑任务在各工厂各车间的分解分配问题。

（3）产品的生产加工过程具有更多的柔性，例如一个零部件的加工往往存在多个可选的加工工艺，其中的工序能在多台设备上进行，对应不同的加工时间。柔性车间调度是典型的NP-hard问题，需要使用合理的调度方法兼顾求解速度和质量。

（4）生产制造环境充满不确定性，如零部件测试不合格需返工返修、设备故障、原料短缺、订单更改等。当以上异常因素发生时，需要对原有生产线调度方案进行变更以重新满足订单的交货期。

目前多Agent系统作为人工智能的热点研究领域，其内的Agent拥有自主性和自适应性，能够通过与其他Agent交互和相互配合来完成大型复杂的任务，同时能根据环境信息快速响应外界的请求，成为了现代柔性车间调度的研究热点。

据查，宁波赛夫科技有限公司申请了“工厂智能车间实时调度系统”专利（专利号：201610403522.5），该专利的工厂智能车间实时调度系统使用智能化和信息化技术对车间生产线、物流运输系统、生产控制系统、报警系统等进行管理，能够有效提高调度系统对工厂的生产管理水平，但其中的报警系统更多是对环境的温度、亮度、空气质量、噪声等进行检测，而没有涉及生产设备的故障信息的采集和分析以及故障引起的生产重调度，同时对车间设备的加入和移除的反馈不够及时，影响了系统的实用性。

中国科学院自动化研究所申请了“基于多智能体的车间自主调度系统和方法”专利（专利号：201611100675.9），该专利的自主调度系统的特点在于为所有工件、设备和物流工具设置对应的智能体，收集生产过程中的数据，发生故障及时报警，能够保证系统的鲁棒性和可靠性，但在生产控制中仅考虑固定位置的一个工厂，没有兼顾企业分布式的制造资源，因此并不是通用性的调度系统。

综上，我国目前的车间调度系统结合各种调度算法一般都能够生成高效的调度方案，但是这些调度方案存在以下问题：（1）基本只针对集中生产控制的制造企业，没有考虑综合利用企业分布在各地的工厂车间的技术和资源。（2）对生产设备、产品工艺信息的增删查改反映不及时。（3）不能快速响应如设备故障、订单更改、原料短缺等异常因素并快速开启重调度。

**发明内容**

[001] 本发明针对当前大部分动态调度方法以及动态调度系统仅考虑设备资源的最优分配，而较少考虑实际生产过程中由于紧急插单、货物搬运以及设备故障等引起的重调度问题，对动态环境的变化响应不及时，影响生产效率。同时也忽略了现代制造业制造的分布式特征，对制造资源的综合利用率不高，导致实用性较低，因此提出一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统。

本发明的目的在于克服上述现有车间调度系统的缺点与不足，提供一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度系统及方法，其基本思想是根据企业工厂车间的制造结构，把其中各模块封装为Agent，对应不同的物理或逻辑实体，通过Agent间的灵活交互和配合，完成订单任务在分布式工厂车间上的分解分配、调度方案的生成、异常状况发生时重调度方案的生成。

[002] 为达上述目的，本发明采用的技术方案是：一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度系统及方法，该系统在架构上主要分为三大模块：资源模块、管理模块和监控模块；在功能上分为六类Agent：管理Agent、资源Agent、监控Agent、算法Agent、维修Agent和工艺Agent，其中资源Agent根据系统的资源的层级结构可进一步分

说 明 书

为车间Agent和设备Agent。资源模块由若干资源Agent和算法Agent；管理模块由若干管理Agent组成；监控Agent由若干监控Agent组成；此外工艺Agent专门作为系统的数据库，提供订单合法性检查和产品工艺信息的数据库查询功能。以下是对资源、管理和监控三大模块的阐述：

[003] （1）资源模块：资源模块代表了制造系统的所有生产设备，该模块根据拥有的设备资源对客户的订单任务进行分解和调度方案的生成，以得到满足交货期的最优调度方案。系统中的每一个机床设备都对应一个资源Agent，因此该模块的核心是一系列的资源Agent。为了体现系统设备资源的层级结构和分布状况，资源Agent进一步分为车间Agent和设备Agent。系统中每一个车间对应一个车间Agent，每一个机床设备、机械臂等对应一个设备Agent。根据从属关系，车间Agent负责管理对应车间中的设备Agent，因此资源模块使用层次型结构，上层Agent(车间Agent)对下层Agent（设备Agent）具有管理控制的权限。

[004] 该模块对于其中每个资源Agent都会分配一个算法Agent，算法Agent用于对若干调度方案进行筛选，从中得出对交货期满足得最好的调度方案。

[005] （2）管理模块：管理模块由若干管理Agent组成，该模块相当于一个虚拟的车间管理员，负责对系统内的所有Agent进行管理，包括Agent的注册和注销、用户订单合法性检验、订单任务优先级的判定、Agent运作状态的监控、系统工作日志的记录等。

[006] （3）监控模块：监控模块由若干监控Agent组成，负责监控生产线上设备的工作状况，进行生产线信息的采集以及故障分析。每个车间根据设备规模大小会配备若干监控Agent，监控Agent连接监控设备，如机械状态监测设备、机械故障诊断仪、摄像头、PLC、RFID读取设备等，对读取到的信息进行分析以判断设备的工作状态是否良好，同时把必要的信息传送到管理Agent。当在数据分析过程检测到设备故障信息，将进一步通知资源模块，根据原有的调度方案重新进行任务分配，即重调度。

[007] 该多Agent动态调度系统是通过所述的Agent的自主性、自适应性、可移动性等来提高系统整体的信息交换能力、降低复杂任务的计算难度以及提高对外部环境变化的响应能力，因此需要通过对所述Agent的模型进行良好的设计才能实现上述目标。在该动态调度系统中，Agent根据功能的不同在内部模型的结构组成上会有所差异，但都基本包括：动态数据库、静态数据库、推理机、调度执行模块和通讯调度模块。以下是各个Agent的具体的内部模型结构以及各部分的功能。

[009]（1）管理Agent：

管理Agent是整个动态调度系统的车间管理员，负责对系统内的Agent进行管理和监控，功能包括Agent的注册和注销、用户订单合法性检验、订单任务优先级的判定、Agent运作状态的监控、系统工作日志的记录等。该类型Agent的内部模型结构如下：

1）动态数据库：记录当前运行的Agent的注册信息，包括Agent的ID信息、类型、状态等；记录系统接收到的订单任务信息，形成任务队列，其中包括各任务的状态、优先级等。

2）静态数据库：包括可生产的产品种类，可用原材料种类和数量、设备加工日

说 明 书

志文件等。

3）注册/注销模块：当有新的Agent添加到系统时，需要在管理Agent中进行信息注册。Agent信息包括ID、IP、端口、种类、运行状态等。AgentID在系统内具有唯一性，不会随Agent位置的改变而更改；由于Agent的可移动性，因此地理位置可能会发生变化，需要记录其IP和端口，作为跟其他Agent信息交换的依据；种类信息如车间Agent、设备Agent、工艺Agent等；运行状态包括运行中、暂停、故障中、中止和已销毁。暂停和故障中的Agent不会收到其他Agent的消息，中止状态的Agent表示Agent的任务已经完成，即将被销毁回收。管理Agent会把动态数据库中被销毁的Agent对应的信息删除。

4）推理机：推理机模块体现Agent的自主性和社会性，通过主动向其他Agent和外部环境发起探寻，获取关于外界的信息。管理Agent的推理规则包括：

a）管理Agent每隔固定时间间隔对其所管辖的Agent发起探测包，若对方在连续十次的探测中均没有回应，将动态数据库中该Agent的运作状况设置为“故障中”；否则根据Agent的回应包更新数据库中的Agent信息。

b）监控所管辖的设备Agent的工作状况，中断资源Agent的死循环、长期阻塞、死锁状态。当设备Agent在最近K次的仿真同步中，产生的平均时间误差远大与设备Agent集合中的平均时间误差，则认为设备Agent的运作异常。对ID为j的设备Agent进行异常判断的条件如下：

若满足上式，表明此设备Agent运行异常，其中表示第i个设备Agent在第k次实时同步中产生的时间误差，为所管辖的Agent总数，为控制系数，在系统中初始化为2。

[010] 设备Agent运行异常的原因包括：系统通讯量过于频繁，消息队列已满，仿真线程获得CPU的机会过低；消息队列中消息的优先级过高，导致仿真线程一直无法得到CPU资源，产生饥饿现象；同一时间过多Agent向工艺Agent、监控Agent发起同步读写请求，临界资源过于激烈。

5）调度执行模块：负责对任务队列和消息队列进行操作：

a）当消息类型为“Order”时，表明有新的用户订单插入，与数据库中的产品工艺信息进行匹配，判断系统当前的设备配置和库存原材料是否有能力生产订单所述的产品。若匹配成功，根据交货期计算任务优先级，生成对应的装配任务，插入到任务队列。

b）当消息类型为“Update\_Product”时，表明接收到工艺Agent所传达的工艺信息和原材料修改消息，同步更新静态数据库中的工艺信息。

c）当消息类型为“Alarm”时，表明接收到监控Agent所传达的设备故障信息，通知资源模块进行故障信息的确认以及启动重调度。

d）当接收到监控Agent所传达的设备工作状态信息，通知其管辖的设备Agent，同步设备Agent模拟的设备工作进度，控制时间误差。

6）通信管理模块：为管理Agent与外界通信提供接口，系统中各Agent的通信管理模块的构造和原理是一样的。该接口使用基于TCP的Socket通信方式，为提高

说 明 书

Agent间的通信效率以及兼顾CPU性能，每个Agent的通信模块使用线程池和同步

阻塞队列来处理来自其他Agent的请求。线程池需设置好初始线程数目，最大线程数目。同步阻塞队列没有容量，每一个请求的插入操作都必须等待一个对应的删除操作，反之亦然。因此Agent接收到的请求不会被真实保存，而是直接提交给线程池中的空闲线程处理，若无空闲线程，则新建线程。若线程数目已达最大值，则执行拒绝策略。这里拒绝策略简单设置为丢弃请求，并返回通知给请求方，要求请求方延迟某个时间后重新进行请求。为了兼顾CPU性能，通过以下公式动态计算线程池的最大线程数目：

线程数目：

其中，为主机CPU数量，为主机CPU使用率，为线程等待时间，为线程计算时间。

[011]（2）资源Agent:

资源Agent表示系统中的车间和设备资源，是资源模块的主体构造。根据生产制造系统的结构，资源Agent分为车间Agent和设备Agent。车间Agent对其下的设备Agent进行管理和监控。资源Agent的内部模型如下，其中的通信管理模块与管理Agent类似：

1）动态数据库：若该Agent是车间Agent，记录所管辖的设备Agent的基本信息（Agent的ID，IP和端口等）；若该Agent是设备Agent，记录对应设备的工作状态（运行中、停止中、故障中、中止，销毁），以及对设备的工作进度进行仿真，实时模拟设备所执行的工序。

2）静态数据库：记录对应设备的能力（可加工的工序类型及对应的加工时间）；记录对应设备的历史工作数据（已完成的工序种类和数等目、发生过的故障类型和次数）。

3）推理机：执行基于订单任务的分配分解方法。车间Agent根据所管辖的设备Agent的能力（能加工的工序类型）来判断是否有能力完成子任务，若能够完成，把所管辖设备集合传达算法Agent，计算所需的调度时间。具体的基于订单任务的分解分配方法的执行过程如下：

步骤1：管理Agent把订单任务以广播的方式发布到其管辖的各个车间Agent。

步骤2：对于接收到的任务，车间Agent检查其下的设备集合能够满足任务对设备的要求。若能够满足，订阅任务，转至步骤3，否则取消订阅，转至步骤4。

步骤3：车间Agent把其所管辖的设备Agent以及任务发送至算法Agent，由算法Agent计算出调度方案以及预计的完成时间，并把调度方案作为订阅结果返回到管理Agent，而后转至步骤4。

步骤4：管理Agent对其所管辖的车间Agent返回的订阅结果进行筛选，若存在车间Agent订阅任务，从中选出完成时间最短的调度方案，结束任务分解分配过程；否则进行任务的分解，转至步骤5

步骤5：若任务是工序级别的任务，则任务已不能进一步分解，系统无法完成该订单，结束调度流程；若装配任务是产品级别或者零部件级别的任务，可对

任务进行分解，得到一个子任务集合。而后把集合内的子任务逐个以广播的形式发布到其下所管辖的车间Agent,执行步骤2。

说 明 书

6）调度执行模块：主要进行对车间设备任务队列的实时仿真。资源模块根据订单任务的进行动态调度后形成调度方案，把产品零部件的生产任务分配到各个设备上，设备Agent需要对所关联的设备的工作状况进行仿真，包括设备正在进行的工序，待加工的工序以及各个工序的开始时间和结束时间。

[012]（3）工艺Agent：

工艺Agent负责管理系统所能生产的产品信息，主要是维护和更新系统的产品工艺以及为其他Agent提供产品工艺信息和库存原材料的查询接口。工艺Agent的内部模型结构如下：

1）静态数据库：记录系统所能生产的产品信息，包括产品的种类、产品的零部件组成，零部件的加工过程，对应的加工设备，需要的原材料等。

2）推理机：对工艺管理员添加的新产品的合法性进行检验。主要检测新产品对设备和原材料的要求是否与系统的设备配置相匹配。

3）调度执行模块：为其他Agent提供工艺信息查询服务。如管理Agent在接收到订单任务时，需要对订单的合法性进行检验，因此需要通过工艺Agent的数据库信息校对订单所要求生产的产品是否在系统的生产能力范围内。

[013]（4）算法Agent:

算法Agent是对调度方法的逻辑封装，根据资源Agent传达的设备集合以及生产任务进行问题求解，得到完成任务的最短时间。算法Agent的内部模型如下，由于算法Agent主要是为资源Agent提供调度方案的求解能力，因此不设有静态数据库模块，以下通信管理模块略去。

1）动态数据库：记录缓存运行期间所查询到的与工序加工信息相关的数据。为了降低通信量，提高工作效率，当动态数据库中存在所需工序信息的缓存时，若缓存的保存时间未超过规定的时间，可以直接使用。

2）调度模块：负责接收来自关联的资源Agent的请求，当所接收消息为“Compute”类型时，表明需要执行调度规则，需要获取设备集合以及任务集合。根据任务集合中与工序相关的信息向工艺Agent发起数据请求。使用推理机的调度策略生成调度方案并把方案的完成时间返回到对应的Agent。

3）推理机：主要包含基于群体智能算法的调度方法和重调度方法。调度方法用于生成调度方案，把各个工序分配到合适的设备上，目的是最小化生产任务的完成时间。推理机根据设备集合和若干道工件工序，按照调度方法给出最优的调度方案，即决定各个工序应当安排在设备集合中哪一台设备，以及应当在哪个时刻开始加工才能使得完成时间尽可能小。当系统面临各种动态不确定，如设备故障、订单更改、紧急订单等情况时，原调度方案将失效，需要执行重调度规则。

[014] 调度方法基于群体智能算法，将生产任务集合M中的零部件的工艺流程图的起点相互连接，得到全局起点S；把终点相互连接，得到全局终点E，由此形成了一个完整独立的有向无环图。该图是群体智能算法中群体进行路径搜索的搜索空间，群体中的个体在起点S和终点E之间探索的路径就是一种可行的调度方案，随着时间的进行，个体将逐渐收敛至其中用时最短的路径，即最终的调度方案。调度过程如下：

步骤1：建立群体的搜索空间。零部件的加工工艺呈现的是工序间的先后约束关系，根据这种关系形成了一个零部件的工艺流程图。把加工任务集合中各个

说 明 书

零部件的工艺流程图的起点相互连接，，由此形成了一个完整独立的有向无环图。该图即为群体执行活动的搜索空间，空间的起始点设为S，终点设为E。

步骤2：对步骤1建立的搜索空间中进行路径搜索，具体过程如下：

<1>执行N轮循环，每轮循环开始时生成一个规模为m的群体，群体中每个个体都有一个搜索序列和可选池，搜索序列初始只包含起始点S，可选池初始包含S的后续工序。在每轮循环中执行以下内循环

<1.1>执行内循环1.1：当且仅当群体中所有个体均达到终点E时内循环结束。结束后个体的搜索序列中的工序按照添加顺序即成为该个体的搜索路径，对应一种调度方案。该内循环的执行过程为：每个个体都需要计算可选池中每一个工序的加工选项的概率。产生随机数，根据各选项的概率选择一个工序加入到搜索序列中，并把后续工序添加到可选池中。个体重复该执行过程直至达到终点E，即搜索序列包含终点E。

<1.2>执行内循环1.2：遍历群体中每个个体的搜索序列，搜索序列中工序的添加顺序即为对应个体的探索轨迹，从中选择用时最短的路径；将该最短路径与全局的最优路径对比，若用时更少，则进行替换。

<1.3>执行内循环1.3：遍历群体中的每个个体，根据个体的搜索序列，更新个体对环境信息的影响程度。

[015] 调度方法的数学模型如下：

1）环境信息矩阵：，其中为参与调度的工序总数

2）个体x在工序i处的可选池：

其中,为群体大小。可选池为个体在选择了工序i后，下一步可以选择的工序集合。

1. 工序j加工选项池：

由于一个工序往往能够在多个设备上执行，因此加工选项池代表一个工序的设备选择集合。

4）个体x在每轮探索后的信息素增量：

其中,为群体大小，即个体数量。上式表示在群体结束一轮探索后，个体x对其所经过轨迹更新的环境信息量，是个体x的轨迹对应的调度方案所需要的时间；，为常数，控制信息量的大小。

1. 个体x从工序i转移到工序j的信息启发式：
2. 个体x从工序i转移到工序j的加工选项k的期望启发式：

[016] 重调度方法：当存在设备发生故障时，由于受工艺流程中工序的先后顺序

说 明 书

约束，原调度方案将失效，因此正常设备和故障设备上尚未进行的工序都需要重新进行分配，即重调度。故障种类分为两种，分别是工作效率下降和中止运行，前者导致相同的装配工序耗时延长，后者导致设备停工等待维修。重调度步骤如下：

1）构建群体智能算法所需的搜索空间。根据资源模块中设备Agent的仿真数据和正常设备的状态选择以下操作：

a）正常设备在故障点正在执行工序，则把该工序的后续可达工序加入群体的可选池中；把该设备加入到调度设备集合E中。

b）正常设备在故障点是闲置状态，则把故障点后的第一个未执行工序加入群体的可选池中；把该设备加入到调度设备集合E中。

1. 根据故障设备的故障类型，选择相应的操作：

a）若设备因故障停止运行，且故障时正在执行某道工序，把该工序加入群体的可选池，设备不加入设备集合E中。

b）若设备因故障停止运行，且故障时为闲置状态，把故障点后的第一个未执行工序加入群体的可选池，设备不加入设备集合E中。

c）若设备因故障而工作效率下降，把故障点后第一个未执行工序加入到群体的可选池，设备加入设备集合E中。由于设备工作效率下降，则之后分配到该设备的工序执行时间需延长，即重新设备工序的加工时间，,其中为故障设备工作效率下降的比例，为工序原本需要的执行时间。

3）基于可选池和设备集合E，执行上述调度规则，重新计算调度方案。

[017] （5）监控Agent:

监控Agent表示与装配设备相连接的机械状态监测设备、机械故障诊断仪、RFID读取器、PLC、摄像头等，负责对生产线设备信息的采集以及故障分析，并将相关数据传送至管理Agent.其内部模型如下:

1）动态数据库：记录对应设备的工作状态，如已完成的加工工序的类型和数目、工作状态（工作中、暂停中、故障）、设备的工作进度（当前进行的工序以及完成的进度）。

2）静态数据库：记录设备工作的历史数据，主要包括完成的加工任务及数量、故障种类和数目等。

3）自学习模块：定时将动态数据库中的数据写入静态数据库。

4）推理机：主要负责对动态数据库中的数据进行故障分析以及时间同步。当设备故障时，需要分析故障的类型、程度以及对工作效率的影响。此外还需要对资源Agent模拟的生产线与实际生产线的时间误差进行判定。

5）执行调度模块：负责接收来自生产线的工位数据以及反馈故障信息以及时间误差到管理Agent。

为达上述目的，本发明采用的技术方案是：一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度系统及方法。

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。

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。所述产品工艺信息包括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对应的加工设备。

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。

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；过程是先向所述工艺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，然后把任务发送至所述资源模块;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；子管里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。

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，模拟结果最终以时间轴的方式呈现，时间轴上标注了分配到该设备上的工序的开始时间和结束时间；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，表示该车间有能力独立完成任务，之后把对应设备Agent模拟的数据以及任务作为调度请求发送至算法Agent，由算法Agent生成调度方案。

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。

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：

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。

（2）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。

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。

（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。

（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。

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。

（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。

（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。

（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。

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。

（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。

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。

（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。

**附图说明**

[018] 图1是本发明中调度系统的结构示意图

图2是本发明中Agent的内部模型设计图。

图3是本发明中资源模块执行基于订单任务的分解分配方法的流程图。

图4是本发明中算法Agent执行调度方法的流程图。

说 明 书

**具体实施方式**

[019] 实施例1：如附图1所示，本发明的一种基于多Agent的面向订单的柔性生产动态调度方法及系统，对应的调度系统主要由三大模块构成：资源模块、管理模块和监控模块。资源模块由车间Agent、设备Agent、算法Agent组成；管理模块根据车间、设备的数量和规模由若干管理Agent组成；监控模块由若干监控Agent组成。此外工艺Agent独立于三大模块，专门负责工艺信息的管理，为三大模块提供数据查询接口。如附图2所示，除了工艺Agent的功能较为单一外，其他Agent的内部模型均设有动态数据库、静态数据库、推理机、通信管理模块、调度执行模块。当动态调度系统启动时，执行以下操作：

（1）启动管理模块，初始化其中的管理Agent。管理Agent运行于整个调度系统的中枢，相当于中央服务器。管理Agent启动后，初始化注册/注销模块，监听来自其他Agent的注册/注销请求；之后依次初始化动态数据库、推理机、调度执行模块、自学习模块，并连接静态数据库。

（2）启动工艺Agent。工艺Agent为其他Agent提供数据查询服务，因此启动顺序仅次于管理Agent。启动后，工艺Agent先向管理Agent发送注册请求，请求中标注有IP和端口。工艺Agent连接静态数据库后，读取产品和库存的原料信息，发送到管理Agent，与管理Agent的数据库进行部分关键信息的同步。

（3）启动资源模块。资源模块的主体是若干资源Agent，并不随中央服务器的启

动而启动，这是由于动态调度系统是分布式的系统，各制造工厂、车间设备资源可能位于任意的地理位置。当某一车间及其中的设备、机械臂开始运作时，相应的车间Agent和设备Agent会依次启动，并初始化自身的各个模块，然后根据设备的工作状态和进度进行模拟仿真，并将相关数据呈现在界面上。各Agent启动后，需第一时间向管理Agent发送注册请求，其次设备Agent需要向所属的车间Agent发送Agent信息，同样包括IP、端口、种类、能力等。算法Agent和维修Agent是随车间Agent的启动而启动的。每个资源Agent都会对应启动一个算法Agent，算法Agent完成注册操作后，开启监听端口，等待来自资源Agent的计算请求。

（4）启动监控模块。监控模块的由若干监控Agent组成，数量由车间和设备的规模决定。当某车间开始运作时，起监控职责的摄像头、RFID读取器、温度和气压检测设备等也会随之启动，对应的各类监控Agent初始化后连接监控设备，采集并分析监控数据，把各设备的工作进度发送至设备Agent，把设备的工作状态和故障信息发送至维修Agent。

[020] 本调度系统中Agent之间是基于TCP的Socket通信方式，资源Agent模块是分层次的结构，订单任务是通过发布/订阅的形式进行分解分配。各Agent的通信管理模块基本一致，使用线程池和同步阻塞消息队列处理来自其他Agent的请求。线程池中线程数目根据主机的CPU数目、CPU使用率、消息处理时间等计算，同步阻塞队列没有大小，每一个请求的入队操作必须对应一个出队操作，反之亦然。Agent根据自身的IP和端口开启监听，每当监听到其他Agent的消息请求时，使用

线程池中的空闲线程进行处理；当没有空闲线程时，新建线程。若线程数目已达最大值，执行拒绝策略，即丢弃该请求，并向请求方返回一个“Discard Message”类型的信息，通知请求方延迟特定时间后重发。

说 明 书

[021] 资源Agent间的通信同样基于TCP的Socket，通过发布/订阅的方式进行订单任务的分解分配过程。资源Agent中，车间Agent对其下的设备Agent具有管理和监控的作用，记录有其管辖的设备Agent的IP地址和端口，当有生产订单任务到来时，上层Agent通过广播的方式，把任务发布到其下每一个子Agent，子Agent根据任务的要求查看是否与自身的资源配置相匹配，若匹配，则订阅该任务，通过算法Agent执行调度规则后把相应的调度方案返回给上层Agent；若下层Agent均无法对任务进行订阅，上层Agent将进一步对订单任务分解，对每个子任务均重复上述发布/订阅过程。

[022] 应用实例二：如附图3所示，当接收到来自用户的生产订单任务时，调度系统所执行的基于订单的任务分解分配方法的执行过程如下：

（1） 管理Agent对订单合法性进行检测。首先根据订单所要求的产品种类与数据库中的产品种类进行比较，若匹配成功，进一步检查订单所需的零部件和原料是否充足。管理Agent通过向工艺Agent发送“Material\_Read”查询请求来进行判断，若两个条件满足，则合法性通过，管理Agent把装配任务封装为Java对象，使用Java序列化转换为字节序列，通过Socket发送到资源模块，由该模块制定最优的调度方案。

（2）资源模块收到生产订单任务后，将其进一步封装，其中主要标注任务对设备资源的要求以及任务包含的零部件加工工艺，然后根据该模块中的车间Agent列表，获取各Agent的IP地址，把任务以广播的方式发布到每个车间Agent。车间Agent将自身所管辖的设备Agent集合与任务中所要求的设备集合进行对比，若两者能相互匹配，则可订阅任务，并把自身的设备集合和任务的零部件集合发送至算法Agent。

（3）算法Agent负责基于特定的设备集合计算任务的最佳调度方案。算法Agent先根据任务集合中的零部件名称向工艺Agent获取详细的工艺流程信息，之后向设备集合对应的设备Agent获取其模拟仿真数据，最后算法Agent使用基于群体智能算法的调度方法计算零部件的加工工序在各设备上的分配方案，以获取用时最少的调度方案，并把该方案返回给请求的资源Agent，该步骤对应附图4。

（4）订阅任务的车间Agent获取算法Agent返回的调度方案后，将完成时间和调度方案返回到上层的资源模块。资源模块需要从订阅的车间Agent中选择用时最短的方案。若不存在订阅的Agent，表明各车间的设备集合均无法独立完成完整的任务，因此需要对任务分解，即把完整的生产任务分解为一个个相对独立的零部件生产子任务，再把子任务逐个发布到各车间Agent，重复上述发布/订阅的过程。

[023] 应用实例三：当设备出现故障时，该调度系统所执行的重调度方法过程为：

（1）监控Agent接收到所连接监控设备的监控数据，分析设备的工作状态，当设备由于零件磨损、老化、断裂或者温度、气压异常导致工作效率下降或中断运作时，监控Agent需对故障信息进行封装，注明故障类型、故障维修所需的维修人

员和对应的维修时间等，最后把该消息发送到对应的管理Agent，消息类型为“Alarm”。

（2）管理Agent接收到故障信息后，根据故障设备的从属关系，通知对应的资源模块，执行重调度方法。

说 明 书

（3）资源模块根据故障信息执行重调度方法，需要重新构建调度设备集合和任务集合。设备集合包括所有正常设备；任务集合包括所有设备Agent模拟仿真数据中尚未执行的工序，同时根据工序间的约束关系构建全局有向无环图，形成群体智能算法的搜索空间。若故障设备仍能运作，只是工作效率下降，也将其归入调度设备集合中，其次根据效率下降的程度，修改相应工序在故障设备上的执行时间。最后，资源模块把设备集合和任务集合发送至算法Agent，由算法Agent计算调度方案。

（4）当故障设备维修完毕，能正常投入使用后，监控Agent返回通知到管理Agent,通知资源模块再一次执行重调度规则，此时的调度设备集合需包含原故障设备，相应装配工序的执行时间也要恢复到原本的大小。

[022] 应用实例四：当出现紧急订单时，该调度系统的重调度步骤为：

（1）紧急插单对应的订单任务在完成期限上更为紧迫，具有最高优先级，不需要在管理Agent的任务队列中等待，而是直接交由资源模块进行调度。资源模块

先进行一次“打赌”，即使用正常的调度方法，基于资源模块内各设备Agent的模拟数据把订单任务发送至算法Agent，由算法Agent计算最优的调度方案，若该方案的完成时间满足紧急订单的交货期，则调度结束，否则执行紧急插单重调度规则。

（2）资源模块执行紧急订单对应的重调度规则：把模块内的设备均置为空闲状态，单独对紧急订单任务进行调度。监控模块先把安排在各个设备Agent上的装配工序保存下来，作为第二次重调度的任务集，然后清空各设备Agent的模拟仿真数据，然后把任务发送至算法Agent计算调度方案，此时紧急订单的装配任务分配完成，由于此过程单独考虑紧急订单任务，因此所得方案是能够在最大程度满足订单的交货期。

（3）对步骤2保存下来的任务集进行重调度。把任务集和全局设备集合发送至算法Agent，执行推理机的调度规则，返回调度方案。

说 明 书 附 图



图1



图2



图3



图4