

DOI:10.13196/j.cims.2017.06.001

# 云制造调度问题研究综述

周龙飞<sup>1,2</sup>, 张霖<sup>1,2+</sup>, 刘永奎<sup>1,3</sup>

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 复杂产品先进制造系统教育部工程研究中心, 北京 100191;

3. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:**为了对云制造调度问题的研究提供参考和指导, 对相关研究现状进行了综述。分析了云制造运作模式和相关的调度问题。对云制造调度问题的最新研究进展进行了总结和分析, 包括云制造平台中计算资源和制造资源的调度、企业层调度和车间层调度问题。介绍了云制造调度相关的理论和技术, 指出了云制造调度问题的复杂性, 并展望了未来的研究趋势。

**关键词:**云制造; 调度; 综述

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

## Survey on scheduling problem in cloud manufacturing

ZHOU Longfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>1,2+</sup>, LIU Yongkui<sup>1,3</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems,  
Ministry of Education, Beijing 100191, China;

3. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** To provide references and guidance for scheduling problem of cloud manufacturing, a comprehensive review of existing works was presented. The operational mode of cloud manufacturing and its relevant scheduling issues in cloud manufacturing were analyzed. The latest advances of research on scheduling in cloud manufacturing were summarized and analyzed, which included scheduling of computational and manufacturing resources in cloud manufacturing platform and scheduling on enterprises and factory shop floors. Theories and technologies related to cloud manufacturing scheduling were presented. The complexity of scheduling issues in cloud manufacturing was pointed out, and an outlook on future research trends was presented.

**Keywords:** cloud manufacturing; scheduling; review

## 0 引言

云制造是基于云计算、物联网、大数据、面向服务技术等新兴信息技术发展起来的一种新的制造模式<sup>[1-5]</sup>。经过多年发展, 云制造的研究已经具有一定

影响, 对其各项关键技术的研究与应用也取得了丰硕的成果。随着传统的车间作业环境、柔性制造系统到复杂的分布式制造系统、面向服务的网络化制造环境<sup>[2]</sup>的发展, 制造系统变得越来越复杂, 系统的动态性和不确定性更加突出, 使得解决复杂制造环

收稿日期: 2016-05-27; 修订日期: 2016-10-24。Received 27 May 2016; accepted 24 Oct. 2016.

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2015AA042101); 国家自然科学基金资助项目(61374199); 复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室资助项目。Foundation items: Project supported by the National High-Tech. R&D Program, China(No. 2015AA042101), the National Natural Science Foundation, China(No. 61374199), and the State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, China.

境下的调度问题变得越来越困难。

调度问题是云制造系统的核心问题之一。与经典制造系统相比,云制造系统在任务、服务、资源、优化目标、不确定性等方面都存在较大差异。从制造任务的角度,云制造系统中的任务具有个性化和大规模的特点;从制造服务的角度,云制造是一种面向服务的制造模式,云制造调度问题不再是简单的工序与设备的匹配,而要考虑制造服务的柔性、关联性、可组合性以及任务与服务的映射关系。另一方面,由于云制造资源分布在不同的地理位置,云制造调度还需要考虑物流和任务转移成本等因素。此外,云制造模式下存在多个利益相关方,包括服务使用者、服务提供者和服务管理者等,云制造调度的优化目标不仅要考虑时间、成本和质量等因素,还要考虑不同角色之间复杂的利益关系。最后,云制造系统中的动态性、不确定性更加凸显,干扰事件更加普遍,导致解决云制造环境下的调度问题更加困难。

传统的制造系统调度方法通常分为精确调度方法和近似调度方法两类。精确调度方法也称最优化方法,它能够保证得到全局最优解,但是只适用于解决较小规模的调度问题,而且求解速度比较慢;近似方法可以较快地得到调度问题的解,但是只能保证得到可行解而非最优解。近似方法比较适合于求解复杂环境下的大规模调度问题,能够较好地满足实际需要。从制造环境层次的维度,云制造调度问题可以分为云制造平台层虚拟资源调度问题、跨企业任务和资源调度问题、企业内调度问题和车间层调度问题。目前云制造环境下调度问题的研究成果仍然较少,主要以计算资源的调度问题为主。为了促进云制造模式的进一步发展,有必要对目前云制造调度问题的研究进行总结,对其中的重点和难点问题梳理与分析,并对未来的发展趋势进行展望,从而促进云制造的发展以及云制造模式在典型行业和企业内的示范应用。

本文对云制造运作模式和云制造调度问题进行了详细分析;对云制造调度问题的研究现状进行了回顾,分别从云制造平台虚拟资源调度、企业层调度和车间层调度3个层面对云制造调度问题涉及的关键技术进行了总结;对云制造调度问题相关的理论和技术进行了分析,包括云制造服务组合、云制造供需匹配和复杂网络理论等。最后对云制造调度问题的复杂性进行了分析,并对未来需要解决的问题和研究趋势进行了展望和总结。

## 1 云制造运作模式及调度问题分析

### 1.1 云制造运作模式

云制造是新型的制造业信息化模式与技术手段,是一种基于网络的、面向服务的智慧化制造模式。云制造的产生和发展是基于信息化制造技术和一些新兴技术的融合,包括云计算、物联网、大数据、服务计算、智能科学和高效能计算等。云制造系统是基于云制造模式建立的制造系统,是一种基于各类网络的、人机物环境信息深度融合的智慧化制造物联网<sup>[3]</sup>。云制造中的用户角色有服务提供者、服务平台管理者、服务需求者3种。制造服务提供者通过对产品全生命周期过程中的制造资源和制造能力进行感知和虚拟化接入,以虚拟资源的形式提供给云制造服务平台,平台通过服务化技术将虚拟资源封装为制造服务。平台管理者实现对云服务的管理和运营,可根据服务需求者的请求为其提供制造服务,并实现多主体的协同交互<sup>[4]</sup>。在云制造平台运行过程中,知识起着重要作用,其不仅能够为制造资源和制造能力的虚拟化接入与服务化封装提供技术支持,还能为云服务的高效管理和智能匹配提供决策支持<sup>[5]</sup>。

云制造运作模式如图1所示。云制造平台运行过程中,服务需求者不断地向云制造服务平台提交自己的制造需求(订单或者制造任务),云制造平台基于每个用户的个性化需求为用户选择最优的制造服务并生成任务与服务的调度方案。制造任务调度方案的生成由云制造调度系统完成,调度系统需要云制造知识库和调度策略库的支持,然后根据实时的制造任务信息和制造服务信息生成可行的调度方案。最后,调度方案通过互联网发送到底层服务提供方或者企业的制造车间中执行。制造任务和制造服务的匹配与调度过程是解决云制造平台供需匹配和资源有效利用的核心,在该过程中不仅要考虑任务的个性化因素(如用户需求、任务优先级、服务流程等),还要考虑不同制造服务之间的优化选择问题。

### 1.2 云制造调度过程分析

#### 1.2.1 云制造调度的特点

与经典制造系统相比,云制造模式下的调度问题具有自己的特点。传统制造系统中的调度决策系统通常位于车间层,制造资源与调度系统的连接距离更“近”,使得调度决策系统能够更容易地实现对突发事件和不确定性事件的响应。而云制造环境下

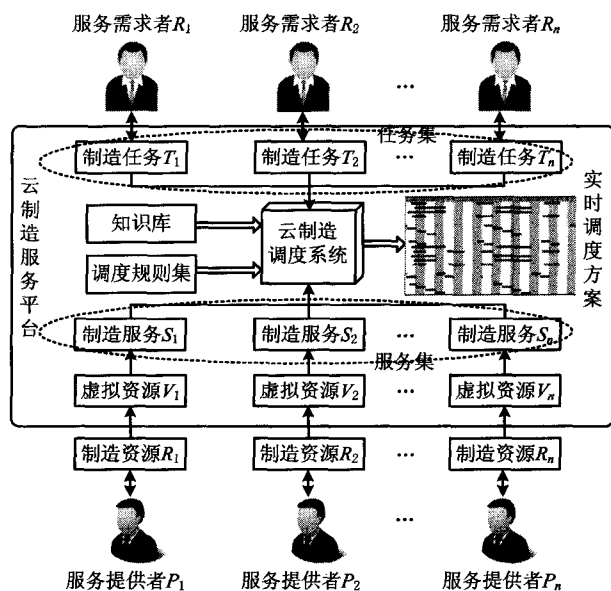


图1 云制造运作模式

的调度系统位于“云端”的云制造服务平台,调度系统与制造资源之间靠互联网连接,这种远程网络连接方式导致云端的调度系统难以对物理资源层发生的动态干扰事件做出及时有效的响应。因此,在云制造环境下,对于干扰事件和系统状态的预测是一个十分重要的问题<sup>[6]</sup>。云制造调度问题的特点可总结如下:

### (1) 制造服务

由于云制造是一种面向服务的制造模式,在云制造环境下与任务进行调度和匹配的不再是传统的制造设备,而是制造服务。云制造服务具有较强的柔性,而且服务和资源间具有关联关系<sup>[7]</sup>。此外,在云制造任务调度过程中还要考虑到云服务池规模的动态增长。

### (2) 制造资源

在云制造环境下,制造资源通过虚拟化和服务化之后形成制造服务。虽然这些制造服务在云端的服务云池中被统一管理,但是制造服务所映射的制造资源却分布在不同地理位置的制造企业中。因此,在云制造任务调度过程中不仅要考虑服务之间的关联性,还要考虑任务在分布式制造资源之间传输时所需的物流时间和物流成本。

### (3) 制造任务

云制造服务平台中,制造任务具有个性化、大规模的特点,这也是云制造不同于传统制造模式的重要特点。因此,云制造任务调度需要使用更加智能

和高效的方法。

### (4) 系统动态性与不确定性

虽然在经典的车间调度问题中也存在系统的动态性、干扰事件和不确定事件,但是在云制造环境下,这些不确定事件和干扰更不容易被控制、更容易发生<sup>[8]</sup>,对系统运行带来的影响也更大。

### 1.2.2 云制造调度的过程

在云制造环境下,服务需求者根据自己的制造需求向云制造平台提交任务。云制造平台及时有效地调动云资源池中的软件和硬件资源,执行相应的产品加工过程以完成服务用户的需求。

在该过程中,服务的调度技术是关键环节之一。云制造调度问题包括资源调度和任务调度两类问题,区别在于调度的着眼点不同。图2给出了云制造模式下调度的详细过程。云制造调度过程分为制造任务分解与处理、云平台虚拟资源调度、跨企业任务调度和企业级任务调度4个方面。

### (1) 制造任务分解与处理

任务分解与处理过程中,服务需求方将制造任务需求发送到云制造服务平台,制造任务的分解与处理是实现制造任务与制造服务匹配的前提。每个制造任务被分解为由多个子任务构成的子任务有向图(子任务链),用属性标签的形式对不同任务的子任务进行多维描述与管理,以支持子任务和服务实例的优化匹配与调度。

### (2) 云平台虚拟资源调度

云制造平台中的虚拟资源调度分为计算资源调度和制造资源调度两种。计算资源是云制造服务平台架构的基础,它可以提供底层的计算能力和存储能力,因此计算资源的调度是制造资源调度的基础。计算资源调度分为基础设施即服务(Infrastructure as a Service, IaaS)层资源调度、平台即服务(Platform as a Service, PaaS)层资源调度和软件即服务(Software as a Service, SaaS)层资源调度。制造资源的调度包括经典的智能制造设备资源调度(如数控设备、3D打印机和智能机器人)和其他制造资源(如物流资源、人力资源、数据资源)。

### (3) 跨企业任务调度

由于云制造平台中存在众多提供服务的企业,制造任务需要在多个企业之间进行分配与协同执行。跨企业的任务调度需要考虑不同企业的服务能力、资源利用程度和服务质量(Quality of Service, QoS)等因素,调度的优化目标需要考虑多个制造任

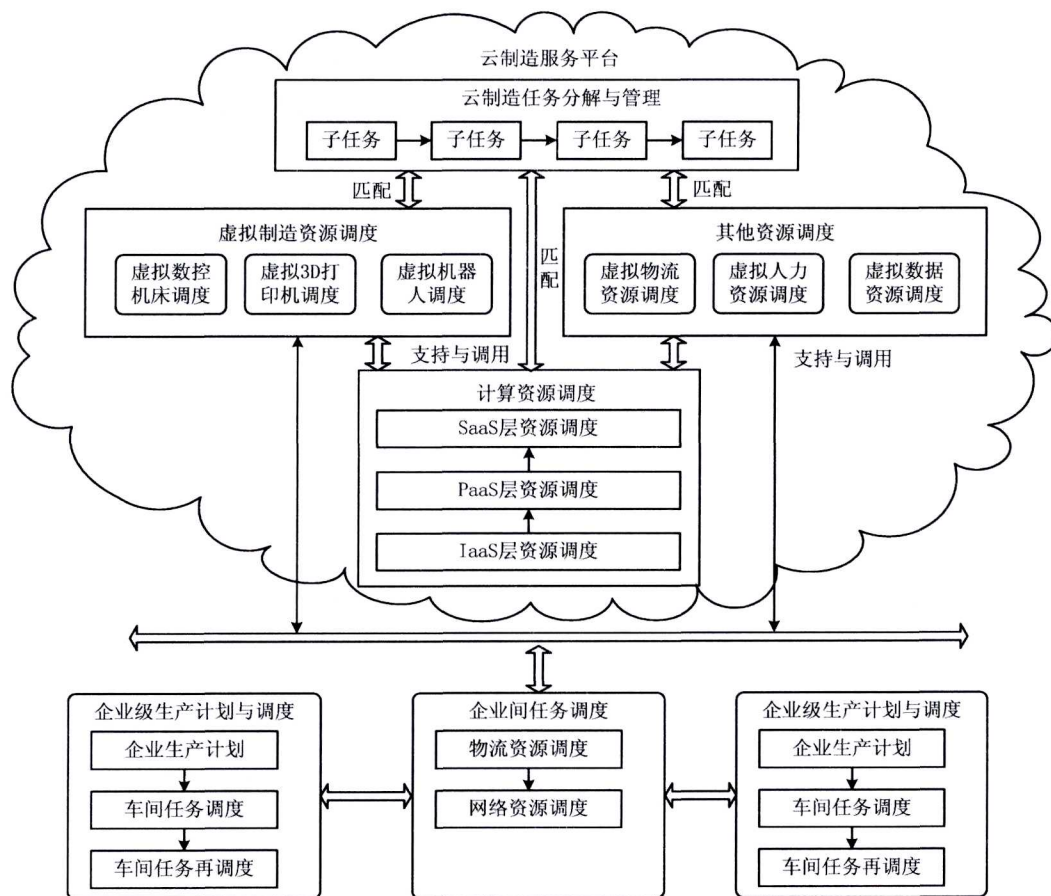


图2 云制造调度过程

务需求的优化目标。物流因素是跨企业调度必须考虑的因素(包括物流时间和物流成本),也是云制造调度与云计算任务调度的一个重要区别。

#### (4) 企业级任务调度

云制造任务的执行最终需要在车间层进行,因此车间层的任务调度问题是云制造调度需要考虑的另一方面。云制造调度系统中产生的调度方案通过网络传递给不同制造企业的车间层,车间制造系统根据当前企业自身的固有任务量和云制造平台下放的制造任务生成优化的车间层调度方案,最终按期完成云制造任务。车间层中产生的干扰事件(如设备宕机、设备周期性维护、物料短缺)需要及时反馈到云平台,以便云平台通过全局优化调度实现对服务网络局部干扰的有效响应。

### 1.3 云制造调度问题的多维描述

对于云制造环境下的调度问题,从不同的角度出发可以进行不同的描述和分类。本文分别从调度类型、调度层次、调度方式和调度资源 4 个维度对云制造环境下的调度问题进行描述与分析,如图 3 所示。

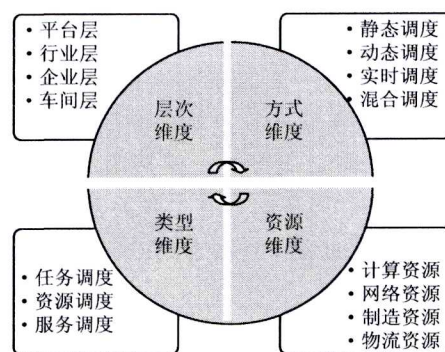


图3 云制造调度问题多维描述

#### 1.3.1 调度类型维度

从云制造系统运行的维度,云制造调度问题可分为任务调度、资源调度和服务调度 3 种类型。任务调度是云制造调度的前提条件和基础,云制造调度问题实质上是制造资源与制造任务之间组合匹配的过程;资源调度是制造设备和资源的优化调度过程,需要考虑资源的实时状态、地理位置以及其他与制造过程相关的属性(如资源可用性、加工时间等);而服务调度是在云制造平台中进行服务选择、匹配

的过程。

### 1.3.2 调度层次维度

从云制造调度层次的维度,云制造调度问题可分为车间层调度、企业层调度、行业层调度和平台层调度4个层次。车间层调度是指单个制造车间内不同制造资源之间的任务分配和工序安排,产生的调度方案通常需要精确到分钟甚至秒级。车间层调度不仅要考虑每种工序在不同设备上的加工时间和成本,还要考虑同一个任务的不同工序在多个制造设备上执行时所耗费的转换时间;企业层调度主要指企业内部的生产计划和任务调度过程,若是企业内部位于不同地域生产中心之间的调度问题,则需要考虑物流问题;行业层调度是面向某个制造行业的任务调度过程,如数控加工行业、泛家居行业、3D打印行业等;平台层调度是云制造环境下最高层的调度问题,其调度模型最复杂需要考虑虚拟资源的实时状态和云制造服务的动态增减。

### 1.3.3 调度方式维度

从云制造调度方式的维度,云制造调度问题分为静态调度、动态调度、混合调度和实时调度4种。静态调度方式将云制造调度问题作为单纯的组合优化问题,此时不考虑云制造系统环境的动态性和干扰事件的发生,虽然在理想的假设下可以得到很好的调度效果,但在实际生产环境下的应用价值有限;动态调度方式考虑了系统状态的动态变化,如制造任务的动态性到达、制造资源的可用性变化、制造设备的宕机等因素,比静态调度方式更接近实际制造环境;混合调度方式将静态调度与动态调度相结合,利用静态调度方法得到较短时间周期内系统运行的运行规律和调度规则集合,利用动态调度的方法得到最终的调度方案;实时调度是动态调度的一种特殊情况,该系统需要实时地获取制造系统中各个元素的状态信息,以及环境中干扰事件的动态信息,并将这些实时信息作为调度系统的输入,通过调度策略产生实时调度方案。实时调度系统中调度算法的时间复杂度和网络传输速度都要满足调度系统对实时性的要求。

### 1.3.4 调度资源维度

从调度资源的维度,云制造调度问题分为计算资源调度、网络资源调度、制造资源调度和物流资源调度。计算资源调度是云制造平台底层计算和存储设备的优化配置与调度问题,需要为云平台自身的计算任务和云平台用户的计算任务提供

计算资源的优化配置方案;网络资源调度需要解决云制造平台中数据传输所占用网络资源的调度问题,既要考虑流量的划分,还要考虑任务的优先级;制造资源调度是云制造调度的核心内容,制造资源的调度过程要考虑制造设备不同属性、系统的动态性、物流因素和调度优化目标等;物流资源的调度和优化配置是云制造调度与其他调度问题的重要不同点,物流资源调度可以为制造资源调度提供重要支撑。

## 2 云制造调度问题的研究现状

### 2.1 云制造平台层调度

云制造平台中的资源调度问题按照资源类型的不同分为计算资源调度和制造资源调度两大类。云制造平台中的计算资源位于云平台的计算中心,因此云计算调度技术是云制造平台中计算资源调度的基础,包括自底向上的IaaS, PaaS和SaaS3层调度。与云计算调度不同的是,云制造平台中的计算资源还为上层虚拟制造资源的管理和运行提供了重要的支撑环境,因此云制造平台中的计算资源调度还包括云制造平台计算资源调度问题。云制造平台中制造资源的调度是根据云平台中虚拟制造资源的状态信息和制造任务的实时信息来产生最优的任务执行方案,这些任务调度方案的执行需要企业层和车间层调度技术的支撑。

#### 2.1.1 计算资源的调度问题

与云计算平台类似,云制造平台中的计算资源也位于云平台的计算中心,云计算调度技术是云制造平台中计算资源调度的重要支撑技术。在云制造模式中,计算资源位于云制造服务平台架构的物理资源层,直接控制着各种制造资源及制造能力的共享与分配,是构成平台的重要组成部分。由于云制造平台面向的是大规模复杂产品的协同制造,向平台提出计算需求的制造服务集通常包括机械、电子、控制等多学科领域的协同仿真及并行计算求解任务,各任务间的协同性强,对资源计算及通信能力的需求较高且各不相同,从而使计算资源需根据特定的制造和仿真任务集进行协同,并产生大量的通信。在保证较短时间跨度下任务或任务集的高效运行和资源的充分利用方面,计算资源优化配置显得尤为重要。云制造系统中的任务调度问题具有大规模、强异构、动态互联和分组协同等特点。而传统并行计算系统中的多处理机任务调度问题一般是为特定



的计算任务配置相应的计算资源。传统的计算资源配置模型因其特定的假设及单一系统结构的局限性,在云制造平台中并不适用。

云制造强调多学科协同制造及设计任务对计算资源的个性化需求,目的是在庞大的计算资源池中配置合适的资源组合,以支撑任务的高效运行。对于计算资源的建模,首先,云制造平台采用云计算网络入端口缓存的方式避免浪涌现象,需要考虑临界缓存及通信时间的关系;其次,不同于以往的并行计算任务,云制造中的制造任务异构性强且需分组协同,因此分布于各地的异构计算资源需要根据网段及地理位置考虑其分组通信开销;除此之外,计算资源还以虚拟接入的方式形成虚拟计算资源来支撑各制造任务的运行<sup>[9]</sup>,在任务与计算资源的映射中,有可能发生多个任务同时运行于同一个计算资源的情况,即必须考虑计算资源的计算能力分配情况。这些问题在云制造平台的运行过程中都起着至关重要的作用,但在现有的研究中却均未考虑。现有计算资源调度方法按调度目标、调度阶段和调度手段可以有不同的分类<sup>[10]</sup>。从任务模型的角度,多处理机任务调度可分为调度相互独立的任务<sup>[11-12]</sup>和调度相互依赖的任务<sup>[13-15]</sup>。对有依赖关系的任务调度研究的最多的当属按照调度阶段划分的起始调度(静态任务调度)与再调度(动态任务调度)。起始调度是在任务初始分配时通过对任务的先验估计得到任务的计算量、通信开销及其之间的依赖信息等,各处理单元之间的连接和处理能力均为已知,管理中心将这些信息分配到各个处理机,一旦任务分配到处理单元,就智能地在该单元中执行。再调度是在执行任务时,通过调度器实时监控获取任务执行情况,按照动态的运行情况将任务分配到处理机单元,即实时地将任务从较重负载的处理单元转移到轻负载处理单元中,实现多处理机的负载平衡,但是再调度的开销较大,还涉及动态任务迁移时的数据一致性和通信同步等问题。Laili 等<sup>[16-18]</sup>对云制造计算资源配置问题进行了分析和建模,并针对其在智能优化算法方面的求解进行了改进和优化。目前,云制造计算资源调度方面的研究需要在资源的使用效果和效率上进行提高,特别是高交互性设计软件资源,如 AutoCAD 等。

云制造是云计算技术在制造领域的应用和扩展<sup>[19]</sup>。云制造平台强大的计算和存储能力需要借

助云计算系统的支持,云计算系统处于云制造平台中的底层和基础部分,因此搭建一个稳定、大规模的云计算系统,是实现云制造平台的基础。云计算包括 IaaS、PaaS 和 SaaS 三层架构。云计算任务调度的目的是将计算任务更合理地分配到分布式的计算资源上,以降低计算成本,提高计算资源利用率,同时提升云服务用户体验。虚拟化技术在云计算中的广泛应用,使中间层与资源节点之间的关系以及用户与中间层之间的关系都发生了很大变化,因此云计算应该研究新的任务调度策略以满足用户的要求<sup>[20]</sup>。在云计算环境中,一个大规模计算任务需要进行分布式并行处理。系统首先将逻辑上完整的一个大任务分解成多个子任务,然后根据任务的相应信息采取合适的调度算法,在不同的计算资源节点上处理这些子任务,所有子任务处理完成后,将计算结果进行汇总后返回给用户。云计算任务调度的目的是给需要的用户分配相应的计算资源,在某一特定的云环境下,依据某一种规则在不同用户之间平衡和调整资源,在满足用户需求的前提下使任务的完成时间尽量小,且资源利用率尽量高。云计算任务调度最终通过负载均衡的方式实现时间、成本和服务质量等目标的优化,任务调度算法的优劣直接影响到云计算系统处理任务的能力。传统调度算法一般把效率作为优化的首要目标,但是其适应性不强,在解决多目标优化问题时具有一定局限性。例如,最小完成时间的任务调度方法虽具有较好的任务完成效率,但是系统负载均衡达不到理想要求,导致计算效率高的虚拟机资源长期超负荷运行,最终不能很好地满足用户任务的服务质量要求。因此,基于智能启发式任务调度算法有了很快的发展,主要有遗传算法<sup>[21-27]</sup>、蚁群优化算法<sup>[28-35]</sup>、粒子群优化算法<sup>[36-43]</sup>和模拟退火算法<sup>[44]</sup>等,现阶段这些智能启发式算法经过许多学者的改进已经广泛应用到云计算系统中,通过迭代对解进行了优化,最终得到近似解。

### 2.1.2 制造资源的调度问题

制造资源的云端化和共享是云制造系统区别于云计算系统的本质特征。由于制造资源在结构性能和运行环境上与计算资源有极大不同,导致云制造中制造资源的调度比计算资源的调度更加困难和复杂。目前,有关云制造环境下制造资源的任务和服务调度问题的研究仍较少,使用的方法以智能优化算法为主,如遗传算法<sup>[45-46]</sup>、蜂群算法<sup>[47]</sup>、粒子群优

化算法<sup>[48-50]</sup>、蚁群算法<sup>[51]</sup>等。另有一些其他方法,如一些研究者尝试将博弈论的方法运用到网络化制造环境下的任务调度问题中<sup>[52]</sup>,取得了初步结果。Liu等<sup>[53]</sup>提出一种面向多任务的云制造服务组合调度模型,考虑了服务、物流和服务能力的动态变化等因素,其中时间因素主要包括服务时间、物流时间和等待时间。Liu等<sup>[54]</sup>研究了云制造系统中基于工作量的多任务调度。首先根据工作量的大小对任务进行排序,然后按照排序依次执行任务,重点考虑了有任务执行时间约束和没有任务执行时间约束两种情形。研究发现,在不考虑任务执行时间约束的情况下,调度工作量较大的任务能够缩短任务总完工时间和提高服务利用率且不明显降低任务完成的质量;而在考虑任务执行时间约束的情况下,调度工作量较大的任务能够在不降低任务完成质量的情况下完成较多的任务(尤其是工作量较大的任务)。此外,因为云制造强调绿色化和智能化,所以在云制造调度问题的优化目标方面,除了将时间、成本和质量作为优化目标之外,一些研究者还考虑了基于能耗的调度优化目标,以能耗为目标的任务调度问题和优化方法<sup>[55-56]</sup>成为云制造调度的一个研究方向。在云制造调度系统的开发与实现方面,设计开发了包括云制造环境下的任务生产计划的计算机辅助工艺规划(Computer Aided Process Planning, CAPP)系统<sup>[57]</sup>和基于 Petri 网的云制造(Cloud-based manufacturing, CBM)系统<sup>[58]</sup>在内的云制造调度系统,解决了云制造任务服务调度问题,对服务和资源匹配过程进行了优化。

制造网格是计算网格在制造领域的延伸和拓展,是一种分布式制造系统,云制造模式中融合了制造网格的一些理念及其资源管理的一些方法。制造网格具有可扩展性、互操作性、自适应性和动态性等特点。与多智能体系统相比,制造网格需要更高效的算法,以实现制造任务的智能优化调度。通常情况下,制造网格中的任务分为两类:单资源请求任务和多资源请求任务。制造网格中各个节点的通信是通过网格成员共同遵守的网络协议实现的。目前,制造网格环境下的制造任务优化调度研究主要包括基于智能优化算法的方法和基于 Petri 网的方法两大类,其中基于智能优化算法的方法中,粒子群优化算法被较早用于解决制造网格环境下的任务调度问题<sup>[59-60]</sup>。此外,基于分层控制的方法也用于解决制造网格任务调度问题<sup>[61]</sup>。制造网格中的工作流建

模可以采用基于 Petri 网的方法<sup>[62]</sup>,通过网格架构中资源层和汇聚层提供的资源操作功能,使网格平台能够支撑虚拟组织,实现高效的资源管理和任务调度。

## 2.2 企业层调度

云制造调度包括计算资源和制造资源的调度,计算资源在云中心,制造资源分布在不同的企业,云制造平台的运营者对制造资源没有所有权,并且不同的企业内部存在不同的运作模式和调度流程。因此,必须考虑企业和车间调度问题,以实现云制造资源的优化调度。为了提高制造系统的效率和柔性,以及提高制造系统的容错性、可靠性、可扩展性和可维护性,网络化制造系统越来越受到人们的重视。网络化制造系统实际上是网络化技术在制造领域的融合和应用。

### 2.2.1 虚拟制造单元调度

在中小规模制造环境中,制造资源通常采用单元的组织模式,即所谓的单元制造系统<sup>[63]</sup>(Cellular Manufacturing System, CMS)。然而传统的 CMS 构建通常保持产品组合固定不变,因此制造系统的重组具有迟滞性、重构成本过大等缺点,并且制造系统设备的物理位置被永久固定,要实现该系统非常困难,投资成本也较高,系统的柔性很差,导致系统对产品的需求变化和动态事件的响应能力不足。为了解决以上问题,虚拟制造单元(Virtual Manufacturing Cell, VMC)这一概念被提出<sup>[64]</sup>。VMC 不强调制造设备的物理布局,而是在逻辑上形成虚拟动态实体。采用这种组织形式可以增强制造系统的柔性和可重构性,提高系统对动态事件和干扰事件的响应能力。

在基于 VMC 的制造资源组织模型下,制造资源根据多项任务中工艺流程的相似性组合成 VMC,制造资源针对该单元对应的加工任务配置相应的辅助工具。不同制造单元中相同类型的设备由于配置了不同的辅助工具而被区分。由于更换辅助工具的时间比更换设备的时间短的多,所以虚拟制造单元的模式缩短了加工新产品时重组生产线导致的换线时间。制造单元可以完成一系列有针对性的制造任务,使单工艺多设备的任务调度问题转变为单工艺 VMC 调度问题,简化了任务分配和调度过程,提高了调度质量。

基于混合整数规划的方法被 Kesen 等较早地用于解决 VMC 环境下的多目标任务调度问题<sup>[65]</sup>。该

研究考虑了具有不同加工流程的多个制造任务,且多种类型的制造设备分布在车间的不同位置,同一种设备类型对应多台相同的制造设备。因为允许外包,所以基于双目标混合整数规划的方法也被用于解决 VMC 环境下的任务调度问题<sup>[66]</sup>,该方法分别考虑了最大完工时间最小和总成本最小两个优化目标。此外,基于智能优化算法的调度方法近期被较广泛地应用于解决 VMC 任务调度问题,其中遗传算法<sup>[67]</sup>是最常用的一种智能优化算法。在一个调度周期内,如果不同加工任务中相同类型的加工工序被分配到设备类型和辅助工具类型都相同的制造单元上,那么更换辅助工具的次数将减少,从而整个调度周期内更换辅助工具所花费的时间将大大缩短。这种调度策略可以提高整个制造系统的调度效率。

### 2.2.2 多智能体制造系统调度

多智能体系统是由多个相互独立的智能体根据一定的目标需求组合在一起的有机整体,智能体所特有的自主性、智能性和反应性使得整个智能体系统能够自主决策和演化。智能体系统中各个独立的智能主体通过系统提供的通信机制实现信息的交互和协作。单个智能体脱离了智能体系统便无法和其他智能体成员进行交互,从而也不再接收智能体系统所赋予的任务。智能体系统还可以根据接受到的任务需求动态调整智能体成员的退出和加入,使智能体系统可以适应外界环境的变化。作为分布式人工智能领域的研究热点,多智能体技术在制造领域的研究逐渐扩大,涉及虚拟企业、供应链、全能制造系统、机器人、生产过程计划、工艺规划、调度与控制等方面,因此多智能体制造系统是一种典型的分布式制造系统。引入智能体技术可增加制造系统的柔性、智能性和可重构性,实现从设计到生产的制造过程和活动,构建企业的智能性制造系统<sup>[67]</sup>。另一方面,利用多智能体系统构建产品的规划和控制模型,可以在很大程度上增强制造系统的敏捷性,提高系统应对市场变化的能力<sup>[68]</sup>;利用智能体的智能化特点,还可以建立仿生多智能体系统模型,从而提高制造系统的可重构性<sup>[69]</sup>。多智能体制造系统中的动态任务调度问题一直受到人们的广泛关注<sup>[70]</sup>,不同的方法被用于解决该问题<sup>[71]</sup>,如蚁群优化算法<sup>[72]</sup>、实时分布式调度方法<sup>[73]</sup>、基于知识学习的方法<sup>[74]</sup>和基于智能体的方法<sup>[75]</sup>等。多智能体制造系统的控制方法也与传统制造系统中的控制方法有所不同。分层控制方法<sup>[77]</sup>和连续反馈控制方法<sup>[78]</sup>都被

用于解决多智能体制造系统中的控制问题。此外,随着现代网络通讯技术的迅速发展,基于 RFID 技术的智能决策方法也被广泛应用到多智能体制造系统环境下的生产监控与调度问题中<sup>[79]</sup>。

虽然学者们对多智能体技术在制造系统中的理论和应用研究已经取得一定成果,但对于智能体的形式化实现仍然缺乏行之有效的建模方法,且所构建的系统体系结构较复杂,系统的稳定性、智能性和可重构能力不足。随着制造系统中设备柔性的提高和系统分布性的增强,传统的调度方法很难解决这种复杂分布式环境下的调度问题,必须寻求更加实时、高效的智能调度求解方法。

### 2.3 车间层调度

云制造平台中的调度方案是根据平台中制造任务的需求状态和云服务池中虚拟资源的实时状态,通过不同优化方法生成的任务执行方案。云制造平台中的制造资源以虚拟资源的形式存在,而制造任务的执行需要在真实的制造资源中进行,这些物理的制造资源分布在车间层不同的加工生产车间中,因此车间层的调度是云制造调度方案顺利执行的重要支撑技术。

#### 2.3.1 经典车间作业调度

调度问题研究的核心主要是问题模型和求解算法。调度问题的研究方法主要有早期的针对小规模问题的精确算法,如数学规划算法<sup>[80-81]</sup>和分支定界法<sup>[82-83]</sup>,以及不断发展的近似方法,包括构造性方法和迭代方法,如局部搜索算法<sup>[84-85]</sup>和人工智能方法。随着计算机技术的不断发展,不少结构复杂的元启发式算法<sup>[86]</sup>都取得了较满意的结果,甚至打破了一些标杆问题的最优解。文献<sup>[87]</sup>从决策树、禁忌搜索算法和仿真 3 个方面对动态调度规则进行了比较和分析。车间作业调度问题是制造系统调度问题中最经典的一类问题。车间制造环境中的调度系统可以生成产品的生产调度方案,这些调度方案声明了某个制造活动在哪个时间点发生,从而保证对制造过程的控制和优化,达到一定的生产调度目标。但是因为制造系统具有动态性、不确定性并存在干扰事件,最初生成的调度方案往往不适合当前的系统状态,所以动态调度方法对于更新调度策略和应对干扰非常重要。动态车间作业调度问题自 20 世纪 50 年代由 Johnson 提出以来<sup>[88]</sup>,由于其发展过程中形成的强大的理论基础及重要的实用价值,一直受到广泛关注。为了应对最开始



的调度方案与之后发生的干扰事件之间的矛盾,通常采用再调度策略和任务排序规则两种方式。图 4 所示为不同动态调度方法的划分和总结。再调度方法是实现动态调度的一种常用手段,实际上是通过通过对现有生产调度方案进行更新来应对系统中的干扰和其他变化的过程<sup>[89]</sup>,这些系统干扰和变化包括新任务的到达、紧急任务插入、机器宕机和维护等。

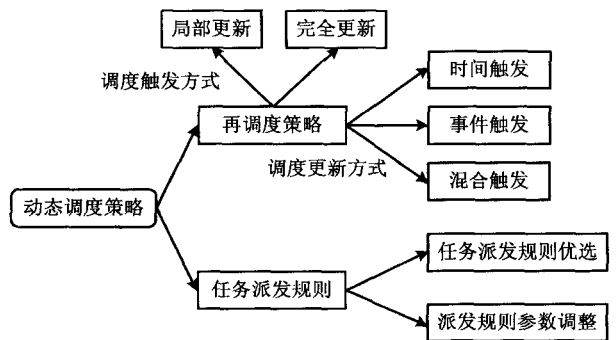


图4 不同动态调度策略分类

调度规则方法是另一种解决动态调度问题的有效方法<sup>[90-91]</sup>,其特点是时间复杂度低,因此适于求解实际生产中复杂的动态调度问题。基于调度规则的调度方法是最早被提出的近似调度方法。由于调度规则利用了多种任务信息和制造资源信息,所以被广泛研究和应用。较为常用的调度规则有先入先出(First In First Out, FIFO)、加工时间(Processing Time, PT)、最早到期日(Earliest Due Date, EDD)、直观延误成本(Apparent Tardiness Cost, ATC)和后续作业排队(Work In Next Queue, WINQ)等<sup>[92]</sup>。调度规则可以根据不同的任务优先级策略进行分类。表 1 所示为不同调度规则的归纳和总结。

表 1 调度规则总结		
调度规则类型	考虑因素	规则举例
简单规则	加工时间	SI, SIS, LI, LIS
	到期日	DD, OPNDD
	工序数量	FOPNR, MOPNR, LHALF
	成本	Value, 1/C
	设置时间	NSUT, MINSEQ, NB
	任务到达时间	FIFO, Random, FASFO
	机器状态	NINQ, WINQ
	其他信息	ESD

续表 1

组合规则	简单规则组合	FIFO/SI, SMOVE, ASIFIFO
加权规则	简单规则加权	PI1, P/WKR, P/TWK, MSR
启发式规则	任务的相互影响	Alternate Operation
	交替路径	With SI, LI, Random
	任务等待队列	Look Ahead
	其他因素	P * S-1, SHOPNH, DSUJ

研究者们还探索并应用了人工智能的一些方法,以解决车间环境下的动态任务调度问题,如人工神经网络<sup>[93]</sup>、智能优化算法、多智能体方法<sup>[94]</sup>等。实际工业环境中的调度问题非常复杂<sup>[95]</sup>,有效利用制造系统中的实时状态信息有助于提高车间作业动态调度的效率<sup>[96]</sup>。利用加权方法对多目标函数进行优化和比较,可以得到不同方法在解决调度问题时的效果<sup>[97]</sup>,如比较约束规划和混合整数规划方法<sup>[98]</sup>。除了传统的车间作业调度问题,研究者们还提出和研究了模糊作业调度问题(Fuzzy JSP)<sup>[99]</sup>。Nie 等<sup>[100]</sup>研究了动态环境下任务的到达时间不确定,即任务持续性到达情况下的作业车间调度,不同的任务优先级规则和任务派发规则更适用于这种场景。

2.3.2 柔性制造系统调度

柔性制造系统在传统作业车间环境的基础上考虑了机器的柔性。在柔性作业车间中,同一个工序可以在不同的几台机器上加工,由于柔性制造系统中制造资源的能力范围从一种类型的任务扩展到多种,使得柔性制造系统中调度问题的解空间比非柔性制造系统中调度问题的解空间更大,所以柔性制造系统中的调度问题比传统车间调度问题更复杂。柔性制造系统调度问题同样需要解决模型和多目标优化的问题<sup>[101]</sup>。早期人们采用禁忌搜索算法<sup>[102]</sup>解决柔性作业车间环境下的任务分配与调度问题,采用基于暂态的实时调度算法<sup>[103]</sup>和基于知识学习的方法<sup>[104]</sup>解决动态柔性作业调度问题。还有大量研究基于混合或者改进的智能优化算法,如遗传算法和模拟退火算法相结合<sup>[105]</sup>、基于生物地理学的优化方法<sup>[106]</sup>、基于重力模拟局部算法的方法<sup>[107]</sup>,以及基于智能体的方法<sup>[108-109]</sup>等。文献<sup>[110]</sup>研究了考虑同步效率和稳定性的柔性作业车间动态调度问题,文献<sup>[111]</sup>采用布局优化的方法解决柔性车间作业调度问题,近几年的研究者则更多地采用现代智能方法来解决柔性制造系统调度问题。

### 3 云制造调度相关理论和支撑技术

云制造调度技术是实现云制造模式下资源整合与服务按需使用的关键技术之一。图 5 所示为云制造环境下与调度技术相关的理论、技术及其支撑技术。

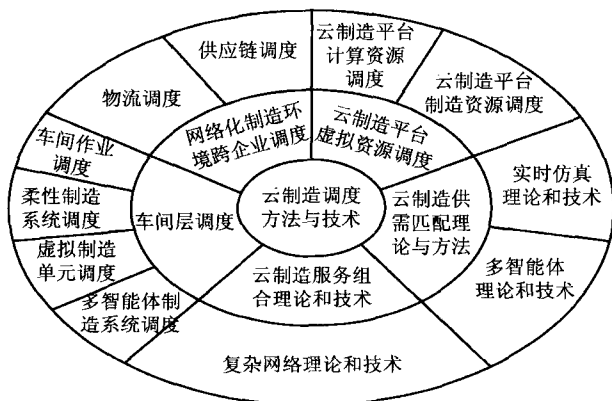


图5 云制造调度相关理论和支撑技术

云制造调度技术不仅涉及云制造平台中虚拟资源的调度问题,还要考虑网络化制造环境下跨企业的任务和资源调度问题,以及车间层调度问题。因此,云制造调度技术需要云平台调度技术、网络化制造调度技术和车间层调度技术作为支撑。此外,在云制造系统环境中与调度问题密切相关的理论和技术还包括云制造服务组合理论与技术,以及云制造供需匹配理论。上述云制造调度相关理论和支撑技术的研究与实现,需要一批基础性理论和技术作为支撑,如:

(1)云制造服务组合技术与云制造调度技术相辅相成。服务组合技术需要利用复杂网络理论对云环境下制造服务之间复杂多变的关联关系进行描述和建模,在此基础上利用网络相关理论将云制造服务组合问题抽象为网络中节点之间的关联关系研究。

(2)云制造供需匹配技术从任务和服务的角度对云制造调度问题进行建模,将云制造调度问题抽象为任务集合与服务集合之间的动态映射问题。云制造供需匹配技术需要运用基于多智能体的技术和实时仿真等方法对云制造任务服务供需匹配问题进行问题描述和供需匹配方案优化,从而实现动态环境下制造服务与任务需求之间的优化匹配。

(3)在云制造平台虚拟资源调度问题研究中,需要针对云制造平台中的制造资源和计算资源的不同

特点,分别进行资源和服务调度问题的研究。目前针对云制造计算资源调度问题的研究相对较多,针对制造资源的调度问题研究相对少一些。

(4)网络化制造环境下的跨企业调度也是实现云制造调度的关键,不仅需要考虑网络化制造环境下的供应链资源优化调度问题,还要考虑制造任务执行过程中的物流资源因素,因为云制造环境下的物流是实现制造任务执行过程的必要因素。

(5)车间层调度问题是云制造调度问题的基石。无论上层云平台中产生的优化服务调度方案还是企业间的任务调度计划,最终制造任务的执行过程都在车间层实现。车间层调度的相关支撑技术包括车间作业调度技术、柔性车间作业调度技术、虚拟制造单元调度技术和多智能体制造系统调度技术等。

下面分别针对服务组合、供需匹配和复杂网络 3 种理论和技术及其研究现状进行详细阐述。

#### 3.1 云制造服务组合理论与技术

在云制造相关研究中,服务组合相关理论和技术与调度问题紧密相关,两者的目的都是在云制造服务资源池中找到与大规模制造任务最优的服务来完成相应的任务,同时到达一定的优化目标。所不同的是云制造服务组合更侧重寻找服务与服务之间的关联关系,从而形成制造服务流程;而云制造调度更侧重于为特定的制造任务寻找具体详细的制造执行方案,同时考虑系统动态性、随机性和干扰事件的发生。云服务及其组合能够形成不同粒度的制造云服务,为云制造终端用户提供个性化服务,云服务组合是实现云制造按需分配和使用资源的有效途径。通过云平台开展制造业务外包或众包、多领域业务协同、虚拟社区组织和管理等高端业务,都离不开服务组合技术的支持。事实上,服务组合并不是一个全新的研究领域,在面向服务的体系架构(Service Oriented Architecture, SOA)中,服务组合即是其关键技术之一。国内外众多学者包括工业界对这一问题进行了广泛深入的研究,形成了许多不同的理论和方法,如基于流程的服务组合<sup>[112-118]</sup>、基于模板和关键字的服务组合<sup>[119-122]</sup>、基于中介器的服务组合<sup>[123-125]</sup>、基于人工智能规划的服务组合<sup>[126-129]</sup>、基于语义的服务组合<sup>[130-131]</sup>、基于 QoS 优化的服务组合<sup>[132-135]</sup>、基于智能体的服务组合<sup>[136-138]</sup>等。在云制造环境中,云服务及服务组合具有一些更加复杂的特性,如动态性、关联性<sup>[139-140]</sup>、模糊性、互操作性、自组织和自适应性等,因此很多服务组合方法在应

用到云制造服务平台时都会受到限制和约束。目前,针对云制造服务组合的研究包括并行化方法<sup>[141]</sup>、基于语义的交互式服务组合方法<sup>[142]</sup>、基于混沌优化算法的方法<sup>[143-144]</sup>、基于群体领导算法的方法<sup>[145]</sup>、基于人造蜂群算法的方法<sup>[146]</sup>和基于全局策略的方法<sup>[147]</sup>等。另外,一些研究者对云制造服务组合的灵活管理架构<sup>[148]</sup>和可扩展模型<sup>[149]</sup>进行了研究。

### 3.2 云制造供需匹配理论与方法

与服务组合相比,云制造供需匹配与云制造调度技术更加接近。通常意义上供需匹配的概念指企业对某种产品的供应和需求进行数量上的匹配<sup>[150]</sup>。目前,在供需匹配方面的研究主要针对某种产品的供需均衡,以及如何减少由信息不对称造成的牛鞭效应<sup>[151-152]</sup>。云制造系统中的工序匹配指云制造系统中服务需求者的制造任务与服务提供者所提供的服务之间的映射关系,具有更广义的概念。若从动态的云制造系统环境来看待供需匹配问题,这种任务与服务之间动态变化的映射关系实际上反映了云制造调度问题中需要生成的调度方案。供需匹配的目的在于得到制造任务需求与制造服务之间的映射关系,若不考虑任务集合和服务集合状态的动态变化,则属于静态供需匹配问题。目前关于静态供需匹配的研究比较多,包括建立数学规划模型以解决制造服务和任务的匹配过程<sup>[153]</sup>,以及基于不同任务指标的服务匹配<sup>[154]</sup>,还包括基于再制造中供需双方利益关系的匹配方法<sup>[155]</sup>和基于服务过程业务规则的服务供需匹配研究<sup>[156]</sup>。当考虑制造系统状态的动态变化和随机不确定性时,这种映射关系也具有动态性,此时属于动态供需匹配问题。目前关于动态供需匹配的研究分为两个方面,即制造需求不确定性时的供需匹配问题和制造服务状态动态不确定时的供需匹配问题。考虑制造需求不确定性的研究内容主要包括在需求不确定情况下制造能力计划问题的建模<sup>[157]</sup>、考虑到需求不确定性和预测误差的供应链计划模型<sup>[158]</sup>以及不确定环境下的供需匹配问题<sup>[159]</sup>等;考虑制造服务动态性的研究内容主要包括对制造服务供应链的规划<sup>[160-161]</sup>、对不同供应链网络和流程的动态不确定性进行建模和评估<sup>[162-163]</sup>,以及在制造服务匹配过程中的设备故障检测与故障消除<sup>[164]</sup>等。

### 3.3 复杂网络理论与技术

复杂网络理论是云制造中另一项与调度问

题紧密相关的理论和方法。随着系统复杂性的增加,网络的拓扑结构变得日益复杂,其网络规模巨大且网络结构随时间动态演化,由此产生了复杂网络的概念。从复杂网络的角度,云制造系统也属于一种特殊的复杂网络,其中网络的节点表示制造服务的实例,网络的边表示服务与服务之间的关联关系。网络的节点也可以表示云制造平台中的服务提供者个体或服务使用者个体,此时网络的边表示云制造平台中不同角色的平台用户之间的关联关系。从复杂网络建模的角度,研究者们提出了不同的网络模型来更好地描述网络的不同性质,文献<sup>[164]</sup>提出小世界网络模型,以描述具有小世界性质的网络模型构造方法;文献<sup>[165]</sup>提出无标度网络模型,对具有无标度性质的复杂网络进行了描述和构造。此外,利用复杂系统对系统演化过程进行预测,是复杂网络理论的一大研究和应用热点<sup>[166-167]</sup>,目前将复杂网络理论应用到云制造环境中的研究主要集中在云制造服务组合优化<sup>[168]</sup>和云制造供需匹配<sup>[169]</sup>两个方面。

## 4 讨论和结论

### 4.1 云制造调度问题的复杂性

云制造系统是一个非常复杂的系统。云制造调度有其固有的复杂性,这些复杂性来源于云制造中资源和服务的大规模性和多粒度性、调度目标的复杂性(包括调度指标的多样性和利益的分散性)、需求任务的复杂性(如需求任务数量众多、流程复杂且高度个性化)、物流(包括库存、物流运输等)的参与,以及其他动态性和不确定性等。

#### 4.1.1 云制造资源的多样性

云制造面向产品全生命周期中的不同制造环节,制造资源涉及各种类型的软件资源、硬件设备和制造能力等。因此,在云制造调度过程中要考虑不同类型资源的异构性。例如,软件服务的输入和输出通常是数据类型的电子文档,任务在软件服务之间进行转移时不需要考虑物流的时间和成本,只考虑数据在网络中传输的网络延时和流量占用即可;而硬件加工设备的输入和输出往往是硬件类型的零部件或产品,任务在硬件制造资源之间进行转移时要考虑物流因素。

#### 4.1.2 云制造服务的多粒度性

云制造中的各类制造资源经过虚拟化和服务化后形成制造服务,云制造调度的目的是实现制造任

务或子任务与制造服务之间随时间而动态组合和匹配,任务与服务匹配的两个基础条件是任务的分解和服务的粒度划分。云制造环境下的制造服务由制造资源封装得到,制造服务粒度的划分存在不确定性和可变性。因此,在云制造调度过程中要充分考虑和分析制造服务的粒度划分策略及服务实例之间的关联关系等因素。

#### 4.1.3 调度目标的复杂性

在云制造环境中,利益相关方涉及服务提供者、服务需求者和服务管理者3种角色。在云制造系统运行的过程中,服务需求者会在需要的时刻向平台提交制造需求,这种制造需求具有个性化的特点。云制造平台会将大量的服务需求用户接入到平台中,从平台的角度而言,这些制造任务具有大规模个性化定制的特点,在共有云模式下进行云制造任务调度时,需要同时考虑多个利益相关方的调度优化目标和约束。因此,云制造服务动态调度模型需要首先考虑用户向云制造平台提交的大规模制造任务的个性化需求,根据不同的制造需求确定不同调度问题的优化目标,这是云制造平台实现智能性的关键问题之一。

#### 4.1.4 调度指标的复杂性

通常生产调度问题的优化指标包括生产周期和生产成本。云制造模式下,调度优化指标中的时间和成本不再是简单的一批次任务或者几个批次任务的生产时间和生产成本,而是不同用户提交的所有任务共同的制造时间和制造成本,这就要求不但考虑制造流程中单个子任务的制造过程执行时间和成本,而且要考虑所有子任务的制造时间和成本。整个制造流程的制造时间和成本不只是每个制造环节的时间和成本加和,还与制造流程的具体模型结构有关系,需要更进一步研究。除此之外,QoS因素也是云制造调度需要考虑的优化指标。由于制造过程中不同环节的服务质量可能会影响相邻的其他制造服务环节,服务质量指标在不同环节之间存在耦合关系,比时间和成本指标更加复杂。

#### 4.1.5 调度时间的复杂性

云制造系统运行过程中,系统一直处于动态变化的状态,因此云制造任务调度也要考虑系统状态的动态变化。虽然在经典的车间调度问题中也存在系统的动态性,但在云制造环境下这些动态事件更容易发生,对系统调度的影响更大。云制造系统动态性主要包括制造任务的动态性(任务动态到达、任

务需求变化、紧急任务加入和任务撤销等)、制造服务的动态性(服务的确定性失效和不确定性失效、服务时间的动态变化、服务任务等待队列状态变化等)两方面因素。

#### 4.1.6 任务之间的耦合关系

云制造调度是面向多任务的调度过程,这些任务可能属于不同的制造服务需求者(平台用户),因此在云制造调度过程中,不仅要考虑任务本身的分解策略和优先级排序问题,还要考虑任务与任务之间的耦合关系,原则上尽可能在比较窄的时间跨度内完成属于同一个平台用户的制造任务,避免因局部任务的拖延而推迟某个用户整体任务的完成时间,从而降低用户满意度。除了平台用户的因素,人为的任务捆绑方式也是解决由其他因素造成制造任务之间耦合的一种方法和手段。

#### 4.1.7 系统不确定性和干扰事件的发生

车间层和企业层本身存在大量的不确定性和干扰事件。不确定性包括加工时间的不确定性、物料达到时间的不确定性、设备和工作人员状态的不确定性等;干扰事件包括制造设备的宕机、设备的周期性维护、加工任务的需求变化与撤销等。车间层和企业层的这些不确定性和干扰事件也会影响云制造平台层的不确定性。此外,云制造平台本身作为一种网络化制造平台,也存在不确定性因素,如公有云网络的不稳定性、人员缺失、资金缺失和制造服务的不确定性失效等。云制造平台的这些不确定性因素和干扰事件,都对云制造调度问题带来了极大的困难和挑战。

## 4.2 结论

### 4.2.1 云制造调度研究现状总结

云制造技术经过多年发展,已经成为具有一定影响的研究领域,云制造相关理论和关键技术的研究已经取得突出的进展,云制造模式的应用和局部行业、企业的落地也取得了一定成效。云制造环境下的调度问题是云制造平台中的核心问题之一,也是云制造平台实现服务化和智能化过程中必须解决的关键问题。本文对云制造平台的运作模式进行了分析,对云制造调度过程和特点进行了总结,在此基础上回顾了云制造调度问题中不同研究点的研究现状和最新进展,包括云制造平台层调度、云制造中跨企业调度问题和车间层调度问题。此外,本文还分析了云制造中与调度问题相关的关键技术,包括服务组合、供需匹配和复杂网络等。

(1)云制造平台层调度问题研究总体上可以分为两大类调度问题:计算资源服务的调度问题和制造资源服务的调度问题。目前,针对计算资源和计算服务调度问题的研究已经非常成熟,不同的智能优化算法被用于解决云环境下的计算资源任务分配和负载均衡等问题。但是针对云环境下制造资源和服务的优化调度方面的研究仍然比较薄弱,主要集中在对制造资源的描述和建模以及制造能耗评估等方面。

(2)企业层调度问题的研究一般以企业内部制造系统建立的不同模型为基础。云制造平台根据制造任务的需求状态和云服务池中虚拟资源的实时状态,生成优化的云制造服务调度执行方案,这些调度方案通常是跨企业的,相当于多个企业协同完成不同的调度任务。目前这方面的研究主要集中在VMC的调度以及基于多智能体制造系统的调度等方面,对于跨企业甚至跨行业的全局云制造调度则缺少比较好的研究成果。

(3)车间层的调度问题也是云制造系统调度需要考虑的重要方面。云制造平台中的制造资源以虚拟资源的形式存在,制造任务需要在制造企业的实际制造环境中执行。由于实际的物理制造资源分布在车间层不同的加工生产车间中,车间层的调度是云制造调度方案顺利执行的重要支撑。经典的车间层调度已经发展得相当成熟,云制造中车间层的优化调度研究目前主要集中在如何提高制造设备的可控性、客观性、柔性和智能性。

(4)在云制造系统环境下,调度问题不是一个孤立的问题,其更关注任务执行过程中的实际约束和时间上的动态性,因此调度问题是云制造环境下非常值得关注的研究方向。与云制造调度问题相关的关键技术包括云制造服务组合技术、云制造供需匹配理论和技术以及云制造复杂网络理论等。目前,在云制造环境下以上几项关键技术的研究成果比调度问题的研究成果更丰富。云制造调度问题的研究需要考虑和借鉴云制造其他相关理论和支撑技术的研究成果。

#### 4.2.2 云制造调度的未来研究方向展望

调度问题是云制造系统解决任务优化分配和资源按需使用的关键问题之一。云制造环境下的调度问题有非常高的复杂性。随着云制造相关理论技术的发展和云制造模式的推广应用,需要对云制造调度问题进行更深入的研究和探索。未来在云制造调

度方面需要开展和深化的研究重点与研究方向包括:

(1)从云制造平台的角度,云制造服务的柔性、服务之间的关联性以及云服务网络的动态演化特性等因素对云制造服务调度模型的建立和调度策略的评估都有很大影响,因此需要从调度问题模型建立和调度策略等方面进行更进一步的研究。

(2)从企业层的角度,需要更加关注制造任务在跨企业的执行过程中,物流、资金分配、利益冲突等因素对云制造调度的影响。在云制造环境下,任务调度实际上从传统的车间层上升到多个企业甚至多个行业,所以云制造环境下多企业之间复杂的供应链关系、协同计划调度以及协同任务执行是将来的研究重点。

(3)从车间层的角度,需要考虑在动态、干扰和不确定性因素存在的环境下,如何实现云制造调度方案对动态干扰事件的响应能力,从而提高调度方法对云制造系统和环境变化(包括任务需求变化、服务提供商不确定性失效等)的鲁棒性。

(4)针对典型行业或典型制造装备的云制造服务调度问题是未来的研究重点和热点,包括云制造3D打印服务的调度、云制造数控加工服务调度,以及云制造环境下的云机器人资源配置和服务调度问题等。

(5)需要更进一步考虑云制造中不同任务的个性化需求对调度优化目标的影响,通过分析云制造中不同服务使用者的制造任务个性化需求的特点,形成针对不同用户个性化需求的统一调度优化目标评价方法。只有考虑和研究云服务用户的功能性需求和非功能性需求,才能更最大限度地满足云制造服务消费者的需求,实现云制造资源的按需使用目标。

#### 参考文献:

- [1] LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7, 16 (in Chinese). [李伯虎, 张霖, 王时龙, 等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-7, 16.]
- [2] LI Bohu, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Further discussion on cloud manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 449-457 (in Chinese). [李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 再论云制造[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 449-457.]
- [3] ZHANG Lin, LUO Yongliang, TAO Fei, et al. Cloud manu-

- facturing; a new manufacturing paradigm[J]. *Enterprise Information Systems*, 2014, 8(2): 167-187.
- [4] LI Bohu, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Typical characteristics, technologies and applications of cloud manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 16(7): 1345-1356(in Chinese). [李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 云制造典型特征、关键技术与应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 16(7): 1345-1356.]
  - [5] ZHANG Lin, LUO Yongliang, TAO Fei, et al. Key technologies for the construction of manufacturing cloud[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(11): 2510-2520(in Chinese). [张霖, 罗永亮, 陶飞, 等. 制造云构建关键技术研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(11): 2510-2520.]
  - [6] LARTIGAU J, NIE L, XU X, et al. Scheduling methodology for production services in cloud manufacturing[C]//*Proceedings of 2012 International Joint Conference on Service Sciences*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2012: 34-39.
  - [7] GUO H, ZHANG L, TAO F. A framework for correlation relationship mining of cloud service in cloud manufacturing system[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314-316: 2259-2262.
  - [8] YADEKAR Y, SHEHAB E, MEHNEN J. Uncertainties in cloud manufacturing[C]//*Proceedings of the 21st ISPE International Conference on Concurrent Engineering*. Amsterdam, the Netherlands: IOS Press, 2014, 1: 297-306.
  - [9] DAVIDOVIC T, HANSEN P, MLADENOVIC N. Permutation-based genetic, tabu, and variable neighborhood search heuristics for multiprocessor scheduling with communication delays[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2005, 22(3): 297-326.
  - [10] HE K, ZHAO Y. Research of grid resource management and scheduling[J]. *Journal of Wuhan Automotive Polytechnic University*, 2005, 27(4): 1-5.
  - [11] ABRAHAM A, BUYYA R, NATH B. Nature's heuristics for scheduling jobs on computational grids[C]//*Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Advanced Computing and Communications*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2000: 45-52.
  - [12] YARKHAN A, DONGARRA J. Experiments with scheduling using simulated annealing in a grid environment[C]//*Proceedings of 2002 International Workshop on Grid Computing*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002: 232-242.
  - [13] ALHUSAINI A, PRASANNA V, RAGHAVENDRA C. A unified resource scheduling framework for heterogeneous computing environments[C]//*Proceedings of the 8th Heterogeneous Computing Workshop*. Washington, D. C., USA: IEEE, 1999: 156-165.
  - [14] GERASOULIS A, YANG T. On the granularity and clustering of directed acyclic task graphs[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1993, 4(6): 686-701.
  - [15] HUANG Jingui, CHEN Songqiao, CHEN Jianer. Resource scheduling model based on multiprocessor job in network parallel computing system[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(29): 54-58(in Chinese). [黄金贵, 陈松乔, 陈建二. 网络并行计算系统中基于多处理机任务的资源调度模型[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(29): 54-58.]
  - [16] LAILI Y, ZHANG L, TAO F. Energy adaptive immune genetic algorithm for collaborative design task scheduling in cloud manufacturing system[C]//*Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2011: 1912-1916.
  - [17] LAILI Y, TAO F, ZHANG L, et al. A study of optimal allocation of computing resources in cloud manufacturing systems[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(5): 671-690.
  - [18] LAILI Y, TAO F, ZHANG L, et al. A ranking chaos algorithm for dual scheduling of cloud service and computing resource in private cloud[J]. *Computers in Industry*, 2013, 64(4): 448-463.
  - [19] XU X. From cloud computing to cloud manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(1): 75-86.
  - [20] SINGH S, CHANA I. A survey on resource scheduling in cloud computing: Issues and challenges[J]. *Journal of Grid Computing*, 2016, 14(2): 217-264.
  - [21] ZHAO C, ZHANG S, LIU Q, et al. Independent tasks scheduling based on genetic algorithm in cloud computing[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2009: 1-4.
  - [22] YE Zhen, ZHOU Xiaofang, BOUGUETTAYA A. Genetic algorithm based QoS-aware service compositions in cloud computing[M]//*Database Systems for Advanced Applications*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011: 321-334.
  - [23] LI Jianfeng, PENG Jian. Task scheduling algorithm based on improved genetic algorithm in cloud computing environment[J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(1): 184-186.
  - [24] KAUR S, VERMA A. An efficient approach to genetic algorithm for task scheduling in cloud computing environment[J]. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 2012, 4(10): 74-79.
  - [25] JANG S H, KIM T Y, KIM J K, et al. The study of genetic algorithm-based task scheduling for cloud computing[J]. *International Journal of Control and Automation*, 2012, 5(4): 157-162.
  - [26] GU Jianhua, HU Jinhua, ZHAO Tianhai, et al. A new resource scheduling strategy based on genetic algorithm in cloud computing environment[J]. *Journal of Computers*, 2012, 7: 42-52. DOI: 10.4304/jcp.7.1.42-52.
  - [27] LIU J, LUO X, ZHANG X, et al. Job scheduling model for cloud computing based on multi-objective genetic algorithm



- [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2013, 10(1):134-139.
- [28] HUA Xiayu, ZHENG Jun, HU Wenxin. Ant colony optimization algorithm for computing resource allocation based on cloud computing environment[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2010, 61(1):127-134.
- [29] LU X, GU Z. A load-adaptive cloud resource scheduling model based on ant colony algorithm[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems. Washington, D. C., USA: IEEE, 2011: 296-300.
- [30] LIU H, XU D, MIAO H. Ant colony optimization based service flow scheduling with various QoS requirements in cloud computing[C]//Proceedings of the 2011 1st ACIS International Symposium on Software and Network Engineering. Washington, D. C., USA: IEEE, 2011: 53-58.
- [31] LI K, XU G, ZHAO G, et al. Cloud task scheduling based on load balancing ant colony optimization[C]//Proceedings of the 6th Annual China Grid Conference. Washington, D. C., USA: IEEE, 2011: 3-9.
- [32] ZHU L, LI Q, HE L. Study on cloud computing resource scheduling strategy based on the ant colony optimization algorithm[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2012, 9(5):54-58.
- [33] NISHANT K, SHARMA P, KRISHNA V, et al. Load balancing of nodes in cloud using ant colony optimization[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation. Washington, D. C., USA: IEEE, 2012: 3-8.
- [34] TAWFEEK M, EL-SISI A, KESHK A, et al. Cloud task scheduling based on ant colony optimization[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Computer Engineering & Systems. Washington, D. C., USA: IEEE, 2013: 64-69.
- [35] GAO Y, GUAN H, QI Z, et al. A multi-objective ant colony system algorithm for virtual machine placement in cloud computing[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2013, 79(8):1230-1242.
- [36] WU Z, NI Z, GU L, et al. A revised discrete particle swarm optimization for cloud workflow scheduling[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Computational Intelligence and Security. Washington, D. C., USA: IEEE, 2010: 184-188.
- [37] PANDEY S, WU L, GURU S, et al. A particle swarm optimization-based heuristic for scheduling workflow applications in cloud computing environments[C]//Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Washington, D. C., USA: IEEE, 2010: 400-407.
- [38] ZHAN S, HUO H. Improved PSO-based task scheduling algorithm in cloud computing[J]. Journal of Information & Computational Science, 2012, 9(13):3821-3829.
- [39] XUE S, WU W. Scheduling workflow in cloud computing based on hybrid particle swarm algorithm[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2012, 10(7):1560-1566.
- [40] WEN X, HUANG M, SHI J. Study on resources scheduling based on ACO algorithm and PSO algorithm in cloud computing[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering & Science. Washington, D. C., USA: IEEE, 2012: 219-222.
- [41] RAMEZANI F, LU J, HUSSAIN F. Task scheduling optimization in cloud computing applying multi-objective particle swarm optimization[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Service Oriented Computing. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013: 237-251.
- [42] LIU J, LUO X, ZHANG X, et al. Job scheduling algorithm for cloud computing based on particle swarm optimization[J]. Advanced Materials Research, 2013, 662: 957-960.
- [43] VERMA A, KAUSHAL S. Bi-criteria priority based particle swarm optimization workflow scheduling algorithm for cloud [C]//Proceedings of 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences. Washington, D. C., USA: IEEE, 2014: 1-6.
- [44] GAN G, HUANG T, GAO S. Genetic simulated annealing algorithm for task scheduling based on cloud computing environment[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems. Washington, D. C., USA: IEEE, 2010: 60-63.
- [45] CHENG Z, ZHAN D, ZHAO X, et al. Multitask oriented virtual resource integration and optimal scheduling in cloud manufacturing[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014(7): 1-9.
- [46] LI W, ZHU C, YANG L, et al. Subtask scheduling for distributed robots in cloud manufacturing[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 99: 1-10. DOI:10.1109/JSYST.2015.2438054.
- [47] LARTIGAU J, XU X, ZHAN D. Artificial bee colony optimized scheduling framework based on resource service availability in cloud manufacturing[C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Service Sciences. Washington, D. C., USA: IEEE, 2014: 181-186.
- [48] JIAN C, WANG Y. Batch task scheduling-oriented optimization modelling and simulation in cloud manufacturing[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2014, 13(1): 93-101.
- [49] WANG S L, GUO L, KANG L, et al. Research on selection strategy of machining equipment in cloud manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9):1549-1563.
- [50] WANG Z, ZHANG J, SI J. Application of particle swarm optimization with stochastic inertia weight strategy to resources scheduling and assignment problem in cloud manufac-

- turing environment[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Washington, D. C., USA: IEEE, 2014: 7567-7572.
- [51] CAO Y, WANG S, KANG L, et al. A TQCS-based service selection and scheduling strategy in cloud manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1): 235-251.
- [52] ZHOU G, JIANG P, HUANG G. A game-theory approach for job scheduling in networked manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(9): 972-985.
- [53] LIU Y, XU X, ZHANG L, et al. An extensible model for multi-task oriented service composition and scheduling in cloud manufacturing[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2016, 16(4). DOI: 10.1115/1.4034186.
- [54] LIU Y, XU X, ZHANG L, et al. Workload-based multi-task scheduling in cloud manufacturing[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2016, 45: 3-20. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.09.008.
- [55] CHENG Ying, TAO Fei, LIU Yilong, et al. Energy-aware resource service scheduling based on utility evaluation in cloud manufacturing system[C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture. 2013, 227(12): 1901-1915.
- [56] UM J, CHOI Y C, STROUD I. Factory planning system considering energy-efficient process under cloud manufacturing[C]//Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Windsor, Canada: CIRP, 2014: 553-558.
- [57] LU Y Q, XU X. Process and production planning in a cloud manufacturing environment[C]//Proceedings of the ASME 10th International Manufacturing Science and Engineering Conference. New York, N. Y., USA: ASME, 2015: 1-8.
- [58] WU D, ROSEN D, SCHAEFER D. Scalability planning for cloud-based manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2015, 137(4): 1-13.
- [59] TAO Fei, ZHAO Dongming, HU Yefa, et al. Correlation-aware resource service composition and optimal-selection in manufacturing grid[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(1): 129-143.
- [60] TAO F, ZHAO D, HU Y, et al. Resource service composition and its optimal-selection based on particle swarm optimization in manufacturing grid system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2008, 4(4): 315-327.
- [61] KUROWSKI K, OLEKSIK A, WOJCIECH P, et al. Hierarchical scheduling strategies for parallel tasks and advance reservations in grids[J]. Journal of Scheduling, 2013, 16(4): 349-368.
- [62] HU H, LI Z. Modeling and scheduling for manufacturing grid workflows using timed Petri nets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(5): 553-568.
- [63] KESEN S, TOKSARI M, GÜNGÖR Z, et al. Analyzing the behaviors of virtual cells(VCs) and traditional manufacturing systems: ant colony optimization (ACO)-based metamodels[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(7): 2275-2285.
- [64] DROLET J, MARCOUX Y, ABDULNOUR G. Simulation-based performance comparison between dynamic cells, classical cells and job shops: a case study[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(2): 509-536.
- [65] KESEN S, DAS S, GUNGOR Z. A mixed integer programming formulation for scheduling of virtual manufacturing cells[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(5): 665-678.
- [66] ARKAT J, GHAVE H. Scheduling of virtual manufacturing cells with outsourcing allowed[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2014, 27(12): 1079-1089.
- [67] KESEN S, DAS S, GÜNGÖR Z. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells(VMCs)[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(6): 1148-1156.
- [68] SOUSA P, RAMOS C. A distributed architecture and negotiation protocol for scheduling in manufacturing systems[J]. Computers in Industry, 1999, 38(2): 103-113.
- [69] LIM M, ZHANG Z. A multi-agent system using iterative bidding mechanism to enhance manufacturing agility[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9): 8259-8273.
- [70] LEITÃO P, BARBOSA J, TRENTESAUX D. Bio-inspired multi-agent systems for reconfigurable manufacturing systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(5): 934-944.
- [71] WONG T, LEUNG C, MAK K, et al. Dynamic shopfloor scheduling in multi-agent manufacturing systems[J]. Expert Systems with Applications, 2006, 31(3): 486-494.
- [72] NADERI B, AZAB A. Modeling and heuristics for scheduling of distributed job shops[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(17): 7754-7763.
- [73] XIANG W, LEE H. Ant colony intelligence in multi-agent dynamic manufacturing scheduling[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21(1): 73-85.
- [74] DUFFIE N, PRABHU V. Real-time distributed scheduling of heterarchical manufacturing systems[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1994, 13(2): 94-107.
- [75] CHIU C, YIH Y. A learning-based methodology for dynamic scheduling in distributed manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 1995, 33(11): 3217-3232.
- [76] SHEN Weimin. Distributed manufacturing scheduling using intelligent agents[J]. IEEE Intelligent Systems, 2002, 17(1):

- 8-94.
- [77] DUFFIE N. Heterarchical control of highly distributed manufacturing systems[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1996, 9(4): 270-281.
- [78] CHO S, PRABHU V. Sliding mode dynamics in continuous feedback control for distributed discrete-event scheduling[J]. *Automatica*, 2002, 38(9): 1499-1515.
- [79] GUO Z, NGAI E, YANG C, et al. An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 159(C): 16-28.
- [80] MANNE A. On the job-shop scheduling problem[J]. *Operations Research*, 1960, 8(2): 219-223.
- [81] HULLE M. goal programming network for mixed integer linear programming; a case study for the job-shop scheduling problem[J]. *International Journal of Neural Systems*, 1991, 2(3): 201-209.
- [82] BALAS E. Machine sequencing via disjunctive graphs; an implicit enumeration algorithm[J]. *Operations Research*, 1969, 17(6): 941-957.
- [83] MCMAHON G, FLORIAN M. On scheduling with ready times and due dates to minimize maximum lateness[J]. *Operations Research*, 1975, 23(3): 475-482.
- [84] CHENG R, GEN M, TSUJIMURA Y. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms, part II: hybrid genetic search strategies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, 37(2): 343-364.
- [85] XIONG H, FAN H, LI G. Genetic algorithm-based hybrid methods for a flexible single-operation serial-batch scheduling problem with mold constraints[J]. *Sensors & Transducers*, 2013, 155(8): 232-241.
- [86] GLOVER F, GREENBERG H. New approaches for heuristic search; a bilateral linkage with artificial intelligence[J]. *European Journal of Operational Research*, 1989, 39(2): 119-130.
- [87] SHAHZAD A, MEBARKI N. Learning dispatching rules for scheduling; a synergistic view comprising decision trees, tabu search and simulation[J]. *Computers*, 2016, 5(1): 3.
- [88] JOHNSON S. Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included[J]. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1954, 1(1): 61-68.
- [89] VIEIRA G, HERRMANN J, LIN E. Rescheduling manufacturing systems; a framework of strategies, policies, and methods[J]. *Journal of Scheduling*, 2003, 6(1): 39-62.
- [90] PANWALKAR S, ISKANDER W. A survey of scheduling rules[J]. *Operations Research*, 1977, 25(1): 45-61.
- [91] HOLTHAUS O, RAJENDRAN C. Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop[J]. *International Journal of Production Economics*, 1997, 48(1): 87-105.
- [92] JR W. Heuristics in job shop scheduling[J]. *Management Science*, 1966, 13(3): 167-190.
- [93] LIU H, DONG J. Dispatching rule selection using artificial neural networks for dynamic planning and scheduling[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1996, 7(3): 243-250.
- [94] RENNA P. Multi-agent based scheduling in manufacturing cells in a dynamic environment[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(5): 1285-1301.
- [95] STOOP P, WIERS V. The complexity of scheduling in practice[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 1996, 16(10): 37-53.
- [96] COWLING P, JOHANSSON M. Using real time information for effective dynamic scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 139(2): 230-244.
- [97] LEITÃO P, RESTIVO F. A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, 24(5): 625-634.
- [98] SAHRAEIAN R, NAMAKSHENAS M. On the optimal modeling and evaluation of job shops with a total weighted tardiness objective; constraint programming vs. mixed integer programming[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(2): 955-964.
- [99] ABDULLAH S, NEZHAD M. Fuzzy job-shop scheduling problems; a review[J]. *Information Sciences*, 2014, 278(1): 380-407.
- [100] NIE L, GAO L, LI P, et al. Reactive scheduling in a job shop where jobs arrive over time[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 66(2): 389-405.
- [101] SHEN X, YAO X. Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems[J]. *Information Sciences*, 2015, 298: 198-224.
- [102] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search[J]. *Annals of Operations Research*, 1993, 41(3): 157-183.
- [103] ISHII N, TALAVAGE J. A transient-based real-time scheduling algorithm in FMS[J]. *International Journal of Production Research*, 1991, 29(12): 2501-2520.
- [104] PRIORE P, FUENTE D, GOMEZ A, et al. A review of machine learning in dynamic scheduling of flexible manufacturing systems[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2001, 15(3): 251-263.
- [105] POUR N, GHASEMISHABANKAREH B. A novel hybrid meta-heuristic algorithm for solving multi objective flexible job shop scheduling[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32(4): 771-780.
- [106] LIN J. A hybrid biogeography-based optimization for the fuzzy flexible job-shop scheduling problem[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 78(1): 59-74.
- [107] HOSSEINABADI A, SIAR H, SHAMSHIRBAND S, et al. Using the gravitational emulation local search algorithm to solve the multi-objective flexible dynamic job shop scheduling problem in small and medium enterprises[J]. *Annals of*

- Operations Research, 2014, 229(1):451-474.
- [108] NEJAD H, SUGIMURA N, IWAMURA K. Agent-based dynamic integrated process planning and scheduling in flexible manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(5):1373-1389.
  - [109] SAHIN C, DEMIRTAS M, EROL R, et al. A multi-agent based approach to dynamic scheduling with flexible processing capabilities[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015:1-19. DOI:10.1007/S10845-015-1069-X.
  - [110] FATTAHI P, FALLAHI A. Dynamic scheduling in flexible job shop systems by considering simultaneously efficiency and stability[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 2(2):114-123.
  - [111] HUANG C C, HUANG C L. Development of cloud computing based scheduling system using optimized layout method for manufacturing quality[C]//Proceedings of Computer, Consumer and Control. 2012:444-447. DOI:10.1109/IS3C.2012.118.
  - [112] CASATI F, ILNICKI S, JIN L, et al. Adaptive and dynamic service composition in e flow[C]//Proceedings of the International Conference on Advanced Information Systems Engineering. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000:13-31.
  - [113] DENG S, WU Z, KUANG L, et al. Management of service flow in a flexible way[C]//Proceedings of International Conference on Web Information Systems Engineering. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2004:428-438.
  - [114] AGGARWAL R, VERMA K, MILLER J, et al. Constraint driven Web service composition in METEOR-S[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Services Computing. Washington, D. C., USA: IEEE, 2004:23-30.
  - [115] NANDA M, KARNIK N. Synchronization analysis for decentralizing composite Web services[J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2004, 13:91-119. DOI:10.1145/952532.952612.
  - [116] NANDA M, CHANDRA S, SARKAR V. Decentralizing execution of composite Web services[C]//Proceedings of the 19th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Language and Applications. New York, N. Y., USA: ACM, 2004:39:170-187.
  - [117] CHAFLE G, CHANDRA S, MANN V, et al. Decentralized orchestration of composite Web services[C]//Proceedings of the 13th International World Wide Web Conference on Alternate Track Papers & Posters. New York, N. Y., USA: ACM, 2004:134-143.
  - [118] CHAFLE G, CHANDRA S, MANN V, et al. Orchestrating composite Web services under data flow constraints [C]//Proceedings of the International Conference on Web Services. Washington, D. C., USA: IEEE, 2005:211-218.
  - [119] LI Jingshan, LIAO Huaming, HOU Zifeng, et al. A dynamic service composition method based on semantic interface description in pervasive computing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(7):1124-1134(in Chinese). [李景山, 廖华明, 侯紫峰, 等. 普及计算中基于接口语义描述的动态服务组合方法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7):1124-1134.]
  - [120] BENATALLAH B, DUMAS M, SHENG Q, et al. Declarative composition and peer-to-peer provisioning of dynamic Web services[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Data Engineering. Washington, D. C., USA: IEEE, 2002:297-308.
  - [121] TOSIC V, MENNIE D, PAGUREK B. On dynamic service composition and its applicability to e-business software systems[C]//Proceedings of the 2001 Workshop on Object-oriented Business Solutions. New York, N. Y., USA: ACM, 2001:95-108.
  - [122] NARAYANAN S, MCILRAITH S. Simulation, verification and automated composition of Web services[C]//Proceedings of the 11th International Conference on World Wide Web. New York, N. Y., USA: ACM, 2002:77-88.
  - [123] FENSEL D, BUSSLER C. The Web service modeling framework WSMF[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2002, 1(2):113-137.
  - [124] BENATALLAH B, CASATI F, GRIGORI D, et al. Developing adapters for Web services integration[C]//Proceedings of the International Conference on Advanced Information Systems Engineering. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005:415-429.
  - [125] BROGI A, POPESCU R. Automated generation of BPEL adapters[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Service-Oriented Computing. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2006:27-39.
  - [126] PONNEKANTI S, FOX A. Sword: a developer toolkit for Web service composition[C]//Proceedings of the 11th International World Wide Web Conference. New York, N. Y., USA: ACM, 2002.
  - [127] SCHUSCHEL H, WESKE M. Automated planning in a service-oriented architecture[C]//Proceedings of the 13th International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. Washington, D. C., USA: IEEE, 2004:75-80.
  - [128] AKKIRAJU R, VERMA K, GOODWIN R, et al. Executing abstract Web process flows[EB/OL]. [2016-05-20]. [https://www.academia.edu/25401849/Executing\\_abstract\\_web\\_process\\_flows](https://www.academia.edu/25401849/Executing_abstract_web_process_flows).
  - [129] SIRIN E, PARSIA B, WU Dan, et al. HTN planning for Web service composition using SHOP2[J]. Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web, 2004, 1(4):377-396.
  - [130] MAO Z, KATZ R, BREWER E. Fault-tolerant, scalable, wide-area internet service composition[R]. Berkeley, Cal., USA: University of California, 2001.

- [131] ZHANG R, ARPINAR I, ALEMAN-MEZA B. Automatic composition of semantic Web services[C]//Proceedings of the International Conference on Web Services. Las Vegas, Nev., USA; University of Twente, 2003: 38-41.
- [132] GAO Y, ZHANG B, NA J, et al. Optimal selection of Web services for composition based on interface-matching and weighted multistage graph[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Parallel and Distributed Computing Applications and Technologies. Washington, D. C., USA; IEEE, 2005: 336-338.
- [133] ZENG L, BENATALLAH B, NGU A, et al. QoS-aware middleware for Web services composition[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(5): 311-327.
- [134] CANFORA G, DI M, ESPOSITO R, et al. An approach for QoS-aware service composition based on genetic algorithms[C]//Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. New York, N. Y., USA; ACM, 2005: 1069-1075.
- [135] RICHARDS D, VAN SPLUNTER S, BRAZIER F M T, et al. Composing Web services using an agent factory[J]. Extending Web Services Technologies, 2004, 13: 229-251.
- [136] MAAMAR Z, MOSTEFAOUI S, YAHYA OUI H. Toward an agent-based and context-oriented approach for Web services composition[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(5): 686-697.
- [137] XU Dezheng, BAI Xiaoying, DAI Guilan. Applying agent to Web services: a survey[J]. Computer Science, 2008, 35(1): 140-143 (in Chinese). [许德正, 白晓颖, 戴桂兰. Agent 技术在 Web 服务中的应用探讨[J]. 计算机科学, 2008, 35(1): 140-143.]
- [138] GUO H, TAO F, ZHANG L, et al. Correlation-aware Web services composition and QoS computation model in virtual enterprise[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(5): 817-827.
- [139] GUO H, ZHANG L, LIU Y, et al. A discovery method of service-correlation for service composition in virtual enterprise[J]. European Journal of Industrial Engineering, 2014, 8(5): 579-618.
- [140] TAO F, LAI L Y J, XU L, et al. FC-PACO-RM: a parallel method for service composition optimal-selection in cloud manufacturing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 2023-2033.
- [141] LI Huifang, ZHANG Lu, JIANG Rui. Study of manufacturing cloud service matching algorithm based on OWL-S[C]//Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference. Washington, D. C., USA; IEEE, 2014: 4155-4160.
- [142] WIJAYA T, ARSON K, ABERER K. Matching demand with supply in the smart grid using agent-based multiunit auction[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Communication Systems and Networks. Bangalore, 2013. DOI: 10.1109/COMSNETS.2013.6465595.
- [143] TAO Fei, LAI L Y J, XU Lida, et al. FC-PACO-RM: a parallel method for service composition optimal-selection in cloud manufacturing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 2023-2033.
- [144] HUANG Biqing, LI Chenghai, TAO Fei. A chaos control optimal algorithm for QoS-based service composition selection in cloud manufacturing system[J]. Enterprise Information Systems, 2014, 8(4): 445-463.
- [145] XIANG Feng, HU Yefa, YU Yingrong. QoS and energy consumption aware service composition and optimal-selection based on Pareto group leader algorithm in cloud manufacturing system[J]. Central European Journal of Operations Research, 2014, 22(4): 663-685.
- [146] LARTIGAU J, XU X, NIE L, et al. Cloud manufacturing service composition based on QoS with geo-perspective transportation using an improved Artificial Bee Colony optimisation algorithm[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(14): 4380-4404.
- [147] LIU Weining, LIU Bo, SUN Dihua, et al. Study on multi-task oriented services composition and optimisation with the 'Multi-Composition for Each Task' pattern in cloud manufacturing systems[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(8): 786-805.
- [148] ZHANG Lin, GUO Hua, TAO Fei, et al. Flexible management of resource service composition in cloud manufacturing [C]. 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Washington D. C., USA; IEEE, 2010: 2278-2282.
- [149] LIU Yongkui, XU Xun, ZHANG Lin, et al. An Extensible Model for Multitask-Oriented Service Composition and Scheduling in Cloud Manufacturing[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2016, 16(4): 041009. DOI: 10.1115/1.4034186.
- [150] CHENG T, WU Y. A multiproduct, multicriterion supply-demand network equilibrium model [J]. Operations Research, 2006, 54(3): 544-554.
- [151] BANDYOPADHYAY S, BHATTACHARYA R. A generalized measure of bullwhip effect in supply chain with ARMA demand process under various replenishment policies [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5/6/7/8): 963-979.
- [152] MOON C, LEE Y, JEONG C, et al. Integrated process planning and scheduling in a supply chain[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(4): 1048-1061.
- [153] JOHANSSON P, OLHAGER J. Industrial service profiling: matching service offerings and processes[J]. International Journal of Production Economics, 2004, 89(3): 309-320.
- [154] GUIDE J, TEUNTER R, VAN L. Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2003, 5(4):

- 303-316.
- [155] MEDJAHED B, ATIF Y. Context-based matching for Web service composition[J]. Distributed and Parallel Databases, 2007, 21(1): 5-37.
- [156] SWAMINATHAN J. Tool capacity planning for semiconductor fabrication facilities under demand uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120(3): 545-558.
- [157] FILDES R, KINGSMAN B. Incorporating demand uncertainty and forecast error in supply chain planning models[J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 62(3): 483-500.
- [158] FISHER M L, HAMMOND J H, OBERMEYER W R, et al. Making supply meet demand in an uncertain world[J]. Harvard Business Review, 1994, 72(3): 83-93.
- [159] PEIDRO D, MULA J, POLER R, et al. Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(3/4): 400-420.
- [160] TAGHIPOUR A, FRAYRET J. Dynamic mutual adjustment search for supply chain operations planning co-ordination[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(9): 2715-2739.
- [161] BHATNAGAR R, SOHAL A. Supply chain competitiveness: measuring the impact of location factors, uncertainty and manufacturing practices[J]. Technovation, 2005, 25(5): 443-456.
- [162] ANUPINDI R, AKELLA R. Diversification under supply uncertainty[J]. Management Science, 1993, 39(8): 944-963.
- [163] TAO F, HU Y, ZHOU Z, et al. Study of failure detection and recovery in manufacturing grid resource service scheduling[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(1): 69-94.
- [164] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamic of 'small world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [165] BARABASI A, ALBERT R. Emergence of scaling in random network[J]. Science, 1999, 286: 509-512.
- [166] SU R, NI X, WANG W. Forecasting synchronizability of complex networks from data[J]. Physical Review E, 2012, 85(5): 056220.
- [167] HUAQIU Z, YU H, HAN X, et al. A study on the key technology of Tibetan social network analysis under Web environment[C]//Proceedings of International Conference on Computer Science and Network Technology. Washington, D. C., USA: IEEE, 2011: 24-26.
- [168] CHENG Y, ZHAO D, TAO F, et al. Complex networks based manufacturing service and task management in cloud environment[C]//Proceedings of the 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications. Washington, D. C., USA: IEEE, 2015.
- [169] CHENG Y, TAO F, ZHAO D, et al. Modeling of manufacturing service supply-demand matching hypernetwork in service-oriented manufacturing systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 45: 59-72.

## 作者简介:

- 周龙飞(1988—),男,山东潍坊人,博士研究生,研究方向:云制造、动态调度、实时仿真等,E-mail:zlfstudy@126.com;
- 张霖(1966—),男,天津人,教授,研究方向:制造集成系统、云制造、建模仿真、模型工程等,通信作者,E-mail:zhanglin@buaa.edu.cn;
- 刘永奎(1981—),男,河南新郑人,北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院博士后,西安电子科技大学机电工程学院副教授,研究方向:云制造、资源调度、企业建模、工业 4.0 等。